

入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响^{*}

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 255049; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

【摘要】 为开发利用浅层地下劣质水,进行均匀土柱一维垂直入渗实验,对矿化度不同的入渗水在土柱中入渗后的剖面含水率分布和土壤入渗率进行了分析,并对土壤剖面的含盐量以及入渗后盐分降低区深度随入渗水矿化度的变化规律进行了研究。结果表明,含盐水入渗能够改变土壤结构,并增强土壤导水和持水能力,但随着进入土壤中的钠离子数量增加,土壤的导水和持水能力并非由矿化度一个因素决定,而是由入渗水矿化度和钠离子数量共同决定。当矿化度低于3 g/L左右时仍可以对土壤上层的盐分有一定的淋洗作用,但当矿化度进一步升高时,入渗水对供试土壤的盐分几乎没有淋洗作用。

关键词: 地下水 积水入渗 矿化度 含水率 盐分降低区深度

中图分类号: S273.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0064-06

Effect on Both Soil Infiltration Characteristics and Ion Mobility Features by Mineralization Degree of Infiltration Water

Wu Zhongdong¹ Wang Quanjiu²

(1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

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

Abstract

One-dimensional perpendicular infiltration process to water with different mineralization degree by uniformity earth pillar experiments was studied. Soil moisture content distribution and infiltration rate infiltrated by different mineralization degree were analyzed. The variance in regular pattern of soil profile salt content as well as desalt depth after infiltration in response to mineralization degree of infiltrated water were carried out at the same time. The results showed that saline water infiltration could transform soil structure and enhance both soil water transmitting ability and moisture holding capacity, but in company with sodium ion in soil increasing, soil water transmitting ability and moisture holding capacity did not depend only on mineralization degree, but rather codetermined by both mineralization degree and sodium ion quantity; top soil salt would be infiltrated by water when mineralization degree lowered about 3 g/L, but soil salt was scarcely infiltrated when mineralization degree further increased.

Key words Groundwater, Ponding infiltration, Mineralization degree, Moisture content, Desalination depth

引言

淡水资源短缺已成为制约我国工农业发展的重

要因素,特别是北方地区显得尤为突出^[1],如何解决我国水资源危机问题已成为一项十分迫切的任务。近年来各国为了缓解淡水资源供需矛盾,均把

收稿日期: 2009-08-27 修回日期: 2009-12-14

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50879067)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-003)和陕西省重点学科建设专项资金资助项目

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

劣质水的开发利用作为重要手段,微咸水分布广、储量大,因此成为开发利用的主要水源^[2]。但微咸水灌溉后容易引起土壤的次生盐碱化,使耕层的土壤含盐量或土壤溶液浓度超过作物的耐盐度,从而影响作物生长和产量^[3]。在目前的技术条件下,应用最多的是2~5 g/L的微咸水,利用方式多为旱季抗旱灌溉^[4]。虽然咸水和微咸水属于劣质水资源,但是由于土壤阳离子的交换作用和土壤阴离子的吸附作用,加上作物也具有一定的耐盐能力,只要采取适当措施,合理利用咸水或微咸水灌溉作物,达到抗旱增产的目的是完全可能的。因此,研究包括咸水在内的水资源灌溉的作物和土壤效应,对解决我国水资源危机和实现农业可持续发展具有重大意义^[5-6]。

土壤是天然的净化器,土体通过对各种污染物的机械吸收或阻留、土壤胶体的理化吸附、土壤溶液的溶解稀释、土壤中微生物的分解及利用而发生物理和生物化学作用,大部分有毒物质会分解、毒性降低或转化为无毒物质及有机物为作物生长发育所利用^[7]。但长期用未经任何处理的不符合标准的水灌溉农田,土壤中的污染物及离子含量超过了土壤吸持和作物吸收能力,必然会出现土壤板结、肥力下降、土壤的结构和功能失调,引起土壤环境恶化,产生环境生态问题^[8]。

为了分析入渗水矿化度对累积入渗量、湿润锋及八大离子在土壤剖面的分布特征的影响,开展室内垂直一维积水入渗下的土壤水盐运移实验研究。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

实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的圆形取样口,入渗结束后从取样口提取土样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,实验装置如图1所示。

1.2 供试土样基本物理性质和盐分组成

实验土壤取自中科院南皮生态试验站田间实验地,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的筛后制备成室内实验土样。对土壤的基本物理化学特性进行测定,包括土壤容重、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,实验土壤为粉质粘壤土。土壤基本物理化学性质如表1所示。

