

青藏高原纳木错高寒草甸生态系统碳交换对多梯度增水的响应

耿晓东^{1,2} 旭日^{1,3*} 刘永稳^{1,3}

¹高寒生态学与生物多样性重点实验室, 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

摘要 高寒草甸是青藏高原的主要草地类型, 对青藏高原生态系统碳收支具有重要的调节作用。目前, 有关高寒草甸生态系统碳交换对气候变化的响应所知甚少, 尤其是降水变化会如何影响高寒草甸碳交换过程的相关研究非常匮乏。该文作者于2013和2014年的生长季(5–9月)在青藏高原纳木错地区高寒草甸进行多梯度人工增水实验, 设置对照和5个水分添加梯度, 分别增加0%、20%、40%、60%、80%和100%的降水, 以研究高寒草甸生态系统在不同降水量条件下的碳交换变化。增水处理后, 各处理梯度之间的土壤温度没有显著差异, 而土壤含水量在不同增水处理后出现显著变化, 相对于对照, 增水幅度越大, 对应的土壤含水量越高。综合2013和2014年的观测结果, 高寒草甸生态系统整体表现为碳吸收, 在20%增水处理中, 净生态系统碳交换(*NEE*)达到最大值, 随着模拟的降水梯度进一步增加, *NEE*逐渐下降; 增水处理对生态系统呼吸(*ER*)无显著影响; 总生态系统生产力(*GEP*)的变化趋势与*NEE*一致, 即随着增水梯度增大, *GEP*先增加, 并在增水20%处理达到最大值, 随后*GEP*开始降低。研究表明, 在高寒草甸生态系统, 水分是影响*GEP*和*NEE*的重要因素, 对*ER*影响较弱; 未来适度的增水(20%–40%)能促进高寒草甸生态系统对碳的吸收。

关键词 碳交换; 增水; 高寒草甸; 青藏高原

耿晓东, 旭日, 刘永稳 (2018). 青藏高原纳木错高寒草甸生态系统碳交换对多梯度增水的响应. 植物生态学报, 42, 397–405. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0395

Responses of ecosystem carbon exchange to multi-level water addition in an alpine meadow in Namtso of Qinghai-Xizang Plateau, China

GENG Xiao-Dong^{1,2}, Xu-Ri^{1,3*}, and LIU Yong-Wen^{1,3}

¹Key Laboratory of Alpine Ecology and Biodiversity, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract

Aims Alpine meadow is widely distributed in the Qinghai-Xizang Plateau, playing an important role in regulating the regional carbon budget. Over the Qinghai-Xizang Plateau, precipitation generally shows an increasing trend during past the several decades, and is projected to increase during the 21st century. Alpine meadow is very susceptible to such climate change, but it remains unclear how its ecosystem carbon exchange responses to precipitation change. In this study, we aim to clarify the effects of altered precipitation on ecosystem carbon exchange in the alpine meadow by conducting a manipulative field experiment.

Methods We conducted a precipitation manipulation experiment at an alpine meadow site in the Namtso area of central Qinghai-Xizang Plateau during 2013 to 2014. A total of six treatments were established, with levels of water addition set for 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%, respectively, of equivalent increases in precipitation. We investigated the effects of water addition on gross ecosystem production (*GEP*), ecosystem respiration (*ER*), net ecosystem carbon exchange (*NEE*), and environmental conditions during the growing season.

Important findings The increasing water addition substantially increased soil moisture, but had no significant effect on soil temperature. Both *GEP* and *NEE* significantly increased with water addition equivalent to 20% of

收稿日期Received: 2015-11-04 接受日期Accepted: 2017-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(41175128和41575152)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05020402和XDA05050404-3-2)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41175128 and 41575152) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05020402 and XDA05050404-3-2).

* 通信作者Corresponding author (xu-ri@itpcas.ac.cn)

increases in precipitation, but were suppressed with further increases in the level of water addition. No significant difference was detected in *ER* across the water addition treatments. Our study suggests that: 1) The change in soil moisture significantly affected *NEE* and *GEP* but had a weak effect on *ER* in the alpine meadow; 2) CO_2 sequestration in the alpine meadow could be stimulated by moderate increases (e.g. 20%–40%) in precipitation.

Key words carbon exchange; water addition; alpine meadow; Qinghai-Xizang Plateau

Geng XD, Xu-Ri, Liu YW (2018). Responses of ecosystem carbon exchange to multi-level water addition in an alpine meadow in Namtso of Qinghai-Xizang Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 397–405. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0395

陆地生态系统碳交换过程包括总生态系统生产力(*GEP*)和生态系统呼吸(*ER*), 两者平衡的结果为净生态系统碳交换(*NEE*)。水分是陆地生态系统碳循环过程的重要驱动因子(Reichstein *et al.*, 2013; Williamson, 2013)。大量研究揭示增加水分促进陆地生态系统*GEP*和*ER* (Wu *et al.*, 2011), *NEE*是这两个过程平衡后的结果, 决定了陆地生态系统对大气 CO_2 的吸收能力。

青藏高原被称作“地球第三极”, 平均海拔4 000 m以上, 面积约257万 km^2 , 占中国陆地面积的26.8%左右(张镱锂等, 2002)。过去几十年来, 青藏高原降水量整体上表现为增加(Gao *et al.*, 2009; 杨凯等, 2010)。其中, 生长季降水量每10年增加14%, 增幅高于非生长季(Piao *et al.*, 2010)。模型预测认为, 未来青藏高原降水仍以增加为主, 并将出现更多的极端气候(张人禾等, 2015)。总体上, 青藏高原未来将变得更加湿润(Li *et al.*, 2010)。

