

海北高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放速率的季节变化规律

李东^{1,2}, 曹广民¹, 吴琴¹, 李月梅¹, 王迎红³

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院生物系, 北京 100039;
3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站干柴滩地区以金露梅 *Potentilla fruticosa* 灌丛草甸生态系统为研究对象, 应用静态密闭箱-气相色谱法对高寒灌丛(GG)、丛内草甸(GC)和次生裸地(GL)的 CO₂ 释放速率进行了长期观测, 并对年释放量作了初步估测。结果表明, GG、GC 和 GL CO₂ 的释放速率在一年内有明显的季节变化。植物生长季 CO₂ 释放量明显高于枯黄期, 释放速率 GG > GC > GL ($P < 0.01$), 且均表现为正排放。不同季节 CO₂ 释放存在明显差异, 表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。2003 年 6 月 30 日至 2004 年 6 月 28 日, 高寒灌丛植被-土壤系统 CO₂ 释放量为 $4\,293.63 \pm 955.75 \text{ g/m}^2$, 丛内草甸植被-土壤系统 CO₂ 释放量为 $3\,319.68 \pm 806.19 \text{ g/m}^2$, 裸地 CO₂ 的释放量为 $1\,724.14 \pm 444.14 \text{ g/m}^2$ 。CO₂ 释放速率的季节变化与土壤 5 cm 温度呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

关键词: CO₂ 释放速率; 高寒灌丛草甸生态系统; 季节变化; 年释放量

中图分类号: S812.05

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2005)05-0004-06

近年来温室气体排放增加引起全球气候变暖已成为科学界最为关注的环境问题之一^[1-3], 导致大气 CO₂ 浓度进一步增加的各种过程研究更受重视。草地作为陆地生态系统的主体类型, 占总面积的 16.4%, 其碳储量约占陆地生态系统碳储量的 15.2%^[4]。由于目前草地是受人类活动影响最为严重的生态系统之一, 所以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^[5]。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 CO₂ 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^[6], 因而, 研究高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 排放特征与排放量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。通过一年多对高寒灌丛、丛内草甸和裸地 CO₂ 释放速率的连续观测, 探讨并估测高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放速率的季节变化规律和年释放量。

1 实验区自然概况

实验区位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)。该站地处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祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段, 地理位置为 37°29' ~ 37°45' N, 101°12' ~ 101°23' E, 海拔 3 200 m 左右, 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, 年均温 - 1.7℃, 最冷月(1月)均温 - 17.4℃, 最热月(7月)均温 9.6℃, 绝对最高温低于 25℃, 绝对最低温达 - 37℃。年降水量为 618 mm, 主要集中于 6 - 8 月, 占全年降水量的 80% 左右。

高寒灌丛是该地区主要的灌丛植被类型之一, 主要分布于山地阴坡、山麓洪积扇以及河流两

收稿日期: 2004-12-20

基金项目: 中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-01-01B); 国家自然科学基金项目(40471133); 资源环境领域野外台站基金项目资助

作者简介: 李东(1977-), 男, 青海湟中人, 助理工程师, 在读硕士生。

通讯作者: 曹广民 E-mail: Caogm@mail.nwipb.ac.cn

岸低阶地,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,植物盖度 70%~80%,地表具有较厚的苔藓层和枯枝落叶层。灌丛内植被以多年生草本植物为主,植被盖度 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,退化形成了次生裸地。灌丛、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。

2 材料与方法

在干柴滩地区选择地势平坦,并能代表该地区地表特征的高寒灌丛(GG)、丛内草甸(GC)和次生裸地(GL)作为观测样地,每个观测样地内均设 3 次重复。植物生长季(5-10月)每月进行 8 次 CO₂ 排放测定,牧草枯黄期(11月-翌年 3 月)每月进行 2~4 次 CO₂ 排放测定;每次采样均在 9:00-11:00 点完成。

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 304 K 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 2 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 3m 远的距离处通过取气接口取样,气体采样时间间隔为 0,10,20,30 min。CO₂ 采用 HP4890D 气相色谱仪进行分析。在 CO₂ 取样前后,用 JM624 便携式数字测温计分别对土壤 5 cm 温度、地表温度、箱内温度和箱外大气温度进行测定。CO₂ 释放通量由下面公式计算得出:

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

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, ρ 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。

