

# 地表水环境质量指数的定量分级及其适用性

裴晓龙<sup>1</sup>, 丁强<sup>1</sup>, 杨玉珍<sup>1</sup>, 彭功平<sup>2</sup>, 杨瑾<sup>1</sup>, 王一博<sup>1</sup>

(1. 陕西省环境监测中心站 水环境监测室, 陕西 西安 710054; 2. 力合科技(湖南)股份有限公司, 湖南 长沙 410205)

**摘要:** [目的] 为了实现地表水环境质量定性评价与定量评价的统一, 简化地表水环境质量评价过程, 减少公众对水质评价的认知难度。[方法] 应用地表水环境质量指数(SWQI), 通过对陕西省地表水监测网2015—2019年 $1.83 \times 10^5$ 个监测数据进行数据统计分析。[结果] 78.7%的样本SWQI指数落在2.5~8.0区间, 点位最为密集; 各水质类别中, SWQI指数各区间样本个数均近似正态分布或半正态分布。[结论] ①用统计方法得到SWQI定性评价I—VI级阈值( $\leq 3.5, \leq 5, \leq 6.5, \leq 8, \leq 10, > 10$ ); ②分级阈值在断面、河流、区域3个层次上的验证显示了与现行地表水环境质量评价办法具有良好的一致性。使用SWQI指数对地表水环境质量进行评价, 可以实现与现行评价办法的对接过渡。

**关键词:** 地表水; 环境质量评价; 定量分级; 分级阈值; 地表水环境质量指数(SWQI)

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2020)05-0146-06

**中图分类号:** X824

**文献参数:** 裴晓龙, 丁强, 杨玉珍等. 地表水环境质量指数的定量分级及其适用性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 146-151. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.022; Pei Xiaolong, Ding Qiang, Yang Yuzhen, et al. Quantitative classification and applicability of surface water environmental quality index [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 146-151.

## Quantitative Classification and Applicability of Surface Water Environmental Quality Index

Pei Xiaolong<sup>1</sup>, Ding Qiang<sup>1</sup>, Yang Yuzhen<sup>1</sup>, Peng Gongping<sup>2</sup>, Yang Jin<sup>1</sup>, Wang Yibo<sup>1</sup>

[Water Environment Monitoring Office, Shaanxi Provincial Environmental Monitoring Center Station, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Lihe Technology Co., Ltd(Hu'nan), Changsha, Hu'nan 410205, China]

**Abstract:** [Objective] To realize the unification of qualitative and quantitative evaluation, simplify the process of surface water environmental quality assessments, and reduce the public's difficulty in the cognition of water quality. [Methods] Using the surface water environmental quality index (SWQI), a statistical analysis was conducted based on  $1.83 \times 10^5$  monitoring data points from the surface water monitoring network of Shaanxi Province from 2015 to 2019. [Results] Considering SWQIs, 78.7% of them were in the range of 2.5—8.0, which had the densest points. The number of samples in each interval of the SWQI index had an approximately normal or semi-normal distribution. [Conclusion] ① We used statistical methods to obtain the SWQI qualitative evaluation thresholds I—VI ( $\leq 3.5, \leq 5.0, \leq 6.5, \leq 8.0, \leq 10.0, > 10.0$ ). ② The verification showed that it was consistent with the current surface water environment quality evaluation method at three levels of verification (section, river, and region). The SWQI can be used to evaluate the surface water environmental quality and realize the transition to the current evaluation method.

**Keywords:** surface water; environmental quality assessment; quantitative classification; classification threshold; surface water environmental quality index (SWQI)

水质评价是水质管理工作的重要基础, 水质评价结果不仅需提供水质类别、主要污染指标, 更应准确反映水质的时空变化情况, 这就要求所采用的评价方

法能够准确地将水质状况进行量化。同时, 一种水质评价方法要想在环境管理中被广泛应用, 除了科学性 and 准确性外, 还必须具备计算简单, 便于掌握和易于

收稿日期: 2020-05-22

修回日期: 2020-06-05

资助项目: 陕西省社会发展科技攻关项目“渭河(陕西段)重金属的分布特征及潜在风险评估研究”(2015SF282); 陕西省教育厅专项科研项目(17JK0379)

第一作者: 裴晓龙(1988—), 男(汉族), 河南省平顶山市人, 大学本科, 助理工程师, 主要从事水环境质量评价方面的研究。Email: peixl5067@163.com.

