

不同土壤类型下灌溉方式对水稻产量形成及水分利用效率的影响

陈梦云 李晓峰 陈雨霏 任红茹 汪伟 荆培培 霍中洋*

(扬州大学 农业部长江流域稻作技术创新中心/江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点, 江苏 扬州 225009;

* 通讯作者: huozhy69@163.com)

摘 要:以常规粳稻南粳 9108 为试验材料,在壤土、黏土、砂土 3 种类型土壤下,自有效分蘖临界叶龄期开始分别设置轻度节水灌溉(-15kPa)、重度节水灌溉(-25kPa)处理,并以常规水层灌溉为对照(CK),探究不同土壤类型下不同灌溉方式对水稻产量及水分利用效率的影响。结果表明,在壤土和黏土条件下,与 CK 相比,轻度节水灌溉、重度节水灌溉处理显著提高了水稻产量和水分利用效率,其中,轻度节水灌溉较 CK 分别增产 13.89%和 10.96%,重度节水灌溉分别增产 7.02%和 6.61%,水分利用效率轻度节水灌溉较 CK 分别提高 32.0%和 26.0%,重度节水灌溉较 CK 分别提高 29.0%和 26.0%;在砂土条件下,轻度节水灌溉和重度节水灌溉处理产量较 CK 明显下降,但水分利用效率提高,其中,轻度节水灌溉处理较 CK 减产 5.67%、水分利用效率较 CK 提高 18.0%,重度节水灌溉处理较 CK 减产 11.22%、水分利用效率较 CK 提高 21.0%。在壤土、黏土条件下,轻度节水灌溉能够提高地上部群体干物质积累量、光合势、群体生长速率和净同化率,从而提高产量,而砂土条件下节水灌溉降低了地上部群体干物质积累,最终导致减产。

关键词:水稻;土壤类型;节水灌溉;产量;水分利用效率

中图分类号:S511.071 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8082(2018)03-0010-06

作物灌溉水利用效率受气候、土壤、作物品种,以及灌溉、耕作、施肥等农业管理措施的影响^[1]。在相同的气候条件和农业管理措施下,土壤条件是影响作物灌溉水利用效率高低的重要因素^[2]。土壤质地是反映土壤物理特性的一个综合指标,决定着土壤持水性能,是导致土壤水的分布及运移方式变化,影响水分在土壤中滞留时间的决定因子^[3],因而直接影响土壤作物系统水分平衡和作物灌溉需水^[4-5]。在区域尺度的灌溉水配置方面,针对不同质地的土壤确定作物灌溉需水、制定适宜的灌溉量和时期等灌溉对策,进而依据土壤条件进行灌溉用水的合理分配是提高灌溉水生产力的关键和区域节水的重要环节^[6-7]。前人已经对水稻的需水供水规律、需水供水的形态生理指标、不同稻作制度下的灌溉模式和技术等进行了广泛的研究,创建了多种节水灌溉技术,如干湿交替灌溉、间歇湿润灌溉、生育中期搁田、垄作栽培、无水层种稻、覆膜旱种、早育秧等^[8-13]。杨建昌等^[14]研究表明,壤土条件下干湿交替灌溉较常规灌溉显著降低了总叶面积指数,显著提高了根系活力。褚光等^[15-16]研究表明,壤土条件下,土壤水势-15kPa 时,水稻的产量和群体质量处于最佳状态。夏琼梅等^[17]研究表明,适度节水对水稻产量影响不大,但提高了水

分利用效率。由此可见,前人的研究主要集中于壤土条件下不同灌溉方式间的比较和分析^[14-16],对不同土壤类型下不同灌溉方式对水稻产量及水分利用效率的影响鲜有报导。因此,本试验选用 3 种不同类型土壤,分别设置 3 种水分灌溉处理,研究了不同土壤类型下不同灌溉方式对水稻产量及水分利用效率的影响,以期为不同土壤类型水稻高产节水灌溉提供参考依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料与地点

试验于 2015-2016 年在扬州大学试验农场土培池进行,供试土壤为黏土、壤土、砂土,土壤基本性状见表 1。供试水稻品种为南粳 9108。

1.2 试验设计与方法

收稿日期:2017-12-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200805);江苏“农业三新”工程项目(SXGC[2016]321);江苏农业科技攻关(BE2015340, BE2016351);江苏省农业科技创新项目(CX[15]1002)

