

# 降水量变化下荒漠草原土壤呼吸及其影响因素

李冰<sup>1,2</sup> 朱湾湾<sup>3</sup> 韩翠<sup>1</sup> 余海龙<sup>3</sup> 黄菊莹<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021; <sup>2</sup>西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; <sup>3</sup>宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021

**摘要** 土壤呼吸是陆地生态系统碳循环最关键的组分之一。研究降水量变化下荒漠草原土壤呼吸的时间动态及其与环境因子间的联系, 可为深入理解降水格局改变下脆弱生态系统碳循环关键过程的调控机制提供数据支撑。该研究基于2014年在宁夏荒漠草原设立的降水量变化(减少50%、减少30%、自然、增加30%、增加50%)的野外控制实验, 探究了2019年6–10月土壤呼吸速率的时间动态, 分析了土壤呼吸速率与土壤性质和植物特征的关系。整个生长季土壤呼吸速率呈先增加后减弱的时间动态, 最大值( $2.79\text{--}5.35\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )出现在7月下旬或8月上旬。与自然降水量相比, 减少30%降水量对土壤呼吸速率无显著影响, 反映了土壤呼吸对适度干旱的适应性。整体来看, 减少50%降水量降低了土壤呼吸速率, 增加降水量(尤其是增加30%)提高了土壤呼吸速率, 且其促进作用在前期(6–7月)尤为明显。土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的指数关系, 与土壤含水量呈显著的线性关系。土壤理化性质对土壤呼吸速率有高的独立解释力, 且其影响与土壤生物学性质和植物多样性高度相关。降水量可直接影响土壤呼吸速率, 也可通过影响土壤生物学性质和植物生物量间接影响土壤呼吸速率。该研究结果表明, 适度增加降水量缓解了荒漠草原土壤水分受限性、刺激了土壤酶活性、促进了微生物活性和植物生长, 从而加速了土壤呼吸; 极端增加降水量则可能导致土壤透气性降低、微生物代谢活动受阻, 进而抑制土壤呼吸。

**关键词** 降水格局改变; 荒漠草原; 植物群落特征; 土壤碳源; 土壤性质

李冰, 朱湾湾, 韩翠, 余海龙, 黄菊莹 (2023). 降水量变化下荒漠草原土壤呼吸及其影响因素. 植物生态学报, 47, 1310-1321. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0176

## Soil respiration and its influencing factors in a desert steppe in northwestern China under changing precipitation regimes

LI Bing<sup>1,2</sup>, ZHU Wan-Wan<sup>3</sup>, HAN Cui<sup>1</sup>, YU Hai-Long<sup>3</sup>, and HUANG Ju-Ying<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; <sup>2</sup>Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; and <sup>3</sup>School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

### Abstract

**Aims** Soil respiration is one of the most critical components of carbon cycle in terrestrial ecosystems. The study on temporal dynamics of soil respiration and its linkage with environmental factors in desert steppes under changing precipitation can provide data supports for a deep understanding of the regulatory mechanisms of key carbon cycling processes in fragile ecosystems.

**Methods** A field experiment involving five precipitation treatments (50% reduction, 30% reduction, natural, 30% increase, 50% increase) was set up in 2014 in a desert steppe in Ningxia. The temporal dynamics of soil respiration rate were explored during the growing season (from June to October) in 2019, and the relationships between soil respiration rate and soil properties and plant characteristics were analyzed.

**Important findings** Soil respiration rate showed a seasonal variation of an increasing and a decreasing trend across the growing season, with the maximum values ( $2.79\text{--}5.35\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) occurring in late July or early August. Compared with the natural condition, 30% reduction in precipitation did not result in a significant effect on soil respiration rate, reflecting the adaptability of soil respiration to moderate drought. Overall, 50% reduction in precipitation reduced soil respiration rate, whereas increased precipitation (especially the 30% increase) enhanced soil respiration rate, and this positive effect was especially obvious in the early growing season (June to July). Soil respiration rate had a significantly exponential relationship with soil temperature and a significantly

收稿日期Received: 2022-05-05 接受日期Accepted: 2022-09-07

基金项目: 宁夏自然科学基金(2022AAC02012和2022AAC03120)和国家自然科学基金(32160277)。Supported by the Natural Science Foundation of Ningxia (2022AAC02012 and 2022AAC03120) and the National Natural Science Foundation of China (32160277).

\* 通信作者Corresponding author (juyinghuang@163.com)

linear relationship with soil water content. Soil physicochemical property had a highly independent explanatory power for soil respiration rate ( $R^2 = 0.36$ ), and its effect was highly correlated with soil biological property and plant diversity ( $R^2 = 0.31$ ). Precipitation could affect soil respiration rate either directly or indirectly through the influences on soil biological property and plant biomass. The results indicated that a moderate increase in precipitation could accelerate soil respiration by alleviating soil water limitation, stimulating soil enzyme activity, promoting microbial activity and plant growth in the desert steppe, and that an extreme increase in precipitation would lead to a decrease in soil permeability and a hindrance to microbial metabolic activity, thus inhibiting soil respiration.

**Key words** changing precipitation pattern; desert steppe; plant community characteristic; soil carbon source; soil property

Li B, Zhu WW, Han C, Yu HL, Huang JY (2023). Soil respiration and its influencing factors in a desert steppe in northwestern China under changing precipitation regimes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 1310-1321. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0176

进入20世纪以来, 人类活动引起大气中温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 等)浓度不断升高, 加上气候内部变率的影响, 促使全球气温上升和大气环流发生改变, 导致全球陆地平均降水量增加, 大多数地区极端降水事件(干旱和洪涝等)频发(IPCC, 2021)。就我国而言, 年降水量呈现出微弱的下降趋势, 但西北地区年降水量和季度降水量均明显增加(Su *et al.*, 2020)。据报道, 1961–2018年西北地区92%站点的年降水量呈增加趋势(王澄海等, 2021)。此外, 我国极端降水事件亦逐年上升(Zhang *et al.*, 2013), 且地区差异明显, 即西北、华东、华南、西南和华中地区呈增加趋势, 华北、东北和西南北部地区则呈下降趋势(Chang *et al.*, 2020)。作为西北干旱半干旱区主要的限制因子, 降水与植物根系和微生物新陈代谢密切相关(Liu *et al.*, 2016), 其格局的改变势必会对区域生态系统碳循环产生影响(Reichmann & Sala, 2014; 杨青霄等, 2017)。开展降水量变化下荒漠草原关键碳循环过程研究, 对于科学评估降水格局改变下干旱半干旱区脆弱生态系统碳汇功能具有重要的现实意义。

作为全球碳循环中最关键的组分之一, 土壤呼吸极易受到极端降水事件的影响(Knapp *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2018)。研究表明, 降水对土壤呼吸的影响主要由降水量和土壤本底水分条件共同决定(Zhao *et al.*, 2021)。在干旱地区, 增加降水量可通过提高土壤水分有效性、调节土壤温度、改善土壤通气状况、刺激土壤酶分泌等, 促进植物地上和地下部分生长, 刺激微生物活动, 从而增强根系和微生物呼吸作用(王忠武等, 2020; 蒿廉伊等, 2021; Zhang *et al.*, 2021; 范凯凯等, 2022)。但在湿润地区, 土壤水分含量受降水量的影响达到一定阈值后, 过度增加

降水量可能会造成土壤透气性下降(Knapp *et al.*, 2008)及养分淋溶流失(Schuur, 2003; 杨青霄等, 2017), 影响植物根系生命活动和微生物活性(郭文章等, 2021), 导致土壤呼吸速率下降。目前, 国内外已有大量研究探讨了降水量变化下干旱半干旱区草原土壤呼吸动态及其影响因素。如, Ru等(2018)发现提前和延后降水高峰均会抑制内蒙古温带草原土壤呼吸, Wang等(2021)观察到降水促进了宁夏天然草原土壤呼吸, Arredondo等(2018)发现土壤含水量和温度是控制墨西哥矮草草原土壤呼吸的重要因素。然而, 相关研究多为适度改变降水量, 缺乏极端降水模式下的探讨, 尤其是长期降水量变化下。研究极端降水量变化下荒漠草原土壤呼吸与环境因子的联系, 可为充分认识降水格局改变下干旱半干旱区脆弱生态系统碳循环调控机制提供科学依据。

