第 54 卷 第 3 期
2021 年(总 221 期)

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 54 No. 3
2021(Sum221)

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.03.019

湖北省江汉平原重点区地下水监测网优化研究

范威[1],江越潇[1],李寅[1],李伟[1],陈志宇[1],胡成[2]

(1. 湖北省地质环境总站,湖北 武汉 430034;2. 中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:为开展湖北省地下水监测网络的优化部署,在全省地下水流系统划分的基础上,选取江汉平原重点区地下水系统作为研究区,对该系统地下水监测网进行了优化研究。采用地下水动态类型编图法,从水文地质条件的角度为地下水监测井的布置提供了地质依据。克里金插值法能够定量评价系统内地下水等水位线的插值精度,从而评价监测网密度。研究区现有国家地下水监测工程(自然资源部分)监测井 77 个,根据监测需求选取临界插值误差标准差值为 1.3,优化后新增监测井 30 个。优化后的监测网有助于获取研究区更加科学全面的地下水动态信息。

关键词:地下水监测优化;地下水动态类型编图法;克里金插值法;监测网密度

中图分类号:P641.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2021)03-0222-07

Study on the Optimization of Groundwater Monitoring Network in Key Areas of Jianghan Plain in Hubei Province

FAN Wei[1], JIANG Yuexiao[1], LI Yin[1], LI Wei[1], CHEN Zhiyu[1], HU Cheng[2]

(1. Hubei Geological Environment Station, Wuhan 430034, Hubei, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: This paper selects the groundwater system in some key areas of Jianghan plain for the study on the optimization of the groundwater monitoring network based on the classification of groundwater flow system in Hubei Province. The adopted groundwater dynamic type mapping method provides geological basis for the arrangement of groundwater monitoring wells from the hydrogeological perspective, while the Kriging interpolation method quantitatively evaluates the interpolation accuracy of the water level so as to evaluate the density of the monitoring network. 77 monitoring wells attached to the National Groundwater Monitoring Project (natural resources) are in the study area. According to the monitoring requirements, the authors select 1.3 as the deviation of the critical interpolation error, thereby adding 30 new monitoring wells after the optimization. The optimized monitoring network in the research area can help obtain the groundwater dynamic information more scientifically and comprehensively.

Keywords: groundwater monitoring optimization; groundwater dynamic type mapping method;

收稿日期:2020-07-05;**修回日期:**2021-02-15

基金项目:中国地质环境监测院项目"国家地下水监测工程运行维护"(WKZB1911BJM300259),湖北省地质局项目"湖北省地下水系统与监测网优化研究"(KJ2015-4),湖北省地质局项目"湖北省地下水资源环境调查与监测"。

作者简介:范威(1990-),男,硕士,水工环工程师,主要从事 3S 技术、地下水资源环境调查与监测工作。E-mail:hbxtxfw@163.com。

Kriging interpolation; monitoring network density

地下水监测网的优化能减少监测网的建设和维护费用，用最少的监测井满足地下水监测需求（余楚等，2015）。随着经济社会的发展，人类工程活动的加剧引发了一系列地质环境问题，但在研究解决相关问题时，却又缺乏足够可靠、有效的信息，这反映了现有地下水监测网存在的问题（郭燕莎等，2011）。长期以来的地下水监测工作，由于对监测网科学性、完整性、合理性缺乏足够的重视，导致了监测信息的冗余和缺失。当前国内监测网优化研究应用广泛，技术方法成熟（朱瑾等，2007；秦延军等，2001；王亚维，2018；刘治政，2010；郑王琼，2017；王力坚等，2000）。湖北省地下水监测网还存在着监测网覆盖区域不全、监测站点布局有待优化等问题。荆州市区东部、监利南部、洪湖地区地下水位监测精度相对不足，迫切需要对区域地下水监测网进行优化。

1　地下水流系统划分及选取

地下水流系统理论是推动区域尺度地下水循环规律研究的有力工具（张俊等，2014）。湖北省可划分为四级地下水流系统，1 级至 4 级地下水流系统数量分别为 4、7、14、70，全省地下水流系统分布情况见图 1。江汉平原长江-汉江孔隙水四级地下水流系统具有以下特点：①边界清晰：东部、西部边界为岩性边界，是相对隔水边界，北边界汉江和南边界长江为水头边界，是零通量边界。②监测重点：区内包含国家地下水监测工程（自然资源部分）监测井 77 个，约占总监测井数量的 1/3；区内人口密度较大，是湖北省重要的农业生产基地和长江经济带汉江经济带交汇部位。③系统典型：该系统属于典型的盆地河间地块，具有统一的水力联系。因此，本次研究选择该系统作为地下水监测网优化研究区。该系统位于江汉平原腹地，地貌类型为堆积低平原区，地势平缓，起伏较小，据地下水监测资料，无明显的地下水分水岭。