表 1 供试土壤的基本性状

土壤名称	pH	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
黏土	7.93	17.7	0.419	29.5	12.64	75.8
壤土	7.86	17.9	0.753	26.3	14.84	62.5
砂土	7.65	15.5	0.632	18.7	13.07	50.3

表 2 不同土壤类型下灌溉方式对水稻产量的方差分析

变异来源	自由度	平方和	均方	F 值
土壤类型	2	52 064.48	10 635.45	12 952.87**
水分处理	2	10 635.45	5 317.73	182.79**
年份	1	2 652.25	2 652.25	30.91**
土壤×水分	4	20 746.20	5 186.55	178.28**
土壤×年份	2	847.62	423.81	4.94*
水分×年份	2	149.69	74.84	0.87
土壤×水分×年份	4	149.17	37.29	0.43
误差	9	85.80	0	
总变异	35	127 767.50		

*表示在 0.05 水平上的差异显著,**表示在 0.01 水平上差异显著。下同。

试验以土壤类型(黏土、壤土、砂土)为主区,水分处理为裂区。自有效分蘖临界叶龄期开始,分别设置 3 种灌溉方式:(1)常规灌溉(CK),长期保持 3~5 cm 浅水层灌溉,直至收获前 1 周断水;(2)轻度节水灌溉(-15 kPa),灌水至水层深度 3~5 cm 后停止灌溉,并自然落干至土壤水势-15 kPa 时再灌水 3~5 cm,如此循环;(3)重度节水灌溉(-25 kPa),灌水至水层深度 3~5 cm 后停止灌溉,并自然落干至土壤水势-25 kPa 时再灌水 3~5 cm,如此循环。试验共 9 个处理,3 次重复,计 27 个小区,小区采用独立的水泥池,每个小区面积 4 m²。每个小区安装真空表式土壤负压计(中国科学院南京土壤研究所生产)监测土壤水势,埋深 15 cm。为避免自然降雨对试验结果的影响,所有处理均预置半自动塑胶薄膜网挡雨。

总施纯氮量 20 kg/667 m²,基肥:穗肥为 6:4,分蘖肥于移栽后 7 d 一次性施用,穗肥于倒 4 叶期和倒 2 叶期分 2 次施用,氮:磷:钾为 2:1:2。磷肥作基肥一次性施用;钾肥分基肥和拔节肥 2 次施用,各施 50%。

5 月 29 日播种,软盘早育秧,每盘播干种 120 g。栽插行株距为 30.0 cm×13.2 cm,每丛 4 苗,栽插后及时查漏补缺。移栽至有效分蘖临界叶龄期的水分管理:移栽活棵期薄水并露田 1~2 次,分蘖期浅水勤灌,有效分蘖临界叶龄期前 1 个叶龄(N-n-1)自然断水轻搁田,直至有效分蘖临界叶龄期。病、虫、草害防治按当地大面积生产统一实施。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 灌溉用水量

自有效分蘖临界叶龄期至成熟,每池在灌溉时均用水表监测并记录每次灌溉量,以此计算总灌溉水量和灌溉水利用效率。

1.3.2 土壤含水量

用土钻采取不同处理下深度为 0~15 cm 的土样,用 0.1 g 精度的天平称取土样的质量,在 105℃的烘箱内将土样烘 6~8 h 至恒质量,然后测定烘干土样,计算含水量。

1.3.3 茎蘖动态

每小区选取 2 个观察点,每点选取连续 10 丛定期调查,每 5 d 调查 1 次茎蘖数,直到抽穗期。

1.3.4 干物质量及叶面积

于拔节期、抽穗期、抽穗后 20 d、成熟期,按每小区茎蘖数的平均数取代表性植株 3 丛,植株于 105℃下杀青 30 min,75℃下烘干至恒质量,测定植株干物质量。采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-Cor 3050 型叶面积仪测定水稻叶片总叶面积,并计算叶面积指数。

