

陶玥玥,周新伟,金梅娟,等. 湿润稻作体系中还田小麦秸秆分解及土壤活性碳变化特征[J].江苏农业学报,2022,38(1):94-101.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.011

湿润稻作体系中还田小麦秸秆分解及土壤活性碳变化特征

陶玥玥^{1,2}, 周新伟^{1,2}, 金梅娟^{1,2}, 施林林^{1,2}, 陆长婴^{1,2}, 王海候^{1,2}

(1.江苏太湖地区农业科学研究所,江苏 苏州 215155; 2.国家土壤质量相城观测实验站,江苏 苏州 215155)

摘要: 为探求稻田湿润灌溉对还田小麦秸秆腐解特征、土壤有机碳含量及其组分的影响,在太湖稻作区开展2年田间试验,设定秸秆还田与否(小麦秸秆不还田、小麦秸秆还田)和种植体系(常规淹水灌溉、湿润灌溉)双因素试验,采用原位模拟网袋法和土壤有机碳化学分组法测定还田小麦秸秆腐解率、碳、氮、磷、钾释放率以及土壤活性有机碳库和土壤总有机碳的变化。研究结果表明,湿润灌溉体系下还田小麦秸秆腐解率较常规淹水灌溉体系显著增加了12.5%,小麦秸秆碳、氮、磷的释放率分别显著增加了8.9%、9.8%和13.1%。小麦秸秆中钾释放较快,不同种植体系间无显著差异。与常规淹水灌溉体系相比,湿润灌溉体系的土壤活性有机碳含量显著提高,并且在小麦秸秆还田条件下更为明显,土壤微生物量碳有效性和活性有机碳有效性显著提高。与常规淹水灌溉相比,湿润灌溉可促进还田小麦秸秆养分释放以及土壤活性碳库提升,湿润灌溉可作为太湖稻作区可行的灌溉策略。

关键词: 稻麦轮作; 湿润灌溉; 小麦秸秆还田; 秸秆腐解率; 土壤活性有机碳

中图分类号: S155.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)01-0094-08

Decomposition of returned wheat straw and change characteristics of soil active carbon in water-saturated rice production system

TAO Yue-yue^{1,2}, ZHOU Xin-wei^{1,2}, JIN Mei-juan^{1,2}, SHI Lin-lin^{1,2}, LU Chang-ying^{1,2}, WANG Hai-hou^{1,2}

(1.Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China; 2.National Soil Quality Observation and Experimental Station in Xiangcheng, Suzhou 215155, China)

Abstract: To investigate the effects of saturated irrigation on the decomposition of wheat straw, soil organic carbon content and its components, a two-year field experiment was carried out in the rice growing area of Taihu Lake region. Two experimental factors of straw returning (with and without wheat straw returning) and rice growing system (traditional flooding and water-saturated irrigation) were included, using the simulated method with net bag in the field and soil organic carbon chemical grouping method, the rate of wheat straw decomposition, the release rates of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium and changes of soil active organic carbon pool and total organic carbon were measured. Compared with the conventional flooding system, the decomposition rate of wheat straw in the water-saturated irrigation system was significantly increased by 12.5%, and the release rates of carbon, nitrogen and phosphorus in wheat straw were significantly increased by 8.9%, 9.8% and 13.1%, respectively. Potassium in wheat straw was released faster, and there was no significant difference between different planting systems.

The content of soil active organic carbon in water-saturated irrigation system was significantly higher than that in the conventional flooding system, and it was more obvious under wheat straw returning. In addition, the soil microbial biomass carbon availability and active organic carbon availability were significantly improved. Hence, compared with the conventional flooding system, water-saturated irrigation system could promote the nutrient release rate of wheat straw and enhance

收稿日期:2021-04-30

基金项目:国家自然科学基金项目(32101854);江苏省农业科技自主创新基金项目[CX21(3097)];苏州市农业科技项目(SNG2020051)

作者简介:陶玥玥(1986-),女,江苏大丰人,博士,副研究员,主要从事农田种植制度与养分管理等相关研究。(E-mail)twahlty@163.com

通讯作者:王海候,(E-mail)wanghaihou@126.com

the soil active carbon pool, which could be used as a feasible irrigation strategy in the rice-growing region of Taihu Lake.

