

太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式对麦季氮素利用与流失的影响研究

俞映惊^{1,2}, 薛利红^{1*}, 杨林章¹

(1.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过对施氮管理模式的调整, 研究太湖流域稻麦轮作系统不同模式下麦季氮素利用率以及土壤中氮素迁移对水体中氮的影响。试验设置 6 个处理: 农户施肥处理、化肥减量处理、稻季按需施肥处理(麦季同化肥减量处理)、新型肥料处理、有机无机配施处理以及无氮处理。结果表明: 有机无机配施处理在麦季持续减少 25% 施氮量的情况下不会影响产量及作物地上部分氮素总积累量, 且氮素表观利用率显著高于其他处理, 麦季径流与渗漏损失量主要受施氮量的影响, $\text{NO}_3\text{-N}$ 是损失的主要形态; 减氮处理可较农户处理降低 $7.7\sim 12.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮素流失; 麦季有机无机配施减量处理, 能够保证作物产量与氮素吸收并且有效降低氮素的流失, 具备可持续性发展的前景。

关键词:氮肥管理模式; 稻麦轮作; 产量; 氮素利用率; 氮流失

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)12-2475-08

Nitrogen Use Efficiency and Loss from Runoff and Leaching in Wheat Season with Rice-wheat Rotation System Under Different Nitrogen Management Methods in Taihu Lake Region, China

YU Ying-liang^{1,2}, XUE Li-hong^{1*}, YANG Lin-zhang¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A field study was carried out focusing on utilization efficiency and loss of nitrogen from runoff and leaching in wheat season in Taihu Lake region. The experiment was conducted with different nitrogen management methods including different nitrogen levels and different kind of fertilizers. Six treatments were designed: Farmer's N treatment (FN), Reduced chemical N treatment (RCN), Site-specific nitrogen management (SSNM) (for paddy season only, same as RCN in wheat season), Organic & chemical N treatment (OCN), Control released urea treatment (CRU) and without nitrogen treatment (N0). Results showed that under OCN treatment, the yield and above-ground nitrogen accumulation wouldn't be lessened when nitrogen input was continuously reduced by 25% in wheat season, and nitrogen utilization efficiency was significantly higher than other N treatments. Runoff was easier to occur in wheat season than rice season. N loss from runoff and leaching mainly depend on the N rate, and nitrate was the main form of N loss in runoff and leachate. Reducing N input about 25% could lower N loss about 25%~40% ($7.0\sim 11.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) compared with farmer's N treatment. Organic combined with chemical N treatment in wheat season could ensure a stable yield and reduce the N loss to environment, and has the potential of sustainable development.

Keywords: nitrogen management method; rice-wheat rotation; yield; nitrogen utilization efficiency; nitrogen loss

随着农村工业化水平的提高, 太湖流域稻田传统“草塘泥+化肥”的配施模式已基本消失^[1], 取而代之的是普通化学肥料尤其是氮肥的大量施用。1982 年太湖地区年平均化肥氮施用量达到 $395\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[2], 20 世

纪 90 年代中期已达 $520\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[3], 而近年来太湖流域稻麦轮作年施氮量平均值已高达 $690\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[4]。氮素是作物生长发育不可或缺的矿质营养元素, 稻麦产量与氮肥用量之间存在着二次曲线响应关系^[5], 过量施用氮肥, 产量反而下降, 生产成本增高导致产投比下降。有研究显示我国氮肥的当季利用率仅为 30%~35%^[6-7], 过低的氮肥利用率, 不仅造成了不必要的经济损失, 而且使得河湖水域富营养化、温室气体排放等生态环境问题相继出现^[8-11], 一定程度上制约了生

收稿日期: 2011-05-25

基金项目: 国家水专项(2008ZX07101-005); 农业部公益性行业项目(200903011)

作者简介: 俞映惊(1986—), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事面源污染相关研究。E-mail: yu.colleen@gmail.com

* 通讯作者: 薛利红 E-mail: lhxue@issas.ac.cn

产效益的提高和农村生态环境的改善。

如今农业面源污染已成为人们普遍关注的一个热点问题^[12-15]。杨林章等指出,农业面源污染的研究重点与控制对策在于主要面源污染物质的形成过程及其量化研究,以及农田养分投入的减量化技术^[16]。径流损失的氮素是水体富营养化的主要贡献者,据估算,我国农田生态系统中化肥氮的年径流损失量约 174 万 t^[17-19]。而渗漏是农田中营养元素影响水体的又一途径,相关研究因采用方法不同,结果具有一定差异^[20-22],渗漏对于水体环境的影响是不可忽视的。立足于“不合理施肥是农业面源污染的主要成因”^[23-24]这一观点,本研究通过调整施肥量与肥料品种,试图寻找合理的氮肥管理模式,在提高氮肥利用率的同时,减少因径流与渗漏产生的环境压力。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2009 年 6 月至 2010 年 5 月在江苏省无锡市滨湖区胡埭镇龙延村(北纬 31°31', 东经 120°06')进行。当地位于长江三角洲的腹地太湖流域,属亚热带中部湿润季风气候,多年平均降雨量 800~1 100 mm,平均气温 13~16 ℃。主要粮食作物为水稻与小麦轮作;土壤为爽水水稻土,耕作层深度 19 cm,土壤基本理化性质如下:pH 6.99、有机质 32.00 g·kg⁻¹、全 N 2.88 g·kg⁻¹、全 P 0.61 g·kg⁻¹、碱解 N 187.75 mg·kg⁻¹、速效 P 37.94 mg·kg⁻¹、速效 K 118.33 mg·kg⁻¹。