供试土样容重1.40 g/cm³,每层5 cm,共20层,利用马氏瓶供水,土柱表面积水深度保持1.0~2.0 cm。

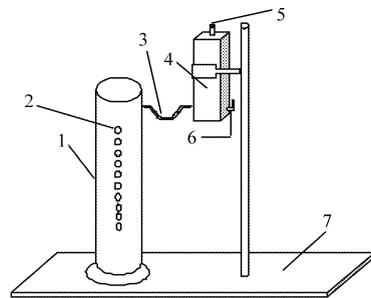


图1 室内垂直一维入渗实验装置

Fig. 1 One dimension vertical infiltration testing apparatus of laboratory experiment

1. 土柱 2. 取样口 3. 输水管 4. 马氏瓶 5. 灌水口 6. 进气口 7. 台架

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 |
|--------|--------------------------|---|------------------------|-------|
| | $d \geq 0.02 \text{ mm}$ | $0.02 \text{ mm} > d \geq 0.002 \text{ mm}$ | $d < 0.002 \text{ mm}$ | |
| 0~67 | 60.0 | 22.5 | 17.5 | 砂质粘壤土 |
| 67~100 | 52.0 | 20.8 | 27.2 | 壤质粘土 |

注:土壤质地分类参见国际分类标准。

1.3 实验设计

室内实验所采用的入渗水由当地深井淡水或浅井咸水根据入渗水的水质不同加入NaHCO₃、Na₂SO₄、MgSO₄、MgCl₂、NaCl和CaCl₂配制而成,或直接利用高矿化度和低矿化度的井水混合、稀释而成,其中0 g/L的入渗实验采用蒸馏水,当配制矿化度呈一定梯度的入渗水时,钠吸附比保持8 (mmol/L)^{0.5}左右。入渗深度均控制在45 cm,为了保证实验结果的可靠性,每个处理都进行了2次重复实验,经分析2次重复实验的结果基本一致。不同矿化度入渗水离子组成和浓度如表2所示,供试土壤的盐分组成如表3所示。

表2 不同矿化度的入渗水离子组成

Tab. 2 Ion content of the saline water with different mineralization degrees

| 入渗水矿化度/g·L ⁻¹ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 1.2 | 0.207 | 0.503 | 0.110 | 0.024 | 0.046 | 0.343 |
| 2.3 | 0.342 | 0.567 | 0.672 | 0.036 | 0.119 | 0.552 |
| 3.0 | 0.696 | 0.666 | 0.730 | 0.096 | 0.141 | 0.667 |
| 3.5 | 0.427 | 1.361 | 0.596 | 0.261 | 0.182 | 0.685 |
| 4.3 | 0.530 | 1.503 | 0.913 | 0.301 | 0.233 | 0.826 |

1.4 测试项目及方法

1.4.1 测试项目

在实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

控制深度即 45 cm 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。

表 3 供试土壤的盐分组成
Tab.3 Salt constituent of the tested soil

| 土壤浸提液 电导率/ $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ | 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 |

1.4.2 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, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂中和法, SO_4^{2-} 采用 EDTA 容量法, Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法, Na^+ 和 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 对土壤含水率剖面影响

图 2 显示了垂直一维积水入渗过程中,不同矿化度的入渗水在达到 45 cm 湿润锋时土壤的质量含水率剖面。

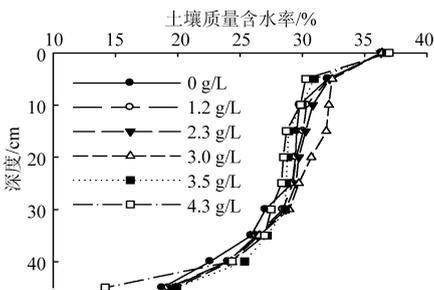


图 2 入渗结束后土壤含水率剖面随矿化度的变化曲线

Fig.2 Soil quality moisture content vs depth infiltrated by different mineralization degrees

