

秸秆还田影响长江下游稻田周年氮磷径流风险

张刚, 张世洁, 王德建, 俞元春, 张磊

引用本文:

张刚, 张世洁, 王德建, 等. 秸秆还田影响长江下游稻田周年氮磷径流风险[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 640–649.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0499>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究

杨坤宇, 王美慧, 王毅, 尹黎明, 李勇, 吴金水

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1723–1734 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0609>

玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响

华玲玲, 王洪媛, 翟丽梅, 付斌, 盖霞普, 胡万里

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1376–1383 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.021>

一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估

王强, 姜丽娜, 潘建清, 马军伟, 叶静, 邹平

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 168–175 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0204>

小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响

张雅洁, 陈晨, 陈曦, 常江, 章力干, 郅红建

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2155–2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.017>

不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响

刘雅文, 马资厚, 潘复燕, 杨林章, 薛利红

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1395–1405 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1674>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张刚, 张世洁, 王德建, 等. 秸秆还田影响长江下游稻田周年氮磷径流风险[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 640–649.

ZHANG Gang, ZHANG Shi-jie, WANG De-jian, et al. Straw incorporation affects the annual nitrogen and phosphorus runoff risk from paddy fields in the lower Yangtze River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 640–649.



开放科学 OSID

秸秆还田影响长江下游稻田周年氮磷径流风险

张刚^{1,2,3}, 张世洁^{1,3}, 王德建^{1,3*}, 俞元春², 张磊⁴

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037; 3. 中国科学院常熟农业生态实验站, 江苏 常熟 215555; 4. 济宁市兖州区源汇规划设计院, 山东 兖州 272000)

摘要:为了阐明秸秆还田模式和施氮量对稻田周年氮磷径流风险的影响,于2014年11月—2015年10月通过监测稻田在稻季田面水和麦季径流中的氮磷浓度,研究了秸秆不还田配施推荐施氮(N1)、麦秸还田配施推荐施氮(WN1)、稻秸还田配施推荐施氮(RN1)、稻秸麦秸均还田配施推荐施氮(WRN1)和稻秸麦秸均还田配施常规施氮(WRN2) 5处理对长江下游稻田周年氮磷径流风险的影响。结果表明,秸秆还田增加小麦和水稻周年产量,增幅约9.03%~18.5%,其中WRN1和RN1处理增产效果显著高于WN1处理;与WRN2处理相比,WRN1处理可以维持稻田高产。在推荐施氮条件下,秸秆还田分别降低稻季田面水和麦季径流中溶解态总氮(DTN)浓度约5.17%~14.9%和12.3%,降低稻田氮径流风险;但增加溶解态总磷(DTP)浓度,增幅分别为6.67%~33.3%和30.0%,增加稻田磷径流风险。RN1处理下稻季田面水中DTN和DTP浓度均低于WRN1和WN1处理,且其DTP浓度与N1处理间无显著差异。在稻秸麦秸均还田下,WRN1处理下稻季田面水DTP浓度与WRN2处理没有显著差异,但能有效降低田面水DTN浓度的12.4%。研究表明,在长江下游稻-麦轮作农田推荐采用“RN1”模式,该模式可以维持稻田的周年高产和有效降低稻田的周年氮径流风险,同时对稻田的磷径流风险影响不显著,是一种兼顾粮食生产和生态环境效益的耕作模式。

关键词: 秸秆还田模式; 氮肥用量; 氮磷径流风险; 产量

中图分类号: S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)03-0640-10 doi:10.11654/jaes.2020-0499

Straw incorporation affects the annual nitrogen and phosphorus runoff risk from paddy fields in the lower Yangtze River, China

ZHANG Gang^{1,2,3}, ZHANG Shi-jie^{1,3}, WANG De-jian^{1,3*}, YU Yuan-chun², ZHANG Lei⁴

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Changshu Agroecological Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences, Changshu 215555, China; 4. Institute of Yuanhui Planning and Design of Yanzhou District, Jining, Yanzhou 272000, China)

Abstract: To clarify the effects of straw incorporation and nitrogen (N) application rate on the annual N and phosphorus (P) runoff risk in paddy fields, we regularly monitored the concentrations of N and P in the surface water of a paddy field in rice season and the runoff water in wheat season. The effects of five treatments: recommended N fertilization rate without straw incorporation (N1), with wheat straw incorporation (WN1), with rice straw incorporation (RN1), with both wheat and rice straw incorporation (WRN1), and conventional N fertilization rate with both wheat and rice straw incorporation (WRN2), on the annual N and P runoff risk in a paddy field in the lower Yangtze River were studied. The results showed that all straw incorporation modes increased the annual yield of wheat and rice by 9.03%~

收稿日期: 2020-05-03 录用日期: 2020-11-11

作者简介: 张刚(1980—), 男, 山东泰安人, 博士, 从事土壤、农业生态环境方面的研究。E-mail: gzhang@issas.ac.cn

*通信作者: 王德建 E-mail: djwang@issas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0801101, 2017YFD0800105)

Project supported: National Key R&D Program of China(2016YFD0801101, 2017YFD0800105)

18.5%, among which the WRN1 and RN1 treatments had a significantly higher annual yield compared to that of the WN1 treatment. Compared with the WRN2 treatment, the WRN1 treatment maintained the field's high yield. Under the recommended N fertilizer rate, straw mulching reduced the dissolved total N (DTN) concentration in surface water in the rice season and runoff water in the wheat season by 5.17%~14.9% and 12.3%, respectively, and reduced the risk of N runoff from the paddy field. Additionally, it increased the dissolved total P (DTP) concentration by 6.67%~33.3% and 30.0%, respectively, as well as increased the risk of P runoff. Among the three straw incorporation models, the concentrations of DTN and DTP in the surface water during rice season under the RN1 model were lower than those under the WRN1 and WN1 models, and there was no significant difference in DTP concentration between the RN1 and N1 treatments. Under the double season's straw incorporation, the WRN1 treatment significantly reduced the DTN concentration in surface water by 12.4% but had no significant effect on the DTP concentration relative to that of the WRN2 treatment. Therefore, the "rice straw incorporation in wheat season + recommended N fertilizer rate" model is recommended for rice-wheat rotation farmland in the lower Yangtze River region, which could maintain a paddy field's high annual yields and effectively reduce its annual N runoff risk but has no significant impact on the P runoff risk. This is a farming model that considers the benefits of grain production and the ecological environment.

