

doi:10.3799/dqkx.2015.169

NaCl 和 Zn 对棉花生长及营养元素吸收的影响

陈文岭^{1,2}, 靳孟贵^{1,2*}, 朱永惠^{1,2}, 王在敏^{2,3,4}

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
3. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059
4. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059

摘要: 微咸水在西北干旱区广泛分布, 越来越多地被运用于灌溉棉花(*Gossypium hirsutum* L.) 等作物. 微咸水中 NaCl 和微量元素含量比淡水高, 有关 NaCl 和微量元素各自对棉花生长的影响已有大量研究, 而他们对棉花生长的相互作用研究比较缺乏. 选取对棉花生长作用敏感的 NaCl 和微量元素 Zn, 开展不同 NaCl 和 Zn 浓度灌溉水盆栽试验. 结果表明, 缺 Zn 环境下, 在灌溉水电导率为 2.90~3.95 dS/m 的范围内, 随着电导率增大, NaCl 促进棉花根和地上部生长及皮棉产量增加. 富 Zn 环境下, 灌溉水电导率大于 5.04 dS/m 时, 随着电导率增大皮棉产量明显下降. 在灌溉水中 Zn 浓度为 0.192 0~3.068 0 $\mu\text{mol/L}$ 的范围内, Zn 浓度越大棉花营养生长越快; 大于 0.767 6 $\mu\text{mol/L}$ 时, 随着 Zn 浓度增大皮棉产量下降. 灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量的影响作用, 表现为相互拮抗作用关系. 棉花叶的 Ca、K、Mg、B 和 Fe 含量以及铃的 Cu 和 Zn 含量高于其他组织, Na 和 Mn 不易迁移, 易富集在棉花根部. Zn 在盐胁迫条件下影响棉花对营养元素的吸收, 使棉花体内相关营养元素含量发生变化, 进而影响棉花生长及产量.

关键词: 棉花; 盐胁迫; 锌; 拮抗作用; 营养元素; 吸收; 微量元素; 生态环境.

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2015)11-1887-09

收稿日期: 2015-02-02

Effects of NaCl and Zn on Growth and Nutrient Elements Uptake of Cotton

Chen Wenling^{1,2}, Jin Menggui^{1,2*}, Zhu Yonghui^{1,2}, Wang Zaimin^{2,3,4}

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
3. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Brackish water distributes widely in arid area of Northwest China and the NaCl and trace element contents in brackish water are higher than those in fresh water. Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) is likely to be affected by simultaneous NaCl and manganese toxicity stress when irrigated with brackish water. The crop yields including cotton (*Gossypium hirsutum* L.) are usually reduced by poor quality of irrigation water or the low contents of nutrient elements in soil. Many experiments indicate that some salinities in irrigation water or soil will affect the cotton growth and yield, and the predominant salt damage to cotton plant is from sodium (Na^+). Meanwhile proper nutrient supply for cotton plant, especially trace elements for cotton, is important. Cotton diseases and abnormal growth are caused by lack or excess of trace elements. However, it remains beyond our full understanding as to the combined effect of salinity and trace elements on cotton growth and its uptake of nutrient elements. Thus we selected the trace element zinc which is sensitive to cotton growth, and conducted a pot experiment including 24 different treatments in irrigation with 6 NaCl levels (0 mmol/L, 5 mmol/L, 15 mmol/L, 25 mmol/L, 35 mmol/L and 45 mmol/L) and 4 Zn levels (0.192 0 $\mu\text{mol/L}$, 0.767 6 $\mu\text{mol/L}$, 3.068 0 $\mu\text{mol/L}$ and 12.272 0 $\mu\text{mol/L}$) in three replicates randomly in a

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41172218).

作者简介: 陈文岭 (1989-), 男, 博士研究生, 主要从事水文循环与生态环境、水流与溶质运移研究. E-mail: chenwl0807@163.com

* 通讯作者: 靳孟贵, E-mail: mgjin@cug.edu.cn

引用格式: 陈文岭, 靳孟贵, 朱永惠, 等, 2015. NaCl 和 Zn 对棉花生长及营养元素吸收的影响. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1887-1895.

greenhouse at Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences. During the experiment, cotton growth of different treatments was measured every ten days after germination and cotton plants were harvested 197 days after sowing. The cotton bolls were harvested and air dried and weighed the wool without seeds to calculate the lint yields. Cotton samples of roots, stems, leaves and fruits were brushed to remove the sand and dusts, rinsed with deionized water; oven dried at 70 °C for two days and weighed dry weight. The dry matters of cotton for each treatment were triturated and sampled 0.5 g for acid digestion. Twenty-seven elements were measured in triplicate by ICP-OES (ICAP6300, Thermo Scientific, England). Nine of the 27 elements i. e. K, Ca, Mg, Na, B, Cu, Fe, Mn and Zn (cotton nutrient elements) are chosen for analysis in this paper. The results show that salinity promoted cotton root, stem growth and cotton lint yields when electrical conductivities (EC) of irrigation water fell in the range of 2.90 to 3.95 dS/m in the zinc deficiency environment. While in the zinc-rich environment, salinity inhibited cotton lint yields when EC was greater than 5.04 dS/m. Cotton plant vegetative growth become faster when Zn concentration of irrigation water in the range of 0.192 to 3.068 $\mu\text{mol/L}$, while when Zn concentration was greater than 0.767 $\mu\text{mol/L}$ would cause cotton plant lint yields decline. Analysis of variance among cotton growth, root and stem dry weight parameters revealed significant influence by salinity effect but not by Zn. Cotton lint yield parameters revealed that the effect of Zn was more obvious than salinity. Interactive effect on cotton growth and yield between NaCl and Zn in the irrigation water was not observed but antagonistic effect was observed. Contents of nutrient elements Ca, K, Mg, B and Fe, in cotton leaves were higher than those in other organizations. Nutrient elements Cu and Zn in cotton bolls were higher than other organizations. Nutrient elements Na and Mn were not so movable that they are easily accumulated in roots. Zn concentration levels in irrigation water under salinity stress affected the nutrient elements uptake of cotton, caused different contents of nutrient elements in cotton, and then influenced cotton growth and yields.

Key words: cotton; NaCl-stress; zinc; antagonistic effect; nutrient element; absorption; trace element; environment.

