

DOI: 10.5846/stxb202111223290

胡运迪, 赵敏, 鲍乾, 李栋, 魏榆, 马松, 曾广能. 岩溶区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 排放模拟研究. 生态学报, 2023, 43(1): 327–338.

Hu Y D, Zhao M, Bao Q, Li D, Wei Y, Ma S, Zeng G N. Simulation experiment on soil CO₂ emission by different land uses in karst area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 327–338.

岩溶区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 排放模拟研究

胡运迪^{1,2,4}, 赵敏^{3,4,*}, 鲍乾^{4,5}, 李栋^{3,4}, 魏榆^{3,4}, 马松^{3,4}, 曾广能⁶

1 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025

2 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550025

3 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

4 中国科学院中国生态系统研究网络普定喀斯特生态系统研究站, 普定 562100

5 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610066

6 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳 550025

摘要: 土地利用变化作为全球气候变化研究的重要内容之一, 对土壤 CO₂ 的排放具有重要影响。岩溶区石漠化治理过程中植被恢复伴随着土地利用方式的转变, 其对土壤 CO₂ 排放的影响有待进一步研究。基于控制性实验, 以土壤、岩溶含水介质初始条件相同, 仅土地利用方式不同的贵州普定沙湾模拟试验场为研究对象, 通过 1 年的土壤 CO₂ 浓度和通量数据, 研究岩溶区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 的排放规律及其影响因素。结果表明: (1) 土壤 CO₂ 的浓度和通量具有明显的季节变化规律, 不同季节下的土壤 CO₂ 通量呈现昼夜变化规律, 温度和降雨影响着土壤 CO₂ 的排放, 前者可促进排放量, 后者可抑制排放量, 且不同土地利用方式受影响的程度不同; (2) 耕作活动也会影响土壤 CO₂ 的排放, 耕作使得土壤变得松散, 加上岩溶区下伏基岩的溶蚀作用, 增加了土壤 CO₂ 向含水层的扩散, 导致春季耕地表现为负通量; (3) 不同土地利用方式下土壤 CO₂ 的年排放量不同, 具体为草地(897.53 tC km⁻² a⁻¹) > 灌木地(258.15 tC km⁻² a⁻¹) > 耕地(207.66 tC km⁻² a⁻¹) > 裸土地(92.68 tC km⁻² a⁻¹), 究其原因, 主要受不同土地利用下植被生物量和土壤有机碳含量的影响; (4) 不同土地利用下的土壤有机碳含量为草地(29.33 g/kg) > 灌木地(23.31 g/kg) > 耕地(22.08 g/kg) > 裸土地(19.00 g/kg), 鉴于这些土壤的初始性质相同, 研究发现随着土地利用方式的改变, 除无植被的裸土地土壤有机碳含量减小外, 其余有植被的类型均有增加, 且增加的程度和植被覆盖的程度有关。综上, 不同土地利用类型可以通过影响上覆植被的生物量和土壤有机碳含量, 进而控制土壤 CO₂ 的排放, 而排放强弱与温度、降雨和耕作活动有关, 可以通过土地利用方式的调整来增加土壤有机质含量和土壤储碳。

关键词: 岩溶区; 土壤 CO₂ 排放; 土地利用; 土壤有机碳

Simulation experiment on soil CO₂ emission by different land uses in karst area

HU Yundi^{1,2,4}, ZHAO Min^{3,4,*}, BAO Qian^{4,5}, LI Dong^{3,4}, WEI Yu^{3,4}, MA Song^{3,4}, ZENG Guangneng⁶

1 School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

2 State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550025, China

3 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China

4 Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China

5 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China

6 College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

Abstract: As one of the important parts of global climate change research, land use change plays a significant role in soil CO₂ emission. In karst area, vegetation has been restored in the process of rocky desertification control, accompanied by the

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072278, 42177248); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]4Y013号)

收稿日期: 2021-11-23; 网络出版日期: 2022-07-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaomin@vip.gyig.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

change of land use, and its impact on soil CO₂ emission needs to be further clarified. Based on the controlled experiment, with the same initial conditions of soil and karst aqueous media but different land uses, the Shawan Test Site at Puding, Guizhou was chosen to study the emission law and influencing factors of soil CO₂. Through the soil CO₂ concentration and flux data in a hydrological year, our results demonstrated that: (1) the soil CO₂ concentration and flux showed obviously seasonal variations, and the soil CO₂ flux had apparent diurnal variation in different seasons. They were mainly controlled by temperature and rainfall. The former could increase the emission, while the latter could decrease the emission, and the increased or decreased degrees were related to land uses. (2) Farming activities affected the soil CO₂ emission as well. Due to the dissolution of the underlying carbonate rock in karst area, farming activities could make the soil loose and increase the diffusion of soil CO₂ to the aquifer, resulting in negative soil CO₂ flux of cultivated land in spring. (3) The annual emission of soil CO₂ under different land uses were grassland (897.53 tC km⁻² a⁻¹) > shrub land (258.15 tC km⁻² a⁻¹) > cultivated land (207.66 tC km⁻² a⁻¹) > bare soil land (92.68 tC km⁻² a⁻¹). It was found that they were mainly dominated by vegetation biomass and soil organic carbon content under different land uses. (4) The contents of soil organic carbon were grassland (29.33 g/kg) > shrub land (23.31 g/kg) > cultivated land (22.08 g/kg) > bare soil land (19.00 g/kg). Given the same initial properties of these soils, we found that with the change of land use, except for the soil organic carbon content in non-vegetated bare soil land decreased, the other types increased, and the increased degree was related to the degree of vegetation coverage. Therefore, land use types could control soil CO₂ emission by affecting the biomass of overlying vegetation and the soil organic carbon content, and the emission intensity is related to temperature, rainfall process and farming activities. Further, we think that the content of soil organic matter and soil carbon storage could be increased through the adjustment of land use.

Key Words: karst area; soil CO₂ concentration; land use; soil organic carbon

土壤碳库是陆地生态系统中最大、最活跃的碳库之一,是大气 CO₂ 的重要源或汇^[1-2]。土壤呼吸作用是土壤碳库向大气输出的主要方式,包含了植物的根呼吸和微生物的异养呼吸^[3-5]。据统计,大气中每年约有 5%—20% CO₂ 来自于土壤^[6]。2008 年全球土壤碳库向大气的碳排放量为 (98±12) Gt,该值仅次于陆地生态系统光合作用的碳吸收量,约为化石燃料燃烧排放量的 10 倍^[7]。2020 年 9 月我国在第七十五届联合国大会上承诺,力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前达到碳中和,对碳收支问题的研究十分必要。鉴于土壤呼吸作用是陆地生态系统碳循环的重要环节,对大气 CO₂ 浓度有重要影响,并决定着陆地生态系统碳收支的平衡,因此研究土壤 CO₂ 排放规律对土壤碳库的变化具有重要意义。

