

微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展*

王全九 单鱼洋
(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 随着淡水资源短缺的日益加剧,合理开发利用微咸水已成为缓解水资源供需矛盾的重要途径之一。由于微咸水中含有大量盐分,用其灌溉必然增加土壤盐分,影响作物生长和土地质量。因此,采取有效措施调控土壤水盐状况成为微咸水安全利用的基础。本文较详细地回顾了微咸水灌溉条件下土壤水盐运移特征、微咸水入渗模型和水盐运移模型、微咸水灌溉方法、微咸水灌溉对作物生长的影响、土壤水盐调控方法等方面的研究进展,并结合目前研究中关注的核心问题,提出了微咸水安全利用方面需要重点研究的科学和技术问题,为进一步研究微咸水灌溉对土壤和作物生长的影响和其内在机制,以及构建合理利用微咸水灌溉模式提供参考。

关键词: 微咸水 水盐调控 盐分累积 模拟模型

中图分类号: S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0117-10

Review of Research Development on Water and Soil Regulation
with Brackish Water Irrigation

Wang Quanjiu Shan Yuyang
(Institute of Water Resources and Hydrologic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the increasing shortage of fresh water resources, reasonable exploitation and utilization of brackish water have become an important way to alleviate the contradiction between water supply and demand. Irrigation with brackish water which contains a lot of salt will affect crop growth and soil quality; therefore, taking effective measures to control the status of soil water and salt has become the basis for the safe use of brackish water. A detailed review of research development on brackish water irrigation was done, including the transport characteristics of soil water and salt with brackish water irrigation, brackish water infiltration mathematical function and soil water and salt transport model, the method of brackish water irrigation, the influence on crop growth and advances in soil water and salt regulation methods. And the scientific and technological problems on the safe use of brackish water combined with the core issues of interest were put forward in order to provide some guidances for further understanding the mechanism of effects of brackish water irrigation on soil quality and crop growth and establishing the reasonable types for using brackish water to irrigate the farmland.

Key words: Brackish water Water and salt regulation Salt accumulation Simulation model

引言

工农业发展、生态环境建设和社会进步对淡水资源需求量的逐步增加,加剧了淡水资源供需矛盾,发展节水技术和开发可利用水源成为缓解水资源供

需矛盾的重要途径。世界上浅层地下微咸水资源较为丰富,因而除了采取一定的措施提高淡水资源的利用效率外,合理开发利用微咸水资源已成为微咸水分布地区解决水资源短缺问题的有效方法之一。国内外大量研究和实践证明,科学合理地开发利用

收稿日期: 2015-07-03 修回日期: 2015-07-30
* 水利部公益性行业科研专项资助项目(201301102)和新疆维吾尔自治区科技计划资助项目(201130103)
作者简介: 王全九,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究, E-mail: wquanjiu@163.com

微咸水资源,对于缓解淡水资源短缺、扩大农业水源、抗旱增产有着极其重要的作用。同时,微咸水开发利用有利于地下水资源更新、淡水存储和生态环境建设与保护。然而与传统的淡水灌溉相比较,微咸水灌溉一方面提供了作物生长所需要的水分,另一方面增加了土壤中的盐分,影响土地质量和作物生长,科学合理、高效安全地利用微咸水一直是利用微咸水进行农田灌溉所关注的核心问题。因此,进行微咸水灌溉条件下土壤水盐分布特征、对作物生长的影响和土壤水盐调控方法的研究,对维持土地可持续利用具有重要的科学意义和实际应用价值。

1 微咸水开发利用的总体情况

微咸水是矿化度在 $2 \sim 5 \text{ g/L}$ 的含盐水^[1]。我国是一个微咸水储量丰富的国家,据统计,微咸水总量为 277 亿 m^3 ,其中可开采利用资源为 130 亿 m^3 ,集中分布在地表以下 $10 \sim 100 \text{ m}$,华北、西北以及沿海地带是我国微咸水主要分布区域^[2]。我国农民自发利用微咸水进行农田灌溉的实践已经有很长的历史,但从 20 世纪 60、70 年代才开始微咸水灌溉和合理利用的研究工作。宁夏是我国较早利用微咸水进行农田灌溉的地区,实践表明微咸水灌溉的作物产量比旱地产量高 $3 \sim 4$ 倍。天津市提出了矿化度 $3 \sim 5 \text{ g/L}$ 微咸水灌溉条件下满足耕地质量安全的技术模式。目前,国内数十个省份都已开展了微咸水灌溉,并取得了理想的效果。

国外利用微咸水进行农田灌溉也有近百年的历史。美国、以色列、法国、日本、意大利、澳大利亚等数十个国家都有微咸水利用的历史,并逐步建立起了较完善的技术体系。在美国西南地区,采用漫灌、沟灌、微灌方法灌溉棉花、甜菜、苜蓿等作物。实践表明,与传统淡水灌溉相比,微咸水灌溉不仅不会影响作物的产量,有些情况下还可以提高产量^[3]。以色列利用矿化度 $1.2 \sim 5.6 \text{ g/L}$ 地下微咸水或咸水进行灌溉,是一个微咸水利用广泛的国家,其中喷灌和滴灌是其农业灌溉的主要方式。在澳大利亚西部,利用矿化度大于 3.5 g/L 的微咸水灌溉苹果树及短期灌溉葡萄树均获得满意效果。西班牙、突尼斯等国家为了更好地开发利用微咸水,专门成立研究机构,对灌溉方法、适宜作物、气候对咸水利用的影响等开展研究。

2 微咸水灌溉条件下土壤水盐运移特征研究

由于微咸水中不仅含有一定的盐分离子,而且含有其他化学元素。微咸水进入土壤后,与土壤溶液和固体颗粒发生各种物理化学作用,必然会改变

土壤结构,导致土壤孔隙特征发生变化,进而影响土壤能量和导水特征,也影响土壤原有化学元素存在的状态和形式,势必造成土壤水盐运移特征的变化。目前,微咸水灌溉方式多以传统的地面灌以及滴灌为主。因此,国内外学者通过试验研究和理论分析方法研究一维积水入渗和点源入渗条件下土壤水盐运移特征。

