

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.015

淡水与微咸水入渗特性对比分析*

毕远杰 王全九 雪 静

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

【摘要】 为了研究淡水与微咸水连续和间歇入渗特性的差异,采用矿化度 1.33 g/L 的淡水与矿化度 3 g/L 的微咸水,在黏质土壤条件下进行了一维积水连续入渗及间歇入渗试验。研究表明,采用微咸水入渗可以改变土壤的结构特性,从而增大土壤的入渗能力;利用一维代数入渗模型对试验资料进行处理,结果表明模型可以比较精确地描述微咸水入渗过程;入渗水为淡水时,间歇入渗减渗,而入渗水为微咸水时,间歇入渗增渗;间歇入渗的循环率不同,其减渗效果及增渗效果都略有差异。

关键词: 微咸水 淡水 间歇入渗 连续入渗

中图分类号: S152.7⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)07-0070-06

Infiltration Characteristic Contrast Analysis of Fresh Water and Saline Water

Bi Yuanjie Wang Quanjiu Xue Jing

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

In order to research the difference between continuous infiltration and intermittent infiltration of fresh water and saline water, one-dimensional infiltration experiments of continuous and intermittent water with salinity of 1.33 g/L for fresh water and 3 g/L for saline were carried out in clay soil. The results showed that saline water can influence soil structural characteristics and enhance infiltration capacity. One dimensional infiltration modeling analysis showed that the model is able to describe the process of saline water infiltration exactly. Intermittent infiltration of fresh water had an effect of reducing infiltration, however, intermission infiltration of saline water had an effect of increasing infiltration. There existed slight difference in infiltration-reducing and infiltration-increasing effect for various circulation rate of intermission infiltration.

Key words Saline water, Fresh water, Intermittent infiltration, Continuous infiltration

引言

我国淡水资源缺乏而且时空上分布不均匀,但浅层地下微咸水资源较为丰富,对于微咸水的分类标准,国内外有几种不同的分类方法^[1-2],我国一般认为含盐量在 2 ~ 5 g/L 范围内的水资源为微咸水^[3]。国内外大量研究和实践证明科学合理的开发利用微咸水资源,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^[4-8]。波涌

灌溉,也称为间歇灌溉,是按一定时间间隔周期性地向沟畦供水的一种节水型地面灌溉新技术,与传统的灌溉方法比较,具有节水、保肥、减少深层渗漏、提高灌水效率、改善灌水均匀度等优点^[9-11]。伴随着间歇灌溉这一地面灌水技术的出现,土壤入渗过程被分为连续入渗和间歇入渗两种。连续入渗过程是指土壤在充分供水条件下的连续入渗过程;间歇入渗过程则是指周期性供水和停水的入渗过程。有研究表明^[12-13],淡水间歇供水会使土表形成

收稿日期: 2009-08-31 修回日期: 2009-10-14

* 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项目(KSCX2-YW-N-003)

作者简介: 毕远杰,博士生,主要从事微咸水灌溉与土壤水盐运动理论研究,E-mail: byuanjie@163.com

通讯作者: 王全九,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与溶质运移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

致密层,改变土壤的入渗特性,因而与连续入渗相比较,间歇入渗具有减渗的作用。前人对间歇入渗的研究只限于入渗水为淡水的情况,当采用微咸水入渗时,由于盐分离子随入渗水进入到土壤后与土壤胶体颗粒以及土壤中原有的化学成分发生物理化学作用,改变土壤的结构及孔隙性,从而改变土壤的入渗特性^[14-15],因此微咸水入渗与传统的淡水入渗相比其入渗机理有所改变。

为了研究淡水与微咸水连续及间歇入渗特性的差异,本文开展一维间歇积水入渗试验,研究淡水与微咸水入渗条件下的连续及间歇入渗特性,并分析对比不同间歇时间(循环率)对间歇入渗特性的影响,旨在揭示采用微咸水入渗时的连续及间歇入渗特性,同时也将会为进一步研究微咸水波涌灌溉技术打下理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置主要包括试验土柱和供水装置。试验

土柱为内径8 cm,高100 cm的有机玻璃圆筒,其侧边开有供水口,底端固定法兰式透气底板,土柱外壁每5 cm有一道分划线,用以作为试验前装土的参照依据。本次试验中的供水装置采用马里奥特筒(以下简称马氏筒)。马氏筒是一种等压供水装置,可以为常水头试验提供一个恒定不变的水头,试验中通过测记马氏筒中水量随时间的变化,计算得到土壤的累积入渗量。

