

DOI: 10.5846/stxb202103200738

章程,汪进良,肖琼,苗迎, Mitja Prelovsek. 斯洛文尼亚典型岩溶区土壤剖面 CO₂ 冬季动态变化特征. 生态学报, 2022, 42(8): 3288-3299.

Zhang C, Wang J L, Xiao Q, Miao Y, Mitja Prelovsek. Wintertime CO₂ changes in a typical karst soil profile in Slovenia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3288-3299.

斯洛文尼亚典型岩溶区土壤剖面 CO₂ 冬季动态变化特征

章程¹, 汪进良¹, 肖琼¹, 苗迎¹, Mitja Prelovsek²

1 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004

2 斯洛文尼亚科学与艺术学院岩溶研究所, 波斯托尼亚 SI-6230

摘要: 土壤 CO₂ 是岩溶作用的重要驱动力, 也是陆地生态系统碳循环与岩溶碳循环的纽带。选择斯洛文尼亚典型岩溶区草地生态系统土壤剖面, 开展大气与土壤 CO₂、土壤水分与土壤温度等指标高分辨率监测, 分析不同指标动态变化、分层效应及相互关系。结果表明, 土壤温度、水分和 CO₂ 含量变幅分别为 3.8—12.9℃、26.9%—34.7% 和 (682—6760) × 10⁻⁶。土壤温度变化趋势与气温变化一致, 上部土壤层随气温出现昼夜变化, 响应敏感, 下部土壤层则表现为多日变化; 土壤水分变化主要受降雨控制, 对降雨过程响应及时, 不同深度分层效应显著, 上部与下部含量较高, 暗示草地根系有利于土壤水分保持, 土岩界面的存在可能是下部保持较高水分的原因。土壤 CO₂ 含量总体上受土温控制, 随着深度增加逐渐升高。降雨过程中, 不同深度土壤 CO₂ 含量均有不同程度且较快速的升降现象, 暗示雨水入渗土壤层后产生的活塞效应和随后的向下迁移是导致土壤 CO₂ 含量陡升陡降的主要原因。从降雨过程大气 CO₂ 含量有较大幅度降低的现象看, 说明来自大气与土壤 CO₂ 均参与了下伏碳酸盐岩的溶蚀过程, 揭示在湿冷的地中海气候岩溶区, 受生态系统控制的 CO₂ 可为下伏碳酸盐岩溶蚀提供驱动力, 其产生的碳汇可能是整个生态系统碳汇的重要组成部分。

关键词: 土壤温度; 土壤水分; 土壤 CO₂; 高分辨率监测; 分层效应; 斯洛文尼亚

Wintertime CO₂ changes in a typical karst soil profile in Slovenia

ZHANG Cheng¹, WANG Jinliang¹, XIAO Qiong¹, MIAO Ying¹, Mitja Prelovsek²

1 Karst Dynamics Key Laboratory of Ministry of Natural Resources/Guangxi Zhuang Autonomous Region, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China

2 Karst Research Institute, Slovenian Academy of Sciences and Arts, Postonja SI-6230, Slovenia

Abstract: Soil CO₂ is a key driving force for karst processes, as well as the link between carbon cycle in terrestrial ecosystem and karst carbon cycle. A typical soil profile of meadow ecosystem in karst region of Slovenia was selected for the purpose of implementing high resolution monitoring of parameters, including contents of atmospheric CO₂ and soil CO₂, soil temperature and soil moisture, etc. The variations with days and at different depths of these parameters were analyzed, and the layered effect and parameters' relationship also were discussed. The results showed that soil temperature, soil moisture and soil CO₂ content ranged from 3.8℃ to 12.9℃, 26.9% to 34.7% and 682 × 10⁻⁶ to 6760 × 10⁻⁶ respectively. Soil temperature changed in accordance with air temperature; moreover, soil temperature at upper layer was much sensitive to air temperature thus presenting daily variation, while lower layer showed less daily fluctuation. Soil moisture mainly was controlled by rainfall and responded to rain events promptly. Layered effects at different depths were remarkable both in soil

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFE0204700); 科技部援外项目(KY201802009); 广西科技计划项目(桂科 AD17129047); 中国科学院国际合作局项目(132852KYSB20170029-01)

收稿日期: 2021-03-20; **网络出版日期:** 2021-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangcheng@mail.cgs.gov.cn

moisture and soil CO₂. Soil moisture lowered and then raised with increase of soil depth, implying that grass roots were favored for soil moisture maintenance, and high moisture content at lower soil part might be caused by the halt of rock-soil interface below. Soil CO₂ content was overall controlled by soil temperature, presenting a significant positive correlation each other. During the rain events, soil CO₂ contents at various layers all exhibited behavior of “rapid ascending and descending”, suggesting that it was possibly resulted from the pulse effect caused by rainfall infiltration and consequent downward movement. Additionally, atmospheric CO₂ content also showed a remarkable decrease during the rainfall, which could be explained that CO₂ both from atmosphere and soil were involved in underlying carbonate rock dissolution. Rainfall processes can not only mitigate soil CO₂ emission to atmosphere, but also dissolve atmospheric CO₂ and flow into the underlying karst aquifer system. This observation revealed that ecosystem controlled CO₂ acted as an important driving force for underlying carbonate rock dissolution in wet/cold Mediterranean climatic karst region. The resulting carbon sink could be an important part of the whole ecosystem carbon sink. Accordingly, it is suggested that carbon sink enhancement resulted from karst processes should be considered as well as carbon sink increase from vegetation restoration and soil amelioration in the development of carbon cycle monitoring plans and carbon sink estimation in karst area, especially in implementation of comprehensive treatment projects of rock desertification.

Key Words: soil temperature; soil moisture; soil CO₂ content; high resolution monitoring; layered effect; Slovenia

碳酸盐岩溶蚀因其快速的反应动力学过程及其对环境变化的敏感性特点^[1-4],决定了岩溶系统水文地球化学特征具有显著的季节变化和对降雨过程的快速响应^[5-6],而且随土地利用的变化而变化^[7-9],因而是现今全球碳循环的积极参与者和贡献者^[10-12]。目前,全球碳循环研究面临碳收支不平衡现状,存在巨大的“遗漏碳汇”^[13-14]。岩溶作用吸收大气或土壤 CO₂,从已有全球或中国因岩溶作用消耗的 CO₂ 估算量看,可能是潜在的重要碳汇项^[15-17]。主要问题是岩溶作用形成的碳汇量在数量级上是否可与陆地生态系统碳汇相比拟,成为岩溶区生态系统碳汇的重要组成部分,气候、水文条件等短时间尺度因子如何影响土壤 CO₂ 的变化,进而影响下伏碳酸盐岩的溶蚀过程^[18]。因此,岩溶作用驱动力 CO₂ 的监测与研究显得十分重要和具有现实意义。

