

模拟酸雨对福州平原水稻田土壤碳库及碳库管理指数的影响

陈晓旋¹, 安婉丽¹, 陈优阳¹, 刘旭阳¹,

金强¹, 林少颖¹, 王维奇^{1,2}

(1.福建师范大学地理研究所,福州 350007;2.湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室,福州 350007)

摘要:为阐明酸雨对水稻田土壤有机碳组分含量以及土壤碳库的影响,以福州平原水稻田为研究对象,在不同生长期早稻和晚稻中,设置对照(CK)、模拟 pH 2.5、pH 3.5、pH 4.5 酸雨处理,对酸雨影响下福州平原水稻田土壤有机碳组分含量进行了测定与分析。结果表明:酸雨处理对土壤总有机碳(SOC)存在不同程度的影响,在早稻整个生长期,酸雨对土壤 SOC 含量的影响不显著($P > 0.05$),晚稻返青期和成熟期中,返青期依次高于 CK 处理 24.70%,10.47%,9.97%,成熟期依次高于 CK 处理 6.33%,8.75%,9.46%,酸雨显著提高土壤 SOC 含量($P < 0.05$)。早稻成熟期,对照组溶解性有机碳(DOC)含量显著高于 pH 3.5 酸雨处理组;整个晚稻生长期,酸雨对土壤 DOC 含量的综合影响不显著($P > 0.05$)。早晚稻酸雨的施加使土壤易氧化态碳(EOC)含量低于对照组($P < 0.05$);早晚稻土壤微生物量碳(MBC)含量表现出明显的随时间变化的规律,早稻对照组土壤 MBC 含量低于酸雨处理($P < 0.05$),晚稻则相反。早稻土壤 SOC 与 TN、TP、电导和含水量存在极显著正相关关系($P < 0.01$),晚稻土壤 SOC 与 TP 存在极显著正相关关系($P < 0.01$)。将早晚稻的对照作参考土壤,早稻返青期以及晚稻拔节期和成熟期酸雨处理下碳库活度(A)及碳库活度指数(AI)低于对照处理,其他生长期差异性不大,且在一定范围内稻田土壤有机碳库维持一定的活跃度。早稻返青期、晚稻拔节期和成熟期酸雨处理下碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CPMI)显著低于对照组($P < 0.05$)。酸雨处理降低了土壤碳库管理指数将不利于水稻生长。

关键词: 碳组分; 碳库管理指数; 酸雨; 水稻田; 福州平原

中图分类号: X17

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0294-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.043

Effects of Simulated Acid Rain on Soil Carbon Pool and Soil Carbon Pool Management Index of Paddy Field in Fuzhou Plain

CHEN Xiaoxuan¹, AN Wanli¹, CHEN Youyang¹,

LIU Xuyang¹, JING Qiang¹, LIN Shaoying¹, WANG Weiqi^{1,2}

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2. Key Laboratory of

Humid Sub-tropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: In order to clarify the effects of acid rain on soil organic carbon content and soil carbon pool in paddy fields, the paddy field in Fuzhou Plain was taken as the research object, and the control (CK), simulated pH 2.5, pH 3.5, pH 4.5 acid rain treatments were set up in early and late rice at different growth stages to determine and analyze organic carbon component content of Paddy soil under the simulated acid rain. The results showed that acid rain had different effects on soil total organic carbon (SOC). During the whole growing season of early rice, the effect of acid rain on soil SOC content was not significant ($P > 0.05$). For the late rice, the soil SOC contents of the acid rain treatments were 24.70%, 10.47% and 9.97% higher than that of CK during the greening period, and during the maturity period, the soil SOC contents were 6.33%, 8.75% and 9.46% higher than that of CK. Acid rain significantly increased soil SOC content ($P < 0.05$). During maturation period of early rice, the dissolved organic carbon (DOC) content of the CK was significantly higher than that of the pH 3.5 acid rain treatment. The comprehensive effect of acid rain on soil DOC content was not significant during the whole growth period of late rice ($P > 0.05$). The application of acid rain made the soil oxidizable carbon (EOC) content lower than that of the CK ($P < 0.05$). The soil microbi-

收稿日期: 2019-04-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571287); 福建省公益类科研院所专项(2018R1034-1); 福建省高校杰出青年科研人才培养计划项目(2017)

第一作者: 陈晓旋(1993-), 男, 广东潮州人, 硕士研究生, 主要从事生态与环境研究。E-mail: chenccx1027@163.com

通信作者: 王维奇(1982-), 男, 辽宁沈阳人, 副研究员, 主要从事生态与环境研究。E-mail: wangweiqi@fjnu.edu.cn

al biomass carbon (MBC) content of early and late rice showed obvious change with time. The MBC content of the early rice in the CK was lower than those in the acid rain treatments ($P < 0.05$), while that of the late rice was the opposite. There was a significant positive correlation between soil SOC and TN, TP, conductivity and water content in early rice ($P < 0.01$). There was a significant positive correlation between soil SOC and TP in late rice ($P < 0.01$). Taking the CK of the early and late rice as the reference soil, the carbon storage activity (A) and carbon storage activity index (AI) of the early rice during greening period and late rice during jointing and mature periods in the acid rain treatment were lower than those of the CK, and there was no significant difference at other growth stages, and within a certain range, the paddy soil organic carbon pool maintained a certain degree of activity. The carbon pool index (CPI) and carbon pool management index (CPMI) of the early rice during greening period, late rice during jointing and mature periods in the acid rain treatments were significantly lower than those of the CK ($P < 0.05$). Acid rain treatment reduced the CPMI, which would be detrimental to rice growth.

