中国水稻科学(*Chin J Rice Sci*), 2016, 30(4): 389－396
http://www.ricesci.cn
DOI: 10.16819/j.1001－7216.2016.5163

缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响

侯红乾[1,2,3] **黄永兰**[4] **冀建华**[1,2,3] **刘益仁**[1,2,3] **刘秀梅**[1,2,3,*] **胡兆平**[5,6]
([1] **江西省农业科学院 土壤肥料与资源环境研究所,南昌** 330200; [2]**国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌** 330200; [3]**农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室, 南昌** 330200; [4]**江西省超级水稻研究发展中心,南昌** 330200; [5] **养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室,山东 临沭** 276700; [6]**金正大生态工程集团股份有限公司,山东 临沭** 276700; * **通讯联系人**, E-mail: lxm3392@163.com)

Effects of Controlled-Release Fertilizer Application on Double Cropping Rice Yield and Nitrogen Use Efficiency

HOU Hong-qian[1,2,3], HUANG Yong-lan[4], JI Jian-hua[1,2,3], LIU Yi-ren[1,2,3], LIU Xiu-mei[1,2,3,*], HU Zhao-ping[5,6]
([1] *Soil & Fertilizer and Resources & Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China*; [2] *National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China*; [3] *Key Laboratory of Crop Eco-physiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, P. R. China, Nanchang 330200, China*; [4] *Jiangxi Super-rice Research and Development Center, Nanchang 330200, China*; [5] *State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Linshu 276700, China*; [6] *Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linshu 276700, China*. * *Corresponding author*, E-mail: lxm*3392@163*.com)

HOU Hongqian, HUANG Yonglan, JI Jianhua, et al. Effects of slow/controlled-release fertilizer application on double cropping rice yield and nitrogen use efficiency. Chin J Rice Sci, 2016, 30(4): 389-396.
Abstract: In order to study the effects of controlled-release fertilizer application on double cropping rice, a successive 2-year location-fixed field experiment was carried out in double cropping region in red soil paddy field derived from the Quaternary red clay in Nanchang, Jiangxi Province of southern China. The field experiment covered 4 treatments including no fertilizer (CK), recommended application split by three times (OF), controlled release fertilizer all used as basal fertilizer (100CRF) and 80% controlled release fertilizer all used as basal fertilizer (80CRF), and each treatment had three replicates. During the two years plantation, rice yield, rice nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of each treatment were measured and the conclusion could be drawn that the average yield for the two years followed the order of 80CRF>100CRF>OF>CF>CK, and the treatment 80CRF, 100CRF, and OF increased rice yield by 25.32%, 23.93% and 23.86% respectively, compared with CK ($P<0.05$). However there was no significant difference between different nitrogen fertilizer treatments. As for the average nitrogen uptake in two years, 100CRF and 80CRF treatment were significantly higher than OF treatment in early rice and 100CRF treatment was higher than OF treatment in late rice ($P<0.05$), but 80CRF and OF were no significant difference in late rice. The nitrogen uptake manifested same trend between straw and grain. The nitrogen recovery efficiency of 100CRF, 80CRF treatment were significantly higher than the OF treatment ($P<0.05$). Nitrogen agronomic efficiency, partial factor productivity of applied N at the highest of 80 CRF, is significantly higher than 100CRF and OF treatments ($P<0.05$). Nitrogen physiological efficiency and Soil N dependent rate at the highest of 80 CRF in late rice in 2012 and OF in double-rice in 2013 respectively, were significantly higher than 100CRF treatment ($P<0.05$), but there was no significant difference between 80CRF and OF treatment. Therefore, one-time use of controlled release fertilizer regardless of the quantity and reduce the dosage of 20%, it could reach the recommended fertilization production levels, and could significantly increase the nitrogen content and uptake in rice. Full amount of controlled release fertilizer utilization rate of nitrogen fertilizer could only improve nitrogen uptake both early rice and late rice, but caused N luxury absorption and nitrogen physiological efficiency lower; Reduced by 20% controlled release fertilizer, the nitrogen recovery efficiency, the agronomic efficiency, and the partial factor productivity for applied N were significantly improved in early and late rice. There was no difference in nitrogen physiological efficiency between 80 CRF treatment and optimized fertilization. On the basis of stable yield, 80CRF treatment has saved the cost and improved the effect of the nitrogen utilization.
Key words: slow/controlled-release fertilizer; yield; nitrogen uptake; nitrogen use efficiency; rice

---

收稿日期: 2015-12-29; **修改稿收到日期**: 2016-03-12。
基金项目: **国家自然科学基金资助项目**(31101603); **国家科技支撑计划资助项目**(2011BAD41B01); **江西省自然科学基金资助项目**; **学科带头人项目**(20122BAB204003,2010GZN0096,20133BCB22013); **农业部作物营养与施肥重点实验室开放基金资助项目**。

侯红乾, 黄永兰, 冀建华, 等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响. 中国水稻科学, 2016, 30(4): 389-396.

