

文章编号: 1007-0435(2001)04-0307-06

环境因子对暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放速率的影响*

曹广民, 李英年, 张金霞, 赵新全

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放的日变化与气温及地表温度的日变化过程同步, 只是气温日变化峰值推迟了 2 h。地表温度与土壤 CO₂ 释放速率呈极显著正相关。暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂ 释入的季节动态受土壤温度(0~ 30 cm, 特别是 10 cm)、真菌菌丝生物量(0~ 20 cm)、土壤有机碳现存量(0~ 20 cm)和生物量的影响。它们均与土壤 CO₂ 的释放速率呈显著或极显著的正相关关系。过度放牧使土壤容重增大, 孔隙度和土壤有机碳贮量减小, 从而降低土壤 CO₂ 释放速率, 方差分析结果表明, 差异显著。而土壤湿度及降雨对土壤 CO₂ 释放速率影响较小。

关键词: 暗沃寒冻锥形土; CO₂ 释放速率; 高寒灌丛

中图分类号: S154.1 **文献标识码:** A

Effect of Soil Circumstances Biogeochemical Factors on Carbon Dioxide Emission from Mollic-Gryic Cambisols

CAO Guangmin, LI Yingnian, ZHANG Jinxia, ZHAO Xinquan

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

Abstract: Soil CO₂ emission is the production of microbial decomposition of soil organic substances and respiration of plant roots, which is effected by soil biotic and environmental factors. Daily changes in soil CO₂ emission from Mollic-gryic Cambisols was paralleled with daily trends of air temperature and soil surface temperature, but the peak of air temperature delay 2 hours than that of soil CO₂ emission and soil surface temperature. Soil surface temperature had strong effect on CO₂ emission and both exhibited a highly significant relationship. However, that were became weak at 5 cm underground. Soil temperature (at 0~ 30 cm, especially 5 cm), fungal hyphal biomass (within 0~ 20 cm), humic content (within 0~ 20 cm) and live extant of aboveground cause seasonal variation of soil CO₂ emission and all exhibited a significant or extremely significant level to soil CO₂ emission. Over grazing made the rising of soil capacity and the decrease of porosity and organic substance, they can reduce soil CO₂ emission. The difference in CO₂ emission, stocking intensities were separately 2.55 and 5.35 sheep/s/km² was significantly by F-test. Precipitation and soil moisture has not affected soil CO₂ emission from Mollic-gryic Cambisols. Sudden climate change would lead to strong fluctuation soil CO₂ emission.

Key words: Mollic-Gryic cambisols; CO₂ emission; Alpine shrub

土壤 CO₂ 的释放是大气温室气体的重要地表生态源之一, 它是土壤微生物等在不同环境因子的综合影响下, 对土壤有机物质分解作用的结果。土壤

温室气体的释放不仅很大程度受到众多土壤理化性状的强烈影响, 而且还受到环境因子及人为活动的强迫作用。

收稿日期: 2001-05-31; 修回日期: 2001-09-20

* 国家重点基础研究专项经费(G1998040800)、中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-1-07)、国家自然科学基金(30074147)和中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站基金资助

作者简介: 曹广民(1963-), 男, 汉族, 副研究员, 主要从事草地生态系统物质循环方面研究工作, 已发表论文 30 余篇

不少研究表明,植物根系呼吸释放的 CO_2 是土壤呼吸的重要组成部分,约占土壤呼吸释放 CO_2 量的10%~40%^[1-3]。土壤物理性状,如质地、机械组成、通气状况、水分运移等都会对土壤温室气体释放强度产生强烈的影响作用^[4-8]。同时证实,土壤有机物质是土壤 CO_2 产生的物质基础,土壤速效养分又影响到土壤微生物分解有机物质中的元素配比^[9,10]。研究者还指出,土壤温室气体释放不仅受到环境温度的强烈影响,而且随环境温度的升高而迅速增强^[11,12]。土壤微生物是土壤温室气体的主要生产者^[13-15]。土地利用也会对土壤温室气体的释放产生强烈影响^[16-18]。