土壤在生态系统和岩溶作用中扮演着重要角色,土壤微生物和土壤有机质对碳酸盐岩溶蚀具有明显的促进作用^[8]。土地利用方式可以通过改变地表覆被类型,进而改变植物生理活动、土壤理化性质和微生物活性等,控制着土壤 CO₂ 的排放^[9-12],最终影响岩溶作用碳循环。在岩性固定的情况下,岩溶碳汇通量主要取决于气候和土地利用变化^[13]。土地利用变化之所以对岩溶碳汇通量产生影响,主要是岩溶水体中溶解无机碳 (DIC) 的形成直接来源于大气 CO₂ 或者间接来源土壤 CO₂ 参与岩溶作用,不同土地利用与覆被差异,导致土壤 CO₂ 浓度和通量差异明显,最终导致岩溶碳汇通量出现差异^[14]。岩溶区占陆地面积的 15%,约 2200×10⁴ km²,而我国碳酸盐岩总的分布面积可达 340×10⁴ km² 以上^[8]。岩溶动力系统作为一个脆弱的生态系统,对气候和土地利用变化有着少有的敏感性。贵州位于西南岩溶区的核心地带,该区气候湿热,属热带-亚热带气候,土壤 CO₂ 排放规律可能与其它区域不同,加上特殊的地质背景造就了其生态环境的脆弱性和敏感性,易引起石漠化的发生,从而使得土壤碳库储量的下降^[15]。从 20 世纪 90 年代起,随着国家石漠化综合治理项目的推进,岩溶区许多地方进行了退耕还林还草,土地利用类型发生了转变,植被得到不同程度的恢复^[16-17],因此岩溶区不同土地利用对土壤 CO₂ 排放的影响需要开展深入研究。目前关于岩溶区土地利用变化对土壤 CO₂ 排放影响的研究,通常是以某地土地利用类型转变前后^[18],或以不同研究区不同土地利用类型作为研究对象^[19-20],前者面临气候因子输入变异性的影响,后者面临气候因子、土壤特性和下覆地质条件不同等因素的影响,而扣除气候、土壤和地质等其它影响因子,单纯讨论岩溶区土地利用变化对土壤 CO₂ 排放通量的研究则

鲜有报道。

贵州作为西南岩溶区的核心地带,生态环境极其脆弱。本研究以位于贵州普定,土壤、岩溶含水介质初始条件相同,土地利用方式不同的沙湾模拟试验场作为研究对象,其不同的土地利用方式可对应岩溶区石漠化治理过程中不同的植被恢复等级,从而通过控制性实验讨论在相同气候因子输入条件下土壤 CO₂ 浓度和通量对温度、降雨等气候因子,耕作等人为活动的响应,及其土壤有机碳的变化规律,最终得到不同土地利用下土壤 CO₂ 的排放规律及其影响因素。相较于以往不同土地利用下土壤 CO₂ 排放的室内控制实验^[21-22]和野外试验,一是本模拟研究更接近于野外真实状况,不但空间尺度较室内模拟大,时间尺度上植被和土壤已经历 5 年的演化,有利于不同土地利用方式下土壤 CO₂ 的真实反映;二是排除了野外土地利用类型混杂而导致的结论似是而非,使得问题的求解变得简单。因此,本研究对准确认识和评估岩溶区植被恢复对土壤碳收支的影响,以及未来通过土地利用格局来提高土壤有机质含量和保持土壤碳库具有重要指示意义,从而为实现双碳目标提供理论支撑和数据支持。

1 研究区概况

本研究以贵州普定沙湾模拟试验场为研究对象(图 1),该试验场位于中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站内,地理坐标为: 26° 14'—26° 15' N, 105° 42'—105° 43' E,气候属亚热带季风湿润气候区,季风交替明显,雨热同期,雨季为 5 月到 10 月,旱季为 11 月到次年的 4 月^[23]。据中国气象网的数据显示,该研究区多年平均气温为 15.1℃,多年平均湿度是 78%,多年平均降水量为 1315 mm,降雨主要集中在雨季。

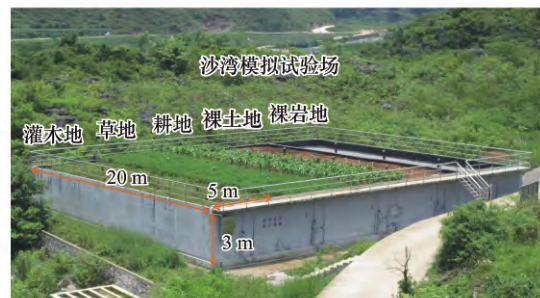


图 1 研究区的土地利用类型

Fig.1 The land use type of the study area

该试验场是由 5 个大小相同的池子组成,长 20 m、宽 5 m、高 3 m。在岩性固定的情况下,岩溶碳汇差异主要取决于气候和土地利用变化,因此每个池子内部填充相同的来自三叠系中统关岭组(T₂g)石灰岩碎石,厚度为 2.5 m,其中有 4 个池子上部覆盖有 0.5 m 厚相同的石灰土,其母岩为 T₂g 石灰岩,石灰岩碎石和石灰土的组成成分见表 1^[24-25]。在石灰土上部通过种植不同的植物,来模拟裸土地、耕地、草地和灌木地等土地利用类型(图 1),且在其中布设有土壤 CO₂ 的观测孔。裸土地只有土壤没有植被;耕地种植玉米,每年进行人为播种,生长期为 5—8 月;草地种植紫花苜蓿,于 2014 年 1 月进行播种;灌木地种植刺梨,也于 2014 年 1 月进行扦插刺梨苗^[8]。总体上,植被的发育程度由低至高分别是裸土地、玉米地、灌木地和草地(图 1)。本研究以该试验场有土壤的 4 种土地利用类型为研究对象,其土壤及下覆岩溶含水介质的初始条件相同,仅土地利用类型不同,是开展土地利用对土壤 CO₂ 排放影响研究的理想场地。

表 1 沙湾试验场岩石、土壤的组成成分

Table 1 Chemical compositions of rock and soil samples from the Shawan Test Site.

组成成分 Chemicals	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Cr ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SrO	TiO ₂	LOI	Total
	/%														
岩石 Rock	0.51	0.02	46.15	<0.01	0.31	0.22	7.40	<0.01	0.03	0.01	1.42	0.08	0.04	44.03	100.19
土壤 Soil	22.04	0.02	0.64	0.02	9.70	0.85	1.60	0.32	0.10	0.24	49.31	0.01	1.48	12.68	99.01

