

# 水质对层状土壤入渗过程的影响

吉恒莹<sup>1 2</sup> 邵明安<sup>3 4</sup> 贾小旭<sup>4</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 新疆师范大学化学化工学院, 乌鲁木齐 830054;  
3. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;  
4. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 供水水质的异同可能会影响层状土壤积水的入渗过程。将去离子水、天然降水、天然积水、自来水4种水质的水作用于3种土壤构型(均质壤土、壤夹砂、砂夹壤), 讨论了4种水质的积水入渗对层状土壤结构入渗特征的影响。结果表明, 不同水质和土壤构型的入渗时间由长到短分别为: 去离子水、天然降水、自来水、天然积水(不同水质)和均质壤土、壤夹砂、砂夹壤(不同土壤构型)。4种水质累积入渗量的变化趋势基本相同, 其累积入渗量由大到小分别为: 天然降水、自来水、去离子水、天然积水(不同水质)和砂夹壤、壤夹砂、均质壤土(不同土壤构型)。相同时间内不同土壤构型的湿润锋推进距离由小到大为: 均质壤土、壤夹砂、砂夹壤; 水质对层状土壤湿润锋推进距离的影响程度由土壤分层组合方式决定。

**关键词:** 水质; 层状土壤; 入渗过程; 实验

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)07-0183-06

## Effects of Water Quality on Infiltration of Layered Soils

Ji Hengying<sup>1 2</sup> Shao Ming'an<sup>3 4</sup> Jia Xiaoxu<sup>4</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Differences in the water quality can affect the water infiltration process of layered soil. Four kinds of water, de-ionized water, natural water, natural precipitation and tap water were used to act on three soil configurations (homogeneous loess soil, loess soil with gravel and sand with loess soil), and the influences of these four kinds of water on the infiltration characteristics of the layered soil structures were studied. The results showed that the infiltration descending time order of these four kinds of water in the three soil configurations was: de-ionized water, natural water, tap water, and natural precipitation. The changing trends of cumulative infiltration amount in the four kinds of water qualities were basically the same, and the descending order of cumulative infiltration amount was: natural water, tap water, de-ionized water, natural precipitation; sand with loess soil, loess soil with gravel, and homogeneous loess soil. The ascending sort order of advancing distances of wetting front in the same period was: homogeneous loess soil, loess soil with gravel, and sand with loess soil. The influence degree of water quality on infiltration rate, cumulative infiltration amount and the wetting front's advancing distance of layered soil was determined by the layered combination mode of the soil.

**Key words:** water quality; layered soil; infiltration process; experiment

收稿日期: 2016-02-04 修回日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41530854)

作者简介: 吉恒莹(1978—), 女, 博士生, 新疆师范大学讲师, 主要从事土壤物理研究, E-mail: jihengying@126.com

通信作者: 邵明安(1956—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤物理研究, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

## 引言

水溶液的理化性质可显著影响土壤水势与导水率<sup>[1-2]</sup>。研究表明,水中溶质的类型及含量均会影响水的密度、表面张力和粘滞系数<sup>[3]</sup>,进而影响水分在土壤中的运动。目前,有关溶质对土壤水动力学参数的影响多针对盐类物质。研究认为:土壤的水力传导度与土壤溶液中可交换阳离子的组成、含量及可溶性电解质浓度有关<sup>[4-5]</sup>,水力传导度随着钠吸附比(SAR)的增加而减小。肖振华等<sup>[6]</sup>研究发现高矿化灌溉水可显著提高土壤导水率;FEIGIN等<sup>[7]</sup>研究指出灌溉水中钠离子的增加可导致土壤颗粒收缩以及胶体颗粒的分散和膨胀,进而影响土壤的渗透性。目前,关于水质对土壤水力性质的影响多报道于均质土壤<sup>[8-12]</sup>,水质对层状土壤入渗过程的影响研究鲜有报道。

