

水分条件和冻融循环对科尔沁沙地不同土地利用方式土壤呼吸的影响*

褚建民¹ 王琼^{2,3**} 范志平^{2,3} 李法云² 孙学凯³

(¹中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; ²辽宁石油化工大学生态环境研究院, 辽宁抚顺 113001; ³中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要 在东北半干旱地区的科尔沁沙地, 秋冬与冬春季节由温度变化引起的土壤冻融对 CO₂ 排放具有显著影响, 研究水分和冻融的交互作用对土壤呼吸的影响具有重要意义。以科尔沁沙地樟子松疏林草地、农田和草地为研究对象, 通过冻融模拟实验分析水分和冻融循环对不同土地利用方式土壤呼吸的影响。结果表明, 水分条件、土地利用方式和冻融循环均对土壤呼吸影响显著。冻融前草地土壤呼吸显著大于疏林草地和农田, 冻融期疏林草地土壤呼吸显著大于农田, 而冻融后草地土壤呼吸速率显著大于疏林草地。80% 田间持水量时 3 种土地利用方式的土壤呼吸速率显著大于 60% 田间持水量时土壤呼吸速率; 在培养期内 (20 d), 60% 田间持水量时疏林草地、农田和草地的土壤 CO₂ 释放量分别为 21.535、19.908 和 25.037 g CO₂ · m⁻², 80% 田间持水量时分别为 26.407、29.447 和 36.246 g CO₂ · m⁻²。

关键词 土壤呼吸; 冻融; 土地利用方式; 土壤水分

中图分类号 S154.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)6-1399-06

Effects of soil moisture condition and freeze-thaw cycle on soil respiration of different land-use types in Horqin Sandy Land. CHU Jian-min¹, WANG Qiong^{2,3**}, FAN Zhi-ping^{2,3}, LI Fa-yun², SUN Xue-kai³ (¹Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ²Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning, China; ³Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1399-1404.

Abstract: In Horqin Sandy Land, a semiarid region of Northeast China, soil freeze-thaw caused by the temperature change in late autumn, winter, and early spring has significant effects on soil CO₂ emission, and thus, it is of significance to study the effects of the interaction between soil moisture content and freeze-thaw on soil respiration. Taking the silvopasture system, cropland, and grassland in Horqin Sandy Land as test objects, a simulation experiment was conducted to study the effects of soil moisture condition and freeze-thaw cycle on the soil respiration under different land use patterns. The results showed that soil moisture condition, freeze-thaw cycle, and land use pattern all had significant effects on soil respiration. Before freeze-thaw, the soil respiration rate was significantly higher in grassland than in silvopasture system and cropland. During freeze-thaw, soil respiration rate was higher in silvopasture system than in cropland. After freeze-thaw, soil respiration rate was significantly higher in grassland than in silvopasture system. When the soil moisture content was 80% of water-holding capacity (WHC), soil respiration rate was significantly higher than that when the soil moisture content was 60% of WHC. During the whole incubation period (20 days), the amount of soil CO₂ emission from silvopasture system, cropland, and grassland under 60% of WHC was 21.535, 19.908, and 25.037 g CO₂ · m⁻², and that under 80% of WHC was 26.407, 29.447, and 36.246 g CO₂ · m⁻², respectively.

Key words: soil respiration; freeze-thaw cycle; land use pattern; soil moisture.

* 公益性专项基金项目 (RIF2010-12)、国家自然科学基金项目 (30972418)、国家科技支撑计划项目 (2011BAD38B05) 和沈阳市科学技术计划项目 (F10-130-9-00) 资助。

