

# 青藏高原高寒灌丛草甸 生态系统碳平衡研究

李 东<sup>1,2</sup>, 曹广民<sup>3</sup>, 黄 耀<sup>1</sup>, 靳代樱<sup>2</sup>, 明珠<sup>4</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 青海省林业局森林资源管理处, 青海 西宁 810008;  
3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810007; 4. 西南林学院园林系, 云南 昆明 650224)

**摘要:**利用静态密闭箱—气相色谱法观测的高寒金露梅 *Dasiphora fruticosa* 灌丛、丛间草甸土壤微生物呼吸 CO<sub>2</sub> 通量结果, 结合研究区群落生物量及样方调查, 对高寒灌丛草甸生态系统的碳平衡状况作了初步估测。结果表明: 植物生长季高寒灌丛草甸生态系统初级生产力年净固定碳量 461.83 g/(m<sup>2</sup>·a), 土壤通过微生物呼吸年碳净排放量 376.78 g/(m<sup>2</sup>·a)。碳素输入大于输出, 系统存在较强的 CO<sub>2</sub> 吸收潜力, 是大气 CO<sub>2</sub> 的汇, 其年净交换吸收碳量 85.05 g/(m<sup>2</sup>·a)。

**关键词:**碳平衡; 高寒灌丛草甸生态系统; 青藏高原

**中图分类号:** X144

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-0629(2010)01-0037-05

工业革命以来, 人类正以前所未有的速度和强度在全球尺度上对地球系统产生着巨大影响。CO<sub>2</sub> 作为大气中最主要的温室气体之一, 其浓度已从工业革命前的 280 μL/L 增加到 1994 年的 358 μL/L, 并且仍以每年 1.5 μL/L 的速率在增加<sup>[1]</sup>。温室气体如以目前的速度积累, 将足以在 21 世纪引起全球气候发生巨大变化<sup>[2]</sup>。草地是陆地生态系统的重要组成部分, 也是世界上分布面积最广的植被类型之一, 其净初级生产力约占全球陆地生态系统净初级生产力的 1/3, 土壤有机碳储量占 1/4 以上<sup>[3]</sup>。我国约有各类草地面积 4 亿 hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>, 有机碳储量达 44.09 Pg, 其中草地土壤碳储量 41.03 Pg<sup>[5]</sup>, 占草地系统有机碳总储量的 93.6%。由于天然草地多分布于生态环境相对较为脆弱的干旱半干旱地区, 也是受人类活动影响最为严重的区域之一, 其功能的正常发挥对维持全球及区域生态平衡具有极其重要的作用<sup>[6]</sup>。高寒金露梅 *Dasiphora fruticosa* 灌丛是青藏高原隆起形成高山冷湿气候的产物, 是该地区主要草地类型之一。近些年, 随着人类放牧活动的介入和高原区气候的暖干化<sup>[7-8]</sup>, 高寒灌丛景观发生了破碎化, 形成大小不同的灌丛窗(类似林窗), 窗间发育形成以珠芽蓼 *Polygonum viviparum* 为优势种的次生中生草甸。这种气候及人为

活动干扰下发生的种群分布格局变化, 必将对整个青藏高原区高寒草甸生态系统碳源、库、流关系和强度发生改变, 对大尺度过程产生影响。因而, 系统研究并估测青藏高原高寒灌丛草甸生态系统碳收支状况, 对科学认识和评价青藏高原在全球碳循环中的作用具有重要意义。为此, 拟通过一年来(2004 年)对高寒灌丛、丛间草甸土壤微生物呼吸 CO<sub>2</sub> 通量观测结果, 结合研究区植物生物量及群落调查, 对高寒灌丛草甸复合生态系统的碳平衡状况进行初步估测。分析探讨自然及人为活动干扰下发生的灌丛退缩过程对系统碳收支的影响, 旨在为进一步研究植物过程变化对草地生态系统碳循环的影响提供必要的参考。

## 1 材料与方法

**1.1 研究地区概况** 研究地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的大通河河谷西段。地理位置北

收稿日期: 2009-06-11

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目“陆地生态系统碳氮通量过程及其耦合关系集成研究”(KZCX2-YW-432-4)

