

DOI: 10.5846/stxb201804160865

李岩, 干珠扎布, 胡国铮, 万运帆, 李玉娥, 旦久罗布, 白玛玉珍, 高倩竹. 增温对青藏高原高寒草原生态系统碳交换的影响. 生态学报, 2019, 39(6):

Li Y, HASBAGAN Ganjurjav, Hu G Z, Wan Y F, LI Y E, DANJIU Luobu, BAIMA Yuzhen, Gao Q Z. Effects of warming on carbon exchange in an alpine steppe in the Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6):

增温对青藏高原高寒草原生态系统碳交换的影响

李 岩^{1,2}, 干珠扎布^{1,2,*}, 胡国铮^{1,2}, 万运帆^{1,2}, 李玉娥^{1,2}, 旦久罗布³, 白玛玉珍³, 高倩竹^{1,2}

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

2 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081

3 那曲市草原站, 那曲 852100

摘要: 碳交换是影响草地生态系统碳汇功能的关键过程, 对气候变暖极为敏感。青藏高原分布着大面积的高寒草原, 其碳汇功能对气候变暖的响应对区域碳循环过程具有重要的影响。为探究高寒草原生态系统碳交换过程对增温的响应, 2012—2014 年, 在青藏高原班戈县进行了模拟增温对高寒草原生态系统碳交换过程影响的研究。结果表明, 增温对高寒草原碳交换各组分的影响存在年际差异, 但总体上对碳交换存在负面影响。3 年平均结果显示, 增温显著降低了高寒草原地上生物量、总生态系统生产力 (GEP)、生态系统呼吸 (ER) 和净生态系统碳交换量 (NEE) ($P < 0.05$), 平均降幅分别为 15.1%、36.8%、19.2% 和 51.5%。增温条件下 3 年平均土壤呼吸 (SR) 较对照无显著变化 ($P > 0.05$), 但 2013 年增温显著降低了 SR ($P < 0.05$), 降幅达 18.1%。增温对 SR 与 ER 的比值具有一定的促进作用, 最高增幅达到 40.0%。GEP、ER、SR 和 NEE 与土壤温度和土壤水分无显著相关 ($P > 0.05$), 而 GEP、ER 和 NEE 与空气温度呈显著的负相关关系 ($P < 0.05$)。增温引起的干旱胁迫以及地上生物量降低是导致高寒草原 NEE 降低的主要原因。本研究表明, 全球变暖会一定程度降低青藏高原高寒草原的碳汇功能。

关键词: 碳交换; 总生态系统生产力; 生态系统呼吸; 生态系统净 CO_2 交换; 地上生物量

Effects of warming on carbon exchange in an alpine steppe in the Tibetan Plateau

LI Yan^{1,2}, HASBAGAN Ganjurjav^{1,2,*}, HU Guozheng^{1,2}, WAN Yunfan^{1,2}, LI Yu'e^{1,2}, DANJIU Luobu³, BAIMA Yuzhen³, GAO Qingzhu^{1,2}

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

3 Nagqu Grassland Station, Nagqu 852100, China

Abstract: Carbon exchange is a key process that affects the carbon sink capacity of grassland ecosystems and is very sensitive to climate warming. The Tibetan Plateau is covered by large areas of alpine steppe, which is the main carbon pool and fundamental in regional carbon cycling. The present study investigated the effects of warming on carbon exchange in an alpine steppe ecosystem in Baingoin County, Tibetan Plateau from 2012 to 2014. The results showed that there are interannual differences in the effects of warming on the components of carbon exchange in alpine steppes, but there is a negative effect on carbon exchange as a whole. Three-year average results showed that warming significantly reduced the above-ground biomass, gross ecosystem productivity (GEP), ecosystem respiration (ER), and net ecosystem carbon exchange (NEE) in the alpine steppe ($P < 0.05$), with an average decrease of 15.1%, 36.8%, 19.2%, and 51.5%,

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0502003); 国家自然科学基金项目 (31570484); 西藏自治区科技计划项目; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (BSRF201713)

收稿日期: 2018-04-16; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ganjurjav@foxmail.com

respectively. Three-year average soil respiration (SR) did not change significantly ($P>0.05$) compared with the control under warming conditions, but warming in 2013 significantly reduced SR ($P<0.05$), by 18.1%. Warming has a certain role in promoting the ratio of SR to ER, with the highest increase reaching 40.0%. GEP, ER, SR, and NEE had no significant correlation with soil temperature and soil moisture ($P>0.05$), whereas GEP, ER, and NEE showed a significant negative correlation with air temperature ($P<0.05$). A decrease in drought stress and above-ground biomass caused by warming were the main factors for the decrease of NEE in the alpine steppe. In summary, our study showed that global warming may reduce the carbon sink capacity of alpine steppes in the Tibetan Plateau.

