

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190309

坡位对寒温带天然樟子松林土壤 微生物生物量碳氮的影响

肖瑞晗 满秀玲 丁令智
(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】研究我国寒温带天然樟子松林土壤微生物生物量碳、氮含量与坡位之间的关系,了解樟子松林对立地条件的响应,揭示天然樟子松林土壤微生物生物量变化特征及影响因素。【方法】以大兴安岭北部不同坡位天然樟子松林为研究对象,选择坡上、坡中和坡下 3 种立地条件,采用氯仿熏蒸浸提法测定了 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤微生物生物量碳、氮含量。对其季节动态变化规律及影响因素进行分析比较。【结果】在观测期内(5—9 月),樟子松林土壤微生物生物量碳、氮含量均呈现出波动式下降趋势,其变化范围分别是 74.33~515.33 mg/kg 和 15.33~240.57 mg/kg,土壤微生物生物量碳氮比在 1.04~5.73 之间。坡位对土壤微生物生物量碳、氮和碳氮比产生显著影响($P < 0.01$),坡下和坡中樟子松林土壤微生物生物量碳、氮含量均值显著高于坡上($P < 0.05$);不同土层间土壤微生物生物量碳、氮含量也存在显著差异,0~10 cm 土层显著高于 10~20 cm 土层($P < 0.05$)。土壤微生物生物量碳、氮与土壤总有机碳、全氮和土壤含水量呈显著正相关,但与土壤温度和 pH 值相关性不显著。【结论】坡位对天然樟子松林土壤微生物生物量影响显著,其含量存在明显的立地分异规律性,土壤总有机碳、全氮和土壤含水量是导致土壤微生物生物量碳、氮差异的主要影响因素。

关键词: 坡位;土壤微生物量;大兴安岭北部;季节动态;樟子松林

中图分类号: S714.3; S154.36 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)02-0031-09

引文格式: 肖瑞晗, 满秀玲, 丁令智. 坡位对寒温带天然樟子松林土壤微生物生物量碳氮的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2): 31-39. Xiao Ruihan, Man Xiuling, Ding Lingzhi. Effects of slope position on soil microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest in the cold temperature zone [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(2): 31-39.

Effects of slope position on soil microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest in the cold temperature zone

Xiao Ruihan Man Xiuling Ding Lingzhi

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] In order to study the characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest in the cold temperature zone, the dynamic variation rule of soil microbial biomass carbon and nitrogen and those influencing factors were analyzed to provide a theoretical basis for soil nutrient transport and flow characteristics in the natural *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest. [Method] Measurements were taken every month from May to September in 2017 at three sites, including the top, the middle, the lower regions of slope in the *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest. The microbial biomass carbon and nitrogen in the 0-10 cm and 10-20 cm were determined by chloroform fumigation and extraction method, with their seasonal dynamics and the relationships with soil physicochemical properties in three sites. [Result] The results showed that the soil microbial biomass carbon and nitrogen contents

收稿日期: 2019-08-30 修回日期: 2019-09-18

基金项目: 东北林业大学双一流专项(00041113102)。

第一作者: 肖瑞晗。主要研究方向: 森林土壤养分。Email: xiaonefu@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学林学院。

责任作者: 满秀玲, 博士, 教授。主要研究方向: 水土保持。Email: mannefu@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

under different slope positions presented fluctuating downward trends from May to September, with the ranges of 74.33 to 515.33 mg/kg and 15.33 to 240.57 mg/kg, respectively. The microbial biomass carbon-nitrogen ratio was between 1.04 and 5.73, which was significantly different among varied site conditions during the measuring periods. The mean values of soil microbial biological carbon and nitrogen in the lower and middle regions of slopes were significantly higher than those in the top regions of slope ($P < 0.05$). Site conditions had significant effects on soil microbial biomass carbon, nitrogen and soil microbial biomass carbon-nitrogen ratio ($P < 0.01$). The soil microbial biomass carbon and nitrogen contents in 0–10 cm soil layer were significantly larger than those in 10–20 cm soil layer. Soil microbial biomass carbon and nitrogen were significantly positively correlated with soil total organic carbon, total nitrogen and soil water content, but not correlated with soil temperature and pH. [Conclusion] The study shows that slope position has significant influence on soil microbial biomass in the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest in the cold temperature zone, and its content has obvious site-differentiation rule. Soil total organic carbon, total nitrogen and soil water content are the main influencing factors leading to soil microbial biomass carbon and nitrogen difference.

Key words: slope position; soil microbial biomass; northern Daxing'an Mountains; seasonal dynamics; *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest

土壤微生物量是土壤的重要组成部分,在养分循环与平衡、土壤理化性质的改善中起着重要作用^[1]。土壤微生物生物量碳和氮虽然只占土壤总有机碳和全氮的一小部分,但其直接参与到土壤养分转化,物质循环和能量流动等关键环节中,是土壤碳、氮等物质“库”和“流”的具体体现^[2-3],也是判断土壤质量好坏的重要依据。土壤微生物生物量受气候、土壤、植被、地形等因子的显著影响,即使在相同的气候条件和土壤类型下,季节变化和土壤水热条件的差异也对土壤微生物量产生很大的影响。目前,针对土壤微生物量的研究主要集中于不同气候带、不同森林类型间土壤微生物生物量碳和氮含量、时空动态变化及其影响因子方面^[4-18],鲜有对不同立地类型(坡上、坡中和坡下)土壤微生物生物量碳和氮的研究报道。

