نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۷۱۱-۱۶۹۱

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1691-1711

بررسی فرآیند معدنی شدن نیتروژن آلی تحت تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی

فاطمه رخش[۱*]- احمد گلچین[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۲

چکیده

کانی‌های رسی تأثیر زیادی بر پویایی ماده آلی خاک دارند و رس‌ها با حفاظت فیزیکی از ماده آلی سرعت تجزیه آن را کاهش می‌دهند. هدف این پژوهش بررسی تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی بود. برای این منظور مقادیر مشخصی از کانی‌های رسی کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت اشباع شده با کاتیون‌های سدیم، کلسیم و آلومینیوم با شن خالص مخلوط شدند تا خاک‌های مصنوعی با مقدار رس، کاتیون تبادلی و نوع رس متفاوت در سه تکرار تهیه شود. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (۳×۳×۳) اجرا شد. بقایای گیاهی یونجه به خاک‌های مصنوعی اضافه و خاک‌ها با فلور میکروبی یک خاک طبیعی تلقیح و به مدت ۶۰ روز خوابانیده شدند و مقدار نیتروژن آمونیومی و نیتراتی هر ۱۵ روز یک‌بار اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد در مدت دو ماه خوابانیدن، درصد نیتروژن معدنی شده، در شن خالص بیشتر از خاک‌هایی با مقادیر ۵ و ۱۰ درصد رس بود که این امر نشان می‌دهد مقدار رس بر ظرفیت خاک‌ها در نگهداشت نیتروژن آلی مؤثر است. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش مقدار رس، مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. بیشترین و کمترین درصد نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست‌توده میکروبی به ترتیب در خاک‌هایی با کاتیون‌های تبادلی کلسیم و آلومینیوم اندازه‌گیری شدند. درصد نیتروژن معدنی شده در مدت دو ماه خوابانیدن در خاک‌هایی با رس کائولینیت حداکثر و در خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت حداقل بود. مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز در خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت کمتر از خاک‌هایی با رس کائولینیت و ایلیت بود.

واژه‌های کلیدی: آمونیوم، زیست‌توده، سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی، نیترات

مقدمه

مواد آلی خاک شامل بقایای گیاهی و جانوری، زیست‌توده و متابولیت‌های میکروبی و قارچی است که در خاک تولید و یا به خاک اضافه می‌شوند. مواد آلی خاک در درجات مختلف پوسیدگی بوده و شامل ترکیبات ساده و پیچیده و مولکول‌های بزرگ و کوچک هستند. شناخت سازوکارهای پایدار کننده ماده آلی در خاک، امری ضروری برای تعیین نقش ماده آلی در تغذیه گیاهان، ذخیره ماده آلی در خاک و جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای است (۴۴). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که کانی‌های رسی نقش مهمی در پایداری ماده آلی در خاک و به‌خصوص ترکیب‌های آلی نیتروژن‌دار دارند (۲۴، ۲۵ و ۳۱). پیوند شیمیایی بین مولکول‌های ماده آلی و سطوح کانی‌ها منجر به کاهش تجزیه ماده آلی و افزایش پایداری کمپلکس‌های آلی- معدنی، در مقابل تجزیه میکروبی می‌شود (۲۲). رس‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلف ماده آلی خاک را از تجزیه سریع میکروبی حفظ می‌کنند (۴۲ و ۴۹).

یکی از این مکانیسم‌ها محبوس شدن ذرات ریز ماده آلی داخل خاکدانه‌ها و تخلخل‌هایی است که برای موجودات تجزیه کننده قابل دسترس نمی‌باشند. خاک‌های رسی تخلخل‌های ریز فراوانی دارند که برای میکروب‌ها قابل‌دسترس نبوده و قرار گرفتن ذرات ماده آلی در این تخلخل‌ها آن‌ها را از تجزیه میکروبی حفظ می‌کند (۴۹). باکتری‌ها نمی‌توانند به تخلخل‌هایی که کوچک‌تر از سه برابر اندازه آن‌ها می‌باشد، وارد شوند و حدود ۹۰ درصد از تخلخل موجود در خاک‌های رسی کوچک‌تر از اندازه باکتری‌ها می‌باشد، در نتیجه ماده آلی موجود در این تخلخل‌ها برای باکتری قابل دسترس نبوده و از تجزیه میکروبی حفظ می‌شوند (۴۶). مکانیسم دیگری که منجر به حفظ ماده آلی در برابر تجزیه میکروبی می‌شود تشکیل کمپلکس‌های آلی- معدنی است. رس‌ها ذرات بسیار فعال خاک هستند که به دلیل داشتن بار و سطح ویژه بالا مواد آلی کلوئیدی را جذب و به تشکیل کمپلکس‌های پایدار ماده آلی- رس در خاک کمک می‌کنند (۴۹). آنزیم‌های برون سلولی که توسط ریز جانداران برای تجزیه ماده آلی ترشح می‌شوند جذب رس‌ها شده و غیرفعال می‌شوند در نتیجه ماده آلی موجود در کمپلکس‌های آلی- معدنی از تجزیه میکروبی حفظ

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان
(*- نویسنده مسئول: Email: rakhsh.fatemeh@znu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.65861

می‌شود. هر دو مکانیسم که حفاظت فیزیکی خاک از ماده آلی نامیده می‌شود منجر به کاهش سرعت تجزیه ماده آلی و ذخیره آن در خاک‌های رسی می‌شوند (۴۲ و ۴۹).

نیتروژن در خاک هم به فرم معدنی (آمونیوم و نیترات) و هم به فرم آلی وجود دارد (۱۸) ولی بیشتر به فرم آلی در خاک ذخیره می‌شود. در حقیقت ۹۵ درصد نیتروژن خاک‌ها به شکل ترکیبات آلی در خاک وجود دارد (۲۴، ۳۱ و ۳۶) که اندازه تقریبی این مخزن ۷۲۵ گرم نیتروژن در متر مربع است درحالی‌که اندازه مخزن نیتروژن معدنی ۶ گرم نیتروژن در متر مربع می‌باشد (۳۶). معدنی شدن نیتروژن یک فرآیند میکروبی است که تحت تأثیر فاکتورهایی مانند دما و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها قرار دارد. تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر معدنی شدن نیتروژن آلی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار رس خاک بر سرعت معدنی شدن نیتروژن مؤثر است و سرعت معدنی شدن نیتروژن در خاک‌هایی با بافت درشت بیشتر از خاک‌هایی با بافت ریز است. خاک‌های ریز بافت مقدار رس بیشتری دارند و به دلیل وجود تخلخل ریز فراوان در این خاک‌ها، ماده آلی از تجزیه میکروبی حفظ می‌شود (۹). ترکیبات نیتروژن‌دار می‌توانند بر سطح رس‌ها جذب شوند و رس‌ها انتقال این مولکول‌ها به آب خاک را به تأخیر انداخته و با جذب و غیرفعال کردن آنزیم‌های برون سلولی که توسط موجودات تجزیه کننده و برای شکستن مولکول‌های آلی ترشح می‌کنند سبب کاهش سرعت تجزیه میکروبی این ترکیبات می‌شوند (۲۶). ظرفیت جذب ترکیبات نیتروژن‌دار در خاک به نوع مکانیسم پیوندی، نوع و مقدار رس و شیمی مواد آلی بستگی دارد. ترکیبات نیتروژن‌دار در محدوده گسترده‌ای از pH و با سرعت به مواد معدنی متصل می‌شوند (۴۱ و ۵۴) و اغلب چند مکانیسم مختلف، همزمان در بخش‌های مختلف یک مولکول آلی نیتروژن‌دار باعث این اتصال می‌شوند. پل‌های کاتیونی و به‌خصوص تبادل لیگاندی مکانیسم‌های پیوندی قوی هستند که باعث اتصال ترکیبات آلی نیتروژن‌دار به رس‌ها می‌شوند، درحالی‌که نیروهای وان‌درووالسی و پیوند هیدروژنی، پیوندهای ضعیفی برای این منظور به حساب می‌آیند (۳۷ و ۴۹). آنیون‌های آلی از طریق بار منفی کانی‌های رسی دفع می‌شوند ولی از طریق کاتیون‌های چند ظرفیتی تبادلی با سطح رس پیوند برقرار می‌کنند. کاتیون‌های چند ظرفیتی شامل Ca^{2+}، Mg^{2+}، Fe^{3+} و Al^{3+} هستند که بار منفی سطح رس‌ها و گروه‌های عاملی اسیدی ماده آلی (مانند -COO) را خنثی کرده و مانند پلی بین دو سطح باردار عمل می‌نمایند (۲۶). اندازه و ساختار مولکول آلی نیتروژن‌دار در جذب بر روی سطح رس‌ها مؤثر است (۴۹). به‌طورکلی، طول عمر و پایداری مواد آلی بستگی به قدرت پیوند این مواد با کاتیون‌های تبادلی رس‌ها مانند کلسیم، آهن و آلومینیوم و کاتیون‌های ساختمانی آن‌ها دارد (۳۱). کاتیون‌های تبادلی همچنین با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و تأثیر بر خاکدانه‌سازی و فعالیت میکروبی می‌توانند تأثیر شگرفی بر پویایی ماده آلی داشته باشند (۱۶). مطالعات نشان می‌دهند که سرعت معدنی شدن ماده آلی خاک همبستگی مثبتی با مقدار رس خاک یا ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) آن دارد (۵۵). در نتیجه سرعت معدنی شدن ماده آلی و تجزیه بقایای گیاهی در خاک‌های شنی سریع‌تر از خاک‌های رسی می‌باشد (۱۷). سرعت معدنی شدن کمتر در خاک‌های رسی به دلیل حفاظت فیزیکی خاک از ماده آلی و زیست‌توده میکروبی می‌باشد (۴۶). کانی‌های رسی فیلوسیلیکاته نقش مهمی در نگهداشت نیتروژن آلی دارند (۸ و ۱۷). کوارتز و کانی‌های رسی غیر منبسط شونده مانند کائولینیت پیوندی ضعیفی با ماده آلی خاک دارند درحالی‌که فیلوسیلیکات‌های لایه‌ای منبسط شونده مانند مونت‌موریلونیت با سطوح داخلی زیاد توانایی بیشتری برای جذب ماده آلی دارند (۴۹ و ۵۴). وگل و همکاران (۴۷) گزارش کردند که ماده آلی به‌طور یکنواخت به سطح بیرونی ذرات رس متصل نمی‌شود، بلکه گوشه‌ها و سطوح ناهموار، مکان‌های اصلی اتصال ماده آلی هستند. اگرچه تأثیر بافت خاک بر نگهداشت و پویایی ماده آلی خاک مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۷). ولی تأثیر نوع رس کمتر مورد بررسی قرار گرفته (۱۰ و ۳۵) و تأثیر کاتیون‌های تبادلی بر پویایی و نگهداشت ماده آلی خاک کاملاً ناشناخته است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر نوع و مقدار رس، نوع کاتیون تبادلی و اثر متقابل آن‌ها بر معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی یونجه و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های مصنوعی صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

مخلوط‌های شن و رس (خاک‌های مصنوعی[1]) برای بررسی تأثیر نوع رس، نوع کاتیون تبادلی و مقدار رس بر معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی و نیتروژن زیست‌توده میکروبی مورد استفاده قرار گرفتند. رس‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل کائولینیت جورجیا (KG-2)، ایلیت ایلینوس (IH-36) و مونت‌موریلونیت وایومینگ (SWy-3) از مرکز نگهداری کانی‌های رسی[2] آمریکا تهیه شدند و با سه کاتیون مختلف سدیم، کلسیم و آلومینیوم برای تهیه رس‌هایی با کاتیون تبادلی یکسان[3] اشباع شدند. رس‌های دارای کاتیون تبادلی یکسان، در نسبت‌های صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی برای تهیه ۲۷ نوع خاک مصنوعی مختلف (۵۰ گرمی) با شن خالص تهیه شده، مخلوط شدند.

