

草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征

张金霞, 曹广民, 周党卫, 赵新全, 周兴民

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 研究了植物生长季节海北高寒草甸生态系统高寒嵩草草甸覆被下草毡寒冻锥形土的 CO₂ 释放速率。其结果表明: CO₂ 释放速率有明显的日变化和季节动态。日最大排放速率多出现在 14:00~16:00 时, 最小排放速率在 6:00~8:00 时。植物生长季日最大振幅为 797.75 mg/m²·h, 最小振幅 197.33 mg/m²·h。CO₂ 排放白天大于夜晚。不同物候期 CO₂ 释放速率不同, 其顺序为草盛期> 枯黄期> 返青期。生长季土壤 CO₂ 释放速率的范围是 441.72 mg/m²·h ± 155.29 mg/m²·h, 最大日均值为 681.06 mg/m²·h (7 月 16 日), 最低值 176.65 mg/m²·h (6 月 1 日)。退化草地土壤 CO₂ 释放速率明显低于未退化草地, 生长季平均日均值低 137.47 mg/m²·h。相关分析表明: 土壤 CO₂ 排放速率与气温、地表温度、土壤 5cm、10cm、15cm、20cm、30cm 地温均呈显著和极显著相关关系。温度是影响土壤 CO₂ 释放速率的主要因子。
关键词: 草毡寒冻锥形土; CO₂ 释放速率; 气温; 地表温度

Carbon dioxide emission of Mat cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow ecosystem

ZHANG Jin-Xia, CAO Guang-Min, ZHOU Dang-Wei, ZHAO Xin-Quan, ZHOU Xing-Min

(Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Sciences, Xining, 810001)

Abstract: The rate of Carbon dioxide emission was determined in the Mat cryo-sod soil covered with alpine *Kobresia humilis* meadow in the region of Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, using a CI-301PS photosynthetic instrument during the plant growing period (May~Sept.). The results indicated that: The CO₂ emission rate had significant diel fluctuation and seasonal dynamics. Maximum rate of CO₂ emission appeared at 14:00~16:00 and minimum at 6:00~8:00. The maximum diel amplitude was 797.75 mg/m²·h (16 Aug.), the minimum amplitude was 197.33 mg/m²·h (1 June) and the CO₂ emission rate of daytime was greater than that of night. Rate of CO₂ emission was different with changing of the phenological periods, and the pattern was observed in order of Exuberance> Withering> Green up. During the plant growing period, range, maximum and minimum value of diel CO₂ emission rate were 441.72 ± 155.29 mg/m²·h, 681.06 mg/m²·h and 176.65 mg/m²·h, respectively. The rate of CO₂ emission in the degraded Mat Cryo-sod soil was lower than Mat Cryo-sod soil and the diel average value was less 137.47 mg/m²·h than Mat Cryo-sod soil. Correlation analysis showed that CO₂ emission rate significantly correlated with air temperature, soil surface temperature and 5cm 10cm 15cm 20cm 30cm soil temperature. The temperature is a one of dominant factor, and it effects the rate of CO₂ emission in Mat Cryo-sod soil.

Key words: Mat Cryo-sod soil; rate of CO₂ emission; Air temperature; soil temperature

文章编号: 1000-0933(2001)04-0544-06 中图分类号: S151 文献标识码: A

CO₂ 是大气中最重要温室气体, 其排放量远大于其它温室气体, 对气候变暖的贡献作用也远超过其

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(G1998040800), 中国科学院青藏高原研究(KZ951-A 1-204 KZ951-A 1-301, KZ95T-04: KZ95T-06)和中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站基金, 国家自然科学基金(30070147)资助项目

收稿日期: 1999-03-10; 修订日期: 2000-03-24

作者简介: 张金霞(1941~), 女, 河北人, 研究员。主要从事草原生态学研究。

它温室气体, CO₂ 浓度倍增造成全球气候变暖。当前 CO₂ 以每年 1.5 mg/kg 增加率增长, 对人们生存的地球环境产生深刻的影响。因此, 近 50a 来大气温室气体浓度变化引起全球变暖的问题成为人们最为关注的科学问题之一^[1-3]。