土壤 CO₂ 主要来自植物根系呼吸作用、微生物代谢活动及有机质分解,受温度与水分控制具有显著的季节变化,已有的监测数据表明在水热配套西南岩溶区土壤剖面 CO₂ 存在中间高上下部低的双向梯度^[19],暗示上部 CO₂ 向大气释放、下部被碳酸盐溶蚀消耗,意味着 CO₂ 环境敏感性尤其是降雨效应监测将直接关系到岩溶碳循环过程的精细刻画,碳汇强度的评估。以往研究较多关注岩溶系统输出端岩溶泉、地下河出口和岩溶区河流^[20-21],多从水文地球化学或生物地球化学角度探讨岩溶碳循环及碳汇稳定性和通量^[22-23],较少关注输入端 CO₂ 来源问题^[24],而从全球尺度讲,受生态系统控制的土壤 CO₂ 分压可以用来表征流域出口水体钙镁离子含量^[25],也就是说,土壤 CO₂ 可以用来评估或预测岩溶作用碳循环强度,因此,土壤 CO₂ 季节变化及其降雨效应的研究可为该方法在生态系统尺度的应用提供科学积累。从地球关键带理念和系统角度考虑,需要综合探究 CO₂ 从大气、土壤层到岩溶含水层的运移行为与作用方式,才能全面揭示岩溶系统碳循环特征及其碳汇效应。在全球岩溶类型中,斯洛文尼亚是地中海气候岩溶的典型代表,如同中国西南岩溶代表热带亚热带岩溶类型。斯洛文尼亚也是“喀斯特”一词发源地,被称为经典喀斯特研究的摇篮,以发育坡立谷、斗淋、峡谷型地下河著称。“喀斯特”原意是裸露的石头,经过数十年的恢复,目前大部分已被人工林地或草地覆盖,而生态修复过程增汇效应的监测对岩溶贡献碳汇能否进入温室气体源汇清单十分关键,选择斯洛文尼亚典型生态系统开展冬雨季节监测研究,有助于加深对地中海气候岩溶碳循环的认识,为全球岩溶碳汇的评估提供基础数据。本文就是围绕这一目的,依托科技部援外项目,与斯洛文尼亚岩溶研究所合作进行的探索性尝试。

1 研究区概况

斯洛文尼亚位于欧洲中南部,地处阿尔卑斯山和亚得里亚海之间,面积为 20273 km²。与中国西南水热配套的亚热带季风气候不同,斯洛文尼亚属于典型的地中海气候,夏季炎热干燥,冬季温和多雨,多年平均气温 10.9℃,平均降雨量 1363 mm^[26]。2019 年冬季(11 月份至次年 3 月份)累计降雨量为 336 mm。森林和草地覆盖率分别为 49.7%和 27.6%。斯洛文尼亚的岩溶面积达 8800 km², 占总面积的 43.4%,主要类型有阿尔卑斯岩溶、第纳尔岩溶和孤立状岩溶,其中发育于侏罗系-白垩系石灰岩和白云岩的第纳尔岩溶是欧洲最主要的岩溶类型^[27](图 1)。研究区位于第纳尔岩溶中部波斯托尼亚(Postojna)地区普拉尼娜(Planina)岩溶流域,主要地貌类型为坡立谷^[28-30]。监测站点位于 Cerknica 坡立谷边缘,海拔 720 m,是典型的草地土壤生态系统,土壤深度一般为 30—60 cm,下伏基岩岩性为侏罗系石灰岩。

2 研究方法

利用发明专利技术“一种土壤二氧化碳浓度的监测装置及监测方法”(专利号:ZL201510606453.3)^[31],开展土壤 CO₂等指标高分辨率在线监测(图 1)。监测指标包括:大气温度、湿度、CO₂含量(体积分数),测量精度分别为 0.01℃、0.1%、1×10⁻⁶,监测装置位于距离地面 1.5 m 高度空中;土壤温度、水分和 CO₂含量,精度分别为 0.01℃、0.1%、1×10⁻⁶。考虑到研究区土壤深度一般在 30—60 cm,土下设置 20 cm、30 cm 和 50 cm 三个不同深度安装电极,同步监测土壤温度、水分与 CO₂含量。20 cm 深度用于监测草地根系层的作用,50 cm 用于监测下部岩土界面的影响。监测工作开始于 2019 年 11 月 15 日,每 5 min 记录一组数据,至 2020 年 3 月 31 日(此后数据因 CO₂电极故障未能及时更换而中断),共获取数据 39600 余组。

每 30 min 降雨量来自距离监测点约 4 km 的 Nova Vas 雨量站(斯洛文尼亚环境署(ARSO)国家气象站点)^[26]。数据处理和图件制作使用 Excel 软件和 Origin8.0 绘图软件。

3 结果

表 1 为大气温度、湿度与 CO₂含量,不同深度土壤温度、水分和 CO₂含量等指标最大最小与均值统计结果,可以看出,冬季气温和湿度变化较大,气温变化值为-9—20.5℃,平均值为 4℃,湿度变化值为 15.3%—100%,均值为 77.6%,大气 CO₂含量变幅为(356—489)×10⁻⁶,均值为 427×10⁻⁶。

表 1 不同深度土壤温度、水分、CO₂含量

Table 1 Temperature, moisture and CO₂ concentration in various soil depths

项目 Item	指标 Parameters ⁽¹⁾	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	
大气 Atmosphere	温度/℃	T-air	-9	20.5	4
	CO ₂ /×10 ⁻⁶	CO ₂ -air	356	489	427
	湿度/%	RH	15.3	100	77.6
土壤 Soil	温度/℃	T-20	3.8	12.9	7.6
		T-30	4.2	11.7	7.4
		T-50	5.2	11.8	7.7
	水分/%	M-20	28.4	34.2	30.6
		M-30	26.9	32.7	28.8
		M-50	27.7	34.7	29.4
	CO ₂ /×10 ⁻⁶	CO ₂ -20	682	5404	1558
		CO ₂ -30	821	5404	2072
		CO ₂ -50	1040	6760	2469