2　研究区水文地质条件

2.1　含水层结构特征

研究区含水层在垂向上的分布差异较大，根据

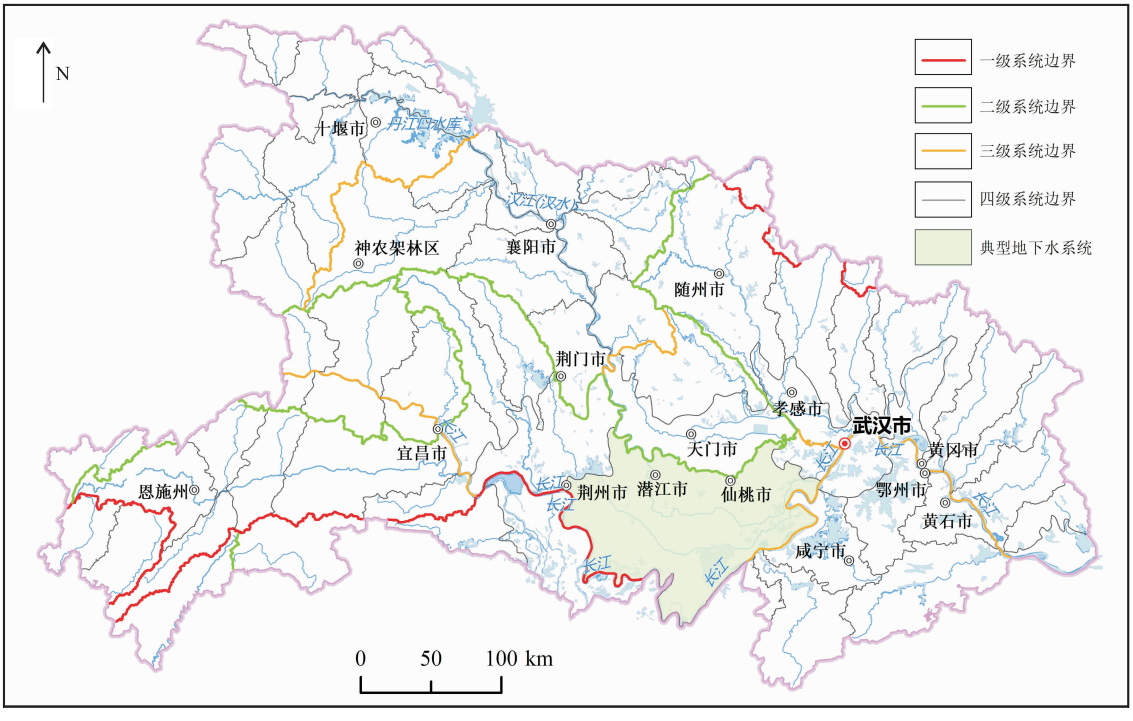

图 1　典型地下水流系统位置图

Fig. 1　Location map of typical groundwater flow system

含水层分布情况，将研究区埋深 300 m 以浅的含水层划分为 4 个含水层（表 1），中层地下水是研究区地下水监测的主要层位。监测孔深度主要在 50～200 m，未开展分层监测，监测层位主要为上中更新统（Qp^{2+3}）孔隙承压水，即中层地下水。

表 1 含水层结构划分表

Tab. 1 Division table of aquifer structure

层位	含水层划分	深度(m)	含水岩组岩性
浅层	第四系全新统(Qh)孔隙承压含水层	0～20	冲积黏性土，粉砂、粉土、粉细砂和砂砾石
中层	第四系上中更新统(Qp^{2+3})孔隙承压含水层	20～120	冲积细粉砂、中细砂、砂砾石；冲洪积砂、砂砾石；冲湖积砂砾石
深层	第四系下更新统(Qp^{1})孔隙承压含水层	120～280	粉砂、中细砂、砂、砂砾石
	新近系(N)裂隙孔隙承压含水层	>280	半固结的粉砂岩、砂砾岩

