

韩丹,李玉霖,杨红玲,等.模拟增温和改变降雨频率对干旱半干旱区土壤呼吸的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):100-108.

模拟增温和改变降雨频率对干旱半干旱区土壤呼吸的影响

韩丹^{1,2},李玉霖¹,杨红玲^{1,2},宁志英^{1,2},张子谦^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 温度和降水是干旱半干旱区土壤呼吸的重要扰动因子,全球气候变化导致的未来干旱半干旱区增温和降水变率增大对土壤呼吸有着重要影响。研究通过人工设置 $P_{16 \times 2.5mm}$ 、 $P_{8 \times 5mm}$ 、 $P_{4 \times 10mm}$ 、 $P_{2 \times 20mm}$ 、 $P_{1 \times 40mm}$ 的降雨频率梯度和增温 $2^{\circ}C$ 左右的控制试验,探讨不同降雨频率和增温处理对干旱半干旱区土壤呼吸的影响,以及土壤呼吸与土壤温湿度度的关系及其对降雨频率改变的响应。结果表明:降雨频率和增温单独对土壤呼吸具有极显著影响 ($P < 0.001$),但是两者之间并无交互作用 ($P > 0.5$);在降雨量一定的情况下,土壤呼吸速率随着降雨频率的减小而减小,即多频率小降雨事件激发的土壤呼吸速率大于小频率大降雨事件;增温促进土壤呼吸,提高了约 11% 的土壤呼吸。本结果有助于对未来干旱半干旱地区全球变暖背景下降雨格局的改变对土壤呼吸产生的影响进行预测,同时也为进一步估算该区域生态系统的碳收支提供参考数据。

关键词: 降雨频率; 增温; 土壤呼吸; 干旱半干旱地区

文章编号: 1000-694X(2021)02-100-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00111

中图分类号: S153

文献标志码: A

0 引言

全球气候变化将引起降雨格局改变和温度的升高,这势必会影响陆地表面土壤呼吸,扰动全球碳库平衡,进一步改变全球变暖的趋势^[1-2]。干旱半干旱区作为陆地生态系统的重要组成部分,面积约占陆地表面的 40%,脆弱的生态系统使得该地区土壤呼吸对温度和水分的变化十分敏感^[3]。因此,深入研究该区域土壤呼吸对温度和水分变化做出的响应,对于准确揭示未来全球气候变化背景下,该区域生态系统碳循环对气候变化的响应过程有着极其重要的意义。

IPCC 气候变化研究显示,全球平均地表温度大约上升了 $0.85^{\circ}C$ ^[4]。温度升高可以促进微生物的活性,提高可溶性碳的浓度^[5-7]。温度升高引起的干旱胁迫会抑制土壤呼吸,且这种影响会随着土壤干旱程度的变化而变化^[8]。长期干旱的土壤,一旦降雨发生,会显著激发土壤呼吸,且干旱时间越长,这种

激发效应越大^[8-14]。此外,在干旱季增加灌溉次数,提高土壤湿度也会显著增加土壤可溶性碳浓度,促进土壤呼吸^[15]。荒漠生态系统长期处于干旱状态,对水分的响应极其敏感,而由降雨引起的干土复湿会在一定程度上激发土壤呼吸,且这种程度很可能会随着干旱时间尺度的改变而改变^[16]。全球变暖导致干旱半干旱地区降雨变率增加,具体表现为降雨强度变大和干旱周期的延长,这将会进一步加深该地区土壤干旱的程度,进而影响土壤呼吸^[1,17]。目前已有大量研究揭示了降雨量和土壤呼吸之间的关系,但对于全球变暖背景下降雨变率增大引起的降雨频率改变对干旱半干旱区土壤呼吸的影响还缺乏共识^[18-20],而由于降雨频率改变引起的土壤干旱程度的变化对土壤呼吸极其重要。因此,在温度变化的基础上,探究干旱半干旱地区土壤呼吸对降雨频率变化做出的响应对准确预测未来全球变暖的趋势具有重要意义。

本研究拟通过人工改变降雨频率和开顶箱

收稿日期:2020-06-24; 改回日期:2020-10-19

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD00704);国家重点研发计划项目(2016YFC0500907)

作者简介:韩丹(1995—),女,青海人,硕士研究生,主要从事干旱区生态研究。E-mail: h_d177258@163.com

通信作者:李玉霖(E-mail: lyulin@gmail.com)

(open-top chamber, OTC)增温控制试验,以干旱半干旱区降雨格局改变和温度升高为背景,研究降雨频率和增温对土壤呼吸的影响,以及不同降雨频率下土壤呼吸与土壤温湿度之间的关系。旨在揭示未来全球气候变化背景下,中国干旱地区土壤呼吸对降雨频率改变、温度升高的响应过程,同时也为进一步估算该区域生态系统的碳收支提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验在内蒙古奈曼旗科尔沁沙地进行,该区属于半干旱大陆性季风气候区,年均气温为 5.7—6.6℃,极端最高气温 39℃,极端最低气温-29.3℃。多年平均降水量 360 mm,生长季内降雨以<10 mm 的降雨事件为主,约占总降雨事件的 64%、总降雨量的 17%;≥30 mm 的降雨事件约占总降雨事件的 11%、总降雨量的 46%,且对总降雨量具有决定性的影响。<10 mm 降雨的间隔在 1—10 d,≥30 mm 的降雨周期约为 30 d^[21]。该地区南部多为褐土、黑垆土,西部多为栗钙土,东部多为钙土,同时伴随着风沙土。表 1 为试验区 0—10 cm 的土壤基本性状。