层状土壤在自然界普遍存在,层状特性对土壤入渗、地下水补给及溶质迁移等过程具有重要影响。层状土壤对水分运动具有减渗和阻挡作用,主要因为层状土壤分层界面处存在毛管障碍,从而降低了土壤水分下渗速率,提高了上层土壤水分含量<sup>[13-16]</sup>。COLMAN等<sup>[17]</sup>假定层状土壤可近似地看作均质土壤,并且入渗过程主要受细质

土控制。HILL等<sup>[18]</sup>研究发现若细沙覆盖粗沙,当湿润锋穿过粗细界面时,湿润锋变为指状,而入渗率趋于常数。王文焰等<sup>[19-20]</sup>对沙土夹层情况下黄土入渗机制进行了室内模拟实验,也发现当湿润锋穿过界面后入渗率变为常数。任利东等<sup>[21]</sup>研究了具有沙土夹层的黄土入渗过程,分析了层状土壤入渗机制及下层沙土对土壤入渗的影响,并利用沙层阻水机制推求了上层土壤蓄水能力。然而,以上研究没有考虑水质对层状土壤入渗的可能影响。本文以壤土和河砂为研究对象,利用去离子水、自来水、天然降水和天然积水进行室内模拟土柱实验,研究水质对层状土壤入渗过程的影响,为深入认识非均质土壤入渗过程以及层状土壤水分运动模型构建提供科学依据,同时为不同水质的田间灌溉提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

本研究选择壤土和砂土作为供试土样。壤土采自陕西杨凌农耕地,砂土采自渭河河床。土样经风干后过2 mm筛备用。利用MS-200型马尔文激光粒度仪测定土样的颗粒组成。2种土壤样品的基本物理性质见表1。

表1 供试土壤样品的基本物理性质

Tab.1 Basic physical property of soil

| 土壤类型 | 颗粒比例/%       |                 |             | 质地  | 干容重/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 饱和导水率<br>( $mm \cdot min^{-1}$ ) |
|------|--------------|-----------------|-------------|-----|-------------------------------|----------------------------------|
|      | 粒径0~0.002 mm | 粒径0.002~0.05 mm | 粒径0.05~1 mm |     |                               |                                  |
| 均质壤土 | 22.8         | 68.5            | 8.7         | 粉壤土 | 1.4                           | 0.020                            |
| 砂土   | 4.49         | 20.87           | 75.64       | 中砂土 | 1.6                           | 2.791                            |

### 1.2 层状土壤结构

实验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。将壤土和河砂2种质地的土壤进行组合,分别利用均质壤土、壤夹砂(壤土中间夹砂土)和砂夹壤(砂土中间夹壤土)进行一维垂直入渗实验,共设3个处理,每个处理重复3次。为减少误差,利用直径5 cm、高35 cm的小型有机玻璃柱进行薄层积水土壤入渗实验。均质土柱和层状土柱高度均为30 cm,层状土柱中每层厚度为10 cm。按照田间土壤容重进行分层填装。此外,土柱表层垫置滤纸,以利于均匀入渗。实验过程中采用马氏瓶供水以保持土柱在恒定水头3 cm情况下入渗,同时记录不同时刻马氏瓶中水面读数,绘制湿润锋运移曲线。入渗时间是从入渗开始至湿润锋到达30 cm深度时所用的时间。由于实验持续时间较短,可忽略蒸发对土壤入渗过程的影响。

### 1.3 入渗实验用水的基本性质

分别利用去离子水、自来水、天然降水和天然积水进行土壤入渗实验,以揭示水质对层状土壤入渗过程的影响。去离子水为实验室自制,其中化合物与离子等均未检出;自来水为杨凌区居民饮用自来水;天然降水为收集的杨凌区自然降水;天然积水是放置1 a以上的雨水。实验用水的基本属性见表2。

