

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.018

洞庭湖上游平原浅层地下水水质综合评价

袁瑞强¹, 钟钰翔¹, 龙西亭²

(1. 山西大学环境与资源学院, 山西 太原 030006; 2. 湖南省地质矿产勘查开发局四零二队, 湖南 长沙 410014)

摘要:采用综合指数法、主成分分析(PCA)法和BP神经网络法对洞庭湖上游平原浅层地下水雨、旱季水质进行了综合评价,并分析了3种方法的适用性。结果表明:洞庭湖上游平原浅层地下水存在大面积地质成因污染和局部人为成因污染;雨季西洞庭湖平原澧水和沅江之间以及南洞庭湖平原资江下游浅层地下水为Ⅳ类水,可用于灌溉,不适宜饮用,雨季后受到降水补给、稀释作用,各指标质量浓度普遍降低。BP神经网络法适合整体水质评价,评价结果最合理;PCA法较简单,水质综合评价的结果与BP神经网络法的结果更接近;综合指数法的评价结果受主要污染指标的影响较大,适用于严苛的水质评价。

关键词:地下水;水质综合评价;综合指数法;主成分分析;人工神经网络;洞庭湖上游平原

中图分类号:TV213.4;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0121-07

Comprehensive evaluation of shallow groundwater quality in upper plain of Dongting Lake // YUAN Ruiqiang¹, ZHONG Yuxiang¹, LONG Xiting² (1. School of Environment & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. The 402 Team, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Hunan Province, Changsha 410014, China)

Abstract: The comprehensive index method, principal component analysis method, and BP neural network method were used to investigate and evaluate the water quality of shallow groundwater in the upper plain of Dongting Lake in rainy and dry seasons. The applicability of the above methods was also discussed. The results show that the shallow groundwater in the upper plain of Dongting Lake has regional geological pollution and local anthropogenic pollution. In the rainy season, the shallow groundwater between the Lishui and Yuanjiang rivers in the West Dongting Lake Plain and around the Zijiang River in the South Dongting Lake Plain is Grade IV in water quality, which can be used for irrigation but is not suitable for drinking. After the rainy season, the concentrations of indicators generally decrease due to the dilution induced by precipitation infiltration. The BP neural network method is suitable for comprehensive water quality evaluation, providing the most reasonable result of overall water quality in the study area. The principal component analysis method is relatively simple, with the result being close to that of the BP neural network method. The evaluation result of the comprehensive index method is greatly affected by the most important pollution indicator and is suitable for severe water quality evaluations.

Key words: groundwater; comprehensive water quality assessment; comprehensive index method; principal component analysis; artificial neural network; upper plain of Dongting Lake

地下水在一定地质条件下或使用、管理不当情况下会引起一系列环境问题^[1-5],近年来,跨流域调水、过量施肥、地表废弃物和尾矿随意堆积等人类活动引起的地下水水质退化问题受到广泛关注^[6-9],迫切需要开展地下水环境质量综合评价。

水质综合评价是对多维变量(各种污染物含量指标)组成的非线性系统进行数据处理、分类的综

合性评价工作^[10]。若只对单个指标进行分析,则很难得到区域水质全面、综合、客观的评价。水质综合评价工作的难点在于如何从整体上客观、准确地反映水质情况。目前,常规的评价方法有综合指数法(内梅罗指数法)^[11]、模糊综合评价法^[12-14]、主成分分析(principal component analysis, PCA)法^[15]和多元统计法^[16]等,但这些方法不能很好地分析各项评

价指标与水质等级之间复杂的非线性关系,可能存在主观干预。近年来,人工智能异军突起^[17-19]。其中,人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型是一种高效的、能够模拟生物大脑的机器模型,被广泛应用于解决各种数据庞大的问题。ANN模型在非线性和数据拟合方面存在优势,能够避免确定性模型处理实际问题时的过度简化问题。适当充分训练的 ANN 模型的处理结果具有较高精度,将 ANN 模型用于水质评价领域^[20],可以解决传统方法难以处理的非线性关系和主观干预问题。近年来,BP 神经网络模型被广泛应用于水质评价,并集成了各种算法以提高评价结果,例如,海豚群算法^[21]、萤火虫算法^[22]、粒子群算法^[23]和头脑风暴优化算法^[24-25]等。此外,BP 神经网络模型在处理不同时间和空间水样数据组合时的效能优于其他方法^[26]。随着各种算法的引入,BP 神经网络法的水质评价精度得到提高,但模型结构趋于复杂,且训练样本的构成方式和数量制约神经网络的训练效果^[27]。在实际工作中,依赖单一评价模型的评价结果进行决策仍然具有风险^[28]。

