

温暖化加剧青藏高原高寒草甸土非生长季冻融循环

林笠¹ 王其兵² 张振华^{3,†} 贺金生^{1,3,†}

1. 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871; 2. 植被与环境变化国家重点实验室, 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 3. 高原适应与进化重点实验室, 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008;
† 通信作者, E-mail: zhenhua@nwipb.cas.cn (张振华), jshe@pku.edu.cn (贺金生)

摘要 在2013年10月至次年4月, 首次利用微根管直接观测和土壤温度间接观测相结合的方法, 研究增温对青藏高原高寒草甸土壤冻融循环过程的影响。结果显示: 1) 全年增温和冬季增温均显著增加非生长季5, 10, 20 cm的土壤温度, 而且冬季增温处理下的5~20 cm土壤非生长季月平均温度比全年增温处理下的高0.01~0.18°C; 2) 全年增温和冬季增温显著降低了完全冻结期和冬春解冻期的冻土层厚度, 而对秋冬始冻期的冻土层厚度没有影响; 3) 全年增温和冬季增温显著减少了完全冻结期的持续天数和增加冬春解冻期的持续天数, 而对秋冬始冻期的持续天数没有影响; 4) 冬季增温比全年增温对冻土层厚度和冻融循环持续天数的影响更加显著。研究表明, 在青藏高原高寒草甸气候温暖化的趋势下, 非生长季土壤冻融交替天数的增加, 可能会进一步对高寒地区的地下碳氮循环产生重要的影响。

关键词 冻土层; 冻融过程; 土壤温度; 增温

中图分类号 S154

Warming Enhances Soil Freezing and Thawing Circles in the Non-growing Season in a Tibetan Alpine Grassland

LIN Li¹, WANG Qibing², ZHANG Zhenhua^{3,†} HE Jinsheng^{1,3,†}

1. Key Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093; 3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008; † Corresponding authors, E-mail: zhenhua@nwipb.cas.cn (ZHANG Z), jshe@pku.edu.cn (HE J)

Abstract Seasonal freezing and thawing process occurs in the non-growing season in the alpine grassland on the Tibetan Plateau. However, it is still unclear that how warming would affect this process in the alpine zone. From October 2013 to April 2014, the research used minirhizotron directly and soil temperature indirectly to investigate the effects of warming on the freezing and thawing process. The results showed that, warming significantly increased soil temperature at the depths of 5, 10 and 20 cm, and soil temperature in the winter warming plots was 0.01–0.18°C higher than that in the annual warming plots. Warming significantly decreased the depth of soil frozen layer in the frozen period and thawing period of winter spring, but had no effect on the the depth of soil frozen layer in the thawing period of fall-winter. It is due to warming-induced reduction on soil moisture. Warming significantly reduced lasting days of frozen period and increased lasting days thawing period of winter-spring, and did not affect the lasting days of freezing period of fall-winter. Effects of winter warming on frozen soil depths and lasting days were much greater than annual warming. The results suggest that the enhanced freezing and thawing circles with a warming trend may subsequently affect soil carbon (C) and nitrogen (N) in this region.

Key words frozen layer; freezing and thawing process; soil temperature; warming

土壤冻融交替指由于热量的变化,土壤反复出现冻结和融化的过程^[1],主要发生在温度较低的高海拔或高纬度地区。这些储藏着大量碳氮库的冻土地区正面临巨大的气候变化^[2-3],可能产生一系列的生态学效应,引起越多越多科学家的关注。

目前,国内外的冻土研究主要集中在多年冻土区域土壤的冻融交替过程^[4-9],对季节性冻土的冻融交替过程研究较少。大量研究证实,多年冻土的冻融交替显著影响土壤地下碳氮循环过程^[1,10-11]。一方面,冻融作用会改变土壤的水热传导^[12]和养分转移,使得土壤养分和水分向冻土层周围转移^[13]。另一方面,冻融循环会降低团聚体的稳定性,加剧团聚体破碎化^[14-15]。团聚体破碎会释放大量的可利用性碳氮,促进反硝化作用和产生更多的 N_2O 等温室气体^[16-17]。因此,土壤冻融过程的变化会直接影响土壤中碳氮循环过程和生态系统的稳定。