暗沃寒冻锥形土是广布青藏高原山地阴坡及洪积扇下部的主要土壤类型之一,土壤有机质含量高达10%~17%,常年处于湿润状况^[19]。它不仅为温室气体的产生提供了丰富的物质基础,也具备了良好的环境条件。对植物生长季暗沃寒冻锥形土土壤 CO_2 释放的日变化及季节动态状况,我们曾作过分析报道^[20],但对各种物理环境及气象因子如何影响土壤 CO_2 释放,该文将作较深入的研究。

1 材料与方法

1.1 自然概况

样地设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)试验区。地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷,位于101°19'E, 37°37'N,海拔3200 m。年均气温-1.7℃,最暖(7月)和最冷(1月)平均气温分别为9.8℃和-14.8℃,年均降水量580 mm,主要集中于5~9月,占年总降水量的80%。该地区地带性植被多为寒冷中生多年生高寒矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸(土壤湿度较低的滩地、阳坡)和金露梅灌丛(*Potentilla fruticosa*)草甸(滩地、阴坡)为主要建群种的植被类型。植被分布均匀,植株低矮、密集、覆盖度大,初级生产力低等。洪积-冲积物(滩地)、坡积-残积(坡地)及古冰水沉积母质在不同水热条件下,受植被改造发育多有寒冻锥形土的大量分布。土层浅薄,有机质含量丰富。

1.2 试验样地

选择广布于青藏高原的暗沃寒冻锥形土为研究

对象,植被以金露梅灌丛为主,尚有山柳(*Salix orientalis*)等。放牧强度设轻牧区和重牧区,样地面积为8.02 hm²,共设5个试验区。仅在轻牧区和重牧区进行 CO_2 释放速率的测定。放牧家畜为成年同龄藏羯羊,按当地高寒牧场传统的两季轮牧习惯,夏秋季在金露梅草场放牧,放牧时间为5个月(5~9月)。轻牧区2.55只羊/hm²,牧草利用率30%,重牧区5.35只羊/hm²,牧草利用率60%^[21]。

1.3 土壤呼吸测定

1.3.1 选择金露梅灌丛分布比较均匀、地势较为平坦的典型样地。试验开始前,剪去植物地上的部分,清除地表凋落物及牲畜粪便等杂物。用小刀将土壤挖开宽1 cm,高5 cm,内径24.5 mm的圆形槽,外周用湿土填实密封,以密闭箱(高30 mm,内径24.5 mm)进行气体收集。箱体与底座间用水进行密封(图1)。

1.3.2 CO_2 采用CF-301PS光合作用测定仪的Absolute功能进行测定,仪器与箱体本间采用密闭回流式连接方法。每次测定的前一天,用374 $\mu\text{L/L}$ 标准 CO_2 气(甘肃光明特种气体开发公司生产)校准仪器。空气中水汽由硅胶脱除。

1.3.3 田间土壤 CO_2 释放速率在1998年植物生长季(5~9月)观测,每月在5日和20日观测两次,日观测频度12次,分别在每日10:00h开始,至翌日10:00h结束,每2h观测一次,每个样点测定10 min内 CO_2 释放累积值(预试验结果表明,在10 min内箱体 CO_2 浓度呈线性增加)。每次设置三个重复。

1.4 影响因子测定

在土壤 CO_2 释放速率测定的同时,记录箱体温度、大气压力、气温和不同土层(0、5、10、15、20和30 cm)地温,采集(0~10、10~20、20~30和40~50 cm)的土样。

1.4.1 用烘干法测定土壤含水量。

1.4.2 用收割法测定地上生物量。

1.4.3 用土柱法测定根系现存量。

1.4.4 每月下旬在 CO_2 释放测定日,采集土壤样品,风干过筛,用丘林法测定土壤有机质含量。

1.4.5 放牧强度采用放牧实验组数据^[21]。

1.5 计算方案

土壤 CO_2 释放速率计算公式:

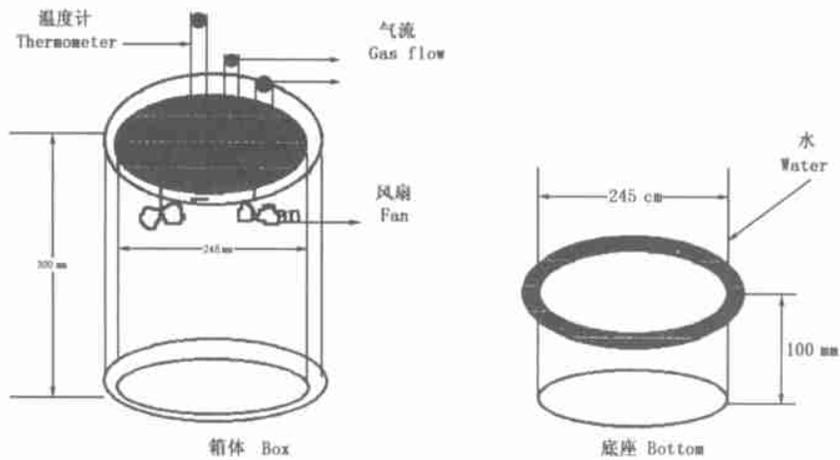


图1 气体采集箱

Fig 1 Gas collected box

$$f = p \Delta c / \Delta t$$

$$p = 120323.35V \cdot P / T_a \cdot 1/A$$

其中: f 为 CO₂ 释放速率 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); p 为标准状况下 CO₂ 密度; Δc 为计时时段 Δt (s) 内 CO₂ 浓度上升值 ($\mu\text{L}/\text{L}$); T_a 为空气温度 (K); A 为土壤面积 (cm^2).

2 结果与分析

2.1 土壤 CO₂ 释放速率

2.1.1 日变化动态 正常天气状况下, 暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放速率在凌晨 6 h 为最低点, 随后逐渐增强, 14 h 达最高, 而后呈下降趋势, 至翌日凌晨又趋最低。表现出土壤 CO₂ 释放速率的日变化呈一高一低的单峰式曲线变化规律, 从 6 h 的低谷开始到 14 h 的峰值结束, 增加过程约持续 8 h, 而从峰值到翌日凌晨下降过程比较缓慢, 持续约 16 h (图 2)。在植物生长期 5~9 月, 暗沃寒冻锥形土 CO₂ 平均释放速率 $478.08 \pm 151.52 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 变异系数 31.69%。日间土壤 CO₂ 最高释放速率 $690.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 最低为 $338.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 日振幅为 $351.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.1.2 季节动态 暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放速率从牧草返青期 (5 月上旬至 6 月上旬) 缓慢降低, 以后又急剧增加, 7 月上旬达最高点。随后又逐渐下降, 直至生长季末期 (图 3)。在植物生长期间也表现出一高一低的变化趋势。在生长季内, 暗沃冻锥形土土壤 CO₂ 平均释放速率平均值 $11.56 \pm 3.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$

$\cdot \text{d}^{-1}$, 变异系数 33.91%。最大值约 $16.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 出现在 7 月 5 日, 最小值 $6.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 出现在 9 月 25 日, 变化振幅 $10.72 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2 影响土壤 CO₂ 释放的环境因子及物理机制