** 通讯作者 E-mail: wangqiong0407@163.com

收稿日期: 2013-03-10 接受日期: 2013-04-12

冻融作用多发生在温带、高纬度和高海拔地区,由于温度变化而引起土壤的理化性质和微生物性状发生改变(Clein & Schimel, 1995; Edwards *et al.*, 2006),进而影响土壤呼吸过程和强度(Mikan *et al.*, 2002; Guicharnaud *et al.*, 2010)。在中国东北地区土壤冻融多受季节性冻融的影响,早春晚秋多发生冻融交替现象(郭东信, 1990)。土壤发生冻融交替现象的一个关键阶段是土壤温度在0℃上下波动,土壤呼吸速率发生变化,表明此时控制土壤呼吸的主要过程发生了改变(Mikan *et al.*, 2002; Lipson & Schmidt, 2004; Panikov, 2009)。研究表明,冻融循环能改变土壤微生物活性和群落结构以及土壤水分和土壤容重等特性,而这些变化都是土壤碳库发生改变的主要原因(Wang & Bettany, 1993)。在温带半湿润半干旱区,水分是该地区生态过程的限制性因子之一。因此,研究该地区水分和冻融的交互作用对土壤呼吸的影响具有重要意义。土壤温度和土壤水分被认为是决定土壤呼吸季节动态的最主要因素(Herrmann & Witter, 2002),其中,水分状况直接和间接影响着土壤中的植物根系、微生物以及土壤动物的生命代谢活动,进而对土壤呼吸产生影响。土壤含水量对土壤呼吸的影响比较复杂,而这种复杂性可能与土壤根系以及微生物本身对水分变化的敏感性有关,亦与温度、植被以及土壤有机质、氮含量等因子的相互作用密切相关,特别是由温度变化引起的冻融循环与含水量的相互作用,在全球气候变化的大背景下对土壤呼吸的研究显得尤为重要。

目前,关于冻融作用对土壤呼吸影响的研究多集中在冻原区和高寒区,而温带地区昼夜冻融现象对土壤呼吸的影响研究较少(王琼等, 2010),特别是水分作为限制因子的半湿润半干旱地区,不同水分条件下冻融循环对土壤呼吸影响方面的研究常被忽视(方精云和王妮, 2007; 王妮等, 2007)。因此,本文以科尔沁沙地草地、樟子松疏林草地和农田为研究对象,通过冻融模拟实验比较不同水分条件下3种土地利用方式土壤呼吸对冻融循环的响应,揭示水分和冻融循环共同作用下土壤呼吸的动态变化,为估算半湿润半干旱区科尔沁沙地不同生态系统冬季土壤呼吸强度变化提供数据支持,为准确预测不同陆地生态系统对全球变化的响应提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

试验地点位于中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地生态实验站(122°21'E, 42°58'N),地处科尔沁沙地东南边缘的内蒙古自治区科左后旗。该地区属温带半湿润半干旱气候,年均降水量450 mm左右,年均潜在蒸发量1780 mm,年均气温6℃,无霜期154 d,土壤类型为风沙土(于占源等, 2007)。本试验选取樟子松疏林草地、农田和沙质草地为研究对象,其中樟子松疏林草地为15年生樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*),密度为245株·hm⁻²,平均株高2.67 m,平均地径8.32 cm,林内草本植物主要有黄蒿(*Artemisia scoparia*)、绿珠藜(*Chenopodium acuminatum*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、细叶胡枝子(*Lespedeza hedysaroides*)、牻牛儿苗等(*Erodium stephanianum*);农田每年种植玉米,春季播种前(5月)施磷酸铵150 kg·hm⁻²,生长盛期(7月)施尿素150 kg·hm⁻²作追肥;草地是自1988年长期围封形成,主要草本植物有黄蒿、狗尾草(*Setaria viridis*)、绿珠藜、牻牛儿苗、委陵菜、细叶胡枝子、披碱草(*Calamagrostis cylindricus*)等。樟子松疏林草地、农田和草地的土壤含水率分别为3.8%、2.4%和4.4%、有机质含量分别为5.03、4.07和5.08 g·kg⁻¹, pH分别为6.4、6.3和6.5,土壤容重分别为1.43、1.54和1.45 g·m⁻³。

1.2 实验设计

2011年11月在樟子松疏林草地、农田和沙质草地样地内设置6个10 m×10 m的样方,在每个样方内采用多点混合法采集0~20 cm层的土壤样品。新鲜样品过2 mm筛去除土壤中的根和杂物,装入塑料袋密封后放入保温箱冷藏并带回实验室进行冻融模拟实验。称取1 kg土壤样品并调节含水率为样地田间持水量(WHC)的60%和80%后放入直径为10.6 cm、长为12 cm的PVC管内,所有样品放入培养箱内静置5 d。根据研究区域冬春季气温实际情况(图1),在-5~10℃温度条件下模拟冻融循环作用。首先调节培养箱温度为10℃时培养4 d为冻融前期,然后开始冻融循环模拟,为确保测量土壤呼吸时土壤处于稳定的冻结和融化状态,调节培养箱温度为-5℃培养2 d、10℃培养1 d作为一个冻融循环,实验连续进行4次冻融循环,此为冻融期,最后调节培养箱温度为10℃继续培养4 d为

