

# 青藏高原高寒草甸土发生季节性潜育化及其生态学意义

林笠<sup>1</sup> 王其兵<sup>2,†</sup> 贺金生<sup>1,†</sup>

1. 北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; † 通信作者, E-mail: qwang@ibcas.ac.cn (王其兵), jshe@pku.edu.cn (贺金生)

**摘要** 为了探究青藏高原高寒草甸非水成化土壤是否发生潜育化, 在2013年12月至2014年3月非生长季的野外观测过程中, 发现青藏高原东北部高寒草甸非水成化土壤存在季节性潜育化, 主要由较高的有机质含量以及土壤季节性冻融产生的厌氧环境造成。在土壤腐殖质层观察到铁锰结核和胶膜层, 呈蓝灰色, 潜育类型属于轻潜型和假潜育型。通过分析得出, 土壤潜育化主要发生在土壤季节性冻融期间, 潜育层厚度与冻融层厚度之间显著正相关。2014年1月的取样分析结果显示, 潜育化显著降低微生物生物量碳, 提高了活性态铁锰含量、阳离子交换量和有效磷含量。季节性潜育化可能对冻融过程中微生物群落结构、根系动态、温室气体排放以及养分循环等方面产生重要影响。由于潜育化只发生在非生长季, 这一现象容易被忽略, 但其对土壤生态过程产生的影响值得关注。

**关键词** 潜育化; 高寒草甸; 土壤冻融过程

**中图分类号** S154

## Soil Seasonal Gleization and Its Ecological Implications in the Alpine Meadow on the Tibetan Plateau

LIN Li<sup>1</sup>, WANG Qibing<sup>2,†</sup>, HE Jinsheng<sup>1,†</sup>

1. Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, 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; † Corresponding authors, E-mail: qwang@ibcas.ac.cn (WANG Qibing), jshe@pku.edu.cn (HE Jinsheng)

**Abstract** In order to investigate soil seasonal gleization process in the alpine meadow on the Tibetan plateau, the soil gleization and its two main controls (high soil organic carbon content (SOC) content and anaerobic environment) were reported in the alpine grassland from Dec. 2013 to March 2014. The results show that the soil seasonal gleization occurs in the humus layer with blue-gray iron and manganese plaques. The soil seasonal gleization occurs during the period of soil freezing and thawing, and a positive relationship between the thickness of gleization layer and frozen layer is observed. The process is pseudogley at mild level, with decreasing soil microbial biomass carbon, and increasing cation exchange capacity (CEC), active  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  and available phosphorus. The results suggest that soil gleization may subsequently affect microbial community, root mortality, greenhouse gas emission and nutrient cycling. Although soil gleization appears in the non-growing season, its impacts on the soil ecological processes should not be ignored.

**Key words** soil gleization; alpine grassland; soil freezing and thawing

土壤潜育化是所有水成土共同经历的过程之一,主要受淹水程度、淹水类型以及母质性质等环境因素影响<sup>[1]</sup>,导致水成土发育成不同类型的潜育土<sup>[2]</sup>。土壤潜育化一般发生在具有充足的水分、丰富的有机质以及兼性或嫌气性微生物区系的区域。在我国南方地区,潜育化水稻土广泛分布,特别是江苏、江西、浙江、广西等省<sup>[3]</sup>。水稻土潜育化已经严重影响到农业生产。潜育化的水稻土还原性物质多,重金属活性增强,土壤微生物活性下降,易导致作物幼苗发僵或坐莖。研究表明,潜育化的水稻土每公顷产量比一般稻田低 1500~2250 kg<sup>[2]</sup>。目前关于土壤潜育化过程的研究集中在水稻田、湿地以及南方丘陵地区<sup>[4-5]</sup>,对于高寒地区土壤潜育化的野外观测以及潜育化过程的研究则很少。

