

华北土石山区刺槐和栓皮栎人工林土壤微生物数量 和微生物量碳、氮研究

王风芹¹, 田丽青¹, 桑玉强², 宋安东¹, 张劲松^{3*}

(1. 河南农业大学生命科学学院,农业部农业微生物酶工程重点实验室,河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学林学院,河南 郑州 450002;
3. 中国林业科学研究院林业研究所,国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091)

关键词:刺槐;栓皮栎;土壤微生物;微生物量碳氮;逐步回归分析

中图分类号:S792.119

文献标识码:A

Studies on Soil Microorganism Quantity and Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen of *Robinia pseudoacacia* and *Quercus variaibilis* Plantations in North China

WANG Feng-qin¹, TIAN Li-qing¹, SANG Yu-qiang², SONG An-dong¹, ZHANG Jin-song³

(1. College of Life Science, He'nan Agricultural University, Key Laboratory of Enzyme Engineering of Agricultural Microbiology, Ministry of Agriculture, Zhengzhou 450002, He'nan, China; 2. College of Forestry, Agricultural University of He'nan, Zhengzhou 450002, He'nan, China;
3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] In order to provide the theoretical basis for evaluating the effect on soil microbial properties and for establishing reasonable sustainable forest management to reduce soil erosion and land degradation, soil chemical properties and microbial biomass of main tree species-*Robinia pseudoacacia* and *Quercus variaibilis* in rocky mountain area of northern China were studied. [Methods] The chemical properties, microorganism amount, microbial biomass carbon and nitrogen in soil of *R. pseudoacacia* and *Q. variaibilis* plantations were analyzed. The factors influencing soil fertility were also studied with principal component analysis and stepwise regression analysis. [Results] The results showed that three kinds of main soil microorganisms and microbial biomass carbon and nitrogen decreased with the deepening of the soil depth. The amount of soil bacteria in the *R. pseudoacacia* plantation was 2.13 - 2.26 times that in the soil of *Q. variaibilis* plantation. While the amount of actinomycetes in the soil of *Q. variaibilis* plantation was 4.48 - 6.05 times that in the soil of *R. pseudoacacia* plantation. No obvious difference was observed between the amounts of fungi in these two kinds of forest soil. The content of nitrate nitrogen, organic matter, available phosphorus and the total amount of microbes, microbial biomass carbon and nitrogen in the soil humus layer of *R. pseudoacacia* plantation were significantly higher than that of *Q. variaibilis* plantation. [Conclusion] (1) The soil physical and chemical properties and the number of microorganisms and microbial biomass carbon/nitrogen could be used to reflect the variability of soil fertility in this area. (2) The main factors affecting the total amount of microbes and microbial biomass carbon/nitrogen are total nitrogen, available phosphorus and available potassium.

收稿日期:2014-03-21

基金项目:国家“十二·五”科技支撑课题(2011BAD38B06)

作者简介:王风芹(1976—),女,博士,副教授,主要从事微生物资源利用与微生物生态学研究.电话:13526520577,E-mail:w_fengqin@

163.com

* 通讯作者:张劲松(1968—),男,博士,研究员,主要从事复合农林业、林业气象等方面研究.E-mail:zhangjs@caf.ac.cn

(3) Planting *R. pseudoacacia* is more conducive to the ecological restoration of soils than planting *Q. variabilis*.

Keywords: *Robinia pseudoacacia*; *Quercus variabilis*; soil microbes; microbial biomass carbon and nitrogen; step-wise regression analysis