通讯作者: 丁强(1968—), 男(回族), 重庆市人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事生态环境监测评价方面的研究。Email: 183361510@qq.com.

认知的特点,另外最好能够同时解决定性和定量评价的统一<sup>[1]</sup>。

目前国内外主要使用的地表水环境质量评价方法主要有单因子评价法、综合污染指数法、灰色评价法、主成分分析法、模糊评价法等<sup>[2]</sup>。而中国地表水环境质量评价办法中使用单因子评价法做水质的定性评价,用综合污染指数法做定量的趋势分析,没有给出能同时完成定性和定量分析评价的方法。

如果从事水环境质量评价方面时间较长,肯定会面临以下几个问题:①两个断面都是Ⅲ类,都可以定性评价为水质良好,怎么对比两个断面的水质优劣呢?②两条河流Ⅰ—Ⅲ类断面比例分别是65%,70%,劣Ⅴ类断面比例分别为10%,13%,按照评价办法两条河流均定性评价为轻度污染,如何对比两条河流的水质优劣呢?③两个区域地表水Ⅰ—Ⅲ类断面比例与劣Ⅴ类断面比例之和差异不大,这时候又如何进行区域地表水环境质量的比较呢?以上几个问题在2011年印发的《地表水环境质量评价办法(试行)》中都不能很好解决。

使用无量纲指数<sup>[3]</sup>对实测数据进行统计定量分级,同时研究对应的评价描述可以解决上述的问题。通过对陕西省地表水监测网2015年至今的 $1.83 \times 10^5$ 余个监测数据进行统计分析,得到一套适用于我省的地表水环境质量指数(简称地表水质指数或SWQI)指数分级标准,并从断面、河流、区域等多个层次做了大量的数据验证。验证结果表明:用统计的方法得到SWQI定性评价Ⅰ—Ⅵ级阈值( $\leq 3.5, \leq 5, \leq 6.5, \leq 8, \leq 10, > 10$ ),与现行地表水环境质量评价办法具有良好的一致性,可以应用于陕西省地表水环境质量现状及趋势评价。另外SWQI指数可以实现地表水环境质量定性评价与定量评价的统一,简化地表水环境质量评价过程,减小公众对水质评价的认知难度,可以实现如同空气质量指数AQI一般的功效,比现行地表水环境质量评价办法在趋势分析、变化程度描述等方面具有明显的优势,甚至具有不可替代性。目前,国内期刊及出版物中相关研究成果很少涉及。

本文从实际工作中遇到的几个问题出发,通过数据分析得到结论,并进行了适用性验证,以期在地表水环境质量评价方法的研究上做出探索,为环境管理提供技术方法和应用数据支撑。

## 1 思路及方法

### 1.1 研究思路

本研究从地表水环境质量评价实际工作中遇到的几个典型问题出发,归纳总结了问题的表现形式,

提出问题的解决思路,然后经过数据收集整理,使用数理统计方法,得到具有适用性的统计结果,并从监测断面、河流(流域)及区域(地市)等3个层次进行数据验证,并分析了影响因素(见图1)。

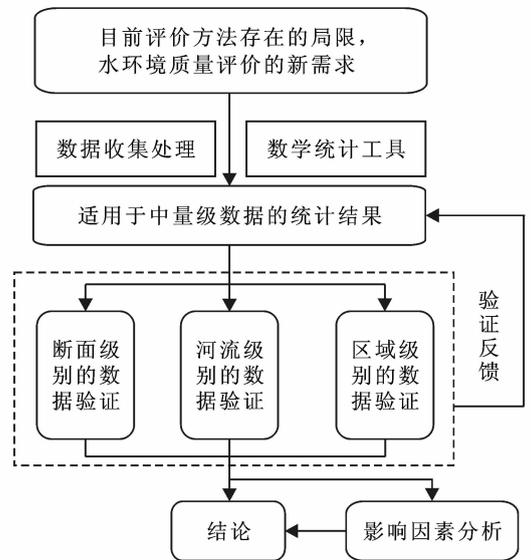


图1 SWQI定量分级和验证性研究思路

### 1.2 研究方法

地表水环境质量指数<sup>[4]</sup>(surface water quality index)可简称地表水质指数(SWQI),计算采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)<sup>[5]</sup>表1中除水温、粪大肠菌群和总氮以外的21项指标,包括:pH值、溶解氧、高锰酸盐指数、生化需氧量、氨氮、石油类、挥发酚、汞、铅、总磷、化学需氧量、铜、锌、氟化物、硒、砷、镉、铬(六价)、氰化物、阴离子表面活性剂和硫化物。