作为欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)的变种,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)在我国境内分为沙地樟子松和山地樟子松,天然山地樟子松仅存在于大兴安岭北部地区^[19-20]。作为我国唯一的高纬度寒温带多年连续冻土分布区,该地区气候寒冷,生长季较短,土壤层较薄且土壤贫瘠。而樟子松因其较强的适应能力,成为该气候区土壤演替顶极群落同时也是大兴安岭地区的主要森林类型之一^[21-23]。由于全球气候变暖,近几十年间大兴安岭地区平均地表温度上升了约 1.0 °C,冻土南缘明显向北退缩了 50~150 km,冻土总面积减少约 35%^[24-25]。冻土退化导致土壤水热条件的变化对这一地区樟子松林的生长产生了很大影响,出现樟子松天然林分布区向北漂移的趋势^[19,26]。因此,对我国大兴安岭北部地区天然

樟子松林的研究与保护迫在眉睫。目前,已有学者对该地区天然樟子松林不同坡位土壤养分以及不同森林类型间土壤理化性质差异进行了分析研究^[22,27-29],但天然樟子松林对不同坡位的适应性及对环境因子的响应尚未给出明确的结论。因此,本研究以大兴安岭北部地区天然樟子松林为研究对象,探讨不同坡位樟子松林土壤微生物生物量碳、氮含量的差异和时空变化规律,为全球气候变化背景下樟子松林生境的保护提供基础数据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站(122°06'~122°27'E, 53°17'~53°30'N)内,该区属于寒温带大陆性季风气候,年均气温-4.9 °C,平均无霜期为 89 d,降水量为 350~500 mm,是多年冻土分布区。地带性顶级群落为兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林,而樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林是本地区土壤的植物顶级群落,此外还分布有白桦(*Betula platyphylla*)林和山杨(*Populus davidiana*)林。林下植被以兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)为主,地带性土壤为棕色针叶林土,土壤层较薄,多在 20~30 cm,石块较多,局部地段分布有沼泽土和草甸土。

1.2 样地设置和样品采集

本研究选取该地区有代表性的坡地樟子松林为研究对象,坡度为 30°~40°,坡长 400 m 左右,坡向为南。在坡地樟子松林的坡上、坡中和坡下分别设

置 3 块 20 m×30 m 的样地, 对每个样地内进行每木检尺, 样地基本情况详见表 1。于 2017 年 5 月至 9 月每月采集土壤样品 1 次, 采用 S 型采样法选 5 个采样点, 每个采样点采集 0~10 cm 和 10~20 cm 的土壤, 用封口袋收集, 样品密封并用保温箱低温保

鲜带回实验室, 挑去石砾、根系和杂物, 过 2 mm 土壤筛。每个土壤样品分为 2 份: 1 份在常温下风干, 用于土壤有机碳、土壤全氮和 pH 值的测定; 另 1 份保存于 4 ℃ 的冰箱中, 用于土壤微生物生物量碳、氮的测定。

表 1 樟子松林基本特征

Tab. 1 Basic situation of *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest

坡位 Slope position	海拔 Altitude/m	树种组成 Species composition	平均树高 Mean tree height/m		平均胸径 Mean DBH/cm		郁闭度 Canopy density	林下主要植物 Major understory species
			樟子松 <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	其他树种 Other species	樟子松 <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	其他树种 Other species		
坡上 Upper slope	556	6P 2L 1S 1B	16.58 ± 1.75	13.74 ± 1.30	22.05 ± 4.18	16.22 ± 2.01	0.8	兴安杜鹃 <i>Rhododendron dauricum</i> 、北国红豆 <i>Vaccinium macrocarpon</i> 、越桔 <i>Vaccinium vitis-idaea</i>
坡中 Middle slope	512	8P 2L	16.53 ± 2.35	12.53 ± 2.34	22.40 ± 2.95	13.60 ± 1.48	0.7	兴安刺玫 <i>Rosa davurica</i> 、兴安杜鹃 <i>Rhododendron dauricum</i> 、北国红豆 <i>Vaccinium macrocarpon</i> 、越桔 <i>Vaccinium vitis-idaea</i>
坡下 Down slope	465	9P 1L	18.88 ± 2.96	16.87 ± 1.97	24.98 ± 2.53	19.28 ± 3.14	0.6	兴安刺玫 <i>Rosa davurica</i> 、兴安杜鹃 <i>Rhododendron dauricum</i> 、羽节蕨 <i>Gymnocarpium jessoense</i> 、北国红豆 <i>Vaccinium macrocarpon</i> 、凤毛菊 <i>Saussurea amurensis</i> 、越桔 <i>Vaccinium vitis-idaea</i> 、杜香 <i>Ledum palustre</i>

注: P为樟子松; L为兴安落叶松; S为山杨; B为白桦。Notes: P, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; L, *Larix gmelinii*; S, *Populus davidiana*; B, *Betula platyphylla*.

