

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

王 静^{1,2}, 郭熙盛^{1,2}, 王允青^{1,2}, 丁树文³

(1.安徽省农科院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2.安徽养分循环与资源环境省级实验室, 合肥 230031; 3.华中农业大学农业部亚热带农业资源与环境重点实验室, 武汉 430070)

摘 要:采用田间小区试验,连续 2 年研究了巢湖流域保护性耕作与平衡施肥对稻田氮素径流损失特征和水稻产量的影响。结果表明,巢湖流域水稻田在传统耕作条件下径流液中 TN 的浓度范围是 $0.73\sim 15.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DN 是氮素径流损失的主要形态,约占 TN 的 74%~92%, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 所占比例差异比较大,主要与径流-施肥时间间隔以及作物的不同生育期有关。氮素径流损失量年际差异比较大,2008 年和 2009 年分别是 $2.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6.23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别占施氮量的 1.62%和 3.46%。由于降雨事件的偶然性,平衡施肥对氮素径流损失量的影响具有很大不确定性,径流流失风险仍难以控制;保护性耕作能有效地降低氮素径流流失负荷,使得氮素流失潜能大大减小。与 T(传统耕作)处理相比,TS(传统耕作+秸秆还田)处理、BF(平衡施肥)处理和 NTS+BF(少免耕+秸秆还田+平衡施肥)处理水稻产量平均增产幅度分别为 9.97%、13.60%和 23.18%,产量差异达到显著水平。因此,保护性耕作可以作为源头控制稻田氮素流失的较好措施之一加以推广。

关键词:保护性耕作;平衡施肥;氮素;径流;面源污染

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)06-1164-08

Effects of Conservation Tillage and Balanced Fertilization on Nitrogen Loss from Paddy Field and Rice Yields in Chaohu Region

WANG Jing^{1,2}, GUO Xi-sheng^{1,2}, WANG Yun-qing^{1,2}, DING Shu-wen³

(1.Institute of Soil & Fertilizer, Anhui Academy of Agriculture Sciences, Hefei 230031, China; 2.Provincial Key Lab of Nutrient Cycling, Resources & Environment, Hefei 230031, China; 3.Key Laboratory of Subtropical Agriculture and Environment, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to evaluate the effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss by runoff from paddy field and rice yields in the rice season, field experiments were carried out for two consecutive years in Chaohu region. The results showed that total nitrogen (TN) concentrations in runoff under the traditional tillage were $0.73\sim 15.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, in which the dissolved nitrogen (DN), as the main form of nitrogen loss by runoff, accounted for 74%~92% of TN. The proportion of NH_4^+-N and NO_3^--N to TN in runoff differed closely with the duration of interval between runoff and fertilization, and the different growth stages of rice. The annual variations of nitrogen losses by runoff were obvious. The nitrogen runoff losses of $6.23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in 2009, accounting for 3.46% of the applied N at the rice season, were two times higher as that of $2.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in 2008, 1.62% of the applied N. Although the uncertainty of balanced fertilization on nitrogen loss by runoff due to the contingency of the rainfall event made it difficult to control the risk of N runoff loss, the conservation tillage could effectively decrease nitrogen loads in runoff water, and remarkably lower the risk of N loss by runoff. The rice yields of the TS, BF and NTS+BF treatments increased significantly by 9.97%, 13.60% and 23.18% on average over T treatment. Therefore, the conservation tillage should be popularized for the source control of the N loss by runoff from paddy field in Chaohu region.

Keywords: conservation tillage; balanced fertilization; nitrogen; surface runoff; non-point source pollution

收稿日期:2009-12-21

基金项目:国家科技支撑计划“沿巢湖地区农田养分流失减控与面源污染防治技术集成与示范”(2007BAD87B06);安徽省科技攻关计划(08010302160)

作者简介:王 静(1982—),女,安徽萧县人,硕士,助理研究员,主要研究方向为土壤肥料与农业生态环境。E-mail:wangjing0553@sina.com

巢湖是我国五大淡水湖泊之一,在该地区的经济和社会发展中扮演着重要的角色。然而,近年来,由于流域内经济的发展和人口的过快增长,巢湖及其周边地表水体的水质日趋恶化,大面积蓝藻暴发现象频频发生。巢湖水体的富营养化已经成为制约该地区经济和社会可持续发展的“瓶颈”因素。随着工业点源污染的有效治理和内源清淤工作的基本完成,巢湖水环境恶化的趋势有所缓解,但由于农业面源污染尚未得到同步有效控制,水环境问题依然非常严峻。国内外大量的研究证明,农业面源污染是导致地表水环境恶化的重要因素之一,而农田土壤氮磷的大量输出是引起农业面源污染的主要原因^[1-4]。农业面源污染的控制途径主要有源头控制、过程阻断和末端治理,过程阻断和末端治理因花费大、周期长、效果相对较差^[5],因此,通过源头控制使氮磷在农田系统内部循环是防治农业面源污染最关键的问题。

