

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0143

刘继朝, 高业新, 冯欣, 等. 砂穴式入渗初步试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 193-199. LIU J C, GAO Y X, FENG X, et al. A primary tentative study on sand hole infiltration[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 193-199. (in Chinese)

砂穴式入渗初步试验研究

刘继朝, 高业新, 冯欣, 张冰, 张英平, 张亚哲

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 以双重介质渗流理论为基础, 借鉴复合地基施工技术, 选取冲积砂、河砂等作为试验填充材料, 在粉砂、中砂地层中开展砂穴式入渗试验, 研究了砂穴这一入渗方式的入渗效率。结果表明: 分选好的多孔介质更适宜作为砂穴填料; 河砂作为填料比冲积砂入渗效果更好; 入渗效率受水介质影响明显。在不同岩性中利用穴式入渗, 入渗效率明显不同。中砂地层的入渗效率是粉砂地层的 7.6 倍, 是粉砂地表入渗的 48.1 倍。在同一岩性中利用不同的入渗方式, 其入渗效率有很大差距。在粉砂地层中利用穴式入渗, 其入渗效率是粉砂地表的 6.3 倍。砂穴式入渗是一种可以加快入渗速率可操控性的技术方法, 它将促进渗流理论转化为减轻雨洪灾害的技术形成生产力服务于城市(或者山区)洪涝减灾, 提高水资源的有效利用水平, 促进水循环体系自我恢复和良性发展。

关键词: 包气带; 砂穴式入渗; 受水介质; 入渗效率; 入渗速率

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0193-07

A primary tentative study on sand hole infiltration

LIU Jichao, GAO Yexin, FENG Xin, ZHANG Bing, ZHANG Yingping, ZHANG Yazhe

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: According to the double porosity media flow theory and the construction technology of composite foundation, with alluvial sand and river sand as experimental padding, we carried out a sand hole infiltration test in the silt and medium sand strata, and studied the efficiency of sand hole infiltration. The results showed that the separated porous media was more suitable for filling sand holes. River sand was more effective as padding than alluvial sand. Infiltration efficiency was obviously affected by aqueous medium. Using sand hole infiltration for different lithological characteristics showed obviously different infiltration efficiency. The infiltration efficiency of medium sand stratum was 7.6 times of that of the silt stratum and 48.1 times of that of the silt surface. Using different infiltration modes for the same lithological characteristic also showed very different infiltration efficiency. The infiltration efficiency of silt stratum was 6.3 times of that of the silt surface. Sand hole infiltration is a manageable technical method which can speed up the infiltration rate. It will promote the conversion of the percolation theory into technologies for alleviating flood disasters in urban or mountainous areas. It will enhance the effective utilization of water resources, and promote the self recovery and healthy development of water cycle system.

Key words: vadose zone; sand hole infiltration; aqueous medium; infiltration efficiency; infiltration rate

随着城市发展, 不透水面积扩大, 人工附加径流量增大, 导致洪峰流量超越了排水渠泄洪能力调节

极限, 城市排水设施无法增加泄洪能力, 排水受阻, 引起了一系列的水文效应, 诱发了城市雨洪灾害等

收稿日期: 2018-04-26 修回日期: 2018-08-21 网络出版时间: 2018-08-28
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180827.1546.008.html>
基金项目: 中国地质科学院基本业务费项目(Y YFM 201624)

Fund: Fundamental Research Fund of the Chinese Academy of Geological Sciences (Y YFM 201624)

