

咸淡水轮灌对棉花产量和土壤溶质迁移的影响

黄金瓯^{1,2}, 靳孟贵^{1,2*}, 栗现文^{2,3}

(1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074;
3. 同济大学水利工程系, 上海 200092)

摘要:为探讨不同咸淡水膜下滴灌方式对棉花根系、产量和土壤剖面溶质迁移的影响,于2012-2013年在巴州灌溉试验站开展大田试验,共设置全生育期微咸水、淡水和咸淡水轮灌(蕾期—花铃前期淡水、其余生育期微咸水)3个处理。对比不同咸淡水处理下,棉花根系发育、地上部生长和产量的差异,分析0~100 cm土壤中铜、铁、锰、钙、钾、钠6种溶质垂向分布与变化特点。结果表明:2012年,微咸水灌溉条件下,钠离子未发生表聚,40 cm以上土壤微量元素含量显著增高($P<0.05$),棉花总根长密度、最大根长密度呈咸水处理>轮灌处理>淡水处理,咸水和轮灌处理下,单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量显著高于淡水处理,分别达32%、20%和22%。2012-2013年,咸水处理下棉花总根长密度骤减,导致该处理下单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量显著降低($P<0.05$)。在土壤盐害离子增加,微量元素减少的情况下,采用蕾期至花铃前期淡水灌溉、其余生育期微咸水灌溉的方式,钠离子未发生表聚,2013年棉花总根长密度高于咸水处理达24%,地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量较咸水处理高出13%~24%。咸淡水轮灌一定程度上促进了棉花根系生长,缓解盐害离子对棉花造成的生长胁迫。另外,不同咸淡水灌溉处理下,土壤溶质迁移规律不同:2012-2013年,土壤中铜、铁、锰平均质量分数降低约40%,0~10 cm的表聚系数由0.14~0.17增长至超过0.20,3种处理下铜、铁、锰都表现出强烈的表聚性;钙、钾、钠平均质量分数增加33%~45%,3种处理下钙、钾未表现出明显的表聚性,而微咸水处理下钠由不表聚转变为显著表聚。该成果可为干旱地区合理利用微咸水,实现棉花优质稳产提供参考。

关键词:灌溉;棉花;盐度;微咸水;根系;产量;时空变化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.013

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0099-09

黄金瓯, 靳孟贵, 栗现文. 咸淡水轮灌对棉花产量和土壤溶质迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 99-107.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.013 <http://www.tcsae.org>

Huang Jinou, Jin Menggui, Li Xianwen. Effects of alternative irrigation with brackish and fresh water on cotton yields and solute transport in soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 99-107. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.013 <http://www.tcsae.org>

0 引言

新疆位于西北内陆盆地的干旱区,是中国微咸水资源的主要分布区之一。据2011-2014年《新疆统计年鉴》^[1]显示,新疆农业生产年用水量为448.4亿 m^3 ~557.7亿 m^3 ,占自治区总用水量的85.7%~94.8%,农业用水份额逐年增加,但仍有大面积农田严重缺水。近年来,全疆在农业主产区广泛推广节水灌溉技术,其中膜下滴灌是将滴灌和覆膜种植技术结合在一起的新型节水灌溉技术,具有减少棵间蒸发、保温保墒、浸润到位等优点,是将微咸水资源合理用于农业生产的重要方式。逢焕成等^[2]研究了微咸水灌溉对土壤盐分与作物产量的

影响,发现微咸水灌溉配合麦秸秆覆盖条件下,土壤没有发生积盐现象,作物产量与淡水灌溉相比,并无显著差异。吴忠东等^[3]探讨了微咸水混灌对冬小麦产量和土壤理化性质的影响,认为3 g/L的微咸水会造成土壤轻微积盐,在平雨年或湿润年,冬小麦产量没有明显降低;在微咸水非充分灌溉^[4]条件下,随着缺水阶段的后移,100 cm内土壤积盐程度逐渐增大,作物产量和水分利用效率均有所提高。何雨江等^[5]认为,在3750 m^3/hm^2 的灌溉定额且未冬灌条件下,微咸水占80%、淡水占20%的轮灌处理下,全年土壤总盐仅增加了0.62 g/kg。另外,国内外学者通过建立不同灌溉模式下土壤水盐运移模型,模拟了包气带土壤水、盐分布及变化规律,结合作物生长和产量指标,提出了灌期咸淡水轮灌、调亏灌溉,非灌期淡水洗盐等综合调控措施^[6-8]。

上述研究主要从作物生长与水盐胁迫的角度,探讨微咸水的合理利用方式,并未考虑微咸水灌溉对作物造成的营养胁迫及溶质迁移问题。多年来,新疆地区棉花种植过程中偏施氮肥的现象普遍,磷、钾肥所占比例偏小,基本不施或盲目施用微量元素肥料^[9]。在长期、单一

收稿日期: 2015-05-06 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(41172218)

作者简介: 黄金瓯,男,安徽合肥人,博士生,研究方向为水文地质与生态环境、水流与溶质运移。武汉 中国地质大学环境学院,430074。Email: hjo2012@163.com。

*通信作者: 靳孟贵,男,安徽舒城人,教授,博士生导师,主要从事地下水与环境的研究。武汉 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,430074。Email: mgjin@cug.edu.cn。

植棉模式下, 土壤中的养分元素被棉花吸收后得不到及时补充, 其含量必然逐年减少, 甚至造成棉花减产等不良结果。相比淡水而言, 微咸水中微量元素(指铜、铁、锰、锌、硼等植物生长必须的元素)含量较高, 这有利于促进植物对养分元素的吸收, 提高水资源利用率^[10], 但若利用不当, 高浓度的盐害离子(如 Na^+ 和 Cl^-) 则会阻碍作物生长。Subbarao 等^[11]认为, 钠作为功能型营养元素, 具有提高细胞活力, 促进植物生长的能力, 但过量的钠将造成植物吸水困难和细胞脱水, 最终导致植物死亡。另外, 研究土壤溶质的垂向分布与变化, 明确不同溶质的迁移特点, 可为了解养分输入、输出及循环过程提供基础资料。目前, 国内外学者对不同植被覆盖条件下氮、钾、铜、锌等元素的迁移规律进行了研究^[12-14], 但对微咸水膜下滴灌条件下棉田溶质的时空变化规律研究较少。综上所述, 随着当地棉花生产与水分、养分供给间的矛盾日益凸显, 探讨微咸水灌溉方式对作物生长和溶质迁移的影响, 对提高微咸水利用效率具有重要意义。