1.3 分析方法

土壤含水率采用烘干法(105 ℃, 24 h)测定, 土壤温度采用数字式瞬时温度计(6310, Spectrum, USA)测定, 土壤总有机碳、全氮采用 MultiC/N 3000 分析仪 HT1500SolidsModule 固体模块和半微量凯氏定氮法测定, 土壤 pH 采用 PHS-3E 型 pH 计(土水质量比 1:2.5)测定, 土壤密度、孔隙度采用环刀法测定。土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提法(土水质量比 1:2), 滤液用 MultiC/N 3000 分析仪测定^[16]。

1.4 数据处理

采用 SPSS19.0 软件进行不同坡位、不同土层土壤总有机碳、全氮及微生物生物量碳、氮含量间差异

分析(one-way ANOVA 及 Duncan 检验), 采用多因素方差分析法检验坡位、土层及季节变化对土壤微生物生物量碳、氮含量的影响, 采用 Pearson 相关系数法分析土壤微生物生物量碳、氮与土壤理化性质等指标的关系, 以 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

如表 2 所示, 观测期内, 樟子松林含水量、pH 值、有机碳及全氮变化范围分别为 23.11%~47.30%、5.24~5.61、7.15~24.87 g/kg 及 0.72~2.43 g/kg。总体上, 0~10 cm 土层不同坡位樟子松林土壤有机碳及全氮存在显著差异 0~10 cm 土层($P < 0.05$), 呈现

表 2 樟子松林样地土壤性质

Tab. 2 Soil characteristics in sample plots of *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest

坡位 Slope position	土层 Soil layer /cm	有机碳 Organic carbon /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤含水量 Soil water content/%	pH
坡上 Upper slope	0~10	11.91 ± 1.65Ca	1.20 ± 0.11Ca	33.36 ± 4.56Ba	5.46 ± 0.12Aa
	10~20	7.15 ± 1.08Bb	0.72 ± 0.06Bb	23.11 ± 2.35Ab	5.61 ± 0.08Aa
坡中 Middle slope	0~10	18.35 ± 2.60Ba	1.67 ± 0.41Ba	38.26 ± 3.01Ba	5.33 ± 0.07Aa
	10~20	8.47 ± 2.07Bb	0.96 ± 0.29Bb	25.05 ± 4.42Ab	5.54 ± 0.10Aa
坡下 Down slope	0~10	24.87 ± 2.40Aa	2.43 ± 0.46Aa	47.30 ± 2.06Aa	5.24 ± 0.11Aa
	10~20	13.71 ± 2.21Ab	1.84 ± 0.20Ab	27.13 ± 3.21Ab	5.30 ± 0.12Aa

注: 不同大写字母表示不同坡位之间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同土层间差异显著($P < 0.05$)。下同。Notes: different capital letters mean significant differences among varied slope positions ($P < 0.05$). Different lowercase letters mean significant differences among varied soil layers ($P < 0.05$). The same below.

出坡下 > 坡中 > 坡上的变化趋势。坡下土壤含水量显著高于坡中和坡上 ($P < 0.05$)。而 pH 值在不同坡位差异不显著 ($P > 0.05$)。土壤含水量、有机碳及全氮含量随土层加深而明显下降 ($P < 0.05$)，土壤 pH 值在不同土层间差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 土壤微生物生物量碳、氮含量

如表 3 所示，坡下和坡中土壤微生物生物量碳、

氮含量均值显著高于坡上 ($P < 0.05$)。不同坡位土壤微生物生物量碳、氮含量随土层加深呈下降趋势，坡上、坡中和坡下 0~10 cm 土层土壤微生物生物量碳含量分别是 10~20 cm 土层的 2.65、1.65 和 1.79 倍，土壤微生物生物量氮分别是 2.53、1.57 和 1.51 倍。不同坡位及不同土层间土壤微生物生物量碳氮比均差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 3 樟子松林不同坡位各层土壤微生物生物量碳、氮含量

Tab. 3 Soil microbial biomass carbon and nitrogen in different soil layers among varied slope positions of *P. sylvestris* var. *mongolia* forest

坡位 Slope position	土层 Soil layer /cm	土壤微生物生物量碳 MBC/(mg·kg ⁻¹)	土壤微生物生物量氮 MBN/(mg·kg ⁻¹)	土壤微生物生物量碳氮比 MBC/MBN
坡上 Upper slope	0~10	267.13 ± 78.73Ba	94.34 ± 40.19Ba	3.07 ± 0.85Aa
	10~20	100.88 ± 23.69Bb	37.36 ± 16.35Bb	3.08 ± 1.19Aa
坡中 Middle slope	0~10	291.31 ± 124.94Aa	117.95 ± 67.19Aa	2.84 ± 1.48Aa
	10~20	176.76 ± 57.73Aa	75.12 ± 6.84Aa	2.54 ± 1.02Aa
坡下 Down slope	0~10	338.76 ± 94.08Aa	130.71 ± 40.04Aa	2.95 ± 1.51Aa
	10~20	188.94 ± 60.53Ab	86.55 ± 29.31Aa	2.57 ± 1.47Aa

Notes: MBC, microbial biomass carbon; MBN, microbial biomass nitrogen.

2.3 土壤微生物生物量碳、氮含量动态

如图 1a~1b 所示，观测期内不同坡位樟子松林各土层土壤微生物生物量碳含量均呈波动式下降趋势。0~10 cm 土层坡上和坡中最大值均出现在 5 月，含量分别为 403.29 和 515.33 mg/kg，而坡下在 5 月 (431.95 mg/kg) 和 8 月 (440.56 mg/kg) 含量较高；10~20 cm 土层土壤微生物生物量碳含量在 74.33~276.30 mg/kg 之间，其中坡中和坡下土壤微生物生物量碳最大值也出现在 5 月，最小值均出现在 9 月，坡上则波动幅度较小，最大值出现在 7 月。

坡上和坡中樟子松林 0~10 cm 土层土壤微生物生物量氮含量在 5—9 月表现出波动式下降的趋势，其土壤微生物生物量氮含量最大值出现在 5 月 (145.86 和 240.56 mg/kg)，坡下最大值出现在 8 月 (170.19 mg/kg) (图 1c)。不同坡位樟子松林 10~20 cm 土层土壤微生物生物量氮含量月变化趋势不同，其含量在 15.33~130.48 mg/kg 之间 (图 1d)。

