

DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2024.03.029

宁夏豹子滩村地下径流暗涵截渗渍害治理技术研究

刘瑾亮¹, 刘学军², 杜斌², 焦炳忠², 王乐²

(1. 宁夏农垦勘测设计院, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏水利科学研究院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为了治理红寺堡区柳泉乡豹子滩村地下水位上升、房屋地基下沉、倒塌的问题, 采用水资源利用调查、水文地质勘查, 探明村庄地下水来源及其上升原因, 提出减少地下径流的节水灌溉方案和管井截渗、沟道截渗、暗涵截渗拦截地下径流控制方案。通过技术经济比较与地下水运动数值模拟分析, 确定暗涵截渗排水方案。结果表明: 暗涵截渗拦截地下径流治理方案的实施, 豹子滩村庄地下水位大幅度降低, 典型农户地下水埋深由治理前的0.3 m~0.8 m降低到2.5 m以下, 村庄渍害治理取得显著效果。说明地下径流暗涵截渗渍害治理技术在此类地区地下水的治理过程中是切实可行的。

关键词: 地下径流; 暗涵截渗; 地下水控制; 渍害治理

中图分类号: S277.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)03-0215-06

Treatment Technology of Underground Runoff Hidden Culvert Interception and Water Logging Damage in Baozitan Village, Liuquan Township, Hongsibao District, Ningxia

LIU Jinliang¹, LIU Xuejun², DU Bin², JIAO Bingzhong², WANG Le²

(1. Ningxia Agricultural Reclamation Survey and Design Institute, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

2. Ningxia Water Conservancy Research Institute, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: In order to address the issues of rising groundwater level, sinking of building foundations, and collapse in Leopard Beach Village, Liuquan Township, Hongsibao District, water resource utilization surveys and hydrogeological surveys were conducted to explore the sources and reasons for the rise of groundwater in the village. Both water saving irrigation schemes and control schemes for reducing groundwater runoff were proposed, including well interception, ditch interception, and hidden culvert interception. Through technical and economic comparison and numerical simulation analysis of groundwater movement, the scheme for intercepting seepage and drainage of underground culverts has been determined. The implementation of the hidden culvert seepage interception and underground runoff control plan has significantly reduced the groundwater level in Baozitan Village, and the groundwater depth of typical farmers has decreased from 0.3 m~0.8 m before the control to below 2.5 m. The village's waterlogging control has achieved significant results. The technology of underground runoff hidden culvert seepage control can provide reference for the treatment of groundwater in similar areas.

Keywords: underground runoff; hidden culvert interception; groundwater control; waterlogging treatment

宁夏红寺堡区柳泉乡位于宁夏中部干旱带大罗山北坡, 地势南高北低, 由东南向西北倾斜, 坡度为2%~0.67%, 海拔1 200 m~1 400 m, 主要由缓坡丘

陵、洪积扇、洪积平原及苦水河河谷平原组成。柳泉乡豹子滩村由西吉、彭阳县两县搬迁移民组成, 村庄位于大罗山北麓的洪积、冲积扇中下部, 耕地面积

收稿日期: 2024-01-21

修稿日期: 2024-03-15

基金项目: 国家重点研发部省联动项目“黄河上游河套平原灌区节水控盐产能提升技术典型模式示范”(2021YFD1900605-06)

