

狗牙根防护边坡土壤呼吸速率的季节变化 及其对环境因子的响应

黄少平¹, 黄竞宇¹, 万豪¹, 王琴¹, 李瑶²,
肖衡林³, 雷智千¹, 王安⁴, 张志永⁵, 仇文岗⁶, 崔新壮⁷

(1.湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2.湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430056; 3.江汉大学 精细爆破国家重点实验室,
湖北 武汉 430056; 4.中建八局华中建设有限公司, 湖北 武汉 430000; 5.水利部 中国科学院
水工程生态研究所, 水利部 水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北 武汉 430079; 6.重庆大学
山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045; 7.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: [目的] 为明确典型护坡草本植物狗牙根覆盖条件下土壤呼吸速率的季节变化特征及其对主要环境因子的响应规律, 在排除复杂水文过程干扰的前提下, 揭示狗牙根土壤碳释放过程的环境响应特性, 为评估其护坡生态效益及潜在固碳功能提供基础过程依据。[方法] 依托户外试验基地, 利用 3051T 土壤呼吸测定仪、自动气象站及土壤检测仪等仪器, 对狗牙根生长季(4—11月)内土壤呼吸速率进行连续观测, 并同步监测空气温湿度、土壤温湿度、大气 CO₂ 浓度及降雨等环境因子。结合多时间尺度分析与 Pearson 相关性分析, 探讨环境因子对土壤呼吸的调控效应。[结果] ①狗牙根覆盖条件下, 土壤呼吸速率在生长季内呈显著季节差异, 整体表现为夏季最高、春季次之、秋季最低; 夏季达到峰值 4.16 μmol/(m²·s), 秋季多在 1.08~1.82 μmol/(m²·s) 范围内波动; 日变化在不同月份呈单峰型或双峰型; ②相关性分析显示, 土壤呼吸速率与空气温度和土壤温度均呈极显著正相关($p < 0.01$), 与土壤湿度($p < 0.01$)及大气 CO₂ 浓度($p < 0.05$)呈显著负相关, 与空气湿度相关性不显著; ③土壤呼吸速率对温度的响应呈非线性, 在较高温度条件下土壤呼吸速率随温度升高而下降; ④降雨发生后 72 h 内, 土壤呼吸速率整体低于无降雨对照组, 降雨第 1 天试验组变化范围为 0.51~1.02 μmol/(m²·s), 显著低于对照组的 1.14~1.51 μmol/(m²·s)。[结论] 狗牙根土壤呼吸主要受温度驱动, 但连续观测前去叶处理引发的碳源供给受限会抵消高温的促进作用; 土壤湿度与降雨主要通过调节土壤通气性来限制碳释放; 土壤呼吸与大气 CO₂ 浓度的负相关实为表观假象。狗牙根致密覆盖能有效缓冲环境扰动, 其碳释放过程是植被生理特性与环境因子协同作用的结果。

关键词: 狗牙根; CO₂ 通量; 水热因子; 季节动态; 生态护坡

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)04-0267-11

中图分类号: Q948.1, S154

文献参数: 黄少平, 黄竞宇, 万豪, 等. 狗牙根防护边坡土壤呼吸速率的季节变化及其对环境因子的响应[J]. 水土保持通报, 2026, 46(4): 267-277. Huang Shaoping, Huang Jingyu, Wan Hao, et al. Seasonal variation of soil respiration rate and its response to environmental factors in slopes vegetated with *Cynodon dactylon* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 267-277.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.036

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.04.036

Seasonal variation of soil respiration rate and its response to environmental factors in slopes vegetated with *Cynodon dactylon*

Huang Shaoping¹, Huang Jingyu¹, Wan Hao¹, Wang Qin¹, Li Yao²,
Xiao Henglin³, Lei Zhiqian¹, Wang An⁴, Zhang Zhiyong⁵, Zhang Wengang⁶, Cui Xinzhuang⁷

(1.School of Civil, Architectural & Environmental Engineering, Hubei University of Technology,

收稿日期: 2025-10-30

修回日期: 2026-03-13

采用日期: 2026-03-13

资助项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目“长江中游河岸防蚀控污新型生态防护结构及其稳定性”(U22A20232); 国家自然科学基金项目(42407272, 52578409); 湖北省科学技术厅创新群体项目(2025AFA020); 湖北省教育厅优秀中青年科技创新团队(T2024006)

第一作者: 黄少平(1989—), 男(汉族), 江西省宜春市人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事边/岸坡生态修复、稳定性评价与利用、地质灾害防治与预测预报等方面研究。Email: hsp@cug.edu.cn。

通信作者: 肖衡林(1977—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事边/岸坡稳定与生态修复、路桥融雪化冰、地热开发与应用等方面研究。Email: xiao-henglin@163.com。

Wuhan, Hubei 430068, China; 2.Hubei Road & Bridge Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China; 3.State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan, Hubei 430056, China; 4.China Construction Eighth Engineering Division Huazhong Construction Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430000, China; 5.Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430079, China; 6.State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 7.School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: [Objective] The seasonal variation characteristics of soil respiration rates beneath typical slope-stabilizing *Cynodon dactylon* cover and their response patterns to critical environmental factors were clarified, and the environmental response properties of soil carbon release processes associated with *C. dactylon* while excluding the influence of complex hydrological processes were revealed, in order to provide a process-based basis for assessing its ecological advantages in slope stabilization and its possible carbon sequestration capabilities. [Methods] Based on an outdoor experimental site, continuous studies of the soil respiration rate of *C. dactylon* during its growing season (April to November) were undertaken using devices including the 3051T soil respiration system, an automatic weather station, and soil sensors. Environmental factors, including air temperature/humidity, soil temperature/humidity, atmospheric CO₂ concentration, and rainfall, were monitored simultaneously. Multi-temporal scale analysis and Pearson correlation analysis were applied to investigate the regulatory effects of these factors on soil respiration. [Results] ① Under *C. dactylon* coverage, soil respiration rates exhibited significant seasonal variations during the growing season, generally peaking in summer, followed by spring, and reaching their lowest levels in autumn. The peak value reached 4.16 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ in summer, while autumn values fluctuated between 1.08 and 1.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Diurnal variations followed either unimodal or bimodal patterns across different months. ② Correlation analysis showed that soil respiration rates were significantly positively correlated with both air and soil temperatures ($p < 0.01$). Conversely, they showed a significant negative correlation with soil moisture ($p < 0.01$) and atmospheric CO₂ concentration ($p < 0.05$), while the correlation with air humidity was not significant. ③ The response of soil respiration rates to temperature was non-linear, with an inhibitory effect observed under high-temperature conditions. ④ Within 72 hours of rainfall, soil respiration rates were generally lower than those of the non-rainfall control group. On the first day after rainfall, soil respiration rates in the experimental group ranged from 0.51 to 1.02 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, significantly lower than the control group's 1.14 to 1.51 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. [Conclusion] Soil respiration in *C. dactylon* systems is primarily driven by temperature. However, the limitation of carbon source supply caused by pre-observation defoliation treatments offsets the promoting effect of high temperatures. Soil moisture and rainfall restrict carbon release mainly by regulating soil aeration. The observed negative correlation between soil respiration rates and atmospheric CO₂ concentration is an apparent phenomenon rather than a direct causal link. The dense coverage of *C. dactylon* effectively buffers environmental disturbances, and its carbon release process is the result of the synergistic effects of vegetation physiological characteristics and environmental factors.

