

DOI: 10.5846/stxb201912262800

刘放, 吴明辉, 魏培洁, 贾映兰, 陈生云. 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征. 生态学报, 2020, 40(18): 6416-6426.

Liu F, Wu M H, Wei P J, Jia Y L, Chen S Y. Variations of soil microbial biomass carbon and nitrogen in alpine meadow of the Shule River headwater region. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6416-6426.

## 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征

刘 放<sup>1,3</sup>, 吴明辉<sup>1,3</sup>, 魏培洁<sup>1,3</sup>, 贾映兰<sup>1,3</sup>, 陈生云<sup>1,2,\*</sup>

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 疏勒河源冰冻圈与生态环境综合监测研究站, 兰州 730000

2 青海师范大学 高原科学与可持续发展研究院 地理科学学院, 西宁 810008

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 土壤微生物生物量是土壤有机质的活性部分, 是反映土壤质量和碳氮循环机制的重要指标。以青藏高原东北缘疏勒河源高寒草甸为研究对象, 对土壤微生物生物量碳(SMBC, mg/kg)和微生物生物量氮(SMBN, mg/kg)的不同季节(春、夏、秋、冬)和土层(0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 cm)变化特征及其影响因素进行研究。结果表明:(1) 不同土层 SMBC 均表现为春季开始逐渐升高、夏季达到最大值、秋季逐渐降低、冬季值最小, 而 SMBN 春季开始逐渐降低、夏季值最小、秋季逐渐升高、冬季达到最大值。(2) SMBC、SMBN 随着土壤深度的增加而下降, 0—10 cm 层 SMBC、SMBN 显著高于 40—50 cm 层, 且 SMBC、SMBN 0—10 cm 层的季节变幅显著大于 40—50 cm 层。(3) 0—50 cm 土层 SMBC/SMBN 表现为春季开始逐渐升高、夏季达到最大值、秋季逐渐降低、冬季值最小, 其季节变化范围为 8.77—23.59, 处于较高水平。(4) SMBC、SMBN、SMBC/SMBN 的季节和土层变化主要受植被地下生物量和土壤温度的影响。(5) 各土层 SMBC/SOC 均表现为春季开始逐渐升高、夏季达到最大值、秋季逐渐降低、冬季值最小, 而 SMBN/TN 春季开始逐渐降低、夏季值最小、秋季逐渐升高、冬季达到最大值。除夏季土层间无显著差异外, SMBC/SOC 与 SMBN/TN 均表现为 0—10 cm 层显著高于 40—50 cm 层。(6) 0—50 cm 土层 SMBC/SOC 夏秋季显著高于冬春季且其季节变化范围为 0.58%—1.18%, 而 SMBN/TN 秋冬季显著高于夏季且其季节变化范围为 0.39%—0.72%。综上, 季节变化和剖面深度均对 SMBC、SMBN 产生显著影响且 0—10 cm 土层对 SMBC、SMBN 的累积能力最强。

**关键词:** 高寒草甸; 土壤微生物生物量碳; 土壤微生物生物量氮; 季节变化; 土层变化

## Variations of soil microbial biomass carbon and nitrogen in alpine meadow of the Shule River headwater region

LIU Fang<sup>1,3</sup>, WU Minghui<sup>1,3</sup>, WEI Peijie<sup>1,3</sup>, JIA Yinglan<sup>1,3</sup>, CHEN Shengyun<sup>1,2,\*</sup>

1 Cryosphere and Eco-Environment Research Station of Shule River Headwaters, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 School of Geographical Sciences, Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Soil microbial biomass is the active part of soil organic matter and an important indicator of soil quality and carbon and nitrogen cycling mechanism. The different season (spring, summer, autumn and winter) and soil layer (0—10, 10—20, 20—30, 30—40 and 40—50 cm) variations of soil microbial biomass carbon (SMBC, mg/kg) and microbial biomass nitrogen (SMBN, mg/kg) and their influencing factors were studied in alpine meadow of the Shule River headwater region in the northeast margin of Qinghai-Tibet Plateau. The results showed that (1) the SMBC of different soil layers increased gradually in spring, peaked in summer, decreased in autumn, and reached the minimum value in winter. While

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41690142, 41871064); 青海省重点研发与转化计划项目(2020-SF-146); 青海省“高端创新人才千人计划”高层次人才项目

收稿日期: 2019-12-26; 修订日期: 2020-08-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sychen@lzb.ac.cn

the SMBN decreased gradually in spring, reached the minimum value in summer, increased in autumn, and peaked in winter. (2) Both SMBC and SMBN decreased with the increase of soil depth. The 0—10 cm layer of SMBC and SMBN was significantly higher than the 40—50 cm layer. The season variations of SMBC and SMBN in the 0—10 cm layer was also higher than those in the 40—50 cm layer. (3) The SMBC/SMBN in the 0—50 cm layers increased gradually in spring, peaked in summer, decreased in autumn, and reached the minimum value in winter. Its season variation range was 8.77—23.59, which was at a relatively high level. (4) The season and layer variations of SMBC, SMBN and SMBC/SMBN were mainly influenced by belowground biomass of vegetation and soil temperature. (5) The SMBC/SOC in different soil layers increased gradually in spring, peaked in summer, decreased in autumn, and reached the minimum value in winter. While the SMBN/TN decreased gradually in spring, reached the minimum value in summer, increased in autumn, and peaked in winter. Except that there was no significant difference in soil layer variation in summer, SMBC/SOC and SMBN/TN showed that the 0—10 cm layer was significantly higher than the 40—50 cm layer. (6) In the 0—50 cm layers, SMBC/SOC was significantly higher in summer and autumn than that in winter and spring. Its season variation range was 0.58%—1.18%, while SMBN/TN was significantly higher in autumn and winter than in summer and its season variation range was 0.39%—0.72%. In conclusion, the variations of season and profile depth could affect SMBC and SMBN contents significantly. The 0—10 cm soil layer has the strongest accumulation ability on SMBC and SMBN.

