

刘润慧,赵蕾,唐清芸,等.滴水量对新疆水稻不同类型品种根系特征、产量及水分利用效率的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(5):82-93.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.010

滴水量对新疆水稻不同类型品种根系特征、 产量及水分利用效率的影响

刘润慧¹,赵蕾¹,唐清芸¹,王子建¹,张高煜¹,魏萌¹,王国栋²,李玉祥¹

1.石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,石河子 832003;

2.新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所/农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室,石河子 832000

摘要 为提高水稻产量和水分利用效率,以抗旱性不同的2个水稻品种T-43(常规早粳抗旱型水稻)和新稻1号(常规早粳早敏型水稻)为试验材料,设置W1(115.44 L/盆)、W2(98.12 L/盆)、W3(83.41 L/盆)3个滴水量处理,研究抽穗期和抽穗后20 d不同滴水量对水稻根系形态、分布、根冠比、产量和水分利用效率的影响。结果显示,W1处理下,抽穗后20 d各土层T-43品种根长密度(RLD)、根表面积密度(SAD)、根体积密度(RVD)较W2、W3处理分别提高了22.8%和33.1%、21.8%和37.7%、27.7%和32.8%,新稻1号则分别增加80.2%和53.2%、63.3%和88.9%、95.0%和32.3%。W2处理下,抽穗期T-43 RLD和SAD的 β 值较W1处理分别提高了0.4%、1.7%,新稻1号则分别增加0.3%、1.1%,其中抗旱型品种T-43在0~40 cm根长密度(RLD)及比根长(SRL)较其他处理增加了1.2%~55.2%、1.6%~29%;在40~60 cm根表面积密度(SAD)、根干质量(RDW)和平均直径(AvgDiam)分别增加了7.2%~13.8%、1.9%~3.0%、8.8%~9.4%,从而维持了T-43在滴水量比W1处理少17.32 L/盆的W2处理下,产量及其构成因子与W1差异不显著,WUE提高4.5%,而新稻1号随滴水量的减少产量及WUE分别降低了28.3%~79.8%和15.2%~71.7%。相关性分析显示,水稻0~20 cm浅层根系各形态指标与产量、产量构成因子及WUE存在显著或极显著正相关,且大于20~60 cm深层根系。综上,水稻根系形态学指标与产量、WUE间存在密切的相关性;通过适当减少滴水量(15%左右)调控作物浅层根系分布情况,促进抽穗后20 d根系发育,在不显著影响产量的前提下提高了水分利用效率;在生产上还应根据水稻品种对水分响应特性的不同制定合理的灌溉制度,以达到更高经济效益。

关键词 节水灌溉;滴灌;水稻;滴水量;根系特征;产量;水分利用效率

中图分类号 S511; S275.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0082-12

水稻是我国主要粮食作物之一,全国约有一半以上人口以稻米为主食^[1]。同时,我国又是水资源匮乏的国家,如何提高作物的水分利用效率、节约宝贵的水资源已成为当前的研究热点。传统的水稻淹灌种植方式致使农业水资源利用效率极低^[2],这对于干旱半干旱的新疆稻区来说是一项严峻的挑战。在新疆,发展以覆膜滴灌为代表的节水灌溉技术是减少作物棵间蒸发、地表无效径流的有效途径^[3]。覆膜滴灌技术可将水稻所需水分及养分精准、定时、定量输送至作物的根区,实现水肥资源直接利用的同时,有效提高水分、养分利用效率并降低硝酸盐污染^[4],是一种高产兼环境友好型的栽培方式。

植物根系具有吸收土壤水分、养分及固持植株等重要功能,是与外界进行物质、能量交换及合成氨基酸、有机酸、激素等生理调节物质的重要场所^[5]。根系的形态和生理特性等不仅与水稻基因型密切相关,更受环境因子如土壤水分、养分等的形态、有效性及其在土壤中分布的影响^[6-7]。有研究认为,大量灌水并不利于水稻根系的生长^[8],适度干湿交替促使水稻根系深扎,增加根长、根表面积、根体积等形态学指标,可显著促进水稻对水分和养分吸收,有利于协调地上部与地下部的生长发育^[9]。徐国伟等^[10]的研究表明,控制性灌溉可显著增加水稻的根长、根干质量(6.7%~13.3%),并改善植株根冠比,有利于水

收稿日期:2022-08-17

基金项目:国家自然科学基金项目(31860345;31460541);石河子大学青年创新拔尖人才项目(CXBJ202003)

刘润慧,E-mail:1121287408@qq.com

通信作者:李玉祥,E-mail:yxli@shzu.edu.cn;王国栋,E-mail:664812734@qq.com

稻抗旱和产量的提高。相反,长期淹水会使土壤产生过多的还原性亚铁、有机酸和硫化氢等,致使水稻根系积累有毒物质从而抑制水分、养分吸收,进而妨碍水稻根系生长^[8];唐树鹏等^[11]认为适度的干湿交替灌溉有利于提高水稻产量;土壤表层(0~5 cm)根系对产量的贡献率高达65%以上^[12]。这表明,环境因子改变特别是土壤水分变化与水稻根系生长及发育是相互影响且复杂多变的。此外,各土层根系的垂直分布情况也受到水分的影响。为描述根系的垂直分布特征与深度关系,Gale等^[13]提出渐进方程 $Y=1-\beta^d$; β 值越大则表明深层土壤中根系分布的百分比越大, β 值越小说明有分布于土壤表层的根系越多^[13-14]。李鹏等^[15]研究表明细根的 β 值显著大于粗根的 β 值,且有利于对土壤水分的吸收和利用。因此,明确覆膜滴灌水稻不同灌溉量的根系生长发育的特点,有助于通过优化土壤水分等环境因子来协调根系的分布状况及其与地上部关系,达到水稻高产和水分利用效率提高的目的。

迄今为止,前人就传统淹灌、控制灌溉和间歇灌溉等方式调控水稻根系形态、超微结构、分泌物、活性、激素、根冠比以及可塑性等方面进行了大量研究^[16-17];也有滴灌水稻产量形成及农艺性状的研究报道^[3-4],但关于滴水量影响水稻根系形态学指标变化、根冠比及产量、水分利用效率等方面的研究鲜有报道。为此,本试验选用抗旱型水稻品种T-43和早敏感型水稻品种新稻1号作为试验材料,探讨3种滴水量下覆膜滴灌水稻的根系形态特征及不同土层分布情况,分析根系形态与产量、水分利用效率提高间的相关性,以期丰富覆膜滴灌水稻高产栽培理论,为水稻滴灌技术推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于2019年在石河子大学北苑新区试验站

(44°18'N,86°03'E)进行,试验地属温带大陆性干旱半干旱气候,光照充足、降雨稀少、蒸发强烈,年均降雨量115 mm、蒸发量1 942 mm、>10 °C活动积温为3 729 °C左右。2019年水稻全生育期降雨量103.9 mm,>5 mm有效降雨量有7次;全生育期日平均最高气温为27.78 °C,日平均最低气温为8.17 °C。

试验采用壁厚1 cm、直径35 cm、高60 cm的PVC管进行土柱模拟栽培,选取本地区具有代表性的灌耕灰漠土(灌淤旱耕人为土,calcaric fluvisals),过直径2 cm网筛后,按75 kg/管填入土柱内,使土表与PVC管面齐平,然后挖60 cm深的坑将土柱埋入田间,使管面与地表保持齐平并浇水沉实,以防止夏季高温及蒸发强烈对试验带来的误差。田间布设完毕后,搭设防雨设施和遮阳网,根据天气预报提前盖好遮雨薄膜,雨后收起。供试土壤pH 8.4、有机质含量11.21 g/kg、全氮0.74 g/kg、速效磷(P₂O₅)51.2 mg/kg、速效钾(K₂O)193 mg/kg、碱解氮61 mg/kg。

