

文章编号: 1007-0435(2005)02-0144-05

# 高寒灌丛草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 释放的初步研究

李 东<sup>1,2</sup>, 曹广民<sup>1\*</sup>, 胡启武<sup>1</sup>, 吴 琴<sup>1</sup>, 李月梅<sup>1</sup>, 王迎红<sup>3</sup>

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001;

2 青海省林业局, 西宁 810001; 3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 以金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸生态系统为对象, 应用静态密闭箱-气相色谱法对高寒灌丛(GG)、丛内草甸(GC)和裸地(GL)的CO<sub>2</sub>释放进行了初步研究。结果表明: GG、GC和GL CO<sub>2</sub>的释放速率均呈明显的单峰型日变化进程, 最大释放速率出现在15 00~17 00之间, 最小值在7 00前后出现, 白天释放速率大于夜晚; CO<sub>2</sub>释放速率具有明显的季节性变化特征, 生长期CO<sub>2</sub>释放速率明显高于枯黄期, 且均表现为正排放, 8月为CO<sub>2</sub>释放高峰期, 释放速率GG>GC>GL ( $P < 0.01$ ); 2003年6月30日至2004年2月28日, 高寒灌丛植被-土壤系统CO<sub>2</sub>释放量为 $3088.458 \pm 287.02 \text{ g/m}^2$ , 丛内草甸植被-土壤系统CO<sub>2</sub>释放量为 $2239.685 \pm 183.68 \text{ g/m}^2$ , 其中基础土壤呼吸CO<sub>2</sub>的释放量约为 $1346.748 \pm 176.24 \text{ g/m}^2$ , 分别占GG和GC释放量的43.61%和60.13%; CO<sub>2</sub>释放速率的日变化主要受地表和5 cm地温制约, 而季节动态与5 cm地温呈显著正相关关系( $P < 0.01$ )。

**关键词:** CO<sub>2</sub>释放; 高寒灌丛草甸生态系统; 金露梅; 日动态; 季节动态

中图分类号: S812.1 文献标识码: A

## A Primary Study on CO<sub>2</sub> Emission from Alpine *Potentilla fruticosa* Scrub Meadow Ecosystem

L IDong<sup>1,2</sup>, CAO Guangmin<sup>1\*</sup>, HU Qiwu<sup>1</sup>, WU Qin<sup>1</sup>, LI Yue-mei<sup>1</sup>, WANG Ying-hong<sup>3</sup>

(1. Institute of Biology of Northwest Plateau, Chinese Academy of Science, Xining, Qinghai Province 810001, China;

2. Bureau of Forestry of Qinghai Province, Xining, Qinghai Province 810001, China;

3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Using static chamber-GC method, a primary study on CO<sub>2</sub> emission from alpine *Potentilla fruticosa* scrub (GG), *Kobresia meadow* (GC) and bare land (GL), interspersing among the scrub, was conducted in alpine *P. fruticosa* meadow ecosystem at Haibei research station, CAS. The results indicate that CO<sub>2</sub> emission rate from GG, GC and GL showed evident characteristics of daily variations, peaked at 15 00~17 00, minimized at 7 00~9 00, with higher CO<sub>2</sub> emission rate at daytime than at night. Furthermore, the CO<sub>2</sub> emission also showed a seasonal variation, and the emission rate higher during the plant growing seasons than at the wilting period, and all the emission values are positive. The fastigium of CO<sub>2</sub> emission appeared in August, and the emission rates varied among GG, GC and GL with an order of GG>GC>GL ( $P < 0.01$ ). During the whole experimental period, from 30th June, 2003 to 28th February, 2004, the CO<sub>2</sub> efflux from plant-soil system at GG and GC sites were  $3088.458 \pm 287.02 \text{ g/m}^2$  and  $2239.685 \pm 183.68 \text{ g/m}^2$ , respectively, while the soil basal respiration was  $1346.748 \pm 176.24 \text{ g/m}^2$ , accounting for 60.13% and 43.61% of the total CO<sub>2</sub> emission from GG and GC, respectively. In addition, the daily variations of CO<sub>2</sub> emission rate were dominated by soil temperature at 5 cm depth and soil surface temperature, and there also existed a significant correlation between the seasonal changes of soil temperature at 5 cm depth and CO<sub>2</sub> emission rate ( $P < 0.01$ ).

