

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.028

基于偏联系数的大兴区地下水水质 时空动态演变趋势分析

门宝辉,李晨,尹世洋

(华北电力大学水利与水电工程学院,北京 102206)

摘要:为探究城镇化对大兴区浅层地下水水质的影响,采用大兴区2006—2016年浅层地下水水质数据,选择硝酸盐、总硬度、溶解性总固体(TDS)3个水质指标作为评价指标,基于ArcGIS的空间插值和区域分析工具,按照行政边界提取区域水质结果,通过集对分析确定各区域的地下水水质等级,基于偏联系数对大兴区地下水水质动态演化规律进行评价分析。结果表明:硝酸盐指标主要涉及Ⅰ~Ⅳ类水,总硬度指标主要涉及Ⅲ~Ⅴ类水,TDS指标主要涉及Ⅲ、Ⅳ类水;研究区地下水水质等级呈现缓慢增长的趋势,水质出现恶化趋势;从空间分布上看,大兴区北部地下水综合水质等级和基于TDS指标的水质等级最高、南部次之、中部最低,基于硝酸盐指标的水质等级北部最高、中部次之、南部最低,基于总硬度指标的水质等级南部最高、中部次之、北部最低;基于各指标的水质Ⅱ级支持度均为最高,2013—2016年综合水质和基于总硬度指标、TDS指标的水质Ⅲ级支持度高于Ⅰ级支持度,相应水质有恶化的趋势,基于硝酸盐指标的水质Ⅰ级支持度高于Ⅲ级支持度,说明大兴区基于硝酸盐指标的整体水质有好转的趋势,但北部相应水质呈现持续恶化的趋势。

关键词:地下水水质;空间变异;偏联系数;硝酸盐;总硬度;溶解性总固体;大兴区

中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0233-11

Analysis of spatiotemporal dynamic evolution trend of groundwater quality in Daxing District based on partial connection number // MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang (College of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to explore the impact of urbanization on shallow groundwater quality in Daxing District, nitrate, total hardness, and total dissolved solids (TDS) were selected as the evaluation indexes, and the spatial interpolation and regional analysis tool of ArcGIS was used to extract water quality values of the study area according to the administrative boundary based on the collected water quality data of shallow groundwater in Daxing District from 2006 to 2016. Then, set pair analysis was used to determine the groundwater quality grade of each region, and the dynamic evolution law of groundwater quality in Daxing District was evaluated and analyzed with partial connection number. Results indicated that the nitrate index was mainly related to water quality of Class I to IV, the total hardness index was mainly related to water quality of Class III to V, and the TDS index was mainly related to water quality of Class III and IV; the groundwater quality grade of the study area showed a slow growth trend, and groundwater quality had a deterioration tendency; in terms of the spatial distribution, the comprehensive groundwater quality grade and TDS index-based groundwater quality grade were the highest in northern region, followed by those in southern and central regions, the nitrate index-based groundwater quality grade was the highest in northern region, followed by that in central and southern regions, and the total hardness index-based groundwater quality grade was the highest in southern region, followed by that in central and northern regions. According to the analysis results of the dynamic evolution trend of groundwater quality in the study area based on partial connection number, the support degree to grade-II groundwater quality of different indices was the highest; the support degrees to the comprehensive groundwater quality, total hardness index-based groundwater quality, and TDS index-based

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401406)

作者简介:门宝辉(1973—),男,教授,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:menbh@ncepu.edu.cn

通信作者:李晨(1989—),男,博士研究生,主要从事水资源综合评价研究。E-mail:lichen5969@sina.com

groundwater quality of grade-Ⅲ were higher than those of grade-I from 2013 to 2016, demonstrating deterioration tendencies of the corresponding groundwater quality in this period; the support degree to nitrate index-based groundwater quality of grade-I was higher than that of grade-Ⅲ, demonstrating an overall trend of improvement in nitrate index-based groundwater quality, however, the nitrate index-based groundwater quality continued to deteriorate in northern region of Daxing District.

Key words: groundwater quality; spatial variation; partial connection number; nitrate; total hardness; total dissolved solids; Daxing District

根据《2020 年城市建设统计年鉴》, 2001—2020 年全国城区人口从 3.57 亿人增加至 4.42 亿人, 城镇人口增加了 23.81%; 城市建设用地面积自 2.42 万 km² 增加至 5.83 万 km², 城市建设面积增加了 140.91%。由于城区人口激增和面积扩张, 城区供水量、污水排放量、生活垃圾等均明显增长。根据《2020 年中国生态环境状况公报》, 全国地表水 1 937 个水质断面中, I ~ Ⅲ 类水质断面数量相比 2010 年增加 23.50%, IV、V 类水质断面数量减少 7.7%, 劣 V 类水质断面数量减少 15.8%, 地表水水质有明显的提高, 可能与城市雨污分流措施、农村污水集中收集处理及河长制实施有关^[1]。而 2020 年的浅层地下水 10 171 个水质监测点中, I ~ Ⅲ 类水质监测点数量相比 2010 年减少 29.2%, IV、V 类增加 20.10%, 说明全国地下水水质有恶化的趋势。

北京作为全国政治、文化、国际交往、科技创新中心, 城镇化率从 2001 年的 78.06% 增加至 2020 年的 87.50%, 人口数量从 2001 年的 1 385.1 万人增加至 2020 年 2 189.0 万人^[2]。人口的增加引起污水排放量的快速增长, 城镇污水排放量从 2003 年的 5.44 万 m³ 增加至 2020 年的 20.42 万 m³, 增加了 275.36%。根据《2020 年北京市生态环境状况公报》, 2020 年 I ~ Ⅲ 类水质河长相比 2010 年增加 3.8%, IV、V 类水质河长减少 3.8%。在地下水方面, 根据《北京市水资源公报》, 2020 年北京全域地下水平均埋深为 22.03 m, 比 2001 年地下水埋深 16.42 m 下降 5.61 m。2020 年浅层地下水符合 Ⅲ 类水质标准的监测点数量比 2010 年提高 1.5%, 符合 IV、V 类水质标准的监测点数量减少 1.5%。由以上分析可知, 北京市地表水和地下水经过多年治理水质均略有好转。但地下水相对地表水治理难度大, 且浅层地下水与大气降水、地表污染物渗漏、人类活动等密切相关^[3,4], 因此需选择合适的评价方法, 动态反映地下水水质的变化规律, 为地下水管理保护提供理论和数据支撑。

目前针对地下水水质的评价方法主要有单因子评价法^[5]、内梅罗指数法^[6]、模糊综合评价法^[7]、灰色聚类法^[8]、灰色关联度法^[9]、人工神经网络法^[10]、多元线性回归法^[11]、时间序列法^[12]、数值模拟

