

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.004.

徐婷, 马露露, 李泽森, 等. 黄土丘陵区自然恢复草地土壤呼吸对降雨格局改变的响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 92-98.

XU Ting, MA Lulu, LI Zesen, et al. Response of Soil Respiration to Changes of Rainfall Pattern in Naturally Restored Grassland in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 92-98.

黄土丘陵区自然恢复草地土壤呼吸对 降雨格局改变的响应

徐婷¹, 马露露¹, 李泽森¹, 曹家仪², 延楠楠², 焦峰¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]揭示黄土丘陵区自然恢复草地土壤呼吸对长期改变降雨的响应情况,并阐明不同降雨处理土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系。[方法]以黄土丘陵区自然恢复草地群落为对象,进行长期野外人工控制降雨试验,设置增雨20%,40%,60%以及减雨20%,40%,60%和对照处理,测定土壤呼吸、土壤温度、土壤含水量。[结果]不同降雨处理土壤呼吸在生长季呈单峰曲线,7月达最大值,10月达最小值;在整个生长季内,增雨20%、增雨60%对土壤呼吸无显著促进作用,增雨40%及减雨20%,40%,60%显著降低土壤呼吸($p<0.05$),表现为土壤呼吸随降雨量的增加而降低。生长季内,降雨显著影响土壤含水量($p<0.05$),土壤含水量随雨量减少而减少;与对照相比除减雨60%处理外,其余降雨处理显著降低了土壤温度($p<0.05$)。无水分胁迫条件下,不同降雨处理土壤温度与土壤呼吸均呈极显著指数相关($p<0.01$);各降雨处理土壤含水量与土壤呼吸均呈显著二次函数相关($p<0.05$);土壤温度、土壤含水量双因素与土壤呼吸呈极显著的线性、幂一指指数相关,且双因素幂一指指数模型最优。[结论]总体上,降雨对黄土丘陵区自然恢复草地群落土壤呼吸的影响受土壤温度与土壤含水量联合调控,其主导程度取决于是否发生水分胁迫。

关键词: 黄土丘陵区; 自然恢复草地; 土壤呼吸; 降雨改变

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0092-07

Response of Soil Respiration to Changes of Rainfall Pattern in Naturally Restored Grassland in Loess Hilly Region

XU Ting¹, MA Lulu¹, LI Zesen¹, CAO Jiayi², YAN Nannan², JIAO Feng¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The response of soil respiration to long-term change of rainfall in naturally restored grassland in the loess hilly region was revealed, and the relationship between soil respiration and soil temperature and soil water content under different rainfall treatments was expounded. [Methods] The natural restoration of grassland communities in the loess hilly area was taken as the object. Long-term field artificially controlled rainfall experiment on setting 20%, 40%, 60% rain increase and 20%, 40%, 60% rain reduction and control treatments was conducted. Soil respiration, soil temperature, and soil water content were measured. [Results] (1) Soil respiration under different rainfall treatments showed a unimodal curve in the growing season, reaching a maximum value in July and a minimum value in October. In the whole growing season, the increase of rainfall by 20% and the increase of rainfall by 60% had no significant effect on soil respiration. 40% increase in rainfall and 20%, 40% and 60% decrease in rainfall significantly inhibited soil respiration ($p<0.05$), which showed that soil respiration decreased with the increase of rainfall. (2) In the grow-

收稿日期: 2022-07-15

修回日期: 2022-08-28

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究”(41977426)

第一作者: 徐婷(1997—), 女, 重庆市璧山人, 硕士研究生, 主要从事黄土丘陵区土壤水分入渗的研究。E-mail: Tiana_xuting@163.com

通信作者: 焦峰(1967—), 男, 陕西省三原县人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持环境效应评价方面的研究工作。E-mail: Jiaof@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

ing season, rainfall significantly affected soil water content ($p < 0.05$), which decreased with the decrease of rainfall. Except for 60% decrease in rainfall treatment, the other rainfall treatments significantly decreased soil temperature ($p < 0.05$). (3) Under the condition of no water stress, soil temperature and soil respiration in different rainfall treatments showed extremely significant exponential correlation ($p < 0.01$). Soil water content and soil respiration in each rainfall treatment showed significant quadratic function correlation ($p < 0.05$). The two factors of soil temperature and soil water content had the very significant linear and power-exponential correlation with soil respiration, respectively, and the two-factor power-exponential model was optimal. [Conclusion] In general, the effect of rainfall on the soil respiration of the naturally restored grassland community in the loess hilly area is jointly regulated by soil temperature and soil water content, and its dominant degree depends on whether water stress occurs.

