

## 旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位-水量”双控技术

刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 刘少玉, 聂振龙

### Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas

LIU Pengfei, ZHANG Guanghui, CUI Shangjin, LIU Shaoyu, and NIE Zhenlong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202054>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24

#### 荒漠-湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性

Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China

魏玉涛, 刘德玉, 张伟, 喻生波, 吴耀坤 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 183-190

#### 水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table

潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154-163

#### 永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

#### 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系

Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin

曹乐, 聂振龙, 刘敏, 卢辉雄, 汪丽芳 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 25-33

#### 柴达木盆地生态植被的地下水阈值

Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin

党学亚, 卢娜, 顾小凡, 金晓媚 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 1-1



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202054

刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 等. 旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位-水量”双控技术 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 42-51.

LIU Pengfei, ZHANG Guanghui, CUI Shangjin, *et al.* Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 42-51.

# 旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与 “水位-水量”双控技术

刘鹏飞<sup>1,2,3</sup>, 张光辉<sup>1,3</sup>, 崔尚进<sup>1,3</sup>, 刘少玉<sup>1,3</sup>, 聂振龙<sup>1,3</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061)

**摘要:** 西北旱区湿地周边农田易盐渍化, 合理实时控制和降低地下水水位是实现湿地保护及其周边农田盐渍化防控“双赢”的有效途径。选取西北石羊河流域邓马营湖湿地与农田之间过渡带为示范研究区, 通过分析地下水埋深变化特征及其与表层土壤盐分的协同关系, 确定生态水位阈值, 并基于该阈值研发了由虹吸辐射井群为支撑的地下水“水位-水量”智能双控技术, 其关键点是: 采用一井虹吸联通多个辐射井, 用于增大弱透水层区单井涌水量, 实现水位面状控制; 利用电系统、信号系统和控制器集成智能控制子系统, 实现地下水水位和水量的实时控制。该技术示范应用结果表明: 随地下水埋深增大, 农田盐渍化风险和湿地植被芦苇覆盖率均降低, 农田盐渍化防控和湿地保护的地下水埋深阈值为 1.9~3.0 m; 每年 7—8 月的潜水蒸发阶段是表层土壤主要积盐时段, 期间智能双控系统可将地下水埋深调控在水位阈限范围; 该双控作用不仅能够控降灌溉引起的表层土壤电导率的增大幅度, 而且还能有效降低表层土壤的积盐速率; 相对微咸水, 淡水灌溉条件下智能双控技术的淋盐和控盐效果更明显。因此, 这项技术能够实现地下水水位精准调控, 对旱区湿地保护及其周边农田盐渍化防控具有重要的现实意义。

**关键词:** 旱区; 湿地周边农田; 生态水位; 水位-水量双控; 淋盐效率; 积盐速率

中图分类号: P641;X173

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0042-10

## Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas

LIU Pengfei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Guanghui<sup>1,3</sup>, CUI Shangjin<sup>1,3</sup>, LIU Shaoyu<sup>1,3</sup>, NIE Zhenlong<sup>1,3</sup>

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*)

**Abstract:** The farmland around wetland in the arid areas in northwest China is easily salinized. Reasonably controlling and reducing groundwater levels in real time is an effective way of protecting wetland and preventing

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-03-18

投稿网址: [www.swdggcdz.com](http://www.swdggcdz.com)

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0406100); 河北省青年科学基金项目(D2021504040); 中国地质调查局基本科研业务费项目(SK202215); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221752)

第一作者: 刘鹏飞(1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事干旱区土壤水盐调控理论与关键技术研究。E-mail: [liupengfei0701@163.com](mailto:liupengfei0701@163.com)

通讯作者: 张光辉(1959-), 男, 二级研究员, 博士生导师, 长期从事水循环演化与水土资源合理开发利用研究。E-mail: [Huanjing59@163.com](mailto:Huanjing59@163.com)

and controlling farmland salinization. The typical demonstration zone is selected in the transitional zone of wetland and farmland near the Dengmaying Lake of the Shiyang River Basin in the arid area. The dynamic characteristics of groundwater depth and the synergic relationship between groundwater depth and salt content of topsoil are analyzed. The threshold value of the ecological water table is confirmed. The Intelligentized dual control technology of water table and its quantity is developed, which is based on groups of radial wells connected by siphons. The key points of the technology are as follows: one well collecting many radial wells by siphons is used for increasing the water yield of the well in the aquitard and contributing to control the water level in the form of a plane. The subsystem consisting of the electricity system, signal system and controllers is used to control the groundwater level and water yield in real time. Demonstration test of the key technology application is carried out and the application effect is remarkable. The results show that when the groundwater depth increases, the risk of salinization and bulrush coverage fraction in wetland decreases. The threshold value of groundwater depth for protecting wetland and preventing and controlling farmland salinization ranges from 1.9 to 3.0 m. The intelligentized regulatory system could make the groundwater depth stay in the suitable ecological range in the stage of evaporation from phreatic water in July and August of each year, when is the critical period of topsoil salification. The regulation not only can decrease the increasing amplitude of soil conductivity caused by irrigation, but also reduce the speed of topsoil salification. The effect of dissolving and controlling salt by the dual control technology of water table and its quantity is more obvious under the condition of fresh water irrigation than under the condition of brackish water. The technology can help realize the accurate regulation and control of groundwater level and it is of realistic significance for wetland protection and preventing and controlling farmland salinization in arid areas.

