

地下水超采管控体系及水量-水位双控体系研究进展

徐 腾^{1,2}, 王以鹏^{1,2}, 叶 逾^{1,2}, 谢一凡^{1,2}, 沈城吉^{1,3}, 南统超^{1,4}, 鲁春辉^{1,4}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:以《地下水管理条例》中空间管控和目标管控思想为指导, 分类梳理了地下水超采管控体系和水量-水位双控体系的研究进展及现状。地下水超采管控体系研究与我国具体国情结合日益紧密, 但目前相关管理制度与规范仍亟待完善; 地下水超采管控体系明确了已发生超采区域的划分标准, 但缺少统一且全面的地下水资源管控区划标准; 地下水水量-水位双控体系克服了由于水位或水量单方面控制、未考虑地下水水位与水量的内在联系、难以有效缓解由水位或水量变化而导致的生态环境问题的局限性; 水量-水位双控体系研究的难点在于通过监管点状分布的水位控制面状分布的开采量, 建议通过管理特定时间的水位控制一定时段的地下水开采量, 或通过管理面状开采量来对点状水位进行控制。

关键词:地下水超采管控; 地下水管理; 地下水水量-水位双控

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)04-0027-09

Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level//XU Teng^{1,2}, WANG Yipeng^{1,2}, YE Yu^{1,2}, XIE Yifan^{1,2}, SHEN Chengji^{1,3}, NAN Tongchao^{1,4}, LU Chunhui^{1,4} (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Guided by the concepts of spatial control and target control in the *Regulations on Groundwater Management*, this study classifies the current research progress and status of groundwater overexploitation control and dual control of groundwater quantity and water level systems. Summary are that the research on groundwater overexploitation control system is increasingly closely integrated with China's specific national conditions, but the relevant management systems and norms still need to be improved urgently. The groundwater overexploitation control system clearly defines the division standards for areas that have already experienced overexploitation, but lacks a unified and comprehensive groundwater resource control zoning standard. The dual control system of groundwater quantity and water level overcomes the limitations of unilateral control of water level or water quantity, failure to consider the inherent relationship between groundwater level and water quantity, and difficulty in effectively alleviating ecological and environmental problems caused by changes in water level or water quantity. The difficulty in the study of water volume and water level dual control system lies in the fact that the water level in the point distribution can be monitored to control the mining output of the areal distribution. It is suggested to control the groundwater exploitation in a certain period by managing the water level in a specific time, or control the point water level by controlling the areal mining output.

Key words: groundwater overexploitation control; groundwater management; dual control of groundwater quantity and water level

我国地下水资源量占水资源总量的 27.7%, 其对于新时代生态文明建设、经济社会高质量发展和

人民幸福生活具有重要意义^[1]。由于区域发展不平衡、不充分以及地下水资源管理规范尚未完善等

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200500); 国家自然科学基金面上项目(42377046)

作者简介:徐腾(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: teng.xu@hhu.edu.cn

通信作者:鲁春辉(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: clu@hhu.edu.cn

问题,我国面临着严峻的地下水资源超采治理挑战^[2]。截至2020年,全国地下水超采区总面积已接近62万 km²^[3]。由地下水超采引发的地面沉降、地裂缝、植被退化、水资源枯竭等一系列生态与地质环境问题已严重影响了社会经济和生态环境的可持续发展^[4-5]。为缓解水资源问题,习近平总书记在2014年提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水新思路。而后,以京津冀地区为重点的地下水超采综合治理工作逐步展开,地下水管理与保护制度建设和科学研究的重点稳步地由地下水水位或水量的单方面控制转向水量-水位双重控制^[6-8]。

20世纪80年代后,政府以解决地下水资源问题为目标,以地下水水位、水量控制为重要抓手制定了一系列的政策法规。1988年发布的《中华人民共和国水法》首次提出应在易发生盐碱化和渍害的地区进行地下水水位控制。2006年发布的《取水许可和水资源费征收管理条例》首次指出应对地下水取水量进行总量控制。早期的法规条例从地下水水位控制到取水总量控制,单方面地对地下水开发利用进行了要求。2012年,《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》首次将地下水水位控制和取水总量控制共同考虑以严格地下水管理和保护。2021年,国务院颁布了首项系统性规范地下水管理工作的规定——《地下水管理条例》,基于“统筹规划、节水优先、高效利用、系统治理”的原则,着重强调地下水水位、水量的控制。相较于水位或水量单方面的控制,水量-水位双控注重探究区域地下水水位和水量的耦合关系,并基于耦合关系更加科学合理地确定地下水水位和水量的综合控制指标^[9-10]。然而,目前鲜有文献对水量-水位双控的相关研究进行系统总结和综述,制约了基于地下水水量-水位双控的地下水管理和保护研究与政策优化。为了便于科研和政策管理人员全面有效地了解地下水超采管控研究进展,促进地下水超采管控及水量-水位双控体系的发展,本文拟综述地下水超采管控体系以及水量-水位双控体系研究进展,从空间管控和目标管控两个层面进行科学阐述与分析,并讨论现有研究存在的不足及其优化途径。

1 地下水超采管控体系研究进展

近年来,随着社会经济的迅速发展,人们对水资源开发利用的程度越来越高,地下水超采问题日益突出,以华北平原为主的北方地区面临着严峻的地下水超采治理问题^[11-12]。地下水超采直接导致了地下水位下降,进而引发地面沉降、地下水资源污染及水循环失衡等生态环境问题^[3,12-15]。采用水利部

