

城市雨水管理

道路下凹绿地渗水过程模拟与防护措施分析

高原原¹, 卢金锁¹, 苏拥军², 张荣国², 孟庆军², 罗文敏²

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 在测定西安市土壤物理参数和分析降雨资料的基础上,以道路旁边下凹绿地为模型,利用 Hydrus 软件对下凹绿地的渗水过程进行动态模拟,观测下凹绿地下方含水量的变化轨迹及不同观测点处的含水量差异。结果表明,下渗水量随着下凹深度的增加而增加;在相同下凹深度下,设置防渗结构后雨水可被导向未设置防渗结构的一侧,从而起到保护设计要求强度高的一侧;防渗结构角度 α 在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间并且下凹深度 < 10 cm 时,防渗结构对道路下部土层含水量的影响很小,可最大化地将雨水回归地下,同时可使道路下方路基结构的黄土规避湿陷性。

关键词: 下凹绿地; 城市道路; 土壤含水量; Hydrus 软件

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)07-0118-06

Simulation of Rainwater Infiltration Process in Roadside Sunken-lawn and Analysis of Protective Measures

GAO Yuan-yuan¹, LU Jin-suo¹, SU Yong-jun², ZHANG Rong-guo², MENG Qing-jun², LUO Wen-min²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Nanning Rail Transit Co. Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: Based on measuring soil physical parameters and analyzing precipitation data of Xi'an City, taking roadside sunken-lawn as the model, Hydrus software was applied to dynamically simulate the water infiltration process in sunken-lawn, and change trajectory of moisture content under the sunken-lawn and the moisture content difference of different observation points were observed. The results showed that the rainwater infiltration volume increased with the increase of the sunken-lawn depth. Under the same sunken depth, impervious structure was set to direct the rainwater into the opposite side with no impervious structure, and thus the side of high strength design requirement was protected. When the impervious structure rotation angle α was between 45° and 60° , and the sunken depth was less than 10 cm, the impervious structure had little effect on soil moisture content under the road, therefore the rainwater could be maximally returned to the underground, and loess collapsibility of the subgrade structure beneath the road could be avoided.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778523); 西部绿色建筑国家重点实验室培养基地开放研究基金资助项目(LSKF201601)

通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@163.com

Key words: sunken-lawn; urban road; moisture content of soil; Hydrus software

在海绵城市建设中,提出了“渗、滞、蓄、净、用、排”六字方针,其中可以通过下凹绿地和透水铺装等来实现城市雨水下渗。然而我国西北地区土质多为黄土,其中大部分为受压受湿后危害性较大的湿陷性黄土,无序下渗会严重威胁道路以及周边建筑的安全,因此,掌握雨水在绿地下及路基中的渗透过程,防止雨水向路基和重要建筑基础下渗,使雨水导向性地向非重载区下渗是西北地区建设海绵城市的关键所在。

降雨进入下凹绿地后的下渗过程属于饱和-非饱和土壤的水分入渗问题,为探究下渗轨迹和方向,国内外较多采用 Hydrus 软件,其可模拟水、热、溶质在土壤饱和-非饱和区域的运移过程,已经在农业灌溉、地下渗滤、黄土地区梯田坡地等方面的水分入渗土壤问题上有诸多应用^[1~4]。笔者以西安市常见的两侧设置下凹绿道路横断面为基础建立概化模型,应用 Hydrus-2D 软件,以采集分析确定的西安市原状黄土土样为下渗土质参数,选取西安市 2005 年—2014 年 4 月—10 月间最大日降雨的分钟降雨资料为最不利降雨过程情景,统计计算不同下凹深度下的单日降雨下渗水量,模拟降雨径流入渗后水分在邻近下凹绿地的道路路基中含水量的变化轨迹,并提出和模拟了不同的导向性雨水下渗情况和路基结构防渗技术方案。

1 模型建立

1.1 基本方程

Hydrus 模型基于 Richards 方程对饱和-非饱和土壤的水分运动过程进行描述,由 Galerkin 线状有限元法对方程进行数值求解,并综合水循环过程中的降雨、蒸发蒸腾、土壤水分运移、地下水位变化等,依据土壤水分特征参数,设定定解条件(初始条件和边界条件),对土壤水分的实时情况进行模拟。