供试小麦品种为杨麦 8 号。灌溉水引自朱家浜(龙延河二级支流)。

1.2 试验设计

设农户施肥(Farmer's N, FN)、化肥减量施肥(Reduced N, RCN 根据前人得出的太湖地区适宜施肥量结果^[17,25]而定)、有机无机配施(Organic & Chemical N, OCN)、新型肥料(Control Released Urea, CRU)、据叶色施肥(Site-Specific N management, SS-NM)以及无 N(N0, 0 kg·hm⁻²)共 6 个处理,均为 3 次重复,小区面积为 80.4 m²(12 m×6.7 m),随机区组排列。其中 OCN 处理施氮量同化肥减量处理,有机肥氮量占 20%,使用江苏田娘公司生产的商品有机肥,全部基施。CRU 处理使用山东金正大公司产的缓控释尿素,占总氮量的 70%,全部基施。SSNM 处理所用基肥同 RCN 处理,追肥根据叶片的 SPAD 值(Soil Plant Analysis Development)实时确定,2009 年稻季该处理实际施氮 153 kg·hm⁻²,较 RCN 处理减少 57 kg·

hm⁻²,为 FN 处理施氮量的 43.4%;麦季该处理施氮量同 RCN 处理。麦季 FN、RCN、SSNM 处理基肥、穗肥 N 用量各半;OCN 与 CRU 处理,基肥占 70%,穗肥占 30%。磷钾肥各处理相同,钾肥用量为(K₂O)90 kg·hm⁻²,基肥、穗肥用量各半,磷肥(P₂O₅)用量为 65 kg·hm⁻²,作底肥一次性施入。具体施氮量和时间见表 1。小麦于 2009 年 11 月 1 日撒播,2010 年 5 月 31 日收割。小麦生长季于 11 月中旬遭遇降雪影响。

1.3 样品采集与项目测定

1.3.1 植株样品采集与测定

在田间调查基础上,作物成熟期各小区取代表性植株地上部分 5 穴,烘干、称重、粉碎、消煮后,使用凯氏定氮仪测定氮含量^[26]。

1.3.2 土壤渗漏液的采集与分析

为在自然条件下研究氮素淋失情况,2009 年稻季开始前埋入小区土壤渗漏液抽取装置(中国科学院南京土壤研究所生产)。渗漏管为 PVC 材质,管长分别为 40、60、80、120 cm,底部顶部均封闭,并在距底部 20 cm 处均匀打孔径为 5 mm 的渗水小孔,其外用塑料纱网紧贴管壁将渗水小孔包住,以阻隔淤泥进入管中。为防止田间表层水溶液沿管壁下渗,在最高钻孔处至距地表 10 cm 段,沿管外壁四周,灌以水泥黄沙,其上部分埋设时按发生层依次将土壤回填。渗漏管顶部钻孔,插放 0.8 cm 直径的塑料软管,软管延伸至渗漏管底部,用于抽取渗漏液。每个小区于同一相对位置埋入 4 根不同深度的渗漏管。

麦季共采集到渗漏液 8 次。用荷兰 Skalar 流动分析仪测定计算渗漏液中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN 含量。

1.3.3 径流液的采集与分析

为准确收集麦季径流样,在各小区中独立围起 2 m²(1 m×2 m)的微区,在微区排水口处理设一小桶,用于收集微区径流。每次降雨后及时收集各微区径流收集桶中的水样,并清空径流收集桶。本试验共收集麦季径流 7 次。用荷兰 Skalar 流动分析仪分别测定其中

表 1 各处理氮肥用量(kg·hm⁻²)

Table 1 Nitrogen rate of each treatment(kg·hm⁻²)

处理 Treatments	总施氮量 Total N	基肥 2009.11.01 Base N	穗肥 2010.03.01 Earing N
FN	240	120	120
RCN	180	90	90
OCN	180	126(36 来自有机肥)	54
CRU	160	112(新型肥料)	48
SSNM	180	90	90
N0	0	0	0

各形态 N 含量。

1.4 计算方法

1.4.1 相关计算

地上部氮素积累量 (N accumulation on aerial part): 成熟期单位面积植株氮积累量总和=成熟期植株含氮量×成熟期单位面积植株干物质积累量

氮肥表观利用率(N utilization efficiency)(%)=[(施氮区作物吸氮量-不施氮区作物吸氮量)/施氮量]×100

氮肥农学效率(Agronomic efficiency of N)(kg·kg⁻¹)=(施氮区作物产量-不施氮区作物产量)/施氮量

DON=TN-(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)

1.4.2 氮素径流损失估算

采用美国水土保持局提出的 SCS-CN 模型^[27]进行径流量的估算:

$$\begin{cases} Q=(P-0.2S)/(P+0.8S), P>0.2S \\ Q=0, P\leq 0.2S \end{cases}$$

$$S=(25,400/CN)-254$$

其中:Q 为径流量;P 为总降雨量;S 为最大滞留量,由土壤覆盖条件决定;CN 为径流曲线值(curve number),受土地利用及土壤类别等的影响,参数单位均为 mm。

