

DOI: 10.11766/trxb201810310455

张世洁, 张刚, 王德建, 刘勤, 王书伟. 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 Shijie, ZHANG Gang, WANG Dejian, LIU Qin, WANG Shuwei. 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.

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*

张世洁^{1, 2}, 张刚^{1, 3}, 王德建¹, 刘勤¹, 王书伟^{1, 4}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037; 4. 中国科学院常熟农业生态试验站, 江苏常熟 215555)

摘要: 针对我国南方稻田氮素流失污染严重问题, 为明确高产稻田秸秆还田下氮肥施用效应, 采用田间试验, 研究秸秆全量还田下不同氮肥用量对水稻产量及稻田田面水氮素动态变化的影响, 以期为长江下游径流易发地区探寻兼顾产量与环境效益的秸秆还田配施氮肥措施。结果表明: (1) 秸秆还田下配施氮肥可显著提高水稻产量, 但当氮肥用量过高则增产效应降低, 连续秸秆还田 4 年以上可以发挥秸秆部分替代氮肥的增产效应; (2) 稻田田面水总氮 TN、NH₄⁺-N 在每次施肥后 1~2 d 达到峰值, 之后迅速下降至相对低浓度水平, 施肥后一周内是氮素径流损失的风险期, 秸秆还田可有效降低水稻生育前期稻田田面水 TN 浓度, 但同时一定程度增大了可溶性有机氮 (DON) 的流失潜力; (3) 秸秆还田下搭配减氮施肥 (SN1) 较推荐氮肥 (SN2) 与常规施肥 (SN3) 可分别减少 25%、40% 氮肥用量, 同时可分别降低田面水中 9.6%、20.8% TN 含量 ($P < 0.05$), 是兼顾产量与环境效益的最佳措施。因此, 推荐长江中下游径流易发的水稻种植区, 对秸秆长期全量还田, 配施氮肥用量 180~225 kg·hm⁻²。

关键词: 秸秆还田; 氮肥; 田面水氮素; 水稻产量

中图分类号: S511 **文献标志码:** A

Effects of Straw Returning Coupled with Application of Nitrogen Fertilizer on Rice Yield and Dynamics of Nitrogen in Surface Water of Paddy Field

ZHANG Shijie^{1, 2}, ZHANG Gang^{1, 3}, WANG Dejian^{1†}, LIU Qin¹, WANG Shuwei^{1, 4}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210037, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 4. Changshu Agroecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, Changshu, Jiangsu 215555, China)

Abstract: [Objective] In view of the fact that hydrosphere pollution caused by nitrogen losses with runoff from paddy fields in South China is increasingly serious, an attempt was made to explore N losing effect and potential risks of straw returning coupled with nitrogen fertilizer application and an optimum synthetic N fertilization rate in addition to full straw return. [Method] A field experiment was conducted to explore effects of straw incorporation coupled with N fertilizer application varying in rate on rice yield and dynamics of nitrogen in paddy surface water, and to seek for an optimum fertilizer-N application rate in addition to full

* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800105) 资助 Supported by the National Key Research and Development Plan of China (NO.2017YFD0800105)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: djwang@issas.ac.cn

作者简介: 张世洁 (1992—), 女, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: sjzhang@issas.ac.cn

收稿日期: 2018-10-31; 收到修改稿日期: 2018-12-18; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-03-26

straw incorporation contributive to crop yield and the environment. 【Result】 Results show: (1) Compared with Treatment N2 (application of synthetic N only), Treatment SN2 (Straw return plus N application at a recommended rate, N : P : K = 240 : 15 : 60) was significantly or 22.5% higher in rice yield ($P < 0.05$). Besides, compared with Treatment SN0 (Straw incorporation with no N applied), Treatment SN1 (Straw return plus N application at a reduced rate, N : P : K = 180 : 15 : 60), SN2 and SN3 (Straw return plus N application at a conventional rate, N : P : K = 300 : 15 : 60) was significantly or 50.1%, 60.1% and 40.8%, respectively, higher in rice yield. This study showed that straw return plus N application significantly increased rice yield, but the effect reduced when too much N fertilizer was applied. Full straw return for 4 or more years in a row could replace part of the N fertilizer applied in yield raising effect; (2) TN (total nitrogen) and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (ammonia nitrogen) in paddy surface water peaked in concentration in 1~2 days after urea application, then declined rapidly to a relatively low level. So the week after urea application was a period full of risks of nitrogen runoff loss. Moreover, compared with Treatment N2, Treatment SN2 reduced TN concentration in paddy surface water during the period after basal and tillering fertilizer application by 2.0% ($P > 0.05$) and 6.1% ($P < 0.05$), respectively. Treatment SNO reached 53.7% and was obviously higher than Treatment N2, SN1, SN2 and SN3, in DON/DTN (dissolved organic nitrogen/dissolved total nitrogen) and dominated with DON in N release. Treatment SN2 was 12 higher than Treatment N2 in DON concentration. All in all, straw return could effectively decrease the concentration of TN in surface water during the earlier rice-growing stage, while increasing the potential of DON loss; and (3) Compared with Treatment SN2 and SN3, Treatment SN1 could save fertilizer-N consumption by 25% and 40% and reduce TN loss by 9.6% and 20.8%, respectively, so it's an optimal mode that takes both yield and environmental benefits into consideration. 【Conclusion】 In a word, for the region in the downstreams of the Yangtze River, especially the flood and runoff prone areas, returning straw fully coupled with 180~225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ -N fertilization in paddy fields is recommended as a long-term farming practice. All the findings in this paper may provide a certain scientific basis for future researches on hydrological N losses as affected by straw return

Key words: Straw return; Nitrogen application rate; Surface water nitrogen; Rice yield

