

太湖地区高产高效措施下水稻氮淋溶和径流损失的研究^①

张敏^{1,2}, 赵森³, 田玉华¹, 尹斌^{1*}, 朱兆良¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(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 成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 在太湖地区, 采用田间小区试验, 研究了高产高效措施对水稻季氮素淋溶和径流损失的影响。结果发现, 水稻季总氮(TN)和可溶性有机氮(DON)淋溶随土壤深度的增加而降低, 不同深度下氮淋溶形态不同。60 cm 处 DON 浓度要高于硝氮(NO₃-N)和铵氮(NH₄⁺-N), 占 TN 的 40.5%~58.9%; 80 cm 处 NO₃-N 的浓度要高于 DON 和 NH₄⁺-N, 占 TN 的 52.3%~60.7%。相比当地常规处理, 高产高效处理的 NO₃-N 淋溶减少了 51.7%~54.7%, 仅占施肥的 0.5%~0.9%。在氮的径流损失中, NH₄⁺-N 占 TN 的 48.1%~56.4%, 而 NO₃-N 占 TN 的 36%~53%。试验中氮素通过径流途径的损失量很低, 仅占施肥的 0.34%~0.59%。高产高效处理的氮淋溶和径流损失之和分别为 10.59 kg/hm² 和 10.18 kg/hm², 低于常规处理(13.41 kg/hm²)。除此之外, 高产高效措施的作物产量(11.14~12.22 t/hm²)和农学利用率(11.8~12.5 kg/kg)均显著高于当地常规处理。水稻收获后, 高产高效处理的土壤 TN 相比常规处理提高了 6.8%~8.1%, 有机质含量提高了 8.6%~9.2%。综上, 高产高效措施不仅有利于作物产量和氮素利用率的提高, 还削弱了氮在土-水界面的迁移, 是作物增产且环境友好型的有效措施。

关键词: 水稻; 氮素利用率; 淋溶; 径流; 高产高效

中图分类号: S143.1; S153.5 **文献标识码:** A

我国人多地少、农业资源短缺, 如何提高作物产量一直是人们研究的重点。水稻是我国最重要的粮食作物, 其种植面积占中国谷物播种面积的 26.6%, 稻谷总产占粮食总产的 43.6%^[1]。但是我国水稻产量的提高主要是依靠加大氮肥的投入量, 2013 年, 我国氮肥用量约为 3.36 Mt, 占世界总投入的 33% (FAO, 2013)。然而我国氮肥利用率较低, 有研究表明, 我国稻田氮肥利用率仅为 30%~35%, 在部分高产和高投入区域, 氮肥利用效率则更低, 过量氮肥的投入、低的利用率不仅是对资源的浪费, 同时也对环境造成危害^[2]。其中氮肥以淋洗和径流的方式进入水体, 对水体的污染越来越引起人们的重视^[3-6]。氮肥以淋洗的方式向下渗漏, 可能会导致地下水的污染, 许多资料指出, 饮用水硝酸盐浓度超过 N 10 mg/L 就会给人和牲畜带来危害^[7]。熊正琴等^[8]对浙、苏、沪 16 个县 76 个饮用井水质的调查表明, NO₃-N 超标率达 38.2%。而氮肥以径流的方式进入地表水, 可能会造成水体富营养化, 对地表

水造成污染^[9-12]。

太湖地区地处长江三角洲中心, 素有“鱼米之乡”的美称, 是我国重要的粮食产地, 从 20 世纪 90 年代起, 为了提高作物产量, 该地区氮肥用量日益增多, 据调查, 该地区水稻作物常规施肥为 300 kg/hm², 部分农户可高达 360 kg/hm²^[13-14]。近年来, 尽管加大了氮肥投入, 该地区作物产量却少有增加或增产很小。为了满足人们的粮食需求, 我国出现了许多超高产研究, 其中通过结合肥料、水分以及栽培管理的综合措施可以显著地提高作物产量^[15], 但是关于该综合措施下氮素淋溶和径流损失的研究还鲜有报告, 因此本研究在田间试验下, 定期采集水样, 探讨高产高效综合措施下田间氮素淋溶与径流损失规律, 为该地区制定合理的施肥方式提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与土壤基本性状

试验在中国科学院常熟生态农业实验站

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201003014)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB127400)资助。

* 通讯作者(byin@issas.ac.cn)

作者简介: 张敏(1990—), 女, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事土壤氮素转化与损失机理及其环境污染控制技术的研究。E-mail: mzhang@issas.ac.cn

(31°32'93"N, 120°41'88"E)进行。该站位于太湖地区,属亚热带季风气候,年平均气温 15.5 ℃,降

水量 1 038 mm。供试土壤为湖积物发育的潜育型水稻土(乌栅土),其基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soil