**Key Words:** alpine meadow; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; season variation; soil layer variation

土壤微生物生物量是指除植物根系和体积大于 $5\times10^3\text{ }\mu\text{m}^3$ 土壤动物以外的土壤中所有活有机体的量<sup>[1]</sup>。常用土壤微生物生物量和活性表征土壤微生物数量及其功能<sup>[2]</sup>,土壤微生物生物量主要反映了土壤微生物的重量或质量。虽然土壤微生物生物量碳氮仅占有机质中的很小比例,但却是最为活跃的部分<sup>[3]</sup>,影响着土壤有机质的转化且能敏感的指示土壤理化性状的变化,可准确及时地反映土壤质量<sup>[4]</sup>。此外,土壤微生物生物量与土壤有机质的比率可作为指示土壤碳动态的数量指标<sup>[5]</sup>。

气候、土壤和植被因子会对土壤微生物生物量产生显著影响,不同区域生态系统中气候、土壤和植被不同,土壤微生物生物量也有较大差异。由于植物的季节性生长及有机质季节性的回归土壤(植物和动物的残留物是形成土壤有机质的主要生物输入物,秋冬季节大量残留复合物进入土壤,被微生物分解形成土壤有机质),使土壤微生物生物量碳氮也具有季节动态<sup>[6]</sup>,其季节变化与环境因子以及植物生理特征密切相关<sup>[7]</sup>。另外,水热条件的季节变化会影响土壤微生物生物量碳氮的周转、植物对养分的利用以及养分的有效性<sup>[8]</sup>。早期土壤微生物生物量碳氮的研究主要侧重在森林、草地、农田等土壤肥力方面,随后逐渐深入到其对自然因素和人类活动响应及其与生态系统功能关系等方面。如:土壤微生物生物量碳氮和有机质动态的关系<sup>[9]</sup>、土地利用<sup>[10]</sup>对土壤微生物生物量碳氮的影响、不同生态系统中土壤微生物生物量碳氮功能<sup>[11]</sup>等。国内对土壤微生物生物量碳氮的研究主要分布在红壤侵蚀区<sup>[12]</sup>、内蒙古草原<sup>[13]</sup>、黄土丘陵沟壑区<sup>[14]</sup>、长白山<sup>[15]</sup>等地,但对青藏高原多年冻土区高寒草地土壤碳氮变化特征方面的研究还相对较少。为准确认识不同气候区不同生态系统中碳、氮平衡和循环机制,还需对不同生态系统中土壤微生物生物量碳氮进行深入研究。

青藏高原位于高海拔地区,约占中国国土面积的25%左右<sup>[16]</sup>,被称为“世界第三极”,是气候变化的敏感区和脆弱区。疏勒河发源于青藏高原东北缘祁连山西段,是我国河西走廊三大内陆河之一。该流域年均气温低,降水量少,蒸发量大,生态环境脆弱。高寒沼泽草甸、高寒草甸、高寒草原是该流域最为典型的生态系统类型,土壤微生物在这些生态系统土壤碳氮循环过程中发挥重要作用。从土壤微生物生物量角度分析疏勒河源区高寒草甸土壤肥力及土壤生态健康状况对该区域生态功能保护和建设具有重要意义。近年来,有关青藏高原高寒草地土壤微生物生物量的研究虽逐渐增多<sup>[17-19]</sup>,但对多年冻土区高寒草甸的相关报道依然缺乏,研究该区域土壤微生物生物量碳氮的季节动态及其影响因素对理解和预测全球气候变化对多年冻土区高寒草甸

生态系统的影响具有重要意义。因此,本研究以青藏高原东北缘疏勒河源多年冻土区高寒草甸为研究对象,分析土壤微生物生物量碳氮的季节与土层变化特征及其控制因子,以期为了解疏勒河源区高寒草甸土壤微生物特征提供依据,为系统认识区域土壤碳氮循环规律提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验样地位于青藏高原东北缘疏勒河源多年冻土区高寒草甸综合观测场( $98^{\circ}16'14''E$ ,  $38^{\circ}21'17''N$ , 海拔约4014 m), 2010年8月布设该样地, 面积为 $10000\text{ m}^2$ 。气象资料显示, 年均气温为 $-4.8^{\circ}\text{C}$ , 降水量为417 mm(图1), 空气相对湿度为48.1%, 总辐射为 $204.5\text{ W/m}^2$ , 干冷多风, 属于大陆性干旱荒漠气候<sup>[20]</sup>。多年冻土类型按其稳定性划分属于亚稳定型多年冻土, 土壤类型为简育干润均腐土。植被类型为高寒草甸, 覆盖度约40%, 代表性植物有波伐早熟禾(*Poa poophagorum*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮生嵩草(*K. humilis*)、柔软紫菀(*Aster flaccidus*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、沙生风毛菊(*Saussurea arenaria*)、西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)和青藏苔草(*Carex moorcroftii*)等。

### 1.2 环境因子监测和土壤样品采集

采用HMP155A型温湿度传感器(Vaisala, 芬兰)测定气温和相对湿度, Hydra-Probe II型土壤传感器(Stevens, 美国)测定土壤温度、含水量和盐分, 上述传感器连接至CR1000型数据采集器(Campbell, 美国), 每10 min记录一次数据。采集土壤样品的时间为2013年4月底和5月初、6月底和8月初、9月底和10月初和12月底, 分别表征为春季、夏季、秋季和冬季。在样地内随机选取3个样方( $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ ), 将各样方内的植物用剪刀齐地剪除, 然后用内半径为2.75 cm的土钻由地表到深层分为5层分别取样(0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 cm)<sup>[20]</sup>, 每层取2份土样。剔除土样中植物根系和石块后, 分别用自封袋装好, 一份放入4℃冰箱中冷藏, 用于测定土壤微生物生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)、土壤微生物生物量氮(Soil microbial biomass nitrogen, SMBN)、pH值和氧化还原电位; 另一份自然风干, 充分研磨后过筛, 用于测定土壤全氮和有机碳含量。

### 1.3 分析方法

土壤有机碳和全氮含量分别用重铬酸钾氧化-外加热法(GB7857-87)和半微量开氏法(GB7173-87)测定。植物地下生物量测定是将地下生物量样品装入土筛, 用水洗掉土壤部分, 并去除石块和其他杂物, 然后同地上生物量样品一起放入烘箱烘干至恒重, 最后称重(精度为0.01 g)测得生物量数据。SMBC和SMBN采用氯仿熏蒸浸提法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据处理

数据处理和统计采用Excel 2010和SPSS 24.0软件分析, Origin 8.5作图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)及最小显著性差异法(Least-Significant Difference, LSD)检验SMBC、SMBN季节和土层变化的差异, 用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验季节和土层变化及其交互作用对SMBC、SMBN的影响。用Pearson相关和逐步回归分析土壤环境因子与SMBC、SMBN的相互关系及其影响因素。

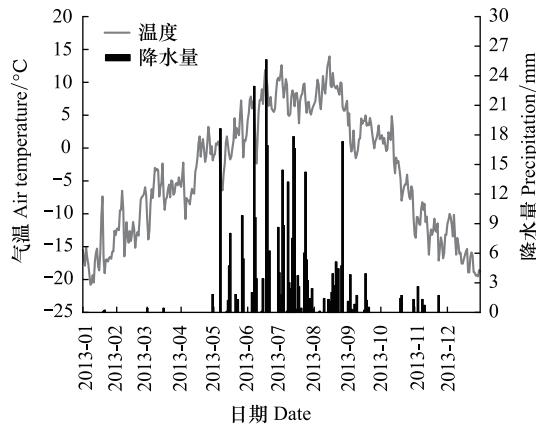


图1 气温和降水量日均变化(2013年样地实测)

