节水改造背景下平原灌区渠系渗漏治理优化方案研究

李树森[1] 梁恒钏[2] 魏 盼[3]

1.山东省潍坊市峡山区王家庄街道办事处 山东 潍坊 262105

2.湖南耀铭人力资源管理服务有限公司 湖南 怀化 419100

3.磴口县诚裕工程管理有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015200

【摘 要】：渠系渗漏是平原灌区水资源利用效率低下的主要因素之一。在节水改造工程大量推行的情况下，怎样科学挑选并合理安排防渗技术，就成了灌区创建和管理当中须要面对的实际难题。本文在梳理平原灌区渠系渗漏主要成因的基础上，利用相关渗流计算理论，对复合土工膜和混凝土组合衬砌方案的适用性进行分析，提出了一个包含前期诊断、材料选择、施工要点和初步监测的优化治理思路。采用该方案后，渠道渗漏率降低，渠系水利用系数提高。研究可以给类似灌区渠系防渗改造提供一定的技术参考。

【关键词】：平原灌区；渠系渗漏；节水改造；复合衬砌；治理方案

0 引言

渠道输水是我国农业灌溉的主要方式，但是由于输水过程中存在渗漏损失，所以灌溉水利用率低是渠道输水的主要问题。根据有关调查结果可知，我国部分地区渠系水利用系数只有0.5左右，远低于发达国家0.7以上。北方平原灌区由于渠床土壤渗透性好、地下水位较高，渗漏现象比较严重。不但造成水资源的浪费，还会引起土壤次生盐碱化等环境问题。

近些年来，国家不断推进灌区续建配套及节水改造工程，渠道防渗属于其中的主要部分，因而受到人们的重视。全国农田灌溉发展规划（2022-2030年）中提出，到2030年全国农田灌溉水有效利用系数要达到0.58以上。达到这一目的就要灌区的渠系防渗技术有新的发展。

目前有关渠道防渗技术的研究比较丰富，主要分为土料夯实、混凝土衬砌、复合土工膜铺设、沥青混凝土等不同的技术路线[2]。但是已有研究大多集中于单一技术的应用效果，对于平原灌区特殊条件下系统的治理方案的探讨还比较欠缺。平原灌区渠道纵横交错、土质渗透性大、冻胀影响不能忽略，因此防渗方案应有较好的适应性以及综合效益。

根据以上认识，本文主要研究平原灌区渠系渗漏问题，从问题诊断、材料选择、结构设计、施工控制等几个方面提出比较系统化的优化治理思路，用具体的案例进行初步的效果检验，为有关工程实践提供一定的参考。

1 平原灌区渠系渗漏问题分析

1.1 渗漏的主要成因

平原灌区渠系渗漏的成因可以从以下几个方面加以理解。

首先，渠床土质属于影响渗漏强度的根基要素。平原灌区大多分布在河流冲积地貌单元，渠床土壤以粉砂、砂壤土为主，颗粒较粗，孔隙较大，渗透系数一般较高。根据有关的测定结果可知，砂壤土渠道的渗漏强度是壤土渠道的2～3倍。

其次，衬砌结构的完整性会直接影响到防渗效果。在已经进行了衬砌的渠道里，由于伸缩缝处理不当、材料配合比控制不好、渠基压实度不够等缘故，渠道在运行一段时间之后就会出现裂缝或者局部破损的情况，从而产生集中渗漏通道。在季节性冻融地区，衬砌结构的冻胀开裂现象比较普遍。

再次，日常保养不到位也会造成渗漏问题逐渐积累。平原灌区渠系级数多、总长度大，部分渠段年久失修，淤积、杂草生长、衬砌老化等问题并存，造成渗漏损失逐年增大。

1.2 渗漏的基本类型

根据渗漏发生形态特征，可以把渠道渗漏大致分为三种基本类型。

面状渗漏是水通过渠床土壤孔隙均匀下渗的现象，主要发生在未衬砌的土渠段，是最基本的渗漏形式。线状渗漏是水沿衬砌板块接缝、伸缩缝等线性处集中渗漏的现象。点状渗漏就是由于衬砌局部破损、动物洞穴、植物根系腐烂等原因造成的集中渗漏通道。三种类型在实际渠道中常常一起出现，但是主次关系不一样。