由图 2 可以看出,由于入渗过程中土壤表面积水的存在,土柱表层土壤含水率基本为饱和含水率,随着湿润锋向下推进,土壤质量含水率呈陡峭的下降趋势,在 45 cm 湿润锋处达到最小值。从土壤 5 ~ 40 cm 的传导区和湿润区看出,随着矿化度的升高,同一深度土层的含水率呈增大的趋势,同一层中矿化度为 3.0 g/L 的入渗水土壤含水率最大,矿化度进一步增大到 3.5 和 4.3 g/L 时土壤含水率并未有增大现象,反而略有减小,即相同湿润锋深度,随着入渗水矿化度的升高,同一土层土壤含水率也增加,但矿化度高于 3.0 g/L 后,土壤含水率反而与入渗水矿化度负相关。造成这一现象的主要原因是随着

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,使得土壤导水能力增加,所以盐分离子在某种程度上可以增强土壤导水和持水能力^[10];但随着矿化度的进一步升高,入渗过程进入土壤中的 Na^+ 数量也随之增加, Na^+ 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, Na^+ 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^[11],使土壤的透水性和透气性变差,因此土壤的导水和持水能力并非入渗水的由矿化度一个因素决定,而是由入渗水矿化度和 Na^+ 数量两个方面共同决定。

2.2 对土壤入渗率的影响

图 3 为垂直一维积水入渗过程中入渗率随时间的变化过程。

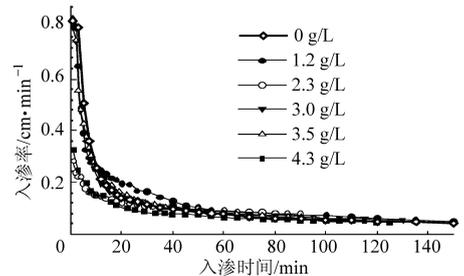


图 3 不同矿化度条件下土壤入渗率的变化曲线

Fig.3 Soil infiltration rate vs time infiltrated by different mineralization degrees

由图 3 可以看出,不同矿化度入渗的土壤入渗率随时间变化的曲线呈相同变化趋势,曲线从开始入渗后在很短时间内由陡峭变为平缓,逐渐趋近于某一定值即稳定入渗率(以下简称稳渗率)。无论在入渗率急剧减小阶段,还是在稳渗阶段,对应同一时间,当入渗水矿化度小于 3.0 g/L 时,土壤入渗率与入渗水矿化度呈正相关关系,当矿化度 3.0 g/L 时入渗率达到最大,之后随着入渗水矿化度的升高土壤的入渗率反而减小,在所有入渗实验中,蒸馏水(0 g/L)的入渗率最低,即按入渗率递增顺序,入渗水矿化度排序为:0、1.2、2.3、4.3、3.5、3.0 g/L。入

渗率的这一变化规律,反映了入渗水质不仅改变了土壤水分的特性,还改变了土壤的结构特性。采用幂函数对入渗率随时间的变化曲线进行拟合,即

$$y = \frac{a}{x} + b$$

式中 y ——入渗率, cm/min

x ——入渗时间, min

当入渗时间 x 趋于无穷大,即入渗时间足够长时,入渗率 y 逐渐趋于一个固定值 b , b 即为稳渗率。经拟合的结果如表 4 所示。

表 4 不同矿化度的入渗率拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of infiltration rate infiltrated by different mineralization degrees

| 矿化度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ | a | b |
|-----------------------------------|-------|-------|
| 0 | 1.111 | 0.035 |
| 1.2 | 1.054 | 0.053 |
| 2.3 | 0.343 | 0.058 |
| 3.0 | 1.049 | 0.068 |
| 3.5 | 0.963 | 0.050 |
| 4.3 | 0.370 | 0.040 |

由表 4 的拟合结果可知,当入渗水矿化度小于 3.0 g/L 时,稳渗率 b 随着矿化度的升高而增加,当矿化度大于 3.0 g/L 时,稳渗率 b 随着矿化度的升高而减小。其中蒸馏水的稳渗率在所有矿化度中最小,所有的含盐入渗水稳渗率均高于蒸馏水,说明土壤溶液中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,因此采用含盐的水分进行入渗在某种程度上有利于增加土壤的透水能力^[12]。但如果矿化度增大到一定程度,入渗水中 Na^+ 含量也会随之增加,使土壤原有的团聚体分散,土壤的孔隙度减少,钠可能成为土壤溶液中占优势的阳离子,引起土壤溶液钠吸附比 (sodium adsorption ratio, 简称 SAR) 值增加,使部分交换性钙、镁被钠所取代。

