

漳滏平原漏斗区地下水溶解性总固体演变特征研究

张希雨, 张光辉, 严明疆

Evolution characteristics of total dissolved solids in the groundwater level funnel area in the Hufu piedmont plain

ZHANG Xiyu, ZHANG Guanghui, and YAN Mingjiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

既地下水采补平衡又冬小麦稳产的探讨

A study of achieving groundwater equilibrium and stable winter wheat yield simultaneously

张雪靓, 任理 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 190-198

格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area

梁乃森, 钱程, 穆文平, 段扬, 朱阁, 张日升, 武雄 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 52-59

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162-171

伊犁河支流大西沟河水与地下水转化关系研究

A study of the conversion between the Daxigou river and groundwater

张琛, 段磊, 刘明明, 李瑛, 宋浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 18-18



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009047

滹滏平原漏斗区地下水溶解性总固体演变特征研究

张希雨^{1,2,3}, 张光辉¹, 严明疆¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 河北地质大学水资源与环境学院/河北省高校生态环境地质应用技术研发中心/
河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心/河北省水资源可持续利用与开发
重点实验室, 河北 石家庄 050031)

摘要: 为揭示滹滏平原漏斗核心区地下水溶解性总固体(TDS)增大对水位下降的响应特征以及驱动 TDS 增大的主要化学组分, 应用地学数理统计分析、时间序列异变分析和 GIS 空间特征分析技术, 分析了近 50 年(1972—2017)研究区地下水水位埋深、TDS 及化学组分变化特征。结果表明: (1)随着水位降幅变化, 地下水 TDS 增幅具有阶段性变化特征, 在漏斗形成初期(1972—1980 年), 地下水水位年均降幅最大, TDS 年均增幅也最大; 中期(1981—2000 年)地下水水位年均降幅最小, TDS 年均增幅也最小; 末期(2001—2017 年)地下水水位年均降幅居中, TDS 年均增幅也居中。(2)随着水位埋深增大, 漏斗核心区地下水水位埋深大小对 TDS 增大影响呈递减效应。漏斗形成初期水位埋深 9.10~23.20 m, 中期水位埋深 13.40~42.28 m, 末期水位埋深 21.41~50.29 m, 漏斗核心区地下水水位年均降幅每增大 1.0 m 条件下, TDS 年均增幅分别增大 21.96, 13.54, 12.32 mg/L。(3)自初期、中期至末期, 地下水中 Na^+ 、 SO_4^{2-} 含量增幅占 TDS 增幅的比率呈不断增大特征, 为漏斗核心区 TDS 增大的主要影响因素。但末期 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 含量增幅占 TDS 增幅的比率合计仍达 65.88%, 对漏斗核心区地下水 TDS 增大仍然发挥至关重要的作用。

关键词: 山前平原; 浅层地下水; 漏斗形成过程; 水位下降; 溶解性总固体; 滹滏平原

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0072-10

Evolution characteristics of total dissolved solids in the groundwater level funnel area in the Hufu piedmont plain

ZHANG Xiyu^{1,2,3}, ZHANG Guanghui¹, YAN Mingjiang¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;
3. School of Water Resources and Environment, Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei Province Collaborative Innovation Center for Sustainable Utilization of Water Resources and Optimization of Industrial Structure, Hebei Province Key Laboratory of Sustained Utilization and Development of Water Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: In order to reveal the response characteristics of total dissolved solids (TDS) increase to groundwater level decline and the main chemical components that drive TDS to increase in the core area of the groundwater level funnel in the Hufu piedmont plain, geological statistical analysis, time series variation analysis and GIS spatial feature analysis technology are applied to analyze the variation characteristics of groundwater level depth,

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-10-15

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0406106); 国家专项基本科研业务费重大创新研究项目(JYYWF20180403)

第一作者: 张希雨(1984-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事水循环与水土环境保护等方面研究。E-mail: zhang_xiyu@126.com

通讯作者: 张光辉(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事区域水循环演化和地下水可持续利用研究。E-mail: huanjing59@163.com

TDS and chemical compositions in the study area in the past 50 years (1972-2017). The results show that (1) the increase of TDS is characterized by stages along with the decrease of groundwater levels. In the initial stage of the funnel formation (1972-1980), the annual decrease of groundwater levels was the largest, and the annual increase of groundwater TDS was also the largest. In the middle period (1981-2000), the average annual decrease of groundwater level was the lowest, and the average annual increase of groundwater TDS was also the lowest. At the end of the period (2001-2017), the average annual decline of groundwater level was in the middle, and the average annual increase of groundwater TDS was also in the middle. (2) The influence of groundwater level on the increasing TDS presents a decreasing effect with the increase of the depth of groundwater level. For each increase of groundwater level of 1.0 m, the average growth rate of groundwater TDS increased by 21.96 mg/L at the initial stage of the funnel formation (the groundwater level buried depth ranged from 9.10 m to 23.20 m), the average growth rate of groundwater TDS increased by 13.54 mg/L at the middle stage (the groundwater level buried depth ranged from 13.40 m to 42.28 m), and the average growth rate of groundwater TDS increased by 12.32 mg/L at the end stage (the groundwater level buried depth ranged from 21.41 m to 50.29 m). (3) The increase of concentrations of Na^+ and SO_4^{2-} in groundwater is the main reason for the increase of TDS in the funnel core area. From the initial stage to the final stage of the funnel formation, with the increasing depth of groundwater level and TDS, the ratio of the increment of Na^+ and SO_4^{2-} in groundwater to the increment of TDS in each stage shows an increasing characteristic. However, the total ratio of the increment of Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- and Cl^- contents in the final stage to the increment of TDS is still 65.88%, which still plays a crucial role in the increasing of groundwater TDS in the funnel core area.