摘 要: 为明确缓/控释肥(slow/controlled-release fertilizer, CRF)在水稻上的应用效果,连续 2 年在南方双季稻区第四纪红壤发育的水稻土上进行双季稻大田试验,比较了不施氮肥(CK)、推荐分 3 次施肥(OF)、一次性基施缓/控释肥(100CRF)和一次性基施 80%缓/控释肥(80CRF)条件下,双季稻的产量形成、氮素吸收和利用的差异。结果表明, 2 年 4 季产量平均表现为 80CRF>100CRF>OF>CK,其中 80CRF、100CRF 和 OF 分别比 CK 增产 25.32%、23.93%和 22.54%($P<0.05$),而各施氮处理间无显著差异;2 年籽粒平均吸氮量中,早稻 100CRF、80CRF 处理均显著高于 OF 处理($P<0.05$),晚稻 100CRF 处理显著高于 OF 处理($P<0.05$),但 80CRF 处理与 OF 无显著差异,秸秆吸氮量与籽粒一致。100CRF、80CRF 处理下氮肥吸收利用率均显著高于 OF 处理($P<0.05$);氮肥农学利用率、氮肥偏生产力以 80CRF 最高,显著高于 100CRF 和 OF 处理($P<0.05$);2012 年晚季 80CRF 的氮肥生理利用率、土壤氮素依存率最高,显著高于 100CRF 处理($P<0.05$),2013 年早晚稻均以 OF 处理最高,显著高于 100CRF 处理($P<0.05$);2 年定位试验中的 80CRF 处理与 OF 处理氮素生理利用率无显著差异。因此,一次性施用缓/控释肥产量水平与推荐分次施肥水平相当,但施用缓/控释肥能显著提高水稻氮素吸收量和含量。全量施缓/控释肥虽能提高早晚稻氮肥吸收利用率,但氮素生理利用率降低;在推荐施肥的基础上减量 20%施用缓/控释肥的早晚稻氮肥吸收利用率、农艺利用率、偏生产力均显著提高,氮肥生理利用率与推荐施肥无差异;即在稳产的基础上,提高了氮素的利用效果,是值得推荐的施肥方式。

关键词: 缓/控释肥; 产量; 吸氮量; 氮肥利用率; 水稻

中图分类号: S143.1; S511.062 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-7216(2016)04-0389-08

目前,中国稻田氮肥吸收利用率为 30%~35%[1],氮肥损失特别严重,随着集约化农区的发展,大量氮肥的施用,不仅造成资源损失,而且引起环境污染,如地表富营养化、硝态氮淋溶、温室气体排放量增加等一系列生态问题[2-5],如何提高氮素利用率、减少环境污染并促进产量增长引起了各方面的重视。控释肥料的应用,能够根据作物生长发育的需求控制养分的释放速度,相比于传统肥料肥效期长,养分释放速率与作物的需肥规律基本吻合,一般认为,缓/控释肥比速效氮肥利用率提高 10%~30%,比传统速效肥料可减少用量 10%~40%,且能实现全生育期一次性施肥[6-9],是提高水稻氮素利用效率的主要措施之一[10]。国际上通用的氮肥利用率定量指标包括氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力,这些指标从不同侧面描述了作物对氮素或氮肥的利用率[1, 11]。陈贤友等[12]指出,等氮量下一次性基施硫磺加树脂包膜尿素,水稻增产 17.75%,氮肥利用率提高 27.64%,氮肥农学效率也显著增加。黄旭等[13]发现,施用缓/控释肥料可以改善水稻后期的生育性状,增加产量,提高养分利用率。陈建生等[14]研究表明,一次性基施水稻控释肥与等养分量的专用肥比较,获得 8.20%的增产效果,水稻氮肥利用率提高 17.10%,减少肥料用量 22.12%。前人关于控释肥料在水稻上的增产效应和氮素利用率方面虽有大量研究,但主要以一年的试验结果为主,涉及的水稻连续生长季较少,将氮素利用率各种指标结合起来综合评价控释肥减施增效作用相对较少。为较准确地反映氮肥在水稻体内吸收利用状况,本研究以典型红壤为研究对象,以推荐分次施肥为对照,连续 2 年定位研究施用缓/控释配方肥对双季稻产量、氮素吸收和利用的影响,以期为控释肥在南方双季稻区的减施增效分析和评价提供理论依据,为缓控释肥在稻田上的推广应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

于 2012-2013 年连续 2 年在江西省南昌县冈上镇进行定位试验(N28°25′; E115°51′)。该地土壤类型为第四纪红壤发育的潴育性水稻土,属中亚热带,年平均气温 17.5 ℃,≥10 ℃积温 5 400 ℃,年降雨量 1 600 mm,年蒸发量 1 800 mm,无霜期约 280 d。温、光、热资源丰富,适宜大多数农作物生长。水稻移栽前土壤有机质为 32.52 g/kg,全 N 为 1.89 g/kg,速效 N 为 135.6 mg/kg,速效 P 为 35.8 mg/kg,速效 K 为 94.14 mg/kg,pH 值为 6.20。

1.2 供试品种

早稻品种为佳优 98,于 4 月中旬抛秧,密度为 43.4 万兜/hm^2,7 月上旬收获,全生育期 110 d 左右。晚稻品种为 101,于 7 月中旬移栽,密度为 18 万兜/hm^2,10 月中下旬收获,全生育期 120 d 左右。

1.3 试验设计

早晚稻大田试验设 4 个处理,分别为:CK,不施氮肥;OF,推荐分 3 次施肥;100CRF,一次性基施缓/控释肥;80CRF,一次性基施 80%缓/控释肥。其中,处理 2、3 等养分设计,小区面积 30 m^2,随机区组排列,重复 3 次,共 12 个小区。

早稻施氮肥(折合纯 N)157.5 kg/hm^2、磷肥(折

表 1 本研究各处理施肥量和施肥方式

Table 1. Amounts and methods of fertilizer application in different treatments.

