

北京市岩溶地下水质量评价及其生态环境效应

郭高轩^{1,2}, 代垠东^{1,2}, 许亮^{1,2}, 朱琳^{2,3}, 戚琦^{1,2}, 欧志亮^{1,2}, 沈媛媛^{1,2}

(1.北京市地质环境监测所, 北京 100195; 2. 城市地下水安全防控技术创新基地, 北京 100195; 3. 首都师范大学, 水资源安全北京实验室, 北京 10048)

提要:【研究目的】岩溶地下水是北京市重要的供水水源, 在城市供水安全保障中发挥着难以替代的作用, 同时又具有重要的生态功能。【研究方法】本文通过对 2021 年 6 月在北京市内系统采集的 278 件岩溶地下水样化验数据为基础, 以岩溶水系统为单元, 开展了岩溶水单因子质量评价和多因子综合评价, 并首次对有机指标进行了统计和分析。【研究结果】(1) 北京市岩溶水的 pH、TDS 和 TH 分别为 7.69、334.77mg L⁻¹ 和 262.01mg L⁻¹, 具有弱碱性、低盐度和低硬度的特点, 地下水质量总体良好。(2) 非常规指标的检出率从大到小为: 苯并[a]芘 (4.32%)、三溴甲烷 (3.60%) 和二甲苯 (总量) (2.52%), 分布较分散, 应当引起足够重视。(3) 北京市岩溶水水质 I-III 类总占比为 82.01%, IV 和 V 类总占比为 17.99%, 超标点主要集中在山区与平原分界线处。各系统超标率大小为大兴-通州 (75.00%) > 北务 (60.00%) > 昌平 (18.18%) > 西山 (16.94%) > 顺平 (16.00%) > 千家店-九渡河 (15.56%) > 延庆 (11.76%), 其中影响北京市地下水质量的指标主要有 Fe、TH、NH₃-N、Mn、SO₄²⁻、F、NO₃-N 等。(4) 应通过提高植被覆盖率加强水源涵养以增加补给量, 应严格控制点源和面源污染减少污染物输入, 持续优化监测网络进行预警, 广泛宣传增强公众生态环保意识, 共同保护岩溶水的生态环境。

关键词: 岩溶水系统; 单因子质量评价; 多因子质量评价; 水化学特征; 生态环境; 水文地质调查工程; 北京市

创新点: 首次在全市域范围内按照系统理论对岩溶水进行了单因子和多因子质量评价, 分系统对比了水化学类型; 识别了北京岩溶水主要环境问题及其特征指标; 首次分析了岩溶水中有机指标的检出和超标情况; 提出了岩溶水环境保护的对策与建议。

Evaluation of karst groundwater quality in Beijing and its eco-environmental effects

GUO Gaoxuan^{1,2}, DAI Yindong^{1,2}, XU Liang^{1,2}, ZHU Lin^{2,3}, QI Qi^{1,2}, OUYIZHILIANG^{1,2}, SHEN Yuanyuan^{1,2},

(1. Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100195, China; 2. Urban Groundwater Safety Prevention and Control Technology Innovation Base, Beijing 100195, China; 3. Capital Normal University Beijing Laboratory of Water Resources Security, Beijing 10048)

Abstract:【Objective】As an important water supply source in Beijing, Karst groundwater played an irreplaceable role in the security of urban water supply and ecological environment improvement in Beijing city. 【Methods】Based on the laboratory data of 278 karst groundwater

基金项目: 北京市百千万人才工程资助项目 (2020A55); 北京市科委: 首都西部地区地下水恢复关键技术研究示范 (Z221100005222014); 北京市科学技术协会学术示范项目—北京西山岩溶裂隙水环境演变及其生态效应。

作者简介: 郭高轩, 男, 1979 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文、环境地质及生态地质方面的调查和研究工作。E-mail: ggx2008@qq.com

samples collected systematically in Beijing karst water system in June 2021, the single factor quality evaluation and multi-factor comprehensive evaluation of karst water were carried out with karst water system as the unit, and the organic indexes were counted and analyzed for the first time. **[Results]** (1) The medians of pH, TDS and TH concentration of karst water in Beijing are 7.69, 334.77 mg L⁻¹ and 262.01 mg L⁻¹ respectively, which are characterized by weak alkalinity, low salinity and low hardness. The concentration of TH, TDS, SO₄²⁻ and Cl⁻ in Daxing-Tongzhou karst water system and Xishan karst water system are significantly higher than those in other karst water systems. (2) From large to small, the detection rate of unconventional indicators is: benzopyrene (4.32%) > tribromomethane (3.60%) > xylene (total amount) (2.52%). The distribution of organic matter detection is relatively scattered and should be given sufficient attention. (3) The results of groundwater quality evaluation show that the total proportion of class I-III karst water quality in Beijing is 82.01%, with an exceeding rate of 17.99%. The exceeding points are mainly concentrated at the boundary between mountainous areas and plain area. The overstandard rate of each system was Daxing-Tongzhou (75.00%) > Beiwu (60.00%) > Changping (18.18%) > Xishan (16.94%) > Shunping (16.00%) > Qianjiadian-Jiuduhe (15.56%) > Yanqing (11.76%). Among them, Fe, TH, NH₃-N, Mn, SO₄²⁻, F⁻ and NO₃-N are the main indexes affecting groundwater quality in Beijing. (4) In order to protect and improve the karst water ecological environment practically, methods such as strengthening water conservation to increase recharge, control point source and non-point source pollution to reduce pollutant input, continue monitoring and give play to early warning, and widely publicize and enhance public awareness should be applied systematically in the future.

Keywords: karst water system; single factor quality evaluation; multi-factor quality evaluation; hydrochemical characteristics; eco-environment, hydrogeological survey engineering; Beijing

Highlights: For the first time, single factor and multi factors quality evaluations of karst water were conducted based on system theory in Beijing, and hydrochemical types were systematically compared; The main environmental issues and characteristic indicators of karst water were identified; The detection and exceeding of organic indicators were analyzed for the first time in the study area; The countermeasures and suggestions for the protection of karst water environment were proposed according to the findings in this study

About the first author: GUO Gaoxuan, male, born in 1979, Ph.D, senior engineer, mainly engaged in investigations and research in hydrology, environmental geology, and ecological geology.

Fund support: Supported by Beijing Ten Million Talents Project (No. 2020A55); Project of Beijing Municipal Commission of Science and Technology: Research and Demonstration on Key Technologies of Groundwater Restoration in the West of Beijing (No.Z221100005222014); Project of Beijing Association for Science and Technology Academic Demonstration: Evolution of karst fissure water environment and its ecological effect in the Western Mountains of Beijing.

1 引言

自 2007 年党的“十七大”提出生态文明思想以来,我国生态文明建设逐渐由理论探索走向实践并不断推进。生态系统的调查评估、保护建设和修复治理是一项极其复杂庞大的系统工程(韩再生, 2003; 聂洪峰等, 2021),在“山水林田湖草沙”系统治理工程中,生态地质起着基础性、先行性的作用。作为生态系统中最为敏感、最为活跃的要素——地下水是诸多生态系统中极为重要的生态因子,其时空变化与诸多生态因子相互作用并始终处在持续演化之中,特别是位于城市上游和周边地区生态涵养区内的地下水更是扮演着资源供给和生态维持的双重角色(王京彬等, 2020; 马震等, 2021)。北京是我国的首都,北京于 2017 年发布的《北京城市总体规划(2016 年-2035 年)》划定了 11100km² 的生态涵养区,涵养区位于北京西部和北部山区,构成北京重要的生态屏障,是重要的水源涵养区。生态涵养区

内地下水以岩溶地下水为主,分布广泛、储量大、水质优良。全市岩溶地下水年开采量达3.5亿 m^3 ,在保障居民生活用水和生态用水方面发挥着重要作用(郭高轩等,2011;郭高轩,2012)。2021年,北京市人民政府发布《北京市生态涵养区生态保护和绿色发展条例》,2022年发布《北京市生态安全格局专项规划(2021年—2035年)》和《北京市国土空间生态修复规划(2021年—2035年)》,这些规划和条例的发布,无论是从资源属性,还是生态保护与修复的角度,都迫切需要对北京岩溶地下水(特别是生态涵养区)进行深入的研究。

北京的岩溶地下水研究历史较长,许多学者先后开展了岩溶泉域划定(赵春红等,2014;2017)、岩溶水系统划分(王晓红等,2016)、补给入渗条件(纪轶群等,2020)、含水层富水性确定(刘士成,2017;刘崇军等,2017)、循环演化规律(李露,2019;李小盼,2017)、径流路径(杨平等,1984;李灵巧等,2019)、应急开采(郭小萌,2014;沈媛媛等,2011;王晓红等,2011)和调蓄能力(秦大军等,2019;沈媛媛等,2021;吴乐等2016;李世君等,2012)等方面的研究,取得了较多的成果。以往这些研究都较零散,但从整体上研究整个北京地区岩溶水环境质量并探讨其生态环境效应,目前还未见报道。北京岩溶水具有北方岩溶水的典型特征,岩溶水系统控制着岩溶地下水的循环、分布埋藏与富集规律,控制着水化学分布特征(史箫笛等,2019;高帅等,2019),控制着岩溶含水层脆弱性程度,从而深刻影响岩溶水的水质及其发展演化趋势(梁永平等,2010)。地下水水化学研究是进行地下水质量评价、污染风险评估和环境管理的重要基础,有助于揭示地下水环境演化过程和变化规律,预测其变化趋势(Usunoff et al.1989;沈照理等,1993)。