针对涉及的降雨径流渗入下凹绿地后,纵向断面中水平(x 轴)、垂直(z 轴)方向的二维饱和-非饱和入渗问题,根据达西定律和质量守恒定律,假设土壤为各向同性的均质多孔介质,忽略温度、土壤水分滞后效应及土壤气相对土壤水分的影响,以含水量为变量的土壤水分运动方程——Richards 方程^[5]如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}]}{\partial z} - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中, θ 为土壤体积含水量, cm^3/cm^3 ; $D(\theta)$ 为土壤水扩散率, cm^2/min ; $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率, cm/min ; t 为时间, min ; x 、 z 分别为水平、垂直方向坐标, cm 。

其中,Richards 方程中的非饱和土壤水分特征参数采用 van Genuchten (VG) 模型进行拟合求解,求解之前需要先实测所研究土壤的粒径分布、容重等物理参数。

1.2 定解条件

雨水进入下凹绿地后的入渗过程属于面源入渗,根据其结构特点,将原始土壤水分运动模拟区域概化为图 1 所示。其中,区域 BEDFGHJK 为原状湿陷性黄土(简称原土),区域 CDEB 和 KJHI 为道路压实路基即压实湿陷性黄土(简称压实原土),区域 ABEJKM 设定为渗透性较好的原土掺 50% 砂。设定道路路面结构为硬质路面,选取下凹绿地入渗面为零基准面,中心为坐标原点 O,ABCFGIKM 为数值模拟区域,以下凹绿地下渗面 AM 为 x 轴方向即道路纵剖面水平方向, z 轴方向即道路纵剖面垂直方向,向右、向上为正。

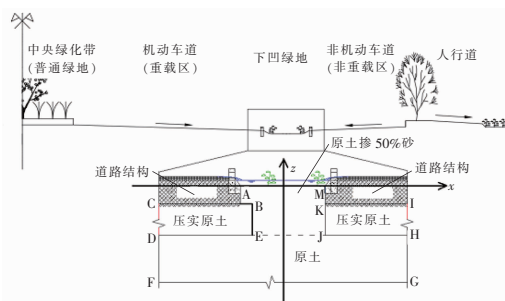


图 1 下凹绿地结构示意

Fig. 1 Schematic diagram of sunken-lawn structure

其中,求解土壤水分运动方程的初始条件为:

$$\theta(x, z, t) = \begin{cases} \theta_{01}(x, z, 0), & x, y \in \Omega_{BCDEB} \cup \Omega_{HIKJH} \\ \theta_{02}(x, z, 0), & x, y \in \Omega_{AEDFGIMA} \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ_{01} 和 θ_{02} 分别为区域 1 压实原土和区域 2 原土的初始含水量,以取样点的实测值概化整个区域的初始含水量。区域尺寸由设计尺寸确定。由于

模拟时间较长,因此对区域土壤水分动态初始条件以点及面的概化,对于长历时动态模拟结果的影响是可忽略的。

边界条件依据实际情况设定如下:模拟区域上边界为下凹绿地入渗面 AM,考虑降雨过程中水分入渗过程,上边界条件选择大气边界条件;左、右边界条件由于侧边界 CF 和 IG 模拟区域较大,水分运动达不到侧边界,从而侧边界 AE、MJ 设定为零通量边界;下边界条件鉴于西安市地下水位较深(通常在 8~20 m),故设定为自由排水边界。

2 模型参数确定

2.1 下渗土壤样品采集与分析

现场取得土壤带回,经风干碾碎后,过 200 目筛网,利用激光粒度分布测定仪测定土壤粒径分布。土壤容重采用环刀法测定,其中,原土容重直接采集测定,压实原土容重根据《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013)中规定的压实度(93%~95%)和湿陷性黄土地区的最大容重(1.85~1.90 g/cm³)确定。经测定,原土、压实原土、原土掺 50% 砂的容重分别为 1.24、1.78、1.22 g/cm³。原土和压实原土中砂粒(粒径>0.05 mm)、粉粒(粒径为 0.005~0.05 mm)、粘粒(粒径<0.005 mm)所占比例分别为 2.6%、66.4%、31.0%,原土掺 50% 砂中相应的比例分别为 11.3%、60.5%、28.2%。