氮素是作物生长和产量形成最重要的营养元素, 氮肥施用对世界发达国家和发展中国家粮食贡献率分别高达 40% 和 55% 以上^[1-2]。迫于人口持续增长对粮食需求的压力, 农田氮素投入越来越多, 施入农田的肥料除被作物吸收和土壤固定外, 其余则以田面径流、渗漏、氨挥发、反硝化等途径损失进入周围环境^[3], 其中农田地表径流所流失的氮、磷已成为我国南方农业面源污染和河湖水质富营养物质污染的主要来源^[4]。我国湖泊富营养化的水体已占 63.6%^[3], 径流排水是农田养分流失的主要途径之一, 而氮素的流失是引起水体富营养化的关键因子^[5]。

基于文献计量学对 1957 年以来世界各国对农田氮流失研究综合分析发现, 源头控制是农田氮流失防控措施中最有效的措施^[6]。水稻作为我国主要的粮食作物之一, 其氮素利用率仅为 17.0%~45.7%^[7]。研究表明: 通过改变肥料种类或优化施肥量, 可以有效减少稻田氮素径流损失^[8-9], 从源头减少氮流失引发的水体污染问题。秸秆还田作为一项重要有机培肥措施, 在蓄水保墒、减少污染等方面

具有优势^[10], 同时还能避免有机粪肥还田造成的土壤重金属积累风险^[11-12], 是一种不可替代的保护性耕作措施。与常规措施相比, 秸秆还田或者秸秆还田搭配减量施肥均可有效降低地表氮流失量甚至降低氮流失率^[13-15], 但不同研究间差异较大。

目前对农田径流氮损失控制效果的评价主要依靠收集径流池或径流收集管的径流样, 通过测定分析, 比较随机径流的氮素损失强度^[16-17]。一方面, 由于径流发生的随机性, 每季样品收集次数有限(有时收集不到), 难以确切地反映当季农田径流控制措施的真实效应; 此外, 现有研究对于稻田田面水的监测, 存在样品采集频度低以及样品测定不及时的问题, 可能导致缺少重要波动点以及误判氮素形态而无法真实反映氮素的流失特征。另一方面, 秸秆还田下的增产效应已有颇多研究, 然而结合秸秆还田及配施不同氮肥用量对产量与农田氮径流的综合影响的研究较少, 也存在试验布设时间短(1-2 季的秸秆还田试验), 不能反应长期秸秆还田下的产量效应。鉴于此, 本研究基于在江苏常熟的秸秆还田配施氮肥的 6 年田间定位试验, 通过测定稻田田面水

氮浓度变化来反映氮素径流流失风险, 探讨秸秆全量还田下氮肥用量对水稻产量及稻田田面水氮动态变化的影响, 以期为长江下游地区合理施肥与秸秆资源化利用、提高农作物经济效益和减少农业面源污染提供指导。

1. 材料与方 法

1.1 研究区概 况

试验位于江苏常熟农田生态系统国家野外科学

观测研究站(31°33'N, 123°38'E)。站区海拔 3.12 m, 属于亚热带北部湿润季风气候区, 2017 年水稻生育期日平均气温与降雨量如图 1, 生育期降雨量 773.6 mm, 与近五年 2012—2016 年稻季平均降雨量相近, 平均气温 23.7 °C, ≥ 10 °C 有效积温 4 281 °C。稻-麦轮作为主要种植制度, 供试土壤为乌栅土(普通筒育水耕人为土), 试验前 0~15 cm 耕层土壤基本理化性质如下: 有机质 40.24 g·kg⁻¹、全氮 2.35 g·kg⁻¹、有效磷 29.9 mg·kg⁻¹、速效钾 156.2 mg·kg⁻¹, pH 7.19。

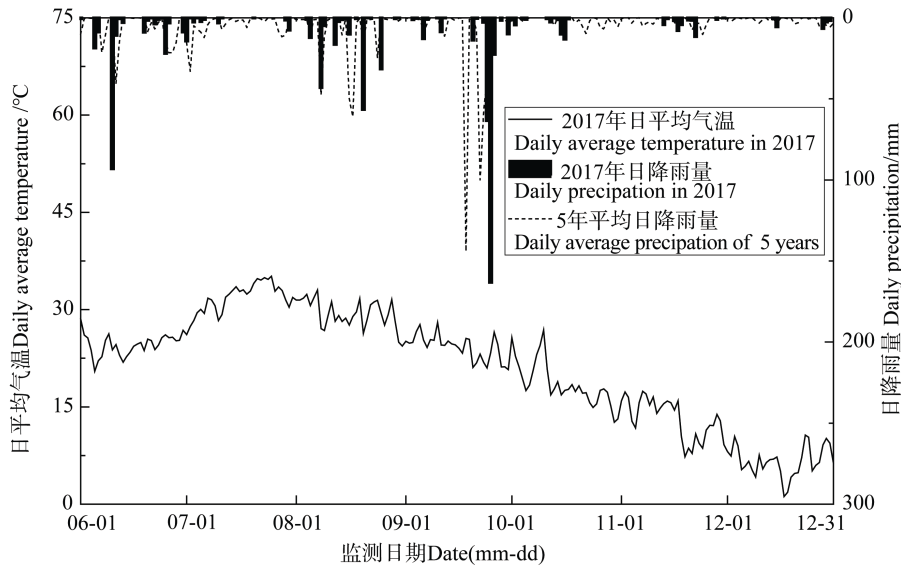


图 1 水稻生育期降雨量与温度变化

Fig. 1 Variation of rainfall and temperature during the rice development stages

1.2 试验设计

试验基于秸秆还田配施氮肥的田间定位试验(始于 2012 年稻季), 水稻每年在 6 月 15 日—6 月 20 日插秧、10 月 28 日—11 月 5 日收获, 每年对于同一处理的管理方式一致。本研究于 2017 年稻季(6 月—11 月)进行田面水采样测定, 试验选择 5 个处理(表 1), 每个处理均设 3 次重复, 共 15 个小区, 随机区组排列。各试验小区面积为 43.7 m², 无坡度, 小区之间均以宽 20 cm 的田埂分隔, 防止各小区间肥水发生侧渗和串灌, 各小区均设有单独的进水口和排水口。

