

山东省暖性草丛生态系统碳库现状和碳通量季节变化特征

李永强^{1,2} 董智³ 丁晨曦³ 王雅楣¹ 贾继文¹ 张佳楠¹ 焦树英^{1*}

¹土肥资源高效利用国家工程实验室/山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; ²内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010018; ³山东农业大学林学院/泰山森林生态站, 山东泰安 271018

摘要 了解山东省草地生态系统碳库现状和碳通量变化规律对于全国尺度草地生态系统碳源/汇核算有着重要的意义。该研究采用野外面上调查取样和固定加强点静态箱法(LI-840红外分析仪联用)相结合的方法, 分析了山东省暖性草丛生态系统的固碳现状、碳通量季节动态以及净生态系统CO₂交换(NEE)对各种环境因子的响应。研究结果表明: 山东暖性草丛生态系统平均碳密度为2.74 Mg C·hm⁻², 碳密度的构成排序为土壤碳密度(89%) > 生物量碳密度(9%) > 凋落物碳密度(2%), 山东暖性草丛碳库总储量约为15.88 Tg C; 结缕草(*Zoysia japonica*)暖性草丛生态系统NEE的季节动态总体表现为夏季低, 冬季高, 非生长季节(11月至次年4月)向外界净排放CO₂, 表现为碳源效应; 生长季节(4–9月)则为净吸收CO₂, 表现为碳汇效应, 峰值月份的平均固碳速率在–2.58– –4.46 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹之间; 2012和2013年泰山小流域暖性草丛NEE年平均值分别为–0.43 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹和–0.31 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹, 都表现为碳汇效应; 光合有效辐射(PAR)、大气温度(T_a)、饱和水汽压差(VPD)和土壤10 cm深度温度(T_s)和含水量(W)是结缕草暖性草丛生态系统NEE动态的主要影响因素, 但不同月份NEE动态的影响因素各异, 且因子间存在着互作效应, 主成分分析表明, NEE的季节动态主要受温度、水分和光强等因子控制。

关键词 暖性草丛; 结缕草; 碳库; 固碳现状; 碳通量

李永强, 董智, 丁晨曦, 王雅楣, 贾继文, 张佳楠, 焦树英 (2018). 山东省暖性草丛生态系统碳库现状和碳通量季节变化特征. 植物生态学报, 42, 277–287. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0329

Carbon stock and seasonal dynamics of carbon flux in warm-temperature tussock ecosystem in Shandong Province, China

LI Yong-Qiang^{1,2}, DONG Zhi³, DING Chen-Xi³, WANG Ya-Mei¹, JIA Ji-Wen¹, ZHANG Jia-Nan¹, and JIAO Shu-Ying^{1*}

¹National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources; College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; ²College of Ecological and Environmental Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; and ³Forestry College of Shandong Agriculture University, Forestry Ecological Station, Tai'an, Shandong 271018, China

Abstract

Aims The project was to analyze the carbon stock, seasonal dynamics of carbon flux and the responses of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) to various environmental factors of *Zoysia japonica* warm tussock ecosystem in Shandong Province.

Methods We used field sampling and fixed-point observation-static chamber method (LI-840 infrared analyzer).

Important findings (1) The average carbon density (carbon stock per area) of *Z. japonica* warm tussock ecosystem in Yaoxiang small watershed was about 2.74 Mg C·hm⁻² and the order of carbon density was as follows: soil carbon (89%) > vegetation carbon (9%) > litter carbon (2%), the total amount of carbon stock of warm tussock in Shandong Province was about 15.88 Tg C. (2) The NEE seasonal dynamics of *Z. japonica* warm tussock ecosystem was low in summer but high in winter. This ecosystem functioned as carbon source (i.e., CO₂ emissions) during the non-growing seasons (October to March of next year), but acted as carbon sink (net absorption of CO₂) during the growing seasons (April to September). The average carbon sequestration rate during the peak months

收稿日期Received: 2015-09-08 接受日期Accepted: 2016-02-19

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0505040303)、国家自然科学基金(31302014)、国家博士后科学基金(2011M501158)、山东省自然科学基金(ZR2009DQ007)和国家博士后科学基金特别资助(2012T50589)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA0505040303), the National Natural Science Foundation of China (31302014), the China Postdoctoral Science Foundation (2011M501158), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2009DQ007) and the Special Fund of China Postdoctoral Science Foundation (2012T50589).

* 通信作者Corresponding author (jshysd@163.com)

was -2.58 – $-4.46 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The annual average *NEE* of small watershed warm tussock was respectively -0.43 and $-0.31 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in the year of 2012 and 2013, indicating this ecosystem exhibited carbon sink effect. (3) The photosynthetic active radiation (*PAR*), atmospheric temperature (T_a), vapor pressure deficit (*VPD*) and the temperature and water content of 10 cm soil depth were the major factors regulating *NEE* dynamics in *Z. japonica* warm tussock ecosystem, but drivers of *NEE* dynamics in different months were different and had the interaction effects between factors. Principal component analysis indicated that the seasonal dynamics of *NEE* was mainly controlled by the temperature, moisture and light intensity.

Key words warm-temperature tussock; *Zoysia japonica*; carbon pool; carbon sequestration status; carbon flux

Li YQ, Dong Z, Ding CX, Wang YM, Jia JW, Zhang JN, Jiao SY (2018). Carbon stock and seasonal dynamics of carbon flux in warm-temperature tussock ecosystem in Shandong Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 277–287. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0329

碳循环与全球气候变化的关系密切, 气候变化成因分析及趋势预测、适应对策研究, 都取决于对地球系统碳循环的理解程度, 因此碳库储量和碳排放清单核算一直是碳循环研究的热点问题(于贵瑞等, 2006, 2011; 王秋凤等, 2012; Liu *et al.*, 2015)。我国正面临着温室气体减排的严峻挑战, 在哥本哈根大会上, 中国政府已经向全世界承诺: 将采取自主行动使得2020年的单位国内生产总值(GDP)碳排放比2005年减少40%–45% (任伟等, 2011); 草地生态系统碳库作为陆地生态系统的重要组成部分, 在全球碳收支平衡中占有重要地位, 中国向联合国气候变化框架公约秘书处提交的《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》(<http://www.ccchina.gov.cn/archiver/ccchinacn/UpFile/Files/Default/20150701083650312041.pdf>, 2015-06-30)文件把“抑制草场退化, 恢复草原植被, 提升土壤储碳能力”作为重要的增加碳汇措施之一; 草地生态系统碳库储量、源/汇变化的研究对国家应对气候变化政策的制定具有重要意义。