高寒草甸土是青藏高原高寒地区的重要土壤类型之一。由于受地下水浸没的影响,使其形成半水成土,同时存在潜育化现象<sup>[6]</sup>。对于不受地下水影响的高寒草甸土壤,普遍认为不存在潜育化。我们在 2013 年 12 月至 2014 年 3 月非生长季的野外观测过程中发现,虽然高寒草甸非水成化土壤不受地下水影响,但由于受土壤季节性冻融过程影响<sup>[7-8]</sup>以及土壤有机质含量高的特点,高寒草甸土也发生潜育化。

本文选取青藏高原高寒草甸非水成化潜育化土壤作为研究对象,利用土壤剖面法和微根管观察法相结合的技术手段,比较发生季节性潜育化土壤的剖面,研究发生季节性潜育化的形成原因,探讨其对非生长季地下生态学过程的可能影响,为该地区生态系统稳定和地球化学循环研究提供科学数据和理论支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地点概况

本实验完成于中国科学院海北高寒草甸生态系统研究站(海北站)。海北站位于青藏高原东北部的祁连山谷地(101°12'E, 37°30'N, 海拔 3200 m),该区域属于典型的高原大陆性气候,夏季受东南季风气候影响,冬季受西伯利亚寒流影响。年平均温度为-2℃,年平均降水量为 500 mm,超过 80% 的降水分配到生长季<sup>[9]</sup>。土壤为草毡寒冻锥形土(即高寒草甸土)<sup>[10]</sup>,有机质及全量养分丰富。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,土壤有机质含量分别为 63 和 36 g/kg,容重分别为 0.82 和 0.98 g/cm<sup>3</sup>,土壤 pH 值分

别为 7.86 和 7.96。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,主要物种有 *Kobresia humilis*, *Festuca ovina*, *Elymus nutans*, *Poa pratensis*, *Carex scabrirostris*, *Scripus distigmaticus* 和 *Gentiana straminea*<sup>[11-12]</sup>。样地的具体信息参见文献<sup>[13]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 土壤剖面观察及理化性质测定

每个时期随机挖取海北站综合观测场土壤剖面(长 0.5 m, 宽 0.5 m, 深 1 m)5 个。按照土层的形态特征,自上而下划分土壤各层分布,观察并记录各层土壤颜色、潜育程度及结核分布情况(包括颜色、丰度、分布面积以及结核大小等),取样测定土壤 pH 和质地。

2014 年 1 月采集腐殖质层、潜育层和淋溶层的土壤样品,在实验室自然风干后,研磨过 10 目和 100 目筛。土壤 Ph 采用 pH 计法测定,水土比为 5:1;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化滴定法测定;土壤 Eh 采用电极法测定;阳离子交换量采用 NH<sub>4</sub>Cl-NH<sub>4</sub>OAc 法测定;土壤还原态活性铁和锰含量采用 DTPA 溶液浸提-原子吸收光谱法测定;土壤速效磷含量采用 Olsen-P 法测定;土壤微生物生物量碳含量采用氯仿-熏蒸法测定(Kec=0.45)。以上土壤理化性质的测定方法参照文献<sup>[14]</sup>。

#### 1.2.2 冻融层观测

采用微根管法观测冻融层的厚度。2012 年 10 月在海北站综合观测区野外随机安装 5 根微根管,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 1 个月扫描 1 次,得到土壤剖面图片。用 Photoshop CS5 软件(Adobe Systems, Inc. 2010)对观测到的冻融层动态划定冻融层上线、下线位置(靠近地面为冻融层上线,远离地面为冻融层下线),计算冻融层厚度。

### 1.3 统计与绘图

土壤不同层间各理化指标差异的分析统计采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)多重比较分析方法。土壤冻融层与潜育层厚度关系分析采用一元线性回归。所有数据处理采用 SPSS 软件(Version 20),作图采用 Sigmaplot 10.0 软件(Systat Software, Inc. 2005)。

