

# 黄土丘陵沟壑区坡面上土壤微生物生物量碳、氮的季节变化\*

胡婵娟<sup>1</sup> 刘国华<sup>1\*\*</sup> 陈利顶<sup>1</sup> 吴雅琼<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; <sup>2</sup>北京市科学技术情报研究所, 北京 100120)

**摘要** 对黄土丘陵沟壑区陕西延安羊圈沟小流域退耕后 2 种典型植被类型刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林和撂荒草地夏、秋和春 3 个季节土壤微生物生物量及其主要影响因子(土壤有机碳、土壤温度和水分及空气温湿度)进行了研究,旨在揭示土壤微生物生物量的季节变化规律及其主控因子。结果表明,2 种植被类型下,土壤微生物生物量均存在明显的季节变化趋势,刺槐林土壤微生物生物量碳夏季和春季高于秋季,而撂荒草地土壤微生物生物量碳在秋季最高,土壤微生物生物量氮与微生物生物量碳季节变化趋势不同,2 种类型均表现为夏季>秋季>春季。土壤微生物生物量碳季节变化受有机碳、空气及土壤温度的变化影响较大,而土壤微生物生物量氮与土壤水分和空气湿度具有显著的相关性。

**关键词** 黄绵土; 微生物生物量碳和氮; 植被; 季节变化

**中图分类号** S154 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)10-2227-06

**Seasonal variations of soil microbial biomass carbon and nitrogen on the hill slope in hilly areas of Loess Plateau.** HU Chan-juan<sup>1</sup>, LIU Guo-hua<sup>1\*\*</sup>, CHEN Li-ding<sup>1</sup>, WU Ya-qiong<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; <sup>2</sup>Beijing Municipal Institute of Science and Technology Information, Beijing 100120, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2227–2232.

**Abstract:** Taking two typical vegetation types after de-farming, *i. e.*, *Robinia pseudoacacia* plantation and abandoned grassland, in the Yangjuangou catchment of Yan'an City, Shaanxi Province of Northwest China as test objects, this paper studied the seasonal variations of soil microbial biomass carbon and nitrogen and the key affecting factors, aimed to understand the seasonal variation pattern of soil microbial biomass and its main controlling factors on the hill slope in the hilly areas of Loess Plateau. Under the two vegetation types, soil microbial biomass all had an obvious seasonal variation trend. The soil microbial biomass carbon under *R. pseudoacacia* plantation was higher in summer and spring than in autumn, while that under abandoned grassland peaked in autumn. The soil microbial biomass nitrogen under the two vegetation types was the highest in summer, followed by in autumn, and in spring. The seasonal variation of soil microbial biomass carbon was more affected by soil organic carbon, soil temperature, and air temperature, whereas that of soil microbial biomass nitrogen had significant correlations with soil moisture and air humidity.

**Key words:** loessal soil; soil microbial biomass carbon and nitrogen; vegetation; seasonal variation.

土壤微生物作为土壤有机质和养分(N、P、S等)转化和循环的动力,在土壤生态系统的能量流动和养分转化中起着重要的作用(Harris & Birch,

1989)。土壤微生物对外界条件诸如土地利用的变化、管理措施、耕作和肥力水平等变化十分敏感,与土壤生态系统的稳定和健康息息相关,能够及时地反映土壤质量状况的变化(Miller & Dick, 1995; Pacual *et al.*, 2000; Steenwerth *et al.*, 2002; Bucher & Lanyon, 2005)。土壤微生物生物量是表征土壤质

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407200-5)和国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC01A01)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: ghliu@rcees.ac.cn

收稿日期: 2010-03-09 接受日期: 2011-06-15

量的重要微生物学指标,其大小与来源于植物残体、有机物质以及植物根系分泌物等的 C、N 营养元素的数量和质量密切相关(Doran,1987; Smith & Paul, 1990; Gunapala & Scow,1998)。