Key words: rice-wheat rotation system; water-saturated irrigation; wheat straw returning; decomposition rate of wheat straw; soil active organic carbon

太湖稻作区是中国水稻主要生产地区,以水稻-小麦复种为主要轮作制度,也是中国秸秆资源相对过剩的农作区之一,秸秆种类多,数量大。秸秆还田可以促进土壤养分循环,维持土壤有机质水平,是提高农田土壤有机碳含量的重要措施^[1]。秸秆腐解率是判断秸秆还田能否发挥固碳效应的关键指标,与水分、温度等环境因子息息相关^[2]。土壤中的活性有机碳可被土壤微生物、植物直接利用,参与土壤生物化学过程,其对外界环境变化十分敏感,能在土壤总有机碳变化之前反映土壤碳库的微小变动^[3]。因此,研究土壤有机碳及其活性组分的变化,有利于揭示农业措施对土壤有机碳的影响机理。

土壤含水量是影响秸秆分解过程和土壤碳库变化的重要环境因子^[4]。随着现代农业集约化生产水平的提高,作物产量不断增加,单位面积上用于还田的秸秆量也随之增加^[5]。当前,太湖稻作区以传统淹水管理为主,即除最高分蘖期排水晒田外,水稻移栽至成熟期前14 d田间均保持一定水层。淹水稻田持续输入大量秸秆,不仅造成秸秆分解困难,易产生还原性物质,抑制水稻生长,还会引起温室气体排放和农业面源污染,导致一系列生态、经济、社会问题^[6-8]。

水分条件对秸秆分解的作用规律目前仍存在一定分歧。传统观点认为,与水田相比,旱地条件下土壤氧气充足,利于好氧微生物繁殖,因此有机残体分解速度较快^[9]。室内培养试验结果表明,淹水条件下秸秆分解速率和分解量均显著高于旱地^[10]。不同于单纯淹水或旱地环境,湿润稻作体系中水稻全生育期内不建立水层,保持田面无水,沟内有水,土壤含水量基本为湿润-饱和状态^[11-12]。在湿润稻作体系中,淹水层消失,土壤氧化还原电位通常高于传统淹水稻田^[13]。目前关于湿润稻作体系的研究主要集中于农学、水肥利用率及温室效应方面^[14-16],关于湿润稻作中还田秸秆分解特征及其对土壤碳库影响的报道较少。国内外关于稻田控水栽培的研究主要集中在水资源紧张的稻作区^[17-18],针对水资源相对丰富同时秸秆还田条件下的太湖地区的研究相对较少。本试验拟在稻田不同水分管理体系下,研究小麦秸秆还田后的腐解规律、养分释放特征及稻

田土壤活性有机碳的变化,探讨稻田水分调控对稻田麦秸分解规律、土壤有机碳及活性有机碳组分的影响,以期太湖稻作区制订绿色、合理、节约型的水稻栽培管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018–2019年在苏州市望亭镇项路村(31°24'N, 120°25'E)进行。试验地位于长江三角洲太湖平原,属于北亚热带季风气候区,年降水量约1 100 mm,年平均温度约15.7℃,年日照时数在2 000 h以上,年无霜期在230 d以上。供试土壤为黄泥土,试验前0~20 cm耕层的土壤有机质含量为30.60 g/kg,全氮含量为1.76 g/kg,速效磷含量为28.90 mg/kg,速效钾含量为78.00 mg/kg, pH值为6.25。种植制度主要实行水稻-小麦轮作。供试水稻品种为南粳5055,大田生育期为6月中下旬至11月上旬,人工移栽,行距25.4 cm,株距16.3 cm。还田秸秆为试验田上茬收获的小麦秸秆。

1.2 试验设计

设定小麦秸秆还田与否(小麦秸秆不还田、小麦秸秆还田)与种植体系(常规淹水灌溉、湿润灌溉)的双因素随机区组试验,常规淹水灌溉(F):自移栽至收获前14 d田间保持3.0~5.0 cm水层;湿润灌溉(S):缓苗后间歇性灌水,田间保持湿润状态,保持沟中有水(图1)。本试验共4个处理:小麦秸秆不还田-常规淹水灌溉、小麦秸秆不还田-湿润灌溉、小麦秸秆还田-常规淹水灌溉、小麦秸秆还田-湿润灌溉;每个处理设3个重复,共12个小区,小区面积30.0 m²(4.0 m×7.5 m)。小区之间以宽50.0 cm、高30.0 cm的田埂隔开。

秸秆还田小区的小麦收获后,粉碎小麦秸秆,按照3 t/hm²施用量旋耕翻压还田。各小区内按厢宽1.60 m,沟宽0.25 m,沟深0.20~0.25 m的规格开沟作厢,整理好厢面后灌水泡田3~4 d。各小区磷肥、钾肥施用量一致,按照当地常规高产田标准施肥。氮肥(纯N)施用量为270 kg/hm²,按照基肥:分蘖肥:穗肥=3:4:3分次施用,其中分蘖肥按

