

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0092

王京晶,徐宗学,李鹏,等.济南市市区地下水埋深动态变化及其成因[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):883-893.
WANG J J, XU Z X, LI P, et al. Characteristics and attribution of groundwater depth changes in Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 883-893. (in Chinese)

济南市市区地下水埋深动态变化及其成因

王京晶¹, 徐宗学¹, 李鹏¹, 程涛², 苏恒¹

(1. 北京师范大学水科学研究院城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510635)

摘要:应用统计学和水均衡原理对济南市1997—2016年地下水水位实测数据进行分析,研究济南市市区地下水埋深动态演变特征及其成因。结果表明:近20年来市区地下水埋深增大趋势得到明显遏制,目前地下水埋深呈稳健减小趋势,市区平均埋深减小2.527 m,多年平均减小速率为0.133 m/a,地下水埋深减小率空间变化特征表现为由东北向西南衰减,其中,历下区党家庄镇区域地下水埋深减小率最高达到0.667 m/a,长清区张夏镇区域地下水埋深增大率最低为0.115 m/a;地下水埋深与降水补给和人工开采直接相关,地下水埋深年内变化呈季节性波动,历下区位于地下水补给区,对补给或开采的响应程度表现最为敏感,而位于地下水排泄区的天桥区响应程度最为缓慢;在2003年采取大规模节水保泉措施后,地下水开采量减少约3亿m³/a,市区地下水蓄变量由2003年以前的负均衡(-2.7亿m³/a)转变至2003年以后的正均衡状态(0.8亿m³/a),行政干预措施效果明显。研究成果可为制定节水保泉方案措施提供科学依据和技术支撑。

关键词:地下水动态;地下水埋深;济南市;泉;下降率

中图分类号:TV122.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地下水埋深的升降直接反映地下水的补给和排泄,研究地下水动态特征有助于认识区域地下水赋存特征^[1-2]。近年来,平原区水资源开发利用及生态环境效应受到了国内外学者^[3-7]的广泛关注,研究内容主要侧重于对区域地下水资源承载力及开发利用潜力分析、水量水质变化、监测布局优化和地表-地下水交换过程等。国内学者^[8-11]主要集中对河套灌区、石羊河流域和华北平原这种大型区域的研究。对济南市的研究主要集中于地下水资源的可持续利用、地下水回灌影响、开发潜力、地表地下水的转化和保泉供水等方面^[12-17],而对于区域地下水的动态变化规律及其成因分析的研究相对较少。

济南市是一个资源型缺水城市,随着社会经济的快速发展,济南市农业、工业、生活用水量日益增

长,地下水超采问题十分突出,水资源短缺已成为制约经济社会可持续发展的瓶颈^[18-19]。随着地下水开采量逐年增加,地下水位逐年下降,直至1976年济南市著名的趵突泉第一次出现了断流,泉水断流时间连续最长达到961 d,严重损害了“泉城”景观^[20-21]。地下水的不合理开采导致泉城无“泉”、河中无“水”,因此科学合理地规划利用地下水资源已迫在眉睫。

济南市水循环过程受到多种因素影响,水资源时空分布及转化等过程较为复杂^[16]。2003年起,济南市开始严厉实施节水保泉政策。根据济南市1997—2016年地下水埋深资料,结合实地调研取证,应用统计学方法和GIS技术,基于水均衡原理探究济南市近20年地下水埋深动态变化规律及其

收稿日期:2021-02-22 修回日期:2021-07-12 网络出版时间:2021-07-16

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210716.1109.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502701)

作者简介:王京晶(1997—),男,河南信阳人,主要从事地下水、水文学研究。E-mail:wangjingjing@mail.bnu.edu.cn

通信作者:徐宗学(1962—),男,山东淄博人,教授,博士,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:zxXu@bnu.edu.cn

影响因素,评估节水保泉措施的效果,以期为济南市合理开发利用地下水和水资源优化配置提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

济南市地处黄河中下游地区山东省中西部,地处 $36^{\circ}10'N \sim 37^{\circ}40'N$ 和 $116^{\circ}12'E \sim 117^{\circ}44'E$,截止 2017 年,济南市辖 7 区 3 县,总面积达 $8\,177\text{ km}^2$ 。济南属温带季风气候,四季分明,年均气温 $13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量 647 mm ^[22-23]。济南市水文地质情况较为复杂,地势南高北低,南北高差达 500 余米。市区主要包括市中、历下、槐荫、天桥、历城和长清等 6 区,总面积 $3\,303\text{ km}^2$,属济南市经济高度发达地区,城镇化程度较高,人口众多,市区依山傍水,境内有趵突泉、珍珠泉和黑虎泉等诸多名泉。研究区地形地貌主要分为三区:北部主要为地下水排泄区的平原区;往南为地下水直接补给区的绵延低山丘陵区;最南部为陡峻山区,最大高程可达 800 m。研究区地层出露较为齐全,总体上是以古生代地层为主体的向北倾斜单元构造,南部主要

分布有太古界泰山岩群(Art)变质岩系,中心南部主要为覆盖在太古界地层上的古生界寒武系(ϵ)地层。奥陶系(O)碳酸盐岩层由南向北埋藏于寒武系之上,主要分布在中部及北部。石炭-二叠系(C-P)仅在西北部有少量出露。新生界第三系(N)主要分布西北部。第四系(Q)位于最上层,主要分布在冲积平原和倾斜平原区和河谷地带。地层厚度根据分布区域不同,呈现出东南薄,西北厚的特征^[24]。研究区基本覆盖泉域,地下水由南部山区经大气降水入渗及地表水渗漏补给至岩溶含水层后,沿地层/地形特征由南向北流动,流经至市区又受火成岩岩体阻碍后形成富水地带,继而使得大量地下水出露地表形成泉水,独特的地质构造使得境内百泉争涌,因此具有“泉城”美名^[20]。研究区主要以寒武系与奥陶系碳酸岩类裂隙岩溶水和第四系松散岩类孔隙水为主,其中岩溶含水层是研究区最重要的含水层,其富水性强、出水量大,对于济南市的饮用水安全及保泉具有重要意义。西北部有黄河流经,河水主要补给沿岸第四系地下水,与岩溶地下水没有直接水力联系^[14]。研究区具体水文地质构造见图 1。

