

氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响

易琼¹, 张秀芝¹, 何萍^{1*}, 杨利², 熊桂云²

(1 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2 湖北省农业科学院植保土肥所, 湖北武汉 430064)

摘要: 田间试验研究了稻-麦轮作体系中减施氮肥对作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响。结果表明, 与当地习惯施肥(小麦: N 225 kg/hm², 基肥与分蘖肥各半; 水稻: N 210 kg/hm², 基肥和分蘖肥为 3:2) 相比, 减氮 20% ~ 30% 处理产量并没有降低, 而氮肥当季利用率、氮素农学利用率以及氮素偏因子生产力则有所增加; 而且, 氮肥分次追施, 能增加子粒产量, 并减少氮肥成本。虽然减氮 20% ~ 30% 处理 0—40 cm 土层无机氮含量较习惯施肥处理降低, 但是并没有降低植株地上部对氮素的吸收。在小麦和水稻收获期, 减施氮肥处理 0—100 cm 土壤无机氮残留量低于习惯施肥处理; 且稻-麦轮作系统中氮的表观损失主要发生在水稻季。初步认为, 在长江中下游平原稻-麦轮作体系氮素过量施用地区, 第一个轮作周期减施氮肥 20% ~ 30% 不仅不影响产量, 而且可提高氮素利用率, 有利于保护环境。

关键词: 氮肥减施; 稻-麦轮作; 氮肥利用率; 土壤无机氮

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)05-1069-09

Effects of reducing N application on crop N uptake, utilization, and soil N balance in rice-wheat rotation system

YI Qiong¹, ZHANG Xiu-zhi¹, HE Ping^{1*}, YANG Li², XIONG Gui-yun²

(1 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/

Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 Institution of Plant Protection and Soil Fertilization, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: The effects of reducing N application on plant N uptake, utilization, and soil N balance in rice-wheat rotation system were studied using field experiments. The results show that compared with farmers' practice for N fertilization, N 225 kg/ha for wheat with 1/2 basal and 1/2 topdressing at the tillering stage and N 210 kg/ha for rice with the ratio of 3:2 for the basal and tillering applications, the grain yields are not decreased under the N application amounts with a reduction by 20%–30%, while the N recovery efficiency, N agronomic efficiency, and N partial factor productivity are increased. Moreover, topdressing N fertilization can increase the grain yields and reduce the cost of the fertilization. Although both soil mineral N content and accumulation are reduced, the N absorptions by crops are not reduced accordingly. There is less residual soil mineral N in 0–100 cm layer at the harvest stages of wheat and rice compared to that of the farmer's practice. In addition, the loss of apparent N in the rice-wheat system is mainly occurred in the rice season. Therefore, it is preliminarily concluded that the reducing N application by 20%–30% is a feasible N management practice under the first rice-wheat rotation system in the middle-lower Yangtze plain with over N fertilization.

Key words: reducing N application; rice-wheat rotation; N use efficiency; soil mineral N

收稿日期: 2009-12-10

接受日期: 2010-02-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109306); 国家科技支撑计划课题(2006BAD02A14)资助。

作者简介: 易琼(1985—), 女, 湖南株州人, 硕士研究生, 主要从事养分资源利用方面的研究。E-mail: yiq100@126.com

* 通讯作者 Tel: 010-82108000, E-mail: phe@caas.ac.cn

合理氮肥用量对作物产量高低和品质好坏以及对生态环境将产生直接或间接的影响^[1-2]。然而,合理施用氮肥在农业生产中是很难真正掌控的一项重要农艺措施^[3]。因此,如何协调作物持续高产、氮肥高效利用和生态环境保护的矛盾近年来倍受关注^[4]。稻麦轮作是我国长江中下游粮食主产区一种主要的种植制度^[5],近年来,水稻和小麦的单产和总产都有大幅度的提高^[6-7]。但是,这种高产大多是以高氮肥用量以及由此可能导致的大气、土壤及水污染等为代价的。我国农民习惯施氮存在一定的盲目性,人们只注重前期氮肥的供应而忽略了作物后期对氮素的需求。当土壤氮素供应与氮肥投入超过作物的需求时,土壤剖面氮素积累与环境压力显著增加^[8-9]。丁艳峰等^[10]研究表明,氮素基肥施用较多的处理,拔节前相对吸氮速率增大,拔节后相对吸氮速率减少,总的氮肥利用率降低。闫德智^[11]等也认为,随氮肥用量的增加,水稻植株含氮量和吸氮量都随之增加;高氮处理的植株在生育前期吸收氮素的比例更高,但氮素从营养器官向谷粒的转移率降低。Peng 等^[12]研究表明,与农民习惯施肥相比,在植物营养生长阶段减施氮肥总用量的30%不仅不会降低产量,反而略有增产,并使氮肥农学利用率翻倍。本研究通过不同氮肥用量和运筹来探求水稻和小麦轮作体系土壤氮素供应和作物需求同步机制,旨在为长江中下游稻麦体系合理氮肥管理和养分资源高效利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于2007年11月至2008年9月在湖北省潜江市浩口镇柳州村4组(30°22'54.5"N,112°37'21.5"E)农田进行。试验田地处江汉平原腹地,地势平坦,属于亚热带季风性湿润气候,海拔为27.5 m,年均降水量1150 mm,年平均气温16℃。供试土壤为潮土,土层深厚,排灌条件一般,土壤质地为砂壤,肥力水平中等。其基础养分状况:pH 7.1,有机质20.62 g/kg,全氮1.53 g/kg,速效氮121.28 mg/kg,速效磷19.16 mg/kg,速效钾72.5 mg/kg,CEC 14.85 cmol/kg。小麦播种前0—20、20—40、40—60、60—80和80—100 cm土层NO₃⁻-N含量分别为11.14、2.25、4.10、3.55和3.47 mg/kg;NH₄⁺-N含量分别为2.20、2.07、2.40、2.59和2.41 mg/kg。