(1)T: 温度; M: 水分; CO₂: 二氧化碳; 右侧数值为土壤深度(cm); air: 大气; RH: 湿度

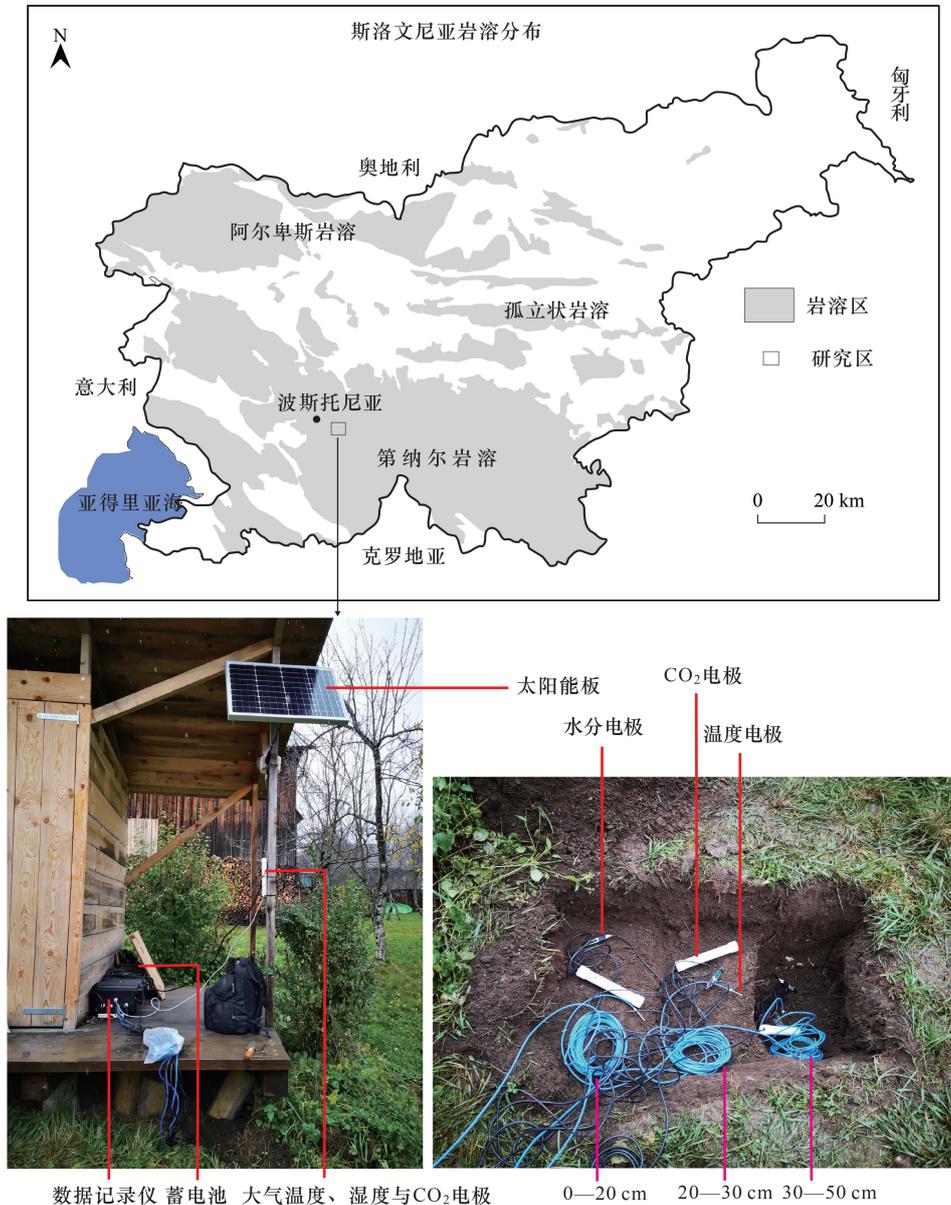


图1 研究区位置与土壤监测装置

Fig.1 Location of study area and the soil monitoring devices

不同深度土温变幅较小,为 3.8—12.9℃,平均为 7.6℃。土壤水分变化不明显,为 26.9%—34.7%,平均值 29.6%,说明降雨对土壤水分保持的重要性,总体上,表层土壤和下部土壤水分略高于中部土壤层。大气 CO₂ 均值为 427×10⁻⁶,变化范围为 356—489×10⁻⁶;不同深度土壤 CO₂ 含量变化相对较大,监测期间变化范围为 682—6760×10⁻⁶,随深度增加而上升,土下 20 cm,30 cm 和 50 cm 深度 CO₂ 含量均值分别为 1558×10⁻⁶,2072×10⁻⁶和 2469×10⁻⁶,受冬季低温微生物活动相对较弱影响,总体上土壤 CO₂ 含量相对较小。

各监测指标变化曲线见图 2,可以看出,大气湿度与 CO₂ 昼夜变化较大,大气 CO₂ 变化趋势与气温相反,即气温上升会导致大气 CO₂ 含量下降,两者呈现显著的负相关关系(图 3)。土壤温度随着冬季的来临呈逐渐下降趋势,受气温影响局部出现回升现象,但存在一定时间的滞后,低值区位于 1 月隆冬期间,可能与该阶段气温低且往往有积雪覆盖有关,此后土壤温度逐渐上升,昼夜变化尤其是上部土壤层变得十分显著,冬季早期下部土壤温度高于上部,后期则相反。土壤 CO₂ 含量总体上与土壤温度变化趋势一致,剖面上均表现为随深度

增加而上升。土壤水分变化曲线波峰与降雨事件有很好的对应关系,即每次降雨过程都会导致土壤水分的陡升陡降(图2)。

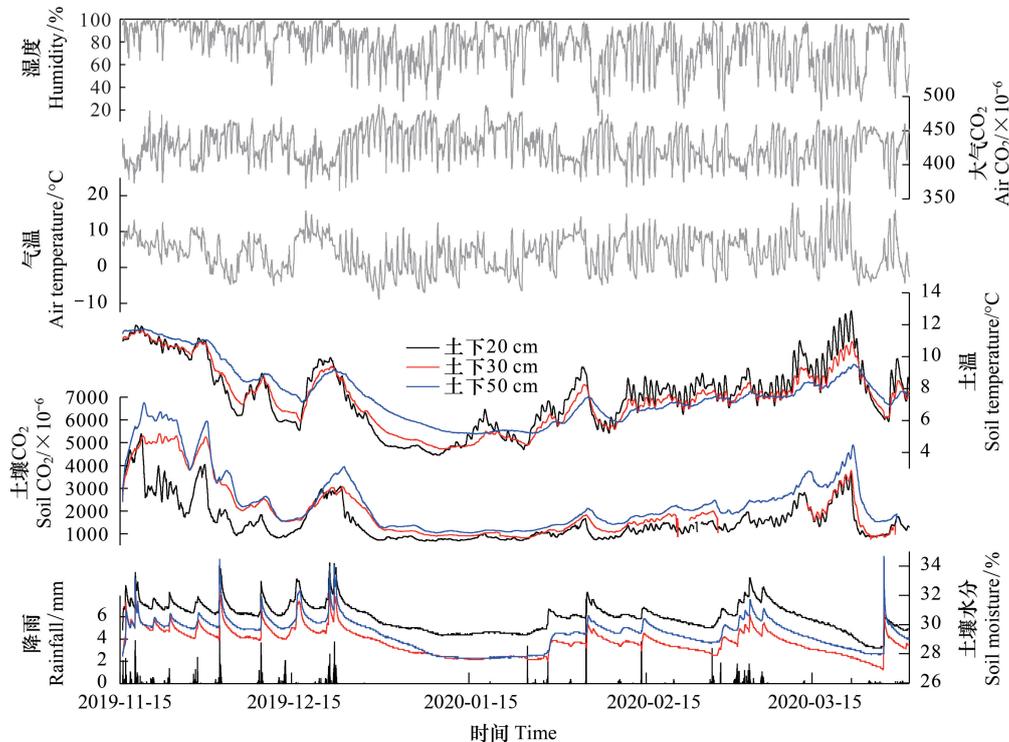


图2 大气与土壤监测指标变化曲线

Fig.2 Variation of monitoring parameters in air and soil

4 讨论

4.1 大气 CO₂ 昼夜变化及降雨效应

受气温影响,大气 CO₂ 含量呈现昼夜变化特征,即白天气温升高,CO₂ 含量下降,夜间则相反,但会受到降雨事件的干扰,降雨过程可导致大气 CO₂ 含量较大幅度的下降,昼夜变幅变小(图4),暗示部分 CO₂ 被雨水吸收,随水体渗入土壤层进入下伏岩溶含水层系统参与岩溶作用过程,有利于溶蚀作用强度的提升^[32]。

