

基于多元统计方法的新疆巴里坤盆地地下水 水化学特征及其影响因素分析

丁启振^{1,2,3}, 周金龙^{1,2,3}, 曾妍妍^{1,2,3}, 雷米^{1,2,3}, 孙英^{1,2,3}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 多元统计方法能同时对多个变量进行分析研究, 是一种可用于地下水水化学特征相关分析的有效工具。基于12组水样的9项指标, 运用多元统计方法系统分析了新疆巴里坤盆地地下水水化学特征及其影响因素。结果表明: 该地区内主要分布低矿化度的 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水(占总取样点的33.3%)和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}$ 型水(占总取样点的25.0%), 地下水中各离子的空间变异性为中等以上。地下水水化学特征主要受以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)为主要荷载变量的蒸发浓缩作用和以 HCO_3^- 为主要荷载变量的溶滤作用影响, 两种作用的贡献率分别达76.17%和14.87%。研究结果可为当地地下水资源的保护和可持续利用提供科学依据。

关键词: 地下水; 水化学特征; 多元统计方法; 新疆巴里坤盆地

中图分类号: TV211.1; P332.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)05-0078-06

Analysis of hydrochemical characteristics and influencing factors of groundwater in the Balikun Basin of Xinjiang based on multivariate statistical method

DING Qizhen^{1,2,3}, ZHOU Jinlong^{1,2,3}, ZENG Yanyan^{1,2,3}, LEI Mi^{1,2,3}, SUN Ying^{1,2,3}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: Multivariate statistical method is an effective tool for the study of hydrochemical characteristics of groundwater, which can be used to analyze multiple variables simultaneously. Based on nine indexes of 12 groundwater samples, the chemical characteristics and influencing factors of groundwater in the Balikun Basin of Xinjiang were systematically analyzed using multivariate statistical method. The results show that $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ water (account for 33.3% of the samples) and $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}$ water (account for 25.0% of the samples) with low salinity are mainly distributed in the study area, and the spatial variability of various ions in the groundwater is above medium. The chemical characteristics of groundwater are mainly affected by evaporation and concentration of the main load variables of Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , total hardness (TH) and dissolved total solids (TDS), as well as the leaching of the main load variable HCO_3^- , with the contribution rates of 76.17% and 14.87%, respectively. The results can provide a theoretical support for the protection and sustainable utilization of local groundwater resources.

Key words: groundwater; hydrochemical characteristics; multivariate statistical method; the Balikun Basin of Xinjiang

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-26

基金项目: 中国地质调查局项目“西北地区主要城市地下水污染调查与评价”(1212011220982)

作者简介: 丁启振(1998-), 男, 山东郓城人, 硕士研究生, 主要从事干旱区地下水水质演化相关工作。

通讯作者: 周金龙(1964-), 男, 浙江龙游人, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区地下水资源评价与保护、水土环境地球化学等研究工作。

1 研究背景

地下水资源是水资源的重要表现形式,在西北干旱地区,地下水具有举足轻重的作用,往往是许多地区主要甚至唯一的可用水源^[1]。在漫长的地质演化过程中,地下水与其流经的岩土体之间的水岩相互作用不断影响和改变着区域地下水环境^[2]。因此,研究地下水水化学特征及其影响因素,可以更好地揭示地下水与环境间的相互影响^[3]。近年来,国内外学者采用数理统计、稳定同位素^[4-5]、Piper 三线图^[6]、Gibbs 图^[7]、矿物饱和指数^[8]、离子比分析^[9]、水文地球化学模拟^[10]等方法,对新疆哈密盆地、柴窝堡盆地、吐-哈盆地、焉耆盆地、塔城盆地和准噶尔盆地的地下水水化学类型、分布特征、形成作用和影响因素展开研究,以探明水体起源、成因与相互转化关系,从而帮助人们重建水文地质史^[11]。对于新疆盆地地下水水化学特征的研究,学者多采用传统的水化学特征分析方法,而涉及多元统计方法的研究成果少见,多元统计方法是一种广泛用于研究水质时空变化和污染源识别的有效工具^[12],可同时对多个变量进行分析研究。