Keywords: carbon component; carbon pool management index; acid rain; paddy field; Fuzhou plain

随着工业革命发展,大气成分中氮氧化物、硫化物浓度显著上升,酸雨频率增多,酸雨作为全球性环境问题引起世界人民的广泛关注^[1]。有报道^[2-3]指出,中国已成为世界第三大酸雨区,且酸雨污染主要集中在长江以南地区,加剧陆地生态系统的酸化,破坏生态系统的平衡,尤其是人类赖以生存的农田生态系统也受到严重影响。农田生态系统中土壤是整个生态系统的最终受体,土壤质量好坏的改变深刻影响生态系统的质量,土壤理化及生物过程均会受酸雨的作用而改变,酸雨对土壤的影响受到国内外学者的重视^[4]。

土壤作为农田生态系统中最活跃的碳库,土壤碳库的变化对碳循环有显著影响,其中有机碳库是土壤碳库的重要组成部分^[5],且占比重较大,其含量是土壤的一个重要属性,以及有机碳库对气候环境、土壤理化性质和生物过程的响应深刻^[6],进而影响土壤有机碳收支平衡及土壤碳库量。不同类型土壤受到酸雨影响程度不同,与旱地相比,水稻土有机碳含量更高,且含量变化有持续增加的趋势^[7],因此,稻田土壤有机碳在酸雨作用下的变化机制值得我们进行深入探讨。

有研究^[8]表明,土壤中总有机碳含量(SOC)的变化非常缓慢,短期内不能迅速指示土壤碳库变化,而活性有机碳能够快速地表征环境条件改变对土壤碳库的影响,主要是因为活性有机碳高效直接的供给植物养分,且易被土壤微生物分解利用,所以活性有机碳被认为是评价土壤碳库早期动态变化的良好指标。此外,有学者^[9-10]认为,活性有机碳之间存在显著或极显著正相关关系,活性有机碳库与稳定有机碳库之间呈负相关关系,然而,目前关于土壤活性有机碳对酸雨的响应探讨仍显不足,特别是酸雨对双季稻土壤不同活性有机碳组分及其相互关系的研究尚鲜见报道。因此,开展不同酸雨强度对不同季水稻土壤的研

究尤为重要,对于厘清土壤中不同组分碳的相互转化关系及其变化,对于提升土壤固碳量及土壤质量具有重要的理论和现实意义。

此外,土壤碳动态还可通过土壤碳库管理指数进行指示,也是土壤有机碳变化的重要依据之一,不同田间管理措施对稻田土壤碳库的影响可从土壤碳组分动态变化去评估结果^[11]。有研究^[12]表明,土壤碳库管理指数越高,表示土壤有机碳分解越快,且质量也越高。近年来,国内外学者对于土壤碳库管理指数的研究较多,但大多集中在田间施肥、废弃物还田及耕作方式等田间管理下土壤碳库管理指数变化状况的研究^[13],而对于环境变化,如不同梯度酸雨作用下对土壤碳库管理指数影响的研究尚鲜见报道。因此,本研究评价酸雨对水稻田土壤碳库及碳库管理指数的影响有重要的理论意义和实践价值。

福州市酸雨频发严重影响水稻生产发展。本研究主要探讨不同强度酸雨影响下,水稻田活性有机碳含量变化及之间的关系变化,表征水稻田土壤碳库及其管理指数,以期为稻田土壤有机碳管理提供科学指导,对水稻可持续生产具有重要的现实意义,进一步提高土壤的利用率和农业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验区位于福建省水稻研究所。试验区内实行轮作制度:早稻—晚稻—蔬菜,试验开始前为保持土壤的均一性,人工整平翻耕后的田地。试验区早晚稻栽培品种分别为江西省农科院研发的“和盛 10 号”和福建省农科院研发的“沁香优 212”,采用机插,株行距 14 cm×28 cm,早稻于 2015 年 4 月 16 日机插移栽,2015 年 7 月 17 日收割,晚稻于 2015 年 7 月 25 日机插移栽,2015 年 11 月 7 日收割。水稻生长水管理为水稻分蘖期以前实行水淹管理,分蘖期后实行烤田—淹水—

湿润灌溉相结合。复合肥(N—P₂O₅—K₂O 为 16—16—16)和尿素(46% N)是本研究中的主要施加肥料,移栽前 1 天施加底肥(42 N, 40 P₂O₅, 40 K₂O kg/hm²),移栽约 1 周后施加分蘖肥(35 N, 20 P₂O₅, 20 K₂O kg/hm²),移栽约 8 周后施加穗肥(18 N, 10 P₂O₅, 10 K₂O kg/hm²)^[14]。经测试,水稻田耕层土壤全碳(TC)含量为(18.16±0.36) g/kg、全氮(TN)含量为(1.93±0.11) g/kg、全磷(TP)含量为(1.80±0.06) g/kg。

1.2 试验设计与样品采集

本试验插秧后第 1 天,选取试验区秧苗高度、密度较一致的地点为采样点。早、晚稻时期分别设置空白对照(CK)、pH=2.5、pH=4.5 和 pH=3.5 的酸雨处理组,每种处理 3 个重复(图 1)。在小区设置上,设置小区面积 10 m²,随机区组排列,为降低大田串水串肥现象,在田埂外围插入 0.5 cm 厚 PVC 板地上地下部分各为 15 cm。每个小区之间的间隔约为 1 m,作为不同处理之间的缓冲区^[15]。根据福州市酸雨成分配置酸雨母液,主要成分及含量分别为:Na⁺(147.96 μmol/L)、K⁺(13.40 μmol/L)、Mg²⁺(24.086 μmol/L)、Ca²⁺(72.97 μmol/L)、NH₄⁺(47.35 μmol/L)、Cl⁻(159.44 μmol/L)、NO₃⁻(119.19 μmol/L)、SO₄²⁻(76.35 μmol/L)并用体积比为 1:1 的浓 HNO₃ 和浓 H₂SO₄ 混合液调酸雨 pH^[14],根据福州市历年年均酸沉降量计算出每个试验样方的最佳喷适量,水稻移栽后每隔 7 天喷淋 1 次酸雨,喷淋高度位于植株顶部上方 5 cm 处,均匀喷淋到样方中,直至水稻收割^[15]。

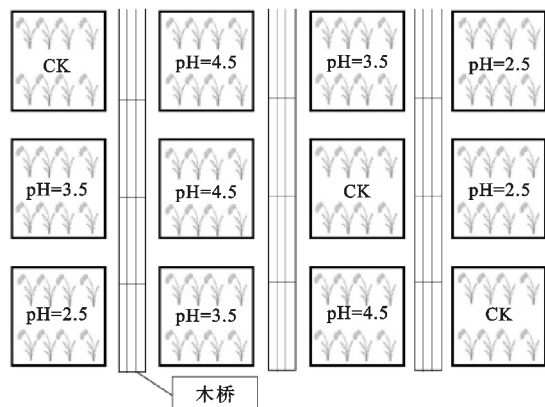


图 1 试验小区分布

土样采集:针对 4 种处理,共 12 个小区,每个小区用土壤采土器多点采集水稻收获期各处理犁耕层 0—15 cm 土壤,迅速混合以降低土壤异质性,装入自封袋,并用便携式保温箱密封保存,带回实验室,挑去植物残体根系后,分成 2 份,1 份自然风干后装入自封袋保存待用,1 份放入 4℃ 冰箱冷藏待用^[12]。