微生物的生长受温度、水分、植物残体及植物生长的综合影响。在不同的季节,环境因子的变化会对土壤微生物生物量和多样性产生一定的影响。Buchanan 和 King (1992) 和 Kaiser 和 Heinemeyer (1993) 研究发现,土壤微生物生物量在夏季显著高于冬季,主要是温度的作用。Bååth 和 Söderström (1982) 和 Sarathchandra 等 (1989) 研究发现,土壤微生物生物量在春季和秋季较高而夏季和冬季较低。而 Holmes 和 Zak (1994) 和 Blume 等 (2002) 的研究则认为,土壤微生物生物量的变化与季节无关。不同的地区,不同的生态系统中,影响微生物生物量季节性变化的主导因素存在差异,微生物生长的受限因子不同,会造成微生物生物量不同的季节变化规律。另外,植被作为影响微生物群落的重要因子,不同的植物群落、不同的植被类型下土壤微生物在土壤中的分布、数量、种类以及微生物的生理活性均存在差异。赵吉等 (1999) 对锡林河流域 6 种不同植物群落作为研究对象进行了土壤各类群微生物量的测定分析,结果表明不同植物群落下微生物的组成及其生物量均有差异。

黄土丘陵沟壑区属于典型的侵蚀环境和半干旱季风气候,长期以来以防治水土流失为主的植被建设取得了较好的成效,目前,林地和草地是坡面上主要的植被类型,研究 2 种植被下土壤微生物生物量随季节的变化不但能够更好地理解和阐明半干旱侵蚀环境下微生物的生长与季节变化之间的关系,同时也可以比较不同植被类型间微生物变化之间的差异。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于陕西省延安羊圈沟小流域(36°42' N,109°31'E),流域面积 2.02 km<sup>2</sup>,该区海拔 1025 ~ 1250 m,地形破碎,沟壑纵横,属于典型黄土高原丘陵沟壑地貌。在气候上属暖温带半干旱季风气候,年平均降雨量 550 mm,降雨量年内和年际间变化较大,70% 的降雨集中在每年的 7—9 月。该区域土壤类型主要为黄绵土,抗蚀性差,水土流失严重(傅伯杰等,1999)。植被主要以种植的刺槐(*Robinia*

*pseudoacacia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和杏树(*Prunus armeniaca*)等人工林及撂荒草地为主。

在研究区域内,选择 20 世纪 80 年代同时退耕后种植的刺槐人工林坡面及自然撂荒形成的草地坡面为研究对象。坡面样地特征如表 1 所示。每个坡面自坡顶至坡脚设置 6 个样地,每个样地间隔 35 ~ 45 m,样地面积约 200 m<sup>2</sup>,每个样地设置 3 个样方作为重复,每个样方面积为 25 m<sup>2</sup>。刺槐林地坡面上平均土壤有机碳、总氮、pH 和容重分别为 6.31 g · kg<sup>-1</sup>、0.64 g · kg<sup>-1</sup>、8.21、1.16 g · cm<sup>-3</sup>,草地坡面上平均土壤有机碳、总氮、pH 和容重分别为 5.78 g · kg<sup>-1</sup>、0.59 g · kg<sup>-1</sup>、8.12、1.25 g · cm<sup>-3</sup>。

1.2 土壤样品的采集及分析

于 2007 年 8 月(夏季)、2007 年 10 月(秋季)及 2008 年 5 月(春季)用直径为 3.5 cm 土钻在每个样方中采集 5 钻表层(0 ~ 10 cm)土样,混合为 1 个土壤样品,一部分新鲜土壤样品过 2 mm 筛 4 ℃ 保存用于土壤微生物生物量碳和氮的测定,另一部分土样风干过 100 目筛用于土壤有机碳的测定。土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法,氯仿熏蒸和未熏蒸土壤用 0.5 mol · L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提,土液比为 1 : 4,浸提溶液中有机碳含量采用 UV-Persuate 全自动有机碳分析仪(Tekmar-Dohrmann Co., USA)测定,转换系数 *k<sub>c</sub>* 取值 0.45(Wu *et al.*, 1990);土壤微生物生物量氮测定参照 Brookes (1985) 的方法,转换系数 *k<sub>N</sub>* 取值 0.54。土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化外加热法(鲁如坤,1999)。