巴里坤盆地位于新疆维吾尔自治区巴里坤哈萨克自治县境内,隶属哈密市。栾凤娇等^[13]于2011年在数理统计的基础上,运用离子比例系数、Gibbs 图和 Piper 三线图等方法,首次针对巴-伊盆地开展了地下水水化学特征的研究;2011年,栾凤娇等^[14]以单因子评价方法为基础,运用综合评价方法评价了巴-伊盆地地下水水质现状。总的来看,目前针对巴里坤盆地地下水水化学特征方面的系统研究较少,且多为简单的双变量分析,忽略了变量间可能存在的相关性。因此本文在前人研究成果的基础上,重点运用多元统计方法对该地区地下水中的主要组分(离子组分和非离子组分)进行分析研究,以期当地地下水资源的保护及可持续利用提供科学依据。

2 水样采集与研究方法

2.1 研究区概况

巴里坤盆地(43°20'~43°50'N,92°30'~93°40'E)是由巴里坤山、莫钦乌拉山和萨尔乔克西山所包围的小型地堑型盆地,呈西北走向,宽为20~30 km。地势呈西低东高的趋势,地貌形态包括南北高山区、西部低山区和中部平原区,巴里坤湖为海拔最低点^[15]。巴里坤县属典型大陆性温带凉干旱气候,冷季严

寒,暖季凉爽,干旱雨少,蒸发强烈。年平均降水量为230.5 mm,年蒸发量为1 622.0 mm,年平均气温为2.7℃,全年日照时数为3 170 h。区内主要河流为柳条河,发源于东山^[16]。

盆地主要被第四系沉积物覆盖,厚度从北向南快速增厚,盆降中心位于盆地东侧;第四系沉积以洪积砾石为主,夹少量砂层^[17];赋存有第四系单一结构孔隙潜水和第四系多层结构孔隙潜水-承压水^[18]。地下水埋深一般为2~100 m,埋深小于5 m的区域主要位于柳条河下游的巴里坤县至北部山前一带(图1)。盆地地下水主要接受南部冰山融雪水补给、山地基岩裂隙水补给、中部农田井灌回归水补给等;地下水径流方向和地形坡向基本一致,总体上由山前向盆地汇水中心汇聚^[18];地下水排泄主要通过潜水蒸发、人工开采(为地下水弱开采区)及泉水溢出等方式进行。区内有我国三大硫化碱生产基地之一的巴里坤湖,盛产芒硝和食盐,矿产资源丰富^[19]。巴里坤盆地平原区概况见图1。

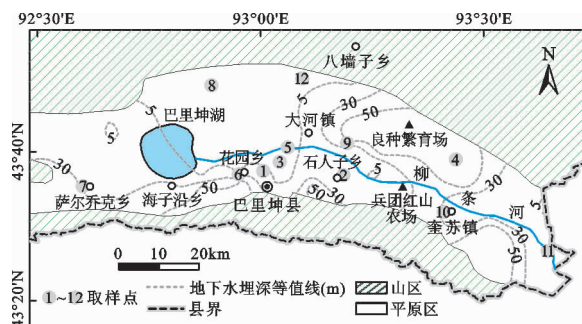


图1 巴里坤盆地平原区概况及地下水取样点分布

2.2 地下水水样采集与测定

在收集研究区水文地质资料的基础上,于2015年7~9月对巴里坤盆地平原区进行地下水水样采集,共采集12组水样,采样点分布见图1。每组水样取3个样本(采集现场空白样、空白加标样和平行样)。采样点控制面积为1 986 km²,布设密度为6.04眼/10³ km²,完全符合《地下水监测规范》(SL 183—2005)内陆盆地平原区弱开采区地下水水质监测站的布设密度为0.4~0.8眼/10³ km²的要求。

在水样采集过程中,按照《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164—2004)严格进行取样和保存工作。取样前先润洗3次聚乙烯塑料瓶,后将标签粘贴好,密封并冷藏。除pH、水温及电导率等多项现场测试指标均采用德国HI9829高精度便携式多参数综合水质测定仪测定外,其余指标由新疆地矿局第二水文地质工程地质大队化验室完成测定。采用