处理 Treatment	施肥量 Fertilizing amount /(kg·hm^{-2})			氮、钾肥施用比例($m_{基肥}$：$m_{分蘖肥}$：$m_{穗肥}$) N and K fertilizer application proportion (Basic：For tillering:For panicle initiation)
	N	P_2O_5*	K_2O	
早稻 Early rice				
CK	0	75	135	50：25：25
OF	157.5	75	135	50：25：25
100CRF	157.5	75	135	100：0：0
80CRF	126	60	108	100：0：0
晚稻 Late rice				
CK	0	54	171	50：25：25
OF	180	54	171	50：25：25
100CRF	180	54	171	100：0：0
80CRF	144	43.2	136.8	100：0：0

CK、OF、100CRF 和 80CRF 分别表示不施氮肥、推荐施肥、施用控释肥和 80%用量控释肥处理。下同。*磷肥全部基施。

CK, OF, 100CRF and 80CRF indicate different fertilization treatments of zero nitrogen application, optimized fertilization, controlled release fertilization and 80 percent controlled release fertilization. The same as below. *Phosphate fertilizer is applied as the basal fertilizer.

合 P_2O_5)75 kg/hm^2、钾肥(折合 K_2O)135 kg/hm^2。晚稻施氮肥(折合纯 N)180 kg/hm^2、磷肥(折合 P_2O_5)54 kg/hm^2、钾肥(折合 K_2O)171 kg/hm^2。推荐施肥，氮肥用尿素(N，46.30%)，磷肥用钙镁磷肥(P_2O_5，12%)，钾肥用氯化钾(K_2O，60%)。早晚稻施肥方法，氮、钾肥 $m_{基肥}$：$m_{分蘖肥}$：$m_{穗肥}$ 为 2：1：1，磷肥全部基施；试验用缓/控释肥由金正大生态工程集团股份有限公司生产，包衣材料为高分子树脂聚合物，早稻缓/控释肥(N：P_2O_5：K_2O 含量为 21：10：14)，晚稻缓/控释肥(N：P_2O_5：K_2O 配方为 20：6：19)均一次性施用。其中，氮素由包膜尿素提供，磷、钾分别由磷酸一铵、氯化钾提供，控释尿素养分释放期 80 d，缓/控释肥用量以氮肥为标准，养分不足部分用氯化钾补充，详细施肥量及施肥方法见表 1。

在早晚稻生长期间，田面灌溉水保持在 5～8 cm，水稻收获 10 d 排水，冬季休闲，不灌溉和栽培作物。小区间用田埂分隔开，单独设立排灌水沟，各小区均采用最优的水分调控技术进行生产管理，除肥料处理外的其他田间管理措施与当地农民的大田管理相同。

1.4 项目测定及方法

包膜控释氮肥的养分释放率按照国标 GB/T23348-2009《缓释肥料》的规定，用 25 ℃静水浸提法测定。土壤 pH 值用酸度计测定；土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定；全氮含量用半微量凯氏法测定；碱解氮含量用扩散法测定；有效磷含量用 Olsen 法测定；速效钾含量用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定；植株氮含量测定用半微量凯氏法。

水稻收获前，每小区数 20 兜计算有效穗，并以此为基础取具有代表性 5 兜，考种后计算每兜有效穗数、每穗实粒数、千粒重和结实率等。水稻收获后，分小区单打、单收，以干质量记产，水稻实际产量用烘干法折算。

1.5 计算公式[15,16]

1)氮素收获指数(Nitrogen harvest index, NHI)＝籽粒吸氮量/植株总吸氮量；2)氮肥吸收利用率(Nitrogen recovery efficiency，NRE，%)＝(施氮区植株总吸氮量－空白区植株总吸氮量)/施氮量×100；3)氮肥农学利用率(Nitrogen agronomic efficiency，NAE，kg/kg)＝(施氮区产量－空白区产量)/施氮量；4)氮肥生理利用率(Nitrogen physiological efficiency，NPE，kg/kg)＝(施氮区产量－空白区产量)/(施氮区植株总吸氮量－空白区植株总吸氮量)；5)氮肥偏生产力(Partial factor productivity for applied N，PFP，kg/kg)＝施氮区产量/施氮量；6)土壤氮素依存率(Soil N dependent rate，SNDR，%)＝空白区植株总吸氮量/施氮区植株总吸氮量×100。

1.6 数据分析

数据处理及作图使用 Excel 2003 完成。数据分析使用 DPS 7.05 统计软件进行单因素方差分析

(ANOVA),多重比较采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻产量的影响

由表 2 可知,连续 2 年施用缓/控释肥早晚稻产量变化规律相似,所有施肥处理产量均极显著高于 CK(不施氮)($P<0.01$),但各施氮处理间无显著差异。2012 年施肥处理增产幅度 10.12%~14.71%;2013 年的增产幅度 35.48%~39.54%;2 年产量平均为 80CRF>100CRF>OF>CK,其中 80CRF、100CRF 和 OF 分别比 CK 增产 25.32%、23.93%和 22.54%($P<0.05$),缓/控释肥与推荐分次施肥处理间无显著差异。综合可知,施用缓/控释肥与推荐分次施肥产量相当,80%用量效果最佳。