Fig.1 Mean daily variations of air temperature and precipitation  
(Field measurement in 2013)

## 2 结果分析

### 2.1 SMBC 和 SMBN 的变化特征

如图 2 所示,不同土层 SMBC 均具有明显的季节变化规律,即春季开始逐渐升高,夏季达到最大值,秋季逐渐降低,冬季值最小。0—10、20—30 cm 和 40—50 cm 层不同季节间均无显著差异,而 10—20 cm 层 SMBC 夏季与冬季有显著差异,30—40 cm 层 SMBC 夏季与秋、冬季均有显著差异。季节变幅方面,0—10 cm 为 165.11—257.52 mg/kg、10—20 cm 为 83.48—183.93 mg/kg、20—30 cm 为 33.5—96.06 mg/kg、30—40 cm 为 32.14—67.04 mg/kg、40—50 cm 为 25.08—42.25 mg/kg。可见,0—10 cm 层 SMBC 季节变幅大于其他各层。

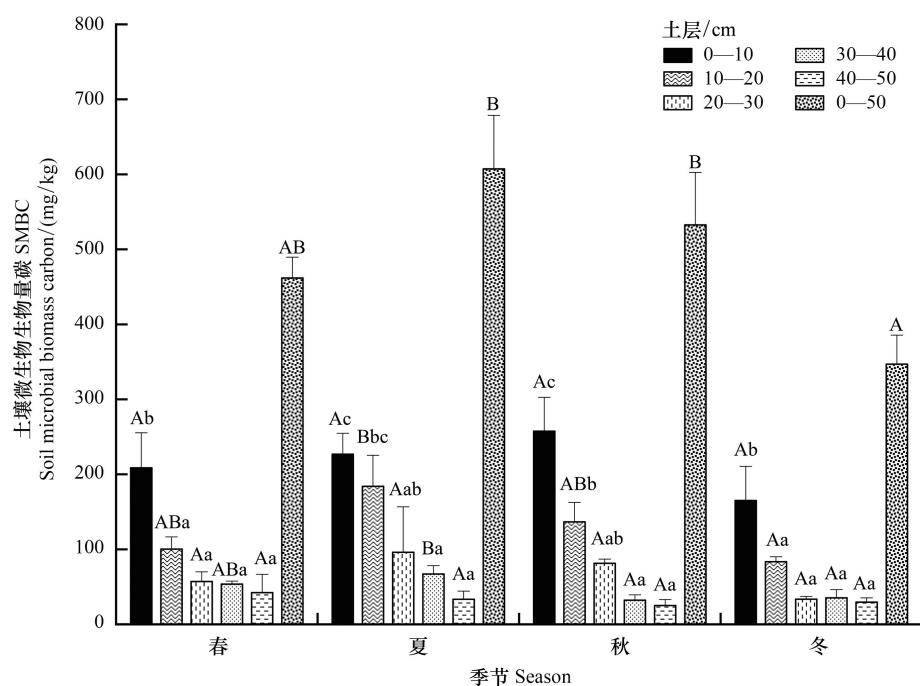


图 2 不同土层土壤微生物生物量碳的季节差异

Fig.2 Season differences of SMBC in different layers

不同大写字母表示同一土层不同季节间差异显著( $P<0.05$ ),不同小写字母表示同一季节不同土层间差异显著( $P<0.05$ )

不同土层 SMBN 也具有明显的季节变化规律(图 3)。0—10、20—30、40—50 cm 层 SMBN 均表现春季开始逐渐降低、夏季值最小、秋季逐渐升高、冬季达到最大值,但其不同季节间均无显著差异,10—20、30—40 cm 层 SMBN 最低值分别出现在春季和秋季,而最大值均在冬季,10—20 cm 层春季和冬季 SMBN 有显著差异而 30—40 cm 层 SMBN 不同季节间无显著差异。季节变幅方面,0—10 cm 为 8.72—16.94 mg/kg、10—20 cm 为 5.49—7.82 mg/kg、20—30 cm 为 5—6.25 mg/kg、30—40 cm 为 2.51—5.1 mg/kg、40—50 cm 为 1.96—3.83 mg/kg,即 0—10 cm 层 SMBN 季节变幅大于其他各层。

同一季节内,SMBC、SMBN 在 0—50 cm 各土层上均呈现降低趋势,其中 0—10 cm 层显著高于 20—30、30—40、40—50 cm 三层。

### 2.2 SMBC/SMBN 的变化特征

如图 4 所示,不同土层土壤微生物生物量碳氮比(SMBC/SMBN)具有明显的季节变化规律。0—10、10—20、20—30 cm 层 SMBC/SMBN 均春季开始逐渐升高、夏季达到最大值、秋季逐渐降低、冬季值最小,0—10 cm 层夏、秋季和冬、春季 SMBC/SMBN 有显著差异而 10—20、20—30 cm 层 SMBC/SMBN 不同季节间均无显著差异。30—40 cm 层春、夏季 SMBC/SMBN 显著高于冬季,40—50 cm 层 SMBC/SMBN 夏季显著高于春、秋和冬。

