

# 透气隔水埋体对土壤水分入渗与溶质运移的影响

刘阳<sup>1</sup>, 王全九<sup>1,2</sup>, 缙丽娜<sup>1</sup>, 张继红<sup>1</sup>, 韦开<sup>1</sup>

(1.省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学), 西安 710048;  
2.中国科学院水利部水土保持研究所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)

**摘要:**为分析透气隔水(弱透水)埋体促进水分入渗与溶质运移功效,开展了不同容重(1.40, 1.45, 1.50, 1.60 g/cm<sup>3</sup>)透气隔水(弱透水)埋体的一维垂直土柱入渗试验,分析了不同容重的透气隔水(弱透水)埋体对土壤水分入渗与溶质分布的影响。结果表明,透气隔水(弱透水)埋体能够增加土壤累积入渗量,推动湿润锋运移,在一定范围内,随着透气隔水(弱透水)埋体容重增加,湿润锋推进速度与土壤入渗率均增加。600 min时,土壤累积入渗量相对增加7.42%~29.17%,湿润锋深度达到27 cm,入渗时间相对减少26.97%~64.27%。相比于对照组,不同容重的透气隔水(弱透水)埋体均能降低溶质向深层土壤迁移数量。Philip模型和代数模型均能描述透气隔水(弱透水)埋体土壤水分入渗过程,且Philip模型中吸渗率 $S$ 和代数模型中综合形状系数 $\alpha$ 均与透气隔水(弱透水)埋体内外容重比呈正相关关系。研究结果表明透气隔水(弱透水)埋体能够通过改变上层土壤吸力分布提高水分入渗能力与溶质传输效率,实现对城市雨水径流调控和净化。

**关键词:**透气隔水(弱透水)埋体;入渗速率;溶质运移

**中图分类号:**S152.7<sup>+</sup>2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)04-0152-06

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.023

## Effect of Air-Permeable and Water-Proof Buried Body on Soil Water Infiltration and Solute Transport

LIU Yang<sup>1</sup>, WANG Quanjiu<sup>1,2</sup>, GOU Lina<sup>1</sup>, ZHANG Jihong<sup>1</sup>, WEI Kai<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In order to analyze the effect of air-permeable and water-proof soil on water infiltration and solute transport, an one-dimensional vertical soil column infiltration test was carried out with different bulk densities (1.40, 1.45, 1.50, 1.60 g/cm<sup>3</sup>). The results showed that the air-permeable and water-proof (weak permeable) buried body could increase the cumulative infiltration of soil and promote the migration of wetting front. In a certain range, with the increases of the bulk densities of the air-permeable and water-proof (weak permeable) buried body, both the infiltration rate and the migration rate of wetting front increased. When the infiltration time was 600 min, the cumulative infiltration of soil increased by 7.42%~29.17%, and the depth of wetting front reached 27 cm. The infiltration time decreased by 26.97%~64.27% correspondingly. Compared with the control group, the amount of solute migration to the deep soil was reduced by different bulk densities of the air-permeable and water-proof (weak permeable) buried body. Both Philip model and algebraic model could describe the infiltration process of soil water in the air-permeable and water-proof (weak permeable) buried body, and the permeability  $s$  in Philip model and the comprehensive shape coefficient  $\alpha$  in the algebraic model were positively correlated with the volume weight ratio and the volume weight ratio inside and outside the air-permeable and water-proof (weak permeable) buried body. The results showed that the air-permeable and water-proof (weak permeable) buried body could improve the water infiltration capacity and solute transport

收稿日期:2019-12-17

资助项目:国家自然科学基金面上项目(51679190);国家自然科学基金重点项目(41830754);国家重点研发计划项目(2016YFC0501405-04);新疆维吾尔自治区重大科技专项(2016A03008)

第一作者:刘阳(1994—),男,在读硕士研究生,主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail:2283312734@qq.com

通信作者:王全九(1964—),男,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

by changing the suction distribution of the upper soil, and realize the regulation and purification of urban rainwater runoff.