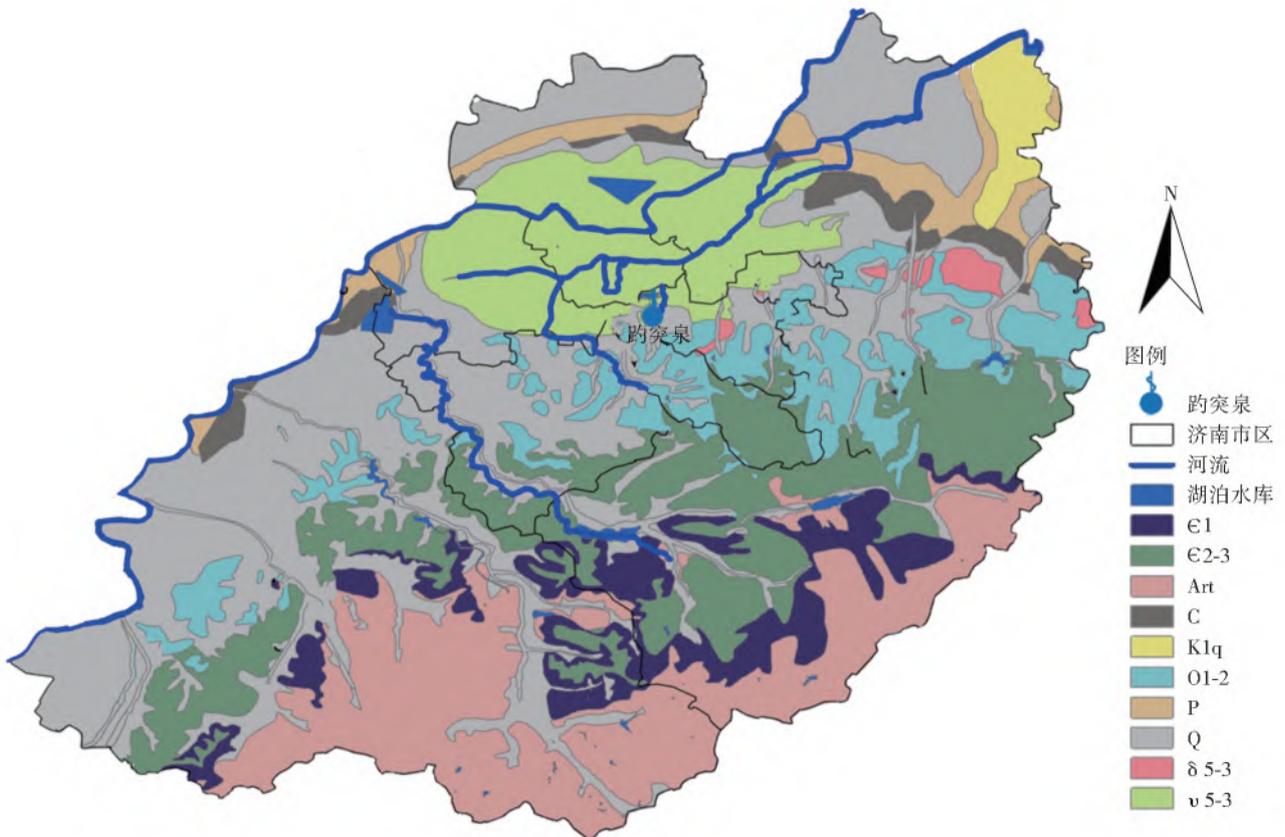


图 1 研究区水文地质概况

Fig. 1 Sketch map of geological structure in the study area

本文主要探究济南市市区地下水埋深的时空演变特征,通过对地下水埋深的年内及年际间变化分

析,得出 1997—2016 年济南市市区地下水埋深动态变化过程及其时空演变规律,并揭示地下水埋深动

态变化成因。

1.2 数据来源与处理

选取济南市水文局提供的 1997—2016 年 24 眼监测井的地下水位监测数据和均匀分布的 12 个雨量站逐日降水数据进行分析,监测井和雨量站分布位置见图 2。监测井主要分布于济南市区北部平原区,监测井点主要分布在地下水径流排泄区,其层位为山前地带第四系松散岩类孔隙水和寒武纪和奥陶纪岩溶水。经大型抽水试验、示踪试验和回灌试验等分析证实,研究区虽然裂隙发育不均匀,但大部分区域岩溶发育,构造裂隙众多,含水层互相连通,岩溶地下水主要通过地下水开采、泉水、补给第四系孔隙水等方式排泄,孔隙水主要通过蒸发、泉水、地下水开采排泄,且在平原强渗漏区,深层地下水在巨大水力压力下可透过河道或渗漏良好的低洼地区排泄至第四系孔隙水及地

表,研究区地质条件错综复杂,孔隙水与其下覆岩溶水水力联系密切,可以大致认为区域岩溶地下水具有统一的水面,存在互补关系^[14,25-26]。区域城市化程度较高、居民人数较多、泵站抽水农田灌溉也较为发达,监测井每月 1、6、11、16、21、26 日各监测 1 次,个别年份每日监测 1 次。海拔较高的南部山区由于地形复杂、居民较少、山区地下水系统受人类活动影响较少等,布置监测井较少,根据山区附近平原区的地下水井监测数据进行插值,表征山区地下水埋深动态变化特征。研究区雨量站分布较为均匀,且数据质量较好,将 12 个雨量站逐日降水数据使用泰森多边形分割计算市区年降雨量。以济南市城市化影响程度较为明显的济南市区为例,结合降水变化分析区域典型监测井地下水埋深的年内、年际和区域分布变化特征,并通过水均衡原理分析近 20 年市区地下水变化成因。