1.3.5 产量及产量构成

成熟期每个小区收割 30 丛测定实际产量,每小区随机取 10 丛有代表性的稻株,测定产量构成。

1.4 试验数据处理

光合势 $[m^2/(m^2 \cdot d)] = 1/2(L_1 + L_2) \times (t_1 - t_2)$;
群体生长率 $[g/(m^2 \cdot d)] = (W_2 - W_1)/(t_1 - t_2)$;
净同化率 $[g/(m^2 \cdot d)] = [(lnLAI_2 - lnLAI_1)/(LAI_2 - LAI_1)] \times [(W_2 - W_1)/(t_2 - t_1)]$ 。

式中,LAI₁和 LAI₂为前后 2 次测定的叶面积指数,t₁和 t₂为前后 2 次测定的时间;L₁和 L₂为前后 2 次测定的叶面积,W₁和 W₂为前后 2 次测定的干物质量。

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据的录入和计算,运用 DPS 软件进行统计分析。

文中 2 年试验结果规律基本一致,本文以 2016 年数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成

方差分析结果(表 2)表明,土壤类型、水分处理及其互作效应均达极显著水平。由表 3 可知,南粳 9108 在不同土壤类型下的产量差异显著,表现为壤土最高、黏土次之、砂土最低,其中,壤土比黏土、砂土分别高 5.16%~5.62%、2.09%~19.02%。在壤土、黏土条件下,均以-15 kPa 处理时产量最高,分别较 CK 增产 13.89%和

表 3 不同土壤类型下灌溉方式对南粳 9108 产量及产量构成因素的影响

土壤类型	水分处理	有效穗数 ($\times 10^4/667\text{ m}^2$)	每穗粒数 (粒)	群体颖花量 ($\times 10^4/667\text{ m}^2$)	结实率 (%)	千粒重 (g)	实产 ($\text{kg}/667\text{ m}^2$)
黏土	CK	21.24 aA	125.81 fD	2 671.63 bcdC	91.46 dC	25.46 bcABC	579.8 eEF
	-15kPa	20.96 abA	137.41 bA	2 880.2 aAB	94.06 bAB	26.58 aA	643.4 bB
	-25kPa	20.47 bA	130.29 dC	2 666.95 cdC	93.28 cB	26.04 abAB	618.1 cCD
壤土	CK	21.41 aA	126.55 eD	2 709.54 bcBC	91.74 dC	25.34 bcBC	596.7 dDE
	-15kPa	21.03 abA	138.30 aA	2 908.4 aA	94.64 aA	26.61 aA	679.6 aA
	-25kPa	20.76 abA	133.56 cB	2 772.76 bABC	93.17 cB	26.07 abAB	638.6 bBC
砂土	CK	21.15 abA	126.21 eFD	2 669.43 cdC	91.28 dC	25.48 bcABC	571.2 eF
	-15kPa	20.71 abA	124.63 gE	2 580.98 dCD	89.49 eD	25.09 cBC	538.8 fG
	-25kPa	20.45 bA	120.62 hF	2 466.66 eD	88.75 fD	24.74 cC	507.1 gH

同列数据后不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著。下同。

表 4 不同土壤类型下灌溉方式对南粳 9108 茎蘖数和成穗率的影响

土壤类型	水分处理	拔节期 ($\times 10^4/667\text{ m}^2$)	抽穗期 ($\times 10^4/667\text{ m}^2$)	成熟期 ($\times 10^4/667\text{ m}^2$)	成穗率 (%)
黏土	CK	24.81 a	23.11 a	20.24 a	81.58 c
	-15kPa	23.65 b	21.54 b	19.96 a	84.40 a
	-25kPa	23.38 b	20.16 c	19.47 a	83.28 b
壤土	CK	24.86 a	22.84 a	20.31 a	81.70 c
	-15kPa	23.52 b	21.07 b	20.13 a	85.59 a
	-25kPa	22.85 b	19.74 c	19.06 a	83.41 b
砂土	CK	24.67 a	21.34 a	20.11 a	81.52 a
	-15kPa	23.53 b	20.52 b	18.63 a	79.18 b
	-25kPa	22.78 b	19.68 c	17.48 b	76.73 c

