

保定平原区地下水生态水位阈值的探讨

靳博文, 王文科, 段磊, 马稚桐, 王一, 黄鑫慧

Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area

JIN Bowen, WANG Wenke, DUAN Lei, MA Zhitong, WANG Yi, and HUANG Xinhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究

Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie

冯海波, 董少刚, 张涛, 李钰, 刘晓波, 李政葵, 王超 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 163-163

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

霍城县地下水资源构成变化及驱动力分析

An analysis of groundwater resources composition and driving force in Huocheng county

霍世璐, 王文科, 段磊, 李瑛, 张琛, 刘明明, 曾磊 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 51-59

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

滹沱平原漏斗区地下水溶解性总固体演变特征研究

Evolution characteristics of total dissolved solids in the groundwater level funnel area in the Hufu piedmont plain

张希雨, 张光辉, 严明疆 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 72-81

鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

饶志, 储小东, 吴代赦, 颜春, 陈婷, 何景媛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 31-37



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112020

靳博文, 王文科, 段磊, 等. 保定平原区地下水生态水位阈值的探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 166-175.
JIN Bowen, WANG Wenke, DUAN Lei, *et al.* Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area [J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 166-175.

保定平原区地下水生态水位阈值的探讨

靳博文^{1,2}, 王文科^{1,2}, 段磊^{1,2}, 马稚桐^{1,2}, 王 一^{1,2}, 黄鑫慧^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054;
2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 (长安大学), 陕西 西安 710054)

摘要: 地下水具有重要的生态价值, 地下水生态系统中的地下水位、水质和包气带含水率与含盐量的变化驱动着表生生态格局的演变, 但目前对各变量的生态阈值研究尚处于起步阶段, 理论与方法体系还不完善。以保定平原区为例, 采用地下水位及地下水生态环境的历史回归法、GIS法、差分网格计算法等方法, 从时空角度分析了地下水位变化的驱动力以及生态效应, 在此基础上确定不同水文地质单元的生态水位阈值。研究表明: (1) 20世纪50—60年代, 研究区依赖于地下水的生态格局基本维持着天然状态; 1959—2000年, 地下水位持续下降, 局部地段出现降落漏斗; 2000—2008年, 地下水位骤降, 降落漏斗迅速扩张, 地下水与地表水补排关系发生变异; 2008年至今, 部分区域地下水位逐渐上升。(2) 研究区内山前地带地下水生态水位埋深为10~15 m, 拒马河冲洪积扇群与漕河—瀑河冲洪积扇群为5~10 m, 唐河—大沙河冲洪积扇群为3~5 m, 冲积平原中定州一望都范围为3~5 m, 保定市为10~15 m, 其余均为5~10 m, 冲湖积平原环淀区域小于3 m。(3) 以确定的地下水生态水位为标准, 初步估算研究区现状地下水位恢复至生态水位的需水量为 $57.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。研究成果对恢复当地地下水生态环境格局有重要意义, 对华北平原地下水生态水位的确定也具有借鉴意义。

关键词: 地下水; 生态环境; 驱动力; 生态地下水位; 保定平原区

中图分类号: P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0166-10

Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area

JIN Bowen^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}, DUAN Lei^{1,2}, MA Zhitong^{1,2}, WANG Yi^{1,2}, HUANG Xinhui^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region (Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Groundwater is of important ecological value. The changes in groundwater level, water quality, water content and salt content in the unsaturated zone in groundwater ecosystems drive the evolution of supergene ecological pattern. So far, the research on the ecological threshold of each variable is still at the starting stage, and the theoretical and methodological system is not perfect. In this study the Baoding Plain is taken as an example, and the driving force and ecological effect of groundwater level changes are analyzed from the perspective of time and space by using the historical regression method, GIS method and difference grid calculation method of

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2022-03-28

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406504)

第一作者: 靳博文(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水生态恢复研究。E-mail: gkydxbl@163.com

通讯作者: 王文科(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事旱区地下水文过程与生态效应研究。E-mail: wenkew@chd.edu.cn

groundwater levels and groundwater ecological environments. On this basis, the ecological water level thresholds of different hydrogeological units are determined. The results show that: (1) In the 1950s-60s, the ecological pattern of the study area depending on groundwater basically maintained a natural state; from 1959 to 2000, the groundwater levels continued to decline, and the groundwater depression cones appeared in some areas. From 2000 to 2008, the groundwater levels dropped sharply, the groundwater depression cones expanded rapidly, and the recharge and discharge relationship between groundwater and surface water changed. Since 2008, groundwater levels have gradually increased in some regions. (2) The depth of groundwater ecological water level in the piedmont zone of the study area is 10–15 m deep, the Juma River alluvial fan group and Cao River-Pu River alluvial fan group are 5–10 m, the Tang-Dasha River alluvial fan group is 3–5 m, the Dingzhou-Wangdu area in the alluvial plain is 3–5 m, the city of Baoding is about 10–15 m, and the rest are 5–10 m. The area around the alluvial lacustrine plain is less than 3 m. (3) Taking the determined ecological groundwater level as the standard, it is preliminarily estimated that the water demand for restoring the current groundwater level to the ecological water level in the study area is $57.14 \times 10^8 \text{ m}^3$. The research results are of important significance for restoring the local groundwater ecological environment pattern and for determining the ecological groundwater level in the North China Plain.

