

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.05.006

黄土夹砂层的持水机制

陈建生^{1,2}, 张 健¹, 詹泸成¹, 黄德文¹, 张 超¹, 张家甫¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究黄土高原西北干旱区农业采用的“压砂”保墒方法机理, 进行3种室内土柱(均质土柱、夹3 cm厚砂层的土柱、夹5 cm厚砂层的土柱)的降雨入渗试验, 并建立微观模型对夹砂层阻水现象进行分析。通过烘干法和MAT253稳定气体同位素质谱仪测定土柱不同深度2个时间点(13 d、197 d)的含水率和土壤水的 δD 、 $\delta^{18}O$, 得到不同时间含水率随深度变化规律和土壤水 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 关系。结果表明:(a)黄土中夹砂层的存在起到了减缓水流下渗的作用, 而不是阻止水分下渗。(b)夹砂层的这种阻水效果一方面是由于砂层薄膜水的持水量远小于黄土, 从而阻滞了水流的下渗; 另一方面是由于在介质突变界面处过水断面面积突然减小, 以致降低了水流的下渗速度。

关键词: 黄土夹砂层; 含水率; 同位素; 持水机制; 微观层面; 薄膜水运移

中图分类号: S278 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)05-0412-06

Water-holding mechanism of sand layer in loess

CHEN Jiansheng^{1,2}, ZHANG Jian¹, ZHAN Lucheng¹, HUANG Dewen¹, ZHANG Chao¹, Zhang Jiafu¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the mechanism of agricultural soil moisture conservation through sand injection in the northwest arid region of the Loess Plateau, rainfall infiltration tests on three kinds of indoor soil columns (a homogeneous soil column, a soil column with a 3 cm-thick sand layer, and a soil column with a 5 cm-thick sand layer) were performed, and the water-resisting phenomenon of the sand layer was analyzed through establishment of a micro model. The water contents in different layers of soil columns at two times (13 days and 197 days) and the δD and $\delta^{18}O$ values of soil water were measured with the drying method and MAT253 gas isotope ratio mass spectrometer. The change in water content with the depth and the relationship between δD and $\delta^{18}O$ of soil water were obtained. The results show that the sand layer can retard water infiltration rather than prevent water infiltration. The reasons for this are that the water-holding capacity of sand is far less than that of loess, retarding water infiltration, and the sudden decrease in the wetted cross-sectional area at the interface with abruptly changed medium causes the water infiltration velocity to decrease.

Key words: sand layer in loess; water content; isotope; water-holding mechanism; micro level; film water migration

黄土高原西北干旱区农业采用的“压砂”保墒方法由来已久,“压砂”就是在黄土表面堆积一层厚5~10 cm的河砂,然后在河砂上铺一层厚约20 cm的黄土,再在这层黄土上种植作物。经过“压砂”处理过的土壤,砂层之上土壤的含水率明显增加。这种耕作方法有利于保持砂层之上土壤中的水分以减少灌溉次数^[1],在黄土高原干旱区是一种有效且环保的节水方式。在土壤中设置砂层能起到阻水减渗作用,使大部

收稿日期: 2015-12-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB417005)

作者简介: 陈建生(1955—),男,江苏泗阳人,教授,博士,主要从事渗流理论与示踪探测技术、同位素水文学研究。E-mail: jschen@hhu.edu.cn

