

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.015

国外地表水水质指数评价法综述

刘玲花,吴雷祥,吴佳鹏,刘来胜,霍炜洁

(中国水利水电科学研究院水环境研究所,北京 100038)

摘要:讨论了水质指数的发展历程,介绍了国外几种比较成熟、应用比较广泛的水质指数,包括它们的背景和应用领域,以期为我国的地表水质量评价提供参考。综合评价已有的水质评价指数及其应用情况,认为加拿大环境部长理事会水质指数(CCMEWQI)法是一种值得推荐使用的水质评价方法,建议以此方法为基础,建立适合我国的水源地水质指数评价方法。

关键词:地表水水质;水质指数;水质评价;水质指数评价

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)01-0086-05

Review on surface water quality index assessment method in foreign countries

LIU Linghua, WU Leixiang, WU Jiapeng, LIU Laisheng, HUO Weijie

(Department of Water Environment Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The development history of water quality index was discussed. Several mature and widely used water quality indexes in western countries, including their background and application fields, were introduced, aiming to offerring reference for surface water quality assessment in our country. Comprehensively evaluation of water quality index and its application showed that the Canadian Council of Ministers of the Environment water quality index (CCMEWQI) is a recommended water quality evaluation method. It is recommended that proper water quality index assessment method for headwater areas in China should be developed based on CCMEWQI.

Key words: surface water quality; water quality index; water quality assessment; water quality index assessment

水质评价是合理利用和保护水资源的一项基本工作,是水环境管理与决策的依据。地表水水质评价是一个复杂的过程,需要考虑大量样本和多种水质参数。目前国内外水质评价方法有很多,包括最差因子判别法^[1]、灰关联分析法^[2]、主成分分析法^[3]、水质指数法^[4-8]、层次分析法^[9]等,每种方法都有自己的特点和使用条件。最差因子判别法是在所有因子中选最差的那个类别作为总体类别,是偏于悲观的方法。水质指数法是将大量的水质监测数据用简单公式进行计算,将水质分为非常好、好、较

好、差等几种类别。水质指数评价法使用简单、评价结果直观、精确度较高,能较为完整地反映地表水的污染程度,在国内外得到广泛应用,如,美国国家卫生基金会水质指数(National Sanitation Foundation Water Quality Index, NSFWQI)^[10],加拿大环境部长理事会水质指数(Canadian Council of Ministers of the Environment Water Qaulity Index, CCMEWQI)^[11],俄勒冈州水质指数(OWQI)^[12]。笔者对国外常用的水质指数评价法进行比较分析,以期为我国的地表水质量评价提供参考。

基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAC12B02)

作者简介:刘玲花(1965—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事水环境监测与评价,水污染控制及水处理技术研究。E-mail: lhlhliu@iwahr.com

1 水质指数的概念及水质指数评价法的发展历程

1.1 水质指数的概念

水质指数 (water quality index, WQI) 是综合了多个水质参数的归一化无量纲数。水质指数里需要考虑的参数取决于水的用途。常考虑的水质参数包括 BOD、COD、pH 值、总大肠菌群、温度和营养物质 (氮和磷) 等。WQI 将这些参数的复杂的科学信息综合成一个单一的数。

- 建立水质指数包括如下的步骤:
- 步骤 1: 根据水体的用途, 确定水质参数以及可接受的标准浓度值;
- 步骤 2: 将每个水质参数的实测值与标准值进行对比, 得到单个水质参数的指数值;
- 步骤 3: 确定每个参数的权重, 以便计算综合水质指数;
- 步骤 4: 选择一种算法计算水质指数值;
- 步骤 5: 按照水质指数的取值范围将水划分为不同的等级, 如优、良、中、差等。

1.2 水质指数评价法的发展历程

最早见诸文献的水质指数评价法可以追溯到 1965 年, 由美国俄亥俄河流域水卫生管理委员会的 Horton^[13] 提出。Horton 选择 10 个最常用的水质参数 (DO、pH 值、粪大肠菌群、电导率、碳-氯仿提取物 (CCE)、碱度、氯化物、温度、污水处理) 计算水质指数, 指标权重的赋值为 1 ~ 4, 用线性聚合函数计算水质指数值。Horton 拟定了水质评分尺度, 0 代表最差水质, 100 代表最佳水质。