洞庭湖平原素有“鱼米之乡”的美誉,但近年来该区域出现的湿地萎缩和地下水水质退化^[4]可能威胁到粮食生产和饮水安全。已有研究表明,洞庭湖平原浅层地下水中的污染因子主要为无机离子和重金属离子^[29]。平原东南的湘江西支地下水污染较东支严重,两支流地下水由上游至下游污染逐渐减轻,铅、锰是主要污染物^[3]。本文采用综合指数法、PCA 法和 BP 神经网络法对洞庭湖上游平原浅层地下水水质进行综合评价,为洞庭湖平原水环境研究提供参考。

1 研究区概况

洞庭湖位于长江中游,跨鄂、湘两省,南近益阳市、湘阴县,北至安乡县、华容县,东滨汨罗市、岳阳市,西抵澧县,在东经 111° 19′ ~ 113° 34′、北纬 27° 40′ ~ 29° 52′ 之间。洞庭湖湖体大致呈 U 形,汇聚了西、南、东三面来水,自东北方城陵矶注入长江,是中国水量最大的通江湖泊。洞庭湖区处于燕山运动形成的断陷盆地构造中,盆地西、南、东部边缘由山地包围,形成了内部低平、外部高的碟形盆地。洞庭湖上游平原区主要由西洞庭湖平原和南洞庭湖平原组成,分布在洞庭湖西缘和南缘至山区间。洞庭湖流域的多年平均年降水量为 1 373 mm^[30]。雨季为 4—7 月,降水量占全年总降水量的 50% 以上。年内径流分配不均匀,5—10 月径流量占年径流量的 70% 以上。洞庭湖水位始涨于 4 月,7—8 月最

高,11 月至来年 3 月为枯水期。该区域水系发达,澧水、沅江、资江和湘江等“四水”注入洞庭湖。

2 研究方法

2.1 采样与测定

分别于 2019 年 7 月和 10 月在西洞庭湖平原和南洞庭湖平原进行调查采样,设置 52 个采样点(图 1),其中,36 个地下水采样点,16 个地表水采样点。对于没有安装提水装置的水井使用底部带有止回阀的不锈钢采样器采样。对于安装有手压提水装置的水井,直接压水放空并管内存水后采集水样。村镇集中供水厂采集处理前泵口的原水,并将水样装入 4 个 50 mL 高密度聚乙烯采样瓶中,样品装满不留气泡并用密封带封口,现场测定水体理化参数如水温、pH 值、电导率等。在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析中心,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, PerkinElmer, Optime 5300DV)测定水中主要阳离子含量,用离子色谱仪(IC, Shimadzu LC-10A)测定主要阴离子含量,用电感耦合质谱计(ICP-MS, PerkinElmer, Elan DRC-e)测定微量元素。每个水样测定了钠、硫酸根、氯、硝酸盐、亚硝酸盐、氟、铝、钡、镉、钴、铜、镍、铅、钼、锌、汞、砷、硒、铁、铬、锰、硼的质量浓度。依据 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》进行水质评价。

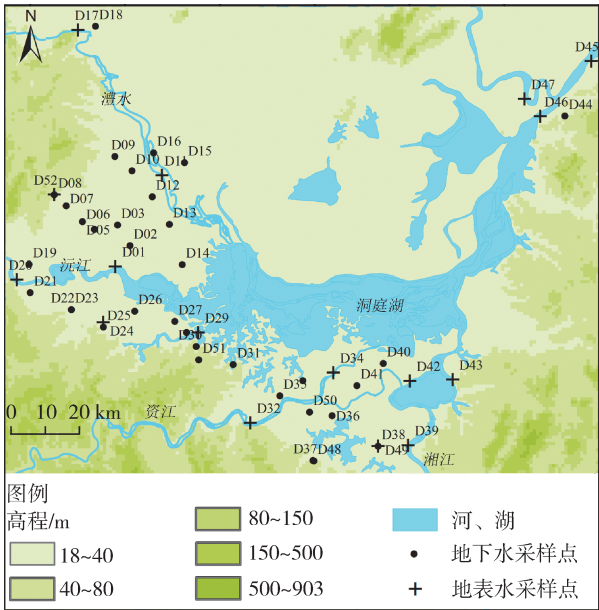


图 1 洞庭湖区域地形、水系和采样点分布

Fig.1 Topography, river system, and sampling sites in Dongting Lake area

2.2 水质评价方法

采用 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》中的评价指标体系,通过综合指数法、PCA 法和 BP 神经网络法分别进行评价。

