

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.007

龙瑞平, 杨兆春, 穆家伟, 等. 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻生长和氮肥利用效率的影响. 土壤, 2022, 54(4): 708–714.

稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻生长和氮肥利用效率的影响^①

龙瑞平¹, 杨兆春², 穆家伟², 鲁康兴², 李维刚³, 李贵勇¹, 夏琼梅¹, 朱海平¹, 杨久¹, 张君莉¹, 王瑶¹, 杨从党^{1*}

(1 云南省农业科学院粮食作物研究所, 昆明 650205; 2 腾冲市农业技术推广中心, 云南腾冲 679100; 3 蒲川乡农业综合服务中心, 云南腾冲 679100)

摘要: 为了探索稻鱼模式下水稻氮肥高效施用技术, 实现减肥增效的生产目标, 以杂交籼稻隆两优 1206 为试验材料, 在稻鱼共作模式下设置了 4 个水稻施氮处理, 分别为: N0 不施氮肥处理、CK 当地常规施氮处理(纯氮用量为 180 kg/hm², 按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=5:2.5:2.5 施用)、N1 氮肥减量处理(纯氮用量为 120 kg/hm², 按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=5:2.5:2.5 施用)、N2 氮肥减量后移处理(纯氮用量为 120 kg/hm², 按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=0:5:5 施用), 研究了不同处理下水稻生长特性、产量和氮肥利用率的变化规律。结果表明: 与 CK 处理相比, N2 处理显著降低了有效分蘖叶龄期水稻的分蘖数和倒 4 叶期水稻的干物质积累量, 但在有效分蘖叶龄期的分蘖数达到了 CK 处理有效穗数的 88.54%, 已经够苗。施穗肥后 N2 处理增加了水稻的干物质积累量、有效穗数和穗粒数, 同时显著降低了水稻的高峰苗, 提高了成穗率, 两年的水稻产量比 CK 处理分别增加了 6.39% 和 8.57%。同时, N2 处理降低了水稻成熟期土壤水解氮的残留, 水稻氮素收获指数、氮素干物质生产效率、氮素谷物生产效率、氮肥偏生产力 and 氮肥农学利用率分别比 CK 处理提高了 5.63%、12.99 kg/kg、12.91 kg/kg、28.45 kg/kg 和 7.79 kg/kg, 增幅分别达 9.33%、15.56%、29.14%、59.57% 和 120.77%, 差异均达到显著水平。可见, 水稻氮肥减量后移施用, 能够显著降低水稻高峰苗, 提高水稻成穗率、后期干物质含量、有效穗数、穗粒数和氮肥农学利用效率, 从而提高产量。在西南地区烟后稻田养鱼模式下, 茬口土壤全氮和水解氮分别在 1.79 g/kg 和 160.02 mg/kg 以上, 水稻采用总施氮为 120 kg/hm², 按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=0:5:5 比例的施用, 可以实现水稻减氮 33.3%、增产 6.39% 以上的目标。

关键词: 稻鱼共作; 氮肥减量后移; 水稻产量; 氮肥利用效率

中图分类号: S511 文献标志码: A

Effects of Postponing and Decreasing Nitrogen Fertilizer on Rice Growth and Nitrogen Use Efficiency Under Rice-fish Coculture

LONG Ruiping¹, YANG Zhaochun², MU Jiawei², LU Kangxing², LI Weigang³, LI Guiyong¹, XIA Qiongmei¹, ZHU Haiping¹, YANG Jiu¹, ZHANG Junli¹, WANG Yao¹, YANG Congdang^{1*}

(1 Food Crops Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2 Agricultural Technology Extension Center of Tengchong County, Tengchong, Yunnan 679100, China; 3 Comprehensive Agricultural Service Center of Puchuan Township, Tengchong, Yunnan 679100, China)

Abstract: In order to explore nitrogen (N) high-efficiency application technology of rice under rice-fish coculture and achieve the goal of N reduction and efficiency increase, a field plot experiment was conducted under rice-fish coculture with Longliangyou 1206 as planting material, in which four different N application treatments of rice were designed, 1) N0: no N application; 2) CK: local conventional N application, 180 kg/hm², 50% topdressing at 15d after transplanting, 25% and 25% topdressing at 4th and 2nd leaves emerged from the top, respectively; 3) N1: reducing N application, 120 kg/hm², 50% topdressing at 15d after transplanting, 25% and 25% topdressing at 4th and 2nd leaves emerged from the top, respectively; 4) N2: reducing and postponing N application, 120 kg/hm², 50% and 50% topdressing at 4th and 2nd leaves emerged from the top, respectively. Rice growth characteristics, N use efficiency,

