

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
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	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

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

张小文,何江涛*,彭聪,张昌延,倪泽华

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院,水资源与环境工程北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:地下水化学组分的异常识别是构建水化学背景值及开展人类活动影响程度识别量化的重要基础。以往提出的基于 5 种水化学图的主要组分异常识别方法取得了良好效果,但是该方法考虑的水化学图种类过多,计算复杂。为简化水化学图法,本文以柳江盆地为例,尝试采用 Durov 图替代 5 种水化学图,对地下水主要组分进行异常识别。为此,分别对比分析了水化学图与数理统计法组合出的 7 种异常识别方法的剔除效果,并进行方法可靠性检验。结果表明,数理统计法与水化学图法结合识别地下水异常相对于两者单独使用可以取得更好的识别效果;其中 3σ 准则 + 5 种水化学图法和 3σ 准则 + Durov 图法对地下水主要组分异常识别效果最好;并证实采用 Durov 图可以有效替代 5 种水化学图进行地下水主要组分的异常识别,既保留了水化学识别异常的科学性,又大大简化了异常识别计算的过程。

关键词:地下水水化学;异常识别;Durov 图; 3σ 准则;柳江盆地

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3225-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201702100

Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater: A Case Study of Liujiang Basin

ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao*, PENG Cong, ZHANG Chang-yan, NI Ze-hua

(Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environmental Engineering, School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Identification of chemical composition anomalies in groundwater is an important basis for establishing groundwater background values and quantifying the degree of influence of human activities. The main component anomaly identification by five kinds of hydrochemical diagrams has achieved good results in the past. However, this method is too complex to be used widely. In order to simplify the five kinds of hydrochemical diagrams, the Durov diagram was used to replace the five kinds of hydrochemical diagrams to identify the main component anomalies of groundwater, with the Liujiang basin employed as a verification example. The effects of seven kinds of anomaly identification methods combined by hydrochemical diagrams and mathematical statistics methods were compared, and the reliability of these methods were tested in the study. The result indicated that the combination of mathematical statistics and hydrochemical diagrams method can identify the groundwater anomalies better than either used alone. The method of the Pauta criterion + five kinds of hydrography diagrams and the Pauta criterion + the Durov diagram were the best to identify the major component anomalies of groundwater. This shows that the Durov diagram can effectively replace the five kinds of hydrochemical diagrams for anomaly recognition of groundwater, which not only preserves the scientificity of hydrochemical anomaly identification, but also greatly simplifies the process of calculation.

Key words: groundwater hydrochemistry; abnormal recognition; Durov diagram; Pauta criterion; Liujiang basin

地下水化学特征可以反映其赋存环境的特点^[1],当地下水赋存环境受到人为影响而改变时,这种改变也会在地下水化学特征中反映出来^[2],即出现“水化学异常”。对地下水水化学的异常识别是确定人类活动对地下水影响程度及背景值等研究中至关重要的一步,直接关系到地下水污染治理的轻重缓急^[3,4]。

自 20 世纪 90 年代前后,国内外开始了对地下水水化学异常的识别研究,并随着对地下水污染问题的重视不断深入。宇庆华等^[5]于 90 年代初期利用拉氏积分函数法和 Thompson 法对地下水水化学

异常的识别进行了探讨研究。2000 年欧盟颁布了《水框架指令》,针对地下水阈值建立体系中天然背景值的问题做了一定研究,并提出了异常数据剔除的五条基本准则^[6]。近些年苏格兰、葡萄牙、土耳其等国家一些学者利用累积频率曲线图、模糊聚类法及多元统计法等方法对地下水异常值剔除进行了当地的背景值计算和人类活动影响程度确定等研

收稿日期: 2017-02-19; 修订日期: 2017-03-18

基金项目: 国土资源大调查项目(1212011121170)

作者简介: 张小文(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为水文地质与工程地质, E-mail: 1978165803@qq.com

* 通信作者, E-mail: jthe@cugb.edu.cn

究^[7-10]. 2017 年彭聪等^[11]利用 5 种水化学图法进行异常识别研究了人类活动对柳江盆地地区的影响程度并取得较好成果.

对比分析国内外相关研究方法,对于地下水水化学异常数据的识别主要是从数理统计方面着手. 方法较简单,容易操作,但对于水化学组分内在联系考虑不足. 彭聪等^[11]将 5 种水化学图(Piper 三线图、离子交换作用图以及 3 种离子间比例关系图)转换为 5 幅二维坐标图,计算出坐标图中各点所对应数据集的马氏距离来进行异常识别. 该方法充分考虑了水文地球化学的演化过程和水化学组分的内在联系,但过程较复杂,操作性差不易推广使用. 基于此,本研究以简化该方法,提高剔除异常精度为出发点,尝试用 Durov 图替代 5 种水化学图法进行地下水主要组分的异常识别,论证其异常识别效果.

1 材料与方法

人类活动对地下水的影响会通过地下水水质的异常反映出来,其不单表现在污染物质的直接输入而反映出的异常,更多的是人类不合理补排地下水造成的水化学场变化而反映出的水化学特征异常^[12,13]. 利用数理统计法识别地下水异常值虽然操作简便、可以较好地剔除数据中离群程度大、较明显的水化学异常点. 但仅用数理统计方法识别异常时未考虑水化学组分的内在联系,存在剔除不足的现象. 水化学图法利用可以反映地下水某种形成作用的水化学图来识别异常,如溶滤、混合、离子交换等一系列过程^[14,15],考虑到了各个化学组分之间的内在联系及水文地球化学演化过程. 故采用数理统计法与水化学图法结合的方法来识别地下水主要组分异常,理论上既可以剔除掉地下水数据中离群程度大、较明显的异常点,又可以根据水化学内在联系剔除掉地下水中水化学特征异常点^[16-19].

Durov 图是在 Piper 三线图的基础上加以改进而提出的,相对于 5 种水化学图法,Durov 图继承了水化学图法的优点可以反映出地下水主要组分之间的内在联系,而且可以很好的识别出地下水中 pH 值和 TDS 所能反应出的异常;转换后的二维坐标图更少,大大简化了异常识别的计算过程. 因此本文利用 Durov 图代替 5 种水化学图进行地下水主要组分的异常识别.

