

https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.197



增温和降水改变对土壤 CO₂ 释放影响研究进展

赵光帅^{1,2,3}, 普政功^{1,3}, 黄奇波^{1,3}, 朱义年², 吴华英^{1,3}

1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004
2. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西桂林 541004
3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西桂林 541004

摘要: 全球变暖正在扩大严重干旱和强降雨事件发生的频率、范围、持续时间和严重程度。高温、干旱、强降雨等极端气候事件显著改变了土壤有机碳矿化和无机碳释放的速率和强度。土壤 CO₂ 输出释放作为陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 对气候变化高度敏感, 探究土壤 CO₂ 释放与气候变化的关系与响应机制, 可为深入理解全球变暖背景下土壤碳循环和源汇机制提供理论支撑。系统分析了前人在全球变暖引起增温和降水改变对土壤呼吸 (soil respiration, R_s)、碳酸盐矿物溶蚀影响的研究成果与结论, 从 R_s 和碳酸盐矿物溶蚀两个方面解析增温和降水改变对土壤 CO₂ 释放的影响。未来应加强气候变化与土壤性质、营养物质含量和有效性、微生物生物量和活性等其他多种因子耦合作用对 R_s 影响的研究, 构建极端气候条件下多变量因子耦合的 R_s 速率模型。深入探究碳酸盐岩基岩土壤区 R_s 、碳酸盐矿物溶蚀对极端强降雨事件的响应阈值, 并精准量化极端强降雨水下两者间碳迁移转化通量。

关键词: 增温; 降水改变; 土壤 CO₂; 土壤呼吸; 碳酸盐矿物溶蚀; 环境地质。

中图分类号: P467

文章编号: 1000-2383(2024)12-4608-14

收稿日期: 2023-06-16

A Review of Influence of Warming and Precipitation Changes on Soil CO₂ Release

Zhao Guangshuai^{1,2,3}, Pu Zhenggong^{1,3}, Huang Qibo^{1,3}, Zhu Yinian², Wu Huaying^{1,3}

1. Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin 541004, China
2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China
3. International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO, National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin 541004, China

Abstract: Global warming is expanding the frequency, scope, duration, and severity of severe drought and heavy rainfall events. Extreme climate events such as high temperatures, droughts, and heavy rainfall have significantly changed the rate and intensity of soil organic carbon mineralization and inorganic carbon release. The release of soil CO₂, as an important component of the carbon cycle in terrestrial ecosystems, is highly sensitive to climate change. Exploring the relationship and response mechanism between soil CO₂ release and climate change can provide theoretical support for in-depth understanding of soil carbon cycling and source sink mechanisms in the context of global warming. In this paper systematically it analyzes the previous studies on the effects of warming and precipitation changes on soil respiration (R_s) and soil carbonate mineral dissolution, and analyzed the impact of

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No.42372294); 广西自然科学基金重点基金项目(No.2018GXNSFDA281036); 中国地质调查项目(No. DD20221758)。

作者简介: 赵光帅(1989-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事岩溶碳循环与全球气候变化研究。ORCID: 0009-0000-4333-8261。E-mail: zhaoguangshuai@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 赵光帅, 普政功, 黄奇波, 朱义年, 吴华英, 2024. 增温和降水改变对土壤 CO₂ 释放影响研究进展. 地球科学, 49(12):4608-4621.

Citation: Zhao Guangshuai, Pu Zhenggong, Huang Qibo, Zhu Yinian, Wu Huaying, 2024. A Review of Influence of Warming and Precipitation Changes on Soil CO₂ Release. *Earth Science*, 49(12):4608-4621.

warming and precipitation changes on soil CO₂ release from the aspects of *R_s* and soil carbonate mineral dissolution. In the future, efforts should be done to strengthen research on the coupling effects of climate change and other factors such as soil properties, nutrient content and availability, and microbial biomass and activity on *R_s*. Constructing an *R_s* rate model with multivariate factor coupling under extreme climate conditions. Deeply explore the response thresholds of *R_s* and carbonate mineral dissolution in carbonate bedrock soil areas to extreme heavy precipitation events. Accurately quantify the carbon migration and transformation flux between *R_s* and carbonate mineral dissolution under extreme heavy rainfall conditions.

Key words: warming; precipitation change; soil CO₂; soil respiration; carbonate mineral dissolution; environmental geology.

0 引言

全球变暖等气候变化正在通过显著改变全球或区域降雨和温度模式来影响生态环境(Grant, 2017; Ullah *et al.*, 2021; Koltz *et al.*, 2022). 研究表明,近年来陆地生态系统碳汇功能一直在发生变化(Brown *et al.*, 2021; Gampe *et al.*, 2021), 1980—2019年,气候变化贡献了中国陆地碳汇通量的22.3%,仅次于森林碳汇通量(44%),远高于氮沉降增加(12.9%)和大气CO₂上升(8.1%)(Yu *et al.*, 2022). 干旱、降水增加和变暖被认为显著影响植物、土壤和微生物的碳循环(Chen *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021a). 在可预见的未来,极端天气事件的频率和强度将持续增加(Hoover *et al.*, 2014; Tan *et al.*, 2018),破坏陆地生态系统的稳定性和碳循环,也对生态环境和经济发展造成严重威胁.

土壤作为最大的陆地碳库,其碳储量超过了陆表植被和大气碳的总和(Schmidt *et al.*, 2011). 土壤中碳储量与流体中的横向碳通量(溶解态碳)及气体中的纵向碳通量(气态碳)均相互关联,其微小变化便能引起全球碳循环及气候变化的响应(Stockmann *et al.*, 2013; Campeau *et al.*, 2019). 土壤呼吸(soil respiration, *R_s*)是生态系统中CO₂最大的单一来源,其主要包括与枯枝落叶、根系和土壤有机质分解相关的异养呼吸,以及植物根系生长和根系生物量维持产生的自养呼吸(Ngaba *et al.*, 2023). *R_s*是土壤碳输出释放的主要途径,约占陆地生态系统总呼吸的60%~90%,是陆地生态系统碳循环的第二大通量,仅次于陆地生态系统光合作用碳通量,它在一定程度上决定着陆地生态系统碳转移过程(Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Zhang *et al.*, 2021).

由于全球变暖带来的增温、增雨对*R_s*的积极影响,中国西南地区*R_s*量最高,西北干旱、半干旱区和青藏高原区*R_s*量较低(马明国等, 2019),全球*R_s*则表现为北回归线沙漠地区*R_s*量最低,赤道热带雨林

地区*R_s*量最高(Lu *et al.*, 2021),陆地生态系统*R_s*量具有显著的空间异质性.此外,土壤有机碳作为*R_s*的主要物质基础,在全球土壤中储量1 500~2 000 Pg,约占土壤总碳储量的62%(Deng *et al.*, 2014),其分布也具有湿润地区高,干旱、半干旱地区低的特点.与湿润地区相比,干旱、半干旱地区土壤无机碳含量较高,且以次生碳酸盐矿物为主,其含量约为土壤有机碳的2~5倍(李龙波等, 2021),部分地区可达9倍以上(Liu *et al.*, 2023).

全球变暖引起*R_s*速率的增强是否会长期持续形成碳—气候正反馈给未来气候变化带来了巨大的不确定性.土壤内部有其独特的水文地球化学和生物地球化学循环机制,且不同地理气候区土壤类型、理化性质往往不同,导致*R_s*对气候变暖的响应差异较大.前人曾将*R_s*与各种生物、非生物变量进行回归分析,发现不同生态系统或生物群落的结果差异巨大(Grosso *et al.*, 2005; Bond-Lamberty and Thomson, 2010),虽然近期Meta分析发现*R_s*对增温或降水改变呈高斯曲线响应,但仍有约13.7%的数据为其他响应关系(Chen *et al.*, 2023),且不同曲线响应之间并没有很好的划分依据.此外,即使不同生态系统或生物群落*R_s*对增温或降水改变有相同响应曲线,其响应阈值也有较大差异.虽已历经几十年的科学研究,但气候变化对*R_s*的影响仍未达成共识(Li *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021; Ngaba *et al.*, 2023).

除*R_s*外,矿物岩石溶蚀风化是土壤CO₂输出释放的另一种重要形式,据测算,全球因大气降水造成矿物岩石溶蚀风化每年消耗土壤或大气CO₂为0.15~1.60 Gt C(Martin, 2017),且以碳酸盐岩区溶蚀风化消耗速率最为显著,然而前人很少将矿物岩石风化消耗CO₂纳入土壤CO₂输出释放通量来研究.

