

青藏高原高寒草原碳排放及其迁移过程研究

裴志永, 欧阳华, 周才平

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:采用箱式法通过对青海省五道梁地区高寒草原生态系统表层土壤含碳温室气体的研究发现, 该地区高寒草原系统表层土壤 CO_2 和 CH_4 在 7~8 月份的平均排放通量分别为 $0.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-0.43 \times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 此两种气体的排放通量随时间都有明显的变化特征, 它们的日变化均为明显的单峰型, 而且其中 CO_2 排放通量的变化明显受大气温度变化的影响。地下土壤中 CO_2 和 CH_4 气体浓度随深度的增加呈递减趋势, 进一步的分析表明这两种气体浓度在土壤中与相邻层次的气体浓度有很明显的相关关系, 尤以永久冻土上层边界附近最为显著。

关键词: CO_2 和 CH_4 ; 排放通量; 地表圈层; 高寒草原; 青藏高原

A study on carbon fluxes from alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau

PEI Zhi-Yong, OUYANG Hua, ZHOU Cai-Ping (Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 231~236.

Abstract: Carbon cycle played an important role in the researches of global climate change, however, only few works on carbon dynamics from the alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau have been reported. Using close chamber technique, the determination of carbon emissions from the alpine grassland soil of Wudaoliang area in Qinghai Province showed that the mean fluxes of CO_2 and CH_4 from alpine grassland soil in growing season were $0.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $-0.43 \times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The emissions of CO_2 and CH_4 demonstrated a very clear trend during the daily experiment. Both of the fluxes showed single peak during the daily variations, and air temperature had great influences on the fluxes of CO_2 . The concentrations of CO_2 and CH_4 below ground decreased gradually with depth. Further analyses showed that gas concentration of one layer was exponentially related to the concentrations of its neighbor layers', especially close to the surface of permanent frozen soil.

Key words: CO_2 and CH_4 ; flux; layers; alpine grassland; Tibetan Plateau

文章编号: 1000-0933(2003)02-0231-06 中图分类号: Q14 文献标识码: A

碳是一切有机物的基本成分, 是构成生物体的主要元素, 约占生物体干重的一半左右, 碳循环及其空间分布也与生态系统的维持、发展和稳定性机制有着密切的联系。早在 1894 年 4 月, 瑞典科学家 Svante

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (G1998040800)

收稿日期: 2001-11-02; **修订日期:** 2002-07-09

作者简介: 裴志永 (1976~), 男, 天津人, 博士。主要从事生物地球化学循环方面的研究。E-mail: Pei@cern.ac.cn

致谢: 感谢刘允芬研究员和徐兴良博士的帮助。

Foundation item: by National Key Project for Basic Research on Tibetan Plateau (G1998040800)

Received date: 2001-11-02; **Accepted date:** 2002-07-09

Biography: PEI Zhi-Yong, Doctor. The author's studies mainly focus on biogeochemical cycle. E-mail: Pei@cern.ac.cn

Arrhenius 在伦敦《科学杂志》上发表了题为“空气中的碳酸气体对地球气温的影响”一文,其结论无疑是对二氧化碳排放导致温室效应提出的第一次警告^[1]。一百多年以后的今天,全球气候变暖及其引起的一系列资源环境危机作为当代生态学研究热点问题,正在全球范围内展开大规模的综合研究。随着人类现代文明的进步,工业化的不断发展和资源消耗的与日剧增对于自然界中各种生态系统的影响及危害也越来越大。据统计,工业革命前大气中二氧化碳和甲烷的浓度仅为 $280\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $0.6\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,受人类活动的影响,到 20 世纪末已经分别上升到了 $355\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $1.7\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 左右,并且继续以每年大约 0.5% 和 0.8% 的速度上升^[2~4]。含碳温室气体(CO_2 和 CH_4)浓度的迅速增加成为引发全球气候变暖的主导因子^[5,6],它们的温室作用占总温室效应的 70% 以上^[7,8],所以这两种气体的倍增可能导致全球性的气候变化,并对整个地球生态系统及人类的生存环境产生深刻的影响。