法^[13]、集对分析法^[14]等。单因子评价法分别对单个水质指标进行评价, 以水质最差的指标作为评价结果, 该方法难以对水质进行整体评价, 造成评价误差较大。内梅罗指数法通过对各指标赋予不同的权重, 综合评定水质类别, 但忽略了水质类别分界线的模糊性, 导致评价结果不能很好地反映水质污染变化的状况。模糊综合评价法通过隶属度函数描述样本水质数据对水质评价等级的隶属关系, 可较客观地反映水质整体情况。灰色聚类法和灰色关联度法以灰色系统理论为基础, 具有推理严谨、简单快捷的特征, 但需要满足序列曲线的相似性, 否则评价结果会出现较大误差。人工神经网络法需大量样本对其进行训练, 以减少评价误差^[15]。多元线性回归法通过拟合各因素之间的相关关系建立数学模型, 对水质状况进行评价, 与人工神经网络法类似, 需大量样本才能得出量化的规律^[16]。时间序列法通过构造水质的时间序列模型, 利用数理统计方法预测未来水质的变化情况, 但该方法只考虑水质随时间的变化规律, 忽略了其他因素对水质变化的影响, 可能造成预测结果误差较大。数值模拟方法目前最常用的模型为 Modflow 模型, 该模型通过有限差分法模拟地下水的水流和溶质运移, 该方法需要大量的实验数据以确定模型参数。集对分析从同一度、差异度、对立度 3 个方面反映评价指标与评价标准的不确定关系, 在处理地下水水质的动态演变问题上具有明显的优势, 由集对分析计算出的同一度、差异度、对立度衍生出很多伴随函数, 如偏联系数^[17-19]、减法集对势^[20-21]、联系熵^[22]、邻联系数^[23]等, 均从不同角度反映同一度、差异度、对立度三者之间的动态演变规律。偏联系数能反映相邻联系数之间的关系和同异反三者之间的转化规律, 对处理长序列样本的动态演化规律具有独特的优势。

本文采用偏联系数对北京市典型平原区域大兴区地下水水质演变趋势进行评价分析。采用大兴区 2006—2016 年 25 个浅层地下水的水质资料, 选择硝酸盐、总硬度、溶解性总固体 (total dissolved solids, TDS) 3 个水质指标作为评价指标, 基于 ArcGIS 空间插值, 提取各区域的水质值, 并通过集对分析确定各区域的水质等级, 基于偏联系数计算

各水质等级支持度,动态反映各区域地下水水质的演变规律,为区域地下水资源保护提供参考。

1 研究区概况

大兴区地处北京市南郊,面积为1036 km²,处于东经116°13′~116°43′、北纬39°26′~39°51′。辖区内包含14个乡镇,其中北部地区包括黄村、西红门、旧宫、亦庄、瀛海5个乡镇;中部地区包括北臧村、庞各庄、魏善庄、青云店4个乡镇;南部地区包括榆垓、礼贤、安定、长子营、采育5个乡镇(图1)。区域气候属中纬度暖温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温11.7℃。多年平均降水量为510.1 mm,降水量年际变化较大,主要集中在6—9月。区域属永定河冲洪积平原,地势较为平坦,地形坡度为0.5‰~2.0‰。研究区地处燕山与太行山交汇处东南侧的北东向构造带,称为“大兴隆起”。第四系松散层厚度为200~300 m,含水层以粗中砂和细砂为主,部分地区有一定厚度的砂砾石层分布。受基底凸起控制,第四系沉积厚度变化大,从西北50 m向东南厚度逐渐增大至300 m。西北部鹅房、狼垓等地第四系沉积厚度为50~60 m,中东部黄村、旧宫、亦庄一带第四系厚度为70~90 m,向南厚度逐渐增大,榆垓、康营一带最大达到300 m。第四系含水层颗粒由粗渐细,富水性由大到小。

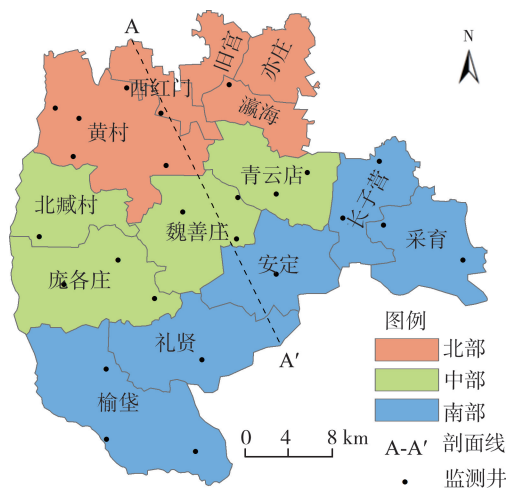


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 反距离权重插值法

反距离权重插值法基于相近相似的原理,以样本点与插值点的距离为权重进行加权平均,距离越近,则权重越大,距离越远,则权重越小^[24]。本文选择反距离插值法对研究区地下水水质评价指标进行插值,采用平均误差和均方根误差两个指标对插值

精度进行评价。

2.2 集对分析联系数的计算和水质等级的确定

2.2.1 评价指标选取及等级限值确定

根据《北京市水资源公报》,北京市平原区Ⅳ、Ⅴ类地下水主要超标指标为硝酸盐、总硬度、TDS,其次为铁、锰、氟化物,其他指标如氯化物、硫酸盐等呈零星超标。北京市平原区总面积6 400 km²(不包括延庆区),总硬度超标面积为2 390 km²,TDS超标面积为1 900 km²,硝酸盐超标面积为320 km²,分别占平原区总面积为37.34%、29.69%、5.00%。其余各超标指标零星分布于平原区东部。因此本文选用硝酸盐、总硬度、TDS 3个主要超标指标作为评价指标,对研究区地下水水质进行评价。

研究数据主要为2006—2016年大兴区25个浅层地下水监测井4—5月的水质监测数据,监测井的位置分布如图1所示。依据研究区地下水样本数据的特征,在参考GB/T 14848—2017《地下水质量标准》、已有资料和专家意见的基础上,确定地下水水质指标等级限值 s_{gj} ,其中 $g(g=1,2,3)$ 为水质指标评价等级; j 为水质指标。

2.2.2 计算各样本指标联系数及水质等级

水质样本指标值 x_{ij} 与水质等级限值 s_{gj} 间的指标联系数采用式(1)~(3)计算。

a. 若指标为正向指标且 $s_{0j} \leq x_{ij} \leq s_{1j}$,或指标为反向指标且 $s_{0j} \geq x_{ij} \geq s_{1j}$,指标联系数计算公式为

$$\begin{cases} u_{ij1} = 1 \\ \{u_{ij2} = 1 - 2 \frac{x_{ij} - s_{1j}}{s_{2j} - s_{1j}} \\ \lfloor u_{ij3} = -1 \end{cases} \quad (1)$$

b. 若指标为正向指标且 $s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j}$,或指标为反向指标且 $s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j}$,指标联系数计算公式为

$$\begin{cases} \{u_{ij1} = 1 - 2 \frac{s_{1j} - x_{ij}}{s_{1j} - s_{0j}} \\ \{u_{ij2} = 1 \\ \lfloor u_{ij3} = 1 - 2 \frac{x_{ij} - s_{2j}}{s_{3j} - s_{2j}} \end{cases} \quad (2)$$

c. 若指标为正向指标且 $s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j}$,或指标为反向指标且 $s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j}$,指标联系数计算公式为

$$\begin{cases} \lfloor u_{ij1} = -1 \\ \{u_{ij2} = 1 - 2 \frac{s_{2j} - x_{ij}}{s_{2j} - s_{1j}} \\ \lfloor u_{ij3} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为水质样本 i 的第 j 个水质指标值; u_{ij1} 、 u_{ij2} 、 u_{ij3} 分别为样本 i 的第 j 个水质指标在各水质评价标准等级范围内的指标联系数; s_{1j} 、 s_{2j} 分别为水质Ⅰ级