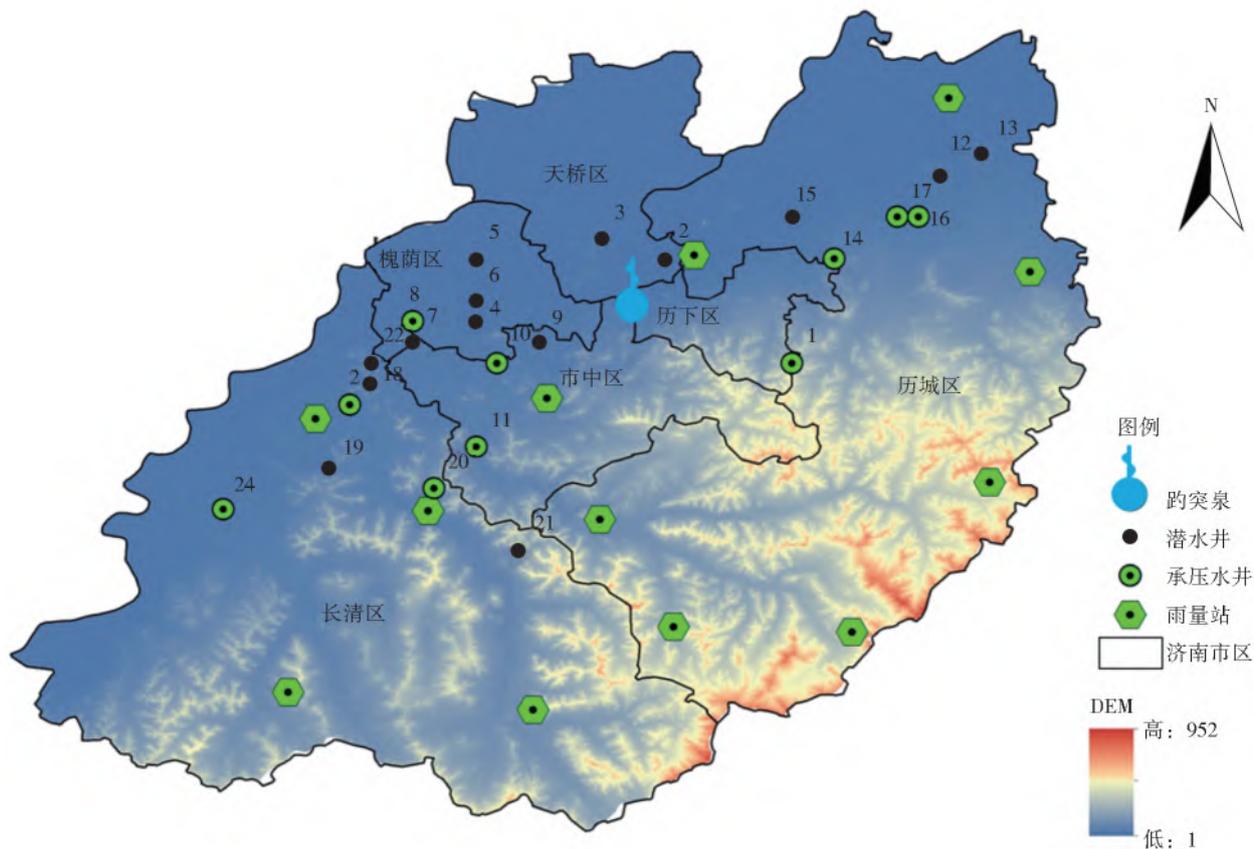


图 2 研究区监测井和雨量站分布

Fig. 2 Distribution map of monitoring wells and precipitation stations

选取济南市各区区内时间序列最长和数据最为完备的监测井作为典型监测井,见表 1,其中:1 号井地面高程最高(基面均为黄海基面),靠近山区,井最深,监测层位主要为寒武纪岩溶水;3、6、15、22 等监测井主要监测距离地表较近的平原区第四系松散岩类孔隙水,地面高程均为 30 m 左右;10 号井监测层

位为奥陶纪岩溶水,井深约为 180 m,监测井各含水层间水力联系较为密切。监测特点为平原区监测井较多,且监测井离山区越近,地面高程越高,监测层位越古老。计算各井地下水埋深数据的年平均值和月平均值,分析研究区地下水埋深年内和年际变化特征。

表 1 济南市区地下水埋深监测井布置情况

Tab. 1 Distribution of groundwater depth monitoring wells in the downtown of Jinan City

研究辖区	面积/km ²	监测井数量/眼	代表井点号	监测频次/d	井深/m	地面高程/m	主要层位
历下区	101	1	1	5	260	173.4	寒武纪岩溶水
天桥区	259	3	3	5	28	24.4	第四系松散岩类孔隙水
槐荫区	152	4	6	5	32	30.4	第四系松散岩类孔隙水
市中区	281	3	10	5	180	47.6	奥陶纪岩溶水
历城区	1 301	6	15	5	30	29.1	第四系松散岩类孔隙水
长清区	1 209	7	22	5.1	10	35.5	第四系松散岩类孔隙水

2 结果分析与讨论

2.1 地下水埋深年内变化特征

济南市区地下水类型基本属于入渗-开采型,地下水动态变化取决于自然变化和人类活动的影响,受降水、蒸发、冻结等气象因素及人工泵站抽水影响较为明显,所以表现出明显的季节性变化特征^[12-13]。根据 1997—2016 年各年地下水位监测数据计算得到年内月平均水位变化,见图 3,可

以明显看出地下水埋深年内动态大致呈现出“单峰单谷”的现象,变化情况大致为:由于春季雨水少,3—5 月开始抽水春灌,农业用水增多,灌水量大且灌溉时间集中,地下水埋深急剧增大,直至 5—6 月出现年内最大地下水埋深;由于 7—9 月汛期来临,此段时间降水较为集中,可以达到年降水总量的 70%,地下水得以有效补给,地下水位开始出现明显的回升,一般在 9—10 月达到年内最小埋深。

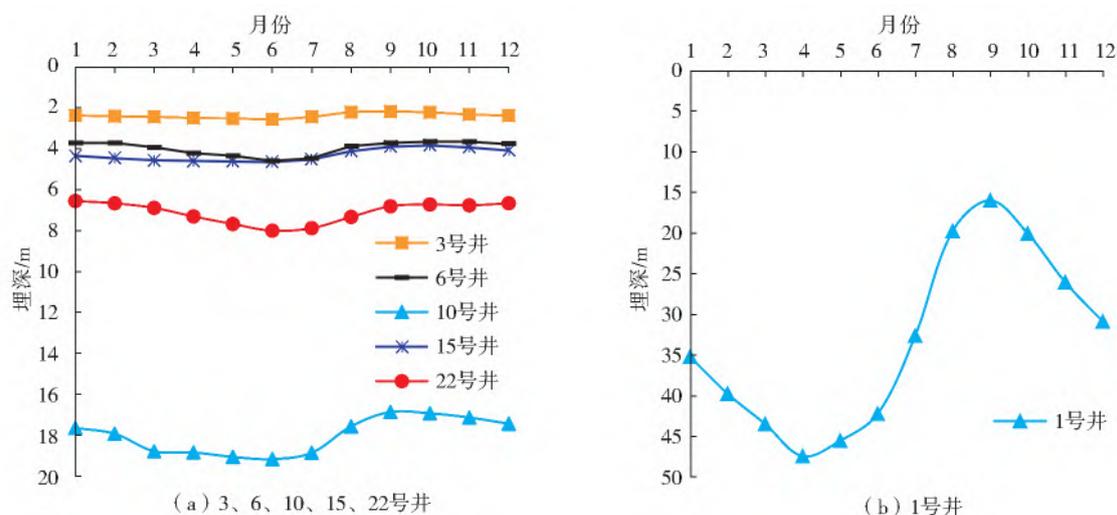


图 3 济南市区典型监测井地下水埋深多年年内变化

Fig. 3 Annual variation of groundwater depth in typical monitoring wells

由于城市化程度、灌溉方式及各区管理水平的差异,各区地下水埋深差别较大^[27]。根据济南市水文地质资料,不同的水文地质单元,年内地下水变幅差异较大^[28]。通常在补给和径流区,地下水埋深年内变幅可达 30~60 m,甚至更大,例如 1 号井所在的历下区,位于济南市山区北部边缘,坡度较大使得山区降水迅速产流补给至地下水,所以其埋深年内变幅较大,约为 30 m;而位于地下水汇流排泄区的点位,受地层影响,其地下水多为松散岩类孔隙水,年内变幅则小得多,一般为 2~4 m,例如位于山区边缘的市中区 10 号井,地表汇流至此较为平稳;其他 4 区 3、6、15 和 22 号观测井,远离山

区,区域地下水多属沿黄平原第四系松散岩类孔隙水,年内变幅一般小于 2 m,其中 3 号井年内变幅最小约为 0.4 m。

综上所述,对济南市地下水动态变化起到主导因素的应是大气降水和人工开采两个方面,年内地下水位动态变化与降水补给和地下水开采量直接相关,其中:在 3—5 月的农灌时期,大量开采地下水,地下水埋深呈现出明显增大趋势;而在 7—9 月的汛期,降水较多,得以补给地下水,地下水位呈现稳健回升趋势;大致在 10 月至翌年 2 月,地下水开采量较少,地下水埋深基本维持在一年中的较低埋深状态。

