DOI: 10.5846/stxb202010282761

陈浮,李肖肖,马静,于吴辰,杨永均,王艺霏.旱改水型农田整治对土壤碳排放的短期影响.生态学报,2021,41(19):7725-7734. Chen F, Li X X, Ma J, Yu H C, Yang Y J, Wang Y F.Short-term effects of land consolidation of dryland-to-paddy conversion on soil carbon flux.Acta Ecologica Sinica,2021,41(19):7725-7734.

旱改水型农田整治对土壤碳排放的短期影响

陈 浮^{1,2,*},李肖肖^{1,3},马 静^{1,2},于吴辰¹,杨永均¹,王艺霏¹

1 中国矿业大学矿山生态修复教育部工程研究中心,徐州 221116
2 中国矿业大学低碳能源研究院,徐州 221008
3 上海交通大学农业与生物学院,上海 200240

摘要:灌溉农业可提升粮食生产潜力,已成为全球农业重要的发展方向,但此类土地利用转换势必影响旱作农田土壤的稳定性, 尤其是碳循环。然而,旱改水整治过程中土壤碳通量变化及其与环境因子间的互馈机制尚不清楚。为此,采用大田模拟实验, 连续7d监测土壤碳通量变化,评估旱改水整治对土壤碳库组成及环境驱动的短期效应。结果表明:①旱地、水田的土壤碳通 量和温度均呈昼高夜低的单峰型曲线,且碳通量与温度峰值出现于每日13:00前后,但水田土壤碳通量稍高于旱地。②旱改 水后短期内土壤可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(EOC)、惰性有机碳(ROC)、总有机碳(TOC)和土壤 碳库管理指数均呈减少趋势,其中土壤微生物量碳、易氧化有机碳降幅分别达28.55%、29.09%。③土壤含水量、微生物OTU 数、碳库含量是影响碳通量速率变化的关键因子(P<0.05),土壤温度、理化性状是制约土壤碳库的主控因子(P<0.05)。农业活 动是重要的碳源之一,深入研究大范围旱改水诱发的碳排放问题可为低碳农业、气候减缓及其应对策略制定提供科学依据。 关键词:土地整治;土壤碳通量;土壤碳库;结构方程模型;土地利用转换

Short-term effects of land consolidation of dryland-to-paddy conversion on soil carbon flux

CHEN Fu^{1,2,*}, LI Xiaoxiao^{1,3}, MA Jing^{1,2}, YU Haochen¹, YANG Yongjun¹, WANG Yifei¹

1 Engineering Research Center of Mine Ecological Construction for Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 Institute of Low Carbon Energy, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

3 College of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Irrigation agriculture has become an important developmental direction of the worldwide agricultural filed, because it could improve the food production capacity. Nevertheless, the conversion of land use pattern is guaranteed to affect the soil stability of dry farmland, especially for the soil carbon cycle. However, the mutual feedback mechanisms between carbon flux variation and environmental factors during the farmland consolidation process are still unclear. Therefore, to assess the short-term effects of dryland-to-paddy consolidation on the composition of soil carbon pool and environmental drivers, field experiments were carried out to monitor continuously the changes of soil carbon flux for 7 days. The results showed that: (1) the soil carbon flux and temperature in both dry land and paddy field presented as the unimodal curve of high day and low night. The peak values of soil CO₂ flux and temperature appeared around 13:00 every day, whereas the soil CO₂ flux of paddy field was slightly higher. (2) The soil dissolved organic carbon, microbial biomass carbon, easily oxidized organic carbon, resistant organic carbon, soil total organic carbon and soil carbon pool management

收稿日期:2020-10-28; 网络出版日期:2021-06-30

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD06B02);国家自然科学基金项目(41907405);江苏省自然科学基金项目(BK20180641)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chenfu@ cumt.edu.cn

index showed the decreasing trends after a short period of farmland consolidation, while the decrease rates of soil microbial biomass carbon and easily oxidized organic carbon were 28.55% and 29.09%, respectively. (3) The modeling results of structural equation models showed that soil water content, microbial OTU number, and soil carbon pool significantly affected the change of soil CO_2 flux (P < 0.05). The soil temperature and soil physicochemical properties were the key environmental factors, which could constraint the soil carbon pool (P < 0.05). The agricultural activities are one of the important carbon sources, and the depth study of carbon emissions induced by large-scale dryland-to-paddy might provide the scientific basis for low-carbon agriculture, climate mitigation and the formulation of coping strategies.

