



# 黄土高原围封与自然放牧草地碳交换特征

沈晓坤<sup>1,2</sup>, 刘明惠<sup>3</sup>, 张燕堃<sup>1\*</sup>, 张 徐<sup>2</sup>, 傅 华<sup>1</sup>

(1 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学 草地农业科技学院, 兰州 730020; 2 阳光凯迪新能源集团有限公司, 武汉 430223; 3 延边大学 外国语学院, 吉林延吉 133000)

**摘 要:**用静态箱法于 2012 年 3 月~2013 年 2 月对黄土高原自然放牧及其围封 6 年的草地土壤呼吸和净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换速率进行为期 1 年的实地观测。结果表明:(1)围封和自然放牧草地全年的碳交换总量均表现为碳汇, 即 CO<sub>2</sub> 净吸收;围封草地全年净生态系统碳交换量为(-58.0±14.5) g·m<sup>-2</sup>, 其中生长季和非生长季交换量分别为(-70.3±11.4) g·m<sup>-2</sup>和(12.4±3.1) g·m<sup>-2</sup>;自然放牧草地生态系统全年碳交换量为(-48.7±14.0) g·m<sup>-2</sup>, 其中生长季和非生长季交换量分别为(-56.9±10.6) g·m<sup>-2</sup>和(8.1±3.3) g·m<sup>-2</sup>。(2)草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换速率生长季主要受土壤含水量的控制, 而在非生长季则主要受土壤温度的控制;草地土壤呼吸速率主要受土壤温度和土壤含水量共同影响, 其中在生长季受土壤含水量的影响作用更大, 而在非生长季则受土壤温度的影响作用更大。(3)土壤有机质含量的差异是造成围封草地土壤呼吸速率大于自然放牧草地的主要原因。(4)研究区草地存在土壤呼吸负通量现象, 样地灰钙土偏高的碱性条件(pH>8.2)促进了土壤次生碳酸盐的淀积可能是造成这一现象的主要原因。

**关键词:**黄土高原;围封;自然放牧;CO<sub>2</sub> 交换;土壤呼吸负通量

**中图分类号:** Q948.11 **文献标志码:** A

## Carbon Exchange Characteristics of Fenced and Natural Grazed Grassland in Loess Plateau

SHEN Xiaokun<sup>1,2</sup>, LIU Minghui<sup>3</sup>, ZHANG Yankun<sup>1\*</sup>, ZHANG Xu<sup>2</sup>, FU Hua<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2 Sunshine Kaidi New Energy Group Co. Ltd, Wuhan 430223, China; 3 School of Foreign Languages and Literatures, Yanbian University, Yanji, Jilin 133000, China)

**Abstract:** Terrestrial ecosystems can act as both “carbon source” and “carbon sink” in the global carbon cycle and play an important role in regulating the global carbon balance. The carbon exchange between grassland ecosystem and atmosphere is an important component of terrestrial ecosystem carbon cycle. The Loess plateau is known for its thick loess and wide distribution, which brings a great impact on the agricultural production of China, as well as the global climate change. However, the carbon sequestration potential and the capacity and distribution of carbon source/sink in the grassland ecosystem on the Loess plateau is still not clear. Based on the continuous measurement of soil respiration and net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange rate between fenced and natural grazed grassland in Loess Plateau by using closed chamber method from March 2012 to February 2013, we studied the temporal variations of soil respiration and net ecosystems CO<sub>2</sub> ex-

收稿日期: 2014-04-13; 修改稿收到日期: 2014-07-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050403); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2013-79); 国家自然科学基金(31070412, 31201837); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120211110029)

作者简介: 沈晓坤(1984-), 男, 硕士, 主要从事草地生态学方面的研究。E-mail: shenxk11@lzu.edu.cn

\* 通信作者: 张燕堃, 硕士, 主要从事草地生态学方面的研究。E-mail: zhangyk11@lzu.edu.cn

change with the effects of soil temperature and soil moisture. The results are as follows: (1) The annual total carbon exchange in each sample plot appears as carbon sink. The annual total carbon exchange in fenced grassland is  $(-58.0 \pm 14.5) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , of which growing season and non-growing season make up  $(-70.3 \pm 11.4) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $(12.4 \pm 3.1) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectively. The annual total carbon exchange in natural grazed grassland is  $(-48.7 \pm 14.0) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , of which growing season and non-growing season make up  $(-56.9 \pm 10.6) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $(8.1 \pm 3.3) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectively. (2) The net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange rate in growing season is mainly controlled by soil moisture, while in non-growing season is mainly controlled by soil temperature. The soil respiration rate is mainly affected by soil temperature and soil moisture, but the situation is different in different seasons, the effect of soil moisture is greater in growing season, while the effect of soil temperature is greater in non-growing season. (3) The difference of soil organic carbon content between two sample areas is the main cause that the soil respiration rate of fenced land is greater than natural grazed land. (4) Negative  $\text{CO}_2$  flux was observed in the sample areas, which might be attributed to the precipitation of soil inorganic carbon, which can be accelerated in the alkaline soil ( $\text{pH} > 8.2$ ).