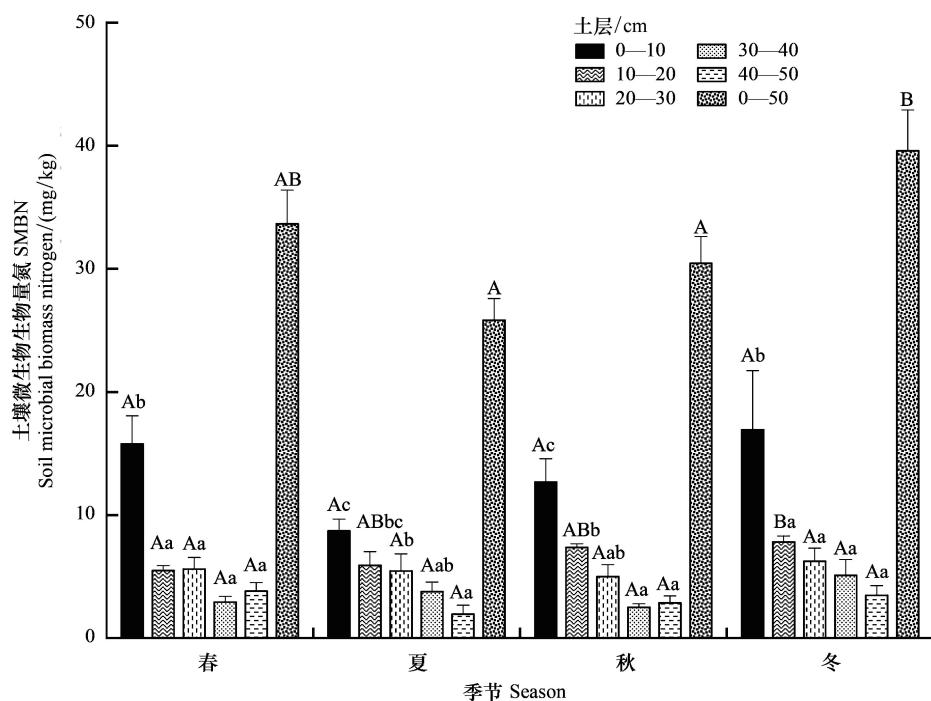


图3 不同土层土壤微生物生物量氮的季节差异

Fig.3 Season differences of SMBN in different layers

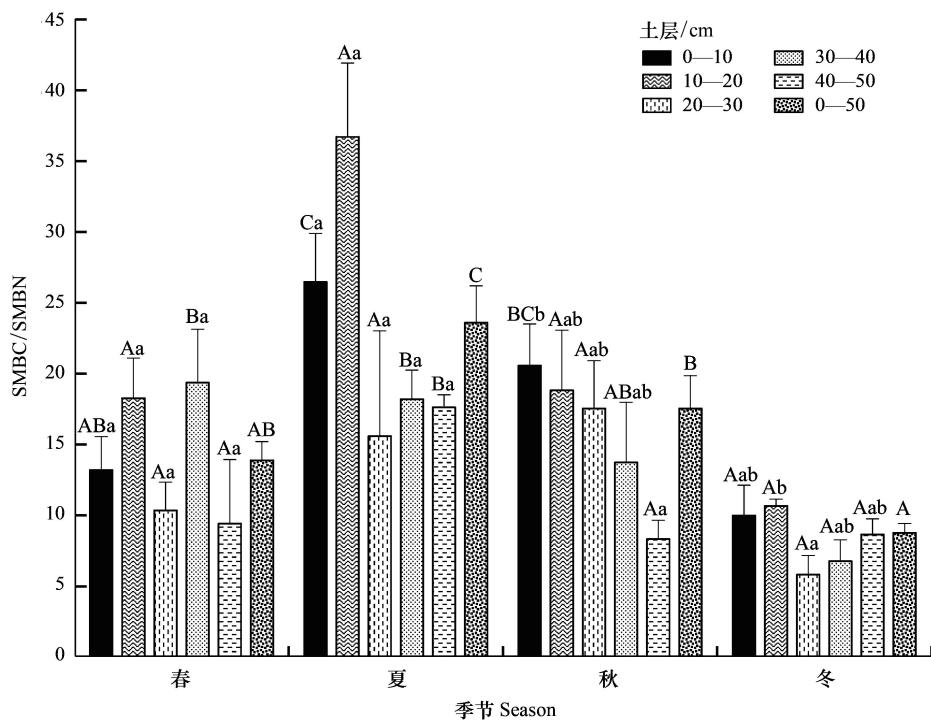


图4 不同土层土壤微生物生物量碳氮比的季节差异

Fig.4 Season differences of SMBC/SMBN in different layers

季。季节变幅方面,0—10 cm 为 9.99—26.47、10—20 cm 为 10.66—36.71、20—30 cm 为 5.82—17.54、30—40 cm 为 6.77—19.36、40—50 cm 为 8.33—17.62,即 0—10 cm 层 SMBC/SMBN 季节变幅大于其他各层,且 0—50 cm 层 SMBC/SMBN 季节变幅为 8.77—23.59。

SMBC/SMBN 在 0—50 cm 各土层的季节变化特征各异。其土层变化春季呈“双峰”型变化模式,夏季呈“N”型变化模式,且春和夏季各层间无显著差异。秋季随着土层加深,SMBC/SMBN 呈下降趋势,冬季呈“N”型变化模式,且秋、冬两季各层有显著差异。