1.2 试验设计

试验为两因素随机区组试验设计。选用抗旱性不同的2个水稻品种T-43(常规早粳抗旱型水稻)和新稻1号(常规早粳早敏型水稻),由新疆天业(集团)有限公司农业干旱研究中心筛选并提供。设置3个滴水量水平,分别为W1(滴灌水稻常规灌溉定额,12 000 m³/hm²,折合115.44 L/盆)、W2(滴水量减15%)、W3(滴水量减25%),每组处理12管(柱),共计72管(柱),具体灌溉处理见表1。水稻全生育期每盆施氮N 29 g, P₂O₅ 26 g, K₂O 23 g, 氮肥料为尿素(N46%), 磷肥为磷酸一铵(N12%、P₂O₅60%), 钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。磷肥与钾肥全部基施,氮肥基施20%,其余80%按照2:3:4:1的比例分别于20、70、90、120 d追施。2019年5月1日人工点播水稻种子,每柱3穴,每穴10粒种子,播深2 cm,播种后架设滴灌带、施肥装置并地膜覆盖,模拟大田滴出苗水,出苗后及时放苗,每穴保苗8株,于9月30日收获。

表1 不同灌水处理

Table 1 Different irrigation water treatments

处理 Treatments	滴水频次/d ⁻¹ Drip frequency	滴水次数 Number of drips	滴水量/[L/(盆·次)] Dripping count	总滴水量/(L/盆) Total water consumption
W1	2	50	2.31	115.44
W2	2	50	1.96	98.12
W3	2	50	1.67	83.41

1.3 测定指标与方法

1) 根系形态学参数测定。在水稻生长至抽穗期

(HS)和抽穗后20 d(20 DAH)分别取样,切割掉土柱外侧的PVC管破坏性取样,将水稻整株从土柱中挖

出。按距地面0~20、20~40、40~60 cm划分为3层,土块置于0.85 mm网筛,流水冲洗干净附着在水稻根系上的土壤,带回实验室测定根系长度、根表面积、平均直径和根系体积等形态学指标。将根系置于有机玻璃根盒内(长28 cm×宽21 cm),保持根盒内装有2/3的水层,镊子轻轻将根系分散开,调整根系位置避免交叉重叠,使根系完全舒展开,使用Epson V800扫描仪以200 dpi分辨率数字化为图形文件,重复3次。

利用WinRHIZO Pro 2017(Canada, Regent Co., Ltd.)根系分析软件,测定各深度水稻根系的总根长、根表面积、平均直径、根体积及根长随直径的分布。其中,根系直径按 ≤ 0.3 、 $0.3\sim 0.9$ 、 ≥ 0.9 mm划分;测定完毕后收集根系80℃烘干至恒质量,千分之一电子天平称量各层根系干物质量,并计算根长密度、根表面积密度、根体积密度、比根长等指标。

2) 渐进方程 β 值计算。渐进方程 $Y=1-\beta^d$ ^[13-14]用来描述农作物、荒漠植物、森林植被等在土壤中根系构型分布情况,本研究用来描述水稻根系总根长、表面积、根体积和根质量等形态学指标垂直分布情况,式中, d 为土壤深度,cm; Y 为地表到土层 d 各形态学指标占总体的比例; β 为深度系数, β 值越小根分布越靠近土壤表面; β 值越大根分布越深;本研究按 $d=20$ cm时的 Y 值来计算 β 值。

3) 干物质量、根干质量与根冠比测定。抽穗期和抽穗后20 d采集水稻根系样品的同时,取各处理地上部植株样品,分茎、叶、穗等器官105℃下杀青30 min,80℃下烘干至恒质量,千分之一电子天平称量各部分干物质量,重复3次,计算水稻根冠比。

4) 产量测定。成熟期调查水稻有效穗数、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重,并按照梗稻14.5%标准含水率折算计产,重复3次。

5) 水分利用效率测定。水分利用效率为水稻产量与全生育期滴水量的比,并按每盆面积与滴水量折算为 kg/m^3 。

1.4 数据处理与绘图

采用Microsoft Excel 2017和DPS 7.05统计软件分析试验数据,采用LSD法多重检验进行均值比较,SigmaPlot 14.0绘图。

2 结果与分析

2.1 不同滴水量对水稻根系形态学指标的影响

如表2所示,滴水量对T-43和新稻1号根系形态学指标的变化有显著影响。抽穗期W2处理下T-43根长密度、根表面积密度和根系平均直径较W1、W3高10.3%和5.3%、15.1%和37.4%、9.4%和18.0%,根长密度达显著差异,而W1处理下新稻

表2 水稻根系形态学指标特征

Table 2 Morphological index characteristics of rice roots

品种(C) Cultivars	处理(W) Treatments	根长密度/(cm/dm ³) RLD		根表面积密度/(cm ² /dm ³) SAD		根系平均直径/mm AvgDiam		根体积密度/(cm ³ /dm ³) RVD	
		抽穗期 HS	抽穗后20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后20 d 20 DAH
T-43	W1	2 822.5±170.4b	4 919.5±62.2a	413.4±53.2a	533.3±29.5a	1.38±0.02a	0.92±0.03a	6.14±0.27a	4.33±0.22a
	W2	3 114.7±68.2a	4 004.6±36.7b	476.0±50.3a	438.0±5.5b	1.51±0.09a	0.92±0.02a	5.87±0.21a	3.39±0.03b
	W3	2 956.2±51.4ab	3 694.9±15.4c	346.5±22.9a	387.2±7.7b	1.28±0.11a	0.92±0.05a	4.96±0.42b	3.26±0.13b
新稻1号 Xindao No.1	W1	3 413.5±81.2a	5 357.2±63.0a	324.9±10.9b	513.0±8.1a	0.87±0.04a	0.93±0.05a	3.43±0.30a	3.90±0.15a
	W2	3 109.8±21.5b	2 973.4±53.9c	411.5±15.3a	314.2±17.8b	0.94±0.01a	0.86±0.05b	3.21±0.16ab	2.00±0.08c
	W3	1 989.4±89.2c	3 497.1±150.7b	303.6±11.8b	271.6±12.3b	0.98±0.03a	0.84±0.00b	2.75±0.08b	2.95±0.19b
F值 F-value									
	C	2.056 9	30.501 7**	11.194 8**	37.601 7**	68.704 5**	2.742 6	193.270 3**	95.450 6**
	W	27.707 8**	205.353 9**	17.992 9**	84.510 2**	2.539 3	2.572 1	9.007 2**	118.284 3**
	C×W	34.337 5**	45.619 2**	0.221 3	4.340 8*	4.131 3	6.351 4*	1.052 7	22.431 5**

注:RLD:根长密度;SAD:根表面积密度;RVD:根体积密度;HS:抽穗期;20DAH:抽穗后20 d;不同字母表示同一指标在同一品种内不同处理之间存在显著差异($P<0.05$);*为0.05水平上显著相关;**为0.01水平上显著相关;下同。Note:RLD:Root length density. SAD:Surfarea density. RVD:Root volume density. HS:Heading stage. DAH:Days after heading. Different letters indicate that the same index has significant differences among different treatments within the same variety ($P<0.05$). *: Significant correlation at 0.05 level; **: Significant correlation at 0.01 level. The same as below.