## 2 结果与分析

### 2.1 潜育化土壤剖面形态特征

在 12 月下旬至 3 月上旬,我们在海北站观测场发现土壤存在潜育层(图 1)。潜育化只发生在冬季,呈现明显的季节性(图 2)。

根据土壤剖面各层形态特征以及理化性质进行分层<sup>[15]</sup>,可大致分为 4 层: A, A<sub>g</sub>, B<sub>t</sub>, C, 即腐殖质层、潜育层(锈斑层)、砾幕淀积层和母质层。

1) 腐殖质层: 土体颜色偏黑,腐殖化程度较差,位于土壤剖面 0~40 cm,该层存在大量活根和死根残体,土壤有机质含量较高。

2) 潜育层: 即氧化还原淀积层,土体颜色偏青



图 1 青藏高原高寒草甸土出现季节性潜育化 (2014 年 1 月 6 日拍摄)

Fig. 1 Seasonal soil gleization of alpine grassland on the Tibetan plateau on Jan. 6, 2014

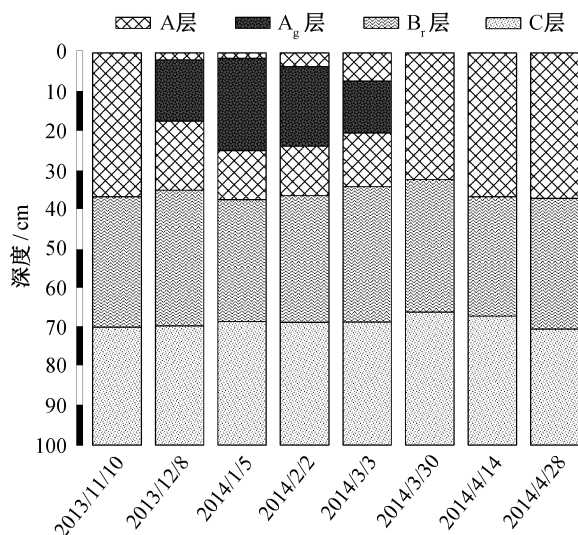


图 2 青藏高原高寒草甸季节性潜育化土壤剖面构型示意图

Fig. 2 Pattern of the soil seasonal gleization along soil profile of alpine meadow on the Tibetan Plateau

灰,位于土壤剖面 10~25 cm,位于土壤腐殖质层中间位置。该层具有灰蓝色的铁锰结核和胶膜层。

3) 砾幕淀积层: 土体偏黄,位于土壤剖面 40~70 cm。该层黏土颗粒多,土壤有机质含量低。

4) 母质层: 有部分的白色母质出现,位于土壤剖面约 70 cm 以下。

### 2.2 潜育层与冻融层的关系

高寒草甸地区由于非生长季气温低且土壤含水量高,土壤 0~40 cm 存在季节性冻土。微根管观测结果表明(图 3),非生长季冻土层存在 150 天左右。2013 年 12 月 8 日,开始观测到土壤冻土层;2014 年 4 月 28 日,土壤冻土层完全消失。土壤冻土层的厚度在 1 月达到最厚,为 42.7 cm。2013 年 11 月至 2014 年 1 月,土壤下层不断冻结,冻土层厚度不断增加。2014 年 2 月至 4 月,土壤表层和底层同时解冻。我们通过土壤剖面观测到,2014 年 1—2 月出现的潜育化程度最高,潜育层厚度最大,分别达到 23.5 和 20.3 cm;新生体结核分布面积大,颜色呈青灰色偏蓝(见图 1 和 2)。

数据分析结果表明,高寒草甸土壤冻土层与土壤潜育层出现在同一时期,并且二者的厚度之间极显著地正相关 ( $R^2=0.97$ ,  $P<0.05$ )(图 4)。高寒草甸土壤冻融过程与潜育化之间存在密切的关系。