1.2 试验设计

1.2.1 小麦试验 设7个施氮处理:1)不施氮肥

对照(N0);2)习惯施氮(N 225 kg/hm²),分2次施用,基肥与分蘖肥各占50%(N225/2);3)氮肥减施20%(N 180 kg/hm²),分2次施用,基肥与分蘖肥各占50%(N180/2);4)氮肥减施30%(N158 kg/hm²),分2次施用,基肥与分蘖肥各占50%(N 158/2);5)氮肥减施40%(N 135 kg/hm²),分2次施用,基肥与分蘖肥各占50%(N135/2);6)氮肥减施30%(N158 kg/hm²),分3次施用,基肥、分蘖肥和穗肥各占1/3(N158/3);7)氮肥减施30%(N158 kg/hm²),分4次施用,基肥、分蘖肥、穗肥和粒肥各占1/4(N158/4)。3次重复,小区面积为5m×8m,随机区组排列。各小区磷、钾施用量相同,分别为P₂O₅ 120 kg/hm²和K₂O 105 kg/hm²,磷肥全部作基肥,钾肥基肥和分蘖肥各占50%。供试小麦品种为湖北省主栽品种郑麦9023,小麦11月2日撒播,播种量为112.5 kg/hm²,11月11日施基肥,12月14日施返青肥,3月11日施拔节肥,4月1日施穗肥,5月30日收获。

1.2.2 水稻试验 水稻试验在上季小麦试验基础上按原小区排列,设7个处理:1)不施氮肥对照(N0);2)习惯施氮(N 210 kg/hm²),分2次施用,基肥60%、分蘖肥40%(N210/2);3)氮肥减施20%(N 168 kg/hm²),分2次施用,基肥60%、分蘖肥40%(N168/2);4)氮肥减施30%(N 147 kg/hm²),分2次施用,基肥60%、分蘖肥40%(N 147/2);5)氮肥减施40%(N 126 kg/hm²),分2次施用,基肥60%、分蘖肥40%(N126/2);6)氮肥减施30%(N 147 kg/hm²),分3次施用,基肥40%、分蘖肥和穗肥各占30%(N147/3);7)氮肥减施30%(N 147 kg/hm²),分4次施用,基肥40%、分蘖肥30%、穗肥20%和粒肥10%(N147/4)。3次重复,小区面积为37m²,随机区组排列。各小区施P₂O₅ 75 kg/hm²和K₂O 120 kg/hm²,磷肥全部作基肥,钾肥基肥和分蘖肥各占50%。水稻品种为当地主栽水稻高产品种Ⅱ优838。水稻5月7日播种,6月11日施基肥,6月30日施分蘖肥,7月31日施孕穗肥,9月20日收获。

试验所用氮、磷、钾肥分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和氯化钾(K₂O 60%)。

1.3 样品采集与测定项目

小麦:分别于小麦播前、苗期(播种后42 d)、返青分蘖期(播种后118 d)、拔节期(播种后138 d)、孕穗期(播种后160 d)、灌浆期(播种后173 d)、成熟期(播种后210 d)在每个小区采集0—100 cm的

土壤样品,每 20 cm 为一层,每个小区采集 6 钻土壤样品,混合的土壤样品迅速充分混匀并过 5 mm 筛, -20℃ 冷冻保藏待测硝态氮和铵态氮含量。

采集土壤样品的同时,在各小区采集有代表性的植株样品,苗期、返青期与拔节期各取 50 株,抽穗期、灌浆期、成熟期各取 10 ~ 20 株,成熟期样品分为子粒和秸秆两部分,于 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘至恒重,称地上部干物重;粉碎后存放样品用于植株氮素含量的测定。收获时全小区实收计产,测定生物产量与子粒产量及其构成。

水稻:于水稻移栽前(即施肥前基础土样)和成熟期(移栽后 105 d)取 0—100 cm 土壤样品;返青期(移栽后 16 d)、分蘖期(移栽后 27 d)、孕穗期(移栽后 47 d)、灌浆期(移栽后 82 d)取 0—40 cm 土壤样品,每 20 cm 为一层。每小区随机取 2 点,相同层次的土壤混合为一个混合土样,迅速充分混匀过 5 mm 筛,置于 -20℃ 冷冻保藏,用于硝态氮和铵态氮的测定。

采取土壤样品的同时,分别于水稻各生育时期采集每个小区内具有代表的植株样品 10 株,成熟期样品分为子粒和秸秆两部分,于 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘至恒重,称地上部干物重;粉碎后用于植株氮素含量的测定。成熟期每个小区采集 3.5 m² 水稻样方,测定子粒产量及其构成。