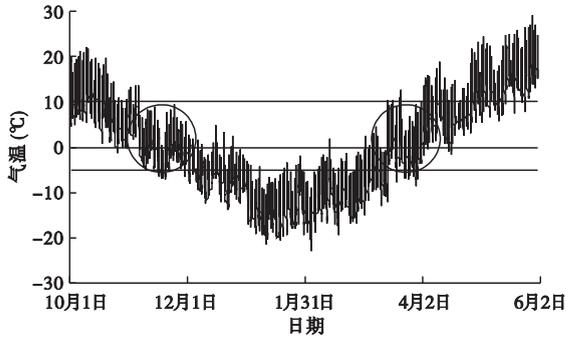


图1 研究区冬春季气温

Fig. 1 Air temperature from October to May in study site

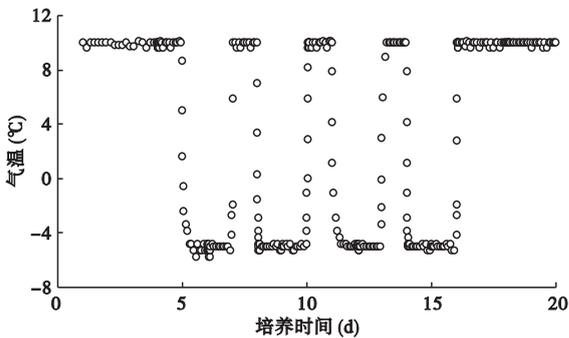


图2 冻融循环模拟实验温度设计

Fig. 2 Schematic representation of the experimental design

冻融后期(图2)。

1.3 土壤呼吸速率及相关因子的测定

土壤呼吸速率在土壤完全冻结和完全融化的稳定阶段测定,采用 Li-8100 土壤碳通量测量系统测定(Li-8100, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA), 土壤温度采用 Li-8100 配置的温度传感器测定。培养箱内气温采用 HOBO 温湿度测量仪测定(HOBO H8 Pro, Onset, Bourne, MA)。

1.4 数据处理

土壤冻融循环实验样品测定的数据均采用 SPSS 14.0、ORIGIN 7.5 和 Excel 数据统计软件进行分析统计。冻融阶段、土地利用方式、水分以及三者的交互作用对土壤呼吸速率的影响采用多因素方差分析。当交互作用显著时,对不同冻融阶段、不同土地利用方式、不同水分条件分别进行均值比较。显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 冻融循环对不同土地利用方式土壤呼吸速率的影响

方差分析结果表明,土地利用方式、冻融处理、水分及其两两交互和三者交互作用对土壤呼吸的影

响显著。草地和农田土壤冻融前、冻融期和冻融后土壤呼吸差异显著,疏林草地冻融前和冻融后土壤呼吸差异不显著(表1)。不同土地利用方式冻融前草地土壤呼吸显著大于疏林草地和农田,而冻融期疏林草地土壤呼吸显著大于草地和农田(表1)。土壤呼吸速率随土壤温度的变化而变化(图3),冻融前土壤呼吸速率较大,冻融期土壤呼吸速率随温度的变化而剧烈波动,当温度降低时土壤呼吸速率也随之降低,当温度升高时土壤呼吸速率也随着升高。随着培养时间的增加,土壤呼吸速率有下降的趋势,冻融后土壤呼吸速率明显小于冻融前(图3)。

2.2 不同水分条件下冻融循环对土壤呼吸速率的影响

从 T 检验结果可以看出,农田土壤冻融后不同水分处理间差异不显著,而草地和疏林草地在冻融前、冻融期和冻融后不同水分处理之间差异均显著(表2)。从图3可以看出,疏林、农田和草地中 80% WHC 时土壤呼吸速率均高于 60% WHC 时的土壤。60% WHC 条件下受冻融作用的影响,在整个培养期疏林草地、农田和草地的土壤呼吸平均速率分别为 0.277 、 0.258 和 $0.314 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 80% WHC 条件下疏林草地受冻融作用的影响疏林草地、农田和草地的土壤呼吸平均速率分别为 0.332 、 0.368 和 $0.454 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3)。

表1 冻融循环对不同土地利用方式土壤呼吸的影响 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 Effect of freeze-thaw cycle on soil respiration in different land use types

土壤水分	土地利用方式	冻融前 (1~4 d)	冻融期 (5~16 d)	冻融后 (17~20 d)
60% WHC	疏林草地	0.403±0.141 aA	0.278±0.092 bB	0.191±0.075 bB
	农田	0.351±0.124 bA	0.234±0.097 aB	0.263±0.096 abC
	草地	0.593±0.132 aA	0.243±0.093 aB	0.320±0.154 aC
80% WHC	疏林草地	0.510±0.082 bA	0.323±0.124 aB	0.237±0.074 bC
	农田	0.796±0.110 cA	0.312±0.109 bB	0.230±0.083 bC
	草地	0.884±0.069 aA	0.374±0.172 aB	0.378±0.064 aB