### 2.3 土壤分层理化性质

实验结果表明,高寒草甸土壤浅层具有较高的土壤有机质含量(表 1)。潜育层和腐殖质层有机碳含量均显著高于淋溶层,腐殖质层高达 46.7 g/kg,潜育层高达 32.4 g/kg。潜育层土壤阳离子交换量、有效铁和有效锰含量显著增加,分别高出腐殖质层和淋溶层 16.8%~45.0%, 8.7%~24.6%, 20.22%~30.3%。潜育层土壤 pH 为 8.05,比腐殖质层高 0.1。潜育层土壤 Eh 为 167 mV,显著低于腐殖质层 69.5%。低于 200 mV,说明土壤处于还原状态。潜育层土壤有效磷含量高达 2.49 mg/kg,显著高于腐殖质层 12.9%。潜育层土壤微生物生物量碳为 177.6 mg/kg,显著低于腐殖质层 43%。

潜育化土壤有两种分类方法。一种是根据潜育层发生环境的不同,划分为矿质潜育土、潜育土、假潜育土与滞水潜育土等<sup>[1]</sup>。潜育土与矿质潜育土主要受地下水影响发育而成,假潜育土与滞水潜育土则主要受表层潜水层影响发育而成。按照高寒草甸土潜育的形成原因,我们判断其为假潜育土。另一种是根据土壤潜育化程度的强弱划分为沼泽型潜育

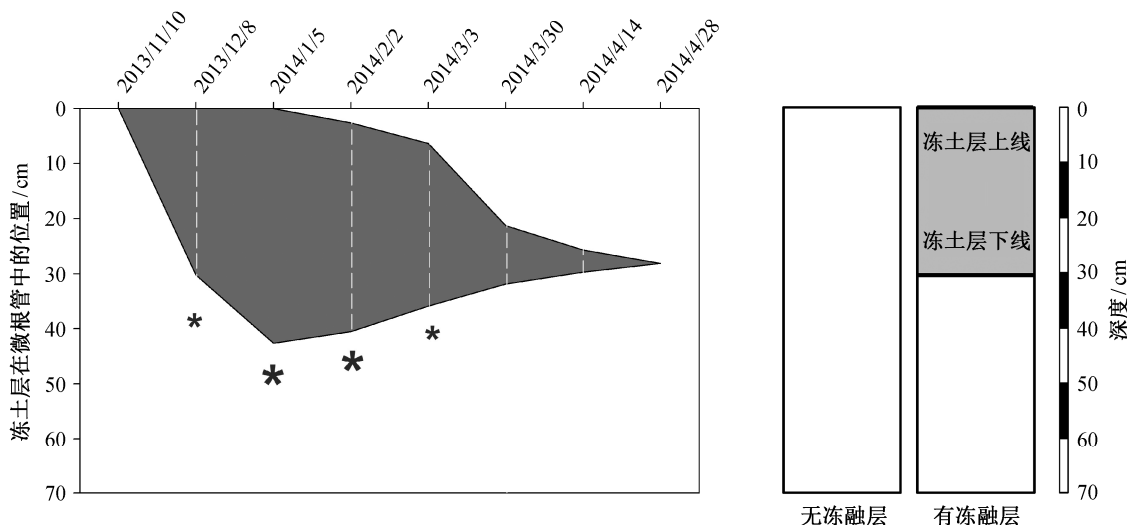


图 3 青藏高原高寒草甸土壤出现潜育期与冻融期的关系

Fig. 3 Relationship between the period of the seasonal soil gleization and soil freezing thawing on the alpine grassland on the Tibetan plateau

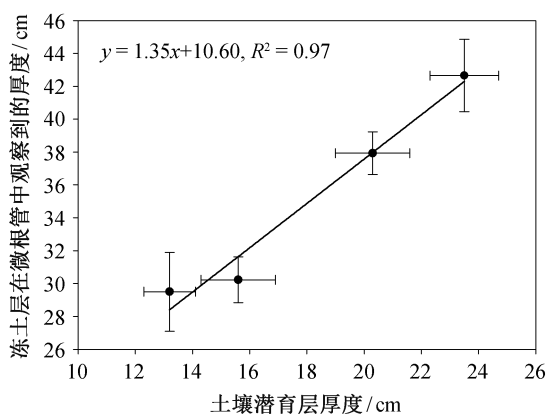


图 4 土壤潜育层与冻融层厚度的关系

Fig. 4 Relationship between the thickness of the soil gleization layer and that of soil freezing thawing layer