本文通过综述前人对增温、降水改变及其耦合作用对*R_s*和碳酸盐矿物溶蚀影响的研究成果,以期

为深入理解不同地理气候环境背景下增温、降水改变及其耦合作用对土壤 CO₂ 释放关键过程的影响机制,同时可为预测极端气候条件下土壤碳循环过程及碳源汇效应提供理论支撑.

1 增温对土壤呼吸的影响

未来气候变化的不确定性主要来自 R_s 对变暖长期响应特征的不确定性 (Soong *et al.*, 2021), 土壤碳释放对变暖的响应很大程度上取决于 R_s 的温度敏感性. 增温对 R_s 的积极影响主要为提高土壤微生物活性和活动所需的能量 (Song *et al.*, 2019; 刘勇勤等, 2022); 增加表层土壤的细根数量 (Leppälammikujansuu *et al.*, 2014); 增强地表初级生产力, 提高土壤有机质的输入 (Luo *et al.*, 2009). 增温的抑制作用则主要表现为抑制微生物活动和酶的活性; 加速土壤水分的蒸发, 降低营养物质的输送和有效性 (Soong *et al.*, 2021); 抑制土壤有机碳激发效应 (Dong *et al.*, 2024).

R_s 是 CO₂ 从土壤到大气的通量, 其大小对温度变化的响应可以用温度敏感性系数 Q_{10} 表示 (马志良等, 2018; Haaf *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2023), 以环境温度每升高 10 °C, 土壤释放 CO₂ 速率的增加倍数来表征 R_s 的温度敏感性, 其值可通过以下公式计算:

温度敏感性 $Q_{10} = R(t, T + 10) / R(t, T)$, (1)
式(1)中, $R(t, T)$ 为 T °C 条件下 t 时刻土壤释放 CO₂ 速率, $R(t, T + 10)$ 为 $T + 10$ °C 条件下 t 时刻土壤释放 CO₂ 速率. Q_{10} 值越大表明 R_s 对温度变化越敏感 (Zhu and Cheng, 2011). 通常, Q_{10} 随温度升高而降低, 且有显著的季节变异性 (Yang *et al.*, 2023).

R_s 的温度敏感性受土壤性质、生物群落、季节气候、土壤含水量、增温幅度和速率等多因子影响. Lellei-Kovács *et al.* (2011) 研究发现与土壤水分相比, 土壤温度是干旱、半干旱生态系统中 R_s 的主要控制因子, 0.6%、4.0% 和 7.0% 的土壤体积含水量是水分对 R_s 温度敏感性影响的阈值. 一项全球 Mate 分析发现变暖刺激了森林生态系统 62% 的 R_s , 抑制了农田生态系统 10% 的 R_s , 对草原生态系统 R_s 的影响微不足道 (Ngaba *et al.*, 2023). 研究发现未有人为扰动的北极、寒带、温带、地中海、亚热带和热带生态系统 R_s 的年平均值分别为 109 ± 109 gC/m²、 383 ± 228 gC/m²、 745 ± 421 gC/m²、 813 ± 436 gC/m²、 776 ± 380 gC/m² 和 $1\ 286 \pm$

633 gC/m², 大致呈现出高纬度、低温度、低 R_s 速率 (Bond-Lamberty and Thomson, 2010). 高纬度地区增温往往发生在土壤微生物活动最适温度以下, 增温可促进微生物生物量和活性的大幅增长 (Yu *et al.*, 2021), 增强 R_s 速率, 最适温度以上的增温则会抑制微生物及酶的活性, 抑制 R_s . 在低纬度非严寒地区, 短期增温并不会显著改变 R_s 速率 (Zhang *et al.*, 2023), 但长期的增温可能会引起微生物的进化、生理适应或群落变化 (Steven, 2023), 导致土壤最佳呼吸温度随年最高日温度升高而升高, 表现出 R_s 最适温度的热适应性 (Chen *et al.*, 2023). 有研究认为由于微生物的热适应性, 随着增温时间增长, 温度对 R_s 的促进作用会减弱 (Li *et al.*, 2023), 但 Soong *et al.* (2021) 通过多年的模拟增温 (+4 °C) 实验发现气候变暖使 R_s 速率持续增加 (30 ± 4)%. 有研究表明, 增温显著增加了生长季的 R_s , 而对生长季前期和末期的 R_s 没有显著影响 (Wang *et al.*, 2023). Liu *et al.* (2016a) 的研究则认为生长季增温处理对 R_s 没有显著影响, 而非生长季 R_s 对增温处理有显著的正响应. 张攀等 (2022) 研究了红树林湿地沉积物中微生物群落对环境的响应, 发现微生物丰度和多样性随土层深度增加而降低, 可能导致深层土壤 R_s 温度敏感性低于表层. Su *et al.* (2023) 对稻田土壤的研究则发现增温没有显著改变土壤微生物生物量, 但提高了底层 (15~30 cm) 土壤寡营养菌的相对丰度, 使底层土壤有机碳矿化的温度敏感性更高. 一定程度的增温虽然可增强 R_s 速率, 但也加速了土壤水分的散失, 当增温引起的土壤湿度下降大于 30% 时, R_s 速率低于未增温对照组 (Carey *et al.*, 2016), 低土壤湿度下的长期增温可能导致温度对 R_s 的影响减弱, 甚至消失 (Suseela and Dukes, 2013).

指数函数、Lloyd-Taylor 函数和高斯函数均被用于拟合 R_s 与温度的相关关系 (Lellei-Kovács *et al.*, 2011), 但不同生态系统、生物群落、地理气候等条件下拟合函数可能并不相同. Zhou *et al.* (2014) 通过 Meta 分析发现森林生态系统 R_s 对温度呈线性响应, Legesse *et al.* (2022) 研究发现草原生态系统 R_s 对温度也呈线性响应, 而另一项 Meta 分析表明森林—农田—草地的 R_s 与温度为高斯曲线响应关系 (Ngaba *et al.*, 2023). 与低纬度地区相比, 高纬度地区的土壤温度通常较低, R_s 对环境温度的响应程度更高, 两者几乎是线性或指数响应关系 (Liu

表 1 温度与 Rs 相关性统计分析

Table 1 Statistics on the correlation between temperature and Rs

正相关	过渡/ 不相关	负相关	生态系统	国家/地点	响应曲线	R _s 速率 ($\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	参考文献	备注
-10~13	-	13~35	森林-农田- 草原	-	高斯曲线	-	Ngaba <i>et al.</i> (2023)	mate 分析
-10~30	-	-	自然再生森林	-	线性	0~7.9	Wang <i>et al.</i> (2010)	mate 分析
0~25	25~40	-	森林和灌木丛	-	二次曲线	0~7.4	Carey <i>et al.</i> (2016)	mate 分析
-10~15	15~30	-	热带森林	-	二次曲线	-	Zhou <i>et al.</i> (2014)	mate 分析
4~32	-	-	-	-	阶梯曲线	-	Kesik <i>et al.</i> (2006)	室内实验
22~26	-	-	湿润热带森林	northeastern Puerto Rico	线性	6~18	Wood <i>et al.</i> (2013)	
-10~25	-	-	-	-	线性	0~4.0	Hursh <i>et al.</i> (2017)	mate 分析
10~30	-	-	沙漠草原	中国内蒙古	线性	0~6.3	Guo <i>et al.</i> (2022)	
14~28	-	-	草原	中国内蒙古	线性	0~10	Legesse <i>et al.</i> (2022)	
-	-	14~17	半干旱草地	中国内蒙古	线性	1.0~3.5	Li <i>et al.</i> (2020)	暗栗钙土
14~18	18~22	22~32	荒漠草地	中国内蒙古	高斯曲线	0~3.0	Liu <i>et al.</i> (2016b)	生长季
-18~20	-	-	荒漠草地	中国内蒙古	指数曲线	0~1.4	Liu <i>et al.</i> (2016b)	非生长季
4~20	-	-	盐碱草地	中国山西	线性	0~6	Diao <i>et al.</i> (2022)	生长季降水量 309 mm
4~20	-	-	盐碱草地	中国山西	指数曲线	0~9	Diao <i>et al.</i> (2022)	生长季降水量 460 mm
-10~20	-	-	高寒草甸	中国四川	指数曲线	0~5.1	Wang <i>et al.</i> (2021b)	
5~32	-	-	亚热带森林	中国桂林	线性	0.5~6.3	Yang <i>et al.</i> (2015)	岩溶土壤
5~32	-	-	亚热带森林	中国桂林	线性	1.2~7.6	Yang <i>et al.</i> (2015)	红壤
5~35	-	-	灌木林	中国桂林	线性	0~3.8	吴夏等(2013)	岩溶土壤
4.5~30.0	-	-	耕地-草地- 林地	中国遵义	线性	0~5	朱粲粲(2021)	岩溶土壤