作者简介: 刘继朝(1972-), 男, 河南新乡封丘人, 高级工程师, 博士, 主要从事生态水文地质方面研究。E-mail: zgddljc@126.com

通讯作者: 高业新(1971-), 男, 河北保定高阳人, 研究员, 博士, 主要从事包气带水文地质方面研究。E-mail: goofy2004@163.com

环境问题^[1]。土地利用/土地覆盖(被)变化(LUCC)诱发水环境效应引起了人们的高度关注,入渗研究成为当前水文学、土壤学等领域研究的热点问题之一^[2]。为应对入渗途径受阻带来的一系列水环境问题,科研工作者开展了大量的研究工作,取得了丰硕的成果。在研究方法方面,除最早应用于描述土壤中动物活动所形成的孔洞方面的染色剂示踪技术^[3]、土壤含水量 TDR 监测技术^[4]等常规手段外,利用 CT 扫描技术可以在不扰动土壤的前提下获得土体孔隙的三维结构^[5]以及对土壤中的团聚体结构、粒径组成等进行探究^[6];另外,核磁共振技术^[7]、探地雷达(GPR)技术^[8]等也成为了土壤优势流入渗研究的得力助手。在基础研究方面,研究结果表明:表层土疏松多孔,利于水向更深层次入渗,大孔隙能使水分在土壤中以较快的速度运移,加快水分在土中的传导^[9];在孔隙直径相差较大的界面上大孔隙流和基质流是包气带渗流的主要形式^[10];松散沉积物组成的包气带有储水性和滞水性,上层滞水只有在降雨量或者雨强较大时才会产生^[11],在包气带中沿不同透水性土层界面流动的水流峰值往往滞后于降雨径流主峰^[12];稳定渗透速率随着失稳性团粒含量的增加而减小,表层土失稳性团粒层状聚集封堵土壤水分入渗的通道,可使入渗能力急剧衰减^[13],表层土团聚体遭到破坏,失稳的颗粒填充了土体的孔隙,表层土被压实造成的入渗的影响大大超过其它因素的影响,其减少入渗量可达 80% 左右^[14]。快速渗滤取得了良好的发展,如:张子元等^[15]阐述了人工快速渗滤系统(CRI)对主要污染元素氮、磷、有机物的主要去除机理和去除过程,以及净化过程中的限制因素;董瑞海等^[16]研究认为地下渗滤系统具有氮、磷去除能力强、可降解病原体等优点。改进的快速渗滤系统,处理效率高,而且对水体各种污染物的去除率均较高,可以对污水进行适当处理,达到目标用途的水质标准,避免了水体的污染,使之成为多种用途的水资源,能在很大程度上缓解我国水资源的紧缺状况^[17],已在污水处理生产中得以推广应用。

在城市雨洪问题专项研究方面:唐双成等^[18]研究了城市化对区域水环境的不利影响;邢薇等^[19]研究了针对可持续城市雨水系统的科学动态评估方法;王文亮等^[20]探讨了城市低影响开发雨水控制利用系统的设计标准及设施规模计算方法;彭秋伟等^[21]研究了不同 LID 措施实施后对城市排涝模数的定量影响;车伍等^[22]研究认为在城市雨水排放系统中建造雨水多功能调蓄设施既可以减少雨水资源

的流失,又可以缓解城市水涝;黄俊杰等^[23]研究了植草沟对道路降雨径流的水文控制效果;赵兵兵等^[24]研究了土地利用方式的改变对径流污染负荷输出的影响,提出控制屋面径流和路面径流污染的低影响开发(LID)技术措施;孙艳伟等^[25]通过 SWMM 软件建立模型,对不同重现期降水的典型 LID 措施截流池、入渗带、透水性路面和生物滞留池进行了模拟研究;深圳市光明新区在全国率先创建了低影响开发雨水综合利用示范区^[26]。雨洪合理开发利用技术研究正在作为解决城市缺水 and 防洪问题的一项重要措施^[27]成为研究焦点。

前人的研究工作在入渗过程探查的技术方法、入渗影响因子、水质控制及城市雨洪专项研究等方面取得了丰硕成果,但由于对人工速渗通道构建技术研究偏少,仍未能针对面状水源补给地下水过程中存在的“肚大口小、能容难进”^[28]问题,也就是说,地下储水空间大,但上覆土层渗透性小,地表水不能及时进入地下空间,给出可操控性技术方法。国家对城市雨水的管理从传统“快排式”管理转变为海绵城市建设的科学管理模式^[29],出台了《海绵城市建设技术指南》《关于推进海绵城市建设的指导意见》,提出将 70% 的降雨就地消纳和利用的建设目标,但承担着增强城市防涝能力重任的 30 个试点海绵城市中仍然有 19 个城市发生了内涝^[30]。为了管理汛期多余水量,以备枯水期之用,就需要合理的水量调控措施^[31]。发展具有占地少、施工方便、入渗速度快、拦蓄量大、可零星分布等特征的城市雨水就地快速拦蓄理论技术方法,解决“城市看海”问题、确保城市秀美,成为新时代对水文地质学科发展的呼唤。

本次试验研究工作,从地层蓄水处着眼,以大孔隙优先流理论为指导,从构建雨水快速入渗通道着手,用提高入渗速率的方法解决城市用地受限问题,实现雨水快速入渗。通过砂穴填料渗透性优选试验、砂穴入渗效率试验,确立砂穴填料原则、测试入渗速率、分析应用前景,形成城市雨水快速入渗技术方法,为划分集水区、构建择地而入的城市雨水就地拦蓄管理模式打下基础,实现自然界水循环与人类城市建设的和谐相处。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区为第四纪冲洪积平原,水位埋深 45 m 左右。根据试验区地层岩性特征划分为粉砂试验场和中砂试验场。粉砂试验场岩性结构自上而下为:

0~20 cm 是以粉土为主的填土; 20~90 cm 为近粉土的粉砂, 其基本特征为粒径大于 0.075 mm 的颗粒占总质量的 53.1%, 粒径小于 0.075 mm 的颗粒占总质量的 46.9%, 渗透系数 0.73 m/d, 底部无上层滞水; 其下为粉质黏土。中砂试验场岩性结构自上而下为: 0~20 cm 是以粉土为主的填土; 其下为厚度大于 2 m 的中砂层, 其基本特征为粒径大于

0.25 mm 的颗粒占总质量的 52.6%, 粒径 0.075~0.25 mm 的颗粒占总质量的 28.3%, 粒径小于 0.075 mm 的颗粒占总质量的 19.1%, 渗透系数 8.6 m/d。

1.2 试验材料

主要使用四种材料。分别为冲积砂、河砂、滤料质石英砂和水洗冲积砂, 详见表 1。

表 1 试验材料对比
Tab. 1 Comparison of test materials

| 材料 | 来源 | 粒度 | 分选磨圆 | 成分 | 其它 |
|--------|--------|-----------------|-----------|---------|--------|
| 冲积砂 | 太行山洪积物 | 粒度不均, 最大直径 2 mm | 差 | 石英、长石为主 | 含有少量泥质 |
| 河砂 | 河流冲洪积物 | 较为均匀, 最大直径 1 mm | 分选好, 磨圆一般 | 石英、长石为主 | 较纯净 |
| 滤料质石英砂 | 人工加工 | 直径 1~3 mm 石英为主 | 纯净 | | |
| 水洗冲积砂 | 太行山洪积物 | 粒度不均, 最大直径 2 mm | 差 | 石英、长石为主 | 不含泥质 |

1.3 试验设计

试验分两组进行, 第一组为砂穴填料渗透性优选试验, 第二组为砂穴入渗效率试验。试验现场情况见图 1。

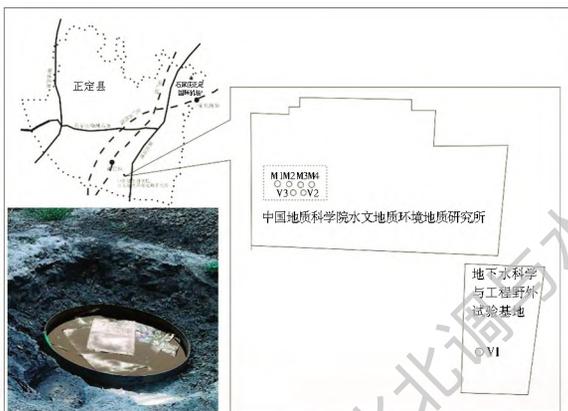


图 1 试验点位置示意图
Fig. 1 Location of test point

第一组包括 4 个试验, 分别是: 填料为冲积砂的粉砂层砂穴式入渗试验 (M1)、填料为水洗冲积砂的粉砂层砂穴式入渗试验 (M2)、填料为河砂的粉砂层砂穴式入渗试验 (M3) 和作为对照的粉砂地层入渗试验 (M4)。

第二组包括 3 个试验, 分别是: 填料为滤料质石英砂的中砂层砂穴式入渗试验 (V1)、填料为滤料质石英砂的粉砂层砂穴式入渗试验 (V2) 和作为对照的粉砂层入渗试验 (V3)。

试验操作方法主要借鉴自桩基施工的洛阳铲挖孔法。此方法在切土、取土过程中对周围土体扰动小, 易于保持孔壁稳定, 且可避免振动和噪音, 能在极狭窄的场地和空间内作业, 可大量节约能源, 环保且造价低、工期短、质量可靠、适用范围大。

施工时, 清除上部杂填土。用洛阳铲打直径 10 cm、深 50 cm 的孔, 分别填入冲积砂、水洗冲积砂、河砂。填料不做压实处理, 以防破坏孔壁孔隙, 影响入渗速率。设置孔口护管以防孔口破坏并方便控制定水头供水。直接在粉砂表面设置直径 10 cm 的渗水试验环进行入渗试验作为对照。试验均采用马氏瓶定水头供水, 控制水面高出粉砂表面 5 cm。以自来水作为水源、清水入渗。各试验间保持较大的间距避免干扰。及时记录入渗水量历时变化。