**Key words:** Loess Plateau; fenced; natural grazed;  $\text{CO}_2$  exchange; negative numerical flux of soil respiration

地球上的碳平衡主要表现为海洋、大气和陆地等生态系统碳库之间的相互作用,大气中碳含量的波动取决于地球上各生态系统之间碳交换通量的变化,在漫长的地质历史时期中,大气碳含量始终处于动态平衡之中<sup>[1-3]</sup>。自工业革命以来,由于人口的剧增、化石燃料的大量使用以及土地的不合理利用等人为因素导致生态系统原有的碳平衡遭到破坏,以  $\text{CO}_2$  为主要成分的温室气体浓度变化速度加快,进而引发全球气候变化<sup>[4]</sup>。全球气候变化对全球生态系统的结构、功能和过程产生了重要影响,成为各国政府、社会公众以及科学界共同关心的焦点问题<sup>[5]</sup>,中国政府已经承诺,到 2020 年单位 GDP 的  $\text{CO}_2$  排放量比 2005 年下降 40%~50%,并将其作为国民经济和社会发展的约束性指标<sup>[6]</sup>。

陆地生态系统-大气间  $\text{CO}_2$  交换主要包括植被光合固定碳(即生态系统总初级生产力, gross primary productivity, GPP)与生态系统呼吸释放碳(total ecosystem respiration, TER, 包括自养呼吸和异养呼吸)两个过程<sup>[7]</sup>。通过对陆地生态系统碳交换各个环节及其与环境因子之间的关系进行研究,可以确定系统的碳源/碳汇性质,并预测在全球变化背景下生态系统各个碳库的响应。草地生态系统碳贮量约占陆地生态系统碳库总贮量的 34%,是陆地生态系统碳循环的一个重要组成部分<sup>[8-9]</sup>。合理的管理措施可以有效提高草地生态系统有机碳贮量,对缓解由于大气  $\text{CO}_2$  浓度升高而引起的全球气候变化具有重要意义<sup>[10]</sup>。

黄土高原总面积约 628 000  $\text{km}^2$ ,是世界范围内黄土分布面积最广、土层厚度最大的地区,长期以来,由于黄土的特殊性质和人类活动的影响,黄土高

原已成为中国乃至世界范围内水土流失最严重的区域之一。20 世纪末,国家在该区域实施了退耕还林还草工程,但截至目前,有关退耕还草工程对黄土高原草地生态系统固碳潜力及其碳源/碳汇强度和分布的影响尚不清楚<sup>[11]</sup>。围封与放牧是草地两种主要的管理方式<sup>[12-13]</sup>,本研究通过对黄土高原自然放牧及其围封草地生态系统碳交换速率进行实地观测,探讨草地生态系统碳交换速率的变化规律及其主要影响因素,旨在为研究区草地在实行围封管理措施之后其碳收支效益的评估以及为草地实现碳汇管理和进一步研究黄土高原草地生态系统碳循环机制提供理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

试验地设在兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL 站),该站位于甘肃省榆中县北部夏管营镇,地理坐标为北纬  $35^{\circ}57'$ ,东经  $104^{\circ}09'$ ,海拔高度 1 965.8 m。地貌类型属于黄土高原残塬梁峁沟壑,土壤属于第四纪风蚀黄土、灰钙土,下垫面为典型的黄土高原地貌。气候类型属于大陆性半干旱气候,年平均气温  $6.7^{\circ}\text{C}$ ,年降水量约 382 mm,年蒸发量变化范围为 917.5~1 368.3 mm,无霜期约 115 d,年日照时数约 2 600 h,年平均风速约 1 m/s,盛行东南风和西北风。植被类型属于半干旱典型草原,草地植物主要有长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、赖草(*Leymus secalinus*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、二裂萎陵菜(*Potentilla bifurca*)和茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)等。该区域原为 20

表 1 样地不同土层土壤理化性质(平均值±标准误,n=5)

Table 1 Physical-chemical properties of soil in different soil layers in the study sites(mean±SE,n=5)

土层 Soil layer /cm	样地 Sample plot	土壤 pH Soil pH	土壤容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤有机碳 Soil organic carbon /(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全氮 Soil total nitrogen /(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全磷 Soil total phosphorus /(g·kg <sup>-1</sup> )
0~5	围封 Fenced	8.24±0.02*	1.14±0.01*	9.45±0.13*	0.88±0.03	0.74±0.01
	放牧 Grazed	8.29±0.01	1.29±0.01	7.67±0.15	0.93±0.02	0.74±0.00
5~10	围封 Fenced	8.29±0.02	1.18±0.01*	6.67±0.09*	0.95±0.05	0.74±0.01*
	放牧 Grazed	8.33±0.01	1.29±0.00	6.32±0.17	0.93±0.01	0.79±0.01
10~20	围封 Fenced	8.47±0.03*	1.19±0.01	6.55±0.13*	0.72±0.05	0.75±0.01
	放牧 Grazed	8.27±0.01	1.22±0.02	5.60±0.08	0.72±0.04	0.76±0.02
20~30	围封 Fenced	8.34±0.04	1.20±0.01	5.41±0.11	0.66±0.07	0.71±0.01
	放牧 Grazed	8.44±0.02	1.19±0.02	5.57±0.47	0.69±0.06	0.73±0.02
30~50	围封 Fenced	8.60±0.02	1.22±0.01	4.24±0.09*	0.55±0.03	0.68±0.01
	放牧 Grazed	8.55±0.02	1.21±0.01	3.63±0.02	0.56±0.07	0.70±0.02
50~70	围封 Fenced	8.76±0.03	1.22±0.01	3.19±0.13	0.41±0.01	0.68±0.02
	放牧 Grazed	8.71±0.03	1.25±0.01	2.87±0.04	0.41±0.03	0.66±0.02
70~100	围封 Fenced	8.78±0.05	1.25±0.01	2.12±0.13	0.30±0.01	0.66±0.01
	放牧 Grazed	8.82±0.02	1.25±0.02	2.31±0.10	0.31±0.01	0.65±0.01

注:同一列中围封草地数据标\*,则表示围封与自然放牧草地间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: \* shows significant difference between fenced and natural grazed grassland in the same soil layer at 0.05 level.