Keywords: *Cynodon dactylon*; CO₂ flux; hydrothermal factors; seasonal dynamics; ecological slope protection

在陆地生态系统中,土壤承担着重要的碳库功能,有机碳储量高达 1 500~2 000 Pg,在陆地生态系统碳库中占据主导地位,对全球碳循环及生态系统稳定具有重要影响^[1-3]。陆地生态系统与大气的碳交换主要通过土壤呼吸过程实现。土壤呼吸是指土壤生物群落(包括植物根系、微生物和动物)在新陈代谢活动中分解有机物并释放 CO₂ 的过程,通常由根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸 3 部分组成。在自然生态系统中,这 3 类呼吸过程相互耦合,其综合

作用决定了土壤呼吸的整体强度,并主导着陆地生态系统与大气的碳交换通量。土壤呼吸不仅是全球碳循环的重要过程,还直接影响生态系统的碳收支,并在气候变化反馈过程中发挥重要作用^[4-5]。据估计^[6],全球土壤每年通过呼吸作用排放的 CO₂ 总量可达 68~100 Pg/a(以 C 计),约为化石燃料燃烧排放量的 10 倍以上,并占陆地生态系统总呼吸量的三分之二以上^[7-8]。因此,土壤呼吸速率的变化被认为是调控陆地碳循环并影响大气 CO₂ 浓度变化的重要过程之一^[9]。

土壤呼吸速率受多种环境因子的共同影响,其中温度和湿度被认为是最重要的非生物控制因子。二者通过调节微生物代谢活性、根系生理过程及土壤气体扩散条件,对土壤呼吸产生显著影响^[10-11]。近年来,研究者在森林、农田及草地等生态系统中对土壤呼吸的时空分布特征及其环境驱动机制开展了大量研究^[12-16],并指出不同植被覆盖条件下土壤呼吸速率存在明显差异^[17]。在生态工程实践中,植被恢复措施广泛应用于边坡和河岸防护,以实现固土、防蚀及生态功能提升。狗牙根(*Cynodon dactylon*)作为一种典型的多年生护坡草本植物,因其根系发达、生长迅速、覆盖度高以及耐旱耐淹等特性,在多种护坡工程和生态修复实践中得到广泛应用^[18]。其密集的须根和匍匐茎结构能够改善表层土壤结构和土壤通气性,增强土壤稳定性,并通过根际作用调节微生物活性,从而对土壤呼吸过程产生潜在影响。然而,目前关于狗牙根覆盖土壤呼吸速率在季节尺度上的变化特征及其对温度、湿度等主要环境因子的响应规律仍缺乏系统的定量研究。

本研究以狗牙根在护坡与护岸工程中的应用为研究背景,在排除复杂水文过程干扰的条件下,利用3050T土壤CO₂通量全自动测量仪对不同季节的狗牙根土壤呼吸速率进行连续监测,揭示其季节变化特征,并结合空气温湿度、土壤温湿度及大气CO₂浓度等环境因子,分析土壤呼吸速率对环境因子的响应规律,以期评估护坡植被狗牙根土壤的环境因子响应特征及其潜在生态效应提供基础过程依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托湖北工业大学河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室户外试验基地完成,地理坐标为114°31'E, 30°49'N,属湿润亚热带季风气候,四季分明。场地平均海拔37.1 m,年均气温约为18℃,年均降水量约为1 205 mm。该地区地带性土壤类型为黄棕壤,发育自第四纪黏土母质,具有质地黏重,结构致密的物理特征,全国土壤普查及区域背景资料显示,该地区土壤养分状况属中等水平,有机质含量背景值约为18~25 g/kg,全氮含量约为1.1~1.4 g/kg。样地植被群落单一,优势种为狗牙根,平均覆盖度约为80%。

鉴于狗牙根的主要生长期集中于4—11月,本研究在春季(4—5月)、夏季(6—8月)和秋季(9—11月)3个季节尺度下开展监测研究。为减小空间异质性的影响,在试验场地内挑选立地条件、狗牙根疏密程度和生长状况相近的区域,设置3块间距5 m,面积5 m×5 m的试验样地,每块试验样地内设置3个重复观测点,以提高数据代表性和统计可靠性。在整个监测期间,春、夏、秋3个季节的观测均在同一试验场地、相同样地及固定观测点进行,样地布设及监测点位置未发生变化。图1a—1c分别展示春、夏、秋3个季节监测点的现场状况变化,仅用于说明样地季节演变特征,相关统计分析结果均基于所有样地及重复观测点的数据。