青藏高原是我国海拔最高、高寒冻土分布面积最广的地区^[18-19],也是全球气候变化的敏感区和放大区,正面临快速的气候变化^[20-23]。1960 年以来,青藏高原气温以 $0.2\sim 0.3^\circ\text{C}/10\text{a}$ 的速度增温,而冬季增温的幅度($0.3\sim 0.5^\circ\text{C}/10\text{a}$)远远高于全年平均增温幅度^[24-25]。不断加剧的全球气候变暖正在改变青藏高原的冻土发生过程和状态,总体上呈现最大冻土深度降低、冻结起始日期推迟、融化起始日期提前、冻结持续期缩短以及冻土下界面升高的趋势^[18,26-28]。高寒草甸是青藏高原主要植被类型之一,分布着大面积的季节性冻土^[29]。温度升高,特别是冬季增温可能导致高寒草甸土冻融交替的状况发生变化,但这种变化的程度仍然不清楚。

因此,我们选取青藏高原高寒草甸季节性冻土作为研究对象,利用微根管和土壤温度监测相结合的技术手段,探讨高寒草甸地区土壤冻融状况、温度的变化特征以及两者之间的相互影响关系,研究增温对土壤冻融交替过程的影响,为该地区生物地球化学循环研究提供科学数据和理论支持。

1 研究方法

1.1 研究地点概况

实验完成于海北高寒草甸生态系统国家野外科学观测研究站(简称“海北站”)。海北站位于青藏高原东北部的祁连山谷地($101^\circ 19'\text{E}$, $37^\circ 36'\text{N}$, 海拔 3215 m)。该区属于典型的高原大陆性气候,夏季受东南季风影响,冬季受西伯利亚寒流影响^[30]。

2009—2012 年,海北站年平均气温 $-0.81\sim 1.82^\circ\text{C}$, 年平均降水 $350.6\sim 501.3\text{ mm}$ ^[31]。土壤为草毡寒冻锥形土(即高寒草甸土)(China soil taxonomy)。0~10 cm 和 10~20 cm 土壤有机质分别为 63 和 36 g/kg, 容重分别为 0.82 和 0.98 g/cm³, 土壤 pH 分别为 7.84 和 7.95。

该地区为典型的高寒草甸生态系统,植被类型主要为青藏高原典型的地带性植被——以金露梅为建群种的高寒灌丛草甸和以嵩草属植物为建群种的高寒嵩草草甸^[32],主要物种有 *Kobresia humilis*, *Festuca ovina*, *Elymus nutans*, *Poa pratensis*, *Carex scabrostris*, *Scripus distigmaticus* 和 *Gentiana straminea*^[31]。2006—2010 年,年平均地上生物量为 350 g/m^2 ^[32]。

1.2 实验设计

采用单因素随机区组设计实验。增温设计有 3 个水平,分别为不增温、全年增温和冬季增温。样地共有 6 个重复,该实验随机选取 4 个重复进行。每个小区面积为 $2.2\text{ m} \times 1.8\text{ m}$, 设有 1 m 缓冲区。实验区从 2011 年 7 月开始采用红外增温系统增温。增温区采用两个不锈钢架固定中波红外加热器(220 V , 长 1 m, 宽 2.2 cm)。红外加热器距地面高度为 1.5 m。采用控制变量法原则,所有小区都安装红外加热器外装置(有/无灯管)。在生长季初期,根据土壤温度的实时数据调节功率,使全年增温和冬季增温形成不同的土壤温度梯度。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤温度的测定

实验区采用 EM-50 仪器(Decagon Devices, 美国)监测离地面 30 cm 的空气温度数据以及土壤 5, 10 和 20 cm 温度数据。从 2013 年 10 月开始,每分钟测定土壤温度数据 1 次,每小时记录平均值。

1.3.2 微根管法监测冻土层厚度

2012 年 10 月在实验区安装微根管,管径为 7 cm, 深度为 80 cm。2013 年 10 月至 2014 年 4 月,采用 CI-600 仪器(CID, Camas, Wash., 美国)每隔 4 周扫描 1 次,得到土壤剖面图片。用 Photoshop CS5 软件(Adobe Systems, Inc. 2010)划定冻土层上界和下界位置(靠近地面为冻土层上界,远离地面为冻土层下界),计算冻土层厚度。