**Key words:** CO<sub>2</sub> Emission; Alpine scrub meadow ecosystem; *Potentilla fruticosa*; Daily variation; Seasonal change

收稿日期: 2004-04-27; 修回日期: 2004-10-31

基金项目: 中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-01-01B)资助

作者简介: 李 东(1977-), 男, 硕士研究生, 主要从事草地生态学研究; \* 通讯作者 Author for correspondence, Email: Cao gm@mail.nwipb.ac.cn

近年来由于温室气体排放增加而引起的全球气候变暖问题已成为科学界最为关注的环境问题之一<sup>[1-3]</sup>, 尤其是导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度进一步增加的各种过程的研究倍受重视。草地作为陆地生态系统的主体类型, 占陆地生态系统总面积的 16.4%, 其碳素储量约占陆地生态系统碳储量的 15.2%<sup>[4]</sup>。草地是受人类活动影响最为严重的生态系统之一, 对草地生态系统碳循环及其影响因素的研究是认识全球碳循环的关键之一<sup>[5]</sup>。青藏高原作为欧亚大陆最高最大的地貌单元, 对气候变化十分敏感, 在亚洲气候乃至全球气候变化中扮演重要角色。同时, 它也是世界上低纬度冻土集中分布区, 由于冻土热力敏感性大, 随着全球 CO<sub>2</sub> 浓度的增加和青藏高原地区气温的不断升高, 高原冻土具有很大的碳、氮等温室效应气体的排放潜力<sup>[6]</sup>。因而, 研究高寒草甸温室气体排放特征对于评价青藏高原生物地球化学循环对全球变化的响应和反馈作用具有重要的科学和实际意义。

高寒灌丛草甸是广布于青藏高原的主要植被类型之一, 它对青藏高原大气与地面之间的能量平衡、水气交换、生物地球化学循环有着极其重要的作用。近年来, 针对高寒草甸土壤 CO<sub>2</sub> 释放已有大量的研究和报道<sup>[7,8]</sup>, 但目前此类研究没有将高寒灌丛草甸作为一个灌丛、草甸和次生裸地的复合体而进行系统区分, 并对之进行 CO<sub>2</sub> 排放的估测。另外, 植物根系的呼吸也无法在土壤呼吸排放中予以剔除, 从而使我们无法精确估测该系统的源汇效应。为弥补这一缺陷, 我们于 2003 年 6 月 30 日至 2004 年 2 月 28 日, 分别对高寒灌丛、丛内草甸和次生裸地的 CO<sub>2</sub> 释放进行初步研究, 为进一步进行高寒灌丛草甸生态系统源汇效应的准确估测提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区自然概况

实验区位于青藏高原东北隅的青海省海北藏族自治州门源回族自治县境内的中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站), 地理位置为 37°29' ~ 37°45' N, 101°12' ~ 101°23' E, 海拔 3200 m。具有典型的高原大陆性气候特征, 冷季漫长而寒冷, 暖季短暂而湿润, 年均气温 -1.7℃, 1 月和 7 月的平均气温分别为 -17.4℃ 和 9.6℃, 绝对最高气温低于 25℃, 绝对最低气温可达 -37℃。年均降水量 618 mm, 主要集中于 6~8 月, 占全年的 80% 左右。

高寒灌丛主要分布于山地阴坡、山麓洪积扇以及河流两岸低阶地, 其原生植物群落以金露梅(*Potentilla*

*fruticosa*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*K. humilis*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)、纤弱银莲花(*Anemone demissa*) 等为优势种, 盖度 70% ~ 80%, 地表具有较厚的苔鲜层和枯枝落叶层。在长期持续放牧压力下, 金露梅灌丛原生景观发生破碎, 形成大小不同, 类似林窗的灌丛窗。窗内植被以多年生草本植物为主, 盖度 40% ~ 60%; 部分地段, 优良牧草消失, 鼠类活动增加, 在风、水蚀作用下, 退化形成窗内次生裸地。灌丛、丛内草地和裸地在高寒灌丛草甸中的分布比例大致为 5:4:1。土壤为高山灌丛土, 有机质丰富, 呈中性反应。为地区夏季牧场。