1- Artificial soils
2 - Source Clays Repository of the Clay Minerals
3- Homoionic

جدول ۱- برخی ویژگی‌های رس‌ها و بقایای یونجه مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Some characteristics of the clay and alfalfa residues used in this study

کانی‌های رسی Clay minerals	سطح ویژه Specific surface area (SSA) ($m^2\ g^{-1}$) نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation		Na-Clay		pH نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation			EC ($\mu S\ cm^{-1}$) نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation		
	Na	Ca	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	چگالی بار سطح Charge density [b]	Na	Ca	Al	Na	Ca	Al
	EGME [a]		$mmol_c\ kg^{-1}$	$mmol_c\ m^{-2}$						
کائولینیت Kaolinite	41	18	85	2.07×10^{-3}	7.0	7.7	5.6	23	34	13.3
ایلیت Illite	195	150	202	1.03×10^{-3}	6.1	7.0	5.2	23	36	26
مونت‌موریلونیت Montmorillonite	799	680	820	1.02×10^{-3}	5.5	6.6	5.0	24	46	32

بقایای یونجه Alfalfa residues	کربن آلی OC	نیتروژن کل Total nitrogen	C/N
	%	%	-
	48.21	3.7	13

سطح ویژه (با استفاده از اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر)

چگالی بار سطح= ظرفیت تبادل کاتیونی/ سطح ویژه

Specific surface area as determined by ethylene glycol monoethyl ether

Charge density=CEC/ Specific surface area (7)

تهیه شن خالص و رس‌هایی با کاتیون تبادلی یکسان

ذرات شن مورد استفاده در خاک‌های مصنوعی تا حذف کامل نمک‌های محلول و ذرات رس شسته شدند. ذرات شن ابتدا از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و آن دسته از ذراتی که بر روی الک ۰/۰۵ میلی‌متر باقی ماندند، برای آزمایش استفاده گردید. در ابتدا برای حذف کربن آلی، ذرات شن در دو مرحله در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۴ ساعت حرارت داده شدند. سپس ذرات شن با اسیدکلریدریک ۲ مولار تا حذف کامل کربنات‌ها (عدم جوشش با اسید کلریدریک) شسته شدند. در ادامه ذرات شن با آب مقطر شسته و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. برای تهیه رس‌هایی با کاتیون‌های تبادلی یکسان، نمونه‌هایی از رس‌های خالص کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت با محلول یک مولار NaCl اشباع شدند تا سدیم تبادلی منجر به انتشار آن‌ها گردد. سپس رس‌ها تا خروج املاح اضافی با آب مقطر شسته شدند و به کمک دستگاه التراسونیک پراکنده و ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرومتر به روش ته‌نشینی جدا شدند (۲۰). ذرات رس کوچک‌تر از ۲ میکرومتر برای تهیه رس‌هایی با کاتیون تبادلی یکسان به کار برده شدند و با سه کاتیون سدیم، کلسیم و آلومینیوم از طریق مصرف محلول‌های یک مولار NaCl، $CaCl_2$ و $AlCl_3$ سه بار اشباع شدند (۱۷). بعد از اشباع کردن رس‌ها با کاتیون‌های مختلف، نمونه‌های رس به‌طور جداگانه در لوله دیالیز ریخته شدند و تا خروج کامل املاح اضافی و یون کلر در آب مقطر قرار گرفتند. عدم وجود یون کلر در آب مقطری که لوله‌های دیالیز در آن قرار گرفته بودند با محلول نیترات نقره یک مولار بررسی گردید (۵۴). رس‌های تیمار شده به کمک دستگاه فریزدرایر[1] خشک شده و در دمای اتاق تا زمان استفاده نگهداری شدند. همچنین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) رس‌ها با استفاده از استات آمونیوم در pH=۷ (۲۰) و سطح ویژه رس‌ها با استفاده از اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر (۷) تعیین گردیدند (جدول ۱).

تهیه و خوابانیدن نمونه‌ها

بقایای یونجه مورد استفاده در آزمایش در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد برای ۷۲ ساعت در آون خشک و از الک یک میلی‌متری عبور داده شده بودند. مقدار کربن آلی بقایا به روش اکسیداسیون

1- Freeze dryer

مرطوب (۵۲) و مقدار نیتروژن کل بعد از هضم مرطوب نمونه گیاهی به روش کلدال (۱) تعیین گردیدند (جدول ۱). بقایای یونجه نیز در سه مرحله و هر بار به مدت ۲ ساعت برای حذف کامل فلور میکروبی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار یک اتمسفر در اتوکلاو قرار گرفتند و استریل شدند (۴۸، ۴۹). در آزمایش خوابانیدن به مقدار ۲/۵ گرم بقایای گیاهی یونجه (۵ درصد وزنی)، به ۵۰ گرم از خاک‌های مصنوعی با مقادیر مختلف رس (صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی)، کاتیون‌های تبادلی مختلف (سدیم، کلسیم و آلومینیوم) و نوع رس متفاوت (کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت) اضافه شد. نمونه‌ها در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و در رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه برای ۶۰ روز (دو ماه) در تاریکی خوابانیده شدند. نمونه‌های تهیه شده از خاک‌های مصنوعی استریل و فاقد جامعه میکروبی بودند به همین دلیل قبل از خوابانیدن خاک‌ها و بعد از اضافه کردن بقایای یونجه استریل به خاک‌های مصنوعی استریل، نمونه‌ها با استفاده از مایه تلقیح استخراج شده از یک خاک طبیعی تلقیح شدند. برای تهیه مایه تلقیح، یک نمونه مرکب از افق شخم یک خاک طبیعی (عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری، کربن آلی= ۰/۵ درصد، pH=۷، هدایت الکتریکی= ۸۶۴ میکرو زیمنس بر متر) تحت کشت گیاه یونجه استفاده شد. برای تهیه مایه تلقیح ۱۰ گرم خاک در ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر (سوسپانسیون ۱:۹ خاک به آب مقطر) ریخته شد و نمونه به مدت ۲ ساعت به هم زده شد. سپس محلول رویی این سوسپانسیون برای اطمینان از حذف کامل رس‌ها، به مدت ۱۲ دقیقه با دور g ۱۰۰۰، سانتریفیوژ گردید. پس از حذف رس‌ها، محلول رویی به یک لوله فالکون جدید منتقل و مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه با دور g ۴۰۰۰ سانتریفیوژ و محلول به دست آمده به‌عنوان مایه تلقیح با نسبت ۱:۱۰ به نمونه‌های خاک‌های مصنوعی اضافه گردید (۳۴). میزان مایه تلقیح برای هر نمونه ۵ میلی‌لیتر بود که با مقدار کافی آب مقطر مخلوط شد تا نمونه‌ها به‌طور یکنواخت با مایه تلقیح آغشته شوند. سپس نمونه‌های تلقیح شده هوا خشک شدند با توجه به این‌که در ادامه آزمایش نمونه‌ها در رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه خوابانیده شدند و ازآنجاکه این مقدار رطوبت در رس‌های مختلف مقادیر متفاوتی آب را شامل می‌شود و میزان آب اضافه شده به همراه مایه تلقیح میکروبی برای همه نمونه یکسان بود بنابراین ابتدا نمونه‌ها هوا خشک و سپس با افزودن مقادیر متفاوت آب به نمونه‌ها، آن‌ها را به رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه رساندیم. تیمارها به مدت ۶۰ روز در تاریکی خوابانیده شدند و هر ۱۵ روز یک‌بار، یعنی پس از گذشت ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز (از شروع خوابانیدن)، مقدار نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی به‌وسیله عصاره‌گیری با کلرید پتاسیم و با استفاده از روش رنگ‌سنجی (۱) اندازه‌گیری شدند. همچنین در پایان دوره خوابانیدن (۶۰ روز) مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی به روش تدخین با کلروفرم و عصاره‌گیری با سولفات پتاسیم (۱) و مقدار نیتروژن موجود در عصاره‌ها به روش کلدال (۵) اندازه‌گیری گردید. درصد نیتروژن معدنی شده از تقسیم کردن مجموع نیتروژن آمونیومی و نیتراتی هر مرحله بر مقدار نیتروژن آلی موجود در ابتدای آن مرحله تعیین گردید.

تجزیه و تحلیل اطلاعات

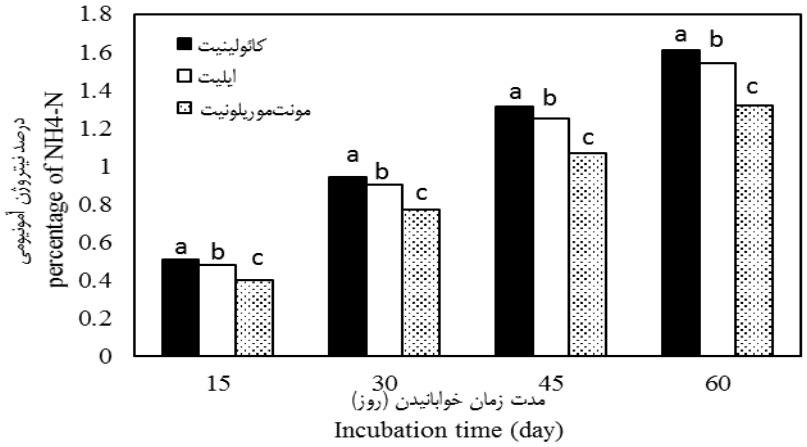
آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با سه فاکتور نوع رس، مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی (۳×۳×۳) در سه تکرار و با مجموع ۸۱ واحد آزمایشی اجرا گردید. تجزیه واریانس به کمک نرم‌افزار SAS 9.4 صورت گرفت و مقایسه میانگین داده‌ها به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شدند.

نتایج و بحث

تأثیر نوع رس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در طی دوره خوابانیدن تأثیر نوع رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن آمونیومی افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۱/۶۱، ۱/۵۴ و ۱/۳۲ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در رس‌های کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت به‌صورت آمونیوم معدنی شدند (شکل ۱). سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بالاتر رس مونت‌موریلونیت در مقایسه با کائولینیت و ایلیت (جدول ۱) احتمالاً عامل کاهش سرعت معدنی شدن بقایای گیاهی یونجه و درصد نیتروژن آمونیومی در خاک‌ها بود (۱۰).

