文章编号:1672 - 3317(2018)08 - 0039 - 07

农田排水与淡水交替灌溉对枣树生理特性及品质的影响

李应海[1,2,3], 王洪博[5], 王兴鹏[4,5*]
(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 3.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 4.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 5.塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘 要:南疆地区农田灌溉洗盐和种稻改良致使排水过多,排水下泄对塔里木河以及地下水环境造成危害。故尝试利用农田排水在缺水时期作为补充水源对枣树进行灌溉,一方面可以提供作物所需水分,另一方面减少排水下泄。【目的】分析农田排水—淡水交替灌溉下枣树的生理特性和品质。【方法】采用农田排水(Farmland Drainage,FD)与淡水(Fresh Water,FW)交替灌溉(Alternative Irrigation,AI)的试验方法,设计了AI1(FD-FD-FW-FD)、AI2(FD-FD-FW-FW)和AI3(FD-FW-FW-FD)3种交替灌溉次序,测定了不同时期农田排水与淡水交替灌溉后连续4 d的枣树光合速率、气孔导度,以及果实品质相关指标,并分析了枣树的水分利用效率。【结果】①连续2次用FD灌溉会显著降低枣树光合速率和气孔导度,随后交替灌溉1次或2次FW的枣树叶片气孔导度没有显著提升;②FD灌溉后连续2次用FW灌溉,枣树光合速率和气孔导度明显提高,再次FD,枣树气孔导度降低不明显;③不同交替灌溉处理的叶片水分利用效率的变异系数大小依次是CK＜AI3处理＜AI2处理＜AI1处理;④不同处理通过极值标准化法的红枣果实品质综合评价值的大小顺序是AI2处理>CK>AI3处理>AI1处理。【结论】在利用FD进行枣树交替灌溉时,应减少连续的FD灌溉次数,使之间隔灌溉,在间隔期连续多于2次的FW灌溉的枣树生理特性较CK略有降低,但品质综合评价较CK有所提高。

关 键 词:农田排水; 交替灌溉; 光合速率; 气孔导度; 叶片水分利用效率
中图分类号: S3 **文献标志码:**A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0564
李应海,王洪博,王兴鹏. 农田排水与淡水交替灌溉对枣树生理特性及品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(8):39-45.

0 引 言

南疆地区由于灌溉洗盐和种稻改良致使排水过多,排水下泄对塔河以及地下水造成污染,仅阿拉尔灌区每年排入塔河的水量达7.07×10^8 m^3,总排盐量340×10^4 t[1]。农田排水属于劣质水范畴,其水质成分复杂,不仅含盐量高,还混掺淋洗出的氮、磷、钾等元素以及残留的农药成分[2]。利用农田排水作为补充水源不仅提供给作物所需水分,同时减小对水环境的影响[3]。在作物耐盐碱较强的生育阶段,农田排水与淡水混合后可作为灌溉水源[4]。但过量的农田排水灌溉,会造成土壤盐胁迫程度不断增大,枣树生育过程受限[5]。当排水矿化度超过3 g/L时,对棉种萌发的抑制作用开始显现,高于5 g/L时抑制作用强烈[2]。王少丽等[6]认为,作物早期采用淡水灌溉较为适宜,而在生长的中后期可采用农田排水进行灌溉。在黄河下游灌区,当农田排水含盐量小于4 mg/cm^3时可用于冬小麦后期的补灌[7]。因此,农田排水资源化利用对提高灌溉水资源重复利用率,减少化肥和农药的流失,降低农业排水污染,促进节水与水资源可持续利用具有重要作用[8]。选择适当的灌溉制度,则是利用非淡水进行农业生产的关键[9-10]。

收稿日期:2017-09-13
基金项目:兵团中青年科技创新领军人才计划项目(2016BC001);塔里木大学重大专项培育项目(TDZKPY201501);宁夏自然科学基金项目(NZ15046)
作者简介:李应海(1977-),男,宁夏海原人。副教授,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: Li_yh@nxu.edu.cn
通信作者:王兴鹏(1978-),男,宁夏吴忠人。教授,博士研究生,主要从事极端干旱荒漠区农业水土环境和节水灌溉方面的研究工作。E-mail: 13999068354@163.com