与Ⅱ级、水质Ⅱ级与Ⅲ级间的限值。若评价指标为正向指标, s_{0j} 、 s_{3j} 分别为水质Ⅰ级的最小值和Ⅲ级的最大值;若评价指标为反向指标,则 s_{0j} 、 s_{3j} 分别为水质Ⅰ级的最大值和Ⅲ级的最小值。

将样本 i 的第 j 个水质指标的同度、差异度、对立度转化为相对隶属度,计算过程如下:

$$v''_{ijg} = 0.5 + 0.5u_{ijg} \quad (4)$$

$$v'_{ijg} = v''_{ijg} / \sum_{g=1}^3 v''_{ijg} \quad (5)$$

$$u_{ij} = v'_{ij1} + v'_{ij2}I + v'_{ij3}J \quad (6)$$

式中: v''_{ijg} 为计算过程量; u_{ij} 、 v'_{ij1} 、 v'_{ij2} 、 v'_{ij3} 分别表示样本 i 的第 j 个水质指标的联系数、同度、差异度和对立度; I 、 J 分别为差异度系数和对立度系数。

指标 j 与水质评价等级 g 之间的评价指标联系数计算过程如下:

$$v'_{jg} = \sum_{i=1}^n v'_{ijg} \quad (7)$$

$$v_{jg} = v'_{jg} / \sum_{g=1}^3 v'_{jg} \quad (8)$$

$$u_j = v_{j1} + v_{j2}I + v_{j3}J \quad (9)$$

式中 v'_{ijg} 为计算过程量; u_j 、 v_{j1} 、 v_{j2} 、 v_{j3} 分别为指标 j 的联系数、同度、差异度和对立度; n 为样本数。

样本 i 与水质评价等级 g 之间的评价指标联系数计算过程如下:

$$v'_{ig} = \sum_{j=1}^3 v'_{ijg} \quad (10)$$

$$v_{ig} = v'_{ig} / \sum_{g=1}^3 v'_{ig} \quad (11)$$

$$u_i = v_{i1} + v_{i2}I + v_{i3}J \quad (12)$$

式中 u_i 、 v_{i1} 、 v_{i2} 、 v_{i3} 分别为样本 i 的联系数、同度、差异度和对立度。

利用级别特征值法计算地下水样本 i 和指标 j 的水质等级:

$$h_{si} = \sum_{g=1}^3 v_{ig}g \quad (13)$$

$$h_{dj} = \sum_{g=1}^3 v'_{jg}g \quad (14)$$

式中 h_{si} 、 h_{dj} 分别为样本 i 和指标 j 的水质等级。

2.3 基于偏系数的地下水水质动态演化评价

偏系数主要用于反映联系数之间的动态演化,目前常用1阶偏系数。由于1阶偏系数仅反映邻联系数之间的演化,未考虑同度和对立度之间的相互转化;而2阶偏系数不仅考虑同异、异反之间的相互转化,还能反映同反之间的相互转化。因此本文选用2阶偏系数对地下水水质动态演化规律进行评价。

通过2阶偏系数计算各水质等级的支持度,

计算公式为

$$S_1 = a(1 + \partial^+ a + \partial^{2+} a) \quad (15)$$

$$S_2 = b(\partial^- b + 1 + \partial^+ b) \quad (16)$$

$$S_3 = c(\partial^{2-} c + \partial^- c + 1) \quad (17)$$

$$\text{其中} \quad \partial^+ a = \frac{a}{a+b}$$

$$\partial^{2+} a = \frac{a}{a+b} / \left(\frac{a}{a+b} + \frac{b}{b+c} \right)$$

$$\partial^- b = \frac{b}{a+b} \quad \partial^+ b = \frac{b}{b+c}$$

$$\partial^{2-} c = \frac{c}{b+c} / \left(\frac{b}{a+b} + \frac{c}{b+c} \right) \quad \partial^- c = \frac{c}{b+c}$$

式中: S_1 、 S_2 、 S_3 分别为水质Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级的支持度; a 、 b 、 c 分别为样本或指标联系数的同度、差异度、对立度; $\partial^+ a$ 、 $\partial^{2+} a$ 分别为 b 、 c 向 a 的正向演化率; $\partial^- b$ 、 $\partial^+ b$ 分别为 a 向 b 的负向演化率和 c 向 b 的正向演化率; $\partial^{2-} c$ 、 $\partial^- c$ 分别为 a 、 b 向 c 的负向演化率。通过比较 S_1 、 S_2 、 S_3 的相对大小,可确定研究对象评价等级深度演化趋势。 S_1 越大,说明评价指标向好的趋势发展; S_3 越大,说明评价指标向差的趋势发展。

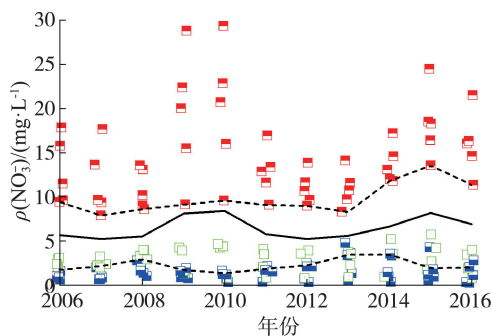
3 结果与分析

3.1 地下水水质评价结果

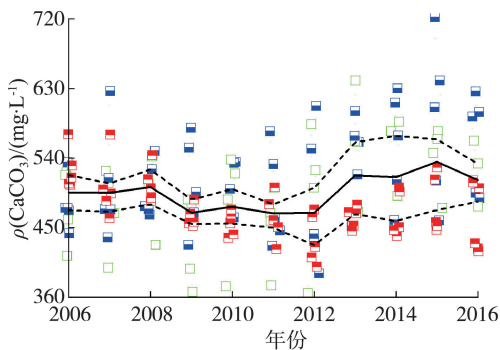
根据2006—2016年25个地下水长期监测点的数据,基于反距离权重法计算得到大兴区区域的水质值,基于ArcGIS中Spatial Analyst工具箱中的区域分析工具,提取各区域的水质值,共154个(图2)。反距离权重法搜索半径内最大预测点数为15个,半径内最小预测点数为10个,通过交叉验证得到硝酸盐质量浓度($\rho(\text{NO}_3^-)$)的平均误差、均方根误差分别为0.08 mg/L和0.51 mg/L;总硬度(以 $\rho(\text{CaCO}_3)$ 计)平均误差、均方根误差分别为0.49 mg/L和29.68 mg/L;TDS质量浓度($\rho(\text{TDS})$)平均误差、均方根误差分别为0.15 mg/L和34.08 mg/L。各指标误差较小,平均误差和均方根误差均可满足本次评价的要求。