LOI: 1000℃ 灼烧损失量 Loss On Ignition at 1000℃

2 研究方法

2.1 数据采集和测试

本研究于 2017 年 6 月到 2018 年 6 月对研究区的气象、土壤 CO₂ 浓度、土壤 CO₂ 通量和土壤有机碳等开展

了一年的监测和采样工作。土壤 CO₂ 浓度使用手持式二氧化碳仪(Vaisala-GM 70) 在 40 cm 深的土壤 CO₂ 观测孔中进行监测, 监测频率为每月至少 1 次, 每次对每个地中 3 个不同的观测孔中进行监测, 结果取平均值。土壤 CO₂ 通量使用 LI-8100A 土壤碳通量自动测量系统进行测量, 在测量之前至少提前 24 h 将 10 cm 短期调查气室的土壤环埋至监测点, 并露出地面 2 cm, 然后将气室水平轻放于土壤环之上进行测量。在研究时段内, 每个季度进行 1 次昼夜监测, 具体时间是 2017 年 7 月、2017 年 10 月、2018 年 1 月和 2018 年 4 月, 昼夜观测的时间长度为 48 h, 间隔 2 h, 每次在每个地所埋置的土壤环上最少进行了 3 次测试, 测量结果取其平均值。降雨量、温度和湿度等气象数据从普定喀斯特生态系统观测研究站的气象站获取。此外, 在 2015 年 10 月和 2017 年 10 月, 采用 S 型采样方法, 利用土钻采集了 0—10 cm 多份鲜土, 再通过四分法收取 500 g 土壤装入自封袋中, 混合均匀后带回实验室, 称取 1.5 g 自然风干后过 100 目筛孔的土壤置于离心管中, 加入 2 mmol/L 盐酸进行摇匀、离心、酸化后用超纯水润洗, 直到 pH 为中性, 最后冷冻干燥。然后包 0.0030 g 酸化后土壤在中国科学院地球化学研究所国家重点实验室采用德国有机元素分析仪 vario MACRO cube 进行测试。

2.2 数据处理

本研究采用 Excel 软件进行数据的整理, 利用 SPSS 24.0 软件进行不同土地利用下土壤 CO₂ 通量的统计学方差分析多重比较, 采用 Sigmaplot 12.5 软件进行图形的绘制。

3 结果

3.1 土壤 CO₂ 浓度的季节变化

研究期间的土壤 CO₂ 浓度变化如图 2 所示, 其呈现明显的季节变化规律, 其中裸土地的 CO₂ 浓度变化范围为 648—1532 mg/m³, 平均浓度是 992 mg/m³; 耕地的 CO₂ 浓度变化范围为 779—6738 mg/m³, 平均浓度是

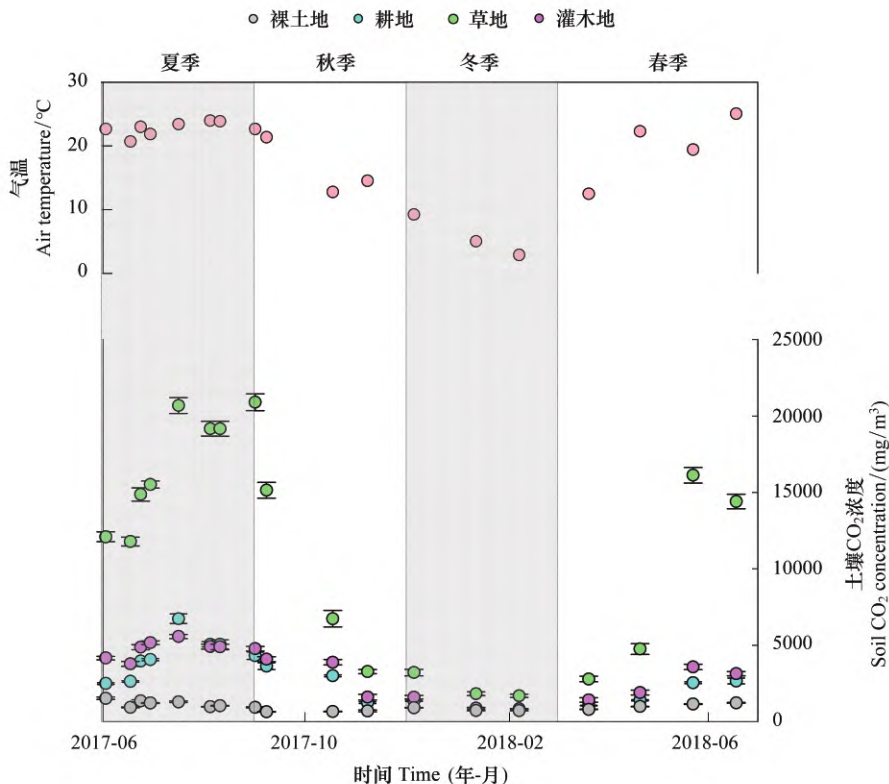


图 2 不同土地利用下气温和土壤 CO₂ 浓度的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of air temperature and soil CO₂ concentration under different land uses

2956 mg/m³; 草地的 CO₂ 浓度变化范围为 1693—20900 mg/m³, 平均浓度是 11605 mg/m³; 灌木地的 CO₂ 浓度变化范围为 838—5579 mg/m³, 平均浓度是 3428 mg/m³ 整体表现为草地>灌木>耕地>裸土地。

3.2 不同季节下土壤 CO₂ 通量的昼夜变化

四个季节的土壤 CO₂ 通量的昼夜变化见图 3。由图 3 可知, 不同季节的土壤 CO₂ 通量均具有明显的昼夜变化规律, 白天呈现出先升高后降低的趋势, 波峰值比较明显, 日最大值约出现在正午 13 点, 进入夜晚后其变化趋势相对比较平缓, 没有明显的波谷值。4 种土地利用类型在不同季节的土壤 CO₂ 通量的昼夜变化范围如下: 夏季时裸土地为 0.25—1.10 μmol m⁻² s⁻¹, 耕地为 0.87—4.22 μmol m⁻² s⁻¹, 草地为 4.04—6.71 μmol m⁻² s⁻¹, 灌木地为 0.74—4.38 μmol m⁻² s⁻¹; 秋季时裸土地是 0.03—0.25 μmol m⁻² s⁻¹, 耕地是 0.12—0.53 μmol m⁻² s⁻¹, 草地是 1.92—2.74 μmol m⁻² s⁻¹, 灌木地是 0.28—1.19 μmol m⁻² s⁻¹; 冬季时裸土地是 -0.16—0.34 μmol m⁻² s⁻¹, 耕地是 -0.14—0.57 μmol m⁻² s⁻¹, 草地是 0.25—0.68 μmol m⁻² s⁻¹, 灌木地是 0.02—0.92 μmol m⁻² s⁻¹。同理, 春季时裸土地是 -0.05—0.62 μmol m⁻² s⁻¹, 耕地是 -1.13—0.45 μmol m⁻² s⁻¹, 草地是 1.16—2.47 μmol m⁻² s⁻¹, 灌木地是 0.13—0.87 μmol m⁻² s⁻¹。