4:6 分别在移栽后 5 d 和 12 d 施用。磷肥为过磷酸钙,施用 50 kg/hm^2 的 P_2O_5 ,均作基肥;钾肥为氯化钾,施用 120 kg/hm^2 的 K_2O ,其中 50% 为基肥,50% 为穗肥。

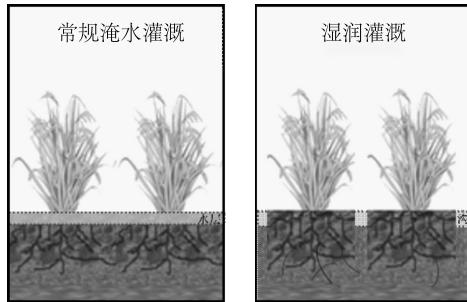


图 1 常规淹水与湿润灌溉水稻种植体系特征对比示意图

Fig.1 Characteristics of traditional and saturated rice production systems

1.3 测定项目及方法

小麦秸秆腐解率和养分释放率测定:参照武际等^[19]研究方法,采用原位模拟网袋法研究小麦秸秆在 2 种水稻种植体系下的养分释放特征,用长 30.00 cm、宽 20.00 cm、孔径 0.12 mm 的尼龙袋装入 40 g、5~7 cm 长的小麦秸秆,扎紧袋口,将网袋埋入各小区约 8 cm 深土层。试验后 0 d、10 d、20 d、30 d、40 d、60 d、90 d、120 d 分别取出埋入土层的秸秆网袋,水洗后烘干,用于测定干质量和养分含量。养分含量分析方法: $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化外加热法测定碳含量, $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-凯氏定氮法测定氮含量,钼锑抗比色法测定磷含量,火焰光度计法测定钾含量^[20],并计算秸秆碳、氮、磷、钾残留量(养分含量与残留干物质质量的乘积)。

土壤有机碳及活性有机碳含量测定:2019 年水稻收获后采集土样,各小区选取 3 个取样点,采集 0~15 cm 耕层土壤,将 3 个取样点的土样混合后装入自封袋,带回实验室用于测定土壤中的碳含量。 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化外加热法测定土壤有机碳(TOC)含量,熏蒸法测定土壤微生物量碳(MBC)含量^[21], KMnO_4 氧化法测定土壤活性有机碳(LOC)含量^[22]。土壤稳态有机碳(NLOC)含量为土壤总有机碳含量与土壤活性有机碳含量的差值。

1.4 数据分析

用 Excel 2016 进行数据处理,用 Origin 9.2 软件进行作图,用 SAS 9.2^[23] 的广义线性模型进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植体系下还田小麦秸秆腐解率与养分释放特征

试验 120 d 时供试小麦秸秆腐解率为 45.5%~56.2%,碳释放率 46.7%~57.3%,氮释放率 49.1%~60.1%,磷释放率 56.6%~68.4%,钾释放率 85.1%~92.3%。双因素方差分析结果(表 1)表明,种植体系显著影响秸秆腐解率以及碳、氮、磷、钾释放率。与常规淹水灌溉体系相比,湿润灌溉体系下小麦秸秆腐解率以及秸秆碳、氮、磷释放率分别显著增加了 12.5%、8.9%、9.8%、13.1%(图 2)。2019 年秸秆碳、氮、钾释放率高于 2018 年。

表 1 种植体系与年份对小麦秸秆腐解率和养分释放率的双因素方差分析结果

Table 1 Two-factor variance analysis of wheat straw decomposition rate and nutrient release rate affected by planting systems and years

