

基于可控性生态减渗目标的河床底质重构技术研究

郑亨¹, 陈卓², 魏俊¹, 张晶², 赵进勇², 王琦², 黄森军¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 位于地下水超采区且具有景观要求的河流, 需同时具备维持生态水位和渗透补给地下水的功能, 研究可控减渗效果的河床底质重构技术对维持河床垂向连通性具有重要意义。以华北平原常见河床底质和膨润土为主要材料配比得到重构底质, 通过变水头渗透试验与模型入渗试验探究了重构底质减渗特性, 根据不同河流条件提出不同的配比及结构方案, 减渗层厚度和纳基膨润土配比方案1为100 mm和9%, 方案2为150 mm和15%, 方案3为200 mm和18%; 利用GeoStudio SEEP/W软件计算模拟了不同方案的渗流及渗流量减少状况。结果表明, 改变膨润土类型和掺量可调节底质的减渗效果, 使其渗透系数达到小于 1×10^{-7} cm/s和小于 1×10^{-6} cm/s目标水平; 纳基膨润土掺量为15%的重构底质在1 m水头渗透作用下, 浸润锋经39 d运移15 cm, 56 d内累计入渗量为11.1 cm, 减渗效果较好; 模拟结果表明, 3种减渗方案有不同的减渗效果, 典型断面河流水位在0.3~2.0 m时, 3种方案河流渗流损失量可降低55.8%~68.8%、91.5%~94.3%和94.8%~96.5%; 方案1适用于减渗需求低、地下水回补要求高的河流, 方案3适用于蓄水减渗需求高或水位较高的河流, 方案2适用范围最广。

关键词: 生态补水; 减渗措施; 渗透系数; 渗流模拟; 河床垂向连通性

中图分类号: TV44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)06-0011-07

在自然力和人类活动双重作用下, 河湖水系连通性发生退化或破坏。在河流垂向, 硬化河床限制了河流垂向连通性, 阻隔了地表水与地下水的交换通道, 也使底栖动物等水生生物丰度降低(董哲仁等, 2019)。天然河流底质是矿物、岩石、土壤等自然侵蚀产物、生物活动产物和河床母质等水底迁移沉积物的统称, 其在河流生态系统中发挥了重要作用, 是水生态系统重要的物质基础、能量信息交换渠道和水生生物生存繁衍场所(Griffith & Perry, 1993; 董哲仁等, 2013)。河水与地下水交换、污染物吸附降解、水生生物栖息繁衍等常在河床底质区域进行, 表层物质结构和渗透能力等影响其功能与作用(Song et al, 2007; 赵佳莉, 2014)。

位于地下水严重超采区且具有景观要求的河流, 通常需要在满足蓄水需求的基础上具备一定的地下水补给能力, 以维持一定的河流垂向连通性。根据水利部试点河道生态补水项目资料, 2018年9月

至2020年11月底项目实施期间, 滹沱河累计入渗补充地下水约3.2亿 m^3 , 维持水面面积31.75 km^2 , 恢复了基本功能并有效进行了生态补水, 为华北地区生态补水及治理提供了成功范例。期间滹沱河单位面积平均入渗速率为 1.44×10^{-5} cm/s, 结合河道渗透水力坡度可得其河床渗透系数为 10^{-6} 数量级, 则认为河床结构渗透系数在 10^{-7} ~ 10^{-6} cm/s时, 多数河流可同时满足减渗蓄水和地下水补给需求。采用河床底质重构技术, 选用具有目标特性的材料对河床底质进行重构, 并采取适宜的修复措施对河床底质进行改良, 可缓解底质特性变化而导致的垂向物理连通性受损所引起的生态问题。河床底质重构中的分层结构主要由表层的抗冲刷保护层、中部减渗措施层和下部反滤层组成, 通常保护层通过布设大粒径卵砾石、铅丝石笼护底、砂石床垫等方法形成, 在提高河床抗冲刷能力、减少泥沙和土料推移淘刷的同时, 也可以提高河床空间异质性, 为水生生物的生存繁衍和生态环境改善提供良好的外在条件(Duan et al, 2009; Wang et al, 2009)。国内外学者已经对添加不同掺料的底质配比及减渗效果开展了相关研究, 但对不同方案的减渗分层结构入渗过程和河道渗流模拟方面的研究较少。减渗层可采用三合土、水泥渗入土、固化剂添加土、天然黏土等(黄文祥, 2011; Ji et al, 2014; 黄晓庆等, 2015; 吕寒雪等, 2019)。减渗常

