围栏封育对天山北坡草甸草原生态系统碳交换的影响

胡毅^{1,2} 朱新萍^{1,2} 贾宏涛^{1,2*} 韩东亮^{1,2} 胡保安^{1,2} 李典鹏¹

¹新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; ²新疆土壤与植物生态过程实验室, 乌鲁木齐 830052

摘要 草本层和大气间的碳交换及其对环境因子的响应是目前研究的热点。该研究通过静态箱法, 采用LI-840 CO₂/H₂O红外分析仪, 对新疆天山北坡草甸草原围栏9年的样地和围栏外自然放牧生态系统碳交换进行监测, 分析了围栏内外生态系统碳交换的差异性、日变化、季节变化及其与环境因子的关系。结果表明: 围栏内生态系统碳交换高于围栏外, 围栏内外表现出明显的差异性; 围栏内外生态系统碳交换均存在明显的日变化和季节变化规律, 呈单峰曲线, 且在植物生长季峰形比较明显。在整个监测期间, 围栏内外生态系统CO₂净交换最小值分别为-7.62和-6.63 μmol·m⁻²·s⁻¹, 生态系统呼吸最大值分别为8.55和7.04 μmol·m⁻²·s⁻¹, 生态系统总初级生产力最大值分别为-14.66和-13.89 μmol·m⁻²·s⁻¹。因围栏内植被得到保护, 草本植物生长茂盛, 光合作用强, 生态系统CO₂净交换较小, 同时有机碳的输入增强了生态系统呼吸。分析发现生态系统碳交换与气温和0–10 cm土壤温度显著相关, 与气温的相关性高于与0–10 cm土壤温度的相关性, 且围栏内禁牧处理相关性高于围栏外自然放牧草地; 土壤含水量与生态系统碳交换存在一定的相关性, 但其相关性略低于温度与生态系统碳交换的相关性。

关键词 围栏封育; 草甸草原; 生态系统碳交换

胡毅, 朱新萍, 贾宏涛, 韩东亮, 胡保安, 李典鹏 (2018). 围栏封育对天山北坡草甸草原生态系统碳交换的影响. 植物生态学报, 42, 372–381. DOI: 10.17521/cjpe.2016.0049

Effects of fencing on ecosystem carbon exchange at meadow steppe in the northern slope of the Tianshan Mountains

HU Yi^{1,2}, ZHU Xin-Ping^{1,2}, JIA Hong-Tao^{1,2*}, HAN Dong-Liang^{1,2}, HU Bao-An^{1,2}, and LI Dian-Peng¹

¹College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Ürümqi 830052, China; and ²Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Ürümqi 830052, China

Abstract

Aims The carbon exchange between ecosystems and the atmosphere and its response to environmental factors is the focus of current research. The aim of this study was to examine the effects of fencing on ecosystem carbon exchange at meadow steppe in the northern slope of Tianshan Mountains.

Methods The static box method with a LI-840 CO₂/H₂O infrared analyzer was used to evaluate daily and seasonal changes of ecosystem carbon exchange and their relationship with environmental factors in the inside fence and outside fence after 9 years fencing.

Important findings We found the ecosystem carbon exchange inside the fence was significantly ($p < 0.05$) higher than that in outside the fence. The ecosystem carbon exchange had obvious daily and seasonal variation both in inside and outside the fence, which showed a unimodal curve during the plant growing season. The minimum net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in the inside and outside of the fences were -7.62 and $-6.63 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively; the maximum ecosystem respiration (ER) were 8.55 and $7.04 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively; and the maximum gross ecosystem productivity (GEP) were -14.66 and $-13.89 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. Due to the protection of fence, the vegetation in the fence was flourished with higher photosynthesis, and thus resulted in lower NEE . Meanwhile, organic carbon input enhanced ecosystem respiration. Besides, the ecosystem carbon exchange significantly correlated with the air temperature and soil temperature of 0 to 10 cm depth, and the correlation with the air temperature was higher than soil temperature of 0 to 10 cm depth. Also, the correlation in the inside of

收稿日期Received: 2016-01-27 接受日期Accepted: 2016-11-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050405)、国家自然科学基金(31560171)和新疆维吾尔自治区研究生教育创新计(XJGRI2014084)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050405), the National Natural Science Foundation of China (31560171) and Innovation Plan of Postgraduate Education in Xinjiang Uygur Autonomous region of China (XJGRI2014084).

* 通信作者Corresponding author (hongtaojia@126.com)

the fence was higher than that in the outside of the fence. Ecosystem carbon exchange had correlation with soil water content, but the correlation was slightly lower than that with soil temperature.

Key words fencing; meadow steppe; ecosystem carbon exchange

Hu Y, Zhu XP, Jia HT, Han DL, Hu BA, Li DP (2018). Effects of fencing on ecosystem carbon exchange at meadow steppe in the northern slope of the Tianshan Mountains. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 372–381. DOI: 10.17521/cjpe.2016.0049

生态系统CO₂净交换速率(*NEE*)代表生态系统吸收或释放CO₂的能力, 它由生态系统总初级生产力(*GEP*)与生态系统呼吸(*ER*)共同决定(Oberbauer *et al.*, 2007)。随着全球气候变化, CO₂浓度升高, 草本层和大气间的碳交换及其对环境因子的响应机制成为目前研究的热点问题。许多学者通过不同尺度的试验观测试图掌握在不同时空上的生态系统碳交换现状、潜力、速率和机制(Baldocchi, 1997; Suyker *et al.*, 2003)。国外在这方面已经做了大量研究(Black *et al.*, 1996, Flanagan & Johnson, 2005)。相比之下, 我国碳通量的观测与研究启动较晚, 而且多集中于农田和森林生态系统(张永强等, 2002; 段晓男等, 2005), 对草地生态系统碳收支的研究大多集中在荒漠草原、典型草原、高寒草原等(Jia *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2014; Luo *et al.*, 2015; Sharkhuu *et al.*, 2016), 虽然对草甸草原的研究有较多报道, 但较少涉及天山山脉山地草甸草原的研究报道。

