

# 三江源区高寒草地退化与恢复过程中 二氧化碳净交换特征\*

李小艳 董世魁\*\* 朱磊 温璐

(北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要** 采用同化箱法测定了青海省南部果洛藏族自治州玛沁县不同退化程度天然草地及不同建植年限人工草地植物群落光合作用、暗呼吸及 CO<sub>2</sub> 净交换量。结果表明,天然草地植物群落光合作用过程 CO<sub>2</sub> 吸收量与暗呼吸作用 CO<sub>2</sub> 释放量的变化趋势为:中度退化草地<重度退化<极度退化<未退化草地;未退化、中度及重度退化高寒草地植物群落净吸收 CO<sub>2</sub>,而极度退化高寒草地植物群落净释放 CO<sub>2</sub>。对“黑土滩”型极度退化草地进行人工恢复后,植物群落通过光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 量增加;2000 和 2004 年建植的垂穗披碱草(*Elymus nutans*)单播人工草地植物群落净吸收 CO<sub>2</sub> 量分别为 1.33 和 2.3 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,大于 2002 和 2005 年混播人工草地;对单播或混播人工草地而言,随着建植年限增加,草地出现一定程度的退化现象,CO<sub>2</sub> 净吸收量也逐渐下降。从青藏高原碳管理的角度,中、重度退化草地要防止退化为“黑土滩”型极度退化草地,使其恢复到未退化程度;极度退化草地要及时进行人工恢复,有效增加碳的吸收量。

**关键词** 三江源; 光合作用; 暗呼吸; 二氧化碳净交换量

**中图分类号** Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)10-1944-06

**Net carbon dioxide exchange of plant communities on degraded and restored alpine grasslands in headwater area of Three Rivers in China.** LI Xiao-yan, DONG Shi-kui, ZHU Lei, WEN Lu (State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(10):1944-1949.

**Abstract:** By the method of carbon assimilation chamber, we measured the photosynthetic rate, dark respiration rate, and net carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) exchange of plant communities on the natural grasslands at different degradation levels and the artificial grasslands having been planted for different years in the Maqin County of Qinghai Province. On the natural grasslands at different degradation levels, the photosynthetic rate and dark respiration rate of plant communities had a variation trend of moderately degraded grassland < heavily degraded grassland < extremely degraded grassland < non-degraded grassland. A certain amount of CO<sub>2</sub> was absorbed by the plant communities on the non-degraded, moderately degraded, and heavily degraded grasslands, while 1.20 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> was released from the extremely degraded grassland. After the artificial restoration of the extremely degraded grassland, the CO<sub>2</sub> release reduced. The mono-cultured *Elymus nutans* grassland established in 2000 and 2004 absorbed much more CO<sub>2</sub> than did the mixed cultivated grassland established in 2002 and 2005. With the increasing established year of mono-cultured and mixed cultivated grasslands, the net CO<sub>2</sub> absorption by the plant communities decreased. From the viewpoint of carbon management in Qinghai-Tibet Plateau, it was suggested that the moderately and heavily degraded alpine grasslands should be prevented from being further degraded, and the extremely degraded alpine grassland should be artificially restored in time to effectively increase the CO<sub>2</sub> absorption by plant community.

**Key words:** headwater area of Three Rivers; photosynthesis; dark respiration; net carbon dioxide exchange.

\* 国家自然科学基金资助项目(30870466 和 50939001)。

\*\* 通讯作者 E-mail: dongshikui@sina.com

收稿日期: 2010-04-03 接受日期: 2010-07-14

三江源区或江河源区是指位于青藏高原腹地的长江、黄河和澜沧江源头地区,它不仅是东亚和东南亚地区重要水源涵养区和生态功能区,也是我国重要的牧业生产基地和藏文化传承地,具有极其重要的生态服务功能和社会经济价值。作为三江源区面积最大(覆盖率达85%)的生态系统,高寒草地在该区水源涵养、气候调节、碳固定、生物多样性维持、牧业生产、文化传播等生态服务功能(谢高地等,2003)及下游地区生态安全保障(Dong *et al.*,2007)中具有重要作用。然而,受气候变暖、人类活动等因素的影响,该区草地生态系统严重退化,部分地区出现“黑土滩”、“黑土坡”等次生裸地,严重影响了高寒草地生态服务功能的发挥,进而降低了整个源区的生态服务功能和社会经济价值(尚占环等,2007)。