本研究根据 SCS 模型提供的 CN 值查算表^[27]并参考相关研究^[28]进行校正,将 CN 值设定为 83,然后根据该地区实测降雨量估算麦季径流量。2009 年 11、12 月,2010 年 3、4 月降雨量分别为 111、67、217、112 mm,模型拟合对应径流量为 66、29、165、67 mm。

1.4.3 氮素淋失量计算

麦季渗漏水量参考地区相关麦季渗漏研究数据^[29-30],将麦季渗漏水量(Q)设定为 120 mm,麦季氮素淋失量由各深度麦季平均氮素渗漏浓度与渗漏水量的乘积累加得出。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 与 Sigmaplot 软件对数据进行统计、制图;采用 SPSS 中 Duncan 法对数据进行差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 产量和氮积累量、利用率

麦季产量随施氮量的减少有所下降(表 2)。N0 处理的产量仅 961.5 kg·hm⁻²,为最高产量的 28%。FN 处理产量最高,RCN 与 SSNM 处理较 FN 处理减少氮肥用量 25.0%(60 kg·hm⁻²),产量分别降低了 14.4%与 12.6%(504.3 kg·hm⁻²与 440.1 kg·hm⁻²)。不同肥料种类中,OCN 处理产量较高,但处理间差异不显著。

如表 2 所示,麦季 OCN 处理氮积累量最高,其余施氮处理间差异不显著,在 112.9~144.6 kg·hm⁻²之间,是 N0 处理的 2.5~3.2 倍。不同肥料种类中,OCN 处理显著高于 RCN 处理(相差 38.1 kg·hm⁻²)。

麦季氮肥表观利用率 OCN 处理显著高于其他处理,高达 63.3%,是其他处理的 1.5 倍左右。FN、RCN 与 SSNM 处理的氮肥表观利用率无明显差异,在 38%~42%之间变动。氮肥农学效率随施氮量增加而降低^[31],FN 处理(施氮 240 kg·hm⁻²)最低,CRU 处理(施氮 160 kg·hm⁻²)最高。相同施氮条件下(RCN、SSNM 与 OCN 处理)处理间差异不显著,OCN 处理具有较高的氮肥农学效率。

2.2 麦季径流

2.2.1 径流氮含量与损失量

2009 年 11 月至 2010 年 4 月,累计降雨量达 550 mm 以上,产生径流 7 次。如图 1 所示,FN 处理径流液氮含量显著高于 RCN 与 SSNM 处理。不同肥料处理下,CRU 处理径流液氮含量的峰值出现在 12 月 9 日,滞后于其他处理(12 月 2 日),且峰值也高于 RCN 与 OCN 处理,但整个麦季的径流氮素损失量与 RCN

表 2 不同处理下麦季产量、氮积累量与氮表观利用率

Table 2 Yield, N accumulation and apparent use efficiency of each treatment in wheat season

处理 Treatments	产量 Yield/kg·hm ⁻²	地上部氮积累量 Aerial N accumulation/kg·hm ⁻²	氮肥表观利用率 N apparent use efficiency/%	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of N applied/kg·kg ⁻¹
FN	3 495.7a	144.6ab	41.7b	10.56c
RCN	2 991.4b	120.5b	42.2b	11.28b
SSNM	3 055.6b	112.9b	38.0b	11.63b
OCN	3 119.6ab	158.6a	63.3a	11.99b
CRU	3 034.2b	108.0b	39.7b	12.95a
N0	961.5c	44.6c	—	—