随着 Horton 的开创性研究, 很多学者又提出了几种不同的水质指数, 这些水质指数被一些供水和水污染控制机构大力提倡使用^[12,14]。

Brown 等^[15] 于 1972 年提出的水质指数与 Horton 水质指数类似, 他们选用 9 项水质参数 (DO、粪大肠菌群、pH、BOD₅、硝酸盐、磷酸盐、浊度、总溶解性固体、温度) 来计算水质指数, 水质参数的权重由 142 位专家进行打分确定, 参数的权重决定了该参数对水质用途的重要性。Brown 水质指数的计算方法为

$$W_{qi} = \sum_{i=1}^9 \omega_i q_i \tag{1}$$

式中: W_{qi} 为水质指数; q_i 为第 i 项参数的水质评分; ω_i 为第 i 项参数的权重。

其他研究人员根据水的用途不同选用不同的水质参数, 提出了类似的水质指数法。意大利的 Prati 等^[16] 在 1971 年提出的水质指数评价系统考虑了 13

项参数 (pH、DO、BOD₅、COD、高锰酸盐指数、悬浮固体、氨氮、硝酸盐、氯离子、铁、锰、吸光值), 把水体水质划分为优良、可允许、轻污染、污染、严重污染 5 个等级。

Nemerow^[17] 1974 年提出了污染指数法 (内梅罗水质指数), 选择 14 项参数: 温度、色度、浊度、pH、粪大肠菌群数、溶解固体、悬浮固体、总氮、碱度、硬度、氯化物、锰、铁、硫酸盐和溶解氧, 根据水体用途按下式计算水质指数:

$$P_{ij} = \sqrt{\frac{\left(\frac{c_i}{s_{ij\max}}\right)^2 + \left(\frac{c_i}{s_{ij\text{av}}}\right)^2}{2}} \tag{2}$$

式中: P_{ij} 为按照第 j 种用途计算的水质指数; c_i 为第 i 项参数的实测浓度; s_{ij} 为第 j 种用途的 i 项参数的水质标准; $\left(\frac{c_i}{s_{ij\max}}\right)$ 和 $\left(\frac{c_i}{s_{ij\text{av}}}\right)$ 分别为 $\frac{c_i}{s_{ij}}$ 的最大值和平均值。

Nemerow 将水体用途分成人体接触的用途 (饮用、游泳、制造饮料等)、人体间接接触的用途 (工业制备食品、农业应用、钓鱼等)、人体不接触的用途 (工业冷却、旅游等)。不同用途的水其水质标准不同。内梅罗指数特别考虑了污染最严重的因子, 是目前仍然应用较多的一种环境质量指数。

Steinhart 等^[18] 于 1982 年应用一种新的环境质量指数评价大型湖泊生态系统的现状与变化趋势。20 世纪 90 年代中期, 加拿大环境部长理事会的水质指南工作组将水质指数法引入加拿大^[19]。最近, 加拿大环境部长理事会水质指数 (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index, CCMEWQI) 在加拿大不同省份及各种生态系统的水质评价工作中得到了广泛应用^[11,20-21]。

几乎所有的水质指数都需要对参数检测值进行无量纲标准化, 根据需要将预期浓度解释为水质“好”或“坏”, 然后根据各参数对水质影响的重要性分别对它们赋予权重, 加权计算得到水质指数。