### 1.2 实验设计

在干柴滩地区选择地势平坦, 并能代表该地区地表特征的灌丛、丛内草甸和次生裸地作为观测样地, 分别以 GG、GC 和 GL 表示。每个观测样地均设 3 次重复。

CO<sub>2</sub> 释放速率日变化研究: 在生长季每月选择晴朗的天气做 1 次 CO<sub>2</sub> 释放速率日变化测定, 当日 9:00 至次日 9:00 白天 2 h 时测定 1 次, 夜间 3 h 测定 1 次。

CO<sub>2</sub> 释放速率季节变化研究: 盛草期 7~8 月每月测定 8 次(每周二、四), 枯草初期 9~10 月每月测定 4 次(7、15、22、29 日), 枯草后期 11 月至次年 2 月每月测定 2 次(15 和 30 日左右); 每次采样均在 9:00~11:00 进行。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 气体采集及分析

气体测定采用静态密闭箱-气相色谱法进行。采集箱由顶箱、中段箱和底座组成, 箱体用进口 304K 薄不锈钢板制作。其中, 顶箱(50 cm × 50 cm × 50 cm) 为正五面体, 箱顶壁安装有两个搅拌风扇, 箱侧面安装有电源插头、取气体样品接口、便携式温度计探头, 并配有 F46 采气管线。中段箱(50 cm × 50 cm × 50 cm) 和底座(50 cm × 50 cm × 10 cm) 正四面体, 上端有密闭水槽, 中段箱仅用于 GG。实验前将底座埋入土壤中, 四周以泥土压实, 实验期间不再取出, 以减小土壤扰动对测定的影响。实验时底座、中段箱密闭水槽内加水, 以使两箱连接间的气路密闭, 切断箱内外空气的自由交换。用 100 ml 医用注射器在 3 m 远的距离处通过取气接口取样, 间隔时间为 0、10、20、30 min。CO<sub>2</sub> 采用 HP4890D 气相色谱仪进行分析。

#### 1.3.2 环境因子测定

在 CO<sub>2</sub> 取样前后, 用 JM 624 便携式数字测温计分

别测定 5 cm 地温、地表温度、箱内温度和箱外大气温度。

### 1.3.3 通量计算

$$F = \rho \frac{V}{A} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{dC_t}{dt}$$

式中,  $F$  是被测气体排放通量,  $V$  是箱体体积,  $A$  是箱体底面积,  $C_t$  是  $t$  时刻箱内被测气体的体积混合比浓度,  $t$  是时间,  $\rho$  是标准状态下的被测气体密度,  $T_0$  和  $P_0$  分别为标准状况下的空气绝对温度和气压,  $P$  为采样地点的气压,  $T$  为采样时的绝对温度。

## 2 结果与分析

### 2.1 高寒灌丛草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 释放速率日动态

高寒灌丛草甸 CO<sub>2</sub> 释放速率具有明显的单峰型日变化进程。CO<sub>2</sub> 释放速率日最大值出现在 15:00~17:00, 最小值出现在 7:00 前后; 7:00~15:00 为 CO<sub>2</sub> 释放速率上升时段, 15:00 至翌日 7:00 为 CO<sub>2</sub> 释放速率下降时段。释放速率白天大于夜晚。以 2003 年 7 月 17 日 9:00 至翌日 9:00 测定结果为例, 该日 GG、GC 和 GL CO<sub>2</sub> 释放速率最大值分别为 2015.23、1114.3 和 388.56 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>; 最小值分别为 491.23、418.61 和 225.78 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。白天(9:00~19:00) GG、GC 和 GL CO<sub>2</sub> 平均释放速率分别为 1150.01 ± 135.75、838.63 ± 115.8 和 306.16 ± 147.33 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 夜晚(20:00 至翌日 9:00) 分别为 487.16 ± 263.11、470.27、