**Keywords:** air-permeable and water-proof (weak permeable) buried body; infiltration rate; solute transport

随着我国城市化进程的快速发展,不透水(弱透水)地面不断扩张,雨水原有的入渗路径被阻断,由此导致城市雨洪灾害泛滥<sup>[1]</sup>。此外,多种污染物质伴随雨水下渗到地下水流中,引起河流及地下水资源污染<sup>[2-3]</sup>。而当前城市中传统的内涝防治理念与排水体系已不能适应正常安全要求<sup>[4]</sup>,城市内涝灾害已成为目前我国城市急需解决的问题之一<sup>[5-6]</sup>。因此,研究如何在城市中及时排水除涝,防控与保护水体免受污染具有十分迫切的现实意义。

国内外众多学者针对城市发展中雨洪失调、水体污染防治进行了大量研究,外国学者<sup>[7-11]</sup>研究发现,通过对城市雨水径流采用生物滞纳等处理措施,可有效控制和净化雨水,这种措施逐渐被众多学者认可为最优雨涝治理模式。我国各地都在积极倡建城市低影响开发(LID),并将低影响开发技术——雨水系统的概念引入我国海绵城市建设<sup>[12-13]</sup>。Brown等<sup>[14]</sup>研究证明,当雨水花园土壤质地组成为黏壤土时,其对雨水径流总量及洪峰有明显的限制作用,而在气温适宜的夏秋季节作用效果明显优于寒冷的冬天。人工湿地作为一种生态治理污水的方法,相比于传统污水处理方式优势明显,其在水环境治理和生态系统修复中具有重要意义<sup>[15-17]</sup>;也有学者<sup>[18-19]</sup>认为,雨水补蓄在地下水汽循环中具有十分重要意义,土壤长期处于干旱状态易引起生态系统失衡,唐双成等<sup>[20]</sup>研究表明,在黄土中填埋均质黄土与砂层土2种填料可有效促进土壤入渗,提升城市雨水花园内涝灾害的拦截能力,实现对过量雨水的再利用,并显著降低径流中污染物的流动速度。我国海绵城市建设理念和运用仍在不断探究,而海绵城市建设也并非直接将降水引入深层地下。我国西北地区海绵城市建设最早的区域是关中平原区,较多研究<sup>[21-25]</sup>发现,该地区海绵城市建设过程中当地土壤特性(特别是土壤容重)在控制土壤水分入渗量方面起着关键性作用,对土壤水分入渗的影响较大。鉴于此,为了探究有效提升海绵城市中水分入渗能力的方法,本文通过在上层土壤中设置不同容重的透气隔水(弱透水)埋体,改变土壤吸力分布,提升土壤入渗能力,并开展一维积水入渗试验,分析其对累积入渗量、湿润锋推进距离、土壤水分分布及溶质迁移特征影响,明确现有入渗模型定量分析入渗过程适用性,旨在为我国西北地区海绵城市推广应用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土样

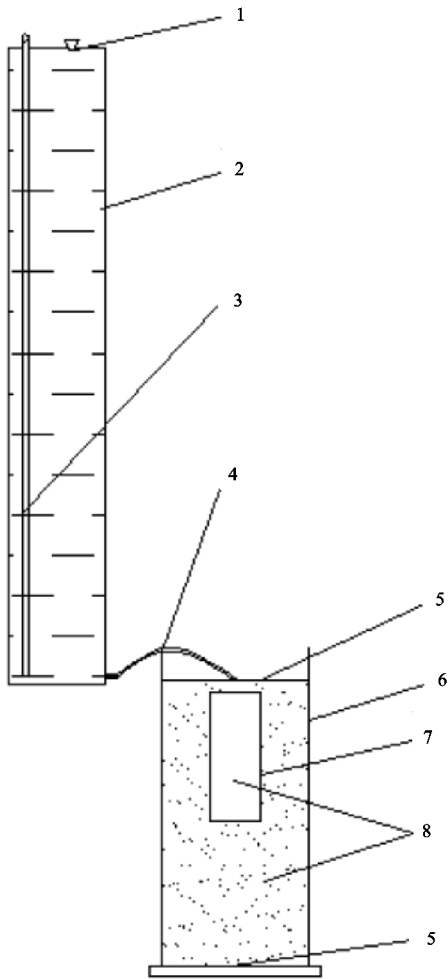
供试土样取自陕西境内富平县(关中平原区)卤泊滩0—20 cm处的表层土壤,试验土样经过自然风干、反复碾碎和过筛(孔径2 mm)后,在105℃条件下烘干8 h测得土壤初始含水量为 $0.017 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,饱和体积含水量为 $0.478 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,经测定分析得试验土样初始含盐量为 $2.76 \text{ g/kg}$ 。供试土样干容重采用环刀法测得为 $1.4 \text{ g/cm}^3$ 。土壤颗粒机械组成通过激光粒度分析仪测定,各级粒径体积分数分别为粉粒50.2%,沙粒41.5%,黏粒8.3%,根据国际制土壤质地划分标准分析后可知本次试验所用土壤为粉壤土。