草地生态系统的碳储量主要包括生物量碳储量和土壤有机碳储量, 其中生物量碳储量又可以分为地上(活体、凋落物)和地下(根系)两部分。许多学者采用不同的方法对我国草地生态系统碳储量进行了研究和分析, 得出我国草地生态系统生物量碳库储量为3.06 Pg C (Ni, 2002)、3.32 Pg C (Fan *et al.*, 2008)、1.0 Pg C (方精云等, 2010); 朴世龙等(2004)通过建立植被生物量估测模型(归一化植被指数(*NDVI*)模型)对中国草地植被生物量及其空间分布格局进行研究, 得出我国草地地上生物量为146.16 Tg C, 认为草地单位面积地上生物量水平分布与水热条件的分布趋势一致; 马文红等(2006)对内蒙古

温带草地植被的碳储量进行研究, 得出以下结论: 植被碳储量为 $(226.0 \pm 13.3) \text{ Tg C}$, 平均碳密度为 $3.44 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$, 地下生物量碳储量是地上的6倍左右。这些研究对准确评估中国草地生态系统碳库储量、年变化以及揭示草地在我国陆地生态系统碳循环中的作用有着重要的意义, 但由于估算方法不同, 特别是占到草地生态系统碳库总量90%以上的土壤碳库和地下生物量数据缺乏, 导致不同研究结果差异较大(方精云等, 2010)。

对净生态系统 CO_2 交换(*NEE*)的准确和长期观测是评价生态系统碳源、汇功能的前提。Verma等(1992)、Ham和Knapp (1998)、Dugas等(1999)利用箱式法对北美大草原生长季节生态系统 CO_2 通量的研究表明, CO_2 日吸收速率普遍较高, 最大可达 $-34 \text{ mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Hunt等(2002)对新西兰的丛生草地 CO_2 通量的研究表明, CO_2 日吸收只有 $-5.0 \text{ mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。近几年来随着相关科研工作的开展, 我国学者对不同类型草地生态系统碳通量等方面的研究不断加强, 崔晓勇等(1999)利用透明静态箱法研究内蒙古锡林河流域大针茅(*Stipa grandis*)群落 CO_2 日变化规律时发现, 土壤 CO_2 排放为昼高夜低的特点, 这与张金霞等(2001)对青海金露梅(*Potentilla fruticosa*)高寒草甸、董云社等(2000)对内蒙古羊草(*Leymus chinensis*)草原的研究结果十分吻合。有关土壤呼吸方面的研究, 李凌浩等(2000)采用碱液吸收法对锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究则发现70%的土壤呼吸量变化是由气温和土壤含水量共同决定的, 放牧对土壤呼吸的影响不大。陈全胜等(2004)对典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})与土壤水分的关系的研究, 利用 Q_{10} 指数模型来阐述温度对土壤呼吸的影响, 结

果表明在中国温带草原地区, 温度升高对较湿润区域土壤呼吸的影响大于较干旱区域。

草地生态系统地上/地下生物量季节动态、净初级生产力和土壤有机碳(SOC)等研究相对于NEE的直接观测相对较简便, 对于长时间尺度碳净交换量的变化具有重大意义, 已经有学者针对不同草地生态系统碳库季节和长期放牧的影响进行了研究, 但多数研究集中于传统草原牧区(朴世龙等, 2004; Bai *et al.*, 2012)。暖性草丛作为我国草地类型的重要组成部分, 与传统牧区相比, 水热条件较好, 平均生物量普遍比较大, 与传统牧区的放牧干扰不同, 除放牧之外, 暖性草丛区经受着更多的人类垦殖干扰, 对这一草地类型, 关于碳库现状和固碳速率的研究相对欠缺。

山东省各类草地总面积为163.8万 hm^2 , 其中暖性草丛和灌草丛类面积为92.6万 hm^2 (中华人民共和国农业部畜牧兽医司等, 1994)。山东省泰山药乡小流域属于北方典型暖性草丛区, 结缕草(*Zoysia japonica*)暖性草丛是森林经过破坏后形成的次生植被, 是一种植被的逆行演替现象。由于森林植被连续受到破坏, 原来的植被在短时间内不能自然恢复, 而以多年生结缕草占优势, 并混有黄背草(*Themeda japonica*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)等多年生中生或旱中生草本植物, 间有少量灌木, 形成基本稳定的次生草地类型。定量评价其固碳特征及其影响因素, 并探究山东省典型暖性草丛生态系统碳密度及固碳机制, 可为山东省草地生态系统碳/源汇贡献的定量评估提供参考和依据, 对我国草地生态系统碳源/汇的数据整合及完善全球碳预算等具有十分重要

的意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

按照中国草地资源分类, 山东省属于华北暖温带半湿润半干旱暖性灌草丛区。由于地形和水分分布的差异, 山东天然草地类型可以分为两个大的区域: 鲁西北平原区分布有草甸和盐生植被, 常见有狗牙根(*Cynodon dactylon*)草甸、白茅(*Imperata cylindrica*)草甸、芦苇(*Phragmites australis*)草甸、獐毛(*Aeluropus sinensis*)草甸, 构成盐生植被的主要优势种是怪柳(*Tamarix chinensis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇和白茅等; 另外一个区域是鲁中南低山丘陵和胶东丘陵地带, 植被以暖性草丛和灌草丛类为主, 主要是以黄背草、野古草(*Arundinella anomala*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)为建群种和优势种, 并散生荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等落叶灌木, 这种植被类型的出现的主要原因是次生林被破坏后, 水土流失严重, 土壤瘠薄干旱; 在土层较厚的地方以黄背草、野古草居多, 在土层较薄处以白羊草、结缕草居多。暖性草丛和灌草丛占到山东天然草地总面积的56.5% (中华人民共和国农业部畜牧兽医司等, 1994), 本试验涉及的7个面上调查样点均为典型暖性草丛, 主要用于评估山东暖性草丛碳库储量和碳库结构, 样点位置和优势种组成见表1。面上调查点数据只能反映生态系统碳库现状, 对于生态系统碳通量变化特征的研究需要长期

表1 山东省暖性草丛面上调查点基本特征

Table 1 Characteristics of diffused study sites in warm-temperature tussock in Shandong Province