CK 处理有效穗数、每穗粒数均低于施氮肥处理($P<0.01$),有效穗数在施氮处理之间无显著差异;施用控释肥处理(100CRF)每穗粒数在 2012 年晚稻季显著高于 OF 处理($P<0.05$),但结实率却显著低于 OF($P<0.05$)(表 3),这可能与缓/控释肥的全量施用,造成养分的奢侈吸收,导致水稻贪青晚熟,容易发生倒伏,结实率降低,其余季节穗粒数、结实率在施氮肥处理间无显著差异,千粒重所有处理均无显著差异。

2.2 不同施肥处理对水稻氮含量的影响

表 4 表明,2 年早晚稻施氮处理的籽粒、秸秆含氮量、吸氮量极显著高于不施氮处理($P<0.01$);其中 100CRF 处理早晚稻籽粒、秸秆含氮量、吸氮量均显著高于 OF 处理($P<0.05$);80CRF 处理早稻吸氮量显著高于 OF($P<0.05$),而早晚稻含氮量、晚稻吸氮量与 OF 处理无显著差异。因此,可以认为等养分条件下,施缓/控释肥处理 100CRF 水稻含氮量、吸氮量均高于优化分次施肥处理 OF;缓/控释肥减量施用处理 80CRF 水稻氮素含量、氮素吸收量与处理 OF 处于同一水平。秸秆氮素含量与籽粒氮素含量、氮素吸收量规律基本相同(表 4)。

2.3 不同施肥处理对水稻氮肥利用率的影响

从表 5 可以看出:1)水稻氮素收获指数以不施肥处理最高,在 2012 年晚稻极显著高于其他施肥处理($P<0.01$);其次是 80CRF 处理,显著高于 100CRF、OF 处理($P<0.05$);在其余季节各处理间无显著差异。因此,在施氮处理中 80CRF 有利于氮素从植株向着籽粒方向转化。2)氮肥吸收利用率以施缓/控释肥处理最高,极显著高于 OF 处理($P<0.01$),第一年早稻,80CRF 极显著高于 100CRF 处理($P<0.01$),其余季节两个施用缓/控释肥处理之间无显著差异,原因是 80CRF 虽然施氮量低,但籽粒秸秆氮含量、吸氮量均较低。3)氮肥农学利用率以缓/控释肥处理 80CRF 最高,2012 年晚稻、2013 年早晚稻显著高于其他施氮处理($P<0.05$);在等氮条件下高农艺利用率意味着高的产量,说明 80CRF

表 2 不同施肥处理下的早晚稻籽粒产量

Table 2. Comparison of grain yield in different treatments.

年份 Year	处理 Treatment	早稻 Early rice /(kg·hm^{-2})	晚稻 Late rice /(kg·hm^{-2})	年产量 Yield /(kg·hm^{-2})
2012	CK	6 395.00±373.60 bB	8 384.46±111.87 bB	14 779.46±485.38 bB
	OF	6 685.00±580.24 aA	9 805.58±226.10 aA	16 491.58±804.15 aA
	100CRF	7 105.00±106.42 aA	9 848.43±326.20 aA	16 953.43±417.52 aA
	80CRF	6 970.00±278.75 aA	9 872.07±93.72 aA	16 842.07±185.92 aA
2013	CK	4 937.63±429.79 bB	6 872.64±124.15 bB	11 810.27±387.37 bB
	OF	7 635.30±174.24 aA	8 457.11±117.90 aA	16 092.40±161.64 aA
	100CRF	7 818.89±399.22 aA	8 182.73±350.75 aA	16 001.61±381.24 aA
	80CRF	7 829.61±259.64 aA	8 651.01±720.06 aA	16 480.62±946.77 aA
平均 Average	CK	5 666.32±388.55 bB	7 628.55±82.77 bB	13 294.87±433.84 bB
	OF	7 160.15±270.20 aA	9 131.35±95.21 aA	16 291.49±330.39 aA
	100CRF	7 461.95±251.20 aA	9 015.58±218.15 aA	16 477.53±372.44 aA
	80CRF	7 399.80±42.04 aA	9 261.54±406.27 aA	16 661.34±382.48 aA

表中数值为平均值±标准差($n=3$);同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平;同列数据后不同大写字母表示处理间在 $P<0.01$ 水平差异显著。下同。

Data in the table are mean value ± standard deviation($n=3$); Different lowercase and capital letters mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same as below.

表 3 不同施肥处理对水稻产量构成因素的影响

Table 3. Effect of different treatments on yield components of rice.