高寒草甸生态系统是青藏高原重要的草地生态系统类型, 约占青藏高原总面积的35% (Zheng & Zhu, 2000)。受气候变化影响, 20世纪末青藏高原从较弱的碳排放或碳中和转变为碳吸收(Zhuang *et al.*, 2010), 其中高寒草甸贡献了较大比例的碳吸收(约89.33%), 是青藏高原重要的碳汇(Yan *et al.*, 2015)。研究表明, 在青藏高原高寒草甸, 降水是生态系统碳交换的主要驱动因子(Hu *et al.*, 2013)。在青藏高原海北地区的观测结果(张法伟等, 2008)表明降水强度对日间*NEE*影响较弱, 但可降低夜间*ER*; 而那曲地区的研究结果表明, 增水20%的情况下, *GEP*和*ER*均升高, *GEP*升高的幅度高于*ER*, 因而降水增加促进了高寒草甸的*NEE* (干珠扎布, 2013), 当雄地区的观测结果(Fu *et al.*, 2009)表明, 降水造成的土壤有效水分变化是影响碳交换的主要因素。因此, 未来的降水变化将对高寒草甸碳交换产生重要影响。

高寒草甸在青藏高原分布广泛, 而目前有关高

寒草甸的降水变化与碳交换关系的研究较少, 且主要集中在增水20%左右, 更大幅度的降水增加对碳交换具有怎样的影响? 相关研究较为匮乏。我们在纳木错高寒草甸设置了6个梯度人工增水实验(最高增水100%), 获取青藏高原中部高寒草甸碳交换的观测数据, 探究未来不同尺度降水量增加的情况下, 纳木错高寒草甸碳交换的变化, 以及高寒草甸碳交换对降水增加的响应是否存在阈值。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究依托中国科学院纳木错多圈层综合观测研究站(30.77° N, 90.99° E, 海拔4 730 m, 以下简称纳木错站), 2009–2013年生长季日平均温度为7.13 °C, 2009、2010、2011、2012和2013年年降水量分别为327、494、402、312和397 mm。研究样地位于青藏高原当雄县念青唐古拉山北麓与纳木错湖南岸之间(30.73° N, 91.02° E), 为典型高寒草甸生态系统, 海拔4 900 m, 距离纳木错站西南约10 km, 2012–2013年生长季日平均温度7.5 °C, 2012和2013年年降水量分别为311和489 mm (Wei *et al.*, 2015)。高寒草甸地上生物量为 $89.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 0–10 cm土壤有机碳含量为 $29.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 土壤全氮值为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 土壤pH值为7.4 (刘永稳, 2014)。

1.2 试验设计

在高寒草甸研究样地设置增水0% (对照)、增水20%、增水40%、增水60%、增水80%、增水100%共6个梯度的水分处理, 每个处理设置4个重复(图1)。每个重复的小区域内6个不同处理装置均随机分布。图1表示增水处理在整个样地的位置以及分布情况, 不代表各不同处理的实际位置。采用立方体不锈钢集雨装置收集样地附近的雨水, 通过带孔橡胶管均匀洒入样地, 以此增加样地的实际降水量。例如, 对于20%增水处理, 集雨装置的有效集雨面积为处理样地面积的20%, 因此降水结束后, 该处理

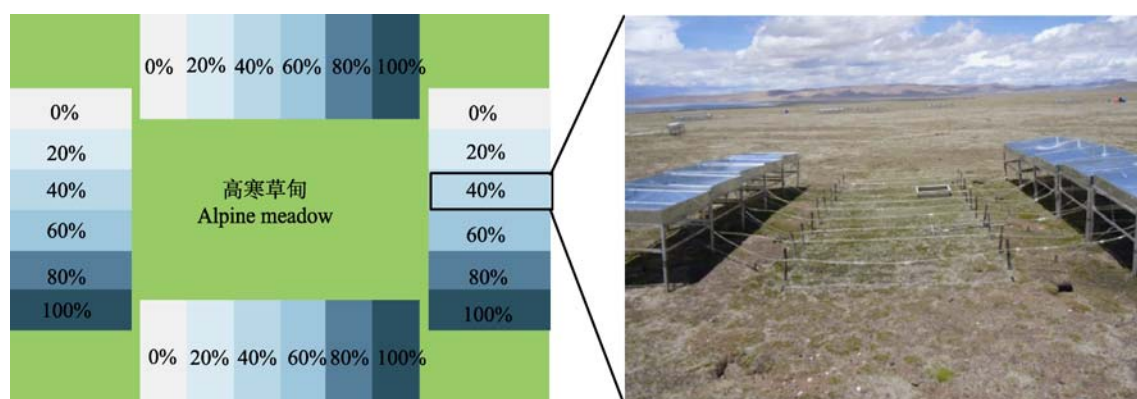


图1 增水样地设计分布与增水装置现场。0%–100%表示降水增加的百分比。

Fig. 1 Layout of water addition treatments and of the field experimental site. Values 0%–100% represent the percentage of increases in precipitation.

样地可以得到额外的20%的降水, 其余处理以此类推。在每个处理样地扣入一个正方形不锈钢底座(50 cm × 50 cm), 用以观测CO₂通量。在2012年冬季完成整套实验装置的安装, 并于2013年8月14日和16日开始进行观测, 2014年分别在7月14日、19日、25日、31日, 8月2日、17日、18日, 9月6日和8日进行观测。

1.3 数据观测处理

采用红外CO₂分析仪(LI-840, LI-COR, Lincoln, USA)观测不同处理样地的NEE和ER。观测时间为北京时间10:00到12:00, 此时段当地碳吸收通常达到最大值(徐玲玲等, 2005)。

1.3.1 NEE测定

将可透光线塑料箱(50 cm × 50 cm × 50 cm, 箱有5个面, 箱内有2个电动小型风扇扣在底座上, 用铁夹固定, 通过空气导管连接箱内与红外分析仪, 观测时打开空气泵与风扇, 空气泵可输送箱内空气样本进入分析仪, 风扇可加速箱内空气混合。分析仪每秒记录一次箱内CO₂浓度, 记录约120 s即完成一次观测。