供试的氮磷钾肥分别为尿素(46% N)、过磷酸钙(5.24% P)和氯化钾(49.8% K), 氮肥按基肥: 分蘖肥: 孕穗肥=4: 2: 4 施用, 磷肥作为基肥于插秧前一次施入, 钾肥 50%作为基肥、50%作为穗肥施入。秸秆还田方式为: 收集上一季小麦秸秆, 并

切断(长 5~10 cm)后旋耕还田。供试水稻品种为南粳 46 号, 于 2017 年 6 月 18 日移栽, 11 月 3 日收获, 水稻移栽后定期灌溉, 灌溉用水为附近河水, 除水稻分蘖后期烤田一周, 以及收获前 10~14 d 小区不进水, 其余时间保持田面水深为 3~5 cm(低于径流排水管口高度)。

1.3 样品采集与分析

2017 年稻季基肥与两次追肥时间分别为 6 月 18 日、7 月 9 日和 8 月 15 日, 以每次施肥后 10 d 内每 2 d 一次(施肥后第 1、3、5、7、9 天), 平常每 10 d 一次的频率采集田面水, 直至水稻收获。每个小区通过五点取样法采集约 100 mL 田面水水样至聚乙烯瓶中, 所采水样立即带回实验室进行测定, 少量不能立即测定的, 则滴加约 3 mL 6 mol·L⁻¹ 稀硫酸并冰冻保存, 5 d 内测定完毕。测定方法为: 总氮(TN)采用

过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,溶解性总氮(DTN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)经定性滤纸过滤,DTN测定方法与TN相同, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用靛酚蓝比色法, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 则直接采用紫外分光光度法测定^[18]。

水稻成熟后,各小区均单独收割测产,按照14%的含水量标准折算产量。各处理中,对其中一组重复选取5穴代表性水稻植株,从中随机选择25株进行考种,对水稻产量及构成要素分析。

表 1 不同处理肥料用量

Table 1 Fertilizer application rate relative to treatments / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

| 处理 Treatment | 描述 Description | N | P | K | 秸秆(麦秸) Wheat straw |
|-----------------|---|-----|----|----|-----------------------|
| N2 | 推荐氮肥 Recommended N fertilization | 240 | 15 | 60 | 0 |
| SN0 | 秸秆还田 Straw returning (SR) | 0 | 15 | 60 | 5 500 |
| SN1 | 秸秆还田+减氮施肥 SR plus reduced N fertilization | 180 | 15 | 60 | 5 500 |
| SN2 | 秸秆还田+推荐氮肥 SR plus recommended N fertilization | 240 | 15 | 60 | 5 500 |
| SN3 | 秸秆还田+常规氮肥 SR plus conventional N fertilization | 300 | 15 | 60 | 5 500 |

水稻成熟后,各小区均单独收割测产,按照14%的含水量标准折算产量。各处理中,对其中一组重复选取5穴代表性水稻植株,从中随机选择25株进行考种,对水稻产量及构成要素分析。

1.4 数据处理

不同形态氮素计算公式如下:

$$\text{TN} = \text{PN} + \text{STN}$$

$$\text{DTN} = \text{DON} + \text{IN}$$

$$\text{IN} = \text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$$

式中,PN为颗粒态氮,DTN为溶解性总氮,DON为溶解性有机氮,IN为无机氮。

氮肥偏生产力(Partial factor productivity, PFP_N , $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=单位面积作物产量/单位面积氮肥施用量(以纯氮投入量计算)^[19]。利用Origin 8和SPSS18.0,Excel 2016软件进行绘图和数据分析,处理之间的差异应用Duncan法进行多重比较。

2 结果

2.1 不同处理水稻产量

本试验近3年的水稻产量如表2所示,2015年

以前的产量变化趋势是:SN3、SN2>SN1>N2>N0,从2016年开始(秸秆还田第5年)SN2与SN1处理产量没有显著差异,2017年与SN2与SN1处理产量仍没有显著差异,但SN3处理产量显著下降,产量依次为SN2>SN1>SN3>N2>SN0。秸秆还田处理下,总体上水稻产量随施氮量的增加而增加,但到2017年SN3处理较SN2显著下降,说明秸秆还田下高量施氮可能降低氮肥的利用率,反而不利于水稻的生长。2017年秸秆还田下施氮处理(SN1、SN2、SN3)较不施氮处理(SN0)均显著增加水稻产量($P<0.05$),增产分别达到50.1%、60.1%、40.8%。而同一施氮水平下秸秆还田SN2处理较不还田N2处理增产22.6%($P<0.05$)。此外,与SN2、SN3相比,SN1在分别减少25%、40%氮肥用量的情况下保证水稻产量不会显著降低。