土壤类型	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	CEC(cmol/kg)
乌栅土	7.35	35.0	2.09	0.93	5.0	121.3	17.7

1.2 试验设计

试验开始于 2013 年稻季,设有 4 个处理(之前已连续进行 4 年),分别为:对照(CK);常规施肥(CT);高产高效栽培 1(IT₁);高产高效栽培 2(IT₂)。氮肥以尿素(含 N 46%)形式施入,对照不施氮肥,高产高效栽培处理除无机肥外还增施菜

籽饼肥。磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),磷肥、钾肥和菜籽饼肥均作为基肥一次性施入,具体施肥见表 2。用于试验的有机肥为腐熟的菜籽饼肥(菜子饼与水混合,厌氧发酵 30 d),含全氮 60.40 g/kg,全磷 8.73 g/kg,全钾 8.30 g/kg。

表 2 稻季不同处理的施肥量(kg/hm²)
Table 2 Fertilizer application under different treatments during rice season

处理	菜籽饼肥	基肥	分蘖肥	促花肥	保花肥	总用量
		N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O : M
CK		0 : 90 : 120	0 : 0 : 0	0 : 0 : 0	0 : 0 : 0	0 : 90 : 120 : 0
CT		180 : 90 : 120	60 : 0 : 0	0 : 0 : 0	60 : 0 : 0	300 : 90 : 120 : 0
IT ₁	2 250	150 : 108 : 72	30 : 0 : 0	60 : 0 : 72	60 : 0 : 0	300 : 108 : 144 : 2 250
IT ₂	2 250	187.5 : 126 : 90	37.5 : 0 : 0	75 : 0 : 90	75 : 0 : 0	375 : 126 : 180 : 2 250

注:总用量中 M 指菜籽饼肥。

试验采用的水稻为杂交粳稻常优 3 号,对照与常规处理栽插株行距为 20 cm × 20 cm,而高产高效处理均为 20 cm × 15 cm,移栽时每穴秧苗 2~3 个。关于田间水分管理,对照与常规处理除生育中期排水搁田外,其余时期保持 3~5 cm 水层至收获前一周断水。高效和高产处理则为节水管理,具体措施为:从移栽至返青建立浅水层;返青至有效分蘖临界叶龄期(N-n)前 2 个叶龄期(N-n-2)进行间隙湿润灌溉,低限土壤水势为-10 kPa;N-n-1 叶龄期至 N-n 叶龄期进行排水搁田,低限土壤水势为-20 kPa,并保持 1 个叶龄期;N-n+1 叶龄期至二次枝梗分化期初(倒三叶开始抽出)进行干湿交替灌溉,低限土壤水势为-25 kPa;二次枝梗分化期(倒三叶抽出期)至出穗后 10 d 进行间隙湿润灌溉,低限土壤水势为-10 kPa;抽穗后 11~45 d 进行干湿交替灌溉,低限土壤水势为-15 kPa。各生育时期达到上述指标后即灌 2~3 cm 浅层水,用水分张力计监测土壤水势。

试验小区面积为 42 m²(6 m × 7 m),随机区组排列,重复 3 次,小区之间设有田埂并用塑料薄膜包被,各小区设置独立的排灌沟,以防止串水、串肥。2013 年水稻于 6 月 18 日移栽,有机肥提前 3 d 施入,并用拖拉机机械混匀,6 月 17 日下午施基肥,6 月 26

日施分蘖肥,7 月 29 日施促花肥,8 月 18 日施保花肥,10 月 30 日收获。

1.3 水样采集、分析与数据处理

每个小区分别埋设 60 cm 和 80 cm 深的带陶土头 PVC 渗漏管(直径 2 cm),管中插入抽取水样的塑料软管,PVC 管与土壤间灌入泥浆,以保证无缝隙。水稻生长期,定期采集 60 cm 和 80 cm 深处的渗漏水样。小区安装有径流收集口,径流口垂直于地面相对高度为 7 cm,并通过管道连接相应的径流池,没有径流的时候径流口用橡皮塞塞住(图 1)。所有水样都带回实验室于 4 ℃ 贮存,水样中 NH₄⁺-N 采用靛酚蓝-紫外分光光度计法测定,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法直接分析,总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定。

土壤水溶液的氮素淋溶损失按照 80 cm 深度计算,氮淋溶损失为渗漏水氮浓度与渗漏水体积的乘积。渗漏水体积并不容易获取,但可以估计,在淹水条件下,试验区乌栅土土壤水分垂直渗透速率 v 平均为 5 mm/d^[16],试验期间记录不同处理的淹水天数(田间达到最大持水量时土壤水势为-10 kPa,低于该值时认为没有渗漏发生),CK 和 CT 的淹水天数为 115 d,IT₁ 和 IT₂ 为 102 d,则氮素渗漏量计算公式为:

