

不同咸水利用方式对棉花叶绿素荧光参数及土壤盐分的影响

王广恩^{1,2}, 郭丽^{3*}, 钱玉源^{1,2}, 刘祎^{1,2}, 张曦^{1,2}

(1. 河北省农林科学院棉花研究所, 石家庄 050051; 2. 农业部黄淮海半干旱区棉花生物学与遗传育种重点实验室, 石家庄 050051; 3. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051)

摘要:【目的】本研究旨在科学合理利用浅层咸水资源。【方法】依托短期定位试验开展了在第3年和第4年不同咸水利用方式下(CK: 造墒和蕾期灌淡水; T1: 造墒和蕾期灌咸淡混配矿化度 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水; T2: 淡水造墒蕾期灌矿化度 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水; T3: 造墒和蕾期灌矿化度 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水; T4: 淡水造墒蕾期不灌水)棉花长势、叶绿素荧光参数、土壤盐分累积及其运移的变化。【结果】T1和T2处理的齐苗率、株高、干物质质量、叶面积指数、叶绿素荧光参数、产量及霜前花率与CK无显著差异, 土壤盐分含量较CK有所增加, 但未对棉花生长产生明显抑制。T3处理的棉花长势指标、叶绿素荧光参数较CK显著降低, 0~100 cm土壤盐分含量较CK明显增加。【结论】从土壤质量安全和咸水高效利用的角度考虑, 连续4年用 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸淡混合水灌溉或用淡水与 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水轮灌不仅能节约淡水, 且不影响棉花产量。本研究结果为当地在棉花生产中安全利用咸水提供技术参考。

关键词: 咸水利用; 棉花; 叶绿素荧光参数; 土壤盐分; 产量; 生长发育

Effects of different saline water irrigation on chlorophyll fluorescence parameters in cotton and the soil salt content

Wang Guang'en^{1,2}, Guo Li^{3*}, Qian Yuyuan^{1,2}, Liu Yi^{1,2}, Zhang Xi^{1,2}

(1. Institute of Cotton, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Science, Shijiazhuang 050051, China; 2. Key Laboratory of Cotton Biology and Genetic Breeding in Huanghuaihai Semiarid Area, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shijiazhuang 050051, China; 3. Institute of Agricultural Resource and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Science, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: [Objective] There is a shortage of fresh water and abundant shallow saline water in Hebei Low Plain. This research aims to make scientific and reasonable use of saline water resources. [Method] The field experiment with five treatments (CK, freshwater irrigation; T1, blended irrigation by mixing fresh water and saline water into $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ saline water; T2, rotated irrigation of $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ saline water with fresh water; T3, direct irrigation with $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ saline water; T4, irrigation before sowing no irrigation in bud stage) was conducted to study cotton growth, chlorophyll fluorescence parameters, communication and transportation of soil salinity based on short-term saline water irrigation experiment at the 3rd and 4th year. [Result] The results showed that the T1 and T2 treatments had no significant differences in seedling emergence, plant height, dry matter weight, leaf area index, chlorophyll fluorescence parameters, yield, and pre-frost cotton rate compared with CK. While, there was an increasing tendency in soil salt content, the plant growth was not impacted, either. In comparison with CK, growth indicators and chlorophyll fluorescence parameters of the treatment T3 decreased significantly, but salt content in 0-100 cm depth of soil layers increased evidently. To sum up, the treatments T1 and T2 did not show obvious negative impacts on cotton growth. [Conclusion] From the perspective of soil quality and efficient use of saline water, the blended irrigation pattern (mixing fresh water and saline water into $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ saline water) and the rotated irrigation pattern (fresh water and $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ saline water) of saline water utilization can save freshwater, but do not decrease cotton yield. The study provided an important technical reference for use of saline water irrigation of cotton.

Keywords: saline water usage; cotton; chlorophyll fluorescence parameters; soil salt; yield; growth and development

收稿日期: 2019-12-06

第一作者简介: 王广恩(1976—), 男, 副研究员, wangguangen@sina.com。

* 通信作者:

guolisoi1@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0100203); 河北省现代农业产业技术体系(2015)

我国淡水资源短缺,随着社会经济的迅速发展,淡水资源紧缺已成为农业发展的主要制约因素之一^[1-2]。河北平原是我国重要农业区,淡水资源匮乏情况更为突出,但该区浅层咸水资源丰富,且易开采、补给快。科学合理利用浅层咸水资源,有利于深层淡水资源储存和农业可持续发展^[3-5]。可见,安全合理开发利用浅层微咸水是缓解该区水资源供需矛盾较为有效的手段。

棉花是仅次于粮食的第二大作物,且是事关国计民生的主要战略物资,确保棉花产业健康稳定发展对国民经济具有重要意义^[6]。随着河北低平原区深层淡水资源越来越匮乏,在深层淡水极度短缺但浅层微咸水蕴藏丰富的河北低平原区,扩大耐盐碱较强的棉花种植既能保证棉花产量,又能充分利用该区浅层地下微咸水,还能保护深层淡水资源。但与淡水不同,如咸水灌溉不合理,易导致土壤中积累过多盐分,破坏土壤理化性状,造成土壤结构板结,作物生长受到抑制^[7-9]。因此科学合理、安全利用咸水是淡水资源紧缺地区需要研究的关键问题。