作者简介: 李东(1977-), 男, 青海西宁人, 工程师, 在读博士生, 主要从事土壤碳循环研究。

E-mail: dongl2005@sina.com

通信作者: 黄耀 E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

纬 37°29′~37°45′, 东经 101°12′~101°23′, 山地平均海拔 4 000 m, 站内以滩地和丘陵低地为主, 平均海拔 3 200 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, 年平均气温 -1.7 °C, 年降水量 618 mm, 主要集中于 6—8 月, 占全年降水量的 80% 左右。原生群落以耐低温中生金露梅灌丛为建群层片, 丛间以珠芽蓼和紫羊茅 *Festuca rubra* 为优势种。伴有双叉细柄茅 *Ptilagrostis dichotoma*、藏异燕麦 *Helictotrichon tibeticum*、落芒草 *Oryzopsis munroi*、早熟禾 *Poa annua*、雪白委陵菜 *Potentilla nivea*、高山唐松草 *Thalictrum alpinum*、纤弱银莲花 *Anemone demissa* 等高山植物。地表有较厚的苔藓层和枯枝落叶层, 植被盖度 60%~70%。土壤为高山灌丛草甸土, 有机质丰富, 呈中性反应, pH 值 7.4~7.7。为地区夏季牧场。

## 1.2 研究方法

1.2.1 气体采样与分析 在海北站观测样地选择地势平坦、植被分布较为均一、并能代表该地区地表特征的金露梅灌丛和草甸作为观测样地(样地面积 50 cm×50 cm), 各样地共设置 3 个重复。气体观测前 1 个月采用刈割法将植物地上部分齐地面剪除, 并清除地表凋落物。地下根系则采用人工剔除法剔除。

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 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。箱外面粘贴厚 3 cm 的泡沫隔热板, 外覆白色防雨布, 以防太阳辐射下箱内温度升高, 影响观测结果。试验前将底座埋入土壤中, 四周以泥土压实, 试验期间不再取出, 以减小土壤扰动对测定的影响。气体采集使用 100 mL 注射器。重复 3 次。样品采集频率为植物生长季(5—10 月)每月进行 8 次 CO<sub>2</sub> 排放测定, 牧草枯黄期(11 月至翌年 4 月)每月进行 2~4 次 CO<sub>2</sub> 排放测定; 每次采样均在 9:00—11:00 完成。CO<sub>2</sub> 气体分析用 HP4890D 气相色谱仪进行。

1.2.2 植物生物量及群落调查 在总面积为 8.05 hm<sup>2</sup> 的金露梅灌丛林地内选择地势较为平缓的地块建立面积为 50 m×50 m 大小的样地, 再把样地分成 100 个面积为 5 m×5 m 的小样方。进行群落调查时沿大样方的对角线选择 10 个小样方, 并对样方内出现灌丛的最大和最小冠幅进行测量, 用于估测灌丛和草甸在整个灌丛草甸生态系统中的分配比例。地上生物量测定采用标准收获法, 灌丛样方面积为 1 m×1 m, 丛间草甸样方面积为 50 cm×50 cm, 齐地面进行刈割, 重复 6 次。地下生物量的测定采用土柱法<sup>[9]</sup>, 土柱大小分别为灌丛 50 cm×50 cm×40 cm, 丛间嵩草草地 25 cm×25 cm×40 cm, 每 10 cm 为 1 层, 取出的土样连同根系装入布袋, 做好样方记录, 将样品带回实验室用清水清洗干净、风干, 置于 80 °C 的恒温箱内烘至恒量, 称干质量。地下生物量与地上生物量取样同时进行。

## 1.2.3 数据计算与分析

CO<sub>2</sub> 通量的计算公式:

$$F = \rho \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

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;  $\frac{dC_t}{dt}$  是采样箱内被测气体的体积混合比浓度变化率;  $t$  是采样时间;  $\rho$  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。

土壤微生物呼吸碳通量月值 = 每月各观测日释放速率均值 × 24 h × 30 d × (12/44) (2)

净生态系统生产力估测:

$$y_{NEP} = x_{NPP} - x_{Rh} \quad (3)$$

式中,  $y_{NEP}$  净生态系统生产力;  $x_{NPP}$  植物净初级生产力固定碳量;  $x_{Rh}$  土壤异养(微生物)呼吸释放量。

数据分析由 SPSS 统计软件完成。

## 2 结果与分析

2.1 高寒灌丛草甸生态系统年净初级生产力估测 高寒灌丛草甸生态系统是以多年生灌丛为建群层片的复层混交群落, 其年净初级生产力可采用生物量观测与群落样方调查相结合的方法