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 No. of effective panicles /($\times10^4$ hm^{-2})	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g
2012	早稻 Early rice				
	CK	460.04±31.30 aA	73.28±4.53 bB	80.63±2.85 aA	21.99±0.88 aA
	OF	558.41±115.26 aA	85.75±3.38 aA	74.36±11.16 aA	22.69±0.60 aA
	100CRF	538.16±83.71 aA	83.20±6.32 aA	74.55±2.45 aA	22.48±0.07 aA
	80CRF	500.55±82.50 aA	88.35±2.70 aA	74.32±4.17 aA	22.78±0.15 aA
	晚稻 Late rice				
	CK	234.33±11.89 bB	139.99±6.00 bA	86.99±2.58 aA	25.45±0.48 aA
	OF	296.00±12.82 aA	142.27±16.99 bA	84.48±3.56 aA	25.29±0.24 aA
	100CRF	304.63±18.62 aA	158.11±12.27 aA	77.57±6.12 bA	25.20±0.63 aA
	80CRF	293.53±17.49 aA	156.14±8.32 aA	79.65±2.11 abA	24.93±0.37 aA
2013	早稻 Early rice				
	CK	358.77±23.90 bB	57.21±2.14 bB	79.83±3.10 aA	20.30±0.15 aA
	OF	541.05±52.50 aA	83.94±4.10 aA	89.34±4.12 aA	21.52±0.41 aA
	100CRF	533.82±45.93 aA	86.00±3.28 aA	86.08±5.31 aA	21.85±0.30 aA
	80CRF	568.54±56.92 aA	82.31±3.96 aA	88.40±2.65 aA	21.59±0.18 aA
	晚稻 Late rice				
	CK	217.07±11.89 bB	132.79±5.80 aA	87.71±1.61 aA	24.26±4.46 aA
	OF	259.00±19.23 aA	148.43±6.98 aA	83.13±23.15 aA	25.27±6.56 aA
	100CRF	288.60±29.60 aA	143.67±20.74 aA	80.36±8.46 aA	24.49±5.69 aA
	80CRF	281.20±26.68 aA	140.66±10.70 aA	83.26±18.13 aA	24.95±1.31 aA

对籽粒产量有明显的促进作用。4)氮肥生理利用率在 2012 年晚稻季 80CRF 最高，显著高于 100CRF 处理($P<0.05$)，2013 年早晚稻均以 OF 处理最高，显著高于 100CRF 处理($P<0.05$)，80CRF 与 OF 处理无显著差异，造成这一现象的原因可能是等氮量条件下控释肥的地上部分叶片、茎秆的吸氮量远高于 OF，从而降低了单位氮素籽粒增产值。而减量条件下，氮素的分配与 OF 比较无显著差异，氮素利用更为合理。在本研究条件下，OF 处理也具有较高的产量，这与其较高的氮素生理利用效率有关。5)氮肥偏生产力以处理 80CRF 最高，显著高于其他施肥处理($P<0.05$)，2012 年晚稻、2013 年早晚稻 100CRF 与 OF 处理间无显著差异。6)从土壤氮素依存率可以看出，施用控释肥比 OF 处理在 2013 年显著降低了土壤氮素依存率($P<0.05$)，说明施用控释肥降低了水稻产量对土壤氮的依赖，提高了氮肥的利用效率。

3 讨论

3.1 缓/控释肥的减施作用及理论依据

鉴于控释肥的高肥力和长肥效，有研究认为在减量施用控释肥的条件下依然可达到稳产甚至高产的作用[17]，这对成本控制具有实际意义。但王斌[18]等研究发现，施控释肥水稻的地上部分特别是稻草的吸氮量远高于常规尿素，即植株茎叶所含氮素是具有较大潜力的供应“源”，其养分如果充分转移到籽粒就能保证产量的提高，而控释肥将可能造成植株茎叶的“奢侈”吸氮；因此，在优化平衡施肥的基础上再适当减少其施入量的 10%～20%，仍然能保证全生育期的氮素供应，在稳产的同时进一步提高氮素利用率和节约成本，这有利于新型氮肥的推广。本研究在推荐施肥的基础上减量 20%，控释肥处理产量和氮素吸收利用率最高，而推荐施肥也具有较高的产量，是因为其具有较高的氮素生理利用效率。通过控释肥减量施用不仅具有较高产量和氮素积累量，也具有较高的氮素生理利用率和农学利用效率，因此，控释肥减量具有较高的氮素利用效率。但也有研究认为控释肥减量条件下与普通尿素处理相比，早稻有效穗数、每穗粒数、产量、氮肥农学利用率有所下降[19]。造成这种结果差异的原因可能与试点的土壤肥力条件和施肥量不同有关。

3.2 施用缓/控释肥增产效益和提高肥料利用作用评价

缓/控释肥料因其具有提高肥料利用率、减轻施肥对环境的污染及一次性施肥等优点已经成为今后肥料发展的趋势。控释肥在减少施肥次数的同时，能够增加产量[20-22]，施用控释肥的作物能够吸收更多的养分、保护环境和减少污染[23,24]。本研究发现，

表 4 不同施肥处理水稻氮素含量和氮素吸收量比较

Table 4. Comparison of nitrogen content and nitrogen uptake of rice in different treatments.