迄今,在河北低平原区研究咸水在棉花上的利用已有报道^[10-12]。冯棣等采用畦灌和沟灌的造墒方法,研究了连续6年灌溉不同矿化度咸水对棉花出苗的影响,认为用于畦灌和沟灌处理的造墒水矿化度应分别控制在 $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下^[10]。张俊鹏等连续3年采用不同矿化度咸水灌溉,发现随矿化度的增加,棉花根系生长层土壤的含水量和电导率也随之增大,且土壤电导率增加趋势更为明显^[11]。张俊鹏等还发现利用 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水灌溉加上地膜覆盖可减少土壤水分蒸发,抑制盐分表聚,育苗移栽棉花的增产效果显著^[12]。上述报道均是在微地貌或不同矿化度咸水、不同种植方式下研究咸水对棉花生长及土壤水盐运移规律的调控效应,但采用咸淡水轮灌和混灌的咸水利用方式对该区棉花长势及土壤盐分积累的影响尚不明确。本文研究依托不同咸水利用方式的短期定位试验,探讨在河北低平原区采用咸淡水混灌、咸淡水轮灌和咸水灌溉对棉花干物质累积、叶绿素荧光参数及土壤盐分运移规律的影

响,对咸水不同利用方式的合理性和安全性做出科学评价,丰富微咸水安全利用理论和提供应用技术。

1 材料与方法

1.1 试验概况

2013年,在河北饶阳留楚试验区($37^{\circ}54'\text{N}$ 、 $115^{\circ}42'\text{E}$,海拔高度20 m)开展了不同咸水利用方式对棉花生长影响的研究。该区属河北低平原区,土壤类型为黏质土壤,定位试验开始前土壤有机质质量比为 $13.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $72.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $17.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $129\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤体积质量为 $1.41\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,0~20 cm耕层土壤盐分含量为 $0.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在前期定位试验基础上,笔者于2015和2016年研究第3年和第4年不同咸水利用方式对棉花的影响。2015和2016年5—9月的降水量分别为59、12、110、41、32 mm和20、81、186、94、44 mm,年平均气温 12.7°C 。

1.2 试验设计

试验共设5个处理。CK:造墒和蕾期灌淡水,T1(混灌):造墒和蕾期均灌咸水与淡水混配的矿化度为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水,T2(轮灌):淡水造墒蕾期灌矿化度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水,T3:造墒和蕾期灌矿化度 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水,T4:淡水造墒蕾期不灌水。其中,CK为深层淡水,淡水矿化度为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;其它不同矿化度咸水为淡水与工业用盐配制而成,不同矿化度灌溉水的离子组成见表1。每小区长10 m,宽8 m,随机排列,3次重复。采用1膜2行的宽窄行种植模式,大行行距80 cm,小行行距50 cm,株距30 cm,人工点播,每穴棉籽4个,窄行播种后用地膜覆盖。2015年和2016年播种期分别为4月26日和4月27日。为了保证密度,缺苗处于播种后20 d左右采用移栽方式补齐。2015年分别于4月21日和6月20日灌造墒水和蕾期水,2016年于4月22日和6月13日分别灌选墒水和苗期水,灌溉时用水表控制灌水量。施肥、病虫害防治及田间管理措施一致,棉花品种为冀863。

表 1 试验用不同矿化度灌溉水的离子组成

Table 1 Ion compositions of irrigation water with different salinities used in the experiment

灌溉水矿化度 Salinity of irrigation water /(g·L ⁻¹)	离子浓度 Ion concentration /(mmol·L ⁻¹)						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
淡水 fresh water (CK)	0.73	0.84	0.14	10.86	5.81	1.01	7.67
3 g·L ⁻¹	0.93	1.92	0.19	41.14	13.65	1.19	34.42
5 g·L ⁻¹	1.08	2.57	0.22	72.25	20.16	1.27	58.43

1.3 观测指标与测定方法

1.3.1 棉花齐苗率。于播种后第 20 天调查齐苗率(每穴含有 1 个健全苗就计为齐苗)。计算公式如下:

齐苗率=齐苗穴数 / 播种穴数×100% (1)

1.3.2 棉花生长指标。分别在盛蕾期 (6 月 25 日)、盛花期(7 月 20 日)和盛铃期(8 月 20 日)测定植株干物质质量、株高和叶面积指数。每区选择 3 株生长一致的棉株,用直尺量取茎基部至主茎顶端的距离测得株高。将 3 株植株于 105 ℃杀青 30 min 后 75 ℃烘至恒重,获得单株干物质质量。采用 SUN-SCAN 型冠层分析仪(Delta-T,英国)在 9:30—10:30 测定叶面积指数(Leaf area index, LAI)。

1.3.3 叶绿素荧光参数。在晴天 09:30—11:00 利用 MINI-PAM 叶绿素荧光仪(德国 Walz 公司)测定叶片叶绿素荧光参数。选择主茎上未被遮蔽且叶位一致的叶片,将测试叶片暗适应 30 min 后测定初始荧光(F_0)和最大荧光(F_m),然后打开光源在光适应情况下测定稳态荧光(F_s)及此时的最大荧光(F_m)。通过公式计算最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})和光化学猝灭系数(q_p),计算方法如下:

$F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ (2)

$\Phi_{PSII} = (F_m - F_s)/F_m$ (3)

$q_p = (F_m - F_s)/(F_m - F_0)$ (4)

1.3.4 土壤盐分。各小区选择具有代表性样点,2015 年和 2016 年在棉花盛花期和收获后,分别取 0~100 cm 土壤样本,每层 10 cm。将土样风干磨碎、过 1 mm 筛,称取 10 g 土样置锥形瓶中,加 50 mL 蒸馏水后振荡 10 min,再静置 5 min 并过滤。采用 DDS-11A 型电导率仪测定电导率。按干燥残渣法确定电导率和土壤含盐量之间的标定