稻田 N 素利用率只有 20%~40%^[6]。N 肥施入稻田后,通过气态挥发、淋溶和径流等途径损失,不仅造成肥料和资源的浪费,而且给环境带来了巨大的影响^[7-9]。因此,稻田水体 N 素损失问题已引起国内外众多学者的关注^[10-14]。另一方面,农作物秸秆蕴藏着巨大的养分资源,但是,长期以来秸秆作为资源却没有得到充分合理利用,每年都有大量的秸秆被付之一炬,或者随意丢弃,其结果不仅浪费了资源,严重污染了环境,而且对土壤的生态系统造成了不利的影响^[15]。近年来,许多地区在积极推广以秸秆还田和少免耕覆盖为主的稻田保护性耕作技术,它是一项具有节本省工、培肥改土、避免秸秆焚烧造成的环境污染等优点的先进实用的节本高效新技术^[16]。关于稻田 N 素随地表径流损失的研究已有较多报道^[17-20],但这些研究多集中在施 N 水平、N 肥品种和影响因素等方面,同时,关于保护性耕作对土壤理化性质、水土流失及作物产量的影响等方面的研究较多^[21-24],而以保护性耕作为切入点研究稻田 N 素径流损失的报道不多。本文采用田间小区试验,连续 2 年对保护性耕作和平衡施肥条件下稻田 N 素的径流损失特征进行了系统的研究,旨在了解巢湖流域稻季 N 素径流流失浓度、流失量和流失形态,探索保护性耕作与平衡施肥对稻田 N 素径流损失的影响,以期合理施用 N 肥、源头控制农业面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在合肥市大杨镇三十岗乡进行,位于巢湖支

流南淝河上游的一个闭合流域内,是我国江淮丘陵地区典型的农业生态系统。该流域年平均气温 15.5℃,平均降水量 1 000 mm,多集中于 6—8 月份,平均无霜期为 226 d,平均日照为 2 218 h。试验小区 0~20 cm 土壤的基本理化性质为:容重 1.31 g·cm⁻³、pH(水土比 2.5:1)、有机质 16.98 g·kg⁻¹、全氮 1.24 g·kg⁻¹、碱解氮 60.49 mg·kg⁻¹、全磷 0.63 g·kg⁻¹、速效磷 10.50 mg·kg⁻¹、缓效钾 618.66 mg·kg⁻¹、速效钾 245.50 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验为长期定位试验,从 2007 年 6 月夏玉米开始,为夏玉米-冬小麦-水稻-油菜-水稻轮作体系。本文讨论的是 2008 年和 2009 年的水稻试验。试验设 4 个处理,分别为:①传统耕作(T);②传统耕作+秸秆还田(TS);③平衡施肥(BF);④少免耕+秸秆还田+平衡施肥(NTS+BF)。3 次重复,完全随机区组排列。各小区面积 20 m²,共计 12 个,小区四周设 5 cm 厚的水泥挡板,地下部分埋深 25 cm,地上高 20 cm,互不渗漏,在其西侧建立径流池,以便收集降雨产流后的水样。小区中间设置标准雨量筒,用以进行降雨观测。根据当地农民种植水稻和水分管理的经验,确定以土表上方 7 cm 为当地水稻田排水口的平均高度,各小区的径流液通过出口在土表上方 7 cm 的 PVC 管道出口流入相应的水泥池中。水稻生长期间,除成熟前一周不灌水,其他时间稻田始终保持约 3~5 cm 的淹水状态,其他管理措施与当地农民习惯保持一致。

N 肥品种为尿素(46%N),各个处理 N 肥用量均为 180 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)75 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)90 kg·hm⁻²,其中处理 1 与处理 2 氮肥作为基肥一次性施入,处理 3 与处理 4 氮肥分 3 次施用,基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3,2008 年基肥施用时间是 6 月 10 日上午,分蘖肥是在 6 月 20 日上午,穗肥是在 7 月 13 日上午,2009 年基肥施用时间是 6 月 4 日上午,分蘖肥是在 6 月 14 日上午,穗肥是在 7 月 8 日上午,磷钾肥作为基肥一次性施入。基肥施入田面,然后用木耙将表层土耙匀,氮肥两次追肥均是表施。2008 年水稻品种为新两优 6 号,2009 年为丰两优 1 号。2008 年处理 2 与处理 4 施油菜秸秆,2009 年施小麦秸秆,将秸秆剪成 10~15 cm,用量为 3 000 kg·hm⁻²,于施基肥前 1 d 均匀撒入小区。

1.3 样品采集与分析

每次降雨产流后立即测定每个径流池水位,并进行取样,所取水样立即带回实验室,测定其中的 TN、DN、NO₃-N、NH₄-N,在 1 周内完成全部测定。总氮

(Total Nitrogen, TN) 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,溶解态氮(Dissolved Nitrogen, DN)由水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,测定方法与总氮相同,颗粒态氮(Particle Nitrogen, PN)的浓度为总氮浓度减去溶解态氮浓度,铵态氮(NH_4^+-N)采用靛酚蓝比色法,硝态氮(NO_3^--N)则直接采用紫外分光光度法测定。氮素流失量的计算方法为每次径流体积与氮流失浓度的乘积。

1.4 数据统计分析方法

试验各处理重复 3 次,结果取其平均值,采用 Excel2003 和 DPSv7.05 进行数据处理分析,并用 LSD (Least significant difference test) 进行样本平均数的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 水稻种植期间的降雨产流情况

