

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.010

2000—2020年中国地下水开采时空演变特征

徐丽丽^{1,2}, 束龙仓^{1,2}, 李伟³, 闵星³, 鲁程鹏^{1,2}, 刘波^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:采用 Mann-Kendall 趋势检验法、重心模型和标准差椭圆法研究了 2000—2020 年我国地下水开采时间变化特征、空间分布特征和重心迁移过程。结果表明:2000—2020 年我国地下水开采量呈现波动性减少趋势, 年均递减率为 0.83%; 华北地区在严格的地下水开采管理、地下水超采综合治理和南水北调工程共同作用下, 地下水开采量得以压减, 东北地区和西北地区由于黑龙江、新疆农业经济发展, 地下水开采量明显增加; 我国地下水开采重心主要分布在河北、山西和内蒙古交界处, 有向西北方向偏移的趋势, 地下水开采空间分布格局由东北—西南方向逐渐偏转为东—西方向, 方向性趋势也更为明显。

关键词:地下水开采; 动态演化; Mann-Kendall 趋势检验法; 开采重心; 标准差椭圆法; 中国

中图分类号:TV211.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0079-07

Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 // XU Lili^{1,2}, SHU Longcang^{1,2}, LI Wei³, MIN Xing³, LU Chengpeng^{1,2}, LIU Bo^{1,2} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Mann-Kendall trend test method, gravity center model, and standard deviation ellipse method were used to study the temporal variation characteristics, spatial distribution characteristics, and the evolution process of gravity center migration of groundwater mining in China from 2000 to 2020. The results indicate that since the 21st century, the amount of groundwater mining in China has shown a fluctuating decreasing trend on the whole, with an average annual decay rate of 0.83%. Under the influences of strict groundwater mining management, comprehensive control of groundwater overmining, and the South-to-North Water Diversion Project, the amount of groundwater mining in North China has been reduced. Due to the development of agricultural economy in Heilongjiang Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region, the amounts of groundwater mining in northeast and northwest regions have increased significantly. The gravity center of groundwater mining is mainly distributed in the junction of Hebei Province, Shanxi Province, and Inner Mongolia Municipality, and has a tendency to move to the northwest. The spatial distribution pattern of groundwater mining has gradually deflected from northeast-southwest direction to east-west direction, with more significant directional trend.

Key words: groundwater mining; dynamic evolution; Mann-Kendall trend test method; exploitation gravity center; standard deviation ellipse method; China

地下水是水资源的重要组成部分, 约占地球上液态淡水总量的 98.5%, 具有巨大的社会、经济和环境效益^[1]。目前世界上约一半的居民生活用水来源于地下水, 约有 25% 的农业灌溉依赖地下水开采, 地下水已成为 21 世纪保障人类社会繁荣发展的重要资源。尽管地下水总量丰富, 但循环更新速率

缓慢, 目前全球范围内的地下水问题已十分突出^[2], 一些国家的地下水位正在明显下降。

我国自 20 世纪 80 年代开始大规模开发利用地下水, 根据第二次全国水资源调查评价成果^[3], 我国可开采的地下水资源约占水资源总量的 30%, 70% 的城乡居民生活用水来自地下水, 95% 以上的

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200502)

作者简介:徐丽丽(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: lilixu1998@163.com

通信作者:束龙仓(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail: lcsu@hhu.edu.cn

农村人口饮用地下水,40%的耕地使用地下水进行灌溉。尤其在在我国北方地区,地表水稀缺,地下水大量开采引发了一系列问题^[4-8],威胁我国经济安全、粮食安全和生态安全^[9-12]。由此可见,地下水不合理开采会影响我国区域甚至国家的可持续发展,分析我国地下水开采时空变化特征,对于总结地下水治理成效、合理取用和科学保护地下水资源具有重要意义。

目前,已有大量学者对我国地下水开发利用及发展情况进行了研究。从已有研究成果来看,在研究尺度方面,前人对于我国地下水开发利用方面的研究大多集中在某个局部流域或地区,对全国地下水开采总体发展趋势及空间分布特征还缺乏认识,不能满足全国层面上的地下水管理需求。例如:迟宝明等^[13]对1994—2001年松辽流域供水、用水组成及其变化特征进行了分析,对地下水开发利用中存在的水环境问题及其成因进行了探讨;王贵玲等^[14]在分析了我国北方地下水资源数量、分布与特征的前提下,提出一系列战略措施以确保地下水资源可持续利用;丁元芳等^[15]分析了内蒙古西辽河流域地下水资源开发利用现状并指出其存在问题及成因;唐世南等^[16]在分析新疆昌吉州地下水开发利用现状的基础上,系统研究了区域地下水位动态特征,深入挖掘水位持续下降的原因。一些学者在全国范围内进行了地下水开发利用的研究,揭示了特定时期全国层面的地下水资源开发利用规律。例如:林柞顶^[17]通过对比地下水资源量、可开采量、实际开采量分析了我国1994—2002年地下水开采情况,论述了地下水超采造成的生态环境问题并提出意见和建议;王小军等^[18]通过分析1980—2005年我国地下水供水量的变化过程,指出了地下水在保障城市供水安全中的作用和存在的问题;李璇等^[19]揭示了1997—2012年中国地下水用水量的变化规律,与美国地下水资源开发利用情况进行对比分析。但现有研究仍缺少对经济快速发展和水资源条件及管理力度变化情势下我国地下水开采时空变化特征的认识。