3 结果与分析

3.1 高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放速率季节变化

从图 1 可以看出,高寒灌丛草甸 CO₂ 释放速率的季节动态呈明显的非单峰型变化规律,且三者的变化趋势基本一致。植物生长期 CO₂ 释放速率明显高于枯黄期,且均表现为正排放。2003 年 6 月 30 日至 2004 年 6 月 28 日 GG, GC 和 GL 的 CO₂ 释放量分别为 4 293.63 ± 955.75, 3 319.68 ± 806.19 和 1 724.14 ± 444.14 g/m², 最高释放速率均出现在 8 月上旬,其值分别为 1 168.23, 1 112.38 和 466.73 mg/(m²·h); 最低排放速率分别出现在 2004 年 2 月 16 日、

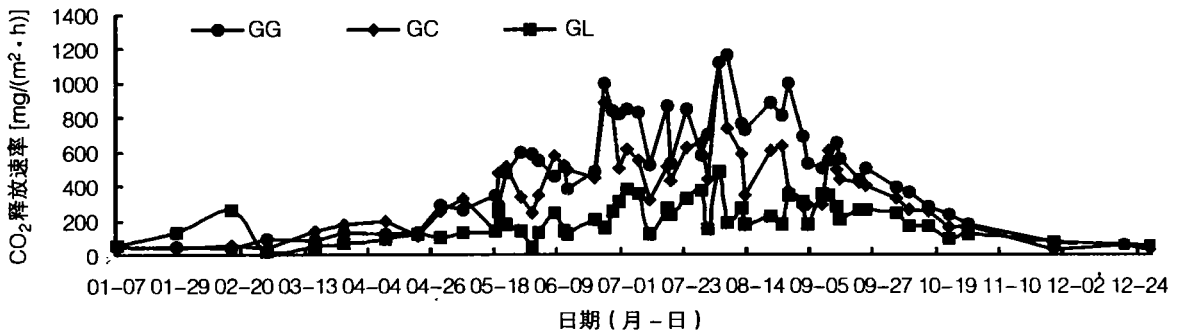


图 1 高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放速率季节变化规律

2003年12月28日和2004年2月28日,其值分别为34.21,28.31和20.49 mg/(m²·h)。7和8月为CO₂释放高峰期,释放速率GG>GC>GL(P<0.01)。

3.2 高寒灌丛草甸生态系统CO₂释放速率的季节差异 不同季节CO₂释放速率和释放量存在明显差异,由表1可看出,夏季GG,GC,GL CO₂释放速率明显高于其他3个季节,冬季

释放速率则达到低谷,且变异较大。整个观测期间,GG和GC的CO₂释放速率、释放量均表现为夏季>秋季>春季>冬季(P<0.01),而GL的释放量则为夏季>秋季>冬季>春季。GG,GC,GL间CO₂的释放速率表现为GG>GC>GL。冬季GG,GC,GL之间CO₂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,并出现裸地释放速率大于灌丛的现象。

表1 高寒灌丛、丛内草甸及裸地CO₂释放速率的四季差异

观测期	样地	变化范围 [(mg/(m ² ·h))]	平均值 [(mg/(m ² ·h))]	标准偏差	变异系数 (%)	释放量 (g/m ²)
春季 2004-03 - 2004-05	GG	592.71 ~ 83.21	300.36	41.42	13.79	648.77 ±89.48
	GC	508.96 ~ 38.22	265.60	89.03	33.52	573.69 ±129.31
	GL	253.23 ~ 43.90	127.19	30.80	24.22	274.74 ±66.53
夏季 2003-06 - 2003-08	GG	1168.23 ~ 380.28	750.08	186.08	24.81	1620.18 ±402.76
	GC	1112.38 ~ 346.68	572.15	127.97	22.37	1235.84 ±276.41
	GL	488.73 ~ 124.02	245.20	73.66	30.04	529.63 ±159.10
秋季 2003-09 - 2003-10	GG	648.85 ~ 178.87	450.99	74.57	16.53	649.42 ±107.38
	GC	604.53 ~ 159.97	336.59	40.71	12.09	484.68 ±58.62
	GL	352.91 ~ 89.42	235.16	37.18	15.81	338.62 ±53.55
冬季 2003-11 - 2004-02	GG	91.71 ~ 34.21	59.51	37.09	62.33	171.39 ±106.38
	GC	57.43 ~ 28.31	42.21	14.76	34.97	121.56 ±42.51
	GL	259.55 ~ 20.49	99.91	36.61	36.64	287.74 ±105.44