荒漠草原是草原向荒漠过渡的一类草原生态系统类型, 是我国主要的生态脆弱区和区域重要的生态屏障; 所处区域降水量少、蒸发量大的气候特征导致其土壤水分有效性差和植物多样性低(余轩等, 2021), 因而极易受到降水格局改变的影响(朱湾湾等, 2019)。目前, 已有许多国内学者探讨了降水量对荒漠草原土壤呼吸的影响(Zhang *et al.*, 2019, 2021; 蒿廉伊等, 2021), 但长期极端降水量变化下相关研究的缺乏, 限制了我们对降水格局改变下荒漠草原碳循环调控机制的深入理解。为此, 本研究依托2014年设立于宁夏荒漠草原的降水量变化的长期野外观测样地, 监测了2019年生长季6–10月土壤呼吸速率的时间动态, 分析了6年降水量变化下土壤呼吸速率与土壤因子和植物特征的关系, 以期回答适度和极端降水量如何影响荒漠草原土壤呼吸动态, 长期降水量变化下土壤呼吸速率与土壤性质和

植物群落结构存在怎样的联系等科学问题。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区吴忠市盐池县柳杨堡乡杨寨子村围栏草地内, 地理位置为 $37.80^{\circ}$  N,  $107.45^{\circ}$  E, 海拔约为1 367 m。该草地自1998年开始围封, 地处毛乌素沙地边缘, 属于黄土高原向鄂尔多斯台地过渡带, 具有典型的温带大陆性气候特征。多年平均降水量为289.4 mm, 降水量季节分配不均, 主要集中于生长季的5–8月, 2019年降水量最大值出现在8月份(图1)。多年平均气温为 $7.5^{\circ}\text{C}$ , 2019年平均气温呈单峰曲线变化, 平均值为 $9.5^{\circ}\text{C}$ , 1月和7月平均气温分别为 $-6.8^{\circ}\text{C}$ 和 $22.8^{\circ}\text{C}$ , 最大值出现在7月。2019年平均风速变化呈双峰曲线趋势, 平均值为 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最大值出现在4月和11月。土壤类型主要为灰钙土, 土壤质地主要为砂壤土, 表现出保水保肥性能差、pH高等特征。草地类型属于荒漠草原, 植物群落简单, 以一年生或多年生草本为主, 优势物种包括猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)和草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)等, 常见物种包括白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。

### 1.2 实验设计

2014年4月, 在围栏草地内选择地势平坦、植被组成均一的区域作为降水量处理的长期实验样地。降水量增减量设置以我国西北地区近几十年来降水量时空分布格局为依据(姚俊强等, 2015; Su *et al.*, 2020)。降水量处理方法参考了国内同类研究方法(Xu *et al.*, 2018), 同时兼顾了野外实验的可操作性。采用完全随机区组实验设计, 设置了5个降水量处

理: 减少50% (极端减少, W1)、减少30% (适度减少, W2)、自然(对照, W3)、增加30% (适度增加, W4)、增加50% (极端增加, W5)。每个处理设置3次重复, 共计15个 $8\text{ m}\times 8\text{ m}$ 的实验小区。每个小区四周垂直插入20 cm宽的彩钢板, 各小区之间设置2 m的缓冲带, 以防止降水时雨滴溅入, 减少地表径流和地下渗漏干扰。

2014–2017年采用自制遮雨棚减少自然降水量。2018年项目组对减雨装置进行了改进, 采用自制拱形减雨架减少自然降水量。减雨架上端最高点距离地面约1.8 m。将20 cm宽的瓦面状透明(透光率 $>95\%$ )聚氯乙烯(PVC)板按照固定间隔放置于减雨架上方, 以搭建分别相当于50%和30%的遮雨面。其中, W1处理每隔20 cm放置一块PVC板; W2处理每隔46.7 cm放置一块PVC板。采用人工喷灌装置增加降水量。W4和W5处理年增加降水量分别为年降水量(289.4 mm)的30% (86.8 mm)和50% (144.7 mm)。喷水前, 在每个小区的人工喷灌装置上安装一个水表和一个三通阀门, 以便准确控制每次的喷水量。由于研究区降水丰沛期为5–8月, 因此将全年需要补给的降水量分8次于5–8月每月上旬和中旬平均喷于小区内。其中, W4处理每次喷水 $0.696\text{ m}^3$ , W5处理每次喷水 $1.160\text{ m}^3$ 。详细的实验处理方法见项目组前期研究报道(朱湾湾等, 2019)。

### 1.3 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率采用便携式LI-8100土壤呼吸测定仪(LI-COR, Lincoln, USA)测定。2019年4月上旬, 在每个小区内靠近中心区域安置一个PVC材质的呼吸环(内径20 cm, 高11 cm), 以实现土壤呼吸速率的长期定点监测。PVC环入土7 cm左右, 即垂直高出地面4 cm左右。安装时尽可能避免破坏周围土壤与植物。每次测定前一天剪除环内地表活体植物,

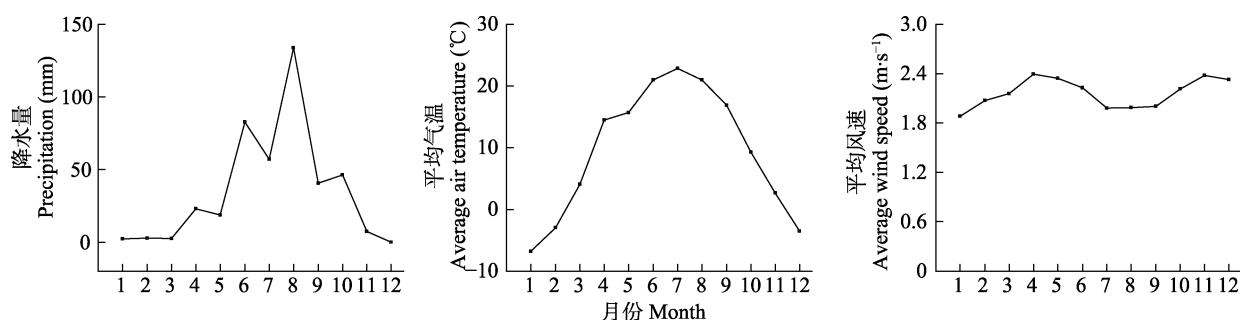


图1 2019年宁夏盐池站点月降水量、平均气温和平均风速。

Fig. 1 Monthly precipitation, average air temperature, and average wind speed in the Yanchi station, Ningxia in 2019.

以避免其对土壤呼吸监测数据产生影响。于6–10月选择晴朗无云的天气进行土壤呼吸速率的测定, 每10天监测1次(8:00–10:00和15:00–17:00各一次), 每月测定3次。如遇刮风、下雨等人力不可控情况, 测定时间适当提前或延后。采用地温计同步测定土壤温度(8:00–10:00和15:00–17:00各一次)。采用土钻法与烘干称质量法相结合的方法, 于6–10月每月下旬测定表层(0–20 cm)土壤含水量(8:00–10:00进行)。因6月9日、8月20日、9月23日、9月30日和10月21日土壤呼吸仪出现故障, 获得的数据可信度低, 故剔除了这5次的测定值。

#### 1.4 植物和土壤样品采集与测定

于2019年7月下旬, 在每个小区内随机设置3个1 m × 1 m的小样方进行植被群落调查, 准确记录各样方内出现物种的名称、物种数、物种高度和物种密度等。调查结束后, 将每个样方内全部植物地上部分用剪刀齐平地剪下, 清除枯枝落叶等杂质后, 按物种分别装入牛皮纸袋带回实验室烘干称质量(65 °C, 48 h), 以获得各物种生物量。群落生物量为各物种生物量之和。物种多样性以Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )、Pielou均匀度指数( $E$ )、Patrick丰富度指数( $R$ )衡量(张金屯, 2004):

$$P_i = (\text{相对生物量} + \text{相对高度} + \text{相对密度})/3 \quad (1)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$E = H'/\ln S \quad (4)$$

$$R = S \quad (5)$$

式中,  $P_i$ 为物种*i*的重要值,  $S$ 为样方内物种数。

同期, 在每个小区内使用内径为5 cm的土钻随机钻取3钻0–20 cm土壤, 将其充分混匀制成混合土壤样品后放入保温箱内带回实验室。实验室内, 将混合土样过2 mm标准筛后分成两部分。一部分室温下自然风干后, 测定土壤pH、电导率、有机碳、全氮、全磷、速效磷含量。另一部分放入冰箱内4 °C下冷藏保存, 尽可能于两周内完成蔗糖酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性、硝态氮、铵态氮和微生物生物量碳、氮、磷含量的测定。