发布的1997—2023年《水资源公报》的地下水开采数据,结合文献[16]的数据,得到我国1980—2023年地下水开采量变化,如图1所示。

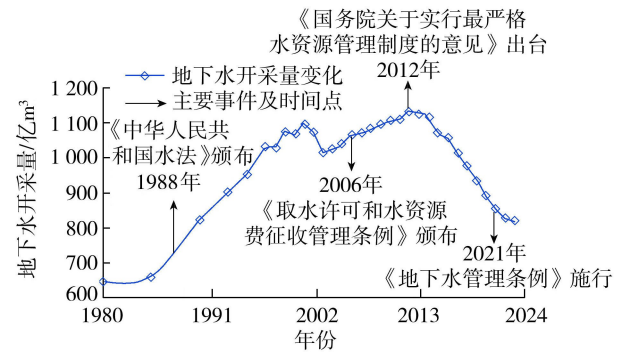


图1 1980—2023年我国地下水开采量变化
Fig.1 Change process of groundwater exploitation in China from 1980 to 2023

自2012年以来,我国地下水开采量持续减少,为解决地下水超采问题所采取一系列措施成效较为显著。图2为地下水超采成因及治理措施,可见地下水超采管控体系主要以缓解地下水超采问题为目的,通过强化地下水整体、区域管控等途径,开展以“管”为主的地下水超采管控。目前,国内缓解地下水超采问题的途径主要分为两种:①通过建立合理的治理模式来规范限制地下水资源开发^[17];②探索有效的地下水水量-水位双控体系来定量地控制地下水资源开采^[18]。

1.1 地下水超采治理法律制度研究

早在1930年,已有国外学者开展了地下水超采治理法律制度的相关研究^[19]。国内对地下水的相关研究最早可追溯到1990年,周伯青^[20]对美国1989年提出的地下水方面的研究项目进行了总结。2005年,颜勇^[21]对澳大利亚地下水资源的开发利用状况、问题、立法历程及管理体制进行了详细介绍。早期国内仅有少部分学者对国外地下水治理及管理制度进行专门研究,开展的相关研究以介绍与总结为主。2010年以后,国内越来越多的学者开始对西方国家和东亚国家的地下水治理及管理法律制度进行深入研究,同时依据《中华人民共和国水法》等法律制度,结合我国实际情况,为我国地下水超采治理及管理的法律制度建设提出科学建议^[22-23]。2019年,周圣佑^[24]将地下水超采治理法律制度的主要作用总结为化解地下水的采补失衡问题,提出应完善地下水超采区划分规定并加强地下水超采法律责任。2022年,李原园等^[25]对《地下水管理条例》进行了深度的解读,表明当前国家立法对地下水实施了“分区、分层、分类”空间管控,同时也根据

地下水水位控制指标、水量控制指标及相关技术标准实施目标管控。

自 2021 年 12 月《地下水管理条例》正式实施，

我国地下水管理法律制度的研究迈入了一个新的阶

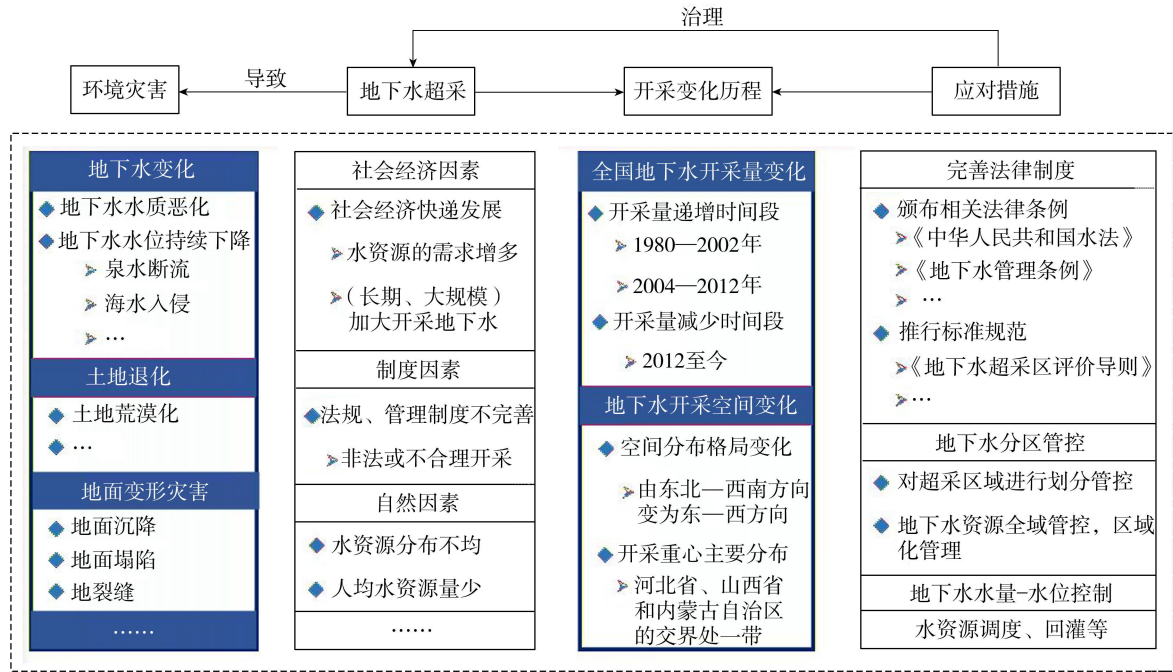


图 2 地下水超采成因及治理措施

Fig. 2 Causes and treatment measures of groundwater overexploitation

段,地下水超采管控的重点转向“空间管控”和“目标管控”相结合(兼顾)的地下水超采智慧化管理和科学决策技术研究。同时,《地下水管理条例》显露出一些亟待解决的问题,如未考虑地下水流动系统及其含水介质的异同、行政区划与地下水管控区划的差异、地表水与地下水资源的时空差异以及缺少对地下水资源管控区域进行划分的标准规范等。

