

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0124

张英,刘春燕,王金翠,等.快速城镇化进程中典型冲洪积扇地下水化学演变特征及影响因素解析[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):172-179,193. ZHANG Y, LIU C Y, WANG J C, et al. Analysis of characteristics and influencing factors of groundwater chemical evolution of typical alluvial fans of rapid urbanization[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 172-179, 193. (in Chinese)

快速城镇化进程中典型冲洪积扇地下水 化学演变特征及影响因素解析

张英^{1,2},刘春燕¹,王金翠¹,侯钦宣¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要: 滹沱河冲洪积扇含水层是石家庄市重要的地下水源,在城市供水安全保障中发挥着重要作用。开展地下水化学演变特征及影响因素分析,可科学的识别人为活动对地下水化学的影响,从而为保障地下水安全提供重要依据。通过水化学方法和多元统计方法,对研究区109组地下水和7组地表水样品的16组化学指标进行分析研究。结果表明,地下水 HCO_3^- 和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 型水在全区分布广泛, $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ 和 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^-$ 型水主要分布在滹沱河冲洪积扇顶部的南部区域及滹沱河北的藁城一无极一带。不同时段地下水化学数据对比分析结果显示,研究区地下水化学类型种类由少变多,呈现复杂化的演变特征,且受人类活动影响的地下水化学类型分布范围呈增加趋势。主成分分析结果显示,研究区地下水化学演化主要受控于地下水超采和水岩作用,其次为污水入渗和粪肥渗滤。

关键词: 地下水;滹沱河冲洪积扇;水化学;城镇化;主成分分析

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of characteristics and influencing factors of groundwater chemical evolution of typical alluvial fans of rapid urbanization

ZHANG Ying^{1,2}, LIU Chunyan¹, WANG Jincui¹, HOU Qinxuan¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Weihe River alluvial fan aquifer is an important groundwater source in Shijiazhuang City and plays an important role in urban water supply security. Study on groundwater hydrochemical characteristics and controlling factors can scientifically identify the natural and anthropogenic factors and can provide reasonable basis for groundwater security. In this paper, 109 groundwater sample and 7 surface water sample were obtained to analyze sixteen chemical parameters using hydrochemical method and multivariate statistical method. The results indicated that the HCO_3^- and $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ facies widely distributed in the whole area. $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ facies were mainly distributed in the southern area of the top of Hutuo River alluvial fan and in the Yicheng-Wuji area of northern Hutuo River. The comparative analysis in different time periods revealed that groundwater chemistry evolved to more facies, with an increasing trend of groundwater facies affected by anthropogenic factors. The results obtained by principal component analysis exhibited that the evolution of groundwater in the area was mainly controlled by the water-rock interaction and overexploitation of groundwater as well as sewage and manure.

收稿日期:2019-03-18 修回日期:2019-04-29 网络出版时间:2019-08-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190815.1138.002.html>

基金项目:中国地质调查局国土资源大调查项目(DD20160309);中国地质科学院基本科研业务费专项(SK201912)

作者简介:张英(1986—),女,山东肥城人,助理研究员,主要从事地下水环境方面的研究。E-mail: are134598@126.com

Key words: groundwater; Hutuo River alluvial fan; hydrochemistry; urbanization; principal component analysis

地下水是人类重要的淡水资源,在人类生活和生产中发挥着重要作用。同时,地下水也是生态环境系统中的重要组成因子,其变化往往会影响生态系统的天然平衡状态^[1-2]。近年来随着我国城镇化进程的快速推进,地下水环境在人为活动强烈干扰下出现显著恶化,主要表现为地下水位持续下降、水质恶化等水环境问题^[3]。人类活动对地下水环境的干扰作用会通过地下水化学组分有所反映^[4]。天然条件下地下水化学组分按一定的规律分布,形成一个天然的水化学场,而一旦受到人为活动的干扰,则破坏了天然的水化学场分布,地下水地球化学环境便发生变化^[5]。因此,为控制地下水环境的进一步恶化,保证地下水资源的可持续利用,有必要掌握人类活动强烈干扰下地下水化学的演变特征。

滹沱河冲洪积扇含水层位于山前补给区,具有富水性好、水质优良等特点,是石家庄市重要的供水水源。近几十年来,由于该区域城镇化进程加快,地下水及上游地表水资源过度开发,水环境条件发生巨大变化,水质恶化明显。此外,该区也是南水北调工程河北段的重要承接区之一。待南水北调工程全面实施后,地下水仍是该地区重要的应急备用水源。因此,保障滹沱河冲洪积扇地下水安全是该区水环境建设的重中之重。研究区地下水研究程度较高,其中在地下水化学方面主要集中在水岩作用机理模拟研究^[6-7]、污灌条件下水化学场的演变机制^[8]、水质评价与变化趋势预测^[2,9],但对于城镇化进程中地下水水化学特征的演变机理研究较少,本研究通过对比城镇化进程中的地下水化学资料,利用水化学方法对研究区地下水进行水化学演变分析,从多元统计学的角度进一步归纳研究区地下水化学演变的主要控制因素,为该区地下水的合理开发利用和保护管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于太行山东麓的山前倾斜平原地带,滹沱河冲洪积扇中上部。行政区划包括石家庄市辖区、鹿泉区、栾城区、藁城区,正定县、灵寿县、无极县等区县。本区气候属于温带大陆性气候,受季风影响,冬冷夏热,多年平均气温为 13℃,平均降水量为 554 mm。地貌类型主要为山前冲洪积扇群,地势西高东低,海拔高程为 60~90 m,坡降平均为 1.2%。滹沱河为流经本区的主要河流,自 1981 年断流至

