

【水资源】

大沽河野外垂向入渗试验研究

杨帆,武桂芝,冯增帅,黄明翔

(青岛理工大学环境与市政工程学院,山东青岛266033)

摘要:选取季节性河流大沽河上、中、下游3处代表性河床作为野外垂向入渗试验场地,每处分别做2组试验,研究不同包气带水理及理化性质下河道入渗能力。结果表明:河道入渗过程可分为快速入渗、缓速入渗与稳定入渗阶段,总历时为1.3~2.0 h;不同河道包气带水理及理化性质影响着河道入渗过程,同一试验场地各组试验相同深度沙层初始含水率越小则入渗速率越快,相同深度沙层初始含水率相近时,上、中、下游沙层水分入渗速率依次减小;当同一试验场地各组试验沙层每层初始含水率之和相近时,各层之间初始含水率差距越小,则达到稳定入渗的时间越短;随上、中、下游沙层粒径依次减小,其稳定入渗率依次减小,约为0.006 5、0.004 1、0.002 3 cm/s。

关键词:季节性河道;野外试验;非饱和入渗;入渗速率;大沽河

中图分类号:TV139.16 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1000-1379.2018.04.011

Study on the Field Vertical Infiltration Test of Dagu River

YANG Fan, WU Guizhi, FENG Zengshuai, HUANG Mingxiang

(School of Environmental & Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: The 3 places of typical riverbed were selected from the upstream, midstream and downstream of the seasonal river of the Dagu River, and the field vertical infiltration experiments conducted based on the theory of streambed aeration zones water-bearing medium infiltration, each site of 2 tests respectively. Capacities of infiltration under water-physical and physicochemical properties in riverbed in different aeration zones were studied. The results show that the infiltration process in the riverbed can be divided into three stages: the rapid infiltration, the slow infiltration and the stable infiltration and it lasts about 1.3–2.0 hours; the infiltration in the riverbed is affected by the water-physical and physicochemical properties of aeration zone; The smaller initial water content of the same depth sand layer in the same test site, the faster the infiltration rate, when the initial water content of the same depth is similar, the infiltration rate of the upstream, midstream and downstream sand layers decreases in turn; when the sum of the initial moisture content of each group of sand samples in the same test site is similar, the smaller initial water content gap between the layers and the shorter the time to achieve stable infiltration; with the decrease of the size of the sand sample in the upper, middle and lower reaches, the steady infiltration rate decreased successively, about 0.006 5, 0.004 1 and 0.002 3 cm/s.

Key words: seasonal channel; field experiment; unsaturated infiltration; infiltration rate; Dagu River

干旱或半干旱地区河流多为季节性河流,丰水期水量大,枯水期河道干枯或少水。大沽河发源于烟台市阜山,流经青岛市莱西、平度、即墨、胶州、城阳等市(区),干流全长179.9 km,流域总面积6 131.3 km²。大沽河流量、水位等水文特征随季节更替变化明显,夏秋季雨量丰沛,径流量较大;冬春季降水较少,径流量小或断流,属于季节性河流。大沽河属于宽浅型沙质河床,河床渗透能力较强,大部分河床经常处于干涸无水状态,汛期渗漏主要影响行洪流量和地下水补给量的大小。因此,研究大沽河河床渗漏规律对该流域的防洪预报和地下水资源综合利用有重要意义^[1-3]。

近些年,诸多学者在季节性河道渗漏方面做了大量的研究工作。梁永平等^[4]根据河水与地下水之间的水动力关系,通过含水层参数和当地水井布置实际情况,计算了河流渗漏量。冯创业等^[5]采用水量平衡

原理计算了滹沱河河道的入渗能力,动水条件下河道入渗能力明显大于静水条件的。吉文平^[6]通过对河渠渗漏影响参数进行分析,得出将平均地下水埋深与河渠渗漏补给系数建立相关关系,从而推算河渠渗漏量的计算方法。I. Shentsis等^[2]用均衡法计算干旱地区河道洪水入渗补给量。利用上述方法计算渗漏能力经验性较强,缺乏观测与试验等,难以推广与实际应用。胡兴林等^[7]通过河道断面法对黑河上中游河段