注:表中数值为温度,单位 $^{\circ}\text{C}$;“-”表示无数据.

et al., 2016b; Guo *et al.*, 2022). 相同纬度和生态系统下响应曲线也并不一致,降水量丰富时 Rs 对温度为指数曲线响应,而降水量较低时呈线性响应(Diao *et al.*, 2022). 然而即使相同的季候条件,生长季 Rs 对温度为高斯曲线响应,而非生长季为指数响应(Liu *et al.*, 2016b). 虽然各种环境因子影响下的响应曲线并不一致,但一项 Mate 分析发现高斯曲线在所有响应拟合曲线中占比最高(Ngaba *et al.*, 2023),即在一定温度范围内, Rs 随温度升高而逐渐增强,当温度升至某一阈值时, Rs 速率达最大值,随后 Rs 随温度升高而降低,但也有学者认为高斯曲线响应仅存在于热带地区,严寒和温带地区响应曲线不成正态分布(Bond-Lamberty and Thomson, 2010)或响应曲线可能并不对称(Lellei-Kovács *et al.*, 2011).

高斯曲线虽然代表了大多数 Rs 对温度的响应关系,但不同生物、非生物因子条件下响应曲线的阈值和温度范围通常并不一致(表 1). 一项 Meta 分析认为 13 $^{\circ}\text{C}$ 时 Rs 速率最高(Ngaba *et al.*, 2023),而 Liu *et al.* (2016b) 研究发现约 20 $^{\circ}\text{C}$ 时 Rs 速率最高, Lellei-Kovács *et al.* (2011) 则认为最适温度为 35 $^{\circ}\text{C}$. 有研究表明生态系统最适呼吸温度具有热适应性, Rs 最适温度随年最高日温度升高而线性升高(Chen *et al.*, 2023). 综合现有高斯曲线响应数据(表 1),发现 Rs 最适温度位于 10~38 $^{\circ}\text{C}$, Rs 速率阈值为 3.0~10.0 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

2 降水改变对土壤呼吸的影响

气候变暖加快了全球水循环过程并扩大了严重干旱和强降雨事件发生的频率、范围、持续时间

和严重程度.降水改变或土壤含水量的高低直接影响 R_s 速率的大小,是 R_s 的最主要驱动因子(Ngaba *et al.*, 2023),同时,降水改变主导了 R_s 对土壤温度的响应,适宜的土壤含水量可以放大低于温度阈值下的 R_s 温度敏感性(Shen *et al.*, 2015). R_s 对降水量的敏感性可用下式计算(Miao *et al.*, 2017):

$$\text{降水量敏感性 } R_s = 10 \times P_c \times (SR_T - SR_C) / [SR_C \times (P_T - P_C)], \quad (2)$$

式(2)中, SR_T , SR_C 分别为降水处理和对照组的 R_s 量; P_T , P_C 分别为降水处理和对照组的降水量.

降水量或土壤含水量只有在很低或非常高的情况下才能成为限制因素(Lellei-Kovács *et al.*, 2011).干旱不仅会抑制土壤微生物活动还会限制微生物对营养物质的获取并降低土壤有机碳的活性(Li *et al.*, 2018a; Soong *et al.*, 2021).适宜的降水量或土壤含水量则会刺激根系生长呼吸和微生物活性及生物量(Du *et al.*, 2023);影响地表生物量的大小,控制地表生物碳的输入,丰富 R_s 可用基质含量;破坏土壤团聚体,提高土壤有机质的流动性和有效性,使基质更容易分解(Gao *et al.*, 2016; Schimel, 2018).土壤含水量过高则可能会抑制根系生物量和微生物活性(Wu and Lee, 2011);阻碍 O_2 输送,形成厌氧环境,抑制 R_s (Ngaba *et al.*, 2023).

R_s 对降水改变的响应受土壤类型、生物群落、可用基质(营养物质)含量及有效性、土壤重新湿润(或干旱)的程度及持续时间等因素的调节(Rey *et al.*, 2017; Niu *et al.*, 2019).干旱对微生物代谢有直接的负面影响,但研究发现微生物可通过生理适应、群落组成和代谢方式的转变在较高干旱频率和强度的土壤中维持异养呼吸(Steven, 2023).Zhao *et al.* (2021)研究发现在中国黄土高原地区,当土壤含水量超过田间持水量(28%)或低于枯萎点(15%)时, R_s 速率(1.27~1.84 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)低于土壤含水量在 15%~28% 时的速率(2.35~3.32 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$).另有研究发现,生长季土壤含水量对 R_s 的影响显著高于非生长季,两者相差可达 26%(Wang *et al.*, 2023).由于土壤中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 与 R_s 分别为负相关和弱相关关系(Liu *et al.*, 2016a),氮添加条件下降水改变对任何生物群落的 R_s 都没有积极影响(Ngaba *et al.*, 2023).一项全球 Mate 分析发现降水改变可使森林和农田的 R_s 分别增加 51% 和 17%,而对草地 R_s 的影响不显著(Ngaba *et al.*, 2023).不同质地的土壤其呼吸对降

水改变的响应也有较大差异(戴磊等, 2021),如砂质土壤具有较低的持水能力和养分保留能力,致使植被拥有更高的细根生物量和总根生物量,而雨季黏土土壤含水量常接近或处于饱和状态,阻止了土壤 CO_2 的扩散,导致砂质土壤 R_s 速率高于黏性土壤(Sotta *et al.*, 2006).由于土壤含水量沿地形梯度的差异分布,通常在斜坡拥有高 R_s 速率,而台地和谷地 R_s 速率较低(Sotta *et al.*, 2006).土壤活性有机碳含量、根系生物量、微生物生物量越大, R_s 对降水改变响应越强,累积 R_s 量越高(Zhao *et al.*, 2021).Liu *et al.* (2016a)认为 R_s 主要受土壤活性有机碳、土壤含水量和根系生物量的积极影响,而受氨氮抑制,根据 R_s 与 4 个关键影响因子的关系建立了 R_s 速率模型:

$$R_s = 0.288 + 4.083W + 0.012B + 0.11C - 0.098N, \quad (R^2 = 0.669, p < 0.01), \quad (3)$$

式(3)中, R_s 为土壤呼吸速率, $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; W 、 B 、 C 分别为 0~10 cm 土层中的土壤含水量(m^3/m^3)、根系生物量(g/m^2)和土壤活性有机碳含量(g/kg); N 为 10~20 cm 土层中的 NH_4^+-N 含量(mg/kg).

此外, R_s 中的自养呼吸和异养呼吸对降水改变的响应也存在诸多差异. Legesse *et al.* (2022)研究了内蒙古草原,认为 R_s 的变化几乎完全由土壤有机质分解(异养呼吸)变化控制,而根及根际微生物呼吸(自养呼吸)对不同降水处理的波动不敏感. Diao *et al.* (2022)研究了山西盐碱草原,认为 R_s 主要由自养呼吸贡献,异养呼吸对降水改变不敏感,其原因可能为长期的干旱缺水和特殊的土壤理化性质导致微生物丰度和活性较低,而植被为汲取深部地下水,长有较发达的根系,因此自养呼吸是 R_s 的主要贡献者.一般来说,自养呼吸对降水改变的响应需要更长的时间和更大的降雨脉冲,因为降水后根系生长相对缓慢(Rey *et al.*, 2017; Schimel, 2018),而土壤微生物生物量、丰度和活性在降水后均快速升高(Bond-Lamberty *et al.*, 2018).与自养呼吸相比,异养呼吸对降水改变具有更强的响应,并在降水后对总 R_s 的贡献更大(Yu *et al.*, 2021).