生态系统对大气 CO₂ 浓度倍增的反应是关键参数, 高寒草甸广布于青藏高原, 高草草甸植被下的草毡寒冻锥形土有机质含量高(7.0%~20.0%左右), 0~30cm 有机物质总贮量为 27kg/m², 其中腐殖物质占总贮量的 87% 以上^[4]。土壤全量养分丰富, 是碳素的巨大贮存库, 成为温室气体的产生的重要来源。高寒草甸究竟是大气 CO₂ 的源还是汇, 对大气温室气体的影响研究报道较少, 仅见王在模、李家藻对高寒草甸土壤呼吸强度和瓦里关山大气 CO₂ 浓度变化及地表排放影响的研究报道^[5-7]。本文旨在研究植物生长季高寒高草草甸土壤温室气体 CO₂ 的释放规律及其影响因子, 为进一步探讨高寒高草草甸对大气温室气体的贡献作用提供可靠的基础资料。

1 材料和方法

1.1 研究样地

样地设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站地区, 选择了未退化和退化的高草草甸植被类型, 土壤类型以最新土壤系统分类方法确定的草毡寒冻锥形土为研究对象。矮高草草甸的主要优势建群种有矮高草(*Kobresia humilis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nulanus*)、线叶龙胆(*Gentiana fareri*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、早熟禾(*Poa* sp.) 麻花九(*Gentiana straminea*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、二柱头薹草(*Scirpus distigmaticus*)、小高草(*Kobresia pygmaea*)、苔草(*Carex* sp.)。未退化草毡寒冻锥形土的草毡表层发育良好, 没有发生剥蚀脱落, 鼠类活动较少, 地表鼠丘极为罕见。退化草地植被优势种群严重退化, 鼠类活动频繁, 土壤草毡表层剥落面积达 60%, 裸露土层再经风力搬运形成砂砾化退化草场“黑土滩”。其植被亦演替为杂类草, 盖度降至 30%~50%, 更甚者可降到 5%~20% 杂类草也寥寥无几, 生态环境进一步恶化。

1.2 测定方法

每个实验样点设置 3 个重复($n=3$), 测定时将气体采集箱的底座埋入地下大约 5cm, 剪去箱体内地表植物, 箱体底座和箱体间以水密封, 测定仪器采用美国 CD 公司生产的 CF-301PS 便携式光和作用测定仪, 箱体用特制的玻璃纤维密闭箱(高 300mm, 内径 245mm), 进行气体采集, 以闭路系统绝对值测量方法, 气体流速 0.5L/min, 测定箱体 10min 内土壤 CO₂ 释放的浓度, 以近地表植物冠层 CO₂ 的浓度作为本底值, 每次测定前用 374mg/kg 标准气(甘肃光明特种气体开发公司生产)进行仪器校正, 该仪器用碱石灰进行严格的零点校正, 对采样气体进行除尘和脱水。在植物生长季的各测定日重新选择样点。土壤 CO₂ 释放速率由下式计算:

$$F = W \times dc/dt$$

W 为箱体内气体在标准状况下的质量流速(mol/m²s), 其中, $W = V/\Delta t \times 273.15/T_a \times P/1.013 \times 10^5 / 22.41 \times 10000/A$; V 为箱体体积(L); Δt 为开始测定和结束时的间隔时间(min); T_a 为箱体内气体温度(K); P 为大气压力(bar); A 为箱体底面积(cm²); 22.41 为标准状况(温度 273.15K, 压力 1.013bar)下的摩尔体积(L/mol); dc/dt 为测定时间内箱体内 CO₂ 浓度的变化速率。

实验观测频度为, 植物生长季(5~9月份), 每月初和中旬测定 2d, 日观测频度为每间隔 2h 测定 1 次, 昼夜测定 12 次, 分别在每个测定日的 6:00 8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 24:00 至次日 4:00 6:00 进行。在测定日同时测定了气温和 0~30cm 的土壤温度, 并且测定了 0~50cm 每 10cm 为一层的土壤水分。