1.3 气候及土壤环境因子的测定

于 2007 年 8 月上中旬、2007 年 10 月中下旬及 2008 年 5 月上中旬用空气温湿度仪测定每个样地空气温度和空气湿度(Testo-615, Germany, ±0.5 ℃),对每个样地分别测定一个白天。用 LI-8100 红外分析仪测定 0 ~ 5 cm 土壤温度(LI-8100TC, LI-COR Inc, Nebraska, USA, ±1.5 ℃, 0 ℃ ~ 5 ℃),用 105 ℃ 烘箱烘干 24 h 后测定土壤水分含量。空气温度、空气湿度和土壤温度为测定当日

表 1 2 种不同植被坡面下的样地特征  
Table 1 Site characteristics of two hill slopes with different vegetation

样地	海拔 (m)	坡度 (°)	坡向	经纬度	
				E	N
刺槐林	1155 ~ 1235	9 ~ 31	东偏南 40°	109°31′	36°42′
撂荒草地	1205 ~ 1250	8 ~ 22	西偏北 37°	109°30′	36°42′

白天的平均值,测定时间为 9:00—17:00,测定间隔为 1 h。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003、SPSS 及 CANOCO 软件进行数据处理和统计分析,采用 repeated measures ANOVA 进行土壤微生物生物量数据的分析。用 RDA 分析环境因子对土壤微生物生物量的影响。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物生物量碳的季节变化

由表 2 可以看出,2 种植被总体来看,季节对微生物生物量碳没有显著影响,但季节和植被的交互作用显著,说明 2 种不同植被的土壤微生物生物量碳的季节性变化存在差异。球形检验  $P>0.05$ ,表明 3 个季节的微生物生物量碳的数据是相对独立的数据。

如图 1 所示,人工刺槐林及撂荒草地 2 种植被类型下土壤微生物生物量碳均存在明显的季节变化规律,但不同的植被类型及不同坡位土壤微生物生物量季节变化存在差异,总体来看,刺槐人工林坡面上土壤微生物生物量碳在春季和夏季较高,而秋季相对较低,且春季和秋季之间的差异达到了显著水

表 2 GLM 模型中各变量对微生物生物量碳变化的解释率 (%)

Table 2 Proportion of the variances of microbial biomass C explained by the variables in the GLM model

	季节	季节× 植被	季节× 坡位	植被× 坡位	季节×植 被×坡位
微生物生物量碳	6.6	46.8**	16.9	56.9**	30.6*

\*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$ 。

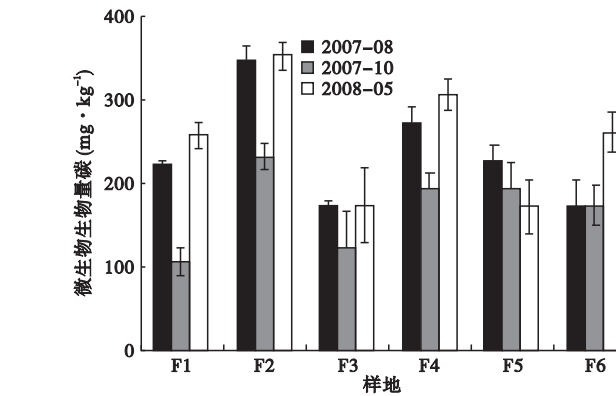


图 1 刺槐人工林及撂荒草地坡面上土壤微生物生物量碳的季节变化  
Fig.1 Seasonal dynamic of soil microbial biomass carbon of *Robinia pseudoacacia* plantation forest and grassland along the hill slopes  
F1 ~ F6 分别代表从刺槐林坡顶到坡趾设置的 6 个样地, G1 ~ G6 分别代表从撂荒草地坡顶到坡趾设置的 6 个样地,下同。