如图 1e~1f 所示，观测期内，不同坡位樟子松林土壤微生物生物量碳氮比存在显著差异 ($P < 0.05$)，且月变化趋势各不相同。0~10 cm 土层土壤微生物生物量碳氮比变化范围在 1.39~5.73 之间，坡上呈波动式递增趋势，最高在 9 月，最低在 6 月。坡中和坡下呈单峰曲线，其最高值均出现在 7 月，最低均在 9 月。不同坡位 10~20 cm 土层土壤微生物生物量碳氮比变化范围为 1.04~5.35。

2.4 土壤微生物生物量碳氮对环境因子的响应

土壤微生物生物量碳、氮及碳氮比受坡位、土壤

层次和取样时间的影响极显著 ($P < 0.01$) (表 4)。多重比较结果显示，土壤层次和取样时间、坡位和取样时间以及三者之间的交互作用都会对土壤微生物生物量碳、氮及碳氮比产生极显著的影响 ($P < 0.01$)。

由于坡位的不同，导致土壤养分含量及温湿度发生改变，会影响土壤微生物生物量碳、氮含量的变化。因此，对土壤微生物生物量碳氮含量与土壤总有机碳、全氮、pH 值和土壤温湿度进行相关分析 (表 5)，结果表明，土壤微生物生物量碳、氮与土壤总有机碳、全氮和土壤含水量呈显著正相关，与土壤温度和 pH 相关性不显著。

3 讨 论

3.1 樟子松林土壤微生物量特征

在不同的森林生态系统中，由于气候、植被、土壤等因素在时间和空间上的差异，土壤微生物量的变化较大。研究表明，不同地区土壤微生物生物量碳、氮含量一般在 42~2 064 mg/kg 和 20~216 mg/kg 之间 [5,30-31]。本研究中大兴安岭北部天然樟子松林土壤微生物生物量碳、氮平均含量在 100.88~338.76 mg/kg 和 37.36~130.71 mg/kg 之间，含量较低。这是由于本研究区属寒温带地区，年均气温较低且该地区土壤层较薄且比较贫瘠，不利于土壤微生物的代谢与繁殖，因此与其他气候带森林生态系统土壤微生物量相比，其含量偏低 [5-14]。有研究表明大兴安岭地区樟子松林较其他森林类型土壤养分含量要低 (土壤总有机碳含量 63.45~123.40 g/kg，土壤全氮含量 2.50~