世纪 80 年代中期弃耕的农田,此后撂荒恢复为自然放牧草地<sup>[11]</sup>。

## 1.2 样地设置

在观测站周围的围封和自然放牧区域分别选择两块地势平缓、坡向相近、面积 2 hm<sup>2</sup> 的草地作为研究样地。其中,自然放牧草地在冷季和暖季的放牧强度分别为每公顷 1~2 只羊和每公顷 2~3.5 只羊;围封草地由自然放牧草地于 2005 年 10 月开始进行围封。2012 年 6 月中旬进行样地土壤调查,土壤基本理化性质见表 1。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 碳交换速率的测定

本研究的碳通量日动态测定均选择晴朗天气,且围封和自然放牧草地的测定在同一天进行。测定频度为:生长季(4~10 月)每月上下旬各 1 次,非生长季(11~次年 3 月)每月 1 次。每次测定提前 1 d 将同化箱底座装入各样地土壤,用样线法每隔约 10 m 安装 2 个 0.5 m×0.5 m 的基座(其中一个底座内的植物地上部分剪掉同时手工清除基座内的枯落物用于土壤呼吸速率的测定,另一个保留植被原状用于净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换速率的测定),各 5 次重复。底座高 8 cm,插入地下 5 cm。测定时,先将装有小风扇的 50 cm×50 cm×50 cm 透明同化箱放在底座上,调整同化箱的位置使其与底座的吻合,将箱体 4 个角的密封扣扣好,打开同化箱风扇,连接 LICOR-840 (LICOR,

Inc., Lincoln NE, USA)进行测定,记录同化箱内气压以及 0 s 和 90 s 时同化箱内的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 浓度和气温值。日动态测定于 6:00~次日 3:00 每隔 3 h 测 1 次,最后利用各个时间点测定得出的 CO<sub>2</sub> 交换速率代表其所在时间段的 CO<sub>2</sub> 交换速率绘制动态曲线,并以此估算当天的 CO<sub>2</sub> 交换速率,进而估算各月的 CO<sub>2</sub> 交换速率<sup>[14]</sup>。CO<sub>2</sub> 交换速率  $F_c$  的计算<sup>[11]</sup>采用以下公式:

$$F_c = \frac{VP_{av}(1000 - W_{av})}{RS(T_{av} + 273.15)} \times \frac{dc}{dt}$$

式中, $V$  为箱体的体积[同化箱长×宽×(箱体高度+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(K·Pa); $W_{av}$  是测量期间箱体内的水气分压(mmole·mol<sup>-1</sup>); $R$  是大气常数(8.314 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>); $S$  是同化箱的面积; $T_{av}$  是测量期间箱体内的平均温度; $dc/dt$  为 90 s 测定时间内 CO<sub>2</sub> 浓度( $\mu$ mol·mol<sup>-1</sup>)变化速率。

### 1.3.2 土壤温度与土壤水分的测定

在每次测定 CO<sub>2</sub> 交换速率的同时,用 6310 针式温度计测定基座外沿 5 cm 深度的土壤温度。由于土壤水分在全天中无明显波动<sup>[15]</sup>,在全天测定结束后,用土壤水分探测仪(Trime TDR probe, IMKO, Ettlingen, Germany)原位测定基座内 10 cm 深度的土壤体积含水量。

### 1.3.3 数据处理

所得数据采用 SPSS 17.0 for Windows 统计分析软件进行围封与自然放牧草地

相关指标的差异性分析和  $\text{CO}_2$  交换速率与土壤温度及土壤水分的相关性分析,动态曲线采用 Microsoft Excel 2010 绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长季草地 $\text{CO}_2$ 交换速率日动态特征

**2.1.1 生长季草地土壤呼吸日动态特征** 围封和自然放牧草地在生长季不同时期的土壤呼吸速率日变化趋势均呈现“单峰型”曲线(图 1),表现为白天高、夜间低,最高值均出现在 12:00~15:00,峰值分别为  $(2.2 \pm 0.1) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $(1.7 \pm 0.1) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且多数时间段围封草地土壤呼吸速率显著高于自然放牧草地( $P < 0.05$ )。

**2.1.2 生长季草地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换速率日动态特征** 围封和自然放牧草地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换速率日变化趋势(图 1)除了 6 月份和生长季初期及末期出现“双峰型”曲线外,多数时期均以“S”型变化曲线为主,即白天的净生态系统  $\text{CO}_2$  交换速率为负值(碳汇),9:00~12:00 前后达到  $\text{CO}_2$  净吸收峰值,18:00 前后由碳吸收逐渐转变为碳排放,之后呈现正值(碳源),21:00 前后达到  $\text{CO}_2$  排放峰值;到了生长季末期,草地在白天各时间段陆续由碳汇转变为碳源。除了 5 月 27 日、9 月 29 日和生长季末期,生长季多数时间段围封草地生态系统白天的  $\text{CO}_2$  净吸收量和夜间  $\text{CO}_2$  净排放量显著高于自然

放牧草地( $P < 0.05$ );围封与自然放牧草地生态系统白天的  $\text{CO}_2$  净吸收峰值和夜间的  $\text{CO}_2$  净排放峰值都出现在 8 月份。

### 2.2 非生长季草地 $\text{CO}_2$ 交换速率日动态特征

非生长季草地的碳交换速率日动态如图 2 所示。草地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换速率在非生长季的日变化趋势及其数值均近似于土壤呼吸速率,且围封与自然放牧草地在同一时间段内的碳交换速率差异并不显著,两地的碳交换速率日变化范围为  $(-0.4 \pm 0.1) \sim (1.0 \pm 0.1) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,呈现“单峰型”变化趋势,最高值出现在 12:00~15:00,进入夜间至次日早晨(18:00~次日 9:00),草地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换和土壤呼吸均出现负通量(土壤吸收  $\text{CO}_2$ )现象。