2 结果

2.1 高寒高草草甸草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的日变化

草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率呈现明显的日变化, 最大释放速率出现在 14:00~16:00 时, 最小值多在早晨 6:00~8:00 时左右。图 2 显示了植物生长季草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的日变化进程, 与气温和地表温日变化趋势一致, 每日呈正弦周期变化趋势, 与 Seiko 结果相似^[3]。图 2 可见, 20cm 土壤温度变化

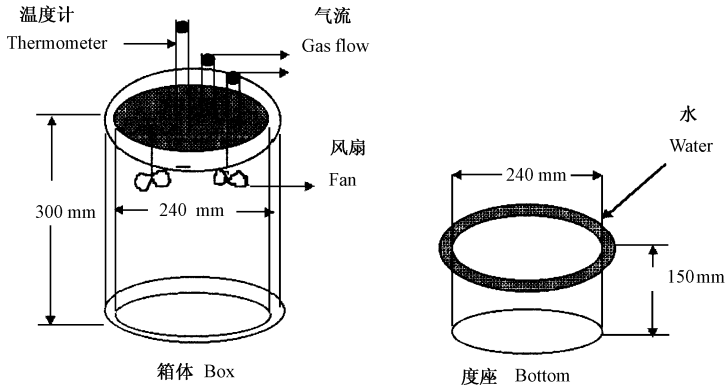


图1 气体采集箱

Fig. 1 Gas collected box

幅度甚小,与 CO_2 释放曲线明显不一致。草毡寒冻锥形土 CO_2 释放速率白天大于夜晚, CO_2 释放速率在5月7日、7月16日、9月16日白天分别是夜晚的1.53倍、1.94倍和1.56倍。

表1 草毡寒冻锥形土 CO_2 释放速率与气温及地温的相关系数Table 1 Correlation coefficients between rate of CO_2 emission and air temperature, soil temperature ($n=10$)

日期 Date	气温 Air temp.	地表温度 Soil surface temp.	10cm 地温 10cm soil temp.	20cm 地温 20cm soil temp.	30cm 地温 30cm soil temp.
5.7	0.8474**	0.9092**	-0.1860	-0.8858**	-0.9399**
5.15	0.7858**	0.7114**	0.7003*	0.6818*	0.6819*
6.1	0.7628**	0.6789*	0.2603	0.2857	0.1287
6.17	0.9039**	0.9359**	0.5099	-0.0560	-0.1834
7.1	0.8721**	0.9581**	-0.0172	-0.7613**	-0.7785**
7.16	0.9248**	0.8628**	-0.2957	-0.8615**	-0.5837*
8.1	0.7019*	0.9329**	0.1025	-0.8186**	-0.4758
8.16	0.9582**	0.9111**	0.0542	-0.7404**	-0.5910*
9.1	0.8963**	0.8225**	-0.1517	-0.4057	0.6861*
9.21	0.9407**	0.6683*	-0.6845*	-0.7787**	-0.6707*

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

CO_2 释放速率与气温、地表温度的相关分析表明: CO_2 释放速率的日变化与气温、地表温呈极显著正相关关系(表1)。说明 CO_2 释放速率的日变化主要受气温和地表温制约,而与土壤深层温度多呈负相关或未达到相关显著水准,这是由于土壤深层温度日变化的滞后效应及土壤下层温度变幅较小所致。

2.2 草毡寒冻锥形土 CO_2 释放速率的季节变化

草毡寒冻锥形土 CO_2 释放速率具有明显的季节变化和物候进程,图3显示了土壤 CO_2 释放速率及15cm地温的季节动态。

在植物生长季(5~9月份) CO_2 释放日均最高值 $681.06 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ (7月16日),最低值为 $176.65 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ (6月1日)。生长季土壤 CO_2 释放速率的范围 $441.72 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h} \pm 155.29 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。日最大振幅为 $797.75 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ (8月16日),最小振幅 $197.33 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ (6月1日)。与王在模测定结果相近^[5],较挪威 Hardangervidda 定位站测定的土壤 CO_2 释放强度($0.41 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$)和美国 Alaska 冻原 CO_2 的排放($4.9 \sim 5.9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$)高^[8,9],较加拿大农业研究站^[10]1988~1990 施肥情况下表层土壤 CO_2 排放($373 \sim 476 \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$)低的多。