土、重潜育型潜育土、中轻度潜育型潜育土和潜育型潜育土 4 种类型<sup>[2]</sup>。按照高寒草甸土养分含量以及潜育程度因素,我们判断其属于轻潜型潜育土。

### 3 讨论

#### 3.1 非水成化土发生季节性潜育化的成因

Von Brümmer 等<sup>[16]</sup>通过总结 190 多篇文献,认为土壤潜育化发生的必须条件是具有充足的水分、丰富的有机质以及兼性或嫌气性微生物区系。青藏高原高寒草甸非水成土虽然不受地下水浸没的影响,但受季节性冻融影响。季节性冻结和融化过程使表层土浸没在冰水中,造成土壤与大气无法进行气体交换,不能形成良好的封闭层,为潜育化的过程提供天然的还原条件<sup>[17-20]</sup>。潜育化发生的另一个重要成因是土壤有机质含量足够高。我们发现潜育层只发生在腐殖质层,即使冻融层出现在腐殖质层与淋溶层的过渡位置,但是由于 40 cm 以下土层有机质含量低,土壤也不发生潜育化。

高寒草甸非水成化土壤与半水成化土壤发生潜育的成因、部位与程度明显不同。长期受地下水影响的高寒草甸土,潜育化发生在淋溶层,终年出现

表 1 土壤剖面各层基本理化性质(2014 年 1 月)

Table 1 Soil properties in different layers along soil profiles in the study site (Jan. 2014)

土壤层	深度/cm	pH (H <sub>2</sub> O)	土壤有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	Eh/mV	阳离子交换量/(mmol(+)·kg <sup>-1</sup> )	有效 Fe/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效 Mn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物生物量碳/(mg·kg <sup>-1</sup> )
腐殖质层	0~40	7.95(0.05) <sup>b</sup>	46.7(9.4) <sup>a</sup>	383.0(15.1) <sup>a</sup>	507.9(52.4) <sup>b</sup>	1.78(0.36) <sup>b</sup>	0.71(0.08) <sup>b</sup>	2.17(0.13) <sup>b</sup>	254.4(7.9) <sup>a</sup>
潜育层	10~25	8.05(0.02) <sup>b</sup>	32.4(7.3) <sup>b</sup>	167.0(35.7) <sup>b</sup>	610.2(42.4) <sup>a</sup>	1.95(0.49) <sup>a</sup>	0.99(0.07) <sup>a</sup>	2.49(0.09) <sup>a</sup>	177.6(12.3) <sup>b</sup>
淋溶层	40~70	8.12(0.02) <sup>a</sup>	10.1(1.1) <sup>c</sup>	145.7(27.8) <sup>b</sup>	335.4(10.5) <sup>c</sup>	1.47(0.37) <sup>c</sup>	0.62(0.04) <sup>c</sup>	1.04(0.11) <sup>c</sup>	83.5(3.5) <sup>c</sup>

注: 不同字母表示显著性差异( $p < 0.5$ )。

锈色斑纹层或铁锰结核等特征<sup>[6]</sup>。不受地下水影响的高寒草甸土潜育只发生在地表和冬季。并且在土壤的淋溶层,由于富集钙及三氧化物,潜育化作用受到抑制<sup>[21]</sup>,因此,高寒草甸非水成化土壤淋溶层不会形成潜育层。