**Keywords:** arid area; farmland around wetland; ecological water table; dual control of water table and its quantity; eluting salt efficiency; salification speed

随着国家实施西部生态保护战略, 逐步落实“退耕还湿”及地下水压采等政策, 西北内陆流域下游输水量增大, 湿地水面面积不断扩大, 周边农田盐渍化风险加剧<sup>[1-3]</sup>。然而, 农田保护事关西北粮食安全, 随着人口增多, 按照全面富裕标准, 西北地区耕地压力达到预警状态<sup>[4]</sup>。实施地下水水位调控是实现湿地保护与农田盐渍化防控“双赢”的有效途径<sup>[5-7]</sup>。在西北内陆流域下游湿地与农田交界带, 适宜的地下水水位既要保证农田区表层土壤含盐量小于作物耐盐阈值(如玉米为 3.46 g/kg, 葵花为 5.0 g/kg), 又要保证湿地生态安全<sup>[8-11]</sup>。

西北内陆流域下游区含水层岩性以粉细砂为主, 渗透性差, 释水缓慢, 同时地下水水位易受灌溉、蒸发及侧向补给等因素影响, 实现水位的实时控制极具难度。在弱透水层区, 当前国内外采用的取(排)水方式主要有竖井、沟渠、暗管、水平井、大口井、辐射井、连通井等<sup>[12-13]</sup>, 如傍河取水中为增大辐射井的取(排)水量, 许多学者<sup>[14-16]</sup>在辐射井距河床距离、井结构参数及堵塞机理等方面开展了研究, Banerjee<sup>[17]</sup>基于含水层给水度和渗透系数布设辐射井, 并对取水量进行了验证。陕西省富平县卤泊滩、宁夏银南灌区和河

套灌区在盐渍化治理过程中均采用了沟渠排水方式<sup>[18-19]</sup>。刘少玉等<sup>[20]</sup>在华北平原东部浅部弱渗透层地区成功建立了“抽咸换淡辐射井”、“虹吸连通增采井”等不同类型示范工程, 取得了特定条件下低成本开采浅层微咸水的有效途径。

国内外学者研发的地下水集采和排水技术, 在一定程度上实现了弱透水层区地下水埋深与水量控制, 但研究多关注如何增大取(排)水量, 对如何实现持续取(排)水及一定范围和时段内地下水水位的实时控制和降低的相关研究不足, 尤其关于“水位-水量”双控技术及应用的研究成果较少。本研究以石羊河流域邓马营湖浅埋区为研究区, 在分析地下水埋深动态及其与表层土壤盐分协同变化关系基础上, 确定生态水位阈值, 研发基于虹吸-辐射井群的地下水“水位-水量”智能双控技术, 并开展应用研究, 其成果对西北内陆流域下游湿地生态保护及其周边农田盐渍化防控具有重要的现实意义。

## 1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠邓马营湖盐渍化农田与自然植被交界带, 属石羊河流域平原区。在 20 世纪

80 年代大规模开发前为湖泊湿地。区域属温带干旱沙漠气候类型, 多年平均气温、降水量和蒸发量分别为 9.4 °C、123.6 mm 和 2 063.5 mm。农作物以玉米、食葵为主, 生长期耐盐阈值分别为 3.56, 5.00 g/kg, 天然植被以芦苇为主。

示范区包气带地层以冲湖积沉积物为主, 岩性以亚砂土、亚黏土为主, 支持毛细水上升高度为 1.7 m。按埋藏条件可分为浅层、中层和深层水含水层组。浅层水位埋深 1.5 m, 含水层岩性以粉细砂为主, 底界埋深 7 m, 与下伏中层水之间有 2 m 厚黏土层, 两者水力联系弱。中层水岩性以中细砂与中粗砂为主, 厚度近 100 m。深层水赋存于第四系中下更新统粉细砂透镜体与底部砾砂层中, 透镜体颗粒细且微胶结、密实, 底部砾砂泥质含量高, 厚度小, 透水性和含水性差, 具弱承压性。在强烈蒸发作用下, 浅层水咸化、土壤盐渍化严重, 农田、交界带、湿地的地下水中溶解性总固体含量分别为 7.63, 8.34, 13.2 g/L。

在每年作物生长期(4月中旬至9月初), 农田非调控区潜水水位受灌溉影响呈逐渐上升趋势(图 1), 其中 7—8 月, 潜水埋深处于 1.5 m 左右, 盐渍化风险较高。示范区同期(7月初为例), 自农田至自然植被区潜水埋深从 1.3 m 增大至 1.6 m(图 2)。

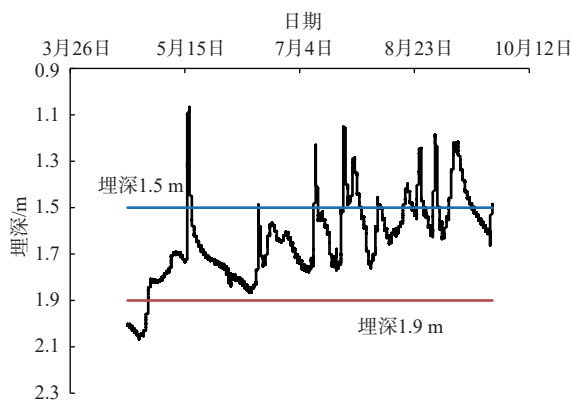


图 1 农田非调控区地下水埋深变化特征 (G20 监测孔)

Fig. 1 Dynamics of groundwater depth in the unregulation area of farmland

## 2 示范区地下水生态水位阈值

### 2.1 阈值上限

采集示范区周边自然植被区与农田区包气带结构相似、不同地下水埋深条件下的不同深度土样, 进行易溶盐测试分析。在不受调控和灌溉影响的自然植被区, 随着潜水埋深增大, 表层土壤含盐量呈减少趋势(图 3)。当潜水埋深( $h$ )分别为  $1.0\text{ m} \leq h < 1.5\text{ m}$ ,