±43.48 和 248.25 ± 106.37 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。白天分别是夜晚的 2.4、1.8 和 1.2 倍(图 1)。

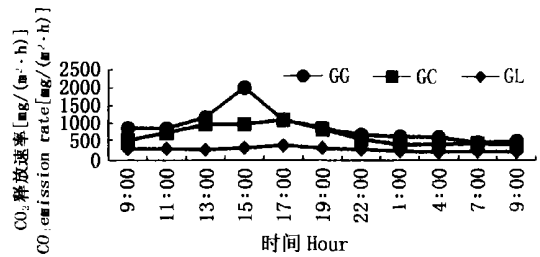


图 1 灌丛(GG)、丛内草甸(GC)、次生裸地(GL) CO<sub>2</sub> 释放速率日变化

Fig. 1 Daily variations of carbon dioxide emission rate from GG, GC and GL

### 2.2 高寒灌丛草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 释放速率季节动态

高寒灌丛草甸 CO<sub>2</sub> 释放速率亦具有明显的季节动态, 且三者的变化趋势基本一致。由图 2 可以看出, 在观测期间生长期 CO<sub>2</sub> 释放速率明显高于枯黄期, 且均表现为正排放。2003 年 6 月 30 日~2004 年 2 月 28 日 GG、GC 和 GL 最高释放速率均出现在 8 月上旬, 分别为 1168.23、1112.38 和 646.73 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>; 最低排放速率出现在 2004 年 2 月 16 日、2003 年 12 月 28 日和 2004 年 2 月 28 日, 分别为 34.21、28.31 和 20.49 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。7、8 月为 CO<sub>2</sub> 释放高峰期, 且释放速率 GG > GC > GL ( $P < 0.01$ )。

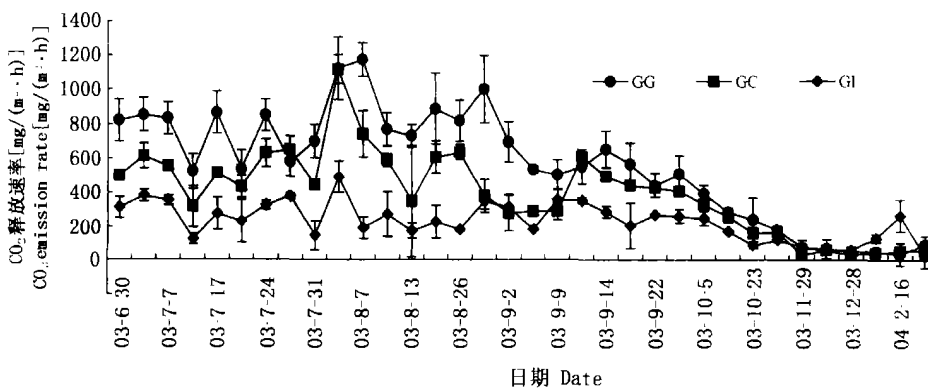


图 2 灌丛(GG)、丛内草甸(GC)、次生裸地(GL) CO<sub>2</sub> 释放速率季节动态

Fig. 2 The seasonal dynamics of carbon dioxide emission rate from GG, GC and GL.

### 2.3 高寒灌丛草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 释放速率季节性差异

枯黄后期(11 月至次年 2 月) GG、GC、GL CO<sub>2</sub> 释放速率明显低于盛草期和枯黄初期(9~10 月), 且变异较大。观测期间, GG、GC 和 GL 的 CO<sub>2</sub> 释放速率均

表现为盛草期 > 枯黄初期 > 枯黄后期 ( $P < 0.01$ ), 而 GG、GC、GL 间则表现为 GG > GC > GL (枯黄后期 GL > GG > GC)。枯黄后期 GG、GC、GL 之间 CO<sub>2</sub> 释放速率的差异明显减小, 基本上以微弱的基础土壤呼吸为主(表 1)。

表 1 高寒灌丛、丛内草甸及裸地 CO<sub>2</sub> 释放速率物候间差异

Table 1 Phenological differences of CO<sub>2</sub> emission rate among alpine *P. fruticosa* shrub, meadow and bare land interspersing among the shrub