1.3.2 ER测定

完成NEE观测后, 从底座上移开明箱, 待箱内通风至空气基本与大气本底值接近时, 扣于底座上固定, 并罩上遮光布, 打开红外分析仪, 记录约120 s, 记录频率同样是每秒1次。完成数据观测后, 参考Jasoni等(2005)的文献, NEE和ER的计算公式如下:

$$Flux = \frac{V \times P \times (1000 - W)}{R \times S \times (T + 273)} \times \frac{dC'}{dt}$$

Flux表示NEE和ER的通量(μmol·m⁻²·s⁻¹); V是箱内所包含的气室体积(m³); P是观测时箱内平均大气压

(kPa); W是观测时箱内平均水汽分压(mmol·mol⁻¹); R为标准气体常数(8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹); S是底座面积(m²); T是观测期间箱内平均气温(°C); C'是经过水汽校正的CO₂浓度, C' = C/(1 - W/1000), C是红外分析仪直接观测时记录的箱内CO₂浓度(μmol·mol⁻¹); dC'/dt是箱内CO₂浓度随时间变化的速率。GEP的计算公式为GEP = -NEE + ER (Flanagan *et al.*, 2002)。

1.4 气象数据获取

在每一个处理样地中各埋设一个微型环境气象记录仪HOBO (H21, Onset Corp, Pocasset, USA), 其2个探头埋入处理样地地下5 cm处, 记录土壤温度和土壤体积含水量的动态变化。使用雨量筒(RG-3, Onset, Pocasset, USA)收集降水信息; 同时利用电子温度计(JM-624, 今明仪器有限公司, 天津)和简易手持湿度计(Delta-T Devices, Cambridge, UK)测定土壤5 cm深度的温度和体积含水量。

1.5 统计分析

采用单因素方差分析, 检验NEE、GEP、ER、土壤温度以及水分在处理之间的差异显著性。统计分析采用SPSS 19.0完成, 图表使用Origin 9.1绘制。

2 结果

2.1 降水与梯度增水处理效应

从生长季的降水分布来看, 2013年降水主要集中在8月上半月和9月, 全年降水量为489 mm; 2014年生长季降水主要集中在7月底和8月下旬, 全年降水量为320 mm。

2013和2014年的HOBO数据记录了土壤含水量(本文指代土壤体积含水量)对降水变化的响应, 基本上, 降水量较大时对应的土壤含水量也较大。多

梯度增水处理之间的土壤含水量出现差异(图2)。但是微型自动气象站只有一个水分探头, 所测数据为一个固定样点的土壤含水量动态变化, 在代表性上存在缺陷, 如2014年8月18日到23日增水20%处理的土壤含水量出现异常变化, 因此在碳交换观测的同时, 使用手持湿度计对各处理样地的土壤含水量进行多点重复测量。根据湿度计的数据, 2013年各处理之间土壤含水量由低到高依次是: 增水20%、对照、增水40%、增水60%、增水80%、增水100%; 2014年各处理土壤含水量由低到高依次是: 对照、增水20%、增水40%、增水60%、增水80%、增水100% (图3A、3B)。

2013和2014年多梯度增水处理后, 各处理的土壤含水量发生显著变化($p < 0.05$)。2013年, 较之对照, 增水20%、增水40%、增水60%、增水80%、增水100%导致土壤含水量分别增加-7.46%、2.75%、16.67%、25.35%、32.85%; 2014年, 较之对照, 增水20%、增水40%、增水60%、增水80%、增水100%

后, 土壤含水量分别增加3.33%、15.62%、17.87%、20.35%、22.32%。线性拟合的结果表明, 随着模拟增水量的增加, 总体上土壤含水量呈持续增加的趋势(图3A、3B)。

2013年, 对照、增水20%、增水40%、增水60%、增水80%、增水100%等6个增水处理样地生长季平均地下5 cm土壤温度分别为10.21、10.29、10.34、10.41、10.18和9.87 °C; 由于微型自动气象站(HOBO)出现故障, 2014年增水60%处理土壤温度数据缺失, 对照、增水20%、增水40%、增水80%、增水100%等处理梯度的温度平均值分别为10.79、10.83、10.77、10.74和10.49 °C。各处理梯度之间土壤温度没有显著差异(2013年 $p = 0.298$, 2014年 $p = 0.692$) (图3C、3D)。