### 2.3 SMBC/SOC、SMBN/TN 的变化特征

土壤微生物生物量碳占有机碳比例(SMBC/SOC)的各土层季节变化趋势与 SMBC 变化趋势相似(图 5)。

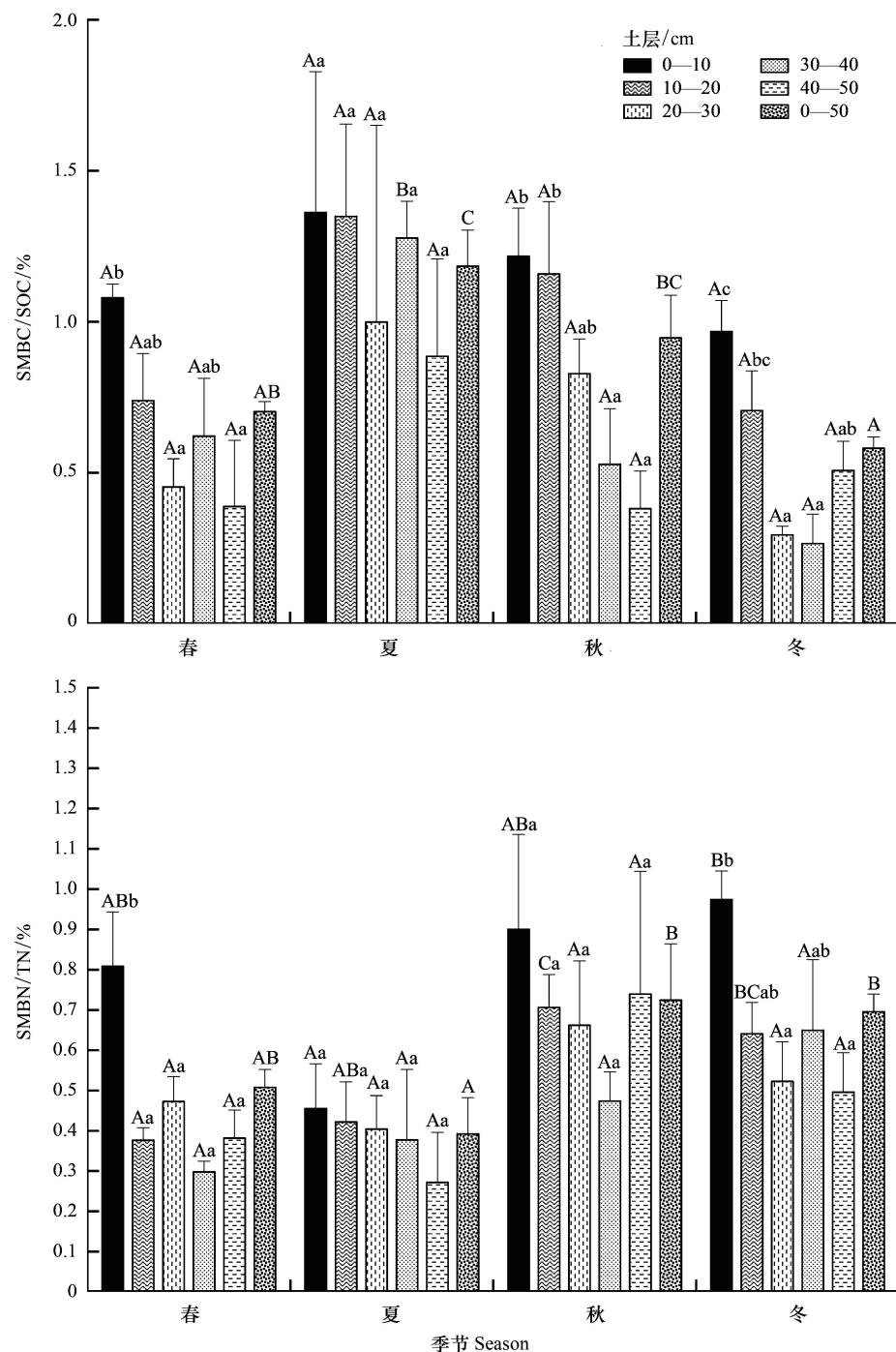


图 5 不同土层土壤微生物生物量碳占有机碳和生物量氮占全氮的比例季节差异

Fig.5 Season differences of SMBC/SOC and SMBN/TN in different layers

SOC: 有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen

0—10 cm 的季节变幅为 0.97%—1.36%、10—20 cm 为 0.71%—1.34%、20—30 cm 为 0.29%—0.99%、30—40 cm 为 0.26%—1.27%、40—50 cm 为 0.38%—0.89%。0—50 cm 层 SMBC/SOC 夏、秋季显著高于冬、春季,且其季节变幅为 0.58%—1.18%。同一季节内随土层加深,SMBC/SOC 大致呈下降趋势。除夏季土层变化无显著差异外,SMBC/SOC 均表现 0—10 cm 层显著高于 40—50 cm 层。

土壤微生物生物量氮占全氮比例(SMBN/TN)的各土层季节变化趋势与 SMBN 变化趋势相似。季节变幅方面,0—10 cm 为 0.46%—0.97%、10—20 cm 为 0.37%—0.71%、20—30 cm 为 0.4%—0.66%、30—40 cm 为 0.29%—0.64%、40—50 cm 为 0.27%—0.74%。0—50 cm 层 SMBN/TN 秋、冬季显著高于夏季,且其季节变幅为 0.39%—0.72%,而 SMBC/SOC 季节变幅大于 SMBN/TN。同一季节内随土层加深,SMBN/TN 各土层变化特征与 SMBC/SOC 的变化特征一致。

## 2.4 影响因素

由表 1 可知,不同季节的 SMBC、SMBN 有显著差异( $P<0.05$ ),SMBC/SMBN 有极显著差异( $P<0.001$ );不同土层的 SMBC、SMBN 有极显著差异( $P<0.001$ ),SMBC/SMBN 有显著差异( $P<0.05$ )。季节和土层变化不存在显著的交互效应,对 SMBC、SMBN 和 SMBC/SMBN 的差异没有贡献。

表 1 土壤微生物生物量碳、氮及其比值的方差分析结果

Table 1 The result of ANOVA for SMBC, SMBN and their ratio

因子 Factor	SMBC			SMBN			SMBC/SMBN		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
季节 Season	3	3.318	0.029	3	3.040	0.040	3	8.467	<0.001
土层 Soil layer	4	30.036	<0.001	4	32.257	<0.001	4	3.157	0.024
季节×土层 Season×Soil layer	12	0.708	0.734	12	1.178	0.331	12	0.918	0.538

SMBC:土壤微生物生物量碳 Soil microbial biomass carbon; SMBN:土壤微生物生物量氮 Soil microbial biomass nitrogen; SMBC/SMBN:土壤微生物生物量碳氮比

季节变化而言,SMBC 与土壤含水率(SWC)、土壤盐分(SS)、pH 值显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤温度(ST)有极显著正相关关系( $P<0.01$ ),但与地下生物量(BGB)、有机碳(SOC)、全氮(TN)、氧化还原电位(Eh)无显著相关关系。SMBN 与 ST、SS、pH 值显著负相关( $P<0.05$ ),与其他土壤环境因子无显著相关关系。SMBC/SMBN 与 ST、SWC、pH 值显著正相关( $P<0.05$ ),而与其他土壤环境因子无显著相关关系。逐步回归分析表明,SMBC、SMBN、SMBC/SMBN 季节变化的驱动因子分别为 BGB、BGB 和 ST、ST(表 2)。

表 2 季节变化上的土壤微生物生物量碳、氮及其比值与土壤环境因子相关性及回归分析

Table 2 Correlations and regression analyses between SMBC, SMBN, their ratio with season variations and soil environment factors, respectively

相关系数 Correlation	BGB	SOC	TN	ST	SWC	SS	pH	Eh
SMBC	-0.057	-0.582	0.268	0.993 **	0.957 *	0.973 *	0.985 *	-0.809
SMBN	-0.074	0.711	-0.238	-0.961 *	-0.939	-0.976 *	-0.972 *	0.760
SMBC/SMBN	-0.304	-0.389	0.162	0.979 *	0.967 *	0.949	0.975 *	-0.904
逐步回归 Stepwise regression								
回归方程 Regression equation								
SMBC=59.543+0.056BGB								
SMBN=4.314+0.003BGB-0.192ST								
SMBC/SMBN=17.514+0.748ST								
调整后 Adjusted R <sup>2</sup>								
0.525 **								
0.605 **								
0.140 *								

BGB:地下生物量 Belowground biomass; SOC:有机碳 Soil organic carbon; TN:全氮 Total nitrogen; ST:土壤温度 Soil temperature; SWC:含水率 Soil water content; SS:土壤盐分 Soil salinity; Eh:氧化还原电位 Redox potential; \* 表示相关性达到显著水平( $P<0.05$ ), \*\* 表示相关性达到极显著水平( $P<0.01$ )