1.2 供试土样及水质

本次试验的土样取自中科院天津静海节水试验基地,取地表至0.5 m深度的土壤均匀混合、风干、碾压、过筛(1 mm)后备用。土壤初始体积含水率为2.88%,饱和含水率为51.89%,饱和导水率为0.000 133 cm/s。采用激光粒度仪测定其土壤颗粒组成,土壤颗粒组成及土壤中部分离子含量如表1所示。试验前使用电导仪标定地下水矿化度,试验中所用的淡水为深层地下水,微咸水则由深层地下水和浅层地下水调配而成。地下水水质指标如表2所示。

表1 土壤颗粒组成及主要离子含量

Tab.1 Texture and major ion content of the experimental soil

土壤各级颗粒百分含量/%								土壤部分离子含量/g·kg ⁻¹					
$d \leq 0.001$	$0.001 < d \leq 0.002$	$0.002 < d \leq 0.01$	$0.01 < d \leq 0.05$	$0.05 < d \leq 0.1$	$0.1 < d \leq 0.25$	$0.25 < d \leq 0.5$	$0.5 < d \leq 1$	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	全盐量
15.57	12.43	14.89	47.30	6.55	1.07	0.90	1.29	0.15	0.08	0.05	0.30	0.02	0.82

表2 地下水水质指标

Tab.2 Quality index of irrigation water

灌溉水水质指标	矿化度/g·L ⁻¹	电导率/mS·cm ⁻¹	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹
浅层地下水	7.99	10.11	1763	405	275	1065
深层地下水	1.33	1.66	483	41	10	568

1.3 试验内容与方法

几个间歇入渗参数的定义:①周期数,指完成一次入渗所需要的循环次数。②净入渗时间,指完成一次入渗的各周期入渗时间的总和。③周期入渗时间,指一个入渗周期的入渗时间。④周期停水时间,指一个入渗周期内的停水时间。⑤周期时间,指一个入渗周期的周期入渗时间与周期停水时间之和。⑥循环率,是周期入渗时间与周期时间的比值,是反应停水时间相对长短的参数。由于上述间歇入渗的6个参数之间存在一定的换算关系,因此仅有3个参数是独立的。本次试验入渗水为淡水(1.33 g/L)和微咸水(3 g/L),入渗方式分为连续入渗(周期数为1,循环率也为1的情况)和间歇入渗,其中间歇入渗又包括周期数为2,循环率分别为1/2和1/3

的两种间歇方式。

试验开始前将供试土样按1.32 g/cm³的设计容重分层均匀装入土柱,装土至供水口下1 cm处。试验开始后采用马氏筒供水以提供恒定水头,本次试验采用的供水水头控制为2 cm。试验过程中记录湿润锋随时间的变化情况以及马氏筒中水位的变化情况。试验结束后用土钻沿土柱垂直方向取土,用烘干法测定土壤含水率。

本次试验中的连续入渗的入渗时间为90 min,间歇入渗的净入渗时间亦为90 min,由于间歇入渗的周期数均为2,因此间歇入渗的周期入渗时间均为45 min,循环率为1/2和1/3的处理周期停水时间分别为45 min和90 min。为了保证试验结果的可靠性,每个处理至少重复3次。

2 结果与分析

2.1 连续入渗特性对比分析

图1显示了淡水与微咸水连续入渗时累积入渗量以及湿润锋随时间的变化曲线。由图1中可以看出:入渗时间相同的情况下,采用微咸水入渗时的累积入渗量以及湿润锋推进深度均大于淡水入渗情况。入渗时间达到90 min时,淡水入渗的累积入渗量为40 mm,微咸水入渗的累积入渗量为43.4 mm;淡水湿润锋推进深度为10.55 cm,微咸水湿润锋推进深度为12.35 cm,与淡水入渗相比较,微咸水入渗的累积入渗率和湿润锋推进深度分别增大8.5%