2.2 NEE的季节动态

2013年NEE的观测仅在8月份进行, 相对于整个生长季(5–9月)时间尺度来说较为短暂。我们采用2014年的观测数据(7、8、9三个月), 探究高寒草甸

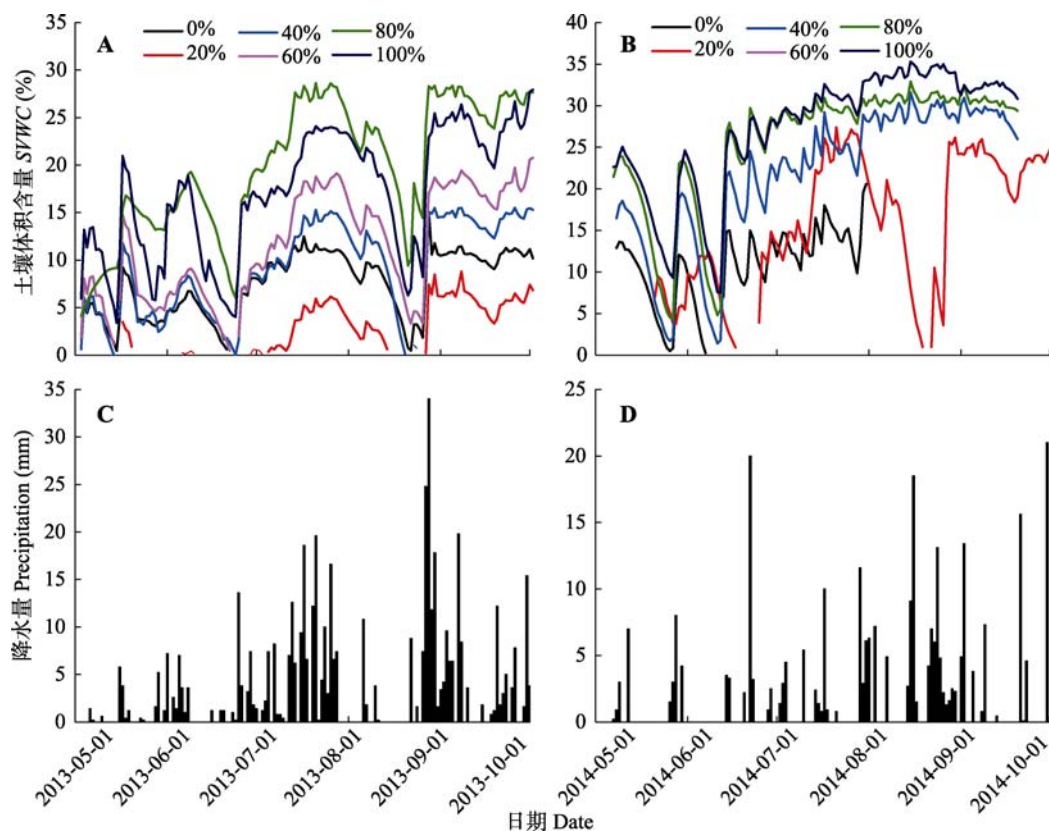


图2 2013年和2014年高寒草甸生长季不同增水处理地下5 cm处土壤体积含水量(A, B)以及降水量(C, D)的动态变化。0%–100%分别表示不同增水处理。

Fig. 2 Seasonal variations in soil volumetric water content (SVWC) at 5 cm depth under different water addition treatments (A, B) and precipitation for alpine meadow (C, D) in 2013 and 2014. Values 0%–100% represent different levels of water addition treatments.

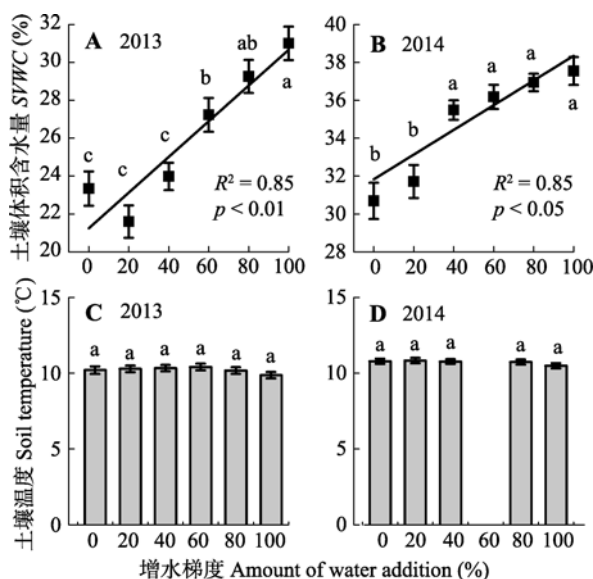


图3 2013年和2014年生长季不同增水处理地下5 cm处土壤体积含水量(A, B)和土壤温度(C, D) (平均值±标准误差)。相同的字母代表增水处理之间最小显著差异(LSD)法多重比较结果差异不显著($p > 0.05$), 不同字母表示处理间差异显著($p < 0.05$), 其中2014年增水60%处理的温度值缺失。

Fig. 3 Soil volumetric water content (SVWC) (A, B) and temperature (C, D) at 5 cm depth under different water addition treatments in the growing seasons of 2013 and 2014 (mean \pm SE). Same letters indicate a non-significant difference ($p > 0.05$) according to the least significant difference (LSD) test, and different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments. Temperature data were not available for the water addition treatment of 60% in 2014.

NEE (对照处理)在时间尺度上的变化趋势。2014年的降水量与地下5 cm温度变化有密切关系, 总体上降水较多的时期温度也较高。从整个生长季来看, 高寒草甸*NEE*均为负值, 表示生态系统对 CO_2 净吸收, 在生长季表现为碳汇。*NEE*在温度较高以及降水较多的8月初期和9月达到较低值, 在降水较少的时期达到较高值(图4)。

2.3 增水处理后各梯度碳通量的变化

如图5A、5B所示, 较之于对照, 增水20%处理的*NEE*相对较高, 增水40%以及随后的处理对应的*NEE*较之于增水20%处理逐渐降低。2013年8月的观测结果表明, 增水处理后最大*NEE*平均值为 $-5.27 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 2014年在7月、8月、9月都进行观测, 增水处理的最大*NEE*平均值为 $-6.34 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2013年, 与对照相比, 5个不同梯度增水处理的*NEE*均未发生显著变化($p > 0.05$)。然而, 从增水20%开始, 随着水分不断增加, 净碳吸收受到抑制, 80%和100%增水处理与增水20%处理的*NEE*具有显著差异($p < 0.05$)。2014年增水20%的

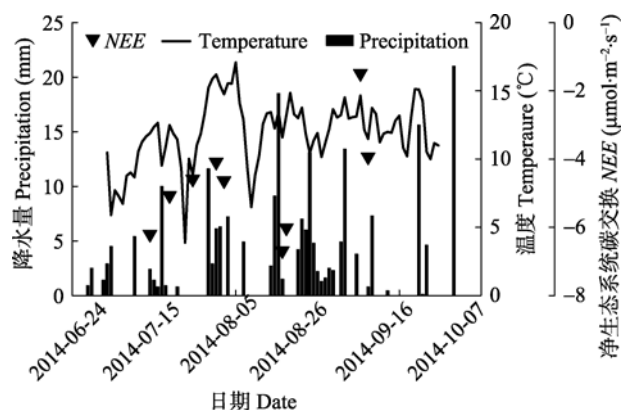


图4 2014年净生态系统碳交换(*NEE*, \blacktriangledown) (对照处理)、降水(柱状图)和温度(线图)的季节变化, *NEE*值采用每日多次测定平均值; 温度为地下5 cm温度。

Fig. 4 Seasonal dynamics of net ecosystem carbon exchange (*NEE*, \blacktriangledown) (control), precipitation (column) and temperature (line) in 2014. The *NEE* value is the mean of multiple investigations in a day, and the temperature refers to the soil temperature at 5 cm depth.

