

水分管理对旱直播稻生长、氮磷吸收及土壤分布的影响

李夏雯, 卢树昌

(天津农学院农学与资源环境学院, 天津, 300384)

摘要:为提高旱直播稻的水分利用效率、降低旱直播稻田土壤氮、磷素环境风险,本文采用两种水分管理方式,即湿润灌溉(T1)和关键需水期灌溉(T2),研究水分管理对旱直播稻生长、养分吸收及稻田土壤氮、磷素迁移情况的影响。结果表明,T2处理有利于促进旱直播稻中后期生长,在拔节孕穗期株高为80.61 cm,SPAD值为41.03,均显著高于T1,光合速率较T1高出20.73%;在分蘖期、拔节孕穗期和灌浆期叶面积分别为40.08、37.49 cm²和32.35 cm²,较T1分别提高9.24%、6.11%和13.51%。T1处理的干物质质量和总吸氮量较高,分别为30 568.65 kg·hm⁻²和287.70 kg·hm⁻²,T2处理总吸磷量高于T1,为44.85 kg·hm⁻²,其稻谷吸磷量达26.70 kg·hm⁻²。T1产量构成因子优势明显,产量较高,为12 666.00 kg·hm⁻²。T2处理下土壤脲酶和碱性磷酸酶活性显著增加,较种植前增幅达38.21%和73.33%,分别较T1增加3.94%和6.82%。土壤氮、磷迁移方面,T2能够显著降低4个土层(0~30,30~60,60~90,90~120 cm)的硝态氮、有效磷和水溶性磷含量,降幅分别为17.48%~65.92%、16.18%~57.47%和10.34%~7.53%,对减缓土壤氮、磷迁移有显著效果。

关键词:旱直播稻;水分管理;生长;氮磷吸收;土壤氮磷分布

中图分类号:S511.6;S365 **文献标志码:**A

Effects of water management on growth, uptake and soil distribution of nitrogen and phosphorus in dry direct seeding rice

LI Xiawen, LU Shuchang

(College of Agronomy and Resources Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Two water management methods, namely moist irrigation (T1) and critical water demand irrigation (T2), were used to study the effect of water management on the growth, nutrient absorption and nitrogen and phosphorus migration of dry direct seeding rice and improve the water use of dry direct seeding rice and reduce the environmental risk of soil nitrogen and phosphorus in dry direct seeding rice field. The results showed that T2 treatment was beneficial to promote the growth of dry direct seeding rice in the middle and late stage. The plant height was 80.61 cm at jointing booting stage, the SPAD value was 41.03, which were significantly higher than T1. The photosynthetic rate was 20.73% higher than T1, and the leaf areas were 40.08, 37.49 cm² and 32.35 cm² at tillering stage, jointing booting stage and filling stage, which was 9.24%, 6.11% and 13.51% higher than that of T1, respectively. The dry matter mass and total nitrogen uptake of T1 treatment were higher, which were 30 568.65 kg·hm⁻² and 287.70 kg·hm⁻², respectively. The total phosphorus uptake of T2 treatment was higher than T1, which was 44.85 kg·hm⁻², and the phosphorus uptake of rice was 26.70 kg·hm⁻². T1 had obvious advantages in yield components, with a higher yield of 12 666.00 kg·hm⁻². Under T2 treatment, the activities of soil urease and alkaline phosphatase increased significantly, up to 38.21% and 73.33% compared with the basic value, and 3.94% and 6.82% compared with T1. In terms of soil nitrogen and phosphorus migration, T2 significantly reduced the content of nitrate nitrogen, available phosphorus and water-soluble phosphorus in four soil layers (0~30, 30~60, 60~90~120 cm).

90 cm and 90~120 cm), with the decrease of 17.48%~65.92%, 16.18%~57.47% and 10.34%~7.53%, respectively. The reduction had a significant effect on slowing down soil nitrogen and phosphorus migration.

Keywords: dry direct seeding rice; water management; growth; nitrogen and phosphorus absorption; soil nitrogen and phosphorus distribution

我国常规水稻生产中大水灌溉下淋失、地表蒸发等途径造成稻田水分利用率低,严重制约我国水稻种植的可持续发展^[1]。不合理施肥导致大量氮、磷素在土壤中积累,长期淹水覆盖增加了氮磷向土壤下层及周围的扩散运移,不利于氮、磷等营养元素的保持,且易造成环境风险^[2-5]。