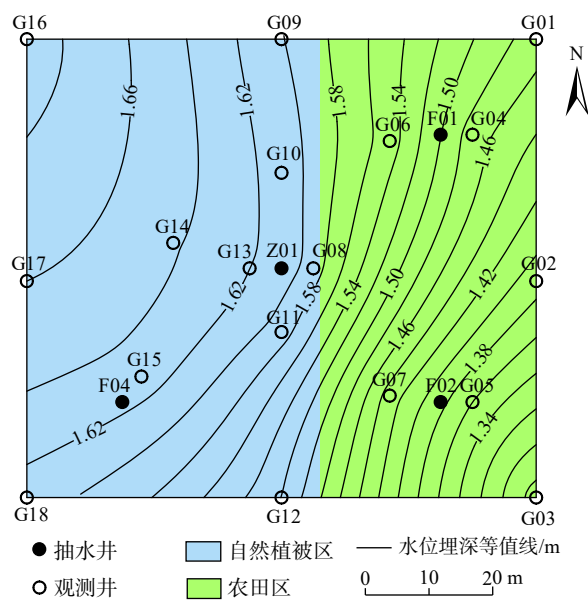


图 2 7 月初地下水埋深等值线及监测孔分布位置

Fig. 2 Contour lines of groundwater depth and monitoring wells distribution in July

$1.5\text{ m} \leq h < 1.9\text{ m}$ ,  $1.9\text{ m} \leq h < 3.5\text{ m}$  时, 相应阶段潜水位埋深每增大 10 cm 表层土壤含盐量分别减少 26.209, 2.433, 0.446 g/kg。

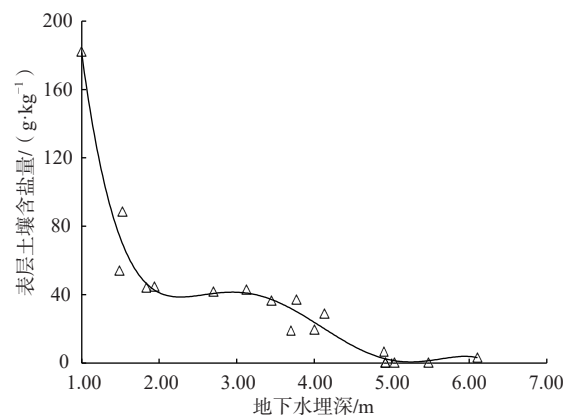


图 3 自然植被区表层土壤盐分与地下水埋深协同变化关系

Fig. 3 Synergic relationship of groundwater depth and topsoil salt content in natural vegetation area

综上所述可知, 当潜水埋深为 1.0, 1.5, 1.9 m 时, 对应表层土壤含盐量分别为 182.4, 52.3, 45.5 g/kg。从盐渍化风险程度和表层土壤盐分调控效率考虑, 随着潜水埋深逐渐增大, 土壤盐渍化风险逐渐降低, 表层土壤积盐速率对潜水埋深变化响应越来越慢, 调控效率越来越低, 其中潜水埋深 1.5 m 和 1.9 m 是重要的分界点。

灌溉条件下, 农田区表层土壤经历淋盐和积盐的复杂交替过程, 相对自然植被区表层土壤含盐量有一



定程度降低。在潜水埋深 1.5~1.9 m 时,由浅至深包气带含盐量先增大、后减小,最后趋于稳定;在潜水埋深 1.5 m 时,15 cm 深度以内土壤含盐量小于 5 g/kg,20 cm 深度处含盐量最高,65 cm 深度以下含盐量变化较小;在潜水埋深 1.9 m 时,30 cm 深度以内土壤含盐量小于 5 g/kg,60 cm 深度处含盐量最高,105 cm 深度以下含盐量变化较小(图 4)。在潜水埋深 1.5 m 时包气带剖面中 1.0 m 深度以下的土壤含盐量,小于潜水埋深 1.9 m 时包气带剖面中相同深度的土壤含盐量。这是由于 2 个剖面中 1.0 m 深度以下均为支持毛细饱水带,其含盐量主要受地下水溶解性总固体含量大小控制,埋深 1.5 m 剖面位于上游,地下水溶解性总固体含量较小。由此可见,灌溉条件下,潜水埋深由 1.5 m 增大至 1.9 m,积盐带从 20 cm 深度下移至 60 cm 深度,明显控降了作物(葵花)生长的表层土壤含盐量。

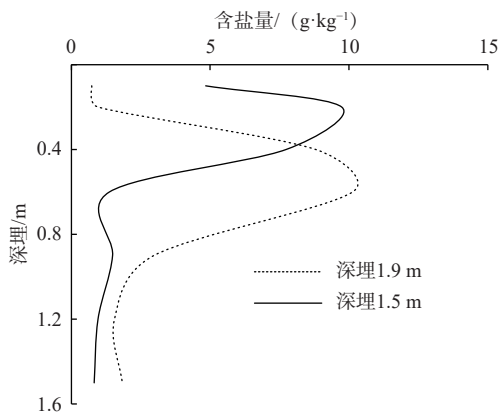


图 4 农田区不同潜水埋深下包气带剖面含盐量

Fig. 4 Salt content of the aeration profile at different phreatic groundwater depths in farmland

潜水埋深是影响表层土壤积盐速率的关键因素<sup>[21]</sup>,因为它决定着潜水通过支持毛细作用向表层土壤输供水盐量多少的能力。综合考虑不同地下水埋深下盐渍化风险程度和灌溉条件下表层土壤积盐规律,确定灌溉期农田盐渍化防控生态水位埋深上限为 1.9 m;对照地下水埋深动态特征,确定示范区 7 月初至 8 月底地下水高水时期(埋深约 1.5 m)为盐渍化防控关键期。

## 2.2 阈值下限

示范区自然植被以湿地植被芦苇为主,地下水是其生长的主要水分来源<sup>[22]</sup>。根据相关研究<sup>[23-27]</sup>,西北内陆流域下游芦苇适宜生态水位埋深小于 3.0 m(表 1)。通过示范区周边不同潜水埋深下植被类型的调查,结果表明潜水埋深大于 3.0 m 的区域内几乎无芦苇存在(表 2),由此确定示范区湿地保护的生态水

位埋深下限为 3.0 m。

表 1 旱区湿地芦苇适宜生态水位埋深

Table 1 Suitable ecological groundwater depth of the wetland bulrush in arid areas