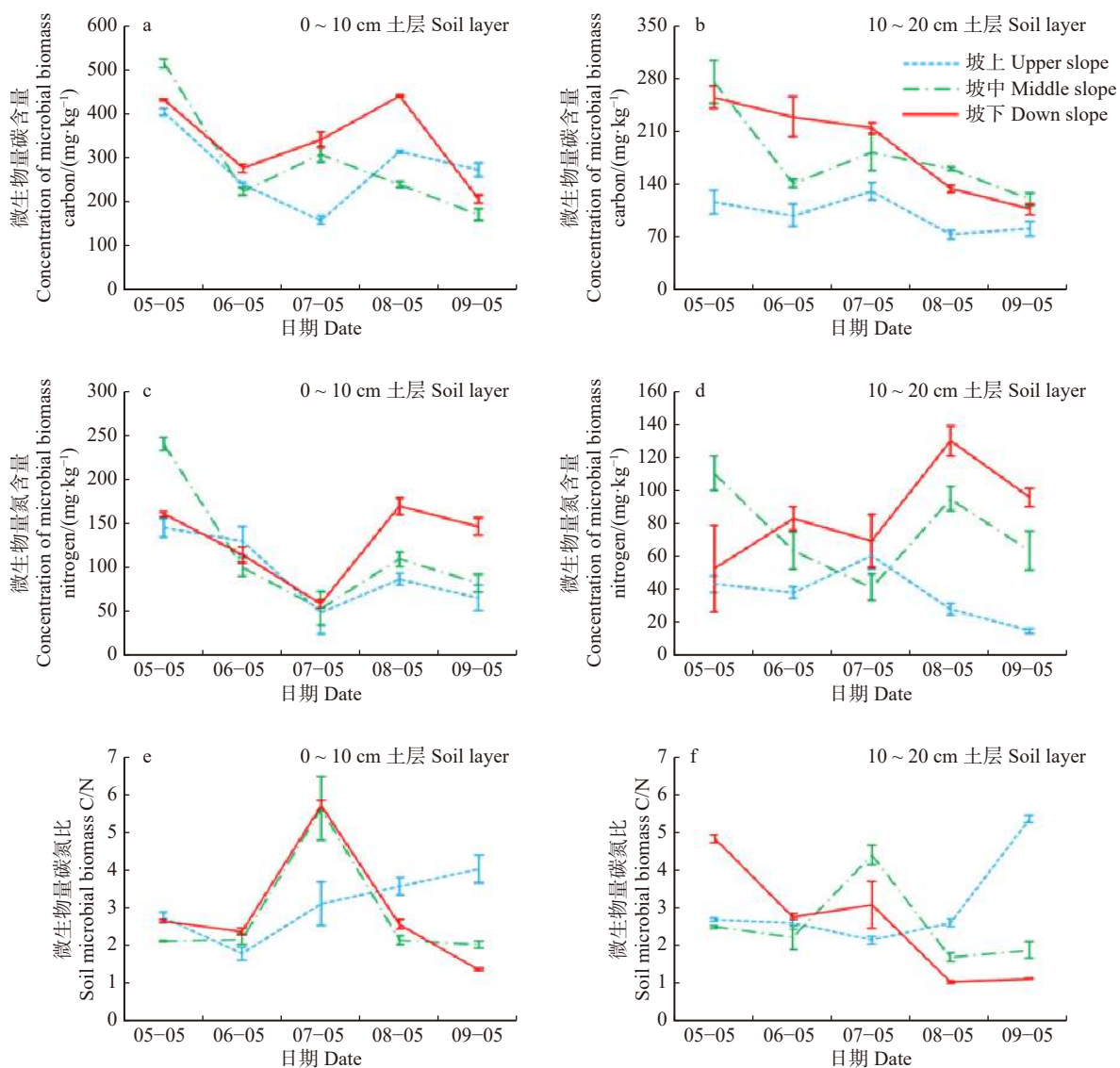


图 1 不同坡位樟子松林各土层土壤微生物量月变化特征

Fig. 1 Monthly dynamics of soil microbial biomass in different soil layers of varied slope positions of *P. sylvestris* var. *mongolia* forest

表 4 土壤微生物生物量碳氮及其比值的方差分析

Tab. 4 ANOVA of soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) as well as MBC/MBN

差异来源 Source of difference	土壤微生物生物量碳 MBC			土壤微生物生物量氮 MBN			土壤微生物生物量碳氮比 MBC/MBN		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
月份 Month	4	427.61	< 0.001	4	94.55	< 0.001	4	131.60	< 0.001
坡位 Slope position	2	188.83	< 0.001	2	106.38	< 0.001	2	18.15	< 0.001
土层 Soil layer	1	2 499.52	< 0.001	1	408.75	< 0.001	1	16.76	< 0.001
月份 × 坡位 Month × slope position	8	57.97	< 0.001	8	40.44	< 0.001	8	124.15	< 0.001
月份 × 土层 Month × soil layer	4	99.91	< 0.001	4	60.99	< 0.001	4	70.00	< 0.001
坡位 × 土层 Slope position × soil layer	2	43.21	< 0.001	2	4.62	0.014	2	4.70	0.013
月份 × 坡位 × 土层 Month × slope position × soil layer	8	33.14	< 0.001	8	5.64	< 0.01	8	17.39	< 0.001

12.14 g/kg), 土壤质量较差^[32-34], 因此樟子松林土壤微生物生物量碳含量也较低(白桦林 909.54 mg/kg、落叶松林 657.93 mg/kg、山杨林 502.33 mg/kg)^[28]。这是由于樟子松是常绿树种, 林内凋落物数量较少,

同时针叶分解速率慢, 影响土壤养分的归还, 导致土壤养分较低, 土壤微生物量的积累缓慢。

3.2 环境因子对樟子松林土壤微生物量的影响

影响土壤微生物量的因素很多, 有研究指出土

表5 土壤微生物生物量碳、氮含量之间及其与土壤养分含量的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients between soil microbial biomass (C, N) and soil nutrient contents

	总有机碳 TOC	全氮 TN	微生物生物量氮 MBN	pH	土壤含水量 Soil water content	土壤温度 Soil temperature
微生物生物量碳 MBC	0.58**	0.69**	0.73**	0.32	0.49**	- 0.57
微生物生物量氮 MBN	0.44*	0.67**	1	0.14	0.37*	- 0.29

注: *和**分别表示 $P < 0.05$ 相关性显著和 $P < 0.01$ 相关性极显著。Notes: * and ** indicate significant correlations at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ level.

壤质地、植被类型、气候、土壤深度以及季节变化等都会对土壤微生物产生很大的影响^[27-29]。本研究中,不同坡位樟子松林土壤含水量、有机碳、全氮及微生物生物量碳、氮含量差异显著($P < 0.05$)。土壤微生物生物量碳、氮含量与土壤含水量呈显著正相关关系,土壤水分是影响樟子松林土壤微生物生物量的重要影响因素,这与以往的很多研究结果相同^[6,27]。土壤水分作为土壤的重要参量,对土壤微生物的过程有着重要影响^[35-36],在不影响土壤通气性的前提下,土壤含水量的增加会增强土壤微生物的活性,为土壤微生物创造更好的生存环境,使得土壤微生物生物量增加^[37-38]。同时随着土壤含水量的增加,林下植被丰富度、盖度和生物多样性均会增加,导致土壤养分增加,而有利于土壤微生物的繁殖与生长^[39-41],因此,坡下樟子松林土壤具有较高的微生物生物量。此外,本研究中,土壤有机碳和全氮与土壤微生物量均表现出极显著的正相关关系,表明土壤有机碳和全氮对土壤微生物生物量有着重要的影响。

土壤深度也是影响土壤微生物生物量的重要因子,以往的研究指出,土壤微生物量会随着土壤深度的增加而减小^[5,12,42]。本研究中,同一坡位,土壤微生物量也随着土层深度的增加而减小,0~10 cm 土层土壤微生物量明显大于10~20 cm 土层。这是因为随着土层深度的增加,土壤含水量降低,较低的含水量会降低土壤微生物活性,导致土壤微生物生物量碳、氮含量较低。此外,随着土层的增加,土壤养分含量降低,动植物残体及根系分泌物的营养物质减少,为土壤微生物提供的营养物质减少,不利于土壤微生物的繁殖,使得深层土壤微生物生物量碳、氮含量较低。