旱直播稻节水显著且水分利用率高,能够缓解中国农业用水短缺问题,同时可确保粮食安全。在农业生产过程中,水分作为土壤肥力中最活跃的因素,不仅影响着作物生长,对土壤氮磷的流失也起着决定性作用。而稻田采用间歇灌溉能减少灌溉用水量、减少溢流损失,减少氮磷的渗漏量及地表流失量^[6-7]。有研究表明,节水灌溉可以有效减少肥水流失,降低耗水量,提高水分利用效率,减少水体污染,有利于保护生态环境^[8-10]。WANG 等^[11]研究表明,相比水层灌溉,轻干湿交替灌溉可以调节地上部冠层结构,能控制不必要的营养生长,从而增源扩库达到产量增加的目的。魏永霞等^[12]研究表明,滴灌旱直播相对于淹水灌溉,虽除分蘖末期外在其他生育时期内光合速率较低,但显著提高了水分利用效率。旱直播稻田中,适度的干湿交替管理措施在一定程度上可以调节水稻根系周围的土壤水分和氧气平衡,从而有利于促进水稻的生长发育和产量形成,同时减少了氮磷的扩散运移,降低稻田土壤氮磷环境风险。

目前,对旱直播稻的研究大多集中在栽培技术以及施肥管理等方面,而对旱直播栽培技术下水分管理方式对水稻生长特性以及土壤氮磷迁移效应的影响研究相对较少,基于此,本试验提出在田面湿润和关键需水期灌溉两种水分管理方式下,结合优化施肥,探究水分管理对旱直播稻长势、养分吸收及稻田土壤氮磷迁移情况的影响,以期为北方旱直播稻栽培合理灌水、提高水氮利用效率、降低土壤氮磷迁移环境风险提供一定参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于天津市武清区大孟庄镇后幼庄村,地理位置 116°57'E,39°32'N。该区为暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量 550~606 mm,60%集

中在 6—8 月。土壤类型为潮土,土壤质地为轻壤,土壤 CEC 15.54 cmol · kg⁻¹,保水保肥性能较差,表层(0~30 cm)土壤有机质 21.21 g · kg⁻¹、全氮 1.86 g · kg⁻¹、硝态氮 10.51 mg · kg⁻¹、有效磷 34.56 mg · kg⁻¹、速效钾 212.37 mg · kg⁻¹,地力中等以上。30~120 cm 以下土层硝态氮含量为 9.3~11.85 mg · kg⁻¹、有效磷含量为 6.28~11.74 mg · kg⁻¹。由于试验区常年大水漫灌,含水量较高的轻质土壤中氮磷移动扩散性较强,存在较大氮磷向深层运移的潜在环境风险。

1.2 供试作物

早稻,品种为津原 E28。该品种为粳型常规稻,京津唐地区种植全生育期平均 178 d。

1.3 试验设计

试验时间为 2020 年 5—10 月,采用田面湿润和关键需水期两种水分管理方式,设计 2 个处理,即 T1(湿润灌溉),T2(关键需水期灌溉),3 次重复,设置保护行,共 6 个试验小区,单个小区面积 36 m²(6 m × 6 m),播种量为 90 kg · hm⁻²。两种灌溉方式按照各自 3 个小区分开设计,中间采用 1.5 m 的空白间隔带。

试验全生育期有效降水量为 250 mm,水稻需水量为 950 mm^[13],适用于平水年华北单季稻稻作区,全生育期灌水量=作物需水量-有效降水量^[14-15]。

湿润灌溉即旱直播后立即进行田间灌水等待出苗,在整个生育期内,灌小水、保持土壤湿润,全生育期灌水量 7 500 m³ · hm⁻²,10~15 d 灌一次,每次 750~900 m³ · hm⁻²。关键需水期灌溉即旱直播后待秧苗长到 1 叶 1 心时开始进行田间灌水,保证水稻分蘖期、孕穗抽穗期及灌浆期的生理需水,适时进行补水,全生育期灌水 6 次,每次 750~900 m³ · hm⁻²,总灌水量 4 500 m³ · hm⁻²。

田间管理:全生育期施用纯氮 300 kg · hm⁻²、P₂O₅ 90 kg · hm⁻²、K₂O 75 kg · hm⁻²。氮肥分为整地、分蘖期、分蘖末期、拔节孕穗期 4 次施用,分别按照 40%、20%、20%、20%施入,即基追比 4 : 6,以尿素形式提供;磷、钾作为基肥一次性施入,以磷酸二铵和硫酸钾形式提供。

1.4 测试方法

株高:茎基部至穗尖的高度,用卷尺测量;叶绿素含量:分别取叶片叶尖、叶中和叶基各部位,用叶

绿素仪(日本柯尼卡美能达,型号为 SPAD-502)测定,取平均值;光合速率:用光合仪(型号为 CI-340,购于北京思爱迪生态科学仪器有限公司)于 10:00 进行测定。叶面积:测定叶长、叶宽,采用校正系数法(叶长×叶宽×0.7348)测定叶面积^[16]。以上叶片取样部位均为顶部倒三叶。