地区	疏勒河流域	塔里木河下游	黑河流域下游	石羊河下游
水位埋深/m	1.0~3.0	1.0~3.0	<3.0	2.91

表 2 示范区周边不同水位埋深下主要植被类型

Table 2 Key vegetational forms in diverse groundwater depths around the demonstration area

水位埋深/m	0.5~2.2	2.2~3.0	3.0~5.0
植被类型	芦苇	芦苇、盐爪爪	盐爪爪、骆驼刺

## 3 基于虹吸辐射井群的“水位-水量”智能双控技术

### 3.1 虹吸辐射井群地下水集采技术子系统

虹吸辐射井群集采技术通过一井虹吸联通多个辐射井(图 5),能够增大弱含水层中单井出水量,实现地下水水位由点到线到面的控制,避免产生大范围漏斗。该系统主要由主抽水井(简称主井)、辐射井、虹吸管、排气孔、排气阀等组成。

主井位于示范区中心,辐射井在主井周边位于地下水流场上游;各辐射井与主井间均用虹吸管单独连接,虹吸管两端距主井和辐射井底部均为 50 cm,两井间虹吸管中间高两侧低,排气孔在中间最高处,便于高效排气和停用后自动排水。各辐射井含辐射管 2~3 根,辐射管长 4 m,埋深 4 m,各井参数见表 3。

### 3.2 地下水“水位-水量”智能双控技术子系统

该系统中主井通过井内高、中、低 3 根信号线对潜水泵的控制实现“水位-水量”的控制,见图 5(b)。各辐射井通过井内高、中、低 3 根信号线对各虹吸管路上电动球阀的控制实现“水位-水量”的控制。运行过程如下:

(1)依次打开各虹吸管上的排气阀门使用真空泵进行排气,等各管路充满水时及时关闭排气阀门,然后打开信号控制器。

(2)打开主井潜水泵,随着抽水进行,主井内水位低于各辐射井内水位,在虹吸作用下各辐射井内水沿虹吸管流入主井。当主井水位下降至中间信号线端点时,潜水泵电源自动切断,抽水停止;当水位恢复至高处信号线端点时,潜水泵电源自动接通,抽水开始。当各辐射井内水位降落至中间信号线端点时,虹吸管路上的电动球阀自动关闭,辐射井抽水停止;水

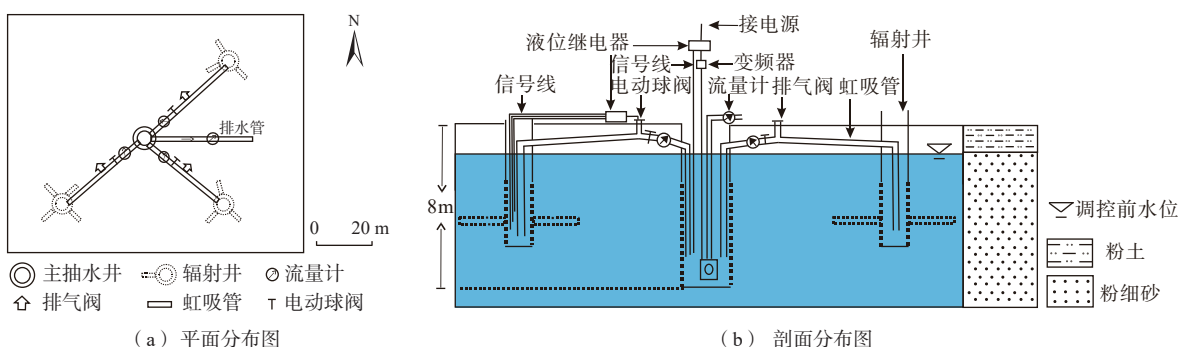


图 5 基于虹吸辐射井群的“水位-水量”双控技术系统

Fig. 5 System of the double control technology of water table and quantity based on radical wells connected by siphons

表 3 主井和辐射井主要参数

Table 3 Key parameters of the main pumping and radical wells

井类型	数量/口	深度/m	井管内径/cm	滤水管埋深/m
主井	1	8	50.0	2~8
辐射井	3	6	31.5	2~6

位恢复至高处信号线端点时,电动球阀自动打开,辐射井抽水开始。如此循环进行。

(3)当地下水补排条件发生变化时,系统能够自动识别该变化,自动调整抽水频率,实现抽水量大小的调整。

由此可看出,“水位-水量”双控技术利用电系统、信号系统和控制器,在节约人力物力条件下实现了地下水水位和水量的智能协同双控。根据设定水位目标,调控系统能够识别地下水补排条件变化并及时调整抽水量大小,从而保证地下水水位维持在合理的生态水位区间。同时各辐射井以间歇大流量方式抽水,可阶段性将虹吸管内积累的气体排出,保证了虹吸抽水的稳定性。

#### 4 “水位-水量”双控技术示范应用方案

##### 4.1 示范运行方案

示范区布设有水位调控淡水灌区、水位调控微咸水灌区、非水位调控淡水灌区、非水位调控微咸水灌区、水位调控天然植被区和水质水量调蓄区(图 6)。灌溉淡水源的溶解性总固体为 0.6 g/L,灌溉微咸水源的溶解性总固体为 3.0 g/L。灌区种植作物为玉米和葵花,在作物生长期(4—9月)每次灌溉量为 900~1 050 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,葵花共计灌溉 6 次,总灌溉量为 6 450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;玉米灌溉 7 次,总灌溉量为 7 350 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。本次研究中,重点以葵花生长耐盐阈值为基础进行分析。结合示范区生态水位阈值及各井参数,运行前设定主井和各辐射井水位调控区间,在 2020 年 7—8 月作物生长

关键期,进行了持续 61 d 的调控和灌溉试验。

##### 4.2 数据获取

示范试验运行过程中,数据的监测和采集由一体化多要素自动监测系统完成,该系统具有多要素、高频率、高密度、可视化和自动化的特点,监测对象、监测指标、设备及监测频率见表 4,监测点分布见图 6。