由于本试验径流小区的水分管理相同,各个处理

每次产生的径流量差别不明显。2008 年水稻种植期间形成径流的降雨共有 4 次,2009 年则产生 3 次径流,降雨量和对应的径流量见表 1,径流量的多少主要与降雨强度和雨前田面水的深度有关。以连续降雨的时间段划分为一次降雨事件,该降雨量包括连续 1~3 d 的降雨。

2.2 不同处理氮素向水体迁移浓度分析

2008 年历次降雨径流中 TN 和 DN 的浓度见表 2 和表 3。2008 年稻季 N 肥作为基肥一次性施入的处理 T 和处理 TS 径流液 TN 的浓度范围分别在 0.73~3.14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.07~2.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,N 肥分 3 次施用的处理 BF 和处理 NTS+BF 径流液中的 TN 浓度范围是在 0.75~17.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.14~7.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。可以看出,2008 年一次性施 N 肥的 2 个处理径流液 TN 浓度的变化幅度要小于 N 肥分 3 次施用的 2 个处理。2009 年稻季处理 T 和处理 TS 径流液 TN 的浓度范围分别在 1.73~15.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.80~9.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

表 1 2008 年和 2009 年稻季降雨量及对应的径流量

Table 1 Rainfall and corresponding runoff in 2008 and 2009 rice seasons

年份 Year	降雨时间 Rainfall date	降雨量 Rainfall/mm	径流量 Runoff date/mm	施肥情况 Fertilization application
2008	21/Jun	86.9	42.1	处理①②施基肥后第 11 d;处理③④追分蘖肥后第 1 d
	8/Jul	72.5	40.4	处理①②施基肥后第 28 d;处理③④追分蘖肥后第 18 d
	1/Aug	60.4	25.2	处理①②施基肥后第 53 d;处理③④追穗肥后第 19 d
	15/Aug	80.3	50.6	处理①②施基肥后第 67 d;处理③④追穗肥后第 33 d
2009	8/Jun	48.3	26.3	处理①②③④施基肥后第 4 d
	28/Jun	108.6	86.2	处理①②施基肥后第 24 d;处理③④追分蘖肥后第 15 d
	29/Aug	70.2	39.6	处理①②施基肥后第 86 d;处理③④追穗肥后第 51 d

表 2 2008 年稻季不同处理径流 TN 和 DN 流失浓度

Table 2 Concentration of TN and DN loss in surface runoff of different treatments in 2008 rice season

处理 Treatments	21/Jun		8/Jul		1/Aug		15/Aug	
	TN	DN	TN	DN	TN	DN	TN	DN
T	3.14±0.37c	2.59±0.32c	2.01±0.25b	1.65±0.23ab	1.62±0.05b	1.19±0.06c	0.73±0.09b	0.61±0.05b
TS	2.05±0.29d	1.84±0.13d	1.86±0.16b	1.58±0.16b	1.72±0.07ab	1.54±0.04a	1.07±0.15a	0.93±0.15a
BF	17.50±0.41a	15.86±0.29a	2.56±0.29a	2.13±0.45ab	1.72±0.07ab	1.40±0.05b	0.75±0.06b	0.63±0.03b
NTS+BF	7.22±0.41b	6.67±0.50b	2.49±0.16a	2.23±0.28a	1.84±0.10a	1.66±0.09a	1.14±0.12a	1.03±0.09a

注:同一行中不同字母表示处理在 $P=0.05$ 水平上差异显著,LSD, $P=0.05$,下同。

表 3 2009 年稻季不同处理径流 TN 和 DN 流失浓度

Table 3 Concentration of TN and DN loss in surface runoff of different treatments in 2009 rice season

处理 Treatments	8/Jun		28/Jun		29/Aug	
	TN	DN	TN	DN	TN	DN
T	15.33±0.49a	12.66±0.55a	1.75±0.12c	1.30±0.09c	1.73±0.12ab	1.31±0.07c
TS	9.03±0.31b	8.14±0.86b	2.01±0.23b	1.62±0.10b	1.80±0.10a	1.46±0.02b
BF	4.55±0.51c	3.88±0.20c	1.95±0.22b	1.60±0.05b	1.70±0.10b	1.47±0.03b
NTS+BF	2.65±0.46d	2.30±0.22d	2.20±0.25a	1.90±0.09a	1.78±0.05a	1.60±0.07a

之间,处理BF和处理NTS+BF径流液中的TN浓度分别是在 $1.70\sim 4.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.78\sim 2.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。可以看出,与2008年不同的是,2009年一次性施N肥的2个处理径流液TN浓度的变化幅度要大于N肥分3次施用的2个处理。

