

微咸水入渗水量对土壤水盐运移特征的影响*

吴忠东¹ 王全九²

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255048; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

【摘要】 通过室内 3 g/L 微咸水的入渗试验,分析了不同微咸水入渗水量对土壤剖面含水率、含盐量、脱盐效率和阳离子分布的影响。结果表明,利用 3 g/L 的微咸水进行垂直一维积水入渗,入渗水量较小时,基质势是水分运动的主要动力,入渗量继续增大时,重力势逐渐取代基质势成为水分运动的主要动力;采用 3 g/L 的微咸水入渗,可以使上层土壤脱盐,但使湿润锋处的含盐量急剧增加且达到最大值;湿润锋处含盐量与入渗水量符合指数函数关系,主根区的脱盐效率随着累积入渗量的增加而减小。在利用微咸水进行农田灌溉时,一方面要考虑盐分的淋洗效果,另一方面要兼顾脱盐效率,才能使土壤可持续利用。

关键词: 微咸水 含水率 含盐量 脱盐效率

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0067-05

Effect on Characteristics of Soil Water and Salt Movement about Saline Water Infiltration with Different Infiltration Amount

Wu Zhongdong¹ Wang Quanjiu²

(1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255048, China
2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

For the sake of rational exploitation and utilization of shallow layer underground saline water, through laboratory infiltration experiment in Nanpi Ecological Experimental Station of Chinese Academy of Science, soil moisture content, salinity, desalting efficiency and cation distribution were analyzed with saline water of 3 g/L. Its purpose was to study the soil infiltration characteristics irrigated with saline water in North China. The results showed that under the vertical one-dimensional ponding infiltration with saline water of 3 g/L, matric potential was the main driving force of water movement when the infiltration amount was comparatively small; gravity potential gradually replaced the matric potential to become major driving force for water movement when infiltration amount became lager; upper soil would be desalted and soil salt content would increase to reach maximum infiltrated with saline water of 3 g/L; relationship between soil salt content in wetting front and infiltration amount according with the exponential function, desalting efficiency of active rooting zone negatively correlated with cumulative infiltration. In short, with saline water was used in farm irrigation, both the effect of salt leaching and the desalting efficiency must be considered to make soil used sustainably.

Key words Saline water, Moisture content, Soil salt content, Desalting efficiency

引言

解决灌溉农业所面临的用水矛盾除了提高现有

淡水资源的利用效率,还要研究和发展以前认为不能或不适于灌溉的劣质水源进行灌溉^[1~3]。我国一般认为含盐量在 2~5 g/L 范围内的水资源为微咸

收稿日期: 2010-05-16 修回日期: 2010-05-31

* 国家自然科学基金资助项目(50879067)和中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KSCX2-YW-N-003)

作者简介: 吴忠东,副教授,博士,主要从事微咸水的地面灌溉及环境效应研究, E-mail: wuzhongdong@126.com

通讯作者: 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

水^[4]。微咸水的灌水量成为农田灌溉中一个非常重要的指标,关于灌水量对土壤含盐量及作物产量的影响已有许多研究成果^[5~8],在盐碱地改良和微咸水利用中,相比淡水灌溉来说更重要的是提高水分的淋洗效率或脱盐效率,因为淋洗需水量占灌水定额的相当大一部分。所以研究影响入渗水量对土壤含水率、含盐量以及淋洗效率对农田节水具有重要意义。由于田间实验受降水量、气温等影响因素较多,难以研究入渗水量单因素对土壤水盐运移特征的影响,因此为了研究入渗水量对累积入渗量、入渗率、水分脱盐效率、土壤水盐分布特征和土壤盐分离子运移特征的影响,有必要进行室内微咸水垂直一维积水入渗实验。文献[9]主要研究了入渗后水盐垂直分布、湿润锋推进深度以及 Na⁺ 和 Cl⁻ 的浓度的变化规律,本文在此基础上着重研究不同入渗水量条件下土柱各深度积盐规律、不同深度土层平均含盐量随入渗水量的变化规律以及 Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量的运移特征等。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置和供试土壤

试验装置包括土柱和供水设备两部分,土柱由直径为 8 cm,高为 100 cm 的有机玻璃制成,在土柱侧面每隔 5 cm 开一直径为 1 cm 的圆型取样口,入渗结束后从取样口提取土样用来分析土壤含水率和含盐量。供水设备为马氏瓶,截面积为 42 cm²,高 70 cm,土柱和马氏瓶外壁均有刻度,用来观察入渗水量和湿润锋推进过程。