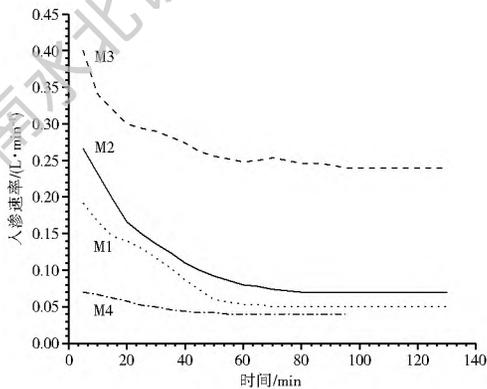
2 结果与分析

2.1 填充介质选取分析

土的粒度组合、空间结构等特征是影响渗透性的主要因子。在试验中, 为避免砂穴填充介质压实过程对砂穴孔壁产生挤密效应影响其渗透性, 对砂穴填入的多孔介质不做压实处理, 仅依靠水分入渗过程中的饱水自重压密作用重建其稳定结构, 故存在砂穴充填介质中的颗粒失稳再平衡问题。土壤颗粒的大小决定了土壤孔隙的大小、多少以及分布位置, 进而影响入渗速率。

图 2 为砂穴中填充的不同介质入渗过程历时曲线。该图显示: (1) 对照组 (M4) 稳定入渗速率最小且入渗速率变化不大, 砂穴中填充的未经处理的冲积砂 (M1) 稳定入渗速率且远远小于河砂 (M3) 的稳定入渗速率。(2) M1、M2 的前期入渗速率衰减较快, 在历时 60 min 左右出现速率拐点, 它们的入渗速率分别由初期的 0.20 L/min、0.30 L/min 衰减至 0.05 L/min、0.07 L/min, 稳定速率仅为初期入渗速率的 0.25 和 0.23; M3 的入渗速率由初期的

0.40 L/min 衰减至 0.24 L/min, 稳定速率为初期入渗速率的 0.60。分析认为: 调节砂穴充填介质中的细粒含量可以有效影响其渗透性。M1、M2 入渗速率受结构重建影响较大, 粗粒河砂受影响相对较小。冲积砂稳定后的入渗速率与相应的地表入渗相近, 起不到加速入渗的效果。水洗后的冲积砂介质作为填料稳定入渗速率是地表入渗速率的 1.75 倍, 也不宜作为充填介质。河砂由于其分选好, 主要由水稳性颗粒组成, 含黏粒少, 入渗速率受饱水压密及失稳等因素影响小, 稳定入渗速率达到地表入渗的近 6 倍, 可以作为填料类型的选取对象。



注: M1 表示填料为冲积砂的粉砂层砂穴式入渗试验; M2 表示填料为水洗冲积砂的粉砂层砂穴式入渗试验; M3 表示填料为河砂的粉砂层砂穴式入渗试验; M4 表示作为对照的粉砂地层入渗试验

图 2 不同充填介质砂穴入渗速率历时曲线

Fig. 2 The duration curves of infiltration rate of different filling media

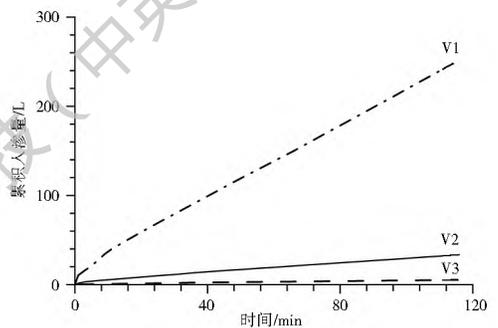
试验砂穴的开挖结果表明: 黏粒失稳平衡后主要集中在孔的底部; 砂性细粒在上部产生局部聚集, 形成堵塞。这是由于起始时砂穴松散、孔隙较大饱水锋面携带细粒土向下运移, 随着深度增加携带物在饱水锋面越聚越多, 导致砂性颗粒形成了局部堵塞, 而黏粒由于个体较小以悬浮状态随水运移, 最终沉积在底部。

综合分析认为, 在选择填充介质时宜选用粒度均匀的, 以保障所填的多孔介质在饱水自重压实条件下失稳重建后的结构不产生较大的局部堵塞而影响入渗速率; 鉴于黏粒主要聚集于底部, 现实中又不可能完全以清水入渗, 因此在设计砂穴时宜预留沉淀空间。

2.2 单穴入渗效率对比分析

不同入渗方式下水分累积入渗量随时间的变化关系见图 3。图 3 显示, 试验时段内的水分累积入渗量为: $V1 > V2 > V3$ 。V2、V3 的受水介质相同, 而试验中 V2 水分累积入渗量是 V3 水分累积入渗量的 6 倍以上, 说明砂穴式入渗提高入渗效果显著。