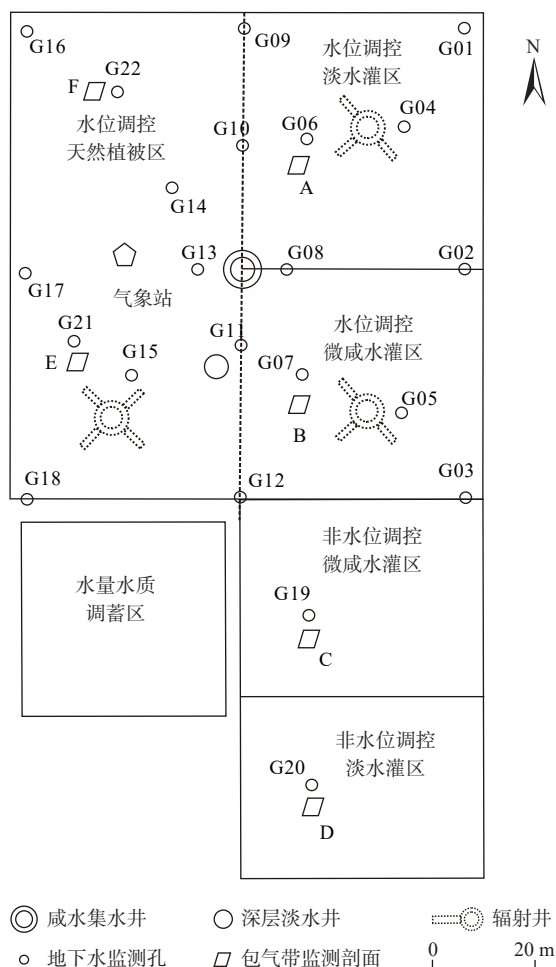


图 6 示范区功能分区及监测点分布  
Fig. 6 Function division and monitoring points distribution in the demonstration zone

## 5 结果与分析

### 5.1 地下水埋深动态

距边界和抽水井较远的监测孔水位埋深代表了示范区大部分区域潜水埋深状况, 作物生长期调控区和非调控区代表性监测孔(G06 和 G20)水位埋深动态见图 7, 可看出 2020 年非调控期内(4月中旬至 6月底), 两区内地下水埋深变化特征相同: 每次灌后水位埋深迅速减小, 然后缓慢增大; 随着灌溉频率增大, 地

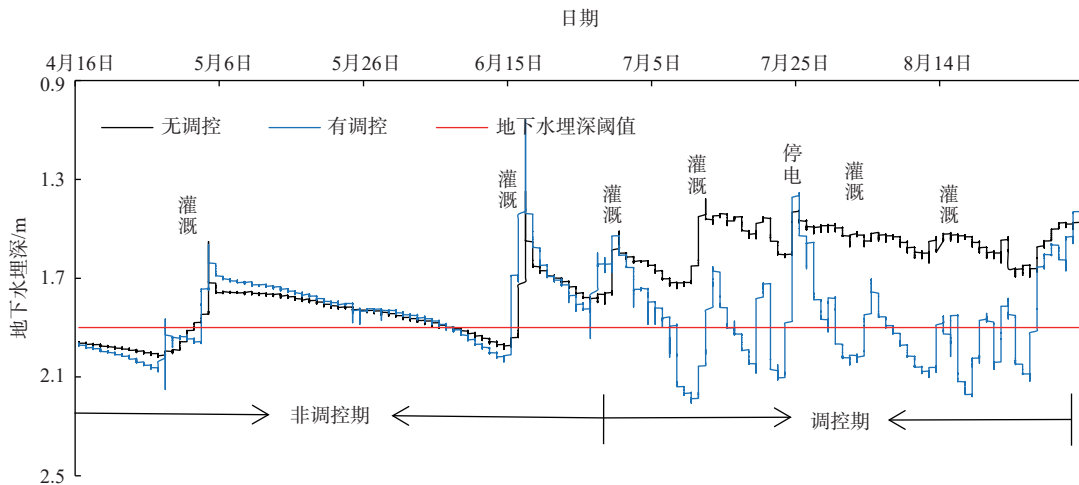


图 7 调控区与非调控区地下水埋深动态变化 (G06、G20 监测孔)

Fig. 7 Dynamic changes of groundwater depths in the regulation and un-regulation zones

调控期内(7—8月), 非调控区地下水水位依然呈阶梯状缓慢上升, 升幅逐渐减小, 7月中旬后地下水埋深稳定在 1.5 m 左右, 土壤积盐速率快, 盐渍化风险高。在调控区, 虽然每次灌溉后水位呈现一定程度上升, 但在“水位-水量”双控作用下, 地下水水位迅速下降, 至 8月底(葵花收获期)水位埋深总体维持在 1.9 m 左右, 表层土壤积盐速率较小, 盐渍化风险较低。由此说明“水位-水量”双控系统能够有效降低地下水向表层土壤输送水盐量和潜水蒸发量。

### 5.2 地下水埋深分布对比

一个灌溉周期内包气带水分运移经历灌溉水入渗对地下水的补给和地下水通过支持毛细水上升到地表附近后蒸发到大气的过程。表层土壤积盐主要发生在潜水蒸发阶段, 期间地下水埋深是土壤积盐速率的关键影响因素, 该阶段初期的地下水埋深空间分布特征是验证双控作用是否有效的关键时间点。根据相关研究<sup>[27]</sup>, 在地下水浅埋区, 灌溉入渗影响一般在灌后 8~10 d 结束, 潜水蒸发阶段初期(灌后 8 d)地下水埋深空间分布见图 8, 依据 7月初非调控区地下

表 4 示范区主要监测指标

Table 4 Main monitoring indicators in the demonstration zone

监测对象	气象	包气带	地下水
监测指标	温度、雨量、风向、风速等	温度、含水率和电导率	水位、水温和电导率
监测设备	HOBO气象站	5TE、MPS-6传感器	地下水三参数监测仪
设备数量	1台	4组	20台
监测频率		每30 min监测1次	