بررسی نتایج نشان داد که درصد نیتروژن نیتراتی در طی دوره خوابانیدن بیشتر از درصد نیتروژن آمونیومی بود. با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن نیتراتی افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۳/۹۹، ۳/۸۳ و ۳/۲۷ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در رس‌های کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت به‌صورت نیترات معدنی شدند (شکل ۲). تشکیل کمپلکس‌های آلی و معدنی (۳) و رفتن ترکیبات آلی نیتروژن‌دار در بین لایه‌های رس‌های سیلیکاته منبسط شونده مانند مونت‌موریلونیت آن‌ها را از تجزیه میکروبی حفظ می‌کند. در نتیجه تولید آمونیوم کاهش یافته و متعاقب آن تولید نیترات از آمونیوم نیز کاهش می‌یابد (۱۰).



شکل ۱- تأثیر نوع رس بر درصد نیتروژن آمونیومی در طول زمان خوابانیدن

Figure 1- The effects of clay type on percentage of NH_4^+-N during the incubation time

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

Table 2- The analysis of variance of data showing the effects of clay types, clay contents and exchangeable cations on percentage of NH_4^+-N and NO_3^--N

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Squares							
		نیتروژن آمونیومی (NH_4^+-N) %				نیتروژن نیتراتی (NO_3^--N) %			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		15 day	30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Clay types	2	0.08**	0.21**	0.42**	0.62**	0.23**	1.03**	2.32**	3.77**
Clay contents	2	0.42**	1.65**	4.33**	6.83**	14.15**	22.78**	32.52**	44.91**
Exchangeable cations	2	0.03**	0.12**	0.29**	0.49**	0.12**	0.32**	0.68**	1.13**
Clay types × Clay contents	4	0.02**	0.06**	0.13**	0.18**	0.06**	0.31**	0.69**	1.13**
Clay types × Exchangeable cations	4	0.002^{ns}	0.005*	0.018**	0.027**	0.007**	0.004**	0.008**	0.018**
Clay contents × Exchangeable cations	4	0.009**	0.036**	0.082**	0.133**	0.37**	0.081**	0.170**	0.284**
Clay types × Clay contents × Exchangeable cations	8	0.001^{ns}	0.003^{ns}	0.010**	0.018**	0.012**	0.021**	0.024**	0.046**
Error	54	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003
Coefficient of variation (%)	-	7.74	4.51	3.73	3.32	3.27	1.96	1.49	1.42

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively

با توجه به شکل ۳ با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، مقدار نیتروژن معدنی شده افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۵/۶۵، ۵/۴۲ و ۴/۶۴ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در رس‌های کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت معدنی شدند (شکل ۳). کوگل-کنابرک و همکاران (۲۷) گزارش کردند با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها، ماده آلی قابل دسترس برای ریز جانداران کاهش می‌یابد. رس‌های ۲:۱ به دلیل سطح ویژه و بار سطحی بیشتر از رس‌های ۱:۱ مقدار ماده آلی بیشتری را جذب و نگهداری کرده و در نتیجه تجزیه ماده آلی کاهش می‌یابد. ذرات شن پیوند ضعیفی با مولکول‌های آلی دارند ولی ذرات رس (سزکویی اکسیدها و سیلیکات‌های لایه‌ای) با برقراری تبادل لیگاندی و پل‌های کاتیونی قوی منجر به حفظ ماده آلی در برابر تجزیه میکروبی می‌شوند (۴۰).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر نوع رس بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در رس کائولینیت به میزان ۷/۹۳ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک و کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در رس مونت‌موریلونیت

به میزان ۶/۲۳ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه‌گیری گردید (شکل ۴). وگل و همکاران (۴۹) در بررسی مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های مصنوعی حاوی رس مونت‌موریلونیت و ایلیت مشاهده کردند که مقدار زیست‌توده میکروبی در خاک‌های مصنوعی حاوی رس مونت‌موریلونیت به‌طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های مصنوعی حاوی رس ایلیت بود. معدنی شدن نیتروژن ماده آلی توسط فلور میکروبی خاک صورت می‌گیرد و به نظر می‌رسد که اندازه، فعالیت و تنوع جمعیت میکروبی بر آن تأثیرگذار است (۱۶). مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی کمتر با معدنی شدن کندتر نیتروژن آلی در خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت مطابقت دارد که احتمالاً دلیل آن تهویه نامطلوب خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت و کاهش انتشار اکسیژن در این خاک‌ها می‌باشد که منجر به کاهش سرعت تجزیه مواد آلی و در نتیجه کاهش مقدار نیتروژن معدنی شده در این خاک‌ها می‌شود (۲۱).

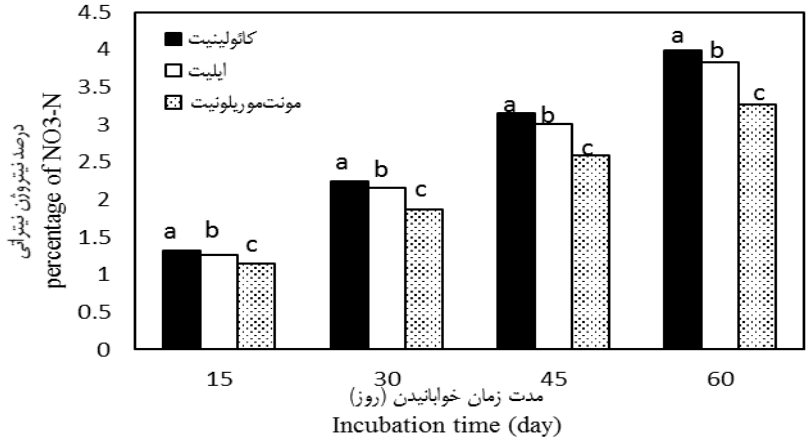
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Table 3- The analysis of variance of data showing the effects of clay types, clay contents and exchangeable cations on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Squares				
		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen %				نیتروژن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass nitrogen
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				
		15 day	30 day	45 day	60 day	mg N/50 g dry soil
Clay types	2	0.58**	2.20**	4.81**	7.63**	19.49**
Clay contents	2	19.20**	36.86**	61.92**	86.69**	173.48**
Exchangeable cations	2	0.27**	0.83**	1.85**	3.16**	248.93**
Clay types × Clay contents	4	0.16**	0.58**	1.27**	2.02**	6.37**
Clay types × Exchangeable cations	4	0.006ns	0.009**	0.015**	0.04**	9.20**
Clay contents × Exchangeable cations	4	0.073**	0.21**	0.472**	0.81**	65.22**
Clay types × Clay contents × Exchangeable cations	8	0.007*	0.016**	0.024**	0.054**	3.13**
Error	54	0.003	0.003	0.003	0.004	0.63
Coefficient of variation (%)	-	3.31	1.91	1.36	1.29	11.17

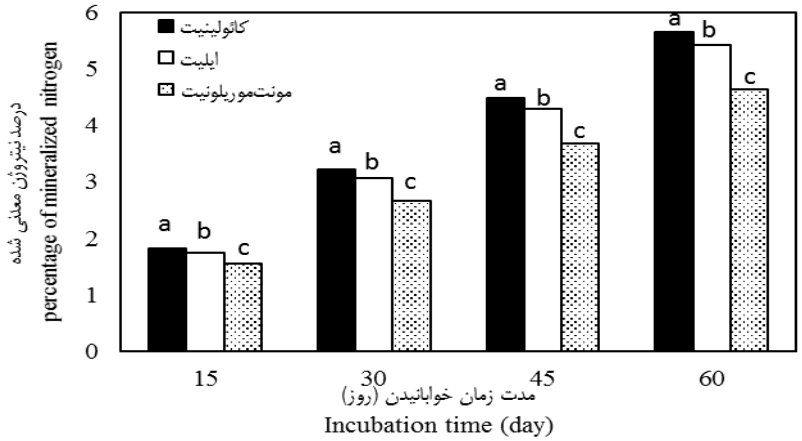
** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively



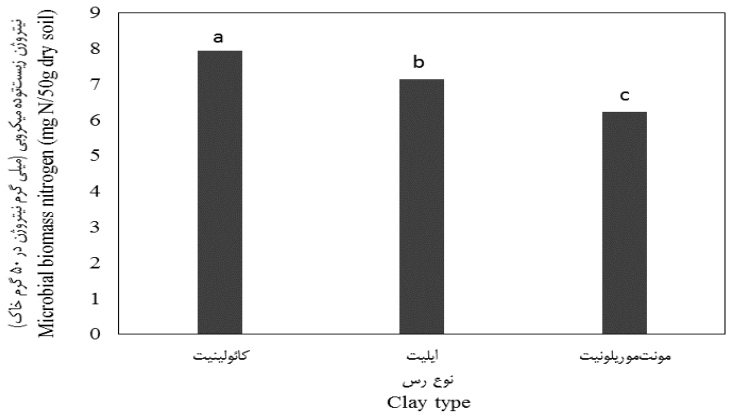
شکل ۲- تأثیر نوع رس بر درصد نیتروژن نیتراتی در طول زمان خوابانیدن

Figure 2- The effects of clay type on percentage of NO_3^--N during the incubation time



شکل ۳- تأثیر نوع رس بر درصد نیتروژن معدنی شده در طول زمان خوابانیدن

Figure 3- The effects of clay type on percentage of mineralized nitrogen during the incubation time



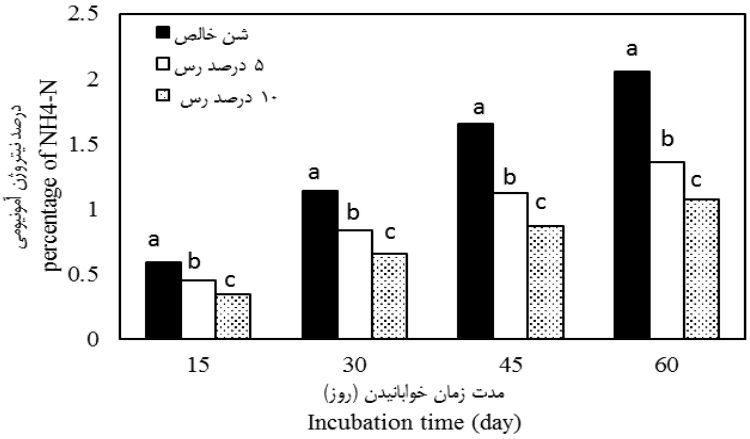
شکل ٤- تأثیر نوع رس بر نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Figure 4- The effects of clay type on microbial biomass nitrogen