火焰原子吸收分光光度法测定 K^+ 和 Na^+ ; 采用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、总硬度 TH(以 $CaCO_3$ 计); SO_4^{2-} 的测定方法为硫酸钡比浊法, Cl^- 的测定方法为硝酸银容量法, 其检测下限均为 0.05 mg/L; 溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)检出下限为 0.10 mg/L, 使用电子天平 MP8-1 测定。对样品测试结果进行误差分析, E 均介于 $\pm 5\%$ 。

2.3 研究方法

2.3.1 因子分析 因子分析(factor analysis)是利用数学降维的思想, 以几个因子来描述多个指标或因素之间关系的一种统计方法^[20-21]。因子分析针对不同的研究对象, 分为 R 型因子分析和 Q 型因子分析^[22], 前者与后者分别将变量和样本作为研究对象。本文选用 R 型因子分析方法。

2.3.2 聚类分析 聚类分析(cluster analysis)是将变量或样品依据它们在性质上的亲疏及相似程度进行分类的方法^[23]。聚类分析划分为 R 型聚类分析和 Q 型聚类分析^[24], 前者与后者分别将变量和样本作为处理对象。本文对研究区地下水水样进行 R 型聚类分析时, 选取的是平方欧式距离度量标准和离差平方和算法。

3 结果与分析

3.1 地下水水化学特征分析

选取巴里坤盆地 12 组地下水水样中检出率高且存在超标的 9 项水化学指标进行统计, 结果见表 1。由表 1 可以看出: (1) 该地区内地下水中 TDS 范围为 244.0 ~ 2 060.0 mg/L, 均值为 579.7 mg/L。根据 TDS 可判断地下水的咸淡类型^[25], 10 组淡水($TDS < 1\ 000$ mg/L)水样(约占总取样点的 83.3%)主要位于柳条河两岸强补给带(地下水埋深 > 5 m), 2 组微咸水($1\ 000$ mg/L $< TDS < 3\ 000$ mg/L)水样(约占总取样点的 16.7%)主要位于巴里坤湖东北部山前弱补给带(地下水埋深 < 5 m)。(2) 总硬度(total hardness, TH)范围为 157.1 ~ 706.6 mg/L, 均值为 252.1 mg/L。依据 TH 可区分地下水的软硬程度^[26], 其区分类型为极硬水($TH > 450$ mg/L)、硬水(300 mg/L $< TH < 450$ mg/L)和微硬水(150 mg/L $< TH < 300$ mg/L), 其中有 10 组微硬水水样(占总取样点的 83.3%), 其空间分布与淡水相似; 硬水、极硬水水样各 1 组(共占总取样点的 16.7%), 两者空间分布与微咸水相似。由此可见, 该区淡水与微硬水赋存环境相似。(3) 根据地下水组分均值可知, 阳离子

浓度的大小排序为 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$, 阴离子浓度的大小排序为 $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$ 。

变异系数(coefficient of variation, CV)是衡量数据间变异程度的一项指标^[27]。由表 1 可知, 所有指标的变异系数变化范围为 0.3 ~ 1.8, 说明空间变异性为中等以上。其中表现出强变异性($CV \geq 1$)的指标包括 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 TDS 4 项, 其余指标均表现为中等变异性($0.1 < CV < 1$)。因此, 地下水水化学指标含量表现出相对强的离散性, 有必要进行聚类分析。

表 1 巴里坤盆地地下水水样主要水化学指标统计结果

指标	极小值/ (mg · L ⁻¹)	极大值/ (mg · L ⁻¹)	均值/ (mg · L ⁻¹)	标准差/ (mg · L ⁻¹)	变异 系数
K^+	1.2	6.0	2.2	1.3	0.6
Na^+	18.2	432.0	102.1	139.1	1.4
Ca^{2+}	32.5	214.6	74.1	47.4	0.6
Mg^{2+}	6.1	41.4	16.3	11.4	0.7
Cl^-	5.3	496.3	79.1	141.8	1.8
SO_4^{2-}	48.1	775.6	183.9	244.7	1.3
HCO_3^-	118.3	342.4	181.5	60.8	0.3
TH	157.1	706.6	252.1	156.1	0.6
TDS	244.0	2060.0	579.7	580.8	1.0