作者简介: 刘瑾亮(1993—), 男, 工程师, 主要从事农田水利工程规划设计工作。E-mail: 563820140@qq.com

通讯作者: 刘学军(1965—), 男, 研究员, 主要从事节水灌溉与水利工程技术研究工作。E-mail: nx-lxj@163.com

600 hm²。经过近 20 年的灌溉,豹子滩村庄及耕地地下水位逐年上升,盐渍化耕地面积达到 260 hm²,约有 100 hm² 耕地已无法种植撂荒。豹子滩村西泉组 358 户居民房屋不同程度受到地下水、盐碱浸害,其中 231 户是重度浸害区、地下水埋深 0.8 m 左右,105 户受到严重浸害、个别农户高水位期地下水埋深 0.3 m 左右,56 户房屋裂缝、地基下沉,已经严重威胁居民生活安全,有 20 多户已弃房搬迁。红寺堡地区洪积扇的大面积开发灌溉,灌区无排水设施,导致地下水位上升,地下径流增加,是村庄出现渍害的主要原因。当地政府曾开展了暗管排水、沟道排水治理,由于黏性土排水不畅,收效甚微。国内对地下径流的截潜研究主要集中在水资源的高效利用^[1-2]以及开挖深沟大渠或盲沟阻挡地下径流的入侵^[3-5],对丘陵地区坡面地下径流造成的盐渍化及其渍害的治理研究较少^[6]。为此,针对红寺堡豹子滩村庄具体特点,开展地下径流控制技术研究,提出切实可行的治理方案,对解决渍害问题具有重要意义。

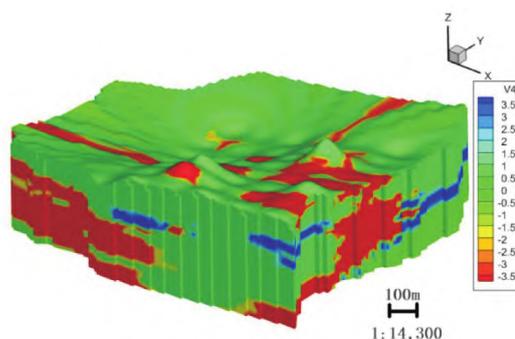
1 水文地质与地下水位上升原因

1.1 水文地质

水文地质勘察是分析地下水补给、地下水运动规律的基础^[7-8]。2022 年 8 月,对豹子滩村庄所在区域进行了水文地质勘察,勘察范围约 15 km²,布置 $\Phi 10$ cm、深度 10 m~15 m 地质钻孔 62 眼,进尺 639 m,重点对西泉组进行了勘察,西泉组南北长约 1 050 m、东西宽约 760 m。勘察区三维总体结构见图 1,勘察区地层结构为:第一层人工填土层,灰色,稍湿,松散,由黏性土、石英砂及少量碎石组成,属人工填土层。第二层细砂层,褐黄色,级配良好,砂质较均匀,岩芯呈散状,土壤通气透水性好,厚度 0.8 m~15.0 m。第三层粉质黏土,黄褐色,潮湿-饱和,土壤以黏粒为主,粉粒次之,土颗粒孔隙小,透水性弱,厚度 0.5 m~10.8 m。第四层细砂,青灰色,中密,稍湿,充填中砂、粗砂、细沙不等,粒径 5 mm~10 mm,最大 20 mm,含量约 55%,颗粒间空隙大,透水性强,厚度 1.4 m~3.0 m。豹子滩村三维水文地质结构见图 2。

豹子滩村庄属移民搬迁村庄,在开发前地下水埋深 8 m~12 m。随着灌区的开发,灌溉面积逐年扩大,灌区田间无排水设施,地下水位逐年上升。豹子滩村庄地下水补给主要来源于上游农田地下径流补给,村庄上游农田地下水主要来源于渠系渗漏补给、农田灌溉入渗补给、降水垂直渗入补给以及罗山

地下径流补给^[9]。地下水以 Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、Mg⁺ 为主,水化学类型均为 SO₄·Cl-Na·Mg·Ca 型。矿化度 2 g/L~3 g/L,属微咸水(弱矿化水)。中粉质壤土给水度 0.03~0.05,田间持水量 23%~25%,渗透系数 0.73 m/d~0.80 m/d,毛细管上升高度 1.3 m~1.6 m;重粉质壤土给水度 0.03,田间持水量 26%~28%,渗透系数 0.3 m/d~0.6 m/d。根据试验监测,现状每次灌水地下水位可升高 0.1 m 左右。罗山北侧、豹子滩村庄以南的红三干渠、盐兴公路、水套村、红塔村附近现状地下水埋深均大于 3 m,洪积扇下部的豹子滩村北部耕地地下水埋深在 1.5 m~3.0 m、大部分在 1.5 m~2.0 m,豹子滩西泉组村庄地下水埋深在 0.5 m~1.5 m,属区域地下水埋深最小区域。