针对这一现状,中国政府和科技部门采取了一系列政策和措施,以期遏制三江源区草地生态环境继续恶化,恢复退化草地生态系统,改善其生产水平和生态条件,维持高寒草地生态服务功能(Dong *et al.*,2007)。目前,三江源“黑土滩”型退化草地恢复重建所采用的措施主要包括封育与补播草地、建设人工或半人工草地、控制鼠虫及毒杂草危害、建立自然保护区及综合治理(董全民和马玉寿,2007)。其中,建设人工草地是该区高寒草地生态环境建设最有效的模式之一(马玉寿等,2002)。

恢复成效评估是生态恢复重建技术选择的理论基础,也是退化草地恢复管理的科学依据。在生态恢复成效的诸多评价指标中,碳平衡可以作为一项主要指标,这是因为碳平衡可以反映草地生态系统固碳能力和草地生态系统对温室气体的调节作用。然而,对三江源区或青藏高原高寒草地生态系统碳平衡研究中,多数学者主要关注植物个体或群体的光合作用能力(易现峰等,2000;师生波等,2006;田玉强等,2009)、土壤系统的呼吸作用强度及其时空变化规律(周党卫等,2003;Gao *et al.*,2004;王俊峰等,2008),较少有学者综合考虑植物群落的光合固碳能力和草地系统(包括植被和土壤)的呼吸排碳强度,缺少对草地退化或恢复过程中碳平衡状态的系统分析。鉴于此,本文通过分析不同退化程度和不同建植年限人工草地二氧化碳净交换特征的差异,探究高寒地区二氧化碳净交换量随草地退化程度和人工草地建植年限的变化规律,寻求恢复和提高高寒草地固碳能力的有效技术措施,以期实证用

碳平衡指标测度草地生态系统健康的科学假说,同时为青藏高原高寒草地的碳管理提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 实验地概况

实验地位于青海省南部果洛藏族自治州玛沁县(33°43'N—35°16'N,98°45'E—100°56'E),地处青藏高原腹地,平均海拔4000 m以上,年均气温-1.3℃,年均降水486.9~666.5 mm,年蒸发量1119.1 mm,属高寒半湿润型气候。根据中国土壤分类系统,土壤属于高山草甸土。原生植被主要为以嵩草、芨芨属和早熟禾为优势种的高寒草甸和以高山柳、金露梅为优势种的高山灌丛草甸。但在气候变化、过度放牧等自然和人为因素的影响下,天然植被出现不同程度的退化现象,部分地区出现地表裸露的“黑土滩”或“黑土坡”。目前,对于“黑土滩”或“黑土坡”型极度退化草地,当地管理部门和农民多采用建植人工草地的方式进行生态恢复。

### 1.2 实验设计

根据董全民和马玉寿(2007)提出的江河源区退化草地评价等级标准,本试验选择了未退化、中度退化、重度退化、极度(“黑土滩”)退化4种类型的天然草地作为退化草地,其优势植物组成见表1。同时选择2000年、2002年、2004年、2005年4个时期建植、并经补播、除杂等精细人工管理的人工草地作为恢复草地,其优势植被组成见表2。于2009年8月10—20日对所有供试草地用外接自制有机玻璃同化箱(箱体大小为0.5 m×0.5 m×0.5 m)的LI-6400光合分析仪测定植物群落光合作用、草地植被-土壤系统光呼吸及暗呼吸,并针对以往测定中内外温差较大、箱内气体混合不匀的问题对同化箱进行了改进,在箱体内安装了高度不同的风扇以混匀气体,并在内部四角放置冰块以保持恒温。所有测定均选择晴朗无云的天气、10:00—12:00进行,以保持所有测定条件的一致性和测定结果的可比性。