综合指数法评价过程为^[31]:①依据水质标准对评价指标进行分类,得出各项指标评价结果;②依据各项指标评价结果所属的类别为其赋值;③计算各项评价指标的平均值与最大值的均方根平均值,得到综合评价分值;④查表得到水质评价结果。

PCA 法由具有一定相关性的 n 个指标线性变换得到一组相互无关的综合指标,实现数据降维,同时突出数据中的关键信息。这种方法保留了原始数据中的大部分信息,使得复杂环境问题更容易解决。PCA 法在地下水水质评价中的步骤为:①水质级别向量化;②生成数据矩阵并标准化;③计算协方差矩阵及其特征值和特征向量;④计算各成分的贡献率并由大到小排列;⑤根据累计贡献率达到 85% 的原则确定主成分并计算主成分载荷;⑥以各主成分的贡献率为权重乘以各主成分得分,求和得到综合评价分值,分值越大水质越差,若水样的分值低于水质类别的分值,则水样满足该水质类别。

本文使用的 BP 神经网络模型结构如图 2 所示。其评价步骤为:①确定各水质指标 $x_1, x_2, \dots, x_{22}$ 的取值区间;②分别为每个水质类别随机生成 300 条训练数据;③用 95% 的训练数据训练网络,用剩余 5% 的训练数据检验网络训练效果;④如果训练效果不好,则返回第 2 步增加训练数据后重做后续步骤;⑤输入水样数据进行水质评价,得到评价类 y 。

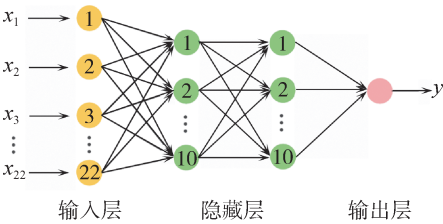


图 2 BP 神经网络模型拓扑结构

Fig.2 Topological structure of BP neural network model

3 结果与分析

3.1 灌溉适宜性及主要超标成分

洞庭湖上游浅层地下水 pH 值主要介于 6.3 ~ 8.0 之间,电导率主要在 40 ~ 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,为低矿化的淡水(图 3)。钠吸附比是美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)盐土实验室提出的可评价地下水灌溉适宜性的指标^[32],考虑到浅层地下水是该区域主要灌溉水源之一,采用钠吸附比评价其灌溉适宜性。根据 USDA 盐土实验室分类,钠吸附比分成 S1 ~ S4 4 个区间,电导率分成 C1 ~ C5 5 个区间。研究区浅层地下水钠吸附比与电导率关系见图 4,测量结果处于 C1S1

和 C2S1 区间,表明水源含盐量较低且引起土壤板结风险小,适宜作为灌溉水源。在选定的 22 项指标中,洞庭湖上游浅层地下水中硝酸盐、铝、锌、铁以及锰的质量浓度较高,构成主要超标成分,使部分水样达到 V 类水质。

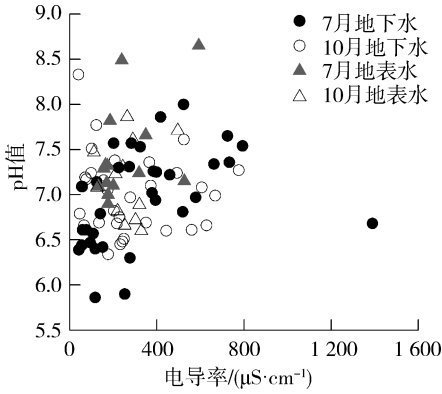


图 3 研究区浅层地下水和地表水电导率与 pH 值关系
Fig.3 Plot of pH value versus conductivity of shallow groundwater and surface water in study area