1.2 地下水超采管控区划体系

图 3 为 2013 年和 2023 年全国水资源一级区地下水开采量变化情况。由图 3 可见,我国地下水开采总量持续减少,开采重心向西北方向转移,水资源

一级分区中松花江区、海河区、淮河区 and 长江区的地下水开采水量显著减少,但西北诸河区的地下水开采量明显上升。为更好地缓解地下水超采问题,我国于 2021 年底出台的《地下水管理条例》中对地下水实施空间管控,明确了地下水区划在地下水超采治理及综合管理中的重要地位。目前,地下水区划分类体系主要分为地下水超采区分类体系与地下水水量-水位控制区分类体系^[8]两类。其中地下水超采区分类体系作为在已确定超采区的基础上进行的二次划分,是地下水管理的部分内容,而地下水水量-水位控制区分类体系则是对地下水资源管理现有研究的系统总结。

GB/T 34968—2017《地下水超采区评价导则》是地下水超采区分类体系的基础,主要采用水位动态法、引发问题法及开采系数法等评价方法对地下水超采区初步划分^[26],按照不同的标准进行分类分区与分级分区。近年来,国内学者主要在该体系的基础上朝着细化超采区及拓展划分方法的方向开展研究^[27]。地下水水量-水位控制区分类体系是在地下水管理政策不断完善的过程中,对地下水资源空间管控的相关研究较为系统的总结,体现了未来对地下水资源进行科学的空间管控的发展方向。根据地下水管理区研究者关注重点的不同,该体系主要分为 3 类地下水管理区划标准:①地下水分类区

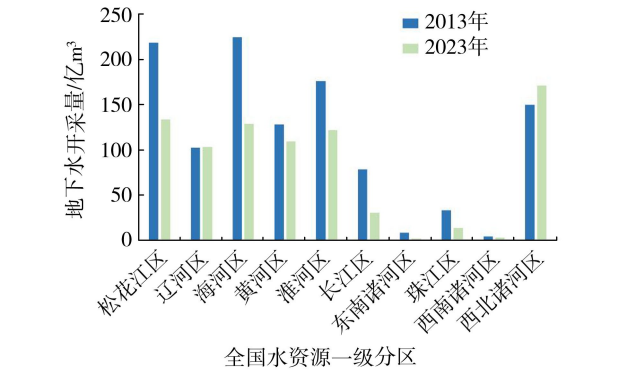


图 3 2013 年和 2023 年全国水资源一级分区地下水开采量变化

Fig. 3 Changes in groundwater exploitation under national water resources primary zone in 2013 and 2023

划^[28],将地下水赋存的水文地质条件与开发利用造成的生态环境效应等作为地下水管理区划的主要影响因子;②地下水分级区划^[29],除考虑地下水赋存的水文地质条件及开发利用情况等因素外,还将流域分区或行政区划纳入地下水管理区划的考虑范围中,对地下水管理区域进行多级分区;③地下水分功能区划^[30],将地下水服务功能及开发利用类型作为划分地下水功能区的主要影响因素。

2 地下水水量-水位双控制体系研究进展

地下水水位控制、总量控制以及水量-水位双控是解决地下水超采问题的主要管控途径。除对超采区域进行空间管控外,《地下水管理条例》对水位及水量控制指标有着目标管控的要求。目前国内外对于地下水水位及水量单方面的研究成果较为丰富^[31-32],水量-水位双控研究则是在单方面研究的基础上进行的更深层次的综合性研究。地下水水量-水位双控体系以“控”为主,旨在通过对地下水水量、水位的单方面或双重控制限制地下水开采。地下水水量、水位控制作为实现地下水超采管控的主要途径之一,其理论研究的发展能够进一步推动地下水超采管控理论研究。本文将对地下水水位和水量的单层控制体系进行分类综述,最后结合二者间的关系对水量-水位双控指标体系进行分类剖析,体系脉络见图4。

2.1 地下水水位单控体系

地下水位下降使得区域地下水埋深不足进而造成作物发育不良,甚至发生湿地生态退化等更加严重的环境地质问题^[33]。波勒诺夫于1931年首次提出了“地下水临界深度”的概念,后来一般认为临界深度是地下水在土壤开始返盐时的埋深^[34]。20世纪50年代中期,我国有计划地开展了全国区域水文

地质普查工作^[35],并在早期的区域水文地质普查报告中对地下水水位控制进行过大量阐述。目前,根据地下水功能属性研究视角的差异,地下水水位控制的相关研究^[36-38]主要侧重于控制水位的资源性^[39]、环境性^[40]、生态性^[41]及多属性^[42]共4个方面。在确定控制地下水水位需达到的功能后,国内外学者主要通过室内室外试验^[43]、探寻地下水水位和功能属性的多年耦合关系^[44]以及建立地下水数值模型^[45]等途径确定地下水水位控制指标。此外,近年来机器学习发展迅速,利用模型对大量的区域地下水水位及相应水文气象数据进行学习,即可对新数据做出决定和预测^[46]。如Kim等^[47]基于地下水水位变化情况复杂的济州岛吉莱地区的大量地下水水位及水文气象数据,提出了适用于地下水水位预测的长短期记忆模型对其进行了较好的预测。目前,机器学习模型在地下水水位预测中的研究已经取得了一定进展,根据模型特性将地下水水位控制所需达到的功能作为输入,将有益于确定地下水水位控制指标的研究。

地下水水位控制是解决地下水超采治理管理问题的重要研究方向,但相关研究中对控制水位的定义仍无统一的规范且在水位控制的实践层面缺少研究。地下水控制水位作为一个动态的概念,是受地下水开发利用状况以及年内水文气象等影响的一组数值,当前在进行地下水控制性关键水位管理时,尚未能较好地采取不同的管理策略、预案及措施以应对不同类型的地下水变化状态,此外仅通过地下水水位控制这一途径来解决地下水管理问题存在局限性。