收稿日期: 2021-04-16 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 国家水体污染与治理科技重大专项(2018ZX07105-002); 水利部公益性行业科研专项(201501030)。

作者简介: 郑亨, 1991年, 男, 硕士研究生, 研究方向为景观生态学。E-mail: zheng_h@ccidi.com

通信作者: 魏俊, 1982年, 男, 教授级高级工程师, 主要从事流域水环境治理研究。E-mail: weijun20210520@163.com

用的措施主要有河道硬化处理减渗、底质工膜减渗、粘土减渗、膨润土防水毯减渗和底质料减渗(段智霞, 2019; Cazzuffi & Giofrè, 2020)。硬化处理减渗效果好, 抗冲刷能力强, 但成本高、不适应地基变形、生态性较差(毕博等, 2018); 土工膜减渗效果好, 成本较低, 施工工艺成熟, 但材质非天然, 隔绝河道地上与地下的连通性, 地基变形适应能力有限, 生态性较差(闵敏等, 2011; 彭云枫和郝丹, 2013); 膨润土防水毯减渗有一定自修复能力, 施工工艺简单, 生态性好于硬化处理和土工膜措施, 但部分材质非天然, 大范围使用容易被掀起(Manubeuge et al, 2000; 郭争争等, 2018); 黏土减渗层生态效果较好, 适应地基变形, 但受粘土资源限制, 成本较高; 采用当地天然河床基质掺入黏性土进行河床底质改良, 可使底质减渗效果可控, 并兼具生态性及经济性。

本研究采用华北平原常见河床底质和膨润土为主要材料, 以渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s 和小于 1×10^{-6} cm/s 为控制指标构建河床底质减渗结构, 通过变水头渗透试验和模型入渗试验, 探究重构底质减渗层的减渗效果和入渗特性, 提出不同的底质重构方案, 并利用 GeoStudio SEEP/W 软件对不同底质重构方案的渗流特性和减渗效果进行模拟验证。

1 材料与方法

1.1 试验材料

底质减渗层材料主要包括天然河床底质土料和 3 种类型的膨润土。河床底质土料取自华北平原某河流漫滩区, 主要为含砂粉质粘土, 呈黄褐色, 属级配不良土体; 天然纳基膨润土购自吉林省刘房子村; 钙基膨润土、人工纳基膨润土购自河北省灵寿县。

1.2 变水头渗透试验

变水头渗透试验研究了不同配比材料重构底质的

渗透性能, 将膨润土与素土按配比方案混合(表 1), 按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)规定的程序制作干密度为 1.6 g/cm^3 的标准试块, 预饱和和处理后采用 TST-55 型变水头渗透装置进行试验。出水后每隔 30 min 或 1 h 测记 1 次数据, 重复至渗透速率稳定, 每个配比方案试验进行 2 次, 取均值作为分析数据。

表 1 底质重构配比方案

Tab.1 Composite sediment proportion scheme

类型	膨润土掺量/%						
天然纳基膨润土	3	6	9	12	15	18	21
人工纳基膨润土	3	6	9	12	15	18	21
钙基膨润土	3	6	9	12	15	18	21

1.3 分层结构模型入渗试验

使用模型入渗试验模拟底质分层结构中减渗层的水流入渗过程, 验证底质从非饱和渗流到饱和渗流过程中的整体减渗效果。本次试验装置由入渗试验结构、恒压供水马氏瓶和监测记录设备 3 部分组成(图 1-a)。入渗试验结构的有机玻璃管高 100 cm, 内径 21 cm, 可分层填筑材料; 恒压供水马氏瓶可为入渗结构提供恒定水头, 高 60 cm, 内径 21 cm, 内壁设有电子水尺, 监测记录设备连接电子水尺, 可自动采集并记录水位数据。