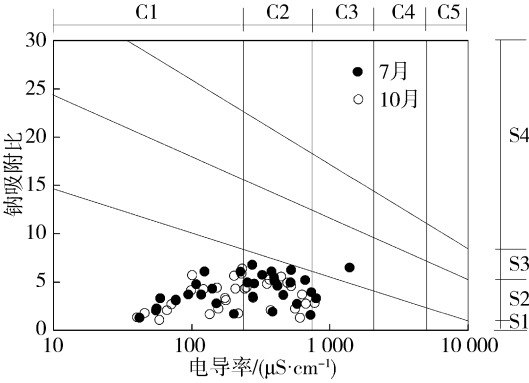


图 4 研究区浅层地下水电导率与钠吸附比关系
Fig.4 Sodium adsorption ratio versus conductivity of shallow groundwater in study area

浅层地下水中硝酸盐超标区域均为耕地和居民养殖区。7 月地下水中硝酸盐质量浓度严重超标的区域包括沅江下游 D22 采样点(45 mg/L)和 D23 采样点(93 mg/L)附近,以及资江下游高粱坪 D36 采样点(53 mg/L)附近;10 月除 D36 采样点外,其余地区的硝酸盐质量浓度较 7 月降低。浅层地下水中铝含量存在明显的季节性,7 月铝的质量浓度普遍达到 V 类水标准,10 月铝的质量浓度降低到 II 类或 III 类水标准。澧水下游 D13 采样点浅层地下水中锌含量超过 V 类水标准。浅层地下水中铁含量集中在西洞庭湖平原,大部分浅层地下水中铁的质量浓度达到 V 类水标准;雨季结束后,10 月浅层地下水中铁的质量浓度降为 IV 类水标准,靠近山前的平原边缘部分出现了 I 类和 II 类水;南洞庭湖平原浅层地下水中铁含量较低,7 月地下水多为 II 类水,10 月多为 I 类水。浅层地下水中锰含量普遍较高,达到 IV

类水标准,其中 D13 采样点附近地下水中锰含量达 V 类水标准。总体上,洞庭湖上游浅层地下水存在大面积的铁、锰和铝污染和局部的人为成因污染(如硝态氮和锌)。雨季后主要超标指标质量浓度普遍降低,水质季节变化明显。

地表水的水质状况与地下水类似,且地表水水质仍然是 10 月优于 7 月。雨季后洞庭湖流域地表水水质好转。

3.2 水质综合评价结果

3.2.1 综合指数法评价结果

综合指数法的评价结果表明,7 月Ⅳ类和Ⅴ类水分别占全部水样的 72.7% 和 27.3%;10 月Ⅳ类水占 66.6%,没有Ⅴ类水,Ⅰ类和Ⅱ类水增多,占比分别为 18.2% 和 15.2%。综合指数法的评价结果显示洞庭湖流域浅层地下水水质受到雨季影响较大,整体上 10 月水质评价结果优于 7 月。

综合指数法将各种污染物的污染指数纳入评价范围,污染最严重的指标权重超过 50%。因此,综合指数法的评价结果中,污染最严重的指标对水质评价结果影响明显。研究区 7 月地下水主要超标成分为硝酸盐、铝、铁、锰、锌,对应的超标区地下水水质评价结果为Ⅳ类和Ⅴ类。10 月研究区大部分地区地下水中铝含量降低,原对应超标区地下水水质达到Ⅰ类或Ⅱ类。铁、锌、锰含量在 10 月略有降低,污染严重的区域地下水水质整体仍为Ⅳ类,如西洞庭湖平原澧水附近的 D09~D13 采样点附近。

3.2.2 PCA 法评价结果

依据累积贡献率大于 85% 的原则,在 22 项评价指标构成的矩阵中提取出 10 个主成分。每个主成分中指标系数的绝对值越大,则该指标与对应主成分之间的相关性就越强。洞庭湖上游浅层地下水主要污染指标中,铝在第一主成分上有较高的载荷,硝酸盐在第二主成分上有较高的载荷,铁、锌和锰在第三主成分上载荷较高。

PCA 法评价结果接近正态分布“钟形曲线”,Ⅰ类和Ⅴ类水很少,Ⅲ类水最多。PCA 法的评价结果中,7 月无Ⅰ类水,10 月有 4 个地下水采样点水质呈Ⅰ类;7 月Ⅱ类地下水有 6 处,10 月有 8 处;7 月Ⅲ类地下水有 17 处,10 月有 9 处;7 月Ⅳ类地下水有 8 处,10 月有 11 处;7 月Ⅴ类地下水有 D13 和 D44 采样点 2 处,10 月时仅有 D13 采样点。总体上,Ⅰ类地下水占所有地下水采样点的 6%,Ⅱ类水的占比为 21%,Ⅲ类水的占比 39%,Ⅳ类水的占比 29%,Ⅴ类水的占比 5%。评价结果显示 10 月水质优于 7 月。水质较差地区集中在西洞庭湖平原澧水和沅江间,其中澧水下游 D13 采样点附近水质