2.2 地下水水量单控体系

地下水总量控制是指对一个区域的地下水允许开采利用总量或对不同用户许可水量进行的控制管

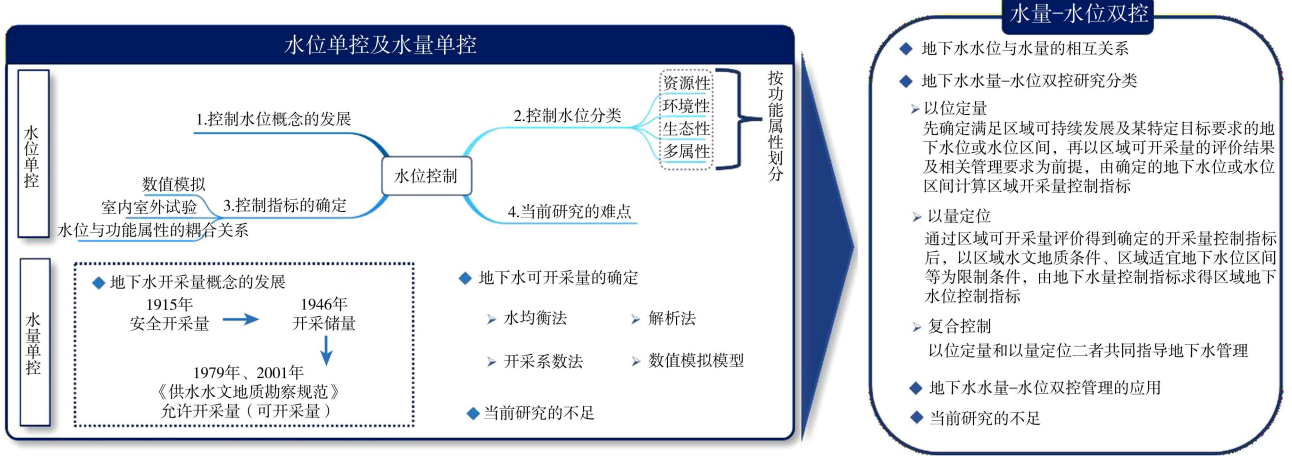


图4 地下水水量-水位双控体系脉络

Fig. 4 Theoretical framework of dual control system of groundwater quantity and water level

理,其控制目标主要是区域地下水的人为开采量。地下水开采量的确定是进行地下水总量控制的关键,在当前的建设项目水资源论证等实际工作中,通常采用 GB50027—2001《供水水文地质勘察规范》中定义的地下水允许开采量(地下水可开采量)进行计算和确定。1915 年, Lee^[48]提出了安全开采量的概念,而后 1956 年普洛特尼科夫提出的开采储量被我国沿用^[49]。直到 1979 年, TJ27—78《供水水文地质勘察规范》抛弃了传统分类法中的开采储量的概念,进而采用能够反映地下水补排关系的允许开采量^[50]。目前国内学者在地下水总量控制的相关研究中所使用的开采量主要为安全开采量^[51]、允许开采量(可开采量)及可持续开采量。其中允许开采量(可开采量)具有明确的国家标准与计算方法,在实际中广泛使用。各研究中对地下水开采量的各种定义差异较小,具体见表 1^[48-49,51-53]。

当前地下水开采量的评价方法主要有水均衡法、开采系数法、解析法和数值模拟法等^[54-56]。已有学者对地下水开采量的评价方法进行了分类,如王振龙等^[51]将国内外地下水开采量的评价方法分为集中式参数模型(主要包括水均衡法、开采系数法、系统分析法等)和分布式参数模型(主要包括解析法和数值法)。由于区域水文地质复杂性及实际应用需求的差异,在不同区域采用的评价方法不尽相同,如索瑞厅等^[57]采用水均衡法和开采系数法对内蒙古自治区多伦县的地下水可开采量进行评价,将区域可开采资源量确定为 2072.53 万 m³; Luo 等^[58]基于对河北省沧州市地下水开发现状的预测,通过调整地下水开发布局,采用三维变参数地下水

渗流数值模型评价地下水可开采量; Wang 等^[59]通过综合分析长白山地区水文地质条件和地形特征的空间格局,提出了适合于季节性冻融山区地下水资源量时空分布评价的新策略,为准确评价地下水资源量提供了参考。

目前地下水水量控制的相关研究中,关于各类地下水可开采量的定义深入贯彻了可持续发展原则,且大多以生态地质环境及经济社会发展受到的影响在某一限度内为目标,相关研究趋于完善。对区域地下水可开采量的评价研究主要集中于评价区域地下水开采潜能,但大多欠缺全方位的综合考量,如从社会经济、生态地质环境等多个角度建立综合评价系统。此外,地下水系统具有较强的不确定性,目前理论模型的设置和简化导致不能更好地应用于实际。

2.3 地下水水量-水位双控体系

地下水水位控制的研究集中于确定特定区域内满足某些地下水功能属性的地下水位,即确定水位控制指标。地下水的水量控制则主要对规定区域内某种定义下的可开采量进行评价,即确定水量控制指标。水位和水量均为地下水在含水层中的数量表现,地下水位能够直观体现区域地下水量的丰富程度,在区域水文地质条件已知时可对地下水水量进行定量估计。而区域地下水水量的多少决定了地下水水位的高低,其主要受区域地下水天然补排关系及人工采补的影响。