1.3.3 土壤冻融阶段的划分

将土壤温度数据进行 7 天滑动平均,即第 4 天 1 时的土壤温度数值是第 1~7 天每天 1 时土壤温度

的平均值^[31]。

不考虑盐分等对土壤冻结的影响,若滑动平均后的土壤日温最大值连续5天都小于0℃,认为土壤属于完全冻结状态,称为完全冻结期;滑动平均后的土壤日温最小值连续5天都大于0℃,认为土壤属于完全消融状态,称为无冻结期;介于完全冻结期与无冻结期之间的时期,土壤属于冻融交替阶段^[31]。根据冻融交替所处的季节,分为秋冬始冻期和冬春解冻期。

1.4 统计与绘图

增温对冻土层不同时期厚度的影响采用重复测量方差分析和最小显著差异法(LSD)多重比较分析。增温对冻融不同时期持续天数的影响采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)多重比较分析。数据处理使用SPSS软件(Version 20, SPSS Inc. 2010),作图采用Sigmaplot 10.0 软件(Systata Software, Inc. 2005)。

2 结果与分析

2.1 土壤温度变化特征

青藏高原高寒草甸区域非生长季(10月至次年4月)空气温度以及5、10和20 cm土壤温度平均温度分别为-7.25、0.00、0.02和0.13℃。随着深度增加,土壤温度存在日变化的相位滞后。在非生长季,各层土壤温度月最高值出现在10月,月最低值都出现在1月。在秋冬始冻期,土壤温度呈现上部低、下部高,而在冻土冬春解冻期则相反。

增温显著提高了5、10和20 cm土壤温度(图1),但对空气温度没有显著影响。在整个非生长季,与对照区相比,全年增温区5、10和20 cm土层的季平均土壤温度分别增加2.30、2.03和2.17℃,冬季增温区5、10和20 cm土层的季平均土壤温度分别增加2.48、2.24和2.18℃。

2.2 增温对土壤冻土层厚度的影响

通过微根管法观测发现(图2),11月11日至12月8日,青藏高原高寒草甸土由表层开始发生冻结。1月5日至2月2日,土壤冻土层的厚度达到最大值(其中最大高度为38.3 cm),位于土壤剖面的0~38.3 cm。3月30日至4月15日,土壤冻土层由表层开始发生融化。

增温显著降低了冻土层的最大冻结厚度和冬春解冻期的厚度,但对秋冬冻结期的土层厚度没有显著的影响(图2)。与对照区相比,全年增温显著降

低冻土层最大冻结厚度7.5%,而冬季增温降低冻土层最大冻结厚度14.8%。

2.3 增温对土壤冻融时间的影响

通过对照区域的土壤温度监测数据(表1),我们发现,青藏高原高寒草甸土5、10和20 cm土层开始发生冻结分别在11月15日、11月23日和12月2日。5、10和20 cm土层处于完全冻结的状态主要发生在11月25日、11月24日和12月3日,分别持续90、109和116天。冬春解冻期起始时间为2月23日、3月13日和3月29日,分别持续24、5和1天。随着深度的增加,始冻期、完全冻结期和解冻期存在相位的滞后,土层冻结时间延长,而消融则时间缩短。

单因素方差分析结果显示,增温对秋冬始冻期的持续天数没有显著影响,但是对完全冻结期的持续天数和冬季解冻期的持续天数有显著影响(表2,图3)。在5、10和20 cm土层,全年增温显著降低了完全冻结期的天数,但是增加了冬春解冻期的持续天数。冬季增温与全年增温有相同的规律,只在10 cm土层存在显著差异。在10 cm土层,全年增温和冬季增温显著降低了完全解冻期的持续天数的32.1%和47.7%,增加了冬春解冻期的持续天数25和44天。

3 讨论

3.1 增温对冻土层厚度的影响

实验结果表明,增温显著降低了冻土层的厚度,与前人的研究结果一致。王绍令等^[33]发现温度升高导致青藏高原东部岛状冻土区内融化层加厚。高荣等^[27,34]发现青藏高原温度升高显著降低冻土层的累计冻结厚度和最大冻结厚度。此外,我们发现冬季增温比全年增温的幅度更大,导致对冻土层最大冻结厚度的影响更大,表明冬季增温可能会对高原的生态环境产生更大的影响。