物候期 Phenological phase	样地 Sites	变化范围 Range(m gm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	平均值 Mean(m gm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Variability(%)
盛草期 Grass exuberance period	GG	1168.32~522.08	813.54	205.16	25.22
(03.6.30~03.8.28)	GC	1112.38~317.12	565.07	82.37	14.58
	GL	488.73~125.74	272.08	71.66	26.34
枯黄初期 Initial wilting period	GG	689.92~178.87	450.99	93.03	20.61
(03.9.2~03.10.30)	GC	669.78~159.97	360.39	48.75	13.53
	GL	352.91~89.42	242.62	39.80	16.41
枯黄后期 Later wilting period	GG	91.71~34.21	59.51	55.5	93.26
(03.11.13~04.2.28)	GC	57.43~29.11	42.92	30.16	70.27
	GL	259.55~20.49	99.91	35.35	35.38

### 3 讨论

3.1 观测资料显示, 高寒灌丛、丛内草甸土壤-植被系统和裸地土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率均具有从低到高再从高到低的单峰型日变化进程, 该变化特点与同地区草毡寒冻锥形土 CO<sub>2</sub> 释放速率的研究结果相近<sup>[9-11]</sup>, 这主要是温度昼夜变化所致。海北站地区具有明显的高原大陆性气候特点, 年降水量在 618 mm 左右。在植物生长季水热同期, 土壤水分充足, 湿度变化小, 而昼夜及季节间温度变化大, 所以 CO<sub>2</sub> 释放速率主要受地表和 5 cm 地温的影响(图 3, 4)。白天温度逐渐升高时, 植物与微生物呼吸代谢增强, CO<sub>2</sub> 释放速率也随之增加。夜晚土壤温度逐渐降低, CO<sub>2</sub> 释放速率相应降低, 这种昼夜间明显的气温差异使得 CO<sub>2</sub> 释放速率出现显著的昼夜差异, 表现为白天高于夜间。

3.2 高寒灌丛草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 释放速率亦具有明显的季节变化特征。其变化规律与植物生物量的季节变化相一致。7、8 两月温度达到年内最高, 植物生长进入盛草期, CO<sub>2</sub> 释放速率达到高峰, 尔后随着温度的降低, 植物新陈代谢减弱, CO<sub>2</sub> 释放速率显著减少, 11 至翌年 2 月, 气温和地表温度均出现负温, 土壤冻结, CO<sub>2</sub> 释放速率降至低谷。观测期间灌丛、丛内草甸和裸地 CO<sub>2</sub> 释放速率与 5 cm 地温均呈极显著或显著相关关系(图 5), 相关系数分别为 0.9402、0.8827 和 0.5117 ( $P < 0.01$ )。另外, 从 CO<sub>2</sub> 释放速率季节变化曲线中可以看到, 盛草期曲线中出现了一些较大的波动, 使曲线呈锯齿状变化特征。这种锯齿状变化的产生并不是取样或分析失误造成, 而是更进一步反映了自然状况下的连续降雨过程对 CO<sub>2</sub> 释放速率的影响。连续降雨使气温和土壤温度降低, 微生物活性减弱。同时, 过多的土壤含水量导致毛细孔隙堵塞, 土壤气体难以产生或产生的气体易溶于水, 且 CO<sub>2</sub> 在水中的扩散常

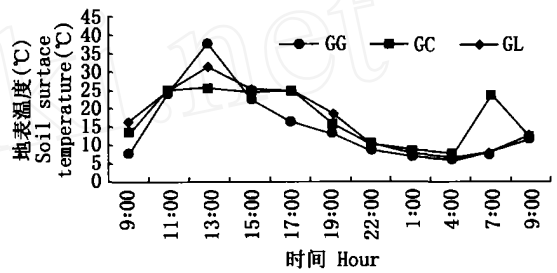


图 3 2003 年 7 月 17 日-18 日灌丛(GG)、丛内草甸(GC)、次生裸地(GL)地表温度日变化  
Fig 3 Daily variations of soil surface temperature from GG, GC and GL from July 17th to 18th, 2003