杨涛等^[15]根据全国第二次土壤普查确定的指标分析发现, 新疆农田土壤中有效态铜、铁、锰、钙、钾变化幅度较大, 与第二次普查结果相比: 微量元素铜、铁、锰降低 33%~54%, 而作为与盐害离子相互竞争、维持植物体内离子平衡的钙、钾呈较高或中等偏低水平, 其余营养元素变化幅度较小。因此, 本文以盐害离子钠和铜、

铁、锰、钙、钾作为土壤化学指标, 重点研究不同咸淡水膜下滴灌方式对棉花根系、产量和土壤溶质迁移的影响, 提出有效的咸淡水灌溉方式, 为干旱地区合理利用微咸水、实现棉花优质稳产提供理论依据。

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)($41^{\circ}35'14''\text{N}$ 、 $86^{\circ}10'24''\text{E}$)。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, 年降水量 53.3~62.7 mm, 蒸发强烈, 潜在蒸发量 2 273~2 788 mm/a, 地下水埋深 1 m 以下。用于试验的微咸水取自当地地下水, 2012—2013 年平均矿化度 1.99~2.01 g/L, pH 值 6.9~7.2, 按照舒卡列夫顺序命名法, 水化学类型为 $\text{SO}_4\text{Cl-Na}$; 淡水源自孔雀河, 经西尼尔水库流出后汇入各级渠道, 矿化度 0.97~1.01 g/L, pH 值 7.3~7.6, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{-Na}$ 。咸、淡水中主要溶质含量见表 1。自 2008 年开展大田试验以来, 试验地已连续种植棉花 5 a 以上, 土壤质地均匀, 按美国农业部土壤分类方法^[16], 耕作土层主要以壤质砂土和砂壤土为主, 土壤干容重^[17]1.43~1.62 g/cm³, 2012—2013 年棉花播种前土壤中 6 种溶质平均含量见表 2。

表 1 2012 和 2013 年试验站灌溉用水中主要溶质含量

Table 1 Main solute content in irrigation water of experimental station in 2012 and 2013

水类型 Water types	Cu ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Zn ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Fe ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mn ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Na^+ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	K^+ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Ca^{2+} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mg^{2+} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	HCO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cl^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SO_4^{2-} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
淡水 Fresh water	5.8±0.2 b	82.2±3.5 b	440.1±21.8 b	20.3±1.7 b	68.3±4.5 B	7.5±0.8 B	54.1±2.9 B	26.7±2.1 B	201.3±14.6 b	16.8±1.6 B	59.6±4.5 B	139.1±10.2 B
微咸水 Brackish water	8.5±0.4 a	129.3±3.3 a	696.1±24.3 a	29.1±1.4 a	389.2±10.1 A	22.5±1.6 A	135.9±4.1 A	102.3±3.2 A	372.1±13.5 a	49.2±2.5 A	452.9±11.3 A	717.6±20.4 A

注: Cu、Zn、Fe、Mn 的含量为各价态溶质之和, 下同; 同种溶质用不同小写字母表示在 0.05 水平上咸、淡水差异显著, 用不同大写字母表示在 0.01 水平上咸、淡水差异极显著, 样本量为 14。

Note: Concentrations of Cu, Zn, Fe, and Mn are sum of different valences, same as below; Different lower case and capital letters of same solute indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level (sample size is 14), respectively.

表 2 播种前土壤剖面溶质质量分数

Table 2 Mass fraction of solute in soil profile before sowing

土深 Soil depth/cm	Cu	Fe	Mn	Ca^{2+}	Na^+	K^+
0~10	1.10±0.04	123.3±4.1	79.9±2.5	11778±504	150.5±6.2	60.2±3.5
>10~20	1.11±0.03	120.1±4.5	78.7±2.7	11717±653	167.4±5.8	59.5±3.1
>20~30	1.09±0.04	113.0±3.2	78.8±2.4	11400±418	168.1±6.3	60.7±3.2
>30~40	0.90±0.06	97.1±4.3	72.7±2.3	10816±622	158.8±6.1	59.1±3.7
>40~50	0.82±0.05	111.9±5.8	79.4±3.1	9967±351	138.9±5.9	51.2±3.6
>50~60	0.40±0.02	59.1±3.5	39.2±2.7	15025±656	280.3±7.4	114.3±4.4
>60~70	0.30±0.01	45.3±4.4	30.8±2.5	17580±832	328.1±8.1	133.7±5.9
>70~80	0.33±0.01	49.1±4.1	33.3±2.1	17773±791	331.7±8.3	135.9±6.2
>80~90	0.34±0.02	51.2±3.8	34.9±2.2	18546±786	346.2±7.9	141.1±6.3
>90~100	0.33±0.03	48.5±3.9	33.7±2.8	17598±855	334.7±7.1	137.5±6.1

注: 样本量 27。

Note: Sample size is 27.

1.2 试验布置与样品采集

1.2.1 试验布置

本试验于 2012 年 4 月—2013 年 10 月在巴州灌溉试验站进行。供试棉花品种为新陆中 21 号, 按当地传统植

棉模式, 棉田经春灌后, 从播种至苗期(4 月 26 日—6 月 9 日)未进行灌水; 蕾期至吐絮初期(蕾期 6 月 10 日—6 月 25 日, 花铃前期 6 月 26 日—7 月 5 日, 花铃后期 7 月 6 日—8 月 24 日, 吐絮初期 8 月 25 日—9 月 8 日)

采用膜下滴灌灌溉。共设置全生育期微咸水、淡水、咸淡水轮灌 3 种处理，分别用 S、F 和 A 表示。其中，A 处理在蕾期至花铃前期灌淡水，其余生育期微咸水灌溉，淡水占总灌量的 20%。各处理设置 3 个重复小区，所有小区大小为 10 m×20 m。各小区均采用 1 膜 2 管 4 行的布管方式，行距 150 cm、株距 10 cm，宽行、窄行和膜间距分别为 50、20 和 40 cm。各处理灌溉量、施肥量相同（图 1）：灌水间隔 5 d，共计 15 次灌水，总灌水量 525 mm；底肥于棉花播种前撒入棉田，包括：46% 尿素 105 kg/hm²，64% 磷酸二铵 375 kg/hm²，45% 硫酸钾 300 kg/hm²，农家肥 15 m³/hm²。灌水过程中只追施氮肥，其余 579 kg/hm² 尿素分 6 次随水滴施。2012—2013 年试验期间的降雨情况见图 2。