年份 Year	项目和处理 Item and treatment	早稻含氮量 N content of early rice /(mg·kg^{-1})	早稻吸氮量 N uptake of early rice /(kg·hm^{-2})	晚稻含氮量 N content in late rice /(mg·kg^{-1})	晚稻吸氮量 N uptake of late rice /(kg·hm^{-2})
2012	**籽粒** Grain				
	CK	12.22±0.98 bB	77.95±2.96 bB	10.69±0.34 cB	118.29±4.55 cC
	OF	15.36±1.61 aA	102.32±9.40 aA	12.80±0.57 abA	180.39±5.76 abAB
	100CRF	15.08±0.76 aA	107.18±5.57 aA	13.65±0.44 aA	192.78±8.83 aA
	80CRF	14.95±0.33 aA	104.22±5.64 aA	12.30±0.42 bA	170.07±8.17 bB
	秸秆 Straw				
	CK	10.19±1.33 bB	45.15±2.93 bB	6.02±0.43 bB	28.70±2.43 cC
	OF	11.66±2.07 aA	59.84±4.12 aA	9.93±0.57 aA	54.95±0.54 aA
	100CRF	12.58±0.49 aA	65.19±12.66 aA	10.40±0.94 aA	58.45±6.56 aAB
	80CRF	12.14±2.21 aA	70.12±23.15 aA	9.31±0.57 aA	48.68±3.64 bB
2013	**籽粒** Grain				
	CK	10.61±0.25 cC	52.37±3.12 cC	11.21±0.46 dC	77.04±2.94 cC
	OF	13.94±0.38 bB	106.44±4.71 bB	13.35±0.51 cB	112.88±3.32 bB
	100CRF	15.46±0.51 aA	120.86±6.53 aA	15.78±0.78 aA	129.02±6.07 aA
	80CRF	14.88±0.66 abAB	116.51±8.17 aA	14.71±0.33 bA	127.17±8.68 aA
	秸秆 Straw				
	CK	6.45±0.71 cC	28.00±2.15 cC	6.73±0.36 cC	34.52±1.93 bB
	OF	8.90±0.82 bA	49.52±5.63 bB	9.46±0.52 bB	58.09±4.07 aA
	100CRF	11.27±1.02 aA	85.91±10.26 aA	12.04±0.20 aA	68.30±6.19 aA
	80CRF	10.52±0.42 bA	68.20±7.32 aA	9.30±0.82 bB	57.70±3.62 aA
平均	**籽粒** Grain				
	CK	11.41±1.03 bB	65.16±8.76 cB	10.95±0.23 cC	97.67±1.88 cC
	OF	14.65±1.52 aA	104.38±8.79 bA	13.07±0.54 bB	146.64±4.23 bB
	100CRF	15.27±0.40 aA	114.02±2.28 aA	14.71±0.50 aA	160.90±5.55 aA
	80CRF	14.91±0.33 aA	110.36±3.44 aA	13.50±0.31 bB	148.62±8.15 bB
	秸秆 Straw				
	CK	8.32±1.92 cB	36.58±6.45 cC	6.37±0.43 cC	31.61±1.15 cB
	OF	10.28±2.20 bA	54.68±0.44 bB	9.70±0.59 bB	56.52±1.78 bA
	100CRF	11.93±1.10 aA	75.55±14.66 aA	11.22±1.17 aA	63.38±5.93 aA
	80CRF	11.33±0.52 abA	69.16±16.69 aA	9.31±0.40 bB	53.19±2.69 bA

施用控释肥处理的产量与推荐施肥无显著差异,而施用全量控释肥处理氮素含量和氮素吸收量均高于推荐施肥处理,减少 20%缓/控释肥处理却与推荐施肥氮素含量和氮素吸收量基本相当。蒋曦龙等[25]研究表明,等量的硫包膜尿素、硫加树脂包膜尿素分别比普通分次施尿素显著增产 13.32%和 18.05%,控释尿素处理与普通尿素处理的氮肥农学效率、氮肥生理效率、氮肥利用率均达显著增加;周亮[19]发现,在早晚稻中,等量控释氮肥处理较普通尿素处理产量增加 5%~27.70%,氮肥利用率提高 18.60%~31.30%,农学利用率也显著增加;陈贤友等[12]和徐明岗等[26]也得出相似结果。本研究施用缓/控释肥和推荐施肥的水稻产量无显著差异,但吸氮量显著增加,氮肥吸收和农学利用率显著提高,与以往研究一致[19,25-27]。本研究等氮量条件下,氮肥生理利用率缓/控释肥处理显著低于推荐施肥与以往研究不一致[25],这可能是因为氮肥的生理利用率比较稳定,受水稻产量的影响较小,当氮肥过量施用时,造成水稻对氮的奢侈吸收,而氮肥生理利用率急剧下降[1]。在水稻生长后期过量施用氮肥比在水稻生长前期过量施用氮肥引起的氮肥生理利用率降幅更大,本研究供试试验田肥力较高,全量施用控释肥可能引起水稻后期氮肥供应过量和奢侈吸收,造成营养生长过剩而抑制水稻生殖生长,导致养分吸收浪费。本研究下全量施控释肥处理在施肥处理中 2 年 4 季结实率均较低也说明了这一点。因此,施用控释肥应在推荐施肥的基础上减量施用,不仅能提高经济效益,而且能提高氮素利用效率。

缓/控释肥施用与推荐分次施肥的产量水平无显著差异,但缓/控释肥施用既可显著提高水稻氮素

表 5 早晚稻不同施肥处理水稻的氮素利用效率

Table 5. Nitrogen use efficiency in different treatments in early and late rice.