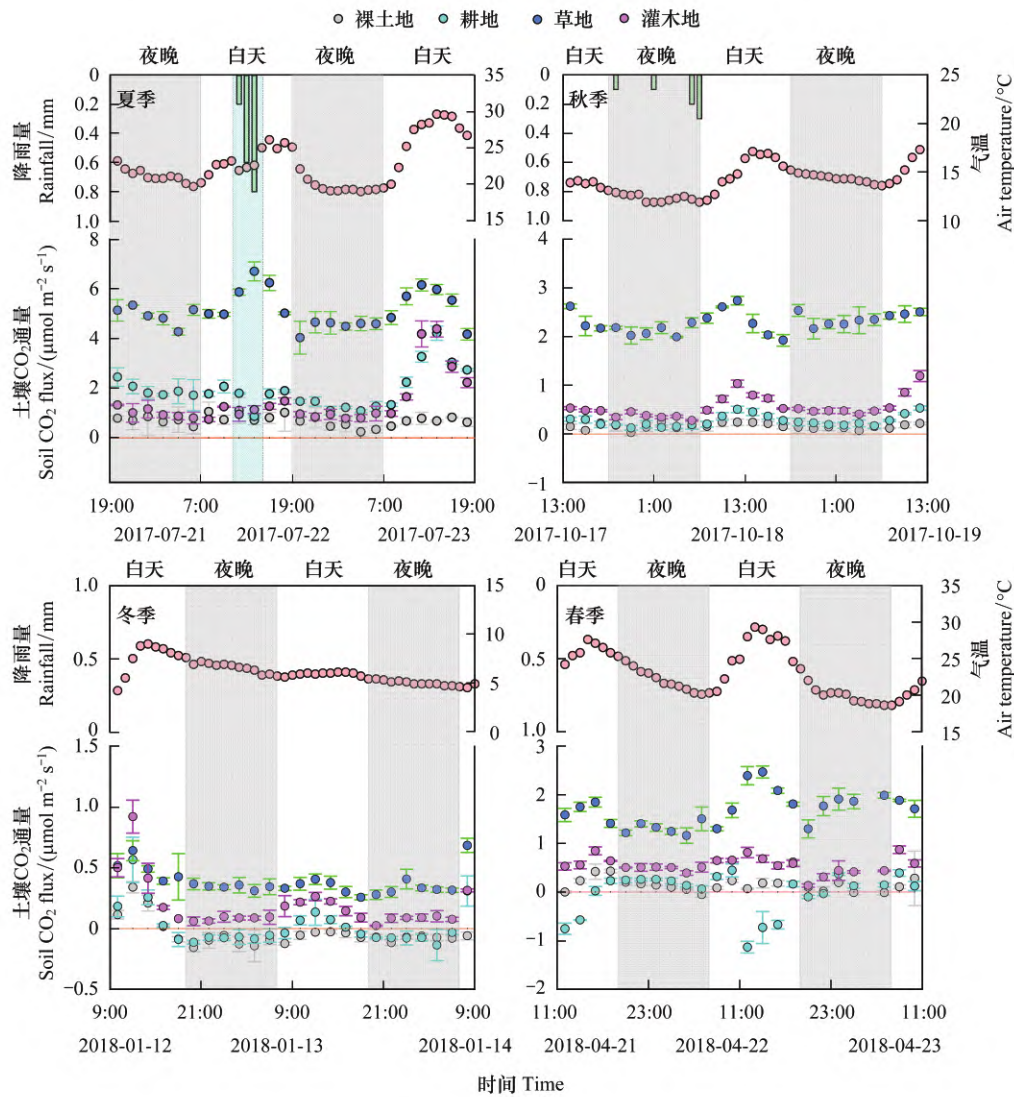


图 3 不同季节下气温、降雨量和土壤 CO₂ 通量的昼夜变化

Fig.3 Diurnal variations of air temperature, rainfall and soil CO₂ flux in different seasons

4种土地利用类型在不同季节的土壤CO₂平均通量如图4,同时对它们进行了统计学方差分析多重比较。由图4可知,夏季土壤CO₂平均通量由大到小依次草地(5.13 μmol m⁻² s⁻¹)、耕地(1.93 μmol m⁻² s⁻¹)、灌木地(1.44 μmol m⁻² s⁻¹)、裸土地(0.70 μmol m⁻² s⁻¹)。其中耕地和灌木地同属B类,表示两者的平均通量相似,没有显著性差异;秋季土壤CO₂平均通量由大到小依次草地(2.29 μmol m⁻² s⁻¹)、灌木地(0.55 μmol m⁻² s⁻¹)、耕地(0.27 μmol m⁻² s⁻¹)、裸土地(0.16 μmol m⁻² s⁻¹)。它们分属不同的类别,表明秋季这4种土地利用类型的CO₂平均通量彼此间存在显著性差异;冬季由大到小的土壤CO₂平均通量依次为草地(0.38 μmol m⁻² s⁻¹)、灌木地(0.19 μmol m⁻² s⁻¹)、耕地(0.02 μmol m⁻² s⁻¹)、裸土地(-0.04 μmol m⁻² s⁻¹)。此时耕地和裸土地没有显著性差异;同理,春季草地为(1.68 μmol m⁻² s⁻¹)、灌木地(0.55 μmol m⁻² s⁻¹)、耕地(0.16 μmol m⁻² s⁻¹)、裸土地(-0.02 μmol m⁻² s⁻¹)。其中耕地和裸土地没有显著性差异。因此,可以发现在玉米长势良好的夏季,其通量仅低于草地,和灌木地同属于B类。到秋季由于玉米干枯死亡,其通量低于灌木地但明显高于裸土地,属于C类。再到冬春季,由于玉米杆被收割未还田,使得该时期的耕地通量较小并接近裸土地,和裸土地同属C类。此外,不同土地利用下土壤CO₂通量在不同季节和年尺度下的统计值可见表2。

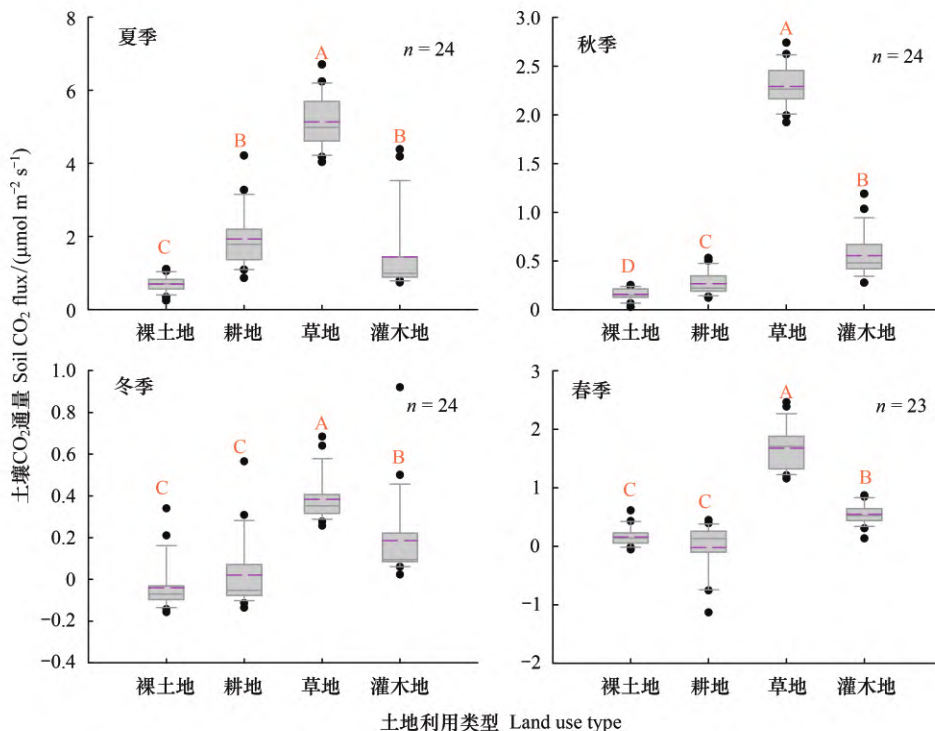


图4 不同季节土壤CO₂通量的箱型图

Fig.4 The box chart of soil CO₂ flux in different seasons

玫红色虚线表示平均值; A、B、C、D表示4种土地利用类型进行统计学方差分析多重比较的结果,以A、B、C、D按从大到小的顺序,依次标定4种土地利用类型通量值。若标定为不同的字母表示平均值存在显著性差异($P < 0.05$)