本研究依托北京市地下水监测网络,通过全域范围内系统采样,分析了全市不同系统和含水层的水化学特征、评价了地下水质量,以期科学保护和合理开发优质的岩溶水,同时为生态环境保护、管理和治理等提供科学支撑。

2 研究区概况

按照系统理论,北京的岩溶水可划分为7个一级系统和16个三级系统(王晓红等,2016)。按照埋藏条件分为裸露型、埋藏型和覆盖型岩溶水,总面积约6600 km^2 。裸露型2866 km^2 ,主要分布于北京西山地区。埋藏型1107 km^2 ,主要分布于顺义-平谷一带。覆盖型3167 km^2 ,主要分布西郊和大兴一带。岩溶含水岩组主要有5类:长城系岩溶含水岩组、蓟县系岩溶含水岩组、寒武系(含青白口系景儿峪组)岩溶含水岩组、奥陶系岩溶含水岩组和洼里砾岩岩溶含水岩组,岩性以灰岩和白云岩为主。在岩溶含水岩组的周边,与其共存的裂隙水赋存于沉积岩(主要是石英砂岩、砾岩)、岩浆岩(主要为玄武岩、安山岩、凝灰岩)和变质岩(片麻岩等)之中(图1)。山区裸露型的岩溶水直接接受大气降水入渗补给,各岩层因其岩溶-裂隙发育特征、节理裂隙发育程度不同呈现较大差异。覆盖型的岩溶水主要接受上覆第四系的越流补给,埋藏型的岩溶水主要靠侧向径流和相邻含水层的越流获得补给。排泄在山区主要以泉水及零星开采为主,平原区则主要以集中水源地开采为主。

3 数据与方法

2021年5—6月,在北京市全域共采集岩溶裂隙地下水样278件,其中井水样品268件,井深60~1900m,泉水样品10件(图1、表1),分析化验指标59项(表2)。10处泉水分别为西山岩溶水系统的黑龙关凉水泉、马刨泉、高庄下营泉群、莲花村泉、东胡林泉、两叉口村泉;平谷岩溶水系统的东牛角峪泉和黄草洼泉;千家店-九渡河系统的旺泉峪泉和延庆岩溶水系统的佛峪口村泉。

取样前,一般先用泵抽取3倍井管体积的水量,之后现场采用便携式多参数水质测定仪测定pH、水温(T)、电导率(EC)等参数。取样时,采用2个一次性塑料瓶,用原水润洗取样瓶3次,样品尽量装满采样瓶,以测试阴离子表面活性剂、耗氧量、铬(六价)、总 α 放射性、总 β 放射性等指标;采用2个棕色玻璃瓶,取样后分别加入氢氧化钠、乙酸锌和氢氧化钠,以测试挥发酚、氰化物和硫化物;采用3个100ml一次性塑料瓶,取样后分别加入盐酸、盐酸和硝酸,以测试汞、砷、硒、二价铁、铁、锰、铜、锌、铝、镉、铅,以上样品北京市中科英曼环境监测有限公司进行及时测试。采用聚乙烯塑料瓶、吹扫捕集样品瓶、棕色玻璃瓶、灭菌袋、白色塑料瓶等不同规格的采样瓶,用水样润洗3次后装满采样瓶,密封并避光低温保存,送往北京市地质环境监测所测试。

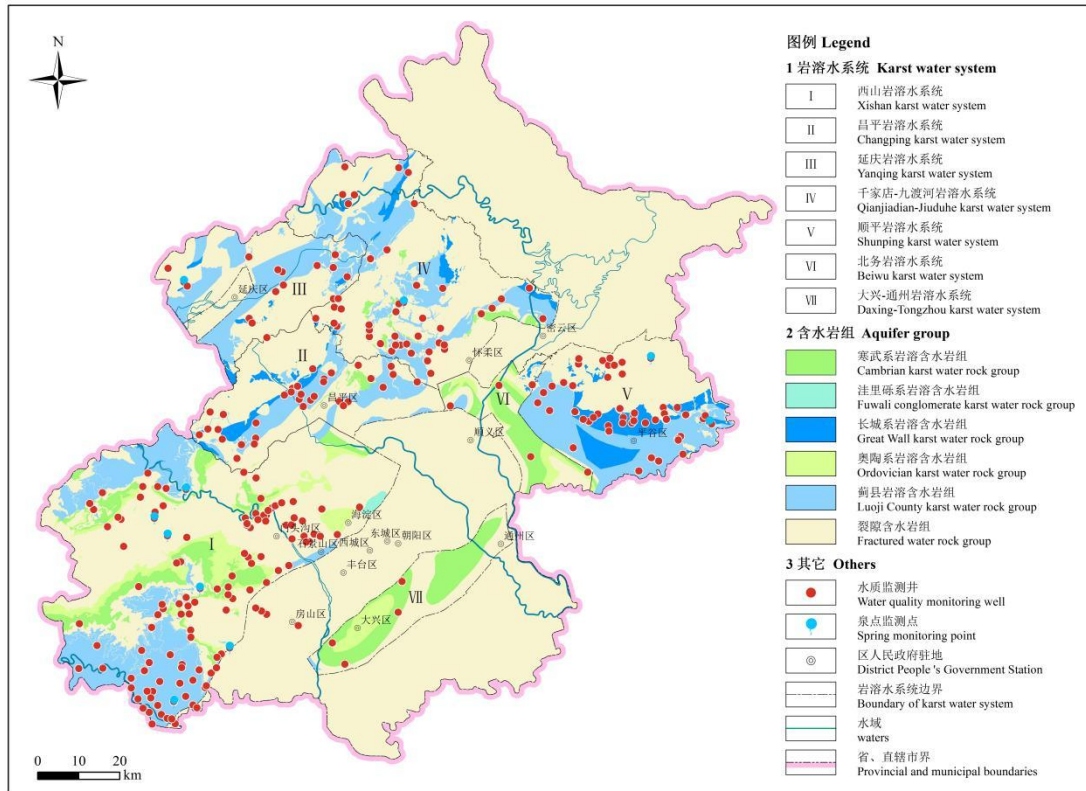


图1 北京岩溶水系统划分及采样点分布图

Fig. 1 Map of karst water system division and sampling point distribution in Beijing

表1 各岩溶水系统采样点数量分布

Table 1 Quantity distribution of sampling points of each karst water system

| 岩溶水系统 | 西山 | 昌平 | 延庆 | 千家店-九渡河 | 顺平 | 北务 | 大兴-通州 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 面积/km ² | 3591.89 | 1276.91 | 1093.32 | 1924.46 | 1253.4 | 433.46 | 595.76 |
| 样品数量/N | 124 | 33 | 17 | 45 | 50 | 5 | 4 |

表2 岩溶水样测试指标一览

Table 2 List of karst water sample Test indexes

| 分类 | 指标 | 数量 | |
|----------------|-------------|--|----|
| 常规指标 (44项) | 感官性状和一般化学指标 | 色、嗅和味、浑浊度、肉眼可见物、pH、总硬度(以 CaCO ₃ 计)、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、铁、锰、铜、锌、铝、挥发性酚类(以苯酚计)、阴离子表面活性剂、耗氧量、氨氮(以 N 计)、硫化物、钠、钾离子、钙离子、镁离子、重碳酸根、碳酸根 | 25 |
| | 微生物指标 | 总大肠菌群、菌落总数 | 2 |
| | 毒理学指标 | 亚硝酸盐(以 N 计)、硝酸盐(以 N 计)、氧化物、氟化物、碘化物、汞、砷、硒、镉、铬(六价)、铅、三氯甲烷、四氯化碳、苯、甲苯 | 15 |
| | 放射性指标 | 总 α 放射性、总 β 放射性 | 2 |
| 非常规指标 (15项) | 毒理学指标 | 二氯甲烷、1,2-二氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、1,2-二氯丙烷、三溴甲烷、氯乙烯、1,1-二氯乙烯、1,2-二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、乙苯、二甲苯、苯乙烯、苯并(a) 芘 | 15 |

4 水化学特征

4.1 岩溶水总体概况

本次所采集的 278 件岩溶水样全部无嗅无味，无肉眼可见物，色度均小于 5、浑浊度均低于 3。统计结果表明（表 3）：北京市岩溶水的 pH 平均值为 7.69，范围在 6.09~9.40 之间，以弱碱性为主。TDS（溶解性总固体）和 TH（总硬度）质量浓度平均值分别为 $289.50\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $254.00\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，全市岩溶水具有低盐度和低硬度的特点。阳离子质量浓度大小为 Ca^{2+} ($63.97\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) $>$ Mg^{2+} ($24.84\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) $>$ Na^+ ($20.57\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) $>$ K^+ ($2.03\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，阴离子含量大小为 HCO_3^- ($246.88\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) $>$ SO_4^{2-} ($51.78\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) $>$ Cl^- ($25.16\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。菌落总数、总大肠菌群总 α 放射性和总 β 放射性均满足《地下水质量标准》(GB/T14848-2017) III 类标准。汞、砷、硒、镉和铬(六价)、铅等毒理学指标均未超过 III 类标准。

