

doi:10.3799/dqkx.2014.070

微咸水膜下滴灌对土壤和棉花元素组成及产量的影响

黄金瓯^{1,2}, 靳孟贵^{1,2*}, 栗现文^{1,2}

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 通过微咸水和淡水膜下滴灌对比试验, 研究灌溉水质对土壤和棉花元素组成及产量的影响. 结果表明: 微咸水灌溉处理, 土壤窄行和膜间微量元素(尤其是铜、铁、锌)含量明显高于宽行, Na^+ 增长率低于宽行; 多数棉花器官中钾钠比、钙钠比并未因灌溉水质的区别而产生显著差异; 微咸水滴灌有利于促进棉花前期营养生长及后期生殖生长, 棉花干物质、单铃重、单位面积铃数及籽棉产量均高于淡水处理; 棉株内锰、硼与钙元素间存在显著的相关关系, 在一定阈值内, 硼、锰促进棉花对钙的吸收. 试验证明: 微咸水中含有一定量的微量元素, 合理利用微咸水灌溉, 不会对棉花生长造成胁迫, 相反能有效抑制土壤中 Na^+ 增长, 增强棉花对盐分胁迫的抵抗能力、提高棉花产量.

关键词: 微咸水; 棉花; 盐害; 抑制; 微量元素; 地球化学; 环境工程.

中图分类号: P595, S151.9 **文章编号:** 1000—2383(2014)06—0751—09 **收稿日期:** 2013—09—26

Influence of Mulched Drip-Irrigation with Brackish Water on Element Composition of Soil, Cotton, and Cotton Yield

Huang Jin'ou^{1,2}, Jin Menggui^{1,2*}, Li Xianwen^{1,2}

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Irrigation with brackish water has a long history throughout the world. Irrational use of brackish or saline waters, however, may lead to soil salinization and reduction of crop yields. In order to promote reasonable applications of brackish water and fertilizer irrigation, a series of experiments of mulched drip-irrigation with brackish and fresh waters were carried out at Bazhou Irrigation Experimental Station (Korla, Xinjiang, China). Plant and soil samples were collected at every growth stage. Cotton yields were measured at boll opening stage. Nine elements (Ca, Na, Mg, K, Cu, Fe, Mn, Zn and B) of each sample were tested in triplicate by ICP-OES (ICAP6300) after pretreated. The influence of water quality on the element compositions of soil and cotton and cotton yield were discussed based on the experiment. The results show that growth rate of Na^+ in narrow rows and interspace of mulches was lower than that in wide rows because of higher content of Cu, Fe, Zn. The ratios of K^+/Na^+ and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, however, in most cotton organs show no significant differences between the two treatments. From buds to boll stages, brackish water irrigation enhanced the accumulation of above ground dry matters, which was favorable for vegetative development. From boll to boll opening stages, root and reproductive growth under brackish water were superior to that for fresh water. Furthermore, dry matters, boll weight, numbers of boll per unit area and cotton yield under brackish water were higher than those for fresh water. According to the correlations analyses, relationship between most trace and macro elements was weak. High correlations, however, were found among manganese, boron, and calcium. Within a certain threshold, boron, manganese promoted the absorption of calcium in cotton. It has been proved that a rational use of brackish water will not lead to the growth stress. On the contrary, it would not only lower the growth rate of Na^+ in the soil effectively, but also strengthen cotton's resistibility to salt stress and increase cotton yields as well.

Key words: brackish water; cotton; salt damage; inhibition; trace element; geochemistry; environmental engineering.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41172218).

作者简介: 黄金瓯 (1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为水文地质与生态环境以及水流与溶质运移. E-mail: hjo2012@163.com

*** 通讯作者:** 靳孟贵, E-mail: mgjin@cug.edu.cn

0 引言

国内外利用微咸水进行农业灌溉已有很长的历史,但若利用不当,会导致土壤盐分离子增加,作物正常生长受抑,尤其是在干旱、半干旱地区,田间土壤盐分大量累积甚至会造成作物减产. 盐分胁迫主要通过离子毒害、渗透胁迫和营养失衡等 3 种方式,土壤中 Na^+ 浓度过高是植物受到盐分胁迫的重要原因. 植物根层 Na^+ 含量过高,不仅降低了土壤水势,而且抑制了植物对其他离子的吸收,长此以往将导致植物生长受到水分、盐分、养分的三重胁迫. 也有研究报道,较低浓度的盐分不但不会对棉花造成盐害,反而有利于棉花产量、品质的提高. 董合忠(2010)认为,土壤含盐量在 0.2% 以下,盐分的增加有利于棉花出苗、生长以及棉花产量、品质的提高. 辛承松等(2002)发现,当土壤中 NaCl 在 0.4 % 以下时,棉叶超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性随含盐量增加而逐渐提高. 以往的研究主要是通过不同氯化钠浓度梯度实验,对比不同处理的棉花株高、干物质、产量、酶活性等指标,很少有人从棉田元素(主要指钙、镁、钠、钾、铜、铁、锰、锌、硼等棉花生长所需元素)含量的角度,探讨微咸水灌溉对盐害抑制、棉花产量的影响.

宏量元素(钙、镁、钾)和微量元素(铜、铁、锰、锌、硼等)含量的高低,显著影响着作物的耐盐性和产量. Dogan *et al.* (2012)认为,钙、镁、钾含量的高低,对于棉花抵抗盐害分别起着至关重要的作用. Yermiyahu *et al.* (2008)发现,硼元素和氯化钠对灯笼椒的生长和产量产生明显的拮抗作用, Bastias *et al.* (2004)研究发现,仅在高硼环境下,氯化钠胁迫抑制玉米根系通过水通道蛋白对硼元素的吸收. 此外,还有学者对植物体内镉(Abo-kassem *et al.* , 1995)、硒(Mikkelsen *et al.* , 1988)、锌(Redondo-Gómez *et al.* , 2011)等微量元素与盐分离子间协同拮抗机理进行了相关研究. 前人的研究主要集中于某种元素与盐分离子间的相互作用,很少研究棉株内微量元素与宏量元素的组成特征及其协同拮抗关系.

