

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.021

海绵城市建设中土水特征曲线对产流的影响

孙召东^{1,2}, 李再兴³, 宋洪庆², 邢奕⁴, 张海龙⁵, 祝庆辉⁵, 李正一²

(1. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 050018; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 河北科技大学 环境科学与工程学院, 河北 石家庄 050018; 4. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083; 5. 庄河市海绵城市建设办公室, 辽宁 庄河 116400)

摘要: 土壤土水特征曲线是海绵城市建设中源头控制阶段的重要参数,是降雨入渗及产流研究的理论基础。针对海绵城市试点庄河市建设的实际情况,对当地3类土壤进行土水特征曲线测定,拟合计算得到土壤基质吸力、非饱和导水系数方程,结合Green-Ampt改进模型计算各类土壤所处区域在不同降雨强度下的雨水入渗及产流情况。结果表明:土壤入渗能力总体呈现为人工回填土>裸露坡地土>耕种土,人工回填土的入渗率是其他土壤的1.1~4.4倍。在降雨强度为大暴雨等级时,人工回填土的延迟产流时间是其他土壤的1.9~5.8倍;在特大暴雨时,3类土壤短时间内均会产生超渗产流,此时在延缓洪峰时间、控制洪峰流量上没有明显作用。

关键词: 产流; 土水特征曲线; 非饱和导水系数; Green-Ampt模型; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0117-06

Effect of Soil-water Characteristic Curve on Runoff in Sponge City Construction

SUN Zhao-dong^{1,2}, LI Zai-xing³, SONG Hong-qing², XING Yi⁴, ZHANG Hai-long⁵, ZHU Qing-hui⁵, LI Zheng-yi²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 4. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 5. Zhuanghe City Sponge City Construction Office, Zhuanghe 116400, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve of soil is an important parameter in the source control stage of sponge city construction, and it is the theoretical basis for the study of rainfall infiltration and runoff. According to the actual situation of sponge city construction of Zhuanghe (a pilot sponge city), the soil-water characteristic curves of three local soils were determined, and the soil matrix suction and unsaturated permeability equation were obtained by fitting calculation. Then, the rainfall infiltration and

基金项目: 北京市科技新星计划项目(Z171100001117081); 庄河市“海绵城市”建设试点项目; 河北科技大学研究生创新资助项目

通信作者: 宋洪庆 E-mail: songhongqing@ustb.edu.cn

runoff under different rainfall intensities were calculated by using the Green-Ampt improved model. The order of soil infiltration capacity was as follows: manual backfill soil > bare slope soil > tillage soil, and the infiltration rate of the manual backfill soil was about 1.1–4.4 times that of the other soils. During a heavy rain, the delayed runoff time of the manual backfill soil was 1.9–5.8 times that of the other soils. In the case of an extremely heavy rain, all the three kinds of soil would produce excess runoff in a short time, which had no obvious effect on delaying flood peak time and controlling flood peak flow.

Key words: runoff; soil-water characteristic curve; unsaturated permeability; Green-Ampt model; sponge city

辽宁省庄河市在2016年成为全国海绵城市试点示范工程城市,试点位于城区中心南部,建设面积约为21.8 km²,主要包括5个汇水区域及三河上游城区段。土壤土水特征曲线能够反映土壤水分运动的基本特征^[1],可为模拟降雨入渗及产流研究奠定理论基础。土水特征曲线在土壤入渗研究中应用较多,例如,杜光波等人^[2]通过土壤土水特征曲线和非饱和导水系数函数,得到非饱和土壤暂态渗流场;Bashir等人^[3]考虑土水特征曲线的滞后作用,预测水量较小或流速较低的土壤水分流动。因此,土水特征曲线在降雨入渗及产流研究中可起到支撑、引导作用。另外,Green-Ampt模型形式简单、适用于解释大区域范围的土壤入渗规律,例如,Zaibon等人^[4]研究种植作物表层土渗透性时,利用Green-Ampt模型预估土壤饱和导水系数等参数;王春颖等人^[5]针对层状夹砂土,建立了适用于模拟此类土壤入渗过程的S-Green-Ampt模型。