平( $P<0.05$ )。撂荒草地坡面上土壤微生物生物量碳则表现为秋季较高且与春季之间的差异显著( $P<0.05$ )。从坡面上不同坡位上微生物生物量的季节变化来看,2 种植被类型下均表现为上坡位和中坡位微生物生物量季节变化规律一致,而下坡位的季节变化规律与坡面上的整体变化存在差异。如图 2 所示,对 2 种不同植被类型下不同季节的土壤微生物生物量碳进行分析后发现,刺槐人工林与草地之间微生物生物量碳存在差异且在秋季和春季均达到了显著水平( $P<0.05$ )。

2.2 土壤微生物生物量氮的季节变化

表 3 列出了季节和季节与植被、坡位等因子的交互作用对 2 种植被类型下土壤微生物生物量氮总体变化的解释率,对于微生物生物量氮,无论是 2 种植被下总体的数据,还是单一植被下的数据 3 个季节之间均存在显著性差异。且不同的坡位上微生物生物量氮也存在显著性的差异。

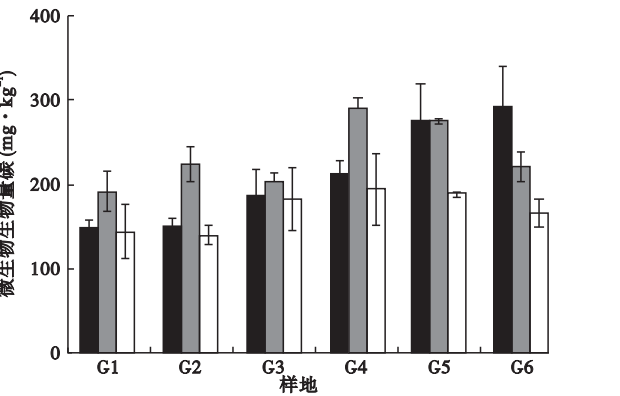
如图 3 所示,土壤微生物生物量氮在人工刺槐林和草地 2 种植被类型下存在较为相似的季节性变化规律,总的趋势表现为夏季>秋季>春季,且 3 个季节间均存在显著差异( $P<0.05$ )。对 2 种不同植被类型土壤微生物生物量氮进行分析比较后发现刺

表 3 GLM 模型中各变量对微生物生物量氮变化的解释率 (%)

Table 3 Proportion of the variances of microbial biomass N explained by the variables in the GLM model

	季节	季节× 植被	季节× 坡位	植被× 坡位	季节×植 被×坡位
微生物生物量氮	87.4**	8.4	41.2**	69.8**	58.3**

\*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$ 。



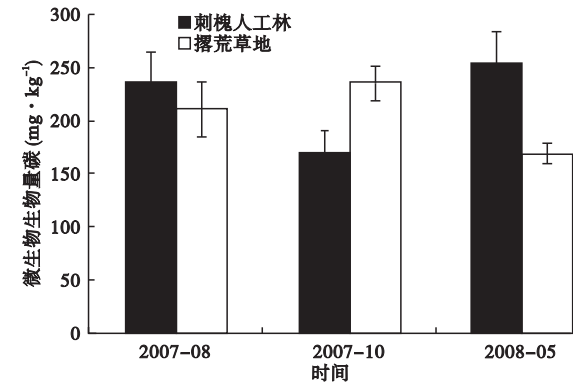


图2 刺槐人工林及撂荒草地土壤微生物生物量碳的季节变化

Fig.2 Soil microbial biomass carbon of *Robinia pseudoacacia* plantation forest and grassland in different seasons