本研究中,不同坡位樟子松林土壤微生物生物量季节动态差异显著($P < 0.05$)。观测期内,不同坡位土壤微生物生物量碳、氮表现出波动式下降的变化趋势,但在7、8月份有小幅度的上升。观测初期(5月),植物还未开始生长,因此微生物与植物在竞争营养物质的过程中会占据优势^[43],促使土壤微生物生物量的增加,同时由于早春土壤表面温度升高积雪融化,促进了土壤微生物对凋落物的分解,也增加了土壤微生物生物量^[44]。6月随着植物的生长,土

壤中的营养物质被快速消耗,使得土壤微生物摄取养分受限,土壤微生物生物量随之减少。进入夏季(7、8月),由于雨季的到来使土壤水分含量增加,为土壤微生物提供了良好的生存环境,因此土壤微生物生物量迅速增加^[45-46]。9月份随着土壤温度及土壤含水量的降低,土壤微生物代谢速率下降,微生物生长和繁殖能力受到了抑制,进而导致微生物量的降低^[42]。土壤微生物生物量季节变动的复杂性主要是土壤温度和湿度综合影响的结果,气候条件不同,土壤微生物生物量的季节变化规律存在较大差异。在热带地区,森林土壤微生物生物量出现干湿季交替循环的变动,导致土壤微生物生物量出现不规律的季节变化^[47-48]。在亚热带和温带地区,由于土壤微生物受到土壤温湿度的综合影响,出现冬低夏高和冬高夏低不同的变动规律^[15,23,49-51]。

3.3 樟子松林土壤微生物量碳氮比特征

土壤微生物量碳氮比是评价土壤供氮能力和有效性指标^[52],常被用来反映土壤微生物种类和区系组成,比值在4~15时,真菌在微生物群落中占优势,比值在3~5之间则细菌占优势^[42]。在本研究中,观测期内樟子松林土壤微生物生物量碳氮比在1.04~5.73之间,说明该地区樟子松林土壤细菌占优势。本研究中,不同坡位樟子松林土壤微生物生物量碳氮比差异显著,且表现出明显的季节动态。土壤微生物对土壤水热条件的变化极为敏感^[31-33],坡位的不同会导致樟子松林间土壤微环境的差异,从而影响土壤微生物生物量碳氮比。同时,由于土壤水热条件等因子的不同,土壤微生物会选择不同的生态对策^[16],因此,土壤微生物生物量碳氮比也会表现出明显的季节差异^[23,25]。

坡位、土壤深度以及季节变化引起的土壤水热变化都会对樟子松林土壤微生物量产生显著影响。因此,在全球气候变暖背景下,大兴安岭地区多年冻土的融化会导致土壤水热条件发生改变^[53],而土壤温湿度发生显著改变时,土壤微生物生物量碳、氮也会随之而变,土壤性质也会发生变化,倘若超过樟子松林适宜生长的生境范围,樟子松林生长将会受到限制,从而樟子松林自然分布区会出现向北漂移的风险。反之,随着樟子松的北移,地表植被覆盖率的

减少,表层土壤含水率会减小^[54],这将进一步对区域和全球气候变化产生深远的影响。

4 结 论

我国寒温带天然樟子松林土壤微生物生物量碳、氮平均含量及微生物生物量碳氮比在 100.88 ~ 356.04 mg/kg、37.36 ~ 136.07 mg/kg 及 1.77 ~ 3.07 范围之间。土壤微生物生物量碳、氮含量对坡位、土壤深度和季节的变化响应敏感,不同坡位不同土层间土壤微生物生物量碳、氮含量差异显著,且具有明显的季节动态变化特征。综上所述,坡位是影响寒温带天然樟子松林土壤养分物质转运和分配的主要因素,土壤总有机碳、全氮和土壤含水量是导致土壤微生物生物量碳、氮差异的主要影响因子。