1.3 样品测定

土壤养分测定:土壤 SOC 测定采用重铬酸钾—

外加热法^[16];土壤全氮(TN)采用 CN 元素分析仪(Elementar Vario MAX CN, Germany)测定^[16],全磷(TP)采用硫酸—高氯酸消解,在连续流动分析仪(SKALAR SAN++, Netherlands)测定^[14]。土壤溶解性有机碳(DOC)使用 0.5 mol/L 硫酸钾浸提^[17],土壤易氧化态碳(EOC)使用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法提取,土壤微生物碳(MBC)经过氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提之后^[16],在总有机碳分析仪(Shimadzu TOC—VCPH, Japan)测定。

环境因子测定:土壤 pH 采用水土质量比为 2.5:1,振荡 30 min,静置后用便携式 pH 计(STARTER 300, 美国)测定;土壤含水量(重量含水量)烘干法^[16]测定;地下 10 cm 土层(表征 0—15 cm 土壤的均值)的土温和电导率(EC)采用便携式电导计(2265 FS, USA)测定。

1.4 指标计算

碳库管理指数(CPMI)的计算方法^[18]为:

碳库活度(A)=土壤活性碳含量/土壤非活性有机碳含量

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度/参考土壤碳库活度

碳库指数(CPI)=样品总有机碳含量/参考土壤总有机碳含量

碳库管理指数(CPMI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100

本文参考土壤选取水稻邻近的未进行酸处理的对照土壤作为参考土壤。

1.5 数据处理与分析

运用 Excel 2013、Origin 8.0、SPSS 20.0 统计软件对测定数据进行整理。原始数据的平均值及标准偏差的计算采用 Excel 2013 软件分析,并运用 Origin 8.0 软件绘制含量及比值图。酸雨对早、晚水稻田土壤有机碳组分含量及比值的差异性均采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差及重复测量方差分析,土壤理化性质及碳库管理指数差异性均采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析。相关性分析采用 SPSS 20.0 软件的 Pearson 相关性分析。

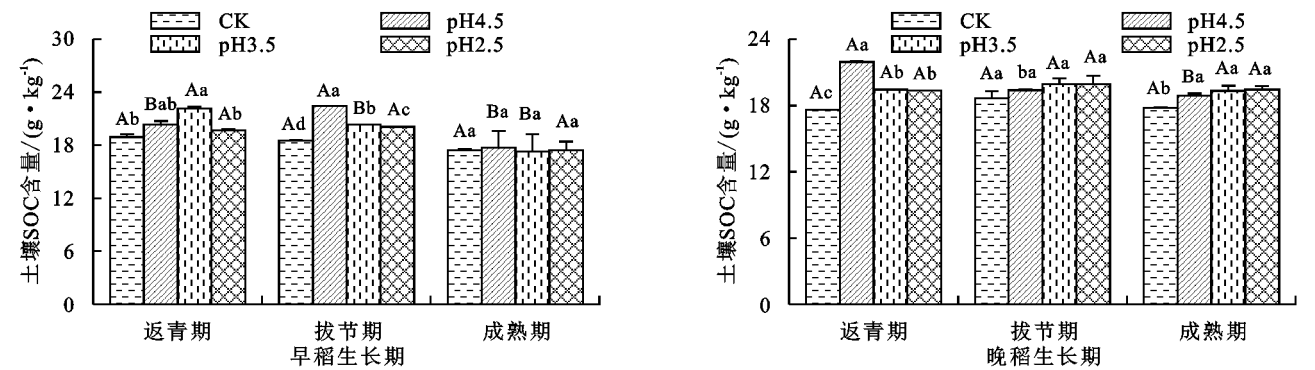
2 结果与分析

2.1 酸雨作用下土壤 SOC 含量变化

总体上,早稻返青期和拔节期中对照组(CK)和酸雨处理组土壤 SOC 含量较高(图 2),成熟期显著降低($P<0.05$)。在早稻整个生长期,酸雨对土壤 SOC 含量的影响不显著,而个别时期中,酸雨处理对土壤 SOC 存在不同程度的影响(表 1),返青期,与 CK 相比, pH 3.5 处理土壤 SOC 含量显著升高 17.00% ($P<0.05$),而 pH 4.5 和 pH 2.5 无明显影

响;拔节期,3 种酸雨处理下,土壤 SOC 含量均高于 CK($P<0.05$),早稻生长期土壤 SOC 季节变化特征明显。晚稻生长期中,酸雨处理下土壤 SOC 含量变化显著($P<0.01$)。与对照组相比,晚稻返青期和成

熟期,酸雨处理下土壤 SOC 含量显著高于 CK($P<0.05$),返青期和成熟期酸雨处理 pH 4.5、pH 3.5 和 pH 2.5 依次高于 CK 处理 24.70%,10.47%,9.97% 和 6.33%,8.75%,9.46%。



注:图中小写字母表示同一生长期不同处理之间差异显著($P<0.05$);大写字母表示同一处理不同生长期期差异显著($P<0.05$)。下同。

图 2 酸雨处理下水稻田土壤 SOC 含量变化特征

表 1 酸雨对早、晚稻土壤 C 的重复测量方差分析

养分	处理	早稻				晚稻			
		<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
SOC	酸雨	3,8	6.556	2.583	0.126	3,8	7.212	16.733	<0.01
	时间	2,16	32.684	16.408	<0.01	2,16	1.889	5.400	0.016
	酸雨×时间	6,16	3.450	1.732	0.178	6,16	2.618	7.483	<0.01
DOC	酸雨	3,8	77.873	8.298	<0.01	3,8	76.749	2.004	0.192
	时间	2,16	1345.985	86.463	<0.01	2,16	839.257	47.444	<0.01
	酸雨×时间	6,16	61.820	3.971	0.013	6,16	178.533	10.093	<0.01
EOC	酸雨	3,8	0.045	0.235	0.870	3,8	1.749	1.957	0.199
	时间	2,16	1.447	2.976	0.080	2,16	1.746	1.389	0.278
	酸雨×时间	6,16	0.447	0.919	0.507	6,16	1.182	1.441	0.260
MBC	酸雨	3,8	738.620	16.109	<0.01	3,8	108.289	0.356	0.786
	时间	2,16	14003.062	62.711	<0.01	2,16	844.334	1.923	0.178
	酸雨×时间	6,16	2077.294	9.303	<0.01	6,16	2498.584	5.692	<0.01

