文章编号:1007-0435(2007)05-0449-05

青海果洛黄河源区高寒草甸 CO_2 释放速率研究

孙步功[1], 龙瑞军[2,3*], 孔 郑[1], 冯瑞章[1]
(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001;
3. 兰州大学草地学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以青海果洛黄河源区高寒退化草甸生态系统为对象,应用静态密闭箱-气相色谱法对高寒退化草甸生态系统 CO_2 释放进行了初步研究。结果表明:所选 4 种不同退化程度高寒草甸,即未退化草甸(A)、轻度退化草甸(B)、中度退化草甸(C)和重度退化草甸(D),其 CO_2 释放速率有明显的日变化特征,日最大排放速率在 15:00 - 17:00左右出现,最低值出现于清晨 7:00 - 9:00 左右,释放白天大于夜晚;(2) CO_2 释放速率具有明显的季节性变化特征,生长期 CO_2 释放速率明显高于枯黄期,8 月为 CO_2 释放高峰期,1 月或 2 月为 CO_2 释放低谷期;(3) CO_2 释放速率的日变化主要受地表温度和 5cm 地温制约,季节动态与 5cm 地温呈显著正相关关系($P < 0.01$),本研究为进一步进行高寒退化草甸生态系统源汇效应的准确估测提供科学依据。

关键词: CO_2 释放速率; 高寒退化草甸系统; 日动态; 季节动态
中图分类号: Q948.1 **文献标识码**: A

A Study on CO_2 Emission Rate from Alpine Meadow in the Source Region of Yellow River in Guo-luo, Qing-hai Province

SUN Bu-gong[1], LONG Rui-jun[2,3*], KONG Zheng[1], FENG Rui-zhang[1]
(1. Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;
2. Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining, Qinghai Province 810001, China;
3. College of Grassland Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu Province 730000, China)

Abstract: The CO_2 emission rate from degraded alpine meadow in the source region of Yellow River in Guo-luo, Qing-hai Province was studied using static chamber-GC method. The results indicate that CO_2 emission rate from non-degraded meadow, minor degraded meadow, medium degraded meadow, and heavily degraded meadow showed evident characteristics of daily variations, e. g. peaked at 15:00 - 17:00 and minimized at 7:00 - 9:00, with higher CO_2 emission rate at daytime than at night. Furthermore, the CO_2 emission also showed a seasonal variation with higher emission rate during the plant growing seasons than at the wilting period. The fastigium of CO_2 emission appeared in August and low in January and February. In addition, the daily variations of CO_2 emission rate were restricted by soil temperature at 5cm depth and soil surface temperature, and a significant correlation was detected between the seasonal dynamics of CO_2 emission rate and soil temperature at 5cm depth ($P < 0.01$).

Key words: CO_2 emission rate; Degraded alpine meadow ecosystem; Daily variation; Seasonal change

近年来由于温室气体排放增加而引起的全球气候变暖已成为科学界最为关注的环境问题之一[1~4],尤其是导致大气 CO_2 浓度进一步增加的各种过程的研究倍受重视。草地占陆地生态系统总面积的 16.4%,是陆地生态系统的重要类型,其碳素储量约占陆地生态系统碳储量的 15.2%[5]。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内容之一[6]。青藏高原作为欧亚大陆最高最大的地理单元,不仅对气候变化十分敏感,而

收稿日期: 2007-03-08;**修回日期**:2007-07-25
基金项目: 国家"十五"科技攻关计划项目(2001BA606A-02-03);中国科学院"百人计划"项目(30371021)
作者简介: 孙步功(1971-),男,甘肃通渭人,副教授,博士研究生,从事草地生态研究,E-mail: sunbg@gsau.edu.cn; *通讯作者 Author for correspondence, E-mail: longrj@gsau.edu.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

且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永久冻土集中分布区,由于冻土热力敏感性大,随着全球 CO_2 浓度的增加和青藏高原地区气温的不断升高,冻土分布区温室效应气体具有很大的排放潜力[7~9]。其结果将进一步加剧气候的温暖化效应。因而,研究青藏高原土壤温室气体排放特征,对于评价区域生物地球化学循环及对全球变化的响应和反馈作用至关重要。