Keywords: straw incorporation mode; N fertilizer application rate; N and P runoff risk; yield

长江下游区域是我国稻-麦两熟制的重要生产基地,是我国重要的粮食产区^[1],其主要特点是农田集约化程度高,化肥投入量大,但肥料利用效率低^[2-3]。农田氮磷养分易通过径流、淋溶等途径进入附近的水体,造成区域水体的富营养化^[4-7]。作物秸秆中含有丰富的N、P、K营养成分,是一种重要的肥料资源^[1]。秸秆还田不但可以培肥土壤^[8-9],还可以提高氮肥利用率^[10],减少化肥施用量^[11-12],是实现农田生态系统可持续发展的重要措施^[13-15]。鉴于此,江苏省政府办公厅颁发了《江苏省农作物秸秆综合利用规划(2010—2015年)》(苏政办发[2009]133号),把秸秆机械化还田列为区域秸秆综合利用的首选技术措施^[1],在全省范围内大力推广秸秆还田。然而,秸秆还田改变了稻田土壤的物理化学环境^[1,16],从而影响稻田的氮磷养分流失,如刘红江等^[5,17]研究表明,麦秸全量还田处理下稻季氮磷径流流失量较不还田处理分别减少9.2%和10.6%;稻草旋耕还田处理下麦季氮磷损失量比不还田处理分别减少5.4%和5.9%;而汪军等^[18]研究表明,麦秸全量还田增加了稻季田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度,较单施化肥处理增幅约11.5%~22.5%。

近年来,有关水稻和小麦等农作物农田的氮磷径流流失规律的研究较多^[19-22],但关于秸秆还田下稻-麦轮作稻田的周年氮磷径流流失的研究较少。因此,本研究以稻-麦轮作稻田为研究对象,通过秸秆还田定位试验,研究长江下游区域秸秆还田模式和施氮量对稻-麦轮作稻田氮磷径流风险的影响,明确秸秆还田在防控农业氮磷面源污染中的利弊,对秸秆还田的进一步推广具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

秸秆还田定位试验地位于常熟农业生态实验站站区,始于2012年6月,种植制度为夏水稻-冬小麦轮作,供试水稻品种为南粳46号,小麦品种为扬麦16号。试验设置秸秆还田模式和施氮量2因素,其中秸秆还田设置4种还田模式:秸秆不还田、稻季麦秸还田、麦季稻秸还田、稻秸麦秸双季均还田,分别记作S0、W、R、WR;设置2个氮肥水平:推荐施氮、常规施氮,分别记作N1、N2。秸秆还田模式和氮肥水平相组合,共设5处理,分别为S0N1(N1)、WN1、RN1、WRN1、WRN2,每处理均设3次重复,共计15个小区,随机区组排列。小区面积43.7 m²,小区之间均以土堆田埂分隔,田埂均用塑料薄膜包被,以减少灌溉水的串流和侧渗。

本试验中,稻季的推荐施氮量和常规施氮量分别为240 kg N·hm⁻²和300 kg N·hm⁻²,氮肥(尿素)运筹为基肥40%、分蘖肥20%、穗肥40%,不同处理的磷钾肥施用量一致,分别为15 kg P·hm⁻²、60 kg K·hm⁻²,磷肥(过磷酸钙)作为基肥一次性施入,钾肥(氯化钾)运筹为基肥50%,穗肥50%。麦季推荐施氮量和常规施氮量分别为200 kg N·hm⁻²和250 kg N·hm⁻²,磷钾肥用量分别为30 kg P·hm⁻²和30 kg K·hm⁻²,麦季的化肥运筹和稻季相同。麦秸还田模式和稻秸还田模式的秸秆还田量分别为5.5 t·hm⁻²和10.0 t·hm⁻²,稻秸麦秸均还田为15.5 t·hm⁻²。稻秸和麦秸在作物收获时同步收割机切碎,分别于小麦播种和水稻移栽前进行旋耕还田,还田的深度约12 cm,其中不还田的秸秆在作

物收获后及时清运出农田。麦季期间在每个小区中间布置一条宽 20 cm、深 15 cm 的排水沟,用来排出麦季降水产生的积水。本研究中麦秸和稻秸的 C/N 分别为 95 和 51。不同秸秆还田模式的田间管理措施一致。

本次试验周期为 2014 年 11 月—2015 年 10 月。2014 年冬小麦 3 次施肥时间分别为 2014 年 11 月 5 日、2015 年 1 月 7 日和 3 月 8 日;2015 年水稻 3 次施肥时间分别为 2015 年 6 月 18 日、7 月 8 日和 8 月 15 日,于水稻分蘖后期烤田 1 周。

1.2 样品采集和测定

水样采集:小麦生长期,每次下雨并于小区排水沟内产生径流时沿排水方向采用五点混合法采取相应的径流水样。采集约 100 mL 水样至聚乙烯瓶中,所采水样立即带回实验室用定性滤纸过滤,于每瓶滤液中加约 3 mL $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀硫酸,进行冰冻保存。水稻生长期,每次施肥后第 1 d 开始采取田面水样,然后每 2 d 取样 1 次,连续采样 4~5 次,之后每 10 d 取样 1 次,直至水稻收获。稻季水样的采集、保存方法同麦季水样。

水样测定:测定项目包括铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、溶解态总氮(DTN)、溶解态总磷(DTP),其中 NH_4^+-N 采用靛酚蓝比色法测定, NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定,DTN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,DTP 采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定^[23],所有分析项目的测定均在水样采集后 2 d 内完成。

产量测定:小麦和水稻成熟后,各小区均单独收割测产,水稻(粳稻)和小麦(硬质红小麦)籽粒产量分别按含水量 14.5%^[24]和 12.5%^[25]计算。

1.3 计算方法及数据分析

所有试验数据均采用 Microsoft Excel 2019 和 Ori-

gin Pro 2020 软件进行数据计算和作图,采用 PASW Statistics 18 软件进行差异性和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田模式和施氮量对稻季田面水 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DTN 浓度的影响