①基金项目: 云南省芒市优质米产业科技特派团项目(202104B1090025)、云南省重大科技专项(202102AE090004)和云南省财政部门预算项目重大专项(53000021000000013809)资助。

* 通讯作者(yangcd2005@163.com)

作者简介: 龙瑞平(1986—), 男, 云南泸水人, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物栽培与生理研究。E-mail: lrp725@126.com

yield and yield components were measured. Results show that N2 treatment significantly reduces the number of tillers at the critical leaf age for productive tillers and the dry matter accumulation of rice at the inverse 4th leaf stage, but the number of tillers at the critical leaf age for productive tillers reaches more than 88.54% of the effective panicles of the CK treatment, which is enough for tillers. The application of panicle N fertilizer increases the dry matter accumulation, effective panicles and number of grains per panicle under N2 treatment, and significantly reduces the peak seedling of rice and improves the spike rate. The rice yields in the two years are increased by 6.39% and 8.57% respectively, compared with the CK treatment. At the same time, the N2 treatment reduces the residue of hydrolysable N in soil at rice maturity stage, and N harvest index, N use efficiency for biomass production, N use efficiency for grain production, partial factor productivity of applied N and N agronomy efficiency are 5.63%, 12.99 kg/kg, 12.91 kg/kg, 28.45 kg/kg and 7.79 kg/kg higher than the CK treatment ($P < 0.05$), increased by 9.33%, 15.56%, 29.14%, 59.57% and 120.77%, respectively. In conclusion, the postponing and decreasing N fertilizer in rice could significantly reduce the peak seedling of rice and improve the spike rate, the dry matter accumulation, effective panicles, number of grains per panicle, N agronomy efficiency and yield. Under the rice-fish coculture mode after tobacco in southwest China, the total N and hydrolyzed N in soil are more than 1.79 g/kg and 160.02 mg/kg respectively, and the total N are 120 kg/hm², and the application ratio is 50% topdressing at 4th and 2nd leaves emerged from the top respectively, which could achieve the goal of reducing N fertilization by 33.3% but increasing rice yield by more than 6.39%.

Key words: Rice-fish coculture; Postponing and decreasing of nitrogen; Yield of rice; Nitrogen use efficiency

氮素是水稻生长发育及产量形成的重要养分之一, 为了确保水稻的高产, 在水稻生产中不合理施氮现象普遍存在, 这不仅造成资源浪费, 而且会导致严重的环境污染^[1]。据统计, 我国水稻单季平均施氮量为 180 kg/hm², 比世界平均水平高出约 75%^[2]。合理施用氮肥, 是提高氮肥利用率、减少氮素流失的重要措施。明确作物各生育阶段的氮素养分吸收量是指指导氮肥合理施用的重要依据^[3]。有关水稻各生育时期的需氮规律前人已做了大量研究。吴文革等^[4]研究表明, 杂交中籼稻氮素的吸收速率高峰出现在拔节至孕穗阶段。林晶晶等^[5]采用 ¹⁵N 标记的方法研究发现, 水稻在生育期内所吸收的氮素, 基肥的贡献率约占 4.13% ~ 10.59%(平均仅为 6.92%), 蘖肥的贡献率约为 3.98% ~ 11.75%(平均为 7.58%), 而穗肥贡献率可占 13.32% ~ 37.56%(平均为 26.02%), 其余部分约 45.71% ~ 70.83% 则来自于土壤。石丽红等^[6]研究表明, 穗肥氮能够提高超级杂交稻生殖生长阶段各时期茎叶氮含量, 有利于优化成熟期茎叶和籽粒氮含量, 从而构建超级稻最大库容量, 使其达到最高产量水平。显然氮肥后移有利于水稻提高氮肥的利用效率, 进而提高产量。但前人的研究主要是在常规施氮量条件下, 减少氮肥的基蘖肥比例、增加穗肥比例得出的, 有关减少氮肥总投入量条件下, 将氮肥全部后移至穗肥施用, 对水稻生长和氮肥利用效率影响的报道较为少见。