目前, R_s 对降水量改变响应的拟合曲线有高斯曲线、二次曲线和线性响应曲线,综合现有研究数据(表 2, 表 3)发现热带、亚热带降雨量丰富地区 R_s 对降水量呈高斯曲线响应,而干旱、半干旱地区 R_s 对降水量多为线性或二次曲线响应,同时温度、基

表 2 降水量与 Rs 相关性统计分析

Table 2 Statistics on the correlation between precipitation and Rs

正相关	过渡/ 不相关	负相关	生态系统	国家/地点	响应曲线	Rs 速率 ($\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	参考文献	备注
0~640	640~1 815	1 815~3 000	森林-农田-草原	—	高斯曲线	—	Ngaba <i>et al.</i> (2023)	mate 分析
0~4 000	—	—	自然再生森林	—	线性	0~6.6	Wang <i>et al.</i> (2010)	mate 分析
0~4 000	—	—	—	—	线性	0.7~5.3	Hursh <i>et al.</i> (2017)	mate 分析
80~400	400~550	—	半干旱草地	中国内蒙古	二次曲线	0.5~2.7	Miao <i>et al.</i> (2017)	
0~220	—	—	亚热带森林	中国桂林	线性	0.5~6.3	Yang <i>et al.</i> (2015)	岩溶土壤
0~220	—	—	亚热带森林	中国桂林	线性	1.2~7.6	Yang <i>et al.</i> (2015)	红壤

注:表中数值为降水量,单位 mm;“—”表示无数据.

表 3 土壤含水量与 Rs 相关性统计分析

Table 3 Statistics on the correlation between soil moisture content and Rs

正相关	过渡/ 不相关	负相关	生态系统	国家/地点	响应曲线	Rs 速率 ($\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	参考文献	备注
25.0~37.5	—	37.5~55	湿润热带森林	northeastern Puerto Rico	高斯曲线	6~18	Wood <i>et al.</i> (2013)	
42.5~43.5	—	43.5~44.5	热带雨林	central Amazonian Rainforest	高斯曲线	3~10	Sotta <i>et al.</i> (2004)	黏土
16~33	—	33~44	热带雨林	Eastern Amazonian Rainforest	高斯曲线	1~5	Sotta <i>et al.</i> (2006)	黏土
14~22	—	22~32	热带雨林	Eastern Amazonian Rainforest	高斯曲线	1.5~6.5	Sotta <i>et al.</i> (2006)	砂土
20~45	—	45~70	热带雨林	La Selva, Costa Rica	高斯曲线	1.2~5.8	Schwendenmann <i>et al.</i> (2003)	
22~27	—	27~35	—	—	高斯曲线	0~2.6	Hursh <i>et al.</i> (2017)	mate 分析
0~30	—	—	沙漠草地	中国内蒙古	线性	0~6.3	Guo <i>et al.</i> (2022)	
10~16	—	—	半干旱草地	中国内蒙古	线性	1~3.5	Li <i>et al.</i> (2020)	暗栗钙土
0~10	—	—	荒漠草地	中国内蒙古	线性	0~3.0	Liu <i>et al.</i> (2016b)	栗土
9~27	—	—	盐碱草地	中国山西	线性	0~9	Diao <i>et al.</i> (2022)	平均土壤温度 18.9 °C
9~18	—	18~27	盐碱草地	中国山西	高斯曲线	0~6	Diao <i>et al.</i> (2022)	平均土壤温度 15.1 °C
—	15~40	—	灌木林	中国桂林	—	0~3.8	吴夏等(2013)	岩溶土壤
5~22	—	22~30	高寒草甸	中国四川	高斯曲线	0~5.1	Wang <i>et al.</i> (2021b)	
—	—	13~42	耕地-草地-林地	中国遵义	线性	0~5	朱燊燊(2021)	岩溶土壤

注:表中数值为土壤体积含水量,单位 %;“—”表示无数据.

岩岩性等是 Rs 对降水量响应曲线类型的主要影响因素.在半干旱盐碱草地,年平均土壤温度为 15 °C 时 Rs 对土壤含水量呈高斯曲线响应,当年平均土壤

温度升高至 19 °C 时两者为线性响应(Diao *et al.*, 2022).在降水充沛的气候区,火成岩、变质岩和碎屑岩基岩区 Rs 对土壤含水量多为高斯曲线响应,而碳

酸盐岩基岩区由于土下溶蚀作用, R_s 与土壤含水量可能为弱响应或负响应关系(吴夏等, 2013; 朱紫, 2021)。一项 Meta 分析认为高斯曲线适应于所有生物群落 R_s 对降水量的响应, 并认为 1 800 mm 降水量为 R_s 响应阈值(Ngaba *et al.*, 2023)。综合分析土壤含水量数据(表 3), 发现热带雨林地区 22%~45% 的土壤体积含水量为 R_s 响应阈值, R_s 速率阈值大致为 5.0~10.0 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

另一个需要考虑的因素是降水频率, 或土壤系统潮湿和干燥事件的交替频率。不同地理气候、干旱程度或降水量下, 降水频率对 R_s 影响也有较大差异。一项 Meta 分析表明降水量降低和降水量、降水频率同时降低可分别抑制 13.3%、24.1% 的 R_s , R_s 对降水量和降水频率同时降低的响应要显著高于仅对降水量降低的响应(Du *et al.*, 2023)。Zhao *et al.* (2021) 的研究则认为总降水量相同的情况下, 降水频率越大 R_s 量越低; 而相同降水频率下, 降水量越大 R_s 量越高。Du *et al.* (2023) 认为降水频率对 R_s 的影响随年平均降水量的增加而减小, 在干旱、半干旱地区降水频率增加对 R_s 有积极影响, 在湿润或潮湿地区则影响微弱, 降水频率减少在所有气候条件下都会抑制 R_s 。频率较低和强度较大的降水可能导致更深的降水渗透和更长的降水滞留, 增强营养物质的可获取性和有机质的可用性, 增加微生物生物量和活性(Knapp *et al.*, 2008)。有研究表明, 干湿交替显著抑制干燥阶段的 R_s , 干旱土壤再湿润会明显激发 R_s , 产生“Birch 效应”(Li *et al.*, 2018b; Steven, 2023), 其引发的呼吸脉冲幅度随干旱强度的增加而增强, 但再湿润时所激发的 R_s 量难以抵消干燥阶段 R_s 的减少量(Li *et al.*, 2018b), 也有研究表明这种呼吸脉冲可能产生比某一稳定土壤含水量阈值下更大的碳释放(Steven, 2023)。对干湿交替后遗留效应的研究表明轻度干旱降水后的 R_s 量与对照组没有明显差异, 而重度干旱降水后的 R_s 量显著高于对照组(Li *et al.*, 2018b)。

3 增温和降水改变耦合作用对土壤呼吸的影响

增温和降水改变耦合通过控制土壤微生物、根系活动及土壤气体扩散来调节 R_s 速率, 两者的作用大小及重要性受生态系统、地理气候和季节差异等多种因子影响。前人研究认为 R_s 主要取决于全球气候变化中土壤含水量和土壤温度的变化(Liu *et al.*,

2016b; Yu *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021), 也有学者认为 R_s 仅与土壤含水量和温度相关, 而与其他环境因子无关(Sotta *et al.*, 2006)。温度可以解释干旱、半干旱生态系统中 R_s 的大部分变化, 而在热带、亚热带湿润生态系统中土壤含水量是 R_s 的主要驱动因子(Schwendenmann *et al.*, 2003)。Heckman *et al.* (2023) 研究了美国大陆 34 处土壤剖面与矿物相关有机碳的丰度和持久性对气候变化的响应, 认为土壤水分对土壤碳库的影响远大于温度作用, 年平均降水量对土壤含水量的积极影响远高于升温对土壤含水量的不利影响, 而土壤含水量对 R_s 的抑制作用则受到年平均温度的影响。增温和降水减少条件下, 温度显著控制生长季前期和整个生长季的 R_s , 土壤含水量则在生长季中期和末期对 R_s 有显著影响(Wang *et al.*, 2023)。一项 Meta 分析认为气候变化对 R_s 的影响高于季节变化, 降水改变或土壤含水量对 R_s 的影响总体上高于变暖(Ngaba *et al.*, 2023)。

增温和降水改变耦合对 R_s 的影响可能会因具体的环境条件、生物群落或影响因子间相互作用而有所差异(Lellei-Kovács *et al.*, 2011; Ngaba *et al.*, 2023)。高温与低土壤含水量的耦合可能会限制 R_s 的增加, 而在高土壤含水量(10%~25%, 体积含水量)下, R_s 可能比在低含水量(<7.5%)下对温度更敏感(Carlyle and Than, 1988)。一项 Meta 分析表明增温和降水改变的耦合可贡献森林生态系统 92% 的 R_s , 草原生态系统 78% 的 R_s 和农田生态系统 45% 的 R_s , 其耦合作用对所有生物群落的 R_s 都有显著而积极的影响(Ngaba *et al.*, 2023)。Yu *et al.* (2021) 在沙漠草原设置了环境温度对照组、长期缓慢变暖组和短期急性变暖组三组原位变暖实验, 发现对照、长期和短期组在测量期间的平均 R_s 分别为 0.51 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、0.30 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 0.30 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 在重新湿润后 R_s 增加到 172 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1.41 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 1.72 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 分别增加了 2.4、3.7 和 4.7 倍, 变暖可抑制沙漠草原的 R_s , 且抑制作用大小几乎不受变暖速率影响, 但降水或重新湿润后 R_s 均显著增加, 变暖速率越快 R_s 增加倍数越大, 与缓慢变暖相比, 快速变暖可增强 R_s 对降水的响应程度。Yu *et al.* (2021) 研究发现缓慢变暖和降水的耦合对沙漠草原 R_s 有抑制作用, 而急性变暖和降水的耦合对沙漠草原 R_s 影响微弱。在热带山地草原生态系统

中,与高土壤含水量相比,低土壤含水量下增温导致 R_s 增加相对更大 (Tiruvaimozhi and Sankaran, 2019). 上述研究表明不同地理气候、生物群落或影响因子的相互作用使 R_s 对土壤含水量和温度耦合的响应有很大差异.