利用农田排水进行灌溉，面临着水盐胁迫的危险。盐分胁迫会导致植物组织细胞质质量浓度变大，水势降低，植物体内因缺水而使叶片气孔关闭，光合作用减弱，植物光合速率、蒸腾速率以及气孔导度降低[11-13]。轻度的盐分胁迫（小于50 mmol/L）可以提高杠柳叶片的光合速率、气孔导率和水分利用效率[14]。当咸淡水混灌后的矿化度大于4.35 g/L时枣树净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳通量和蒸腾速率会显著降低[15]。研究[16-17]表明，咸淡水轮灌较直接咸水灌溉的作物产量高。国内外学者还对咸淡水的轮灌制度[18-19]、次序[20]及轮灌对土壤盐分分布[21-22]方面进行了探讨。为此，以农田排水与淡水为水源交替灌溉对枣树光合特性、叶片水分利用效率及红枣品质的影响进行分析，为进一步明确农田排水在极端干旱区果树灌溉中的安全利用提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2016年在新疆阿拉尔市塔里木大学水利与建筑工程学院节水灌溉试验基地进行，该区属典型大陆性极端干旱沙漠气候，干旱少雨，昼夜温差大，多年降水量不足70 mm，年蒸发量高达2 337.4 mm，年均日照时间2 729.0 h，最高月平均气温为27 ℃，最低月平均气温为-22 ℃，无霜期达200 d以上，干旱指数为18。土壤质地为沙壤土，透气性良好，0~80 cm土壤平均体积质量为1.34 g/cm^3，田间质量持水率为25%，0~80 cm土壤含盐量在0.39%左右，地下水多年平均埋深在3~4.5 m。

1.2 试验设计

以矮化密植枣树（骏枣）为研究对象，树龄为6 a，试验小区总面积为1 334 m^2，枣树株行距为1.5 m×2 m。为了保证枣树矮化树型，每间隔15~20 d修剪，控制株高在2~2.2 m，南北冠幅1.3~1.5 m，东西冠幅1.4~1.6 m。

灌溉方式为地面滴灌，选用内镶式滴灌管，现场打孔安装，滴头布设间距如图1所示，单滴头最大流量为3.5 L/h，工作压力为0.1 MPa，滴灌管平行布置，为单行毛管布置（每株枣树布置2个滴头），灌水定额为60 mm（高峰期日耗水量6 mm），在枣树需水关键期（7月上旬—8月下旬）的灌水周期为10 d，其他时期为15~20 d。为了保证后期的红枣产量和品质，7月17日后均采用淡水灌溉。

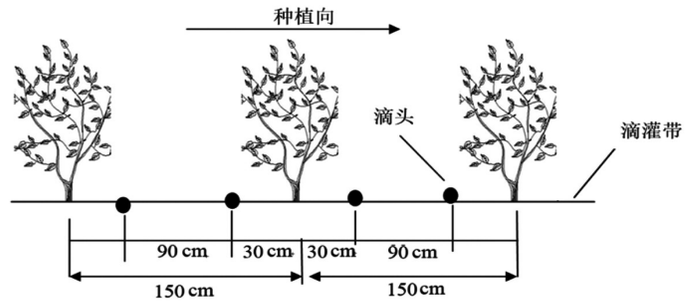


图1 滴头布置图

农田排水（Farmland Drainage，FD）水源和淡水（Fresh Water，FW）水源分别取自阿拉尔灌区塔南总干排和南二干灌溉渠道水，每次灌溉均测定FD和FW的矿化度，6月4日、6月18日、7月9日和7月17日FD和FW的矿化度值分别为10.76、7.74、6.09、6.46 g/L和0.84、0.93、0.76、0.81 g/L。

采用农田排水和淡水交替灌溉的方式，共设置3种交替灌溉次序（表1）。枣树株行距为1.5 m×2 m，3行枣树为1个处理，每个处理3次重复，共计30株枣树，每个试验小区面积40 m^2，设置1个对照（CK）。排淡水的交替灌溉时间分别是6月4日、6月18日、7月9日和7月17日，各次灌水定额一致均为60 mm，灌溉试验期内无有效降水。为了降低高矿化度FD灌溉对枣树造成的胁迫风险，且为了保证FD灌溉对枣树光合特性影响结果的一致性，在试验设计中将交替灌溉的FD矿化度控制在6 g/L，当测定的FD矿化度高于6 g/L时，需要稀释以降低FD矿化度满足试验要求。

表1 农田排水与淡水交替灌溉方案

处理	0604	0618	0709	0717
AI1	FD	FD	FW	FD
AI2	FD	FD	FW	FW
AI3	FD	FW	FW	FD
CK	FW	FW	FW	FW

1.3 研究方法

光合参数采用Li-6400P光合仪测定。为了反映FD和FW交替灌溉对枣树光合特性的连续影响，每次交

替灌溉后连续4 d在每天10:00—20:00测定光合参数：包括光合速率（P_n，μmol/(m^2·s)）、蒸腾速率（T_r，mmol/(m^2·s)）和气孔导度（G_s，mmol/(m^2·s)），并计算叶片水分利用效率*WUE*，计算公式[23]为$WUE=P_n/T_r$。测定前，每个处理分别在试验行内选择3株枣树，每行1株作为测定样株，在每株枣树东西南北向分别标记4片长势相近的主叶，每次均测定样株所标记的主叶，以保证结果一致性。

