北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

河岸杨树人工林土壤呼吸及其组分对不同降雨模式的响应

李炎 许行 吴小云 张志强

Response of soil respiration and its components to different rainfall patterns in riparian poplar plantations

Li Yan, Xu Hang, Wu Xiaoyun, Zhang Zhiqiang

引用本文:
李炎, 许行, 吴小云, 张志强. 河岸杨树人工林土壤呼吸及其组分对不同降雨模式的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):9–17. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240027
Li Yan, Xu Hang, Wu Xiaoyun, Zhang Zhiqiang. Response of soil respiration and its components to different rainfall patterns in riparian poplar plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):9–17. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240027

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240027

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

太行山南麓刺槐人工林土壤呼吸与土壤温度间的滞后关系
Time lag between soil respiration and soil temperature in a *Robinia pseudoacacia* plantation in the south of the Taihang Mountains
北京林业大学学报, 2019, 41(4): 78–87. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180398

太行山南麓栓皮栎人工林光合作用对土壤呼吸的影响
Effects of photosynthesis on soil respiration of *Quercus variabilis* plantation in southern Taihang Mountain of northern China
北京林业大学学报, 2021, 43(1): 66–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200010

地震灾区2种气候生态治理区恢复初期土壤呼吸动态及其影响因子
Dynamics of soil respiration and its influencing factors at the early stage of ecological restoration of two kinds of climate in earthquake–affected area
北京林业大学学报, 2019, 41(3): 93–104. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180192

坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应
Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different vegetation cover types on the Bashang Plateau, northwestern Hebei Province of northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(5): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220220

降雨减少对油松人工林凋落叶分解的影响
Effects of rainfall reduction on litter leaf decomposition of *Pinus tabuliformis* plantation
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 68–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190211

色季拉山急尖长苞冷杉林不同层次土壤CO_2浓度及温湿度响应
Response of soil CO_2 concentration at different depths of *Abies georgei* var. *smithii* forest to soil temperature and water content on Sejila Mountain, Tibet of southwestern China
北京林业大学学报, 2023, 45(2): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220222

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240027

河岸杨树人工林土壤呼吸及其组分对不同降雨模式的响应

李 炎[1] 许 行[1,2] 吴小云[1] 张志强[1,2]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083）

摘要:【目的】确定不同降雨模式下土壤呼吸及其组分的响应差异及其原因，为精确预测和模拟全球变化背景下土壤碳循环的过程和陆地碳汇能力提供理论指导。**【方法】**对两年（2018—2019 年）土壤呼吸及其组分（自养呼吸和异养呼吸）进行连续测量，并利用 *K*-均值聚类分析对降雨进行分类，探究自然降雨过程对环境因子和土壤呼吸速率的影响。**【结果】**(1)土壤呼吸速率在长历时小雨、中历时小雨和短历时大雨下分别降低 41.6%、36.3% 和 45.8%，异养呼吸速率分别降低 60.5%、41.2% 和 85.1%；自养呼吸速率在长历时小雨和中历时小雨下分别降低了 11.7% 和 30.0%，在短历时大雨下提高了 72.5%。(2)异养呼吸对降雨的响应更快且雨后变化幅度更大。(3)降雨事件通过改变土壤湿度影响呼吸速率，土壤温度在降雨前后变化不显著。**【结论】**随着降雨强度增加或降雨持续时间的延长，土壤呼吸和异养呼吸受到的抑制效果愈发显著，且相较于自养呼吸，异养呼吸对降雨的响应更为敏感，降雨主要通过改变异养呼吸来影响土壤呼吸。

关键词：土壤呼吸；自养呼吸；异养呼吸；降雨模式；温度敏感性
中图分类号：S714 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)07−0009−09
引文格式：李炎，许行，吴小云，等. 河岸杨树人工林土壤呼吸及其组分对不同降雨模式的响应 [J]. 北京林业大学学报，2024，46(7)：9−17. Li Yan, Xu Hang, Wu Xiaoyun, et al. Response of soil respiration and its components to different rainfall patterns in riparian poplar plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 9−17.

Response of soil respiration and its components to different rainfall patterns in riparian poplar plantations

Li Yan[1] Xu Hang[1,2] Wu Xiaoyun[1] Zhang Zhiqiang[1,2]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] This paper aims to determine the differences in the response of soil respiration and its components under different rainfall patterns and their causes, so as to provide theoretical guidance for accurate prediction and modeling of the process of soil carbon cycle and terrestrial carbon sink capacity in the context of global change. [**Method**] In this research, conducted from 2018 to 2019, we continuously monitored soil respiration, including both autotrophic and heterotrophic respiration. We used *K*-means clustering to classify rainfall patterns, investigating the effects of natural rainfall on environmental variables and the rate of soil respiration. [**Result**] (1) The total soil respiration rate decreased by 41.6%, 36.3%, and 45.8%, respectively under the intensity of light rainfall over a long duration, light rainfall with a moderate duration and heavy rainfall with a short duration, and the heterotrophic respiration rate decreased by 60.5%,

收稿日期: 2024−01−25 **修回日期:** 2024−03−14
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项（QNTD202303），“十四五”国家重点研发计划（2022YFF1302501），中国科协青年人才托举工程（YESS20230091），国家自然科学基金项目（32301664），中国博士后科学基金项目（2023T160055）。
第一作者: 李炎。主要研究方向：土壤碳通量。Email: 1659174220@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 许行，博士，副教授。主要研究方向：全球变化生态学、生态水文学。Email: hangxu@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

41.2%, and 85.1%, respectively; the autotrophic respiration rate decreased by 11.7% and 30.0% under light rainfall with a long duration and light rainfall with a moderate duration, respectively, and increased by 72.5% under heavy rainfall with a short duration. (2) Heterotrophic respiration responded more quickly to rainfall and changed more dramatically after rain. (3) Rainfall events affected respiration rates by changing soil moisture, and soil temperature did not change significantly before or after rainfall. [**Conclusion**] With the increase in rainfall intensity or the extension of rainfall duration, the inhibitory effects on soil respiration and heterotrophic respiration become more significant. Compared with autotrophic respiration, heterotrophic respiration is more sensitive to rainfall. Rainfall mainly influences soil respiration by altering heterotrophic respiration.