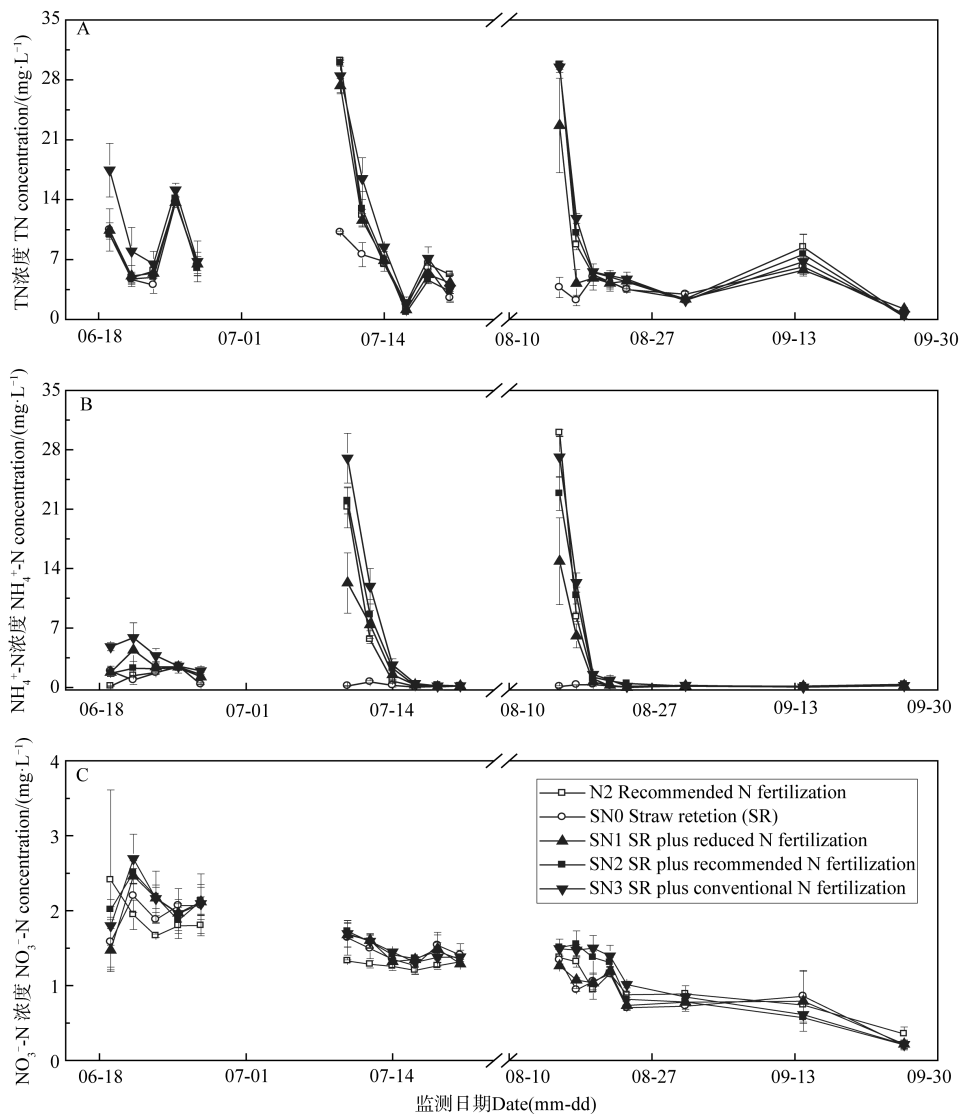
从水稻产量构成因素来看,不施氮处理(SN0)籽粒千粒重最低,秸秆全量还田下,施氮处理(SN1、SN2、SN3)较SN0千粒重分别高出2.1%、9.1%、7.1%,一定程度说明氮素是限制作物生长发育的关键因子。此外,同等氮肥用量下,SN2较N2处理有效穗数更多、瘪率更低,并且前者较后者氮肥偏生产力高出22.6%($P<0.05$),说明秸秆还田处理主要通过提高单位面积水稻有效穗数与结实率,从而提高水稻产量。

表 2 不同处理的水稻产量及产量构成因素

Table 2 Grain yield and its components of rice relative to treatments

| 处理 Treatment | 2015 年产量 Yield of year 2015/ (kg·hm ⁻²) | 2016 年产量 Yield of year 2016/ (kg·hm ⁻²) | 2017 年 Year 2017 | | | | |
|-----------------|--|--|---|--|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| | | | 产量/ Yield (kg·hm ⁻²) | 穗数 Number of panicles/ (10 ⁴ ·hm ⁻²) | 千粒重 Weight per 1 000 grains/g | 瘪率 Rate of infertile grain/% | 氮肥偏生产力 PFPN/ (kg·kg ⁻¹) |
| N2 | 8 061b | 8 010b | 7 959c | 270 | 26.7 | 4.24 | 33.2c |
| SN0 | 6 555c | 6 010c | 6 094d | 203 | 24.1 | 2.26 | — |
| SN1 | 8 842b | 8 832ab | 9 145ab | 281 | 24.6 | — | 50.8a |
| SN2 | 10 090a | 9 582a | 9 757a | 304 | 26.3 | 2.63 | 40.7b |
| SN3 | 10 089a | 8 896ab | 8 580bc | 304 | 25.8 | 3.40 | 28.6d |

注：同一列无相同字母代表处理间差异性显著 ($P < 0.05$)。下同。“—”表示数据缺失或不能计算。Note: Values followed by different letters within the same column are significantly different at the 5% level. The same blow. “—” represents the missing or incalculable data.

图 2 稻季生育期不同施肥处理田面水 TN (A)、NH₄⁺-N (B)、NO₃⁻-N (C) 浓度变化Fig. 2 Concentrations of TN (A), NH₄⁺-N (B), NO₃⁻-N (C) in surface water relative to treatments during the rice growing period

2.2 秸秆还田配施氮肥对田面水不同形态氮素动态变化的影响

稻田田面水 TN 动态监测表明 (图 2A), 每次施肥后田面水 TN 浓度都急剧升高, 在 1 d 内达到峰值, 然后迅速下降, 由于降雨和灌溉以及秸秆本身对氮素吸附与释放等因素的综合作用, 每次施肥后期 TN 浓度均出现小幅波动。每次施肥后 8~9 d, TN 仍在 $0.32 \sim 7.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内波动。秸秆还田处理下 (SN1、SN2、SN3), 田面水 TN 浓度随着施氮量的增加而显著增加。表 3 结果显示, 在同一施氮水平下, 与 N2 处理相比, SN2 处理可降低水稻生育前期 (基、蘖肥期) 田面水 TN 含量, 尤其是蘖肥期的降幅达 6.1% ($P < 0.05$), 说明秸秆还田可有效减少生育前期氮素流失风险。此外, 秸秆全量还田下减氮施肥处理 (SN1) 和推荐氮肥处理 (SN2) 较常