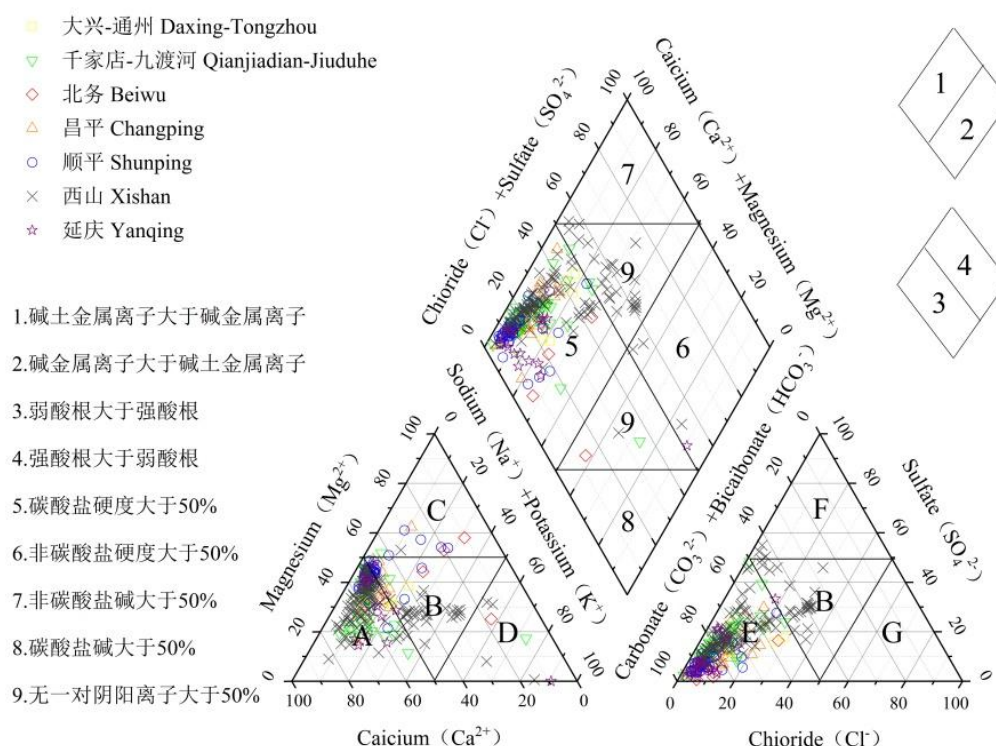


图2 研究区水样水化学Piper图

Fig.2 Piper diagram of hydrochemical parameters

按照系统分类，研究区内岩溶地下水化学类型 Piper 图如 2 所示，岩溶地下水化学类型共计 39 种，总体上地下水 $\text{HCO}_3\text{-Ca Mg}$ 型为主，278 件水样中，有 163 件水样为 $\text{HCO}_3\text{-Ca Mg}$ 型（占比 58.63%）， $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型 27 件（占比 9.71%）、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 型 7 件（占比 2.52%）、 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型 7 件（占比 2.52%）和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型 6 件（占比 2.51%），其余水化学类型均小于 5 件。需要指出的是 SO_4^{2-} 参与命名的水样，多分布在西山岩溶水系统之内。在从水样分区来看，97.5% 的水样落在 1 和 3 区水体碱土金属 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 毫克当量百分比超过碱金属离子 (Na^+ 、 K^+)，弱酸根 (HCO_3^-) 毫克当量百分比超过强酸根离子 (Cl^- 、 SO_4^{2-})，地下水离子含量主要受溶滤作用影响，水化学形成受岩石风化和大气降水作用共同控制。

从各系统水样分布来看，除了西山岩溶水系统以外，其他 6 个系统均集中在 5 区，该区域水样碳酸盐硬度大于 50%，顺平岩溶水类型分布最为集中，其次是延庆和昌平岩溶水系统。西山系统的水样最为分散，分析原因一方面由于其面积最大 (3591.89km^2)，样品数量最多 (124 件)，另一方面可能与历史上采煤活动对含水层的扰动有关（张长敏，2009）。

4.2 各岩溶水系统水质特征

对比不同岩溶水系统的浓度分布发现：①TH、TDS 和 EC 三者呈正相关，与 pH 呈负相关。TH、TDS 和 EC 是水体中溶解离子含量的反映，在一定程度上反映了水流在区域水循环过程中径流途径和滞留时间。根据不同水体中电导率的空间分布特征，可以大致推断水的运移路径。在 7 个系统中，TH、TDS 和 EC 在大兴-通州岩溶水系统的质量浓度最高，分别为 405.50、543.25、934.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，反映了该区域径流路径较长，水岩相互作用充分的特点。而在延庆岩溶水系统和北务岩溶水系统含量最低，TH 质量浓度分别为 173.53 和 151.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，TDS 质量浓度分别为 209.71 和 219.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，EC 质量浓度分别为 371.12 和 390.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，体现出岩溶含水层节理裂隙接受大气降水入渗补给和山前侧向补给径流路径短，并与地表局部水系联系较为密切的特点。pH 值的分布与二者正好相反，北务岩溶水系统 8.21，值最高，大兴-通州岩溶水系统 7.40，值最低。② $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 二者具有明显负相关性，总体表现为北务岩溶水系统中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的含量高于其他岩溶水系统，而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量却低于其他岩溶水系统。

4.3 非常规有机指标的分布特征

对非常规有机指标的检出及超Ⅲ类状况进行统计，结果表明：除氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷未检出，其他指标均有检出，检出率在 0.36%~4.32%之间，检出最多的 3 项指标依次为：苯并[a]芘（4.32%）、三溴甲烷（3.60%）和二甲苯（总量）（2.52%）。

根据非常规有机物检出空间分布图（图 3）所示，检出位点主要集中在山区与平原分界线及其周边地区，此外还有部分位于千家店-九渡河岩溶水系统中的千家店镇附近。各系统检出率大小为大兴-通州岩溶水系统（50.00%）>千家店-九渡河岩溶水系统（24.44%）>延庆岩溶水系统（23.53%）>西山岩溶水系统（12.10%）>顺平岩溶水系统（10.00%）>昌平岩溶水系统（9.09%）>北务岩溶水系统（0.00%）。

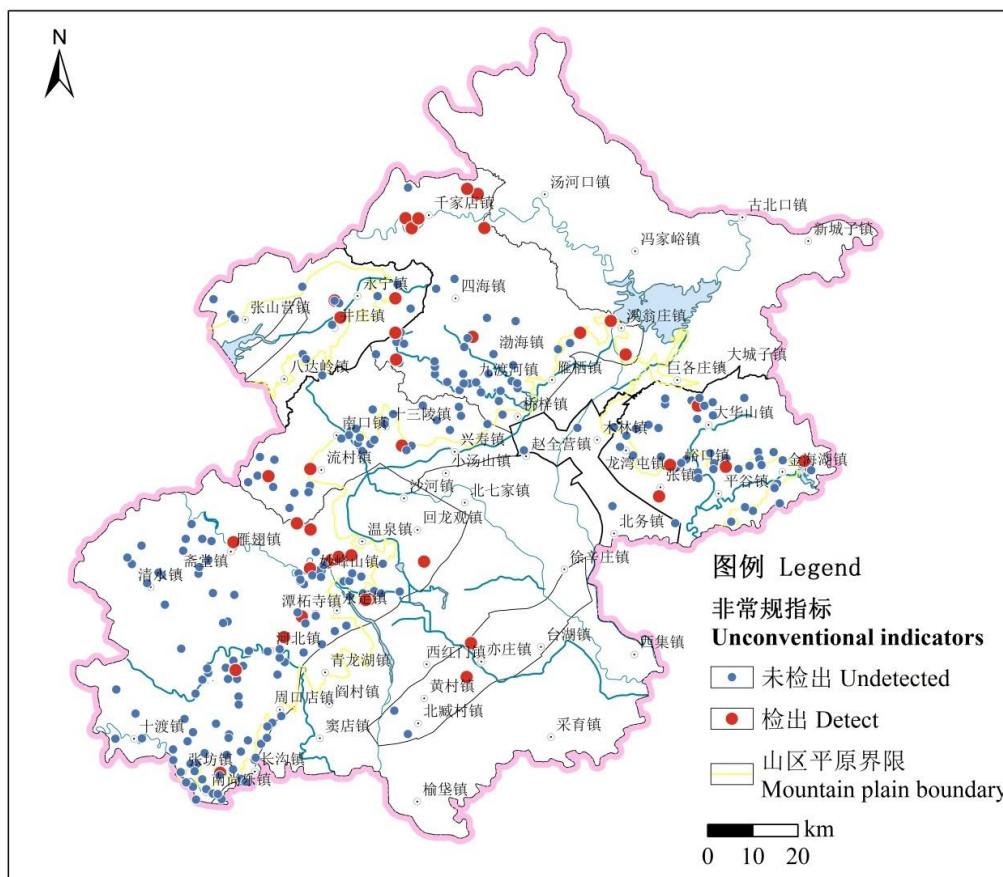


图 3 北京市岩溶水非常规有机物检出空间分布图

Fig.3 Distribution of unconventional organic indexes of detection in karst water in Beijing