高寒草甸是广布于青藏高原的主要植被类型之一,它在青藏高原生物地球化学循环有着极其重要的作用。目前国内外在这方面的研究热点是植被碳库的准确估算,以及揭示"碳失汇"现象。影响 CO_2 释放的关键因素是植被本身的生物学特征和环境因子。近年来,针对高寒草甸 CO_2 释放过程及释放速率等已有大量的研究报道[10,11],但研究没有将高寒草甸作为一个不同退化阶段的复合体而进行。为弥补这一缺陷,本研究于 2005 年 4 月 30 日至 2006 年 4 月 28 日,分别对青海果洛黄河源区未退化草甸、轻度退化草甸、中度退化草甸和重度退化草甸 CO_2 释放进行观测研究,为进一步进行高寒退化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

实验区位于青海省南部果洛藏族自治州境内的黄河支流大武河流域。研究区年均气温 - 0.6 ℃,极端最低气温 - 34.9 ℃,最冷月 1 月平均气温 - 12.9 ℃,最热月 7 月平均气温 9.1 ℃, ≥0 ℃的年积温为 1202.6 ℃, ≥5 ℃的年积温为 865.0 ℃,野生牧草生长季为 120 d 左右,年降水量 513 mm,多集中在 5 - 9 月,雨热同季,专用 20 cm 口径年水面蒸发量 1459 mm,年日照时数 2571 h,无绝对无霜期。土壤类型为高山草甸土,草地植被为高寒草甸。

1.2 实验设计

根据草地退化程度选择 4 个样地作为试验对象(表 1)。每个样地设 3 次重复。

表 1 4 种样地植被状况

Table 1 Soil and vegetation status of the 4 types of sampling plots

样地类型 Sampling plot types	草地类型 Grassland types	编号 No.	海拔 Altitude	经纬度 Latitude and longitude	土壤类型 Soil types	土壤容重 Soil bulk density (g/cm^3)	土壤紧实度 Soil tightness	植被状况 Conditions of vegetation
未退化草甸 Non-degraded meadow	嵩草草甸 *Kobresia* meadow	A	3972 m	N34°31.673′ E100°02.064′	高山草甸土 Alpine meadow soil	1.13 ±0.015	4.0	以嵩草属、禾本科为绝对优势物种,杂草较少、物种分布均匀,总盖度达 80 %~95 %以上,基本无秃斑地。 *Kobresia* and *Gramineae* is the dominant species and ruderal is a few in non-degraded meadow. Species distributing is well-balanced. Whole coverage is over 80 %~95 % and bareness is few.
轻度退化草甸 Minor degraded meadow	嵩草草甸 *Kobresia* meadow	B	3732 m	N34°28.921′ E100°13.067′	高山草甸土、暗栗钙土 Alpine meadow soil、Gray millet calcium soil	1.08 ±0.015	3.5	以禾草为优势种,嵩草属植物较多,呈密丛状,物种分布不均匀,总盖度达 60 %~75 %,草场秃斑地占 15 %~20 %。 Grass is the dominant species and *Kobresia* is secondary in minor degraded meadow. Species distributing is unsymmetrical and cespitose. Whole coverage is 60 %~75 % and bareness is 15 %~20 %.
中度退化草甸 Medium degraded meadow	嵩草草甸 *Kobresia* meadow	C	3728 m	N34°28.748′ E100°13.159′	高山草甸土、灰钙土 Alpine meadow soil、Gray calcium soil	1.04 ±0.076	2.0	以禾草为优势种,豆科、菊科植物较多,嵩草属植物较少,总盖度为 20 %~30 %,裸露的秃斑地占 40 %~60 %。 Grass is the dominant species in medium degraded meadow, *Leguminosae* and *Compositae* is secondary and *Kobresia* is a few. Whole coverage is 20 %~30 % and bareness is 40 %~60 %.
重度退化草甸 Heavily degraded meadow	杂类草草地 Ruderal meadow	D	3745 m	N34°27.856′ E100°12.524′	高山草甸土、灰钙土 Alpine meadow soil、Gray calcium soil	0.98 ±0.015	1.0	植被构成以杂类草为主,禾草和莎草科植物偶见,毒草比例较大,总盖度为 40 %~60 %,秃斑地面积占 30 %~50 %左右。 Ruderal is the dominant species and poison grass is secondary in heavily degraded meadow. Grass and *Cyperaceae* is only a few. Whole coverage is 40 %~60 % and bareness is about 30 %~50 %.