最差。

3.2.3 BP 神经网络法评价结果

用于水质评价的 BP 神经网络模型训练效果好,用于检验的数据全部评价正确。应用该模型对洞庭湖上游平原区地下水水质进行评价的结果包含小数,显示部分水样的水质处于两个水质类别之间,为水质评价和对比提供更多的信息。将评价结果四舍五入可得到最终水质整体评价结果。

BP 神经网络法水质评价结果中,7 月地下水无Ⅴ类水,多数属于Ⅳ类水,占比为 55%,Ⅲ类、Ⅱ类和Ⅰ类水占比分别为 27%、16% 和 2%;10 月地下水Ⅰ~Ⅳ类水的占比分别为 21%、37%、24% 和 18%,多数属于Ⅱ类和Ⅲ类水。评价结果显示了地下水水质明显的季节变化特征。7 月西洞庭湖澧水和沅江之间以及南洞庭湖资江下游水质较差,为Ⅳ类,其余地区水质多呈Ⅲ类。10 月洞庭湖上游平原浅层地下水水质总体好转,仅有澧水下游的 D13 和 D14 采样点附近,以及益阳市周边的 D36 采样点附近水质仍然较差。

3.3 讨论

评价结果中如图 5 所示。综合指数法和 BP 神经网络法的结果显示出更明显的水质季节变化,符合实际情况;PCA 法的评价结果中 7 月和 10 月的平均值变化不大,且分布区间接近。PCA 法和 BP 神经网络法的评价结果更接近,相对综合指数法的评价结果更好。综合指数法的评价结果受个别重污染指标的影响比 PCA 法和 BP 神经网络法大,使其 7 月水质评价结果明显比另外两种方法评价结果差;10 月主要污染指标质量浓度降低,综合指数法的评价结果和另外两种方法的结果相似。此外,PCA 法和 BP 神经网络法 10 月的评价结果接近正态分布,但是综合指数法的评价结果显示明显的偏态分布。一般来说,当存在明显的大范围污染时,水质评价结果显示为偏态分布;当污染缓解后,水质评价结果应

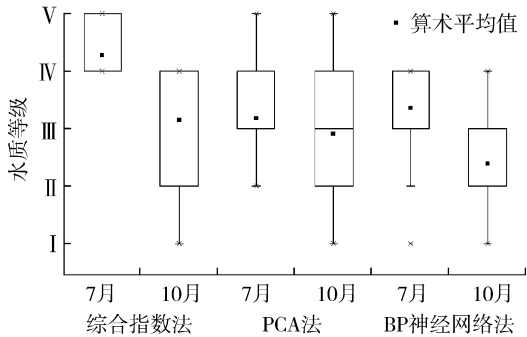


图 5 不同评价方法水质评价结果箱式图

Fig. 5 Box diagram of water quality evaluation results of different evaluation methods

近似于天然水体的正态分布。综上所述,BP 神经网络法的水质评价结果更符合实际。

3 种评价方法都识别出了主要的污染区域。综合指数法评价结果中几乎整个西洞庭湖平原和南洞庭湖平原为重污染的Ⅳ类和Ⅴ类水分布区。主成分分析法和 BP 神经网络法评价结果显示主要污染区域在西洞庭湖平原的澧水和沅江之间,以及南洞庭湖平原的资江下游,污染范围较明确。

从采样点数量来看,BP 神经网络法和 PCA 法评价结果相同的采样点有 32 个,BP 神经网络法和综合指数法评价结果相同的采样点有 22 个,PCA 法和综合指数法评价结果相同的采样点有 20 个。BP 神经网络法与其他方法评价结果相同的采样点个数最多。同时,BP 神经网络法和 PCA 法对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类水评价结果相同的采样点个数最多;BP 神经网络法和综合指数法对Ⅳ类水评价结果相同的采样点个数最多(图 6),可见 BP 神经网络法能有效地反映主要污染指标对整体水质的影响,同时没有过度突出这种影响。综上所述,在水质综合评价中,BP 神经网络法的评价效果最优。

