

有机物料和氮添加对宁夏沙化土壤碳矿化的影响

庞飞^{1,3}, 李志刚^{2,3}, 李健³

(1. 宁夏大学 生命科学学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学 农学院,
银川 750021; 3. 宁夏林业研究院 种苗生物工程国家重点实验室, 银川 750004)

摘 要:以宁夏当地的枝条、秸秆为材料,通过室内模拟试验设计了不添加(N)、添加枝条(B,5 g/kg)、添加秸秆(S,5 g/kg)配施不同水平氮肥(N₀,0 mg/kg;N₁,40 mg/kg;N₂,50 mg/kg;N₃,60 mg/kg),研究了宁夏沙化土壤碳矿化及土壤微生物性质的影响。结果表明:各类处理均在第一天出现了矿化速率的最大值,到第 3 天时下降了 72.47%~96.54%(N),55.58%~63.43%(B),65.92%~75.38%(S)。各类处理有机碳累积矿化量为 0.65~0.88 g/kg(N),0.58~0.99 g/kg(B),0.63~1.44 g/kg(S)。各处理有机碳、全氮、碳矿化量、微生物性质在同一氮水平下呈现 S>B>N 趋势,而在同一种有机物料添加处理下,则整体上伴随着施氮水平的提高呈现先增加后降低或提高的趋势(N 处理的微生物量氮、脲酶除外)。碳累积矿化量及平均矿化速率与有机碳、全氮、微生物量碳氮、酶活均呈极显著关系($p<0.01$)。有机物料添加和氮肥添加以及它们的交互作用总体上对有机碳的矿化速率、矿化量有极显著影响($F>F_{0.01}$)。该研究为宁夏当地及中国北方沙化土壤改良研究提供了参考。

关键词:有机物料;氮肥;碳矿化;沙化土壤

中图分类号:S156.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0075-06

Effects of Incorporated Organic Materials with N Fertilizer on Soil Carbon Mineralization of Desertified Soil in Ningxia

PANG Fei^{1,3}, LI Zhigang^{2,3}, LI Jian³

(1. School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

3. State Key Laboratory of the Seedling Bioengineering, Ningxia Forestry Institute, Yinchuan 750004, China)

Abstract: The local poplar branch and corn straw in NingXia were used as the test materials. Through indoor simulation experiment with treatments of no addition (N), addition of branches (B), addition of straws (S) combining with nitrogen fertilizer of different contents (N₀, 0 mg/kg; N₁, 40 mg/kg; N₂, 50 mg/kg; N₃, 60 mg/kg), we investigated the soil organic carbon mineralization and soil microbial properties of desertified soils in Ningxia. The results showed that the soil organic C mineralization rates of all treatments sharply declined at the first day of incubation, decreased by 72.47% ~ 96.54% (N), 55.58% ~ 63.43% (B), 65.92% ~ 75.38% (S), respectively, over 3 days. The soil organic carbon cumulative mineralization amounts of the treatments were 0.65~0.88 g/kg (N), 0.58~0.99 g/kg (B), 0.63~1.44 g/kg (S), respectively. At the same N application rate, the mineralization cumulative amounts of soil carbon, MBC, MBN, enzymes activity of all kinds of treatment presented the order: S>B>N, which increased or decreased after first rise with the increased of N application amount under the same kind of organic material (except MBN, urease activity of N). The correlations between soil mineralization cumulative amount, mineralization rate and carbon, nitrogen, MBC, MBN, enzyme activity were highly insignificant ($p<0.01$). Organic material, nitrogen fertilizer and the interaction of them significantly influenced on soil mineralization cumulative amount in general, mineralization rate ($F>F_{0.01}$). The study results can provide the successful case of sandy soil improvement in Ningxia and the other arid and semiarid areas of north China.