国内外关于灌溉水中盐害离子对棉花生长及产量的影响和棉花营养元素需求做了大量研究工作,取得一些重要成果. Robin *et al.* (1983)和 Leidi and Saiz(1997)提出棉花的盐害主要来源于土壤中的 Na 离子. 当土壤或灌溉水中盐分过多时将棉花产生盐害,影响棉花生长及产量(Vulkan-Levy *et al.*, 1998; 武雪萍等, 2010; 王在敏等, 2012; 张俊鹏等, 2014), 究其原因主要是土壤耕层中过多的盐离子将通过离子毒害、渗透胁迫、营养失衡等机制对棉花产生盐害, 导致棉花减产(Qadir and Shams, 1997; Ashraf, 2002; Chen *et al.*, 2010). 近年来, 土壤中微量营养元素对棉花生长的作用也越来越得到重视(黄金瓯等, 2014), 土壤中微量元素缺乏会引发棉花黄叶、缺绿、棉铃脱落等各种病虫害(Foy *et al.*, 1995; 黄慧等, 2007), 但微量元素过量, 也将对棉花产生毒害并抑制棉花生长, 降低产量(Rehab and Wallace, 1978; Hocking, 1981; Samuel and Derrick, 2005). 相关营养元素含量在棉花体内的高低不同将影响棉花生理活动, 进而影响棉花生长(Mu *et al.*, 2001). 纵观国内外关于盐害离子和微量元素对棉花响应的研究, 大多是研究它们各自对棉花生长的影响, 很少将盐害和特定微量元素结合起来, 研究它们对棉花生长及元素吸收的影响. Yermiyahu *et al.* (2008)通过盆栽试验研究, 发现 NaCl 和微量元素 B 对灯笼椒(*Capsicum annum L.*)生长

存在相互拮抗作用关系. 汪啸等(2014)通过不同 NaCl 和 Mn 浓度灌溉水盆栽试验, 发现 NaCl 和 Mn 对棉花生长及产量存在拮抗效应. 而关于灌溉水中 NaCl 和微量元素 Zn 对棉花生长及营养元素吸收的影响研究还未见报道. 因此, 本文选取对棉花生长作用敏感的 NaCl 和微量元素 Zn(支金虎等, 2010), 开展不同 NaCl 和 Zn 浓度灌溉水盆栽试验, 研究 NaCl 和 Zn 对棉花生长的相互作用, 探讨灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长及营养元素吸收的影响.

1 试验材料与方法

不同 NaCl 和 Zn 浓度灌溉水盆栽试验在中国科学院武汉植物园(30°32'N, 114°25'E)温室大棚里完成. 该试验于 2013 年 4 月 8 日播种育苗, 4 月 13 日出苗, 5 月 4 日移栽, 6 月 5 日进入蕾期, 6 月 18 日进入花期, 6 月 26 日打顶, 7 月 1 日进入铃期, 8 月 5 日进入吐絮期, 10 月 21 日进行棉花植株样品取样, 历时 197 d. 供试棉花品种为鄂杂棉 16, 棉花采用营养钵育苗, 每个营养钵播种 2 棵, 待棉花开始长出 2 片真叶, 将 2 株棉花幼苗移栽在 26 cm 高、上部和下部直径分别为 21 cm 和 26 cm 且装有基质为细砂的桶里, 桶底部打孔, 并用海绵垫好保证透气, 细砂经过自来水冲洗干净, 充分混合均匀后每桶填

装至桶高 21 cm 处, 留取 5 cm 空间, 使得每桶盆栽的细砂基质具有相同重量. 最后选留 2 株棉苗中长势较好的一株.

在实验室里按配方配好荷格伦特营养液, 营养液中含 15 mmol/L 的 N、1 mmol/L 的 P、6 mmol/L 的 K、5 mmol/L 的 Ca、2 mmol/L 的 Mg、2 mmol/L 的 S、0.05 mmol/L 的 B、10 μ mol/L 的 Fe、9.188 μ mol/L 的 Mn、0.32 μ mol/L 的 Cu、0.111 μ mol/L 的 Mo. 在棉花育苗阶段每天按上述营养液用喷壶喷洒两壶共 3 L, 使每个营养钵基质保持湿润, 保证棉花的出苗和生长. 棉苗移栽一周后(5 月 11 日), 开始往营养液中加入 NaCl 和 Zn; 在实验室内配好 NaCl 和 ZnSO₄ 浓缩液, 于营养液中滴加相应量 NaCl 浓缩液, 使 6 个水平营养液中 NaCl 浓度分别为: 0 mmol/L、5 mmol/L、15 mmol/L、25 mmol/L、35 mmol/L 和 45 mmol/L, 并在室温 25 $^{\circ}$ C 条件下测得对应营养液电导率分别为 2.36 dS/m、2.90 dS/m、3.95 dS/m、5.04 dS/m、6.11 dS/m 和 7.17 dS/m. 于营养液中滴加相应量 ZnSO₄ 浓缩液, 使 4 个水平营养液中 Zn 浓度分别为: 0.192 μ mol/L、0.767 μ mol/L、3.068 μ mol/L 和 12.272 μ mol/L. 这样盆栽试验共有 24 个不同处理, 每个处理设 3 个平行试验. 棉花不同生育期营养液浇灌频次为苗期、蕾期和吐絮前期每隔 3 天 1 次, 花铃期每天 1 次, 每次浇灌营养液 500 mL, 到棉花进入吐絮盛期(8 月 21 日)停止浇灌.

试验过程中, 待棉苗完全长出 2 片真叶(5 月 7 日)后, 每隔 10 d 记录一次棉花株高, 打顶后不再测株高, 将每个处理下 3 个重复的所得株高求取平均值, 作为该处理下的棉花株高. 棉花进入吐絮期时, 及时收取籽棉棉絮, 待棉花生育期结束后, 收取每株棉花的结铃, 风干后将籽棉絮去籽测得各处理下 3 个重复的单株棉花皮棉产量, 求取平均值作为该处理下棉花的单株皮棉产量. 并将每个处理下 3 个重复的棉花植株样品, 分为根、茎、叶和铃 4 部分, 先用自来水冲洗, 再用去离子水洗净装入纸袋, 置于烘箱, 105 $^{\circ}$ C 杀青半小时, 70 $^{\circ}$ C 烘干 48 h 至恒重, 分别称量干物质重, 求取平均值作为该处理棉花各部分干物质重. 选取灌溉水中 NaCl 在低、中、高浓度(5 mmol/L、25 mmol/L、45 mmol/L)和 Zn 在低、中、高浓度(0.192 μ mol/L、3.068 μ mol/L、12.272 μ mol/L)处理下的棉花组织样品, 将烘干后的样品磨碎、过 40 目筛备用. 取混合均匀后每个处理下 3 个重复的棉花的各组织样品 0.5 g, 采用 HNO₃-HF-HClO₄ 湿法消解(赵宁等, 2009), 消解

完成后, 利用 ICP-OES(ICAP6300, Thermo Scientific, England)测定棉花组织的 27 种元素含量(王小平和李柏, 2010; 陈春飞等, 2014), 最后测得各棉花组织中相关元素含量平均值, 主要包括 K、Ca、Mg、Na、B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 等元素.