在多年咸、淡水膜下滴灌对比试验的基础上,利用 2012 年实验结果,探究灌溉水、土壤及棉花内 9 种元素含量对盐害抑制、棉花产量的影响,以及棉株内微量元素与宏量元素之间的协同拮抗关系,为干旱地区棉花的合理灌溉、施肥,增强棉花对盐分胁迫的抵抗能力,提高棉花产量提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于新疆维吾尔自治区塔里木河流域巴音郭楞管理局水利科研所国家重点灌溉试验站(简称巴州灌溉试验站)内($41^{\circ}35'14''\text{N}$, $86^{\circ}10'24''\text{E}$). 该地地处塔里木盆地北缘,地形平缓,属典型的暖温带大陆性干旱气候,降雨稀少,蒸发强烈,年降水量为 53.3~62.7 mm,蒸发量为 2 273~2 788 mm. 试验区光热资源丰富,全年平均日照时数为 3 036.2 h,年均气温为 11.48 $^{\circ}\text{C}$,最低气温为 -30.9 $^{\circ}\text{C}$,最高气温为 42.2 $^{\circ}\text{C}$;年均风速为 2.4 m/s,最大风速为 22 m/s. 用于试验的微咸水取自当地地下水,2012 年矿化度为 1.99~2.01 g/L,水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$;淡水取自渠水,为孔雀河来水,矿化度为 0.97~1.01 g/L,水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Na}$,其中主要元素和离子的含量见表 1. 试验地土质以粉砂和砂壤土为主,容重为 1.43~1.78 g/cm³(何雨江等,2010),土壤中各元素背景含量见表 2.

1.2 试验布置及样品采集

1.2.1 试验布置 本次试验于 2012 年 5 月—10 月在巴州灌溉试验站进行. 蕾期至吐絮期共设置微咸水灌溉和淡水灌溉 2 种处理,每种处理设置 3 个重复小区,各小区面积为 10×20 m². 所有小区均采用一膜双管四行的布管方式(图 1),株距为

表 1 2012 年巴州灌溉试验站灌溉用水中主要元素和离子含量

Table 1 Elements and anions in irrigation water of Bazhou Irrigation Experimental Station in 2012

元素及离子	淡水	微咸水
Cu	6.1±0.2	8.0±0.3
Zn	84.4±4.3	127.3±4.2
Fe	449.7±29	690.6±23.1
Mn	21.6±1.9	27.1±1.5
B	92.9±12.5	293.7±20.5**
Na	67.86±11.20	401.37±7.43**
K	7.12±1.11	23.38±0.43**
Ca	51.57±3.24	145.01±3.98**
Mg	24.06±1.84	100.67±3.98**
HCO ₃ ⁻	196.08±3.16	368.07±2.81**
NO ₃ ⁻	16.37±1.36	47.14±2.25**
Cl ⁻	55.18±7.09	443.20±10.61**
SO ₄ ²⁻	132.75±13.57	704.70±15.15**

注: Cu、Fe、Mn、Zn、B 含量的单位为 $\mu\text{g/L}$, 其余为 mg/L ; 表内各项指标为平均值±标准差; * 表示 0.05 水平上, 2 种处理差异显著; ** 表示 0.01 水平上, 2 种处理差异极显著; 表 2、4~7 同理.

表 2 供试土壤中各元素背景值(10⁻⁶)

Table 2 Background value of different elements in tested soil (10⁻⁶)

处理	深度 (cm)	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Ca	Mg	Na	有效钾	有效磷	有效氮
微咸水	0~10	0.88±0.06	102±0.8	58.9±3.2	1.58±0.24	1.56±0.09	21 023±1113	587±7	169±69	47.9±5.9	11.3±3.8	23.3±2.2
	10~20	0.93±0.03	101±2.9	57.1±1.6	1.12±0.03	1.80±0.06	19 622±687	569±14	143±41	47.0±1.2	20.4±5.4	22.1±3.2
	20~30	0.94±0.04	100±4.3	58.8±1.6	1.00±0.08	1.92±0.21	20 371±1097	557±9	123±10	55.6±8.1	14.0±3.5	26.0±3.5
	30~40	0.75±0.03	87±2.8	55.0±2.2	0.87±0.11	1.40±0.13	21 124±607	447±8	108±5	50.8±4.6	5.5±3.3	18.3±2.0
	40~50	0.81±0.13	83±5.1	58.8±4.0	0.96±0.34	1.55±0.29	18 244±1686	600±40	151±24	56.5±6.4	4.3±2.3	15.4±1.6
	50~60	0.87±0.06	96±2.9	64.2±5.6	0.72±0.20	1.83±0.17	24 892±961	756±9	231±67	53.1±3.6	3.4±0.8	12.5±0.8
淡水	0~10	0.91±0.07	101±6.3	57.8±4.6	1.52±0.33	1.70±0.38	20 662±1690	610±35	156±47	50.6±2.1	12.0±4.7	24.5±2.1
	10~20	0.96±0.17	102±6.9	59.3±3.3	1.09±0.23	1.78±0.43	20 332±953	587±43	135±30	46.0±3.7	19.7±4.1	23.2±2.8
	20~30	0.99±0.16	97±6.8	56.3±4.1	1.02±0.16	2.07±0.70	19 232±1987	563±33	127±22	54.2±1.5	13.2±6.7	25.0±1.4
	30~40	0.73±0.02	85±5.4	58.0±6.9	0.94±0.27	1.33±0.12	21 884±1450	470±84	104±27	52.8±4.6	5.9±7.3	17.5±4.1
	40~50	0.79±0.11	88±8.8	62.8±9.0	1.04±0.17	1.51±0.27	19 650±3896	637±47	156±44	53.6±10.1	4.1±2.5	14.8±1.3
	50~60	0.83±0.26	91±15.3	62.1±4.9	0.75±0.48	1.97±0.02	25 050±3322	762±66	214±3	55.5±6.9	3.5±0.2	13.3±3.6

表 3 2012 年田间灌水、施肥方案

Table 3 Scheme of irrigation and fertilization in 2012

生育期	蕾期			花期			铃期						吐絮初期			合计
灌水次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
灌水日期 (月/日)	6/25	6/30	7/5	7/10	7/15	7/20	7/25	7/30	8/4	8/9	8/14	8/19	8/24	8/29	9/3	
灌水份额 (%)	4.3	7.1	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	5.7	5.7	2.9	2.9	2.9	100.0
灌水量 (mm)	22.499	37.498	44.998	44.998	44.998	44.998	44.998	44.998	44.998	44.998	29.999	29.999	14.999	14.999	14.999	524.970
施氮量 (kg/hm ²)	14.4		19.2		52.8		60.0		60.0		60.0					266.4