其中, 土壤有机碳、全氮和全磷含量分别采用重铬酸钾容量法-外加热法、凯氏定氮法和钼锑抗比

色法测定; 土壤pH和电导率分别采用梅特勒S220多参数测试仪(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司, 上海)和S230电导率仪(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司, 上海)测定; 土壤硝态氮和铵态氮含量采用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3, SEAL Analytical GmbH, Hanau, Germany)测定; 土壤速效磷含量采用0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>法测定(鲍士旦, 2000); 土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性分别采用3, 5-二硝基水杨酸比色法、氨释放量比色法和对硝基苯磷酸盐法测定(关荫松, 1986); 微生物生物量碳、氮和磷含量分别采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提-碳分析仪器法、氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取-流动注射氮分析仪器法和氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取-正磷酸盐态无机磷测定-外加正磷酸盐态无机磷校正法测定(鲁如坤, 2000)。

#### 1.5 数据分析

采用Excel 2016对数据进行初步整理。运用SPSS 26.0对数据进行统计分析: 采用重复测量方差分析研究降水量、测定时间及其交互作用对土壤呼吸速率、含水量和温度的影响; 采用单因素方差分析研究降水量对土壤呼吸速率、土壤性质和植物特征的影响。分析前, 对各指标进行方差齐性检验。若方差为齐性, 选用最小显著差异(LSD)法, 否则选用Tamhane's T2法。采用Origin 2021绘图(平均值±标准误,  $n = 3$ )。在Origin中, 采用指数回归模型描述土壤呼吸速率与土壤温度的关系, 采用线性回归方程模型拟合土壤呼吸速率与土壤含水量的关系(丁金枝等, 2011):

$$SR = ae^{bT} \quad (6)$$

$$SR = a + bW \quad (7)$$

式中,  $SR$ 为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $T$ 为土壤温度(°C),  $W$ 为土壤含水量(%),  $a$ 和 $b$ 为常数。

采用R 4.1.2软件中“vegan”包进行数据的方差分解。因环境因子(土壤性质和植物特征)间存在共线性, 使用方差膨胀因子(VIF < 10)进行变量剔除。为获得各组环境因子对土壤呼吸速率独立的解释力以及组间共同的解释力, 将土壤性质分为土壤理化性质(含水量、温度、pH、有机碳含量、硝态氮含量和铵态氮含量, 命名为X1)、土壤生物学性质(蔗糖酶活性和微生物生物量碳、氮、磷含量, 命名为X2)以及植物多样性(Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数, 命名为X3)等3组作为解释变量, 以土壤呼吸速率作为响应变量, 用var.part函数进行

方差分解。

为了进一步分析降水量变化下环境因子对土壤呼吸速率的直接和间接影响,采用R软件中“lavaan”包构建结构方程模型。考虑到土壤因子众多,将其归为土壤物理性质(含水量和温度)、化学性质(pH、电导率、有机碳、全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量)和生物学性质(蔗糖酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性、微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷含量)3个潜变量。选取植物生物量和多样性(Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Pielou均匀度指数、Simpson优势度指数)作为植物因子的观测变量。基于理论知识构建初始模型,使用R软件中“plspm”包进行潜变量筛选及数据标准化,剔除标准载荷(loading)小于0.5的土壤因子(Lopatin *et al.*, 2022)。依据模型拟合度发现,土壤化学性质中pH、电导率、有机碳、速效磷含量的拟合结果最优;土壤生物学性质中,蔗糖酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性、微生物生物量碳含量的拟合结果最优;植物多样性指标中,Patrick丰富度指数的拟合结果最优。结构方程采用最大似然估计法,使用卡方检验评估模型的适合度,即以卡方检验 $p > 0.05$ 、标准化残差均方根(RMSEA)  $< 0.05$ 、相对适配指数(SRMR)  $< 0.05$ 和拟合优度指数(GFI)  $> 0.95$ 评估模型拟合程度(Zuo *et al.*, 2016)。

2 结果和分析

2.1 降水量对土壤呼吸速率的影响

降水量和测定时间均对土壤呼吸速率有极显著影响,但二者的交互作用均对土壤呼吸速率无显著影响(表1)。

随着生长季的推移,各处理下土壤呼吸速率均表现出先增加后降低的时间动态(图2),最大值出现在7月下旬或8月上旬(分别为2.79、3.16、3.39、5.31、5.35  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。与自然降水量相比,减少30%降水量(W2)对各时期土壤呼吸速率均无显著影响,减少50% (W1)和增加(W4和W5)降水量不同程度地改变了各时期土壤呼吸速率,尤其是6-7月:8:00-10:00,减少50%降水量显著降低了6月18日、7月26日、8月29日和9月10日的土壤呼吸速率,增加降水量显著提高了6月18日(W5)、6月28日(W4和

表1 降水量和测定时间影响荒漠草原土壤呼吸速率的重复测量方差分析  
Table 1 Repeated measurement ANOVA of precipitation and measuring time on soil respiration rate in a desert steppe

差异来源	Difference source	df	8:00-10:00	15:00-17:00
降水量处理	Precipitation treatment ( $\alpha$ )	4	13.198**	37.013**
测定时间	Measuring time ( $\beta$ )	4	24.532**	37.278**
降水量处理×测定时间	Interaction of $\alpha$ and $\beta$	16	0.520	0.678

表中数据为F值。\*\*,  $p < 0.01$ 。  
Data in the table are F values. \*\*,  $p < 0.01$ .

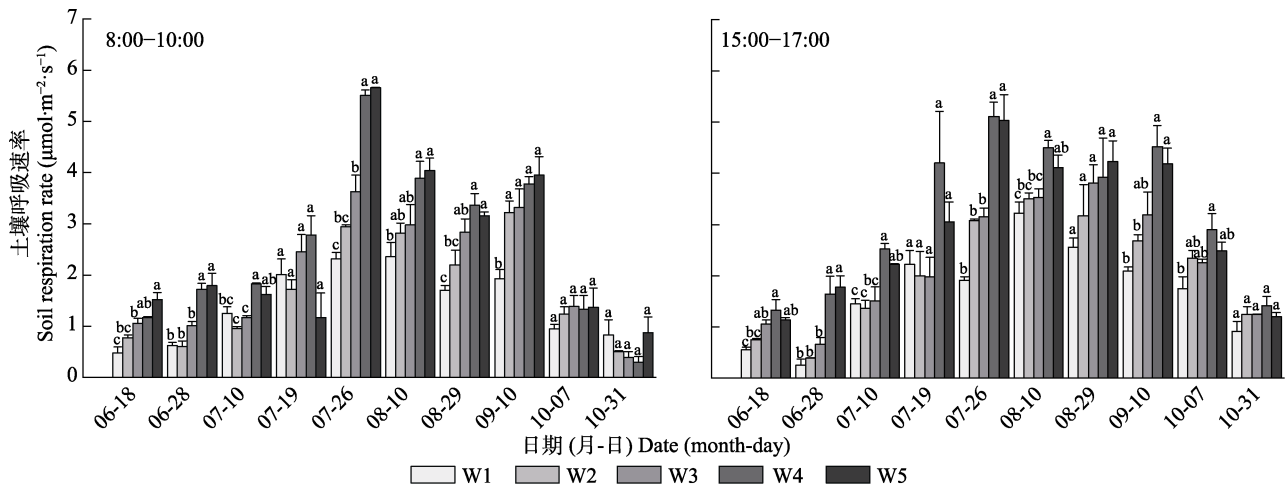


图2 降水量变化对6-10月荒漠草原土壤呼吸速率的影响(平均值±标准误)。W1, 降水量减少50%; W2, 降水量减少30%; W3, 自然降水量; W4, 降水量增加30%; W5, 降水量增加50%。不同小写字母表示同一测定时间下降水量处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 2 Effects of precipitation change on soil respiration rate from June to October in a desert steppe (mean  $\pm$  SE). W1, 50% reduction in precipitation; W2, 30% reduction in precipitation; W3, natural precipitation; W4, 30% increase in precipitation; W5, 50% increase in precipitation. Different lowercase letters indicate significant differences among the precipitation treatments under the same measuring time ( $p < 0.05$ ).