全新统(Qh)孔隙承压含水层：主要分布在长江和汉江沿岸地带，厚度一般为 10～35 m，与上更新统呈上叠阶地形式。上中更新统(Qp^{2+3})孔隙承压含水层：厚度变化较大，总体为平原腹地比边缘厚，东部比西部厚。顶板埋深一般为 15～35 m，盆地中心较边缘深，且由西向东、自北向南，埋深逐渐加大；底板埋深在盆地中心最大，由盆地中心向边缘翘起，与下更新统(Qp^{1})裂隙孔隙承压含水层之间有较稳定的隔水层，隔水层厚度一般为 5～7 m。下更新统(Qp^{1})孔隙承压含水层：主要分布于江汉平原腹地，多不连续，呈透镜状，在盆地中心水平和垂直方向上都较稳定，而在盆地边缘变化较大，盆地中心含水层厚度大于 400 m，向边缘尖灭。新近系(N)裂隙孔隙承压含水层：平原北部边缘位置埋深较浅，上部多为中更新统黏土、粉质黏土等弱透水层，向南埋深增加，上部为中上更新统砂-砂砾石层，至平原中部上部为下更新统砂卵砾石，至监利长江沿岸，埋深由深变浅，呈碗状分布(图 2)。

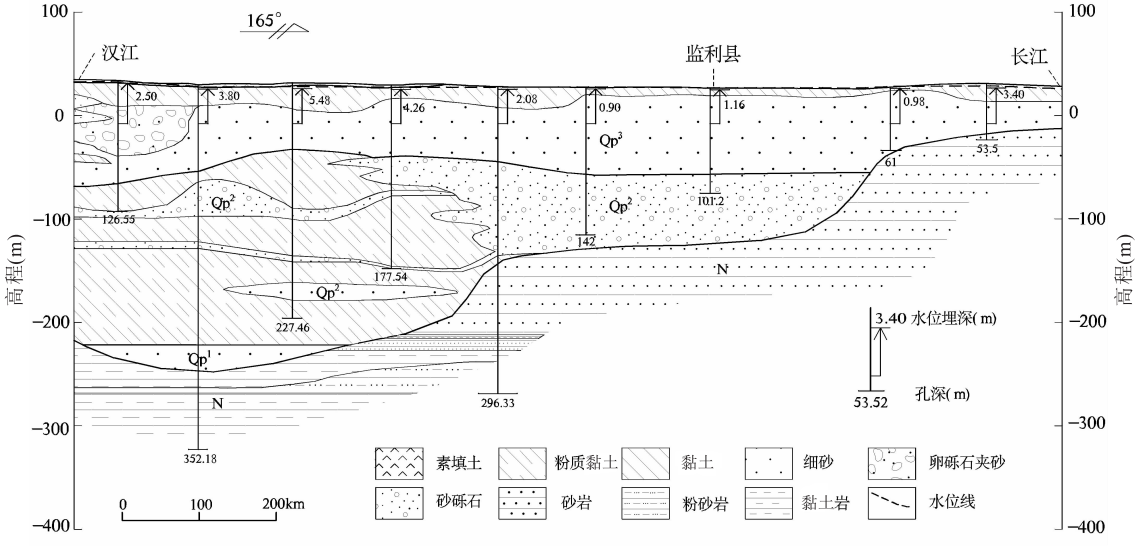

图 2 研究区水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

2.2 地下水补径排条件

研究区地下水的主要补给来源是大气降水入渗、地表水和田间灌溉水的下渗以及含水层的侧向径流补给。排泄形式包括地面蒸发、叶面蒸腾、人工开采和含水层侧向径流。

上中更新统孔隙承压水：研究表明，在长江、汉江等主要地表水体切穿承压含水层隔水顶板或隔水顶板较薄的地段，地表水为该含水层主要补给来源；

同时还接受下更新统裂隙孔隙承压水的越流补给和同一含水层侧向径流补给。丰水期，该含水层地下水径流方向总体上为自西向东径流。地下水的排泄主要为向地表水体排泄、向下更新统裂隙孔隙承压含水岩组的越流排泄，以及局部人工开采。地表水是地下水的重要补给来源，同时也是地下水的重要排泄场所，取决于两者地下水水位高低和水力联系程度。