Keywords: piedmont plain; shallow groundwater; funnel forming process; decline of the water table; total dissolved solids; Hufu piedmont plain

滹滏山前平原地处滹沱河山前冲洪积扇带, 含水层介质颗粒粗、孔隙大, 地下水水力梯度较大, 径流更替积极, 溶滤作用强烈。天然条件下, 随溶滤作用长期持续, 该平原含水层中易溶盐类贫乏, 地下水中难溶离子的相对含量较高, 溶解性总固体 (total dissolved solids, TDS) 较低。1970 年之前滹滏山前平原浅层地下水 TDS 普遍小于 0.50 g/L^[1]。

1970 年以来, 滹滏山前平原长期大规模超采地下水, 地下水水位不断下降, 并形成了稳定的地下水水位降落漏斗 (简称“漏斗区”), 最大面积曾达 473.8 km², 漏斗中心水位埋深大于 50 m^[2-6]。与此同时, 该漏斗区地下水 TDS 及其主要化学组分呈增大趋势特征^[7-10], 在漏斗形成中、末期部分区域的地下水 TDS 超过了《地下水质量标准》III 类水标准 (小于 1 000 mg/L)^[11-14]。在地下水漏斗形成过程中, 滹滏山前平原浅层地下水 TDS 增大过程的阶段特征、主要化学组分含量影响 TDS 增大过程以及 TDS 增大的驱动因素, 是值得探讨的科学问题。

本文以滹滏山前平原浅层地下水漏斗区为研究区, 应用地学数理统计分析、时间序列异变分析和

GIS 空间特征分析技术^[15], 从地下水漏斗形成初期、中期和末期三个阶段的水位年均降幅、TDS 年均增幅及不同时期主要化学组分对 TDS 增加贡献率和化学组分比值变化特征等方面探讨, 以期改善和保护滹滏山前平原地下水供水安全提供科学依据。

1 研究区概况

滹滏山前平原地处河北省中部的石家庄地区 (图 1), 地势平坦、西高东低, 地面高程介于 65 ~ 100 m。年均降水量 513.1 mm, 年均蒸发量 1 677 mm, 年均气温 13 ℃。滹沱河位于研究区北部, 自 1980 年以来, 滹沱河常年断流, 仅丰水年上游水库泄洪才有河道过水^[16]。

研究区地下水为松散岩类孔隙水, 自上而下分为 4 个含水岩组。其中, 第 I + II 含水岩组为浅层地下水, 是研究区主要开采层位和本次研究的主体; 第 III、IV 含水岩组是承压含水层组, 厚度较薄、富水性差, 尚未大规模开采。目前, 第 I 含水岩组已疏干, 主要开采第 II 含水岩组。第 I + II 含水岩组的岩性主要为砂砾卵石、砂卵石和中粗砂含砾卵石, 渗透系数 60 ~ 130 m/d。

研究区分为 3 个区。漏斗核心区 (记作 I 区) 为本

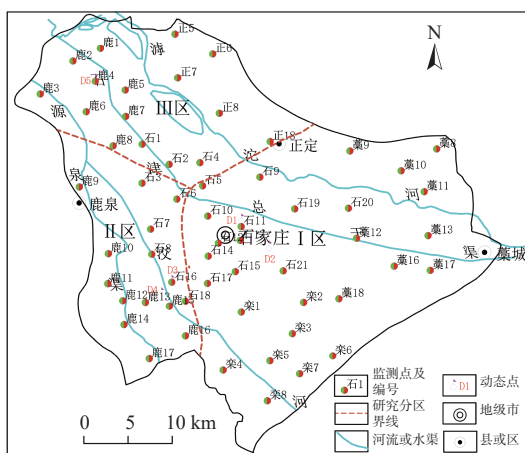


图1 研究区地理位置、研究分区与地下水监测点

Fig. 1 Location of the study area, subregions and groundwater monitoring points

文的目标研究区,位于漏斗区的中心区域(图2)。研究区西部为山区至平原的过渡带,是漏斗核心区上游地下径流侧向主要补给带(记作II区)。研究区西北部为滹沱河冲洪积扇轴部、河道渗漏对浅层地下水的主要补给带(记作III区),如图1所示。II、III区地处倾斜平原的山前带,地下水水位埋藏浅,1980年之前水位埋深不足10 m,含水层以砂砾石层为主,地下水防污性能较弱。

研究区浅层地下水漏斗形成于20世纪60年代末、70年代初,当时较为稳定的漏斗面积为57 km²,漏斗中心水位埋深7.57 m。至1980年,该区漏斗面积扩大为200 km²,中心水位埋深下降至23.27 m。至2000年,该区漏斗面积达368.0 km²,漏斗中心水位埋深41.93 m。研究区地下水漏斗分布面积的峰值出现在

2012年,漏斗面积473.8 km²,漏斗中心水位埋深50.60 m。之后,研究区地下水超采综合治理力度不断加大。2014年开始,南水北调中线通水给该区供水,研究区地下水漏斗面积扩大趋势得到遏止。至2017年底,漏斗面积缩小至96.2 km²,漏斗中心水位埋深回升至45.83 m,2018年区内地下水漏斗消失。在天然条件下,研究区地下水自西北向东南径流;漏斗形成之后,漏斗核心区地下水自漏斗四周向漏斗中心汇流(图2)。

2 数据来源

本研究的数据主要来自国家级、省级监测网地下水动态长期观测和5年期统测资料,以及中国地质调查局地质调查项目“石家庄—西柏坡经济区水文环境地质调查综合研究”(2014—2017年)成果资料。其中时间系列较长并完整的地下水动态监测点61个,I区、II区和III区分别有30,15,16个(图1)。监测指标包括地下水水位、水温、pH值、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、总硬度和TDS等指标。

3 水位埋深变化阶段特征

3.1 初期变化特征

研究区初期地下水水位埋深9.10~23.20 m,如图2(a)所示。I区水位埋深较大,20~25 m的分布面积占研究区总面积的10.99%。水位埋深小于10 m的分布面积占研究区总面积的15.43%,主要分布在II区和III区。水位埋深介于10~20 m的分布面积占研究区总面积的73.58%。