### 1.2 试验设计

试验于2018年9月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室进行,试验装置由透气隔水(弱透水)埋体、供水装置以及试验土柱组成,透气隔水(弱透水)埋体为直径8 cm,高为20 cm的圆柱包体。供水装置为内径15 cm,高度100 cm(每次装水为95 cm)的马氏瓶(图1)。试验土柱为内径23 cm,高50 cm(其中每次装土柱高为40 cm)的透明有机玻璃筒。为分析透气隔水(弱透水)埋体内土壤容重的影响,将风干试验土样按容重 $1.40, 1.45, 1.50, 1.60 \text{ g/cm}^3$ 分别装入埋体内。试验过程中设置3组重复,确保试验数据准确性。

在试验时,试验土柱按照设计容重 $1.40 \text{ g/cm}^3$ 分层装填土样,将透气隔水(弱透水)埋体设置在上层土体中,并使透气隔水(弱透水)埋体垂直处于土柱横截面中心位置,填埋位置位于表层土壤下方1.5 cm。试验过程中利用马氏瓶稳定水头供水,控制土柱表层积水深度在2~3 cm内。入渗至距土柱表层27 cm(入渗深度约为整个土柱长度的2/3)终止供水,并立刻吸出表层积水。试验过程中定时刻分别记录不同处理下的马氏瓶刻度、湿润锋深度变化以及入渗时间变化。

土柱取样深度分别为0—3,3—6,6—9,9—12,12—15,15—18,18—21,21—24,24—27 cm(湿润锋面处)。土壤体积含水量采用干燥法间接测得。所取土样经烘干、碾碎过筛(2 mm)处理后按照土水质量比1:5得到土样浸提液,利用DDS-307型电导仪测定浸提液电导率值,并通过预先标定好的换算系数计算得到土壤含盐量。



注:1 为橡胶塞;2 为马氏瓶;3 为进气管;4 为供水管;5 为滤纸;  
6 为试验土柱;7 为透气隔水(弱透水)埋体;8 为试验土样。

图 1 试验装置示意

### 1.3 入渗模型

1.3.1 Philip 入渗模型 Philip 入渗模型简单明确,在众多土壤模型中应用广泛,能够很好地反映土壤入渗特性,其表达式<sup>[26]</sup>为:

$$I = St^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $I$  为累积入渗量(cm); $t$  为入渗历时(min); $S$  为吸渗率( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1/2}$ )。

1.3.2 代数模型 Wang 等<sup>[27]</sup>提出的垂直一维积水入渗的代数模型能够很好地描述累积入渗量等水分运动过程特征量,代数模型具体为:

$$I = Z_f(\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2)$$

式中: $Z_f$  为湿润锋深度(cm); $\theta_s$  为土壤饱和持水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_r$  为土壤初始含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\alpha$  为综合形状系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 透气隔水(弱透水)埋体对土壤入渗能力的影响