Keywords: groundwater; ecosystem; driving force; ecological groundwater level; Baoding Plain area

近 40 年来, 由于地下水位持续下降^[1], 华北平原出现一系列生态环境负效应, 如地下水降落漏斗^[2]、地面沉降^[3-4]、区域地下水文循环发生变化^[5]以及河流生态基流无法得到有效保障^[6]等, 这些生态环境负效应的出现破坏了平原内原有的山水林田湖草格局。大量研究表明, 地下水在维持河流生态基流^[7-8]、湖泊湿地水域面积^[9]、提供植被需水^[10-11]、调节土壤含水量与含盐量、维持地质环境的稳定性等方面具有重要作用^[12], 地下水位在一定程度上驱动着生态环境演化^[13-15], 从恢复区域地下水生态环境格局的角度考虑, 确定区域地下水生态水位是恢复地下水生态环境的重要抓手。目前关于生态水位的研究多集中在干旱半干旱地区^[16], 其研究内容主要是基于满足植物生长需求^[17-20]、消除土壤盐渍化^[21-22]、协调地下水资源开发利用与表生生态环境之间的关系^[23]进而提出最优地下水位。常见的方法有生态调查统计法^[24]、数值模型法^[25]、3S(GPS、RS 和 GIS)法^[26]; 生态调查统计法实施起来易操作, 所得数据直观, 但野外调查工作量较大, 耗时较多, 不适宜进行大尺度研究; 数值模型法理论性较强, 适用于大尺度研究, 且能够通过设立参数进行情景预测模拟, 但模型建立过程涉及诸多要素, 需要充足的数据支撑, 且模型使用前需通过大量实地观测资料进行校核验证; 3S 法适用于大尺度研究, 处理结果直观, 但该方法对遥感数据精度要求很高。综上所述, 提出一种针对大尺度流域研究, 能够联系实地情况、综合考虑多方面因素, 计算操作简

易、合理、结果可靠的地下水生态水位计算方法已成为生态环境治理修复的迫切需求和领域研究的热点方向。

本文以保定平原区为例, 从环境地质与生态环境格局的角度出发, 运用地下水位及生态环境的历史回归法、GIS 法确定研究区地下水生态水位阈值, 通过差分网格计算法量化生态水位恢复, 为保定平原区生态环境建设和水资源合理利用提供一定参考, 对地下水生态水位阈值的确定也具有一定的借鉴意义。

1 研究区概况

保定平原区位于太行山东麓的华北平原区, 西靠太行山, 属山前倾斜平原, 地势由西北向东南逐渐降低, 地面高程大部分在 5~26 m 之间, 地面坡降一般小于 2%, 根据地貌类型可进一步划分为山前冲洪积平原、冲积平原、冲湖积平原(图 1)。山前冲洪积平原位于靠近太行山的西部地区, 地面高程 7~23 m; 冲积平原位于南部边界及东南地区, 地面高程 5~17 m; 冲湖积平原位于中东部地区, 由近代河流冲积和湖沼沉积形成, 地势较低, 地面高程多为 5~10 m。研究区属暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候, 年平均气温 12.7 °C, 水系发育, 河渠纵横, 主要河流包括南拒马河、唐河、萍河、漕河、瀑河等。区域地表出露第四系冲洪积松散地层, 第四系以下的岩层包括新近系、古近系、奥陶系、寒武系、中上元古界、太古界等, 堆积了巨厚的松散堆积物, 为第四系松散岩类孔隙地下水

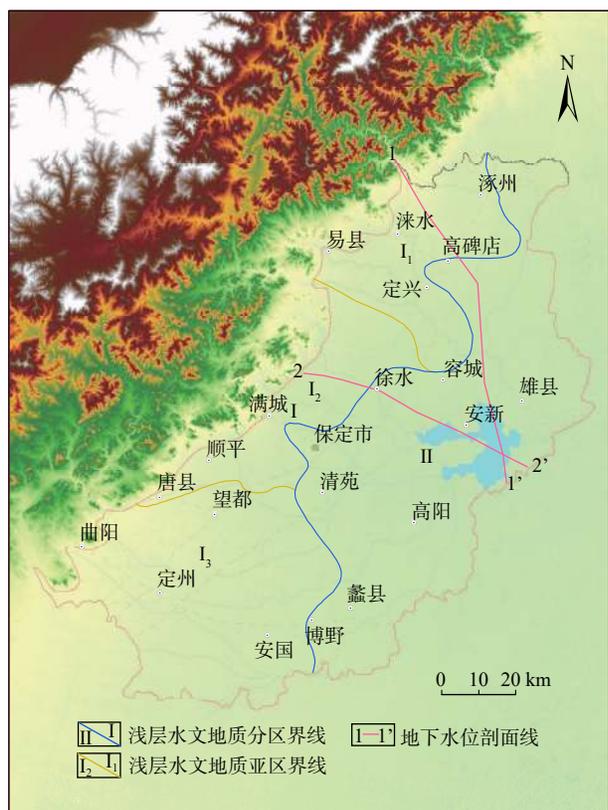


图 1 研究区地理位置及计算单元划分

Fig. 1 Geographical location and calculation unit division of the study area

的分布与赋存提供了良好的场所。

研究区浅层地下水属潜水-承压水, 主要为第 I、II 含水层组, 自出山口至冲洪积扇群前缘, 地下水由砾卵石、砂砾石组成的单一潜水含水层, 向黏土和砂砾石及中砂组成的潜水-微承压水含水层过渡, 厚 10~50 m 不等, 地下水补给、径流条件较好。靠近山前的北部拒马河冲洪积扇群(I₁)、西部漕河—瀑河冲洪积扇群(I₂)、南部唐河—大沙河冲洪积扇群(I₃), 是平原区第四系孔隙水的主要补给区, 自山前至平原中部表现出良好的水文地质分带性(图 2)。区域内地下水基本沿山前冲洪积扇展布方向自西向东径流, 径流方向

和梯度与地形倾斜方向和坡降基本一致, 区域内地下水位在维持地质环境稳定、保障白洋淀水域面积与水生态安全、控制生态环境格局等方面发挥重要作用。

2 数据来源及研究方法

本研究所用 1959 年浅层地下水位数据来源于《华北平原地下水可持续利用图集》^[27]; 1982 年、2000 年、2010 年、2015 年浅层地下水位数据与多年地下水降落漏斗数据均来源于《京津冀协同发展保定市平原区地质环境保障调查评价报告》^[28]; 2019 年浅层地下水位数据来源于地下水位统测点实测数据; 2005—2020 年地下水位、降水量、地下水开采量数据均来自《保定市水资源公报(2005—2020 年)》; 地下水资源计算含水层给水度(μ)的取值和分区, 主要参考文献 [27—28] 成果资料; 保定平原区高程栅格数据来源于地理信息空间数据云网站, 并运用河北省水文工程地质勘察院提供的区域内高程实测值进行校改。