下更新统裂隙孔隙承压水：与上中更新统孔隙承压含水层的越流关系主要取决于两者之间的水位差。丰水期，上中更新统孔隙承压水水位高于下更新统，中层水向深层越流补给；枯水期，局部地段由深层水越流补给中层水。地下水位的变化受地表水位制约，具有明显的季节性变化特点，当汉江水位上涨时，地下水水位随之抬高。深层地下水总体自西北向东南径流，地下水水力梯度在沙市、潜江以南较平缓，径流速度相当缓慢，基本处于静止状态。地下水向相邻含水层侧向径流排泄以及局部人工开采排泄。

3　监测网优化方法及现状评价

3.1　监测网优化原则

监测网在总体上应能反映区域地下水的动态变化，监测网的布置应尽可能以最少的监测点获取最多的有代表性的监测信息。在优化前，应对工作区的含水层特征、地下水补径排条件、地下水开发利用现状、地下水环境现状等进行分析研究，在此基础上对地下水监测网的布设进行优化，同时对监测网密度进行评价。克里金插值法能定量评价监测网密度，将插值误差的标准差作为评价标准。

3.2　克里金插值法

3.2.1　优化原理

地下水监测井之间的水位是用研究区各个监测井的地下水位插值计算得到的，插值的精度与监测井的数量与位置密切相关。将克里金插值误差的标准差作为评价监测网密度的指标，标准差越小，则地下水监测网的部署方案越合理。在特定的地下水监测网的分布形式下，监测点的位置和地下水位是已知的，克里金插值误差标准差的平均值是监测点密度的函数，据此绘制图 3 以示监测网密度（周仰效等，2007）。选取适当的插值精度可以从监测网密度图中得到相对应的监测井的数量。首先，用克里金插值法计算现有监测网的插值误差标准差，根据监测精度需要和拟投入的合理工作量选取适当的临界值。在满足事先给定临界值的前提下补充监测点：在高于临界值的区域增加监测井，不断调整，直至全区计算结果逼近临界值。

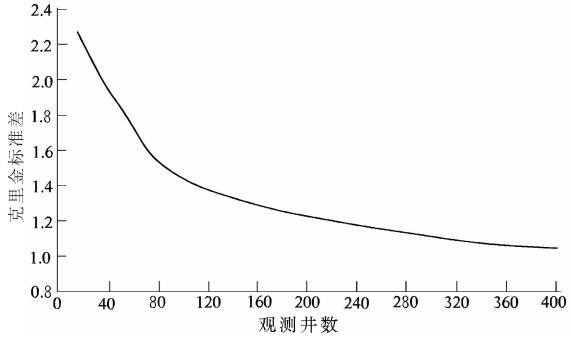

图 3　监测网密度图

Fig. 3　Density map of monitoring network

3.2.2　监测网现状评价

使用克里金插值法绘制工作区 2018 年丰水期地下水等水位图（图 4）。该区地下水水位整体上西高东低，中部地区由于监测点密度偏低，地下水水位空间分布规律不明显。

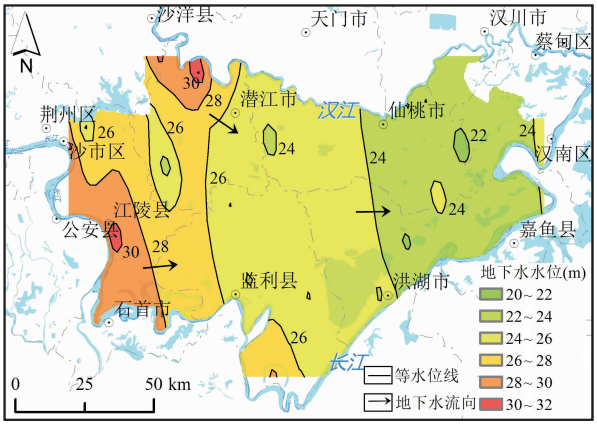

图 4　研究区地下水等水位图

Fig. 4　Isolevel map of groundwater in the study area

通过对插值过程的数据分析，拟合变异函数，利用拟合的变异函数，计算优化前研究区地下水水位标准差，得到研究区优化前标准差分布图（图 5）。由图 5 可知，研究区中部和北部标准差相对较小，一

般小于 1.3;东部、西部及南部边缘处标准差普遍为 1.3～1.5。南部边界为长江,边界处监测点控制程度较低,无法对在地表水影响下的地下水动态进行有效监测。因此,需要对插值误差标准差较大的地区补充监测点。