注: $n=12$ 。

2.2 酸雨作用下土壤 DOC 含量变化

早稻土壤 DOC 含量在酸雨作用下,返青期土壤 DOC 含量最高,拔节期最低(图 3),随水稻生长时间变化特征显著(表 1)。返青期中,pH 3.5 和 pH 2.5 处理显著降低土壤 DOC 含量($P<0.05$),而 pH 4.5 处理相反($P<0.05$);拔节期各处理土壤 DOC 含量无显著变化;成熟期,对照组土壤

DOC 含量显著高于 pH 3.5 酸雨处理组。

总体晚稻生长期,酸雨对土壤 DOC 含量的影响显著性不强。晚稻返青期,酸雨处理组 pH 3.5、pH 4.5 下土壤 DOC 含量比对照组明显增多($P<0.05$);拔节期则不同,酸雨处理组 pH 4.5 和 pH 2.5 显著降低($P<0.05$);成熟期各处理组无差异性(图 3)。

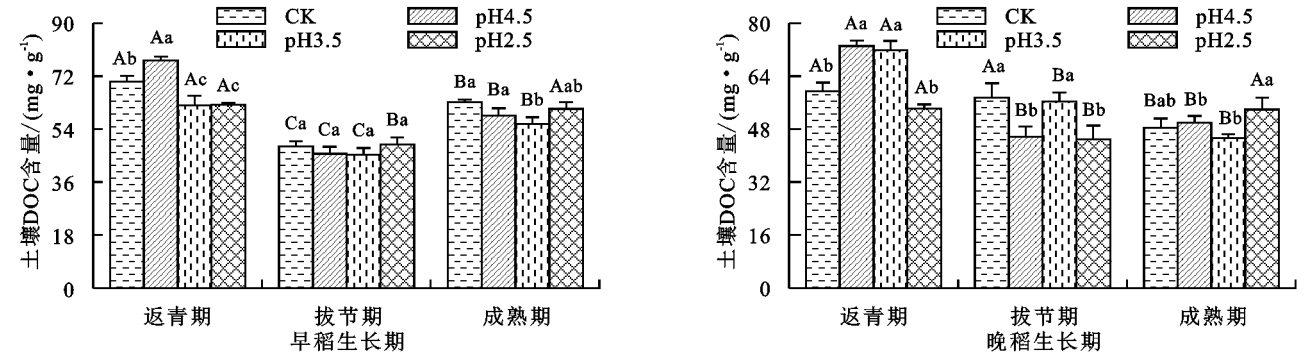


图 3 酸雨处理下水稻田土壤 DOC 含量变化特征

2.3 酸雨作用下土壤 EOC 含量变化

早稻期间,酸雨作用对土壤 EOC 含量影响不显

著(图 4)。晚稻期间土壤 EOC 含量无明显变化规

律。晚稻返青期,pH 2.5 处理土壤 EOC 含量显著高于 CK 组 48.68%($P<0.05$),而拔节期和成熟期土壤

EOC 含量有所降低,酸雨处理对晚稻土壤 EOC 含量影响不显著(表 1)。

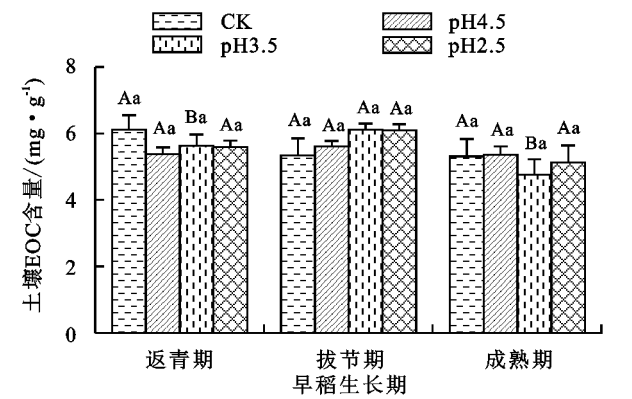


图 4 酸雨处理下水稻田土壤 EOC 含量变化特征

2.4 酸雨作用下土壤 MBC 含量变化

由图 5 可知,返青期 pH 3.5 酸雨处理组显著增加土壤 MBC 含量($P<0.05$);拔节期土壤 MBC 含量随酸雨 pH 的降低显著减少($P<0.05$);成熟期酸雨处理均显著提高土壤 MBC 含量($P<0.05$)。晚稻

生长期间,酸雨处理增加了返青期和拔节期土壤 MBC 含量,成熟期则相反($P<0.05$)。早稻土壤中 MBC 含量在不同的生长期有显著的差异(表 1),酸雨和时间的交互作用对早稻土壤 MBC 也有着显著影响($P<0.01$)。