表2 土壤电导率均值 μS/cm

处理	0605—0608	0619—0622	0710—0713	0718—0721
AI1	1 017.8	1 463.6	816.8	1 095
AI2	823.8	1 114.5	803.8	812.5
AI3	816.3	603.8	345	581
CK	159.5	182.5	186.8	189.5

在测定枣树光合参数的同时，每个处理同步取土测定土壤电导率，取土深度为20、40、60、80、100 cm，表2是连续4 d的0~100 cm土层深度的土壤电导率均值。电导率仪型号为雷磁DDSJ-308A。

在红枣成熟期，选择测定过光合参数的枣树作为果实品质的测定样株，每棵枣树选取红枣30颗，每个处理共计90颗红枣。红枣还原性糖、可溶性糖、VC、有机酸及可溶性固形物分别采用直接滴定法、蒽酮比色法、2，6-二氯靛酚滴定法、高效液相色谱法和折光仪法测定。

红枣的单一品质指标难以客观判断适宜该地区红枣的最佳农田排水交替灌溉次序。因此，红枣品质采用极值标准化法进行综合评价，将属性数据按照比例缩放落入[0, 1]区间。

转化公式：

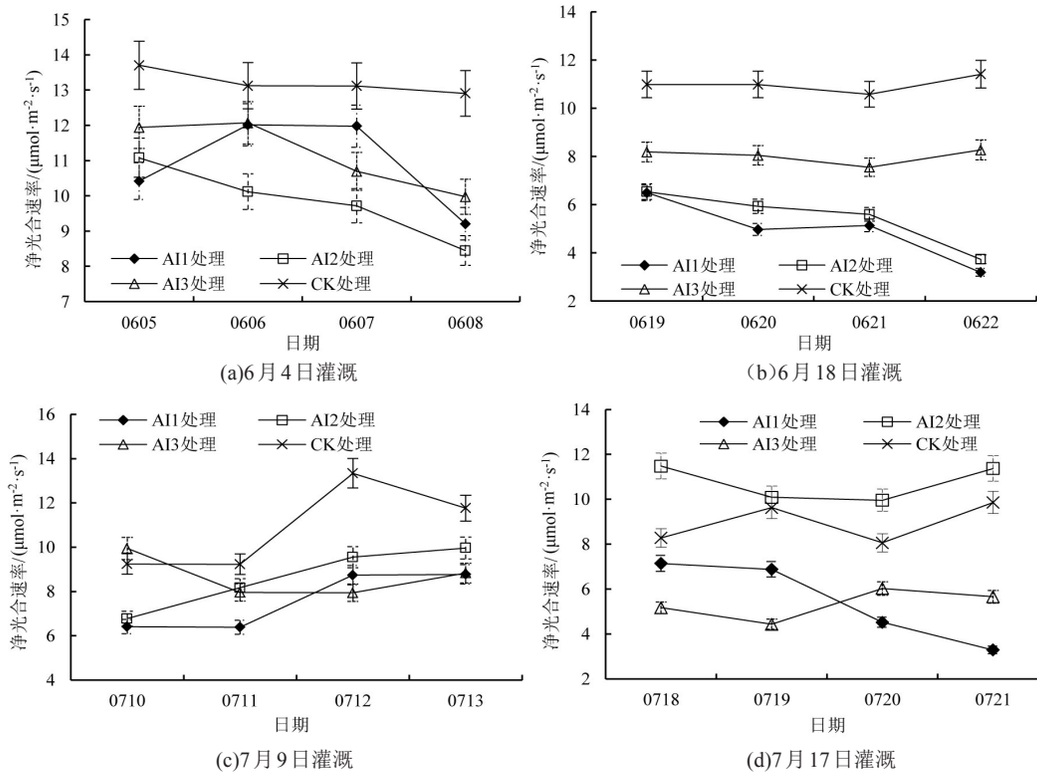
$$\text{正指标}\quad Z_{ij}=\frac{X_{ij}-\min\left(X_j\right)}{\max\left(X_j\right)-\min\left(X_j\right)}\ , \tag{1}$$

$$\text{逆指标}\quad Z_{ij}=\frac{\min\left(X_j\right)-X_{ij}}{\max\left(X_j\right)-\min\left(X_j\right)}\ , \tag{2}$$