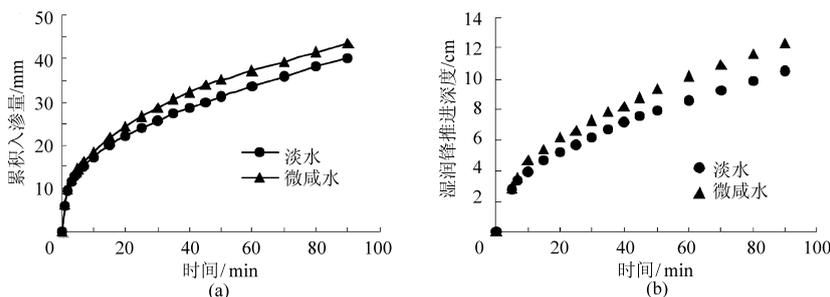


图1 入渗水质对连续入渗特性的影响

Fig. 1 Effect of infiltration water quality on continuous infiltration characteristic

(a) 累积入渗量 (b) 湿润锋

2.2 利用一维代数模型分析累计入渗量与含水率分布

王全九等依据一维垂直土壤水分运动基本方程,推求出垂直一维非饱和土壤水分运动代数模型,该模型适用于描述均质土壤在恒定水头下的一维积水入渗过程。利用该模型通过代数计算就可以求得土壤水分运动特征,计算过程简便且减小了数值计算所引起的误差^[16]。其累积入渗量可以表示为

$$I = z_f(\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \alpha} + (\theta_r - \theta_i) z_f \quad (1)$$

$$\theta = \left(1 - \frac{z}{z_f}\right)^\alpha (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (2)$$

式中 I ——累积入渗量, cm

z_f ——湿润锋推进深度, cm

θ_s ——土壤饱和含水率, cm^3/cm^3

θ_r ——土壤滞留含水率, cm^3/cm^3

α ——土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合性状系数

θ_i ——土壤初始含水率, cm^3/cm^3

θ ——土壤含水率, cm^3/cm^3

z ——土体中任意一点距土表的深度, cm

因此,只要获得累积入渗量与湿润锋的关系,便可以得到 α 值,进而可以计算出土体中任意一点的含水率值。由于试验土壤初始含水率较低,故取滞

和17.1%。入渗结束时累积入渗量与湿润锋推进深度的比值再加上土壤初始含水率为整个湿润体土壤平均含水率,则淡水入渗湿润体土壤平均含水率为40.79%,微咸水入渗湿润体土壤平均含水率小于淡水入渗的情况,为37.99%。这可能是由于土壤盐分浓度的提高有利于促进土壤颗粒的絮凝,随着溶液中盐分浓度的增大,扩散双电子层向黏粒表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力降低,进而增强了土壤胶体的絮凝作用,有助于形成团粒结构,增加其团聚性,稳定土壤结构,使土壤中大孔隙增加,增强其渗透性的同时,降低其保水能力。

留含水率等于初始含水率,对累积入渗量与湿润锋推进深度间关系进行拟合,结果如下:淡水入渗 $I = 0.399z_f$, $R^2 = 0.966$;微咸水入渗 $I = 0.375z_f$, $R^2 = 0.973$ 。

根据式(1)计算出淡水入渗时的 α 为0.228,微咸水入渗时的 α 为0.307。利用式(2)计算土壤水分剖面,计算结果如图2所示。从土壤含水率剖面看,当入渗水为淡水时,土壤剖面含水率的计算值与实测值吻合得较好,计算值与实测值的最大相对误差的绝对值介于0.03%~3.6%之间;而当入渗水为微咸水时,土壤剖面含水率的计算值大于实测值,而且计算中发现,自土表0~8 cm范围内,相对误差较大,湿润锋附近相对误差较小,这主要是由于上层土壤水分通量较大,这也从某种角度说明了微咸水入渗后改变土壤结构特征,降低土壤保水能力。微咸水入渗后土壤剖面含水率计算值与实测值的最大相对误差虽然普遍大于淡水入渗,但其绝对值仍较小,最大值不超过5.3%,因此无论淡水还是试验所用的微咸水,该模型均可以反映土壤水分分布特征。

2.3 间歇入渗特性对比分析

间歇入渗相对连续入渗根本的差别就在于间歇入渗过程包括一个或几个没有水分入渗的间歇过程。图3显示了淡水及微咸水间歇入渗时累积入渗量及湿润锋随时间的变化过程。图3a为淡水入渗