规氮肥处理 (SN3) 田面水 TN 浓度分别降低 20.8% 和 12.4% ($P < 0.05$)。

施肥后稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化如图 2B 所示, 3 个施肥期内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度峰值表现为基肥期 < 蘖肥期 < 穗肥期, 追肥期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均在施肥后也在 1 d 内达到高峰, 之后迅速下降。与 TN 不同的是, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在第 7~9 天开始趋于稳定, 且浓度接近为 0 ($0.04 \sim 1.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。统计分析表明 (表 3), 秸秆还田下 (SN1、SN2、SN3), 各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均随施氮量的增加而显著增加, 同一施氮水平下, 施秸秆处理 (SN2) 浓度略高于不施秸秆处理 (N2) 浓度, 但两者之间无显著差异。减氮施肥处理 (SN1) 和推荐氮肥处理 (SN2) 较常规氮肥处理 (SN3) 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别降低 45.8% 和 23.3% ($P < 0.05$)。

表 3 水稻生育期田面水不同形态氮素平均浓度

Table 3 Mean concentration of nitrogen in surface water relative to form during the rice growth stages / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

| 处理 Treatment | 基肥期 Base fertilizer stage | | | 蘖肥期 Tiller fertilizer stage | | | 穗肥期 Panicle fertilizer stage | | | 整个生育期 The whole growth period | | |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | TN | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | TN | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | TN | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | TN | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ |
| | N2 | 8.09b | 1.45c | 1.92a | 10.34b | 4.69b | 1.27b | 7.86a | 5.03ab | 0.96bc | 8.71b | 3.98b |
| SN0 | 7.85b | 1.48c | 1.96a | 5.81d | 0.23d | 1.45a | 3.57c | 0.18d | 0.87c | 5.40d | 0.53d | 1.34bc |
| SN1 | 8.22b | 2.45b | 2.04a | 9.41c | 3.62c | 1.46a | 6.23b | 2.79c | 0.88c | 7.76c | 2.96c | 1.37abc |
| SN2 | 7.93b | 1.95bc | 2.14a | 9.75c | 5.56b | 1.48a | 8.10a | 4.57b | 1.01ab | 8.58b | 4.19b | 1.46ab |
| SN3 | 10.77a | 3.77a | 2.14a | 11.02a | 7.07a | 1.46a | 8.29a | 5.32a | 1.07a | 9.80a | 5.46a | 1.47a |

图 2C 结果显示, 田面水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度远低于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 其峰值滞后于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 出现在每次施肥后第 3~5 天, 之后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度随时间缓慢降低, 稻季 3 次施肥期峰值表现为基肥期 > 蘖肥期 > 穗肥期, 分别为 2.81、1.78 和 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水稻整个生育期内 (表 3), 各处理间田面水硝态氮平均浓度水平相差不大, 但同一氮肥水平下 SN2 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较 N2 处理高 11.5% ($P < 0.05$)。

2.3 稻田田面水各形态氮素比例

由表 4 可知, 水稻生育期内可溶性总氮是田面水氮素的主要部分, DTN/TN 高达 75~91%。比较各处理发现, 随着无机氮肥含量的提高, DTN/TN 越高, 单施秸秆处理 SN0 的 DTN 占比显著低于其它施氮处理 (N2、SN1、SN2、SN3)。在溶解性总

氮 (DTN) 中, 施氮处理 (N2、SN1、SN2、SN3) 的无机氮 (IN) 总体占比更高, 而单施秸秆处理 (SN0) DON/DTN 达 53.7%, 显著高于其它处理, 说明单施秸秆下可溶性有机氮素的释放占更重要地位。虽然同一施氮水平下秸秆还田处理 (SN2) 与不还田处理 (N2) 的 DON/DTN 差异不显著, 但前者 DON 浓度较后者高出 12% (SN2、N2 处理分别为 2.01、 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 并且从秸秆还田下随着氮肥施用减少而 DON/DTN 增高也可得出, 秸秆还田一定程度增加了 DON 流失风险。此外, 田面水无机氮 (IN) 中以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 除单施秸秆外, 其余处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{IN}$ 达到 68.4%~78.7%, 而单施秸秆的 SN0 处理则以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主, $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{IN}$ 高达 71.4%。

表 4 稻季田面水各形态氮素比例

Table 4 Fractionation of nitrogen in surface water during the rice growth season /%

| 处理 Treatment | DTN/TN | DON/DTN | IN/DTN | NH ₄ ⁺ -N /IN | NO ₃ ⁻ -N/IN |
|-----------------|--------|---------|--------|-------------------------------------|------------------------------------|
| N2 | 83.7ab | 27.3bc | 72.7ab | 75.2a | 24.8bc |
| SN0 | 74.7c | 53.7a | 46.3c | 28.6c | 71.4a |
| SN1 | 83.0b | 32.7b | 67.3b | 68.4b | 31.6b |
| SN2 | 87.0ab | 24.0c | 76.0a | 74.2a | 25.8bc |
| SN3 | 91.0a | 22.0c | 78.0a | 78.7a | 21.3c |

3 讨论

3.1 秸秆还田对水稻产量的影响

秸秆由于高 C/N 及难分解成分物质的存在, 单一施用不能像无机肥一样能迅速为作物提供充足的速效养分, 二者的配施是发挥彼此作用的最佳方式^[20]。已有研究表明秸秆还田配施氮肥可以促进土壤有机质积累, 改良土壤结构, 改善土壤供氮状况^[21-23], 从而促进水稻增产。本研究中, 秸秆全量还田下水稻产量随着施氮量的增加而增加, SN2 处理达到峰值, 之后出现下降。这与李勇等^[24]的研究一致, 当施氮量超过某一阈值, 产量就不再增加甚至减少, 这也说明秸秆与氮肥配比是影响土壤养分动态平衡与作物产量的关键。有研究表明: 秸秆全量还田配施氮肥 (360 kg·hm⁻²) 水稻产量最高, 而减少 10% 的氮肥施用量并不会显著降低水稻产量^[25]; 王海候等^[26]研究表明: 氮肥用量为 225 kg·hm⁻² 时, 6 000 kg·hm⁻² 稻秸还田以及 (6 000+4 000) kg·hm⁻² 稻麦秸 (双季) 还田产量显著高于 4 000 kg·hm⁻² 麦秸还田处理。而本研究中, 麦秸全量还田 (5 500 kg·hm⁻²) 配施推荐氮肥 (240 kg·hm⁻²) 的 SN2 处理产量最高, 比 N2 处理显著增产 22.6%, 两个处理的氮肥运筹均为基肥: 蘖肥: 穗肥=4: 2: 4。太湖流域其他高产稻田的研究表明, 在氮肥运筹 6: 4 (基肥: 穗肥)、4: 3: 3 (基肥: 蘖肥: 穗肥) 下, 秸秆还田比不还田处理水稻分别增产 3.0%^[27]和 7.7%^[28] ($P < 0.05$)。当然产量差异还与秸秆还田方式、土壤质量以及当地水热状况也密切相关。本研究中, 虽然 SN2 处理产量最高, 但其与减氮施肥处理 SN1 (180 kg·hm⁻²) 的产量没有显著差异, 并且 SN1 处理可减少 25% 氮肥用量。有趣的是, 此结果与该试验前 4 年的结果

