

不同灌溉条件下氮肥配施模式对 水稻干物质和产量的影响

潘 晨, 杨 宇, 漆栋良*
(长江大学 农学院, 湖北 荆州 434025)

摘 要:【目的】明确不同灌溉模式下普通尿素与控释尿素配施对水稻干物质积累、分配和产量的影响。【方法】以“超级稻-两优 152”为供试作物, 采取完全随机设计, 灌溉方式设置常规灌溉(CF)和干湿交替灌溉(AWD)2种, 氮肥配施模式设置 100%普通尿素(N1), 60%控释尿素+40%普通尿素(N2)和 100%控释尿素(N3), 施氮总量均为 240 kg/hm²。测定不同处理组合下各生育期水稻叶片 SPAD 值、株高、抽穗期和成熟期各器官干物质质量、茎蘖数、籽粒产量及其构成因素。【结果】同一施氮模式下, 与 CF 处理相比, AWD 处理下拔节—灌浆期水稻叶片的 SPAD 值、作物生长速率、茎蘖成穗率、干物质积累量及其向籽粒的分配比例增加。同一灌溉模式下, 与 N1 处理相比, N2、N3 处理的茎蘖成穗率、作物生长速率、干物质积累量、穗粒数、千粒质量、结实率及籽粒产量增加, 其中 N2 处理籽粒产量的增加幅度要高于 N3 处理。整体来看, 与其他处理相比, AWDN2 处理获得较高的 SPAD 值、茎蘖成穗率、作物生长速率、干物质积累量、收获指数、穗粒数、千粒质量、结实率和籽粒产量。【结论】干湿交替灌溉耦合 60%控释尿素+40%普通尿素有利于减少水稻的无效分蘖, 改善植株的氮营养状况, 促进干物质的积累及其向籽粒的分配, 从而提高产量。

关 键 词: 水稻; 干湿交替灌溉; 控释尿素; 收获指数; 干物质

中图分类号: S276.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022242

OSID:



潘晨, 杨宇, 漆栋良. 不同灌溉条件下氮肥配施模式对水稻干物质和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 73-78, 109.

PAN Chen, YANG Yu, QI Dongliang. The Combined Effect of Irrigation and Nitrogen Fertilization on Dry Matter and Yield of Rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 73-78, 109.

0 引 言

【研究意义】水稻是我国最主要的粮食作物之一, 同时中国也是全球第一大稻米生产国, 其产量约占全球总产量的 31%。目前, 我国水稻氮肥表观利用率为 39%~52%^[1], 水分利用率为 55.4%^[2]。长期过量或不合理的水肥管理, 不仅容易降低水氮利用效率, 造成农业资源浪费, 同时还会引发水体污染、土壤酸化和温室气体排放加剧^[3]等问题。因此, 在水资源日益短缺、农业面源污染日益严重的情况下, 发展节水灌溉技术, 并优化氮肥施用模式对农业可持续发展具有重要意义。【研究进展】水氮管理措施对水稻生长存在明显的互作效应^[4-5]。例如采用干湿交替灌溉耦合适宜施氮量及施氮方式能提高水氮利用率及水稻产量^[6-8]。干湿交替灌溉是我国水稻生产中推广应用面

积最广也是最有效的节水灌溉技术^[9], 它能减少 CH₄ 的排放^[10]和病虫害的危害^[11]。与传统常规灌溉相比, 部分研究^[12-14]认为干湿交替灌溉能提高水稻产量, 部分研究^[15-16]认为干湿交替灌溉只能维持产量, 另外一些研究^[17-18]结果表现为减产, 研究差异较大, 可能是因为不同气候条件、土壤质地等因素所致的。氮素也是决定作物产量的关键因子, 近年来, 缓/控肥料的研发与推广迅速展开。缓/控肥料利用多种调控机制使养分按照设定的释放速率和周期缓释或控制释放, 以满足作物生长季内各生育时期对养分的需求, 可有效降低施肥劳动强度和成本提高肥料利用率^[19-20]。控释氮肥是目前简化施肥技术的主要载体, 随着廉价、环保包膜材料的不断发展, 进一步增加了其生产运用前景。传统常规灌溉下施用控释氮肥可显著降低稻田表层水中铵态氮量, 减少氮素因氨挥发而造成的损失, 提高叶片氮代谢酶活性, 改善根系构型, 延缓根系衰老, 达到稳定水稻产量的同时适当减少施氮量、提高氮肥利用率的目的^[21-22]。采用控释氮肥和尿素配施, 在实现多级供氮的基础上, 有利于进一步减少控释氮肥使用成本, 是当前优化控释氮肥运用的主要方式。

收稿日期: 2022-04-28

基金项目: 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目(2020NSG05); 湿地生态与农业利用教育部工程中心开放基金项目(KF202008)

