

## 稻麦轮作下秸秆还田对稻麦产量和稻田可溶性有机碳含量的影响

郑继成, 张刚, 王德建, 王灿, 曹志强, 汪军

引用本文:

郑继成, 张刚, 王德建, 等. 稻麦轮作下秸秆还田对稻麦产量和稻田可溶性有机碳含量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 431–440.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180698>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控

Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment

中国生态农业学报. 2015(9): 1073–1082 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150237>

#### 不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响

Effects of years of straw return to soil on greenhouse gas emission in rice/wheat rotation systems

中国生态农业学报. 2015(3): 302–308 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141079>

#### 稻-油轮作下保护性耕作对土壤肥力的影响及评价

Effect of conservation tillage on soil fertility under rice-rape rotation system

中国生态农业学报. 2017, 25(11): 1604–1614 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170433>

#### 稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响

Effect of rice-crayfish co-culture on greenhouse gases emission in straw-puddled paddy fields

中国生态农业学报. 2017, 25(11): 1591–1603 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170280>

#### 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响

Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization

中国生态农业学报. 2016, 24(12): 1633–1642 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160357>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180698

郑继成, 张刚, 王德建, 王灿, 曹志强, 汪军. 稻麦轮作下秸秆还田对稻麦产量和稻田可溶性有机碳含量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 431-440

ZHENG J C, ZHANG G, WANG D J, WANG C, CAO Z Q, WANG J. Effects of straw incorporation on crop yield and dissolved organic carbon concentration at rice growing season in rice-wheat rotation cropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 431-440

## 稻麦轮作下秸秆还田对稻麦产量和稻田可溶性有机碳含量的影响\*

郑继成<sup>1,2</sup>, 张刚<sup>1</sup>, 王德建<sup>1\*\*</sup>, 王灿<sup>1</sup>, 曹志强<sup>1,2</sup>, 汪军<sup>3</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 重庆三峡学院环境与化学工程学院 重庆 404632)

**摘要:** 为阐明稻麦轮作体系下秸秆还田对作物产量与稻田可溶性有机碳(DOC)的影响, 通过连续2年盆栽试验研究了两种典型土壤(壤土和黏土)在无秸秆还田、半量秸秆还田、全量秸秆还田3种处理下稻麦产量和稻田土壤溶液 DOC 浓度的动态变化。结果表明, 秸秆还田显著增加了两种土壤大多数处理的水稻产量, 增幅1.6%~11.9%, 其中全量秸秆还田的增产效果大于半量秸秆还田(第1年不显著, 第2年显著)。秸秆还田对小麦产量的影响因土壤类型而异, 壤土中小麦产量显著增加7.2%~10.6%(第1年)或增产不显著(第2年), 但全量秸秆还田和半量秸秆还田处理之间没有显著差异; 黏土中小麦显著减产(5.0%~9.3%), 其中第2年的全量秸秆还田减产效应显著大于半量秸秆还田。秸秆还田及土壤类型显著影响水稻前期(烤田之前)的土壤溶液 DOC 浓度, 全量秸秆还田、半量秸秆还田分别比无秸秆还田处理平均增加141.7%、61.9%, 壤土比黏土平均增加89.6%; 间歇淹水之后, 所有秸秆还田处理及土壤类型的 DOC 浓度均迅速降低。总体上, 秸秆还田对两种土壤的水稻增产都有利, 但对黏土小麦增产不利, 秸秆还田显著增加了稻田前期的 DOC 浓度, 间歇淹水可以迅速降低稻田 DOC 浓度。

**关键词:** 秸秆还田; 稻麦轮作; 产量; 可溶性有机碳(DOC); 土壤类型; 间歇淹水

中图分类号: S141.4; S311 文献标识码: A 文章编号: 2096-6237(2019)03-0431-10

## Effects of straw incorporation on crop yield and dissolved organic carbon concentration at rice growing season in rice-wheat rotation cropping system \*

ZHENG Jicheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Gang<sup>1</sup>, WANG Dejian<sup>1\*\*</sup>, WANG Can<sup>1</sup>, CAO Zhiqiang<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404632, China)

**Abstract:** In recent years, straw incorporation as an important way of straw utilization and culture fertility has been applied widely to achieve sustainable development of agriculture. However, straw incorporation also creates some novel problems. One of the most

\* 国家重点研发计划项目(2017YFD0800105)和江苏省农业科技自主创新资金重点项目[CX(15)1002]资助

\*\* 通信作者: 王德建, 主要研究方向为农田生态系统养分循环及其环境效应。E-mail: djwang@issas.ac.cn  
郑继成, 主要研究方向为农田碳氮养分循环及其环境效应。E-mail: jczheng@issas.ac.cn

收稿日期: 2018-07-26 接受日期: 2018-09-11

\* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800105) and the Agricultural Science and Technology Innovation Foundation of Jiangsu Province [CX(15)1002].

\*\* Corresponding author, E-mail: djwang@issas.ac.cn

Received Jul. 26, 2018; accepted Sep. 11, 2018

important of these is a large amount of crop straw returned to the field affecting the growth of rice and wheat at seeding stage. Even though lots studies reported that straw incorporation increased crop yield, there were also many reports that had a negative effect on crop yield. Another problem is that straw decomposition in rice field can produce lots of dissolved organic carbon (DOC), which has a close relationship with water eutrophication. Many studies reported the effect of straw incorporation on DOC concentration of paddy field at harvest time or on the dynamic of DOC concentration in soil incubation experiment. But little is known about effect of straw incorporation on the dynamic of DOC in rice growing season with different rate of straw returned and soil types. A two-year pot experiment was conducted to investigate the effects of straw incorporation on the yield of wheat & rice and DOC concentration in soil solution in rice growing season in two types of soil, loamy soil (L) and clay soil (C). According to the level of straw incorporated into soil, each soil type consisted of three treatments: 1) 0% straw returned from previous crop to soil (S0); 2) 50% straw returned from previous crop to soil (S1); 3) 100% straw returned from previous crop to soil (S2). Compared with no straw treatment, straw incorporation significant increased rice yield in most of treatments in both soil types (1.6%–11.9%), and the yield increases of S2 treatment were higher than those of S1 treatment (no significant in first year but yes in second year). However, straw incorporation had different effects on wheat yield for two soils: in loamy soil, wheat yield increased in straw incorporation treatments in both years but only significantly in first year (7.2%–10.6%), and there was no significant difference between S1 and S2 treatments; in clay soil, wheat yield decreased significantly in straw incorporation treatments in both years (5.0%–9.3%), and the yield decrease of S2 treatment were higher than that of S1 treatment (no significant in first year but yes in second year). As to the DOC concentration in soil solution in rice growing season, compared with treatment of no straw returned, DOC concentration of S2 and S1 treatments significantly increased by 141.7% and 61.9%, respectively, and DOC of loamy soil was 89.6% higher than that of clay soil on average in the early rice growing stage, but all straw treatments and soils would decrease quickly once intermittent flooding. In conclusion, straw incorporation had a positive effect on rice yield for both loamy and clay soil, but a negative effect on wheat yield for clay soil, and also increased DOC concentration significantly. The intermittent flooding could rapidly reduce the concentration of DOC in paddy soil.