关系式为:

$S = (0.2878EC/1\ 000 - 0.004\ 3) \times 100\%$ (5)

式中, S 为土壤含盐量(% ,质量分数), EC (Electric conductivity)为电导率($\mu S \cdot cm^{-1}$)。

1.3.5 产量及构成因素。每小区选取同行生长一致且相邻的 3 株棉株测单株成铃数,然后将这 3 株的全部成铃取下,烘干称重,得铃重。霜降日之前采摘的棉花为霜前花,之后为霜后花。每个小区单收计产。

1.4 数据统计方法

采用 SPSS 7.05 软件计算行数据平均值、标准差等并进行显著性分析,采用 MS Excel 2007 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同咸水利用方式对棉花齐苗率的影响

由于 2015 年 T2 和 T4 处理的底墒水与 CK 相同,齐苗率无显著差异。混灌处理的齐苗率与 CK 无显著差异,但咸水灌溉处理的齐苗率较 CK 下降 4.6%(图 1)。2016 年不同处理间的齐苗率与 2015 年的表现趋势基本一致,虽然 T1 和 T2 处理土壤积累了部分盐离子,但对棉花齐苗率无显著影响;咸水灌溉处理的齐苗率比 CK 下降 6.4%,

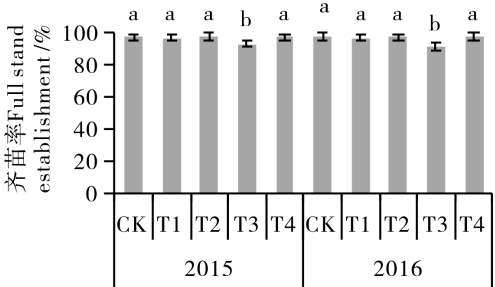


图 1 2015—2016 年不同处理间棉花齐苗率
Fig. 1 Full stand establishment for each treatment from 2015 to 2016

差异显著。上述结果表明,采用混灌和轮灌的咸水灌溉方式 3~4 年对棉花的齐苗率无显著影响,但灌溉 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水会降低棉花的齐苗率。

2.2 不同咸水利用方式对棉花单株干物质质量及株高的影响

2015 年, T3 处理不同生育时期的单株干物质质量和株高均显著低于 CK, 混灌和轮灌处理较 CK 无显著差异。随着棉花生育期的延长, T4 处理的单株干物质质量和株高较其它处理显著降低(表 2)。2016 年, T3 和 T4 处理各生育时期

的干物质质量和株高显著低于 CK, 但 T3 与 T4 无显著差异; T1 和 T2 处理的单株干物质质量和株高较 CK 无显著差异。上述结果表明采用矿化度 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸淡混灌水或 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水与淡水轮灌对棉花干物质质量和株高的影响较小, 但仅灌底墒水或仅用 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水灌溉则会影响棉花的生长。

2.3 不同咸水利用方式对棉花叶面积指数的影响

不同咸水灌溉对棉花叶面积指数的影响见

表 2 不同咸水利用方式对棉花干物重和株高的影响

Table 2 Changes of dry weight accumulation and plant height under condition of different utilization ways of saline water irrigation

年份 Years	处理 Treatment	单株干物质质量 Dry matter weight /g			株高 Plant height /cm		
		06-25	07-20	08-20	06-25	07-20	08-20
2015	CK	$15.7\pm 1.1\text{ a}$	$78.7\pm 5.9\text{ a}$	$183.8\pm 7.9\text{ a}$	$53.7\pm 2.6\text{ a}$	$88.2\pm 3.9\text{ a}$	$105.1\pm 4.0\text{ a}$
	T1	$16.1\pm 1.2\text{ a}$	$77.6\pm 5.7\text{ a}$	$183.1\pm 7.0\text{ a}$	$53.8\pm 2.5\text{ a}$	$89.4\pm 3.1\text{ a}$	$105.6\pm 4.7\text{ a}$
	T2	$15.3\pm 1.16\text{ a}$	$77.1\pm 2.8\text{ a}$	$178.0\pm 9.5\text{ a}$	$53.8\pm 2.6\text{ a}$	$88.2\pm 3.1\text{ a}$	$106.8\pm 4.4\text{ a}$
	T3	$13.4\pm 0.9\text{ b}$	$67.2\pm 5.9\text{ b}$	$164.2\pm 5.9\text{ b}$	$47.6\pm 1.9\text{ b}$	$75.1\pm 3.6\text{ b}$	$93.4\pm 2.7\text{ b}$
	T4	$12.7\pm 1.0\text{ b}$	$64.0\pm 5.5\text{ b}$	$148.8\pm 6.6\text{ c}$	$46.1\pm 1.6\text{ b}$	$70.1\pm 3.4\text{ b}$	$84.9\pm 4.5\text{ c}$
2016	CK	$18.6\pm 0.9\text{ a}$	$92.7\pm 5.2\text{ a}$	$200.1\pm 10.6\text{ a}$	$56.1\pm 3.1\text{ a}$	$95.8\pm 3.0\text{ a}$	$116.4\pm 3.8\text{ a}$
	T1	$17.7\pm 0.8\text{ a}$	$92.8\pm 7.4\text{ a}$	$196.3\pm 7.5\text{ a}$	$56.5\pm 3.4\text{ a}$	$94.9\pm 2.9\text{ a}$	$117.1\pm 5.1\text{ a}$
	T2	$18.2\pm 0.9\text{ a}$	$89.5\pm 7.9\text{ a}$	$198.8\pm 12.9\text{ a}$	$56.4\pm 2.9\text{ a}$	$98.1\pm 3.9\text{ a}$	$113.1\pm 4.0\text{ a}$
	T3	$14.7\pm 0.9\text{ b}$	$73.4\pm 6.5\text{ b}$	$174.5\pm 7.6\text{ b}$	$48.2\pm 3.1\text{ b}$	$82.8\pm 3.4\text{ b}$	$103.2\pm 4.1\text{ b}$
	T4	$15.5\pm 1.0\text{ b}$	$75.9\pm 5.5\text{ b}$	$176.6\pm 8.4\text{ b}$	$50.1\pm 2.4\text{ b}$	$81.3\pm 4.8\text{ b}$	$104.1\pm 3.8\text{ b}$