稻田养鱼是种植业和养殖业的有机结合, 具有生物除虫、除草以及增肥促长等多种生态功能, 可在一

定程度上代替和减少化肥及农药的使用量, 减少环境污染, 生态效益和经济效益均十分明显^[7]。近年来, 农村大量劳动力向城市转移, 引发传统农业生产劳动力短缺, 加上稻米价格低、稻作模式效益低下, 严重制约了传统农业的发展^[8]。为提升传统稻作模式的经济效益, 保障粮食生产安全, 稻田综合种养模式发展迅速^[9]。但是, 由于稻鱼综合种养模式有一定的水体面积和较长的淹水期等, 导致其稻田环境与传统的稻作模式差异较大^[10]。再者, 稻农过度依赖水产收益, 忽略了对水稻生产的管理, 从而导致稻鱼模式中水稻的生产管理较为粗放, 稻谷产量不高^[11-12]。传统耕作认为, 稻鱼共作中水稻施肥应以基肥为主、追肥为辅, 然而基肥用量越大, 其损失越大, 总体氮肥利用效率越低^[5], 使得氮肥用量增加, 环境污染风险提高。因此, 本研究结合水稻的需氮规律, 在稻鱼模式下开展了水稻氮肥减量后移研究, 旨在为稻鱼共作模式下实现水稻氮肥的合理管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2017 年和 2018 年在云南省保山腾冲市蒲川乡进行, 前作为烤烟, 供试水稻品种为当地主栽品种隆两优 1206。2017 年水稻移栽前土壤肥力情况为: 土壤 pH 7.12, 有机质 28.56 g/kg, 全氮 1.79 g/kg, 水解性氮 160.02 mg/kg, 有效磷 71.39 mg/kg, 速效钾 218.66 mg/kg。供试氮肥为普通尿素(含 N ≥ 460 g/kg), 磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ ≥ 160 g/kg), 钾肥为硫酸钾

(含 $K_2O \geq 520 \text{ g/kg}$)。

1.2 试验设计

试验设 4 个施氮处理, 分别是: N0, 不施氮肥; CK, 当地常规施氮(纯氮用量为 180 kg/hm^2 , 按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=5:2.5:2.5 施用); N1, 氮肥减量(纯氮用量为 120 kg/hm^2 , 按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=5:2.5:2.5 施用); N2, 氮肥减量后移(纯氮用量为 120 kg/hm^2 , 按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=0:5:5 施用)。分蘖肥于移栽后 15 d 施用, 促花肥于倒 4 叶抽出时施用, 保花肥于倒 2 叶抽出时施用。同时施 90 kg/hm^2 磷肥 (P_2O_5), 75 kg/hm^2 钾肥 (K_2O), 其中磷肥作基肥于整田时全部施入, 钾肥按照基肥: 促花肥为 5:5 的比例施入。试验采用大田随机区组设计, 栽插方式为手插, 栽插规格为 $30 \text{ cm} \times 13.3 \text{ cm}$, 每个处理设 3 次重复, 小区面积为 30 m^2 ($5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), 小区间用塑料隔水板隔开。水稻于 5 月中旬播种, 6 月下旬移栽, 10 月下旬收获。水稻移栽后 7 d 进行放鱼, 水稻移栽至收获前 7 d 稻田一直保持淹水状态。

1.3 测定项目及方法

在倒 4 叶期(施促花肥前)、齐穗期和成熟期, 每个小区选取 3 个点, 每点调查茎蘖数 20 穴, 根据调查的平均数取代表性植株 3 丛, 分成茎鞘、叶片、穗 3 部分, 于 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘至恒重后称干重, 并依据 NY/T 2017—2011 《植物中氮、磷、钾的测定》^[13] 测定含氮量。同时, 在上述 3 个生育时期, 每个小区取 3 个水稻耕层土壤混合装袋, 风干过筛后, 依据 LY/T1228—2015^[14] 测定土壤水解性氮含量。收获时, 各小区随机取两个点, 每个点调查 20 穴, 计算水稻平均有效穗数; 另取有代表性的植株 3 穴, 分析穗粒数、结实率和千粒重等性状; 再各小区实称重, 用谷物水分测量仪 (PM-8188 New) 测定

各小区的谷物水分含量, 折算成 14.5% 标准含水量, 计作各小区的实际产量。

另外, 试验过程中, 调查有效分蘖临界叶龄期 (CLPT) 水稻的茎蘖数、高峰苗, 并计算成穗率。CLPT: 水稻在此时期以前发生的分蘖可以成穗, 而在此时期以后发生的分蘖不能成穗; 高峰苗: 水稻在整个生育期中最大分蘖数; 成穗率: 水稻最终的有效穗/高峰苗 $\times 100$ 。

本文中各时期土壤和水稻植株的含氮量数据为 2017 年的试验数据。水稻氮素利用效率指标计算如下:

氮素收获指数 (%) = 穗粒氮吸收量/地上部分氮吸收量 $\times 100$

氮素干物质生产效率 (kg/kg) = 成熟期单位面积植株干物质质量/地上部分氮吸收量

氮素稻谷生产效率 (kg/kg) = 实际产量/地上部分氮吸收量

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区实际产量/施氮量

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量

氮肥表观利用率 (%) = (施氮处理的吸氮量 - 不施氮处理的吸氮量)/氮肥用量 $\times 100$

文中数据使用 Excel 2010 进行处理, SPSS 19.0 软件 Duncan 新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻茎蘖数的影响