从图 2 可以看出,相同入渗时间,随透气隔水(弱

透水)埋体容重(对照,1.40,1.45,1.50,1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$ )的增大,累积入渗量逐渐增加。相比对照组,设置透气隔水(弱透水)埋体皆能显著提升土壤入渗速率,透气隔水(弱透水)埋体容重为 1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$  时土壤入渗最快。入渗时间 600 min 时,透气隔水(弱透水)埋体容重为 1.40, 1.45, 1.50, 1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$  的土壤累积入渗量分别比对照组的提高 7.42%, 13.56%, 19.83%, 29.17%。结果表明,透气隔水(弱透水)埋体能够有效增加土壤累积入渗量,提高土壤入渗能力,这主要由于透气隔水(弱透水)埋体表层由透气隔水(弱透水)高分子材料制作而成,其分子结构特殊,具有良好透气性而亲水性极差的特点。在水分入渗过程中,一方面随着入渗水分的推动,土壤空气逐渐向下迁移,由于透气隔水(弱透水)埋体具有透气特性,随着埋体内土壤容重的增大,埋体内外土壤孔隙所含空气含量差距明显,从而在透气隔水(弱透水)埋体内外形成一定的气体浓度高差,埋体内所含的土壤空气数量小于埋体外部空气数量,引起埋体内外空气的交换流动,透气隔水埋体内土壤孔隙通过对外部水分的吸持作用产生一定的吸力<sup>[28]</sup>,在透气隔水(弱透水)埋体界面形成一定的附加基质势,土壤水势能增大,水分入渗动力增加,入渗速率随之加快;另一方面由于透气隔水(弱透水)埋体具有隔水的特性,在一定供水水头下<sup>[29-30]</sup>,当水分入渗到透气隔水埋体所在界面时,水分入渗截面突然减小,单位面积土壤上水分所受压力变大,水分入渗速度随之加快。

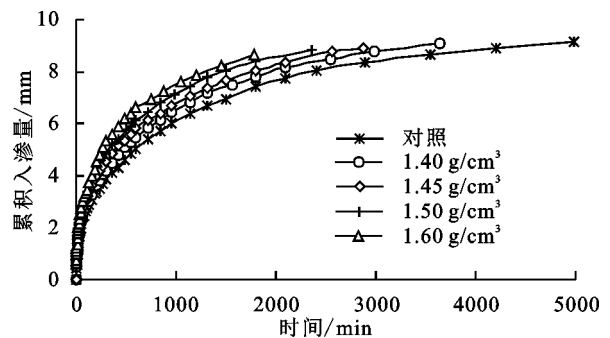


图 2 不同容重透气隔水(弱透水)埋体入渗下对累积入渗量影响

由图 3 可知,不同容重的透气隔水(弱透水)埋体入渗下湿润锋推进深度随入渗历时延长而逐渐增大。入渗过程中湿润锋推进相同深度时,设置透气隔水(弱透水)埋体相比于对照组所用时间明显缩短。入渗结束后,湿润锋深度均达到 27 cm,不同容重的透气隔水(弱透水)埋体(1.40, 1.45, 1.50, 1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$ )相比于对照组入渗时间分别减少 26.97%, 42.37%, 52.80%, 64.27%。可以看出,设置透气隔水(弱透水)埋体在增加累积入渗量的同时也在一定程度上加快了湿润锋推进速率,且随透气隔水(弱透水)埋体容重增加,湿润锋推进速率提高。

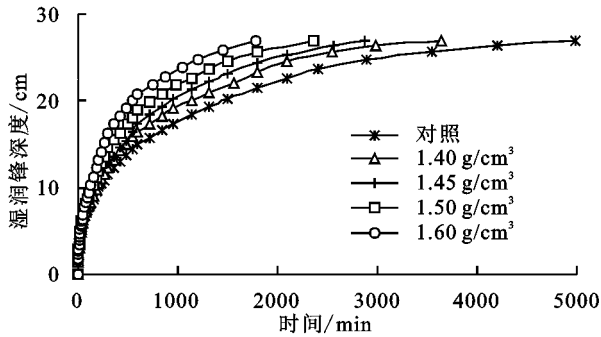


图 3 不同容重透气隔水(弱透水)埋体入渗下对湿润锋的影响

### 2.2 透气隔水(弱透水)埋体容重对入渗模型参数的影响

为分析透气隔水(弱透水)埋体对入渗模型参数的影响,利用 Philip 公式及代数模型对实测数据进行处理,结果见表 1。结果显示 2 种入渗模型拟合结果良好,决定系数  $R^2$  均大于 0.90,说明 2 种入渗模型都