作者简介: 潘晨(1998-), 女。硕士研究生, 主要从事农业资源环境方面的研究。E-mail: 619475712@qq.com

通信作者: 漆栋良(1987-), 男。副教授, 主要从事农业水土环境调控及作物涝渍灾害防控方面的研究。E-mail: qdl198799@126.com

同一施氮水平下,70%缓释氮肥+30%尿素氮肥 1 次基施的产量及氮肥利用率与常规一基二追相近,实现了高产高效、简化施肥的目标^[23]。【切入点】然而,干湿交替灌溉条件下,控释尿素与普通尿素配施对水稻生长及产量影响的研究较少,且其高效耦合的机制尚不明确。【拟解决的关键问题】为此,从灌溉方式与普通尿素及控释尿素配施着手,研究不同灌溉条件下氮肥配施模式对水稻植株生长、干物质积累及分配和产量形成的影响,以探索水稻高效水肥管理模式,为水稻生产中水肥科学管理提供理论依据。

表 1 试验土壤基本化学性状

Table 1 Basic chemical properties for test soil

全氮量/(g·kg ⁻¹)	全磷量/(g·kg ⁻¹)	全钾量/(g·kg ⁻¹)	速效磷量/(mg·kg ⁻¹)	速效钾量/(mg·kg ⁻¹)	碱解氮量/(mg·kg ⁻¹)	有机质量/(g·kg ⁻¹)	pH 值
1.71	0.35	7.46	19.5	85.1	63.4	17.85	7.63

1.2 试验设计

灌水方式设置常规灌溉(除分蘖期晒田外,整个生育期保持 2~3 cm 的水层,直至收获前自然落干,记为 CF)和干湿交替灌溉(水稻移栽后返青前一直保持 2~3 cm 的水层,分蘖末期晒田,其他各生育期均先保持 2~3 cm 的水层,直至 0~20 cm 土层土壤水势降到-20 KPa 时再灌水至 2~3 cm 的水层,如此反复,至收获前 7 天左右断水^[24],记为 AWD) 2 种模式。氮肥配施模式设置单施普通尿素(N1),普通尿素与控释尿素配施(60%控释尿素+40%普通尿素,N2)和全部施用控释尿素(N3) 3 个水平。试验使用的普通尿素含氮量为 46%,控释尿素为树脂包膜尿素,含氮量 43%,释放期为 3 个月。各处理的总施氮量为 240 kg/hm²,N1 处理与当地农民做法一致,采用一基二追的常规模式,即水稻基施 40%+分蘖期 30%+孕穗期 30%。N2 处理采用一基一追的模式,即基施 60%控释肥,孕穗期追施 40%尿素。N3 处理在移栽前 1 天以基肥施入。所有小区 P₂O₅(过磷酸钙,P₂O₅≥12%) 和 K₂O(氯化钾,K₂O≥60%) 用量分别为 90、120 kg/hm²,全部作基肥插秧前 1 次施用。

每个处理 3 次重复,采用完全随机设计,共计 18 个试验小区。试验小区面积为 5.92 m²(2.62 m×2.26 m),小区四周用高 60 cm(田间土壤表面以上及以下各 30 cm),宽 30 cm 防渗水泥墙隔开,防止试验过程中小区串水。试验供试水稻品种为“超级稻-两优 152”,行距 18 cm,株距 12 cm。

1.3 测定指标与方法

1) 株高:在水稻各生育期,每小区测量 10 株株高(测量时从植株的基部发根处至最上部叶片的顶端)。

2) 叶绿素的测定:在水稻各生育期,每小区随机选取 10 株水稻,用日本美能达便携式 SPAD-502 叶绿素仪测定剑叶的上、中、下 3 个部位的 SPAD 值,

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2021 年 3—7 月在湖北省荆州市荆州区农业气象试验站(30.349 5°N, 112.154 4°E,海拔 28 m)进行,2021 年 3 月 28 日播种,7 月 25 日收获。试验站所在地区属亚热带季风气候区,多年平均降水量 1 089 mm,气温 16.5 ℃,日照时间 1 742.4 h。试验地土壤肥力中等,土壤类型为水稻土,田间质量持水率为 23.8%,饱和含水率为 28.6%,体积质量为 1.5 g/cm³。播种前土壤 0~40 cm 基本化学性状见表 1。

取其平均值。

3) 干物质的测定:分别于水稻抽穗期和成熟期进行田间取样,选择具有代表性的 3 穴稻株。将样株的茎、叶、穗分解后分别装袋,烘箱 105 ℃下杀青 30 min 后,然后 80 ℃下烘干至恒质量称量。

4) 茎蘖数的测定:每小区选 10 穴具有代表性的植株,分别于拔节期、抽穗期和成熟期观测其分蘖数、总茎数和成穗数。

5) 产量及产量组成:收获前 1 天按 5 点取样法每小区选取 5 穴植株带回室内考种,调查穗粒数、千粒质量、结实率等产量组成因素,并用水选法将实粒和空粒分开,放置烘箱烘至恒质量后,测定实粒数、空粒数、实粒质量和空粒质量;各小区籽粒产量采用实收实打方式测定。

1.4 数据处理及计算

Excel 2010、DPS 软件处理试验数据;多重比较采用最小显著性差异法(LSD)。

茎蘖成穗率(%) =

(成熟期有效穗数/拔节期茎蘖数)×100, (1)