表 1 培养土壤基本性状(0—10 cm)

Table 1 Physical and chemical properties (0–10 cm) of incubated soil

土壤性状	测定值	土壤性状	测定值
黏粉粒含量/%	9.6	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)	1.72
极细砂含量/%	14.8	全氮含量/(g·kg ⁻¹)	0.22
中粗砂含量/%	75.6	碳氮比	7.8
最大持水量/%	5.9	pH 值	7.84
容重/(g·cm ⁻³)	1.59	电导率/(μS·cm ⁻¹)	23

1.2 研究方法

为了模拟不同降雨频率下的土壤干湿交替过程,试验设置 5 个降雨梯度处理,各个处理之间相互对照(图 1)。将总降雨量设置为 40 mm,按照单次降雨量为 2.5、5、10、20、40 mm 在 32 d 内通过控制降雨间隔为 16、8、4、3、2、1 d 均匀分配分别来模拟小降雨和大降雨事件,每个处理设置 5 个重复。同时,为了模拟气候变暖所导致的增温对土壤呼吸的影响,试验设计了 OTC 增温装置,该设置可将温度增高约 2℃左右,增温处理和降雨处理在同一块试验

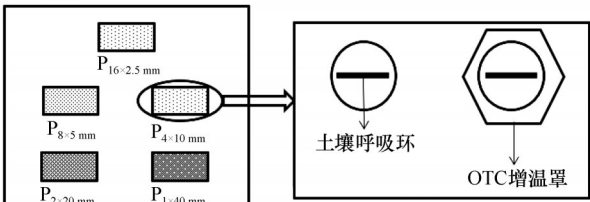


图 1 样地设置
Fig.1 Setting of the experimental plot

地同时交叉进行,以探讨二者之间交互作用。
在科尔沁沙地选取一块 1 000 m²相对平整且没有植物的沙地,分成 5 个 10 m×20 m 样区,每个样区内随机布置 5 个 2 m×2 m 的小区,包括 P_{16×2.5mm}(降雨时间为第 1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、21、23、25、27、29、31 天,单次降雨量为 2.5 mm)、P_{8×5mm}(降雨时间为第 1、5、9、13、17、21、25 天,单次降雨量为 5 mm)、P_{4×10mm}(降雨时间为第 1、9、17、25 天,单次降雨量为 10 mm)、P_{2×20mm}(降雨时间为第 1、17 天,单次降雨量为 20 mm)和 P_{1×40mm}(降雨时间为第 1 天,单次降雨量为 40 mm)5 个处理的降雨频率梯度,每个梯度设置 5 个重复。另外在每个小区内布置 2 个 2 m×1 m 的亚区,每个亚区内提前放置土壤呼吸环(PVC 材质,内壁直径 10 cm,高 8 cm,露出地表约 2 cm),其中一个亚区内单独放置一个上部开口的 OTC 增温罩。

此外,根据研究区降雨的间隔分布情况(约为 9 d),对样区土壤采取为期 12 d 的干旱处理,当土壤含水量下降到 4% 左右开始试验。试验开始前一天按照样区设置人工模拟降雨处理,分别为 P_{16×2.5mm}、P_{8×5mm}、P_{4×10mm}、P_{2×20mm} 和 P_{1×40mm} 5 个处理。模拟降雨在前一天下午完成,浇水后第二天测量样区土壤呼吸。试验一共进行 32 d,为了模拟生长季和雨季的环境,试验时间选在 7 月 1 日至 8 月 1 日,在每天的 08:00—11:30 使用土壤 CO₂ 通量测定系统(Li-8100, Li-COR Inc, Lincoln, 美国)对土壤呼吸和温湿度进行测定。试验期间,如果遇到阴雨天,则用遮雨棚盖住样地以免自然降雨落入。

1.3 数据处理

用双因素重复测量方差分析检验增温和降雨频率对土壤温湿度、土壤呼吸速率影响的差异性,另外对不同降雨频率组内进行 LSD 差异性分析。采用相关性分析探讨土壤温湿度和土壤呼吸之间的关系。利用 Excel 软件对数据进行预处理,SPSS

25 软件进行方差分析, SigmPlot 14 软件制作相关的基础图件。

2 结果

2.1 土壤温湿度和土壤呼吸的动态变化

增温对土壤湿度的影响无显著差异($P>0.1$), 不同降雨频率对土壤湿度的影响具有显著性差异($P<0.01$, 表2), 但是二者之间对土壤湿度的影响并无交互作用($P>0.5$)。土壤温度的变化幅度很小, 增温提高了约2℃(图2)。土壤湿度的变化基本与降雨同步, $P_{16\times 2.5\text{mm}}$ 和 $P_{8\times 5\text{mm}}$ 土壤湿度随周期性降雨小幅度升高并逐渐稳定在11%左右。相比较 $P_{16\times 2.5\text{mm}}$ 和 $P_{8\times 5\text{mm}}$, $P_{4\times 10\text{mm}}$ 、 $P_{2\times 20\text{mm}}$ 、 $P_{1\times 40\text{mm}}$ 水分波动较为剧烈, 降雨后土壤水分迅速升高, 然后逐渐下降至雨前湿度至下次降雨。不同降雨频率的湿度波动范围: 增温处理下, $P_{1\times 40\text{mm}}$ 最大(3.4%—17.5%), 不增温处理下 $P_{2\times 20\text{mm}}$ 最大(3.6%—17.7%)。