4 降水改变对碳酸盐矿物溶蚀的影响

增温通过影响土壤 CO₂ 浓度和生成速率间接控制碳酸盐矿物溶蚀,另一方面,增温加速了土壤水的蒸散发,减缓了碳酸盐矿物溶蚀速率. 与降水改变相比,增温对碳酸盐矿物溶蚀的影响较为微弱,据测算,全球因大气降水造成矿物岩石溶蚀风化形成 DIC 的 通 量 达 0.30~0.46 Gt C (Suchet *et al.*, 2003), 而 50%~74% 的 DIC 源自土壤 CO₂ (Zhao *et al.*, 2023). 有研究指出,碳酸盐岩地区 DIC 流失通量约为非岩溶区的 66 倍 (Qin *et al.*, 2020), 可见碳酸盐矿物溶蚀是土壤 CO₂ 流失释放的一种重要方式.

基岩或土壤中碳酸盐矿物溶蚀是土壤 CO₂ 形成 DIC 的主要驱动力 (图 1), 一定强度的增雨可促进根系和微生物呼吸产生 CO₂ 并提高土壤含水量或形成渗流水, 促进碳酸盐矿物溶蚀, 使土壤 CO₂ 不断溶于降水而流失. 研究发现年降水量 < 20 mm, 土壤碳酸盐矿物含量较低; 年降水量 20~250 mm, 土壤碳酸盐矿物含量较高且分布在所有地貌位置; 年降水

量 250~500 mm, 土壤碳酸盐矿物含量较高但仅分布在平坦或下凹的地貌位置, 斜坡土壤几乎不含碳酸盐矿物; 年降水量 > 500 mm, 土壤碳酸盐矿物含量迅速降低 (Pfeiffer *et al.*, 2023). 因 CO₂ 溶于水侵蚀风化基岩矿物每年可造成亚马逊盆地 13 640 kg/km² 的土壤或空气 CO₂ 形成 DIC 流失, 而 94% DIC 来源于碳酸盐矿物风化 (Liu *et al.*, 2018). 另有研究指出, 即使基岩仅含 1% 的碳酸盐矿物, 其溶蚀仍可贡献流域超 80% 的 DIC (Blum *et al.*, 1998). 张春来等 (2021) 综合前人研究成果发现碳酸盐矿物溶蚀量 (D) 与降水量 (P) 之间存在如下关系: $D = 0.0043 \times P^{1.26}$. Liu and Zhao (2000) 系统分析了已发表的碳酸盐矿物溶蚀量 (D) 与径流量 (P 降水量 - E 蒸发量) 数据, 建立了碳酸盐矿物溶蚀量与径流量间的线性关系: $D = 0.0544 \times (P - E) - 0.0215$, ($r = 0.98$). 当考虑生态系统净初级生产力 (NPP)、年均降水量 (P) 和 R_s 速率时, 碳酸盐矿物溶蚀速率 (D) 可由下式计算, $D = 0.696 \times P^4 + 0.483 \times R_s^4 + 0.324 \times NPP^4 + 0.176$ ($r^2 = 0.728$) (Cao *et al.*, 2011). 上述公式展现出碳酸盐矿物溶蚀量对降水量的线性或指数响应关系. 另有学者指出岩石 (矿物) 溶蚀消耗土壤或大气 CO₂ 的通量模型为 $F_{CO_2} = a \times Q$ (Suchet and Probst, 1995), 式中 F_{CO_2} 为 CO₂ 的消耗量 ($10^{-3} \text{ mol/km}^2 \cdot \text{s}$), Q 为降水导致的地表径流量 ($L/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$), a 为针对不同岩石类型的系数. Cao *et al.* (2011) 依据碳酸盐岩纯度和溶蚀速率建立了碳酸盐矿物溶蚀消耗土壤或大气 CO₂ 通量模型:

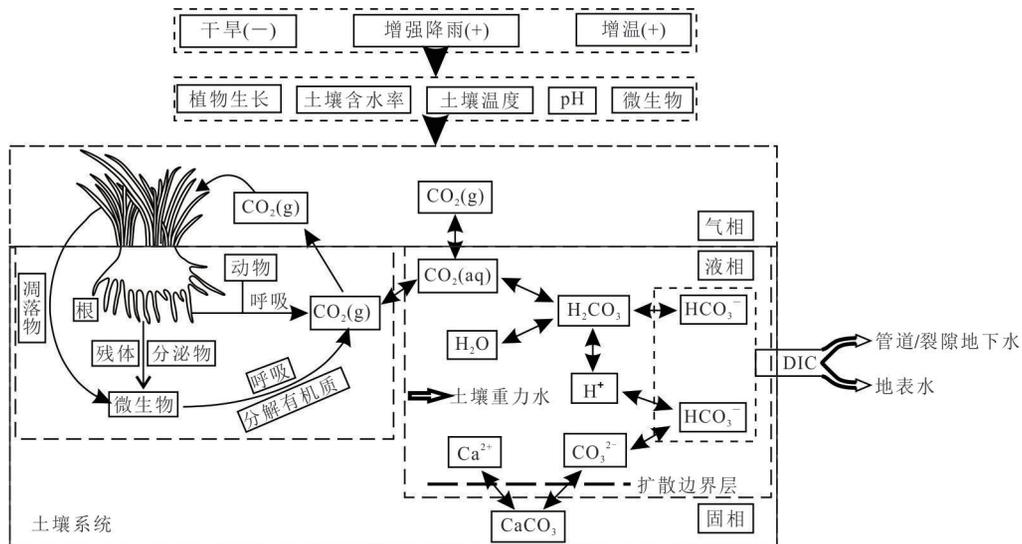


图 1 土壤岩溶动力系统中碳转移模型(修改自 Liu *et al.*, 2018)

Fig.1 Carbon transfer model in surface karst dynamic system (modified from Liu *et al.*, 2018)

$$F_{\text{CO}_2} = 0.44 \times d \times \lambda \times A, \quad (4)$$

式(4)中, F_{CO_2} 为消耗 CO_2 的量 (10^9 g/a), d 为碳酸盐岩溶蚀速率 ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$), λ 为比溶蚀度, A 为碳酸盐岩面积 (km^2).

Liu *et al.* (2018) 认为 DIC 和水生生物光合作用将 DIC 转化成的有机碳是计算碳酸盐矿物溶蚀消耗土壤或大气 CO_2 通量必须考虑的因素, 并利用公式(5):

$$F_{\text{CO}_2} = Q \times (0.5 \times [\text{DIC}] + [\text{AOC}]) / A + F_{\text{AOC(s)}}, \quad (5)$$

计算了 CO_2 消耗通量, 式(5)中, F_{CO_2} 为单位面积碳酸盐矿物溶蚀消耗 CO_2 量, Q 为降水引起流域径流排泄量, A 为流域面积, $[\text{DIC}]$ 为水中溶解无机碳的浓度, $[\text{AOC}]$ 为水生生物光合作用将 DIC 转为原生有机碳的浓度, $F_{\text{AOC(s)}}$ 为 AOC 在地表水系统中的沉积通量.