新疆草地资源丰富, 面积为 $57.26 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 居全国草地面积第三位(许鹏, 1993), 位于天山山脉中的山地草甸草原面积为 $26.57 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占新疆草地面积的5.53% (许鹏, 1998), 山地草甸草原生长于天山山脉中低山地区, 热量条件较好, 有较高的产草量, 是新疆重要的草场(叶茂等, 2006); 同时, 山地草甸草原作为草地生态系统的重要组成部分, 其碳收支对全球碳循环起着重要的作用(Law *et al.*, 2002)。草地是目前人类活动影响最严重的区域(杨丽丽等, 2016)。近些年, 人类活动干扰对陆地生态系统碳通量研究带来许多不确定性。放牧作为目前最主要的草地利用方式, 对草原生物量、土壤、根系、水、热等因子均存在着不同程度的影响(张伟华等, 2000; 胡毅等, 2016)。过度放牧等人为因素对草地生态系统物质组成及土壤理化性质造成显著影响(郭明英等, 2012), 草地出现严重退化, 改变了草地生态系统的净初级生产力(*NPP*)及有机碳的输入, 使得草地生态系统碳汇功能逐渐丧失, 甚至成为碳源(陈全胜等, 2003; 杨阳等, 2012)。近年来, 围栏封育成为草地管理模式, 并得到推广。因此, 要准确地

评估草地生态系统碳收支, 必须对草地生态系统碳交换进行系统研究(贾丙瑞等, 2005)。本文探讨了围封9年的草甸草原生态系统碳交换特征, 旨在揭示两种不同利用方式下生态系统碳交换的规律及其与环境因子之间的关系, 从而为草甸草原碳收支的精确估算提供数据支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北坡典型温性草甸草原, 隶属于新疆乌鲁木齐县甘沟乡(87.21° E, 43.54° N), 海拔1 742 m, 属于大陆性干旱气候。该区坡向为半阴坡, 坡度28°–33°, 地势起伏较大, 呈南北走向, 土壤类型为栗钙土。该研究区植被以长羽针茅(*Stipa kirghisorum*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、草原糙苏(*Phlomis pratensis*)为优势种, 以羊茅(*Festuca ovina*)、委陵菜(*Potentilla* sp.)为伴生种等, 是典型山地草甸草原。从2005年开始围栏处理, 围栏封育样地约为400 m²。围栏内禁牧, 围栏外自由放牧, 草地利用率约为50%, 属于中等退化草地。围封前围栏内与围栏外草地的本底状况一致。

1.2 方案设计

试验于2013年4–10月进行, 以围封9年(全年禁止放牧)样地和围栏外自由放牧样地为研究对象, 在围栏内外分别随机设置3个长期固定LI-840不锈钢底座, 每月中旬监测一次完整的生态系统碳交换的日变化特征, 当天11:00开始至次日11:00结束, 每3 h监测1次, 同步监测环境因素, 包括同化箱内的起止温度、近地面气温、0–10 cm土壤温度及土壤含水量。

1.3 试验方法

采用LI-840 CO₂/H₂O 红外分析仪(LI-COR, Lincoln, USA)进行生态系统测定。野外试验测定从4月开始, 11月结束。试验开始前一天, 在围栏内外各随机安置3个不锈钢同化箱基座(50 cm × 50 cm × 10 cm), 8 cm插入土壤, 所有的底座顶面与地面的高度

保持一致,底座两两之间相隔约10 m。同化箱采用的规格为50 cm × 50 cm × 50 cm的透明方形密室,内部两角装置两个0.1 m × 0.1 m的风扇,使其内的环境状态最大限度地接近自然环境状态。笔记本电脑与仪器连接操作,设置每秒自动记录一次CO₂浓度值,记录时间一般为120 s左右。根据同化箱内CO₂浓度值变化计算出 NEE 。此外,用不透光的遮阳罩罩住同化箱,测定 ER ,最后算出 GEP 。每月中旬测定一次,每次监测时间为24 h,当日11:00开始,至次日11:00结束,每隔3 h测定一次,记录起止时间同化箱内的温度。

1.4 数据处理

生态系统 CO₂ 交换公式:

$$FC = \frac{V \times P_{av} (1000 - W_{av})}{R \times S (T_{av} + 273)} \times \frac{dc}{dt}$$

其中, FC 为CO₂ 通量($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); V 为箱体的体积: $V = \text{同化箱长} \times \text{宽} \times (\text{箱体高度} + \text{底座露出地上部的高度})$; P_{av} 为测量期间箱体内的平均大气压强(kPa); W_{av} 是测量期间箱体内的水气分压($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$); R 是大气常数 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; S 是同化箱的面积; T_{av} 是测量期间箱体内的平均温度。

$$GEP = NEE - ER$$

当 NEE 为负值时,即为碳汇; NEE 为正值时,即为碳源。

对所得的数据采用Excel 2010、SPSS 18.0进行数据处理和分析。采用单因素方差分析检验围栏内外生态系统碳交换的显著性。采用双变量相关分析中的Pearson相关分析,分析生态系统碳交换与温度、土壤含水量的相关性。每月中旬测定生态系统碳交换的日动态变化,通过加权累加计算求得当日