Key Words: carbon exchange; gross ecosystem productivity; ecosystem respiration; net ecosystem carbon exchange; above-ground biomass

草地是重要的陆地生态系统碳库,草地生态系统碳循环是目前全球变暖研究中的热点。草地生态系统与大气之间的碳交换是碳循环的主要过程之一。碳交换组分包括总生态系统生产力(GEP, Gross ecosystem productivity)、净生态系统碳交换(NEE, Net ecosystem carbon exchange)、生态系统呼吸(ER, Ecosystem respiration)和土壤呼吸(SR, Soil respiration)等。气候变暖对草地生态系统碳交换各组分均有不同程度的影响,从而改变碳循环过程^[1]。青藏高原平均海拔超过 4000 m,被称为“世界第三极”^[2],其面积约占中国陆地面积的 26.8%^[3]。高寒草地生态系统是青藏高原分布最广、面积最大的生态系统,其自然条件复杂,生态环境脆弱,抵御灾害能力差,对气候变化极其敏感^[4]。近年来,青藏高原气候变暖趋势明显,其增温幅度明显高于全球和全国平均水平,达到每 10 年 0.32℃^[5]。青藏高原高寒草地因其独特的地理位置和垫面特点,气候变化导致的碳收支不平衡可能对我国中东部、亚洲其他地区乃至全球的气候产生极为重要的影响^[6-7]。

温度是限制青藏高原草地生产力的重要生态因子之一。温度通过影响植物的生长、繁殖、生物量分配,从而引起群落结构及物候等变化,进而间接影响生态系统的碳循环过程^[8-9]。目前,学者对水分条件较好的青藏高原高寒草甸碳循环做了大量研究^[10-13]。元伟伟等^[10]认为相比土壤水分,温度对青藏高原高寒草甸碳通量的变化影响更大,增温使生态系统年平均总初级生产力增加了 34.3%。Lin 等^[11]研究表明土壤温度是高寒草甸碳循环的主要控制因素,增温促进了生态系统呼吸和土壤呼吸,而土壤水分对呼吸作用无显著的影响。但也有研究认为,土壤水分在特定条件下对高寒草地生态系统碳交换具有显著的影响。例如,耿晓东等^[12]发现增温幅度超过 3℃时,将对土壤形成干旱胁迫,从而抑制 GEP 并降低 NEE。Ganjurjav 等^[13]认为,增温尽管促进生长季平均 GEP、ER 和 NEE,但在雨季来临之前,由于增温引起干旱,高寒草甸生态系统碳交换各组分均有不同程度的降低。综上所述,增温对水分条件较好的高寒草甸生态系统碳交换总体上具有促进作用,但增温超过一定阈值或者在干旱季节,增温将对生态系统产生干旱胁迫,从而抑制碳交换。因此,为了进一步明确增温对高寒草地碳交换的影响,本研究选取了水分条件较差的高寒草原生态系统,采用开顶增温室(Open Top Chamber, OTC)进行模拟增温,研究增温是否会对高寒草原产生干旱胁迫,是否对生态系统碳交换产生负面影响,为评估未来气候变化条件下青藏高原高寒草原碳储存能力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于那曲市班戈县普保镇,地处念青唐古拉山和唐古拉山之间以及藏北高原纳木错、色林错两大湖泊之间,地理坐标为 92°03'E, 31°39'N, 平均海拔 4700 m。试验区为高原亚寒带半干旱季风气候,高寒缺氧,气候干燥,昼夜温差大,年均气温 0℃,生长季(5—9 月)平均气温为 8.0℃;全年日照时数为 2900 h,年降水量为 289—390 mm,主要集中在 6—9 月份,年蒸发量为 2000 mm。

1.2 试验设计

本试验采用开顶增温室对高寒草原进行全年模拟增温。该设备是以聚碳酸酯为原料的透明圆台,底部直

径 1.2 m, 顶部直径 0.6 m, 高 0.45 m, 顶部和底部与外界相通, 保持空气流动。OTC 固定在样地内, 进行全年增温。

本试验设置增温(W, Warming)和对照(CK, Control check)两个处理, 每个处理重复 4 次, 共 8 个小区, 相邻试验样方间隔 2 m 的缓冲带。试验地位于地势较为平坦, 群落结构较为均匀的自然高寒草原, 主要建群种为禾本科植物紫花针茅(*Stipa purpurea*), 其他伴生种包括银荻草(*Koeleria argentea*)、羊茅(*Festuca ovina*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、小叶棘豆(*Oxytropis microphylla*)等。土壤类型为高寒草原土, 土壤质地为砂壤土。试验地于 2011 年 6 月进行围封禁牧, 2011 年 7 月开始进行增温试验, 数据采集在 2012—2014 年 6—9 月份进行。

1.3 数据观测方法

采用温湿度记录器(北京佳乐宜科技有限公司)对高寒草原生态系统空气温度、土壤温度(5 cm)和土壤湿度(5 cm)进行全年动态观测(测定频率为 15 min), 以监测模拟增温条件下群落环境因子的变化。

采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪(LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)和箱式法对高寒草原 NEE 和 ER 进行测定。实验开始前, 将面积为 30 cm×30 cm 的底座嵌入各小区中, 以备日后的定点测定。在植物生长季, 选择晴朗天气在 10:00—20:00(10:00 之前露水较多, 导致仪器测定效果不佳), 每隔 2 h 进行 1 次测定, 每个月测定 1 次。测定时将体积为 30 cm×30 cm×40 cm 的透明有机玻璃箱放在底座上, 箱子顶部采用风扇对箱内进行气体混匀, 测定 NEE, 测定时间为 90 s。NEE 测定结束后, 将箱子抬起, 待箱内水分和 CO₂ 接近外界值时将箱子重新放在底座上, 并用遮光布(内黑外白)盖在箱上, 开始测定 ER, 测定时间同样为 90 s。测定结束后通过 NEE 与 ER 之和计算出 GEP。