### 1.3 CO<sub>2</sub>净交换量测定原理

自然状态下,陆地生态系统碳循环的基本模式为:大气中的CO<sub>2</sub>通过植物光合作用(PC)转化为有机碳,一部分有机碳在植物呼吸作用下以CO<sub>2</sub>的形式返回到大气,另一部分有机碳随地上植被和根系枯死残留在土壤中形成土壤有机质,再通过土壤呼吸形成CO<sub>2</sub>释放到大气中。由于植物群落的光合作用相较于暗呼吸作用可以忽略不计,因此,植

表1 不同退化程度天然草地群落优势植物组成

Tab.1 Composition of plant communities in different degradation level of native grasslands

退化水平	植物群落优势种
未退化	苔草 <i>Carex</i> spp., 矮蒿草 <i>Kobresia humilis</i> , 线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i>
中度退化	异针茅 <i>Stipa aliena</i> , 小嵩草 ( <i>K. pygmaea</i> ), 珠芽蓼 ( <i>Polygonum viviparum</i> )
重度退化	冷地早熟禾 <i>Poa pratensis</i> , 矮蒿草, 茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>
极度退化	黄帚 <i>Ligularia virgaurea</i> , 甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i> , 黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrantha</i> , 裂叶独活 <i>Heracleum millefolium</i> , 鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>

表2 不同建植年限人工草地群落植物组成

Tab.2 Composition dynamics of plant communities of cultivated grassland

生长年限 (年)	植物群落优势种
2000	披碱草 <i>Elymus nutans</i>
2002	披碱草, 中华羊茅 <i>Festuca sinensis</i>
2004	披碱草
2005	披碱草, 中华羊茅, 冷地早熟禾 <i>Poa pratensis</i> , 赖草 <i>Elymus secalinus</i> , 碱茅 <i>Puccinellia distans</i>

物群落光合作用吸收的  $\text{CO}_2$  与暗呼吸 ( $P_d$ ) 释放的  $\text{CO}_2$  之差为植物群落  $\text{CO}_2$  净交换量 ( $NEE$ ), 即  $NEE = PC - P_d$ , 其中暗呼吸包括植物呼吸和土壤呼吸; 若  $NEE > 0$ , 植物群落净吸收碳, 若  $NEE < 0$ , 植物群落净释放碳。群落的光合速率:

$$PC = P_d + NEE \quad (1)$$

#### 1.4 草地 $\text{CO}_2$ 净交换量测定

用带有有机玻璃同化箱 (0.5 m × 0.5 m × 0.5 m) 的 LI-6400  $\text{CO}_2$  分析仪测定同化箱内  $\text{CO}_2$  浓度。每个样地测定 3 个重复, 每个重复测 3 次, 每次持续 3 min。

#### 1.5 草地暗呼吸 ( $P_d$ ) 测定

$\text{CO}_2$  净交换量测定结束后, 用黑布罩住同化箱, 使其处于完全黑暗状态, 测定同化箱内  $\text{CO}_2$  浓度。重复个数及测定时间同 1.4。

#### 1.6 草地植物群落光合速率 ( $PC$ ) 计算

根据式 (1), 获得植物群落  $\text{CO}_2$  净交换量 ( $NEE$ ) 和暗呼吸 ( $P_d$ ) 测定值后, 可计算出植物群落光合速率  $PC$ 。

#### 1.7 数据处理

采用 Excel 软件处理了天然草地和人工草地光合速率、暗呼吸和  $\text{CO}_2$  净交换量的实验数据, 并使用 SPSS 软件对其进行方差分析, 利用最小显著差数

法分别比较不同退化程度和不同建植年限草地间各指标的差异显著性 ( $\alpha = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同退化程度草地 $\text{CO}_2$ 交换特征

**2.1.1 植物群落光合吸收  $\text{CO}_2$  量** 如图 1a 所示, 不同退化程度的高寒草地植物群落光合作用存在明显差异 ( $P < 0.05$ ), 极度退化草地的植物群落光合速率最大, 为  $12.86 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 重度退化和未退草地化次之, 但三者间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 中度退化草地的光合速率显著低于其他 3 类草地 ( $P < 0.05$ ), 仅为  $3.56 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其原因在于, 植物群落光合作用不仅与光照强度、温度、相对湿度和大气  $\text{CO}_2$  浓度有关 (戚秋慧等, 1997; 林栋一等, 2009), 而且与植物群落及叶面积指数密切相关 (戚秋慧, 1989; 易现峰等, 2000)。本文及其他学者 (周华坤等, 2005) 的研究表明, 在青藏高原高寒草甸的退化演替序列上, 未退化的草地主要以莎草和禾草为主, 杂草很少; 中度退化草地莎草相对未退化草地明显减少, 禾草略有增加, 杂草显著增加; 重度和极度退化草地杂草为主, 禾草和莎草生物量很低。可见, 极度退化草地的植物群落组成以阔叶型杂草类为主, 叶面积指数较大, 光合作用效率较高。