2.1 微咸水入渗特性的研究

传统土壤入渗特征研究大都基于淡水入渗所表现的各种现象,但微咸水含有大量化学元素,影响土壤结构和能量状态,必然影响土壤入渗特征。目前研究主要集中在微咸水矿化度、钠吸附比、土壤化学特征、供水方式、土壤构造等方面对土壤入渗特征的影响。

(1) 微咸水矿化度对土壤入渗特征的影响

由于微咸水中含有大量化学元素,这些元素对土壤入渗特征的影响有些比较清楚,但有些作用机制仍未被揭示,如微咸水中究竟含有何种微量元素,以及这些微量元素如何与土壤发生作用等方面的机制,仍未被全面理解。同时,各地区微咸水化学组成不尽相同,为了便于研究和研究成果的推广应用,通常利用矿化度来综合反映微咸水盐离子含量。大量研究表明,随着微咸水矿化度增加,入渗能力逐渐增强,在矿化度达到 $3 \sim 4 \text{ g/L}$ 时,入渗能力达到最大,然后随着矿化度增加,入渗能力逐步减弱,因此土壤入渗能力与微咸水矿化度呈现抛物线变化过程^[4-7]。马东豪等的试验结果表明,虽然微咸水矿化度影响土壤入渗能力,但总体表现与淡水入渗特征类似,即累积入渗量、湿润锋与入渗时间均呈幂函数关系,累积入渗量与湿润锋呈线性关系,但微咸水入渗条件下的累积入渗量、湿润锋都大于淡水^[4]。史晓楠等利用入渗模型计算了不同矿化度入渗条件下土壤水力参数值,结果表明矿化度的增加有效地提高了土壤的扩散率和饱和导水率^[8]。王春霞等通过田间的双点源交汇试验,对不同矿化度条件下湿润锋运移规律进行研究,分析发现滴头下方和交汇区湿润锋范围与矿化度呈正相关关系,矿化度与湿润锋交汇时间呈负相关^[9]。通过这些试验结果也充分证明了微咸水能够改变土壤结构的事实。

(2) 微咸水钠吸附比对土壤入渗特征的影响

矿化度表征了水体中所含盐分离子的总量,未反映微咸水离子组成。一般而言,对于碱性土,钠离子增加会破坏团粒结构,而钙、镁离子有利于团粒结构的形成。因此,为了进一步从微咸水离子组成分析微咸水对入渗的影响,通常利用钠吸附比来描述微咸水主要离子组成特征。Feigen 等指出灌溉水中

的盐分对土壤的影响主要表现为对土壤交换性钠和土壤溶液电导率的影响。土壤盐分浓度的提高有利于促进土壤颗粒的絮凝,增加其团聚性,稳定土壤结构,使土壤中大孔隙增加,渗透性增强。但是,盐分过量会引起土壤结皮,导致土壤渗透性减小。钠盐是引起土壤退化的主要盐分,由于离子电荷少,半径相对较大,水化能较小,钠离子的存在会引起土壤颗粒的膨胀和分散,在干湿交替作用下改变土壤物理特性^[10]。Oster 等 和 Murtaza 等研究发现,入渗率随着钠吸附比(SAR)的增加而减小,随着阳离子浓度的降低而降低,并指出阳离子总浓度可以作为预测入渗率的一种较好的标准^[11-12]。吴忠东等通过分析不同的 SAR 微咸水入渗过程发现,相同矿化度条件下,累积入渗量、湿润锋均随 SAR 的增加而减小。原因在于 SAR 的增加引起 Na⁺ 增加,导致土壤导水能力下降^[13]。Xiao 等研究发现灌溉水的高矿化度可以增加土壤的絮凝作用而减少粘粒的膨胀和分散,从而减轻高交换性钠百分率 ESP 对土壤物理性质的不利影响^[14]。因此,微咸水钠吸附比也是影响土壤入渗特征的重要指标。

(3)土壤理化特性对土壤入渗特征的影响

由于微咸水中含有各类化学物质,这些化学物质与土壤溶液和固体颗粒作用受到土壤理化特性的影响。杨艳等利用试验资料分析了微咸水入渗条件下,盐土和碱土的水分运动特征,结果显示一定矿化度条件下,盐土、碱土的累积入渗量、湿润锋均随矿化度的增加而增加,碱土湿润锋、累积入渗量在数值上均大于盐土^[15]。王全九等进行了不同初始含水率条件下次生碱土微咸水的入渗试验,结果显示,在一定低含水率条件下,随着土壤初始含水率的增加,累积入渗量增加,而高含水率之间的差异并不明显^[16]。这与常规土壤入渗特征结果相反,利用 Green - Ampt 入渗公式对试验资料进行处理,结果如表 1 所示。结果显示土壤饱和导水率随着含水率的增加而增加,湿润峰处平均吸力随初始含水率增加而减小。这说明微咸水入渗对土壤结构的影响表现为碱土大于盐土。陈丽娟等通过试验分析了黏土夹层对微咸水入渗规律的影响,结果显示黏土夹层以上土壤平均含水率、含盐量随灌溉水矿化度增大而呈增加的趋势,黏土夹层以下各处理土壤水盐分布几乎不受微咸水灌溉的影响^[17]。

此外,一些学者也研究了间歇供水对微咸水入渗的影响。毕远杰等和雪静等分别研究了间歇灌对微咸水入渗的影响,结果显示间歇入渗能增加湿润深度,灌溉周期与累积入渗量呈正相关关系,而循环率与累积入渗量之间则符合负相关关系^[18-19]。

表 1 计算的饱和导水率和湿润峰处平均吸力值

Tab.1 Average suction value in wetted front and calculated saturated hydraulic conductivity

初始含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.026	0.056	0.130	0.195	0.260
饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.006 5	0.011 7	0.018 0	0.035 0	0.037 5
湿润锋处平均 吸力/cm	123	48	47	42	35