为了后续能够针对不同区域提出适宜的地下水位恢复方案, 依据含水层介质沉积相类型、地下水补给和径流条件的差异, 将研究区划分为 3 个水文地质大区与 3 个水文地质亚区。在此基础上采用地下水位及生态环境的历史回归法对 1959—2020 年地下水位时空演化特征、地下水位演化生态效应及地下水与地表水补排关系演变进行分析, 查明地下水位动态驱动力, 确定地下水生态环境变异拐点, 进而界定地下水生态水位阈值。把保定平原区 2019 年浅层地下水位作为现状水位, 以确定的生态地下水位为标准, 利用 GIS 技术, 结合生态补水量数学模型计算得到不同水文地质单元由现状水位恢复至地下水生态水位所需水量。其中, 保定平原区生态补水量数学模型为:

$$W_{\text{生态}} = 10^{12} \sum_{i=1}^n \mu_i F_i \Delta H_i \quad (1)$$

式中: $W_{\text{生态}}$ ——现状地下水位恢复至生态水位所需的

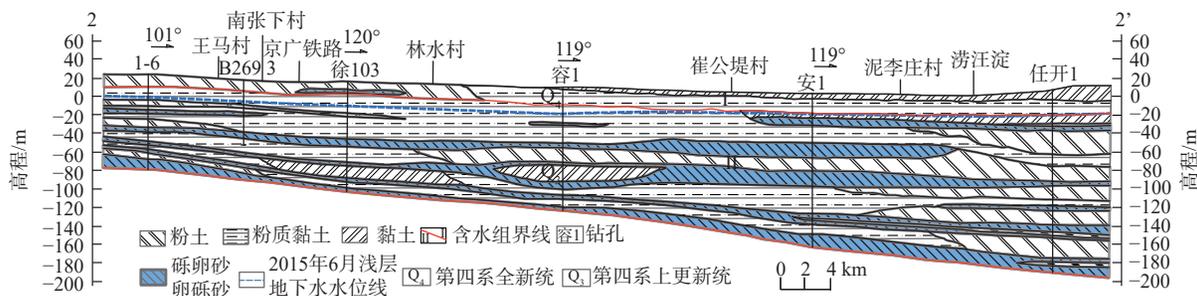


图 2 研究区 2—2' 水文地质剖面图 (据文献 [28] 修改)

Fig. 2 Hydrogeological profile of 2—2' in the study area (modified from Ref. [28])

水量/m³;
 10¹²——单位换算系数;
 μ_i ——分区浅层含水层组给水度;
 F_i ——分区计算单元面积/m²;
 ΔH_i ——分区计算单元内地下水生态水位降至现状地下水位的浅层含水层疏干厚度/m。

3 地下水生态水位的确定

3.1 地下水水位动态特征

收集研究区内不同水文地质单元年际地下水水位动态数据(图3),并选取贯穿地下水补给区—径流转化区—排泄区的2个典型剖面进行年际地下水水位动态观测(图4),从时空角度分析研究区近60年地下水水位的动态特征。

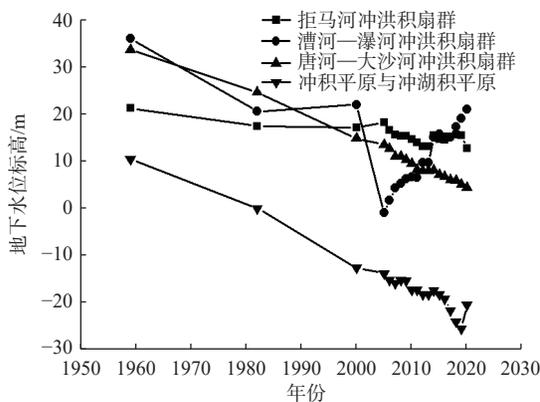
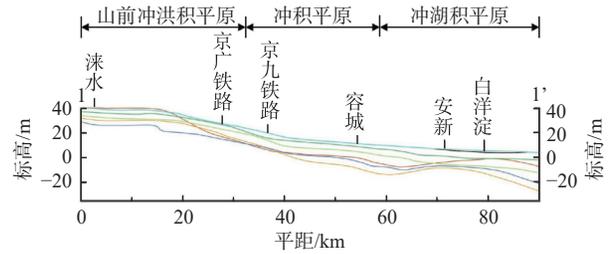


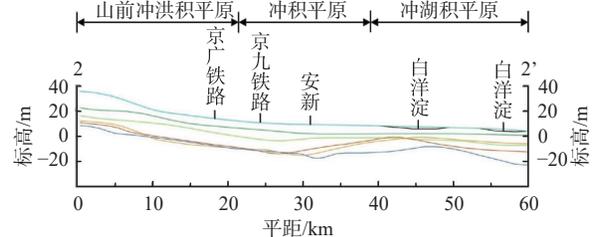
图3 不同水文地质单元年际地下水水位动态
 Fig. 3 Annual groundwater level dynamics of different hydrogeological units

从时间角度来看,研究区内多年地下水水位变化可以分为4个阶段。20世纪50—60年代(天然稳定阶段),地下水受人为扰动影响小,地下水水位呈天然动态稳定状态,此时各区域地下水水位均处于历史最高值;全区域平均地下水水位为17.5 m。1959—2000年(持续下降阶段),各区域地下水水位持续下降,平均下降速率为0.38 m/a。2000—2008年(大幅骤降阶段),各区域地下水水位大幅下降;全区域平均地下水水位由2000年的4.05 m下降至0.32 m。2008年至今(缓慢上升阶段),除漕河—瀑河冲洪积扇群(I₂)地下水水位开始上升外,其它区域地下水水位呈下降趋势,平均下降速率为0.4 m/a,在上一阶段平均地下水水位下降速率基础上减少约50%。