表2 不同土地利用下土壤CO₂通量

	Table 2 Summary results of soil CO ₂ flux under different land use				年均值 Annual mean	年均值 Annual mean
	2017/7(夏季) Summer	2017/10(秋季) Autumn	2018/1(冬季) Winter	2018/4(春季) Spring		
	/(μmol m ⁻² s ⁻¹)					
裸土地 Bare soil land	0.70±0.27	0.16±0.07	-0.04±0.03	0.16±0.07	0.24±0.11	92.68±41.63
耕地 Cultivated land	1.93±0.19	0.27±0.05	0.02±0.05	-0.02±0.07	0.55±0.09	207.66±34.06
草地 Grassland	5.13±0.28	2.29±0.11	0.38±0.05	1.68±0.12	2.37±0.14	897.53±52.98
灌木地 Shrub land	1.44±0.19	0.55±0.04	0.19±0.04	0.55±0.06	0.68±0.08	258.15±30.27

4 讨论

4.1 主要环境因子对土壤 CO₂ 浓度和通量的影响

由图 2 可知 4 种土地利用类型下的土壤 CO₂ 浓度均具有明显的季节变化规律, 表现为夏季最高, 秋季和春季次之, 冬季最低, 与气温变化同步。根据土壤 CO₂ 浓度和温度的关系图(图 5), 可以发现土壤 CO₂ 浓度和温度具有显著的正相关关系 ($P < 0.005$), 表明研究区土壤 CO₂ 浓度主要受到温度的控制。当处于温度较高的夏季(6—8 月), 植物处于生长旺盛期, 根呼吸作用强烈^[26], 加上土壤的微生物活动较强, 土壤有机质分解较快^[27—28], 使得夏季土壤 CO₂ 浓度最高(图 2)。相反, 在温度较低的冬季(12—2 月), 植物的根呼吸作用和土壤微生物活动较弱, 使得冬季土壤 CO₂ 浓度最低。此外, 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 浓度的季节变化幅度不同, 表现为草地 > 灌木地 > 耕地 > 裸土地(图 2)。同时, 通过土壤 CO₂ 浓度和温度的相关关系斜率, 也发现是草地 > 灌木地 > 耕地 > 裸土地(图 5)。这些特征表明这 4 种不同土地利用类型中, 草地的土壤 CO₂ 浓度对温度的响应最敏感, 响应幅度最大, 灌木地和耕地次之, 裸土地最弱, 分析其原因可能是草地植被生物量最大, 输入到土壤的有机碳含量较高^[29], 加上根呼吸作用最强, 因而对温度响应最为强烈。

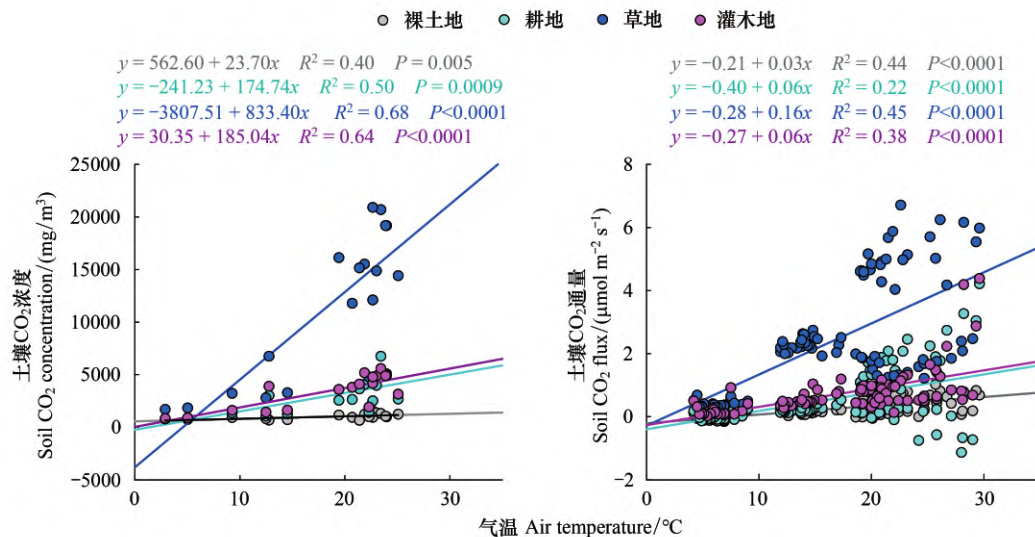
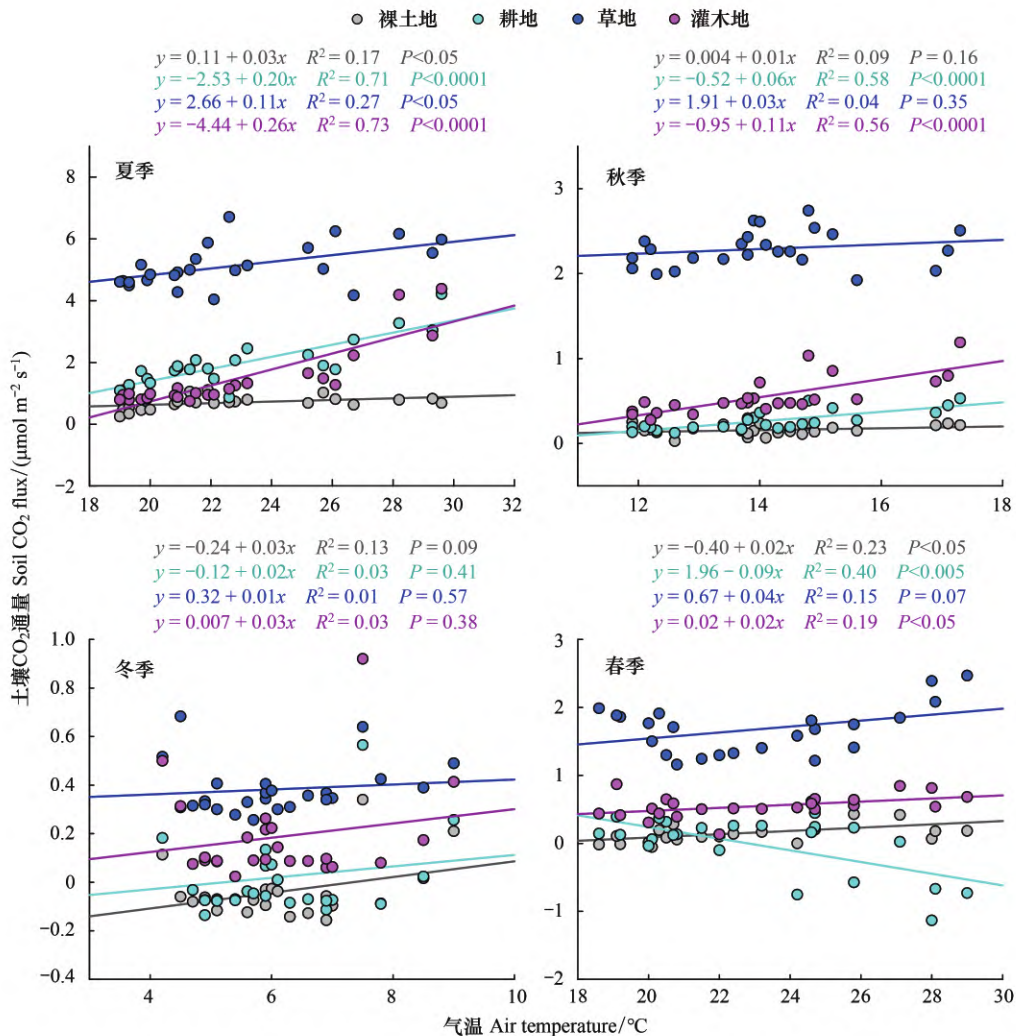