### 3.2 非水成化土发生季节性潜育化的形成过程

青藏高原高寒草甸土壤潜育化过程分成3个阶段:潜育初期、中期和后期。在潜育初期,土壤冻土层使土壤与大气的交换受阻,导致土体内的氧气被好氧微生物消耗尽,形成缺氧还原性厌氧环境;在潜育中期,土壤中丰富的有机质在厌氧细菌的作用下产生大量还原性物质<sup>[22]</sup>,使土壤中稳定态的三价铁离子和四价锰离子还原成活性态的二价铁离子和二价锰。土壤中的氧化物与活性态铁锰离子结合,形成土壤新生体铁锰结核和铁锰氧化物,使土体层呈现青色和青蓝色;在潜育后期,土壤冻土层解冻,结束厌氧封闭状态,铁锰结核重新被氧化,潜育层逐渐消失。

### 3.3 季节性潜育化的生态学意义

大量农田和湿地潜育化研究结果表明,土壤潜育化影响多种生态过程<sup>[23-24]</sup>,比如抑制植物生长<sup>[25]</sup>、改变微生物群落<sup>[26-27]</sup>等。在高寒草甸土潜育层土壤中,有效铁锰的含量显著高于其他土层,大量稳定的 $\text{Fe}^{3+}$ 和 $\text{Mn}^{4+}$ 转变成具有活性的 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Mn}^{2+}$ ,大大增加了形成铁锰毒害的可能性。Laan等<sup>[28]</sup>和Batty等<sup>[29]</sup>研究表明,铁锰毒最直接伤害的部位是根分生区。铁锰毒使根分生区表面形成铁氧化物和锰氧化物,进而可能导致多年生根系在冬季大量死亡。

活性态铁锰含量的增加降低了微生物生物量碳含量,说明可能改变了微生物的群落结构和功能<sup>[30-31]</sup>。在厌氧环境下,好氧性微生物活动受到抑制,厌氧微生物的数量和活性增加,可能会改变物质循环(例如有机质分解矿化等过程)<sup>[32-33]</sup>。同时,土壤铁锰浓度的增加能够促进土壤氧化物溶解度提高和有效磷的释放。这种养分浓度升高现象可能会在早春期间为植物萌发、返青和生长提供更多的养分。

## 4 结论

青藏高原高寒草甸非水成化土壤潜育化只发生

在非生长季腐殖质层,主要原因是季节性冻土层产生的厌氧环境以及腐殖质层高含量土壤有机质。潜育化显著降低土壤微生物生物量碳,提高了土壤pH值、CEC、还原态铁锰含量以及有效磷含量,进而可能影响微生物群落结构、根系周转以及土壤养分循环等生态学过程。因此,研究青藏高原高寒草甸土壤潜育化具有重要的生态学意义。

致谢 中国科学院西北高原生物研究所在野外研究期间给予支持,中国科学院植物研究所对样品采集与分析给予帮助,北京大学朱彪研究员,中国科学院西北高原生物研究所张振华、陈立同助理研究员以及北京大学宋维民博士、王永慧博士、杨新宇硕士在文章修改方面提出建议,在此一并致谢。