截止到2014年,全国水土流失面积已高达294.91万 km^2 ,占国土总面积的30.72%^[1-2]。水土流失造成生态环境脆弱,植被破坏促使水土流失加剧是区域环境恶化的主要原因之一^[3]。众多研究表明,植被恢复可有效地减少水土流失,是遏制生态环境恶化、改善脆弱生态系统的有效措施^[4-6]。在森林生态系统中,土壤微生物对土地利用的变化、管理措施、耕作和肥力水平等外界条件的变化十分敏感,它的分布与活动是植被生长、土壤肥力及物质循环和能量转化现状和趋势相关性的具体体现^[7]。其中,微生物数量与土壤生物活性的强弱、养分的供给程度相关,可反映微生物群落的状态和功能,是土壤肥力的重要指标之一^[8-10]。由于土壤管理措施的改变,土壤微生物量的变化早于有机质的变化,而且变化幅度比有机质的变化幅度大^[11-15]。因此,长期以来土壤微生物数量和微生物量一直被认为是研究和评价土壤质量和肥力的重要参数^[7, 16-17]。

华北土石山区因早期大量植被受到破坏,造成众多山体裸露,再加上该区本就是石质山区,土壤肥力不佳,故而水土流失、土地退化等问题成为困扰该区可持续发展和农民脱贫致富的主要问题。目前,大部分学者对华北土石山区退耕还林的研究主要集中在退耕对农户收益的影响,以及退耕还林工程带来的生态和经济效益的评估^[18-19],很少有学者深入研究该区退耕还林对土壤肥力及土壤生物活性的影响。本试验选取该区2种主要植被—刺槐和栓皮栎,对其土壤微生物数量及微生物量进行系统研究,旨在揭示同种生境下,不同植被模式对土壤微生物的影响,为科学评价退耕还林的生态效应,制定合理的土壤管理措施提供重要的理论依据,以寻求恢复和改善土壤质量的对策,优化退耕还林植被恢复方案。

1 研究区概况

试验地位于黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35°01'N,112°28'E)内。该站隶属中国森林生态系统定位研究网络(CFERN),地处河南省济源市境内的太行山南段与黄河流域的交接处,定位站中心地区海拔410 m。属暖温带大陆性季风气候,年均

气温12.4~14.3℃,年日照时数2 367.7 h,年均降水量641.7 mm,年平均蒸发量为1 611.2 mm,无霜期历年平均213.2 d。试验区林分以人工林为主,代表性树种主要有刺槐和栓皮栎。本研究选取的样地均为半阴坡中部的人工林林地,土壤类型为褐土,刺槐和栓皮栎的林龄分别为43、35 a。

2 研究方法

2.1 研究样地的设置与土壤样品采集方法

分别在2013年3月从栓皮栎(*Quercus variabilis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)2种样地取样,每种样地设置3个样方,每个样方面积为200 m^2 。每个样方按S型布设9个样点,每个样点挖取土壤剖面,分0~5、5~10、10~20 cm自下而上分别取等量的土壤混合均匀,剔除石砾、植物残根等,迅速带回实验室过直径2 mm筛后4℃冰箱保存备用。

样地基本情况见表1。

表1 样地基本情况

样地	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株· hm^{-2})	郁闭度	腐殖质层/cm	枯枝落叶层厚度/cm
刺槐	10.45	10.49	1 667	0.85	7.00	3.50
栓皮栎	9.90	10.80	1 890	0.91	5.50	4.10

2.2 土壤化学性质的测定

土壤化学性质的测定采用常规化学分析方法测定^[20]。

2.3 土壤微生物的分离与计数

称取10 g新鲜土样置于已灭菌的装有90 mL无菌水和适量玻璃珠的三角瓶中,180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡30 min使土样分散成均匀的土壤悬液。对土壤悬液进行梯度稀释,取合适的稀释度采用表面涂抹法接种,28℃倒置培养。细菌、真菌和放线菌分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基和高氏一号培养基^[21]。

2.4 土壤微生物量碳、氮测定

土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸浸提法,氯仿熏蒸和未熏蒸土壤用0.5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 溶液浸提,土液比为1:4,浸提液中有有机碳含量采用 FeSO_4 溶液滴定法测定,转换系数 K_{EC} 值取0.38;浸提液中有有机氮含量采用茚三酮比色法测定,转换系数 m 取