### 2.3 草地土壤呼吸负通量现象

为进一步探讨土壤呼吸负通量现象,本研究以 3 月份草地碳交换速率和土壤温度日变化为研究对象(图 3)。图中显示,3 月份草地土壤呼吸和净生态系统  $\text{CO}_2$  交换日变化趋势开始出现差异。土壤呼吸与土壤温度日变化趋势一致,呈现“单峰型”曲线,白天表现为  $\text{CO}_2$  净排放,夜间仍然出现图 2 所显示的冬季土壤呼吸  $\text{CO}_2$  负通量现象。草地生态系统在白天表现为  $\text{CO}_2$  净吸收,夜间继续呈现冬季的净生态系统  $\text{CO}_2$  交换和土壤呼吸  $\text{CO}_2$  负通量现象,因此草地的净生态系统  $\text{CO}_2$  交换在全天各个时段均

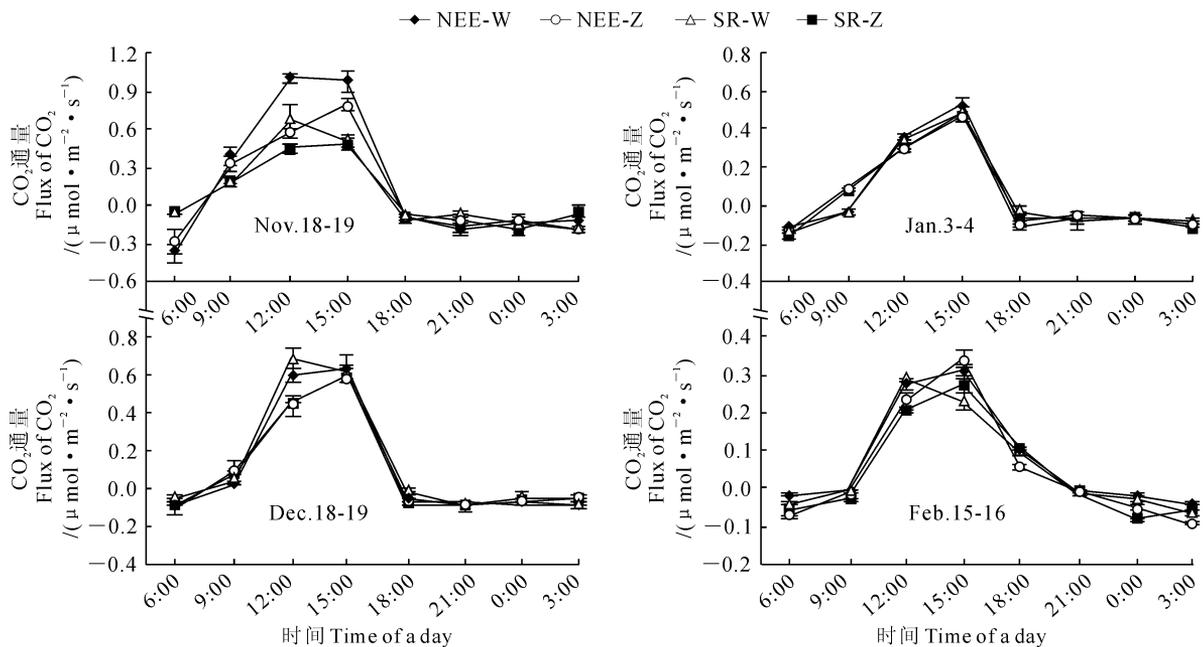


图 2 非生长季围封和自然放牧草地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换和土壤呼吸速率的日动态  
Fig. 2 Diurnal variations of net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange and soil respiration rate between fenced and natural grazed grassland in non-growing season