Keywords: loess hilly area; natural restoration of grassland; soil respiration; rainfall change

由于人类活动致使大气环境中二氧化碳等温室气体含量急速增长,导致世界气候变暖和水循环明显加剧。由于全球气温升高,极端天气在未来将愈发频繁,降雨格局已然发生改变^[1]。土壤呼吸是陆地生态系统释放二氧化碳最主要的来源之一,具有调控陆地生态系统土壤碳库和碳循环等方面的重要作用,草地是世界上分布最广的陆地生态系统之一,其土壤有机碳储量占世界土壤有机碳储量的 15.5%^[2]。我国草地多集中在西北部地区,其碳储量占我国陆地生态系统的 16.7%,占全球草地生态系统碳储量的 8.0%^[3-4]。黄土高原属于干旱半干旱地区,水分便成为限制当地植物生长、土壤呼吸的重要环境因子^[5]。因此,研究黄土高原地区草地土壤呼吸对降雨变化的响应对于进一步预测土壤碳变化具有重要意义。

已有研究表明不同降雨格局会改变土壤含水量,形成不同的植物群落和结构^[6],同时不断变化的降雨格局将显著影响陆地生态系统碳循环^[7]。李寅龙等^[8]研究发现,增雨 30% 使短花针茅草原的土壤呼吸速率显著增加;陶冬雪等^[9]研究发现,减雨 50% 使呼伦贝尔草甸草原的土壤呼吸速率显著降低,而增雨 50% 对土壤呼吸速率无显著影响;王兴等^[10]研究发现,增雨 50% 使黄土丘陵区草地的土壤呼吸速率显著增加。随着国内外开展控制降雨试验的增加,虽然对降雨影响土壤呼吸变化的机制有一定的了解,但由于降雨的时间、空间异质性也使得土壤呼吸对未来降雨格局变化响应的预测具有非常大的不确定性,为比较精确地估算在降雨变化背景下碳循环的响应,很有必要开展降雨变化对草地生态系统碳循环过程中土壤呼吸的响应研究。因此,本研究在野外进行长期控制降雨试验,模拟完全改变降雨格局,揭示自然恢复草地群落土壤呼吸对降雨格局改变的响应及其与土壤温度、土壤含水量的关系,以期对半干旱区草地群

落生态系统碳循环应对未来降雨格局的改变和进一步开展生态环境保护与退化草地治理提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选在延安安塞水土保持综合试验站(108°51'44"—109°26'18"E, 36°30'45"—37°19'3"N),属黄土高原中部暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡区,年均气温 8.8℃,年均降雨量 531.4 mm 年际年内分布不均,多集中在 7—9 月;土壤类型为黄绵土,土质疏松抗蚀性差,水土流失严重;植被类型处于暖温带落叶阔叶林向草原过渡的森林草原区,草本植物多以菊科、豆科、禾本科为主,主要有茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、山苦荬(*Ixeris denticulata*)、黄鹌菜(*Youngia japonica*)、苦马豆(*Sphaerophysa salsula*)、野豌豆(*Vicia sepium* L.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、早熟禾(*Poa pratensis* L.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等。

1.2 样地布设

所选样地 2000 年撂荒,撂荒前主要种植稀疏的老品种果树(基本不管理)。2015 年初对老化果树进行清理,在试验样地四周设置铁护栏,并对样地进行除草、翻整,样地地形平坦,以达乌里胡枝子、茵陈蒿、蒙古蒿、早熟禾、山苦菜、铁杆蒿等植被为优势种。

试验于 2015 年采用随机机组试验设计,以自然恢复 5 a 草地群落作为样地,设置增雨 60%(L₁)、增雨 40%(L₂)、增雨 20%(L₃)、减雨 20%(D₁)、减雨 40%(D₂)、减雨 60%(D₃)、对照(CK)7 个降雨梯度处理。在 7 个降雨梯度处理分别设置 5 个面积为 3 m×3 m 的小样方,彼此间隔 2 m。