法获得,有关该方法可参阅文献[10]。表1为2004年植物生长季高寒灌丛、丛间草甸群落最大和最小生物量观测结果。由此,计算得到该年份高寒灌丛、丛间草甸群落年净初级生产力分别为干物质1323.33和985.85 g/(m<sup>2</sup>·a)。以固定

样地群落调查结果(表2),灌丛、草甸群落配置比1:1,植物各器官有机碳含量40%,计算得到2004年高寒灌丛、丛间草甸及整个灌丛草甸生态系统每年通过植物光合作用固定和吸收的碳量分别为529.33、394.34和461.83 g/(m<sup>2</sup>·a)。

表1 植物生长季高寒金露梅灌丛、丛间草甸植物生物量观测结果 g/(m<sup>2</sup>·a)

草甸类型	6月15日		8月28日	
	地上生物量	地下生物量	地上生物量	地下生物量
灌丛	308.26	1 091.45	545.82	2 177.18
丛间草地	239.65	1 469.56	465.85	1 989.55

表2 高寒金露梅灌丛草甸生态系统灌丛、草甸群落分布格局

样方样方面积 编号 (m <sup>2</sup> )	金露梅灌丛			丛间草甸	
	面积(m <sup>2</sup> )	比例(%)	面积(m <sup>2</sup> )	比例(%)	比例(%)
1	25	17.0	68.0	8.0	32.0
2	25	10.7	42.8	14.3	57.2
3	25	13.7	54.7	11.3	45.3
4	25	16.2	64.9	8.8	35.1
5	25	13.5	54.0	11.5	46.0
6	25	9.9	39.6	15.1	60.4
7	25	8.6	34.4	16.4	65.6
8	25	12.4	49.4	12.6	50.6
9	25	10.5	41.9	14.5	58.1
10	25	11.9	47.7	13.0	52.3
均值	25	12.4	49.8	12.5	50.2

主要途径<sup>[11]</sup>。高寒灌丛草甸生态系统土壤微生物呼吸CO<sub>2</sub>通量在年内呈单峰型季节变化特征(图1)。草盛期6—8月为土壤呼吸CO<sub>2</sub>释放高峰期,最大值出现在8月中下旬,低谷期则出现在植物枯黄期11月至翌年3月。整个观测期,高寒灌丛、丛间草甸通过土壤微生物呼吸释放的碳量为392.71和360.84 g/m<sup>2</sup>。以固定样地群落调查结果(表2),计算得到2004年单位面积高寒灌丛草甸生态系统通过土壤微生物呼吸排放的碳量为376.78 g/(m<sup>2</sup>·a)。

净生态系统生产力是表示生态系统碳平衡的指标。它是生态系统净初级生产力与土壤异养呼吸的差值,净生态系统生产力为负值表示生态系统是碳源,若为正值,则表明生态系统是碳汇<sup>[12]</sup>。对比2004年高寒灌丛、丛间草甸及整个灌丛草甸生态系统年净初级生产力固定碳量与土壤微生物(异养)呼吸CO<sub>2</sub>排放量,得到其净生态系统生产

2.2 高寒灌丛草甸生态系统土壤CO<sub>2</sub>释放通量及碳平衡估算 土壤通过微生物呼吸作用向大气释放CO<sub>2</sub>是陆地生态系统碳素输出的