收获指数(Harvest Index, HI, %) =

(稻谷籽粒产量/成熟期地上部干物质质量)×100, (2)

作物生长速率(Crop growth rate, CGR,

g/(m²·d)) = (W₂-W₁)/(T₂-T₁), (3)

式中:W₁和 W₂为前后 2 次测定的地上部干物质质量(g/m²);T₁和 T₂为前后测定的时间(d)。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对水稻叶片 SPAD 值的影响

图 1 为不同水氮处理下水稻 SPAD 值,图中同一生育期不同字母表示各处理在 0.05 水平差异显著;下同。由图 1 可知,各处理水稻叶片 SPAD 值从拔节期到灌浆期逐步提升,在灌浆期达到最大值,成熟期

水稻叶片 *SPAD* 值迅速降低。任一施氮模式下，与常规灌溉相比，干湿交替灌溉下拔节—灌浆期的 *SPAD* 值增加，而成熟期 *SPAD* 值在 2 种灌溉方式间无显著差异 ($P>0.05$)。任一灌溉模式下，与 N1 处理相比，拔节—孕穗期 N2、N3 处理的 *SPAD* 值减少，而抽穗—成熟期 N2、N3 处理的 *SPAD* 值增加，且差异在成熟期达到显著水平 ($P<0.05$)。与常规灌溉单施普通尿素相比，干湿交替灌溉耦合（60%控释尿素+40%普通尿素）或 100%控释尿素有利于提高生育期内水稻叶片的 *SPAD* 值。

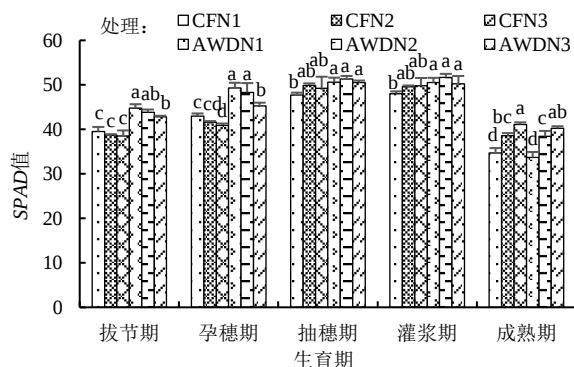


图1 不同水氮处理下水稻SPAD值

Fig.1 Leaf *SPAD* values of rice for different water and nitrogen treatments

2.2 不同水氮处理对水稻株高的影响

由图 2 可知，任一施氮模式下，与常规灌溉相比，干湿交替灌溉下各生育期的水稻株高均增加。任一灌溉模式下，与 N1 处理相比，拔节期 N2、N3 处理的株高减少，而孕穗—成熟期 N2、N3 处理的株高增加，

且 N2 处理的株高较 N3 处理的株高增加。与常规灌溉单施普通尿素相比，干湿交替灌溉耦合（60%控释尿素+40%普通尿素）或 100%控释尿素下水稻抽穗—成熟期的株高增加。

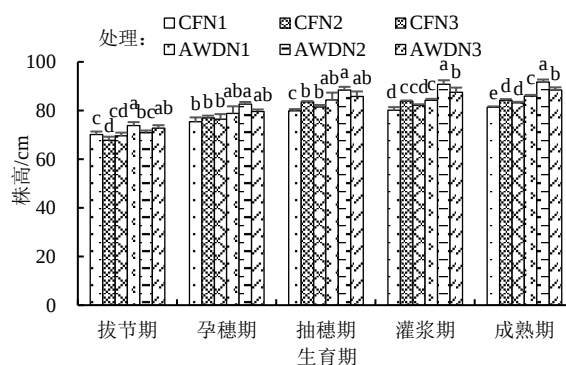


图2 不同水氮处理对水稻株高的影响

Fig.2 Effects of different water and nitrogen treatments on plant height of rice

2.3 不同水氮处理对水稻干物质和作物生长速率的影响

由表 2 可知，任一施氮模式下，与常规灌溉相比，干湿交替灌溉下作物生长速率增加。任一灌溉模式下，与 N1 处理相比，N2、N3 处理作物生长速率增加。任一施氮模式下，与常规灌溉相比，干湿交替灌溉下抽穗期茎、叶、穗的干物质积累量均减少，而成熟期茎、叶、穗的干物质质量和总干物质质量均增加。任一灌溉模式下，与 N1 处理相比，抽穗期和成熟期 N2、N3 处理各器官干物质积累量均增加。CFN3、AWDN2、AWDN3 处理的成熟期总干物质积累量较大。

表 2 抽穗期和成熟期不同水氮处理下水稻干物质质量的变化

Table 2 Changes of dry matter quality in rice at the heading and maturity stages for different water and nitrogen treatments