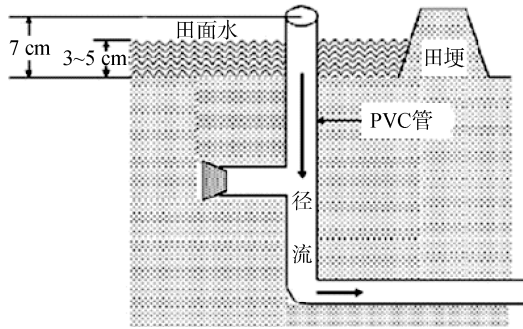


图 1 径流收集实验设计装置

Fig. 1 Design of experimental device for runoff collecting

$$P = C \times t \times 5 \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中： P 为氮素淋失量(kg/hm^2)， C 为 80 cm 处氮素淋失的平均浓度 (mg/L)， t 为水稻移栽至收获之间的淹水天数(d)。

水稻成熟后，人工收割 6 m^2 用以计产；另取一份考种样，烘至恒重后粉碎，测定其总氮含量。植株吸氮量(PNU)为植株干重与总氮(TN)之积。土壤样品(0~20 cm)采用随机多点混合采样，每个小区用土钻采 5 点混合，于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻储存。KCl 浸提后，测土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (靛酚蓝-分光光度计)和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (紫外分光光度计)含量。土样风干磨细过 100 目，进行土壤总氮(凯氏氮法)和有机质含量(重铬酸钾容量法)的测定。

养分的利用率采用氮收获指数、氮回收利用率(NRE)和氮农学利用率(ANE)来计算：

$$\text{氮收获指数} = \text{籽粒吸氮量} / \text{植株总吸氮量}$$

$$\text{氮回收利用率}(\%) = (\text{施氮区作物吸氮量} - \text{氮空白区吸氮量}) / \text{总施氮量} \times 100\%$$

$$\text{氮农学利用率}(\text{kg}/\text{kg}) = (\text{施氮区产量} - \text{氮空白区产量}) / \text{总施氮量} \times 100\%$$

数据使用 SPSS19.0 和 Microsoft Excel 2013 分析，Origin 9.1 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥以及不同深度下氮淋溶损失

试验期间收集了两种深度的土壤水溶液，即 60 cm 和 80 cm 土壤水溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 均在稻秧移栽初期较高，而在水稻生育中后期较低(图 2)。这可能是因为基肥施入时，稻秧处于移栽初期，对氮的吸收能力不强，而且土壤对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸附作用较弱，小麦生育末期积累在土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在泡田之后，易随渗漏水向下迁移，这与这一地区以前研究的结果基本一致^[6]。试验一共收集了 15 次淋溶水，不同深度的氮淋溶浓度结果见表 3。与前人研究类似，60 cm 处 TN 浓度高于 80 cm 处，表明 TN 淋溶随土壤深度的增加而减少。与 TN 类似，DON 也随土壤深度的增加而减少。然而不同于 TN 和 DON 的结果，不同处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 随着深度的增加并没有降低，反而呈现出增加的趋势，推测是土壤矿化导致的。不过对于 IT_2 处理，60 cm 和 80 cm 处的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化很小，这可能是因为该处理提高了氮肥投入，而且加施了有机肥，进而提高了微生物活性，增强了土壤对氮素的固持。两种深度下， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度均高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ，80 cm 处 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 的 52.28%~60.7%，而 60 cm 处 DON 浓度要高于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ，占 TN 的 40.5%~58.9%。