本文在现有研究的基础上进一步分析2000—2020年我国地下水开采时空演变特征,采用Mann-Kendall(MK)趋势检验法重点研究了2000—2020年地下水开采的时间变化特征和重点地区地下水开采量变化趋势,采用重心模型和标准差椭圆法研究了典型年份的地下水开采空间分布特征和开采重心迁移过程。

1 数据来源

2000—2020年地下水开采量数据摘录于水利

部发布的中国水资源公报(<http://szy.mwr.gov.cn/gbsj/>),将其中的地下水供水量近似视为地下水开采量,结合全国第一、二次水资源调查评价结果,分析我国地下水开采时空变化特征。由于缺失台湾地区、香港特别行政区和澳门特别行政区地下水开采量数据,本文的研究区域为除台湾、香港、澳门之外的中国31个省级行政区(下文简称为“省级区”)。

为分析不同区域地下水开采变化情况,结合各省级区的地理位置、气候条件及地下水开发利用特征,将研究区域划分为东北(黑龙江、吉林和辽宁)、华北(北京、天津、河北、河南、山东和山西)、华东(上海、安徽、江苏、浙江、江西、湖北和湖南)、西北(陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆和内蒙古)、西南(云南、四川、重庆、贵州和西藏)、华南(广东、广西、海南和福建)六大地区^[20]。

2 研究方法

2.1 MK趋势检验法

MK趋势检验法是一种非参数统计检验方法,是常用的时间序列变化趋势分析方法^[21-22],相对于其他方法有诸多优点:不需要样本遵从一定的分布,并且不会受到少数异常值的干扰,更加适用于类型变量和顺序变量,非常高效且较为便捷。

在MK趋势检验中,定义趋势检验统计量 Z 。 $Z > 0$ 时,序列呈上升趋势; $Z < 0$ 时,序列呈下降趋势。在给定显著水平 α 下,由标准正态分布概率表得到 $Z_{1-\alpha/2}$ 。当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时,序列变化趋势不显著;当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,序列呈显著上升或下降趋势。本文采用双尾检验分别进行 α 为0.1、0.05、0.01和0.001显著性水平检验。

经过完善和改进,MK趋势检验法不仅可以用来检测时间序列的趋势性变化,还可用于非正态分布的数据突变分析,得到突变开始时间和突变区域^[23-25]。

2.2 重心模型

重心模型是在区域几何中心的基础上将子区域的某一空间现象作为权重,计算出该空间现象空间均值的方法。重心往往向空间现象的“高密度”区域偏离,可能显著区别于几何中心,能够指示这一空间现象存在的不均衡分布情况。目前,重心模型已被广泛应用于降水及人口空间分布等研究领域^[26-27]。

地下水开采重心的变化轨迹能够反映地下水资源在空间上的开采情况及其演变的基本态势,某一年份地下水开采重心的计算公式为

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{X} &= \sum_{i=1}^N (p_i X_i) / \sum_{i=1}^N p_i \\ \bar{Y} &= \sum_{i=1}^N (p_i Y_i) / \sum_{i=1}^N p_i \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别为地下水开采重心的横坐标和纵坐标; N 为研究区域省级区的数量; X_i 、 Y_i 分别为省级区 i 几何重心的横坐标和纵坐标; p_i 为省级区 i 的地下水开采量。

2.3 标准差椭圆法

标准差椭圆法^[28]是一种空间统计方法。利用此方法可以生成一个能够精确度量地理要素空间方向性和离散性的椭圆,椭圆的长轴和短轴可以指示地理要素空间分布的方向和范围。椭圆的扁率越大,地理要素空间分布的方向性越明显;椭圆的扁率越小,地理要素空间分布的离散程度越大,方向性越不明显。采用标准差椭圆法,能够研究某一特定时期我国地下水资源开采空间上的方向性和分布趋势。