今,目前部分地段为景观河流。

研究区自 1990 年以来,城镇化水平呈不断增长趋势,城镇化率由 14.59% 上升到 2016 年的 59.96%。城镇化过程中通过人口、产业集中和地域扩散来占用土地,从而改变了原来的土地利用结构。据石家庄市统计年鉴,1988 年研究区城市建成区面积约 68 km²,到 2016 年增加到 432.13 km²,相应的耕地面积随之减少。随着人口的不断增加和工业的发展,城市生活污水和工业废水量逐年增加,且主要排入东、西明渠及泄洪渠,在输送过程中沿途渗漏,加之南部郊区长期的污水灌溉,在很大程度上影响了地下水水质。另外,周边区县小型工厂污水的跑冒漏现象形成一些局部污染源,通过包气带渗透对地下水造成影响。

研究区含水层属河北平原第四系多层巨厚含水层系统,为山前倾斜平原水文地质区。该区第四系沉积受构造控制,使含水层的构成及其空间分布具有明显的差异性。在水平方向上,由西向东含水层单层厚度由厚变薄,颗粒由粗变细,层次由少变多,含水介质的分选性、磨圆性由差到好,富水性由强变弱(图 1);在垂向上,含水层变化是上部及下部砂层颗粒较细,厚度较小,中部砂层颗粒较粗,含水层较厚。根据研究区第四系含水系统特征,以水文地质要素及地下水开发利用条件为依据,将研究区地下水划分为浅层地下水系统和深层地下水系统。其中,浅层地下水主要为第 I+II 含水组,在山前地段无稳定隔水层,底界埋深为 120~170 m。深层地下水主要为第 III+IV 含水组,受基地构造控制拗陷区和隆起区埋藏深度和厚度差异较大。该地区浅层地下水补给来源主要有大气降水入渗补给、西部山区侧向径流补给、地表水入渗补给以及农田灌溉回归补给。其中大气降水入渗补给为本区地下水最主要的补给方式。受地形条件影响,区内地下水总体上由西北向东南方向汇流,但由于地下水过量开采形成降落漏斗,在漏斗区内水流由四周流向漏斗中心。区内地下水的排泄以人工开采为主,其次为侧向径流排泄。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

2014—2016 年在滹沱河冲洪积扇顶部和中部地段共采集地下水样品 109 组和地表水样品 7 组(图 1)。

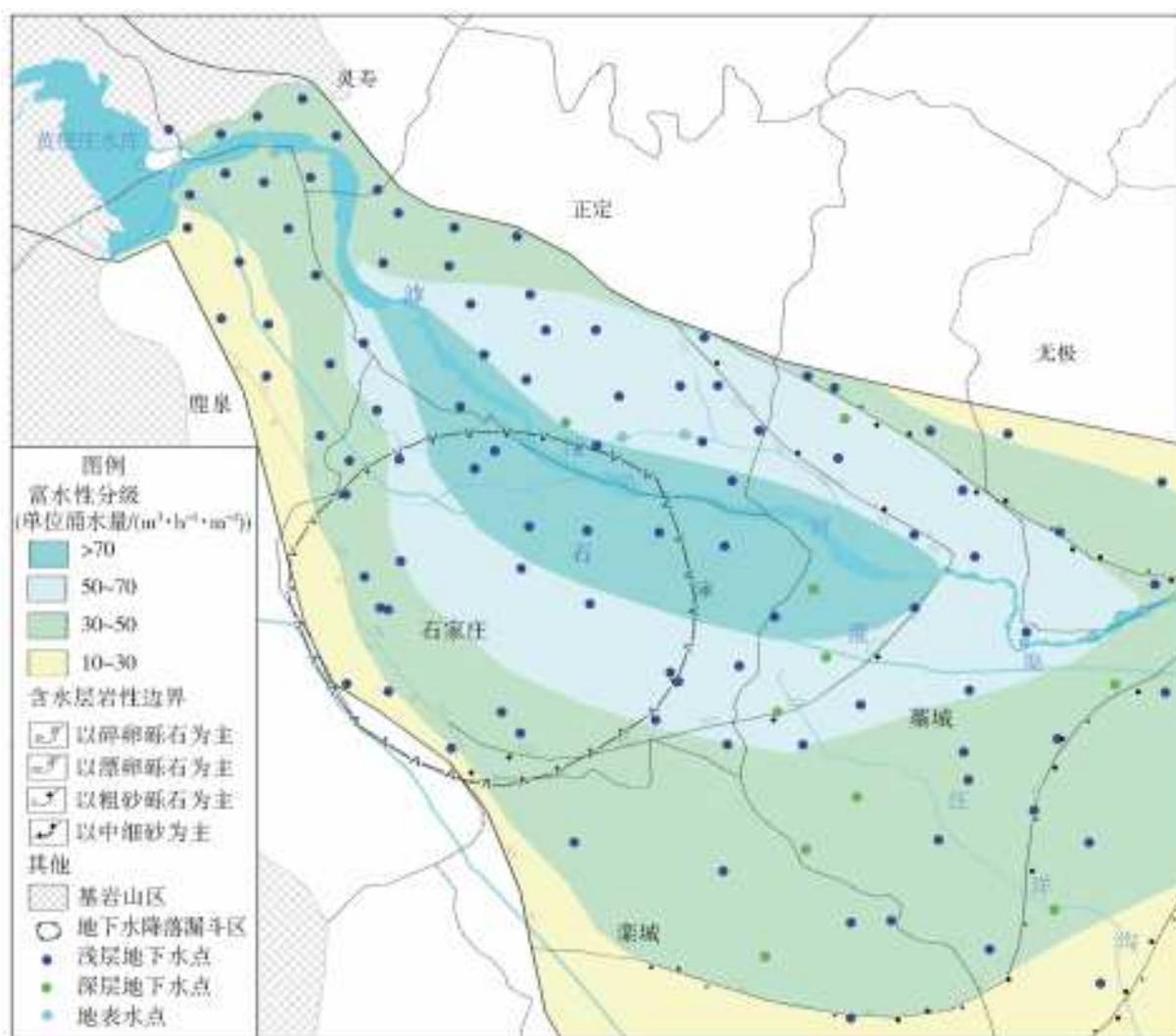


图 1 研究区水文地质略图及采样点分布

Fig. 1 The hydrogeological map and location of the sampling points in the study area