的生态系统日排放碳量。土壤日平均土壤温度是用各个时间段的土壤温度累加平均求得,日平均土壤含水量是用各个时间段的土壤含水量累加平均求得。

2 结果和分析

2.1 围栏内外生态系统碳交换的日变化特征

2.1.1 NEE 的日变化特征

如图1A所示,围栏内外草本层 NEE 日变化趋势相似,围栏内最小值出现在14:00左右,为 $-7.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,围栏外草本层 NEE 最小值出现在11:00左右,为 $-6.63 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从8:00开始至将近20:00, NEE 为负值,此时段由于光合作用,山地草甸草原表现为碳汇,2:00前后至8:00前及20:00后,植物无法进行光合作用, NEE 为正值,草甸草原此时段为碳源。11:00–20:00,围栏内低于围栏外,在14:00其差异达到显著水平($p < 0.05$),这可能是由于围栏内植物长势良好,光合作用强,吸收了较多的碳所致。由图1B可知,围栏内外的日平均 NEE 分别为 -0.94 和 $-0.56 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,围栏内的日平均 NEE 显著低于围栏外($p < 0.05$)。

2.1.2 ER 的日变化特征

由图2A可知,在 ER 日变化特征上,围栏内外变化趋势大致相似,围栏外单峰模式比围栏内明显,但与 NEE 和 GEP 呈现相反的变化趋势(图1A,图3A)。2:00–8:00及23:00出现较低值,围栏内的 ER 最小值出现在8:00,为 $3.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,围栏外出现在23:00, ER 值为 $3.37 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。早晨太阳升起,气温上升, ER 也迅速增加,在14:00左右围栏内外均达到峰值,分别为 7.04 和 $8.55 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,然后呈下降趋势,在23:00降到较低水平。除了14:00低于围栏外,围栏内 ER 在日变化尺度上的其他各个时间段

图1 围栏内外生态系统 CO₂ 净交换速率(NEE)日动态(A)和日平均值(B) (平均值±标准误差)。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Fig. 1 The daily dynamic (A) and daily average value (B) of the net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in inside and outside the fence (mean ± SE). The different lowercase letters represent significant differences at the 0.05 level.

均高于围栏外。由图2B可以看出, 围栏内外的日平均 ER 差异并不显著($p > 0.05$), 围栏内和围栏外的 ER 值分别为 5.31 和 $4.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.1.3 GEP 的日变化特征

由图3A所示, 草本层 GEP 呈现“V”字形模式, 与 NEE (图1A)呈现一致的变化规律, 上午植物接受阳光的照射, 温度逐渐升高, 光合作用增强, GEP 逐渐减小。在14:00时出现谷值, 围栏内外 GEP 分别为 -14.66 和 $-13.89 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。晚上植物无法进行光合作用, 没有碳的固定, NEE 表现为 ER , 而 $GEP = NEE - ER$, 因此 GEP 值在夜间为0。由图3B可以得出, 围栏内的日平均 GEP 略高于围栏外, 但差异并不显著($p > 0.05$), 围栏内与围栏外的值分别为 -6.25 和 $-5.51 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 围栏内外生态系统碳交换的季节变化特征

2.2.1 NEE 的季节变化特征

如图4A所示, 围栏内外山地草甸草原 NEE 的季节变化规律一致, 表现为先降低再升高的变化趋势, 围栏内与围栏外自然放牧草地 NEE 在5–8月为负值,

表现为净吸收(碳汇), 原因是在5–8月植物处于生长期和成熟期, 植物光合作用强, 且白天的光照时间多于晚上, 碳的固定高于碳的排放。 NEE 在4月、9月、10月为正值, 表现为排放(碳源), 4月植被正处于发芽的状态, 光合作用弱, 9月后植物开始枯萎, 光合作用减弱, 围栏内外在10月 NEE 达到最大值, 分别为 1.57 和 $1.73 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 草地生态系统则由碳汇转为碳源。围栏外除了7月表现较高的碳汇外, 5、6、8月表现为较低的碳汇, 而在同期围栏内 NEE 小于围栏外, 说明围栏禁牧促进草甸草原的碳汇能力。其原因可能是围栏外受到动物的啃食与践踏, 植被遭到破坏, 而围栏内的植物受到保护, 长势优于围栏外, 群体光合作用高于围栏外。围栏内在8月达到全年的谷值, 围栏外在7月达到全年的谷值, 谷值分别为 -1.14 和 $-0.56 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图4B得知, 整个生长期, 围栏内 NEE 的平均值为 $-0.03 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 围栏外为 $0.28 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此可知, 在整个生长季, 围栏禁牧处理均表现为碳汇, 而围栏外自然放牧处理表现为碳源。

图2 围栏内外生态系统呼吸(ER)日动态(A)和日平均值(B)(平均值 $\pm$ 标准误差)。相同小写字母表示在0.05水平上差异不显著。
Fig. 2 The daily dynamic (A) and daily average value (B) of the ecosystem respiration (ER) in inside and outside the fence (mean $\pm$ SE). The same lowercase letters represent no significant differences at the 0.05 level.

图3 围栏内外生态系统总初级生产力(GEP)日动态(A)和日平均值(B)(平均值 $\pm$ 标准误差)。相同小写字母表示在0.05水平上差异不显著。
Fig. 3 The daily dynamics (A) and daily average value (B) of the gross ecosystem productivity (GEP) in inside and outside the fence, respectively (mean $\pm$ SE). The same lowercase letters represent no significant differences at the 0.05 level.

图4 围栏内外生态系统 CO_2 净交换速率(NEE)生长季动态特征(A)及 NEE 平均值(B)(平均值 $\pm$ 标准误差)。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Fig. 4 The seasonal dynamic (A) and average value (B) of the the net ecosystem CO_2 exchange (NEE) in inside and outside the fence, respectively (mean $\pm$ SE). The different lowercase letters represent significant differences at the 0.05 level.