槐人工林土壤微生物生物量氮高于草地(图4),但

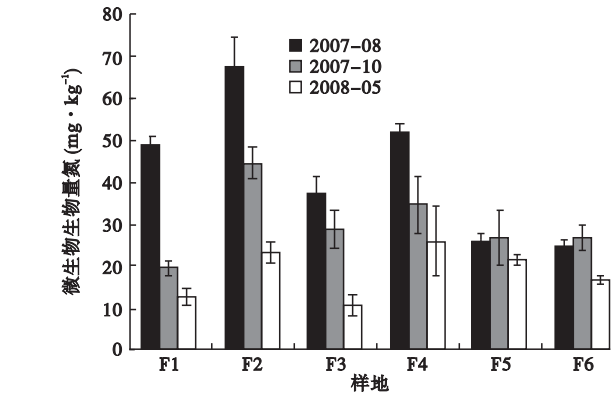


图3 刺槐人工林及撂荒草地坡面上土壤微生物生物量氮的季节变化

Fig.3 Seasonal dynamic of soil microbial biomass nitrogen of *Robinia pseudoacacia* plantation forest and grassland along the hill slopes

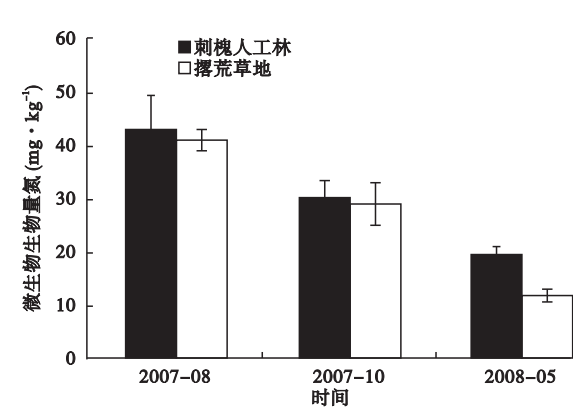


图4 刺槐人工林及撂荒草地土壤微生物生物量氮的季节变化

Fig.4 Soil microbial biomass nitrogen of *Robinia pseudoacacia* plantation forest and grassland in different seasons

二者只有在春季差异显著,其他季节未有显著差异。

2.3 土壤微生物生物量季节变化与环境因子之间的关系

对人工刺槐林和草地2种植被类型下土壤微生物生物量碳和氮与影响其季节变化的环境因子空气温湿度、土壤温度、土壤水分及土壤有机碳进行RDA分析(图5,图6)。结果表明,对于不同的植被类型,影响微生物生物量季节变化的主导环境因子存在一定差异。如图5所示,对于人工刺槐林,土壤微生物生物量碳的季节变化主要与土壤有机碳、土壤和空气的温度有关,微生物生物量氮则受土壤水分和空气湿度的影响较大。而草地(图6)土壤微生物生物量碳主要受土壤有机碳的影响,土壤微生物生物量氮与土壤水分和空气湿度的相关性较刺槐人工林更为密切。

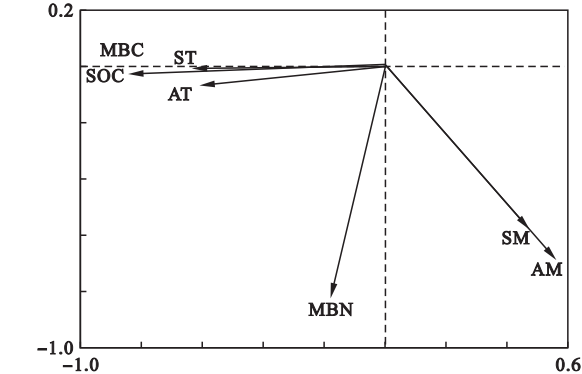
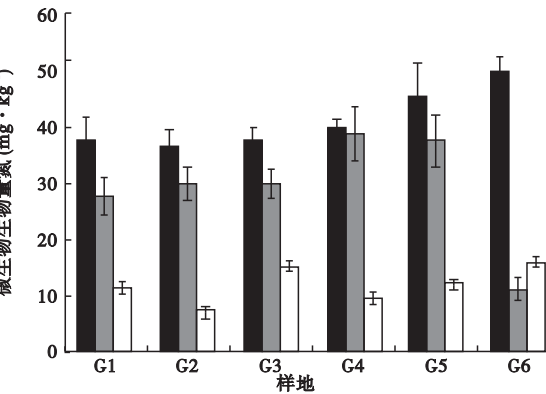