**2.1.2 草地暗呼吸释放  $\text{CO}_2$  量** 不同退化程度高寒草地释放  $\text{CO}_2$  速率的变化趋势与光合作用的变化基本趋于一致 (图 1b)。极度退化草地最大 ( $P < 0.05$ ), 为  $14.06 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 重度退化和未退化草地次之, 且二者之间不显著; 中度退化最低 ( $P < 0.05$ ), 为  $2.94 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

**2.1.3 草地系统  $\text{CO}_2$  净交换量** 从  $\text{CO}_2$  净交换量看, 未退化、中度退化和重度退化草地植物群落均净吸收  $\text{CO}_2$  (图 1c), 随着退化程度加剧, 草地植物群落净吸收碳量逐渐下降, 未退化草地为  $3.2 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 中、重度退化草地约为 1.19 和  $0.61 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 但三者间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 对于极度退化的“黑土滩”型草地来说, 植物群落净释放  $\text{CO}_2$ , 为  $1.20 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与未退化草地有显著差异 ( $P < 0.05$ )。由此可见, 当高寒草地退化为“黑土滩”时, 植物群落的  $\text{CO}_2$  净交换特征由净吸收碳转化为净释放碳, 即暗呼吸 (包括土壤呼吸和植被呼吸) 释放的  $\text{CO}_2$  量高于草地植被光合作用固定的  $\text{CO}_2$  量。

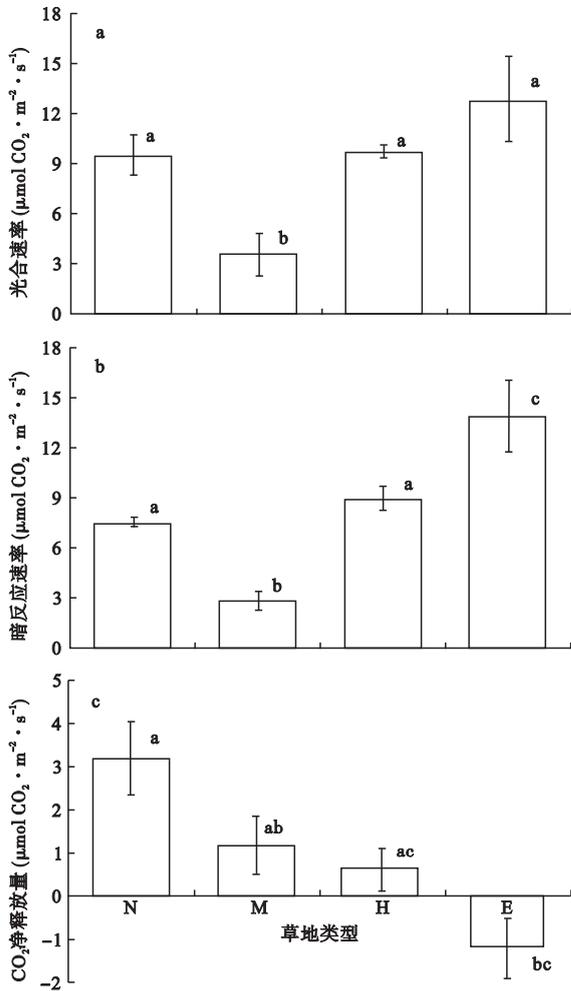


图1 不同退化程度高寒草地植物群落光合速率(a)、暗呼吸速率(b)及CO<sub>2</sub>净交换速率(c)

Fig.1 Photosynthesis (a), dark respiration (b) and net CO<sub>2</sub> exchange (c) in plant communities of differently degraded alpine grasslands