笔者对庄河市3种类型土壤的土水特征曲线进行了测定,以期各类土壤的降雨入渗及产流变化规律研究奠定理论基础。采用van Genuchten(VG)模型拟合实测数据,VG模型基质吸力范围较广、能够较好地拟合土水特征曲线实际形状。结合van Genuchten & Mualem(VGM)模型,得到各类土壤的非饱和导水系数随土壤体积含水率及基质吸力的变化关系,结合饱和导水系数,VGM模型由土水特征

曲线得出土壤的非饱和导水系数。根据Green-Ampt模型计算各类土壤的湿润锋入渗深度、入渗率随时间变化的规律,并通过MATLAB计算各区域产流时间、累计产流量随降雨强度变化的关系。根据各类土壤的降雨入渗及产流结果分析,为相应区域的雨水消纳提供建议,进而为庄河市海绵城市建设提供理论依据。

1 土水特征曲线测定试验

土水特征曲线测定方法发展至今已经十分成熟,主要包括:张力计法、轴平移技术、湿度测量技术、湿度控制技术、滤纸法等^[6]。由于滤纸法具有费用低、操作简单且可测量较大基质吸力范围的特点,本研究选用滤纸法测定庄河市不同类型土壤的土水特征曲线。

1.1 土样采集及其基本性质

为了研究庄河市的降雨入渗及产流情况,在城区以及周边选取3种类型土壤进行研究,除了耕种土和坡地土这两种当地常见的土壤外,还包括植草沟内的人工回填土。其中,南北两侧的耕种土分别占当地总耕种面积的39.01%、28.87%;裸露坡地土约占当地总面积的2.13%。除了人工回填土外,其余两类土壤均根据网格分布,按照每种土壤8个采样点进行取样。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)测定各类土壤的基本土性指标,结果如表1所示。

表1 各类土壤的基本土性指标

Tab.1 Basic properties of different soils

| 项 目 | 土壤相对密度 | 土壤孔隙比 | 土壤干密度/(g·cm ⁻³) | 液限/% | 塑限/% | 饱和导水系数/(cm·s ⁻¹) | 饱和含水率/(cm ³ ·cm ⁻³) |
|------------------------|--------|-------|-----------------------------|-------|-------|------------------------------|--|
| 南侧耕种土(1 [#]) | 2.596 | 0.868 | 1.39 | 34.54 | 13.25 | 5.02×10^{-5} | 0.464 7 |
| 裸露坡地土(2 [#]) | 2.616 | 1.076 | 1.26 | — | — | 1.17×10^{-4} | 0.518 3 |
| 人工回填土(3 [#]) | 2.637 | 0.884 | 1.40 | — | — | 1.31×10^{-4} | 0.469 2 |
| 北侧耕种土(4 [#]) | 2.613 | 0.936 | 1.35 | 29.56 | 13.28 | 2.96×10^{-5} | 0.483 5 |

1.2 试验结果与分析

庄河市不同土壤的土水特征曲线测定结果如图1所示。可以看出,各类土壤的土水特征曲线区别较明显;随着基质吸力的增加,体积含水率逐渐减小。其中,人工回填土的土水特征曲线最陡,进气值最小;而北侧耕种土的土水特征曲线最平缓,进气值最大。

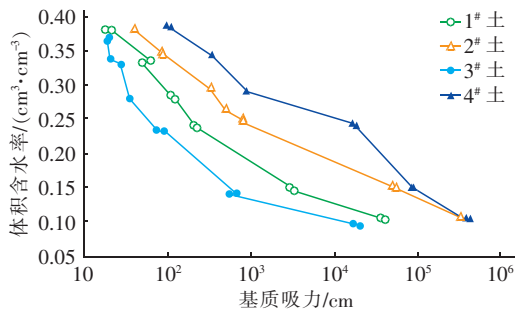


图1 不同土壤的土水特征曲线

Fig.1 Soil-water characteristic curves of different soils

2 土壤水分运动方程

2.1 土壤基质吸力方程

土壤基质吸力方程由土水特征曲线拟合得出,土水特征曲线拟合模型主要包括:Gardner、Brooks & Corey、van Genuchten (VG) 及 Fredlund & Xing 等模型,本研究选用 VG 模型,其表达式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率, cm^3/cm^3 ; θ_r 为土壤残余含水率, cm^3/cm^3 ; θ_s 为土壤饱和含水率, cm^3/cm^3 ; α 为土壤土水特征曲线进气值的倒数, cm^{-1} ; ψ 为土壤基质吸力, cm ; n 和 m 为土壤土水特征曲线经验参数^[7],其中 $m = 1 - 1/n$, $0 < m < 1$ 。