地下水取自供水井和农田灌溉井。取样前对采样井进行抽水清洗,等到抽出水量大于井筒水量的 3 倍,且现场测试参数趋于稳定再进行采样,以保证样品具有代表性。采样瓶为 1.5 L 聚乙烯塑料瓶,样品采集后立即保存于便携式冷藏存储箱中,送至国土资源部地下水矿泉水及环境测试中心进行测试。现场测试指标为 pH、电导率(EC)、溶解氧(DO)、氧化还原点位(Eh),现场测试仪器为多功能便携式测试仪 HQ40D(美国哈希公司)。实验室测试指标为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、总硬度(TH)、总溶解固体(TDS),实验室指标的测试参考国家地下水水质检验方法(DZ/T 0064—1993)。

2.2 统计方法

主成分分析是一种降维的统计方法,其原理是将原来具有一定相关性的变量重新组合成一组新的互相无关的综合变量,并尽可能多的反映原来变量的信息^[10]。该方法在水质数据分析方面应用较为

广泛,通过提取少数几个公共因子来解释控制水化学特征的天然或人为因素^[11-14]。本文利用 SPSS18.0 软件进行主成分分析,结合水文地质条件和野外调查资料进一步阐释影响该地区地下水化学的主要因素。

3 结果与分析

3.1 地下水水化学特征

研究区主要水化学指标统计特征见表 1。研究区浅层地下水 pH 介于 7.1~8.5,深层地下水 pH 介于 7.5~8.3,为弱碱性水。浅层地下水 EC 平均值仅 979.4 $\mu s/cm$,相比深层地下水偏高(均值为 579.1 $\mu s/cm$),主要是由于地下水位埋藏浅,受人类活动影响相对较大。从 Eh 和溶解氧的统计情况来看,研究区地下水多处于氧化环境,个别点处于还原环境。从各宏量组分的变异系数来看,浅层地下水阴离子大小关系为 $Cl^- > NO_3^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$,阳离子大小关系为 $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} >$

Mg^{2+} , 即阴离子中 Cl^- 和 NO_3^- 的变异系数相对较大, 阳离子以 Na^+ 的变异系数较大, 说明其含量受外界环境影响较大, 表现为含量分布较为离散, 而 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的变异系数相对较小, 指示其含量在全区分布较为稳定, 主要受地质背景条件控制, 受外界人类活动影响较小。从 Piper 三线图(图 2)上可以看出, 地下水阴离子以 HCO_3^- 为

主, 阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等碱土金属为主, 仅个别地下水以碱金属 Na^+ 为主; 地表水绝大部分水化学阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, 有两组以碱金属 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主导, 仅一组以 Cl^- 为主。研究区内部分地下水水化学与地表水较为一致, 指示地表水与地下水之间存在一定的补给关系。

表 1 研究区地下水水化学指标统计特征

Tab. 1 Statistics for hydrogeochemical parameters of groundwater

指标	浅层地下水					深层地下水				
	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
EC/ $(\mu s \cdot cm^{-1})$	367.0	2340.0	979.4	357.7	0.37	308.0	1020.0	579.1	214.2	0.37
Eh/mv	-87.0	253.0	143.8	71.0	0.49	-36.4	241.0	154.3	86.1	0.56
DO/ $(mg \cdot L^{-1})$	0.03	13.76	4.63	2.40	0.52	1.38	8.03	3.99	2.00	0.50
pH	7.1	8.5	7.5	0.3	0.04	7.5	8.3	7.8	0.2	0.03
K^+ / $(mg \cdot L^{-1})$	0.1	7.0	2.0	1.0	0.48	1.1	2.4	1.7	0.5	0.26
Na^+ / $(mg \cdot L^{-1})$	8.2	237.2	33.0	26.5	0.80	11.1	139.0	40.4	38.8	0.96
Ca^{2+} / $(mg \cdot L^{-1})$	33.4	253.4	122.6	50.4	0.41	27.2	87.8	56.3	14.3	0.25
Mg^{2+} / $(mg \cdot L^{-1})$	9.5	115.2	35.2	15.3	0.43	11.5	22.5	17.4	3.5	0.20
NH_4^+ / $(mg \cdot L^{-1})$	BDL	3.00	0.06	0.40	0.69	BDL	0.19	0.02	0.05	3.16
Cl^- / $(mg \cdot L^{-1})$	5.3	311.8	73.3	53.2	0.73	11.9	135.3	31.8	34.5	1.08
SO_4^{2-} / $(mg \cdot L^{-1})$	4.9	488.2	119.9	81.6	0.68	18.0	168.6	64.0	40.4	0.63
HCO_3^- / $(mg \cdot L^{-1})$	148.4	565.2	299.5	76.3	0.25	109.4	401.1	228.2	72.4	0.32
NO_3^- / $(mg \cdot L^{-1})$	1.5	265.0	51.5	43.1	0.84	0.2	10.6	4.2	2.7	0.65
NO_2^- / $(mg \cdot L^{-1})$	BDL	8.2	0.50	1.84	3.66	BDL	BDL	BDL		
TH/ $(mg \cdot L^{-1})$	122.6	1107.0	451.2	176.2	0.39	115.1	307.3	212.2	46.7	0.22
TDS/ $(mg \cdot L^{-1})$	161.7	1554.0	607.9	256.0	0.42	174.0	626.5	350.2	118.8	0.34