注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

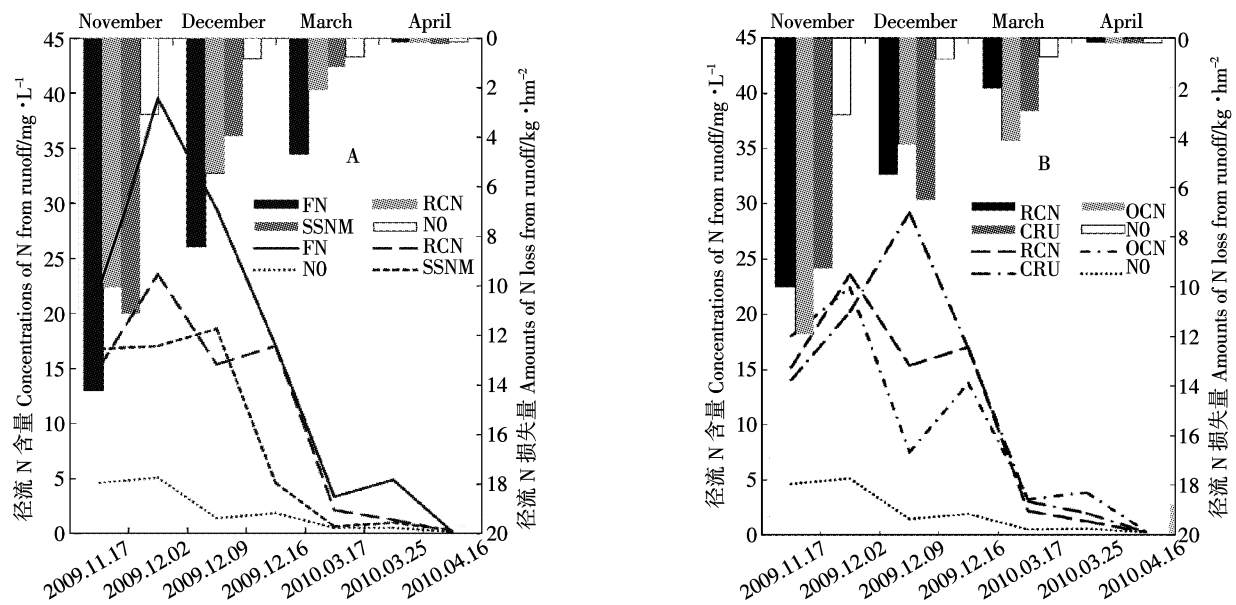


图 1 麦季径流氮素浓度与氮损失量 (A 不同施氮水平处理, B 不同肥料种类处理, 折线图为含量, 柱状图为损失量)

Figure 1 N concentrations and loss amounts of runoff in wheat season (A Treatments of different nitrogen levels, B Treatments of different fertilizer types, lines denote TN concentrations, and bars denote amounts of N loss)

处理无较大差别。除 CRU 处理外, 施氮各处理 11 月径流氮损失量占其整个麦季径流氮损失量的 51.8%~67.6%。虽然 2010 年 3、4 月份仍有较大降水, 但因其径流液中氮含量较低, 氮损失量较低。

2.2.2 径流氮损失形态与比例

施肥处理的麦季径流氮素损失量在 16.46~27.50 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 为施肥量的 9%~12% (图 2)。其中, SSNM 处理最低, FN 处理最高。等氮量施肥下, OCN 处理的径流氮损失略高于纯化肥 RCN 处理。普通化肥处理 (FN、RCN、SSNM 处理), 减少施氮量不仅减少了氮径流损失量, 氮损失比例也有所下降, 由 FN 处

理的 11.46% 降低到 SSNM 处理的 9.14%。

如表 3 所示, 麦季径流损失氮素的主要形态为 NO_3^--N , 占 60% 以上。除 CRU 处理外, 处理间不同形态氮的损失比例相近, NH_4^+-N 损失低于 6%, NO_3^--N 损失比例范围在 60%~70%, DON 在 30% 左右。CRU 处理 NO_3^--N 形态氮损失高达 84.8%, 而 DON 所占比例相对较低。该现象应与缓控释肥的特性相关, 有待进一步研究。

2.3 麦季渗漏

2.3.1 各月份渗漏液平均氮含量的变化

如表 4 所示, 麦季渗漏液氮素平均含量呈不断降低的趋势, 变化范围为 4.74~0.59 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。渗漏液氮浓度随施氮量的增加而明显增加: $\text{FN} > \text{RCN} > \text{SSNM} > \text{N0}$ 。不同肥料种类处理间渗漏液浓度随生育进程的变化表现出一定的差异, 基肥期 (2009 年 11 月至 2010 年 1 月) RCN 渗漏液氮含量高于 OCN 与 CRU 处理, 但穗肥期, 尤其在 4 月份, 由于 CRU 处理的肥料缓慢释放特性, 其渗漏液氮素平均含量最高达 1.08 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.3.2 不同深度渗漏液平均氮含量的变化

图 3 所示为各处理不同深度渗漏液氮素的平均含量。渗漏液氮含量在各层次深度主要受施氮高低的影响, 其中 20~40 cm 与 60~80 cm 深度处理间差异较为明显。20~40 cm 深度, 普通化肥处理的渗漏液氮含量是 N0 处理的 2.8~4.4 倍, SSNM 处理其余深度渗漏液氮含量与 N0 无较大差异。不同肥料种类处理间,

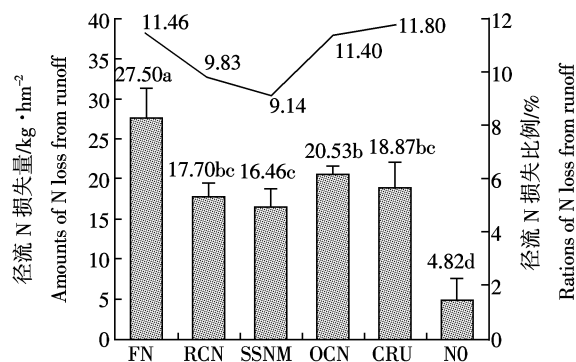


图 2 麦季氮素径流损失量与比例
(柱状图为径流损失量, 折线图为径流损失比例)

Figure 2 Amounts and ratios of N loss from runoff in wheat season
(bars denote amounts of N loss from runoff, and lines denote the ratio of N runoff loss to N fertilizer)

表 3 麦季径流不同形态氮素损失量(kg·hm⁻²)与比例(%)

Table 3 Amounts(kg·hm⁻²) and ratios(%) of N from runoff in different forms of wheat season

氮素形态 N forms	FN		RCN		SSNM		OCN		CRU		N0	
	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例
NH ₄ ⁺ -N	0.64a	2.3	0.68a	3.8	0.73a	4.5	0.51a	2.5	0.51a	2.7	0.26b	5.4
NO ₃ ⁻ -N	17.9a	64.9	12.2ab	69.0	10.2b	62.0	13.7a	66.7	16.0b	84.8	3.18c	66.0
DON	9.02a	32.8	4.82b	27.2	5.52b	33.6	6.34b	30.9	2.37c	12.6	1.38c	28.6
TN	27.5a		17.7bc		16.5c		20.5b		18.9bc		4.82d	