参 考 文 献

- [1] Bargali K, Manral V, Padalia K, et al. Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India[J]. *Catena*, 2018, 171: 125–135.
- [2] 漆良华, 张旭东, 周金星, 等. 湘西北小流域不同植被恢复区土壤微生物数量、生物量碳氮及其分形特征[J]. *林业科学*, 2009, 45(8): 14–20.
- Qi L H, Zhang X D, Zhou J X, et al. Soil microbe quantities, microbial carbon and nitrogen and fractal characteristics under different vegetation restoration patterns in watershed, Northwest Hunan[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(8): 14–20.
- [3] Kononen M, Jauhainen J, Strakova P, et al. Deforested and drained tropical peat land sites show poorer peat substrate quality and lower microbial biomass and activity than unmanaged swamp forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 229–241.
- [4] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135–3143.
- Liu S, Wang C K. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3135–3143.
- [5] 刘宝, 吴文峰, 林思祖, 等. 中亚热带 4 种林分类型土壤微生物生物量碳氮特征及季节变化[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1901–1910.
- Liu B, Wu W F, Lin S Z, et al. Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and its seasonal dynamics in four types mid-subtropical forests[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 1901–1910.
- [6] 陈平, 赵博, 杨璐, 等. 接种蚯蚓和添加凋落物对油松人工林土壤养分和微生物量及活性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(6): 63–71.
- Cheng P, Zhao B, Yang L, et al. Effects of earthworm and litter application on soil nutrients and soil microbial biomass and activities in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(6): 63–71.
- [7] 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 等. 坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3832–3838.
- Feng S Z, Su Y R, Zhang W, et al. Effects of slope position and soil horizon on soil microbial biomass and abundance in karst primary forest of southwest China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3832–3838.
- [8] Gran R F. Nitrogen mineralization drives the response of forest productivity to soil warming: modeling in ecosys vs. measurements from the Harvard soil heating experiment[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 288: 38–46.
- [9] 李胜蓝, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区 4 种森林类型土壤微生物生物量碳氮含量[J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 8–16.
- Li S L, Feng X, Xiang W H, et al. Soil microbial biomass carbon and nitrogen concentrations in four subtropical forests in hilly region of central Hunan Province, China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(5): 8–16.
- [10] Zhao F Z, Kang D, Han X H, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415–422.
- [11] 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 等. 黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 1973–1980.
- Qin Q, Zhu S S, Xia B, et al. Temporal and spatial dynamics of soil microbial biomass carbon and its influencing factors on eroded slope in hilly Loess Plateau region[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1973–1980.
- [12] 王薪琪, 韩轶, 王传宽. 帽儿山不同林龄落叶阔叶林土壤微生物生物量及其季节动态[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(6): 597–609.
- Wang X Q, Han Y, Wang C K. Soil microbial biomass and its seasonality in deciduous broadleaved forests with different stand ages in the Mao 'ershan Region, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(6): 597–609.
- [13] Sorensen P O, Finzi A C, Giasson M A, et al. Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 39–47.
- [14] 刘平, 邱月, 王玉涛, 等. 渤海泥质海岸典型防护林土壤微生物量季节动态变化[J]. *生态学报*, 2019, 39(1): 1–8.
- Liu P, Qiu Y, Wang Y T, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in typical shelterbelts on the Bohai muddy coast[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 1–8.
- [15] Bölscher T, Paterson E, Freitag T, et al. Temperature sensitivity of substrate-use efficiency can result from altered microbial physiology without change to community composition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109: 59–69.
- [16] Xiong Q L, Pan K W, Zhang L, et al. Warming and nitrogen deposition are interactive in shaping surface soil microbial communities near the alpine timberline zone on the eastern Qinghai -Tibet Plateau, southwestern China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101: 72–83.
- [17] 郑海峰, 陈亚梅, 杨林, 等. 高山林线土壤微生物群落结构对模拟增温的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2840–2848.
- Zheng H F, Chen Y M, Yang L, et al. Responses of soil microbial

- community structure to simulated warming in alpine timberline in western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(9): 2840–2848.
- [18] Soleimani A, Hosseini S M, Bavani A R M, et al. Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran[J]. *Catena*, 2019, 177(2): 227–237.
- [19] 李俊霞, 白学平, 张先亮, 等. 大兴安岭林区南、北部天然樟子松生长对气候变化的响应差异[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7232–7241.
Li J X, Bai X P, Zhang X L, et al. Different responses of natural *Pinus sylvestris* var. *mongolica* growth to climate change in southern and northern forested areas in the Great Xingan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 7232–7241.
- [20] 周志强, 郝雨, 刘彤, 等. 大兴安岭北段天然樟子松林遗传多样性与主要生态因子的相关性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(6): 22–27.
Zhou Z Q, Hao Y, Liu T, et al. Correlativity analysis between the main ecological factors and genetic diversity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* population in the north part of Great Xingan Mountains[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(6): 22–27.
- [21] 顾云春. 大兴安岭林区森林群落的演替[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1985(1): 64–70.
Gu Y C. Succession of forest community in Great Xingan Mountains forest region[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1985(1): 64–70.
- [22] 李奕, 满秀玲, 蔡体久, 等. 大兴安岭山地樟子松天然林土壤水分物理性质及水源涵养功能研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 87–91, 96.
Li Y, Man X L, Cai T J, et al. Research on physical properties of soil moisture and water conservation of scotch pine forest in Da Xingan Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 87–91, 96.
- [23] 顾云春. 大兴安岭几个主要森林类型的天然更新[J]. *林业资源管理*, 1980(4): 21–27.
Gu Y C. Natural regeneration of several major forest types in Great Xingan Mountains[J]. *Forest Resources Management*, 1980(4): 21–27.
- [24] Cheng G D, Jin H J. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in northeast China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21: 5–23.
- [25] Gao W F, Yao Y L, Liang H, et al. Emissions of nitrous oxide from continuous permafrost region in the Daxingan Mountains, Northeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 198: 34–45.
- [26] 晏寒冰, 彭丽潭, 唐旭清. 基于气候变化的东北地区森林树种分布预测建模与影响分析[J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 132–139.
Yan H B, Peng L T, Tang X Q. Modeling and impact analysis on distribution prediction of forest tree species in northeast China based on climate change[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(5): 132–139.
- [27] 李奕, 满秀玲, 蔡体久, 等. 大兴安岭山地樟子松天然林不同坡位土壤养分特征及相关性研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(5): 1413–1416, 1420.
Li Y, Man X L, Cai T J, et al. Research on soil nutrient characteristic and correlation in different slope position of scotch pine forest in Da Hinggan Mountains[J]. *Journal of Anhui Agri*, 2014, 42(5): 1413–1416, 1420.
- [28] 田舒怡, 满秀玲. 大兴安岭北部森林土壤微生物量碳和水溶性有机碳特征研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 838–845.
Tian S Y, Man X L. Study on characteristics of soil microbial biomass carbon and dissolved organic carbon in northern forest region of Daxingan Mountains[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(4): 838–845.
- [29] 肖瑞晗, 满秀玲, 丁令智. 大兴安岭北部天然针叶林土壤氮矿化特征研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2762–2771.
Xiao R H, Man X L, Ding L Z. Study on the characteristics of soil nitrogen mineralization of the natural coniferous forest on northern of Daxing'an Mountains, Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2762–2771.
- [30] 王宁, 杨雪, 李世兰, 等. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态[J]. *林业科学*, 2016, 52(1): 150–158.
Wang N, Yang X, Li S L, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon-nitrogen in the Korean pine mixed forests along elevation gradient[J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2016, 52(1): 150–158.
- [31] Liu W X, Qiao C L, Yang S, et al. Microbial carbon use efficiency and priming effect regulate soil carbon storage under nitrogen deposition by slowing soil organic matter decomposition[J]. *Geoderma*, 2018, 332: 37–44.
- [32] 田舒怡. 大兴安岭北部主要森林类型土壤活性碳特征[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
Tian S Y. Study on characteristics of soil labile organic carbon in main forest types in the north of Daxing'anling Mountains[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [33] 石宪, 张秋良, 曹阳, 等. 兴安落叶松天然林不同林型土壤养分分布特征研究[J]. *内蒙古林业科技*, 2015, 41(3): 6–10.
Shi X, Zhang Q L, Cao Y, et al. Study on distribution feature of soil nutrient in natural forest of *Larix gmelinii* with different forest types[J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2015, 41(3): 6–10.
- [34] 曲杭峰, 董希斌, 唐国华, 等. 补植改造对大兴安岭白桦低质林土壤养分的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2017, 45(4): 75–80.
Qu H F, Dong X B, Tang G H, et al. Effects of replanting alterations of *Betula platyphylla* low-quality forest on soil nutrients in Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2017, 45(4): 75–80.
- [35] 沈丹, 王磊. 青藏高原土壤湿度对中国夏季降水与气温影响的敏感试验[J]. *气象科技*, 2015, 43(6): 1095–1103, 1120.
Shen D, Wang L. Sensitivity test of soil moisture on summer precipitation and temperature in China on Qinghai-Tibet plateau[J]. *Weather Technology*, 2015, 43(6): 1095–1103, 1120.
- [36] Ren C J, Chen J, Lu X J, et al. Responses of soil total microbial