田面水中的N浓度是影响径流液N浓度的关键因素,有研究表明,稻季氮素径流损失量与径流发生前田面水中TN浓度显著相关($P<0.05$)^[18],本试验田面水N浓度数据表明(数据未列出),施用尿素后田面水TN浓度在第2d即达到峰值,然后,随着时间的延长而迅速衰减,在8~10d后降至稳定,因此,在施肥后8~10d内,如遇大雨则N素通过径流流失的风险很大。在2008年稻季4次径流中,以第1次径流液中N浓度最高,对于分3次施N肥的处理BF和处理NTS+BF而言,距离施分蘖肥仅1d,此时田面水N浓度比较高,处理BF和处理NTS+BF径流液中TN浓度分别达到了 $17.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而对于N肥作为一次性施入的处理T和处理TS而言,距离基肥施用时间已有11d,此时田面水N浓度已经比较低,径流液中TN浓度分别只有 $3.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2009年稻季3次径流中,也是第1次径流中TN浓度最高,此次径流发生在施基肥后的第4d,此时,田面水中N浓度仍然比较高,一次性施N肥的处理T和处理TS径流液中TN的浓度则分别达到了 $15.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分3次施N肥的处理BF和处理NTS+BF的TN的浓度只有 $4.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其余各次径流发生在施肥后期,各个处理径流液中TN浓度均比较低。由此可以看出,径流液中N浓度与径流-施肥间隔时间有着密切的关系,由于降雨事件的偶然性,N肥的分次施用对径流液N浓度的影响有很大的不确定性,N素径流流失风险仍难以控制。

秸秆还田对径流液的N浓度最显著的影响是在秸秆还田的初期,它主要是通过影响田面水的N浓度来对径流液的N产生影响。2008年第1次径流发生在秸秆还田的第11d,处理TS与处理T相比,径流水中总氮(TN)和溶解态氮(DN)浓度分别降低了34.83%和29.03%,处理NTS+BF和处理BF相比,总氮(TN)和溶解态氮(DN)浓度分别降低了58.74%和57.94%;2009年第1次径流发生在秸秆还田的第4d,处理TS与处理T相比,径流液总氮(TN)和溶解态氮(DN)浓度分别降低了41.10%和35.72%,处理NTS+BF和处理BF相比,总氮(TN)和溶解态氮(DN)

浓度分别降低了41.63%和33.90%。

秸秆作为一种含碳丰富的能源物质,其C/N比较高,秸秆还田初期,土壤微生物为了满足自身分解植物残体对N养分的需求,需要从周围的环境中补充N源来维持其代谢^[25],从而降低了田面水中的N浓度。因此,施用一定量的秸秆可以降低水稻施肥后短期内较高的田面水N浓度,对减少径流损失,降低农田氮面源污染风险十分有利。处理NTS+BF和处理BF相比,径流水中TN浓度降低的原因是秸秆腐解与少免耕综合作用的结果,一方面,少免耕由于土肥较常规翻耕难于相容,从而使得田面水TN浓度较高,而另一方面,秸秆腐解使TN浓度降低,两者相互消长的最终结果是TN的浓度有所降低。本试验的田面水数据表明,在秸秆还田的后期(大约40d,具体时间有待于进一步研究),有秸秆的处理TS和处理NTS+BF田面水的N浓度比不施秸秆的处理要略高,从而使得径流液的N浓度也略高,其原因可能是,随着还田秸秆的腐解,碳的损失总是大于氮的损失,秸秆C/N比逐渐变窄,此时,土壤微生物不再需要从周围环境中补充N源,随着微生物的死亡,微生物固持的N会重新释放出来。另外还有可能就是长期的秸秆还田使得土壤有机氮和氮储量有所增加,提高了土壤的供N能力。虽然,这种重新释放出来的N素会使田面水N浓度略有增加,但由于其释放是缓慢的、逐渐的,因此,微生物固持N素的释放对其影响较小。

2.3 不同处理氮素地表径流流失负荷及流失系数分析

2008年和2009年水稻田N素地表径流流失负荷见图1和图2。可以看出,不同年份之间N素径流损失量差异比较大。当地常规耕作条件下,2008年和2009年稻季N素径流损失量分别为 $2.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和

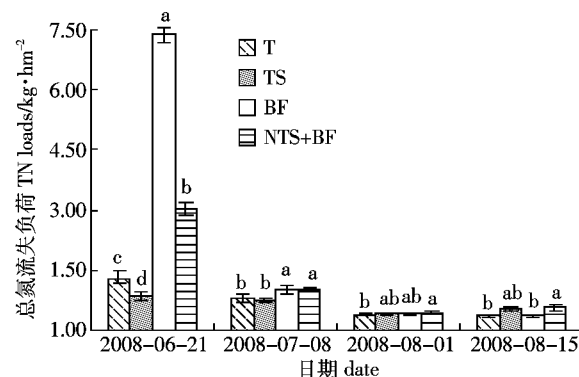


图1 2008年稻季不同处理地表径流氮流失负荷

Figure 1 Loading of N loss in surface runoff of different treatments in 2008 rice season

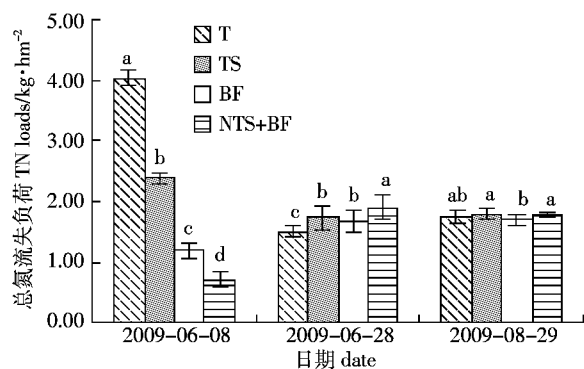


图 2 2009 年稻季不同处理地表径流氮流失负荷

Figure 2 Loading of N loss in surface runoff of different treatments in 2009 rice season