年份 Year	处理 Treatment	氮素收获指数 NHI	氮肥吸收利用率 NRE/%	氮肥农学利用率 NAE /(kg·kg^{-1})	氮肥生理利用率 NPE /(kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力 PFP /(kg·kg^{-1})	土壤氮素依存率 SNDR/%
2012	早稻 Early rice						
	CK	0.63±0.01 aA					
	OF	0.63±0.04 aA	26.03±5.58 cC	3.97±1.45 aA	18.75±4.30 aA	47.57±1.45 bA	76.05±3.95 aA
	100CRF	0.62±0.05 aA	37.28±6.07 bB	4.73±0.71 aA	14.87±2.19 aA	47.37±0.71 bA	71.76±6.00 aA
	80CRF	0.61±0.07 aA	55.58±8.25 aA	4.79±2.32 aA	11.73±1.28 aA	58.08±2.32 aA	71.96±12.45 aA
	晚稻 Late rice						
	CK	0.76±0.01 aA					
	OF	0.70±0.01 cB	34.50±3.20 bB	7.90±1.26 bA	22.96±3.69 abA	54.48±1.26 bB	65.62±2.08 abA
	100CRF	0.70±0.02 cB	41.38±4.91 aA	8.14±1.81 bA	19.83±4.84 bA	54.71±1.81 bB	61.45±2.84 bA
	80CRF	0.71±0.01 bB	39.11±1.52 aA	10.34±0.65 aA	29.14±3.85 aA	68.56±0.65 aA	69.66±3.41 aA
2013	早稻 Early rice						
	CK	0.65±0.02 aA					
	OF	0.68±0.01 aA	23.98±3.44 bB	14.62±0.71 bB	35.48±3.38 aA	51.28±0.71 bB	64.41±2.02 aA
	100CRF	0.59±0.04 aA	57.85±6.21 aA	14.95±2.44 bB	22.67±2.64 bB	51.69±2.44 bB	48.59±3.51 bB
	80CRF	0.63±0.03 aA	53.93±5.38 aA	18.53±0.72 aA	27.57±4.21 abAB	64.41±0.72 aA	54.39±4.12 bB
	晚稻 Late rice						
	CK	0.69±0.00 aA					
	OF	0.66±0.02 aA	33.01±2.68 bB	8.80±0.65 bB	26.73±2.22 aA	46.98±0.65 bB	65.29±1.85 aA
	100CRF	0.65±0.01 aA	47.64±6.44 aA	7.27±1.95 bB	15.20±3.38 bB	45.46±1.95 bB	56.67±3.26 bA
	80CRF	0.69±0.02 aA	50.91±7.49 aA	12.34±5.00 aA	23.62±6.48 aAB	60.08±5.00 aA	60.48±3.53 abA

NHI, NRE, NAE, NPE, PFP and SNDR indicate nitrogen harvest index, nitrogen recovery efficiency, nitrogen agronomic efficiency, nitrogen physiological efficiency, partial factor productivity for applied N and soil N dependent rate, respectively.

含量和吸收量，又能省工稳产。全量施缓/控释肥氮肥虽能提高早晚稻氮肥吸收利用率，但导致氮素生理利用率降低；减量 20%施用缓/控释肥的早晚稻氮肥吸收利用率、农艺利用率和偏生产力均显著提高，且氮肥生理利用率与推荐施肥相当；因此，在本地区推荐施肥的基础上减量 20%施用缓/控释肥，在稳产的基础上，能提高氮素的利用效果和节约成本，是值得推荐的施肥方式。

参考文献：

[1] 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. 中国农业科学，2002，35(9)：1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese with English abstract)

[2] 卢艳丽，白由路，王磊，等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析. 植物营养与肥料学报，2011，17(1)：209-215.
Lu Y L, Bai Y L, Wang L, et al. Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat-maize in North China. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17(1): 209-215. (in Chinese with English abstract)

[3] 张福锁，王激清，张卫峰，等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报，2008，45(5)：915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese with English abstract)

[4] 应宗荣，李静，欧阳钊，等. 木粉对缓释化肥包膜透过能力的调控. 化工进展，2008，27(6)：872-877.
Ying Z R, Li J, Ou Y Z, et al. Adjusting effect of wood powder to urea permeation capability of membranes for slow-release fertilizers. *Chem Indu Eng Prog*, 2008, 27 (6): 872-877. (in Chinese with English abstract)

[5] 朱兆良，文启孝. 中国土壤氮素. 南京：江苏科技出版社，1992：228-231.
Zhu Z L, Wen Q X. Chinese Soil Nitrogen. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 228-231. (in Chinese with English abstract)

[6] 黄丽娜，刘俊松. 我国缓/控释肥发展现状及产业化存在的问题. 资源开发与市场，2009，25(6)：527-530.
Huang L N, Liu J S. Development status of Chinese slow/controlled release fertilizers and the problems in its industrialization. *Res Develp Mark*, 2009, 25 (6): 527-530. (in Chinese with English abstract)

[7] 张爱平，刘汝亮，杨世琦，等. 基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响. 农业环境科学学报，2012，31(3)：555-562.
Zhang A P, Liu R L, Yang S Q, et al. Effect of side fertilization technology based on slow-release fertilization on rice and nitrogen losses. *J Agro-Environ Sci*, 2012, 31(3): 555-562. (in Chinese with English abstract)

[8] Li G Q, Yang J T, Yan L Y, et al.The effects of controlled release fertilizer and conventional complex fertilizer on the dry matter accumulation and the yield in winter wheat. *Res J Appl Sci: Engineer Technol*, 2013, 5(7): 2724-2728.