由表 1 可见, 在 CLPT, 施氮处理水稻的茎蘖数显著高于不施氮处理(N0), 且施氮量增加茎蘖数显著增加。在高峰苗期, 氮肥减量处理(N1)的高峰苗显著低于常规施氮处理(CK), 氮肥减量后移处理(N2)的高峰苗少于 N1 处理, 其中在 2017 年差异达到显著水平。N2 处理的有效穗数和成穗率显著高于 N1 处理,

表 1 稻鱼共作下不同氮肥处理水稻茎蘖数与成穗率

Table 1 Rice tiller numbers and spike rates under different nitrogen treatments under rice-fish coculture

年份	处理	CLPT 茎蘖数($10^4/\text{hm}^2$)	高峰苗($10^4/\text{hm}^2$)	有效穗数($10^4/\text{hm}^2$)	成穗率(%)
2017	N0	326.12 c	351.96 c	245.49 d	69.75 b
	CK	456.40 a	501.14 a	312.31 a	62.33 d
	N1	385.10 b	385.10 b	260.20 c	67.57 c
	N2	329.51 c	359.89 c	280.57 b	77.96 a
2018	N0	312.30 c	390.15 c	278.89 c	71.49 c
	CK	437.33 a	471.75 a	339.85 a	72.07 c
	N1	364.65 b	412.14 b	318.16 b	77.21 b
	N2	300.90 c	401.63 bc	337.34 a	84.00 a

注: CLPT: 有效分蘖临界叶龄期; 同列数字后不同小写字母表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同。

与 CK 处理相比, N2 处理 2017 年的有效穗数略低于 CK 处理, 2018 年达到 CK 处理水平, 而两年的成穗率分别比 CK 处理增加了 15.63% 和 11.93%, 差异达显著水平。总体来看, 在 CLPT 虽然 N2 处理水稻茎蘖数显著低于 N1 和 CK 处理, 但 2017 年的分蘖数已经超过 CK 处理最终的有效穗数, 2018 年的分蘖数也达到 CK 处理有效穗数的 88.54%, 说明 N2 处理在 CLPT 已经基本够苗, 通过穗肥的施用, 促进部分分蘖成穗, 提高 N2 处理的成穗率。

2.2 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻干物质积累的影响

由表 2 可见, 倒 4 叶期, 施氮处理水稻的干物质积累量显著高于 N0 处理, N1 处理的干物质积累量显著低于 CK。齐穗期, N0 处理水稻的干物质积累量低于施氮肥处理。在相同氮肥施用量条件下, N2 处理各器官的干物质积累量高于 N1 处理, 其中 2018

年的穗干物质积累量和总干物质积累量差异达显著水平; 与 CK 处理相比, N2 处理叶片干物质积累量显著低于 CK 处理, 穗干物质积累量显著高于 CK 处理, 茎鞘和总干物质积累量与 CK 处理差异不显著。成熟期, 相同氮肥施用量下, N2 处理两年穗干物质积累量均大于 N1 处理, 其余各器官的干物质积累量及总干物质积累量为 N1 处理大于 N2 处理, 其中叶片和 2017 年茎鞘的干物质积累量差异达显著水平; 两年中 N2 处理穗的干物质积累量均大于 CK 处理, 叶片的干物质积累量均小于 CK 处理, 茎鞘的干物质积累量则表现出 2017 年差异不显著, 2018 年显著大于 CK 处理; 试验中 2018 年茎鞘和叶片干物质积累量明显高于 2017 年, 这主要是由于 2017 年秧苗素质较好, 采用单苗移栽, 而 2018 年秧苗素质较差, 移栽时每穴移栽了 2~3 苗, 导致茎秆和叶片的干物质积累量较大。

表 2 稻鱼共作下不同氮肥处理水稻干物质积累量(t/hm²)
Table 2 Rice dry matter accumulation under different nitrogen treatments under rice-fish coculture

年份	处理	倒 4 叶期			齐穗期				成熟期			
		茎鞘	叶	合计	茎鞘	叶	穗	合计	茎鞘	叶	穗	合计
2017	N0	1.48 c	1.13 c	2.61 c	8.95 a	2.14 c	1.58 b	12.67 b	6.12 a	2.01 c	6.90 b	15.03 b
	CK	1.78 a	1.56 a	3.34 a	9.59 a	3.31 a	1.57 b	14.48 a	5.66 bc	2.76 a	7.91 a	16.34 a
	N1	1.64 b	1.29 b	2.93 b	9.34 a	2.72 b	1.84 a	13.90 a	5.96 ab	2.37 b	7.67 a	16.00 a
	N2	1.49 c	1.11 c	2.60 c	9.38 a	2.74 b	1.85 a	13.97 a	5.46 c	2.13 c	8.04 a	15.63 a
2018	N0	1.19 c	0.94 b	2.12 bc	8.63 b	2.58 c	3.49 a	14.70 c	8.06 b	2.17 c	6.25 b	16.48 c
	CK	1.48 a	1.30 a	2.78 a	9.69 a	3.40 a	2.88 b	15.97 ab	7.72 c	3.01 b	7.54 a	18.27 b
	N1	1.28 b	1.00 b	2.28 b	9.61 a	2.84 b	2.87 b	15.32 bc	8.65 a	3.45 a	7.58 a	19.78 a
	N2	1.20 c	0.88 b	2.08 c	9.70 a	2.85 b	3.63 a	16.18 a	8.58 a	2.99 b	7.69 a	19.16 a