从空间角度来看,拒马河冲洪积扇群(I₁)为研究区的地下水补给区,地下水补给充沛、径流通畅,1959—



(a) 地下水水位剖面1-1'



(b) 地下水水位剖面2-2'

1959年 1982年 2000年
 2010年 2015年 2019年

图4 研究区多年地下水水位剖面图

Fig. 4 Groundwater level profile of the study area in some years

2000年地下水水位下降速率最小,为0.1 m/a;在2000—2008年地下水水位快速下降阶段,相比其余的水文地质单元,该区域地下水水位下降速率最小,为0.22 m/a。据《保定经济统计年鉴》可知,研究区内漕河—瀑河冲洪积扇群(I₂)为工业集中区,唐河—大沙河冲洪积扇群(I₃)与冲积平原和冲湖积平原(II)为农业集中区。由于2005年后白洋淀出现死鱼事件,区域内大量不合规企业被关闭,漕河—瀑河冲洪积扇群(I₂)区域工业用水量大幅降低,地下水水位开始上升,2005—2020年,年均上升速率为1.47 m/a;唐河—大沙河冲洪积扇群(I₃)、冲积平原与冲湖积平原(II)农灌用水需求量大,除2007—2008年、2013—2014年均出现短暂的上升,1959—2020年2个区域内地下水水位整体为持续下降趋势,地下水水位下降速率分别为0.49 m/a与0.52 m/a。

3.2 地下水水位动态驱动力

3.2.1 气候条件

通过对研究区1991—2020年降水量与地下水水位埋深数据资料进行系统整理,绘制得到研究区历年降水量与地下水水位埋深图(图5)。经过分析可知除1993—1994年降水量出现快速回升外,其他年份研究区降水量整体呈先快速下降后不断波动缓慢上升的趋势,多年平均降水量约为500 mm/a。除1994—1995年地下水水位埋深出现快速下降外,其他年份研究区地下水水位埋深整体呈上升趋势,上升速率约为0.57 m/a。综合分析发现,除个别年份外,1991—2020年研究区随着

降水量的减少, 地下水位埋深逐渐增大; 1994—2000 年降水量下降速率最大, 为 86.63 mm/a, 此时地下水位埋深上升速率最大, 为 1.44 m/a; 2000—2020 年期间, 降水量变化幅度较小, 此时地下水位埋深增长速率减缓。由此说明在一定程度上降水量与地下水位埋深之间变化趋势一致, 两者之间存在一定的关联。

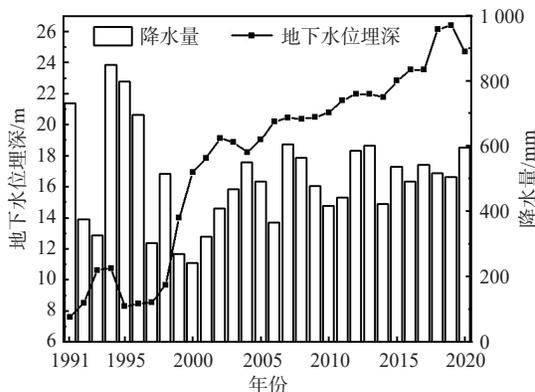


图 5 历年降水量与地下水位埋深关系图

Fig. 5 Annual precipitations and groundwater level depths

3.2.2 人为影响

图 6 为研究区 2001—2020 年地下水开采量与地下水位埋深图, 可以看出 2001—2011 年地下水开采量不断上下波动, 2011—2020 年地下水开采量呈现单一下降趋势。从整体上看, 2001—2020 年研究区地下水开采量呈下降趋势, 综合研究区地下水位埋深分析可知, 除 2001—2002 年外, 2001—2014 年地下水位埋深与地下水开采量变化趋势近乎一致, 即随着地下水开采量减少, 地下水位埋深减小。在 2014—2020 年期间随着开采量减少, 地下水位埋深增加速率变小, 由此表明地下水开采量的减少对地下水位的恢复具有一定的促进作用。

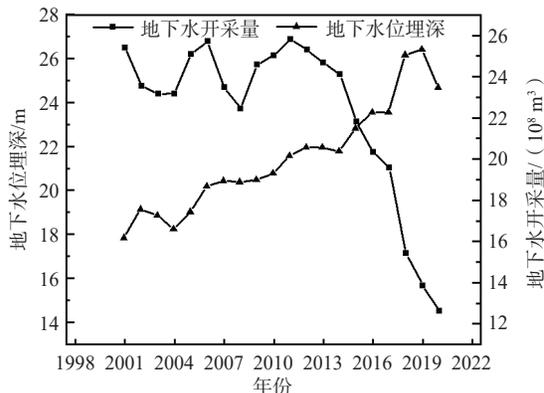


图 6 2001—2020 年地下水开采量与地下水位埋深图

Fig. 6 Groundwater exploitations and groundwater level depths from 2001 to 2020

3.3 地下水位演化生态效应

地下水与生态环境关系密切, 地下水位的持续、快速下降会引发一系列生态环境问题, 通过上节分析可知, 研究区内强烈的人为地下水开采活动, 叠加气候条件变化, 造成地下水位持续下降, 主要引起以下几方面的生态效应。

3.3.1 地下水降落漏斗

由于含水层岩性颗粒较细、厚度较小、水文地质条件差, 随着地下水位持续下降, 在平原东侧及中部形成了多个地下水降落漏斗。全区地下水降落漏斗总面积达到 4 144.5 km², 占全区总面积的 33.8%。选取位于不同水文地质单元的降落漏斗, 结合所在区域地下水位动态, 分析降落漏斗对地下水位变化的响应, 结果如图 7 所示。