注:不同年份同列数据后不同小写字母表示 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters followed the same column labeled indicate significant difference at the 0.05 probability level in different years.

表 3, 2015 年不同生育时期 T3 处理的叶面积指数较 CK 显著下降, 混灌和轮灌处理与 CK 相比无显著差异, T4 处理在盛铃期显著低于其他处理。2016 年不同时期 T3 与 T4 处理较其他处理显著降低, 但 T3 与 T4 不同生育期无显著差异, 这一结果与 2015 年不尽一致。总体来看: 连续 3~4 年采用混灌和轮灌的咸水利用方式其叶面积指数较 CK 变化较小, 仅用咸水灌溉的棉花的叶面积指数较 CK 降低。

2.4 不同咸水灌溉对棉花叶片叶绿素荧光参数的影响

最大光化学效率(F_v/F_m)代表光系统 II (photosystem II complex, PS II) 的最大量子产量, 反应植物的潜在最大光合能力; 实际光化学效率

(Φ_{PSII})反映了在光照下 PS II 的实际量子产量; 光化学猝灭系数(q_p)反映了 PSII 天线色素吸收的光子用于引发光化学反应电子传递链的份额, 也反映了 PS II 反应中心的开放程度。试验表明, 2015 年棉花叶片最大光化学效率年表现为各调查时期 T1 和 T2 与 CK 无显著差异, 而 T3 和 T4 处理的最大光化学效率较 CK 显著下降; 随生育期的延长, 盛铃期 T4 处理显著低于 T3 处理。2016 年各生育时期表现为 T1 和 T2 与 CK 无显著差异, 但 T3 和 T4 处理较 CK 分别低了 3.4% 和 3.1%, 差异显著。不同生育时期的棉花叶片 Φ_{PSII} 和 q_p 与最大光化学效率表现趋势基本一致(图 2)。由此可见, 混灌与轮灌对棉花叶片叶绿素荧光参数的影响较小, 而连续 3~4 年灌溉 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸

表 3 不同咸水利用方式对棉花叶面积指数的影响
Table 3 Effects of different utilization ways of saline water irrigation on leaf area index

年份 Years	处理 Treatment	日期 Date		
		06-25	07-20	08-20
2015	CK	0.58±0.03 a	2.43±0.07 a	3.42±0.21 a
	T1	0.57±0.02 a	2.46±0.08 a	3.35±0.22 a
	T2	0.59±0.02 a	2.45±0.13 a	3.49±0.19 a
	T3	0.47±0.05 b	2.03±0.08 b	2.96±0.17 b
	T4	0.46±0.05 b	1.98±0.08 b	2.56±0.13 c
2016	CK	0.46±0.03 a	2.83±0.23 a	3.77±0.2 a
	T1	0.47±0.04 a	2.76±0.15 a	3.73±0.2 a
	T2	0.48±0.03 a	2.72±0.15 a	3.72±0.19 a
	T3	0.38±0.04 b	2.22±0.10 b	3.07±0.11 b
	T4	0.35±0.04 b	2.18±0.06 b	2.94±0.17 b

注:不同年份同列数据后小写字母不同表示 0.05 水平差异显著。
Note: Different lowercase letters show significant difference at the 0.05 probability level in different years.

水较灌溉淡水显著降低棉花叶绿素荧光参数。
2.5 不同咸水利用方式对土壤盐分含量及其运移的影响

在咸水利用过程中,土壤盐分是影响棉花生长的主要因素,因此我们对 0~100 cm 土壤含盐量进行了测定(图 3)。2015 年和 2016 年棉花盛花期和收获后,同一层土壤盐分含量表现为咸水处理最高,混灌和轮灌处理低于咸水灌溉,且混灌和轮灌土壤含盐量相近,CK 和不灌水处理土壤含盐明显低于上述处理。从不同土壤层的盐分含量分析,2015 年盛花期、收获后和 2016 年收获后在同一灌溉处理下不同土壤层的土壤盐分变化幅度较小,但 2016 年盛花期混灌、轮灌和咸水灌溉处理的 0~50 cm 土壤含盐量随土层深度呈逐渐上升的趋势,50~100 cm 的土壤含盐量的变化较小。这一结果可能与 2016 年 7 月降水量较大,导致浅层土壤盐分淋洗有关。由此可见,该试验条件下咸淡混灌或轮灌处理虽然会携带盐分进入土壤,但土壤盐分含量明显低于咸水灌溉。采用 5 g·L⁻¹ 的咸水灌溉增加了 0~100 cm 土壤的盐分累积量。