数理统计法的选择基于方法简便且异常识别效果好的原则. 其中 3σ 准则相对于众多数理统计方法来说简单易操作、对测量数据中粗大误差剔除效

果较好. 其使用条件为测量数据不能少于 10,符合大多数地下水异常识别工作中采样点个数. 故本文选用的数理统计方法为 3σ 准则^[20].

基于以上基本思路,对 3σ 准则、Durov 图法及 5 种水化学图法组合出的 7 种异常识别方法(3σ 准则、Durov 图法、5 种水化学图法、 3σ 准则 + Durov 图法、 3σ 准则 + 5 种水化学图法、Durov 图法 + 3σ 准则、5 种水化学图法 + 3σ 准则)进行比对研究. 作出各方法异常剔除前和剔除后数据的拐点图、箱型图及正态直方图,并对各方法识别结果进行评分量化来综合对比其识别效果. 最后结合研究区水文地质调查结果对识别方法进行可靠性检验.

1.1 异常识别方法

Durov 图中两个三角形显示了地下水主要组分的毫克当量百分数,中间正方形是对两个三角形的结合,较好地显示出主要组分阴阳离子间的联系. 其中两个矩形表示的是地下水 pH 值、TDS 与地下水主要组分之间的关系,见图 1^[21]. 利用 Durov 图进行水化学异常识别时,将其正方形及两个矩形区域所表示的关系图利用公式(1)转化为二维坐标图,则得到 3 组表示不同水化学联系的二维数组. 再分别利用公式(2)计算其马氏距离.

二维坐标转换公式:

$$X = 0.5 \times m(\text{SO}_4^{2-}) + m(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$$

$$Y = 0.5 \times m(\text{Mg}^{2+}) + m(\text{Ca}^{2+}) \quad (1)$$

式中, m 表示毫克当量百分数.

马氏距离公式:

$$(X - \bar{X})' S^{-1} (X - \bar{X}) = D_a^2 \quad (2)$$

式中, X 表示数组毫克当量浓度; $\bar{X}$ 表示数组毫克当量浓度平均值; S^{-1} 表示协方差逆矩阵; D_a 表示马氏距离.

得到二维数组对应的马氏距离后,分别利用马氏距离的均值加减 3 倍标准差作为临界距离(D_i^2),比较 D_i^2 与 D_a^2 的大小,将 D_a^2 值超出临界距离(D_i^2)的样品全部剔除,即所有剩余样品对应的马氏距离都处于均值加减 3 倍标准差内. 然后重新计算所剩样品的均值、协方差矩阵、马氏距离,再次比较 D_i^2 与 D_a^2 的大小,反复循环,直到剩余样品的马氏距离均小于临界距离 D_i^2 ,即无离群样品即可^[22,23]. 剩余样品数据即为剔除水化学异常后的正常数据,见图 1.

利用 3σ 准则识别地下水异常时,各水化学指标以其平均值加减 3 倍标准差为度量值进行循环剔除直至全部满足该度量值,见公式(3). 所有水化学

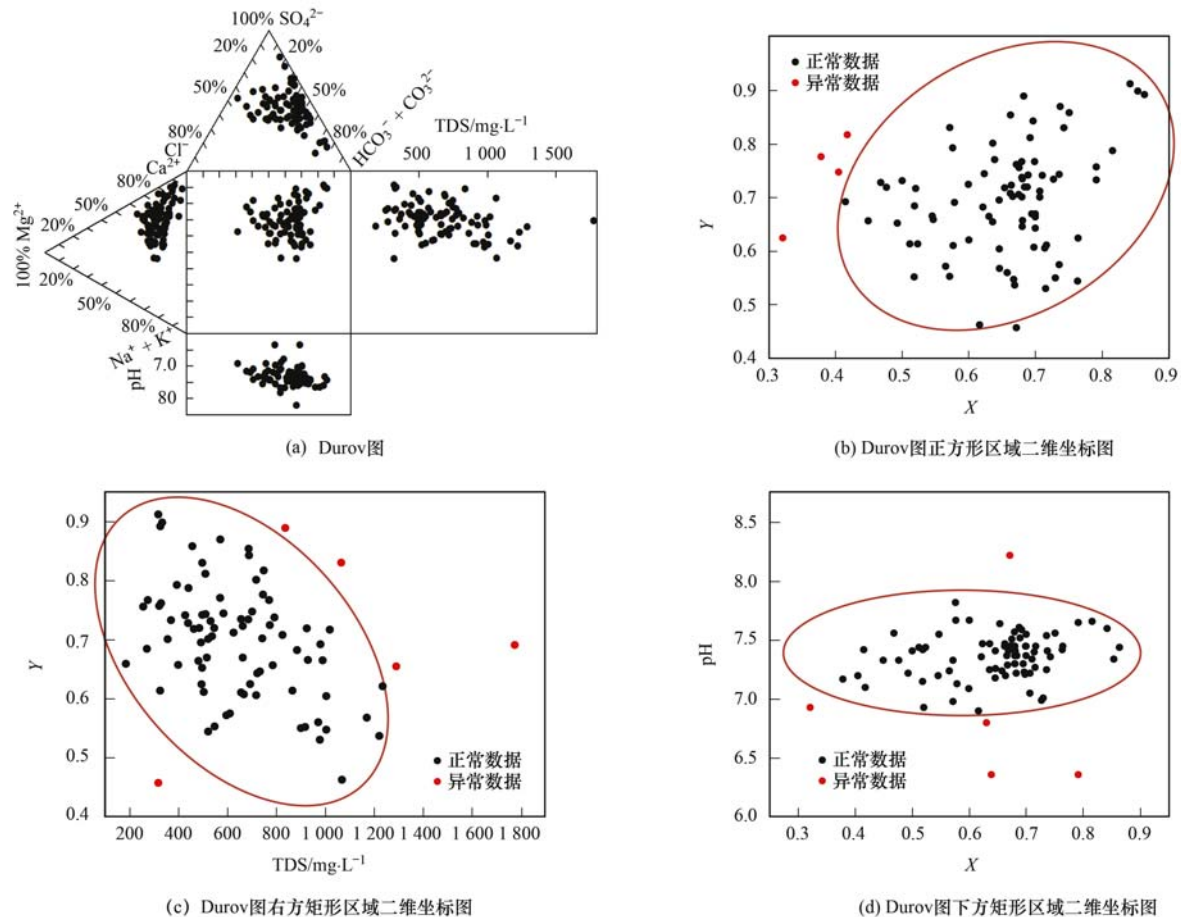


图1 Durov图及其转换后的二维坐标
Fig. 1 Durov diagram and its transformed 2D diagram

指标所剔除的样品即为数理统计法所识别出的异常点.