表2为不同土壤土水特征曲线的拟合参数。

表2 不同土壤土水特征曲线的拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of soil-water characteristic curves for different soils

| 项目 | $\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$ | α/cm^{-1} | n | m | R^2 |
|----------------|---|-------------------------|-------|-------|---------|
| 1 [#] | 0.465 | 0.054 1 | 1.385 | 0.278 | 0.986 8 |
| 2 [#] | 0.518 | 0.079 7 | 1.263 | 0.208 | 0.982 6 |
| 3 [#] | 0.469 | 0.071 1 | 1.581 | 0.367 | 0.985 5 |
| 4 [#] | 0.484 | 0.021 6 | 1.236 | 0.191 | 0.925 0 |

注: 假设 $\theta_r = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

由表2可知,各曲线对应的 R^2 值均在 0.92 以上,说明 VG 模型对各类土壤土水特征曲线试验数据的拟合效果较好,该拟合曲线能较好地代表各类

土壤水分运动特征。VG 模型可为土壤非饱和和导水系数方程导出、降雨入渗和产流控制研究提供理论基础。

2.2 土壤非饱和和导水系数方程

通过试验直接测定土壤的非饱和和导水系数时存在周期较长、试验成本较高等问题。本研究通过 VGM 模型得到土壤非饱和和导水系数方程,VGM 模型的表达式如下^[6,8]:

$$k_r(\psi) = \frac{\{1 - (\alpha \cdot \psi)^{n-1} [1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^{m/2}} \quad (2)$$

$$k_r(\theta) = \Theta^{0.5} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

式中: k_r 为相对传导率, $k_r = k/k_s$, 其中, k 和 k_s 分别为土壤的非饱和和导水系数与饱和导水系数, cm/s ; Θ 为标准化体积含水率, $\Theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ 。

根据 VGM 模型推导结果,庄河市 3 类土壤的体积含水率与基质吸力、非饱和和导水系数的关系如图2所示。可知,各类土壤的非饱和和导水系数随土壤体积含水率的增大而增大;土壤体积含水率接近饱和和含水率时,土壤的非饱和和导水系数趋向于饱和和导水系数。而随着基质吸力的增加,非饱和和导水系数则逐渐减小;土壤体积含水率趋近零时,土壤的非饱和和导水系数达到最小值。

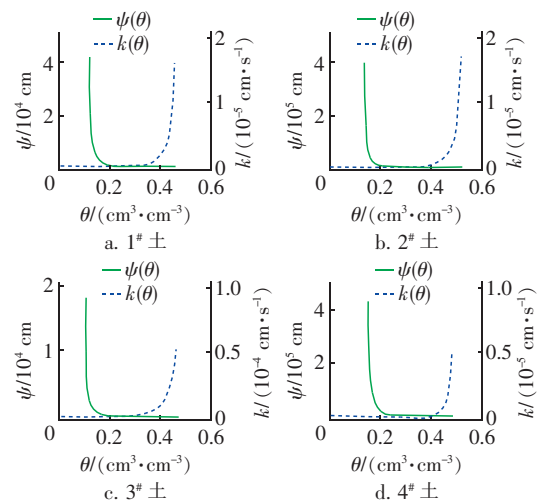


图2 不同土壤体积含水率与基质吸力、非饱和和导水系数的关系曲线

Fig.2 Relationship among volumetric moisture content, matrix suction and unsaturated permeability of different soils