由图2(a)可知,按照GB/T 14848—2017《地下水质量标准》,154个水质评价样本中,硝酸盐指标主要涉及Ⅰ~Ⅳ类水,其中Ⅰ类水($\rho(\text{NO}_3^-) \leq 2 \text{ mg/L}$)样本数为54个,Ⅱ类水($2 \text{ mg/L} < \rho(\text{NO}_3^-) \leq 5 \text{ mg/L}$)的样本数为42个,Ⅲ类水($5 \text{ mg/L} < \rho(\text{NO}_3^-) \leq 20 \text{ mg/L}$)的样本数为50个,Ⅳ类水($20 \text{ mg/L} < \rho(\text{NO}_3^-) \leq 30 \text{ mg/L}$)的样本数为8个,分别占样本总数的35.06%、27.27%、32.47%、5.19%,说明硝酸盐指标以Ⅰ~Ⅲ类水为主,此外,硝酸盐指标为Ⅳ类水的样本全部位于大兴

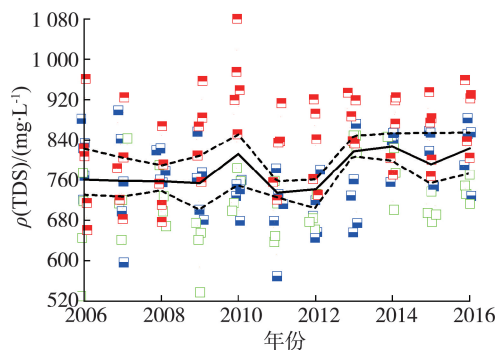
■ 北部 ■ 中部 ■ 南部 — 均值线 - - - 33%和66%平均数



(a) 硝酸盐



(b) 总硬度



(c) TDS

图2 大兴区水质指标变化趋势

Fig.2 Trends of water quality indices in different regions in Daxing District

区北部,说明北部硝酸盐污染较严重。由图2(b)可知,总硬度指标主要涉及Ⅲ~Ⅴ类水,其中Ⅲ类水($\rho(\text{CaCO}_3) \leq 450 \text{ mg/L}$)的样本数为30个,Ⅳ类水($450 \text{ mg/L} < \rho(\text{CaCO}_3) \leq 650 \text{ mg/L}$)的样本数为123个,Ⅴ类水($\rho(\text{CaCO}_3) > 650 \text{ mg/L}$)的样本数为1个,占比分别为19.48%、79.87%、0.65%,说明该区域总硬度指标以Ⅳ类水为主,水质较差。由图2(c)可知,TDS指标主要涉及Ⅲ、Ⅳ类水,其中Ⅲ类水($\rho(\text{TDS}) \leq 1 \text{ g/L}$)的样本数为153个,Ⅳ类水($1 \text{ g/L} < \rho(\text{TDS}) \leq 2 \text{ g/L}$)的样本数为1个,占比分别为99.35%、0.65%,说明该区域TDS指标以Ⅲ类水为主。

为进一步分析评价地下水的水质演化方向,本文取各样本指标值的33%和66%的平均数(图2)

作为各水质等级评价指标限值,采用集对分析及偏联系数对各指标的演化趋势进行分析评价。各水质等级指标限值如表1所示。

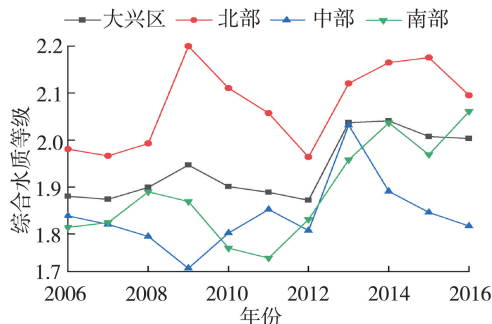
表1 各水质等级指标限值

Table 1 Limits of indexes for different water quality grades

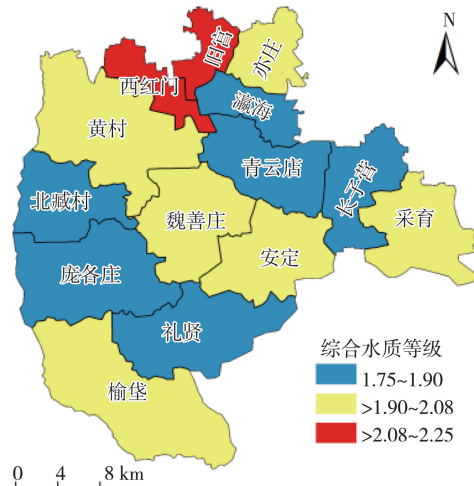
水质等级	指标限值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{CaCO}_3)$	$\rho(\text{TDS})$
I级	≤ 2	≤ 450	≤ 750
Ⅱ级	$> 2 \sim 10$	$> 450 \sim 550$	$> 750 \sim 850$
Ⅲ级	$> 10 \sim 30$	$> 550 \sim 720$	$> 850 \sim 1\ 100$

3.2 地下水水质综合等级动态演化趋势

利用式(13)计算大兴区及各乡镇地下水的综合水质等级。由2006—2016年大兴区地下水综合水质等级计算结果(图3(a))可知,2006—2016年地下水综合水质等级有增长的趋势,说明2006—2016年地下水水质有恶化的趋势。2006—2012年大兴区地下水综合水质等级处于平稳的状态;2012—2013年地下水综合水质等级处于上升的趋势,主要是由于2013年相对于2012年, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{CaCO}_3)$ 、 $\rho(\text{TDS})$ 均值分别由5.20 mg/L、469.16 mg/L、742.17 mg/L上升至5.58 mg/L、517.61 mg/L、817.55 mg/L,引起综合水质等级的增



(a) 变化趋势



(b) 空间分布

图3 大兴区地下水综合水质等级计算结果

Fig.3 Results of comprehensive water quality grade of groundwater in Daxing District

长;2013—2016 年地下水综合水质等级处于平稳的状态,其值基本在 2.0 附近波动,说明大兴区自 2013 年以来地下水综合水质有恶化的趋势,这与区域城镇化进程有关。根据《大兴区统计年鉴》,2006—2016 年大兴区人口数从 91.90 万人增长至 169.40 万人,增加了 84.33%;工业产值从 76.15 亿元增长至 236.88 亿元,增加了 210.64%;第三产业产值从 103.48 亿元增长至 422.35 亿元,增加了 308.15%。南水北调入京后,除黄村地区外,大兴区供水主要水源仍以地下水为主,快速城镇化导致地下水持续超采,人口数、工业产值、第三产业产值的快速增长导致用水量、污水量、生活垃圾量的快速增加,引起地下水水质的恶化。

从空间分布上看,大兴区北部地下水综合水质等级明显高于中部和南部,2006—2009 年北部地下水综合水质等级持续处于增长的趋势,2010—2012 年处于降低的趋势,2013—2016 又处于增长的趋势。总体上大兴区北部地下水水质有恶化的趋势。由 2006—2016 年大兴区地下水综合水质等级空间分布可知(图 3(b)),北部西红门、旧宫、亦庄、黄村地区地下水综合水质等级最高,这与大兴区人口和产业大量分布于北部有关。与北部相比,大兴区中部和南部地下水综合水质等级较低,中部和南部 2006—2012 年地下水综合水质等级总体变化不大,2012—2013 年均出现增长的趋势,2013—2016 年处于持续降低的状态;2013 年后南部地下水综合水质等级始终在 2.0 附近波动,其水质比中部差。