同列间不同小写字母,同行间不同大写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

表2 不同土地利用方式对土壤呼吸影响的 T 检验 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 2 T -test between soil respiration and different land use types

土地利用	冻融前 (1~4 d)	冻融期 (5~16 d)	冻融后 (17~20 d)
疏林草地	0.028	0.027	0.041
农田	0.002	0.000	0.589
草地	0.003	0.000	0.089

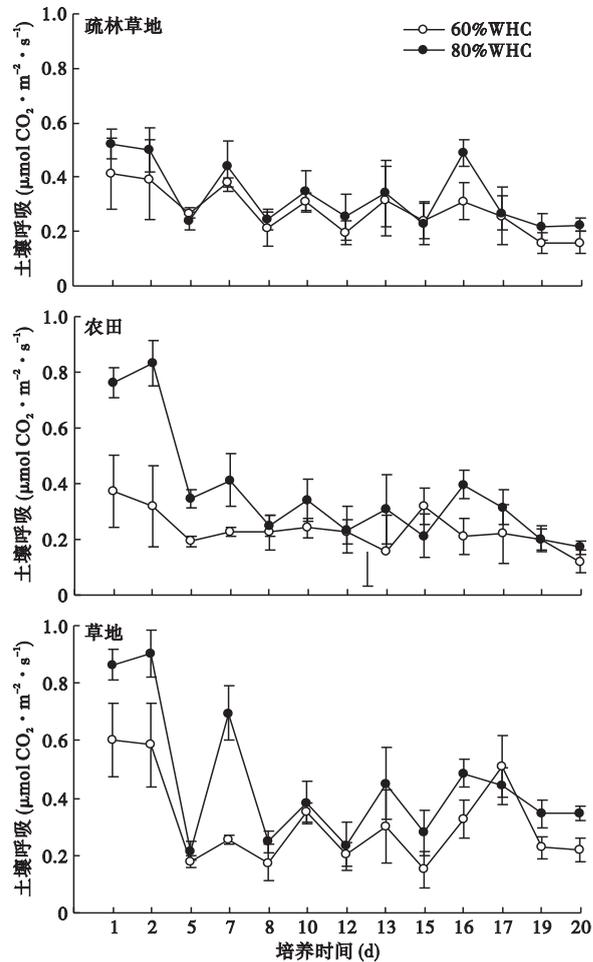


图3 不同水分条件下冻融循环对疏林草地、农田、草地土壤呼吸的影响

Fig. 3 Effects of freeze-thaw cycle on soil respiration in different soil moisture of silvopasture system, corn field and grassland

2.3 不同水分条件下疏林草地、农田和草地土壤 CO₂ 累积释放量

在实验处理期间,水分对疏林草地、农田和草地土壤 CO₂ 释放量影响显著(图4)。针对3种不同土地利用方式而言,60% WHC 土壤 CO₂ 释放量显著< 80% WHC 土壤 CO₂ 释放量。60% WHC 时疏林草地、农田和草地的土壤 CO₂ 释放量分别为 21.535、19.908 和 25.037 g CO₂ · m⁻²。80% WHC 时疏林草地、农田和草地的土壤 CO₂ 释放量分别为 26.407、29.447 和 36.246 g CO₂ · m⁻²。

3 讨论

3.1 冻融循环作用下土壤呼吸的动态变化

冻融循环对土壤呼吸影响显著。土壤呼吸随温度的下降而变小,随温度的升高而变大。许多研究

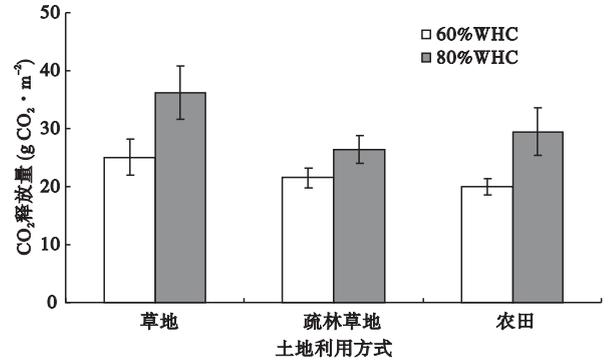


图4 不同水分条件下疏林草地、农田和草地土壤 CO₂ 累积释放量

Fig. 4 The cumulative CO₂ release in different soil moisture of silvopasture, corn field and grassland