注: BDL 为低于检出限。

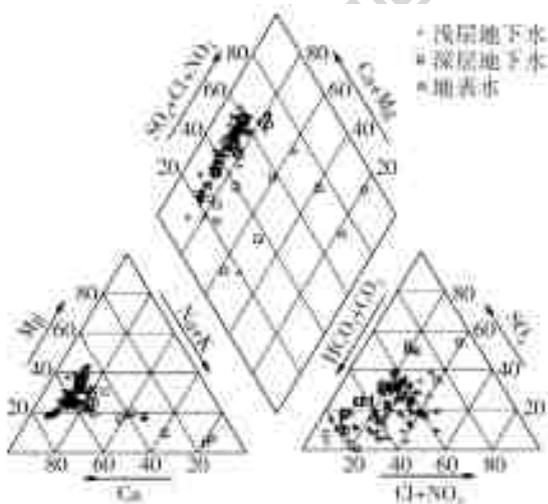


图 2 研究区不同类型水 Piper 三线图

Fig. 2 The Piper diagram of different types of water in the study area

根据舒卡列夫分类法对研究区地下水进行分类, 结果显示研究区浅层水中共存在 9 种化学类型,

其中, $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca$ 、 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca \cdot Mg$ 型水为主要水化学类型, 分别占比 27.5%、21.4% 和 20.4%, 其次为占比 1%~12% 的水化学类型, 按所占比例大小依次为 $HCO_3 \cdot Cl-Ca \cdot Mg$ 、 HCO_3-Ca 、 $HCO_3 \cdot Cl-Ca$ 、 $Cl \cdot HCO_3-Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3-Na \cdot Ca$ 、 $SO_4 \cdot HCO_3-Ca$ 型水。值得注意的是, 研究区有 27 组浅层地下水硝酸盐毫克当量百分比已超过 10% 并接近 20%, 虽未能参与到地下水化学类型的命名, 但在一定程度上说明了该地区浅层地下水受人类活动的影响较大。深层地下水化学类型主要为低矿化度的 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ ($Ca \cdot Na \cdot Ca$) 型水, 基本保持天然状态, 受人类活动影响较小。