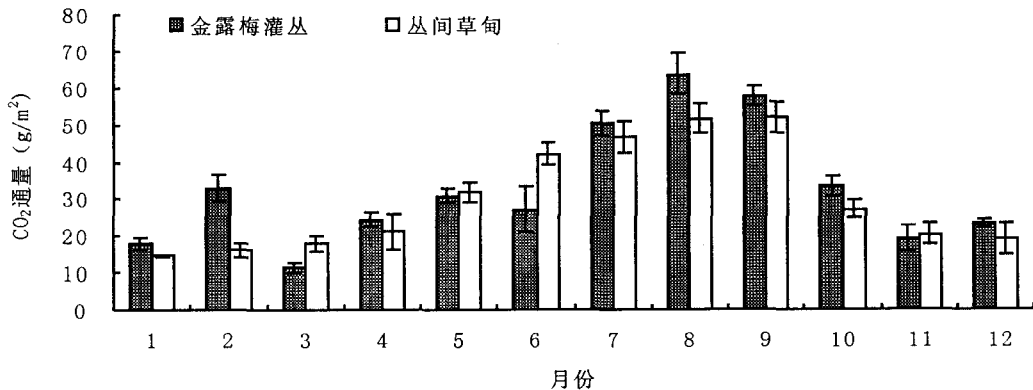


图1 高寒灌丛、丛间草甸土壤异养呼吸CO<sub>2</sub>释放通量

力大小分别为 136.62、33.50 和 85.05  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。表明 2004 年高寒灌丛草甸生态系统存在较强的  $\text{CO}_2$  吸收潜力,土壤有机碳处于积累状态,是大气  $\text{CO}_2$  的汇。

### 3 讨论与结论

净生态系统生产力是反映陆地生态系统碳平衡的一个重要指标。从全球范围来看,草地净生态系统生产力在不同气候区及群落间存在明显差异,这在一定程度上反映了不同草地类型碳(源)汇特征的差别。青藏高原高寒灌丛草甸生态系统是以耐低温中生灌木为建群层片的多年生灌丛草甸复层混交群落。目前,在灌丛群落层面上对其生物量及  $\text{CO}_2$  通量已有大量研究和报道<sup>[13-19]</sup>,但基于生态系统水平上对其碳(源)汇特征报道尚不多见。本研究在这方面作了初步尝试。结果表明,植物生长季高寒灌丛草甸生态系统年净初级生产力碳吸收量明显高于土壤(微生物)呼吸碳排放量,系统存在较强的  $\text{CO}_2$  吸收潜力,是大气  $\text{CO}_2$  的汇,其年净交换吸收碳量为 85.05  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。其中,灌丛、草甸群落年净交换吸收碳量约 68.31 和 16.75  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,分别占整个生态系统年净交换吸收总量的 80.31% 和 19.69%。

夏季放牧是高寒灌丛草甸主要利用方式之一。放牧干扰通过改变生态系统的种群分布格局,从而对其群落组成、生物量及土壤呼吸等产生重要影响<sup>[20-23]</sup>。盛海彦等<sup>[24]</sup>的研究发现,在不同放牧压力梯度下高寒灌丛草甸生态系统群落组成、种群分布格局变化明显。如灌丛层片群落覆盖度由 62.69% 下降为 3.94%,单位面积上平均植株数也由原来的 115.80 株/ $\text{m}^2$  降低到 25.75 株/ $\text{m}^2$ ,降幅达 77.89%。这种人类放牧干扰下发生的灌丛退缩在一定程度上降低了高寒灌丛草甸生态系统作为大气  $\text{CO}_2$  汇功能,甚至使其逆转为碳源<sup>[25]</sup>。从本研究结果分析,高寒金露梅灌丛草甸生态系统为大气  $\text{CO}_2$  的汇,但其碳汇功能随着灌丛群落的退缩而呈降低趋势。当金露梅灌丛分布面积减少 50% 时,整个灌丛草甸生态系统的年净交换吸收碳量较单一灌丛群落降低 37.74%。而当灌丛完全退缩,形成以珠芽蓼为优势种的次

生草甸后,其年净交换吸收碳量降低 75.48%,每年通过光合作用固定吸收碳量仅为 33.50  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 1995: the science of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 14-15.
- [2] Melillo J M, Prentice T C, Farquhar G D, et al. Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate [A]. Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, et al. Climate change 1995: The science of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 444-481.
- [3] Carter A T, Scholes R J. Spatial global database of soil properties [A]. IGBP Global Soil Data Task CD-ROM [C]. Toulouse: International Global-biosphere Program (IGBP) Data Information Systems, 2000.
- [4] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 264-265.
- [5] Ni J. Carbon storage in grassland of China [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50: 205-218.
- [6] 耿远波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述 [J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74-80.
- [7] Zhang Y, Welker J M. Tibetan alpine tundra response to simulated changes in climate: Above-ground biomass and community responses [J]. Arc. Alp. Res., 1996, 128(2): 203-209.
- [8] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景分析 [J]. 高原气象, 2004, 28(4): 558-567.
- [9] 马克平, 周瑞昌, 郭亚胜. 小叶章草甸地下生物量形成规律的研究 [J]. 草业科学, 1992, 9(2): 24-28.
- [10] 李英年, 赵亮, 王勤学, 等. 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量 [J]. 草地学报, 2006, 14(1): 72-76.
- [11] 李凌浩, 刘先华, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究 [J]. 植物学报, 1998, 40(10): 955-961.
- [12] 张宪洲, 石培礼, 刘允芬, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤  $\text{CO}_2$  排放及其碳平衡 [J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(S2): 54-62.