1.3 平原灌区渗漏治理的特点

与山丘区灌区相比，平原灌区渠系渗漏治理具有以下特点。

第一，渠道断面一般比较平缓，流速较小，泥沙淤积现象比较严重，对衬砌表面的抗冲刷、抗磨损要求较低，但是对防渗层整体性、均匀性要求较高。第二，地下水位埋深浅，渠道水位和地下水位水头差小，渗漏以垂直下渗为主，侧渗影响范围小。第三，灌区农田连片集中，渠道改线或者重建会遇到用地协调等问题，方案选择受到外部条件的限制较多。由此可知，平原灌区渗漏治理要对技术可行性和经济合理性做综合权衡。

2 渗漏治理的关键技术分析

2.1 防渗材料的基本特性与比选

目前渠道防渗工程中常用的材料有混凝土、复合土工膜、土料、砌石等，不同的材料在防渗性能、适应变形能力、经济性等方面存在差异。各种常用材料的主要性能参数见表 1。

表 1 常用渠道防渗材料主要性能对比

材料类型	渗透系数参考值（cm/s）	适应变形能力	工程投资参考（元/㎡）	设计使用年限（年）
现浇混凝土	1×10^{-8}~1×10^{-7}	较差	90~130	20~30
预制混凝土板	1×10^{-7}~1×10^{-6}	较差至一般	70~110	15~25
复合土工膜	1×10^{-11}~1×10^{-10}	良好	40~60	15~20
土料夯实	1×10^{-5}~1×10^{-4}	一般	15~25	5~10

表中数据为基于多个工程实例的参考范围，具体数值会因为工程条件的不同而不同。

从表 1 可知，复合土工膜防渗性能较好，变形适应性好，工程造价较低。混凝土材料结构强度高、耐久性好，抗外伤能力强，但是适应不均匀变形能力较差。因此，在近几年来，以两者组合使用为主的复合衬砌结构得到了较多的关注。

2.2 复合衬砌结构的设计思路

根据以上材料特性，复合土工膜和混凝土组合的衬砌结构可以考虑如下：以复合土工膜为主防渗层，阻水；以现浇或预制混凝土层为保护层，防止土工膜机械损伤、紫外线老化；在两者之间设砂砾石或中细砂垫层，起缓冲、保护作用。

在断面设计上，流量大干、支渠道用梯形断面现浇混凝土板，流量小斗、农渠用 U 形断面，抗冻胀性好，可作为首选之一。伸缩缝设置间距应根据当地气温、渠道断面尺寸等综合考虑，一般取 6～10m，缝内应填入有一定弹性的止水材料。

2.3 施工过程中的质量控制要点

复合衬砌防渗效果的好坏很大程度上取决于施工质量。以下三个环节值得重视。

渠床基础处理时，应在衬砌施工前清除渠表杂物及松散土层，按设计要求削坡或填筑，渠基压实度不小于 0.91。对于局部软弱地基，应采取换填或者加铺土工格栅等加固措施。

土工膜铺设时要保证膜面平整，与渠床表面贴合紧密，不能悬空、褶皱。相邻幅搭接宽度一般不小于 10～15cm，搭接方式一般用热熔焊接，焊接质量用充气或者真空法检测。

混凝土浇筑或砌筑时要严格控制混凝土的配合比和坍落度，浇筑后应及时覆盖保湿养护，养护时间一般不少于 14 天。气温低的季节施工时要采取相应的防冻措施。

3 渗漏治理优化方案构建

3.1 优化目标与基本原则

平原灌区渠系渗漏治理方案的优化，在保证防渗效果达到要求的基础上，还要考虑工程耐久性以及经济合理性。就具体的方面来说，可以设定如下几个基本目标，即衬砌后的渠道渗漏率比土渠要明显降低，渠系水利用系数满足有关的规划要求；工程结构在设计使用年限内保持较好的完整性；单位长度渠道的治理费用控制在合理的范围内。