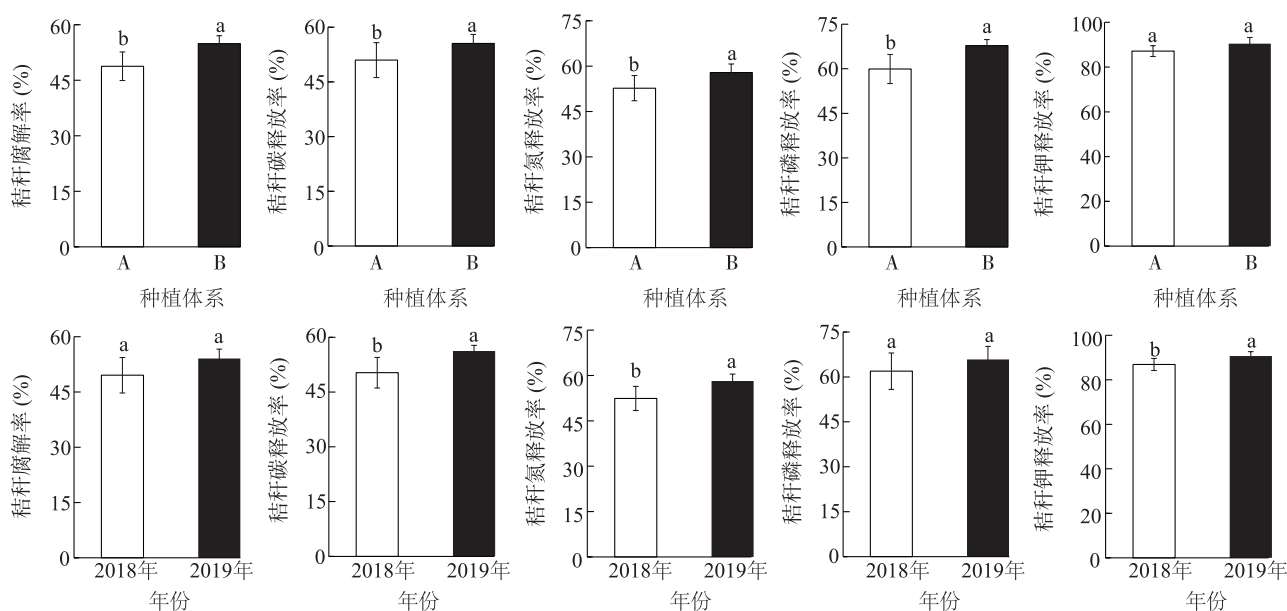
| 因素 | F 值 | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | 腐解率 | 碳释放率 | 氮释放率 | 磷释放率 | 钾释放率 |
| 种植体系 | 38.61 *** | 32.08 *** | 31.28 *** | 20.45 ** | 11.42 ** |
| 年份 | 21.37 ** | 41.86 *** | 39.47 *** | 4.98 ns | 15.12 ** |
| 年份×种植体系 | 4.06 ns | 11.03 * | 2.22 ns | 2.33 ns | 0.03 ns |

* 表示在 0.05 水平显著; ** 表示在 0.01 水平显著; *** 表示在 0.001 水平显著; ns 表示不显著。

2.2 不同种植体系下还田小麦秸秆各阶段腐解率的动态变化

2018~2019 年不同种植体系下还田小麦秸秆腐解规律基本一致,秸秆残留量和秸秆碳、氮、磷残留量均表现为 0~40 d 分解前期迅速下降(快速期),40~90 d 分解中期腐解率明显减慢(缓慢期),90~120 d 分解后期腐解率基本不变(停滞期);秸秆钾释放则表现为 0~30 d 快速期与 30~120 d 停滞期 2 个阶段(图 3、图 4)。整个进程中,湿润灌溉体系下的秸秆腐解率和养分释放率均高于常规淹水灌溉体系。

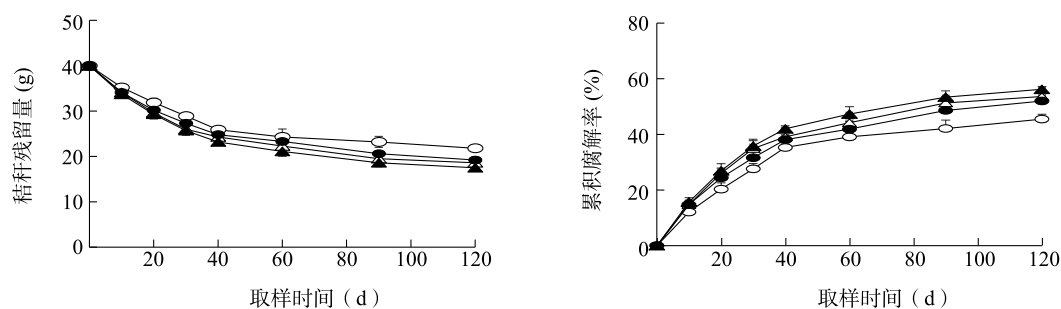
表 2 显示,与常规淹水灌溉体系相比,湿润灌溉体系下快速期、缓慢期秸秆腐解率分别提高了 10.6% 和 37.2%,碳释放率分别提高了 8.4% 和 20.2%,氮释放率分别提高了 9.5% 和 15.0%。湿润灌溉体系下快速期秸秆磷释放率较常规淹水灌溉体系提高了 19.4%,常规淹水灌溉体系与湿润灌溉体系间的钾释放率无显著差异。



A: 常规淹水灌溉; B: 湿润灌溉。图中不同小写字母表示不同种植体系、年份间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 不同种植体系、年份间小麦秸秆腐解率和养分释放率的差异

Fig.2 The wheat straw decomposition rate and nutrient release rate at different experimental years and systems



