

DOI: 10.5846/stxb201811302609

李岩, 干珠扎布, 胡国铮, 万运帆, 李玉娥, 旦久罗布, 何世丞, 谢文栋, 高清竹. 增温对青藏高原高寒草甸呼吸作用的影响. 生态学报, 2020, 40(1): 266-273.

Li Y, Hasbagan Ganjurjav, Hu G Z, Wan Y F, Li Y E, Danjiu L B, He S C, Xie W D, Gao Q Z. Effects of warming on respiration in alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 266-273.

增温对青藏高原高寒草甸呼吸作用的影响

李 岩¹, 干珠扎布^{1,*}, 胡国铮¹, 万运帆¹, 李玉娥¹, 旦久罗布², 何世丞², 谢文栋², 高清竹¹

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 那曲市草原站, 那曲 852100

摘要: 生态系统呼吸(ER)和土壤呼吸(SR)是草地生态系统碳排放的关键环节, 其对气候变化极为敏感。高寒草甸是青藏高原典型的草地生态系统, 其呼吸作用对气候变化的响应对区域碳排放具有重要的影响。以高寒草甸生态系统为对象, 于 2012—2016 年采用模拟增温的方法研究呼吸作用对增温的响应。结果表明: 增温对高寒草甸 ER 的影响存在年际差异, 2013 年和 2014 年增温对 ER 无显著影响, 其他年份显著增加 ER ($P < 0.05$), 综合 5 年结果, 平均增幅达 22.3%。增温显著促进了高寒草甸 SR ($P < 0.05$), 较对照处理 5 年平均增幅高达 67.1%; 增温总体上提高了 SR 在 ER 中的比例 ($P < 0.05$), 最高增幅达到 59.9%。ER 和 SR 与土壤温度有显著的正相关关系 ($P < 0.05$), 与土壤水分没有显著的相关关系 ($P > 0.05$)。对照样地中, 土壤温度分别能解释 33.0% 和 18.5% 的 ER 和 SR 变化。在增温条件下, 土壤温度可以解释 20.5% 和 13.0% 的 ER 和 SR 变化。在增温条件下, SR 的温度敏感性显著增加, 而 ER 的温度敏感性变化较小, 导致 SR 的比重进一步增加。因此, 在未来气候变暖条件下, 青藏高原高寒草甸生态系统碳排放, 尤其是土壤碳排放有可能进一步增加, 土壤碳流失风险增加。

关键词: 生态系统呼吸; 土壤呼吸; 温度敏感性; 青藏高原

Effects of warming on respiration in alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau

LI Yan¹, HASBAGAN Ganjurjav^{1,*}, HU Guozheng¹, WAN Yunfan¹, LI Yu'e¹, DANJIU Luobu², HE Shicheng², XIE Wendong², GAO Qingzhu¹

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

2 Nagqu Grassland Station, Nagqu 852100, China

Abstract: Ecosystem respiration (ER) and soil respiration (SR) are key components of grassland ecosystem carbon emissions and are extremely sensitive to climate change. Alpine meadow is one of the main grassland types on the Qinghai-Tibet Plateau and its response to climate change has an important influence on regional carbon emission. In this paper, we conducted in situ warming experiment to investigate the response of ecosystem respiration and soil respiration to warming in an alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau from 2012 to 2016. The results showed that there was the interannual variability of the warming effects on ER in the alpine meadow. In 2013 and 2014, warming had no significant effects on ER, but warming significantly increased ER in other years ($P < 0.05$). Five-year average of ER and SR increased by 22.3% and 67.1%, respectively, under warming compared to control. The proportion of SR in ER increased significantly under warming

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31570484); 国家自然科学基金 (青年) (31600366); 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: 2018-11-30; 网络出版日期: 2019-10-25

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

relative to control ($P < 0.05$), and the highest increase reached 59.9%. ER and SR were positively correlated with soil temperature ($P < 0.05$), not soil moisture ($P > 0.05$). In control plots, soil temperature explained variations of ER and SR by 33.0% and 18.5%, respectively. Under warming, the soil temperature explained variations of ER and SR by 20.5% and 13.0%. Under warming, the temperature sensitivity of SR increased significantly, while the temperature sensitivity of ER have no significant change. Overall, the carbon emissions and soil carbon loss may increase in the future climate warming scenario in alpine meadow ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau.