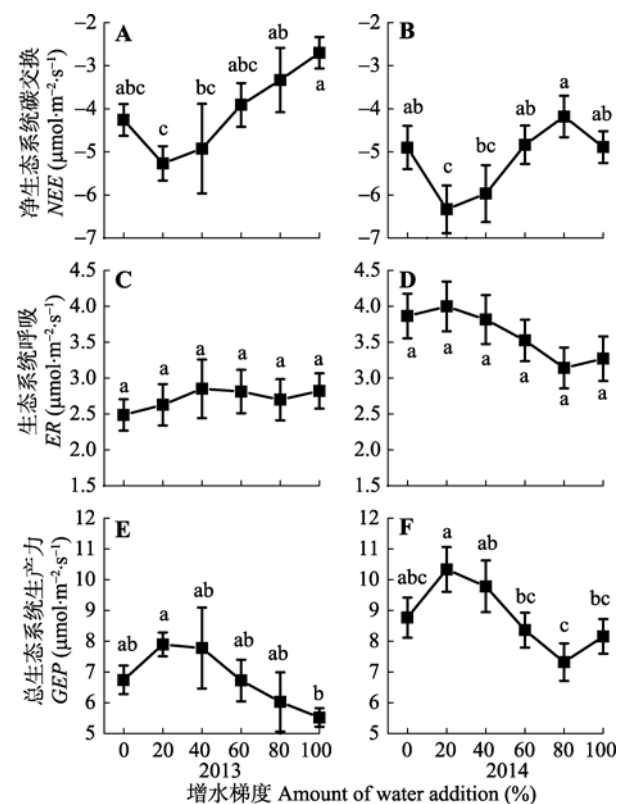


图5 2013–2014年生长季不同增水处理下的净生态系统碳交换(*NEE*) (A, B)、生态系统呼吸(*ER*) (C, D)以及总生态系统生产力(*GEP*) (E, F), (平均值±标准误差)。相同的字母代表不同处理之间最小显著差异(LSD)法多重比较结果差异不显著($p > 0.05$), 不同字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 5 Net ecosystem carbon exchange (*NEE*) (A, B), ecosystem respiration (*ER*) (C, D) and gross ecosystem production (*GEP*) (E, F) under different water addition treatments in the growing seasons of 2013 and 2014 (mean \pm SE). Same letters indicate a non-significant difference ($p > 0.05$) according to the least significant difference (LSD) test, and different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments.

*NEE*与对照、增水60%、增水80%、增水100%等处理具有显著性差异($p < 0.05$)。

2013和2014年,不同梯度增水处理后,*ER*没有发生显著的变化(2013年 $p = 0.948$; 2014年 $p = 0.309$)。2013年*ER*的观测集中在8月份,而2014年的观测跨越7、8、9月3个月,其*ER*的平均值总体上大于2013年(图5C、5D)。

2013年,随着增水梯度的增加,*GEP*先增加然后逐渐降低,并于增水20%处理达到最大值,但只有20%和100%增水处理之间具有显著差异($p < 0.05$)。2014年,随增水梯度增加,*GEP*先增加然后逐渐降低,在增水20%处理达到最大值,增加更多的降水后*GEP*逐渐降低,但在增水100%处理中开始略有增加的趋势。多重比较结果显示,与增水20%处理相比,60%、80%、100%增水处理*GEP*具有显著差异($p < 0.05$) (图5E、5F)。2013和2014年的观测结果均表明,当20%增水处理后,高寒草甸生态系统*GEP*和*NEE*达到最大值。

3 讨论

3.1 模拟降水增加对*GEP*的影响

中国大部分陆地生态系统的观测研究表明,年降水量变化会对*GEP*造成显著影响(Yu *et al.*, 2013)。在青藏高原高寒草甸,*GEP*依赖于草甸植被的光合作用。由于增水促进光合有效辐射(Zhu *et al.*, 2016),因而本研究中,较之于对照,增加20%增水处理后*GEP*有所增加,但增水过量(超过20%)未能进一步促进*GEP* (图5E、5F)。在干旱生态系统,水分是限制植物生长和*GEP*的重要因素(Weltzin *et al.*, 2003)。例如,在内蒙古草原的观测表明增水促进*GEP* (Niu *et al.*, 2009; Bai *et al.*, 2010)。这表明在受水分胁迫的生态系统,*GEP*对增水具有正反馈。相对于半干旱的草原,温度对高寒生态系统尤为重要;青藏高原高寒草甸生态系统较高寒草原更为湿润(Yang *et al.*, 2011),因此水分不是高寒草甸最主要的限制因子。当土壤水分过量时,植物的生理生态过程会受到负面影响,如代谢底物供应不足、产生有毒物质等(Jackson & Colmer, 2005),这将导致植物光合效率的降低(Xu & Zhou, 2011),因此,在高寒草甸适度增加降水会促进*GEP*,而水分过量时,这种促进作用会受到抑制,这表明纳木错高寒草甸*GEP*存在水分胁迫,且20%以内的增水对*GEP*具有促进作用。