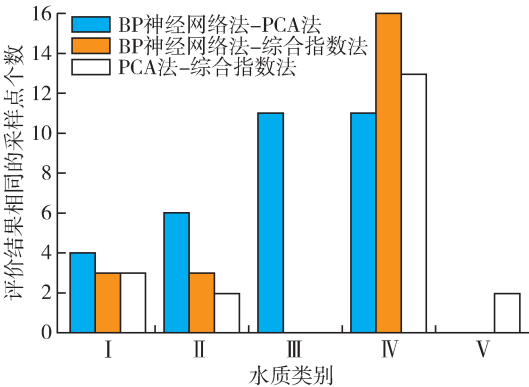


图 6 任意两种方法评价结果相同的采样点个数对比

Fig.6 Comparison of number of samples with same evaluation result of any two methods

综合指数法在水质评价中需要对各评价指标赋权重,权重大小由经验确定,导致评价结果的客观性不足。污染程度最高的指标权重大于整体水质的权重,对水质综合评价结果的影响过大。洞庭湖上游平原区浅层地下水中主要超标指标硝酸盐、铝、铁、锌和锰的质量浓度直接影响了评价结果。综合指数法适用于严苛的水质评价,例如,居民饮用水源水质综合评价。

PCA 法对水质综合评价的结果比较理想。该方法较为简单并基本消除了主观性对评价结果的影响。然而,该方法中数据降维步骤虽然消除了数据之间的相关性,剔除冗余信息,但是丢失了部分信息,增加评价结果的不确定性。该方法计算过程中

把数据之间的关系简化为线性关系,忽略了自然过程中变量之间非线性关系的本质。

BP 神经网络法克服了综合指数法和 PCA 法的缺点,综合评价结果在反映水质时间变化和空间变化方面是最好的。该方法克服了主观性对评价结果的干扰,保证了水质综合评价的客观性。BP 神经网络法从所有指标的表现出发评价总体水质,保留全部数据信息,不过度强调污染最严重的指标。此外,BP 神经网络法可以处理数据之间的非线性关系,提高了数据信息的保真度。必须指出,BP 神经网络法属于人工智能算法,无法给出水质评价的过程和机理,其评价结果的精度只能通过优化网络结构、提升网络训练水平来提高。

4 结 论

a. 西洞庭湖平原和南洞庭湖平原浅层地下水中存在大面积地质成因污染(如铁、锰和铝)和局部人为成因污染(如硝态氮和锌)。西洞庭湖平原的澧水和沅江之间,以及南洞庭湖平原的资江下游浅层地下水中水质较差的Ⅳ类水分布较广,可用于灌溉,但不适宜饮用。总体上,雨季西洞庭湖平原浅层地下水污染较重,主要污染物为地质来源的铁、锰和铝。雨季后主要超标指标的质量浓度普遍降低,水质季节变化明显。

b. BP 神经网络法适用于水质综合评价,可有效地显示但不会过度突出主要污染指标对水质综合评价结果的影响,能更好地反映出水质季节变化,评价水体水质整体情况的效果好于传统的综合指数法和 PCA 法,在 3 种方法中评价结果最合理。

c. PCA 法不能充分反映主要污染指标对水质综合评价结果的影响。综合指数法的评价结果中没有Ⅲ类水,水质“非好即坏”,这与其他两种方法的评价结果有明显差异。此外,主要污染指标对综合指数法的评价结果影响较大,该方法适用于严苛的水质评价。

参考文献:

[1] LONG Xiting, ZHANG Keneng, YUAN Ruiqiang, et al Hydrogeochemical and isotopic constraints on the pattern of a deep circulation groundwater flow system [J]. Energies, 2019, 12(3) :404:1-18.

[2] WANG Shiqin, HU Yukun, YUAN Ruiqiang, et al. Ensuring water security, food security, and clean water in the North China Plain: conflicting strategies [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2019, 40:63-71.