分土壤水滞留在砂层之上的细质土层中,这也是近年来较有前途的建筑减渗防渗措施^[2]。

对于黄土中夹砂节水的问题,国内外学者已经做了很多研究,并取得了丰硕成果。一些学者从导水系数和入渗率出发探究层状土壤的入渗特征或建立土壤水分运动模型。如:Fox^[3]假定入渗过程中的水头损失为粗、细土壤水头损失之和,按照各层土壤厚度和导水系数,推求整个土壤的平均导水系数,并利用平均导水系数计算土壤入渗过程;范严伟等^[4-5]在 Green-Ampt 入渗模型基础上引入导水系数,建立了改进的夹砂层土壤 Green-Ampt 入渗模型,并根据非饱和土壤水分运动理论建立了垂直一维土壤饱和-非饱和水分运动的数学模型;Hillel^[6-7]研究发现当下层土壤质地和导水性质与上层不同时会降低土壤的入渗率,并且砂质夹层的存在对水向土中的入渗特性具有重要影响;王春颖等^[8]发现在湿润锋穿过夹砂层上界面时入渗率有较大波动,且进入稳渗阶段后,其稳渗率明显小于同时刻均质土柱入渗率。李毅等^[9]通过积水入渗试验,对比了夹砂层位置和土壤质地变化对层状土入渗特性的影响,发现距土表 10~15 cm 的夹层位置减渗效果最好,夹砂层位置越深,其对入渗率的改变程度越明显。

另有一些研究,通过室内土柱模拟试验探究夹砂层对土壤水盐运移的影响。王文焰等^[10]基于一维土柱入渗试验,发现砂层在黄土中不仅具有阻水作用而且还具有减渗性,但是未从理论上进行分析;王丁等^[11]通过室内土柱模拟试验对层状土壤毛管水运动特性进行了研究,得到砂层对毛管水运移具有明显阻滞作用的结论;甘永德等^[12]通过将黏土、壤土、砂土 3 种土壤不同分层组合的方式进行降雨入渗试验,得到分层土壤入渗特征由土壤分层组合方式决定、其累计入渗量与湿润锋呈线性相关关系的结论;史文娟等^[13-14]通过室内土柱试验探讨了蒸发条件下夹砂层土壤水盐运动的规律以及不同层位夹砂层土壤剖面盐粒子的动态变化情况,发现砂层对水分和盐分的抑制率随着蒸发历时的延长而减少。

上述针对砂夹层对土壤水分入渗影响的研究,大多集中在土壤水盐的分布规律及水分运移的模型研究方面,通过模拟试验得出夹砂层具有减渗、抑制水分和盐分蒸发等相关结论,或者通过相关土壤水分运动理论建立数学模型以推求土壤剖面含水率、湿润锋、入渗量等。通过这些研究,对存在夹砂层情况下土壤水分、盐分的运移有了充分的认识,但是夹砂层阻水的机理仍然缺乏理论分析和微观层面上的解释。笔者拟通过室内试验验证黄土夹砂层对降水入渗的阻碍作用,并建立薄膜水沿土粒表面运移模型,在微观层面上探讨在入渗量较小的情况下黄土中夹砂层的阻水作用机理,为黄土区“压砂”耕作方法提供理论依据。

1 试验土样物理指标、方案及仪器

1.1 试验土样物理指标

试验所用土样为南京燕子矶的下蜀黄土,其为风积土,颗粒比黄土高原黄土细小,渗透系数也偏小,但是它的发育模式与黄土高原典型黄土的发育模式一致,堆积的气候环境也较为相似^[15],颗粒表面对水分均具有吸附作用,满足模拟试验的要求。采用密度计法对待测土样进行颗粒分析,粒径分布曲线如图 1 所示。试验在 26~27 °C 条件下进行(颗分试验除外)。

将下蜀黄土风干 48 h,然后碾碎,过 0.1 mm 筛,测得黄土初始含水率为 3.32%,土壤水同位素值为 $\delta D = -5.13\%$ 、 $\delta^{18}O = -0.78\%$ 。试验用砂经风干后过 1 mm 筛,其中粒径小于 0.25 mm 的砂粒质量分数为 1%、粒径 0.25~0.5 mm 之间的砂粒质量分数为 87%、粒径大于 0.5 mm 的砂粒质量分数为 12%。砂土初始含水率为 0.12%,由于含水率小而没有提取出吸湿水,未能测得其同位素值。