2 几个重要的地表水水质评价指数

2.1 加拿大环境部长理事会水质指数

加拿大水质指数 (Canadian Water Quality Index, CWQI) 是在 1995 年英国哥伦比亚大学公布的水质指数基础上确定的^[19], 目前该方法在加拿大很多省份均已得到应用^[22-23], 该指数从范围 (Scope)、频率 (Frequency) 和振幅 (Amplitude) 3 个方面计算水质监测数据是否超过了水质标准限值^[23]。加拿大水质指数的计算公式为

$$W_{\text{QI}} = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (3)$$

其中 $F_1 = \frac{P}{N} \times 100 \quad (4)$

$$F_2 = \frac{q}{M} \times 100 \quad (5)$$

$$F_3 = \frac{Q}{0.01Q + 0.01} \quad (6)$$

其中 $Q = \frac{1}{M} \sum S \quad (7)$

式中: F_1 为超过标准限值的水质参数的个数占总监测参数数量的百分比(代表范围); F_2 为超过标准限值的监测数据个数占有所有监测数据的百分比(代表频率); F_3 为振幅; P 为超标的水质参数的个数; N 为水质监测参数总数; q 为所有水质监测数据中超标数据的个数; M 为水质监测数据总数; S 为不达标水质指标的实测值偏离标准值的倍数。

对于规定了上限值的一般水质指标,则

$$S = \frac{c_i}{c_s} - 1 \quad (8)$$

对于不能低于某一限值的指标(如溶解氧、pH等),则

$$S = \frac{c_s}{c_i} - 1 \quad (9)$$

式中: c_i 为指标实测值, c_s 为对应指标标准限值。

水质综合指数(WQI)的取值在0~100之间,0表示水质非常差,100表示水质很好。根据WQI值将水体划分为5个级别:很好(95~100),好(80~94),中等(60~79),及格(45~59),差(0~44),见表1。对不同级别的水体可以采取不同的水处理工艺,以达到饮用水安全的目标^[20]。加拿大水质指数值对于水质级别的分类有一定的主观性,需要结合专家经验和群众对水质的期望对WQI值划分区间以确定水质级别。

2.2 加拿大不列颠哥伦比亚水质指数

加拿大不列颠哥伦比亚水质指数(British

表1 加拿大饮用水源水体总体等级分值及其相对应的适宜性说明

水质级别	分值	适宜性说明
很好	95~100	水质没有受到任何污染威胁或损害,水质条件非常接近自然的原始水平
好	80~94	水质只受到轻微程度的污染威胁或损害,水质条件基本保持在自然的或令人满意的水平
中等	60~79	水质偶尔受到威胁或损害,水质条件有时无法保持自然的或令人满意的水平
及格	45~59	水质经常受到威胁或损害,水质条件往往无法保持自然的或令人满意的水平
差	0~44	水质总是受到威胁或损害,水质条件通常无法保持自然的或令人满意的水平

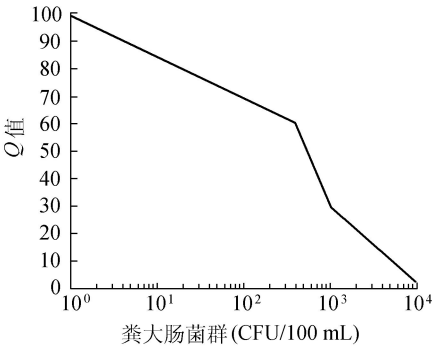
Columbia Water Quality Index, BCWQI)是由加拿大环境部在1995年增加的一种水质评价指数。该指数类似于2.1节介绍的CCMEWQI。将水样的水质参数的监测结果与其标准限值比较,确定该参数是否超标,然后利用下面的公式计算水质指数值:

$$B_{\text{CWQI}} = \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + \left(\frac{F_3}{3}\right)^2}}{1.453} \quad (10)$$

数字1.453是为了保证指数值在0~100之间。 F_1 、 F_2 、 F_3 的计算方法见式(4)~(6)。需要强调的一点是,重复采集水样和增加监测站点的数量可以提高不列颠哥伦比亚省水质指数的准确性。