1.3 方法

气体测定采用静态密闭箱-气相色谱法进行。采集箱由顶箱和底座组成,箱体用进口 304K 薄不锈钢板制作。其中,顶箱(40 cm ×40 cm ×40 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。底座(40 cm ×40 cm ×10 cm)正四面体,上端有密闭水槽。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。实验时底座密闭水槽内加水,以

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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_2 采用 HP4890D 气相色谱仪进行分析[12]。

在 CO_2 取样前后,用 JM624 便携式数字测温计分别测定 0～5 cm 的平均地温、地表温度、箱内温度和箱外大气温度。

1.4　CO_2 通量计算

利用下式计算所测 CO_2 通量

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

式中,F 是被测气体排放通量,V 是箱内空气体积,A 是箱子覆盖的面积,Ct 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[12]。

1.5　数据处理

CO_2 释放速率日变化观测及统计:在植物生长季(5 - 9 月)每月选择比较晴朗的天气 3 次,在 9 ∶00 至次日 7 ∶00 测定 CO_2 释放速率的日变化,观测中,日间每 2h 时测定 1 次,夜间 3h 测定 1 次,共 10 次。统计时将 5 - 9 月 15 个观测日的 10 个采样时刻的 CO_2 释放速率值分别平均得到日变化。

CO_2 释放速率季节变化的观测与处理:生长季 5 - 9 月每月测定 8 次(每周二、四),非生长季 10 月至翌年 4 月每月测定 4 次(每周二),每次采样均在 9 ∶00 - 11 ∶00 进行[12],将每月所得数据进行平均即为每月平均释放速率。

2　结果与分析

2.1　高寒草甸生长季 CO_2 释放速率日动态

青海果洛黄河源区生长季 4 种退化程度草甸 CO_2 日释放速率的变化特征见图 1。植物生长季高寒草甸 CO_2 释放速率具有明显的单峰型日变化进程。CO_2 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_2 释放速率上升时段,15 ∶00 至次日 7 ∶00 为 CO_2 释放速率下降时段。释放速率白天大于夜晚。生长季 A、B、C 和 D 4 种草甸 CO_2 释放速率最大值分别为 1005.34、504.21、308.56 和 457.28 mg ·m^{-2} ·h^{-1};最小值分别为 212.93、187.16、158.21 和 168.12 mg ·m^{-2} ·h^{-1}。白天(9 ∶00 - 19 ∶00) A、B、C 和 D 4 种草甸 CO_2 平均释放速率分别为 515.10 ±73.57、443.36 ±75.1、146.61 ±73.73 和 106.16 ±74.37 mg ·m^{-2} ·h^{-1},夜晚(20 ∶00 至次日 9 ∶00)分别为 241.76 ±83、195.31 ±81.1、188.21 ±54.02 和 186.16 ±54.30 mg ·m^{-2} ·h^{-1}。

由图 1 还可看出,4 种高寒草甸 CO_2 释放速率不仅具有单峰型日变化,而且因植被退化程度的不同释放速率不同,生长季释放速率由大到小的顺序为 A、B、D、C。这与植物活体现存量以及 5 cm 处地温密切相关,活体呼吸产生的 CO_2 是系统 CO_2 释放的重要组成部分。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,同时为碳循环过程提供了很好的物质基础。