随土层变化,SMBC 与 SOC、TN、ST 有极显著正相关关系( $P<0.01$ ),与 BGB 显著正相关( $P<0.05$ ),与 pH

值显著负相关( $P<0.05$ )，而与 SWC、SS、Eh 无显著相关关系。SMBN 与 BGB、SOC、TN、ST 有极显著正相关关系( $P<0.01$ )，而与其他土壤环境因子无显著相关关系。SMBC/SMBN 与土壤环境因子之间无显著相关关系。逐步回归分析表明，SMBC、SMBN、SMBC/SMBN 土层变化的驱动因子分别为 ST、BGB、ST(表 3)。

表 3 随土层变化的土壤微生物生物量碳、氮及其比值与土壤环境因子相关性及回归分析

Table 3 Correlations and regression analyses between SMBC, SMBN, their ratio with layer variations and soil environment factors, respectively

相关系数 Correlation	BGB	SOC	TN	ST	SWC	SS	pH	Eh
SMBC	0.935 *	0.989 **	0.985 **	0.994 **	-0.693	-0.700	-0.905 *	0.802
SMBN	0.969 **	0.988 **	0.983 **	0.967 **	-0.756	-0.767	-0.846	0.675
SMBC/SMBN	0.010	0.120	0.114	0.251	0.094	0.139	-0.331	0.641
逐步回归 Stepwise regression								调整后 $R^2$
回归方程 Regression equation								0.983 **
$SMBC = -71.870 + 116.262ST$								0.919 **
$SMBN = 3.747 + 0.003BGB$								0.898 **
$SMBC/SMBN = 13.845 + 4.835ST$								

\* 表示相关性达到显著水平( $P<0.05$ )，\*\* 表示相关性达到极显著水平( $P<0.01$ )

### 3 讨论

#### 3.1 SMBC、SMBN 的变化特征

植被生态系统土壤微生物生物量受复杂的生物地球化学过程影响，导致不同季节、不同土层 SMBC、SMBN 存在一定差异<sup>[22]</sup>。众多研究结果也表明，SMBC、SMBN 受季节变化、土层变化影响显著<sup>[23-25]</sup>，然而其结果并没有统一的规律。疏勒河源多年冻土区高寒草甸 SMBC 与 SMBN 的季节变化有所差异，总体上 SMBC 春季开始逐渐升高，夏季达到最大值，秋季逐渐降低，冬季值最小，这与以往研究结果一致<sup>[26-27]</sup>。夏季适宜的土壤温度、湿度为土壤微生物的繁殖提供了良好的代谢环境，从而增加了 SMBC，冬季较低的土壤温度、湿度抑制了土壤微生物的生长与繁殖，削弱了其代谢功能，从而降低了 SMBC<sup>[4]</sup>。而 SMBN 总体上春季开始逐渐降低、夏季值最小、秋季逐渐升高、冬季达到最大值，这与 Saratchandra 等<sup>[28]</sup>结果一致，峰值出现在冬季可能与秋季大量凋落物的输入以及碳水化合物由地表不断向地下转移有关，为冬季土壤微生物提供了较丰富的代谢底物，尽管该区冬季气温很低，但由于积雪覆盖对土壤的保温作用，使土壤微生物仍具活性继而生长和繁殖；Wardle<sup>[3]</sup>发现，在生长旺季植物和土壤微生物对养分的利用存在激烈的竞争关系，可导致生长旺季微生物量发生变化，夏季 SMBN 最低，可能是植物进入生长旺季，需从土壤中摄取大量营养物质，从而限制了土壤微生物对养分的可利用性。但研究区 SMBN 季节变化特征与 Devi 和 Yadava<sup>[4]</sup>、Singh 等<sup>[8]</sup>的研究结果不同，可能是由于不同研究区域气候、土壤、植被条件的不同，导致研究结果有差异。

表层 SMBC、SMBN 季节变幅较深层土壤更大，可能是表层土壤物理环境变化较剧烈、底物输入波动较大、植物根系与土壤微生物对养分的竞争较激烈等原因<sup>[29]</sup>，从而使表层土壤微生物生物量季节变幅更大。SMBC、SMBN 均随土层深度的增加而显著降低，与 Wen 等<sup>[30]</sup>研究结果一致，且 0—10 cm 层 SMBC、SMBN 显著高于 20—30、30—40、40—50 cm，这反映了土壤微生物的垂直分布格局。形成这种垂直分布格局的原因可能是表层土壤水热、通气状况良好、有机物质丰富且有较多的碳源输入(凋落物分解、根系分泌物形成)，为微生物提供充足的能源，而中层和深层土壤微生物生物量主要受营养元素在土壤中长期积累及该土层根系周转的影响<sup>[31]</sup>，因此，SMBC、SMBN 均随土层深度的增加而降低。

#### 3.2 SMBC/SMBN 的变化特征

有研究表明，细菌的碳氮比为 3—5 之间，而真菌的碳氮比为 4—15 之间<sup>[32]</sup>，且相较于细菌，真菌往往能适应较差的土壤环境。因而，SMBC/SMBN 在一定程度上不仅可以反映土壤中真菌和细菌的比例，同时也可以说说明土壤环境状况<sup>[33]</sup>。同样，季节变化和土层变化对 SMBC/SMBN 均有显著影响。研究区 SMBC/SMBN

季节变化介于 5.82—36.71,与杨成德等<sup>[34]</sup>研究结果(3.19—20.55)有所差异,说明疏勒河源多年冻土区高寒草甸土壤微生物群落中,真菌占优势。总体上 SMBC/SMBN 春季开始逐渐升高、夏季达到最大值、秋季逐渐降低、冬季值最小,可能由于夏季土壤含水率较高,同时有地表凋落物的输入,促进了土壤中真菌的大量繁殖,此时高寒草甸固碳能力达到最高<sup>[35]</sup>;而冬季 SMBC/SMBN 偏低,这可能是由于冬季植物根系分泌了能促进土壤中细菌繁殖的物质,导致 SMBC/SMBN 偏低<sup>[36]</sup>。0—10 cm 层 SMBC/SMBN 的季节变幅较 40—50 cm 层更大,即 40—50 cm 层的固碳能力较 0—10 cm 层更稳定,这与 Bailey 等<sup>[35]</sup>研究结果一致。不同季节 SMBC/SMBN 土层变化特征各异,春季和夏季,10—20 cm 层 SMBC/SMBN 均高于 0—10 cm 层,可能由于春季积雪融水和夏季降雨增加,淋溶作用使营养物质渗入地表下层,下层土壤植物根系发达,从而使大量菌根真菌繁殖,导致 SMBC/SMBN 升高<sup>[37]</sup>。而 SMBC/SMBN 在秋季随土层深度的增加而降低,在冬季则呈“N”型变化趋势,这与魏卫东和刘育红<sup>[38]</sup>研究结果不同,可能是由于不同研究区域气候、土壤、植被条件的不同,导致研究结果有差异。SMBC/SMBN 的季节和土层差异说明了青藏高原环境的特殊性,其土壤中可能存在独特的微生物,即该区域有很多需进一步研究的特殊微生物群落。