利用式(13)计算得到的综合水质等级只能反映硝酸盐、总硬度、TDS 3 个指标的总体水质变化情况,而不能反映大兴区地下水综合水质在各等级区间内的动态演化规律。将图 3(b)中综合水质等级 1.75~1.90、>1.90~2.08、>2.08~2.25 分别记为综合水质 I 级、II 级、III 级,利用式(15)~(17)计算硝酸盐、总硬度、TDS 指标对各综合水质等级的支持度。由 2006—2016 年大兴区地下水各综合水质等级的支持度演化曲线(图 4(a))可知,2006—2016 年地下水综合水质 II 级支持度最高;2006—2012 年地下水综合水质 I 级支持度高于综合水质 III 级,说明该时段大兴区地下水水质有好转的趋势;2013—2016 年地下水综合水质 III 级支持度高于综合水质 I 级,说明该时段大兴区地下水水质有恶化的趋势。

由 2006—2016 年大兴区北部地下水各综合水质等级支持度演化曲线(图 4(b))可知,大兴区北部地下水综合水质 II 级支持度最高,III 级支持度次之, I 级支持度最低,说明北部地下水综合水质等级

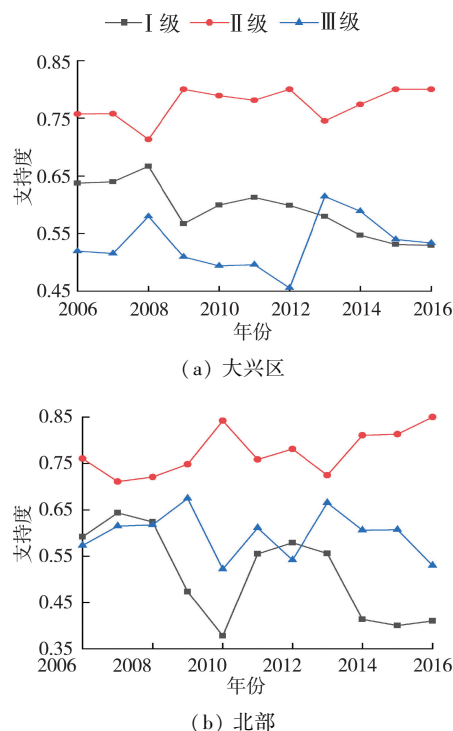


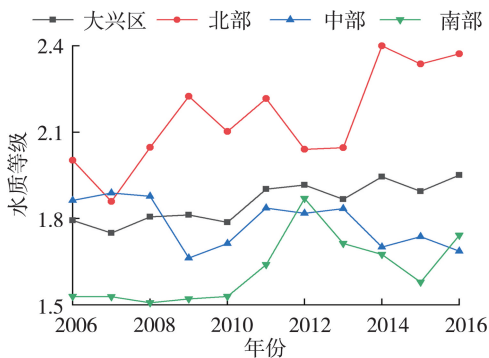
图 4 大兴区及其北部地下水各综合水质等级支持度演化曲线

Fig. 4 Evolution curves of support degree to each comprehensive water quality grade in Daxing District and its northern region

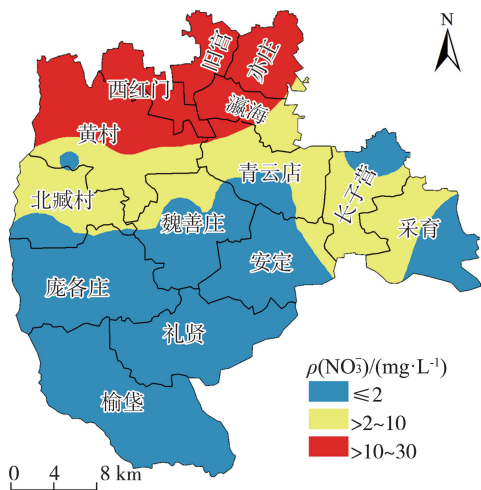
持续处于 II 级;综合水质 III 级支持度曲线值除个别年份(2006—2008 年、2012 年)外,都大于 I 级支持度曲线值,说明北部地下水水质有恶化的趋势。

3.3 基于硝酸盐指标的水质等级动态演化趋势

利用式(14)计算大兴区及各乡镇基于硝酸盐指标的水质等级(硝酸盐水质等级)。2006—2016 年大兴区地下水硝酸盐水质等级变化趋势如图 5(a)所示,地下水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 的空间分布如图 5(b)所示。2006—2016 年大兴区地下水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均值从 5.64 mg/L 增加至 6.87 mg/L,水质等级总体呈缓慢上升趋势,一方面由于大兴区北部过境污水渗漏引起地下水污染,另一方面由于区域内工业和生活污水经市政管线排入新风河过程中,污水渗漏引起污染^[25]。从空间分布上看,大兴区北部硝酸盐水质等级最高,南部最低。北部地下水中,2006—2013 年 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均值为 13.58 mg/L,水质等级变化不大;2013—2016 年 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均值从 13.58 mg/L 增加至 15.97 mg/L,水质等级呈增长的趋势。北部西红门、旧宫、亦庄地区地下水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均值达到 16.15 mg/L,水质等级高。中部地下水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均值为 2.94 mg/L,水质等级总体变化不大;南部 2006—2012 年水质等级呈上升的趋势,2012—2016 呈下降的趋势。



(a) 变化趋势



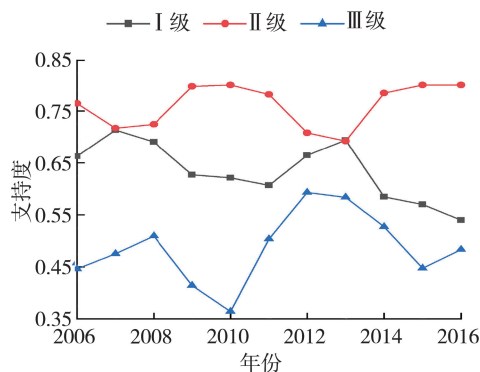
(b) 空间分布

图5 大兴区地下水硝酸盐水质等级变化趋势及 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 空间分布

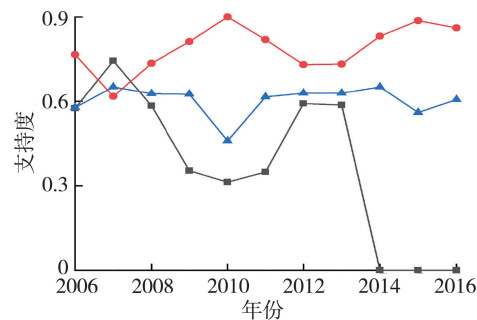
Fig.5 Trends of nitrate index-based groundwater quality grades and spatial distribution of $\rho(\text{NO}_3^-)$ in groundwater in Daxing District

利用式(14)计算得到的硝酸盐水质等级只能反映硝酸盐指标的总体水质变化情况,而不能反映大兴区地下水硝酸盐指标处于Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级(表1)的水质等级动态演化规律,为此,需进一步计算硝酸盐指标对各水质等级的支持度。由2006—2016年大兴区地下水硝酸盐指标对各水质等级的支持度演化曲线(图6(a))可知,大兴区水质Ⅱ级支持度最高,水质Ⅰ级支持度次之,水质Ⅲ级支持度最低,说明大兴区地下水水质将持续处于Ⅱ级。从支持度随时间的演化过程来看,2006—2013年水质Ⅱ级支持度曲线基本在0.74附近波动,2013—2016年水质Ⅱ级支持度呈增加的趋势;从总体趋势来看,2006—2016年水质Ⅰ级支持度始终高于水质Ⅲ级支持度,说明大兴区硝酸盐指标有变好的趋势。