样地区域 Administrative region	地理坐标 Location	坡向 Slope	平均盖度 Average coverage (%)	主要优势种 Dominant species
东平县 Dongping County	116.30° E 36.02° N	半阳坡 Half sunny slope	80	黄荆+百里香 <i>Vitex negundo</i> + <i>Thymus mongolicus</i>
海阳市 Haiyang City	121.18° E 36.86° N	阳坡 Sunny slope	90	结缕草+野古草 <i>Zoysia japonica</i> + <i>Arundinella anomala</i>
莱西市 Laixi City	120.23° E 37.06° N	阳坡 Sunny slope	95	结缕草+野古草 <i>Zoysia japonica</i> + <i>Arundinella anomala</i>
泰安市 Taishan City	117.09° E 36.34° N	半阳坡 Half sunny slope	90	结缕草+白颖藎草+野古草 <i>Zoysia japonica</i> + <i>Carex duriuscula</i> subsp. <i>Rigescens</i> + <i>Arundinella anomala</i>
栖霞市 Qixia City	121.04° E 37.32° N	阳坡 Sunny slope	88	胡枝子+白颖藎草 <i>Lespedeza bicolor</i> + <i>Carex duriuscula</i> subsp. <i>rigescens</i>
沂水县 Yishui County	118.30° E 35.89° N	阳坡 Sunny slope	70	野古草+鸭跖草 <i>Arundinella anomala</i> + <i>Commelina communis</i>
章丘市 Zhangqiu City	117.61° E 36.56° N	半阳坡 Half sunny slope	75	长芒草+黄荆 <i>Stipa bungeana</i> + <i>Vitex negundo</i>

定位观测数据,因此在面上调查点中选择有代表性的样地作为加强点,用于暖性草丛碳通量日变化和季节变化特征的观测。

山东泰山药乡小流域加强点位于山东省泰安市泰山主峰以北,地理位置 36.28°N , 117.32°E 。该流域东西长12 km,南北宽5 km。流域总面积1 210.4 hm^2 ,海拔730 m。该流域光热资源丰富,属于半湿润大陆性季风气候,夏季多东南风,冬季多西北风,平均风力3–4级;年平均气温 12.1°C ,7月份气温最高,1月份气温最低,绝对最高气温 42.5°C ,绝对最低气温 -28.1°C ;年降水量900–1 000 mm,多集中在6–8月,年蒸发量为414.18 mm。年平均相对湿度82%,无霜期198天;土壤为中性到微酸性山地棕壤,土层厚度15–90 cm,多数在30–50 cm之间,中性偏酸。植被茂密,植物种类繁多,仅木本植物就有43科160余种,林草覆盖率达90%以上,呈垂直分布。随着海拔的升高,可依次见到落叶林、阔叶针叶混交林、针叶林、高山灌草丛等。

1.2 研究方法

1.2.1 山东暖性草丛碳库储量和碳库结构调查

面上调查点在生物量最高的季节进行取样(2012年8月中旬),在研究区选择100 m \times 100 m代表性区域进行取样调查,在其对角线上设置一条100 m样带,样带上设10个1 m \times 1 m草本样方,并按阿拉伯数字排序。编号为偶数的样方设置为草本分种调查样方,测定总盖度、物种平均高度、物种株丛数、活体生物量、凋落物生物量等指标;编号为奇数的样方设置不分种调查样方,测定总盖度、平均高度、活体生物量、凋落物(未分解层和半分解层)生物量等指标。将所有植物样品带回室内称其鲜质量, 65°C 下烘至恒质量,采用粉碎机磨碎样品备用。

生物量碳密度(包括地上活体、凋落物、根系),由单位面积内生物量乘以含碳率得出:

$$POC = D_p \times Biomass_p + D_l \times Biomass_l + D_r \times Biomass_r \quad (1)$$

式中, POC 为单位面积内生物量碳密度,单位为 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$; D_p 和 $Biomass_p$ 表示地上活体植物碳含量(%,下同)和单位面积地上活体生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,下同); D_l 和 $Biomass_l$ 表示凋落物碳含量和单位面积凋落物生物量; D_r 和 $Biomass_r$ 表示根系碳含量和单位面积根系生物量。

土壤碳密度测定采用直径5 cm土钻固定深度法

钻取,取样深度分别为0–5、5–10、10–20、20–30、30–50、50–70和70–100 cm共7层(部分土层全部为砾石分布,以实际取得的土层为计算依据),土壤样品带回室内风干后过2 mm筛,挑出毛细根。取样同时在5号样方附近挖取土壤剖面,采用环刀法分层测定土壤容重,每层重复5次;采用铝盒烘干法测定每层土样的土壤含水量;在剖面上取土样,带回室内风干,用电位法测定土壤pH值。地下生物量根系的取样在奇数样方上进行,采用规格为7 cm的根钻,于每个样方内分别在不同深度(与土样取样深度一致)取3钻混合(共5个重复),用水冲洗土壤中的根系,带回室内在 65°C 下烘至恒质量,作为地下生物量的计算。所有植物和土壤样品利用干烧法进行碳元素含量的测定。

土壤碳密度计算采用刘迎春等(2011)的方法:

$$SOC = 10^4 \times \sum_{i=1}^n (D_i \times \theta_i \times C_i \times (1 - \delta_i)) \quad (2)$$

式中, SOC 为土壤有机碳密度($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$), n 为土层数; D_i 为不同土层的厚度(cm); θ_i 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 为不同土层土壤有机碳的含量(%); δ_i 为对应土层 >2 mm砾石体积含量(%)。

为便于比较,所有碳密度单位最后按单位 $\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 进行核算;生态系统总碳密度为生物量碳密度和土壤碳密度之和。

1.2.2 山东暖性草丛 CO_2 通量变化特征测量

采用静态箱法红外分析仪(LI-840, LI-COR, Lincoln, USA)联用,2012年1月至2013年12月期间,每月测定 NEE 、生态系统呼吸量(R_e)和土壤呼吸量(R_s);测定前至少一周将同化箱底座(规格为50 cm \times 50 cm \times 10 cm)安装到土壤中,根据样地的异质性程度,采用样线法每隔10–15 cm安装一个底座,在样地内共安装10个底座(其中 NEE 和 R_e 共5个重复, R_s 测定5个重复)。同化箱底座高8 cm,一般插入地下5 cm,地上部3 cm。测定频次:生长季节3–10月每月两次(月初和月中旬),非生长季节11月至次年4月每月一次(每月中旬)。每个测定日,进行每间隔3 h的日进程测定(6:00至次日6:00)。生态系统总光合生产力(GEP),通过 NEE 与 R_e 进行计算。

4个碳通量参数的单位均为 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在进行昼夜连续观测的观测日不同时间段的平均值作为日通量平均值,每月不同日期平均值作为月通量平均值。

1.2.3 环境因子监测

环境因子利用泰山森林生态系统定位观测站地面标准气象站观测获得, 监测的环境因子包括: 土壤10 cm深度温度(T_s)、光合有效辐射(PAR)、平均月降水量(P)、大气相对湿度(RH)、10 cm深度土壤含水量(W)、大气温度(T_a)等。两年实验期间的主要环境因子变化见图1。

1.3 数据统计

利用SPSS 16.0进行方差分析和数据最小显著性检验(LSD)(最低显著性水平为0.05)。其中简单相关分析(采用Pearson相关系数)和偏相关分析使用双尾 t 检验, NEE 对环境因子的响应采用逐步回归法和主成分分析法。