方案制定时应遵守以下原则，即因地制宜，根据具体的渠段地质、水文、气候等条件来选择合适的防渗技术路线；分级处理，骨干渠道和田间渠道可以有不同的防渗标准和结构型式；过程管理，从前期勘察到施工验收各个环节都应有明确的技术要求和质量控制措施。

3.2 分级治理的基本思路

由于平原灌区渠系等级多、战线长，所以根据渠道在灌区中所起的作用可以采取不同的治理措施。

对干渠和重要的支渠由于输水量大、运行时间长，防渗标准可以适当提高，采用复合土工膜和现浇混凝土板的组合衬砌方式，伸缩缝处设可靠的止水构造。一般支渠、斗渠可以采用复合土工膜加预制混凝土板或者现场预制 U 形槽的形式，保证防渗效果的同时又控制了工程造价。对农渠以下的田间渠道，在条件允许的情况下可以采用土工膜简易防渗加渠床夯实的方式或者使用定型预制渠槽进行装配式衬砌。对于穿越特殊地段（村庄附近、交通路口等）的渠段，根据实际情况来评价管道化改造的可行性。

3.3 “诊断—选材—施工—监测”的基本框架

就方案的具体实施而言，本文认为应该建立一个包含四个主要环节的基本工作框架。

诊断环节就是治理开始之前，对渠道渗漏情况的调查和评价。静水法可以用于典型渠段的渗漏测定，即在封闭渠段内蓄水，观察水位下降速率，从而计算出渠道的渗漏强度。另外还要对渠床土壤性质、地下水位埋深、衬砌破损情况等进行调查，为方案设计提供基础数据。

在选材阶段，即根据诊断结果和渠道具体条件，选择合适的防渗材料和衬砌结构型式。材料选择要考虑防渗性、耐久性、施工方便性、经济性等各方面因素。

施工阶段就是按照设计要求和施工规范组织施工，对重要的工序进行质量检验和验收。施工过程中若出现地质条件与勘察结果不一致的情况，应及时反馈并修改设计方案。

监测环节就是治理工程结束之后，在相应的部位布设观测点，对渠道水位、渗流量、周边地下水位等进行定期观测，从而评价防渗效果并发现可能出现的后期隐患。监测数据也可以给今后类似的工程提供借鉴。

四个环节互相联系，前一环节的输出是后一环节的输入，同时监测结果可以对诊断和设计环节起到反馈作用，有利于经验的积累和方法的改进。

图 1 所示的工作框架重视各个环节之间的衔接以及信息传递，试图把渗漏治理由单项技术的使用转变成有一定系统性的工程管理过程。

图 1 平原灌区渠系渗漏治理工作流程示意

4 案例应用与效果分析

4.1 案例灌区基本情况

为了初步检验上述优化方案的可行性，选取我国南方某平原灌区一个典型的渠段进行应用分析。该灌区位于河流冲积平原上，渠系总长 1200km，灌溉面积 5.6 万 hm²，主要种植水稻。灌区属于亚热带季风气候区，多年平均气温 17.5℃，年均降水量约 1580mm，降水季节分配不均，灌溉对农业生产起到重要的保障作用。

该灌区自 20 世纪 60 年代建成之后，经过多次续建改造，部分骨干渠道已经实施了混凝土衬砌，但是仍然存在大量的支、斗渠道为土渠或者衬砌老化渠段。根据灌区管理单位提供的数据，在本次治理前，灌区干、支渠道的综合渗漏率估计为 25%～30%，渠系水利用系数约为 0.56～0.60。

4.2 治理方案实施情况

本文所提出的优化思路在灌区近年来的节水改造工程中被应用，对不同的渠道等级采用了不同的防渗措施。

具体来说，对一条长度约为 8.5km 的干渠进行复合土工膜和现浇 C20 混凝土板的复合衬砌，土工膜规格为两布一膜（≥300g/m²），混凝土板厚 12cm，板下铺 10cm 厚中细砂垫层。对两条总长约 15km 的支渠，采用复合土工膜和预制混凝土板衬砌。斗渠以下的渠道主要采用预制混凝土 U 形渠槽进行防渗改造。施工时对渠基压实度、土工膜焊接质量、混凝土养护条件等进行检验，各项指标基本符合设计要求。