Key Words: land consolidation; soil CO2 flux; soil carbon pool; structural equation model; land use conversion

土壤是陆地生态系统碳库的重要组成部分^[1-2],其微小波动可能诱发全球碳循环巨变。土地利用变化驱动着全球变化及生态系统碳循环^[3-4],不同土地利用方式转换下土壤有机碳动态是碳循环的关键环节^[5],一直倍受关注^[6-7]。农业约占全球碳排放量的 1/4,从源头上控制和减少碳排放是最佳途径,对全球碳减排意义重大^[8]。中国是人口第一大国,也是重要的农业大国,农业碳排放高达数亿 t^[9]。如何既保障国家粮食安全,又满足碳减排对中国未来实现碳中和目标至关重要^[10]。

土地整治是提升农田生产力的重要手段^[11],尤其是增加灌溉设施,即旱改水型农田整治^[12-14]。近几年, 为满足日益增长的粮食需求和认真贯彻落实"占优补优、占水田补水田"新政策要求,我国许多地方开展了大 范围的旱改水型农田整治工程,尤其是华北、东北地区^[14-15]。尽管科学合理的土地利用和管理方式可重新固 定了 60%—70%已耗损的碳^[4],但土地利用转换势必对农田生态系统格局和服务产生了更为复杂的影响^[5], 土壤碳库表现出明显的区域差异和复杂的时空变化^[16]。丁金枝等研究表明,合理的土地整治措施可将土壤 表层有机碳含量提高 4%—27%^[17],但也有学者发现土地整治后土壤有机碳含量总体呈下降趋势,降幅为 17. 5%—55.8%^[16,18]。马原等研究发现土壤有机碳含量在旱改水整治后出现先降后升趋势,短期内会出现区域 性不平衡现象,其稳定性随水稻种植年限延长、土层加深而增强^[19]。大规模的农田旱改水转变不可避免地影 响了土壤碳储量^[5,20],且水田被认为是重要的温室气体排放源^[21],对全球气候有着重要的威胁^[20]。此外,旱 地-水田转化因地面覆盖状况差异会对区域气候特征和区域生态服务产生潜在影响^[14]。不同农田管理方式 通过改变土壤环境因子引起土壤微生物结构功能及分子网络的相应变化^[13,22]。Hopkins等^[23]对土壤有机质 分解的定量研究表明,土壤 58%—90%的碳通量通过微生物分解作用产生。由此可见,大规模实施旱改水必 将改变局部乃至大区域农田土壤环境,影响土壤的物理性状、化学性质及其生物学过程,进而直接或间接地影 响农田生态系统碳氮循环及 CO₂、CH₄等温室气体排放。

土地利用转换的碳效应一直倍受关注^[3,5],旱改水型整治必定影响长期旱作农田土壤生态环境的稳定性 已是不争的事实^[13-15]。然而,人们对旱改水整治过程中微观环境的变化规律、土壤碳通量动态及其与环境因 子间互馈机制认知匮乏。旱改水型整治在提升粮食生产潜力的同时,对农田土壤碳通量产生什么影响? 是否 有助于提升农田土壤固碳能力? 碳通量与环境因子的互作机制如何? 这些问题均亟待研究。为此,本研究采 用大田实验,利用 LI-8100 开路式土壤碳通量测试仪监测旱地与水田的土壤碳通量动态变化,分析土壤有机 碳组成特征,并基于结构方程模型揭示土壤碳通量特征与环境因子之间的交互关系,旨在为土地整治、农田管 理和低碳农业发展等提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区和实验设计

本研究旱改水大田实验位于中国矿业大学南湖校区土地科学研究中心,属暖温带半湿润季风气候,年均 气温 14.1 ℃,年均降水量 841.2 mm。该区传统种植结构为一年二熟的小麦-玉米轮作,土壤类型主要为褐潮 土,长期以来受盐渍化、田块破碎等影响。为改善灌溉条件和增强农业生产稳定性,该区域周边农田近几年已 推广旱改水整治。

该实验田从 2011 年起已连续种植小麦-玉米 8 年。2019 年 6 月 1 日,设立了不相邻的二组各 6 块 15 m× 20 m 格田:一组继续种植玉米(Dry land, DL),品种为农华 101;另一组先淹水浸泡 5d 再移栽水稻(Paddy field, PF),品种为无育梗 31。为防止相互渗水,两组格田间设 1.2 m 防渗沟。水稻生长期按当地农业用水定额 425 m³进行浅水灌溉。

1.2 土壤样品采集与分析

2019年11月6日,采用随机五点法采集0—20 cm 表土混合样约1000g,二组每个格田采集5个,总共60 个土壤样品,分别记为 DL 和 PF。土壤样品采用无菌的 Ziploc 袋包装,密封后立刻带回实验室。土壤样品分 两部分处理:①在室内自然风干后剔除石砾、动植物残体,磨碎过2 mm 筛,用于土壤基本理化性质的测定。 测定采用常规方法^[24],具体理化性状见表1。②新鲜土壤样品直接用于生物多样性分析。采用高通量测序 技术分别对土壤细菌 16S rRNA 和标准真菌 ITS 测定,在 Galaxy 平台(http://:mem.rcees.ac.cn.8080/)计算 Alpha 多样性指数^[15]。

选取土壤总有机碳(Soil total organic carbon, TOC)、可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、易氧化有机碳(Easily oxidized organic carbon, EOC)和惰性有机碳 (Resistant organic carbon, ROC)等土壤碳库指标,并分别测定。其中,土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法测定,可溶性有机碳采用 TOC 自动分析法(艾力蒙塔,Vario TOC,德国),微生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法,易氧 化有机碳采用 333 mmol/LKMnO₄氧化法^[25]。土壤惰性有机碳测定采用盐酸水解法^[26],同一土样相同指标测试 3 次,计算其平均值。