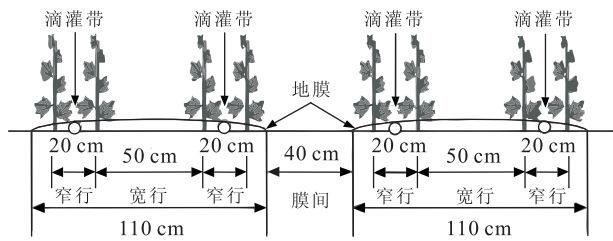


图 1 田间棉花种植及滴灌带布局

Fig. 1 Sketch of cottons and pipes for drip irrigation

10 cm,一膜宽 110 cm,两滴灌带间距为 70 cm,窄行距为 20 cm,宽行距为 50 cm,膜间距为 40 cm. 在生育期内采用膜下滴灌,滴头间距为 30 cm,滴头流量为 2.0 L/h,共 15 次灌水,灌水间隔为 5 d,灌水量为 524.97 mm. 共施氮素(用含氮量为 46% 尿素) 314.4 kg/hm²,其中 48 kg/hm² 于播种前作底肥施入田间,其余 266.4 kg/hm² 分 6 次随水滴施(表 3).

1.2.2 样品采集与制备 在各个小区选取无缺苗、棉花长势均匀处,每个生育期于首次随水施肥后第 4 日取 6 株棉花(外行、内行各 3 株,取样时混合装样,以 6 株的平均值代表本区结果),每个处理取 3

个重复小区的平均结果. 采用网格法对棉花根系取样,以每行第 2 株棉花为中心,沿滴灌带方向 30 cm,垂直滴灌带方向外行、内行各延伸 15 cm,取样深度为 60 cm,即整个取样空间体为 30×50×60 cm³,取样时平面上划分为 10×10 cm² 网格,垂向间隔为 10 cm,即每次采集根系样品 90 件. 植株样品采集后,用蒸馏水清洗,把植株根、茎、叶、蕾、花、铃、絮等器官分解开,控制烘箱在 105 ℃ 杀青半小时,于 80 ℃ 烘干 72 h 后称得干重,各器官经粉碎后过 1 mm 尼龙孔筛待测. 植株样品的测定指标为不同器官内微量元素和宏量元素含量.

在采集植株样品的同时,用竹筒(避免金属器具对样品的污染)获取各对应植株处宽行、窄行、膜间 0~60 cm 土样,垂向取样间隔 10 cm(同一小区设 3 个取样点,将相同深度的土样混合装样,测定混合土样的指标代表该小区结果),每个处理取 3 个重复小区的平均结果. 土样采集后,置于干净整洁的室内通风处自然风干. 用木棍或塑料棒碾压风干后的土样,并剔除植物残体、石块等侵入体. 压碎的土样过

2 mm尼龙孔筛后待测. 土样测定指标为不同深度土壤中微量元素和宏量元素的含量.

在吐絮期,选取各小区 3 处长势均匀、无缺苗区域,测定 $1.5\times2.22\text{ m}^2$ 内所有棉花结铃数. 每个小区设 3 处采样点,共采集 100 朵已吐絮的棉铃,经自然晒干后计算单铃重. 利用单位面积铃数、单铃重,推算各小区每公顷籽棉产量,不同处理的总产量由各自重复小区的平均值算出.

1.3 样品测定方法及数据处理

植株样品用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 完全消解酸体系,在电热板上充分消解;土样采用 M3 浸提法提取其中有效态元素. 用 ICP-OES(ICAP6300)测定所有样品中钙、镁、钠、钾、铜、铁、锰、锌、硼的含量,每个样品 3 次重复. 用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 对所获数据进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 土壤—棉株内元素对盐害抑制的作用

不同离子在土壤中的分布特性主要与离子的浓度和电荷数有关. 当 Na^+ 浓度较高时,会使土壤胶体吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 易于被 Na^+ 置换而进入土壤溶液,降低土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量,反之,较高浓度的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 也会将土壤中 Na^+ 代换出土壤胶体

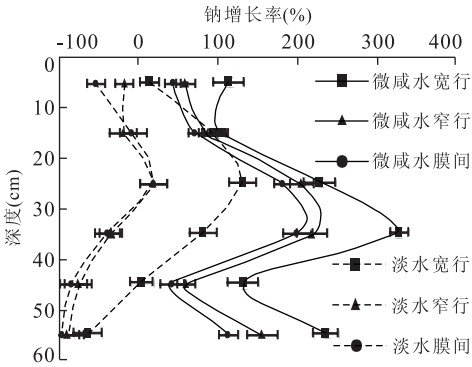


图 2 咸、淡水膜下滴灌土壤剖面钠元素增长率
Fig. 2 Growth rate of sodium in soil profile under mulched drip irrigation with brackish and fresh water

(吴忠东和王全九,2010). 但这方面的研究主要集中于土壤水盐(Jin *et al.*, 1998;王在敏等,2012)、常规离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)的迁移、分布(王丹等,2007),对土壤中微量元素与盐分离子(Na^+ 、 Cl^- 等)相互作用的研究甚少. 如图 2,不同处理下土壤 Na^+ 增长率(蕾期至吐絮期土壤剖面 Na^+ 的变化率)表现出明显的异同:微咸水处理土壤剖面 Na^+ 呈增加趋势,而淡水处理 Na^+ 仅在宽行 0~50 cm 深度内积累,窄行、膜间 Na^+ 总体呈减少趋势;2 种处理窄行、膜间 Na^+ 增长率相近,低于宽行 Na^+ 积累程度. 分析土壤中钙、镁、钾元素(图 3)时发现,微咸水灌溉处理钙、镁、钾的含量高