**Keywords:** Straw incorporation; Rice-wheat rotation; Yield; Dissolved organic carbon (DOC); Soil type; Intermittent flooding

近年来,作物收获后将秸秆直接还田逐渐成为秸秆利用的主流。秸秆还田不但避免了秸秆焚烧造成的大气污染<sup>[1]</sup>,而且有利于农田生态系统中碳、氮等营养元素的循环<sup>[2]</sup>及我国农田土壤的可持续利用。秸秆还田可以增加土壤养分<sup>[3]</sup>,降低土壤容重<sup>[4]</sup>并促进根系生长<sup>[5-6]</sup>,但是还田秸秆的腐解在前期会与作物争氮<sup>[2]</sup>,并恶化土壤氧化还原条件<sup>[7-8]</sup>。有关秸秆还田对产量的影响,前人研究结果并不一致,增产或减产的报道都很普遍<sup>[2,9-10]</sup>,这影响了人们对秸秆还田效应的认识。造成产量效应不一原因可能是多样的,可能与作物熟制有关,一年1熟下还田秸秆有充足的时间在下茬作物种植前完成腐解,可以避免对作物生长产生不利影响,而一年多熟制下秸秆还田因腐解不完全往往会显著抑制下茬作物的前期生长<sup>[11-12]</sup>;也可能与水管理条件有关,比如稻麦轮作下,小麦(*Triticum aestivum*)旱作,水稻(*Oryza sativa*)水作,则麦季与稻季的秸秆腐解进程必然差异很大;或者与土壤类型有关,沙土、壤土还有黏土的理化性质差异明显,秸秆的腐解进程会有差异;还有秸秆还田量、还田方法的不同等等。这都有待进一步深入研究。

稻田可溶性有机碳(DOC)与水体富营养化<sup>[13]</sup>及温室气体排放<sup>[14-15]</sup>关系密切,而且在稻田重金属污染与修复<sup>[16]</sup>和农药在土壤中的活化迁移<sup>[17]</sup>等方面有

着重要影响。近年来,关于秸秆还田影响稻田 DOC 研究开始增多,主要分两类:其一为稻田土壤的室内培养试验,试验条件容易控制,且普遍进行 DOC 的动态观测<sup>[18-19]</sup>,缺点是不能反映水稻生长对 DOC 的影响;其二为植稻试验,缺点是 DOC 采样费时费力,往往只检测水稻收获时的土壤 DOC 含量<sup>[20-21]</sup>。目前,关于不同秸秆还田方式进行土壤 DOC 动态观测的植稻试验很少,且已有的研究结果之间差异很大<sup>[13,22]</sup>,仍需要进一步研究观察。

鉴于当前稻麦轮作体系下秸秆还田对作物产量效应研究的结果不一致,以及秸秆还田下稻季土壤溶液 DOC 系统监测研究的缺乏,本研究选择江苏两种典型的农田土壤——壤土(淮北平原的黄潮土)和黏土(里下河地区的勤泥土),采用盆栽试验,比较无秸秆还田、半量秸秆还田和全量秸秆还田 3 种处理下,稻季土壤溶液 DOC 的动态变化规律及稻麦轮作下的作物产量,旨在为秸秆还田技术的合理实施提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

盆栽试验所用土壤采自水稻收获后的稻麦轮作农田。两种类型土壤分别采自江苏省淮北地区的泗阳县城厢镇红星村(壤土)和里下河地区的高邮市周山农场(黏土)。其中,壤土的基本理化性质是 pH 8.22,有机

质  $17.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $36.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $112 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 黏土的 pH 7.33, 有机质  $30.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $10.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $137 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。盆栽容器为 PVC 材质圆柱形盆, 内径 24 cm, 高 30 cm, 每盆装风干土 9.4 kg。盆栽试验所用秸秆: 2012 年 10 月第 1 季试验开始时, 尚无前茬作物秸秆, 统一使用大田的水稻秸秆(秸秆有机碳含量  $387.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮含量  $7.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , C/N 比 55.0), 之后每季直接使用前茬收获的秸秆还田。

## 1.2 试验设计

盆栽试验于 2012 年 10 月—2014 年 10 月在中国科学院南京土壤研究所温室内进行, 小麦-水稻轮作, 共进行 4 季。土壤类型分两种: 壤土(L)、黏土(C)。每种土壤按秸秆还田量分为 3 个处理: 对照, 无秸秆还田(S0); 半量秸秆还田(S1), 前茬作物的一半秸秆归还; 全量秸秆还田(S2), 前茬作物的全部秸秆归还。每个处理 3 次重复。第 1 季的外来水稻秸秆还田量 S1、S2 处理分别为每盆 22.6 g 与 45.2 g(计算依据为: 以当地水稻秸秆风干产量  $10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  计算, 依据盆栽容器面积与每公顷面积的比例, 计算出每个处理的秸秆施用量), 以后 3 季的还田秸秆为前茬盆栽收获秸秆。秸秆切碎与盆栽土壤全层混匀。为尽量减小重复间的误差, 每次小麦收获后将同一处理下的 3 个盆栽土壤混匀并重新分装。

所有处理施肥量相同, 小麦季土壤施 N  $0.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $0.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$   $0.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 水稻季土壤施入 N  $0.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $0.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$   $0.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。所用氮肥、磷肥、钾肥分别为试剂级尿素、磷酸氢二钠、氯化钾。磷肥和钾肥全部作基肥一次性施入; 氮肥分 3 次施用(麦季和稻季的基肥、蘖肥、穗肥的分配比例分别为 3 3 4 和 4 2 4), 其中基肥与磷肥、钾肥同施, 蘖肥和穗肥用水溶解后浇入盆中。

小麦季秸秆还田约 3 日后播种, 品种为‘扬麦 16’, 出苗 1 周后剔苗, 每盆留苗 24 棵。水稻季秸秆还田 1 周后淹水, 淹水 5 d 后插秧, 秧龄 30 d 左右, 每盆 3 穴, 每穴 2 苗, 水稻品种为‘南粳 46’。第 1 季水稻于 2013 年 6 月 26 日插秧, 保持淹水直至分蘖末期, 其后湿润灌溉一段时间以模拟大田烤田(7 月 30 日—8 月 8 日, 持续 10 d), 然后恢复淹水状态直到扬花期结束(10 月 2 日), 之后开始间歇淹水直至收获前 1 周。第 2 季水稻于 2014 年 6 月 24 日插秧, 自烤田(7 月 29 日—8 月 10 日, 持续 13 d)结束后即开始间歇淹水直至收获前 1 周, 烤田之前的水分管