3 结果与分析

3.1 全国地下水开采时间变化特征

我国地下水开采量的变化与社会经济发展状况密切相关,也受水资源管理政策和跨流域调水等工程措施的影响。20 世纪 80 年代以来,随着人口增长和经济不断发展,我国尤其是北方地区对水资源的需求逐渐增大。2000 年之前我国地下水开采量持续增加,年均增长率为 3.28%,部分地区地下水超采形势严峻,引发了一系列问题。2000 年之后,地下水开采量开始出现波动性变化,本文重点分析 2000—2020 年我国地下水开采的变化特征。

我国 2000—2020 年地下水开采量和供水占比变化情况如图 1 所示。年均地下水开采量为 1 056.4 亿 m^3 ,地下水开采 MK 趋势检验结果显示 Z 值为 -0.79,整体呈现波动性减少趋势。2000—2020 年地下水开采量由 1 069.17 亿 m^3 减少到 892.4 亿 m^3 ,减少了 16.53%,年均递减率为 0.83%。其中,2001—2003 年全国地下水开采量由 1 104.2 亿 m^3 减少到 1 018.4 亿 m^3 ;2003 年之后开始呈现出上升趋势,2012 年达到峰值;2012—2020 年全国地下水开采量由峰值 1 134.3 亿 m^3 下降至 892.4 亿 m^3 。

据统计,2001 年以来沿海部分城市出现海水倒灌现象,全国有 30 多座城市出现不同程度的地面沉降、塌陷、裂缝等地面破坏,天津、北京、西安等城市地面沉降较严重,引发了管理部门、专家学者的广泛

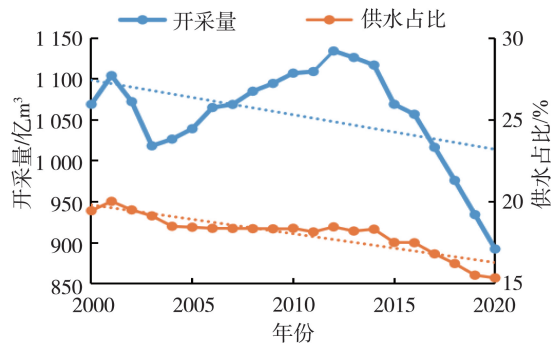


图1 2000—2020 年地下水开采量及地下水供水占比

Fig.1 Amount of groundwater mining and groundwater supply proportion from 2000 to 2020

关注,将实施南水北调工程,缓解用水矛盾提上日程^[29]。在此期间,我国采取了一系列措施加强对地下水开采的管理,例如全国人大制定了《中华人民共和国水法》,并颁布相应的配套法规以及有关的地方法规,由各省、地市主管部门对区内地下水开采进行行政管理。由于水资源的调度和管理、节约和保护得到加强,且 2002 年为丰水年,2003 年降水量比常年偏多^[19],我国地下水开采量在 2001—2003 年有所减少。但由于我国北方地区水资源条件有限,地下水开布局的调整尚缺乏足够的水源替代条件,且随着社会进一步发展,水资源需求仍持续增加,地下水开采难度加大,2003 年后地下水开采量又开始不断增加,2012 年达到 1 134.3 亿 m^3 ^[30]。据水利部 2011 年公布的数据^[31],地下水超采区域 300 多个,面积达 19 万 km^2 ,严重超采面积达 7.2 万 km^2 。针对地下水严重超采的局面,国务院 2012 年发布了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》,强化水资源管理、注重用水效率的提升;2014 年 3 月,习近平总书记在中央财经第五次会议中,针对华北地区地下水超采综合治理的决策部署,强调采取划定超采区、地下水限制开发、地下水禁采等有效措施加快地下水超采治理。此外,南水北调东线一期工程于 2013 年 11 月 15 日通水,中线于 2014 年 12 月 12 日全面建成通水,缓解了我国北方城市水资源紧张局面,改变了沿线地区的水资源配置格局,为缓解地下水超采、改善地下水环境提供了水源条件。严格的地下水管理制度、区域地下水超采综合治理和跨流域调水作为替代水源,使我国 2012 年后的地下水开采量逐渐下降。

从图 1 中的供水占比来看,我国地下水供水占比整体处于降低趋势,波动性不大。2000—2020 年,我国更加重视对地下水资源的保护,利用多种举措以地表水供水代替地下水供水,使地下水供水量占比由 2001 年最高 20.03% 减少到 2020 年的 15.35%。

我国不同地区地下水开采量差别很大。由表 1 可见,南方地区由于地表水资源丰富,地下水开采量较少,华南地区地下水开采量占全国的 3.58%,西南地区仅占 2.69%。北方地区地下水开采量是南方地区的 6.42 倍,其中华北地区地下水开采量占全国的 40.65%,东北地区占 22.70%,西北地区占 23.17%,北方地区地下水开发利用问题备受关注。本文通过 MK 趋势检验着重分析东北、西北和华北三大重点地区的地下水开采变化趋势。