表 5 不同土壤类型下灌溉方式对南粳 9108 叶面积指数的影响

土壤类型	水分处理	拔节期	抽穗期	抽穗后 20 d	成熟期
黏土	CK	4.26 a	6.68 c	5.16 b	1.38 b
	-15kPa	4.17 b	7.25 a	5.42 a	1.63 a
	-25kPa	4.12 b	7.02 b	5.28 ab	1.41 b
壤土	CK	4.29 a	6.83 c	5.16 c	1.35 b
	-15kPa	4.25 a	7.35 a	5.57 a	1.66 a
	-25kPa	4.16 a	7.08 b	5.33 b	1.43 b
砂土	CK	4.20 a	6.69 a	5.18 a	1.47 a
	-15kPa	4.14 a	6.51 b	5.03 ab	1.32 a
	-25kPa	4.16 a	6.39 c	4.76 b	1.17 b

10.96%; 而砂土在 CK 时产量最高, 较-15 kPa 和-25 kPa 分别增产 6.01%和 12.64%。在-15 kPa 处理下壤土的产量比黏土高 5.62%、比砂土 CK 高 18.97%。说明不同土壤类型有不同的适宜灌溉方式。不同灌溉方式下, 壤土、黏土在-15kPa 处理下的结实率、千粒重均显著高于其他处理, 而砂土在 CK 处理时的每穗粒数、结实率均高于其他处理。因此, 在壤土条件下配以轻度节水灌溉方式, 更能促进分蘖早发, 稳定穗数, 增加穗粒数, 提高群体总颖花量, 从而实现增产。

2.2 群体茎蘖数和成穗率

由表 4 可知, 在不同土壤类型下南粳 9108 的茎蘖数和成穗率与产量趋势表现一致, 壤土最高、黏土次之、砂土最低。壤土的成穗率较黏土和砂土分别高 0.14%~1.40%和 0.22%~8.70%, 平均高 0.59%、5.59%。在不同的灌溉方式下壤土、黏土以-15kPa 处理时的成穗率最高, 而砂土以 CK 处理最高。壤土的最高成穗率(-15kPa 时)比黏土和砂土的最高成穗率(-15kPa 时和 CK)分别高 1.41%和 4.99%。说明壤土在轻度节水灌溉下能够有效降低无效分蘖的发生, 控制高峰苗数, 提高茎蘖成穗率。

2.3 叶面积指数

由表 5 可知, 在拔节期, 3 种类型土壤在不同灌溉方式下的叶面积指数无显著差异; 而在抽穗期、抽穗后 20 d、成熟期 3 种土壤在不同灌溉方式下的叶面积指数差异显著, 且均以壤土的叶面积指数最高、黏土次之、砂土最低。在不同的灌溉方式下, 壤土、黏土均以-15kPa 处理的叶面积指数最高, 砂土以 CK 处理的叶面积指数最高, 且壤土的最高叶面积指数(-15kPa 处理)比黏土和砂土的最高叶面积指数(-15kPa 处理和 CK)增加 5.3%、19.1%。

2.4 群体干物质积累量

由表 6 可知, 壤土、黏土的干物质积累随着节水程度的增强呈现先上升后下降趋势, 而砂土的干物质积累随着节水程度的增强逐渐下降, 其中, 壤土、黏土以-15kPa 处理时的干物质质量最高, 砂土以 CK 处理最高。抽穗期壤土的干物质积累较黏土和砂土分别高 1.40%~3.17%和 0.47%~14.27%; 成熟期壤土的干物质积累较黏土和砂土分别高 0.81%~4.88%和 17.26%~19.18%; 抽穗期、成熟期壤土比黏土和砂土的干物质积累平均分别高 2.34%、3.27%和 9.03%、11.43%。说明壤土、黏土条件下适当的节水灌溉能够提高中后期群体的生