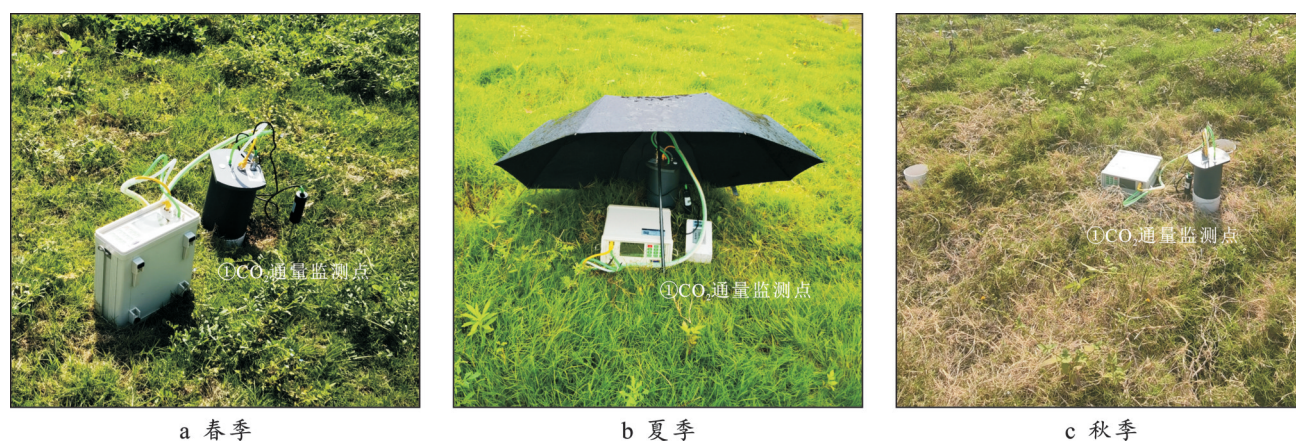


图1 不同季节CO₂通量监测点现场状况

Fig.1 Field conditions of CO₂ flux monitoring point in different seasons

1.2 试验方法

本研究于2023年4月至2023年11月开展样地监测(如图1),覆盖狗牙根主要生长季节。

(1) 土壤呼吸测量原理。本研究通过土壤呼吸测定仪(3051T型,浙江托普云农科技股份有限公司,

浙江杭州)对狗牙根样地CO₂通量进行观测。该仪器基于静态箱法原理工作,通过密闭箱体覆盖土壤表面,监测箱内CO₂浓度随时间的变化。在假定地上植物呼吸贡献相对稳定且无明显人为扰动的条件下,箱内CO₂浓度变化主要表征土壤呼吸过程。根据箱

内 CO_2 浓度随时间的变化率,并结合箱体体积、覆盖面积及测量时环境条件,对数据进行换算,计算得到单位时间内单位面积土壤向大气释放的 CO_2 通量(单位: $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),在生态学研究,该通量通常作为土壤呼吸速率的定量表征指标,综合表征土壤中植物根系、微生物及土壤动物新陈代谢活动所产生 CO_2 的总释放速率。因此,本研究将仪器测得的土壤 CO_2 通量作为土壤呼吸总速率的表征指标,用于分析其时空变化特征及其对环境因子的响应。

(2) 土壤呼吸监测。为保证测量条件稳定并减少人为扰动,在每次数据采集前24 h,预先将PVC管(内径10 cm,高度7 cm)插入土壤5 cm,并将样地内地上植物齐地割除,尽量避免扰动表层生物结皮与根系结构,以减弱绿色组织光合作用对箱内 CO_2 浓度的直接影响,使所测通量主要来源于土壤呼吸过程。经24 h平衡后,使用3050T土壤 CO_2 通量全自动测量仪进行土壤呼吸速率测定。每次测量获得的数据即为该点位的瞬时土壤呼吸总速率。监测频次为每月1次,每次连续观测3 d。监测均选择无降雨且气候条件相对稳定的时段进行,以避免降雨对 CO_2 通量的干扰。每日监测时间为8:00—18:00,每2 h记录一次土壤呼吸速率、土壤温度和湿度及大气 CO_2 浓度数据。

(3) 环境因子监测。试验区内安装自动气象站(PH型,武汉新普惠科技有限公司,湖北武汉),其功能能够满足本研究对气象条件的监测需求,可实时记录风向、风速、降雨量、空气温度及空气湿度等指标。同时,土壤温度与土壤湿度采用四合一土壤检测仪(LD-WSYP型,山东莱恩德智能科技有限公司,山东潍坊)进行测定,传感器探针插入土壤表层0—10 cm处进行原位测量,每次观测与土壤呼吸同步进行。本监测体系为分析土壤呼吸速率与环境因子的关系提供可靠的基础数据支撑。

(4) 降雨处理设置。为研究降水对土壤呼吸的综合影响,样地设置降水处理组与无降雨对照组。降水处理采用人工降雨系统,顶部支架的雾化喷头可均匀覆盖整个样地,模拟天然降雨,雨滴分布均匀,降雨强度稳定,可通过水泵流量调节至设定降雨量(30 mm/h),每次持续约1 h,处理后立即进行土壤呼吸测量。对照组在相邻场地同步进行,不施加降水。试验期间,两组样地的空气温度、空气湿度等宏观背景气象条件保持一致,以确保本研究能客观捕捉短时降水这一整体复合扰动事件对土壤表层碳释放过程的综合干扰效应。

1.3 数据分析

观测数据经初步筛选后,使用Microsoft Excel 2021

进行数据整理与预处理,采用SPSS 27.0软件统计不同时间的单位面积土壤呼吸速率,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同时间土壤呼吸速率的差异,并通过最小显著差异法(LSD)进行多重比较。采用Pearson相关性分析方法探讨土壤呼吸速率与环境因素的关系,识别影响土壤呼吸变化的主要环境因子。文中所有图均为Origin 2024绘制。

2 结果与分析

2.1 不同环境因子变化特征

2.1.1 不同月份空气温湿度变化特征

根据图2,在整个监测期间,空气温度与空气湿度均表现出明显的日变化规律。空气温度在各月份均呈现单峰型变化趋势,日最高值多出现在14:00左右;空气湿度日变化呈相反变化规律,在14:00—16:00达到日最低值。

从月变化来看,空气温度在生长期变化范围为 20.1°C 至 40°C 。其中6—8月整体空气温度水平最高,7—8月在14:00—16:00时段达到全年峰值;4—5月和9—11月空气温度相对较低。空气湿度变化趋势与空气温度相反,4—5月和9—11月湿度较高,而6—8月整体偏低,午后最低值较为明显。

总体上,狗牙根生长期空气温湿度表现为春季(4—5月)空气温度上升、湿度相对较高;夏季(6—8月)高温低湿;秋季(9—11月)随着空气温度降低,空气湿度有所回升。这种季节性差异为后续分析狗牙根土壤呼吸变化提供气象背景支撑。

2.1.2 不同月份土壤温湿度变化特征

由图3可知,监测期间狗牙根样地土壤温度与湿度均表现出明显的日变化特征。各月份土壤温度随日照增强逐渐升高,随日照减弱而下降,并在14:00—16:00达到峰值,其日变化幅度明显小于空气温度。土壤湿度日变化与土壤温度呈相反变化趋势,在16:00—18:00出现最低值。

从月变化来看,土壤温度在6—8月维持较高水平,7—8月达到全年最高值;4—5月和9—11月相对较低。土壤湿度的变化规律与土壤温度相反,春、秋两季湿度相对较高,而夏季整体偏低,午后最低值较为明显。

总体来看,生长季内根区土壤环境表现为夏季高温低湿,水热条件波动较大;春季和秋季土壤温度相对较低、湿度较高,根区土壤维持着相对稳定的水热条件。上述季节性特征为后续分析狗牙根土壤呼吸变化提供重要的土壤环境背景。