2.2 微咸水灌溉条件下土壤水盐运移模型

入渗过程本身就是一个极为复杂的过程,为了能够准确地描述整个过程,许多专家学者通过大量的试验和理论分析构建了许多模型^[20-22]。目前大多数有关土壤水盐运移的数学模型主要是基于淡水灌溉条件下建立的,未充分考虑微咸水灌溉对土壤入渗特征的影响。目前水盐运移模型的研究主要集中在两个方面,一是对现有入渗公式适用性进行评估,一是在不考虑微咸水灌溉对土壤结构的影响下,利用现有模型分析微咸水灌溉条件下水盐分布特征。随着计算机技术的快速发展,计算机模型模拟成为研究微咸水运移的新手段。目前,以上 2 种方式也是研究微咸水入渗规律的重要手段。吴忠东等通过试验资料验证一维代数模型和 Green - Ampt 模型都能够较为精确地描述微咸水入渗过程^[23]。史晓楠等通过试验资料验证了 Philip 模型和 Green - Ampt 模型模拟的结果都比较理想,后者模拟的精度更高^[8]。Phogat 等、Forkutsa 等和栗现文等利用 HYDRUS - 1D 模拟了微咸水灌溉条件下的水盐运移^[24-26]。陈丽娟等和 Wang 等利用 HYDRUS (2D/3D) 模型对微咸水膜下滴灌土壤水盐的运移、盐分累积进行了模拟预测,发现利用矿化度 3 g/L 的水进行灌溉土壤积盐程度较轻,不会对作物的生长产生影响^[17,27]。王卫光等和杨树青等利用 SWAP 模型对不同微咸水灌溉条件下的水盐运移进行了模拟,并制定出了合理的微咸水灌溉方式和灌溉制度^[28-29]。单鱼洋利用 Saltmodel 模型对不同矿化度,生育期灌水量 4 500 m³/hm² 和非生育期灌水量 1 500 m³/hm² 灌溉条件下棉田根层土壤盐分的累积程度进行了模拟预测,结果如图 1 所示,由图可以发现,土壤盐分累积随着时间的增加而增加,累积量随着矿化度的增加而增加,根据对土壤盐分累积的分析发现,可以采用 3 g/L 微咸水灌溉,但 3 a 后需采取加大非生育期灌水量或轮作等方式保证土地的可持续利用^[30]。陈艳梅等利用 Saltmodel 模型探讨了灌水矿化度对区域内土壤盐分的影响,提出加大排沟深度、渠道衬砌水平及混灌措施相结合的灌溉方

式,实现缓解土壤盐分累积的目标^[31]。

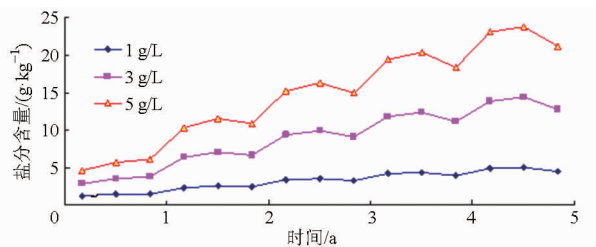


图1 不同水质盐分累积变化规律

Fig.1 Changes of salt accumulation at different irrigation water mineralization levels

3 微咸水灌溉方式

世界各国在生产实际中,根据水源状况、种植结构和社会经济状况,采取了不同微咸水利用方式。总的来讲,目前微咸水灌溉利用的主要方式有微咸水直接利用、咸淡水轮灌、咸淡水混灌。微咸水直接灌溉主要对于一些淡水资源十分紧张的地区,同时种植一些耐盐性作物,并配合其它措施,维持土地可持续利用。咸淡水轮灌是目前常用的微咸水利用方法,一般根据微咸水和淡水资源量、作物耐盐特性和耗水特征以及土地质量,确定轮灌水量、轮灌次序和时间,以保证作物正常生长和土地可持续利用。一般作物苗期耐盐能力比较低,因此在苗期避免利用微咸水灌溉,而作物生长后期耐盐能力一般会增强,因此可以在生育期后期加大微咸水灌溉用水量。咸淡水混灌主要是将淡水和微咸水混合进行灌溉,以降低灌溉水矿化度。目前微咸水与淡水混合模式有3种:①在入田水源处进行混合。如设立混合水箱,按照一定比例将淡水和微咸水进行混合。②在管道或渠道中混合。将微咸水和淡水分别输送到末级管道或渠道,使微咸水和淡水混合。③在土壤表层混合,这种方式常用在滴灌系统中。田间并行设立两套滴灌管,微咸水和淡水分别利用不同滴头进行灌溉,并使2个滴头灌溉水在土壤表层混合。为了提高微咸水利用效率,将其与改进的地面灌、滴灌、覆膜滴灌等高效的节水灌溉技术相结合。目前,漫灌、沟灌、喷灌和滴灌等是微咸水灌溉的主要方法。

3.1 微咸水地面灌溉

漫灌、沟灌是常见的微咸水地面灌溉技术。张展羽等通过田间膜孔沟灌试验分析表明,膜孔沟灌能够有效减少水分蒸发,抑制盐分累积,有效调节了土壤水盐分布,0~40 cm 土层土壤处于明显的脱盐状态^[32]。冯棣等利用微咸水畦灌、沟畦轮灌的方式对棉花的产量及土壤性质进行了研究,结果显示沟畦轮灌对盐分淋洗效率高于畦灌处理,土壤盐分更低,从而为棉花生长提供了更好的环境^[33]。吴忠东

等研究发现,微咸水条件下波涌灌比连续灌土壤水分分布均匀且有效降低了土壤盐分局部累积的发生,保证了土壤的可持续利用^[34]。米迎宾等研究表明,直接利用3 g/L 微咸水进行灌溉会引起土壤盐分的累积及作物减产,而利用咸淡轮灌的方式可获得比较理想的效果^[35]。吴忠东等通过研究发现,畦灌条件下利用微咸水灌溉比旱作增产,同时也提出了合理的冬小麦微咸水轮灌制度^[36-37]。Malash 等对比沟灌和滴灌条件下,微咸水、淡水及咸淡水混灌对马铃薯产量的影响,分析发现无论哪种条件下,滴灌都比沟灌产量高,且根层土壤盐分低;提出了适宜的混灌模式,即淡水60%、微咸水40%^[38]。Rajinder 设置了6种电导率(4、6、8、10、12、14 dS/m)微咸水灌溉试验,研究结果表明,在2种土质(沙壤土和壤土)条件下,利用14 dS/m 以下的微咸水和渠水轮灌是可行的。另外,为保证作物的正常生长,所有条件下的底墒水要用渠水进行灌溉^[39]。上述的研究结果为完善合理的传统灌溉提供了保证。