地下水水位与水量具有孪生性^[8],二者能够共同反映人类活动对地下水系统的影响。地下水水位控制及水量控制是地下水管理中解决地下水超采问

表 1 地下水开采量的各类定义

Table 1 Various types of definitions of recoverable amounts of groundwater exploitation			
名称	时间	定义	来源
安全开采量	1915 年	可以进行有规律且持久的开采而不引起疏干危险的极限水资源量	文献[48]
	2010 年	在一定时期内,通过技术经济合理的取水方案,在不产生不能承受的生态环境问题,满足地下水的资源、生态环境和地质环境等功能的前提下,达到地下水资源可持续开发利用的最大开采量	文献[51]
开采储量	1956 年	用技术经济合理的取水工程能从含水层中取出的水量,并在预定开采期内不致发生水量减少、水质恶化等不良后果	文献[49]
允许开采量 (可开采量)	1979 年	通过技术经济合理的取水构筑物,在整个开采期内出水量不会减少,动水位不超过设计要求,水质和水温变化在许可范围内、不影响已建水源地的正常开采、不发生危害性的工程地质现象的前提下,单位时间内从水文地质单元或取水地段中能够取得的出水量	TJ27—78《供水水文地质勘察规范》
	2001 年	通过技术经济合理的取水方案,在整个开采期内出水量不会减少,动水位不超过设计要求,水质和水温变化在允许范围内,不影响已建水源地正常开采,不发生危害性环境地质现象的前提下,单位时间内从水文地质单位或取水地段中能够取得的水量	GB50027—2001 《供水水文地质勘察规范》
可持续开采量	2003 年	从可持续发展的观念出发,以供水永续性为原则,在环境承载力许可的条件下,使当今世代与未来世代均可持续利用的水量	文献[52]
	2010 年	在满足水均衡约束、环境约束、经济约束及社会约束的条件下,一个地下水系统可以永续开采的水量	文献[53]

题的两类途径,但就地下水水位及水量二者的关系而言,单一途径的控制并不能很好地解决超采问题^[60-61]。基于水资源管理的需要,地下水水量-水位双控开始逐渐发展,在最严格的水资源管理制度下必须对水位和水量进行动态均衡的综合控制,当前理论研究的成果和实际管理的经验已表明推行地下水水位与水量的双控管理是当前解决地下水超采问题更加有效的管理模式,地下水水量-水位双控管理逐步成为研究重点。根据地下水水位控制和水量控制的主导地位,当前地下水水量-水位双控的研究可分为以位定量、以量定位以及复合控制3类。

a. 以位定量。即先确定满足区域可持续发展及某特定目标要求的地下水水位或水位区间,再以区域可开采量的评价结果及相关管理要求为前提,由确定的地下水水位或水位区间计算区域开采量控制指标。殷玉忠等^[62]通过确定安徽省阜阳市的适宜地下水水位区间,将在适宜水位区间内的地下水开采量确定为适宜开采量。王晓玮等^[18]根据不同地下水功能区的管理水位确定适宜地下水水位区间,以水位区间为约束采用数值模拟法确定了地下水开采量。

b. 以量定位。即通过区域可开采量评价得到确定的开采量控制指标后,以区域水文地质条件、区域适宜地下水水位区间等为限制条件,由地下水水量控制指标求得区域地下水水位控制指标。叶勇等^[29]在2009年首次提出结合控制水位和可开采量对地下水进行双重管理,并根据地下水开采量与地下水可开采量之间的关系划定地下水控制红线水位和蓝线水位。谢新民等^[63]开发了以地下水水量-水位双控思想为基础的水资源配置模型,主要由水资源优化配置模块与可开采量动态计算模块得到不同水平年的地下水水量变化,由水量变化模拟水位变化。

c. 复合控制。即以位定量和以量定位二者共同指导地下水管理。闫学军等^[64]于2012年提出了水位-水量“二元”指标管理模式,以地下水控制水位为表征指标,地下水可开采量为总量控制指标,二者共同作用于地下水管理。许一川^[65]根据地下水含水层损耗程度将地下水开采区划分为Ⅰ类区和Ⅱ类区,并认为Ⅰ类区应主要体现“以位控量”的管理思想,Ⅱ类区则实行“以位控量”和“以量控位”的双重控制。

随着地下水水量-水位双控相关研究的不断发展,水量-水位双控管理模式在以华北平原为主的部分区域取得了较好的应用。如姚梅^[66]以安徽省阜阳市为研究区,建立了顶底板固结条件下地下水数

值模型,结合土体变形方程,提出了基于地面沉降约束的地下水水量-水位双控方案。王建磊^[67]以ArcGIS为平台设计并建立了吉林市区地下水水量-水位双控管理系统,提高了水文地质工作的工作效率,为地下水资源的科学管理及合理开发利用提供支持。

3 结论与展望

我国地下水超采管控的相关研究自20世纪80年代就已持续开展,主要集中于相关法律制度的制定、管理区域的划分以及应对地下水超采问题的解决措施:

a. 法律制度的研究主要集中于吸取西方和东亚国家的政策经验,并将合适的管理政策条例与我国具体实际相结合。但近年实施的《地下水管理条例》仍存在一定的不足,需进一步完善相关法律法规及标准规范。

b. 管理区域划分的研究主要集中于地下水超采区的细分以高效治理地下水超采问题,以及地下水开发利用区的细分以预防管控地下水超采问题的发生。

c. 水量-水位双控是当前控制地下水超采问题的新思路,也是未来地下水管理问题的研究重点。水量-水位双控研究主要分为以位定量、以量定位和复合控制3类。近年来国内主要研究区以华北平原为主且部分研究在治理地面沉降上有较好的应用,但仍未能建立较为全面规范的地下水水量-水位双控指标体系及方法。

地下水水量-水位双控管理研究的难点,在于通过监管点状分布的水位达到控制面状分布的开采量,通过管理特定时间的水位达到控制一定时段的地下水开采,或通过控制面状开采量来对点状水位进行控制。目前国内研究仍需要继续深入和完善,具体表现在:

a. 从科学性和管理性两方面对管理制度的内涵及指标设计开展综合研究。地下水水量-水位双控管理是科学问题,也是管理问题,当前的相关研究多偏重于某一方面,需要更多地将理论与实际相结合。

b. 加强地下水水位和水量控制的技术方法和短期动态控制指标的研究。目前根据实际数据建立的区域地下水水位、水量间的统计关系无法反映多因素影响下的地下水系统变化,易产生水位得到有效控制但开采量不易控制,或者开采量得到有效控制但水位还在持续下降的情况。在研究的时间尺度上,对长期静态的指标研究较多,短期动态指标的研