W5)、7月10日(W4和W5)和7月26日(W4和W5)的土壤呼吸速率; 15:00–17:00, 减少50%降水量显著降低了6月18日的土壤呼吸速率, 增加降水量显著提高了6月28日(W4和W5)、7月10日(W4)、7月26日(W4和W5)和8月10日(W4)的土壤呼吸速率。

## 2.2 降水量对环境因子的影响

降水量对8:00–10:00土壤温度有显著影响, 测定时间对8:00–10:00和15:00–17:00土壤温度均有极显著影响; 降水量和测定时间均对土壤含水量有极显著影响; 二者对土壤温度和含水量均无显著的交互作用(表2)。

降水量对土壤温度的影响随月份不同而异(图3): 8:00–10:00, 与自然降水量相比, 减少和增加30%降水量对各时期土壤温度均无显著影响, 减少50%降水量显著降低了10月7日的土壤温度, 增加50%降水量显著提高了8月10日的土壤温度; 15:00–17:00, 与自然降水量相比, 减少降水量显著降低了6月18日(W1和W2)和8月29日(W1)的土壤温度、显著提高了7月26日(W2)和10月31日(W1和W2)的土壤温度, 增加降水量对各时期土壤温度均无显著影响。

与自然降水量相比, 减少30%和增加30%降水量对各时期土壤含水量均无显著影响, 减少50%降水量显著降低了9月和10月土壤含水量, 增加50%降水量显著提高了7月土壤含水量(图4)。

与自然降水量相比, 减少50%降水量显著提高了土壤全磷、硝态氮含量和Simpson优势度指数, 显

著降低了Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数; 减少30%降水量显著提高了土壤pH、全磷、微生物生物量磷含量, 显著降低了Pielou均匀度指数; 增加30%降水量显著提高了土壤pH、硝态氮含量、脲酶活性, 显著降低了土壤全氮含量和Pielou均匀度指数; 增加50%降水量显著提高了土壤pH、硝态氮、微生物生物量碳含量、脲酶和磷酸酶活性, 显著降低了土壤全氮含量(表3)。

## 2.3 降水量变化下土壤呼吸速率与环境因子的关系

如图5所示, 随土壤温度增加, 土壤呼吸速率呈指数增加; 随土壤含水量增加, 土壤呼吸速率呈线性增加。

方差分解结果(图6)显示: 被土壤性质和植物多样性所解释的土壤呼吸速率方差总 $R^2$ 为0.84; 各组环境因子中, X1独立的解释量较大, X2独立的解释

表2 降水量和测定时间影响荒漠草原土壤温度(ST)和含水量(SWC)的重复测量方差分析

Table 2 Repeated measurement ANOVA of precipitation and measuring time on soil temperature (ST) and soil water content (SWC) in a desert steppe

差异来源 Differences source	df	ST		SWC
		8:00–10:00	15:00–17:00	8:00–10:00
降水量处理 Precipitation treatment ( $\alpha$ )	4	3.707*	2.276	27.601**
测定时间 Measuring time ( $\beta$ )	4	57.317**	146.775**	15.003**
降水量处理×测定时间 Interaction of $\alpha$ and $\beta$	16	0.108	0.306	1.879

表中数据为F值。\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ 。

Data in the table are F values. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ .

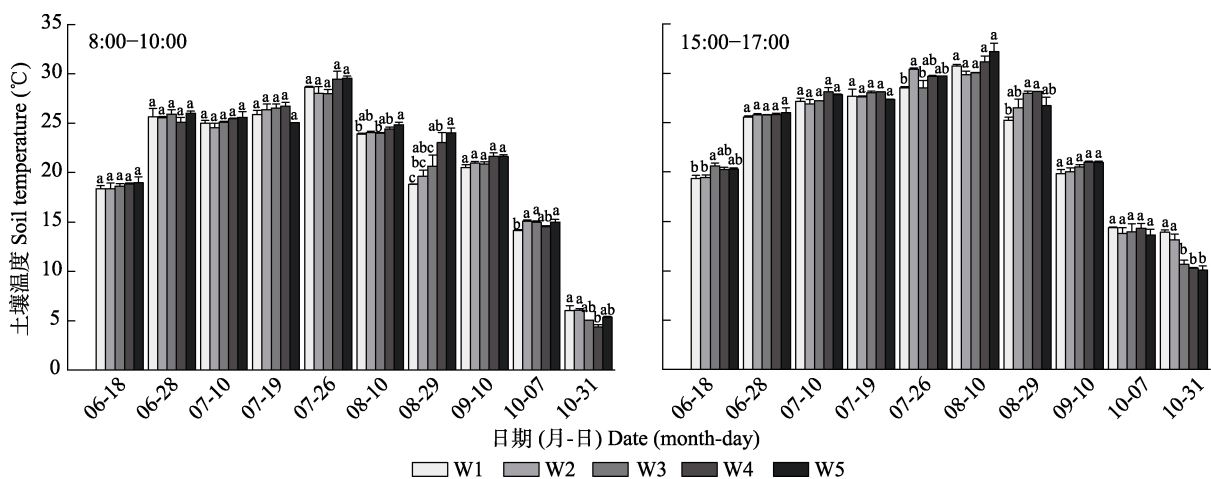


图3 降水量变化对6–10月荒漠草原土壤温度的影响(平均值±标准误)。W1, 降水量减少50%; W2, 降水量减少30%; W3, 自然降水量; W4, 降水量增加30%; W5, 降水量增加50%。不同小写字母表示同一测定时间下降水量处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 3 Effects of precipitation change on soil temperature from June to October in a desert steppe (mean  $\pm$  SE). W1, 50% reduction in precipitation; W2, 30% reduction in precipitation; W3, natural precipitation; W4, 30% increase in precipitation; W5, 50% increase in precipitation. Different lowercase letters indicate significant differences among the precipitation treatments under the same measuring time ( $p < 0.05$ ).

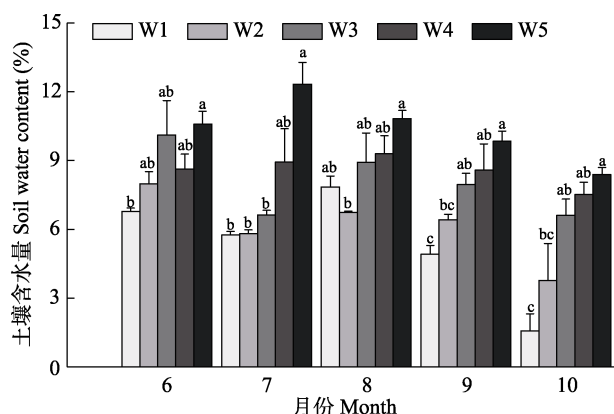


图4 降水量变化对6–10月荒漠草原土壤含水量的影响(平均值±标准误)。W1, 降水量减少50%; W2, 降水量减少30%; W3, 自然降水量; W4, 降水量增加30%; W5, 降水量增加50%。不同小写字母表示同一测定时间下降水量处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

**Fig. 4** Effects of precipitation change on soil water content from June to October in a desert steppe (mean  $\pm$  SE). W1, 50% reduction in precipitation; W2, 30% reduction in precipitation; W3, natural precipitation; W4, 30% increase in precipitation; W5, 50% increase in precipitation. Different lowercase letters indicate significant differences among the precipitation treatments under the same measuring time ( $p < 0.05$ ).