4.2 土壤温度分层与降雨效应

土壤温度总体上与气温变化趋势一致,即随着冬季气温的下降,土壤温度也随之降低,整个冬季土壤温度变化曲线呈 U 字形分布,但不同深度土壤温度变化差异仍然较大,分层效应显著(图5)。土下 20 cm 土壤温度变化受气温影响,一方面呈现较显著的白天升高夜间下降的昼夜变化,另一方面,在冬季早期低于土下 30 cm 和土下 50 cm 温度,反映上部土壤温度对昼夜气温变化响应敏感;下部土壤温度曲线波动减弱,由于热传导衰减原因,土温日变幅不显著,呈现多日动态变化特征,且受热传导影响略滞后于气温^[33],土下 20 cm 日最高土温多位于下午 6 点左右,意味着滞后最高气温约

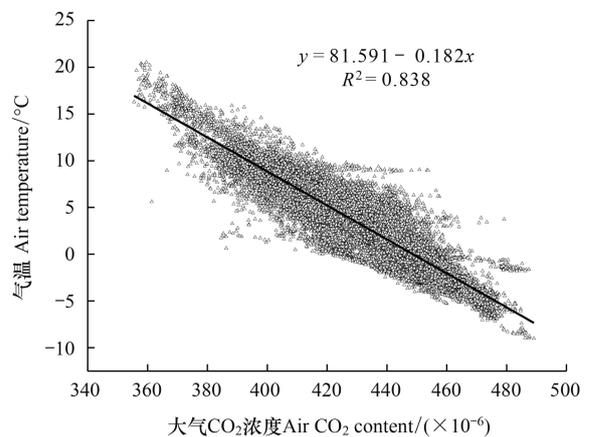
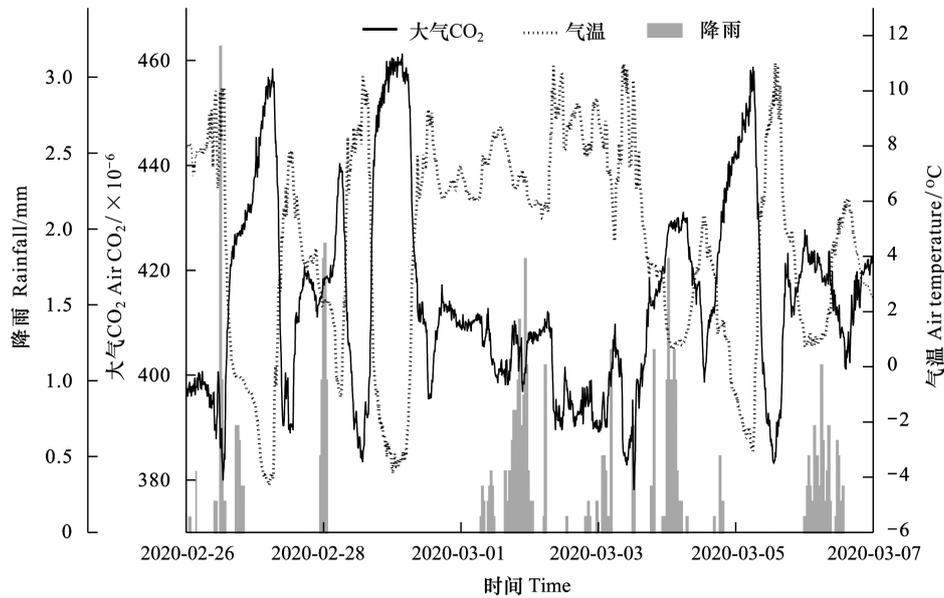


图3 大气 CO₂ 含量与气温负相关关系

Fig.3 Negative relationship between air temperature and CO₂ content

图4 气温与大气 CO₂ 含量昼夜变化(2020.2.26—3.6)Fig.4 Daily changes of air temperature and atmospheric CO₂ content

3—5 h。隆冬季节受降雪覆盖影响, 土下温度昼夜变化不显著, 冬季后期随着气温的回升, 土下 20 cm 土壤温度快速回升, 总体上土温高于下部土壤温度, 揭示上部土壤层温度对环境温度较敏感, 在冬季不同时段出现较大的变化。

土下 30 cm 和 50 cm 土壤温度总体变化趋势与土下 20 cm 温度变化一致, 但随着土壤深度的增加, 昼夜变化越来越弱, 代之以较平缓的变化幅度较小的多日变化。在冬季早期, 土壤温度随深度增加而升高, 冬季后期则相反, 随着深度增加而降低(图 5)。

降雨事件可以显著干扰昼夜热变幅, 由于水的比热高, 当土壤水分处于较高水平至饱和状态时, 土壤温度则易保持稳定, 但当水分快速减少时昼夜热变幅会加大, 如无雨日土温昼夜变幅显著大于降雨日(图 6)。如 2020 年 3 月 1 日至 3 日连续降雨期间, 土下 20 cm 土壤温度昼夜变幅只有 0.3—0.75°C, 而晴天的昼夜变幅高达 1.3—2.0°C

4.3 土壤水分的降雨与界面效应

由于降雨较充沛且分配较均匀, 气温较低蒸发量较小, 冬季土壤水分相对保持在 27%—33.5% 区间较高的水平, 但不同深度分层效应显著, 对降雨过程响应及时(图 7), 降雨过程水分上升幅度为一般在 1%—3%, 最高达 6.5%。总体上, 土下 20 cm 土壤水分相对较高, 其次为土下 50 cm, 土下 30 cm 土壤水分含量最低, 即随着深度增加, 土壤水分呈现先降低后升高趋势, 暗示草地根系有利于土壤水分保持, 中部土壤水分受下渗流的影响, 部分补给下部土壤层, 下部土岩界面的存在可能是土下 50 cm 保持较高水分的原因^[34—37]。因为在灰岩岩溶区, 土壤剖面不发育 C 层, 即缺少基岩风化层, 也就是说基岩与土壤为硬接触, 而灰岩孔隙裂隙率一般均较低, 导致土壤水到达岩土界面后出现滞水现象。在冬季早期和后期, 伴随降雨过程不同深度土壤水分均出现陡升陡降的特征, 说明土壤水分变化主要受降雨控制。无雨期间土壤水分会持续且以较快速度下降。

隆冬降雪覆盖期间(1 月份), 土壤水分则相对稳定, 波动微弱且具有逐渐下降的趋势, 但下部土壤水分下降幅度要大于上部, 呈现低值区, 上部和中下部水分分别稳定在 29.5% 和 28% 左右, 可能与无降雨期间上部土壤层水分蒸发减小, 下部土壤层水分向下入渗有关。冬春之交土壤水分持续减小, 可能与降雨偏少及气温回升密切相关, 气温回暖会导致水分蒸发加剧。