3.2 地下水水化学时空演变特征

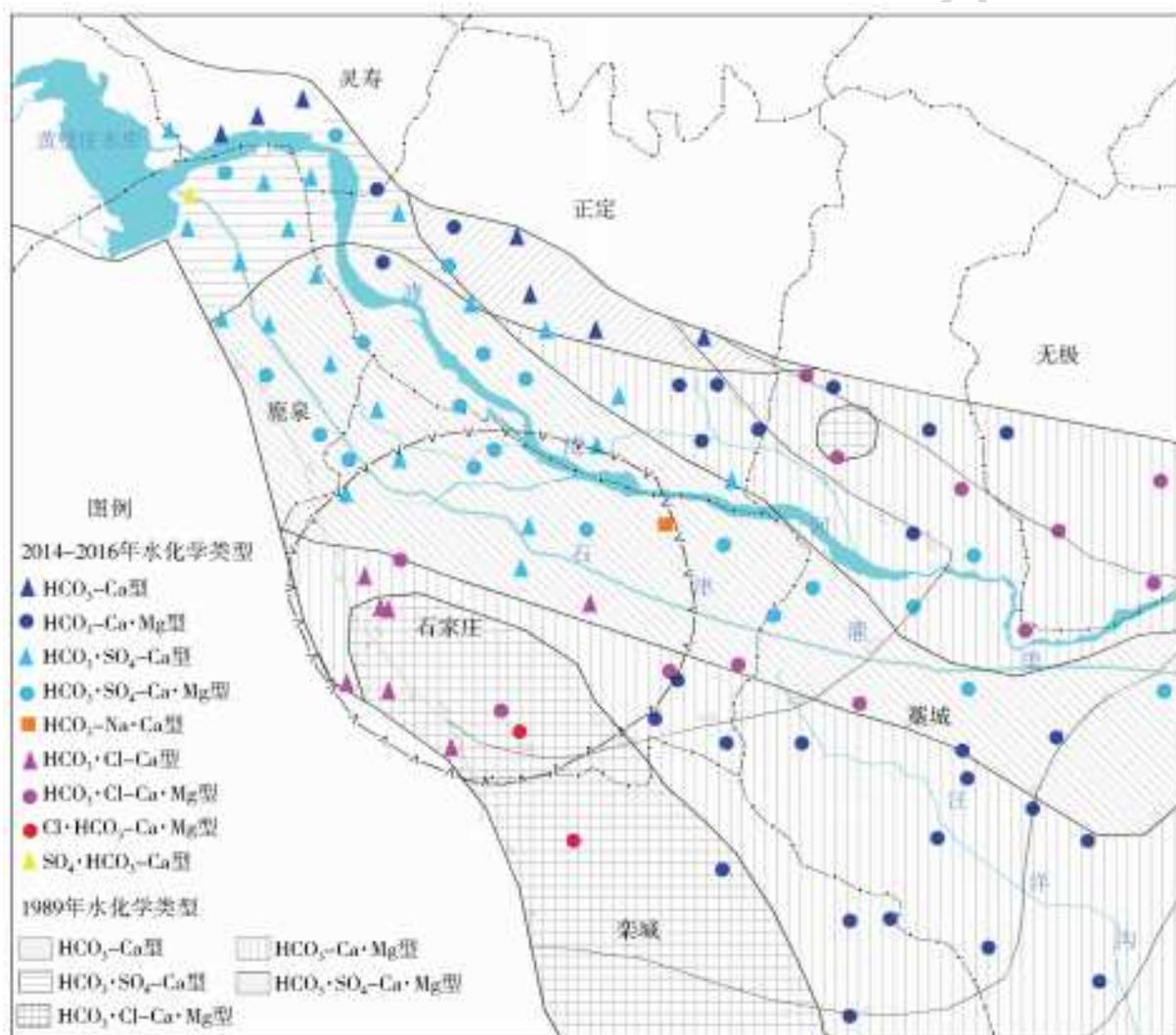
3.2.1 地下水化学空间分布特征

从浅层地下水水化学类型分布图(图 3)上可以看出, HCO_3-Ca ($Ca \cdot Mg$) 型水在全区分布最为广泛, 主要分布在滹沱河冲洪积扇南北两侧, 该类型地

下水受人类活动影响较少,地下水径流条件良好,基本保持天然的化学成分。 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}(\text{Ca} \cdot \text{Mg})$ 型水呈条带状分布于滹沱河冲洪积扇轴部地带,基本沿滹沱河从黄壁庄水库延伸到藁城。该类型水的主要成因是,黄壁庄水库上游的阳泉、井陘煤矿矿坑排水(水化学类型为硫酸型水)进入黄壁庄水库,由于水库坝下渗漏,滹沱河地表水入渗补给地下水,使地下水中硫酸根离子增多,形成 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型水^[16]。黄壁庄水库和水库下游滹沱河河水的水化学类型分别为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型水,进一步证实了该类型水的主要成因。 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Ca}(\text{Ca} \cdot \text{Mg})$ 型水主要分布在滹沱河冲洪积扇顶部的石家庄南部郊区及滹沱河以北的藁城—无极一

带,主要受城市生活污水、工业废水和污灌影响,使地下水中氯离子含量增多,形成 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$ 型水及部分 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3$ 型水。其他水化学类型在研究区内呈零星分布。

研究区内由于大量开采地下水形成区域性地下水降落漏斗,引起地下水动力场和水文地球化学环境的改变,加剧了包气带与含水层中的一系列水文地球化学作用(如离子交换作用、酸性溶滤作用等),使地层中矿物溶解加快,造成地下水中天然化学组分的不断积累。同时,地下水降落漏斗的形成,使漏斗周边人类活动产生的污染物质(如 Cl^-)向漏斗区汇集并不断积累,这也是导致漏斗区内以氯离子为主导的水化学类型分布较为集中的一个重要原因。



注:图中数据引自石家庄地质环境监测报告^[15](1989年数据)

图 3 研究区浅层地下水化学类型分布

Fig. 3 The distribution of shallow groundwater facies in the study area

3.2.2 地下水化学随时间演化特征

随着自然条件的演化和人类活动的影响加剧,石家庄市地下水动力条件发生变化,原来的水岩平衡被打破,造成地下水盐分运移方向和方式改变,使

得研究区浅层地下水水化学特征在过去的几十年中发生了显著地变化^[17]。

为阐明研究区地下水化学演变规律,将本次水化学数据与 1959 年和 1980 年的水化学数据进行对

比。从 Piper 三线图(图 4)可以看出,沿箭头方向,地下水中阴离子出现明显偏移,受人类活动影响较大的氯离子和硝酸根离子增加趋势明显,毫克当量百分比由 10%左右增加至 20%~50%;硫酸根离子毫克当量百分比由 10%左右增加至 30%左右。另外,从总硬度箱型对比图(图 5)来看,1959 年研究区地下水总硬度的均值 260 mg/L,1980 年上升至 317 mg/L,到本次调查地下水总硬度均值已经高达 451 mg/L。从水化学数据的历史变化趋势来看,研究区地下水在向盐化和硬化方向演变。

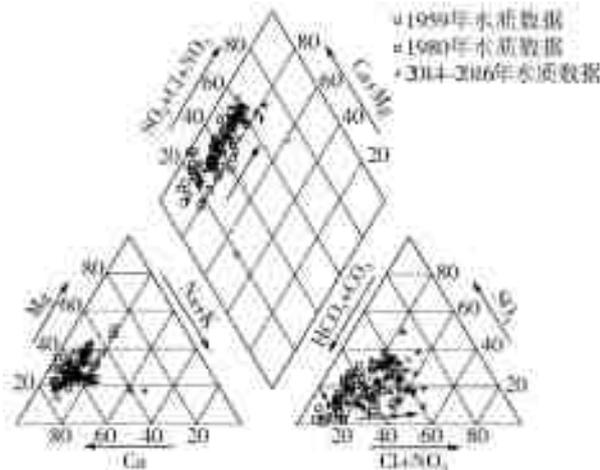


图 4 研究区不同时间地下水 Piper 三线图

Fig. 4 The Piper diagram of groundwater in different periods in the study area

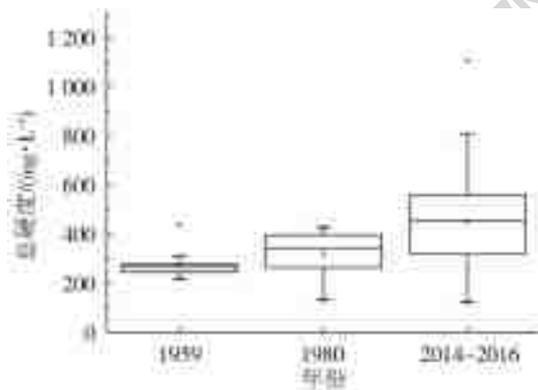


图 5 研究区不同时间地下水总硬度箱型图

Fig. 5 The box plots of total hardness of groundwater in different periods in the study area