表2 不同水质的基本性质

Tab.2 Properties of various water

| 水质类型 | 钠吸附比/( $mmol \cdot L^{-1}$ ) | pH值  | 电导率/( $\mu S \cdot cm^{-1}$ ) |
|------|------------------------------|------|-------------------------------|
| 去离子水 | 0                            | 7.04 | 3                             |
| 天然降水 | 0.03                         | 7.76 | 36                            |
| 天然积水 | 1.47                         | 7.97 | 452                           |
| 自来水  | 2.24                         | 7.78 | 634                           |

### 1.4 数据分析

实验数据采用SPSS软件进行统计分析,利用

Excel 和 Origin 软件进行相关计算及图表绘制。

### 1.5 实验读数

实验过程中,同时读取马氏瓶上的读数以计算入渗水量、测定湿润锋推进位置及记录对应入渗时间。当开始读取湿润锋推进距离的第 1 个读数时,选择实验柱圆筒壁四周可见湿润区的最远位置为该时间对应的湿润锋推进距离。后续的湿润锋推进距离,都是固定在筒壁的该方向,向下量取到可见湿润区的最远位置。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质对层状土壤入渗时间的影响

由图 1 可见,均质壤土在 4 种水质作用下的土壤入渗时间由长到短依次为:去离子水、天然降水、自来水、天然积水;砂夹壤土也有相同趋势,但天然降水、自来水和天然积水之间的差异不大;壤夹砂土壤入渗时间也表现为去离子水最大,自来水、天然降水和天然积水之间差异不大。

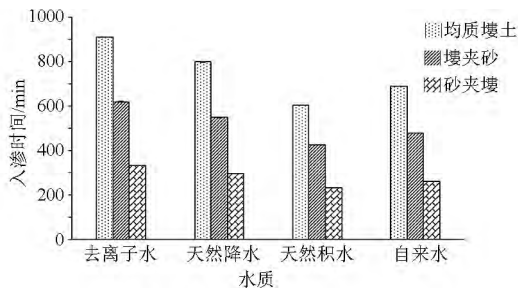


图 1 不同水质土壤的入渗时间比较

Fig. 1 Comparison of infiltration time with different water qualities of soils

### 2.2 水质对层状土壤入渗率的影响

不同的水质含盐离子不同,钠吸附比和电导率也不相同(表 2),因而可能对土壤入渗过程产生不同影响。与其他 3 种水质相比,去离子水电导率最低,几乎为零,因此其进入土壤后不会发生离子交换作用,而是会迅速将土体内的钠离子溶出,改变了粘粒的絮凝状态,促进了其分散程度,进而造成土壤孔隙阻塞,导致土壤入渗速率降低,入渗时间变长。与层状结构土壤相比,均质壤土入渗过程受水质影响更加明显,而砂夹壤土壤入渗过程受水质影响最小。因此,水质对土壤入渗过程的影响程度受制于土壤质地,质地越细,受影响程度越大。

入渗率是单位时间内土壤的入渗水量,稳定入渗率是土壤入渗速率趋于稳定时的速率,可反映土壤的入渗能力。利用 SPSS 软件进行单因素重复测量的方差分析,结果显示 Sig. 值大于 0.05,重复间的差异不显著,故取 3 次重复的平均值绘制曲线图 2,可以看出 4 种水质作用下的层状土壤入渗率