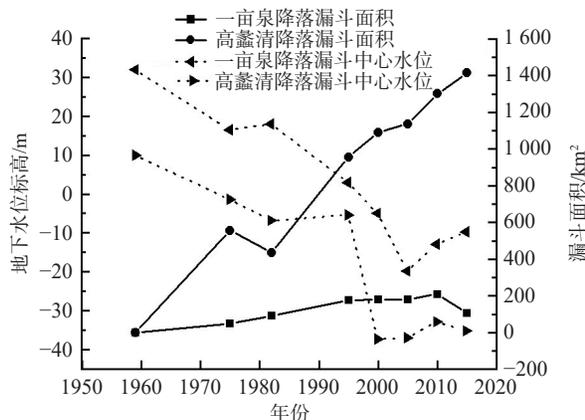


图 7 1959—2020 年地下水位与降落漏斗演变趋势图

Fig. 7 Evolution trend of groundwater levels and groundwater depression cones from 1959 to 2020

一亩泉地下水降落漏斗位于漕河—瀑河冲洪积扇中部, 含水层岩性以粗砂、砂砾石及砾卵石为主, 厚 10~40 m。1959 年低水位期地下水平均水位为 32 m, 此时降落漏斗尚未出现; 1965—1976 年间气候偏于干旱, 年平均降水量仅 468 mm, 地下水开采量增大, 地下水位迅速下降至 16.51 m, 降落漏斗雏形出现; 除 1975—1982 年地下水位出现微小回升外, 1975—2005 年, 地下水位呈持续下降趋势, 降落漏斗表现为持续扩大, 至 2005 年漏斗面积增至 180.01 km²; 2005 年至今, 由于控制地下水开采方案的实施及年降水量的增加, 漏斗区地下水位持续回升, 漏斗面积整体呈现缩减趋势。高蠡清地下水降落漏斗位于本区东部冲洪积平原, 地处扇间洼地, 含水层颗粒细、厚度小, 水文地质条件较差, 除 1975—1985 年漏斗面积出现小幅度缩小外, 1959—2020 年随着地下水位降低, 高蠡清降

落漏斗呈不断扩大的趋势。综上分析可知, 1959—2020 年, 随着漏斗中心地下水位下降, 一亩泉降落漏斗与高蠡清降落漏斗的漏斗面积均呈增加趋势, 漏斗面积与地下水位之间呈负相关, 说明地下水位变化对降落漏斗的演化存在一定的影响。

3.3.2 地面沉降

地下水主要开采层至地面之间的多为黏土层与粉、细砂层互层, 当抽水造成水位下降时, 引起相邻黏性土层塑性释水压密, 从而引起地面沉降。保定地区地面沉降量大于 1 000 mm 的面积为 313 km², 分布于高阳县以东, 其中保定市地面沉降以保定市漏斗区为沉降中心, 至 2013 年最大累计沉降量约为 887 mm, 沉降速率为 27 mm/a。

3.3.3 含水层疏干

区域地下水位快速下降, 使得包气带厚度逐年增加, 最终导致含水层被疏干。研究区表现为中部白洋淀附近含水层疏干厚度较小, 北部及南部地区疏干厚度较大^[29]; 1982—2015 年, 东北部地区及定州地区含

水层疏干厚度大于 15 m, 南部的望都、清苑、高阳、蠡县和北部容城地区含水层疏干厚度 5~10 m, 其余的西部太行山前地带和白洋淀附近疏干厚度小于 5 m, 全区平均疏干厚度为 7.13 m。

3.4 地下水与地表水补排关系演变

结合研究区水文地质特征, 运用 ArcGIS 软件对 1959、1982、2000、2010、2015、2019 年各年地下水水位资料进行处理, 绘制得到多年地下水流场演化图(图 8)。分析可知 20 世纪 50—60 年代, 研究区尚未大规模开采地下水, 其流场基本处于天然状态, 地下水水位在该阶段高于淀区湖水位, 且与白洋淀能够形成水量交换, 主要以地下水补给白洋淀为主。1959—1982 年, 随着工农业的发展, 地下水持续被大量开采, 且气候趋于干旱, 降水量较五六十年代削减约 20% 左右, 地表水产流减少, 加之上游地带水利设施的建设, 维系地下水补给的河道水被截流, 导致浅层地下水补给量减少, 造成浅层地下水采补失衡, 水位开始持续下降; 在该阶段部分地下水水位低于淀区湖水位, 与