收获时,将旱直播稻分茎叶、根、穗三部分称重后自然风干晾晒,然后在 75℃ 烘干至恒重,计算干物质量。植物样品经浓硫酸-H₂O₂ 消煮后,分别采用凯氏定氮法、钒钼黄比色法测定各部位全氮、全磷含量,并计算各部位吸氮量(吸氮量=干物质量×含氮量)、吸磷量(吸磷量=干物质量×含磷量)。收割前每小区取 5 穴考种,测定有效穗数、每穗粒数、千粒重和结实率。

土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定,以 NH₄-N mg·g⁻¹土(37℃,24 h)表示;土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;土壤硝态氮含量采用氯化钙溶液浸提-紫外分光光度法测定;土壤有效磷含量采用碳酸氢钠溶液浸提-钼蓝比色法测定;土壤水溶性磷含量采用氯化钙溶液浸提-钼蓝比色法测定。

1.5 数据处理与分析

应用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析,用 Duncan 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同水分管理方式下旱直播稻的生长状况

如表 1 所示,两个处理的株高均随生长时期的递进呈增加趋势,叶绿素含量均在分蘖期达到最高,而后随生育进程逐渐下降。T1 处理株高在分蘖期高于 T2 处理,在拔节孕穗期显著低于 T2 处理,T2 处理 3 个时期的叶绿素含量均高于 T1,说明 T1

湿润管理下旱直播稻生长初期长势较快,T2 关键需水期管理有利于旱直播稻生育中后期生长。

随生育进程,两个处理旱直播稻不同生育时期光合速率和叶面积均呈现下降趋势。T1 处理在分蘖期光合速率较 T2 处理高 5.39%,而在拔节孕穗期,T2 处理的光合速率较 T1 处理高 20.73%。T2 处理在分蘖期、拔节孕穗期和灌浆期的叶面积均高于 T1 处理,增幅分别为 9.24%、6.11%和 13.51%。整体来看,T2 关键需水期管理方式下旱直播稻叶面积大、叶绿素含量高,中后期光合速率也较高,较 T1 湿润管理长势好。

2.2 不同水分管理方式下旱直播稻的干物质量、养分吸收及产量

如表 2 所示,T1 湿润管理方式下干物质量较高,为 30 568.65 kg·hm⁻²,较 T2 处理增加 11.93%。氮素吸收方面,两处理均为茎叶>稻谷>根,总吸氮量 T1 处理显著高于 T2。茎叶部分 T1 处理吸氮量较高,较 T2 处理增加 29.70%,差异显著,占总吸氮量的 36.18%,而 T2 茎叶部分则占总吸氮量的 31.76%。根部、稻谷同样为 T1 吸氮量较高,但与 T2 间未达显著差异。说明 T1 处理利于干物质量的积累,对旱直播稻氮素吸收有明显的促进作用。磷素吸收方面,如图 1 所示,T1 处理下茎叶、根部磷素吸收量分别为 14.16、6.56 kg·hm⁻²,均显著高于 T2 处理。T2 处理总吸磷量较高为 44.90 kg·hm⁻²,稻谷吸磷量为 26.60 kg·hm⁻²,显著高于 T1 处理,增加了 13.22%。表明 T2 处理对促进稻谷磷素吸收效果显著。

由表 3 可知,产量上 T1 处理较高,为 12 666.00 kg·hm⁻²,较 T2 处理增加了 16.48%。产量构成因子方面,T1 处理下优势明显,其有效穗数、每穗粒数和结实率均显著高于 T2 处理,增幅分别为 4.24%、7.20%和 1.60%,千粒重高于 T2 但差异未达显著水

表 1 不同水分管理方式下旱直播稻各生育期的生长状况

Table 1 Growth status of dry direct seeding rice at each growth stage under different water management modes

生育时期 Growth period	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	叶面积 Leaf area/cm ²	叶绿素含量 Leaf color/SPAD	光合速率 Photosynthetic rate /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
分蘖期 Tillering stage	T1	46.30±6.21a	36.69±2.83b	42.03±0.77a	27.77±3.23a
	T2	45.29±5.10b	40.08±3.60a	42.10±1.32a	26.35±4.68b
拔节孕穗期 Jointing booting stage	T1	77.39±4.13b	35.33±3.50b	38.21±2.61b	13.75±1.13b
	T2	80.61±2.44a	37.49±0.86a	41.03±1.89a	16.60±3.25a
灌浆结实期 Grouting period	T1	92.10±2.81a	28.50±3.17b	35.92±1.57b	6.85±1.25a
	T2	91.40±4.57b	32.35±2.14a	37.72±2.76a	5.05±0.90a

注:同列不同小写字母表示相同生育期处理间差异显著(P<0.05),表中数值为平均值±标准偏差。下同。
Note:Different lowercase letters in the same column indicate that there are significant differences among treatments in the same growth period (P<0.05), and the values in the table are the mean ± standard deviation. The same below.