指出,在土壤温度低于 0 °C 时土壤呼吸急速下降,而高于 0 °C 时土壤呼吸急速上升(Mikan *et al.*, 2002; Lipson *et al.*, 2004; Panikov, 2009)。土壤温度在 0 °C 左右变动时,土壤发生冻融现象。冻融改变土壤物理性质、土壤微生物活性和群落结构,是土壤呼吸在冻融循环时急剧变化的部分原因(Schimmel & Clein, 1996; Sjursen *et al.*, 2005)。冻融循环对土壤呼吸的影响是一个复杂的生物、物理和化学过程,冻融循环能改变土壤微生物,土壤水分和土壤容重特性。在温带、高纬度和高海拔地区冻融变化直接或间接作用于陆地生态系统地下生态过程(Elberling & Brandt, 2003; Elberling & Ladegaard-Pedersen, 2005; Elberling, 2007),对陆地生态系统碳循环过程产生深远的影响。可见,理解冻融交替作用对陆地生态系统 C 循环的影响是全球变化与区域响应研究领域亟待回答的重要科学命题之一。

3.2 冻融期土壤含水量对土壤呼吸的影响

由于土壤呼吸是一个复杂的生态学过程,是土壤中生物代谢和生物化学过程等所有因素综合作用的结果。土壤温度和含水量被认为是决定土壤呼吸动态变化的最主要因素。水分状况直接影响着土壤有机碳、养分元素的移动性和土壤的通气状况,从而间接地影响微生物、动物等的代谢活动,进而对土壤呼吸产生影响。本研究中,60% WHC 时土壤呼吸速率较小,而 80% WHC 土壤呼吸速率较大。近年来大量的研究表明,冻结土壤中凋落物的分解和土壤呼吸作用仍在进行(Hudgens & Yavitt, 1997; Grace & Rayment, 2000; Grogan *et al.* 2004),在土壤温度高于 -5 °C 条件下,可以检测到微生物的活力和土壤中自由水的存在。另外有研究表明,

-10 °C 仍能检测到土壤微生物的呼吸作用 (Hannu *et al.* 2006)。有学者指出,在低温条件下控制土壤呼吸的主要因素是水分的可获取性,而不是温度 (Happer *et al.* 2005)。本研究中不同土地利用方式土壤呼吸与冻融过程和土壤含水量相关,在融化状态高含水量土壤呼吸速率显著高于低含水量土壤呼吸速率,土壤冻结状态高含水量和低含水量土壤呼吸速率差异不大。

3.3 土地利用方式对土壤呼吸的影响

研究表明,不同土地利用方式的土壤呼吸速率有很大差异 (Raich & Tufekcioglu, 2000; 陈全胜等, 2003; Lal, 2005)。在本研究中,冻融前草地土壤呼吸显著大于疏林草地和农田,这可能与土壤碳库和土壤微生物活性有关。Raich 和 Tufekcioglu (2000) 的研究指出不同的土地利用方式其土壤微生物、土壤结构、土壤有机质均存在差异,而这些都是影响土壤呼吸的主要因素。莫彬等 (2006) 和易志刚等 (2003) 研究得出土壤有机质和微生物量高的土壤中 CO₂ 释放的量。冻融期疏林草地土壤呼吸显著大于农田,冻融后草地土壤呼吸显著大于疏林草地。这种冻融前、冻融期和冻融后不同土地利用方式土壤呼吸的变化可能由于土壤微生物的结构与组成不同,造成了不同土地利用方式的土壤微生物对冻融作用的耐受性不同,导致土壤微生物活性发生变化甚至死亡。冻融作用对不同土地利用方式土壤呼吸的影响是复杂多变的,需进一步加强不同植被类型及土壤水分条件下土壤呼吸对冻融作用响应机理的研究。

4 结 论

冻融前草地土壤呼吸显著大于疏林草地和农田,而冻融期疏林草地土壤呼吸显著大于农田,冻融后草地土壤呼吸显著大于疏林草地。

土壤呼吸速率随土壤温度的变化而变化,冻融期土壤呼吸速率随温度的变化而剧烈波动,当温度降低时土壤呼吸速率也随之降低,当温度升高时土壤呼吸速率也随着升高。

水分对土壤 CO₂ 释放量影响显著。60% WHC 时疏林草地、农田和草地土壤 CO₂ 释放量 < 80% WHC 土壤 CO₂ 释放量。

致 谢 在本研究的完成过程中,得到了中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地生态实验站和辽宁石油化工大学生态环境研究院的大力支持和帮助,在此深表谢意。