青藏高原是全球海拔最高的一个独特地域单元,是全球唯一仍在活动中的大陆碰撞区,其独特的自然环境和生态系统在全球占有特殊的地位。另外,青藏高原位于中纬度西风带对流层中部,是亚洲季风区气候变化的敏感区,其上的任何变化都可能迅速波及周围地区,所以说发生在青藏高原上的生态演变和全球变化的研究都息息相关。青藏高原上独特的自然地理特征,使得其上生态系统内部碳的迁移循环都与众不同,因而探讨高原生态系统的碳循环特征将对全球变化的研究有重大的意义。本文主要通过研究含碳温室气体(CO_2 和 CH_4)在青藏高原高寒草原土壤表面的排放通量特征,进一步探讨它们在土壤中的动态和迁移变化的内部机制。

1 野外采样及样品分析

1.1 采样位置及其环境特点

野外气体采样是在五道梁附近的小山顶上完成的,五道梁位于我国青海省昆仑山以南青藏公路路标 3010 处,样地具体位置为 93.05°E , 35.15°N ,海拔 4767m。五道梁相对青藏高原的其它地区来讲比较湿润,年平均降雨量高达 266.5mm,其中 6~9 月份降雨比较集中,约占全年总降水量的 84%。地貌类型为高海拔冲积平原,由于地势较高,温度相对偏低,除去 6~9 月份以外其它月平均温度都在 0°C 以下,年平均温度只有 -5.6°C 。该地区主要土壤类型为莎嘎土(高寒草原土),其上的植被类型主要为紫花针茅(*Stipa purpurea*),是典型的高寒草原生态系统^[9]。

1.2 样品收集

野外采样过程除了土壤、植被样品采集和一些常规气候的观测以外,主要是对该地区地下及地表气体样品的收集。其中 2000 年 7 月 25~26 日、8 月 10~11 日采样工作只在白天进行,2000 年 8 月 25~26 日作了一次完整的日变化测量。

1.2.1 表层土壤排放气体收集 土壤表层气体排放样品的收集采用静态箱式法完成。主要采集器由箱体(地上部分)和箱底座(地下部分)组成,其中箱体由白色非透明有机玻璃做成,箱体底面呈正方形,边长 0.5m,箱体高 0.3m,顶部有可供采集气体样品用的气管、温度计和 2 个安装在内侧由 12VDC 电池供电的 $\Phi 0.05\text{m}$ 的电风扇(箱内气体搅匀之用),箱体底部开口(与箱底座吻合扣于底面之上);箱底座由不锈钢片焊制而成,内边长 0.5m,高为 0.04m,其中下部 0.02m 为单层,上部 0.02m 为槽状。整个采集器底面贴地以后与外面大气保持密闭,采样设备为医用三通和 100ml 玻璃注射器,将定时采得的气体样品保存到密闭的气袋中,然后马上特快专递寄回北京分析。采样时,根据地表生物量的不同分别选取 3 个实验点同时进行测定。

1.2.2 地下土壤排放气体的收集 地下采气样的设备是按照 Burton^[10]测量土壤温室气体排放时所用设备仿制的(如图 1 所示),其整体由大、小不锈钢管焊制而成,大钢管长 1.8m,内径为 0.1m,小钢管内径为 0.008m。大钢管被埋于地下,并与土壤保持紧密接触,采样的深度分别为地下 0.2m、0.5m、1.0m 和 1.5m,采样结束后将小钢管顶口封闭以防漏气。另外大钢管边还附有不同深度内带温度计的小钢管,这可以测量采样时各土壤层面的地温。其他采气样设备与 1.2.1 相同。地下采样同时也设置了 3 个重复,采样点之间的距离为 10m 左右。