土壤湿度的变化显著影响土壤呼吸(图3)。土

表2 增温和降雨频率对土壤温湿度的影响

Table 2 Effect of increasing temperature and rainfall frequency on soil temperature and humidity

处理	温度/℃		湿度/%	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
小区	1.422	>0.1	1.627	>0.1
增温	1820.557	<0.01	.073	>0.5
降雨频率	42.351	<0.01	561.883	<0.01
增温×降雨频率	0.000	>0.5	0.080	>0.5

壤呼吸在降雨初期被显著激发, 且降雨越多, 激发效应越大。在 $P_{16\times 2.5\text{mm}}$ 、 $P_{8\times 5\text{mm}}$ 的降雨频率下, 增温组和不增温组土壤呼吸在3—7 d后随着土壤湿度的变化趋于稳定状态。相较于 $P_{16\times 2.5\text{mm}}$ 和 $P_{8\times 5\text{mm}}$, $P_{4\times 10\text{mm}}$ 、 $P_{2\times 20\text{mm}}$ 、 $P_{1\times 40\text{mm}}$ 的土壤呼吸对水分变化的响应十分剧烈。降雨后, 土壤含水量变大, 土壤呼吸速率在降雨后24 h达到峰值。增温组 $P_{1\times 40\text{mm}}$ 变化最大(1.04—9.69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 平均3.11 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 不增温组为 $P_{4\times 10\text{mm}}$ (1.29—9.09 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 平均3.73