Keywords: organic material; nitrogen fertilizer; soil organic carbon mineralization; desertified soils

有机碳是土壤中最重要组成成分^[1]。土壤中固有有机碳和外源有机碳经过微生物分解释放 CO₂ 的数量与强度可以反映土壤质量状况以及评价环境因素或人为因素对其产生的影响^[2-3]。土壤有机碳的矿化过程受水分、温度、管理措施、土壤理化性质等多种因素的影响^[3]。目前国内外土壤矿化研究主要是草林地^[4-5]、沼泽湿地^[6]、农田^[7]等,而关于沙化土地的研究则鲜有报道。

沙漠化是最主要的土地退化类型之一,宁夏沙化耕、林、草地占宁夏沙化土地的 84%^[8]。这些土地比较贫瘠,提高这部分土壤的肥沃程度对宁夏农林业生产和生态环境发展具有重要意义。土壤沙化的过程也是土壤中有机碳减少的过程^[9]。土壤中的有机碳是微生物、土壤酶和矿物质的有机载体,它能增强土壤孔隙度、通气性和结构性,有显著的缓冲作用和持水作用。提高土壤中的有机碳是沙化土壤改良与修复过程中重要的环节。当前有通过外源性有机物料输入提高沙化土壤有机碳含量并取得较好效果的报道^[10-11],但关于通过有机物料添加对沙化土壤有机碳矿化影响的研究则很少。

近些年关于外源性氮输入对土壤有机碳矿化的影响因结果不同而存在争议^[12-13]。氮素作为土壤中重要的营养元素,尤其在沙化土壤中,氮素的缺少是土壤微生物生长繁殖受限的因素之一,而微生物是碳矿化的重要参与者,关于氮添加对沙化土壤碳矿化及微生物生长影响的研究则少之又少。基于此,本试验进一步深化研究有机物料配施氮肥对沙化土壤有机碳矿化的影响。以期对宁夏当地及中国北方的沙漠化土壤生物修复提供的参考与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域自然概况与材料

研究区位于银川腹部沙地(106°08′—107°22′E, 38°28′—38°42′N,海拔约 1 115 m),地处我国西北内陆,为中温带半干旱大陆性气候,分布有流动沙丘,是宁夏的沙漠化地区。年均气温 10.1℃,年均降雨量 181.2 mm。年均蒸发量为 1 882.5 mm^[14],处理之前的土壤及材料基本理化性质:土壤 pH 值 8.97,有机碳含量为 12.99 g/kg、全氮含量 0.798 g/kg、全磷含量 0.068 g/kg、全钾含量 16.51 g/kg。枝条有机碳 535.0 g/kg、全氮 3.7 g/kg,秸秆有机碳 201.3 g/kg、全氮 13.5 g/kg。

1.2 试验设计

本研究于 2016 年 4 月完成试验布置,采用裂区试验设计,以有机物料类型为主处理,氮肥水平为副处理。主处理包括不添加(N)、添加枝条(B):5 g/kg

(土)、添加秸秆(S):5 g/kg(土),副处理包括 4 个氮水平(以纯氮计):N₀,0 mg/kg;N₁,40 mg/kg(为当地的沙地农林生产正常施用量);N₂,50 mg/kg;N₃,60 mg/kg,共 12 个处理,每个处理 3 个重复。

1.3 室内培养与测定

本试验采用室内培养法碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量。将采集于试验区的沙化土壤自然风干后过 2 mm 筛,一部分用于测定土壤基本性质。一部分用于矿化试验。具体操作是将培养土样 100 g 装到 1 000 ml 的密闭培养瓶中,然后将粉碎至 1 cm 左右林木枝条、玉米秸秆分别添加后摇荡混匀再将不同水平氮肥(以尿素溶液的形式)一次性添加并调节土壤含水量至田间最大持水量的 60%。同时将盛有 10 ml 浓度为 0.1 mol/L NaOH 溶液的小烧杯放入到培养瓶,在 25℃暗室下控温控湿培养。培养期间每隔 3 d 采用称重法补充水分。在培养的第 1 d,3 d,7 d,14 d,22 d,30 d,40 d,55 d,75 d,105 d 取出小烧杯,重新放入另一个盛有 10 ml 浓度为 0.1 mol/L NaOH 溶液的小烧杯,进入下一个培养时期,取出的 NaOH 溶液用 0.05 mol/L 的 HCl 标准溶液滴定,根据消耗的 HCl 的体积计算 CO₂-C 释放量,土壤碳矿化量用 CO₂-C g/kg(干土)表示。培养结束后土样用于测定土壤碳、氮、微生物性质,有机碳的测定采用重铬酸钾外加热法^[15]。全氮的测定采用 FOSS 凯氏定氮仪测定。微生物量碳、氮的测定采用氯仿熏蒸浸提法^[16]。土壤过氧化氢酶的测定采用高锰酸钾滴定法^[17],纤维素酶的测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[17];脲酶的测定采用苯酚钠一次氯酸钠比色法^[17]。