1.3 样品测定

气体样品直接寄到中国科学院地理科学与资源研究所水文室代为测定,主要分析项目为气体样品中 CO_2 和 CH_4 温室气体的浓度。

CH_4 ($\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}$) 利用惠普 5890 II 型气相色谱仪分析,检测器为离子火焰检测器(FID),分子筛分离柱温度 90°C ,检测器工作温度 150°C ,载气为高纯氮气,流速 $23 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$; CO_2 ($\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}$) 利用 LI-COR 6252 型 CO_2 红外分析仪直接测定。

1.4 土壤表层气体排放速率计算方法

用箱式法采气时在每个试验点设置 3 个重复,采样前 1 天将采集器底下的植株地上部分齐根剪掉,在第 2 天的采样过程中,分别取每次扣箱开始第 0min、10min、30min 和 40min 时刻箱内气体样品,通过不同时刻箱内气体浓度的变化来测定表层土壤气体通量,其计算公式如下:

$$Q_t = \frac{V}{A} \times \frac{273.15}{T_A} \times \frac{P}{101.3} \times \frac{1000}{22.41} \times \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

式中, Q_t 为 t 时土壤气体排放通量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); V 为箱子体积 (m^3); A 为被采集器覆盖的土壤面积 (m^2); T_A 为空气温度 (K); P 为大气压力 (kPa, 试验场地气压为 58.84 kPa); 22.41 为标准状况 (温度 273.15 K , 气压 101.3 kPa) 下的摩尔体积 ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$); ΔC 为时间间隔 t 内箱内气体浓度增量 ($\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}$); Δt 为时间间隔 (s)。其中, $\Delta C / \Delta t$ 是气体观测时间内浓度随时间变化的直线斜率。

2 结果与分析

2.1 土壤表层 CO_2 和 CH_4 排放通量

表 1 所示为 2000 年 7~8 月份五道梁地区青藏高原高寒草原生态系统表层土壤 CO_2 和 CH_4 排放通量的总体状况,其结果表明,此高寒草原生态系统土壤与大气间的 CO_2 交换表现出明显的排放的特点,其平均排放通量为 $0.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 而 CH_4 则主要表现为吸收的特点,其平均吸收量为 $0.43 \times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Dugas 和 Mielnick 等的研究表明,平原地区草原生态系统土壤与大气的 CO_2 交换以排放为主^[11-12],而在海拔 4000m 以上的高寒草原土壤也表现出了相同的 CO_2 排放特征,但是就表层土壤 CO_2 的排放通量来讲,高寒草原土壤 CO_2 的排放量远小于同季节平原地区草原生态系统土壤 CO_2 的排放量(例如我国内蒙古地区典型草原生态系统生长季 CO_2 的排放通量为 $1.95 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[13],另外,研究区域的土壤 CO_2 排放通量也低于同季节海北站高寒草甸生态系统土壤 CO_2 的排放通量(海拔 3215m, 其生长季 CO_2 的排放通量为 $0.73 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[14],如此相对较低的 CO_2 排放量可能是低生物量、低降水量和低温等环境因子共同作用的结果^[12, 15-16]。高寒草原表层土壤 CH_4 与大气的交换波动性很大,但是其总体特征还是表现出土壤吸收 CH_4 的特点,也和其平原地区草原生态系统中 CH_4 的通量特点非常相似^[17],这主要是由于土壤 CH_4 通量变化受湿度影响所导致的^[18]。

2.2 土壤 CO_2 和 CH_4 通量日变化

如图 2 所示为北京时间 2000 年 8 月 25 日 14:00 到 26 日 10:00 高寒草原生态系统表层土壤 CH_4 和 CO_2 通量日变化折线图。图中土壤 CH_4 通量和 CO_2 通量日变化均表现出明显的单峰型特征,其中土壤 CH_4 气体排放最大出现在 18:00 附近,吸收最大出现在 22:00 前后; CO_2 最大排放通量出现在 14:00 左右,最小出现在 6:00 前后,此时的高寒草原土壤表现为吸收大气中 CO_2 的特征。