变化规律和趋势与均质壤土基本一致,均随时间呈幂函数下降趋势。去离子水、天然降水和天然积水在入渗前期,入渗率由大到小均为:砂夹壤、壤夹砂、均质壤土,自来水前期入渗速率由大到小为:砂夹壤、均质壤土、壤夹砂。这可能与自来水电导率高有关。当入渗历时约 20~30 min 后 2 种层状土壤入渗率均低于均质壤土入渗速率。随着入渗时间的增加,层状土壤入渗率逐渐趋于稳定,但稳定入渗率明显小于相应的均质壤土入渗率(表 3)。此外,在入渗初期,砂夹壤土壤入渗率最快,且随着入渗时间的延长 2 种层状土壤入渗率趋于相等,差异不明显。主要是因为对于砂夹壤土壤,水分由砂土进入壤土,壤土质地细密,对砂土中水分具有较强的水吸力,并且在相同含水率的壤土和砂土中,壤土的土壤水吸力远较砂土高,主要是壤土中粘粒含量多使土壤中的细小孔隙多。因此,可以判断砂土的吸力越小,基质势越大,总土水势较壤土的大,土壤水分从土水势大的土壤流向土水势小的土壤,即从砂土流向粘土,故初期入渗率快。而在壤夹砂土壤中,壤土入渗率低,壤土和砂土颗粒间孔隙差异大,起到了阻水的作用,砂层的存在增加了上层土体的持水能力,在下渗水流没有达到最大持水能力前,砂层起到了阻止水流继续向下层渗流的作用,导致入渗率降低<sup>[12]</sup>。

### 2.3 水质对层状土壤累积入渗量的影响

由图 3 可以看出,无论利用何种水质进行入渗实验,相同土层厚度( $d > 5$  cm)的情况下<sup>[18]</sup>,均表现为砂夹壤累积入渗量最高,壤夹砂与均质壤土累积入渗量差异不大,表明土壤入渗量主要由土壤物理性质(孔隙状况)决定,且层状土壤入渗量与上层土壤孔隙状况有关。4 种水质作用下,均质壤土和壤夹砂、砂夹壤 2 种层状土壤累积入渗量在 100 min 内随时间变化趋势一致,在入渗初期均具有较高的入渗率,即入渗初期累积入渗量曲线斜率较大。对于同一种类型土壤,水质对累积入渗量具有一定影响。对于均质壤土和砂夹壤层状土壤而言,水质对累积入渗量的影响基本相同,由大到小依次为:天然降水、自来水、去离子水、天然积水。对于壤夹砂土壤而言,去离子水、天然降水和天然积水作用下,累积入渗量基本相同;而自来水作用下累积入渗量最低,这可能是因为自来水钠吸附比高,使土壤中的粘粒分散而导致孔隙阻塞,使得入渗率降低,累积入渗量相应减少。以上结果表明,水质对土壤累积入渗量具有一定影响,其作用程度因土壤分层状况不同而异。