数值为平均值±标准误;N、M、H、E 分别代表未退化、中度、重度和极度退化草地;同一图中不同字母代表差异显著( $P < 0.05$ )。

## 2.2 不同建植年限人工草地 CO<sub>2</sub> 交换特征

**2.2.1 植物群落光合吸收 CO<sub>2</sub> 量** 由图 2a 可知,2000 年建植的垂穗披碱草单播草地植物光合吸收 CO<sub>2</sub> 量小于 2004 年建植的垂穗披碱草单播草地,但二者间差异不显著( $P > 0.05$ );2002 年建植的垂穗披碱草+中华羊茅混播草地的植物群落光合吸收 CO<sub>2</sub> 量显著小于 2005 年建植的垂穗披碱草+中华羊茅+冷地早熟禾+赖草+碱茅混播草地( $P < 0.05$ )。由此可以推断,随着建植年限的增加,人工草地植物群落的光合固碳能力不断下降。

**2.2.2 植物群落暗呼吸释放 CO<sub>2</sub> 量** 人工草地植物群落暗呼吸释放 CO<sub>2</sub> 的变化趋势与群落光合吸

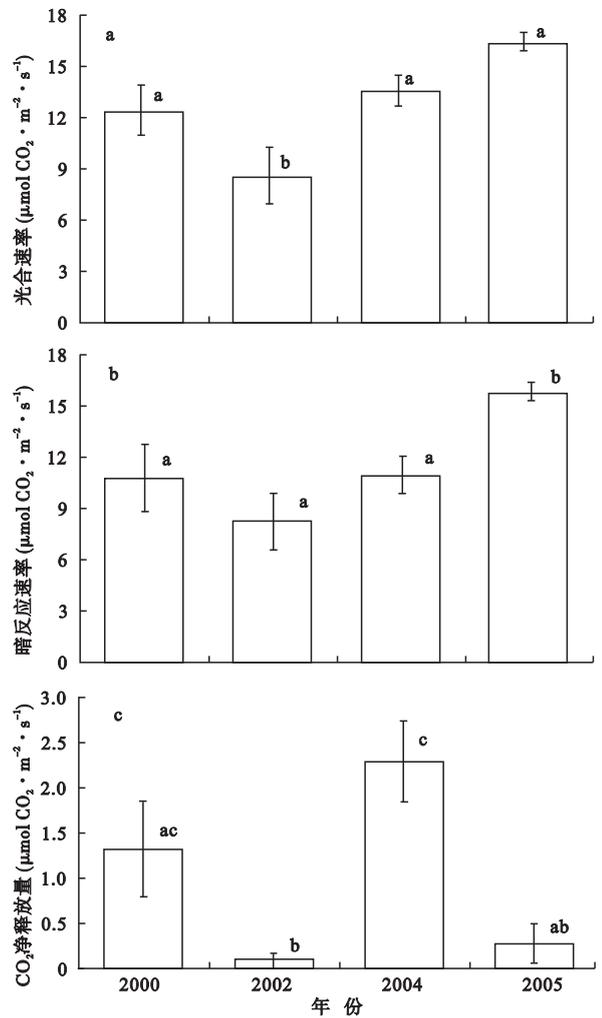


图2 不同建植年限人工草地植物群落光合速率(a)、暗呼吸速率(b)及CO<sub>2</sub>净交换量(c)

Fig.2 Photosynthesis (a), dark respiration (b) and net CO<sub>2</sub> exchange (c) in plant communities of cultured grasslands in different years

数值为平均值±标准误;同一图中不同字母代表差异显著( $P < 0.05$ )。

收 CO<sub>2</sub> 的趋势一致(图 2b),即随建植年限的增加,单播或混播人工草地暗呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 量也不断减少,2005 年混播人工恢复草地的 CO<sub>2</sub> 释放量最大,达  $16.08 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,明显大于 2002 年混播人工草地释放 CO<sub>2</sub> 量( $P < 0.05$ )。2004 年单播人工草地暗呼吸释放 CO<sub>2</sub> 量虽然也大于 2000 年单播人工草地释放 CO<sub>2</sub> 量,但二者间的差异不显著( $P > 0.05$ )。

