

增温对高寒灌丛根际和非根际土壤微生物生物量碳氮的影响

马志良^{1,2} 赵文强² 刘 美^{2,3} 刘 庆^{2*}

(¹西华师范大学生命科学学院, 四川南充 637009; ²中国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 成都 610041; ³绵阳师范学院, 生态安全与保护四川省重点实验室, 四川绵阳 621000)

摘 要 本文对青藏高原东缘窄叶鲜卑花高寒灌丛生长季根际和非根际土壤微生物生物量碳和氮对增温的响应进行研究.结果表明:窄叶鲜卑花灌丛生长季初期根际和非根际土壤微生物生物量碳和氮均显著高于生长季中期和末期.在多数时期,增温对根际土壤微生物生物量碳和氮的影响不显著.在非根际土壤中,增温对土壤微生物生物量碳和氮的影响因不同生长季节而不同:增温使生长季初期土壤微生物生物量碳显著降低,而使土壤微生物生物量氮显著提高;生长季中期增温使土壤微生物生物量碳和氮显著提高;而在生长季末期增温对土壤微生物生物量碳和氮的影响不显著.土壤微生物生物量碳和氮的根际效应也因不同生长季节而不同:土壤微生物生物量碳和氮在生长季初期表现为负根际效应,而在生长季中期表现为正根际效应;在生长季末期,土壤微生物生物量碳表现为负根际效应,土壤微生物生物量氮则表现为正根际效应.增温在生长季初期使土壤微生物生物量碳和氮的根际效应显著提高,而在生长季中期和末期使土壤微生物生物量碳和氮的根际效应降低.本研究初步阐明了气候变暖背景下高寒灌丛根际和非根际土壤生物学过程变化机理.

关键词 高寒灌丛; 增温; 土壤微生物生物量; 根际效应

Effects of warming on microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere and bulk soil in an alpine scrub ecosystem. MA Zhi-liang^{1,2}, ZHAO Wen-qiang², LIU Mei^{2,3}, LIU Qing^{2*} (¹College of Life Science, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China; ²Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, Sichuan Province Key Laboratory of Ecological Restoration Biodiversity Conservation, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; ³Sichuan Province Key Laboratory of Ecological Security and Protection, Mianyang 621000, Sichuan, China).

Abstract: To understand the effects of climate warming on the rhizosphere ecological process in the alpine scrub ecosystem, the responses of microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere and bulk soil to experimental warming were examined in a *Sibiraea angustata* scrubland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. The results showed that the concentrations of microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere and bulk soil in the early growing season were significantly higher than those in the middle and late growing seasons. Experimental warming did not significantly affect the concentrations of microbial biomass carbon and nitrogen of the rhizosphere soil in the most growing seasons. In the bulk soil, however, the effects of experimental warming on the microbial biomass carbon and nitrogen differed among the growing season. Experimental warming

本文由国家重点研发计划项目(2017YFC0505000)、国家自然科学基金项目(31570476)和国家科技基础性工作专项(2015FY110300)资助 This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0505000), the National Natural Science Foundation of China (31570476) and the National Science and Technology Basic Work Project (2015FY110300).

2018-08-12 Received, 2019-02-26 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuqing@cib.ac.cn

significantly decreased microbial biomass carbon but increased microbial biomass nitrogen in the early growing season. In the middle growing season, warming significantly increased both microbial biomass carbon and nitrogen. In the late growing season, there was no significant effect. The rhizosphere effects of soil microbial biomass carbon and nitrogen also differed with the growing season. The rhizosphere effects of microbial biomass carbon and nitrogen were negative in the early growing season but positive in the middle growing season. In the late growing season, there were negative rhizosphere effects of soil microbial biomass carbon and positive rhizosphere effects of soil microbial biomass nitrogen. Furthermore, experimental warming significantly increased the rhizosphere effects of soil microbial biomass carbon and nitrogen in the early growing season, but decreased those in the middle and late growing seasons. These results uncovered the changing mechanism of the biological process in the rhizosphere and bulk soil in the alpine scrub ecosystems under the background of climate warming.

Key words: alpine scrub; warming; soil microbial biomass; rhizosphere effect.