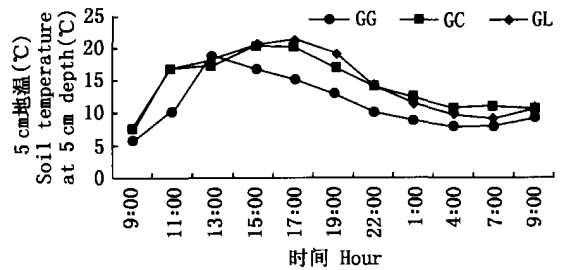


图 4 2003 年 7 月 17 日-18 日灌丛(GG)、丛内草甸(GC)、次生裸地(GL) 5 cm 地温日变化  
Fig 4 The daily variation of soil temperature at 5 cm depth on GG, GC and GL in July 17th to 18th, 2003

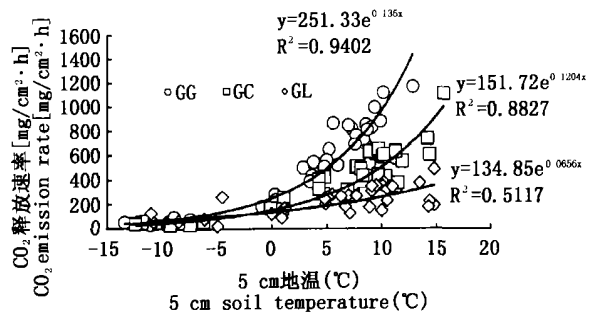


图 5 CO<sub>2</sub> 释放速率与 5 cm 地温相关分析  
Fig 5 The relevant analysis of carbon dioxide emission rate and 5 cm depth soil temperature

数低 ( $1.77 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ), 不利于土壤气体与大气进行交换, 使该测定日  $\text{CO}_2$  释放速率偏低。在西安地区, 对马兰黄土  $\text{CO}_2$  释放规律的研究中发现, 连续降雨后的 5d 内土壤  $\text{CO}_2$  释放一直处于较低水平的释放状态, 但之后的第 12 天  $\text{CO}_2$  释放量明显增加<sup>[12]</sup>。有关这方面的研究结果在高寒草甸生态系统  $\text{CO}_2$  排放研究中还不多见, 尚有待深入研究与探讨。

**3.3 灌丛  $\text{CO}_2$  释放速率最大, 而裸地较草地和灌丛都小。** 观测期灌丛  $\text{CO}_2$  释放量为  $3088.458 \pm 287.02 \text{ g/m}^2$ , 而丛内草甸和裸地则分别为  $2239.685 \pm 183.68 \text{ g/m}^2$  和  $1346.748 \pm 176.24 \text{ g/m}^2$ , 灌丛  $\text{CO}_2$  释放量明显高于丛内草甸和裸地。究其原因主要是植被的多重作用导致土壤微生物数量的不同所致。土壤-植被系统  $\text{CO}_2$  释放速率的大小主要由植物代谢和微生物活动的强弱所决定。土壤中共有 60% 的  $\text{CO}_2$  是在微生物分解土壤有机质的过程中产生<sup>[13]</sup>。微生物数量的多少、活动强弱主要是温度、湿度决定, 温度高、湿度大, 微生物数量多、活动强, 相应的  $\text{CO}_2$  释放速率大, 反之则小。灌丛地表覆盖度和地下根系较草甸和裸地大, 根系呼吸活动强, 并在土层中产生较多的有机质和根系分泌物, 为土壤微生物活动提供了能源。其次, 灌丛郁闭度高能有效控制和减少土层蒸发, 导致土壤湿度增大, 并有效改善土层结构, 使土层疏松多孔, 利于  $\text{CO}_2$  扩散, 导致灌丛  $\text{CO}_2$  释放速率高于草甸和裸地。而冬季植物新陈代谢微弱, 土壤微生物活动停止, 覆盖度高可能会降低  $\text{CO}_2$  的释放速率。如实验期 2003 年 11 月~2004 年 2 月 28 日, 裸地  $\text{CO}_2$  释放速率略高于灌丛和丛内草甸, 这与一般实验结果有所出入, 其原因可能是由于裸地下垫面覆盖物较灌丛和草甸少, 能有效地吸收和利用太阳辐射, 土壤导热性能强, 在较短的时间内表层土壤温度变化大, 出现短暂的冻融现象, 进而使其  $\text{CO}_2$  释放速率高于灌丛和丛内草甸。有关这方面的研究尚需进一步深入探讨。