表3 研究区地下水主要化学成分统计
Table 3 Statistics of main chemical constituents of groundwater in the study area

| 系统 | | pH | TDS | TH | EC | DO | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ | NH ₃ -N | NO ₃ -N |
|-----------------------|------|------|--------|--------|---------|------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 北务 (N=5) | 平均值 | 8.21 | 219.60 | 151.00 | 390.60 | 0.38 | 22.94 | 5.03 | 25.41 | 21.28 | 18.69 | 14.03 | 187.14 | 9.12 | 0.68 | 2.04 |
| | 标准偏差 | 0.72 | 49.57 | 68.06 | 83.95 | 0.37 | 10.18 | 4.35 | 21.96 | 6.40 | 9.60 | 13.89 | 85.41 | 17.24 | 1.08 | 4.15 |
| | 最小值 | 7.49 | 182.00 | 71.00 | 320.00 | 0.16 | 9.70 | 0.95 | 6.86 | 10.20 | 8.97 | 1.30 | 42.70 | 0.00 | 0.02 | 0.10 |
| | 最大值 | 9.40 | 288.00 | 245.00 | 506.00 | 1.04 | 37.60 | 11.90 | 60.90 | 26.60 | 34.60 | 29.60 | 251.00 | 39.60 | 2.52 | 9.47 |
| 昌平 (N=33) | 平均值 | 7.61 | 315.21 | 268.30 | 546.67 | 0.36 | 11.34 | 2.01 | 62.86 | 27.02 | 19.61 | 32.14 | 257.58 | 0.00 | 0.07 | 7.13 |
| | 标准偏差 | 0.13 | 84.28 | 61.46 | 127.34 | 0.42 | 5.85 | 1.25 | 16.50 | 7.58 | 13.58 | 24.60 | 36.40 | 0.00 | 0.13 | 5.23 |
| | 最小值 | 7.31 | 215.00 | 174.00 | 402.00 | 0.07 | 3.43 | 0.69 | 22.70 | 7.84 | 3.16 | 2.97 | 143.00 | 0.00 | 0.01 | 0.41 |
| | 最大值 | 7.85 | 542.00 | 426.00 | 840.00 | 1.68 | 26.50 | 6.63 | 98.90 | 45.90 | 52.90 | 114.00 | 359.00 | 0.00 | 0.71 | 21.80 |
| 大兴-通州 (N=4) | 平均值 | 7.40 | 543.25 | 405.50 | 934.00 | 0.29 | 42.95 | 2.13 | 96.62 | 39.95 | 71.90 | 68.72 | 369.25 | 0.00 | 0.02 | 8.33 |
| | 标准偏差 | 0.17 | 209.85 | 147.30 | 326.39 | 0.19 | 12.03 | 0.51 | 40.10 | 11.87 | 51.74 | 32.83 | 57.03 | 0.00 | 0.01 | 9.38 |
| | 最小值 | 7.28 | 323.00 | 253.00 | 577.00 | 0.14 | 31.30 | 1.44 | 51.70 | 30.00 | 27.30 | 35.60 | 286.00 | 0.00 | 0.01 | 0.47 |
| | 最大值 | 7.65 | 791.00 | 585.00 | 1300.00 | 0.56 | 54.40 | 2.60 | 143.00 | 55.60 | 131.00 | 108.00 | 414.00 | 0.00 | 0.03 | 20.30 |
| 千家店-九 渡河 (N=45) | 平均值 | 7.78 | 285.98 | 235.76 | 494.89 | 0.48 | 12.37 | 2.23 | 59.58 | 21.12 | 14.61 | 37.08 | 231.51 | 2.72 | 0.03 | 4.75 |
| | 标准偏差 | 0.38 | 77.36 | 75.42 | 131.43 | 0.67 | 11.89 | 2.07 | 19.40 | 9.73 | 11.78 | 17.76 | 71.91 | 8.54 | 0.03 | 3.88 |
| | 最小值 | 6.86 | 66.00 | 38.00 | 116.00 | 0.09 | 2.84 | 0.37 | 9.61 | 1.62 | 1.69 | 5.67 | 63.50 | 0.00 | 0.01 | 0.26 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|--------|--------|---------|------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| | 最大值 | 9.15 | 526.00 | 455.00 | 892.00 | 3.73 | 79.50 | 13.10 | 112.00 | 48.20 | 49.10 | 77.70 | 380.00 | 55.20 | 0.16 | 20.10 |
| | 平均值 | 7.71 | 256.74 | 227.00 | 455.54 | 0.42 | 7.47 | 1.63 | 48.93 | 25.46 | 10.76 | 18.10 | 239.54 | 1.73 | 0.14 | 5.25 |
| 顺平 (N=50件) | 标准偏差 | 0.31 | 58.38 | 56.93 | 96.20 | 0.60 | 4.95 | 1.10 | 15.50 | 5.70 | 6.32 | 10.01 | 63.82 | 5.97 | 0.42 | 3.61 |
| | 最小值 | 7.29 | 128.00 | 93.00 | 235.00 | 0.06 | 2.82 | 0.70 | 10.30 | 9.15 | 3.82 | 3.06 | 89.10 | 0.00 | 0.01 | 0.12 |
| | 最大值 | 8.82 | 420.00 | 377.00 | 719.00 | 3.95 | 25.80 | 8.11 | 91.10 | 36.20 | 34.80 | 54.80 | 391.00 | 28.80 | 2.81 | 17.70 |
| | 平均值 | 7.63 | 404.20 | 295.96 | 676.40 | 0.45 | 31.25 | 2.12 | 75.24 | 26.25 | 37.23 | 81.83 | 256.83 | 1.20 | 0.07 | 4.80 |
| 西山 (N=124) | 标准偏差 | 0.36 | 190.58 | 103.70 | 297.94 | 0.49 | 37.01 | 1.65 | 30.25 | 10.25 | 44.14 | 69.52 | 76.15 | 6.89 | 0.21 | 3.99 |
| | 最小值 | 6.09 | 7.00 | 0.50 | 18.60 | 0.05 | 2.07 | 0.04 | 0.39 | 0.01 | 1.09 | 1.05 | 3.66 | 0.00 | 0.01 | 0.10 |
| | 最大值 | 9.12 | 934.00 | 551.00 | 1490.00 | 3.19 | 142.00 | 11.50 | 163.00 | 47.80 | 168.00 | 270.00 | 412.00 | 51.60 | 1.83 | 20.70 |
| | 平均值 | 7.85 | 209.71 | 173.53 | 371.12 | 0.18 | 13.12 | 1.10 | 43.45 | 15.83 | 9.14 | 15.78 | 204.57 | 0.71 | 0.02 | 1.97 |
| 延庆 (N=17) | 标准偏差 | 0.45 | 69.67 | 80.63 | 125.58 | 0.05 | 12.21 | 0.47 | 16.84 | 10.02 | 5.71 | 10.68 | 85.86 | 1.99 | 0.02 | 2.10 |
| | 最小值 | 7.16 | 103.00 | 12.00 | 186.00 | 0.07 | 3.78 | 0.56 | 4.80 | 0.00 | 3.57 | 2.41 | 65.90 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| | 最大值 | 9.35 | 364.00 | 337.00 | 629.00 | 0.31 | 54.20 | 2.55 | 77.80 | 34.70 | 24.30 | 41.80 | 326.00 | 6.00 | 0.07 | 9.52 |
| | 平均值 | 7.69 | 334.77 | 262.01 | 571.79 | 0.42 | 20.47 | 2.03 | 63.97 | 24.84 | 25.16 | 51.78 | 246.88 | 1.49 | 0.08 | 4.98 |
| 全市 (N=278) | 标准偏差 | 0.36 | 157.52 | 96.02 | 247.33 | 0.52 | 27.65 | 1.68 | 27.38 | 9.71 | 33.47 | 55.71 | 73.03 | 6.72 | 0.28 | 4.22 |
| | 最小值 | 6.09 | 7.00 | 74.23 | 18.60 | 0.05 | 2.07 | 0.04 | 0.39 | 0.00 | 1.09 | 1.05 | 3.66 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| | 最大值 | 9.40 | 934.00 | 585.00 | 1490.00 | 3.95 | 142.00 | 13.10 | 163.00 | 55.60 | 168.00 | 270.00 | 414.00 | 55.20 | 2.81 | 21.80 |

注：pH 为无量纲，EC 为 $\text{us} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，其余单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

5 地下水质量评价

依据《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017），选取常规指标（除去浑浊度、总大肠菌群、菌落总数）36项、非常规指标15项指标开展了单指标评价和综合质量评价。