式中：Z_{ij}为红枣品质综合评价指标；X_j为不同处理的品质指标。

1.4 数据处理

各处理的光合速率、气孔导度和蒸腾速率及红枣品质均为多次重复的算术平均值，所得数据通过SPSS 18.0统计软件进行方差分析和显著性检验（$P<0.01$和$P<0.05$），文中图均由EXCEL2007绘制完成。



(a)6月4日灌溉 (b)6月18日灌溉

(c)7月9日灌溉 (d)7月17日灌溉

图2 光合速率变化

2 结果与分析

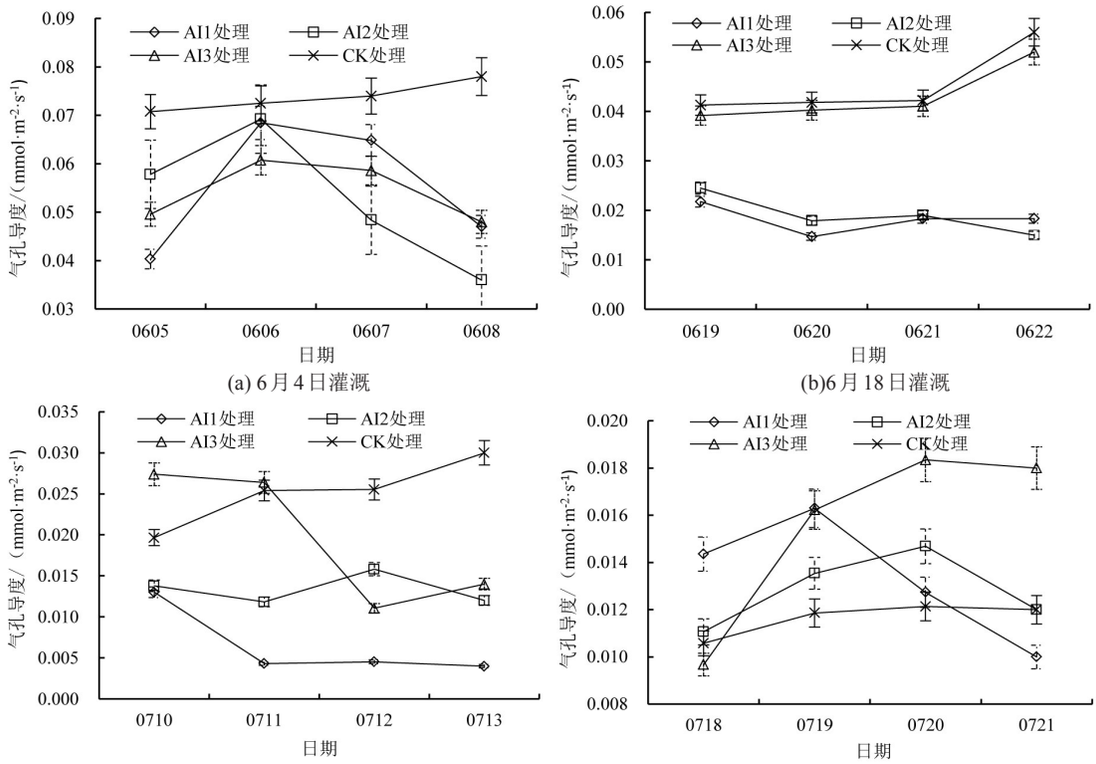
2.1 农田排水与淡水交替灌溉对枣树光合速率的影响

图2为不同农田排水与淡水交替灌溉处理方案的枣树净光合速率，CK枣树光合速率变化则相对稳

定。由图2(a)可知，FD灌溉后，AI1处理的光合速率先增大再降低，而AI2、AI3处理的光合速率呈现逐渐降低的趋势，在灌溉后第4天均达到最小值，AI1、AI2、AI3处理连续4 d的光合速率均值为10.905、9.841，11.171 μmol/(m²·s)，较CK降低17.5%、25.5%、15.5%。由图2(b)可知，连续FD灌溉的AI1、AI2处理光合速率持续降低，降幅较为明显，而交替FW灌溉的AI3处理连续4 d的光合速率变化幅度较小并略有回升，AI1、AI2、AI3处理连续4 d的光合速率均值为4.949、5.452、8.018 μmol/(m²·s)，较CK降低45.7、41.9、22.5%。由图2(c)可知，交替FW灌溉的AI1、AI2处理光合速率明显回升，升幅一度达到了6月8日的水平，而连续FW灌溉的AI3处理光合速率与前次FW灌溉保持较为一致的变化趋势，变化相对稳定，AI1、AI2、AI3处理连续4 d的光合速率均值为7.579、8.614、8.671 μmol/(m²·s)，较CK降低25.1%、17.3%、16.8%。由图2(d)可知，交替FD灌溉的AI1处理光合速率逐渐降低，AI3处理光合速率较7月9日也明显减小，虽在7月20日略有回升但幅度不大，而连续FW灌溉的AI2处理连续4 d光合速率较高，变化较小。AI1、AI2、AI3处理连续4 d的光合速率均值为5.458、10.723、5.323 μmol/(m²·s)，较CK降低26.5%、27.5%，而AI2处理却提高13.4%。