图5 围栏内外生态系统呼吸(ER)的生长季动态(A)及 ER 平均值(B) (平均值 $\pm$ 标准误差)。相同小写字母表示在 0.05 水平上差异不显著。

Fig. 5 The seasonal dynamic (A) and month average value (B) of the ecosystem respiration (ER) in inside and outside the fence, respectively (mean $\pm$ SE). The same lowercase letters represent no significant differences at the 0.05 level.

2.2.2 ER的季节变化特征

从图5A可以看出,在植物生长季,围栏内外ER具有明显的季节变化特征,变化曲线特征表现为很好的一致性,即单峰曲线。从4月开始,ER迅速上升,6月下旬达到顶峰,然后下降,围栏内外ER峰值分别为5.65和5.40 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在6月下旬到7月中旬,温度逐渐上升,降水量增多,促进了植物的生长量和土壤微生物的活动,使得此时段ER保持着较高的排放,随后有一个较大幅度的下降,植物生长后期(9月中旬后)植物生长放缓,并开始凋落枯萎,气温开始逐渐降低,降水减少,土壤微生物呼吸及植物呼吸均降低,使得在10月中旬ER的值最小,围栏内外ER最小值分别为1.45和1.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。除了5、10月围栏内ER低于围栏外,其他月份均高于围栏外,其中在8月ER显著高于围栏外($p < 0.05$),其他月份围栏内外ER差异性并不显著($p > 0.05$)。由图5B可以看出,在整个生长季,围栏内ER的平均值要高于围栏外,围栏内外分别为22.65和20.35 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,差异并不显著($p > 0.05$)。

2.2.3 GEP的季节变化特征

从图6A可以看出,围栏内外GEP季节变化特征与NEE季节变化特征(图4A)一致,与ER季节变化特征(图5A)相反。围栏内GEP除了5月略高于围栏外,其他月份均低于围栏外,6、7、8月围栏内GEP显著低于围栏外($p < 0.05$),其他月份差异不显著($p > 0.05$)。这可能是因为围封后植物长势茂盛,光合作用强。由图6B可知,围栏内的GEP显著高于围栏外($p < 0.05$),围栏内外GEP分别为-22.68和-19.31 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.3 生态系统碳交换与环境因子的相关性

2.3.1 生态系统碳交换日变化与温度的相关性

运用SPSS统计软件中双变量相关分析中的Pearson相关分析,对围栏内外NEE、ER、GEP的日动态与近地面气温及0–10 cm土壤温度进行了相关性分析(表1)。由表1可以看出,除10月份及围栏外自然放牧处理4月份的NEE和10月份的GEP显著负相关($p < 0.05$)外,其他月份NEE和GEP与气温均表现出极显著负相关($p < 0.01$)。ER与气温的相关性来看,

图 6 围栏内外生态系统总初级生产力(GEP)生长季动态(A)及 GEP 平均值(B) (平均值±标准误差)。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Fig. 6 The seasonal dynamic (A) and average value (B) of the GEP in inside and outside the fence, respectively (mean ± SE). The different lowercase letters represent significant differences at the 0.05 level.

表 1 围栏内外草甸草原生态系统 CO₂ 净交换速率(NEE)、生态系统呼吸(ER)、生态系统总初级生产力(GEP)与大气温度和 0–10 cm 土壤温度相关性
Table 1 The inside and outside the fence correlation coefficients between the net ecosystem CO₂ exchange (NEE), ecosystem respiration (ER), gross ecosystem the productivity (GEP) and atmospheric temperature and 0–10 cm soil temperature in meadow steppe

	月份 Month	气温 Air temperature		土壤温度 Soil temperature	
		围栏内 Inside the fence	围栏外 Outside the fence	围栏内 Inside the fence	围栏外 Outside the fence
NEE	4	-0.592**	-0.487*	0.501*	0.602**
	5	-0.572**	-0.547**	0.529**	0.542**
	6	-0.873**	-0.841**	0.349	0.109
	7	-0.685**	-0.783**	0.136	-0.227
	8	-0.867**	-0.801**	0.252	-0.089
	9	-0.850**	-0.829**	-0.347	-0.465*
ER	10	-0.458*	-0.471*	0.384*	0.440*
	4	0.218	0.283	0.473*	0.517**
	5	0.620**	0.767**	0.353*	-0.021
	6	0.483*	0.298	0.354*	0.423*
	7	0.118	0.268	0.516**	0.376*
	8	0.392*	0.548**	0.752**	0.567**
GEP	9	0.064	0.049	0.259	0.333
	10	-0.302	-0.308	0.279	0.508*
	4	-0.632**	-0.572**	0.501*	0.624**
	5	-0.677**	-0.517**	0.429*	0.475*
	6	-0.903**	-0.839**	0.204	-0.055
	7	-0.735**	-0.805**	0.147	-0.259
	8	-0.798**	-0.828**	0.116	-0.183
	9	-0.851**	-0.769**	-0.412*	-0.465*
	10	-0.598**	-0.436*	0.497*	0.465*

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

除5月份及围栏外自然放牧处理8月份表现为极显著相关($p < 0.01$)和6、8月份围栏禁牧处理显著相关($p < 0.05$)外, 其他月份相关性均不显著($p > 0.05$)。围栏内外的NEE、ER、GEP与0–10 cm土壤温度的相关性较为复杂。NEE和GEP与土壤温度的相关性在4月、5月、10月表现为显著或极显著正相关, 在6–8月相关性不显著($p > 0.05$), 9月NEE与土壤温度的相关性

在围栏外自然放牧草地显著负相关($p < 0.05$), 围栏内禁牧草地则无显著相关($p > 0.05$), GEP在围栏内外显著负相关($p < 0.05$)。ER与围栏内土壤温度的相关性在4–8月表现为显著或极显著相关, 在9月、10月份并无显著相关($p > 0.05$); ER与围栏外的土壤温度在4、8月极显著相关($p < 0.01$), 5月、6月、10月显著相关($p < 0.05$), 5月和9月无显著相关($p > 0.05$)。