1号根长密度和根体积密度较W3、W2显著高71.6%和9.8%、24.7%和6.9%。抽穗后20d W1处理下T-43根长密度、根表面积密度和根体积密度较其他处理分别增加22.8%和33.1%、21.8%和37.7%、27.7%和32.8%，新稻1号则增加80.2%和53.2%、63.3%和88.9%、95.0%和32.3%，差异显著。品种间，除根长密度及抽穗后20d根系平均直径，其他指标均表现为T-43比新稻1号高0.16%~45.32%。方差检验表明，抽穗期根长密度、根表面积密度、根系平均直径和根体积密度分别为品种×滴水量、滴水量、品种、品种的F值最大；抽穗后20d品种间根长密度、根表面积密度和根体积密度均为滴水量的F值最大，表明根系受滴水量影响最大，品种与滴水量对各形态学指标存在显著或极显著的交互影响。

2.2 不同直径范围内各根系形态学指标分级特征与差异

由表3可知，各处理下RLD随平均直径增加显著降低。直径≤0.3 mm范围内，T-43 RLD、SAD和RVD在W3处理下最小；抽穗期新稻1号RLD、SAD及RVD在W2处理下最大，抽穗后20d均在W1处理下最大。直径0.3~0.9 mm范围内，抽穗期T-43 RLD、SAD为W2最高，RVD则为W1最高。直径≥0.9 mm范围内，T-43 RLD在W3最短，SAD和RVD在W1最大；新稻1号RVD在W1最大。其中，T-43 RVD在W1与W2处理间差异不显著。品种间，直径≤0.3 mm范围内，T-43 RLD比新稻1号高6.99%~53.93%；直径0.3~0.9 mm范围内，W2处理下，T-43 SAD、RVD均高于新稻1号；直径≥0.9 mm范围内，T-43 RLD、SAD和RVD均高于新稻1号。

表3 不同直径范围内各根系形态学指标的分布

Table 3 Root length density, surface area density and root volume density distribution classified by various root diameters

根系形态指标 Root morphology characteristics.	品种 Cultivars	处理 Treatment	平均直径/mm AvgDiam					
			≤0.3		0.3~0.9		≥0.9	
			抽穗期 HS	抽穗后20d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后20d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后20d 20 DAH
根长密度/ (cm/dm ³) RLD	T-43	W1	1 678.4±35.2b	4 050.3±79a	871.8±17.1ab	1 194.0±41.6a	411.0±21.7a	407.6±32.3a
		W2	1 868.0±25.5a	3 447.7±185.5b	927.0±34.7a	969.6±171.5ab	390.1±17.5a	342.2±33.1ab
		W3	1 538.4±31.5c	3 024.8±95.7c	712.5±77.8b	822.9±30.2b	337.0±3.8b	292.4±4.6b
	新稻1号 Xindao No.1	W1	1 389.3±20.3b	3 719.1±44a	604.6±20.2c	1116.5±61.4a	209.5±13.7b	336.7±10.5a
		W2	1 737.4±104.4a	1 588.2±123c	920.2±42.0a	526.8±206.2b	307.0±19.0a	155.9±53.8b
		W3	1 338.0±32.6b	2 605.8±117.9b	782.5±50.7b	936.1±56.7a	213.0±15.7b	222.0±19.9b
根表面积密度/ (cm ² /dm ³) SAD	T-43	W1	86.7±7.4ab	141.7±4.1a	107.4±4.1a	124.0±4.0a	213.7±3.0a	218.3±5.3a
		W2	91.2±0.5a	112.0±1.7b	153.2±3.5a	137.9±3.0a	185.4±3.1b	133.8±5.4b
		W3	75.8±2.8b	105.0±5.0b	125.2±5.1a	133.3±3.0a	159.3±1.5c	123.3±0.2b
	新稻1号 Xindao No.1	W1	72.9±2.3b	144.3±0.8a	92.5±1.4c	180.3±3.1b	95.6±2.8b	140.3±4.4b
		W2	96.1±3.1a	82.9±1.1b	80.8±0.8a	54.1±1.3a	142.9±5.8b	115.5±1.1a
		W3	79.6±8.6ab	79.2±0.9b	95.4±13.4b	77.6±3.5ab	144.1±29.5a	119.4±2.7c
根体积密度/ (cm ³ /dm ³) RVD	T-43	W1	0.41±0.02a	0.58±0.02a	2.16±0.12a	2.67±0.11a	9.45±0.11a	6.52±0.10a
		W2	0.40±0.00a	0.53±0.12a	2.15±0.02a	2.26±0.16a	9.13±0.13a	5.11±0.21b
		W3	0.33±0.01b	0.42±0.03a	1.84±0.06b	1.92±0.03b	7.80±0.10b	4.91±0.13b
	新稻1号 Xindao No.1	W1	0.25±0.01c	0.62±0.02a	1.46±0.07b	2.76±0.07a	4.20±0.11a	5.32±0.16a
		W2	0.48±0.02a	0.44±0.02b	2.15±0.08a	1.56±0.02a	4.38±0.12a	3.10±0.03b
		W3	0.41±0.02b	0.44±0.05b	1.69±0.02b	1.82±0.08b	2.69±0.12b	2.70±0.10c

2.3 不同直径范围内各根系形态学指标的百分比

由表4可知，随平均直径增加，各处理下RLD百分比显著降低，而RVD百分比显著增加。抽穗期，

直径≤0.3 mm范围内，W3处理下T-43 RLD百分比比较W1、W2高4.9%、1.5%，新稻1号在W2处理下SAD百分比比较W1、W3高7.5%、19.5%；直径0.3~

表4 不同直径范围内各根系形态学指标的百分比

Table 4 Proportion of root length density, surface area density and root volume density with different diameters in total root length

根系形态指标 Root morphology characteristics.	品种 Cultivars	处理 Treatment	平均直径/mm AvgDiam						%
			≤0.3		0.3~0.9		≥0.9		
			抽穗期 HS	抽穗后20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后20 d 20 DAH	
根长密度 百分比 RLD percent	T-43	W1	56.7±0.4b	71.7±0.4a	29.5±0.9a	21.1±0.7a	13.9±0.6a	7.2±0.5a	
		W2	58.6±0.3b	72.6±2.0a	29.1±0.9a	20.2±1.9a	12.3±0.7a	7.2±0.3a	
		W3	59.5±1.7a	73.1±0.5a	27.4±2.0a	19.9±0.6a	13.0±0.4a	7.1±0.2a	
	新稻1号 Xindao No.1	W1	74.5±15.6a	71.9±0.9a	32.7±8.1a	21.6±1.1a	11.3±2.6a	6.5±0.2a	
		W2	58.6±0.9a	70.9±6.0a	31.1±1.2a	22.4±4.8a	10.4±0.5a	6.7±1.1a	
		W3	57.4±1.1a	69.2±1.7a	33.5±1.0a	24.9±1.3a	9.1±0.6a	5.9±0.4a	
根表面积密度百分比 SAD percent	T-43	W1	21.2±1.1a	29.3±0.5a	36.8±0.2a	37.4±0.7a	42.0±0.9b	33.4±0.3a	
		W2	21.2±0.3a	29.2±0.1a	35.6±0.3ab	35.9±1.0b	43.1±0.2ab	34.9±1.0a	
		W3	21.0±0.4a	29.0±0.7a	34.7±0.6b	36.9±0.1ab	44.2±0.8a	34.1±0.7a	
	新稻1号 Xindao No.1	W1	27.9±0.9b	31.0±0.1ab	35.5±0.1b	38.8±0.8a	36.6±0.8a	30.2±0.8a	
		W2	30.0±0.3a	32.8±0.2a	37.5±0.7b	33.8±0.4a	32.5±0.6b	33.4±0.4a	
		W3	25.1±1.2b	28.7±0.3b	45.2±1.3a	38.3±0.5a	29.6±2.3b	33.0±0.6a	
根体积密度 百分比 RVD percent	T-43	W1	3.4±0.1ab	6.0±0.1a	18.0±0.8a	27.3±0.5a	78.6±1.0a	67.7±0.6a	
		W2	3.4±0.1a	6.7±1.2a	18.4±0.1a	26.5±0.6a	78.2±0.2a	64.7±1.8a	
		W3	3.3±0.1b	5.8±0.4a	18.5±0.6a	28.6±0.6b	78.2±0.7a	66.7±1.1a	
	新稻1号 Xindao No.1	W1	4.3±0.2c	7.1±0.3a	24.7±0.5c	31.7±1.0b	71.0±0.4a	61.2±1.2a	
		W2	6.8±0.4b	8.7±0.4a	30.7±0.3b	30.5±0.3b	62.5±0.2b	60.8±0.2a	
		W3	8.6±0.4a	8.8±0.7a	35.4±1.0a	36.8±0.1a	56.1±1.4c	54.5±0.6b	