2 结果分析

2.1 灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长及产量的影响

2.1.1 灌溉水中 NaCl 在缺 Zn 和富 Zn 环境下对棉花生长和产量的影响 以棉花株高(6 月 26 株高)、根及地上部干重和单株皮棉产量为例, 分析灌溉水中 NaCl 在缺 Zn(0.192 μ mol/L)和富 Zn(12.272 μ mol/L)环境下(黄慧等, 2007)对棉花生长和产量的影响(图 1).

从图 1 中棉花株高变化可以看出, 缺 Zn 与富 Zn 环境下, 棉花株高随不同电导率灌溉水的变化大致相同, 当灌溉水电导率为 2.36~2.90 dS/m 时, 电导率越大株高越高. 灌溉水电导率为 2.90 dS/m 时, 株高最高; 大于 2.90 dS/m 时, 随着电导率增大, NaCl 抑制棉花株高生长. 从根和地上部干重变化图可以看出, 缺 Zn 环境下, 灌溉水电导率为 2.36 dS/m 时, 根干重最大; 电导率为 3.95 dS/m 时, 地上部干重最大. 当灌溉水电导率为 2.90~3.95 dS/m 时, 随着电导率增大, NaCl 促进根和地上部生长; 大于 3.95 dS/m 时, 电导率越大, 根和地上部干重越小. 富 Zn 环境下, 灌溉水电导率为 6.11 dS/m 时, 棉花根干重最大; 电导率为 2.36 dS/m 时, 地上部干重最大. 灌溉水电导率为 2.36~5.04 dS/m 时, 随着电导率增大, NaCl 抑制地上部生长. 电导率为 5.04~6.11 dS/m 时, 随着电导率增大, NaCl 促进根和地上部生长; 大于 6.11 dS/m 时, 电导率越大, 根和地上部干重越小. 从皮棉产量变化(图 1)可以看出, 缺 Zn 环境下, 皮棉产量在灌溉水电导率为 3.95 dS/m 时最大, 在电导率为 6.11 dS/m 时最小. 当灌溉水电导率为 2.36~3.95 dS/m 时, 电导率越大, 皮棉产量越大; 电导率大于 3.95 dS/m 时皮棉产量出现下降. 富 Zn 环境下, 灌溉水电导率为 5.04 dS/m 时, 皮棉产量最大, 电导率大于 5.04 dS/m 时, 随着电导率增大皮棉产量明显下降.

2.1.2 灌溉水中 Zn 对棉花生长和产量的影响 灌溉水 NaCl 浓度在 0 mmol/L (即电导率为

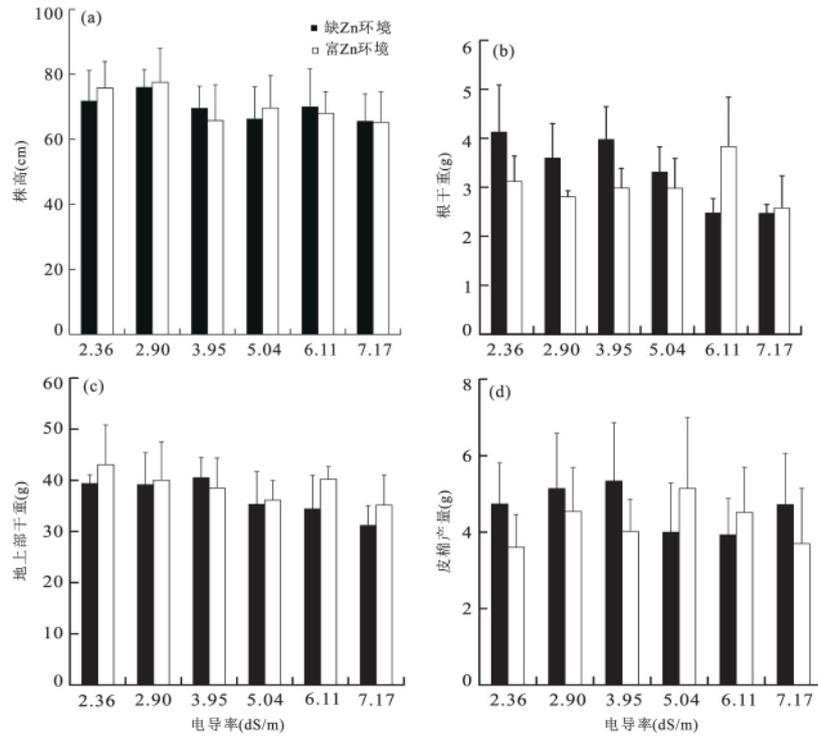


图 1 缺 Zn 与富 Zn 环境下不同电导率灌溉水的棉花株高、干物质重和皮棉产量变化

Fig. 1 Cotton plant height, dry weight and lint yields of different electrical conductivities in irrigation water with Zn deficiency and Zn-rich environment

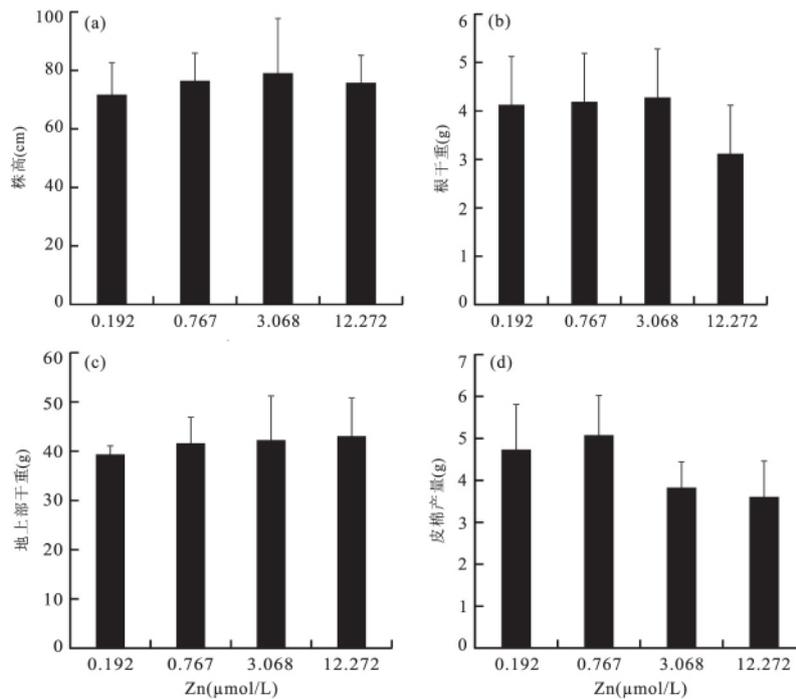


图 2 不同 Zn 浓度灌溉水的棉花株高、干物质重和皮棉产量

Fig. 2 Cotton plant height, dry weight and lint yields irrigated with water of different Zn concentration