表 6 不同土壤类型下灌溉方式对水稻群体干物质积累量的影响

土壤类型	水分处理	拔节期	抽穗期	成熟期	拔节-抽穗期		抽穗-成熟期	
		(kg/667 m ²)	(kg/667 m ²)	(kg/667 m ²)	积累量(kg/667 m ²)	比例(%)	积累量(kg/667 m ²)	比例(%)
黏土	CK	250.61 a	754.45 c	1089.60 c	503.84 c	46.24 a	335.15 c	30.76 c
	-15kPa	246.87 a	816.95 a	1216.70 a	570.08 a	46.85 a	399.75 a	32.86 a
	-25kPa	241.52 a	770.50 b	1126.27 b	528.98 b	46.97 a	355.77 b	31.59 b
壤土	CK	255.63 a	765.03 c	1098.44 c	509.41 c	46.38 a	333.41 c	30.35 c
	-15kPa	248.29 a	836.86 a	1265.20 a	588.57 a	46.52 a	428.34 a	33.86 a
	-25kPa	245.24 a	794.90 b	1181.20 b	549.66 b	46.53 a	386.30 b	32.70 b
砂土	CK	249.74 a	761.45 a	1112.40 a	511.72 a	46.00 a	350.95 a	31.55 a
	-15kPa	246.95 a	732.33 b	1061.60 b	485.38 b	45.72 a	329.27 b	31.02 a
	-25kPa	242.20 a	704.60 c	1007.27 c	462.40 c	45.91 a	302.67 c	30.05 b

表 7 不同土壤类型下灌溉方式对南粳 9108 群体光合势、净同化率和群体生长率的影响

土壤类型	水分处理	光合势 LAD[m ² /(m ² ·d)]		群体生长率 CGR[g/(m ² ·d)]		净同化率 NAR[g/(m ² ·d)]	
		拔节-抽穗	抽穗-成熟	拔节-抽穗	抽穗-成熟	拔节-抽穗	抽穗-成熟
黏土	CK	142.28 a	208.08 c	19.38 b	11.17 b	3.60 b	2.08 bc
	-15kPa	148.46 a	226.44 a	21.93 a	13.32 a	3.94 a	2.39 a
	-25kPa	144.82 a	217.52 b	20.35 b	11.86 b	3.74 b	2.18 b
壤土	CK	144.53 a	211.14 c	19.59 b	11.11 bc	3.59 c	2.04 c
	-15kPa	150.80 a	229.76 a	22.64 a	14.28 a	4.00 a	2.52 a
	-25kPa	146.12 a	219.56 b	21.14 a	12.88 b	3.85 b	2.34 b
砂土	CK	141.57 a	208.08 a	19.68 a	11.70 a	3.68 a	2.19 a
	-15kPa	138.45 a	199.67 b	18.67 a	10.98 b	3.57 b	2.10 b
	-25kPa	137.15 a	192.78 bc	17.78 a	10.09 c	3.42 c	1.94 c

长。

2.5 群体光合势、群体生长率和净同化率

从表 7 可见,拔节到抽穗阶段不同土壤类型下壤土的光合势最高,平均分别比黏土、砂土高 1.35%、5.80%;抽穗到成熟阶段,分别高 1.29%、9.97%。在不同灌溉方式下,壤土、黏土及砂土拔节到抽穗阶段的光合势无显著差异,抽穗到成熟阶段壤土、黏土均以-15kPa 处理最高,而砂土以 CK 处理时最高。壤土的最高光合势(-15kPa 处理)比黏土和砂土的最高光合势(-15kPa 处理和 CK)高 1.46%、10.42%。群体生长率反映干物质的日生产量,是描述群体生产率的重要指标。净同化率是单位叶面积在单位时间内所积累的干物质量,是白天光合生产量与夜间呼吸消耗量的差值。从表 5 可看出,群体生长率和净同化率在拔节到抽穗阶段最高,在不同土壤类型下,壤土的群体生长率比黏土、砂土的群体生长率平均高出 2.79%、12.89%;壤土的净同化率较黏土、砂土的净同化率分别高 1.43%、7.22%。在不同灌溉方式下,壤土、黏土的群体生长率和净同化率在-15kPa 处理时最高,CK 最低。砂土的群体生长率和净同化率均在 CK 处理下最高。由此可以看出,壤土在轻度节水灌溉下可以提高水稻中后期的群体生长率,提高抽穗后的净同化率。

2.6 灌溉用水量与水分利用效率

由表 8 可知,壤土、黏土、砂土在-15kPa、-25kPa 处理时的灌溉用水量显著低于 CK,分别减少了 13.87%~17.15%、11.73%~15.75%、22.81%~26.54%;而-15kPa 处理和-25kPa 处理的水分利用效率分别较 CK 增加 29.00%~32.00%、26.00%、18.00%~21.00%。