收稿日期:2017-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51309137, 51379097)。

作者简介:杨帆(1991—),男,安徽池州人,硕士研究生,研究方向为水资源管理、保护与水环境模拟。

通信作者:武桂芝(1974—),女,河南商丘人,副教授,博士,主要从事水资源管理、保护与水环境模拟方面的研究工作。

E-mail:guizhiwu701@163.com

河道渗漏量进行了比测试验,表明河床岩性构成、河流平面几何形态变化及人类活动等对河道渗漏量有显著影响。杨文斌等^[8]采用土壤深度水量渗漏测试记录仪对库姆塔格沙漠地区多坝沟季节性河道 1.5 m 深处的水分渗漏过程进行了监测与人工模拟试验,初步实现了河道渗漏速率的动态监测,基本摸清了该河道的渗漏速率及特征。受季节性河道包气带水理特性等因素影响,比测试验与渗漏测试记录仪方法在测量时会有较大误差。K. W. Blasch^[9]研究了季节性河道非饱和阶段的非稳定入渗在整个入渗过程中所占的比重和影响。S. Villeneuve 等^[10]研究了季节性河流河道沉积物相关因素对含水层渗漏量的影响,下游水流减少量与河道沉积物中的孔隙体积成正比。

武桂芝等^[11-12]已进行了大沽河河道沙样的水理特性及相关试验(如水分特征曲线的测定、室内垂向沙柱、侧向沙槽入渗),为本野外试验的开展奠定了基础。笔者利用自制的双环垂向入渗装置,通过水分传感器现场测定,获得各试验点不同深度的动态入渗过程,进一步研究季节性河道的入渗规律,以期为建立季节性河道渗漏影响的洪水演进数学模型以及进行河道渗漏数值模拟计算提供科学依据。

1 野外垂向入渗试验

1.1 试验场地选择

大沽河上、中、下游河床的沙质不同,由粗到细变化,造成地表水的渗漏补给规律存在一定差异。在野外实地调查的基础上,综合考虑各种因素(河道特点、地下水位、沙样质地、取水难易程度等),分别选取 2016 年 5 月枯水期大沽河上、中、下游代表性试验场地:上游河段莱西市孙受镇马家会村(北纬 36°47'06"、东经 120°25'08"),中游河段即墨市移风店镇马军寨村(北纬 36°30'34"、东经 120°17'34")、下游河段胶州市李哥庄镇贾疃村(北纬 36°26'02"、东经 120°07'38")。试验前期,分别在现场采集沙样,在室内测定试验场沙样的理化及水理性质(孔隙度、中值粒径、干容重、初始含水率、渗透系数等)见表 1。

表 1 试验场地包气带沙样特性

试验场地	孔隙度/%	中值粒径/mm	最大干容重/(kg·m ⁻³)	初始含水率/%	渗透系数/(m·d ⁻¹)
马家会村	43.62	0.94	1 420	3.44	28.59
马军寨村	42.00	0.81	1 570	2.25	26.54
贾疃村	40.98	0.57	1 650	3.47	23.13

1.2 试验装置

试验设备主要包括改进的双环入渗过程可视化装置(见图 1)、SMAWS016 土壤水分传感器、数据采集

器、供水桶、有机玻璃板、角钢架等。

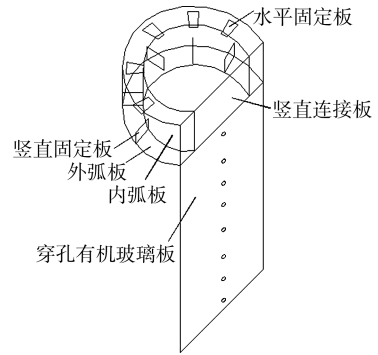


图 1 改进的双环入渗可视化试验装置

1.3 试验方法

(1) 试验点选择。选择地势平坦、沙质均匀、距取水点较近、河床表层植被较少、试验点面积约为 1.5 m² (1 400 mm×1 050 mm) 的地块,去除表层杂草,消除植物根系对包气带水分入渗试验的影响。