2.2 农田排水与淡水交替灌溉对枣树气孔导度的影响

图3为不同农田排水与淡水交替灌溉处理下枣树气孔导度的变化。由图3可知，枣树叶片气孔导度受交替灌溉次序的影响，其值变化差异明显。CK(6月5日、6月19日和7月7日)的气孔导度变化稳定，其值大于AI1、AI2、AI3处理。由图3(a)可知，FD灌溉的AI1、AI2、AI3处理，枣树叶片气孔导度均呈先增大再降低趋势，并在灌溉后第4天达到最小值，连续4 d的气孔导度均值分别为0.055、0.053、0.054 mmol/(m²·s)。



(a) 6月4日灌溉　(b)6月18日灌溉　(c) 7月9日灌溉　(d) 7月17日灌溉

图3 叶片气孔导度变化

由图3(b)可知，FD灌溉后，AI1、AI2处理的枣树气孔导度的变化趋势相同，连续4 d的气孔导度均值分别是0.018、0.019 mmol/(m²·s)。而FW灌溉后，AI3处理的枣树气孔导度与CK变化趋势一致，其均值为0.043 mmol/(m²·s)，较CK低0.002 mmol/(m²·s)。由图3(c)可知，FW灌溉后，受前面连续2次的FD灌溉影响，AI1、AI2处理的气孔导度持续降低，升高趋势不明显，同时，AI3处理的气孔导度则在灌后第3、4天有较大幅度的降低。AI1、AI2、AI3处理连续4 d的气孔导度均值依次为0.006、0.013、0.02 mmol/(m²·s)；由图3(d)可知，由于连续的FW灌溉，AI2处理的气孔导度与前次(7月9日)FW灌溉后的值保持较为一致的变化趋势，其连续4 d的均值为0.013 mmol/(m²·s)。而交替FD灌溉的AI1、AI3处理，在灌后1、2 d的气孔导度变化趋势相同，但在第3、4天，AI3处理的值升高，而AI1处理降低。AI1、AI3处理连续4 d的气孔导度均值是0.013、0.016 mmol/(m²·s)。与CK相比，AI1处理的(6月14日、18月、7月9日)气孔导度(灌后连续4 d的

平均值）分别降低了25.2%、59%和71%，7月17日灌后连续4 d的均值则提高了15.4%。AI2处理分别降低了27.8%、56.5%和45.3%，7月17日提高了9.9%。AI3处理分别降低了26.3%、4.7%和16.7%，7月17日则提高了32.4%。

2.3 农田排水（FD）与淡水交替灌溉对叶片水分利用效率（*WUE*）的影响

表3为不同FD和FW交替灌溉次序的枣树叶片水分利用效率（*WUE*）。由表3可知，FD灌溉后的枣树叶片*WUE*普遍不高，其中连续2次FD灌溉对叶片*WUE*的影响更大，其值更低。当交替灌溉FW后，叶片*WUE*会有较为明显的提高，甚至高于CK，如AI1、AI2处理。而AI3处理的枣树水*WUE*提高的幅度较小，连续2次FW交替灌溉与CK的差异性不显著（$P<0.05$）。因此，AI3处理的FD和FW交替灌溉，既能够在一定程度上提升枣树的*WUE*，同时又不会影响到枣树的正常生理活动。由表4可知，AI1处理的叶片*WUE*变异系数最大，其次是AI2处理，而CK和AI3处理的变异系数相近。