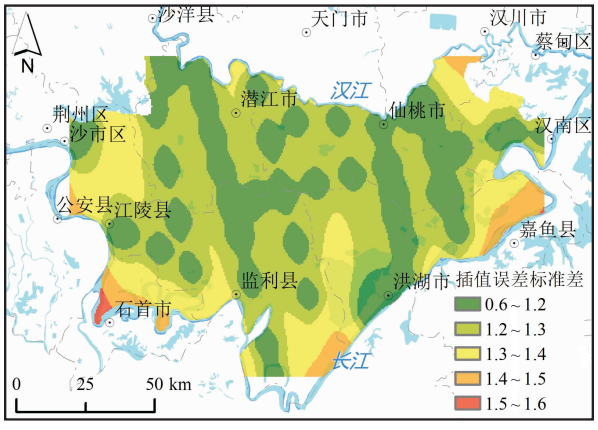

图 5 优化前标准差分布图

Fig. 5 The distribution of standard deviation before optimization

3.3 地下水动态类型编图法

3.3.1 优化原理

在地下水水位监测网优化研究中,地下水动态类型编图法是常用的方法之一(李阳等,2015)。地下水动态类型分区能够反映不同的地下水动态类型在空间上的分布(董殿伟等,2007)。地下水动态特征是降水、地表水、岩性条件等各类因素对地下水系统影响的直接反映(王浩等,2020)。充分考虑影响地下水动态的多种因素,划分各个影响因素的分区图,进行综合分析叠加,得到影响地下水的多因素综合分区图。地下水监测的目的之一是为了获取区域地下水动态信息。因此,监测点的布置应尽可能多地覆盖所有的地下水动态分区,这是该方法的基本原理,优点是充分利用了水文地质信息,弥补了克里金插值法的不足。

3.3.2 监测网现状评价

刘薇等人(刘徽等,2014)综合叠加了水文地质条件、地下水补给、非饱和带、局部影响等因子,得到了图 6 所示的影响地下水动态的多因素综合分区图。研究区一共划分为 54 个地下水动态区,平原中部面积较大,长江、汉江等地表水一带面积较小,每个区具有不同的地下水动态变化规律特征。研究区现有国家地下水监测工程监测井(自然资源部分)77 个,由图 6 可知,监测井并未全面覆盖所有的动态分区。荆州城区东南部、监利县南部、洪湖东部、汉川南部部分动态分区没有监测点覆盖,无法对全区的地下水动态形成全面控制。

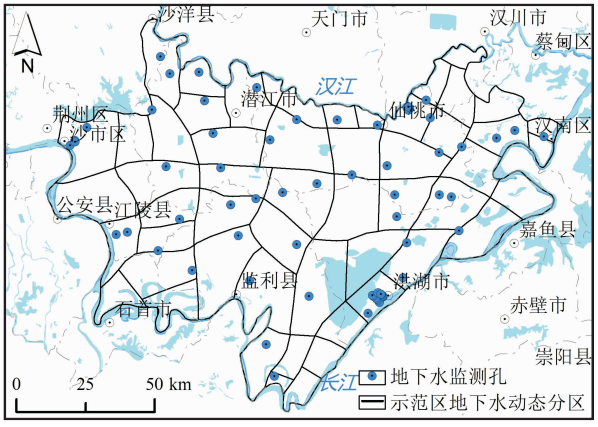

图 6 影响地下水动态的多因素综合分区图

Fig. 6 Multifactor comprehensive zoning map affecting groundwater dynamics

4 监测网优化布设及合理性评价

4.1 监测网优化布设

研究区现有监测井 77 个,尚无法全面反映该区域地下水动态特征。因此,需要补充地下水监测点。首先是根据克里金插值法确定标准差临界值,并确定监测点密度或数量。对于临界值的选取,目前国内外还没有统一的标准,各地区需要根据监测精度和拟投入的合理工作量确定。临界值取值过小,则需要的监测井数量大,造成较高的投入。如研究区临界值取 1.2 时,监测井数量需要约 190 个。临界值取值过大,虽需要的监测井数量小,但可能导致优化效果不明显,达不到优化监测的目的。据研究区地下水监测网优化前标准差分布图,结合监测网密度图,研究确定研究区临界值取 1.3,需要观测井数 140 个左右,能满足下一步监测工作的需要;当监测要求更高时,需要进一步减小临界值。