5.0^[22]。

2.5 数据统计分析

数据用 WPS2013 和 DPS7.05 统计软件进行处理和分析,采用 LSD 法进行不同处理间差异显著性检验,所有数值均为 3 组数据的平均值。

3 结果与分析

3.1 刺槐和栓皮栎林地土壤化学性质

刺槐和栓皮栎林地土壤化学性质层次性规律明显,均依次下降(表 2)。刺槐土壤化学性质整体优于栓皮栎,但二者的差别主要表现在腐殖质层(0~5 cm),其中,两植被土壤腐殖质层的硝态氮、有机质

和有效磷含量差异显著,前者分别是后者的 1.69、1.80 和 4.04 倍。

3.2 刺槐和栓皮栎林地土壤微生物数量

不同植被的有机物质不同,林下土壤微生物种类和数量差异较大,导致各植被土壤生物学特性的差异。两植被土壤微生物数量均随土壤深度的加深而依次减少(表 3)。刺槐林地土壤中细菌占微生物总量的比例最大,为 91.25%,其数量是栓皮栎的 2.13~2.26 倍;栓皮栎林地土壤中放线菌占微生物总量的比例最高,为 57.70%,其数量是刺槐的 4.48~6.05 倍;两植被土壤中真菌数量的差异不显著。

表 2 刺槐和栓皮栎林地土壤化学性质的差异分析

植被类型	土层/cm	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾/ (mg·kg ⁻¹)
刺槐	0~5	21.29±4.29Aa	0.68±0.14Aa	3.29±0.97Aa	73.85±11.98Aa	3.80±1.16Aa	154.00±19.89Aa
	5~10	6.76±1.86Ba	0.45±0.15Ba	1.23±0.26Ba	17.71±3.00Ba	1.71±0.64Ba	92.00±9.31Ba
	10~20	6.65±1.60Ba	0.34±0.10Ba	0.89±0.12Ba	11.09±2.25Ca	1.41±0.44Ba	71.00±7.57Ba
栓皮栎	0~5	12.60±2.41Ab	0.51±0.08Aa	2.19±0.57Aa	41.00±15.24Ab	0.94±0.27Ab	131.67±20.01Aa
	5~10	5.17±0.88Ba	0.10±0.00Bb	1.21±0.34Ba	14.09±1.84Ba	0.64±0.19Ab	87.33±6.66Ba
	10~20	3.78±1.57Bb	0.04±0.02Bb	1.02±0.21Ba	15.23±4.08Ba	0.96±0.03Aa	58.33±3.21Cb

注:同一层次不同小写字母代表在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,不同层次不同大写字母代表同种植被在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同。

表 3 刺槐和栓皮栎林地土壤微生物数量的差异分析

植被类型	土层/cm	细菌 × 10 ⁶ /(CFU·g ⁻¹)		真菌 × 10 ³ /(CFU·g ⁻¹)		放线菌 × 10 ⁶ /(CFU·g ⁻¹)		微生物总量 × 10 ⁶ /(CFU·g ⁻¹)
		数量	所占比例/%	数量	所占比例/%	数量	所占比例/%	
刺槐	0~5	11.60±0.32Aa		19.60±0.31Aa		1.12±0.33Ab		
	5~10	9.48±3.15Aa	91.25	2.60±0.41Ba	0.07	0.81±0.31Ab	8.67	10.30
	10~20	7.21±2.30Aa		0.24±0.00Ca		0.76±0.17Ab		
栓皮栎	0~5	5.17±0.71Ab		17.00±2.29Aa		5.02±1.03Aa		
	5~10	4.35±0.42ABa	42.34	2.41±0.57Ba	0.00	4.75±0.61Aa	57.70	7.99
	10~20	3.38±0.46Bb		0.20±0.39Ba		4.61±0.99Aa		