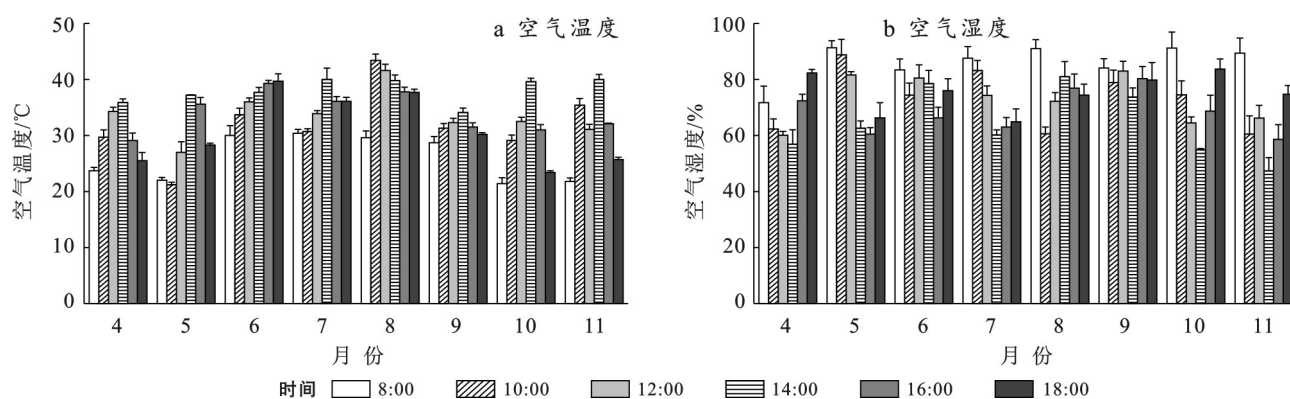


图2 空气温度与湿度月变化

Fig.2 Monthly variation of air temperature and humidity

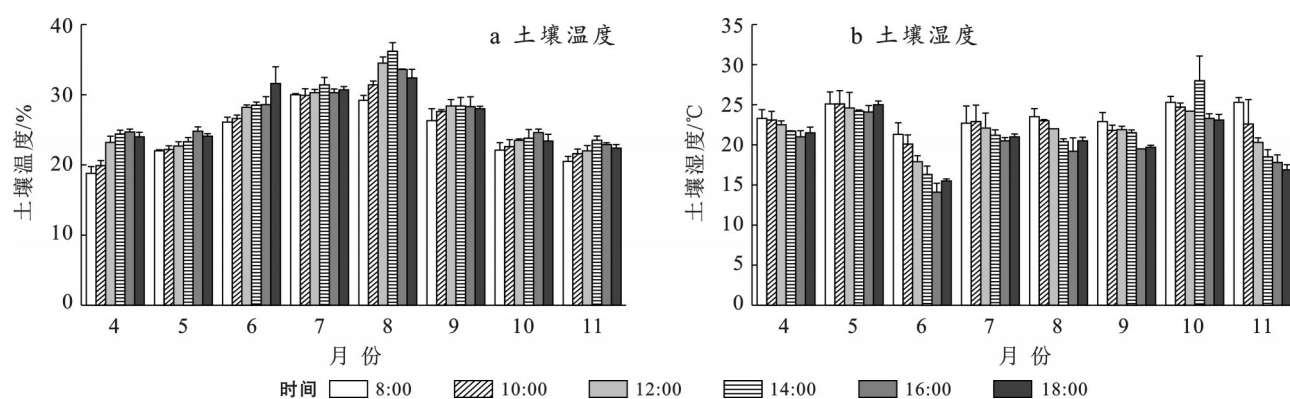
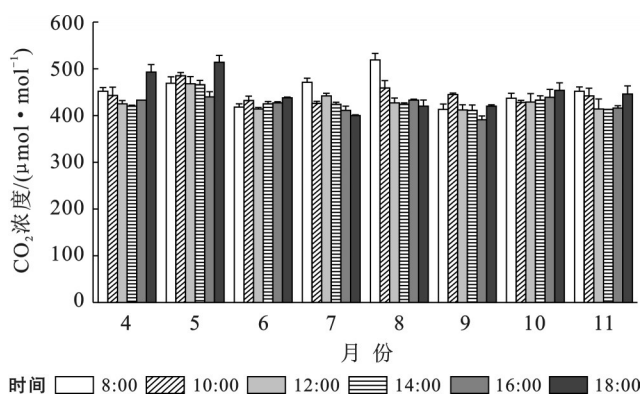


图3 土壤温度与湿度月变化

Fig.3 Monthly variation of soil temperature and humidity

2.1.3 不同月份空气中CO₂浓度变化特征

由图4可知,生长季内近地层大气CO₂浓度表现出稳定的日变化特征。总体上,大气CO₂浓度均表现为在8:00时段的CO₂浓度处于当日较高水平,在10:00—14:00期间降至最低,随后在16:00—18:00时段略有回升。

图4 CO₂浓度月变化Fig.4 Monthly variation of CO₂ concentration

从月变化看,不同月份大气CO₂浓度存在一定差异。4—5月整体水平相对较低,且午间降幅较为明显,其中4月的12:00—14:00大气CO₂浓度最低,约

420 $\mu\text{mol}/\text{mol}$;6—8月的CO₂浓度整体较高,而9—11月变化幅度相对较小,日内变化趋于平缓。

整体而言,大气CO₂浓度在狗牙根生长季内表现为夏季偏高、春季次之、秋季最低的变化特征。该季节性差异为后续分析狗牙根覆盖条件下土壤呼吸速率的季节变化提供必要的大气背景条件。

2.2 不同月份土壤呼吸速率变化特征

如图5所示,不同月份狗牙根覆盖土壤的呼吸速率均表现出明显的日变化规律,但峰值时间和变化幅度存在一定差异。

从日变化特征来看,4月、5月、7月、8月和11月的土壤呼吸速率呈单峰型变化,其中4月、7月和8月的峰值集中在12:00—14:00,5月和11月则在14:00—16:00达到峰值;而6月、9月和10月的日变化呈现双峰型,峰值分别出现在上午(8:00—12:00)和下午(14:00—18:00)。

从月变化来看,不同月份土壤呼吸速率水平差异明显。4月的呼吸速率最高,峰值达到4.16 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;8月次之,峰值超过3.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;5—7月的呼吸速率处于中等水平,日变化幅度维持在1.25~2.56 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;相比之下,9月、10月与11月的呼

吸速率整体较低,多在 $1.08\sim 1.82\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内,且日变化曲线较为平缓。

总体来看,狗牙根土壤呼吸速率在生长季内呈现春季升高,夏季维持较高水平,而秋季下降并趋于稳定。该季节性变化特征表明,土壤呼吸速率在不同季节背景下具有显著差异,为后续讨论其对环境因子的响应提供基础依据。