V1、V2 的砂穴充填介质相同, 而试验中 V1 水分累积入渗量是 V2 水分累积入渗量的 7 倍以上, 说明受水介质的性质在砂穴式入渗中依然对入渗量起着控制性作用, 也证明了 V2 试验中人工充填多孔介质(1~3 mm 滤料质石英砂)对于周围的粉砂供水充分, 即是一种充分供水试验。分析认为, 水分不饱和的土体, 意味着土体倾向于吸收水分, 当外界向土体输入水分, 则水分将受到基质势、渗透势与重力势的层层约束, 并在土壤孔道里逐渐浸入, 沿着水势梯度差的方向浸润扩展, 直至整体水势均衡为止。一般情况下, 土壤水不存在压力势。而对于砂穴式入渗, 水在人工砂穴中的传导符合大孔隙优势流运移理论, 它不但造成大孔隙优势流使得水可以快速向深部传递使砂穴达到饱和状态、水土接触面积增大, 而且由于砂穴饱和后连续存在自由水体产生压力势与重力势, 与地面入渗相比砂穴式入渗成为一种有压入渗, 从而入渗速率相对较快。



注: V1 表示填料为滤料质石英砂的中砂层砂穴式入渗试验; V2 表示填料为滤料质石英砂的粉砂层砂穴式入渗试验; V3 表示对照的粉砂层入渗试验

图 3 不同入渗方式下累积入渗量历时曲线

Fig. 3 The cumulative infiltration duration curve of different infiltration modes

2.3 砂穴式入渗应用前景分析

包气带是良好的储水空间, 粉土、砂性土的渗透性都能成为蓄水区。据给水度经验值估算, 近地表粉土、粉砂、细砂蓄水能力分别约为其体积的 10%、15%、20%, 也就是说 2 m 左右的地层进行处理后足可以容纳 200 mm 降雨量。但是长期以来受制于入渗速率慢, 入渗面积不断减少, 包气带储水空间不能很好的发挥作用。

根据图 2, 砂穴入渗效率试验数据线性回归分析结果(表 2)表明: 入渗量与时间是线性关系, 入渗量随着时间的增加而增加; 拟合度近似于 1, 说明时间与入渗量关系密切, 趋势线可靠。在趋势线公式中斜率也就是入渗速率, 在试验约束条件下, 分析对比趋势线斜率可知: V1 的入渗速率是 V2 入渗速率的 7.6 倍, 是 V3 入渗速率的 48.1 倍; V2 入渗速率

是 V3 入渗速率的 6.3 倍。这说明,砂穴式入渗是一种可以提高入渗速率的入渗技术。

表 2 试验数据线性回归分析结果

Tab. 2 Linear regression analysis results of test data

| 砂穴类型 | 趋势线公式 | 拟合度 |
|------|----------------------|-------|
| V1 | $y = 2.069x + 13.39$ | 0.998 |
| V2 | $y = 0.272x + 2.606$ | 0.995 |
| V3 | $y = 0.043x + 0.385$ | 0.990 |

当包气带不发生变化的条件下(如储水空间不足,水位与砂穴直接联通等情况),砂穴可以连续入渗。结合降雨强度分级和我国《海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建》(所有低影响开发设施的绿化均满足景观要求,设计最大雨水排空时间为 24 h),按雨水汇集量与单个砂穴 24 h 入渗量相等的原则,通过公式(1)估算不同降雨强度下单个砂穴可调控面积。

$$F = \frac{Q_s}{q\Psi} \quad (1)$$

式中: Q_s 为雨水估算流量(L/s)或单个砂穴平均入渗速率; q 为暴雨强度[L/(s·hm²)]; Ψ 为径流系数; F 为汇水面积(hm²)。

其中,径流系数可按表 3(引自《建筑给排水规范》)取值,汇水面积的平均径流系数按地面种类加权平均计算。

表 3 径流系数

Tab. 3 Runoff coefficient

| 地面种类 | Ψ |
|---------------------|-----------|
| 各种屋面、混凝土或沥青路面 | 0.85~0.95 |
| 大块石铺砌路面或沥青表面处理的碎石路面 | 0.55~0.65 |
| 级配碎石路面 | 0.40~0.50 |
| 干砌砖石或碎石路面 | 0.35~0.40 |
| 非铺砌土路面 | 0.25~0.35 |
| 公园或绿地 | 0.10~0.20 |