研究区监测网优化是在已有的地下水监测站点基础上,首先要保证每个影响地下水动态的多因素综合分区中有地下水监测点,其次要对标准差大于 1.3 的区块中心补充监测点,将整个区域的标准差限制在 1.3 以内。另外,从研究区地下水等水位线

图可以看出,潜江市西南部局部地区地下水位明显低于周边地区,为了更好地对该漏斗进行监测,需在该漏斗周边补充地下水监测井。

根据以上原则补充监测点,优化后的监测点分布如图 7 所示,共新增监测点 30 个。

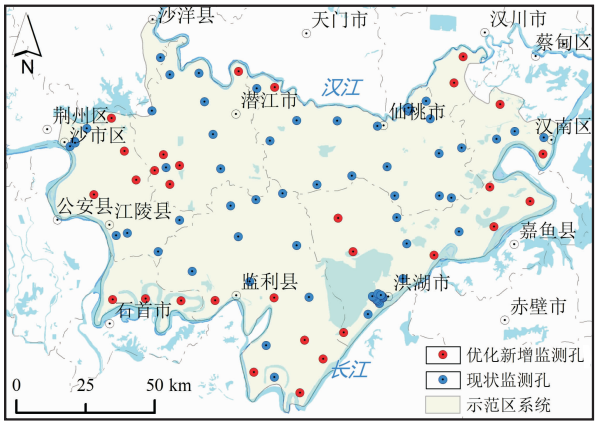

图 7　地下水监测网优化布置图

Fig. 7　Optimal layout of groundwater monitoring network

4.2　监测网优化合理性评价

对优化后的监测网重新进行插值误差标准差的计算,对比优化前和优化后的标准差分布图(图 8)可知:经优化新增一定的监测点后,区内原插值误差标准差超过 1.3 的荆州市城区东部、石首市北部、洪湖东部、监利南部和汉川市南部等地区的标准差均控制在 1.3 以内,说明优化后,新的地下水监测网能够更全面地反映研究区地下水动态变化规律。同时,新的监测网也从水文地质条件的角度,覆盖了不同的地下水动态类型区,能够对研究区内具有不同地下水动态特征的区域形成有效监测。对潜江市西南部局部地下水降落漏斗加密监测,能更科学地反映地下水降落漏斗的形态和变化情况。综上所述,研究区地下水监测网经过优化后,总体上提高了区内地下水监测精度,能够更好地服务于生态环境保护、地下水资源开发利用及自然资源规划管理。

5　结论及建议

(1)针对湖北省地下水监测网覆盖区域不全、监测站点布局有待优化等问题,在地下水系统划分的基础上,选取江汉平原长江-汉江孔隙水四级地下水系统作为优化区,进行地下水监测网的优化研究。

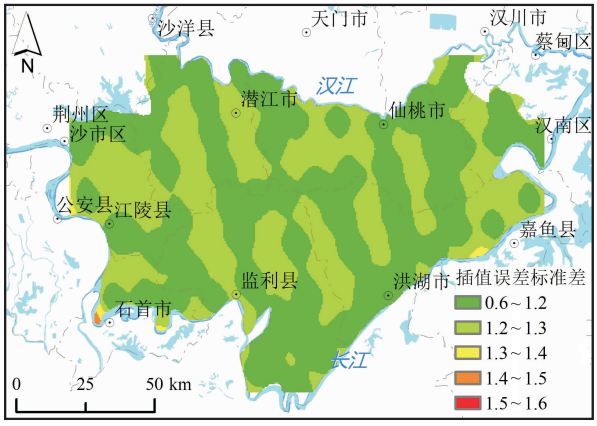

图 8　优化后标准差分布图

Fig. 8　The distribution of standard deviation after optimization

(2)采用地下水动态类型编图法和克里金插值法对监测网进行优化,取得了较好的效果,经过合理性评价,新增加的监测井明显降低了水位插值的误差,提高了监测精度。

(3)本次研究为研究区地下水监测网优化探索了一套有效的方法,研究区的地下水监测井优化数量是对当前监测工作的有效补充。随着地下水环境状况的改变和经济社会发展、生态环境保护对地下水监测要求的提高,监测网密度和监测精度需进一步提高。

参考文献(References):

余楚,张翼龙,孟瑞芳,等. 河套平原浅层地下水动态监测网优化设计[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2015,45(04):1173-1179.