0.9 mm 范围内, W3 处理新稻 1 号 RLD 百分比和 RVD 百分比比较 W1、W2 高 2.4% 和 7.7%、43.3% 和 15.3%; 直径 ≥0.9 mm 范围内, W1 处理下 T-43 RLD 百分比和 RVD 百分比比较 W2、W3 分别高 13.0% 和 6.9%、0.5% 和 0.5%, 新稻 1 号 RVD 百分比比较 W2、W3 分别高 13.6%、26.6%。抽穗后 20 d, 直径 ≤0.3 mm 范围内, W3 处理下 T-43 RLD 百分比比较 W1、W2 高 2.0%、0.7%, 新稻 1 号在 W2 处理下 SAD 百分比比较 W1、W3 高 5.8%、14.3%; 直径 0.3~0.9 mm 范围内, W3 处理新稻 1 号 RLD 百分比和 RVD 百分比比较 W1、W2 分别高 15.3% 和 11.2%、16.1% 和 20.7%; 直径 ≥0.9 mm 范围内, W1 处理下 T-43 RVD 百分比比较 W2、W3 分别高 4.6%、1.5%, 新稻 1 号 RVD 百分比比较 W2、W3 分别高 0.7%、12.3%。品种间, 直径 ≤0.3 mm 范围内, 抽穗期 W1 处理下 T-43 RLD、SAD 和 RVD 百分比比较新稻 1 号低 20.9%~24.0%; 直径 0.3~0.9 mm 范围内, 抽穗期 T-43 RLD、RVD 百分比比较新稻 1 号低 6.9%~47.7%, 抽穗后 20 d 则降低

2.4%~25.1%; 直径 ≥0.9 mm 范围内, 抽穗期 T-43 RLD、RVD 百分比比较新稻 1 号增加了 10.7%~42.9%, 抽穗后 20 d 增加 7.5%~20.3%。

2.4 不同滴水量对各土层的根系形态学指标分布的影响

由图 1 可知, 各处理 RLD、SAD、RVD 和 RDW 主要分布在 0~20 cm 土层内, 各指标在该层占比约为 60%, 且随土层深度增加呈现显著下降趋势。抽穗期 W2 处理下, T-43 0~40 cm RLD 和 SRL 较 W1、W3 分别高 1.2%~55.2%、1.6%~29%, 新稻 1 号 SAD 和 RDW 较 W1、W3 分别高 6.5%~201.1%、30.4%~100.9%; T-43 40~60 cm SAD、RDW 和根系平均直径较 W1、W3 分别高 72% 和 13.8%、3.0% 和 1.9%、8.8% 和 9.4%, 新稻 1 号 RLD、SAD、RDW 和 SRL 较 W1、W3 分别高 0.1%~173.3%、6.5%~201.1%、30.4%~100.9%、57.4%~296.4%。抽穗后 20 d W1 处理下两品种 0~60 cm RLD 高于其他处理。品种间, T-43 RVD 及 AvgDiam 较新稻 1 号高 43.1%~298.3%、0.3%~84.3%; W2、W3 下 20~40 cm T-43

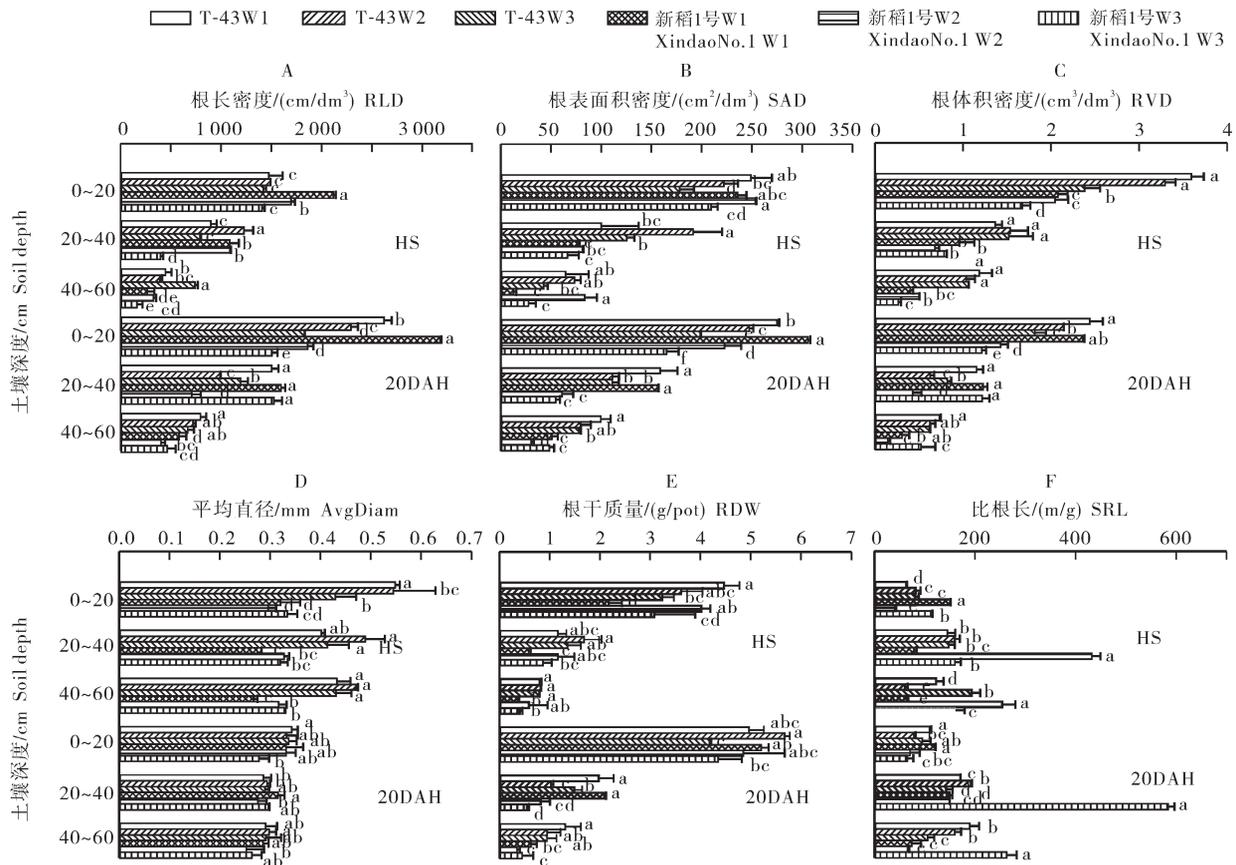


图1 不同土层根长密度(A)、根表面积密度(B)、根体积密度(C)、根平均直径(D)、根干质量(E)及比根长(F)分布
 Fig. 1 Distribution of total root length density(A), surface area density(B), root volume density(C), average diameter(D), dry weight(E) and specific root length(F) in different soil layers

RLD、RDW 较新稻 1 号分别增加 5.2%~171.4%、0.9~347.7%；W1 下 T43 SRL、SAD 较新稻 1 号分别增加 14.3%~154.9%、5.6%~406.7%。