6月1日和8月1日是 CO_2 释放速率的低谷值,这可能与天气状况有关。6月1日为阴天,有冰雹,8月

1 日阴天有小雨,大雨直到午夜。尽管这两天的高温及地表温都比前一测定日的高,但因下雨使土壤透气性差,土壤中的空隙以雨水充满,使 CO₂ 不易逸出。

不同物候期土壤 CO₂ 释放速率不同,草盛期(7~8 月份)CO₂ 释放速率最大 $590.11 \pm 250.72 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 较牧草枯黄期(9 月份) $455.46 \pm 127.22 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 及草返青期(5~6 月份) $285.99 \pm 79.66 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 都高。其顺序为草盛期 > 草枯黄期 > 草返青期。

2.3 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率

退化草毡寒冻锥形土使 CO₂ 释放速率减小。在生长季平均减小 $137.47 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。尤其是白天土壤 CO₂ 释放强度低。退化草地因土壤草毡表层受到破坏,引起土壤物理性状及化学性质改变。土壤结构、土壤质地,以致于影响到土壤有机质和土壤养分,代换量、速效养分的降低。退化高草草地由于原生植被破坏,杂类草丛生,更甚者杂类草也少见,地表裸露,盖度甚至可达到 5%~20%。观测到 7 月 16 日未退化草地上生物量较退化草地高,退化草地生物量仅占未退化草地的 11.46%,那么,地下根系量也同样减少,因此活根的呼吸量及死根的分解量都较少。退化草地因地表草毡表层遭到破坏,土壤水分易散失。退化草地各种微生物的数量和纤维素分解活性均较低^[6]。退化草甸微生物对纤维素的分解率仅是未退化草地的 50%,最低 5 月份仅占 16%^[11]。

3 讨论

土壤空气中 CO₂ 的主要来源有土壤中各种有机物质的分解作用,如有机质的矿化,生物来源包括有微生物,土壤动物及植物根系的呼吸作用。

影响土壤气体和大气间气体交换的因素很多,主要有土壤本身的因素如土壤结构、土壤物理及化学性质、土壤孔隙度、土壤粘粒、土壤团聚体结构、土壤通气性、土壤生物和有机质的数量,以及它们所进行的生物化学过程的强度。环境条件也影响 CO₂ 释放速率,植被状况和气象因子的变化对土壤呼吸都产生一定的影响,气象因子主要有气温、土壤温度、降水、气压和风速也影响土壤气体和大气间的交换。高寒草甸生态系统定位站地区年平均气温为 -1.7 , 最热的 7 月份平均气温 < 10 , 最冷 1 月份平均气温 -15 , 植物生长期短,仅有 145d 左右。以下就主要影响 CO₂ 释放的主要因素进行分析。

3.1 温度对土壤 CO₂ 释放速率的影响

土壤有机质的转化包括有矿化过程和腐殖化作用。矿化作用是有机物质在微生物的参与下的氧化过程。所有影响微生物生命活动的因素都影响矿化过程。温度不仅影响微生物细胞的物理反应及生物化学反应速率,而且对环境中的物理化学特性也有影响。高寒高草甸土壤的矿化氮累积量与培养温度相关最显