表 4 麦季不同月份渗漏水总氮含量

Table 4 Concentrations of TN in leach-water of different months in wheat season(mg·L⁻¹)

处理	总氮含量 Concentration of TN/mg·L ⁻¹				
	11 月	12 月	1 月	3 月	4 月
FN	4.74a	3.94a	2.77a	1.39a	0.85b
RCN	3.63b	3.28a	2.08b	1.18ab	0.72b
SSNM	3.42b	2.63b	1.52b	0.96b	0.59b
OCN	2.60c	2.67b	1.95b	1.19ab	0.68b
CRU	2.50c	2.94b	2.03b	1.18ab	1.08a
N0	1.61d	1.67c	1.28b	0.79b	0.59b

20~40 cm 深度 OCN 与 CRU 处理分别较 RCN 降低了 24.5%与 17.1%,OCN 处理在 60~80 cm 深度显著高于其余处理。

2.3.3 渗漏氮损失形态与比例

如表 5 所示,麦季渗漏水中 NO₃⁻-N 所占比例在

44.6%~67.7%之间,是氮素渗漏损失的主要形态。NH₄⁺-N 损失比例在 9.2%~19.5%之间。DON 比例除 SSNM 处理较低外,其余各处理均在 30%左右。

麦季渗漏损失量在 1.2~2.8 kg·hm⁻² 之间,占施肥量的 1.0%~1.2%,处理间差异不显著。渗漏氮素损失量主要受施肥水平的影响,与 FN 处理相比,RCN 处理和 SSNM 处理氮素损失分别降低 19.0%和 37.9%(图 4)。NO₃⁻-N 与 DON 损失量主要受施氮水平影响,FN 处理损失量最高,SSNM 处理最低。不同种类肥料间,CRU 处理具有较高的 NO₃⁻-N 损失量与比例以及最低的 NH₄⁺-N 损失量与比例,OCN 处理的 DON 损失量与比例则较高。这主要是和 OCN 与 CRU 中的缓控释成分不同有关,前者为有机氮,后者为缓慢释放的尿素,因此在渗漏水氮形态上有不同的表现。

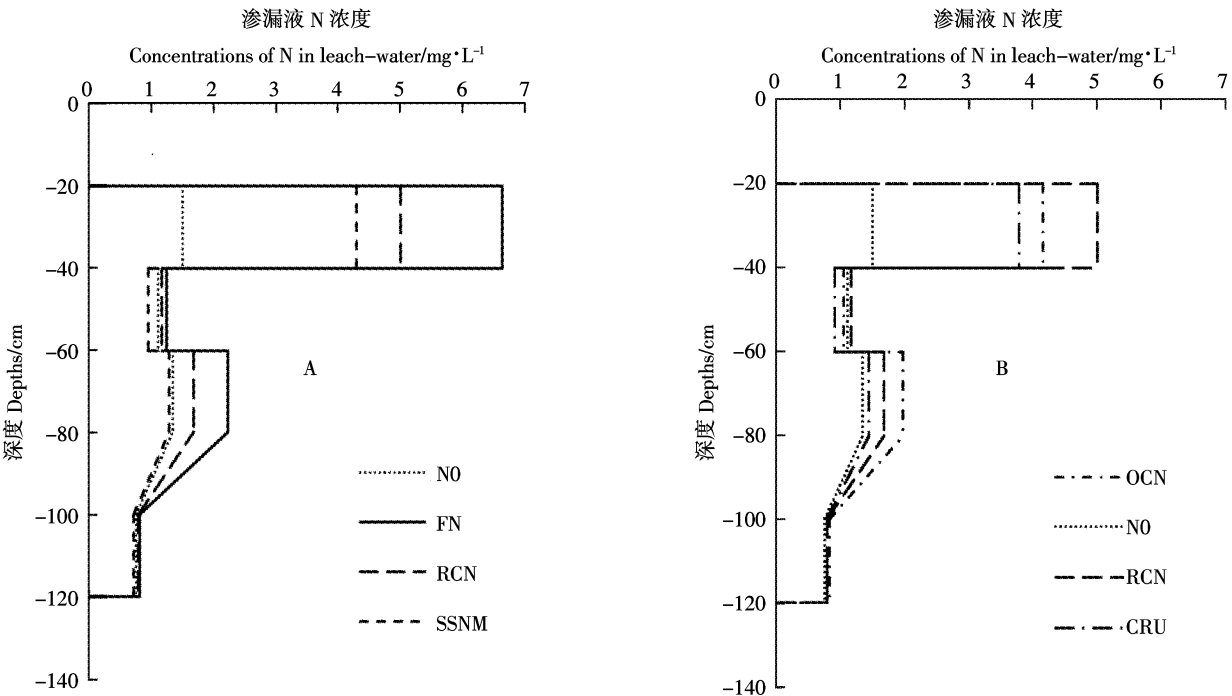


图 3 麦季不同深度渗漏水总氮含量(A 不同施氮水平处理,B 不同肥料种类处理)

Figure 3 Concentration of TN in leach-water of different depths in wheat season
(A Treatments of different nitrogen levels, B Treatments of different fertilizer types)