土壤呼吸测定采用 Portable Flux Meter(West systems, Italy)和箱式法测定。在每个小区内设置一个永久性土壤呼吸底座, 并嵌入土壤。测定前 24 h 将底座内的绿色植物齐地面剪下, 以消除植物冠层呼吸对土壤呼吸测定的影响。土壤呼吸测定选择晴朗天气, 10:00—20:00 进行动态观测, 每 2 h 测定一次, 每次测定时间为 90 s, 每个月测定 1—2 次, 与 NEE 和 ER 同时测定。

地上生物量采用估算法测定: 每年的生长季初(5 月初), 在试验地开顶增温室旁随机设置 20 个 0.5 m×0.5 m 矫正样方, 每年的生长旺季(7 月底或 8 月初), 采用样方法在矫正样方内对每种植物进行群落特征调查, 首先用直尺测定植物高度, 随后在每个样方的冠层上方放置一个 0.5 m×0.5 m 的框架, 框架中有 100 个均匀分布的网格(5 m×5 cm), 然后估算每种植物的分盖度和群落总盖度。随后将植物齐地面剪下, 分物种装入信封, 在实验室烘箱中 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘干至恒重, 测定干重。用每种植物的高度和盖度与所测生物量之间的关系建立回归方程, 并运用该方程估算对照和增温处理的地上生物量^[14], 具体方程如下:

$$B = 4.772 H + 0.408 C - 7.202 \quad (1)$$

$$B = 4.916 H + 1.228 C - 11.313 \quad (2)$$

$$B = 6.677 H + 1.015 C - 16.628 \quad (3)$$

公式 1、2、3 分别为 2012、2013 和 2014 年生物量方程。其中, B 代表生物量(g/m²), H 代表植株高度(cm), C 代表植物盖度(%)。

1.4 数据处理方法

采用 IBM SPSS Statistics 19 软件中单样本 t 检验分析比较不同处理间空气温度、土壤温度和土壤湿度的差异, 采用重复测定方差分析比较不同处理对高寒草原 GEP、ER、SR、NEE 和地上生物量的影响, 采用回归分析方法分析碳交换与空气温度、土壤温度、土壤湿度和地上生物量的关系。

2 结果与分析

2.1 高寒草原环境因子对模拟增温的响应

通过对青藏高原高寒草原生长季空气温度、土壤温度和土壤水分连续 3 年(2012—2014 年)的观测, 发现

增温显著增加了空气温度、土壤温度并降低了土壤含水量($P<0.05$)。2012 年,2013 年,2014 年对照样地生长季空气平均温度分别为 10.8,10.8,10.5℃,增温样地分别为 12.8,12.5,12.5℃,较对照增加了 2.0,1.7,2.0℃,增长率分别为 18.5%,15.8%,19.0%(图 1);同样,对照样地 3 年土壤温度分别为 13.4,13.6,13.4℃,增温样地分别为 15.3,14.5,15.0℃,较对照样地增加了 1.9,0.9,1.6℃,增长率为 14.2%,6.7%,11.9%(图 1)。在土壤水分方面,增温样地的土壤含水率普遍低于对照处理(图 1)。2012 年,2013 年,2014 年对照样地生长季土壤含水率分别为 11.99%,10.82%,10.77%,增温处理下分别为 10.7%,10.55%,10.22%,较对照处理分别下降了 1.29,0.27,0.55 个百分点。在年际间,空气温度和土壤温度没有明显的变化,2013 年,2014 年的土壤含水率较 2012 年略有下降,在增温之后,3 年之间的土壤含水率没有明显的变化。