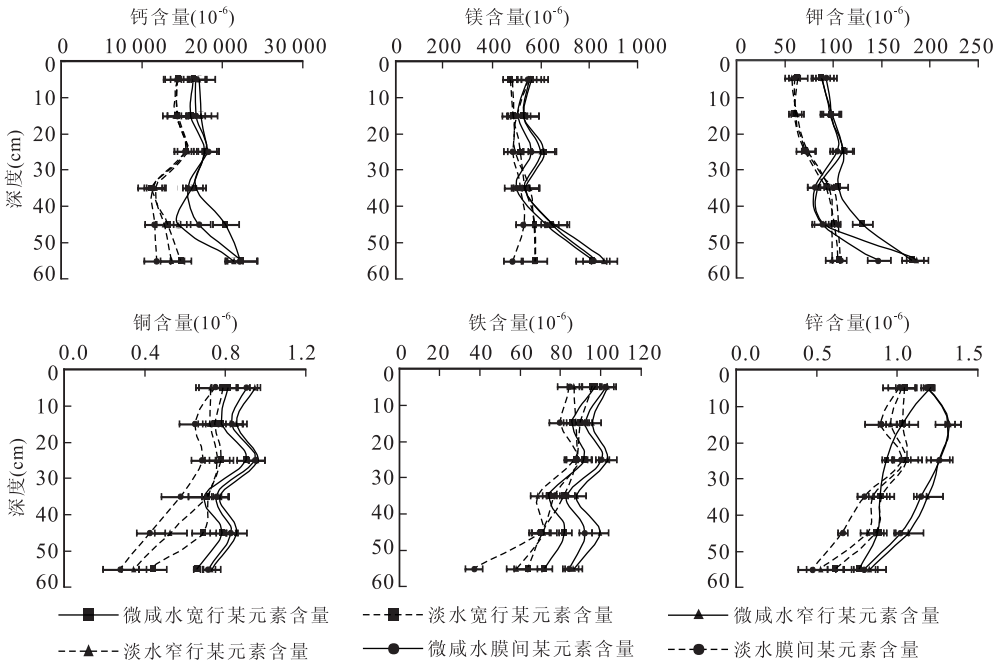


图 3 咸、淡水膜下滴灌 6 种元素在土壤剖面的分布
Fig. 3 Distribution of six elements in soil profile under mulched drip irrigation with brackish and fresh water

于淡水处理;0~60 cm 深度内,宽行、窄行、膜间镁元素含量差别不大,钾、钙在 0~30 cm 深度内差别较小,30~60 cm 深度内窄行、膜间的钾、钙元素含量小于宽行. 分析土壤中微量元素时发现,微咸水灌溉处理铜、铁、锌的含量高于淡水处理;同样在 0~60 cm 内,微咸水处理下窄行、膜间铜、铁、锌 3 种元素的含量相近,并且明显高于宽行(平均高出:铜 7.7%,铁 10.8%,锌 18.3%),而淡水处理窄行、膜间 3 种元素含量小于宽行. 与钙、镁、钾相比,铜、铁、锌离子体积小、水化半径小、电子亲和能大,更易与土壤胶体结合,根据元素电负性大小排序:铜>铁>锌>镁>钙>钠>钾(陈静生等,1990),因此铜、铁、锌较钙、镁、钾更易被土壤胶体吸附,置换被吸附的 Na⁺,进而降低土壤中 Na⁺ 含量. 另外,淡水处理下微量元素没有表现出对 Na⁺ 积累的抑制,这主要是因为微量元素含量需要在一定阈值范围内才能有效抑制盐分离子,微咸水(淡水)处理下,0~60 cm 土壤剖面铜、铁、锌平均含量分别为 0.82(0.63)×10⁻⁶、90.69(76.83)×10⁻⁶、1.07(0.87)×10⁻⁶,土壤中微量元素含量稍有变化,将显著影响 Na⁺ 累积,但产生盐害抑制的阈值仍需深入研究.

在一定阈值内,微量元素铜、铁、锌能有效抑制土壤中 Na⁺ 累积,而 Ca²⁺ 和 K⁺ 对于维持植物体内离子平衡、降低离子毒害具有重要意义,通常用钾钠比、钙钠比来表示植物体内离子环境(Al-Karakci, 2000). 分析表 4 发现,无论蕾期还是絮期,棉株钾钠比、钙钠比均保持着较高的值:蕾期,微咸水滴灌棉株的钾钠比、钙钠比在各个器官内均高于淡水处理,最大比值出现于蕾中,最小比值出现于茎、叶中;絮期,微咸水滴灌棉株根、铃的钾钠比、钙钠比高于淡水处理,茎、叶、絮中则低于淡水处理,最大比值出现于铃、絮中,最小比值出现于茎、叶中. 在本试验条件下,钾钠比主要在茎、蕾、絮中差异显著,钙钠比主要在叶、蕾、絮中差异显著,其余器官内钾钠比、钙钠比并未因灌溉水质的区别而产生明显差异. 此外,随着生育期发展,Ca²⁺、K⁺ 向生殖器官转移,营养器官钾钠比、钙钠比呈降低趋势,因此,棉株的钾钠比、钙钠比呈现出生殖器官>营养器官. 微咸水中 Ca²⁺、K⁺ 含量较高,棉花根部通过选择性吸收,将 Ca²⁺、K⁺ 运输至各个器官,使棉花体内一直维持着较高水平的钾钠比和钙钠比,降低 Na⁺ 对棉花的离子毒害.

2.2 微咸水中元素含量对棉花产量的影响

根冠比是植物为适应其生长环境的变化,由体内激素调控光合作用产物在不同器官之间的运输与

表 4 不同生育期棉株钾钠比、钙钠比
Table 4 The ratio of K⁺/Na⁺ and Ca²⁺/Na⁺ in cotton at different growth stages

生育期	器官	K ⁺ /Na ⁺		Ca ²⁺ /Na ⁺	
		微咸水	淡水	微咸水	淡水
蕾期	根	16.33±1.44	13.35±1.97	3.16±1.36	2.22±0.54
	茎	14.36±0.12*	8.14±1.11	5.87±1.82	3.79±1.47
	叶	9.69±1.81	5.45±1.27	16.02±1.43**	9.12±0.74
	蕾	86.64±3.36**	39.28±2.78	81.83±2.28**	51.35±1.71
絮期	根	5.32±1.93	5.10±0.13	1.64±0.45	1.48±0.23
	茎	4.94±1.04*	6.31±0.54	2.16±0.76	2.41±0.09
	叶	3.80±1.52	4.39±0.04	5.06±0.69**	8.22±1.34
	铃	48.41±6.19	46.57±9.66	13.10±4.98	10.65±1.85
	絮	25.22±8.83*	37.71±6.65	5.75±0.79**	7.73±0.31