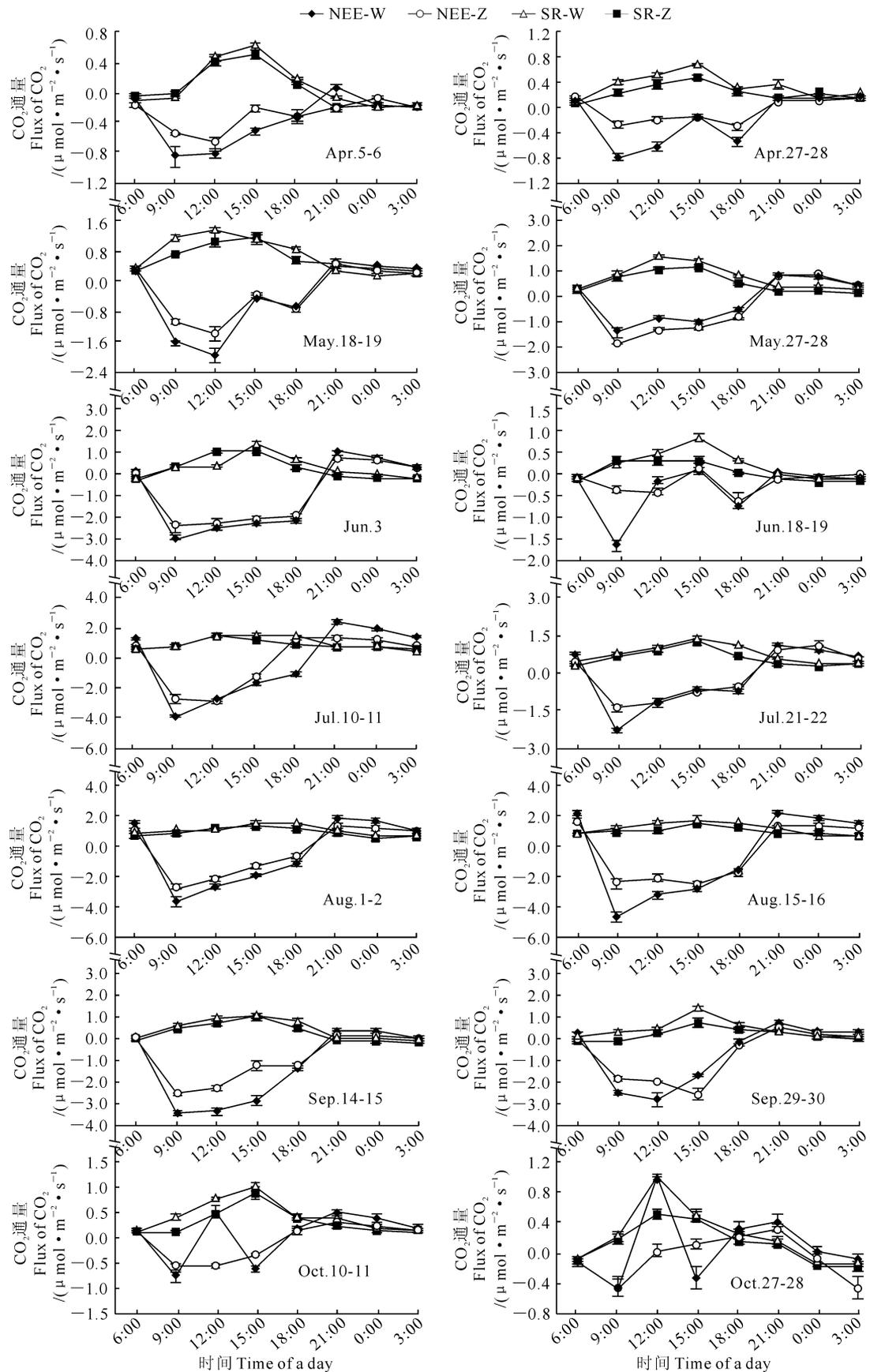


图 1 生长季围封和自然放牧草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换和土壤呼吸速率的日动态  
 Fig. 1 Diurnal variations of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and soil respiration rate between fenced and natural grazed grassland in growing season

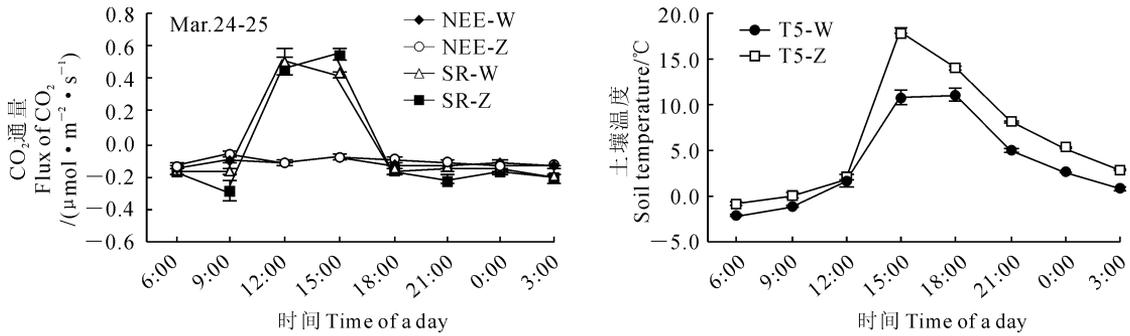


图3 围封和自然放牧草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换和土壤呼吸速率以及土壤温度在3月份的日动态

Fig. 3 Diurnal variations of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and soil respiration rate and soil temperature at 5 cm between fenced and natural grazed grassland in March

表现为碳汇(图3)。

2.4 草地 CO<sub>2</sub> 交换速率与环境因子季节动态特征

2.4.1 草地土壤呼吸的季节动态特征 图4显示,围封和自然放牧草地土壤呼吸的季节变化趋势相近,CO<sub>2</sub> 日交换量从生长季初期开始增强,于6月16日前后随着土壤含水量的下降而减弱,此后又逐渐增强,到8月中旬达到最大值,分别为(4 415.7 ± 74.2) mg · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>和(3 642.6 ± 54.4) mg · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>,到了生长季末期开始减弱。生长季围封草地土壤呼吸速率显著高于自然放牧草地(P < 0.05),非生长季围封草地偏高,但增幅不显著。草地土壤呼吸除了在6月份随着土壤含水量的下降而出现下降,其季节变化趋势与土壤温度的季节变化趋势基本相近(图4)。

2.4.2 草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换速率的季节动态特征 围封与自然放牧草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 的日交换量从3月份开始表现为碳汇,此后于6月份随着土壤含水量的下降,围封草地生态系统表现为微弱的碳汇,而自然放牧草地生态系统则由碳汇转化为微弱的碳源,此后两地的日交换量都恢复为碳汇,到8月下旬至9月上旬两地的净生态系统 CO<sub>2</sub> 日交换量达到全年的峰值,分别为(-3 306.0 ± 238.3) mg · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>和(-1 596.2 ± 298.7) mg · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>;到了生长季末期,围封草地生态系统开始由碳汇转化为碳源,而自然放牧草地生态系统则表现为微弱的碳汇;11月份开始,至非生长季结束,两地均表现为碳源。

2.5 草地 CO<sub>2</sub> 交换速率与环境因素的关系

为寻找与黄土高原草地生态系统碳交换速率相关的环境因子,将围封与自然放牧草地 CO<sub>2</sub> 日交换量与5 cm土壤日平均温度和10 cm土壤日平均含水量分不同季节分别进行相关性分析,结果如表2