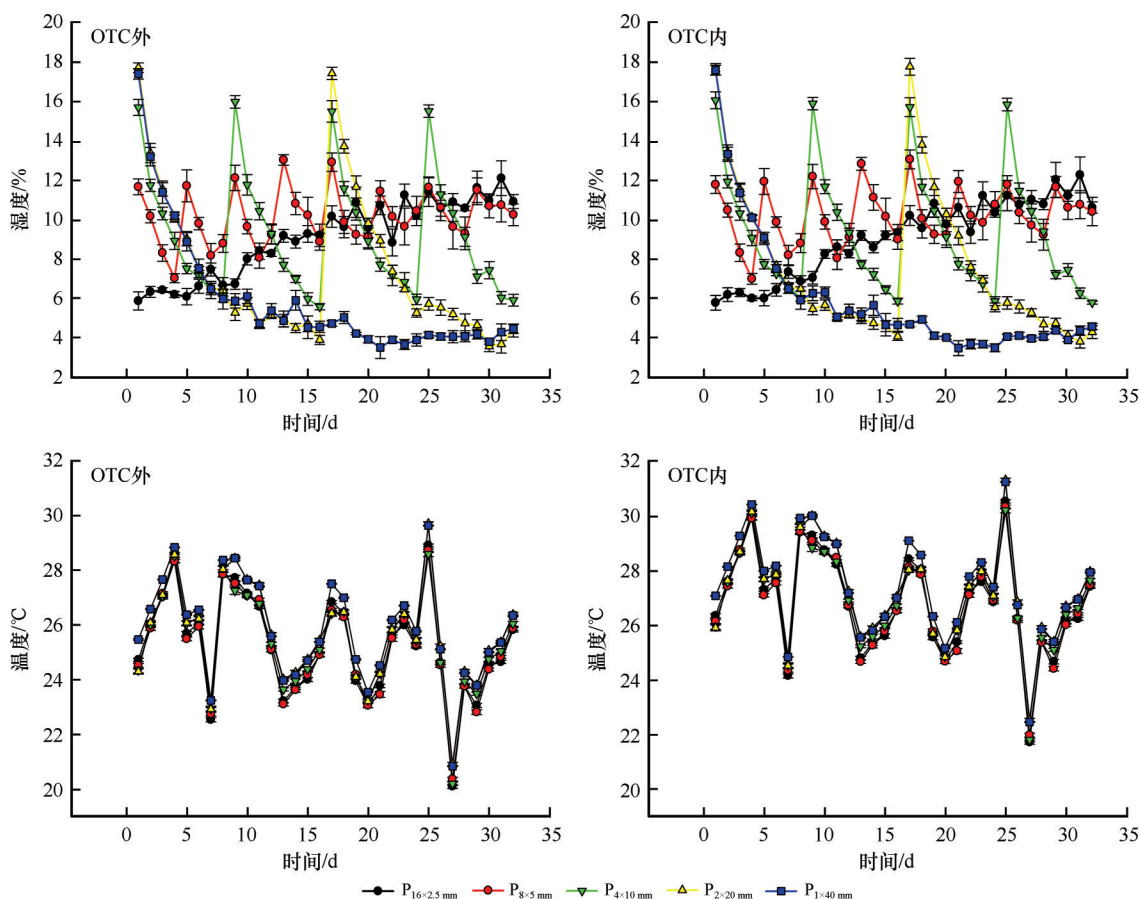


图2 土壤温湿度日变化动态

Fig.2 Diurnal dynamics of soil temperature and humidity

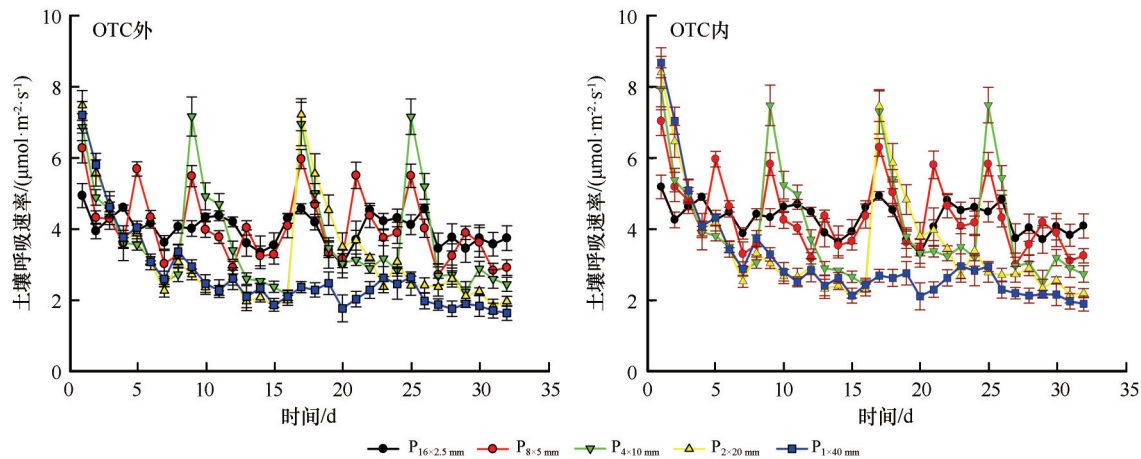


图3 土壤呼吸速率日变化动态
Fig.3 Diurnal dynamics of soil respiration

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。土壤呼吸速率随着降雨频率的减小而减小, $P_{16\times2.5\text{mm}}$ 和 $P_{8\times5\text{mm}} > P_{4\times10\text{mm}} > P_{2\times20\text{mm}} > P_{1\times40\text{mm}}$, 均值排列为 $4.14、4.2 > 3.92 > 3.38 > 2.9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 降雨频率改变和增温对土壤呼吸速率的影响

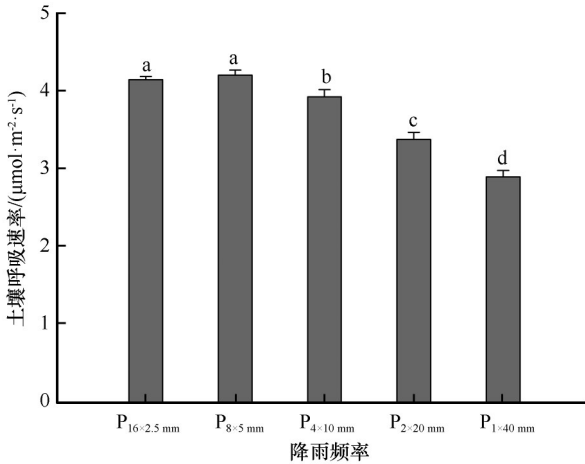
降雨频率和增温对土壤呼吸速率影响显著 ($P < 0.001$, 表 3), 增温和降雨处理之间无交互作用 ($P > 0.5$)。随着降雨频率的减小, 土壤呼吸速率均呈现减小的趋势(图 4)。比较 $P_{16\times2.5\text{mm}}$ 处理, $P_{4\times10\text{mm}}$ 、 $P_{2\times20\text{mm}}$ 、 $P_{1\times40\text{mm}}$ 土壤呼吸速率分别降低了 5%、18%、30%。增温和不增温处理的土壤呼吸均值分别为 $3.9、3.52 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 增温使土壤呼吸速率提高了 11.4% ($P < 0.001$)。

表 3 增温和降雨频率对土壤呼吸的影响
Table 3 Effect of increasing temperature and rainfall frequency on soil respiration

处理	<i>F</i>	<i>P</i>
温度	73.219	<0.01
降雨频率	121.770	<0.01
温度×降雨频率	0.070	>0.5

2.3 土壤温湿度对土壤呼吸的影响

土壤呼吸速率与土壤湿度的最优拟合模型为二项式方程, 二者之间呈显著正相关关系 ($P < 0.01$, 图 5, 表 4)。土壤湿度对土壤呼吸的变异解释量随着湿度的减小而增加, 相较于 $P_{16\times2.5\text{mm}}$ 和 $P_{8\times5\text{mm}}$ (13%、40%) 组, $P_{4\times10\text{mm}}$ 、 $P_{2\times20\text{mm}}$ 、 $P_{1\times40\text{mm}}$ 土壤湿度对土壤呼吸的变异解释量逐渐增加, 分别可以解释土壤呼吸变异的 90%、95%、90%。土壤温度与土壤呼吸速率呈



不同小写字母代表不同降水频率处理间土壤呼吸平均速率存在显著差异 ($P < 0.01$)

图 4 不同降雨处理的土壤呼吸速率变化
Fig.4 Soil respiration changes under different rainfall treatments