3 σ 准则公式:

$$\bar{X} - 3\sigma \leq X \leq \bar{X} + 3\sigma \quad (3)$$

式中, X 表示数组质量-体积浓度值; $\bar{X}$ 表示数组质量-体积浓度的算术平均值; σ 表示数组质量-体积浓度的标准差.

1.2 异常识别结果

根据异常剔除前后数据做出各水化学指标的拐点图、箱型图及正态直方图,可对各方法异常识别结果进行分析研究.

拐点图是将某种水化学指标的浓度值从小到大排列并依次编号,以其序号为横轴,浓度值为纵轴所表示的二维坐标图.能较好地表示采样区域该指标浓度的大小分布情况,由于地下水受天然和人类活动的多因素复合影响,拐点图中通常会出现斜率较大的拐点位置将数据分为表示不同来源影响的数据集群^[24].对比分析异常剔除前和剔除后的拐点图,根据是否将受人类活动影响及离群程度大的异常数

据集群剔除可以较好地认识该方法异常识别效果.

箱型图提供了一种用6个数据节点对数据集做简单总结的方式,包括箱型图的上边缘(95百分位数)、上四分位数、中位数、下四分位数、下边缘(5百分位数)及一个异常值.用作显示一组数据的分散情况,能提供有关数据位置和分散情况等关键信息^[25].异常值剔除前后多组数据集箱型图的对比有助于分析各方法对水化学异常的识别情况.

正态直方图是以组距为底边、以频数为高度的一系列连接起来的直方型矩形图,与拐点图作用相似,都可以表示一组数据的分布情况^[26],且在水化学异常识别过程中通过数据分布情况通常可大致区分出天然成因和人为成因等不同成因来源的数据集,分界点通常位于直方图频数较低位置所对应的数据值.

1.3 异常识别结果量化

由于各方法对各个化学指标异常的识别效果并不完全相同,例如对于钾离子的异常识别而言,钾离子和钠离子当量值之间存在着近一个数量级的差

距,而水化学图法是将钾与钠的当量值进行直接加和一起考虑,严重弱化的钾离子所能反映出的地下水异常,故水化学图法对钾离子的异常识别效果明显低于数理统计法.对于 pH 的异常识别而言,由于 5 种水化学图法未考虑 pH 值,故 5 种水化学图法对 pH 值的异常识别效果明显低于 Durov 图法.且通过直接观察各异常识别结果图得到各方法的异常识别效果,可能会因为坐标轴拉伸或缩短而产生不同的观察结果,带有明显地人为性.因此,为更加科学合理地对各方法对水化学异常的识别效果,综合考虑异常剔除后剩余数据的离散程度及其相对于剔除前数据的偏离程度两个指标通过指标赋值来量化研究各方法的异常识别效果.

数据离散程度可以反映各观测个体之间的差异程度,用剔除异常后剩余数据集的变异系数(CV)来表示,见公式(4).即剩余数据离散程度越小表示对离群数据剔除效果越好.则对该指标赋值时,各方法对各个水化学指标剔除后剩余数据的离散程度数据集作出其拐点图,根据拐点位置将该数据集分为数个集群进行依次赋值^[27].

偏离程度(D)表示异常剔除后剩余数据相对于剔除前数据的偏离度,通过剩余数据最大值与剔除前数据最大值对比而体现,见公式(5);偏离程度过大或过小都表示异常识别效果并不理想.故对其赋值时作出箱型图分析偏离程度大小分布情况,依靠箱型图数据节点位置分为不同类型的集群并依次赋值.

公式:

$$CV = S / \bar{Y} \quad (4)$$

$$D = (Y_{\max} - \bar{Y}) / (\bar{Y}'_{\max} - \bar{Y}) \quad (5)$$

式中, $Y_{\max}$ 为剔除异常后剩余数据的最大值; $Y'_{\max}$ 为剔除前数据的最大值; $\bar{Y}$ 为剔除异常后剩余数据的平均值; S 为剔除后剩余数据的标准偏差.

通过上述分析计算,可以得到每种识别方法对各个水化学指标异常剔除后剩余数据的离散程度及偏离程度评分值,直接加和各个水化学指标的评分值计算其平均值,得到各异常识别方法的综合评分值进行识别效果对比.

1.4 可靠性验证

根据上文各方法异常剔除结果图分析及量化比较得到对地下水主要组分水化学异常识别效果较好的方法,作出该方法所剔除异常数据与剩余正常数据在研究区的投点图,结合该区水文地质调查资料,包括人类聚集地、潜在污染源分布及土地利用类型

等情况对该方法识别结果进行可靠性验证.

2 结果与讨论

以柳江盆地为例,基于 2013、2014 年地下水采集工作,共获得 231 组有效采样数据,运用电荷平衡、碳酸平衡进行数据预筛选,去除平行样,剩余 211 组有效数据用于此次异常识别.

2.1 研究区概况

柳江盆地地质遗迹国家级自然保护区位于河北省秦皇岛市抚宁县境内,研究区地理坐标为东经 $119^{\circ} 27' 37'' \sim 119^{\circ} 40' 42''$,北纬 $40^{\circ} 01' 32'' \sim 40^{\circ} 13' 13''$.位于燕山山脉的东部,濒临渤海,地势东低西高,南低北高.主要地貌为侵蚀构造区、侵蚀剥蚀区和侵蚀堆积区.区内有铁路、公路与秦皇岛市连通,交通便利.研究区内工农并重,农业以种植玉米、小麦、高粱等作物为主,工业主要有采煤、耐火黏土、石灰岩、玻璃砂岩、水泥等.区内广泛分布有石灰岩,可作为水泥、石灰的原材料.

该区属温带半湿润季风型的大陆性气候,多年平均降水量 $744.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,降水集中在 6~8 月.多年平均蒸发量 1600 mm .区内水系较为发育,大石河为研究区主要的地表河流,由许多支流汇合而成,构成树枝状水系,由北向南流经本区注入渤海.