2.3 不同环境因子对土壤呼吸的影响

2.3.1 不同环境因子与土壤呼吸的 Pearson 相关性分析

表 1 给出土壤呼吸速率与主要环境因子的相关关系。结果表明,土壤呼吸速率与空气温度和土壤湿度均呈极显著正相关($p<0.01$),相关系数分别为 0.383, 0.417, 其中与土壤湿度的相关性略高于空气温度。土壤湿度与土壤呼吸速率呈极显著负相关($p<0.01$),相关系数为 -0.377 。相比之下,空气湿度与土壤呼吸速率相关性未达到显著水平。此外,大气 CO_2 浓度与土壤呼吸速率呈显著负相关($p<0.05$),相关系数为 -0.265 。整体来看,温度因子与土壤呼吸速率的相关系数最为显著,而空气湿度的影响相对较弱。

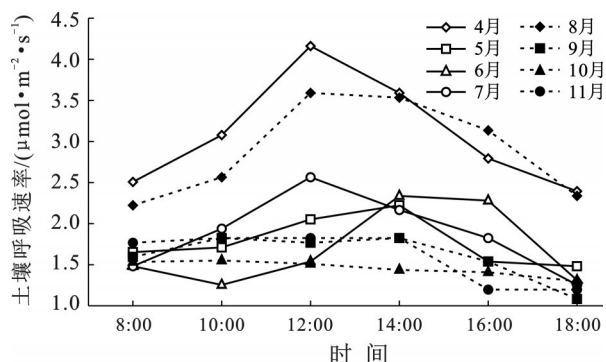


图 5 土壤呼吸速率月变化

Fig.5 Monthly variation of soil respiration rate

表 1 土壤呼吸速率与环境因子的 Pearson 相关系数
Table 1 Pearson correlation coefficients between soil respiration rate and environmental factors

项目	土壤呼吸速率	空气温度	空气湿度	土壤温度	土壤湿度	大气 CO_2 浓度
土壤呼吸速率	1					
空气温度	0.383**	1				
空气湿度	-0.125	-0.689**	1			
土壤温度	0.417**	0.638**	-0.23	1		
土壤湿度	-0.377**	-0.478**	0.154	-0.503**	1	
大气 CO_2 浓度	-0.265*	-0.287**	0.242	-0.297**	0.505**	1

注:**和*分别表示显著性水平达到 0.01 和 0.05。

2.3.2 空气温湿度对土壤呼吸的影响

结合空气温湿度变化特征(图 2)与土壤呼吸速率变化特征(图 5)可以看出,空气温度的日变化与土壤呼吸速率变化趋势总体一致。在多数月份中,空气温度在中午至下午时段达到较高水平,对应时段的土壤呼吸速率也普遍较高;而在清晨和傍晚空气温度较低时,土壤呼吸速率相应较低。这一现象在 7 月和 8 月等生长旺盛月份表现尤为明显,土壤呼吸速率日内波动幅度高于春秋两季。

从季节尺度来看,春季随空气温度升高,土壤呼吸速率逐渐增长;夏季空气温度维持在较高水平,对应的土壤呼吸速率整体较高;进入秋季后,随着空气温度下降,土壤呼吸速率呈降低趋势。相比之下,空气湿度在不同时间尺度上的变化与土壤呼吸速率未表现出明显对应关系,相关性分析(表 1)结果亦显示二者关系不显著。

2.3.3 土壤温湿度对土壤呼吸的影响

如图 6 所示,2023 年 10 月 11 日至 13 日连续 3 d 测量结果表明,在狗牙根覆盖土壤条件下,当土壤湿度处于 22%~32% 区间时,土壤呼吸速率与土壤湿度呈极显著负相关($R^2=0.77$, $p<0.01$),随着土壤湿度增加,土壤呼吸速率整体呈下降趋势。回归结果表明,当土壤湿度约为 25.5% 时,土壤呼吸速率达到相对高值 [$1.14\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$];而当土壤湿度升至 31.7% 时,呼吸速率降至最低 [$0.507\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]。

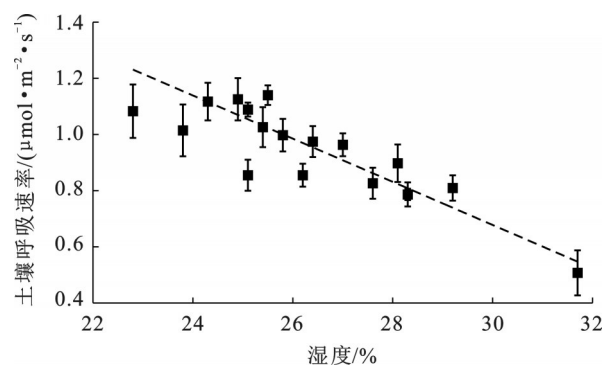


图 6 土壤呼吸速率与土壤湿度响应关系

Fig.6 Relationship between soil respiration rate and soil moisture

如图 7 所示,2023 年 5 月 24—26 日连续 3 d 观测结果显示,不同日期的土壤呼吸速率变化特征存在差异,5 月 24 日和 26 日的土壤呼吸速率呈单峰型变化,峰值主要出现在 14:00—16:00,平均呼吸速率分别为 1.78 , $1.36\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。而 5 月 25 日的土壤呼吸速率呈双峰型变化,峰值分别在 8:00—10:00, 14:00—16:00 出现,全天平均呼吸速率为 $2.11\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。结合同期土壤温度变化可以发现,25 日土壤

日均温度较前一日升高约 3.64°C , 对应土壤呼吸速率明显增加; 而 26 日当土壤温度进一步升高至 28.5°C 时, 土壤呼吸速率未继续增加, 反而出现下降。

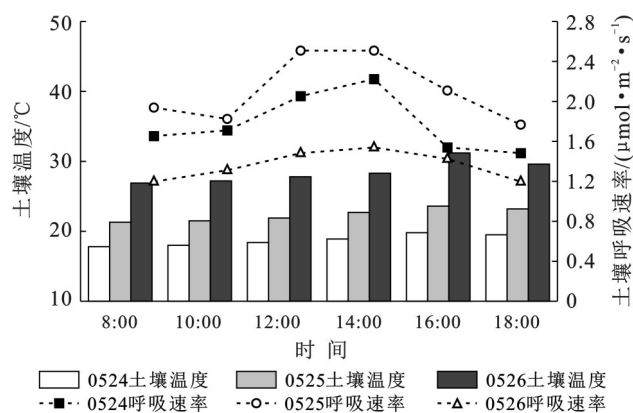


图7 连续3 d测定的土壤温度、呼吸速率变化

Fig.7 Variation of soil temperature and respiration rate over three consecutive days

2.3.4 空气 CO_2 浓度对土壤呼吸的影响

如图8所示, 2023年10月11—13日连续3 d监测结果表明, 大气 CO_2 浓度在日尺度上表现出明显变化特征。总体来看, 大气 CO_2 浓度在夜间及清晨较高, 而在日间逐渐降低, 呈现出明显的日变化规律。在对应观测时段内, 土壤呼吸速率亦表现出明显的日变化特征: 当大气 CO_2 浓度较高时, 土壤呼吸速率相对较低; 而在 CO_2 浓度下降阶段, 土壤呼吸速率相对较高。