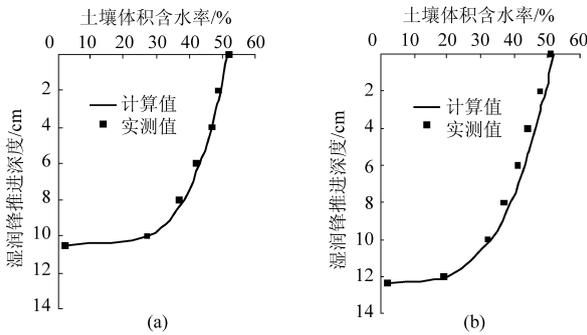


图 2 含水率剖面

Fig. 2 Water content profile

(a) 淡水 (b) 微咸水

条件下累积入渗量随时间的变化过程。由图中可以看出：从入渗开始到间歇入渗第 1 周期末，间歇入渗累积入渗量随时间的变化过程与连续入渗基本一致；从第 2 周期开始，间歇入渗累积入渗量曲线开始趋于平缓，累积入渗量以及累积入渗量的变幅都略小于连续入渗。这主要是由于，间歇过程结束后第 2 个周期的入渗开始时，由于土表裂隙和土水势的增大，导致入渗初期入渗率增大，当表层土壤达到饱和后，致密层开始起主导作用，使入渗率迅速减小并趋于稳定入渗，此外，由于致密层导致表层土壤饱和导水率减小，因而土壤稳定入渗率减小。虽然第 2 个周期开始时入渗率增大，但随后会迅速减小并趋于稳定入渗，这个过程所用时间很短，所以第 2 周期开始时入渗率的增大对累积入渗量变化率的增加作用小于稳定入渗率的减小对累积入渗量变化率的减小作用，最终导致入渗结束时连续入渗的累积入渗量略大于间歇入渗情况。

图 3b 显示了淡水入渗时湿润锋随时间的变化

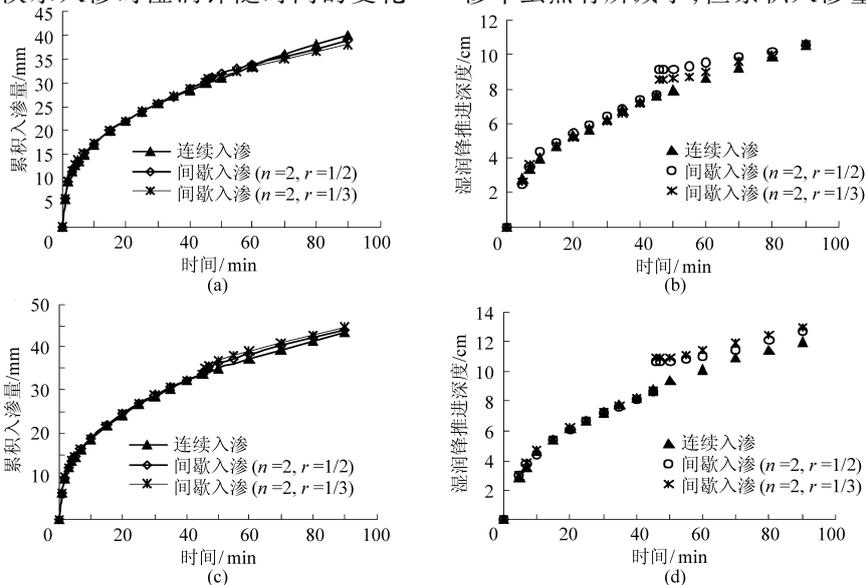


图 3 入渗水质对间歇入渗特性的影响

Fig. 3 Effect of infiltration water quality on intermittent infiltration characteristic

(a) 淡水入渗累积入渗量 (b) 淡水入渗湿润锋 (c) 微咸水入渗累积入渗量 (d) 微咸水入渗湿润锋

过程。由图中可以看出：从入渗开始到间歇入渗第 1 周期末，间歇入渗湿润锋随时间的变化过程与连续入渗基本一致；第 2 周期开始时，湿润锋值显著增大，随着入渗的过程的进行，湿润锋曲线趋于平缓，湿润锋推进速度低于对应时刻连续入渗的湿润锋推进速度；入渗结束时，与连续入渗相比，间歇入渗的湿润锋推进深度与连续入渗的差别不大。间歇过程中，土壤表面虽然没有积水，但由于土壤中水分再分布作用，湿润锋仍然向下推进，致使下一入渗周期开始时湿润锋值有突变；另外，由于此时土壤含水率较大以及致密层的作用，致使在接下来入渗过程湿润锋推进较慢；二者综合作用表现为入渗结束时，间歇入渗与连续入渗的湿润锋推进深度无明显差别。