表 1 各地区 2000—2020 年年均地下水开采量

Table 1 Average annual amount of groundwater mining in various regions from 2000 to 2020			
地区	年均地下水开采量/亿 m ³	地区	年均地下水开采量/亿 m ³
华北	429.40	华南	37.79
东北	239.83	西南	28.45
华东	76.16	西北	244.76

重点地区不同时段年均地下水开采量和 MK 趋势检验结果如表 2 所示。东北地区 2000—2020 年年均地下水开采量为 239.83 亿 m³,其中开采量最大的省级区是黑龙江,占东北地区开采量的 56.87%,辽宁和吉林分别占 25.86% 和 17.27%。东北地区地下水开采量序列 MK 趋势检验值为 2.60,通过了 0.01 显著性水平检验,开采量整体呈现显著的增加趋势,2011—2020 年地下水开采量相对于 2000—2010 年增加了 12.77%。东北地区地下水开采量整体变化主要原因是开采量占比较大的黑龙江由于农业发展需要,地下水灌溉需求增大。西北地区 2000—2020 年年均地下水开采量为 244.76 亿 m³,开采量最大的省级区是新疆,占西北地区开采量的 36.07%,其次是内蒙古,占 34.91%,陕西和甘肃分别占 13.56% 和 10.94%,青海和宁夏仅占 2.19% 和 2.32%。西北地区地下水开采量序列 MK 趋势检验值为 4.56,通过了 0.001 显著性水平检验,表明开采量整体呈现显著的增加趋势,2011—2020 年地下水开采量相对于 2000—2010 年增加了 21.96%。华北地区 2000—2020 年年均地下水开采量为 429.40 亿 m³,开采量较大的省级区是河北、河南和山东,分别占华北地区开采量的 33.81%、29.17% 和 22.66%,山西、北京和天津仅占 8.01%、4.97% 和 1.38%。华北地区地下水开采量序列 MK 趋势检验值为 -5.65,通过了 0.001 显著性水平检验,表明开采量整体呈现显著减少的趋势,2011—2020 年地下水开采量相对于 2000—2010 年减少了 17.63%。华北地区作为南水北调工程的主要受水区,2011—2020 年由于地表水源的补充,对地下水需求减少。

表 2 重点地区不同时段年均地下水开采量及 MK 趋势检验结果

Table 2 Average annual amount of groundwater mining and MK trend test results in different periods in key regions

地区	年均地下水开采量/亿 m ³		MK 检验值
	2000—2010 年	2011—2020 年	
东北	226.08	254.95	2.60 **
西北	221.58	270.25	4.56 ***
华北	468.75	386.12	-5.65 ***

注: ** 表示通过 0.01 显著性水平的双尾检验; *** 表示通过 0.001 显著性水平的双尾检验。

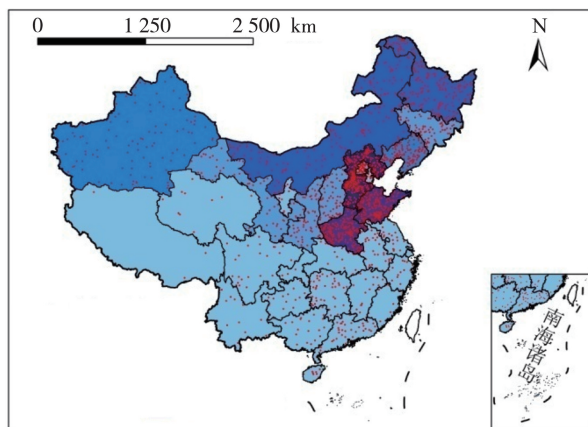
3.2 典型年份全国地下水开采空间分布特征

由图 1 可以看出,2003 年和 2012 年是我国地下水开采变化较为明显的转折点。根据各省级区 2000—2020 年地下水开采量序列 MK 突变检验结果,2003 年是 4 个省级区地下水开采变化的突变时间点,2012 年是 5 个省级区的突变时间点,2003 年和 2012 年是我国地下水开采突变区域最多的两年。为了对比分析地下水开采空间分布现状,对 2020 年全国地下水开采的空间分布特征进行分析。