图 4 显示了不同水质入渗下一维垂向湿润锋运移规律。由图可知,垂直向下运移距离随着入渗时

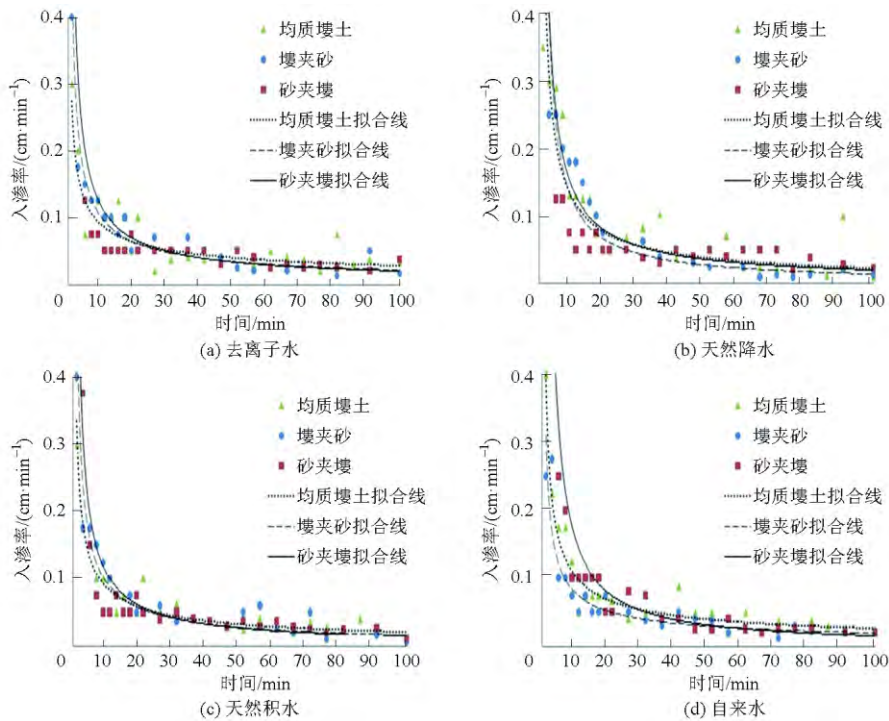


图2 不同水质作用下层状土壤入渗率随时间的变化曲线

Fig. 2 Changing curves of infiltration rates of layered soils with time under different water qualities

表3 不同水质土壤的稳定入渗率

Tab. 3 Stable infiltration rates with different water qualities of soils

| 土壤构型 | 去离子水  | 天然降水  | 天然积水  | 自来水   |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 均质壤土 | 0.013 | 0.015 | 0.016 | 0.024 |
| 壤夹砂  | 0.010 | 0.012 | 0.014 | 0.012 |
| 砂夹壤  | 0.010 | 0.013 | 0.014 | 0.014 |

间的延长而增大,且入渗初期湿润锋运移速率较快,而后运移速度逐渐减慢。4种水质作用下,均质壤土、壤夹砂和砂夹壤土壤湿润锋运移规律相似,均表现为天然降水作用下湿润锋运移最快,而自来水和去离子水作用下湿润锋运移最慢。对于壤夹砂土壤而言,天然积水和天然降水作用下湿润锋变化规律相似,湿润锋运移速度高于自来水和去离子水,这是由于天然积水和天然降水含盐量比去离子水高,增加了土壤含盐量,扩散双电子层将降低土壤颗粒间

的斥力,使土壤粒子的物理稳定性下降,利于粒子絮凝,为团聚体形成创造条件,大孔隙数量随之增多,因而导水率有所提高。但导水能力并没有随着盐分的增加一直增大,如自来水和去离子水作用下湿润锋运移规律相近,这可能是自来水中的高盐分使土壤中 $\text{Na}^+$ 总量不断上升,而 $\text{Na}^+$ 会导致胶体分散度加大以及黏粒扩张明显,进而影响土壤团粒结构,使得土壤导水能力降低,入渗率减缓,导致湿润锋推进距离变小。虽然均质壤土和壤夹砂土壤表层均为黏粒含量较高的壤土,然而4种水质作用下的湿润锋推进距离却有较大差异,这是由于壤夹砂土壤中,入渗锋面还没有到达土砂交界面时( $t < 20 \text{ min}$ ),均质壤土和壤夹砂土中表现一致;当到达土砂界面后,水流将不再继续向砂层入渗,而是在土砂界面以上土体迅速聚积,直至壤土总土水势开始大于砂层总土水势,入渗水流方能渗入砂层,这就使上层土壤中盐分