基于 Grapher11.0 软件绘制 2015 年巴里坤盆地地下水 Piper 三线图, 如图 2 所示。由图 2 可知, 地区内地下水水化学类型共 7 种, 包括 5 种低矿化度的 HCO_3 型和两种中等矿化度的 $SO_4 \cdot Cl$ 型, 以 $HCO_3 \cdot SO_4 - Ca \cdot Na$ 型(占总取样点的 33.3%)和 $HCO_3 \cdot SO_4 - Ca$ 型(占总取样点的 25.0%)为主。

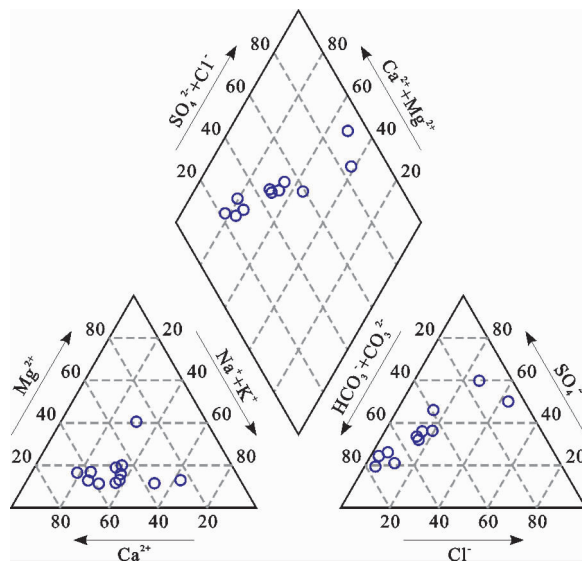


图 2 2015 年巴里坤盆地地下水水化学 Piper 三线图

表3 巴里坤盆地地下水水化学成分旋转因子载荷矩阵

指标	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TH	TDS	特征值	贡献率/ %	累计贡 献率/%
F1	0.686	0.992	0.873	0.951	0.942	0.980	-0.053	0.948	0.992	6.856	76.17	76.17
F2	0.240	-0.028	-0.407	0.234	-0.274	-0.160	0.943	-0.238	-0.112	1.338	14.87	91.04

由表3可知:

(1) Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、TH、TDS 为 F1 主因子的 7 个主要决定因素,其贡献率为 76.17%。研究区内蒸发作用强且降水稀少,年蒸发量达 1 622.0 mm,年平均降水量为 230.5 mm,说明该地区内具备形成蒸发浓缩作用的先决条件。随着地下水的大量蒸发排泄,TDS 值和 TH 值会不同程度的增大,析出部分溶解度较小的盐类,溶解度大的 Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺ 离子得以保留。另外,产生 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 载荷分别为 0.873 和 0.951 的原因可能是析出有关碳酸盐的沉淀较少,与上述相关分析的结果一致。因此,F1 代表的是蒸发浓缩作用。

(2) HCO₃⁻ 为 F2 主因子的主要决定因素,其贡献率为 14.87%,载荷为 0.943。研究区内柳条河上游沿岸一带补给径流条件相对较好,地下水多为低矿化度水。巴里坤盆地山前地表水主要为中等矿化度及中等硬度水^[14],在此区域内地下水多为淡水和微硬水,说明地下水可能受到了地表水的补给。一般认为,若某区域径流条件好,则其溶滤作用也占据优势,因此使水中难溶的 Ca²⁺、Mg²⁺ 得以富集,同时由于在此区域内可能存在地表水 HCO₃⁻ 的富集和极少部分重碳酸盐的风化溶解,使 HCO₃⁻ 成为地下水中主要的阴离子。因此,F2 代表的是溶滤作用,且位于补给径流条件相对较好的区域。