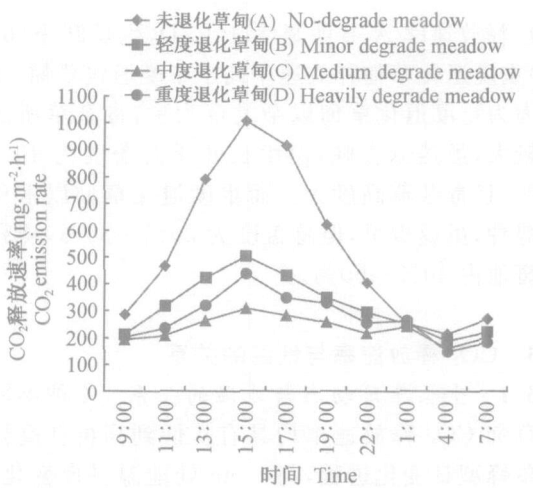

图 1　生长季 4 种不同退化草地 CO_2 释放速率日变化

Fig. 1　Daily variations of CO_2 emission rate from the 4 sampling plots in growing seasons

2.2　高寒草甸 CO_2 释放速率季节动态

4 种退化程度草甸 CO_2 释放季节动态见图 2。

从图 2 可以看出,高寒草甸 CO_2 释放速率具有明显的季节动态,且 4 种草甸的变化趋势基本一致。生长期 CO_2 释放速率明显高于枯黄期。2005 年 5 月至 2006 年 4 月,A、B、C 和 D 最高释放速率均出现在 8 月,分别为 625.21、593.01、342.08 和 384.28 mg ·m^{-2} ·h^{-1};2006 年最低排放速率出现在 1 月、2 月、1 月和 1 月,分别为 99.23、93.20、94.19 和 93.21 mg ·m^{-2} ·h^{-1}。7、8 月为 CO_2 释放高峰期,且释放速率 A > B > D > C ($P < 0.01$)。非生长季(10 月至翌年 4 月)释放速率 A、B 草地略大于 C、D 草地,且 C、D 草地的释放速率差别不大。生长季(5 - 10 月)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

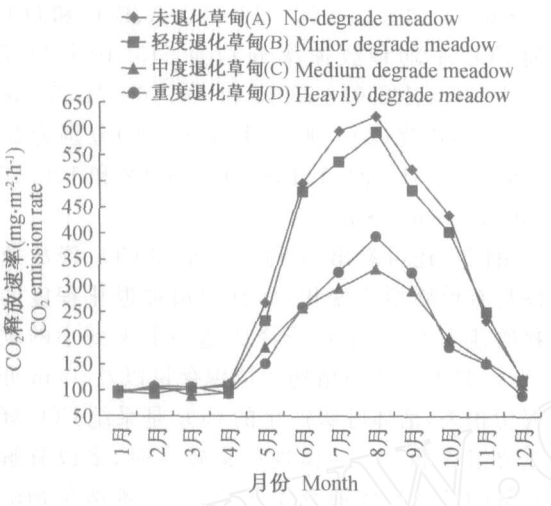

图 2 4 种退化草甸 CO_2 释放季节动态

Fig. 2 The seasonal dynamics of CO_2 emission rate from the 4 sampling plots

CO_2 释放速率 A、B 明显大于 C、D,生长旺季(6 - 9 月)重度退化草甸释放速率高于中度退化草甸,主要是因为重度退化草甸以杂类草为主,毒杂草所占比例较大,虽然返青晚,但生长旺季总盖度为 40 %～60 %,且毒杂草高度大。而重度退化草甸以禾草为优势种,虽返青早,但总盖度为 20 %～30 %,裸露的秃斑地占 40 %～60 %。

2.3 CO_2 释放速率与地温的关系

2.3.1 生长季日动态与地温的关系 4 种不同退化草甸 CO_2 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,与 5 cm 处地温昼夜变化(图 2)趋势一致。在植物生长季水热同期,土壤水分充足,湿度变化小,而昼夜温度变化大,所以 CO_2 释放速率主要受地表和 5 cm 地温的影响。白天温度逐渐升高时,植物与微生物呼吸代谢增强,CO_2 释放速率也随之增加。夜晚土壤温度逐渐降低,CO_2 释放速率相应降低,这种昼夜间明显的气温差异使得 CO_2 释放速率出现显著的昼夜差异,表现为白天明显高于夜间。