### 3.3 SMBC/SOC、SMBN/TN 的变化特征

土壤微生物生物量与土壤养分的比值可以反映土壤养分向土壤微生物生物量的周转效率、土壤养分损失,且其在表征土壤变化过程时比单独使用土壤微生物生物量或土壤养分更有效<sup>[39]</sup>。研究区 SMBC 对 SOC 贡献率在夏季最高,冬季最低;而 SMBN 对 TN 贡献率在秋季最高,夏季最低,这与杨成德等<sup>[34]</sup>研究结果相同。SMBC 对 SOC 贡献率介于 0.58%—1.18%,而 SMBN 对 TN 贡献率介于 0.39%—0.72%,与杨成德等<sup>[34]</sup>在东祁连山高寒草地的 SMBC/SOC(0.16%—0.84%)相比略高,与 SMBN/TN(0.48%—1.93%)相比略低;低于 Liao 和 Xie<sup>[40]</sup>研究植被覆盖下的 SMBC/SOC(2%—7%),且低于 Devi 和 Yadava<sup>[4]</sup>研究混合森林系统的 SMBN/TN(2%—7.8%),造成这种差异的原因可能是研究区气候恶劣,海拔较高,微生物活性较低。同一季节随土层加深,SMBC/SOC、SMBN/TN 均大致呈下降趋势,即 0—10 cm 层 SMBC 对 SOC 贡献率、SMBN 对 TN 贡献率均高于 40—50 cm 层,表明 40—50 cm 层对 SMBC、SMBN 的累积能力弱于 0—10 cm 层,这与吴建国和艾丽<sup>[2]</sup>研究结果一致。

### 3.4 影响因素分析

影响 SMBC、SMBN 的因素复杂多样。季节变化而言,SMBC 与 ST 呈极显著正相关关系,即研究区 ST 是影响 SMBC 季节变化的主要因素之一,且 SMBC 与 SWC、SS、pH 呈显著正相关关系,说明 SWC、SS、pH 可能也是影响 SMBC 季节变化的重要因素,这与前人的研究结果一致<sup>[41-42]</sup>。但 SMBN 与 ST、SS、pH 均呈显著负相关关系,这与 Arnold 等<sup>[43]</sup>研究结果有差异,表明土壤微生物生物量受 ST、SS、pH 的影响具有一定复杂性,不同研究区得到的研究结果可能不同。SMBC/SMBN 与 ST、SWC、pH 呈显著正相关关系,其季节变化趋势受 ST、SWC、pH 季节变化的综合影响。

随土层变化,SMBC、SMBN 均与 SOC、TN、ST 呈极显著正相关关系,这与前人研究结果一致<sup>[44-45]</sup>,由此可见,除 ST 外,不同土层土壤养分状况的差异可能也是影响 SMBC、SMBN 变化的重要因素,有机质含量越高可为微生物新陈代谢提供的物质和能量来源越充足,SOC、TN 随土壤深度增加而降低,这与 SMBC、SMBN 的土层变化趋势一致。SMBC 与 pH 呈显著负相关关系,这与柴雪思等<sup>[46]</sup>研究结果一致,但与 Ma 等<sup>[47]</sup>在三角洲湿地的研究结果不完全相同,表明弱酸性环境可能更有利微生物的繁殖,但 pH 值对 SMBC 的影响因研究区不同可能有差异。BGB 与 SMBC 呈显著正相关关系,与 SMBN 呈极显著正相关关系,说明 BGB 也是影响 SMBC、SMBN 在土层变化的重要因素,随土层深度增加,BGB 降低,SMBC、SMBN 也呈下降的趋势。SMBC/SMBN 与土壤环境因子之间未发现显著相关关系,这可能与研究区特殊的土壤环境条件有关。

## 4 结论

疏勒河源多年冻土区高寒草甸 SMBC、SMBN 季节变化范围分别为 346.9—607.25 mg/kg、25.84—

39.59 mg/kg; SMBC 对 SOC 贡献率介于 0.58%—1.18%, SMBN 对 TN 贡献率范围为 0.39%—0.72%, 均处较低水平; SMBC/SMBN 变化范围为 8.77—23.59, 处于较高水平。SMBC、SMBN 均随土层深度的增加而显著降低且 0—10 cm 层 SMBC、SMBN、SMBC/SMBN 季节变幅大于其他各层, 即 40—50 cm 层的固碳能力较 0—10 cm 层更稳定; 随土层加深, SMBC/SOC、SMBN/TN 均大致呈下降趋势, 表明 40—50 cm 层对 SMBC、SMBN 的累积能力弱于 0—10 cm。SMBC、SMBN 的季节和土层变化受 ST、SOC、TN、BGB、pH、SWC、SS 的影响显著, 其中 ST 和 BGB 是 SMBC、SMBN 变化的主要影响因素。