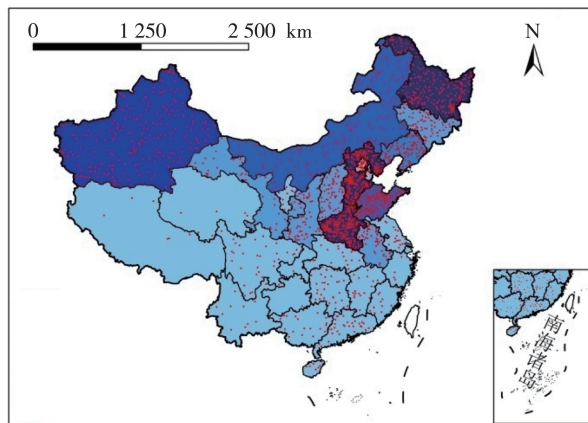
根据各省级区 2003 年、2012 年、2020 年地下水开采量资料绘制了典型年份全国地下水开采量空间分布,如图 2(底图审图号为 GS(2020)4619)所示。图中采用随机点数分布反映各省级区地下水开采量,1 个红点代表 0.5 亿 m³ 地下水开采量,红点分布密度表征各省级区地下水开采模数,红点分布越密集表示单位面积上地下水开采量越大,越稀疏则表示单位面积上的开采量越小。从图 2 可以看出,整体上我国北方地区地下水开采量空间分布差异较大,在研究期间发生了较为明显的变化;南方地区地下水开采量空间分布较为均匀,各省级区地下水开采量多数在 25 亿 m³ 之内,且空间分布在研究期间变化较小。

2003 年是 2000—2020 年我国地下水开采量小幅波动减少和后续增长的转折点,2003 年全国地下水开采量为 1 018.4 亿 m³。从图 2(a) 可以看出,2003 年地下水开采量超过 100 亿 m³ 的省级区有河北、山东和河南,均在华北地区,此外,北京、天津、河北、山东和河南地下水开采模数非常大,其次是黑龙江和辽宁。

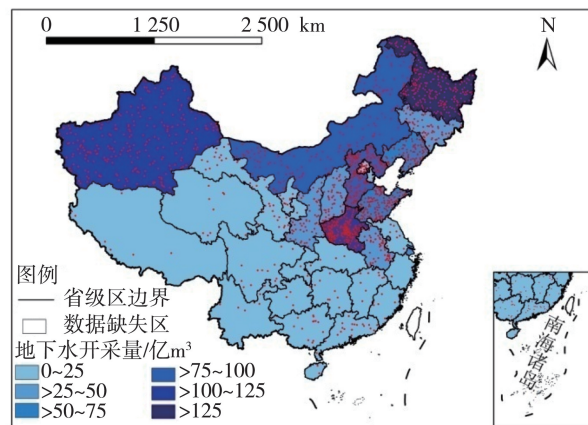
2012 年我国地下水开采量增加至 1 134.3 亿 m³。从图 2(b) 可以看出,2012 年我国地下水开采量超过 100 亿 m³ 的省级区有河北、河南、黑龙江和新疆。2003 年以后,国家针对华北地区率先出台了一系列超采治理、地下水资源保护的法规和法规,优化地下水开采管理。因此,与 2003 年相比,华北地区河北、



(a) 2003 年



(b) 2012 年



(c) 2020 年

图2 全国地下水开采量空间分布

Fig.2 Spatial distributions of amount of groundwater mining in China

河南、山东地下水开采量有所减少,其中,山东地下水开采量减少到 100 亿 m^3 以内。值得注意的是,与 2003 年相比,新疆和黑龙江地下水开采量明显增加。随着西部大开发战略的实施和推进,新疆耕地面积不断增长,2010 年农业灌溉用水量占总用水量的 91.3%^[32],用水结构长期失衡使新疆地下水开采量大幅增长^[33],由 2003 年的 53.1 亿 m^3 增加到 2012 年的 110.9 亿 m^3 。黑龙江社会经济尤其是农

业经济不断发展,2000 年以后水田面积大幅度增加,整体以抽取地下水灌溉为主^[34],黑龙江地下水开采量也增加到 100 亿 m^3 以上。

2020 年全国地下水开采量为 892.4 亿 m^3 。从图 2(c) 可以看出,2020 年我国地下水开采量超过 100 亿 m^3 的省级区仅为河南、黑龙江和新疆。相较于 2012 年,2020 年全国地下水开采量整体有所减少。这是由于在我国对地下水资源保护更为重视的新形势下,地下水开采制度不断优化,最严格水资源管理制度开始实施,我国整体地下水开采量得到压减。华北地区地下水超采综合治理取得明显成效,此外,南水北调工程建成通水为北方地区提供了替代水源,其受水区如北京、天津、河北、河南、山东,地下水开采量明显大幅减少。

3.3 中国地下水开采重心迁移演变特征

根据我国各省级区地下水开采量数据,运用重心模型和标准差椭圆法计算了典型年份(2003 年、2012 年、2020 年)地下水开采重心及其移动轨迹,结果见图 3。从图 3 可以看出,我国地下水开采重心主要分布在河北、山西和内蒙古的交界处,位于 112°E ~ 115°E、38°N ~ 40°N 之间。