5 存在问题与研究展望

全球变化带来了严重干旱和强降水事件, 给土壤碳循环和碳源汇的研究与量化增添了新的挑战. R_s 作为土壤碳释放的最主要途径, 其对增温和降水改变的响应过程、机制和阈值仍未达成共识. 此外每年因降水从土壤系统中流失的 CO_2 达亿吨级, 是土壤无机碳以溶解态流失的主要部分. 目前已有丰富的针对特定生态系统和地区的相关研究, 但各研究数据或结论并不一致, 虽然后期做了大量的 Meta 分析, 但得出的响应阈值和范围有较大差异. 针对现有研究中存在的主要不足点, 今后需要在以下方面加强相关研究.

(1) 由于微生物的热适应性, 未来土壤微生物可能会适应高温、干旱等极端气候事件, 应加强不同时间、空间尺度上异氧微生物对增温、干旱和极端强降水敏感性的测量, 量化异氧呼吸的响应速率和强度.

(2) 虽然目前的研究认为 R_s 主要受土壤温度和含水量(降水改变)驱动, 但土壤 pH、土壤性质、营养物质含量与有效性和微生物活性与生物量等因素对 R_s 的影响也不容忽视, 增温和降水改变对 R_s 的影响可能会因具体的土壤性质、生物群落、环境阈值或不同变量因子间相互作用而有较大差异, 应加强增温和降水改变与其他多种因子耦合对 R_s 影响的研究.

(3) 不同地理气候区、不同生态系统土壤 CO_2 释放对增温强度、速率和降水强度、频率及季节差异

的响应机制及阈值仍需深入研究, 特别是热带/亚热带潮湿/湿润气候碳酸盐岩基岩土壤区, 常年较高的土壤含水量本底和岩溶作用导致 R_s 与降水改变呈现不相关、线性上升/下降或高斯曲线等多种复杂响应关系.

(4) 目前, 虽然已有模型描述 R_s 的温度敏感性和不同土壤含水量下的 R_s 速率, 但各模型考虑因子比较单一, 应加强增温、降水改变耦合及与其他多种生物、非生物因子耦合作用下 R_s 速率模型构建. 在全球变化引起未来更极端气候的背景下, 模型的构建和选择十分重要.

(5) 土壤或大气 CO_2 溶于水参与碳酸盐矿物溶蚀过程和机制已经有了较为清晰的认知, 但由于土壤盐基离子交换 H^+ 作用, 流失 DIC 源自土壤 CO_2 的比例还需进一步精确量化. 此外水生生物光合作用和 CO_2 脱气作用均一定程度改变了水体 DIC 浓度, 如何精准量化两者的影响仍需深入研究.

References

- Bond-Lamberty, B., Thomson, A., 2010. A Global Database of Soil Respiration Data. *Biogeosciences*, 7(6): 1915–1926. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010>
- Bond-Lamberty, B., Bailey, V.L., Chen, M., et al., 2018. Globally Rising Soil Heterotrophic Respiration over Recent Decades. *Nature*, 56080–83. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0358-x>
- Blum, J.D., Gazis, C.A., Jacobson, A.D., et al., 1998. Carbonate versus Silicate Weathering in the Raikhot Watershed within the High Himalayan Crystalline Series. *Geology*, 26(5):411–414.
- Brown, R.W., Chadwick, D.R., Zang, H.D., et al., 2021. Use of Metabolomics to Quantify Changes in Soil Microbial Function in Response to Fertiliser Nitrogen Supply and Extreme Drought. *Soil Biology and Biochemistry*, 160: 108351. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108351>
- Campeau, A., Bishop, K., Amvrosiadi, N., et al., 2019. Current Forest Carbon Fixation Fuels Stream CO_2 Emissions. *Nature Communications*, 10(1): 1876. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09922-3>
- Cao, J.H., Yang, H., Kang, Z.Q., 2011. Preliminary Regional Estimation of Carbon Sink Flux by Carbonate Rock Corrosion: A Case Study of the Pearl River Basin. *Chinese Science Bulletin*, 56(35): 3766–3773. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4377-3>
- Carey, J.C., Tang, J.W., Templer, P.H., et al., 2016. Temperature Response of Soil Respiration Largely Unaltered

- with Experimental Warming. *PNAS*, 113(48): 13797–13802. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605365113>
- Carlyle, J.C., Than, U.B., 1988. Abiotic Controls of Soil Respiration beneath an Eighteen-Year-Old Pinus Radiata Stand in South-Eastern Australia. *The Journal of Ecology*, 76(3):654. <https://doi.org/10.2307/2260565>
- Chen, J., Elsgaard, L., van Groenigen, K.J., et al., 2020. Soil Carbon Loss with Warming: New Evidence from Carbon-Degrading Enzymes. *Global Change Biology*, 26(4): 1944–1952. <https://doi.org/10.1111/gcb.14986>
- Chen, W.N., Wang, S., Wang, J.S., et al., 2023. Evidence for Widespread Thermal Optimality of Ecosystem Respiration. *Nature Ecology & Evolution*, 7(9): 1379–1387. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02121-w>
- Dai, L., Wang, G.L., He, Y.J., 2021. The Relationship between Soil Structure and Water Characteristics Based on Fractal Theory. *Earth Science*, 46(9):3410–3420 (in Chinese with English abstract).
- Deng, L., Liu, G.B., Shangguan, Z.P., 2014. Land-Use Conversion and Changing Soil Carbon Stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A Synthesis. *Global Change Biology*, 20(11): 3544–3556. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>
- Dong, H.X., Lin, J.J., Lu, J.Y., et al., 2024. Priming Effects of Surface Soil Organic Carbon Decreased with Warming: A Global Meta-Analysis. *Plant and Soil*, 500(1): 233–242. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05851-1>
- Diao, H.J., Chen, X.P., Zhao, X., et al., 2022. Effects of Nitrogen Addition and Precipitation Alteration on Soil Respiration and Its Components in a Saline-Alkaline Grassland. *Geoderma*, 406: 115541. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115541>
- Du, Y., Wang, Y.P., Hui, D.F., et al., 2023. Significant Effects of Precipitation Frequency on Soil Respiration and Its Components: A Global Synthesis. *Global Change Biology*, 29(4): 1188–1205. <https://doi.org/10.1111/gcb.16532>
- Gampe, D., Zscheischler, J., Reichstein, M., et al., 2021. Increasing Impact of Warm Droughts on Northern Ecosystem Productivity over Recent Decades. *Nature Climate Change*, 11: 772–779. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01112-8>
- Gao, J.Q., Feng, J., Zhang, X.W., et al., 2016. Drying-Rewetting Cycles Alter Carbon and Nitrogen Mineralization in Litter-Amended Alpine Wetland Soil. *Catena*, 145: 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.026>
- Grant, P.R., 2017. Evolution, Climate Change, and Extreme Events. *Science*, 357(6350): 451–452. <https://doi.org/10.1126/science.aao2067>
- Grosso, S.J.D., Parton, W.J., Mosier, A.R., et al., 2005. Modeling Soil CO₂ Emissions from Ecosystems. *Biogeochemistry*, 73(1): 71–91. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0898-z>
- Guo, N., Lv, S.J., Lv, G.Y., et al., 2022. Effects of Warming and Precipitation on Soil CO₂ Flux and Its Stable Carbon Isotope Composition in the Temperate Desert Steppe. *Sustainability*, 14(6): 3351. <https://doi.org/10.3390/su14063351>
- Haaf, D., Six, J., Doetterl, S., 2021. Global Patterns of Geo-Ecological Controls on the Response of Soil Respiration to Warming. *Nature Climate Change*, 11: 623–627. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01068-9>
- Heckman, K.A., Possinger, A.R., Badgley, B.D., et al., 2023. Moisture-Driven Divergence in Mineral-Associated Soil Carbon Persistence. *PNAS*, 120(7): e2210044120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2210044120>
- Hoover, D.L., Knapp, A.K., Smith, M.D., 2014. Resistance and Resilience of a Grassland Ecosystem to Climate Extremes. *Ecology*, 95(9): 2646–2656. <https://doi.org/10.1890/13-2186.1>
- Hursh, A., Ballantyne, A., Cooper, L., et al., 2017. The Sensitivity of Soil Respiration to Soil Temperature, Moisture, and Carbon Supply at the Global Scale. *Global Change Biology*, 23(5): 2090–2103. <https://doi.org/10.1111/gcb.13489>
- Kesik, M., Blagodatsky, S., Papen, H., et al., 2006. Effect of pH, Temperature and Substrate on N₂O, NO and CO₂ Production by *Alcaligenes faecalis* P. *Journal of Applied Microbiology*, 101(3): 655–667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02927.x>
- Knapp, A.K., Beier, C., Briske, D.D., et al., 2008. Consequences of More Extreme Precipitation Regimes for Terrestrial Ecosystems. *Bioscience*, 58(9): 811–821. <https://doi.org/10.1641/b580908>
- Koltz, A.M., Gough, L., McLaren, J.R., 2022. Herbivores in Arctic Ecosystems: Effects of Climate Change and Implications for Carbon and Nutrient Cycling. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1516(1): 28–47. <https://doi.org/10.1111/nyas.14863>
- Legesse, T.G., Qu, L.P., Dong, G., et al., 2022. Extreme Wet Precipitation and Mowing Stimulate Soil Respiration in the Eurasian Meadow Steppe. *Science of the Total Environment*, 851: 158130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158130>