勘察区三维数字模型总体结构图(正向北偏西 300°)

图 1 勘察区三维数字模型总体结构图(正向北偏西 300°)

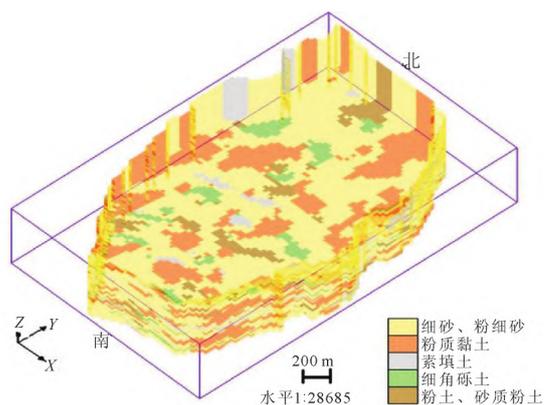


图 2 豹子滩村三维水文地质结构图

1.2 村庄地下水位上升原因

豹子滩村庄位于洪积扇中下部,地势南高北低,地面坡度在 8‰~11.8‰,村庄地面高程在 1 238 m~1 227 m,村庄所在地南北长约 1 km,高差 10 m 左右,地形坡度较大。根据水文地质勘探,0~2 m 土壤主要以壤土、重壤土、粉质黏土为主,2 m~15 m

在不同深度、不同位置,存在不连续、厚度不一的黏性弱透水层,渗透系数 $0.2\text{ m/d}\sim 5.0\text{ m/d}$,试验单井涌水量 $10\text{ m}^3/\text{d}$ 左右。项目区地下水由于特殊的土壤结构导致地下水纵、横向渗透性较差,渗透缓慢,排水不畅再叠加地下径流汇集等因素,导致该区域地下径流水位抬高^[10]、甚至地下水出漏,导致房屋渍害严重。地下水在强烈的蒸发作用下,排泄以垂直蒸发排泄为主,将土壤与灌溉带入的盐分集聚地表,形成较严重的土壤盐渍化。

2 地下径流控制技术方案

治理目标:村庄地下水抬升是地下径流汇集以及当地特殊的土壤结构导致的结果。要解决豹子滩西泉组村庄地下水渍害,必须控制村庄上游地下径流入,将地下水最小埋深控制在 2.5 m 以下^[11],在高水位期,在现状地下水埋深基础上降低 $1.5\text{ m}\sim 2.0\text{ m}$ 。

根据地下水的来源、地下水径流方向,降低村庄地下水位的根本措施是减少上游地下水补给,修建地下径流截渗工程,拦截地下径流,减少地下径流入村^[12-13]。

2.1 地下径流控制措施

2.1.1 方案一:高效节水灌溉方案

豹子滩村庄及其周边区域,包括红塔村、豹子滩村全部,水套村的部分区域,由天然沟道分割成一个独立的灌排系统,规划灌溉面积 $1\,220\text{ hm}^2$,实际灌溉面积 $1\,088\text{ hm}^2$,其中豹子滩村庄以南区域灌溉面积 695 hm^2 ,见图3。该区域现状灌溉方式全部为地面灌溉。为了减少地下径流,将该区域全面或者豹子滩村庄以南区域实施高效节水灌溉,可减少洪积扇上部灌溉区域地下水渗漏补给,减少洪积扇上部径流向下部的汇集,有效降低地下径流向豹子滩村庄的汇集,解决豹子滩村庄地下水位过高、村庄渍害问题。