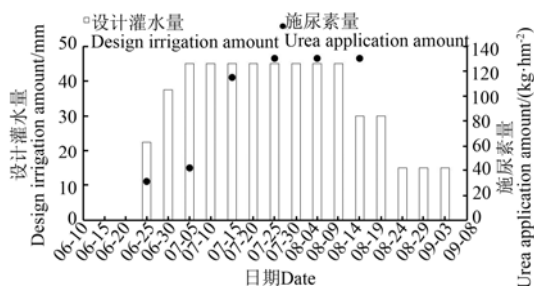


图 1 2012 年和 2013 年田间设计灌水、施肥量

Fig.1 Scheme of irrigation and fertilization in 2012 and 2013

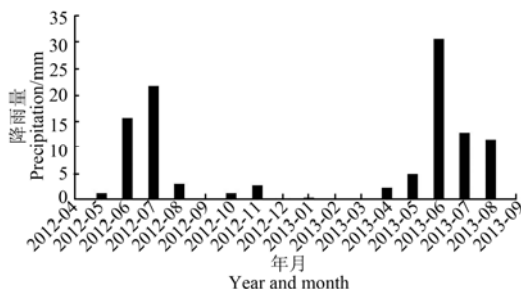


图 2 2012 年 4 月—2013 年 9 月试验站月降雨量

Fig.2 Monthly precipitation of experimental station from April 2012 to September 2013

1.2.2 样品采集与制备

每年于最后一次灌水后第 4 天，在各小区棉花长势均匀处采摘 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。植株样品采集后，用蒸馏水清洗，把根、茎、叶、蕾、花、铃、絮等器官分解开，控制烤箱在 105 ℃ 杀青 30 min，于 80 ℃ 烘干至质量恒定后称得各器官干物质量。棉絮样经粉碎后待测。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 0~100 cm 土样，垂向取样间隔 10 cm（同一小区设 6 个取样点，以 6 个点的平均值代表该小区结果），每个处理取 3 个重复小区的平均结果。土样采集后，置于室内洁净、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。

在棉花吐絮期采用网格法对棉花根系进行取样（图 3），以宽行中心为起始点，垂直于滴灌带方向布置 70 cm×20 cm×50 cm 的取样空间，平面上等距划分 7 段，每个取样平面为 10 cm×20 cm，垂向取样间隔为 10 cm，即每组共 35 件根系样品。为降低根的腐烂速度，将采集的根系样品置于冰箱内冷藏保鲜，洗根前取出。将每件含根土样用细纱布包裹系好，人工捡出老根和杂质后，放入 1 mm 尼龙孔筛中并用水冲洗。将收集的根样用滤纸吸干水分后自然风干，装入密封袋干燥保存。用扫描仪将根样扫描成黑白对照的 TIF 图像文件，然后利用 DT-SCAN (DT-SCAN 2.04, Delta-T Devices Ltd, England) 图像分析软件计算每件样品的根系长度，再将根系长度除以每件含根土样体积 (10 cm×10 cm×20 cm)，最终得到根长密度，mm/cm³。为减少空间变异对根长密度的影响，每个小区进行根系样品的采集，各处理取 3 个重复小区的平均结果。

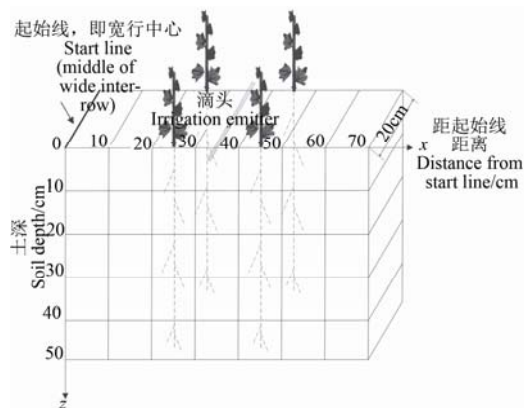


图 3 棉花根系取样空间布置图

Fig.3 Spatial layout of root sampling

采用围框法测量棉花产量：在各小区选取 3 处长势均匀、无缺苗区域（每处面积为 1.5 m×2.2 m），清数各处棉花结铃数，并采集 100 朵已吐絮的棉铃。将采集的棉铃置于室内清洁、干燥通风处天然风干，严禁暴晒，注意剔除外来侵入体，并在风干过程中经常翻动棉铃，直至棉铃质量恒定。用单位面积铃数和单铃质量推算各小区每公顷籽棉产量，不同处理的产量取 3 个小区的平均值。

1.3 样品测定方法

采用 M3 浸提法提取土壤样品中有效态铜、铁、锰、钙、钾、钠等元素^[18]：由精度为万分之一的天平准确称取 5 g 风干过筛后的土样于 100 mL 塑料浸提瓶中，加入 50 mL Mehlich 3 浸提剂^[19]（NH₄F-EDTA、冰醋酸和浓 HNO₃ 按一定比例的混合液），用水浴振荡器在 (25±2) ℃ 振荡 5 min（振荡强度为 180 r/min），然后用定量滤纸过滤浸提液，收集滤液于 50 mL 塑料瓶中。同时做空白对照。

棉絮样用 HNO₃-HClO₄-HF 消解体系在电热板上充分消解^[20]，提取其中铜、铁、锰、钙、钾、钠等元素：由精度为万分之一精确称量 0.5 g 干燥样品于 50 mL 聚四氟乙烯烧杯中，加入 5 mL HNO₃，加盖放置过夜。次日再

向烧杯中加入 1 mL HNO_3 、1 mL H_2O_2 和 0.5 mL HF ，控制电热板温度在 180 °C 条件下消化 5 h，去盖，将溶液缓慢加热至全干。向残渣中滴入 2 mL HClO_4 ，缓慢加热至冒白烟以驱除多余的 F^- 。冷却后，加入 2 mL HNO_3 ，缓慢加热以溶解残渣，最后，将溶液转移至 50 mL 容量瓶中，用去离子水稀释至刻度。同时做空白对照。

棉絮、土壤样品经酸法消解或浸提前处理后，用 ICP-OES (ICAP6300, Thermo Scientific, England) 测定溶液中铜、铁、锰、钙、钾、钠的含量，每个样品重复 3 次测量。

1.4 数据处理

溶质的表聚性可用表聚系数^[21]表征，即 0~10 cm 或 0~20 cm 溶质含量占 0~100 cm 土壤溶质总含量的比值，若表聚系数分别 >0.1 及 0.2，则该溶质具有表聚性，其计算公式如下：

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^m N_i \cdot D}{\sum_{i=1}^d N_i \cdot D}$$

式中： C_i 为 0~10 cm 或 0~20 cm 某种溶质含量占 0~100 cm 土壤溶质总含量的比值（表聚系数）； N_i 为第 i 层土壤溶质含量； D 为第 i 层土壤厚度，cm；对于 0~10 cm

厚度， $m=1$ ，对于 0~20 cm 厚度， $m=2$ ； d 为取样层次 10。

用 Excel 进行数据处理，用 Sufer 8.0 (Sufer 8.0, Golden Software Inc., USA) 绘制棉花根长密度在土壤剖面的等值线图，用 SPSS 19.0 (SPSS 19.0, SPSS Inc., USA) 对所获数据进行统计分析。