Key Words: ecosystem respiration; soil respiration; temperature sensitivity; Qinghai-Tibet Plateau

自工业革命以来,全球气候持续变暖,高纬度地区和高海拔地区表现的尤为明显^[1]。气候变化通过影响陆地生态系统的结构和功能,进而影响碳循环过程^[2]。生态系统呼吸作用(ER, Ecosystem respiration)是重要的碳输出过程,其包括土壤呼吸(SR, Soil respiration)和植物地上部分呼吸。其中,土壤呼吸约占陆地生态系统呼吸的 47.5%—96.4%^[3]。

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,约 90% 的碳贮存在土壤中^[4]。青藏高原高寒草甸是典型的高寒草地生态系统^[5],其海拔高、生态系统脆弱,对气候变化极为敏感,被称为“生态指示器”。近年来,作为气候变化的高敏感区域,青藏高原气候发生了明显的变化,增温幅度达每 10 年 0.32℃,显著高于其他地区^[6]。目前,研究人员在青藏高原开展了一系列关于气候变化对高寒草甸生态系统碳排放相关研究,但并未得到一致结论^[7-8]。李军祥等^[7]研究表明,增温显著降低了 ER,土壤温度和水分是决定 ER 的关键因素;Fu 等^[8]通过 3 年的增温实验却发现,增温促进 ER,空气温度是控制 ER 的主要因素,由于植物和微生物对模拟增温的适应性,增温降低了 ER 的温度敏感性。还有研究得出小于 2℃ 和大于 3℃ 的增温均没有显著促进高寒草甸 CO₂ 的排放^[9]。也有研究表明土壤温度与 ER 有正相关关系,土壤温度是 ER 的主要控制因素^[10]。土壤呼吸是生态系统呼吸的重要组成部分。Peng 等^[11]在不同含水量高寒草甸生态系统的变暖实验中得出增温显著促进了 SR,土壤含水量决定了 SR 对气候变暖的响应。也有在高寒草甸的研究得出增温促进了 SR,土壤温度是 SR 的主要影响因素,土壤水分与 SR 无显著相关^[10]。还有研究表明 SR 与土壤温度和水分均有显著的相关关系,即土壤温度和水分越高,SR 越大^[12]。

目前,在青藏高原开展的大多数增温对生态系统呼吸影响的研究试验周期较短,多在 3 年以下,且未能将高寒草甸 ER 和 SR 对增温响应的差异性进行比较。因此,为进一步明确生态系统呼吸和土壤呼吸对增温响应的相对变化,本文采用开顶增温室(Open Top Chamber, OTC)于 2012—2016 年进行模拟增温,旨在研究未来气候变化条件下,青藏高原高寒草甸生态系统呼吸和土壤呼吸的变化趋势。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于西藏自治区那曲市色尼区那曲镇的农业农村部农业环境科学观测实验站,地理坐标为北纬 31°44′、东经 92°02′。该区平均海拔超过 4500 m,属于高原亚寒带半干旱季风性气候,雨热同季,近十年(2005—2014 年)年均气温为 0.3℃,生长季平均气温为 8.0℃;年均降水量为 462 mm,生长季降水量 403 mm,主要集中在 5—9 月;年日照时数为 2790 h。试验地位于地势平坦,群落结构均匀的自然高寒草甸,主要以莎草科高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)和青藏苔草(*Carex moorcroftii*)为建群种,其他的莎草科植物还有线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)和矮生嵩草(*Kobresia humilis*);伴生种包括禾本科的紫花针茅(*Stipa purpurea*)、早熟禾(*Poa pratensis*),豆科的藏豆(*Stracheya tibetica*)、紫花棘豆(*Oxytropis subfalcata*)以及钉柱委陵菜(*Potentilla saundersiana*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurea*)和肉果草(*Lancea tibetica*)等杂草。试验地土壤类型为高寒草甸土,土壤质地为砂壤土。试验于 2011 年 7 月开始进行,于 2012—2016 年生长季(5—9 月)进行数据采集。