本次研究的暴雨强度采用石家庄的设计参数,可以按公式(2)计算:

$$q = \frac{1689(1 + 0.898 \lg P)}{(t + 7)^{0.729}} \quad (2)$$

式中: q 为设计暴雨强度 L/(s·hm²); t 为降雨历时(min); P 为设计重现期(a)。

实际中的雨水流量指的是降雨量中扣除植物截留、下渗、填洼与蒸发等各种损失后所剩下的那部分量。以汇水各种损失为安全量(也就是不计汇水损失),假设有蓄水体存在可以缓存雨水 24 h 的情况下,估算 24 h 不同降雨强度下单个砂穴可调控面积,见表 4。可见,初步试验中,一个 V1 式砂穴可

控约 60~120 m² 大雨的降雨量,是其占地面积的数千倍,一个 V2 式砂穴可调控约 8~16 m² 大雨的降雨量,是其占地面积的数百倍。也就是说,一个 V1 式砂穴 24 h 入渗量最小相当于 60 m² 大雨的降雨量,一个 V2 式砂穴 24 h 入渗量最小相当于 8 m² 大雨的降雨量,也就具有调控相应面积降雨量的能力。同时,包气带水分传导的特征是干土导水力弱,传输缓慢,只有当土壤逐渐浸润之后,才能恢复其较高的传导力,保证水分的下渗。在多个砂穴面状施工时,砂穴还能加速穴间土饱水,尽快发挥其较高的水分传导力。

表 4 24 h 降雨条件下,单个砂穴可调控入渗面积

Tab. 4 Regulable infiltration area of a single sand hole under 24 h rainfall condition

| 降雨强度 | V1 式砂穴可调控面积/m ² | V2 式砂穴可调控面积/m ² |
|------|----------------------------|----------------------------|
| 大雨 | 59.9~119.7 | 7.9~15.8 |
| 暴雨 | 29.9~59.9 | 3.9~7.9 |
| 大暴雨 | 12.0~29.9 | 1.6~3.9 |
| 特大暴雨 | <12.0 | <1.6 |

在华北平原地区,一般砂穴的深度限制在 6 m 以内。结合地层实际情况,上部采用不透水管作为导水通道,下部伸入强透水介质中的砂穴结构,可以很好的解决水分入渗软化地基持力层的问题,利用零星场地形成入渗点。城市建筑垃圾经适当粉碎筛选即可用作砂穴充填介质,实现建筑垃圾的就地利用。

砂穴式入渗还在调节微观水循环、减轻灾害、提高雨水利用率等方面有良好的应用前景。地球表层系统受人类活动影响,透水性孔隙大量减少形成渗透性差的阻水层,使得雨水以地表径流方式运移流失,加剧了雨洪灾害与干旱的发生。遵循水循环平衡的法则和要求,以砂穴式入渗为手段,田格法划分构建集水区,化整为零控制径流携沙量,依据包气带储水空间分布特征,就地构建砂穴入渗区,将雨水入渗至深部,减少了地表蒸发量,使更多的降雨转化为可被植被直接利用的生态水资源及可采水资源,达到调节水循环、提高雨水利用率、减轻灾害的目的。

综合分析认为,砂穴式入渗是一种解决地下水“肚大口小,能容难进”的瓶颈问题的可操控性手段,它将促进渗流理论转化为减轻雨洪灾害的技术,形成生产力服务于城市(或者山区)洪涝减灾,提高水资源的有效利用水平,促进水循环体系自我恢复和良性发展,从而实现可持续发展以及人与自然的和谐相处。

3 结论

(1) 砂穴式入渗是一种可以加快入渗速率的技

术方法。它为了解决地下水库“肚大口小,能容难进”的瓶颈问题提供了一种可操控性技术方法。在试验中,它对于提高入渗速率效果显著,直径 10 cm、深 50 cm 粉砂穴式入渗速率即可达到同等面积粉砂地表入渗速率的 6 倍以上。

(2) 砂穴填料宜选用分选好的多孔介质。为保障孔壁入渗性不受影响,填料主要依靠饱水自重压密。分选差的多孔介质中粒径较小的组份在饱水时会发生失稳运移,易产生局部堵塞影响入渗速率。试验中,河砂作为填料时的入渗速率是水洗冲积砂作为填实时入渗速率的 3.4 倍。

(3) 砂穴式入渗技术在雨水就地拦蓄入渗等方面有较好的应用前景。初步试验中,一个中砂穴 24 h 的入渗量最小相当于面积 60 m² 大雨的降雨量,而且施工占地少、施工无污染等,完全适应在场地狭窄的城市建成区施工,因此它在城市降雨就地消纳和利用方面具有良好的应用前景。此外,它可将雨水径流直接入渗至土壤深部,减少了地表蒸发量,为植被恢复提供更多的生态水量,因此它将在西北干旱地区利用土壤水库提高雨水利用率加快生态恢复治理领域有广阔的应用前景。

参考文献(References):

[1] 刘文,陈卫平,彭驰.城市雨洪管理低影响开发技术研究与利用进展[J].应用生态学报,2015,26(6):1901-1912. (LIU W, CHENG W P, PENG C, et al. Advances in low impact development technology for urban stormwater management [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1901-1912 (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150331.009.