长江下游区域内水稻移栽期处于高温季节,尿素施入稻田土壤后,受高温影响很快转化为 NH_4^+-N ,导致稻田田面水中 NH_4^+-N 浓度很快升高,一般在每次施肥后数日内达到峰值。本试验的监测数据也取得了相似的结论,单施化肥(N1)处理下基肥期 NH_4^+-N 浓度峰值出现在施肥后第 1 d,而秸秆还田处理下浓度峰值出现在施肥后 1~4 d;蘖肥期和穗肥期的浓度峰值均出现在施肥后第 1 d(图 1)。在等氮量水平下(推荐施氮量),N1 处理下 3 次施肥期的峰值分别为 2.94 、 1.98 、 $5.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均高于 WN1、RN1 和 WRN1 处理的峰值。统计分析表明(表 1),整个水稻生育期内 N1、WN1、RN1、WRN1 处理下稻田田面水中 NH_4^+-N 的平均浓度分别为 1.07 、 0.85 、 0.59 、 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,N1 处理下 NH_4^+-N 平均浓度显著高于 WN1、RN1 和 WRN1 处理,WN1 和 WRN1 处理没有显著差异,但均显著高于 RN1 处理,呈以下规律: $\text{N1} > \text{WN1} \approx \text{WRN1} > \text{RN1}$ 。WN1、RN1、WRN1 等秸秆还田处理下 NH_4^+-N 平均浓度较 N1 处理分别降低 0.22 、 0.48 、 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,降幅分别为 20.6% 、 44.9% 和 29.0% ,平均降幅约 31.5% 。在稻秸麦秸均还田的条件下,WRN2 处理在整个生育期内田面水 NH_4^+-N 平均浓度为 $1.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 WRN1 处理只有 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,表明秸秆还田配施推荐施氮量较配施常规施氮量可有效降低稻田田面水中 NH_4^+-N 浓度。本试验中推荐施氮处理下田面水 NH_4^+-N 浓度降低了 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,秸秆还田配施推荐施氮量能有效降低稻田 NH_4^+-N 的径流风险。

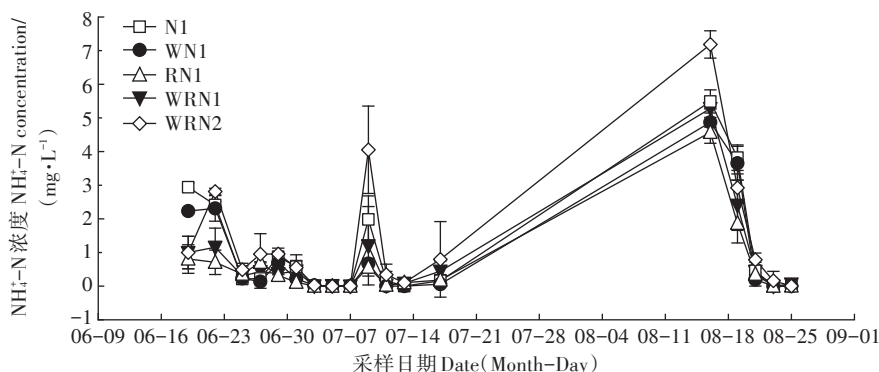


图 1 秸秆还田和施氮量对稻季田面水 NH_4^+-N 浓度的影响(2015 年)

Figure 1 Effects of straw incorporation and N application rate on NH_4^+-N concentration in surface water in rice season(2015)

表1 不同处理下稻季田面水中氮磷平均浓度分析(2015年)

Table 1 Analysis of average N and P concentrations in surface water in rice season under different treatments (2015)

处理 Treatments	NH ₄ ⁺ -N 平均浓度 NH ₄ ⁺ -N mean concentration/(mg·L ⁻¹)	(NH ₄ ⁺ -N/DTN)/ %	NO ₃ ⁻ -N 平均浓度 NO ₃ ⁻ -N mean concentration/(mg·L ⁻¹)	(NO ₃ ⁻ -N/DTN)/ %	DTN 平均浓度 DTN mean concentration/ (mg·L ⁻¹)	DTP 平均浓度 DTP mean concentration/ (mg·L ⁻¹)
N1	1.07b	32.6	0.63a	19.2	3.29b	0.15d
WN1	0.85c	27.3	0.35b	11.2	3.12c	0.17bc
RN1	0.59d	21.2	0.33b	11.7	2.80d	0.16cd
WRN1	0.76c	25.0	0.32b	10.7	3.03c	0.20a
WRN2	1.29a	37.2	0.40b	11.7	3.46a	0.19ab

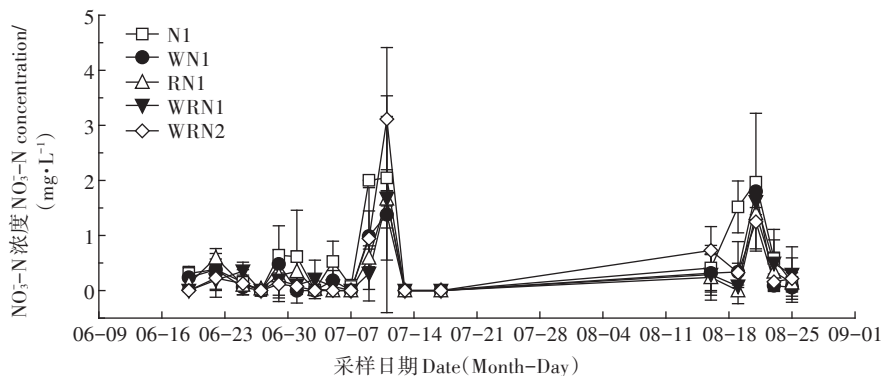
注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著(LSD法)。下同。

Note: Different letters in a column indicate significant differences among treatments at 0.05 level(LSD test). The same below.