1.2 试验设计

增温装置为是聚碳酸酯为制作材料的开顶增温室,其规格为:底部直径 1.2 m,顶部直径 0.6 m,高 0.45 m。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。

1.3 数据观测方法

土壤温湿度和空气温度测定:采用温湿度记录器(北京佳乐宜科技有限公司)对青藏高原高寒草甸生态系统土壤温湿度(5 cm)和空气温度进行全年动态观测,测定频率为 1 h。

生态系统呼吸测定:采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪(LI-COR Inc, Lincoln, NE, USA)和箱式法对高寒草甸 ER 进行测定。每次实验开始前,将面积为 30 cm×30 cm 的底座嵌入各小区中,并做好标记,以备日后的定点测定。在植物生长季,选择晴朗天气在 10:00—12:00 进行测定,每 10—15 天测定 1 次^[10,13]。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,并用遮光布(内黑外白)盖在箱上,开始测定 ER,测定时间为 90 s。

土壤呼吸测定: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—12:00 进行观测,每次测定时间为 90 s,每 10—15 天测定 1 次,与 ER 同时测定。

1.4 数据处理方法

呼吸作用月均值为该月中多次测定值的均值,年均值为该年生长季各月份均值的平均。

采用 t 检验对比对照和增温处理之间土壤温度、空气温度和土壤湿度的差异,采用重复测定方差分析法分析年、月和增温对高寒草甸 ER、SR 和 SR/ER 的影响,采用 Pearson 相关分析法和逐步回归方法分析 ER 和 SR 与土壤温度、空气温度和土壤湿度的关系。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸生态系统环境因子对增温的响应

对照样地中,高寒草甸土壤温度(ST, Soil temperature)年际间变化较小(图 1),2013 年土壤温度最高,达 13.2℃,2015 年最小,为 11.8℃,五年平均为 12.6℃;在增温条件下,土壤温度为 14.3℃,较对照增加了 1.7℃,显著高于对照处理($P<0.05$);对照处理下,五年生长季平均空气温度(AT, Air temperature)为 10.7℃,增温条件下为 13.0℃,较对照增加了 2.3℃($P<0.05$)。对照样地内,土壤含水量(SWC, Soil water content)五年均值为 15.2%,增温条件下为 13.3%,两者具有显著差异($P<0.05$)。

2.2 增温对高寒草甸生态系统呼吸(ER)的影响

增温对高寒草甸生态系统呼吸的影响存在显著地年际差异($P<0.05$,表 1)。在增温初期(2012 年),增温

表 1 不同测定时间内生态系统呼吸和土壤呼吸的显著性

Table 1 Significance of ecosystem respiration and soil respiration in different measurement times

模型/Model	生态系统呼吸 Ecosystem respiration		土壤呼吸 Soil respiration	
	F	Sig	F	Sig
年 Year	63.472	<0.001	17.498	<0.001
月 Month	73.185	<0.001	24.672	<0.001
处理 Treat	40.287	<0.001	63.103	<0.001
年×月/Year×Month	6.232	<0.001	6.054	<0.001
年×处理/Year×Treat	5.839	<0.001	3.821	<0.05
月×处理/Month×Treat	1.859	>0.05	2.933	<0.05
年×月×处理/Year×Month×Treat	0.342	>0.05	1.829	>0.05