图 3c 为微咸水入渗条件下累积入渗量随时间的变化过程。由图中可以看出：微咸水间歇入渗与淡水间歇入渗的主要区别在第 2 周期开始阶段，微咸水间歇入渗累积入渗量以及累积入渗量的变幅大于连续入渗，并且持续时间较长，虽然在随后的入渗过程中，致密层开始起主导作用，累积入渗量曲线开始趋于平缓，但入渗结束时间歇入渗的累积入渗量依然大于连续入渗。与淡水间歇入渗相比较，在间歇过程中，微咸水入渗土壤水分再分布更充分，土壤表层及上层土壤剖面土壤含水率相对较低，因此在第 2 周期入渗开始时，土壤入渗率较大，且达到稳定入渗所需的时间较长。虽然间歇过程对表层土壤致密层的形成有一定的贡献，但由于微咸水入渗对土壤结构的改变，以及试验土壤质地黏重，各种因素综合作用的结果表现为：微咸水入渗时土壤的稳定入渗率虽然有所减小，但累积入渗量却不同程度的增

大,循环率越小,间歇时间越长,累积入渗量增大的就越多。

图3d显示了微咸水入渗时湿润锋随时间的变化过程。当循环率为1/2时,淡水入渗间歇过程中湿润锋突变值为0.95 cm,微咸水入渗为2.05 cm;循环率为1/3时,淡水为1.40 cm,微咸水2.20 cm。因此循环率一定时,微咸水入渗间歇过程中湿润锋的突变值大于淡水入渗。对于微咸水间歇入渗,由于第2周期入渗开始时土壤含水率较大以及致密层的作用,致使在接下来的入渗过程湿润锋推进较连续入渗略慢一些,但二者综合作用表现为入渗结束时,间歇入渗湿润锋推进深度大于连续入渗,且循环率越小,湿润锋推进深度相对越大。

2.4 间歇供水对累积入渗量的影响分析

对于淡水入渗,间歇入渗具有减渗作用,通常用减渗率来表示,用 H_2 表示间歇入渗全过程的累积入渗量,用 H_1 表示与间歇入渗供水时间相同的连续入渗的累积入渗量,则减渗量 $\Delta H = H_1 - H_2$,减渗率 $\eta = \Delta H / H_1 \times 100\%$ 。然而对于微咸水间歇入渗,当入渗结束时,与连续入渗相比较,循环率不同其间歇入渗的累积入渗量均不同程度地增加。因此,在此定义增渗量和增渗率的概念:同样,用 H_2 表示间歇入渗全过程的累积入渗量,用 H_1 表示与间歇入渗供水时间相同的连续入渗的累积入渗量,则增渗量 $\Delta H = H_2 - H_1$,增渗率 $\eta = \Delta H / H_1 \times 100\%$ 。

表3给出了淡水与微咸水连续入渗及间歇入渗累积入渗量的差异情况,从表中可以看出,当入渗水为淡水时,间歇入渗较连续入渗均不同程度地减渗,而入渗水为微咸水时,结果恰恰相反,即间歇入渗较连续入渗均有不同程度的增渗效果。

对于入渗水为淡水的间歇入渗,由于试验土壤质地较为黏重,所以间歇入渗的减渗效果不是很明显,试验的两种处理最大减渗率不超过5%。对于入渗水为微咸水的间歇入渗情况,由上述分析可知

微咸水带入土壤中的盐分离子改变了土壤的结构特性,使土壤的大孔隙增加,加之试验土壤较为黏重,致密层对减渗的贡献不大,因此出现间歇入渗较连续入渗非但不减渗反而增渗的现象。另外当循环率为1/3时,由于周期停水时间较长,使土壤表面形成裂隙,致使在第2周期入渗开始时入渗率急剧增大且持续时间相对较长,因此淡水入渗条件下,循环率为1/3的处理减渗效果较循环率为1/2的处理稍差;而微咸水入渗条件下,循环率为1/3的处理增渗效果较循环率为1/2的处理略强。