YU C, ZHANG Y L, MENG R F, et al. Optimization Design of the Shallow Groundwater Dynamic Monitoring Network in Hetao plain[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(04): 1173-1179.

郭燕莎,王劲峰,殷秀兰. 地下水监测网优化方法研究综述[J]. 地理科学进展,2011,30(09):1159-1166.

GUO Y S, WANG J F, YIN X L. Review of the Optimization Methods for Groundwater Monitoring Network[J]. Progress in Geography, 2011, 30(09): 1159-1166.

朱瑾,霍传英,姜越,等. 乌鲁木齐河流域地下水水位监测网设计[J]. 水文地质工程地质,2007,(02):8-14.

ZHU J, HUO C Y, JIANG Y, et al. Monitoring of regional groundwater level in Urumqi River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, (02): 8-14.

秦延军,宋雷鸣,刘梅侠,等. 大庆油田西部地区地下水动态监测网优化设计[J]. 水文地质工程地质,2001,(02):21-25.

QIN Y J, SONG L M, LIU M X, et al. Optimization Design of the Shallow Groundwater Dynamic Monitoring Network in Western Area of Daqing Oilfield[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001,(02):21-25.

王亚维. 贵阳市地下水位监测网优化分析[A]. 2018 年西南 5 省、市、区第二次岩石力学与工程学术大会[C]. 贵阳,2018.

WANG Y W. Optimization Analysis of groundwater level Monitoring Network in Guiyang City[A]. The second Academic Conference on Rock Mechanics and Engineering of 5 Provinces, Cities and Districts in Southwest China in 2018[C]. Guiyang,2018.

刘治政. 黄水河流域平原区地下水监测网优化研究[D]. 泰安:山东农业大学,2010.

LIU ZZ. Study on Optimizing Groundwater Monitoring Network of Plain in Huang Shui River Basin[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010.

郑王琼. 雷州半岛地下水监测网络优化设计[J]. 安全与环境工程,2017,24(01):95-99.

ZHEN W Q. Optimal Design of Groundwater Monitoring Network of Leizhou Peninsula[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(01):95-99.

王力坚,鱼晓利,曹新艾,等. 陕西省地下水动态监测井网优化试验研究[J]. 地下水,2000,(02):47-49.

WANG L J, YU X L, CAO X A, et al. Experimental study on groundwater dynamic monitoring well pattern optimization in Shaanxi Province[J]. Ground Water, 2000, (02):47-49.

张俊,尹立河,侯光才,等. 区域地下水流理论最新进展——区域地下水流理论、应用与发展国际研讨会综述[J]. 西北地质,2014,47(03):200-204.

ZHANG J, YIN L H, HOU G C,et al. A Recent Review of Regional Groundwater Flow Theory-International Symposium on Regional Groundwater Flow Theory, Applications and Future Development[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(03):200-204.

周仰效,李文鹏. 区域地下水位监测网优化设计方法[J]. 水文地质工程地质,2007,(01):1-9.

ZHOU Y X, LI W P. Design of regional groundwater level monitoring networks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, (01):1-9.

李阳,周金龙,徐东. 我国地下水动态监测网优化布设方法研究综述[J]. 地下水,2015,37(02):64-65.

LI Y, ZHOU J L, XU D. A review on the optimal layout of groundwater dynamic monitoring network in China [J]. Ground Water, 2015, 37(02):64-65.

董殿伟,林沛,晏婴,等. 北京平原地下水水位监测网优化[J]. 水文地质工程地质,2007,(01):10-19.

DONG D W, LIN P, YAN Y, et al. Optimum design of groundwater level monitoring network of Beijing Plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, (01):10-19.

王浩,段磊,王文科. 秦岭北麓地下水位动态特征与影响因素[J]. 西北地质,2020,53(02):280-288.

WANG H, DUAN L, WANG W K. Dynamic Features of Groundwater Level in Northern Qinling and Its Influence Factors [J]. Northwestern Geology, 2020, 53 (02):280-288.

刘徽,邓少平,孙康. 江汉平原地下水位监测网优化设计[J]. 资源环境与工程,2014,28(05):692-696.

LIU H, DEGN S P, SUN K. Optimum Design of Groundwater Level Monitoring Network in Jianghan Basin[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(05):692-696.