○—2018年常规淹水灌溉体系; △—2018年湿润灌溉体系; ●—2019年常规淹水灌溉体系; ▲—2019年湿润灌溉体系

图3 不同种植体系下小麦秸秆残留量和累积腐解率动态变化特征

Fig.3 Dynamic changes of wheat straw residue and cumulative decomposition rate under different planting systems

2.3 不同处理下土壤有机碳及组分变化

表3显示,不同处理间土壤总有机碳含量无显著差异,但小麦秸秆还田+湿润灌溉处理的土壤微生物量碳含量和活性有机碳含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。整体而言,与常规淹水灌溉体系相比,湿润灌溉体系下稻田土壤微生物量碳含量和活性有机碳含量分别增加了14.6%和16.9%,同时土壤微生物量碳含量和活性有机碳含量各占总有机碳含量比例显著增加。湿润灌溉体系中,小麦秸秆不还田处理的土壤总有机碳含量和稳定性有机碳含量最低,较小麦秸秆还田处理分别降低了8.2%和5.2%。

3 讨论

3.1 湿润灌溉稻作体系对还田小麦秸秆分解规律的影响

连续2年田间原位模拟试验研究结果表明,小麦秸秆还田90 d时其腐解率已基本不变,此时秸秆中易分解的物质已基本腐解完毕,这与前人研究结果^[19, 24]基本一致。经过前期快速分解后,秸秆中残存的主要是木质素、单宁和蜡质素等难分解物质,一般易被机械耕作等物理方法粉碎掩埋到地下,在田间残留长达2~3年甚至更长,最终形成腐殖质积累在土壤中^[25]。秸秆腐解过程的本质是微生物和酶

主导的生物化学反应,土壤水分是秸秆腐解转化的决定性因子之一^[2]。在本研究中,与常规淹水灌溉稻作体系相比,湿润灌溉稻作体系明显促进了小麦秸秆的分解以及碳、氮、磷的释放。这可能是由于在