3.3 聚类分析

由巴里坤盆地地下水水样 R 型聚类分析树状图(图4)可知,当类距为 10 时,所取水样被划分为 A、B、C 3 类:A 类为主要受强烈蒸发浓缩作用的中

等矿化度水;B 类为在补给径流条件相对较好区域,以溶滤作用为主的低矿化度水;产生 C 类这种情况的原因可能是个别取样点中 SO₄²⁻ 浓度值相比其他取样点过高,且该点主要位于盆地北部山前倾斜平原区。查阅由新疆化工设计研究院有限责任公司于 2019 年 6 月编制的《巴里坤县化工区工业废渣(硫化碱废渣)处置一期项目环评报告》可知,自 20 世纪 60 年代中期,硫化碱企业陆续在巴里坤湖周围建成,经过几十年的发展,大量的废渣(硫化碱、硫酸盐和亚硫酸盐等)堆放在巴里坤湖东北侧湖岸附近,间接补给地下水,这可能是导致周围取样点 SO₄²⁻ 浓度增高的原因之一;另一个原因可能是该区域受到一部分洪水冲积影响,普遍认为早期溶滤作用将 Cl⁻ 最先溶于水中并被水流带走,由于持续溶滤作用,大量的 SO₄²⁻ 聚集到该区域。因此,将 C 类归为 A 类。通过与因子分析结果对比,得出两者结果基本一致的结论。

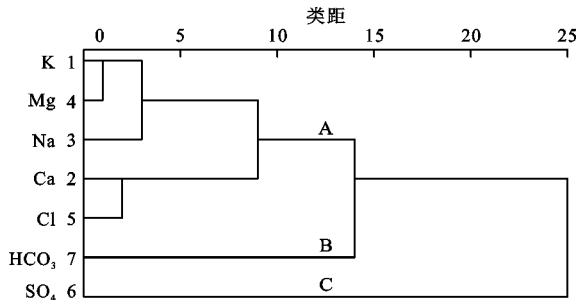
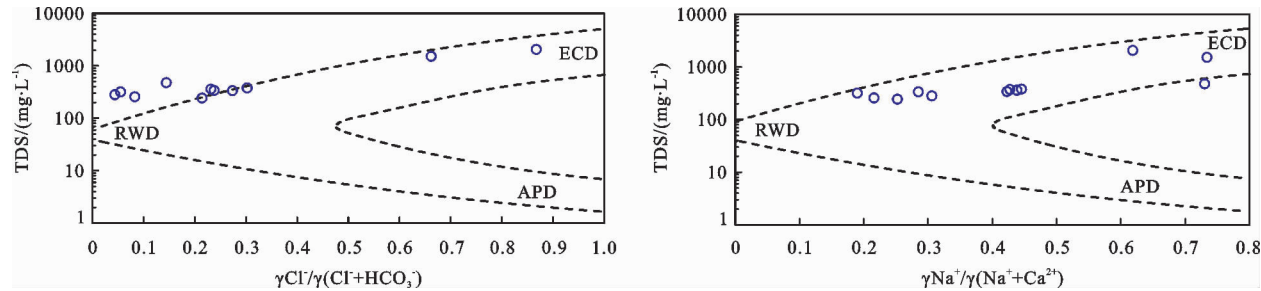


图4 2015年巴里坤盆地地下水水样 R 型聚类分析树状图

3.4 综合 Gibbs 图分析

2015 年巴里坤盆地地下水 Gibbs 图见图 5。



注:RWD 代表岩石风化区,APD 代表大气降水区,ECD 代表蒸发浓缩区

图5 2015年巴里坤盆地地下水 Gibbs 图

通过绘制巴里坤盆地地下水 Gibbs 图(图 5)可发现,取样点均未落入大气降水区(atmospheric precipitation district, APD)控制区域内,说明大气降水作用不是地下水化学作用的主导因素,主要原因是巴里坤盆地属于干旱区,降水稀少所致;绝大多数取样点落入岩石风化区(rock weathering district, RWD)控制区域附近,这是由于在补给径流条件相对较好、蒸发相对弱的区域,会形成以溶滤作用为主导因素的低 TDS 水;个别取样点落入蒸发浓缩区(evaporation concentration district, ECD)控制区域,在地下水弱补给区、蒸发强烈和埋深较浅的区域会形成以蒸发浓缩作用为主导因素的高 TDS 水。与潘希哲等^[32]采用 2018 年数据研究得出巴里坤山间盆地地下水水化学特征主要由溶滤作用控制的结论基本一致。