退化草甸生态系统 CO_2 释放速率日变化与 5 cm土壤温度日变化趋势相同(图 1 和图 3)。气温变化不能直接影响土壤微生物分解和植物根系呼吸等过程,对 CO_2 释放的影响起到间接作用。空气是太阳辐射热能向土壤较深层传热的载体,太阳能以热力传导作用给予土壤后,从而引发土壤温度的变化,进而导致土壤 CO_2 释放速率的变化。温度是通过生物新陈代谢速率而影响 CO_2 的释放。对于高寒土壤,土壤微生物在 35 ℃时的活性最高,分解有机物质能力最强[13]。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 ℃,远低于土壤微生物最适温度[14]。青藏高原土壤微生物活动是在长期适应高寒、潮湿的环境下进行的,在温度非常低时,微生物活动极其微弱,甚至停止,当温度稍微升高时,微生物活动便会急剧加强[15]。因此,随着土壤温度的升高,土壤生物活性随之增强。CO_2 的释放速率相应增加。植物根系的呼吸代谢速率同样具有类似的变化特性。

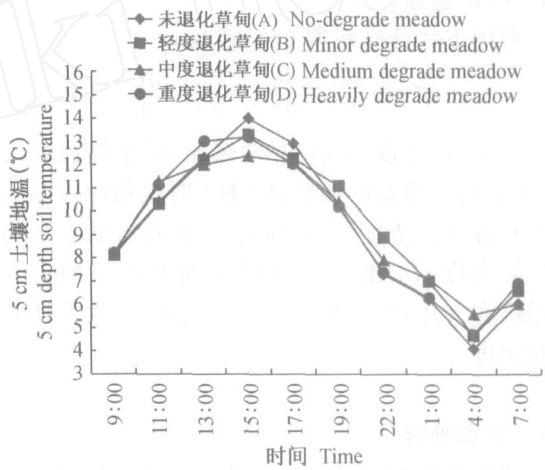

图 3 生长季 4 种退化草甸 5 cm 地温日变化

Fig. 3 Daily variations of soil temperature at 5 cm depth of the 4 sampling plots in growing seasons

2.3.2 季节动态与地温的关系 高寒草甸生态系统 CO_2 释放速率的季节变化特征与 5 cm 地温的季节变化相一致。7、8 两月温度达到年内最高,11 月至翌年 2 月,CO_2 释放速率降到最低时期。植物枯黄后期和休眠期(11 月至翌年 2 月)A、B、C 和 D CO_2 释放速率明显低于盛草期和枯黄初期(9 - 10 月),且变异较大。观测表明,A、B、C 和 D 4 种草甸的 CO_2 释放速率均表现为盛草期 > 枯黄初期 > 枯黄后期和休眠期($P < 0.01$),且 A、B、C 和 D 间 CO_2 释放速率表现为 A > B > D > C。枯黄后期和休眠期 A、B、C 和 D 之间 CO_2 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。CO_2 释放速率季节动态与 5 cm 地温呈显著正相关关系,A、B、C 和 D 4 种草地的相关系数分别为 0.899、0.9516、0.9393和 0.9356($P < 0.01$)。图 4 所示。

未退化草甸 CO_2 释放速率最大,而中度退化草甸和重度退化草甸都小。观测期未退化草甸 CO_2 释放量为 2668.452 ±207.08 gm^{-2},而轻度退化草甸、中度退化草甸和重度退化草甸则分别为 2031.681 ±173.62 gm^{-2}、1413.618 ±203.19 gm^{-2} 和 1446.748 ±120.29 gm^{-2},未退化草甸 CO_2 释放量明显高于中度退化草甸、重度退化草甸。究其原因

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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 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。土壤中约有 60 %的 CO_2 是在微生物分解土壤有机质的过程中产生[16]。未退化草甸地表覆盖度和地下根系较重度退化草甸大,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,未退化草甸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 CO_2 扩散,导致近似未退化草甸 CO_2 释放速率高于重度退化草甸,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 CO_2 的释放速率。如试验期 2005 年 11 月至翌年 2006 年 2 月,重度退化草甸 CO_2 释放速率略高于未退化草甸和中度退化草甸,其原因可能是由于重度退化草甸下垫面覆盖物较近似未退化草甸少,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 CO_2 释放速率高于未退化草甸和重度退化草甸。