3.2 模拟降水增加对*ER*的影响

降水变化会直接或间接地对植物生长和微生物过程造成影响,继而影响*ER* (Wan *et al.*, 2007)。对干旱地区的研究发现增水能够促进*ER* (Niu *et al.*, 2009),这主要是由于增水促进了植物的生长(Huxman *et al.*, 2004)和微生物的活性等(Austin *et al.*, 2004)。而在水分相对充裕的海北高寒草甸(土壤含水量达到39.1%),*ER*与土壤含水量为负相关关系(Hu *et al.*, 2008)。本研究试验地比内蒙古干旱草原湿润,但土壤含水量低于海北地区(图3A、3B)。增水处理后,*ER*并没有发生显著的变化(图5C、5D)。这说明在纳木错地区高寒草甸,降水增加对*ER*的影响较弱。这可能是由于生态系统呼吸作用相关过程对降水增加的响应相互抵消。当水分明显增加时,植物和微生物的生理过程不再受到水分胁迫,但土壤含水量的变化改变了土壤通透性,影响了土壤和大气之间的气体交换(Curry, 2007; Zhuang *et al.*, 2013)。并且,土壤含水量较高一方面促进了微生物所需的有机质的流通,另一方面也降低了土壤 O_2 浓度(Skopp *et al.*, 1990)。另外,土壤含水量也通过改变土壤呼吸的温度敏感性,控制土壤的 CO_2 排放(Zhou *et al.*, 2014; Shen *et al.*, 2015)。通过以上调节机制,高寒草甸维持*ER*在水分变化中的稳定,对增水的敏感性低于*GEP*。

3.3 模拟降水增加对*NEE*的影响

由于增加降水对*ER*的影响较弱,*NEE*的变化主要取决于*GEP* (图5)。2013–2014年的观测结果表明,适度增加降水(20%增水)促进高寒草甸*NEE*,这主要是由于增水对*GEP*的促进超过对*ER*的促进作用。过量增加降水则导致植物的光合作用降低(Xu & Zhou, 2011),因而削弱*GEP*可抑制生态系统对碳的吸收,因此过量增水(>20%增水)不会导致*NEE*继续增加(图5A、5B)。这是高寒草甸生态系统碳交换应对气候变化的负反馈调节的重要环节(Marcolla *et al.*, 2011)。2013–2014年的降水情况并不一致,如降水强度和分布存在差异,但是我们的观测结果表明在20%范围内的增水促进高寒草甸的碳吸收。Chen等(2009)在内蒙古草原的研究认为,干旱生态系统碳吸收的能力受降水时间分布的影响比受降水量的影响更大。我们在高寒草甸的研究结果支持这一结论(图5A、5B)。目前青藏高原高寒草甸生态系统被认为是自然条件下较弱的碳汇(Gu *et al.*, 2003; Kato *et al.*,

2006; Zhao *et al.*, 2006)。由于未来的气候变化有利于 *GEP* 的增加(Wu *et al.*, 2011), 且低温导致高寒生态系统有机质分解较慢(Ni, 2002), 高寒草甸的固碳能力具有一定的提升空间。我们的结果表明未来降水增加会促进高寒草甸生长季在白天对碳的吸收。

3.4 模拟增加降水设计及存在的问题

准确了解降水变化对生态系统的影响需要建立更加科学合理的实验设计, 这需要考虑包括降水的频率、大小以及与其他因素的相互作用等(Beier *et al.*, 2012)。不同的生态系统面临的实际情况与问题存在差别, 国内外在草地生态系统进行的增水实验也得出不同的处理效应, 例如在内蒙古草原进行的多梯度人工增水试验, 模拟增加0、5、10、25和75 mm的降水, 处理后的土壤含水量从4.88%增加到13% (Chen *et al.*, 2009); 在加拿大亚伯达地区矮草草原(short grassland)进行的增水50%的试验, 同时也设置了减水50%和对照处理, 但它们的土壤含水量没有发生显著变化(Flanagan *et al.*, 2013); 在美国田纳西州人工草地进行的“少增水”(每周增加2 mm降水)和“多增水”(每周增加25 mm降水)试验表明其土壤含水量差异显著, 相应的土壤含水量分别为21.7%和26.2% (Wan *et al.*, 2007)。高寒草甸海拔较高(平均4 000 m以上), 人烟稀少, 夏季平均温度低于8 °C, 降水形式多样, 包括雨水、冰雹、降雪等。由于受自然条件的限制, 目前在该区域进行的增水试验较少。我们在纳木错进行的增水试验采用等面积收集雨水并均匀洒入样地的方式(详见试验设计), 一方面可使增水过程自动化, 另一方面也在一定程度上保证了增水的自然效果, 经过处理, 2013年和2014年最大土壤含水量分别增加了32.8%和22.3% (图3A、3B)。已有的研究通常采用一个增水标准(Beier *et al.*, 2012), 而我们在高寒草甸进行6个梯度的增水, 可以较全面地研究降水变化(增加)对碳交换的影响。

我们的装置存在两个方面的问题: 一是增水导致水分蒸散增加(Gu *et al.*, 2008)以及引起一些土壤结构与温度等其他环境因子的改变(van der Molen *et al.*, 2011), 二是高寒草甸生长季降水分布不均, 因此不同观测日期所对应的土壤含水量存在差异。

4 结论

在青藏高原高寒草甸生态系统, 增水显著改变

土壤含水量, 并对生态系统碳交换产生重要影响。其中, 降水变化对 *ER* 影响较弱, 适度增加降水可以促进 *GEP*, 并最终表现为对 *NEE* 的促进, 因此适量的降水增加(20%–40%)有利于高寒草甸生态系统碳吸收。作为青藏高原的碳汇, 未来高寒草甸生态系统在降水增加的情况下将会吸收更多的 CO_2 。