先计算出所有监测断面各单项指标浓度的算术平均值,计算出单项指标的水质指数,再综合计算出断面水质指数SWQI。低于检出限的指标项,按照1/2检出限值参加计算各单项指标浓度的算术平均值。

(1) 单项指标的水质指数。单项指标的水质指数是指监测断面某单项监测指标浓度的算术平均值与该指标对应的地表水Ⅲ类标准限值的比值。除溶解氧、pH值两项指标外,计算单项指标的水质指数如公式(1)所示:

$$SWQI(i) = \frac{C(i)}{C_s(i)} \quad (1)$$

式中: $C(i)$ 为第*i*个水质指标的浓度值; $C_s(i)$ 为第*i*个水质指标地表水Ⅲ类标准限值;SWQI(*i*)为第*i*个水质指标的水质指数。下同。

溶解氧计算方法如公式(2),pH值计算方法如公式(3)—(4):

$$SWQI(DO) = \frac{C_s(DO)}{C(DO)} \quad (2)$$

式中: $C(\text{DO})$ 为溶解氧的浓度值; $C_s(\text{DO})$ 为溶解氧的地表水Ⅲ类标准限值; $\text{SWQI}(\text{DO})$ 为溶解氧的水质指数。

$$\text{SWQI}(\text{pH}) = \frac{7.0 - \text{pH}}{7.0 - \text{pH}_{\text{sd}}} \quad (\text{pH} \leq 7) \quad (3)$$

$$\text{SWQI}(\text{pH}) = \frac{\text{pH} - 7.0}{\text{pH}_{\text{su}} - 7.0} \quad (\text{pH} > 7) \quad (4)$$

式中: $\text{pH}_{\text{sd}}$ 为 GB3838-2002 中 pH 值的下限值; $\text{pH}_{\text{su}}$ 为 GB3838-2002 中 pH 值的上限值; $\text{SWQI}(\text{pH})$ 为 pH 的水质指数。

根据各单项指标的 SWQI,取其加和值即为断面的 SWQI,计算如式(5)所示:

$$\text{SWQI}_{\text{断面}} = \sum_{i=1}^n \text{SWQI}(i) \quad (5)$$

式中: $\text{SWQI}_{\text{断面}}$ 为断面水质指数; $\text{SWQI}(i)$ 为第  $i$  个水质指标的水质指数; $n$ 为水质指标个数。

(2) 河流(流域)水质指数取该河流(流域)内所有断面水质指数 SWQI 的算术平均值,计算如公式(6)所示:

$$\text{SWQI}_{\text{河流}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{SWQI}_{\text{断面}(i)} \quad (6)$$

式中: $\text{SWQI}_{\text{河流}}$ 为河流水质指数; $\text{SWQI}_{\text{断面}(i)}$ 为第  $i$  个监测断面的水质指数; $n$ 为该河流上监测断面总数。

(3) 区域水质指数取该区域内所有监测断面水质指数 SWQI 的算术平均值,计算如式(7)所示:

$$\text{SWQI}_{\text{区域}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{SWQI}_{\text{断面}(i)} \quad (7)$$

式中: $\text{SWQI}_{\text{区域}}$ 为区域水质指数; $\text{SWQI}_{\text{断面}(i)}$ 为区域内第  $i$  个监测断面的水质指数; $n$ 为该区域内监测断面总数。

## 2 统计结果与对比分析

基于统计样本数量的代表性和数据计算量等方面的考虑,选取 2015—2019 年陕西省国、省、市控监测断面共计  $1.83 \times 10^5$  个数据,覆盖了陕西省十市一区的 107 条河流。通过对 SWQI 指数的数学统计和散点分布分析(见图 2),可以得到 3 点结论:①SWQI 指数超过 20 的污染非常严重断面是少数,只占不足 1%;②SWQI 指数在 2.5~8 区间聚集度非常高,占比超过 78.7%;③样本序号是以时间顺序排列,序列靠后的样本 SWQI 指数越收敛,且低值区域样本越密集,也宏观反映了全省地表水环境质量的改善情况。