4 讨论

4.1 土壤呼吸的季节动态 主要受温度和水分及两者间配置的影响,并因地理位置和植被类型而异^[7]。杨靖春等的研究表明,中国温带草原土壤呼吸速率最大值出现在一年中温度最高的月份,呈现十分规律的单峰曲线,在最冷月呼吸作用几乎是停止的,其季节动态与土壤温度的季节动态基本上一致^[8]。而对于多数热带草原群落,土壤呼吸的季节性变化与温度变化节律有所不同,一般最大呼吸量出现在温度适中而降水量最大的月份,土壤呼吸的季节变化为不规则的多峰波动曲线^[9-11]。海北站地区具有明显的高原大陆性气候特点,年降水量约为618 mm。在植物生长季水热同期,土壤水分充足,属湿润土壤水分状况,湿度变化小,而季节间温度变化大,因此CO₂释放速率季节变化主要受温度的影响。由图1可以看出,高寒灌丛草甸生态系统CO₂释放速率

季节变化规律呈由低到高再到低非单峰型变化特征。春季3-5月植物返青开始,随着温度和湿度的不断升高,CO₂释放速率逐渐增加。6-8月,植物进入草盛期,温度和降水均达到年内最高,CO₂释放进入高峰期,枯黄期CO₂释放速率随温度的降低而呈下降趋势,冬季释放速率达到最低。草盛期6-8月CO₂释放速率出现了一些较大的波动,使曲线呈锯齿状变化特征,这与在内蒙古锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸速率的研究结果有所差异^[12]。以往研究表明,高草草原土壤在饱和或永久萎蔫含水量时土壤呼吸作用均停滞^[13],在西安地区,马兰黄土CO₂释放量在连续降雨后的5 d内一直处于较低水平的释放状态,但之后的第12天CO₂释放量出现了明显的增加^[14]。根据海北站地区野外气象观测记录,发现2003年6-8月该地区降水频率明显高于往年,这可能是连续降水过程对CO₂释

放速率影响的结果。连续或较大的降水过程首先会影响土壤和大气温度,进而使土壤微生物活性减弱。另外,土壤含水量过多会导致土壤毛细孔隙堵塞,土壤气体难以产生或产生的气体易溶于水,且CO₂在水中的扩散常数低(1.77×10^{-5} cm/s),不利于土壤气体与大气进行交换,造成该测定日CO₂释放速率偏低,在图中则表现为曲线的大幅波动。有关这方面的研究结果在高寒草甸生态系统CO₂排放研究中还不多见,有待进一步的深入研究与探讨。

4.2 高寒灌丛草甸生态系统CO₂释放量同时也具有明显的季节间差异。由图2可以看出,随着季节的变化,CO₂释放量呈现倒“V”字形的变化曲线,夏季为CO₂释放高峰期,释放量最大。从

秋季开始逐渐减少,冬季达到年内最低。整个观测期CO₂释放量依次为夏季>秋季>春季>冬季,这证明温度的季节间变异同样是影响高寒灌丛草甸生态系统CO₂释放速率的主导因子,温度高,释放速率大,反之则小。在对实验地土壤和大气温度的实地测定结果分析后发现,高寒灌丛和丛内草甸CO₂释放速率与土壤5cm地温间存在显著的相关关系(图3),释放速率随温度升高呈指数上升,Q10值分别为2.52和2.70,稍高于2.0~2.5^[15],这是由于青藏高原地处高海拔的寒冷地区,而Q10值在寒冷地区一般高于温暖地区^[16],故得出这一结果是合理的。裸地CO₂释放速率与土壤5cm温度的相关性则不太明显,其Q10值为1.68。