分配,并最终表现出的综合指标(Dasgan *et al.*, 2002). 由表 5 可看出,2 种处理棉花根冠比(地下部与地上部干物质重的比值)均随着生育期的发展呈逐渐减小趋势. 蕾期—铃期(播种后 59~116 d),微咸水滴灌处理根冠比略低于淡水处理;铃期—吐絮期(播种后 116~137 d),微咸水滴灌处理棉花根重明显高于淡水处理,根冠比高出淡水处理 0.6%~3.7%;进入蕾期末段(播种后 66 d),微咸水灌溉处理棉花生殖器官(蕾、花、铃、絮)干物质量明显高于淡水处理.

干物质是形成棉花产量的基础. 图 4 反映了咸、淡水灌溉处理下,棉株干物质的累积情况,可以看出:微咸水灌溉处理,棉株的干物质重高于淡水处理,并且随着生育期进行,2 种处理干物质量差异逐渐加大,蕾期至吐絮期,微咸水处理棉株干物质重分别高出淡水处理 5.78、13.01、17.32、30.05 g/株. 微咸水中主要元素和离子含量显著高于淡水(表 1),其中:棉花生长所必须的微量元素(铜、铁、锰、锌)高出淡水 26%~54%,增强棉花耐盐性的钙、钾元素较淡水分别高出 181%、228%,营养元素氮、硫分别是淡水的 2.9 倍和 5.3 倍,参与光合作用的重要元素镁是淡水的 4.2 倍,促进生殖器官发育的硼元素是淡水的 3.2 倍,利用微咸水灌溉促进棉花对营养物质的吸收,增加了干物质重. 本试验表明:采用微咸水灌溉有利于棉花干物质累积,但是, Gouia *et al.* (1994) 认为,盐分胁迫会导致棉花干物质累积减少,生长缓慢,甚至死苗. 造成结论差异的主要原因: Gouia *et al.* (1994) 的结论是在棉花受到盐分胁迫条件下得到的. 根冠比、钾钠比和钙钠比的结果都已证明,本试验过程中,微咸水灌溉未对棉花生长产生盐分胁迫.

表 6 所示为 2 种处理的棉花最终产量:微咸水

表 5 咸、淡水膜下滴灌条件下棉花根冠比

Table 5 Root/shoot ratios under mulched drip irrigation with brackish and fresh water

播种 后天 数(d)	处理	棉花不同器官干物质(g)								地下部干 物质重(g)	地上部干 物质重(g)	根冠比
		根	茎	叶	蕾	花	铃	絮				
59	微咸水	1.03±0.78	1.61±0.35	1.64±0.52	0.27±0.03					1.03±0.78	3.51±1.17	29.2±5.1%
	淡水	1.23±0.72	2.04±0.3	1.64±0.47	0.34±0.04					1.23±0.72	4.02±1.23	30.5±6.3%
66	微咸水	2.37±0.63	5.84±1.83	6.33±1.98	0.95±0.35*	1.27±0.44*				2.37±0.63	14.39±4.25	16.5±1.4%
	淡水	1.58±0.58	3.61±0.46	4.81±0.48	0.45±0.13	0.31±0.02				1.58±0.58	9.17±1.11	17.2±1.2%
71	微咸水	2.24±0.35*	7.33±0.14*	8.08±0.74	2.81±0.51*	0.16±0.03*				2.24±0.35*	18.37±1.37*	12.2±1.5%
	淡水	1.65±0.48	4.74±1.28	6.29±1.74	1.89±0.35	0.27±0.01				1.65±0.48	13.18±1.38	12.5±3.6%
81	微咸水	3.62±0.11**	10.56±1.82	9.02±1.68*	2.32±0.52*	0.30±0.02*	9.18±0.05**			3.62±0.11**	31.38±5.01*	11.5±1.5%
	淡水	2.33±0.15	8.32±0.31	7.19±0.54	1.43±0.39	0.48±0.05	2.25±0.01			2.33±0.15	19.66±0.04	11.9±1.7%
116	微咸水	6.54±0.81*	16.62±2.87	16.16±2.81			27.17±2.11*			6.54±0.81*	59.95±3.04*	10.9±0.9%*
	淡水	3.28±0.69	13.39±0.87	10.83±3.23			21.38±2.94			3.28±0.69	45.59±3.16	7.2±0.6%
137	微咸水	6.47±1.98	14.45±2.41	17.47±0.85*			29.89±8.74	25.61±7.72		6.47±1.98	87.42±3.94*	7.4±1.4%
	淡水	4.04±0.42	9.32±2.96	8.53±1.85			22.23±8.18	19.71±5.41		4.04±0.42	59.79±6.97	6.8%±1.9%

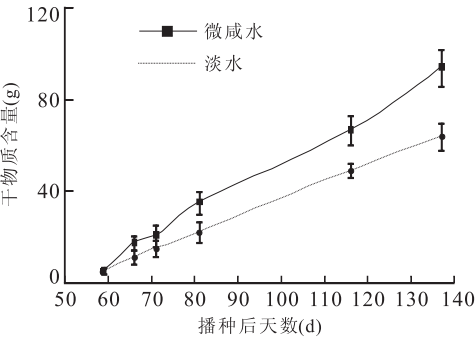


图 4 咸、淡水膜下滴灌条件下棉花干物质累积
Fig. 4 Accumulation of cotton dry matter under mulched drip irrigation with brackish and fresh water

表 6 咸、淡水膜下滴灌条件下棉株产量

Table 6 Cotton yields under mulched drip irrigation with brackish and fresh water

处理	单铃重(g)	单位面积铃数 (个/3.3 m ²)	籽棉产量 (kg/hm ²)
微咸水	6.014±0.534	397.8±48.5**	7 177.05±883.96**
淡水	5.833±0.428	318.3±42.6	5 569.95±754.32