可以描述设置透气隔水(弱透水)埋体情况下土壤入渗过程。为了进一步定量分析透气隔水(弱透水)埋体容重对入渗模型参数的影响,将透气隔水(弱透水)埋体容重与土柱容重之比定义为容重比,则设置透气隔水(弱透水)埋体容重为 1.40,1.45,1.50,1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$  相应的容重比分别为 1.00,1.04,1.07,1.14。

从图 4 可以看出,吸渗率  $S$  随着容重比  $\gamma$  的增加呈现逐渐增加的趋势,由 0.191 逐渐增加到 0.256,呈正相关关系,且均大于对照组吸渗率  $0.167 \text{ cm}/\text{min}^{1/2}$ 。在容重比为 1.14 时,吸渗率高于对照组 52.99%。吸渗率  $S$ <sup>[31-32]</sup> 常用来表征土壤依靠毛管力吸持液体水分的能力,表明随透气隔水埋体容重变大,土壤入渗能力也逐渐增加。将吸渗率  $S$  与容重比之间关系进行拟合,结果见公式(3),相关系数  $R^2$  为 0.913,表明吸渗率  $S$  与容重比  $\gamma$  之间呈现较好的线性关系。

$$S = 0.4327\gamma - 0.2336 \quad (3)$$

表 1 入渗参数拟合结果

入渗模型	参数	容重比				
		对照	1.00	1.04	1.07	1.14
Philip	吸渗率 $S/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1/2})$	0.167	0.191	0.227	0.231	0.256
	决定系数 $R^2$	0.866	0.882	0.907	0.867	0.871
代数模型	综合形状系数 $\alpha$	0.355	0.360	0.362	0.377	0.405
	决定系数 $R^2$	0.999	0.997	0.993	0.992	0.986

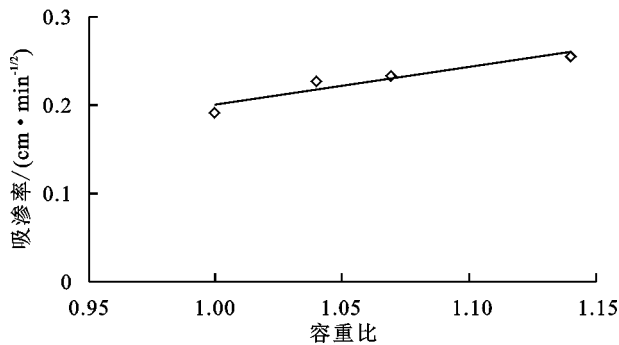


图 4 容重比对吸渗率的影响

从图 5 可以看出,综合形状系数  $\alpha$  随着容重比  $\gamma$  的增加而呈现逐渐增大的趋势,当容重比为 1.14(即透气隔水(弱透水)埋体容重为  $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ )时,综合形状系数  $\alpha$  最大,高于对照组 13.94%。将综合形状系数  $\alpha$  与容重比  $\gamma$  之间关系采用线性公式进行拟合见公式(4)。拟合相关系数  $R^2$  为 0.941,表明综合形状系数  $\alpha$  与容重比  $\gamma$  之间呈现较好的线性关系。

$$\alpha = 0.3335\gamma + 0.0218 \quad (4)$$

### 2.3 透气隔水(弱透水)埋体对土壤含水率分布影响

图 6 为入渗结束后不同土层深度(0—27 cm)的土壤体积含水率分布。由图 6 可知,在土壤表层,各处理下土壤含水率接近土壤饱和持水率,随土层深度增加,土壤含水率逐渐降低并在湿润锋深度处趋近于