Table 1	Description of son physicochemical properties before and after the conversion of dryland to paddy									
土壤性状 Soil properties	旱地 DL	水田 PF	Р							
рН	8.59±0.17	8.15±0.06	<0.001 ***							
电导率 EC/ (mS/cm)	17.07±5.61	30.81 ± 4.07	<0.001 ***							
有机质 SOM/ (g/kg)	21.43±3.26	16.57±2.81	0.002 **							
硝态氮 NN/ (mg/kg)	4.30±0.48	3.76 ± 0.58	0.037 *							
氨态氮 AN/ (mg/kg)	1.34±0.19	1.02 ± 0.30	0.011 *							
有效磷 AP/ (mg/kg)	32.07±6.13	27.20 ± 1.71	0.026 *							
速效钾 AK/ (mg/kg)	74.56±6.61	73.13±5.32	0.601							

表1 旱改水整治前后土壤基本理化性状描述性统计

DL:旱地 Dryland; PF:水田 Paddy field; pH:土壤 pH Soil pH; EC:电导率 Electric conductivity; SOM:土壤有机质 Organic matter; NN:硝态氮 Nitrate nitrogen; AN: 氨态氮 Ammonia nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; 数据为平均值±标准差, P 值为 T 检验显著性, * 表示 P<0.05 显著, ** 表示 P<0.01 极显著, *** 表示 P<0.001 非常显著

1.3 土壤碳通量监测

旱地和水田土壤碳通量监测采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测试仪,2019 年 9 月 18—24 日在 DL 和 PF 内选取适合点位,测定前 24 小时随机放置 2—3 个 PVC 环,确保 PVC 环嵌入土壤后露出地面 3—4 cm,环内 无活体植物,土壤凋落物保持原状。同时,利用 LI-8100 自带的温度探针和土壤水分探针,同步测定 PVC 环附 近深度为 3—5 cm 处的土壤温度和土壤含水量。

1.4 碳库管理指数计算

碳库管理指数用于反映农田不同土地利用方式下土壤质量的变化^[25]。以实验田周边无人为管理措施 (即不种植农作物)土壤碳库活度(A)和总有机碳(TOC)含量的平均值作为参考土壤的 A、TOC,计算旱地和 水田土壤的 CPMI,具体公式如下:

 $A = EOC(g/kg) / \{TOC(g/kg) - EOC(g/kg)\}$

AI = A/Ar

CPI=TOC(g/kg)/TOCr(g/kg) CPMI=CPI×AI×100

式中,A:碳库活度;Ar:参考土壤碳库活度;AI:碳库活度指数;CPI:碳库指数;TOC:土壤总有机碳;TOCr:参考 土壤总有机碳;CPMI:碳库管理指数。

1.5 结构方程模型构建

结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)是一种基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的方法,可同时处理分析多个变量。土壤碳通量的变化具有高度复杂性,传统的多元回归方法难以满足分析需求。本研究选取土壤水分、温度、土壤理化、微生物 OTU 数、土壤碳库等 5 个指标作为结构方程模型的观测变量,借助 Amos 7.0 软件进行 SEM 拟合分析,探究旱改水型农田整治后土壤碳通量、碳库与土壤环境因子变量之间关系。

1.6 数据统计与处理

采用 SPSS 20.0 软件(IBM,美国)做方差分析(ANOVA)与 Pearson 相关分析。用 R-project(MathSoft,美国)进行相关分析。用 Origin 9.0 软件(Origin Lab,美国)绘制土壤碳通量、温度、水分变化趋势图。

2 结果与分析

2.1 旱改水型农田整治对土壤碳通量动态变化的影响

从 LI-8100 读取测定值,计算不同时点 DL 与 PF 土 壤碳通量及标准差(图 1)。结果表明:DL 和 PF 土壤碳 通量均为昼高夜低的单峰型曲线,峰值分别为 3.26、 3.56 μmol m⁻² s⁻¹, PF 平均值略高于 DL。自每日 9:00 起土壤碳通量快速上升,11:00—14:00 达到峰值,随后 快速下降,19:00 后下降速率减缓,该变化趋势与温度 极为相似。DL 和 PF 土壤碳通量日际间存在差异,日 变幅分别为 39.43%、42.42%,日变化差异显著(*P*< 0.05)。由此可见,旱改水整治后一定程度上增加了土 壤碳排放。

2.2 旱改水型农田整治对土壤碳库组成的影响

从图 2 可知:旱改水型整治后土壤有机碳含量显著 降低(P<0.05),碳库各指标标准差减小,土壤碳库相对 均一。土壤活性有机碳呈显著减低水平(P<0.05),微 生物量碳、易氧化有机碳降幅分别为 28.50%、29.09%, 呈极显著性差异(P<0.01)。但水旱条件改变几乎不影 响土壤惰性有机碳含量。旱地较水田碳库管理指数变