图 5 不同土地利用下土壤 CO₂ 浓度、土壤 CO₂ 通量和气温的相关关系图

Fig.5 Plots of soil CO₂ concentration, soil CO₂ flux and air temperature under different land uses

从图 3 可以看出, 不同土地利用下土壤 CO₂ 通量均具有明显的昼夜变化规律, 表现为白天高, 夜晚低。通过分析发现土壤 CO₂ 通量和温度存在一定的正相关关系(图 6), 即白天温度较高, 植物的根呼吸作用和土壤的微生物活动较强, 释放出的 CO₂ 通量较大, 反之夜晚温度较低, 释放出的 CO₂ 通量较小, 表明土壤 CO₂ 通量的变化也受控于温度。由于受到不同季节植物生理和微生物活动的影响, 可以发现夏季各土地利用土壤 CO₂ 通量和温度的响应幅度最为显著, 相关关系斜率最大, 春季和秋季次之, 冬季最小(图 3 和图 6)。此外, 年尺度下不同土地利用类型的土壤 CO₂ 通量和温度的关系见图 5, 可以发现同土壤 CO₂ 浓度一样, 土壤 CO₂ 通量和温度的相关关系斜率也表现为草地最大, 灌木地和耕地次之, 裸土地最小, 这表明草地土壤 CO₂ 浓度随温度的响应最敏感, 使得其土壤 CO₂ 浓度的积累最快, 从而造成草地土壤 CO₂ 的排放最为强烈, 其通量随温度的响应也最敏感。这与前人发现土壤 CO₂ 浓度和 CO₂ 通量均受控于温度且彼此呈现一定正相关关系的研究结果相对应^[30—31]。

此外, 我们发现研究区的土壤 CO₂ 通量还受到降雨的影响。据图 3 可知, 在 2017 年 7 月 22 日正午, 土壤 CO₂ 通量本应升高的裸土地、耕地和灌木地却意外地发生了下降, 而在该时段里的草地土壤 CO₂ 通量却保持上

图6 不同季节下土壤 CO₂通量和气温的相关关系图Fig.6 Plots of soil CO₂ flux and air temperature in different seasons

升。究其原因,和该时期发生的降雨过程有关,当降雨有效入渗补给土壤时,一方面土壤中 CO₂随着雨水入渗而加速向下扩散、迁移,对下伏碳酸盐岩溶蚀,从而导致 CO₂的消耗^[28,32],另一方面,雨水渗入到土壤中,土壤湿度的增加降低了其通气性,导致土壤 CO₂排放减少^[33]。有趣的是这个现象仅在裸土地、耕地和灌木地中出现,而在草地中未出现,和草地的长势茂密、较大的叶面积指数使其具有较大的植物截留量有关,因此当天的降雨量扣除草地的植物截留量后未达到入渗补给下覆土壤的有效量,使得该时段处于正午的草地,其土壤 CO₂通量主要受到温度的影响,呈现出当天土壤 CO₂通量的峰值。

因此,不同土地利用类型下温度和降雨等环境因子对土壤 CO₂浓度和通量的影响不尽相同,在降雨量较小时,土壤 CO₂的浓度和通量主要受到温度的影响。

4.2 耕作等人为活动对土壤 CO₂通量的影响

根据春季土壤 CO₂通量的昼夜变化规律(图3),可以发现耕地土壤 CO₂通量除受温度、降雨影响外,还受到其他因素干扰而造成其通量变化。由图3可知,耕地白天土壤 CO₂通量降低,夜晚升高,呈现出与其他3种土地利用类型明显不同的异常规律。此外,白天的通量为负,最大的负通量均出现在观测时段的正午 12:00,这与大多数的研究发现不同^[34-35]。图7为 LI-8100A 记录的耕地在 2018 年 4 月 21 日和 4 月 22 日 12:00 的实时观测数据和拟合曲线,可以发现耕地的土壤 CO₂浓度在测试时段内明显减小,表明 CO₂通量为负,且用于

计算负通量的曲线拟合度非常好 ($R^2 > 0.97$, $P < 0.01$), 加上 3 次重复测试的结果相似, 测试误差较小, 因此可以判定耕地的负通量并非偶然的测试误差造成, 主要是不同植被覆盖差异导致的内在变化规律。

通过春季耕地土壤 CO₂ 通量和温度的昼夜观测数据进行相关性分析, 发现春季耕地的土壤 CO₂ 通量和温度存在显著的负相关关系(图 6), 这与温度较高, 根呼吸作用和微生物活动较强, 土壤的 CO₂ 浓度较高, 通量较大的规律不一致。结合前人在碱性钙质土中也发现了 CO₂ 的这一负通量现象^[36], 耕地在白天, 尤其是正午表现出较大的负通量, 很有可能与下伏基岩和耕地的长期耕作导致土壤扰动大有关。由于试验场岩石为石灰岩, CaO 的含量较高, 占 46.15%(表 1), 石灰岩的溶蚀作用需要吸收 CO₂^[37-38], 加上 4 月份刚翻完地进行玉米的种植, 使得原本厚度就薄的耕地土壤变得松散, 从而加剧了岩石的溶蚀作用, 但松散的土壤降低了土壤 CO₂ 的积累, 土壤底部 CO₂ 被消耗后使得土壤 CO₂ 向下逃逸和扩散, 造成了负通量的产生。此外, 冬季裸土地和耕地的负通量也证明了 CO₂ 对下伏石灰岩溶蚀作用, 因为冬季两者土壤有机质分解释放的 CO₂ 较少, 土壤 CO₂ 浓度低(730 mg/m³ 和 792 mg/m³, 图 2), 这部分 CO₂ 不足以满足石灰岩溶蚀作用的消耗, 从而使得空气中的 CO₂ 进入含水层产生了负通量现象, 而此时草地和灌木地的正通量是由于两者土壤 CO₂ 浓度保持较高状态(1826 mg/m³ 和 889 mg/m³, 图 2), 可以满足溶蚀作用的消耗。