2 结果和分析

2.1 山东暖性草丛植被地上/地下及土壤碳密度

7个面上调查点生物量碳密度平均值为6 185.68 $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图2), 分为地上生物量碳、凋落物碳、地下生物量碳3部分; 其中地上生物量碳密度为1 029.25 $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$, 凋落物又分为未分解层和半分解层两部分, 未分解层和半分解层碳密度分别为405.29和491.29 $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$; 地下根系生物量碳密度为4 259.85 $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$; 地上/地下生物量碳(F/C)比值为0.24。土壤碳密度为48 688.59 $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$, 土壤碳密度是生物量碳密度的7.8倍。方差分析表明, 构成碳库的各种组分之间, 除未分解层和半分解层、土壤碳库和总碳库之间差异不显著外, 其他碳库组

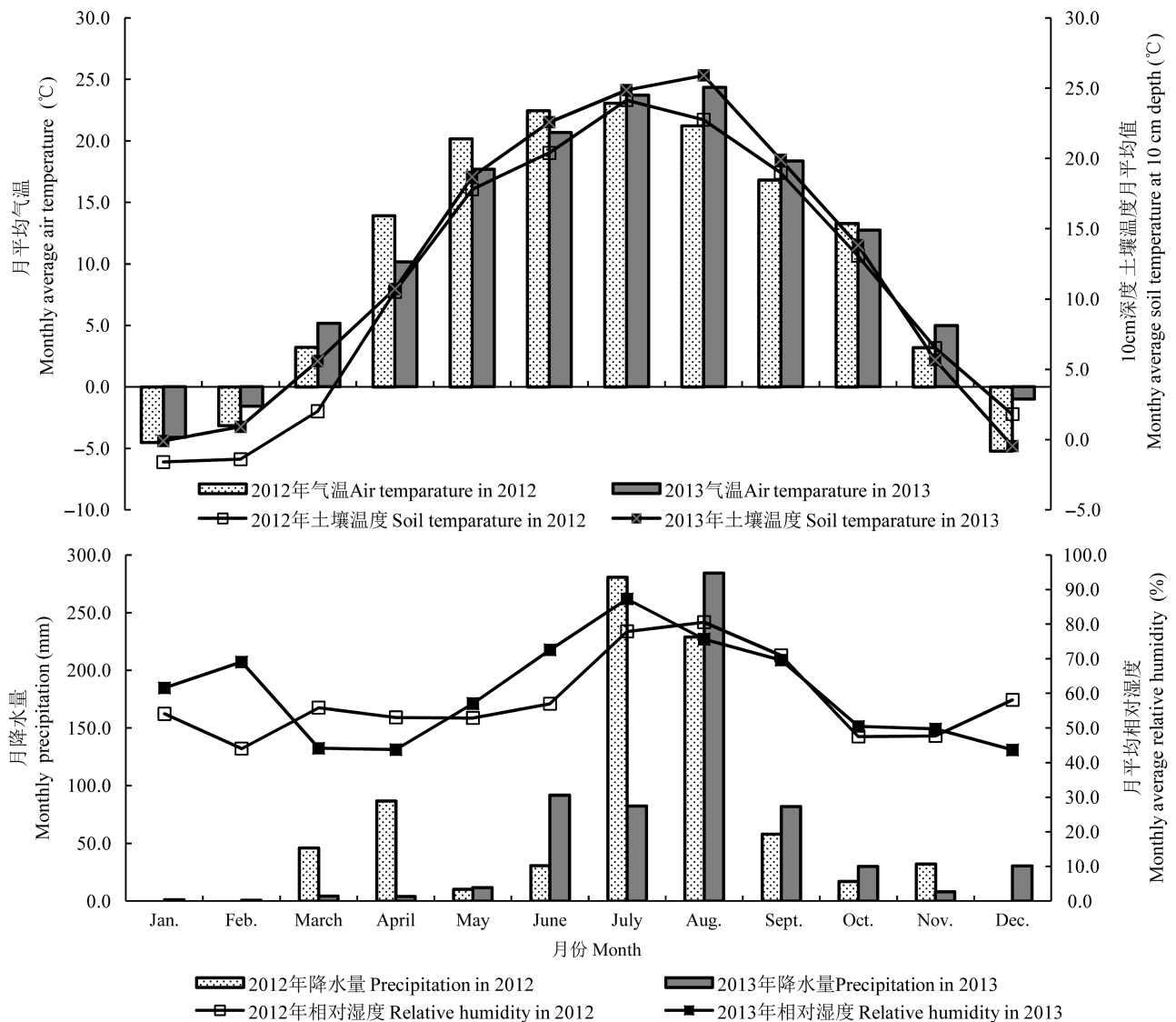


图1 2012–2013年气象要素月动态。

Fig. 1 Monthly dynamics of meteorological variables from 2012 to 2013.

分之间差异显著($p < 0.05$)。山东省暖性草丛生态系统碳密度组分间大小排序为: 土壤碳密度(89%) > 地上/地下生物量碳密度(9%) > 凋落物碳密度(2%)。

按照农业部草业普查数据, 山东暖性草丛总面积 289 613 hm^2 , 以本次暖性草丛碳库结构分析结果进行核算, 山东暖性草丛生态系统碳总储量为 15.88 Tg。

2.2 结缕草暖性草丛生态系统 NEE 、 R_e 、 R_s 和 GEP 的季节变化特征

2.2.1 结缕草暖性草丛生态系统 NEE 的季节动态

结缕草暖性草丛生态系统 NEE 通量随季节动态变化明显(图3), 观测的两个年度尽管在局部月份有差别, 但基本上5–10月 NEE 是负值, 11月至次年4月是正值, 这也反映了暖性草丛源汇转化的季节规律。冬季(1、2和12月份)的 NEE 日均值在0刻度之上, 生态系统处于碳源(CO_2 净排放)状态; 从春季(3月)起 NEE 日平均值开始逐渐降低, 春末(5月份)达到全年第一个吸收峰值, 但2013年5月吸收峰值($-4.46 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)显著高于2012年的同期月份。2012年6月份 NEE 通量显著小于5月份的吸收量; 秋初(9月份) NEE 通量日均值达到全年第二个吸收峰值($-2.12 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 从10月份开始, 结缕草暖性草丛生态系统处于 CO_2 净排放时期。2013年

NEE 变化较为平稳, 全年 NEE 也体现单峰特征, 与2012年有类似的变化规律。2012和2013年泰山小流域暖性草丛 NEE 年平均值分别为 $-0.43 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-0.31 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 都表现为碳汇效应, 2012和2013年度间固碳能力差异较小。