2 结果和分析

2.1 不同咸淡水处理下土壤剖面溶质时空变化特征

土壤中微量元素铜、铁、锰垂向分布特征相近，以铜为例（图 4a），2012 年溶质含量最高值位于 >20~30 cm，>30~70 cm 含量迅速降低（相对最高值减少 50%~78%），>70~100 cm 铜、铁、锰含量基本不随深度变化。2013 年（图 4c），铜、铁、锰含量最高值上移至 0~10 cm，>10~30 cm 含量迅速降低（相对最高值减少 53%~61%），>30~100 cm 铜、铁、锰含量基本不随深度变化。另外，2012 年咸水和轮灌处理下微量元素含量相近，40 cm 以上土壤中铜、铁、锰平均含量分别高于淡水处理 19%、12%、10%，40 cm 以下微量元素含量反而是淡水处理 > 轮灌、咸水处理（ $P < 0.05$ ）；受作物吸收、微量元素连续减少等因素的影响，2012—2013 年，土壤剖面铜、铁、锰平均质量分数降低约 40%，2013 年不同处理间，土壤剖面微量元素含量相近。

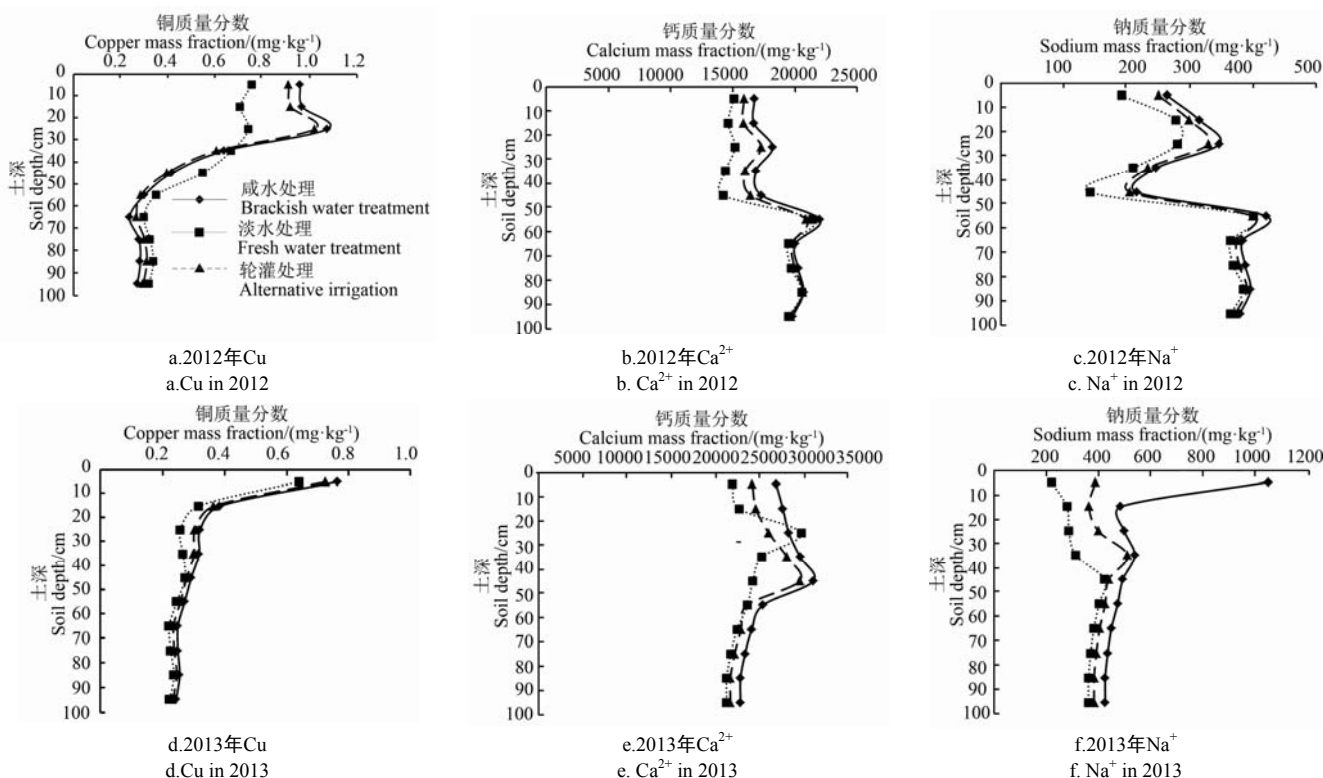


图 4 2012 和 2013 年土壤剖面溶质时空变化曲线

Fig.4 Temporal and spatial variation curves of solutes in soil profile in 2012 and 2013

2012 年，土壤中宏量元素钙、钾、钠的垂向分布特征相近，以钙为例（图 4b）：溶质含量峰值处于 >20~30 和 >50~60 cm，最高值位于 >50~60 cm，>60~70 cm 含量降低（相对最高值减少 15%~21%），>70~100 cm 钙、钾、钠含量不随深度变化。2013 年，钙、钾、钠含

量最高值上移，钙、钾的垂向分布特征一致（以钙为例，图 4d），钠与钙、钾的垂向分布差异较为明显（图 4e）：咸水和轮灌处理下钙、钾最高值位于 >40~50 cm，>50~60 cm 含量降低（相对最高值减少 20%），>60~100 cm 钙、钾含量基本不随深度变化；淡水处理下钙、

钾最高值上移至>20~30 cm, >30~100 cm 含量随深度增加逐渐降低; 咸水、轮灌和淡水处理下钠最高值分别位于 0~10、>30~40 和>40~50 cm, 最高值以下钠含量基本不随深度变化。另外, 受灌水、施肥带入溶质等因素的影响, 2012—2013 年, 钙、钾、钠平均质量分数增加 33%~45%, 不同处理间宏量元素含量的差异逐渐增大。

分析 2012 和 2013 年土壤剖面 6 种溶质的迁移特征发现(表 3): 2012 年, 微量元素铜、铁、锰在 0~10 cm 的表聚系数为 0.14~0.17, 0~20 cm 为 0.29~0.33, 满足

表聚条件, 但由图 4a 可知, 溶质主要聚集于 20~30 cm 深度内; 宏量元素钙、钾、钠在 0~10 cm 的表聚系数为 0.07~0.09, 在 0~20 cm 为 0.13~0.17, 并未发生表聚。2013 年, 铜、铁、锰在 0~10 cm 的表聚系数就超过了 0.20, 表明微量元素具有很强的表聚性; 钙、钾在 0~10 cm 的表聚系数为 0.10, 在 0~20 cm 为 0.2, 满足表聚条件但不是很明显; 钠在咸水处理下 0~10 cm 的表聚系数为 0.20, 表聚性强, 但在轮灌和淡水处理下的表聚系数均低于临界值, 无表聚现象。