试验前在入渗试验结构有机玻璃管中自下而上分别铺设砾石层、反滤层、减渗层、上垫层、保护层结构(图 1-b)。砾石层填充厚 30 cm、粒径 1.2~2.8 cm 碎砾石块, 放置无纺布包裹的直径 20 cm 透水石, 再铺设轻压平整后厚度 5 cm 的细砂反滤层, 起反滤防护作用; 反滤层上分 3 次压实铺设 15 cm 底质减渗层(素土和纳基膨润土配比为 0.85:0.15, 干密度为 1.6 g/cm^3), 再铺设 5 cm 细砂上垫层和 10 cm 卵砾石保护层, 铺设过程严格控制每层厚度和平整度, 保证每层结构均匀完整。

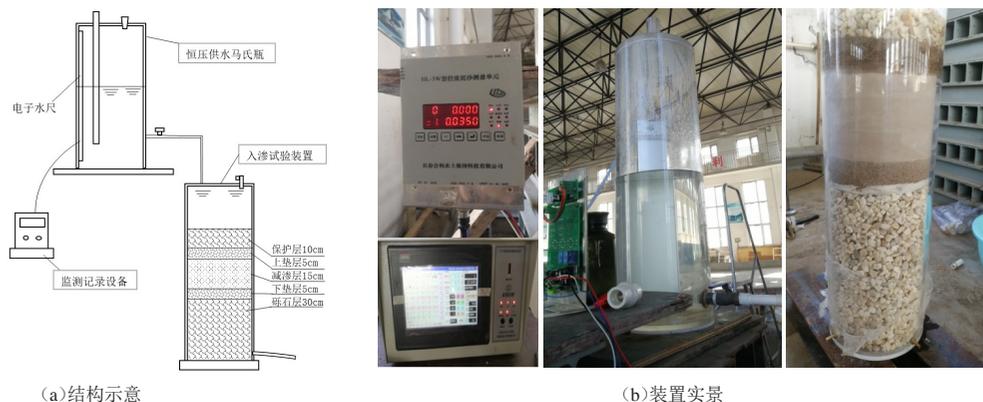


图 1 试验结构示意图(a)和装置实景图(b)

Fig.1 Schematic diagram(a) and images of the experimental device(b)

设备调试运行后,每隔8 h观测记录1次土柱中浸润锋运移进入减渗层的距离,同时数据监测设备和电子水尺自动监测记录马氏瓶水位数据,每隔1 min输出1次数据,观察并记录浸润锋首次达到减渗层底的时间。

1.4 渗流模拟计算

Geo Studio SEEP/W 渗流模拟软件是岩土、水利工程常用的一款渗流仿真模拟软件,对非饱和土进行渗流过程、稳态渗流等方面的模拟计算时,模拟结果通常与模型试验、现场测算结果相近,适合于多种工况的渗流模拟分析(Yang et al, 2012; Yoo et al, 2016; 高文静, 2018)。根据减渗指标测定结果及对应3种减渗需求的方案,构建典型河道断面,模拟不同水位条件下采取措施前后河道稳定渗流状况。建模河道断面宽15.2 m、深4.7 m,底质分层结构结合两岸挡墙约束铺设于河道主槽,水位分别为0.3、1.2、2.0 m。方案1的减渗层厚100 mm、纳基膨润土配比为9%,方案2为150 mm、15%,方案3为200 mm、18%,减渗层材料渗透系数由变水头渗透试验测得。

2 结果与分析

2.1 不同配比材料底质的渗透性能

根据变水头渗透试验数据绘制图2。可见掺入3种类型膨润土均可有效降低重构底质的渗透系数,其受膨润土类型和膨润土掺量因素的共同影响。同种膨润土掺量逐渐增大时,底质渗透系数随之显著降低,当膨润土掺量低于15%时,底质渗透系数下降速率较快,3种掺料的底质渗透性差异较大;当掺量高于15%时,底质渗透系数下降速率较慢,渗透性趋于一致。通过调节3种类型膨润土掺量,都可使底质渗透系数达到小于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 和小于 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 两个目标水平。分析认为膨润土能够减小渗透系数的原因,是膨润土遇水时能快速吸水形成的胶体颗粒团结构会填充土壤孔隙,使得土壤孔隙大量减少,堵塞土壤中水分运移通道。