在高寒生态系统中,土壤微生物作为地上和地下生态系统联系的纽带和桥梁,调控着凋落物分解、土壤碳和养分矿化、养分循环等土壤生态过程,在陆地生态系统碳、氮、磷等元素生物地球化学循环过程中发挥着重要作用^[1-2].土壤微生物生物量是土壤有机质组分中最具活力的部分,是土壤碳、氮元素矿化的来源,同时还对土壤养分转化和物质循环起着重要的催化作用^[3].土壤微生物生物量对环境变化非常敏感,全球气候变暖引起的土壤温度、土壤湿度和土壤养分有效性等的微小变化都可能直接或间接地影响土壤微生物的生长、活性和群落结构,进而改变土壤微生物生物量^[4-5].因而,土壤微生物生物量被认为是比土壤总有机碳更可靠的土壤环境变化的指示因子.然而,目前关于气候变暖对土壤微生物生物量的影响并无一致的结论.多数研究表明,土壤温度升高可以提高土壤养分有效性,促进土壤微生物生长、繁殖,土壤微生物生物量也将增加^[6].然而,Fu等^[7]在青藏高原高寒草甸开展的一项研究结果表明,增温导致土壤水分含量显著降低,从而使土壤微生物生物量碳、氮和碳氮比降低.Sorensen等^[8]则发现,土壤增温并不能补偿因土壤冻融而导致的土壤微生物生物量降低.同时,也有研究报道全球气候变暖并未显著影响土壤微生物生物量^[9].

根际是指植物根系周围、受根系影响的数毫米内的区域^[10],是进行复杂的生物地球化学循环最活跃的区域,同时也是土壤-植物根系-微生物三者相互作用的场所和各种物质循环和能量流动的门户^[11].根际由于源源不断的根系分泌物输入、死亡根细胞脱落和裂解,导致根际土壤有效养分显著高于非根际土壤,根际土壤微生物活性和群落结构也和非根际土壤显著不同,即存在明显的“根际效

应”^[12].根际是土壤-植物根系-微生物之间进行物质交换的活跃界面,因此,清楚地认识根际生态过程对于深入理解三者之间的相互关系至关重要,根际生态过程也成为近年来地下生态学研究领域中的热点和难点.全球气候变暖可能导致植物根系分泌物输入增加^[13]、细根死亡周转加速^[14],进而深刻改变植物根际土壤生态过程.然而,目前的研究多关注植物根际和非根际土壤养分含量和有效性差异^[11,15],对于土壤微生物介导的根际生态过程及其对全球气候变暖的响应认识仍明显不足.因此,开展气候变暖背景下根际和非根际土壤微生物过程研究,对于深入了解植物根际生态过程具有重要意义.

分布在青藏高原东缘的高寒灌丛生态系统是响应全球气候变暖最为敏感的区域之一^[16].气候变暖正在深刻地改变该区域植物群落结构和分布面积.例如,该区域高寒灌丛分布上限明显上升,且其分布面积仍在逐步扩张^[17].气候变暖将会对该区域植物根际生态过程产生深刻影响,但缺乏必要关注.窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)灌丛是青藏高原特有的、具有代表性的典型高寒灌丛类型,垂直分布于海拔3000~4000 m,在川西岷江源区具有较高的群落稳定性^[18].目前,在该区域已开展增温和植物去除对灌丛土壤微生物群落结构的影响研究^[19],关于根际和非根际土壤微生物生物量对增温的响应研究尚未涉及.这严重限制了对气候变暖背景下高寒灌丛生态系统植物根际土壤生态过程的认识.

因此,本研究以青藏高原东缘窄叶鲜卑花高寒灌丛为对象,进行模拟增温、对照试验,研究根际和非根际土壤微生物生物量碳和氮的季节动态及其对增温的响应,为更清晰地认识全球气候变暖背景下高寒灌丛生态系统植物根际生态过程提供基础理论

依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院设在四川省阿坝州松潘县川主寺镇卡卡沟的高寒灌丛定位研究点,地理坐标为 32.98° N, 103.67° E,海拔 3300 m,距离岷江源 3.5 km.地势低平,坡度约 20°.气候类型为典型的高原山地气候,昼夜温差大.年平均温度为 4.8 °C,年降水量 693 mm,且主要集中于 5—8 月.季节性冻土期长达 5 个月.土壤类型为雏形土.研究区域内灌木层主要包括窄叶鲜卑花、山生柳 (*Salix oritrepha*)、高山绣线菊 (*Spiraea alpina*)、金露梅 (*Potentilla fruticosa*)、刺黑珠 (*Berberis sargentiana*) 等;草本层主要包括羊茅 (*Festuca ovina*)、红花绿绒蒿 (*Meconopsis punicea*)、条纹龙胆 (*Gentiana striata*)、黄花野青茅 (*Deyeuxia flavens*)、钟花报春 (*Primula sikkimensis*) 等.研究点植被和土壤基本特征详见文献^[20].

1.2 试验设计

本研究采用配对试验设计,设置变量为是否增温.于 2015 年 10 月初选择研究区域内物种组成、群落结构和生境相对均匀的窄叶鲜卑花灌丛群落,模拟增温试验采用开顶式生长室 (open top chamber, OTC) 对环境进行增温.基于窄叶鲜卑花灌丛群落的平均盖度和高度^[20],OTC 材料选用 1.6 m×1.6 m×5 mm 的有机玻璃板 (透光率达 95% 以上,成都天中广告材料有限公司生产) 制成,4 块有机玻璃板连接成正立方体型,OTC 下端插入土壤 1 cm,地表增温面积为 2.56 m²,选择一株窄叶鲜卑花植株生长于每个 OTC 装置的中央;同时,在每个 OTC 的附近随机设置一个对照 (不增温) 样方.所选择窄叶鲜卑花样株具有一致的高度、盖度和相似的生长势.增温和对照处理均设置 4 个重复样方.