3.2 微咸水喷灌

对于微咸水喷灌的研究也较多,主要集中在对作物的影响和灌溉模式方面。研究发现,微咸水喷灌作物将受到土壤盐分和灌水盐分的双重影响。Grieve 等和 Wang 等研究不同微咸水灌溉条件下大豆对 Na^+ 、 Cl^- 的吸收,结果发现滴灌、沟灌处理吸收量均在0.5%以下,喷灌则达到2%。孙泽强等研究了微咸水喷灌对作物生长和产量的影响,结果发现微咸水喷灌明显影响了作物的生长,导致作物产量下降^[40-41]。Singh 等发现冬小麦产量随微咸水喷灌灌水量的增加而增加,灌溉水矿化度增加时,增加灌水频率能减缓冬小麦产量的下降^[42]。Isla 等研究了微咸水喷灌对苜蓿品质的影响,发现苜蓿的粗蛋白含量不会显著地受到微咸水喷灌盐分含量的影响^[43]。Busch 等研究发现利用矿化度3.16 g/L 微咸水灌溉棉花,夜间进行喷灌更加合理^[44]。Shalhevet 研究认为与间歇灌溉相比夜间连续灌溉可减轻对作物的伤害^[45]。这些研究结果对更好地利用微咸水喷灌方法提供了良好的基础。但微咸水喷灌易造成作物叶面的灼伤,因此,利用微咸水喷灌需要考虑微咸水对地上生物的影响。

3.3 微咸水滴灌

随着滴灌技术的不断推广,对微咸水滴灌的研究也在不断地深入。目前,对于微咸水滴灌的研究主要包括:水质、灌溉制度、作物产量及品质、土壤质量等方面。雷廷武等研究发现,利用电导率3.3~6.3 dS/m 地下咸水灌溉蜜瓜,与不灌溉相比,蜜瓜的产量和品质都有较大的提高^[46]。万书勤等经过

3 年的研究结果表明,微咸水滴灌不同盐分和土壤基质势处理对番茄的产量没有明显的影响^[47]。Ayars 等研究滴灌频率对棉花根区盐分及产量的影响,结果表明,每天灌水土壤剖面含盐量要比每隔 3~4 d 灌水的低得多,但对棉花产量无明显影响^[48]。王伟等研究了不同水质、灌水频率对棉花苗期根系分布的影响,发现微咸水有助于提高根系的干物质量,低频灌溉有利于深层根系干物质量的累积^[49]。王丹等通过研究发现,利用电导率 4.2 dS/m 的微咸水进行覆膜滴灌,番茄生育期内土壤剖面未发生积盐现象^[50]。何雨江等研究发现,覆膜滴灌条件下,采用 3 g/L 微咸水轮灌方式可以保证棉花的产量,同时不会对土壤环境产生明显影响^[51]。栗现文等研究发现,微咸水滴灌的积盐量高于淡水处理,影响作物的出苗率,提出非生育期应制定合理的冬、春灌灌溉制度^[52]。

4 微咸水灌溉对作物生长及土地质量的影响研究

4.1 微咸水灌溉对土壤质量的影响

由于微咸水灌溉过程中带入的盐分与土壤自身的土壤颗粒及化学元素发生相互作用,改变了土壤的物理化学特性,从而影响土地的质量及可持续利用。Zartman 等对咸水灌溉条件下沙质石灰性土壤理化性质的变化进行了研究。结果表明,灌溉 4 年后,土壤溶液的电导率、可溶性钠、钙、镁、钠吸附比显著增加,土壤导水率明显下降,而土壤容重和持水率曲线无明显变化^[53]。Feigen 认为微咸水灌溉对土壤质量的影响主要表现为对土壤交换性钠和电导率的影响,钠离子含量的增加会使土壤颗粒收缩、胶体颗粒分散和膨胀,导致土壤孔隙率降低^[10]。Padole 等研究表明,对于粘性土而言,土壤最大持水量、孔隙度、入渗率与可交换性钠百分率呈负相关关系^[54]。张余良等对长期微咸水灌溉条件下耕地土壤理化性状进行了研究,发现长期灌溉微咸水造成土壤表层盐分累积,土壤理化性质有恶化的趋势,土壤入渗率下降^[55]。王国栋等对于干旱绿洲区长期微咸水灌溉条件下土壤微生物量的变化进行了研究,结果显示长期微咸水灌溉使土壤微生物量碳、氮、有机质明显降低,不利于农田的可持续利用^[56]。此外,Termaat 等、Meiri 等、Marcelis 等、Mondal 等均对微咸水灌溉造成的土壤次生盐碱化进行了研究^[57-60]。

4.2 微咸水灌溉对作物生长的影响

灌水质量是保证作物正常生长最基本的条件。掌握微咸水对作物生长、产量及品质的影响是其合

理利用的重要保证。Karin 等发现轻微的盐分胁迫能够刺激某些植物生长^[61]。Esechie 等研究了 4 种不同电导率(0.8、4.6、8.4、12.2 dS/m)微咸水灌溉对鹰嘴豆出苗率的影响,结果显示电导率 4.6 dS/m 微咸水处理出苗率最高,12.2 dS/m 最低^[62]。Triantafilis 等研究发现,使用电导率为 1.4 dS/m 的微咸水灌溉不会对农作物产量造成影响,而电导率为 4.0、9.0 dS/m 的咸水灌溉会对农业的发展产生一定危害^[63]。Amnon 等研究了微咸水灌溉对甜瓜产量和品质的影响,发现利用电导率 4.5 dS/m 进行灌溉不会影响甜瓜产量和品质,而 7 dS/m 微咸水进行灌溉会造成甜瓜产量和品质下降^[64]。Talebnejad 等研究发现利用低于电导率 20 dS/m 的咸水进行灌溉不会造成藜麦生物量降低^[65]。Karlberg 等在南非用滴灌方式进行微咸水和咸水灌溉的番茄产量高于平均产量^[66]。Abdel-Gawad 等研究发现咸水灌溉可提高番茄的可溶性固形物含量和含糖量,其果实大小会随盐分质量浓度的增大而减小^[67]。肖振华等以灌溉水矿化度和钠吸附比作为评价指标,研究了灌溉水质对大豆、小麦生长的影响,结果表明矿化度大于 3 g/L、钠吸附比超过 14 对大豆出苗、生长和产量产生影响,矿化度大于 4 g/L,将影响小麦生长和产量^[68]。Shainberg 等研究发现咸水灌溉频率与作物的产量及水分利用效率呈正比。邢文刚等的研究结果表明,利用 3 g/L 微咸水膜下滴灌可以提高西瓜的产量和品质^[69]。马文军等对微咸水漫灌条件下作物生长及土壤盐分的研究发现,在合理灌溉的前提下,利用电导率为 5.4 dS/m 的微咸水进行灌溉,不会使土壤发生盐碱化,也可以获得比较理想的产量^[70]。