2.36 dS/m)时的棉花株高(6月26日株高)、根及地上部干物质重和棉花单株皮棉产量随灌溉水不同

Zn 浓度变化如图 2 所示.

由图 2 可以看出,当灌溉水 Zn 浓度为 0.192~

3.068 $\mu\text{mol/L}$ 时,随着 Zn 浓度增大,Zn 促进棉花营养生长,棉花株高、根和地上部干重越大。灌溉水中 Zn 浓度大于 3.068 $\mu\text{mol/L}$ 时,随着 Zn 浓度增大,Zn 抑制棉花营养生长,棉花株高、根和地上部干重越小。当灌溉水中 Zn 浓度为 0.192 ~ 0.767 $\mu\text{mol/L}$ 时,Zn 浓度越大,皮棉产量越大;大于 0.767 $\mu\text{mol/L}$ 时,随着 Zn 浓度增大皮棉产量下降。

2.2 灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量的协同拮抗作用

为分析灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量的协同拮抗作用,首先要讨论它们对棉花生长和产量是否存在交互效应。利用 SPSS19.0 软件对不同 NaCl 和 Zn 浓度灌溉水盆栽试验的棉花株高、干物质重和单株皮棉产量数据进行两因素方差分析 (Yermiyahu *et al.*, 2008),置信区间设定为 $\alpha = 0.05$,方差分析结果见表 1。表 1 中 P 值为两因素方差分析的显著性水平检验值,在设定的置信区间内, P 值越小则反映该因素对棉花生长或产量的影响越显著。由表 1 可知,棉花营养生长(株高、根和地上部干物质重)受灌溉水中 NaCl 影响显著 ($P < 0.05$),但受 Zn 影响不明显 ($P > 0.05$)。皮棉产量受灌溉水中 Zn 影响比受 NaCl 影响更为明显。两因子方差分析的 P 值显示灌溉水中 NaCl 与 Zn 对棉花生长和产量的影响不存在交互效应 ($P > 0.05$)。因此可以独立地讨论灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量的影响,利用雅培方程讨论它们对棉花生长和产量的相互作用是表现简单的叠加效应还是相互协同或拮抗的作用关系 (Levy *et al.*, 1986)。

两因子的协同或拮抗作用是指当他们相互作用时,一个因子对另一个因子起到促进或抑制作用,使得实际观测值比预期值大或小的现象。为评价灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量的协同或拮抗作用,引入协同因子 SF (全称为 synergy factor; Levy *et al.*, 1986) 概念。SF 的计算公式为:

$$SF = \frac{RGO_{x,y}}{RGE_{x,y}} \quad (1)$$

式(1)中 $RGO_{x,y}$ 是在灌溉水中 NaCl 浓度为 x 、Zn 浓度为 y 处理下实测棉花生长或产量的相对值; $RGE_{x,y}$ 是在灌溉水中 NaCl 浓度为 x 、Zn 浓度为 y 处理下棉花生长或产量的期望值。协同因子 SF 就是灌溉水中 NaCl 和 Zn 两因子作用下得到的棉花生长或产量的实际观测值与期望值比值。本文用 SF 值评价 NaCl 和 Zn 对棉花生长或产量的相互作用。

期望值 $RGE_{x,y}$ 的计算公式为:

表 1 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量交互作用两因子方差分析的显著性水平检验 P 值

Table 1 P values for the two-way analyses of variance conducted to determine the interactive effects of NaCl and Zn on the cotton growth and yields

| 来源 | 株高 (%) | 根干重 (g) | 地上部 (g) | 皮棉产量 (g) |
|---------|--------|---------|---------|----------|
| NaCl | 0.015 | 0.001 | 0.010 | 0.965 |
| Zn | 0.972 | 0.315 | 0.529 | 0.772 |
| NaCl+Zn | 1.000 | 0.137 | 0.998 | 0.848 |

表 2 不同处理下棉花株高、干物质重和皮棉产量相对值

Table 2 The relative growth, dry weigh and lint yields of cotton in different treatments

| Na (mmol/L) | Zn ($\mu\text{mol/L}$) | 株高 (cm) | 干重(%) | | |
|-------------|--------------------------|---------|--------|--------|--------|
| | | | 根 | 地上部 | 皮棉产量 |
| 0 | 0.192 | 90.73 | 75.87 | 91.39 | 88.71 |
| 5 | 0.192 | 96.04 | 66.54 | 90.89 | 96.35 |
| 15 | 0.192 | 87.92 | 85.37 | 94.04 | 100.00 |
| 25 | 0.192 | 83.71 | 66.36 | 82.01 | 74.89 |
| 35 | 0.192 | 86.85 | 44.24 | 79.89 | 73.63 |
| 45 | 0.192 | 81.75 | 47.71 | 72.46 | 88.38 |
| 0 | 0.767 | 96.74 | 89.21 | 96.63 | 95.18 |
| 5 | 0.767 | 95.07 | 64.72 | 87.61 | 67.49 |
| 15 | 0.767 | 85.08 | 74.04 | 83.55 | 77.47 |
| 25 | 0.767 | 76.23 | 62.71 | 75.62 | 80.42 |
| 35 | 0.767 | 88.45 | 69.29 | 82.56 | 88.38 |
| 45 | 0.767 | 82.89 | 74.41 | 76.90 | 77.33 |
| 0 | 3.068 | 100.00 | 86.65 | 98.17 | 71.76 |
| 5 | 3.068 | 96.61 | 69.65 | 94.25 | 82.53 |
| 15 | 3.068 | 89.19 | 57.59 | 83.80 | 88.06 |
| 25 | 3.068 | 83.97 | 52.10 | 85.08 | 85.57 |
| 35 | 3.068 | 86.87 | 59.23 | 80.62 | 81.26 |
| 45 | 3.068 | 78.09 | 49.18 | 76.08 | 72.46 |
| 0 | 12.272 | 95.85 | 54.48 | 100.00 | 67.54 |
| 5 | 12.272 | 98.04 | 47.71 | 92.96 | 85.01 |
| 15 | 12.272 | 83.14 | 53.75 | 89.40 | 75.27 |
| 25 | 12.272 | 88.01 | 51.19 | 83.85 | 96.35 |
| 35 | 12.272 | 85.99 | 100.00 | 93.38 | 84.59 |
| 45 | 12.272 | 82.45 | 63.99 | 81.62 | 69.32 |