表 3 各处理不同土层土壤剖面溶质的表聚系数
Table 3 Accumulation coefficients of six solutes in soil profile of different depths for each treatment

年份 Years	处理 Treatments	0~10 cm						0~20 cm					
		Cu	Fe	Mn	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cu	Fe	Mn	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺
2012	微咸水 S	0.18b	0.16 c	0.16 c	0.09 b	0.07 c	0.08 c	0.35 a	0.32 a	0.31a	0.18 bc	0.13 c	0.17 bc
	轮灌 A	0.17 bc	0.16 c	0.15 c	0.09 b	0.07 c	0.08 c	0.34 a	0.31 a	0.3 a	0.17 c	0.13 c	0.17 bc
	淡水 F	0.15 c	0.14 d	0.12 d	0.09 b	0.07 c	0.06 d	0.29 b	0.27 b	0.25 c	0.17 c	0.13 c	0.16 c
2013	微咸水 S	0.23a	0.22 a	0.21 a	0.1 a	0.1 a	0.2 a	0.34 a	0.32 a	0.31 a	0.21 a	0.21 a	0.29 a
	轮灌 A	0.23 a	0.21 ab	0.2 ab	0.1 a	0.1 a	0.09 b	0.34a	0.31 a	0.3 ab	0.2 ab	0.2 ab	0.18 b
	淡水 F	0.22 a	0.2 b	0.18 b	0.09 b	0.09 b	0.06 d	0.33 a	0.3 a	0.28 b	0.19 b	0.19 b	0.15 c

注: 样本数为 18。
Note: Sample size is 18.

Jóbbágy 等^[22]研究表明, 植被覆盖条件下, 溶质的分布深度随着其含量的降低而减小, 这将引起溶质的表聚。本试验条件下, 田间微量元素受棉花根系吸收、溶质随水运移等因素的影响, 加上未得到有效补充, 其含量逐年减少, 造成土壤剖面微量元素在 2012、2013 年均发生明显表聚, 且表聚系数逐年增加。此外, 在一定深度内, 受灌溉输入、植物截留和土壤蒸腾等共同影响, 轮灌和淡水处理下宏量元素钙、钾、钠的峰值虽然上移, 但始终在 20 cm 以下, 因此这 2 种处理下钙、钾、钠并未呈现显著表聚性; 咸水处理下, 钠的峰值上移至 0~10 cm, 土壤胶体吸附的钙、钾被高浓度的钠离子置换进入土壤溶液, 并随水流迁移^[23], 在根系吸收和土壤蒸发等因素共同作用下, 钙、钾峰值上升至 40~50 cm, 因此该处理下钠由未表聚转变为显著表聚, 而钙、钾表聚性不强。

分析不同咸淡水处理下棉絮器官的元素组成(表 4)发现: 2012 年, 咸水和轮灌处理下, 6 种元素含量相近, 且咸水处理下元素含量显著高于淡水处理; 2013 年, 3 种处理间微量元素铜、铁、锰含量差异不显著, 咸水处理下宏量元素钙、钾、钠含量显著增加($P<0.05$)。受土壤溶质含量变化的影响, 棉絮内元素含量可能产生相应的变化: 土壤微量元素铜、铁、锰含量逐年减少, 咸淡水处理间, 棉絮内元素含量的差异程度由显著变为不显著; 土壤宏量元素钙、钾、钠逐年增加, 咸水处理下, 随着土壤中钠离子的表聚, 棉絮内钠含量也显著增加。棉絮是形成棉花产量的重要器官, 其元素含量的变化反应了棉花对溶质的吸收情况, 不同咸淡水灌溉处理造成了土壤溶质分布的差异, 这可能对棉花生长和产量造成一定影响。

表 4 不同处理棉絮内元素组成
Table 4 Element composition in cotton bolls of different treatments

年份 Years	处理 Treatments	mg·kg ⁻¹					
		Cu	Fe	Mn	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺
2012	微咸水 S	2.63±0.07 a	109.1±2.4 a	7.5±0.6 a	1545±16 b	6763±23 b	264.2±4.2 b
	轮灌 A	2.38±0.06 ab	98.1±1.7 b	7.1±0.3 ab	1405±23 b	6424±47 bc	241.6±3.7 b
	淡水 F	2.21±0.06 b	59.8±0.5 c	6.8±0.2 b	1254±29 c	6111±76 c	163.1±4.1 c
2013	微咸水 S	2.31±0.05 b	61.8±3.1 c	6.9±0.4 ab	1715±20 a	7642±52 a	323.8±5.1 a
	轮灌 A	2.22±0.08 b	59.3±2.2 c	6.7±0.2 b	1457±18 b	6474±38 bc	248.2±4.3 b
	淡水 F	2.18±0.10 b	56.7±1.5 c	6.5±0.3 b	1290±21 c	6143±41 c	171.4±3.8 c

注: 样本数为 9。
Note: sample size is 9.

2.2 不同咸淡水处理对棉花根系生长的影响

如图 5 所示, 水平方向上, 棉花根长密度在窄行段(25~45 cm)最大, 宽行段(0~25 cm)次之, 膜间段最小(45~65 cm), 3 段分别占总根量的 24%、64%、12%,

这主要是因为窄行段是棉花主根分布范围, 且离滴头距离最近, 根系生长向水性造成根长密度在水平方向的差异^[24]。垂直方向上, 棉花根系主要分布于 0~40 cm 深度范围内, 占总根量的 91%~98%, 40 cm 以下根长密度骤

减,最大根长密度位于 20~30 cm,这与何雨江等^[25]的研究结果一致。不同处理间 0~50 cm 范围内棉花的总根长密度差异显著(表 5):2012 年,咸水处理下总根长密度(346 mm/cm³)高于轮灌(303 mm/cm³)和淡水(239 mm/cm³)处理;2013 年,总根长密度由大到小大小

依次为淡水(223 mm/cm³)、轮灌(199 mm/cm³)和咸水(152 mm/cm³)处理。另外,受总根长密度显著降低的影响,2012—2013 年,>40~50 cm 范围内棉花根长密度由 20 mm/cm³降低至 4 mm/cm³,主根区根系生长受抑造成棉花扎根深度由深变浅。