土壤初始含水率。入渗结束后,在 0—21 cm 土层深度范围内的湿润体内,透气隔水(弱透水)埋体容重为 1.40,1.45,1.50,1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$  的土壤含水量分别低于对照组 1.97%,3.34%,6.06%,9.36%。

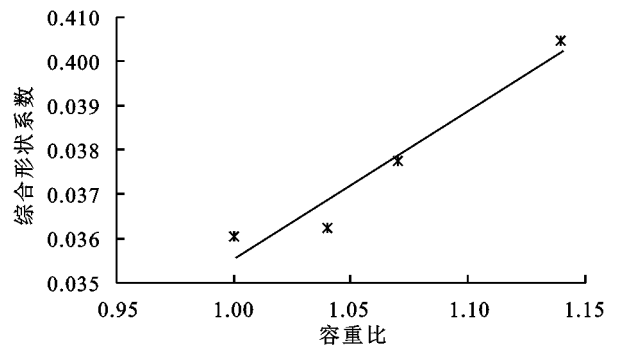


图 5 容重比对综合形状系数  $\alpha$  的影响

为进一步说明透气隔水(弱透水)埋体提升向下层土壤输送水分的能力,定义相同入渗时间,透气隔水(弱透水)埋体入渗下的土壤湿润体含水率与对照组土壤含水率的差值和对照组含水率之比为土壤入渗过程中的相对输水效率。在入渗 1 800 min 时,不同处理下的湿润锋推进距离均超过透气隔水(弱透水)埋体底端所在截面,因此计算入渗 1 800 min 时,不同处理入渗过程中向透气隔水(弱透水)埋体底部下层输水的效率。入渗 1 800 min 时不同处理下的

土壤输水效率随透气隔水(弱透水)埋体容重增加依次为 5.4%, 8.9%, 13.7%, 16.6%。可以发现,在相同入渗时间下,透气隔水(弱透水)埋体可提升土壤向下层输水的效率,且土壤的输水效率随透气隔水(弱透水)埋体容重的增加而逐渐增加,在透气隔水(弱透水)埋体容重为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的土壤输水效率最大。因此,在一定深度范围内,透气隔水(弱透水)埋体能够提高土壤入渗过程中的相对输水效率,促进地表水迅速迁移到地下,降低地表雨水聚集泛滥危害性,同时保证深层土壤水分存储,使得更多水分储存在地下层供缺水季节调节利用。

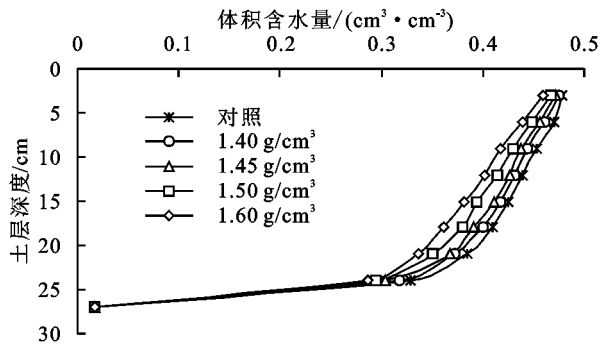


图 6 不同容重透气隔水(弱透水)埋体入渗下对土壤含水率的影响

## 2.4 透气隔水(弱透水)埋体对土壤溶质运移的影响

为分析设置透气隔水(弱透水)埋体对土壤溶质运移的影响,以盐分作为溶质示踪元素,明确透气隔水(弱透水)埋体对土壤溶质运移的影响。由图 7 可知,土壤溶质由土壤表层逐步向下运移,最终在湿润锋面处聚集。在 0—18 cm 土层深度范围内,设置透气隔水(弱透水)埋体处理的土壤溶质含量均高于对照组土壤溶质含量。在湿润锋面处,相比于对照组,随透气隔水(弱透水)埋体容重的增加,土壤溶质含量逐渐降低。