1.4 数据分析

数据处理采用 SPSS 17.0 和 Excel 2013 软件进行统计分析、作图。用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 秸秆、枝条配施氮肥下土壤中有机碳的矿化速率

各处理 CO₂ 释放速率随时间的动态变化如图 1 所示。N、B、S 处理土壤呼吸速率均在第 1 天达到最大值。在同一氮水平下,各类处理矿化速率呈现 S>B>N 趋势。在同一种有机物料添加处理下,N、B 处理的矿化速率均呈现 N₃>N₂>N₀>N₁ 趋势,S 处理出现 N₃>N₂>N₁>N₀ 趋势,且 N₂,N₃ 水平矿化速率显著高于 N₀ 的矿化速率($p<0.05$)。各处理土壤 CO₂ 释放速率均随培养时间的延长呈快速下降趋势,至第 3 d 时下降了 72.47%~96.54%(N),55.58%~63.43%(B),65.92%~75.38%(S)。后略有上升(除 N),N 处理在 14~30 d,SN₃ 在 30~40 d 出现第 2 个小高峰,之后各处理总体上

逐渐降低至一个稳定水平。从 105 d 平均矿化速率看(图 2)氮素添加对土壤有机碳矿化动态的影响较大($p<0.05$),当施氮量从 N_0 升高至 N_3 时,土壤有机碳矿化速率由 $0.024\sim0.029\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 增加到 $0.03\sim0.04\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ($p<0.05$)。B,S 处理与 N 相比之间的差异不显著,并且 B,S 处理之间差异也不显著。