3 土壤入渗模型及求解

降雨在土壤中的入渗涉及非饱和土壤水分运动

过程,该研究基于法国工程师 Darcy 提出的达西定律^[9]。依托土壤入渗模型对土壤水分运动过程进行模拟,常用入渗模型有 Green - Ampt、Philip、Kostiakov 和 Horton 等。其中,Green - Ampt 入渗模型是基于毛管理论建立的一种简化模型。该模型假定土壤湿润锋处各点吸力水头均为恒值,以土壤湿润锋处平均基质吸力表示;湿润锋前端体积含水率均为饱和含水率;湿润锋后端体积含水率均为初始含水率。根据达西定律可得:

$$i(t) = -k_s \frac{H + S_f + z}{z} \quad (4)$$

式中: H 为土壤积水深度,cm; z 为土壤湿润锋深度,cm; $i(t)$ 为土壤入渗率,cm/s; S_f 为土壤湿润锋处的平均基质吸力,cm。

为确定某时刻土壤的入渗率,需确定 S_f 值,该值通过土壤土水特征曲线及非饱和导水系数方程得出^[10],如下:

$$S_f = \int_0^{\psi_0} k_r d\psi = \frac{1}{k_0} \int_0^{\psi_0} k(\psi) d\psi \quad (5)$$

式中: ψ_0 为土壤在初始含水率时的基质吸力,cm; k_0 为土壤在初始含水率时的非饱和导水系数,cm/s。

结合式(4),根据水量平衡原理可得:

$$k_s \frac{H + S_f + z}{z} = \frac{dz}{dt} (\theta_s - \theta_0) \quad (6)$$

对式(6)进行积分得到:

$$t = \frac{\theta_s - \theta_0}{k_s} \left[z - (H + S_f) \ln \frac{H + S_f + z}{H + S_f} \right] \quad (7)$$

根据式(7)可得某时刻土壤的湿润锋位置,某时刻土壤的累计入渗量如下:

$$W_i = (\theta_s - \theta_0) z \quad (8)$$

Mein 与 Larson 将上述模型改进应用至稳定降雨入渗过程中,将降雨在土壤中的入渗分为水头控制入渗与流量控制入渗两个阶段,所得结果更接近实际。土壤入渗率与降雨时间的关系式如下:

$$\begin{cases} f(t) = P, & (t \leq t_p) \\ f(t) = k_s + k_s \frac{S_f(\theta_s - \theta_0)}{W_i}, & (t > t_p) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f(t)$ 为土壤入渗率,cm/s; P 为降雨强度,cm/h; t_p 为土壤产流时间,s。

以上为土壤入渗模型的建立及求解过程,可以为表征庄河市各类土壤的入渗及产流规律奠定理论

基础。

4 土壤入渗能力计算及产流分析

4.1 土壤入渗能力分析

图3为庄河市各类土壤湿润锋深度与降雨时间的关系。可以看出,随降雨时间的增加,各类土壤的湿润锋深度均逐渐增大;各类土壤湿润锋到达同一位置所用的时间由短到长依次为:人工回填土、裸露坡地土、南侧耕种土、北侧耕种土,当湿润锋位置处于300 cm时,裸露坡地土、南侧耕种土和北侧耕种土所用时间依次是人工回填土的1.4、2.6、4.6倍。所以土壤入渗能力总体呈现:人工回填土 > 裸露坡地土 > 耕种土。

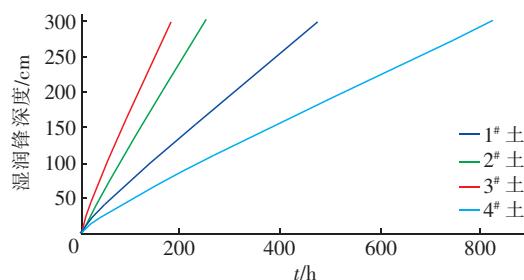


图3 不同土壤湿润锋深度随降雨时间的变化

Fig. 3 Change of wet front depth of different soils with time

图4为庄河市各类土壤入渗率与降雨时间的关系。可知,随着降雨时间的增加,各类土壤的入渗率均逐渐减小并趋于稳定,入渗率由大到小依次为:人工回填土、裸露坡地土、南侧耕种土、北侧耕种土,与土壤饱和导水系数实测结果一致。其中,人工回填土的入渗率分别是裸露坡地土、南侧耕种土、北侧耕种土的1.1、2.6、4.4倍。