减雨处理:在样方南北方向边缘两侧搭建支撑钢架(南低北高),支撑钢架平均高1 m,保证近地表的空气自由流通以避免对微气候的影响,样方正上空在支撑钢架上搭建V型透光有机玻璃槽(长1.8 m、宽0.1 m、厚2 mm,与水平面夹角20°),其透光性大于92%,可消除环境差异影响,分别设置6,12,18个等间距V型槽固定在支撑钢架上,代表D₁,D₂,D₃处理。

增雨处理:在自然降雨过后,各减雨处理的V型槽承接到的雨水顺着高度差流入与V型槽末端紧密连接的横向集雨UPVC管道,最后流向集雨桶中,人工将集雨桶中的水均匀洒入对应的增雨小区中,对照组不做任何处理。

1.3 土壤呼吸速率、土壤温度、土壤含水量的测定

在2019年5—10月期间完成土壤呼吸速率、土壤温度、土壤含水量的测定(此时改变降雨处理已长达4 a),在每个样方中布设1个呼吸环,直径20 cm、高10 cm,缓慢插入土中,小心避免对植物根系造成损伤,同时避免边际效应,保持呼吸环露出地面约2—3 cm。在测定前将基座内的地上植被剪去,整个过程避免扰动土壤和枯落物,保证基座与气室紧密对接,根据天气每月选择2 d无雨晴朗日,采用EGM-4便携式CO₂分析仪测定进行土壤呼吸测定,起测时间为每日6:00,每2 h测定一次,到18:00结束所有测定共计6次。土壤温度、土壤体积含水量(5 cm)采用直角地温计和Spectrum TDR100便携式水分测定仪同步测定。经统计分析,本文以9:00—11:00所测值代表全天均值将两天所测值作为该月土壤呼吸速率的平均值^[11]。试验期间的降雨量见图1。

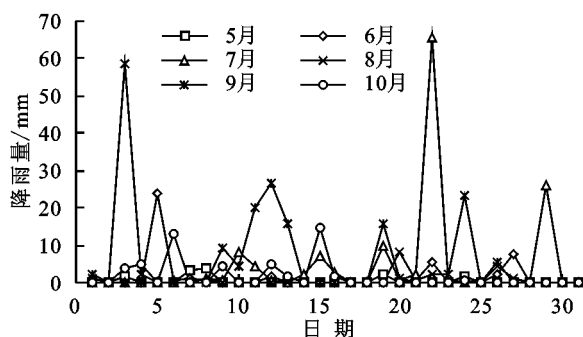


图1 2019年黄土丘陵区自然恢复草地生长季降雨量

1.4 数据处理

本研究使用Excel 2016和Origin 2018软件进行数据与图形处理,使用SPSS 26进行统计分析。通过双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验不同降雨处理、时间对土壤呼吸速率、土壤温度及含水量的影响,对有显著差异的因素再进行LSD多重比较;采用回归分析探究土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量的关系^[12-13],其表达式如下:

$$R_s = a e^{bT}$$

$$Q_{10} = e^{b^{10}}$$

$$R_s = a w^2 + b W + c$$

$$R_s = a + b T + c W$$

$$R_s = a e^{bT} w^c$$

式中: R_s 为土壤呼吸速率[g/(m²·h)]; T 为5 cm土层温度(°C); W 为5 cm土层土壤含水量(%); Q_{10} 为土壤呼吸温度敏感性系数; a, b, c 为参数。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸的季节性变化

不同降雨处理土壤呼吸速率均存在明显的季节变化(图2),表现为随时间推移先上升后下降的单峰曲线。7月达峰值,各处理的峰值变化范围为0.53~0.97 g/(m²·h),大小依次为L₁,L₃,CK,L₂,D₁,D₂,D₃。土壤呼吸速率最小值主要出现在10月(除L₂,D₃的最小值为5月外),谷值变化范围为0.14~0.34 g/(m²·h),大小依次为CK,L₂,L₃,D₁,L₁,D₂,D₃。

在整个植物生长季(5—10月),土壤呼吸速率均值变化范围为0.35~0.61 g/(m²·h)(表1)。L₃,L₁处理大于CK但无显著差异,L₂处理较CK显著降低了10.17%,所有减雨处理均显著低于CK土壤呼吸速率,表现为土壤呼吸随降雨量减少而降低,D₁,D₂,D₃较CK分别降低了15.25%,28.81%,40.68%。

表1 降雨处理对生长季草地土壤呼吸速率及水热因子的影响(平均值±标准差)