2.2.2 结缕草暖性草丛生态系统 R_e 的季节动态

2012年度, 结缕草暖性草丛 R_e 的年平均值为 $3.61 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值出现在12月($0.74 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 从1月份开始随着 T_a 和 RH 的升高, 草丛生态系统地上及地下部分生理活动增强, R_e 也随着逐渐增大, 4月份达到第一个峰值($4.19 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 夏季草丛进入了旺盛的生长期, 在8月出现最大值($8.89 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 之后随着温度的降低, R_e 开始不断降低, 到2012年12月 R_e 月平均值达到年度最低值 $0.74 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2013年 R_e 的变化规律与2012年类似, 7月份出现明显的单峰呼吸排放峰值, 2013年 R_e 的年平均值为 $3.60 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.3 结缕草暖性草丛生态系统 R_s 的季节动态

2012年土壤呼吸速率在 0.07 – $3.43 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间波动, 全年 R_s 平均值为 $1.19 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值出现在冬季12月($0.07 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

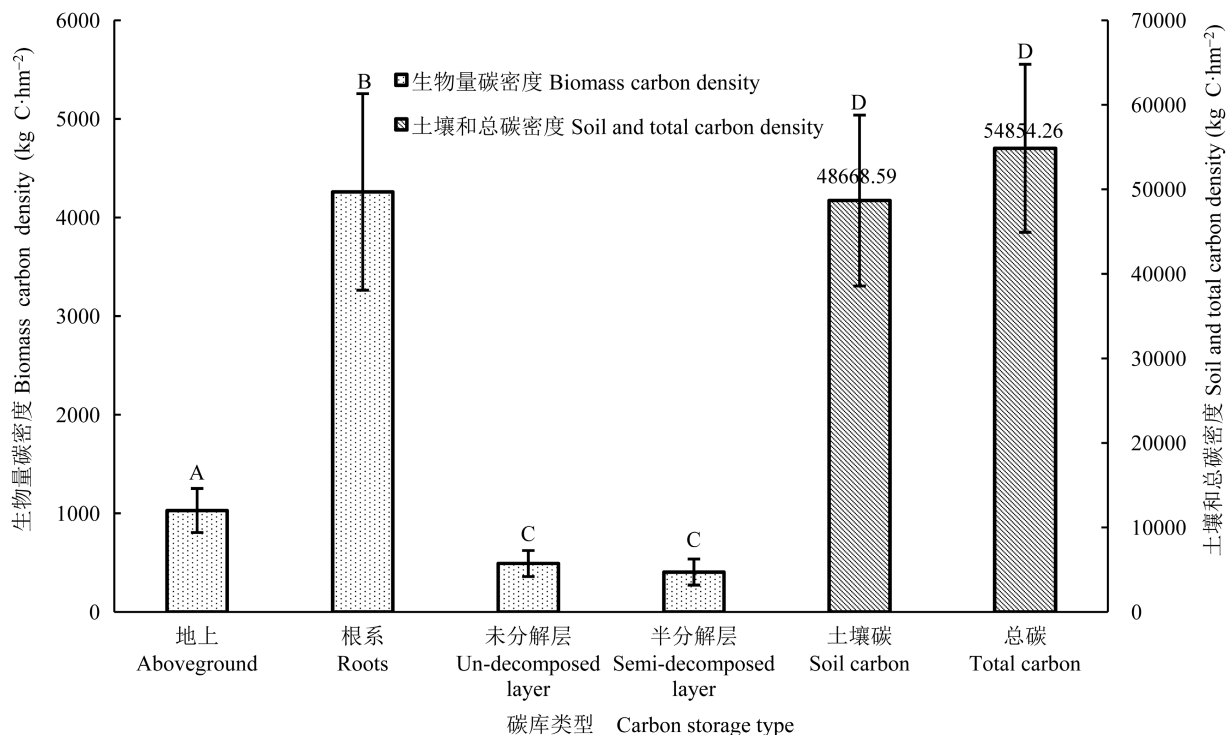


图2 山东省暖性草丛生态系统碳库结构(平均值±标准误差)。不同大写字母表示不同类型碳差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Carbon stock of natural warm-temperature tussock vegetation in Shandong Province (mean \pm SE). Different capital letters indicate significant differences among the various carbon component ($p < 0.05$).