土壤水分特征参数利用 Hydrus-2D 软件自带的神经网络模块内嵌 ROSSTA 软件^[6],依据所测土壤粒径分布及容重确定,如表 1 所示。

表 1 土壤水分特征参数

Tab. 1 Soil moisture characteristic parameters

项 目	剩余含水量 $\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水量 $\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	经验系数 a/cm^{-1}	形状系数 n	渗透系数 $K_s/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$
原土	0.090 7	0.506	0.007 8	1.525	0.804
压实原土	0.071 6	0.366	0.009 2	1.393	0.055
原土掺 50% 砂	0.085 8	0.489	0.006 8	1.572	1.196

2.2 降雨情景选择

本研究根据西安市肖家村气象站 2005 年—2014 年的分钟自记降雨量资料对降雨最为集中的 4 月—10 月的日降雨量信息数据进行统计,共计 643 个降雨日,年均降雨量为 522.6 mm,降雨日的日均降雨量为 8.1 mm。对日降雨量排序,最大降雨日为 2007 年 8 月 9 日,日降雨量为 76.9 mm,占当年 4

月—10 月降雨量的 11.59%,降雨历时为 19.2 h。其中间隔 10 min 降雨量分布情况及累计降雨量变化如图 2 所示。以 10 年内的最大日降雨作为最不利情景进行模拟,则未达到该规模的降雨所得结果均小于该场降雨的结果。

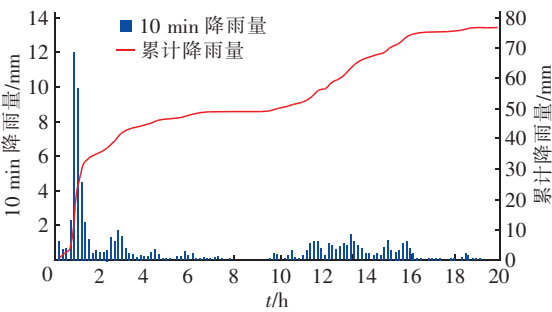


图 2 10 min 降雨量分布及累计降雨量变化

Fig. 2 Change of 10 min of precipitation distribution and cumulative precipitation distribution

2.3 下凹绿地水量平衡及下渗量分析

降雨过程中,下凹绿地及其周围环境中的降雨、汇流、蓄集、溢出排放、下渗、蒸发形成小的水循环系统,假定超出凹地蓄集量的雨水通过雨水管溢出排放,根据水量平衡原理,一定时段内,下凹绿地的水量平衡关系如下:

$$Q + U_1 = S + E + U_2 + P \quad (3)$$

其中, Q 为时段内道路汇集雨水进入下凹绿地的径流量, m^3 ; U_1 为时段开始时下凹绿地的蓄水量, m^3 ; S 为时段内下凹绿地的雨水下渗量, m^3 ; E 为时段内下凹绿地的雨水蒸发量, m^3 ; U_2 为时段结束时下凹绿地的蓄水量, m^3 ; P 为时段内下凹绿地的雨水溢出排放量, m^3 。

以图 1 所示的概化区域为例,机动车道宽为 11 m,非机动车道宽为 5.5 m,下凹绿地宽为 2.7 m,雨水溢流井间距为 40 m 且道路坡向一致,并假定径流汇流区域以溢流井为界,则汇水面积为 785 m²,绿地面积为 135 m²,绿地率为 17.2%。下凹深度指有效下凹深度,即雨水溢流井至绿地最低点的深度。

依据降雨径流进入下凹绿地后的水量平衡分析,在所述降雨时,不同下凹深度的下凹绿地积水量变化如图 3 所示。可以看出,由于前期降雨分布集中,瞬时降雨径流量大,以下凹 10 cm 为例,下凹绿地积满历时仅为 1.2 h,降雨停止后积水下渗历时为 18.7 h;不同下凹深度时下凹绿地容纳的雨水量不同,下凹深度越深,则总下渗水量越大。