进一步线性回归分析(图9)结果表明, 在观测期间, 当大气 CO_2 浓度由 $428 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 升至 $494 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 时, 土壤呼吸速率由 $1.55 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下降至 $1.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 二者呈显著负相关 ($R^2=0.66$, $p<0.05$)。

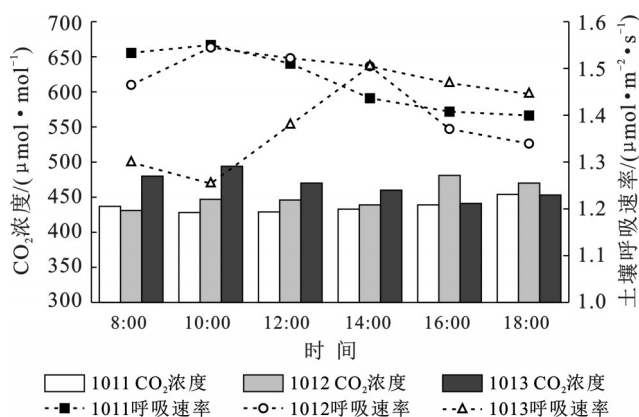


图8 连续3 d测定的大气 CO_2 浓度变化

Fig.8 Variation of atmospheric CO_2 concentration over three consecutive days

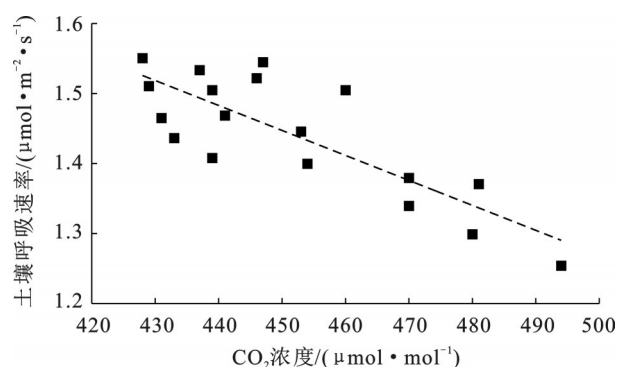


图9 土壤呼吸速率与大气 CO_2 浓度响应关系

Fig.9 Relationship between soil respiration rate and atmospheric CO_2 concentration

2.3.5 降雨对土壤呼吸的影响

如图10所示, 经降雨处理(试验组)后72 h内, 土壤呼吸速率表现出明显的时间动态变化。总体上, 降雨处理试验组的土壤呼吸速率变化趋势与无降雨对照组的一致, 但试验组在整个观测期内的土壤呼吸速率均低于对照组。

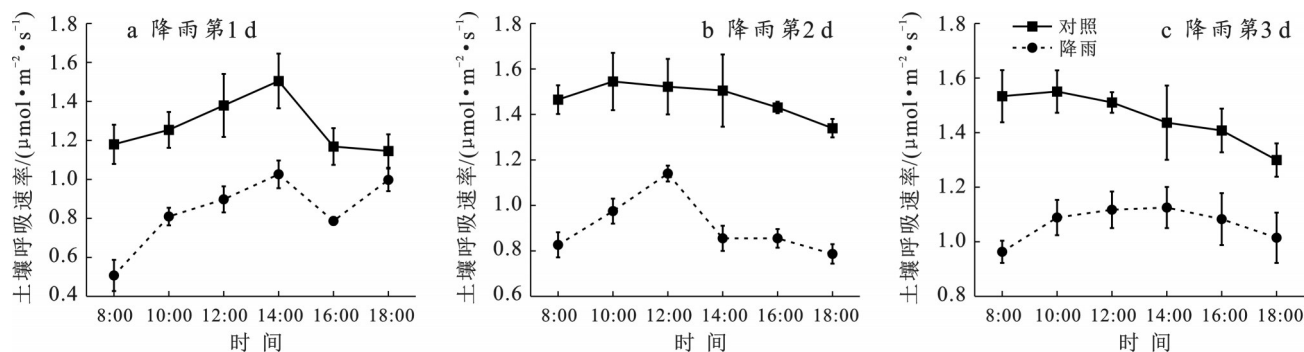


图10 降雨后72 h土壤呼吸速率变化

Fig.10 Variation of soil respiration rate within 72 hours after a rainfall event

雨后第1天, 试验组的土壤呼吸速率下降幅度较大, 变化范围为 $0.51 \sim 1.02 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 明显低

于对照组的 $1.14 \sim 1.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。雨后第2天, 试验组的土壤呼吸速率有所回升, 变化范围为

0.83~1.14 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,但仍低于对照组的 1.43~1.55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。雨后第 3 天,试验组的土壤呼吸速率波动幅度减小,但整体水平仍未恢复至对照组水平。

3 讨论

本研究结果表明,在狗牙根覆盖条件下,土壤呼吸速率在观测期内呈现出明显的季节变化特征,表现为夏季较高、春季次之、秋季最低。这一变化趋势与狗牙根在生长季内春季返青、夏季旺盛、秋季衰老的生长节律高度一致。春季随着气温逐渐回升,植物根系活动和土壤微生物代谢逐渐增强,土壤呼吸速率随之升高;夏季在充足的热量和光照条件下,植物光合作用增强,根系呼吸与微生物分解作用均达到较高水平,使土壤呼吸速率及其日变化幅度达到生长季峰值;进入秋季后,随着气温下降和狗牙根生理活性减弱,土壤呼吸速率明显降低并趋于稳定。

温度是驱动上述土壤呼吸变化的重要环境因子之一。已有研究^[19-21]表明,温度通过影响植物根系呼吸强度和土壤微生物代谢活性,进而调节土壤 CO_2 的产生速率。土壤温度升高通常会促进微生物对有机质的分解,并增强植物根系呼吸作用,从而提高土壤呼吸速率。本研究相关性分析结果印证了以下结论:土壤呼吸速率与空气温度和土壤温度均呈极显著正相关。其中,由于狗牙根植株冠层相对低矮、遮阴效应有限,土壤热环境对外部气温波动的响应更为直接,使得土壤呼吸与土壤温度的相关性更为密切,凸显土温在呼吸调控中的直接作用。然而,本研究亦观测到土壤呼吸速率对温度的响应存在非线性特征。在较高温度区间时,土壤呼吸速率并未持续增长,反而出现一定程度的下降趋势。这一现象在草地生态系统中已有相关报道^[13],通常归因于高温胁迫引发的土壤水分有效性降低、微生物活性受抑以及根系呼吸效率下降。值得注意的是,在连续观测后期(5月26日)出现土温升高,呼吸反降的反常现象。深入剖析发现,该现象实际上叠加了预处理所引发的方法学效应:本研究在观测前 24 h 实施齐地刈割处理以排除上部干扰,但这切断了近期光合产物向地下的输送。至观测第 3 天,因新鲜碳源持续中断,根系储藏底物耗竭,引发碳源饥饿效应。该效应在后期占据主导并大幅抑制自养呼吸,最终抵消高温对呼吸的物理促进作用^[22]。该结果不仅反向印证近期光合碳输入对草地土壤呼吸的驱动作用,也为未来采用静态箱法开展连续观测时,必须审慎评估去叶处理带来的时效性干扰。