图 1 7日内不同时刻旱地和水田土壤碳通量、温度和水分的变化 Fig.1 Changes of soil carbon flux, temperature and moisture in dry land (DL) and paddy field (PF) within seven days

化幅度大,离散程度也相对较大,旱改水后 CPMI 平均降幅高达 11.65%,呈显著差异水平。该结果在一定程度上证实了旱改水整治后短期内土壤肥力降低,不利于农田土壤质量改善。

2.3 不同水旱条件下土壤碳通量变化的主控因子

2.3.1 温度和水分条件对土壤碳通量变化的影响

利用线性回归方程模型拟合土壤碳通量对土壤温度、水分的响应,结果如图 3 所示。从显著性水平(P< 0.001)和决定系数(R²)看,土壤温度和水分是影响碳通量变化的重要环境因子,土壤碳通量与温度、水分呈显著性正相关和显著性负相关关系。相比旱地,水田含水量对土壤碳通量敏感性较弱,且水分与碳通量回归





Fig.2 Contents characteristics of soil carbon pool in dry land (DL) and paddy field (PF)

DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; EOC: 易氧化有机碳 Easily oxidized organic carbon; ROC: 惰性有机碳 Resistant organic carbon; *A*:碳库活度 Carbon pool activity; *AI*:碳库活度指数 Carbon pool activity index; CPI:碳库指数 Carbon pool index; CPMI:碳库管理指数 Carbon pool management index

模型离散程度大。土壤温度的影响贡献度高于土壤含水量,二者共同作用于土壤碳通量变化。但土壤温度、 水分与碳通量的相关系数又明显不同,这表明由旱改水型农田整治导致土壤物理条件变化对碳通量变化异常 敏感。此外,淹水状态短期内对土壤微生物等产生胁迫,加剧了土壤呼吸的不稳定性,从而降低了土壤水分与 碳通量之间相关性。



图 3 温度和水分条件对土壤碳通量变化的影响 Fig.3 Effects of soil temperature and moisture on the soil CO₂ flux

2.3.2 不同环境因子对土壤碳通量变化的贡献

由图 4 可知,农田土壤碳库与 pH、有机质、硝态氮、氨态氮、水分含量、微生物 Shannon 指数等多个指标均 呈极显著正相关关系,与土壤 EC、温度呈显著负相关关系(P<0.05),这表明早改水整治后土壤碳库受多重因 子抑制。土壤碳通量则与土壤 EC、温度呈极显著正相关关系,与 pH、有机质、水分含量等呈显著负相关关系 (P<0.05)。旱改水前后土壤环境因子与土壤碳通量之间相关性存在着差异,均以旱地的相关系数较大。从 单个指标来看,旱地和水田土壤碳通量均与 EC、有机质、硝态氮和温度存在显著相关性,但二者的相关系数又 明显不同,如旱地和水田土壤硝态氮与碳通量相关系数为 0.86 和 0.58,这一方面说明土壤碳通量对环境因子 变化较为敏感,硝态氮是影响碳通量的重要因素;另一方面也说明旱改水整治后短期的淹水胁迫减低了土壤 环境因子与碳通量之间相互作用。

DOC	0.12	-0.44**	0.35	0.6***	0.03	0.29	-0.02	-0.39*	0.41*	0.26	0.01	0.16	0.29	
MBC	0.58**	-0.63***	0.75***	0.66***	0.7***	0.18	0.3	-0.57**	0.46*	0.9***	0.53**	0.79***	0.46*	
EOC	0.36*	-0.58**	0.51**	0.48**	0.15	-0.25	0.22	-0.44**	0.25	0.57***	0.45*	0.62***	0.49**	
ROC	0.57**	-0.65***	0.93***	0.77***	0.72***	0.04	-0.25	-0.77***	0.74***	0.27	0.45*	0.27	0.68***	
TOC	0.63***	-0.78***	1***	0.85***	0.86***	-0.06	-0.14	-0.83***	0.74***	0.44*	0.56**	0.46*	0.77***	
CPMI	0.62***	-0.32*	0.17	0.23	0.32	-0.23	0.31	-0.49**	-0.01	0.49**	0.27	0.53**	0.25	1.0
CF	-0.62***	0.74***	-0.97***	-0.86***	-0.81***	0.01	0.12	0.86***	-0.79***	-0.4*	-0.52**	-0.43*	-0.78***	- 0.5 🙀
	pН	EC	SOM	NN	AN	AK	AP	ST	SM	BON	FON	BSI	FSI	-0 考 W
DOC	0.41*	-0.52**	0.71***	0.41*	0.16	-0.02	0.2	-0.22	0.22	0.3	0.32	0.3	0.37*	-0.5 #
MBC	0.38*	-0.28	0.63***	0.55**	-0.07	-0.19	0.01	-0.27	0.34	0.44**	0.51**	0.38*	0.27	-1.0
EOC	0.54**	-0.52**	0.64***	0.48**	0.21	0.15	0.03	-0.45*	0.41*	0.52**	0.61***	0.58**	0.34	
ROC	0.36*	-0.31	0.96***	0.6***	0.5**	-0.17	0.29	-0.42*	0.35	0.24	0.29	0.18	0.17	
TOC	0.46*	-0.42*	1***	0.64***	0.49**	-0.1	0.26	-0.49**	0.41*	0.36*	0.42*	0.32	0.24	
CPMI	0.39*	-0.36*	0.57***	0.2	-0.04	0.25	-0.17	-0.26	0.26	0.38*	0.47**	0.55**	0.26	
CF	-0.46*	0.46*	-0.86***	-0.58**	-0.49**	0.27	-0.13	0.61***	-0.59***	-0.37*	-0.41*	-0.33	-0.33	
	pН	EC	SOM	NN	AN	AK	AP	ST	SM	BON	FON	BSI	FSI	