2.1.2 方案二:机井或小管井截渗排水方案

在豹子滩村庄南边界,建设 $\Phi 30\text{ cm}$ 无砂混凝土排水管井或 $\Phi 5\text{ cm}$ PVC小管井1排,抽排拦截地下径流。根据水文地质勘查、土壤透水性、影响半径等,确定 $\Phi 30\text{ cm}$ 无砂混凝土排水管井深度 $10\text{ m}\sim 15\text{ m}$ 、间距 $10\text{ m}\sim 15\text{ m}$ 。村庄南边界 $1\,000\text{ m}$ 共打管井 $60\sim 100$ 眼,每眼机井配套小型潜水泵;或 $\Phi 5\text{ cm}$ PVC排水小管井 200 眼、水管井深度 10 m 、间距 5 m 。3~5眼小管径配套真空泵1台。实行 24 h 抽水排水,全年运行。

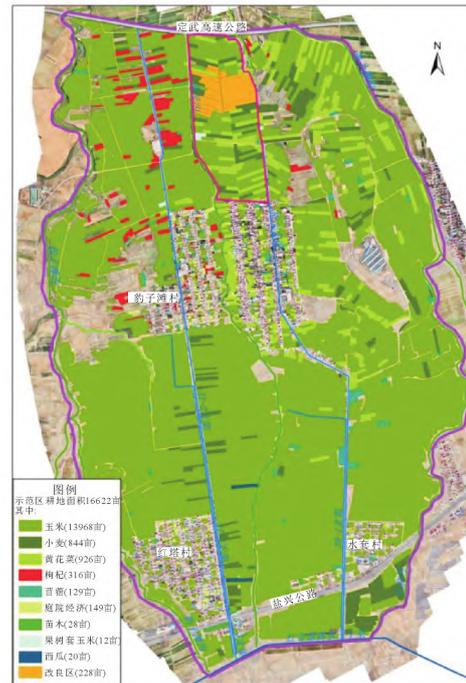


图3 豹子滩村庄及周边灌区分布图

2.1.3 方案三:沟道截渗排水方案

在豹子滩村庄南边界,建设截渗排水沟道,将村庄以南上游农田灌溉入渗形成的地下径流通过排水沟拦截,将排水沟拦截径流导入村庄西侧的天然排水沟道,减少地下径流入村,有效降低村庄地下水位。设计排水沟道平均深度 5 m 、边坡 $1:1.5$ 、沟道纵坡降 $1/1000$ 。

2.1.4 方案四:暗涵截渗排水方案

在豹子滩村庄南边界,建设截渗排水暗涵,将村庄以南上游农田灌溉入渗形成的地下径流通过排水暗涵拦截,排水暗涵拦截径流排入村庄西侧的天然排水沟道,减少地下径流入村,有效降低村庄地下水位。设计排水暗涵平均埋深 5 m 、暗涵直径 50 cm 、暗涵纵坡降 $1/800$,沟道或暗涵布置位置见图4。



图4 豹子滩村庄南部机井、截渗暗涵或排水沟道布置图

2.2 治理方案比选

2.2.1 工程建设投资

全面实施高效节水灌溉或豹子滩村庄以南实施高效节水灌溉,均需要实行规模化经营、集约化管理,实现统一种植、灌溉、施肥、管理、收获,才能保证高效节水灌溉的正常运行。目前,红寺堡柳泉乡豹子滩村、红塔村种植管理均为一家一户种植管理形式,土地流转困难,高效节水灌溉难以短期内实行。此外,高效节水灌溉工程建设投资在 3 万元/hm²左右,国家支持建设费用 60% 左右,地方政府、农户配套 40% 左右,高效节水灌溉需要每年更新毛管,增加费用在 2 250 元/hm²左右,减少水费 450 元/hm²左右,农民与地方政府都难以承受高效节水灌溉配套建设经费与运行管理增加的费用,因此农民接受高效节水灌溉的程度较差。虽然高效节水灌溉对降低地下水位、提高水资源利用效率最为明显,但现实情况下,近期建设高效节水灌溉工程的可能性不大,因此暂不考虑高效节水灌溉工程方案。机井截渗排水方案、沟道截渗排水方案、暗涵截渗排水方案,工程建设均无制约性障碍。机井截渗方案投资最小、沟道截渗方案次之、暗涵排水方案投资最高。