表 5 麦季渗漏液不同形态氮素损失量 (kg·hm⁻²)与比例 (%)

Table 5 Volumes(kg·hm⁻²) and ratios(%) of N leakage in different forms of wheat season

氮素形态	FN		RCN		SSNM		OCN		CRU		NO	
	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例	损失量	比例
NH ₄ ⁺ -N	0.29a	10.8	0.36a	16.7	0.35a	19.5	0.25b	12.4	0.16b	9.2	0.22b	18.7
NO ₃ ⁻ -N	1.55a	56.5	1.22a	56.2	1.24a	67.7	1.10a	54.8	1.11a	63.8	0.53b	44.6
DON	0.89a	32.7	0.59b	27.1	0.23c	12.8	0.66b	32.8	0.47b	27.0	0.44b	36.7
TN	2.74a		2.17b		1.82b		2.01b		1.74b		1.19c	

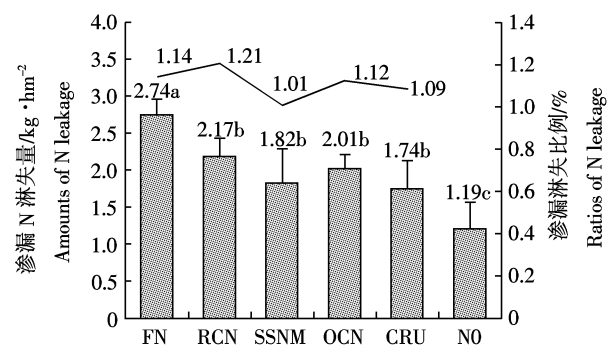


图 4 麦季氮素渗漏液渗漏损失量与比例
(柱状图为渗漏损失量,折线图为渗漏损失比例)

Figure 4 Amounts and ratios of N leakage in wheat season (bars denote amounts of N leakage, and lines denote the potential maximal ratios of N fertilize)

3 讨论

3.1 不同氮肥管理模式对麦季作物生长情况的影响

作物产量是衡量经济效益的重要指标,农民盲目过量施肥均是以提高产量为目的。氮积累量由植株含氮量和生物量共同决定,与表观利用率、氮肥农学效率结合,用于反映各处理对氮肥的利用转运情况。在试验所设模式下,稻季氮肥用量减少 20%~40%,对水稻产量没有显著影响^[32]。但麦季持续减氮后,普通尿素处理产量较农户处理显著下降,降幅在 12%~15%之间,而配施有机肥处理(OCN)的产量并未因氮量的持续减少而有所影响。同时,配施有机肥的处理氮积累量与表观利用率、氮肥农学效率均显著高于其余处理,可见适当有机肥的施入可以增加产量,促进氮素积累,肥料增产效果较好^[33]。CRU 处理的氮积累量较低,而其产量并未显著低于其他肥料处理,可能是因为该处理的氮肥农学效率较高(表 2),氮素的转运吸收较好^[34]。

3.2 不同氮肥管理模式对麦季径流与渗漏的影响

为避免渍害对小麦生产的影响,需开深沟打破犁底层,促进排水畅通、确保“雨停田干”,排水口在地表

下。因此,同等强度降水下,麦季比稻季更易产生径流。本研究稻季径流氮损失量在 5~10 kg·hm⁻³²,麦季是稻季的 2~3 倍,麦季径流是氮素流失的重要形式。

降雨是麦季径流发生的动力,当降雨强度大于土壤下渗速度时,就产生地表径流。有研究显示,降雨量直接影响径流量的大小,一般在其他各类因素相同的前提下,N 的径流输出量与降雨量呈较好的线性关系^[35],同时径流量还与降雨强度有密切关系^[36-37]。发生降水时距离施肥的时间以及作物的生长情况,决定了表层土壤中氮素的残留,因此降水时机对径流氮浓度起决定作用。本试验期间,2009 年 11 月至 12 月多次降雨产生径流,径流初始浓度较高并达到峰值,随降雨历时延长而下降(图 1),与康玲玲等^[37]研究相似。试验基肥期径流氮损失量达到总麦季径流损失量的 60%以上,这主要是由于基肥期小麦生长缓慢,留存在表层土壤中氮素含量较高,遇到降水时,随径流损失的氮素量较大,因此冬季成为麦季氮素损失的关键时期。

麦季不同于稻季,仅在田面因降水而存有积水的条件下才可收集到渗漏液。因此,麦季渗漏的产生依赖于降雨的发生与强度,相对稻季的淹水环境,麦季旱地环境下渗漏明显减少^[32]。一般情况下,随深度的增加,渗漏液氮素平均含量整体呈现下降趋势,但麦季各处理均出现 60~80 cm 处渗漏液氮含量高于 40~60 cm 的梯度现象。这一现象主要由田面覆水的间歇性引起,稻季田面始终处于淹水状态,土壤持水饱和,水分不断因重力作用向下迁移,麦季仅在降水时才发生氮素的向下迁移,降水的间隔带来了下渗的间断,造成了 60~80 cm 处渗漏液氮含量较高的现象发生。