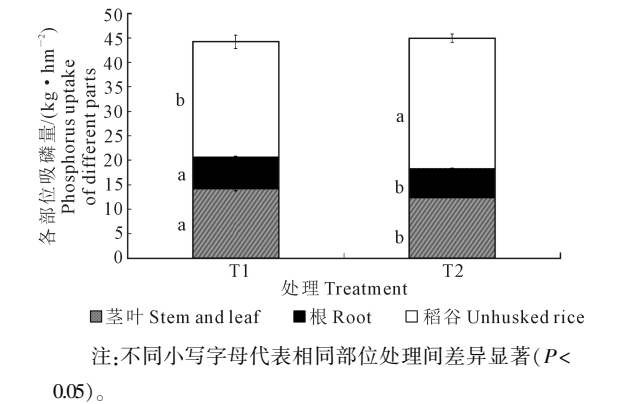
平,说明在湿润灌溉条件下能够促进穗部发育,更有利于提高旱直播稻有效穗数、每有效穗总粒数,以及获得较高结实率以增加产量,而在关键需水期干湿交替的灌溉方式对产量因素有一定影响。

2.3 不同水分管理方式下旱直播稻田土壤氮磷运移情况

2.3.1 土壤脲酶、磷酸酶活性 如表 4 所示,与种植前相比,种植后两处理均能显著提高土壤脲酶、磷酸酶活性,其中 T2 处理显著提高了 38.21% 和 73.33%;与 T1 相比,T2 处理的脲酶、磷酸酶活性分

表 2 不同水分管理方式下旱直播稻干物质量及吸氮量/(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	干物质量 Dry biomass	吸氮量 Nitrogen uptake			
		茎叶 Stem and leaf	根 Root	稻谷 Unhusked rice	总计 Total
T1	30568.65	104.09±4.17a	26.79±1.14a	156.81±4.91a	287.69±3.41a
T2	27310.80	80.25±0.59b	24.12±1.23a	148.31±2.36a	252.69±1.40b



Note: Different lowercase letters represent significant differences between treatments of the same part ($P < 0.05$).

图 1 不同水分管理方式下旱直播稻的吸磷量
Fig.1 Phosphorus uptake of dry direct seeding rice under different water management modes

表 3 不同水分管理方式下旱直播稻产量及其构成因素
Table 3 Yield and its components of dry direct seeding rice under different water management modes

处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	有效穗数 /(个·m ⁻²) Number of productive ear (No.·m ⁻²)	每有效穗 总粒数 Number of grain per productive ear	千粒重 Thousand kerner weight/g	结实率 Setting percentage/%
T1	12666.00	172.00a	134a	29.40a	82.70a
T2	10873.65	165.00b	125b	28.80a	81.40b

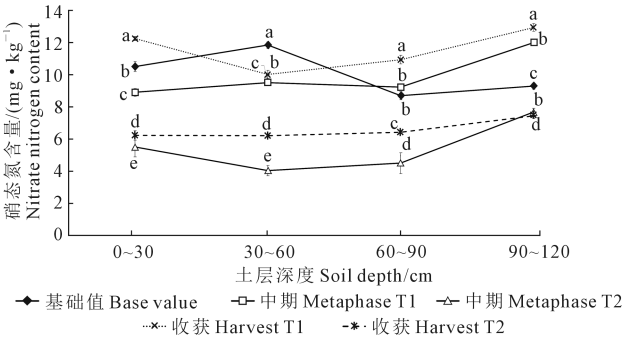
别提高了 3.94% 和 6.82%。说明 T2 处理对脲酶和磷酸酶活性促进作用更明显,进而有利于促进旱直播稻植株对土壤氮、磷的向上吸收。

2.3.2 土壤硝态氮含量 如图 2 所示,种植后两个时期(中期,9 月 12 日,拔节孕穗期;收获期,10 月 31 日,结实期,下同)T2 处理均能够显著降低 4 个土层的硝态氮含量,降幅在 17.48%~65.92%;T1 处理中期与收获期 30~60 cm 土层的硝态氮含量分别较种植前降低 15.27%和 15.42%,在 60~90 cm 土层硝态氮含量升高但差异不显著,在 90~120 cm 土层硝态氮含量显著增加了 28.93%。与中期相比,收获期各土层硝态氮含量均有增加趋势,可能因为结实期追施了尿素,未被吸收利用的氮素随水向下运移,但在 90~120 cm 土层,T2 处理较种植前降低了 3.01%,说明 T2 处理降低氮素迁移效果较好。综上,T2 处理 4 个土层中硝态氮含量的降低幅度最大,即 T2 处理能够显著降低硝态氮含量,对减少土壤氮素迁移有明显效果。