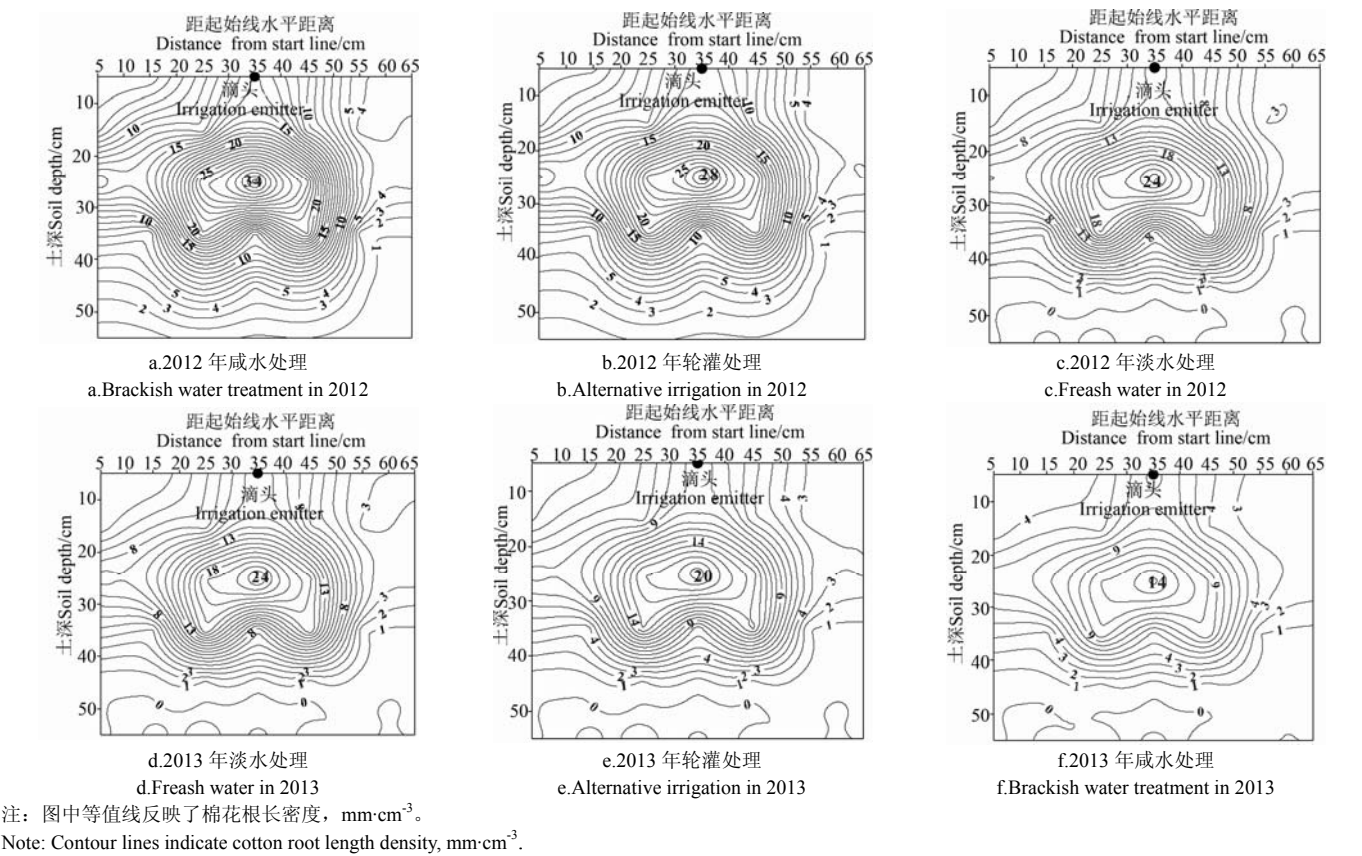


图 5 不同处理棉花根长密度
Fig. 5 Root length densities of cotton in different treatments

表 5 不同处理间 0~50 cm 土层内棉花总根长密度、地上部干物质与产量 Table 5 Total root length density in 0-50 cm soil layer, aboveground dry matter and yield of cotton in different treatments						
年份 Years	处理 Treatments	总根长密度 Total root length density/(mm·cm ⁻³)	单株地上部干物质 Aboveground dry matter per plant/g	单铃质量 Dry matter of one boll/g	单位面积铃数 Number of bolls per m ²	籽棉产量 Seed cotton yield/(kg·hm ⁻²)
2012	微咸水	345.5±13.5 a	87.4±3.9 a	6.014±0.534 a	120.5±14.7 a	7177±884 a
	轮灌	303.2±10.4 b	80.2±5.3 a	5.974±0.541 a	109.2±12.2 a	6460±806 a
	淡水	239.3±9.7 c	59.8±7.0 b	5.833±0.428 a	96.5±12.9 b	5570±754 b
2013	微咸水	151.8±8.9 e	39.1±3.5 d	5.902±0.522 a	80.6±12.5 c	4690±747 c
	轮灌	198.7±9.5 d	51.3±4.2 c	5.877±0.478 a	92.3±13.3 b	5363±752 b
	淡水	223.3±10.2 c	56.7±6.5 b	5.815±0.451 a	95.7±13.7 b	5503±788 b

注:总根长密度样本数为 3,其余指标样本数为 10。
Note: Sample size for total root length density is 3, whereas 10 for other indicators.

棉花根系发育受田间土壤水分、养分和盐害离子含量变化等因素的综合影响。本试验条件下,各处理的灌水量、施肥量一致,因此,不同咸淡水灌溉方式可能是造成棉花根系生长呈现差异的原因之一。由表 3、图 5 可知:微咸水灌溉条件下,盐害离子钠未发生表聚时,40 cm 以上土壤中微量元素含量显著增高($P<0.05$),2012 年棉花总根长密度、最大根长密度由大到小依次为咸水(图 5a)、轮灌(图 5b)、淡水(图 5c)处理;钠离子表聚时,土壤剖面微量元素在 3 种处理下差异不显著,咸水

和轮灌处理下钠最大值位于 40 cm 以上,淡水处理钠最大值位于 40~50 cm 且 20~30 cm 钙、钾含量较高,2013 年棉花总根长密度、最大根长密度由大到小依次为淡水(图 5d)、轮灌(图 5e)、咸水(图 5f)处理。作为耐盐性较强的作物,土壤中一定含量的溶质能够促进棉花根系的发育^[26],但在干旱区连续的全生育期微咸水灌溉可能造成盐害离子增长并在根层聚集^[27],这将不利于棉花根系的生长。试验结果表明,在根系生长旺盛的生育期(蕾期至花铃前期)采用淡水灌溉未造成土壤剖面钠

离子的表聚, 相比 2013 年咸水处理, 轮灌处理下总根长密度增加了 24%, 这在一定程度上缓解了盐害离子对根系生长的胁迫。

2.3 不同咸淡水处理对棉花生长及产量的影响

由表 5 可知, 不同处理间棉花单铃质量差异不显著。2012 年, 咸水和轮灌处理下, 单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量的结果相近, 这些指标显著高于淡水处理, 分别达 32%、20%和 22%; 2013 年, 咸水处理下, 单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量较 2012 年显著降低 ($P<0.05$), 而轮灌和淡水处理下, 单位面积铃数和籽棉产量结果相近, 均显著高于咸水处理约 17%。