为了能够对 SWQI 指数进行分级,形成定性评价,我们以数据统计结果为基础,得到 SWQI 指数区间与水质综合类别的关联矩阵(见表 1)。

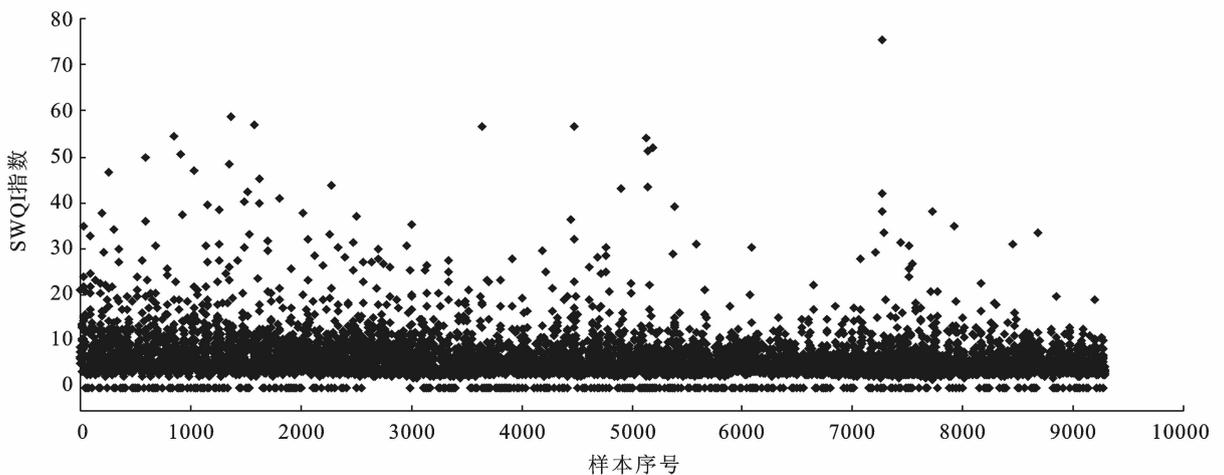


图 2 2015—2019 年陕西省十市一区 SWQI 样本散点分布

表 1 SWQI 指数各区间样本数与水质综合类别的关联矩阵

水质类别	SWQI 指数各区间样本数/个						样本总数/个
	$\leq 3.5$	$\leq 5$	$\leq 6.5$	$\leq 8$	$\leq 10$	$> 10$	
I	364	67	2				433
II	1 283	2 248	329	3			3 863
III	13	377	922	322	31		1 665
IV		23	248	532	397	147	1 347
V		2	15	92	234	157	500
劣 V		1	5	48	147	705	906
合计/个	1 660	2 718	1 521	997	809	1 009	8 714

关联矩阵显示:①结合 SWQI 指数各区间样本数分布图,各水质类别中,SWQI 指数各区间样本个数均呈现正态分布(I类和劣V呈现半正态分布),且收敛区间较小,特别是Ⅲ类水质的 SWQI 指数近似服从  $N(5.73, 1.04)$  的正态分布;②I—II类样本数量与 SWQI 指数不大于 5 的样本数量偏差率为 0.95%,说明水质类别评价为优的样本可以用 SWQI 指数不大于 5 来做数学替换,这一点也与现行的地表水环境质量评价办法中 I—II 类水质统称为水质优一致;③IV, V类样本数量与 SWQI 指数 6.5~10 的样本数量偏差率为 1.12%,说明水质类别评价为轻度及中度污染的样本可以用 SWQI 指数 6.5~10 来做数学替换;④劣V类样本数量与 SWQI 指数大于 10 的样本数量偏差率为 5.38%,说明水质类别评价为重度污染的样本基本可以用 SWQI 指数大于 10 来做数学替换(见图 3)。