2.6 不同咸水利用方式对棉花产量的影响

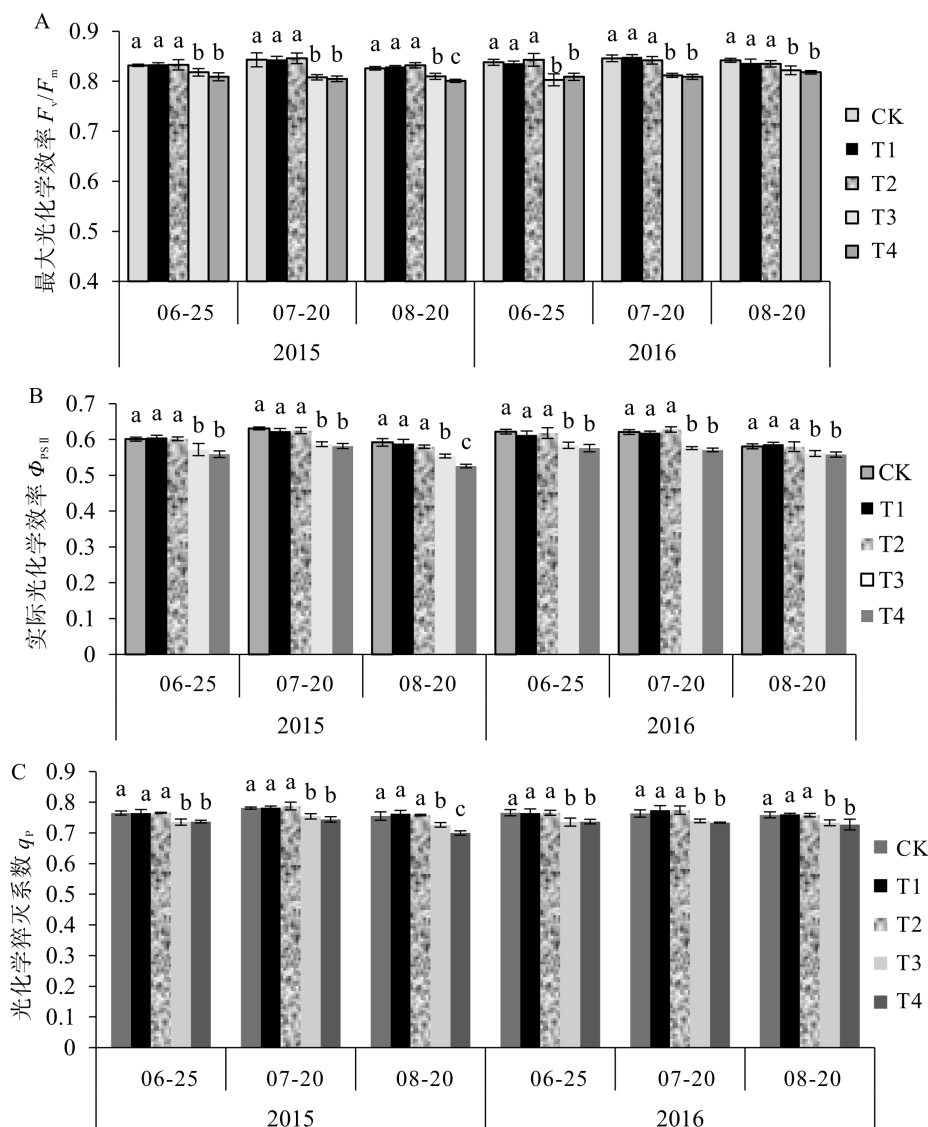
2015 年 T1 和 T2 处理的产量及产量构成因素与 CK 无显著差异。T3 处理的单株成铃数和产量较 CK 显著降低,T4 处理的单株成铃数、铃重和产量均低于其它处理;T4 处理的霜前花率显著高于其它处理,而 T1 和 T2 处理与 CK 无显著

差异(表 4)。2016 年 T1 和 T2 处理的单株成铃数、铃重、产量与 CK 差异较小;T3 和 T4 处理的单株成铃数、T3 处理铃重和产量较 CK 显著下降,但 T3 和 T4 处理的单株成铃数、铃重和产量变化幅度较小;霜前花率与 2015 年表现出相似趋势。综上可知,连续 3~4 年采用混灌和轮灌对产量的影响不大,而矿化度 5 g·L⁻¹ 的咸水灌溉较 CK 产量显著降低,但干旱年份较蕾期不灌水有增产效应,多雨年份与蕾期不灌水无显著差异。

3 讨论

3.1 不同咸水利用方式对棉花形态指标及叶绿素荧光参数的影响

将微咸水科学安全的应用到灌溉农业中,不仅能缓解干旱地区淡水供需矛盾,提高咸水可利用率,还增加农业可用水源,起到抗旱增产的效果。目前微咸水利用方式主要有微咸水直接灌溉、咸淡水混灌及咸淡水轮灌^[5]。混灌是将不同质量的水混合,使劣质水得以利用,增加了农业可用水资源^[13]。Kang 等认为咸淡水轮灌可显著减少咸水灌溉的不利影响^[14],Wang 等发现咸淡水交替灌溉可选择在作物耐盐阶段进行,能减轻盐胁迫造成的植物损伤^[15]。还有研究表明,盐胁迫可抑制干物质质量,影响根系形态指标^[16-17]。本试验通过第 3 和第 4 年不同咸水利用方式的定位试验,发现混灌和轮灌处理的齐苗率、棉花干物质质量、株高和叶面积指数与淡水处理无显著差



同一调查日期的数据上方不同小写字母表示差异显著。

Different lowercase letters at the same date of investigation show significant difference at the 0.05 probability level.