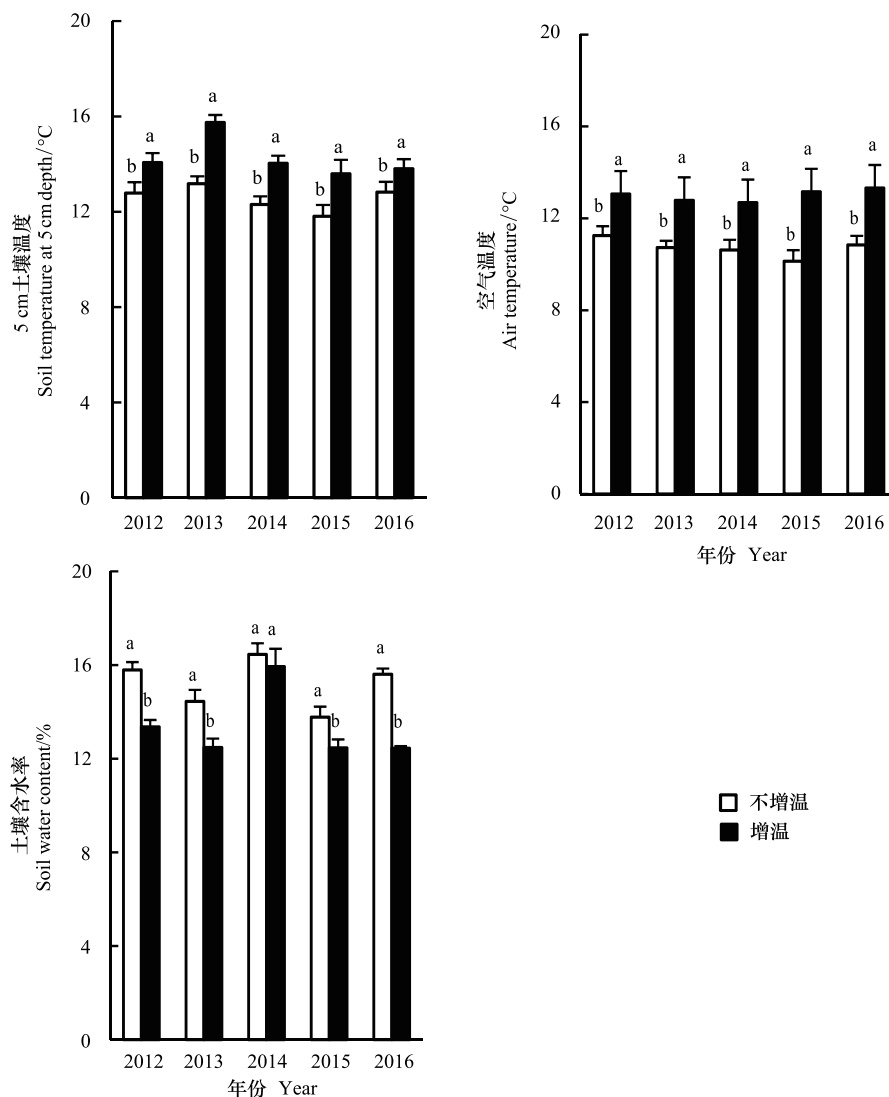


图1 增温对高寒草甸环境因子的影响

Fig.1 Effects of warming on environmental factors in alpine meadow

显著促进了高寒草甸 ER ($P < 0.05$), 图 2 增幅达到 20.9%。但在 2013 年和 2014 年, 增温对 ER 没有明显的影响 ($P > 0.05$); 同时, 2013 年和 2014 年 ER 显著低于其他年份 ($P < 0.05$)。同 2012 年一样, 较对照处理, 2015 年和 2016 年增温显著提高了 ER ($P < 0.05$), 其中, 2015 年增温使 ER 提高了 46.6%。高寒草甸 ER 五年均值在对照和增温处理中分别为 $2.94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $3.60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 经方差分析, 增温条件下 ER 显著高于对照处理 ER ($P < 0.05$), 增幅达 22.3%。

在年内尺度上, 高寒草甸生长季 ER 对增温响应的变化不尽相同 (图 3)。对照样地内, ER 最高值出现在七月份或八月份; 其中, 2016 年 8 月达到最高点, 为 $6.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。增温条件下, 2016 年 8 月 ER 最高, 其值为 $6.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在 2013 年和 2014 年生长季初期, 增温降低了 ER, 而到生长季中后期, 增温促进了 ER。以 2014 年为例, 在 5 月份, 对照和增温处理下 ER 分别为 $1.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 但到 6 月份, 其值分别为 $1.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $2.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

2.3 增温对高寒草甸土壤呼吸 (SR) 的影响

在青藏高原高寒草甸, 增温显著促进了 SR ($P < 0.05$)。增温条件下, 高寒草甸 SR 最高值出现在 2016 年, 为 $3.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图 4)。较对照处理, 2015 年增温处理下 SR 增幅最大, 达 142.7%; 在其他年份, 2012 年,

2013 年,2014 年和 2016 年增温使 SR 增幅分别达到 52.4%,42.5%,52.2%和 63.2%。高寒草甸 5 年 SR 均值为 $1.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,增温条件下为 $2.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,增幅达 67.1% ($P<0.05$)。