1.3 微环境监测

于 2016 年 5 月初开始进行空气温度、土壤温度和水分监测.对照和增温处理地下 5 cm 土层土壤温度和地上 70 cm 空气温度分别采用纽扣式温度传感器 (DS1921G-F5#, Maxim/Dallas semiconductor, Sunnyvale, California, USA) 进行监测,所有的地下温度传感器均埋设在样方的中央.温度传感器设置为每 2 h 读取一次数据,自动记录试验期间空气温度和土壤温度变化,所得数据用于月平均空气温度和土壤温度的计算.并且从 2016 年生长季节开始,逐月使用便携式土壤水分测定仪 (TRIME TDR, IMKO,

Germany) 对地下 5 cm 土层土壤含水量进行监测.

1.4 根际土和非根际土样品采集

窄叶鲜卑花灌丛根际土壤样品采集采用抖落法^[21].于 2016 年 5 月 (生长季初期)、7 月 (生长季中期) 和 9 月 (生长季末期) 的下旬分别挖取增温和对照样方内窄叶鲜卑花灌丛下具有完整根系的土体,首先轻轻抖落大块不含根系的土壤,用小刀小心取下附在根系周围的土壤为非根际土,然后用刷子小心地刷下粘附在根围的土壤 (距离根系周围 0~5 mm) 作为根际土.在取根际土的过程中尽量避免对窄叶鲜卑花灌丛根系造成伤害,对混杂于非根际土中的根系彻底分离并去除.采集的所有土壤样品于 4 °C 条件下保存并尽快带回试验室,过筛后用于土壤微生物生物量碳和氮的测定.

1.5 土壤微生物生物量碳和氮测定和根际效应计算

所有土壤样品微生物生物量碳和氮采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法^[22-23]进行测定.取 8 g 新鲜土壤样品用氯仿在 25 °C 真空条件下培养 24 h 后,用 25 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液对熏蒸处理和未熏蒸处理的土壤样品进行浸提,使用碳/氮分析仪 (Multi-N/C 2100, Analytik Jena AG, Germany) 测定浸提液中的碳和氮含量.土壤微生物生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 和氮 (microbial biomass nitrogen, MBN) 的转换系数均为 0.45^[24].

为了比较根际和非根际土壤微生物生物量碳和氮的差异,本研究计算了土壤微生物生物量碳和氮的根际效应.

土壤微生物生物量根际效应大小的计算公式^[21]为:

$$P_r = C_r / C_b$$

其中: C_r 和 C_b 分别为土壤微生物生物量指标在根际和非根际的数值大小.当 P_r < 1 时表现为负根际效应, P_r > 1 时表现为正根际效应.

1.6 数据处理

使用 Student-*t* 检验分别比较增温处理和对照下窄叶鲜卑花灌丛土壤含水量、非根际和根际土壤微生物生物量碳、氮和碳氮比,以及根际效应之间的差异 (α=0.05).采用重复测量方差分析检验增温和取样时期以及二者的交互作用对非根际和根际微生物生物量碳、氮和碳氮比,以及根际效应的影响 (α=0.05).所有统计分析均在 SPSS 20.0 中进行,采用 Origin 8.5 软件作图.

2 结果与分析

2.1 增温对空气温度、土壤温度和含水量的影响

增温没有改变窄叶鲜卑花灌丛空气温度、土壤温度和土壤水分的动态变化,增温处理和对照下土壤温度、空气温度和土壤水分均随季节呈现有规律的变化(图 1).空气温度和土壤温度随生长季均表现出先升高后降低的趋势;土壤水分除在 6 月因采样前降雨而出现大幅度提高以外,也表现出随生长季进行先升高后降低的趋势.与对照样方相比,增温分别使整个生长季地上 70 cm 空气温度和地下 5 cm 土层土壤温度平均升高了 0.5 和 1.3 ℃,使土壤含水量显著降低了 3.2%.