灌溉方式	施氮模式	抽穗期/(kg·hm ⁻²)				成熟期/(kg·hm ⁻²)				CGR/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
		茎	叶	穗	合计	茎	叶	穗	合计	
CF	N1	675.3±0.3c	728.4±0.3a	185.0±0.4b	1 588.7±0.4cd	2 219.8±0.4a	1 207.7±0.1b	7 096.6±0.3c	10 524.1±0.3b	7.5±0.5d
	N2	975.8±0.4ab	749.0±0.3a	214.7±0.9ab	1 939.1±1.3ab	2 355.1±0.4a	1 314.0±0.3ab	7 507.2±0.6ab	11 176.3±0.9ab	13.2±0.3ab
	N3	1 036.8±0.5a	747.4±0.2a	269.2±1.8a	2 053.4±1.1a	2 567.6±0.7a	1 314.0±0.3ab	7 410.6±0.6abc	11 292.2±0.9a	12.7±0.7b
AWD	N1	654.3±0.3c	724.1±0.4a	176.1±0.1b	1 554.5±2.2d	2 458.9±0.5a	1 263.3±0.3b	7 386.5±0.4bc	11 108.7±1.0ab	10.4±0.6c
	N2	944.7±0.6ab	730.2±0.3a	209.3±0.9b	1 883.3±0.4ab	2 603.9±0.9a	1 403.4±0.4ab	7 744.0±0.7a	11 751.3±2.3a	13.9±1.1a
	N3	837.9±0.3bc	735.6±0.1a	208.3±0.2b	1 781.8±0.6bc	2 587.0±0.3a	1 529.0±0.3a	7 570.0±0.1ab	11 686.0±0.3a	12.9±0.2ab

注 同列数字后不同字母表示差异性达0.05显著水平；下同。

2.4 不同水氮处理对成熟期水稻各器官干物质分配的影响

由表 3 可知，成熟期各处理水稻各器官干物质分配有差异，从干物质在各器官分配比例来看，表现为穗>茎>叶。茎占干物质总量的比例在不同处理间无显著差异，叶占干物质总量的比例表现为：同一灌溉模式下，不同施氮模式间无显著差异；而同一施氮模式下，CF 处理显著大于 AWD 处理。穗占干物质总量的比例变化与叶占干物质总量的比例相反，说明干

湿交替灌溉有利于促进干物质向籽粒的分配。

表 3 成熟期不同水氮处理下水稻干物质分配比例

Table 3 Dry matter distribution ratio at the maturity stage for different water and nitrogen treatments

灌溉方式	施氮模式	茎	叶	穗	%
CF	N1	21.3±1.4a	12.4±0.4a	66.3±1.3b	
	N2	21.2±0.9a	12.2±1.0a	66.6±1.8b	
	N3	21.1±2.0a	12.1±0.7a	66.8±2.7b	
AWD	N1	20.3±1.3a	10.4±0.6b	69.3±1.4a	
	N2	20.1±1.8a	10.2±0.7b	69.7±2.3a	
	N3	20.6±0.9a	10.8±1.0b	68.6±0.6a	

2.5 不同水氮处理对水稻茎蘖数及茎蘖成穗率的影响

由表 4 可知,任一施氮模式下,与常规灌溉相比,干湿交替灌溉下拔节期和抽穗期的茎蘖数减少,成熟期的茎蘖数无显著差异,而其茎蘖成穗率增加。任一灌溉模式下,与 N1 处理相比,拔节期、抽穗期和成熟期 N2、N3 处理的茎蘖数均减少,而 N2、N3 处理的茎蘖成穗率增加。与 CFN1 处理相比,AWDN2、AWDN3 处理的茎蘖数显著减少,而茎蘖成穗率显著增加 ($P<0.05$)。说明干湿交替灌溉耦合(60%控释尿素+40%普通尿素)或 100%控释尿素有利于减少水稻无效分蘖,提高茎蘖成穗率。

2.6 不同水氮处理水稻产量及构成因素的差异

由表 5 可知,任一施氮模式下,与常规灌溉模式相比,干湿交替灌溉下水稻产量显著增加。任一灌溉模式下,与 N1 处理相比,N2、N3 处理的产量和收获指数都显著增加,且在 AWDN2 处理下达到最大值。就产量构成因素来说,任一施氮模式下,与常规灌溉

相比,干湿交替灌溉下有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量均增加。任一灌溉模式下,与 N1 处理相比,N2、N3 处理均提高了有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量。AWDN2 处理的穗粒数、结实率、千粒质量和收获指数最高。说明干湿交替灌溉耦合(60%控释尿素+40%普通尿素)或 100%控释尿素有利于提高水稻产量及收获指数。

表 4 不同水氮处理下水稻的分蘖数及茎蘖成穗率

灌溉方式	施氮模式	茎蘖数/(个·m ⁻²)			茎蘖成穗率/%
		拔节期	抽穗期	成熟期	
CF	N1	447.6±8.8a	354.5±5.1a	325.9±8.9ab	64.8±3.4d
	N2	398.2±5.0c	335.7±2.7c	316.4±3.7bc	77.3±4.2b
	N3	392.7±1.8c	316.1±1.3e	310.5±1.5c	77.6±5.4b
AWD	N1	429.5±3.8b	344.0±5.4b	330.1±1.4a	68.2±3.6c
	N2	388.9±6.5cd	326.2±3.2d	322.1±3.0b	80.8±2.2a
	N3	380.7±3.7d	313.4±3.0e	318.1±1.3bc	82.8±1.7a