理与 2013 年相同(保持淹水状态)。农药除虫, 人工除草。

## 1.3 采样与测定方法

水稻季土壤溶液 DOC 采集与测定: 稻季淹水前于各盆土深 5—15 cm 处插入带橡皮塞的陶土管 1 根(长 10 cm), 通过橡皮塞插入细管到陶土管底部取样, 淹水后第 2 d 开始抽取水样, 其后约 5 d 抽取一次, 水稻生长后期改为 10~20 d 一次, 烤田期间不采样。水样取回后过滤, 滤液用岛津 TOC 仪(5000, Shimadzu)测定 DOC 浓度。

作物产量测定: 小麦、水稻籽粒收获后 70 ℃ 烘干测定质量与含水量, 然后按标准含水量 13.5% 折算得出作物产量<sup>[23]</sup>。盆栽产量单位为  $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 。

## 1.4 数据处理与分析

数据处理与分析采用 Microsoft Excel 2013 与 SPSS 17.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田对作物产量的影响

#### 2.1.1 小麦产量

由图 1a 可知, 壤土中, 2013 年和 2014 年对照处理 S0 小麦产量分别为  $40.8 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$  和  $43.6 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ , 2013 年 S1 和 S2 处理分别比 S0 处理显著增产 7.2% 和 10.6% ( $P < 0.05$ ), 2014 年 S1、S2 处理分别比 S0 增产 0.9% 和 0.6%, 但均不显著。黏土中, 2013 年、2014 年 S0 处理小麦产量分别为  $44.5 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、 $47.1 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ , 2013 年 S1、S2 处理分别比 S0 处理显著减产 7.8%、8.6% ( $P < 0.05$ ), 2014 年分别比 S0 处理显著减产 5.0%、9.3% ( $P < 0.05$ )。总体上, 秸秆还田后, 壤土中小麦增产, 其中第 1 年增产显著, 第 2 年增产不显著; 黏土中连续两年小麦均显著减产, 且在第 2 年 S2 处理产量显著低于 S1 处理。

#### 2.1.2 水稻产量

秸秆还田对两种土壤水稻产量的影响如图 1b 所示。壤土中, 2013 年 S0、S1、S2 处理水稻产量分别为  $57.1 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、 $60.8 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$  和  $60.8 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ , S1 和 S2 处理均比对照 S0 显著增产 6.5% ( $P < 0.05$ ), S1 和 S2 处理间没有显著差异 ( $P > 0.05$ ); 2014 年 S0、S1、S2 处理水稻产量分别为  $55.0 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、 $55.8 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、 $58.8 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ , 与对照 S0 相比, S1 增产不显著(1.6%), S2 增产显著(7.4%) ( $P < 0.05$ )。在黏土中, 2013 年 S0、S1、S2 处理水稻产量分别为  $59.2 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、 $64.9 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、 $66.1 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ , S1、S2 处理分别比对照 S0 显著增产 9.6%、11.7% ( $P < 0.05$ ), 但 S1 和 S2 处理之间无显著性差异; 2014 年

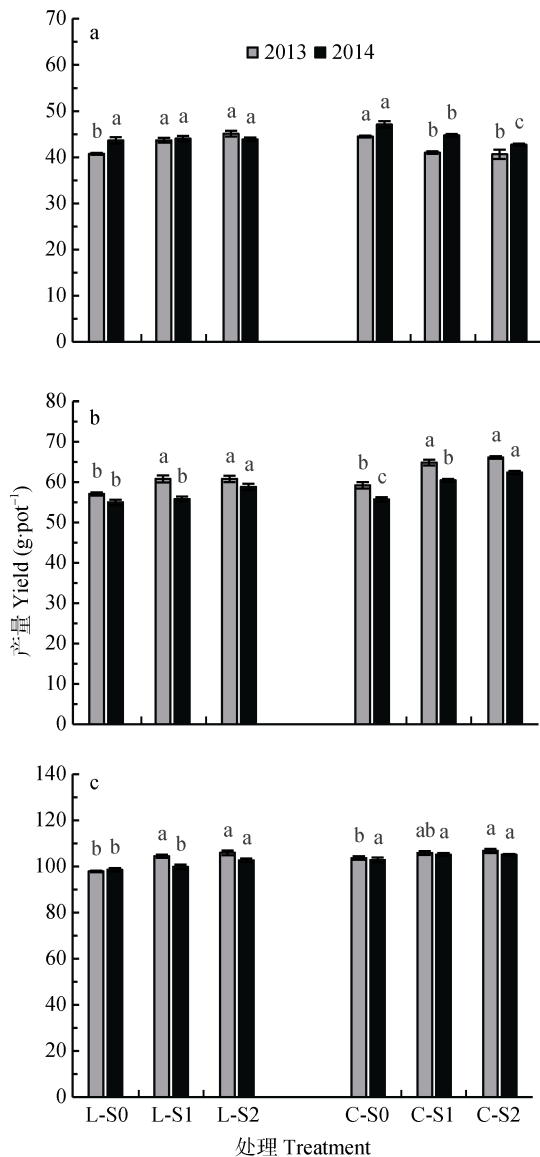


图 1 2013 年和 2014 年不同土壤类型上秸秆还田对小麦产量(a)、水稻产量(b)和全年产量(c)的影响

Fig. 1 Effect of straw incorporation on wheat yield (a), rice yield (b) and annual yield (c) of different soil types in 2013 and 2014

L: 壤土; C: 黏土; S0: 无秸秆还田(对照); S1: 半量秸秆还田; S2: 全量秸秆还田。相同年份及土壤类型中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。L: loam; C: clay; S0, S1 and S2 represent 0%, 50% and 100% previous crop straw returned to soil, respectively. Different lowercase letters in the same year and same soil type mean significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ).

S0, S1, S2 处理水稻产量分别为  $55.7 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 、 $60.4 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 、 $62.4 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ , S1、S2 处理分别比对照 S0 处理显著增加 8.5%、11.9% ( $P < 0.05$ ), 且 S2 处理显著大于 S1 处理 ( $P < 0.05$ )。总体上, 无论是在壤土还是黏土中, 秸秆还田对水稻产量都表现出促进作用, 全量还田的增产效果优于半量还田。

### 2.1.3 稻麦全年产量

本试验中, 全年产量指一个稻麦轮作周期中小

麦与水稻的产量之和。由图 1c 可知, 壤土中, 2013 年、2014 年对照处理 S0 产量分别为  $97.9 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 、 $98.6 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ , 与之相比, 2013 年 S1 和 S2 处理分别增产 6.8%、8.2%, 均达显著水平 ( $P < 0.05$ ); 2014 年 S2 处理显著增产 4.2% ( $P < 0.05$ ), S1 处理增产不显著。黏土中, 对照处理两年的产量分别为  $103.7 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 、 $102.8 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ , 与之相比, 所有秸秆还田处理都有增产, 但只有 2013 年的 S2 处理增产显著 (增产 3.0%) ( $P < 0.05$ )。总体上, 秸秆还田以后, 无论是壤土还是黏土, 全年产量都有增加甚至显著增加。