表3 降水量变化对8月荒漠草原土壤性质和植物特征的影响(平均值±标准误)

**Table 3** Effects of precipitation change on soil properties and plant characteristics in August in a desert steppe (mean  $\pm$  SE)

指标 Index	处理 Treatment				
	W1	W2	W3	W4	W5
pH	8.52 $\pm$ 0.05 <sup>bc</sup>	8.58 $\pm$ 0.04 <sup>ab</sup>	8.43 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	8.67 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	8.66 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>
EC	89.97 $\pm$ 0.88 <sup>a</sup>	93.37 $\pm$ 2.44 <sup>a</sup>	128.70 $\pm$ 18.49 <sup>a</sup>	289.67 $\pm$ 22.93 <sup>a</sup>	358.00 $\pm$ 38.19 <sup>a</sup>
SOC	2.96 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	3.25 $\pm$ 0.50 <sup>ab</sup>	3.34 $\pm$ 0.17 <sup>ab</sup>	3.38 $\pm$ 0.24 <sup>ab</sup>	3.70 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>
TN	0.48 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.49 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.48 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.43 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	0.43 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
TP	0.34 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.29 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	0.27 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.28 $\pm$ 0.00 <sup>bc</sup>	0.27 $\pm$ 0.00 <sup>c</sup>
NO <sub>3</sub> -N	5.50 $\pm$ 0.41 <sup>a</sup>	5.08 $\pm$ 0.76 <sup>ab</sup>	3.28 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	5.19 $\pm$ 0.91 <sup>a</sup>	5.81 $\pm$ 0.42 <sup>a</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	2.91 $\pm$ 0.23 <sup>a</sup>	3.59 $\pm$ 0.68 <sup>a</sup>	5.44 $\pm$ 1.12 <sup>a</sup>	5.71 $\pm$ 1.84 <sup>a</sup>	5.31 $\pm$ 3.34 <sup>a</sup>
AP	1.56 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	1.62 $\pm$ 0.51 <sup>a</sup>	1.72 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	2.14 $\pm$ 0.30 <sup>a</sup>	2.47 $\pm$ 0.68 <sup>a</sup>
SA	318.41 $\pm$ 33.75 <sup>c</sup>	359.39 $\pm$ 41.44 <sup>bc</sup>	381.78 $\pm$ 33.90 <sup>abc</sup>	434.93 $\pm$ 36.46 <sup>ab</sup>	474.67 $\pm$ 30.07 <sup>a</sup>
UA	27.85 $\pm$ 3.86 <sup>b</sup>	30.68 $\pm$ 0.67 <sup>b</sup>	30.95 $\pm$ 1.96 <sup>b</sup>	45.34 $\pm$ 4.52 <sup>a</sup>	45.70 $\pm$ 4.82 <sup>a</sup>
PA	44.58 $\pm$ 0.32 <sup>bc</sup>	40.89 $\pm$ 3.01 <sup>c</sup>	43.88 $\pm$ 2.97 <sup>bc</sup>	49.02 $\pm$ 2.42 <sup>ab</sup>	55.60 $\pm$ 1.35 <sup>a</sup>
MBC	99.05 $\pm$ 9.57 <sup>ab</sup>	77.05 $\pm$ 20.59 <sup>ab</sup>	46.68 $\pm$ 14.32 <sup>b</sup>	100.24 $\pm$ 27.02 <sup>ab</sup>	108.73 $\pm$ 8.91 <sup>a</sup>
MBN	48.97 $\pm$ 2.28 <sup>a</sup>	5.90 $\pm$ 0.80 <sup>a</sup>	7.45 $\pm$ 1.74 <sup>a</sup>	15.10 $\pm$ 7.95 <sup>a</sup>	19.91 $\pm$ 8.67 <sup>a</sup>
MBP	1.76 $\pm$ 0.73 <sup>b</sup>	3.56 $\pm$ 0.40 <sup>a</sup>	1.76 $\pm$ 0.76 <sup>b</sup>	1.14 $\pm$ 0.34 <sup>b</sup>	2.00 $\pm$ 0.34 <sup>ab</sup>
R	5.00 $\pm$ 0.58 <sup>b</sup>	6.67 $\pm$ 0.88 <sup>ab</sup>	6.00 $\pm$ 1.00 <sup>ab</sup>	8.67 $\pm$ 1.20 <sup>a</sup>	8.67 $\pm$ 0.88 <sup>a</sup>
H'	1.13 $\pm$ 0.14 <sup>c</sup>	1.31 $\pm$ 0.07 <sup>bc</sup>	1.49 $\pm$ 0.10 <sup>ab</sup>	1.43 $\pm$ 0.02 <sup>ab</sup>	1.66 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>
E	0.70 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	0.70 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	0.86 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.67 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	0.77 $\pm$ 0.00 <sup>ab</sup>
D	0.43 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	0.37 $\pm$ 0.05 <sup>ab</sup>	0.27 $\pm$ 0.02 <sup>bc</sup>	0.36 $\pm$ 0.04 <sup>abc</sup>	0.24 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>

W1, 降水量减少50%; W2, 降水量减少30%; W3, 自然降水量; W4, 降水量增加30%; W5, 降水量增加50%。AP, 土壤速效磷含量; D, Simpson优势度指数; E, Pielou均匀度指数; EC, 土壤电导率; H', Shannon-Wiener多样性指数; MBC, 微生物生物量碳含量; MBN, 微生物生物量氮含量; MBP, 微生物生物量磷含量; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 土壤铵态氮含量; NO<sub>3</sub>-N, 土壤硝态氮含量; PA, 土壤磷酸酶活性; pH, 土壤酸碱度; R, Patrick丰富度指数; SA, 土壤蔗糖酶活性; SOC, 土壤有机碳含量; TN, 土壤全氮含量; TP, 土壤全磷含量; UA, 土壤脲酶活性。同一行不同小写字母表示该指标在降水量处理间差异显著( $p < 0.05$ )。W1, 50% reduction in precipitation; W2, 30% reduction in precipitation; W3, natural precipitation; W4, 30% increase in precipitation; W5, 50% increase in precipitation. AP, soil available phosphorus content; D, Simpson dominance index; E, Pielou evenness index; EC, soil electrical conductivity; H', Shannon-Wiener diversity index; MBC, microbial biomass carbon content; MBN, microbial biomass nitrogen content; MBP, microbial biomass phosphorus content; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, soil ammonium nitrogen content; NO<sub>3</sub>-N, soil nitrate nitrogen content; PA, soil phosphatase activity; R, Patrick richness index; SA, soil sucrose activity; SOC, soil organic carbon content; TN, soil total nitrogen content; TP, soil total phosphorus content; UA, soil urease activity. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences of the index among the precipitation treatments ( $p < 0.05$ ).

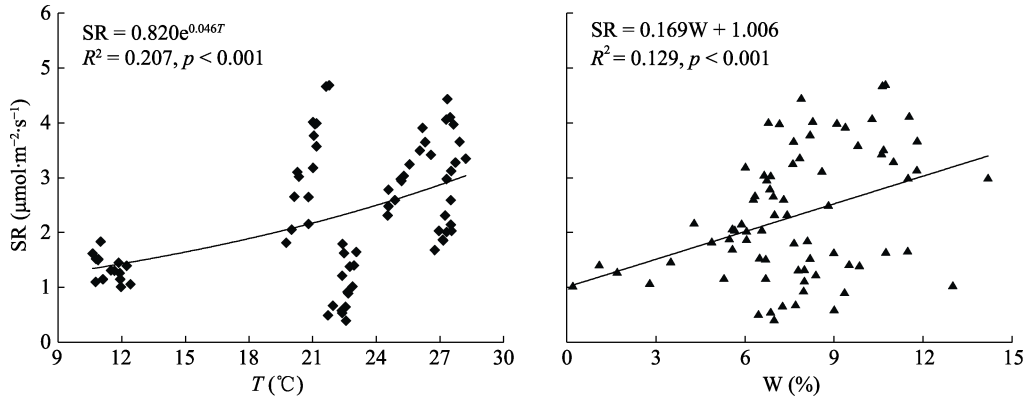


图5 整个生长季荒漠草原土壤呼吸速率(SR)与土壤温度( $T$ )和含水量( $W$ )的拟合关系。

**Fig. 5** Fitting relationships of soil respiration rate (SR) with soil temperature ( $T$ ) and water content ( $W$ ) across the whole growing season in a desert steppe.

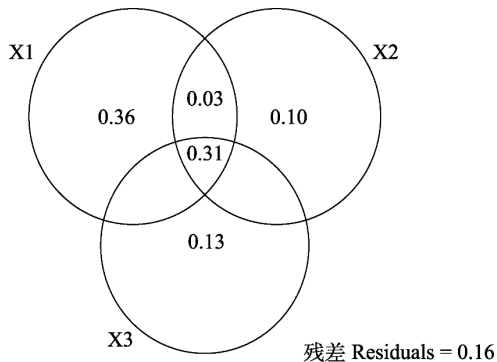


图6 环境因子组合对荒漠草原土壤呼吸速率的方差分解。小于0的数值未显示。单个圆圈内数字代表该环境因子组合能解释的方差。圆圈重合部分内数字代表几个环境因子组合共同解释的方差。X1组包括土壤温度、含水量、pH、有机碳、硝态氮和铵态氮含量。X2组包括土壤蔗糖酶活性和微生物生物量碳、氮、磷含量。X3组包括Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数。

**Fig. 6** Variation partitioning of soil respiration rate by environmental factor groups in a desert steppe. Values  $< 0$  are not shown. Data in one circle represent the variation individually explained by the environmental factor groups. Data in the overlapped part of circles represent the variation jointly explained by environmental factor groups. X1 group includes soil temperature, water content, pH, organic carbon, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen content. X2 group includes soil sucrose activity and microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus content. X3 group includes Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index.