试验土壤取自中国科学院南皮生态农业试验站田间试验地,从表层至 100 cm 深度混合取土,该土样经过风干、碾压、均匀混合、过 2 mm 的筛后制备成室内试验土样。对土壤的基本物理化学特性进行测定,包括土壤密度、容积密度、颗粒组成等物理特征参数和土壤初始盐分组成等,按国际制土壤分类方法,试验土壤为粉质粘壤土。土壤基本物理化学性质如表 1 所示^[10]。

表 1 土壤基本物理性质
Tab.1 Soil physical properties

深度 /cm	各级颗粒含量百分数/%			土壤质地
	$d \geq$	$0.02\text{ mm} > d \geq$	$d <$	
	0.02 mm	0.002 mm	0.002 mm	
0~67	60	22.5	17.5	砂质粘壤土
67~100	52	20.8	27.4	壤质粘土

注:土壤质地分类参见国际分类标准。

供试土样密积密度 1.40 g/cm³,每层 5 cm,共

20 层,利用马氏瓶供水,土柱表面积水的深度保持 1.0~2.0 cm。供试土壤的盐分组成如表 2 所示。

表 2 供试土壤的盐分组成
Tab.2 Salt constituent of the tested soil

土壤浸提液 EC /dS·m ⁻¹	含盐量 /%	土壤盐分离子组成/%						
		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
0.32	0.114	0.027	0.032	0.018	0.010	0.005	0.019	0.003

1.2 试验设计

不同入渗水量通过控制不同湿润锋深度控制入渗水量,分别以 25、35、45、55 和 65 cm 5 个不同湿润锋深度水平进行研究。采用当地浅层地下水配制成矿化度为 3 g/L 的微咸水,微咸水的离子组成如表 3 所示。

表 3 微咸水的离子组成
Tab.3 Ion content of the saline water g/L

入渗水矿化度	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
3.0	0.696	0.666	0.73	0.096	0.141	0.667

1.3 测试项目与方法

1.3.1 测试项目

试验过程中观测湿润锋运移深度和马氏瓶水位,并记录马氏瓶刻度和湿润锋读数以及对应的入渗时间,由秒表进行入渗计时,由此可得累积入渗量和垂直湿润锋深度随入渗时间的变化。湿润锋到达控制深度时,停止供水,迅速吸干表层积水,从表层至湿润锋处每隔 5 cm 提取土样,进行含水率和含盐量分析。

1.3.2 测试方法

用烘干法测定土壤含水率;利用土壤浸提液滴定法测定水土比为 5:1 的土壤浸提液中各离子含量;采用 DDS-307 型电导率仪测定电导率,并换算成土壤总盐;CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 采用双指示剂中和法,SO₄²⁻ 采用 EDTA 容量法,Cl⁻ 采用 AgNO₃ 滴定法,Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 采用 EDTA 络合滴定法,Na⁺ + K⁺ 采用阴阳离子平衡法,土壤总盐量为八大离子之和。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面水盐分布特征

图 1 显示了不同微咸水入渗水量下土壤剖面体积分含水率和含盐量分布。由图 1 可知,因为是积水入渗,因此土壤表层含水率为饱和含水率^[11]。随着湿润锋深度的增加,相同深度处土壤体积分含水率随之有明显增加,即通过某一断面的水量越大,则该断面含水率越高。具体分析可知,在湿润锋为 25 cm

和 35 cm 的情况下,基质势是水分运动的主要动力,水分剖面只有过渡区和湿润区;随着入渗水量的增加,饱和区和传导区出现,并表现出随时间增大的趋

势;入渗水量继续增加,重力势逐渐取代基质势成为水分运动的主要动力,湿润区的形状趋于一个稳定的陡峭面,这与淡水入渗的水分剖面是一致的。

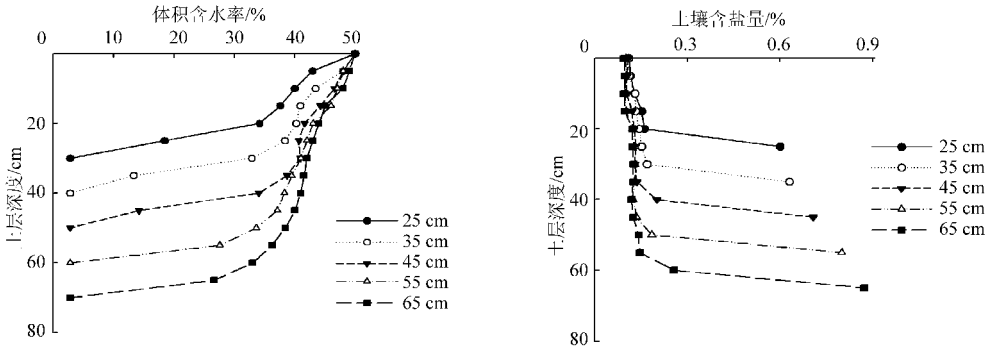


图 1 不同入渗水量下土壤剖面含水率和含盐量分布
Fig. 1 Moisture content and salt content of soil profile with different infiltration rate