5.1 单因子指标评价

图4是部分常规指标单因子质量评价结果，总体来看，94.98%的水样的Fe和TH含量达到III类标准，96.42%的水样的NH₃-N含量达到III类标准，97.13%的水样的Mn含量达到III类标准，98.21%的水样的NO₃-N、SO₄²⁻和F含量达到III类标准，98.92%的水样的DO含量达到III类标准。非常规指标评价结果，除1,2-二氯丙烷以外指标均的含量达到III类标准，而1,2-二氯丙烷I类占98.92%，II类占0.00%，III类占0.72%，IV类占0.35%。

单因子指标评价结果显示（图4和图5）：①各单因子指标的超标点位均位于山区与平原过渡地带。②SO₄²⁻超标范围最小，集中在西山系统山前地区，原因可能主要由于该地区历史上是主要的采煤区，地层主要为侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系和奥陶系。其中石炭系和侏罗系是含煤主要地层，煤层中含有大量的硫，在开采过程中经氧化、溶蚀等作用，最后溶解于水中，造成地下水中SO₄²⁻升高（梁永平，2013，2015）。③Fe、NH₃-N和F等三个指标有个别样品属于V类标准，TDS全部优于III类标准，I-II类占比达86.7%。

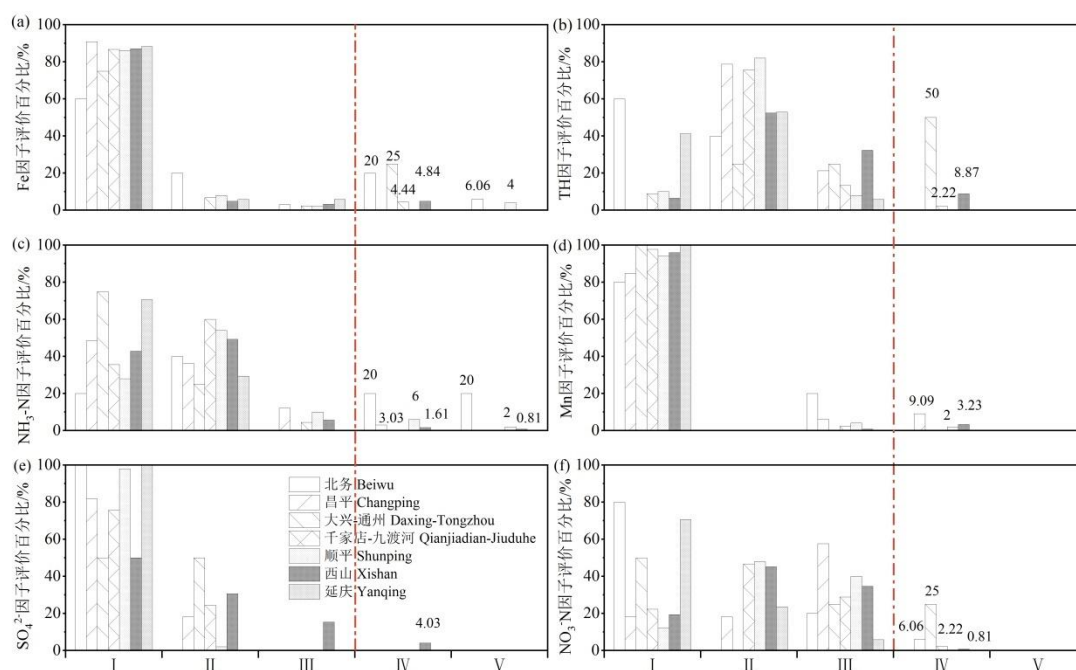
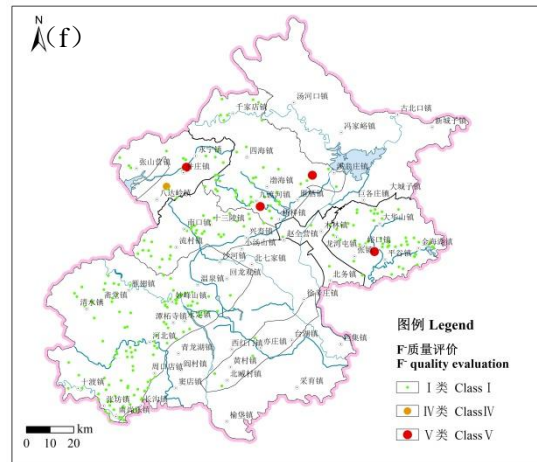
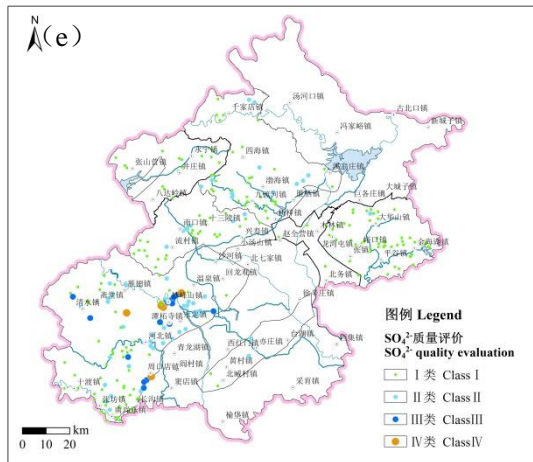
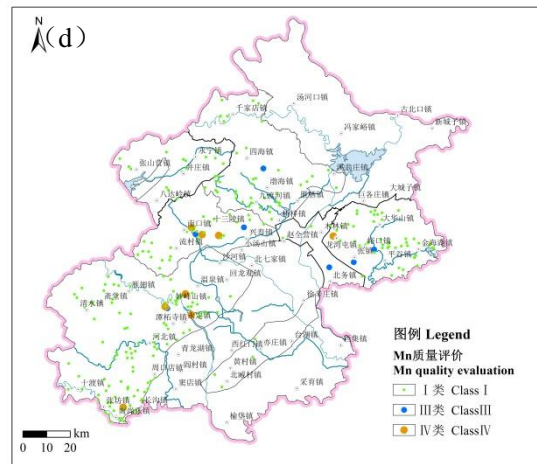
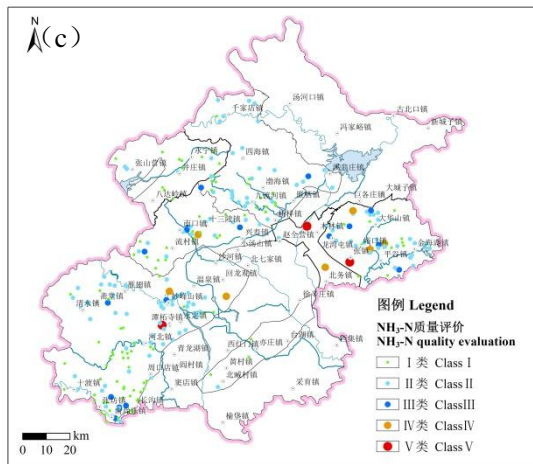
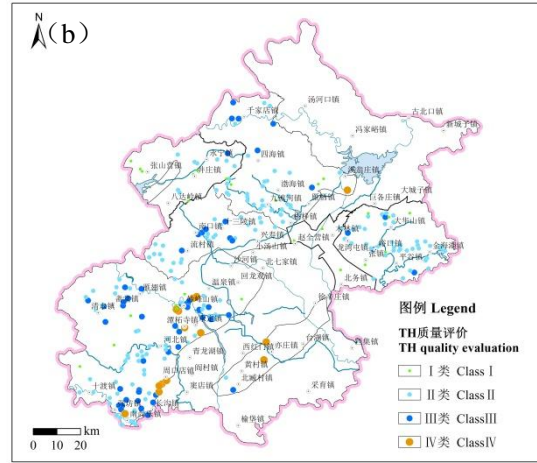
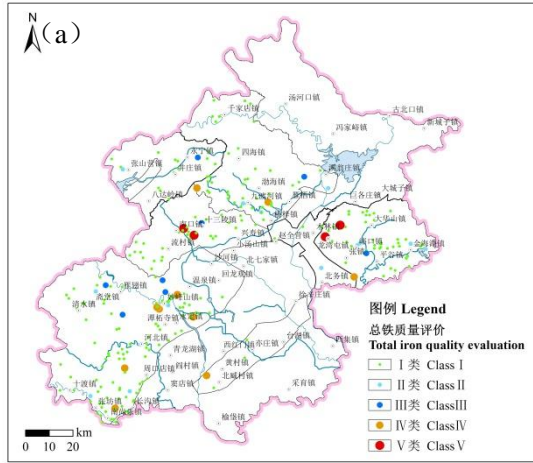


图4 单因子质量评价结果 (a: Fe; b: TH; c: NH₃-N; d: Mn; e: SO₄²⁻; f: NO₃-N)

Fig.4 Results of quality evaluation by single indexes (a: Fe; b: TH; c: NH₃-N; d: Mn; e: SO₄²⁻; f: NO₃-N)