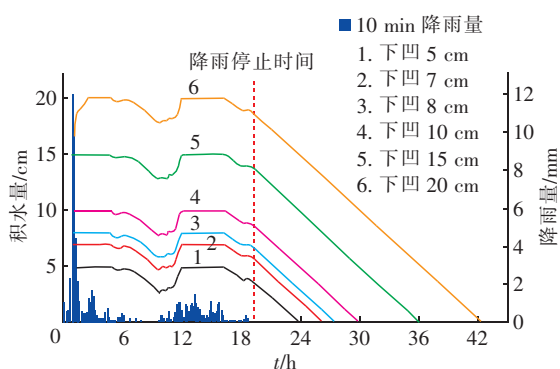


图3 不同下凹深度的下凹绿地滞留积水深度变化

Fig. 3 Change of depth of detention seep in sunken-lawn with different depth

2.4 下凹绿地及其防渗结构设定

如图4所示,本研究提出在下凹绿地与道路结构相连接处设置防渗结构(BE处)。在下凹绿地土层下方,以重载区一侧的道路结构为起点,以B点为原点,将BE处防渗结构逆时针旋转 α 角度(分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60°),旨在通过不同角度防渗结构的设置,探究降雨径流入渗后向非重载区(观测点1侧)和重载区(观测点2侧)流入的水量比较。

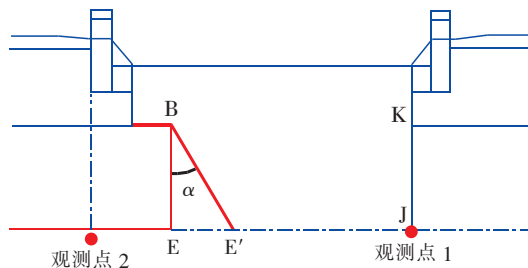


图4 下凹绿地的防渗层结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of sunken-lawn with different observation point

3 模拟结果与分析

将土壤水力参数、降雨数据和概化的初始含水量代入模型,结合上、下边界条件设置,代入不同设计条件,得出土壤含水量的分布情况,为保证观测下渗的长期效果,模拟历时为2 000 h。

3.1 防渗结构的作用分析

传统无防渗结构和设置防渗结构(角度为 45°)的下凹绿地(下凹10 cm)下渗结果见图5。可以看出,无防渗结构时下凹绿地下方道路路基中两侧含水量的情况基本相同,而设置防渗结构的下凹绿地观测点2处含水量明显小于观测点1处。比较图5

(a)、(b)可知,设置防渗结构后,雨水更多地进入未设置防渗结构一侧(非重载区),设置防渗结构一侧(重载区)的含水量减少,通过防渗结构可将雨水导向异侧(非重载区),从而起到保护设计要求强度高的一侧(重载区)。以2 000 h时为例,普通下凹绿地的观测点2处含水量为 $0.232 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,而设置 45° 防渗结构时为 $0.185 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

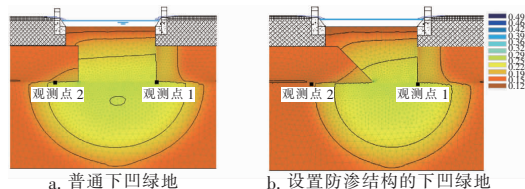


图5 下渗效果模拟

Fig. 5 Simulated results of infiltration effect

3.2 导向性雨水下渗过程分析

模拟不同下凹深度和不同防渗结构条件下观测点1处的含水量,如前分析,随着下凹深度的增加,观测点1处的含水量增大,其中绿地下凹10 cm时不同角度防渗结构下观测点1处的含水量见图6。

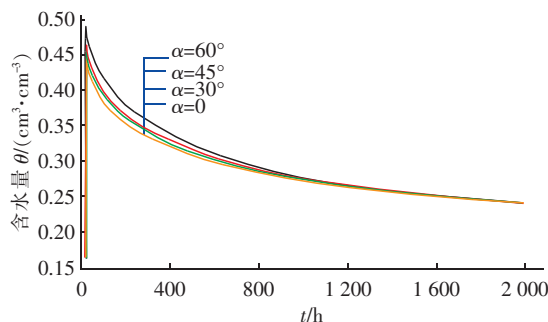


图6 下凹10 cm时观测点1处含水量的变化

Fig. 6 Change of moisture content in observation point 1 with different impervious structure rotation angles

由图6可知,设置不同角度防渗结构时观测点1处的含水量在33 h时达到最大,当防渗结构角度为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 时,最大值分别为 0.429 、 0.443 、 0.462 、 $0.488 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。角度越大,观测点1处的最大含水量越高,达到最大含水量后,随着时间的推移,由于水分向观测点1右侧及下方迁移,不同角度防渗结构下观测点1处的含水量均逐渐减少,并趋于一致。可以看出,不同角度防渗结构之间有差异,角度越大则含水量越大,说明防渗结构设置的区域面积越大,则进入异侧的水量越大,导水作用越好。