在年内尺度上,增温显著促进了 SR ($P<0.05$),且具有明显的月份差异 ($P<0.05$,表 1)。在生长季内,高寒草甸 SR 呈现较为明显的规律,SR 峰值总会出现于 7 月末或 8 月初,2016 年例外,峰值出现在 9 月初,且峰值的大小因年份不同而不同(图 5)。以 2014 年为例,进入生长季后,SR 不断升高,直到 7 月 7 日达到第一个峰值,为 $1.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,之后开始下降,在 8 月甚至降至 $0.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。除此之外,2013 年和 2016 年增温处理中第一次 SR 出现峰值的时间与对照处理有所不同。

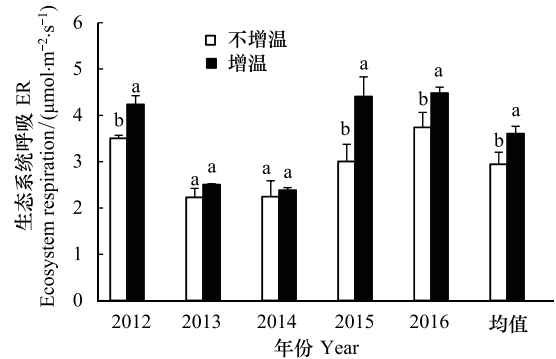


图 2 增温对高寒草甸生态系统呼吸(ER)年际变化的影响

Fig.2 Effect of warming on interannual changes of ecosystem respiration(ER) in alpine meadow

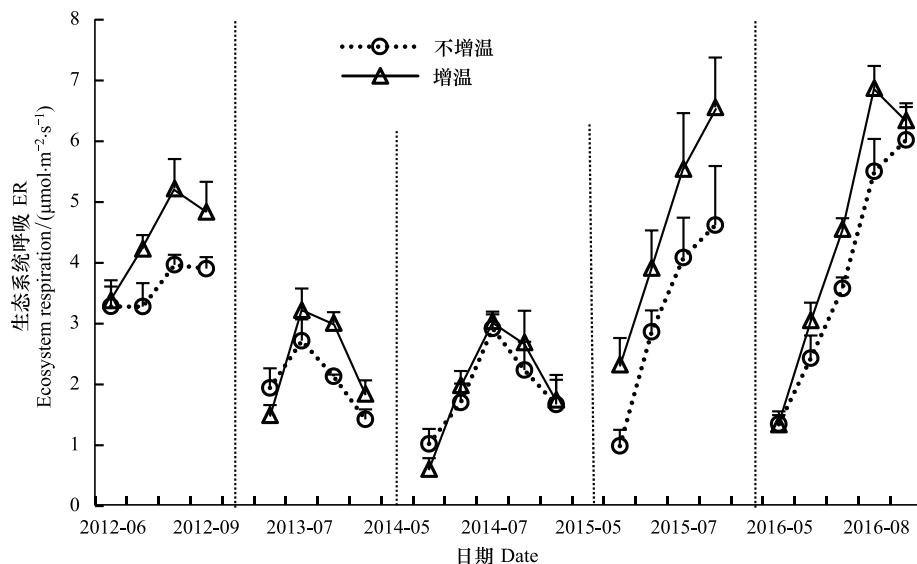


图 3 增温对高寒草甸生态系统呼吸(ER)年内变化的影响

Fig.3 Effects of warming on the changes of respiration (ER) in alpine meadow ecosystems during the year

2.4 增温对高寒草甸土壤呼吸与生态系统呼吸比值(SR/ER)的影响

高寒草甸不同年份增温均显著提高了 SR/ER ($P<0.05$)。对照样地中,不同年份之间 SR/ER 波动较大;其中,2014 年达到最高值,为 0.52,而 2012 年仅为 0.37,比 2014 年降低了 28.8%(图 6)。在增温条件下,高寒草甸 SR/ER 在 2014 年达到最大,其值为 0.74,最小为 2012 年的 0.49。不同年份增温均显著提高了 SR/ER ($P<0.05$),最高增幅出现在 2015 年,增幅达 59.9%。综合五年结果,SR/ER 在增温条件下为 0.64,显著高于对照处理的 0.45 ($P<0.05$)。