表3 各处理的叶片*WUE*　　μmol/mmol

灌溉处理	0605	0606	0607	0608	均值	0619	0620	0621	0622	均值
AI1	4.872	3.512	3.497	2.889	3.693ABa	3.47	2.55	2.72	1.79	2.63 Aa
AI2	3.755	3.353	2.944	4.028	3.520Aa	4.84	4.04	3.77	2.47	3.78 ABa
AI3	4.511	4.545	3.929	3.51	4.124ABa	5.38	5.17	4.82	5.20	5.14 Bb
CK	5.15	4.78	4.65	4.92	4.875Bb	6.88	6.80	6.53	7.03	6.81 Cc
灌溉处理	0710	0711	0712	0713	均值	0718	0719	0720	0721	均值
AI1	12.09	11.99	18.40	18.13	15.15 Aa	10.29	10.73	5.71	4.13	7.71ABCa
AI2	9.66	11.46	9.91	10.24	10.32 Ab	14.01	10.16	13.38	12.76	12.58Ab
AI3	8.14	6.47	6.39	7.08	7.02 Bc	3.74	3.19	4.32	3.99	3.81Bc
CK	8.78	8.69	7.14	6.27	7.72 Bc	5.72	6.62	5.44	6.60	6.10Ca

注　同列不同大小写字母表示处理间差异极显著（$P<0.01$）和显著（$P<0.05$），下同。

表4 叶片*WUE*变异系数

灌溉处理	*WUE*/(μmol·mmol^{-1})	平均值/(μmol·mmol^{-1})	标准差/(μmol·mmol^{-1})	变异系数/%
AI1	1.79~18.40	7.298	5.55	76.003
AI2	2.47~14.01	7.549	4.22	55.955
AI3	3.19~8.14	5.056	1.42	28.176
CK	4.65~8.78	6.063	1.24	19.5

2.4 农田排水与淡水交替灌溉对果实品质的影响

表5为不同农田排水与淡水交替灌溉处理方案的枣树品质参数。由表5可看出，CK的红枣还原性糖量最高，AI3处理最低，各处理间差异显著（$P<0.05$）。对于红枣可溶性糖量，AI3处理高于其他处理，各处理间差异极显著（$P<0.01$）。采用农田排水灌溉处理的红枣VC量均高于CK，且各处理间差异极显著（$P<0.01$）。红枣的有机酸量、可溶性固形物受农田排水交替灌溉的影响较小，各处理间差异不显著。

表5 果实品质参数

灌溉处理	还原性糖量/%	可溶性糖量/%	VC/(10^{-2}·mg·g^{-1})	有机酸量/%	可溶性固形物量/%
AI1	9.69±0.24bB	29.54±0.44bB	268.45±0.6b4bB	0.37±0.01aA	31.94±0.34aA
AI2	9.17±0.13cB	34.22±0.19cC	353.47±0.47cC	0.38±0.01aA	29.97±0.31bB
AI3	7.78±0.27dC	36.63±0.22dD	245.75±0.16dD	0.34±0.01bB	31.37±0.31aA
CK	14.92±0.39aA	32.26±0.55aA	220±0.29aA	0.37±0.01aA	30.11±0.19bB

2.5 红枣果实品质的综合评价

农田排水与淡水交替灌溉次序的不同均会对果实品质指标产生影响（表6）。采用式（1）对各处理进行综合评判发现，各处理果实品质综合评价的结果为AI2处理>CK>AI3处理>AI1处理，AI2处理的枣树果实品质综合评价值最高。因此，在农田排水与淡水的交替灌溉中AI2处理的枣树果实品质最优。

表6 红枣果实品质综合评价

品质指标	CK	AI1处理	AI2处理	AI3处理
还原糖量	1	0.34	0.51	0.71
可溶性固形物量	0.29	0.95	0.24	0.76
有机酸量	0.6	0.6	0.7	0.3
VC	0	0.36	1	0.19
可溶性糖量	0.59	0.34	0.78	1
综合评价	0.596	0.518	0.646	0.592
位次	2	4	1	3

3 讨论与结论

研究表明，第1次FD灌溉时，由于土壤初始盐分不同，使得各处理枣树光合速率、气孔导度差异较大。连续灌溉2次FD会显著降低枣树光合速率和气孔导度，随后交替灌溉1次或连续灌溉2次FW并没有显著提升枣树的气孔导度，说明农田排水灌溉可能引起了枣树气孔传导活性机能发生紊乱，光合速率的变化无法与气孔导度产生对应关系。王宇超等[24]、邹丽娜等[25]研究表明滨藜、紫穗槐的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均随着含盐量的增加而降低，这与本研究较为一致。究其原因是连续2次的FD灌溉持续加重了盐分胁迫程度，枣树根系产生的化学信号引起气孔关闭导致光合速率下降[26-27]，而随后交替灌溉FW并没有起到改善土壤逆境的作用，造成光合速率降低主要来自气孔限制因素。然而，当交替灌溉1次FD后交替FW连续灌溉2次，枣树光合速率和气孔导度有了明显提高，即使再次交替灌溉FD，也并没有使枣树气孔导度出现降低，主要是由于交替FW连续灌溉2次，在一定程度上缓解了盐分胁迫程度，植物通过自身的生理调节维持体内水势，从而保持一定气孔开度，因此，光合速率也没有进一步降低[28-29]。所以，连续灌溉FD，会引起枣树气孔导度降低，光合速率受阻，生长受限，对后期的产量和品质产生影响。因此，在干旱区利用咸水灌溉时，为了降低盐胁迫对枣树造成生理破坏，应考虑选择较为适宜的咸淡水交替灌溉方式[29]。当利用FD进行枣树交替灌溉时，应减少连续的FD灌溉次数，使之间隔出现，并在间隔期连续灌溉多于2次的FW对枣树光合特性及品质较为有利。