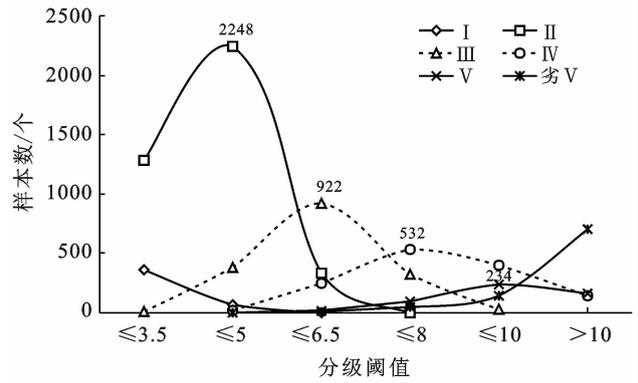


图 3 SWQI 指数各区间样本数分布趋势

基于上述分析,为了与现行的地表水环境质量标准中的水质类别对应统一,同时参考空气质量指数相关定义,将 SWQI 指数分级的阈值定义如表 2 所示。

表 2 SWQI 指数分级阈值及对应的定性评价

项目	SWQI 指数					
	≤3.5	≤5	≤6.5	≤8	≤10	>10
SWQI 分级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级
对应定性评价结果	优	优	良好	轻度污染	中度污染	重度污染

### 3 数据验证和影响因素

为了验证 SWQI 指数分级阈值及对应的定性评价结论,笔者设计了断面、河流和区域等 3 个不同层次的验证,来全面评估 SWQI 指数在定性和定量评价上的稳定性和适用性。

#### 3.1 断面水质验证

为了减小系统误差,选择 2019 年陕西省国、省、市控断面的 1 658 组数据做验证(见表 3)。结果显示: I—II 类样本数量与 SWQI 指数 I—II 级的样本数量偏差率为 2.9%;Ⅲ类样本数量与 SWQI 指数Ⅲ级样本数量偏差率为 0.1%;IV 类样本数量与 SWQI 指数 IV 级的样本数量偏差率为 11.4%;V 类样本数量与 SWQI 指数 V 级的样本数量偏差率为 6.2%;劣 V 类样本数量与 SWQI 指数 VI 级的样本数量偏差率为 11.5%。在断面层次,SWQI 指数分级评价与现行地表水环境质量评价办法的一致性良好。

#### 3.2 河流水质验证

现行的地表水环境质量评价办法中,是以涵盖断面数量是否少于 5 个来使用不同方法确定河流的水质状况:当断面数量少于 5 个时,取断面各指标的算术平均值,然后按照断面的类别对应的水质状况来作

为该河流的水质状况;当断面数量多于 5 个(含 5 个)时,按照所有断面中 I—III 类及劣 V 类断面的比例关系(即通常所说的优 III 劣 V 比例法)来确定该河流的水质状况。SWQI 指数的话,则不需如此繁琐,直接计算河流涵盖所有断面的 SWQI 指数的算术平均值。

表 3 2019 年 SWQI 指数各区间样本数与水质综合类别的验证矩阵

水质类别	2019 年 SWQI 指数各区间样本数/个						合计
	≤3.5	≤5	≤6.5	≤8	≤10	>10	
I	97	14	1				112
II	340	435	53				828
III	6	99	194	36	4		339
IV		5	82	78	24	1	190
V			6	25	25	12	68
劣V		1	2	12	24	82	121
合计/个	443	554	338	151	77	95	1 658

考虑到陕西省特殊的地理分布,陕南、关中、陕北等 3 个区域的河流各具特点,因此分别选择了渭河、汉江、延河 3 条具有地域代表性的河流,并分别选择 2,5,9 月作为枯水期、平水期、丰水期的代表月份,进行河流 SWQI 指数分级评价与现行地表水环境质量评价办法的一致性验证(结果见表 4)。

表 4 渭河、汉江、延河 3 条河流 SWQI 指数评价与水质类别比例法的对比验证

月份	河流	断面 总数/个	水质类别比例法评价结果/%				SWQI 指数法评价	
			I—III	IV—V	劣 V	定性评价	SWQI 指数	SWQI 指数评价
2	渭河	19	47.4	47.4	5.3	轻度污染	6.413 7	良好
	汉江	14	100.0			优等	3.562 1	优等
	延河	7	14.3		85.7	重度污染	13.329 1	重度污染
5	渭河	19	84.2	15.8		良好	5.152 6	良好
	汉江	14	100.0			优等	3.456 2	优等
	延河	7	28.6	71.4	0.0	轻度污染	7.427 2	轻度污染
9	渭河	19	89.5	10.5		良好	4.699 6	优等
	汉江	14	100.0			优等	3.646 2	优等
	延河	7	42.9	28.6	28.6	中度污染	8.233 1	中度污染