土壤无机氮(N_{min})为硝态氮和铵态氮之和。称取过筛解冻后的土样 10 g,用 50 mL 1 mol/L KCl 溶液浸提(水土比 5:1),震荡 45 min,定量滤纸过滤后,用流动注射分析仪 FIASTAR 5000 测定 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量,同时测定土壤含水量^[14]。

植株全氮:称取 0.2500 g 植株样品,按照国标 GB2905-82 用半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量^[15]。

相关计算式:

氮收获指数(NHI, %) = 子粒吸氮量/植株总吸氮量 × 100;

氮肥利用率(RE_N, %) = (施氮区地上部吸氮量 - 空白区地上部吸氮量)/施氮量 × 100;

氮肥农学利用率(AE_N, kg_{grain}/kg_N) = (施氮区子粒产量 - 空白区子粒产量)/施氮量;

氮肥偏生产力(PFP_N, kg_{grain}/kg_N) = 施氮区产量/施氮量;

土壤氮素的表观净矿化量 = 不施氮小区作物吸氮量 + 不施氮肥区土壤残留 N_{min} - 不施氮肥区土壤

起始 N_{min}。

氮素表观氮素损失 = 施氮量 + 土壤起始 N_{min} + 土壤氮素净矿化量 - 作物收获带走量 - 收获后土壤残留 N_{min}

试验数据采用 Excel 13.0 和 SAS 8.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 产量与氮肥利用率

氮肥减施,小麦和水稻的产量并未显著降低。表 1 看出,各施氮处理小麦产量较不施氮处理产量显著增加。与习惯施肥量相比,小麦产量并未随着施氮量的降低而降低,即使减少 40% 的氮肥用量,也没有降低小麦产量;减氮 30% 的 3 个施氮处理之间产量也无显著差异。表明当地施 N 225 kg/hm² 是过量的。各施氮处理中,子粒产量,氮肥利用率及氮素收获指数均未达到显著水平,以减氮 40% 的处理(N135/2)其氮肥利用率、氮肥农学利用率以及氮素偏生产力最高,分别为 66.6%、8.0 kg/kg, 33.9 kg/kg。

表 1 还看出,在当地习惯施肥的基础上适量减施氮肥并未降低水稻产量,其中,以 N168/2 处理产量最高,为 8348 kg/hm²,略高于习惯施肥处理;各施氮处理子粒产量均显著高于不施氮处理。与小麦试验不同的是,水稻季减氮 40% 处理(N126/2)处理产量较减氮 20% (N168/2)处理产量显著降低,表明氮肥的减量施用效果在第 2 季作物中体现的较为明显,过量减施氮肥会降低水稻产量;而减氮 30% 的 3 个处理其水稻产量未表现出显著差异。水稻各施氮处理氮肥利用率、氮肥农学利用率及氮素偏生产力之间均无显著差异。

从整个稻-麦轮作周期的结果来看,施氮处理增加了稻-麦轮作体系的生产能力,但是各施氮处理之间以及同一氮素用量的不同氮素运筹处理之间产量差异不显著。氮素当季回收率除了减氮 30% 分 4 次施用显著高于分 2 次施用和习惯施氮处理外,其它处理并无显著差异;而氮素偏因子生产力则以减氮 40% 处理最高,其次为减氮 20% 和减氮 30% 的各处理,习惯施氮处理最低;而氮素的农学利用率在不同施氮处理间则无显著差异。综上所述,适当减少氮肥用量,不仅不会减少作物的产量,而且还可以减少生产成本,提高氮肥的利用率。

表 1 水稻-小麦轮作体系产量及氮肥利用率
Table 1 Grain yield and N use efficiency of the wheat and rice rotation system

处理 Treatment	子粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	氮收获指数 NHI(%)	氮肥利用率 RE _N (%)	氮肥农学利用率 AE _N (kg/kg)	氮素偏生产力 PFP _N (kg/kg)
小麦 Wheat					
N0	3493 b	80.7 a			
N225/2	4246 a	53.9 c	54.8 a	3.3 c	18.9 d
N180/2	4327 a	59.1 bc	60.6 a	4.6 bc	24.0 c
N158/2	4268 a	63.7 b	56.7 a	4.9 bc	27.1 b
N135/2	4577 a	66.8 b	66.6 a	8.0 a	33.9 a
N158/3	4393 a	64.5 b	53.9 a	5.7 b	27.9 b
N158/4	4489 a	63.0 b	64.7 a	6.3 ab	28.5 b
水稻 Rice					
N0	4801 c	69.4 a			
N210/2	7880 ab	53.2 b	52.2 a	14.7 a	37.5 a
N168/2	8348 a	60.7 ab	58.1 a	21.1 a	49.7 a
N147/2	7332 ab	60.8 ab	51.5 a	17.2 a	49.9 a
N126/2	6879 b	65.8 ab	59.1 a	16.5 a	54.6 a
N147/3	7422 ab	55.1 ab	62.1 a	17.8 a	50.5 a
N147/4	7384 ab	50.9 b	67.8 a	17.6 a	50.2 a
稻-麦体系 Rice-wheat system					
N0	8295 b	75.1 a			
N225(210)/2	12127 a	55.7 c	53.6 b	8.8 a	27.9 c
N180(168)/2	12675 a	59.0 bc	59.4 ab	12.6 a	36.4 b
N158(147)/2	11601 a	61.6 b	54.2 b	10.9 a	38.1 b
N135(126)/2	11456 a	64.1 b	63.0 ab	12.1 a	43.9 a
N158(147)/3	11816 a	62.0 b	57.9 ab	11.6 a	38.8 b
N158(147)/4	11874 a	60.3 bc	66.2 a	11.8 a	39.0 b

注(Note): NHI—Harvest index of N; RE_N—Recovery efficiency of N; AE_N—Agronomic efficiency of N; PFP_N—Partial factor productivity of N. 不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters mean significant difference at 5% level.