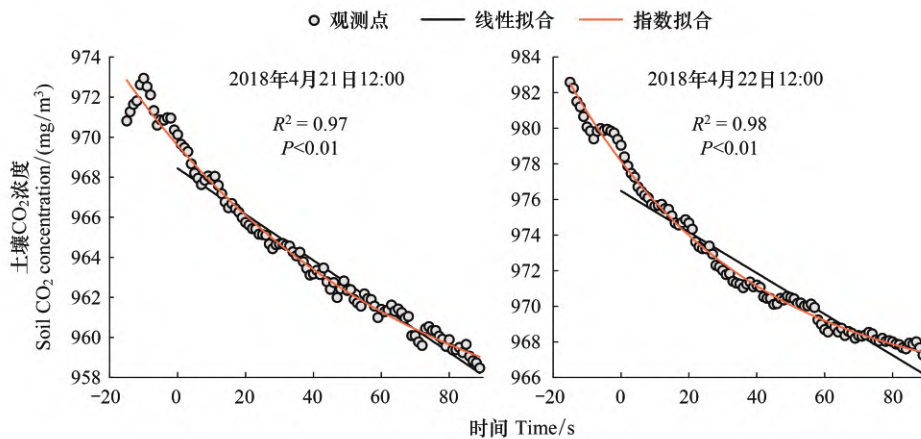


图 7 LI-8100A 实时观测数据及拟合曲线

Fig.7 Real time measurement data and fitting curve of LI-8100A

4.3 土地利用方式对碳通量的影响

如前所述, 研究区温度、降雨和耕作活动等因素影响着土壤的 CO₂ 浓度和通量, 但也可以发现不同土地利用类型下, 土壤 CO₂ 浓度和通量对于温度和降雨等响应也不同。根据表 2 和图 4 可知, 除了夏季土壤 CO₂ 通量呈现草地>耕地>灌木地>裸土地的规律外, 其它三个季节以及全年平均值, 土壤 CO₂ 通量均表现出草地>灌木地>耕地>裸土地的规律, 相应土壤 CO₂ 浓度的年均值也呈现同样的规律(图 2)。土壤 CO₂ 主要来源于植物的根呼吸和微生物的异养呼吸, 前者取决于植物的生物量, 后者和土壤有机碳含量有关。图 8 给出了研究区 2015 年 10 月和 2017 年 10 月的土壤有机碳含量, 总体上是草地>灌木地>耕地>裸土地。鉴于本控制性实验最初(2014 年 1 月)所用的土壤一致, 而通过种植不同的植被来研究土地利用类型的影响, 可以看出植被覆盖程度不同, 土壤有机碳含量变化也不同, 没有植被覆盖的裸土地有机碳含量随着时间的推移在降低, 而其余 3 种有植被覆盖的土地利用类型, 有机碳含量均在升高, 且升高的程度和植被的覆盖程度有关, 表现为植被覆盖程度最高的草地, 其土壤有机碳含量增加最大, 灌木地和耕地次之。从图 8 还可以发现, 从 2014 年 1 月到 2015 年 10 月, 经过近两年的演替, 裸土地为 22.18 g/kg, 而草地为 28.64 g/kg, 说明从无植被到草地, 每年净增加有机碳含量约 3.23 g kg⁻¹ a⁻¹, 由此说明通过土地利用调整后, 土壤固碳能力明显增加。

种植苜蓿的草地其生物量最大, 根呼吸作用最强, 加上土壤有机碳含量也最高, 从而使得草地的土壤 CO₂

浓度最高,通量最大,前人的研究也表明土壤有机质的含量与土壤 CO_2 排放的速率呈一定的正相关关系^[39-40]。其次是灌木地,灌木地种植的刺梨,属于常年生植物,而耕地种植的玉米,生长期仅为5—8月,所以虽然夏季正处于生长旺期的玉米地,其土壤 CO_2 通量大于灌木地,但在其它非生长期却小于灌木地(图4),加上灌木地的土壤有机碳含量大于耕地,因此从年尺度上看灌木地的土壤 CO_2 浓度大于耕地,通量亦是如此;最后,裸土地的碳通量最小,主要是因为裸土地未种植植被,土壤 CO_2 主要来源于微生物的异养呼吸,加上土壤有机碳含量低且逐年降低,所以土壤 CO_2 浓度最低,通量最小。

综上所述,不同的土地利用方式通过影响上覆植被的生物量和土壤有机碳含量,进而控制着土壤 CO_2 浓度和通量,并且随着植被的演替,土壤中有有机碳含量增加明显,尤其是种植草地后土壤有机碳含量增值最快。因此,可以通过土地利用方式的调整来增加土壤有机质含量和土壤储碳,尤其是在岩溶区石漠化综合治理过程中,可以通过土地利用调整来达到增加有机碳存储目的,助力碳中和这一国家目标需求。

5 结论

(1) 土壤 CO_2 的浓度和通量具有明显的季节变化规律,夏季最高,秋季和春季次之,冬季最低。不同季节土壤 CO_2 通量具有明显的昼夜变化规律,温度和降雨影响着土壤 CO_2 的排放,前者可促进排放量,后者可抑制排放量,且不同土地利用方式下受影响的程度不同;

(2) 耕作等人为活动也会影响土壤 CO_2 的排放,由于春季耕作使耕地的土壤变得松散,从而增加土壤 CO_2 向下的逃逸和扩散,加上下伏基岩的溶蚀,导致春季耕地为负通量;

(3) 不同土地利用方式下土壤 CO_2 的年排放量不同,具体表现为草地>灌木地>耕地>裸土地,这主要受不同土地利用下植被的生物量和土壤有机碳含量的影响;

(4) 不同植被覆盖程度可以改变土壤的有机碳含量,除无植被覆盖的裸土地土壤有机碳含量减小外,其余有植被覆盖的3种土地利用类型均增加,且增加的程度和植被的发育程度有关,具体为草地>灌木地>耕地。

综上,不同土地利用类型可以通过影响上覆植被的生物量和土壤有机碳含量,进而控制土壤 CO_2 的排放,而排放强弱和温度、降雨过程和耕作等人为活动有关。实际工作中,植被的恢复可以增加土壤有机质含量,而土地利用方式的调整,对于岩溶石漠化治理和增加有机碳存储具有重要的意义。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Piao S, Fang J, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [3] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [4] Savin M C, Görres J H, Neher D A, Amador J A. Biogeophysical factors influencing soil respiration and mineral nitrogen content in an old field soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(4/5): 429-438.
- [5] Ma T, Zhu G F, Ma J Z, Zhang K, Wang S T, Han T, Shang S S. Soil respiration in an irrigated oasis agroecosystem: linking environmental