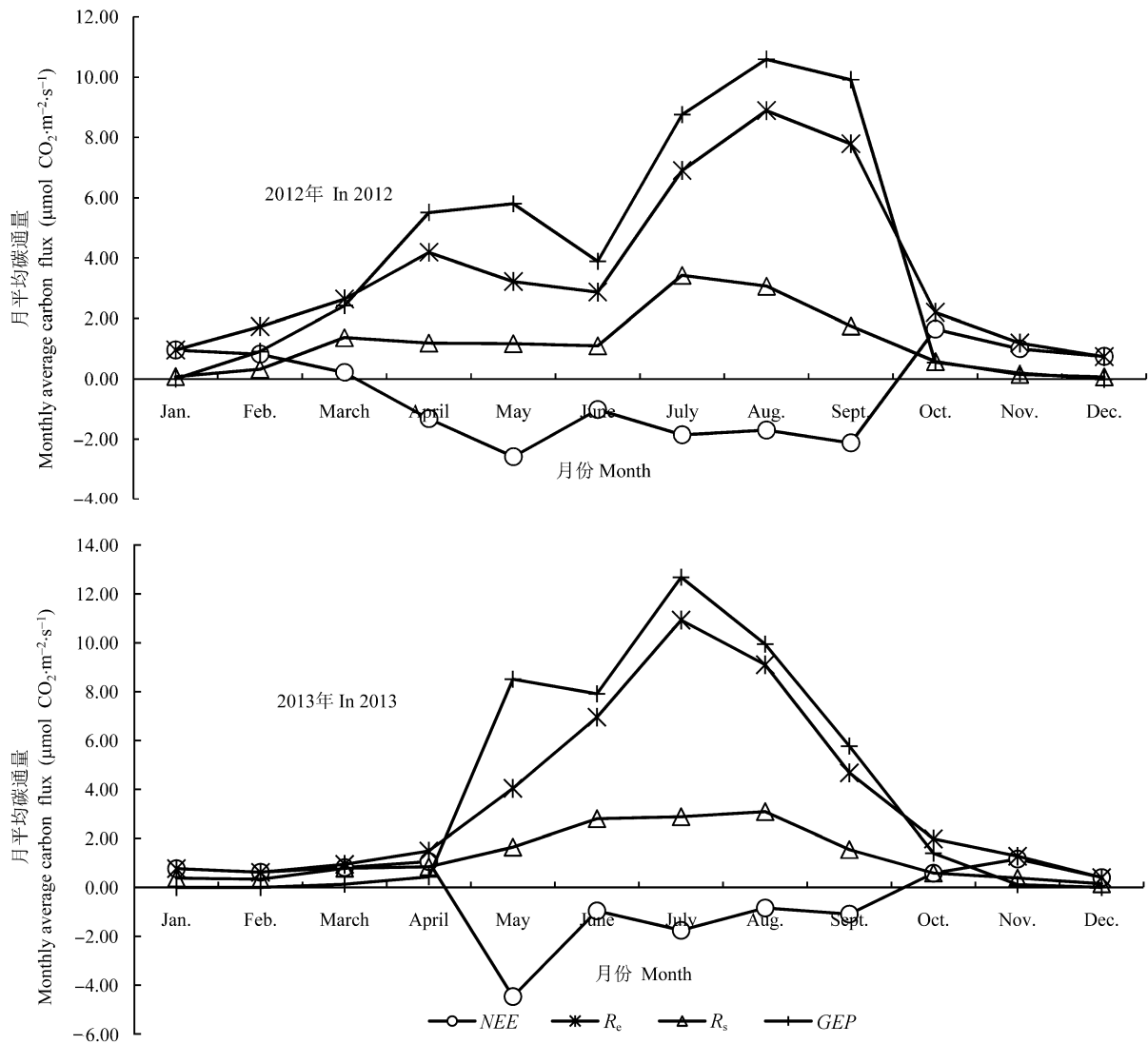


图3 山东省结缕草暖性草丛生态系统净生态系统CO₂交换(NEE)、生态系统呼吸量(R_e)、土壤呼吸量(R_s)和生态系统总光合生产力(GEP)月平均值动态。

Fig. 3 Seasonal dynamics of monthly average value of net ecosystem CO₂ exchange (NEE), ecosystem respiration rate (R_e), soil respiration rate (R_s) and gross ecosystem productivity (GEP) in *Zoysia japonica* warm-temperature tussock ecosystem in Shandong Province.

CO₂·m⁻²·s⁻¹), 最大值出现在7月(3.43 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹) (图3)。最小值出现在冬季主要是由于 T_a 较低, 导致土壤根系和微生物呼吸活动受到抑制。从1月份开始, 随着 T_a 升高, R_s 也逐渐增大, 3月份达到全年第一个高峰期(1.37 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹), 之后呈平稳降低的趋势, 这可能与降雨有关, 因为前期的持续降雨导致土壤含水量增加, 使土壤通透性变差, 土壤气体很难与外界进行气体交换, 夏季7月份达到全年第二个高峰期, 之后随着 T_a 降低, R_s 也随着逐渐递减直到年底12月份(图3)。2013年 R_s 的季节变化与2012年类似, 但变化幅度更平缓, 8月份是全

年的 R_s 的高峰期(3.09 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹), 2013年全年 R_s 平均值为1.29 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹。

2.2.4 结缕草暖性草丛生态系统GEP季节动态

2012年冬季(1-2月份)草丛生态系统GEP维持在0-0.91 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹, 之后逐渐升高, 于5月份达第一个峰值5.80 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹, 然后比较稳定, 8月份到达全年第二个峰值10.59 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹, 之后逐渐降低, 2012年全年GEP的平均值为4.04 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹; 2013年GEP季节变化规律与2012年相同, 与其他通量因子变化规律类似, 7月份为全年的总光合生产峰值, 2013年GEP全年平均

值为 $3.91 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 结缕草暖性草丛生态系统NEE对环境因子的响应

分析NEE季节变化的主导环境因子时，选择PAR、 T_a 、RH、 T_s 、W、饱和水汽压差(VPD) 6个因子的日平均值，对这些环境因子进行相关性分析表明，各环境因子间存在着显著或极显著的相关关系(表2)，为了进一步解释各因子对NEE的影响作用大小，对这些环境因子进行主成分分析，得出了各因子间因子载荷矩阵(表3)和贡献率及特征值(表4)。结合表3、表4可知，第一主成分因子主要因子分量包

表2 环境因子之间的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficients matrix among different environmental factors

	PAR	T_a	RH	T_s	W	VPD
PAR	1	0.58*	0.22	0.57*	-0.34	0.64*
T_a		1	0.63*	0.94**	0.30	0.59*
RH			1	0.78**	0.70*	-0.21
T_s				1	0.44	0.41
W					1	-0.46
VPD						1

PAR, 光合有效辐射; T_a , 大气温度; RH, 大气湿度; T_s , 10 cm土壤温度; W, 10 cm土壤含水量; VPD, 饱和水汽压差。

PAR, photosynthetic active radiation; T_a , atmospheric temperature; RH, atmospheric humidity; T_s , soil temperature at 10 cm depth; W, soil water content at 10 cm depth; VPD, vapor pressure deficit. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

表3 净生态系统CO₂交换(NEE)的影响因素主成分分析因子负荷矩阵

Table 3 Principal component analysis factor matrix of influencing net ecosystem CO₂ exchange (NEE)

因素	第一主成分	第二主成分
Factor	The 1st principal component	The 2nd principal component
PAR	0.181	0.827
T_a	0.710	0.651
RH	0.965	-0.050
T_s	0.822	0.515
W	0.774	-0.441
VPD	-0.134	0.940

PAR, 光合有效辐射; T_a , 大气温度; RH, 大气湿度; T_s , 10 cm土壤温度; W, 10 cm土壤含水量; VPD, 饱和水汽压差。

PAR, photosynthetic active radiation; T_a , atmospheric temperature; RH, atmospheric humidity; T_s , soil temperature at 10 cm depth; W, soil water content at 10 cm depth; VPD, vapor pressure deficit.

表4 净生态系统CO₂交换(NEE)的影响因素的主成分分析特征值和贡献率

Table 4 The eigenvalue and percent of variance of principal component analysis on net ecosystem CO₂ exchange (NEE) influencing factor

主成分	主要因子分量	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
Principal component	Main factor	Eigenvalue	Percent of variance	Total percent of variance
第一主成分 The 1st principal component	T_a , RH, T_s , W	3.672	45.895	45.895
第二主成分 The 2nd principal component	PAR, T_a , VPD	2.474	30.930	76.825

PAR, 光合有效辐射; RH, 大气湿度; T_a , 大气温度; T_s , 10 cm土壤温度; VPD, 饱和水汽压差; W, 10 cm土壤含水量。

PAR, photosynthetic active radiation; RH, atmospheric humidity; T_a , atmospheric temperature; T_s , soil temperature at 10 cm depth; VPD, vapor pressure deficit; W, soil water content at 10 cm depth.