灌溉处理,棉株的单铃重、单位面积铃数以及籽棉产量均高于淡水处理,分别高出 3.1%、24.98%、28.85%,其中单位面积铃数及籽棉产量差异显著。

2.3 棉株内微量元素与宏量元素间相关关系

分析棉花生长末期棉株内元素组成发现(表 7):微咸水灌溉处理棉株根、铃、絮内元素含量高于淡水处理,茎、叶内元素含量低于淡水处理;各器官内元素差异程度表现为:絮>茎>根>叶>铃。本试验条件下,微咸水膜下滴灌棉株生殖器官各元素含量显著增加,有利于提高棉花的产量。另外,微咸水灌溉处理改变了棉株内(尤其是生殖器官)元素组

成,如钾钠比、钙钠比等,有利于提高棉花在高盐环境中的耐受性。

运用 SPSS 19.0 对 2 种处理下 54 个样本中 9 种元素(钙、镁、钾、钠、铜、铁、锰、锌、硼)进行相关分析发现(表 8),不同元素间具有一定的相关关系:铁、锰、锌、硼 4 种微量元素之间呈显著相关(除锌、硼间呈弱相关),钙、镁、钠、钾这 4 种元素之间呈显著相关(除钙、钾间呈弱相关),铜与其他元素的相关程度不高(相关系数均低于 0.5)。

在一定范围内,锰、硼能促进植物体内钙元素的积累,但过低或过高含量的锰、硼都会抑制钙的吸收(Minarik and Shive, 1939; Keyser and Munns, 1979; Abdalnour *et al.*, 2000)。前人的研究主要关注锰、硼、钙对植物生长的影响,而对三者产生相互作用的阈值研究较少。图 5 为棉株内微量元素锰、硼与宏量元素钙之间的相关关系拟合曲线,从中可以看出:硼、钙以及锰、钙的实际点与拟合曲线之间相关程度较高,拟合方程分别为:

$$y = -13.43x_1^2 + 1\,497x_1 - 10\,806,$$
$$(R^2 = 0.824),$$

(1)

$$y = -24.64x_1^2 + 1\,890x_1 - 7\,584,$$
$$(R^2 = 0.824).$$

(2)

式中: y 、 x_1 、 x_2 分别为棉株体内钙、硼、锰元素的含量,单位是 mg/kg。

棉花正常生长所需硼、锰元素分别为 $20 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ 、 $20 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$,低于阈值会造成棉花微量元素的缺乏,高于阈值则造成相应的元素毒害。本试验发现,在 $0 < \text{硼} < 55 \times 10^{-6}$ 、 $0 < \text{锰} < 40 \times 10^{-6}$ 范围内,棉株体内钙元素随着硼、锰的增加而增加,超过这一范围后,钙元素随之增加而

表 7 咸、淡水膜下滴灌棉花内元素组成(吐絮期)

Table 7 Elements composition in cotton under mulched drip irrigation with brackish and fresh water (boll opening stage)

处理	器官	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Ca	Mg	Na	K
微咸水	根	5.6±0.8	70.2±3.0	5.6±0.2**	9.0±1.1*	11.1±0.2	2 793±18**	1 437±3**	1 709±8**	9 099±50**
	茎	7.4±0.1**	213.9±8.2*	11.0±0.8	23.2±9.2	32.4±0.2**	21 418±234**	10 840±313**	9 960±40**	49 145±467**
	叶	4.4±1.0	374.6±5.4	27.5±4.2	16.3±1.1	39.0±1.5*	33 841±138**	7 710±30**	6 707±100**	25 470±466**
	铃	3.3±0.6**	89.7±1.4*	8.3±0.5	14.5±1.2	15.5±1.7	3 741±223**	2 119±11	283±13	13 829±286
	絮	2.6±0.1**	109.1±2.4**	8.5±0.6**	15.5±1.2*	10.6±0.4**	1 545±16**	1 407±18**	264±4**	6 763±23**
淡水	根	3.0±1.1	73.8±8.4	3.6±0.2	10.5±0.7	11.0±1.3	2 390±46	1204±12	1 614±18	8 221±45
	茎	6.4±0.2	239.9±3.4	10.3±2.1	27.5±5.9	23.2±0.6	22 808±194	12 622±384	9 472±28	59 798±550
	叶	4.8±0.1	384.0±45.4	29.1±1.8	17.9±1.5	43.3±1.6	35 825±465	7 857±27	4 368±15	19 177±786
	铃	4.4±0.9	70.4±8.7	7.4±0.6	12.0±1.4	13.7±0.3	3084±21	2 071±51	291±6	13 506±316
	絮	2.2±0.1	59.8±0.5	6.8±0.2	11.9±1.2	5.7±0.1	1254±29	1 023±144	163±4	6 111±76

注:元素单位为 10⁻⁶.

表 8 棉株内 9 种元素间相关性分析(n=54)

Table 8 Correlations of 9 elements in cotton

元素	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Ca	Mg	Na	K
Cu	1.000								
Fe	0.294*	1.000							
Mn	0.407**	0.576**	1.000						
Zn	0.35**	0.617**	0.529**	1.000					
B	0.349**	0.579**	0.648**	0.267	1.000				
Ca	0.35**	0.38**	0.704**	0.295*	0.715**	1.000			
Mg	0.458**	0.220	0.53**	0.246	0.534**	0.794**	1.000		
Na	0.068	0.136	−0.012	−0.082	0.260	0.493**	0.607**	1.000	
K	0.080	0.177	−0.030	0.133	0.162	0.382**	0.587**	0.782**	1.000