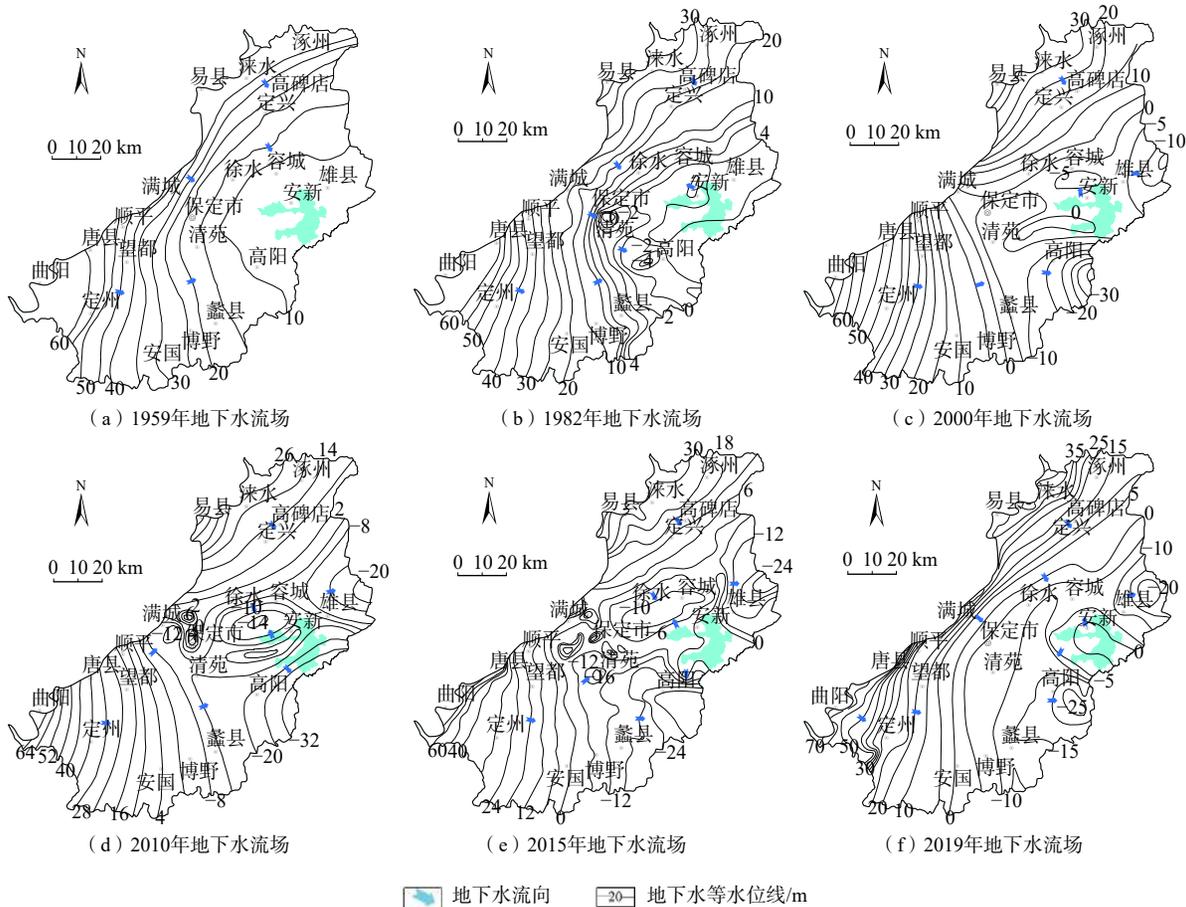


图 8 研究区多年地下水流场演化图(据文献 [27-28] 修改)

Fig. 8 Evolution of groundwater flow field in the study area in some years(modified from Ref. [27-28])

地表水转化关系发生转变,主要以白洋淀补给地下水为主。1982—2015年,研究区气候持续干旱,降水持续减少,平原区大部分河流流量减少乃至干枯,地下水天然补给量大幅减少;而地下水开采量逐年增加,浅层地下水采补失衡状况更趋严重,区域水位持续下降,地下水降落漏斗规模迅速发展扩大,地下水流场发生改变,受人工开采的控制,大面积抽水改变了白洋淀与地下水的补排关系,白洋淀上游地下水不再补给白洋淀,白洋淀开始补给地下水。2015年至今,由于实施地下水压采和生态补水,白洋淀周围地区地下水水位有所上升,但白洋淀水位仍高于地下水水位,以白洋淀以渗漏方式补给地下水为主。

综上所述,研究区地下水生态格局在 20 世纪 50—60 年代为天然状态;1959—1982 年间地下水开采量较小,对研究区地下水环境影响很小,在此期间地下水流场基本维持天然状态^[30],生态格局未发生较大的变化;1982 年之后,日益增加的地下水开采改变了当地的水文循环过程,研究区的地下水流场受到破坏,生态格局发生变化,白洋淀出现干涸现象。1984—2005 年地下水脆弱性各级面积变化速率远大于 1959—1984 年^[31],故选取 1959 年浅层地下水水位作为地下水生态水位上限,1982 年水位为下限,由于缺少 1959—1982 年期间的水位资料,选取二者的平均值作为地下水生态水位,并将高程数据与生态水位数据进行差值运算得到生态地下水埋深(图 9)。

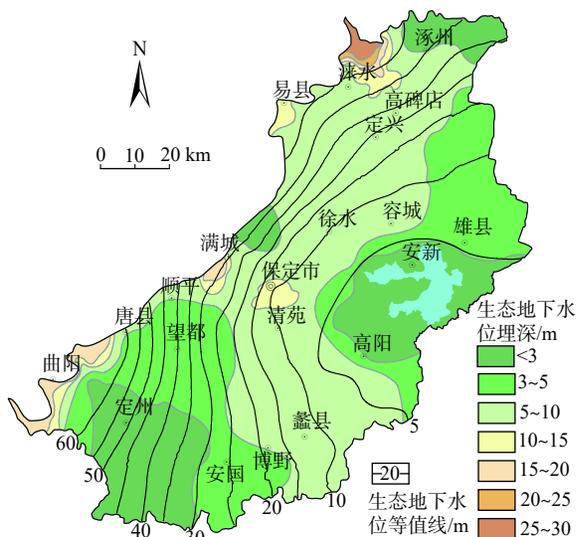


图 9 研究区生态地下水埋深关系图
Fig. 9 Ecological groundwater levels and their depths

如图 9 所示,当研究区由现状地下水水位恢复至生态地下水水位,表现为地下水流场与天然地下水流场相

似,计算得出研究区内山前地带生态地下水埋深为 10~15 m;冲积平原中定州—望都范围为 3~5 m,保定市为 10~15 m,其余均为 5~10 m;冲湖积平原环淀区域生态地下水埋深小于 3 m,其余区域为 3~5 m。

廖梓龙等^[32]基于各代表性监测井 2001—2013 年水位数据构建量化关系模型,研究得到河北省平原区浅层地下水埋深阈值为 1.93~27.06 m;盖美等^[33]基于提高降雨入渗补给量,减小土壤盐渍化提出海河流域中部平原汛前控制生态水位埋深阈值为 5~7 m;张长春等^[34]研究表明,在华北中东部平原防治土壤盐碱化的合理地下水埋深为 2.0~2.5 m,有利于地下水获得最大补给的地下水埋深为 3~5 m,在山前平原有利于获得最大补给的埋深为 10 m 左右。上述研究成果与本文的研究成果基本一致,因此本文提出的生态水位计算方法具有一定的合理性。