增温导致冻土层厚度的降低,可能是由于增温显著地降低了冻融前期土壤含水量。以前的研究结果表明,土壤水分极大影响冻土层的厚度^[4-5,35-36]。当干旱发生,土壤含水量降低时,冻土层的厚度有下降的趋势。本研究中,全年增温和冬季增温显著降低了秋冬冻结期前(11月份)的土壤水分(图4),这与土壤冻结期的最大冻土厚度有关。

3.2 增温对冻融交替(冬春解冻期)的影响

我们发现全年增温和冬季增温同时显著增加了

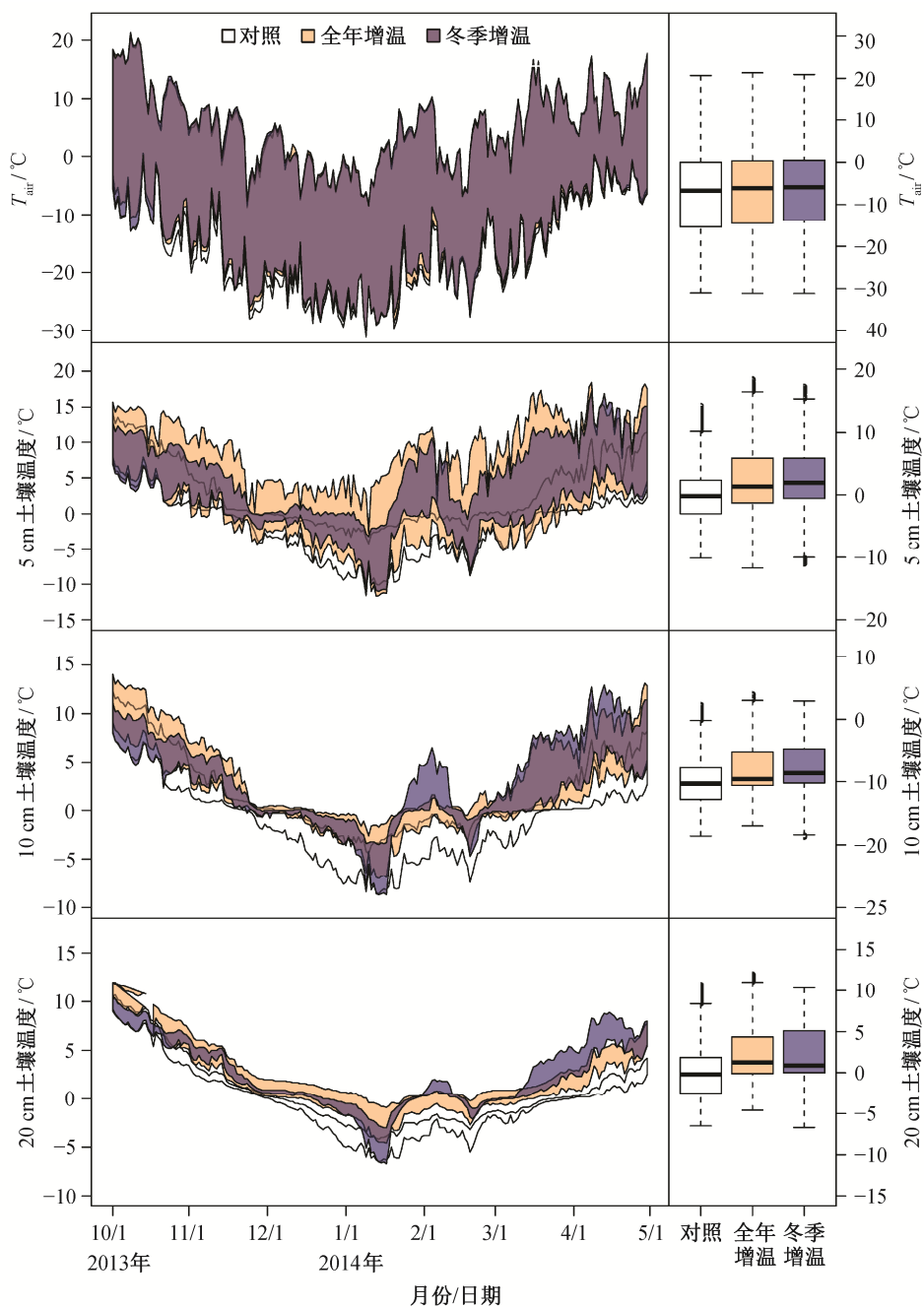
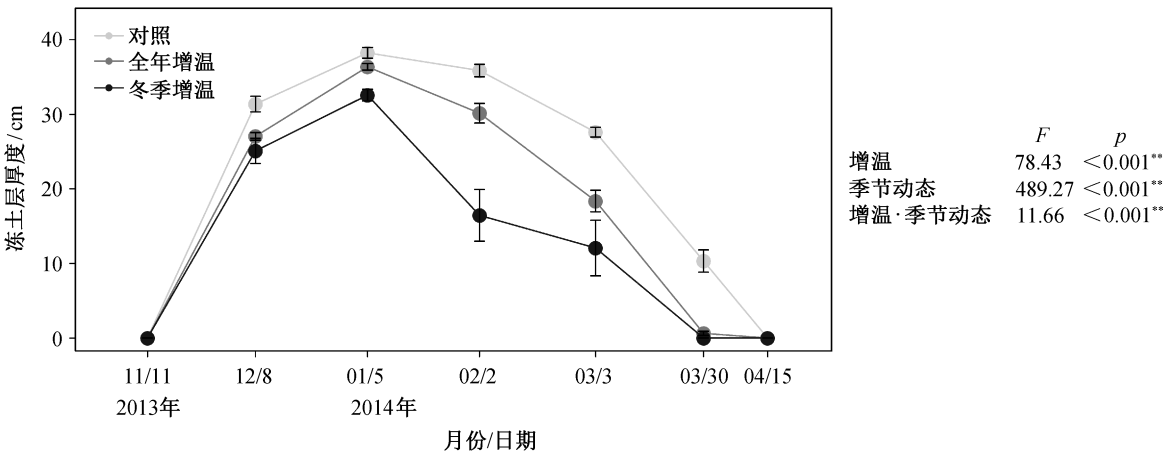