(2) 放置双环入渗装置。将改进的双环有刀锋一面扣在地面上,双环顶面放置垫木,用铁锤轻轻敲打,尽量避免扰动表层,使入渗装置均匀深入地面 200 mm。在内外渗流槽中平铺细铁丝网,与渗流槽底面紧贴,以减缓水流对地表的冲刷。

(3) 挖掘观察槽,放置传感器。在改进的双环入渗装置渗流槽水平一侧挖观察槽(1 200 mm×800 mm×1 000 mm),观察面为垂直剖面。按照试验方案确定水分传感器安装位置,垂直剖面上传感器相互错开安放,横向投影距离相隔 100 mm,水分传感器安装位置依次距地面 200、300、400、500、600、700、800、900 mm,试验装置见图 2。用自制控土器缓缓挖取 400 mm 深度沙洞,将传感器放进沙洞,用木锤配合垫木缓慢敲进沙层中,用原沙回填,均匀夯实水分传感器沙洞。为观察湿润锋的运移情况和防止入渗试验时沙层坍塌,用 5 mm 厚有机玻璃板护壁(渗流槽一侧)。为防止试验中水流沿玻璃板最短路径入渗,在有机玻璃与双环装置接触处用凡士林密封,并用角钢架支护。装置放置完毕,将水分传感器与采集器连接并通电,待水分传感器读数稳定后,记录其初始读数,作为沙质初始含水率。

(4) 注水,渗流槽调平。将主、副渗流槽沿内侧全部铺上塑料布,用水泵抽吸河水加满 3 个供水桶。将 2 个供水桶放置在渗流槽对角线处为主渗流槽供水,另 1 个供水桶为副渗流槽供水。开启止水阀,将主、副渗流槽水位加至 100 mm 处,观察主、副渗流槽水位是否相平,调整主、副渗流槽成水平放置。

(5) 记录数据。快速抽出主、副渗流槽塑料布,记为 0 时,渗流试验开始,同时打开供水桶排水阀,使试

验过程中主、副渗流槽水位保持 100 mm 不变。鉴于初始入渗速率很大,先以 30 s 为记录水位读数时间间隔,随着时间延长,改为每 1 min 记录一次两个主渗流槽供水桶水位变化的读数。副渗流槽是为使主渗流槽的水不发生侧渗而设,其水位变化不用计数。从入渗试验开始,采集器自动记录土壤水分传感器的读数变化。

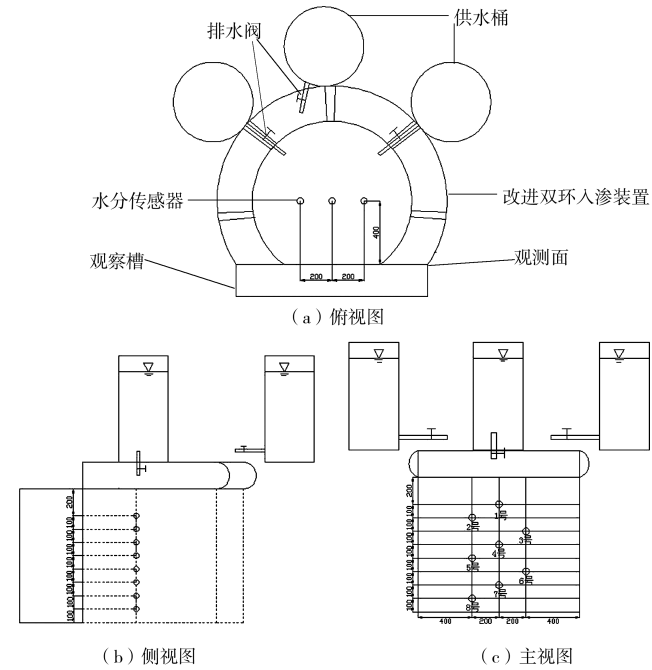


图2 试验装置示意(单位:mm)

基本不变时停止供水,试验结束。主渗流槽供水桶水位随时间变化的下降差,即为主渗流槽随时间变化的入渗量,再除以入渗面积即可计算出随时间变化的入渗速率。对现场记录的各种数据进行整理。每个野外试验点试验历时为 1.3~2.0 h。