2.2 地上部氮素吸收和积累

图 1 表明,小麦季各处理的氮素累积量随作物生育时期的推进总体呈增加趋势,小麦氮素积累最快阶段出现在拔节~灌浆期,此阶段氮素积累量占氮素总积累量的 34%~64%,说明小麦在越冬返青

后,随着气温回升,小麦进入旺盛生长期,吸收大量的氮素以供干物质的累积^[16]。而水稻季不同处理的氮素积累趋势基本相同,自移栽至返青,水稻的氮素吸收量较低,自返青期至分蘖期,水稻吸氮量增加较快,分蘖期后,吸氮量继续增加,增幅有所下降。

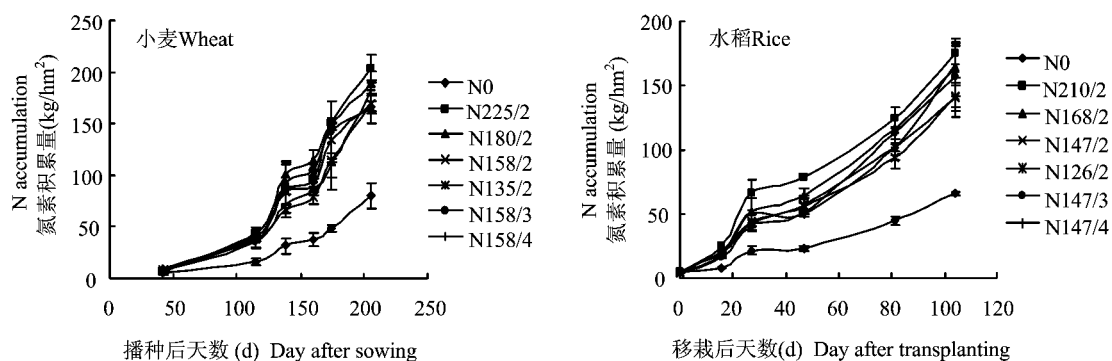


图 1 小麦和水稻生育期内氮素积累动态

Fig.1 Dynamics of N accumulation at the wheat and rice growth stages

小麦和水稻的氮素积累总体趋势均表现为随施氮量的增加氮素积累量增加,各施氮处理氮素积累显著高于不施氮处理。

试验表明,100 kg 小麦子粒需氮量略高于 100 kg 稻谷需氮量(表 2),这与相关研究小麦耐肥特性高于水稻的结论相一致^[13]。单位小麦子粒产量的氮素需求量随施氮量的增加而增加,最高施氮量时,

总吸氮量达到最高为 203.6 kg/hm²,每生产 1000 kg 小麦子粒需氮量最高为 48.0 kg。随着施氮量的增加,水稻吸氮量也增加,当施氮总量相同时,氮肥施用时期和比例不同也会引起水稻吸氮量的改变。表 2 还看出,N147/4 > N147/3 > N147/2,表明随着氮肥施用时期的向后推移,氮素吸收量相应增加,整个稻-麦轮作体系也呈现相同的趋势。

表 2 小麦和水稻总吸氮量与子粒吸氮特征

Table 2 Total N uptake and the N uptake characteristics of grains of wheat and rice

小麦 Wheat			水稻 Rice			稻-麦体系 Wheat-rice system		
处理 Treatment	吸氮量 N uptake (kg/hm ²)	需氮量 N requirement (kg/t, grain)	处理 Treatment	吸氮量 N uptake (kg/hm ²)	需氮量 N requirement (kg/t, grain)	处理 Treatment	吸氮量 N uptake (kg/hm ²)	需氮量 N requirement (kg/t, grain)
N0	80.3 d	23.0 d	N0	66.2 c	13.8 b	N0	146.6 d	17.7 d
N225/2	203.6 a	48.0 a	N210/2	175.8 a	22.3 a	N225(210)/2	379.5 a	31.3 a
N180/2	189.3 ab	43.8 ab	N168/2	163.8 ab	19.6 a	N180(168)/2	353.2 ab	27.9 ab
N158/2	169.6 c	39.7 bc	N147/2	141.9 b	19.4 a	N158(147)/2	311.5 c	26.9 c
N135/2	170.2 c	37.2 c	N126/2	140.7 b	20.5 a	N135(126)/2	311.0 c	27.1 bc
N158/3	165.2 c	37.6 c	N147/3	157.5 ab	21.2 a	N158(147)/3	322.8 bc	27.3 bc
N158/4	182.2 bc	40.6 bc	N147/4	165.9 ab	22.5 a	N158(147)/4	348.2 ab	29.3 ab

注(Note): 不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters mean significant difference at 5% level.