不同入渗水量条件下,土壤含盐量在土柱上层增幅较小,在湿润锋处急剧增加且达到最大值;且随着入渗水量增加,除湿润锋外,整个湿润剖面上土壤含盐量相对减少,所以单纯从淋洗角度来说,增大微咸水入渗水量有利于土壤脱盐。由此可见,采用 3 g/L 矿化度微咸水入渗,一方面淋洗了土壤上层盐分,使得上层土壤脱盐;另一方面淋洗出的盐分以及微咸水带入的盐分也增加了下层土壤,特别是湿润锋处的含盐量。此外,由图 1 还可以看出,中间土层含盐量变化不太大,并接近土壤初始含盐量 (0.114%),即从整个剖面来看,呈现上层土壤脱盐,中层土壤持平 and 湿润锋处积盐的规律。

2.2 湿润锋处含盐量随入渗水量的变化特征

水分垂直入渗时,土壤中的盐分随水分向下迁移,并在湿润锋附近累积,此时土壤将出现上层脱盐,下层积盐的现象^[6],因此有必要了解湿润锋处的盐分变化规律。湿润锋处含盐量随入渗水量的变化关系如图 2 所示。

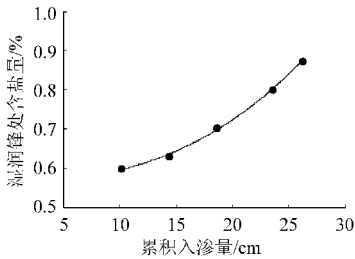


图 2 累积入渗量与湿润锋处含盐量的关系
Fig. 2 Relationship between cumulative infiltration and soil salt content in wetting front

由图 2 可知,湿润锋处含盐量与入渗水量呈正相关关系,采用指数函数拟合实测资料,拟合结果为 $S=0.4587e^{0.0238I}$ ($R=0.9795$) (1) 式中 S ——湿润锋处含盐量, %
 I ——累积入渗量, cm

R ——相关系数

由式(1)可以看出,拟合相关系数很高,表明湿润锋处含盐量随入渗量呈指数增加。由式(1)可知,当累积入渗量为零时,湿润锋处土壤含盐量为 0.4587%,是土壤初始含盐量 (0.114%) 的 4.02 倍,由此可见,土壤盐分的淋洗主要集中在入渗初期累积入渗量很小的情况。而当累积入渗量持续增大时,湿润锋处的含盐量也随之增大,导致这一结果的原因一方面是因为湿润锋上方的土壤中的盐分被有效地淋洗到了湿润锋处,另一方面则是因为累积入渗量越大,则通过入渗而进入土壤的盐分越多,这些盐分在水分不断入渗的过程中随水分积累到了湿润锋处,因此微咸水可以对土壤上层的盐分进行有效的淋洗,从而形成一个低盐区域,为作物的正常生长创造有利条件。根据式(1)可以在已知入渗水量的情况下,计算出湿润锋处的含盐量,或者在需要控制湿润锋处含盐量时,计算出最大可能的入渗水量。

2.3 土层平均含盐量随入渗水量的变化特征

0~5 cm、0~10 cm 和 10~20 cm 土层的平均含盐量随入渗水量的变化规律如图 3 所示。

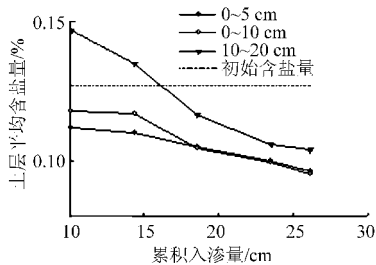


图 3 累积入渗量与土层平均含盐量的关系
Fig. 3 Relationship between cumulative infiltration and average soil salt content in different depth

由图 3 可知,随湿润深度由 25 cm 增至 65 cm,土柱表层 0~5 cm 和 0~10 cm 含盐量均低于初始值,且随入渗水量的增加,脱盐效果越明显。由此可