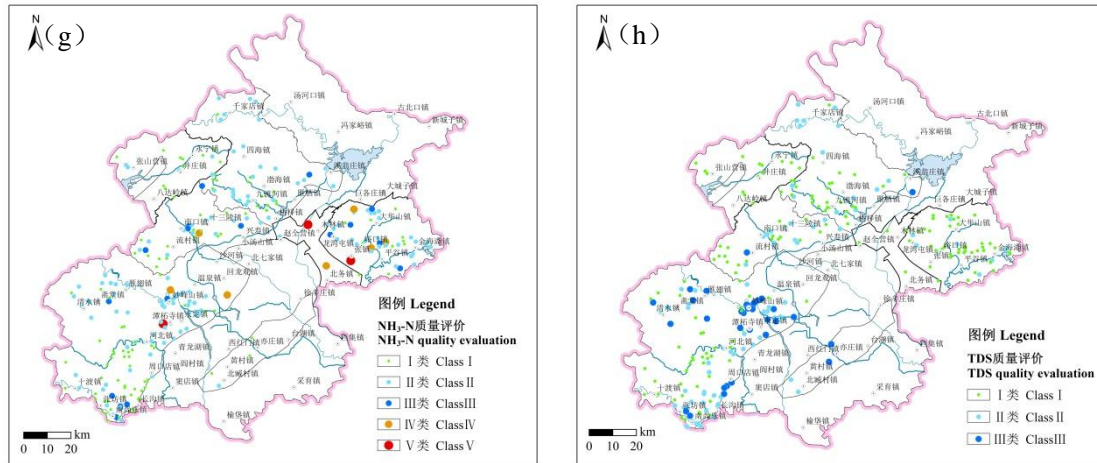


图 5 各岩溶系统主要无机指标单因子质量评价结果

Fig.5 Distribution map of karst groundwater quality evaluation by inorganic indexes in Beijing

(a: Fe; b: TH; c: $\text{NH}_3\text{-N}$; d: Mn; e: SO_4^{2-} ; f: F; g: $\text{NO}_3\text{-N}$; h: TDS)

5.2 多因子综合评价

将评价结果导入 Arcgis10.3 中, 绘制多因子综合评价分布图, 多因子综合评价结果显示 (图 6): 北京市岩溶水系统水质总体较好, I 类水占比为 0.72%, II 类水占比 32.73%, III 类占比 48.56%, IV 占比 13.31%, V 类占比 4.68%。各系统超标率由大到小依次为: 大兴-通州 (75.00%) > 北务 (60.00%) > 昌平 (18.18%) > 西山 (16.94%) > 顺平 (16.00%) > 千家店-九渡河 (15.56%) > 延庆 (11.76%)。大兴-通州和北务两个系统的水样数量分别为 4 件和 5 件, 超标率较高的原因可能与样本数量较少有关。

6 岩溶水生态环境效应

6.1 资源功能属性

北京市岩溶地下水主要分布于山区和山前地带, 这一区域面积约 9573.24 km^2 , 其中岩溶裸露区面积 2866 km^2 , 可溶岩中的溶洞、孔洞以及溶隙、裂隙广泛接收大气降水入渗补给, 在河道区域接收河流下渗补给, 在山前地带通过侧向排泄一部分补给基岩含水层, 另一部分补给第四系。如前所述, 岩溶地下水水质优良, 往往具有低硬度、低矿化度特点, 而且局部地区还含有特殊的微量元素, 是优质的供水水源。因此, 在北京山前地带分布有大大小小二十余处水源地, 皆以岩溶水作为供水水源。从西南至东北, 环北京依次分布有房山区的娄子水水源地、韩村河水源地、张坊应急水源地 (开采量 2700 万 m^3a^{-1})、石景山区杨庄水源地、五里坨水源地、海淀区市三厂水源地 (开采量 3350 万 m^3a^{-1})、昌平邓庄-化庄水源地 (开采量 1470 万 m^3a^{-1})、平谷中桥水源地 (开采量 780 万 m^3a^{-1}) 等, 除此以外, 还有许多零星开采 (辛宝东等, 2022)。岩溶水发挥了巨大的资源供给功能, 极大的保障了北京市供水安全。除此以外, 在山区和山前地带, 岩溶裂隙水往往以泉水排泄, 构成了河流基流重要部分。随着近年来北京市地下水压采、减采工程实施, 许多山泉出现了复涌 (北京日报, 2022-03-25), 在地下水-地表水的循环和转化过程中, 使得河道和泉眼附近植被覆盖度和生态环境进一步好转。

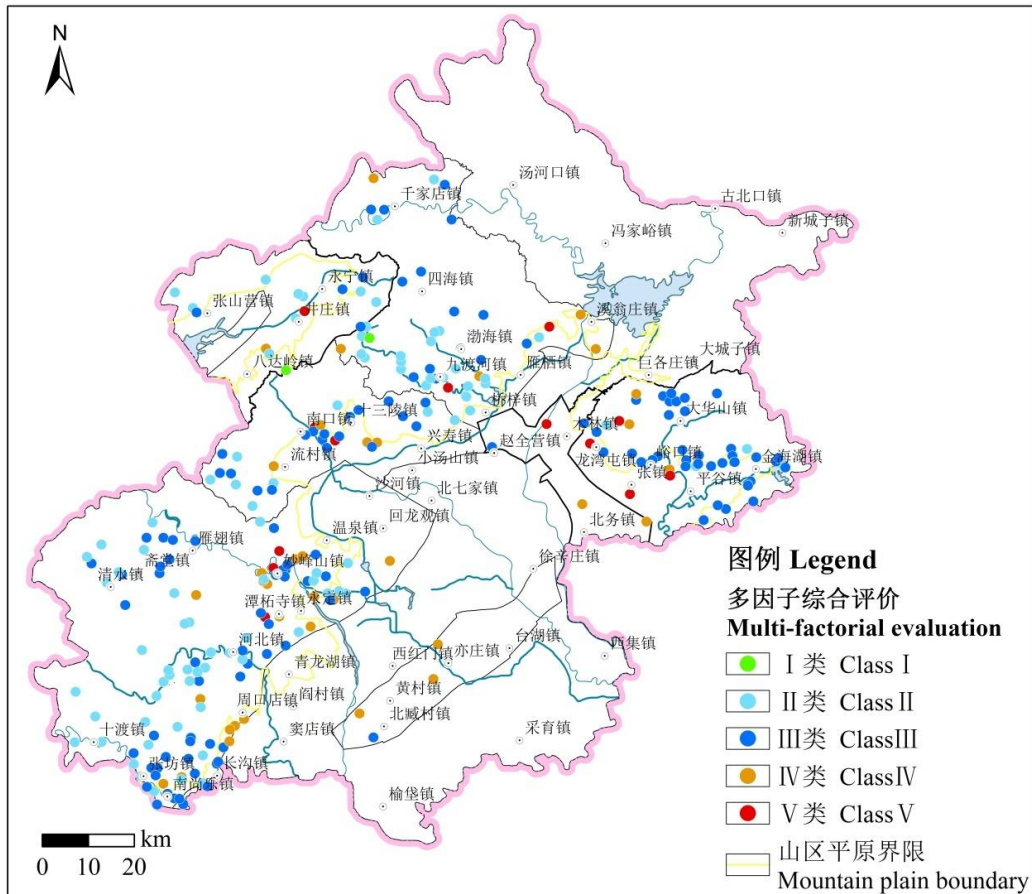


图6 北京岩溶水多因子综合质量评价结果

Fig.6 Distribution map of quality evaluation based on multi-indexes of karst groundwater in Beijing

6.2 主要环境问题

影响北京岩溶水环境的主要因素有：

(1) 北京山区历史采矿活动对含水层造成了较大的扰动。仅西山地区历史上大大小小矿山达千余座，矿山开采疏排水对地下水含水层造成了较大的扰动（张长敏，2009）。据2017年数据，北京全市共有尾矿库29座，分布在密云、平谷、怀柔 and 延庆4个区，矿种主要为铁矿、金矿和铅锌矿，总规模5697.6万 m^3 ，矿山尾矿库废渣重金属元素等污染物构成了含水层环境的潜在威胁。2020年，全市仍有未治理废弃矿山及裸露岩壁面积1373 hm^2 ，绝大部分位于浅山区。此外，部分废弃巷道“老窑水”可能是造成周边水质劣化的主要原因，如西山岩溶水系统的 SO_4^{2-} 平均值为81.83 $mg L^{-1}$ 为全区最高，远高于全市平均值51.78 $mg L^{-1}$ 。系统内门头沟区杨坨、西杨坨和潭柘寺村北，地下水化学类型多为 SO_4^{2-} 型， SO_4^{2-} 质量浓度最高达2157 $mg L^{-1}$ ，并出现pH降低的现象，直接威胁周边的植被系统（梁永平等，2021）。

(2) 浅山区和山前地带人类活动污染载荷输入强度较高构成潜在威胁。在山区与平原过渡地带，河道地表水与地下水转化强烈，水力联系密切，水源输入源也更为复杂。该区域总面积7416.6 km^2 ，占北京市总面积的45.16%，分布有85个乡镇及街道办事处，1601个村及社区。相比较整个生态涵养区，该区域土地开发程度高，植被覆盖率低，人类活动强度高（陈龙等，2020）。278件样品中，有超过10件综合评价结果为V类（3.6%），32件（11.6%）达到IV类。以 NH_3-N 和 NO_3-N 为例，分别有10件（3.6%）和4件（1.44%）超IV类。CI是表征人类活动对地下水影响强弱的重要指标，主要来自于土壤中盐渍残留物的淋失和人为活动。