- Lellei-Kovács, E., Kovács-Láng, E., Botta-Dukát, Z., et al., 2011. Thresholds and Interactive Effects of Soil Moisture on the Temperature Response of Soil Respiration. *European Journal of Soil Biology*, 47(4): 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.05.004>
- Leppälampi-Kujansuu, J., Salemaa, M., Kleja, D. B., et al., 2014. Fine Root Turnover and Litter Production of Norway Spruce in a Long-Term Temperature and Nutrient Manipulation Experiment. *Plant and Soil*, 374(1): 73–88. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1853-3>
- Li, L., Qian, R., Wang, W., et al., 2020. The Intra- and Inter-Annual Responses of Soil Respiration to Climate Extremes in a Semiarid Grassland. *Geoderma*, 378: 114629. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114629>
- Li, L. B., Zhang, X. Y., Cai, D. W., 2021. Vertical Distribution of Soil Carbonate Concentration and the Carbon Isotopic Composition in Typical Soil Profiles from Guizhou Karst Areas, Southwest China. *Earth and Environment*, 49(4): 409–415(in Chinese with English abstract).
- Li, J. J., Huang, Y., Xu, F. W., et al., 2018a. Responses of Growing-Season Soil Respiration to Water and Nitrogen Addition as Affected by Grazing Intensity. *Functional Ecology*, 32(7): 1890–1901. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13118>
- Li, J. T., Wang, J. J., Zeng, D. H., et al., 2018b. The Influence of Drought Intensity on Soil Respiration during and after Multiple Drying - Rewetting Cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 127: 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.018>
- Li, J. Q., Pei, J. M., Fang, C. M., et al., 2023. Thermal Adaptation of Microbial Respiration Persists Throughout Long-Term Soil Carbon Decomposition. *Ecology Letters*, 26(10): 1803–1814. <https://doi.org/10.1111/ele.14296>
- Liu, L. L., Sayer, E. J., Deng, M. F., et al., 2023. The Grassland Carbon Cycle: Mechanisms, Responses to Global Changes, and Potential Contribution to Carbon Neutrality. *Fundamental Research*, 3(2): 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.09.028>
- Liu, L. L., Wang, X., Lajeunesse, M. J., et al., 2016b. A Cross-Biome Synthesis of Soil Respiration and Its Determinants under Simulated Precipitation Changes. *Global Change Biology*, 22(4): 1394–1405. <https://doi.org/10.1111/gcb.13156>
- Liu, T., Xu, Z. Z., Hou, Y. H., et al., 2016a. Effects of Warming and Changing Precipitation Rates on Soil Respiration over Two Years in a Desert Steppe of Northern China. *Plant and Soil*, 400(1): 15–27. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2705-0>
- Liu, Y., Ji, M., Liu, J. Z., et al., 2022. How Microbes in Glacier and Permafrost Record and Influence Climate Change? *Earth Science*, 47(10): 3825–3826(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., Zhao, J., 2000. Contribution of Carbonate Rock Weathering to the Atmospheric CO₂ Sink. *Environmental Geology*, 39(9): 1053–1058. <https://doi.org/10.1007/s002549900072>
- Liu, Z. H., MacPherson, G. L., Groves, C., et al., 2018. Large and Active CO₂ Uptake by Coupled Carbonate Weathering. *Earth-Science Reviews*, 182: 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.007>
- Lu, H. B., Li, S. H., Ma, M. N., et al., 2021. Comparing Machine Learning-Derived Global Estimates of Soil Respiration and Its Components with those from Terrestrial Ecosystem Models. *Environmental Research Letters*, 16(5): 054048. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf526>
- Luo, Y. Q., Sherry, R., Zhou, X. H., et al., 2009. Terrestrial Carbon Cycle Feedback to Climate Warming: Experimental Evidence on Plant Regulation and Impacts of Biofuel Feedstock Harvest. *Global Change Biology Bioenergy*, 1(1): 62–74. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2008.01005.x>
- Ma, M. G., Tang, X. G., Han, X. J., et al., 2019. Research Progress and Prospect of Observation and Simulation of Carbon Cycle in the Karst Areas of Southwest China. *Progress in Geography*, 38(8): 1196–1205(in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. L., Zhao, W. Q., Liu, M., et al., 2018. Research Progress on the Responses of Soil Respiration Components to Climatic Warming. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(10): 3477–3486(in Chinese with English abstract).
- Martin, J. B., 2017. Carbonate Minerals in the Global Carbon Cycle. *Chemical Geology*, 449: 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.11.029>
- Miao, Y., Han, H. Y., Du, Y., et al., 2017. Nonlinear Responses of Soil Respiration to Precipitation Changes in a Semiarid Temperate Steppe. *Scientific Reports*, 7: 45782. <https://doi.org/10.1038/srep45782>
- Ngaba, M. J. Y., Uwiragiye, Y., Bol, R., et al., 2023. Global Cross-Biome Patterns of Soil Respiration Responses to Individual and Interactive Effects of Nitrogen Addition, Altered Precipitation, and Warming. *Science of the Total Environment*, 858: 159808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159808>
- Niu, F. R., Chen, J., Xiong, P. F., et al., 2019. Responses of

- Soil Respiration to Rainfall Pulses in a Natural Grassland Community on the Semi-Arid Loess Plateau of China. *Catena*, 178:199–208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.020>
- Pfeiffer, M., Padarian, J., Vega, M. P., 2023. Soil Inorganic Carbon Distribution, Stocks and Environmental Thresholds along a Major Climatic Gradient. *Geoderma*, 433: 116449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116449>
- Qin, C. Q., Li, S. L., Waldron, S., et al., 2020. High-Frequency Monitoring Reveals How Hydrochemistry and Dissolved Carbon Respond to Rainstorms at a Karstic Critical Zone, Southwestern China. *Science of the Total Environment*, 714: 136833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136833>
- Rey, A., Oyonarte, C., Morán-López, T., et al., 2017. Changes in Soil Moisture Predict Soil Carbon Losses upon Rewetting in a Perennial Semiarid Steppe in SE Spain. *Geoderma*, 287: 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.025>
- Schimel, J. P., 2018. Life in Dry Soils: Effects of Drought on Soil Microbial Communities and Processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49: 409–432. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062614>
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., et al., 2011. Persistence of Soil Organic Matter as an Ecosystem Property. *Nature*, 478: 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Schwendenmann, L., Veldkamp, E., Brenes, T., et al., 2003. Spatial and Temporal Variation in Soil CO₂ Efflux in an Old-Growth Neotropical Rain Forest, La Selva, Costa Rica. *Biogeochemistry*, 64(1): 111–128. <https://doi.org/10.1023/a:1024941614919>
- Shen, Z. X., Li, Y. L., Fu, G., 2015. Response of Soil Respiration to Short-Term Experimental Warming and Precipitation Pulses over the Growing Season in an Alpine Meadow on the Northern Tibet. *Applied Soil Ecology*, 90:35–40. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.015>
- Song, J., Wan, S. Q., Piao, S. L., et al., 2019. A Meta-Analysis of 1, 119 Manipulative Experiments on Terrestrial Carbon-Cycling Responses to Global Change. *Nature Ecology & Evolution*, 3(9): 1309–1320. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0958-3>
- Soong, J. L., Castanha, C., Hicks Pries, C. E., et al., 2021. Five Years of Whole-Soil Warming Led to Loss of Subsoil Carbon Stocks and Increased CO₂ Efflux. *Science Advances*, 7(21): eabd1343. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1343>
- Sotta, E. D., Meir, P., Malhi, Y., et al., 2004. Soil CO₂ Efflux in a Tropical Forest in the Central Amazon. *Global Change Biology*, 10(5): 601–617. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00761.x>
- Sotta, E. D., Veldkamp, E., Guimarães, B. R., et al., 2006. Landscape and Climatic Controls on Spatial and Temporal Variation in Soil CO₂ Efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 237(1–3): 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.027>
- Steven, D. A., 2023. Microbial Drought Resistance may Destabilize Soil Carbon. *Trends in Microbiology*, 31(8): 780–787. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2023.03.002>
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., et al., 2013. The Knowns, Known Unknowns and Unknowns of Sequestration of Soil Organic Carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164: 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
- Su, R. L., Wu, X., Hu, J. L., et al., 2023. Warming Promotes the Decomposition of Oligotrophic Bacterial-Driven Organic Matter in Paddy Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 186: 109156. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109156>
- Suchet, P. A., Probst, J. L., 1995. A Global Model for Present-Day Atmospheric/Soil CO₂ Consumption by Chemical Erosion of Continental Rocks (GEM-CO₂). *Tellus B*, 47(1–2): 273–280. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.47.issue1.23.x>
- Suchet, P. A., Probst, J. L., Ludwig, W., 2003. Worldwide Distribution of Continental Rock Lithology: Implications for the Atmospheric/Soil CO₂ Uptake by Continental Weathering and Alkalinity River Transport to the Oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2):1038. <https://doi.org/10.1029/2002gb001891>
- Suseela, V., Dukes, J. S., 2013. The Responses of Soil and Rhizosphere Respiration to Simulated Climatic Changes Vary by Season. *Ecology*, 94(2): 403–413. <https://doi.org/10.1890/12-0150.1>
- Tan, X. Z., Gan, T. Y., Horton, D. E., 2018. Projected Timing of Perceivable Changes in Climate Extremes for Terrestrial and Marine Ecosystems. *Global Change Biology*, 24(10):4696–4708. <https://doi.org/10.1111/gcb.14329>
- Tiruvaimozhi, Y. V., Sankaran, M., 2019. Soil Respiration in a Tropical Montane Grassland Ecosystem is Largely Heterotroph-Driven and Increases under Simulated Warm-