[3] 姜燕松,李忠武,黄金权,等. 基于标识指数与敏感性分

- 析的洞庭湖滨湖区地下水重金属污染评价[J]. 环境科学研究, 2013 (7): 736-742. (JIANG Yansong, LI Zhongwu, HUANG Jinqian, et al. Assessments for heavy metal pollution of groundwater at lakeside of Dongting Lake based on identification index and sensitivity analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26 (7): 736-742. (in Chinese))
- [4] 黄兵, 姜恒, 钱湛, 等. 环洞庭湖区地下水水质空间分布特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2019 (10): 34-37. (HUANG Bing, JIANG Heng, QIAN Zhan, et al. Spatial distribution characteristics of groundwater quality in Dongting Lake area based on ArcGIS [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (10): 34-37. (in Chinese))
- [5] 孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 等. 华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例[J]. 环境科学, 2015, 36 (11): 4051-4059. (KONG Xiaole, WANG Shiqin, ZHAO Huan, et al. Distribution characteristics and source of fluoride in groundwater in lower plain area of North China Plain: a case study in Nanpi Country [J]. Environmental Science, 2015, 36 (11): 4051-4059. (in Chinese))
- [6] YUAN Ruiqiang, WANG Meng, WANG Shiqin, et al. Water transfer imposes hydrochemical impacts on groundwater by altering the interaction of groundwater and surface water [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124617.
- [7] ZHU Meijia, WANG Shiqin, KONG Xiaole, et al. Interaction of surface water and groundwater influenced by groundwater over-extraction, waste water discharge and water transfer in Xiong'an New Area, China [J]. Water, 2019, 11 (3): 539.
- [8] 袁瑞强, 张文新, 王鹏, 等. 引黄调水对汾河受水区水环境的影响[J]. 自然资源学报, 2018, 33 (8): 1416-1426. (YUAN Ruiqiang, ZHANG Wenxin, WANG Peng, et al. Impacts of water transfer from the Yellow River on water environment in the receiving area of the Fenhe River [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33 (8): 1416-1426. (in Chinese))
- [9] YUAN R, WANG S, WANG P, et al. Changes in flow and chemistry of groundwater heavily affected by human impacts in the Baiyangdian catchment of the North China Plain [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76 (16): 571.
- [10] 冯蕊, 袁瑞强. 基于 t-SNE 的晋北矿区地下水水质评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (10): 2540-2546. (FEN Rui, YUAN Ruiqiang. Groundwater quality assessment based on the t-SNE method in the north coal field of Shanxi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (10): 2540-2546. (in Chinese))
- [11] 刘萌, 陈世俭. 基于内梅罗指数与主成分分析的洪湖地区地下水水质评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2016, 50 (4): 633-640. (LIU Meng, CHEN Shijian. Groundwater quality assessment of Honghu Area based on the Nemerow index and principal component analysis method [J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences), 2016, 50 (4): 633-640. (in Chinese))
- [12] 刘子剑, 崔斌, 张楠. 改进的模糊综合评价法在长春市地下水水质评价中的应用[J]. 水资源保护, 2014, 30 (6): 40-43. (LIU Zijian, CUI Bin, ZHANG Nan. Application of improved fuzzy mathematical comprehensive evaluation method to evaluation of groundwater quality in Changchun City [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (6): 40-43. (in Chinese))
- [13] 周密, 陈龙赞, 马振. 基于变权重的水质综合评价体系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47 (1): 20-25. (ZHOU Mi, CHEN Longzan, MA Zhen. Study on the comprehensive evaluating system of water quality based on variable weight [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (1): 20-25. (in Chinese))
- [14] 陈建明, 李美枫, 袁汝华, 等. 水利工程精细化管理组合评价与实证分析[J]. 水利经济, 2020, 38 (6): 37-42. (CHEN Jianming, LI Meifeng, YUAN Ruhua, et al. Evaluation and empirical analysis of delicacy management of water conservancy projects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38 (6): 37-42. (in Chinese))
- [15] 程学宁, 卢毅敏. 基于 SOM 和 PCA 的闽江流域地表水水质综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33 (3): 59-67. (CHENG Xuening, LU Yimin. Comprehensive evaluation of surface water quality in Minjiang River Basin based on SOM and PCA [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (3): 59-67. (in Chinese))
- [16] 周及, 关卫省, 付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36 (2): 79-84. (ZHOU Ji, GUAN Weisheng, FU Lintao. Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (2): 79-84. (in Chinese))
- [17] AHMED A N, OTHMAN F B, AFAN H A, et al. Machine learning methods for better water quality prediction [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124084.
- [18] BUI Q T, NGUYEN Q H, NGUYEN X L, et al. Verification of novel integrations of swarm intelligence algorithms into deep learning neural network for flood susceptibility mapping [J]. Journal of Hydrology, 2019, 581: 124379.
- [19] 崔东文. 多组群教学优化算法-神经网络-支持向量机