تأثیر مقدار رس

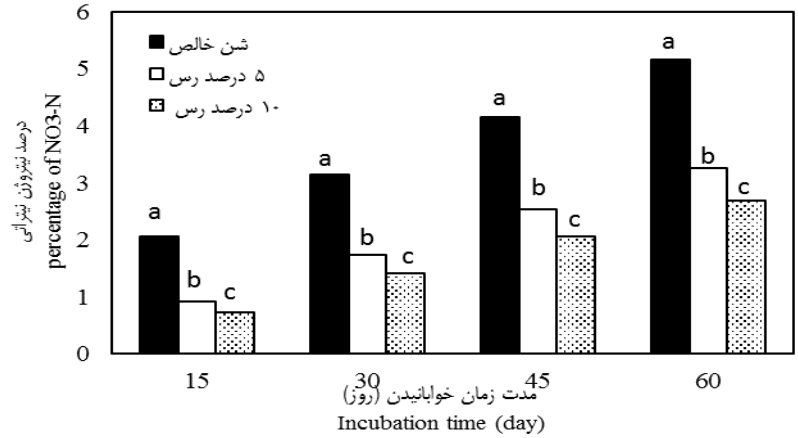
با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر مقدار رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). با گذشت زمان درصد نیتروژن آمونیومی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی بعد از گذشت ۶۰ روز از انکوباسیون نمونه‌ها و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی ۱۵ روز بعد از انکوباسیون آن‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ۵). همچنین صرف‌نظر از مدت زمان خوابانیدن با افزایش مقدار رس در نمونه‌ها از مقدار معدنی شدن نیتروژن به‌صورت آمونیوم کاسته شد. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی بعد از گذشت ۶۰ روز و در تیمار شاهد به میزان ۲/۰۵ درصد اندازه‌گیری شد (شکل ۵). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که مواد معدنی نقش مهمی در پایداری مواد آلی و ترکیبات حاوی نیتروژن در خاک دارند (۲۵، ۳۲) و رس‌ها و اکسیدهای پدوژنیک نیتروژن آلی را در برابر تجزیه میکروبی حفظ می‌کنند. مطالعات ورونی و دری (۵۱) نشان داد که افزایش مقدار رس منجر به کاهش معدنی شدن نیتروژن در خاک می‌شود. بخش بزرگی از نیتروژن معدنی به فرم آمونیوم توسط رس‌ها و مواد معدنی تثبیت می‌شود (۳۹). مطالعات نشان می‌دهد خاک‌های رسی مقدار آمونیوم بیشتری از خاک‌های با بافت سبک جذب می‌کنند (۱۲).

بررسی نتایج نشان داد که درصد نیتروژن نیتراتی در طی دوره خوابانیدن بیشتر از درصد نیتروژن آمونیومی بود. با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن نیتراتی افزایش یافت. بعد از گذشت ۶۰ روز از خوابانیدن نمونه‌ها به ترتیب ۵/۱۵، ۳/۲۵ و ۲/۶۹ درصد از نیتروژن آلی بقایای یونجه در تیمارهای شن خالص، ۵ درصد رس و ۱۰ درصد رس به‌صورت نیترات معدنی شدند (شکل ۶). با افزایش مقدار رس خاک و کاهش اندازه خاکدانه‌های ایجاد شده، معدنی شدن نیتروژن در خاک کاهش می‌یابد (۵۴).



شکل ۵- تأثیر مقدار رس بر درصد نیتروژن آمونیومی در طول زمان خوابانیدن

Figure 5- The effects of clay content on percentage of NH_4^+-N during the incubation time



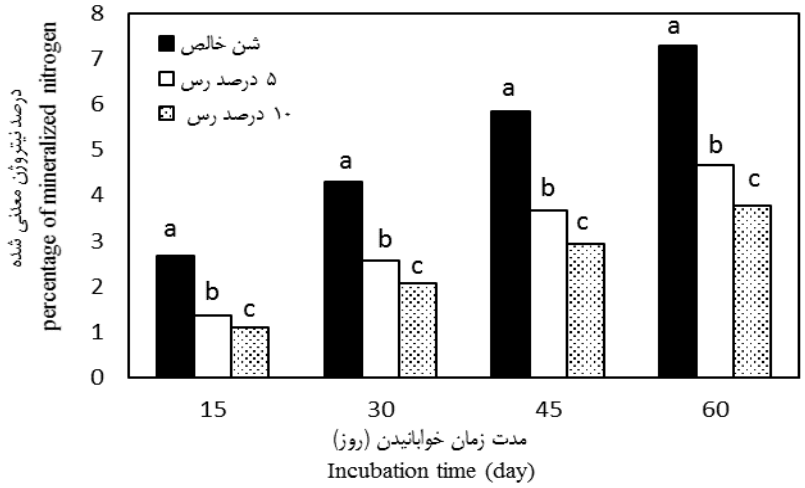
شکل ٦- تأثیر مقدار رس بر درصد نیتروژن نیتراتی در طول زمان خوابانیدن

Figure 5- The effects of clay content on percentage of NO_3^--N during the incubation time

با گذشت زمان درصد نیتروژن معدنی شده افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی شده بعد از گذشت ۶۰ روز از انکوباسیون نمونه‌ها و کمترین درصد نیتروژن معدنی شده ۱۵ روز بعد از انکوباسیون آن‌ها اندازه‌گیری گردید (شکل ۷). همچنین صرف‌نظر از مدت زمان خوابانیدن با افزایش مقدار رس در نمونه‌ها از مقدار معدنی شدن نیتروژن کاسته شد. با بررسی اثر متقابل مقدار رس و مدت زمان خوابانیدن مشخص شد که بیشترین درصد نیتروژن معدنی شده بعد از گذشت دو ماه از خوابانیدن و در شن خالص به میزان ۷/۲۸ درصد اندازه‌گیری گردید (شکل ۷). معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی در شن خالص (شاهد) بسیار بیشتر از خاک‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد رس بود. سرعت معدنی شدن کمتر نیتروژن در خاک‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد رس به دلیل حفاظت فیزیکی بیشتر خاک از مواد آلی و زیست‌توده میکروبی است (۱۸). نتایج مشابهی برای خاک‌های شنی و رسی در مطالعات مختلف نشان داده شده است (۲۴). خاک‌هایی با مقادیر رس متفاوت، سطوح متفاوتی برای جذب ترکیبات آلی دارند؛ بنابراین مقدار رس بر ظرفیت خاک‌ها در حفظ و ذخیره نیتروژن آلی تأثیرگذار است. محققین مختلف نشان داده‌اند که جذب سطحی نیتروژن آلی با افزایش سطح خاک‌ها افزایش می‌یابد (۲۲ و ۲۳). نتیجه مطالعه کالیس و همکاران (۲۴) نشان داد مونت‌موریلونیت منجر به تشکیل کمپلکس‌های پایدار اسید هومیک و رس شده و ماده آلی خاک در برابر تجزیه میکروبی حفظ گردید.

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر مقدار رس بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که با افزایش مقدار رس در خاک‌های مصنوعی مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار ۱۰ درصد رس به میزان

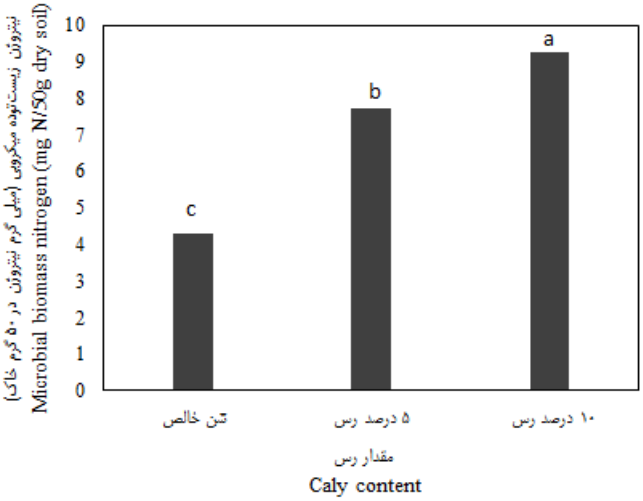
۹/۲۶ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک و کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار شاهد به میزان ۴/۳۱ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه‌گیری شد (شکل ۸).



شکل ۷- تأثیر مقدار رس بر درصد نیتروژن معدنی شده در طول زمان خوابانیدن

Figure 7- The effects of clay content on percentage of mineralized nitrogen during the incubation time

همبستگی مثبتی بین مقدار رس خاک و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک وجود داشت و این امر نشان می‌دهد ظرفیت خاک برای حفظ زیست‌توده میکروبی بستگی به مقدار رس آن دارد (۳۱). افزایش معنی‌دار مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی با افزودن ۵ درصد رس نشان می‌دهد که مقدار اندکی رس (۵ درصد) می‌تواند از میکروب‌ها در برابر شکارچیان حفاظت کند و با افزودن بر این مقدار شرایط محیط رشد آن‌ها بهبود می‌یابد. دلیل اصلی افزایش مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با مقدار رس بالا احتمالاً کاهش تنش آبی و کاهش فعالیت شکارچیان به دلیل افزایش حفاظت فیزیکی خاک از زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با بافت ریزتر می‌باشد. بافت خاک می‌تواند به‌طور مستقیم با حفاظت میکروب‌ها از شکارچی‌ها و به‌طور غیرمستقیم با نگهداشت بیشتر ماده آلی، بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی خاک تأثیرگذار باشد. به‌طورمعمول، نیتروژن زیست‌توده میکروبی بیشتر در خاک‌هایی با بافت ریز به دلیل مقدار بیشتر ماده آلی و حفاظت بیشتر میکروب‌ها از شکارچیان توسط خاکدانه‌ها می‌باشد (۳۱).

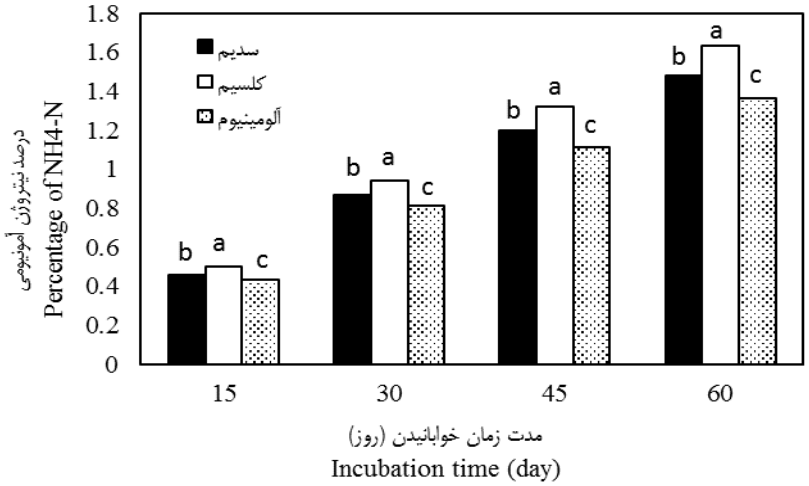


شکل ۸- تأثیر مقدار رس بر نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Figure 8- The effects of clay content on microbial biomass nitrogen

تأثیر نوع کاتیون تبادلی

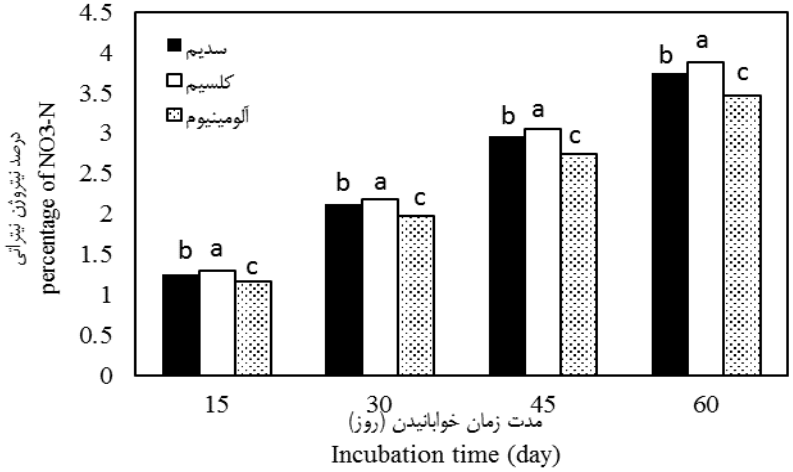
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد در طی دوره خوابانیدن تأثیر نوع کاتیون تبادلی، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). با توجه به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی در طی ۶۰ روز خوابانیدن نمونه‌ها و در تیمار رس اشباع از کاتیون کلسیم به میزان ۱/۶۳ درصد اندازه‌گیری شد، درصورتی‌که تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون آلومینیوم دارای کمترین درصد نیتروژن آمونیومی (۱/۳۶ درصد) بود و کاتیون سدیم اثرات متوسطی بر درصد نیتروژن آمونیومی داشت (شکل ۹).