Key words: soil respiration; autotrophic respiration; heterotrophic respiration; rainfall pattern; temperature sensitivity

全球土壤碳储量约 16 000 亿 t，作为陆地生态系统中最大的碳库，其容量大约是陆地植被碳储量的 2 至 3 倍[1]。土壤碳库在全球碳循环中扮演着至关重要的角色，即便是微小的变动也能对大气中的碳水平产生显著影响。土壤碳库与大气之间的主要碳交换是通过土壤呼吸，每年的碳交换量约为 600 亿 t，这是化石燃料燃烧碳排放量的十倍以上[2]。在全球气候变化的背景下，降雨模式亦发生了显著变化，极端降雨事件变得更为频繁[3−4]。研究表明，在降雨量较大的年份，土壤呼吸的碳排放量有所上升，降雨量、持续时间和降雨强度都会对土壤呼吸产生影响，一方面降雨历时与降雨强度可能会影响土壤温度与土壤湿度进而影响土壤呼吸；另一方面降雨事件下压力梯度的变化、对微生物群落的影响等也是土壤呼吸变化的因素之一[5−6]。因此，深入研究不同降雨事件下土壤呼吸的响应特征，对于更精确地评估土壤碳排放量及其对降雨模式变化的敏感性具有重要意义。

土壤呼吸作为生态系统碳循环的关键过程，主要由自养呼吸和异养呼吸这两个重要组分构成[7]。部分研究指出，降雨对这两个组分产生的影响存在显著差异性，尤其是异养呼吸对水分的敏感度普遍高于自养呼吸[8]。具体来说，自养呼吸主要与植物根系活动相关，水分通过促进根系生长间接提升自养呼吸；而异养呼吸则与土壤微生物分解作用密切相关，水分通过增加土壤中营养物质的有效性而促进微生物的生长和代谢，进而增强了异养呼吸[9]。然而，超过特定阈值的土壤含水量可能导致厌氧条件的形成，从而抑制了土壤呼吸活动[10−12]。因此，明确自养和异养呼吸各自对降雨的响应对于全面理解气候变化下全球土壤碳循环过程至关重要。

杨树（*Populus*）因其广泛应用于用材林、防护林以及城郊绿化，已成为我国北方最主要的人工林树种之一[13]。由于杨树可以稳定河岸线、预防水土流失、减轻洪水冲击，被广泛应用于河岸防护。河岸生态系统的土壤和水文特征上与其他系统不同，从而可能对降雨事件产生响应差异。在水分较少的生态系统中，降雨能显著提升微生物的底物可用性，并在降雨之后促进生态系统的光合作用，进而增强土壤呼吸[14]。相对而言，在水分充足的系统中，土壤水分的增加可能会限制氧气的传输和微生物的活性，由此抑制土壤呼吸[15]。因此，在河岸杨树人工林中探究降雨对土壤呼吸及其组分的影响，不但有助于进一步丰富降雨事件对我国北方河岸杨树人工林生态系统土壤碳排放影响的理解和认识，而且对于提高全球碳循环模型在预测河岸生态系统碳动态中的准确性具有积极推动作用。

本研究以华北杨树人工林为研究对象，通过对降雨事件和土壤呼吸及其组分开展两年（2018—2019 年）连续观测，利用 *K*-均值聚类分析，解析土壤呼吸及其组分在不同降雨模式下的变化过程，旨在深入揭示不同降雨模式下土壤呼吸及其组分的响应差异及造成这种差异的原因，为准确模拟和预测降雨变化下人工林生态系统碳收支提供依据和支撑。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

本研究所有试验均在北京市顺义共青林场（116°43′00″E，40°06′30″N）进行，海拔 29 m 左右。该地区属于温带半湿润大陆性季风气候，夏季炎热潮湿，冬季寒冷干燥，年均气温 13.4 ℃，年均降雨量 546 mm，6—10 月降雨最为集中，占全年降雨的 94%。无霜期约 200 d，日照时数多年平均为 2 600 h。该地区立地类型为冲积扇平原，土壤以砂土为主，土质疏松，平均土壤密度为（1.51 ± 0.05）g/cm^3，距离潮白河约 500 m，中心园区地下水位约 2 m[16]。林场主要乔木有欧美杨（*Populus euramericana*，> 85%）、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、油松（*Pinus tabuliformis*）、

元宝枫(*Acer truncatum*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、火炬树(*Rhus typhina*)等。灌木树种主要是连翘(*Forsythia suspensa*)、红端木(*Swida alba*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)等。园区内草本植物种主要有早熟禾(*Poa annua*)、灰绿(*Chenopodium glaucum*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、小蓟草(*Cirsium setosum*)、石竹(*Dianthus chinensis*)等[16]。

1.2　土壤呼吸观测

采用 Li-8100(Li-Cor Inc., Lincoln. NE, USA)土壤碳通量自动观测系统与 LI-8150 多通道测量系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE. USA)测量土壤呼吸速率。本研究设置 6 个 PVC(直径 20 cm, 高度 11 cm)环,其中 3 个安装在断根处理样方四周的壕沟上。在样方四周挖 0.3 m 宽的壕沟,壕沟深度挖至根系分布层以下,插入隔离板防止新生根进入样方,对样方进行断根处理用来测量异养呼吸,断根处理样方空置 6 个月使断根完全分解腐烂,防止测量结果偏高。另外 3 个 PVC 环设置在未断根样方内,安装位置距树基 0.5 m,测量时气室自动转接到 PVC 环上,环内的枯落物需要经常清理以免影响测量结果。本研究中土壤呼吸及其组分测量频率为每天(24 h)连续测量,每 1 h 测量一次,每次 3 min。同时进行土壤异养呼吸与土壤总呼吸的测定。在以往本地的研究中发现短期内凋落物难以分解和土壤动物呼吸占比极小,故本研究中根呼吸近似等于自养呼吸,土壤呼吸等于自养呼吸与异养呼吸之和[16]。