图4 土壤环境因子与土壤碳库、碳通量之间的相关关系



BON:细菌 OTU 数 Bacterial OTU numbers;FON:真菌 OTU 数 Fungus OTU numbers;BSI:细菌 Shannon 指数 Bacterial Shannon index;FSI:真菌 Shannon 指数 Fungus Shannon index;上(左)图为旱地,下(右)图为水田

为厘清各环境因子的贡献,引入结构方程模型分析旱地、水田各环境因子与土壤碳通量的相互关系(图 5),二者模型结构具有相似性。土壤水分含量直接导致土壤温度、理化性状(pH、EC、有机质、铵态氮、硝态 氮)的改变,旱地和水田路径系数分别为-0.76、-0.26和-0.92、-0.18,一方面水分条件影响着土壤保温保熵, 另一方面短期淹水胁迫在一定程度上也影响着土壤养分的调节与分配。土壤碳库主要受到土壤水分、温度、 理化因素直接或间接的影响。土壤水分含量、微生物 OTU 数对碳通量作了积极贡献,其中微生物 OTU 数主 要受土壤理化和温度的调控。旱地、水田土壤碳库指标对 CO₂通量的路径系数分别高达 0.84、0.68,呈非常显 著负相关(*P*<0.001),在未来农田土壤 CO₂减排过程中应重点关注土壤碳库这一观测变量。

3 讨论

3.1 旱改水型农田整治对土壤碳排放的影响

雨养农业转向灌溉农业可有效增加粮食生产能力^[12],但极易改变区域农业生产结构、地表覆被和下垫面 性状^[14],对农田生态系统碳排放产生深远影响。本研究发现旱改水整治短期内增加了土壤 CO₂排放量。一 方面,在土壤干湿交替情况下,亦会出现土壤呼吸 CO₂通量短暂而急剧增大的激发效应^[27-28]。Ruser 等发现 土壤由干变湿会增加土壤碳的有效性,而土壤呼吸消耗 O₂,导致土壤呼吸的显著增加^[29]。另一方面,植被覆 盖类型能够影响土壤呼吸,大量研究表明稻田中产生更多温室气体^[21,30],水稻根系分泌的有机物增加使地下 的微生物的生命活动加剧,共同促进了 CO₂的排放^[31]。因此,大规模旱改水型整治存在农业碳排放增加的 风险。

土壤碳排放兼受生物因素和非生物因素的影响^[32],一般认为在水分充足的情况下,温度是主要限制因子,通过控制生物化学反应速率在 CO₂、N₂O 排放中发挥关键作用^[33-34];当水分供给不足时,温度和湿度共同影响土壤 CO₂排放^[35]。本研究中,土壤温度、含水量与土壤碳通量均存在显著相关关系(*P*<0.001)。但"旱 改水"后减弱了温度、含水量与碳通量的相关系数 R²(图 3)。这可能是由于淹水增加对土壤的扰动,从而使





Fig.5 The structural equation model (SEM) of dryland-to-paddy conversion affecting soil carbon flux through different ways 土壤理化为土壤 pH、EC、有机质、铵态氮、硝态氮(绝对含量)PAC 分析第一轴的指标因子,旱地、水田解释度分别为 89.5%、98.1%;微生物 OTU 数为细菌 OTU 数(绝对含量)PAC 分析第一轴的指标因子,旱地、水田解释度分别为 100%、100%,土壤碳库为可溶性有 机碳、微生物量碳、易氧化有机碳、惰性有机碳、土壤总有机碳(绝对含量)PAC 分析第一轴的指标因子,旱地、水田解释度分别为 99.3%、 99.5%。箭头上的数值代表标准通经系数,箭头粗细代表相关性高低;红色箭头表示显著正相关(P<0.05),绿色箭头表示显著负相关(P<0.05),虚线箭头表示无显著影响,R²值表示通经解释度