2.2.2 排水效果

项目区抽水试验表明,内径 $\Phi 30$ cm 无砂混凝土管井,成井深度 10 m,地下水埋深 0.8 m,配套 3 m³/h 机泵,下泵深度 9 m,抽水 4 min 井筒抽干,等待 45 min 后水位恢复。要实施机井每天 24 h 运行,管理强度较大,排水效果难以保证。因此从排水效果的可靠性比较,机井截渗排水可靠性较差,应该淘汰机井或小管井截渗排水方案。

根据区域地下水运动数值模拟结果:现状豹子滩西泉组村庄所在区域地下水补给量大于排泄量,平均地下水储量增加约 172 m³/d。而采用机井和沟道(暗涵)截渗排水方案,地下水排泄量均大于地下水补给量,地下水储量分别减少 250 m³/d 和 747 m³/d,沟道(暗涵)排水方案优于机井排水方案。

沟道截渗排水方案、暗涵截渗排水方案,工程一旦建成,管理工作相对较少,能长期保证连续排水,排水效果也较可靠,均能达到地下水埋深控制目标。根据沟道排水截渗、暗涵截渗排水方案,虽然设计的沟道、暗涵排水能力较大,但只有高于沟底或暗涵底板高程以上的地下径流能够拦截,暗涵或沟底以下的地下径流仍会进入村庄,但总体上可以极大的拦截上游高出沟底高程地下径流,达到村庄地下水位控制的目标。

2.2.3 工程运行维护费用

沟道截渗排水与暗涵截渗排水方案,都必须开挖排水沟,差别在于沟道排水是对开挖的沟道进行防塌坡治理并保留开挖的沟道用于明沟排水,永久占用耕地。而且,红寺堡区域沟道难以深挖、流沙严重,沟坡不稳定,另外需要每年清淤。沟道一旦淤积、塌坡,就会影响排水效果。暗涵排水方案需要首先开挖沟道、降水安装暗涵、然后回填沟道,排水暗涵长期处于地下。可见,暗涵排水工程的可靠性高于沟道截渗工程,暗涵工程运行维护费用最低。

经过不同治理方案技术经济比较,最终推荐应用暗涵截渗排水方案。

2.3 暗涵截渗排水方案设计

(1) 在豹子滩村庄南部、与地下径流垂直方向,布设排水截渗暗涵一条,设计排水暗涵长度 1 000 m。

(2) 根据村庄最小地下水埋深控制在 2.5 m ~ 3.0 m 防治土壤盐渍化要求^[14],设计截渗暗涵埋深 5 m,暗涵纵坡 1/800,暗涵底部铺设砂砾石垫层厚 0.2 m、宽度 1.0 m,在砂砾石垫层上安装排水暗涵,暗涵采用长度 6 m、内径 40 cm 无砂混凝土管,暗涵两侧及顶部外包级配砂砾石过滤料,厚度不小于 15 cm,暗涵下游垂直铺设防渗土工布^[15]。

(3) 暗涵属无压自由流,无砂混凝土管过水断面面积 0.1256 m²,管道坡度 $J = 1/800$,管道糙率 0.018,管道最大流速 0.423 m/s,最大流量 191 m³/h。

(4) 两节暗涵管道接口处采用焊接工艺。暗涵铺设完成后,分层回填土方,垂直防渗土工布随土方逐层回填延伸到地表以下 50 cm。暗涵沿线每 100 m 设置检查井 1 座。暗涵排水工程设计见图 5。

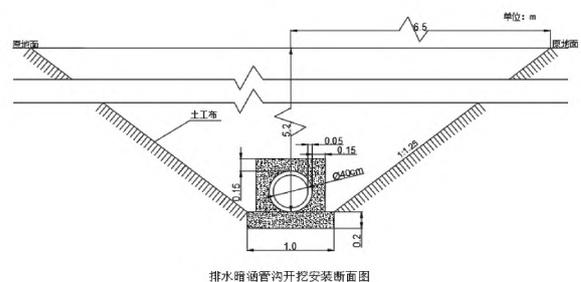


图 5 地下径流截渗暗涵管沟开挖横断面设计示意图

(5) 为了保证暗涵工程质量(埋深、坡度、接口、外包滤料厚度),要求暗涵的安装必须在干燥环

境下施工,因此需要建设施工降水井,推荐采用内径 $\Phi 30$ cm 无砂混凝土降水井,井深 10 m。暗涵排水导引到村庄西侧的天然排水沟道,高程满足自流排水要求。