图5 刺槐人工林土壤微生物生物量季节变化与环境因子间的关系

Fig.5 Relationship between soil microbial biomass and environmental factors under *Robinia pseudoacacia* plantation forest

MBC: 微生物生物量碳; MBN: 微生物生物量氮; SOC: 有机碳; SM: 土壤水分; ST: 土壤温度; AM: 空气湿度; AT: 空气温度。下同。



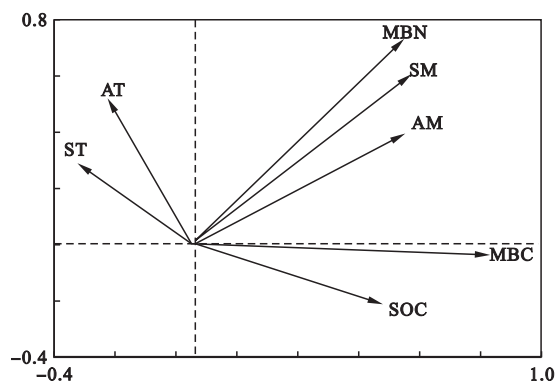


图6 撂荒草地土壤微生物生物量季节变化与环境因子的关系

Fig. 6 Relationship between soil microbial biomass and environmental factors under grassland

### 3 讨论

土壤微生物生物量碳的消长可以反映微生物利用土壤碳源进行自身细胞合成、大量繁殖与微生物细胞解体使得有机碳矿化的过程(张明等,2007)。对黄土丘陵区退耕后的2种典型植被类型刺槐林及撂荒草地的研究表明,土壤微生物生物量碳存在明显的季节变化,且2种植被类型变化趋势存在差异,对于林地,微生物生物量碳表现为夏季和春季较高,而秋季较低,草地微生物生物量碳的变化则为秋季最高,这与前人的一些研究有相同之处, Saratchandra 等(1984)和 Singh 等(1989)对于热带干旱森林、稀疏草原和温带草原的研究中也发现微生物生物量的高值出现在春节和夏季。土壤微生物生物量氮也是表征微生物生物量的一个重要指标, Singh 等(1989)对热带干旱地区林地及草原土壤微生物生物量氮的研究发现,在干旱炎热的夏季,土壤微生物生物量氮最高,原因是干旱缺水限制了作物正常生长,而微生物仍可利用土壤水分,土壤养分被微生物固持。美国堪萨斯州的草原土壤早春的微生物生物量氮最高,随着植物的生长,其含量逐渐下降,夏末秋初后,土壤微生物生物量氮又开始上升(Garcia & Rice, 1994)。Franzluebbers 等(1995)对农田土壤研究却发现,作物生长前期土壤微生物生物量氮最低,5—11月土壤微生物生物量氮逐渐增加,随后开始下降。Holmes 和 Zak (1994)对北美落叶林地区土壤研究发现,一年中微生物生物量氮相对稳定。不同生态系统土壤微生物量氮季节变化规律存在差异。本研究中微生物生物量氮与微生物生物量碳的季节变化存在一定差异,植被类型的影响较小,林地和草地表现出相似的季节性变化趋势,均表现为夏

季最高,而春季最低。针对黄土丘陵区两种典型的退耕植被进行比较发现,总体来看,刺槐林的种植有利于微生物的生存和繁殖,微生物生物量碳和微生物生物量氮均表现为林地高于草地,这可能一方面与林地的生长过程中为微生物提供了更多可利用的能源如根系分泌物等有关,另一方面刺槐本身属豆科植物,一定程度上可以更有利于氮的固定,为微生物的生长提供更为充足的氮源。