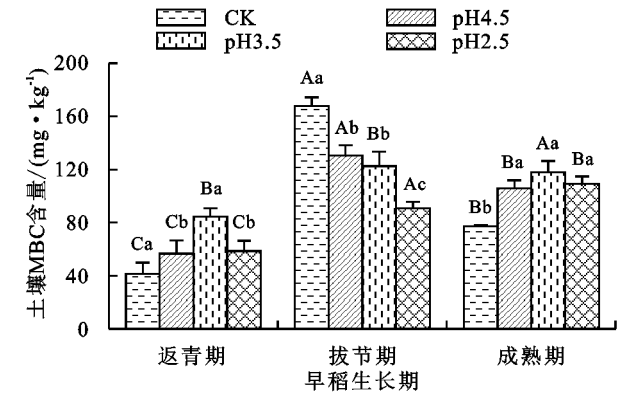
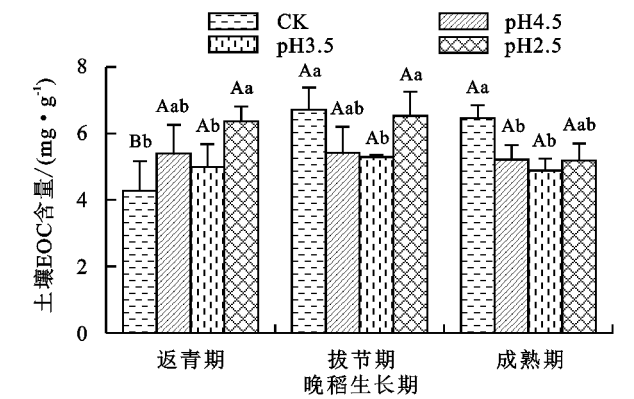
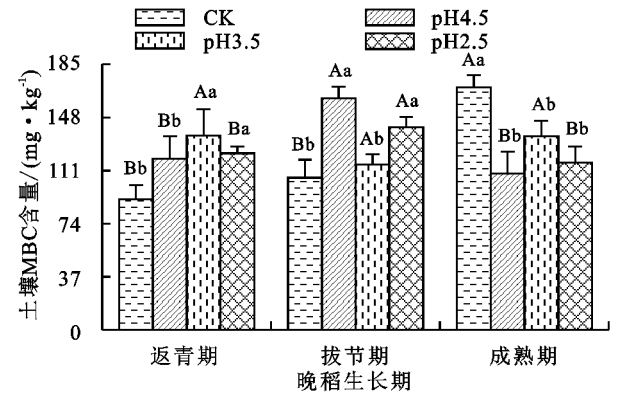


图 5 酸雨处理下水稻田土壤 MBC 含量变化特征

2.5 酸雨处理下土壤有机碳组分与总有机碳比值

由图 6 可知,早稻拔节期土壤 DOC/SOC 显著低于返青期和成熟期($P<0.05$);返青期土壤 MBC/SOC 显著低于拔节期和成熟期($P<0.05$),其中,返青期和成熟期 pH 3.5 处理下该含量显著高于 CK 处理,以及拔节期 CK 处理 MBC/SOC 含量最高;而土壤 EOC/SOC 在各生长期之间无显著差异($P>0.05$)。



晚稻土壤 DOC/SOC 含量返青期最高,其中 pH 4.5 和 pH 3.5 处理显著高于拔节期和成熟期($P<0.05$);拔节期 pH 4.5 处理土壤 MBC/SOC 显著高于其他生长期同一处理($P<0.05$),成熟期 CK 处理土壤 MBC/SOC 含量最高;晚稻各生长期土壤 EOC/SOC 差异性不显著($P>0.05$),成熟期中 CK 处理显著高于酸雨处理($P<0.05$)。

DOC/SOC 存在极显著正相关关系($P<0.01$);早稻土壤 MBC 与 DOC/SOC 存在极显著负相关关系($P<0.01$),早、晚稻土壤 MBC 与 MBC/SOC 存在极显著正相关关系($P<0.01$);早、晚稻土壤 EOC 与 EOC/SOC 存在极显著正相关关系($P<0.01$)。

2.6 酸雨处理下土壤有机碳组分之间及其与土壤理化性质之间的相关关系

由表 2 可知,早、晚稻土壤中土壤 DOC 与土壤 MBC、MBC/SOC 存在极显著负相关关系($P<0.01$),与

早稻土壤 SOC 与 TN、TP、电导率和含水量存在极显著正相关关系($P<0.01$),晚稻土壤 SOC 与 TP 存在极显著正相关关系($P<0.01$),与电导率存在较显著正相关关系($P<0.05$),与 pH 存在较显著负相关关系($P<0.05$);早稻土壤 DOC 与 TN 和土温呈现极显著负相关关系($P<0.01$),与 TP 存在较显著负相关关系($P<0.05$),晚稻土壤 DOC 与 TN 存在较显著正相关关系($P<0.05$),与电导率、耗水量和土温存在极显著正相关关系($P<0.01$);早稻土壤 MBC 与 TN、电导率和含水量存在极显著负相关关系($P<0.01$),与土温存在极显著正相关关系($P<0.01$);早稻土壤 EOC 与电导率和含水量存在较显著正相关关系($P<0.05$),晚稻土壤 EOC 与 TN 存在较显著负相关关系($P<0.05$)。

2.7 酸雨处理下碳库管理指数特征变化

将早晚稻的对照作参考土壤,计算不同酸雨处理下碳库管理指数的变化(表3)。早稻返青期酸雨处理下碳库活度(A)及碳库活度指数(AI)低于对照

处理,其他生长期差异性不大,数值维持在0.33~0.45;而晚稻除返青期外,拔节期和成熟期酸雨处理下碳库活度及碳库活度指数低于对照处理,数值维持在0.33~0.58。