1.3　环境因子观测

5 cm 处的土壤湿度和 10 cm 深度土壤温度(T_s)使用 Li-8100 测量系统配备的 8100-202 土壤湿度传感器(Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA)和 8100-201 热敏电阻探头(Omega Engineering Inc., Stamford, CT, USA)进行测量,传感器布置在土壤呼吸监测点附近;降雨数据通过 Inteli Met Advantage 气象站(Dynamax Inc., USA)收集获得,气象站布设于距研究地点 200 m 处,每隔 30 min 测定 1 次。

1.4　数据处理与分析

1.4.1　数据处理

本文选用 2018、2019 年 5—10 月的土壤呼吸及其组分的呼吸速率数据,剔除了呼吸数据中的异常值。在量化降雨事件时,排除可能因翻斗式雨量计受其他因素干扰导致的记录(半小时降雨量小于 0.2 mm)。本研究以降雨前 3 天土壤呼吸及其组分呼吸速率平均值作为初始值,观察降雨期间及雨后 3 天呼吸速率的变化情况。因此,筛除雨前 3 天和雨后 3 天有降雨的场降雨数据后,共计筛选出 42 场降雨数据进行研究。

1.4.2　数据计算和分析

土壤呼吸及其组分与土壤温度的关系采用指数方程进行拟合。

$$R_s = ae^{bT_s} \tag{1}$$

式中:R_s 为土壤呼吸速率(μmol/(m^2·s)),T_s 为土壤温度(℃),a 为 0 ℃ 时土壤呼吸速率(μmol/(m^2·s)),b 为温度反应系数。

$$R_a = R_s - R_h \tag{2}$$

式中:R_a 为自养呼吸速率(μmol/(m^2·s)),R_h 为异养呼吸速率(μmol/(m^2·s))。

结合降雨强度和降雨历时采用 *K*-均值聚类分析法对两年 42 场降雨进行分类,该方法是一种迭代求解的聚类分析算法,具有简洁和高效的优点,是所有聚类算法中使用最为广泛的。用 Pearson 相关分析判断非生物因素与土壤呼吸各组分关系,用 Origin 2018 软件对不同雨型下土壤温度、土壤湿度、土壤呼吸及其组分进行单因素方差分析,作图采用 Origin 2018 和 SPSS 20.0 软件。

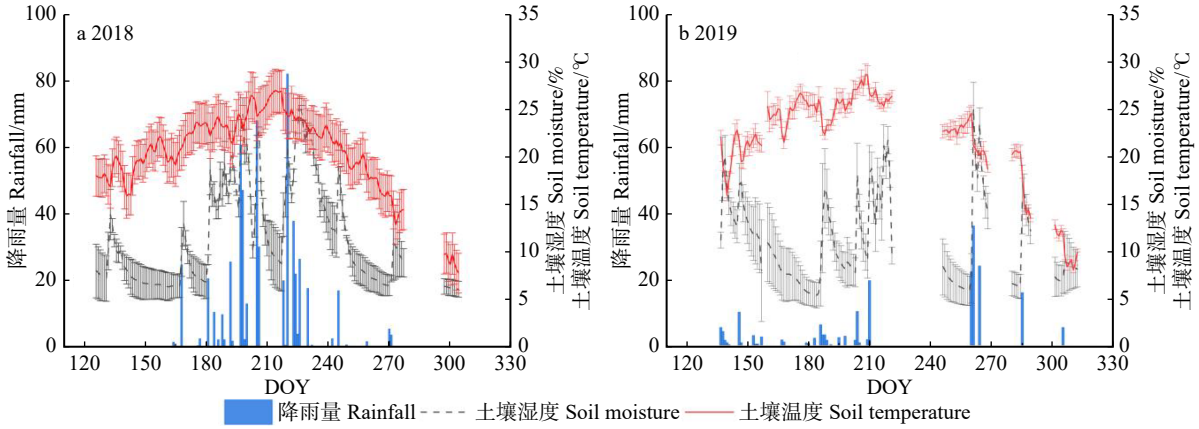
2　结果与分析

2.1　降雨类型划分

研究区小气象站在 2018、2019 年 5—10 月(DOY120—310)间共监测到 42 场不连续降雨(图 1)。其中夏季为降雨多发期,降雨事件与土壤温湿度峰值均位于 6—8 月(DOY186—248)。对监测期内的场降雨进行 K-均值聚类分析(图 2、表 1),将 42 场降雨按降雨强度和降雨历时分为长历时小雨、中历时小雨、短历时小雨和短历时大雨 4 类,占比分别为 14.28%、19.05%、50.00% 和 16.67%。

2.2　土壤呼吸及其组分对降雨模式的响应

不同降雨模式对土壤呼吸及其组分具有不同影响。研究发现,在降雨期间,不同降雨模式对土壤总呼吸和异养呼吸产生了不同程度的抑制效果。具体来说,降雨期间土壤总呼吸速率在长历时小雨、中历时小雨和短历时大雨 3 种雨型下相比于降雨前下降了 41.6%、36.3% 和 45.8%;而异养呼吸速率则在相同条件下分别下降了 60.5%、41.2% 和 85.1%。相比之下,降雨期间自养呼吸速率在长历时小雨和中历时小雨条件下相较于降雨前降低幅度分别为 11.7% 和 30.0%,在短历时大雨条件下增加了 72.5%,但降雨前、降雨期间与降雨后自养呼吸速率变化均不显著(表 2)。这些结果表明,雨强增大或降雨历时延长会加强对土壤总呼吸和异养呼吸的抑制作用。此外,在相同雨型条件下,短历时小雨对土壤呼吸及其



误差棒表示 3 个土壤气室的标准差；缺失值因仪器维修空缺。Error bars indicate the standard deviation of three soil air chambers; missing values due to instrument maintenance vacancies.