同等掺量情况下,掺入纳基膨润土的底质渗透系数最小,人工纳基膨润土底质居中,钙基膨润土底质最大。主要原因在于不同类型膨润土层间阳离子类型的不同会导致膨润土胶体团的半径等特性有所不同,层间为 Na^+ 的膨润土胶体团半径大于层间为 Ca^{2+} 的胶体团半径,导致了在相同电荷的情况下,纳基膨润土有效成分遇水后形成的胶体团数量和体积更大,能够填充更多的土壤孔隙,使同样掺量情况下纳基膨润土封闭土壤孔隙的能力最强,减渗效果更好。

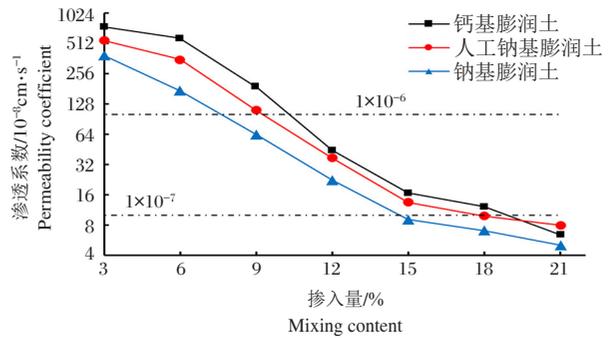


图2 不同类型膨润土掺量对渗透系数的影响

Fig.2 Influence of bentonite content on the permeability coefficient

2.2 减渗层的入渗过程及特性

浸润线的推移过程代表着土壤水分的运移过程,采用幂函数($y=ax^b$)对浸润线推移深度与入渗时间关系进行拟合,结果见图3。可见浸润线运移深度与入渗时间之间的关系采用幂函数拟合效果较好、精度高。1 m水头条件下的水分入渗时,随着渗透时间的增加,减渗层中浸润线运移速度逐渐减缓,第1天时浸润线运移速度最快,速度为13 mm/d;第27天后,浸润线运移速度降低到了2 mm/d,浸润锋运移达到15 cm的重构底质减渗层底部历时39 d,平均浸润线运移速度是3.9 mm/d。

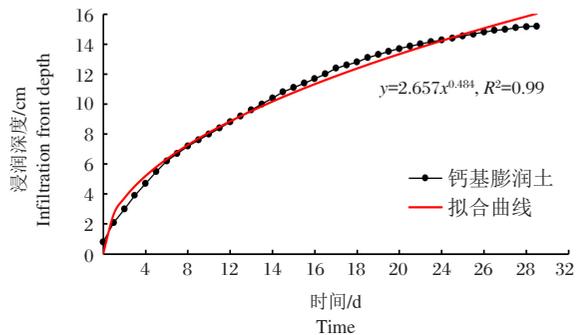


图3 浸润锋运移深度随时间的变化

Fig.3 Migration of the infiltration front with time

对数据监测设备输出的数据处理分析结果见图4。入渗速率是指单位时间内单位面积土壤的入渗水量。入渗过程中,减渗层土壤由非饱和逐渐接近饱和,水分入渗速率逐渐降低。初始入渗速率在15.98~16.73 mm/h,第39天浸润锋运移到15 cm厚的减渗层底部时,入渗速率为5.51 mm/h;第52~56天时入渗速率基本稳定,在4.12 mm/h左右。

累计入渗量是指土壤中水分入渗全过程的累计入渗水量(某面积范围内)。由图4可见,土壤累计入渗量增长的速度逐步降低,在1 m水头作用下,30 d累计入渗量仅为7.8 cm,56 d累计入渗量为11.1 cm。

可见重构底质的水分入渗过程中,整体水分入渗速率保持在较低的水平,累计入渗量增加缓慢并逐渐保持在稳定水平,整体减渗层减渗效果良好,能将水分高效截流在减渗层上,有效减少入渗水量。

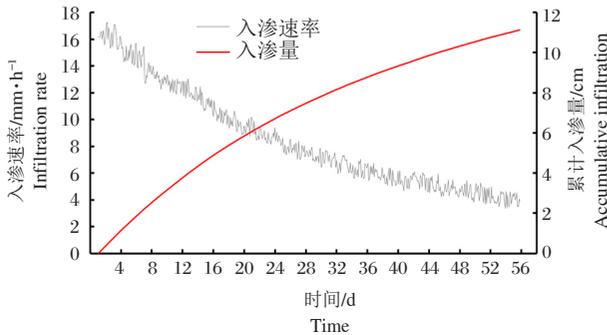


图 4 入渗速率和累计入渗量随时间的变化

Fig.4 Changes of infiltration rate and cumulative infiltration distance with time