知,在作物生长的初级阶段,根系刚刚开始发育,此时的淋洗深度不必达到根系完全发育时的深度,即只需将土壤表层的盐分进行淋洗就可使作物正常出苗生长,如果继续加大灌水量,虽然对盐分的淋洗效果更好,但对于作物生长发育却无益,既浪费了水资源,又因微咸水入渗量大而使土壤总盐量增加,增加了土壤次生盐渍化的风险。

此外,10~20 cm 的平均含盐量则在湿润深度为 25 cm 和 35 cm 时含盐量高于初始值,即如果入渗水量不足可使盐分累积在该区域,而当湿润深度达到 35 cm 之后 10~20 cm 含盐量才低于初始值,因此如果淋洗水量不足,不但不会减少作物根系活动层的土壤盐分,反而会使根区内局部土壤盐分过高,危及作物正常生长。

2.4 脱盐效率与入渗水量的关系

为了进一步分析土壤盐分随入渗水量的变化规律,定义某土层脱盐率与通过该土层的水量的比值为水分的脱盐效率,其公式为

$$D' = \frac{S_i - S_f}{S_i I'} \times 100\%$$
 (2)

式中 D' ——脱盐效率,%/cm
 S_i ——初始含盐量,%
 S_f ——入渗后含盐量,%
 I' ——通过该土层的水量,cm

由式(2)可知,脱盐效率不仅与入渗始末的含盐量有关,而且还与通过供试土层的水量有关,脱盐效率更全面地反映了水-盐之间的关系。据当地研究资料表明,冬小麦主要根系 80% 位于 0~40 cm,因此称这一层为主根区^[12]。因此下面主要分析距土层 0~40 cm 的脱盐效率与累积入渗量的关系,如图 4 所示。

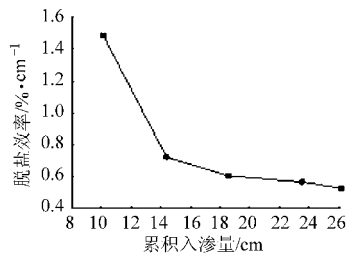


图 4 主根区脱盐效率与入渗水量的关系
Fig. 4 Relationship between cumulative infiltration and efficiency of desalination

试验结束时,5 个水平的湿润深度条件下通过 0~40 cm 土层的水量是不同的,通过水量平衡法计算出该水量,这样可得到脱盐效率随累积入渗量的变化关系。由图 4 可知,开始入渗时水分的脱盐效率很高,这是因为入渗量很小时,可以使土壤表层的

含盐量得到淋洗,入渗水量小因而导致进入土壤的盐分少,表层土壤得到了淋洗,通过整个主根区的土层的水量很少,因此由式(2)可知,其脱盐效率较高。但随着入渗水量的增加迅速降低到一个较低的水平,虽然脱盐效率降低的速率随着累积入渗量的增加而变慢了,但脱盐效率的总趋势仍然随淋洗水量的增加随之降低。由此可知在利用咸水进行农田灌溉时,必须掌握合适的灌水量,脱盐率并非越高越好,一方面需要将主根区含盐量淋洗到作物根系可耐受的范围内,另一方面要兼顾脱盐效率;如果单纯追求脱盐率,会导致灌水量增大,使进入土壤的总盐增加,当气温升高时会发生返盐现象,如果要将这些多余的盐分淋洗到主根区之外,则需要更大的灌水量才能实现,进而使进入土壤的盐分进一步增多,形成淋洗-返盐-再淋洗-再返盐这样的恶性循环,并由此产生土壤的次生盐渍化。

2.5 土壤盐分离子的运移与入渗水量的关系

由于土壤对盐分中各离子的吸附性能是不同的,所以各离子在土壤中的运移也必然存在差异。虽然总盐是衡量土壤盐化程度的指标,但土壤盐分中 Na^+ 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的相对大小则是衡量土壤碱化程度的一个重要指标,为了防止土壤碱化趋势的发展,有必要对这 3 种阳离子在微咸水入渗时的运移特征加以分析。由于二价阳离子 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相对 Na^+ 有相同的吸附特征,在下面的分析中把 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 综合考虑。

图 5 显示了不同入渗深度下,土壤中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 Na^+ 的含量随土层深度和湿润深度的变化,图中虚线为土壤的初始离子含量。