图 1 2018、2019 年(5—10 月)日降雨量、土壤温湿度统计

Fig. 1 Daily rainfall, soil moisture and soil temperature statistics in 2018 and 2019 (May to October)

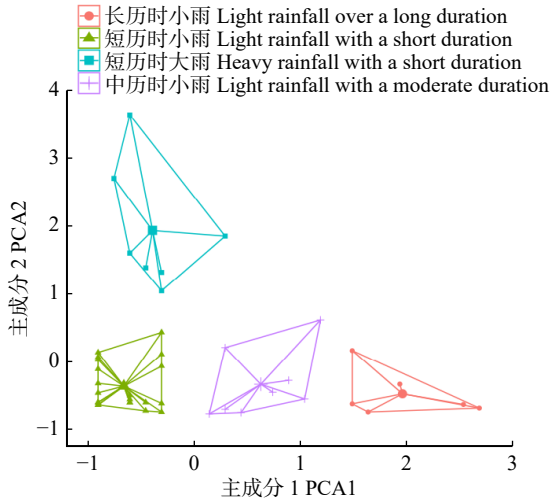


图 2 场降雨聚类分析结果

Fig. 2 Results of field rainfall clustering analysis

组分的影响不显著，而长历时小雨、中历时小雨和短历时大雨条件下，异养呼吸的变化幅度大于自养呼吸，暗示降雨期间土壤总呼吸速率的下降主要由异养呼吸所驱动(图 3)。总体而言，在降雨期间，较大的雨强或更长的降雨历时会更强烈地抑制土壤总呼吸和异养呼吸。

在降雨事件之后，不同类型的降雨对土壤呼吸的各个组分产生了显著不同的影响。在长历时小雨条件下(图 4a)，异养呼吸速率在降雨初始阶段迅速降低，随着降雨的进行逐步恢复，至降雨结束时基本回到降雨前的水平。相比之下，自养呼吸速率在降雨结束后的较长时间内持续缓慢增加，显示出降雨对自养呼吸的促进效应。在中历时小雨条件下(图 4b)，土壤呼吸及其组分的变化模式与长历时小雨类似，但呼吸速率的恢复时间大约延长了一天。在短历时小雨条件下(图 4c)土壤呼吸及其组分的变化并不明显。而在短历时大雨条件下(图 4d)，短暂而急剧的降雨导致呼吸速率短期内下降，降雨结束后土壤呼吸及其组分的呼吸速率显著上升，显示出明显的促进作用。在这 4 种雨型下，异养呼吸比自养呼吸对降雨的响应更快，且雨后变化更为显著，表

表 1 不同雨型的降雨特征

Tab. 1 Rainfall characteristics of different rainfall types

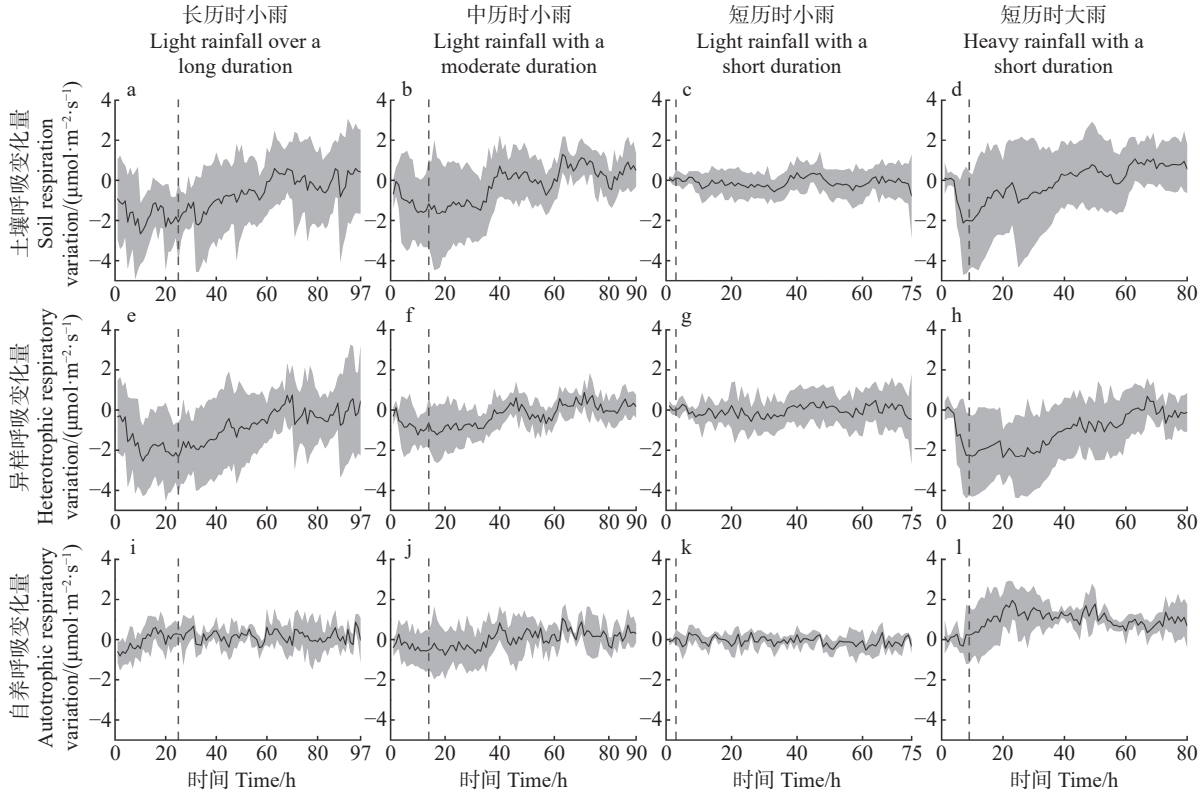
降雨类型 Rainy type	统计值 Statistical value	特征变量 Characteristic variable		频次 Frequency	比例 Proportion/%
		降雨强度 Rainfall intensity/(mm·h^{-1})	降雨历时 Rainfall duration/h		
长历时小雨 Light rainfall over a long duration	均值 Average	0.96	20.17	6	14.28
	范围 Range	0.20 ~ 2.78	17 ~ 25		
中历时小雨 Light rainfall with a moderate duration	均值 Average	1.36	11.25	8	19.05
	范围 Range	0.13 ~ 4.06	8 ~ 15		
短历时小雨 Light rainfall with a short duration	均值 Average	1.28	2.61	21	50.00
	范围 Range	0.20 ~ 3.54	1 ~ 5		
短历时大雨 Heavy rainfall with a short duration	均值 Average	7.81	4.43	7	16.67
	范围 Range	5.28 ~ 12.67	2 ~ 9		