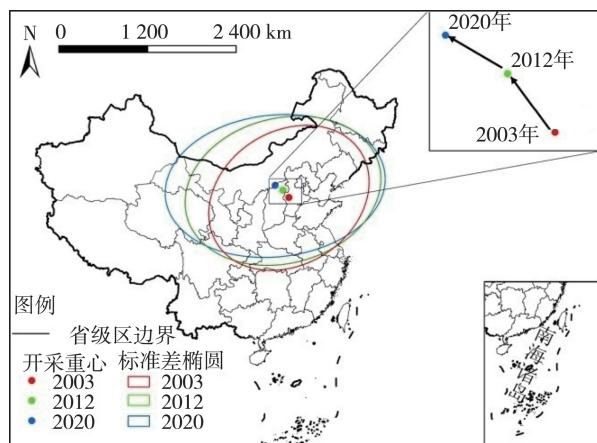


图3 典型年份全国地下水开采重心分布及移动轨迹

Fig.3 Distributions and movement trajectory of gravity center of groundwater mining in typical years

2003 年我国地下水开采重心位于河北中西部边界处。2003—2012 年开采重心往西北方向移动 123.81 km,移至山西东北部。之后,地下水开采重心继续向西北方向移动,2020 年移至山西北部与内蒙古交界处,移动了 123.61 km。由此可见我国地下水开采重心的迁移是一个在京津冀经济圈附近逐渐向西北方向偏移的过程。21 世纪以来,在严格的地下水开采管理、地下水超采综合治理和南水北调工程的影响下,华北地区地下水开采量得以压减,而新疆和黑龙江由于灌溉农业发展,对地下水的需水量呈现大幅增加趋势,西部和北部地下水开采量增加,

导致我国地下水开采重心有向西北方向偏移的趋势。

为了进一步分析各典型年份地下水开采空间分布的方向性和离散型,创建了不同年份地下水开采空间分布的标准差椭圆(图3)。我国地下水开采空间分布标准差椭圆在向西北偏移的过程中,其方向和椭圆扁率也发生了变化。2003年标准差椭圆方向为北偏东 57° ,长轴位于东北—西南方向,长度为1140.11 km,短轴位于东南—西北方向,长度为879.67 km,椭圆扁率为0.23,说明2003年我国地下水开采空间分布格局在各方向上较为离散,主要分布在东北—西南方向。而2020年标准差椭圆方向发展为近似东—西方向,长轴长度为1488.26 km,短轴长度为932.49 km,椭圆扁率增加为0.37,反映出2020年地下水开采空间分布主要向东—西方向集中,与2003年相比,开采空间分布的方向趋势更为明显。由于西北地区新疆地下水开采量的不断增加,西北地区与东部地区的开采量差异性逐渐减少,使地下水开采空间分布从东北—西南方向逐渐偏转为东—西方向。

4 结 论

a. 2000—2020年我国地下水开采量整体呈现波动减少趋势,年均递减率为0.83%。其中,2001—2003年地下水开采量短暂减少,2003年后开采量整体增加,至2012年达到峰值后逐渐减少。

b. 我国北方地区地下水开采量空间分布差异较大,在研究期间发生了较为明显的变化。2000—2020年东北地区、西北地区年均地下水开采量分别为239.83亿 m^3 和244.76亿 m^3 ,开采量均呈现显著的增加趋势;华北地区年均地下水开采量为429.4亿 m^3 ,开采量整体呈现显著减少趋势。

c. 我国地下水开采量变化与区域经济发展需求密切相关,受水资源管理政策和跨流域调水等工程措施的影响。华北地区特别是北京、天津、河北和山东地下水开采量得以压减是由于严格的地下水开采管理、地下水超采综合治理和南水北调工程的共同作用;东北地区和西北地区地下水开采量明显增加与农业经济的发展有关,尤其与黑龙江和新疆灌溉农业的发展有关。

d. 我国地下水开采重心主要分布在河北、山西和内蒙古的交界处,由于西北和东北地区地下水开采量增大,开采重心有向西北方向偏移的趋势;地下水开采空间分布格局由东北—西南方向逐渐偏转为东—西方向,方向性趋势更为明显。

参考文献:

- [1] 陈梦熊. 中国水文地质环境地质问题研究[M]. 北京:地震出版社,1998:6-8.
- [2] FAMIGLIETTI J S, FERGUSON G. The hidden crisis beneath our feet[J]. Science, 2021, 372(6540): 344-345.
- [3] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水资源及其开发利用调查评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [4] 赵振,陈惠娟,秦光雄,等. 青海乌兰盆地地下水资源评价及可开采潜力分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 60-66. (ZHAO Zhen, CHEN Huijuan, QIN Guangxiong, et al. Groundwater resources evaluation and exploitable potential analysis in Wulan Basin, Qinghai Province [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 60-66. (in Chinese))
- [5] 陆玮,李兆,骆祖江. 南通市地下水压缩开采对水质咸化的控制效应[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 85-91. (LU Wei, LI Zhao, LUO Zujang. Control effect of groundwater compression mining on water salinization in Nantong City [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 85-91. (in Chinese))
- [6] 李英连,吴彬,杜明亮. 新形势下新疆地下水超采治理思路与对策[J]. 中国水利, 2017(1): 28-30. (LI Yinglian, WU Bin, DU Mingliang. Ideas and strategies to govern groundwater overdraft under new situation in Xinjiang [J]. China Water Resources, 2017(1): 28-30. (in Chinese))
- [7] 张金良. 黄河流域河湖生态环境复苏研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 141-146. (ZHANG Jinliang. Eco-environment recovery of rivers and lakes in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 141-146. (in Chinese))
- [8] 张婧,马贵宏,高雅,等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))
- [9] 粟晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))
- [10] 王丽娟,宋翹楚,吴为,等. 江苏沿海滩涂地下水埋深及矿化度变化规律[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 52-57. (WANG Lijuan, SONG Qiaochu, WU Wei, et al. Variation law of groundwater depth and

- mineralization of coastal tidal flats in Jiangsu Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 52-57. (in Chinese))
- [11] 田芳, 罗勇, 周毅, 等. 北京地面沉降与地下水开采时空演变对比[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 163-169. (TIAN Fang, LUO Yong, ZHOU Yi, et al. Contrastive analysis of spatial-temporal evolution between land subsidence and groundwater exploitation in Beijing [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 163-169. (in Chinese))
- [12] 陈飞, 丁跃元, 李原园, 等. 华北地区地下水超采治理实践与思考[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(2): 191-198. (CHEN Fei, DING Yueyuan, LI Yuanyuan, et al. Practice and consideration of groundwater overexploitation in North China Plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 191-198. (in Chinese))
- [13] 迟宝明, 王志刚, 林岚, 等. 松辽流域水资源现状与地下水开发利用分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(3): 70-73. (CHI Baoming, WANG Zhigang, LIN Lan, et al. Water resources state and groundwater exploitation in Songliao Basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(3): 70-73. (in Chinese))
- [14] 王贵玲, 陈德华, 蒯文静, 等. 中国北方地区地下水资源的合理开发利用与保护[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 684-689. (WANG Guiling, CHEN Dehua, LI Wenjing, et al. Reasonable exploitation and utilization of groundwater resource in North China [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 684-689. (in Chinese))
- [15] 丁元芳, 李月宁, 吴昊晨, 等. 西辽河流域地下水开发利用及问题成因分析[J]. 东北水利水电, 2020, 38(5): 32-34. (DING Yuanfang, LI Yueying, WU Haochen, et al. Exploitation utilization problem and cause analysis of groundwater in Xiliahe River Basin [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2020, 38(5): 32-34. (in Chinese))
- [16] 唐世南, 羊艳, 运剑苇. 昌吉州地下水开发利用存在问题与对策分析[J]. 水利技术监督, 2021(12): 62-65. (TANG Shinan, YANG Yan, YUN Jianwei. Problems and countermeasures of groundwater development and utilization in Changjizhou [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021(12): 62-65. (in Chinese))
- [17] 林祚顶. 我国地下水开发利用状况及其分析[J]. 水文, 2004, 24(1): 18-21. (LIN Zuoding. The status and analysis on the groundwater development and utilization in China [J]. Hydrology, 2004, 24(1): 18-21. (in Chinese))
- [18] 王小军, 赵辉, 耿直. 我国地下水开发利用现状与保护对策[J]. 中国水利, 2010(13): 38-39. (WANG Xiaojun, ZHAO Hui, GENG Zhi. Current groundwater exploitation situation and protection countermeasure in China [J]. China Water Resources, 2010(13): 38-39. (in Chinese))
- [19] 李璇, 束龙仓, CHEN Xunhong. 中美地下水资源开发利用对比分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 37-43. (LI Xuan, SHU Longchang, CHEN Xunhong. Comparison and analysis of groundwater resources exploitation and utilization between China and USA [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(2): 37-43. (in Chinese))
- [20] 柳开楼, 都江雪, 马常宝, 等. 中国主要旱作粮食耕地土壤钾素的时空演变特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 673-684. (LIU Kailou, DU Jiangxue, MA Changbao, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil potassium in main dry-farming grain arable land of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 673-684. (in Chinese))
- [21] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018 [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [22] 付铁文, 徐宗学, 陈浩, 等. 粤港澳大湾区 1961—2014 年降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 56-65. (FU Tiewen, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on spatiotemporal evolution characteristics of precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 56-65. (in Chinese))
- [23] 韩世亮, 陈泰霖. 气候变化影响下黄河上游梯级水库群未来发电量预测[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 32-38. (HAN Shiliang, CHEN Tailin. Future power generation prediction of cascade reservoirs in upper reaches of the Yellow River under climate change [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 32-38. (in Chinese))
- [24] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310. (ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A new perspective on water issues in North China [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese))
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [26] 孙乐强, 郝振纯, 王加虎, 等. TMPA 卫星降水数据的评估与校正[J]. 水利学报, 2014, 46(10): 1135-1146. (SUN Leqiang, HAO Zhenchun, WANG Jiahu, et al. Assessment and correction of TMPA products 3B42RT and 3B42V6 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 46(10): 1135-1146. (in Chinese))