是由于随着生长季的推移气温逐渐升高、自然降水量逐渐增多(图1), 而水分的增多增强了土壤可溶性有机物的有效性和流动性, 促进了植物地下部分根系生长和微生物的代谢活动(蒿廉伊等, 2021), 从而使得土壤呼吸作用加快并在夏季达到高值; 之后随着气温降低、自然降水量减少, 植物地下部分生长和微生物活性减弱, 其呼吸强度随之下降(郭文章等, 2021)。与自然降水量相比, 减少30%降水量对土

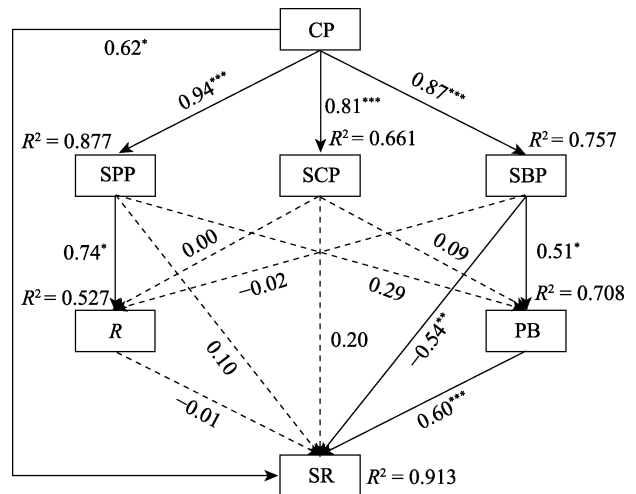


图7 降水量变化下荒漠草原土壤呼吸速率与环境因子的结构方程模型。CP, 降水量; PB, 植物生物量; R, Patrick丰富度指数; SBP, 土壤生物学性质(蔗糖酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性、微生物生物量碳含量); SCP, 土壤化学性质(pH、电导率、有机碳、速效磷含量); SPP, 土壤物理性质(含水量和温度); SR, 土壤呼吸速率。黑色实线和虚线分别表示显著( $p < 0.05$ )和不显著( $p > 0.05$ )路径。箭头上数字为标准化的路径系数(\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ )。模型拟合总结:  $\chi^2 = 5.709$ ,  $p = 0.457$ ,  $df = 6$ ; 拟合优度指数(GFI) = 0.998; 标准化残差均方根(RMSEA) = 0.000; 相对适配指数(SRMR) = 0.035。

**Fig. 7** Structural equation model of soil respiration rate and environmental factors under changing precipitation regimes in a desert steppe. CP, precipitation; PB, plant biomass; R, Patrick richness index; SBP, soil biological properties (sucrase activity, urease activity, phosphatase activity, microbial biomass carbon content); SCP, soil chemical property (pH, electrical conductivity, organic carbon, available phosphorus content); SPP, soil physical property (water content and temperature); SR, soil respiration rate. Black solid and dashed arrows indicate significant ( $p < 0.05$ ) and insignificant ( $p > 0.05$ ) path, respectively. Numbers on the arrows are normalized path coefficients (\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ ). Model fit summary:  $\chi^2 = 5.709$ ,  $p = 0.457$ ,  $df = 6$ ; comparative fit index (GFI) = 0.998; root mean square error of approximation (RMSEA) = 0.000; standardized root mean square residual (SRMR) = 0.035.



壤呼吸速率影响较小,反映了土壤呼吸对适度干旱的适应性(杨青霄等, 2017)。减少50%降水量不同程度地降低了各月份土壤呼吸速率,增加降水量(尤其增加30%)则表现出相反的效应,且其促进作用在前期尤为明显(图2)。在极端干旱条件下,土壤长时间处于缺水状态,土壤水分以及有机质的扩散、有机质分解受到限制,不仅阻碍了土壤CO<sub>2</sub>的传输,而且影响了植物地下部分根系生长和微生物的生命活动,从而抑制了土壤呼吸作用(刘涛等, 2012; 王忠武等, 2020)。随着降水量增加,土壤水分和养分(氮和磷)等资源限制逐渐得以缓解,从而提高了植物有氧代谢(Ma *et al.*, 2017)、刺激了土壤酶活性(李新鸽等, 2019),进而促进了植物生长和微生物活动(杨青霄等, 2017; 蒿廉伊等, 2021),加速了植物地下部分根系呼吸和微生物呼吸(宋晓辉等, 2019)。由于生长季前期较后期自然降水量少(图1),因此土壤呼吸对增加降水量的反应在前期更加明显(王忠武等, 2020)。然而,持续增加降水量(增加50%)可能引起土壤通透性下降,从而限制了CO<sub>2</sub>的传输、抑制了土壤呼吸(刘涛等, 2012; 郭文章等, 2021)。

### 3.2 降水量变化下环境因子对土壤呼吸的影响

降水格局改变下,土壤呼吸作用受生物和非生物因素的共同调节(杨青霄等, 2017)。在受水分限制的荒漠草原,降水量变化主要通过改变土壤含水量来改变生态系统碳循环(侯建峰等, 2014; Knapp *et al.*, 2017)。本研究中,土壤呼吸速率随土壤含水量增加而增加(图5),证实土壤含水量是影响土壤呼吸速率的重要因素(Zhang *et al.*, 2019; 韩丹等, 2021)。研究区土壤长期处于干旱状态,过低的土壤含水量引起可溶性底物扩散受阻,植物生长和微生物活性受到抑制,导致CO<sub>2</sub>排放减少(范凯凯等, 2022);适量增加降水量增强了土壤水分有效性(郭文章等, 2021),从而调节了土壤通气性(范凯凯等, 2022),提高了植物生物量和多样性(蒿廉伊等, 2021),刺激了微生物活动和酶活性(杨青霄等, 2017),提高了土壤有机质水平(呼吸底物) (Arredondo *et al.*, 2018; 李新鸽等, 2019),进而刺激了土壤呼吸作用和CO<sub>2</sub>排放。

此外,土壤呼吸速率随土壤温度升高呈指数增加(图5),证实土壤温度亦是影响土壤呼吸速率的重要因素。研究区所处纬度较高,冬季漫长,土壤温度长期处于较低水平。随着生长季的到来,土壤温度

逐渐升高,这不仅刺激了植物地下部分生长和微生物活动,而且加速了酶的分泌和有机物的分解,提高了微生物呼吸底物水平,进而促使土壤呼吸速率升高(窦韦强等, 2022; 郭艳萍和李洪建, 2022)。本研究发现增加降水量对土壤温度影响较小,减少降水量对土壤温度影响较大,但未呈现出一致的规律,与张亚峰等(2013)得出的土壤温度随降水量增加而下降的结论不同,表明降水量变化下土壤温度不但受土壤湿度的影响,同时是土壤热容量和上覆植被等因素综合作用的结果(张慧智等, 2009; 王忠武等, 2020; 郭艳萍和李洪建, 2022)。进一步的方差分解结果(图6)显示,土壤含水量和温度等理化性质对土壤呼吸速率的影响与土壤生物学性质和植物多样性高度相关,证实降水量变化下土壤呼吸是非生物因素和生物因素共同作用的结果(杨青霄等, 2017)。