湿润灌溉稻作体系中,淹水层消失使得土壤通气性增加,土壤温度提升,水热条件改善,土壤微生物和酶的活性提高,从而提高了微生物对秸秆的分解速率^[19,26]。

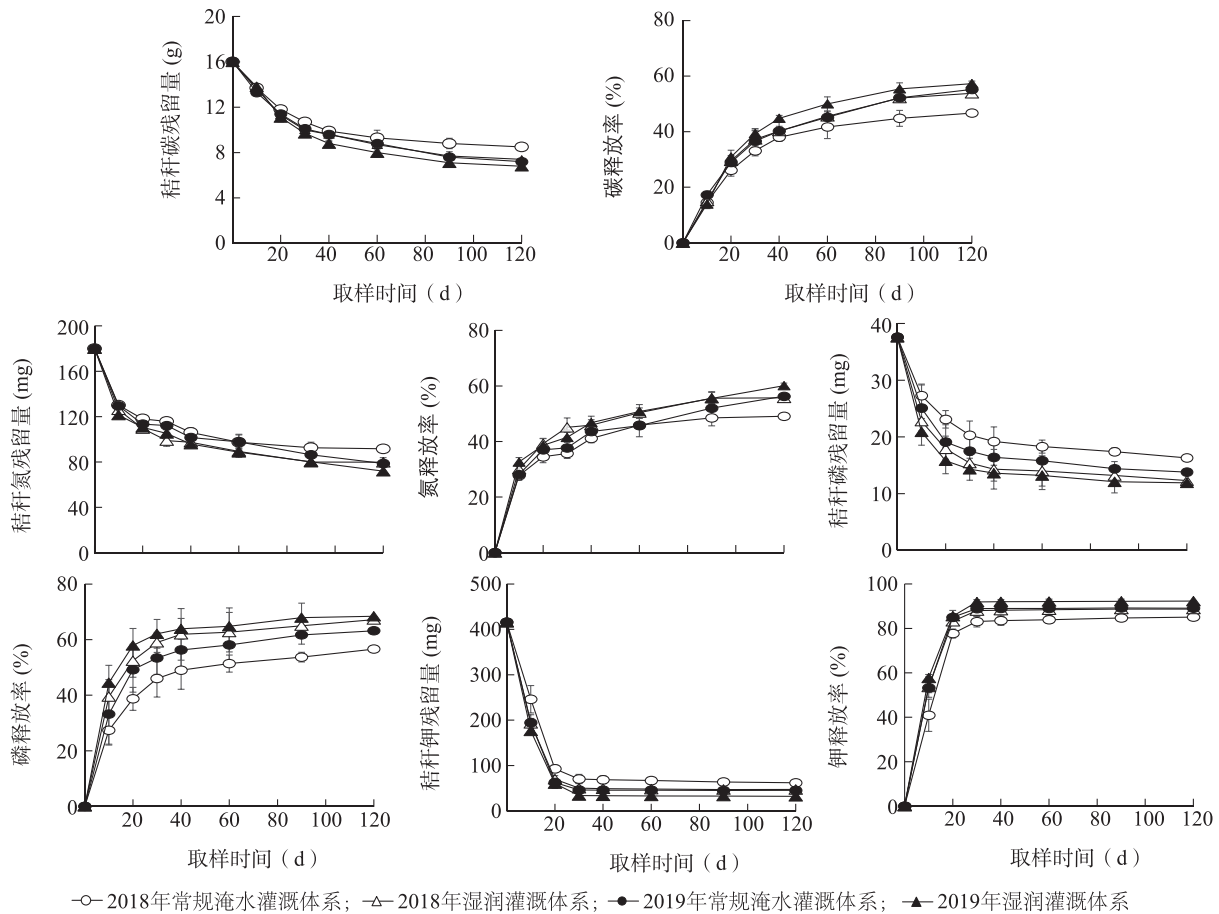


图 4 不同种植体系下小麦秸秆碳、氮、磷、钾养分残留量和释放率动态特征

Fig.4 Dynamic characteristics of residue and release rate of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium in wheat straw under different planting systems

表 2 不同种植体系下小麦秸秆腐解各阶段平均腐解率和养分释放率

Table 2 Average decomposition rate and nutrient release rate of wheat straw at each stage of decomposition under different planting systems

| 指标 | 种植体系 | 快速期 | 缓慢期 | 停滞期 |
|----------|----------|-------------|-------------|------------|
| 腐解率 (%) | 常规淹水灌溉体系 | 36.70±2.10b | 8.60±2.30b | 3.40±1.30a |
| | 湿润灌溉体系 | 40.60±2.70a | 11.80±1.70a | 2.60±0.90a |
| 碳释放率 (%) | 常规淹水灌溉体系 | 39.40±1.90a | 9.40±3.00a | 2.50±1.60a |
| | 湿润灌溉体系 | 42.70±3.30a | 11.30±1.80a | 1.80±0.80a |
| 氮释放率 (%) | 常规淹水灌溉体系 | 42.30±3.40b | 8.00±2.50a | 2.50±2.30a |
| | 湿润灌溉体系 | 46.30±1.40a | 9.20±1.60a | 2.30±2.60a |
| 磷释放率 (%) | 常规淹水灌溉体系 | 52.70±7.10b | 5.10±7.80a | 2.20±5.60a |
| | 湿润灌溉体系 | 62.90±6.40a | 3.50±8.50a | 1.40±2.90a |
| 钾释放率 (%) | 常规淹水灌溉体系 | 86.00±3.60a | — | 0.70±0.58a |
| | 湿润灌溉体系 | 89.90±2.80a | — | 0.54±0.46a |

表中数据为 2018、2019 年平均值。同列数据后不同小写字母表示同一指标不同种植体系间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 不同处理土壤碳库组分含量

Table 3 Content of each component in soil carbon pool under different treatments

| 处理 | 总有机碳含量 (g/kg) | 微生物量碳含量 (mg/kg) | 活性有机碳含量 (g/kg) | 稳定性有机碳 含量(g/kg) | 微生物量 碳有效性(%) | 活性有机 碳有效性(%) |
|--------------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 麦秸不还田+常规淹水灌溉 | 16.2a | 210.9c | 2.7c | 13.6a | 1.30c | 16.6c |
| 麦秸不还田+湿润灌溉 | 15.7a | 231.0bc | 3.1b | 12.7b | 1.47b | 19.7b |
| 麦秸还田+常规淹水灌溉 | 17.0a | 238.5b | 3.2b | 13.8a | 1.41bc | 18.6b |
| 麦秸还田+湿润灌溉 | 17.1a | 284.2a | 3.8a | 13.4ab | 1.66a | 22.0a |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