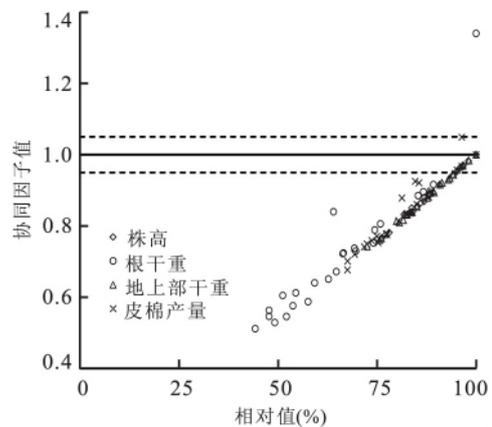


图 3 协同因子与棉花生长和产量相对值关系

Fig. 3 Synergy factor (SF) as a function of relative cotton growth and yields

实线表示 $SF=1$,虚线为设置置信区间

$$RGE_{x,y} = RG_x + RG_y - RG_x \frac{RG_y}{100} \quad (2)$$

表 3 不同 NaCl 和 Zn 浓度处理下棉花根、茎、叶和铃的营养元素含量

Table 3 Nutrient elements content in cotton roots, stems, leaves and bolls of different NaCl and Zn levels treatments

| 组织样品 | Na(mmol/L) | Zn($\mu\text{mol/L}$) | 常量元素($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) | | | | 微量元素($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) | | | | |
|------|------------|-------------------------|---|------|-----|------|---|-------|-------|-------|------|
| | | | Ca | K | Mg | Na | B | Cu | Fe | Mn | Zn |
| 根 | 5 | 0.192 | 3.2 | 13.2 | 2.0 | 6.3 | 14.8 | 5.0 | 262.5 | 119.2 | 9.3 |
| | 25 | 0.192 | 2.7 | 12.4 | 2.0 | 9.6 | 11.5 | 3.8 | 137.2 | 89.6 | 9.3 |
| | 45 | 0.192 | 2.2 | 11.4 | 1.6 | 9.7 | 9.9 | 3.2 | 83.2 | 70.1 | 6.5 |
| | 5 | 3.068 | 3.0 | 14.3 | 2.1 | 6.1 | 11.2 | 3.6 | 192.0 | 7.8 | 12.1 |
| | 25 | 3.068 | 2.6 | 13.0 | 1.8 | 10.4 | 10.7 | 3.0 | 147.9 | 7.2 | 10.0 |
| | 45 | 3.068 | 2.8 | 11.8 | 2.0 | 11.4 | 10.6 | 3.4 | 154.9 | 7.7 | 15.4 |
| | 5 | 12.272 | 2.4 | 13.4 | 1.6 | 4.8 | 11.0 | 3.0 | 115.7 | 62.6 | 5.9 |
| | 25 | 12.272 | 2.8 | 13.6 | 1.8 | 11.7 | 11.7 | 3.1 | 132.5 | 93.4 | 5.9 |
| | 45 | 12.272 | 2.2 | 10.1 | 1.6 | 14.6 | 10.8 | 3.1 | 88.8 | 60.9 | 4.8 |
| 茎 | 5 | 0.192 | 5.2 | 14.2 | 2.5 | 5.2 | 10.7 | 2.5 | 26.7 | 6.9 | 11.5 |
| | 25 | 0.192 | 4.6 | 12.5 | 2.5 | 9.9 | 8.1 | 2.9 | 13.8 | 7.6 | 17.3 |
| | 45 | 0.192 | 4.7 | 11.5 | 2.1 | 12.0 | 8.5 | 3.8 | 7.1 | 7.7 | 16.0 |
| | 5 | 3.068 | 6.1 | 18.8 | 3.0 | 5.2 | 11.5 | 2.8 | 49.3 | 6.9 | 11.0 |
| | 25 | 3.068 | 5.8 | 14.8 | 2.4 | 13.4 | 12.4 | 2.7 | 46.5 | 7.8 | 11.2 |
| | 45 | 3.068 | 5.1 | 13.1 | 2.2 | 14.1 | 11.7 | 3.3 | 42.7 | 7.6 | 16.7 |
| | 5 | 12.272 | 4.7 | 13.8 | 2.4 | 4.4 | 6.8 | 2.2 | 11.9 | 5.9 | 11.6 |
| | 25 | 12.272 | 4.4 | 11.8 | 2.1 | 12.4 | 7.3 | 3.6 | 32.5 | 6.4 | 11.5 |
| | 45 | 12.272 | 4.5 | 10.3 | 2.1 | 16.8 | 8.9 | 3.3 | 15.9 | 6.2 | 18.6 |
| 叶 | 5 | 0.192 | 30.8 | 31.2 | 6.2 | 5.1 | 88.9 | 6.9 | 229.7 | 56.0 | 20.9 |
| | 25 | 0.192 | 32.4 | 26.5 | 6.3 | 9.5 | 87.7 | 5.5 | 381.8 | 67.5 | 24.6 |
| | 45 | 0.192 | 30.2 | 29.2 | 6.5 | 9.0 | 91.5 | 5.9 | 274.9 | 65.7 | 24.1 |
| | 5 | 3.068 | 34.4 | 28.9 | 6.4 | 6.5 | 96.4 | 3.7 | 235.5 | 59.0 | 22.2 |
| | 25 | 3.068 | 34.2 | 22.5 | 6.7 | 10.3 | 100.5 | 4.4 | 385.4 | 73.4 | 26.6 |
| | 45 | 3.068 | 27.1 | 22.9 | 6.5 | 10.7 | 94.3 | 4.3 | 300.3 | 66.8 | 26.3 |
| | 5 | 12.272 | 32.4 | 27.2 | 6.5 | 4.6 | 89.7 | 5.6 | 301.5 | 59.9 | 31.5 |
| | 25 | 12.272 | 35.2 | 22.3 | 6.6 | 10.6 | 90.8 | 5.5 | 307.0 | 65.4 | 23.4 |
| | 45 | 12.272 | 32.7 | 20.9 | 7.2 | 10.2 | 97.1 | 5.2 | 343.6 | 60.2 | 32.3 |
| 铃 | 5 | 0.192 | 2.6 | 11.4 | 1.7 | 0.3 | 12.6 | 121.1 | 63.8 | 13.4 | 31.1 |
| | 25 | 0.192 | 3.1 | 15.5 | 1.9 | 0.6 | 16.0 | 90.9 | 57.7 | 12.7 | 30.5 |
| | 45 | 0.192 | 3.0 | 18.1 | 2.2 | 1.1 | 15.0 | 82.2 | 56.5 | 14.7 | 39.3 |
| | 5 | 3.068 | 3.1 | 9.8 | 1.6 | 0.3 | 11.6 | 552.9 | 174.0 | 16.8 | 69.8 |
| | 25 | 3.068 | 2.2 | 11.6 | 1.5 | 0.5 | 10.0 | 210.5 | 57.2 | 13.5 | 40.7 |
| | 45 | 3.068 | 2.1 | 10.3 | 1.3 | 0.7 | 10.3 | 330.3 | 68.7 | 13.7 | 46.4 |
| | 5 | 12.272 | 3.6 | 17.2 | 2.2 | 0.4 | 17.3 | 118.4 | 66.8 | 58.8 | 29.7 |
| | 25 | 12.272 | 2.9 | 19.5 | 2.0 | 1.0 | 17.2 | 162.0 | 64.7 | 14.7 | 40.4 |
| | 45 | 12.272 | 2.4 | 17.4 | 1.8 | 0.9 | 15.2 | 161.2 | 54.6 | 14.1 | 38.4 |