结构方程模型结果(图7)显示,降水量既可直接正向影响土壤呼吸速率,也可通过影响土壤生物学性质间接影响土壤呼吸速率。一方面,土壤生物学性质通过直接正向影响植物生物量进而间接正向影响土壤呼吸速率,与其他研究结果(蒿廉伊等, 2021; Zhang *et al.*, 2021)一致。在荒漠草原,土壤水分增多刺激了土壤酶分泌和酶活性,加速了土壤碳矿化过程(郭文章等, 2021),促进了微生物元素固持(徐敏等, 2020)和植物地下部分生命活动(宋晓辉等, 2019),从而提高了植物地上生物量积累(Ru *et al.*, 2018)。高的植物地上生物量为植物地下部分输送了多的光合产物,从而提高了后者呼吸强度(崔海和张亚红, 2016; 范凯凯等, 2022),反映了植物-酶-微生物之间的正反馈调节关系(王长庭等, 2010; 高明华等, 2016)。另一方面,土壤生物学性质直接负向影响土壤呼吸速率,与崔羽等(2019)研究结果相反。这在一定程度上也反映了适量增加降水量有助于促进微生物代谢和土壤呼吸,但过量增加降水量降低了土壤透气性,影响了土壤中可溶性底物扩散,从而限制了植物-微生物代谢活动,导致土壤呼吸速率下降(李新鸽等, 2019; 郭文章等, 2021)。此外,研究发现植物多样性通过植物根系和微生物生物量的变化调节土壤呼吸,即植物多样性影响着根系呼吸和微生物呼吸底物来源,从而直接调节着土壤呼吸速率(Chen & Chen, 2019)。本研究中,降水量通过影响土壤物理性质改变了植物多样性,但群落中不同物种表现出各异的生理生态适应过程(Wang *et al.*, 2022),

使得植物多样性未显著影响土壤呼吸速率, 有待进一步深入研究。

#### 4 结论

综合而言, 整个生长季土壤呼吸速率呈先增加后降低的时间动态; 极端减少降水量抑制了土壤呼吸速率, 但适量减少降水量对土壤呼吸速率影响较小, 反映了荒漠草原土壤呼吸作用对适度干旱的适应性; 适量增加降水量提高了土壤含水量, 刺激了土壤酶活性, 促进了植物-微生物代谢活动, 从而提高了荒漠草原土壤呼吸速率。但极端增加降水量导致土壤水分过饱和, 土壤透气性降低、微生物活动受限, 从而降低荒漠草原土壤呼吸速率。本研究未分析土壤呼吸组分(自养呼吸和异养呼吸)对降水量变化的响应规律, 因此有待通过长期的定位观测对此进行深入分析。

#### 参考文献

- Arredondo T, Delgado-Balbuena J, Huber-Sannwald E, García-Moya E, Loescher HW, Aguirre-Gutiérrez C, Rodríguez-Robles U (2018). Does precipitation affects soil respiration of tropical semiarid grasslands with different plant cover types? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 218-225.
- Bao SD (2000). *Soil and Agricaltral Chemistry Analysis*. 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 3版. 中国农业出版社, 北京.]
- Chang M, Liu B, Martinez-Villalobos C, Ren G, Li S, Zhou T (2020). Changes in extreme precipitation accumulations during the warm season over continental China. *Journal of Climate*, 33, 10799-10811.
- Chen X, Chen HYH (2019). Plant diversity loss reduces soil respiration across terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 25, 1482-1492.
- Cui H, Zhang YH (2016). Diurnal and seasonal dynamic variation of soil respiration and its influencing factors of different fenced enclosure years in desert steppe. *Environmental Science*, 37, 1507-1515. [崔海, 张亚红 (2016). 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因素. 环境科学, 37, 1507-1515.]
- Cui Y, Yan SW, Wu JZ, Luo QH, Lin YM, Wang DJ, Wu CZ (2019). Effects of plant and microbial biomass and enzyme activities on soil respiration in the preliminary stage after the Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 25, 215-224. [崔羽, 严思维, 吴建召, 罗清虎, 林勇明, 王道杰, 吴承祯 (2019). 汶川地震受损区恢复初期植物与微生物生物量、土壤酶活性对土壤呼吸的影响. 应用与环境生物学报, 25, 215-224.]
- Ding JZ, Lai LM, Zhao XC, Zhu LH, Jiang LH, Zheng YR (2011). Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 1594-1603. [丁金枝, 来利明, 赵学春, 朱林海, 姜联合, 郑元润 (2011). 荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响. 生态学报, 31, 1594-1603.]
- Dou WQ, Tian LL, Xiao B, Yao XM, Li SL (2022). Responses of respiration rate of moss biocrusts to the manipulation of rainfall amount on the Chinese Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 42, 1703-1715. [窦韦强, 田乐乐, 肖波, 姚小萌, 李胜龙 (2022). 黄土高原藓结皮土壤呼吸速率对降雨量变化的响应. 生态学报, 42, 1703-1715.]
- Fan KK, Li SZ, Chen JQ, Yan YC, Xin XP, Wang X (2022). Spatial heterogeneity analysis of soil respiration in Hulunbuir grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 30, 205-211. [范凯凯, 李淑贞, 陈金强, 闫玉春, 辛晓平, 王旭 (2022). 呼伦贝尔草原土壤呼吸作用空间异质性分析. 草地学报, 30, 205-211.]
- Gao MH, Wurenqiqige, Bateer, Mu YH, Wang J, Zhao HR, Meng QT (2016). Influences of grazing on plant community characteristics, soil microorganism and soil enzyme activity. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 36, 62-65. [高明华, 乌仁其其格, 巴特尔, 穆艳红, 王金, 赵慧如, 孟庆涛 (2016). 放牧对植物群落特征和土壤微生物及酶活性的影响. 水土保持通报, 36, 62-65.]
- Guan YS (1986). *Soil Enzymes and Their Research Methods*. China Agriculture Press, Beijing. [关荫松 (1986). 土壤酶及其研究方法. 中国农业出版社, 北京.]
- Guo WZ, Jing CQ, Wang GX, Hou ZX, Zhao WK (2021). Responses of soil respiration and ecosystem respiration to precipitation in desert steppe on the northern slope of Tianshan Mountains. *Acta Agrestia Sinica*, 29, 2031-2039. [郭文章, 井长青, 王公鑫, 侯志雄, 赵苇康 (2021). 天山北坡荒漠草原土壤呼吸和生态系统呼吸对降水的响应. 草地学报, 29, 2031-2039.]
- Guo YP, Li HJ (2022). Response of soil respiration to soil moisture, temperature and vegetation factors in two shrub communities of Tianlong Mountain area. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (4), 131-139. [郭艳萍, 李洪建 (2022). 天龙山灌丛生态系统土壤呼吸对水热和植被因子的响应. 中国土壤与肥料, (4), 131-139.]
- Han D, Li YL, Yang HL, Ning ZY, Zhang ZQ (2021). Effects of simulated temperature increase and change of rainfall frequency on soil respiration in arid and semi-arid areas. *Journal of Desert Research*, 41, 100-108. [韩丹, 李玉霖, 杨红玲, 宁志英, 张子谦 (2021). 模拟增温和改变降雨频率对于干旱半干旱区土壤呼吸的影响. 中国沙漠, 41, 100-108.]
- Hao LY, Zhang LH, Xie ZK, Zhao RF, Wang JF, Guo YF, Gao JP (2021). Influence of precipitation change on soil respiration in desert grassland. *Environmental Science*, 42,