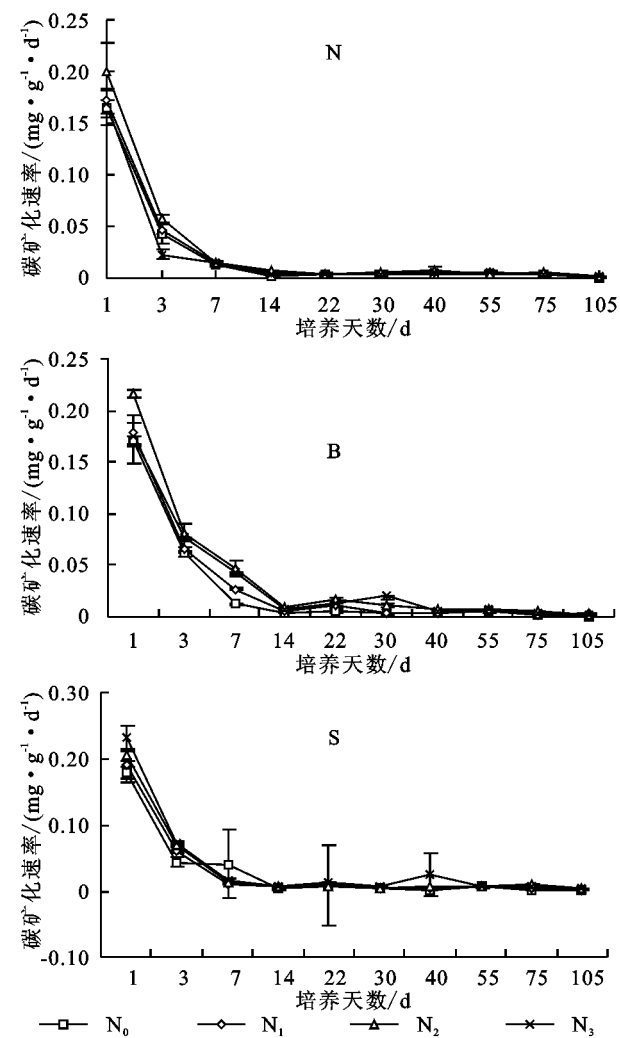


图 1 枝条、秸秆配施氮肥下处土壤 CO₂ 的动态变化

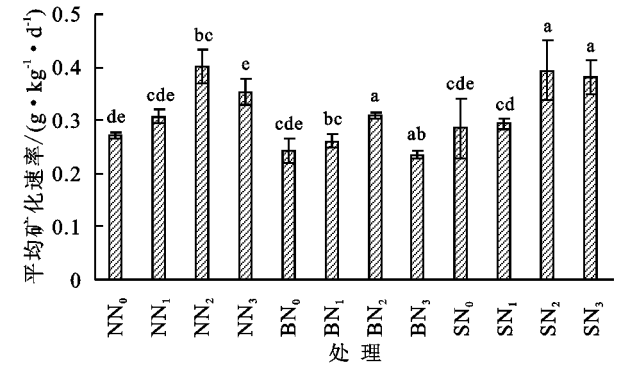


图 2 秸秆、枝条配施氮肥下土壤碳矿化平均速率

2.2 秸秆、枝条配施氮肥下土壤中有机碳的累积矿化量

如图 3 所示,105 d 培养周期内各处理土壤有机

碳累积矿化量为 $0.65\sim0.88\text{ g}/\text{kg}(\text{N})$, $0.58\sim0.99\text{ g}/\text{kg}(\text{B})$, $0.63\sim1.44\text{ g}/\text{kg}(\text{S})$ 。同一氮水平下,各处理 N_0 水平呈 $S>N>B$,而在 N_1, N_2, N_3 水平则呈现 $S>B>N$,并且在 N_3 水平 B,S 处理碳矿化量显著高于 N 处理碳矿化量($p<0.05$)。同一种有机物料添加处理下,N 处理有机碳矿化累积量呈现 $N_2>N_1>N_0>N_3$,B,S 处理则出现 $N_3>N_2>N_1>N_0$ 趋势,且 N_2, N_3 水平下有机碳累积矿化量显著高于 N_0 水平有机碳累积矿化量($p<0.05$)。前 30 d 的累积矿化量占整个培养时期的 $57.97\%\sim69.09\%(N)$, $62.22\%\sim71.04\%(B)$, $58.28\%\sim72.30\%(S)$,由图 2 可知添加氮素后有机碳矿化量明显增加,而添加有机物料的处理在 N_2, N_3 水平的氮添加下有机碳矿化量有显著变化。