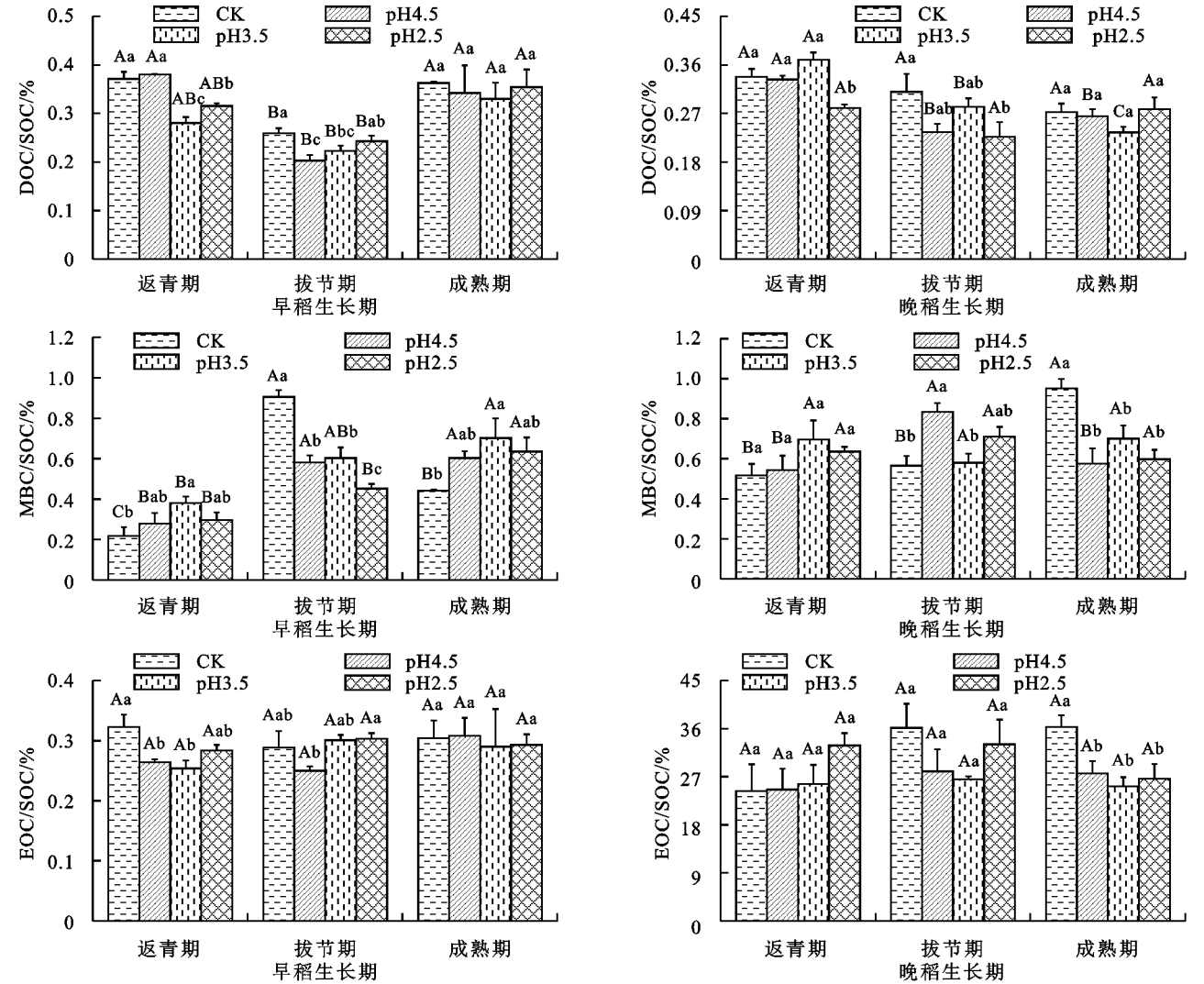


图6 酸雨处理下土壤有机碳组分与总有机碳比值

表2 酸雨处理下土壤碳组分之间及其与土壤理化性质的相关性分析

指标	早稻				晚稻			
	SOC	DOC	MBC	EOC	SOC	DOC	MBC	EOC
SOC	1.000	-0.164	-0.036	0.284	1.000	0.236	0.037	-0.074
DOC	-0.164	1.000	-0.758**	-0.136	0.236	1.000	-0.436**	-0.150
MBC	-0.036	-0.758**	1.000	-0.148	0.037	-0.436**	1.000	0.136
EOC	0.284	-0.136	-0.148	1.000	-0.074	-0.150	0.136	1.000
DOC/SOC	-0.618**	0.804**	-0.530**	-0.235	-0.185	0.746**	-0.299	0.024
MBC/SOC	-0.385*	-0.641**	0.924**	-0.228	-0.224	-0.467**	0.950**	0.143
EOC/SOC	-0.594**	-0.006	-0.080	0.584**	-0.341*	-0.189	0.121	0.959**
TN	0.575**	0.504**	-0.535**	-0.031	0.253	0.341*	-0.078	-0.338*
TP	0.811**	-0.378*	0.256	0.175	0.480**	0.065	-0.225	-0.112
电导率	0.551**	0.159	-0.483**	0.399*	0.338*	0.690**	-0.210	-0.291
含水量	0.542**	0.309	-0.539**	0.372*	0.262	0.503**	-0.318	-0.022
pH	-0.044	0.275	-0.307	0.221	-0.373*	0.205	-0.099	0.056
土温	-0.244	-0.745**	0.745**	-0.084	0.232	0.626**	-0.231	-0.046

注:n=36; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关; **表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

由表 3 可知,早稻拔节期、成熟期以及晚稻返青期与对照土壤相比变化幅度分别是 19.73%,6.19%,66.47%,随酸雨处理强度的增强而呈增加的趋势,说明酸雨处理增加了土壤碳库管理指数;早稻返

青期、晚稻拔节期和成熟期与对照土壤相比变化幅度分别是 14.19%,19.22%,30.76%,酸雨处理下碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CPMI)显著低于对照组($P<0.05$)。

表 3 酸雨处理对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响

生长期	处理	早稻				晚稻			
		A	AI	CPI	CPMI	A	AI	CPI	CPMI
返青期	CK	0.48±0.05Aa	1.00±0.00Aa	1.00±0.00Ad	100.00±0.00Aa	0.33±0.09Aa	1.00±0.00Aa	1.00±0.00Ad	100.00±0.00Ab
	4.5	0.36±0.01Ab	0.77±0.08Aa	1.08±0.01Abc	82.58±10.03Ab	0.33±0.07Aa	1.29±0.57Aa	1.25±0.00Aa	160.93±70.75Aa
	3.5	0.34±0.02Ab	0.73±0.12Aa	1.17±0.03Aa	86.33±15.64Ab	0.35±0.06Aa	1.27±0.51Aa	1.10±0.00Ab	139.83±55.60Aa
	2.5	0.40±0.02Aab	0.85±0.11Aa	1.04±0.02Acd	88.52±13.03Ab	0.49±0.05Aa	1.81±0.66Aa	1.10±0.00Abc	198.66±72.64Aa
拔节期	CK	0.41±0.06Aa	1.00±0.00Aa	1.00±0.00Ad	100.00±0.00Ab	0.58±0.12Aa	1.00±0.00Aa	1.00±0.00Aa	100.00±0.00Aa
	4.5	0.33±0.01Aa	0.85±0.13Aa	1.21±0.00Aa	102.69±15.24Ab	0.40±0.08Ab	0.72±0.18Aa	1.04±0.04Ba	73.72±15.55Ab
	3.5	0.43±0.02Aa	1.08±0.11Aa	1.10±0.00Ab	118.38±11.99Aab	0.36±0.01Ab	0.66±0.11Aa	1.07±0.01Aa	70.49±10.82Ab
	2.5	0.44±0.02Aa	1.11±0.17Aa	1.08±0.00Abc	120.11±17.80Aa	0.51±0.10Aa	0.94±0.27Aa	1.07±0.04Aa	98.13±25.16Aa
成熟期	CK	0.44±0.06Aa	1.00±0.00Aa	1.00±0.00Aa	100.00±0.00Aa	0.57±0.05Aa	1.00±0.00Aa	1.00±0.00Ab	100.00±0.00Aa
	4.5	0.45±0.06Aa	1.06±0.19Aa	1.02±0.11Aa	106.44±21.38Aa	0.38±0.04Abc	0.68±0.09Ab	1.06±0.01Ba	71.93±9.14Ab
	3.5	0.43±0.14Aa	0.95±0.22Aa	0.99±0.12Aa	89.39±8.66Ab	0.34±0.03Ac	0.61±0.12Abc	1.09±0.02Aa	66.44±12.89Ab
	2.5	0.42±0.04Aa	1.01±0.25Aa	1.00±0.06Aa	101.81±28.01Aa	0.37±0.05Ac	0.64±0.05Abc	1.09±0.02Aa	69.36±4.57Ab