相对1972年,I区地下水水位年均降幅介于

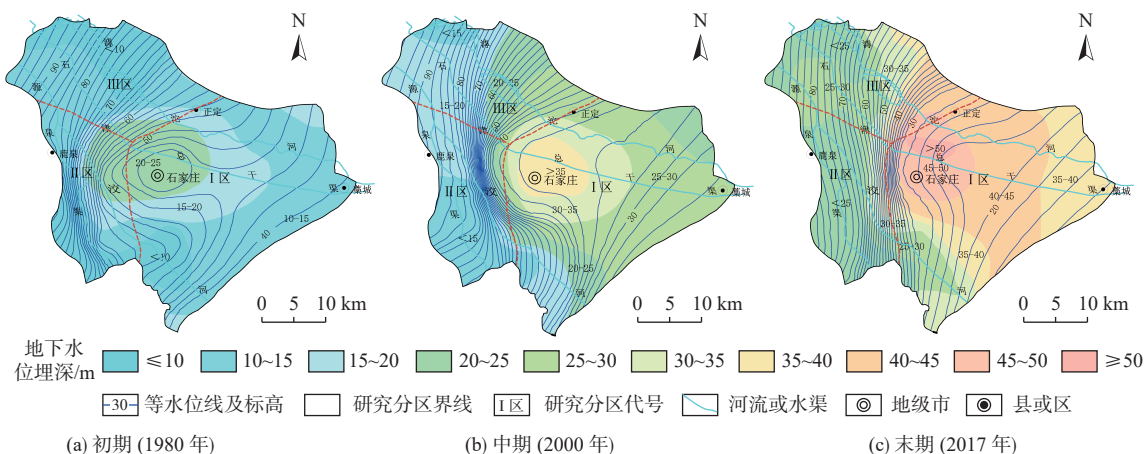


图2 研究区漏斗形成不同时期地下水水位与埋深分布特征

Fig. 2 Distribution of groundwater level and buried depth in different stages of the funnel formation in the study area

0.76 ~ 2.54 m, 地下水水位呈现显著下降特征。Ⅰ区水位年均降幅的最小值、最大值和平均值分别是Ⅱ区、Ⅲ区水位年均降幅的 2.53 ~ 4.47 倍、1.06 ~ 1.47 倍和 1.07 ~ 1.49 倍(表 1)。

表 1 漏斗形成不同时期地下水水位变化特征
Table 1 Characteristics of groundwater level changes in different stages of the funnel formation

漏斗形成阶段	地下水水位年均降幅特征值	Ⅰ区水位年均降幅/m	Ⅱ区		Ⅲ区	
			水位年均降幅/m	与Ⅰ区水位年均降幅的比值	水位年均降幅/m	与Ⅰ区水位年均降幅的比值
初期 (1972—1980年)	最小值	-0.76	-0.30	2.53	-0.17	4.47
	最大值	-2.54	-2.39	1.06	-1.73	1.47
	平均值	-1.68	-1.57	1.07	-1.13	1.49
中期 (1981—2000年)	最小值	-0.30	-0.14	2.14	-0.20	1.50
	最大值	-0.88	-0.87	1.01	-1.04	0.85
	平均值	-0.63	-0.43	1.47	-0.52	1.21
末期 (2001—2017年)	最小值	-0.66	-0.25	2.64	-0.24	2.75
	最大值	-1.15	-1.14	1.01	-1.02	1.13
	平均值	-0.94	-0.56	1.68	-0.75	1.25

注: 负值表示水位下降, 初、中、末期分别相对 1972 年、1980 年和 2000 年地下水水位的年均降幅。

3.2 中期变化特征

研究区中期地下水水位埋深 13.40 ~ 42.28 m, 相对 1980 年水位埋深极小值与极大值, 增大 47.25% ~ 82.24%, 如图 2(b) 所示。水位埋深大于 20 m 的分布面积占研究区总面积的 52.61%, 是初期相同水位埋深分布面积的 4.79 倍。Ⅰ区水位埋深普遍下降至 30 m 之下, 分布面积达 249.6 km²。

Ⅰ区地下水水位年均降幅仍然明显大于Ⅱ区、Ⅲ区(表 1)。Ⅰ区水位年均降幅的最小值、最大值和平均值, 分别是该区初期水位年均降幅的 0.39, 0.35, 0.38 倍, 水位年均降幅明显减小。1981—2000 年淳滹河河道常年断流^[16], Ⅲ区地下水水位年均降幅明显增大, 对Ⅰ区地下水补给能力(影响)显著减弱。

3.3 末期变化特征

研究区末期地下水水位埋深 21.41 ~ 50.60 m; 相对 2000 年水位埋深极小值与极大值, 增大 19.68% ~ 59.78%, 但增大的幅度小于中期, 如图 2(c) 所示。水位埋深大于 35 m 的分布面积占研究区总面积的 53.83%, 是中期相同水位埋深分布面积的 4.11 倍。其中, 水位埋深 35 ~ 45 m 的分布面积 890.3 km², Ⅰ区水位埋深大于 45 m 的分布面积达 135.7 km²。

Ⅰ区地下水水位年均降幅分别是Ⅱ区、Ⅲ区水位年均降幅的 1.01 ~ 2.64 倍和 1.13 ~ 2.75 倍, 明显大于Ⅱ区、Ⅲ区(表 1)。Ⅰ区地下水水位年均降幅的最小值、最大值和平均值分别是该区中期的 2.20, 1.31, 1.49 倍, 水位年均降幅明显增大。