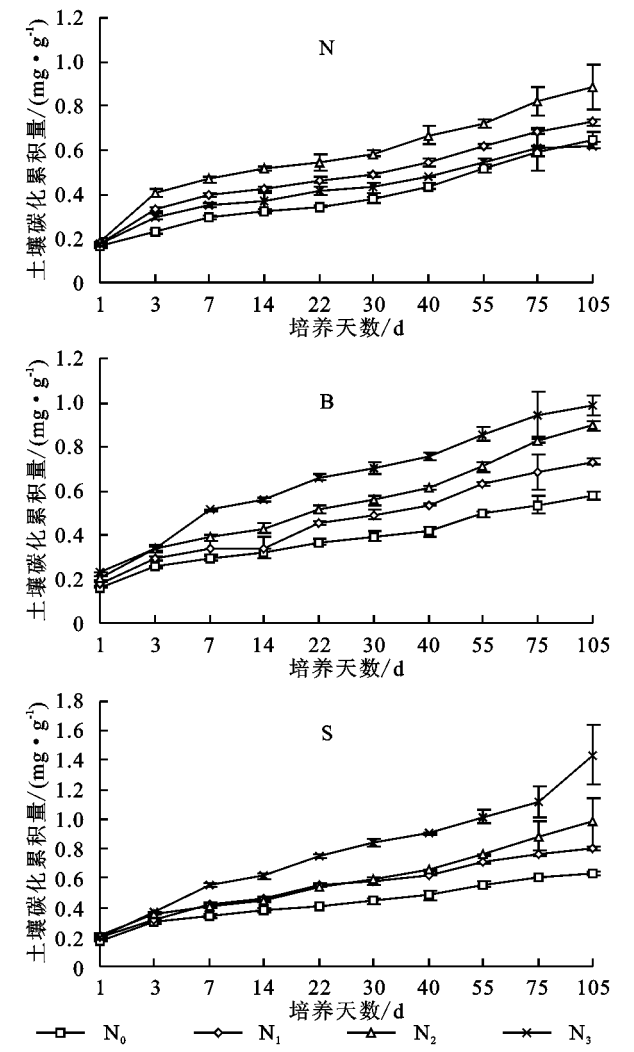


图 3 枝条、秸秆配施氮肥下处土壤 CO₂-C 的累积动态变化

2.3 秸秆、枝条配施氮肥下土壤碳、氮、微生物性质

表 1 所示各处理的有机碳、全氮含量不同。在同一氮水平下,各处理有机碳、全氮含量呈现 $S>B>N$,其中 S 处理的有机碳含量显著高于 N 处理的有机碳含量($p<0.05$)。同一有机物料添加下,随着施

氮水平的提高各处理有机碳、全氮含量呈提高或先升高后降低趋势,其中 B、S 处理在 N_2 、 N_3 水平有机碳含量显著高于 N_0 水平的有机碳含量($p<0.05$)。各处理碳氮比在 9~16.05。土壤微生物量碳、氮是土壤有机碳中最为活跃、最易变化的部分,是土壤中易于利用的养分库^[18]。本试验各处理在同一施氮量下微生物量碳、氮含量、土壤酶活性呈 $S>B>N$ 趋势(除 N_0 水平下的纤维素酶、 N_1 水平下的微生物量碳、 N_2 水平下的微生物量碳、纤维素酶以及 N_3 水平下的微生物量碳外)。与 N 处理相比,S 处理的微生物量碳氮含量、酶活性显著提高($p<0.05$),在 N_0 、 N_1 、 N_2 水平下,S 处理的微生物量碳含量分别是 N 处理微生物量碳含量的 4.93、4.85、3.91 倍。同一种有机物料添加下,各处理微生物量碳氮含量、土壤酶活性随施氮量的增加出现先提高后降低的趋势(除了

N 处理的过氧化氢酶、B 处理的脲酶、S 处理的过氧化氢酶、脲酶外),其中 N_2 水平的微生物量氮提高最显著($p<0.05$)。

2.4 有机碳矿化量、有机碳、氮、微生物性质相关分析

土壤碳矿化与土壤含有的有机碳、氮含量及土壤微生物存在密切关系。有机碳矿化反映土壤中碳、氮含量变化及微生物活性质,而土壤碳、氮含量及微生物性质决定土壤有机碳矿化的过程^[18]。表 2 所示土壤有机碳累积量、平均矿化速率、碳、氮、微生物量碳、氮及酶活性间相关关系。土壤碳累积矿化量、平均矿化速率与有机碳、全氮、微生物量碳、氮、酶(脲酶除外)活均关系极显著($p<0.01$),其中有机碳累积矿化量与纤维素酶相关关系最高为 0.857,而平均矿化速率与微生物量碳、氮相关关系最高。土壤有机碳、氮与土壤微生物性质同样呈极显著关系($p<0.01$)。