3.3 刺槐和栓皮栎林地土壤微生物量碳、氮

两植被土壤微生物量碳和氮含量均随土壤深度的加深而依次下降(图 1)。刺槐腐殖质层(0~5 cm)土壤微生物量碳和氮含量均显著高于栓皮栎,分别是栓皮栎的 1.82 和 3.30 倍;两植被土壤微生物量碳和氮含量在 5~20 cm 土层中差异不显著(图 1)。刺槐土壤 0~5、5~10、10~20 cm 土层的微生物量碳氮比分别是 5.29、5.40 和 5.33,而栓皮栎 3 个层次的碳氮比变异较大,且均比刺槐土壤的高,分别是 9.59、8.83 和 5.84。

3.4 刺槐和栓皮栎林地相关性分析

3.4.1 微生物数量与土壤化学性质相关性分析

由表 4 可知:微生物总数与土壤化学性质均呈显

表 4 微生物数量与土壤化学性质的相关分析

项目	相关系数					
	硝态氮	铵态氮	全氮	有机质	有效磷	有效钾
细菌	0.70	0.82*	0.59	0.62	0.91**	0.60
真菌	-0.29	-0.53	-0.12	-0.17	-0.65	-0.12
放线菌	0.93**	0.80*	0.96**	0.94**	0.62	0.97**
微生物总数	0.90**	0.83*	0.92**	0.91**	0.85*	0.92**

注:*表示显著相关($P < 0.05$),**表示极显著相关($P < 0.01$),下同。

著或极显著正相关;细菌与铵态氮和有效磷显著或极显著正相关;放线菌除与有效磷相关不显著外,与其它化学性质均显著或极显著正相关;而真菌与土壤各化学性质负相关不显著。为了更好地说明土壤微生物数量与各化学性质之间的关系,本研究采

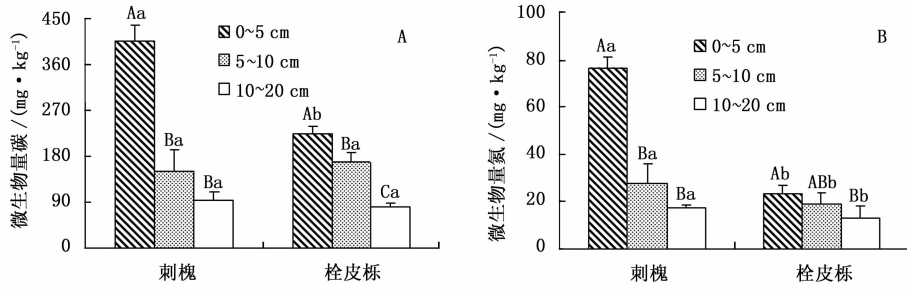


图1 刺槐和栓皮栎土壤的微生物量碳氮

用逐步回归法拟合的土壤微生物总数与土壤化学性质的数学模型如下:

$$Y_1 = 4\ 535\ 584.43 - 492\ 139.84A_1 + 63\ 855.49A_2 + 1\ 253\ 981.83A_3 + 60\ 419.63A_4$$

式中: Y_1 —土壤微生物总数; A_1 —硝态氮; A_2 —有机质; A_3 —有效磷; A_4 —有效钾。

有效钾、有效磷、硝态氮、有机质对微生物总数的偏相关系数分别为 0.9586**、0.9563**、-0.9170**、0.8273**，绝对值依次递减，且均极显著相关。有效钾和有效磷的偏相关系数最大，说明有效磷和有效钾是影响土壤微生物总数的主要因子，硝态氮是第2影响因子，有机质是第3影响因子。

3.4.2 微生物量碳、氮与土壤化学性质的相关性分析 由表5可知:微生物量碳、氮与各化学性质之间均显著或极显著正相关。土壤微生物量碳的多元线性回归方程是:

$$Y_2 = -237.31 + 586.97B_1 - 18.04B_2 + 52.67B_3 - 1.017B_4$$

式中: Y_2 —微生物量碳; B_1 —全氮; B_2 —有机质; B_3 —有效磷; B_4 —有效钾。

有效磷、全氮、有机质、有效钾对微生物量碳的偏相关系数分别为 0.9595**、0.9364**、-0.9227**、-0.6921*，绝对值依次递减，且均显著或极显著相关。微生物量氮与全氮的回归系数最大，偏相关系数仅略小于有效磷而位居第二，说明全氮和有效磷是影响土壤微生物量碳的主要因子，有机质是第2影响因子，有效钾是第3影响因子。