柳江盆地出露的地层从新到老依次为新生界第四系;中生界侏罗系、三迭系;古生界二迭系、石炭系、奥陶系、寒武系和上元古界青白口系.区内含水层为第四系孔隙潜水和寒武、奥陶系地层中碳酸盐岩类裂隙岩溶水,盆地基底为山海关变质花岗岩.由山海关变质花岗岩和燕山期花岗岩构成了盆地四周的相对隔水边界,使柳江盆地构成了一个完整封闭的储水构造.区内地下与地表分水岭基本一致,降雨渗入补给、河流的渗入补给及灌溉回归水的渗入补给是地下水的补给来源.河谷地带的松散砂卵石层为盆地内地表水创造了良好的人渗条件,且盆地内孔隙水与岩溶水也具有密切的水力联系.

2.2 水化学异常识别

根据研究区的汇水条件、地质构造、岩石类型、地下水分水岭等因素将研究区分为:大石河中游石门寨汇水亚区、大石河上游驻操营汇水亚区、东宫河东部落汇水亚区及大石河上游秋子峪汇水亚区这 4 个水文地质单元,运用上述由数理统计法和水化学图法组合出的 7 种异常识别方法对研究区有效采样点数据分区进行水化学异常识别^[28~31],结果如表 1.

表 1 水化学异常识别结果统计

Table 1 Statistical results of hydrochemical anomaly identification

水化学识别方法	异常采样点剔除个数				总计
	石门寨亚区	秋子峪亚区	东部落亚区	驻操营亚区	
3σ 准则	23	4	3	14	44
Durov 图法	12	0	2	11	25
5 种水化学图法	16	3	6	17	42
3σ 准则 + Durov 图法	24	6	5	24	59
3σ 准则 + 5 种水化学图法	33	7	8	22	70
Durov 图法 + 3σ 准则	28	4	5	20	57
5 种水化学图法 + 3σ 准则	32	5	8	22	67

2.3 水化学异常识别方法对比

2.3.1 异常识别结果

以大石河中游石门寨汇水亚区各方法对总溶解性固体异常值识别为例,利用 Excel、Origin 等作图软件得到各方法异常剔除后剩余数据各化学指标的拐点图、箱型图及正态直方图,见图 2~4。

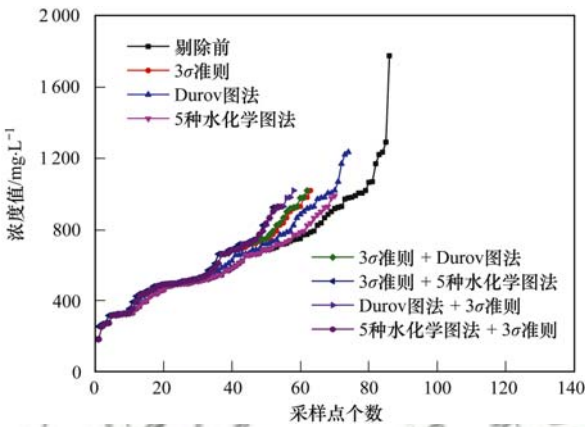


图 2 TDS 拐点图

Fig. 2 TDS curve diagram

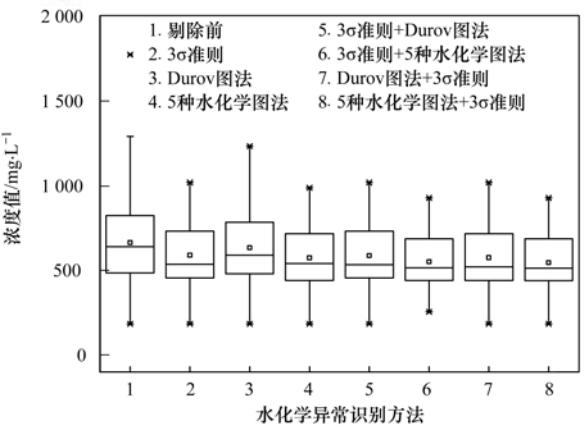


图 3 TDS 箱型图

Fig. 3 TDS box plot

结合以上异常剔除前后图件可以得到, TDS = 1 100 mg·L⁻¹ 为数据集分界浓度值, TDS > 1 100 mg·L⁻¹ 为受到人类活动和天然因素影响的明显异

常数据, 选用方法大多能较好地对其识别. 单独使用 Durov 图法异常剔除后 TDS 最大值为 1 233 mg·L⁻¹, 其最大值点位于拐点图拐点位置上方, 从箱型图来看, 最大值及箱宽均大于其他方法剔除后结果, 直方图中也可以看到大于 1 100 mg·L⁻¹ 的位置处仍有频数分布. 结合表 1 可知单独使用 Durov 图法对石门寨亚区 TDS 异常识别力度不够, 存在剔除不完全的现象. 同理可根据其他水化学指标的拐点图、箱型图及正态直方图分析对比各方法对其异常识别的效果.

2.3.2 识别结果的量化对比分析

统计各方法对各水化学指标异常剔除后剩余数据的离散程度及其相对于剔除前数据的偏离程度, 作出其拐点图和箱型图分析数据分布情况对其进行赋值, 结果如图 5 和图 6。

通过拐点图及箱型图分析数据集分布情况, 借助拐点位置及箱型图节点位置将数据集分为 4 类, I 类集群表示最好的异常识别效果, IV 表示最差的异常识别效果. 则可以对 I ~ IV 类数据集依次赋以分值 1 ~ 4. 即评分值越低表示该方法对异常识别效果越好, 各方法综合评分情况见表 2。

对比 3σ 准则 + 5 种水化学图法和 5 种水化学图法 + 3σ 准则, 3σ 准则 + Durov 图法和 Durov 图法 + 3σ 准则评分结果, 可知水化学图法与数理统计法结合识别地下水主要组分异常值时, 先用数理统计法后用水化学图法可以取得更好的异常识别效果。

水化学图法与数理统计法结合和两者单独使用来识别异常的方法评分值对比可明显看出两者结合使用识别地下水异常的方法评分值更低, 即单一的使用数理统计法或水化学图法对地下水异常值存在剔除不足的现象, 其识别效果低于数理统计与水化学图结合的方法。