1.2 试验方案及仪器

黄土样和砂样分别混合均匀后填充高 190 mm、直径 75 mm 的土柱。试验共设置 3 种土柱(图 2),土柱 A 为均质黄土土柱;B、C 分别具有厚 30 mm、50 mm 夹砂层的黄土土柱,且夹砂层之上黄土层厚均为 70 mm。黄土和砂的平均密度分别为 1.32 g/cm^3 和 1.58 g/cm^3 。每种土柱有 2 个,编号为第 1 组(A1、B1、C1)、第 2 组(A2、B2、C2)。试验降水取自当地自来水,并统一封存在一个封闭的容器中,其同位素值为 $\delta D = -7.99\%$ 、

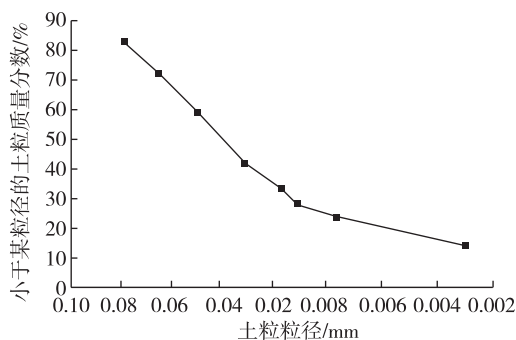


图1 黄土粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of loess

$\delta^{18}\text{O} = -1.10\%$ 。

试样填充完成后,为使降水均匀下渗,在黄土表面覆盖滤纸。由于0~50 cm的土层平均含水率在田间持水量以下时,土壤饱和前的入渗量平均为36.3 mm^[16],所以为使降水能够全部入渗至土壤而不使土壤达到饱和,每组试样分别一次性降水132.4 mL,相当于30 mm降雨量。注水结束后立即在土柱A、B、C表面覆盖薄膜,薄膜紧贴于土壤表面。由于试验土柱较短,在自然界中190 mm厚度的土层属于表层土,其受到的蒸发作用对土壤水运动影响较大,所以覆盖薄膜能有效地减小这种影响。

降水入渗后的13 d和197 d分别对第1组、第2组土柱进行取样。从试样顶部(0~15 mm)开始取样,然后是土-砂界面处的土和砂,砂-土界面处的砂和土对各剖面均取样2次,将测得的值取平均,以减少试验误差。

取一定样品放在铝盒中,将铝盒放入105℃烘箱中烘24 h后计算含水率。利用真空抽取法提取土壤水,用MAT253稳定气体同位素质谱仪测得土壤水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$,采用SMOW标准,测试精度分别为 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 0.02\%$ 。试验在河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室进行。

2 试验结果分析

图3是土柱A、B、C不同剖面含水率曲线,对比其中13 d和197 d时的含水率,土柱A、B、C的上层黄土含水率均随时间推移而减小,这是由水分向下运移及蒸发造成的。土壤水分蒸发过程中,含轻同位素水分子蒸发速度相对较快,留下的就相对富集重同位素,蒸发越强烈,越富集重同位素,土壤水同位素数据就越偏正^[17]。因此,土壤水同位素的富集程度可以反映土壤水蒸发的强烈程度。由图4可知,13 d和197 d时3个土柱上层土壤水的同位素变化大致相当,从而可以认为试验过程中3个土柱上层黄土受到的蒸发作用大致相同。在此情况下夹砂土柱B、C的上层黄土含水率始终远高于土柱A,因此黄土夹砂层确实对水分下渗起到了良好的阻碍作用。

图3中,13 d时土柱B、C下层砂-土界面处黄土的含水率均低于试样A相同深度黄土含水率。而在197 d时,土柱B、C下层砂-土界面处黄土的含水率与土柱A相同深度黄土含水率趋于一致,说明砂层的存在不是阻止水分下渗,而是减缓了水分下渗。