由2006—2016年大兴区北部地下水硝酸盐指标对各水质等级的支持度演化曲线(图6(b))可知,北部水质Ⅱ级支持度最高,水质Ⅲ级支持度次之,水质Ⅰ级支持度最低,说明北部地下水水质将持



(a) 大兴区



(b) 北部

图6 大兴区及北部地下水硝酸盐指标对各水质等级的支持度演化曲线

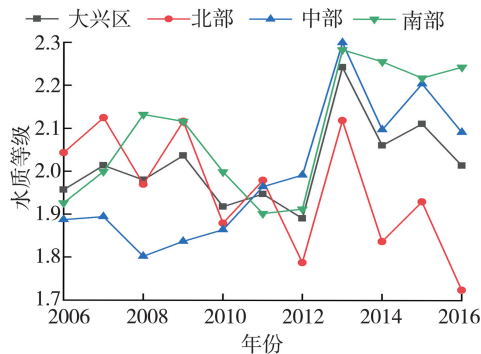
Fig.6 Evolution curves of support degree of nitrate index to each water quality grade in Daxing District and its northern region

续处于Ⅱ级。从支持度随时间的演化过程来看,2008—2016年水质Ⅱ级和Ⅲ级支持度变化不大;2008—2013年水质Ⅰ级支持度曲线呈先降低后增长的趋势,2014—2016年支持度变为0。从总体趋势来看,2008—2016年水质Ⅲ级支持度始终高于水质Ⅰ级的支持度,说明北部地下水水质有恶化的趋势。

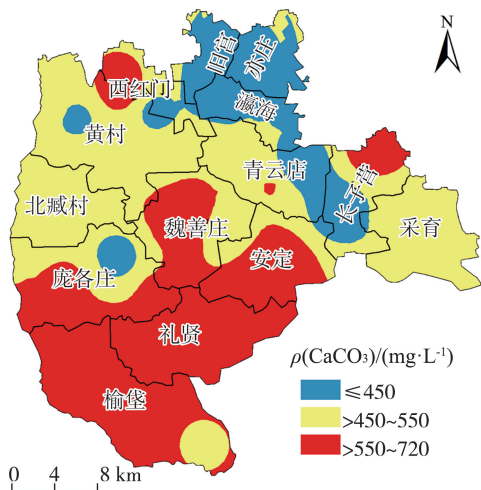
3.4 基于总硬度指标的水质等级动态演化趋势

2006—2016年大兴区地下水基于总硬度指标的水质等级(总硬度水质等级)变化趋势如图7(a)所示,地下水总硬度水质等级总体处于缓慢增长的状态,地下水中 $\rho(\text{CaCO}_3)$ 均值从495.52 mg/L增加至511.70 mg/L;从空间上看,南部水质等级最高,中部次之,北部最低,2006—2016年北部、中部、南部地下水中 $\rho(\text{CaCO}_3)$ 均值分别为455 mg/L、520 mg/L和560 mg/L。总体上研究区地下水的硬度较高,一方面与大兴区地下水化学类型有关,另一方面与垃圾填埋场底部垃圾渗滤液渗入地下水引起污染有关。由2006—2016年大兴区地下水总硬度空间分布(图7(b))可知,南部榆垓、礼贤、安定一带,地下水总硬度最高。

利用式(14)计算得到的总硬度水质等级只能反映总硬度指标的总体水质变化情况,而不能反映



(a) 变化趋势



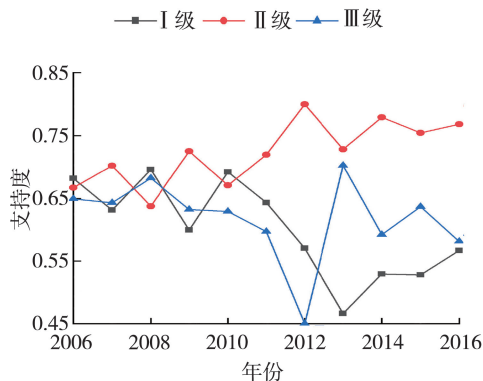
(b) 空间分布

图7 大兴区地下水总硬度水质等级变化趋势及总硬度空间分布

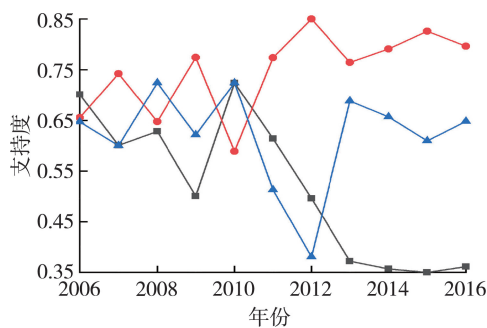
Fig.7 Trends of total hardness index-based groundwater quality grades and spatial distribution of groundwater total hardness in Daxing District

大兴区地下水总硬度指标处于Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级(表1)的水质等级动态演化规律。为此,需进一步分析总硬度指标对各水质等级的支持度。由2006—2016年大兴区地下水总硬度指标对各水质等级支持度演化曲线(图8(a))可知,大兴区水质Ⅱ级支持度最高,水质Ⅲ级支持度次之,水质Ⅰ级支持度最低,说明水质等级主要为Ⅱ级。2006—2010年大兴区水质Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级支持度差别不大,说明此阶段水质等级没有明显的趋势特征,处于均衡状态;2011—2012年水质Ⅰ级支持度高于水质Ⅲ级,说明此阶段水质有好转的趋势;2013—2016年水质Ⅲ级支持度高于水质Ⅰ级,说明此阶段水质有恶化的趋势。

大兴区南部是地下水总硬度最高的区域,由2006—2016年大兴区南部地下水总硬度指标对各水质等级的支持度演化曲线(图8(b))可知,其水质Ⅱ级支持度最高,水质Ⅲ级支持度次之,水质Ⅰ级支持度最低。2006—2010年3个等级支持度相差不大;2011—2016年水质Ⅱ级支持度明显高于Ⅰ级



(a) 大兴区



(b) 南部

图8 大兴区及其南部地下水总硬度指标对各水质等级的支持度演化曲线

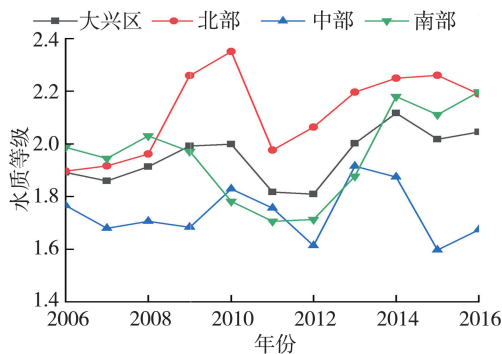
Fig.8 Evolution curves of support degree of total hardness index to each water quality grade in Daxing District and its southern region