为定量分析不同容重透气隔水(弱透水)埋体对土壤溶质运移的影响,将设置透气隔水(弱透水)埋体入渗下的土壤含盐量减去对照组土壤含盐量与对照组含盐量之比定义为溶质相对传输率(%)。若溶质相对传输率为正值,土壤溶质含量表现为高累积状态;溶质相对传输率为负值,土壤溶质含量呈现为低累积状态。由于不同处理在 0—18 cm 土层深度范围内土壤溶质均表现为高累积状态,因此计算得出 0—18 cm 土层深度范围内溶质相对传输率。由表 2 可知,0—18 cm 土层深度范围内,设置透气隔水(弱透水)埋体入渗的土壤溶质均表现出高累积状态,越接近表层溶质累积现象越明显,且溶质相对传输率值随透气隔水(弱透水)埋体容重增加而逐渐变大,平均溶质相对传输率值随透气隔水(弱透水)埋体容重的增

加依次为 25.4%, 47.5%, 69.9%, 92.1%。可以看出在 0—18 cm 土层深度范围内,土壤溶质积累随透气隔水(弱透水)埋体容重的增加而逐渐变大。因此,当存在透气隔水(弱透水)埋体这种介质时能够有效的减少土壤溶质向深层迁移量,使得大量溶质(如水体污染物)停留在土壤上层,降低溶质污染物污染土壤和深层地下水的风险,从而有利于保护深层土壤和地下水资源安全。

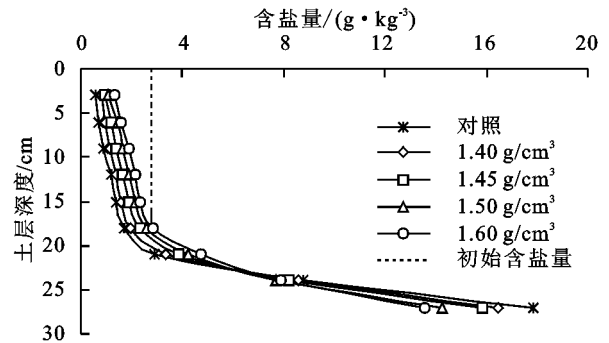


图 7 不同容重透气隔水(弱透水)埋体入渗下土壤溶质分布

表 2 不同容重透气隔水(弱透水)埋体入渗下对土壤溶质运移的影响 单位:%

土层	1.40	1.45	1.50	1.60
深度/cm	$\text{g/cm}^3$	$\text{g/cm}^3$	$\text{g/cm}^3$	$\text{g/cm}^3$
0—6	41.7	72.4	104.8	135.8
6—12	28.7	53.7	82.0	107.5
12—18	22.0	45.3	67.3	88.2

## 3 结论

(1) 土壤中设置透气隔水(弱透水)埋体能够提高土壤入渗速率,相同入渗时间,累积入渗量随透气隔水(弱透水)埋体容重增加而逐渐增加。湿润锋推进相同距离,入渗所用时间明显减少。入渗结束后,透气隔水(弱透水)埋体容重为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时入渗时间相比对照组可降低 64.27%。

(2) 土壤中设置透气隔水(弱透水)埋体入渗下 Philip 入渗公式和代数模型均能较好描述土壤入渗过程,Philip 入渗公式中吸渗率  $S$  随容重比增加而逐渐变大,容重比为 1.14,吸渗率达到最大值  $0.256 \text{ cm/min}^{1/2}$ ;代数模型中,综合形状系数  $\alpha$  也呈现相同的趋势,容重比为 1.14,综合形状系数  $\alpha$  达到最大值 0.405。

(3) 设置透气隔水(弱透水)埋体入渗下土壤的输水效率随透气隔水(弱透水)埋体容重增加而逐渐变大。此外,相比于对照组,设置透气隔水(弱透水)埋体能够降低土壤溶质向深层土壤的迁移量。

### 参考文献:

- [1] 郭斌,任志远.西安城区土地利用与生态安全动态变化[J].地理科学进展,2009,28(1):71-75.