虽然微咸水中含有一定盐分,但短时间内微咸水带入土壤的盐分含量较少。如果土壤初始含盐量比较低,微咸水带入的盐分不足以对作物生长和土地质量造成明显的影响;反而,由于微咸水中含有一定微量元素,可以刺激作物生长。如果土壤初始含盐量比较低,一般利用微咸水灌溉的前 1~3 年,可能出现比淡水灌溉更有利于作物生长的现象。随着微咸水灌溉年限延长,土壤盐分逐步增加,对作物生长影响的负面作用逐步显现,作物产量出现降低。因此,微咸水灌溉对作物生长的影响应该利用长期的试验资料进行分析,才能获得比较客观的结论。

5 土壤水盐调控措施

微咸水灌溉下的土壤水盐调控措施与盐碱地土壤水盐调控措施类似,主要包括水利措施、农业措施、生物措施和化学措施。

5.1 水利措施

灌排技术是防止土壤盐碱化以及改良盐碱土的主要技术措施之一^[71-73]。对于一直用咸水灌溉的地区,为了降低土壤盐分质量浓度以及淋洗土壤中的盐分,应加大咸水灌溉定额,尤其是一次灌水量。常见的排水工程包括明沟排水、暗管排水和竖井排水^[74-75],无论是哪种方式,都是通过降低地下水位,有效减少潜水蒸发,抑制土壤盐分的累积。研究表明,暗管排水措施可以增加排水、排盐量,加速土体脱盐,提高盐碱土淋洗改良效率^[76-77]。良好的排水措施是微咸水灌溉条件下,保证作物正常生长和土地质量的前提条件。

5.2 农业措施

农业措施包括:平整地面、深耕晒垡、客土抬高地面、微区改地、整地以及地表覆盖等。目前,地表覆盖是一种有效控盐的措施。郑九华等和 Pang 等开展了秸秆覆盖条件下微咸水灌溉对棉花、小麦产量及土壤质量的研究,发现秸秆覆盖对棉花的生长有促进作用,同时有效地抑制了土壤盐分的积累^[78-79]。王在敏等研究了微咸水膜下滴灌棉花产量及土壤盐分分布规律,发现覆膜能够很好地降低土壤盐分的累积,同时保证棉花的产量^[80]。Nassar 等和宋日权等分别研究了覆砂、压实对土壤盐分累积的影响,结果表明 2 种措施都能有效抑制盐分在表层土壤的累积^[81-82]。

5.3 生物措施

生物措施主要是通过种植耐盐碱作物实现盐碱地改良的方式。耐盐作物改良盐碱地的机理是通过增加土壤有机质、改变土壤结构、提高土壤保土、保肥能力,提高土壤的透水、透气性,减少土壤潜水的补给量和提高淋洗率来实现控盐。目前主要种植的耐盐植物和作物包括苜蓿、牧草、枸杞、碱蓬、油葵、水稻、耐盐小麦等。任巍等研究发现,牧草、枸杞都提高了土壤的脱盐效率^[83]。王全九等研究表明,小麦和油葵的轮作种植方式有效地抑制了土壤盐分的表聚程度^[84]。

5.4 化学措施

化学措施是指施用化学改良剂改善酸性土壤和碱性土壤(碱土)理化性质的过程。改良剂通过改变土壤胶体吸附性离子的组成,从而改善土壤物理性质,增加土壤通透性。常用的化学改良剂有石灰、石膏、磷石膏、沸石、氯化钙、硫酸亚铁、硫磺、硫酸、腐殖酸、腐殖酸钙等。张余良等研究发现磷石膏、磷石膏+沸石 2 种改良剂能够明显抑制微咸水对土壤

水稳性团聚体的破坏效应^[85]。赵秀芳等研究了石膏改良下微咸水灌溉对土壤水盐分布的影响,结果发现土壤盐分累积并不明显^[86]。刘易等利用 5 种不同的土壤改良剂对矿化度在 2~3 g/L 的微咸水灌溉棉田土壤进行改良效果研究,结果表明,5 种改良剂均能不同程度地降低土壤的 pH 值,改善土壤理化特性和盐离子分布^[87]。改良剂的长期使用势必会带来一定的负面影响,因此,需要进行科学合理的应用。

6 展望

随着水资源供需矛盾日益突出,开发利用微咸水成为世界各国关注的热点问题。世界各国学者围绕微咸水安全、高效利用方面进行了大量有益的研究,也提出了一些合理的微咸水利用模式,在生产实践中发挥了重要作用。由于不同地区土壤质地和理化性质、气候条件、微咸水理化特性、种植类型和结构、社会经济水平和科技发展水平的差异,一些内在机制仍未被揭示,相应微咸水灌溉下水盐运移模型仍未建立,一些局部研究成果难以广泛应用。随着农业对微咸水开发量需求的不断扩大,建立合理的开发利用模式十分关键。根据目前研究现状和生产实际需求,应着重开展如下几方面研究工作。

(1)加强微咸水灌溉与土壤盐碱化对作物影响差异的研究,提出微咸水灌溉条件下作物耐盐度指标和盐分胁迫系数确定方法,建立微咸水灌溉条件下的作物生长模型。

(2)进一步定量研究微咸水灌溉对土壤理化特征的影响,建立适合微咸水灌溉条件下的土壤水盐运移模型,提出模型参数确定方法。同时应加强微咸水灌溉下土壤水盐运移长期变化过程的模拟,实现土壤水盐运移模型的尺度转化和长期预测。