## 2.2 秸秆还田对稻季土壤溶液 DOC 含量的影响

### 2.2.1 稻季土壤溶液 DOC 浓度总体变化趋势

前后两年的观测显示(图 2), 从开始淹水到烤田结束, 壤土和黏土稻季土壤溶液 DOC 含量总体上都有一个降—升—降的动态变化规律。但是烤田后的 DOC 浓度变化趋势, 前后两年差别很大: 2013 年, 两种土壤在烤田结束之后, DOC 浓度短期内显著升高, 然后维持较高浓度直至水稻扬花期结束, 之后才开始迅速降低; 2014 年, 两种土壤的 DOC 浓度在烤田结束之后继续保持较低浓度(仅为 2013 年同期的 41.6%)直至稻季结束, 这可能跟 2014 年烤田后采用间歇淹水有关。

### 2.2.2 不同秸秆还田处理 DOC 浓度比较

由图 2 可知, 稻季前期(烤田之前), S1、S2 处理的 DOC 浓度均大于 S0 处理, 其中 S2 处理高于 S1 处理。为了便于比较此期间不同处理间 DOC 含量差异, 每年选择 3 个代表性时间节点进行统计分析: 淹水后第 2 d、第 12 d、第 39 d, 分别对应于 DOC 动态曲线在此期间的 3 个极值。

2013 年淹水后第 2 d(图 3a), 壤土中 S0、S1、S2 处理 DOC 浓度分别为  $157.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $228.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $293.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , S1 处理比 S0 处理显著增加 45.1% ( $P < 0.05$ ), S2 处理比 S1 处理显著增加 28.4% ( $P < 0.05$ )。黏土中, 淹水后第 2 d S0、S1 和 S2 处理 DOC 浓度分别为  $47.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $84.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $106.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , S1 处理比 S0 处理显著增加 77.8% ( $P < 0.05$ ), S2 处理比 S1 处理显著增加 25.9% ( $P < 0.05$ )。

2013 年淹水后第 12 d(图 3b), 壤土 S0、S1、S2 处理 DOC 浓度分别为  $7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $17.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $26.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , S1 处理比 S0 处理显著增加 133.2% ( $P < 0.05$ ), S2 处理比 S1 处理显著增加 57.4% ( $P < 0.05$ ); 黏土 S0、S1、S2 处理 DOC 浓度分别为  $6.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $13.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $19.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , S1 处理比对照 S0 显著增加 93.1% ( $P < 0.05$ ), S2 处理比 S1 处理显著增加 44.4% ( $P < 0.05$ )。

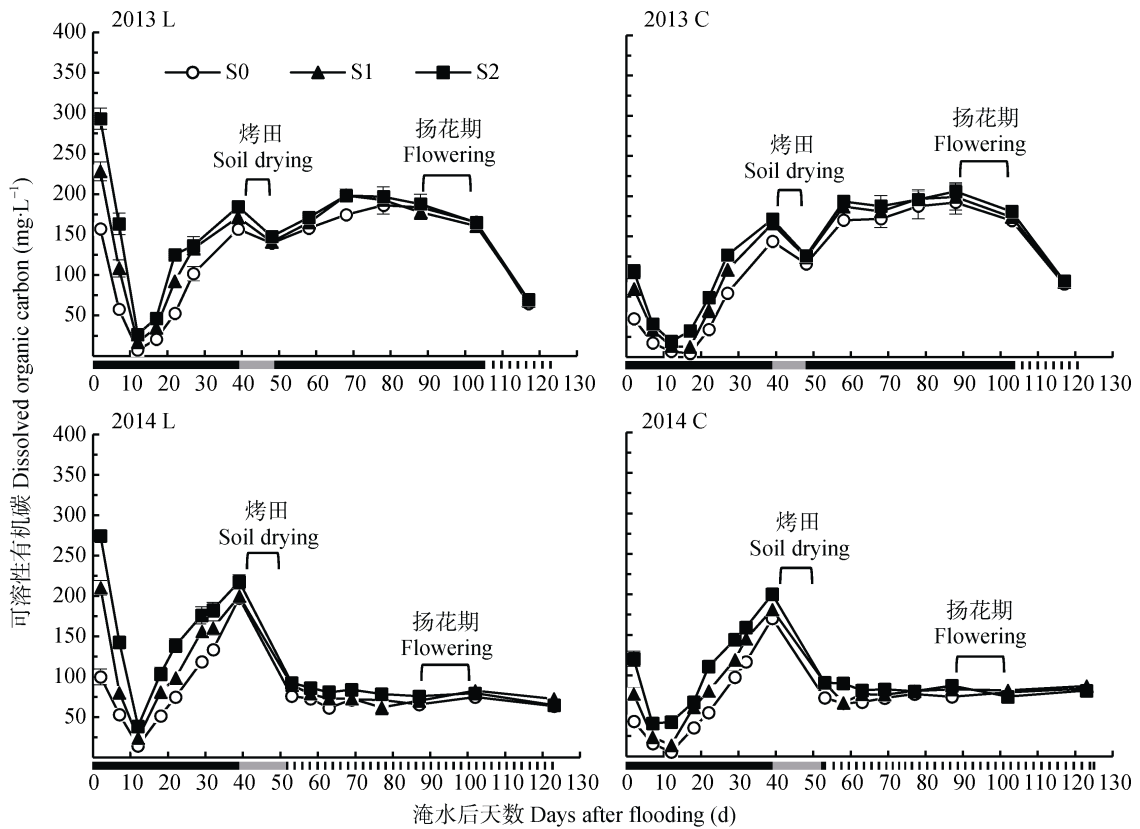


图 2 2013 年和 2014 年不同土壤类型上稻季土壤溶液可溶性有机碳(DOC)浓度动态变化

Fig. 2 Dynamics of dissolved organic carbon (DOC) concentration in soil solution during rice growing season in different soil types under different straw incorporation treatments in 2013 and 2014

L: 壤土; C: 黏土; S0: 无秸秆还田(对照); S1: 半量秸秆还田; S2: 全量秸秆还田。横坐标轴下方颜色表示水分管理状态: 黑色表示淹水, 灰色表示烤田, 黑白相间表示间歇淹水。L: loam; C: clay; S0, S1 and S2 represent 0%, 50% and 100% previous crop straw returned to soil, respectively. Different colors below the X-axis represent different water management practices: the black, gray, black & white represent continuous flooding, soil drying, and intermittent flooding, respectively.