2.3 减渗指标及技术方案的确定

不同的河流在功能、自然条件及减渗需求都有所差异。以下列 3 类河流为例,根据其河道基本地形条件和功能,确定不同的减渗技术方案。

1 类:纵坡较缓的乡村河流,功能以排涝、生态基流保障为主,河床减渗后下渗能力满足河床生态流量持水要求外,可增加回补地下水,河床下渗性能中等。

2 类:纵坡较陡、冲刷较强的平原-山区过渡带河流,功能为防洪、生态为主,河床抗冲刷性能较高、下渗性能较低。

3 类:纵坡较缓、断面宽浅的平原河流,多分布于城市区域,功能以蓄水、景观、生态为主,河床在减渗防漏的基础上,下渗性能应保持较低水平。

下渗性能通过调整重构底质层的厚度及配比控制。例如,减渗需求较低的 1 类河流可采取厚度较小、纳基膨润土配比较低的方案;减渗需求相对较高的 3 类河流则可根据河段采取厚度适中或较厚、纳基膨润土配比较高的方案。河床底质分层结构中,保护层选取的卵石或块石粒径应以水流冲刷不起动或不被水流冲走为原则,根据《堤防工程设计规范》(GB50286-2013)公式计算,保护层厚度应能够对河床质进行有效蔽护,以保护河床质不被水流带走,均匀布置并紧贴河底(戚振宁,2011)。

根据上述减渗要求,以减渗层厚度、减渗层纳基膨润土配比、卵石粒径、保护层厚度为内容,结合试验得到的重构底质渗透能力参数制定不同方案(表 2),以方案中减渗层厚度和配比参数为基础进行后续渗流模拟。

表 2 配比及结构方案

Tab.2 Structure and proportioning scheme

河流类型	减渗层厚度/mm	纳基膨润土配比/%	卵石粒径/cm	保护层厚度/mm
1 类	100	6~12	2.5~4.5	100~150
2 类	150	9~15	5.0~7.5	150~250
3 类	150、蓄水段 200	12~18	2.5~4.5	150~200

2.4 渗流模拟计算

对原河道采用 3 种方案前后的渗流情况进行模拟分析。根据 Geo Studio SEEP/W 软件模拟计算结果,不同方案在 0.3、1.2、2.0 m 水位条件下稳定渗流时流场、水头分布、流量线等渗流状况见图 5。

不采取减渗措施时,河流渗流量较大,等压水头线向外均匀扩散,流速矢量线分布均匀,主槽下方位置矢量线较为密集。采取减渗措施后,整体渗流量明显降低,在侧向挡墙约束条件下,渗流适量线方向趋于一致,长度降低明显,垂向减渗成为了主要渗流途径,压力水头在减渗层急剧减少,主要渗流特性变化见表 3。

表 3 各方案渗流特性变化

Tab.3 Changes in seepage characteristics for each scheme

方案	指标	水位/m		
		0.3	1.2	2.0
无措施	单宽渗流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	6.376×10^{-8}	6.018×10^{-7}	1.423×10^{-6}
	方案 1	单宽渗流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	2.819×10^{-8}	2.359×10^{-7}
方案 2	减少率/%	55.8	60.8	68.8
	单宽渗流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	5.393×10^{-9}	4.418×10^{-8}	8.314×10^{-8}
方案 3	减少率/%	91.5	92.7	94.3
	单宽渗流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	3.295×10^{-9}	2.683×10^{-8}	5.048×10^{-8}
方案 3	减少率/%	94.8	95.5	96.5