图 1 增温对非生长季(2013 年 10 月至次年 4 月)气温以及 5, 10, 20 cm 土壤温度季节动态和平均温度的影响

Fig. 1 Effects of warming on seasonal dynamic and average values of air temperature and soil temperatures at 5, 10, 20 cm depths over the non-growing season from October 2013 to April 2014

冻土层冻融交替(冬春解冻期)的天数。实验结果与高荣等^[27]的发现一致,即 20 世纪 90 年代以来的 20 年间,高原季节性冻土冻结日数呈下降趋势。目前,国外通过模拟增温研究温度升高对冻土冻融交替影响的实验较少,而国内通过模拟增温研究温度升高对土壤冻融过程影响的野外实验仍然是空白。因此,我们的实验结果无法进行充分比较。

通过对土壤温度的季节动态分析(图 1),我们认为增温对不同阶段冻融交替(秋冬始冻期和冬春解冻期)的影响主要取决于青藏高原非生长季的温度变化特征。非生长季前期,土壤温度在较短时间内急速下降,而人工增温的幅度与自然形成的温差相比是非常微小的,所以,增温对秋冬始冻期没有显著影响。在生长季后期,土壤温度缓慢上升,全



右侧为增温对冻土层厚度的季节动态影响的重复测量方差分析结果

图 2 利用微根管监测增温对冻土层厚度的季节动态的影响

Fig. 2 Effects of warming on seasonal dynamics of frozen soil layer depths using Minirhizotone over the experimental period

表 1 增温对不同土壤深度冻融发生起始日期和持续天数的影响

Table 1 Effects of warming on freezing periods and lasting days at 5, 10, 20 cm depths

土壤深度/cm	处理	秋冬始冻期		完全冻结期		冬春解冻期	
		起始日期	持续天数	起始日期	持续天数	起始日期	持续天数
5	对照	11 月 15 日	10 ^a	11 月 25 日	90 ^a	2 月 23 日	24 ^b
	全年增温	11 月 17 日	9 ^a	11 月 26 日	55 ^b	1 月 20 日	63 ^a
	冬季增温	11 月 18 日	8 ^a	11 月 26 日	54 ^b	1 月 19 日	65 ^a
10	对照	11 月 23 日	1 ^a	11 月 24 日	109 ^a	3 月 13 日	5 ^c
	全年增温	11 月 26 日	2 ^a	11 月 28 日	74 ^b	2 月 10 日	30 ^b
	冬季增温	11 月 27 日	1 ^a	11 月 28 日	57 ^c	1 月 24 日	49 ^a
20	对照	12 月 2 日	1 ^a	12 月 3 日	116 ^a	3 月 29 日	1 ^b
	全年增温	12 月 15 日	2 ^a	12 月 17 日	46 ^b	2 月 1 日	36 ^a
	冬季增温	12 月 22 日	3 ^a	12 月 25 日	33 ^b	1 月 27 日	38 ^a