由此可知,通过运用因子分析、聚类分析以及 Gibbs 图 3 种方法可得到相同的结论。

4 结 论

(1) 巴里坤盆地地下水水化学类型分带特征明显,且以低矿化度的 HCO_3^- 型水为主;地下水以微硬水为主,各离子具有中等以上的空间变异性。

(2) 通过 R 型因子分析和 R 型聚类分析一致得出:该地区内水化学特征的主要影响因素是以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TH、TDS 为主要荷载变量的蒸发浓缩作用,贡献率达 76.17%;其次是以 HCO_3^- 为主要荷载变量的溶滤作用,贡献率为 14.87%。

(3) 结合 Gibbs 图综合分析得出:溶滤作用是影响巴里坤盆地地下水水化学特征的主要因素。

参考文献:

- [1] 李文鹏,郝爱兵.中国西北内陆干旱盆地地下水形成演化模式及其意义[J].水文地质工程地质,1999,(4):30-34.
- [2] 李政葵,夏蔓宏,董少刚,等.洛阳盆地浅层地下水水化学特征及其演化特征分析[J].地球与环境,2019,47(1):57-63.
- [3] ADAMS S, TITUS R, PIETERSEN K, et al. Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2001, 241(1): 91-103.
- [4] 吴丁丁,姚震,贾凤超,等.新疆哈密盆地地下水水化学特征及成因分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(7):133-141.
- [5] 殷秀兰,李文鹏,王俊桃,等.新疆柴窝堡盆地地下水化学及稳定同位素研究[J].地质学报,2010,84(3):439-448.
- [6] 蒋万军,赵丹,王广才,等.新疆吐-哈盆地地下水水文地球化学特征及形成作用[J].现代地质,2016,30(4):825-833.
- [7] 孙厚云,毛启贵,卫晓峰,等.哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J].中国地质,2018,45(6):1128-1141.
- [8] 赵江涛,周金龙,梁川,等.新疆焉耆盆地平原区地下水演化的主要水文地球化学过程分析[J].环境化学,2017,36(6):1397-1406.
- [9] 吕晓立,刘景涛,韩占涛,等.城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因[J].环境科学,2020,41(3):1197-1206.
- [10] 李巧.准噶尔盆地平原区地下水水质时空演化研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
- [11] 吴琼,梁伊,高凡,等.新疆阿拉尔市苦咸水水化学特征、分布及成因分析[J].环境化学,2021,40(3):737-745.
- [12] 卜红梅,刘文治,张全发.多元统计方法在金河水水质时空变化分析中的应用[J].资源科学,2009,31(3):429-434.
- [13] 栾凤娇,周金龙,贾瑞亮,等.新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J].环境化学,2017,36(2):380-389.
- [14] 栾凤娇,周金龙,贾瑞亮,等.新疆巴里坤-伊吾盆地平原区地下水质量评价及分析[J].新疆农业大学学报,2016,39(3):253-258.
- [15] 郭延东,刘恒义.巴里坤县水资源开发利用现状与思考[J].中国水运(下半月刊),2010,10(11):160-161.
- [16] 郑松林,罗丽萍.巴里坤湖水质 18 年变化及水资源保护方案研究[J].环境科学与技术,2011,34(8):85-88+119.
- [17] 孙凯.巴里坤盆地地质填图中地球物理信息综合应用研究[D].武汉:中国地质大学,2018.
- [18] 李续续,居马·吐尔逊,伊永强.新疆巴里坤县地下水开发利用及环境地质问题[J].西部探矿工程,2014,26(12):119-122.
- [19] 蔡云标,吕惠萍,罗光晓.巴里坤湖生态环境及营养状态分析[J].新疆水利,2012(4):24-27.
- [20] 余建英,何旭宏.数据统计分析与 SPSS 应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.
- [21] 向东进.实用多元统计分析[M].武汉:中国地质大学出版社,2005.
- [22] 林永生,裴建国,杜毓超,等.基于多元统计方法的岩溶地下水化学特征及影响因素分析[J].环境化学,2016,35(11):2394-2401.
- [23] 曹阳,滕彦国,刘昀竺.宁夏吴忠市金积水源地地下水水质影响因素的多元统计分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(1):235-244.
- [24] 沈杨,何江涛,王俊杰,等.基于多元统计方法的地下水水化学特征分析:以沈阳市李官堡傍河水源地为例[J].现代地质,2013,27(2):440-447.