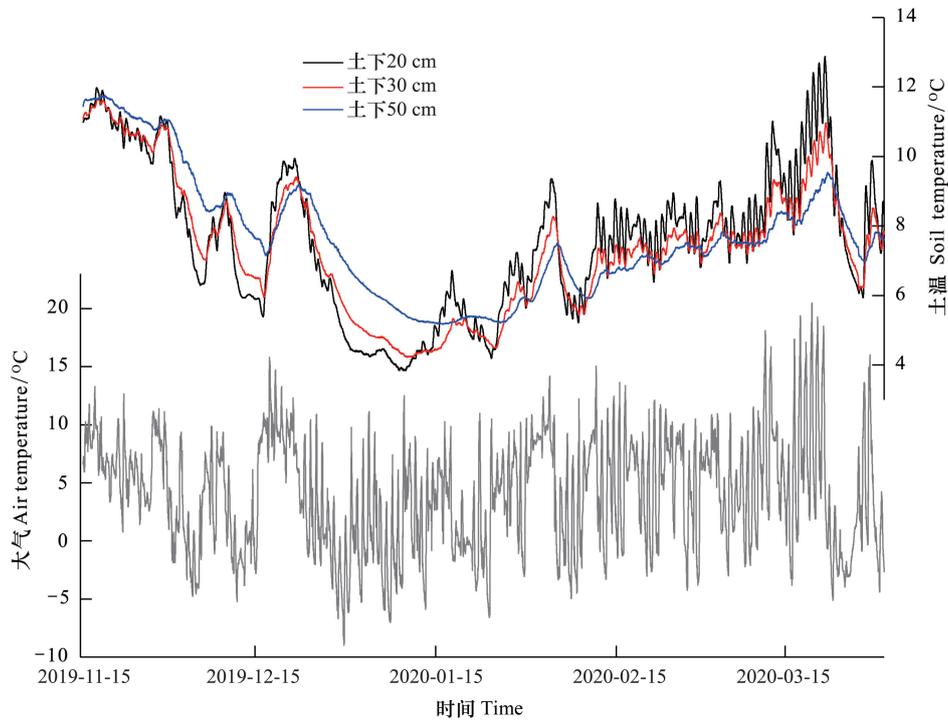


图5 冬季不同深度土壤温度变化曲线及其与气温的关系

Fig.5 Variations of soil temperatures in different depths

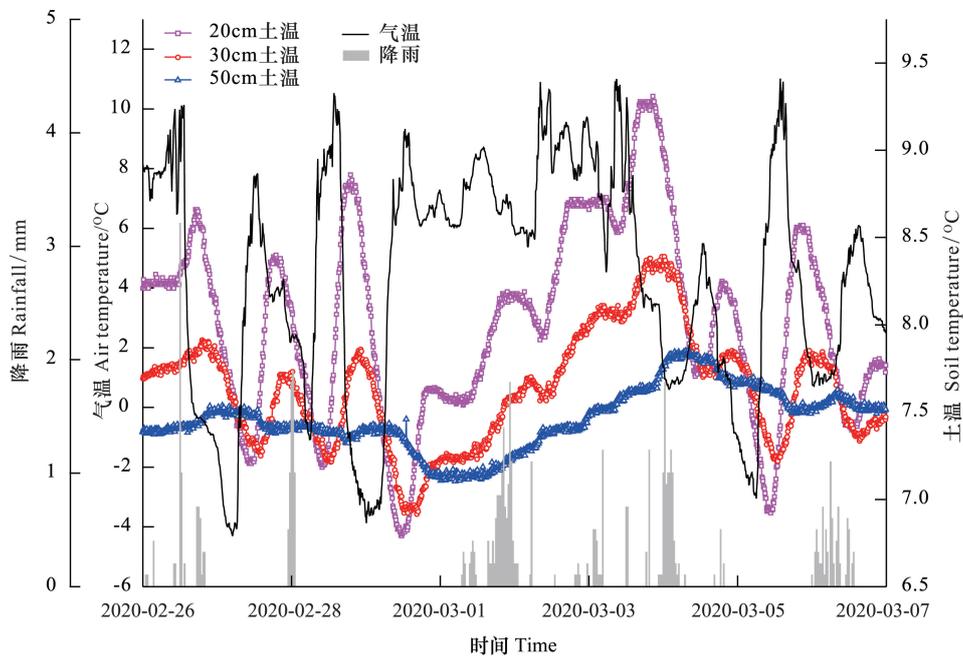


图6 土温昼夜变化及降雨效应

Fig.6 Daily changes of soil temperature and rainfall effect

4.4 土壤 CO₂变化的温度与水分效应

冬季土壤 CO₂ 含量总体上受土温控制,即随着土温的下降而减小,隆冬降雪覆盖时期出现相对稳定的低值区,此后随着土温回升又逐渐增加(图 2),两者之间具有较显著的正相关关系也证实了这点(图 8),说明土

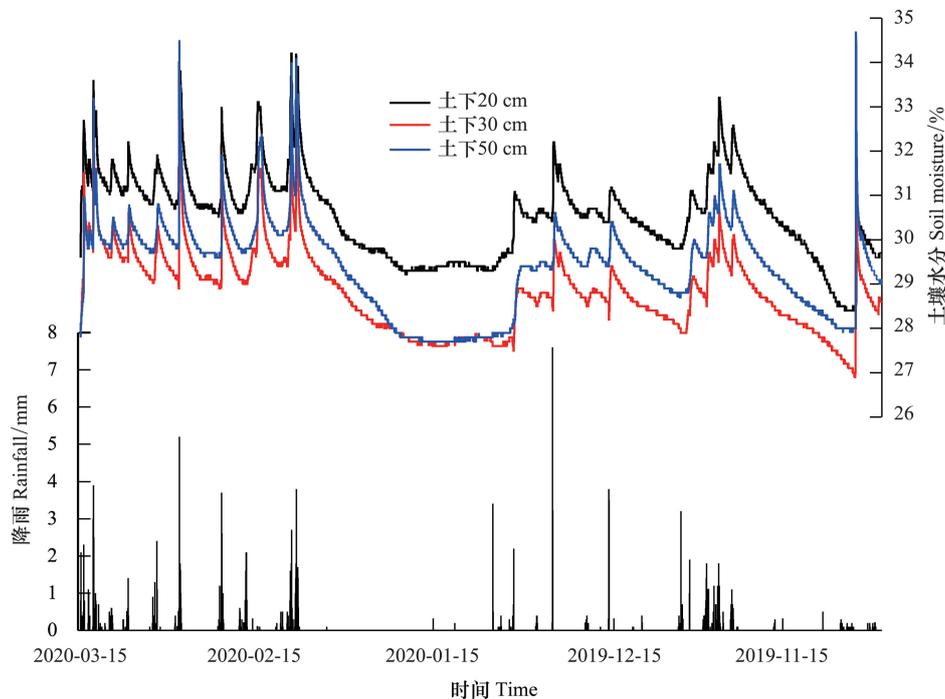


图 7 不同深度土壤水分变化及降雨影响

Fig.7 Variations of soil moistures in different depths and the impact of rainfall