2.3 美国国家卫生基金会水质指数

为了比较不同地区的河流和湖泊水质状况,Brown等^[15]在调查142个水质科学家基础上建立了美国国家卫生基金会水质指数(National Sanitation Foundation Water Quality Index, NSFQI),该水质指数考虑了9个水质参数,分别为DO、粪大肠菌群、pH、BOD₅、硝酸盐、总磷、温度、浊度、总固体。建立了9个水质参数的Q值曲线,如粪大肠菌群和溶解氧的Q值曲线见图1和图2。



注:粪大肠菌落数大于100000时,Q值为2。

图1 粪大肠菌群的Q值曲线

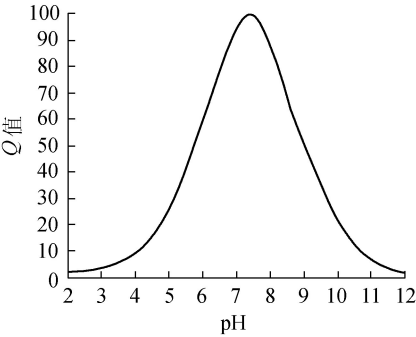


图2 pH的Q值曲线

根据9个参数的实测值,确定其Q值,然后乘以Q值得出水质指数。NSFWQI值的计算公式如下:

$$W_{\text{QI}} = \sum_{i=1}^q \omega_i Q_i \quad (11)$$

式中: ω_i 为第 i 项参数的权重, Q_i 为第 i 项参数的水质评分。

表 2 是水质指数的计算实例。水质指数取值范围为 0~100,根据水质指数的取值范围将水分为 5 类:0~25 为非常差的水,25~50 为差的水,50~70 为中等质量的水,70~90 为质量好的水,90~100 为非常好的水。

表 2 水质指数计算实例

参数	实测值	Q 值	权重	水质分指数
溶解氧	82%	90	0.17	15.30
粪大肠菌群	0.12 (CFU/mL)	72	0.16	11.52
pH	7.67	92	0.11	10.12
BOD ₅	2 (mg/L)	80	0.11	8.80
温度变化	5℃	72	0.10	7.20
总磷 (PO ₄ -P)	0.5 (mg/L)	60	0.10	6.00
硝酸盐 (NO ₃)	5 (mg/L)	67	0.10	6.70
浊度 (NTU)	5	85	0.08	6.80
总固体	150 (mg/L)	78	0.07	5.46
W_{QI}				77.90

2.4 俄勒冈州水质指数

俄勒冈州水质指数 (Oregon Water Quality Index,OWQI) 选择 8 个水质参数 (温度、DO、BOD、pH、总固体、氨氮和硝酸盐氮的加和、TP、粪大肠菌群) 表征水质状况^[24]。每个参数的检测结果按照水的用途转换成无量纲指数值,指数值 10 为最差,100 为最好。计算公式为

$$W_{QI} = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^2}}}$$

(12)

式中: n 为参数的数量; S_i 为第 i 个参数的指数值。

W_{QI} 小于 60 表示水质极差,60~79 表示水质较差,80~84 表示水质一般,85~89 表示水质良好,95~100 表示水质特别好。

2.5 综合污染指数

Sargaonkar 等^[25] 在对印度河流指标监测和随后的分类基础上开发了综合污染指数 (Overall Index of Pollution,OIP),监测指标包括 pH、浊度、溶解氧、生化需氧量、硬度、总溶解性固体、总大肠菌群、砷和氟化物。根据印度的水质标准或者其他公认的标准如世界卫生组织或欧盟的水质标准,将水样的水质级别分为 5 个等级:非常好、可接受、轻微污染、污染、严重污染。综合污染指数计算公式为

$$O_{IP} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n}$$

(13)

式中: O_{IP} 为综合污染指数, P_i 为第 i 个参数的污染指数, n 为参数个数。

2.6 Bhargava 水质指数

为了开发这种指数,Bhargava^[26] 将水质参数划

分为 4 组,每组都包含同一类型的几个参数。第 1 组包括了表示饮用水细菌污染状况的大肠杆菌;第 2 组包括了有毒物质、重金属等;第 3 组包括了感官类参数,如气味、颜色和浊度;第 4 组包括了无机和有机无毒物质,如氯化物、硫酸盐等。确定了分类指数,可以采用下面的简化模型计算水质指数值:

$$W_{QI} = \prod_{i=1}^n f_i(P_i)^{\frac{1}{n}}$$

(14)