2 试验结果与分析

2.1 体积含水率

经过 15 d 时间,完成野外 6 组定水头垂向入渗试验(上、中、下游试验各 2 组)。选择具有代表性的 1~6 号水分传感器(见图 2(c)),以体积含水率为纵轴,入渗时间为横轴,绘制各深度体积含水率随时间变化的曲线(见图 3)。

上游两组试验点表层初始体积含水率分别为 4.6% 和 2.1%,入渗水流到达 1 号水分传感器的时间分别为 6 min 和 5 min;中游两组试验点表层初始体积含水率分别为 1.8% 和 2.6%,入渗水流到达 1 号水分传感器的时间分别为 9 min 和 10 min;下游两组试验点表层初始体积含水率分别为 4.5% 和 2.3%,入渗水流到达 1 号水分传感器的时间分别为 13 min 和 15 min。可知,同一试验场地初始含水率越小,入渗速率越快,入渗水流到达传感器的时间越短。上、中、下游第 2 组各试验点表层初始含水率相近,试验沙样粒径依次减小,水分在上、中、下游沙层中运移时间依次延长,表明上游入渗速率最快,其次是中游,下游最慢。

(6) 数据处理。待土壤水分传感器读数较长时间

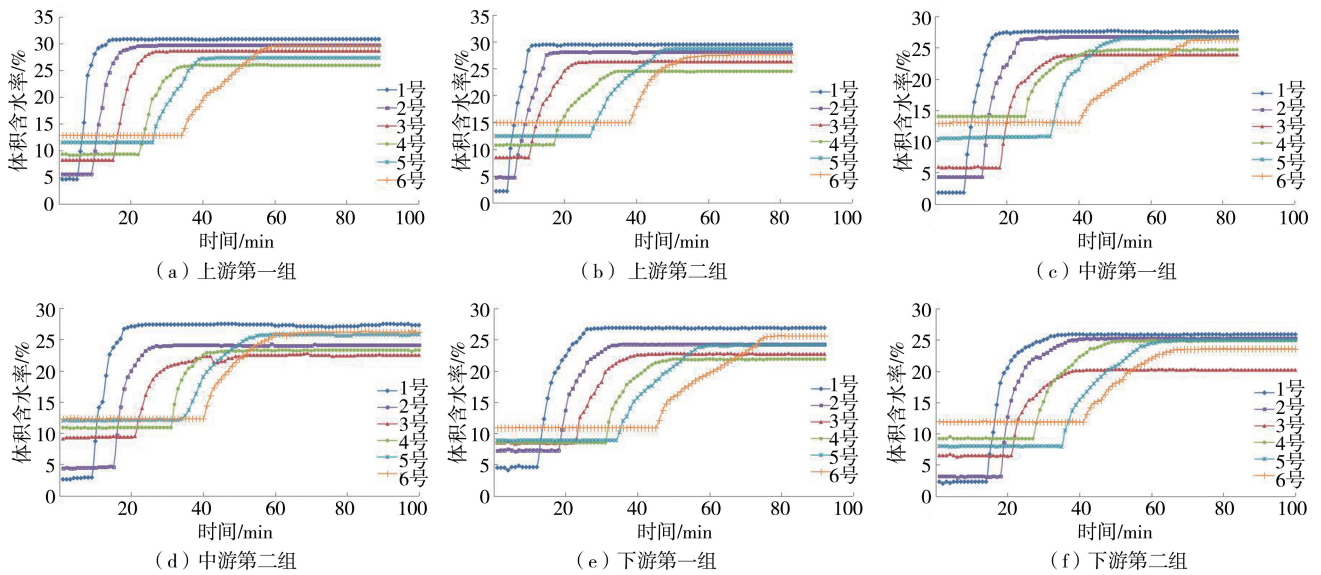


图3 各层体积含水率随时间变化曲线

由图 3 可知,随着深度的增大初始体积含水率依次增大,但是中游第 1 组试验中 4 号传感器含水率大于 5 号、6 号的,下游第 2 组试验中 4 号传感器含水率大于 5 号的,原因可能是试验前有降雨出现,雨水未达