شکل ۹- تأثیر نوع کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی در طول زمان خوابانیدن

Figure 9- The effects of exchangeable cation on percentage of NH_4^+-N during the incubation time

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی در طی ۶۰ روز خوابانیدن نمونه‌ها و در تیمار رس اشباع از کاتیون کلسیم (۳/۸۸ درصد) به دست آمد درصورتی‌که تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون آلومینیوم دارای کمترین درصد نیتروژن نیتراتی (۳/۴۷ درصد) بود. کاتیون سدیم اثرات متوسطی بر درصد نیتروژن نیتراتی داشت (شکل ۱۰). همچنین صرف‌نظر از نوع کاتیون تبادلی در طی دوره خوابانیدن نمونه‌ها کمترین درصد نیتروژن نیتراتی در ۱۵ روز اول خوابانیدن نمونه‌ها مشاهده شد (شکل ۱۰).

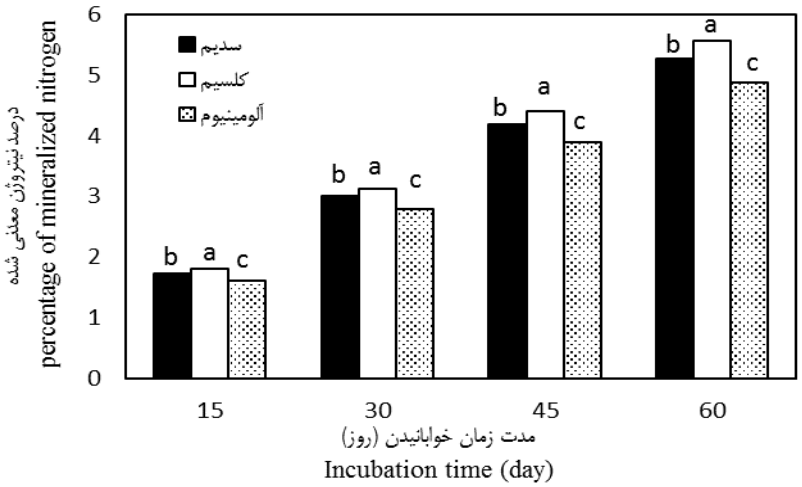


شکل ۱۰- تأثیر نوع کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن نیتراتی در طول زمان خوابانیدن

Figure 10- The effects of exchangeable cation on percentage of NO_3^--N during the incubation time

صرف‌نظر از نوع کاتیون تبادلی با افزایش زمان خوابانیدن نمونه ها، مقدار نیتروژن معدنی شده افزایش یافت. بیشترین مقدار نیتروژن معدنی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها و در رس‌های اشباع از کلسیم (۵/۵۳ درصد) و کمترین مقدار نیتروژن معدنی ۱۵ روز بعد از

خوابانیدن نمونه‌ها و در رس‌های اشباع از آلومینیوم (۱/۵۷ درصد) اندازه‌گیری گردید (شکل ۱۱). معدنی شدن کربن و نیتروژن تحت تأثیر pH خاک قرار دارد و با کاهش pH خاک فعالیت میکروبی و درنتیجه تجزیه مواد آلی در خاک کاهش می‌یابد (۳۰) به همین دلیل در تیمار حاوی رس اشباع شده با کاتیون آلومینیوم معدنی شدن نیتروژن به دلیل pH پایین و مسمومیت آلومینیوم، کمتر بود (۴۶). کاتیون‌های تبادلی با تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، معدنی شدن مواد آلی را کنترل می‌کنند (۱۷). این امر که سدیم تبادلی منجر به انتشار رس و ایجاد تهویه نامطلوب و شرایط فیزیکی ضعیف در خاک‌ها می‌شود، توسط مطالعات مختلف تأیید شده است. خاک‌های سدیمی به‌خصوص خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت در شرایط مرطوب به‌شدت دیسپرس شده و مواد ژل‌مانندی در خاک ایجاد می‌کنند؛ بنابراین معدنی شدن کمتر نیتروژن آلی در خاک‌های حاوی سدیم در مقایسه با خاک‌های حاوی کلسیم به دلیل فقدان شرایط هوازی مناسب می‌باشد.



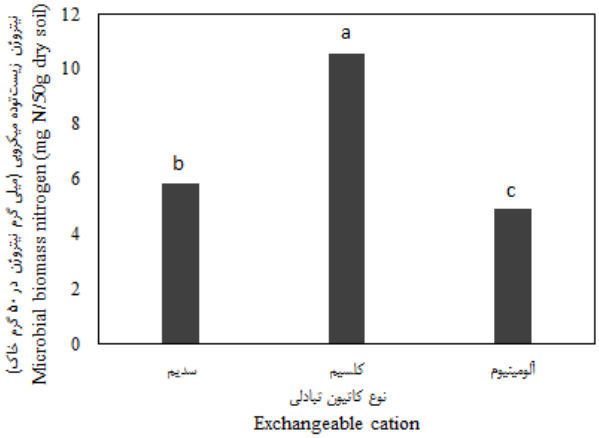
شکل ۱۱- تأثیر نوع کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن معدنی شده در طول زمان خوابانیدن

Figure 11- The effects of exchangeable cation on percentage of mineralized nitrogen during the incubation time

کلسیم تبادلی، ساختمان خاک و در نتیجه شرایط هوازی و رطوبتی را به نفع ریز جانداران خاک بهبود می‌دهد که منجر به افزایش معدنی شدن نیتروژن آلی بقایای گیاهی می‌شود (۱۷). مطالعات بسیاری تأثیر شدید اسیدیته و سمیت آلومینیوم را بر ریز جانداران خاک نشان داده‌اند (۵۳). سمیت آلومینیوم برای ریز جانداران خاک علت معدنی شدن کندتر نیتروژن بقایای گیاهی در این خاک‌ها است. زران و همکاران (۵۶) نشان دادند که آلومینیوم تبادلی در رس بنتونیت منجر به کاهش تعداد سلول‌های زنده در مقایسه با بنتونیت اشباع شده با کلسیم شد. در آزمایشی معدنی شدن کربن گلوکز در رس بنتونیت اشباع شده با آلومینیوم بعد از یک وقفه ۱۰ روزه شروع شد که این امر به دلیل pH پایین و سمیت آلومینیوم برای ریز جانداران خاک بود (۱۷). به نظر می‌رسد تأثیر کاتیون‌های تبادلی بر تجزیه بقایای گیاهی بخشی به دلیل تأثیر این کاتیون‌ها بر رشد میکروب‌ها و فعالیت‌های متابولیکی آن‌ها از طریق تأثیر بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی محیط رشد آن‌ها باشد. در حقیقت به نظر می‌رسد تأثیر غیرمستقیم کاتیون‌های تبادلی بر تجزیه بقایای گیاهی بیشتر از نقش مستقیم آن‌ها در اتصال مواد آلی به سطح رس‌ها از طریق پل کاتیونی باشد. مطالعات نشان داده است که کاتیون‌های تبادلی چند ظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم ظرفیت جذب سطحی رس‌ها را به‌وسیله ایجاد پل کاتیونی بین بار منفی سطح رس و بار منفی گروه‌های عاملی مواد آلی، افزایش می‌دهند و این اتصال مواد آلی را از تجزیه سریع حفظ می‌کند. سرعت معدنی شدن سریع‌تر نیتروژن بقایای گیاهی در خاک‌های کلسیمی در مقایسه با خاک‌های سدیمی نشان می‌دهد که نقش غیرمستقیم این کاتیون‌ها بر معدنی شدن و نگهداشت نیتروژن آلی، قوی‌تر از نقش مستقیم این کاتیون‌ها است. مطالعات مختلفی تأثیر رس و یا خصوصیات وابسته به آن را در پایداری بقایای آلی و زیست‌توده میکروبی خاک‌ها نشان داده‌اند (۱۷).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تأثیر نوع کاتیون تبادلی بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج نشان داد بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون کلسیم به میزان ۱۰/۵۷ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک به دست آمد درصورتی‌که تیمار حاوی رس اشباع از کاتیون آلومینیوم دارای کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی (۴/۹۲ میلی‌گرم در ۵۰

گرم خاک خشک) بود (شکل ۱۲). مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های سدیمی در مقایسه با خاک‌های کلسیمی کمتر بود که این امر می‌تواند به دلیل فقدان شرایط هوازی مناسب در خاک سدیمی باشد (۵۳). سمیت آلومینیوم برای ریز جانداران سبب کاهش فعالیت آنزیم‌ها در نتیجه کمپلکس شدن، فلوکوله شدن یا رسوب آنزیم‌ها شده و در نتیجه تجزیه ماده آلی کاهش می‌یابد (۲۴). همچنین وجود آلومینیوم در خاک منجر به کاهش pH خاک شده در نتیجه رشد و فعالیت ریز جانداران و فعالیت آنزیمی کاهش می‌یابد (۳۱).



شکل ۱۲- تأثیر نوع کاتیون تبادلی بر نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Figure 12- The effects of exchangeable cation on microbial biomass nitrogen

اثر متقابل نوع و مقدار رس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در طی دو ماه خوابانیدن نمونه‌ها اثر متقابل نوع و مقدار رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی با افزایش مقدار رس در خاک‌های مصنوعی برای هر سه نوع رس کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت کاهش یافتند و درصد نیتروژن آمونیومی، نیتراتی و معدنی در رس کائولینیت بیشتر از رس ایلیت و مونت‌موریلونیت بود (جدول‌های ۴ و ۵).