由图 5 可知,3 g/L 的微咸水入渗后,土壤中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 几乎呈活塞式运动,除了湿润锋处,整个土柱剖面上的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量都低于土壤初始 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的含量;且经淋洗过的土壤, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量随入渗水量变化不明显。 Na^+ 的运移规律则与此相反,除了表层土壤,整个剖面的 Na^+ 含量都大于土壤初始 Na^+ 含量。比较 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量和 Na^+ 含量可以发现,除了在湿润锋处 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 Na^+ 都发生盐分累积外,整个剖面上都表现出此消彼长的同步变化。在表层 Na^+ 含量最低,而 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量则相应高于下层剖面(不包括湿润锋处),在离子含量相对稳定区, Na^+ 含量高于土壤初始离子含量,而 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量却低于土壤初始离子含量。土壤中这两种离子含量的此消彼长的同步变化表明在土壤胶体上发生了离子交换。在土壤表层,由于入渗溶液中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量相对较高,土壤溶液中的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量相对占优,置换出了土壤胶

体上的 Na^+ ,使得土壤表层的 Na^+ 及时淋洗,从而使表层土壤中的 Na^+ 相对减少, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量有所回升;而在土壤下层,土壤本身 Na^+ 相对较高,再加上上层 Na^+ 的累积,使得土壤中 Na^+ 的含量相对提

高,置换出土壤胶体上的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$,使得 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 得到及时淋洗,而 Na^+ 则由于胶体的吸附,迁移缓慢,使土壤 Na^+ 含量增加。

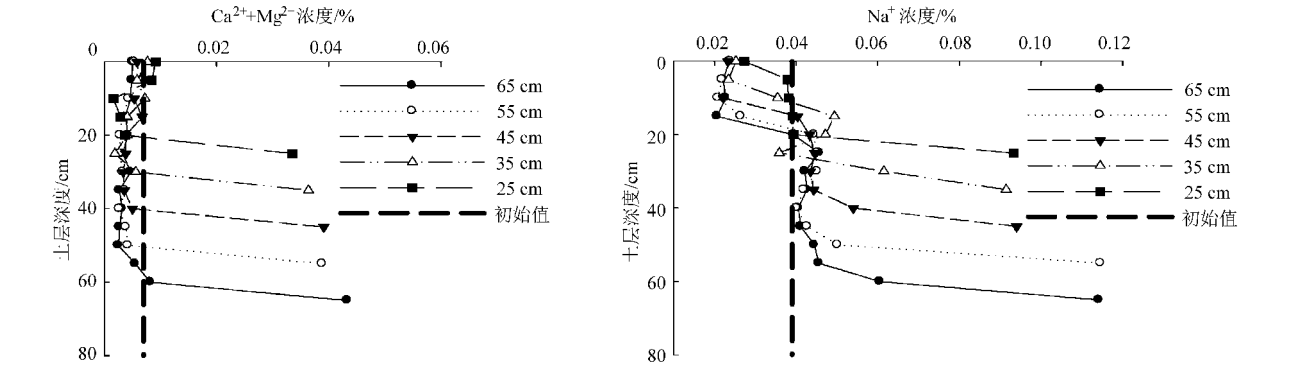


图 5 土壤剖面中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 Na^+ 的含量
Fig. 5 Content of $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and Na^+ in soil profile

3 结论

(1) 不同入渗水量条件下,当湿润锋较小时,基质势是水分运动的主要动力,随着入渗水量的增加,重力势逐渐取代基质势成为水分运动的主要动力,湿润区的形状趋于一个稳定的陡峭面,与淡水入渗的水分割面相一致。采用 3 g/L 的微咸水入渗,随着入渗水量增大,呈现上层土壤脱盐,中层土壤持平和湿润锋处积盐的规律。

(2) 湿润锋处含盐量与入渗水量符合指数函数关系,土壤盐分的淋洗主要集中在入渗初期累积入渗量很小的情况。微咸水可以对土壤上层的盐分进行有效的淋洗,从而形成一个低盐区域,为作物的正常生长创造有利条件。

(3) 土柱表层 0 ~ 5 cm 和 0 ~ 10 cm 含盐量均低于初始值,且随入渗水量的增加脱盐效果越明显。10 ~ 20 cm 的平均含盐量则在湿润深度为 25 cm 和 35 cm 时含盐量高于初始值,因此如果淋洗水量不足,会使根区内局部土壤盐分过高。

(4) 淋洗水量比较小时,虽然开始水分的脱盐效率很高,但随之迅速降低到一个较低的水平,因此在利用咸水进行农田灌溉时,必须掌握合适的灌水量,使灌水量一方面将盐分淋洗到作物根系可以耐受的范围内,另一方面要兼顾脱盐效率。

(5) 除了在湿润锋处 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 Na^+ 都发生盐分累积外,整个剖面上都表现出此消彼长的同步变化,表明在土壤胶体上发生了二价阳离子和一价阳离子的交换。

参 考 文 献

1 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 Quanju. Effects of blending irrigation with brackish water on soil physico-chemical properties and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):36~43. (in Chinese)

2 Shani U, Dudley L M. Field studies of crop response to water and salt stress[J]. Soil Sci. Soc. Am.,2001,65:1 522 ~ 1 528.