深层,天气转晴表层土壤经过蒸发,导致下层含水率小于中层含水率。

由图 3 可知,各层的入渗速率从上层到下层依次减慢,达到饱和和体积含水率的时间依次增大。野外试

验影响因素较多,如各试验点的土壤结构、沙样质地、颗粒级配以及优先流等,造成个别沙层体积含水率较上层体积含水率大,如中游与下游的第2组4号传感器沙层。随着试验场地深度增加,沙层的密实度增大,沙层孔隙度减小,试验点各层饱和体积含水率随深度增加依次减小。

2.2 入渗速率

入渗速率是单位时间通过单位面积土壤的水量。将供水桶单位时间液面高度的变化值记为单位时间入渗量,除以主渗流槽横截面面积(即垂向入渗面积),即为入渗速率。以入渗速率为纵坐标,以时间为横坐标,绘制入渗速率随时间变化曲线,见图4。

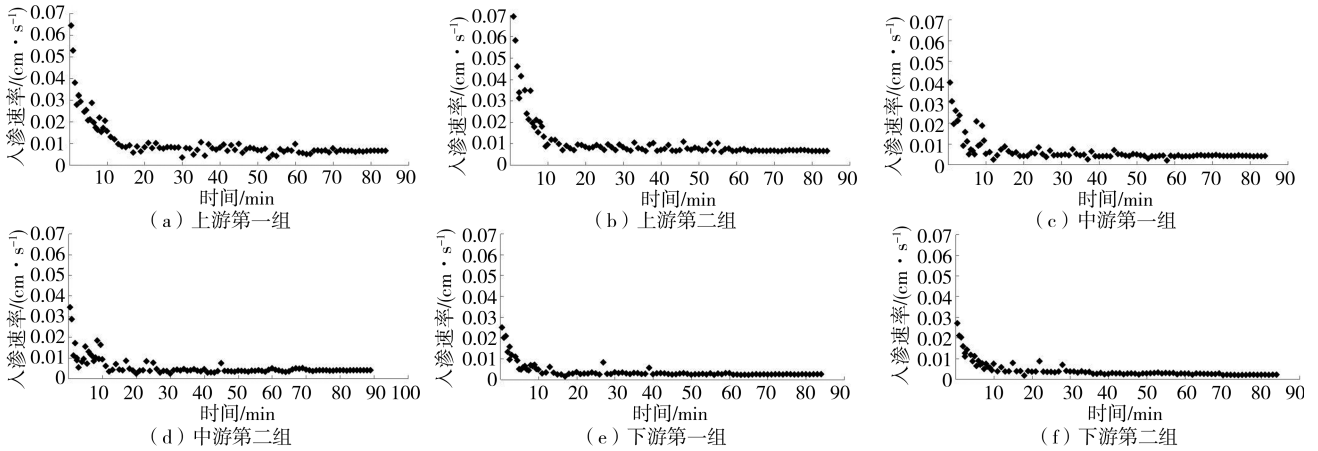


图4 垂向入渗速率随时间变化曲线

由图4可知,上、中、下游河床垂向入渗速率随时间变化趋势一致。入渗初期,河床初始含水率较小,入渗速率较快,随着沙层体积含水率增大,入渗速率逐渐减小,最后趋于稳定,可以概括为入渗速率快速下降期、缓速下降期、稳速入渗期3个阶段。

野外试验河床各沙层初始含水率不同,上游第1组初始体积含水率由表层到底层依次为4.6%、5.6%、8.2%、9.3%、11.5%和12.8%,上游第2组初始体积含水率由表层到底层依次为2.1%、4.7%、8.4%、10.7%、12.4%和14.9%。上游第1组各层之间初始含水率相对于第2组各层之间初始含水率变化幅度较小,且上游第1组各层初始含水率之和与第2组各层初始含水率之和相近,上游第1组最后达到稳定入渗速率的时间较第2组的短。同理,对于中游和下游试验各层之间初始含水率变化幅度小,且各层初始含水率相近的试验点达到稳定入渗速率的时间较短,原因是体积含水率变化较小的非饱和层比含水率变化较大的非饱和层有较多的孔隙,达到稳定入渗速率用时较短。