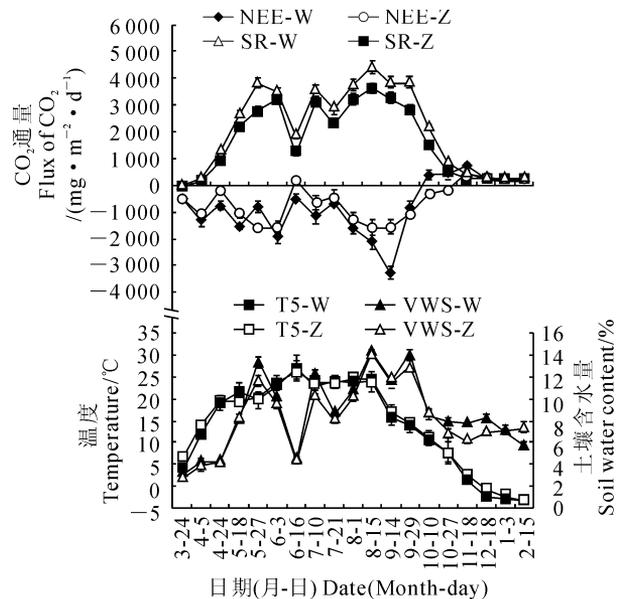


图4 围封和自然放牧草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换和土壤呼吸速率、土壤温度以及土壤水分的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and soil respiration rate, soil temperature at 5 cm and soil moisture at 0-10 cm between fenced and natural grazed grassland

所示。围封和自然放牧草地碳交换速率与土壤温度和土壤水分的相关性均表现为:生长季和非生长季草地土壤呼吸速率的变化与土壤温度和土壤水分的变化均呈显著正相关,但是生长季土壤呼吸与土壤温度的相关系数小于其与土壤含水量的相关系数,而在非生长季土壤呼吸速率与土壤温度的相关系数大于其与土壤含水量的相关系数;生长季草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换速率与土壤温度的相关性并不显著,而与土壤含水量则呈显著相关,到了非生长季则是与土壤含水量呈显著相关(P < 0.05),而与土壤温度呈极显著相关(P < 0.01)。

表 2 碳交换速率与环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between carbon exchange rate and environmental factors

季节 Season	CO <sub>2</sub> 交换速率 CO <sub>2</sub> exchange rate	样地 Plot	土壤温度 Soil temperature	土壤水分 Soil moisture
生长季 Growing season	生态系统净交换速率 NEE	围封 Fenced	-0.122	-0.377*
		放牧 Grazed	-0.216	-0.555**
	土壤呼吸速率 SR	围封 Fenced	0.613**	0.890**
		放牧 Grazed	0.633**	0.867**
非生长季 Non-growing season	生态系统净交换速率 NEE	围封 Fenced	0.736**	0.366*
		放牧 Grazed	0.826**	0.501*
	土壤呼吸速率 SR	围封 Fenced	0.544**	0.461*
		放牧 Grazed	0.662**	0.453*

注: \*\* 和 \* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: \*\* and \* show significant correlation at 0.01 and 0.05 levels(2-tailed), respectively.

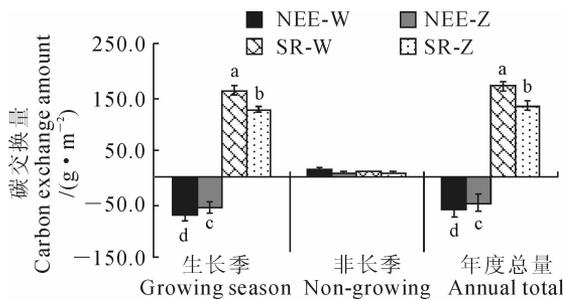


图 5 围封和自然放牧草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换和土壤呼吸的碳交换量

Fig. 5 The carbon exchange amount of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and soil respiration between fenced and natural grazed grassland

## 2.6 草地年度碳交换量

将草地全年各月的日动态测定得到的碳交换速率估算出来的各月碳交换量相加,得到草地生态系统全年的碳交换量如图 5 所示。生长季围封草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 吸收量和土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 排放量均显著大于自然放牧草地 ( $P < 0.05$ ),非生长季围封草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 吸收量和土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 排放量虽大于自然放牧地,但增加幅度未达到显著水平。围封草地全年土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 排放量显著高于自然放牧草地 ( $P < 0.05$ ),净生态系统 CO<sub>2</sub> 吸收量高于自然放牧草地,但增幅不显著。

## 3 讨论

### 3.1 草地土壤呼吸特征及其影响因素

土壤温度和土壤含水量是控制土壤呼吸速率的两个重要因素<sup>[16]</sup>,一般情况下,土壤温度是土壤呼吸最主要的驱动因素<sup>[17]</sup>。本研究结果显示,围封与自然放牧草地生态系统土壤呼吸速率与土壤温度和土壤含水量均呈显著正相关,但是土壤温度和土壤含水量在生长季和非生长季对土壤呼吸速率的影响程度有所区别:生长季草地的土壤呼吸速率与土壤

含水量的相关性系数大于其与土壤含水量的相关性系数,这说明生长季土壤含水量是影响草地土壤呼吸速率的主要因素;非生长季则是草地土壤呼吸速率与土壤温度的相关性系数大于其与土壤含水量的相关性系数,说明非生长季土壤温度是影响草地土壤呼吸速率的主要因素。因此,黄土高原草地土壤呼吸速率在不同季节所受的主要调控因素有所不同。

土壤有机质是土壤呼吸重要的基质<sup>[18]</sup>,有研究表明,土壤有机质含量与土壤呼吸速率呈正相关,土壤有机质含量可作为预测土壤呼吸速率的重要参数<sup>[19-20]</sup>。本研究结果显示,草地在围封 6 年之后,与自然放牧草地相比,土壤全氮和全磷含量无显著变化,而 50 cm 以上土层土壤有机碳含量则出现了不同程度的差异,特别是 20 cm 以上土层土壤围封草地有机碳含量显著高于自然放牧草地,而在多数时间里围封草地的土壤呼吸速率也显著高于自然放牧草地,两地的土壤温度和土壤含水量在多数时间里并无显著差异,这说明表层土壤有机碳含量的差异是造成围封草地土壤呼吸速率高于自然放牧草地的主要原因。植物的光合作用与土壤有机质矿化作用是影响碳素循环的 2 个主要因素<sup>[21]</sup>,围封草地土壤呼吸速率增强,在引起土壤有机质消耗增加的同时可促进土壤有机质矿化释放无机养分被植物根系吸收,从而有利于植物地上部分得到更加充足的养分进行光合作用并向土壤输入更多的有机质。