2.3.3 土壤有效磷含量 如图 3 所示,在中期,与基础值相比,T2 处理能够显著降低各个土层土壤有效磷含量,降幅在 16.18%~57.47%之间,较 T1 处理各个土层显著(30~60 cm 除外)降低 6.73%~37.63%,

表 4 不同水分管理方式下稻田土壤脲酶、磷酸酶活性
Table 4 Activities of urease and phosphatase in paddy soil under different water management

处理 Treatment	脲酶/(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹) Urease	碱性磷酸酶/(mg·100g ⁻¹ ·h ⁻¹) Alkaline phosphatase
基础值 Base value	0.192±0.002c	0.068±0.003c
T1	0.255±0.005b	0.111±0.004b
T2	0.265±0.001a	0.117±0.001a



Note: Different lowercase letters represent significant differences among treatments in the same soil layer ($P < 0.05$), the same below.
图 2 不同水分管理方式下稻田各土层的土壤硝态氮含量
Fig.2 Soil nitrate nitrogen content in different soil layers of paddy field under different water management methods

而 T1 处理在 90~120 cm 土层较种植前有所增加,表明其中期磷素向深层运移。收获期,相比种植前 T1、T2 处理均只在 0~30 cm 和 30~60 cm 土层降低了有效磷含量,T2 处理效果明显,在两土层较基础值的降低率分别为 13.85% 和 21.71%,较 T1 处理分别降低 8.04% 和 18.05%;在 60~90 cm 和 90~120 cm 土层,两处理有效磷含量较种植前均有所增加,在 90~120 cm 土层,T1 处理较种植前增加 25.16%,较 T2 处理增加 20.72%,向深层迁移度较大,表明湿润灌溉下相对增加了磷素迁移风险。综上,T2 需水关键期灌溉方式能够弱化磷素随水流失扩散,有效将土壤磷素固持在土壤表层,减缓磷素向下迁移程度。

2.3.4 土壤水溶性磷含量 如图 4 所示,与种植前相比,T2 处理两个时期均能够不同程度地降低 4 个土层土壤水溶性磷含量,降幅在 10.34%~37.53%;中期 T1 在 0~30 cm 和 30~60 cm 土层水溶性磷含量有所降低,降幅为 12.78%~26.77%;在 60~90 cm 和 90~120 cm 土层水溶性磷含量有不同程度的增加,说明 T1 处理在种植后有磷素向下迁移情况。收获期与中期相比,T2 处理各土层水溶性磷含量均有不同程度的降低,其中在 0~30 cm 和 30~60 cm 土层降低明显,分别达 8.62% 和 9.42%;T1 处理则增

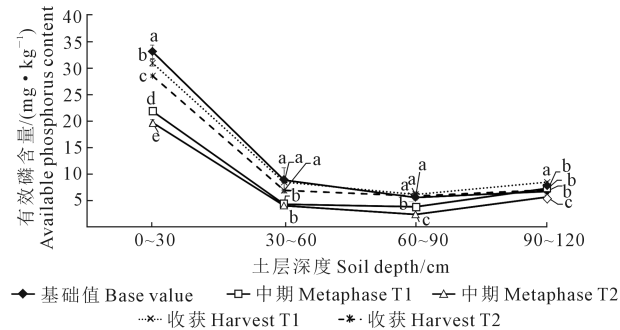


图 3 不同水分管理方式下稻田各土层的土壤有效磷含量
Fig.3 Soil available phosphorus content in each soil layer of paddy field under different water management methods

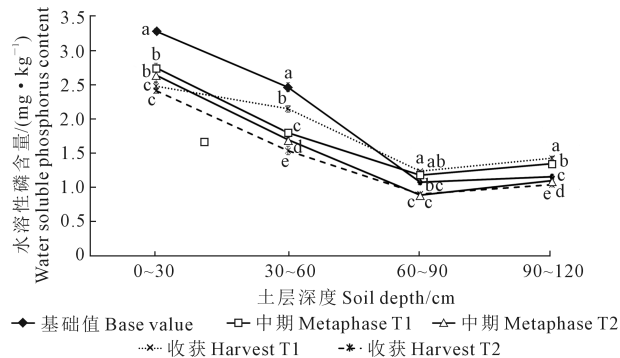


图 4 不同水分管理方式下稻田土壤水溶性磷含量
Fig.4 Content of water-soluble phosphorus in paddy soil under different water management modes