2.3 表层土壤 CO_2 和 CH_4 通量变化与温度关系

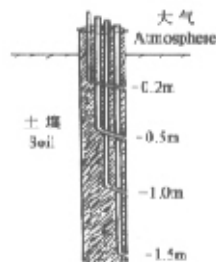


图 1 地下采样示意图

Fig. 1 Diagram of the facilities used

表 1 高寒草原土壤表层气体排放通量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

	平均通量 Mean flux	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	样品个数 Number of samples
CO_2	0.46	0.23	1.18	-0.27	30
CH_4	-0.0004	0.0080	0.0013	-0.0046	30

通过上面的结果可以看出,高寒草原土壤 CO_2 和 CH_4 通量都随时间变化均为明显的单峰型分布特征,土壤气体排放通量可能会受大气温度变化的影响,下面将进一步分析高寒草原生态系统土壤气体通量变化与大气温度的关系。如图 3 所示为北京时间 2000 年 8 月 25 日 14:00 到 26 日 10:00(假设此时段内其它环境因子基本保持不变)土壤 CO_2 通量与大气温度的变化关系, CO_2 排放通量变化与大气温度的相关系数为 0.89 ($n = 6$),此结果与董云社等在内蒙古草原的测定结果基本一致^[13],草原生态系统土壤 CO_2 排放明显受大气温度变化的控制。当分析土壤 CH_4 通量与大气温度的变化关系时,发现它们之间并没有显著的相关关系($R^2 = 0.32$),此结果正如 Castro 和 Bilings 在研究森林土壤 CH_4 动态所指出的那样,土壤 CH_4 的排放变化并不受温度变化的影响^[19,20]。在分析土壤气体通量变化与地温(地下 0.05m、0.1m、0.15m、0.2m、0.5m、1.0m 和 1.5m)的关系时候,发现除了 CO_2 排放通量与地下 0.05m 处地温有明显的的的相关关系($R = 0.71, n = 6$)以外,气体排放通量与地下各深度层次温度的变化几乎没有什么必然联系。

2.4 土壤中 CO_2 和 CH_4 浓度变化

表 2 所示为土壤中不同梯度 CO_2 的平均浓度值。由此可以明显看出,地下土壤气体中 CO_2 浓度变化较大,最大值与最小值的差值大于 $500\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 CO_2 浓度变化在不同梯度上也有一定的规律可寻,地下土壤中的 CO_2 含量随深度的增加呈递减趋势,而至 1.5m 处达到最小,此处长年温度保持在 0°C 左右,为永久冻土层的上界。 CH_4 在不同梯度下的浓度变化趋势(见表 3)与 CO_2 很相似,土壤中浓度差异比较大。 CH_4 浓度随深度增加而递减,到永久冻土层上界达到最小,此结果与 Dueñas 在西班牙 Málaga 地区研究得到的结果一致^[21]。

表 2 土壤中不同梯度 CO_2 的浓度

Table 2 Concentrations of CO_2 from different layers in soil ($\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}$)					
梯度(m) Layers	平均浓度 Mean concentration	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	样品个数 Number of samples
-0.2	696.61	131.41	1155.5	509.73	25
-0.5	662.84	109.13	978.77	459.23	26
-1.0	654.01	112.48	821.32	487.25	27
-1.5	650.33	143.22	930.11	442.20	27

2.5 相邻层之间 CO_2 和 CH_4 关系

表 4 中所列的是 2000 年 8 月 25 日 14:00 到 26 日 10:00 所测定的地下土壤中各梯度之间 CO_2 浓度和表层土壤排放通量的相关系数。在此主要关心靠近对角线的相关系数值,它们代表相邻层次 CO_2 浓度的相关关系。由表中可以看出,除了与表层土壤排放通量(Q_e)有关的数据以外,其它的相关系数都比较大,这说