试验结果表明,黄土中夹砂层的存在起到了减小水流下渗速度、保持夹砂层上层土体水分的作用。

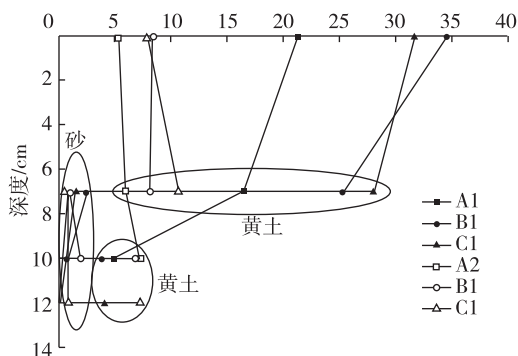


图3 土柱A、B、C各层剖面含水率

Fig. 3 Water content profile at every layer of A, B, and C samples

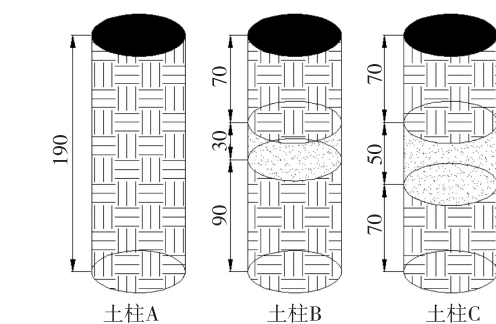


图2 试验土柱示意图(单位:mm)

Fig. 2 Sketch of test soil column (units: mm)

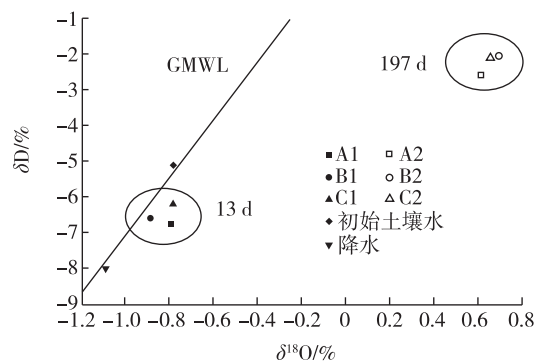


图4 土柱A、B、C上层黄土土壤水 δD ~ $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 4 Relationships between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of soil water at upper layer of A, B, and C samples

3 黄土夹砂层阻水模型的建立及其微观机理

为了解夹砂层减缓水分下渗、保持上部土壤水的原因,建立薄膜水沿土粒表面运移的模型,以便从微观

层面对其进行解释。

3.1 模型假定条件

黄土高原西北干旱区降雨稀少,远不能使“压砂”层上部黄土层达到饱和。随着深度增加,土壤含水率越来越小,水分便以薄膜水的形式沿土粒表面向土壤深部迁移。研究表明,土粒表面非重力水的迁移速度缓慢^[18]。黄土在处理过程中破碎程度很大,且装样时经过压实处理,因此黄土层中不存在或极少存在连通的大孔隙,加之试验降雨量小,所以认为在水流入渗过程中无重力水存在,即水流的入渗是以薄膜水迁移形式进行的。由太沙基理论,土粒之间为点接触,且接触点的面积不超过土粒表面积的1%。这为薄膜水沿土粒表面入渗提供了良好的理论基础。

试验中,黄土表面压置了一张滤纸,因此水流在土表均匀下渗。在这样的前提下,假定水流在上层土体中均匀垂直下渗(图5),同层之间含水率相等,水平方向上水流量为零,忽略土粒表面交换阳离子的影响,水分子在土粒表面一个接一个地有序排列且不考虑蒸发影响,根据模型沿土粒表面的迁移规律建立模型。

3.2 模型建立

现将砂粒和黄土粒分别简化成球体,设砂粒半径为 R ,做该球体的外切正方体。另做一个与正方体大小完全相等的正方体并在其中密排黄土粒。假设黄土半径为 r ,球体之间以点接触形式排布,且最外层黄土粒与正方体表面相切。由黄土颗粒粒径分布和砂粒粒径分布可以明显看出,黄土粒粒径远远小于砂粒粒径。由于黄土粒粒径多分布在 $0.001 \sim 0.1 \text{ mm}$ 之间,砂粒粒径多分布在 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 之间,于是取 $R = 10r$,因此在搁置一个砂粒的正方体中可以有序密排黄土粒的个数 $n = 1000$ (图6)。砂粒和黄土粒表面均被极薄的水膜包裹,设水膜厚度为 Δd 。在此基础上,研究土粒薄膜水的持水情况。单个砂粒、黄土粒表面薄膜水的持水量分别为