2.3 生育期 0—40 cm 土层无机氮变化

2.3.1 0—20 cm 土层无机氮含量变化 本试验氮肥追施一般在采样后的第 1 d 进行,由于试验地属于热带季风性湿润气候,施肥前 1 周内都有不同强度的降水(仅小麦返青与水稻收获前 1 个月无降水),施肥后一般不浇水。由图 2 可看出,小麦生育期内,0—20 cm 土层中无机氮 N_{min} (NO₃⁻-N + NH₄⁺-N) 的含量表现为先升高、后降低、再升高,而后再

缓慢降低的变化趋势;水稻生育期内,0—20 cm 土层中的 N_{min} 含量仅返青分蘖期稍微升高,此后趋于平稳,变化不显著。整个稻-麦轮作体系,0—20 cm 土层的 N_{min} 含量基本表现出随施氮量的增加而增加的趋势,习惯施肥处理高于各减氮处理,而不施氮处理最低。不同施氮处理在试验开始时,0—20 cm 土层的 N_{min} 含量差异较大,但是随着轮作体系的推进,这种差异逐渐变小,在水稻季这种差异降为最小。

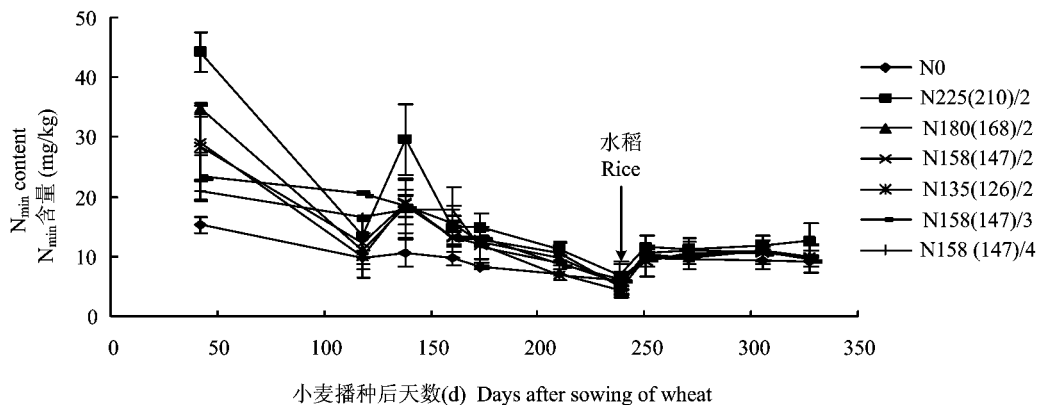


图 2 小麦和水稻生育期间 0—20cm 土壤 N_{min} 含量变化

Fig. 2 Dynamics of N_{min} content in 0-20cm soil layer during the growing seasons of wheat and rice

20—40 cm 土层中,土壤 N_{min} 含量变化趋势与表层 0—20 cm 基本相似。由于小麦苗期对土壤中无机氮的需求量少,施基肥后,土壤中无机氮的含量表现出一定差异;随后土壤无机氮含量逐渐降低,此后稍有升降起伏变化;成熟期,20—40 cm 土层中

N_{min} 残余量以习惯施肥处理最高,不施氮处理最低。水稻生育期内 20—40 cm 土层中 N_{min} 含量呈现出先增后降,再升高,成熟期降低的趋势,各处理之间在水稻季差异很小(图 3)。

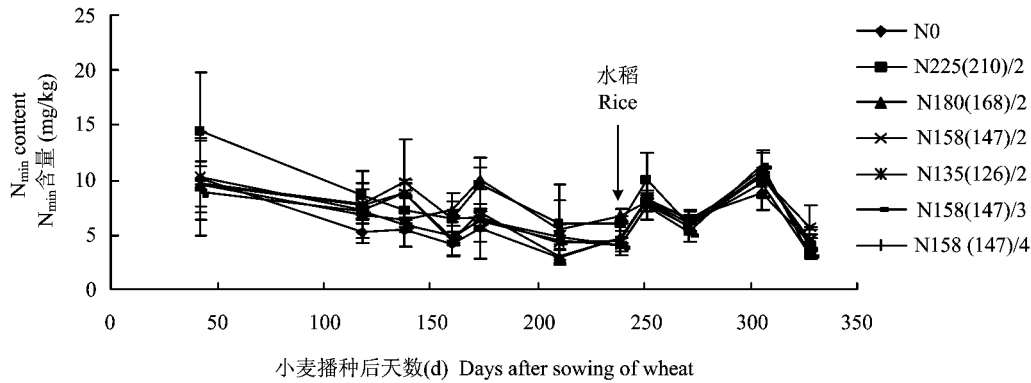


图 3 小麦和水稻生育期间 20—40 cm 土壤 N_{min} 含量变化

Fig. 3 Dynamics of N_{min} content in 20—40 cm soil layer during the growing seasons of wheat and rice

2.3.2 0—40 cm 土层 N_{min} 积累量的变化 在小麦整个生育期内,各施氮处理 0—40 cm 土层的 N_{min} 积累量呈现先升高、后降低,再升高,之后又降低的趋势,且习惯施肥处理(N225/2)积累量一直高于各减氮处理;施氮处理高于不施氮处理。小麦返青分蘖期各处理 N_{min} 积累量较多,分蘖至拔节期积累量降

低,此过程为小麦氮素吸收的一个高峰期。之后,小麦生长加快,对土壤中氮素的需求增加,吸收土壤中 N_{min} 增加,积累量降低;至抽穗期,各处理氮素积累略有升高,而后总体呈下降趋势。水稻生育期内 0—40 cm 土层 N_{min} 的变化趋势与小麦大体相似,只是增减幅度较低(图 4)。