3 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 Quanju. 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)

4 张启海,周玉香. 微咸水灌溉发展的基础与措施探讨[J]. 中国农村水利水电,1998(10):12~13.
Zhang Qihai, Zhou Yuxiang. Probe into foundation and measure of saline water irrigation development[J]. China Rural Water and Hydropower,1998(10):12~13. (in Chinese)

5 乔玉辉,宇振荣. 灌溉对土壤盐分的影响及微咸水利用的模拟研究[J]. 生态学报,2003,23(10):2 050~2 056.
Qiao Yuhui, Yu Zhenrong. Simulation study on the effects of irrigation on soil salt and saline water exploration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(10):2 050~2 056. (in Chinese)

- 12 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 13 张智韬, 黄兆铭, 李援农. 遥感影像土地利用方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6B): 20~21.
Zhang Zhitao, Huang Zhaoming, Li Yuannong, et al. The study of deriving land use information from TM image[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6B): 20~21. (in Chinese)
- 14 张智韬, 李援农, 杨江涛, 等. 土壤含水率遥感监测模型及精度分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 152~155.
Zhang Zhitao, Li Yuannong, Yang Jiangtao, et al. Study of model and accuracy of monitoring soil moisture by remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 152~155. (in Chinese)
- 15 仇肇悦. 遥感技术应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1998.
- 16 潘永昌, 王军. 基于蚁群算法的配水树状管网优化布置[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2007, 15(6): 28~31.
Pan Yongchang, Wang Jun. Optimization layout of tree water-pipe network by ant colony algorithms[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry: Natural Science Edition, 2007, 15(6): 28~31. (in Chinese)
- 17 符杨, 孟令合, 胡荣, 等. 改进多目标蚁群算法在电网规划中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 57~62.
Fu Yang, Meng Linghe, Hu Rong, et al. Application of improved multi-objective ant colony algorithm in power network planning[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 57~62. (in Chinese)
- 18 Ippolito M G, Sanseverino E R, Vuinovich F. Multiobjective ant colony search algorithm for optimal electrical distribution system strategically planning[C]//CEC2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004.
- 19 汪志农, 雷雁斌, 周安良, 等. 灌区管理体制变革与监测评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- 20 张智韬, 李援农, 陈俊英, 等. 基于 3S 技术和蚁群算法的灌区渠系优化配水[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 37~41.
Zhang Zhitao, Li Yuannong, Chen Junying, et al. Optimization of water allocation management for irrigated canals based on 3S technology and ant colony algorithm[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2010, 38(7): 37~41. (in Chinese)

(上接第 71 页)

- 6 Feizi M. Long term effect of using saline water on soil salinity and sodicity[C]//Proc. 10th Afro-Asian Confr. Bali, Indonesia, 1998: 89~95.
- 7 巨龙, 王全九, 王琳芳, 等. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 86~90.
Ju Long, Wang Quanjiu, Wang Linfang, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 86~90. (in Chinese)
- 8 张建军, 唐小明, 党翼. 灌水量及其分配方式对冬小麦水分利用效率-光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 85~90.
Zhang Jianjun, Tang Xiaoming, Dang Yi. Effects of irrigation quantity and irrigation ways on water use efficiency, photosynthetic characters and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(1): 85~90. (in Chinese)
- 9 苏莹, 王全九, 叶海燕, 等. 微咸水不同入渗水量土壤水盐运移特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 43~48.
Su Ying, Wang Quanjiu, Ye Haiyan, et al. Study on water and salt transporting feature of soil with different infiltration amount of saline water[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4): 43~48. (in Chinese)
- 10 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 on soil water-salt distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 53~58. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 张永波, 王秀兰. 表层盐化土壤区咸水灌溉试验研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 53~59.
Zhang Yongbo, Wang Xiulan. Experimental investigation of saline water irrigation at surface layer salification soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 53~59. (in Chinese)