式中: n 为水质参数的个数; $f_i(p_i)$ 为第 i 个参数的灵敏度函数,包括第 i 个变量的权重影响。

2.7 几种水质评价指数的对比分析

表 3 对上述介绍的不同国家的 6 种水质评价指数的计算方法进行了对比。从表 3 可以看出,水质指数的计算方法多种多样,包括了加权算术平均法如美国国家卫生基金会水质指数 (NSFWQI),算术平均法如综合污染指数 (OIP),调和平方的不加权算术平均法如俄勒冈州水质指数 (OWQI)、加权几何平均 (如 Bhargava) 水质指数以及调和平方加和法,如加拿大环境部长理事会水质指数 (CCMEWQI) 和加拿大不列颠哥伦比亚水质指数 (BCWQI) 等。

表 3 6 种水质评价指数计算方法对比

水质评价指数	计算方法 (模型)
加拿大环境部长理事会水质指数 (CCMEWQI)	调和平方的加和
加拿大不列颠哥伦比亚水质指数 (BCWQI)	调和平方的加和
美国国家卫生基金会水质指数 (NSFWQI)	加权算术平均
俄勒冈州水质指数 (OWQI)	调和平方的不加权算术平均
综合污染指数 (OIP)	算术平均
Bhargava 水质指数	加权几何

Lumb 等^[27] 采用加拿大安大略湖的 30 个水质监测站点连续 7 年的水质监测数据,利用美国 NSF 水质评价指数法、俄勒冈州水质指数 (OWQI) 和加拿大水质评价指数法进行评价,并将两国的水质指数评价方法进行对比分析,结果表明:①在水的使用方面利用水质指数进行评分和分类,加拿大水质指数评价法比美国的水质指数评价法严格;②俄勒冈州水质指数 (OWQI) 与加拿大水质评价指数的评价结果较接近;③美国的 NSF 水质评价指数法在对水质分级方面显得较宽松,该方法对安大略湖水质评价结果在大多数情况下都是“好”和“极好”,即使是对一些穿过工业区、人口密集区和农业区的监测断面的评价结果也是如此。

加拿大环境部长理事会水质指数 (CCMEWQI) 和加拿大不列颠哥伦比亚水质指数 (BCWQI) 利用

调和平方和法计算水质指数,这是一种比较好的水质指数算法,该方法不仅在加拿大得到广泛应用,联合国环境署(UNEP)也应用加拿大水质指数法评价世界不同国家的饮用水水质^[24]。

3 结 语

水质指数法是评价不同时空的水体水质优劣的一种较好的工具,能把一系列水质数据用一个简单的公式综合成一个数,用来评价某一时间和地点的水质好坏,可以回答“水可以饮用吗? 水可以作为饮用水源吗? 水可以游泳吗?”等诸如此类的问题。水质评价指数的简化表达更容易被公众、政策制定者所接受。

各国的水质指数计算方法各不相同,常用的水质指数计算方法包括加权算术平均法,算术平均法,调和平方的不加权算术平均法、加权几何平均法、调和平方加和法等。加权平均或修正的加权平均应用比较广泛。

综合评价已有的水质评价指数及其应用情况,加拿大环境部长理事会水质指数(CCMEWQI)法是一种值得推荐使用的水质评价方法,建议以此方法为基础,建立适合我国的水源地水质指数评价方法。

参考文献:

[1] 毛兴华. 常用水质评价方法的选择[J]. 水科学与工程 技术, 2006 (1): 21-23. (MAO Xinghua. Selection on assessment methods of typical water quality [J]. Water Science and Engineering Technology, 2006 (1): 21-23. (in Chinese))