加了水溶性磷含量,且在 30~60 cm 增幅最大 (19.0%),说明 T2 处理降低 4 个土层中水溶性磷含量效果最好,对减缓土壤磷素向深层迁移效果显著。

3 讨论

本试验结果表明,T2 处理生长前期株高较低,这与赵步洪等^[17]研究相符,即水分亏缺致使细胞代谢、营养物质运输受阻,株高降低^[18-19]。而中后期优势明显,这可能是适度的水分胁迫改善了干物质积累,株高增加^[20]。殷大伟^[21]研究认为,全生育期轻干湿交替灌溉可以提高水稻尤其是中后期的株高,这与本试验研究结果一致。本研究发现,较 T1 处理,T2 处理下适度干旱使得中后期叶片叶绿素含量升高,这与刘艳等^[22]研究相一致,干湿交替使土壤通气性提高,促进根系良好发育进而提高对水分、养分的吸收,使 SPAD 值显著提高。

有研究表明,水稻控制灌溉和旱作管理下叶片光合速率较淹灌均有所下降^[23-24],本研究得到,T2 处理光合速率在分蘖期较低,生育中后期表现较高,较 T1 处理高出 20.73%,灌浆结实期差异较小,这可能是由于干旱控制造成叶片含水率下降,叶间蒸腾作用加剧,在消耗单位水量情况下,有机物积累增加^[25],另外水分胁迫使得旱直播稻中后期根系发达,拔节孕穗期 T2 处理光合速率明显高于 T1 处理,说明根据作物需水规律进行适度节水灌溉,也能促进旱直播稻正常生长。本试验 T2 处理叶面积在生育中后期始终维持较高水平,这是由于水分胁迫延缓了叶片衰老,与于美芳^[26]研究结果一致。

本试验研究发现,干物质质量与吸氮量方面 T2 处理较低,这可能由于拔节孕穗期之后水分胁迫促进根系发育,根系活力提高且获得较高根部干物质累积,而这对旱直播稻籽粒生长产生了负向影响^[27],因而影响了产量。磷素吸收方面,T2 稻谷吸磷量显著高于 T1,这可能由于适度干旱下作物内部运转加快,促进了旱直播稻磷素养分从茎叶向稻谷的运输。研究表明,直播稻后期干物质质量积累与有效穗数呈正相关^[28-30],与本试验 T1 湿润灌溉下增加了有效穗数及每有效穗总粒数的结果相一致,湿润条件下保证了水分充足,能够加快地上部物质运转,促进灌浆,提高产量。

本文研究结果,试验中期 T1 处理土壤硝态氮含量在 60~90 cm 和 90~120 cm 两土层较种植前有所升高,并且在 90~120 cm 土层达显著差异,这可能由于湿润管理下,旱直播稻生育中期需水旺盛,累积在土壤中的硝态氮没有被及时汲取,在灌水的淋洗向下迁移脱离根区^[31],增加了硝态氮向深层

的迁移;而在试验后期,T1 处理土壤硝态氮含量除在 30~60 cm 土层含量降低外,在其他土层均有显著增加,此为灌水加大与后期追肥的共同影响,这与前人研究相一致,即土壤水分下渗会引起硝态氮的淋失,且随降水或灌溉增多而淋失增大^[32-33]。而 T2 处理土壤硝态氮含量较种植前能够保有降低趋势,且在各个时期显著低于 T1,可能因为干湿交替减缓了灌溉造成的下渗累积,适度干旱下土壤通气性增强,早直播稻根系发达且酶活性提高,有利于促进氮素向上吸收利用。有研究发现,作物获产后硝态氮在土壤含量会升高^[34],这与本试验收获时期硝态氮含量较中期升高的结果相一致。

本试验 T2 处理降低 4 个土层有效磷、水溶性磷含量的优势明显,降幅分别为 16.18%~40.50% 和 10.34%~37.53%,可能由于干湿交替下土壤通透性强,氧化条件促进了亚铁离子向三价铁离子转化,土壤对磷亲和力增强,进而能够将磷素固持在土壤表面,降低了有效磷含量^[35];另外,土壤碱性磷酸酶活性提高,土壤磷素周转加快,促进磷素向上吸收,这与余双等^[36]研究结果相一致,说明 T2 关键需水期灌溉有利于磷素的保持,能够降低磷素向深层迁移的风险。

4 结 论

T2 关键需水期灌溉方式有利于促进早直播稻中后期生长发育。T1 湿润灌溉能够获得较高干物质与吸氮量,分别为 30 568.65 kg·hm⁻² 和 287.70 kg·hm⁻²,而 T2 处理对促进稻谷部位磷素吸收效果显著,稻谷吸磷量达 26.70 kg·hm⁻²。从产量看,T1 能够提高有效穗数、每有效穗总粒数、千粒重和结实率,获得较高产量 12 666.00 kg·hm⁻²。从土壤氮磷迁移方面看,T2 关键需水期灌溉方式显著降低了早直播稻田土壤 4 个土层的硝态氮、有效磷和水溶性磷含量,对减缓氮磷迁移有显著效果,能够有效降低土壤氮磷迁移造成的环境风险。