(3)通过研究灌溉水质、灌溉制度、地下水埋深、气象因素、土壤特征、种植结构等对土壤盐分动态与累积特征的影响,确定不同灌溉水质条件下防止土壤盐分累积危害的合理灌溉方式、灌溉制度以及适宜的地下水位控制指标。

(4)应加强微咸水灌溉条件下水利改良、生物改良、化学改良、农业改良措施的功效及其综合调控模式研究。构建微咸水灌溉条件下,区域或灌区集水盐运移、灌溉技术、利用模式、作物生长、改良措施、生态环境响应为一体的综合模拟模型,以实现区域或灌区尺度微咸水长期利用效应的预测评价,为优化微咸水安全、高效利用模式提供手段。

参 考 文 献

- 1 徐秉信, 李如意, 武东波, 等. 微咸水的利用现状和研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(36): 13914 – 13916, 13981.
Xu Bingxin, Li Ruyi, Wu Dongbo, et al. Utilization status and research progress of brackish water[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(36): 13914 – 13916, 13981. (in Chinese)
- 2 刘友兆, 付光辉. 中国微咸水资源化若干问题研究[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 57 – 60.
Liu Youzhao, Fu Guanghui. Utilization of gentle salty water resource in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(2): 57 – 60. (in Chinese)
- 3 Dutt G R, Pennington D A, Turner F J. Irrigation as a solution to salinity problems of river basins[M]//French R M. Salinity in Watercourses and Reservoirs. Michigan: Ann Arbor Science, 1984:465 – 472.
- 4 马东豪. 土壤水盐运移特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- 5 杨艳. 土壤溶质运移特征实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- 6 史晓楠, 王全九, 苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 516 – 520.
Shi Xiaonan, Wang Quanjiu, Su Ying. Effect of slight salt water quality on the characteristics of soil water and salt transference [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(4): 516 – 520. (in Chinese)
- 7 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): 65 – 69, 75.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on both soil infiltration on characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 65 – 69, 75. (in Chinese)
- 8 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green – Ampt 模型参数的对比分析[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 360 – 363.
Shi Xiaonan Wang Quanjiu, Ju Long. Parameters of Philip and Green – Ampt models for soils infiltrated with brackish water[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 360 – 363. (in Chinese)
- 9 王春霞, 王全九, 单鱼洋, 等. 微咸水滴灌下湿润锋运移特征研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 59 – 63, 68.
Wang Chunxia, Wang Quanjiu, Shan Yuyang, et al. Research on the transport characteristics of soil wetting front under drip irrigation with saline water[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 59 – 63, 68. (in Chinese)
- 10 Feigen A, Ravina I, Shalhevet J. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment[M]. Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 34 – 116.
- 11 Oster J D, Schroer F W. Infiltration as influenced by irrigation water quality[J]. Soil Science Society of American Journal, 1979, 43(3): 444 – 447.
- 12 Murtaza G, Ghafoor A, Qadir M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton-wheat rotation [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1 – 2): 98 – 114.
- 13 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 231 – 236.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 231 – 236. (in Chinese)
- 14 Xiao Zhenhua, Prendergast B, Rengasamy P. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic conductivity[J]. Pedosphere, 1992, 2(3): 237 – 244.
- 15 杨艳, 王全九. 微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 13 – 19.
Yang Yan, Wang Quanjiu. Analysis water and salt transport characteristic of irrigation with saline water on alkaline and saline soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 13 – 19. (in Chinese)
- 16 王全九, 叶海燕, 史晓楠, 等. 土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 51 – 53.
Wang Quanjiu, Ye Haiyan, Shi Xiaonan, et al. Influence of initial water content on slight saline water infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 51 – 53. (in Chinese)
- 17 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44 – 51.
Chen Lijuan, Feng Qi, Wang Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 44 – 51. (in Chinese)
- 18 毕远杰, 王全九, 雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 70 – 75.
Bi Yuanjie, Wang Quanjiu, Xue Jing. Infiltration on characteristic contrast analysis of fresh water and saline water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 70 – 75. (in Chinese)
- 19 雪静, 王全九, 毕远杰. 微咸水间歇供水土壤入渗特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 14 – 19.
Xue Jing, Wang Quanjiu, Bi Yuanjie. Soil infiltration properties with slight saline water intermittent application[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 14 – 19. (in Chinese)
- 20 Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics; 1. flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1 – 24.
- 21 Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5(C): 399 – 417.
- 22 Philip J R. The theory of infiltration; 1. the infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345 – 357.
- 23 吴忠东, 王全九. 利用一维代数模型分析微咸水入渗特征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 21 – 26.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Infiltration characteristics of brackish water by one dimensional algebraic model[J]. Transactions