Na^+ 的增加会引起土壤颗粒收缩、胶体颗粒的分散和膨胀,导致土壤孔隙的减少,影响土壤的渗透性和作物根系的发育生长。当土壤溶液的 SAR 达到一定水平后,就会使土壤 pH 值升高,对土壤的物理性质包括结构形态有明显的影响,可导致土壤在亚类分级上发生变化,成为碱化土壤^[13-14]。

2.3 对土壤剖面含盐量垂直分布的影响

除了 0 g/L 的蒸馏水之外,其他入渗水中本身就含有一定的盐分,这必然会给土壤带来额外的盐分累积,所以其盐分运移必然会有不同于淡水入渗的某些特征。不论入渗水的含盐量如何,进行造墒或灌溉都会给土壤带入一定的盐分,从而提高了土壤含盐量,但如果盐分累积深度在根区以外的范围,则对作物生长的影响较小^[15],因此盐分在土壤中的分布状况对于作物的生长非常重要。

一方面,随着入渗水矿化度的增加,土壤整体盐分也随之增加,但另一方面,由于水分的淋洗作用,整个土壤湿润体分为盐分降低区域和盐分累积区域两部分。在实际灌溉中,最重要的不仅是土壤剖面整体盐分的增加量,还应了解作物根区内的土壤盐分是否超过作物的耐受能力,并研究入渗水矿化度需要控制在什么程度才能既保持根区活动层不发生盐分累积,又不会使土壤剖面上盐分累积过多导致土壤次生盐渍化。本研究通过不同矿化度的入渗水垂直一维积水入渗,分析了土壤垂直方向的盐分分布特征,结果如图 4 所示。

由图 4a 可知,入渗结束后,同一深度的含盐量与入渗水矿化度呈明显的正相关关系。入渗过程就是土壤盐分离子随着水分的运动而不断迁移的过程。将从土柱表面至土壤含盐量低于土壤初始含盐量的区域深度称之为盐分降低区深度,图 4b 为入渗水矿化度与盐分降低区深度的关系。

总体上土壤含盐量在 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 的土壤表层较小,土层中部 ($5 \sim 35 \text{ cm}$) 随着矿化度增加略有增加但增幅较小,在湿润锋处含盐量急剧增加,并达到剖

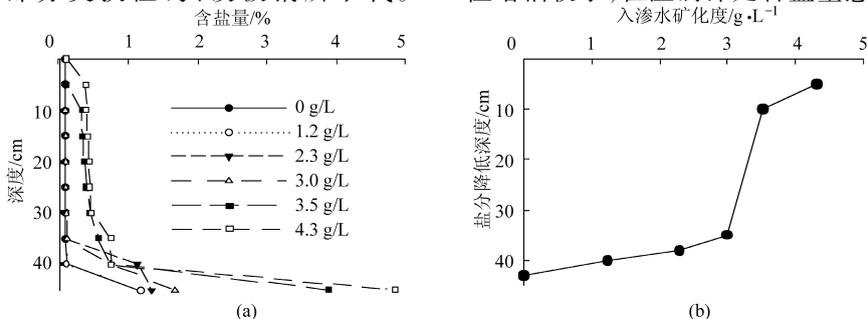


图 4 不同矿化度入渗水入渗后土壤盐剖面 and 盐分降低区深度

Fig. 4 Soil salt profile and desalt depth infiltrated by different mineralization of saline water

(a) 土壤含盐量在土壤剖面的分布 (b) 入渗水矿化度与盐分降低深度的关系

面最大值;其中蒸馏水的盐分降低区深度最大,除了湿润锋之外区域均得到淋洗;随着矿化度由1.2 g/L升高到3.0 g/L,入渗结束后剖面含盐量逐渐增大,盐分降低区域逐渐缩小,但矿化度低于3.0 g/L时盐分降低区深度的变化由图4b可以看出并不明显,矿化度小于3.0 g/L时,盐分降低区深度为35~43 cm之间,变化幅度为18.60%;当矿化度由3.0 g/L增大到3.5 g/L时,盐分降低区深度有较大变化,向上移动到10 cm处,变化幅度为71.43%,整个土柱湿润区域积盐区占据优势,积盐区域深度为盐分降低区域深度的3.5倍,当矿化度进一步增大

到4.3 g/L时,对应的盐分降低区深度为5 cm,即整个土柱剖面几乎全部积盐,可以说该矿化度的入渗水对于土壤盐分淋洗作用很小。土壤含盐量和盐分降低区深度随入渗水质的这种显著变化表明,每一种作物因其对土壤盐分的耐受能力和主根区分布状况而存在一个适于灌溉的矿化度的上限,控制好灌溉水的矿化度对于作物的正常生长至关重要。