采取减渗方案后,在水位由低到高的过程中,方案 1 的渗流减少率在 55.8%~68.8%,方案 2 的渗流减少率在 91.5%~94.3%,方案 3 的渗流减少率在 94.8%~96.5%,均逐步增加,可见模拟的 3 种减渗方案都能够起到一定减渗效果;其中,方案 1 与后 2 种方案减渗效果相差较大,渗流量减少率明显低于方案 2 和方案 3,适合应用于减渗需求较低并有一定地下水回补能力的区域;方案 2 和方案 3 减渗效果较强且渗流量减少率都大于 90%,方案 3 减渗效果略好于方案 2,同水位条件下掺料含量的提高和厚度的增加使渗流减少率提高不到 4%,方案 3 减渗

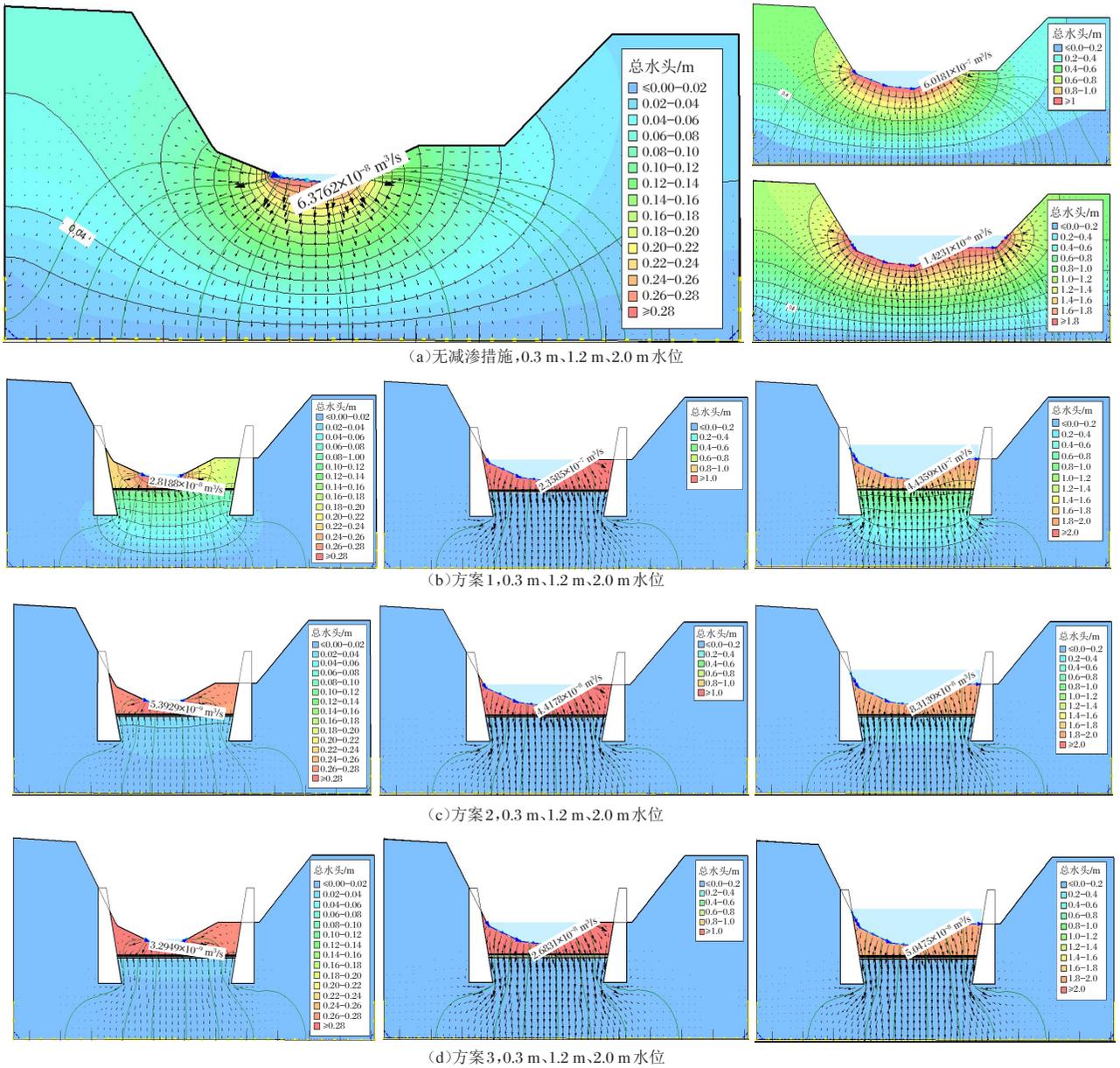


图5 不同水位的渗流模拟方案

Fig.5 Seepage simulation diagram for the different design schemes at different water levels