壤温度的上升可促进土壤微生物活动与有机质降解,进而释放更多 CO₂^[38-39],而土壤温度又与气温密切相关,证实土壤 CO₂的变化主要受季节性气温变化控制^[40-41]。土下 20 cm 土壤 CO₂含量相对较低,随着深度增加,CO₂含量逐渐升高。总体上 CO₂含量低于中国云南石林岩溶区草地秋季土壤^[34]。在降雨过后观测到不同深度土壤 CO₂含量均有不同程度且较快速的升降现象(图 9),暗示雨水入渗土壤层后产生的活塞效应和随后的向下迁移是导致土壤 CO₂含量陡升陡降的主要原因,一般认为土壤空气 CO₂含量随着深度递增是由于土壤 CO₂的不断产生以及较低的向上或向下的扩散速率的降低,尤其是当有下部基岩的阻碍^[42-43]。从降雨过程大气 CO₂含量有较大幅度降低的现象看,降雨过程溶解部分大气 CO₂进入土壤层,说明来自大气与土壤 CO₂均参与了下伏碳酸盐岩的溶蚀过程。降雨过程一方面可遏制土壤 CO₂向大气的逸出,同时携带大气 CO₂进入下伏岩溶含水层,揭示岩溶作用过程对大气 CO₂同时具有减源与碳汇效应。

不同深度土壤 CO₂含量与土壤温度之间指数相关曲线见图 8,揭示土壤温度区间及变幅对土壤 CO₂含量变化的影响,土温在 4—8℃ 区间,温度每上升 1℃ 产生的土下 CO₂含量上升幅度为 $(130-530) \times 10^{-6}$,土温在 8—12℃ 区间,则为 $(400-1430) \times 10^{-6}$ 。可见低温区土壤 CO₂含量较低变幅较小,当土温大于 8℃ 后,单位温度梯度产生的 CO₂变幅显著增加,土壤下部的变幅又大于上部。监测期间总体上温度较低,但 CO₂含量对温度变化的敏感性特征,十分有利于土壤层维持在较高 CO₂含量的水平,进而为土下溶蚀作用的持续进行提供驱动力。图 10 是根据土温、水分与 CO₂含量监测数据制作的 CO₂含量等值线图,反映土壤 CO₂含量变化主要受土壤温度和水分共同控制,但土温在 11℃ 以下似乎仅受温度控制。总体上,土壤 CO₂含量随着土壤温度的增加而增加,从土温 5℃ 左右时的低于 1000×10^{-6} 上升到温度 11℃ 左右的大于 5000×10^{-6} 。当土温上升到 12℃ 左右、水分在 31%—32% 范围出现一个土壤 CO₂高值区,反映较高的土温和适宜的水分含量有利于微生物呼吸作用与代谢活动,进而释放更多的 CO₂。研究表明土壤水分会对土壤 CO₂释放产生负面效应^[44-46],即存在所谓的“双峰效应”(Bimodal effect)。过高的水分(大于临界值)导致土壤孔隙被水充填,从而减弱微生物活动影响 CO₂产出,也影响 CO₂的传输与逸出^[47-49]。

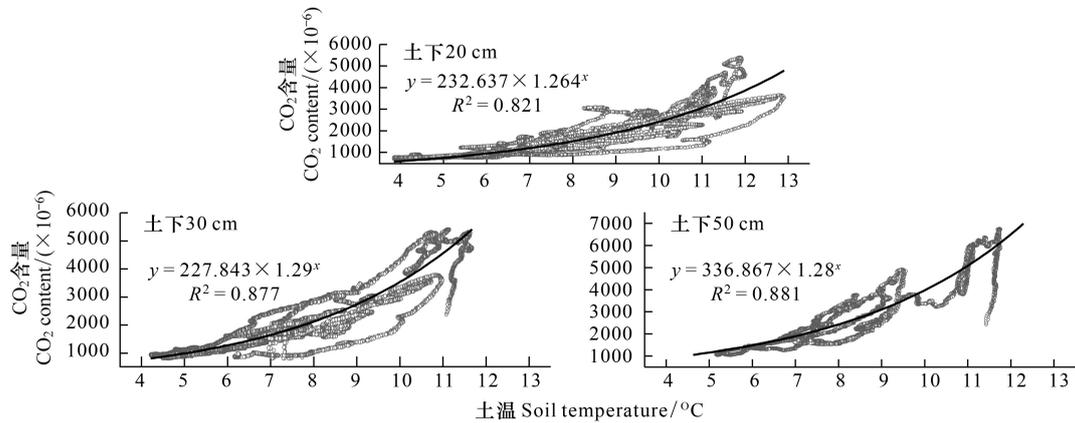


图8 不同深度土壤 CO₂与土温相关关系

Fig.8 Relationship between soil CO₂ contents and temperatures in different depths