注: $n=36$;表中小写字母表示同一生长期不同处理之间差异显著($P<0.05$);大写字母表示同一处理不同生长期期差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 酸雨对不同季稻田各生长期土壤有机碳组分的影响

土壤有机碳组分在不同程度上维持着土壤质量、物质循环和能量流动^[19],土壤活性有机碳直接参与了土壤生物化学转化及养分循环过程,同时也是土壤微生物活动和土壤养分循环的驱动力^[20]。

本研究中,酸雨增加了早、晚稻田土壤 SOC 含量,水稻返青期和拔节期、晚稻返青期和成熟期中酸雨处理下土壤 SOC 含量高于对照组,而早稻成熟期和晚稻拔节期各处理差异不显著。造成这一结果的原因可能是返青期和拔节期的植物较小(低矮),施加酸雨大部分直接流入到土壤中,酸雨调节土壤 pH,土壤现有的微生物活性也受到一定的抑制作用,使土壤有机质分解速率降低和矿化速度减缓^[21],从而进一步有利于土壤有机碳的保存。N 素是合成土壤微生物生命体的重要元素之一,酸雨中氨态氮、硝态氮输入土壤创造有利的条件,进一步提高土壤微生物种类和数量,最终导致酸雨处理组土壤 SOC 含量高于对照组。此外,随着水稻生长,酸雨直接作用土壤的过程减弱,早、晚稻成熟期不同现象差异还有可能是因为温度不同,早稻生长温度较低,土壤中输入分解的外源有机碳量较少,而晚稻生长温度较高,外源碳输入量增加,从而使得晚稻土壤有机碳含量更高。

土壤 DOC 和 EOC 是土壤活性有机碳库的重要

表征之一,土壤 DOC 主要来源于土壤内部微生物量、根系分泌物及土壤腐殖质,土壤外部主要来源于动植物残体及新鲜凋落物的分解等;土壤 EOC 主要来源植物残体,尤其是木质素碎屑,表层含量高于底层,对周围环境变化较为敏感^[22]。早、晚稻各处理返青期 DOC 总量高于其他生长时期,可能是返青期水稻淹水时间较长,土壤有机质在淹水条件下分解,可溶性有机质溶出量大,土壤 DOC 含量高^[23]。早稻返青期,酸雨处理下土壤 DOC 和 EOC 含量比对照组低,可能是水稻在返青期水稻植株幼小,喷施的酸雨几乎渗入土壤,酸雨中的氮元素被土壤微生物利用,并结合成新生命体,与此同时,土壤先前积累的碳分碳也有可能被微生物直接利用,甚至前茬作物残体中的碳大部分被用于土壤微生物自身生命活动。

此外,早稻返青期中,酸雨处理组土壤 MBC 含量显著高于对照组,也证实了前面的结论。而晚稻返青期各酸雨处理土壤 SOC 和活性碳组分含量均高于对照组,正值高温夏季,且前茬水稻枯落物丰富,因此土壤微生物分解产生的有机碳不仅供给自身生命活动,还参与土壤 SOC 系统周转,并向稻田土壤中输送 SOC;在晚稻拔节期和成熟期,由于前期酸雨累积效应作用,土壤酸化加剧,土壤微生物活动能力有限,碳的周转速率明显下降,因而晚稻生长中后期酸雨各处理组活性碳含量低于对照组。

3.2 酸雨作用下对稻田土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数与土壤活性碳组分关系密切,

并被作为土壤碳库变化和更新变化的有效指标,在其质和量上全面和动态地反映不同田间管理措施对土壤碳库影响^[9]。本研究发现,早稻返青期酸雨处理下碳库活度(A)及碳库活度指数(AI)低于对照处理,其他生长期差异性不大;而晚稻除返青期外,拔节期和成熟期酸雨处理下碳库活度及碳库活度指数低于对照处理;说明在一定范围内稻田土壤有机碳库必须维持一定的活跃度,原因可能在于归还土壤的有机质一部分转化为惰性碳库固存下来,一部分则需要通过活化这一过程,才能为植物生长提供养分,这样才使得这个比例维持稳定^[24],当充足植物碳返回稻田土壤表层时,有机质向活性碳和总碳库、非活性的有机碳转化同步增加。此外,晚稻拔节期和成熟期酸雨处理下碳库活度低于对照处理,可能是这段生长期温度较高,酸雨的累积量不断增强,与土壤活性有机碳相关微生物数量和酶的活性受到抑制,有机质的分解速率下降,转化成惰性碳的数量增加,进而稻田土壤有机碳得以稳定和积累^[2]。

早稻返青期以及晚稻拔节期和成熟期酸雨处理下碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CPMI)显著低于对照组,水稻植株凋落物返还的有机残体使得稻田土壤快速累积碳含量,同时酸雨降低碳矿化和释放养分速率,并抑制了水稻生长所必需的活性有机质,因此碳库活性组分含量也同步减少,使得稻田土壤有机碳库发生显著变化,引起稻田土壤 CPMI 显著减少。此外,在酸雨影响下,相关参与有机碳循环的酶活性也会受到抑制,导致稻田土壤微生物对有机碳源利用率下降,促进稻田土壤有机碳的保存^[25]。另外,早稻返青期和晚稻返青期酸雨处理土壤碳库总量均有增加,但早稻返青期碳库管理指数显著低于晚稻返青期,主要是前作物残茬还田补偿稻田土壤中的有机质,从而增加了稻田土壤总有机碳含量^[26],活性有机碳数量减少在早稻返青期较为明显,土壤有机碳在酸雨处理下活化作用降低;晚稻返青期雨水充足温度较高,对于喜湿热水稻作物的生长十分有利,作物的生长需要土壤活性养分及有机碳的供给支持,有利于反刺激土壤有机碳的活化^[27],提高土壤活性碳含量;因此晚稻返青期酸雨处理碳库管理指数显著高于对照组和早稻返青期对应处理。