(下转第 91 页)

- 12113064.
- [5] 王慧,韦凤年.全视角多维度全过程把控水利发展定位推进节水优先建设幸福河湖:访中国工程院院士邓铭江[J].中国水利,2020(6):7-10+4.
- [6] 左其享,郝明辉,姜龙,等.幸福河评价体系及其应用[J].水科学进展,2021,32(1):45-58.
- [7] 程常高,马骏,唐德善.基于变权视角的幸福河湖模糊综合评价体系研究——以太湖流域为例[C]//2020(第八届)中国水生态大会论文集.郑州:2020.
- [8] 尤洋,许志兰,王培京,等.温榆河生态河流健康评价研究[J].水资源与水工程学报,2009,20(3):19-24.
- [9] 唐新玥,唐德善,常文倩,等.基于云模型的区域河长制考核评价模型[J].水资源保护,2019,35(1):41-46.
- [10] 李先明.幸福河的文化内涵及其启示[J].中国水利,2020(11):55-59.
- [11] 韩冰,刘义军,陈汶滨,等.基于云模型的指标权重获取方法[J].软件导刊,2012,11(5):15-17.
- [12] CHEN Yan, FENG Yazhong, ZHANG Fan, et al. Assessing water resources vulnerability by using a rough set cloud model: A case study of the Huai River Basin, China. [J]. Entropy, 2018, 21(1): E21010014.
- [13] 张秀梅.基于熵权法和云模型的农村居民点集约利用评价——以山西省芮城县为例[D].晋中:山西农业大学,2013.
- [14] 乔丹颖,刘凌,闫峰.基于云模型的中运河水安全评价[J].水资源保护,2015,31(2):26-29.
- [15] 蓝利,雷晓云,高凡,等.基于组合赋权与有序度熵模型的干旱内陆河流健康评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):57-62.
- [16] 黄雍华.基于GIS的上海市都市功能优化区应急避难场所适宜性评价与分析[D].上海:上海师范大学,2018.
- [17] 杨丹,唐德善,周祎.基于正态云模型的人水和谐度评价[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):53-58.
- [18] 彭欣雨,唐德善.基于组合权重-理想区间法的河长制实施效果评价模型及应用研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):50-56.
- [19] NGUYEN H X, NGUYEN A T, NGO A T, et al. A Hybrid Approach using GIS-based fuzzy AHP - TOPSIS assessing flood hazards along the south - central coast of Vietnam [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (20): 10207142.
- [20] 赵梦薇.基于改进的变权TOPSIS评价法的湖泊生态安全评价方法研究[D].大连:大连理工大学,2020.
- [21] 刘娟,王飞,韩文辉,等.汾河上中游流域生态系统健康评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):91-98.
- [22] ZHANG Yongyong, XIA Jun, Wang Zhonggen. Integrated water resources carrying capacity in Tongzhou District, Beijing City [J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(3): 253-258.
- [23] 许杨,陈菁,夏欢,等.基于DPSIR-改进TOPSIS模型的淮安市水资源承载力评价[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):47-52+62.
- [24] 李晓峰,刘宗鑫,彭清娥. TOPSIS模型的改进算法及其在河流健康评价中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(2):14-21.
- [25] 周向华,杨侃,蒋立伟,等.引入SPA的6级模糊模式识别模型在水质综合评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):1-6.

(上接第83页)

- [25] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础(第六版)[M].北京:地质出版社,2011.
- [26] 钱会,马致远,李培月,等.水文地球化学[M].北京:地质出版社,2005.
- [27] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [28] 张彦军.巴伊盆地地表水资源评价[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [29] 张艳,吴勇,杨军,等.阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J].环境科学,2015,36(9):3230-3237.
- [30] ZHAO Jian, FU Guo, LEI Kun, et al. Multivariate analysis of surface water quality in the Three Gorges area of China and implications for water management[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(9): 1460-1471.
- [31] LIU Chenwuing, LIN Kaohung, KUO Yiming. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2003, 313(1-3): 77-89.
- [32] 潘希哲,王旭奎,张鹏飞,等.新疆准噶尔盆地浅层地下水水化学类型特征及成因研究[J].地下水,2020,42(3):21-22.