- 4527-4537. [葛廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (2021). 降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响. *环境科学*, 42, 4527-4537.]
- Hou JF, Lü XT, Wang C, Wang P (2014). Variation of soil respiration and its underlying mechanism in grasslands of northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 2840-2846. [侯建峰, 吕晓涛, 王超, 王朋 (2014). 中国北方草地土壤呼吸的空间变异及成因. *应用生态学报*, 25, 2840-2846.]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021). *Climate Change 2021: the Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Knapp AK, Beier C, Briske DD, Classen AT, Luo YQ, Reichstein M, Smith MD, Smith SD, Bell JE, Fay PA, Heisler JL, Leavitt SW, Sherry R, Smith B, Weng E (2008). Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*, 58, 811-821.
- Knapp AK, Ciais P, Smith MD (2017). Reconciling inconsistencies in precipitation-productivity relationships: implications for climate change. *New Phytologist*, 214, 41-47.
- Li XG, Han GX, Zhu LQ, Chen CN (2019). Effects of drying-wetting cycle caused by rainfall on soil respiration: progress and prospect. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 567-575. [李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 陈超男 (2019). 降雨引起的干湿交替对土壤呼吸的影响: 进展与展望. *生态学杂志*, 38, 567-575.]
- Liu L, Wang X, Lajeunesse MJ, Miao G, Piao S, Wan S, Wu Y, Wang Z, Yang S, Li P, Deng M (2016). A cross-biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes. *Global Change Biology*, 22, 1394-1405.
- Liu T, Wang L, Feng XJ, Zhang JB, Ma T, Wang X, Liu ZG (2018). Comparing soil carbon loss through respiration and leaching under extreme precipitation events in arid and semiarid grasslands. *Biogeosciences*, 15, 1627-1641.
- Liu T, Zhang YX, Xu ZZ, Zhou GS, Hou YH, Lin L (2012). Effects of short-term warming and increasing precipitation on soil respiration of desert steppe of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1043-1053. [刘涛, 张永贤, 许振柱, 周广胜, 侯彦会, 林琳 (2012). 短期增温和增加降水对内蒙古荒漠草原土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 36, 1043-1053.]
- Lopatin J, Araya-López R, Galleguillos M, Perez-Quezada JF (2022). Disturbance alters relationships between soil carbon pools and aboveground vegetation attributes in an anthropogenic peatland in Patagonia. *Ecology and Evolution*, 12, e8694. DOI: 10.1002/ECE3.8694.
- Lu RK (2000). *Methods for Soil Agrochemical Analysis*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. [鲁如坤 (2000). 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Ma ZY, Liu HY, Mi ZR, Zhang ZH, Wang YH, Xu W, Jiang L, He JS (2017). Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production. *Nature Communications*, 8, 15378. DOI: 10.1038/ncomms15378.
- Reichmann LG, Sala OE (2014). Differential sensitivities of grassland structural components to changes in precipitation mediate productivity response in a desert ecosystem. *Functional Ecology*, 28, 1292-1298.
- Ru JY, Zhou YQ, Hui DF, Zheng MM, Wan SQ (2018). Shifts of growing-season precipitation peaks decrease soil respiration in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, 24, 1001-1011.
- Schuur EAG (2003). Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation. *Ecology*, 84, 1165-1170.
- Song XH, Wang YH, Wang ZW, Kang H, Liu C, Li ZG, Qu ZQ, Han GD, Wang ZW (2019). Relationship between soil respiration and community underground biomass of desert steppe under different grazing intensities and water treatments. *Acta Agrestia Sinica*, 27, 962-968. [宋晓辉, 王悦骅, 王占文, 康慧, 刘晨, 李治国, 屈志强, 韩国栋, 王忠武 (2019). 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. *草地学报*, 27, 962-968.]
- Su YF, Zhao CF, Wang Y, Ma ZS (2020). Spatiotemporal variations of precipitation in China using surface gauge observations from 1961 to 2016. *Atmosphere*, 11, 303. DOI: 10.3390/atmos11030303.
- Wang CH, Zhang SN, Li KC, Zhang FM, Yang K (2021). Change characteristics of precipitation in northwest China from 1961 to 2018. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 45, 713-724. [王澄海, 张晟宁, 李课臣, 张飞民, 杨凯 (2021). 1961-2018年西北地区降水的变化特征. *大气科学*, 45, 713-724.]
- Wang CT, Long RJ, Wang GX, Liu W, Wang QL, Zhang L, Wu PF (2010). Relationship between plant communities, characters, soil physical and chemical properties, and soil microbiology in alpine meadows. *Acta Prataculturae Sinica*, 19, 25-34. [王长庭, 龙瑞军, 王根绪, 刘伟, 王启兰, 张莉, 吴鹏飞 (2010). 高寒草甸群落地表植被特征与土壤理化性状、土壤微生物之间的相关性研究. *草业学报*, 19, 25-34.]
- Wang JL, Teng DX, He XM, Li ZK, Chen YD, Ma W, Li WJ, Wang SY, Liu FY, Lü GH (2022). Spatial variation in the direct and indirect effects of plant diversity on soil respiration in an arid region. *Ecological Indicators*, 142, 109288. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109288.
- Wang Y, Xie Y, Rapson G, Ma H, Jing L, Zhang Y, Li J (2021). Increased precipitation enhances soil respiration in a semi-arid grassland on the Loess Plateau, China. *PeerJ*, 9, e10729. DOI: 10.7717/PEERJ.10729.
- Wang ZW, Song XH, Wang YH, Wang ZW, Yan BL, Han GD

- (2020). Effects of simulated precipitation on soil respiration of *Stipa breviflora* desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 42, 111-116. [王忠武, 宋晓辉, 王悦骅, 王占文, 闫宝龙, 韩国栋 (2020). 模拟降水对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. *中国草地学报*, 42, 111-116.]
- Xu M, Bian HF, Xu L, Chen Z, He NP (2020). Effects of precipitation pulse on soil carbon released by microbes in different grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 1562-1571. [徐敏, 边红枫, 徐丽, 陈智, 何念鹏 (2020). 脉冲式降水对不同类草地土壤微生物呼吸碳释放量的影响. *生态学报*, 40, 1562-1571.]
- Xu Z, Li MH, Zimmermann NE, Li SP, Li H, Ren H, Sun H, Han X, Jiang Y, Jiang L (2018). Plant functional diversity modulates global environmental change effects on grassland productivity. *Journal of Ecology*, 106, 1941-1951.
- Yang QX, Tian DS, Zeng H, Niu SL (2017). Main factors driving changes in soil respiration under altering precipitation regimes and the controlling processes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 1239-1250. [杨青霄, 田大栓, 曾辉, 牛书丽 (2017). 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. *植物生态学报*, 41, 1239-1250.]
- Yao JQ, Yang Q, Liu ZH, Li CZ (2015). Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5846-5855. [姚俊强, 杨青, 刘志辉, 李诚志 (2015). 中国西北干旱区降水时空分布特征. *生态学报*, 35, 5846-5855.]
- Yu X, Wang X, Wu T, Wang QX, Ma Y, Xie L, Song NP (2021). Relationship between restoration of plant diversity and soil habitat in desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 8516-8524. [余轩, 王兴, 吴婷, 王启学, 马昀, 谢莉, 宋乃平 (2021). 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系. *生态学报*, 41, 8516-8524.]
- Zhang HZ, Shi XZ, Yu DS, Wang HJ, Zhao YC, Sun WX, Huang BR (2009). Seasonal and regional variations of soil temperature in China. *Acta Pedologica Sinica*, 46, 227-234. [张慧智, 史学正, 于东升, 王洪杰, 赵永存, 孙维侠, 黄宝荣 (2009). 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究. *土壤学报*, 46, 227-234.]
- Zhang JT (2004). *Quantitative Ecology*. Science Press, Beijing. [张金屯 (2004). 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang Q, Li J, Singh VP, Xu CY (2013). Copula-based spatio-temporal patterns of precipitation extremes in China. *International Journal of Climatology*, 33, 1140-1152.
- Zhang R, Zhao X, Zuo X, Degen AA, Shang Z, Luo Y, Zhang Y, Chen J (2019). Effect of manipulated precipitation during the growing season on soil respiration in the desert-grasslands in Inner Mongolia, China. *Catena*, 176, 73-80.
- Zhang Y, Xie YZ, Ma HB, Zhang J, Jing L, Wang YT, Li JP (2021). The responses of soil respiration to changed precipitation and increased temperature in desert grassland in northern China. *Journal of Arid Environments*, 193, 104579. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104579.
- Zhang YF, Wang XP, Hu R, Pan YX (2013). Effects of shrubs and precipitation on spatial-temporal variation of soil temperature at the microhabitats induced by desert shrubs. *Journal of Desert Research*, 33, 536-542. [张亚峰, 王新平, 虎瑞, 潘颜霞 (2013). 荒漠灌丛微生境土壤温度的时空变异特征——灌丛与降水的影响. *中国沙漠*, 33, 536-542.]
- Zhao M, Guo SL, Wang R (2021). Diverse soil respiration responses to extreme precipitation patterns in arid and semiarid ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 163, 103928. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.103928.
- Zhu WW, Wang P, Fan J, Niu YB, Yu HL, Huang JY (2019). Effects of precipitation and N addition on soil C:N:P ecological stoichiometry and plant community composition in a desert steppe of Ningxia, northwestern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 28(9), 33-44. [朱湾湾, 王攀, 樊瑾, 牛玉斌, 余海龙, 黄菊莹 (2019). 降水量及N添加对宁夏荒漠草原土壤C:N:P生态化学计量特征和植被群落组成的影响. *草业学报*, 28(9), 33-44.]
- Zuo XA, Zhang J, Lv P, Zhou X, Li YL, Luo YY, Luo YQ, Lian J, Yue XY (2016). Plant functional diversity mediates the effects of vegetation and soil properties on community-level plant nitrogen use in the restoration of semiarid sandy grassland. *Ecological Indicators*, 64, 272-280.

责任编辑: 杜 盛 责任编辑: 赵 航