6.23 kg·hm⁻², 以该地当季施 N 量 180 kg·hm⁻² 计算, N 的流失系数(流失负荷/施肥量×100%)则分别为 1.62% 和 3.46%(表 4)。郭红岩等在太湖流域雪堰镇的研究认为, 该区水稻田的 N 素流失负荷为 48.15 kg·hm⁻²; 田平等利用 GIS 技术和 N 素浓度流失模型相结合的方法, 估算杭嘉湖平原淹水稻田 N 素的径流流失负荷约为 35.26 kg·hm⁻²[27]。从本试验 2 a 的数据来看, 和这些地区的 N 素径流流失水平相比, 巢湖流域要低得多, 这可能与降雨发生时间、施肥水平以及土壤本身有关。处理 BF 氮肥分 3 次施用, 2008 年和 2009 年稻季 N 素径流损失量分别为 9.21 kg·hm⁻² 和 3.55 kg·hm⁻², 流失系数分别为 5.12% 和 1.97%。与常规耕作处理 T 相比, 分次施 N 肥的处理 BF 2008 年 N 素流失负荷增加了 216.26%, 而 2009 年却减少了 42.92%, N 肥的分次施用对于 N 素径流流失影响具有不确定性。同为分次施 N 的处理 NTS+BF 与处理 BF 相比,

2008 年和 2009 年 N 素流失负荷分别减少了 44.75% 和 7.17%, 一次性施 N 肥的处理 TS 与处理 T 相比, 分别减少了 11.17% 和 22.57%, 由此可见, 保护性耕作能够减少 N 素径流损失, 降低农田氮面源污染风险。

2.4 不同处理氮素向水体迁移形态分析

在不考虑气态氮挥发损失情况下, 径流 TN 的流失包括颗粒态氮(PN)和溶解态氮(DN)两部分。溶解态氮(DN)包括溶解态无机氮(DIN)和溶解态有机氮(DON), 其中 DIN 包括 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 等, 它们都是能够被植物吸收利用的有效养分。

本试验由于径流中 NO₂⁻-N 含量很低, 忽略不计, 所以 NH₄⁺-N+NO₃⁻-N=DIN。稻田径流的发生主要是由于“超渗”或“蓄满”而造成的, 稻田土壤上面覆盖了一层 3~5 cm 的田面水, 它可以保护表层土免受雨水的直接打击, 因此由物理冲刷作用引起的 PN 流失较少, 进入水体的 N 主要是 DN。表 5 和表 6 显示的是 2008 年和 2009 年稻季不同处理的地表径流各形态 N 所占比例, 2008 年和 2009 年径流中 DN 占 TN 的比例分别是 74%~92% 和 75%~90%。NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 所占 TN 的比例变幅比较大, 2008 年和 2009 年 NH₄⁺-N 占 TN 比例分别是 6%~77% 和 9%~59%, NO₃⁻-N 占 TN 比例分别是 5%~69% 和 12%~67%, 其比例发生较大的变异主要与径流-施肥时间间隔以及作物的不同生育期有关。2008 年第 1 次产流发生在处理 BF 和处理 NTS+BF 的追施分蘖肥的次日, 径流水中 DN 以 NH₄⁺-N 为主, NH₄⁺-N 占 TN 比例则分别高达 77% 和 62%, 而 NO₃⁻-N 所占 TN 比例则比较低, 分别占 5% 和 15%; 2009 年的第 1 次产流发生在基肥施用后的第 4 d, 4 个处理的径流水中的 N 均以 NH₄⁺-N 为主, NH₄⁺-

表 4 2008 年和 2009 年稻季不同处理的地表径流氮流失负荷和流失系数

Table 4 Loading and coefficient of N loss in surface runoff of different treatments in 2008 and 2009 rice seasons

处理 Treatments	2008				2009			
	T	TS	BF	NTS+BF	T	TS	BF	NTS+BF
流失负荷 N loss/kg·hm ⁻²	2.91±0.15	2.59±0.17	9.21±0.04	5.09±0.10	6.23±0.19	4.82±0.22	3.55±0.35	3.30±0.11
流失系数 Loss coefficient/%	1.62±0.11	1.44±0.10	5.12±0.02	2.83±0.05	3.46±0.10	2.68±0.12	1.97±0.20	1.83±0.06

表 5 2008 年稻季不同处理的地表径流各形态氮所占比例

Table 5 Ratio of different forms of N in surface runoff of different treatments in 2008 rice season

处理 Treatments	21/Jun			8/Jul			1/Aug			15/Aug		
	DN/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	DN/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	DN/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	DN/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN
T	0.76	0.58	0.12	0.82	0.57	0.10	0.74	0.64	0.06	0.83	0.67	0.12
TS	0.80	0.56	0.15	0.85	0.49	0.19	0.89	0.66	0.09	0.87	0.56	0.15
BF	0.90	0.05	0.77	0.83	0.61	0.12	0.81	0.69	0.10	0.85	0.64	0.13
NTS+BF	0.92	0.15	0.62	0.90	0.60	0.11	0.91	0.65	0.07	0.90	0.60	0.10