使用 3σ 准则 + 5 种水化学图法识别异常方法的综合评分值最低, 其次为 3σ 准则 + Durov 图法,

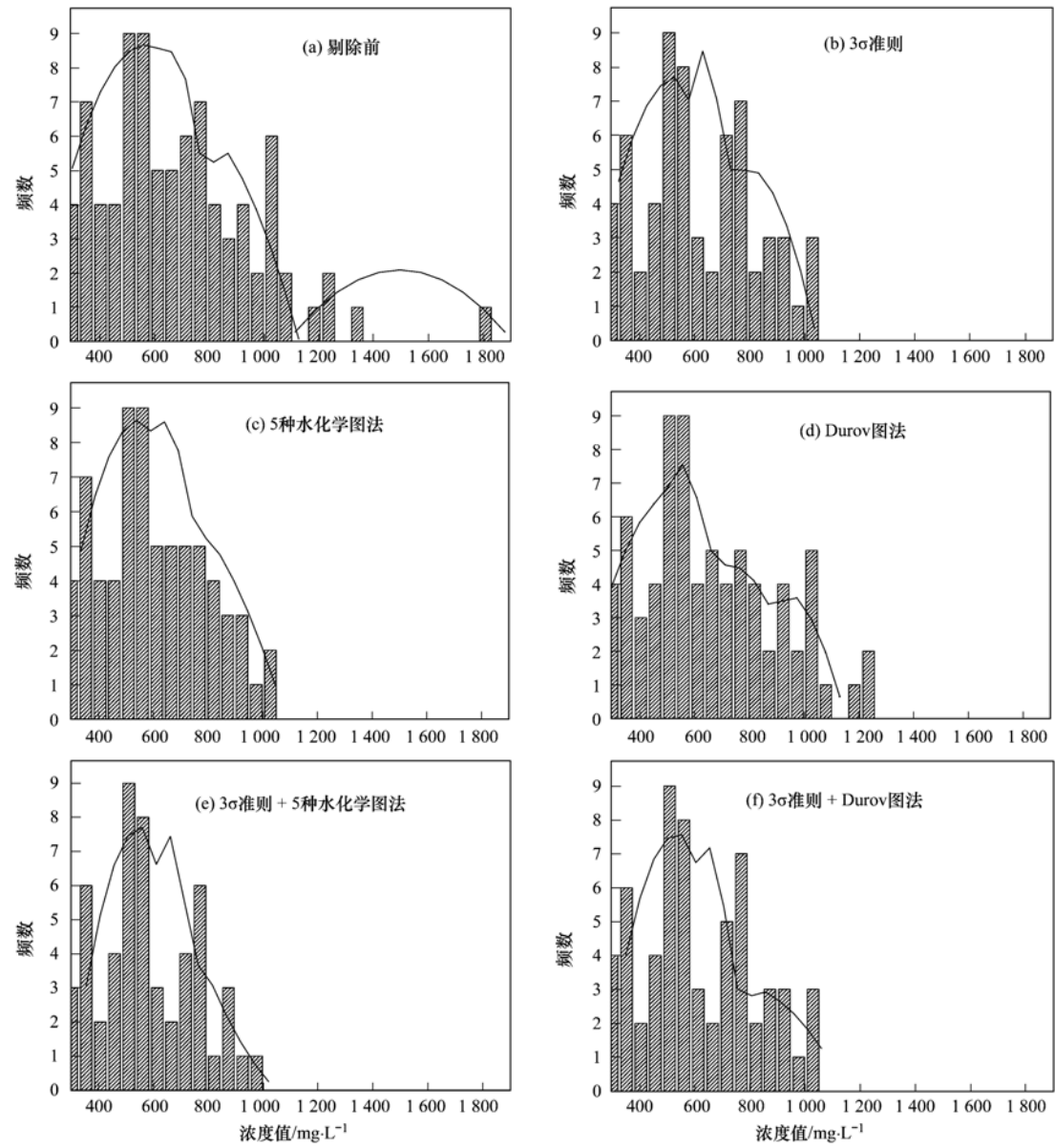


图 4 TDS 正态直方图

Fig. 4 TDS normal histogram

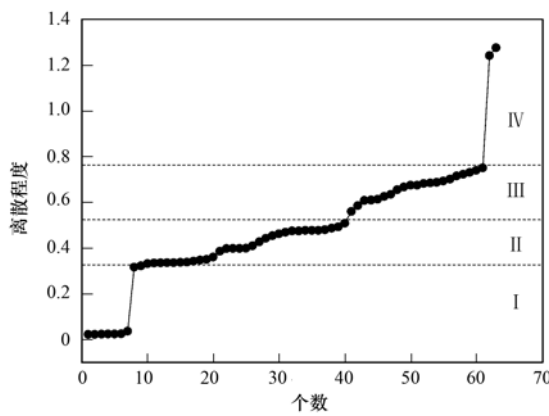


图 5 离散程度拐点图

Fig. 5 Diagram of measures of dispersion curves

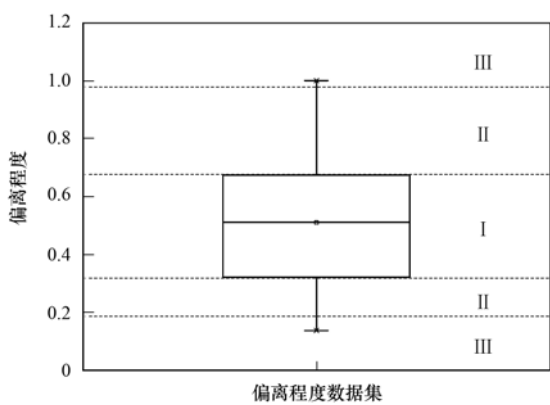


图 6 偏移程度箱型图

Fig. 6 Diverge degree box plot

表 2 各方法异常识别效果评分值

Table 2 Anomaly recognition scores

水化学指标		3σ 准则	5 种水化学图法	Durov 图法	3σ 准则 + Durov 图法	3σ 准则 + 5 种水化学图法	Durov 图法 + 3σ 准则	5 种水化学图 + 3σ 准则法
K ⁺	离散程度	3	4	4	3	3	3	3
	偏离程度	2	3	3	2	2	2	2
Na ⁺	离散程度	3	3	4	3	3	3	3
	偏离程度	2	2	3	1	1	1	2
Ca ²⁺	离散程度	2	2	2	2	2	2	2
	偏离程度	1	1	1	1	1	1	1
Mg ²⁺	离散程度	2	2	3	2	2	2	2
	偏离程度	1	1	1	1	1	2	1
HCO ₃ ⁻	离散程度	2	2	2	2	2	2	2
	偏离程度	2	2	3	2	1	2	2
Cl ⁻	离散程度	4	3	3	3	3	4	3
	偏离程度	3	1	3	3	1	2	3
SO ₄ ²⁻	离散程度	2	2	4	2	2	2	3
	偏离程度	2	2	1	2	2	2	2
TDS	离散程度	2	2	2	2	2	2	2
	偏离程度	1	1	1	1	1	1	1
pH	离散程度	1	1	1	1	1	1	1
	偏离程度	1	3	1	1	1	1	1
综合离散程度		2.33	2.33	2.78	2.22	2.22	2.33	2.33
综合偏离程度		1.78	1.78	1.89	1.56	1.22	1.56	1.67
综合评分值		2.06	2.06	2.34	1.89	1.72	1.95	2.00