括 T_a 、RH、 T_s 、W，并且载荷绝对值均在0.7以上，说明第一主成分主要是反映研究区热量、水分和风速指标条件的综合因子，其贡献率为45.90%；第二主成分中PAR、 T_a 和VPD等指标的载荷明显高于其他因子，说明它们主要是反映研究区的光照、热量和蒸腾的综合气象因子，其贡献率为30.93%。主成分分析中一般认为因子累计贡献率达到70%以上时才能反映事物的基本面貌。本试验中，热量、水分相关因素构成的(表4)第一主成分贡献率为45.90%，加上光照、温度和VPD的第二主成分的累计贡献达到了76.83%，由此可以说明影响NEE季节动态的因素很多，其中温度、水分和光照共同对结缕草暖性草丛生态系统NEE季节动态变化起主导作用。进一步对结缕草暖性草丛生态系统NEE季节变化与各环境因子进行偏相关分析，表明NEE与RH、 T_s 和W呈极显著负相关关系，与 T_a 呈显著负相关关系(表5)。

3 结论和讨论

3.1 山东省暖性草丛生态系统碳密度分布特征

影响草丛生态系统植被碳储量变化的因素有环境因子和人类活动(放牧、刈割和火烧)两个方面(齐玉春等, 2003)。本研究中植被碳储量为 $188.91 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ，低于程积民等(2011)对黄土高原草地植被与土壤固碳量研究中植被碳储量的结果，主要是由于黄土高原草地植被地下根系生物量比较大，从而增加了植被碳储量。

凋落物碳储量是联系草丛植被碳储量和土壤碳储量的重要中间环节。在分解的过程中，一部分碳储量以腐殖质的形式进入土壤碳库中，另一部分以CO₂的形式返回到大气中。对凋落物的分解速率和机制的研究有助于进一步了解草地生态系统碳循环的机制，这是今后重要的研究方向。山东省暖性草丛生态系统半分解层的碳密度与未分解层的碳密度差异不明显，半分解层在分解的过程中，与未分解层混合，取样难以清晰地区分也是造成差异较小的

表5 净生态系统CO₂交换(NEE)均值与环境因子的偏相关分析系数
Table 5 Biased correlation coefficient of the mean net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and environmental factor

	PAR	T _a	RH	T _s	W	VPD
NEE	0.517	-0.737*	-0.802**	-0.808**	-0.755**	-0.276

PAR, 光合有效辐射; T_a, 大气温度; RH, 大气湿度; T_s, 10 cm土壤温度; W, 10 cm土壤含水量; VPD, 饱和水汽压差。
PAR, photosynthetic active radiation; T_a, atmospheric temperature; RH, atmospheric humidity; T_s, soil temperature at 10 cm depth; W, soil water content at 10 cm depth; VPD, vapor pressure deficit.

原因, 但就含碳率而言, 由于分解过程不断地释放CO₂, 导致未分解层平均含碳率(39.6%)显著高于半分解层(22.4%)。

山东省暖性草丛生态系统土壤碳库密度为48.67 t·hm⁻², 土壤碳储量占草丛生态系统碳储量的89%, 单位面积土壤碳密度是内蒙古典型草原土壤碳密度的2–3倍(何念鹏等, 2011), 但与中国东部地区同一类型的土壤碳储量(114.60 t·hm⁻²)(王绍强等, 2000)相比, 本研究结果土壤碳密度偏低; 差别较大的原因可能包括: 山东暖性草丛大多位于鲁中南低山丘陵和胶东丘陵地带土石山区, 该地区土层较薄; 本次调查的7个样点的土壤处理过程中, 将土壤中直径大于2 mm的砾石全部去掉, 也是导致土壤碳储量偏低的重要原因。

3.2 结缕草暖性草丛碳通量的影响因素

结缕草暖性草丛生态系统NEE的季节动态整体上表现为夏低冬高, 从4月份开始结缕草草丛生态系统表现为吸收CO₂, 直到10月末开始表现为CO₂净排放状态, 与内蒙古羊草草原NEE的平均值的季节变化(董云社等, 2000)相似, 但碳汇效应比内蒙古草原提前1个月, 碳源效应延后1个月。羊草生态系统从5月中旬开始才吸收CO₂, 至9月末就表现为CO₂净排放状态; 加强点定位观测的两个年度, 2012年NEE峰值月份要显著低于2013年, 主要是由于2012年5–6月气候干燥, 降水偏少, 部分结缕草草丛进入枯黄期, 使生态系统光合作用降低, 从而进一步导致吸收CO₂的能力减弱; 暖性草丛两年的NEE月平均碳吸收峰值分别为-2.58 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹和-4.46 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹, 即-160.49 g C·m⁻²·a⁻¹和-115.71 g C·m⁻²·a⁻¹, 平均比北方温带封育草原的固碳速率84.2 g C·m⁻²·a⁻¹(何念鹏等, 2011)高64%。日本的芒草草地(Li *et al.*, 2003)和美国俄克拉荷马州暖季型草原(Suyker & Verma, 2001)的NEE季节动态变化也具有上述草原的变化特征, 但是不同的是, 这两个

地方在生长季表现出更强的碳吸收能力, 这可能与这些区域有更高的水热条件支持有关。

草地生态系统NEE的昼夜动态与PAR的变化明显相关, 不同的草地类型都发现NEE随着PAR的增大绝对值逐渐增大, 在中午12:00左右达到吸收峰值(Sims & Bradford, 2001; 刘冉等, 2009); 本实验NEE日进程变化规律表明, PAR是结缕草暖性草丛生态系统NEE昼夜动态变化的主要因子之一, 3月份PAR能单独解释NEE日变化的74%。也有学者认为, NEE的昼夜变化主要受PAR和T_a的共同控制, NEE的变化与PAR的响应的相关性在下午减弱, 主要因为下午的高温促进了生态系统的呼吸作用, 造成NEE值降低(Li *et al.*, 2005)。本研究中2012年6月NEE平均值显著地降低, 可能与6月份降雨偏少(仅不到5月份降雨量的1/8)有关, 严重影响群落光合能力, 导致NEE、GEP、R_e都有明显的降低; 结缕草暖性生态系统NEE与环境因子的逐步回归中发现, T_a和VPD能更好地解释NEE的昼夜变化, 全年各观测值与环境因子的多元逐步回归分析中, 这两个指标分别同时进入到方程中, 这也说明T_a和VPD是结缕草生态系统NEE季节变化的主要因素。

参考文献

- Bai YF, Wu JG, Clark CM, Pan QM, Zhang LX, Chen SP, Wang QB, Han XG (2012). Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. *Journal of Applied Ecology*, 49, 1204–1215.
- Chen QS, Li LH, Han XG, Yan ZD, Wang YF, Zhang Y, Xiong XG, Chen SP, Zhang LX, Gao YZ, Tang F, Yang J, Dong YS (2004). Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 831–836. [陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹, 王艳芳, 张焱, 熊小刚, 陈世苹, 张丽霞, 高英志, 唐芳, 杨晶, 董云社(2004). 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. *生态学报*, 24, 831–836.]
- Cheng JM, Cheng J, Yang XM (2011). Grassland vegetation and soil carbon sequestration in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 26, 401–411. [程积民, 程杰, 杨晓梅 (2011). 黄土高原草地植被与土壤固碳量研究. *自然资源学报*, 26, 401–411.]
- Cui XY, Wang YF, Du ZC (1999). Primary study on soil respiration of main plant communities in typical grasslands in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 7, 245–250. [崔晓勇, 王艳芬, 杜占池 (1999). 内蒙古典型草原主要植物