降雨梯度	土壤呼吸速率/(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	土壤温度/°C	土壤体积含水量/%
L ₁	0.59±0.01a	21.62±0.74bc	6.61±0.28b
L ₂	0.53±0.01b	20.34±0.42d	7.13±0.31a
L ₃	0.61±0.01a	19.93±0.75d	7.11±0.11a
D ₁	0.50±0.02c	20.43±0.43cd	5.35±0.25d
D ₂	0.42±0.01d	21.00±0.64cd	4.73±0.13 e
D ₃	0.35±0.01 e	22.28±1.00ab	4.07±0.26 f
CK	0.59±0.02a	23.09±0.19a	5.84±0.07c

注:表中含有不同字母表示差异显著($p < 0.05$);相同字母表示差异不显著($p > 0.05$)。

2.2 水热因子的季节性变化

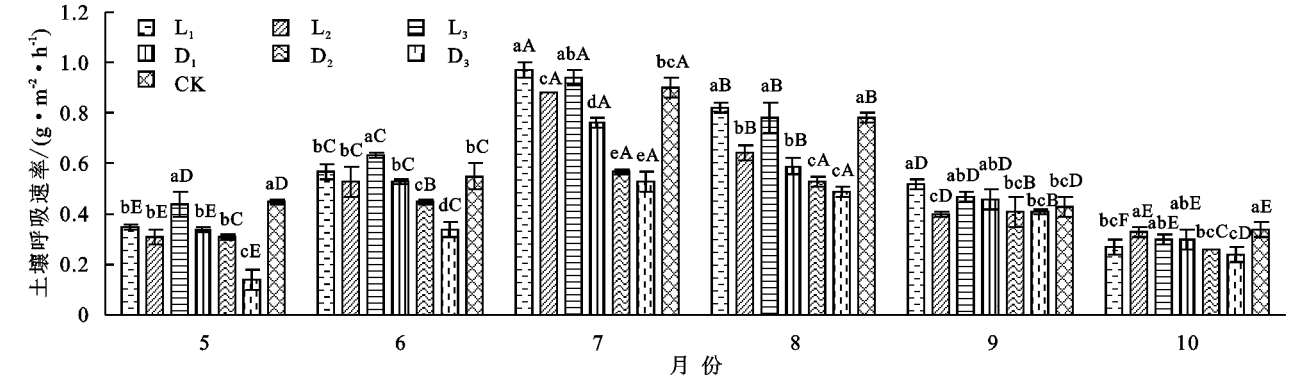
各降雨处理下土壤温度存在明显的单峰曲线季节变化(图3),均于7月达峰值,10月达谷值。土壤温度在月间存在显著差异($p < 0.05$),月内各处理土壤温度存在一定差异,CK的土壤温度高于增、减雨处理。

各降雨处理土壤含水量在生长季随时间呈先降后升的变化,增雨处理大于降雨处理土壤含水量。各降雨处理土壤含水量最大值均出现在10月(图4),最小值多集中于6月,由于D₃,D₂处理雨量减少较多

且 5 月降雨量最少,故二者的最小值出现在 5 月。

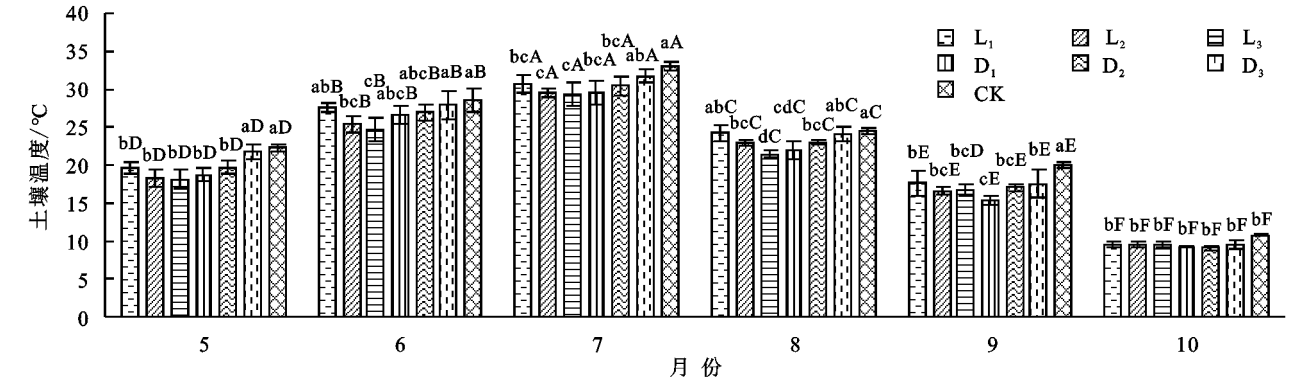
在整个植物生长季(5—10 月),各降雨处理下土壤温度均值变化范围为 19.93~23.09℃,大小依次为 CK,D₃,L₁,D₂,L₂,D₁,L₃,且 CK 和 D₃ 土壤温度显著高于其余处理,L₃ 和 L₂ 土壤温度显著低于其余处