表5 微生物量碳氮与土壤化学性质的相关分析

项目	相关系数					
	有效钾	硝态氮	铵态氮	全氮	有机质	有效磷
微生物量碳	0.96**	0.77*	0.98**	0.97**	0.85*	0.95**
微生物量氮	0.92**	0.76*	0.90**	0.92**	0.97**	0.81*

$$Y_3 = -10.03 - 1.48C_1 - 7.07C_2 + 18.05C_3 + 16.78C_4$$

式中: Y_3 —微生物量氮; C_1 —硝态氮; C_2 —铵态氮; C_3 —全氮; C_4 —有效磷。有效磷、全氮、硝态氮、铵态氮对微生物量氮的偏相关系数分别为 0.9998**、0.9976**、-0.9869**、-0.9663**，绝对值依次降低，均达到极显著水平。全氮和有效磷的回归系数也明显高于其它因子，说明全氮和有效磷是影响土壤微生物量氮的主要因子，随着全氮和有效磷含量的增加，土壤微生物量氮含量也会随之增加。硝态氮和铵态氮是第2影响因子。

3.5 主成分分析

表6显示:前2个主成分累计方差贡献率达95.4371%，可以代表该地区土壤肥力系统内的变异信息。

根据特征值与贡献率，得到反映土壤肥力水平的主成分方程分别是:

$$Y_1 = 0.3335X_1 + 0.3019X_2 + 0.3241X_3 + 0.3265X_4 + 0.3081X_5 + 0.3164X_6 + 0.2688X_7 - 0.1315X_8 + 0.3006X_9 + 0.3268X_{10} + 0.3229X_{11}$$

$$Y_2 = 0.0849X_1 - 0.1249X_2 + 0.2074X_3 + 0.1696X_4 - 0.2545X_5 + 0.2090X_6 - 0.4466X_7 + 0.6873X_8 + 0.3167X_9 + 0.1304X_{10} - 0.0877X_{11}$$

式中: Y_1 、 Y_2 为主成分, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 分别代表硝态氮、铵态氮、全氮、有机质、有效磷、有效钾、细菌、放线菌、真菌、微生物量碳和微生物量氮。

表6 供试土壤主成分特征值

项目	第1主成分	第2主成分	第3主成分
特征值	8.7290	1.7691	0.4074
方差贡献率/%	79.3548	16.0823	3.7035
累计方差贡献率/%	79.3548	95.4371	99.1406

土壤微生物量氮的多元线性回归方程是:

第1个主成分综合了各种化学性质、微生物量

碳、氮和真菌数量的变化,可见这几种因素对土壤肥力贡献率最大,且这几种因素的特征根不相上下,说明土壤在保肥供肥时需要这几种因素的协同作用;第2个主成分中,细菌和放线菌数量贡献率较大。从主成分分析的结果来看,土壤微生物数量、各种化学性质和微生物量碳、氮对土壤肥力的贡献率均较大,说明可以用它们来反映该地区的土壤肥力状况。

4 讨论

4.1 土壤微生物数量、微生物量碳氮的动态变化

刺槐和栓皮栎是华北土石山区主要的人工林树种,但是由于山坡林地立地条件以及树龄选择上两树种很难达到绝对一致,为此,主要对比研究了刺槐和栓皮栎林地表层土(0~20 cm)尤其是腐殖质层(0~5 cm)土壤中微生物数量和生物量碳和氮含量的差异。结果发现,刺槐林地土壤中细菌占微生物总量比例最大,为91.25%,但其土壤中放线菌数量低于栓皮栎数量的4.48~6.05倍。原因可能是刺槐林中固氮菌的大量繁殖抑制了放线菌的活性^[23],而栓皮栎林地含水量低,受太阳辐射影响大,刚好与放线菌喜热耐旱的特性相符^[24]。刺槐林地土壤微生物量碳和氮含量腐殖质层明显高于栓皮栎,分别是栓皮栎的1.82和3.30倍。原因可能是栓皮栎林地多为石坡地,土层薄,草本灌木稀少,群落结构单一,土壤微生物数量较少,而刺槐林地土层厚实,早已形成以刺槐为主,乔、灌、草相结合的更为丰富的群落结构,且刺槐可形成固氮菌和菌根,加强了对氮的固定,故而得出此结果,这与张笑培等^[25]的研究一致。前人研究^[26-27]也发现,刺槐根瘤具有耐高、低温及酸碱环境的特性,再加上刺槐本身具有良好的抗逆性,充分保证了刺槐根部稳定的氮素积累。