表 1 枝条、秸秆配施氮肥处理下土壤碳、氮、微生物量及酶活性

处理	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹)	过氧化氢酶/ (ml·L ⁻¹)	纤维素酶/ (mg·g ⁻¹)	脲酶/ (mg·g ⁻¹)
NN ₀	11.24±0.82ef	0.70±0.10f	16.05	13.46±0.170h	1.37±0.067j	0.10±0.004f	0.051±0.003ef	0.08±0.003h
NN ₁	11.37±0.70ef	1.04±0.05e	10.93	13.84±1.443h	2.08±0.088j	0.14±0.004e	0.061±0.002d	0.11±0.010g
NN ₂	14.83±0.92cd	1.18±0.02cde	12.56	24.69±0.064g	20.48±0.192c	0.15±0.002d	0.075±0.001c	0.16±0.007de
NN ₃	10.81±0.78f	1.20±0.09bcde	9.00	14.65±0.561h	11.15±0.278g	0.15±0.004d	0.053±0.001e	0.13±0.007fg
BN ₀	13.28±1.40de	1.04±0.04e	15.76	43.92±2.109f	5.67±0.332i	0.19±0.004c	0.045±0.001f	0.15±0.007ef
BN ₁	13.28±0.70cd	1.11±0.07de	11.96	73.92±2.679d	11.91±0.398fg	0.20±0.005c	0.064±0.004d	0.17±0.014cde
BN ₂	15.06±0.54cd	1.22±0.04abcde	12.34	84.41±0.281b	23.41±0.391a	0.20±0.007c	0.072±0.003c	0.17±0.003de
BN ₃	15.18±1.40bc	1.32±0.02abcd	11.5	78.37±1.395c	15.27±0.457e	0.24±0.002a	0.064±0.003d	0.19±0.011bcd
SN ₀	15.57±1.22cd	1.31±0.19a	11.88	66.40±0.956e	9.72±0.164h	0.20±0.000c	0.053±0.002e	0.20±0.010b
SN ₁	15.72±0.43c	1.40±0.08abc	11.23	67.19±1.070e	12.13±0.186f	0.22±0.000b	0.074±0.001c	0.21±0.004bc
SN ₂	17.98±0.39ab	1.41±0.03ab	12.75	96.53±0.357a	19.12±0.337d	0.24±0.001a	0.149±0.001b	0.17±0.011de
SN ₃	18.92±3.10a	1.35±0.04abc	14.01	68.77±1.848e	21.98±0.485b	0.25±0.002a	0.139±0.002a	0.27±0.005a

表 2 碳积累量与碳、氮、微生物量碳、氮及酶活性的相关关系

项目	有机碳 累积量	平均矿化 速率	有机碳	全氮	微生物 量碳	微生物 量氮	过氧化 氢酶	纤维 素酶	脲酶
有机碳累积量	1								
有机碳平均矿化速率	0.742**	1							
有机碳	0.677**	0.713**	1						
全氮	0.476**	0.441**	0.598**	1					
微生物量碳	0.621**	0.751**	0.797**	0.644**	1				
微生物量氮	0.659**	0.773**	0.601**	0.597**	0.614**	1			
过氧化氢酶	0.569**	0.669**	0.744**	0.752**	0.880**	0.609**	1		
纤维素酶	0.857**	0.656**	0.549**	0.471**	0.526**	0.631**	0.573**	1	
脲酶	0.361*	0.529**	0.608**	0.744**	0.646**	0.644**	0.832**	0.524**	1

表 3 秸秆、枝条配施氮肥双因素方差分析

变异来源	有机碳	全氮	微生物量碳	微生物量氮	过氧化氢酶	纤维素酶	脲酶	有机碳矿化量
有机物料种类	48.22**	70.50**	2308.06**	543.84**	436.348**	527.427**	112.581**	27.144**
氮水平	8.38**	16.60**	209.96**	1513.36**	56.507**	290.942**	19.786**	41.219**
有机物料种类×氮水平	3.40*	9.87**	51.59**	110.30**	3.42*	118.587**	13.151**	16.382**

注:n=36。

3 讨论

在本试验 105 d 的培养过程中。土壤有机碳矿化规律表现为:在培养初期(第 1 天)土壤的矿化作用最强,日矿化速率达到最大值,之后随着时间的延长矿化速率降低至稳定的状态,在前 30 d 各处理有机碳累积矿化量占整个培养期有机碳累积矿化量的 57.97%~69.09%(N),62.22%~71.04%(B),58.28%~72.30%(S),这与艾丽等^[18]、王义祥等^[19]、马昕昕等^[20]等的研究结果相一致。前期土壤和有机物料中易分解组分会快速分解,使得大量养分迅速释放,提高了土壤中微生物活性,使得土壤有机碳的矿化速率和矿化量迅速提高和增加,随培养时间的延长,在土壤及有机物料中的易分解组分被利用完后,微生物开始转向分解较难分解的组分,矿化速率随之减缓,有机碳分解量随之下降^[21]。本试验同一施氮水平下,相对 N 处理,B 处理、S 处理矿化速率及有机碳积累量较高,整体呈 S>B>N 趋势,S 处理的矿化速率及碳累积矿化量在 N₃ 水平显著高于 N 处理的矿化速率与矿化量($p<0.05$),这说明秸秆中的易分解成分较高。B 处理的有机碳矿化量较 S 处理有机碳矿化量低,分析可能是短期内分解枝条的微生物群落并没有大量繁殖,也可能是枝条含有较多的木质素和其他难分解成分造成碳素释放较秸秆低,对微生物分解矿化有机碳的激发作用较小^[22-23]。