理,较 CK 分别降低了 13.69%,11.91%。土壤含水量均值变化范围为 4.07%~7.13%,大小依次为 L₂,L₃,L₁,CK,D₁,D₂,D₃,且 D₃ 土壤含水量显著小于其余处理,比 CK 小 1.77%,L₃ 和 L₂ 土壤含水量显著大于其余处理,分别比 CK 大 1.27%,1.29%。



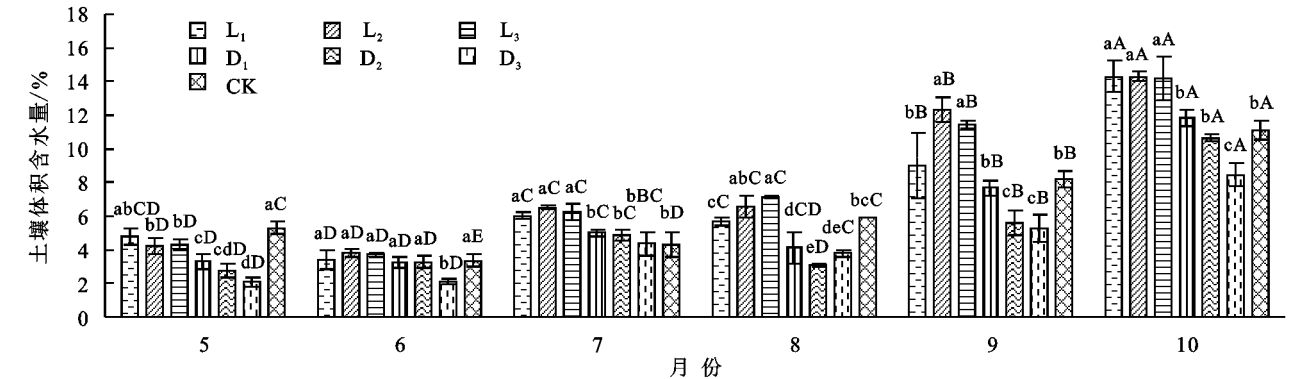
注:图中含有不同小写字母表示相同月份下不同降雨梯度的土壤呼吸速率差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示相同降雨梯度下不同月份的土壤呼吸速率差异显著($p<0.05$)。

图 2 土壤呼吸速率对不同降雨处理的响应



注:图中含有不同小写字母表示相同月份下不同降雨梯度的土壤温度差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示相同降雨梯度下不同月份的土壤温度差异显著($p<0.05$)。

图 3 土壤温度对不同降雨处理的响应



注:图中含有不同小写字母表示相同月份下不同降雨梯度的土壤体积含水量差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示相同降雨梯度下不同月份的土壤体积含水量差异显著($p<0.05$)。

图 4 土壤体积含水量对不同降雨处理的响应

2.3 土壤呼吸与水热因子的关系

采用指数、二次函数模型对各降雨处理的土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量分别进行回归分析(表 2)。D₃ 处理土壤呼吸与土壤温度无显著相关性,

其余处理土壤呼吸与土壤温度均呈极显著指数相关($p<0.01$),土壤温度可以解释 68.3%~83.8% 的土壤呼吸变化。总体上,土壤呼吸的 Q_{10} 值随降雨量的增加而增大,最大值为 L₃ 处理(1.768),最小值为 D₃

处理(1.336)。不同降雨处理土壤呼吸与土壤含水量均呈显著二次函数相关($p < 0.05$)。土壤含水量可以解释 34.1%~69.4% 的土壤呼吸变化。

采用双因素模型对不同降雨处理的土壤呼吸与土

壤温度、土壤含水量进行回归分析(表 3),土壤温度、土壤含水量联合与土壤呼吸存在极显著的线性相关和幂—指数相关($p < 0.01$),二者联合可共同分别解释土壤呼吸变化的 50.4%~86.9%和 66.5%~88.6%。