土壤湿度与降雨构成影响土壤呼吸的另一重要限制因子。在观测湿度范围内,土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著负相关,即当土壤处于高湿润状态时,土壤呼吸速率出现下降趋势^[23-26]。这本质上与土壤气体扩散理论相关:土壤呼吸过程中产生的 CO_2 需要通过土壤孔隙向大气扩散,而当土壤含水量较高时,部分土壤孔隙被水分填充,导致气体扩散通道受阻,从而降低 CO_2 向大气释放的效率^[27-29]。同时,高含水率引发的土壤通气性下降,也可能抑制好氧微生物的代谢活动。

降雨作为一种典型的短期环境扰动,其效应同样支持上述物理机制。在降雨处理后 72 h 内,试验组土壤呼吸整体低于对照组。降雨促使大量水分快速渗入并占据土壤孔隙,引发短期缺氧和气体扩散阻滞;同时,降雨过程可能伴随地表降温,也在一定程度上削弱微生物活动。但随着时间推移,土壤水分因下渗或蒸散发而逐渐减少,土壤通气条件得以恢复,土壤呼吸速率随之出现回升趋势^[23]。此外,得益于狗牙根致密的植被覆盖和发达的根系结构,在一定程度上缓冲了降雨对土壤表层的直接冲击与侵蚀,使水分波动对土壤呼吸的影响主要表现为短期物理扩散受限,而未改变其整体的长期演变规律。

在环境气体交互方面,大气 CO_2 浓度变化与土壤呼吸速率存在表观负相关。从直观的物理扩散角度看,土壤 CO_2 释放理应增加近地层大气 CO_2 ^[30],但本研究观测到的负相关现象实则是植物光合作用以及空气对流扩散条件综合调控的结果^[31]。具体而言,在白天的正午至午后时段(12:00—14:00),一方面地温升高促使土壤呼吸速率达到峰值;另一方面,充足的光照使狗牙根光合作用同样达到顶峰,冠层大量吸收近地层的 CO_2 。加之此时地表受热导致空气对流旺盛,气体扩散条件好,进而稀释近地层积聚的 CO_2 。这使得土壤呼吸最大的时段,大气 CO_2 浓度反而处于低谷。相反,在清晨(8:00),光合作用相对较弱,且受夜间地表降温影响,近地层空气往往较为稳定,流通受阻,导致夜间累积的 CO_2 在近地表大量滞留,形成一天中浓度的高峰;而此时由于土壤温度偏低,土壤瞬时呼吸速率反而较小。因此,这种负效应是两者在昼夜交替下产生的表观假象。相比之下,原有的 CO_2 浓度梯度约束影响是次要的。

综上所述,狗牙根覆盖土壤呼吸速率的变化是植被结构特性与环境因子共同作用的结果。其低矮密集的冠层和发达的须根系统,使土壤表层环境更容易受到外界气候变化的直接影响,从而增强土壤

呼吸对温度变化的敏感性,又凭借出色的固土护坡能力缓冲水分与降雨带来的剧烈扰动。这种响应模式,为科学评估护坡植被(狗牙根)的土壤碳循环过程及其固碳价值提供参考依据。

需要指出的是,本研究仍存在一定局限。本研究基于单一生长季的连续观测数据,对狗牙根覆盖条件下土壤呼吸的季节变化特征及其与环境因子的响应关系进行分析。由于观测时间尺度相对有限,本研究结果主要揭示特定年份气候背景下的变化特征,在解释年际气象波动影响及推演长期气候演变趋势方面略显不足。因此,本研究结果主要适用于生长季尺度下狗牙根土壤呼吸动态变化特征的分析与解释。

4 结论

(1) 狗牙根覆盖条件下,土壤呼吸在生长季内表现出与狗牙根生长节律高度一致的季节变化特征,整体呈夏季最高,春季次之,秋季最低的规律。这表明在植被覆盖背景下土壤碳释放过程具有显著的时间异质性。

(2) 温度是影响狗牙根土壤呼吸变化的重要环境因子之一。土壤呼吸速率对温度变化表现出较高的响应敏感性,但二者呈现的非线性响应特征表明,土壤呼吸过程在受温度驱动的同时,还受到水分条件及生物活动等多种因素的共同调节。

(3) 土壤湿度和降雨主要通过填充土壤孔隙、切断气体扩散通道的物理机制限制 CO_2 向大气的释放。同时,狗牙根致密的地上冠层与根系网络有效缓冲降雨带来的表层水土剧烈扰动,维持水分波动下碳排放过程的相对平缓与生态系统的结构韧性。

(4) 大气 CO_2 浓度变化与土壤呼吸的表观负相关特征,实质上是植物光合固碳与近地表热力对流扩散协同作用产生的表观现象,原有理论中的浓度梯度物理阻滞在此过程中仅居次要地位。

综上所述,狗牙根土壤呼吸并非单一环境因子的线性叠加,而是植被结构特性与多种环境因子协同作用的综合响应。本研究结果明确了其季节变化特征及其对主要环境因子的响应规律,为认识狗牙根土壤 CO_2 释放过程及其潜在生态效应,并为后续评估其固碳功能提供基础过程依据。

参考文献(References)

[1] Lagomarsino A, De Angelis P, Moscatelli M C, et al. The influence of temperature and labile C substrates on heterotrophic respiration in response to elevated CO_2 and

nitrogen fertilization [J]. *Plant and Soil*, 2009, 317(1): 223-234.

[2] Endsley K A, Kimball J S, Reichle R H. Soil respiration phenology improves modeled phase of terrestrial net ecosystem exchange in Northern Hemisphere [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, 14(2): e2021MS002804.

[3] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter [J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.

[4] Jian Jinshi, Vargas R, Anderson-Teixeira K, et al. A restructured and updated global soil respiration database (SRDB-V5) [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(2): 255-267.

[5] 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.

Wei Shujing, Luo Bizhen, Sun Long, et al. Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: A review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 689-704.

[6] 吴夏, 潘谋成, 曹建华, 等. 典型岩溶区土壤呼吸作用的昼夜变化特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 157-163.

Wu Xia, Pan Moucheng, Cao Jianhua, et al. Diurnal variation characteristics of soil respiration and influencing factors in the Maocun Karst area, Guilin [J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 157-163.