前人^[28]研究发现,酸雨影响水稻的光合作用和叶片的代谢活动;酸雨淋洗水稻造成水稻植株营养元素的析出,使得水稻营养失衡,在一定程度上抑制水稻的营养吸收和生殖生长。早稻和晚稻成熟期,不同酸雨处理土壤碳库管理指数存在明显的差异,pH 4.5 处理下土壤碳

库管理指数高于 pH 3.5 和 pH 2.5,说明酸雨酸性的增强对于土壤碳库活性有一定的抑制作用;同时早晚稻土壤 pH 与土壤总有机碳呈现负相关关系,说明酸雨酸性的增强提高了土壤碳含量;主要的原因是酸雨通过影响土壤结构和微生物活性,从而使不同酸雨处理的土壤呼吸释放碳和土壤有机物矿化速率及程度不同,各处理凋落物等外源碳在土壤中的腐解速率差异所造成^[29]。因此,酸雨处理会降低土壤碳库管理指数,这不利于促进水稻作物的生长,这与前人^[30]研究中酸雨对作物生长抑制的结论相吻合。

4 结论

(1)酸雨处理对土壤 SOC 存在不同程度的影响,在早稻整个生长期,酸雨对土壤 SOC 含量的影响不显著,晚稻返青期和成熟期中,酸雨显著提高土壤 SOC 含量($P<0.05$)。早稻土壤 SOC 与 TN、TP、电导率和含水量存在极显著正相关关系($P<0.01$),晚稻土壤 SOC 与 TP 存在极显著正相关关系($P<0.01$)。

(2)早稻成熟期,对照组 DOC 含量显著高于 pH 3.5 酸雨处理组;整个晚稻生长期,酸雨对土壤 DOC 含量的综合影响不显著。早晚稻酸雨的施加使土壤 EOC 含量低于对照组,但差异不显著($P<0.05$);早晚稻土壤 MBC 含量表现出明显的随时间变化的规律。

(3)早稻返青期、晚稻拔节期和成熟期酸雨处理下碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CPMI)显著低于对照组($P<0.05$),说明酸雨处理降低了土壤碳库管理指数将不利于水稻作物生长。

致谢:本研究在野外采样和室内分析过程中得到福建师范大学黄晓婷、宋旭和徐康等同学的帮助,在此一并表示深深地感谢!

参考文献:

- [1] Qiu Q, Wu J, Liang G, et al. Effects of simulated acid rain on soil and soil solution chemistry in a monsoon evergreen broad-leaved forest in southern China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(5): 1-13.
- [2] Wu J, Liang G, Hui D, et al. Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in Southern China [J]. Science of The Total Environment, 2016, 544(1): 94-102.
- [3] Dai Z, Liu X, Wu J, et al. Impacts of simulated acid rain on recalcitrance of two different soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(6): 4216-4224.
- [4] 王安群,邹润莉,罗文华,等.湖南省酸雨污染现状特征分析及发展趋势研究[J].绿色科技, 2011(5): 1-5.
- [5] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and

- land-use change: Processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [6] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4): 669-681.
- [7] Yan X, Cai Z, Wang S, et al. Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(3): 1487-1496.
- [8] Manu V, Whitbread A, Blair N, et al. Carbon status and structural stability of soils from differing land use systems in the Kingdom of Tonga [J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(4): 517-523.
- [9] Cui F J, Liu J H, Li L J, et al. Effect of zero tillage with mulching on active soil organic carbon [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(9): 195-200.
- [10] Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, et al. Dynamics of soil particulate organic carbon and mineral-incorporated organic carbon in black soils in northeast China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 153-158.
- [11] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 465-473.
- [12] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 等. 稻草还田方式对双季稻产量和土壤、碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1572-1578.
- [13] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 等. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4): 735-740.
- [14] 安婉丽, 曾从盛, 王维奇, 等. 模拟酸雨对福州平原水稻田温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3984-3994.
- [15] Wang C, Wang W Q, Sardans J, et al. Effect of simulated acid rain on CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes and rice productivity in a subtropical Chinese paddy field [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243(11): 1196-1205.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soils [J]. *Biological and Fertility of Soils*, 2000, 30(5): 374-387.
- [18] Zhao F, Yang G, Han X, et al. Stratification of carbon fractions and carbon management index in deep soil affected by the grain-to-Green program in China [J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e99657.
- [19] 李蓉蓉, 王俊, 毛海兰, 等. 秸秆覆盖对冬小麦农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 187-192.
- [20] 王小利, 郭振, 段建军, 等. 黄壤性水稻土有机碳及其组分对长期施肥的响应及其演变[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(23): 4593-4601.
- [21] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤 pH 值和土壤微生物量碳氮对模拟酸雨的响应[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 911-918.
- [22] Datta S P, Rattan R K, Chandra S. Labile soil organic carbon, soil fertility, and crop productivity as influenced by manure and mineral fertilizers in the tropics [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(5): 715-726.
- [23] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 240-246.
- [24] 薛莲, 刘国彬, 潘彦, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(4): 1458-1464.
- [25] 吴建平, 陈小梅, 褚国伟, 等. 南亚热带森林土壤有机碳组分对模拟酸雨的早期响应[J]. *广西植物*, 2015, 35(1): 64-68.
- [26] 肖小平, 唐海明, 聂泽民, 等. 冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1202-1208.
- [27] 王淑彬, 王礼献, 杨文亨, 等. 南方不同“冬种+双季稻”种植模式对土壤有机碳和作物产量的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6603-6610.
- [28] Liang C J, Ge Y Q, Su L, et al. Response of plasma membrane H^+ -ATPase in rice (*Oryza sativa*) seedlings to simulated acid rain [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(1): 535-545.
- [29] 梁国华, 李荣华, 丘清燕, 等. 南亚热带两种优势树种叶凋落物分解对模拟酸雨的响应[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5728-5735.
- [30] 吴玺, 梁婵娟. 模拟酸雨对水稻根系激素含量与生长的影响[J]. *环境化学*, 2016, 35(3): 568-574.