2.2 地下水埋深年际变化特征

根据济南市水文局提供的地下水水位和降水资料,统计得到 1997—2016 年济南市区典型监测井地下水埋深和降水量的年际变化情况,见图 4。可以明显看出,近 20 年来济南市区地下水埋深总体呈下降趋势,在 2003 年济南市政府实施回灌补源、关停自备井、减少水源地开采量等人工调控措施后,地下

水埋深一直处于较低水平。其中:历下区的 1 号井地下水埋深减小率最高为 0.185 8 m/a;天桥区的 3 号井地下水埋深减小率最低仅为 0.014 1 m/a,这可能与天桥区城市化进程较快超采地下水有关。近 20 年来降水变化不大,平均降水量为 656 mm,2002 年和 2014 年降水量分别为 396 mm 和 434 mm,属特枯水年。

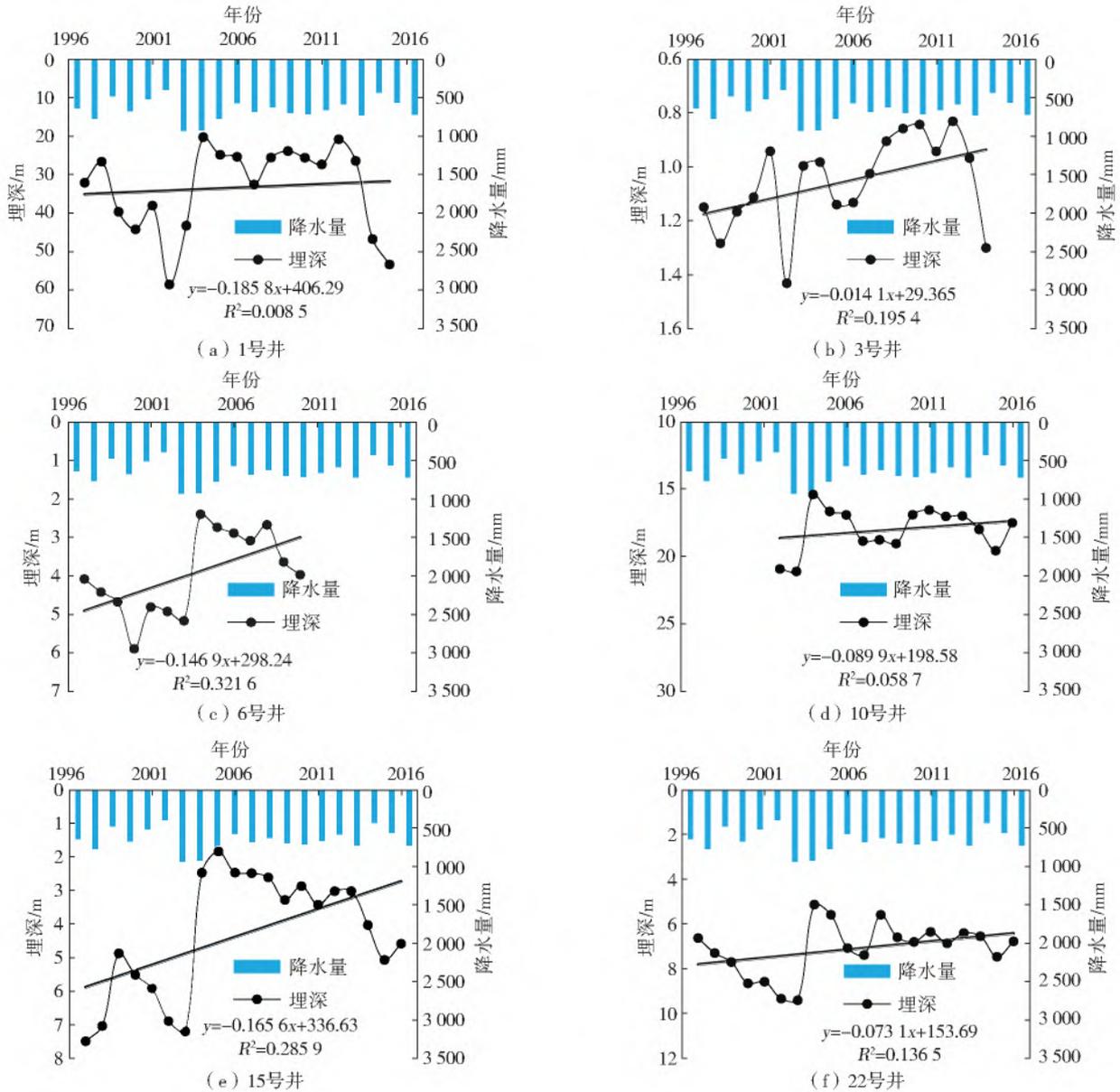


图 4 典型监测井多年地下水埋深变化

Fig. 4 Variation of groundwater depth of typical monitoring wells over the years

据图 4,可将 1997—2016 年分为 1997—2002 地下水埋深增加时段和 2003—2016 地下水埋深减小时段,并计算两个时间段的平均降水量和各典型监测井的地下水平均埋深。其中:1997—2002 年平均降水量为 581 mm;2003—2016 年平均降水量为 689 mm。1997—2002 年,过度开采地下水和降水补给稀少(2002 年是特枯水年)等原因使得地下水

埋深呈整体增大趋势,这一趋势在 2002 年表现最为明显,2002 年地下水埋深为近 20 年来各监测井最大值。这期间地下水平均埋深值为 13.539 m,由于地下水埋深过大,趵突泉曾在 1999 年 3 月 2 日至 2001 年 9 月 17 日之间连续断流 30 个月。在 2003 年政府大力实施节水保泉措施后,2003—2016 年地下水埋深年际间变化不大且呈稳健减小

趋势,平均降水量增加了 108 mm,地下水埋深一直保持较低水平,多年平均地下水埋深为 10.479 m,地下水采补基本保持平衡。监测井 2003—2016 年较 1997—2002 年地下水平均埋深明显减小,减少约 3.060 m。

地下水动态变化受自然因素(降水变化)和人为因素(地下水开采)共同作用影响,且济南的泉水主要来源于南部山区的大气降水入渗补给,地下水开采量特别是农业灌溉抽取地下水对地下水动态影响较为深刻^[28]。降水量的大小可明显影响地下水动态,当降水量过少时,地下水埋深会明显增加。特别是处于枯水年时,大气降水入渗补给地下水较少,农业灌溉则更多依赖于过度开采地下水,如 2002 和 2014 年为特枯水年,在这两年农业灌溉依赖于地下水尤为明显,而降水补给相对偏少,过度开采地下水使得各监测井地下水埋深明显上升^[29]。随着人类活动影响和城市化进程加快,地表硬化率提高,减少了大气降水对地下水的入渗补给,大量降水以地表径流的形式排泄。由此可见,地下水埋深受自然因素与人为因素共同影响,尤其在枯水年份,地下水埋深受自然因素和人为因素共同作用下明显增大。在 2003 年以后,地下水位埋深的减小除受降水量和