جدول ٤- تأثیر نوع و مقدار رس بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

Table 4- The effects of clay type and clay content on percentage of NH_4^+-N and NO_3^-N

نوع رس× مقدار رس Clay type × Clay content		نیتروژن آمونیومی(NH_4^+-N) %				نیتروژن نیتراتی(NO_3^--N) %			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		15 day	30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Kaolinite	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.55 b	0.97 b	1.32 b	1.60 b	1.05 b	1.96 b	2.86 b	3.64 b
	10	0.38 d	0.72 d	0.96 d	1.19 d	0.86 d	1.66 c	2.44 d	3.17 d
Illite	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.45 c	0.88 c	1.17 c	1.43 c	0.93 c	1.75 c	2.58 c	3.33 c
	10	0.39 d	0.68 de	0.92 d	1.14 e	0.79 e	1.56 e	2.30 e	3.00 e
Montmorillonite	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.35 d	0.65 e	0.85 e	1.05 f	0.77 e	1.49 f	2.16 f	2.79 f
	10	0.26 e	0.53 f	0.71 f	0.86 g	0.58 f	0.99 g	1.45 g	1.89 g

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

بررسی نتایج نشان داد صرف‌نظر از نوع رس، با افزایش مقدار رس از درصد نیتروژن آمونیومی کاسته شد (جدول ۴). با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها درصد نیتروژن آمونیومی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به میزان ۲/۰۵ درصد و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی با ۱۰ درصد رس مونت‌موریلونیت به میزان ۰/۲۶ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۴). در طی دوره خوابانیدن، با افزایش مقدار رس در نمونه‌های خاک صرف‌نظر از نوع رس، درصد نیتروژن نیتراتی کاهش یافت. بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به میزان ۵/۱۵ درصد و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی با ۱۰ درصد رس مونت‌موریلونیت به میزان ۰/۵۸ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۴). با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها معدنی شدن نیتروژن افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی شده ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به میزان ۷/۲۸ درصد و کمترین درصد نیتروژن معدنی شده ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی با ۱۰ درصد رس مونت‌موریلونیت به میزان ۰/۸۴ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۵). سطح ویژه بالاتر و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بیشتر مونت‌موریلونیت در مقایسه با کائولینیت و ایلیت (جدول ۱) منجر به کاهش مقدار و درصد نیتروژن معدنی شد. سطح ویژه برای جذب نیتروژن در خاک‌ها بستگی به مینرالوژی رس‌ها دارد. وگل و همکاران (۴۸) مشاهده کردند که مدت طولانی بعد از اضافه کردن کود آلی به خاک‌های مصنوعی با مینرالوژی متفاوت مقدار کربن و نیتروژن آلی در خاک‌های مصنوعی حاوی مونت‌موریلونیت در مقایسه با خاک‌های مصنوعی حاوی ایلیت بیشتر بود؛ بنابراین زمانی که کانی‌های خالص با مواد آلی خوابانیده می‌شوند، ممکن است مینرالوژی تأثیری بر پویایی کربن و نیتروژن آلی در کوتاه مدت نداشته باشد (۳۴) ولی زمانی که این خاک‌های مصنوعی به مدت طولانی خوابانیده می‌شوند، مقدار کربن و نیتروژن آلی بیشتری در خاک‌های حاوی رس مونت‌موریلونیت مشاهده شد (۴۸). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل نوع و مقدار رس، بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی با افزایش مقدار رس در نمونه‌ها، صرف‌نظر از نوع رس، افزایش یافت. همچنین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در رس کائولینیت بیشتر از رس ایلیت و مونت‌موریلونیت بود (جدول ۵). بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های دارای ۱۰ درصد رس کائولینیت به میزان ۱۰/۳۵ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک و کمترین نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار شاهد (شن خالص) به میزان ۴/۳۱ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه‌گیری شد (جدول ۵).

جدول ۵- تأثیر نوع و مقدار رس بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Table 5- The effects of clay type and clay content on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

نوع رس× مقدار رس Clay type × Clay content		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen %				نیتروژن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass nitrogen
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				
		15 day	30 day	45 day	60 day	mg N/50 g dry soil
Kaolinite	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.60 b	2.94 b	4.20 b	5.28 b	9.12 b
	10	1.24 d	2.39 d	3.43 d	4.39 d	10.35 a
Illite	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.38 c	2.64 c	3.77 c	4.80 c	7.33 cd
	10	1.18 e	2.25 e	3.24 e	4.17 e	9.79 ab
Montmorillonite	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.13 e	2.15 f	3.03 f	3.86 f	6.73 d
	10	0.84 f	1.53 g	2.17 g	2.77 g	7.65 c

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژنی معدنی در تمام دوره خوابانیدن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند ولی اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی در ۳۰ روز خوابانیدن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول‌های ۲ و ۳). همچنین اثر متقابل نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژنی معدنی در ۱۵ روز اول خوابانیدن معنی‌دار نبود (جدول‌های ۲ و ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در طی دوره خوابانیدن، بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در خاک حاوی کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در خاک حاوی مونت‌موریلونیت با کاتیون تبادلی آلومینیوم مشاهده شدند، درحالی‌که کاتیون تبادلی سدیم اثر حد واسطی بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در هر سه نوع رس داشت (جدول‌های ۶ و ۷). بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم به میزان ۱/۸۱ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۶). همچنین بررسی نتایج نشان داد در طی دوره خوابانیدن بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی صرف‌نظر از نوع رس در خاک‌های اشباع شده با کاتیون کلسیم و کمترین درصد نیتروژن نیتراتی در خاک‌های اشباع شده با کاتیون آلومینیوم مشاهده شدند (جدول ۶). بیشترین درصد نیتروژن نیتراتی در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم به میزان ۴/۱۸ درصد (۶۰ روز بعد از خوابانیدن) و کمترین درصد نیتروژن نیتراتی در خاک حاوی رس مونت‌موریلونیت با کاتیون تبادلی آلومینیوم به میزان ۱/۰۹ درصد (۱۵ روز بعد از خوابانیدن) اندازه‌گیری شدند (جدول ۶).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها درصد نیتروژن معدنی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها، در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم به میزان ۶/۰۶ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۷). در تمام دوره خوابانیدن خاک‌های کلسیمی بیشترین و خاک‌های آلومینیومی کمترین درصد نیتروژن معدنی را صرف‌نظر از نوع رس داشت (جدول ۷). نتایج نشان داد که تأثیر مینرالوژی رس بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی در خاک‌های کلسیمی مشخص‌تر و بیشتر از خاک‌های سدیمی و آلومینیومی بود. مطالعه مستقیم تأثیر مینرالوژی رس بر نگهداشت و پویایی مواد آلی کمیاب است و دانش ما در این زمینه محدود و اطلاعات موجود ضدونقیض می‌باشد. ولی به‌طورکلی پذیرفته شده است که نگهداشت مواد آلی خاک در حضور کانی‌های رسی به ترتیب آلوفان> اسمکتایت> ایلیت> کائولینیت کاهش می‌یابد (۶، ۵۰). مینرالوژی خاک در تعیین مقدار کربن آلی ذخیره شده در خاک‌ها و زمان بازگشت آن اهمیت زیادی دارد (۴). چون برهمکنش بین ذرات مواد معدنی و مواد آلی از مینرالوژی خاک، به دلیل سطح ویژه (SSA) و میزان بار متفاوت کانی‌های مختلف خاک، تأثیر می‌پذیرد (۴۴). به نظر می‌رسد نتایج متفاوت و متضاد تأثیر مینرالوژی رس بر نگهداشت و پویایی مواد آلی تا اندازه‌ای مربوط به نوع کاتیون‌های تبادلی موجود در مکان‌های تبادلی کانی‌های رسی باشد. در پژوهش حاضر تأثیر مینرالوژی رس بر تجزیه بقایای گیاهی زمانی که سدیم کاتیون تبادلی کانی‌های رسی است، کمتر مشخص می‌باشد. مکانیسم‌های مختلفی چگونگی تأثیر مینرالوژی بر معدنی شدن مواد آلی در خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند. برای مثال، فرض می‌شود که کانی‌های رسی به‌طور مستقیم با میکروب‌ها در ارتباط هستند بنابراین سرعت متابولیسم میکروب‌ها با تغییر محلول خاک و پیوند آنزیم‌های برون سلولی تغییر می‌کند و در نتیجه فعالیت میکروب‌ها و تجزیه ماده آلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۴۵).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل نوع رس و نوع کاتیون تبادلی بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک حاوی رس کائولینیت با کاتیون تبادلی کلسیم (۱۲/۵۷ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک) و کمترین نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک حاوی رس مونت‌موریلونیت با کاتیون تبادلی آلومینیوم (۴/۶۸ میلی‌گرم نیتروژن در ۵۰ گرم خاک خشک) اندازه‌گیری شد و کاتیون تبادلی سدیم اثر حد واسطی بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در هر سه نوع رس داشت (جدول ۷). این امر به‌خوبی نشان می‌دهد که سدیم تبادلی باعث ایجاد شرایط فیزیکی نامطلوب در خاک می‌شود بنابراین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی کمتر در خاک‌های سدیمی در مقایسه با خاک‌های کلسیمی می‌تواند به دلیل شرایط فیزیکی نامطلوب در این خاک‌ها باشد. در خاک‌های آلومینیومی با مینرالوژی متفاوت مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت به‌طور معنی‌داری کمتر بود. ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالاتر رس مونت‌موریلونیت، سمیت آلومینیوم در محیط خاک را افزایش داده و بنابراین تعداد سلول‌های زنده کاهش می‌یابد و در نتیجه از تجزیه بقایای گیاهی کاسته می‌شود. به نظر می‌رسد شرایط فیزیکوشیمیایی محیط رشد میکروب‌ها و در نتیجه فعالیت ریز جانداران خاک توسط کاتیون‌های تبادلی تغییر می‌یابد که این تأثیر غیرمستقیم کانی‌های رسی، منجر به تفاوت در تجزیه بقایای گیاهی می‌شود؛ زیرا تغییرات فیزیکوشیمیایی ایجاد شده در خاک در نتیجه تغییر کاتیون‌های تبادلی در رس‌هایی با

ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالاتر، بیشتر می‌باشد (۱۵).

جدول ٦- تأثیر نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

Table 6- The effects of clay type and exchangeable cation on percentage of NH_4^+-N and NO_3^--N

نوع رس× نوع کاتیون تبادلی Clay type × Exchangeable cation		نیتروژن آمونیومی(NH_4^+-N) %			نیتروژن نیتراتی(NO_3^--N) %			
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Kaolinite	Na	0.94 b	1.28 c	1.57 c	1.34 b	2.29 b	3.19 b	1.02 b
	Ca	1.03 a	1.47 a	1.81 a	1.41 a	2.36 a	3.29 a	4.18 a
	Al	0.86 cd	1.19 de	1.46 de	1.23 d	2.11 e	2.98 d	3.76 d
Illite	Na	0.88 c	1.22 d	1.51 d	1.27 c	2.18 d	3.06 c	3.88 c
	Ca	0.95 b	1.33 b	1.65 b	1.33 b	2.24 c	3.17 b	4.04 b
	Al	0.86 cd	1.19 de	1.46 de	1.19 e	2.02 f	2.80 e	3.56 e
Montmorillonite	Na	0.79 e	1.09 f	1.36 f	1.16 e	1.90 h	2.62 g	3.31 g
	Ca	0.83 d	1.16 e	1.43 e	1.17 e	1.95 g	2.70 f	3.41 f
	Al	0.70 f	0.95 g	1.17 g	1.09 f	1.78 i	2.45 h	3.10 h

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

جدول ۷- تأثیر نوع رس و کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Table 7- The effects of clay type and exchangeable cation on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