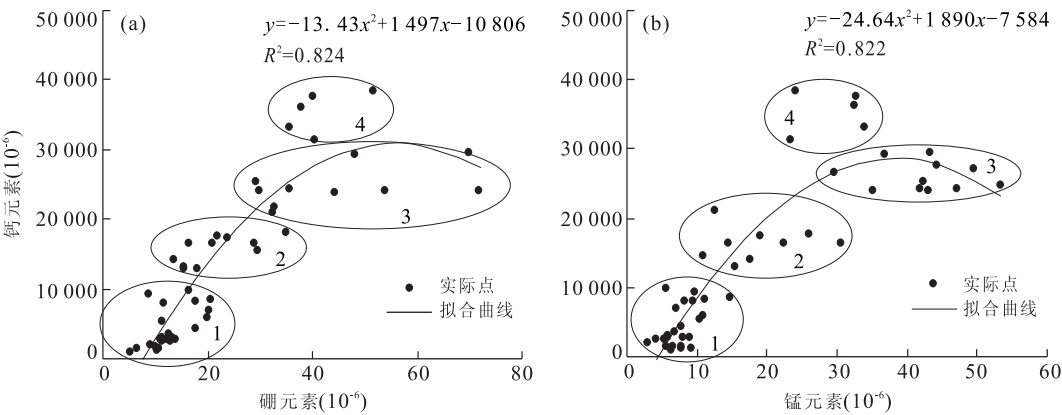


图 5 棉株内锰、硼与钙元素的相关关系拟合曲线

Fig. 5 Matched curve of correlations among manganese, boron and calcium in cotton

a. 硼、钙相关关系拟合曲线; b. 锰、钙相关关系拟合曲线. 1. 根、铃、絮 ($\text{Ca} < 10\,000 \times 10^{-6}$); 2. 茎、蕾 ($\text{Ca}: 10\,000 \times 10^{-6} \sim 20\,000 \times 10^{-6}$); 3. 蕾期叶片 ($\text{Ca}: 20\,000 \times 10^{-6} \sim 30\,000 \times 10^{-6}$); 4. 絮期叶片 ($\text{Ca}: 30\,000 \times 10^{-6} \sim 40\,000 \times 10^{-6}$)

减小. 计算阈值内拟合曲线的平均斜率,得到钙:硼:锰 $\approx 597.36:1:0.83$,因此可通过合理施肥,在棉花补充钙元素的同时,适当伴施硼肥和锰肥,保证棉花体内各元素处于较高的水平,这有利于维持棉花体内离子平衡,增强棉花对盐胁迫的抵抗能力.

按钙元素含量的高低,将拟合曲线分为 4 个区

域(图 5 圈中部分): (1) 根、铃、絮 ($\text{Ca} < 10\,000 \times 10^{-6}$); (2) 茎、蕾 ($\text{Ca}: 10\,000 \times 10^{-6} \sim 20\,000 \times 10^{-6}$); (3) 蕾期叶片 ($\text{Ca}: 20\,000 \times 10^{-6} \sim 30\,000 \times 10^{-6}$); (4) 絮期叶片 ($\text{Ca}: 30\,000 \times 10^{-6} \sim 40\,000 \times 10^{-6}$). 钙元素在棉花叶片中积累,可保护细胞的膜结构,减少 Na^+ 向地上部的运输,缓解盐害对棉花

的胁迫作用(Rengel, 1992; Marschner, 1995). 根据硼、锰、钙 3 种元素在棉花体内的组成特点,通过合理施肥,可维持棉花叶片中钙元素含量处于较高的水平.

3 结论与讨论

(1)微咸水膜下滴灌条件下,土壤窄行和膜间微量元素(尤其是铜、铁、锌)含量明显高于宽行,Na⁺增长率低于宽行. 试验说明,合理利用微咸水灌溉并不会对棉花造成盐害:多数器官中钾钠比、钙钠比并未因灌溉水质的区别而产生显著差异,甚至在棉花生长初期,微咸水处理棉花各器官的钾钠比、钙钠比高于淡水处理,这有利于提高棉花生长初期对盐害的耐受性. 此外,随着生育期发展,营养器官钾钠比、钙钠比呈降低趋势,生殖器官钾钠比、钙钠比高于营养器官,这种差异性分布的特点能使蕾、铃、絮避免受到 Na⁺ 毒害的影响,有利于提高棉花的产量、品质以及耐盐性(Saleh, 2012).

(2)考虑到微咸水中矿物元素含量较高的特点,合理利用当地微咸水灌溉,既避免棉花受到盐分胁迫的危害,又有效提高了棉花干物质量和棉花产量:蕾期至铃期,微咸水滴灌促进了地上部分干物质的积累,有利于前期营养生长;铃期至吐絮期,微咸水滴灌棉花根系发育明显优于淡水处理,有利于后期生殖生长,微咸水处理下铃、絮(构成棉花产量的主要器官)的干物质重高于淡水处理. 微咸水灌溉能够显著提高单位面积铃数和籽棉产量,这符合盐碱地植棉形成高产的特征(郭文琦等,2012).

(3)研究发现,棉株内微量元素与宏量元素之间相关性较弱,仅锰、硼与钙元素间存在显著的相关关系,并且在一定阈值内,硼、锰能够促进棉花对钙元素的吸收. 棉花根系将吸收的钙元素向地上部分,尤其是叶片中运输,形成棉株内钙浓度梯度顺序[Ca²⁺]_叶>[Ca²⁺]_茎>[Ca²⁺]_根,这与棉株体内Ca²⁺分布规律一致(陈德明和俞仁培,1996).

References

Abdunnour, J. E., Donnelly, D. J., Barthakur, N. N., 2000. The Effect of Boron on Calcium Uptake and Growth in Micropropagated Potato Plantlets. *Potato Research*, 43 (3): 287—295. doi:10. 1007/BF02358088

Abo-Kassem, E., Sharafeldin, A., Rozema, J., et al., 1995. Synergistic Effects of Cadmium and NaCl on the

Growth, Photosynthesis and Ion Content in Wheat Plants. *Biologia Plantarum*, 37(2): 241—249. doi: 10. 1007/BF02913220

Al-Karaki, G., 2000. Growth, Water Use Efficiency and Sodium and Potassium Acquisition by Tomato Cultivars Grown under Salt Stress. *Journal of Plant Nutrition*, 23: 1—8. doi:10. 1080/01904160009381992

Bastias, E., Fernandez-Garcia, N., Carvajal, M., 2004. Aquaporin Functionality in Roots of Zea Mays in Relation to the Interactive Effects of Boron and Salinity. *Plant Biology*, 6(4): 415—421. doi:10. 1055/s—2004—820889

Chen, D. M., Yu, R. P., 1996. Studies on Relative Salt Tolerance of Crops II. Salt Tolerance of Some Main Crop Species. *Acta Pedologica Sinica*, 33(2): 121—128 (in Chinese with English abstract).

Chen, J. S., Deng, B. S., Tao, S., et al., 1990. Environmental Geochemistry. China Ocean Press, Beijing, 140 (in Chinese).