2.7 土壤含水量

从表 9 可以看出,随着土壤深度的增加,土壤含水量依次递减。壤土、黏土在不同处理、不同深度下的含水量差异不显著。而砂土在 CK 处理时的含水量与壤土、黏土含水量无明显差异,在-15kPa、-25kPa 处理下的含水量明显低于壤土、黏土。各土壤在不同水分处理下的平均含水量趋势为黏土>壤土>砂土。

3 小结与讨论

3.1 不同类型土壤下不同灌溉方式对水稻产量及其构成的影响

关于节水灌溉对水稻产量的影响,前人进行了大量研究,认为壤土条件下节水灌溉较水层灌溉增产效应显著^[16,18-20]。褚光等^[15]认为,可以将-15kPa 作为在水稻节水灌溉中土壤落干程度的安全土壤水势指标。本研究结果表明,在壤土条件下轻度节水灌溉(-15kPa)能够提高水稻产量,在黏土条件下灌溉方式对水稻产量的影响与壤土条件下一致,且进一步研究发现,在砂

表 8 不同土壤类型下灌溉方式对灌溉用水量和灌溉利用效率的影响

土壤类型	水分处理	灌溉用水量		水分利用效率	
		(m ³)	(%)	(kg/m ³)	(%)
黏土	CK	519 a	100	1.12 b	100
	-15kPa	458 a	88	1.41 a	126
	-25kPa	437 a	84	1.41 a	126
壤土	CK	532 a	100	1.12 b	100
	-15kPa	458 b	86	1.48 a	132
	-25kPa	441 b	83	1.45 a	129
砂土	CK	617 a	100	0.93 a	100
	-15kPa	503 b	81	1.09 a	118
	-25kPa	453 c	73	1.12 a	121

表 9 不同土壤类型在不同灌溉方式下的含水量

土壤类型	水分处理	含水量(%)			
		0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	平均
黏土	CK	24.4 a	26.6 a	30.5 a	27.1 a
	-15kPa	20.4 b	23.4 b	28.0 b	23.9 b
	-25kPa	18.1 c	19.6 c	22.1 c	19.9 c
壤土	CK	23.5 a	25.6 a	28.7 a	25.9 a
	-15kPa	19.7 b	20.1 b	26.2 b	22.0 b
	-25kPa	16.6 c	18.0 c	20.9 c	18.5 c
砂土	CK	21.3 a	23.6 a	23.5 a	22.8 a
	-15kPa	11.6 b	12.9 b	14.9 b	13.1 b
	-25kPa	10.2 c	11.7 c	13.6 c	11.8 c

土条件下将土壤水势下限控制在 CK 处理下时才能取得较好产量。

杨龙生等^[21]研究表明,在壤土条件下常规淹水灌溉栽培使水稻分蘖高峰期提前,分蘖增多,株高增高;节水灌溉栽培处理,分蘖高峰期后移,分蘖减少,株高降低。林贤青等^[22]则认为,节水灌溉比淹水灌溉早发分蘖。由于本研究在有效分蘖临界叶龄进行处理,在拔节期,3 种土壤条件下的节水灌溉处理与水层灌溉处理分蘖数无显著差异。张益武等^[23]认为,在壤土条件下干湿交替灌溉下抽穗到成熟期的干物质质量高于淹水灌溉。周明耀等^[24]认为,水分在水稻生物量转化的过程中起着重要的作用,对于壤土条件下节水灌溉处理,其地上部植株干物质质量相对较小,产量相对较高。本研究结果表明,不仅壤土条件下抽穗到成熟期的干物质质量较水层灌溉显著提高,且黏土条件下表现与壤土一致。而砂土条件下节水灌溉较水层灌溉干物质质量下降显著。这可能是因为壤土、黏土条件下轻度节水灌溉使叶片挺拔直立,株型紧凑,提高了水稻生长后期的群体透光率和光合面积,促进干物质的积累和转运,从而促进籽粒灌浆。水稻产量的源泉是光合物质生产,而群体光合生产能力指标有光合势、群体生长率和净同化率等。