## 4 结 论

**4.1 高寒灌丛草甸生态系统  $\text{CO}_2$  释放速率从 9:00 至次日 9:00 呈现由低到高再由高到低的单峰型日变化规律, 最大释放速率出现在 15:00~17:00, 最小释放速率在 7:00 前后。其变化规律主要由影响土壤微生物活性和植物新陈代谢的地温和大气温度控制。**

**4.2 高寒灌丛草甸生态系统  $\text{CO}_2$  释放速率亦具有多**

**峰多谷的季节性变化特征。盛草期 7、8 月为  $\text{CO}_2$  释放速率高峰期, 12 月至翌年 2 月为低谷期, 生长季  $\text{CO}_2$  释放速率明显高于非生长季, 且均为正排放。  $\text{CO}_2$  释放速率的季节性变化特征与植物生物量季节变化趋势一致, 并与 5 cm 地温呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )。连续的降雨过程和冻融交替现象均会对  $\text{CO}_2$  的释放速率产生影响。**

**4.3 由于植被多重性的影响, 不同植被类型  $\text{CO}_2$  释放速率各异。观测期间高寒灌丛  $\text{CO}_2$  释放量为  $3088.458 \pm 287.02 \text{ g/m}^2$ , 丛内草甸为  $2239.685 \pm 183.68 \text{ g/m}^2$ 。基础土壤呼吸  $\text{CO}_2$  释放量为  $1346.748 \pm 176.24 \text{ g/m}^2$ , 分别占灌丛、丛内草甸植被-土壤系统  $\text{CO}_2$  释放量的 43.61% 和 60.13%。**

## 参考文献

- [1] Burton D L, Beauchamp E G. Profile mitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing [J]. Soil Sci Soc, 1994, 58: 15-122
- [2] Ouyang Y, boersma L. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere model development [J]. Soil Sci Soc, 1992, 56: 1695-1702
- [3] Christensen T R, Jonasson S, Callaghan T V, et al. On the potential  $\text{CO}_2$  release from tundra soils in changing climate [J]. Applied Soil Ecology, 1999, 11: 127-134
- [4] Houghton R A. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850[A]. In: Lai R et al ed. Soils and Global Change[C]. Boca Raton, Florida: CRC press, 1995. 45-65
- [5] Ojima D S, Parton W J, Schimel D S, et al. Modeling the effects of climate and  $\text{CO}_2$  changes on grassland storage of soil C [J]. Water Air Soil Pollution, 1993, 70: 643-657
- [6] 王根绪, 程国冻, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693
- [7] 曹广民, 李英年, 张金霞, 等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤  $\text{CO}_2$  的释放量[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 14-19
- [8] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 放牧强度对高寒灌丛草甸土壤  $\text{CO}_2$  释放速率的影响[J]. 草地学报, 2001, 9(3): 183-190
- [9] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 草毡寒冻锥形土  $\text{CO}_2$  释放特征[J]. 生态学报, 2001, 21(4): 544-549
- [10] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻锥形土  $\text{CO}_2$  释放的日变化和季节动态[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 32-39
- [11] 周党卫, 曹广民, 张金霞, 等. 植物生长季退化草毡寒冻锥形土  $\text{CO}_2$  释放特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 367-371
- [12] 赵景波, 杜娟, 袁道先, 等. 西安地区土壤  $\text{CO}_2$  释放量和释放规律[J]. 环境科学, 2002, 23(1): 25
- [13] 麦克拉伦 A D, 波得森 G H, 斯库金斯 J, 等. 土壤生物化学[M]. 北京: 农业出版社, 1984, 490-491