[2] 赵秀春. 灰关联分析法在大沽河青岛段水质评价中的应用[J]. 水生态学, 2009, 2 (5): 115-118. (ZHAO Xiuchun. Applicaton of gray relational analysis method in evaluation of water quality in Qingdao part of Dagū River [J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2 (5): 115-118. (in Chinese))

[3] 孙雷. 主成分分析法和模糊综合分析法在水质评价中的实例比较[J]. 环境科学与管理, 2011, 36 (8): 178-181. (SUN Lei. Comparison between performance of principal component analysis and fuzzy analysis in water quality evaluation [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36 (8): 178-181. (in Chinese))

[4] 黄海东, 张克峰. 小城镇水源地水质评价方法选择方案探讨[J]. 水利科技与经济, 2010, 16 (7): 736-740. (HUANG Haidong, ZHANG Kefeng. Discussion on methods of water quality assessment of small towns water source [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16 (7): 736-740. (in Chinese))

[5] 李思悦, 张全发. 运用水质指数法评价南水北调中线水源地丹江口水库水质[J]. 环境科学研究, 2008, 21

(3): 61-68. (LI Siyue, ZHANG Qianfa. Assessing the water quality in the water source area of the middle route of the South to North Water Transfer Project (Danjiangkou Reservoir) using a water quality index method [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21 (3): 61-68. (in Chinese))

[6] 周晓铁, 韩宁宁, 孙世群, 等. 安徽省河流和湖库型饮用水水源地水质评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22 (2): 176-180. (ZHOU Xiaotie, HAN Ningning, SUN Shiqun, et al. Assessment of water quality in river-based and lake/ reservoir-based drinking water sources in Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22 (2): 176-180. (in Chinese))

[7] 闫欣荣. 修正的内梅罗指数法及其在城市地下饮用水源地水质评价中的应用[J]. 地下水, 2010, 32 (1): 6-7. (YAN Xinrong. Modified Nemerow exponent and application of the water quality evaluation in urban underground drinking water source area [J]. Groundwater, 2010, 32 (1): 6-7. (in Chinese))

[8] ZHU Lei, HU Han. Fuzzy complex index in water quality assessment of municipalities [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2010, 2 (9): 809-813.

[9] 庞振凌, 常红军, 李玉英, 等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J]. 生态学报, 2008, 28 (4): 1810-1819. (PANG Zhenling, CHANG Hongjun, LI Yuying, et al. Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (4): 1810-1819. (in Chinese))

[10] SHARIFI M. Assessment of surface water quality by an index system in Anzali Basin [J]. Hydrological Basis for Water Resources Management, 1990, 197: 163-171.

[11] LUMB A, HALLIWELL D, SHARMA T. Application of CCME water quality index to monitor water quality: a case study of the Mackenzie River Basin, Canada [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 113 (1/ 3): 411-429.

[12] DEBELS P, FIGUEROA R, URRUTIA R, et al. Evaluation of water quality in the Chilla' n River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 110 (1): 301-322.

[13] HORTON R K. An index number system for rating water quality [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1965, 37 (3): 300-306.

[14] KANNEL P R, LEE S, LEE Y S, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 132 (1): 93-110.

(下转第 96 页)