表 2 降雨改变下土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量单因素模型拟合关系

降雨处理	土壤呼吸速率与土壤温度模型					土壤呼吸速率与土壤含水量模型				
	$R_s = a e^{bt}$					$R_s = aw^2 + bw + c$				
	a	b	R^2	p	Q_{10}	a	b	R^2	p	Q_{10}
L ₁	0.164	0.054	0.715	<0.001	1.716	-0.010	0.142	0.181	0.341	0.017
L ₂	0.177	0.049	0.716	<0.001	1.632	-0.014	0.228	0.023	0.493	0.002
L ₃	0.178	0.057	0.838	<0.001	1.768	-0.010	0.153	0.168	0.508	0.002
D ₁	0.213	0.039	0.696	<0.001	1.477	-0.010	0.121	0.212	0.349	0.016
D ₂	0.195	0.035	0.683	<0.001	1.419	-0.010	0.117	0.163	0.459	0.004
D ₃	0.170	0.029	0.153	0.060	1.336	-0.023	0.244	-0.146	0.621	<0.001
CK	0.204	0.042	0.694	<0.001	1.522	-0.005	0.023	0.651	0.694	0.022

表 3 降雨改变下土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量双因素模型拟合关系

降雨处理	土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量线性模型					土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量幂—指模型				
	$R_s = a + bT + cW$					$R_s = a e^{bT} W^c$				
	a	b	c	R^2	p	a	b	c	R^2	p
L ₁	-0.604	0.043	0.035	0.745	<0.001	0.377	0.045	0.319	0.816	<0.001
L ₂	-0.535	0.040	0.030	0.869	<0.001	0.506	0.037	0.225	0.886	<0.001
L ₃	-0.316	0.039	0.017	0.822	<0.001	0.624	0.039	0.149	0.847	<0.001
D ₁	-0.207	0.028	0.025	0.777	<0.001	0.717	0.027	0.168	0.819	<0.001
D ₂	0.044	0.016	0.009	0.661	<0.001	0.995	0.016	0.060	0.679	<0.001
D ₃	-0.289	0.020	0.046	0.504	0.002	0.690	0.020	0.222	0.665	<0.001
CK	-0.794	0.043	0.058	0.702	<0.001	0.348	0.042	0.370	0.726	<0.001

3 讨论

3.1 不同降雨处理土壤呼吸及水热因子变化

草地土壤呼吸对降雨响应的普遍规律为增雨促进土壤呼吸,减雨抑制土壤呼吸^[14-15],本研究中减雨处理土壤呼吸结果与前人研究结果一致,但增雨处理下土壤呼吸结果有所不同。本研究发现在黄土丘陵区自然恢复草地,增雨 60%,20%对土壤呼吸无显著促进作用,减雨 60%,40%,20%处理和增雨 40%处理土壤呼吸速率显著降低。减雨主要通过加剧干旱胁迫来抑制土壤呼吸,一方面减雨使土壤微生物呼吸底物的供给减少,进而使微生物活性减弱,导致土壤微生物呼吸降低;另一方面减雨使植株生长发育减缓,进而使植物根际的光合产物分配减少,导致植株根系呼吸降低^[16]。在相对干旱的生态系统中,增雨使土壤含水量明显提高,进而增强土壤可溶性有机物的有效性和流动性,促使植株根系生长发育、凋落物

积累,同时有机质的增加又为微生物活动所需底物提供保障,进而大幅促进土壤呼吸^[17];但由于增雨幅度不断增加,土壤含水量逐渐超过一定阈值并迅速达到过饱和状态,制约 O₂ 进入土壤,从而造成厌氧环境,减弱微生物和植被根系呼吸作用,转而开始抑制土壤呼吸^[16]。本研究区属暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡区,年均降雨量 531.4 mm,增加降雨可以使土壤含水量较快达到饱和状态,导致增雨对土壤呼吸的促进作用有限。本研究增雨处理的土壤含水量明显大于减雨处理,土壤含水量整体上随雨量的增加而增加,但增雨 60%处理的土壤含水量却低于增雨 40%、增雨 20%的处理。这说明增雨 20%处理的土壤含水量已经接近饱和状态,故而增雨 40%处理的土壤含水量最高并显著抑制了土壤呼吸,而增雨 60%的土壤含水量和土壤呼吸之所以高于对照,一方面可能是由于经过长期的高降雨量处理,最终促进了该降雨量格局下土壤有机质的矿化和地表枯落物的分解,提高