表 2　不同降雨模式下土壤呼吸及其组分变化

Tab. 2　Changes in soil respiration and its components under different rainfall patterns

降雨类型 Rainy type	呼吸速率 Respiration rate	降雨前 Pre-rainfall	降雨期间 During the rainfall	降雨后 Post-rainfall
长历时小雨 Light rainfall over a long duration	R_s	5.62 ± 1.00 a	3.19 ± 0.32 b	4.62 ± 1.33 ab
	R_h	3.65 ± 0.79 a	1.44 ± 0.50 b	2.72 ± 0.76 a
	R_a	1.97 ± 0.38 a	1.74 ± 0.22 a	1.94 ± 0.59 a
中历时小雨 Light rainfall with a moderate duration	R_s	5.34 ± 1.32 a	3.40 ± 0.83 a	4.96 ± 0.90 a
	R_h	2.96 ± 0.56 a	1.74 ± 0.32 b	2.68 ± 0.62 ab
	R_a	2.37 ± 0.77 a	1.66 ± 0.52 a	2.28 ± 0.30 a
短历时小雨 Light rainfall with a short duration	R_s	3.76 ± 0.80 a	3.61 ± 0.43 a	3.64 ± 0.53 a
	R_h	2.67 ± 1.11 a	2.52 ± 0.63 a	2.63 ± 0.37 a
	R_a	1.09 ± 0.40 a	1.08 ± 0.35 a	1.00 ± 0.35 a
短历时大雨 Heavy rainfall with a short duration	R_s	4.03 ± 1.36 ab	2.03 ± 1.41 b	4.46 ± 1.04 a
	R_h	3.16 ± 1.51 a	0.47 ± 0.17 b	2.61 ± 0.68 a
	R_a	0.91 ± 0.30 a	1.57 ± 1.30 a	1.86 ± 0.65 a

注:R_s为土壤呼吸速率,R_h为异养呼吸速率,R_a为自养呼吸速率;不同小写字母表示在不同降雨阶段差异显著($P < 0.05$)。下同。Notes: R_s is the rate of soil respiration, R_h is the rate of heterotrophic respiration, and R_a is the rate of autotrophic respiration; different lowercase letters indicate significant ($P < 0.05$) differences at varied rainfall stages. Same as below.



图中虚线代表降雨结束的时刻,阴影部分表示标准差。The dotted line in the figure represents the moment when the rainfall ended, and the shaded area indicates the standard deviation.

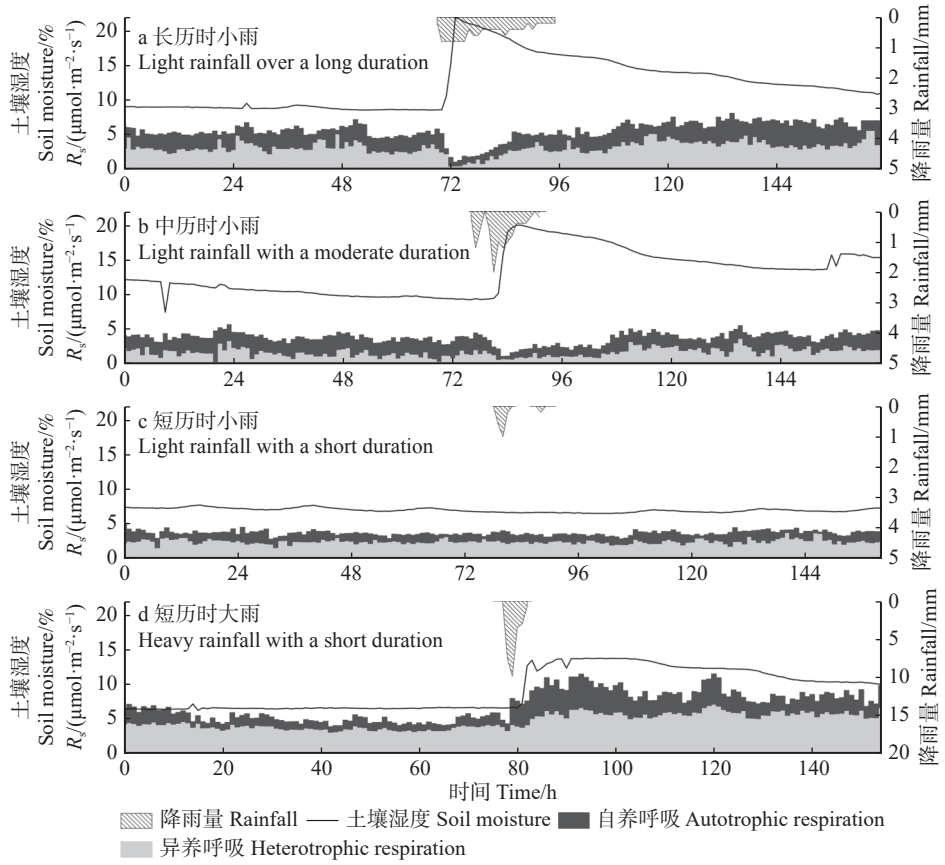
图 3　不同降雨模式下土壤呼吸及其组分随时间(降雨期间和降雨后 3 天)的变化

Fig. 3　Changes in soil respiration and its components with time (during rainfall and 3 d after rainfall) for different rainfall patterns