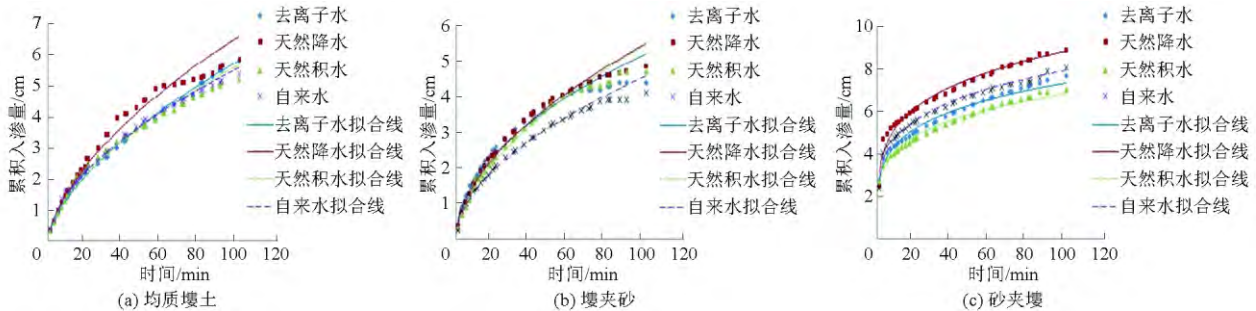


图3 不同水质作用下土壤累积入渗量随时间的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of soil cumulative infiltration amount with time under different water qualities

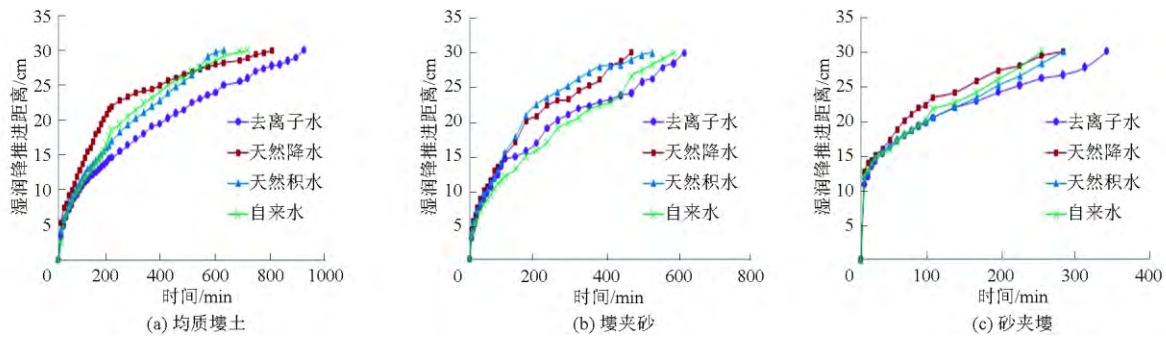


图 4 不同水质对土壤湿润锋推进距离的影响

Fig. 4 Effects of different water qualities on soil wetting front's advancing distance

含量高于均质壤土,因而,自来水作用下的湿润锋推进距离减小。因此,湿润锋在相同时间内推进距离由小到大为:均质壤土、壤夹砂、砂夹壤,而水质对层状土壤湿润锋推进距离的影响由土壤分层状况决定。

### 3 结论

(1) 水质对土壤入渗时间和入渗率具有显著影响。与层状土壤相比,均质壤土入渗过程受水质影响更加明显。4种水质作用下土壤入渗时间由长到短依次为:去离子水、天然降水、自来水、天然积水;2种层状土壤入渗时间在去离子水作用下最大,但天然降水、自来水和天然积水之间的差异不明显。因此,水质对土壤入渗过程的影响程度受制于土壤构型。

(2) 4种水质作用下,砂夹壤土壤累积入渗量

最高。均质壤土与壤夹砂层状土壤累积入渗量差异不大。对于同一种土壤构型,水质对累积入渗量具有一定影响。水质对均质壤土和砂夹壤土壤累积入渗量的影响由大到小依次为:天然降水、自来水、去离子水、天然积水,而自来水作用下壤夹砂土壤累积入渗量最低。因此,水质对土壤累积入渗量的作用程度因土壤分层状况不同而异。

(3) 在湿润锋推进距离为0~30 cm时,均质壤土和砂夹壤土壤在4种水质作用下湿润锋运移速率均表现为天然降水作用下最快,去离子水作用下最慢。对于壤夹砂土壤,天然降水和天然积水作用下湿润锋运移速率相似,均高于自来水和去离子水。因此,湿润锋运移速率受水质影响,并且也受土体构型状况的影响。