究较少,加强该方面的研究才能满足政策对于动态管理和动态考核的要求。

c. 加强区域地下水水位、水量监控,构建科学合理的水量-水位双控指标体系。当前地下水水位、水量监控数据仍需要不断完善,相关监控点位更需要科学合理地布置,才能有效地支持地下水水量-水位双控管理。

d. 建立区域地下水水量-水位双控动态集成数据库及管理系统。基于区域性地下水管控模型和长历时且密度合理的数据建立动态集成数据库后,充分考虑地下水资源、生态及环境地质功能,利用数值模型和替代模型建立以采补平衡为目标的水量-水位双控指标确定模型,并通过相应的模型达到高效确定地下水取水总量指标与控制性关键水位的目的。

参考文献:

[1] 贾永锋,赵萌,尚长健,等. 黄河流域地下水环境现状、问题与建议[J]. 环境保护,2021,49(13):20-23. (JIA Yongfeng, ZHAO Meng, SHANG Changjian, et al. Current situation and suggestions on groundwater environmental problems in the Yellow River basin [J]. Environmental Protection,2021,49(13):20-23. (in Chinese))

[2] 王冠儒,胡继连,王秀鹃. 山东省地下水超采井灌区农业水权制度改革研究[J]. 水利经济,2022,40(2):68-73. (WANG Guanru, HU Jilian, WANG Xiujuan. Reform of agricultural water right system in well irrigation areas of groundwater over-exploitation in Shandong Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022,40(2):68-73. (in Chinese))

[3] 尤戆聪,易露霞. 看不见的地下水超采和污染[J]. 生态经济,2022,38(2):5-8. (YOU Yucong, YI Luxia. Invisible groundwater overexploitation and pollution[J]. Ecological Economy,2022,38(2):5-8. (in Chinese))

[4] 梁广林,刘成程,戴霞,等. 京津冀地下水超采和地面沉降监管对策[J]. 环境保护,2021,49(20):53-55. (LIANG Guanglin, LIU Chengcheng, DAI Xia, et al. The supervisory countermeasure of groundwater over-exploitation and ground subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Protection, 2021, 49 (20):53-55. (in Chinese))

[5] HA Da, ZHENG Gang, LOÁICIGA H A, et al. Long-term groundwater level changes and land subsidence in Tianjin, China[J]. Acta Geotechnica,2021,16(4):1303-1314.

[6] 王宗志,王宇,王坤,等. 滨海地下水库建设与利用方式对含水层水盐运移规律的影响[J]. 水资源保护,2023,39(4):69-78. (WANG Zongzhi, WANG Yu, WANG Kun, et al. Influences of coastal underground reservoir construction and utilization on saltwater and freshwater

transport law in aquifers[J]. Water Resources Protection, 2023,39(4):69-78. (in Chinese))

[7] 卢毅,宋泽卓,刘瑾,等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):81-88. (LU Yi, SONG Zezhuo, LIU Jin, et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):81-88. (in Chinese))

[8] 孙雪峰,孙春峰. 地下水水位水量双控管理研究综述[J]. 水资源开发与管理,2022,8(8):25-29. (SUN Xuefeng, SUN Chunfeng. Summary of research on dual control management of groundwater level and quantity[J]. Water Resources Development and Management,2022,8(8):25-29. (in Chinese))

[9] 戴振宇. 基于数值模拟的呼和浩特城市规划区地下水量-水位双控研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.

[10] 张喆. 石家庄平原区浅层地下水水量-水位双控指标研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.

[11] 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))

[12] LUO Jianmei, ZHANG Hongmei, QI Yongqing, et al. Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Agricultural Water Management,2022,262:107326.

[13] 孙才志,陈相涛,陈雪姣,等. 地下水污染风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):152-161. (SUN Caizhi, CHEN Xiangtao, CHEN Xuejiao, et al. Recent advances in groundwater contamination risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):152-161. (in Chinese))

[14] 沈回归,饶文波,谭红兵,等. 高寒区典型流域地下水化学特征、影响因素及健康风险[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):9-17. (SHEN Huigui, RAO Wenbo, TAN Hongbing, et al. Chemical characteristics, influencing factors and human health risks of groundwater in a typical alpine watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (6):9-17. (in Chinese))

[15] 张迪,王煜,郑小康,等. 大沽河流域海水入侵数值模拟及其全局敏感性分析[J]. 水资源保护,2024,40(1):100-107. (ZHANG Di, WANG Yu, ZHENG Xiaokang, et al. Numerical simulation of seawater intrusion in the Dagou River Basin and its global sensitivity analysis[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 100-107. (in