- [13] 杨福囤,沙渠,张松林. 青海高原海北高寒灌丛和高寒草甸初级生产量[A]. 中国科学院西北高原生物研究所. 高寒草甸生态系统[C]. 兰州:甘肃人民出版社,1982:44-50.
- [14] 周华坤,周立,赵新全,等. 金露梅灌丛地下生物量形成规律的研究[J]. 草业学报,2002,11(2):59-62.
- [15] 于应文,胡自治,张德罡,等. 金露梅灌丛净第一生产力[J]. 草业学报,2000,9(4):33-39.
- [16] 李东,曹广民,胡启武,等. 高寒灌丛草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 释放的初步研究[J]. 草地学报,2005,13(2):144-148.
- [17] 李东,曹广民,吴琴,等. 海北高寒灌丛草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 释放速率的季节变化规律[J]. 草业科学,2005,22(5):4-9.
- [18] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 放牧强度对高寒灌丛草甸土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的影响[J]. 草地学报,2001,9(3):183-190.
- [19] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 退化草地暗沃寒冻维形土 CO<sub>2</sub> 释放的日变化和季节变化动态[J]. 土壤学报,2001,38(1):31-40.
- [20] 杜岩功,梁东营,曹广民,等. 放牧强度对嵩草草甸草毡表层及草地营养和水分利用的影响(简报)[J]. 草业学报,2008,17(3):146-150.
- [21] 孙飞达,龙瑞军,蒋文兰,等. 三江源不同鼠洞密度下高寒草甸植被群落生物量和土壤容重特性研究[J]. 草业学报,2008,17(5):111-116.
- [22] 赵云,陈伟,李春鸣,等. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤有机质含量及其与主要养分的关系[J]. 草业科学,2009,26(5):20-25.
- [23] 石峰,李玉娥,高清竹,等. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响[J]. 草业科学,2009,26(3):9-15.
- [24] 盛海彦,曹广民,李国荣,等. 放牧干扰对祁连山高寒金露梅灌丛草甸群落的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(1):235-241.
- [25] 赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化[M]. 北京:科学出版社,2009:320-321.

### Carbon budget of alpine shrub meadow ecosystem in Qinghai-Tibetan plateau

LI Dong<sup>1,2</sup>, CAO Guang-min<sup>3</sup>, HUANG Yao<sup>1</sup>, JIN Dai-ying<sup>2</sup>, MING Zhu<sup>4</sup>

(1. Resource and Environmental Science College, Nanjin Agricultural University, Jiangsu Nanjin 210095, China; 2. Forest Resources Management Department, Qinghai Forest Bureau, Qinghai, Xining 810008, China; 3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Qinghai, Xining 810007, China; 4. Landscape Architecture Department, Southwest Forestry College, Yunnan, Kungming 650224, China)

**Abstract:** The soil heterotrophic carbon dioxide flux from alpine *Dasiophora fruticosa* shrub and meadow dispersed among the shrubs were measured using static chamber-Gas Chromatography method, and the community biomass and sample plot were also surveyed. The carbon budget of alpine shrub meadow ecosystem was estimated primarily. The results suggested that during the growing seasons, the observed amount of annual carbon fixation via primary production for alpine shrub meadow ecosystem was about 461.83 g/(m<sup>2</sup> · a). The carbon dioxide outputs via soil heterotrophic respiration was about 376.78 g/(m<sup>2</sup> · a). So carbon budget was input more than output, the alpine shrub meadow ecosystem has stronger potential to absorb carbon dioxide, it was a sink of atmospheric CO<sub>2</sub>, and the plant community had a net carbon gain of 85.05 g/(m<sup>2</sup> · a) in a year.

**Key words:** carbon budget; alpine shrub meadow ecosystem; Qinghai-Tibetan plateau