北京西山沟域经济和民宿、旅游发展程度较高，系统内岩溶水中Cl⁻的平均质量浓度为37.23mg L⁻¹，明显高于全市均值25.16mg L⁻¹，表明该区域地表污染物载荷相对较高。此外，历史上不规范的污水排放和垃圾处理方式可能是造成该区域内地下水中SO₄²⁻和Cl⁻含量较高的原因（王永红等，2012；梁永平，2010；2013）

（3）有机指标检出率较高，个别点已出现超标现象。278件水样中，有39件样品有机物检出。15项检测指标中，有13项检出，检出最多的前3项指标依次为：苯并[a]芘（检出率4.32%）、三溴甲烷（3.60%）和二甲苯（检出率2.52%），且分布较为分散。1,2-二氯丙烷出现超标现象，最大值为7.22μg L⁻¹，超标率为44.4%。有机物是最常见、治理最困难的一类污染物，对人体健康十分不利，应引起足够重视。

6.3 保护对策与建议

岩溶地下水系统由于其强烈的非均质性和各向异性，局部地区甚至有岩溶管道发育，因此岩溶水系统是仅次于地表水的脆弱性系统，一旦遭受污染，危害极大。针对北京岩溶水出现的部分指标超标的空间分布特点，综合考虑其地质、地貌和地理位置（主要是与人类聚集区、矿业开采活动）等综合因素，提出保护对策与建议如下：

（1）提高植被覆盖率，加强山区水源涵养。2020年北京市山区森林覆盖率为58.8%（北京日报：2020-06-18），未来应进一步提高这一指标，进一步防止水土流失，优化产流-汇流-入渗-补给模式，增强补给能力，推进山区516条小流域综合治理，形成植被覆盖率与地下水净补给量的双赢。

（2）控制点源污染，减轻面源污染，开展小流域环境综合整治。山区旅游、民宿经济的发展是后矿山时代乡村振兴的重要手段。首先要加强污水处理，严格污水达标排放、严格垃圾规范处置。其次要减少农业化肥、农药使用，清除白色垃圾，从源头上控制潜在污染物进入含水层系统。

（3）落实和贯彻条例制度，做好动员宣传。坚决落实《北京城市总体规划（2016-2035）》和《北京市生态涵养区生态保护和绿色发展条例》规划确定的责任与目标，切实做好生态涵养区的保护与治理工作，让流动、循环过程中的岩溶水发挥最大社会效益、经济效益和生态效益。

（4）做好监测，优化监测网络。河流生态补水和矿山修复治理过程中均会引发地下水环境的不断变化，迫切要求持续开展地下水监测工作，特别是西部矿区煤矿酸性水和北部山区地下水中重金属的持续监测，此外应对局部地区超标有机物持续跟踪，发挥其预警功能，并以问题为导向，支撑国家级、部级和市级等各层面战略工程，为生态环境一体化治理发挥重要支撑作用。

7 结论

北京地区的岩溶地下水分布广泛，在北京市供水和生态功能维系中发挥着重要作用，通过系统采样，统计分析，探讨其水质空间分布特征并进行综合分析，得到如下认识：

（1）北京市岩溶水的pH、TDS和TH分别为7.69、334.77mg L⁻¹和262.01mg L⁻¹，总体上具有弱碱性、低盐度和低硬度的特点。阳离子以Ca²⁺和Mg²⁺为主，阴离子以HCO₃⁻为主，岩溶地下水化学类型以HCO₃-Ca Mg型为主，在西部山前多点出现SO₄²⁻参与命名的现象。

（2）非常规有机指标检测结果表明，北京岩溶地下水中除氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷未检出，其他指标均有检出，检出率在0.36%~4.32%之间，其中检出最多的3项指标为：苯并[a]芘（4.32%）、三溴甲烷（3.60%）和二甲苯（总量）（2.52%），分布较分散，应当引起足够重视。

（3）单因子指标评价结果显示，影响北京市地下水质量的指标主要有Fe、TH、NH₃-N、Mn、SO₄²⁻、F⁻、NO₃⁻等。其超标率（Ⅲ类）依次为5.04%、5.04%、3.60%、2.88%、1.80%、

1.80%和 1.80%，其中西部超标率总体上略大于北部和东部。

(4) 综合质量评价结果显示，北京市岩溶水质量整体良好，其中 I 占比 0.72%，II 类占比 32.73%，III 类占比 48.56%，IV 占比 13.31%，V 类占比 4.68%。各系统超标率由大到小依次为：大兴-通州（75.00%）>北务（60.00%）>昌平（18.18%）>西山（16.94%）>顺义（16.00%）>千家店-九渡河（15.56%）>延庆（11.76%）。整个北京市域范围内，超标点空间上主要位于西部山区-山前地带和平原隐伏区，超标原因主要与人类活动如采矿业、旅游业、生活污水和垃圾不规范处理等因素有关。

(5) 未来应进一步提升山区森林覆盖率，加强水源涵养。应严格控制点源和面源污染，开展小流域环境综合整治，减少地表污染物进入岩溶水系统。应持续监测，以问题为导向，优化监测网络，对重点区域加密监测，发挥预警功能。应坚决落实和贯彻相关法规条例，做好动员宣传，增强公众意识，共同保护好岩溶水环境，发挥其生态功能，支撑首都生态文明建设。

致谢：感谢审稿专家和编辑老师对本文付出的辛勤劳动和提出的富有建设性意见。

References

- Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring. 2022. Beijing Yanrong Shui[M]. Beijing: Geology Press, 1-273 (in Chinese with English abstract).
- Chen Long, Liu Chunlan, Pei Sha, Liu Xiaona, Ning Yangcui.2020.Evaluation of the effect terrain gradient of ecosystem services in the transitional zone of Beijing bay[J]research of Soil and Water Conservation, 27(04):247-255 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shuai, Li Changsuo, Jia Chao, Sun Bin, Zhang Hailin, Pang Wei. 2019. Spatiotemporal difference study of karst hydrochemical characteristics in the Baotu Spring area of Jinan[J]. Acta Geologica Sinica,,93(S1):61-70 (in Chinese with English abstract).
- Guo Gaoxuan, Liu Wenchen, Xin Baodong, Chen Yuanyuan. 2011. Current Situation and Discussions on Karst Groundwater Resources Exploration in Beijing[J]. South-to-North Diversion and Water Science &Technology,9(02):33-36+45 (in Chinese with English abstract).
- Guo Gaoxuan. 2012. Comprehensive assessment of groundwater quality of different aquifers in Beijing Plain[J]. GEOLOGY IN CHINA,39(02):518-523 (in Chinese with English abstract).
- Ji Yiqun, Wang Shufang, Han Zheng, Huang Yuqi, Cao Ying, Guo Zhaocheng.2020. Reseachon Infiltration Coefficient of Precipitation in Karst Area of Beijing[J]. Yellow River, 42(02):38-41+47 (in Chinese with English abstract).
- Li Lu, Qin Dajun, Guo Yi, Sun Jie. 2019. Sources and migration of nitrate in groudwater in Xishan karst aquifer in Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,46(04):73-80+96 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaopan. 2017.Characteristics of the circulation and renewability of the karst water system in Xishan area, Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li Qiaoling, Lei Xiaodong, Yang Yong, Yang Quanhe, Li Chen, Guan Wei, Sun Jiefu. 2019. A study of flow path in Yuquanshan area of westernBeijing based on integrated geophysical technology[J]. Geology in China, 46(2): 346-358(in Chinese with English abstract).
- Li Shijun. 2012. A Study of the Characteristic and Regulation-Storage Capacity of the Zhangfang Karst-groundwater Reservoir in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Wang Weitai. 2010. The Division and Characteristics of Karst Water Systems in Northern China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(06):860-868 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Wang Weitai, Zhao Chunhong, Wang Wei, Tang Chunlei.2013. Variations of karst water and