2013 年淹水后第 39 d(图 3c), 壤土 S0、S1、S2 处理 DOC 浓度分别为  $156.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $171.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $184.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , S1 处理比 S0 处理增加 9.3%, S2 处理比 S1 处理增加 7.6%, 均达显著水平( $P<0.05$ ); 黏土中, 各处理 DOC 浓度分别为  $143.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (S0)、 $165.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (S1)和  $171.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (S2), S1 处理比 S0 处理显著增加 15.4%( $P<0.05$ ), S2 处理比 S1 处理增加 3.3%, 但二者无显著差异。

2014 年, 淹水后第 2 d、12 d、39 d 不同秸秆还田处理间土壤溶液 DOC 浓度变化规律(图 3a、b、c)与 2013 年相似, 不同之处是在淹水后第 39 d: 无论是壤土还是黏土, 处理 S1 与 S0 之间均差异不显著, 处理 S2 比 S1、S0 显著增加( $P<0.05$ )。

但是在烤田结束后的一段时间里(约 30 d), 不同年份的 DOC 浓度受秸秆还田的影响有所不同(图 2): 其中 2013 年秸秆还田处理的 DOC 浓度显著大于不还田处理( $P<0.05$ ), S2 和 S1 之间无显著差异; 2014 年 3 个处理之间差异均不显著。在此之后, 不同还

田处理间的 DOC 浓度差异不显著。

### 2.2.3 不同土壤类型秸秆还田处理 DOC 浓度比较

从图 2 中两种类型土壤秸秆还田处理 DOC 浓度动态变化看出, 稻季前期(烤田之前), 壤土多大于黏土, 稻季后期(扬花期之后), 壤土小于黏土。选择每年稻季淹水后第一次采样(淹水后 2 d)与最后一次采样(2013 年淹水后第 117 d; 2014 年淹水后第 123 d)的 DOC 浓度比较两种土壤的差异, 结果如图 4 所示。稻季第一次采样(图 4a), 各秸秆处理的壤土 DOC 浓度均显著大于黏土( $P<0.05$ ): 2013 年壤土的 S0、S1、S2 处理分别为黏土的 3.3 倍、2.7 倍和 2.8 倍, 2014 年壤土的 S0、S1、S2 处理分别为黏土的 2.3 倍、2.7 倍和 2.3 倍。稻季最后一次采样(图 4b), 壤土的 DOC 浓度均显著小于黏土( $P<0.05$ ): 2013 年壤土各处理的 DOC 浓度变化范围  $64.8\sim 69.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 黏土处理变化范围  $90.4\sim 94.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 黏土是壤土的 1.3~1.4 倍; 2014 年壤土处理的 DOC 浓度变化范围  $63.4\sim 72.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 黏土处理变化范围  $81.3\sim 87.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 黏土是壤土的 1.2~1.3 倍。

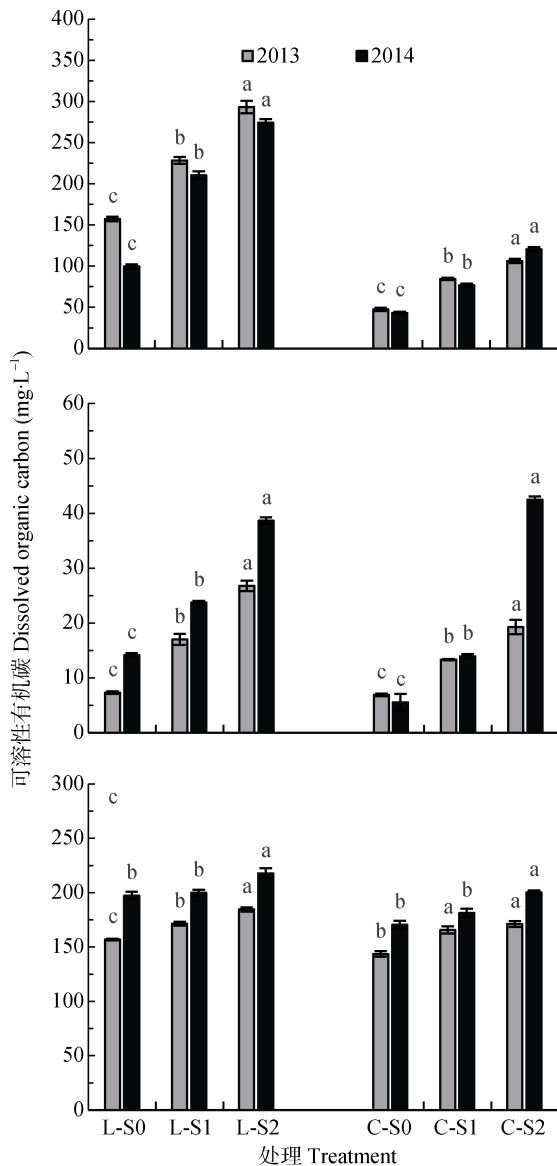


图 3 2013 年和 2014 年不同土壤类型上秸秆还田对稻季土壤溶液可溶性有机碳(DOC)浓度的影响(a: 淹水后第 2 d; b: 淹水后第 12 d; c: 淹水后第 39 d)

Fig. 3 Effect of straw incorporation on dissolved organic carbon (DOC) concentration in soil solution in rice growing season of different soil types in 2013 and 2014 [a: 2 days after flooding (DAF); b: 12 DAF; c: 39 DAF]

L: 壤土; C: 黏土; S0: 无秸秆还田(对照); S1: 半量秸秆还田; S2: 全量秸秆还田。相同年份及土壤类型中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。L: loam; C: clay; S0, S1 and S2 represent 0%, 50% and 100% previous crop straw returned to soil, respectively. Different lowercase letters in the same year and same soil type mean significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆还田对稻麦产量的影响

关于秸秆还田的增产机理, 一般认为有以下几个方面: 首先, 秸秆还田提高了土壤肥力<sup>[3]</sup>。大量研究报道表明, 秸秆还田能显著提高土壤有机质, 改

善有机质品质, 提高土壤养分含量, 而且后效十分明显<sup>[24-25]</sup>。Surekha 等<sup>[26]</sup>报道, 秸秆还田或焚烧均能显著提高土壤有效钾与有机碳含量, 而土壤总氮仅秸秆还田处理增加。Nie 等<sup>[27]</sup>试验显示, 秸秆还田土壤的有机质和全氮含量分别比不还田增加 8.9% 与 14.8%, 土壤微生物碳、氮分别比不还田增加 12.7% 和 15.1%。其次, 秸秆还田能改善土壤物理性质, 比如降低土壤容重<sup>[4]</sup>, 减小根系阻力<sup>[28-29]</sup>, 并最终促进根系生长<sup>[5-6]</sup>。本试验中, 秸秆还田下两种土壤上的水稻均表现出显著增产效应, 其中全量还田处理的水稻增产效果为 6.5%~11.9%, 与前人研究结果相近<sup>[30-31]</sup>。小麦在壤土上表现增产(第 1 年显著, 第 2 年不显著), 在黏土上两年均表现出显著减产。原因可能与黏土的性质有关, 黏土保水性好, 透气性差, 秸秆腐解慢, 释放养分少。另外, 与壤土相比, 黏土由于透气性差, 秸秆还田后局部厌氧腐解, 恶化土壤氧化还原条件, 产生大量还原性物质<sup>[7-8]</sup>, 毒害根系, 最终影响小麦产量。与麦季相比, 稻季淹水条件下土壤透气性更差, 但无论是壤土还是黏土, 秸秆还田处理的水稻均显示增产效应, 可能是因为水稻根系有通气组织向根际分泌 O<sub>2</sub>, 从而减轻了秸秆腐解缺 O<sub>2</sub> 的危害。