说明：不同字母表示同一土壤深度的不同处理间差异显著($p<0.05$)。完全冻结期，土壤日温最大值连续 5 天都小于 0℃；秋冬始冻期，秋冬季节土壤日温最大值连续 5 天都大于 0℃，最小值连续 5 天都小于 0℃；冬春解冻期，秋冬季节土壤日温最大值连续 5 天都大于 0℃，最小值连续 5 天都小于 0℃。

表 2 采用微根管监测增温对不同时期冻土层厚度的影响

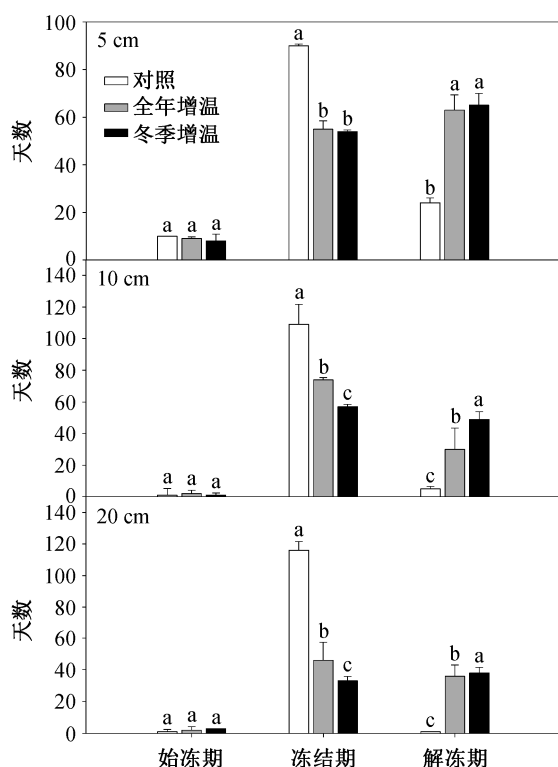
Table 2 Summary of one-way ANOVA for frozen soil depths under warming conditions over the experimental period

处理	不同时期冻土层厚度/cm						
	11 月 10 日	12 月 8 日	1 月 5 日	2 月 2 日	3 月 3 日	3 月 30 日	4 月 15 日
对照	0.00 ^a	31.38 ^a	38.25 ^a	35.88 ^a	27.60 ^a	10.33 ^a	0.00 ^a
全年增温	0.00 ^a	27.05 ^a	35.38 ^b	30.15 ^b	18.38 ^b	0.00 ^b	0.00 ^a
冬季增温	0.00 ^a	25.10 ^a	32.58 ^b	16.45 ^c	12.08 ^c	0.00 ^b	0.00 ^a

说明：不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

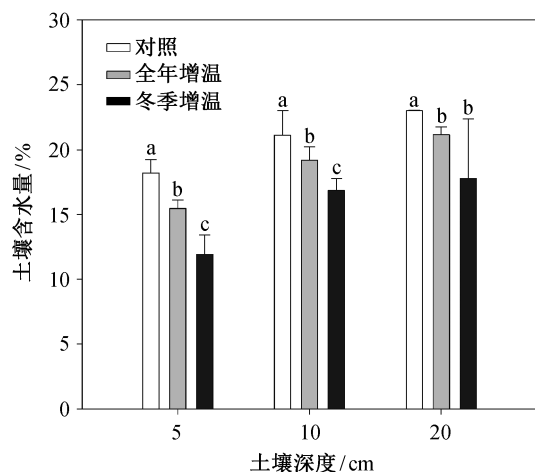
年增温和冬季增温的增温幅度改变了土壤中冰水的临界温度，导致冻土发生反复的冻融过程，增加了冻融交替的天数。