据 1959 年《石家庄供水水文地质勘测报告》^[18],研究区地下水在 20 世纪 50 年代、20 世纪 60 年代基本保持天然状态,地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,仅在西部的南铜冶出现 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$ 型水。自 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代以来,随着城镇化深入发展,研究区地下水环境出现剧烈变化。为进一步揭示快速城镇化进程中研究区地下水化学的变化规律,将本次水

化学类型分布图与 1989 年水化学类型分布图进行对比分析(图 3)。1989 年研究区水化学类型相对简单,共有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$ 5 种水化学类型,而本次调查研究区水化学类型演变为 9 种,水化学类型呈现复杂化演变特征。其中滹沱河冲洪积扇顶部的 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水分布范围基本未发生变化,仅一处由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型水演变为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水。原 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水大部分未发生变化,沿冲洪积扇轴部呈条带状分布,但在市区中部演变为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水。原 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水在滹沱河南部的分布区基本未发生改变,但滹沱河北部分布区多半已演变为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$,并呈片状分布。原 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水分布区范围有所扩大,且在个别点上演变为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水。总体来说,研究区水化学类型呈现复杂化的演变特征,且表征天然地下水化学状态的 HCO_3 型水范围逐渐缩小,而受人类活动影响的 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}$ 型水范围逐渐增加。

3.3 地下水水化学影响因素分析

主成分分析可以有效的区分影响地下水化学组分的天然背景因素和人为因素^[19-20]。相关水化学指标归于同一主成分,指示这些指标可能存在同源关系或相近的水文地球化学作用。本研究利用主成分分析对研究区地下水 12 种化学组分进行主成分分析来探讨影响该地区地下水化学的主要因素。利用最大方差正交旋转法对主成分矩阵进行旋转,基于特征值大于 1 的原则,共提取 3 个主控因子,这 3 个因子的累积方差解释率为 79.7%(表 2)。

第一主成分(PC1)的贡献率为 39.453%,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、TH、TDS 的荷载较大,且与 PC1 呈正相关。如前所述,研究区地下水 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要受水岩作用控制。对比 1959 年石家庄地区水质资料^[18], HCO_3^- 均值由 267 mg/L 上升至现在的 300 mg/L, Ca^{2+} 均值由 76 mg/L 上升至 122 mg/L, Mg^{2+} 的均值也由 20 mg/L 上升至 35 mg/L。从总硬度箱型图(图 5)可以看出,总硬度指标从 1959 年至今基本呈显著增高的趋势。虽然这些组份大部分来源于矿物溶解,但其浓度远远大于天然水岩作用下这些组份的浓度,即在人类活动作用下,矿物的溶解作用大大加快。研究区地下水超量开采使地下水动力场发生改变,包气带厚度加大,导致大气降水入渗到地下水的路径延长,淋滤距离变大。同时,生活污水入渗使 pH 条件改变,加上超采地下水形成的人工氧化环境加速了

污水中的有机质分解,产生大量 CO_2 ,使 CO_2 分压增大,进一步加速了矿物溶解作用^[21-22]。另外,超采地下水对硝酸盐浓度也有较大的影响。超采地下水形成降落漏斗,使包气带加厚,改变了水文地球化学环境^[23-24],加速了硝化作用的进行,造成地下水中的硝酸根含量升高。故第一主成分可以解释为地下水超采和水岩作用对地下水化学演化的影响。

表 2 研究区地下水化学组分主成分分析结果

Tab. 2 The principal component analysis results of groundwater parameters

指标	PC1	PC2	PC3
K	0.471	-0.003	0.657
Na	0.169	0.906	0.170
Ca	0.781	0.530	0.045
Mg	0.853	0.290	0.044
NH_4	0.086	0.012	0.862
Cl	0.437	0.756	-0.050
SO_4	0.491	0.711	0.152
HCO_3	0.828	0.312	0.167
NO_3	0.840	0.148	-0.042
NO_2	-0.184	0.178	0.681
TH	0.862	0.481	0.048
TDS	0.735	0.668	0.089
特征值	4.734	3.092	1.735
方差贡献率/%	39.453	25.764	14.459
累积贡献率/%	39.453	65.216	79.676

第二主成分(PC2)的贡献率为 25.764%, Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 与 PC2 表现为较强的正相关关系。 Cl^- 是比较稳定的离子,不受地下水环境中物理、化学和生物等作用的影响,其除了天然来源(如矿物溶解)外,主要来源于污水入渗^[25]。从研究区 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$ 和 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3$ 型水分布区域来看,石家庄市南部和栾城一带为城市污水汇集区和历史污灌区,无极一带为小型皮革厂聚集区,工业和生活污水的不合理排放势必会对地下水造成一定的影响。本研究对滹沱河河道(藁城)和周汉河纳污段进行取样测试,发现随意排放的工业和生活污水中均含高浓度的 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} ,其最高值分别为 961.9、1 275、1 833 mg/L,进一步证实了推测。另外,如上文分析,研究区沿滹沱河冲洪积扇轴部地带呈条带状分布的 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型水主要受上游山区煤矿区的矿坑排水影响。因此,第二主成分可以解释为工业和生活污水下渗对地下水化学演化的影响。

第三主成分(PC3)的贡献率为 14.459%, NH_4^+ 与 PC3 表现为较强的正相关关系, NO_2^- 和

K^+ 与 PC3 表现为中等正相关关系。研究区氨氮检出率相对较低,检出点土地利用类型以养殖场、菜地为主。调查显示,研究区养殖场周围多堆放动物粪便,菜地施肥多以农家肥(即人畜粪便)为主。另外多数氨氮检出点水位埋藏较浅,且临近滹沱河,包气带岩性以砂为主,地下水易受地表污染的影响。故可判断 PC3 与人畜粪便渗滤相关。