- [2] 王和意.上海城市降雨径流污染过程及管理措施研究[D].上海:华东师范大学,2005.
- [3] Hsieh C, Davis A P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff[J].*Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(11):1521-1531.
- [4] 王梓墉.基于海绵城市理念的城市内涝防治研究[J].*价值工程*, 2019, 38(23):157-159.
- [5] 崔广柏,张其成,湛忠宇,等.海绵城市建设研究进展与若干问题探讨[J].*水资源保护*, 2016, 32(2):1-4.
- [6] 任韶华.现代城市内涝频发下的防涝体系及防涝设施规划研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [7] 李毅,邵明安.人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J].*农业工程学报*, 2007, 23(3):18-23.
- [8] 廖朝轩,高爱国,黄恩浩.国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J].*水资源保护*, 2016, 32(1):42-45, 50.
- [9] 石磊,樊瀚琳,柳思勉,等.国外雨洪管理对我国海绵城市建设的启示:以日本为例[J].*环境保护*, 2019, 47(16):59-65.
- [10] National Research Council. Urban stormwater management in the United States[M]. USA: National Academies Press, 2009.
- [11] Liaw C H, Tsai Y L, Cheng M S. Hydrologic analysis of distributed small-scale stormwater control systems [J].*Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 2005, 23(1):1-12.
- [12] 住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[R].北京:住房和城乡建设部, 2014.
- [13] 国务院办公厅.关于推进海绵城市建设的指导意见[R].北京:国务院办公厅, 2015.
- [14] Brown R A, Hunt III W F. Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of undersized bioretention cells [J].*Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2010, 137(3):132-143.
- [15] Scholz M, Xu J. Performance comparison of experimental constructed wetlands with different filter media and macrophytes treating industrial wastewater contaminated with lead and copper[J].*Bioresource Technology*, 2002, 83(2):71-79.
- [16] Knight R L, Kadlec R H, Ohlendorf H M. The use of treatment wetlands for petroleum industry effluents [J].*Environmental Science and Technology*, 1999, 33(7):973-980.
- [17] 籍国东,孙铁珩,常士俊,等.自由表面流人工湿地处理超稠油废水[J].*环境科学*, 2001, 22(4):95-99.
- [18] 王根绪,程国栋,徐中民.中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J].*自然资源学报*, 1999, 14(2):14-21.
- [19] 陆垂裕,孙青言,李慧,等.基于水循环模拟的干旱半干旱地区地下水补给评价[J].*水利学报*, 2014, 45(6):701-711.
- [20] 唐双成,罗纨,贾忠华,等.填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J].*水土保持学报*, 2016, 30(1):73-78, 102.
- [21] 左其亭.我国海绵城市建设中的水科学难题[J].*水资源保护*, 2016, 32(4):21-26.
- [22] 赵景波.陕西黄土高原 500 ka BP 的古土壤与气候带迁移[J].*地理学报*, 2001, 56(3):323-331.
- [23] 陈瑶,张科利,罗利芳,等.黄土坡耕地弃耕后土壤入渗变化规律及影响因素[J].*泥沙研究*, 2005(5):45-50.
- [24] 袁建平,张素丽,张春燕,等.黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J].*土壤学报*, 2001, 38(4):579-583.
- [25] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等.定容重条件下生物炭对干旱半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J].*应用生态学报*, 2014, 25(8):2281-2288.
- [26] Philip J R. The theory of infiltration: 1.The infiltration equation and its solution[J].*Soil Science*, 1957, 83(5):345-358.
- [27] Wang Q J, Horton R, Shao M A. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution [J].*Soil Science*, 2003, 168(10):671-676.
- [28] 梁爱民.非饱和土壤渗透特性及饱和入渗机理试验研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [29] 马娟娟,孙西欢,李占斌.蓄水坑灌条件下变水头作用的垂直一维土壤入渗参数试验研究[J].*农业工程学报*, 2005, 21(增刊1):88-91.
- [30] 徐尧权.动态水压滴灌条件下土壤水分运移特性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [31] 付秋萍,王全九,樊军.盘式吸渗仪吸渗率计算方法比较[J].*农业机械学报*, 2009, 40(9):56-62.
- [32] 付秋萍,王全九,樊军.Philip 公式确定吸渗率时间尺度研究[J].*干旱地区农业研究*, 2009, 27(4):65-70.