Dasgan, H., Aktas, H., Abak, K., et al., 2002. Determination of Screening Techniques to Salinity Tolerance in Tomatoes and Investigation of Genotype Responses. *Plant Science*, 163(4): 695—703. doi:10. 1016/S0168—9452(02)00091—2

Dogan, I., Ozyigit, I. I., Demir, G., 2012. Mineral Element Distribution of Cotton (*Gossypium Hirsutum* L.) Seedlings under Different Salinity Levels. *Pakistan Journal of Botany*, 44(1): 15—20.

Dong, H. Z., 2010. Cotton Farming in Saline Soil. Science Press, Beijing, 77 (in Chinese).

Gouia, H., Ghorbal, M. H., Touraine, B., 1994. Effects of NaCl on Flows of N and Mineral Ions and on NO₃⁻ Reduction Rate within Whole Plants of Salt-Sensitive Bean and Salt-Tolerant Cotton. *Plant Physiology*, 105(4): 1409—1418.

Guo, W. Q., Bian, S. G., Zhang, P. T., et al., 2012. Analysis of Yield and Yield Formation Features of High-Yielding Cotton Cultivars Planted in Coastal Saline-Alkali Soil in Jiangsu Province. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 24(9): 15—18 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3969/j. issn. 1001—8581. 2012. 09. 004

He, Y. J., Wang, B. G., Wang, Z. M., et al., 2010. Study on Irrigation Scheduling of Cotton under Mulch Drip Irrigation with Brackish Water. *Transactions of the CSAE*, 26(7): 14—20 (in Chinese with English abstract). doi:10. 3969/j. issn. 1002—6819. 2010. 07. 003

Jin, M. G., Zhang, R. Q., Gao, Y. F., et al., 1998. Sustainable Irrigation with Brackish Groundwater in Heilonggang Region, China. *Journal of China University of*

- Geosciences*, 9(1): 90—94.
- Keyser, H. H., Munns, D. N., 1979. Effects of Calcium, Manganese, and Aluminum on Growth of Rhizobia in Acid Media. *Soil Science Society of America Journal*, 43 (3): 500—503. doi: 10. 2136/sssaj1979. 03615995004300030014x
- Marschner, H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London, 171—178.
- Mikkelsen, R. L., Haghnia, G. H., Page, A. L., et al., 1988. The Influence of Selenium, Salinity, and Boron on Alfalfa Tissue Composition and Yield. *Journal of Environmental Quality*, 17(1): 85—88. doi: 10. 2134/jeq1988. 00472425001700010012x
- Minarik, C. E., Shive, J. W., 1939. The Effect of Boron in the Substrate on Calcium Accumulation by Soybean Plants. *American Journal of Botany*, 26(10): 827—831.
- Redondo-Gómez, S., Andrades-Moreno, L., Naranjo, E. M., et al., 2011. Synergic Effect of Salinity and Zinc Stress on Growth and Photosynthetic Responses of the Cordgrass, *Spartina Densiflora*. *Journal of Experimental Botany*, 62 (15): 5521—5530. doi: 10. 1093/jxb/err234
- Rengel, Z., 1992. The Role of Calcium in Salt Toxicity. *Plant Cell Environment*, 15 (6): 625—632. doi: 10. 1111/j. 1365—3040. 1992. tb01004. x
- Saleh, B., 2012. Effect of Salt Stress on Growth and Chlorophyll Content of Some Cultivated Cotton Varieties Grown in Syria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, (43): 1976—1983. doi: 10. 1080/00103624. 2012. 693229
- Wang, D., Kang, Y. H., Wan, S. Q., 2007. Distribution Characteristics of Different Salt Ions in Soil under Drip Irrigation with Saline Water. *Transactions of the CSAE*, 23(2): 83—87 (in Chinese with English abstract). doi: 1002—6819(2007)2—0083—05
- Wang, Z. M., Jin, M. G., He, Y. J., et al., 2012. Water Flow and Salt Transport in Cotton Field of Mulched Drip Irrigation Using Dye Tracer. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(5): 1093—1100 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3799/dqkx2012. 116
- Wu, Z. D., Wang, Q. J., 2010. Effect on Both Soil Infiltration Characteristics and Ion Mobility Features by Mineralization Degree of Infiltration Water. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 41(7): 64—69 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3969/j. issn. 1000—1298. 2010. 07. 014
- Xin, C. S., Tang, W., Wang, H. Z., et al., 2002. Responses of Seedling Growth of Lumian 14 to NaCl Stress and Effects of Treatments with Microelement and Hormone. *Cotton Science*, 14(2): 108—112 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3969/j. issn. 1002—7807. 2002. 02. 010
- Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., Keren, R., et al., 2008. Combined Effect of Salinity and Excess Boron on Plant Growth and Yield. *Plant Soil*, 304(1—2): 73—87. doi: 10. 1007/s11104—007—9522—z

附中文参考文献

- 陈德明, 俞仁培, 1996. 作物相对耐盐性的研究——Ⅱ. 不同栽培作物的耐盐性差异. *土壤学报*, 33(2): 121—128.
- 陈静生, 邓宝山, 陶澍, 等, 1990. 环境地球化学. 北京: 海洋出版社, 140.
- 董合忠, 2010. 盐碱地棉花栽培学. 北京: 科学出版社, 77.
- 郭文琦, 卞曙光, 张培通, 等, 2012. 江苏沿海滩涂盐碱地植棉高产品种产量及形成特征分析. *江西农业学报*, 24(9): 15—18.
- 何雨江, 汪丙国, 王在敏, 等, 2010. 棉花微咸水膜下滴灌灌溉制度的研究. *农业工程学报*, 26(7): 14—20.
- 王丹, 康跃虎, 万书勤, 2007. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征. *农业工程学报*, 23(2): 83—87.
- 王在敏, 靳孟贵, 何雨江, 等, 2012. 基于染色示踪的膜下滴灌水盐运移规律. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(5): 1093—1100.
- 吴忠东, 王全九, 2010. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响. *农业机械学报*, 41(7): 64—69.
- 辛承松, 唐薇, 王洪征, 等, 2002. 鲁棉 14 幼苗生长对氯化钠胁迫的反应及微量元素、激素处理的效应. *棉花学报*, 14(2): 108—112.