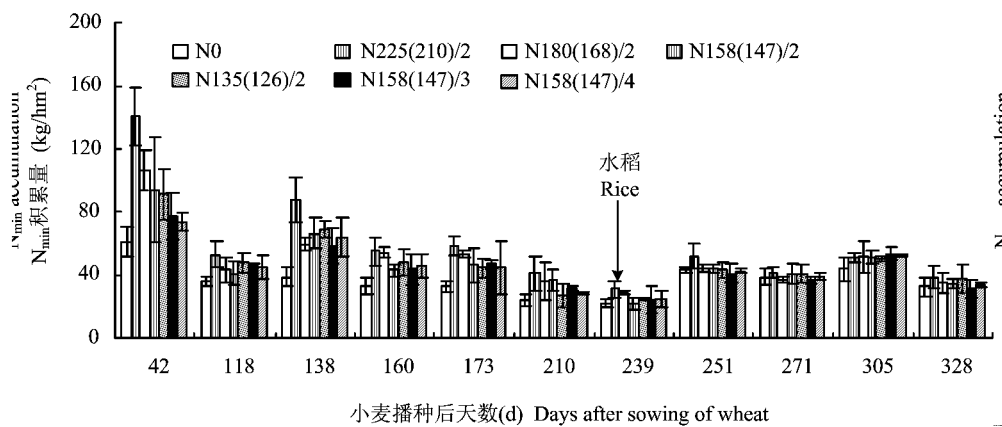


图 4 小麦和水稻生育期间 0—40cm 土壤 N_{min} 积累量

Fig. 4 N_{min} accumulation in 0—40cm soil layer during the growing seasons of wheat and rice

2.4 土壤氮素平衡

运用氮输入、输出平衡原理^[17],根据土壤 N_{min} 和稻、麦氮素吸收,分别计算了 0—100 cm 小麦、水稻及整个轮作周期的氮肥利用与平衡情况。由表 4 可看出,小麦季,习惯施肥处理投入的总量、小麦吸收以及土壤残留的 N_{min} 分别为 352.3 和 203.6、73.6

kg/hm²,明显高于其它各施氮处理。水稻季,随着施氮量的减少,表观损失逐渐减少,其中习惯施肥处理氮素表观损失为 118.6 kg/hm²,显著高于其它各施氮处理。这可能与小麦前茬棉花施氮水平为 N 300 ~ 375 kg/hm²,导致小麦起始 N_{min} 相对较高(86.8 kg/hm²)有关。

从整个轮作体系看,氮素表观损失主要发生在水稻季。由于本试验中不施氮(N0)处理的氮素损失设为零,相对来说,氮素的损失如氨挥发,反硝化,氮淋溶或径流等没有包括在氮平衡的计算中,施氮处理的氮素损失可能被低估了^[18-19]。此外,氮肥用

量相同但追肥次数不同的处理,其表观损失表现为: N(158)147/4 > N(158)147/3 > N(158)147/2,说明氮肥用量一定时,适当增加追肥次数,将氮肥后移,可以减少氮素的表观损失和对环境的影响,提高氮肥利用率。

表 4 冬小麦和水稻体系氮素平衡(kg/hm²)

Table 4 Nitrogen balance during the growing seasons of winter wheat and rice

处理 Treatment	氮投入 N input			氮输出 N output		表观损失 Apparent loss
	施氮量 N rate	起始无机氮 Initial N _{min}	净矿化氮 Net N _{mineralization}	吸氮量 N uptake	残留无机氮 Residual N _{min}	
小麦 Wheat						
N0	0	86.8	40.5	80.3 d	47.0 c	
N225/2	225	86.8	40.5	203.6 a	73.6 a	75.1 a
N180/2	180	86.8	40.5	189.4 ab	68.0 ab	49.9 ab
N158/2	157.5	86.8	40.5	169.6 c	59.3 abc	55.9 ab
N135/2	135	86.8	40.5	170.3 c	53.3 bc	38.7 b
N158/3	157.5	86.8	40.5	165.3 c	57.6 abc	62.0 ab
N158/4	157.5	86.8	40.5	182.2 bc	55.9 abc	46.7 ab
水稻 Rice						
N0	0	47.0	74.6	66.2 c	55.4 a	
N210/2	210	73.6	74.6	175.9 a	63.7 a	118.6 a
N168/2	168	68.0	74.6	163.8 ab	61.5 a	85.4 ab
N147/2	147	59.3	74.6	141.9 b	59.5 a	79.5 ab
N126/2	126	53.3	74.6	140.7 b	58.8 a	54.5 b
N147/3	147	57.6	74.6	157.5 ab	60.2 a	61.4 b
N147/4	147	55.9	74.6	165.9 ab	60.1 a	51.5 b
稻-麦体系 Wheat-rice system						
N0	0	86.8	115.1	146.5 d	55.4 a	
N225(210)/2	435	86.8	115.1	379.5 a	63.7 a	193.7 a
N180(168)/2	348	86.8	115.1	353.2 ab	61.5 a	135.3 b
N158(147)/2	304.5	86.8	115.1	311.5 c	59.5 a	135.4 b
N135(126)/2	261	86.8	115.1	311.0 c	58.8 a	93.2 c
N158(147)/3	304.5	86.8	115.1	322.8 bc	60.2 a	123.4 bc
N158(147)/4	304.5	86.8	115.1	348.2 ab	60.1 a	98.2 c

注(Note): 不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters mean significant difference at 5% level.