- 水源地水质变化趋势分析及对策建议[J]. 干旱环境监测, 2014, 28 (3): 97-103. (HAN Qinqin, YANG Yonghong. Analysis and suggestion on water quality monitoring data of centralized drinking water source in Urumqi City of 2007 to 2013 [J]. Arid Environmental Monitoring, 2014, 28(3): 97-103. (in Chinese))
- [4] GB/T 14848—93 地下水质量标准[S].
- [5] 袁辉. 石羊河干流水功能区水质变化趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2014, 50 (6): 5-7. (YUAN Hui. Changing trend analysis of water quality in the water function areas of Shiyang River trunk stream [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2014, 50 (6): 5-7. (in Chinese))
- [6] MA Fangbing, LI Chunhui, WANG Xuan. A bayesian method for comprehensive water quality evaluation of the Danjiangkou Reservoir water source area, for the middle route of the South-to-North Water Diversion Project in China [J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 8(2): 242-250.
- [7] FULAZZAKY M A. Water quality evaluation system to assess the status and the suitability of the Citarum River water to different uses[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 168 (1): 669-684.
- [8] 吕丽霞. 石羊河流域地表水水质评价分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2013, 49 (6): 4-6. (LYU Lixia. Surface water quality evaluation in Shiyang River Basin [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2013, 49 (6): 4-6. (in Chinese))
- [9] 王方园, 张树云, 洪华娣, 等. 乡镇集中式饮用水水源地水质监测与评价[J]. 供水技术, 2011, 5 (6): 1-5. (WANG Fangyuan, ZHANG Shuyun, HONG Huachang, et al. Monitoring and evaluation of water quality for centralized village and town water source area [J]. Water Technology, 2011, 5(6): 1-5. (in Chinese))
- [10] 王鹤扬. 综合营养状态指数法在陶然亭湖富营养化评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2012, 37 (9): 188-194. (WANG Heyang. Application of comprehensive eutrophication state index in evaluation in Taoranting Lake [J]. Environmental Science and Management, 2012, 37 (9): 188-194. (in Chinese))
- [11] 季定民, 张勃, 黄淑玲, 等. 宿州市沱河段水质时间变化及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33 (6): 308-312. (JI Dingmin, ZHANG Bo, HUANG Shuling, et al. Time variation and influence factors of water quality of Tuohe River Section in Suzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33 (6): 308-312. (in Chinese))
- [12] 朱元生. 水资源可持续发展的道路[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (1): 54-56. (ZHU Yuansheng. The road of sustainable development of water resources [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 54-56. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-05-05 编辑: 彭桃英)

(上接第 90 页)

- [15] BROWN R M, MCLELLAND N I, DEININGER R A, et al. A water quality index-crashing the psychological barrier [J]. Indicators of Environmental Quality, 1972 (1): 173-182.
- [16] PRATI L, PAVANELLO R, PESARIN F. Assessment of surface water quality by a single index of pollution [J]. Journal of Water Resources, 1971, 5 (9): 741-751.
- [17] NEMEROW N L. Scientific stream pollution analysis [M]. Washington D C: Scripta Book Co, 1974: 210-231.
- [18] STEINHART C E, SCHIEROW L J, CHESTERS G. A review of water quality and related indices [M]. Wisconsin: Water Resources Center, University of Wisconsin, 1981: 65-71.
- [19] ROCCHINI R, SWAIN L G. The British Columbia water quality index [M]. Victoria: Water Quality Branch, EP Department, B. C., Ministry of Environment, 1995: 13.
- [20] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Canadian environmental quality guidelines for the protection of aquatic life [M]. Winnipeg, Canada: CCME, 2001: 36-37.
- [21] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Canadian environmental sustainability indicators, freshwater quality indicator: data sources and methods [EB/OL]. [2001-12-30] <http://www.statcan.ca/bsolc/english/bsolc?catno=16-256-XIE#formatdisp>.
- [22] HURLEY T, SADIQ R, MAZUMDER A. Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality [J]. Water Research, 2012, 46 (11): 3544-3552.
- [23] RICKWOOD C J, CARR G M. Development and sensitivity analysis of a global drinking water quality index [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 156 (1/4): 73-90.
- [24] CUDE C. Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness [J]. Journal of the American Water Resources Assessment, 2001, 37 (1): 125-137.
- [25] SARGAONKAR A, DESHPANDE V. Development of an overall index of pollution for surface water based on a general classification scheme in Indian context [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, 89 (1): 43-67.
- [26] BHARGAVA D S. Use of a water quality index for river classification and zoning of the Ganga River [J]. Environmental Pollution (Series B), 1983, 6(1): 51-67.
- [27] LUMB A, SHARMA T C, BIBEALULT J F, et al. A comparative study of USA and Canadian water quality index models [J]. Water Quality Exposure and Health, 2011, 3(3): 203-216.

(收稿日期: 2015-02-28 编辑: 彭桃英)