- biomass and community compositions to rainfall reductions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 4–10.
- [37] 刘纯, 刘延坤, 金光泽. 小兴安岭6种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 451–459.
- Liu C, Liu Y K, Jin G Z. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxingan Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 451–459.
- [38] 曹艳峰, 李彦, 李晨华, 等. 荒漠灌木梭梭 (*Haloxyylon ammodendron*) 周围土壤微生物的空间分布[J]. *生态学报*, 2016, 36(6): 1628–1635.
- Cao Y F, Li Y, Li C H, et al. The spatial distribution of soil microbes around a desert shrub of *Haloxyylon ammodendron*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 1628–1635.
- [39] 王国兵, 郝岩松, 王兵, 等. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2006(增刊2): 73–79.
- Wang G B, Hao Y S, Wang B, et al. Influence of land-use change on soil respiration and soil microbial biomass[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006(Suppl.2): 73–79.
- [40] Cusack D F, Mcclereytl L. Patterns in understory woody diversity and soil nitrogen across native- and non-native-urban tropical forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 318: 34–43.
- [41] Zhang W, Zhao J, Pan F J, et al. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China[J]. *Plant and Soil*, 2015, 391: 77–91.
- [42] 孙双红, 陈立新, 李少博, 等. 阔叶红松林不同演替阶段土壤酶活性与养分特征及其相关性[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 20–28.
- Sun S H, Chen L X, Li S B, et al. Characteristics of soil enzyme activity and nutrient content and their correlations at different succession stages of broadleaf-Korean pine forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(2): 20–28.
- [43] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, Northeast India[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31: 220–227.
- [44] 付战勇, 孙景宽, 李传荣, 等. 黄河三角洲贝壳堤土壤微生物生物量对不同生境因子的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6594–6602.
- Fu Z Y, Sun J K, Li C R, et al. Responses of soil microbial biomass to different habitat factors in the chenier of the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6594–6602.
- [45] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 453–461.
- [46] Ruan H H, Zou X M, Scatena F N, et al. Asynchronous fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260: 147–154.
- [47] Sugihara S, Funakawa S, Kilasara M, et al. Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agroecosystems in Tanzania[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44: 80–88.
- [48] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 武夷山自然保护区不同植被类型土壤微生物群落特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2301–2309.
- Wu Z Y, Lin W X, Chen Z F, et al. Characteristics of soil microbial community under different vegetation types in Wuyishan National Nature Reserve, East China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2301–2309.
- [49] Li J W, Wang G S, Mayes M A, et al. Reduced carbon use efficiency and increased microbial turnover with soil warming[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(3): 900–910.
- [50] 王风芹, 田丽青, 宋安东, 等. 华北刺槐林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态[J]. *林业科学*, 2015, 51(3): 16–24.
- Wang F Q, Tian L Q, Song A D, et al. Seasonal dynamics of microbial biomass carbon and nitrogen in soil of *Robinia pseudoacacia* forests and near-naturally restored vegetation in Northern China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(3): 16–24.
- [51] Zhong Z, Makeschin F. Differences of soil microbial biomass and nitrogen transformation under two forest types in central Germany[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283: 287–297.
- [52] 朱瑞. 马鞍山多年冻土地面变形研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- Zhu R. Study on ground deformation of permafrost in Ma Xian Mountain[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [53] 胡宏昌, 王根绪, 王一博, 等. 江河源区典型多年冻土和季节冻土区水热过程对植被盖度的响应[J]. *科学通报*, 2009(2): 242–250.
- Hu H C, Wang G C, Wang Y B, et al. Response of soil heat-water processes to vegetation cover on the typical permafrost and seasonally frozen soil in the headwaters of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009(2): 242–250.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑 臧润国)