围封与自然放牧草地生态系统在非生长季的夜间和早晨有固碳现象,由于非生长季环境温度低且植被枯萎,草地的碳交换日动态图显示土壤呼吸速率与净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换速率相近,这说明此时植被对草地生态系统碳交换过程的影响甚微,土壤方面的因素才是造成这一现象的主要原因,即土壤呼吸负通量现象。在研究区的其它研究中也有观测到

相同的现象<sup>[14]</sup>。有人通过对高寒草甸在非生长季出现土壤呼吸负通量现象的解释是:冬季气温和土壤温度均很低,土壤微生物和根系呼吸基本停止,而CO<sub>2</sub>在水中的溶解度随温度下降而升高,此时土壤孔隙中的CO<sub>2</sub>易被土壤水分吸收而积聚在冻土层中,造成大气中的CO<sub>2</sub>浓度因高于土壤孔隙中的CO<sub>2</sub>浓度而向土壤扩散,从而出现土壤呼吸负通量现象<sup>[22]</sup>。本研究区土壤温度在0℃以上(0~10℃温度范围)条件下也有土壤呼吸负通量现象的存在。因此,土壤在冬季低温下发生冻土并不是造成土壤呼吸负通量的主要原因。通过对比前人没有出现土壤呼吸负通量的研究时发现这些样地的土壤pH值多数偏向酸性或接近中性<sup>[23-27]</sup>,而本研究中围封和自然放牧草地土壤在1m深度范围内各土层土壤pH值均介于8.2~8.9之间,呈碱性,且随着土层的下降,土壤pH值有升高的趋势。有研究认为,由于CO<sub>2</sub>水溶液是由H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>等成分组成的平衡混合物,且CO<sub>2</sub>易溶于水,各组成之间存在平衡反应:CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O⇌H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>⇌H<sup>+</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>⇌2H<sup>+</sup>+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>;碱性溶液会使平衡向右移动,当溶液pH值约为7~9时,溶液中的碳素主要以HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的形式存在;pH值再高时,溶液中的碳素则主要是以CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的形式存在;方解石溶解产生的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和硅酸盐风化形成的全部HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>有一半是来自于土壤或大气中的CO<sub>2</sub><sup>[28]</sup>。因此,本研究认为,草地钙质土壤偏高的碱性促进了土壤次生碳酸盐的形成进而导致土壤吸收CO<sub>2</sub>现象的出现,且由于冬季低温限制了土壤微生物和根系呼吸的进行,进而使得这一现象能够被观测。由此可见,在生长季也可能出现土壤吸收CO<sub>2</sub>现象,但由于生长季环境温度较高,植物根系和土壤微生物呼吸排放CO<sub>2</sub>的速率大于土壤吸收CO<sub>2</sub>的速率,从而使得土壤吸收CO<sub>2</sub>现象被掩盖。因此,黄土高原灰钙土偏高的碱性是造成草地土壤呼吸负通量现象的主要原因。碱性的钙质土壤对大气CO<sub>2</sub>的吸收可为研究全球碳循环过程中的碳失汇现象<sup>[29]</sup>提供一个新的方向。由于土壤呼吸负通量过程的贡献,草地在一定程度上减少了碳排放量,这对研究区草地的碳收

支具有重要意义。同时,土壤吸收CO<sub>2</sub>现象的存在也可能使得研究区草地土壤呼吸速率的观测值低于实际值,因此要正确量化草地土壤呼吸过程的碳收支,需要做进一步的研究。

### 3.2 草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换特征及其影响因素

生长季全天温度保持在较高水平,本研究结果表明,生长季土壤温度对草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换速率的影响并不显著,而土壤含水量与草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换速率显著相关,且在6月中旬草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换速率和日交换量随着土壤含水量的急剧下降而下降,这说明生长季土壤含水量是影响草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换速率和日交换量的主要因素。在非生长季草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换速率与土壤温度呈极显著相关( $P<0.01$ ),与土壤含水量呈显著相关( $P<0.05$ ),说明在非生长季草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换速率受土壤温度和土壤含水量共同影响,但土壤温度对其影响作用更大。

有研究表明,内蒙古草地在轻度放牧的管理条件下表现为碳固持,在重度放牧管理条件下表现为碳流失,放牧草地存在碳源/碳汇的转化阈值<sup>[12]</sup>,而该区的围封草地在围封30年之后,草地生态系统的碳贮量达到最大值,并处于弱碳源/碳汇相互转化的相对平衡状态,其转化的方向主要受当年降雨量的控制<sup>[30-31]</sup>。围封和自然放牧草地生态系统年度碳交换总量均表现为碳汇,且围封草地全年固碳总量大于自然放牧草地。这一方面说明,自然放牧草地进行一定时间的围封管理之后草地净生态系统CO<sub>2</sub>交换速率升高,草地固碳能力增强,且随着围封年限的增加草地仍有碳增汇的潜力;另一方面,自然放牧草地在自然放牧强度下仍然表现为碳汇,说明研究区自然放牧草地生态系统在合理增加放牧强度的条件下仍有可能维持碳收支平衡。因此,制定合理的管理措施,使研究区围封草地生态系统实现碳增汇,同时增加不同的放牧梯度以寻找研究区自然放牧草地碳源/碳汇的转化阈值,使放牧草地生态系统在保障生态效益的前提下实现其最大的经济效益,这对缓解近年来大气CO<sub>2</sub>浓度的升高趋势<sup>[4]</sup>具有重要的意义。