曹树青等^[25]研究认为,提高抽穗至成熟期的光合生产能力是提高抽穗至成熟期的干物质积累的前提。洪植蕃等^[26]研究认为,水稻生育前期和后期的 CGR 和 NAR 差异大,而拔节期到齐穗期的差异较小。赵黎明等^[27]认为,壤土条件下干湿交替灌溉或低密度下可以增加水稻中后期 CGR,提高抽穗后 NAR,而重干湿交替灌溉或低密度下有助于抽穗期之前 NAR 的提高。本研究认为,壤土、黏土在轻度节水灌溉(-15kPa)处理下能够增加抽穗后水稻的光合势、群体生长率和净同化率,而砂土在 CK 处理下的光合势、群体生长率和净同化率最高。

3.2 不同土壤类型下不同灌溉方式对水稻水分利用效率的影响

在本试验 3 种土壤中,在不同水分处理下黏土的含水量高于壤土和砂土,但是黏土的产量低于壤土,砂土低于壤土、黏土。造成这种结果的原因可能与土壤的透性、根系有关。砂土土壤疏松,活土层深厚,有利于根系向深层土壤生长,但其保水性及养分水平较差;黏土土壤致密,通气性差,虽然其保水性及养分水平较高,根系活力后期下降较慢,但在整个生育期不利于根系深扎;壤土致密性和通气性介于砂土及黏土之间,土壤养分特性适中,有利于根系生长并保持较强的根系活力。关于水分利用率的研究,张慎凤^[28]认为,在壤土条件下轻度节水灌溉的灌溉用水量较水层灌溉显著减少,水分利用效率较水层灌溉显著提高。陈小飞^[29]认为,浅湿干灌溉较淹水灌溉水分利用效率高。张玉屏等^[30]认为,水稻以干湿灌溉处理最佳,干湿灌溉不仅有较好的节水效果,而且保证了一定的产量,大大提高了水分利用效率。本研究结果表明,在黏土和砂土条件下轻度节水灌溉较水层灌溉的灌溉用水量显著下降,水分利用效率显著提高。说明 3 种土壤下节水灌溉均可提高水分利用效率,但具体提高的原因有待进一步试验和研究。

参考文献

[1] Ali M H, Talukder M S U. Increasing water productivity in crop production—A synthesis[J]. *Agr Water Manage*, 2008, 95: 1 201-1 213.

[2] Bossio D, Geheb K, Critchley W. Managing water by managingland: addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods[J]. *Agr Water Manage*, 2010, 97: 536-542.

[3] 李王成,冯绍元,康绍忠,等. 石羊河中游荒漠绿洲区土壤水分的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 138-144.

[4] Connolly R D. Modeling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review[J]. *Soil Till Res*, 1998, 48: 1-19.