致谢 感谢中国科学院纳木错多圈层综合观测站提供的支持, 感谢中国科学院青藏高原研究所张国帅博士提供2014年的降水数据。

参考文献

- Austin AT, Yahdjian L, Stark JM, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta DA, Schaeffer SM (2004). Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 141, 221–235.
- Bai WM, Wan SQ, Niu SL, Liu WX, Chen QS, Wang QB, Zhang WH, Han XG, Li LH (2010). Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: Implications for ecosystem C cycling. *Global Change Biology*, 16, 1306–1316.
- Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, Penuelas J, Emmett B, Korner C, de Boeck H, Christensen JH, Leuzinger S, Janssens IA, Hansen K (2012). Precipitation manipulation experiments—Challenges and recommendations for the future. *Ecology Letters*, 15, 899–911.
- Chen SP, Lin GH, Huang JH, Jenerette GD (2009). Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. *Global Change Biology*, 15, 2450–2461.
- Curry CL (2007). Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB4012. DOI: 10.1029/2006GB002818.
- Flanagan LB, Sharp EJ, Letts MG (2013). Response of plant biomass and soil respiration to experimental warming and precipitation manipulation in a Northern Great Plains grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 40–52.
- Flanagan LB, Wever LA, Carlson PJ (2002). Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 8, 599–615.
- Fu Y, Zheng Z, Yu G, Hu Z, Sun X, Shi P, Wang Y, Zhao X (2009). Environmental influences on carbon dioxide fluxes over three grassland ecosystems in China. *Biogeosciences*, 6, 2879–2893.
- Ganjurjav (2013). *Ecosystem Carbon Exchange Under Warming and Precipitation Enhancement in Kobresia Pygmaea Meadow in North Tibet*. Master degree dissertation, Institute of Environment and Sustainable Development in

- Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. 29–37. [干珠扎布 (2013). 增温增雨对藏北小嵩草甸生态系统碳交换的影响. 硕士学位论文, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京. 29–37.]
- Gao QZ, Li Y, Wan YF, Qin XB, Jiangcun WZ, Liu YH (2009). Dynamics of alpine grassland *NPP* and its response to climate change in Northern Tibet. *Climatic Change*, 97, 515–528.
- Gu S, Tang YH, Cui XY, Du MY, Zhao L, Li YN, Xu SX, Zhou HK, Kato T, Qi PT, Zhao XQ (2008). Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 113, D08118. DOI: 10.1029/2007JD009173.
- Gu S, Tang YH, Du MY, Kato T, Li YN, Cui XY, Zhao XQ (2003). Short-term variation of CO_2 flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 108, 4670. DOI: 10.1029/2003JD003584.
- Hu J, Hopping KA, Bump JK, Kang SC, Klein JA (2013). Climate change and water use partitioning by different plant functional groups in a grassland on the Tibetan Plateau. *PLOS ONE*, 8, e75503. DOI:10.1371/journal.pone.0075503.
- Hu QW, Wu Q, Cao GM, Li D, Long RJ, Wang YS (2008). Growing season ecosystem respirations and associated component fluxes in two alpine meadows on the Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50, 271–279.
- Huxman TE, Smith MD, Fay PA, Knapp AK, Shaw MR, Loik ME, Smith SD, Tissue DT, Zak JC, Weltzin JF, Pockman WT, Sala OE, Haddad BM, Harte J, Koch GW, Schwinning S, Small EE, Williams DG (2004). Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 429, 651–654.
- Jackson MB, Colmer TD (2005). Response and adaptation by plants to flooding stress—Preface. *Annals of Botany*, 96, 501–505.
- Jasoni RL, Smith SD, Arnone JA (2005). Net ecosystem CO_2 exchange in Mojave Desert shrublands during the eighth year of exposure to elevated CO_2 . *Global Change Biology*, 11, 749–756.
- Kato T, Tang YH, Gu S, Hirota M, Du MY, Li NY, Zhao XQ (2006). Temperature and biomass influences on interannual changes in CO_2 exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 12, 1285–1298.
- Li L, Yang S, Wang ZY, Zhu XD, Tang HY (2010). Evidence of warming and wetting climate over the Qinghai-Tibet Plateau. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 42, 449–457.
- Liu YW (2014). *Nitrogen Wet Deposition on the Tibetan Plateau and Typical Grazing Steppe Responses to Nitrogen Fertilization*. PhD dissertation, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing. [刘永稳 (2014). 青藏高原氮湿沉降现状及典型放牧草原对氮施肥的响应. 博士学位论文, 中国科学院青藏高原研究所, 北京.]
- Marcolla B, Cescatti A, Manca G, Zorer R, Cavagna M, Fiora A, Gianelle D, Rodeghiero M, Sottocornola M, Zampedri R (2011). Climatic controls and ecosystem responses drive the inter-annual variability of the net ecosystem exchange of an alpine meadow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1233–1243.
- Ni J (2002). Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 50, 205–218.
- Niu SL, Yang HY, Zhang Z, Wu MY, Lu Q, Li LH, Han XG, Wan SQ (2009). Non-additive effects of water and nitrogen addition on ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Ecosystems*, 12, 915–926.
- Piao SL, Ciais P, Huang Y, Shen ZH, Peng SS, Li JS, Zhou LP, Liu HY, Ma YC, Ding YH, Friedlingstein P, Liu CZ, Tan K, Yu YQ, Zhang TY, Fang JY (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467, 43–51.
- Reichstein M, Bahn M, Ciais P, Frank D, Mahecha MD, Senneviratne SI, Zscheischler J, Beer C, Buchmann N, Frank DC, Papale D, Rammig A, Smith P, Thonicke K, van der Velde M, Vicca S, Walz A, Wattenbach M (2013). Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500, 287–295.
- Shen ZX, Li YL, Fu G (2015). Response of soil respiration to short-term experimental warming and precipitation pulses over the growing season in an alpine meadow on the Northern Tibet. *Applied Soil Ecology*, 90, 35–40.
- Skopp J, Jawson MD, Doran JW (1990). Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil-water content. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1619–1625.
- van der Molen MK, Dolman AJ, Ciais P, Eglin T, Gobron N, Law BE, Meir P, Peters W, Phillips OL, Reichstein M, Chen T, Dekker SC, Doubkova M, Friedl MA, Jung M, van den Hurk BJJM, de Jeu RAM, Kruijt B, Ohta T, Rebel KT, Plummer S, Seneviratne SI, Sitch S, Teuling AJ, van der Werf GR, Wang G (2011). Drought and ecosystem carbon cycling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 765–773.
- Wan SQ, Norby RJ, Ledford J, Weltzin JF (2007). Responses of soil respiration to elevated CO_2 , air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 13, 2411–2424.
- Wei D, Xu-Ri, Tenzin T, Wang YS, Wang YH (2015). Considerable methane uptake by alpine grasslands despite the cold climate: *In situ* measurements on the central Tibetan Plateau, 2008–2013. *Global Change Biology*, 21, 777–788.