#### 3.2 秸秆还田对稻季土壤溶液 DOC 浓度的影响及其与水稻产量的关系

前人土壤淹水培养试验表明<sup>[19,32]</sup>, 淹水后秸秆还田处理土壤溶液 DOC 浓度往往很高, 随后迅速降低。这与本试验秸秆还田处理在淹水后第 1—12 d 的 DOC 浓度变化规律类似。此阶段 DOC 浓度很高的可能原因, 一是秸秆加入土壤以后, 易分解成分(蛋白质、可溶性糖等)首先腐解, 迅速释放大量单糖、氨基酸、氨基糖等小分子物质, 导致土壤 DOC 含量迅速升高。二是秸秆还田初期显著促进了土壤有机质转化生成 DOC<sup>[32-34]</sup>, 通常称为激发效应(priming effect)。Ye 等<sup>[34]</sup>土壤培养试验显示, 秸秆还田量占土壤质量 2% 的处理中, 还田后第 10 d, 转化自土壤有机质的 DOC 生成量是不还田处理的 2 倍。然后, 由于这些 DOC 组分生物降解性高, 加之水分、温度条件适宜, 微生物大量繁殖, 大大提高脲酶、蔗糖酶的活性, 导致 DOC 很快被大量消耗掉<sup>[35]</sup>, 于是出现了迅速降低的现象。与前人室内培养试验结果不同的是, 本试验不还田处理在此阶段也表现出与秸秆还田处理相似的现象, 应该与上季作物根系与残茬没有清除干净有关。

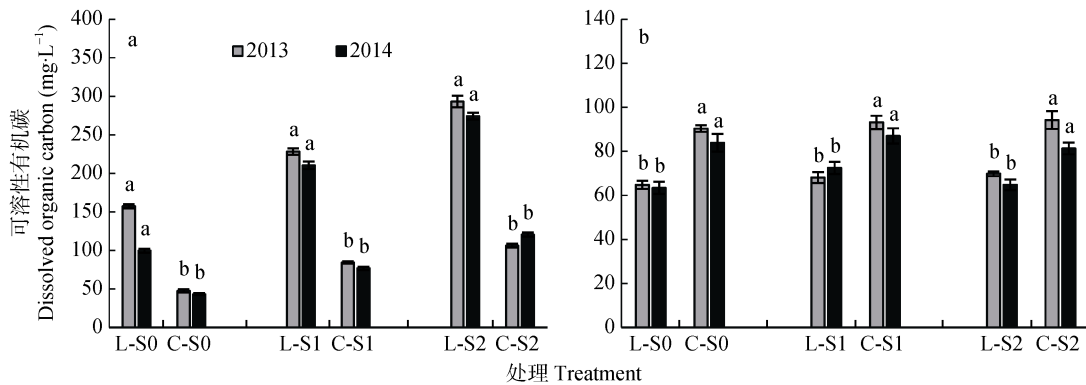


图 4 2013 年和 2014 年不同秸秆还田处理下土壤类型对稻季土壤溶液可溶性有机碳(DOC)浓度的影响[a: 稻季第一次采样, 淹水后第 2 d; b: 稻季最后一次采样, 淹水后第 117 d(2013 年)、123 d(2014 年)]

Fig. 4 Effect of soil type on dissolved organic carbon (DOC) concentration in soil solution during rice growing season under different straw incorporation treatments in 2013 and 2014 (a: the first sampling at 2 days after flooding in rice growing season; b: the last sampling at 117 days in 2013 and 123 days in 2014 in rice growing season)

L: 壤土; C: 黏土; S0: 无秸秆还田(对照); S1: 半量秸秆还田; S2: 全量秸秆还田。相同年份及秸秆还田处理中不同小写字母表示土壤间差异显著( $P < 0.05$ )。L: loam; C: clay; S0, S1 and S2 represent 0%, 50% and 100% previous crop straw returned to soil, respectively. Different lowercase letters in the same year mean significant differences among treatments in different soil types ( $P < 0.05$ ).

本试验表明, 自 DOC 浓度降低至低谷之后到烤田开始前, 秸秆还田处理的 DOC 浓度有显著增长, 其中全量还田处理高于半量还田处理 3%~161%(多数时候显著)。可见秸秆还田在此阶段对土壤溶液 DOC 浓度仍然有显著贡献。首先, 随着秸秆易分解成分的消耗殆尽, 此前 DOC 浓度迅速降低阶段中大量生成的微生物开始进入稳定或衰亡期, 次级代谢产物积累或微生物死亡分解释放出大量活性有机碳, 导致土壤溶液 DOC 浓度增加<sup>[35]</sup>; 其次, 因为秸秆开始进入缓慢腐解期, 纤维素和木质素等成分的降解产物增加了土壤溶液 DOC 浓度<sup>[36]</sup>。不施秸秆处理在此阶段也表现出 DOC 浓度显著增加的趋势, 此现象与前人研究结果相似<sup>[31,37]</sup>。除了受前茬作物根茬残留的影响外, 应该还在一定程度上受到了根系分泌物的影响, 根系分泌物也是稻田 DOC 的重要来源<sup>[38-40]</sup>, 而此阶段水稻根系正处于快速生长期<sup>[41-42]</sup>。

目前, 以稻田 DOC 含量变化为切入点研究秸秆还田影响水稻产量的研究不多。与前人研究结果类似<sup>[31]</sup>, 本试验中秸秆还田对稻田 DOC 浓度的影响主要发生在烤田之前。所以如果秸秆还田可以通过影响 DOC 浓度来影响产量, 那么其作用时间当主要发生在烤田之前, 即通过影响烤田之前的水稻营养生长来影响烤田之后的水稻生殖生长。至于秸秆还田下 DOC 浓度如何影响烤田之前的水稻营养生长, 有研究认为秸秆腐解前期产生大量有机酸类物质<sup>[43-44]</sup>, 从而抑制水稻的前期生长(营养生长)。但是这种对营养生长的抑制作用不一定造成产量的降低, 适当的抑制作用, 可以避免水稻前期的营养生长过旺, 从

而可能有利于水稻后期的生殖生长, 并最终起到增产作用。但是, 水稻产量的影响因素及机理十分复杂, 秸秆还田下 DOC 浓度增加当只是其中一个因素, 至于其重要性, 有待进一步研究。

### 3.3 秸秆还田下稻田土壤 DOC 径流风险的应对措施建议

稻田 DOC 含量与水体富营养化关系密切<sup>[13]</sup>, DOC 是农田土壤中氮、磷等元素向水体中移动的重要载体, 并以此为主要移动途径; 水体中藻类繁殖必需的许多营养元素来自于水体微生物的转化, 而 DOC 作为碳源促进了微生物的生长代谢。秸秆还田因为显著促进稻田 DOC 的产生, 无疑加剧了水体富营养化风险。本试验表明, 秸秆还田对稻季 DOC 浓度的影响随着时间的推移逐渐减小, 烤田之后作用逐渐消失。因此在稻季前期, 秸秆还田后要加强稻田 DOC 径流风险的防控。