暗沃寒冻锥形土 CO₂ 的释放是土壤微生物分解土壤有机质和植物根系呼吸等共同作用的结果。

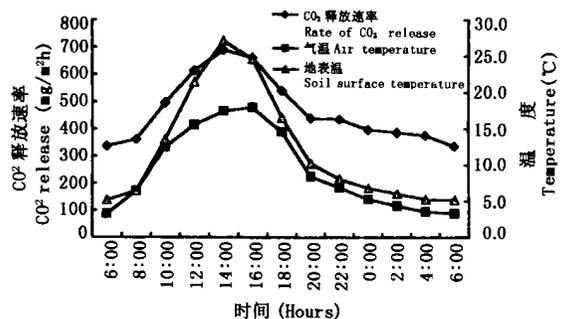


图2 土壤 CO₂ 释放速率日变化

Fig 2 Diel change in rate of CO₂ emission from Mollic-Gryic cambisols

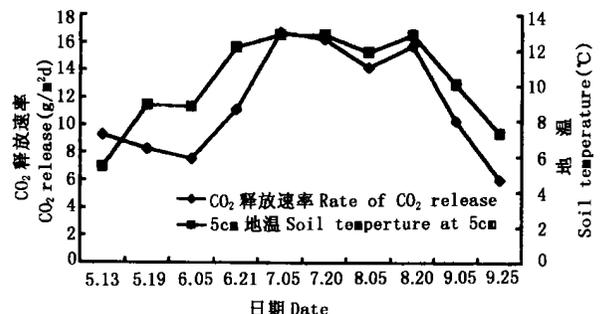


图3 暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放速率季节动态

Fig 3 Seasonal change of CO₂ emission from Mollic-Gryic cambisols

因此凡能影响土壤微生物数量、活性及植物根系新陈代谢的因子,均会对暗沃寒冻锥形土 CO₂ 的释放速率产生极重要的影响。为此笔者就诸多环境因子对 CO₂ 的释放速率的影响及相互关系给予分析和探讨。

2.2.1 土壤温度 温度是通过影响土壤生物新陈代谢速率而影响土壤 CO₂ 的释放。过去的实验研究表明,对于高寒土壤,土壤微生物在 35 ℃ 时的活性最高,分解有机物质的能力最强^[22]。自然条件下,在植物生长的 5~9 月,0~30 cm 土层地温变化在 4.4~18.5 ℃,远低于其土壤微生物最适温度。在青藏高原,土壤微生物活动是在长期适应高寒,土壤潮湿等环境下进行的,但温度稍微升高时,微生物活动便会急剧加强。因此,随着土壤温度的升高,土壤微生物活性随之增强。土壤 CO₂ 的释放速率相应增加。土壤温度降低,情况则相反。植物根系的呼吸代谢速率同样具有类似的变化特性。

空气是太阳辐射热能向土壤较深层传层热量的载体,而气温变化不能直接影响土壤微生物分解土壤有机物质和植物根系呼吸等过程,从而对土壤 CO₂ 释放的影响则为间接作用,将其携带的太阳能以热力传导作用给予土壤内部,从而引发土壤温度的变化,进而导致土壤生物活性和土壤 CO₂ 释放速率的变化。

土壤 CO₂ 释放速率日变化与地表温度日变化同步。统计结果表明,土壤 CO₂ 释放速率日变化与地表温度日变化呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$),而与 5 cm 以下土壤温度的相关性不显著,或不出现相关性。CO₂ 释放速率的季节动态和不同土层地温的相关显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关,其中与 5 cm 地温相关性最为密切(表 1)。结果表明,土壤温度是诱发土壤 CO₂ 释放的主要因素(图 2、3)。

表 1 土壤 CO₂ 释放速率与土壤温度的相关性

Table 1 Correlation between CO₂ release from soil and soil temperature

日变化 Diel course			季节动态 Seasonal dynamic		
测定日期 Date	样本容量 Samples size	相关系数 r	土壤深度(cm) Soil depth (cm)	样本容量 Samples size	相关系数 r
5.13	10	0.8111**	0	8	0.643*
5.19	10	0.9782**	5	8	0.801**
6.05	10	0.9126**	10	8	0.793**
6.21	10	0.9193**	15	8	0.752*
7.05	10	0.9493**	20	8	0.688*
7.20	10	0.9757**	30	8	0.679*
8.05	10	0.9830**			
8.20	10	0.8950**			
9.05	10	0.9604**			
9.25	10	0.8329**			

* 显著相关 significance ($P < 0.05$), ** 极显著相关 Extreme significance ($P < 0.01$)