表2 围栏内外草甸草原生态系统 CO₂ 净交换速率(*NEE*)、生态系统呼吸(*ER*)、生态系统总初级生产力(*GEP*)与温度和土壤含水量的回归分析
Table 2 The regression analysis of the *NEE* (net ecosystem CO₂ exchange), *ER* (ecosystem respiration), *GEP* (gross ecosystem the productivity) and temperature and soil water content in inside and outside the fence

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	围栏内 Inside the fence				围栏外 Outside the fence			
		回归方程 Regression equation	<i>R</i> ²	<i>p</i>		回归方程 Regression equation	<i>R</i> ²	<i>p</i>	
<i>NEE</i>	气温 Air temperature	$y = -0.299x + 4.722$	0.863	0.002		$y = -0.235x + 4.050$	0.897	0.001	
	土壤温度 Soil temperature	$y = 0.118x^2 - 4.823x + 1.459$	0.765	0.009		$y = -0.178x + 2.738$	0.907	0.001	
	土壤含水量 Soil water content	$y = 0.135x - 2.654$	0.603	0.040		$y = -0.002x^2 + 0.198x - 1.459$	0.493	0.078	
<i>ER</i>	气温 Air temperature	$y = 0.069e^{0.197x}$	0.720	0.012		$y = 0.886e^{0.066x}$	0.810	0.005	
	土壤温度 Soil temperature	$y = 0.792e^{0.026x}$	0.690	0.017		$y = 0.446e^{0.580x}$	0.706	0.015	
	土壤含水量 Soil water content	$y = -0.015x^2 + 4.198x - 5.459$	0.633	0.045		$y = 10.348e^{-0.067x}$	0.460	0.094	
<i>GEP</i>	气温 Air temperature	$y = -0.767x + 8.517$	0.899	0.001		$y = -0.650x + 7.244$	0.789	0.008	
	土壤温度 Soil temperature	$y = -0.558x + 4.313$	0.929	0.000		$y = -0.515x + 3.895$	0.871	0.002	
	土壤含水量 Soil water content	$y = 0.294x - 9.289$	0.453	0.097		$y = 0.253x - 7.831$	0.353	0.160	

2.3.2 生态系统碳交换季节变化与温度、土壤含水量的相关性

分别对围栏内和围栏外草地*NEE*、*ER*和*GEP*与温度和土壤含水量进行回归分析(表2)可知, *NEE*、*ER*和*GEP*与土壤温度和气温都表现为显著相关($p < 0.05$), 气温的相关性略高于土壤温度。*NEE*和*GEP*与温度的相关性以线性负相关为主, 而*ER*与温度的相关性呈指数关系($p < 0.05$)。由表2可以看出, 土壤含水量与围栏内*NEE*呈线性相关, 与*ER*呈二次项关系, 即随着土壤含水量的增加, *ER*有一个先增加后下降的趋势, 可能是因为当土壤含水量达到一定程度抑制了*ER*。*GEP*与土壤含水量呈线性相关, 相关性并不显著($p > 0.05$)。并且围栏内的拟合方程要优于围栏外自然放牧草地。以上说明, 山地草甸草原生态系统碳交换主要受温度和土壤含水量的双重控制, 但是温度的贡献要大于土壤含水量。

3 讨论

3.1 围栏封育对生态系统碳交换的影响

天山山脉中低山山地草甸草原围栏内外生态系统碳交换的监测结果表明, 与围栏外相比, 草甸草原围栏封后, *NEE*显著降低。在季节尺度上, 围栏内*NEE*为 $-0.03 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 围栏外为 $0.28 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 表明在季节尺度上围栏内表现为碳汇, 围栏外为碳源。原因是围栏后植被得到了恢复(杨阳等, 2012), 光合作用增强; 而围栏外由于动物的啃食和践踏, 使得在植物生长季生物量降低(胡毅等, 2016)。同时, 围栏内*ER*高于围栏外, 在植物生长期, 围栏明显增加了生物量, 导致有机碳输入增加, 同时也改善了土壤微生物及土壤动物的生存环境(殷国梅等,

2014), 从而导致围栏后*ER*显著提高。放牧通常通过影响草地植被和土壤来影响草地生态系统碳交换, 草地根系获得能量的途径是地上植被, 地上植被的减少必然降低地下根系量, 减少了土壤的自养呼吸(胡毅等, 2016)。根系呼吸是土壤呼吸的一部分, 而*ER*由土壤呼吸和地上植被呼吸组成。因此, 放牧通过降低群落地上、地下生物量进而降低*ER*(张文丽等, 2008)。草本层碳通量在日尺度上不仅表现为单峰曲线的变化趋势, 在季节尺度上也表现出相似的变化趋势。在草本层生长旺盛季, 碳交换日过程变化幅度较大(范连连等, 2013), 与本研究一致。本研究中国围栏外的自然放牧区并没有改变*NEE*、*ER*和*GEP*在日尺度和季节尺度上的变化特征; 但围栏内草本植物在生长季日尺度上表现为碳汇, 围栏外则成为碳源; 围栏内对于围栏外来说, *NEE*、*ER*和*GEP*分别提高了33.50% ($p < 0.05$)、11.09% ($p > 0.05$)和20.79% ($p < 0.05$), 说明围栏封禁牧对草地*NEE*的影响较大。地上绿色植被是植物光合作用的唯一途径, 围栏外受到动物的啃食和践踏等, 降低了地上植被生物量, 破坏了植株的光合器官, 使草地植物群落光合作用下降(孙殿超等, 2015), 从而降低了群落的*NEE*。*GEP*由*NEE*和*ER*共同决定, 因而放牧同时也降低了群落*GEP*。正确合理的草地利用方式不仅可以提高牧草产量, 而且有利于草地碳汇功能的发挥; 但是, 不合理的草地利用方式也会降低草地碳汇功能, 甚至使草地由碳汇转为碳源(Houghton, 2003)。