叶片*WUE*能较为准确反映树木叶片的瞬间或短期的反应行为，是评价胁迫条件下树木生长适宜程度的一个综合生理生态指标[30]。本研究结果显示，与CK相比，交替灌溉1次FD的枣树叶片*WUE*与CK差异不显著（$P>0.05$），而交替FD连续灌溉2次后枣树的叶片*WUE*与CK的差异显著（$P<0.05$）。由于FD灌溉后，土壤含盐量增大，可能会引起枣树根系吸水困难，进入植株体内的有效水分减少，光合速率降低程度高于蒸腾速率的降低，枣树的叶片水分利用效率出现不同程度的降低。当交替灌溉FW后，土壤含盐量降低，根系吸水能力增强，但是由于受到FD灌溉的影响，气孔导度较低导致叶片*WUE*较高，而李树朋等[14]研究也认为当土壤在没有达到相对较高的盐浓度时，植物的*WUE*不会被抑制甚至在较低盐胁迫时还会被促进。但是，交替灌溉1次FD后交替FW连续灌溉2次的枣树叶片*WUE*要低于交替FD连续灌溉2次后再交替FW灌溉1次或2次，这可能是土壤盐分值不同所致。同时，叶片*WUE*的变异系数大小依次是CK＞AI3处理＞AI2处理＞AI1处理，变异系数越大说明叶片*WUE*越不稳定，而差值越大对于维持枣树正常生长的生理机能被破坏的风险就会增强。

在农田排水与淡水的交替灌溉过程中，不同灌溉方案处理对红枣还原性糖量、可溶性糖量及VC量的影响较大，而对有机酸量和可溶性固形物的影响相对较小。通过极值标准化法，采用正指标对各处理进行综合评判结果表明，AI2处理的红枣果实品质综合评价值最高，各处理所处的位次依次是AI2处理>CK>AI3处理>AI1处理。

参考文献：

[1] 艾尼瓦尔•买买提, 普拉提•苏力坦, 海米提•依米提.阿克苏河灌区农田排水特征研究[J].干旱区资源与环境, 2009, 23(12):145-150.

[2] 王兴鹏, 段爱旺, 李双. 农田利用排水灌溉对土壤入渗特性及棉花生长的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6):100-106.

[3] QADIR M, OSTER J D. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture[J]. Science of the Total Environment, 2004, 323(1/3):1-19.

[4] 胡顺军, 郭谨, 陈斌, 等. 新疆沙井子灌区农田排水再利用的可行性分析[J].干旱区研究, 2004, 21(3)：221-224.

[5] 张军,李宗阳,李朝阳, 等. 干旱区农田排水灌溉对枣树根区土壤水盐运移特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4):278-283.

[6] 王少丽, 许迪, 方树星, 等.宁夏银北灌区农田排水再利用水质风险评价[J].干旱地区农业研究, 2010, 28(3):43-47.

[7] 许迪,丁昆仑, 蔡林根, 等.黄河下游灌区农田排水再利用效应模拟评价[J].灌溉排水学报, 2004, 23(5):1-5.

[8] 贺新春, 邵东国, 刘武艺, 等.农田排水资源化利用的研究进展与展望[J].农业工程学报, 2006, 22(3): 176-179.

[9] ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, REA E, et al. Comparison of the sub-irrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1/2):99-117.

[10] 王卫光, 王修贵, 沈荣开, 等.河套灌区咸水灌溉试验研究[J].农业工程学报, 2004, 20(5): 92-96.

[11] 王颖.不同灌水量对梨枣生理特性及产量品质的影响研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2011.

[12] 武文珺. 盐胁迫下耐盐性不同朝天椒品种间生理生化特性差异研究[D].泰安：山东农业大学, 2012.

[13] 宋立奕. 盐胁迫对青檀幼苗生长及生理特性的影响[D]. 南京：南京林业大学, 2004.