2.3 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻产量与产量构成因素的影响

由表 3 可见, 施氮肥后的各处理水稻产量显著高于 N0 处理, 与 CK 处理相比, N1 处理两年分别增产

1.05% 和 3.19%, 其中 2017 年差异不显著, 2018 年差异显著。在相同氮肥用量条件下, N2 处理比 N1 处理两年分别增产 5.29% 和 5.22%, 差异均达显著水平。与 CK 处理相比, N2 处理两年分别增产 6.40%

表 3 稻鱼共作下不同氮肥处理水稻产量与产量构成因素
Table 3 Rice yields and yield components under different nitrogen treatments under rice-fish coculture

年份	处理	有效穗数 (10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数	总颖花量 (10 ⁴ /hm ²)	结实率 (%)	千粒重 (g)	理论产量 (t/hm ²)	实际产量 (t/hm ²)	增产率 (%)
2017	N0	245.49 d	159.67 c	39197.39 d	67.27 a	27.73 a	7.31 b	7.43 c	-13.60
	CK	312.31 a	177.62 b	55472.50 a	59.35 b	26.87 a	8.98 a	8.60 b	-
	N1	260.20 c	190.34 a	49526.47 c	68.41 a	27.69 a	8.97 a	8.69 b	1.05
	N2	280.57 b	186.56 a	52343.14 b	62.62 b	27.71 a	9.08 a	9.15 a	6.40
2018	N0	278.89 c	149.54 c	41705.21 b	64.96 a	26.20 a	7.10 b	7.33 d	-10.17
	CK	339.85 a	159.91 b	54345.41 a	61.75 a	25.50 a	8.56 a	8.16 c	-
	N1	318.16 b	168.64 a	53654.50 a	64.00 a	26.00 a	8.46 a	8.42 b	3.19
	N2	337.34 a	160.64 b	54190.30 a	61.98 a	25.67 a	8.62 a	8.86 a	8.58

和 8.58%，差异达显著水平。从产量构成因素看，相同氮肥用量条件下，N2 处理的有效穗数和总颖花量均高于 N1 处理，其中有效穗数差异达显著水平。与 CK 处理相比，N2 处理水稻的有效穗数有所降低，其中 2017 年差异达显著水平，2018 年差异不显著，但提高了水稻的穗粒数和结实率。各处理两年的千粒重差异不显著。

2.4 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻氮素含量的影响

由表 4 可见，倒 4 叶期，施氮处理水稻茎鞘和叶片的含氮率显著高于 N0 处理。齐穗期，相同施氮量下，N2 处理的含氮率要高于 N1 处理，与 CK 处理差异不显著；N1 处理茎鞘的含氮率显著低于 CK 处理，叶、穗的含氮率与 CK 处理差异不显著。在成熟期，相同施氮量下，N2 处理的茎鞘、叶含氮率高于 N1 处理，穗的含氮率与 N1 处理相当。与 CK 处理相比，N1 和 N2 处理水稻茎鞘、叶、穗的含氮率均低于 CK

处理，其中叶片的含氮率差异达显著水平，茎鞘和穗的含氮率差异不显著。

2.5 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻氮素利用效率的影响

由表 5 可见，在氮肥施用量相同的条件下，N2 处理的氮素收获指数、氮素干物质生产效率、氮素谷物生产效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥表观利用率均高于 N1 处理，其中氮肥偏生产力和氮肥农学利用率的差异达显著水平。与 CK 处理相比，N1、N2 处理的氮素收获指数、氮素干物质生产效率、氮素谷物生产效率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率均高于 CK 处理，差异均达显著水平，氮肥表观利用率与 CK 处理差异不显著。N2 处理水稻的氮素收获指数、氮素干物质生产效率、氮素谷物生产效率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率分别比 CK 处理提高了 5.63%、12.99 kg/kg、12.91 kg/kg、28.45 kg/kg 和 7.79 kg/kg，增幅分别为 9.33%、15.56%、29.14%、59.57%和 120.77%。