和Ⅲ级;2013—2016年水质Ⅲ级支持度持续高于水质Ⅰ级支持度,说明南部水质有恶化的趋势。

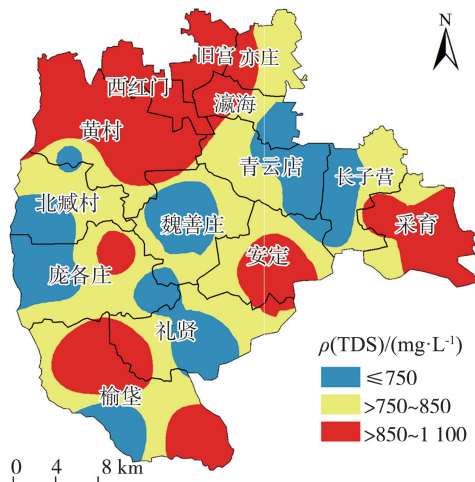
3.5 基于TDS指标的水质等级动态演化趋势

2006—2016年大兴区地下水基于TDS指标的水质等级(TDS水质等级)变化趋势如图9(a)所示,地下水中 ρ (TDS)的空间分布如图9(b)所示。2006—2016年大兴区地下水中 ρ (TDS)均值从761.42 mg/L增长至823.03 mg/L,水质等级处于缓慢增长的状态。2006—2010年地下水中 ρ (TDS)均值从761.42 mg/L增长至812.70 mg/L;2010—2012年地下水中 ρ (TDS)均值从812.7 mg/L降低至742.17 mg/L,水质等级出现降低;2012—2016年地下水中 ρ (TDS)均值从742.17 mg/L增长至823.03 mg/L,水质等级处于持续增长的状态。 ρ (TDS)升高一方面与河道污水和垃圾填埋场渗漏有关,另一方面可能与大兴区长期实施污水灌溉有关。

从空间分布上看,2006—2016年大兴区北部地下水TDS水质等级最高,南部次之,中部最低。北部2006—2010年地下水中 ρ (TDS)均值从793.26 mg/L增长至952.75 mg/L,水质等级处于持续增长的状态;2010—2011年地下水中 ρ (TDS)均值从952.75 mg/L降低至812.19 mg/L,水质等级



(a) 变化趋势



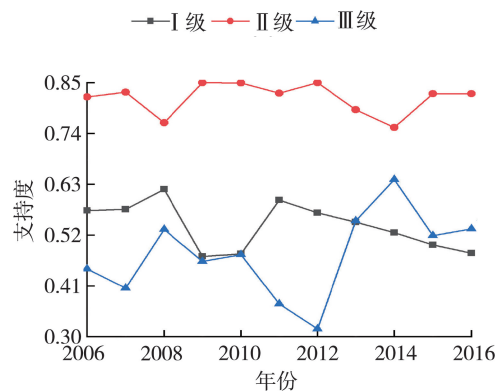
(b) 空间分布

图9 大兴区地下水 TDS 水质等级变化趋势及 $\rho(\text{TDS})$ 空间分布

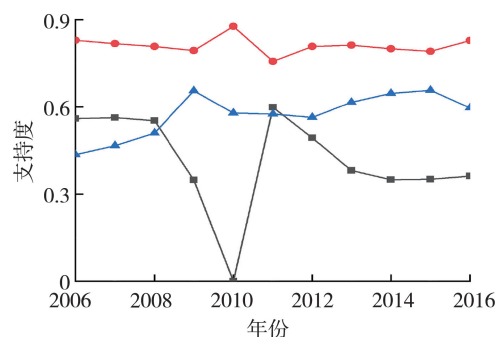
Fig.9 Trends of TDS index-based groundwater quality grade and spatial distribution of $\rho(\text{TDS})$ in groundwater in Daxing District

从 2.35 降低至 1.97; 2011—2016 年地下水中 $\rho(\text{TDS})$ 均值从 812.19 mg/L 增长至 890.52 mg/L, 水质等级又处于增长状态。北部黄村、西红门、旧宫地区地下水中 $\rho(\text{TDS})$ 均值达到了 936.76 mg/L, 水质等级最高。中部地下水中 $\rho(\text{TDS})$ 均值为 720.24 mg/L, 水质等级基本变化不大; 南部水质等级 2012—2016 年处于增长状态。

利用式(14)计算得到的 TDS 水质等级只能反映 TDS 指标的总体水质变化情况, 而不能反映大兴区地下水 TDS 指标处于 I 级、II 级、III 级(表 1)的水质等级动态演化规律, 为此, 需进一步计算 TDS 指标对各水质等级的支持度。由 2006—2016 年大兴区地下水 TDS 指标对各水质等级的支持度演化曲线(图 10(a))可知, 大兴区水质 II 级支持度最高, 支持度基本变化不大, 水质 I 级支持度次之, 水质 III 级支持度最低。2006—2012 年水质 I 级支持度高于水质 III 级, 说明该时段水质有好转的趋势; 2012—2016 年水质 III 级支持度大于 I 级, 说明该时



(a) 大兴区



(b) 北部

图 10 大兴区及其北部地下水 TDS 指标对各水质等级的支持度演化曲线

Fig.10 Evolution curves of support degree of TDS index to each water quality grade in Daxing District and its northern region

段水质有恶化的趋势。

由 2006—2016 年大兴区北部地下水 TDS 指标对各水质等级的支持度演化曲线(图 10(b))可知, 北部水质 II 级支持度大于水质 I 级和 III 级, 说明北部地下水水质持续处于 II 级。2006—2008 年水质 I 级支持度大于水质 III 级, 说明该时段水质有好转的趋势; 2008—2016 年(除 2011 年外)水质 III 级支持度大于水质 I 级, 说明该时段水质有恶化的趋势。

4 结 论

a. 硝酸盐指标主要涉及 I ~ IV 类水, 在 I、II、III、IV 类水中样本数占比分别为 35.06%、27.27%、32.47%、5.19%; 总硬度指标主要涉及 III ~ V 类水, 在 III、IV、V 类水中样本数占比分别为 19.48%、79.87%、0.65%; TDS 指标主要涉及 III、IV 类水, 在 III、IV 类水中样本数占比分别为 99.35%、0.65%。

b. 大兴区地下水水质总体呈恶化的趋势, 地下水综合水质等级有增长的趋势; 地下水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均值从 2006 年的 5.64 mg/L 增加至 2016 年的 6.87 mg/L, 地下水硝酸盐水质等级呈缓慢上升的

趋势;地下水中总硬度(以 $\rho(\text{CaCO}_3)$ 计)均值从2006年的495.52 mg/L增加至2016年的511.70 mg/L,地下水总硬度水质等级处于缓慢增长的状态;地下水中 $\rho(\text{TDS})$ 均值从2006年的761.42 mg/L增加至2016年的823.03 mg/L,地下水TDS水质等级从1.89增长至2.04。

c. 从空间分布上看,大兴区北部地下水综合水质等级明显高于中部和南部,这与大兴区的人口和产业大量分布于北部有关。大兴区北部地下水硝酸盐水质等级最高,中部次之,南部最低;大兴区南部地下水总硬度水质等级最高,中部次之,北部最低;大兴区北部地下水TDS水质等级最高,南部次之,中部最低。

d. 基于偏系数分析地下水各指标水质等级支持度得出,2006—2016年地下水各指标水质Ⅱ级支持度均为最高;2013—2016年地下水综合水质、总硬度水质、TDS水质Ⅲ级支持度高于Ⅰ级支持度,水质有恶化的趋势;地下水硝酸盐水质Ⅰ级支持度高于Ⅲ级支持度,说明大兴区硝酸盐水质有好转的趋势,但北部硝酸盐水质Ⅲ级支持度高于Ⅰ级支持度,北部硝酸盐水质有恶化的趋势。