冻土完全冻结期持续天数的显著减少和冻融交替期(冬春解冻期)持续时间的显著增加可能具有以下生态学意义。1) 改变了地上植被状况。李英年



不同字母表示同一冻融期的不同处理间差异显著($p < 0.05$)

图 3 增温对不同土壤深度 5, 10, 20 cm 冻融持续天数的影响
Fig. 3 Effects of warming on lasting days of 3 stages of freezing and thawing process at depths of 5, 10, 20 cm



不同字母表示同一深度的不同处理间差异显著($p < 0.05$)

图 4 增温对 11 月份 5, 10, 20 cm 土壤水分的影响
Fig. 4 Effects of warming on soil moisture in November at depths of 5, 10, 20 cm

等^[37]认为高寒草甸季节冻土的变化与植物地上年产量有一定的关系。在温度增加条件下,降低的冻土层厚度导致解冻时期土壤含水量的明显降低,将会导致次年高寒草甸植被生产力下降。吴青柏

等^[38]也认为青藏高原冻土的过程与地上植被发育程度有密切的联系。一旦冻土水热条件和地表植被状况平衡被打破,生态环境将会发生退化,甚至荒漠化。2) 改变了温室气体排放状况。冻融交替使得部分微生物细胞破裂而释放碳氮,存活下来的微生物利用释放出来的碳氮进行生命活动,使得温室气体 CO_2 , N_2O 和 CH_4 的释放强度加大^[39-40]。大量实验证实,冻融循环加剧提高 N_2O 排放量^[41-43]。Song 等^[17]的研究表明,青藏高原高寒湿地在非生长季 CH_4 的排放量(占全年排放量的 43.2%~46.1%)与土壤温度和土壤冻融循环过程存在密切关系。3) 改变土壤理化性质。大量研究表明,冻融循环的加剧会增加对凋落物、土壤有机质以及土壤微生物的破坏,进而导致土壤溶液中的可溶性有机物质增加^[44-46]。常宗强等^[10]的研究表明,通过多次冻融交替实验,祁连山森林土壤可溶性有机氮含量显著提高。因此,增温,特别是冬季增温,会严重影响高寒草甸地下生态系统过程。

4 结论

本研究首次采用微根管直接观测与土壤温度间接观测相结合的方法,研究增温对土壤冻融循环过程的影响。研究结果表明全年增温和冬季增温显著降低冻土层的厚度,加剧土壤冻融交替过程。如果青藏高原高寒草甸气候持续温暖化,非生长季土壤冻融交替天数的增加可能会对高寒地区的地上生产力、温室气体排放及地下碳氮循环产生重要影响。

本研究结果有助于进一步认识高寒地区冻土对全球气候变暖的响应,为解决日益严峻的高寒地区环境问题提供理论基础。此外,土壤水分也是影响土壤冻融过程的重要影响因素之一,在今后的实验中应考虑土壤水分对冻融交替过程的影响。

致谢 感谢中国科学院西北高原生物研究所在野外研究期间给予的支持,感谢中国科学院西北高原生物研究所米兆荣博士以及北京大学生态系的刘慧颖和李颖同学在文章修改方面提出的建议。

参考文献

- [1] 王连峰, 蔡延江, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2361-2367
- [2] Cheng G, Wu T. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-

- Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(F2): 93–104
- [3] Zimov S, Schuur E, Chapin F. Permafrost and the global carbon budget. *Nature*, 2006, 312: 1612–1613
- [4] 王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原 D105 点土壤冻融状况与温湿特征分析. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 56–62
- [5] 杨梅学, 姚檀栋, 勾晓华. 青藏公路沿线土壤的冻融过程及水热分布特征. *自然科学进展*, 2000, 10(5): 443–450
- [6] 刘帅, 于贵瑞, 浅沼顺, 等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布. *土壤学报*, 2009, 46(1): 46–50
- [7] Sushama L, Laprise R, Caya D, et al. An RCM projection of soil thermal and moisture regimes for North American permafrost zones. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(20): 891–895
- [8] Iijima Y, Fedorov A N, Park H, et al. Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21(1): 30–41
- [9] Li X, Jin R, Pan X D, et al. Changes in the near-surface soil freeze–thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17(7): 33–42
- [10] 常宗强, 马亚丽, 刘蔚, 等. 土壤冻融过程对祁连山森林土壤碳氮的影响. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 200–206
- [11] 伍星, 沈珍瑶. 冻融作用对土壤温室气体产生与排放的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(7): 1432–1439
- [12] Hansson K, Simunek J, Mizoguchi M, et al. Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and freeze-thaw applications. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2): 693–704
- [13] Radke J K, Berry E C. Soil water and solute movement and bulk density changes in repacked soil columns as a result of freezing and thawing under field conditions. *Soil Science*, 1998, 163(8): 611–624
- [14] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 52(1): 1–8
- [15] Van B E, Prévost D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1638–1643
- [16] Mastepanov M, Sigsgaard C, Dlugokencky E J. Large tundra methane burst during onset of freezing. *Nature*, 2008, 456(4): 628–630
- [17] Song W M, Wang H, Wang G S, et al. Methane emissions from an alpine wetland on the Tibetan Plateau: neglected but vital contribution of non-growing season. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1475–1490
- [18] 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 517–522
- [19] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. *中国冻土*. 北京: 科学出版社, 2000: 44–79
- [20] Yao T, Shi Y, Thompson L G. High resolution record of paleoclimate since the Little Ice Age from the Tibetan ice cores. *Quaternary International*, 1997, 37(2): 19–23
- [21] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729–1742
- [22] Duan A, Wu G, Zhang Q, et al. New proofs of the recent climate warming over the Tibetan Plateau as a result of the increasing greenhouse gases emissions. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(11): 1396–1400
- [23] Li L, Yang S, Wang Z, et al. Evidence of warming and wetting climate over the Qinghai-Tibet Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2010, 42(4): 449–457
- [24] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, et al. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940–2955
- [25] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467: 43–51
- [26] 王澄海, 董文杰, 韦志刚. 青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征. *地理学报*, 2001, 56(5): 523–530
- [27] 高荣, 韦志刚, 董文杰, 等. 20 世纪后期青藏高原积雪和冻土的变化特征及其对气候变化的响应. *高原气象*, 2003, 22(2): 191–196
- [28] 李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 320–328
- [29] 赵新全. *高寒草甸生态系统与全球变化*. 北京: 科学出版社, 2009
- [30] Zhao X Q, Zhou X M. Ecological basis of alpine meadow ecosystem management in Tibet: Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station. *Ambio*,

- 1999, 28(8): 642–647
- [31] Wang Y H, Liu H Y, Chung H, et al. Non-growing-season soil respiration is controlled by freezing and thawing processes in the summer monsoon-dominated Tibetan alpine grassland. *Global Biogeochemistry Cycle*, 2014, 28(10): 1081–1095
- [32] Wang S P, Duan J C, Xu G P, et al. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow. *Ecology*, 2012, 93(11): 2365–2376
- [33] 王绍令, 赵秀峰, 郭东信, 等. 青藏高原冻土对气候变化的响应. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊 1): 157–165
- [34] 高荣, 韦志刚, 董文杰. 青藏高原土壤冻结始日和终日的年际变化. *冰川冻土*, 2003, 25(1): 49–54
- [35] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征. *大气科学*, 2005, 29(5): 671–681
- [36] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系. *大气科学*, 2006, 30(2): 277–284
- [37] 李英年, 关定国, 赵亮, 等. 海北高寒草甸的季节冻土及在植被生产力形成过程中的作用. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 311–319
- [38] 吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 250–255
- [39] Kato T, Hirota M, Tang Y, et al. Strong temperature dependence and no moss photosynthesis in winter CO₂ flux for a *Kobresia* meadow on the Qinghai-Tibetan plateau. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(10): 1966–1969
- [40] Teepe R, Ludwig B. Variability of CO₂ and N₂O emissions during freeze-thaw cycles: results of model experiments off undisturbed forest soil cores. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(2): 153–159
- [41] Preme A, Christensen S. Natural perturbations, drying rewetting and freeze thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(33): 2083–2091
- [42] Müller C, Martin M, Stevens R J, et al. Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9): 1325–1331
- [43] 蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N₂O 排放的影响研究进展. *土壤学报*, 2013, 50(5): 1032–1042
- [44] Fitzhugh R D, Driscoll C T, Groffman P M, et al. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 215–238
- [45] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(10): 1495–1505
- [46] Shilpi S, Zsofia S, Rolf S, et al. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(3): 2148–2154