**2.2.3 草地系统 CO<sub>2</sub> 净交换量** 各类人工草地的植物群落均净吸收 CO<sub>2</sub>,但人工草地的 CO<sub>2</sub> 净吸收量因群落组成和建植年限而显著变化(图 2c)。在同类植物群落(单播或混播)中,人工草地的 CO<sub>2</sub> 净

吸收量随着建植年限增加而降低,2000年单播草地 CO<sub>2</sub> 净吸收量比2004年单播草地 CO<sub>2</sub> 净吸收量小 0.97 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,2002年混播草地 CO<sub>2</sub> 净吸收量比2005年混播草地 CO<sub>2</sub> 净吸收量小 0.18 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。在相近建植年限内,混播草地的 CO<sub>2</sub> 净吸收量远低于单播草地 ( $P < 0.05$ ),2002年混播草地比2000年单播草地低 1.23 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,2005年混播草地比2004年单播草地低 2.02 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。由此可见,单播和混播人工草地植物群落类型的差异是 CO<sub>2</sub> 净交换量明显不同的主要原因。

### 3 讨论

近年来,随着全球各界应对气候变化意识的不断提高,草地碳平衡问题受到广泛关注。虽然全球学者在不同地域开展了研究工作,但草地 CO<sub>2</sub> 净交换量的结论仍存在较大分歧,这是由于不同地区草地 CO<sub>2</sub> 净交换量因降水、放牧强度、光合辐射、土壤表面温度、土壤湿度等环境因子的差异而波动较大 (Xu & Baldocchi, 2003; Li *et al.*, 2005; Gilmanov *et al.*, 2007)。Xu 和 Baldocchi (2003) 研究发现,美国加利福尼亚地区的草地是个碳源,每年净释放碳 0.095 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。Gilmanov 等 (2007) 对欧洲 20 个草地的研究表明,它们的碳净吸收量为 > 1.73 ~ < -0.43 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。Li 等 (2005) 研究发现,蒙古典型草原 7 月份净释放碳 2.22 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。

对于青藏高原高寒草地,徐玲玲等 (2005) 在拉萨市北当雄高寒草甸 CO<sub>2</sub> 净交换量研究中发现,在生长季(8—9月)该区高寒草甸生态系统净吸收碳,最大净吸收速率为 6.08 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>;张宪洲等 (2004) 对班戈高寒草原生态系统的研究表明,该区草地全年净吸收碳;张金霞等 (2003) 在海北地区的研究结果表明,该区高寒矮嵩草草甸生态系统是大气温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放源,其中退化草地每年土壤释放的碳素为 4.620 t C · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>,但年间有所波动;Zhao 等 (2005) 对青海海北矮嵩草草地、金露梅灌丛和藏嵩草沼泽等 3 类高寒草地比较发现,前二者分别净吸收 8.56 和 2.69 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,而藏嵩草沼泽净释放碳 2.1 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。

这些研究虽然从长时间(年或季)尺度上对草

地的 CO<sub>2</sub> 净交换量进行了分析,为草地碳管理提供了科学依据,但这些研究未深入揭示碳平衡的生态学过程,无法从机理上阐释研究结果差异较大的主要原因。

本研究通过样点实测,明确了高寒草地 CO<sub>2</sub> 的净交换量主要由植物群落光合作用吸收的 CO<sub>2</sub> 量、植物群落呼吸作用排放的 CO<sub>2</sub> 量和土壤呼吸排放的 CO<sub>2</sub> 量 3 部分组成。不同退化状态下,草地植物群落的光合固碳量和草地植物+土壤系统的呼吸排碳量不同,当高寒草地从中度退化向重度退化演替时,草地系统的 CO<sub>2</sub> 净吸收量由 3.20 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 下降到 0.61 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,但其仍具有吸收碳的潜力;当草地达到极度退化状态即“黑土滩”时,高寒草地净释放碳 1.20 μmol CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。徐玲玲等 (2005) 研究表明,草地生态系统在夜间净释放 CO<sub>2</sub>,8:00 左右整个系统转换为净吸收碳,并通常在 12:00 左右达到碳吸收的最大值。由此认为,通过测定旺盛生长期草地的 CO<sub>2</sub> 净交换量可以判定高寒草地生态系统退化或健康受损的状态。