参考文献:

- [1] 苗得雨,衣鹏. 2013—2018年我国地表水水质变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 62-64. (MIAO Deyu, YI Peng. Trends of surface water quality in China from 2013 to 2018 [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12): 62-64. (in Chinese))
- [2] 裘月,张志强,周洁,等. 城市化进程下地表温度时空变化及其与植被覆盖度的相关性:以北京五环区域为例[J]. 林业科学, 2021, 57(6): 1-13. (XI Yue, ZHANG Zhiqiang, ZHOU Jie, et al. Spatial and temporal variation of ground surface temperature under urbanization and Its correlation with vegetation coverage: a case study of the 5th ring road of Beijing [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(6): 1-13. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 薛联青,廖淑敏,刘远洪,等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 322-328. (XUE Lianqing, LIAO Shumin, LIU Yuanhong, et al. Cumulative effects of ecological water

- conveyance based on groundwater dynamic simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 322-328. (in Chinese))
- [5] 杨荣金,王逸卓,李秀红,等. 官厅水库水质评价及时空变化特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 135-141. (YANG Rongjin, WANG Yizhuo, LI Xiuhong, et al. Water quality evaluation and spatiotemporal variation characteristics of Guanting Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 135-141. (in Chinese))
 - [6] 刘修英,黄功学,郑志宏,等. 贾鲁河郑州段水质评价和污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 40-46. (LIU Xiuying, HUANG Gongxue, ZHENG Zhihong, et al. Water quality evaluation and pollution source apportionment to Zhengzhou section of Jialu River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 40-46. (in Chinese))
 - [7] 徐健,吴玮,黄天寅,等. 改进的模糊综合评价法在同里古镇水质评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 143-149. (XU Jian, WU Wei, HUANG Tianyin, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation to water quality evaluation in Tongli Town [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(2): 143-149. (in Chinese))
 - [8] 宁阳明,尹发能. 基于改进内梅罗污染指数法和灰色聚类法的水质评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(1): 149-155. (NING Yangming YIN Faneng. Water quality evaluation based on improved Nemerow pollution index method and grey clustering method [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2020, 54(1): 149-155. (in Chinese))
 - [9] 陈鹏飞,王丽学,李爱迪,等. 基于灰色关联度与BP神经网络的清河水库总氮浓度预测模型[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 40-43. (CHEN Pengfei, WANG Lixue, LI Aidi, et al. Prediction model of total nitrogen concentration in Qinghe Reservoir based on grey relational grade and BP neural network [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 40-43. (in Chinese))
 - [10] 刘东,李帅,付强,等. 基于KHA优化BP神经网络的地下水水质综合评价方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 275-284. (LIU Dong, LI Shuai, FU Qiang, et al. Comprehensive evaluation method of groundwater quality based on BP network optimized by Krill Herd algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 275-284. (in Chinese))
 - [11] 李海云,梁籍,郭道宇. 再生水补给河道入渗区地下水水质时空变异分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6309-6320. (LI Haiyun, LIANG Ji, GUO Xiaoyu. Multivariate statistical analysis of temporal-spatial variations in ground water quality of urban riverways [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(12): 6309-6320. (in Chinese))

- [12] 徐发凯,何丽,王一帆,等. 2010—2019 年黄河干流兰州和白银段水质时空变化特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 44-50. (XU Fakai, HE Li, WANG Yifan, et al. Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Lanzhou and Baiyin section of the Yellow River mainstream from 2010 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 44-50. (in Chinese))
- [13] LYU Sidan, CHEN Weiping, WEN Xuefa, et al. Integration of HYDRUS-1D and MODFLOW for evaluating the dynamics of salts and nitrogen in groundwater under long-term reclaimed water irrigation [J]. Irrigation Science, 2019, 37(1): 35-47.
- [14] 金菊良,李蔓,周戎星,等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 198-204. (JIN Juliang, LI Man, ZHOU Rongxing, et al. Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagnosis[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 198-204. (in Chinese))
- [15] KADAM A K, WAGH V M, MULEY A A, et al. Prediction of water quality index using artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Shivganga River Basin, India [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2019, 5(3): 951-962.
- [16] ALADEJANA J A, KALIN R M, SENTENAC P, et al. Assessing the impact of climate change on groundwater quality of the shallow coastal aquifer of eastern Dahomey Basin, Southwestern Nigeria [J]. Water, 2020, 12(1): 224.
- [17] 杨亚锋,王红瑞,赵伟静,等. 水资源承载力的集对势-偏联系数评价模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 99-105. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on set pair potential and partial connection number[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 99-105. (in Chinese))
- [18] 杨红梅,赵克勤. 偏联系数的计算与应用研究[J]. 智能系统学报, 2019, 14(5): 865-876. (YANG Hongmei, ZHAO Keqin. The calculation and application of partial connection numbers[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(5): 865-876. (in Chinese))
- [19] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 33-44. (YANG Yafeng, GONG Shuxin, WANG Hongrui, et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 33-44. (in Chinese))
- [20] 金菊良,沈时兴,郇建强,等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))
- [21] 门宝辉,李晨,尹世洋. 基于减法集对势的大兴区地下水开采强度评价与诊断[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 17-25. (MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang. Evaluation and diagnosis of groundwater exploitation intensity in Daxing District based on subtraction set pair potential[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 17-25. (in Chinese))
- [22] 金菊良,刘鑫,周戎星,等. 联系熵方法在水资源承载力评价中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 447-455. (JIN Juliang, LIU Xin, ZHOU Rongxing, et al. The application of link entropy method in water resources carrying capacity evaluation[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 447-455. (in Chinese))
- [23] 金菊良,何飘,张浩宇,等. 减法全邻联系数及其在区域水资源承载力趋势分析中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 438-446. (JIN Juliang, HE Piao, ZHANG Haoyu, et al. Subtractive full neighbor connection number and its application in trend analysis of regional water resources carrying capacity[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 438-446. (in Chinese))
- [24] 马贵仁,屈忠义,王丽萍,等. 基于 ArcGIS 空间插值的河套灌区土壤水盐运移规律与地下水动态研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 208-216. (MA Guiren, QU Zhongyi, WANG Liping, et al. Research on soil water and salt movement and groundwater dynamics in Hetao irrigation district based on ArcGIS spatial interpolation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 208-216. (in Chinese))
- [25] 张晓琳,蒙格平,孙美,等. 北京市大兴区浅层地下水水质时空变化分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(12): 22-25. (ZHANG Xiaolin, MENG Geping, SUN Mei, et al. Water quality spatial and temporal variation of shallow groundwater in Daxing District of Beijing [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(12): 22-25. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-02-14 编辑: 施业)