3 高寒草甸生态系统呼吸和土壤呼吸与环境因子之间的关系。

青藏高原高寒草甸 ER 和 SR 与土壤温度和空气温度之间有着显著地相关关系 ($P<0.05$)。由于土壤温度与呼吸作用的拟合度更高,因此未将空气温度放入回归方程中。对照样地中,ER 和 SR 与 ST 之间呈显著的正相关关系 ($P<0.05$),即土壤温度升高能够促进呼吸作用,土壤温度分别能解释 33.0%和 18.5%的 ER

和 SR 变化(表 2)。在增温条件下,土壤温度仅能解释 20.5%和 13.0%的 ER 和 SR 变化。对比不同处理下 ER 与温度之间的回归方程斜率相差较小,即增温处理中 ER 的敏感性较对照增加了 15.4%;但 SR 与温度之间的回归方程斜率在增温处理中达到 0.11,明显高于对照的 0.07,增幅达 57.1%。除此之外,土壤水分与 ER 和 SR 没有表现出显著的相关关系($P>0.05$),这就说明相对于土壤水分,温度对呼吸作用起着更为关键的作用。

4 讨论

生态系统呼吸是草地生态系统碳交换环节中的主要碳输出过程。生态系统呼吸包括土壤动物、土壤微生物和植物的呼吸过程。生态系统呼吸的强弱不仅可以

影响出植物生产力,其对生态系统碳源碳汇功能具有重要意义。有研究得出,在高寒草甸,增温通过改变土壤温湿度而促进土壤碳氮循环,提高土壤纤维素酶和磷酸酶的活性^[14],从而提高微生物活性^[15],最终促进 ER。本研究结果显示,增温在某些年份增加了 ER,在一些年份无显著影响。例如,在 2013 年和 2014 年,增温并未显著改变高寒草甸 ER,这可能与增温条件下植物生长期推迟,导致生长季前期增温处理中 ER 低于对照,从而抵消了生长旺季增温对 ER 的正效应^[16]。

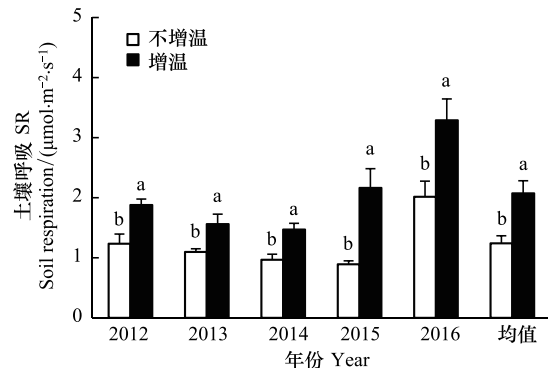


图 4 增温对高寒草甸土壤呼吸(SR)年际变化的影响

Fig. 4 Effect of warming on interannual changes of soil respiration (SR) in alpine meadow

表 2 生态系统呼吸和土壤呼吸与土壤温度的关系

Table 2 Relationship between ecosystem respiration, soil respiration and soil temperature

因变量 Dependent variable	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	Sig.
生态系统呼吸 Ecosystem respiration	对照	$ER = 0.26 ST - 0.46$	0.330	<0.001
	增温	$ER = 0.30 ST - 0.63$	0.205	<0.001
土壤呼吸 Soil respiration	对照	$SR = 0.07 ST + 0.35$	0.185	<0.05
	增温	$SR = 0.11 ST + 0.35$	0.130	<0.05

土壤呼吸是生态系统呼吸的重要组成部分,其强弱可以反映出大气与土壤之间 CO_2 交换能力的高低。以往的很多研究表明,温度升高一般会促进土壤 CO_2 的排放^[17-19]。一方面,低温下土壤呼吸受生物化学反应限制,根呼吸随着升温呈指数上升^[20]。另一方面,增温改变土壤微生物数量、群落结构和活性^[21],进而影响土壤 CO_2 释放速率。与多数研究结果相似,在本研究中,增温显著促进了 SR($P<0.05$)。