得土壤的原有结构被破坏,加剧了土壤呼吸的不稳定性,进而降低了土壤环境因子与碳通量之间相关性。土 壤水分对碳通量的影响,不同土壤环境条件下亦有所差异。Holt 等^[36]发现干旱条件下土壤水分与碳通量呈 极显著的正相关关系,而 Kucera 等^[37]认为当土壤含水量低于永久萎蔫点时,随着土壤水分增加,CO₂排放量 会降低。本研究中旱地和水田土壤碳通量与含水量均存在显著负相关(*P*<0.001),这可能与本研究所处地区 较为湿润有关。土壤环境具有一定复杂性,碳通量不仅受温度、水分影响,且受土壤理化、微生物、植被覆盖等 多因素调控,农田 CO₂排放难以单用一个简单方程来刻画,要综合考虑各因素的互馈作用机制。

3.2 旱改水后土壤碳通量的变化机制

旱改水型农田整治过程中土地平整、合并地块、差异化田间管理措施等是推动土壤水热条件、通气状况等 微生态变化的重要因素^[13-14]。水田和旱地是两种截然不同的土地利用方式,二者在土壤有机碳周转和保护、 土壤微生物群落结构等方面差异悬殊^[15,38],使得土壤有机碳的输入及排放产生变化^[39-40]。本研究发现,土壤 水分、微生物 OTU 数、土壤碳库对碳通量的排放速率的互作效应显著。微生物呼吸作用是土壤碳排放的主要 途径^[23],Pille 等^[41]发现土壤微生物学特性在一定程度上影响微生物生物量碳和微生物的呼吸作用。旱地、 水田土壤理化性状通过改变土壤微生物 OTU 数,进而影响碳通量变化。微生物对环境变化反应敏感^[36],土 壤 pH、水分含量、有机质等理化因子对微生物群落结构和组成具有较大影响^[21,39],笔者此前研究也表明,旱 改水前后农田土壤环境条件的极大差异影响到微生物参与的土壤碳氮循环过程^[13,15]。

先前的田间实验表明,长期种植水稻有利于土壤有机碳固存,水田有机碳含量平均高出同一景观的旱地 10%以上^[6,16]。但也有学者认为淹水可促进有机碳的降解,Ma等研究表明农田土壤淹水后有利于有机碳的 矿化,淹水处理 CO₂的排放速率在 15—60 d 和 60—180 d 分别增加了 188%和 74%,土壤 CO₂排放量显著增 加^[42],这与本研究结果相似。旱改水整治后短期内土壤有机碳和土壤碳库管理指数均呈减少趋势,我们判断 主要原因是干湿交替驱动了土壤有机碳在植物-土壤-微生物中重新分配,土壤也在呼吸释放二氧化碳,减少 有机碳的积累量。土壤碳库兼受 pH、硝态氮、温度、微生物 OTU 数等多重环境因子影响。其中土壤硝态氮比 与碳库含量呈极显著正相关(*P*<0.001),其原因可能是硝态氮与土壤消化、反消化过程关系密切,其变化会影 响微生物对有机碳的分解速率^[15]。

3.3 旱改水的不确定性

为应对耕地过快损失和维护粮食安全,近年来中国大规模开展旱改水型农田整治工程,导致华北、东北水田面积持续扩张^[14]。灌溉农业大规模扩张的威胁包含二方面:一是地下水资源安全面临严峻挑战^[34],二是地表蒸发加强导致夏季极端高温气候出现,加速全球气候变化^[43]。例如水田面积持续扩大,地下水位下降,导致华北平原现已成为世界上最大的地下降落水漏斗区^[30]。农业灌溉大规模扩张,致使地表辐射、能量平衡发生变化,进而影响地表湿度和温度。Kang和 Eltahir 研究表明,华北平原灌溉农业大面积扩张,地表蒸发愈发强烈,地表辐射增强导致高温热浪频发,将会在本世纪末不适宜人类生存^[43]。

伴随全球变化加剧,温室气体减排与低碳生产已成为各界关注的热点^[3,24]。一方面区域生态系统碳氮循 环过程对土地利用方式、田间管理措施的响应程度存在差异^[3,5],先前研究表明,农用地内部转化也会造成大 量的温室气体排放,如森林或草地转变为耕地、旱田转变为水田等^[16]。另一方面稻田作为重要的温室气体排 放源,产生大量的 CO₂、CH₄、N₂O 严重威胁全球变化^[44]。

当前我国农业正面临资源约束与环境趋紧双重压力^[30],本研究以持续田间监测数据为基础,发现旱改水 在短期内增加了土壤碳通量,旱改水整治在确保耕地占补平衡、维护粮食安全的同时,在温室气体排放等方面 产生潜在的风险。综合全国旱改水整治工程而言,本文仅对探究了黄淮海平原旱改水整治对土壤碳通量的短 期影响。未来可在全国范围内选取旱地改水田不同年限的农田土壤为研究对象,建立全国范围旱改水整治土 壤环境数据库,深入探讨旱改水整治农田土壤碳排放时空变化特征。同时兼顾作物产量、农田碳排放、生产资 料等数据,定量测算生产单位标准粮旱地、水田投入产出间的关系,评估旱改水对农业碳排放的适应性。大面 积旱改水带来的农田碳循环机理的改变需引起足够的重视,并持续关注旱改水型整治中碳排放的长期动态变 化。作为农业大国,我国未来应推行农业减排政策、推广兼顾生态与经济的农业技术,以期积极应对全球变化 影响。