本试验稻季前期, 壤土 DOC 浓度显著大于黏土, 因此相对于黏土, 壤土秸秆还田后应更加重视稻田径流的风险。壤土 DOC 浓度较大, 主要是因为壤土黏粒含量低, 对 DOC 的吸附能力弱, 则进入土壤溶液的 DOC 增多<sup>[45-46]</sup>。此外, 本试验中的壤土 pH 大于黏土, 在高 pH 条件下 DOC 更不容易被吸附<sup>[47]</sup>。但是在稻季后期, 黏土中各处理的 DOC 浓度大于壤土, 原因可能与本试验中黏土有机质含量高于壤土有关: 稻季后期秸秆腐解基本结束, 根系活力大幅衰退导致根系分泌物显著减少, 土壤有机质分解成为 DOC 的主要来源。

针对秸秆还田下稻季前期的 DOC 径流风险过



大,可以考虑半量秸秆还田甚至不还田,从而通过降低 DOC 浓度的方法降低稻田 DOC 的径流风险。另外,稻田淹水状况对土壤溶液 DOC 浓度亦有显著影响。本研究 2013 年水稻生长中期(烤田结束—扬花期)持续淹水,而 2014 年在此期间间歇淹水,结果是 2013 年该期间的 DOC 浓度显著大于 2014 年。李忠佩等<sup>[48]</sup>土壤培养试验显示,4 周以后的土壤 DOC 浓度变化曲线趋于稳定,其中持续淹水处理显著高于间歇淹水处理。许轲等<sup>[31]</sup>水稻微区试验也表明,分蘖末期以后开始间歇淹水,DOC 浓度迅速降低。稻季持续淹水,有利于土壤有机碳的溶出和团聚体的分散,导致 DOC 浓度的增加<sup>[48]</sup>;而在间歇淹水下,土壤通气条件好,微生物大量增殖,代谢活性高,土壤 DOC 的矿化速率高于淹水条件。在不影响产量的前提下,寻找合适的间歇淹水模式或许也是降低稻田 DOC 径流风险的可行办法。

#### 4 结论

稻麦轮作下秸秆还田显著增加水稻产量;但对小麦产量的效果因土壤类型而不同,壤土中秸秆还田后小麦增产或不受影响,黏土中秸秆还田后小麦减产。总体上,秸秆还田对黏土的水稻增产有利,对壤土的稻麦增产都有利。

稻季土壤溶液 DOC 浓度受多种因素影响,秸秆还田显著增加稻季前期(烤田之前)的 DOC 浓度,间歇淹水可以迅速降低 DOC 浓度;稻季前期的 DOC 浓度,壤土显著高于黏土,而稻季后期壤土低于黏土。从环境安全方面考虑,秸秆还田下需加强稻季前期水分管理,实行间歇灌溉,减轻淹水对稻田 DOC 浓度的影响,避免径流发生污染水体。

#### 参考文献 References

- [1] ZHANG L B, LIU Y Q, HAO L. Contributions of open crop straw burning emissions to PM<sub>2.5</sub> concentrations in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(1): 014014
- [2] SINGH Y, SINGH B, TIMSINA J. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 269–407
- [3] 王德建, 常志州, 王灿, 等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(9): 1073–1082  
WANG D J, CHANG Z Z, WANG C, et al. Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1073–1082
- [4] 李玮, 乔玉强, 杜世州, 等. 秸秆还田配施氮肥对冬小麦氮素吸收特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(10): 1420–1425  
LI W, QIAO Y Q, DU S Z, et al. Effects of combined maize straw turnover and N application on nitrogen absorption characteristic and yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(10): 1420–1425
- [5] YANG C M, YANG L Z, YANG Y X, et al. Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 70(1): 67–81
- [6] SURIYAGODA L, DE COSTA W A J M, LAMBERS H. Growth and phosphorus nutrition of rice when inorganic fertiliser application is partly replaced by straw under varying moisture availability in sandy and clay soils[J]. *Plant and Soil*, 2014, 384(1/2): 53–68
- [7] TANAKA F, NISHIDA M. Inhibition of nitrogen uptake by rice after wheat straw application determined by tracer NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-<sup>15</sup>N[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1996, 42(3): 587–591
- [8] CUCU M A, SAID-PULLICINO D, MAURINO V, et al. Influence of redox conditions and rice straw incorporation on nitrogen availability in fertilized paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(5): 755–764
- [9] 李继福, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 麦秆还田配施不同腐秆剂对水稻产量、秸秆腐解和土壤养分的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 270–276  
LI J F, LU J W, LI X K, et al. Effect of wheat straw returning with different organic matter-decomposing inoculants (OMIs) on the yield of rice, the decomposition of straw and soil nutrients[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 270–276
- [10] 杨卫国, 马超, 梅亚林, 等. 麦茬秸秆还田对直播稻产量影响的初步研究[J]. *上海农业科技*, 2010, (4): 44  
YANG W G, MA C, MEI Y L, et al. Study on effect of wheat straw return on yield of direct seeding rice[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2010, (4): 44
- [11] KONGCHUM M, DELAUNE R D, HUDNALL W H, et al. Effect of straw incorporation on <sup>15</sup>N-labeled ammonium nitrogen uptake and rice growth[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(15/16): 2149–2161
- [12] 杜康, 谢源泉, 林赵淼, 等. 秸秆还田条件下氮肥对水稻幼苗生长及养分吸收的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(1): 18–25  
DU K, XIE Y Q, LIN Z M, et al. Effect of nitrogen on rice seedling growth and nutrient uptake under wheat straw returning[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(1): 18–25
- [13] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 等. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 736–741  
LU P, SHAN Y H, YANG L Z, et al. Effect of wheat straw incorporation into paddy soil on dissolved organic matter in soil solution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 736–741
- [14] 吴家梅, 纪雄辉, 霍蓬杰, 等. 稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4599–4607  
WU J M, JI X H, HUO L J, et al. Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH<sub>4</sub>