- Chinese))
- [16] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 79-93. (XU Lili, SHU Longcang, LI Wei, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 79-93. (in Chinese))
 - [17] 马磊. 河北省地下水超采综合治理实践及启示[J]. 水资源管理, 2017(7): 51-54. (MA Lei. Comprehensive treatment practice of groundwater overexploitation[J]. China Water Resources, 2017(7): 51-54. (in Chinese))
 - [18] 王晓玮,邵景力,王卓然,等. 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[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 17-24. (WANG Xiaowei, SHAO Jingli, WANG Zhuoran, et al. 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 [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 17-24. (in Chinese))
 - [19] BAKER D M, CONKLING H. Water supply and utilization: an outline of hydrology from the viewpoint of the arid section of the united states together with an outline of water law and its administration as it has developed in the arid states[M]. New York: Groundwater in Alluvial Deposits, 1930: 17-30.
 - [20] 周伯青. 美国在一九八九年提出的灌溉与排水方面的研究项目[J]. 灌溉排水, 1990(4): 32-35. (ZHOU Boqing. By the ASCE research and education administrative committee [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1990(4): 32-35. (in Chinese))
 - [21] 颜勇. 澳大利亚地下水资源管理的法律与政策[J]. 地下水, 2005, 27(2): 75-77. (YAN Yong. Legislation and policy of groundwater resources management in australia [J]. Underground Water, 2005, 27(2): 75-77. (in Chinese))
 - [22] 姜斌,邵天一. 国外地下水管理制度经验借鉴[J]. 水利发展研究, 2010, 10(6): 68-73. (JIANG Bin, SHAO Tianyi. Experience of foreign groundwater management system for reference [J]. Water Resources Development Research, 2010, 10(6): 68-73. (in Chinese))
 - [23] 刘卓,戴向前,马俊. 欧盟地下水管理法规政策体系及其启示[J]. 水利发展研究, 2019, 19(5): 61-65. (LIU Zhuo, DAI Xiangqian, MA Jun. The policy and regulation system of groundwater management in European Union and its enlightenments [J]. Water Resources Development Research, 2019, 19(5): 61-65. (in Chinese))
 - [24] 周圣佑. 我国地下水超采治理法律制度研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020.
 - [25] 李原园,陈飞,羊艳,等. 《地下水管理条例》立法思路与法律制度设计[J]. 中国水利, 2022(6): 11-14. (LI Yuanyuan, CHEN Fei, YANG Yan, et al. Legislative thoughts and legal system of groundwater management regulation[J]. China Water Resources, 2022(6): 11-14. (in Chinese))
 - [26] 何晔. 地下水超采区划定方法对比分析[J]. 水利技术监督, 2021(10): 112-113. (HE Ye. Comparative analysis of delimitation method of groundwater overexploitation area [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021(10): 112-113. (in Chinese))
 - [27] 董亚楠,邢立亭,张欣慧,等. 地下水超采区评价法及其应用[J]. 地质与勘探, 2019, 55(2): 641-648. (DONG Ya'nan, XING Liting, ZHANG Xinhui, et al. Assessment methods of groundwater overdraft area and its application [J]. Geology and Exploration, 2019, 55(2): 641-648. (in Chinese))
 - [28] 朱文举,平建华,侯俊山,等. 安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 200-208. (ZHU Wenju, PING Jianhua, HOU Junshan, et al. A study of the water resources management and division of the groundwater heat pump system construction in Anyang [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 200-208. (in Chinese))
 - [29] 叶勇,谢新民. 地下水控制性水位管理分区研究[J]. 黑龙江水专学报, 2009, 36(1): 116-119. (YE Yong, XIE Xinmin. Study on the management subarea based on groundwater dominate water level [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2009, 36(1): 116-119. (in Chinese))
 - [30] 唐克旺,杜强. 地下水功能区划分浅谈[J]. 水资源保护, 2004, 20(5): 16-19. (TANG Kewang, DU Qiang. Discussion on groundwater function zoning [J]. Water Resources Protection, 2004, 20(5): 16-19. (in Chinese))
 - [31] MU Enlin, YAN Long, DING Aizhong, et al. Determination of controlled limit value of groundwater level depth and management practice in Xi'an, China [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 15505.
 - [32] RASEL H M, AL MAMUN A, HASNAT A, et al. Sustainable futures in agricultural heritage: geospatial exploration and predicting groundwater-level variations in Barind tract of Bangladesh [J]. Science of the Total Environment, 2023, 865: 161297.
 - [33] 韩双宝,李甫成,王赛,等. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1001-1019. (HAN Shuangbao, LI Fucheng, WANG Sai, et al. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin [J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1001-1019. (in Chinese))
 - [34] 袁长极. 地下水临界深度的确定[J]. 水利学报, 1964(3): 50-53. (YUAN Changji. Determination of critical depth of groundwater [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(3): 50-53. (in Chinese))
 - [35] 陈梦熊. 现代水文地质学的演变与发展[J]. 水文地质