[2] 肖雄,吴华武,李小雁.壤中流研究进展与展望[J].干旱气象,2016,34(3):391-402. (XIAO X, WU H W, LI X Y. Research progress and prospects of subsurface flow [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3): 391-402. (in Chinese)) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0391.

[3] 李柳,郑肖然,李小雁,等.小叶锦鸡儿灌丛对土壤水分下渗及优势流的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):55-59. (LI L, ZHENG X R, LI X Y, et al. Influences of soil infiltration and preferential flow by shrub *Caragana microphylla* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 55-59. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2015.02.011.

[4] 李旺霞,陈彦云.土壤水分及其测量方法的研究进展[J].江苏农业科学,2014,42(10):335-339. (LI W X, CHEN Y Y. Research Progress of soil moisture and its measuring methods [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(10): 335-339. (in Chinese)) DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2014.10.273.

[5] 程亚南,刘建立,吕菲,等.基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测[J].农业工程学报,2012,28(22):115-122. (CHENG Y N, LIU J L, LYU F, et al. Three dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of soil hydraulic

properties based on CT images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2012, 28(22): 115-122. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.22.018.

[6] JIANG J, XIANG W, ROHN J, et al. Research on mechanical parameters of coarse-grained sliding soil based on CT scanning and numerical tests [J]. Landslides, 2015: 1-12. DOI: 10.1007/s10346-015-0635-9.

[7] METZNER R, EGGERT A, DUSSCHOTEN D V, et al. Direct comparison of MRI and X-ray CT technologies for 3D imaging of root systems in soil: potential and challenges for root trait quantification [J]. Plant Methods, 2015, 11(1): 17. DOI: 10.1186/s13007-015-0060-z.

[8] 李蕙君,钟若飞.探地雷达波振幅与土壤含水量关系的数值模拟[J].应用科学学报,2015,33(1):41-49. (LI H J, ZHONG R F. Numerical study on the relationship between amplitudes of ground penetrating radar wave and water content in soil [J]. Journal of Applied Sciences Electronics and Information Engineering, 2015, 33(1): 41-49. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0255-8297.2015.01.005.

[9] 张英虎,牛健植,朱蔚利,等.森林生态系统林木根系对优先流的影响[J].生态学报,2015,35(6):1788-1797. (ZHANG Y H, NIU J Z, ZHU W L, et al. Effects of plant root systems on preferential flow in forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1788-1797. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201305151079.

[10] BOULET A K, PRATS S A, MALVAR M C, et al. Surface and subsurface flow in eucalyptus plantations in north central Portugal [J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2015, 63(3): 193-200. DOI: 10.1515/johr-2015-0015.

[11] FU C S, CHEN J Y, ZENG S Q. Observation and Analysis of Rainfall Runoff Characteristics in a Coastal Granite Catchment in Southern China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(1): 138-149. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000413.

[12] 谢颂华,涂安国,莫明浩,等.自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J].水科学进展,2015,26(4):526-534. (XIE S H, TU A G, MO M H, et al. Analysis on the characteristic of interflow production processes on red soil slopes in the case of natural rainfall events [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 526-534. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.009.

[13] 耿洁.双坡度条件下不同母质土壤壤中流发育及氮素淋失特征[D].武汉:华中农业大学,2013. (GENG J. Subsurface flow development and nitrogen leaching characteristics of dual slope under different parent material of the soils [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2013. (in Chinese))

[14] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45. (ZHAO X N, WU F Q. Developments and reviews of soil infiltration research [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 42-45. (in Chinese))