2.2.2 土壤湿度 湿度影响土壤活性及气体扩散路径的长短。高山土壤微生物分解土壤有机物质的最适土壤湿度为 70%^[22]。在植物生长季节,暗沃寒冻锥形土 10~10 cm 土壤湿度平均为 $59.08 \pm 16.50\%$,属湿润土壤水分状况,接近土著微生物活动的最适土壤湿度,因此对土壤 CO₂ 释放速率影响不大。土壤 CO₂ 释放速率与土壤湿度之间的单相关不显著。理论上讲,土壤湿度愈高,土壤透水性愈差,土壤气体扩散路径越长,气体释放量越小。但本实验似乎没有造成什么影响,这可能与暗沃寒冻锥形土质地较粗,较高的土壤水分含量主要是由土壤粗有机质(半分解植物根系)对水分的吸附作用强,同时植物根系保持有较强的滞水能力有关。

2.2.3 降水 与土壤湿度相关的降水,在 6 月 21

日测定时,恰遇 12.9 mm 的降雨,理论计算可提高 0~20 cm 土壤含水量 78.35%,但从土壤 CO₂ 释放速率来看,并没有造成影响,这可能与暗沃寒冻锥形土土壤质地较粗,植物根系发达,加之暗沃寒冻锥形土多在地阴坡分布,土层浅薄(一般为 40~60 cm),在 40~60 cm 深处便可达砾石层,致使土壤水分渗漏速度快,因而使降水所能造成的高土壤水分实际上并未达到较高的水准。统计分析结果表明,土壤 CO₂ 释放速度与降雨之间的单相关不显著。

2.2.4 地上活体现存量 植物地上活体现存量(正常放牧条件下无法测得生物量)与地下活体生物量密切相关,而地下活体呼吸产生的 CO₂ 是土壤 CO₂ 释放的重要组成部分。统计结果表明,土壤 CO₂ 释放速度与地上活体现存量之间呈极显著正相关关系($r =$

0.8442, n=8)说明地上活体现存量较多时,多以分解与半分解的植物残体留存于土壤,给土壤微生物活动奠定了良好的外部条件,同时为土壤碳循环过程以及土壤有机质提高提供了很好的物质基础。

2.2.5 土壤有机质现存量 土壤有机物质包括植物根系(又分为活根与死根)及土壤腐殖质,由于高地带气温低,植物纤维素分解缓慢,根系也常多于分解与半分解状态,土壤腐殖质相对丰富。活根通过呼吸作用产生CO₂,死根及土壤腐殖物质通过微生物的分解作用释放CO₂。土壤有机碳素是CO₂产生的物质基础,数量愈多,CO₂释放速率愈高。统计结果表明,土壤CO₂释放速度与土壤有机物质及根系现存量相关不显著。而与0~10cm土壤腐殖质态碳的

现存量呈极显著相关(r=0.9297, n=3)。

2.2.6 土壤微生物 真菌、纤维素分解菌是暗沃寒冻锥形土土壤有机物质分解的主体,其数量和活性的大小直接影响到土壤CO₂的释放速率。暗沃寒冻锥形土真菌菌丝生物量与土壤CO₂的释放速率具有相似的季节动态^[23,24](表2)。统计结果表明,土壤CO₂的释放速率与0~20cm真菌菌丝生物量相关极显著(r=0.8429, n=5)而与真菌孢子生物量及纤维素分解菌个数相关不显著。但有学者^[23]在同一地,用202滤纸代替土壤纤维物质进行纤维素分解的研究中,得出纤维素分解率与真菌菌丝生物量及土壤纤维素分解菌均呈显著相关的结论,这可能是实验材料不同而产生的差异。

表2 高寒草甸土壤(0~10cm)主要微生物类群季节动态

Table 2 Seasonal dynamic of soil microorganism (0~10cm) in alpine meadow

月份 Month	纤维素分解菌 Cellulose decomposition (×10 ³ cell/g)		真菌生物量 Fungal biomass 10 ⁴ g/g	
	轻牧	重牧	轻牧	重牧
	Lightly grazed	Heavily grazed	Lightly grazed	Heavily grazed
May	7.90	-	13.80	13.15
June	11.95	-	20.01	19.27
July	13.04	-	19.52	18.09
Aug	21.37	-	17.66	18.46
Sep.	18.72	-	16.66	17.83
Oct	7.60	-	15.30	16.10
Nov	4.75	-	13.50	14.10