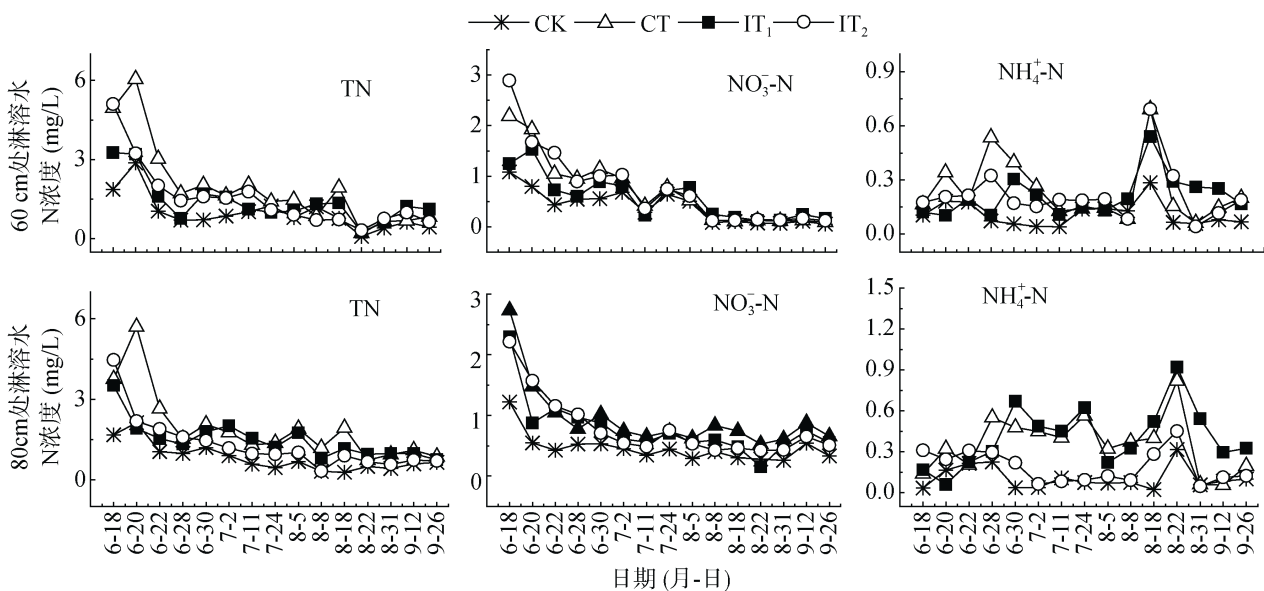


图 2 稻季不同处理 60 cm 和 80 cm 处的氮淋溶

Fig. 2 N leaching under different treatments in 60 cm and 80 cm depths during rice season

表 3 不同处理不同深度处淋溶水的氮平均浓度
Table 3 Average N concentrations in percolation water under different treatments in 60 cm and 80 cm depths

深度(cm)	处理	NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N		DON		TN
		浓度(mg/L)	占 TN 比例(%)	浓度(mg/L)	占 TN 比例(%)	浓度(mg/L)	占 TN 比例(%)	浓度(mg/L)
60	CK	0.11 a	11.1	0.40 c	40.9	0.46 b	47.1	0.98 b
	CT	0.24 a	12.3	0.71 ab	36.0	0.94 a	47.6	1.97 a
	IT ₁	0.21 a	14.9	0.58 bc	40.8	0.83 a	58.9	1.41 a
	IT ₂	0.20 a	12.1	0.76 a	47.4	0.65 ab	40.5	1.61 a
	CK	0.11 c	12.9	0.46 c	56.0	0.26 b	31.1	0.82 c
80	CT	0.35 ab	18.5	0.94 a	48.9	0.63 a	32.7	1.92 a
	IT ₁	0.41 a	27.4	0.77 b	52.2	0.30 ab	20.4	1.48 ab
	IT ₂	0.19 bc	14.6	0.79 b	60.7	0.32 ab	24.8	1.31 b

注：表中同列数据小写字母不同表示同一深度不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平，下同。

在整个水稻季,不同处理氮淋溶损失存在显著差异($P < 0.05$)。IT₂ 处理的 NH₄⁺-N 淋溶损失显著低于 CT 和 IT₁ 处理,这是因为该处理的 NH₄⁺-N 浓度较低。至于 NO₃⁻-N 损失,高产高效措施显著低于常规处理,前者比后者低了 51.7%~54.7%(表 4)。IT₁ 和 IT₂ 处理氮淋溶损失分别为 7.48 和 6.59 kg/hm², 占总施肥量

的 0.5%~0.9% ;CT 处理氮淋溶损失为 11.02 kg/hm², 占总施肥的 2.1%。这表明高产高效措施可以有效地降低氮淋溶损失,可能是因为高产高效措施一方面提高了植株对氮的吸收,降低了淋溶水中的氮浓度,另一方面节水管理减小了向下渗漏的淋溶水体积,从而降低了氮淋溶损失。

表 4 稻季不同处理氮淋溶损失量
Table 4 N leaching losses under different treatments in different depths during rice season

深度(cm)	处理	NH ₄ ⁺ -N(kg/hm ²)	NO ₃ ⁻ -N(kg/hm ²)	DON(kg/hm ²)	TN(kg/hm ²)	占施肥的比率(%)
80	CK	0.63 b	2.65 c	1.49 b	4.74 c	-
	CT	2.03 a	5.39 a	3.60 a	11.02 a	2.1
	IT ₁	2.07 a	3.88 b	1.74 ab	7.48 ab	0.9
	IT ₂	0.96 a	4.00 b	1.63 ab	6.59 b	0.5

2.2 不同处理的氮径流损失

氮通过径流进入周围水体是稻田氮损失的一个重要途径,同时也容易对周围水环境造成污染。研究表明氮径流损失主要与降雨、灌溉以及田面水氮浓度有关,但是前人的研究表明氮通过径流产生的损失差异较大,为 0~51%^[11-12]。施肥之后若有大雨发生,很容易产生径流,大量的氮也随之流失;但是如果径