4 TDS 变化阶段特征

4.1 初期变化特征

研究区初期地下水 TDS 为 342 ~ 997 mg/L, Ⅰ区地下水 TDS 为 471 ~ 997 mg/L, 平均值 736 mg/L, 呈现异常高值分布特征, 见图 3(a)。Ⅰ区地下水 TDS 的平均值、最小值和最大值, 与Ⅱ区相应特征值相近, 但明显大于Ⅲ区(表 2), 呈现Ⅲ区(淳滹河河道过水渗漏)补给的冲淡作用效应。

相对 1973 年, Ⅰ区初期地下水 TDS 年均增幅 26.53 ~ 49.51 mg/L, 呈显著增大特征。这一特征与该区水位年均降幅增大趋势特征相同, 见图 2(a)。Ⅰ区地下水 TDS 年均增幅的平均值、最小值和最大值是Ⅲ区相应特征值的 1.54, 5.21, 1.61 倍, 同时普遍大于Ⅱ区相应特征值(表 2), 呈现漏斗核心区因地下水滞流延长水-岩之间作用的效应(进入水中的化学组分累计增多)。

4.2 中期变化特征

研究区中期地下水 TDS 为 462 ~ 1 353 mg/L, 相对 1980 年 TDS 极小值与极大值增大 35.09% ~ 35.71%。Ⅰ区、Ⅱ区地下水 TDS 最大值分别为 1 231, 1 353 mg/L, 出现地下水 TDS 异常高值区。Ⅰ区地下水 TDS 的平均值、最小值和最大值, 全部小于Ⅱ区, 明显大于Ⅲ区(表 2), 呈现Ⅱ区为Ⅰ区地下水 TDS 趋增的物源区特征, 见图 3(b)。

Ⅰ区中期地下水 TDS 年均增幅 2.50 ~ 18.33 mg/L, 年均增幅的最小值、最大值和平均值分别是Ⅰ区初期相应值的 0.09, 0.37, 0.25 倍, 明显小于Ⅰ区初期

TDS 年均增幅。这一特征与 I 区同期水位年均降幅变化特征相同,见图 2(b),表明地下水水位下降幅度大小对 I 区地下水 TDS 的增幅具有一定影响。I 区地下水 TDS 年均增幅的平均值、最小值和最大值,是

Ⅲ区相应特征值的 1.64, 0.95, 2.34 倍,小于Ⅱ区相应特征值(表 2),进一步呈现Ⅱ区为物源输出影响特征(图 2、图 3)。

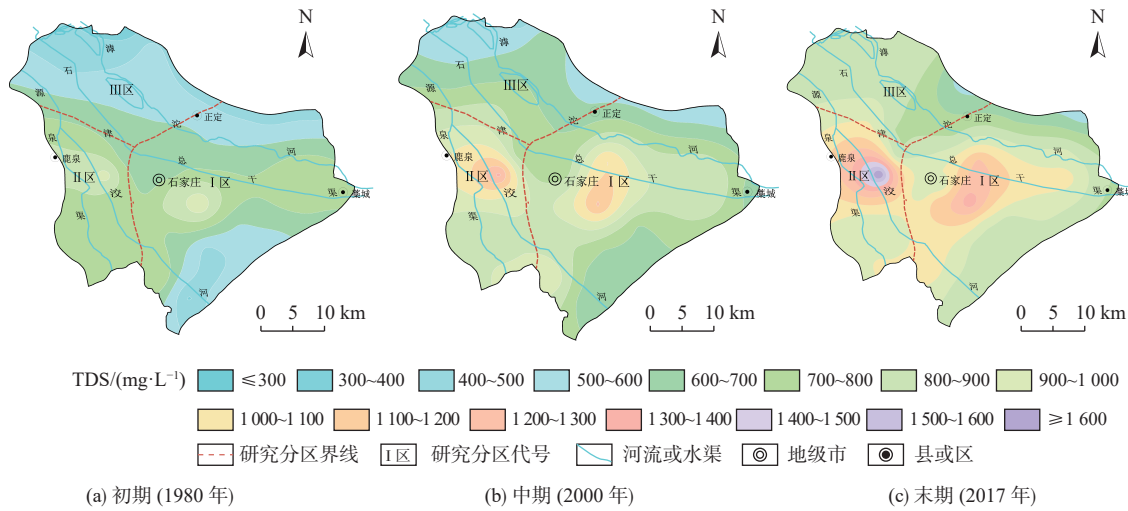


图 3 研究区漏斗形成不同时期地下水 TDS 分布特征

Fig. 3 Characteristics of groundwater salinity distribution in different stages of the funnel formation in the study area

表 2 研究区漏斗形成不同时期地下水 TDS 演变特征

Table 2 Characteristic of groundwater salinity changes in different stages of the funnel formation

漏斗形成阶段	地下水TDS 及年均增幅特征值		I 区TDS	Ⅱ 区		Ⅲ 区	
				TDS	与 I 区的 比值	TDS	与 I 区的 比值
初期 (1973—1980年)	TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最小值	471	634	0.74	342	1.38
		最大值	997	954	1.05	613	1.63
		平均值	736	737	1.00	518	1.42
	年均增幅/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最小值	26.53	24.58	1.08	5.09	5.21
		最大值	49.51	47.86	1.03	30.69	1.61
		平均值	36.04	35.00	1.03	23.34	1.54
中期 (1981—2000年)	TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最小值	625	711	0.88	462	1.35
		最大值	1 231	1 353	0.91	738	1.67
		平均值	913	933	0.98	626	1.46
	年均增幅/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最小值	2.50	3.87	0.65	2.64	0.95
		最大值	18.33	19.97	0.92	7.82	2.34
		平均值	8.88	9.81	0.91	5.40	1.64
末期 (2001—2017年)	TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最小值	828	804	1.03	700	1.18
		最大值	1 379	1 729	0.80	897	1.54
		平均值	1 064	1 087	0.98	804	1.32
	年均增幅/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最小值	4.65	1.51	3.08	3.11	1.50
		最大值	24.32	26.87	0.91	27.14	0.90
		平均值	10.79	10.97	0.98	12.91	0.84