有所不同, 在 2015 年及之前 SN2 水稻产量均显著高于 SN1, 而从 2016 年开始两处理变得无显著差异。此外, 同一施氮水平下, 2012—2015 年 SN2 处理较 N2 处理高出 12.9%~16.7%, 而 2016、2017 则分别高达 19.7%、22.6%。这说明长期秸秆还田 (本试验中 ≥4 年) 不仅可以提高水稻产量, 还能减少氮肥使用, 达到部分替代无机氮肥的效果。从另一角度而言, 秸秆长期连续还田对土壤综合肥力的提高效应大于秸秆腐解对土壤及作物根系的毒害作用^[29]。

本研究 SN2 处理氮肥偏生产力较 N2 处理显著提高 22.6%, 从产量构成上来看, 秸秆还田下有效穗数增加 12.6%、而瘪率下降 1.6 个百分点, 说明秸秆还田提高产量主要是增加了水稻的有效穗数, 提高了水稻结实率。这与李勇^[30]和张传辉^[31]等的研究一致, 究其原因: 一方面, 秸秆还田后激发了土壤氮素矿化, 增加了土壤对作物的供氮潜能; 另一方面, 秸秆还田改善了土壤的物理性质, 增加了土壤通透性和饱和导水率, 氮素更易于通过水体迁移至水稻根系^[32-33], 进而促使氮素由茎秆向籽粒迁移^[23, 31], 氮肥充足时, 水稻籽粒得到更多的氮素输送, 同时有效穗数比例也得到提升^[26]。另外, 秸秆还田下合理配施氮肥能有效地降低秸秆还田后的抑制效应, 从而增加穗粒数, 提高群体总颖花量, 实现高增产^[34]。

3.2 秸秆还田配施氮肥对田面水氮流失风险及其调控

本研究显示, 稻季不同氮素动态变化中, 各施肥处理田面水 NH₄⁺-N 浓度均在一周后降至稳定低浓度水平, TN 浓度在每次施肥后期仍出现不同趋势的波动, 这可能与降雨、水稻生长及农田灌水有关^[35]。有研究表明, 这种波动在一定程度上导致了氮素流失关键期的增长^[36-38], 因此不能单纯地将 TN 由峰

值降至低水平浓度判定为稻田氮素流失的关键时期。而本研究中农田灌溉水（附近河水）TN 浓度为 $2.36 \sim 5.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，与施肥后期田面水 TN 浓度波动水平相差不大，因此本研究中 TN 的波动不会使氮素流失风险期延长。另外，本研究中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在氮肥运筹基肥：基肥：穗肥为 4：2：4 下表现为基肥期浓度最低，主要原因是：基肥是耙施入土的，土壤对肥料 N 有强烈的吸附作用；加之还田初期秸秆吸附及微生物分解秸秆吸收氮素的因素，减少了水稻由于苗期对养分吸收能力弱而引起的氮素流失^[24]。秸秆还田下，不同氮肥运筹对于氮素流失风险也会造成差异。太湖流域高产稻田的研究表明，在氮肥运筹 6：4、4：3：3 下，秸秆还田比不还田处理可分别降低稻季 TN 径流流失率 $9.08\% \sim 13.16\%$ ^[27,39]和 22.63% ^[28]，对于秸秆还田在水稻不同生育期发挥的减少氮素流失作用还有待进一步研究。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度则在施肥后 3~5d 出现微弱峰值，这与大多研究一致^[35]。原因一方面是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要依赖尿素水解产生 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 然后再经过硝化作用而生成，而尿素水解的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 还需要供给水稻生长吸收、微生物利用以及其他途径的损失；另一方面，淹水条件下硝化作用较弱且存在反硝化作用，这与旱作下铵固定作用及硝化作用驱动下导致的硝态氮占径流氮素损失主导地位相反^[40]。

不同处理中，虽然同等施氮水平下秸秆还田处理与不还田处理田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度总体上没有显著差异，但秸秆还田处理在水稻生育前期（基肥、基肥期）田面水 TN 浓度较低，尤其是基肥期 SN2 处理田面水 TN 浓度显著低于 N2 处理，说明秸秆还田能够降低前期氮素向水体的释放，这与王静等^[28]的报道一致。其主要原因是秸秆还田后使微生物活性增强，加上秸秆本身 C/N 较高，使得更多的氮素被土壤及秸秆微生物吸附固定，即不添加秸秆时，土壤微生物代谢受到碳含量的限制，导致有机氮更多地以矿质态形式释放而增加田面水中无机氮素的含量^[41]，这均表明秸秆诱导下的微生物在其中发挥重要作用。此外，对太湖地区 60 年降雨资料的统计分析表明，基肥期和基肥期是稻季径流易发期^[42]，结合本研究中水稻产量对施肥的响应，秸秆全量还田下配施减氮处理（SN1）较推荐氮肥（SN2）与常规氮肥（SN3）相比可分别降低田面水 9.6% 和 20.8% 的 TN、29.4% 和 45.8% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度（ $P < 0.05$ ）。因