下水埋深整体呈阶梯减小趋势, 该时期地下水埋深维持在 1.9 m 左右, 盐渍化风险低。

水埋深等值线分布(图 2), 将农田区至自然植被区分为上游、中游和下游, 双控作用下上游区受侧向补给影响, 地下水埋深在 1.8 m 左右, 中游井群分布区地下水埋深为 1.9~2.2 m, 下游区受双控作用影响侧向补给量减少, 地下水埋深在 2.1 m 左右。由此, 验证了“水位-水量”双控系统能够将一定区域范围内地下水埋深调控至适宜生态水位埋深区间, 实现农田盐渍化防控和湿地保护的双赢。

### 5.3 包气带盐分分布特征对比

灌溉水入渗过程中首先溶解表层土壤盐分, 然后携带盐分向下运移, 为查明“水位-水量”双控作用对入渗初期灌溉水淋盐和入渗中后期表层土壤积盐速率的影响, 需对比分析调控区和非调控区灌后入渗初期(1 d)、入渗后期(8 d)包气带盐分垂向分布特征。

#### 5.3.1 淡水灌溉

相对灌溉前, 从图 9(a)可看出灌溉后 1 d 调控区浅层电导率增幅大于深层, 40 cm 深度以内增幅大于 10%, 40 cm 深度以下增幅小于 6%; 从图 9(c)可看出, 非调控区不同深度电导率增幅明显大于调控区, 为

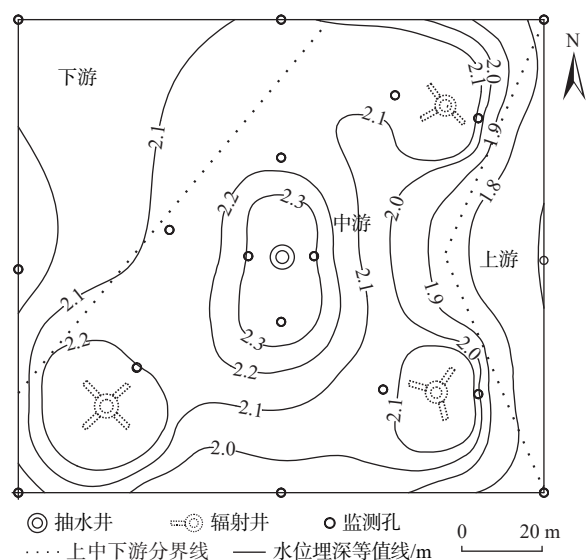


图 8 灌后 8 d 地下水埋深等值线

Fig. 8 Contour lines of groundwater depths 8 days after irrigation

20% ~ 50%。这是由于灌溉初期灌溉水溶解表层土壤盐分并携带盐分入渗,包气带电导率增大,调控区在双控作用下地下水埋深及支持毛细水埋深增大,表层土壤含水率相对较低,灌溉水在毛细力和重力作用下

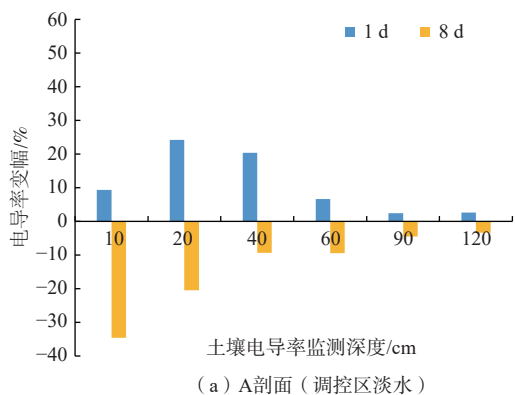
携带盐分入渗速率快,包气带电导率增幅较小;非调控区,地下水埋深和支持毛细水埋深小,表层土壤含水率相对较高,灌溉水协盐只在重力作用下缓慢入渗,包气带电导率增幅较大。

灌溉后 8 d 调控区不同深度电导率均降低,浅层降幅大于深部;非调控区电导率呈现浅层(40 cm 以内)基本不变,中层(40 ~ 80 cm)降低,深层(105 ~ 135 cm)增大的特点。这是由于灌溉水淋盐入渗过程中,表层土壤蒸发同时进行,缓慢积盐,相对非调控区,调控区在双控作用下灌溉水入渗快,表层土壤含水率相对较低,蒸发和积盐速率较慢。

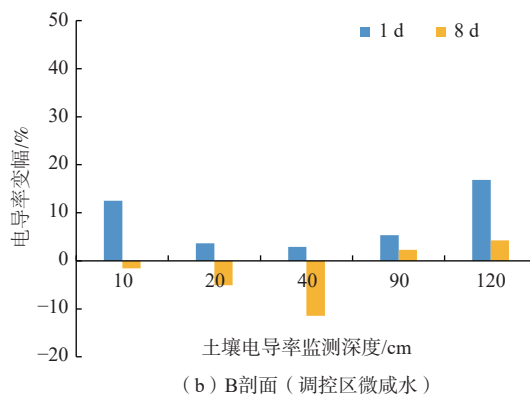
综上分析,得出“水位-水量”双控作用不仅能降低灌溉水溶盐导致的电导率增大幅度,而且还有助于降低灌溉水入渗过程中表层土壤的积盐速率。

### 5.3.2 微咸水灌溉

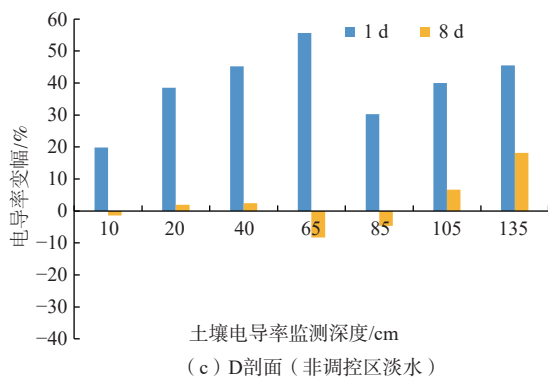
微咸水灌溉条件下,相对灌溉前,从图 9(b)(d)可看出灌后 1 d 调控区与非调控区各层电导率均呈现不同程度增大,调控区 10 cm 深度处电导率增幅大于 10%, 20 ~ 90 cm 深度增幅小于 5%, 90 ~ 120 cm 深度电导率增幅大于 10%, 非调控区各层电导率增幅 15% ~ 45%,