明异养呼吸对降雨更敏感,是土壤总呼吸速率变化的主要驱动因素。

2.3　不同降雨模式下土壤呼吸及其组分对土壤温湿度变化的响应

土壤温度和湿度是影响呼吸速率的关键因素。土壤温度下降和湿度增加,均会改变土壤呼吸。在降雨期间,土壤湿度通常抑制呼吸速率,而土壤温度则起促进作用(表 3)。研究发现,4 种雨型下土壤温度在降雨前、降雨期间、降雨后均没有显著差异,土壤湿度在短历时小雨和中历时小雨降雨前、降雨期



每类选取一场降雨为例。For each category, a rainfall event is selected as an example.

图 4 不同降雨模式下场次降雨对土壤呼吸及其组分的影响

Fig. 4 Effects of field rainfall on soil respiration and its components under different rainfall patterns

表 3 土壤呼吸各组分与土壤温湿度的相关性

Tab. 3 Correlations between soil respiration components and soil temperature as well as soil moisture

降雨类型 Rainy type	指标 Index	土壤呼吸 Soil respiration	异养呼吸 Heterotrophic respiration	自养呼吸 Autotrophic respiration
长历时小雨 Light rainfall over a long duration	T_s	0.283	0.294	0.085
	SM	–0.457**	–0.605**	–0.168
中历时小雨 Light rainfall with a moderate duration	T_s	0.668**	0.710**	0.525**
	SM	–0.485**	–0.453**	–0.444**
短历时小雨 Light rainfall with a short duration	T_s	–0.499**	–0.426**	0.608**
	SM	–0.428**	–0.313	–0.111
短历时大雨 Heavy rainfall with a short duration	T_s	0.489**	0.832**	–0.588**
	SM	–0.675**	–0.835**	0.156

注：T_s为土壤温度，SM为土壤湿度，**表示在$P < 0.01$水平上显著相关。Notes: T_s means soil temperature and SM means soil moisture, ** indicates significant correlation at $P < 0.01$ level.

间、降雨后无显著差异，当降雨量增大时，短历时大雨与长历时小雨下降雨前与降雨期间土壤湿度存在显著差异(表 4)。这与土壤呼吸以及异养呼吸在降雨前以及降雨期间存在显著差异的情况一致，表明降雨对土壤呼吸以及异养呼吸的影响与土壤湿度变化密切相关。

3 讨 论

3.1 降雨模式对土壤呼吸的影响

不同降雨模式对土壤呼吸会产生不同影响。在降雨期间，雨强越大或降雨历时越长土壤总呼吸与异养呼吸受到的抑制作用越强，相关研究发现降雨抑制土壤呼吸速率并受到降雨量和降雨强度的影响[15,17]，这与我们的研究结果相同，土壤初始水分条件对土壤呼吸速率有一定影响[18–19]，降雨历时较长，降雨强度较大的降雨多发生在 7—9 月，在此期间土壤水分处于较高的状态，加上研究区砂土易渗透的特性，土壤水能够更快达到饱和状态形成厌氧环境，从而抑制了土壤呼吸的释放。同时短历时小雨以及中历时小雨下降雨前后土壤湿度差异并不显著，当

表 4　不同降雨模式下土壤温湿度变化

Tab. 4　Changes in soil temperature and moisture under different rainfall patterns

降雨类型 Rainy type	指标 Index	降雨前 Pre-rainfall	降雨期间 During rainfall	降雨后 Post-rainfall
长历时小雨 Light rainfall over a long duration	T_s/℃	24.77 ± 1.68 a	23.98 ± 2.51 a	24.34 ± 2.45 a
	SM/%	11.52 ± 4.76 b	19.16 ± 4.13 a	17.34 ± 3.77 ab
中历时小雨 Light rainfall with a moderate duration	T_s/℃	11.37 ± 5.97 a	12.11 ± 8.17 a	11.80 ± 7.11 a
	SM/%	9.74 ± 8.61 a	13.16 ± 4.40 a	13.28 ± 3.99 a
短历时小雨 Light rainfall with a short duration	T_s/℃	24.62 ± 1.08 a	23.15 ± 1.70 a	23.50 ± 1.52 a
	SM/%	11.37 ± 5.97 a	12.11 ± 8.17 a	11.80 ± 7.11 a
短历时大雨 Heavy rainfall with a short duration	T_s/℃	23.58 ± 2.57 a	22.70 ± 1.54 a	23.47 ± 1.32 a
	SM/%	8.21 ± 1.76 a	19.94 ± 8.57 b	16.55 ± 4.91 a

降雨量增大即短历时大雨和长历时小雨下，降雨期间与降雨前土壤湿度存在显著差异，这主要是因为随着降雨历时或降雨强度的增加土壤孔隙被雨水填充导致的，在此期间土壤湿度长时间处于较高水平，土壤含水量的增加并没有促进植物根系的生长或刺激微生物的活性，相反导致土壤氧气含量的下降，造成抑制的结果，这种抑制结果会在含水量下降后得到缓解。本研究中，短历时大雨下自养呼吸速率增强，这主要可能是因为由于细根区（0 ~ 60 cm）的土壤含水量随降雨历时或降雨强度增加导致根系的生长受到刺激，且土壤水下渗透到深层土壤，降雨后一段时间内自养呼吸速率会持续变化，这一现象在很多研究中得到证实[20−22]。在对祁连山亚高山草地的研究中，谢欢欢等[23]发现降雨量较小时会促进土壤呼吸速率，但在我们的研究中短历时小雨对土壤呼吸影响并不明显，究其原因本研究区地表植被覆盖度高，受到林冠截留的影响且土壤湿度较高，短历时小雨对其影响不明显。