2.5 不同滴水量对根系形态学指标渐进分布方程 β 值的影响

由表 5 可知，T-43 和新稻 1 号根系形态学指标在不同处理间渐进分布 β 值差异显著。抽穗期 W2 处理下，T-43 RLD 和 SAD 较 W1 分别高 0.4%、1.7%，新稻 1 号 RLD、SAD 较 W1、W2 分别高 0.8% 和 2.2%、1.7% 和 1.2%；而抽穗后 20 d W3 处理下 T-43 RLD 和 SAD 较 W1、W2 分别高 0.3% 和 0.8%、1.1% 和 0.6%。抽穗至抽穗后 20 d，W3 处理下两品种 RVD 均高于其他处理，W1 处理下新稻 1 号 RDW 高于其他处理。方差分析结果表明，仅品种对根质量存在显著的影响，根系质量受品种影响较大。

2.6 不同滴水量对水稻干物质质量、根干质量、根冠比的影响

由表 6 可知，不同的干物质质量、根干质量均随滴

水量增加而增加，根冠比则随着滴水量增加而显著降低。与 W1 相比，抽穗期 T-43 干物质质量较 W2、W3 高 29.4%、82.8%，新稻 1 号则增加 4.5%、88.7%；抽穗后 20 d T-43 干物质质量和根干质量较 W2、W3 分别高 16.7% 和 137.6%、14.9% 和 41.5%，新稻 1 号增加 43.1% 和 118.6%、25.2% 和 26.3%；而根冠比则是在 W3 达到最大值。品种间，抽穗期 T-43 根干质量及根冠比高于新稻 1 号。方差分析结果显示，滴水量对干物质质量、根冠比及抽穗后 20 d 的根干质量影响最大，品种与滴水量之间存在显著或极显著交互作用。

2.7 不同滴水量对水稻产量、籽粒产量构成因子及水分利用效率的影响

由表 7 可知，T-43 和新稻 1 号的产量及其构成因子均随滴水量增加而增加。W1 处理下 T-43 有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重、产量较 W2、W3 分别增加了 0.8%、2.6%、3.6%、5.0%、11.9% 和 29.2%、55.9%、10.6%、8.9%、142.8%，新稻 1 号则分别增加 2.7%、7.0%、17.8%、6.6%、39.5% 和 60.6%、34.0%、

表5 水稻根长密度、根表面积密度、根体积密度及根质量分布渐进方程 β 值
Table 5 The progressive equation β value of root length density, surface area density, root volume density and root mass distribution in rice

品种(C) Cultivars	处理(W) Treatment	根长密度/(cm/dm ³) RLD		根表面积密度/(cm ² /dm ³) SAD		根体积密度/(cm ³ /dm ³) RVD		根干质量/(g/m ²) Root dry mass	
		抽穗期 HS	抽穗后 20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后 20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后 20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后 20 d 20 DAH
T-43	W1	0.964±0.003a	0.963±0.001a	0.952±0.014a	0.964±0.002a	0.957±0.002a	0.959±0.001a	0.942±0.003a	0.955±0.003a
	W2	0.968±0.001a	0.958±0.001a	0.968±0.006a	0.959±0.002a	0.960±0.002a	0.951±0.001a	0.956±0.003a	0.934±0.005a
	W3	0.968±0.000a	0.966±0.000a	0.965±0.001a	0.965±0.001a	0.968±0.002a	0.960±0.002a	0.955±0.005a	0.951±0.004a
新稻1号 Xindao No.1	W1	0.953±0.002ab	0.956±0.001ab	0.937±0.001a	0.956±0.001a	0.954±0.003a	0.954±0.002a	0.942±0.003a	0.948±0.002a
	W2	0.961±0.001a	0.952±0.002b	0.953±0.003a	0.940±0.005a	0.951±0.002a	0.939±0.005a	0.941±0.009a	0.921±0.002a
	W3	0.940±0.004b	0.972±0.002a	0.942±0.007a	0.954±0.002a	0.954±0.002a	0.974±0.003a	0.941±0.013a	0.918±0.012a
F值 F-value									
	C	2.162	0.982	0.183	0.432	0.202	4.688	5.961*	3.040
	W	1.112	2.469	0.095	0.185	1.788	0.204	0.904	0.125
	C×W	0.692	0.061	2.596	0.786	0.178	2.174	1.871	0.420

表6 水稻干物质质量、根干质量及根冠比
Table 6 Dry matter mass, root dry mass, and root-shoot ratio in rice

品种(C) Cultivars	处理(W) Treatment	干物质质量/(g/m ²) Dry matter mass		根干质量/(g/m ²) Root dry mass		根冠比/% Root shoot ratio	
		抽穗期 HS	抽穗后 20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后 20 d 20 DAH	抽穗期 HS	抽穗后 20 d 20 DAH
T-43	W1	109.79±3.27a	189.11±4.28a	5.81±0.68a	11.32±0.78a	5.58±0.01b	5.66±0.01b
	W2	84.87±2.67b	162.09±6.73b	5.70±0.67a	9.85±0.89b	6.38±0.01b	6.09±0.01b
	W3	60.07±3.69c	79.58±2.31c	5.18±0.49a	8.00±0.24b	8.63±0.01a	10.27±0.00a
新稻1号 Xindao No.1	W1	117.32±3.22a	173.73±6.83a	4.70±0.26a	10.09±0.62a	2.29±0.01c	5.83±0.01b
	W2	112.28±2.20b	121.41±7.86b	5.63±0.63a	8.06±1.06b	5.00±0.00b	6.95±0.01b
	W3	62.17±3.91c	79.47±6.35c	2.77±0.55b	7.99±1.08b	7.56±0.00a	10.62±0.01a
F值 F-value							
	C	50.91**	153.62**	24.22**	14.85**	20.82**	1.12
	W	195.66**	732.76**	5.20*	16.13**	29.80**	45.40**
	C×W	14.86**	40.54**	7.06*	1.27	3.34	0.25

72.9%、38.4%、395.8% ($P<0.05$)。T-43 WUE 在 W2 达到最大值,而新稻1号在 W1 达到最大值。品种间,T-43 有效穗数、结实率、千粒重较新稻1号高 2.0%~59.1%,穗粒数则降低 8.4%~24.5%。方差分析结果表明,有效穗数、穗粒数、产量、水分利用效率表现为 $W>C>C\times W$,结实率和千粒重为 $C>W>C\times W$,在结实率上品种与滴水量之间存在极显著的交互作用。

2.8 不同土层根系形态指标与籽粒产量、产量构成因子及水分利用效率相关分析

相关性分析(表8)显示,2个品种 0~20 cm RLD、SAD、RVD 与有效穗数、穗粒数、水分利用效

率存在显著或极显著正相关。品种间,T-43 20~40 cm RLD 与有效穗数、结实率、产量、水分利用效率存在显著或极显著的正相关,0~40 cm RLD 与产量呈极显著正相关;新稻1号 20~40 cm SAD 与穗粒数、结实率、千粒重、产量及水分利用效率呈显著或极显著正相关,而 40~60 cm 平均直径与千粒重、产量、水分利用效率存在显著负相关。

3 讨论

3.1 不同滴水量对滴灌水稻根系形态的影响

根系是植株获取水分和养分的重要器官^[18]。在缺水条件下,植物可以通过调节根系在土壤中所占

表 7 水稻产量、籽粒产量构成因子及水分利用效率
Table 7 Yield, grain yield components and water use efficiency in rice