2.2 增温对土壤微生物生物量碳的影响

由图 2 和表 1 可以看出,增温对根际和非根际土壤微生物生物量碳的影响不同,且表现出明显的季节差异.无论是在根际还是非根际土壤中,生长季初期(5 月)土壤微生物生物量碳均显著高于生长季中期(7 月)和末期(9 月).在非根际土壤中,增温显著降低了生长季初期微生物生物量碳,显著提高了生长季中期微生物生物量碳,而对生长季末期微生物生物量碳的影响不显著.在根际土壤中,增温在生

表 1 增温和取样时间对非根际和根际土壤微生物量指标的重复测量方差分析
Table 1 Repeated measures ANOVA for the responses of microbial biomass in the bulk and rhizosphere soil to warming and sampling dates

指标 Index		增温 Warming	采样时间 Sampling date	增温×采样时间 Warming × sampling date
MBC	B	0.529	<0.001	<0.001
	R	0.080	<0.001	0.500
	RE	0.502	0.070	0.014
MBN	B	0.002	<0.001	0.016
	R	0.333	<0.001	<0.001
	RE	0.072	0.331	0.022
MBC/MBN	B	0.870	0.002	0.125
	R	0.061	0.006	0.002
	RE	0.055	0.001	0.013

MBC: 土壤微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN: 土壤微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen. B: 非根际土壤 In the bulk soil; R: 根际土壤 In the rhizosphere soil; RE: 根际效应 Rhizosphere effect.

长季 3 个时期内均没有显著影响微生物生物量碳.对照中,土壤微生物生物量碳在生长季初期和末期表现为负根际效应,在生长季中期表现为正根际效应.增温显著提高了生长季初期微生物生物量碳根际效应值,使生长季中期根际效应值显著降低,末期无显著变化.

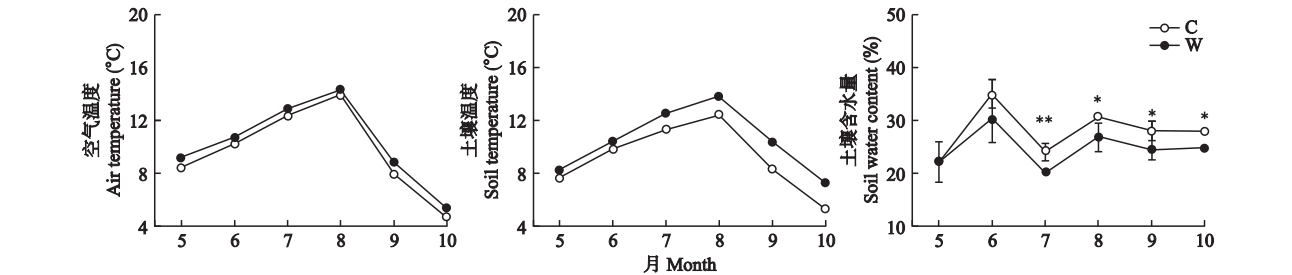


图 1 窄叶鲜卑花灌丛空气温度、土壤温度和土壤含水量的季节动态
Fig.1 Seasonal dynamics of air temperature, soil temperature and soil water content in the *Sibiraea angustata* scrubland.
C: 对照 Control; W: 增温 Warming. * $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

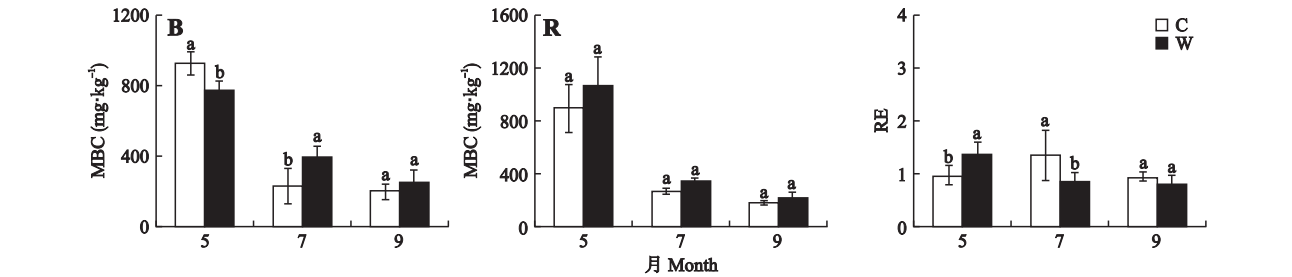


图 2 窄叶鲜卑花灌丛非根际、根际土壤微生物生物量碳(MBC)及其根际效应的季节动态
Fig.2 Seasonal dynamics of microbial biomass carbon (MBC) in the bulk and rhizosphere soil and its rhizosphere effects in the *Sibiraea angustata* scrubland.
B: 非根际土壤 In the bulk soil; R: 根际土壤 In the rhizosphere soil; RE: 根际效应 Rhizosphere effect. 不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)
Different letters meant significant difference between treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