3 豹子滩村庄治理工程建设效果

为了开展豹子滩村庄地下水的治理,结合水文地质勘查,2022年8月建设村庄地下水观测井,对地下水埋深变化进行跟踪观测,区域地下水埋深变化见图6。2022年12月,在水文地质勘查基础上,编制了《豹子滩村庄地下水、土壤盐渍化治理工程建设可行性研究报告》,2023年4月,正式建设施工,工程于2023年10月下旬完成,建设截渗暗涵760 m。村庄内典型观测孔地下水埋深变化见图7。

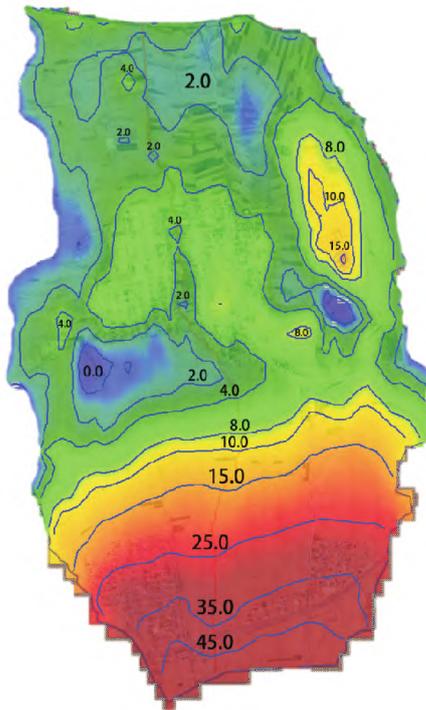


图6 勘探区地下水埋深等值线图

监测结果显示,截渗暗涵排水量达到 $50\text{ m}^3/\text{h} \sim 80\text{ m}^3/\text{h}$,村庄地下水位已开始大幅度下降,典型农户地下水位已下降 $1.5\text{ m} \sim 2.5\text{ m}$,豹子滩村庄的地下水渍害得到了根本治理,达到了预期效果。对暗涵排水水质监测,矿化度在 $3.32\text{ g}/\text{kg} \sim 2.8\text{ g}/\text{kg}$,排水水质逐步好转。根据红寺堡区水资源紧缺形势,规划在截渗暗涵排水出口建设 20 万 m^3 调蓄水池,年可拦蓄排水 50 万 m^3 以上,暗涵排水与黄河水掺灌,可一定程度缓解豹子滩村水资源紧张局面。

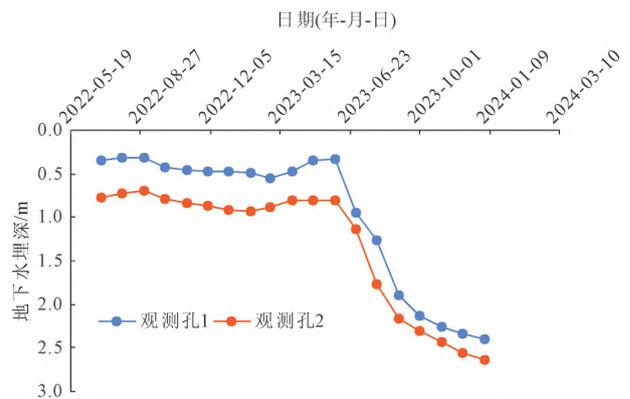


图7 红寺堡豹子滩村庄地治理前后地下水埋深变化图

4 结论

(1) 本文针对宁夏红寺堡扬黄灌区的豹子滩村庄地下水位上升、渍害严重问题,开展水文地质勘查、水资源利用调查分析,查明了豹子滩村庄所在区域土壤结构,黏土、粉质壤土、砂壤土交替叠加。在灌区灌溉后,地下径流向下游集聚,豹子滩村庄所在区域地下水排泄不畅,地下水位上升甚至出漏地表,造成渍害和土壤盐渍化。