地下水开采量影响外,政府大规模地严格执行节水保泉措施也使得地下水动态发生明显变化。相关政策的有力实施,严格控制了地下水开采量,达到了保泉目的,并对地下水位恢复具有积极效果。

2002—2004 年可以认为是地下水埋深转折期,这段时间水位回升趋势明显,主要是受两方面影响:一方面是在 2003 年济南市政府颁布节水保泉措施并严格执行减少地下水开采量;另一方面济南市区 2003 年和 2004 连续两年均属丰水年,降水量约 930 mm,为 2002 年降水量的两倍多,降水入渗有力补给至地下水。泉水多来源于岩溶地下水,岩溶地下水主要补给来源于南部山区的大气降水补给,降水量的大小对市区内水资源总量起着控制作用,所以降水的明显增加也使得停喷 548 d 之久的趵突泉得到充分有效补给,并于 2003 年 9 月 6 日复涌。在转折期中位于地下水补给区的 1 号井地下水埋深变幅最大,上升 38.368 m,1 号井对补给最为敏感。3 号井埋深变幅最低,对补给的响应最为缓慢,仅有 0.450 m。转折期监测井地下水埋深变化特征与年内地下水埋深和地下水埋深年际变化特征相同,1 号井变幅最大,3 号井变幅最小,具体变化结果见表 2。

表 2 典型监测井地下水埋深变化
Tab. 2 Variation of groundwater depth in typical monitoring wells

单位:m

埋深类型	监测井号					
	1	3	6	10	15	22
转折期埋深下降	38.368	0.450	2.531	5.536	4.412	4.200
1997—2002 年平均埋深	39.973	1.182	4.815	20.949	6.285	8.032
2003—2016 年平均埋深	30.556	0.995	3.331	17.823	3.458	6.714

2.3 地下水埋深变化率空间分布特征

地下水埋深减小率与含水层岩性、地下水开采量及气象因素等密切相关,研究区地质条件错综复杂,大部分地区岩溶发育,裂隙众多。各监测井间虽可能未处于同一层位,但所处含水层间互相连通,具有较为密切的水力联系^[14,25]。因此,应用 ArcGIS 软件绘制市区 24 眼监测井近 20 年来地下水埋深下降速率等值线图,见图 5。地下水埋深下降速率地区分布特点如下:

(1)济南市区近 20 年来地下水位整体呈回升趋势,地下水平均埋深减小 2.527 m,地下水埋深减小率为 0.133 m/a,济南市实行的补水保泉措施颇有成效,济南市因此于 2016 年荣获全国首个“水生态文明城市”荣誉称号。

(2)地下水埋深减小率整体从东北向西南区域

衰减,随着城市化进程加快,城区逐渐向西南方向扩展,在济南市实施节水保泉措施后,东北区域城市化进程较为缓慢且受人类活动影响相对较少,受保泉措施影响较大,因此北部整体区域地下水埋深减小率较大。西南部的市区中心面积扩大使得人口高度向城区聚拢、工农业耗水量迅速增加,所以受人类活动影响较大,即使采取大规模节水保泉措施,市区西南部区域的地下水埋深减小率仍略低。市区北部建有鹊山水库供给约 1.6 亿 m³,西部有玉清湖水库供给每年约 1.2 亿 m³,这两座水库是济南市城市主要供水水源。位于东南部的历城区因有卧虎山(南部)、锦绣川(东部)两大水库,且两座水库近 20 年每年约向济南市区中心供水 0.16 亿 m³,南部水源供水量明显低于北部水源供水量,北部鹊山水库水源在供水沿途区域地下水也能够得到有效补给。因

此,地下水埋深减小率总体呈从东北向西南递减的趋势。济南市中心部分区域地下埋深呈增大趋势可能是因为近 20 年城市快速发展,泉群集中的市区中心区域中的重点渗漏带和泉水直接补给面积减少,部分水库、河道被防渗处理,且人口高度向城区集中,高强度人类活动用水量巨大,地下水超采严重,削弱地下水自然补给能力。

(3)济南市区具有 3 个明显的地下水漏斗区,两升一降,地下水位明显回升的区域有市中区的党家庄镇区域和位于市区东北部的历城区唐王镇区域。其中卧虎山水库下游的玉符河流经党家庄镇,它是济南诸泉的补给源头之一,属重点渗漏带,河道渗漏性能良好^[16,30-31]。在济南市实行节水保泉措施至今十几年来以来,位于卧虎山水库下游的玉符河水位明显升高,河道渗漏补给地下水,使得党家庄镇区域地下水埋深减小率为 0.667 m/a,响应程度为济南市区最高。位于历城区东北部的唐王镇区域可能由

于鹊山水库的有效补给、城市化进程较为缓慢和近些年行政补水措施的强力干预使得区域地下水开采量明显减少等原因^[20],唐王镇区域地下水位也出现了较为明显的回升趋势,其中心区域埋深减小率约为 0.582 m/a。地下水埋深呈明显增大的区域位于长清区与市中区交界的城郊接合区,漏斗末端位于长清区张夏镇,这可能与长清区近些年高速发展有关,长清区于 2001 年撤县设区,经济的高速发展也过度消耗了长清区地下水资源,特别是邻近较为发达的市中区的城郊接合区,为加快城市化进程扩大城区面积,过度开采地下水以及导致下垫面性质的改变(地表硬化率提高)使得降水下渗补给地下水的量减少^[32]。同时,济南市于 2003 年和 2012 年相继建立济西一期、济西二期供水工程,从长清区年抽取地下水约 0.3 亿 m³ 供给市内饮用。这些原因使得城郊接合部张夏镇区域附近发生明显的地下水埋深增大趋势,漏斗中心埋深增大率约为 0.115 m/a。