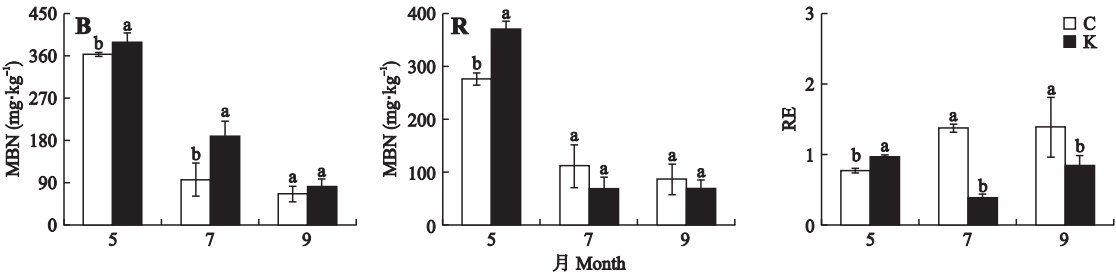


图3 窄叶鲜卑花灌丛非根际、根际土壤微生物生物量氮(MBN)及其根际效应的季节动态

Fig.3 Seasonal dynamics of microbial biomass nitrogen (MBN) in the bulk and rhizosphere soil and its rhizosphere effects in the *Sibira angustata* scrubland.

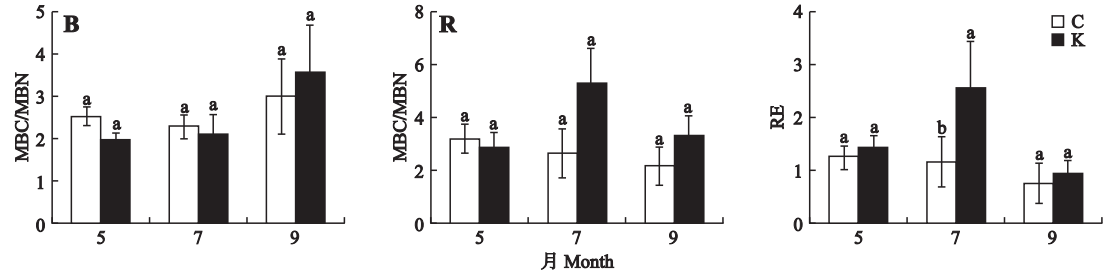


图4 窄叶鲜卑花灌丛非根际、根际土壤微生物生物量碳(MBC)/氮(MBN)比值及其根际效应的季节动态

Fig.4 Seasonal dynamics of microbial biomass carbon/nitrogen in the bulk and rhizosphere soil and its rhizosphere effects in the *Sibira angustata* scrubland.

2.3 增温对土壤微生物生物量氮的影响

与土壤微生物生物量碳类似,增温对根际和非根际土壤微生物生物量氮的影响不同,且表现出明显的季节差异(图3和表1).无论是在根际还是非根际土壤中,生长季初期土壤微生物生物量氮均显著高于生长季中期和末期.在非根际土壤中,增温显著提高了生长季初期和中期微生物生物量氮,而对生长季末期微生物生物量氮的影响不显著.在根际土壤中,增温仅在生长季初期显著提高了微生物生物量氮,在生长季中期和末期对微生物生物量氮的影响不显著.对照中,土壤微生物生物量氮在生长季初期表现为负根际效应,在生长季中期和末期表现为正根际效应.增温显著提高了生长季初期微生物生物量氮根际效应值,使生长季中期和末期根际效应值显著降低.

2.4 增温对土壤微生物生物量碳氮比的影响

由图4和表1可见,根际和非根际土壤微生物生物量碳氮比季节动态明显.在非根际土壤中,微生物生物量碳氮比随生长季进行呈持续增加趋势;而在根际土壤中,微生物生物量碳氮比呈先增加后降低的趋势.增温对非根际和根际土壤微生物生物量碳氮比均没有显著影响.对照中,土壤微生物生物量碳氮比在生长季初期和中期表现为正根际效应,在生长季末期表现为负根际效应.增温仅在生长季中

期显著提高了微生物生物量碳氮比根际效应值,对生长季初期和末期的根际效应值影响不显著.

3 讨论

3.1 根际和非根际土壤微生物生物量碳和氮的季节动态

在高寒生态系统中,植物生长期受气候季节波动的影响而表现出一定的物候规律,对土壤微生物生物量的动态变化也存在一定的影响^[25].本研究中,无论是在根际还是非根际土壤中,生长季初期土壤微生物生物量碳和氮均显著高于生长季中期和末期(图2和图3).这可以解释土壤微生物生物量碳和氮的季节性动态:首先,高寒灌丛生态系统土壤温度和土壤水分含量显著的季节变化可引起土壤微生物群落结构发生明显改变^[26].前期研究结果表明,窄叶鲜卑花灌丛生长季中期和末期土壤放线菌和革兰氏阳性菌群落丰富度显著降低^[19],因而导致这两个时期土壤微生物生物量碳和氮显著降低.其次,土壤微生物生物量碳和氮的季节性变化可能与土壤中可利用性碳和养分资源的限制有关.窄叶鲜卑花灌丛在非生长季节土壤表面覆盖一层较厚的雪被,雪被下较高的土壤温度有利于地表凋落物分解^[27]以及土壤碳和养分的矿化^[28],非生长季末期频繁的土壤冻融也为土壤养分矿化提供了便利条件和充足的

水分^[29],因此导致了生长季初期土壤养分含量较高.而生长季初期窄叶鲜卑花灌丛刚刚萌芽,对土壤养分的利用效率不高,较高的土壤养分含量有利于土壤微生物的复苏、生长和繁殖,土壤微生物群落对土壤有效养分的竞争在此时期占优势,从而导致此时期土壤微生物生物量碳和氮较高.在植物生长季中期和末期,植物的旺盛生长吸收了大量的土壤养分,土壤微生物和植物之间产生严重的养分竞争^[30],土壤微生物生长、繁殖可能受到严重的养分限制,因而导致了此时期土壤微生物生物量碳和氮显著降低.