- environmental problems in North China[J]. *Carsologica Sinica*, 32(01):34-42(in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Zhao Chun-hong, Tang Chunlei, Wang Weitai, Shen Haoyong. 2015. Progress of Hydrogeology and Environmental Geology Survey in Karst Area of Northern China: An Example from Karst Area in Western Hills of Beijing[J]. *Geological Survey of China*, 2(08):1-8(in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, SHEN Haoyong, Zhao Chunhong, WANG Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. 2021. Thinking and practice on the research direction of karst water in northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 40(03):363-380 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chongjun, Liu Quanguo, Yu Yang, Wang Xiaosong. 2017. Permeability Coefficient Calculation and Aquiferous Property Analysis on Karst Water System in the West Hill of Beijing[J]. *Urban Geology*, 12(02): 73-77 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shicheng. 2017. Discussion on Water Abundance of Karst Water System in Shunping Area, Beijing[J]. *Urban Geology*, 12(04):67-71 (in Chinese with English abstract).
- Lu Haiyan, Yang Fan, Xin Baodong, Xu Liang. 2014. Hydrochemical characteristics and deterioration reasons of karst groundwater in Daxing covered karst area of Beijing[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 12(05):155-159+186 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xia Yubo, LI Haitao, HAN Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, GUO Xu, LI Hongqiang, Pei Yandong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*. 48(03):677-696(in Chinese with English abstract).
- Nie Hongfeng, XIAO Chunlei, REN Weixiang, LIU Jian-yu, DAI Meng. 2021. Progress and prospect of eco-geological research[J]. *Geological Survey of China*. 8(06):1-8(in Chinese with English abstract).
- Qin Dajun, Sun Jie, Guo Yi, Li Lu, Mohammed Haji, Wang Dongdong, Liu Wencai. 2019. Impacts of Yongding River on the Xishan karst aquifer and Yuquan spring in Beijing, China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(1):162-169(in Chinese with English abstract).
- Usunoff E J, Amado Guzmán-Guzmán. 1989. Multivariate analysis in hydrochemistry: An example of the use of factor and correspondence analyses[J]. *Groundwater*, 27(1): 27-34.
- Wang Xiaohong, Liu Wenchen, Shen Yuanyuan, Liu Shicheng. 2011. Analysis on the hydrogeology characteristics and exploitation on potential of the emergency karst water source field in Xishan region, Beijing[J]. *Carsologica Sinica*, 30(02): 216-221(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaohong, Liu Jiurong, Xin Baodong, Ye Chao, Shen Yuanyuan. 2016. Division and Characterization Analysis of Karst Groundwater System in Beijing[J]. *URBAN GEOLOGY*, 11(03):8-15 (in Chinese with English abstract).
- Wu Le, Zhang Youquan, Gong Huili, Ye Chao, Shen Yuanyuan, Wang Rong. 2016. Numerical simulation of groundwater flow for Xishan area in Beijing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 43(03): 29-36(in Chinese with English abstract).
- Shen Yuanyuan, Xin Baodong, Guo Gaoxuan, Ji Yiqun. 2011. Numerical Simulation and Prediction of Groundwater Flow in Emergency Karst Well Fields in Fangshan, Beijing[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 9(05):103-106+114 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yuanyuan, Guo Gaoxuan, Ou Zhiliang, Xin Baodong, Nan Yinghua, Wang Liya, Wang Shufang, Liu Jiurong. 2021. Recovery scheme of Yuquanshan spring in Beijing[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 19(4): 645-655(in Chinese with English abstract).
- Shi Xiaodi, Kang Xiaobing, Xu Mo, Deng Hongke. 2019. Hydrochemical characteristics and evolution laws of karst groundwater in the slope zone of the canyon area, Sichuan-Yunnan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11):2975-2984 (in Chinese with English abstract).

- Zhao Chunhong, Li Qiang, Liang Yongping, Xu Liang, Wang Wertai, Lu Haiping, Tang Chunlei. 2014. Karst water system boundaries and hydrogeological properties of Heilongguanspringshed in Xishan region, Beijing[J]. Advances in Earth Science,29(3):412-419 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chunhong, Liang Yongping, Wang Weitai, Tang Chunlei, Shen Yuanyuan.2017. Discussion on the characteristic of karst water systems in the Xian area of Beijing[J]. Carsologica Sinica,36(05):641-647 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changmin. Subsidence features and risk prediction in coaling goafs: A case study of the Xishan area in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 北京地质环境监测所. 2022. 北京岩溶水[M]. 北京: 地质出版社, 1-273.
- 陈龙, 刘春兰, 裴厦, 刘晓娜, 宁杨翠. 北京湾过渡带生态系统服务地形梯度效应评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(04): 247-255.
- 高帅, 李常锁, 贾超, 孙斌, 张海林, 逢伟. 2019. 济南趵突泉域岩溶水化学特征时空差异性研究[J]. 地质学报, 93(S1): 61-70.
- 郭高轩, 刘文臣, 辛宝东, 李宇, 沈媛媛. 2011. 北京岩溶水勘查开发的现状与思考[J]. 南水北调与水利科技, 9(02): 33-36+45.
- 郭高轩. 2012. 北京市平原区地下水分层质量评价[J]. 中国地质, 39(02): 518-523.
- 郭高轩. 2017. 中国北方岩溶地下水系统数值模拟及其脆弱性评价——以北京顺平地区为例[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 郭小萌. 2014. 北京西山岩溶水数值模拟及其应急开采能力评价[D]. 北京: 首都师范大学.
- 纪轶群, 王树芳, 韩征, 黄昱琪, 曹颖, 郭兆成. 2020. 北京岩溶水系统降水入渗系数研究[J]. 人民黄河, 42(02): 38-41+47.
- 韩再生. 生态环境地质调查进展与展望[J]. 地质通报, 2003, (Z1): 977-983.
- 李露, 秦大军, 郭艺, 孙杰. 2019. 北京西山岩溶水中硝酸盐来源及迁移特征[J]. 水文地质工程地质, 46(04): 73-80+96.
- 李巧灵, 雷晓东, 杨勇, 杨全合, 李晨, 关伟, 孙杰夫. 北京西郊玉泉山地区岩溶水强径流路径地球物理分析[J]. 中国地质, 46(2): 346-358.
- 李小盼. 2017. 北京西山岩溶水系统的循环特征和可更新能力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李世君. 2012. 北京张坊岩溶地下水库特征及调蓄能力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 梁永平, 王维泰. 2010. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报, 31(06): 860-868.
- 梁永平, 王维泰, 赵春红, 王玮, 唐春雷. 2013. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶, 32(01): 34-42.
- 梁永平, 赵春红, 唐春雷, 王维泰, 申豪勇. 2015. 北方岩溶区水文地质环境地质调查进展——以北京西山岩溶区为例[J]. 中国地质调查, 2(08): 1-8.
- 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶, 2021, 40(03): 363-380.
- 刘崇军, 刘全国, 于洋, 王小松. 2017. 北京西山岩溶水系统渗透系数计算及富水性分析[J]. 城市地质, 12(02): 73-77.
- 刘士成. 2017. 北京顺平岩溶水系统富水性分析[J]. 城市地质, 12(04): 67-71.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 韩博, 余学中, 周亚龙, 王雨山, 郭旭, 李洪强, 裴艳东. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 2021, 48(03): 677-696.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 任伟祥, 刘建宇, 戴蒙. 生态地质研究进展与展望[J]. 中国地质调查, 2021, 8(06): 1-8.
- 秦大军, 孙杰, 郭艺, 李露, Mohammed Haji, 王东东, 刘文才. 2019. 永定河对北京西山岩溶水和玉泉山泉

- 的影响[J]. 工程地质学报, 27(01):162-169.
- 沈媛媛, 辛宝东, 郭高轩, 纪轶群. 2011. 北京房山岩溶水应急水源地地下水数值模拟及预测[J]. 南水北调与水利科技, 9(05):103-106+114.
- 沈媛媛, 郭高轩, 欧志亮, 辛宝东, 南英华, 王丽亚, 王树芳, 刘久荣. 2021. 北京玉泉山泉恢复方案[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 19(04):645-655.
- 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 1993. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 14-15.
- 王晓红, 刘文臣, 沈媛媛, 刘士成. 2011. 北京西山岩溶水应急水源地水文地质特征及开采潜力分析[J]. 中国岩溶, 30(02):216-221.
- 王晓红, 刘久荣, 辛宝东, 叶超, 沈媛媛. 2016. 北京岩溶水系统划分及特征分析[J]. 城市地质, 11(03):8-15.
- 王京彬, 卫晓锋, 张会琼, 甘凤伟. 基于地质建造的生态地质调查方法——以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J]. 中国地质, 2020, 47(06):1611-1624.
- 王永江, 刘万兆. 2012. 北京市山区沟域经济主要特征及发展模式分析[J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版), 14(01):34-36.
- 吴乐, 张有全, 宫辉力, 叶超, 沈媛媛, 王荣. 2016. 北京市西山地区地下水数值模拟及预测[J]. 水文地质工程地质, 43(03):29-36.
- 史箫笛, 康小兵, 许模, 邓宏科. 2019. 川滇高原斜坡地带峡谷区岩溶水化学特征及演化规律[J]. 地质学报, 93(11):2975-2984.
- 杨平, 侯井岩, 高润华. 1984. 论北京玉泉山泉补给源——北京西山山前奥陶系岩溶水径流特征[J]. 水文地质工程地质, (02):15-19.
- 赵春红, 李强, 梁永平, 许亮, 王维泰, 卢海平, 唐春雷. 2014. 北京西山黑龙关泉域岩溶水系统边界与水文地质性质[J]. 地球科学进展, 29(03):412-419.
- 赵春红, 梁永平, 王维泰, 唐春雷, 申豪勇. 2017. 北京西山泉域岩溶水系统特征探讨[J]. 中国岩溶, 36(05):641-647.
- 张长敏. 2009. 煤矿采空塌陷特征与危险性预测研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 2022-03-25. 北京日报: 汨汨泉水润京城 http://www.beijing.gov.cn/renwen/jrbj/202203/t20220323_2637189.html
- 2020-06-18. 北京日报: 北京市山区森林覆盖率达到 58.8%.
<http://www.forestry.gov.cn/zlszz/4262/20200623/092454097789248.html>