显著正指数相关 ($P < 0.01$), 增温和不增温处理的土壤温度可分别解释土壤呼吸变异的 5.5% 和 5.4%。

3 讨论

3.1 降雨频率改变和增温对土壤呼吸的影响

增温和降雨频率单独对土壤呼吸产生影响 ($P < 0.001$), 二者之间无交互作用 ($P > 0.5$)。这与大量研究所得到的温度升高会通过影响土壤水分含量进而影响土壤呼吸的结论相悖^[6, 22-23]。许多研究表明, 增温会通过改变土壤水分来影响土壤呼吸。例如, 增温会使苔原、泰加林、高寒草甸等生态系统中冻土层的凝结水转化成有效水, 增加土壤水分含量, 进而增强土壤呼吸^[24]。在热带雨林、季雨林生态系

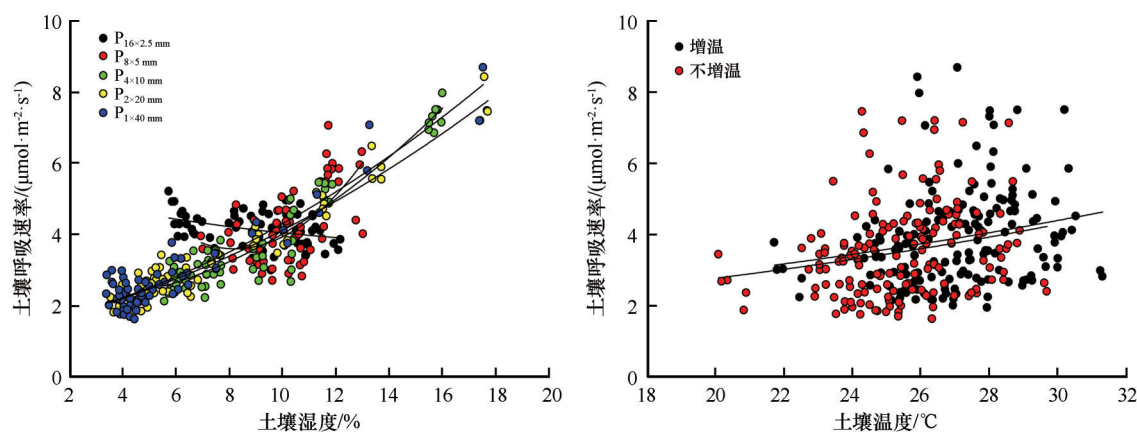


图5 土壤呼吸速率与土壤温湿度的回归

Fig.5 Regression curve of soil respiration rate and soil temperature and humidity

表4 土壤呼吸速率与土壤温湿度的回归方程

Table 4 Regression equation of soil respiration rate and soil temperature and humidity

处理		方程	R^2	P
降雨频率	$P_{16 \times 2.5 \text{ mm}}$	$y = 0.0052x^2 - 0.18x + 5.3306$	0.1299	<0.01
	$P_{8 \times 5 \text{ mm}}$	$y = 0.1054x^2 - 1.7313x + 10.708$	0.399	<0.01
	$P_{4 \times 10 \text{ mm}}$	$y = 0.0248x^2 - 0.0553x + 2.089$	0.9046	<0.01
	$P_{2 \times 20 \text{ mm}}$	$y = 0.0111x^2 + 0.165x + 1.3561$	0.9474	<0.01
	$P_{1 \times 40 \text{ mm}}$	$y = 0.0128x^2 + 0.1674x + 1.3466$	0.898	<0.01
温度	增温	$y = 1.1818e^{0.0421x}$	0.0547	<0.01
	不增温	$y = 1.0536e^{0.0449x}$	0.0543	<0.01

统中,增温会通过蒸发水分缓解水分含量过高而导致的土壤呼吸降低^[25]。造成以上差异的主要原因是生态系统环境因子的异质性。本试验前期对土壤进行了干旱处理,即土壤水分是限制因子,无论是多次小降雨还是少次大降雨事件都能迅速激发土壤呼吸达到峰值,且干旱时间越久,激发效应越大,这就造成土壤对水的敏感性要远远高于温度^[26-27]。此外,也有可能是由于小幅度小范围的增温并没有很大程度上影响土壤水分的理化性质,相比于增温,降水的影响更大,掩盖了这种交互作用^[20]。

在本试验中,各降雨处理下的土壤呼吸速率呈现明显的多峰型变化,并且在降雨后24 h达到最大,降雨激发的土壤呼吸速率比雨前提高了2倍左右($P < 0.01$),且这种激发效应会持续6 d左右。这与Townsend等^[28]在热带森林所得出的降雨可使该地区土壤呼吸在1—2 d内显著增加的结果相同,也与有些研究中所得到的降雨能改善干燥土壤的水分状况,迅速激发土壤呼吸并持续2—6 d左右的结论

相似^[11,29]。但与Kursar^[30]在巴拿马潮湿的热带常绿林所得17 mm降雨产生的土壤呼吸比降雨前少了29%,与巴西亚马逊河流域的森林和草原得到的大量降雨是造成土壤呼吸总量降低的结论相反,可能主要与雨前的土壤水分、地形和土壤结构与性质有关^[31-32]。本研究区在干旱半干旱区,且对土壤进行了为期12 d的干旱处理,这大大提升了土壤呼吸对降雨的敏感性。有研究表明,土壤干旱时,强降雨促进了土壤呼吸,土壤湿润时,土壤呼吸下降了20%左右^[33]。此外,干旱时间越长,降雨对土壤呼吸的影响越强烈,这种现象在干旱区十分明显^[11]。目前,已有的大量研究表明,物理替代与阻滞效应、底物供应改变机制和微生物胁迫机制是解释土壤呼吸对降雨响应具有代表性的三类机制^[19]。