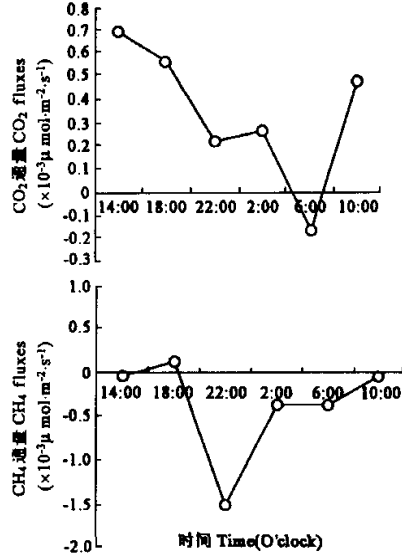


图 2 CO_2 通量($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和 CH_4 通量($\times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)日变化

Fig. 2 Variations of CO_2 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and CH_4 ($\times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) fluxes

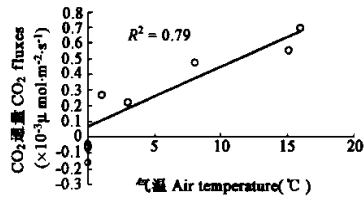


图 3 土壤 CO_2 排放($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)与大气温度($^\circ\text{C}$)关系

Fig. 3 Relationship between CO_2 fluxes($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and air temperature($^\circ\text{C}$)

明 CO₂ 在地下土壤中临近层的分布浓度有很好的正相关关系。

表 3 土壤中不同梯度 CH₄ 的浓度

Table 3 Concentrations of CH ₄ from different layers in soil (ml · m ⁻³)					
梯度(m) Layers	平均浓度 Mean concentration	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	样品个数 Number of samples
-0.2	1.7586	0.9075	3.6019	0.2667	25
-0.5	1.5447	0.7618	3.1589	0.2397	26
-1.0	1.2242	0.6789	2.7093	0.2307	27
-1.5	1.2042	0.7011	3.4532	0.2266	27

表 5 中所示为同时间地下土壤中各梯度之间 CH₄ 浓度和表层土壤排放通量的相关系数。与 CO₂ 相比, CH₄ 浓度分布在地下各临近层之间的相关关系更显著。在分析 CO₂ 和 CH₄ 在地下不同深度临近层次中浓度的关系时,发现一个很明显的共同特点,这两种气体的浓度变化分别在 -1.5m~-1.0m 的相关系数都是最大,其次是 -0.5m~-0.2m,而 -1.0m~-0.5m 相关系数都是最小,即浓度在永久冻土上层边界附近分布的相关关系最显著,土壤表层次之,中间层的相关关系最弱,此现象可能与地温、土壤表层生物作用及土壤活动性有关,具体细节机制还有待进一步的研究。

表 4 各个相邻层之间 CO₂ 浓度及表层土壤排放相关关系
Table 4 Co-relationships of CO₂ concentrations from different layers (n=6)

土壤层(m) Soil layers	Qt	-0.2	-0.5	-1.0
-0.2	0.28	1		
-0.5		0.74	1	
-1.0			0.59	1
-1.5				0.75

表 5 各个相邻层之间 CH₄ 浓度及表层土壤排放相关关系
Table 5 Co-relationships of CH₄ concentrations from different layers (n=6)

土壤层(m) Soil layers	Qt	-0.2	-0.5	-1.0
-0.2	0.45	1		
-0.5		0.79	1	
-1.0			0.57	1
-1.5				0.91

3 结论与展望

通过对五道梁地区青藏高原高寒草原生态系统含碳温室气体迁移及其变化的研究,得出以下结论并需进一步探讨:

- (1)高寒草原生态系统土壤与大气中的 CO₂ 交换表现出明显的排放的特点,7~8 月份平均排放通量为 0.46μmol · m⁻² · s⁻¹;而 CH₄ 则主要表现为吸收的特点,观测期间平均吸收量为 0.43×10⁻³μmol · m⁻² · s⁻¹。
- (2)表层土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放通量有明显的日变化特征,均为单峰型,进一步的研究表明 CO₂ 的排放通量与大气温度有显著的正相关关系。
- (3)土壤中 CO₂ 和 CH₄ 的浓度都随地下深度的增加而递减,到永久冻土层上界达到最小。
- (4)CO₂ 和 CH₄ 在土壤中相邻层次之间的浓度分布有明显的正相关关系。土壤中气体浓度在永久冻土上层边界附近分布的相关关系最显著,土壤表层次之,中间层的相关关系最弱,此原因尚须进一步研究探讨。