两者综合评分值相差不大,均取得较好的异常识别效果.

2.3.3 异常识别结果的验证分析

根据对各方法异常识别结果分析,得到使用 3σ 准则 + 5 种水化学图法和 3σ 准则 + Durov 图法可取得较好的异常识别效果. 利用作图软件得到其异常采样点投点图结合水文地质调查结果,进行方法的可靠性分析,并作出两种方法对各水化学指标剔除后剩余数据浓度分布特征表,对比分析两种方法对地下水主要组分水化学异常识别效果.

如图 7 所示,研究区北部区域属于大石河上游驻操营汇水亚区、南部区域属于大石河中游石门寨汇水亚区、西部区域属于大石河上游秋子峪汇水亚区、东部区域属于东宫河东部落汇水亚区. 结合调查结果分析以上图表可知:两种方法识别的异常点均在驻操营镇和石门寨镇附近有集中分布的现象,这与该区域为人口聚集地有关,且石门寨异常点分布位置与该区污水河及曹沟煤矿、黑山窑煤矿、柳江煤矿这 3 个煤矿开采位置有很好的吻合. 东部落亚区零星分布的异常点主要与部分采样井附近的养殖场、化粪池等有关. 秋子峪亚区异常点分布主要

受该区长城煤矿、青龙炉料厂、水泥厂等工厂的影响. 其次可发现仅使用数理统计法相对于数据统计法 + 水化学图法明显有异常识别不完全的现象. 例如位于石门寨亚区北港镇殷家沟的监测点(编号为 3-J033),该采样点处于人口聚集地,受人类活动及当地煤矿的影响氯离子与硫酸根浓度偏高,硫酸根离子浓度为 191.1 mg·L⁻¹,氯离子浓度高达 117.7 mg·L⁻¹. 使用 3σ 准则 + 5 种水化学图法和 3σ 准则 + Durov 图法均可以识别出此异常点,但利用数理统计法识别异常并未剔除该采样点. 此外,对比驻操营、东部落、秋子峪这 3 个汇水亚区异常点剔除的情况,相对于其他异常识别方法,使用 3σ 准则 + 5 种水化学图法和 3σ 准则 + Durov 图法可对水化学类型异常的采样点予以更好的识别效果.

从整个研究区剔除的异常数据来看,3σ 准则 + 5 种水化学图法共剔除异常数据点 70 个,3σ 准则 + Durov 图法共剔除 59 个,两种方法共同剔除的异常数据点为 54 个. 有 16 组数据为 5 种水化学图法所剔除而 Durov 图法未识别出,16 组数据中有 11 组数据为 (Na⁺ + K⁺)-Cl⁻ 离子比例关系图所贡献. 具体分析 11 组 (Na⁺ + K⁺)-Cl⁻ 离子比例关系图所