对比土壤呼吸速率的平均值可以发现,降雨显著激发土壤呼吸,且多次少量的降雨激发的土壤呼吸要显著高于少次多量的降雨处理,也可以理解为在降雨量一定的情况下,反复的干湿交替会使土壤呼吸保持在一个较高的水平上。这一结论与某些

研究结果具有相似之处。对于干旱区两类结皮斑块土壤呼吸对降雨频率的响应试验和对温带混交林的模型模拟试验都表明,反复干湿交替可在一定程度上提高土壤呼吸速率^[12-14,16]。这种现象可以被地下非生物有机质矿化机制解释,降雨可以破坏土壤团聚体释放有机物来激发微生物呼吸^[34]。干湿交替过程可减少21%—30%的土壤团聚体,增加土壤可溶性有机碳(DOC),提高N矿化速率,进而增强了土壤呼吸^[35-37]。此外,微生物群落结构和功能的改变也是解释土壤呼吸对干湿交替响应的一个重要机制。降雨可以使受到干旱胁迫的微生物从休眠期迅速进入活跃期和繁殖期,进而影响土壤呼吸^[38]。微生物的数量也会受干湿交替的影响^[8]。对加利福尼亚草地生态系统进行研究,表明反复干湿交替增加了50%表层土壤微生物,且提高了约7倍的底层微生物数量和活性^[39]。与此同时,干湿交替也可以通过增加真菌与细菌的比例使土壤有机质的分解速率发生改变来影响土壤呼吸^[40]。而少量多次的降雨事件伴随着干旱周期的延长,土壤干湿交替的次数下降,干旱胁迫的时间和次数会增加,这导致土壤微生物活性降低,进而抑制了土壤呼吸^[15]。此外,这也与研究区的土壤性质紧密相关,沙地土壤孔隙度大,土壤对水的有效利用范围为0—10 cm,在进行少次多量的强降雨以后,雨水会渗入到土壤深层(>10 cm),减少了表层土壤对水的利用效率,进而减弱了土壤呼吸,而多次少量的降雨则会存留在土壤有效层激发土壤呼吸。

本研究增温2℃左右显著提高了土壤累积碳排放($P<0.01$)。增温处理提高了约11.4%的土壤呼吸。这与大量研究所得的短期增温可以促进土壤呼吸速率上升的结论一致^[41]。例如,有研究总结了增温对多个生态系统内土壤呼吸的影响,得到土壤温度增加2℃可以增加约12%的土壤呼吸速率^[24]。但也有不同的研究结果,Xia等^[42]在内蒙古多伦多草原增温3年间,温度升高1℃左右可以增加约3.2%土壤呼吸速率。导致差异的原因是时间空间格局、植被类型、土壤结构以及背景气候特征的差异性。例如,在苔原、北方针叶林、温带森林、草地生态、农田生态系统中,平均土壤温度升高1.73、3.42、3.72、2.02、2.63℃时,土壤累积碳排放提高约28%、10%、12%、6%、6%^[41]。大量研究表明,增温除了能直接影响土壤呼吸,也可以通过影响环境因子(土壤水分、盐分、理化性质等)和生物因子(光合作

用、凋落物等)对土壤呼吸产生间接影响^[41,43]。温度升高能够增强真菌优势,增加其丰富度,从而改变微生物群落结构,影响微生物活性,最终改变微生物土壤呼吸^[44]。除此之外,土壤酶活性在土壤呼吸过程中也发挥着重要作用,增温对其的影响一般表现为促进作用,但是由于增温状况、养分差异也可能导致土壤酶响应很小甚至不明显^[45-46]。在本研究中,降雨所增加的土壤呼吸(19%—75%)远大于增温所增加的11.4%。这也进一步证实了在干旱半干旱地区,温度并不是土壤呼吸的限制因子,水分才是限制土壤呼吸的关键因子^[14,26]。

3.2 土壤呼吸与土壤温湿度的关系及其对降雨频率改变的响应

本研究用单因素指数模型来拟合土壤温度与土壤呼吸之间的关系,土壤呼吸速率与土壤温度具有显著的指数相关关系,即随着土壤温度的升高,土壤呼吸呈指数升高,这与大多数研究结果相同^[47-48]。通常认为,只有当土壤水分不受限制时,土壤温度才能成为控制土壤呼吸变化的主要限制因子,这时土壤温度能较大程度地通过影响土壤微生物活性、改变土壤湿度和输入土壤有机物对土壤呼吸造成影响^[14,49]。本研究结果表明,土壤温度只能解释土壤变异的5%左右,这说明土壤温度并不是唯一影响沙地土壤呼吸的因子,土壤水分等其他因素也应该被考虑。二项式方程能够很好地模拟土壤湿度与土壤呼吸速率,其相关性显著($P<0.01$)。土壤湿度能解释沙地土壤呼吸变化的90%左右,比土壤温度的解释量高,这说明土壤湿度可以单独解释土壤呼吸变化。在较低的土壤湿度条件下,土壤湿度对于土壤呼吸的影响会更明显^[3,50]。本研究还表明,多次少量的降雨事件的土壤湿度对土壤呼吸的变异解释量小于少次多量的。这是因为少次多量的降雨中间干旱期长、单次降雨力度大,短时间内会通过破坏土壤团聚体、加快土壤微生物呼吸作用来影响土壤呼吸速率,这使得降雨对土壤呼吸的激发效应更明显,从而就会表现为土壤呼吸变化与土壤湿度变化的相关性更大,土壤湿度对土壤呼吸的影响更为显著,短期试验尤为明显^[16,19]。此外,多次少量的降雨使土壤含水量升高,改变了影响土壤呼吸的其他因子(NPP、土壤生物),进而减弱了土壤湿度的限制作用,减小了土壤湿度对土壤呼吸的变异解释量^[51]。而少次多量的降雨因为沙地孔隙度