品种(C) Cultivar	处理(W) Treatment	有效穗数 Effective panicles per pot	每穗粒数 Spikelets number per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1000-grain weight	产量/ (g/pot) Yield	水分利用效率/ (kg/m ³) Water use efficiency
T-43	W1	51.3±1.25a	93.4±3.27a	90.4±1.23a	23.3±1.27a	101.5±4.62a	0.88±0.04a
	W2	50.9±1.51a	91.0±1.63a	87.3±1.70a	22.2±2.24a	90.7±12.00a	0.92±0.12a
	W3	39.7±0.94b	59.9±7.46b	81.7±7.72a	21.4±1.17b	41.8±7.15b	0.50±0.09b
新稻 1 号 Xindao No.1	W1	49.3±3.09a	106.3±3.86a	88.7±2.49a	22.7±0.76a	106.6±11.99a	0.92±0.10a
	W2	48.0±5.89a	99.3±2.62a	75.3±2.49b	21.3±0.84a	76.4±6.98b	0.78±0.07a
	W3	30.7±3.68b	79.3±6.18b	51.3±2.87c	16.4±1.45b	21.5±7.07c	0.26±0.08b
F 值 F-value							
	C(品种)	6.1381*	29.256 2**	38.975 9**	7.982 5*	4.814 7	4.284 3
	W(滴水量)	25.55 01**	53.842 0**	28.307 8**	4.337 0*	82.135 5**	34.168 8**
	C×W	0.782 1	2.234 8	10.060 3**	2.252 0	3.077 1	2.268 3

表 8 根长密度、根表面积密度、平均直径、根体积密度与产量、产量构成因子及水分利用效率的相关性分析
Table 8 Relationship between root length density, surfarea density, avgdiam, root volume density and yield, yield components, water use efficiency in rice

根系形态 RMC	土壤深度/cm Soil depth	有效穗数 Effective panicles per pot		每穗粒数 Spikelets number per panicle		结实率/% Seed setting rate		千粒重/g 1000-grain weight		产量/ (g/pot) Yield		水分利用效率/ (kg/m ³) Water use efficiency	
		新稻 1 号 Xindao No.1		新稻 1 号 Xindao No.1		新稻 1 号 Xindao No.1		新稻 1 号 Xindao No.1		新稻 1 号 Xindao No.1		新稻 1 号 Xindao No.1	
		T-43	Xindao No.1	T-43	Xindao No.1	T-43	Xindao No.1	T-43	Xindao No.1	T-43	Xindao No.1	T-43	Xindao No.1
根长 RLD	0~20	0.664**	0.850*	0.678**	0.783**	0.638	0.917	0.383	0.950**	0.617**	0.983	0.533*	0.967**
	20~40	0.807**	0.100	0.770	0.533	0.800*	0.583	0.533	0.467	0.800**	0.517	0.767*	0.417
	40~60	-0.345	0.383	0.192	0.500	-0.264	0.583	-0.200	0.517	0.000	0.617	0.000	0.550
根表面积 SAD	0~20	0.731**	0.717**	0.745**	0.867***	0.672	0.867***	0.483	0.867	0.750	0.900***	0.667*	0.850***
	20~40	0.345	0.600	0.502	0.767*	0.000	0.850**	0.300	0.833*	0.533	0.817**	0.667	0.783*
	40~60	0.546	0.000	0.736	-0.450	0.485	-0.467	0.567	-0.350	0.700	-0.433	0.733	-0.317
平均直径 ADW	0~20	0.269	0.100	0.427	0.217	0.579	0.000	0.150	0.083	0.367	0.050	0.283	0.030
	20~40	0.067	-0.467	0.000	-0.183	-0.183	-0.250	0.000	-0.283	0.089	-0.383	0.133	-0.400
	40~60	-0.080	-0.867**	0.167	-0.367	-0.090	-0.567	0.000	-0.733*	0.112	-0.767*	0.133	-0.817*
根体积 RVD	0~20	0.773***	0.717*	0.753**	0.867**	0.690*	0.867***	0.350	0.867**	0.650**	0.900	0.600*	0.850**
	20~40	0.000	-0.317	0.092	0.117	0.621	0.100	0.400	0.000	0.167	0.067	0.067	-0.056
	40~60	0.143	-0.417	0.192	-0.415	0.596	-0.433	0.233	-0.450	0.083	-0.367	0.000	-0.400

注：*为 0.05 水平上显著相关；**为 0.01 水平上显著相关。Note：*：Significant correlation at 0.05 level；**：Significant correlation at 0.01 level.

体积及根长密度等途径来增强对土壤水分的利用效率^[19]。补红英等^[20]研究发现,水分亏缺可使水稻的不定根数、根体积显著下降,但根系直径无显著变化。本研究中,抽穗期 W2 处理下,T-43 的 RLD、RVD、SAD 显著增加,但新稻 1 号有所降低;而抽穗

后 20 d 各形态指标均在 W3 达到最大值。表明适当减少滴水量有助于促进抽穗期抗旱型水稻(T-43)根系生长发育,为地上部生长奠定基础,而新稻 1 号根系生长减弱,可能是与品种自身抗旱性有关^[18]。此外,抽穗后 20 d 充足的水分灌溉可以使滴灌水稻根

系生长状况更好。

前人研究表明,总根长主要由直径 ≤ 1.0 mm的根系决定,根总表面积由直径 < 1.5 mm范围的根系决定,根总体积则由 $0.5\sim 1.5$ mm直径范围的根系决定,并且水分调控根系最核心的区域是 $0.5\sim 1.0$ mm的根直径区间^[12]。本研究中,RLD在直径为 ≤ 0.3 mm的区域占66.4%,而SAD及RVD在直径为 ≥ 0.9 mm的范围占27.3%~35.6%,根系长度主要取决于直径 ≤ 0.3 mm的根系, ≥ 0.9 mm的根系则对根表面积和根体积起决定性作用,这与前人的研究结果^[12]表现出一定的差异性,这可能与滴灌水稻根系生长发育状况不如传统淹灌水稻,根系直径普遍较细密切相关。在W2处理下不同直径范围内T-43的SAD、RVD要高于新稻1号,表明T-43能更好地适应适度缺水的条件。此外,W2显著提高了抽穗期 $0\sim 0.9$ mm直径范围内水稻根系的RLD、SAD及RVD,W3则提高 ≥ 0.9 mm根系各形态指标,这说明适度减少滴水量能促进抽穗期水稻 ≤ 0.3 mm根系的发育,充足灌水则更有利于抽穗后20 d直径 ≥ 0.9 mm根系的生长。同时,水稻根系对水分、养分等的吸收主要由直径 ≤ 0.3 mm的根系承担^[21],进一步说明抽穗期适度降低水稻滴水量有利于保持较高根长密度,进而增强 ≤ 0.3 mm直径范围内根系的吸收功能。

3.2 不同滴水量对滴灌水稻根系构型及根冠比的影响

作物根系构型主要取决于根系的形态指标与空间分布,其可塑性与环境因子的变化密切相关,而土壤水分是调控作物根系分布最重要的因子^[22]。李丽等^[3]研究表明,滴灌水稻土表20 cm内根长、表面积、体积和平均直径均高于传统淹灌,更有利于根系与地上部物质交换。本研究中,W2提高了T-43抽穗期 $0\sim 40$ cm RLD和SRL以及新稻1号SAD和RDW,且T-43 RDW的 β 值高于新稻1号。说明滴水量适度减少可促进滴灌水稻浅层根系向土壤深处分布,有利于水稻(尤其是T-43品种)根系形态建成,进而提高作物抗旱能力、维持产量。这与前人研究发现深层根系有助于增强水稻对不良环境的适应能力结论一致^[23]。

作物合理的根冠比是协调地上、地下部生长的重要参数^[7]。前人认为根冠比增加是植物抵抗干旱胁迫的一种响应性机制^[24]。本研究中,W2、W3处理下,T-43品种的根干质量及根冠比均高于新稻1号,

表明T-43的耐旱性相对较强,受滴水量减少的影响较小。减少滴水量会导致2个类型水稻品种干物质质量及根干质量均显著降低,但根冠比显著增加,这与前人的研究结果一致^[25]。其原因可能是水分缺乏导致干物质更多分配于根系生长、减弱叶冠生长,缓解了水分供应矛盾,以达到根系能从土壤吸收更多水分、提高水分利用效率的目的^[26]。