注: 初期、中期和末期地下水TDS年均增幅的初值分别为1973年、1980年和2000年研究区相应监测点地下水TDS监测值。

4.3 末期变化特征

研究区末期地下水 TDS 为 700 ~ 1 729 mg/L , 相对 2000 年 TDS 极小值与极大值增大 27.79% ~ 51.52%。I 区、

Ⅱ区地下水 TDS 最大值分别由中期的 1 231, 1 353 mg/L 增大至 1 379, 1 729 mg/L , TDS 超标(大于 1 000 mg/L) 范围明显扩大, 见图 3(c)。Ⅲ区地下水 TDS 由中期

的 462~738 mg/L 增大至 700~897 mg/L。I 区地下水 TDS 的特征值明显大于 III 区(表 2)。I 区地下水 TDS 的平均值和最大值小于 II 区, 最小值大于 II 区, 表明 I 区地下水 TDS 底值继续上升, 而最大值和平均值的增幅呈减缓特征, 这与水环境综合治理密切相关^[17-18]。

I 区末期地下水 TDS 年均增幅 4.65~24.32 mg/L, 大于该区中期 TDS 年均增幅, 呈显著增大特征, 与该区同期水位年均降幅增大特征相符, 见图 2(c), 即末期 I 区地下水水位年均降幅增大, 该区 TDS 年均增幅也增大。I 区 TDS 年均增幅的平均值和最大值是 II 区的 0.98, 0.91 倍, III 区的 0.84, 0.90 倍, 小于 II 区和 III 区; I 区 TDS 年均增幅的最小值分别是 II 区、III 区的 3.08, 1.50 倍, 大于 II 区、III 区, 进一步呈现末期漏斗核心区地下水 TDS 底值普遍上升的特征(表 2)。

5 TDS 变化影响因素

5.1 水位的影响

自初期、中期至末期, I 区地下水水位埋深、TDS 呈不断增大趋势, 且具有阶段性特征(表 1、表 2)。I 区地下水 TDS 年均增幅与水位年均降幅之间互动特征显著(图 4)。水位年均降幅每增大 1.0 m 条件下,

从总研究期(1972—2017 年)来看, I 区地下水 TDS 年均增幅增大 18.45 mg/L, 见图 4(a); 初期 TDS 年均增幅增大 21.96 mg/L, 这期间水位埋深 9.10~23.20 m, 见图 4(b); 中期 TDS 年均增幅增大 13.54 mg/L, 这期间水位埋深 13.40~42.28 m, 见图 4(c); 末期 TDS 年均增幅增大 12.32 mg/L, 这期间水位埋深 21.41~50.60 m, 见图 4(d)。由此可见, I 区水位埋深不断增大过程中, 水位年均降幅相同变化条件下, 初期、中期和末期地下水 TDS 年均增幅的增大值越来越小。这表明 I 区地下水抵御外部影响的防污性能不断增强, 同时, 因漏斗区内地下水滞流、更替能力变弱而延长含水层中水-岩之间作用, 以至地下水中化学组分的积累量越来越多。

5.2 主要化学组分影响

在初期, I 区地下水 TDS 增大与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量之间相关性显著, 相关系数(R^2)分别为 0.63, 0.56; 与 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量之间相关性较弱(表 3)。

在初期 I 区地下水 TDS 增大过程中, 阳离子组分中 Ca^{2+} 含量增幅占 TDS 增幅的比率最大, 占 14.10%; 其次是 Na^+ ; Mg^{2+} 最小。阴离子组分中 HCO_3^- 含量增幅占 TDS 增幅的比率最大, 占 29.17%; 其次是 Cl^- ; SO_4^{2-}