3.2 生态系统碳交换与环境因子的关系

温度是影响草地生态系统碳交换的主要环境控制因子(Mcfadden *et al.*, 2003; 于贵瑞等, 2005; Kato *et al.*, 2006; 马俊和唐海萍, 2011), 本研究也印证了

这一点, 这与于贵瑞和孙晓敏(2008)得出的草地生态系统碳收支的转变受温度调控的结论相似。由生态系统碳交换与环境因子的回归分析可知, 草本层 NEE 与温度的相关关系以线性负相关为主(表2)。白天植被受到太阳照射进行光合作用, 同化箱中 CO_2 浓度不断减少, NEE 为负值, 而同化箱中的气温及土壤温度却不断升高, 因此 NEE 与温度呈现负相关关系, 与高程达等(2009)的研究结果一致。在季节变化尺度上, NEE 先降低后升高, 在植物生长初期的4月, 温度低, 植物较小, 光合作用弱, NEE 为正值, 随着温度的升高, 光合作用增强, 围栏内外 NEE 分别在8月份和7月份达到最小值, 进入9月份后, 植物开始枯萎, 温度逐渐下降, NEE 随之增大(图4A)。导致这种现象发生的原因是温度和光合作用共同变化的结果, 光合作用通常随温度的升高而增强(吴力博等, 2010)。表明 NEE 与温度有较高的敏感性。土壤呼吸是 ER 的重要组成部分, 土壤中的微生物活性与温度存在密切的联系, 土壤温度受气温的调控, 随着土壤温度的升高或降低, 微生物呼吸增强或减弱(郭明英等, 2012)。因此, ER 与温度之间呈现出指数相关关系(表2)。 GEP 是由 NEE 和 ER 共同决定的, 任何影响 NEE 和 ER 的因素都必将影响 GEP , 因此温度的变化必然会引起 GEP 的改变。温度和水分通过控制生态系统的光合作用和呼吸作用来控制生态系统碳交换量, 温度对草原植被光合作用和呼吸作用有较大的影响, 但土壤水分能显著影响生态系统光合生产力和呼吸对温度的响应(伏玉玲等, 2006)。

以大陆性气候为主的草地, 水分是影响植物生长的重要因子, 进而影响生态系统碳通量(范莲莲等, 2013)。干旱区草地对大气降水变化敏感(Bachman *et al.*, 2010)。本研究中土壤含水量与 NEE 和 GEP 呈线性负相关关系, 与 ER 呈现指数相关关系($p < 0.05$), 进一步证明了土壤含水量在生态系统碳收支的调控中起重要的作用。围栏内 GEP 与土壤含水量之间存在显著的正相关关系, 围栏内 GEP 与0–10 cm土壤含水量拟合方程的斜率大于围栏外, 说明土壤含水量对围栏内草甸草原碳的固定和释放影响程度大于围栏外, 土壤含水量是生态系统碳交换的限制因子。土壤含水量会显著影响土壤的物理性质和植被的生长以及土壤中的微生物活动(Li *et al.*, 2004), 从而显著地影响 NEE 、 ER 和 GEP 。围封样地中生物量相对较多(左小安等, 2013), 土壤含水量略大于围

栏外的放牧样地, 植物可利用的土壤水分是控制生态系统碳通量的主要环境因子(董刚, 2011)。因此, 提高草甸草原植被可利用的土壤含水量也可以促进草甸草原生态系统碳交换。

4 结论

天山北坡山地草甸草原生态系统碳交换规律都表现为明显的日变化和季节变化, 均呈单峰曲线; 放牧并没有改变生态系统碳通量的变化规律, 5–8月明显表现为碳汇。其他月份则表现为碳源, 但围栏禁牧处理的碳吸收显著高于围栏外自然放牧草地; 由于围栏内5–8月在生态系统碳吸收中贡献较大, 围封禁牧后的山地草甸草原在年季上表现为碳汇, 而围栏外因夏季在碳吸收中贡献小, 因此围栏外的自然放牧草地表现为碳源。

温度和土壤含水量是影响天山北坡山地草甸草原生态系统碳交换的两个重要因子。生态系统碳交换与温度和土壤含水量存在显著的相关关系, 影响生态系统碳交换的主导因子中, 土壤温度的作用大于土壤含水量。

参考文献

- Bachman S, Heisler-White JL, Pendall E, Williams D, Morgan JA, Newcomb J (2010). Elevated carbon dioxide alters impacts of precipitation pulses on ecosystem photosynthesis and respiration in a semi-arid grassland. *Oecologia*, 62, 791–802.
- Baldocchi D (1997). Measuring and modeling carbon dioxide and water vapor exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1985 summer drought. *Plant, Cell & Environment*, 20, 1108–1122.
- Black TA, Hartog GD, Neumann HH, Blanken PD, Yang PC, Russell C, Nesic Z, Lee X, Chen SG, Staebler R, Novak MD (1996). Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, 2, 219–229.
- Chen J, Shi WY, Cao JJ (2014). Effects of grazing on ecosystem CO_2 exchange in a meadow grassland on the Tibetan Plateau during the growing season. *Environmental Management*, 55, 347–359.
- Chen QS, Li LH, Han XG, Yan ZD, Wang YF, Zhang Y, Yuan ZY, Tang F (2003). Responses of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingol grassland, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 441–447.
- [陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹, 王艳芬, 张焱, 袁志友, 唐芳 (2003). 温带草原11个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应. 植物生态学报, 27, 441–447.]