刺槐和栓皮栎微生物量碳氮比的平均比值分别是5.32和8.42。有研究表明,微生物量碳氮比可反映土壤微生物的种类和区系组成,细菌、放线菌、真菌的碳氮比一般在5:1、6:1、10:1左右^[28]。这与上述研究中刺槐林细菌、栓皮栎林放线菌所占微生物总量比例最大相符合。Cleveland等^[29]认为,土壤中有效氮、有效磷越丰富则土壤微生物量碳氮比值越低。本研究也发现,刺槐土壤中各层次硝态氮、有效氮、有效磷含量均高于栓皮栎,其中,腐殖质层的硝态氮和有效磷差别较明显,刺槐分别是栓皮栎的1.69和4.04倍。

4.2 土壤微生物、微生物量碳氮与化学性质的关系

主成分分析结果表明,微生物数量、各种化学性

质和微生物量碳氮可用来反映该地区的土壤肥力状况,而土壤微生物量碳氮与各种化学性质均呈显著或极显著正相关,说明微生物量碳氮的变化与各种化学性质的变化一致,可代表各种化学性质作为科学评价人工林土壤肥力高低的指标,换言之,微生物数量和微生物量碳氮的高低即可代表该区的土壤肥力状况,这与前人的研究一致^[30-31],Parffit^[32]甚至指出,土壤微生物量因其含量高低能直接地说明养分的有效性,故而更能有效地反映土壤肥力状况。而逐步回归方程表明,影响微生物总量和微生物量碳氮的主要因子是全氮、有效磷和有效钾。实际应用中是否增加全氮、有效磷和有效钾的量就可以显著的提高土壤肥力,因前人也并无此方面的特别研究,无从参考,还有待我们进一步的实践证明。

4.3 比较两种树种的优劣,提出建议

刺槐和栓皮栎因其生长快、适应性强、抗旱耐瘠等优点,同是我国经济、生态与社会价值为一体的树种。本研究发现,在该地区种植刺槐比种植栓皮栎更有利于土壤的生态恢复;然而,刺槐最大的缺点是属于浅根性树种,防风能力有限,且不耐寒冷;而栓皮栎属于深根系,能耐-20℃的低温,且其生长抗外界影响能力较强,对整个生态系统的稳定具有重要作用^[33]。若将二者进行混交是否可互利共生,分层利用土壤的营养空间,更快地提高土壤肥力,还有待对其进行进一步的实践探究。目前,只有邵泽坦^[34]对二者混交进行了研究,发现混交林刺槐的单株生物量比纯林高13.7%,栓皮栎则比纯林高达66.7%。土壤有机质和全磷的含量,混交林也比刺槐纯林高7.1%~25.0%,比栓皮栎纯林高47.1%~66.7%。依据邵泽坦等^[34]的研究,二者混交可提高土壤肥力,建议该区将二者混交种植。

5 结论

(1)刺槐林地土壤中细菌占微生物总量的比例最大,为91.25%,其数量是栓皮栎的2.13~2.26倍;但其土壤中放线菌数量低于栓皮栎数量的4.48~6.05倍;两植被土壤中真菌数量差异不显著。