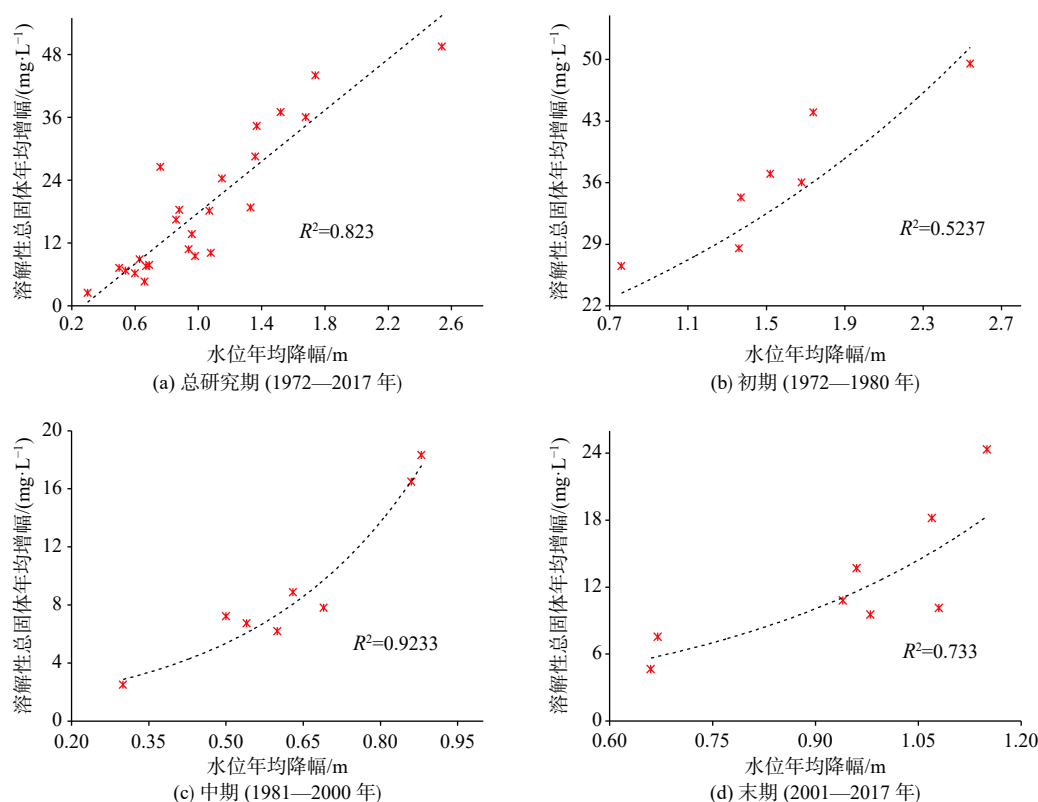


图 4 漏斗核心区地下水 TDS 年均增幅与水位年均降幅互动关系

Fig. 4 Interaction between the increase of groundwater salinity and the decrease of groundwater level in the funnel core area

表 3 漏斗核心区地下水 TDS 与主要化学组分相关性
Table 3 Correlation between TDS and main chemical components in the funnel core area

主要化学组分	与TDS相关系数(R^2)		
	初期	中期	末期
Na ⁺	0.20	0.37	0.16
Ca ²⁺	0.63	0.72	0.68
Mg ²⁺	0.56	0.55	0.38
Cl ⁻	0.22	0.37	0.37
SO ₄ ²⁻	0.16	0.23	0.04
HCO ₃ ⁻	0.20	0.18	0.17

占比率最小(表 4)。由此可见,初期地下水中 Ca²⁺、HCO₃⁻含量增加是 TDS 增大的主要因素;Cl⁻和 SO₄²⁻含量增幅合计占 TDS 增幅的 46.47%,发挥了不可忽视的作用。

在中期, I 区地下水 TDS 增大仍然与 Ca²⁺、Mg²⁺

含量之间呈较显著相关特征,相关系数(R^2)分别为 0.72, 0.55;与 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻和 HCO₃⁻含量之间相关性仍然较弱。相对初期,地下水 TDS 增大与 HCO₃⁻含量之间相关性减弱,相关系数(R^2)由初期的 0.20 减小为 0.18;地下水 TDS 增大与 Ca²⁺、Na⁺、Cl⁻和 SO₄²⁻含量之间相关性明显增强,相关系数(R^2)分别由初期的 0.63, 0.20, 0.22, 0.16 增大为中期的 0.72, 0.37, 0.37, 0.23(表 3)。

在中期 I 区地下水 TDS 增大过程中,阳离子组分中 Ca²⁺含量增幅占 TDS 增幅的比率仍然最大,占 13.86%,但小于初期的占比率;Na⁺占比率相对初期呈明显增大特征;Mg²⁺占比率相对初期呈减小特征。阴离子组分中,SO₄²⁻占比率由初期的 21.63% 增大为中期的 23.60%,呈增大特征;HCO₃⁻、Cl⁻占比率相对初期呈减小特征(表 4)。

表 4 不同时期地下水 TDS 增幅中主要化学组分增幅贡献比率

Table 4 Variation characteristics of the increment contribution ratio of main chemical components in groundwater salinity increment in different periods

漏斗形成阶段	水化指标	TDS	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	化学组分含量比值			
									r_1	r_2	r_3	r_4
初期(1972—1980年)	增幅/(mg·L ⁻¹)	324	17	45	16	94	70	80	2.21	0.28	0.26	0.30
	占TDS增幅比率/%	/	5.14	14.10	5.13	29.17	21.63	24.84				
中期(1981—2000年)	增幅/(mg·L ⁻¹)	175	11	24	8	49	41	42	1.89	0.33	0.28	0.35
	占TDS增幅比率/%	/	6.27	13.86	4.46	27.89	23.60	23.93				
末期(2001—2017年)	增幅/(mg·L ⁻¹)	151	15	20	6	40	37	33	1.45	0.42	0.44	0.43
	占TDS增幅比率/%	/	9.98	13.07	4.17	26.68	24.14	21.96				

注: r_1 为(Ca²⁺+Mg²⁺)和SO₄²⁻当量浓度比值, r_2 为Na⁺和Ca²⁺当量浓度比值, r_3 为SO₄²⁻和HCO₃⁻当量浓度比值, r_4 为Na⁺和SO₄²⁻当量浓度比值。

在末期, I 区地下水 TDS 增大与 Ca²⁺含量之间呈较显著相关特征,相关系数(R^2)为 0.68。相对中期,末期地下水 TDS 增大与 Na⁺、Mg²⁺含量之间相关性减弱,相关系数(R^2)分别由 0.37, 0.55 减小为 0.16, 0.38。地下水 TDS 增大与 Cl⁻含量之间相关性仍然较强,相关系数(R^2)为 0.37;与 SO₄²⁻和 HCO₃⁻含量之间相关性进一步减弱,相关系数(R^2)分别由中期的 0.23, 0.18 减小为 0.04, 0.17(表 3)。

在末期 I 区地下水 TDS 增大过程中,阳离子组分中 Ca²⁺含量增幅占 TDS 增幅的比率最大,占 13.07%,但相对中期进一步减小;Na⁺占比率相对中期进一步增大;Mg²⁺占比率由中期 4.46% 减小为 4.17%。阴离子组分中,SO₄²⁻占比率由中期的 23.60% 增大为 24.14%,呈进一步增大特征;HCO₃⁻、Cl⁻占比率相对中期呈进一步减小特征(表 4)。

自初期、中期至末期, I 区地下水 TDS 增大与

Ca²⁺、Mg²⁺含量之间相关性显著,相关系数较大;与 HCO₃⁻含量之间相关性较弱,但相关性保持稳定。这表明 I 区地下水仍基本保持山前平原 HCO₃—Ca 型、HCO₃—Ca·Mg 型水的水化学特征。但由于地下水中 Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻含量的不断增大,这种特征越来越不显著。