4 结 论

(1)研究区地下水化学类型以 HCO_3 和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型水为主,其次为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$ 型水。其中, HCO_3 型水在全区广泛分布, $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型水沿滹沱河冲洪积扇轴部呈条带状分布。受城市生活污水、工业废水和污灌影响, $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$ 型水主要分布于滹沱河冲洪积扇顶部的南部区域及滹沱河以北的藁城一无极一带。通过与历史水质资料对比分析,地下水化学类型的种类由少变多,呈现复杂化的演变特征,且表征天然地下水化学状态的 HCO_3 型水范围逐渐缩小,而受人类活动影响的 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$ 型水范围呈增加趋势。

(2)研究区地下水演化受天然和人为因素双重作用影响,其中地下水超采和水岩作用是该地区地下水演化的主导因素,部分区域地下水化学受工业和生活污水入渗以及粪肥渗滤的影响。南水北调工程的实施对恢复地下水位产生一定的作用,其对地下水化学场的影响将有待于进一步研究。

参考文献(References):

- [1] MORRE W S. The subterranean estuary: a reaction zone of groundwater and seawater [J]. *Mar Chem*, 1999 (65):111-125.
- [2] 李亚松,张兆吉,费宇红,等.河北省滹沱河冲积平原地下水质量及污染特征研究[J]. *地球学报*, 2014, 35(2): 169-176. (LI Y S, ZHANG Z J, FEI Y H, et al. Groundwater quality and contamination characteristics in the Hutuo River Plain Area, Hebei Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35 (2): 169-176. (in Chinese) DOI:10.3975/cagsb.2014.02.07.
- [3] 张宗祜,施德鸿,任福弘,等.论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(2): 168-173. (ZHANG Z H, SHI D H, REI F H, et al. The discussion of the evolution of quaternary groundwater in North China Plain [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(2): 168-173. (in Chinese)
- [4] GUO H M, WANG Y X. Hydrogeochemical processes in shallow quaternary aquifers from the Northern Part of

- the Datong Basin, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19 (1): 19-27. DOI: 10. 1016/S0883-2927 (03) 00128-8.
- [5] 张宗祜, 沈照理, 薛禹群. 华北平原地下水环境演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2000. (ZHANG Z H, SHEN Z L, XUE Y Q. The evolution of groundwater environment in North China Plain [M]. Beijing: The geological press, 2000. (in Chinese))
- [6] 王东胜, 沈照理, 钟佐燊, 等. 石家庄平原地下水化学演化的质量平衡模拟 [J]. *地质论评*, 1997, 43 (4): 434-440. (WANG D S, SHEN Z L, ZHONG Z X, et al. Mass balance modeling of the evolution of groundwater chemistry in the Shijiazhuang Plain [J]. *Geological Review*, 1997, 43 (4): 434-440. (in Chinese))
- [7] 张翠云, 刘文生. 河北平原浅层地下水地球化学演化模拟 [J]. *地学前缘*, 1996 (2): 245-248. (ZHANG C Y, LIU W S. Geochemical evolution simulation of shallow groundwater in Hebei plain [J]. *Geoscience Frontiers*, 1996 (2): 245-248. (in Chinese))
- [8] 王贵玲, 蔺文静, 张发旺. 太行山前平原地下水环境演化规律研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18 (3): 74-77. (WANG G L, LIN W J, ZHANG F W. The environmental evolution of groundwater in Taihang Mountain-foot Plain of North China [J]. *Journal of arid land resources and environment*, 2004, 18 (3): 74-77. (in Chinese))
- [9] 毕二平, 高扬, 刘长礼. 人类活动影响下石家庄市地下水环境质量现状及趋势研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2000 (4): 40-43. (BI E P, GAO Y, LIU C L. The groundwater environmental quality and the trend prediction in Shijiazhuang influenced by human activities [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000 (4): 40-43. (in Chinese))
- [10] ZHANG Q Q, WANG H W, WANG Y C, et al. Groundwater quality assessment and pollution source apportionment in an intensely exploited region of northern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017 (24): 16639-16650. DOI: 10. 1007/s11356-017-9114-2.
- [11] GÜLER C, KURT M A, ALPSLAN M, et al. Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414-415 (none): 435-451. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2011. 11. 021.
- [12] ZHANG B, SONG X, ZHANG Y, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China [J]. *Water Research*, 2012, 46 (8): 0-2748. DOI: 10. 1016/j. wat res. 2012. 02. 033.
- [13] HUANG G X, SUN J C, ZHANG Y, et al. Impact of anthropogenic and natural processes on the evolution of groundwater chemistry in a rapidly urbanized coastal area, South China [J]. *Science of The Total Environment*, 2013, 463-464: 209-221. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2013. 05. 078.
- [14] 张小文, 何江涛, 刘丹丹, 等. 滹沱河冲洪积扇浅层地下水水质外界胁迫作用分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45 (5): 54-62. (ZHANG X W, HE J T, LIU D D, et al. An analysis of the stress effects and methods of the shallow groundwater quality in the Hutuo River alluvial fan [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45 (5): 54-62. (in Chinese) DOI: 10. 16030 /j. cnki. Issn. 1000-3665. 2018. 05. 07.
- [15] 河北省环境水文地质总站. 河北省石家庄地区及石家庄市地质环境监测报告 (1986年-1990年) [R]. 河北省环境水文地质总站, 1991. (EHTHP. Geological environment monitoring report of Shijiazhuang area in Hebei Province, [R]. Environmental hydrogeology team of Hebei Province, 1991. (in Chinese))
- [16] ZHANG Y P, ZHOU A G, ZHOU J, et al. 2015. Evaluating the sources and fate of nitrate in the alluvial aquifers in the Shijiazhuang rural and suburban area, China: Hydrochemical and Multi-Isotopic Approaches. *Water*, 7: 1515-1537. DOI: 10. 3390/w7041515.
- [17] 郭永海. 河北平原地下水环境演化规律及其与人类活动相互关系的研究——以石家庄、衡水、沧州地区为例 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 1994. (GUO Y H. Groundwater environment evolution and its relation with human activities in Hebei plain: a case study of Shijiazhuang, Hengshui and Cangzhou districts [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1994. (in Chinese))
- [18] 曾渊深. 石家庄供水水文地质勘测报告 [R]. 河北省地质局水文地质工程地质大队, 1959. (ZENG Y S. The report of hydrogeological investigation for water supply in Shijiazhuang [R]. Hydrogeology and engineering geology team of hebei geological bureau, 1959. (in Chinese))
- [19] AIUPPA A, BELLOMOS, BRUSCA L, et al. Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano (Mt. Etna, Italy). *Appl Geochem* 2003 (18): 863-82. DOI: 10. 1016/S0883-2927(02)00182-8.
- [20] SINGH KP, MALIK A, SINHA S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti River (India) using multivariate statistical techniques—a case study [J]. *Anal Chim Acta*, 2005, 538: 355-374. DOI: 10. 1016/j. aca. 2005. 02. 006.