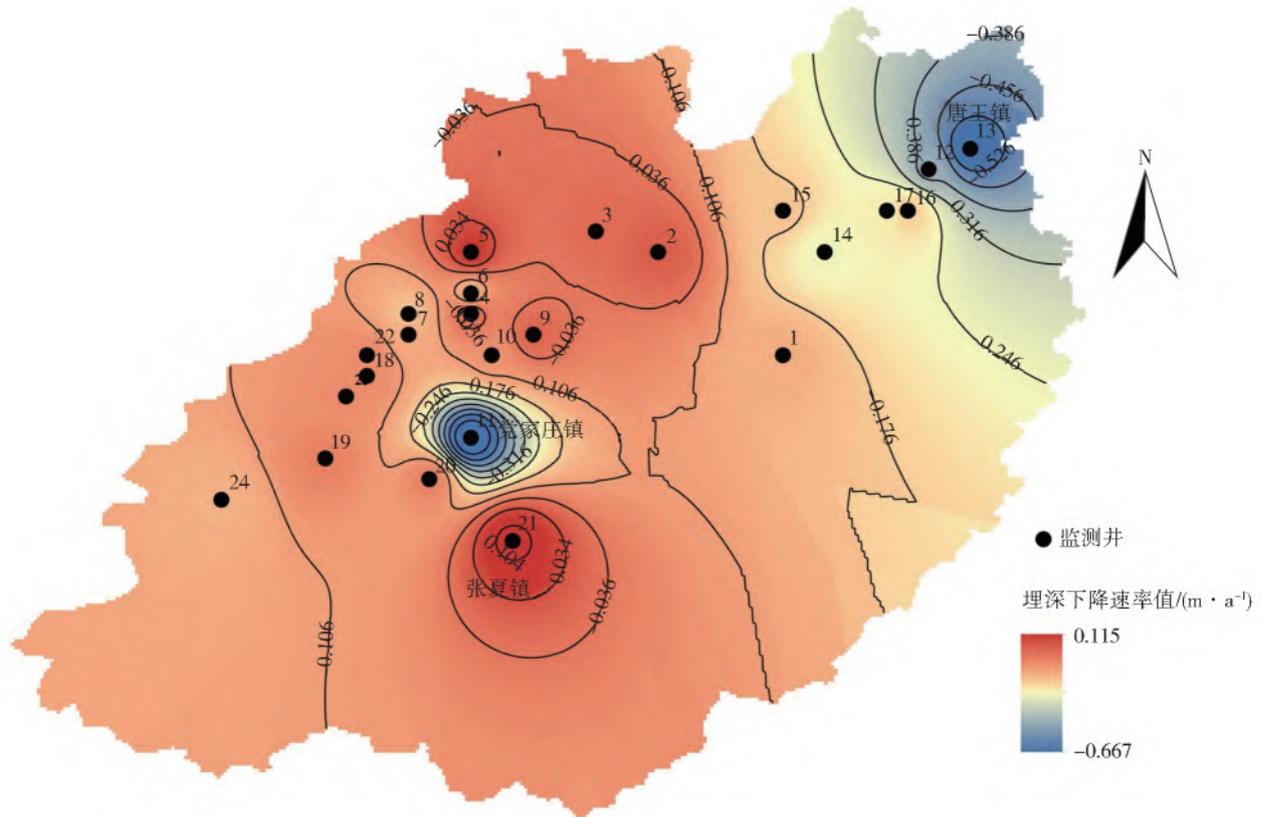


图 5 地下水埋深下降速率等值线图

Fig. 5 Contour map of groundwater depth decline rate

2.4 地下水埋深变化成因分析

地下水动态受降水、下渗、人工开采等因素综合影响^[5,7],本研究基于水均衡法揭示济南市区地下水埋深变化成因^[33],其原理是水量平衡,表达式为

$$G_{w补} - G_{w地} = \Delta G_w$$

式中: $G_{w补}$ 为地下水补给量,m³/a; $G_{w地}$ 为地下水排

泄消耗量,m³/a; ΔG_w 为地下水蓄变量,m³/a。

济南市区地下水补给主要来自降水补给(鹊山、玉清湖、卧虎山和锦绣川四大水库补给表现为市区内部水量调配,不计入补给),降水入渗补给系数的取值与地表岩性和降水量及地下水埋深等因素密切相关,济南市通常取值 0~0.2。结合水文地质特征

计算得多年平均降水入渗补给量约为 3 亿 m^3/a ^[34]。

1997 年济南市地下水供给量占总供给量的 55.52%，为市内主要供水水源^[19]。在济南市 2003 年采取大规模节水保泉措施之后，地下水已不再是济南市主要供水水源，至 2016 年地下水供给量仅占总供给量的 36.03%，但农田灌溉仍为最大用水户，占总用水量约为 43.55%^[34]。济南市区多年平均地下水允许开采量约为 5 亿 m^3/a ^[19]。1997—2003 年，经济的高速发展使得用水量不断增加，地下水超采现象愈来愈严重，超采地下水是济南市区地下水水位下降的主要原因。根据《济南市水资源公报》计算结果，多年地下水开采量约为 5.2 亿 m^3/a ，且在此期间几乎没有大规模的引水和地下水回灌措施^[18]。济南市作为著名的泉城，泉是地下水一种重要的排泄消耗方式，根据何奔等^[14]研究结果估算，1997—2002 年济南市区平均泉涌量约为 0.5 亿 m^3/a 。通过地下水均衡公式计算，结果表明济南市区 1997—2002 年地下水呈负均衡状态，多年平均地下水蓄变量减少 2.7 亿 m^3/a 。

济南市的保泉工作始于 20 世纪 80 年代初，经历“采外补内”“节水”“引黄”“封井”等保泉措施^[12-14]；2003 年市政府采取封井保泉措施，全市封井 700 余眼，关闭 300 多眼自备井，大大降低了地下水开采量，为泉水正常喷涌创造了条件；2005 年济南市建成使用南水北调济平干渠工程，每年向济南市区内的小清河输送生态用水约 0.8 亿 m^3 ；2008 年建成运行东联供水工程(引黄、引江)，年均供水约 0.9 亿 m^3 ，此部分用水多用于市区生活、农业、工业等，降低当地地下水开采压力，起到水源置换、涵养补泉等作用。截至 2010 年底，共封闭自备井 2 481 眼，其中深层自备井 326 眼，受 2014—2015 年两年干旱和降水稀少的影响，济南市首次调用长江水补源。同时，卧虎山水库大坝放水量由 20 万 m^3/d 增至 30 万 m^3/d ，进一步增加玉符河河道入渗量，实施泉水生态补源。综上，为恢复济南市地下水位，济平干渠、东联供水工程等新建引黄引江大型调水工程多年来调水补源量约达到 1 亿 m^3/a 。诸如此类重大饮水调水保泉措施减轻了济南市区对地下水的依赖程度，同时增加地下水补给量，保障了泉水的正常喷发。经计算，2003—2016 年济南市区减少地下水开采量约 3 亿 m^3/a ，多年平均地下水开采量约为 2.2 亿 m^3/a ，在这期间年泉涌量则达到 1 亿 m^3/a ，各调水、供水工程年补源量约有 1 亿 m^3/a 。水均衡计算结果为 0.8 亿 m^3/a ，表明济南市区地下水埋深上升现象已得到遏制，基本呈现稳健上升趋势。

3 结 论

本研究分析了济南市区地下水埋深动态时空变化规律，同时分析了区域内典型观测点的同时间年内水位波动状况，得到以下几个结论：

(1) 济南市对地下水开发利用程度较大，行政干预措施对地下水的影响很大。近 20 年济南市区地下水水位整体呈回升趋势，地下水平均埋深减小 2.527 m，减小率为 0.133 m/a。2003 年采取大规模节水保泉措施之后，地下水开采量减少约 3 亿 m^3/a ，市区地下水蓄变量由 2003 年以前的负均衡(-2.7 亿 m^3/a)转变至 2003 年以后的正均衡状态(0.8 亿 m^3/a)。地下水埋深增大现象得到明显遏制，目前基本呈现稳健减小趋势。