在通气良好的条件下,田面水中的NH₄⁺-N经硝化细菌的硝化作用转化为NO₃⁻-N,因此,每次施肥后稻田田面水中NO₃⁻-N浓度峰值的出现时间要滞后于NH₄⁺-N,田面水中NO₃⁻-N浓度随时间的变化规律同NH₄⁺-N。由图2可知,稻季不同施肥期田面水中NO₃⁻-N浓度表现为蘖肥期高于基肥期和穗肥期,这主要是因为基肥和分蘖肥施用时间比较接近,导致基肥期和蘖肥期产生的NO₃⁻-N叠加,此外水稻分蘖后期的烤田措施也有利于NO₃⁻-N的产生。在等氮量水平下,秸秆还田下稻田田面水中NO₃⁻-N浓度均低于单施化肥处理。整个生育期内N1、WN1、RN1、WRN1处理下稻田田面水中NO₃⁻-N的平均浓度分别为0.63、0.35、0.33、0.32 mg·L⁻¹(表1),N1处理下NO₃⁻-N平均浓度显著高于WN1、RN1和WRN1处理,但WN1、RN1和WRN1处理间没有显著差异,表现为:N1>WN1≈RN1≈WRN1。本试验中WN1、RN1、WRN1等秸秆还田处理下NO₃⁻-N平均浓度较N1处理分别降低0.28、0.30、0.31 mg·L⁻¹,降幅分别为44.4%、47.6%和49.2%,平均降幅约47.1%。在稻秸麦秸均还田条件下,WRN2处理下水稻生育期内田面水NO₃⁻-N平均浓度略高于

WRN1处理,较WRN1处理增加0.08 mg·L⁻¹,表明秸秆还田下NO₃⁻-N含量受氮肥施用量的影响,氮肥减量可以降低田面水中NO₃⁻-N浓度。

稻季田面水中DTN的浓度变化趋势同NH₄⁺-N基本一致,单施化肥(N1)处理下DTN浓度峰值均出现在施肥第1 d,秸秆还田处理下蘖肥期和穗肥期的浓度峰值出现在施肥后第1 d,而基肥期浓度峰值出现在施肥后第4~7 d。在等氮量水平下,秸秆还田处理下稻田田面水DTN的浓度低于单施化肥处理,施肥初期不同处理间的差异尤为显著(图3)。本试验中整个水稻生育期内N1、WN1、RN1、WRN1处理下稻田田面水中DTN的平均浓度分别为3.29、3.12、2.80、3.03 mg·L⁻¹,不同处理间的方差分析结果与NH₄⁺-N基本一致(表1),呈以下规律:N1>WN1≈WRN1>RN1,WN1、RN1、WRN1等秸秆还田处理下DTN平均浓度较N1处理分别降低0.17、0.49、0.26 mg·L⁻¹,降幅分别为5.2%、14.9%和7.9%。在稻秸麦秸均还田的条件下,WRN2处理下田面水DTN的平均浓度为3.46 mg·L⁻¹,WRN1较WRN2降低0.43 mg·L⁻¹,降幅约12.4%,表明秸秆还田下氮肥施用量显著影响稻田田面水

图2 秸秆还田和施氮量对稻季田面水NO₃⁻-N浓度的影响(2015年)Figure 2 Effects of straw incorporation and N application rate on NO₃⁻-N concentration in surface water in rice season (2015)

DTN浓度。

整体来看,本试验中 NO_3^- -N在水稻生育期间的平均浓度为 $0.32\sim 0.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远小于 NH_4^+ -N的平均浓度($0.59\sim 1.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), NH_4^+ -N/DTN浓度比值显著高于 NO_3^- -N/DTN浓度比值(表1)。这表明稻季的氮径流损失以 NH_4^+ -N为主,在监测稻季氮径流损失时,应把 NH_4^+ -N作为主要监测指标, NO_3^- -N作为辅助指标。

2.2 秸秆还田模式和施氮量对稻季田面水DTP浓度的影响

稻季田面水中DTP监测结果表明(图4),N1和RN1处理下稻田田面水中DTP浓度峰值出现在施肥后的第1d,之后DTP浓度呈降低趋势,WN1、WRN1和WRN2处理下田面水DTP浓度在施肥初期低于N1和RN1处理,其峰值出现在施肥后的3~4d。从整个生育期来看,N1、WN1、RN1、WRN1、WRN2处理下田面水中DTP的平均浓度分别为 0.15 、 0.17 、 0.16 、 0.20 、 $0.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均高于水体富营养化总磷浓度临界值($0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),有可能引发附近水体的富营养化。

在等氮量水平下,WRN1处理下田面水中DTP平

均浓度显著高于WN1和RN1处理,WN1略高于RN1处理但显著高于N1处理,RN1和N1处理间没有显著差异,表现为: $\text{WRN1} > \text{WN1} \geq \text{RN1} \geq \text{N1}$ (表1)。本试验中,秸秆还田增加了稻田田面水DTP浓度,较N1处理平均增幅约17.8%(6.67%~33.3%),其中RN1处理增幅最小,约6.67%。在稻秸麦秸均还田条件下,WRN2处理下田面水中DTP的平均浓度较WRN1处理低 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,两者间没有显著差异。

2.3 秸秆还田模式对麦季径流氮磷浓度的影响

冬小麦期间共有6次降雨产生了田面径流,降水时间分别为2015年2月8日、2月14日、3月1日、4月20日、4月24日、5月14日,其他时间段的降雨较小,没有产生田面径流,不予考虑。其中N1和RN1处理在6次降水时均采集到径流水样,而WN1和WRN1仅在2月8日和2月14日时采集到径流水样。麦季径流的氮磷浓度及其平均浓度如图5所示。图中“前2次均值”代表N1、WN1、RN1和WRN1处理下第1次和第2次径流水样中氮磷浓度均值,“6次均值”代表N1和RN1处理下冬小麦期间6次径流水样中氮磷浓度均值。