(2) 经技术经济比较,提出截渗暗涵拦截,减少地下径流的技术措施。工程的实施,村庄渍害得到全面治理。

(3) 宁夏扬黄灌区多属新开发灌区,由于地形坡度较大,无排水设施,近年来同心县、红寺堡区等都已出现地下水上升、居民房屋受到地下水浸害和大量耕地盐渍化问题,截渗暗涵技术在红寺堡的成功应用,可为同类问题的治理提供指导与借鉴。

参考文献:

- [1] 赵景洲. 截潜流工程的调查分析与预测[J]. 吉林水利, 1995(11): 13-14.
- [2] 陈维杰, 姚宜洛. 地下蓄水工程——截潜流[J]. 河南水利与南水北调, 2007(2): 37-38.
- [3] 陈宝玲. 论黄河三角洲排盐截渗工程建设[J]. 山东水利, 2006(9): 25-27.
- [4] 张惠萍, 韩墩总干截渗沟综合治理探讨[J]. 山东水利, 2013(5): 33-38.
- [5] 郭春艳, 黄永存, 于峰. 盲沟排水在地下室抗浮设计中的应用[J]. 建筑技术研究, 2013(4): 44-47.
- [6] 桂林国, 黄建成, 王天宁. 扬黄灌区次生盐渍型盐碱地改良利用的技术对策[J]. 宁夏农林科技, 2010(3): 55.
- [7] 陈建斌. 宁夏红寺堡扬黄灌区盐碱地成因及治理措施分析[J]. 南方农业, 2023(8): 104-106.

- [8] 贾壮壮, 谭亚男, 管孝艳, 等. 宁夏盐碱地成因及分区治理措施综述[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 122-130.
- [9] 刘学军, 杜斌, 焦炳忠, 等. 红寺堡柳泉乡豹子滩村庄地下水、土壤盐渍化治理工程建设可行性研究报告[R]. 银川: 宁夏水利科学研究院, 2022.
- [10] 马永辉, 刘娟. 宁夏引黄灌区盐碱地治理措施研究进展[J]. 农业与技术, 2023, 43(16): 56-59.
- [11] 沈景文. 地下水与生态环境[J]. 干旱环境监测, 1990(6): 107-110.
- [12] 刘学军, 刘平, 蒋正文. 宁夏扬黄灌区土壤盐渍化防治对策[J]. 宁夏农林科技, 2018(9): 54-58.
- [13] 韩顺理. 河西走廊盐碱地的防治与改良[J]. 水利水电技术, 1990, 4(9): 43-45.
- [14] 盛乔华, 盛金昌, 高鹏, 等. 平原水库浸没地下水临界埋深分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 80-83.
- [15] 赵荣昌, 王春磊. GIS 支持下的西北干旱区地下侧向径流量的计算研究[J]. 甘肃地质, 2019, 28(Z1): 85-89.

(上接第 188 页)

- [17] 丁兆洋, 边洪广, 董凤新. 氧化物组成对地聚物再生骨料混凝土尺寸效应的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 324-330.
- [18] 丁兆洋, 周静海, 苏群. 再生骨料取代率对地聚物混凝土尺寸效应的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 709-715.
- [19] 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [20] 再生混凝土结构技术标准: JGJ/T 443—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [21] Li Biao, Yu Shiting, Gao Benhao, et al. Effect of recycled aggregate and steel fiber contents on the mechanical properties and sustainability aspects of alkali-activated slag-based concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105939.
- [22] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [23] Li Biao, Wu Feng, Xia Dongtao, et al. Compressive and flexural behavior of alkali-activated slag-based concrete: Effect of recycled aggregate content [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 67: 105993.