表 5 不同水氮处理下水稻产量及其构成

Table 5 Rice yield and its components of different water and nitrogen treatments

灌溉方式	施氮模式	产量/(kg·hm ⁻²)	有效穗数/(×10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	收获指数/%
CF	N1	7 485.4±0.1e	290.0±9.4b	140.0±2.2c	75.6±1.2c	23.0±0.7b	69.3±1.8d
	N2	8 286.1±0.3bc	307.8±20.2ab	145.3±4.6abc	81.4±2.4b	23.9±0.5ab	74.1±1.0ab
	N3	7 966.0±0.1cd	304.8±21.8ab	144.2±2.9abc	82.1±1.3ab	24.6±0.4a	70.5±1.7bc
AWD	N1	7 690.2±0.3de	292.7±13.9ab	142.0±2.3bc	76.1±0.8c	23.2±1.2b	69.2±2.1d
	N2	8 776.5±0.2a	314.0±2.4ab	149.2±2.2a	84.5±0.6a	24.2±0.6a	74.6±1.6a
	N3	8 430.0±0.1ab	315.2±4.8a	147.3±4.5ab	82.0±1.7b	24.9±0.2a	72.1±1.3ab

3 讨论

光合作用是作物生长发育最重要的作用之一,水稻产量的 80%~90%都来自光合作用^[25]。叶绿素是植物进行光合作用最主要的光合色素,叶绿素量高低可反映出光合能力的强弱,而 SPAD 值能间接反映植株叶片叶绿素的高低。本研究表明,常规灌溉会降低拔节—灌浆期水稻叶片叶绿素量,这与前人^[26-27]研究一致。这是因为常规灌溉条件下长期淹水后产生过量的 H₂O₂ 积累,致使叶绿体结构遭到破坏^[28],此外由于长期淹水导致叶片碳氮比失调,叶绿体的分解大于合成,致使叶绿素量降低^[29],进而降低了作物光合作用,导致光合产物减少。然而,成熟期 2 种灌水方式下 SPAD 值差异不显著。这可能与干湿交替灌溉促进氮素向籽粒分配、提高氮素收获指数有关^[8],从而使叶片 SPAD 值降低。但其生理机制尚不明确,有待进一步研究。本研究还发现,与 N1 处理相比,N2、N3 处理降低抽穗期前水稻叶片的 SPAD 值,而提高抽穗期后的 SPAD 值。这与不同类型的氮肥供氮差异有关。普通尿素施入土壤后,在脲酶的作用下迅速释放大量的氮^[30]。而控释尿素的氮素释放速率较慢,在水稻生长中后期可维持较高的土壤氮素供应^[20]。而

且,与 N3 处理相比,N2 处理提高拔节—灌浆期的 SPAD 值,说明控释尿素与普通尿素配施(60%控释尿素+40%普通尿素)有利于维持较高的 SPAD 值。这是因为该施氮模式下水稻对氮素的需求与土壤氮素的供给更加协调^[30]。因此,干湿交替灌溉耦合控释尿素与普通尿素配施提高水稻叶片的 SPAD 值。这也是干湿交替灌溉耦合控释尿素与普通尿素配施下水稻株高、作物生长速率和干物质积累较高的原因。

干湿交替灌溉能否提高水稻产量还存在分歧^[12-18]。本研究发现,与常规灌溉相比,干湿交替灌溉下 N1 处理的水稻产量无显著差异,而 N2、N3 处理的产量显著提高。说明干湿交替灌溉是否提高水稻产量与氮肥管理策略密切相关,适宜施氮模式(N2、N3 处理)利于提高干湿交替灌溉下水稻的产量。这与 Sun 等^[7]的研究结果相一致。原因在于与普通尿素相比,控释尿素的施用有利于促进吸收的氮素及积累的干物质向籽粒部分转移^[21],N2、N3 处理下穗粒数、结实率、千粒质量及收获指数较高(表 5)证实了这一点。有效穗数是决定水稻高产的关键所在,而有效穗数的多少取决于水稻分蘖数及茎蘖成穗率^[36]。本研究中拔节期、抽穗期和成熟期 N2、N3 处理下的茎蘖数显著低于 N1 处理,而茎蘖成穗率和有效穗数高于 N1 处理