层更厚、掺料配比更高、减渗效果最强,当承受较高压力水头时,更厚的减渗层有利于分散水压力,减少渗流破坏的可能,稳定状况更好,因此方案3更适合于蓄水减渗需求高或河湖水位较高的河流;方案2减渗效果略差于方案3,但远高于方案1,适用于大多数城市或农村河流,从经济和效果角度考虑,适用范围最广。工程应用时可根据河流减渗需求的高低改变配比和减渗层厚度,从而调节减渗能力,实现不同的减渗目标。

3 讨论

河流水系连通性是维护河流健康的重要保障条件,也是河流生态修复的重要内容之一(董哲仁,

2013)。因此,对位于地下水严重超采区且具有景观要求的河流进行减渗处理时,考虑其水力和生态学特性,维持一定的河流垂向连通性是很必要的。根据试验及模拟的底质重构技术方案,可以调节底质层渗透系数达到 1×10^{-7} cm/s、 1×10^{-6} cm/s等不同目标水平,满足不同河流的差异性蓄水和地下水补给需求,维持垂向连通性,对比其他减渗手段(Ji et al, 2014; 黄晓庆等, 2015; 吕寒雪等, 2019; Cazzuffi & Gioffrè, 2020),具备更好的渗透调控能力,对河流水生态保护和水资源管理具有重要作用。

工程应用时,针对某河流特定的渗流量减少目标,首先可根据河道参数通过Geo Studio SEEP/W 软

件建模并计算原渗流量,然后在模型中添加具备不同厚度、渗透系数参数的底质结构,调节参数进行河流渗流量试算,根据试算结果得到达到拟定减渗目标时的结构厚度和渗透系数,再通过配比试验得到对应渗透系数的材料配比,最终确定河床底质重构技术方案。生态补水是河流生态修复的重要组成部分,本研究结果可为不同功能需求的华北平原河流生态补水及修复工作提供技术参考和数据支撑。

参考文献

- 毕博,陈丹,汤树海,等,2018. 灌溉渠道生态化设计研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 36(8):707-712.
- 董哲仁,王宏涛,赵进勇,等,2013. 恢复河湖水系连通性生态调查与规划方法[J]. 水利水电技术, 44(11):8-13.
- 董哲仁,赵进勇,张晶,2019. 3流4D连通性生态模型[J]. 水利水电技术, 50(6):134-141.
- 段智霞,2019. 细颗粒物潜入河道底泥截污效果研究[D]. 太原:太原理工大学.
- 高文静,2018. 细粒土渗透特性的影响因素试验研究[D]. 西安:西安理工大学.
- 郭争争,管俊芳,陈菲,等,2018. 膨润土防水毯应用进展[J]. 硅酸盐通报, 37(11):3449-3453.
- 黄文祥,2011. 矿区充水因素及三合土在地表防治水工程中的应用[J]. 广东科技, 20(24):217-218.
- 黄晓庆,杨志斌,王殿顺,等,2015. MSMTW工法水泥土防渗墙在宝应湖圩堤加固中的应用[J]. 治淮, (2):42-43.
- 吕寒雪,冯瑞莹,王浩,2019. 土壤固化剂在现代路面基层和底基层中的应用[J]. 环渤海经济瞭望, (7):198-200.
- 闵敏,潘起来,李润杰,2011. 高分子新型材料在渠道防渗中的应用研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 29(1):1-3,8.
- 彭云枫,郝丹,2013. 土工膜防渗工程的渗流计算探讨[J]. 安徽农业科学, 41(7):3241-3243.
- 戚振宁,2011. 基于生态可持续发展下城市河道整治措施分析[J]. 中国水运(下半月刊), 11(1):142-143.
- 赵佳莉,2014. 格尔木河河床沉积物渗透系数变异性研究[D]. 西安:长安大学.
- Cazzuffi D, Gioffrè D, 2020. Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams[J]. Geotextiles and Geomembranes, 48(2):130-136.
- Duan X H, Wang Z Y, Xu M Z, et al, 2009. Effect of streambed sediment on benthic ecology[J]. International Journal of Sediment Research, 24(3):325-338.
- Griffith M B, Perry A S, 1993. The distribution of macroinvertebrates in the hyporheic zone of two small appalachian headwater streams[J]. Archiv Für Hydrobiologie, doi: 10.1127/archiv-hydrobiol/126/1993/373
- Ji Y J, Zhang L Z, Yue J N, 2014. Solution of AntiSeepage for Mengxi River Based on Numerical Simulation of Unsaturated Seepage[J]. The Scientific World Journal, <https://doi.org/10.1155/2014/270939>
- Manubeuge K P V, Witte J, Heibaum M, 2000. Installation and monitoring of a geosynthetic clay liner as a canal liner in a major waterway[J]. Geotextiles & Geomembranes, 18: 263-271.
- Song J X, Chen X H, Cheng C, et al, 2007. Effects of hyporheic processes on streambed vertical hydraulic conductivity in three rivers of Nebraska[J]. Geophysical Research Letters, 34(7):248-265.
- Wang Z Y, Melching C S, Duan X H, et al, 2009. Ecological and Hydraulic Studies of Step-Pool Systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 135(9):705-717.
- Yang H F, Jian W X, Wang F W, et al, 2012. Numerical Simulation of Failure Process of the Qianjiangping Landslide Triggered by Water Level Rise and Rainfall in the Three Gorges Reservoir, China[M]. Springer: Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia.
- Yoo C, Ku J M, Jun C, et al, 2016. Simulation of infiltration facilities using the SEEP/W model and quantification of flood runoff reduction effect by the decrease in CN[J]. Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 74(1): 118-129.