氮肥添加对于土壤有机碳矿化的影响目前有诸多争议。Neff 等^[24]研究在添加氮肥后土壤有机碳矿化速率显著提高。Ji^[25]等研究认为,氮添加能够促进植物生长和凋落物的分解,进而增加土壤碳矿化。莫江明^[14]则认为添加氮肥后降低了土壤有机碳的矿化。Schimel 等^[26]的研究则表明添加氮素对土壤有机碳矿化没有影响,并分析是因为土壤有机碳矿化受胞外酶以及动力学影响。在本试验中,在同一种有机物料添加下,N 处理随着氮肥水平的增加矿化量呈现先增加后降低的趋势,其中最高的 N₂ 处理是最低的 N₃ 的 1.46 倍。对于 B,S 的处理来说,都出现了随着氮水平的增加碳矿化量呈现提高的趋势,最高的 N₃ 处理是分别是最低的 N₀ 处理的 1.74 倍、2.29 倍。

表明氮肥的添加对于有机碳的矿化有促进作用,分析可能是外源氮源的添加使得原来受氮素营养限制的微生物的活性增强以及其群落的改变^[27]。同时发现在低氮水平下添加有机物料对土壤有机碳矿化并没有显著影响。分析可能是低氮水平的添加能够促进土壤微生物内部的代谢过程^[28]。分析图 3 则发现氮素的添加会显著提高土壤有机碳矿化的速率($p<0.05$),而添加秸秆或枝条则对有机碳矿化无显著的提高。说明对于沙化土中的分解有机碳的微生物,氮素是主要的限制因子,氮素的添加会促进土壤微生物的活性与数量从而提高了有机碳的矿化速率。N 和 B,S 处理随着氮素水平的提高出现了不同的趋势。分析可能是有机物料本身性质影响,秸秆分解释放的碳、氮素较多,而枝条释放的碳、氮素则较低,同时对于不添加处理其会消耗土壤中原有的有机质短期内会促进有机碳的释放,而长期则会降低土壤有机碳的矿化速率,这些都会对有机碳矿化产生影响。

本试验在添加氮肥配施有机物料的情况下,土壤中的微生物量碳、氮以及酶活性随着有机物料的添加以及氮水平得到提高呈现不断增加或着呈现先增加在降低的趋势(N₁,N₂ 水平的脲酶除外)。说明了有机物料及氮肥的添加会促进土壤中碳、氮库、源的改变,营养元素含量及组分的变化以及物料添加到土壤中对微生物生存环境的改善都会影响微生物对土壤有机碳的分解矿化。而对微生物量碳、氮酶活性与有机碳累积矿化量的相关分析研究发现纤维素酶与累积矿化量的相关关系最为显著,也说明了微生物分解有机物料在有机碳矿化过程中发挥着重要的作用,同时进行的方差分析(表 3)表明有机物料添加和氮肥的添加以及他们的互作作用整体上对沙化土壤碳、氮、矿化速率、土壤有机碳累积矿化量、微生物性质有极显著的影响($F>F_{0.01}$)。

4 结论

各处理均在第一天出现了矿化速率的最大值,之后随着培养时间的增加矿化速率不同程度的降低。到第 3 d 时下降了 72.47%~96.54%(N),55.58%~63.43%(B),65.92%~75.38%(S)。各类处理有