表 4 稻鱼共作下不同氮肥处理水稻各生育时期含氮率(%，2017 年数据)
Table 4 Rice nitrogen contents under different nitrogen treatments under rice-fish coculture

处理	倒 4 叶期		齐穗期			成熟期		
	茎鞘	叶	茎鞘	叶	穗	茎鞘	叶	穗
N0	1.53 b	3.61 b	0.54 c	2.04 b	1.14 a	0.38 b	0.71 c	1.38 a
CK	1.96 a	4.13 a	0.94 a	2.83 a	1.20 a	0.61 a	1.52 a	1.48 a
N1	1.86 a	4.01 a	0.75 b	2.60 a	1.21 a	0.55 a	1.24 b	1.40 a
N2	1.42 b	3.46 b	0.84 ab	2.75 a	1.27 a	0.57 a	1.33 b	1.40 a

表 5 稻鱼共作下不同氮肥处理水稻氮肥利用效率(2017 年数据)
Table 5 Rice nitrogen use efficiencies under different nitrogen treatments under rice-fish coculture

处理	氮素收获指数 (%)	氮素干物质生产效率 (kg/kg)	氮素谷物生产效率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥农学利用率 (kg/kg)	氮肥表观利用率 (%)
N0	69.28 a	126.55 a	63.26 a	—	—	—
CK	60.34 c	83.46 c	44.31 c	47.76 c	6.45 c	33.76 a
N1	63.58 bc	94.40 b	52.13 b	72.45 b	10.48 b	30.59 a
N2	65.97 ab	96.45 b	57.22 b	76.21 a	14.24 a	32.07 a

2.6 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻季土壤水解氮和水稻氮素积累的影响

由图 1 可见，N1、N2 和 CK 处理的土壤水解氮含量的变化规律相同，均表现为在倒 4 叶期和成熟期高、齐穗期低，N0 处理则表现出相反规律。3 个时期各施肥处理的土壤水解氮含量均表现为 CK>N1>N2，N0 处理在倒 4 叶期和成熟期土壤水解氮含量与 N2 处理相近，但在齐穗期明显高于其他处理。齐穗期和成熟期植株氮素积累量明显高于倒 4 叶期，倒 4

叶期和成熟期各处理植株氮素积累量为 CK>N1>N2>N0，齐穗期为 CK>N2>N1>N0。这是由于在倒 4 叶期 N0 和 N1 处理没施分蘖氮肥，导致土壤水解氮含量和植株氮素积累量相对较低；齐穗期由于施氮处理水稻植株对氮素的吸收量大于 N0 处理，使得土壤水解氮表现出降低趋势，而 N0 处理表现出增加趋势；成熟期由于水稻对氮素吸收能力的降低和施肥处理氮素的残留，使得施肥处理土壤水解氮含量回升，而 N0 处理没有氮肥的补充，土壤水解氮含量表现出下降。

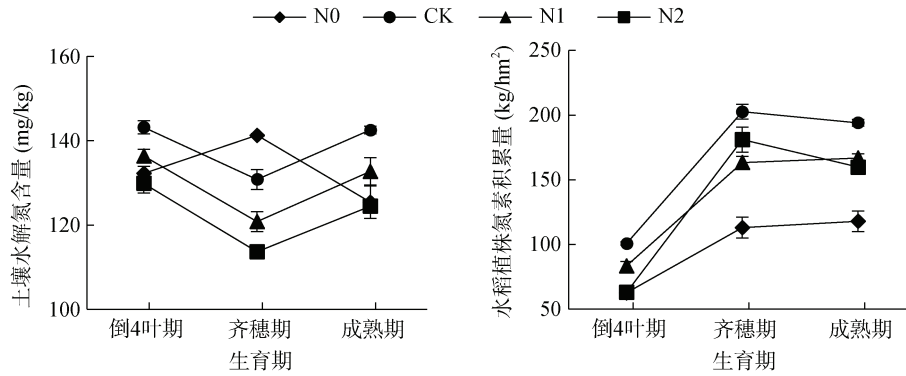


图 1 稻鱼共作下不同氮肥处理土壤和水稻植株氮素变化规律(2017 年数据)

Fig. 1 Nitrogen changes in soil and rice under different nitrogen treatments under rice-fish coculture