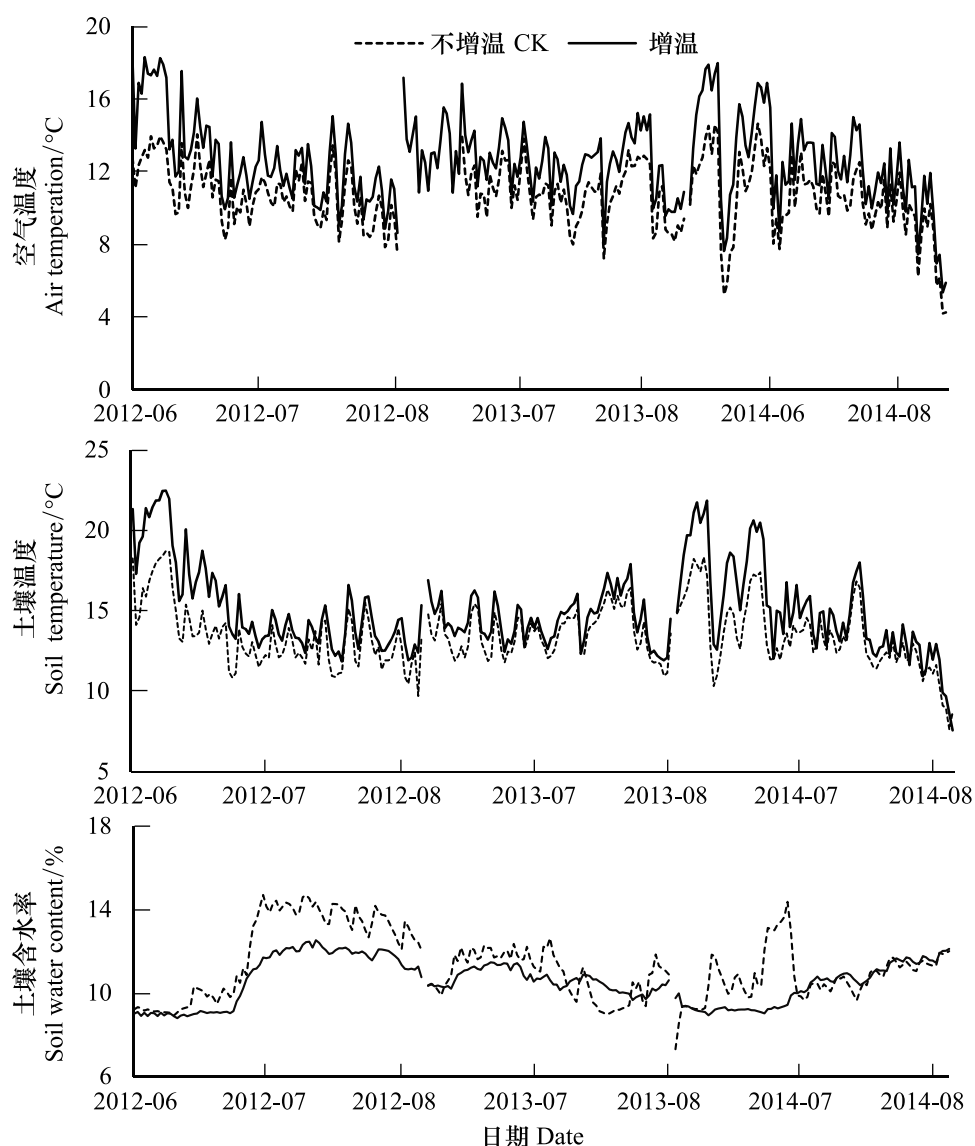


图 1 增温对空气温度、土壤温度和土壤含水率的影响

Fig.1 The air temperature and soil temperature and soil water content under warming condition

CK: 不增温 Control check; W: 增温 Warming

2.2 增温对高寒草原地上生物量的影响

增温对高寒草原地上生物量的影响存在年际差异,但总体上表现出其对地上生物量具有负效应(图 2)。其中,2013 年和 2014 年对照样地地上生物量分别为 73.2 g/m²和 66.1 g/m²,增温样地为 58.8 g/m²和 52.9 g/m²。

m^2 ;较对照而言,增温处理地上生物量分别降低了 19.7%和 20.0%,达到显著性差异($P<0.05$)。增温样地 3 年平均地上生物量为 59.7 g/m^2 ,对照样地为 70.2 g/m^2 ,增温使地上生物量降低了 15.1%,达到显著性差异($P<0.05$)。年际变化方面,对照样地内 3 年地上生物量分别为 $71.5, 73.2 \text{ g/m}^2$ 和 66.1 g/m^2 ,未达到显著性差异($P>0.05$);增温样地内,2012 年地上生物量最大,为 67.4 g/m^2 ,2014 年最小,为 52.9 g/m^2 ,年际间差异性显著($P<0.05$),表现出随着增温年限的增加,地上生物量逐渐降低的趋势。

2.3 增温对总生态系统生产力(GEP)的影响

在高寒草原,增温条件下不同年份 GEP 均低于对照(图 3),其中,2013 年和 2014 年达到显著性差异($P<0.05$)。2013 年和 2014 年,对照处理 GEP 分别为 $4.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $5.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温处理为 $2.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $3.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温处理 GEP 较对照分别减少了 40.9%和 43.6%。增温样地内 3 年平均 GEP 为 $3.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对照样地为 $5.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温样地 GEP 较对照降低了 36.8%,达到显著性差异($P<0.05$)。在年际间,2012 年的 GEP 显著高于 2013 年和 2014 年($P<0.05$),对照样地内,2012 年 GEP 分别是 2013 年和 2014 年的 1.7 倍和 1.4 倍,增温样地内,2012 年的 GEP 是 2013 年和 2014 年的 2.2 倍和 1.8 倍。

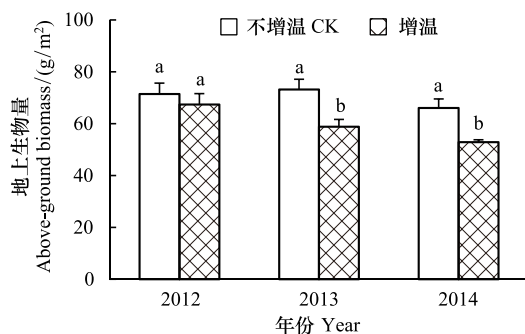


图 2 增温对生物量的影响

Fig.2 The above-ground biomass under warming condition

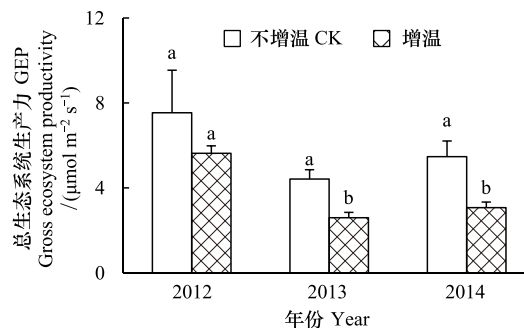


图 3 增温对总生态系统生产力的影响

Fig.3 The gross ecosystem productivity under warming condition

2.4 增温对生态系统呼吸(ER)和土壤呼吸(SR)的影响

2012—2014 年,增温条件下 ER 低于对照(图 4),其中 2013 年达到显著水平($P<0.05$),降低幅度达到 22.7%。增温样地内 3 年平均 ER 为 $2.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对照样地为 $2.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温样地 ER 较对照降低幅度达 19.2%,达到显著性差异($P<0.05$)。年际间,同 GEP 一致,较 2012 年,2013 年和 2014 年的 ER 较弱,而在增温条件下其年际差异进一步增加。