棉花地上部生长及产量除受到灌溉、施肥等作用的影响外, 也与根系的发育状况直接相关。本试验条件下, 单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量与根系生长的变化趋势基本相同, 这与前人的研究结果一致^[27-28]。另外, 冯棣等^[29]认为, 棉花地上部干物质对盐分十分敏感, 在高盐害离子条件下, 该指标显著降低。还有研究表明, 低矿化度的微咸水灌溉对棉花的生殖生长具有一定的促进作用^[30], 在高浓度的溶质环境中, 棉花通过减少蕾、花、铃的数量, 使有限的营养物质向较少的生殖器官运输, 保证自身处于相对适宜的生长状态^[31]。这说明通过改变土壤环境, 不同咸淡水灌溉方式可能对棉花生长、产量造成一定影响, 因此, 可根据棉花生长特点, 在不同生育期选择合适的灌溉水质。试验结果表明 (表 5): 2012—2013 年, 咸水处理棉花总根长密度骤减, 导致该处理下单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量显著降低 ($P<0.05$); 轮灌处理下, 土壤盐害离子未发生表聚, 2013 年棉花总根长密度高于咸水处理达 24%, 地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量较咸水处理高出 13%~24%。咸淡水轮灌在一定程度上保证棉花正常生长并且稳定了籽棉产量, 是合理有效的灌溉模式。

3 结论与讨论

在干旱区合理利用微咸水进行农业灌溉, 不仅要发挥微咸水灌溉补水的作用, 还应积极探寻适宜作物生长、产量稳定的灌溉方式。除受到土壤水分、养分和盐分等因素的影响外, 不同的咸淡水灌溉方式通过改变土壤环境, 也可能对棉花根系生长造成一定影响。棉花地上部生长、产量与根系生长的变化趋势基本相同。

1) 2012 年, 微咸水灌溉条件下, 钠离子未发生表聚, 40 cm 以上土壤中微量元素含量显著增高 ($P<0.05$), 棉花总根长密度、最大根长密度呈咸水处理>轮灌处理>淡水处理, 咸水和轮灌处理下, 单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量显著高于淡水处理, 分别达 32%、20%和 22%。连续的全生育期微咸水灌溉可能造成盐害离子表聚, 2012—2013 年, 咸水处理棉花总根长密度骤减, 导致该处理下轮灌处理下单株棉花地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量显著降低 ($P<0.05$)。在

土壤盐害离子增加, 微量元素减少的情况下, 采用蕾期至花铃前期淡水灌溉、其余生育期微咸水灌溉的方式, 土壤盐害离子未发生表聚, 2013 年棉花总根长密度高于咸水处理达 24%, 地上部干物质、单位面积铃数和籽棉产量较咸水处理高出 13%~24%。咸淡水轮灌一定程度上促进了棉花根系生长, 缓解盐害离子对棉花造成的生长胁迫。但是轮灌并不能从根本上解决微量元素连续亏缺、钠离子表聚等问题, 因此在实际植棉过程中, 还需测土配方施肥, 依据土壤剖面养分元素、盐害离子时空变化特点制定合理的灌溉、施肥制度, 及时补充棉花生长所需的各种养分。

2) 不同咸淡水灌溉处理下, 土壤溶质迁移规律不同: 2012—2013 年, 土壤中铜、铁、锰平均质量分数降低约 40%, 最高值由 20~30 cm 上移至 0~10 cm, 0~10 cm 的表聚系数由 0.14~0.17 增长至超过 0.20, 具强烈的表聚性; 钙、钾、钠平均质量分数增加 33%~45%, 咸水和轮灌处理下钙、钾最高值上移至 40~50 cm, 淡水处理下钙、钾最高值上移至 20~30 cm, 咸水、轮灌和淡水处理下钠最高值分别上移至 0~10、>30~40 和 >40~50 cm; 3 种处理下钙、钾未表现出明显的表聚性, 而微咸水处理下钠由不表聚变为显著表聚, 0~10 cm 表聚系数达到 0.20。

[参 考 文 献]

- [1] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴: 2011—2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011—2014.
- [2] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 599—603.
Pang Huancheng, Yang Jinsong, Yan Huijun. Effects of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 599—603. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴忠东, 王全九. 微咸水混灌对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 69—73.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effects of blending irrigation with brackish water on soil physico-chemical properties and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 69—73. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吴忠东, 王全九. 微咸水非充分灌溉对土壤水盐分布与冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 36—42.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effects of deficit irrigation with brackish water on soil water-salt distribution and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 36—42. (in Chinese with English abstract)
- [5] 何雨江, 汪丙国, 王在敏, 等. 棉花微咸水膜下滴灌灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 14—20.
He Yujiang, Wang Bingguo, Wang Zaimin, et al. Study on irrigation scheduling of cotton under mulch drip irrigation with brackish water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 14—20. (in Chinese with English abstract)