3.3 路基防护措施的方案选择

分别模拟不同下凹深度及不同防渗结构时的下

渗过程,选择观测点2处含水量随时间变化的曲线,将曲线以不同下凹深度分组,分析相同下凹深度时不同角度防渗结构下含水量的变化,如图7所示。

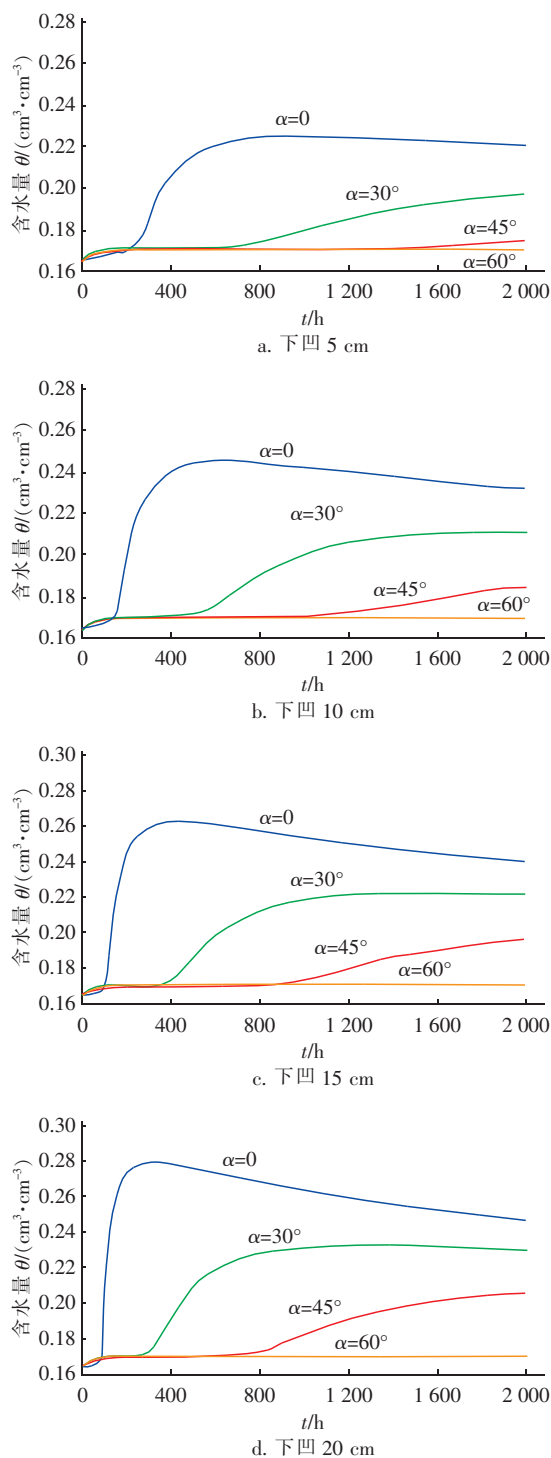


图7 不同防渗结构下观测点2处含水量的变化

Fig. 7 Change of moisture content in observation point 2 with different impervious structure and sunken depths

以防渗结构角度为45°、历时2 000 h 时为例,

下凹5 cm 时观测点2 处的含水量为0.175 cm³/cm³,下凹10 cm 时为0.185 cm³/cm³,下凹15 cm 时为0.197 cm³/cm³,下凹20 cm 时为0.207 cm³/cm³,故无论防渗结构旋转角度多大,随着下凹深度的增加,由于进入土壤的总水量增大,观测点2 处的含水量不断加大。比较不同下凹深度下观测点2 处含水量的变化,随着防渗结构旋转角度的增大,最大含水量逐渐减小,进一步说明防渗结构角度对土壤中水分分布有影响。

选择敏感含水量 $\theta = 0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。在下凹5 cm 条件下,防渗结构角度 $> 30^\circ$ 时含水量低于敏感含水量,且为 30° 时接近敏感含水量;在下凹10 cm 条件下,防渗结构角度 $> 45^\circ$ 时含水量低于敏感含水量;在下凹15 cm 条件下,防渗结构角度 $> 45^\circ$ 时含水量低于敏感含水量,且为 45° 时接近敏感含水量;在下凹20 cm 条件下,防渗结构角度为 45° 时含水量略大于敏感含水量。综上,当防渗结构角度 $> 45^\circ$ (可能是 50°) 时含水量低于敏感含水量。当防渗结构角度为 60° 时,土壤含水量在不同下凹深度下均无变化。