高寒草原 SR 对增温的响应存在年际差异(图 4)。2012 年和 2014 年 SR 在增温与对照之间无显著差异($P>0.05$),但在 2013 年,增温条件下 SR 显著降低($P<0.05$),降幅为 18.1%;增温样地内 3 年 SR 平均为 $1.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对照样地为 $1.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温样地 SR 较对照降低了 1.5%,未达到显著性差异($P>0.05$)。在不同年份,增温条件下 SR/ER 均有所升高,但只有在 2014 年达到显著性水平($P<0.05$),达到 0.91,较对照的 0.65 增加了 40.0%(图 4);在增温条件下,3 年平均 SR/ER 为 0.8,较对照的 0.6 升高幅度达 18.8%。

2.5 增温对净生态系统碳交换量(NEE)的影响

在高寒草原,增温对 NEE 的影响存在年际差异(图 5),其中,2013 年和 2014 年达到显著性差异($P<0.05$),对照样地 NEE 分别为 $2.3, 3.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温样地为 $0.9, 1.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温较对照 NEE 分别降低了 60.9%,61.3%;2012 年对照样地内 NEE 为 $4.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温样地为 $2.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温较对照降低了 35.7%。增温样地内 3 年 NEE 平均为 $1.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对照样地为 $3.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,增温样地 NEE 平均降低幅度达 51.5%,达到显著性水平($P<0.05$)。年际变化方面,对照样地内 3 年 NEE 分别为 $4.2, 2.3$ 和 $3.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$;增温样地内 NEE 分别为 $2.7, 0.9, 1.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,其中 2013 年和 2014 年 NEE 变化不显著($P>0.05$),却显著低于 2012 年($P<0.05$)。

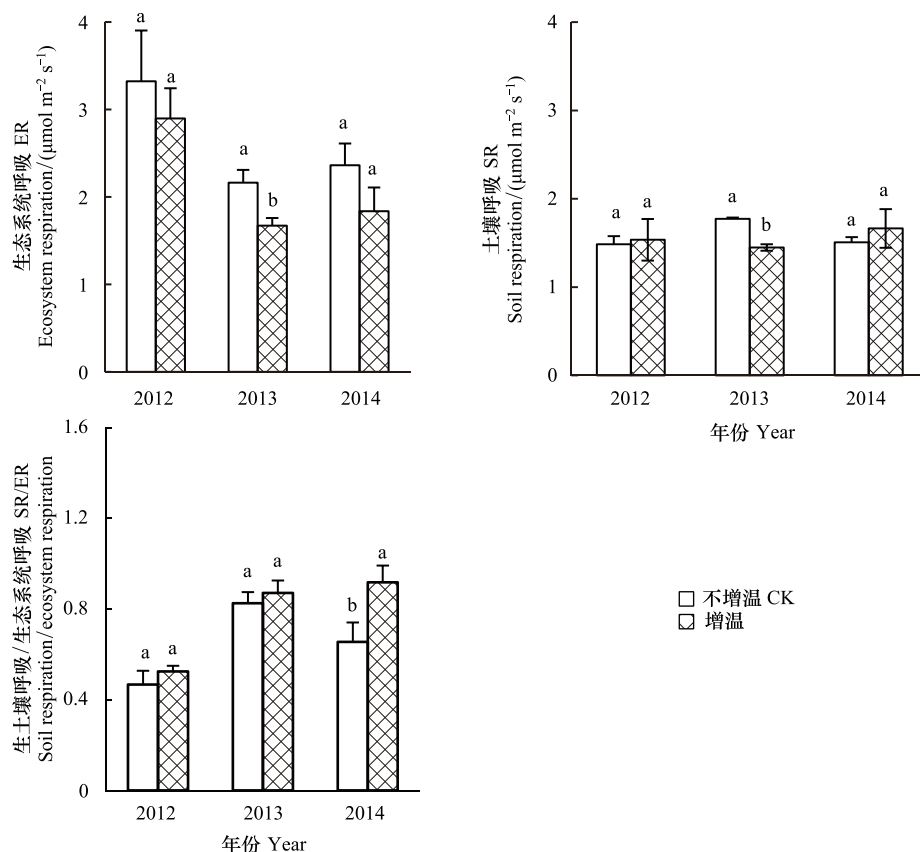


图4 增温对生态系统呼吸和土壤呼吸的影响

Fig.4 The ecosystem respiration and soil respiration under warming condition

2.6 青藏高原高寒草原碳交换与非生物因子和生物因子之间的关系

生长季内,青藏高原高寒草原 GEP、ER、SR、NEE 和地上生物量与土壤温度(ST, Soil temperature)、土壤水分(SW, Soil moisture)之间没有显著的相关关系($P > 0.05$, 表 1); 与 ST 和 SW 不同, 空气温度(AT, Air temperature)与 GEP、ER、NEE 和地上生物量之间有显著的负相关关系($P < 0.05$), 其中, AT 与 GEP 和 NEE 呈极显著的负相关关系($P < 0.01$); AT 也与 SR 呈负相关关系, 但没有达到显著水平($P > 0.05$)。