微生物生物量随季节涨落与有机物的供应、植物生长状况及温度、湿度等环境因素有关(Srivastava, 1992)。本研究中,通过对不同季节微生物生物量的分析及其与有机碳、温度、水分等影响因素之间的相互关系的分析表明,微生物生物量碳的季节性变化与有机碳的变化具有相关性,且刺槐林微生物生物量碳与温度之间的关系也十分密切, Mahmood 等(2007)研究也表明,限制微生物生物量和活性的主要因子是碳输入的数量和质量,同时也受土壤温度的影响(Nicolardot *et al.*, 1994)。本研究中,微生物生物量碳与微生物生物量氮相比更易受植被类型和有机物质输入的影响,春季和夏季,林地生长旺盛,大量根系分泌物给微生物带来了更为丰富的能源,因此刺槐林地土壤微生物生物量碳在春季和夏季的时候含量较高。而在秋季,微生物生物量碳表现为草地更高。有研究表明,黄土高原地区林地的凋落物的输入量高于草地(郭胜利等, 2009),之所以秋季草地微生物生物量碳较高的原因可能在于林地以刺槐为主,草地多为1年生草本,草地根系的寿命低于林地根系的生长,虽然地上有机物质的输入较少,但地下死亡根系为微生物提供了更多可供利用的活性碳。土壤微生物生物量的季节性涨落还受到湿度条件的影响,土壤干旱或渍水都会引起土壤微生物量暂时性变化。在干旱和半干旱地区,季节性降雨是限制初级生产力、土壤微生物活性和生态系统动态变化的主要因素(Bell *et al.*, 2008)。刺槐林及草地2种植被类型下微生物生物量碳与水分之间的关系不明显,但微生物生物量氮与土壤水分之间存在显著的正相关关系。与碳源相比,能够被微生物利用的氮源相对贫乏,2种不同的植被类型在不同季节有机物质输入和变化不足以引起微生物对氮源利用程度的改变,但干旱半干旱地区,水分作为主要的受控因子可以直接抑制微生物的活性,胡婵娟等(2009)在该区域的研究中发现微生物的代谢活性与土壤水分之间具有显著的正相关关系,所以土壤含水量的增加可以有效的增加微生物的活性

从而提高微生物对于氮源的利用。

#### 4 结 论

黄土丘陵区2种植被类型下的土壤微生物生物量均存在显著的季节变化,2种植被类型相比,刺槐林的生长为微生物生物量的提高提供了更有利的条件。土壤有机碳、温度、水分能够显著影响土壤微生物生物量的季节性变化,其中微生物生物量碳与有机碳、土壤和空气的温度关系较为密切,而微生物生物量氮更易受土壤水分和空气湿度变化的影响。