从不同阶段小麦秸秆分解情况来看,一般认为秸秆腐解包括前期快速分解和后期缓慢分解 2 个阶段^[25]。本研究进一步明确了不同种植体系下太湖流域稻田还田麦秸分解以及碳、氮、磷释放的阶段差异特征。供试小麦秸秆腐解以及秸秆碳、氮、磷释放均分为 3 个阶段,分别为 0~40 d 快速期、40~90 d 缓慢期和 90~120 d 停滞期。在 0~40 d,湿润灌溉体系下的小麦秸秆腐解率以及碳、氮释放率较常规淹水灌溉体系增加了 10.6%、8.4%、9.5%,在 40~90 d 增幅分别为 37.2%、20.2%、15.0%。可见,水稻湿润灌溉体系对小麦秸秆分解以及秸秆碳、氮释放的促进效应主要表现在缓慢期。这可能是由于在秸秆快速分解期,即水稻移栽后 40 d 内,正值 5 月至 6 月,太湖流域气温相对适宜,雨水丰富,适宜的环境条件使得秸秆中可溶性化合物迅速矿化,然而水稻移栽后 40~90 d 时秸秆中残留的碳、氮难溶性有机物分解则受水分条件影响较大,湿润灌溉体系下小麦秸秆分解速率明显升高。此外,湿润灌溉体系与常规淹水灌溉体系相比,0~40 d 小麦秸秆磷释放率显著增加了 19.4%,缓慢期和停滞期无显著变化。这些结果对太湖稻作区土壤磷库活化和磷肥减施具有重要意义。不同稻作体系对小麦秸秆各阶段钾的释放无显著影响,主要是由于秸秆中钾主要以离子形式存在,极易释放,还田后水热适宜,0~30 d 迅速释放完毕^[19, 24]。

3.2 不同种植体系下麦秸还田与否对土壤碳库的影响

小麦秸秆还田作为一种外源添加有机质的方式^[27-28],有助于土壤有机碳的积累。上世纪 80 年代以来,中国水稻产量持续增加导致秸秆残体输入量增加,有机肥施用量增加^[29],使得稻田表层土壤较旱地土壤有机碳积累较快,试验点水稻土壤有机碳含量处于全国各地相对较高水平^[30]。本研究中,短期试验

条件下,无论常规淹水灌溉或是湿润灌溉种植体系,与小麦秸秆不还田相比,小麦秸秆还田下土壤总有机碳含量无显著变化,但土壤中微生物量碳含量和活性有机碳含量显著提高,原因是小麦秸秆还田后可以为土壤微生物提供外源有机碳输入,大部分被矿化,显著提高了土壤活性碳库组分含量^[31-32]。土壤活性有机碳库为土壤微生物活动提供能源,在土壤碳素转化过程中发挥重要作用,对维持土壤碳库平衡具有重要的意义^[33-34]。可见,还田小麦秸秆在土壤中分解对土壤碳库组分进行了更新,释放了土壤微生物生长代谢所需的营养物质。

值得注意的是,本研究中在小麦秸秆不还田条件下,与常规淹水灌溉体系相比,湿润灌溉体系中土壤总有机碳含量有降低趋势,同时其稳定性有机碳含量显著降低。一般认为,长期淹水环境有助于维持土壤有机质数量和稳定性,维持土壤自身供氮水平^[30,35]。这可能是由于稻田长期淹水条件下土壤微生物活性较低,土壤有机质分解速率降低^[36]以及厌氧细菌缺乏响应分解酶,木质素和多酚类物质等具有较高稳定性的物质增加^[37]。在多种保护机制的共同作用下,与旱地相比,水田有机碳具有较高稳定性,因此水田被普遍认为是较为稳定的生产体系^[35,38]。土壤有机碳水平主要由净积累量决定,即由有机质输入与矿化之间的相对平衡决定。秸秆还田等外源有机物的输入是土壤有机质含量增加的重要来源,同时,土壤有机质含量也取决于土壤原有有机质的矿化分解^[39]。所以在无外源麦秸输入条件下,湿润灌溉体系中土壤微生物活性增加,加速了土壤中原有有机质的分解。由此,在水稻生产过程中,应将水分管理与碳管理相结合,发挥水碳耦合效应,同步实现水资源节约和碳资源循环。

4 结论

本研究中,还田小麦秸秆在 0~40 d 迅速腐解并

释放碳、氮、磷素,随后腐解速率降低。与常规淹水灌溉体系相比,湿润灌溉体系下秸秆腐解率显著增加了12.5%,碳、氮、磷释放率分别增加了8.9%、9.8%和13.1%,钾释放率无显著变化。不同种植体系间土壤总有机碳含量无显著差异,但在小麦秸秆不还田条件下,湿润灌溉体系中土壤总有机碳含量较常规淹水灌溉体系有下降趋势。湿润灌溉体系较常规淹水灌溉体系提高了土壤微生物量碳含量和活性有机碳含量。可见,与常规淹水灌溉相比,湿润灌溉可促进还田小麦秸秆养分释放以及土壤活性有机碳含量的提升,可作为太湖稻作区可行的灌溉策略。

致谢: 苏州市农业科学院农业资源与环境研究中心技术员朱兴连、王岳初以及实习生胡婕、赵英豪等同志在本试验实施与样品采集中做了大量工作,特此致谢!