- [6] Hanson B, Hopmans J W, Šimůnek J. Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 810—818.
- [7] Letey J, Hoffman G J, Hopmans J W, et al. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines[J]. *Agricultural water management*, 2011, 98(4): 502—506.
- [8] Wang Z, Jin M, Šimůnek J, et al. Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(1): 15—27.
- [9] 韩春丽. 新疆棉花长期连作土壤养分时空变化及可持续利用研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2010.
Han Chunli. Temporal and Spatial Variation of Soil Nutrients of Long-Term Monoculture Cotton Field and Soil Sustainable Utilization in Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [10] Jin Menggui, Zhang Renquan, Gao Yunfu. Sustainable irrigation with brackish groundwater in Hei Longgang region, China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1998, 9(1): 90—94.
- [11] Subbarao G V, Ito O, Berry W L, et al. Sodium - a functional plant nutrient[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22(5): 391—416.
- [12] Göransson H, Ingerslev M, Wallander H. The vertical distribution of N and K uptake in relation to root distribution and root uptake capacity in mature *Quercus robur*, *Fagus sylvatica* and *Picea abies* stands[J]. *Plant and soil*, 2008, 306(1-2): 129—137.
- [13] Abdu N, Abdulkadir A, Agbenin J O, et al. Vertical distribution of heavy metals in wastewater-irrigated vegetable garden soils of three West African cities[J]. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(3): 387—397.
- [14] Bai Junhong, Wang Qinggai, Deng Wei, et al. Spatial and seasonal distribution of nitrogen in marsh soils of a typical floodplain wetland in Northeast China[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2012, 184(3): 1253—1263.
- [15] 杨涛, 陈宝燕, 马兴旺, 等. 南疆高产棉田土壤养分现状调查[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(36): 212—218.
Yang Tao, Chen Baoyan, Ma Xinwang, et al. Survey of soil nutrients about high-yield cotton field in southern Xinjiang[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(36): 212—218. (in Chinese with English abstract)
- [16] USDA. USDA Soil Texture Calculator[EB/OL]. 2013-08-05 [2015-04-07]. http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/soils/?cid=nrcs142p2_054167
- [17] 何雨江. 干旱区膜下微咸水滴灌棉田水盐调控[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
He Yujiang. Soil Water and Salt Regulation of Cotton Field under Mulched Drip Irrigation of Brackish Water in Arid Zones[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [18] NY/T 1118-2006, 测土配方施肥技术规范[S].
- [19] Carter M R. Soil Sampling and Methods of Analysis[M]. New York: CRC Press, 1993.
- [20] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 50—55.
Han Fengpeng, Zheng Jiyong, Zhang Xingchang. Plant root system distribution and its effect on soil nutrient on slope land converted from farmland in the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25 (2): 50—55. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王小平. 不同分解方法对 ICP-AES 测定植物样品中元素含量的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(4): 563—566.
Wang Xiaoping. Comparison of different digestion methods used for the decomposition of plant samples in elemental quantification by using ICP-AES[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(4): 563—566. (in Chinese with English abstract)
- [22] Jobbágy E G, Jackson R B. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 53(1): 51—77.
- [23] 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 64—69.
Wu Zhongdong, Wang Quanjie. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM)*, 2010, 41(7): 64—67. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊 1): 98—105.
Liu Meixian, Yang Jingsong, Li Xiaoming, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(Supp.1): 98—105. (in Chinese with English abstract)
- [25] 何雨江, 靳孟贵, 王在敏, 等. 膜下滴灌棉花根系发育特征及其与土壤水盐分布的关系[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1): 39—44.
He Yujiang, Jin Menggui, Wang Zaimin, et al. Characteristics of cotton root development under mulch drip irrigation and their relationship with soil water and salt distribution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: some new advances[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2002, 21(1): 1—30.
- [27] Liu Meixian, Yang Jingsong, Li Xiaoming, et al. Distribution and dynamics of soil water and salt under different drip irrigation regimes in northwest China[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(4): 675—688.
- [28] Min Wei, Guo Huijuan, Zhou Guangwei, et al. Root distribution and growth of cotton as affected by drip irrigation with saline water[J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 1—10.
- [29] 陶先萍. 水氮调控对棉花根系生长及产量的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
Tao Xianping. Effect of Water and Nitrogen Application Control on Root Growth and Yield of Cotton (*Gossypium spp.*) [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [30] 冯棣, 张俊鹏, 孙景生, 等. 咸水畦灌棉花耐盐性鉴定指标与耐盐特征值研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 52—57.
Feng Di, Zhang Junpeng, Sun Jingsheng, et al. Cotton salt tolerance appraisal indices and eigenvalue under border irrigation with saline water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(8): 52—57. (in Chinese with English abstract)

- [31] 黄金瓯, 靳孟贵, 栗现文. 微咸水膜下滴灌对土壤和棉花元素组成及产量的影响[J]. 地球科学, 2014, 39(6): 751—759.
Huang Jinou, Jin Menggui, Li Xianwen. Influence of mulched drip-irrigation with brackish water on the element composition of soil and cotton and cotton yield[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(6): 751—759. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王在敏. 干旱区微咸水膜下滴灌棉花-水-溶质相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
Wang Zaimin. Study on the Cotton-Water-Solute Interactions under Mulched Drip Irrigation with Brackish Water in An Arid Area[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese with English abstract)

Effects of alternative irrigation with brackish and fresh water on cotton yields and solute transport in soil

Huang Jinou^{1,2}, Jin Menggui^{1,2*}, Li Xianwen^{2,3}

(1.State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2.School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In arid or semi-arid areas, brackish water is often used for irrigation because of water shortage and soil nutrient deficiency. However, irrational irrigation with brackish water may lead to the accumulation of saline ions such as sodium, which might inhibit plant growth or even crop failure. In this study, we investigated the relationship between different irrigation methods and crop growth and yield in order to find a proper method of irrigation and fertilization. In order to achieve this objective, 2 years of field experiments in 2012 and 2013 were conducted at the experimental station in Korla, Xinjiang, China. Three irrigation treatments with brackish water, fresh water and alternative irrigation (20% of fresh water at bud and early boll stages, 80% of brackish water at late boll and boll opening stages) in the whole growing season were designed. Cotton and soil samples (from 0-100 cm depth) were collected in 4 days after the last irrigation. Cotton root were sampled with square monolith method in the space of 70cm×20cm×50cm. Root length density was estimated with DT-SCAN software. Available content of copper, iron, magnesium, calcium, potassium, and sodium in soil samples were extracted with Mehlich 3 reagent. Element content of cotton bolls were extracted after wet acid digestion (HNO₃-HClO₄-HF). Then, they were determined in triplicate by inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES). Accumulation coefficient was defined as the ratio of nutrient content in soil layers of 0-10 cm or 0-20 cm to that in 0-100 cm, representing the element aggregation capability in topsoil. The results showed that when sodium did not accumulate in 2012, irrigation with brackish water significantly enlarge (compared to results in fresh water) the aboveground dry matter, numbers of bolls per unit area, and seed cotton yields by 32%, 20%, and 22%, respectively. Nevertheless, continuous irrigation using brackish water under heavy application of nitrogen fertilizer resulted in the surface aggregation of sodium, which significantly inhibited the root growth as well as aboveground dry matter and the yields. From 2012 to 2013, the total root length density decreased significantly under the brackish water treatment, which led to a sharp reduction of the aboveground dry matter, the numbers of bolls per unit area, and the seed cotton yields ($P<0.05$). In this case, the root length density, the aboveground dry matter, the numbers of bolls per unit area, and the seed cotton yields were improved by 12%-24% compared to the results for the brackish water treatment under the alternative irrigation. Moreover, the alternative irrigation did not essentially solve the problem of nutrient deficiency under the traditional cultivation pattern, thus a sustainable scheme of irrigation and fertilization should be made according to the solute variation in the soil. The average copper, iron, and magnesium in the soil profile reduced by 40% from 2012-2013 and the accumulation coefficients varied from 0.14-0.17 to over 0.20; however, the average calcium, potassium, and sodium increased by 33%-45% in the soil profile. For all treatments, calcium and potassium did not gather in the topsoil, whereas sodium under the brackish water treatment changed from weak to strong aggregation in the surface. This result provides valuable information for the rational irrigation and fertilization with brackish water in cotton cultivation.

Key words: irrigation; cotton; salinity; brackish water; root; yield; temporal and spatial variation