(2)刺槐林土壤腐殖质层硝态氮、有机质、有效磷含量、微生物总量以及微生物量碳、氮含量均显著高于栓皮栎,表明该区种植刺槐更有利于土壤的生态恢复。

(3)相关性分析和主成分分析发现,微生物数量和微生物量碳氮能反映该区土壤肥力的变异信

息。逐步回归方程表明,影响微生物总量和微生物量碳、氮的主要因子是全氮、有效磷和有效钾。

参考文献:

- [1] 每日经济新闻[EB/OL](2015-11-3). <http://news.mydrivers.com/1/454/454537.htm>.
- [2] 国家环保部. 2016年中国环境状况公报[EB/OL](2016-6-2). http://www.mep.gov.cn/hjzl/trhj/201606/t20160602_353282.shtml.
- [3] 邹军,张明礼,杨浩. 退耕还林(草)与水土保持若干问题的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 506-512.
- [4] 胡娟娟,郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [5] Zhang B, Yang Y, Zepp H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China[J]. Catena, 2004, 57: 77-90.
- [6] Zhang F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2006, 16: 420-427.
- [7] 刘满强,胡锋,何园球,等. 退化红壤不同植被恢复模式下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 937-943.
- [8] Bossio D A, Scow K M. Impact of carbon and flooding on the metabolic diversity of microbial communities in soils[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(11): 4043-4050.
- [9] Rogers B F, Tate R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a topo sequence in pineland soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(10): 1389-1401.
- [10] 胡海波,张金池,高智慧. 岩质海岸防护林土壤微生物数量及其与酶活性和化学性质的关系[J]. 林业科学研究, 2001, 15(1): 88-95.
- [11] Aciego Pietri J C, Brookes P C. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(7): 1396-1405.
- [12] Nobili M D, Contin M, Mondini C, et al. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(9): 1163-1170.
- [13] 于树,汪景宽,高艳梅,等. 地膜覆盖及不同施肥处理对土壤微生物量碳和氮的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4): 602-606.
- [14] 单鸿宾,梁智,王纯利,等. 连作及灌溉方式对棉田土壤微生物量碳氮的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 202-205.
- [15] Moore J M, Klose S, Tabatabai M A. Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems[J]. Biol Fert Soils, 2000, 31: 200-210.
- [16] Kandeler E, Tschirko D, Spiegel H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 28(4): 343-351.
- [17] 闫浩,赵彤,蒋跃利,等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 1-8.
- [18] 蔡志坚,蒋瞻,杨加猛,等. 环境治理视角下石漠化片区的农业发展[J]. 江淮论坛, 2014(2): 18-28.
- [19] 韩克松. 退耕还林对农户可持续生计的影响探讨[J]. 绿色科技, 2014(2): 131-132.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [21] 李振高,骆永明,滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [22] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [23] 李亮. 乌兰布和沙漠东北部沙区农田和林地土壤微生物及酶活性研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2010.
- [24] 薛立,赖日石,陈红跃,等. 深圳宝安区生态风景林典型造林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(2): 242-246.
- [25] 张笑培,杨改河,王得祥,等. 黄土高原沟壑区不同植被恢复模式对土壤生物学特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(5): 149-159.
- [26] 薛楚,刘国彬,藏全厚,等. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)土壤微生物量演变特征[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 909-917.
- [27] 刘栋,黄懿梅,安韶山. 黄土丘陵区人工刺槐林恢复过程中土壤氮素与微生物活性的变化[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 322-329.
- [28] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global-scale synthesis[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(13): 1627-1637.
- [29] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [30] 赵彤,闫浩,蒋跃利,等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [31] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144-152.
- [32] Parfitt R L, Yeates G W, Ross D J, et al. Relationships between soil biota, nitrogen and phosphorus availability, and pasture growth under organic and conventional management[J]. Applied soil ecology, 2005, 28(1): 1-13.
- [33] 孙儒泳,李博,诸葛阳,等. 普通生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 132-135.
- [34] 邵泽坦. 刺槐栓皮栎混交林调查报告[J]. 山东林业科技, 1992, 84(3): 33-35.

(责任编辑:詹春梅)