3.3 不同滴水量对滴灌水稻产量及水分利用效率与根系形态相关性的影响

大量研究证实,作物根系形态、发育以及建成等过程均可通过土壤水分进行调控,进而影响作物产量形成及水分利用效率的提高。前人研究表明适度减少灌溉水量能够稳定穗数,增加穗粒数,从而增加水稻的产量,提高水分利用效率^[27]。马晓鹏等^[28]认为滴灌水稻在一定范围内随灌水量的增加,穗粒数及千粒重显著增加,从而导致产量显著提升。朱士江等^[29]发现轻度水分亏缺条件下水稻的各个生长指标及水分利用效率较常规灌溉显著增加。本研究中,T43和新稻1号产量及其构成因子均随滴水量降低而显著降低,当滴水量减少15%(W2)时,T-43产量较W1降低了10.6%,差异不显著,水分利用效率提高了4.5%,新稻1号产量及WUE均显著下降39.5%和17.9%。这表明,适当降低滴灌水稻滴水量在不减产的前提下提高水分利用效率是可以实现的,但还需根据不同品种对水分响应特征不同制定合理的灌溉策略。

不同土层水稻根系的形态指标与产量之间存在密切的关系。陈达刚等^[30]研究发现,水稻产量、千粒重、单株穗数均与抽穗期根表面积、根长呈显著或极显著正相关;对养分吸收起主要作用的是土壤表层根系,上位根各根系参数与产量之间相关达显著水平^[31]。本研究中,土壤表层($0\sim 20$ cm)根系各形态指标与产量、水分利用效率间呈现显著或极显著正相关,同时,随土壤深度增加($20\sim 60$ cm)根系形态与产量间相关性降低,这与前人的研究结果一致^[17]。进一步证明土壤表层根系与产量关系更加密切,可通过调控浅层($0\sim 20$ cm)根系形态达到提高水稻的产量及水分利用效率的目的。同时,本研究受限于土柱模拟栽培,可能会限制根系的下扎和分布,还需要进行大田试验验证。

适宜的滴水量有利于水稻构建良好的根系形态、提高水分利用效率。本研究中,当滴水量降低15%(83.41 L/盆)时,2个类型水稻品种抽穗后20 d

的RLD、SAD、AvgDiam和RVD值均有所增加。其中,T-43通过显著促进深层(20~60 cm)根系及细根(直径<0.9 mm)的生长发育来提高水分利用效率(4.5%),且产量及其构成因子与正常灌水无显著差异;新稻1号的根系形态建成受到抑制,产量显著降低39.5%。浅层土壤(0~20 cm)根系形态指标与产量及其构成因子和水分利用效率间均存在显著或极显著正相关。鉴于此,我们建议在滴灌水稻生产实践中适当减少滴水量(15%左右),通过调控作物浅层根系分布情况,促进抽穗后20 d的根系发育,进而在不显著影响产量的情况下提高水分利用效率。此外,在生产上还应根据水稻品种对水分响应特性的不同制定合理的灌溉制度,以达到更高经济效益。

参考文献 References

- [1] 徐春春,纪龙,李凤博,等.当前我国水稻产业发展形势与战略对策[J].华中农业大学学报,2022,41(1):21-27.XU C C, JI L, LI F B, et al. Situation and strategies of rice industry development in China[J].Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 21-27 (in Chinese with English abstract).
- [2] 侯丹平,谭金松,毕庆宇,等.水分胁迫对节水抗旱稻产量形成和根系形态生理特性的影响[J].中国水稻科学,2021,35(1):27-37.HOU D P, TAN J S, BI Q Y, et al.Effects of water stress on yield formation and root morphological and physiological characteristics of water-saving and drought-resistant rice[J].Chinese journal of rice science, 2021, 35(1): 27-37 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李丽,陈林,张婷婷,等.膜下滴灌对水稻根系形态及生理性状的影响[J].排灌机械工程学报,2015,33(6):536-540.LI L, CHEN L, ZHANG T T, et al.Effects of mulch drip irrigation on the form of rice root and physiological characteristics [J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015,33(6):536-540 (in Chinese with English abstract).
- [4] 戴含,王小卉,邓莹萍,等.供氮水平对水稻抽穗期植株根系形态及养分吸收的影响[J].排灌机械工程学报,2021,39(7):727-732.DAI H, WANG X H, DENG Y P, et al.Effect of nitrogen supply levels on root morphology and nutrient absorption of rice plants at heading stage[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2021, 39(7): 727-732 (in Chinese with English abstract).
- [5] 潘晓华,王永锐,傅家瑞.水稻根系生长生理的研究进展[J].植物学通报,1996,31(2):13-20.PAN X H, WANG Y R, FU J R.Research progress of rice root growth physiology[J].Chinese bulletin of botany, 1996,31(2):13-20(in Chinese).
- [6] PADILLA F M, PUGNAIRE F I. Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought[J].Functional ecology, 2007, 21(3): 489-495.
- [7] 李森.覆膜水稻生理节水机制及水分利用效率评估[D].北京:中国农业大学,2017.LI S. Water-saving physiological mechanism and evaluation of water use efficiency for ground cover rice production systems [D].Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [8] ZHOU G Y, ZHOU X H, NIE Y Y, et al.Drought-induced changes in root biomass largely result from altered root morphological traits:evidence from a synthesis of global field trials [J].Plant, cell & environment, 2018, 41(11): 2589-2599.
- [9] SHI J C, YASUOR H, YERMIYAHU U, et al.Dynamic responses of wheat to drought and nitrogen stresses during re-watering cycles [J]. Agricultural water management, 2014, 146: 163-172.
- [10] 徐国伟,陆大克,王贺正,等.施氮和干湿灌溉对水稻抽穗期根系分泌有机酸的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(4):516-525.XU G W, LU D K, WANG H Z, et al.Coupling effect of alternate wetting and drying irrigation and nitrogen rate on organic acid in rice root secretion at heading stage [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2018, 26(4): 516-525 (in Chinese with English abstract).
- [11] 唐树鹏,刘洋,简超群,等.干湿交替灌溉对水稻产量、水氮利用效率和稻米品质影响的研究进展[J].华中农业大学学报,2022,41(4):184-192.TANG S P, LIU Y, JIAN C Q, et al. Progress on the effects of alternating wet and dry irrigation on the use efficiency of water and nitrogen, yield and quality of rice [J].Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(4): 184-192 (in Chinese with English abstract).
- [12] 陈云,刘昆,李婷婷,等.结实期干湿交替灌溉对水稻根系、产量和土壤的影响[J].中国水稻科学,2022,36(3):269-277. CHEN Y, LIU K, LI T T, et al.Effects of alternate wetting and moderate soil drying irrigation on root traits, grain yield and soil properties in rice [J].Chinese journal of rice science, 2022,36(3):269-277 (in Chinese with English abstract).
- [13] GALE M R, GRIGAL D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status[J].Canadian journal of forest research, 1987, 17(8): 829-834.
- [14] JACKSON R B, CANADELL J, EHLERINGER J R, et al.A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108(3): 389-411.
- [15] 李鹏,赵忠,李占斌,等.淳化县不同立地上刺槐根系的分布参数[J].南京林业大学学报(自然科学版),2002,26(5):32-36.LI P, ZHAO Z, LI Z B, et al.Research on root distribution parameters of *Robinia pseudoacacia* on different sites in Chunhua County [J].Journal of Nanjing Forestry University (natural sciences edition), 2002, 26(5): 32-36 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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