3.5 恢复地下水生态水位的需水量估算

运用 ArcGIS 软件对现状水位-生态地下水埋深与浅层含水层组给水度进行叠加分析(图 10),通过计算得出保定平原区由现状地下水水位恢复至生态地下水水位需补水量共 $57.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1)。

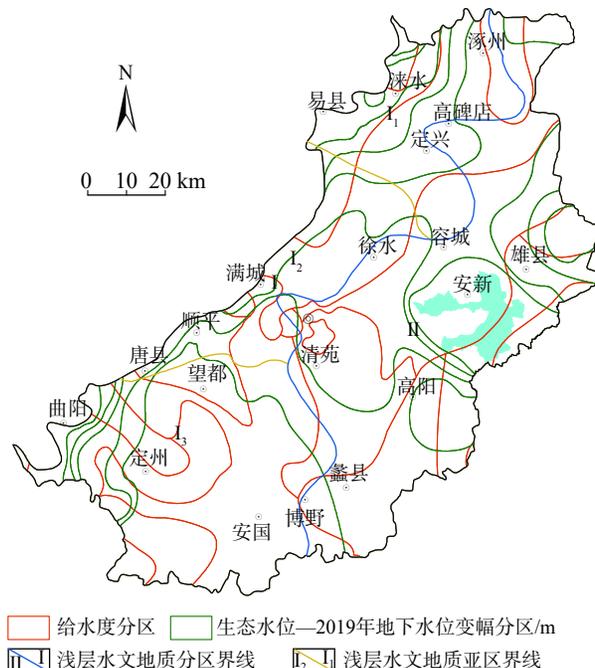


图 10 浅层地下水生态补水量计算分区
Fig. 10 Calculation division of ecological supplementary water capacity of shallow groundwater

4 结论

(1) 20 世纪 50—60 年代,研究区地下水生态格局

表 1 浅层地下水生态补水量计算结果

Table 1 Calculation results of ecological recharge of shallow groundwater

水文地质单元	计算面积 /km ²	现状地下水位 /m	地下水生态水位 /m	水位变差 /m	给水度	地下水生态补水量 /(10 ⁸ m ³)
拒马河冲洪积扇群(I ₁)	1 455.56	20.90	26.40	5.50	0.09	2.37
山前冲洪积平原(I) 漕河—瀑河冲洪积扇群(I ₂)	1 250.32	10.10	26.20	16.10	0.09	5.50
唐河—大沙河冲洪积扇群(I ₃)	3 092.90	14.70	38.10	23.40	0.12	28.00
冲积平原+冲湖积平原(II)	4 790.33	-7.80	9.40	17.20	0.08	21.26

维持着天然状态; 1959—2000 年, 地下水位持续下降, 漏斗雏形出现; 2000—2008 年, 地下水位骤降, 降落漏斗影响范围迅速扩张, 地下水与地表水补排关系发生变化, 上游地下水不再补给白洋淀, 转由白洋淀补给地下水; 2008 年至今, 由于控制地下水开采及大气降水增多, 部分区域地下水位出现上升。

(2) 自然降水是驱动研究区地下水位变化的重要驱动力, 人工开采是地下水位变化的主导驱动力。

(3) 研究区内山前地带生态地下水位埋深为 10~15 m; 冲积平原中定州—望都范围为 3~5 m, 保定市为 10~15 m, 其余均为 5~10 m; 冲湖积平原环淀区域生态地下水位埋深小于 3 m, 其余区域为 3~5 m。由现状水位恢复至生态水位共需补水 57.14×10⁸ m³, 其中拒马河冲洪积扇群(I₁)恢复至生态水位需补水 2.37×10⁸ m³, 漕河—瀑河冲洪积扇群(I₂)需水量为 5.50×10⁸ m³, 唐河—大沙河冲洪积扇群(I₃)为 28.00×10⁸ m³, 冲积平原与冲湖积平原(II)需水量为 21.26×10⁸ m³。

参考文献 (References) :

- [1] 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 等. 近40年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1142 - 1155. [YANG Huifeng, CAO Wengeng, ZHI Chuanshun, et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1142 - 1155. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 费宇红, 苗晋祥, 张兆吉, 等. 华北平原地下水降落漏斗演变及主导因素分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 394 - 399. [FEI Yuhong, MIAO Jinxiang, ZHANG Zhaoji, et al. Analysis on evolution of groundwater depression cones and its leading factors in North China Plain[J]. *Resources Science*, 2009, 31(3): 394 - 399. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 等. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1115 - 1127. [GUO Haipeng, BAI Jinbin, ZHANG

Youquan, et al. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 2017, 44(6): 1115 - 1127. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 等. 华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 162 - 171. [GUO Haipeng, LI Wenpeng, WANG Liya, et al. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 162 - 171. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张光辉, 刘中培, 连英立, 等. 华北平原地下水演化地史特征与时空差异性研究[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 848 - 854. [ZHANG Guanghui, LIU Zhongpei, LIAN Yingli, et al. Geohistory characteristics and temporal-spatial diversity of groundwater evolution in North China Plain in Holocene[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(6): 848 - 854. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨泽凡, 胡鹏, 赵勇, 等. 新区建设背景下白洋淀及入淀河流生态需水评价和保障措施研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 6(6): 563 - 570. [YANG Zefan, HU Peng, ZHAO Yong, et al. Study on ecological water demand and safeguard measures of Baiyangdian Lake and the upstream rivers under the background of Xiongan New Area[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, 6(6): 563 - 570. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 翟新博. 塔里木河下游地下水恢复需水量探析[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(3): 72 - 75. [ZHAI Xinbo. Analysis on groundwater restoration demand in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2021, 4(3): 72 - 75. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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.