本研究还发现,单播草地的 CO<sub>2</sub> 净吸收量远大于混播草地,但远小于未退化草地。因此,建议中、重度退化的草地防止其退化为“黑土滩”,可采用围栏封育或人工补播,使其恢复到未退化的程度,更加有效地增加碳的吸收量;对“黑土滩”型退化高寒草地,采用单播建植的人工草地恢复方式改善其固碳能力;然而,随着建植年限增加,人工草地 CO<sub>2</sub> 净吸收量会随之降低,因此需要及时地更新管理。

### 参考文献

- 董全民, 马玉寿. 2007. 三江源区“黑土型”退化草地生态系统恢复研究. 青海农牧业, (3): 21.
- 林栋一, 马晖玲, 吕世海, 等. 2009. 华北山地阳坡中生灌草群落植被光合差异性研究. 甘肃农业大学学报, 44 (2): 122-125.
- 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 等. 2002. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究. 草业科学, 19(9): 1-5.
- 戚秋慧, 盛修武, 姜 恕, 等. 1989. 羊草和大针茅群落光合速率的比较研究. 植物生态学与地植物学学报, 13 (4): 332-340.
- 戚秋慧, 尹承军, 盛修武. 1997. 不同时期羊草群落光合速率与环境条件之间的关系模型. 生态学报, 17(2): 170-175.
- 尚占环, 丁玲玲, 龙瑞军. 2007. 江河源区退化高寒草地土

- 壤微生物与地上植被. 土壤环境关系. 草业学报, **16**(1): 34-40.
- 师生波, 惠梅, 王学英, 等. 2006. 青藏高原几种典型高山植物的光合特性比较. 植物生态学报, **30**(1): 40-46.
- 田玉强, 高琼, 张智才, 等. 2009. 青藏高原高寒草地植物光合与土壤呼吸研究进展. 生态环境学报, **8**(2): 711-721.
- 王俊峰, 王根绪, 吴青柏. 2008. 青藏高原腹地不同退化程度高寒沼泽草甸生长季节 CO<sub>2</sub> 排放通量及其主要环境控制因子研究. 冰川冻土, **30**(3): 408-414.
- 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 等. 2003. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估. 山地学报, **21**(1): 50-55.
- 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 等. 2005. 青藏高原高寒草甸生态系统净二氧化碳交换量特征. 生态学报, **25**(8): 1948-1952.
- 易现峰, 贲桂英, 师生波, 等. 2000. 高寒草甸矮嵩草种群光合作用及群落生长季节变化. 中国草地, (1): 12-15.
- 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 2003. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环. 生态学报, **24**(4): 627-634.
- 张宪洲, 石培礼, 刘允芬, 等. 2004. 青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 排放及其碳平衡. 中国科学, (S2): 193-199.
- 周党卫, 曹广民, 张金霞, 等. 2003. 植物生长季退化草毡寒冻锥形土 CO<sub>2</sub> 释放特征. 应用生态学报, **14**(3): 367-371.
- 周华坤, 赵新全, 周立, 等. 2005. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. 草业学报, **14**(3): 30-40.
- Dong SK, Kang MY, Long RJ, *et al.* 2007. Economic comparison of annual crop, perennial pasture and native grassland forage production in the alpine region of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Grass and Forage Science*, **62**: 405-415.
- Gao GM, Tang YH, Mo WH, *et al.* 2004. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 237-243.
- Gilmanov TG, Soussana JF, Aires L, *et al.* 2007. Partitioning European grassland net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **121**: 93-120.
- Li SG, Aanuma J, Eugster W, *et al.* 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, **11**: 1941-1955.
- Xu LK, Baldocchi DD. 2003. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, **123**: 79-96.
- Zhao L, Li YN, Zhao XQ, *et al.* 2005. Comparative study of the net exchange of CO<sub>2</sub> in 3 types of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, **50**: 1767-1774.
- 
- 作者简介** 李小艳,女,1985年生,硕士研究生。主要从事生态风险评价与生态系统规划管理研究。E-mail: lxynmu.2008@163.com
- 责任编辑** 刘丽娟
-