References

[1] Elisabeth K. Greenhouse gas emission, Asia and the Pacific; Moving ahead. *AMBIO*, 1996, 25 (4): 219.
[2] Neftel A, Moor E, Oeschger H, et al. Evidence from polarice cores for the increase in atmosphere CO₂ in the past two centuries. *Nature*, 1985, 315: 45~47.
[3] Castro M S, Stedudler P A, Mellio J M. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Glob. Biogeochem. Cyc.*, 1995, 9: 1~10.
[4] Phillips R A L, Whalen S C, Schlesinger W H. Influence of atmospheric CO₂ enrichment on methane consumption

- in a temperate forest soil. *Glob. Chan. Biol.*, 2001, **7**: 557~563.
- [5] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, **289**: 270~277.
- [6] Tett S F B, Stott P A, Allen M R, *et al.* Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 1999, **399**: 569~572.
- [7] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, 1990, **344**: 529~531.
- [8] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to greenhouse effect. *Science*, 1990, **248**: 1217~1219.
- [9] Zheng D, Zhang R Z, Yang Q Y. On the natural zonation in the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geograph. Sin.*, 1979, **34**(1): 1~11.
- [10] Burton D, Beauchamp E G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, **58**: 115~122.
- [11] Dugas W A, Reicosky D C, Kiniry J R. Chamber and micrometeorological measurements of CO₂ and H₂O fluxes for three C-4 grasses. *Agric. For. Meteorol.*, 1997, **83**(1-2): 113~133.
- [12] Mielenick P C, Dugas W A, Johnson H B, *et al.* Net grassland carbon flux over a subambient to superambient CO₂ gradient. *Glob. Chan. Biol.*, 2000, **7**: 747~754.
- [13] Dong Y, Zhang S, Qi Y, *et al.* Fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation. *Chin. Sci. Bull.*, 2000, **45**(17): 1590~1594.
- [14] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, *et al.* Carbon dioxide emission of Mat cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 544~549.
- [15] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Glob. Chan. Biol.*, 2001, **7**: 667~677.
- [16] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability temperature and moisture on soil respiration in eucalyptus pauciflora forest. *Plant Soil*, 1997, **190**(1): 127~141.
- [17] Kammann C, Grünhage L, Jäger H J. Methane flux from differentially managed grassland study plots: the important role of CH₄ oxidation in grassland with a high potential for CH₄ production. *Environ. Pollut.*, 2001, **115**: 261~273.
- [18] Huang G H, Xiao D N, Li Y X, *et al.* CH₄ emissions from the reed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(9): 1494~1497.
- [19] Castro M S, Steudler P A, Mello J M. Exchange of N₂O and CH₄ between the atmosphere and soil in spruce-fir forests in the northeastern United States. *Biogeochemistry*, 1993, **18**: 119~136.
- [20] Billings S A, Richter D D, Yarie J. Sensitivity of soil methane fluxes to reduced precipitation in boreal forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, **32**: 1431~1441.
- [21] Dueñas C, Fernandez M C, Carretero J, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes in soils evaluated by ²²²Rn flux an soil air concentration profiles. *Atmos. Environ.*, 1999, **33**: 4495~4502.

参考文献

- [9] 郑度, 张荣祖, 杨勤业. 试论青藏高原的自然地带. *地理学报*, 1979, **34**(1): 1~11.
- [14] 张金霞, 曹广民, 周觉卫, 等. 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征. *生态学报*, 2001, **21**(4): 544~549.
- [18] 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥, 等. 芦苇湿地温室气体甲烷(CH₄)排放研究. *生态学报*, 2001, **21**(9): 1494~1497.