نوع رس× نوع کاتیون تبادلی Clay type × Exchangeable cation		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen %			نیتروژن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass nitrogen
		مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			mg N/50 g dry soil
		30 day	45 day	60 day	
Kaolinite	Na	3.24 b	4.50 b	5.63 c	6.27 d
	Ca	3.40 a	4.79 a	6.06 a	12.57 a
	Al	2.98 d	4.19 d	5.63 c	4.95 ef
Illite	Na	3.08 c	4.31 c	5.44 d	5.73 de
	Ca	3.21 b	4.53 b	5.75 b	10.55 b
	Al	2.89 e	4.02 e	5.07 f	5.14 ef
Montmorillonite	Na	2.69 g	3.74 g	4.71 h	5.42 ef
	Ca	2.79 f	3.88 f	4.89 g	8.58 c
	Al	2.49 h	3.43 h	4.31 i	4.68 f

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

اثر متقابل نوع کاتیون تبادلی و مقدار رس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در طول دوره خوابانیدن اثر متقابل نوع کاتیون تبادلی و مقدار رس، بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول‌های ۲ و ۳). در تمام دوره خوابانیدن با افزایش سطح رس صرف‌نظر از نوع کاتیون‌های تبادلی از درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی و نیتروژن معدنی کاسته شد. بیشترین درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی ۶۰ روز بعد از

خوابانیدن نمونه‌ها در شن خالص به ترتیب به میزان ۲/۰۵ و ۵/۱۵ درصد و کمترین درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی ۱۵ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها در خاک‌هایی آلومینیومی با ۱۰ درصد رس به ترتیب به میزان ۰/۳۰ و ۰/۶۴ درصد اندازه‌گیری گردیدند (جدول ۸). با افزایش زمان خوابانیدن نمونه‌ها، درصد نیتروژن معدنی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی در تیمار شاهد (شن خالص) به میزان ۷/۲۸ درصد ۶۰ روز بعد از خوابانیدن نمونه‌ها و کمترین درصد نیتروژن معدنی در مدت زمان ۱۵ روز بعد از خوابانیدن در خاک آلومینیومی با ۱۰ درصد رس به میزان ۰/۹۴ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۹). به دلیل تأثیر مضر سدیم و آلومینیوم بر محیط خاک، تأثیر مقدار رس بر معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی زمانی که این کاتیون‌ها، به‌عنوان کاتیون تبادلی بر روی سطح رس قرار دارند، واضح‌تر است. تفاوت در معدنی شدن نیتروژن بین خاک‌هایی با مقادیر صفر و ۵ درصد رس بسیار بیشتر از تفاوت در معدنی شدن نیتروژن بین خاک‌هایی با مقادیر ۵ و ۱۰ درصد رس بود. این امر نشان می‌دهد که خاک‌هایی با ۵ درصد رس سطح کافی برای پایداری نیتروژن آلی عرضه می‌کنند. واکنش ماده آلی با مواد معدنی خاک یکی از مهم‌ترین فرایندهای طبیعی برای کاهش تجزیه ماده آلی خاک است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل نوع کاتیون تبادلی و مقدار رس بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). با افزایش مقدار رس صرف‌نظر از نوع کاتیون تبادلی مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی، افزایش یافت. بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های کلسیمی با ۱۰ درصد رس به میزان ۱۵/۱۳ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تیمار شاهد به میزان ۴/۳۱ میلی‌گرم در ۵۰ گرم خاک خشک مشاهده گردید (جدول ۹). به نظر می‌رسد تأثیر کاتیون‌های تبادلی بر تجزیه نیتروژن بقایای گیاهی از طریق تأثیر بر رشد میکروبی و فعالیت متابولیکی و تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محیط رشد میکروب‌ها صورت می‌گیرد. از آنجایی که معدنی شدن بقایای گیاهی توسط فلور میکروبی خاک صورت می‌گیرد، این نتیجه استنباط می‌شود که حداقل بخشی از این فرآیند به‌وسیله اندازه، فعالیت و تنوع جمعیت میکروبی خاک تنظیم می‌شود (۱۶، ۴۰، ۴۱).

جدول ۸- تأثیر نوع کاتیون تبادلی و مقدار رس بر درصد نیتروژن آمونیومی و نیتروژن نیتراتی

Table 8- The effects of exchangeable cation and clay content on percentage of NH_4^+-N and NO_3^--N

نوع کاتیون تبادلی× مقدار رس Exchangeable cation ×Clay content		نیتروژن آمونیومی(NH_4^+-N) % مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				نیتروژن نیتراتی(NO_3^--N) % مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)			
		15 day	30 day	45 day	60 day	15 day	30 day	45 day	60 day
Na	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.46 c	0.84 c	1.10 c	1.33 c	0.92 c	1.77 c	2.59 c	3.32 c
	10	0.33 e	0.63 e	0.84 f	1.05 f	0.79 d	1.46 e	2.12 e	2.74 f
Ca	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.50 b	0.95 b	1.31 b	1.61 b	1.03 b	1.87 b	2.73 b	3.53 b
	10	0.41 d	0.73 d	1.00 d	1.24 d	0.79 d	1.54 d	2.27 d	2.96 d
Al	0	0.59 a	1.14 a	1.65 a	2.05 a	2.07 a	3.14 a	4.16 a	5.15 a
	5	0.39 d	0.63 e	0.84 f	1.05 f	0.80 d	1.56 d	2.27 d	2.90 e
	10	0.30 e	0.57 f	0.75 g	0.90 g	0.64 e	1.22 f	1.81 f	2.37 g

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

نتیجه‌گیری کلی

مخلوط کردن بقایای گیاه یونجه با خاک‌های مصنوعی و خوابانیدن آن‌ها این امکان را فراهم کرد تا تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نیتراتی، نیتروژن معدنی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی مورد بررسی قرار گیرند. با افزایش مدت زمان خوابانیدن نمونه‌ها درصد نیتروژن معدنی افزایش یافت. نتایج پژوهش نشان داد که معدنی شدن نیتروژن آلی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی تحت تأثیر ویژگی‌های کانی‌های رسی قرار می‌گیرد و برهمکنش مواد آلی و معدنی مهم‌ترین فرآیندی است که باعث کاهش تجزیه ماده آلی در خاک می‌شود. مقدار نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با

رس کائولینیت با ظرفیت تبادل کاتیونی کمتر، بیشتر از خاک‌هایی با رس مونت‌موریلونیت و ایلیت بود.

جدول ۹- تأثیر نوع کاتیون تبادلی و مقدار رس بر درصد نیتروژن معدنی شده و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Table 9- The effects of exchangeable cation and clay content on percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

نوع کاتیون تبادلی× مقدار رس Exchangeable cation × Clay content		نیتروژن معدنی شده Mineralized nitrogen % مدت زمان خوابانیدن (روز) Incubation time (day)				نیتروژن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass nitrogen mg N/50 g dry soil
		15 da y	30 day	45 day	60 day	
Na	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.38 c	2.63 c	3.72 c	4.69 c	6.08 d
	10	1.12 e	2.09 e	2.97 f	3.82 f	7.03 c
Ca	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.53 b	2.83 b	4.06 b	5.18 b	12.27 b
	10	1.20 d	2.28 d	3.29 d	4.23 d	15.13 a
Al	0	2.67 a	4.29 a	5.85 a	7.28 a	4.31 e
	5	1.19 d	2.27 d	3.22 e	4.07 e	4.84 e
	10	0.94 f	1.80 f	2.57 g	3.29 g	5.62 d

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی در شن خالص بیشتر از خاک‌های دارای ۵ و ۱۰ درصد رس بود که نشان می‌دهد مقدار رس خاک‌ها بر ظرفیت آن‌ها برای حفظ و ذخیره نیتروژن آلی مؤثر است. از آنجا که خاک‌هایی با مقدار رس متفاوت سطح و ظرفیت تبادل کاتیونی متفاوتی دارند، بنابراین ذخیره نیتروژن آلی در این خاک‌ها تا اندازه‌ای توسط سطح، ظرفیت تبادل کاتیونی و حفاظت فیزیکی عرضه شده توسط آن‌ها کنترل می‌شود. معدنی شدن نیتروژن بقایای گیاهی و مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در خاک‌هایی با کاتیون‌های تبادلی مختلف، متفاوت بود. بیشترین و کمترین مقدار نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست‌توده میکروبی به ترتیب در خاک‌های با کاتیون تبادلی کلسیم و خاک‌هایی با کاتیون تبادلی آلومینیوم اندازه‌گیری گردید. کاتیون‌های تبادلی با تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محیط رشد میکروب‌ها و احتمالاً کنترل اندازه، فعالیت و تنوع جمعیت میکروبی، معدنی شدن نیتروژن آلی و مقدار زیست‌توده میکروبی تولید شده را کنترل می‌کنند. از آنجایی که کانی‌های مختلف دارای سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی متفاوتی هستند و تغییرات فیزیکوشیمیایی ایجاد شده در محیط خاک در نتیجه تغییر کاتیون تبادلی در خاک‌هایی با ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالاتر، بیشتر است، به همین دلیل به نظر می‌رسد که تأثیر مینرالوژی بر پویایی مواد آلی و زیست‌توده میکروبی تا اندازه‌ای ناشی از نوع کاتیون تبادلی موجود در مکان‌های تبادلی سطح رس‌ها باشد.

منابع

1- Alef K., and Nannipieri P. 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry, Academic Press, London.

2- Anderson J.M., and Ingram J.S.I. 1993. In Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods, CAB International, Wallingford, U. K.

3- Baldock J.A., and Skjemstad J.O. 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack, Journal of Organic Geochemistry, 31: 697-710.

4- Barré P., Fernandez-Ugalde O., Virto I., Velde B., and Chenu C. 2014. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects, Geoderma, 235-236: 382-395.

5- Brooks P. C., Kragt J. F., Powlson D. S., and Jenkinson D. S. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen. The effects of fumigation time and temperate, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 17(6): 831-835.