参考文献

- 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 2003. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对温度变化的响应. *植物生态学报*, **27**(4): 441-447.
- 方精云, 王 妮. 2007. 作为地下过程的土壤呼吸: 我们理解了多少? *植物生态学报*, **31**(3): 345-347.
- 郭东信. 1990. 中国冻土. 兰州: 甘肃教育出版社.
- 莫 彬, 曹建华, 徐祥明, 等. 2006. 岩溶山区不同土地利用方式对土壤活性有机碳动态的影响. *生态环境*, **15**(6): 1224-1230.
- 王 妮, 汪 涛, 彭书时, 等. 2007. 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气交换过程. *植物生态学报*, **31**(3): 394-402.
- 王 琼, 范志平, 孙学凯, 等. 2010. 冻融交替对科尔沁沙地不同土地利用方式下土壤呼吸的影响. *生态学杂志*, **29**(7): 1333-1339.
- 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 2003. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. *生态学报*, **23**(8): 1673-1678.
- 于占源, 曾德慧, 艾桂艳, 等. 2007. 添加氮素对沙质草地土壤氮素有效性的影响. *生态学杂志*, **26**(11): 1894-1897.
- Clein JS, Schimel JP. 1995. Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures. *Soil Biology & Biochemistry*, **27**: 1231-1234.
- Edwards KA, McCulloch J, Kershaw GP, *et al.* 2006. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology & Biochemistry*, **38**: 2843-2851.
- Elberling B, Brandt KK. 2003. Uncoupling of microbial CO₂ production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**: 263-272.
- Elberling B, Ladegaard-Pedersen P. 2005. Subsurface CO₂ dynamics in temperate beech and spruce forest stands. *Biogeochemistry*, **75**: 479-506.
- Elberling B. 2007. Annual soil CO₂ effluxes in the High Arctic: The role of snow thickness and vegetation type. *Soil Biology & Biochemistry*, **39**: 646-654.
- Grace J, Rayment M. 2000. Respiration in the balance. *Nature*, **404**: 819-820.
- Grogan P, Michelsen A, Ambus P, *et al.* 2004. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms. *Soil Biology & Biochemistry*, **36**: 641-654.
- Guicharnaud R, Arnalds O, Paton GI. 2010. Short term changes of microbial processes in Icelandic soils to increasing temperatures. *Biogeosciences*, **7**: 671-682.
- Hannu TK, Tuula J, Minna M, *et al.* 2006. Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze thaw cycles. *Soil Biology & Biochemistry*, **38**: 1861-1871.
- Happer CW, Blair JM, Fay PA, *et al.* 2005. Increased rainfall

- variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, **11**: 322–334.
- Henry HAL. 2007. Soil freeze-thaw cycle experiments; Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biology & Biochemistry*, **39**: 977–986.
- Herrmann A, Witter E. 2002. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 1495–1505.
- Hudgens E, Yavitt JB. 1997. Land-use effects on soil methane and carbon dioxide fluxes in forests near Ithaca, New York. *Ecoscience*, **4**: 214–222.
- Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, **220**: 242–258.
- Lipson DA, Schmidt SK. 2004. Seasonal changes in an alpine soil bacterial community in the Colorado Rocky Mountains. *Applied and Environmental Microbiology*, **70**: 2867–2879.
- Mikan CJ, Schimel JP, Doyle AP. 2002. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 1785–1795.
- Panikov NS. 2009. Microbial activity in frozen soils. *Soil Biology*, **16**: 119–147.
- Raich JW, Tufekcioglu A. 2000. Vegetation and soil respiration; Correlations and controls. *Biogeochemistry*, **48**: 71–90.
- Schimel JP, Clein JS. 1996. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **28**: 1061–1066.
- Sjursen HS, Michelsen A, Holmstrup M. 2005. Effects of freeze-thaw cycles on microarthropods and nutrient availability in a sub-Arctic soil. *Applied Soil Ecology*, **28**: 79–93.
- Wang FL, Bettany R. 1993. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil. *Journal of Environmental Quality*, **22**: 709–714.

作者简介 褚建民,男,1975年生,博士,副研究员,主要从事植物生理生态研究。E-mail: cjmcaf@163.com
责任编辑 魏中青