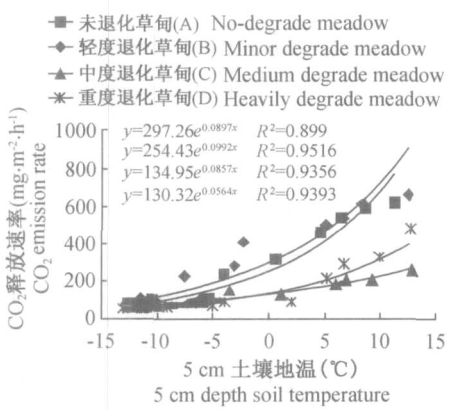

图 4　4 种退化草甸 CO_2 释放速率季节变化与 5 cm 地温季节变化的关系

Fig. 4　The correlative analysis between seasonal dynamics of CO_2 emission rate and soil temperature at 5 cm depth of 4 sampling plots

3　结　论

3.1　4 种不同退化程度的高寒草甸 CO_2 释放有明显的日变化特征,最大排放速率在 15 :00 - 17 :00 左右出现,最低值出现于清晨 7 :00 - 9 :00 左右。生长季释放速率由大到小的顺序为 A、B、D、C。

3.2　CO_2 释放速率具有明显的季节性变化特征,生长期 CO_2 释放速率明显高于枯黄期,8 月为 CO_2 释放高峰期,1 月或 2 月为 CO_2 释放低谷期。生长季(5 - 10 月) CO_2 释放速率 A、B 明显大于 C、D,生长旺季(6 - 9 月)重度退化草甸释放速率高于中度退化草甸。

3.3　CO_2 释放速率与温度密切相关。CO_2 释放速率日变化与 5 cm 土壤温度日变化趋势相同;CO_2 释放速率的季节变化特征与 5 cm 地温的季节变化相一致,呈显著的正相关关系($P < 0.01$)。

参考文献

[1] Houghton J H, Meira L G, Bruce J. Climate Change 1994 [M]. Great Britain: Cambridge University Press, 1995. 163-176

[2] Ouyang Y, Boersma L. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere model development[J]. Soil Sci., 1992, 56: 1695-1702

[3] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 180-201

[4] Ojima D S, Parton W J, Schimel D S, *et al*. Modeling the effects of climate and CO_2 changes on grassland storage of soil C[J]. Water Air Soil Pollution, 1993, 70: 643-657

[5] 赵亮,徐世晓,伏玉玲,等. 积雪对藏北高寒草甸 CO_2 和水汽通量的影响[J]. 草地学报,2005,13(3): 242-247

[6] 周党卫,曹广民,张金霞,等. 植物生长季退化草毡寒冻雏形土 CO_2 释放特征[J]. 应用生态学报,2003,14(3):367-371

[7] 李东,曹广民,胡启武,等. 高寒灌丛草甸生态系统 CO_2 释放的初步研究[J]. 草地学报,2005,13(2):145-149

[8] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 放牧强度对高寒退化草甸土壤 CO_2 释放速率的影响[J]. 草地学报,2001,9(3):183-190

[9] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, *et al*. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 237-243

[10] Janzen H H, Campbell C A, Izaurralde R C, *et al*. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 47: 181-195

[11] 李东,曹广民,吴琴,等. 海北高寒灌丛草甸生态系统 CO_2 释放速率的季节变化规律[J]. 草业科学,2005,22(5): 4-9

[12] 杜睿,王庚辰,吕达仁,等. 静态箱法原位观测草原 CO_2 通量的探讨[J]. 大气科学,2001,25(1):61-70

[13] 张金霞,曹广民,周党卫. 草毡寒冻雏形土 CO_2释放特征[J]. 生态学报,2001,21(4): 544-549

[14] Sims P L, Bradford J A. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109: 117-134

[15] 裴志永,欧阳华,周才平. 青藏高原高寒草原碳排放及其迁移过程研究[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 231-236

[16] Gu S, Tang Y H, Du M Y, *et al*. Short-term variation of CO_2 flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 108: 4670-4679

(责任编辑　梁艳萍)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net