6- Bruun T.B., Elberling B., and Christensen B.T. 2010. Labiality of soil organic carbon in tropical soils with different clay minerals, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 42: 888-895.
7- Chorom M., and Rengasamy P. 1995. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type, European Journal of Soil Science, 46(4): 657-665.
8- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K.D., and Paul E. 2013. The Microbial efficiency matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter, Global Change Biology, 19: 988-995.
9- Deb S.K., and Shukla M.K. 2011. A review of dissolved organic matter transport processes affecting soil and environmental quality, Journal of Environmental and Analytical Toxicology, 1 (2): 1-11.
10- Deenik J. 2006. Nitrogen mineralization potential in important agricultural soils of Hawaii, Soil and Crop Management, 16: 1-5.
11- Denef K., and Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macro aggregate formation and stabilization, European Journal of Soil Science, 56: 469-479.
12- Denef K., Six J., Merckx R., and Paustian K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy, Journal of Plant and Soil, 246: 185-200.
13- El-Sharkawi H.M. 2012. Effect of nitrogen sources on microbial biomass nitrogen under different soil types, ISRN Soil Science. 1-7.
14- Eltantawy I.M. and Arnold P.W. 1973. Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimation of clays, Journal of Soil Science, 24: 232-238.
15- Feng W., Plante A., and Six J. 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles, Biogeochemistry, 112: 81-93.
16- Fontaine S., and Barot S. 2005. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation, Ecology Letters, 8: 1075-1087.
17- Golchin A., Clarke P., and Oades J.M. 1996. The heterogeneous nature of microbial products as shown by solid-state 13C CPIMAS NMR spectroscopy, Biogeochemistry, 34: 71-97.
18- Grandy A.S., Strickland M.S., Lauber C.L., Bradford M.A., and Fierer N. 2009. The influence of microbial communities, management, and soil texture on soil organic matter chemistry, Geoderma, 150: 278-286.
19- Houlton B.Z., and Morford S.L. 2015. A new synthesis for terrestrial nitrogen inputs, Journal of Soil, 1: 381-397.
20- Jackson M.L. 1979. Soil Chemical Analysis, Advanced Course, Prentice Hall incorporated. p. 895.
21- Jansen B., Nierop K.G.J., and Verstraten J.M. 2002. Influence of pH and metal/carbon ratios on soluble organic complexation of Fe (II), Fe (III) and Al (III) in soil solutions determined by diffusive gradients in thin films, Analytica Chimica Acta, 454: 259-270.
22- Kahle M., Kleber M., and Jahn R. 2004. Retention of dissolved organic matter by phyllosilicate and soil clay fractions in relation to mineral properties, Organic Geochemistry, 35: 269-276.
23- Kaiser K., and Guggenberger G. 2003. Mineral surfaces and soil organic matter, European Journal of Soil Science, 54: 219-236.
24- Kalisz B., Lachacz A., and Glazewski R. 2010. Transformation of some organic matter components in organic soils exposed to drainage, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 34: 245-256.
25- Kleber M., Sollins P., and Sutton R. 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces, Biogeochemistry, 85: 9-24.
26- Knicker H. 2011. Soil organic N an under-rated player for C sequestration in soils, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 43: 1118-1129.
27- Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., and Leinweber P. 2008. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry, Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 171: 61-82.
28- Masion A., Vilgea-Ritter A., Rose J., Stone W.E., Teppen E.B.J., Rybacki D., and Bottero J.E.Y. 2000. Coagulation-flocculation of natural organic matter with Al salts: speciation and structure of the aggregates, Environmental Science and Technology, 34: 3242-3246.
29- Mikutta R., Kleber M., Torn M.S., and Jahn R. 2006. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance, Biogeochemistry, 77: 25-56.
30- Motavalli P.P., Palm C.A., Parton Z.W.J., Elliott E.T., and Frey S.D. 1995. Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 27 (12): 1589-1599.
31- Muller T., and Hoper H. 2004. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 36 (6): 877-888.
32- Nannipieri P., and Eldor P. 2009. The chemical and functional characterization of soil N and its biotic components, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 41: 2357-2369.

33- Nguyen B.V., Olk D.C., and Cassman K.G. 2004. Characterization of humic acid fractions improves estimates of nitrogen mineralization kinetics for lowland rice soils, Soil Science Society of American Journal, 68: 1266-1277.
34- Pronk G.J., Heister K., and Kögel-kanber I. 2013. Is turnover and development of organic matter controlled by mineral composition, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 67: 235-244.
35- Rayment G.E., and Lyons D.J. 2011. Total Soil-N, Semi Micro Kjeldahl Automated Color, FIA. In: Rayment G.E. and Lyons D.J. (eds.). Soil Chemical Methods-Australasia, CSIRO Publishing, Melbourne.
36- Reichert J.M., Norton L.D., Favaretto N., Huang C.H., and Blume E. 2009. Settling velocity, aggregate stability, and interrill erodibility of soils varying in clay mineralogy, Soil Science Society of American Journal, 73: 1369-1377.
37- Rillig M.C., Caldwell B.A., Wösten H.A.B., and Sollins P. 2007. Role of proteins in soil carbon and nitrogen storage: controls on persistence, Biogeochemistry, 85: 25-44.
38- Sanderman J., and Maddern T. 2014. Similar composition but differential stability of mineral retained organic matter across four classes of clay minerals, Biogeochemistry, 121: 409-424.
39- Scherer H.W., Feils E., and Beuters P. 2014. Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium, Plant, Soil and Environment, 60 (7): 325-331.
40- Schimel J.P., and Schaeffer S.M. 2012. Microbial control over carbon cycling in soil, Front Microbiologica, 3: 1-11.
41- Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kogel-Knabner I., Lehmann J., and Manning D.A.C. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, Nature, 478: 49-56.
42- Scott E., and Rothstein D.E. 2014. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 69: 83-92.
43- Six J., and Paustian K. 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 68: 4-9.
44- Six J., Elliott E.T., and Paustian K. 2000. Soil macro aggregate turnover and micro aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no tillage agriculture, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 32: 2099-2103.
45- Smernik R., and Skjemstad J. 2009. Mechanisms of organic matter stabilization and destabilization in soils and sediments: conference introduction, Biogeochemistry, 92: 3-8.
46- Vaieretti M.V., Pérez H.N., and Gurvich D.E. 2005. Decomposition dynamics and physico-chemical leaf quality of abundant species in montane woodland in central Argentina, Journal of Plant and Soil, 21: 205-278.
47- Van Veen J.A., and Kuikman P.J. 1990. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. Biogeochemistry, 11: 213-233
48- Vogel C., Babin D., Pronk G.J., Heister K., Smalla K., and Kögel-Knabner I. 2014. Establishment of macro-aggregates and organic matter turnover by microbial communities in long-term incubated artificial soils, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 79: 57-67.
49- Vogel C., Heister K., Buegger F., Tanuwidjaja I., Haug S., Schloter M., and Kögel-Knabner I. 2015. Clay mineral composition modifies decomposition and sequestration of organic carbon and nitrogen in fine soil fractions, Biology and Fertility of Soils, 1-17.
50- Von Lützow M., Kogel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., and Flessa H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions, European Journal of Soil Science, 57: 426-445.
51- Voroney P., and Derry D. 2008. Origin and distribution of nitrogen in soil. Agronomy, 49: 1-30.
52- Walkley A., and Black I.A. 1934. An Examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, Journal of Soil Science, 37: 29-37.
53- Wood M., and Cooper J.E. 1988. Acidity, aluminum and multiplication of Rhizobium Trifolii: possible mechanisms of aluminum toxicity, Journal of Soil Biology and Biochemistry, 20: 95-99.
54- Yoder L. 1919. Adaptation of the mohr volumetric method to general determinations of chlorine, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 11(8): 755-755.
55- Yu W.H., Li N., Tong D.S., Zhou C.H., Lin C.X.C., and Xu C.Y. 2013. Adsorption of proteins and nucleic acids on clay minerals and their interactions: A review, Applied Clay Science, 80: 443-452.
56- Zech W., Nicola S., Guggenberger G., Kaiser K., Lehmann J., Miano T.M., Miltner A., and Schroth G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in tropics, Geoderma, 79: 117-161.
57- Zwarun A.A., Bloomfield B.J., and Thomas G.W. 1971. Effect of soluble and exchangeable aluminum on a soil Bacillus, Soil Science Society of American Journal, 35: 460-463.

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1691-1711

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۷۱۱-۱۶۹۱

Investigation of Mineralization of Organic Nitrogen under the Influence of Type, Content of Clay and Exchangeable Cations

F. Rakhsh*[1] - A. Golchin[2]

Received: 30-07-2017
Accepted: 13-12-2017

Introduction: Mobilization and stabilization of organic matter in soils represent a set of complex processes involving the processing and decomposition of organic matter by diverse communities of soil fauna and microorganisms, as well as chemical-physical interactions with mineral particles of soil. Clay minerals have high effects on the soil organic matter dynamics. Clay minerals with the physical protection of organic matter play an important role in reducing the rate of decomposition of organic matter. The effects of soil texture on the soil organic matter dynamics have been investigated in many studies, but the effects of exchangeable cations and clay types on mineralization of organic nitrogen and microbial biomass nitrogen have not been given much attention. For this reason, the aim of this study was to evaluate the effects of types and clay contents and exchangeable cations on the mineralization of organic nitrogen and microbial biomass nitrogen.

Material and Methods: Appropriate amounts of homoionic Na-, Ca- and Al- clays from Georgia kaolinite, Illinois illite and Wyoming montmorillonite were mixed with pure sand to prepare artificial soils with different clay contents, exchangeable cations, and clay types. The artificial soils have zero, 5 and 10% clay from Georgia kaolinite, Illinois illite and Wyoming montmorillonite that their clay minerals saturated with Ca, Na and Al. Alfalfa plant residues were incorporated into the artificial soils and the soils were inoculated with microbes from a natural soil and incubated for 60 days and concentration of NH_4-N and NO_3-N were measured every 15 days. In the artificial soil samples, microbial biomass nitrogen was measured by the fumigation-extraction method in the end time of incubation period.

Results and Discussion: The results of this study showed that the percentage of mineralized nitrogen in the two-month incubation period, was higher in the pure sand than in soils containing 5% and 10% clay, indicating that clay contents influence the capacity of soils to protect and store organic nitrogen. Microbial biomass nitrogen increased as the amount of clay in the soil increased. The highest and lowest amounts of microbial biomass nitrogen measured in soils with 10% clay (9.26 mg per 50 g dry soil) and pure sand (4.31 mg per 50 g dry soil), respectively. There was a significant influence of exchangeable cations on the percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen. The microbial biomass nitrogen and the percentage of mineralized nitrogen were highest in Ca-soils and lowest in Al-soils. The percentage of mineralized organic nitrogen in two months of incubation period was highest in soils with Georgia kaolinite clay and lowest in soil with Wyoming montmorillonite clay. The amounts of microbial biomass nitrogen in soils with Wyoming montmorillonite clay were lower than soils with Georgia kaolinite and Illinois illite clays. The percentage of mineralized organic nitrogen increased as the incubation period increased. The results of this study indicated that organic nitrogen mineralization rates and microbial biomass nitrogen were affected by types and clay contents and exchangeable cations and interaction of organic matter with clays and is an important process as it slows soil organic matter decomposition.

Conclusions: Mixing the alfalfa residues with artificial soils and incubation samples allowed to study the effects of types and clay contents and exchangeable cations on the percentage of NH_4^+-N, NO_3^--N, mineralized nitrogen, and microbial biomass nitrogen. Soils with different clay contents have different surface areas and cation exchange capacities; therefore, it is concluded that organic nitrogen storage of soils is, partly, controlled by the surface areas, cation exchange capacity and physical protection provided by the soils. Nitrogen mineralization and the amounts of microbial biomass nitrogen were different in soils with different exchangeable cations. It is concluded that exchangeable cations exert their influence on microbial biomass and hence nitrogen dynamics by controlling the size and activity of the microbial population through modifying the physicochemical characteristics of microbial habitats. Since various clay minerals have different specific surface areas and cation exchange capacity and the physicochemical changes induced in the soil environment as a result of variations of exchangeable cations is much greater in soils with higher cation exchange capacity and specific surface area. It

1 and 2- Ph.D. Student and Professor of Soil Science Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran
(*- Corresponding Author Email: rakhsh.fatemeh@znu.ac.ir)

seems the effects of clay mineralogy on the dynamics of organic materials and microbial biomass, in part, arise from the type of exchangeable cations present on the exchange sites of the clay minerals.

Keywords: Ammonium, Biomass, Cation Exchange Capacity, Nitrate, Specific surface