表3 间歇供水对累积入渗量的影响对比
Tab.3 Contrast of infiltration-decrease effect

入渗水质	周期数	循环率	累积入渗量 /mm	减(增)渗量 /mm	减(增)渗率 /%
淡水	1	1	40.0		
	2	1/2	38.1	1.9	4.75
	2	1/3	38.7	1.3	3.25
微咸水	1	1	43.3		
	2	1/2	44.0	0.7	1.62
	2	1/3	44.8	1.5	3.46

3 结束语

为了研究入渗水矿化度对入渗过程的影响,开展了一维连续与间歇积水入渗试验,研究了淡水(1.33 g/L)与微咸水(3 g/L)入渗条件下的连续入渗及间歇入渗的入渗特性,并分析对比了不同间歇时间(循环率)对间歇入渗特性的影响,结果表明采用微咸水入渗可以改变土壤的结构特性,从而增大土壤的入渗能力;利用一维代数入渗模型对试验资料进行处理,发现模型可以比较精确地描述微咸水入渗过程;入渗水为淡水时,间歇入渗减渗;而入渗水为微咸水时,间歇入渗增渗;间歇入渗的循环率不同,其减渗效果及增渗效果都略有差异。

参 考 文 献

- 马太玲,袁保惠,梅金铎. 内蒙河套灌区建立回归水灌溉系统可行性分析[J]. 灌溉排水,2001,20(2):69~72.
Ma Tailing, Yuan Baohui, Mei Jinduo. Feasibility analysis on irrigation return flow reuse system in hetao irrigation district in Inner Mongolia[J]. Irrigation and Drainage,2001,20(2):69~72. (in Chinese)
- Rhoades J D. The use of saline water for crop production-irrigation and drainage paper 48[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nation, 1992.
- 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.
- Oster J D. Irrigation with poor quality water [J]. Agricultural Water Manage, 1994, 25(3):271~275.
- Fang Sheng, Chen Xiuling. Using shallow saline groundwater for irrigation and regulating for soil salt-water regime [J]. Irrigation and Drainage Systems, 1997, 11(1):1~14.
- 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)
- 7 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):71~75.
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)
 - 8 吴忠东,王全九. 微咸水混灌对土壤理化性质和冬小麦产量的影响研究[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 CSAE,2008,24(6):69~73. (in Chinese)
 - 9 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 波涌灌溉条件下土壤致密层的形成及其对入渗特性的影响[J]. 水利学报,1996,27(7):75~81.
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng, Wang Zhirong, et al. Formation of soil seal and its effect on infiltration characteristics in surge flow irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1996,27(7):75~81. (in Chinese)
 - 10 王文焰,汪志荣,费良军,等. 波涌灌溉的灌水质量评价及计算[J]. 水利学报,2000,31(3):53~58.
Wang Wenyan, Wang Zhirong, Fei Liangjun, et al. Evaluation and calculation of irrigation quality in surge flow irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(3):53~58. (in Chinese)
 - 11 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)
 - 12 刘贤赵,康绍忠. 连续与间歇积水入渗对比试验研究[J]. 水科学进展,1999,10(1):53~58.
Liu Xianzhao, Kang Shaozhong. Contrast experimental research on continuous and intermittent infiltration under ponded conditions[J]. Advances in Water Science,1999,10(1):53~58. (in Chinese)
 - 13 王文焰,张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水土保持学报,1991,5(4):38~44.
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng. Research on field soil water penetration testing device [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1991,5(4):38~44. (in Chinese)
 - 14 郭太龙,迟道才,王全九,等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊):84~87.
Guo Tailong, Chi Daocai, Wang Quanjiu, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(Supp.):84~87. (in Chinese)
 - 15 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.
 - 16 王全九,邵明安,郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:24~28.

(上接第69页)

- 11 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)
- 12 Feigen A. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment, irrigation with treated sewage effluent[M]. Berlin: Management for Environmental Protection, 1990:59~87.
- 13 于天仁,王振权. 土壤分析化学[M]. 北京:科学出版社,1988:208~209.
- 14 Bajwa M S. Josan A S. Effect of gypsum and sodic irrigation water on soil and crop yields in a rice-wheat rotation[J]. Agric. Water Management,1989,16(1~2):53~61.
- 15 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)
- 16 Hillel D. Out of the earth: civilization and the life of the soil[M]. New York: University of California Press,1991.