$$W_s = 4\pi R^2 \Delta d \rho \quad (1)$$

$$W_l = 4\pi r^2 \Delta d \rho \quad (2)$$

式中: ρ ——水的密度。

因此,相同体积中砂粒与黄土粒持水量之比为

$$q = \frac{W_s}{nW_l} = \frac{4\pi R^2 \Delta d \rho}{4\pi r^2 \Delta d \rho n} = \frac{1}{10} \quad (3)$$

单个砂粒、黄土粒表面薄膜水的过水断面面积分别为

$$S_s = \pi(R + \Delta d)^2 - \pi R^2 = \Delta d \pi(2R + \Delta d) \quad (4)$$

$$S_l = \pi(r + \Delta d)^2 - \pi r^2 = \Delta d \pi(2r + \Delta d) \quad (5)$$

相同体积中砂粒与黄土粒表面薄膜水的过水断面面积之比为

$$p = \frac{S_s}{nS_l} = \frac{\Delta d \pi(2R + \Delta d)}{\Delta d \pi(2r + \Delta d)n} \approx \frac{1}{100} \quad (6)$$

3.3 砂层阻水的微观机理

水分初始是以薄膜水的形式下渗,薄膜水处于黏滞状—液态状,水膜厚的薄膜水势能比水膜薄的势能高,因此在表面张力作用下水分子由水膜厚处向薄处移动,这个过程非常缓慢^[18]。在同样的温度条件下,单个砂粒与黄土粒表层薄膜水均只有极薄的十几个水分子,但是砂粒的比表面积远小于黄土粒的比表面积,因此相同体积内砂土所含薄膜水的量远小于黄土所含薄膜水的量,砂层中可以通过颗粒表面水膜传递的水量远远小于黄土层中的,砂层中薄膜水的过水断面较之土层明显减小。通过以上试验结果及理论研究可知, $R = 10r$ 时,砂层可以持有的薄膜水量只有黄土层的 $1/10$ (图3),土柱B2、C2上层黄土含水率分别约为9.0%和

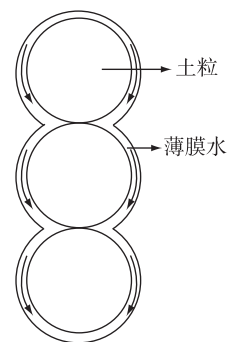


图5 薄膜水沿土粒表面垂向迁移示意图

Fig. 5 Sketch of vertical migration of film water along surface of soil particles