#### 参考文献

- 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 1999. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例. *地理学报*, **54**(3): 241–246.
- 郭胜利, 马玉红, 车升国, 等. 2009. 黄土区人工与天然植被对凋落物和土壤有机碳变化的影响. *林业科学*, **45**(10): 14–18.
- 胡婵娟, 傅伯杰, 刘国华, 等. 2009. 黄土丘陵沟壑区典型人工林土壤微生物功能多样性研究. *生态学报*, **29**(2): 727–733.
- 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 赵吉, 廖仰南, 张桂枝, 等. 1999. 草原生态系统的土壤微生物生态. *中国草地*, (3): 36–39.
- 张明, 白震, 张威, 等. 2007. 长期施肥农田黑土微生物生物量碳、氮季节性变化. *生态环境*, **16**(5): 1498–1503.
- Bååth E, Söderström B. 1982. Seasonal and spatial variation in fungal biomass in a forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **14**: 353–358.
- Bell C, McIntyre N, Cox S, *et al.* 2008. Soil microbial responses to temporal variations of moisture and temperature in a Chihuahuan desert grassland. *Microbial Ecology*, **56**: 153–167.
- Blume E, Bischoff M, Reichert JM, *et al.* 2002. Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season. *Applied Soil Ecology*, **20**: 171–181.
- Brookes PC, Landman A, Pruden G, *et al.* 1985. Chloroform fumigation and the release of soil organic nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **17**: 837–842.
- Buchanan M, King LD. 1992. Seasonal fluctuations in soil microbial biomass carbon, phosphorus, and activity in no-till and reduced chemical-input maize agroecosystems. *Biology and Fertility of Soils*, **13**: 211–217.
- Bucher AE, Lanyon LE. 2005. Evaluating soil management with microbial community-level physiological profiles. *Applied Soil Ecology*, **29**: 59–71.
- Doran JW. 1987. Microbial biomass and mineralizable nitrogen distributions in no-tillage and plowed soils. *Biology and Fertility of Soils*, **5**: 68–75.
- Franzluebbers AJ, Hons FM, Zuberer DA. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. *Soil Science Society of America Journal*, **59**: 460–466.
- Garcia FO, Rice CW. 1994. Microbial biomass dynamics in tallgrass prairie. *Soil Science Society of America Journal*, **58**: 816–816.
- Gunapala N, Scow KM. 1998. Dynamics of soil microbial biomass and activity in conventional and organic farming systems. *Soil Biology & Biochemistry*, **30**: 805–816.
- Harris JA, Birch P. 1989. Soil microbial activity in opencast coal mine restoration. *Soil Use and Management*, **5**: 155–160.
- Holmes WE, Zak DR. 1994. Soil microbial biomass dynamics and net nitrogen mineralization in Northern hardwood ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, **58**: 238–243.
- Kaiser EA, Heinemeyer O. 1993. Seasonal variations of soil microbial biomass carbon within the plough layer. *Soil Biology & Biochemistry*, **25**: 1649–1635.
- Mahmood T, Ali R, Hussain F, *et al.* 2007. Seasonal changes in soil microbial biomass nitrogen under an irrigated wheat-maize cropping system. *Pakistan Journal of Botany*, **39**: 1751–1761.
- Miller M, Dick RP. 1995. Dynamics of soil C and microbial biomass in whole soil and aggregates in two cropping systems. *Applied Soil Ecology*, **2**: 253–261.
- Nicolardot BG, Fauvet, Cheneby D. 1994. Carbon and nitrogen cycling through soil microbial biomass at various temperatures. *Soil Biology & Biochemistry*, **26**: 253–262.
- Pascual JA, Garcia C, Hernandez T, *et al.* 2000. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology & Biochemistry*, **32**: 1877–1883.
- Saratchandra SU, Perrot KW, Upsdell MP. 1984. Microbiological and biochemical characteristics of a range of New Zealand soils under established pasture. *Soil Biology & Biochemistry*, **16**: 177–183.
- Sarathchandra SU, Perrot KW, Littler RA. 1989. Soil microbial biomass influence of simulated temperature changes on size, activity and nutrient content. *Soil Biology & Biochemistry*, **21**: 987–993.
- Singh JS, Raghubanshi AS, Singh RS, *et al.* 1989. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, **338**: 499–500.
- Smith LJ, Paul EA. 1990. The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil Biochemistry*, **6**: 357–359.
- Srivastava SC. 1992. Microbial C, N and P in dry tropical soils: Seasonal changes and influence of soil moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, **24**: 711–714.
- Steenwerth KL, Jackson LE, Calderon FJ, *et al.* 2002. Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 1599–1611.
- Wu J, Joergensen RG, Pommerening B, *et al.* 1990. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure. *Soil Biology & Biochemistry*, **22**: 1167–1169.

作者简介 胡婵娟,女,1981年生,博士后。主要研究方向为土壤生态学及景观生态学,发表论文5篇。E-mail: huchuanjuan1981@126.com

责任编辑 魏中青