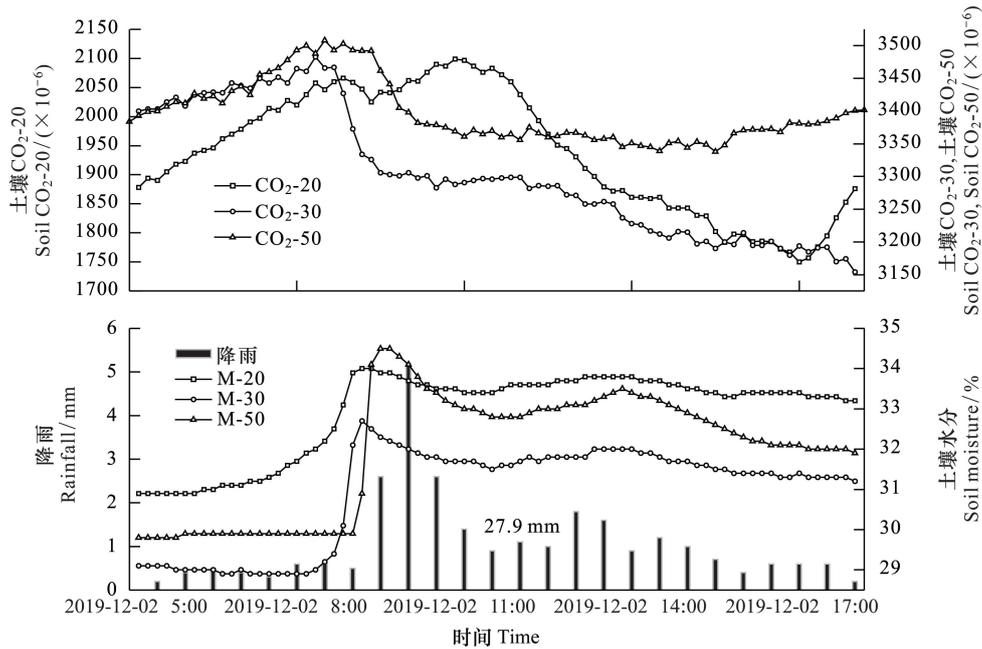


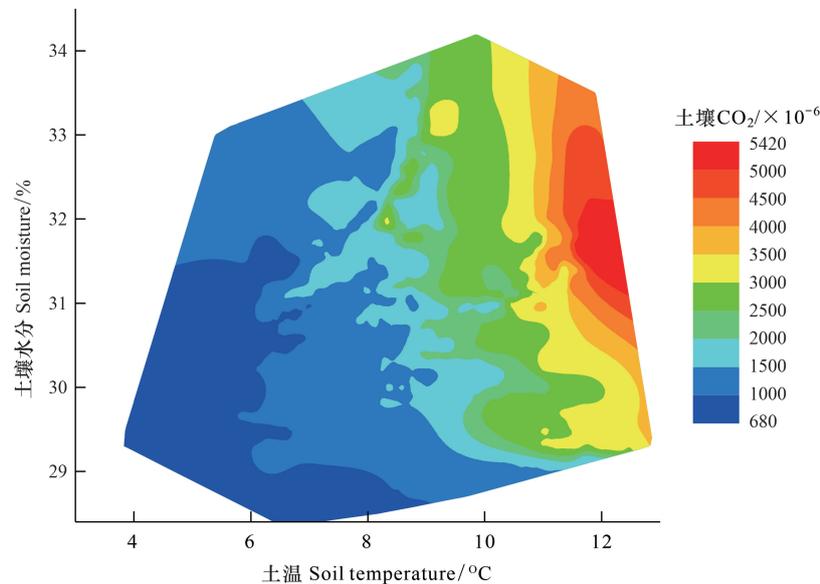
图9 强降雨条件下土壤水分和 CO₂变化

Fig.9 Changes of soil CO₂ and moisture during storm water event

温度和土壤水分是反映气候条件的两个特征指标^[50],也是控制土壤呼吸的两个关键因子^[51]。水分的增加直接影响土壤微生物活动,同时减小气液相扩散速率,并限制 O₂和其它气体的供给^[52-53]。另一方面,较低的土壤水分含量不利于植物生长和土壤微生物活动^[54]。这些条件较好地解释了研究区土壤 CO₂的分布形态(图 10)。

4 结论

高分辨率在线监测表明,土壤温度与 CO₂含量对环境因子变化极其敏感,不同深度分层效应显著。尤其是上部土壤层,两者既有昼夜动态也有多日动态变化特征。季节尺度上土壤 CO₂含量主要受土温控制,两者具有显著的指数相关关系,温度越高,其温度梯度产生的 CO₂变幅越大,意味着冬季土温的快速下降可导致土

图 10 土下 20cm 土壤 CO₂ 含量等值线图Fig.10 Contour map of CO₂ contents at soil depth of 20 cm

壤 CO₂ 含量快速下降,春季土温的快速上升可导致土壤 CO₂ 含量的快速回升。由于降雨较充沛,土壤水分总体上保持在较高水平,但受降雨过程影响,出现陡升陡降。降雨期间大气 CO₂ 含量有下降现象,土壤 CO₂ 也表现为先上升后下降的特点,证实雨水溶解部分大气 CO₂ 进入土壤层,并进一步溶解土壤 CO₂ 通过脉冲效应使得 CO₂ 向下迁移补给下伏岩溶含水层,因而促进岩溶作用的持续进行,同时可缓解土壤 CO₂ 向大气释放。也就是说,在湿冷的地中海气候岩溶区,受生态系统控制的 CO₂ 仍可为下伏碳酸盐岩溶蚀提供驱动力,其产生的碳汇可能是整个生态系统碳汇的重要组成部分,因而在岩溶区碳汇估算中,不仅要考虑石漠化治理产生的植被与土壤改良增汇,同时也要考虑岩溶作用产生的增汇效应。

参考文献 (References):

- [1] Merkel B J, Planer-Friedrich B. Groundwater Geochemistry. Berlin: Springer, 2005: 1-200.
- [2] Ford D, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chichester: John Wiley & Sons, 2007: 1-562.
- [3] Liu Z H, Groves C, Yuan D X, Meiman J. South China karst aquifer storm-scale hydrochemistry. Ground Water, 2004, 42(4): 491-499.
- [4] 章程. 不同土地利用下溶蚀速率季节差异及其影响因素——以重庆金佛山为例. 地质论评, 2010, 56(1): 136-140.
- [5] Zhang C, Yuan D X, Cao J H. Analysis of the environmental sensitivities of a typical dynamic epikarst system at the Nongla monitoring site, Guangxi, China. Environmental Geology, 2005, 47(5): 615-619.
- [6] Liu Z H, Liu X L, Liao C J. Daytime deposition and nighttime dissolution of calcium carbonate controlled by submerged plants in a Karst spring-fed pool: insights from high time-resolution monitoring of physico-chemistry of water. Environmental Geology, 2008, 55(6): 1159-1168.
- [7] 章程, Worakul M, 汪进良, Assiri P, 黄奇波, 张强, 肖琼, 苗迎. 泰国热带典型岩溶峰丛谷地区不同土地利用下的溶蚀速率. 第四纪研究, 2016, 36(6): 1393-1402.
- [8] 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 姜光辉, 邓艳. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究. 生态学报, 2004, 24(6): 1131-1139.
- [9] 蓝家程, 傅瓦利, 彭景涛, 周小萍, 肖时珍, 袁波. 不同土地利用方式下岩溶溶蚀速率及影响因素. 生态学报, 2013, 33(10): 3205-3212.
- [10] 袁道先. 地质作用与碳循环研究的回顾和展望. 科学通报, 2011, 56(26): 2157.
- [11] Yuan D X, Zhang C. Karst Processes and the Carbon Cycle. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1-220.
- [12] 蒲俊兵, 蒋忠诚, 袁道先, 章程. 岩石风化碳汇研究进展: 基于 IPCC 第五次气候变化评估报告的分析. 地球科学进展, 2015, 30(10): 1081-1090.