(责任编辑 万月华)

Research on Riverbed Sediment Reconstruction Technology Based on Controllable Ecological Seepage Reduction Targets

ZHENG Heng¹, CHEN Zhuo², WEI Jun¹, ZHANG Jing², ZHAO Jin-yong², WANG Qi², HUANG Sen-jun¹

- (1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, P.R.China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China)

Abstract: Rivers located in groundwater overexploitation areas provide the functions of maintaining ecological water levels and supplying groundwater by infiltration. Thus, it is important to study riverbed substrate reconstruction technology to maintain the vertical connectivity of the riverbed by controlling seepage. In this study, we obtained the materials to reconstruct the riverbed sediment by mixing riverbed sediment from the North China Plain with various types of bentonite in different ratios. The infiltration characteristics of the reconstituted substrate were then explored using variable water head infiltration tests and model infiltration tests. Next, we proposed different seepage reduction ratios and developed three structural schemes (Scheme 1: 100 mm seepage reduction layer with 9% sodium bentonite; Scheme 2: 150 mm seepage reduction layer with 15% sodium bentonite; Scheme 3: 200 mm seepage reduction layer with 18% sodium bentonite) based on river conditions. Finally, GeoStudio SEEP/W software was used to simulate the seepage conditions and the seepage reduction effects of the three schemes were analyzed. Results show that permeability coefficient reduction by the composite sediment can be controlled by changing the type and content of bentonite, and two target permeability coefficients ($< 1 \times 10^{-7}$ cm/s and $< 1 \times 10^{-6}$ cm/s) were achieved. When the content of sodium bentonite in the composite soil was 15% and the infiltration head was 1 m, the infiltration front moved 15 cm in 39 days and the cumulative infiltration water volume in 56 days was 11.1 cm. The composite sediment was better at reducing seepage and simulation results indicate that the three schemes all effectively reduced the seepage flow. When the river water level rose from 0.3 m to 2 m, seepage loss was reduced by 55.8%–68.8% in Scheme 1, 91.5%–94.3% in Scheme 2, and 94.8%–96.5% in Scheme 3. Scheme 1 is suitable for rivers with low infiltration requirements and high groundwater recharge requirements, Scheme 3 is suitable for rivers with high infiltration requirements and high water levels, and Scheme 2 has the widest scope of application. Our results provide reference and basis for ecological water replenishment and infiltration reduction restoration work in the North China Plain.

Key words: ecological water supplement; seepage reduction; permeability coefficient; seepage simulation; vertical connectivity of riverbed