图2 不同咸水利用方式对PS II最大光化学效率、PS II光化学效率及化学猝灭系数的影响。

Fig. 2 Effects of different utilization ways of saline water irrigation on the maximum photochemical efficiency, the PS II photochemical efficiency and the PS II photochemical quenching of leaves of cotton

异,而灌溉 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉处理的上述指标较淡水处理显著下降。

叶绿素荧光参数可反映植物进行光合的生理状况,被视为是研究植物光合作用与环境关系的内在探针。已有报道指出,利用一定矿化度的咸水进行咸淡轮灌,可减轻盐分胁迫对光合能力和叶绿素荧光参数影响^[18-19]。本研究以棉花为材料,发现矿化度为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸淡水混灌处理和淡水与 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水的轮灌处理对叶绿素荧光参数的响应较淡水处理无显著变化,但咸水灌溉和仅灌造墒水较淡水处理的叶绿素荧光参数显著

下降。可见,该试验条件下采用 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水灌溉对叶绿素荧光参数具有一定的负调控效应,而利用 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸淡水混合水或淡水与 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水轮灌对叶绿素荧光参数的影响较小。

3.2 不同咸水利用方式对棉花产量及土壤盐分运移规律的影响

前人研究表明,用电导率为 $4.61\text{ dS}\cdot\text{mL}^{-1}$ 微咸水灌溉对棉花产量无显著影响, $8.04\text{ dS}\cdot\text{mL}^{-1}$ 咸水灌溉对产量产生负面影响^[20]。灌溉矿化度 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水皮棉产量下降2.1%,差异不显著;灌 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水则下降9.6%,差异显著,产量

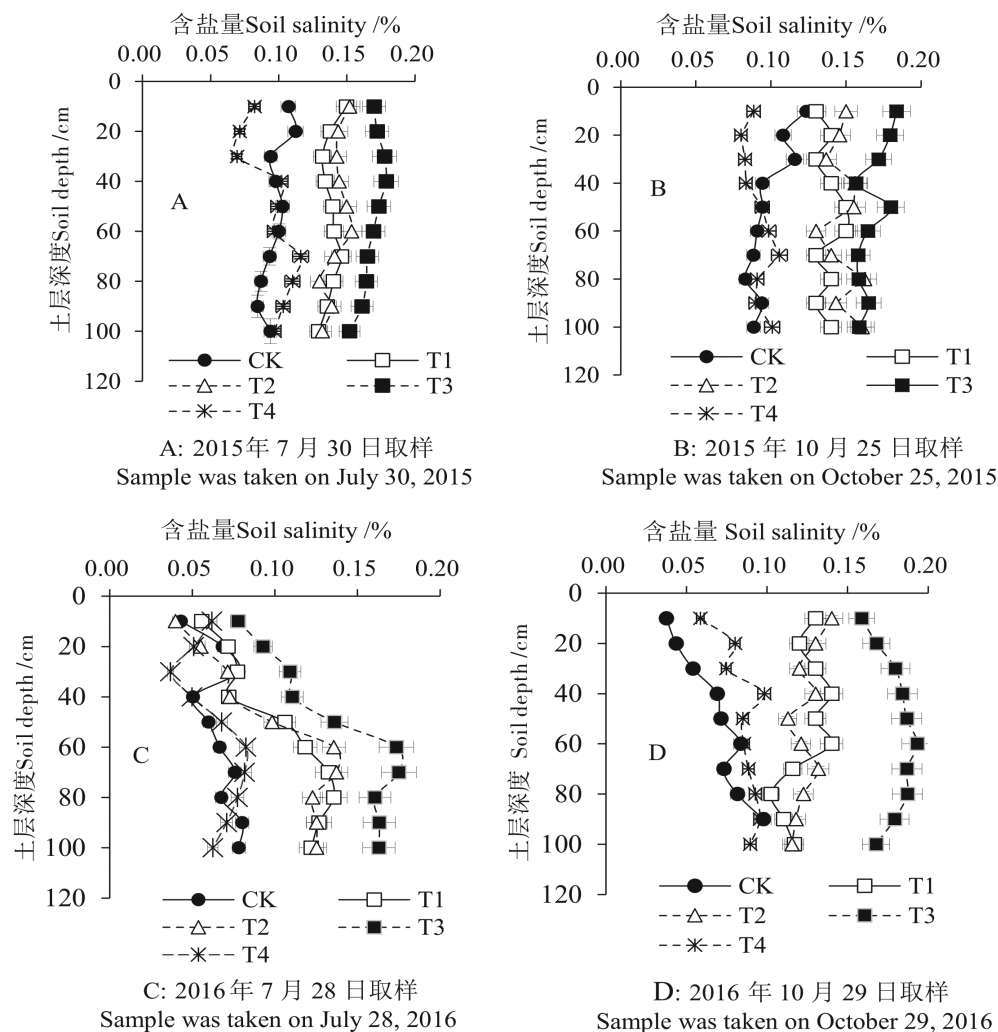


图3 不同咸水利用方式下0~100 cm土壤盐分含量的变化

Fig. 3 Changes of 0–100 cm soil salt content under condition of different ways of salty water irrigation

表4 不同咸水利用方式下棉花产量及产量构成因素的变化

Table 4 Changes of grain yield components and yield under condition of different utilization ways of salty water