4 结论

① 依据下凹绿地水量平衡分析,下凹绿地的下渗水量随着下凹深度的增加而增加。

② 比较普通下凹绿地和设置防渗结构的下凹绿地中设置在防渗结构一侧的观测点处含水量的差异,发现设置防渗结构后,相同下凹深度下降雨径流入渗的水分更多地进入未设置防渗结构一侧,而设置防渗结构一侧的含水量减少,通过设置防渗结构可将雨水导向异侧,从而起到保护设计要求强度高的一侧。

③ 比较不同下凹深度、不同防渗结构铺设形式下设置防渗结构一侧(重载区)的观测点处含水量的差异,发现旋转角度 α 在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间且下凹深度 $< 10 \text{ cm}$ 时,防渗结构对道路下部土层含水量的影响很小,可以最大化地将雨水回归地下,同时使道路下方路基结构的黄土规避湿陷性。这种防护措施可以应用于西北黄土地区的下凹绿地,从而因地制宜地建立新型道路绿化结构。

参考文献:

- [1] Li Y, Simunek J, Jing L, et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experi-

- ment using Hydrus-1D[J]. Agric Water Manage, 2014, 142:38 – 46.
- [2] Fuerhacker M, Haile T M, Monai B, *et al.* Performance of a filtration system equipped with filter media for parking lot runoff treatment[J]. Desalination, 2011, 275 (1/3): 118 – 125.
- [3] 苏静. 黄土高原半干旱地区坡面产流入渗作用机制的模拟研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.
Su Jing. Study on the Simulation of Rainfall-Infiltration-Runoff Mechanism in Slope in Loess Plateau Semi-arid Zone[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008 (in Chinese).
- [4] Lü H, Zhu Y, Skaggs T H, *et al.* Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau, China[J]. Agric Water Manage, 2009, 96 (2): 299 – 306.
- [5] Kandelous M M, Simunek J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D[J]. Agric Water Manage, 2010, 97 (7): 1070 – 1076.
- [6] Schaap M G, Leij F J. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem – van Genuchten model[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64 (3): 843 – 851.



作者简介:高原原(1991 –), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要进行雨水土壤下渗方面的研究。

E – mail: 343112096@ qq. com

收稿日期: 2017 – 01 – 21

(上接第117页)

- concentration *o*-cresol with adsorption resin[J]. Applied Chemical Industry, 2009, 38 (11): 1652 – 1655 (in Chinese).
- [10] 袁辉洲, 邹原, 张鹏, 等. AMBBR 工艺处理城市污水[J]. 环境工程, 2012, 30 (1): 30 – 34, 82.
Yuan Huizhou, Zou Yuan, Zhang Peng, *et al.* Treating urban sewage with anaerobic MBBR process[J]. Environmental Engineering, 2012, 30 (1): 30 – 34, 82 (in Chinese).
- [11] 李卫平, 时屹然, 朱浩君, 等. SMBBR 处理聚氯乙烯废水的2种方式的探究[J]. 水处理技术, 2015, 41 (4): 95 – 98.
Li Weiping, Shi Yiran, Zhu Haojun, *et al.* SMBBR two ways of treatment of wastewater from PVC research[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41 (4): 95 – 98 (in Chinese).
- [12] 师永健, 张耀斌, 全燮, 等. 移动床生物膜反应器用于苯酚废水处理的性能研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33 (1): 30 – 35.
Shi Yongjian, Zhang Yaobin, Quan Xie, *et al.* Performance of moving bed biofilm reactor in removal of phenol from artificial waste water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33 (1): 30 – 35 (in Chinese).
- [13] 樊瑜. 耐高浓度苯酚菌株的筛选及其降解特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2012.
Fan Yu. Screening of High-phenol-tolerance Strain and Studying of Its Phenol-degrading Abilities[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012 (in Chinese).



作者简介:敬双怡(1978 –), 男, 四川遂宁人, 硕士, 副教授, 研究方向为市政污水处理。

E – mail: 43461612@ qq. com

收稿日期: 2017 – 09 – 12