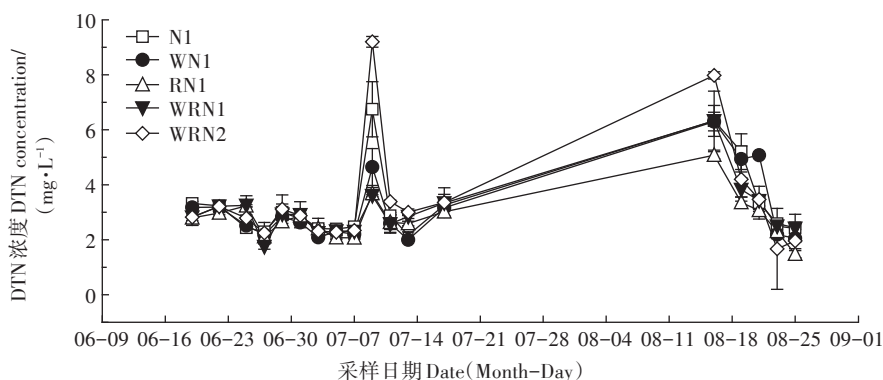


图3 秸秆还田和施氮量对稻季田面水DTN浓度的影响(2015年)

Figure 3 Effects of straw incorporation and N application rate on DTN concentration in surface water in rice season(2015)

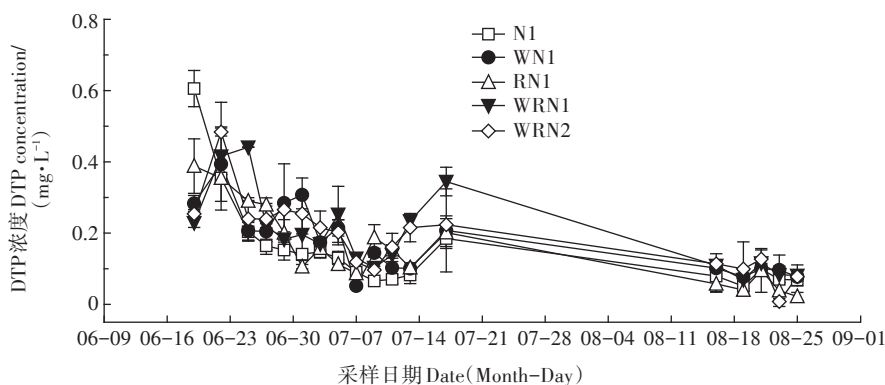


图4 秸秆还田和施氮量对稻季田面水DTP浓度的影响(2015年)

Figure 4 Effects of straw incorporation and N application rate on DTP concentration in surface water in rice season(2015)

2月8日和2月14日径流养分浓度数据表明, RN1和WRN1处理下径流中 NO_3^- -N和DTN浓度低于N1处理,而WN1处理高于N1处理,表现为:WN1>N1>RN1>WRN1; NH_4^+ -N浓度在2月8日表现为秸秆还田

处理<N1处理,2月14日表现为秸秆还田处理>N1处理,但 NH_4^+ -N平均浓度表现为秸秆还田处理<N1处理。3种秸秆还田处理下DTP浓度均高于N1处理,表现为WRN1>RN1>WN1>N1。结合径流氮磷浓度

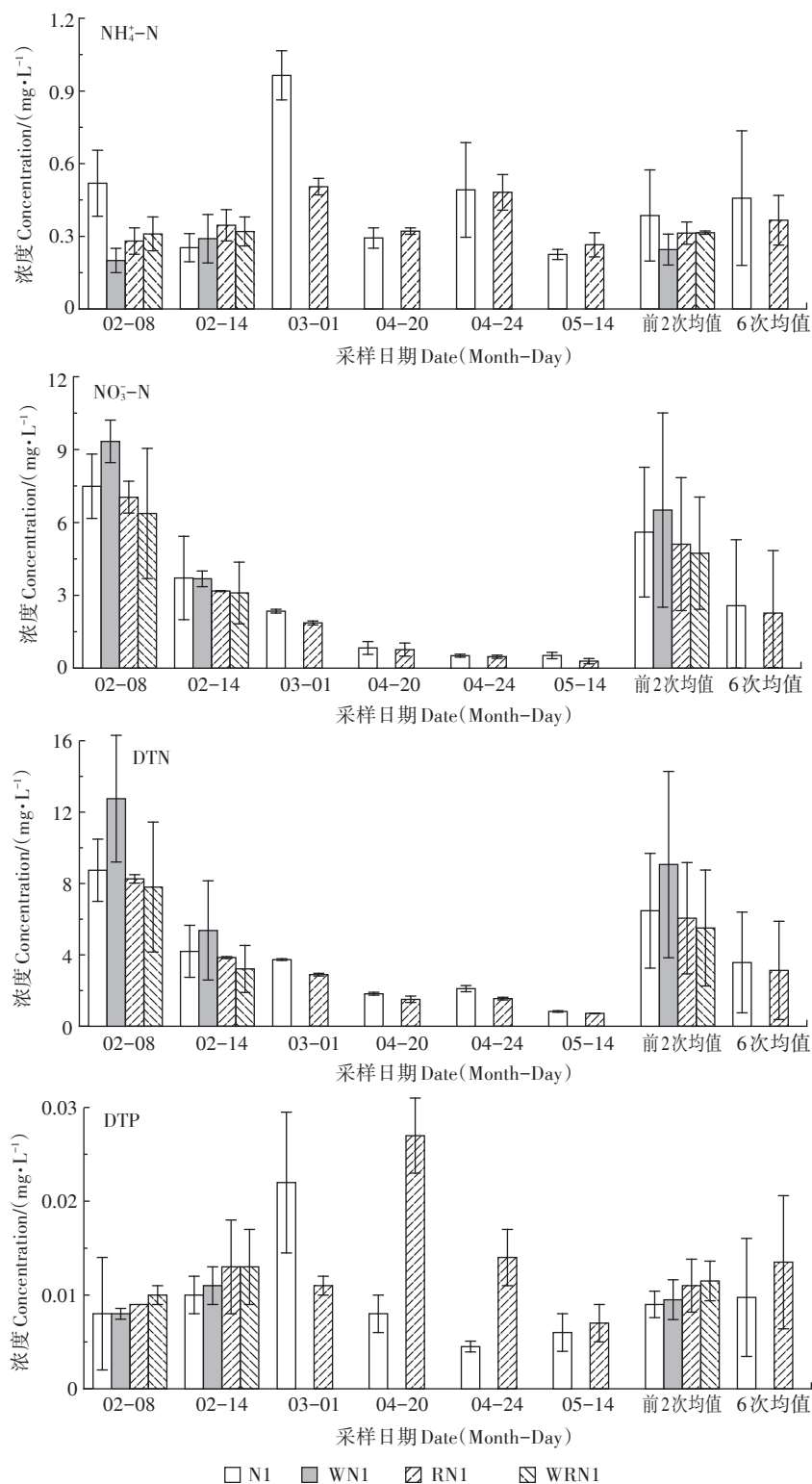


图5 秸秆还田模式对麦季径流中氮磷浓度的影响(2014—2015年)