年份	处理	单株铃数	铃重	棉花产量	霜前花率
Years	Treatments	Bolls No. per plant	Boll weight /g	Lint yield /(kg·hm ⁻²)	Ratio of yield before frost /%
2015	CK	20.3±10 a	6.64±0.17 a	3 751.0±163.7 a	85.2±1.8 c
	T1	20.8±1.3 a	6.48±0.16 a	3 670.8±119.3 a	85.9±1.6 c
	T2	21.1±1.8 ab	6.51±0.17 a	3 694.7±189.0 a	86.0±2.3 c
	T3	18.2±1.2 b	6.23±0.19 ab	3 475.6±92.7 b	89.5±1.8 b
	T4	13.6±1.2 c	5.80±0.17 c	2 565.3±87.6 c	98.8±0.5 a
2016	CK	23.3±1.7 a	6.72±0.20 a	3 985.3±147.4 a	82.6±1.8 b
	T1	22.7±1.3 a	6.65±0.19 ab	4 019.0±164.0 a	83.1±1.3 b
	T2	22.6±1.2 a	6.73±0.16 a	3 874.3±91.6 ab	82.8±1.7 b
	T3	19.9±1.4 b	6.36±0.10 b	3 654.3±136.6 bc	85.4±1.2 ab
	T4	19.3±1.0 b	6.57±0.19 ab	3 568.3±98.8 c	88.3±2.2 a

注:不同年份同列数据后不同小写字母不同表示差异显著。

Note: Different lowercase letters within the column show significant difference at the 0.05 probability level in different years.

下降主要原因是单株结铃数和铃重显著下降^[21]。本研究表明, $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸淡混合水或淡水与 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水轮灌处理的单株铃数、铃重、产量及霜前花率较淡水无显著差异; $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉的产量较淡水显著降低, 但连续 3 年咸水灌溉在少雨年份较生长季不灌水增产效应显著, 第 4 年 (多雨年份) 咸水灌溉较生长季不灌水增产但差异不显著。

咸水灌溉引起土壤盐分增加, 从而影响棉花生长^[22], 土壤盐分淋洗与灌溉水矿化度、灌溉频率及方式密切相关^[23-25]。Wang 等利用 HYDRUS 2D 模型预测了西北区长期咸淡水交替膜下滴灌棉田土壤盐分变化情况, 结果表明在进行春灌的情况下, 采用该方式进行灌溉不会造成作物根区积盐^[15]。张俊鹏等在黑龙港流域连续 3 年研究不同矿化度咸水灌溉下棉田土壤电导率变化, 指出棉花生育期内根系层土壤电导率随灌溉水矿化度的增加而增大^[11]。本研究表明, $0\sim 100\text{ cm}$ 土层咸水灌溉处理土壤含盐量最高, 对棉花生长有一定负效应; 咸淡水混灌和轮灌处理也带入部分盐分, 但明显低于咸水处理, 对棉花生长未产生盐胁迫。在多雨年份, $0\sim 50\text{ cm}$ 土层盐分含量变化较大, 这可能是受降水、灌溉及蒸腾作用的影响。综上, 从土壤安全及棉花产量的角度考虑, 矿化度 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水不宜长期直接造墒和生长期灌溉, 而连续 3~4 年利用矿化度控制在 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸淡水混灌或淡水和 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水轮灌带入土壤中的盐分未对棉花植株长势产生负效应, 同时还可以利用浅层咸水, 节约宝贵的淡水资源。

4 结论

连续 3~4 年灌溉矿化度 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸淡混合的微咸水或淡水与矿化度 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水轮灌对棉花齐苗率、干物重、株高、叶面积指数、叶绿素荧光参数、产量较淡水无显著影响, 咸水处理下上述指标较淡水显著降低。在第 3 年干旱年份, 咸水灌溉的棉花产量较仅灌造墒水 (T4) 显著提高, 多雨年份 (第 4 年) 咸水灌溉较仅灌造墒水增产效果不显著。咸水灌溉明显增加了 $0\sim 100\text{ cm}$ 土壤的盐分, 咸淡混灌和轮灌土壤盐分也有所增加, 但低于 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水灌溉处理, 且对棉花生长无显著影响。

由于不同年份棉花生育期间的光照、土壤水分蒸发、植株蒸腾及降水量存在差异, 对根区土壤盐分的淋溶存在一定影响。此外, 由于咸水灌

溉会将部分盐分带入耕层土壤, 因此连续多年不同咸水利用方式对棉花生长特征及土壤盐分累积及运移的影响需进一步研究。

参考文献:

- [1] Gao Y, Yang L, Shen X, et al. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 1-10. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.07.010.
- [2] Yuan C F, Feng S Y, Huo Z L, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 424-432. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.09.019.
- [3] 王电龙, 张光辉. 不同气候条件下华北粮食主产区地下水保障能力时空特征与机制[J]. *地球学报*, 2017, 38(S1): 47-50. DOI: 10.3975/cagsb.2017.s1.13.
Wang Dianlong, Zhang Guanghui. Groundwater ensure capacity spatial-temporal characteristics and mechanism in main grain producing areas of north China plain under different climatic conditions[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(S1): 47-50.
- [4] 田言亮, 张光辉, 王茜, 等. 黄淮海平原灌溉农业对地下水依赖程度与保障能力[J]. *地球学报*, 2016, 37(3): 257-265. DOI: 10.3975/cagsb.2016.03.01.
Tian Yanliang, Zhang Guanghui, Wang Qian, et al. Groundwater safeguard capacity and dependency degree of agricultural irrigation on groundwater in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 257-265.
- [5] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 117-126. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017.
Wang Quanjiu, ShanYuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 117-126.
- [6] 喻树迅. 我国棉花生产现状与发展趋势[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(4): 9-13.
Yu Shuxun. Present situation and development trend of cotton production in China[J]. *Engineering Sciences*, 2013, 15(4): 9-13.
- [7] Chen Sheng, Zhang Zhanyu, Wang Zhenchang, et al. Effects of uneven vertical distribution of soil salinity under a buried straw layer on the growth, fruit yield, and fruit quality of tomato plants [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 203: 131-142. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.03.024.
- [8] Hirich A, Jelloul A, Choukr A R, et al. Saline water irrigation of quinoa and chickpea: Seedling rate, stomatal conductance and yield responses[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2015, 200(5): 378-389. DOI: 10.1111/jac.12072.
- [9] Wang Q M, Huo Z L, Zhang L D, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for