2.2.7 放牧强度 增加放牧强度,将使土壤容重和硬度增加,孔隙度减小,土壤持水量、有机质含量和养分含量降低,同时,随着放牧的加强,土壤细菌(嫌气性细菌除外)、丝状真菌和放线菌明显降低(表3),均能引起土壤CO₂释放速率的减小,过度放牧

尤为明显。轻牧区较重牧区土壤CO₂释放速率高,分别为11.56±3.92 g·m⁻²·d⁻¹和10.05±3.96 g·m⁻²·d⁻¹,后者比前者低15%左右。方差分析结果表明,两种放牧强度的土壤CO₂释放速率差异显著(表4)。

表3 放牧强度对土壤物理性状的影响

Table 3 The effect on soil character with grazing

深度 (cm)	容重 Capacity (g/cm ³)		空隙度 Porosity (%)		土壤有机质 O.M. (%)	
	轻牧	重牧	轻牧	重牧	轻牧	重牧
	Lightly grazed	Heavily grazed	Lightly grazed	Heavily grazed	Lightly grazed	Heavily grazed
0~10	0.5689	0.9429	69.67	61.84	13.82±3.18	11.60±3.17
10~20	0.9764	0.9874	59.92	57.23	9.11±0.81	8.80±1.66
20~30	0.9787	1.0909	53.69	51.49	6.42±0.43	6.55±0.56

表4 放牧强度与土壤CO₂释放速率的方差检验

Table 4 Comparisons to CO₂ emission for different stocking intensity from Mollic-gryic cambisols

差异源 Source	SS	df	MS	F	P-value	F crit
日期 Date	265.07	9	29.45	18.59	8.76E-05	3.19
放牧强度 Grazing intensity	11.45	1	7.23	0.02	5.12	
误差 Error	14.26	9	1.58			
总计 Total	290.78	19				

2.2.8 天气状况 突变的天气状况如乌云蔽日、雷阵雨、冰雹、大风及日出、日落时,土壤CO₂释放速

率会发生剧烈的波动,原因于,在上述天气变化过程中,大气与土壤交接面的土表层,气候性态发生强烈

变化, 将造成短时的湍流过程复杂化, 致使地表面感热, 潜热通量发生急剧变化, 导致地表温度变化强烈, 最终使土壤 CO₂ 释放速率发生错综复杂的变化过程。

3 结语

土壤温室气体 CO₂ 的释放, 是土壤微生物、植物根系在一系列气候、土壤环境因子影响下, 微生物对土壤有机物质分解和根系呼吸作用的产物。土壤有机物质是产生 CO₂ 的物质基础, 而微生物及植物根系是土壤 CO₂ 的生产者。温度、水分、土壤通气状况、土壤 pH、微生物类群数量及活性、根系呼吸、有机物质数量及分解速率、C/N、氧化还原电位、土壤孔隙度、放牧强度等诸多因素是通过影响土壤微生物及根系的生物活性, 从而影响到土壤 CO₂ 释放速率。