此本研究长期连续秸秆还田试验表明，秸秆全量还田配施减氮肥可以保证产量的同时能有效减少水稻生育期尤其是生育前期（径流易发期）氮素径流损失风险。

$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$ 能够反映出稻田田面水氮转化与流失潜力的相对水平^[7]，本研究中秸秆还田增大了 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$ （SN2 较 N2 高 2.3%），但差异不显著。此外，DTN 是田面水氮素的主要成分，而无机氮肥的比例越高，DTN/TN 就越高（表 4），氮素流失风险越大。综合分析，可能是秸秆还田的激发效应促进更多无机氮素的释放，单施秸秆的 DTN/TN 达到最低（显著低于其他施氮处理），除没有无机氮肥的贡献影响外，秸秆腐解过程会产生一部分有机氮素也会产生影响，也说明秸秆还田一定程度增加了 DON 流失风险^[35]。

综合上述研究结果，在秸秆全量还田条件下，长江下游地区水稻高产（ $8\ 700 \sim 9\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）与环境协调的适宜肥料 N 用量在 $180 \sim 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，氮肥的基肥与穗肥的比例为 6：4~7：3。

4 结 论

秸秆还田可减少水稻由于苗期对养分吸收能力弱而引起的不同形态的氮素流失，同时长期的秸秆还田不仅可以提高作物产量，还能减少氮肥使用，达到部分替代无机氮肥的效果。本试验在稻麦两季秸秆全量还田条件下，将当地农民常规施氮量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 减少至 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，在保证单季晚粳稻（南粳系列）增产的同时从源头上减少氮素流失潜力，兼顾了产量与环境效益，是目前理想的秸秆还田配套施肥模式，对本区农业的可持续发展具有重要意义。关于秸秆还田后作物不同生育期内氮素转化过程和秸秆本身的氮素释放问题，以及氮肥运筹对于增产和氮流失的影响问题有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Erismann J W, Sutton M A, Galloway J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 2008, 1 (10): 636—639.
- [2] Malhi S S, Grant C A, Johnston A M, et al. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: A review. *Soil & Tillage Research*, 2001, 60 (3-4): 101—122.

- [3] Lü Y M, Wu Y H, Li H D, et al. Effects of dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field under different fertilizer rate. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(4): 349—355. [吕亚敏, 吴玉红, 李洪达, 等. 减肥措施对稻田田面水氮, 磷动态变化特征的影响. *生态与农村环境学报*, 2018, 34 (4): 349—355.]
- [4] Ding M, Yang R B, Feng G L, et al. Research on loss characteristics of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field under controlled drainage condition and its performance of emission reduction. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2010, 22 (5): 122—124. [丁孟, 杨仁斌, 冯国禄, 等. 微区模拟控排水条件下田面水氮磷流失特征及其减排效能研究. *江西农业学报*, 2010, 22 (5): 122—124.]
- [5] Huang J, Xu C C, Ridoutt B G, et al. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159: 171—179.
- [6] Zhang Y T, Liu H B, Wang H Y, et al. A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (20): 6664—6676. [张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响. *生态学报*, 2016, 36 (20): 6664—6676.]
- [7] Zhang Z J, Dong L, Zhu Y M. The dynamic characteristics and modeling of nitrogen in paddy field surface water and nitrogen loss from field drainage. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21 (4): 475—480. [张志剑, 董亮, 朱荫澍. 水稻田面水氮素的动态特征, 模式表征及排水流失研究. *环境科学学报*, 2001, 21 (4): 475—480.]
- [8] Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Practice characteristics of sediment in erosion on hillslope. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1235—1240. [吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究. *土壤学报*, 2012, 49 (6): 1235—1240.]
- [9] Yan L, Gao Q, Zhang Z D, et al. Effect of reducing fertilizer and resource recycling on nitrogen and phosphorus loss on black soil with planting maize in northeast region under natural rainfall condition. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 1—6. [焉莉, 高强, 张志丹, 等. 自然降雨条件下减肥和资源再利用对东北黑土玉米地氮磷流失的影响. *水土保持学报*, 2014, 28 (4): 1—6.]
- [10] Wu J, Guo X S, Lu J W, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 45 (9): 1741—1749. [武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响. *中国农业科学*, 2011, 45 (9): 1741—1749.]
- [11] Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (2): 466—480. [王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (2): 466—480.]
- [12] Quan X F, Yan X Y, Wang S W, et al. Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (7): 1406—1415. [全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 等. 长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (7): 1406—1415.]
- [13] Wang J, Guo X S, Wang Y Q. Effects of straw mulch and balanced fertilization on nitrogen loss from farmland in Chaohu Lake region. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (2): 331—335. [王静, 郭熙盛, 王允青. 秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田氮素流失的影响研究. *土壤通报*, 2011, 42 (2): 331—335.]
- [14] Guo Z, Zhou W, Chen L G, et al. Effects of rice straw return on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat growing season in intensive rice-wheat rotation field. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (4): 17—20, 25. [郭智, 周炜, 陈留根, 等. 稻秸还田对稻麦两熟农田麦季养分径流流失的影响. *水土保持学报*, 2011, 25 (4): 17—20, 25.]
- [15] Liu H J, Guo Z, Zheng J C, et al. Effect of different cultivation techniques on rice yield and NPK runoff losses. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (9): 1790—1796. [刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 不同栽培技术对水稻产量及径流 NPK 流失的影响. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (9): 1790—1796.]
- [16] Xue L, Yu Y, Yang L. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management. *Environmental Research Letters*, 2014, 9 (11): 115010. DOI: 10.1088/1748-9326/9/11/115010.
- [17] Qiao J, Yang L, Yan T, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146 (1): 103—112.
- [18] National Environment Protection Agency. Monitoring and analyzing methods for water and waste water. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [19] Zhao H B, Si L Z. Effects of topdressing with nitrogen fertilizer on wheat yield, and nitrogen uptake and utilization efficiency on the Loess Plateau. Section B—*Soil & Plant Science*, 2015, 65 (8): 681—687.
- [20] Monaco S, Sacco D, Pelissetti S, et al. Laboratory