(表 4、表 5)。这可能是由于普通尿素在前期供应了过多的氮素,增加了无效分蘖,而控释肥释放期长,能均匀满足水稻整个生育期对氮肥的需求,从而减少了无效分蘖,提高了茎蘖成穗率和有效穗数。本研究还发现,干湿交替灌溉下 60%控释尿素+40%普通尿素较 100%控释尿素的水稻产量进一步提高。可能原因是,与传统常规灌溉相比,干湿交替灌溉显著提高了复水期的根系氧化活性和光合速率,它们的增加有效地增加了生长季节(尤其是从抽穗期到成熟期)根系和干物质积累量、叶片光合势和作物生长速率^[38]。而且,干湿交替灌溉处理减少了拔节期和抽穗期的分蘖数,有效提高了成熟期干物质向穗的分配比例(表 3)和茎蘖成穗率(表 4),减少多余的营养生长有助于提高冠层质量^[38],获得较高的收获指数。提高收获指数是水稻获得高产的关键^[40]。与此同时,控释尿素与普通尿素配施模式下土壤氮素供应较好地满足水稻各生育期对氮素的需求^[21],获得最高的干物质积累量(表 2),为水稻高产奠定了坚实的基础^[27]。因此,干湿交替灌溉与 60%控释尿素+40%普通尿素耦合时,二者互作对水稻生长及产量形成的促进效应叠加,表现为该处理下水稻叶片 *SPAD* 值、茎蘖成穗率、作物生长速率、干物质积累量、收获指数、穗粒数、千粒质量和结实率较高,从而实现水稻高产。这与前人^[7-8]关于水稻水氮高效耦合机制的研究结果一致。本研究证实干湿交替灌溉结合 60%控释尿素+40%普通尿素有利于提高水稻产量,但是本文只研究了水稻地上部分的农艺性状。根系作为植株吸收水分和养分的重要器官,其形态结构、生理特性与地上部的关系都十分重要。因此,关于干湿交替灌溉结合 60%控释尿素+40%普通尿素对水稻根系生理生态特性的影响有待进一步研究。

4 结 论

1) 与 CF 处理相比,AWD 处理有利于提高拔节期至灌浆期的水稻叶片的 *SPAD* 值,茎蘖成穗率,作物生长速率,干物质积累量及其向穗部的分配比例、有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量及籽粒产量。

2) 同一灌溉水平下,与 N1 处理相比,N2、N3 处理有利于提高水稻叶片的 *SPAD* 值,茎蘖成穗率,作物生长速率,干物质积累量及其向穗部的分配比例、有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量及籽粒产量。且 N2 处理较 N3 处理进一步提高籽粒产量。

3) 干湿交替灌溉耦合 60%控释尿素+40%普通尿素有利于改善植株的氮营养状况,提高水稻茎蘖成穗率,促进干物质的积累及其向籽粒的分配,从而获得高产。

参考文献:

- [1] 于飞,施卫明.近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J].土壤学报,2015,52(6): 1 311-1 324.
YU Fei, SHI Weiming. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1 311-1 324.
- [2] 朱丽娟,陆秋雨.中国省域耕地与灌溉水资源利用效率及其耦合协调度的空间相关性分析[J].中国农业大学学报,2022,27(3): 297-308.
ZHU Lijuan, LU Qiuyu. The use efficiency of cultivated land and irrigation water and the spatial correlation analysis of its coupling coordination in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(3): 297-308.
- [3] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5 917): 1 014-1 015.
- [4] 陈新红,刘凯,王志琴,等.水稻水氮互作效应与产量模型研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(9): 141-148.
CHEN Xinhong, LIU Kai, WANG Zhiqin, et al. Studies on interactions between soil moisture and nitrogen and yield models in rice[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, 34(9): 141-148.
- [5] 彭玉,孙永健,蒋明金,等.不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质和氮素吸收、运转及分配的影响[J].作物学报,2014,40(5): 859-870.
PENG Yu, SUN Yongjian, JIANG Mingjin, et al. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(5): 859-870.
- [6] 褚光,展明飞,朱宽宇,等.干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J].作物学报,2016,42(7): 1 026-1 036.
CHU Guang, ZHAN Mingfei, ZHU Kuanyu, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1 026-1 036.
- [7] SUN Y J, MA J, SUN Y Y, et al. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 85-98.
- [8] WANG Z Q, ZHANG W Y, BEEBOUT S S, et al. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates[J]. Field Crops Research, 2016, 193: 54-69.
- [9] 李婷婷,冯钰枫,朱安,等.主要节水灌溉方式对水稻根系形态生理的影响[J].中国水稻科学,2019,33(4): 293-302.
LI Tingting, FENG Yufeng, ZHU An, et al. Effects of main water-saving irrigation methods on morphological and physiological traits of rice roots[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(4): 293-302.
- [10] YAN X Y, YAGI K, AKIYAMA H, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields[J]. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1 131-1 141.
- [11] ZHUANG Y H, ZHANG L, LI S S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 374-382.
- [12] ISHFAQ M, AKBAR N, ANJUM S A, et al. Growth, yield and water productivity of dry direct seeded rice and transplanted aromatic rice under different irrigation management regimes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2 656-2 673.
- [13] YANG J C, LIU K, WANG Z Q, et al. Water-saving and high-yielding irrigation for lowland rice by controlling limiting values of soil water potential[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(10): 1 445-1 454.
- [14] 李翊君,聂凌利,张文,等.水密肥互作对水稻产量及产量构成的影响[J].中国稻米,2018,24(6): 67-69, 72.