[15] 张子元,黄权中,郑艳侠.人工快速渗滤系统的发展与展望[J].南水北调与水利科技,2011,9(4):81-86. (ZHANG Z Y,

- HUANG Q Z, ZHENG Y X. Development and Prospects of Constructed Rapid Infiltration [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 81-86. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.04081.
- [16] 董瑞海, 顾宝群, 张博雄, 等. 基于源分离的农村污水生态治理模式与技术[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 209-212. (DONG R H, GU B Q, ZHANG B X, et al. Analysis on ecological control model and technology of rural wastewater based on source separation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 209-212. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.06.048.
- [17] 赵建芬, 马香玲, 韩会玲. 改进的污水土地处理系统去污试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(2): 43-45. (ZHAO J F, MA X L, HAN H L. Experiment of the improved sewage land treatment system in disposal effect [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(2): 43-45. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2005.02.015.
- [18] 唐双成, 罗纳, 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 (TANG S C, LUO W, JIA Z H, et al. Effects of filler and rainfall characteristics on runoff reduction of rain garden and achieving the goal of sponge city construction[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 73-78, 102. (in Chinese) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.01.015.
- [19] 邢薇, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 基于低影响开发(LID)的可持续城市雨水系统[J]. 中国给水排水, 2011, 27(20): 13-16. (XING W, ZHAO D Q, CHENG J N, et al. Sustainable urban rainwater system based on low impact development[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(20): 13-16. (in Chinese))
- [20] 王文亮, 李俊奇, 车伍, 等. 城市低影响开发雨水控制利用系统设计方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 13-17. (WANG W L, LI J Q, CHE W, et al. Study on design method of urban stormwater management and utilization system based on low impact development [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 13-17. (in Chinese))
- [21] 彭秋伟, 罗强, 王修贵, 等. 低影响开发措施的建设对城镇排涝模数的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2016, (5): 13-16, 22. (PENG Q W, LUO Q, WANG X G, et al. Impact of low impact development measures for urban drainage modulus [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, (5): 13-16, 22. (in Chinese))
- [22] 车伍, 张燕, 李俊奇, 等. 城市雨洪多功能调蓄技术[J]. 给水排水, 2005, 31(9): 25-29. (CHE W, ZHANG Y, LI J Q, et al. Multifunctional storage of rainwater in urban area[J]. Water & Wastewater Engineering, 2005, 31(9): 25-29. (in Chinese) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2005.09.008.
- [23] 黄俊杰, 沈庆然, 李田. 植草沟对道路径流的水文控制效果研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(3): 118-122. (HUANG J J, SHEN Q R, LI T. Study on hydrological effect of grass swales on road runoff[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(3): 118-122. (in Chinese))
- [24] 赵兵兵, 冯霖. 基于 LID 的沈阳市径流污染控制及对策[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3): 538-545. (ZHAO B B, FENG L. Control and countermeasure of runoff pollution in Shenyang City based on LID[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(3): 538-545. (in Chinese) DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2016.03.19.
- [25] 孙艳伟, POMEROY C A, 吕素冰, 等. 基于不同重现期降水的 LID 措施水文调控性能研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 178-186. (SUN Y W, POMEROY C A, LYU S B, et al. Hydrological regulation performances of lid practices based on different rainfall reappearance periods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 178-186. (in Chinese) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.023.
- [26] 胡爱兵, 任欣欣, 俞绍武, 等. 深圳市创建低影响开发雨水综合利用示范区[J]. 中国给水排水, 2010, 26(20): 69-72. (HU A B, REN X X, YU S W, et al. Exploration for creating low-impact development stormwater management demonstration area in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(20): 69-72. (in Chinese))
- [27] 周嵘. 奥林匹克公园中心区雨洪利用系统水质净化效果研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 119-121. (ZHOU R. The effect of water quality purify to rainwater and flood utilization system in the central area of Beijing Olympic Garden [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 119-121. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.032.
- [28] 邓铭江, 裴建生, 王智. 干旱区内陆河流域地貌单元特征及地下水储水构造[J]. 水利学报, 2006, 30(11): 1360-1366. (DENG M J, PEI J S, WANG Z. Landform unit characteristic and its underground storage structure for inland river basin in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 30(11): 1360-1366. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2006.11.013.
- [29] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO G, SHI R, PANG B, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: case study for Liangshui River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5): 55-64. (in Chinese) DOI: 10.11660/slfdbx.20160507.
- [30] 王红茹. 全国 30 个海绵城市试点, 19 城今年出现内涝[J]. 中国经济周刊, 2016(35): 48-50. (WANG H R. 19 cities in 30 Sponge cities in China have been waterlogged this year [J]. China Economic Weekly, 2016(35): 48-50. (in Chinese))
- [31] 王坤, 杨同春, 徐征和, 等. 多级闸门调控下徒骇河流域雨洪资源利用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 50-57. (WANG K, YANG T C, XU Z H, et al. Research on utilization of rain flood resources with the operation of multi stage sluices in Tutai River Basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 50-57. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.02.008.