表 6 2009 年稻季不同处理的地表径流各形态氮所占比例

Table 6 Ratio of different forms of N in surface runoff of different treatments in 2009 rice season

处理 Treatments	8/Jun			28/Jun			29/Aug		
	DN/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	DN/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	DN/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN
T	0.83	0.12	0.57	0.75	0.61	0.09	0.76	0.55	0.13
TS	0.90	0.13	0.59	0.81	0.61	0.11	0.81	0.59	0.14
BF	0.85	0.20	0.48	0.82	0.57	0.13	0.86	0.69	0.11
NTS+BF	0.87	0.18	0.51	0.86	0.58	0.15	0.90	0.67	0.12

N 占 TN 比例分别达到最高值 57%、59%、48% 和 51%,NO₃⁻-N 所占比例则分别为 12%、13%、17% 和 19%。这主要是因为,施肥后的最初几日内,稻田田面水中的 N 主要以 NH₄⁺-N 的形式存在,再加上水稻在生育苗期和分蘖初期其根系尚未充分发育完全而处于非活跃时期,对 N 素营养物质的吸收能力弱,需求量小,所以径流水中的 DN 主要以 NH₄⁺-N 为主。而其他各次径流和对于处理 T 和处理 TS 来说的 2008 年的第 1 次径流,均与前 1 次施肥有较长间隔。径流水中 DN 主要以 NO₃⁻-N 为主,其原因可能是,一方面 NH₄⁺-N 作为尿素转换的中间产物,在田面水和土壤溶液中持续的时间比较短暂,在施肥约 8~10 d 后即降至很低水平;另一方面 NH₄⁺-N 容易被土壤颗粒和土壤胶体吸附固定而且水稻偏好吸收 NH₄⁺-N^[28],所以在施肥的后期 NH₄⁺-N 不易随径流水迁移。

2.5 不同处理水稻产量分析

2008 年和 2009 年不同处理的水稻产量与千粒重见表 7。可以看出,与处理 T 相比,处理 TS、BF 和 NTS+BF 水稻产量均有不同程度的增加,平均增产幅度分别为 9.97%、13.60% 和 23.18%,方差分析表明,产量差异达到显著水平。处理 TS 与处理 T 相比,2008 年和 2009 年水稻产量分别增加了 12.25% 和 7.68%,秸秆还田之所以能提高水稻产量,其原因可能是,秸秆还田直接补充了农田生态系统的土壤养分,同时又通过调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,使水稻各生育阶段得到更为均衡的矿质营养。处理

BF 与处理 T 相比,2008 年和 2009 年水稻产量分别增加了 15.37% 和 11.83%。平衡施肥能够显著提高水稻的产量,其原因可能是,水稻 N 肥的分次施用,满足了水稻不同生育期对 N 素的需求,有利于提高肥料的利用率和籽粒含 N 量,而传统的施肥模式多为“一炮轰”,难以满足后期植株对 N 素吸收、运转和分配的需要,易造成后期脱 N 的现象。多数研究者和学者认为免耕覆盖等措施能增加土壤水分,减少地面蒸发,改善土壤结构,降低耕层盐分,增强生物活性,增产幅度一般在 10% 以上。本试验的结果表明,处理 NTS+BF 与处理 BF 相比,2008 年和 2009 年水稻产量分别增加了 8.88% 和 7.98%,其产量差异达到显著水平。分析其原因可能是免耕覆盖的水稻根系发达,低节位分蘖多,无效分蘖时间短,营养消耗少,成穗率高,有效穗多,从而能够提高水稻产量。

3 讨论

农田 N 素流失既是影响氮肥利用率提高的一个重要方面,也是引起附近水体质量损害的主要污染源,寻求高产和环境保护的最佳结合点已成为许多学者关注的焦点之一^[13,29]。土壤中有機态 N 的矿化和矿质态 N 的生物固定是同时发生在 N 素转化过程中两个极其重要的过程,这两个过程主要受土壤中易分解的有机 C 和无机 N 源数量的影响。一般而言,当进入土壤的有机物料 C/N>30 时,主要发生土壤微生物对矿质态 N 的固定作用。本试验的研究结果表明,施用

表 7 2008 年和 2009 年不同处理的水稻产量

Table 7 Rice yields of different treatments in 2008 and 2009

处理 Treatments	2008			2009		
	产量 Yield/ kg·hm ⁻²	增产 Yield increase/ %	千粒重 1 000-grain weight/ g	产量 Yield/ kg·hm ⁻²	增产 Yield increase/ %	千粒重 1 000-grain weight/ g
T	6 732±157c	—	27.73±0.58b	7 226±138d	—	27.78±0.69b
TS	7 556±162b	12.25	28.19±0.37ab	7 781±109c	7.68	28.31±0.75b
BF	7 766±105b	15.37	28.70±1.03ab	8 081±220b	11.83	28.95±0.76a
NTS+BF	8 456±179a	25.61	29.06±0.23a	8 726±152a	20.75	29.09±0.60a