3.2 增温对根际和非根际土壤微生物生物量碳和氮的影响

土壤温度是影响土壤微生物活性的重要生态因子,土壤温度升高会使土壤微生物生物量、土壤微生物群落结构发生显著改变^[5].尤其是在高寒生态系统中,土壤微生物活动长期适应低温环境,土壤温度升高将会打破长期以来的低温限制效应,土壤微生物群落的生物活性和生物量将做出敏感反应^[2].例如,在北极冻土区的一项研究结果表明,1.5 年的土壤增温导致与土壤碳、氮循环相关的微生物类群发生明显改变^[31].然而,在本研究中,增温对窄叶鲜卑花灌丛根际和非根际土壤微生物生物量碳和氮的影响不同,增温对非根际土壤微生物生物量碳和氮的影响明显强于根际土壤,而且增温对非根际土壤微生物生物量碳和氮的影响存在明显的季节差异(图 2 和图 3).在生长季初期,增温使非根际土壤微生物生物量碳显著降低,土壤微生物生物量氮显著提高.这说明在生长季初期,土壤微生物群落对土壤中有有效碳源和氮源的利用可能不同^[32].虽然土壤中存在较为丰富的可利用碳源和氮源,但此时期土壤温度低,土壤水分含量较高,土壤微生物正处于复苏阶段,土壤温度升高可能不利于土壤微生物群落对碳源的利用,而促进土壤微生物对土壤有效氮源的吸收^[33].增温同时使生长季中期非根际土壤微生物生物量碳和氮显著提高.这可能是因为生长季中期,土壤水热条件较好,土壤温度升高有利于土壤矿化作用的进行^[34],因而增加了土壤中可利用性碳和氮的含量;增温处理同时也会促进细根周转和分解过程,提高土壤有效养分含量^[14].这些条件均有利于土壤微生物生长、繁殖,因此增温在此时期能够显著提高土壤微生物生物量碳和氮.而在生长季末期,增温并未对非根际土壤微生物生物量碳和氮产生显著影响.这可能是因为土壤增温导致土壤含水量显著降

低(图 1),土壤微生物受到严重的水分胁迫,从而抵消了增温对土壤微生物生物量碳和氮的正效应^[35].王军等^[35]研究结果也表明,在青藏高原高寒草甸生态系统,由增温导致的土壤干旱会抑制土壤微生物活性,因此土壤微生物生物量在气候变暖情境下可能不变或降低.本研究中,增温在多数时期没有显著影响根际土壤微生物生物量碳和氮(图 2 和图 3).这可能是因为根际土壤在整个生长季节由于有源源不断的根系分泌物、根细胞死亡脱落等,使根际土壤养分始终维持在较高的水平,根际土壤微生物不受土壤有效养分和水分的限制^[36],因此增温使根际土壤养分含量提高对根际土壤微生物生物量碳和氮的促进效应不如在非根际土壤中明显.本研究还发现,无论是根际还是非根际土壤,增温均没有显著影响土壤微生物生物量碳氮比(图 4).这可能与增温时间较短、幅度较低,土壤微生物优势类群没有发生显著变化有关.土壤微生物生物量碳氮比变化可以在一定程度上反映土壤微生物群落优势类群的变化^[37].前期研究结果显示,在该研究区域,细菌群落是土壤中的优势类群,增温并没有显著改变土壤微生物各类群的优势度^[19].值得注意的是,短期小幅度土壤增温对根际和非根际土壤微生物群落的影响可能与长期增温不同,因此应进一步开展长期增温对高寒灌丛根际土壤生态过程的影响研究,以更清晰地认识未来气候变暖情境下高寒灌丛生态系统根际土壤生态过程的潜在变化趋势.