Figure 5 Effects of straw incorporation on N&P concentration in runoff water in wheat season (2014—2015)

可以发现,3种还田处理中RN1处理可以降低麦季氮径流风险,同时它的磷径流风险较小;WRN1处理下麦季氮径流风险降幅虽然最大,但它的磷径流风险大于RN1处理;而WN1处理的麦季氮磷径流风险均有所增加。

RN1和N1处理下6次麦季径流水样监测结果表明,RN1处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和DTN浓度均低于N1处理,且DTN浓度随时间呈降低趋势;而DTP浓度基本以RN1处理较高(3月1日水样除外),且DTP浓度随时间呈先增后降的趋势。从整个麦季来看,N1处理下径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DTN、DTP的平均浓度分别为0.46、2.57、3.57、0.010 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,RN1处理下径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DTN、DTP的平均浓度分别为0.37、2.27、3.13、0.013 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与N1处理相比,RN1处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DTN的平均浓度分别降低0.09、0.30、0.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降幅分别为19.6%、11.7%、12.3%,而DTP浓度则相反,较N1处理增加了30.0%(0.003 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。t检验表明,RN1和N1处理下麦季径流中氮磷平均浓度间均没有显著差异($P>0.05$),这表明与单施化肥处理相比,稻秸还田对麦季径流水中的氮磷浓度没有显著影响,不会加剧麦季的氮磷径流风险。

小麦生育期内不同处理下径流中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均浓度为2.27~2.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为0.37~0.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ /DTN的浓度比值显著高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /DTN的浓度比值。这表明稻田的麦季氮素径流损失以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主,在监测麦季氮素径流损失时,应以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 作为主要监测指标, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为辅助指标。

2.4 秸秆还田模式和施氮量对水稻和小麦产量的影响

分别于小麦和水稻收获季进行测产,2014年冬小麦和2015年夏水稻的产量数据见表2。

在等氮量条件下,WN1和WRN1处理较N1处理均显著增加小麦产量,增产幅度分别为7.46%和7.66%,RN1处理略有减产,但没有达到显著水平;水稻产量显示,WN1、RN1和WRN1等秸秆还田处理较N1处理均增加水稻产量,平均增产幅度达19.2%,其中WRN1和RN1处理增产效果显著,较N1处理分别增产25.2%和22.2%。在稻秸麦秸均还田条件下,WRN2和WRN1处理下小麦和水稻产量均无显著差异。从稻麦周年产量来看,秸秆还田处理下稻麦的周年产量均显著高于秸秆不还田处理,平均增幅约9.03%~18.5%,其中WRN1和RN1处理增产效果高于WN1处理,且WRN1和RN1处理没有显著差异。WRN2处理下周年稻麦产量略高于WRN1处理,但没

表2 秸秆还田和施氮对小麦和水稻产量的影响

(2014—2015年, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 2 Effects of straw incorporation and N application rate on wheat and rice yield (2014—2015, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	小麦产量 Wheat yield	水稻产量 Rice yield	周年产量 Annual yield
N1	4.96±0.39b	8.11±0.91c	13.07±0.52d
WN1	5.33±0.12a	8.92±0.66bc	14.25±0.73c
RN1	4.92±0.02b	9.91±0.22ab	14.84±0.21bc
WRN1	5.34±0.18a	10.15±0.13a	15.49±0.28ab
WRN2	5.67±0.05a	10.16±0.60a	15.83±0.55a

有达到显著差异。

3 讨论

长江下游是我国重要粮食产区,Xing等^[26]研究表明长江流域稻麦轮作稻田的施氮量高达500~600 $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,大量氮肥在未充分利用前通过地表径流、淋溶等途径进入农田周围水体,加重水体富营养化^[7,27]。秸秆还田作为一项有效培肥增产农业措施,被列为区域秸秆综合利用首要措施^[1]。秸秆还田可以通过秸秆腐解的养分释放和秸秆对养分的吸持作用影响稻田田面水或者径流中氮磷浓度,从而影响稻田的氮磷径流风险^[28-30]。在化肥施用量一致的条件下,朱利群等^[31]研究认为秸秆还田可以通过降低稻田田面水中氮磷浓度减少稻田氮磷径流损失,其在太湖地区进行的秸秆还田试验表明,秸秆还田处理下稻田田面水TN、TP浓度较不还田处理分别降低15.4%~19.8%和5.48%~14.9%,氮磷径流损失量分别减少20.0%~28.9%和10.3%~22.0%。本试验结果表明,秸秆还田降低稻田田面水氮浓度但同时增加磷浓度。在稻季,不同秸秆还田模式均降低了稻田田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,较不还田处理分别降低31.5%和47.1%,降低了稻田氮径流风险;对于磷而言,不同秸秆还田模式均增加了田面水DTP浓度,平均增幅约17.8%,增加了稻田磷径流风险。麦季试验也取得了相似结果,秸秆还田降低麦季径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,较不还田处理分别降低19.6%和11.7%,但增加DTP浓度,增幅约30.0%。本试验中秸秆还田降低了稻田稻季田面水和麦季径流中氮素浓度,主要有两方面的原因:一是还田秸秆具有高C/N,秸秆还田初期易发生微生物固氮作用^[1,32],秸秆吸附田面水中的氮素,而造成田面水氮浓度降低;二是还田秸秆在水稻和小麦生育期的中后期虽然释放一定量的氮素^[33],但由于