参 考 文 献:

- [1] 陈钰佩.氮素形态和水分条件对水稻通气组织及水分吸收影响的研究[D].南京:南京农业大学,2016.
CHEN Y P. Effect of nitrogen forms and water station on the root aerenchyma formation and water uptake of rice seedlings [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [2] 李勇,杨林章,殷广德.太湖地区直播稻田氮素渗漏损失试验研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):99-104.
LI Y, YANG L Z, YIN G D. Experimental study on nitrogen leaching in a direct-seeding rice paddy of Taihu lake basin[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(1): 99-104.
- [3] 刘海东,唐湘如,赵烈,等.不同施肥深度对直播水稻氮素积累与转移的影响[J].华北农学报,2016,31(5):216-221.
LIU H D, TANG X R, ZHAO L, et al. Influences of different nitrogen application depths on nitrogen accumulation and transfer in direct-seeded rice[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(5): 216-221.
- [4] DE JAGER P C, CLAASSENS A S. Long-term phosphate desorption kinetics of an acid sandy clay soil from Mpumalanga, south Africa[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36(1/3): 309-319.
- [5] 章明奎,王丽平.旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J].农业环境科学学报,2007,26(1):282-285.
ZHANG M K, WANG L P. Study on vertical migration mechanism of soil phosphorus in Dryland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 282-285.
- [6] 叶优良,李隆.水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J].农业工程学报,2009,25(1):33-39.
YE Y L, LI L. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 33-39.
- [7] 王晓英,贺明荣,刘永环,等.水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J].生态学报,2008,28(2):685-694.
WANG X Y, HE M R, LIU Y H, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 685-694.
- [8] 王唯道,刘小军,田永超,等.不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响[J].生态学报,2012,32(22):7053-7060.
WANG W X, LIU X J, TIAN Y C, et al. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7053-7060.
- [9] 迟道才,佟延旭,陈涛涛,等多生育期不同水分胁迫耦合对水稻产量及水分生产率的影响[J].沈阳农业大学学报,2016,47(1):71-77.
CHI D C, TONG Y X, CHEN T T, et al. Effects of water stress coupling in different growth stage on rice yield and water productivity [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(1): 71-77.
- [10] 陈新红,徐国伟,孙华山,等.结实期土壤水分与氮素营养对水稻产量与米质的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2003,24(3):37-41.
CHEN X H, XU G W, SUN H S, et al. Effects of soil moisture and nitrogen nutrition during grain filling on the grain yield and quality of rice [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Sciences Edition), 2003, 24(3): 37-41.
- [11] 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.
- [12] 魏永霞,侯景翔,吴昱,等.不同水分管理早直播水稻生长生理与节水效应[J].农业机械学报,2018,49(8):253-264.
WEI Y X, HOU J X, WU Y, et al. Effects of different water management on growth physiology and water-saving of dry direct seeding rice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 253-264.
- [13] 刘钰,汪林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(12):6-12.
LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6-12.
- [14] 杨晓琳,梁芳婷,闫菊萍,等.冀中南多样化种植模式的适水效应分析[J].中国农业大学学报,2021,26(4):1-17.
YANG X L, LIANG F T, YAN J P, et al. Research on water requirements of diversified crop rotations in the middle and southern areas of Hebeiprovince [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(4): 1-17.