[7] Zhang Zheyu, Li Yaoliang, Williams R A, et al. Responses of soil respiration and its sensitivities to temperature and precipitation: A Meta-analysis [J]. *Ecological Informatics*, 2023, 75: 102057.

[8] Huang Ni, Wang Li, Song Xiaopeng, et al. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover [J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabb8508.

[9] 赵光帅, 普政功, 黄奇波, 等. 增温和降水改变对土壤 CO_2 释放影响研究进展[J]. *地球科学*, 2024, 49(12): 4608-4621.

Zhao Guangshuai, Pu Zhenggong, Huang Qibo, et al. A review of influence of warming and precipitation changes on soil CO_2 release [J]. *Earth Science*, 2024, 49(12): 4608-4621.

[10] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778-785.

Zhang Dongqiu, Shi Peili, Zhang Xianzhou. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7): 778-785.

[11] Feng Jiguang, Wang Jingsheng, Song Yanjun, et al.

- Patterns of soil respiration and its temperature sensitivity in grassland ecosystems across China [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(17):5329-5341.
- [12] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1):31-39.
- Feng Wenting, Zou Xiaoming, Sha Liqing, et al. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains, China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1):31-39.
- [13] 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 Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, 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.
- [14] 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 Xu, Yan Yuchun, Yan Ruirui, 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.
- [15] 陈爱华, 马涛, 董彦丽, 等. 黄土区梯田不同覆膜条件下土壤的呼吸特征[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):194-200.
- Chen Aihua, Ma Tao, Dong Yanli, et al. Soil respiration characteristics under different film mulching conditions in terraced land in loess area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):194-200.
- [16] 严俊霞, 郝忠, 荆雪锴, 等. 太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性[J]. *环境科学*, 2016, 37(9):3625-3633.
- Yan Junxia, Hao Zhong, Jing Xuekai, et al. Interannual variations of soil respiration and its temperature sensitivity in an orchard in Jinci region of Taiyuan City [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9):3625-3633.
- [17] 陈玮. 太行山南麓不同植被类型土壤呼吸特征及其温度敏感性[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):92-98.
- Chen Wei. Soil respiration and its temperature sensitivity of different vegetation types at southern foothill of Taihang Mountains [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):92-98.
- [18] 程鹏, 李锦辉, 宋磊. 生态边坡的水力和力学特性分析: 试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10):1901-1907.
- Cheng Peng, Li Jinhui, Song Lei. Hydraulic and mechanical characteristics of ecological slopes: Experimental study [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10):1901-1907.
- [19] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8):2301-2311.
- Yang Qingpeng, Xu Ming, Liu Hongsheng, et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8):2301-2311.
- [20] 伏星舟, 王立, 杨彩红, 等. 不同耕作方式对绿洲区夏玉米农田土壤呼吸及酶活性的影响[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5):103-108.
- Fu Xingzhou, Wang Li, Yang Caihong, et al. Effects of different cultivation on soil respiration and enzyme activity of summer maize in oasis region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5):103-108.
- [21] 丁杰萍, 罗永清, 周欣, 等. 植物根系呼吸研究方法及其影响因素研究进展[J]. *草业学报*, 2015, 24(5):206-216.
- Ding Jieping, Luo Yongqing, Zhou Xin, et al. Review of methodology and factors influencing plant root respiration [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(5):206-216.
- [22] Wan Shiqiang, Luo Yiqi. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: Results of a clipping and shading experiment [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2):1054.
- [23] 胡啸, 张鹏, 田瑞, 等. 全球升温 and 降水变化对农田土壤呼吸的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2025, 40(3):175-185.
- Hu Xiao, Zhang Peng, Tian Rui, et al. Effect of global warming and precipitation change on agricultural soil respiration [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2025, 40(3):175-185.
- [24] 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 Zhiyun, Cui Boliang, Chen Kelong, 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.
- [25] 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 Weiqiang, Tian Lele, Xiao Bo, 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.

- [26] 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.
- [27] 高胜,王蕊,Salman Ali,等.水分对苹果园土壤呼吸季节性变化与年际变化的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):60-66.
Gao Sheng, Wang Rui, Ali S, et al. Impact of soil moisture on seasonal and annual variations in soil respiration in an apple orchard on Loess Plateau region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):60-66.
- [28] 李冰,朱湾湾,韩翠,等.降水量变化下荒漠草原土壤呼吸及其影响因素[J].植物生态学报,2023,47(9):1310-1321.
Li Bing, Zhu Wanwan, Han Cui, et al. Soil respiration and its influencing factors in a desert steppe in north-western China under changing precipitation regimes [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023,47(9):1310-1321.
- [29] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.水分对土壤呼吸的影响及机理[J].生态学报,2003,23(5):972-978.
Chen Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(5):972-978.
- [30] 周玉梅,韩士杰,辛丽花.CO₂浓度升高对红松和长白松土壤呼吸作用的影响[J].应用生态学报,2006,17(9):1757-1760.
Zhou Yumei, Han Shijie, Xin Lihua. Soil respiration of *Pinus koraiensis* and *P. sylvestris* trees growing at elevated CO₂ concentration [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(9):1757-1760.
- [31] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future [J]. Global Change Biology, 2003,9(4):479-492.
- ~~~~~

(上接第256页)

- [26] 宁发金,鲁茸拉木,杜发春.云南省县域农业生态效率时空分异及其影响因素[J].中国农业资源与区划,2024,45(2):49-61.
Ning Fajin, Lu Ronglamu, Du Fachun. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of agricultural ecological efficiency in counties of Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024,45(2):49-61.
- [27] 冯薇,赵荣钦,谢志祥,等.碳中和目标下土地利用碳排放效率及其时空格局:以黄河流域72个地级市为例[J].中国土地科学,2023,37(1):102-113.
Feng Wei, Zhao Rongqin, Xie Zhixiang, et al. Land use carbon emission efficiency and its spatial-temporal pattern under carbon neutral target: A case study of 72 cities in the Yellow River basin [J]. China Land Science, 2023,37(1):102-113.
- [28] 任世鑫,李二玲,赵金彩,等.黄河流域耕地利用碳排放时空特征及影响因素研究[J].中国土地科学,2023,37(10):102-113.
Ren Shixin, Li Erling, Zhao Jincai, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions from cultivated land use in the Yellow River basin and the influencing factors [J]. China Land Science, 2023,37(10):102-113.
- [29] 卢新海,匡兵,李菁.碳排放约束下耕地利用效率的区域差异及其影响因素[J].自然资源学报,2018,33(4):657-668.
Lu Xinhai, Kuang Bing, Li Jing. Regional differences and its influencing factors of cultivated land use efficiency under carbon emission constraint [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(4):657-668.
- [30] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002,143(1):32-41.