青藏高原高寒草原生态系统碳交换与地上生物量之间具有显著的线性相关关系($P < 0.05$)。地上生物量与 GEP、ER 和 NEE 之间呈极显著的正相关关系($P < 0.01$), 它分别能解释 38.6%、36.8% 和 35.8% 的 GEP、ER 和 NEE 的变化; 地上生物量与 SR 呈正相关, 却没有达到显著性水平($P > 0.05$), 它能解释 7.3% 的 SR 变化(图 6)。

3 讨论

草地生态系统碳交换包括碳输出和输入两个过程, 碳输出主要以生态系统呼吸为主, 碳输入主要是指植物光合作用, 在生态系统尺度上称为 GEP^[15]。植物光合作用的强弱决定了 GEP 的高低, 而光合作用又受到

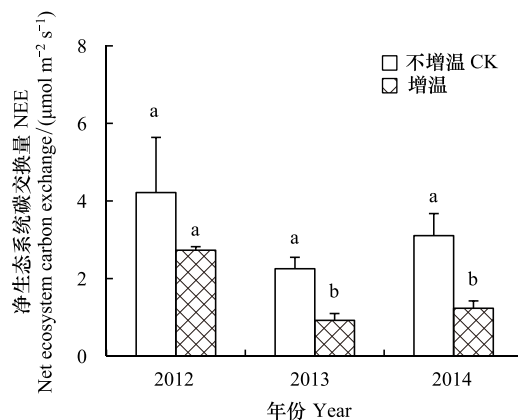


图5 增温对净生态系统碳交换量的影响

Fig.5 The net ecosystem exchange under warming condition

环境温度的影响,适宜的温度范围内,增温有利于植物光合作用增强,而当环境温度超过植物的最适温度时,高温会破坏植物细胞原生质和光合膜结构^[16],从而降低光合作用。此外,水分条件亦是限制植物光合作用的主要因素^[17]。Wertin^[18]在北美通过对干旱群落 3 年的增温实验结果表明,温度升高显著降低了植物的光合作用。郭亚奇^[19]在藏北高寒草地的研究发现,增温使紫花针茅的光合速率下降,气孔导度降低,而水分增加可以促进紫花针茅的光合速率升高。也有研究认为由于在水分胁迫条件下植物光合作用受到影响,叶片气孔导度下降^[20-21],CO₂进入细胞内的阻力增加,抑制了植物的光合作用^[17],从而导致 GEP 在不同水分条件的生态系统中差异性较大。本研究结果表明,模拟增温显著降低了 GEP ($P<0.05$),其原因可能是增温导致土壤含水率下降,对植物形成了干旱胁迫,从而降低了植物生产力,进而引起 GEP 下降。

表 1 高寒草原碳通量与非生物因子之间的关系

Table 1 Relationship between carbon flux and abiotic factors in alpine steppe

碳交换组分 The composition of carbon exchange	土壤温度(ST) Soil temperature	空气温度(AT) Air temperature	土壤水分(SW) Soil moisture
总生态系统生产力(GEP)	-0.228	-0.657 **	0.144
生态系统呼吸(ER)	-0.165	-0.549 *	0.241
土壤呼吸(SR)	-0.040	-0.059	0.249
净生态系统生产力(NEE)	-0.250	-0.680 **	0.088
地上生物量(AGB)	-0.435	-0.475 *	0.061

*、** 分别表示在 95%、99% 的置信水平上具有差异显著性;总生态系统生产力:GEP, Gross ecosystem productivity; 生态系统呼吸:ER, Ecosystem respiration; 土壤呼吸:SR, Soil respiration; 净生态系统生产力:NEE, Net ecosystem carbon exchange; 地上生物量:AGB, Above-ground biomass

ER 是碳交换过程中的重要环节,ER 的强弱不仅关系着生态系统植物生产力的高低,而且对全球气候变化起着重要的反馈作用。一项在青藏高原的研究^[22]结果表明,生长季前期,增温显著降低了 ER,而在生长季后期,增温对其影响并不显著,这与生长季不同时期水分条件差异有关,既土壤温度和水分共同调节 ER。Lin^[11]的研究结果显示增温对青藏高原高寒草甸生长季平均 ER 无显著影响,但显著促进生长季初期和末期 ER,土壤温度与 ER 呈正相关,其解释了 63%—83% 的 ER 变化。本研究得出增温条件下,3 年 ER 均有不同程度的降低,ER 与空气温度呈显著的负相关关系 ($P<0.05$),这与 Fu 的研究相似^[23],其发现增温不仅降低了青藏高原高寒草甸 ER,而且降低了 ER 的温度敏感性。SR 是 ER 的主要组成部分,包括土壤有机质分解、根系呼吸、及土壤动物和微生物呼吸,SR 的强弱决定着土壤与大气之间碳交换能力的高低,而 SR/ER 能间接地反映出 SR 对生态系统碳输出的贡献。Lin^[11]的研究发现增温显著增加 SR,土壤温度与 SR 呈正相关。本研究中,SR 对增温的响应存在年际差异;2012 年和 2014 年增温促进了 SR,但 2013 年增温显著的抑制了 SR ($P<0.05$),其原因可能是 2013 年土壤水分较低,水分胁迫抑制了 SR。本研究中,增温并未显著改变 SR/ER,这可能是 ER 的敏感度高于 SR,抵消了 SR 的变化^[11]。总体来看,增温对 SR 的影响相对较小,而对 ER 的影响较大,这主要取决于增温导致高寒草原地上生物量降低^[24]。