3.2　降雨对土壤呼吸不同组分作用差异

土壤呼吸速率的波动受多种因素影响，包括土壤湿度、微生物活性、植被状况和有机质含量等[15,24−25]。在我们的研究中，异养呼吸对降雨的响应比自养呼吸更快，且变化幅度更大。这可能是由于降雨对异养呼吸和自养呼吸的作用机制不同所致。自养呼吸速率的变化主要受植物根系活动的影响。降雨后，随着时间的推移，土壤水分渗透至深层土壤，刺激根系生长，从而导致自养呼吸速率在较长时间内增加。相比之下，异养呼吸速率对降雨更敏感，降雨引起的水分变化可以通过渗透压胁迫和氧气扩散来影响异养呼吸。当水分含量过高时，土壤水会堵塞土壤孔隙，限制好氧微生物活性，从而抑制异养呼吸速率。此外，异养呼吸还受到底物有效性的影响[26]，降雨后，当雨水接触到凋落物时，一方面会使易淋溶养分进入土壤直接被微生物利用，同时易淋溶的养分进入土壤也对现存的碳氮氧分具有刺激作用，促进了异养呼吸速率的提高[27−29]；这些因素共同造成了土壤呼吸各组分对降雨的响应不一致。此外，砂质土壤的快速入渗特性在短时间内会抑制土壤呼吸及其组分，但随着土壤水分含量的减少和缺氧状态的改善，土壤呼吸及其组分会逐渐恢复至降雨前水平，甚至由于水分补给刺激了微生物和根系活性，而略有增加，这种现象可能持续数日[30]。

3.3　土壤呼吸各组分与土壤温湿度响应关系

大量的研究表明，降雨事件所导致的土壤呼吸速率的变化是由于土壤含水量的增加或者改变了土壤呼吸与土壤温度之间的关系[8,31]。在降雨量丰富且土壤含水量长期较高的阔叶常绿森林生态系系统中的研究发现，土壤温度是影响异养呼吸的主要因素，异养呼吸速率的变化与土壤湿度无关[32]，这与我们的研究结果不同，我们发现降雨条件下土壤温度并无显著变化，异养呼吸速率的变化更多是由于土壤湿度变化引起的，此外我们发现与土壤温度相比，土壤湿度对异养呼吸的影响较为复杂，较低和较高的土壤湿度均对异养呼吸速率起抑制作用[33]。样地砂土的孔隙大，高含水量阻塞土壤孔隙的特性或许是影响异养呼吸速率的另一因素。4 种雨型下降雨前后自养呼吸速率均无显著差异，但是我们发现在降雨后自养呼吸速率有缓慢上升的趋势，这说明自养呼吸与异养呼吸对土壤湿度的响应是存在差异的，降雨对自养呼吸速率的刺激作用或许在降雨后更长时间才能体现出来。

4　结　　论

（1）在中等历时的小雨条件下，降雨期间土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸的速率较降雨前分别下降了 36.3%、41.2% 和 30.0%。而在长历时小雨条件下，这些数值分别降低了 41.6%、60.5% 和 11.7%。对于短历时的大雨条件，土壤总呼吸和异养呼吸速

率分别减少了 45.8% 和 85.1%，但自养呼吸速率却增加了 72.5%。这些观察结果指出，土壤呼吸及其组成部分的变化与降雨强度和历时密切相关，根据降雨强度和历时对降雨进行分类，能更准确地描述在不同降雨模式下土壤呼吸速率的变化规律。

（2）在 4 种降雨模式下，与自养呼吸相比，异养呼吸对降雨的响应更为迅速且变化幅度更显著，表现出更高的敏感度。这种差异是导致土壤总呼吸速率变化的关键因素。因此，在研究土壤呼吸与降雨事件的响应机制时，应重点关注异养呼吸相关影响因子的作用。

（3）降雨事件通过增大土壤湿度影响土壤呼吸速率，降雨后温度变化不显著。故关注降雨事件后湿度变化对土壤呼吸速率的影响对全球气候变化下碳汇过程的研究具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623−1627.

[2] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 164: 80−99.

[3] Limsakul A, Singhruck P. Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand[J]. Atmospheric Research, 2016, 169: 301−317.

[4] Pfahl S, O'Gorman P A, Fischer E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(6): 423−427.

[5] Song W, Chen S, Wu B, et al. Simulated rain addition modifies diurnal patterns and temperature sensitivities of autotrophic and heterotrophic soil respiration in an arid desert ecosystem[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 82: 143−152.

[6] 尚晴, 程露, 王忠伟, 等. 森林土壤呼吸对降雨脉冲的响应研究进展 [J]. 世界林业研究, 2019, 32(4): 18−22.
Shang Q, Cheng L, Wang Z W, et al. Research on the response of soil respiration to precipitation pulse in forests[J]. World Forestry Research, 2019, 32(4): 18−22.

[7] Wang W, Chen W L, Wang S P. Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: global patterns and responses to temperature and precipitation[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(8): 1236−1244.

[8] Zheng P, Wang D, Yu X, et al. Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration[J/OL]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2021, 308: 107267[2023−01−25]. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107267.

[9] Liu X, Chen S, Yang Z, et al. Will heterotrophic soil respiration be more sensitive to warming than autotrophic respiration in subtropical forests?[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(3): 655−663.

[10] 王旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5631−5635.
Wang X, Yan Y C, Yan R R, et al. Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5631−5635.