流发生在施肥 7 d 后,此时田面水氮浓度很低,一般不会造成氮的大量损失^[4-11]。因此为了减少氮的径流损失,本试验中的施肥和灌水都尽量避开暴雨天气。试验过程中一共发生 4 次径流,分别发生于 6 月 26 日、7 月 7 日、8 月 30 日以及 10 月 8 日,均在施肥 7 d 之后(图 3)。从图 3 可知,降雨是发生径流的最主要的原因,降雨体积越大,径流损失体积也越大。

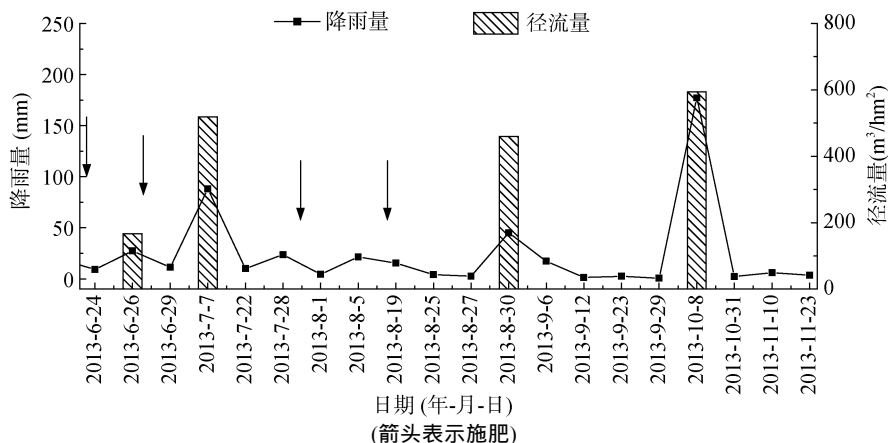


图 3 试验期间降雨(mm)与径流事件(m³/hm²)

Fig. 3 Rainfall (mm) and runoff events during experimental period

不同处理的径流损失氮浓度结果见图 4，由图 4 可知，径流水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在水稻生长初期最高，孕穗后期急剧减少。移栽初期水稻对氮的吸收能力较弱，径流发生时(施肥 10 d 后)田面水仍然有一定浓度的氨氮，故此时径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较高。而生育后期植株对氮的吸收能力增加，径流发生时田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度很低。而在整个稻季，径流水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度一直较低且变化不大，各个处理之间浓度差异很小，这是因为田面水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度一直保持在一个较低的浓度。至于 TN，其变化趋势与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 类似，也是在移栽初期浓度最高，之后降低。

径流损失结果见表 5，结果可知， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是径流损失的主要形式，占 TN 的 48%~56%。除去空白处理外，不同处理的径流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 损失没有差异。对于施肥处理，径流中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 损失仅占 TN 的 36%~42%。整个稻季中氮通过径流途径的损失并不显著，仅占施肥的 0.3%~0.6%，这主要是因为每次径流产生时间与施肥时间的间隔较长，田面水氮浓度较低，因此通过径流损失的氮较小。不同施肥处理之间氮径流损失并没有显著差异($P>0.05$)，不过 IT_1 和 IT_2 处理的氮径流损失要略高于常规 CT 处理，这是因为加施菜籽饼肥带来了额外的氮，提高了田面水氮浓度。

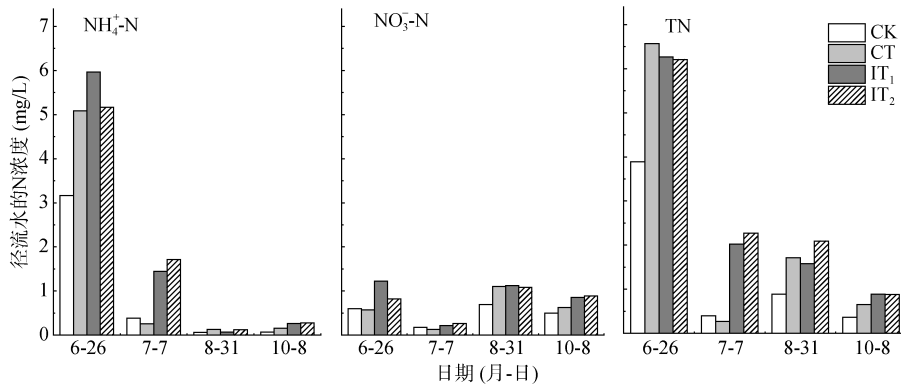


图 4 不同处理径流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度(mg/L)

Fig. 4 Concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN in runoff under different treatments