3 讨论

3.1 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻生长和产量的影响

基肥氮主要是促进水稻移栽后快速返青和分蘖^[15-17],而水稻分蘖的发生与叶片的含氮率有密切关系, Ishyuka 和 Tanaka^[18]的研究认为,叶片含氮率在 3.5% 时分蘖旺盛, 2.5% 时停止, 1.5% 时死亡。丁艳锋^[19]的研究结果表明,为促进水稻分蘖,有效分蘖叶龄期内叶片含氮率应在 3.3%~3.6%,含氮率在 2.5% 时分蘖停止。本研究中,前期不施基肥氮处理,在倒 4 叶期水稻叶片的含氮率在 3.46% 以上(表 4),表明在不施基肥氮条件下,水稻在土壤中吸收的氮能够满足其分蘖的发生。这主要是由于稻田本身肥力较高,同时在稻鱼模式下由于饵料的投入、鱼粪的腐解等作用改善了土壤的肥力状况^[20-22],所以前期不施基肥氮,可以降低高峰苗,增加有效穗数,提高成穗率和穗粒数,从而获得高产(表 1、表 3)。而施穗肥后 N2 处理的有效穗数高于 N1 处理,但穗粒数、结实率有所降低,这是由于 N2 处理施穗肥后保住了水稻的动摇了分蘖,从而增加了小的有效穗所造成的。研究表明,水稻籽粒产量是由抽穗前贮藏的碳水化合物和抽穗后的干物质积累量共同组成的,其中抽穗前的贮藏物只占籽粒产量的 20%~40%,绝大部分籽粒产量都是来自于抽穗后的干物质积累^[23]。本研究中,虽然 N2 处理前期干物质积累量较低,但施穗肥后增加了水稻的干物质积累量,在抽穗后干物质积累量与 CK 处理差异不显著(表 2),表明稻田养鱼中不施基肥氮只施穗肥能够保障抽穗至成熟期的干物质积累量,提高水稻的产量,这进一步补充和验证了笔者提出的“在茬口肥力条件较好的条件下,水稻不施基肥氮只施穗肥,能够实现水稻减氮不减产”的结论^[24]。

3.2 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻氮肥利用效率的影响

研究表明,影响氮肥利用效率的主要因素有施氮量、施氮方法和土壤肥力等^[25]。王道中等^[26]研究指出,在常规栽培中减量施氮,中高肥力土壤氮素回收率提高 9.99%~16.52%。本研究中, N2 处理的水稻氮素收获指数、氮素干物质生产效率、氮素谷物生产效率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率显著提高,这与前人常规栽培的研究结果相似,而氮肥的表观利用率与 CK 处理相比略有降低,但差异不显著,这主要是由于 N2 处理前期不施氮肥,降低了水稻干物质积累量和含氮率所致。稻田养鱼模式下,由于鱼的活动搅动水体与土壤,增加了水体的溶解氧浓度,改善了土壤氧化还原状况,使得稻田氮的矿化作用加强,有助于提高稻田的土壤肥力,促进水稻养分吸收^[27-29]。徐富贤等^[30]研究结果表明,只养鱼处理土壤全氮和水解氮含量分别较试验前略有下降,而既养鱼又施氮处理土壤全氮和水解氮含量分别较试验前略有提高,但差异均不显著。本研究结果显示,稻田养鱼不施氮肥处理土壤水解氮在齐穗期含量高于其他处理,这表明稻田养鱼会增加土壤水解氮含量,提高稻田肥力,这与前人的研究结果^[20-22]相似。但在倒 4 叶期和成熟期土壤水解氮含量明显低于施分蘖肥处理,这是由于在倒 4 叶期不施分蘖肥土壤水解氮含量和植株氮素积累量相对较低;齐穗期由于施氮处理水稻植株长势好于 N0 处理,对氮素的吸收量大于 N0 处理,使得土壤水解氮含量小于 N0 处理;成熟期由于水稻对氮素吸收量的减少和施穗肥补充了氮素,使得施肥处理土壤水解氮含量比齐穗期有所升高,而 N0 处理由于没有氮肥的补充,加上水稻植株的吸收,使得土壤水解氮含量下降。值得注意的是,成熟期 N2 处理和 N0 处理的土壤水解氮含量相近并明显低于 CK 处理,

说明 N2 处理对水解氮的吸收利用率要高于 CK 处理, 这在水稻氮肥农学利用率上也得到验证。

此外, 本研究结果显示, 由于高地力土壤中, 土壤供氮能力较强, 能满足水稻前期的生长, 所以可以不施基肥。但土壤肥力的高低是通过土壤的化学肥力、物理肥力和微生物肥力来综合判定的, 是一个相对的概念, 不同研究者对其的划定标准所不同^[31-32], 本研究土壤的化学肥力中全氮和水解氮的含量分别为 1.79 g/kg 和 160.02 mg/kg, 符合全国第二次土壤普查推荐的肥力分级标准中高地力土壤全氮含量 1.5 g/kg 以上和水解氮含量大于 150 mg/kg 的标准。但适用该施肥技术土壤的物理肥力和微生物肥力标准, 以及长期采用此施肥方法是否会影响茬口肥力等, 还有待进一步的研究。