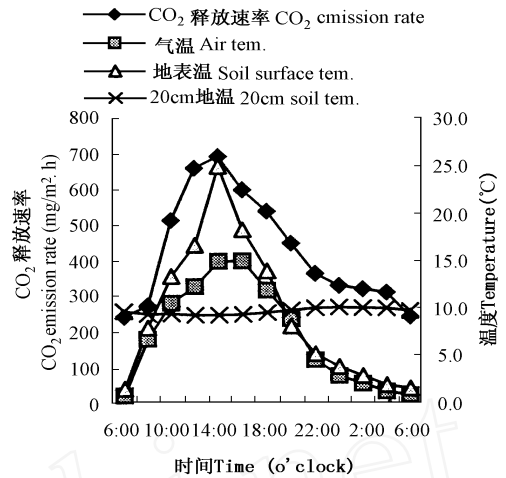


图2 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的日变化进程

Fig. 2 Course of diel variation of CO₂ emission rate in M at Croy-sod soil

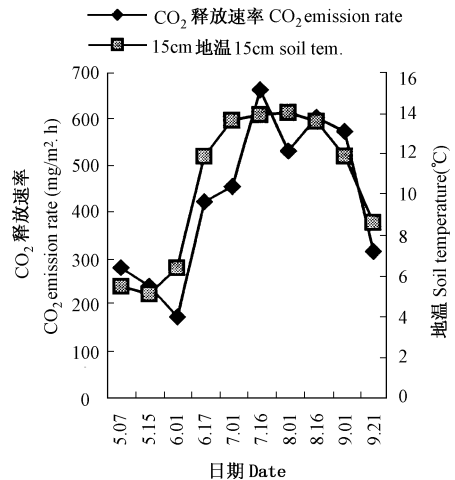


图3 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率及 15cm 地温的季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamics of CO₂ emission rate and soil temperature at 15 cm layer from M at Croy-sod soil

著,并且认为在高寒地区,热量条件对于有机氮的矿化效应较气候较温暖地区敏感^[12]。同样环境温度也是影响高寒高草甸土壤 CO₂ 释放强度最主要的因素。在植物生长季(5~9 月份)将土壤 CO₂ 的日平均释放速率与日平均气温、地表温度、5cm 地温、10cm 地温、15cm 地温、20cm 地温及 30cm 地温进行回归分析,土壤 CO₂ 释放速率与气温及各层地温均呈显著正相关关系(表 2)。与 10cm 以下的地温呈极显著相关关系,说明草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的季节动态主要受 10cm 以下地温影响较大,受剖面下层温度所控制,土壤温度呈明显的日变化和季节变化,两者的变幅随深度而变小。土壤剖面具有较大的垂直温度梯度,温度梯度在土壤中随深度而变小。土壤下层温度不如表土层剧烈,热量释放相对较慢,当表层温度低时,逐渐向上部传递热量,从而影响了土壤的呼吸作用。

土壤 CO₂ 释放速率的日变化与气温和土壤表层温度强烈的相关性,表明土壤微生物的数量和活性随表土层温度的变化而变化,有机物质的矿化也随之波动,土壤 20 cm 及 30 cm 的温度变化幅度甚小,且和气温及表土层温度呈负相关关系,因而 CO₂ 释放速率与之多呈负相关关系。说明土壤 CO₂ 释放主要是地表的贡献作用,与 Steven 的研究结果一致^[9]。

温度不但影响微生物类群的数量而且影响微生物的活性,微生物细胞活动力是受热力学定律控制的,在高山草甸土纤维素分解的季节动态^[11]研究结果表明:高寒矮高草甸土壤的纤维素分解菌的数量和纤维素分解率均在 7、8 月份最高,纤维素分解率与土壤温度呈正相关。其分解速率随温度升高而增加。与 CO₂ 释放速率的季节动态一致。将土壤 CO₂ 释放速率与纤维素菌的数量进行相关分析, $r = 0.9812 (n = 5)$ 达到极显著正相关水准。王启兰对高寒高草甸真菌生物量研究结果表明 5 月份开始菌丝生物量迅速增高^[13], 7、8 月份达最高值,以后开始下降,与土壤 CO₂ 释放速率趋势相同。

表 2 草毡寒冻锥形土 CO₂ 日平均释放速率与日平均气温和地温的相关分析

Table 2 Correlation analysis between diel mean rate of CO₂ emission and diel mean air temperature, and diel soil temperature ($n = 17$)