[11] 温超, 单玉梅, 晔蕾罕, 等. 氮和水分添加对内蒙古荒漠草原放牧生态系统土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2020, 44(1): 80−92.
Wen C, Shan Y M, Ye L H, et al. Effects of nitrogen and water addition on soil respiration in a Nei Mongol desert steppe with different intensities of grazing history[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(1): 80−92.

[12] 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.
Yang Q X, Tian D S, Zeng H, et al. Main factors driving changes in soil respiration under altering precipitation regimes and the controlling processes[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(12): 1239−1250.

[13] 朱嘉磊, 薄慧娟, 李璇, 等. 不同毛白杨无性系林分蓄积量的长期水氮耦合效应 [J]. 林业科学, 2019, 55(5): 27−35.
Zhu J L, Bo H J, Li X, et al. Long term water-nitrogen coupling effect on stand volume of different clones of *Populus tomentosa*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(5): 27−35.

[14] 彭逸飞, 史嘉炜, 魏春雪, 等. 高寒草甸土壤呼吸对降雨梯度变化的响应 [J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(5): 1178−1185.
Peng Y F, Shi J W, Wei C X, et al. Response threshold of soil respiration to precipitation gradient in the alpine meadow[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(5): 1178−1185.

[15] Han G, Sun B, Chu X, et al. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256: 292−303.

[16] Zhu M, de Boeck H J, Xu H, et al. Seasonal variations in the response of soil respiration to rainfall events in a riparian poplar plantation[J/OL]. Science of The Total Environment, 2020, 747: 141222[2023−12−23]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141222.

[17] 盛浩, 杨玉盛, 陈光水, 等. 土壤异养呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 的影响因子 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2006, 1(1): 1673−7105.
Sheng H, Yang Y S, Chen G S, et al. Controls on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: Q10 variability and analysis[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2006, 1(1): 1673−7105.

[18] 周祉蕴, 崔博亮, 陈克龙, 等. 模拟降雨量变化对高寒湖滨湿地土壤呼吸的影响 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 130−137.
Zhou Z Y, Cui B L, Chen K L, et al. Effects of simulated changes in precipitation on soil respiration in alpine lakeshore wetlands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 130−137.

[19] 张春阳. 不同降雨强度对亚热带杉木林伐桩区与非伐桩区土壤呼吸及其组分的影响 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.

Zhang C Y. Effects of different rainfall intensities on soil respiration and its components in stumped and non-felled stump areas of subtropical Chinese fir plantations[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022.

[20] Jenerette G D, Scott R L, Huxman T E. Whole ecosystem metabolic pulses following precipitation events[J]. Functional Ecology, 2008, 22(5): 924−930.

[21] Liu Z, Zhang Y, Fa K, et al. Rainfall pulses modify soil carbon emission in a semiarid desert[J]. Catena, 2017, 155: 147−155.

[22] Wang Y, Li X, Zhang C, et al. Responses of soil respiration to rainfall addition in a desert ecosystem: linking physiological activities and rainfall pattern[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 3007−3016.

[23] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 等. 祁连山亚高山草地土壤呼吸和生态系统呼吸对降雨的响应 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2875−2882.
Xie H H, Ma W Y, Zhao C Y, et al. Rainfall effect on soil respiration and ecosystem respiration of a subalpine meadow in Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 2875−2882.

[24] Wang B, Zha T S, Jia X, et al. Soil water regulates the control of photosynthesis on diel hysteresis between soil respiration and temperature in a desert shrubland[J]. Biogeosciences, 2017, 14(17): 3899−3908.

[25] 于雷. 缙云山典型林分土壤呼吸特征及其对影响因子响应的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
Yu L. Characteristics of soil respiration and its response to impact factors in typical forests at Jinyun Mountain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

[26] Poblador S, Lupon A, Sabate S, et al. Soil water content drives spatiotemporal patterns of CO_2 and N_2O emissions from a Mediterranean riparian forest soil[J]. Biogeosciences, 2017, 14(18): 4195−4208.

[27] 田慧敏, 刘彦春, 刘世荣. 暖温带麻栎林凋落物调节土壤碳排放通量对降雨脉冲的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3889−3896.
Tian H M, Liu Y C, Liu S R. Litter regulates the response of soil CO_2 emission to precipitation pulse in warm temperate *Quercus acutissima* forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3889−3896.

[28] 黄彩凤, 梁晶晶, 张燕林, 等. 森林凋落物特性及对土壤生态功能影响研究进展 [J]. 世界林业研究, 2021, 34(4): 20−25.
Huang C F, Liang J J, Zhang Y L, et al. Research review of forest litter characteristics and its effects on soil ecological function[J]. World Forestry Research, 2021, 34(4): 20−25.

[29] 徐晓, 徐瑾, 曹国华, 等. 接种蚯蚓与添加凋落物对杨树人工林土壤理化性质和微生物生物量的影响 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(2): 264−269.
Xu X, Xu J, Cao G H, et al. Effects of earthworm inoculation and litter addition on soil physical and chemical properties and soil microbial biomass in poplar plantation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 50(2): 264−269.

[30] Drake J E, Macdonald C A, Tjoelker M G, et al. Three years of soil respiration in a mature eucalypt woodland exposed to atmospheric CO_2 enrichment[J]. Biogeochemistry, 2018, 139(1): 85−101.

[31] 朱梦洵. 华北平原典型人工林土壤呼吸特征及其对水分环境变化的响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
Zhu M X. Soil respiration and its environmental responses under different soil water conditions of typical plantations in north China plain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[32] 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.
Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 831−836.

[33] 窦韦强, 田乐乐, 肖波, 等. 黄土高原藓结皮土壤呼吸速率对降雨量变化的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1703−1715.
Dou W Q, Tian L L, Xiao B, et al. Responses of respiration rate of moss biocrusts to the manipulation of rainfall amount on the Chinese Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1703−1715.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　孟　平）