参考文献:

- [1] LU F, WANG X, HAN B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15 (2): 281-305.
- [2] 杨滨娟,钱海燕,黄国勤,等. 秸秆还田及其研究进展[J]. *农学报*, 2012, 2(5): 1-4.
- [3] ZAGAL E, MUNOZ C, QUIROZ M, et al. Sensitivity of early indicators for evaluating quality changes in soil organic matter[J]. *Geoderma*, 2009, 151(3): 191-198.
- [4] GUNTIASET M E, LEIROS M C, TRASARC C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 48: 73-80.
- [5] 王海候,金梅娟,陆长婴,等. 秸秆还田模式对农田土壤碳库特性及产量的影响[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 755-764.
- [6] RAO D, MIKKELSEN D. Effect of rice straw additions on production of organic acids in flooded soil[J]. *Plant and Soil*, 1977, 47 (2): 303-311.
- [7] 史然,陈晓娟,沈建林,等. 稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展[J]. *土壤*, 2013, 45(2): 193-198.
- [8] MA J, MA E, XU H, et al. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 1022-1028.
- [9] 黄耀,孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. *科学通报*, 2006, 51(7): 750-763.
- [10] 唐国勇,童成立,苏以荣,等. 含水量对¹⁴C标记秸秆和土壤原有有机碳矿化的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 538-543.
- [11] TAO Y Y, QU H, LI Q J, et al. Potential to improve N uptake and grain yield in water saving ground cover rice production system[J]. *Field Crops Research*, 2014, 168(2): 101-108.
- [12] YANG J C, ZHANG J H. Crop management techniques to enhance harvest index in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(12): 3177-3189.
- [13] TAO Y Y, ZHANG Y, JIN X X, et al. More rice with less water-evaluation of yield and resource use efficiency in ground cover rice production system with transplanting[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 68: 13-21.
- [14] GUO L, LIU M J, TAO Y Y, et al. Innovative water-saving ground cover rice production system increases yield with slight reduction in grain quality[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 180 (3): 102795.
- [15] LIANG H, HU K L, QIN W, et al. Ground cover rice production system reduces water consumption and nitrogen loss and increases water and nitrogen use efficiencies[J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 70-79.
- [16] YAO Z S, DU Y B, TAO Y Y, et al. Water-saving ground cover rice production system reduces net greenhouse gas fluxes in an annual rice-based cropping system[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2014, 11: 8925-8967.
- [17] 王孟雪,张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田N₂O排放增加水稻产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 72-79.
- [18] 姚林,郑华斌,刘建霞,等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1381-1387.
- [19] 武际,郭熙盛,王允青,等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44 (16): 3351-3360.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 25-38.
- [21] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54-60.
- [22] BLAIR G J. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 393-406.
- [23] 黄燕,吴平. SAS统计分析及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 103-125.
- [24] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276.
- [25] JENKINSON D S, AYANABA A. Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(5): 912-915.
- [26] LI Y S, WU L H, ZHAO L M, et al. Influence of continuous plastic film mulching on yield, water use efficiency and soil properties of rice fields under non-flooding condition[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(2): 370-378.
- [27] 马南,陈智文,张清. 不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(3): 53-57.

- [28] 赵亚慧,贺笑,王宁,等.不同理化调控措施缓解麦秸对水稻生长负面效应[J].江苏农业科学,2020,48(18):300-305.
- [29] WU J. Carbon accumulation in paddy ecosystems in subtropical China: evidence from landscape studies[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62: 29-34.
- [30] PAN G X, LI L Q, WU L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology, 2004, 10(1): 79-92.
- [31] 马俊永,李科江,曹彩云,等.有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J].植物营养与肥科学报,2007,13(2): 236-241.
- [32] HUQ S, GRUBB M. Mitigation and adaptation strategies for global change: Preface[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2007, 12(5): 645-649.
- [33] HENRIKEN T, BRELAND T. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. Biology & Fertility of Soils, 2002, 35(1): 41-48.
- [34] COOKSON W, ABAYE D, MARSCHENER P, et al. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(9): 1726-1737.
- [35] PAN G X, XU X W, SMITH P, et al. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 136(S1/S2): 133-138.
- [36] WITT C, CASSMAN K, OLK D, et al. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems[J]. Plant and Soil, 2000, 225(1): 263-278.
- [37] OLK D, CASSMAN K, SCHNIDTROHR K, et al. Chemical stabilization of soil organic nitrogen by phenolic lignin residues in anaerobic agroecosystems[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(11): 3303-3312.
- [38] 潘根兴,赵其国.我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和国家安全粮食安全[J].地球科学进展,2005,20(4):384-393.
- [39] 陈晓侠,梁爱珍,张晓平.土壤团聚体固碳的研究方法[J].应用生态学报,2012,23(7): 1999-2006.

(责任编辑:王妮)