- of the CSAE, 2007, 23(6): 21–26. (in Chinese)
- 24 Phogat V, Yadav A K, Malik R S, et al. Simulation of salt and water movement and estimation of water productivity of rice crop irrigated with saline water[J]. Paddy Water Environment, 2010, 8(4): 333–346.
- 25 Forkutsa I, Sommer R, Shirokova Y I, et al. Modeling irrigation cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan; I. water dynamics[J]. Irrigation Science, 2009, 27(4): 331–346.
- 26 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. (in Chinese)
- 27 Wang Zaimin, Jin Menggui, Šimůnek J, et al. Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China[J]. Irrigation Science, 2014, 32(1): 15–27.
- 28 王卫光, 王修贵, 沈荣开, 等. 河套灌区咸水灌溉试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 92–96.
Wang Weiguang, Wang Xiugui, Shen Rongkai, et al. Experimental research on saline-water irrigation in Hetao Irrigation District [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 92–96. (in Chinese)
- 29 杨树青, 丁雪华, 贾锦凤, 等. 盐渍化土壤环境下微咸水利用模式探讨[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 490–498.
Yang Shuqing, Ding Xuehua, Jia Jinfeng, et al. Light-saline water use pattern in saline soil environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 490–498. (in Chinese)
- 30 单鱼洋. 干旱区膜下滴灌水盐运移规律模拟及预测研究[D]. 杨凌: 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 2012.
- 31 陈艳梅, 王少丽, 高占义, 等. 基于 SaltMod 模型的灌溉水矿化度对土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 11–16.
Chen Yanmei, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, et al. Effect of irrigation water mineralization on soil salinity based on SaltMod model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 11–16. (in Chinese)
- 32 张展羽, 冯根祥, 马海燕, 等. 微咸水膜孔灌土壤水盐分布与灌水质量分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 112–116.
Zhang Zhanyu, Feng Genxiang, Ma Haiyan, et al. Analysis of soil water-salt distribution and irrigation performance under brackish water film hole furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 112–116. (in Chinese)
- 33 冯棣, 张俊鹏, 孙池涛, 等. 长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 171–176.
Feng Di, Zhang Junpeng, Sun Chitao, et al. Effect of long-term irrigation with saline water on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 171–176. (in Chinese)
- 34 吴忠东, 王全九. 微咸水波涌畦灌对土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 53–58.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect of saline water surge flow border irrigation soil water-salt distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 53–58. (in Chinese)
- 35 米迎宾, 屈明, 杨劲松, 等. 咸淡水轮灌对土壤盐分和作物产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 83–86.
Mi Yingbin, Qu Ming, Yang Jingsong, et al. Effects of rotational irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 83–86. (in Chinese)
- 36 吴忠东, 王全九. 微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 36–43.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect of saline water continuous irrigation on winter wheat yield and soil physicochemical property [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 36–43. (in Chinese)
- 37 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71–76.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 71–76. (in Chinese)
- 38 Malasha N, Flowers T J, Ragab R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1–2): 25–38.
- 39 Rajinder S. Simulations on direct and cyclic use of saline waters for sustaining cotton-wheat in a semi-arid area of northwest India [J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(2): 153–162.
- 40 Grieve C M, Wang D, Shannon M C. Salinity and irrigation method affect mineral ion relations of soybean[J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26(4): 901–913.
- 41 Wang D, Shannon M C, Grieve C M, et al. Ion partitioning among soil and plant components under drip, furrow, and sprinkler irrigation regimes: field and modeling assessments[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(5): 1684–1693.
- 42 Singh R B, Chauhan C P S, Minhas P S. Water production functions of wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated with saline and alkali waters using double-line source sprinkler system[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 736–744.
- 43 Isla R, Aragüés R. Response of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to diurnal and nocturnal saline sprinkler irrigations. I. Total dry matter and hay quality[J]. Irrigation Science, 2009, 27(6): 497–505.
- 44 Busch C D, Turner F J. Sprinkler irrigation with high salt-content water[J]. Transactions of the ASAE, 1967, 10(4): 494–496.
- 45 Shalhevet J. Using water of marginal quality for crop production: major issues [J]. Agricultural Water Management, 1994, 25(3): 233–269.
- 46 雷廷武, 肖娟, 王建平, 等. 地下咸水滴灌对内蒙古河套地区蜜瓜用水效率和产量品质影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 80–84.

- Lei Tingwu, Xiao Juan, Wang Jianping, et al. Experimental investigation into effects of drip irrigation with saline groundwater on water use efficiency and quality of honeydew melons in Hetao Region, Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 80–84. (in Chinese)
- 47 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 30–35.
Wan Shuqin, Kang Yuehu, Wang Dan, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 30–35. (in Chinese)
- 48 Ayars J E, Hutmacher R B, Schoneman R A, et al. Influence of cotton canopy on sprinkler irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(3): 890–896.
- 49 王伟, 李光永, 傅臣家, 等. 水质与灌溉频率对棉花苗期根系分布的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2006, 37(4): 603–608.
Wang Wei, Li Guangyong, Fu Chenjia, et al. Effect of water quality and irrigation frequency on root distribution of cotton seedling[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2006, 37(4): 603–608. (in Chinese)
- 50 王丹, 康跃虎, 万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 83–87.
Wang Dan, Kang Yuehu, Wan Shuqin. Distribution characteristics of different salt ions in soil under drip irrigation with saline water[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 83–87. (in Chinese)
- 51 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 CSAE, 2010, 26(7): 14–20. (in Chinese)
- 52 栗现文, 靳孟贵. 不同水质膜下滴灌棉田盐分空间变异特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 180–187.
Li Xianwen, Jin Menggui. Spatial variability of cotton field salinity under mulched drip irrigation with brackish and fresh water [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 180–187. (in Chinese)
- 53 Zartman R E, Gichuru M. Saline irrigation water effect on soil chemical and physical properties[J]. Soil Science, 1984, 138(6): 417–422.
- 54 Padole V R, Bhalkar D V. Effect of irrigation water on soil properties[J]. PKV Research Journal, 1995, 19: 31–33.
- 55 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969–973.
Zhang Yuliang, Lu Wenlong, Zhang Wei, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of Agrarian soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969–973. (in Chinese)
- 56 王国栋, 褚贵新, 刘瑜, 等. 干旱绿洲长期微咸地下水灌溉对棉田土壤微生物量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 44–48.
Wang Guodong, Chu Guixin, Liu Yu, et al. Effects of long-term irrigation with brackish groundwater on soil microbial biomass in cotton field in arid oasis[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 44–48. (in Chinese)
- 57 Termaat A, Passioura J B, Munns R. Shoot turgor does not limit shoot growth of NaCl-aected wheat and barley[J]. Plant Physiology, 1985, 77(4): 869–872.
- 58 Meiri A, Frenkel H, Mantell A. Cotton response to water and salinity under sprinkler and drip irrigation[J]. Agronomy Journal, 1992, 84(1): 44–50.
- 59 Marcelis L F M, Hooijdonk V. Effect of salinity on growth, water use and nutrient use in radish (*Raphanus sativus* L.) [J]. Plant and Soil, 1999, 215(1): 57–64.
- 60 Mondal M K, Bhuiyan S I, Franco D T. Soil salinity reduction and prediction of salt dynamics in the coastal rice lands of Bangladesh[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(1): 9–23.
- 61 Karin. The effect of NaCl on growth, dry mater allocation and ion uptake in salt marsh and inland population of *America maritima* [J]. New Phytologist, 1997, 135(2): 213–225.
- 62 Esehie H A, Saidi A A, Khanjari S A. Effect of sodium chloride salinity on seedling emergence in chickpea[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2002, 188(3): 155–160.
- 63 Triantafilis J, Odeh I, Warr B, et al. Mapping of salinity risk in the lower Namoi valley using non-linear Kriging methods [J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(3): 203–231.
- 64 Amnon B, Shabtai C, Yoel D M, et al. Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(2): 123–134.
- 65 Talebnejad R, Sepaskhah A R. Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter[J]. Agricultural Water Management, 2015, 144: 177–188.
- 66 Karlberg L, Rockstrom J, Annandale J G, et al. Low-cost drip irrigation—a suitable technology for southern Africa; an example with tomatoes using saline irrigation water[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(1–2): 59–70.
- 67 Abdel-Gawad G, Arslan A, Gaihbe A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria(1999–2002)[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1–2): 39–53.
- 68 肖振华, 万洪富, 郑莲芬. 灌溉水质对土壤化学特征和作物生长的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(3): 272–285.
Xiao Zhenhua, Wan Hongfu, Zheng Lianfen. Effect of irrigation water quality on soil chemical characteristics and crop growth [J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3): 272–285. (in Chinese)
- 69 邢文刚, 俞双恩, 安文钰, 等. 春棚西瓜利用微咸水滴灌与畦灌的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 54–56, 68.
Xing Wen'gang, Yu Shuang'en, An Wenyu, et al. Application of brackish water for spring watermelon in greenhouses under drip