表 5 2013 年水稻氮径流损失量

Table 5 N loss through runoff during rice season in 2013

处理	径流量 (m^3/hm^2)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$		$\text{NO}_3^-\text{-N}$		TN	
		损失量(kg/hm^2)	占 TN 比例(%)	损失量(kg/hm^2)	占 TN 比例(%)	损失量(kg/hm^2)	占施肥的比率(%)
CK	1 641	0.74 b	54	0.72 b	53	1.36 b	-
CT	1 766	1.15 a	48	1.01 a	42	2.39 a	0.3
IT_1	1 730	1.76 a	56	1.29 a	41	3.11 a	0.6
IT_2	1 821	1.94 a	54	1.29 a	36	3.59 a	0.6

2.3 作物产量及氮利用率

相比当地常规处理，高产高效栽培增产效果稳定，两年间 CT、 IT_1 和 IT_2 处理水稻平均产量分别为 8.6、11.0 和 12.2 t/hm^2 ，相比 CT 处理，高产高效处理提高了 28%~42%。总颖花数的增加是其产量增加的

主要原因(表 6)。高产高效处理也显著提高了作物吸氮量(表 7)， IT_1 和 IT_2 处理的两季平均吸氮量分别为 230.3 和 312.2 kg/hm^2 ，比 CT 处理高了 25%~69%。但是 IT_2 处理的氮收获指数显著低于其他处理，表明它吸收的氮素更多集中于稻草中，造成水稻对氮素的奢侈吸收。

表 6 2012 年与 2013 年水稻季作物产量和其构成因素

Table 6 Rice yields and its components during rice seasons in 2012 and 2013

年份	处理	产量(t/hm^2)	穗数($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数	总颖花量($\times 10^4/\text{hm}^2$)	结实率(%)	千粒重(g)
2012	CK	5.8 d	132 c	165 c	217.1 c	93.3 a	28.6 a
	CT	8.7 c	211 b	174 b	367.7 b	87.0 ab	27.2 ab
	IT_1	10.9 b	281 a	177 b	502.8 a	82.9 b	26.5 b
	IT_2	12.2 a	274 a	190 a	522.1 a	86.8 ab	27.0 ab
2013	CK	5.8 d	130 c	168 d	219.4 d	92.1 a	28.9 a
	CT	8.4 c	206 b	172 c	368.7 c	86.8 ab	27.4 b
	IT_1	11.1 b	281 a	182 b	503.6 b	81.3 b	26.7 c
	IT_2	12.2 a	272 a	200 a	531.6 a	82.4 ab	27.2 b

表 7 不同处理水稻的吸氮量、氮收获指数和氮肥利用率
Table 7 N uptake, N harvest index and N use efficiencies of rice under different treatments

年份	处理	吸氮量(kg/hm ²)	氮收获指数	农学利用率(kg/kg)	氮回收利用率(%)
2012	CK	83.4 d	0.71 a	—	—
	CT	181.5 c	0.58 c	9.7 b	32.7 b
	IT ₁	230.1 b	0.62 b	11.8 a	33.7 b
	IT ₂	297.9 a	0.53 d	12.2 a	42.1 a
2013	CK	84.7 d	0.68 a	—	—
	CT	186.4 c	0.61 b	8.7 b	33.9 b
	IT ₁	230.5 b	0.64 b	12.2 a	33.5 b
	IT ₂	326.5 a	0.52 c	12.5 a	47.4 a

把有机肥带来的氮考虑进去, CT、IT₁ 和 IT₂ 处理的两季平均农学利用率分别为 9.2、12.0 和 12.4 kg/kg, 氮回收利用率分别为 33.3%、33.6% 和 44.3%(表 7)。高产高效处理的农学利用率显著高于常规处理; IT₂ 处理的氮回收利用率显著高于 CT 处理, 但是 IT₁ 处理和 CT 处理之间并没有显著差异。有机肥在当季水稻并不能利用完全, 它不仅提高土壤有机质含量, 并且对下一季作物存在后续影响, 例如, Mohanty 等^[17]和 Singh 等^[18]的研究表明, 稻季配施的有机肥可以显著提高下一季作物的产量和氮素利用率。因此本文单纯地将有机氮全部考虑进入, 可能导致高产高效处理的氮利用率被低估。

2.4 土壤氮以及有机质含量

水稻收获后, 表层土无机氮、总氮和有机质含量结果见表 8。不同处理的土壤 NH₄⁺-N 含量并没有差异; 除去空白处理, 常规和高产高效处理之间的 NO₃⁻-N 含量也没有显著差异, 不过高产高效处理的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量有高于常规处理的趋势。对于土壤 TN, 施肥处理要显著高于空白处理($P < 0.05$), 其中 IT₁ 和 IT₂ 处理的 TN 含量要明显高于 CT 处理, 前者比后者高了 6.8% ~ 8.1%。这表明高产高效措施可以有效地提高土壤氮含量。对于土壤有机质含量, 高产高效处理显著高于常规以及空白处理, 相比常规处理, 高产高效处理土壤有机质提高了 8.6% ~ 9.2%。总之, 高产高效措施有效地提高了土壤肥力。