上、中、下游沙样中值粒径分别为0.94、0.81、0.57 mm,上游第1组和第2组的稳定入渗速率分别为0.0066 cm/s和0.0064 cm/s,中游第1组和第2组的稳定入渗速率分别为0.0041 cm/s和0.0040 cm/s,下游第1组和第2组的稳定入渗速率分别为0.0024 cm/s和0.0022 cm/s。可知,随着上、中、下游沙样粒径依次减小,上游河床稳定入渗速率大于中游的,中游河床稳定入渗速率大于下游的。

3 结论

(1)选择代表性试验场地和试验点,研制了改进的双环入渗试验装置,进行了野外垂向入渗试验。结果表明:河床入渗过程可分为快速入渗、缓速入渗与稳定入渗阶段,总历时为1.3~2.0 h;上游稳定入渗速率平均值为0.0065 cm/s,中游稳定入渗速率平均值为0.0041 cm/s,下游稳定入渗速率平均值为0.0023 cm/s。

(2)不同试验场地各组试验,随着上、中、下游沙样粒径依次减小,其稳定入渗率也依次减小。

(3)同一试验场地各组试验,相同深度的初始含水率越小,入渗速率越快,入渗水流到达传感器的时间越短。

(4)同一试验场地各组试验,随着深度增大,含水率依次减小且达到饱和的时间变长;相同深度沙层初始含水率相近时,上、中、下游河沙入渗速率依次减小。

(5)同一试验场地各组试验,沙样各层初始含水率之和相近且各层之间初始含水率差距越小,达到稳定入渗的时间越短。

参考文献:

[1] DAHAN O, TATARSKY B, ENZEL Y, et al. Dynamics of Flood Water Infiltration and Ground Water Recharge in Hyperarid Desert[J]. Ground Water, 2008, 46(3): 450-461.
 [2] SHENTISIS I, ROSENTHAL E. Recharge of Aquifers by Flood Events in an Arid Region[J]. Hydrological Processes, 2003, 17

- (4): 695-712.
- [3] 王少丽, THIELEN R, 李祥福, 等. 渠道渗漏量的试验及分析方法[J]. 灌溉排水, 1998, 17(2): 39-42.
- [4] 梁永平, 高洪波, 张江华, 等. 建立在水动力关系基础上桃河阳泉段河道渗漏补给量的计算[J]. 山西水利科技, 2005(3): 58-60.
- [5] 冯创业, 张增勤, 赵志超, 等. 滹沱河大型入渗试验及其入渗能力计算[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 19-23.
- [6] 吉文平. 河渠渗漏补给规律和计算方法的探讨[J]. 地下水, 2007, 29(5): 131-132.
- [7] 胡兴林, 肖洪浪, 蓝永超, 等. 黑河中上游段河道渗漏量计算方法的试验研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 460-468.
- [8] 杨文斌, 李永华, 吴鹏, 等. 干旱区季节性河道深层渗漏速率及变化特征初探: 以库姆塔格沙漠多坝沟为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 48-53.
- [9] BLASCH K W. Methodology to Assess Water Presence on Speleothems During Periods of Low Precipitation, with Implications for Recharge Sources: Kartchner Caverns, Arizona [J]. Journal of Cave & Karst Studies the National Speleological Society Bulletin, 2011, 73(2): 63-74.
- [10] VILLENEUVE S, COOK P G, SHANAFIELD M, et al. Groundwater Recharge via Infiltration Through an Ephemeral Riverbed, Central Australia [J]. Journal of Arid Environments, 2015, 117: 47-58.
- [11] 武桂芝, 李宁宁, 冯增帅, 等. 季节性河床不同沙样的水分特征曲线研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(1): 57-61.
- [12] 李宁宁, 武桂芝, 冯增帅, 等. 基于季节性河床砂样的垂向非饱和入渗试验研究[J]. 水资源研究, 2016(1): 16-22.

【责任编辑 张华兴】