- 群落土壤呼吸的初步研究. 草地学报, 7, 245–250.]
- Department of Animal Husbandry and Veterinary, Institute of Grassland of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Commission for Integrated Survey of Natural Resources of the Chinese Academy of Sciences (1994). *Date on Grassland Resources of China*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. [中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 中国农业科学院草原研究所, 中国科学院自然综合考察委员会 (1994). 中国草地资源数据集. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Dong YS, Zhang S, Qi YC, Chen ZZ, Geng YB (2000). CO₂, N₂O, CH₄ flux and daily variation of the typical grassland in Inner Mongolia. *Science Bulletin*, 45, 318–322. [董云社, 章申, 齐玉春, 陈佐忠, 耿远波 (2000). 内蒙古典型草地 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化. 科学通报, 45, 318–322.]
- Dugas WA, Heuer ML, Mayeux HS (1999). Carbon dioxide fluxes over Bermuda grass, native prairie, and sorghum. *Agriculture and Forest Meteorology*, 93, 121–139.
- Fan JW, Zhong HP, Harris W, Yu G, Wang SQ, Hu ZM, Yue YZ (2008). Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 86, 375–396.
- Fang JY, Yang YH, Ma WH, Mohammad A, Shen HH (2010). Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Scientia Sinica Vitae*, 40, 566–576. [方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花 (2010). 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 40, 566–576.]
- Ham JM, Knapp AK (1998). Fluxes of CO₂, water vapor, energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source. *Agriculture and Forest Meteorology*, 89, 1–14.
- He NP, Han XG, Yu GR (2011). Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 4270–4276. [何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞 (2011). 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响. 生态学报, 31, 4270–4276.]
- Hunt JE, Kelliher FM, McSeveny TM, Byers JN (2002). Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 65–82.
- Li LH, Wang QB, Bai YF, Zhou GS, Xing XR (2000). Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River Basin as affected by over-grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica*, 24, 680–686. [李凌浩, 王其兵, 白永飞, 周广胜, 邢雪荣 (2000). 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. 植物生态学报, 24, 680–686.]
- Li SG, Asanuma J, Eugster W, Kotani A, Liu JJ, Urano T, Oikawa GD, Oyunbaatar D, Sugita M (2005). Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, 11, 1941–1955.
- Li SG, Lai CT, Yokoyama T (2003). Carbon dioxide and water vapor exchange over a *Miscanthus* type grassland: Effects of development of the canopy. *Ecological Research*, 18, 661–675.
- Liu R, Wang XQ, Tang LS, Li Y (2009). Seasonal variation in water, heat and CO₂ fluxes and its driving forces over a saline desert. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 67–75. [刘冉, 王勤学, 唐立松, 李彦 (2009). 盐生荒漠地表水热与二氧化碳通量的季节变化及驱动因素. 生态学报, 29, 67–75.]
- Liu Z, Guan D, Wei W, Davis SJ, Ciais P, Bai J, Peng S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G (2015). Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature*, 524, 335–338.
- Ma WH, Han M, Lin X, Ren YL, Wang ZH, Fang JY (2006). Carbon storage in vegetation of grasslands in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(3), 192–195. [马文红, 韩梅, 林鑫, 任艳林, 王志恒, 方精云等 (2006). 内蒙古温带草地植被的碳储量. 干旱区资源与环境, 20(3), 192–195.]
- Ni J (2002). Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 50, 205–218.
- Piao SL, Fang JY, He JS, Xiao Y (2004). Spatial distribution of grassland biomass in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 491–498. [朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉 (2004). 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 28, 491–498.]
- Qi YC, Dong DY, Geng YB, Yang XH, Geng HL (2003). The progress in the carbon cycle researches in grassland ecosystem in China. *Progress in Geography*, 22, 342–352. [齐玉春, 董云社, 耿元波, 杨小红, 耿会立 (2003). 我国草地生态系统碳循环研究进展. 地理科学进展, 22, 342–352.]
- Ren W, Wang QF, Liu YH, He NP, Liu YC, F C, Yu GR (2011). Certified carbon inventory methods of carbon sequestration rate and potential in terrestrial ecosystem at region scale and their uncertainty analysis. *Progress in Geography*, 30, 795–804. [任伟, 王秋凤, 刘颖慧, 何念鹏, 刘迎春, 付超, 于贵瑞 (2011). 区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力定量认证方法及其不确定性分析. 地理科学进展, 30, 795–804.]
- Sims PL, Bradford JA (2001). Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109, 117–134.
- Suyker AE, Verma SB (2001). Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tall grass prairie. *Global Change Biology*, 7, 279–289.
- Verma SB, Kim J, Clement RJ (1992). Momentum, water vapor and carbon dioxide exchange at a centrally located prairie site during FIFE. *Journal of Geophysical Research*, 97, 18629–18639.

- Wang QF, Liu YH, He NP, Fang HJ, Fu YL, Yu GR (2012). Demands and key scientific issues in the synthesis research on regional terrestrial ecosystem carbon budget in China. *Progress in Geography*, 31, 78–87. [王秋凤, 刘颖慧, 何念鹏, 方华军, 伏玉玲, 于贵瑞 (2012). 中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求与重要科学问题. 地理科学进展, 31, 78–87.]
- Wang SQ, Zhou CH, Li KR, Zhu SL, Huang FH (2000). Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 55, 533–544. [王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红 (2000). 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 55, 533–544.]
- Yu G R, Fu YL, Sun XM, Wen XF, Zhang LM (2006). Progress and development of the China network of the terrestrial ecosystem (ChinaFLUX). *Science in China Series D*, 36(Suppl. 1), 1–21. [于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 温学发, 张雷明 (2006). 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的研究进展及其发展思路. 中国科学: D辑, 36(增刊1), 1–21.]
- Yu GR, Wang QF, Zhu XJ (2011). Methods and uncertainties in evaluating the carbon budgets of regional terrestrial ecosystems. *Progress in Geography*, 30, 103–113. [于贵瑞, 王秋凤, 朱先进 (2011). 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性. 地理科学进展, 30, 103–113.]
- Zhang JX, Cao GM, Zhou DW, Zhao XQ, Zhou XM (2001). Diel and seasonal changes of carbon dioxide emission from mollic-cryic cambisols on degraded grassland. *Acta Pedologica Sinica*, 38, 31–40. [张金霞, 曹广民, 周党卫, 赵新全, 周兴民 (2001). 退化草地暗沃寒冻雏形土CO₂释放的日变化和季节动态. 土壤学报, 38, 32–40.]
- 责任编辑: 白永飞 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答