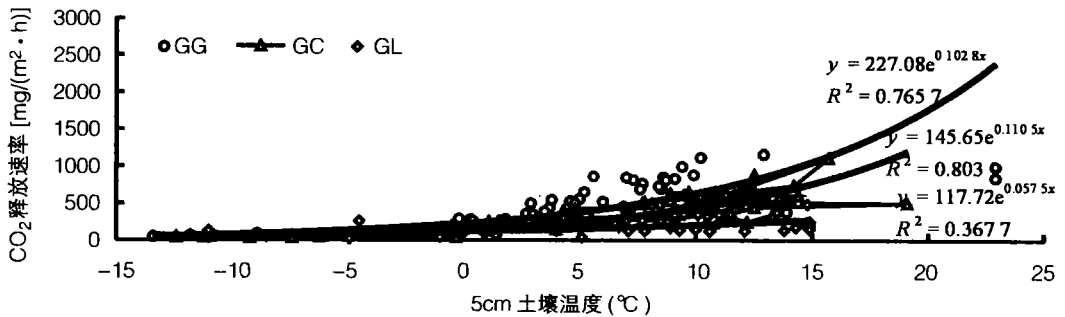


图2 CO₂释放速率与土壤5cm地温相关分析

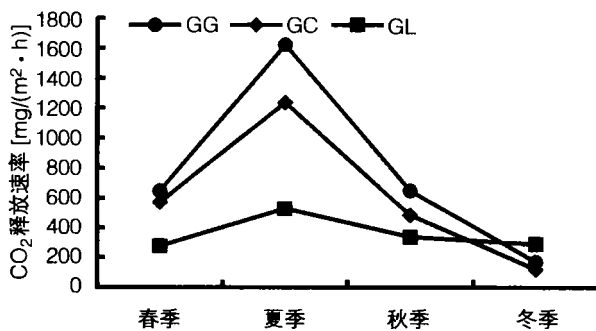


图3 高寒灌丛草甸生态系统CO₂释放量季节间差异

4.3 从不同植被覆盖下系统CO₂释放速率的观测资料可知,不同植被类型CO₂释放速率存在明显差异。由图1可以看出,整个观测期CO₂释放速率基本表现为高寒灌丛>丛内草甸>裸地。2003年6月30日至2004年6月28日,灌丛、丛内草甸CO₂的释放量分别为 4293.63 ± 955.75

和 3319.68 ± 806.19 g/m²,灌丛CO₂释放量明显高于丛内草甸,而裸地的释放量最低,仅为 1724.14 ± 444.14 g/m²。产生这种差异主要是植被的多重作用导致土壤微生物数量的变化造成。土壤中共约有60%的CO₂是在微生物分解土壤有机质的过程中产生^[17]。微生物数量多、活动强,相应的CO₂释放速率大,反之则少。实验地灌丛地表植被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,这些为土壤微生物活动提供了能源。其次,灌丛的群落结构较草甸和裸地复杂,能有效控制和减少土层水分蒸发,导致土壤湿度大,并能有效改善土层结构,使土层疏松多孔,利于土壤CO₂扩散,促使灌丛CO₂释放速率明显高于草甸和裸地。但也发现,冬季CO₂释放速率出现了非常规的变化,如2003年11月-2004年2

月28日,裸地 CO₂ 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,在当地高寒矮嵩草草甸草场也出现同样的结果^[18],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,出现了短暂的冻融现象,近而使 CO₂ 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研究与探讨。

4.4 以往对单一高寒灌丛 CO₂ 释放的研究结果表明,灌丛作为高寒灌丛草甸生态系统的主要植被类型,能通过光合作用吸收并固定大气中的 CO₂ 气体,是大气 CO₂ 的碳汇^[19-26],但随着放牧和人类活动的介入,系统组成发生改变,高寒灌丛草甸生态系统碳汇的作用被逐渐减弱。从研究结果可以看出,冬季灌丛和丛内草甸无植被生长,部分生长季通过光合作用从大气固定的 CO₂ 又通过土壤呼吸重新释放到大气中,再加上裸地常年处于净排放状态。这些潜在的因素和地区放牧活动导致的系统退化过程都可能使高寒灌丛草甸生态系统碳汇的效应被不断减弱,进而影响整个青藏高原地区生物地球化学循环及其作为地球碳循环中碳汇的作用。

5 结论

5.1 高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放速率呈明显的由低到高再到低的非单峰型季节变化规律。释放速率最大值出现在8月,最小值出现在12月-翌年2月,其季节间差异表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,并与土壤 5 cm 温度呈极显著或显著相关 ($P < 0.01$)。

5.2 因植被类型的不同,CO₂ 释放速率在灌丛、丛内草甸和裸地间亦存在明显的差异,灌丛 CO₂ 释放量大于丛内草甸,而裸地最小。整个观测期2003年6月30日-2004年6月28日,高寒灌丛植被-土壤系统 CO₂ 释放量为 $4\,293.63 \pm 955.75 \text{ g/m}^2$,丛内草甸植被-土壤系统 CO₂ 释放量为 $3\,319.68 \pm 806.19 \text{ g/m}^2$,裸地 CO₂ 的释放量为 $1\,724.14 \pm 444.14 \text{ g/m}^2$ 。

5.3 整个观测期高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放均表现为正排放。裸地常年处于较高水平的

CO₂ 释放状态,而灌丛和丛内草甸在冬季也向大气释放了部分碳。这些通过土壤呼吸损失的碳将极大地减弱高寒灌丛草甸生态系统碳汇的效应,并与地区放牧活动导致的系统退化过程共同结果,对整个青藏高原地区地球化学循环及其作为地球碳循环中碳汇的作用产生极大影响。