- LI Yijun, NIE Lingli, ZHANG Wen, et al. Effects of water, density and fertilizer interaction on yield and yield components of rice[J]. *China Rice*, 2018, 24(6): 67-69, 72.
- [15] LINQUIST B, SNYDER R, ANDERSON F, et al. Water balances and evapotranspiration in water- and dry-seeded rice systems[J]. *Irrigation Science*, 2015, 33(5): 375-385.
- [16] 陈伯全, 杨春, 洪静, 杨亚娟, 等. 水稻节水灌溉技术的研究[J]. *吉林农业科学*, 2004, 29(6): 16-18, 36.
- [17] 陈国林, 王人民, 王兆骞. 不同灌溉方式对水稻产量与生理特性的影响[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(3): 20-26.
- CHEN Guolin, WANG Renmin, WANG Zhaoqian. Effects of different irrigation patterns on the yield and physiological characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(3): 20-26.
- [18] CARRUO D R, LUNDY M E, LINQUIST B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 173-180.
- [19] 柯健, 陈婷婷, 徐浩聪, 等. 控释氮肥运筹对钵苗摆栽籼粳杂交稻甬优1540产量及氮肥利用的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(7): 1372-1382.
- KE Jian, CHEN Tingting, XU Haocong, et al. Effects of different application methods of controlled-release nitrogen fertilizer on grain yield and nitrogen utilization of indica-japonica hybrid rice in pot-seedling mechanically transplanted[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(7): 1372-1382.
- [20] SUN Y, MI W H, SU L J, et al. Controlled-release fertilizer enhances rice grain yield and N recovery efficiency in continuous non-flooding plastic film mulching cultivation system[J]. *Field Crops Research*, 2019, 231: 122-129.
- [21] 黄恒, 姜恒鑫, 刘光明, 等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(11): 2232-2249.
- HUANG Heng, JIANG Hengxin, LIU Guangming, et al. Effects of side deep placement of nitrogen on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(11): 2232-2249.
- [22] 褚光, 徐冉, 陈松, 等. 控释尿素侧深施对机械精量穴直播水稻产量形成与氮肥利用效率的影响[J]. *作物研究*, 2021, 35(1): 1-7.
- CHU Guang, XU Ran, CHEN Song, et al. Effects of controlled release urea side deep placement on yield formation and nitrogen use efficiency of mechanical precise hill-drop drilling rice[J]. *Crop Research*, 2021, 35(1): 1-7.
- [23] 王宝档, 王朝贤, 董作为, 等. 缓释氮肥与尿素配施对早稻产量和氮肥效率的影响[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(2): 265-267.
- WANG Baodang, WANG Chaoxian, DONG Zuwei, et al. Effect of combination of slow-release nitrogen fertilizer and urea on early rice yield and nitrogen fertilizer efficiency[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(2): 265-267.
- [24] 徐国伟, 赵喜辉, 江孟孟, 等. 轻度干湿交替灌溉协调水稻根冠生长、提高产量及氮肥利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1388-1396.
- XU Guowei, ZHAO Xihui, JIANG Mengmeng, et al. Alternate wetting and moderate drying irrigation harmonize rice root and shoot growth, improves grain yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1388-1396.
- [25] 杨建昌, 张建华. 水稻高产节水灌溉[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- YANG Jianchang, ZHANG Jianhua. High-yielding and water-saving irrigation in rice[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [26] COLLAKU A, HARRISON S A. Losses in wheat due to waterlogging[J]. *Crop Science*, 2002, 42(2): 444-450.
- [27] 吴宗钊, 原保忠. 水肥耦合对水稻生长、产量及氮素利用效率的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 199-207, 215.
- WU Zongzhao, YUAN Baozhong. Effect of water and fertilizer coupling on growth, yield and nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(4): 199-207, 215.
- [28] 姜卫兵, 高光林, 俞开锦, 等. 水分胁迫对果树光合作用及同化代谢的影响研究进展[J]. *果树学报*, 2002, 19(6): 416-420.
- JIANG Weibing, GAO Guanglin, YU Kaijin, et al. A review of studies on effect of water stress on photosynthesis and assimilation metabolism in fruit crops[J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(6): 416-420.
- [29] 杨京平, 陈杰. 不同生长时期土壤渍水对春玉米生长发育的影响[J]. *浙江农业学报*, 1998, 10(4): 188-192.
- YANG Jingping, CHEN Jie. The effects of soil waterlogging at different growth stages on the growth and development of spring corn: [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1998, 10(4): 188-192.
- [30] GUO J J, FAN J L, XIANG Y Z, et al. Coupling effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer type on grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-irrigated maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107389.
- [31] 吴文革, 张洪程, 钱银飞, 等. 超级杂交中籼水稻物质生产特性分析[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(3): 287-293.
- WU Wenge, ZHANG Hongcheng, QIAN Yinfei, et al. Analysis on dry matter production characteristics of middle-season indica super hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(3): 287-293.
- [32] 孟翔燕, 周凌云, 张忠学, 等. 不同灌溉模式对水稻生长、水分和辐射利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 285-292.
- MENG Xiangyan, ZHOU Lingyun, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different irrigation patterns on growth, water and radiation use efficiency of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 285-292.
- [33] 鲁艳红, 纪雄辉, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 490-495.
- LU Yanhong, JI Xionghui, ZHENG Shengxian, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on reducing nitrogen runoff loss and increasing nitrogen recovery efficiency of rice plant[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 490-495.
- [34] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(12): 2221-2232.
- SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, LIU Shujin, et al. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2221-2232.
- [35] 褚光, 徐冉, 陈松, 等. 干湿交替灌溉对籼粳杂交稻产量与水分利用效率的影响及其生理基础[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(7): 1499-1511.
- CHU Guang, XU Ran, CHEN Song, et al. Effects of alternate wetting and soil drying on the grain yield and water use efficiency of indica-japonica hybrid rice and its physiological bases[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(7): 1499-1511.
- [36] HUANG M, YANG C L, JI Q M, et al. Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of Southern China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 149: 187-192.
- [37] 叶家敏, 刘逊忠, 刘旭钦. 有机无机缓释肥一次性施用对超级稻产量及效益的影响[J]. *农业科技通讯*, 2013(4): 63-66.
- [38] ZHANG W Y, YU J X, XU Y J, et al. Alternate wetting and drying irrigation combined with the proportion of polymer-coated urea and conventional urea rates increases grain yield, water and nitrogen use efficiencies in rice[J]. *Field Crops Research*, 2021, 268: 108165.
- [39] DING W C, XU X P, HE P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11-18.
- [40] FU J, HUANG Z H, WANG Z Q, et al. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice[J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(2): 170-182.