自初期、中期至末期,在 I 区地下水 TDS 趋增过程中,Na⁺含量增幅占 TDS 增幅的比率由初期的 5.14%、中期的 6.27% 增大至末期的 9.98%,SO₄²⁻占比由初期的 21.63%、中期的 23.60% 增大至末期的 24.14%,两者占比呈增大趋势。由此可见,地下水中 Na⁺、SO₄²⁻含量增幅不断增大是 I 区地下水 TDS 增大的重要驱动因素。地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻和 Cl⁻占比呈减小特征,末期四者合计占比率相对初期减少 11.17%,但末期四者占比合计仍达 65.88%。它们在 I 区地下水 TDS 增大过程中仍发挥至关重要作用(表 4)。

从地下水主要化学组分含量的比值来看,(Ca²⁺+

$\text{Mg}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ 比值(r_1)由初期的 2.21、中期的 1.89,至末期减少为 1.45; $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值(r_2)、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 比值(r_3)和 $\text{Na}^+/\text{SO}_4^{2-}$ 比值(r_4)从初期、中期至末期都呈增大特征(表 4)。由此进一步表明,随着 I 区水位埋深不断增大,地下水中 Na^+ 、 SO_4^{2-} 含量增幅的不断增大对 TDS 增大发挥了驱动作用。

由于 Na^+ 、 SO_4^{2-} 作用不断增强,改变了地下水化学场的原有水-岩作用平衡,环境介质中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等组分进一步溶入地下水中。因而, I 区地下水 TDS 随着水位埋深不断增大而增大。

5.3 水动力条件与人类活动的影响

自 1972 年以来, I 区水力梯度显著变缓导致地下水滞流,以至含水层组中水-岩作用时间不断增长和补给更新水量不断减少^[19-24](记作 A 类因素);上游的 II 区、III 区城镇化程度、洗煤及煤化工等产业结构和规模,以及滹沱河沿岸灌溉农田施用化肥农药种类和数量等不断变化^[25-29](记作 B 类因素)。从初期、中期至末期, A 类因素对 I 区地下水中化学组分和 TDS 增大的影响强度不断增大;随着研究区水位埋深不断增大,地下水抵御外部影响的防污性能不断增强,因而 B 类因素——地表人类活动(工业、农业、生活等)对地下水中化学组分和 TDS 增大的影响强度不断减弱。综合分析可知,初期 B 类因素的影响强、A 类因素的影响较弱;中期 A、B 类因素的影响都较强;末期 A 类因素的影响强、B 类因素的影响较弱。

6 结论

自 20 世纪 70 年代初滹沱山前平原形成稳定的地下水漏斗以来,随着地下水水位不断下降,漏斗核心区地下水 TDS 呈不断增大过程,具有如下特征:

(1)随地下水水位年均降幅的变化,漏斗核心区地下水 TDS 年均增幅呈现阶段性变化特征。初期地下水水位年均降幅最大, TDS 年均增幅也最大;中期地下水水位年均降幅最小, TDS 年均增幅也最小;末期地下水水位年均降幅居中, TDS 年均增幅也居中。

(2)随水位埋深增大,漏斗核心区地下水水位埋深大小对 TDS 增大影响呈现递减效应。漏斗核心区地下水水位年均降幅每增大 1.0 m,初期、中期和末期 TDS 年均分别增大 21.96, 13.54, 12.32 mg/L。

(3)自初期、中期至末期,漏斗核心区地下水中 Na^+ 、 SO_4^{2-} 含量增量占 TDS 增幅的比率呈不断增大的特征,是 TDS 增大的主要驱动因素。

(4)水动力条件与人类活动对漏斗核心区地下水 TDS 增大的影响强度具有阶段性特征。初期人类活动影响强、水动力条件影响较弱;中期人类活动、水动力条件的影响都较强;末期水动力条件的影响强、人类活动的影响较弱。

参考文献 (References):

- [1] 李凤林,杨先锋,杨天申,等. 石家庄城市供水水文地质勘测报告[R]. 石家庄:河北省地质局水文地质观测总站, 1965. [LI Fenglin, YANG Xianduo, YANG Tianshen, et al. Hydrogeological survey report of Shijiazhuang City water Supply[R]. Shijiazhuang: Hydrogeological Observation Station of Hebei Geology Bureau, 1965. (in Chinese)]
- [2] 张光辉,费宇红,张行南,等. 滹沱河流域平原区地下水流场异常变化与原因[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 747 - 752. [ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, ZHANG Xingnan, et al. Abnormal variation of groundwater flow field in plain area of Hutuo River basin and analysis on its cause[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 747 - 752. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王金哲,张光辉,母海东,等. 人类活动对浅层地下水干扰程度定量评价及验证[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1445 - 1451. [WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, MU Haidong, et al. Quantitative valuation and validation of the influence degree of human activities on shallow groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1445 - 1451. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 冯慧敏,张光辉,王电龙,等. 近50年来石家庄地区地下水流场演变驱动力分析[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 180 - 186. [FENG Huimin, ZHANG Guanghui, WANG Dianlong, et al. Analysis on driving force for groundwater flow field evolution in Shijiazhuang Area in recent 50 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 180 - 186. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 冯慧敏. 石家庄平原区地下水流场演变特征与尺度效应[D]. 北京:中国地质科学院, 2015. [FENG Huimin. Groundwater flow field evolution characteristic and size effect of Shijiazhuang plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张光辉,田言亮,王电龙,等. 冀中山前农业区地下水位强升降特征与机制[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 227 - 232. [ZHANG Guanghui, TIAN Yanliang,