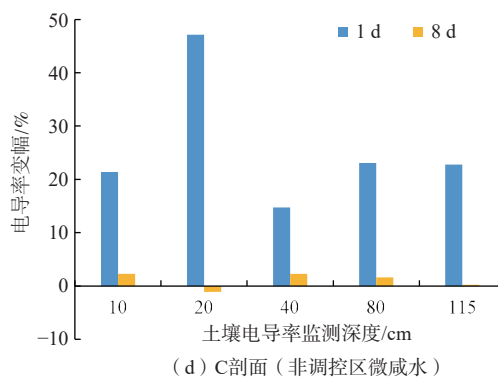
(a) A剖面(调控区淡水)



(b) B剖面(调控区微咸水)



(c) D剖面(非调控区淡水)



(d) C剖面(非调控区微咸水)

图 9 调控区淡水(A剖面)、微咸水(B剖面)和非调控区淡水(D剖面)、微咸水(C剖面)灌后相对灌前电导率变幅  
Fig. 9 Electrical conductivity range compared to those before fresh and brackish water irrigation in the regulation zone and unregulation zone



可看出调控区增幅小于非调控区,进一步验证了灌溉入渗初期双控作用能够增大灌溉水入渗速率,降低灌溉水溶解表层盐分导致的电导率增大幅度。对比双控作用淡水灌溉条件下,见图 9(a),灌后 1 d 10 cm 深度电导率增幅小于 10%, 20 ~ 40 cm 深度电导率增幅大于 20%,说明淡水灌溉促使盐分下移,这是由于淡水溶盐能力更强,能够快速溶解并携带盐分下渗。

灌后 8 d,调控区 40 cm 深度以内电导率低于灌溉前,降幅 3% ~ 10%; 90 cm 深度以下电导率依然高于灌溉前,增幅小于 3%。在非调控区,各层电导率变幅较小,除 20 cm 深度处呈小幅度降低,其余位置均小幅增大。相对灌溉前,调控区盐分降低,非调控区盐分基本稳定,进一步验证了双控作用有助于减缓土壤积盐。对比图 9(a)和图 9(b),灌后 8 d 淡水灌溉条件下表层土壤盐分降低幅度大于微咸水灌溉,进一步验证了淡水溶盐和携带盐分能力强于微咸水。

## 6 结论

(1)地下水埋深是农田盐渍化防控和湿地保护的关键因子,示范区湿地保护生态水位埋深下限为 3.0 m,农田盐渍化防控生态水位埋深上限为 1.9 m。受灌溉影响,每年 6 月底至 8 月底示范区地下水埋深维持在 1.5 m 时,农田土壤盐渍化风险高,是实施地下水水位实时精准调控的关键期。

(2)在西北内陆流域下游湿地周边盐渍化农田,针对如何实时控制和降低地下水水位的难题,研发了基于虹吸辐射井群的“水位-水量”智能双控技术,关键技术包括:一井虹吸联通多辐射井地下水集采子系统用于增大弱透水层区单井涌水量和实现水位面状控制;利用电系统、信号系统和控制器集成的“水位-水量”智能双控子系统,保证地下水埋深维持在适宜生态水位埋深区间。

(3)在表层土壤主要积盐期(潜水蒸发阶段),“水位-水量”双控系统能够将示范区地下水埋深控制在适宜生态水位埋深区间,降低潜水蒸散发量和土壤积盐速率;在灌溉水入渗阶段,双控系统不仅能够降低灌溉水淋溶盐分引起的电导率增大幅度,而且还有助于减缓表层土壤的积盐速率;实施双控条件下灌溉淡水的溶盐和淋盐能力强于微咸水,淡水灌溉与双控技术紧密结合应用效果更显著。

### 参考文献 (References):

[ 1 ] 周远刚,赵锐锋,赵海莉,等. 黑河中游湿地不同恢复

方式对土壤和植被的影响:以张掖国家湿地公园为例[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3333 - 3343. [ ZHOU Yuangang, ZHAO Ruifeng, ZHAO Haili, et al. Effects of different fallow and wetting methods on soil and vegetation properties in the middle reaches of the Heihe River: A case study of Zhangye National Wetland Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3333 - 3343. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] ZHANG F, YUSHANJIANG A, WANG D F. Ecological risk assessment due to land use/cover changes (LUCC) in Jinghe County, Xinjiang, China from 1990 to 2014 based on landscape patterns and spatial statistics[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(13): 1 - 16.

[ 3 ] 王宇,李均力,郭木加甫,等. 1989—2014年赛里木湖水面面积的时序变化特征[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 851 - 860. [ WANG Yu, LI Junli, GUOMU Jiafu, et al. Time-series analysis of Sayram Lake area changes during 1989-2014[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 851 - 860. (in Chinese with English abstract) ]

[ 4 ] 夏积德,吴发启,张青峰,等. 基于粮食安全视角的西北六省耕地压力评价[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(8): 95 - 98. [ XIA Jide, WU Faqi, ZHANG Qingfeng, et al. Evaluation of farmland pressure in six northwestern provinces based on visual angle of food security[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2016, 62(8): 95 - 98. (in Chinese) ]

[ 5 ] 胡立堂,郭建丽,张寿全,等. 永定河生态补水的地下水水位动态响应[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 5 - 11. [ HU Litang, GUO Jianli, ZHANG Shouquan, et al. Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 5 - 11. (in Chinese with English abstract) ]

[ 6 ] LIU J T, SUN J C, ZHU L, et al. Analysis of groundwater environmental conditions and influencing factors in typical city in northwest China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2013, 1(2): 60 - 73.