- spring maize in arid regions of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163: 125-138. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.09.012.
- [10] 冯棣, 张俊鹏, 曹彩云, 等. 适宜棉花成苗的咸水灌溉方式及矿化度指标确定[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 95-101. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.22.012.
- Feng Di, Zhang Junpeng, Cao Caiyun, et al. Optimal irrigation method in pre-sowing irrigation with saline water and determination of mineralization degree index for cotton seedling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 95-101.
- [11] 张俊鹏, 冯棣, 曹彩云, 等. 咸水灌溉对棉花耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 107-112. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.014.
- Zhang Junpeng, Feng Di, Cao Caiyun, et al. Effects of saline water irrigation on water consumption characteristics and water use efficiency of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 107-112.
- [12] 张俊鹏, 曹彩云, 冯棣, 等. 微咸水造墒条件下植棉方式对产量与土壤水盐的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 97-102. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.019.
- Zhang Junpeng, Cao Caiyun, Feng Di, et al. Effects of different planting patterns on cotton yield and soil water-salt under brackish water irrigation before sowing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44 (2): 97-102.
- [13] Flowers T J, Ragab R, Malash N, et al. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean: SALTMED[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1-2): 3-14. DOI: 10.1016/j.agwat.2005.04.014.
- [14] Kang Y H, Chen M, Wan S Q. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. *certain* Kulesh) in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(9): 1303-1309. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.03.006.
- [15] Wang Z M, Jin M G, Šimůnek J, et al. Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(1): 15-27. DOI: 10.1007/s00271-013-0409-x
- [16] 李双男, 郭慧娟, 侯振安. 不同盐碱胁迫对棉花离子组稳态及Na⁺相关基因表达影响[J]. *棉花学报*, 2019, 31(6): 515-528. DOI: 10.11963/1002-7807.lsnhza.20191106.
- Li Shuangnan, Guo Huijuan, Hou Zhen'an. Ionic homeostasis and expression of Na⁺ related genes of cotton under different salt and alkali stresses[J]. *Cotton Science*, 2019, 31(6): 515-528.
- [17] 许艳超, 韦洋洋, 李振庆, 等. 复合盐碱胁迫下半野生棉苗期耐盐性综合评价及其关键生理指标的变化[J]. *棉花学报*, 2018, 30(3): 231-241. DOI: 10.11963/1002-7807.xyczzl.20180430.
- Xu Yanchao, Wei Yangyang, Li Zhenqing, et al. Integrated evaluation and the physiological and biochemical responses of semi-wild cotton under complex salt-alkali stress[J]. *Cotton Science*, 2018, 30(3): 231-241.
- [18] Zhu C L, Huang M Y, Zhai Y M, et al. Response of gas exchange and chlorophyll fluorescence of maize to alternate irrigation with fresh- and brackish water[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2017, 67 (5): 474-484. DOI: 10.1080/09064710.2017.1301547.
- [19] 朱成立, 强超, 黄明逸, 等. 咸淡水交替灌溉对滨海垦区夏玉米生理生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 253-261. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.031.
- Zhu Chengli, Qiang Chao, Huang Mingyi, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and slight saline water on physiological growth of summer maize in coastal reclamation area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 253-261.
- [20] Wei M, Guo H J, Zhou G W, et al. Root distribution and growth of cotton as affected by drip irrigation with saline water [J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 1-10. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.09.002.
- [21] 郭仁松, 林涛, 徐海江, 等. 微咸水滴灌对绿洲棉田水盐运移特征及棉花产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 211-216. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.035.
- Guo Rensong, Lin Tao, Xu Haijiang, et al. Effect of saline water drip irrigation on water and salt transport features and cotton yield of oasis cotton field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 211-216.
- [22] Chen W L, Jin M G, Ferré T P A, et al. Spatial distribution of soil moisture, soil salinity, and root density beneath a cotton field under mulched drip irrigation with brackish and fresh water[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 207-221. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.10.019.
- [23] 周立峰, 杨荣, 冯浩. 微咸水膜下滴灌对盐碱化农田土壤斥水特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 322-332. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.035.
- Zhou Lifeng, Yan Gong, Feng Hao. Effect of mulched drip irrigation with brackish saline water on soil water repellency characteristics of saline-alkali field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 322-332.
- [24] 栗现文, 靳孟贵, 袁晶晶, 等. 微咸水膜下滴灌棉田漫灌洗盐评价[J]. *水利学报*, 2014, 45(9): 1091-1098, 1105.
- Li Xianwen, Jin Menggui, Yuan Jingjing, et al. Evaluation of soil salts leaching in cotton field after mulched drip irrigation with brackish water by freshwater flooding[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(9): 1091-1098, 1105.
- [25] 张珂萌, 牛文全, 汪有科, 等. 微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 175-182. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.023.
- Zhang Kemeng, Niu Wenquan, Wang Youke, et al. Characteristics of water and salt movement in soil under moisture-irrigation with brackish water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 175-182.