3 讨论与结论

确定合适的氮肥用量,使土壤氮素供应与作物需求达到同步是研究工作者的目标。Zhao等^[20]认为,过量施用氮肥会导致氮的大量流失。在肥力水平中等的水稻田,杂交水稻以施N 180 kg/hm²产量最高^[21]。本研究中,当地小麦和水稻的习惯施肥量分别为225 kg/hm²和210 kg/hm²,而减氮40%处理(N135/2),小麦子粒产量、氮肥利用率、氮肥农学利用率及氮素偏生产力分别比习惯施肥处理提高了

7.8%、21.5%、142.4%和79.4%;而水稻减氮20%处理(N168/2)的子粒产量,氮肥利用率、氮肥农学利用率以及氮素偏生产力分别比习惯施肥高5.9%、11.5%、43.5%和32.5%。钟旭华等^[22]研究表明,控制氮肥总用量,适当的减少作物生长前期氮肥的供应,增加后期氮肥用量,将氮肥后移,能很有效地实现氮肥高效的目的。本研究结果显示,江汉平原稻-麦轮作体系当年减少20%~30%的氮肥用量,以及当氮肥用量一定时,增加氮肥的追施次数,将氮肥后移,不仅不降低产量,且能减少氮肥用量,

提高氮肥利用效率。

Shukla 等^[23] 研究认为,若小麦和水稻土壤背景供氮量分别达到 35 ~ 45 kg/hm² 和 50 ~ 60 kg/hm² 时则不施用基肥产量不会降低;而本试验小麦和水稻土壤背景供氮量分别达到 80.3 kg/hm² 和 66.2 kg/hm²。因此,若在本研究的基础上进一步减少基肥或不施用基肥,则有可能进一步优化氮肥管理,提高氮肥利用率。

在小麦和水稻的整个生育过程中,各减氮处理的地上部干物重和氮素积累量与习惯施肥差异不显著,且均显著高于不施氮处理。据报道,每 100 kg 稻谷吸氮量为 1.40 ~ 2.97 kg^[24],本试验习惯施肥处理每 1000 kg 稻谷需氮量为 22.3 kg,而减氮 20% 处理(N168/2)每 1000 kg 稻谷需氮量为 19.6 kg,表明形成相同产量的减氮处理比习惯施肥处理所需氮素要少得多,这是其农学利用率高的主要原因。

减施氮肥的主要目的是保证高产条件下,减少氮肥的损失,提高氮肥的利用率。有研究认为,高肥力土壤条件下,施 N 0 ~ 180 kg/hm² 范围内,土壤硝态氮的积累较为缓和,在高于此范围时,土壤硝态氮积累量会大幅度增加,因此推荐适宜的小麦氮肥用量为 N 150 kg/hm²^[25];也有研究认为,在优化施用氮肥的条件下,根际土壤 NO₃⁻-N 与习惯施肥相比,能维持着一个比较低的水平,并且向深层土层迁移的土壤硝态氮大大减少了^[20]。敖和军等^[26] 认为,晚稻产量主要受当季施氮量的影响,而受早稻施氮量的影响较少。因此,在一定程度上降低稻田氮肥用量不会导致土壤背景氮含量的下降。本研究结果表明,习惯施肥处理由于氮素过量、过早施用,增加了 0—40 cm 土壤无机氮素积累和作物地上部的氮素吸收,但是并没有增加子粒产量和氮肥利用率,反而造成较高的土壤无机氮残留和较高的氮素表观损失。而氮素优化处理,由于降低了氮肥用量且通过减少基肥用量增加后期追肥用量使氮素供应和作物需求更趋于同步,降低了 0—40 cm 土层无机氮积累量和 0—100 cm 土层的残留量,从而减少了氮素的表观损失。

综上所述,在长江中下游稻-麦轮作体系氮肥施用过量的地区,第一个轮作周期在习惯施肥的基础上减施 20% ~ 30% 的氮肥用量能保证不减产和减少环境风险,是可行的施肥措施。但是,本试验仅为一年的结果,尚需进行多年多点持续定位研究,才能得出更明确的结论。

参考文献:

- [1] 王宜庭. 氮肥运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 河北农业科学, 2008, 12(4): 56-57.
Wang Y T. Effect of N fertilizer management on rice yield and N elements absorption and utilization [J]. J. Hebei Agric. Sci., 2008, 12(4): 56-57.
- [2] 吴文革,阮新民,施伏芝. 不同施氮水平对中籼稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(5): 1403-1405.
Wu W G, Yuan X M, Shi F Z. Effects of different nitrogen levels on nitrogen uptake, utilization and yield of indica [J]. J. Anhui Agric. Sci., 2007, 35(5): 1403-1405.
- [3] 崔振岭,石立委,许久飞,等. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表观损失的影响研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2071-2075.
Cui Z L, Shi L W, Xu J F *et al.* Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(11): 2071-2075.
- [4] 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 M W, Liu M, Lu M *et al.* Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem [J]. Acta Environ. Sci., 2007, 27(4): 629-636.
- [5] 杨仁朋,王德科,刘长庆,刘春生. 冬小麦夏玉米轮作体系优化施氮对土壤硝态氮的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 369-372.
Yang R P, Wang D K, Liu C Q, Liu C S. The effects of optimize nitrogen fertilizer on the nitrate-N of soil under winter wheat and summer maize rotational cultivation [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2006, 22(12): 369-372.
- [6] 申建波,张福锁. 水稻养分资源管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. 2-5.
Shen J B, Zhang F S. Theory and practice of nutrient resources management in rice [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006. 2-5.
- [7] 宋歌,孙波. 县域尺度稻麦轮作农田土壤无机氮的时空变化[J]. 农业环境科学学报, 2008, 28(2): 636-642.
Song G, Sun B. Spatial and temporal changes of soil inorganic nitrogen in rice-wheat rotation system at county scale—A case study in Yizheng County, Jiangsu Province, China [J]. J. Agro-Environ. Sci., 2008, 28(2): 636-642.
- [8] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X *et al.* On-farm evaluation of winter wheat yield response to residual soil nitrate-N in north China plain [J]. Agron. J., 2008, 100(6): 1527-1534.
- [9] Alam M M, Ladha J K, Foyjunnessa *et al.* Nitrogen management for increased productivity of rice-wheat cropping system in Bangladesh [J]. Field Crops Res., 2006, 96: 374-386.
- [10] 丁艳锋,刘胜环,王绍华,等. 氮素基、蘖肥对水稻氮素吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 739-744.
Ding Y F, Liu S H, Wang S H *et al.* Effects of the amount of basic and tillering nitrogen applied on absorption and utilization of nitrogen in rice [J]. Acta Agron. Sin., 2004, 30(8): 739

- 744.
- [11] 闫德智,王德建,林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的的影响[J]. 土壤学报,2005,42(3): 440-446.
Yan D Z, Wang D J, Lin J H. Effects of fertilizer-N application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu region[J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(3): 440-446.
- [12] Peng S B, Buresh R J, Huang J L *et al.* Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. Field Crops Res., 2006, 96: 37-47.
- [13] 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 W B, Wu L S, Liao H Q. Application and crop recovery of N-fertilizer in high-yielding paddy fields of Taihu region[J]. Acta Pedol. Sin., 1997, 34(1): 67-72.
- [14] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, Chen X P. Nitrogen recommendation for winter wheat using N_{min} test and rapid plant tests in North China plain[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 2003, 34(17-18): 2539-2551.
- [15] 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. 147-159.
Lu Y K. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000. 147-159.
- [16] 裴雪霞,王秀斌,何萍,等. 氮肥后移对土壤氮素供应和冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(1): 9-15.
Pei X X, Wang X B, He P *et al.* Effect of postponing N application on soil N supply, plant N uptake and utilization in winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(1): 9-15.
- [17] 刘学军,巨晓棠,张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(3): 458-462.
Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(3): 458-462.
- [18] Fan M S, Lu S H, Jiang R F *et al.* Nitrogen input, ^{15}N balance and mineral N dynamics in a rice-wheat rotation in Southwest China[J]. Nutr. Cycl. Agroec., 2007, 79: 255-265.
- [19] Timsina J, Pnauellan G M, Saleque M A *et al.* Nutrient uptake and apparent balance for rice-wheat sequence I. Nitrogen[J]. Plant Nutr., 2006, 29(1): 137-155.
- [20] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S *et al.* Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China[J]. Agron. J., 2006, 98: 938-945.
- [21] 陈祥,同延安,亢欢虎,等. 氮肥后移对冬小麦产量、氮肥利用率及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3): 450-455.
Chen X, Tong Y A, Kang H H *et al.* Effect of postponing N application on the yield, apparent N recovery and N absorption of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 450-455.
- [22] 钟旭华,黄农荣,郑海波,等. 不同时期施氮对华南双季杂交稻产量及氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. 杂交水稻,2007,22(4): 62-66
Zhong X H, Huang N R, Zheng H B *et al.* Effect of nitrogen application timing on grain yield, nitrogen uptake and use efficiency of hybrid rice in south China[J]. Hybrid Rice, 2007, 22(4): 62-66
- [23] Shukla A K, Ladha J K, Singh V K *et al.* Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a systems perspective[J]. Agron. J., 2004, 96: 1606-1621
- [24] 彭显龙,刘元英,罗盛国,等. 实地氮肥管理对寒地水稻干物质积累和产量的影响[J]. 中国农业科学,2006,39(11): 2286-2293.
Peng X L, Liu Y Y, Luo S G *et al.* Effects of the site-specific nitrogen management on yield and dry matter accumulation of rice in cold areas of northeastern China[J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(11): 2286-2293.
- [25] 孟建,李雁鸣,党红凯. 施氮量对冬小麦氮素吸收利用、土壤中硝态氮积累和籽粒产量的影响[J]. 河北农业大学学报,2007,30(2): 1-5.
Meng J, Li Y M, Dang H K. Effect of nitrogen application rate on nitrogen absorption, NO_3^- -N accumulation in soil and grain yield of winter wheat[J]. J. Hebei. Agric. Univ., 2007, 30(2): 1-5.
- [26] 敖和军,邹应斌,申建波,等. 早稻施氮对连作晚稻产量和氮肥利用率及土壤有效氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(5): 772-780.
Ao H J, Zou Y B, Shen J B *et al.* Effects of fertilizer-N application for double early rice on the yield, nitrogen use efficiency and soil nitrogen content of double late rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 772-780.