- [9] 孙才志, 高颖, 朱正如. 基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1513 – 1523. [SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru. Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1513 – 1523. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吴明辉, 宁虎森, 王让会, 等. 克拉玛依地区减排林地地下水动态变化及合理生态水位分析[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 129 – 133. [WU Minghui, NING Husen, WANG Ranghui, et al. Dynamic change of groundwater and reasonable ecological groundwater level in Karamay artificial carbon-dioxide-capture forest[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(4): 129 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [11] DANG X Y, LU N, GU X F, et al. The relationship between groundwater and natural vegetation in Qaidam Basin[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(4): 341 – 349.
- [12] WANG W K, YANG Z Y, KONG J L, et al. Ecological impacts induced by groundwater and their thresholds in the arid areas in Northwest China[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2013, 12(7): 1497 – 1507.
- [13] LIU F, SONG X F, YANG L H, et al. Predicting the impact of heavy groundwater pumping on groundwater and ecological environment in the Subei Lake Basin, Ordos Energy Base, Northwestern China[J]. *Hydrology Research*, 2018, 49(3/4): 1156 – 1171.
- [14] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(8): 67 – 74. [YANG Zeyuan, WANG Wenke, HUANG Jinting, et al. Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2006, 34(8): 67 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王哲, 付宇, 朱静思, 等. 华北典型河道地下水回补效果评价[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 843 – 853. [WANG Zhe, FU Yu, ZHU Jingsi, et al. Effect assessment on groundwater recharge for typical rivers in North China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(3): 843 – 853.]
- [16] 翟家齐, 董义阳, 祁生林, 等. 干旱区绿洲地下水生态水位阈值研究进展[J]. *水文*, 2021, 41(1): 7 – 14. [ZHAI Jiaqi, DONG Yiyang, QI Shenglin, et al. Advances in ecological groundwater level threshold in arid oasis regions[J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(1): 7 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ZHU Y H. Relationship of dominant herbaceous plant species and groundwater depth in Tongliao Plain, Northwestern China[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(6): 15363 – 15374.
- [18] LI F W, WANG Y, ZHAO Y, et al. Modelling the response of vegetation restoration to changes in groundwater level, based on ecologically suitable groundwater depth[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(7): 2189 – 2204.
- [19] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 25 – 33. [CAO Le, NIE Zhenlong, LIU Min, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 25 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 党学亚, 卢娜, 顾小凡, 等. 柴达木盆地生态植被的地下水阈值[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 1 – 8. [DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [21] WANG Y, CHEN M J, YAN L, et al. Quantifying threshold water tables for ecological restoration in arid Northwestern China[J]. *Groundwater*, 2020, 58(1): 132 – 142.
- [22] 汪勇, 陈敏建, 赵勇, 等. 基于生态圈层结构稳定的地下水位计算与调控[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 597 – 607. [WANG Yong, CHEN Minjian, ZHAO Yong, et al. Calculation and regulation of groundwater level based on the stability of groundwater-dependent ecosystem[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 597 – 607. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 尚海敏, 王文科, 段磊, 等. 天山北麓地下水基于生态水位的调控模拟分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 144 – 147. [SHANG Haimin, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Simulation on groundwater regulation based on ecological water table in the northern foot of Tianshan Mountain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 144 – 147. (in Chinese with

- English abstract)]
- [24] LI X, ZHENG Y, SUN Z, et al. An integrated ecohydrological modeling approach to exploring the dynamic interaction between groundwater and phreatophytes[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 356: 127 – 140.
- [25] 陈敏建, 张秋霞, 汪勇, 等. 西辽河平原地下水补给植被的临界埋深[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 24 – 33. [CHEN Minjian, ZHANG Qiuxia, WANG Yong, et al. Critical depth of recharge of the vegetation by groundwater in the West Liaohe Plain[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 24 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [26] KAISER T, WEHRHAN M, WERNER A, et al. Regionalizing ecological moisture levels and groundwater levels in grassland areas using thermal remote sensing[J]. *Grassland Science*, 2012, 58(1): 42 – 52.
- [27] 张兆吉, 费宇红. 华北平原地下水可持续利用图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2009. [ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong. Atlas of groundwater sustainable utilization in North China Plain[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2009. (in Chinese)]
- [28] 田晓华, 冯创业, 张增勤, 等. 京津冀协同发展保定市平原区地质环境保护调查评价报告[R]. 石家庄: 河北省地矿局水文工程地质勘察院, 2017. [TIAN Xiaohua, FENG Chuangye, ZHANG Zengqin, et al. Survey and evaluation report of geological environment protection in the plain area of Baoding City in the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei[R]. Shijiazhuang: Hydrological Engineering Geological Survey Institute of Hebei Geology and Mineral Bureau, 2017. (in Chinese)]
- [29] 李林森. 白洋淀流域平原区地下水动力场演化及预测[D]. 西安: 长安大学, 2020. [LI Linsen. Evolution and prediction of groundwater dynamic field in plain area of Baiyangdian Watershed[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 肖丽英. 海河流域地下水生态环境问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. [XIAO Liying. Research on the problem of groundwater eco-environment in Haihe River Basin[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 孟素花, 费宇红, 张兆吉, 等. 华北平原地下水脆弱性演变及对埋深变化的响应[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 78 – 81. [MENG Suhua, FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, et al. Evolution features and respond to groundwater depth variation of groundwater vulnerability in North China Plain[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2010, 8(6): 78 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 廖梓龙, 马真臻, 程双虎, 等. 地下水控制性临界水位及确定方法[J]. 水利水电技术, 2018, 49(3): 26 – 32. [LIAO Zilong, MA Zhenzhen, CHENG Shuanghu, et al. Dominant critical water level of groundwater and its determining method[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(3): 26 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 盖美, 耿雅冬, 张鑫. 海河流域地下水生态水位研究[J]. *地域研究与开发*, 2005, 24(1): 119 – 124. [GAI Mei, GENG Yadong, ZHANG Xin. Research on groundwater ecology water level of Haihe River Basin[J]. *Areal Research and Development*, 2005, 24(1): 119 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 华北平原地下水生态环境水位研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 323 – 326. [ZHANG Changchun, SHAO Jingli, LI Cijun, et al. A study on the ecological groundwater table in the North China Plain[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2003, 33(3): 323 – 326. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
实习编辑: 刘真真