4 结论

全面、系统地认识土地利用方式转化过程中土壤碳通量变化至关重要。本研究利用田间模拟实验、野外监测和室内实验方法,探索旱改水型整治下土壤碳通量动态及碳库组成特征及其驱动因子,取得如下主要结论:①"旱改水"整治短期内可增加土壤碳通量。旱地与水田的土壤碳通量和温度的最大值均出现在 13:00 前后,且土壤碳通量的日变幅分别为 21.84%、15.02%。②旱改水短期内土壤有机碳下降,农田土壤可溶性有机碳、微生物量碳、易氧化有机碳、惰性有机碳、总有机碳和碳库管理指数均减少,对土壤微生物量碳、易氧化有机碳、零1.5%、29.09%。③土壤碳排放与环境因子显著相关。旱改水整治引起的土壤含水量、微生物 OTU、碳库含量改变是导致土壤碳通量速率变化的主要原因(P<0.05),土壤温度、理化性状是制约碳库的主控因素(P<0.05)。可见,旱改水型整治虽能落实耕地占补平衡、维护粮食安全,但同时可能造成农田碳排放压力增大,故未来应引入土壤碳通量实时监测体系,以期实现农业低碳化发展、减缓全球气候变化。

参考文献(References):

[1] Crowther T W, Todd-Brown K E O, Rowe C W, Wieder W R, Carey J C, Machmuller M B, Snoek B L, Fang S, Zhou G, Allison S D, Blair J M, Bridgham S D, Burton A J, Carrillo Y, Reich P B, Clark J S, Classen A T, Dijkstra F A, Elberling B, Emmett B A, Estiarte M, Frey S D, Guo J, Harte J, Jiang L, Johnson B R, Kröel-Dulay G, Larsen K S, Laudon H, Lavallee J M, Luo Y, Lupascu M, Ma L N, Marhan S, Michelsen A, Mohan J, Niu S, Pendall E, Peñuelas J, Pfeifer-Meister L, Poll C, Reinsch S, Reynolds L L, Schmidt I K, Sistla S, Sokol N W, Templer P H, Treseder K K, Welker J M, Bradford M A. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. Nature, 2016, 540(7631):

104-108.

- [2] Zhou Z H, Wang C K, Luo Y Q. Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality. Nature Communications, 2020, 11(1): 3072.
- [3] Lai L, Huang X J, Yang H, Chuai X W, Zhang M, Zhong T Y, Chen Z G, Chen Y, Wang X, Thompson J R. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology, 2002, 8(4): 345-360.
- [6] 王苑,宋新山,王君,严登华,王宇晖,周斌.干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响.土壤学报,2014,51(2):342-350.
- [7] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋,揣小伟.区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化.农业工程学报,2013,29(17):220-229.
- [8] Rosa L, Chiarelli D D, Sangiorgio M, Beltran-Peña A A, Rulli M C, D'Odorico P, Fung I. Potential for sustainable irrigation expansion in a 3 °C warmer climate. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(47): 29526-29534.
- [9] 陈罗烨, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇时空演化特征分析. 自然资源学报, 2016, 31(4): 596-607.
- [10] 崔文超, 焦雯珺, 闵庆文, 吴敏芳, 孙业红. 基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价——以青田稻鱼共生系统为例. 生态学报, 2020, 40(13): 4362-4370.
- [11] 郧宛琪,朱道林,汤怀志.中国土地整治战略重塑与创新.农业工程学报,2016,32(4):1-8.
- [12] 向长玉,周东兴,宋戈,赵映慧.黑龙江省通河县旱地改水田许可转换度研究.农业工程学报,2012,28(13):226-230.
- [13] Li X X, Zhang Q, Ma J, Yang Y J, Wang Y F, Fu C. Flooding Irrigation weakens the molecular ecological network complexity of soil microbes during the process of dryland-to-paddy conversion. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(2): 561.
- [14] Dong J, Xiao X, Zhang G, Menarguez M A, Choi C Y, Qin Y, Luo P, Zhang Y, Moore B. Northward expansion of paddy rice in northeastern Asia during 2000-2014. Geophysical Research Letters, 2016, 43(8): 3754-3761.
- [15] Li X X, Ma J, Yang Y J, Hou H P, Liu G J, Chen F. Short-term response of soil microbial community to field conversion from Dryland to paddy under the land consolidation process in North China. Agriculture, 2019, 9(10): 216.
- [16] 谭梦,黄贤金,钟太洋,赵荣钦,顾留其,徐泽基,蒋超俊,黄金碧.土地整理对农田土壤碳含量的影响.农业工程学报,2011,27(8): 324-329.
- [17] 丁金枝,来利明,赵学春,朱林海,姜联合,郑元润.荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响.生态学报,2011,31(6): 1594-1603.
- [18] 李肖肖,朱凤武,许桃元,姚新春,余漫,陈浮.苏南农田土壤性状和水稻长势对土地整治的短期响应.土壤学报,2019,56(3): 571-581.
- [19] 马原,迟美静,张玉玲,范庆峰,虞娜,邹洪涛.黑土旱地改稻田土壤水稳性团聚体有机碳和全氮的变化特征.中国农业科学,2020,53 (8):1594-1605.
- [20] Kueppers L M, Snyder M A, Sloan L C. Irrigation cooling effect: regional climate forcing by land-use change. Geophysical Research Letters, 2007, 34(3): L03703.
- [21] Qin H L, Tang Y F, Shen J L, Wang C, Chen C L, Yang J, Liu Y, Chen X B, Li Y, Hou H J. Abundance of transcripts of functional gene reflects the inverse relationship between CH₄ and N₂O emissions during mid-season drainage in acidic paddy soil. Biology and Fertility of Soils, 2018, 54(8): 885-895.
- [22] Watanabe T, Katayanagi N, Agbisit R, Llorca L, Hosen Y, Asakawa S. Influence of alternate wetting and drying water-saving irrigation practice on the dynamics of *Gallionella*-related iron-oxidizing bacterial community in paddy field soil. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 152: 108064.
- [23] Hopkins D W, Sparrow A D, Gregorich E G, Novis P, Elberling B, Greenfield L G. Redistributed lacustrine detritus as a spatial subsidy of biological resources for soils in an Antarctic dry valley. Geoderma, 2008, 144(1/2): 86-92.
- [24] 俄有浩, 霍治国, 赵花荣, 马玉平. 华北平原农田 CO,浓度变化特征. 生态学报, 2020, 40(18): 6613-6620.
- [25] 蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 龙高飞, 杨丽蓉, 贾永霞, 徐小逊, 李云. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化. 生态学报, 2017, 37(2); 367-377.
- [26] Leavitt S W, Follett R F, Paul E A. Estimation of slow- and fast-cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis. Radiocarbon, 1996, 38 (2): 231-239.
- [27] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1485-1498.
- [28] Olsen H R, Van Miegroet H. Factors affecting carbon dioxide release from forest and rangeland soils in northern Utah. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 282-291.
- [29] Ruser R, Flessa H, Russow R, Schmidt G, Buegger F, Munch J C. Emission of N2O, N2 and CO2 from soil fertilized with nitrate: effect of