- [5] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 等. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 742-746.
- [6] Ahmadi S H, Andersen M N, Plauborg F, et al. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: yield and water productivity[J]. *Agr Water Manage*, 2010, 97: 1 923-1 930.
- [7] 苏永中, 杨荣, 刘文杰, 等. 基于土壤条件的边缘绿洲典型灌区灌溉需水研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1 128-1 139.
- [8] Singandhupe R B, Rajput R K. Response of rice to irrigation schedule and nitrogen in sodic soil[J]. *Indian J Agron*, 1987, 32: 130-133.
- [9] Ramasamy S, Hfinten B, Purushothaman S. Yield formation in rice in response to drainage and nitrogen application [J]. *Field Crop Res*, 1997, 51: 65-82.
- [10] Ockerby S E, Fuka S. The management of rice grown on raised beds with continuous furrow irrigation[J]. *Field Crop Res*, 2001, 69: 215-226.
- [11] Bouman B A M, Peng S, Castañeda A R, et al. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems [J]. *Agr Water Manage*, 2005, 74: 87-105.
- [12] Liu X J, Wang J C, Lu S H, et al. Effects of non-flooded mulching cultivation on crop yield nutrient uptake and nutrient balance in rice-wheat cropping systems[J]. *Field Crop Res*, 2003, 83: 297-311.
- [13] Tao H, Brueck H, Ditter K, et al. Growth and yield formation for rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS)[J]. *Field Crop Res*, 2006, 95: 1-12.
- [14] Yang J C, Zhang J H. Crop management techniques to enhance harvest index in rice[J]. *J Exp Bot*, 2010, 61: 3 177-3 189.
- [15] 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.
- [16] 张自常, 徐云姬, 褚光, 等. 不同灌溉方式下的水稻群体质量[J]. 作物学报, 2011, 37(11): 2 011-2 019.
- [17] 夏琼梅, 陈清华, 李从英, 等. 浅湿交替节水灌溉对水稻产量及生态学特性的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(4): 114-117.
- [18] Mishra H S, Rathore T R, Pant R C. Effect of intermittent irrigation on groundwater table contribution, irrigation requirement and yield of rice in Mullions of Tarai region [J]. *Agr Water Manage*, 1990, 18: 231-241.
- [19] Tabbal D F, Bouman B A M, Bhuiyan S I, et al. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice: case studies in the Philippines[J]. *Agr Water Manage*, 2002, 56: 93-112.
- [20] 柯传勇. 不同水分处理对水稻生长、产量及品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [21] 杨龙生, 王兴盛, 强爱玲, 等. 不同灌溉方式对水稻产量及产量构成因子的影响[J]. 中国稻米, 2010, 16(1): 49-51.
- [22] 林贤青, 朱德峰, 李春寿, 等. 水稻不同灌溉方式下的高产生理特性[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 328-332.
- [23] 张益武, 朱利群, 王伟, 等. 不同灌溉方式和秸秆还田对水稻生长的影响[J]. 作物杂志, 2014(2): 113-118.
- [24] 周明耀, 赵瑞龙, 顾玉芬, 等. 水肥耦合对水稻地上部分生长与生理性状的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 38-43.
- [25] 曹树青, 翟虎渠, 钮中一, 等. 不同产量潜力水稻品种的剑叶光合特性研究[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(3): 1-4.
- [26] 洪植蕃, 林菲, 庄宝华. 两系杂交稻栽培生理生态特性 II. 干物质生产特性[J]. 福建农学院学报, 1992, 21(2): 129-136.
- [27] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 等. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 159-169.
- [28] 张慎凤. 干湿交替灌溉对水稻生长发育、产量与品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- [29] 陈小飞. 肥水耦合处理对水稻氮素、水分利用率及产量的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [30] 张玉屏, 朱德峰, 林贤青, 等. 不同灌溉方式对水稻需水量和生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(2): 83-85.

Effects of Different Irrigation Methods on Yield and Water Use Efficiency of Rice in Different Soil Types

CHEN Mengyun, LI Xiaofeng, CHEN Yufei, REN Hongru, WANG Wei, JING Peipei, HUO Zhongyang*

(Yangzhou University/Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture / Jiangsu Province Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; *Corresponding author: huozy69@163.com)

Abstract: In order to discuss the influence of different irrigation methods on yield and water use efficiency of rice, an experiment was conducted in loam, clay, sand, using *japonica* rice Nangeng 9108 as material. The results showed that compared with the water layer irrigation treatment(CK), mild water saving irrigation treatment(soil water potential -15kPa)and severe water saving irrigation treatment (soil water potential -25 kPa) significantly improved rice yield and water use efficiency in the condition of loam and clay, the grain yield of mild water saving irrigation treatment were increased by 13.89% and 10.96%, the grain yield of severe water saving irrigation treatment were increased by 7.02% and 6.61%, the water use efficiency of mild water saving irrigation treatment were increased by 32.0% and 26.0%, the water use efficiency of severe water saving irrigation treatment were increased by 29.0% and 26.0%, respectively; in the condition of sand, the yield of mild saving irrigation treatment and severe water saving irrigation treatment were significantly lower than CK, but the water use efficiency was improved, the yield of mild water-saving irrigation treatment was reduced by 5.67% compared with CK, water use efficiency was increased by 18.0%; the yield of severe water saving irrigation treatment was reduced by 11.22%, water use efficiency was increased by 21.0%. The results showed that in the condition of loam and clay, the mild water saving irrigation could increase the dry matter accumulation, photosynthetic potential, population growth rate and net assimilation rate of the aboveground population, eventually increase the grain yield.

Key words: rice; soil type; water saving irrigation; grain yield; water use efficiency