### 参考文献

- [1] 董元华,徐琪.土壤潜育化作用的特点及其研究进展.土壤学进展,1990,18(1):9-14
- [2] 熊明彪,舒芬,宋光煜,等.南方丘陵区土壤潜育化的发生与生态环境建设.土壤与环境,2002,11(2):197-201
- [3] Zeng Z, Pan X. Study on soil gleization in subtropic region of China using LBV transformed landsat images. Pedosphere, 1997, 7(3): 219-224
- [4] 龚子同,韦启潘,黄俄,等.关于水稻土的次生潜育化问题.土壤学报,1981,18(2):122-138
- [5] Takai Y, Kamura T. The mechanism of reduction in waterlogged paddy soil. Folia Microbiologic, 1996, 11(4): 304-313
- [6] 乐炎舟.海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及其基本特点.北京:科学出版社,1982
- [7] 刘宗香,苏珍,姚檀栋,等.青藏高原冰川资源及其分布特征.资源科学,2000,22(5):49-52
- [8] 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
- [9] Zhao X, Zhou X. Ecological basis of Alpine meadow ecosystem management in Tibet Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station. Allen Press on behalf of Royal Swedish Academy of Sciences, 1999, 28(8): 642-647
- [10] Group of Chinese Soil Taxonomy Research. Chinese soil taxonomy. Beijing: Science Press, 1995
- [11] 赵新全.高寒草甸生态系统与全球变化.北京:科学出版社,2009
- [12] Wang S, Duan J, Xu G, 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
- [13] Luo C, Xu G, Chao Z, et al. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan plateau. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1606–1617
- [14] Robertson G P, Coleman D C, Bledsoe C S, et al. *Standard soil methods for long-term ecological research*. New York: Oxford University Press, 1999
- [15] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2009
- [16] Von Brümmer G. Redoxpotentiale und Redoxprozesse von mangan-, eisen- und Schwefelverbindungen in hydromorphen Böden und Sedimenten. *Geoderma*, 1973, 12(3): 207–222
- [17] Müllera C, Martina M, Stevensb R J, et al. Processes leading to N<sub>2</sub>O emissions in grassland soil during freezing and thawing. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9): 1325–1331
- [18] Sharma S, Szele Z, Schilling R, et al. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil. *Appl Environ Microbiol*, 2006, 72(3): 2148–2154
- [19] 杨梅学, 姚檀栋, Hirose N, 等. 青藏高原表层土壤的日冻融循环. *科学通报*, 2006, 51(16): 1974–1976
- [20] Wang Yonghui, Liu Huiying, 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 Biogeochemical Cycles*, 2014, 28: 1–15
- [21] Zaidel'man F R, Plavinskii V A, Belyi A V. Effect of deep meliorative loosening on physical properties of soils on heavy cover rocks and on crop yields. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 1986, 41(2): 233–238
- [22] Fageria N K, Rabelo N A. Tolerance of rice cultivars to iron toxicity. *Journal of Plant Nutrition*, 1987, 10(6): 471–504
- [23] Ponnamporuma F N. The chemistry of submerged soils. *Advanced Agronomy*, 1972, 24: 29–96
- [24] 邹元春, 姜明. 湿地土壤铁的分析测定方法比较. *湿地科学*, 2008, 6(2): 136–141
- [25] 臧小平. 土壤锰毒与植物锰的毒害. *土壤学通报*, 1999, 30(3): 1–6
- [26] 张西科, 张福锁, 毛达如. 植物根表铁、锰氧化物胶膜及其在植物营养中的作用. *土壤学进展*, 1995, 23(6): 1–8
- [27] James T G, Jenna E D, Brett M P, et al. Anaerobic methanogenesis in wetland ecosystems: do cut emergent aerenchyma of *Typha × glauca* facilitate increased atmospheric methane emission?. *Ecology*, 2011, 38: 1–12
- [28] Laan P, Blom C. The relative importance of anaerobiosis and high iron levels in the flood tolerance of *Rumex* species. *Plant and Soil*, 1991, 136: 153–161
- [29] Batty C, Baker A, Wheeler BD, et al. The effect of pH and Plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis*(Cav.) Trin-ex. Steudel. *Annals Botany*, 2000, 86: 647–653
- [30] Marschner P, Fu Q L, Rengel Z. Manganese availability and microbial populations in the rhizosphere of wheat genotypes differing in tolerance to Mn deficiency. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166: 712–718
- [31] Nogueira M A, Nehls U, Hampp R, et al. Mycorrhiza and soil bacteria influence extractable iron and manganese in soil and uptake by soybean. *Plant and Soil*, 2007, 298: 273–284
- [32] Keppler F, Hamilton J T, Brass M, et al. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 2006, 439: 187–191
- [33] Ma J, Ma E, Xu H, et al. Wheat straw management affects CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 1022–1028