(2) 市区地下水埋深减小率整体呈现出从东北向西南区域衰减趋势，其中：历城区党家庄镇区域地下水埋深减小率最高，达到 0.667 m/a；长清区张夏镇区域地下水埋深呈明显增大趋势，中心增加率约为 0.115 m/a。各区地下水埋深对地下水开采或补给的响应程度不同，其中：位于地下水补给区的历下区表现最为敏感，变幅最大；而位于地下水排泄区的天桥区响应程度最为缓慢。

(3) 市区地下水埋深动态变化与降水补给和人工开采直接相关，在枯水年份，地下水埋深呈明显增大趋势，对降水变化响应程度较强，且地下水埋深年内动态分布呈明显的“单峰单谷”的季节性特征，其变化情况大致为：受春灌影响，年内最大地下水埋深约在 5—6 月；受 7—9 月汛期降水较多影响，年内最小地下水埋深一般出现在 9—10 月。

参考文献(References):

- [1] RICHARD G T, BRIDGET S, PETRA D, et al. Ground water and climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 322-329. DOI: 10.1038/nclimate1744.
- [2] KAREL D, PASCAL B, OSWALD V C, et al. Seasonal groundwater nitrate dynamics in a riparian buffer zone [J]. *Agronomie*, 2002, 22 (7/8): 747-753. DOI: 10.1051/agro:2002063.
- [3] 林祚顶. 我国地下水开发利用状况及其分析[J]. *水文*, 2004(1): 18-21. (LIN Z D. Development and utilization of groundwater in China[J]. *Journal of China Hydrology*, 2004 (1): 18-21. (in Chinese)) DOI: 1000-0852 (2004)01-0018-04.
- [4] 徐宗学, 李景玉. 水文科学研究进展的回顾与展望[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 450-459. (XU Z X, LI J Y. Progress in hydrological sciences: Past, present and fu-

- ture[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 450-459. (in Chinese) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 04. 003.
- [5] MAXWELL R M, KOLLET S J. Interdependence of groundwater dynamics and land-energy feedbacks under climate change [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 665-669. DOI: 10. 1038/ngeo315.
- [6] 王爱平, 杨建青, 杨桂莲, 等. 我国地下水监测现状分析与展望[J]. *水文*, 2010, 30(6): 53-56. (WANG A P, YANG J Q, YANG G L, et al. Discussion on China groundwater monitoring: Current situation and perspectives [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(6): 53-56. (in Chinese) DOI: 1000-0852(2010) 06-0053-04.
- [7] BURNETT W C, WATTAYAKORN G, SUPCHAROEN R, et al. Groundwater discharge and phosphorus dynamics in a flood-pulse system: Tonle Sap Lake, Cambodia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 79-91. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2017. 03. 049.
- [8] XU X, HUANG G H, QU Z Y, et al. Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(2): 301-313. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2010. 08. 025.
- [9] 贾金生, 刘昌明. 华北平原地下水动态及其对不同开采量响应的计算: 以河北省栾城县为例[J]. *地理学报*, 2002(02): 201-209. (JIA J S, LIU C M. Groundwater dynamic drift and response to different exploitation in the North China Plain; A case study of Luancheng County, Hebei Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 201-209. (in Chinese) DOI: 10. 11821/xb200202010.
- [10] 张士杰, 黄智华. 华北平原邯郸地区地下水位动态及成因分析[J]. *人民黄河*, 2019, 41(S2): 25-27, 36. (ZHANG S J, HUANG Z H. Analysis of groundwater level dynamics and causes in Handan area of North China Plain [J]. *Yellow River*, 2019, 41(S2): 25-27, 36. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2019. S2. 011.
- [11] 张展羽, 梁振华, 冯宝平, 等. 基于主成分-时间序列模型的地下水位预测[J]. *水科学进展*, 2017, 28(3): 415-420. (ZHANG Z Y, LIANG Z H, FENG B P, et al. Groundwater level forecast based on principal component analysis and multivariate time series model [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 415-420. (in Chinese))
- [12] 李常锁, 秦品瑞, 王少娟. 济南水资源与可持续利用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2010, 8(6): 114-117. (LI C S, QIN P R, WANG S J. Sustainable utilization of water resource in Jinan City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2010, 8(6): 114-117. (in Chinese) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2010. 06114.
- [13] 周保华, 李大秋, 吕华. 济南市地下水保护与合理利用[J]. *给水排水*, 2006(9): 4-7. (ZHOU B H, LI D Q, LYV H. Groundwater protection and rational utilization in Jinan City [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006(9): 4-7. (in Chinese))
- [14] 何奔, 贾超, 刘新宇, 等. 济南市区泉域地下水时空分布规律及污染物运移特性研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(5): 981-988. (HE B, JIA C, LIU X Y, et al. Temporal and spatial distribution of groundwater and feathers of contaminant transportation in Jinan spring area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(5): 981-988. (in Chinese) DOI: 10. 13544/j. cnki. jeg. 2014. 05. 030.
- [15] 齐欢. R/S 和 Mann-Kendall 法在济南市地下水管理模型中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2019(8): 20-25. (QI H. The application of R/S and Mann-Kendall methods in groundwater management model in Jinan City [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(8): 20-25. (in Chinese))
- [16] 刘丽芳, 王中根, 姜爱华, 等. 近 50 年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2018, 16(1): 22-27, 56. (LIU L F, WANG Z G, JIANG A H, et al. Analysis of rainfall-runoff relationship variation characteristics in Sanchuan watershed in Jinan City over recent 50 years [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(1): 22-27, 56. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180004.
- [17] 田园. 济南市地下水资源调查及开发应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2013. (TIAN Y. Investigation and application of groundwater resources in Jinan [D]. Jinan: Shandong University, 2013. (in Chinese))
- [18] 史丽华, 韩美, 张翠. 济南城市型水灾害特征分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2015, 13(4): 674-680. (SHI L H, HAN M, ZHANG C. Analysis of characteristics of urban water disasters in Jinan [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(4): 674-680. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 04. 015.
- [19] 段秀铭, 林常平, 靳丰山. 济南市地下水资源现状分析及开发利用建议[J]. *山东地质*, 2001(1): 40-45. (DUAN X M, LIN C P, JIN F S. Analysis on the present situation of groundwater resources in Jinan City and suggestions on its development and utilization [J]. *Geology of Shandong*, 2001(1): 40-45. (in Chinese))