施氮水平是影响径流与渗漏液氮素含量以及氮素损失量的主要因素。与 FN 处理相比,减少氮肥用量 25%(RCN 和 OCN 处理)和 33.3%(CRU 处理),径流氮素含量与氮损失量可降低 25%~36%(图 2),渗漏氮素含量与氮损失量可降低 20%~36%(图 4),与前人的研究结果类似^[38,18]。SSNM 处理麦季与 RCN 处理

施氮量相同,但因稻季施氮水平较低(比 RCN 处理少 $57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其麦季径流与渗漏氮损失量显著低于 RCN 处理。由此可见,稻季施肥模式的调整会通过土壤氮素的变化而影响麦季的径流与渗漏。不同肥料种类处理间,CRU 处理由于肥料包膜,在麦季降雨初期其营养元素的释放要缓于 RCN 与 OCN 处理,径流氮素浓度的峰值也较其余处理滞后 10 d 左右;且其渗漏液氮素平均含量下降缓慢,12 月份反而出现略微增加的趋势,在穗肥期该处理的氮损失(2010 年 3 月至 4 月)则明显高于其他处理。因此,合理施氮模式是减少氮素径流与渗漏损失的主要途径,同时肥料的特性与种类也影响了氮素的流失。

4 结论

(1)当前地力下,有机无机配施减量处理(OCN)能在麦季持续减氮 25%的情况下仍保持较高的产量与氮肥利用率。

(2)麦季径流与渗漏氮损失取决于降水发生的时间和降水量,损失量主要受施氮水平的影响。麦季径流损失占总施肥量的 10%左右,渗漏占总施肥量的 1%左右。径流液和渗漏液中均以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主要成分。麦季施氮量由 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 降低到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮环境排放量可减少 $7.7 \sim 12.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(3)麦季有机无机配施减量处理(OCN)能够保证作物产量与氮素吸收,并能有效降低氮素流失,为适宜该地区麦季的具备可持续性的氮肥管理模式。

参考文献:

- [1] 李伟波,吴留松,廖海秋.太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究[J].土壤学报,1997,34(1):67-72.
LI Wei-bo, WU Liu-song, LIAO Hai-qiu. Application and crop recovery of N fertilizer in high-yielding paddy fields of Taihu region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(1):67-72.
- [2] 朱兆良,张绍林,徐银华.平均适宜施氮量的含义[J].土壤,1986,18(6):316-317.
ZHU Zhao-liang, ZHANG Shao-lin, XU Yin-hua. The meaning of average appropriate N application rate[J]. *Soil*, 1986, 18(6):316-317.
- [3] 徐慰心.太仓市化肥投入使用状况的几个问题[J].上海农业科技,1994(4):29.
XU Wei-xin. Some questions on fertilizer usage in Taicang City [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 1994(4):29.
- [4] 王海,席运官,陈瑞冰,等.太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J].农业环境与发展,2009(3):10-15.
WANG Hai, XI Yun-guan, CHEN Rui-bing, et al. Investigation on excessive application of fertilizer and pesticides in Taihu Lake region[J]. *Agro-Environment and Development*, 2009(3):10-15.
- [5] 朱新开,郭文善,周正权,等.氮肥对中筋小麦扬麦 10 号氮素吸收、产量和品质的调节效应[J].中国农业科学,2004,37(12):1831-1837.
ZHU Xin-kai, GUO Wen-shan, ZHOU Zheng-quan, et al. Effects of nitrogen fertilizer on N absorption, yield and quality of medium-gluten wheat Yangmai 10[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12):1831-1837.
- [6] 吕耀.农业生态系统中氮素造成的非点源污染[J].农业环境保护,1998,17(1):35-39.
LÜ Yao. Nitrogen loss in agricultural ecosystems in non-point source pollution [J]. *Agricultural Environmental Protection*, 1998, 17(1):35-39.
- [7] 李庆远,朱兆良,于天仁.中国农业可持续发展的肥料问题[M].南昌:江西科学技术出版社,1977.
LI Qing-kui, ZHU Zhao-liang, YU Tian-ren. Sustainable development of Chinese agricultural fertilizer problem[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1977.
- [8] 张国梁,章申.农田氮素渗漏损失研究进展[J].土壤,1998,30(6):291-297.
ZHANG Guo-liang, ZHANG Shen. Research progress in agriculture nitrogen leaching[J]. *Soils*, 1998, 30(6):291-296.
- [9] 朱兆良,范晓晖,孙永红,等.太湖地区水稻土稻季氮素循环及其环境效应[J].作物研究,2004(4):187-191.
ZHU Zhao-liang, FAN Xiao-hui, SUN Yong-hong, et al. The nitrogen cycle and environmental effects in rice paddy in Taihu Lake region[J]. *Crop Research*, 2004(4):187-191.
- [10] 张水龙,庄季屏.农业非点源污染研究现状与发展趋势[J].生态学杂志,1998,6:51-55.
ZHANG Shui-long, ZHUANG Ji-ping. The research status and development trend of agricultural non-point source[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 6:51-55.
- [11] Jin J, Yang J P. Farmland nitrogen loss and its control strategies from the view of water environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3):579-582.
- [12] Ng Kee Kwong K F, Bholah A, Volcy L. Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius[J]. *Agricultural Ecosystem and Environment*, 2002, 91:147-157.
- [13] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等.豆科绿肥和化肥氮对双季稻田氧化亚氮排放贡献的研究[J].土壤学报,2003,40(3):704-710.
XIONG Zheng-qin, XING Guang-xi, TSURUTA H, et al. Nitrous oxide emissions from paddy soils as affected by incorporation of leguminous green manure and fertilization during double-cropping rice-growing season[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3):704-710.
- [14] 王小治,高人,朱建国,等.稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J].中国环境科学,2004,24(5):600-604.
WANG Xiao-zhi, GAO Ren, ZHU Jian-guo, et al. Nitrogen loss via runoff and leaching from employ of different urea bleeds in paddy season[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5):600-604.
- [15] Turtola E, Paajanen A. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 28:295-310.
- [16] 杨林章,王德建,夏立忠.太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J].中国水利,2004,20:29-30.
YANG Lin-zhang, WANG De-jian, XIA Li-zhong. Characteristics and control approach on agricultural non-point source pollution in Taihu Lake region[J]. *China Water Resources*, 2004, 20:29-30.