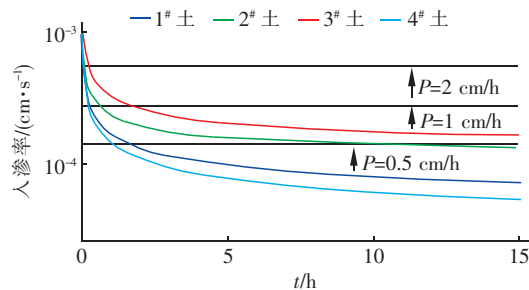


图4 不同土壤入渗率随降雨时间的变化

Fig. 4 Change of infiltration rate of different soils with time

4.2 土壤产流分析

降雨等级根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)划分,降雨强度 P 分别设定为 0.5、1、2 cm/h,依次代表暴雨、大暴雨、特大暴雨。各等级降雨强度

如图4中3条横线所示,其与4条曲线交点的横坐标表示各类土壤产流对应的时间。图5为不同降雨强度下各类土壤产流时间的变化。可知,随着降雨强度的增加,各类土壤的产流时间逐渐提前,且各类土壤产流时间的差异越来越不明显。其中,在降雨等级达不到大暴雨时($P \leq 1 \text{ cm/h}$),各类土壤的产流时间相差较大。当降雨等级为暴雨时($0.2 \text{ cm/h} \leq P \leq 0.5 \text{ cm/h}$),人工回填土的产流时间与其他土壤的差异尤为明显;当降雨强度为 1 cm/h 时,人工回填土的产流出现时间相比裸露坡地土、南侧耕种土、北侧耕种土大约分别延缓了 191%、471%、581%。由此说明,庄河市各类土壤在应对降雨等级为大暴雨及以下降雨时,人工回填土相比其他土壤的入渗能力较高,能有效延缓区域产流;而应对降雨等级为特大暴雨及以上降雨时,人工回填土的入渗能力与其他土壤相差无几,单从地面一维垂直入渗分析,此时各土壤对延缓区域产流均没有明显作用。

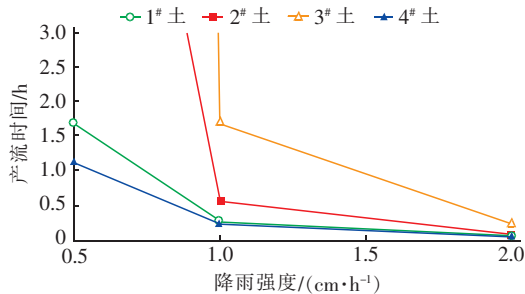


图5 不同土壤的产流时间随降雨强度的变化

Fig. 5 Change of runoff time of different soils with rainfall intensity

根据式(9)可得出土壤累计产流量与降雨时间的关系如下:

$$F(x) = \int_{t_p}^x [P - f(t)] dt \quad (10)$$

式中: x 为自产流出现起之后的某一时刻, s;
 $F(x)$ 为 x 时刻内土壤累计产流量, cm。

图6为各类土壤在不同降雨强度下的累计产流量与降雨时间的关系。可以看出,在某恒定降雨强度条件下,随着降雨时间的增加,各类土壤的累计产流量均逐渐增加;当降雨强度为 0.5 cm/h 、降雨时间为 20 h 时,人工回填土未出现积水,而当降雨强度为 $1, 2 \text{ cm/h}$ 时,其与裸露坡地土、耕种土的累计产流量相差无几。由此说明,在降雨等级为暴雨时,人工回填土相比其他土壤对累计产流量的控制作用显著。

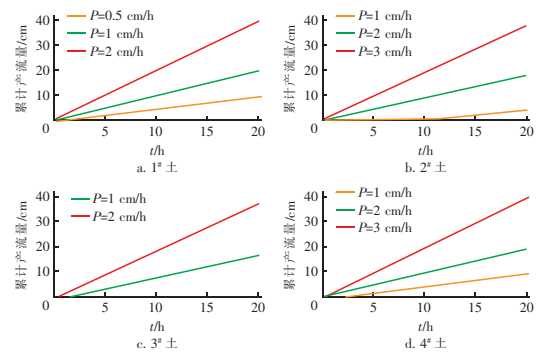


图6 不同降雨强度下各类土壤的累计产流量随降雨时间的变化

Fig. 6 Change of cumulative runoff of different soils with time under different rainfall intensities