大,下渗作用强烈,水分利用效率低,进而使得水分的限制作用升高,加大了土壤湿度对土壤呼吸的变异解释量^[52]。根据二项式曲线来看,其拐点就是土壤湿度对土壤呼吸抑制或者促进的临界点,出现拐点的原因是当土壤湿度低于临界点,土壤呼吸速率随着土壤湿度的增加而减小,而当土壤湿度高于临界点,土壤呼吸随着土壤湿度的增加而增加。

4 结论

不同降雨频率土壤呼吸的表现不同,降雨量一致的情况下,多次少量的降雨事件所激发的土壤呼吸高于少次多量的降雨事件,这表明反复的干湿交替会激发土壤呼吸,而干旱周期的延长会抑制土壤呼吸。增温促进土壤呼吸,增温处理提高了大约11.4%的土壤呼吸。以上结果表明,在气候变化背景下,即降雨频度的改变和温度的增加,可能会进一步改变未来干旱半干旱地区的土壤碳库平衡。此外,本试验基于一个短期的监测,主要为了揭示降雨频率改变和增温对土壤呼吸的影响。事实上,在生长季过程中,干旱和降雨的变化是很难预测的,所以以后的研究有必要根据实际情况对研究区域做完整生长季的动态观测,这将有助于进一步准确了解土壤呼吸的变化过程。

参考文献:

- [1] Solomon S, Qin D H, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. IPCC, 2007: 95-123.
- [2] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 1-90.
- [3] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [4] Stocker T, Plattner G K, Qin D H. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis: findings and lessons learned[C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014: 17003.
- [5] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.
- [6] 李欢, 杨玉盛, 司友涛, 等. 模拟增温及隔离降雨对中亚热带杉木人工林土壤可溶性有机质的数量及其结构的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2884-2895.
- [7] Fenner N, Freeman C, Lock M A, et al. Interactions between elevated CO₂ and warming could amplify DOC exports from peatland catchments[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(9): 3146-3152.
- [8] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(6): 777-787.
- [9] Fröberg M, Grip H, Tipping E, et al. Long-term effects of experimental fertilization and soil warming on dissolved organic matter leaching from a spruce forest in Northern Sweden[J]. Geoderma, 2013, 200/201: 172-179.
- [10] Evans C D, Monteith D T, Cooper D M. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts[J]. Environmental Pollution, 2005, 137(1): 62-71.
- [11] Birch H F. Further observations on humus decomposition and nitrification[J]. Plant and Soil, 1959, 11(3): 262-286.
- [12] Xu L, Baldocchi D D, Tang J. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(4): GB4002.
- [13] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, et al. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(12): 2195-2204.
- [14] Curiel Y J, Nagy M, Janssens I A, et al. Soil respiration in a mixed temperate forest and its contribution to total ecosystem respiration[J]. Tree Physiology, 2005, 25(5): 609-619.
- [15] 赵慢, 王蕊, 李如剑, 等. 半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2714-2720.
- [16] 赵蓉, 李小军, 赵洋, 等. 固沙植被区两类结皮斑块土壤呼吸对不同频率干湿交替的响应[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 138-144.
- [17] 王苗, 郭品文, 郭昀, 等. 我国极端降水事件研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 79-86.
- [18] 刘殿君. 极端干旱区泡泡刺群落土壤呼吸对增雨的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [19] 王义东, 王辉民, 马泽清, 等. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 601-610.
- [20] 吴杨周, 陈健, 胡正华, 等. 水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 280-287.
- [21] 岳祥飞, 张铜会, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地降雨特征分析: 以奈曼旗为例[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 118-123.
- [22] 付刚, 沈振西, 张宪洲, 等. 草地土壤呼吸对全球变化的响应[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1391-1399.
- [23] 王鹤龄, 张强, 王润元, 等. 增温和降水变化对西北半干旱区春小麦产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 67-75.
- [24] Wang X, Liu L, Piao S, et al. Soil respiration under climate warming: differential response of heterotrophic and autotrophic respiration[J]. Global Change Biology, 2014, 20(10): 3229-3237.
- [25] Xu Q Y, Huang M, Liu P L, et al. Integrated assessment of eco-environmental vulnerability in Yangtze River Delta Based on RS and GIS[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24

- (1); 58–65.

[26] 刘尉.大渡河中游干旱河谷区云南松人工林凋落叶分解和土壤呼吸对增加降水的响应[D].四川雅安:四川大学, 2016.