高寒草甸生态系统中,SR 约占 ER 的 46%^[22],这与本文的研究结果相近。本研究发现,对照条件下 SR/ER 为 45%。在增温条件下,SR 的增加幅度高于 ER,因此其在 ER 中的比重由对照的 45%增加到 64%,说明土壤呼吸比地上的自氧呼吸对温度更为敏感。有大量研究指出增温通过增加凋落物的分解速率^[23],加速土壤有机质及营养矿物质的分解速度^[24-25],或促进植物根系呼吸^[20],从而增加土壤碳排放。因此,从本研究结果来看,在未来持续变暖的环境下,土壤碳排放有可能进一步增加,存在土壤碳流失的风险。

在青藏高原高寒草甸生态系统中,温度是决定 ER 和 SR 的主要因素。在青藏高原的一些研究表明,呼吸作用与温度存在正相关关系,与土壤水分关系并不显著^[10,26]。但也有研究发现升温对呼吸作用的影响取决于土壤水分,在湿润条件下增温促进呼吸作用,而在干旱条件下则具有抑制作用^[11]。本研究结果显示,呼吸作用与温度存在显著的正相关关系($P<0.05$,表 2),而与土壤水分的关系并不显著($P>0.05$)。这可能是因为高寒草甸生长季水分条件充足,但温度较低,使温度成为呼吸作用的主要限制因子^[27-28]。

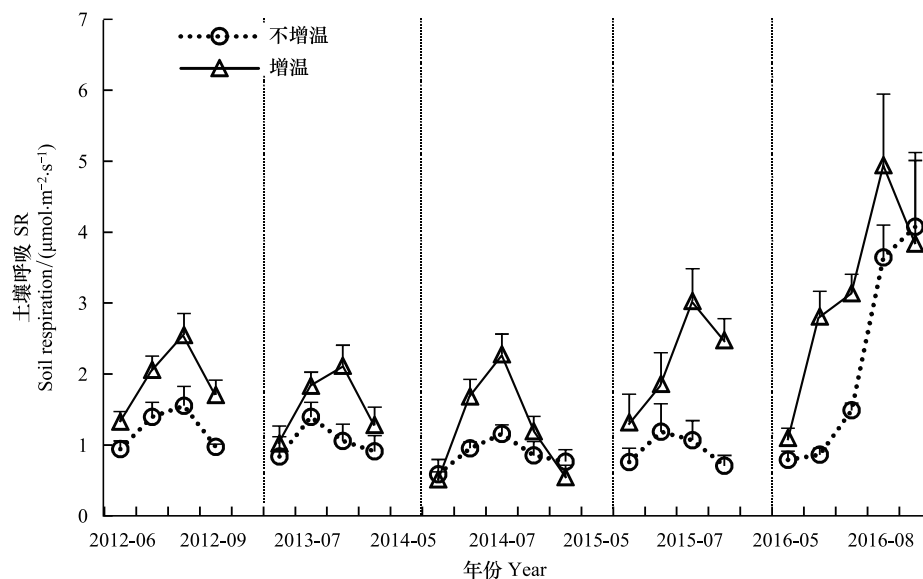


图5 增温对高寒草甸土壤呼吸(SR)年内变化的影响

Fig.5 Effects of warming on the changes of soil respiration (SR) in alpine meadow ecosystems during the year

5 结论

通过5年的增温试验,研究了藏北高寒草甸生态系统呼吸和土壤呼吸对增温的响应,结果表明,增温显著促进了高寒草甸ER和SR,增幅分别达到22.3%和67.1%。增温提高了SR在ER中的比例,由对照的45%显著上升到64%。温度是影响高寒草甸呼吸作用的重要因素,呼吸作用与温度存在正相关关系,而与水分没有显著的相关关系。因此,在未来气候持续变暖的条件下,高寒草甸碳排放,尤其是土壤碳排放将有可能进一步增加。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Luo Y Q, Sherry R, Zhou X H, Wan S Q. Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming: experimental evidence on plant regulation and impacts of biofuel feedstock harvest. GCB Bioenergy, 2009, 1(1): 62-74.
- [3] Wang J, Sha L Q, Li J Z, Feng Z L. CO₂ efflux under different grazing managements on subalpine meadows of Shangri-La, Northwest Yunnan Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3574-3583.
- [4] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81-99.
- [5] Gao Q Z, Li Y, Xu H M, Wan Y F, Jiangcun W Z. Adaptation strategies of climate variability impacts on alpine grassland ecosystems in Tibetan Plateau. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2014, 19(2): 199-209.
- [6] 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.
- [7] 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.