一定量的秸秆可以降低水稻施肥后短期内较高的田面水 N 浓度,对减少径流损失,降低农田 N 面源污染风险十分有利,其主要原因就是,稻田土壤中施入含有较多能源和碳源的秸秆后,其 C/N 相对较高,促进了土壤微生物的生长与繁殖,增强了土壤微生物固定 N 素的作用。由此推测,秸秆还田后土壤微生物对 N 的固定增加也同时减少了因水稻在苗期对 N 营养物质吸收能力弱而引起的氨挥发、硝化-反硝化、淋溶等途径损失的 N 素。马宗国等^[30]认为秸秆还田表现为前期抑制水稻生长,中后期促进水稻生长,这是因为,在秸秆腐解的前期会产生一些对水稻生长不利的物质,如各种有机酸和 CO₂ 等;另外,秸秆 C/N 较高,在腐解的过程中会出现土壤微生物与幼苗之间对矿质态 N 的竞争,从而影响水稻的正常生长。但从本试验的研究结果来看,秸秆还田后并未出现抑制水稻生长的现象。分析其原因可知:首先,本试验秸秆还田时配施了化学氮肥,减少了微生物与水稻对矿质态 N 的竞争;其次,本试验的秸秆还田量不大,可能产生的有机酸和 CO₂ 的浓度也比较低,对水稻苗期生长未产生明显的毒害作用;另外,还有可能就是长期的秸秆还田提高了土壤的供 N 能力和秸秆 N 的利用率,从而促进了水稻的生长发育。

N 肥的分次施用,从水稻生理角度来看,分别在水稻需肥高峰期施用肥料,满足了水稻不同生育期对 N 素的需求,促进了水稻对 N 素的吸收,有利于提高肥料的利用率和水稻的产量。从环境影响角度来看,分次施 N 有助于降低田面水 N 素的最高浓度,减少了单次径流的 N 素损失量。如 2009 年稻季的第 1 次径流,也同时减少了前期因水稻吸氮能力弱而造成的 N 素损失。但由于降雨事件的偶然性,以及追肥采用表施的方式,分次施 N 使稻田田面水 N 浓度产生多次峰值,径流损失风险仍然难以控制^[9],如 2008 年稻季分次施 N 处理要比一次性施 N 肥处理所产生的 N 素径流损失量大的多。施 N 量以及径流-施肥时间间隔对稻田田面水 N 浓度起决定性作用,进而影响 N 素径流损失量。因此,适当降低施 N 量及避免在雨前施肥是减少稻田 N 素径流的有效途径之一。

4 结论

研究结果显示,巢湖流域水稻田在传统耕作条件下氮素径流中 TN 的浓度范围是 0.73~15.33 mg·L⁻¹,DN 是氮素径流流失的主要形态,约占 TN 的 74%~92%,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 所占比例差异比较大,主要与

径流-施肥时间间隔以及作物的不同生育期有关。氮素径流损失量年际差异比较大,2008 年和 2009 年分别是 2.91 kg·hm⁻² 和 6.23 kg·hm⁻², 分别占施氮量的 1.62% 和 3.46%。

由于降雨事件的偶然性,平衡施肥对 N 素径流损失量的影响具有不确定性,径流流失风险仍难以控制;保护性耕作能有效地降低 N 素径流流失负荷,N 素流失潜能大大减小。

与 T 处理相比,TS 处理、BF 处理和 NTS+BF 处理水稻产量平均增产幅度分别为 9.97%、13.60% 和 23.18%,产量差异达到显著水平。

参考文献:

- [1] Tim U S, Jolly R. Evaluating agriculture non-point source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model[J]. *Environ Qual*, 1994, 23(1):25-35.
- [2] 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, 37:1008-1033.
- [3] ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agriculture non-point source pollution in China and the alleviating strategies I :Estimation of agriculture non-point source pollution in China in early 21 century.[J]. *Science Agricultura Sinica*, 2004, 37:1008-1033.
- [4] Xie Y X, Xiong Z Q, Xing G X, et al. Assessment of nitrogen pollutant sources in surface waters of Taihu Lake region[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2):200-208.
- [5] Sharpley A N. Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils[J]. *J Environ Qual*, 2003, 32:1375-1384.
- [6] Haris B L, Nipp T L, Waggoner D K, et al. Agricultural water quality program policy consideration[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24:405-411.
- [7] Vlek P L G, Byrens B H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice[J]. *Fertilizer Research*, 1986, 9(1-2):131-147.
- [8] Kurakova N G. Role of denitrification in nitrogen balance of soils[J]. *Agronomy*, 1984, 5:124
- [9] Mengel K. Impacts of intensive plant nutrient management on crop production and environment[J]. *Trans 14th Intern Congr Soil Sci*, 1990, 13:42-52.
- [10] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1):1-6.
- [11] ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):1-6.
- [12] WANG J Y, Wang S J, Chen Y. Study on leaching loss of nitrogen in rice fields by using large undisturbed monolith lysimeters[J]. *Pedosphere*, 1994, 4(1):87-92.
- [13] Eriksen A B, Kjeldby M, Nilsen S. The effect of intermittent flooding on the growth and yield of wetland rice and nitrogen-loss mechanism with surface applied and deep placed urea[J]. *Plant Soil*, 1985, 84(4):387-401.
- [14] Gao X J, Hu X F, Wang S P, et al. Nitrogen losses from flooded rice