了呼吸底物的有效性,进而加快了土壤呼吸,使土壤含水量下降^[18];另一方面可能是由于经过长期的高降雨量处理,植物长势最好,生物量最大(增雨60%的生物量为336.26 g/m²),物质运输和能量流动较为剧烈,加快了土壤呼吸,同时使土壤含水量下降^[19]。对照土壤温度高于所有增、减雨处理,可能是由于研究区内植株已适应了本地气候的土壤含水量,其土壤含水量也适宜该类植株的生长发育,而高于或低于该土壤含水量可能会降低微生物代谢产热,从而影响土壤温度^[20],具体影响机制有待进一步探究。

3.2 土壤呼吸与土壤温度、含水量的关系

土壤温度、土壤含水量主要通过改变土壤微生物代谢、植物根系生长进程来影响土壤呼吸作用^[21]。土壤温度通过影响酶的活性从而改变土壤中微生物、动物、植物根系代谢以及有机质分解进而调控土壤呼吸^[22]。在一定范围内,土壤温度升高可以通过提高酶活性从而加快土壤微生物代谢、植物根系生长以及加速有机质分解来促进土壤呼吸;当土壤温度超出该范围后,抑制土壤呼吸,使土壤呼吸与温度的关系变为高斯型变化趋势^[22-23]。一般情况下,增加土壤含水量主要通过提高土壤养分利用率、激活微生物活性来促进土壤呼吸;但当土壤水分超出一定范围后,过多的土壤水分使O₂和CO₂在土壤中的扩散受阻,从而抑制土壤呼吸^[24]。大部分条件下,土壤呼吸受土壤水分和温度的联合调控^[25],也有研究表明干旱半干旱区土壤呼吸主要受土壤温度影响,而与土壤含水量无显著相关性^[26-27]。本研究发现,土壤呼吸与土壤含水量、温度存在显著相关性。各降雨处理温度单因素指数函数的解释程度均高于水分单因素二次函数的解释程度,故土壤温度是影响该地区土壤呼吸的关键环境因子。大多数研究表明,在没有土壤水分胁迫的条件下,土壤呼吸与土壤温度呈指数函数关系^[28];反之,发生土壤水分胁迫时,土壤含水量成为影响土壤呼吸的主导因素^[29],本研究中减雨60%造成水分胁迫导致温度单因素指数函数的解释程度最低(15.3%),而水分单因素二次函数在减雨60%的解释程度较高。

往往由单一土壤温度或土壤水分对土壤呼吸变化解释程度不足,便需要采用双因素模型来预测土壤温度和水分对土壤呼吸的共同作用^[28]。目前多采用幂—指数函数模型模拟土壤呼吸,高宇等^[27]研究发现该模型能够解释土壤呼吸变异的35%~58%,本研究双因素幂—指数模型能够解释土壤呼吸变异的66.5%~88.6%。温度—水分双因素线性函数和双

因素幂—指数函数均在减雨60%的解释程度最低,增雨40%的解释程度最高,说明在增雨40%~60%存在阈值,即降雨改变土壤温度和土壤含水量对土壤呼吸的主导程度,进而改变其交互效应程度。本研究论证了由于水分胁迫,温度单因素指数函数模型不适用于减雨60%处理,土壤温度和水分的双变量函数能更准确地应用于黄土丘陵区不同降雨量梯度草地的土壤呼吸预测,且双因素幂—指数模型能更好解释土壤呼吸的变异性。

3.3 土壤呼吸的温度敏感性

Q₁₀是指温度每升高10℃,土壤呼吸增加的倍数。张鹤等^[30]研究得出黄土丘陵区退耕天然草地群落5 cm土层Q₁₀范围为1.31~2.01。本研究中除D₃处理与土壤温度间不存在显著相关性,L₃,L₂,L₁,D₁,D₂,CK处理Q₁₀分别为1.77,1.63,1.72,1.48,1.42,1.52。陈全胜等^[31]经过长时间的监测得出,内蒙古典型温带草原的Q₁₀值随着土壤水分含量增加呈上升趋势。本研究也发现增雨增加了土壤呼吸的温度敏感性,减雨降低了土壤呼吸的温度敏感性。土壤呼吸的温度敏感性与土壤含水量相关,在一定土壤含水量范围内,土壤温度对土壤呼吸无显著影响;当土壤含水量高于一定程度时,土壤温度和土壤呼吸具有很强的相关性。因此,降雨量改变引起土壤含水量变化将进一步影响土壤呼吸的温度敏感性。