2.4 对土壤盐分离子运移的影响

图5分别显示了不同矿化度的水入渗后,土壤中二价阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和一价阳离子 Na^+ 的含量随土层深度和入渗水矿化度的变化。

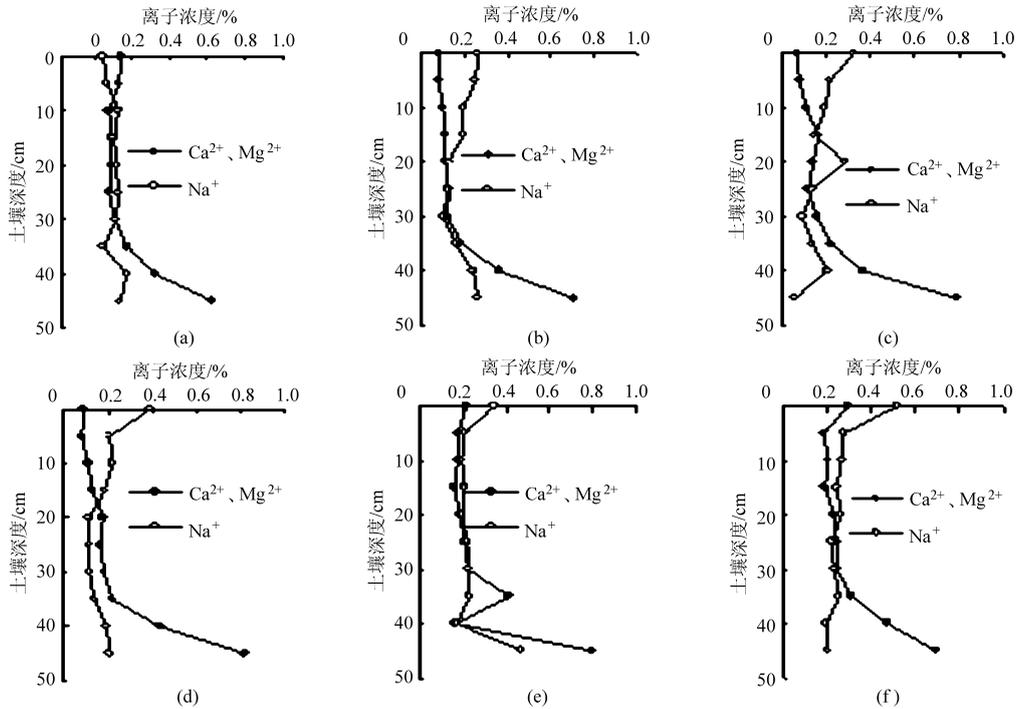


图5 入渗后土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 含量剖面

Fig. 5 Profile of Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ after infiltration

(a) 0 g/L (b) 1.2 g/L (c) 2.3 g/L (d) 3.0 g/L (e) 3.5 g/L (f) 4.3 g/L

由图5可知,总的来说, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 在整个土壤剖面上呈此消彼长的变化规律。随入渗水矿化度的增加,使土壤溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的含量都相应增加,但入渗水的阳离子组成以 Na^+ 为主,因此进入土壤中的 Na^+ 浓度随之增加,则土壤表面的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与土壤溶液中的 Na^+ 发生了离子交换作用,因此除了蒸馏水之外的其他入渗过程均在土柱表面的 Na^+ 发生了表聚现象, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 被淋洗到深层土壤,除表层和湿润锋处,其含量均低于初始值;随入渗水矿化度的增加,土壤溶液中 Na^+ 含量增加显著,其低于土壤初始含量的土层深度随矿化度的增加而减小,即发生积盐的土壤深度与入渗水的矿化度正相关。土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的交换和吸附,以及水分的淋洗是造成上述现象的主要原

因。在土壤表层, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 代换出了土壤胶体上的 Na^+ ,从而使表层 Na^+ 得到及时淋洗,含量降低,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 由于土壤的吸附量增加使得表层土壤含量超过土壤初始含量。在湿润土层中部,随着矿化度增加的 Na^+ 经上层淋洗在此累积,使得 Na^+ 相对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量增加,发生与表层土壤胶体相反的交流过程, Na^+ 置换出胶体上的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量降低,而 Na^+ 则被吸附于土壤固体上,并且入渗水矿化度越高,这种现象越明显。 Na^+ 的存在导致土壤中的黏粒分散,由此导致土壤向着膨胀、潮解、阻塞孔隙的方向发展,使土壤的入渗性和透气性变差,即土壤产生次生盐渍化现象^[16]。