- 工程地质, 1993 (3): 1-2. (CHEN Mengxiang. The advance and evolution of modern hydrogeology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1993 (3): 1-2. (in Chinese))
- [36] 唐克旺, 侯杰, 于丽丽. 基于功能的地下水控制水位确定方法[J]. 水资源管理, 2015 (9): 30-32. (TANG Kewang, HOU Jie, YU Lili. Approaches for controlling groundwater water level based on its functions[J]. China Water Resources, 2015 (9): 30-32. (in Chinese))
- [37] MOGHADDAM H K, BANIHAIB M E, JAVADI S, et al. A framework for the assessment of qualitative and quantitative sustainable development of groundwater system[J]. Sustainable Development, 2021, 29 (6): 1096-1110.
- [38] CUI Haohao, ZHANG Guanghui, WANG Qian, et al. Study on index of groundwater ecological function crisis classification and early warning in Northwest China[J]. Water, 2022, 14 (12): 1911.
- [39] 王俊. 滨海地区地下水源地预警方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [40] 孙晓林. 滹沱河冲洪积扇地下水数值模拟及其适宜水位控制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [41] 刘玉兰. 下辽河平原地下水生态水位与水资源优化配置研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2007.
- [42] 王琨, 束龙仓, 刘波, 等. 地下水安全开采量的内涵及安全开采控制水位划定[J]. 水资源保护, 2014, 30 (6): 7-12. (WANG Kun, SHU Longcang, LIU Bo, et al. Connotations of safe yield of groundwater and determination of controlled groundwater level for safe exploitation [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (6): 7-12. (in Chinese))
- [43] CUI Weizhe, HAO Qichen, XIAO Yong, et al. Combining river replenishment and restrictions on groundwater pumping to achieve groundwater balance in the Juma River Plain, North China Plain[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 902034.
- [44] FENG Qi, PENG Jiazhong, LI Jianguo, et al. Using the concept of ecological groundwater level to evaluate shallow groundwater resources in hyperarid desert regions [J]. Journal of Arid Land, 2012, 4 (4): 378-389.
- [45] VAN DE CRAATS D, VAN DER ZEE S E A T M, LEIJNSE A. Anticipatory drainage base management for groundwater level optimization [J]. Water Resources Research, 2021, 57 (11): e2021WR029623.
- [46] 牛欣怡, 鲁程鹏, 卢佳赞, 等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (4): 74-82. (NIU Xinyi, LU Chengpeng, LU Jiayun, et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (4): 74-82. (in Chinese))
- [47] KIM D, JANG C, CHOI J, et al. A case study: groundwater level forecasting of the Gyorae area in actual practice on Jeju Island using deep-learning technique [J]. Water, 2023, 15 (5): 972.
- [48] LEE C H. The determination of safe yields of underground reservoirs of the closedbasin type[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1915, 78 (1): 148-218.
- [49] 苏联地质部. 地下水开采储量分类规范[M]. 蔡东生, 译. 北京: 地质出版社, 1956.
- [50] 康凤新. 地下水允许开采量及其潜力评价研究[J]. 工程勘察, 2005 (3): 29-33. (KANG Fengxin. Research on allowable yield of groundwater and its potential evaluation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005 (3): 29-33. (in Chinese))
- [51] 王振龙, 鲁程鹏, 刘猛. 地下水安全开采量的概念与评价方法研究[J]. 水文, 2010, 30 (2): 14-19. (WANG Zhenlong, LU Chengpeng, LIU Meng. Concept and estimation of safe yield of groundwater systems [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30 (2): 14-19. (in Chinese))
- [52] 张人权. 地下水资源特性及其合理开发利用[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30 (6): 1-5. (ZHANG Renquan. Characteristics of groundwater resources and their reasonable development [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30 (6): 1-5. (in Chinese))
- [53] 周仰效, 李文鹏. 地下水可持续开发: 概念、原理与方法[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (1): 1-8. (ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Groundwater sustainability: concepts and approaches [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37 (1): 1-8. (in Chinese))
- [54] MARTINSEN G, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Optimizing water resources allocation in the Haihe River Basin under groundwater sustainability constraints [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29 (6): 935-958.
- [55] 王金生, 王长申, 滕彦国. 地下水可持续开采量评价方法综述[J]. 水利学报, 2006, 37 (5): 525-533. (WANG Jinsheng, WANG Changshen, TENG Yanguo. Review on assessment methods of groundwater sustainable yield [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (5): 525-533. (in Chinese))
- [56] LYRA A, LOUKAS A, SIDIROPOULOS P, et al. An integrated modeling system for the evaluation of water resources in coastal agricultural watersheds: application in Almyros Basin, Thessaly, Greece [J]. Water, 2021, 13 (3): 268.
- [57] 索瑞厅, 张绍兴, 姜德强, 等. 多伦县地下水资源评价与可开采潜力分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45 (3): 50-57. (SUO Ruiting, ZHANG Shaoxing, JIANG Deqiang, et al. Groundwater resource assessment and exploitable potential analysis in Duolun County [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,

[39] 赵芬,庞爱萍,李春晖,等. 黄河干流与河口湿地生态需水研究进展[J]. 生态学报,2021,41(15):6289-6301. (ZHAO Fen,PANG Aiping,LI Chunhui,et al. Progress in ecological water requirements in the mainstream and estuary ecosystem of the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (15): 6289-6301. (in Chinese))

[40] LU Shibao, CAI Wenting, SHAO Wei, et al. Ecological water requirement in upper and middle reaches of the Yellow River based on flow components and hydraulic index[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(20):10956.

[41] SMAKHTIN V, REVENGA C, DÖLL P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity[J]. Water International,2004,29(3):307-317.

[42] 赵勇,黄可静,高学睿,等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J]. 水资源保护,2022,38(4):39-47. (ZHAO Yong,HUANG Kejing,GAO Xuerui,et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):39-47. (in Chinese))

[43] 张永凯,孙雪梅. 黄河流域水资源利用效率测度与评价[J]. 水资源保护,2021,37(4):37-43. (ZHANG Yongkai,SUN Xuemei. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):37-43. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-30 编辑:王芳)

(上接第 35 页)

[58] LUO Zujiang, WANG Yan. 3-D variable parameter numerical model for evaluation of the planned exploitable groundwater resource in regional unconsolidated sediments [J]. Journal of Hydrodynamics,2012,24(6):959-968.

[59] WANG He, WANG Fugang, SUN Jingwei, et al. New strategy for evaluating the spatiotemporal distribution of groundwater resource quantity under seasonal freeze/thaw in mountainous areas [J]. Journal of Hydrology, 2023, 616:128850.

[60] NOORDUIJN S L, COOK P G, SIMMONS C T, et al. Protecting groundwater levels and ecosystems with simple management approaches[J]. Hydrogeology Journal,2019, 27(1):225-237.

[61] LI Shuoyang, YANG Guiyu, WANG Hao, et al. A spatial-temporal optimal allocation method of irrigation water resources considering groundwater level [J]. Agricultural Water Management,2023,275:108021.

[62] 殷玉忠,刘佩贵. 阜阳市现状地下水水位水量适宜性分析[J]. 安徽地质, 2017, 27 (4): 289-293. (YIN Yuzhong,LIU Peigui. Analysis of suitability of groundwater level and withdrawal in current situation in Fuyang City [J]. Geology of Anhui, 2017, 27 (4): 289-293. (in Chinese))

[63] 谢新民,李丽琴,周翔南,等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护,2019,35(5):6-12. (XIE Xinmin,LI Liqin,ZHOU Xiangnan,et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):6-12. (in Chinese))

[64] 闫学军,周亚萍,张伟,等. 地下水开发利用水位-水量“二元”指标管理模式研究[J]. 河北工业大学学报, 2012, 41 (2): 65-68. (YAN Xuejun, ZHOU Yaping, ZHANG Wei, et al. Study on the management modes of groundwater level-quality two indicators in exploitation [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2012, 41 (2): 65-68. (in Chinese))

[65] 许一川. 地下水总量控制和水位控制管理模式研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.

[66] 姚梅. 顶底板固结排水条件下的地下水数值模拟 [D]. 合肥:合肥工业大学,2018.

[67] 王建磊. 吉林市区地下水位、水量双控管理系统设计 [D]. 长春:吉林大学,2018.

(收稿日期:2023-12-07 编辑:王芳)