### 参 考 文 献

- 赵加瑞. 灌溉水质对土壤质量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.  
ZHAO Jiarui. Effect of different irrigation water on soil quality [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)
- XIAO Z, PRENDERGAST B, RENGASAMY P. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic conductivity [J]. *Pedosphere*, 1992, 2(3): 237-244.
- MARSHALL T J, HOLMES J W. 土壤物理学[M]. 赵诚斋,等译. 北京:科学出版社,1986.
- CARTE D L, ROBBINS C W. Salt outflows from new and old irrigated lands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(4): 627-632.
- DE S F, WIERENGA P J. Solute transfer through columns of glass beads [J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(2): 225-232.
- 肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响 [J]. *土壤学报*, 1998, 35(3): 359-366.  
XIAO Zhenhua, WAN Hongfu. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 359-366. (in Chinese)
- FEIGIN A, RAVINA I, SHALHEVET J. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment [M] // *Irrigation with Treated Sewage Effluent*, Series Advanced Series in Agricultural Sciences Springer Berlin Heidelberg, 1991, 17: 34-116.
- 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 64-67.  
ZHU Yuanjun, SHAO Ming'an. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 64-67. (in Chinese)
- 周彩景. 灌溉水质对土壤物理性质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.  
ZHOU Caijing. Effect of different irrigation water on soil physical properties [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)
- 张淑侠, 吴旭银, 马为民, 等. 灌溉水质对草坪土壤化学性质的影响 [J]. *草业学报*, 2004, 13(3): 119-122.  
ZHANG Shuxia, WU Xuyin, MA Weimin, et al. Effect of irrigation water quality on the chemical properties of lawn soil [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(3): 119-122. (in Chinese)



- 11 牛文全,薛万来. 矿化度对微润灌土壤入渗特性的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(4):163-172.  
NIU Wenquan,XUE Wanlai. Effects of mineralization degrees on soil infiltration under moistube-irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(4):163-172. (in Chinese)
- 12 王全九,单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报,2015,46(12):117-126.  
WANG Quanjiu,SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):117-126. (in Chinese)
- 13 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(1):104-110.  
WANG Wenyan,ZHANG Jianfeng,WANG Zhirong,et al. Experiment and study on water-tightness and infiltration reduction of sand layer in loess soils [J]. Transactions of the CSAE,1995,11(1):104-110. (in Chinese)
- 14 王金平. 蒸发条件下层状土壤水分运动的数值模拟[J]. 水利学报,1989(5):49-42.  
WANG Jinping. Numerical simulation of soil water movement under the condition of evaporation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1989(5):49-42. (in Chinese)
- 15 HANKS R J,BOWERS S A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils1 [J]. Soil Science Society of America Journal,1962,26(6):530-534.
- 16 李毅,任鑫. 覆膜开孔条件下斥水性层状土壤蒸发实验[J]. 农业机械学报,2012,43(11):58-64.  
LI Yi,REN Xin. Evaporation experiments on layered water-repellent soil under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(11):58-64. (in Chinese)
- 17 COLMAN E A,BODMAN G B,COLMAN E A,et al. Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1945,9(C):3-11.
- 18 HILL D E,PARLANGE J Y. Wetting front instability in layered soils [J]. Soil Science Society of America Proceedings,1972,36(5):697-702.
- 19 王文焰,汪志荣,王全九,等. 黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报,2003(5):30-34.  
WANG Wenyan,WANG Zhirong,WANG Quanjiu,et al. Improvement and verification of Green-Ampt model for sand-layered soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003(5):30-34. (in Chinese)
- 20 张建丰,王文焰. 砂层在黄土中发生指流条件的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(3):82-86.  
ZHANG Jianfeng,WANG Wenyan. Experimental study of finger flow occurrence in loess soil [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(3):82-86. (in Chinese)
- 21 任利东,黄明斌,樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报,2013,29(19):105-111.  
REN Lidong,HUANG Mingbin,FAN Jun. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering [J]. Transactions of the CSAE,2013,29(19):105-111. (in Chinese)