- emission fluxes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4599–4607
- [15] 杨镒铭. 稻麦秸秆还田对分蘖期稻田土壤碳氮及甲烷排放的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014  
YANG Y M. Effects of soil carbon and nitrogen and methane emissions from rice fields under rice and wheat straws return during the tillering stage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014
- [16] 曹晓玲, 罗尊长, 黄道友, 等. 镉污染稻草还田对土壤镉形态转化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(9): 1786–1792  
CAO X L, LUO Z C, HUANG D Y, et al. Effects of Cd-contaminated rice straw incorporation on transformation of Cd forms in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9): 1786–1792
- [17] MADHUN Y A, YOUNG J L, FREED V H. Binding of herbicides by water-soluble organic materials from soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1986, 15(1): 64–68
- [18] 应晓成. 稻麦秸秆不同部位在淹水土壤中腐解过程的差异[D]. 扬州: 扬州大学, 2015  
YING X C. Differences in decomposing process between different parts of rice and wheat straws in flooded soil[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015
- [19] 吕璐. 湖北省主要水稻产区水稻土硝化、反硝化潜势及其与铁、锰的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017  
LYU L. Paddy soil nitrification and denitrification potential and its relationship with iron and manganese in major rice producing areas of Hubei Province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017
- [20] 周兴, 廖育林, 鲁艳红, 等. 肥料减施条件下水稻土壤有机碳组分对紫云英-稻草协同利用的响应[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 283–290  
ZHOU X, LIAO Y L, LU Y H, et al. Responses of contents of soil organic carbon fractions to Chinese milk vetch-rice straw synergistic dispatching under the condition of reducing fertilizer application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 283–290
- [21] 王丹丹. 耕作方式与秸秆还田对土壤活性有机碳特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013  
WANG D D. Effects of tillage practices and straw returned to the field on labile organic carbon fractions[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013
- [22] 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 等. 不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3083–3090  
LIU X Y, ZOU J D, XU L L, et al. Effects of different fertilizer species on carbon and nitrogen leaching in a reddish paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 3083–3090
- [23] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(3): 282–290  
PEI P G, ZHANG J H, ZHU L F, et al. Effects of straw returning coupled with N application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(3): 282–290
- [24] 曾洪玉, 唐宝国, 蔡建华, 等. 秸秆还田对耕地质量及稻麦产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2011, 39(4): 499–501  
ZENG H Y, TANG B G, CAI J H, et al. Effect of straw incorporation on quality of cultivated land and yield of rice and wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(4): 499–501
- [25] KUMAR K, GOH K M. Crop Residues and management practices: Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery[J]. *Advances in Agronomy*, 1999, 68: 197–319
- [26] SUREKHA K, KUMARI A P P, REDDY M N, et al. Crop residue management to sustain soil fertility and irrigated rice yields[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 67(2): 145–154
- [27] NIE J, ZHOU J M, WANG H Y, et al. Effect of long-term rice straw return on soil glomalin, carbon and nitrogen[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 295–302
- [28] FAGERIA N K, BALIGAR V C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 97–185
- [29] GANGWAR K S, SINGH K K, SHARMA S K, et al. Alternative tillage and crop residue management in wheat after rice in sandy loam soils of Indo-Gangetic plains[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88(1/2): 242–252
- [30] 金鑫, 蔡林运, 李刚华, 等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (5): 80–85  
JIN X, CAI L Y, LI G H, et al. Effects of all wheat crop straw application on rice growth and redox substance in rice fields[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013, (5): 80–85
- [31] 许轲, 刘萌, 陈京都, 等. 麦秸秆全量还田对稻田土壤溶解有机碳含量和水稻产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 430–436  
XU K, LIU M, CHEN J D, et al. Effects of wheat-straw returning into paddy soil on dissolved organic carbon contents and rice grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 430–436
- [32] KATOH M, MURASE J, SUGIMOTO A, et al. Effect of rice straw amendment on dissolved organic and inorganic carbon and cationic nutrients in percolating water from a flooded paddy soil: A microcosm experiment using <sup>13</sup>C-enriched rice straw[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(5): 803–811
- [33] 汤宏, 沈健林, 刘杰云, 等. 稻秸的不同组分对水稻土甲烷和二氧化碳排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(7): 1125–1133  
TANG H, SHEN J L, LIU J Y, et al. Effects of rice straw fraction on methane and carbon dioxide emission from rice paddy soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(7): 1125–1133
- [34] YE R Z, HORWATH W R. Influence of rice straw on priming of soil C for dissolved organic C and CH<sub>4</sub> production[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1/2): 231–241
- [35] 黄蓉. 水稻秸秆腐解产生溶解性有机质对高铜猪粪腐熟入田的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012  
HUANG R. Effect of rice straw dissolved organic matter on

- the high copper pig into the field of composting[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012
- [36] 徐一然. 水稻与小麦两种秸秆及其组分在淹水土壤中腐解进程的差异[D]. 扬州: 扬州大学, 2014  
XU Y R. Differences in decay process between wheat and rice straws and their components under flooded soil condition[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014
- [37] ZSCHORNACK T, BAYER C, ZANATTA J A, et al. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from flood-irrigated rice by no incorporation of winter crop residues into the soil[J]. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2011, 35(2): 623–634
- [38] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 有机肥施用、土壤有效铜和氮素对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 565–569  
JIAO Y, HUANG Y, ZONG L G, et al. Methane emission from paddy soils as influenced by application of organic manure, soil available copper and nitrogen[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(5): 565–569
- [39] FUMOTO T, KOBAYASHI K, LI C S, et al. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes[J]. Global Change Biology, 2008, 14(2): 382–402
- [40] LU Y H, WASSMANN R, NEUE H U, et al. Dynamics of dissolved organic carbon and methane emissions in a flooded rice soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 2011–2017
- [41] 李娟, 章明清, 林琼, 等. 水稻根长动态模拟和生长特性研究[J]. 福建农业学报, 2009, 24(3): 217–221  
LI J, ZHANG M Q, LIN Q, et al. Dynamic models simulating root length and growth characteristics of rice[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2009, 24(3): 217–221
- [42] 潘晓华, 王永锐, 傅家瑞. 水稻根系生长生理的研究进展[J]. 植物学通报, 1996, 13(2): 13–20  
PAN X H, WANG Y R, FU J R. Advance in the study on the growth-physiology in rice of root system (*Oryza sativa*)[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1996, 13(2): 13–20
- [43] 胡帅珂. 水稻秸秆化感物质对水稻生长发育的影响及消除化感影响的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012  
HU S K. Study on effect of rice straw allelochemicals to rice growth and eliminate the impact of allelopathic[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012
- [44] 于建光, 顾元, 常志州, 等. 小麦秸秆浸提液和腐解液对水稻的化感效应[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 349–356  
YU J G, GU Y, CHANG Z Z, et al. Allelopathic effects of wheat straw extract and decomposition liquid on rice[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 349–356
- [45] 周江敏, 陈华林, 唐东民, 等. 秸秆施用后土壤溶解性有机质的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 678–684  
ZHOU J M, CHEN H L, TANG D M, et al. Dynamic changes of dissolved organic matter in the soils amended with rice straw[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 678–684
- [46] 寿秀玲, 吴静怡, 周江敏, 等. 水稻秸秆施用后土壤溶解性有机碳的变化与土壤 CO<sub>2</sub> 排放[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1218–1225  
SHOU X L, WU J Y, ZHOU J M, et al. Dynamic changes of soil dissolved organic carbon and CO<sub>2</sub> emission amended with rice straw[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1218–1225
- [47] 王良梅. 农田土壤中水溶性有机物的动态及其对重金属铜、镉环境行为的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2004  
WANG G M. Dynamics of dissolved organic matter and its impact on the behaviors of copper and cadmium in farmland[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004
- [48] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544–552  
LI Z P, ZHANG T L, CHEN B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 544–552