- Weltzin JF, Loik ME, Schwinning S, Williams DG, Fay PA, Haddad BM, Harte J, Huxman TE, Knapp AK, Lin GH, Pockman WT, Shaw MR, Small EE, Smith MD, Smith SD, Tissue DT, Zak JC (2003). Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *Bioscience*, 53, 941–952.
- Williamson R (2013). Researchers illustrate the impact of climate extremes on the carbon cycle. *Carbon Management*, 4, 481–481.
- Wu ZT, Dijkstra P, Koch GW, Penuelas J, Hungate BA (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 17, 927–942.
- Xu LL, Zhang XZ, Shi PL, Yu GR, Sun XM (2005). Net ecosystem carbon dioxide exchange of alpine meadow in the Tibetan Plateau from August to October. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 1948–1952. [徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 于贵瑞, 孙晓敏 (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, 1948–1952.]
- Xu ZZ, Zhou GS (2011). Responses of photosynthetic capacity to soil moisture gradient in perennial rhizome grass and perennial bunchgrass. *BMC Plant Biology*, 11, 21.
- Yan L, Zhou GS, Wang YH, Hu TY, Sui XH (2015). The spatial and temporal dynamics of carbon budget in the alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau using the Terrestrial Ecosystem Model. *Journal of Cleaner Production*, 107, 195–201.
- Yang K, Lin ED, Gao QZ, Wan YF, Jiangcun WZ, Wang BS, Li WF (2010). Simulation of climate change impacts on grassland productivity in Northern Tibet. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 1469–1476. [杨凯, 林而达, 高清竹, 万运帆, 江村旺扎, 王宝山, 李文福 (2010). 气候变化对藏北地区草地生产力的影响模拟. *生态学杂志*, 29, 1469–1476.]
- Yang ZP, Hua OY, Zhang XZ, Xu XL, Zhou CP, Yang WB (2011). Spatial variability of soil moisture at typical alpine meadow and steppe sites in the Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region. *Environmental Earth Sciences*, 63, 477–488.
- Yu GR, Zhu XJ, Fu YL, He HL, Wang QF, Wen XF, Li XR, Zhang LM, Zhang L, Su W, Li SG, Sun XM, Zhang YP, Zhang JH, Yan JH, Wang HM, Zhou GS, Jia BR, Xiang WH, Li YN, Zhao L, Wang YF, Shi PL, Chen SP, Xin XP, Zhao FH, Wang YY, Tong CL (2013). Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 19, 798–810.
- Zhang FW, Li YN, Zhao XQ, Gu S, Wang QX, Du MY, Tang YH (2008). Effects of one precipitation process on CO₂ flux and thermal transportation in alpine meadow of Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 1685–1691. [张法伟, 李英年, 赵新全, 古松, 王勤学, 杜明远, 唐艳鸿 (2008). 一次降水过程对青藏高原高寒草甸CO₂通量和热量输送的影响. *生态学杂志*, 27, 1685–1691.]
- Zhang RH, Su FG, Jiang ZH, Gao XJ, Guo DL, Ni J, You QL, Lan C, Zhou BT (2015). An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 60, 3036–3047. [张人禾, 苏凤阁, 江志红, 高学杰, 郭东林, 倪健, 游庆龙, 兰措, 周波涛 (2015). 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展. *科学通报*, 60, 3036–3047.]
- Zhang YL, Li BY, Zheng D (2002). A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 21, 1–8. [张镔锂, 李炳元, 郑度 (2002). 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 21, 1–8.]
- Zhao L, Li YN, Xu SX, Zhou HK, Gu S, Yu GR, Zhao XQ (2006). Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrub land on Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 12, 1940–1953.
- Zheng D, Zhu LP (2000). *Formation and Evolution, Environmental Changes and Sustainable Development on the Tibetan Plateau*. Academy Press, Beijing, 466.
- Zhou WP, Hui DF, Shen WJ (2014). Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: A laboratory incubation study. *PLOS ONE*, 9, e92531. DOI:10.1371/journal.pone.0092531.
- Zhu XJ, Yu GR, Wang QF, Gao YN, He HL, Zheng H, Chen Z, Shi PL, Zhao L, Li YN, Wang YF, Zhang YP, Yan JH, Wang HM, Zhao FH, Zhang JH (2016). Approaches of climate factors affecting the spatial variation of annual gross primary productivity among terrestrial ecosystems in China. *Ecological Indicators*, 62, 174–181.
- Zhuang Q, He J, Lu Y, Ji L, Xiao J, Luo T (2010). Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau during the 20th century: An analysis with a process-based biogeochemical model. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 649–662.
- Zhuang QL, Chen M, Xu K, Tang JY, Saikawa E, Lu YY, Melillo JM, Prinn RG, McGuire AD (2013). Response of global soil consumption of atmospheric methane to changes in atmospheric climate and nitrogen deposition. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 650–663.

责任编辑: 杨元合 责任编辑: 王 威



扫码加入读者圈
听语音, 看问答

DOI: 10.17521/cjpe.2015.0395