- T T, FENG Y F, ZHU A, 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 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李华, 张玉屏, 杨艳萍, 等. 土壤水分状况对水稻表层根系和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 96-99. LI H, ZHANG Y P, YANG Y P, et al. Effects of soil moisture on superficial roots and yield of rice[J]. Agricultural research in the arid areas, 2006, 24(1): 96-99 (in Chinese with English abstract).
- [18] HE J, TAN C, QIN L. Root-zone heat priming effects on maximum quantum efficiency of PSII, productivity, root morphology and nutritional quality of two aeroponically grown leafy greens in a tropical greenhouse[J/OL]. Plants, 2022, 11(13): 1684[2022-08-17]. <https://doi.org/10.3390/plants11131684>.
- [19] 张喜英. 高粱根系生长发育规律及动态模拟[J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 65-67. ZHANG X Y. Characters and dynamic model of *Sorghum* root growth and development[J]. Chinese journal of ecology, 1999, 18(5): 65-67 (in Chinese with English abstract).
- [20] 补红英, 宋维周, 曹凑贵, 等. 节水抗旱稻早优113号的根系生长对土壤水分亏缺的响应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4277-4289. BU H Y, SONG W Z, CAO C G, et al. Root growth responses to soil water deficit for a water-saving and drought-resistant rice genotype Hanyou113[J]. Scientia agricultura sinica, 2017, 50(22): 4277-4289 (in Chinese with English abstract).
- [21] 卞金龙, 蒋玉兰, 刘艳阳, 等. 干湿交替灌溉对抗旱性不同水稻品种产量的影响及其生理原因分析[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(4): 379-390. BIAN J L, JIANG Y L, LIU Y Y, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on grain yield in rice cultivars with different drought resistance and its physiological mechanism[J]. Chinese journal of rice science, 2017, 31(4): 379-390 (in Chinese with English abstract).
- [22] PUL M, LI Z, JIA M Y, et al. Effects of a soil collembolan on the growth and metal uptake of a hyperaccumulator: modification of root morphology and the expression of plant defense genes[J/OL]. Environmental pollution, 2022, 303: 119169[2022-08-17]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119169>.
- [23] MI G H, CHEN F J, WU Q P, et al. Ideotype root architecture for efficient nitrogen acquisition by maize in intensive cropping systems[J]. Science China life sciences, 2010, 53(12): 1369-1373.
- [24] DASH G, BARIK M, DEBATA A, et al. Identification of most important rice root morphological markers in response to contrasting moisture regimes under vegetative stage drought[J/OL]. Acta physiologiae plantarum, 2017, 39(1): 8[2022-08-17]. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2297-1>.
- [25] ZHOU G Y, ZHOU X H, NIE Y Y, et al. Drought-induced changes in root biomass largely result from altered root morphological traits: evidence from a synthesis of global field trials[J]. Plant, cell & environment, 2018, 41(11): 2589-2599.
- [26] 张馨月, 王寅, 陈健, 等. 水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(1): 34-44. ZHANG X Y, WANG Y, CHEN J, et al. Effects of soil water and nitrogen on plant growth, root morphology and spatial distribution of maize at the seedling stage[J]. Scientia agricultura sinica, 2019, 52(1): 34-44 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张鸿, 朱从桦, 李其勇, 等. 灌溉方式和施氮量对直播稻氮素和水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1802-1814. ZHANG H, ZHU C H, LI Q Y, et al. Effect of irrigation management and nitrogen rate on nitrogen and water utilization of direct-seeded rice[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(12): 1802-1814 (in Chinese with English abstract).
- [28] 马晓鹏, 莫彦, 吕玉平, 等. 不同灌水量与每穴直播粒数对滴灌水稻生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 1-7. MA X P, MO Y, LÜ Y P, et al. Effects of different irrigation volume and direct seeding number on growth and yield of rice under drip irrigation[J]. Journal of irrigation and drainage, 2019, 38(9): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [29] 朱士江, 叶晓思, 王斌, 等. 不同水分调控、生物炭配比对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2018(1): 1-5. ZHU S J, YE X S, WANG B, et al. Effects of water-biochar coupling on rice yield and water use efficiency[J]. Water saving irrigation, 2018(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [30] 陈达刚, 周新桥, 李丽君, 等. 华南主栽高产籼稻根系形态特征及其与产量构成的关系[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1899-1908. CHEN D G, ZHOU X Q, LI L J, et al. Relationship between root morphological characteristics and yield components of major commercial indica rice in South China[J]. Acta agronomica sinica, 2013, 39(10): 1899-1908 (in Chinese with English abstract).
- [31] 张宇杰, 马鹏, 王志强, 等. 麦秆还田下水氮耦合对水稻根际环境及根系形态的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(6): 924-936. ZHANG Y J, MA P, WANG Z Q, et al. Water-nitrogen coupling influence on rhizosphere environment and root morphology of rice under wheat straw return[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2022, 30(6): 924-936 (in Chinese with English abstract).

Effects of drip volume on characteristics of root, yield and water use efficiency of different rice varieties in Xinjiang

LIU Runhui¹, ZHAO Lei¹, TANG Qingyun¹, WANG Zijian¹,
ZHANG Gaoyu¹, WEI Meng¹, WANG Guodong², LI Yuxiang¹

1. College of Agronomy / Xinjiang Production and Construction Group Key laboratory of
Oasis Eco-Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-Fertilizer, Ministry of Agriculture and
Rural Affairs Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Xinjiang
Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihezi 832000, China

Abstract Paddy rice cultivars T-43 (drought-resistant type) and Xindao 1 (drought-sensitive type) were used to study rice yield and water use efficiency. Three irrigation modes including W1 (115.44 L/Pot), W2 (98.12 L/Pot) and W3 (83.41 L/Pot) were set to study the effects of drip volume on the morphology and distribution of rice root, the ratio of root to shoot, yield and water use efficiency at the stage of HS (heading stage) and 20 DAH (20 days after heading). The results showed that the root length density (RLD), root surface area density (SAD), root mean diameter (AvgDiam) and root volume density (RVD) of T-43 at the stage of 20 d after heading under W1 treatment increased by 22.8% and 33.1%, 21.8% and 37.7%, 27.7% and 32.8% compared with other treatments, respectively. However, those indexes of Xindao 1 increased by 80.2% and 53.2%, 63.3% and 88.9%, 95.0% and 32.3%. Under W2 treatment, the β value of RLD and SAD of T-43 varieties at the stage of heading increased by 0.4% and 1.7% compared with W1 treatments, the β value of Xindao 1 increased by 0.3% and 1.1%. Among them, 0-40 cm RLD and specific root length (SRL) of T-43 increased by 1.2%-55.2%, 1.6%-29%. Compared with other treatments, and 40-60 cm SAD, root dry weight (RDW) and AvgDiam of T-43 increased by 7.2%-13.8%, 1.9%-3.0%, 8.8%-9.4%. Thus, T-43 maintained a lower drip volume compared to W1 treatment. Under W2 treatment, there was no significant difference in yield and its components compared to W1, with a 4.5% increase in WUE. However, the yield and WUE of Xindao 1 decreased by 28.3% to 79.83 and 15.2% to 71.7% with the decrease of drip water. The results of correlation analysis showed that there was a significant or extremely significant positive correlation between various morphological indexes of yield, yield components, and WUE of the 0-20 cm shallow root of rice, greater than that of the 20-60 cm deep root of rice. It is indicated that there is a close correlation between morphological indexes of root and the yield, WUE of rice. It is feasible to regulate the distribution of shallow roots in crops and promote root development at the stage of 20 days after heading by appropriately reducing the amount of dripping water (about 15%). The water use efficiency is improved without significantly affecting yield. Reasonable irrigation systems should be formulated based on the different water response characteristics of rice varieties in production to achieve higher economic benefits.

Keywords water-saving irrigation; drip; irrigation; rice; irrigation volume; characteristics of roots; yield; water use efficiency

(责任编辑:张志钰)