3 结论

(1) 在垂直一维积水入渗条件下,在同一深度

处,入渗水矿化度以 3.0 g/L 为界,土壤含水率呈现先随矿化度的升高而增加,之后随矿化度的升高而减小的规律,说明土壤的导水和持水能力并非入渗水的由矿化度一个因素决定,而是由入渗水矿化度和 Na^+ 数量两个方面共同决定。

(2) 通过对土壤稳渗率的拟合可知,蒸馏水入渗的稳渗率最小,土壤溶液中盐分浓度的提高有利于稳定土壤结构,使土壤中大孔隙增加,渗透性增强。但如果矿化度增大到一定程度,入渗水中 Na^+ 含量也随之增加,使土壤原有的团聚体分散,土壤的孔隙度减少,对土壤的物理性质包括结构形态有明显的影响,可导致土壤在亚类分级上发生变化,成为碱化土壤。

(3) 入渗结束后,同一深度处的含盐量与入渗水矿化度呈明显的正相关关系。蒸馏水的盐分降低区深度最大,除了湿润锋之外的区域均得到淋洗;矿

化度小于 3.0 g/L 时,盐分降低区深度为 35 ~ 43 cm 之间,当矿化度由 3.0 g/L 增大到 3.5 g/L 时,盐分降低区深度有较大变化,当矿化度进一步增大到 4.3 g/L 时,几乎整个剖面都积盐,由此可知,每一种作物因其对土壤盐分的耐受能力和主根区根系深度而存在一个适于灌溉的矿化度的上限,控制好灌溉水的矿化度对于作物的正常生长至关重要。

(4) Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 在整个土壤剖面上呈此消彼长的变化规律,发生积盐的土壤深度与入渗水的矿化度正相关。在土壤表层, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 代换出了土壤胶体上的 Na^+ ,从而使表层 Na^+ 得到及时淋洗,含量降低,在湿润土层中部发生了相反的置换作用,入渗水矿化度越高,进入土壤溶液中的 Na^+ 越多,由此导致土壤向着膨胀、潮解、阻塞孔隙的方向发展,使土壤的入渗性和透气性变差,即土壤产生次生盐渍化现象。

参 考 文 献

- 1 严晔端,李悦. 发展咸淡水混灌技术合理开发地下水资源[J]. 地下水,2000,22(4):153~156.
Yan Yeduan, Li Yue. Developing fresh-saline water blending irrigation technology and rational explorer groundwater resource [J]. Ground Water, 2000, 22(4): 153~156. (in Chinese)
- 2 张新民. 干旱区水资源量与质统一管理研究[D]. 西安:西安理工大学,2000.
Zhang Xinmin. Study on integrated water management of water quantity with quality for arid area [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000. (in Chinese)
- 3 李加宏,俞仁培. 矿化灌溉水-土壤-作物系统中盐分迁移和循环的分室模型[J]. 土壤通报,1997,28(5):197~201.
Li Jiahong, Yu Renpei. Compartment model of salt transplant and circular in water-soil-plant system by mineralize irrigational water[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(5):197~201. (in Chinese)
- 4 王艳娜,侯振安,龚江,等. 咸水资源农业灌溉应用研究进展与展望[J]. 中国农学通报,2007,23(2):393~397.
Wang Yanna, Hou Zhen'an, Gong Jiang, et al. Development and expectation of utilization of saline water resources in agriculture irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(2): 393~397. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 刘小勇,董新光. 农业工程水资源管理中 GIS 区域分析方法的应用[J]. 农业机械学报,2004,35(4):196~198.
- 7 乔玉辉,宇振荣,张银锁,等. 微咸水灌溉对盐渍化地区冬小麦生长的影响和土壤环境效应[J]. 中国土壤与肥料,1999(4):11~14.
Qiao Yuhui, Yu Zhenrong, Zhang Yinsuo, et al. Effect on winter wheat growth and soil environmental effect by saline water irrigation in salinization area[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 1999(4): 11~14. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 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)
- 10 Abdel Gawad G, Arslan A, Gaihbe A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999—2002) [J]. Agricultural Water Management,2005,78(1~2):39~53.

- 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.