An Optimized SCS-CN Method to Calculate Runoff over Different Underlying Surfaces in Yanqing District of Beijing

LI Zhimei

(Water and Soil Conservation Management Station of Yanqing District Water Bureau of Beijing, Beijing 102100, China)

Abstract: 【Objective】 The soil conservation service curve number (SCS-CN) method is an empirical model developed in the 1950s to estimate event-based rainfall-runoff response. We propose an optimized SCS-CN in this paper and apply it to calculate runoffs in different underlying surfaces in Yanqing District of Beijing. 【Method】 Seven different underlying surfaces were selected, and long-term measured rainfall and runoff from each is used to establish and validate the improved SCS-CN model. 【Result】 ①The results calculated using the standard SCS-CN model are higher than the measured values from all seven underlying surfaces. ②The improved SCS-CN model is more accurate than the standard SCS model to reproduce the measured data. ③The improved SCS-CN model is most accurate for estimating runoffs in fallow land, followed by forest land and cultivated land. 【Conclusion】 The standard SCS-CN model is not suitable for calculating runoff in the seven underlying surfaces in Yanqing District of Beijing, and the proposed SCS-CN model significantly improves it.

Key words: SCS-CN model; runoff calculation; runoff curve; model improvement; Yanqing District

责任编辑：白芳芳

（上接第 78 页）

The Combined Effect of Irrigation and Nitrogen Fertilization on Dry Matter and Yield of Rice

PAN Chen, YANG Yu, QI Dongliang*

(College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: 【Objective】 Nitrogen uptake and its translocation in crops is modulated by soil water. In this paper, we studied the combined impact of different irrigations and fertilizations on dry matter accumulation and yield of rice.

【Method】 The experiment was carried out in the field, with the variety Liangyou 152 used as the model plant. The experiments consisted of two irrigation methods: conventional irrigation (CF) and alternating wet and dry irrigation (AWD). For each irrigation method, there were three nitrogen applications: 240 kg/hm² of traditional urea (N1), 144 kg/hm² controlled-release urea + 96 kg/hm² traditional urea (N2), and 240 kg/hm² controlled-release urea (N3). For each treatment, we measured the change in *SPAD* in the leaves, plant height and the total numbers of heads, dry matter accumulation in each organ at the panicle extraction and maturity stages, as well as grain yield and its formation. 【Result】 When nitrogen application was the same, AWD increased *SPAD*, crop growth, tillering panicle formation rate, dry matter accumulation and distribution ratio of rice leaves from jointing to filling stages. When irrigation was the same, compared to N1, N2 and N3 increased the stem tillering panicle formation rate, crop growth rate, dry matter accumulation, the numbers of grains per panicle, 1 000-grain weight, fruiting rate and grain yield; the yield of N2 was higher than that of N3. Overall, AWD+N2 increased *SPAD*, stem tiller panicle rate, crop growth rate, dry matter accumulation, harvest index, panicle number, 1 000-grain weight, seed setting rate, and grain yield of rice, compared with other treatments. 【Conclusion】 Alternating wet and dry irrigation combined with fertilization of 144 kg/hm² controlled-release urea and 96 kg/hm² traditional urea is most effective to reduce ineffective tillering, improve nitrogen in the crop, and promote dry matter accumulation and its translocation to rice grains.

Key words: rice; alternate wetting and drying irrigation; controlled-release urea; harvest index; dry matter

责任编辑：白芳芳