参考文献

- [1] Jukka Laine *et al* (译文). 北京沼泽地水位下降对全球气候变暖的影响. *Ambio*, 1996, 25(3): 179~ 184
- [2] Bouma T J, Nielsen K L, Elsenstat D M, Lynch J P. Estimating respiration of roots in soil interactions with soil CO₂, soil temperature and soil water content [J]. *Plant & Soil*, 1997, Aug; 195(2): 221~ 232
- [3] Burton A J, Zogg G P, Pregitzer K S, Zak D R. Effect of measurement CO₂ concentration on sugar maple root respiration [J]. *Tree physiology*, 1997, Jul; 17(7): 421~ 427
- [4] Bertram Ostendorf. Modeling the influence of hydrological processes on spatial and temporal patterns of CO₂ from an arctic tundra catchment [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1996, 128(3): 318~ 327
- [5] Neilson J W, Pepper I L. Soil respiration as an index of soil aeration [J]. *Soil Sci Soc Am. J.* 1990, 54: 428~ 432
- [6] Terhune C L, Harden J W. Seasonal variations of carbon dioxide concentration in stony, coarse-textured desert soils of southern Nevada, USA [J]. *Soil science*, 1990, 151(6): 417~ 429
- [7] Burton D L, Beauchamp E G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentration in soil subject to freezing [J]. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1994, 58: 115~ 122
- [8] Jones M H, Fahnestock J T, Walker D A, Walker M D, Welker J M. Carbon dioxide fluxes in moist and dry arctic tundra during the snow-free season: Responses to increases in summer temperature and winter snow accumulation [J]. *Arctic and alpine research*, 1998, 30(4), 373~ 380
- [9] Yoshida Y, Morimoto T, Yokoyama K. Soil organic substances positively affect carbon dioxide environment in greenhouse and yield in strawberry [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 1997, 65(4): 797~ 799
- [10] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in eucalyptus pauciflora forest [J]. *Plant & Soil*, 1997, 190(1): 127~ 141
- [11] Steven F Oberbauer, Chris T, Gillespie, Weixin Cheng, *et al*. Diurnal and seasonal patterns of ecosystem CO₂ efflux from upland tundra in the foothills of the Brooks range [J]. *Arctic and alpine research*, 1996, 28(3): 328~ 338
- [12] Seiko Osozawa, Shuichi Hasegawa. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an arctic soil [J]. *Soil Science* 1995, 160(2): 117~ 124
- [13] Santruckova H, Simek M. Effect of soil CO₂ concentration on microbial biomass [J]. *Biology Fertility of Soils*, 1997, 25(30): 269~ 273
- [14] Catherine Blet-Charaudeau, Muller J, Laudebut H. Kinetics of carbon dioxide evolution in relation to microbial biomass and temperature [J]. *Soil Sci Soc Am. J.* 1990, 54: 1324~ 1328
- [15] Svensson B H, Veum A K, Kjølvi S K. Carbon losses from tundra soils [A]. In: Wielgolaski F E (ED): *Fennoscandian tundra ecosystems, Part 1: plant and microorganisms* [C]. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg New York 1975, 279~ 286
- [16] Hudgens D E, Yavitt J B. Land-use effects on soil methane and carbon dioxide fluxes in forests near Ithaca [J]. *New York, Ecoscience*, 1997, 4(2): 214~ 222
- [17] Reicosky D C, Dugas W A, Torbert H A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems [J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 41(1~ 2): 105~ 118
- [18] Ivan J, Fernandez, Yowhan Son, Chuck, R. Kraske, Lindsey E, Rustad, Mark B, David. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types after harvest [J]. *Soil Sci Soc Am J.* 1993, 57: 1115~ 1121
- [19] 曹广民, 李英年, 鲍新奎. 高山土壤持水特性的分析 [J]. *土壤*, 1998, 30(1): 27~ 30
- [20] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 赵新全. 退化暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态 [J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 32~ 40
- [21] 刘伟, 周立, 王溪. 不同放牧强度对植物及啮齿动物作用的研究 [J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 376~ 383
- [22] 鲍新奎, 赵宝莲, 曹广民. 高山土壤有机磷的净矿化作用. *高寒草甸生态系统* (3) [M]. 北京: 科学出版社, 1993 227~ 236
- [23] 姜文波, 王启兰, 杨涛, 耿博闻. 高山草甸土纤维素分解的季节性动态. *高寒草甸生态系统* (4) [M]. 北京: 科学出版社, 1995 183~ 187
- [24] 王启基, 李家藻. 高寒草甸不同植被土壤真菌生物量的季节动态. *高寒草甸生态系统* (4) [M]. 北京: 科学出版社, 1995 169~ 178