- Dong G (2011). *Carbon and Water Fluxes and Water Use Efficiency of the Songnen Meadow Steppe in North East China*. PhD dissertation, Northeast Normal University, Changchun. [董刚 (2011). 中国东北松嫩草甸草原碳水通量及水分利用效率研究. 博士学位论文, 东北师范大学, 长春.]
- Duan XN, Wang XK, Feng ZZ, Ouyang ZY (2005). Study of net ecosystem exchange for seedling stage of spring wheat ecosystem in Hetao irrigation district, Inner Mongolia. *Journal of Environmental Science*, 25, 166–171. [段晓男, 王效科, 冯兆忠, 欧阳志云 (2005). 内蒙古河套灌区春小麦苗期生态系统CO₂通量变化研究. 环境科学学报, 25, 166–171.]
- Fan LL, Xie JP, Ma J, Wang ZY, Zhao HM (2013). Variation characteristics of herb layer carbon flux and soil respiration in southern edge of Junggar Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 2567–2573. [范连连, 谢继萍, 马健, 王忠媛, 赵红梅 (2013). 准噶尔盆地南缘草本层碳通量及土壤呼吸的变化特征. 生态学报, 32, 2567–2573.]
- Flanagan LB, Johnson BG (2005). Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 237–253.
- Fu YL, Yu GR, Wang YF, Li ZQ, Hao YB (2006). Effect of water stress on ecosystem photosynthesis and respiration of a *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 36(Suppl. I), 183–193. [伏玉玲, 于贵瑞, 王艳芬, 李正泉, 郝彦宾 (2006). 水分胁迫对内蒙古羊草草原生态系统光合和呼吸作用的影响. 中国科学: D辑 地球科学, 36(增刊I), 183–193.]
- Gao CD, Sun XY, Zhang L, Li ZG, A L (2009). Changing characteristics of CO₂ flux from the interface of soil-atmosphere at arid area in north temperate. *Journal of Beijing Forestry University*, 31(6), 32–38. [高程达, 孙向阳, 张林, 李志刚, 阿拉塔 (2009). 北温带干旱地区土壤-大气界面CO₂通量的变化特征. 北京林业大学学报, 31(6), 32–38.]
- Guo MY, Chao KL, You JC, Xu LJ, Wang LJ, Jia SJ, Xin XP (2012). Soil microbial characteristic and soil respiration in grassland under different use patterns. *Acta Agrestia Sinica*, 20, 42–48. [郭明英, 朝克图, 尤金成, 徐丽君, 王丽娟, 贾淑杰, 辛晓平 (2012). 不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性. 草地学报, 20, 42–48.]
- Houghton RA (2003). Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus Series B—Chemical and Physical Meteorology*, 55, 378–390.
- Hu Y, Zhu XP, Han DL, Jia HT, Hu BA, Li DP (2016). Effects of fencing on soil respiration rates in the meadow steppes in the northern slope of the Tianshan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 6379–6386. [胡毅, 朱新萍, 韩东亮, 贾宏涛, 胡保安, 李典鹏 (2016). 围栏封育对天山北坡草甸草原土壤呼吸的影响. 生态学报, 36, 6379–6386.]
- Jia BR, Zhou GS, Wang FY, Wang YH (2005). Soil respiration and its influencing factors at grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Nei Monggol. *Environment Science*, 26(6), 1–7. [贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 王玉辉 (2005). 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因素. 环境科学, 26(6), 1–7.]
- Jia BR, Zhou GS, Wang FY, Wang YH, Weng EH (2007). Effects of grazing on soil respiration of *Leymus chinensis* steppe. *Climatic Change*, 82, 211–223.
- Kato T, Tang YH, Gu S, Hirota M, Du MY, Li YN, Zhao XQ (2006). Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 12, 1285–1298.
- Law BE, Falge E, Gu L, Baldocchi DD, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman AJ, Falk M, Fuentes JD, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens IA, Jarvis P, Jensen NO, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw KT, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S (2002). Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 97–120.
- Li XR, Ma FY, Xiao HL, Wang XP, Kim KC (2004). Long term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. *Journal of Arid Environments*, 57, 1–16.
- Luo CY, Bao XY, Wang SP, Zhu XX, Cui SJ, Zhang ZH, Xu BB, Niu HS, Zhao L, Zhao XQ (2015). Impacts of seasonal grazing on net ecosystem carbon exchange in alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 396, 381–395.
- Ma J, Tang HP (2011). Variations of soil respiration rate and its temperature sensitivity among different land use types in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 167–175. [马骏, 唐海萍 (2011). 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化. 植物生态学报, 35, 167–175.]
- Mcfadden JP, Eugster W, Chapin FS (2003). A regional study of the controls on water vapor and CO₂ exchange in arctic tundra. *Ecology*, 84, 2762–2776.
- Oberbauer SF, Tweedie CE, Welker JM Fahnestock JT, Henry GHR, Webber PJ, Hollister RD, Waiker MD, Kuchy A, Elmore E, Starr G (2007). Tundra CO₂ fluxes in response to experimental warming across latitudinal and moisture gradients. *Ecological Monographs*, 77, 221–238.
- Sharkhuu A, Plante AF, Enkhmandal O, Gonneau C, Casper BB, Boldgiv B, Petraitis PS (2016). Soil and ecosystem