(下转第 193 页)

- [9] QIAO RU LI,ZHAO R,CHEN L. Short-term traffic flow forecasting model based on SVM and adaptive spatio-temporal data fusion[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015. DOI:10.11936/bjtxb2014050068.
- [10] 葛赛,赵涛,吴思,等. 基于主成分分析-支持向量机的人工加糙渠道糙率系数预测模型[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 169-174. (GE S, ZHAO T, WU S, et al. Prediction model of roughness coefficient of artificially roughened channels based on principal component analysis-support vector machine [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 169-174. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0084.
- [11] 李波,刘明军,马奕仁,等. 基于平均曲率模态和最小二乘支持向量机的混凝土拱坝损伤识别方法研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 113-118. (LI B, LIU M J, MA Y R, et al. Damage identification of concrete arch dam using mean curvature mode and least squares support vector machine[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(11): 113-118. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2013.11.023.
- [12] 贺先辉. 基于特征学习的目标检测与跟踪技术研究[D]. 成都:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2017. (HE X H. Study on the object detection and tracking based on feature learning[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics (Chinese Academy of Science), 2017. (in Chinese))
- [13] 楼雄伟. 支持向量机的核方法研究及其在森林火灾视频识别中的应用[D]. 杭州:浙江工业大学, 2014. (LOU X W. Research on kernel method for support vector machine and its application in forest fire video recognition[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [14] 董宝玉. 支持向量技术及其应用研究[D]. 大连:大连海事大学, 2016. (DONG B Y. Research on support vector techniques and their applications[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016. (in Chinese))
- [15] 黄正海,苗新河. 最优化计算方法[M]. 北京:科学出版社, 2015: 224. (HUANG Z H, MIAO X H. Optimal calculation method[M]. Beijing: Science Press, 2015: 224. (in Chinese))
- [16] 肖浩波,谷艳昌. 混凝土坝安全监控最小二乘支持向量机模型[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(5): 34-37. (XIAO H B, GU Y C. Monitoring model for concrete dam safety using least square support vector machine [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(5): 34-37. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2013.05.008.
- [17] DAHL G E, YU D, DENG L, et al. Large vocabulary continuous speech recognition with context-dependent DBN-HMMS [C]. 2011. DOI: 10.1109/ICASSP.2011.5947401.
- [18] 李航. 统计学习方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2012: 14, 235. (LI H. Statistical Learning Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 14, 235. (in Chinese))
- [19] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2003: 405. (WU Z R. Safety monitoring theory and its application of hydraulic structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 405. (in Chinese))

(上接第 179 页)

- [21] 丁开宁,郝爱兵,王孟科. 石家庄市地下水污染特征及机理[J]. 水文地质工程地质, 1996(6): 29-32. (DING K N, HAO A B, WANG M K. (The pollution mechanism of groundwater in Shijiazhuang [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1996(6): 29-32. (in Chinese))
- [22] 程东会. 北京城近郊区地下水硝酸盐氮和总硬度水文地球化学过程及数值模拟[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2007. (CHEN D H. The hydrogeochemical process and the numerical simulation of total hardness and nitrogen in groundwater of Beijing urban[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007. (in Chinese))
- [23] 李纯,武强,王欣宝. 人类活动影响下石家庄市浅层地下水环境的演化[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(8). (LI C, WU Q, WANG X B. Environmental evolution of shallow groundwater resulting from intensive human activities in Shijiazhuang City[J]. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2007.08.016.
- [24] 张千千,王慧玮,翟天伦,等. 滹沱河冲洪积扇地下水硝酸盐的污染特征及污染源解析[J]. 水文地质工程地质, 2017(6): 116-123. (ZHANG Q Q, WANG H W, ZHAI T L, et al. Characteristics and source apportionment of groundwater nitrate contamination in the Hutuo River alluvial-pluvial fan regions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017(6): 116-123. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.06.17.
- [25] LIU C Q, LI S L, LANG Y C, et al. Using delta15N-and delta18O-values to identify nitrate sources in karst ground water, Guiyang, Southwest China [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(22): 6928. DOI: 10.1021/es0610129.