- 组合模型在径流预测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 41-48. (CUI Dongwen. Combined model of multi-group teaching optimization algorithm-neural network-support vector machine in runoff prediction application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4): 41-48. (in Chinese))
- [20] 崔永华, 左其亭. 基于 Hopfield 网络的水质综合评价及其 matlab 实现[J]. 水资源保护, 2007, 23(3): 14-16. (CUI Yonghua, ZUO Qiting. Comprehensive assessment of water quality based on Hopfield network and realization with matlab[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(3): 14-16. (in Chinese))
- [21] 徐康耀, 葛考, 赵建强, 等. 基于 DPA-BP 神经网络的地下水水质综合评价[J]. 节水灌溉, 2015(9): 66-69. (XU Kangyao, GE Kao, ZHAO Jianqiang, et al. Comprehensive evaluation of groundwater quality based on DPA-BP neural network[J]. Water Saving Irrigation, 2015(9): 66-69. (in Chinese))
- [22] 颜建, 潘志富, 谭璟, 等. 基于萤火虫算法的 BP 神经网络的水质评价[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(4): 104-110. (YAN Jian, PAN Zhifu, TAN Jing, et al. Assessment of water quality by firefly algorithm based on BP neural network model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 104-110. (in Chinese))
- [23] 李海涛, 王博睿. 基于粒子群算法优化的 BP 神经网络在海水水质评价中的应用[J]. 海洋科学, 2020, 44(6): 31-36. (LI Haitao, WANG Borui. Application of BP neural network based on particle swarm optimization in seawater quality assessment[J]. Marine Sciences, 2020, 44(6): 31-36. (in Chinese))
- [24] 李海涛, 邵泽东. 基于头脑风暴优化算法与 BP 神经网络的海水水质评价模型研究[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(1): 57-62. (LI Haitao, SHAO Zedong. Research on seawater quality evaluation model based on brain storm optimization algorithm and BP neural network[J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(1): 57-62. (in Chinese))
- [25] 胡林凯, 崔东文. 基于 SBO-PP 模型的水资源可持续发展能力评价模型及应用[J]. 水利经济, 2017, 35(5): 7-11. (HU Linkai, CUI Dongwen. Evaluation model for sustainable development capacity of water resources based on SBO-PP model and its application[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(5): 7-11. (in Chinese))
- [26] KUMAR P G D, VISWANATH N C, CYRUS S, et al. Mixing data for multivariate statistical study of groundwater quality[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(8): 506.
- [27] 杨程, 郭亚昆, 郑兰香, 等. T-S 模糊神经网络模型训练样本构建及其在鸣翠湖水质评价中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2020, 35(3): 356-366. (YANG Cheng, GUO Yakun, ZHENG Lanxiang, et al. Construction of training samples for T-S fuzzy neural network model and its application in water quality evaluation of Mingcui Lake[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(3): 356-366. (in Chinese))
- [28] 刘礼庆, 袁乃华, 夏蔚芸. 单一模型地下水水质评价结果的可靠性探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 10-13. (LIU Liqin, YUAN Naihua, XIA Weiyun. Study of reliability of groundwater quality evaluation results using a single model[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 10-13. (in Chinese))
- [29] 皮建高, 陈新国, 刘长明, 等. 洞庭湖区浅层地下水质量现状与安全供水研究[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 536-541. (PI Jiangao, CHEN Xinguo, LIU Changming, et al. A study of the secure water supply and shallow groundwater quality in Dongting Lake area[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 536-541. (in Chinese))
- [30] 徐卫红, 葛德祥, 李娜, 等. 1960—2011 年洞庭湖流域降水量变化特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(1): 108-121. (XU Weihong, GE Dexiang, LI Na, et al. Characteristics of precipitation variation in the Dongting Lake Basin during 1961-2011[J]. Wetland Science, 2016, 14(1): 108-121. (in Chinese))
- [31] 时雯雯, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆乌昌石城市群地下水多重水质评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 109-116. (SHI Wenwen, ZHOU Jinlong, ZENG Yanyan, et al. Multiple groundwater quality evaluation of Urumqi-Changji-Shihezi city agglomeration in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(2): 109-116. (in Chinese))
- [32] RICHARDS L A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[J]. Soil Science, 1954, 78(2): 154.

(收稿日期: 2020-06-15 编辑: 施业)