[ 7 ] ZHANG C C, LI X Q, GAO M, et al. Exploitation of groundwater resources and protection of wetland in the Yuqia Basin[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(3): 222 - 234.

[ 8 ] 查恩爽,肖霄. 吉林省西部潜水资源与生态环境风险分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 36 - 43. [ ZHA Enshuang, XIAO Xiao. Assessment of resources and ecological risks induced by groundwater utilization in the unconfined aquifer in the western Jilin Province: A

- case study in the Taoyer River catchment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 36 - 43. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 孔东, 史海滨, 霍再林, 等. 河套灌区不同盐分含量土壤对向日葵生长的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(增刊 1): 414 - 416. [ KONG Dong, SHI Haibin, HUO Zailin, et al. Effects on growth of sunflower under different saline soils in the Hetao irrigation area[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35 (Sup 1): 414 - 416. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 童文杰, 陈中督, 陈阜, 等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜区划分[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 131 - 137. [ TONG Wenjie, CHEN Zhongdu, CHEN Fu, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(10): 131 - 137. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] ZHANG W, SHI J S, XU J M, et al. Dynamic influence of Holocene characteristics on vadose water in typical region of central North China Plain[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2016, 4(3): 247 - 258.
- [ 12 ] 刘昌军, 赵华, 张顺福, 等. 台兰河地下水库辐射井抽水过程的非稳定渗流场的有限元分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(3): 922 - 930. [ LIU Changjun, ZHAO Hua, ZHANG Shunfu, et al. Finite element analysis on unsteady seepage field of groundwater reservoir of tailan river during the pumping water of the radiation well[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(3): 922 - 930. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 张金龙, 刘明, 钱红, 等. 漫灌淋洗暗管排水协同改良滨海盐土水盐时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 98 - 103. [ ZHANG Jinlong, LIU Ming, QIAN Hong, et al. Spatial-temporal variation characteristics of water-salt movement in coastal saline soil improved by flooding and subsurface drainage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 98 - 103. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] BOŽOVIĆ Đ, POLOMČIĆ D, BAJIĆ D, et al. Hydrodynamic analysis of radial collector well ageing at Belgrade well field[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124463.
- [ 15 ] COLLINS S L, HOUBEN G J. Horizontal and radial collector wells: simple tools for a complex problem[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(5): 1925 - 1935.
- [ 16 ] AMELI A A, CRAIG J R. Semi-analytical 3D solution for assessing radial collector well pumping impacts on groundwater-surface water interaction[J]. *Hydrology Research*, 2018, 49(1): 17 - 26.
- [ 17 ] BANERJEE G. Groundwater abstraction through river-bed collector well: A case study based on geophysical and hydrological investigation[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2012, 14(4): 573 - 587.
- [ 18 ] 李山. 灌区控制排水条件下水盐调控及农田湿地盐分动态研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. [ LI Shan. Water and salinity management and its dynamic of wetland under controlled drainage in irrigated area[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 贾忠华, 罗纨, 方树星, 等. 双重排水条件下控制措施对银南灌区水稻田水盐关系的影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(5): 213 - 216. [ JIA Zhonghua, LUO Wan, FANG Shuxing, et al. Water and salt dynamics in rice fields under dual-drainage in Yinnan irrigation district, China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(5): 213 - 216. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 刘少玉, 靳盛海, 韩双平, 等. 华北东部平原浅层高矿化弱渗透地下水的开发技术示范研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(1): 114 - 120. [ LIU Shaoyu, JIN Shenghai, HAN Shuangping, et al. Development and utilization mode of high salinity shallow groundwater from low permeability aquifer in eastern North China plain[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(1): 114 - 120. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 魏玉涛, 刘德玉, 张伟, 等. 荒漠-湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 183 - 190. [ WEI Yutao, LIU Deyu, ZHANG Wei, et al. Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 183 - 190. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 孙自永, 王俊友, 葛孟琰, 等. 基于水稳定同位素的地下水型陆地植被识别: 研究进展、面临挑战及未来研究展望[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 11 - 20. [ SUN Ziyong, WANG Junyou, GE Mengyan, et al. Isotopic approaches to identify groundwater dependent terrestrial vegetation: Progress, challenges, and prospects for future research[J]. *Bulletin of Geological Science and*

- Technology, 2020, 39(1): 11 – 20. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 郭占荣. 西北内陆盆地地下水的生态环境效应研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2000. [ GUO Zhanrong. Study on the eco-environmental effect of groundwater development in the inland basins of northwest China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2000. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 马兴华, 王桑. 甘肃疏勒河流域植被退化与地下水水位及矿化度的关系 [J]. *甘肃林业科技*, 2005, 30(2): 53 – 54. [ MA Xinghua, WANG Sang. Relationship between vegetation degradation and groundwater table and degree of mineralization in the Shule river Basin in Gansu Province [J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2005, 30(2): 53 – 54. (in Chinese) ]
- [25] 白玉锋, 陈超群, 徐海量, 等. 塔里木河下游荒漠植被地上生物量空间分布与地下水埋深关系 [J]. *林业科学*, 2016, 52(11): 1 – 10. [ BAI Yufeng, CHEN Chaoqun, XU Hailiang, et al. Relationship between spatial distribution of aboveground biomass of desert vegetation and groundwater depth in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(11): 1 – 10. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] LIU M, NIE Z L, CAO L, et al. Comprehensive evaluation on the ecological function of groundwater in the Shiyang River watershed [J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(4): 326 – 340.
- [27] 史海滨, 郭珈玮, 周慧, 等. 灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 268 – 278. [ SHI Haibin, GUO Jiawei, ZHOU Hui, et al. Effects of irrigation amounts and groundwater regulation on soil water and salt distribution in arid region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 268 – 278. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 张若琳