[27] 陈荣荣, 刘全全, 王俊, 等. 人工模拟降水条件下旱作农田土壤“Birch效应”及其响应机制[J].生态学报, 2016, 36(2): 306–317.

[28] Townsend A R, Vitousek P M, Holland E A. Tropical soils could dominate the short-term carbon cycle feedbacks to increased global temperatures[J]. Climatic Change, 1992, 22(4): 293–303.

[29] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, et al. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(6): 1421–1431.

[30] Kursar T A. Evaluation of soil respiration and soil CO₂ concentration in a lowland moist forest in Panama [J]. Plant and Soil, 1989, 113(1): 21–29.

[31] Chang S C, Tseng K H, Hsia Y J, et al. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan [J]. Agricultural and Forest Meteorology Amsterdam Elsevier, 2008, 148(5): 788–798.

[32] Davidson E A, Verchoy L V, Cattaneo J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 53–69.

[33] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应[J].生态学报, 2008, 28(12): 6189–6196.

[34] Owliaie H R. Micromorphology of pedogenic carbonate features in soils of Kohgiluyeh, Southwestern Iran [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14(1): 225–239.

[35] Deneff K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(12): 1599–1611.

[36] Wu J, Brookes P C. The proportional mineralisation of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(3): 507–515.

[37] McIntyre R E S, Adams M A, Ford D J, et al. Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(1): 92–101.

[38] Schjønning P, Thomsen I, Moldrup P, et al. Linking soil microbial activity to water and air-phase contents and diffusivities [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1): 156–165.

[39] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, et al. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2281–2289.

[40] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(2): 302–311.

[41] 孙宝玉, 韩广轩. 模拟增温对土壤呼吸影响机制的研究进展与展望[J].应用生态学报, 2016, 27(10): 3394–3402.

[42] Xia J, Han Y, Zhang Z, et al. Effects of diurnal warming on soil respiration are not equal to the summed effects of day and night warming in a temperate steppe [J]. Biogeosciences, 2009, 6(1): 1361–1370.

[43] Lin G H, Rygielwicz P T, Ehleringer J R, et al. Time-dependent responses of soil CO₂ efflux components to elevated atmospheric [CO₂] and temperature in experimental forest mesocosms [J]. Plant and Soil, 2001, 229(2): 259–270.

[44] Rinna R, Michelsen A, BåÅTH E, et al. Fifteen years of climate change manipulations alter soil microbial communities in a subarctic heath ecosystem [J]. Global Change Biology, 2007, 13(1): 28–39.

[45] Zhang W J, Xu Q, Wang X K, et al. Impacts of experimental atmospheric warming on soil microbial community structure in a tallgrass prairie [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1742–1747.

[46] Feng R F, Yang W Q, Zhang J, et al. Effects of simulated elevated concentration of atmospheric CO₂ and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4019–4026.

[47] Elberling B, Brandt K K. Uncoupling of microbial CO₂ production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(2): 263–272.

[48] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J].生态学报, 2007(5): 1960–1968.

[49] 宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 等. 川西南常绿阔叶林土壤呼吸及其对氮沉降的响应[J].水土保持学报, 2007(4): 168–172, 192.

[50] 陈骥, 曹军骥, 魏永林, 等. 青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸对温度和湿度的响应[J].草业学报, 2014, 23(6): 78–86.

[51] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 等. 温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响[J].植物生态学报, 2009, 33(5): 936–949.

[52] 鲍芳, 周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展[J].植物生态学报, 2010, 34(6): 713–726.

Effects of simulated temperature increase and change of rainfall frequency on soil respiration in arid and semi-arid areas

Han Dan^{1,2}, Li Yulin¹, Yang Hongling^{1,2}, Ning Zhiying^{1,2}, Zhang Ziqian^{1,2}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Temperature and precipitation are important disturbance factors for soil respiration in arid and semi-arid regions. The future increase in temperature and precipitation variability in arid and semi-arid regions caused by global climate change will have an important impact on soil respiration. The study was conducted through the artificial setting of $P_{16 \times 2.5 \text{mm}}$, $P_{8 \times 5 \text{mm}}$, $P_{4 \times 10 \text{mm}}$, $P_{2 \times 20 \text{mm}}$ and $P_{1 \times 40 \text{mm}}$ rainfall frequency gradient and OTC temperature increase of about 2 °C. The study explored the effect of different rainfall frequency and temperature increase treatment on the drought. The influence of soil respiration in arid areas, as well as the relationship between soil respiration and soil temperature and humidity, and its response to changes in rainfall frequency. The results show that: rainfall frequency and warming alone have a very significant effect on soil respiration ($P < 0.001$), but there is no interaction between the two ($P > 0.5$); under a certain rainfall, the soil respiration rate increases with Rainfall frequency decreases and decreases, that is, the soil respiration rate triggered by multi-frequency small rainfall events is greater than that of small-frequency heavy rainfall events; increasing temperature promotes soil respiration and improves soil respiration by about 11%. This result is helpful to predict the impact of changes in rainfall patterns on soil respiration under the background of global warming in arid and semi-arid regions, and also provides reference data for further estimating the carbon budget of the regional ecosystem.

Key words: frequency of rain; warming; soil respiration; semi-arid and arid areas