气温或地温 Air or soil temperature	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficients
气温 Air tem.	$y = 155.31 + 37.55x$	0.6395*
0cm	$y = 156.25 + 28.91x$	0.6767*
5cm	$y = -12.02 + 44.77x$	0.7487*
10cm	$y = -21.67 + 46.21x$	0.8117**
15cm	$y = -13.83 + 43.42x$	0.8985**
20cm	$y = 1.204 + 45.68x$	0.8325**
30cm	$y = 33.40 + 44.28x$	0.8243**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

3.3 根系呼吸对土壤 CO₂ 释放速率的影响

根系生物量也是影响土壤 CO₂ 释放的一个重要因素, Silvola 的研究结果表明,根系呼吸可占到土壤呼吸的 10%~40%^[14],高寒高草甸地下根系的现存量是地上部分生物量的 6.15~9.64 倍,且多集中于土壤表层。高寒高草甸植物根系在土壤呼吸中的贡献作用有待进一步研究。

综上所述,高寒地区土壤 CO₂ 释放受到温度、水分、土壤通气状况,土壤 pH、微生物类群数量及活性、根呼吸、有机物质数量及分解速率、C/N、氧化还原电位、土壤孔隙度等诸多因素都可能影响土壤 CO₂ 释放速率,因此土壤 CO₂ 释放速率是在多种因素协迫下的综合反映,该研究表明了高寒高草甸在严酷的自然环境条件下 CO₂ 释放规律。

参考文献

[1] Ouyang Y and Boersma L. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: III. Model

- simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992, **56**: 1702~ 1710.
- [2] Bertram O. Modeling the influence of hydrological processes on spatial and temporal patterns of CO₂ from an arctic tundra catchment. *Arctic and alpine research*, 1996, **28**(3), 318~ 327.
- [3] Seiko O and Hasegawa S. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an andisol. *Soil Science*. 1995, **160**(2): 117~ 124.
- [4] 鲍新奎. 青海寒毡土有机物质积累. 见: 龚子同主编. 中国土壤系统分类探讨, 北京: 科学出版社, 1992. 195~ 201.
- [5] 王在模, 乐炎舟, 等. 高山土壤呼吸强度的初步研究. 见: 夏武平主编. 高寒草甸生态系统 第一集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982. 174~ 183.
- [6] 李家藻, 朱桂茹, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站纤维微素分解和土壤 CO₂ 释放的研究. 见: 夏武平主编, 高寒草甸生态系统 第一集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982. 162~ 173.
- [7] 温玉璞, 汤洁, 邵志清, 等. 瓦里关山大气 CO₂ 浓度变化及地表排放影响的研究, *应用气象学报*, 1997, **8**(2): 129~ 136.
- [8] Svensson B H, Veum A K and Kjølsvik S K. Carbon losses from tundra soils. In: Wielgolaski, F. E. ed. *Fennoscandian tundra ecosystems, Part 1: plant and microorganisms*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1975. 279 ~ 286
- [9] Steven F, Chris T G, Weixin Cheng. Diurnal and seasonal patterns of ecosystem CO₂ efflux from upland Tundra in the foothills of the Brooks range, Alaska, U. S. A. *Arctic and Alpine Research*, 1996, **28**(3): 328~ 338.
- [10] Burton D L and Beauchamp E G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentration in a soil subject to freezing. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1994, **58**: 115~ 122.
- [11] 姜文波, 王启兰, 杨 涛. 等. 高寒草甸土纤维素分解的季节性动态. 见: 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站编著. 高寒草甸生态系统 第四集. 北京: 科学出版社, 1995. 183~ 188.
- [12] 乐炎舟, 张金霞, 王在模. 高寒草甸土壤有机氮矿化之研究. 见: 中国科学院西北高原生物研究所编. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会文集, 北京: 科学出版社, 1988. 155~ 168.
- [13] 王启兰, 李家藻. 高寒草甸不同植被土壤真菌生物量的季节动态. 见: 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站编著主编. 高寒草甸生态系统 第四集. 北京: 科学出版社, 1995. 169~ 177.
- [14] Jukka Laine, et al 李文华译. 北方沼泽地水位下降对全球气候变暖的影响. *Ambio*, 1996, **25**(3). 179~ 184.