结果显示:①SWQI 指数评价法与现行地表水环境质量评价办法中水质类别比例法在汉江、延河两条河流不同水期代表月份的评价结果完全一致,并且 SWQI 指数评价法可以直观的反映出不同月份水质状况的变化;②平水期的渭河使用 SWQI 指数评价法与水质类别比例法的结果一致,在枯水期和丰水期评价均高于水质类别比例法的评价结果。经过进一步的挖掘分析,枯水期渭河 SWQI 指数 6.4137 已经非常接近轻度污染的阈值下限 6.5,处于轻度污染的灰色区域(邓聚龙教授的灰色系统理论<sup>[6]</sup>)。丰水期的优 III 比例已经达到 89.5%,已经非常接近水

质优的阈值下限 90%,处于水质优的灰色地带,且灰度值非常高。SWQI 指数分级评价与现行地表水环境质量评价办法在河流层次呈现高度一致的评价结果。

### 3.3 区域水质验证

现行的地表水环境质量评价办法中,区域地表水环境质量与河流水质状况的评价一致,不在赘述。在关中、陕南、陕北选择咸阳、安康、延安 3 个地市,并选择 2,5,9 月作为枯水期、平水期、丰水期的代表月份,进行区域(地市)SWQI 指数分级评价与现行地表水环境质量评价办法的一致性验证(见表 5)。

表 5 咸阳、安康、延安 3 市 SWQI 指数评价与水质类别比例法的对比验证

月份	地市	断面 总数/个	水质类别比例法评价结果/%				SWQI 指数法评价	
			I—III	IV—V	劣 V	定性评价	SWQI 指数	SWQI 指数评价
2	咸阳	11	54.5	27.3	18.2	轻度污染	5.895 6	良好
	安康	28	100.0	0	0	优等	3.268 1	优等
	延安	19	15.8	26.3	57.9	重度污染	12.725 4	重度污染
5	咸阳	11	100.0	0	0	优等	5.107 8	良好
	安康	28	100.0	0	0	优等	3.240 5	优等
	延安	19	36.8	47.4	15.8	轻度污染	8.636 2	中度污染
9	咸阳	10	80.0	20.0	0	良好	5.282 2	良好
	安康	28	100.0	0	0	优等	3.774 1	优等
	延安	18	26.3	52.6	21.1	中度污染	8.096 7	中度污染

结果显示:①SWQI 指数评价法与水质类别比例法在安康市不同水期代表月份的评价结果完全一致,并且 SWQI 指数评价法可以直观的反映出安康市不同月份水质状况的细微变化;②丰水期的咸阳市 SWQI 指数评价法与水质类别比例法一致,平水期基本一致,枯水期略有差异(相差一个评价级别);③枯水期、丰水期的延安市 SWQI 指数评价法与水质类别比例法一致,平水期有差异(相差一个评价级别)。综上,SWQI 指数分级评价与现行地表水环境质量评价办法在区域(地市)层次的呈现基本一致的评价结果。

### 3.4 影响因素分析

3.4.1 评价标准的影响 地表水环境质量标准 GB3838-2002 是在 2002 年发布的,标准中对部分常规项目的分类不够细(I, II 类标准值相同的项目有 11 个, II, III 类标准值相同的项目有 9 个, III, VI 类标准值相同的项目有 5 个),跨类别同标的情况导致单因子评价时水质类别会出现跳跃式变化。例如:由于阴离子表面活性剂的 I, II 和 III 类标准均为 0.2 mg/L,如果阴离子表面活性剂 2 个实测值为 0.19, 0.21 mg/L,用单因子评价则分别为 I 类和 IV 类,类别差异巨大,

反映被评价水体状况明显变化;而用 SWQI 指数评价是,单项分指数分别为 0.95 和 1.05,差异很小。这也反映出单因子评价存在自身难以解决的问题。

3.4.2 评价方法统计基础的影响 SWQI 指数评价法是一种均权量化评价法,因而 SWQI 指数反应的是水质各项污染物质浓度水平的数学概化。现行地表水环境质量评价办法是一种极值评价法,只关注到污染最重的指标,忽略或者弱化了其他指标的影响<sup>[7]</sup>。