4 结论

在西南地区烟后稻田养鱼模式下, 茬口土壤全氮和水解氮含量分别在 1.79 g/kg 和 160.02 mg/kg 以上, 水稻采用 120 kg/hm² 纯氮按分蘖肥: 促花肥: 保花肥=0: 5: 5 的施肥技术, 有利于降低水稻的高峰苗, 增加水稻抽穗后的干物质积累量、有效穗数、成穗率和穗粒数。与常规施氮相比, 在减氮 33.3% 的情况下, 氮肥后移处理水稻产量两年分别提高了 6.39% 和 8.57%, 且土壤水解氮残留明显降低, 水稻氮素收获指数、氮素干物质生产效率、氮素谷物生产效率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率显著提高, 实现了稻鱼共作模式下水稻减氮增产的效果。

参考文献:

- [1] 曹志洪. 施肥与水体环境质量——论施肥对环境的影响(2)[J]. 土壤, 2003, 35(5): 353-363.
- [2] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [3] 隗英华, 宫亮, 孙文涛, 等. 氮肥运筹对水稻养分累积特性的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(24): 71-75.
- [4] 吴文革, 张洪程, 陈焯, 等. 超级中籼杂交水稻氮素积累利用特性与物质生产[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1060-1068.
- [5] 林晶晶, 李刚华, 薛利红, 等. ¹⁵N 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1424-1434.
- [6] 石丽红, 纪雄辉, 李永华, 等. 施氮量和时期运筹对超级杂交稻植株氮含量与籽粒产量的影响研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 534-541.
- [7] 蒋艳萍, 章家恩, 朱可峰. 稻田养鱼的生态效应研究进展[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2007, 20(4): 71-75.
- [8] 肖国樱, 肖友伦, 李锦江, 等. 高效是当前水稻育种的主导目标[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 287-292.
- [9] 孙金凤, 王仁杰, 熊英, 等. 1949 年后稻渔综合种养的发展历程、现状与趋势分析[J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(3): 48-55.
- [10] 隆斌庆, 陈灿, 黄璜, 等. 稻田生态种养的发展现状与前景分析[J]. 作物研究, 2017, 31(6): 607-612.
- [11] 怀燕, 王岳钧, 陈叶平, 等. 稻田综合种养模式的化肥减量效应分析[J]. 中国稻米, 2018, 24(5): 30-34.
- [12] 陈文辉, 彭亮, 刘莹莹, 等. 江汉平原稻虾综合种养模式经济效益和生态效益分析[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(14): 160-166.
- [13] 中华人民共和国农业部. 植物中氮、磷、钾的测定: NY/T2017—2011[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [14] 中华人民共和国林业部. 中华人民共和国林业行业标准: 森林土壤氮的测定: LY/T1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋. 水稻精确定量栽培理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [16] 余翔, 王强盛, 王夏雯, 等. 机插稻鸭共作系统氮素基肥用量对水稻群体质量与氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 529-536.
- [17] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论: 南方本[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [18] Ishizuka Y, Tanaka A. Studies on nutritio-physiology of rice plant[M]. Japan: Yokendo Press, 1963: 307.
- [19] 丁艳锋. 氮素营养调控水稻群体质量指标的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 1997: 64-65.
- [20] 周晓丰, 段红霞, 夏桂龙, 等. 稻鱼模式下减施氮肥对水稻生长和产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2020(5): 40-42.
- [21] 周兴兵, 刘茂, 张力, 等. 稻田养鱼模式下减量施氮对杂交中稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 80-83.
- [22] 王华, 黄璜. 湿地稻田养鱼、鸭复合生态系统生态经济效益分析[J]. 中国农学通报, 2002, 18(1): 71-75.
- [23] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
- [24] 龙瑞平, 张朝钟, 戈芹英, 等. 不同轮作模式下基于机插粳稻稳产和氮肥高效的氮肥运筹方式[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 646-656.
- [25] 刘立军, 徐伟, 桑大志, 等. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 987-994.
- [26] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 161-165.
- [27] Vromant N, Chau N T H. Overall effect of rice biomass and fish on the aquatic ecology of experimental rice plots[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 111(1/2/3/4): 153-165.
- [28] 曹志强, 梁知洁, 赵艺欣, 等. 北方稻田养鱼的共生生态效应研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 405-408.
- [29] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统中稻田田面水的 N 素动态变化及淋溶损失[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 2125-2132.
- [30] 徐富贤, 周兴兵, 张林, 等. 稻田养鱼与氮密互作对土壤肥力、水稻产量及其养分累积的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(15): 1-7.
- [31] 彭卫福, 吕伟生, 黄山, 等. 土壤肥力对红壤性水稻土壤水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(18): 3614-3624.
- [32] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(1): 56-64.