4.3 各类土壤的特点总结及建议

综上可知,耕种土的特点是:土壤入渗能力较弱;应对暴雨等级及以上降雨时,短时间内易出现产流。因此建议:采用横坡种植方式,并在等高沟垄两端加挡,或在作物汲水半径外搁置稻草起到拦截泥沙、减少径流的作用,提高作物对降水的利用率。

裸露坡地土的特点是:土壤入渗能力较强;应对大暴雨等级及以上降雨时,短时间内易出现产流。因此建议:在坡地周围栽种易于繁殖、根系深的植物篱树种,一方面改善土壤结构、提高入渗能力,另一方面固结土壤、预防滑坡等地质灾害。

人工回填土的特点是:土壤入渗能力强;应对特大暴雨等级及以上降雨时,延迟洪峰时间能力较弱。因此建议:将该土壤广泛应用于除植草沟外的更多海绵工程设施结构层,最大程度地提升设施本体的入渗性能;改善土壤结构以应对特大暴雨及以上等级的降雨,增强延缓产流时间以及削减洪峰流量的能力。

5 结论

① 采用滤纸法测定得出3类土壤的土水特征曲线,各曲线经过VG模型拟合所得 R^2 值均在92%以上,并利用VGM模型得到了土壤非饱和导水系数方程。

② 基于Green-Ampt改进模型,在不同降雨强度下计算分析3类土壤的入渗特征,土壤入渗能力总体呈现出:人工回填土 > 裸露坡地土 > 耕种土,人工回填土的入渗率是其他土壤的1.1~4.4倍。

③ 在降雨为暴雨等级时,人工回填土延缓洪峰时间及削减洪峰流量的能力显著;在降雨为大暴

雨等级时,人工回填土的延迟产流时间是其他土壤的1.9~5.8倍;在应对特大暴雨及以上等级降雨时,人工回填土和其他两类土壤在延缓洪峰时间及削减洪峰流量方面均没有明显作用。

参考文献:

- [1] 王康. 非饱和土壤水流运动及溶质迁移[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Wang Kang. Water Flow and Solute Transport in Unsaturated Soil [M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese).
- [2] 杜光波, 倪万魁. 降雨条件下黄土斜坡的入渗特征分析[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1387-1391.
Du Guangbo, Ni Wankui. Status-in-situ observation and analysis for the loess landslide under the impact of the rainfall [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4): 1387-1391 (in Chinese).
- [3] Bashir R, Sharma J, Stefaniak N H. Effect of hysteresis of soil-water characteristic curves on infiltration under different climatic conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(2): 273-284.
- [4] Zaibon S, Anderson S H, Thompson A L, et al. Soil water infiltration affected by topsoil thickness in row crop and switchgrass production systems [J]. Geoderma, 2017, 286: 46-53.
- [5] 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 CSAE, 2010, 26(11): 61-67 (in Chinese).
- [6] Ning Lu, William J Likos. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
Ning Lu, William J Likos. Unsaturated Soil Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012 (in Chinese).
- [7] 高志鹏, 屈吉鸿, 陈南祥, 等. 一维水流及溶质运移对VG模型参数的敏感性分析[J]. 节水灌溉, 2017(11): 65-71.
Gao Zhipeng, Qu Jihong, Chen Nanxiang, et al. Sensitivity analysis of VG model parameters to one dimensional water flows and solute transport [J]. Water Saving Irrigation, 2017(11): 65-71 (in Chinese).
- [8] 徐飞. 非饱和膨胀土的试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Xu Fei. Experiment Study of Unsaturated Expansive Soil [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013 (in Chinese).
- [9] 董孟军, 白美健, 李益农, 等. 地面灌溉土壤入渗参数及糙率系数确定方法研究综述[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 129-132.
Dong Mengjun, Bai Meijian, Li Yinong, et al. A review on the methods of determining infiltration parameters and roughness coefficient for surface irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 129-132 (in Chinese).
- [10] 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: 孙召东(1994-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为海绵城市建设中雨水入渗机理及雨洪管理。

E-mail: szd1317@163.com

收稿日期: 2019-11-11