3.3 增温对土壤微生物生物量碳和氮根际效应的影响

受植物根系活动的影响,根际土壤的物理、化学和生物学特征显著不同于非根际土壤^[11].例如,大量研究表明,根际土壤养分含量显著高于非根际土壤^[38],根际土壤微生物群落结构、活性和生物量也明显不同于非根际土壤^[39].本研究中,对照土壤微生物生物量碳和氮在生长季初期表现为负根际效应,在生长季中期表现为正根际效应;土壤微生物生物量碳在生长季末期表现为负根际效应,土壤微生物生物量氮在生长季末期则表现为正根际效应.这表明不同生长季节植物根际土壤环境对根际土壤微生物群落的影响不同.这可能与不同生长季节根际土壤 pH 值、养分浓度、根系分泌物组分的化感作用不同有关^[39].而增温在不同生长季节对土壤微生物生物量碳和氮根际效应的影响也不同,如在生长季初期使土壤微生物生物量碳和氮根际效应显著提高,在生长季中期和末期使土壤微生物生物量碳和

氮根际效应降低. 这可能是由于不同生长季节增温对土壤微生物群落碳源和氮源利用模式的影响不同. 在生长季初期, 增温可能促进了根际土壤微生物对土壤碳源和氮源的利用, 而在生长季中期和末期则可能抑制土壤微生物对土壤碳源和氮源的利用, 但是其具体机制还需进一步深入研究.

4 结 论

综上所述, 青藏高原东缘窄叶鲜卑花高寒灌丛根际和非根际土壤微生物量碳和氮具有明显的季节动态. 增温对根际土壤微生物量碳和氮的影响不显著, 增温对土壤微生物量碳、氮的影响主要发生在非根际土壤中, 且因不同生长季节而有显著差异. 同时, 土壤微生物量碳和氮根际效应也因不同生长季节而不同, 如在生长季初期表现为负根际效应, 在生长季中期表现为正根际效应. 增温对土壤微生物量碳和氮根际效应的影响可能与土壤微生物群落碳源和氮源的利用方式不同有关. 因此, 未来气候变暖可能对青藏高原东缘高寒灌丛生态系统根际和非根际土壤微生物群落产生复杂而深刻的影响, 进而改变高寒灌丛根际土壤生态过程.

参考文献

- [1] Chen Y, Ding J, Peng Y, *et al.* Patterns and drivers of soil microbial communities in Tibetan alpine and global terrestrial ecosystems. *Journal of Biogeography*, 2016, **43**: 2027–2039
- [2] Xiong Q, Pan K, 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. *Applied Soil Ecology*, 2016, **101**: 72–83
- [3] Khan KS, Mack R, Castillo X, *et al.* Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios. *Geoderma*, 2016, **271**: 115–123
- [4] Zheng H-F (郑海峰), Chen Y-M (陈亚梅), Yang L (杨 林), *et al.* Responses of soil microbial community structure to simulated warming in alpine timberline in western Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(9): 2840–2848 (in Chinese)
- [5] Chu HY, Grogan P. Soil microbial biomass, nutrient availability and nitrogen mineralization potential among vegetation-types in a low arctic tundra landscape. *Plant and Soil*, 2010, **329**: 411–420
- [6] Wang X, Dong S, Gao Q, *et al.* 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 Bio-*

- chemistry*, 2014, **76**: 140–142
- [7] Fu G, Shen Z, Zhang X, *et al.* Response of soil microbial biomass to short-term experimental warming in alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, 2012, **61**: 158–160
- [8] Sorensen PO, Finzi AC, Giasson MA, *et al.* Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 39–47
- [9] Schindlbacher A, Rodler A, Kuffner M, *et al.* Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 1417–1425
- [10] Hess LJT, Austin AT. Pine afforestation alters rhizosphere effects and soil nutrient turnover across a precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Plant and Soil*, 2017, **415**: 1–16
- [11] Xiao L (肖 列), Liu G-B (刘国彬), Li P (李 鹏), *et al.* Effects of short-term elevated CO₂ concentration and drought stress on the rhizosphere effects of soil carbon, nitrogen and microbes of *Bothriochloa ischaemum*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(10): 3251–3259 (in Chinese)
- [12] Wang Q-T (汪其同), Gao M-Y (高明宇), Liu M-L (刘梦玲), *et al.* Illumina Miseq sequencing-based fungal community of rhizosphere soils along root orders of poplar plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(4): 1177–1183 (in Chinese)
- [13] Yin HJ, Li YJ, Xiao J, *et al.* Enhanced root exudation stimulates soil nitrogen transformations in a subalpine coniferous forest under experimental warming. *Global Change Biology*, 2013, **19**: 2158–2167
- [14] Leppälammil-Kujansuu J, Salemaa M, Dan BK, *et al.* Fine root turnover and litter production of Norway spruce in a long-term temperature and nutrient manipulation experiment. *Plant and Soil*, 2014, **374**: 73–88
- [15] Liu S (刘 顺), Sheng K-Y (盛可银), Liu X-S (刘喜帅), *et al.* Contents of soil organic carbon and nitrogen forms in rhizosphere soil of *Cunninghamia lanceolata* and the rhizosphere effect. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2017, **36**(7): 1957–1964 (in Chinese)
- [16] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [17] Zhang H-Q (张贺全), Sun R-B (孙饶斌), Ye M-S (冶民生), *et al.* Characteristics of main shrub populations in the original area of the Minjiang River. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2012, **19**(1): 124–129 (in Chinese)
- [18] Ye M-S (冶民生), Wu B (吴 斌), Guan W-B (关文彬), *et al.* Plant community stability in the upper reaches of Minjiang River. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2009, **16**(1): 259–263 (in Chinese)
- [19] Ma Z, Zhao W, Zhao C, *et al.* Plants regulate the effects of experimental warming on the soil microbial