- [17] 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.
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.
- [18] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1):39-47.
MA Li-shan, WANG Zu-qiang, ZHANG Shui-ming, et al. A research on agricultural non-point source pollution and its countermeasures[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(1):39-47.
- [19] Chen L D, Fu B J, Zhang S R, et al. A comparative study on nitrogen-concentration dynamics in surface water in a heterogeneous landscape[J]. *Environmental Geology*, 2002, 42:424-432.
- [20] 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.
WANG Jia-yu, WANG Sheng-jia, CHEN Yi, et al. Study on nitrogen leaching in rice paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1):28-36.
- [21] 王德建, 林静慧, 夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1):16-18.
WANG De-jian, LIN Jing-hui, XIA Li-zhong. Characteristics of nitrogen leaching of rice-wheat rotation field in Taihu Lake area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1):16-18.
- [22] 王少平, 俞立中, 许世远, 等. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 22(6):554-558.
WANG Shao-ping, YU Li-zhong, XU Shi-yuan, et al. Nitrogen leaching in the purple clay and analysis on its influence on water environmental quality in Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 22(6):554-558.
- [23] Owens L B, Edwards W M. Groundwater nitrate levels under fertilized grass and grass-legumes pastures[J]. *J Environment Quality*, 1994, 23:752-758
- [24] 彭奎, 朱波. 试论农业养分的非点源污染与管理[J]. 环境保护, 2001(1):15-17.
PENG Kui, ZHU Bo. Discussion on non-point pollution and management of agricultural nutrients[J]. *Environmental Protection*, 2001(1):15-17.
- [25] 薛峰, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4):26-31, 51.
XUE Feng, YAN Ting-mei, QIAO Jun, et al. Economic and environmental benefits of lower fertilizer application rate in paddy fields in Taihu Area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4):26-31, 51
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:309-311.
LU Ru-kun. Chemical analysis of agricultural soil [M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000:309-311.
- [27] USDA-SCS (Department of Agriculture-Soil Conservation Service). National engineering handbook. Section 4:Hydrology, soil conservation service. U. S. Washington DC, 1985.
- [28] 万荣荣, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 中尺度流域次降雨洪水过程模拟:以太湖上游苕溪流域为例[J]. 湖泊科学, 2007, 19(2):170-176.
WAN Rong-rong, YANG Gui-shan, LI Heng-peng, et al. Simulating flood events in mesoscale watershed:A case study from River Xitiaoxi Watershed in the upper region of Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(2):170-176.
- [29] 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.
- [30] 王小治, 高人, 朱建国, 等. 麦季使用不同尿素的氮排水和渗漏损失[J]. 农村生态环境, 2005, 21(1):24-29.
WANG Xiao-zhi, GAO Ren, ZHU Jian-guo, et al. The losses of leachate and drain off water in wheat season with different urea[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(1):24-29.
- [31] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2):143-149.
ZHAO Man-xing, ZHOU Jian-bin, YANG Rong, et al. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2):143-149.
- [32] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4):1133-1138.
XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4):1133-1138.
- [33] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能: II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报, 2006, 43(2):256-260.
CAO Zhi-hong, LI Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of paddy field ring to urban and rural environment: II. Characteristics of nitrogen accumulation, movement in paddy field ecosystem and its relation to environment protection[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2):256-260.
- [34] 李方敏, 樊小林, 陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4):494-500.
LI Fang-min, FAN Xiao-lin, CHEN Wen-dong. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(4):494-500.
- [35] Kumar R, Ambasht R S, Srivastava A, et al. Reduction of nitrogen losses through erosion by *Leonotis nepetaefolia* and *Sida acuta* in simulated rain intensities[J]. *Ecological Engineering*, 1997, 8(3):233-239.
- [36] Pruski F F, Nearing M A. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U. S. locations[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(12):1298.
- [37] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):536-543.
KANG Ling-ling, ZHU Xiao-yong, WANG Yun-zhang, et al. Research on nutrient loss from a loessial soil under different rainfall intensities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4):536-543.
- [38] 杨金玲, 张甘霖, 周瑞荣. 皖南丘陵地区小流域氮素径流输出的动态变化[J]. 农村生态环境, 2001, 17(3):1-4.
YANG Jin-ling, ZHANG Gan-lin, ZHOU Rui-rong. Dynamic change in nitrogen discharge with runoff from a small watershed in southern Anhui hilly areas[J]. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17(3):1-4.