### 参考文献:

- [1] ESWARAN H, VAN D B E, REICH P. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(1):192-194.
- [2] XIE X L(解宪丽), SUN B(孙波), ZHOU H ZH(周慧珍), et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 2004, **41**(1):35-43(in Chinese).
- [3] QU J SH(曲建升), SUN CH Q(孙成权), ZHANG ZH Q(张志强), et al. Trends and advances of the global change studies on carbon cycle

- [J]. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2003, **18**(6): 980—987 (in Chinese).
- [4] IPCC. Climate change 2007: The Scientific Basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental Panel on climate change[R]. UK: Cambridge University Press, 2007.
- [5] LI G D (李国栋), ZHANG J H (张俊华), CHEN C (陈 聪), *et al.* Research progress on carbon storage and flux in different terrestrial ecosystem in China under global climate change[J]. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2013, **22**(5): 873—878 (in Chinese).
- [6] WEI W J (魏文佳), GUI ZH F (桂智凡), XUE B (薛 滨), *et al.* Effects of land use changes on the carbon storage of terrestrial ecosystem—A case study of Hulun lake and Taihu lake basins[J]. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2012, **32**(2): 327—336 (in Chinese).
- [7] ZHANG W L (张文丽), CHEN SH P (陈世苹), MIAO H X (苗海霞), *et al.* Effects on carbon flux of conversion of grassland steppe to cropland in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2008, **32**(6): 1 301—1 311 (in Chinese).
- [8] SCURLOCK J M, HALL D O. The global carbon sink: A grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(2): 229—233.
- [9] LAL R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect[J]. *Climatic Change*, 2001, **51**(1): 35—72.
- [10] MAIA S F, OGLE S M, CERRI C P, *et al.* Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil[J]. *Geoderma*, 2009, **149**(1—2): 84—91.
- [11] 李旭东. 黄土高原草地与农田系统土壤呼吸及碳平衡[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [12] HE N P (何念鹏), HAN X G (韩兴国), YU G R (于贵瑞). Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(3): 844—851 (in Chinese).
- [13] WANG W (王 玮), WU J G (邬建国), HAN X G (韩兴国). Estimation of soil carbon sequestration potential in typical steppe of Inner Mongolia and associated uncertainty[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(1): 29—37 (in Chinese).
- [14] LI X D, FU H, GUO D, *et al.* Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italica* (L.) Beauv. cropland on the Loess Plateau, northern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(2): 337—346.
- [15] JIA B R, ZHOU G SH, WANG F Y, *et al.* Effects of grazing on soil respiration of *Leymus chinensis* steppe[J]. *Climatic Change*, 2007, **82**(1—2): 211—223.
- [16] LI Y Q (李玉强), ZHAO H L (赵哈林), ZHAO X Y (赵学勇), *et al.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different sand dune types[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2006, **20**(3): 154—158 (in Chinese).
- [17] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, **44**(2): 81—99.
- [18] GUPTA S R, SINGH J S. Soil respiration in a tropical grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, **13**(4): 261—268.
- [19] ZHANG D Q (张东秋), SHI P L (石培礼), ZHANG X ZH (张宪洲). Some advance in the main factors controlling soil respiration[J]. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2005, **20**(7): 778—785 (in Chinese).
- [20] SIKORA L J, MCCOY J L. Attempts to determine available carbon in soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, **9**(1): 1 9—24.
- [21] SHAN ZH J (单正军), CAI D J (蔡道基), REN ZH H (任阵海). A preliminary assessment of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from soil in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 1996, **16**(2): 150—154 (in Chinese).
- [22] ZHANG J X (张金霞), CAO G M (曹广民), *et al.* The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil vegetation and animal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(4): 627—634 (in Chinese).
- [23] WANG X (王 旭), ZHOU G SH (周广胜), *et al.* soil respiration in natural mixed (*Betula platyphylla* and *Populus davidiana*) secondary forest and primary broad-leaved Korean pine forest[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2007, **31**(3): 348—354 (in Chinese).
- [24] LIU H (刘 惠), ZHAO P (赵 平). Diurnal variations of soil respiration of typical land-use types in a hilly area of South China[J]. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(1): 249—255 (in Chinese).
- [25] WANG M (王 淼), HAN SH J (韩士杰), WANG Y S (王跃思). Important factors controlling CO<sub>2</sub> emission rates from forest soil[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(5): 24—29 (in Chinese).
- [26] DENG Q (邓 琦), LIU SH ZH (刘世忠), LIU J X (刘菊秀), *et al.* Contributions of litter-fall to soil respiration and its affecting factors in southern subtropical forests of China[J]. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2007, **22**(9): 976—986 (in Chinese).
- [27] LIANG Y (梁 宇), XU J W (许嘉巍), HU Y M (胡远满), *et al.* Soil respiration of degraded Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(5): 1 097—1 104 (in Chinese).
- [28] LIU Z H (刘再华), WOLFGANG D, WANG H J (王海静). A potential CO<sub>2</sub> sink produced by global water cycle[J]. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2007, **52**(20): 2 418—2 422 (in Chinese).
- [29] WANG X K (王效科), BAI Y Y (白艳莹), OUYANG ZH Y (欧阳志云), *et al.* Missing sink in global carbon cycle and its causes[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(1): 94—103 (in Chinese).
- [30] HE N P, YU Q, WU L, *et al.* Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of Northern China[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2008, **40**(12): 2 952—2 959.
- [31] HAO Y B, WANG Y F, MEI X R, *et al.* CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and energy exchange of an Inner Mongolia steppe ecosystem during a dry and wet year [J]. *Acta Oecologica*, 2008, **33**(2): 133—143.