- WANG Dianlong, et al. Sharp decline and sluggish rise of shallow groundwater level in the Central Hebei piedmont agricultural region[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(2): 227 – 232. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张千千, 王慧玮, 王龙, 等. 滹沱河冲洪积扇地区地下水硬度升高的机理研究[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(增刊2): 62 – 68. [ZHANG Qianqian, WANG Huiwei, WANG Long, et al. Increasing mechanism of groundwater total hardness (TH) in the hutuo river alluvial-pluvial fan[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(Sup2): 62 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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): 48 – 56. [ZHANG Xiaowen, HE Jiangtao, LIU Dandan, 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): 48 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王磊, 何江涛, 张振国, 等. 基于信息筛选和拉依达准则识别地下水主要组分水化学异常的方法研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 919 – 929. [WANG Lei, HE Jiangtao, ZHANG Zhenguo, et al. Research on the method to identify the outliers of the main components of groundwater based on the information screening coupled with PauTa criterion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 919 – 929. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 单晓杰, 何江涛, 张小文, 等. 基于人为活动影响识别的区域地下水水质演化预测: 以石家庄地区为例[J]. *现代地质*, 2020, 34(1): 189 – 198. [SHAN Xiaojie, HE Jiangtao, ZHANG Xiaowen, et al. Prediction of regional groundwater quality evolution affected by human activities: A case study of Shijiazhuang area[J]. *Geoscience*, 2020, 34(1): 189 – 198. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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 Yasong, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, 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 with English abstract)]
- [12] 程中双. 强烈开采含水层的水化学和同位素响应及其水文地质指示: 以石家庄山前平原为例[D]. 北京: 中国地质科学院, 2015. [CHENG Zhongshuang. Chemical and isotopic response to intensive groundwater exploitation and its implications: A case study in the piedmont plain, Shijiazhuang[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 田夏. 滹沱河超采区地下水水化学演变特征与模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. [TIAN Xia. Study on the chemical characteristics and simulation of groundwater in overdrafted zone of the Hutuo River Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [14] YAN M J, WANG Q, TIAN Y L, et al. The dynamics and origin of groundwater salinity in the northeast Hufu Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(16): 1 – 15.
- [15] RINA K, SINGH C K, DATTA P S, et al. Erratum to: Geochemical modelling, ionic ratio and GIS based mapping of groundwater salinity and assessment of governing processes in Northern Gujarat, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(5): 2421 – 2422.
- [16] 费宇红, 陈树娥, 刘克岩. 滹沱河断流区水环境劣变特征与地下调蓄潜力[J]. *水利学报*, 2001(11): 41 – 44. [FEI Yuhong, CHEN Shue, LIU Keyan. characteristics of inferior variation of water environment in Hutuohe River dried-up area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(11): 41 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李婉珠. 石家庄市地下水环境演化规律研究[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2009. [LI Wanzhu. Research of environmental evolution of groundwater of Shijiazhuang City[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张学礼. 滹沱河流域水环境变迁与区域社会发展研究(1949-2009)[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2018. [ZHANG Xueli. Research on water environmental transition and regional social development in Hutuo River basin(1949-2009)[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王晓玮, 邵景力, 王卓然, 等. 西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究: 以民勤盆地为例[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 17 – 24. [WANG Xiaowei, SHAO Jingli, WANG Zhuoran, et al. A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 17 – 24. (in Chinese

- with English abstract)]
- [20] 田夏,李亚松,费宇红,等. 漳沱河超采区地下水硫酸盐来源识别及迁移转化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2583 - 2589. [TIAN Xia, LI Yasong, FEI Yuhong, et al. Sulfate source identification, migration and transformation in the groundwater over-exploited area of the hutuo river basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(7): 2583 - 2589. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张小文,何江涛,彭聪,等. 地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3225 - 3234. [ZHANG Xiaowen, HE Jiangtao, PENG Cong, et al. Comparison of identification methods of main component hydrochemical anomalies in groundwater: a case study of Liujiang basin[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3225 - 3234. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王水献,王云智,董新光. 焉耆盆地浅层地下水埋深与TDS时空变异及水化学的演化特征[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 90 - 93. [WANG Shuixian, WANG Yunzhi, DONG Xinguang. The spatio-temporal variation of shallow groundwater TDS, depth and it's evolvement characteristic of water chemistry in Yanqi basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5): 90 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 赵江涛,周金龙,高业新,等. 新疆焉耆盆地平原区地下水溶解性总固体时空演化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 120 - 125. [ZHAO Jiangtao, ZHOU Jinlong, GAO Yexin, et al. Spatial-temporal evolution of total dissolved solids of groundwater in plain area of Yanqi Basin, Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(5): 120 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王雨山,李戌,李海学,等. 海原盆地地下水咸化特征和控制因素[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 10 - 17. [WANG Yushan, LI Shu, LI Haixue, et al. Groundwater salinization characteristics and controlling factors in the Haiyuan Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 10 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 章旭,郝红兵,刘康林,等. 西藏加查象牙泉水文地球化学特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 1 - 9. [ZHANG Xu, HAO Hongbing, LIU Kanglin, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation of the Ivory spring in Jiacha County of Tibet[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张千千,王慧玮,翟天伦,等. 漳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, 44(6): 110 - 117. [ZHANG Qianqian, WANG Huiwei, ZHAI Tianlun, et al. Characteristics and source apportionment of groundwater nitrate contamination in the Hutuo River alluvial-pluvial fan regions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 110 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [27] YI Q, STEWART M. Prediction of groundwater quality trends resulting from anthropogenic changes in southeast Florida[J]. *Ground Water*, 2018, 56(1): 46 - 61.
- [28] 张光辉,刘中培,连英立,等. 河北平原地下水水质变及农药化肥施用量变化影响[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(2): 50 - 54. [ZHANG Guanghui, LIU Zhongpei, LIAN Yingli, et al. Variation of groundwater quality and influence of pesticide and fertilizer on Hebei plain[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(2): 50 - 54. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 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. [ZHANG Ying, LIU Chunyan, WANG Jincui, 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. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