4 结论

在生长季内,不同降雨处理改变了黄土丘陵区自然恢复草地土壤呼吸速率,土壤呼吸总体上随降雨量的减少而减慢,与增雨处理相比,土壤呼吸对减少降雨更为敏感,减雨60%下土壤呼吸速率最小,降低幅度达40.68%;不同降雨处理没有改变土壤呼吸的季节性变化规律,各降雨处理土壤呼吸速率均呈单峰曲线变化,于7月达峰值;土壤呼吸与土壤温度、含水量存在显著相关性,二者是降雨格局改变条件下调控土壤呼吸的重要因子,其双因素幂—指数模型能较好地解释土壤呼吸的变异性。

参考文献:

- [1] Jeff T. IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125,000 years[J]. Nature, 2021, 596(7871): 171-172.
- [2] Du Y, Wang Y P, Su F L, et al. The response of soil respiration to precipitation change is asymmetric and differs between grasslands and forests [J]. Global

- Change Biology, 2020, 26(10): 6015-6024.
- [3] 於方, 朱文泉, 曹东, 等. 青海省因草地生态破坏造成土壤流失的经济损失核算[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 90-94.
- [4] Schuma G E, Janzen H H, Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 391-396.
- [5] 王胜, 樊军, 王建国, 等. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸特征及其对水热因子的响应[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1770-1781.
- [6] Churkina G, Running S W, Schloss A L. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): the importance of water availability[J]. Global Change Biology, 1999, 5(1): 46-55.
- [7] Liu L L, Wang X, Lajeunesse M J, et al. A cross-biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes[J]. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1394-1405.
- [8] 李寅龙, 红梅, 白文明, 等. 水、氮控制对短花针茅草原土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1727-1733.
- [9] 陶冬雪, 李文瑾, 杨恬, 等. 降水变化和养分添加对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(3): 465-472.
- [10] 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 等. 增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1657-1667.
- [11] 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 等. 黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 479-488.
- [12] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, et al. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(10): 1200-1211.
- [13] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy[J]. Global Change Biology, 2002, 8(9): 851-866.
- [14] 宋晓辉, 王悦骅, 王占文, 等. 不同放牧强度和水分处理下荒漠草原土壤呼吸与群落地下生物量的关系[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 962-968.
- [15] 杨青霄, 田大栓, 曾辉, 等. 降水格局改变背景下土壤呼吸变化的主要影响因素及其调控过程[J]. 植物生态学报, 2017, 41(12): 1239-1250.
- [16] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 等. 降雨量改变对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4806-4820.
- [17] 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 等. 降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4527-4537.
- [18] 彭琴, 齐玉春, 董云社, 等. 干旱半干旱地区草地碳循环关键过程对降雨变化的响应[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1510-1518.
- [19] 姜佰文, 李静, 陈睿, 等. 降雨年型变化及竞争对反枝苋和大豆生长的影响[J]. 生物多样性, 2018, 26(11): 1158-1167.
- [20] 朱义族, 李雅颖, 韩继刚, 等. 水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4323-4332.
- [21] 邵玉琴, 赵吉, 杨劫. 恢复草地和退化草地土壤微生物类群数量的分布特征[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 223-226.
- [22] 全权, 张震, 何念鹏, 等. 短期氮添加对东灵山 3 种森林土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 797-804.
- [23] Davidson E A, Verchot 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.
- [24] 范洪旺, 滕臻, 许克福. 城市绿地土壤呼吸研究综述[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 210-216.
- [25] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 689-704.
- [26] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217-227.
- [27] 高宇, 樊军, 米美霞, 等. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸影响因素及其对土地利用方式变化的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1207-1217.
- [28] 郭艳萍, 李洪建. 天龙山灌丛生态系统土壤呼吸对水热和植被因子的响应[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 131-139. Doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21262.
- [29] Wang Y, Hu Y, Ji B, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in Semi-arid Grassland[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(1): 119-127.
- [30] 张鹤, 陈吉, 熊沛枫, 等. 黄土丘陵区 3 种典型天然草地群落土壤呼吸对模拟降雨的响应[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3139-3148.
- [31] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 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[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836.