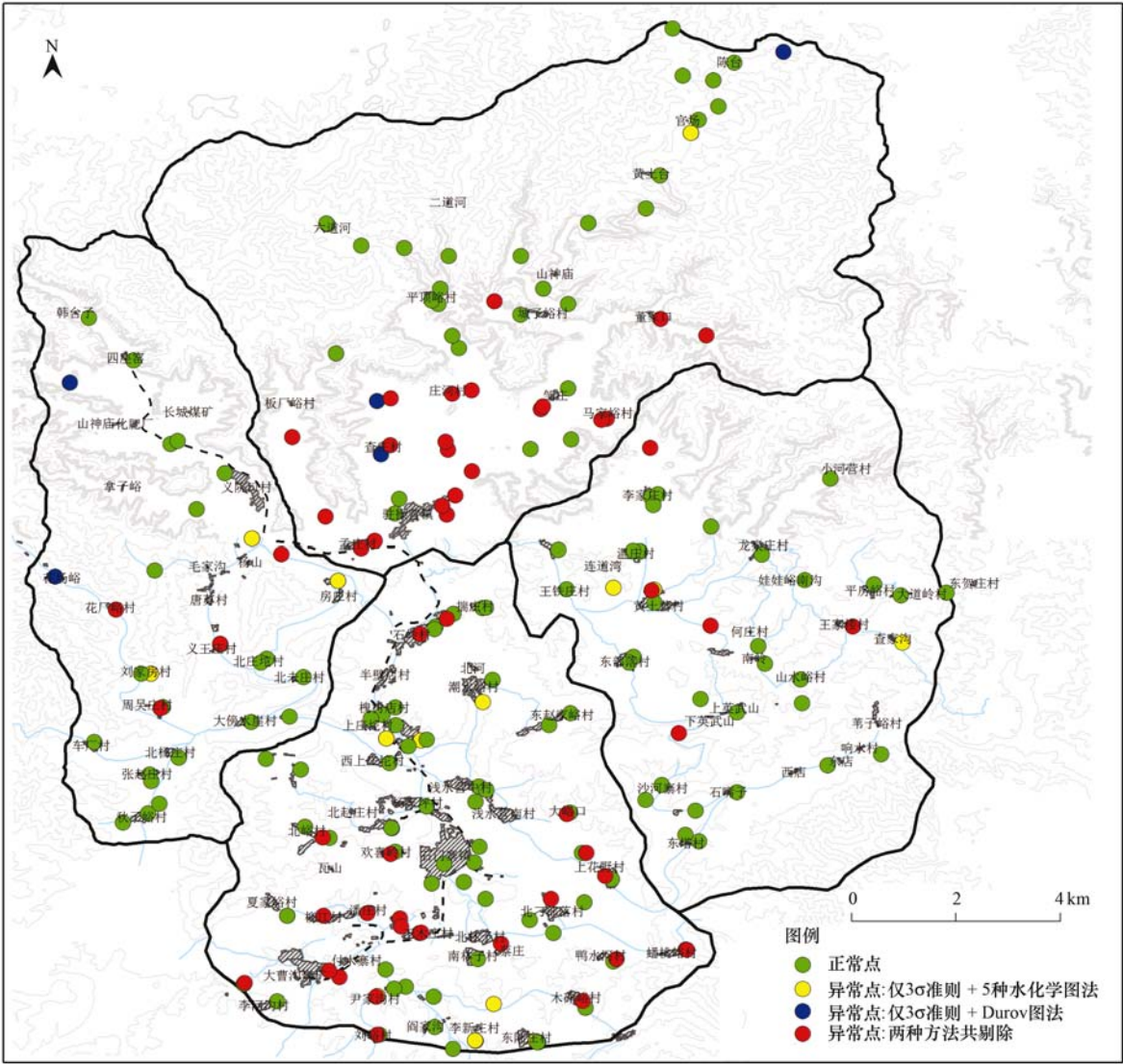


图 7 研究区异常数据识别结果投点

Fig. 7 Map of anomaly identification results for the study area

表 3 研究区异常剔除后剩余数据分布特征¹⁾

Table 3 Distribution of the residual data after the abnormal recognition

剩余数据特征值		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS	pH
最大值	3σ 准则 + Durov 图法	9.3	116.3	189.2	47.6	363.7	124.8	293.0	1 017.9	7.8
	3σ 准则 + 5 种水化学图法	9.3	77.7	180.4	47.6	346.6	90.8	293.0	979.3	7.8
最小值	3σ 准则 + Durov 图法	0.4	5.3	26.5	3.9	26.8	9.9	32.3	184.4	6.9
	3σ 准则 + 5 种水化学图法	0.4	5.3	40.1	3.9	34.2	9.9	32.3	254.7	7.0
中位值	3σ 准则 + Durov 图法	2.7	30.2	107.8	18.5	229.4	27.7	146.0	533.1	7.4
	3σ 准则 + 5 种水化学图法	2.6	29.1	103.4	18.5	231.9	26.9	141.1	517.6	7.4
平均值	3σ 准则 + Durov 图法	3.1	37.7	110.8	20.5	210.0	38.0	145.3	586.9	7.4
	3σ 准则 + 5 种水化学图法	3.1	33.9	107.0	19.3	210.4	33.4	142.3	550.8	7.4
标准差	3σ 准则 + Durov 图法	2.1	25.4	37.5	9.8	89.2	27.5	68.0	206.1	0.2
	3σ 准则 + 5 种水化学图法	2.1	20.7	34.5	9.2	84.0	20.3	68.0	174.5	0.2

1) pH 指标无量纲,其余水化学指标单位为 mg·L⁻¹

剔除而 Durov 图未识别出的采样点数据,其氯离子与钠离子浓度值大多处于全部数据平均值加减 3 倍标准差该限值左右,说明这 11 组异常数据点离群程度较小,异常程度低。且由表 3 可知两种方法异常剔除后剩余数据分布特征差别不大。证实采用 Durov 图可以有效替代 5 种水化学图进行异常识别,既保留了水化学识别异常的科学性,又大大简化了异常识别计算的过程。

3 结论

(1) 7 种组合识别方法结果对比表明,单独使用数理统计法或水化学方法对于异常值识别力度不够,均达不到最好的效果。使用数理统计法与水化学图法结合所识别出的水化学异常与水文地质调查资料有较高的吻合度,可靠性较高,能取得更好的识别效果。

(2) 数理统计法和水化学图法结合识别地下水化学异常时两种方法使用的前后次序会对剔除效果有影响。对比分析各异常识别结果图表及量化评分值可知,先用数理统计法剔除离群程度较大的数据,再利用水化学图法识别水化学特征异常可以取得更好的识别效果。

(3) 实例验证结果表明 3σ 准则 + 5 种水化学图法和 3σ 准则 + Durov 图法对地下水主要组分水化学异常均有较好的识别效果,并证实了用 Durov 图替代 5 种水化学图进行异常识别的可行性。

参考文献:

- [1] 王焰新, 马腾, 郭清海, 等. 地下水与环境变化研究[J]. 地学前缘, 2005, **12**(S): 14-21.
Wang Y X, Ma T, Guo Q H, *et al.* Groundwater and environmental change[J]. Earth Science Frontiers, 2005, **12**(S): 14-21.
- [2] 樊丽芳, 陈植华. 地下水环境背景值的确定[J]. 西部探矿工程, 2004, **16**(7): 90-92.
Fan L F, Chen Z H. Determination of environment background value of groundwater[J]. West-China Exploration Engineering, 2004, **16**(7): 90-92.
- [3] 郭高轩, 辛宝东, 刘文臣, 等. 我国地下水环境背景值研究综述[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(2): 95-98.
Guo G X, Xin B D, Liu W C, *et al.* Review on the study of the environment background values of groundwater in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, **37**(2): 95-98.
- [4] Gorelick S M. A model for managing sources of groundwater pollution[J]. Water Resources Research, 1982, **18**(4): 773-781.
- [5] 宇庆华, 曹玉和. 地下水化学背景值研究中的异常值判定与处理[J]. 吉林地质, 1991, (2): 75-79.
Yu Q H, Cao Y H. The research on the chemical background values in groundwater in Jilin province[J]. Jilin Geology, 1991, (2): 75-79.
- [6] Reimann C, Filzmoser P, Garrett R G. Background and threshold: critical comparison of methods of determination[J]. Science of the Total Environment, 2005, **346**(1-3): 1-16.
- [7] Güler C, Kurt M A, Alpaslan 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**: 435-451.
- [8] Cruz J V, Andrade C. Natural background groundwater composition in the Azores archipelago (Portugal): a hydrogeochemical study and threshold value determination[J]. Science of the Total Environment, 2015, **520**: 127-135.
- [9] MacDonald A M, Dochartaigh B É Ó. Baseline Scotland: an overview of available groundwater chemistry data for Scotland[R]. British Geological Survey, 2005.
- [10] Re V, Sacchi E, Mas-Pla J, *et al.* Identifying the effects of human pressure on groundwater quality to support water management strategies in coastal regions: a multi-tracer and statistical approach (Bou-Areg region, Morocco)[J]. Science of the Total Environment, 2014, **500-501**: 211-223.
- [11] 彭聪, 何江涛, 廖磊, 等. 应用水化学方法识别人类活动对地下水水质影响程度: 以柳江盆地为例[J]. 地学前缘, 2017, **24**(1): 321-331.
Peng C, He J T, Liao L, *et al.* Research on the influence degree of human activities on groundwater quality by the method of geochemistry: a case study from Liujiang basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, **24**(1): 321-331.
- [12] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 48-54.
Pu T, He Y Q, Zhu G F, *et al.* Geochemistry of surface and ground water in the Lijiang basin, northwest Yunnan[J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 48-54.
- [13] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 72-79.
Yu S, Sun P A, Du W Y, *et al.* Effect of hydrochemistry characteristics under impact of human activity: a case study in the upper reaches of the Xijiang river basin[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 72-79.
- [14] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. (第六版). 北京: 地质出版社, 2011.
- [15] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲浅层地下水水化学特征及形成作用[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 370-378.
An L S, Zhao Q S, Ye S Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yellow river delta[J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 370-378.
- [16] Edmunds W M, Shand P. Natural groundwater quality[M]. Malden, MA: Blackwell Publishing, 2008.
- [17] Thilagavathi R, Chidambaram S, Prasanna M V, *et al.* A study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of Pondicherry region, southeast India[J]. Applied Water Science, 2012, **2**(4): 253-269.
- [18] Dogramaci S, Skrzypek G, Dodson W, *et al.* Stable isotope and hydrochemical evolution of groundwater in the semi-arid Hamersley Basin of subtropical northwest Australia[J]. Journal

- of Hydrology, 2012, **475**: 281-293.
- [19] 廖磊, 何江涛, 曾颖, 等. 柳江盆地浅层地下水硝酸盐背景值研究[J]. 中国地质, 2016, **43**(2): 671-682.
- Liao L, He J T, Zeng Y, *et al.* A study of nitrate background level of shallow groundwater in the Liujiang basin[J]. Geology in China, 2016, **43**(2): 671-682.
- [20] 张敏, 袁辉. 拉依达(PaūTa)准则与异常值剔除[J]. 郑州工业大学学报, 1997, **18**(1): 84-88.
- Zhang M, Yuan H. The PaūTa criterion and rejecting the abnormal value [J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1997, **18**(1): 84-88.
- [21] 孙亚乔, 钱会, 张黎, 等. 基于矩形图的天然水化学分类和水化学规律研究[J]. 地球科学与环境学报, 2007, **29**(1): 75-79.
- Sun Y Q, Qian H, Zhang L, *et al.* Natural-water hydrochemistry classification and hydrochemistry rule research based on rectangle hydrochemistry diagram [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, **29**(1): 75-79.
- [22] 宋运红. 河北三沟地区水系沉积物数据马氏距离处理与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- Song Y H. The processing and the application of stream sediment data with Mahalanobis distance in Sangou area, Hebei province [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [23] 陈永良, 路来君, 李学斌. 多元地球化学异常识别的核马氏距离方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, **44**(1): 396-408.
- Chen Y L, Lu L J, Li X B. Kernel Mahalanobis distance for multivariate geochemical anomaly recognition[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, **44**(1): 396-408.
- [24] Morgantini N, Frondini F, Cardellini C. Natural trace elements baselines and dissolved loads in groundwater from carbonate aquifers of central Italy[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2009, **34**(8-9): 520-529.
- [25] 李梦辉, 桑小田, 田振川, 等. 箱形图在长江流域棉区棉花含杂率异常值检验中的应用[J]. 湖北农业科学, 2016, **55**(11): 2895-2898, 2954.
- Li M H, Sang X T, Tian Z C, *et al.* Application of box plot in the outlier test of the cotton trash content in the Yangtze River Cotton Areas[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, **55**(11): 2895-2898, 2954.
- [26] 孙宪春, 金晓媚, 万力. 应用混合分布研究银川平原地下水埋深对植被的影响[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 344-348.
- Sun X C, Jin X M, Wan L. The effect of groundwater level on the vegetation from the mixture of distributions in Yinchuan plain, northwest China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, **15**(5): 344-348.
- [27] 赵微, 林健, 王树芳, 等. 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1277-1283.
- Zhao W, Lin J, Wang S F, *et al.* Influence of human activities on groundwater environment based on coefficient variation method [J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1277-1283.
- [28] 王贺, 谷洪彪, 迟宝明, 等. 柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1699-1706.
- Wang H, Gu H B, Chi B M, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of nitrate pollution in shallow groundwater of Liujiang Basin [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1699-1706.
- [29] 邱汉学, 黄巧珍. 地下水环境背景值及其确定方法[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, (S): 16-20.
- Qiu H X, Huang Q Z. The concept of groundwater environment background and its determination [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994, (S): 16-20.
- [30] 刘文波, 冯翠娥, 高存荣. 河套平原地下水环境背景值[J]. 地学前缘, 2014, **21**(4): 147-157.
- Liu W B, Feng C E, Gao C R. Background value of groundwater environment in Hetao Plain [J]. Earth Science Frontiers, 2014, **21**(4): 147-157.
- [31] 张英, 孙继朝, 黄冠星, 等. 珠江三角洲地区地下水环境背景值初步研究[J]. 中国地质, 2011, **38**(1): 190-196.
- Zhang Y, Sun J C, Huang G X, *et al.* A preliminary study of natural background levels of groundwater in the Zhujiang river delta [J]. Geology in China, 2011, **38**(1): 190-196.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)