[9] **李艳梅, 廖上强, 薛高峰, 等. 减量灌溉下番茄施控释肥的水氮耦合效应研究. 农业环境科学学报**, 2014, 33(1): 134-140.
Li Y M, Liao S Q, Yue G F, et al. Coupling effects of controlled-release urea and water on tomato yield and soil nitrate under reduced irrigation. *J Agro-Environ Sci*, 2014, 33(1): 134-140. (in Chinese with English abstract)

[10] Arvind K S, Jagdish K L, Singh V K, et al. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a systems perspective. *Agrono J*, 2001, 96(6): l606-1621.

[11] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production. *Plant Soil*, 1981, 58: 177-204.

[12] **陈贤友, 吴良欢, 韩科峰, 等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报**, 2010, 16(4): 918-923.
Chen X Y, Wu L H, Han K F, et al. Effects of different mixture rates of coated urea and prilled urea on rice grain yield and nitrogen use efficiency. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16(4): 918-923. (in Chinese with English abstract)

[13] **黄旭,唐拴虎,徐培智,等. 不同种类缓/控释肥料对水稻产量及养分利用率的影响. 广东农业科学**, 2010, 8: 95-96,105.
Huang X, Tang S H, Xu P Z, et al. The effects of different types of slow/controlled release fertilizer on rice yield and nutrient utilization. *Guangdong Agric Sci*, 2010, 8: 95-96,105. (in Chinese with English abstract)

[14] **陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 等. 一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果. 应用生态学报**, 2005, 16(10): 1868-1871.
Chen J S, Xu P Z, Tang S H, et al. Nutrient use efficiency and yield-increasing effect of single basal application of rice-specific controlled release fertilizer. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(10): 1868-1871. (in Chinese with English abstract)

[15] **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. 植物营养与肥料学报**, 2005, 11(4): 494-500.
Li F M, Fan X L, Chen W D. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency. *Plant Nutr Fert Sci*, 2005, 11(4): 494-500. (in Chinese with English abstract)

[16] **吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响. 植物营养与肥料学报**, 2007, 13(5): 757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J, et al. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rim land of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, 13(5): 757-764. (in Chinese with English abstract)

[17] **李敏, 李广涛, 叶舒娅, 等. 连续施用控释氮肥对超级稻水稻产量、氮肥利用率及土壤养分变化的影响. 中国农学通报**, 2012, 28(33): 130-134.
Li M, Li G T, Ye S Y, et al. Effect of super-rice yield, apparent N recovery rates and soil nutrients change by long-term applying controlled-release nitrogen. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 28(33): 130-134. (in Chinese with English abstract)

[18] **王斌,万运帆,郭晨,等. 控释尿素、稳定性尿素和添加菌剂尿素肥料对双季稻增产效益和氮素利用率影响. 植物营养与肥料学报**, 2015, 21(5): 1104-1112.
Wang B, Wan Y F, Guo C, et al. Effects of controlled release urea, nitrification inhibitor and effective microorganisms on double rice yield and nitrogen use efficiency. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21(5): 1104-1112.(in Chinese with English abstract)

[19] **周亮,荣湘民,谢桂先,等. 不同氮肥施用对双季稻产量及氮肥利用率的影响. 土壤**, 2014, 46(6): 971-975.
Zhou L, Rong X M, Xie G X, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency. *Soils*, 2014, 46(6): 971-975. (in Chinese with English abstract)

[20] Kiran J K, Khanif Y M, Amminuddin H, et al. Effects of controlled release urea on the yield and nitrogen nutrition of flooded rice. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 2010, 41: 811-819.

[21] Yang Y C, Zhang M, Li Y C, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield. *Soil Sci Soc Amer J*, 2012, 76: 2307-2317.

[22] **张宣,丁俊山,刘彦伶,等.机插配合控释掺混肥对水稻产量和土壤肥力的影响. 应用生态学报**, 2014, 25(3):783-789.
Zhang X, Ding J S, Liu Y L,et al. Effects of mechanical transplanting of rice with controlled release bulk blending fertilizer on rice yield and soil fertility. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(3): 783-789. (in Chinese with English abstract).

[23] Shen Y Z, Zhao C, Zhou J M, et al. Application of waterborne acrylic emulsions in coated controlled release fertilizer using reacted layer technology. *Chin J Chem Engin*, 2015, 23:309-314.

[24] Xie Z Y, Chen N C, Zhou J M, et al. Synthesis and characterization of ethylenediamine tetraacetic acid tetrasodium salt loaded in microcapsules with slow release properties. *Chin J Chem Engin*, 2010, 18 (1):149-155.

[25] **蒋曦龙, 陈宝成, 张民, 等. 控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究. 水土保持学报**, 2014, 28(1):215-220.
Jiang X L, Chen B C, Zhang M, et al. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice. *J Soil Water Conserv*, 2014, 28(1): 215-220. (in Chinese with English abstract)

[26] **徐明岗, 李菊梅, 李冬初, 等. 控释氮肥对双季稻生长及氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报**, 2009, 15(5): 1010-1015.
Xu M G, Li J M, Li D C, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in southern China. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15(5): 1010-1015 (in Chinese with English abstract).

[27] **侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 等. 南方红壤区稻-稻连作体系下氮肥减施模式研究. 中国水稻科学**, 2012, 26(5): 555-562.
Hou H Q, Ji J H, Liu G R, et al.On the mode of nitrogen-reduction in double-rice cropping region in red soil. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(5):555-562. (in Chinese with English abstract)