3.4.3 地区差异带来的影响 SWQI 指数评价法定量分级的阈值是使用数理统计方法得到的,因此在数据区间的高值区和低值区都会存在扰动。而由于陕西省地理上差异,陕南、关中、陕北 3 个地理区域的地表水环境现状有明显不同的特点,对 SWQI 指数评价法的稳定性和适应性提出了很高的要求。

## 4 结论

(1) 从监测数据出发,用数理统计方法得到 SWQI 定性评价 I—VI 级阈值( $\leq 3.5$ ,  $\leq 5$ ,  $\leq 6.5$ ,  $\leq 8$ ,  $\leq 10$ ,  $> 10$ ),经过断面、河流、区域等 3 个层次的数据验证,在不同水期、不同地理区域上均显示了与现行地表水环境质量评价办法良好的一致性。

(2) 在 SWQI 分级评价的基础上,地表水环境质量指数 SWQI 可以实现地表水环境质量定性评价与定量评价的统一,简化地表水环境质量评价过程,普及公众对水质评价的认知度,实现如同空气质量指数 AQI 一般的功效。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 孔海燕,陈珂,赵颖,等.水环境质量评价及其数量分析方法研究[J].中国资源综合利用,2018,36(3):109-111.
- [2] 李名升,张建辉,梁念,等.常用水环境质量评价方法分析与比较[J].地理科学进展,2012,31(5):617-624.
- [3] 马立平.统计数据标准化—无量纲化方法:现代统计分析方法的学与用(三)[J].北京统计,2000(3):34-35.
- [4] 嵇晓燕,孙宗光,陈亚男.城市地表水环境质量排名方法研究[J].中国环境监测,2016,32(4):54-57.
- [5] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [6] 邓聚龙.灰色系统综述[J].世界科学,1983(7):1-5.
- [7] 廖岳华,樊娟,陈世雄,等.我国地表水环境质量评价存在的问题与建议[J].安全与环境工程,2010,17(3):55-58.
- (上接第 145 页)
- [3] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等.中国水土保持措施分类[J].水土保持学报,2013,27(2):80-84.
- [4] 汪丁建,唐辉明,李长冬,等.强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J].岩土力学,2016,37(2):439-445.
- [5] 尹晓萌,晏鄂川,杜毅,等.库水位下降条件下堆积层滑坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(3):8-15.
- [6] 刘礼领.库水位升降对堆积体滑坡稳定性影响的研究[J].西部探矿工程,2011,23(2):35-39.
- [7] 武秀文,贺可强,崔宪丽,等.不同库水位条件下堆积层滑坡渗流场和稳定系数的影响分析[J].卷宗,2012(10):144-145.
- [8] 武秀文.库水位变化加卸载动力效应及其对堆积层边坡稳定性影响规律研究[D].山东青岛:青岛理工大学,2012.
- [9] 刘晓红,贺可强,罗会来,等.库水位升降对典型堆积层滑坡的加卸载动力作用规律研究[J].工程建设,2014,46(5):18-23.
- [10] 蔡玲,胡成,陈植华,等.江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律[J].水文地质工程地质,2019,46(4):18-25.
- [11] Liu Xiaoli, Wang Sijing, Wang Enzhi. A study on the uplift mechanism of Tongjiezhi dam using a coupled hydro-mechanical model [J]. Engineering Geology, 2011,117(1/2):134-150.
- [12] Seo S N, Liu P L F. Edge waves generated by the landslide on a sloping beach [J]. Coastal Engineering, 2013,73:133-150.
- [13] 赵权利,孙红月,王智磊,等.承压水对平推式滑坡的作用分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):762-769.
- [14] 赵权利.缓倾滑坡中承压水作用机理研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [15] Doglioni A, Fiorillo F, Guadagno F M, et al. Evolutionary polynomial regression to alert rainfall-triggered landslide reactivation [J]. Landslides, 2012, 9(1):53-62.
- [16] Xu Qiang, Liu Hanxiang, Ran Jiabin, et al. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, Southwestern China [J]. Landslides, 2016,13(6):1555-1570.
- [17] Ran Qihua, Qian Qun, Wang Guangqian, et al. Analytical solution for slope instability assessment considering impact of confined aquifer [J]. Journal of Central South University, 2015,22(4):1502-1509.
- [18] 孙红月,吕庆.堆积层滑坡成因机理与防治[M].北京:科学出版社,2012:1-5.