- field[J]. *Pedosphere*, 2002, 12(2):151-156.
- [13] 汪 华, 杨京平, 金 洁, 等. 不同氮素用量对高肥力稻田水稻-土壤-水体单独变化及环境影响分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 50-54.
WANG Hua, YANG Jing-ping, JIN Jie, et al. N variation in rice-soil-water system under different N application level in high-yielding paddy field and its environment effect[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 50-54.
- [14] 黄明蔚, 刘 敏, 陆 敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4):629-636.
HUANG Ming-wei, LIU Min, LU Min, et al. Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4):629-636.
- [15] 刘天学, 纪秀娥. 焚烧秸秆对土壤有机质和微生物的影响研究[J]. 土壤, 2003, 35(4):347-348.
LIU Tian-xue, JI Xiu-e. Effects of crop straw burning on soil organic matter and soil microbes[J]. *Soils*, 2003, 35(4):347-348.
- [16] 章秀福, 王丹英, 符冠富, 等. 南方稻田保护性耕作的研究进展与研究对策[J]. 土壤通报, 2006, 37(2):346-351.
ZHANG Xiu-fu, WANG Dan-ying, FU Guan-fu, et al. Research progress and developing strategy in paddy-field conservation tillage in the south of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 346-351.
- [17] 梁新强, 田光明, 李 华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):59-63.
LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 59-63.
- [18] 田玉华, 尹 斌, 贺发云, 等. 太湖地区稻季的氮素径流损失研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(6):1070-1075.
TIAN Yu-hua, YIN Bin, HE Fa-yun, et al. Nitrogen loss with runoff in rice season in the Taihu Lake region, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6):1070-1075.
- [19] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1432-1440.
JI Xiong-hui, ZHENG Sheng-xian, LU Yan-hong, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on surface water N dynamics and its runoff loss in double cropping paddy fields in Dongtingshu Lake area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7):1432-1440.
- [20] 邱卫国, 唐 浩, 王 超. 水稻田面水氮素动态径流流失特征及控制技术[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):740-744.
QIU Wei-guo, TANG Hao, WANG Chao. Rule of loss nitrogen in the surface water of rice fields and the control technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):740-744.
- [21] 劳秀荣, 孙伟红, 王 真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4):618-622.
LAO Xiu-rong, SUN Wei-hong, WANG Zhen, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4):618-622.
- [22] 刘世平, 张洪程, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2):393-396.
LIU Shi-ping, ZHANG Hong-cheng, DAI Qi-gen, et al. Effects of no-tillage plus inter-planting and remaining straw on the field on cropland eco-environment and wheat growth [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2):393-396.
- [23] 徐国伟, 吴长付, 刘 辉, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(10):209-215.
XU Guo-wei, WU Chang-fu, LIU Hui, et al. Effect of straw residue returned and site-specific nitrogen management on yield and quality of rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(10):209-215.
- [24] 陈留根, 张宝生, 庄恒扬, 等. 太湖地区稻田保护性耕作条件下水稻生育期土壤肥力的变化[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(6):826-832.
CHEN Liu-gen, ZHANG Bao-sheng, ZHUANG Heng-yang, et al. Effects of protective tillage of paddy fields on soil fertility under different rice growing stage in Taihu region[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 24(6):826-832.
- [25] 李逢雨. 秸秆还田养分释放规律及稻草化感作用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007:28-31.
LI Feng-yu. Patterns of nutrient release from straws returned to the field and the allelopathic effect of rice straw[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2007:28-31.
- [26] 郭红岩, 王晓蓉, 朱建国, 等. 太湖流域非点源氮污染对水质影响的定量研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2):150-153.
GUO Hong-yan, WANG Xiao-rong, ZHU Jian-guo, et al. Quantity of nitrogen from non-point source pollution in Taihu Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):150-153.
- [27] 田 平, 陈英旭, 田光明, 等. 杭嘉湖地区淹水稻田氮素径流流失负荷估算[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1911-1917.
TIAN Ping, CHEN Ying-xu, TIAN Guang-ming, et al. Estimation of N loss loading by runoff from paddy field during submersed period in Hangjiahu area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1911-1917.
- [28] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 水稻对氨态氮和硝态氮的吸收特征的研究[J]. 中国水稻科学, 1998, 12(4):249-252.
HE Wen-shou, LI Sheng-xiu, LI Hui-tao. Characteristics of ammonium and nitrate uptake in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, 12(4):249-252.
- [29] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮素管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12):1456-1461.
LIU Li-jun, SANG Da-zhi, LIU Cui-lian, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Science Agricultura Sinica*, 2003, 36(12):1456-1461.
- [30] 陈新红, 叶玉秀, 许仁良, 等. 小麦秸秆还田量对水稻产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2009(1):54-57.
CHEN Xin-hong, YE Yu-xiu, XU Ren-liang, et al. Effects of wheat straw residue amount on grain yield and quality in rice[J]. *Crops*, 2009(1):54-57.