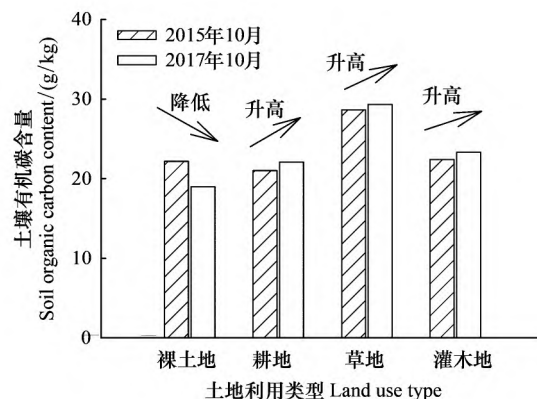


图8 2015年10月和2017年10月不同土地利用下土壤有机碳含量

Fig.8 Soil organic carbon content under different land uses in October 2015 and October 2017

- controls with plant activities on hourly, daily and monthly timescales. *Plant and Soil*, 2020, 447(1/2) : 347–364.
- [6] 刘慧峰, 伍星, 李雅, 李宗善, 刘国华. 土地利用变化对土壤温室气体排放通量影响研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33(7) : 1960–1968.
- [7] Peters G P, Marland G, Le Quéré C, Boden T, Canadell J G, Raupach M R. Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Nature Climate Change*, 2012, 2(1) : 2–4.
- [8] 朱辉, 曾成, 刘再华, 曾庆睿, 李玲珑. 岩溶作用碳汇强度变化的土地利用调控规律——贵州普定岩溶水–碳通量大型模拟试验场研究. *水文地质工程地质*, 2015, 42(6) : 120–125.
- [9] Merino A, Pérez-Batallón P, Macías F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6) : 917–925.
- [10] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(2) : 189–204.
- [11] 张容娟, 布乃顺, 崔军, 方长明. 土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2010, 30(24) : 6698–6706.
- [12] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2) : 378–390.
- [13] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望. *科学通报*, 2012, 57(S1) : 95–102.
- [14] 曾庆睿. 岩溶碳汇的土地利用调控机制研究——以普定沙湾水–碳通量模拟式试验场为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [15] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨. *地学前缘*, 2006, 13(3) : 185–189.
- [16] Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a Karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 245–253.
- [17] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the Karst regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105–113.
- [18] 房彬, 李心清, 程建中, 王兵, 程红光, 张立科, 杨放. 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量. *生态学报*, 2013, 33(17) : 5299–5307.
- [19] 蓝芙宁, 王文娟, 覃小群, 黄奇波, 刘朋雨, 安树青, 唐绍政. 土地利用和覆被变化对岩溶区土壤 CO₂ 浓度的影响. *中国岩溶*, 2011, 30(4) : 449–455.
- [20] 郑维熙, 周忠发, 朱粲粲, 梅再美, 汤云涛, 安丹. 典型岩溶区不同土地利用类型土壤 CO₂ 浓度时空变化特征及影响因素分析——以贵州双河洞为例. *土壤通报*, 2021, 52(3) : 594–601.
- [21] Wu X, Yao Z, Brüggemann N, Shen Z Y, Wolf B, Dannemann M, Zheng X, Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(5) : 773–787.
- [22] Lang M, Cai Z C, Chang S X. Effects of land use type and incubation temperature on greenhouse gas emissions from Chinese and Canadian soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(1) : 15–24.
- [23] Zhao M, Zeng C, Liu Z H, Wang S J. Effect of different land use/land cover on Karst hydrogeochemistry: a paired catchment study of Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou, SW China. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(1/2) : 121–130.
- [24] Zeng Q R, Liu Z H, Chen B, Hu Y D, Zeng S B, Zeng C, Yang R, He H B, Zhu H, Cai X L, Chen J, Ou Y. Carbonate weathering-related carbon sink fluxes under different land uses: a case study from the Shawan Simulation Test Site, Puding, Southwest China. *Chemical Geology*, 2017, 474: 58–71.
- [25] Hu Y D, Liu Z H, Ford D, Zhao M, Bao Q, Zeng C, Gong X Y, Wei Y, Cai X L, Chen J. Conservation of oxygen and hydrogen seasonal isotopic signals in meteoric precipitation in groundwater: an experimental tank study of the effects of land cover in a summer monsoon climate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 284: 254–272.
- [26] Burton A, Pregitzer K, Ruess R, Hendrick R, Allen M. Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 2002, 131(4) : 559–568.
- [27] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytologist*, 2000, 147(1) : 141–154.
- [28] Yang R, Zhao M, Zeng C, Chen B, Liu Z. Spatiotemporal variations of soil CO₂ in Chenqi, Puding, SW China: the effects of weather and LUCC. *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 191–205.
- [29] Zhao X X, Li Y L, Xie Z M, Li P. Effects of nitrogen deposition and plant litter alteration on soil respiration in a semiarid grassland. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 139634.

- [30] 程建中,李心清,周志红,王兵,程红光,邢英,唐源. 土壤 CO₂浓度与地表 CO₂通量的季节变化及其相互关系. 地球与环境,2011,39(2): 196-202.
- [31] 王先鹤,王秀君,韩广轩,王钧漪,宋维民,尤再进. 黄河三角洲湿地非生长季土壤 CO₂浓度及地表 CO₂通量的动态变化. 生态学杂志,2018,37(9): 2698-2706.
- [32] 邓钰婧,李小雁,胡霞,吴秀臣,王佩. 高寒草甸生态系统降雨事件对不同深度土壤碳释放的试验分析. 生态学报,2022,42(8) doi: 10.5846/stxb202010312791.
- [33] 陈萍. 贵州喀斯特地区土地利用变化对土壤-大气温室气体交换的影响[D]. 北京: 中国科学院大学,2020.
- [34] Entry J A, Reeves D W, Backman C B, Raper R L. Influence of wheel traffic and tillage on microbial biomass, residue decomposition and extractable nutrients in a Coastal Plain Soil. Plant and Soil, 1996, 180(1): 129-137.
- [35] Patiño-Zúñiga L, Ceja-Navarro J A, Govaerts B, Luna-Guido M, Sayre K D, Dendooven L. The effect of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emissions of N₂O, CO₂ and CH₄ in the central Highlands of Mexico: a laboratory study. Plant and Soil, 2009, 314(1/2): 231-241.
- [36] 谢静霞,翟翠霞,李彦. 盐生荒漠与绿洲农田土壤 CO₂通量的对比研究. 自然科学进展,2008,18(3): 262-268.
- [37] 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.
- [38] 章程,汪进良,肖琼,苗迎, Mitja Prelovesk. 斯洛文尼亚典型岩溶区土壤 CO₂冬季动态变化特征. 生态学报,2022,42(8) doi: 10.5846/stxb202103200738.
- [39] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Mo W H, Koizumi H. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest. Ecological Research, 2002, 17(3): 401-409.
- [40] 沈征涛. 土壤 CO₂释放速率影响因素试验研究[D]. 南京: 南京大学,2012.