- assessment of ammonia emission after soil application of treated and untreated manures. *Journal of Agricultural Science*, 2011, 150 (1): 65—73.
- [21] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (5): 40—44, 62. [汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响. *水土保持学报*, 2010, 24 (5): 40—44, 62.]
- [22] Zhang G, Wang D J, Wang C. The variation characteristics of soil organic carbon and total nitrogen in paddy field and its environmental effect under different fertilization patterns. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29 (32): 303—308. [张刚, 王德建, 王灿. 不同农田施肥方式下土壤碳氮变化特征及其环境意义. *中国农学通报*, 2013, 29 (32): 303—308.]
- [23] Zhang G, Wang D J, Yu Y C, et al. Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (4): 877—885. [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. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (4): 877—885.]
- [24] Li Y, Cao H D, Deng J S, et al. Effect of return of total wheat straw on soil mineral nitrogen dynamics and rice yield. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25 (4): 46—51. [李勇, 曹红娣, 邓九胜, 等. 小麦秸秆全量还田对土壤速效氮及水稻产量的影响. *生态与农村环境学报*, 2009, 25 (4): 46—51.]
- [25] Liu H J, Guo Z, Zheng J C, et al. Effects of nitrogen reduction on rice yield and nitrogen loss in Taihu area. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36 (3): 713—718. [刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响. *生态学杂志*, 2017, 36 (3): 713—718.]
- [26] Wang H H, Shen M X, Lu C Y, et al. Effect of patterns of straw returning to field on methane and nitrous oxide emissions during rice-growing season in a rice-wheat double cropping system. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30 (4): 758—763. [王海候, 沈明星, 陆长婴, 等. 不同秸秆还田模式对稻麦两熟农田稻季甲烷和氧化亚氮排放的影响. *江苏农业学报*, 2014, 30 (4): 758—763.]
- [27] Liu H J, Zheng J C, Chen L G, et al. Effects of wheat straw return on annual overland runoff NPK loss in farmland. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21 (6): 1031—1036. [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. *生态环境学报*, 2012, 21 (6): 1031—1036.]
- [28] Wang J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in Chaohu Region. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (6): 1164—1171. [王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (6): 1164—1171.]
- [29] Wang D J, Chang Z Z, Wang C, et al. Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23 (9): 1073—1082. [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. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (9): 1073—1082.]
- [30] Li Y, Cao H D, Chu Y Y, et al. Effects of wheat straw returning and nitrogen application model on rice yield and soil nitrogen supply. *Soils*, 2010, 42 (4): 569—573. [李勇, 曹红娣, 储亚云, 等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响. *土壤*, 2010, 42 (4): 569—573.]
- [31] Zhang C H, Yang S J, Gu K J, et al. Effects of straw-returning on carbon and nitrogen assimilate translocation and yield formation in wheat. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2013, 28 (6): 214—219. [张传辉, 杨四军, 顾克军, 等. 秸秆还田对小麦碳氮转运和产量形成的影响. *华北农学报*, 2013, 28 (6): 214—219.]
- [32] Wu J, Cai L Q, Luo Z Z, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties of rainfed field of the Loess Plateau in central of Gansu. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (2): 112—117. [武均, 蔡立群, 罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响. *水土保持学报*, 2014, 28 (2): 112—117.]
- [33] Liu S C, Zhang H, Lü J L, et al. A preliminary study on soil water transport and thermodynamics in a loess soil with straw returning for long time. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (9): 1791—1798. [刘思春, 张红, 吕家珑, 等. 长期秸秆还田对农田土壤水分运动与热力学函数关系初探. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (9): 1791—1798.]
- [34] Li X F, Cheng J Q, Liang J, et al. Effects of total straw returning and nitrogen application on grain yield and nitrogen absorption and utilization of machine transplanted Japonica rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43 (6): 912—924. [李晓峰, 程金秋, 梁健, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插粳稻产量及氮素吸收利用的影响. *作物学报*, 2017, 43 (6): 912—924.]
- [35] Wang J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Study on dynamics of nitrogen in different forms in surface water of paddy field under straw return. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45 (4): 410—418. [王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田条件下稻田田面水不同形态氮动态变化特征研究. *水利学报*, 2014, 45 (4): 410—418.]
- [36] Wu J, Fan J B, He Y Q, et al. Dynamics of nitrogen and

- runoff loss in ponding water of paddy field under different fertilization practices. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1561—1566. [吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1561—1566.]
- [37] Xiao J N, Zhang A P, Liu R L, et al. Effects of biochar application on the losses of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(3): 163—171. [肖建南, 张爱平, 刘汝亮, 等. 生物炭施用对稻田氮磷肥流失的影响. *中国农业气象*, 2017, 38(3): 163—171.]
- [38] Zhang X L, Dong W Y, Liu Q, et al. Effects of organic fertilizer substituting chemical nitrogen fertilizer on nitrogen content in the surface water and soil of paddy field in the Erhai Lake Basin. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(4): 256—266. [张雪丽, 董文怡, 刘勤, 等. 有机肥替代化肥氮对水稻田面水和土壤中氮素含量的影响. *中国农业气象*, 2018, 39(4): 256—266.]
- [39] Guo Z, Xiao M, Chen L G, et al. The Characteristics of surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during rice season in intensive rice-wheat rotation field. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1622—1627. [郭智, 肖敏, 陈留根, 等. 稻麦两熟农田稻季养分径流流失特征. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1622—1627.]
- [40] Tan D S, Jiang L H, Tan S Y, et al. Effect of fertilization controlling nitrogen and phosphorus loss from farmland under wheat-maize rotation in Nansi Lake region. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 128—137. [谭德水, 江丽华, 谭淑樱, 等. 湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究. *土壤学报*, 2015, 52(1): 128—137.]
- [41] Cao Y, Sun H, Liu Y, et al. Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(5): 4841—4850.
- [42] Hou P F, Xue L X, Yu Y J, et al. Nitrogen loss risk of paddy field under different fertilizations in runoff prone period. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1353—1361. [侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1353—1361.]

(责任编辑: 卢 萍)