- [13] Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni R, Piao S L, Thornton P, Metz N, Wania R. Carbon and other biogeochemical cycles//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 465-570.
- [14] Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, Mackenzie F T, Gruber N, Janssens I A, Laruelle G G, Lauerwald R, Luysaert S, Andersson A J, Arndt S, Amosti C, Borges A V, Dale A W, Gallego-Sala A, Goddérís Y, Goossens N, Hartmann J, Heinze C, Ilyina T, Joos F, LaRowe D E, Leifeld J, Meysman F J R, Munhoven G, Raymond P A, Spahni R, Suntharalingam P, Thullner M. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 597-607.
- [15] Li H W, Wang S J, Bai X Y, Luo W J, Tang H, Cao Y, Wu L H, Chen F, Li Q, Zeng C, Wang M M. Spatiotemporal distribution and national measurement of the global carbonate carbon sink. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 157-170.
- [16] Liu Z H, Macpherson G L, Groves C, Martin J B, Yuan D X, Zeng S B. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182: 42-49.
- [17] Li H W, Wang S J, Bai X Y, Cao Y, Wu L H. Spatiotemporal evolution of carbon sequestration of limestone weathering in China. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(6): 974-991.
- [18] 赵瑞一, 吕现福, 蒋建建, 段逸凡. 土壤 CO₂ 及岩溶碳循环影响因素综述. *生态学报*, 2015, 35(13): 4257-4264.
- [19] 徐胜友, 蒋忠诚. 我国岩溶作用与大气温室气体 CO₂ 源汇关系的初步估算. *科学通报*, 1997, 42(9): 953-956.
- [20] De Montety V, Martin J B, Cohen M J, Foster C, Kurz M J. Influence of diel biogeochemical cycles on carbonate equilibrium in a karst river. *Chemical Geology*, 2011, 283(1/2): 31-43.
- [21] 章程, 汪进良, 蒲俊兵. 地下河出口河流水化学昼夜动态变化——生物地球化学过程的控制. *地球学报*, 2015, 36(2): 197-203.
- [22] Liu Z H, Dreybrodt W. Significance of the carbon sink produced by H₂O-carbonate-CO₂-aquatic phototroph interaction on land. *Science Bulletin*, 2015, 60(2): 182-191.
- [23] 章程, 肖琼, 苗迎, 郭永丽, 汤庆佳, 郝玉培. 广西桂林漓江典型河段水化学昼夜动态变化及其对岩溶碳循环的影响. *地球学报*, 2018, 39(5): 613-621.
- [24] 潘根兴, 孙玉华, 滕永忠, 陶于祥, 韩富顺, 曹建华, 何师意. 湿润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 69-72.
- [25] Gaillardet J, Calmels D, Romero-Mujalli G, Zakharova E, Hartmann J. Global climate control on carbonate weathering intensity. *Chemical Geology*, 2019, 527: 118762.
- [26] Slovenian Environment Agency (ARSO), Meteo.si-National Meteorological Service of Slovenia-Interactive weather. [2021-03-06]. <http://meteo.arso.gov.si/met/en/app/webmet/>
- [27] Kovacic G, Ravbar N X N. Extreme hydrological events in karst areas of Slovenia, the case of the Unica River basin. *Geodinamica Acta*, 2010, 23(1/3): 89-100.
- [28] Blatnik M, Frantar P, Kosec D, Gabrovšek F. Measurements of the outflow along the eastern border of planinsko polje, Slovenia. *Acta Carsologica*, 2017, 46(1): 83-93.
- [29] Blatnik M, Mayaud C, Gabrovšek F. Groundwater dynamics between Planinsko Polje and springs of the Ljubljana River, Slovenia. *Acta Carsologica*, 2019, 48(2): 199-226.
- [30] Ravbar N, Petrič M, Kogovšek B, Blatnik M, Mayaud C. High waters study of a classical Karst polje-an example of the Planinsko Polje, SW Slovenia//Proceedings of the International Symposium KARST 2018. Belgrade: Centre for Karst Hydrogeology, 2018: 417-424.
- [31] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 一种土壤二氧化碳浓度的监测装置及监测方法: 中国, 201510606453.3. 2015-12-23.
- [32] Krklec K, Domínguez-Villar D, Carrasco R M, Pedraza J. Current denudation rates in dolostone karst from central Spain: Implications for the formation of unroofed caves. *Geomorphology*, 2016, 264: 1-11.
- [33] Domínguez-Villar D, Fairchild I J, Baker A, Carrasco R M, Pedraza J. Reconstruction of cave air temperature based on surface atmosphere temperature and vegetation changes: implications for speleothem palaeoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369-370: 158-168.
- [34] 章程, 李玉辉, 汪进良, 苗迎, 肖琼, 郭永丽. 云南石林地质公园土岩、土根界面过程和土下溶蚀速率. *地质论评*, 2020, 66(4): 1019-1030.
- [35] Calmels D, Gaillardet J, François L. Sensitivity of carbonate weathering to soil CO₂ production by biological activity along a temperate climate transect. *Chemical Geology*, 2014, 390: 74-86.
- [36] Cotton J M, Jeffery M L, Sheldon N D. Climate controls on soil respired CO₂ in the United States: implications for 21st century chemical weathering rates in temperate and arid ecosystems. *Chemical Geology*, 2013, 358: 37-45.

- [37] Romero-Mujalli G, Hartmann J, Börker J, Gaillardet J, Calmels D. Ecosystem controlled soil-rock $p\text{CO}_2$ and carbonate weathering-constraints by temperature and soil water content. *Chemical Geology*, 2019, 527: 118634.
- [38] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [39] Qin Y B, Xin Z B, Wang D M, Xiao Y L. Soil organic carbon storage and its influencing factors in the riparian woodlands of a Chinese karst area. *CATENA*, 2017, 153: 21-29.
- [40] Andrews J A, Matamala R, Westover K M, Schlesinger W H. Temperature effects on the diversity of soil heterotrophs and the $\delta^{13}\text{C}$ of soil-respired CO₂. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(5): 699-706.
- [41] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 601-610.
- [42] Loisy C, Cohen G, Laveuf C, Le Rouxa O, Delaplace P, Magnier C, Rouchon V, Cerepi A, Garcia B. The CO₂-Vadose Project: dynamics of the natural CO₂ in a carbonate vadose zone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 14: 97-112.
- [43] Wiaux F, Vanclooster M, Van Oost K. Vertical partitioning and controlling factors of gradient-based soil carbon dioxide fluxes in two contrasted soil profiles along a loamy hillslope. *Biogeosciences*, 2015, 12(15): 4637-4649.
- [44] Perrin D, Laitat E, Aubinet M, Yernaux M. Modelling of the response of forest soil respiration fluxes to the main climatic variables. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2004, 8(1): 15-25.
- [45] Wiaux F, Vanclooster M, Cornelis J T, Van Oost K. Factors controlling soil organic carbon persistence along an eroding hillslope on the loess belt. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 187-196.
- [46] Tran A P, Bogaert P, Wiaux F, Vanclooster M, Lambot S. High-resolution space-time quantification of soil moisture along a hillslope using joint analysis of ground penetrating radar and frequency domain reflectometry data. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 252-261.
- [47] Webster K L, Creed I F, Bourbonnière R A, Beall F D. Controls on the heterogeneity of soil respiration in a tolerant hardwood forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G3): G03018.
- [48] Castellano M J, Schmidt J P, Kaye J P, Walker C, Graham C B, Lin H, Dell C. Hydrological controls on heterotrophic soil respiration across an agricultural landscape. *Geoderma*, 2011, 162(3/4): 273-280.
- [49] Bauer J, Weihermüller L, Huisman J A, Herbst M, Graf A, Séquaris J M, Vereecken H. Inverse determination of heterotrophic soil respiration response to temperature and water content under field conditions. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1): 119-134.
- [50] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [51] Elberling B. Seasonal trends of soil CO₂ dynamics in a soil subject to freezing. *Journal of Hydrology*, 2003, 276(1/4): 159-175.
- [52] Banerjee S, Helgason B, Wang L F, Winsley T, Ferrari B C, Siciliano S D. Legacy effects of soil moisture on microbial community structure and N₂O emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 40-50.
- [53] Blagodatsky S, Smith P. Soil physics meets soil biology: towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 78-92.
- [54] Ilstedt U, Nordgren A, Malmer A. Optimum soil water for soil respiration before and after amendment with glucose in humid tropical acrisols and a boreal mor layer. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1591-1599.