生态系统呼吸与生态系统初级生产力之间的平衡称为生态系统净交换(NEE)。NEE 是评价生态系统碳汇功能的重要指标。土壤温度和土壤水分是生态系统碳收支过程的主要控制因素^[2,25]。Peng^[26]在青藏高原高寒草甸的研究中得出增温导致 GEP 的增加大于 ER 的减少,表现为 NEE 增加。但在本研究中,增温条件下高寒草原 GEP 和 ER 均有所下降,最终导致 NEE 降低,其主要原因是增温引起的干旱胁迫和地上生物量降低。Ganjurjav 等^[13]认为,虽然增温导致高寒草甸生长季平均 NEE 显著增加,但在雨季来临之前,增温显著降低高寒草甸 NEE,说明增温条件下土壤水分是决定 NEE 的关键因素。Xia^[14]的研究结果表明,在干旱年份,温带草原 NEE 表现出对草地生物量的正向依赖性。因此,可以推测出全球气候变暖对青藏高原高寒草原碳汇功能具有消极的影响。

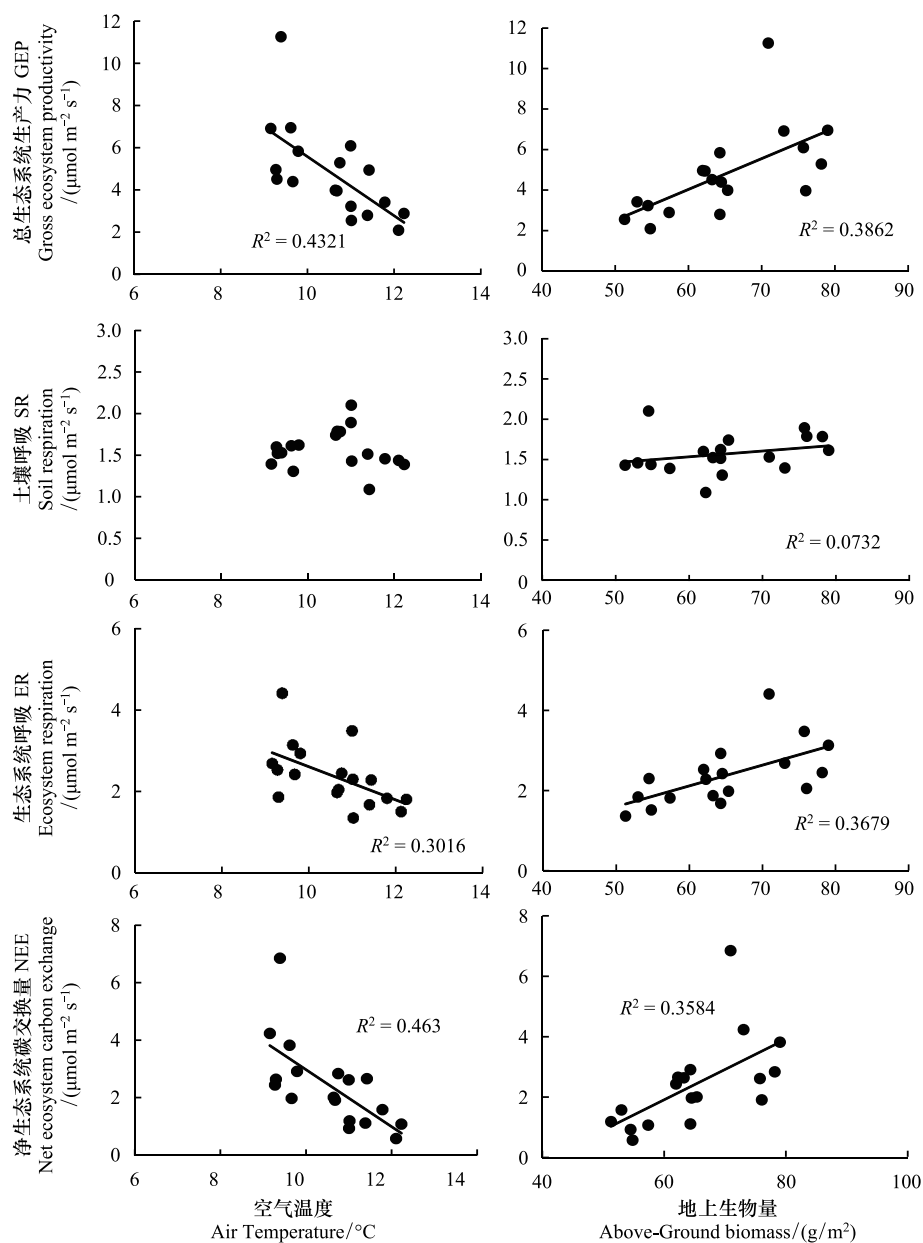


图6 总生态系统生产力、土壤呼吸、生态系统呼吸和净生态系统碳交换量与空气温度和地上生物量的关系

Fig.6 Relationship between gross ecosystem productivity, soil respiration, ecosystem respiration and net ecosystem carbon exchange and air temperature and above-ground biomass