- community in an alpine scrub ecosystem. *PLoS One*, 2018, **13**(4): e0195079
- [20] Ma Z-L (马志良), Zhao W-Q (赵文强), Zhao C-Z (赵春章), *et al.* The responses of soil inorganic nitrogen to warming and plant removal during the growing season in a *Sibiraea angustata* alpine scrub ecosystem of eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2018, **42**(1): 86–94 (in Chinese)
- [21] Phillips RP, Fahey TJ. The influence of soil fertility on rhizosphere effects in northern hardwood forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **72**: 453–461
- [22] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**: 703–707
- [23] Brookes PC, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, **17**: 837–842
- [24] Joergensen RG, Wu J, Brookes PC. Measuring soil microbial biomass using an automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 873–876
- [25] Cao C-Y (曹成有), Chen J-M (陈家模), Shao J-F (邵建飞), *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities in four sand-fixation plantations on Horqin sandy land. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2011, **30**(2): 227–233 (in Chinese)
- [26] Yong Z, Dong S, Gao Q, *et al.* Soil bacterial and fungal diversity differently correlated with soil biochemistry in alpine grassland ecosystems in response to environmental changes. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 43077
- [27] Hu X (胡霞), Yin P (尹鹏), Wang Z-Y (王智勇), *et al.* Preliminary study on the effect of snow depth and snow duration on soil N dynamics. *Ecology and Environment Sciences* (生态环境学报), 2014, **23**(4): 593–597 (in Chinese)
- [28] Li Z, Yang W, Yue K, *et al.* Effects of snow absence on winter soil nitrogen dynamics in a subalpine spruce forest of southwestern China. *Geoderma*, 2017, **307**: 107–113
- [29] Wang W, Shu X, Zhang Q, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles on the soil nutrient balances, infiltration, and stability of cyanobacterial soil crusts in northern China. *Plant and Soil*, 2015, **386**: 263–272
- [30] Wang J-N (王金牛). Adaptable Contribution of Differentiation Patterns of Plant Phenology to Maintaining Nitrogen Utilization of Plants in Alpine Meadows and Its Dynamic Balance. PhD Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences 2013 (in Chinese)
- [31] Xue K, Yuan MM, Zhou JS, *et al.* Tundra soil carbon is vulnerable to rapid microbial decomposition under climate warming. *Nature Climate Change*, 2016, **6**: 595–600
- [32] 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. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **109**: 59–69
- [33] Xi N, Bloor JMG. Interactive effects of precipitation and nitrogen spatial pattern on carbon use and functional diversity in soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 2016, **100**: 207–210
- [34] Bai E, Li S, Xu W, *et al.* A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics. *New Phytologist*, 2013, **199**: 441–451
- [35] Wang J (王军), Wang G-Q (王冠钦), Li F (李飞), *et al.* Effects of short-term experimental warming on soil microbes in a typical alpine steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2018, **42**(1): 883–891 (in Chinese)
- [36] Li YY, Wang J, Pan FX, *et al.* Soil nitrogen availability alters rhizodeposition carbon flux into the soil microbial community. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**: 1472–1480
- [37] Zhang ZJ, Qu YY, Li SZ, *et al.* Soil bacterial quantification approaches coupling with relative abundances reflecting the changes of taxa. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 4837, doi: 10.1038/s41598-017-05260-w
- [38] Toberman H, Chen CR, Xu ZH. Rhizosphere effects on soil nutrient dynamics and microbial activity in an Australian tropical lowland rainforest. *Soil Research*, 2011, **49**: 652–660
- [39] Xiao L (肖玲), Wang K-Y (王开运), Zhang Y-B (张远彬), *et al.* Responses of microbes in rhizospheric soil of *Abies faxoniana* to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(5): 773–777 (in Chinese)

作者简介 马志良,男,1988年生,博士,讲师.主要从事高寒灌丛生态系统土壤碳循环过程研究. E-mail: feng281@126.com

责任编辑 肖红

马志良, 赵文强, 刘美, 等. 增温对高寒灌丛根际和非根际土壤微生物生物量碳氮的影响. 应用生态学报, 2019, **30**(6): 1893–1900

Ma Z-L, Zhao W-Q, Liu M, *et al.* Effects of warming on microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere and bulk soil in an alpine scrub ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(6): 1893–1900 (in Chinese)