#### 参考文献(References):

- [1] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应. 南京农业大学学报, 1996, 19(4): 45-51.
- [2] 吴建国, 艾丽. 祁连山 3 种典型生态系统土壤微生物活性和生物量碳氮含量. 植物生态学报, 2008, 32(2): 465-476.
- [3] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. Biological Reviews, 1992, 67(3): 321-358.
- [4] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 220-227.
- [5] Insam H, Parkinson D, Domsch K H. Influence of macroclimate on soil microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(2): 211-221.
- [6] Murata T, Tanaka H, Yasue S, Hamada R, Sakagami K, Kurokawa Y. Seasonal variations in soil microbial biomass content and soil neutral sugar composition in grassland in the Japanese Temperate Zone. Applied Soil Ecology, 1999, 11(2/3): 253-259.
- [7] Myers R T, Zak D R, White D C, Peacock A. Landscape-level patterns of microbial community composition and substrate use in upland forest ecosystems. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 359-367.
- [8] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, Srivastava S C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. Nature, 1989, 338(6215): 499-500.
- [9] Alvarez C R, Alvarez R, Grigera M S, Lavado R S. Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(6): 767-773.
- [10] Balota E L, Colozzi-Filho A, Andrade D S, Dick R P. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. Biology and Fertility of Soils, 2003, 38(1): 15-20.
- [11] Merilä P, Strömmér R, Fritze H. Soil microbial activity and community structure along a primary succession transect on the land-uplift coast in western Finland. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1647-1654.
- [12] Tang G Y, Xiao H A, Su Y R, Huang D Y, Liu S L, Huang M, Tong C L, Wu J S. Spatial variation in organic carbon, nutrients and microbial biomass contents of paddy soils in a hilly red soil region. Frontiers of Agriculture in China, 2007, 1(4): 424-429.
- [13] 吴永胜, 马万里, 李浩, 吕桂芬, 卢萍. 内蒙古退化荒漠草原土壤有机碳和微生物生物量碳含量的季节变化. 应用生态学报, 2010, 21(2): 312-316.
- [14] 胡婵娟, 刘国华, 陈利顶, 吴雅琼. 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. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2227-2232.
- [15] 王宁, 杨雪, 李世兰, 王楠楠, 韩冬雪, 冯富娟. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态. 林业科学, 2016, 52(1): 150-158.
- [16] 李文杰, 袁潮霞, 赵平. 青藏高原地区积雪及其变化的不确定性: 3 种积雪观测资料的对比分析. 气象科学, 2018, 38(6): 719-729.
- [17] Wang X X, Dong S K, Gao Q Z, Zhou H K, Liu S L, Su X K, Li Y Y. Effects of short-term and long-term warming on soil nutrients, microbial biomass and enzyme activities in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau of China. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 76: 140-142.
- [18] 何芳兰, 金红喜, 王锁民, 韩生慧, 曾荣, 马俊梅. 沙化对玛曲高寒草甸土壤微生物数量及土壤酶活性的影响. 生态学报, 2016, 36(18): 5876-5883.
- [19] Wang C T, Wang G X, Wang Y, Zi H B, Lerdau M, Liu W. Effects of long-term experimental warming on plant community properties and soil microbial community composition in an alpine meadow. Israel Journal of Ecology and Evolution, 2017, 63(1): 85-96.
- [20] 陈生云, 刘文杰, 叶柏生, 杨国靖, 宜树华, 王发刚, 秦翔, 任贾文, 秦大河. 疏勒河上游地区植被物种多样性和生物量及其与环境因子的关系. 草业学报, 2011, 20(3): 70-83.
- [21] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [22] Durán J, Morse J L, Groffman P M, Campbell J L, Christenson L M, Driscoll C T, Fahey T J, Fisk M C, Mitchell M J, Templer P H. Winter climate change affects growing-season soil microbial biomass and activity in northern hardwood forests. Global Change Biology, 2014, 20(11):

3568-3577.

- [23] Edwards K A, Jefferies R L. Inter-annual and seasonal dynamics of soil microbial biomass and nutrients in wet and dry low-Arctic sedge meadows. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 83-90.
- [24] Patel K, Kumar J I N, Kumar R N, Bhoi R K. Seasonal and temporal variation in soil microbial biomass C, N and P in different types land uses of dry deciduous forest ecosystem of Udaipur, Rajasthan, Western India. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2010, 8(4): 377-390.
- [25] Singh J S, Singh D P, Kashyap A K. Microbial biomass C, N and P in disturbed dry tropical forest soils, India. *Pedosphere*, 2010, 20(6): 780-788.
- [26] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉, 徐长林, 薛莉. 东祁连山高寒灌丛草地土壤微生物量及土壤酶季节性动态特征. *草业学报*, 2011, 20(6): 135-142.
- [27] 丁玲玲, 龙瑞军, 祁彪, 陈秀蓉, 尚占环, 徐长林. 东祁连山高寒草地土壤微生物碳氮研究. *甘肃农业大学学报*, 2005, 40(5): 639-645.
- [28] Sarathchandra S U, Perrott K W, Upsdell M P. Microbiological and biochemical characteristics of a range of New Zealand soils under established pasture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1984, 16(2): 177-183.
- [29] Zhu S Y, Zhou B, Mao Z J, Wang X W, Sun Y F. Space-time dynamics of fine root biomass of six forests in Maoershan forest region. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(6): 13-19.
- [30] Wen L, Lei P F, Xiang W H, Yan W D, Liu S G. Soil microbial biomass carbon and nitrogen in pure and mixed stands of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* differing in stand age. *Forest Ecology and Management*, 2014, 328: 150-158.
- [31] Thakur M P, Mileu A, Manning P, Niklaus P A, Roscher C, Power S, Reich P B, Scheu S, Tilman D, Ai F X, Guo H Y, Ji R, Pierce S, Ramirez N G, Richter A N, Steinauer K, Strecker T, Vogel A, Eisenhauer N. Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. *Global Change Biology*, 2015, 21(11): 4076-4085.
- [32] 刘宝, 吴文峰, 林思祖, 林开敏. 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. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1901-1910.
- [33] Fauci M F, Dick R P. Soil microbial dynamics: short-and long-term effects of inorganic and organic nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3): 801-806.
- [34] 杨成德, 龙瑞军, 薛莉, 陈秀荣, 徐长林. 东祁连山高寒草本草地土壤微生物量及酶的季节动态. *中国草地学报*, 2014, 36(2): 78-84.
- [35] Bailey V L, Smith J L, Bolton Jr H. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 997-1007.
- [36] Moore J M, Klose S, Tabatabai M A. Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(3/4): 200-210.
- [37] 郭良栋, 田春杰. 菌根真菌的碳氮循环功能研究进展. *微生物学通报*, 2013, 40(1): 158-171.
- [38] 魏卫东, 刘育红. 不同退化程度高寒草地土壤微生物量碳特征分析. *西北农业学报*, 2014, 23(2): 205-210.
- [39] Filep T, Draskovits E, Szabó J, Koós S, László P, Szalai Z. The dissolved organic matter as a potential soil quality indicator in arable soils of Hungary. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(7): 479.
- [40] Liao M, Xie X M. Effect of heavy metals on substrate utilization pattern, biomass, and activity of microbial communities in a reclaimed mining wasteland of red soil area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 66(2): 217-223.
- [41] 衡涛. 高寒草甸土壤碳和氮及微生物生物量碳和氮对温度和降水量变化的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [42] 李红琴. 马衔山多年冻土与季节冻土区土壤微生物量及酶活性的季节动态[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [43] Arnold S S, Fernandez I J, Rustad L E, Zibilske L M. Microbial response of an acid forest soil to experimental soil warming. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30(3): 239-244.
- [44] Feng W T, Zou X M, Schaefer D. Above-and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 978-983.
- [45] Allen A S, Schlesinger W H. Nutrient limitations to soil microbial biomass and activity in loblolly pine forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(4): 581-589.
- [46] 柴雪思, 雷利国, 江长胜, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊. 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨. *环境科学*, 2016, 37(8): 2979-2988.
- [47] Ma Z W, Zhang M X, Xiao R, Cui Y, Yu F H. Changes in soil microbial biomass and community composition in coastal wetlands affected by restoration projects in a Chinese delta. *Geoderma*, 2017, 289: 124-134.