- ing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276: 107619. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107619>
- Ullah, M. R., Carrillo, Y., Dijkstra, F. A., 2021. Drought-Induced and Seasonal Variation in Carbon Use Efficiency is Associated with Fungi: Bacteria Ratio and Enzyme Production in a Grassland Ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 155: 108159. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108159>
- Wang, H. H., Huang, W. D., He, Y. Z., et al., 2023. Effects of Warming and Precipitation Reduction on Soil Respiration in Horqin Sandy Grassland, Northern China. *Catena*, 233: 107470. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107470>
- Wang, J. S., Tian, D. S., Knapp, A. K., et al., 2021a. Precipitation Manipulation and Terrestrial Carbon Cycling: The Roles of Treatment Magnitude, Experimental Duration and Local Climate. *Global Ecology and Biogeography*, 30(9): 1909–1921. <https://doi.org/10.1111/geb.13356>
- Wang, J. S., Quan, Q., Chen, W. N., et al., 2021b. Increased CO₂ Emissions Surpass Reductions of Non-CO₂ Emissions More under Higher Experimental Warming in an Alpine Meadow. *Science of the Total Environment*, 769: 144559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144559>
- Wang, W., Chen, W. L., Wang, S. P., 2010. Forest Soil Respiration and Its Heterotrophic and Autotrophic Components: Global Patterns and Responses to Temperature and Precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(8): 1236–1244. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.013>
- Wood, T. E., Detto, M., Silver, W. L., 2013. Sensitivity of Soil Respiration to Variability in Soil Moisture and Temperature in a Humid Tropical Forest. *PLOS One*, 8(12): e80965. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080965>
- Wu, H. J., Lee, X. H., 2011. Short-Term Effects of Rain on Soil Respiration in Two New England Forests. *Plant and Soil*, 338(1): 329–342. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0548-2>
- Wu, X., Zhu, X. Y., Zhang, M. L., et al., 2013. Effects of Soil Temperature and Moisture on Soil Respiration in Epikarst. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(12): 1904–1908 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Li, Q. H., et al., 2022. Microbial Community Structure and Its Response to Environment in Mangrove Sediments of Dongzhai Port. *Earth Science*, 47(3): 1122–1135 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.025>
- Yang, H., Zhou, L., Huang, L. Y., et al., 2015. A Comparative Study of Soil Carbon Transfer between Forest Soils in Subtropical Karst and Clasolite Areas and the Karst Carbon Sink Effect in Guilin, Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 74(2): 921–928. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3903-4>
- Yang, Z. H., Luo, X. R., Shi, Y. H., et al., 2023. Controls and Variability of Soil Respiration Temperature Sensitivity across China. *Science of the Total Environment*, 871: 161974. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161974>
- Yu, H. Y., Liu, X. D., Ma, Q. H., et al., 2021. Climatic Warming Enhances Soil Respiration Resilience in an Arid Ecosystem. *Science of the Total Environment*, 756: 144005. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144005>
- Yu, Z., Ciais, P., Piao, S. L., et al., 2022. Forest Expansion Dominates China's Land Carbon Sink since 1980. *Nature Communications*, 13(1): 5374. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>
- Zhang, C. L., Huang, F., Pu, J. B., et al., 2021. Estimation of Karst Carbon Sink Fluxes and Manual Intervention to Increase Carbon Sinks in China. *Geological Survey of China*, 8(4): 40–52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qin, W., Feng, J., et al., 2023. Whole-Soil-Profile Warming does not Change Microbial Carbon Use Efficiency in Surface and Deep Soils. *PNAS*, 120(32): e2302190120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2302190120>
- Zhang, Y., Xie, Y. Z., Ma, H. B., et al., 2021. The Responses of Soil Respiration to Changed Precipitation and Increased Temperature in Desert Grassland in Northern China. *Journal of Arid Environments*, 193: 104579. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104579>
- Zhao, G. S., Huang, Q. B., Zhu, Y. N., et al., 2023. Simulation of the Buffering Process of Karst Soil on Sulfuric Acid Rain and the Characteristic of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and the Carbon Sink Flux in Guilin City, Southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 82(12): 296. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10948-6>
- Zhao, M., Guo, S. L., Wang, R., 2021. Diverse Soil Respiration Responses to Extreme Precipitation Patterns in Arid and Semiarid Ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 163: 103928. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103928>
- Zhou, L. Y., Zhou, X. H., Zhang, B. C., et al., 2014. Different Responses of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen Addition among Biomes: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, 20(7): 2332–2343. <https://doi.org/10.1111/gcb.12490>

Zhu, B., Cheng, W. X., 2011. Rhizosphere Priming Effect Increases the Temperature Sensitivity of Soil Organic Matter Decomposition. *Global Change Biology*, 17(6): 2172–2183. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02354.x>

Zhu, C. C., 2021. Study on the Characteristics of Soil Respiration and Its Influencing Factors in Karst Region (Dissertation). Guizhou Normal University, Guiyang, 34–40 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

戴磊, 王贵玲, 何雨江, 2021. 基于分形理论研究土壤结构及其水分特征关系. *地球科学*, 46(9):3410–3420.

李龙波, 张兴勇, 蔡大为, 2021. 贵州喀斯特地区典型土壤碳酸盐垂直分布特征及其同位素组成研究. *地球与环境*, 49(4):409–415.

刘勇勤, 计慕侃, 刘军志, 等, 2022. 青藏高原冰川冻土微生物

如何记录和影响气候变化? *地球科学*, 47(10):3825–3826.

马明国, 汤旭光, 韩旭军, 等, 2019. 西南岩溶地区碳循环观测与模拟研究进展和展望. *地理科学进展*, 38(8):1196–1205.

马志良, 赵文强, 刘美, 等, 2018. 土壤呼吸组分对气候变暖的响应研究进展. *应用生态学报*, 29(10):3477–3486.

吴夏, 朱晓燕, 张美良, 等, 2013. 岩溶表层带土壤温度和含水率对呼吸作用的影响. *生态环境学报*, 22(12):1904–1908.

张春来, 黄芬, 蒲俊兵, 等, 2021. 中国岩溶碳汇通量估算与人工干预增汇途径. *中国地质调查*, 8(4):40–52.

张攀, 谢先军, 黎清华, 等, 2022. 东寒港红树林沉积物中微生物群落结构特征及其对环境的响应. *地球科学*, 47(3):1122–1135.

朱粲粲, 2021. 岩溶地区土壤呼吸特征及其影响因素研究(硕士学位论文). 贵阳: 贵州师范大学, 34–40.