- [15] 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等.旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J].灌溉排水学报,2007,(3):27-30,34.
LIU Z D, DUAN A W, XIAO J F, et al. Research progress on calculation methods of effective rainfall in growing period on dry crop[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007,(3): 27-30, 34.
- [16] 郁进元,何岩,赵忠福,等.长宽法测定作物叶面积的校正系数研究[J].江苏农业科学,2007,(2):37-39.
YU J Y, HE Y, ZHAO Z F, et al. Study on correction coefficient for measuring crop leaf area by length width method [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2007,(2): 37-39.
- [17] 赵步洪,张洪熙,陈新红,等.不同旱种方式水稻的生长发育与产量形成特性[J].江苏农业学报,2003,19(4):211-217.
ZHAO B H, ZHANG H X, CHEN X H, et al. Growth, development and yield formation characteristics of rice in different dry culture methods [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2003, 19(4): 211-217.
- [18] 周利民,罗怀彬,古璇清.水稻节水灌溉机理研究[J].广东水利水电,2003,(2):29-33.
ZHOU L M, LUO H B, GU X Q. Study on water saving irrigation mechanism of rice[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2003,(2): 29-33.
- [19] 钱银飞,邱才飞,邵彩虹,等.不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻产量及其构成的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):13-19.
QIAN Y F, QIU C F, SHAO C H, et al. Effects of soil water deficit at growing stages on yield formation of double-cropping super indica rice [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 13-19.
- [20] 段素梅,杨安中,黄义德,等.干旱胁迫对水稻生长、生理特性和产量的影响[J].核农学报,2014,28(6):1124-1132.
DUAN S M, YANG A Z, HUANG Y D, et al. Effects of drought stress on growth and physiological feature and yield of various rice varieties [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(6): 1124-1132.
- [21] 殷大伟.控水灌溉对寒地水稻产量和品质的影响[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2010.
YIN D W. Effect of water-controlled irrigation on yield and quality of rice in cold region[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010.
- [22] 刘艳,孙文涛,隗英华.控水对水稻生长发育及产量的影响[J].江苏农业科学,2018,46(4):53-55.
LIU Y, SUN W T, JUAN Y H. Effects of water control on rice growth and yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(4): 53-55.
- [23] 何海兵,武立权,杨茹,等.干旱区控制灌溉下水稻光合特性与蒸腾效率研究[J].农业机械学报,2016,47(9):186-193.
HE H B, WU L Q, YANG R, et al. Photosynthesis characteristics and transpiration efficiency of rice plants under controlled irrigation technology in arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 186-193.
- [24] 王志军,叶春秀,董永梅,等.滴灌和淹灌栽培模式下水稻光合生理、荧光参数及产量构成因素分析[J].植物生理学报,2016,52(5):723-735.
WANG Z J, YE C X, DONG Y M, et al. Photosynthetic physiology, chlorophyll fluorescence parameters and yield components of rice under drip irrigation with plastic film mulching and continuous flooding[J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(5): 723-735.
- [25] 王志军,谢宗铭,田又升,等.膜下滴灌和淹灌两种栽培模式下水稻光合生理特性的研究[J].中国水稻科学,2015,29(2):150-158.
WANG Z J, XIE Z M, TIAN Y S, et al. Photosynthetic characteristics of rice under drip irrigation with plastic film mulching and continuous flooding[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(2): 150-158.
- [26] 于美芳.分蘖期干旱胁迫对寒地梗稻产量形成的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
YU M F. Effects of drought stress at tillering stage on yield formation of japonica rice in cold region[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [27] 吴岳轩,吴振球.播期对亚种间杂交稻根系形态发育和生理活性的影响[J].作物学报,1996,22(2):178-184.
WU Y X, WU Z Q. Effect of sowing date on the morphological development and physiological activities of the root system of intersubspecific hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(2): 178-184.
- [28] 李洪亮,孙玉友,侯国强,等.寒地梗稻产量及其主要构成性状间的关系[J].干旱地区农业研究,2021,39(3):107-112.
LI H L, SUN Y Y, HOU G Q, et al. Relationship between yield and main components of japonica rice in cold region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 107-112.
- [29] 王玉梅,杨广,赵春容,等.不同播种量对直播杂交稻产量及干物质生产的影响[J].杂交水稻,2017,32(3):66-69,78.
WANG Y M, YANG G, ZHAO C R, et al. Effects of different seeding rates on grain yield and dry matter production of direct-seeding hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 2017, 32(3): 66-69, 78.
- [30] 李宗泽,靳晓敏,王思成,等.不同播量对宁夏引黄灌区直播水稻生育特性及产量的影响[J].湖北农业科学,2016,55(14):3549-3552.
LI Z Z, JIN X M, WANG S C, et al. Effects of different seeding rate on growth characteristics and yield of direct seeding rice in Ningxia yellow river irrigation region[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(14): 3549-3552.
- [31] 董强,吴得峰,党廷辉,等.黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):856-863.
DONG Q, WU D F, DANG T H, et al. Effects of different nitrogen reduction modes on yield of spring maize and nitrate-N residue in soils of the southern Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4): 856-863.
- [32] 赵俊晔,于振文.不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J].生态学报,2006,26(3):815-822.
ZHAO J Y, YU Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 815-822.
- [33] 高亚军,李生秀,李世清,等.施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J].水土保持学报,2005,(6):63-66.
GAO Y J, LI S X, LI S Q, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005,(6): 63-66.
- [34] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1358-1365.
LI L, HONG J P, WANG H T, et al. Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(6): 1358-1365.
- [35] 周驰,李阳,曹秀云,等.风干和淹水过程对巢湖流域土壤和沉积物磷吸附行为的影响[J].长江流域资源与环境,2012,21(S2):10-17.
ZHOU C, LI Y, CAO X Y, et al. Effect of air-drying and flooding on phosphorus sorption behavior of soils and sediments along the aquatic-terrestrial ecotone of lake Chaohu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(S2): 10-17.
- [36] 余双,崔远来,王力,等.水稻间歇灌溉对土壤肥力的影响[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(1):46-53.
YU S, CUI Y L, WANG L, et al. Effects of intermittent irrigation on rice paddy soil fertility[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 46-53.