机碳累积矿化量为 0.65~0.88 g/kg (N), 0.58~0.99 g/kg (B), 0.63~1.44 g/kg (S)。

同一氮水平下各处理碳矿化量、微生物性质呈 S>B>N。同一种有机物料添加处理下,各处理矿化量及微生物性质整体上随施氮水平提高呈先增加后降低或提高的趋势(不添加类的微生物量氮、脲酶除外)。土壤碳累积量、矿化速率与土壤碳、氮、微生物量碳、酶活均呈现极显著相关($p<0.01$)。有机物料添加和氮肥添加以及他们互作总体上对有机碳的矿化速率、矿化量有极显著影响($F>F_{0.01}$)。总体来看添加有机物料以及氮肥随沙化土壤碳矿化有促进作用,其中 SN_3 处理效果较其他处理好。

参考文献:

- [1] Saggat S, Yeates G W, Shepherd T G. Cultivation effects on soil biological properties, microfauna and organic matter dynamics in Eutric Gleysol and Gleyic Luvisol soils in New Zealand[J]. Soil & Tillage Research, 2001, 58(1/2): 55-68.
- [2] Huang Y, Liu S. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 709-714.
- [3] Min K, Kang H, Lee D. Effects of ammonium and nitrate additions on carbon mineralization in wetland soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(12): 2461-2469.
- [4] 王红, 范志平, 邓东周, 等. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1469-1475.
- [5] 王意锟, 方升佐, 田野, 等. 残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7239-7246.
- [6] 王丹, 吕瑜良, 徐丽, 等. 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6436-6443.
- [7] 杨钙仁, 童成立, 肖和艾, 等. 水分控制下的湿地沉积物氧化还原电位及其对有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, 3(8): 2381-2386.
- [8] 李涛, 葛晓颖, 何春娥, 等. 豆科秸秆、氮肥配施玉米秸秆还田对秸秆矿化和微生物功能多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2377-2384.
- [9] 王梅梅, 朱志玲, 吴咏梅. 宁夏中部干旱带土地沙漠化评价[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 320-324.
- [10] 沙金龙, 李健, 李志刚. 添加杨柳树枝对沙化土壤有机碳、含水量及微生物活性的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(9): 1308-1312.
- [11] 李金林, 李志刚, 李健. 林木枝条不同施用方式对宁夏沙化草地土壤微生物特性及理化性质的短期影响[J]. 北方园艺, 2014(12): 168-173.
- [12] 刘德燕, 宋长春, 王丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3525-3530.
- [13] 莫江明. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟 N 沉降的短期响应[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 682-690.
- [14] 李志刚, 谢应忠. 翻埋与覆盖木枝条改善宁夏沙化土壤性质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 174-181.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 艾丽, 吴建国, 朱高, 等. 祁连山中部高山草甸土壤有机碳矿化及其影响因素研究[J]. 草业学报, 2007, 16(5): 22-33.
- [19] 王峰, 王义祥, 江福英, 等. 氮肥施用对柑橘果园土壤有机碳矿化的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 1702-1707.
- [20] 马昕昕, 许明祥, 杨凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3893-3900.
- [21] 张薇, 王子芳, 王辉, 等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1013-1019.
- [22] 黄耀, 沈雨, 周密, 等. 木质素和氮含量对植物残体分解的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 183-188.
- [23] 张继旭, 张继光, 申国明, 等. 不同类型秸秆还田对烟田土壤碳氮矿化的影响[J]. 烟草科技, 2016, 49(3): 10-15.
- [24] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. Nature, 2002, 419: 915-917.
- [25] Ji Y J, Lal R. Impacts of nitrogen fertilization on biomass production of switchgrass (*Panicum Virgatum*, L.) and changes in soil organic carbon in Ohio [J]. Geoderma, 2011, 166(1): 145-152.
- [26] Schimel J P, Weintraub M N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(4): 549-563.
- [27] 白洁冰, 徐兴良, 宋明华, 等. 温度和氮素输入对青藏高原 3 种高寒草地土壤碳矿化的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 855-859.
- [28] 王峰, 王义祥, 江福英, 等. 氮肥施用对柑橘果园土壤有机碳矿化的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 1702-1707.