表 8 表层土(0 ~ 20 cm)中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 以及有机质含量

Table 8 Contents of soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and organic matter in 0-20 cm soil

处理	NH ₄ ⁺ -N(mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N(mg/kg)	TN(g/kg)	有机质(g/kg)
CK	3.33 a	9.42 b	2.01 c	33.61 b
CT	3.34 a	18.70 a	2.21 b	36.05 b
IT ₁	3.69 a	23.47 a	2.36 a	39.37 a
IT ₂	3.42 a	23.22 a	2.39 a	39.14 a

3 讨论

试验中随着土层深度的增加, 淋溶水 TN 和 DON 浓度随之削减, 这与其他一些研究结果类似^[11]。但土壤水溶液中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度却并没有降低的趋势, 反而出现升高的趋势。该地区的水稻土持永久负电荷, 对 NH₄⁺-N 吸附能力很强, 上层 NH₄⁺-N 向下的渗漏能力很弱, 因此试验中 80 cm NH₄⁺-N 浓度的升高, 应该是土壤矿化导致的。此外, 前人研究表明, 淋溶水中 30% ~ 48% 的 NO₃⁻-N 是来自土壤残留无机氮和有机质的矿化^[19-20], 因此试验中 80 cm 处 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度的提高应该是土壤残留氮矿化导致的, 这表明减小氮淋溶损失不仅要从减少肥料氮损失出发, 还要降低土壤矿化作用的强度。

试验中 NO₃⁻-N 淋溶损失为 3.88 ~ 5.39 kg/hm², 这与该地区 Cao 等^[6]的研究类似。IT₁ 和 IT₂ 处理的 NO₃⁻-N 淋溶要显著低于 CT 处理, 表明高产高效措施可以有效地降低 NO₃⁻-N 淋溶损失, 这是因为该措施增加了分次施肥的次数, 并提高了作物移栽密度, 有利于土壤和植株对氮的吸收, 降低了淋溶水的氮浓度。此外, 配施有机肥可以提高土壤有机质含量, 增强土壤对氮的固持, 从而降低氮淋溶(表 8), 这与前人研究类似^[21-22]。例如, 张玉平等^[22]研究表明相比无机肥, 配施有机肥可以降低 18% ~ 38% 淋溶水 NO₃⁻-N 浓度。除此之外, 节水管理可以明显地减少渗漏水体积, 高产高效措施的渗漏水体积比常规处理减少了 11%。在先前研究里, 相比淹水管理, 节水管理可以减少 20% ~ 30% 土壤水溶液体积^[23]。对于径流氮损失, 不同处理之间并没有显著的差异($P > 0.05$), 仅占施肥的 0.3% ~ 0.6%, 低于该地区前人研究的 0.3% ~ 7.2%^[9-11]。这是因为试验的施肥和灌水尽可能避开了暴雨天气, 所有的径流均发生在 7 d 后, 此时田面水浓度较低, 这表明合理施肥和灌水是降低稻田径流的有效措施。总体上, IT₁ 和 IT₂ 处理的氮淋溶和径流

损失之和分别为 10.59 kg/hm² 和 10.18 kg/hm²，低于常规 CT 处理(13.41 kg/hm²)。这表明高产高效措施可以有效地削弱氮在土-水界面的迁移，减少氮素损失。

试验中高产高效措施的作物产量和农学利用率显著高于常规处理，这是改进的田间管理措施的联合结果。同前人研究一致，配施有机肥可以更好地提供水稻生长所需的养分，提高土壤氮的供给，促进植物对氮的吸收并且增加水稻分蘖和穗数，一直以来它都是农业中提高作物产量的一项有效措施^[13-24]。研究也表明分次施肥可以更好地维持土壤供氮与作物需求之间的关系，从而提高植株的吸氮量和氮素利用率^[25]。除此之外，节水管理和增施磷、钾肥有助于促进根长以及增强作物茎粗^[16]，从而有助于作物的增产。因此高产高效措施的水稻产量得到了很大的提高。尽管 IT₂ 处理氮素利用率很高，但是氮收获指数很低，表明该处理奢侈吸氮现象较为严重，因此 IT₁ 处理更适用于实际的应用生产。

4 结论

相比当地常规处理，高产高效措施的氮素淋溶和径流损失减少了 21%~24%，水稻产量提高了 28.7%~42.7%。该措施还显著提高了土壤总氮以及有机质含量。这表明高产高效措施可削弱氮在土-水界面的迁移，减少氮素损失，并且提高作物产量，是作物增产且环境友好型的农田管理措施。