compaction, soil moisture and rewetting. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(2): 263-274.

- [30] 成升魁,鲁春霞,郭金花,刘立涛,徐增让,黄绍琳.中国农业资源环境透视——问题与建议.科技导报,2018,36(11):13-21.
- [31] Lu Y H, Lueders T, Friedrich M W, Conrad R. Detecting active methanogenic populations on rice roots using stable isotope probing. Environmental Microbiology, 2005, 7(3): 326-336.
- [32] Li Y H, Shahbaz M, Zhu Z K, Deng Y W, Tong Y Y, Chen L, Wu J S, Ge T D. Oxygen availability determines key regulators in soil organic carbon mineralisation in paddy soils. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 153: 108106.
- [33] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in Eucalyptus pauciflora forest. Plant and Soil, 1997, 190(1): 127-141.
- [34] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [35] 韩营营,黄唯,孙涛,陆彬,毛子军.不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量.生态学报,2015,35(5):1460-1469.
- [36] Holt J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi-arid northeastern Australia. Applied Soil Ecology, 1997, 5(2): 143-149.
- [37] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. Ecology, 1971, 52(5): 912-915.
- [38] 刘真勇,高振,王艳玲,姚怡.旱地转变为稻田对关键带红壤剖面土壤团聚体碳含量的影响.土壤学报,2019,56(6):1526-1535.
- [39] Jiang Y J, Liang Y T, Li C M, Wang F, Sui Y Y, Suvannang N, Zhou J Z, Sun B. Crop rotations alter bacterial and fungal diversity in paddy soils across East Asia. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 95: 250-261.
- [40] Pries C E H, Castanha C, Porras R C, Torn M S. The whole-soil carbon flux in response to warming. Science, 2017, 355(6332): 1420-1423.
- [41] Pille da Silva E, Dutra de Armas R, Ademar Avelar Ferreira P, Laurentino Dantas M K, Giachini A J, Rocha-Nicoleite E, González A H, Fonsêca Sousa Soares C R. Soil attributes in coal mining areas under recovery with bracatinga (*Mimosa scabrella*). Letters in Applied Microbiology, 2019, 68(6): 497-504.
- [42] Ma C, Chen X, Zhang J Z, Zhu Y P, Kalkhajeh Y K, Chai R S, Ye X X, Gao H J, Chu W Y, Mao J D, Thompson M L. Linking chemical structure of dissolved organic carbon and microbial community composition with submergence-induced soil organic carbon mineralization. Science of the Total Environment, 2019, 692: 930-939.
- [43] Kang S, Eltahir E A B. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation. Nature Communications, 2018, 9 (1): 2894.
- [44] 杨蕙琳, 娄运生, 刘燕, 周东雪. 夜间增温品种混栽对稻田土壤 CH₄和 N₂O 排放的影响. 生态学报, 2021, 41(2): 553-564.