- respiration responses to grazing, watering and experimental warming chamber treatments across topographical gradients in northern Mongolia. *Geoderma*, 269, 91–98.
- Sun DC, Li YL, Zhao XY, Zuo XA, Mao W (2015). Effects of enclosure and grazing on carbon and water fluxes of sandy grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 565–576. [孙殿超, 李玉霖, 赵学勇, 左小安, 毛伟 (2015). 围栏和放牧对沙质草地碳水通量的影响. *植物生态学报*, 39, 565–576.]
- Suyker AE, Verman SB, Burba GG (2003). Interannual variability in net CO₂ exchange of a native tall grass prairie. *Global Change Biology*, 9, 255–265.
- Wu LB, Gu S, Zhao L, Xu SX, Zhou HK, Feng C, Xu WX, Li YN, Zhao XQ, Tang YH (2010). Variation in net CO₂ exchange, gross primary production and its affecting factors in the planted pasture ecosystem in Sanjiangyuan Region of the Qinghai-Tibetan Plateau of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 770–780. [吴力博, 古松, 赵亮, 徐世晓, 周华坤, 冯超, 徐维新, 李英年, 赵新全, 唐艳鸿 (2010). 三江源地区人工草地的生态系统CO₂净交换、总初级生产力及其影响因子. *植物生态学报*, 34, 770–780.]
- Xu P (1993). *Grassland Resources and Its Utilization in Xinjiang*. Science and Technology and Health Press, Ürümqi. [许鹏 (1993). 新疆草地资源及其利用. 科技卫生出版社, 乌鲁木齐.]
- Xu P (1998). *The Desert Grassland and Water Salt Plant System and Optimized Ecological Model in Xinjiang*. Science Press, Beijing. 9–11. [许鹏 (1998). 新疆荒漠区草地与水盐植物系统及优化生态模式. 科学出版社, 北京. 9–11.]
- Yang LL, Gong JR, Wang YH, Liu M, Luo QP, Xu S, Pan Y, Zhai ZW (2016). Effects of grazing intensity and grazing exclusion on litter decomposition in the temperate steppe of Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 748–759. [杨丽丽, 龚吉蕊, 王忆慧, 刘敏, 罗亲普, 徐沙, 潘琰, 翟占伟 (2016). 内蒙古温带草原不同放牧强度和围栏封育对凋落物分解的影响. *植物生态学报*, 40, 748–759.]
- Yang Y, Han GD, Li YH, Chen ZF, Wang CJ (2012). Response of soil respiration to grazing intensity, water contents, and temperature of soil indifferent grasslands of Inner Mongolia. *Acta Prataculturae Sinica*, 21(6), 8–14. [杨阳, 韩国栋, 李元恒, 陈志芳, 王成杰 (2012). 内蒙古不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应. *草业学报*, 21(6), 8–14.]
- Ye M, Xu HL, Wang XP, Li XX (2006). An assessment of the value and valuation of the grassland ecosystem in Xinjiang. *Acta Prataculturae Sinica*, 15, 122–128. [叶茂, 徐海量, 王小平, 李祥心 (2006). 新疆草地生态系统服务功能与价值初步评价. *草业学报*, 15, 122–128.]
- Yin GM, Zhang YJ, Wang MY, Xue YL, Zhao HP (2014). Influence of short-term enclosure on characteristics of community and species diversity on meadow steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 36(3), 61–66. [殷国梅, 张英俊, 王明莹, 薛艳林, 赵和平 (2014). 短期围封对草甸草原群落特征与物种多样性的影响. *中国草地学报*, 36(3), 61–66.]
- Yu GR, Sun XM (2008). *Carbon Flux Observation Technology and Temporal and Spatial Characteristics of Terrestrial Ecosystems in China*. Science Press, Beijing. [于贵瑞, 孙晓敏 (2008). 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征. 科学出版社, 北京.]
- Yu GR, Wen XF, Li QK, Zhang LM, Ren CY, Liu YF, Guan DX (2005). Seasonal patterns of ecosystem respiration and environmental response characteristics of China subtropical and temperate typical forests. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 34(Suppl.), 84–94. [于贵瑞, 温学发, 李庆康, 张雷明, 任传友, 刘允芬, 关德新 (2005). 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学: D辑*, 34(增刊), 84–94.]
- Zhang WH, Guan SY, Li YJ (2000). Effect of grazing capacity on water content, nutrient and biomass of steppe soil. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 14(4), 62–65. [张伟华, 关世英, 李跃进 (2000). 不同牧压强度对草原土壤水分、养分及其地上生物量的影响. *干旱区资源与环境*, 14(4), 62–65.]
- Zhang WL, Chen SP, Miao HX, Lin GH (2008). Effects on carbon flux of conversion of grassland steppe to cropland in China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 1301–1311. [张文丽, 陈世苹, 苗海霞, 林光辉 (2008). 开垦对克氏针茅草地生态系统碳通量的影响. *植物生态学报*, 32, 1301–1311.]
- Zhang YQ, Chen YJ, Liu CM, Yu Q, Sun HY, Jia JS, Tang CY, Kondoh A (2002). Measurement and analysis of water, heat and CO₂ flux from a farmland in the North China Plain. *Acta Geographica Sinica*, 57, 333–342. [张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 于强, 孙宏永, 贾金生, 唐常源, Kondoh A (2002). 华北平原典型农田水、热与CO₂通量的测定. *地理学报*, 57, 333–342.]
- Zuo XA, Zhao HL, Zhao XY, Guo YR, Zhang TH, Mao W, Su N, Feng J (2009). Species diversity of degraded vegetation in different age restorations in Horqin Sandy Land, Northern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 18(4), 9–16. [左小安, 赵哈林, 赵学勇, 郭轶瑞, 张铜会, 毛伟, 苏娜, 冯静 (2009). 科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性. *草业学报*, 18(4), 9–16.]

责任编辑: 黄建辉 责任编辑: 王 薇

扫码加入读者圈
听语音, 看问答

DOI: 10.17521/cjpe.2016.0049