水稻和小麦此时处于生长旺盛期需要吸收大量氮,而导致不同处理下稻田田面水中氮含量均较低,无显著差异。本试验中秸秆还田增加稻季田面水和麦季径流的磷浓度,主要是因为秸秆含有的磷遇水易释放^[34],以及秸秆腐解产生的有机酸与土壤钙-磷、镁-磷、铝-磷进行螯合反应,释放土壤固定的磷^[35]。总体而言,秸秆还田降低稻田氮径流风险,但增加磷径流风险。因此,在秸秆还田过程中需要采取某些农艺措施降低秸秆还田带来的磷径流流失风险,如优化秸秆还田模式、减少磷肥用量、加高农田四周田埂高度等。

秸秆还田模式和施氮量影响稻田氮磷径流风险。当施氮量一致时,稻秸还田、稻秸麦秸均还田和麦秸还田模式均降低稻季田面水 DTN 浓度,较不还田模式分别降低 14.9%、7.9% 和 5.2%,其中稻秸还田模式降幅最大,其 DTN 浓度显著低于稻秸麦秸均还田和麦秸还田模式,而稻秸麦秸均还田和麦秸还田模式无显著差异。这是因为,对于稻季而言,稻秸还田模式的秸秆还田发生在麦季,秸秆氮释放集中在麦季;而稻秸麦秸均还田和麦秸还田模式的秸秆还田发生在稻季,其秸秆氮的释放集中在稻季^[34]。因此,稻秸还田模式下稻季田面水的氮浓度低于稻秸麦秸均还田和麦秸还田模式,3种还田模式中以稻秸还田模式对径流氮的削减效果最好,稻秸麦秸均还田和麦秸还田模式次之。秸秆还田较不还田处理均提高了稻季田面水 DTP 浓度,其中麦秸还田和稻秸麦秸均还田模式下 DTP 浓度增加显著,而稻秸还田模式增加不显著。这主要与秸秆磷遇水易释放的规律有关。稻秸还田模式下的稻秸磷主要在麦季释放,而稻秸麦秸均还田和麦秸还田模式的麦秸磷主要在稻季释放^[34]。因此,3种还田模式中以稻秸还田模式下田面水中 DTP 浓度的增幅最小,采用稻秸还田基本不会增加稻田稻季磷径流风险。总体来看,稻秸还田模式可以在不增加磷径流风险前提下,有效降低稻季氮径流风险。对于麦季径流而言,本试验数据表明,稻秸还田模式虽然增加了麦季径流中 DTP 浓度,但同时降低了 DTN 浓度,且 DTP 和 DTN 浓度与不还田模式均没有显著差异。因此,3种还田模式中以稻秸还田模式的周年氮磷径流损失最小。在稻-麦轮作体系中,稻秸还田模式可以有效防控农田的周年氮磷径流风险。在稻秸麦秸均还田条件下,推荐施肥处理下田面水 DTN 浓度较常规施肥处理降低 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,降幅约 12.4%,这表明稻田田面水中氮素浓度随施氮量的增加而增加,这与汪军等^[36]在太湖地区的秸秆还田试验结论一

致;DTP 浓度受施氮量的影响较小,推荐施氮处理和常规施氮处理间 DTP 浓度没有达到显著差异。因此,在秸秆还田下减少氮肥用量可以有效降低稻田的氮径流风险。

长江下游作为我国重要粮食产区,因此保障稻田的稳产高产是筛选适宜农业耕作措施的一个重要标准。本试验中稻麦产量表明,秸秆还田模式下小麦虽有一定的减产(RN1 处理略有减产,但不显著),但水稻呈增产趋势。从稻麦周年产量来看,3种秸秆还田模式下稻麦周年产量均呈增加趋势,但不同秸秆还田模式的增产效果不同。本试验中稻秸麦秸均还田和稻秸还田模式下的稻麦周年产量没有显著差异,但均高于麦秸还田模式。此外,研究还表明,在稻秸麦秸均还田条件下,推荐施氮处理下稻麦周年产量与常规施氮处理之间没有显著差异,同时节氮约 20%。因此,在长江下游地区采用“RN1”模式可以在降低施氮量的前提下,保障当地的周年稻麦产量安全。

4 结论

(1)不同秸秆还田模式均增加稻麦的周年产量,其中稻秸还田和稻秸麦秸均还田模式的周年产量高于麦秸还田模式;稻秸麦秸均还田下,推荐施氮处理下的稻麦周年产量较常规施氮处理无显著差异,同时节氮 20%。

(2)推荐施氮水平下,不同秸秆还田模式均降低稻季田面水和麦季径流中氮浓度,但增加磷浓度。稻秸还田模式显著降低稻田的氮径流风险,但对磷径流风险影响不显著。

(3)稻秸麦秸均还田下,推荐施氮较常规施氮处理有效降低稻田田面水 DTN 浓度,但对 DTP 浓度无显著影响。

综合考虑稻田的周年稻麦产量和氮磷径流风险,推荐长江下游稻-麦轮作农田采用“麦季稻秸还田+推荐施肥”模式,该模式下稻田的周年氮磷径流风险最小,且可以维持稻麦周年高产,是一种兼顾生态环境效益和粮食安全的耕作模式。在实际生产过程中可以通过减少磷肥用量、加高田埂等措施进一步降低稻田磷径流风险。对于不还田的麦秸应及时收集、转运,进行合理化利用。

参考文献:

- [1] 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

- De-jian, CHANG Zhi-zhou, WANG Can, 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.
- [2] 夏文建. 优化施氮下稻麦轮作农田氮素循环特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011: 2-16. XIA Wen-jian. Nitrogen cycling in rice-wheat rotation system under optimized nitrogen management[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2011: 2-16.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用效率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 沈婷. 长江下游平原河网典型地区面源污染特征和控制策略研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015: 1-2. SHEN Ting. Study on the characteristics and countermeasures of non-point source pollution of the lower reaches of the Yangtze River plain[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015: 1-2.
- [5] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1031-1036. LIU Hong-jiang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(6): 1031-1036.
- [6] Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57(1): 67-73.
- [7] Yan W J, Huang M X, Zhang S, et al. Phosphorus export by runoff from agricultural field plots with different crop cover in Lake Taihu watershed[J]. *Journal of Environmental Science*, 2001, 13(4): 502-507.
- [8] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535. PAN Jian-ling, DAI Wan-an, SHANG Zhan-huan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526-535.
- [9] 王忍, 黄璜, 伍佳, 等. 稻草还田对土壤养分及水稻生物量和产量的影响[J]. 作物研究, 2020, 34(1): 8-15. WANG Ren, HUANG Huang, WU Jia, et al. Effects of rice straw returning on soil nutrients, rice biomass and yield[J]. *Crop Research*, 2020, 34(1): 8-15.
- [10] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 877-885. ZHANG Gang, WANG De-jian, YU Yuan-chun, et al. Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(4): 877-885.
- [11] Watanabe T, Man L H, Vien D M, et al. Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(6): 754-763.
- [12] 张廷光, 王达群, 严洪, 等. 秸秆还田化肥减量对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 耕作与栽培, 2015(6): 38-40. ZHANG Ting-guang, WANG Da-qun, YAN Hong, et al. The influence of straw re-
- turned to farmland and reduced amount of fertilizer on yield of rice and soil fertility[J]. *Tillage and Cultivation*, 2015(6): 38-40.
- [13] 汪军, 王德建, 张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265-270. WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang. Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2011, 19(2): 265-270.
- [14] 郭智, 周炜, 陈留根. 稻秸还田对稻麦两熟农田麦季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 17-20, 25. GUO Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen. Effects of rice straw return on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat growing season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 17-20, 25.
- [15] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: Issues and challenges[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(2): 93-132.
- [16] 胡心意, 傅庆林, 刘琛, 等. 秸秆还田和耕作深度对稻田耕层土壤的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(7): 1202-1210. HU Xin-yi, FU Qing-lin, LIU Chen, et al. Effects of straw-returning and tillage depth on soil properties in plough layer of paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(7): 1202-1210.
- [17] 刘红江, 陈留根, 周炜, 等. 麦秸还田对水稻产量及地表径流 NPK 流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1337-1343. LIU Hong-jiang, CHEN Liu-gen, ZHOU Wei, et al. Effects of wheat straw return on rice yield and the NPK loss with overland runoff[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1337-1343.
- [18] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氮挥发特性比较[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 27-33. WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2013, 34(1): 27-33.
- [19] 席运官, 陈瑞冰, 徐欣, 等. 太湖地区麦季氮磷径流流失规律与控制对策研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(4): 106-109. XI Yun-guan, CHEN Rui-bing, XU Xin, et al. Study on N, P loss through runoff in wheat field of Tai Lake region and countermeasures[J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2010, 22(4): 106-109.
- [20] 席运官, 田伟, 李妍, 等. 太湖地区稻麦轮作系统氮、磷径流排放规律及流失系数[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 534-540. XI Yun-guan, TIAN Wei, LI Yan, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses and loss coefficients in rice-wheat rotation system in Taihu Lake basin[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(3): 534-540.
- [21] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 21-25. XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu, ZHU Li-qun, et al. Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in Taihu region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 21-25.
- [22] 李瑞玲, 张永春, 曾远, 等. 太湖流域丘陵地区暴雨条件下农田氮

- 素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1185-1190. LI Rui-ling, ZHANG Yong-chun, ZENG Yuan, et al. Effects of rainstorm on the export of farmland nitrogen with surface runoff in hilly area of Tai Lake basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1185-1190.
- [23] 李瀚, 邓欧平, 胡佳, 等. 成都平原农业废弃物施用下稻田田面水氮磷动态变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 485-493. LI Han, DENG Ou-ping, HU Jia, et al. Dynamics of nitrogen and phosphorus in paddy field water under agricultural residue applications in Chengdu plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 485-493.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 稻谷(GB 1350—2009)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration. Paddy (GB 1350—2009) [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 小麦(GB 1351—2008)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration. Wheat (GB 1351—2008) [S]. Beijing: China standard Press, 2008.
- [26] Xing G X, Cao Y C, Shi S L, et al. N pollution sources and denitrification in waterbodies in Taihu Lake region[J]. *Science China Series B: Chemistry*, 2001, 44: 304-314.
- [27] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I: 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017. ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I: Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [28] 刘平东. 水稻、油菜还田秸秆氮素释放与吸附特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 2-3, 9-12. LIU Ping-dong. Characteristics of nitrogen release and adsorption by rape and rice straw incorporation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 2-3, 9-12.
- [29] 刘春晓, 曹扬, 王晓杰, 等. 小麦秸秆对尿素中养分的吸附研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(7): 125-127. LIU Chun-xiao, CAO Yang, WANG Xiao-jie, et al. Research on absorption of wheat straw to nutrient in Urea solution[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(7): 125-127.
- [30] 张世洁, 张刚, 王德建, 等. 秸秆还田配施氮肥对稻田增产及田面水氮动态变化的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 435-445. ZHANG Shi-jie, ZHANG Gang, WANG De-jian, et al. Effects of straw returning coupled with application of nitrogen fertilizer on rice yield and dynamics of nitrogen in surface water of paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 435-445.
- [31] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 6-10. ZHU Li-qun, XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 6-10.
- [32] 徐英德, 孙良杰, 汪景宽, 等. 还田秸秆氮素转化及其对土壤氮素转化的影响[J]. 江西农业大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 859-870. XU Ying-de, SUN Liang-jie, WANG Jing-kuan, et al. Nitrogen transformation of returned straw in soil and its effect on soil nitrogen transformation[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition)*, 2017, 39(5): 859-870.
- [33] 王维敏. 麦秸、氮肥与土壤混合培养时氮素的固定、矿化与麦秸的分解[J]. 土壤学报, 1986(2): 97-105. WANG Wei-min. Immobilization and mineralization of nitrogen and decomposition of straw during incubation of soils mixed with wheat straw and nitrogen fertilizer [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1986(2): 97-105.
- [34] 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. DAI Zhi-gang, LU Jian-wei, LI Xiao-kun, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 272-276.
- [35] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 779-789. HUANG Xin-xin, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling, et al. Effects of long-term straw return on various fractions of phosphorus in Fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 779-789.
- [36] 汪军, 王德建, 张刚. 秸秆还田下氮肥用量对稻田养分淋洗的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 316-321. WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang. Effect of incorporated straw-nitrogen fertilizer on nutrient leaching in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2010, 18(2): 316-321.