4.3 治理前后主要指标对比

治理工程结束之后，灌区管理单位用静水法对治理渠段的渗漏状况展开复测。治理前后主要指标对比如表 2 所示。表中数据来自于灌区管理单位观测记录以及估算资料，各个指标值为多次观测的参考范围。

从表 2 可知，在采用复合衬砌防渗措施之后，渠道的综合渗漏率降低，渠系水利用系数提高。灌溉周期变短，亩均用水量呈下降趋势。需要说明的是，上述变化幅度是由许多因素共同作用造成的，防渗工程属于其中的一个重要因素。但是由于

观测周期还比较短，部分数据的长期代表性还需要进一步的验证。

表 2 某平原灌区典型渠段治理前后主要指标对比

指标名称	治理前	治理后	变化情况
渠道综合渗漏率（估算）	26.8%	2.1%~3.5%	有所降低
渠系水利用系数	0.58	0.73~0.76	有所提高
灌溉周期（天）	约 12~15	约 9~11	有所缩短
亩均灌溉用水量（m³/亩）	约 520	约 380~400	有所减少

5 结论与讨论

本文从平原灌区渠系渗漏原因分析入手，比较了常用防渗材料的主要性能，对复合土工膜与混凝土组合的复合衬砌方案进行了适用性分析，提出了一种包含诊断、选材、施工、监测四个环节的优化治理思路，用一个具体的灌区应用案例进行了初步的效果验证。从研究工作和案例分析可知，复合衬砌方案对于平原灌区来说是适用的，用分级治理思路和系统化的管理方法可以提高渠系防渗改造的效果。

与此同时，本文还存在着一些不足之处，在今后的研究中需要加以考虑。第一，渠道渗漏受土壤空间变异性影响较大，本文所采用的渗流计算方法为简化处理，对于非均质渠床条件下渗漏规律还需要做更细致的数值模拟及现场试验。第二，复合衬砌在冻融交替条件下长期耐久性，特别是土工膜和混凝土界面在温度应力作用下协同工作性能，还需要更长周期的观测数据来支撑。第三，由于不同的灌区地形、气候、土壤、水源条件等各方面的差别，本文所提出治理思路在推广到其他地区的时候，需要根据当地的实际情况做出相应的调整和论证。第四，本文所选取的案例数据是单个灌区的，观测时间较短，方案在其他类型的灌区中是否适用还需要更多的案例来证明。

本文所研究的优化治理思路对平原灌区节水改造中渠系防渗工程有参考意义，但是不能直接推广到所有的灌区。后续的研究可以在更长的时间跨度、更广的地域范围内搜集更多的实证数据，尝试把遥感监测、机器学习这些新的技术手段应用到渗漏检测和效果评定当中去，从而改善治理方案的科学性以及精细化程度。

参考文献

[1]王浩,杨贵羽,贾仰文,等.中国农业水资源利用效率评价与提升路径[J].水利学报,2022,53(1):1-13.

[2]李志华,张绍强.渠道防渗工程技术研究进展[J].灌溉排水学报,2021,40(5):1-9.

[3]陈永奇,王振龙.复合土工膜在渠道防渗工程中的应用研究[J].中国农村水利水电,2023(8):125-130.

[4]赵勇,裴源生.灌区渠系水利用系数测算方法及其影响因素分析[J].水利水电技术,2022,53(4):89-97.

[5]刘群昌,邢义川.渠道防渗抗冻胀设计理论与方法[M].北京:中国水利水电出版社,2020.

[6]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50600-2020 渠道防渗工程技术标准[S].北京:中国计划出版社,2020.

[7]吴普特,赵西宁.农业节水科技发展态势与前沿方向[J].农业工程学报,2023,39(12):1-12.

[8]水利部农村水利水电司.全国灌区续建配套与节水改造实施方案（2021-2025 年）[R].北京,2021.

作者简介：李树森（1970—），汉，男，本科，研究方向为农田水利工程。