- DOI:1009-0258(2001)01-0040-06.
- [20] 倪寒茜,束龙仓,韩刚,等. 城市化对趵突泉泉域降水入渗补给的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020,18(6): 64-70,147. (NI H Q, SHU L C, HAN G, et al. Impact of urbanization on precipitation infiltration recharge in Baotu Spring basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 64-70, 147. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0115.
- [21] 李铁锡,邢立亭. 济南保泉供水研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 25-27. (LI T X, XING L T. Research on spring water supply in Jinan[M]. Jinan: Shandong science and Technology Press, 1996: 25-27. (in Chinese))
- [22] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 济南市降水特征时空演变规律分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(5): 567-574. (CHANG X D, XU Z X, ZHAO G, et al. Spatiotemporal variations in precipitation in Jinan China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(5): 567-574. (in Chinese)) DOI:10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.05.011.
- [23] CHANG X D, XU Z X, ZHAO G, et al. Spatial and temporal variations of precipitation during 1979-2015 in Jinan City, China[J]. Journal of Water and Climate Change, 2018, 9(3): 540-554. DOI: 10.2166/wcc.2017.029.
- [24] 刘笑萌. 海绵城市建设背景下济南泉域地下水水位和水量动态研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2019. (LIU X M. Research of groundwater level and water quantity dynamic in Jinan Spring area under the background of sponge city construction[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2019. (in Chinese))
- [25] 王庆兵,段秀铭,高赞东,等. 济南岩溶泉域地下水可持续开采方案分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 1-5. (WANG Q B, DUAN X M, GAO Z D, et al. Analysis of sustainable groundwater development scenarios in the Jinan karstic spring basin[J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2010, 37(3): 1-5 (in Chinese)) DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2010.03.009.
- [26] 邢立亭,李常锁,胡爱民,等. 济南地区水资源调蓄与生态环境地质调查评价[R]. 济南: 山东省地矿局 801 水文地质工程地质大队, 2004. (XING L T, LI C S, HU A M, et al. Geological survey and evaluation of water resources regulation and storage and ecological environment in Jinan area[R]. Jinan: 801 Hydrogeological Engineering Geological Brigade of Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, 2004. (in Chinese))
- [27] 王通,徐征和,张立志,等. 邢家渡灌区地下水动态特征及驱动因素研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 49-54. (WANG T, XU Z H, ZHANG L Z, et al. Research of dynamic characteristics and driving factors of groundwater in Xingjiadu irrigation area[J]. Yellow River, 2017, 39(8): 49-54. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.08.010.
- [28] 王茂枚,束龙仓,季叶飞,等. 济南岩溶泉水流量衰减原因分析及动态模拟[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 19-23, 31. (WANG M M, SHU L C, JI Y F, et al. Causes of spring's of flux attenuation and simulation of spring's regime: A case in Jinan karst spring area[J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(1): 19-23, 31. (in Chinese)) DOI:1001-4810(2008)01-0019-05.
- [29] 刘春葵,刘志雨,谢正辉. 地下水对气候变化的敏感性研究进展[J]. 水文, 2007(2): 1-6. (LIU C Z, LIU Z Y, XIE Z H. Recent advances in research on sensitivity of groundwater to climate changes[J]. Journal of China Hydrology, 2007(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 1000-0852(2007)02-0001-06.
- [30] 路洪海,陈诗越,张重阳. 济南泉域排泄区地下水演变趋势分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(6): 80-82. (LU H H, CHEN S Y, ZHANG C Y. Analysis of groundwater evolution trend in Jinan spring drainage area[J]. Yellow River, 2009, 31(6): 80-82. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2009.06.033.
- [31] 刘霞,田汉功,董卫军,等. 南水北调济南市段输水工程地基优化设计[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2009, 7(4): 25-27, 30. (LIU X, TIAN H G, DONG W J, et al. South-to-North Water Diversion Project in Ji'nan urban water optimize design foundation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(4): 25-27, 30. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1683.2009.04.007.
- [32] 赵彦军,徐宗学,赵刚,等. 城市化对济南小清河流域产汇流的影响研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10): 35-46. (ZHAO Y J, XU Z X, ZHAO G, et al. Impact of urbanization on regional rainfall-runoff processes in Xiaoqing River basin, Jinan[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(10): 35-46. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdb.20191004.
- [33] 李晓英,顾文钰. 水均衡法在区域地下水资源量评价中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 87-90. (LI X Y, GU W Y. Application of water balance method in evaluation of groundwater resources[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 87-90. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2014.01.18.
- [34] 济南市水文局. 2016 年济南市水资源公报[R]. 济南,

济南市水文局,2016:3-7. (Jinan Municipal Bureau of hydrology. Water resources bulletin of Jinan City in

2016[R]. Jinan, bureau of hydrology of Jinan City, 2016:3-7 (in Chinese))

Characteristics and attribution of groundwater depth changes in Jinan City

WANG Jingjing¹, XU Zongxue¹, LI Peng¹, CHENG Tao², SU Heng¹

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

Abstract: In recent years, scholars have focused on the impact of groundwater recharge, development potential, conversion of surface and groundwater, and spring water supply, while less attention has been paid to regional groundwater dynamics and their causes. Jinan is a resource-based water-deficient city. The unreasonable exploitation of groundwater has resulted in no "spring" in the spring city and no "water" in the river. Therefore, scientific and reasonable planning and utilization of groundwater resources are important.

Based on the groundwater level data from 1997 to 2016 in the downtown of Jinan city and evidence collection through field investigation, the interannual variation characteristics of the groundwater depth are analysed with a statistical calculation of the average groundwater depth over the years and months. In ArcGIS software, the groundwater depth change contour map is drawn according to the monitoring data of each groundwater monitoring well, and the spatial distribution characteristics of the groundwater depth change rate are calculated and analyzed, and the dynamic change law of the groundwater depth and its influencing factors are explored based on the principle of water balance.

The dynamics of groundwater depth during the year show a "single peak and single valley" phenomenon, reaching the maximum groundwater depth in the year from May to June, and reaching the minimum depth of the year from September to October. In the past 20 years, the groundwater depth has shown a steady downward trend. The average groundwater depth in urban areas has dropped by 2.527 m, and the average declining rate during the past 20 years was 0.133 m/a. The spatial changes of groundwater depth declining rate are characterized by the attenuation from the northeast to the southwest. After 2003, the amount of groundwater extraction decreased by about 300 million m³/a, and the urban groundwater storage variable changed from a negative equilibrium (-270 million m³/a) before 2003 to a positive equilibrium after 2003 (80 million m³/a).

In the past 20 years, the groundwater depth in the urban area of Jinan has shown a steady downward trend. The average groundwater depth in urban areas has dropped by 2.527 m, and the average declining rate during the past 20 years was 0.133 m/a. After large-scale water-saving and spring-preserving measures in 2003, groundwater extraction was decreased by about 300 million m³/a, and the urban groundwater storage variable in the downtown of Jinan city has changed from a negative equilibrium (-270 million m³/a) to a positive equilibrium (80 million m³/a). The decrease rate of groundwater depth in the urban area shows an overall reduction trend from northeast to southwest, and the response degree of groundwater depth in each district to groundwater extraction or recharge is different. Among them, Lixia district is located in the groundwater recharging area and is most sensitive to the recharging or mining of groundwater, while the Tianqiao district showed the most insensitive. The dynamic change of underground groundwater depth in the urban area is directly related to precipitation replenishment and artificial mining. In dry years, the buried depth of groundwater showed an obvious increasing trend, and it responded strongly to changes in precipitation. The dynamic distribution of the buried depth of groundwater showed obvious seasonal characteristics of "single peak and single valley". The change was rough as follows: Affected by spring irrigation, the largest buried depth of groundwater in the year is about May-June; affected by more precipitation during the flood season from July to September, the minimum water depth of the year generally appears in September-October.

Key words: groundwater dynamics; groundwater depth; Jinan City; spring; declining rate