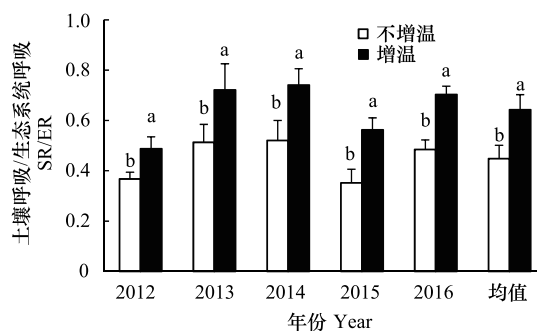


图6 增温对高寒草甸土壤呼吸/生态系统呼吸(SR/ER)的影响

Fig. 6 Effects of warming on soil respiration/ecosystem respiration (SR/ER) in alpine meadow

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Peng F, Xu M H, You Q G, Zhou X H, Wang T, Xue X. Different Responses of soil respiration and its components to experimental warming with contrasting soil water content. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2015, 47(2): 359-368.
- [12] 常宗强, 冯起, 司建华, 苏永红, 席海洋, 郭瑞. 祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量的时空变化及其影响分析. *环境科学*, 2007, 28(10): 2389-2395.
- [13] Niu S L, Wu M Y, Han Y, Xia J Y, Li L H, Wan S Q. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 2008, 177(1): 209-219.
- [14] 刘琳, 朱霞, 孙庚, 罗鹏, 王蓓. 模拟增温与施肥对高寒草甸土壤酶活性的影响. *草业科学*, 2011, 28(8): 1405-1410.
- [15] 周兴民. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] Ganjurjav H, Gao Q Z, Schwartz M W, Zhu W Q, Liang Y, Li Y, Wan Y F, Cao X J, Williamson M A, Jiangcun W, Guo H B, Lin E D. Complex responses of spring vegetation growth to climate in a moisture-limited alpine meadow. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23356.
- [17] Cox P M, Betts R A, Jones C D, Spall S A, Totterdell I J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, 408(6809): 184-187.
- [18] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [19] 严文超, 孙庚, 张春波, 何静, 张楠楠. 模拟增温和中度放牧对青藏高原东部高寒草甸生态系统净碳交换及组分的影响. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(1): 132-139.
- [20] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 141-154.
- [21] Bokhorst S, Bjerke J W, Melillo J, Callaghan T V, Phoenix G K. Impacts of extreme winter warming events on litter decomposition in a sub-Arctic heathland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(4): 611-617.
- [22] Hu Q W, Wu Q, Cao G M, Li D, Long R J, Wang Y S. Growing season ecosystem respirations and associated component fluxes in two alpine meadows on the Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(3): 271-279.
- [23] Bronson D R, Gower S T, Tanner M, Linder S, Van Herk I. Response of soil surface CO₂ flux in a boreal forest to ecosystem warming. *Global Change Biology*, 2008, 14(4): 856-867.
- [24] Körner C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 1998, 115(4): 445-459.
- [25] Nadelhoffer K J, Giblin A E, Shaver G R, Linkins A E. Microbial processes and plant nutrient availability in Arctic soils//Chapin III F S, Jefferies R L, Reynolds J F, Shaver G R, Svoboda J, Wu E W, eds. *Arctic Ecosystems in A Changing Climate*. San Diego: Academic Press, 1992: 281-300.
- [26] Chen B Y, Liu S R, Ge J P, Chu J X. Annual and seasonal variations of Q₁₀ soil respiration in the sub-alpine forests of the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1735-1742.
- [27] 石福孙, 吴宁, 吴彦, 王乾. 模拟增温对川西北高寒草甸两种典型植物生长和光合特征的影响. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(6): 750-755.
- [28] Chen J, Luo Y Q, Xia J Y, Shi Z, Jiang L F, Niu S L, Zhou X H, Cao J J. Differential responses of ecosystem respiration components to experimental warming in a meadow grassland on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 21-29.