[14] 李树朋，吴仁烨，朱艳菲, 等. 盐分胁迫下杠柳叶片光合特性的光响应研究[J].西北植物学报,2013,33(12)：2 507-2 512.

[15] 张世卿. 微咸水滴灌对枣园土壤、枣树生长和红枣果实品质的影响[D].阿拉尔: 塔里木大学, 2015.

[16] 严亚龙.微咸水供水方式对土壤水盐分布及作物的影响[D].太原：太原理工大学, 2015: 36-39.

[17] MINHAS P S. Saline water management for irrigation in India[J].Agricultural Water Management, 1996, 30(1):1-24.
[18] 张永波, 时红. 冬小麦高产咸水灌溉制度的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2000,16 (1) :44-48.
[19] 吕祝乌. 土壤水盐运移模拟及灌溉制度优化设计[D]. 南京：河海大学, 2005.
[20] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23（11）：71-76.
[21] 管孝艳, 杨培岭, 吕烨. 咸淡水交替灌溉下土壤盐分再分布规律的室内实验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5):88-91.
[22] 吕烨, 杨培岭, 管孝艳. 咸淡水交替淋溶下土壤盐分运移试验[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6):90-93.
[23] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 冬小麦光合特征及叶绿素含量对保水剂和氮肥的响应[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):79-85.
[24] 王宇超，王得祥. 盐胁迫对木本滨藜叶绿素合成及净光合速率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10)：151-158.
[25] 邹丽娜, 周志宇, 颜淑云, 等. 盐分胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3):84-90.
[26] 赵福庚，孙诚，刘友良. 不同浓度NaCl对 14C-Glu 向大麦幼苗质膜、液泡膜和类囊体膜蛋白掺入的影响及ABA的调节作用[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(2)：5-8.
[27] 李朝阳，王兴鹏. 干旱区咸水滴灌对枣树生理特性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5):12-16.
[28] 刘建新，胡浩斌，王鑫. 一氧化氮参与盐胁迫下黑麦草幼苗脯氨酸积累的调控[J]. 草地学报, 2010,18(6)：786-791.
[29] 高雁，娄恺，李春. 盐分胁迫下棉花幼苗对外源甜菜碱的生理响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1)：244-248.
[30] 刘茂秀, 史军辉, 王新英, 等. 微咸水灌溉下3种耐盐植物光合特性及水分利用效率比较研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(12):6-12.

Efficacy of Alternate Irrigation with Drainage-water and Freshwater on Photosynthetic Traits and Quality of Jujube

LI Yinghai [1,2,3], WANG Hongbo[5], WANG Xingpeng[4,5*]

(1.College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.The Center of Hard Technology Research on Water-saving Irrigation and Water Resource Regulation Ningxia, Yinchuan 750021, China; 3.The Center of Engineering Research on Modern Agricultural Water Resources Efficient Utilization in Arid Region, Yinchuan 750021, China; 4. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 5.College of Water Resource and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

Abstract: Salt-affected soils in Xinjiang are often remediated by irrigation-washing or rice cultivation, with their leachate discharged to groundwater or the Tarim River. We have investigated the feasibility of using the leachates as supplementary water to irrigate jujube trees when water is in serious shortage.【Objective】Analyze the photosynthetic traits and quality of Jujube under alternative irrigation with drainage-water and freshwater.【Method】The technique is to alternate irrigation with the leached drainage (FD) and freshwater (FW). We examined three alternate schemes: FD-FD-FW-FD(AI1), FD-FD-FW-FW(AI2), and FD-FW-FW-FD (AI3). In each treatment, we measured the photosynthetic rate and stomatal conductance of the jujube at different growth stages. We also analyzed the water use efficiency as well as fruit quality and index after harvest.【Result】①Two successive FD considerably decreased the photosynthetic rate and the stomatal conductance, and the stomatal conductance was unable to recover even after two FW following two successive FD. ②Two FW followed by one FD significantly improved the photosynthetic rate and the stomatal conductance, but the stomatal conductance decreased if FD was applied again. ③The variation coefficient of water use efficiency ranked the treatments in CK＜AI3＜ AI2＜ AI1. The fruit quality calculated using the extremum normalization method ranked the treatments in AI2>CK> AI3>AI1.【Conclusion】Using FD for Jujube should alternate FD and FW rather than successively use FD for more than once. Alternating FD and FW more than twice decreased the physiological characteristics but improved the quality of the jujube, compared to the CK.

Key words: farmland drainage; alternative irrigation; photosynthetic rate; stomatal conductance; leaf water utilization efficiency

责任编辑：白芳芳