注:DW 为干物质重量.

式(2)中 RG_x 是某个处理下实测棉花生长或产量的相对值,该处理灌溉水中 NaCl 浓度为 x , Zn 浓度为最小值; RG_y 是某个处理下实测棉花或产量的相对值,该处理灌溉水中 NaCl 浓度为最小值, Zn 浓度为 y .

棉花生长和产量的相对值计算公式为:

$$RG = 100 \frac{G_i}{G_{\max}}, \quad (3)$$

式(3)中 RG 是试验所得棉花生长或产量的相对值, G_i 为灌溉水中 i 处理下所得棉花生长或产量的实测值, G_{\max} 是所有处理中棉花生长或产量的最大值.

按上述公式计算,盆栽试验不同灌溉水处理下棉花株高、干物质重和单株皮棉产量相对值见表 2.

结合盆栽试验不同灌溉水处理下棉花株高、干物质重和皮棉产量相对值,按式(1)和式(2)即可算出对应不同处理下的协同因子值.以棉花株高、根及地上部干重和皮棉产量相对值为横坐标,对应处理下的协同因子值为纵坐标绘制散点图(图 3).散点图中水平实线表示 $SF=1$,实线上下虚线为设置的置信区间.若 $SF=1$,点落在两条虚线中间,则说明在设置的置信区间内,灌溉水中 NaCl 与 Zn 对棉花生长和产量的影响作用为简单的相互叠加,没有相互作用关系(协同或拮抗作用).如果点落在虚线之外,则它们表现为协同或拮抗作用,不是相互叠加.若 $SF > 1$,点落在上边的虚线之外,则灌溉水中

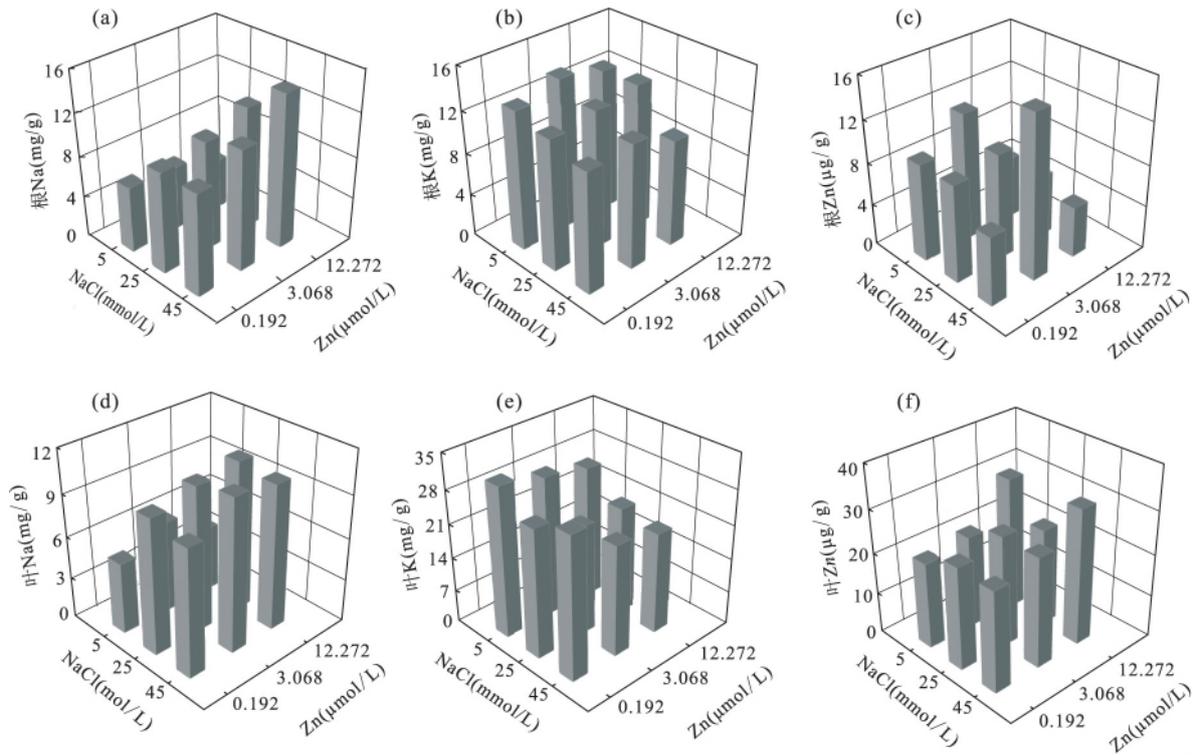


图 4 营养元素 Na、K 和 Zn 在棉花根及叶片含量分布

Fig. 4 The different contents of nutrient elements Na, K and Zn in cotton roots and leaves

NaCl 与 Zn 对棉花生长和产量的影响为相互协同作用. 若 $SF < 1$, 点落在下边虚线之外, 则灌溉水中 NaCl 与 Zn 对棉花生长和产量的影响为相互拮抗作用 (Levy *et al.*, 1986; Yermiyahu *et al.*, 2008).