参考文献：

- [1] 薛亚光, 王康君, 颜晓元, 等. 不同栽培模式对杂交粳稻常优 3 号产量及养分吸收利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4781-4792
- [2] Yang S, Peng S, Xu J, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake region of China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(16): 2393-2407
- [3] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 等. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 28-36
- [4] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu lake region, China[J]. Plant and Soil, 2009, 319(1/2): 225-234
- [5] Zhu Z L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2/3): 117-127
- [6] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, et al. Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice-wheat rotation system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 195: 61-67
- [7] Luo L G, Itoh S, Zhang Q W, et al. Leaching behavior of nitrogen in a long-term experiment on rice under different N management systems[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 177(1/2/3/4): 141-150
- [8] 熊正琴, 邢光熹, 沈光裕, 等. 太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(2): 29-33
- [9] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake Region, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(4): 445-456
- [10] 李冬初, 徐明岗, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配合施用下双季稻田氮素形态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 303-310
- [11] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 156: 1-11
- [12] Zhang Z Y, Kong L L, Zhu L, et al. Fate characteristics of nitrogen in runoff from a small agricultural watershed on the south of Huaihe River in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 66(3): 835-848
- [13] 叶静, 俞巧钢, 杨梢娜, 等. 有机无机肥配施对杭嘉湖地区稻田氮素利用率及环境效应的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 87-91
- [14] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Multidisciplinary Sciences, 2009, 106(9): 3041-3046
- [15] 褚光, 周群, 薛亚光, 等. 栽培模式对杂交粳稻常优 5 号根系形态生理性状和地上部生长的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1245-1258
- [16] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, et al. Assessment of ammonia volatilization from paddy fields under crop management practices aimed to increase grain yield and N efficiency[J]. Field Crops Research, 2013, 147: 23-31
- [17] Mandal U K, Singh G, Victor U S, et al. Green manuring: Its effect on soil properties and crop growth under rice-wheat cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 225-237
- [18] Singh G, Jalota S K, Singh Y. Manuring and residue management effects on physical properties of a soil under the rice-wheat system in Punjab, India[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1): 229-238
- [19] Song G, Zhao X, Wang S Q, et al. Dissolved organic nitrogen leaching from rice-wheat rotated agroecosystem in Southern China[J]. Pedosphere, 2015, 25(1): 93-102
- [20] Paré K, Chantigny M H, Carey K, et al. Leaching of mineral and organic nitrogen from putting green profiles supporting various turfgrasses[J]. Crop Science, 2008, 48(5): 2010
- [21] 刘益仁, 李想, 郁洁, 等. 有机无机肥配施提高麦-稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 81-86

- [22] 张玉平, 刘强, 荣湘民, 等. 有机无机肥配施对双季稻田土壤养分利用与渗漏淋失的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 22–27, 32
- [23] Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat–maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 199: 34–42
- [24] 张小莉, 孟琳, 王秋君, 等. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 624–630
- [25] 褚清河, 潘根兴, 李健英, 等. 不同施氮量下北方稻田一次与分次施氮对水稻产量的影响 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(1): 82–86

Study on N Leaching and Runoff Under Integrated High Yield and High Efficiency Practices in Paddy Fields of Taihu Lake Region

ZHANG Min^{1,2}, ZHAO Miao³, TIAN Yuhua¹, YIN Bin^{1*}, ZHU Zhaoliang¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*)

Abstract: The influences of integrated practices for high yield and high efficiency on nitrogen (N) leaching and runoff under rice-wheat rotation system were studied with field plot experiment in the Taihu Lake Region. It was found that the leaching of total nitrogen (TN) and organic N (DON) declined with the increase of soil depth and the forms of N leaching changed with soil depth. DON in the percolation water in 60 cm depth, which accounting for 40.5%–58.9% of TN, was higher than NO₃-N and NH₄⁺-N. NO₃-N in the percolation water in 80 cm was higher than DON and NH₄⁺-N and accounted for 51.7%–54.7% of TN. NH₄⁺-N loss was the main form of N runoff, and accounted for 48.1%–56.4% of TN. However, N losses via runoff were indistinctive, only accounting for 0.3%–0.6% of fertilizer application. The total loss of N leaching and runoff in the high yield and high efficiency treatments were 10.59 and 10.18 kg/hm², which were lower than in the current treatment with a value of 13.41 kg/hm². The rice yield in high yield and high efficiency treatments was 11.14–12.22 t/hm², and the agronomic efficiency reached 11.8–12.5 kg/kg, which were significantly higher than those of the traditional treatment. After harvest, soil TN content increased by 6.8%–8.1% and soil organic matter by 8.6%–9.2% in high yield and high efficiency treatments compared to traditional treatment. In short, high yield and high efficiency practices can increase crop yield and N use efficiency, weaken the migration of N through water to soil and thus is beneficial to both crop yield and environment.

Key words: Rice; N use efficiency; N leaching; Runoff; High efficiency and high yield