4 结论

通过模拟增温对青藏高原高寒草原碳交换的观测与分析,结果表明,增温对高寒草原碳交换各组分的影响存在年际差异,但总体上对碳交换存在负面影响。增温显著降低了高寒草原地上生物量、GEP、ER 和 NEE,而 SR 对增温的响应随着年份的变化而不同。GEP、ER、SR 和 NEE 与土壤温度和土壤水分无显著相关,而 GEP、ER 和 NEE 与空气温度呈显著的负相关关系。NEE 降低主要是土壤干旱胁迫和地上生物量降低引起的。因此,在未来气候变暖的环境下,青藏高原高寒草原的碳汇功能会有一定程度的减弱。

参考文献 (References):

- [1] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(4): 446-452.
- [2] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 胡启武, 赵新全. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环. 生态学报, 2003, 23(4): 627-634.
- [3] 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.
- [4] 高清竹, 段敏杰, 万运帆, 李玉娥, 郭亚奇, 江村旺扎. 藏北地区生态与环境敏感性评价. 生态学报, 2010, 30(15): 4129-4136.
- [5] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan plateau during recent decades. International Journal of Climatology, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [6] 郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展. 地学前缘, 2002, 9(1): 95-102.
- [7] Liu X D, Yin Z Y. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 183(3/4): 223-245.
- [8] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects on mountain plants. Nature, 1994, 369(6480): 448-448.
- [9] Jarvis A J, Stauch V J, Schulz K S, Young P C. The seasonal temperature dependency of photosynthesis and respiration in two deciduous forests. Global Change Biology, 2004, 10(6): 939-950.
- [10] 元伟伟, 牛海山, 汪诗平, 刘艳杰, 张立荣. 增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究. 生态学报, 2012, 32(6): 1713-1722.
- [11] Lin X W, Zhang Z H, Wang S P, Hu Y G, Xu G P, Luo C Y, Chang X F, Duan J C, Lin Q Y, Xu B, Wang Y F, Zhao X Q, Xie Z B. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7): 792-802.
- [12] 耿晓东, 旭日. 梯度增温对青藏高原高寒草甸生态系统碳交换的影响. 草业科学, 2017, 34(12): 2407-2415.
- [13] Ganjurjav H, Gao Q, Zhang W, Liang Y, Li Y W, Cao X J, Wan Y F, Li Y, Danjiu L B. Effects of warming on CO₂ fluxes in an alpine meadow ecosystem on the central Qinghai-Tibetan Plateau. PLoS One, 2015, 10(7): e0132044.
- [14] Xia J Y, Niu S L, Wan S Q. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe. Global Change Biology, 2009, 15(6): 1544-1556.
- [15] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems-recent progress and challenges. Global Change Biology, 2006, 12(2): 141-153.
- [16] 刘福娟. 光合作用的影响因素分析. 农机化研究, 2004, (4): 237-237.
- [17] Xu Z Z, Zhou G S. Effects of water stress on photosynthesis and nitrogen metabolism in vegetative and reproductive shoots of *Leymus chinensis*. Photosynthetica, 2005, 43(1): 29-35.
- [18] Wertin T M, Belnap J, Reed S C. Experimental warming in a dryland community reduced plant photosynthesis and soil CO₂ efflux although the relationship between the fluxes remained unchanged. Functional Ecology, 2017, 31(2): 297-305.
- [19] 郭亚奇, 阿里穆斯, 高清竹, 段敏杰, 干珠扎布, 万运帆, 李玉娥, 郭红保. 灌溉条件下藏北紫花针茅光合特性及其对温度和 CO₂ 浓度的短期响应. 植物生态学报, 2011, 35(3): 311-321.
- [20] 胡中民, 于贵瑞, 樊江文, 温学发. 干旱对陆地生态系统水碳过程的影响研究进展. 地理科学进展, 2006, 25(6): 12-20.
- [21] 王云龙, 许振柱, 周广胜. 水分胁迫对羊草光合产物分配及其气体交换特征的影响. 植物生态学报, 2004, 28(6): 803-809.
- [22] 李军祥, 曾辉, 朱军涛, 张扬建, 陈宁, 刘瑶杰. 藏北高原高寒草甸生态系统呼吸对增温的响应. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1612-1620.
- [23] Fu G, Shen Z X, Zhang X Z, Yu C Q, Zhou Y T, Li Y L, Yang P W. Response of ecosystem respiration to experimental warming and clipping at daily time scale in an alpine meadow of Tibet. Journal of Mountain Science, 2013, 10(3): 455-463.
- [24] Wang W, Guo J X, Oikawa T. Contribution of root to soil respiration and carbon balance in disturbed and undisturbed grassland communities, northeast China. Journal of Biosciences, 2007, 32(2): 375-384.
- [25] 王妮, 汪涛, 彭书时, 方精云. 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气 CO₂ 交换过程. 植物生态学报, 2007, 31(3): 394-402.
- [26] Peng F, You Q G, Xu M H, Guo J, Wang T, Xue X. Effects of warming and clipping on ecosystem carbon fluxes across two hydrologically contrasting years in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau. PLoS One, 2014, 9(10): e109319.