由图 4 可以看出, 棉花株高、干物质重和产量协同因子值变化范围为 0.51~1.34. 图 4 中显示大部分点(96%)的 SF 值都小于 1, 只有根干重和皮棉产量的 SF 值各自有一个大于 1, 且求得他们各自 SF 平均值分别为 0.77、0.51、0.74 和 0.68, 都小于 0.95. 说明在设置的置信区间 $\alpha=0.05$ 内, 灌溉水中 NaCl 与 Zn 对棉花株高、根及地上部干重和皮棉产量的影响为相互拮抗作用. 根据上述分析, 灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量的影响作用不是简单的相互叠加效应, 而表现为明显的相互拮抗作用关系.

2.3 灌溉水中 Zn 在盐胁迫条件下对棉花营养元素吸收的影响

选定灌溉水 NaCl 分别在低、中、高浓度 (5 mmol/L、25 mmol/L、45 mmol/L), 对应不同 Zn 浓度 (0.192 μmol/L、3.068 μmol/L、12.272 μmol/L) 处理的 3 个重复棉花进行取样, 测定不同组织样品营养元素含量, 测得的营养元素含量平均值见表 3. 由表 3 可知, Ca、K、Mg、B 和 Fe 在棉花叶中的含量最高. Cu

和 Zn 在铃的含量高于其他组织, Na 在根和茎中的含量高于其他组织, Mn 在根中的含量高于其他组织. 上述营养元素含量的分布规律说明, Na 和 Mn 受棉花蒸腾作用影响最小, 不易随水分迁移而积累在根部, 其他营养元素受棉花蒸腾作用影响明显, Ca、K、Mg、B 和 Fe 随水分迁移到棉花叶中, Cu 和 Zn 积累在棉花铃中.

笔者选择棉花主要盐害离子 Na、棉花所需大量营养元素 K 和对棉花生长敏感的微量元素 Zn 为例, 分析灌溉水中 Zn 在盐胁迫条件下对棉花相关营养元素吸收的影响. 为更好地看出它们在棉花根及叶片组织中随灌溉水不同 NaCl 和 Zn 浓度处理的含量分布及迁移变化特征, 笔者作出它们各自的三维图(图 4).

由图 4 可以看出, 在盐胁迫条件下, 灌溉水中 NaCl 浓度越大, Na 离子在棉花根和叶中含量越多, 且灌溉水中 NaCl 浓度对棉花根部吸收 Na 离子有显著影响. 在中、高浓度盐胁迫条件下, 随着灌溉水中 Zn 浓度增加, Zn 促进棉花根系对 Na 离子的吸收和 Na 离子向叶片的迁移积累, 将加重棉花盐害. 随着盐胁迫加剧, NaCl 抑制棉花根部对 K 的吸收, 并阻碍 K 向棉花叶片的迁移, 进而抑制棉花的生长. 当灌溉水中 Zn 浓度为 0.192~3.068 μmol/L

时,随着 Zn 浓度增大,根中 K 营养元素的含量越多.灌溉水中随着 Zn 浓度增大,积累在棉花叶中 K 的含量越少,将导致棉花 K 营养元素缺乏.随着盐胁迫加剧,NaCl 促进 Zn 在棉花叶片中的积累.当灌溉水中 Zn 浓度为 0.192~3.068 $\mu\text{mol/L}$ 时,随着 Zn 浓度增大,根中 Zn 的含量越多.在低、高浓度盐胁迫条件下,随着 Zn 浓度增大,叶片中积累 Zn 含量越多,将对棉花产生毒害.

3 结论

(1)缺 Zn 环境下,当灌溉水电导率为 2.90~3.95 dS/m 时,随着电导率增大,NaCl 促进棉花根和地上部生长及皮棉产量增加.电导率大于 3.95 dS/m 时,电导率越大,根和地上部干重越小,皮棉产量出现下降.富 Zn 环境下,灌溉水中电导率大于 5.04 dS/m 时,随着电导率增大,皮棉产量明显下降.当灌溉水中 Zn 浓度为 0.192~3.068 $\mu\text{mol/L}$ 时,Zn 浓度越大,棉花营养生长越快,大于 0.767 $\mu\text{mol/L}$ 时,随着 Zn 浓度增大,皮棉产量下降.

(2)棉花营养生长受灌溉水中 NaCl 影响显著,但受 Zn 影响不明显.皮棉产量受灌溉水中 Zn 影响比受 NaCl 影响明显.灌溉水中 NaCl 和 Zn 对棉花生长和产量的影响作用不是简单的叠加效应,而存在明显的相互拮抗作用关系.

(3)Zn 在盐胁迫条件下对棉花营养元素吸收的影响表现为:营养元素 Ca、K、Mg、B 和 Fe 在棉花叶中的含量高于其他组织,铃的 Cu 和 Zn 含量高于其他组织,Na 和 Mn 不易迁移,易富集在棉花根部.灌溉水中 Zn 在盐胁迫条件下导致了相关营养元素含量在棉花体内分布不同,相关营养元素含量的高低不同将影响棉花生理活动,使棉花生长及产量状况存在差异.建议实际生产中,在测定土壤和灌溉水中盐分以及宏量和微量营养元素含量的基础上,参考本文结果因地制宜制定水肥调控方案,以保证棉花正常生长和稳产高产,且不危害土壤环境质量.

致谢:感谢中国科学院武汉植物园水生植物研究中心湿地生态学学科组为本研究提供盆栽试验场地,以及中国地质大学(武汉)黄金瓿、杨仲康、王珺瑜对本实验提供帮助;感谢审稿专家对本文提出了修改意见.