(下转第 93 页)

- [26] LIN Xiaohu, REN Jie, XU Jingcheng, et al. Prediction of life cycle carbon emissions of sponge city projects: a case study in Shanghai, China [J]. Sustainability, 2018, 10 (11): su10113978
- [27] SHAO Weiwei, LIU Jiahong, YANG Zhiyong, et al. Carbon reduction effects of sponge city construction: a case study of the city of Xiamen [J]. Energy Procedia, 2018, 152: 1145-1151.
- [28] KIM D, PARK T, HYUNK, et al. Life cycle greenhouse-gas emissions from urban area with low impact development (LID) [J]. Advances in Environmental Research, 2013, 2(4): 279-290.
- [29] LIU Jiahong, WANG Jia, DING Xiangyi, et al. Assessing the mitigation of greenhouse gas emissions from a green infrastructure-based urban drainage system [J]. Applied Energy, 2020, 278: 115686.
- [30] 李晨璐, 郑涛, 彭开铭, 等. 基于全生命周期法的海绵城市雨水系统碳排放研究[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44 (1): 132-137. (LI Chenlu, ZHENG Tao, PENG Kaiming, et al. Study on carbon emission of sponge city stormwater system based on life cycle assessment [J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44 (1): 132-137. (in Chinese))
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [32] 尚海洋, 宋妮妮. 碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J]. 水资源保护, 2018, 34 (2): 15-21. (SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint: comparison of concepts, methods, and policy responses [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2): 15-21. (in Chinese))
- [33] 黄显峰, 石志康, 金国裕, 等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护, 2020, 36 (4): 47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4): 47-51. (in Chinese))
- [34] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [35] 李卓熹. 基于低冲击开发的暴雨径流控制及其碳排放: 以深圳光明新区为例 [D]. 北京: 北京大学, 2013.
- [36] 中国建筑标准设计研究院. 城市道路与开放空间低影响开发雨水基础设施 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

(收稿日期: 2022-07-08 编辑: 熊水斌)

(上接第 85 页)

- [27] 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析[J]. 地理科学, 2001, 21 (5): 385-389. (XU Jianhua, YUE Wenzhe. Evolvement and comparative analysis of the population center gravity and the economy gravity center in recent twenty years in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21 (5): 385-389. (in Chinese))
- [28] WONG D W S. Several fundamentals in implementing spatial statistics in GIS: using centrophagic measures as examples [J]. Geographic Information Sciences, 1999, 5 (2): 163-174.
- [29] 张凤林. 河北省地下水超采状况堪忧南水北调势在必行[J]. 中国水利, 2001 (10): 53-55. (ZHANG Fenglin. Serious over-abstraction of groundwater in Hebei Province calls on immediate action of south to north water transfer [J]. China Water Resources, 2001 (10): 53-55. (in Chinese))
- [30] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2011) [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2012.
- [31] 杨迪. 中国超 50 个城市发生地面沉降尚无统一监测网 [EB/OL]. (2011-11-16) [2022-06-12]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2011/11-16/3465178.shtml>.
- [32] 邓铭江. 新疆地下水资源开发利用现状及潜力分析[J]. 干旱区地理, 2009, 32 (5): 647-654. (DENG Mingjiang. Current situation and its potential analysis of exploration and utilization of groundwater resources of Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2009, 32 (5): 647-654. (in Chinese))
- [33] 郑昊安, 吴彬, 李绅. 近 20a 来哈密盆地地下水埋深变化趋势[J]. 人民黄河, 2013, 35 (12): 73-76. (ZHENG Haoan, WU Bin, LI Shen. Groundwater change tendency in Hami Basin in the past 20 years [J]. Yellow River, 2013, 35 (12): 73-76. (in Chinese))
- [34] 束龙仓, 徐丽丽, 袁亚杰, 等. 三江平原典型区地下水场变化及主要影响因素分析[J]. 水利学报, 2022, 53 (6): 644-654. (SHU Longcang, XU Lili, YUAN Yajie, et al. Analysis on variation of groundwater flow field and its main influencing factors in the typical district of Sanjiang Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (6): 644-654. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-09-06 编辑: 施业)