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 CO₂ release from tunda 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]. *Soils and Global Change* [M]. CRC press, Inc. Boca Raton, Florida, 1995. 45-65.
- [5] Ojima D S, Parton W J, Schimel D S, et al. Modeling the effects of climate and CO₂ changes on grassland storage of soil C [J]. *Water Air Soil Pollut*, 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] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration interrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, (43): 449-528.
- [8] Yang J C. Study on the microbial respiration rate of *Leymus chinensis* grasslands in Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, (9): 139-143.
- [9] Behera N, Pati D P. Carbon budget of a protected tropical grassland with reference to primary production and total soil respiration[J]. *Review of Ecology, Biology and Soil*, 1986, (23): 167-181.
- [10] Gupta S R, Singh J S. Soil respiration in a tropical grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, (13): 261-268.

- [11] Holt J A ,Hodgen M J ,Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North Queensland [J]. Australian Journal of Soil Research ,1990 ,28 :737-745.
- [12] 李凌浩,王其兵,白永飞,等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. 植物生态学报,2000,24(6):681-682.
- [13] Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri [J]. Ecology, 1971, (52):912-915.
- [14] 赵景波,杜娟,袁道先,等. 西安地区土壤 CO₂ 释放量和释放规律[J]. 环境科学,2002,23(1):25.
- [15] Bridge B J, Mott J J, Hartigan R J. The formation of degraded areas in the dry savanna wood lands of northern Australia [J]. Australian Journal of Soil Research, 1983, (21):91-104.
- [16] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, (27):753-760.
- [17] 麦克拉伦 A D, 波得森 G H, 斯库金斯丁, 等. 土壤生物化学[M]. 北京:农业出版社,1984. 490-491.
- [18] 曹广民,李英年,张金霞,等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量[J]. 环境科学,2001,22(6):14-19.
- [19] 曹广民,李英年,张金霞,等. 环境因子对暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放速率的影响[J]. 草地学报,2001,9(4):307-312.
- [20] 曹广民,张金霞,赵新全. 草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放量估测方法初探[J]. 土壤学报,2002,39(2):261-267.
- [21] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 高寒矮蒿草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J]. 生态学报,2003,123(4):627-634.
- [22] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 放牧强度对高寒灌丛草甸土壤 CO₂ 释放速率的影响[J]. 草地学报,2001,9(3):183-190.
- [23] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征[J]. 生态学报,2001,21(4):544-549.
- [24] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态[J]. 土壤学报,2001,38(1):32-39.
- [25] 周党卫,曹广民,张金霞,等. 植物生长季退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征[J]. 应用生态学报,2003,14(3):367-371.
- [26] 杜占池,樊江文,梁颢,等. 我国南方地区天然牧地营养价值和生产能力评价及其开发潜力[J]. 草业科学,2004,21(9):9-10.

The seasonal change rule of CO₂ release rate in alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow ecosystem

LI Dong^{1,2}, CAO Guang-min¹, WU Qin¹, LI Yue-mei¹, WANG Ying-hong³

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2. Postgraduate school of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;

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

Abstract: Using static chamber-GC method, a long-term CO₂ emission study was conducted on alpine *Potentilla fruticosa* shrub (GG), *Kobresia* meadow (GC) and bare land (GL), and annual release amount of CO₂ was also evaluated in alpine *P. fruticosa* meadow ecosystem at Haibei research station, CAS. The results indicated that CO₂ emission rates from GG, GC and GL varied seasonally in a year. The emission rates in growing seasons were higher compared with that during the wilting period, and the CO₂ emission rates ranked GG > GC > GL ($P < 0.01$). Furthermore, the emission rate had a remarkable differences with the rank of Summer > August > Spring > Winter. During the whole experimental period, from 30th June, 2003 to 28th June, 2004, the CO₂ efflux from plant-soil system at GG and GC sites were $3\ 088.458 \pm 287.02\ \text{g/m}^2$ and $2\ 239.685 \pm 183.68\ \text{g/m}^2$, respectively; and the efflux from bare land was $1\ 346.748 \pm 176.24\ \text{g/m}^2$. In addition, there was also a significant correlation between soil temperature at 0~5 cm depth and CO₂ emission rate ($P < 0.01$).

Key words: CO₂ emission rate; alpine *Potentilla fruticosa* scrub meadow ecosystem; seasonal change; annual efflux