References

Ashraf, M., 2002. Salt Tolerance of Cotton: Some New

Advances. *Crit. Rev. Plant Sciences*, 21(1):1-30. doi: 10.1080/0735-260291044160

Chen, C. F., Liu, X. G., Hu, Z. C., et al., 2014. In Situ Analysis of Major and Trace Element Compositions of Hydrous Silicate Minerals by LA-ICP-MS. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(5):525-536 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2014.050

Chen, W. P., Hou, Z. N., Wu, L. S., et al., 2010. Effects of Salinity and Nitrogen on Cotton Growth in Arid Environment. *Plant and Soil*, 326:61-73. doi:10.1007/s11104-008-9881-0

Foy, C. D., Weil, R. R., Coradetti, C. A., 1995. Differential Manganese Tolerances of Cotton Genotypes in Nutrient Solution. *Journal of Plant Nutrition*, 18:685-706. doi:10.1080/01904169509364931

Hocking, P. J., 1981. Response of *Typha Domingensis* to Salinity and High Levels of Manganese in the Rooting Medium. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 32(6):907-919. doi:10.1071/MF9810907

Huang, H., Wang, T. J., Qu, J., et al., 2007. Effect of Different Contents of Zinc on Growth and Absorption of Cotton Seeding. *Shandong Agricultural Sciences*, (4):84-85 (in Chinese).

Huang, J. O., Jin, M. G., Li, X. W., 2014. Influence of Mulched Drip-Irrigation with Brackish Water on Element Compositin of Soil, Cotton, and Cotton Yield. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(6):751-759 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2014.070

Levy, Y., Benderly, M., Cohen, Y., et al., 1986. The Joint Action of Fungicides in Mixtures; Comparison of Two Methods for Synergy Calculation. *EPPO Bulletin*, 16(4):651-657. doi:10.1111/j.1365-2338.1986.tb00338.x

Leidi, E. O., Saiz, J. F., 1997. Is Salinity Tolerance Related to Na Accumulation in Upland Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Seedlings? *Plant and Soil*, 190(1):67-75. doi:10.1023/A:1004214825946

Mu, Q. Y., Wei, T., Dao, W., et al., 2001. Systematic Studies on Absorption of 11 Trace Heavy Metals on Thiol Cotton Fiber. *Analytica Chimica Acta*, 428:209-218. doi:10.1016/S0003-2670(00)01238-1

Qadir, M., Shams, J. M., 1997. Some Agronomic and Physiological Aspects of Salt Tolerance in Cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Agronomy & Crop Science*, 179(2):101-106. doi:10.1111/j.1439-037X.1997.tb00504.x

Rehab, F. I., Wallace, A., 1978. Excess Trace Metal Effects on Cotton I. Copper, Zinc, Cobalt and Manganese in

- Solution Culture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 9: 507 — 518. doi: 10. 1080/00103627809366826
- Robin, B. A. , Chen, K. Y. , Zhang, M. H. , et al. , 1983. Cotton physiology. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai.
- Samuel, P. S. , Derrick, M. O. , 2005. Effect of EDTA on the Foliar Absorption of Trace Element Fertilizers. *Summaries of Arkansas Cotton Research*, (2): 58—61.
- Vulkan-Levy, R. , Ravinaa, I. , Mantellb, A. , et al. , 1998. Effect of Water Supply and Salinity on Pima Cotton. *Agricultural Water Management*, 37 (2): 121 — 132. doi:10. 1016/S0378—3774(98)00042—0
- Wang, X. , Wang, Z. M. , Jin, M. G. , 2014. Antagonistic Effect of Mn and NaCl in Irrigation Water on Cotton Growth and Yield. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 22(5): 571—577 (in Chinese with English abstract). doi:10. 3724/SP. J. 1011. 2014. 31223
- Wang, X. P. , Li, B. , 2010. Analysis of 27 Mineral Elements in the Rice Samples Collected from China and Japan by Using ICP-OES and ICP-MS. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30 (8): 2260 — 2264 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3964/j. issn. 1000 — 0593 (2010)08—2260—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/dqkx. 2012. 116
- Wu, X. P. , Zheng, Y. , Wang, X. B. , et al. , 2010. Effects of Irrigation Using Sea Ice Water with Different Salt Contents on Cotton Yield and Quality. *Resources Science*, 32 (3): 452—456 (in Chinese with English abstract).
- Yermiyahu, U. , Gal, A. , Keren, R. J. , et al. , 2008. Combined Effect of Salinity and Excess Boron on Plant Growth and Yield. *Plant and Soil*, 304(1—2): 73—87. doi:10. 1007/s11104—007—9522—z
- Zhang, J. P. , Feng, D. , Zheng, C. L. , et al. , 2014. Effects of Saline Water Irrigation on Soil Water-Heat-Salt Variation and Cotton Yield and Quality. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 45 (9): 161—167 (in Chinese with English abstract). doi:10. 6041/j. issn. 1000—1298. 2014. 09. 027
- Zhao, N. , Guo, P. J. , Lei, R. , et al. , 2009. Determination of Mineral Elements in Two Pine Trees by ICP-OES. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 26 (1): 74—77 (in Chinese with English abstract).
- Zhi, J. H. , Zhao, S. Z. , Duan, H. J. , et al. , 2010. Research on Relativity of Cotton Chlorophyll and Yield by Zinc Regulation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 28 (3): 137—140 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈春飞, 刘先国, 胡兆初, 等, 2014. LA-ICP-MS 微区原位准确分析含水硅酸盐矿物主量和微量元素. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(5): 525—536.
- 黄慧, 王天建, 曲杰, 等, 2007. 不同供锌水平对棉苗生长和养分吸收的影响. *山东农业科学*, (4): 84—85.
- 黄金瓴, 靳孟贵, 栗现文, 2014. 微咸水膜下滴灌对土壤和棉花元素组成及产量的影响. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(6): 751—759.
- 汪啸, 王在敏, 靳孟贵, 2014. 灌溉水中 NaCl 和 Mn 对棉花生长及产量的拮抗效应. *中国生态农业学报*, 22 (5): 571—577.
- 王小平, 李柏, 2010. ICP-OES 和 ICP-MS 测定中日两国大米中 27 种矿物质元素含量. *光谱学与光谱分析*, 30 (8): 2260—2264.
- 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.
- 武雪萍, 郑妍, 王小彬, 等, 2010. 不同盐分含量的海冰水灌溉对棉花产量和品质的影响. *资源科学*, 32 (3): 452—456.
- 张俊鹏, 冯棣, 郑春莲, 等, 2014. 咸水灌溉对土壤水盐热变化及棉花产量和品质的影响. *农业机械学报*, 45 (9): 161—167.
- 赵宁, 郭盘江, 雷然, 等, 2009. ICP-OES 测定两种松树中的矿物质元素光谱实验室. 26(1): 74—77.
- 支金虎, 赵书珍, 段黄金, 等, 2010. 锌素调节下棉花叶绿素和产量的协同响应. *干旱地区农业研究*, 28 (3): 137—140.