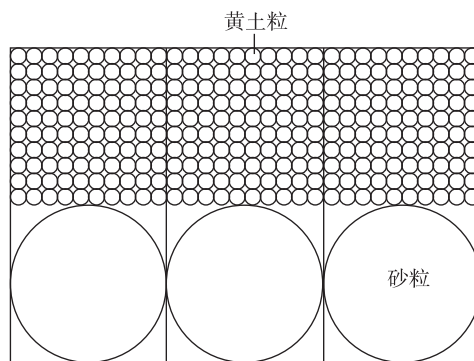


图6 模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of model

8.0%,砂层含水率分别约为0.75%和0.9%,即上层黄土含水率分别约为砂层含水率的12倍和9倍,这与模型得出的结果相似。因此,当入渗水流在势梯度作用下到达土-砂界面时,由于上层土壤的能量水平低于砂层,因此入渗水流将不再继续下渗,而是滞留在界面上方。随着砂层以上土壤含水量的增加,土-砂界面处含水率随时间延长出现突变。其所具有的能量水平也在不断提高,土壤基质势、吸力也随之下降,水分聚积在界面以上土壤中至界面上方总水势大于砂层中水分持有的能量水平后入渗水流方能渗入砂层,即当土-砂界面处的土壤吸力值开始小于砂层的吸力值时,上层的入渗水流才可能在一定的吸力梯度下开始流向砂层。此后土壤水开始进行再分布。这一临界含水量是由黄土与砂的持水能力差异导致的,差异越大,黄土所需持有的水量越大,临界含水量就越大。由图3可知,土柱B1、C1土-砂界面处黄土与砂含水率相差30%以上,土柱B2、C2黄土与砂的含水率相差10%左右,且大概13d时上下土层达到临界含水量,水流开始向砂中入渗。因此,砂层对水流产生了阻滞作用。另外,砂层的过水断面面积仅是黄土层的1/100,导致在土-砂界面处过水断面面积突然减小,从而降低了水流的下渗速度。在夹砂层中,同样由于过水断面面积较黄土小,而导致水流通过砂层的时间要比相同厚度的土层长。所以砂层的存在降低了水流的下渗速度,从而起到了阻水减渗效果。试验中土柱A的上层黄土含水率下降较快,下渗速度明显高于土柱B、C,这一现象也与模型解释相符。

综上,黄土夹砂层对水流入渗有阻碍效果一方面是由于砂层薄膜水的持水量远小于黄土,从而阻滞了水流的下渗;另一方面是由于在介质突变界面处过水断面面积突然减小,以致降低了水流的下渗速度。

由于简化的薄膜水沿土粒表面运移模型是在理想状态下建立的,所以一些地方需要加以修正:(a)小土粒的形状不可能是规整的球体,这样它们之间的孔隙存在形式应该更为散乱,即在一定厚度的土层中从上到下连通的孔隙几乎不可能存在,这样在水流入渗到介质突变处就不会有重力水产生。(b)密排的小土粒中毛管悬着水的存在不可避免,上层黄土的持水量应该大于模型计算出来的水量。(c)模型中假定黄土粒和砂粒表面水膜厚度均为 Δd ,这是不符合实际情况的。由于黏粒对薄膜水的吸附能力较强,因此黄土粒表面水膜厚度应比砂粒水膜厚度大。

采用模型对水流在砂层处运动趋缓进行验证。假设薄膜水沿上层黄土均匀下渗到夹砂黄土的土-砂界面处时,对均质黄土样和夹砂黄土样2个土柱的水流运动状态是一样的。由于假定水流始终是垂直入渗,因此,运动速度为

$$v = \frac{\Delta Q}{S_z} = \frac{Q_2 - Q_1}{S_z} \quad (7)$$

式中: Q_1 ——197d时所取土-砂界面处黄土的含水量; Q_2 ——13d时所取土-砂界面处黄土含水量; S_z ——土柱截面积。

模型中,水流通过的黄土层和砂层的截面积相等。则 ΔQ 越大, v 越大。由图3可知,均质黄土土柱中含水率的变化远远大于夹砂黄土土柱中砂层的含水率变化。由此,验证了水流入渗到土-砂界面处速度趋缓这一情况,这与前文分析得出的结论一致。

4 结 语

a. 黄土中,砂质夹层的存在起到了阻碍水流入渗、保持砂层上部土壤水分的作用。

b. 根据模型,从微观层面出发揭示夹砂层阻水的原因:(a)砂层薄膜水的持水量远小于黄土,从而阻滞了水流的下渗;(b)在介质突变界面处过水断面面积突然减小,以至降低了水流的下渗速度。

研究对于黄土高原等西北干旱区农业长期采用的“压砂”耕作方法提供了科学依据,从理论上完善了黄土中夹砂层的阻水机制。“压砂”保水的农业耕作方法,不仅对于干旱及半干旱区有效,也是一种值得推广到各地采用的环保节水的耕作方法。

参考文献:

- [1] 胡恒觉.我国砂田免耕法[C]//中国作物学会.耕作制度研究论文集.北京:农业出版社,1981.
- [2] 汪志荣,王文焰.砂土夹层的阻水减渗机制及合理埋深[J].西安理工大学学报,2000,16(2):170-174. (WANG Zhirong,