- irrigation and furrow irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(3): 54–56, 68. (in Chinese)
- 70 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73–80.
Ma Wenjun, Cheng Qinjuan, Li Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 73–80. (in Chinese)
- 71 Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: a review[J]. Land Degradation and Development, 2000, 11(6): 501–521.
- 72 陈小兵, 杨劲松, 杨朝晖, 等. 渭干河灌区灌排管理与水盐平衡研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 59–65.
Chen Xiaobing, Yang Jingsong, Yang Zhaohui, et al. Irrigation-drainage management and hydrosalinity balance in Weigan River Irrigation District [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 59–65. (in Chinese)
- 73 迟道才, 程世国, 张玉龙, 等. 国内外暗管排水的发展现状与动态[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(4): 312–316.
Chi Daocai, Cheng Shiguo, Zhang Yulong, et al. The status and developments of subsurface pipe drainage at home and abroad [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2003, 34(4): 312–316. (in Chinese)
- 74 Kelleners T J, Chaudhry M R. Drainage water salinity of tube wells and pipe drains: a case study from Pakistan[J]. Agricultural Water Management, 1998, 37(1): 41–53.
- 75 张金龙, 张清, 王振宇, 等. 排水暗管间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 85–89.
Zhang Jinlong, Zhang Qing, Wang Zhenyu, et al. Effect of subsurface drain spacing on elution desalination for coastal saline soil [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 85–89. (in Chinese)
- 76 张洁, 常婷婷, 邵孝侯. 暗管排水对大棚土壤次生盐渍化改良及番茄产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 81–86.
Zhang Jie, Chang Tingting, Shao Xiaohou. Improvement effect of subsurface drainage on secondary salinization of greenhouse soil and tomato yield[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 81–86. (in Chinese)
- 77 王秀丽, 张凤荣, 王跃朋, 等. 农田水利工程治理天津市土壤盐渍化的效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 82–88.
Wang Xiuli, Zhang Fengrong, Wang Yuepeng, et al. Effect of irrigation and drainage engineering control on improvement of soil salinity in Tianjin[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 82–88. (in Chinese)
- 78 郑九华, 冯永军, 于开芹, 等. 秸秆覆盖条件下微咸水灌溉棉花试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 26–31.
Zheng Jiuhua, Feng Yongjun, Yu Kaiqin, et al. Irrigation with brackish water under straw mulching[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 26–31. (in Chinese)
- 79 Pang Huancheng, Li Yuyi, Yang Jinsong, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1971–1977.
- 80 王在敏, 何雨江, 靳孟贵, 等. 运用土壤水盐运移模型优化棉花微咸水膜下滴灌制度[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 63–70.
Wang Zaimin, He Yujiang, Jin Menggui, et al. Optimization of mulched drip-irrigation with brackish water for cotton using soil-water-salt numerical simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 63–70. (in Chinese)
- 81 Nassar I N, Horton R. Salinity and compaction effects on soil water evaporation and water and solute distributions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(4): 752–758.
- 82 宋日权, 褚贵新, 张瑞喜, 等. 覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分迁移的影响[J]. 土壤学报, 2011, 49(2): 282–288.
Song Riquan, Chu Guixin, Zhang Ruixi, et al. Effect of sand mulching on soil infiltration, evaporation and salt distribution[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 49(2): 282–288. (in Chinese)
- 83 任巍, 罗廷彬, 王宝军, 等. 新疆生物改良盐碱地效益研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 211–214.
Ren Wei, Luo Tingbin, Wang Baojun, et al. Biological improvement of saline and alkaline land in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4): 211–214. (in Chinese)
- 84 王全九, 毕远杰, 吴忠东. 微咸水灌溉技术与土壤水盐调控方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(5): 559–564.
Wang Quanjiu, Bi Yuanjie, Wu Zhongdong. Irrigation technique of saline water and regulation and control method of soil water and salt[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 559–564. (in Chinese)
- 85 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969–973.
Zhang Yuliang, Lu Wenlong, Zhang Wei, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969–973. (in Chinese)
- 86 赵秀芳, 杨劲松, 张清, 等. 石膏-微咸水复合灌溉量对土壤水盐分布特征的影响[J]. 土壤, 2010, 42(6): 978–982.
Zhao Xiufang, Yang Jingsong, Zhang Qing, et al. Effects of saline water irrigation capacity under gypsum applied on distribution characteristics of soil water-salt[J]. Soils, 2010, 42(6): 978–982. (in Chinese)
- 87 刘易, 冯耀祖, 黄建, 等. 微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 146–152.
Liu Yi, Feng Yaozu, Huang Jian, et al. Effects of modifiers on saline soil salt distribution under brackish water irrigation conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 146–152. (in Chinese)