- WANG Wenyan. The physical mechanism and depreciation and rational burying depth of sand layer in loess[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(2): 170-174. (in Chinese))
- [3] FOK Y S. One-dimensional infiltration into layered soils[J]. Journal of the Irrigation & Drainage Division, 1970, 43: 121-129.
- [4] 范严伟, 赵文举, 王昱, 等. 夹砂层土壤 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 93-99. (FAN Yanwei, ZHAO Wenju, WANG Yu, et al. Improvement and verification of Green-Ampt model for sand-layered soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 93-99. (in Chinese))
- [5] 范严伟, 黄宁, 马孝义. 层状土垂直一维入渗土壤水分运动数值模拟与验证[J]. 水土保持学报, 2015, 35(1): 215-219. (FAN Yanwei, HUANG Ning, MA Xiaoyi. Numerical simulation and verification of layered soil water movement in vertical one-dimensional infiltration[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 215-219. (in Chinese))
- [6] HILLEL D. Soil and water physical principles and processes [M]. New York: Academic Press, 1971.
- [7] HILLEL D. Application of Soil Physics [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [8] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61-67. (WANG Chunying, MAO Xiaomin, ZHAO Bing. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(11): 61-67. (in Chinese))
- [9] 李毅, 任鑫, HORTON R. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 485-490. (LI Yi, REN Xin, HORTON R. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 485-490. (in Chinese))
- [10] 王文焰, 张建丰, 汪志荣, 等. 黄土中砂层对入渗特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 34-41. (WANG Wenyan, ZHANG Jianfeng, WANG Zhirong, et al. Influence of sand layer in loess on infiltration characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 34-41. (in Chinese))
- [11] 王丁, 费良军. 层状土壤上升毛管水运移特性试验研究[J]. 地下水, 2009, 31(1): 349-356. (WANG Ding, FEI Liangjun. Rising capillary water transported characteristics of layered soil[J]. Ground Water, 2009, 31(1): 349-356. (in Chinese))
- [12] 甘永德, 贾仰文, 仇亚琴, 等. 降雨条件下分层土壤入渗特性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 217-219, 223. (GAN Yongde, JIA Yangwen, QIU Yaqin, et al. Stratified soil infiltration characteristics during rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 217-219, 223. (in Chinese))
- [13] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 23-26. (SHI Wenjuan, SHEN Bing, WANG Zhirong, et al. Water and salt transport in sand-layered soil under evaporation with the shallow under ground water table[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9): 23-26. (in Chinese))
- [14] 史文娟, 汪志荣, 沈冰, 等. 蒸发条件下夹砂层土壤盐离子的迁移特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 133-137. (SHI Wenjuan, WANG Zhirong, SHEN Bing, et al. The migration characteristics of sand layered soil under evaporation of salt ions[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007, 35(1): 133-137. (in Chinese))
- [15] 武春林, 朱诚, 鹿化煜, 等. 南京地区下蜀黄土磁性地层年代与古环境变化[J]. 地层学杂志, 2006, 30(2): 116-123. (WU Chunlin, ZHU Cheng, LU Huayu, et al. Magnet stratigraphical dating of the Xiashu Loess in Nanjing area and its paleo-environmental interpretation[J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(2): 116-123. (in Chinese))
- [16] 黄英, 杨秋珍. 闵行区各历时不同重现期最大降水量及其径流量估算[C]//中国气象学会. 2006 年年会“灾害性天气系统的活动及其预报技术”分会场论文集. 北京: 气象出版社, 2006.
- [17] 胡海英, 包为民, 王涛, 等. 土壤水中氢氧同位素变化模拟及试验[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 149-152. (HU Haiying, BAO Weimin, WANG Tao, et al. Simulation and experiment on variations of hydrogen and oxygen isotopes in soil water[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(4): 149-152. (in Chinese))
- [18] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.