

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0141

孙甲,韩品磊,王超,等.南水北调中线总干渠水质状况综合评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):102-112. SUN J, HAN P L, WANG C, et al. Study on the comprehensive evaluation of water quality status of the middle route main channel of the South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 102-112. (in Chinese)

## 南水北调中线总干渠水质状况综合评价

孙甲<sup>1</sup>, 韩品磊<sup>1</sup>, 王超<sup>2</sup>, 辛小康<sup>2</sup>, 雷俊山<sup>2</sup>, 尹炜<sup>2</sup>

(1. 南水北调中线干线工程建设管理局 渠首分局, 河南 南阳 473000; 2. 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051)

**摘要:**为了客观、科学地反映南水北调中线总干渠水体水质状况,选取南水北调中线2015年1月至2018年5月全线8个常规监测断面的逐月水质监测数据进行水质综合评价。单因子评价结果显示,南水北调中线总干渠水质类别为Ⅲ类(基于平均值和中位值)和Ⅳ至Ⅴ类(基于最大值);若不考虑总氮,评价结果则为Ⅰ至Ⅱ类(基于平均值和中位值)和Ⅱ至Ⅲ类(基于最大值)。综合污染指数评价结果表明,总干渠各断面综合污染指数在0.16~0.30,各断面评价结果均为合格,总氮对大部分断面污染指数的分担率都在50%以上。模糊评价结果显示,大部分断面对Ⅰ类水质标准的隶属度均超过0.7,对Ⅱ类水质标准的隶属度在0.14~0.17,对Ⅲ至Ⅴ类水质标准的隶属度很低,水质最终的评价结果均为Ⅰ类。综合三种评价结果,南水北调中线总干渠水质总体良好,能够满足供水水质要求。

**关键词:**南水北调;中线总干渠;单因子评价;综合污染指数;水质模糊评价

中图分类号:TV68;X824 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Study on the comprehensive evaluation of water quality status

#### of the middle route main channel of the South-to-North Water Diversion Project

SUN Jia<sup>1</sup>, HAN Pinlei<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>2</sup>, XIN Xiaokang<sup>2</sup>, LEI Junshan<sup>2</sup>, YIN Wei<sup>2</sup>

(1. Qushou Branch of Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Nanyang 473000, China; 2. Yangtze River Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China)

**Abstract:** In order to objectively and scientifically reflect the water quality of the main channel of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project (MRSNWDP), the monthly water quality monitoring data of 8 routine monitoring sections along the main channel from January 2015 to May 2018 was selected for comprehensive water quality assessment. The results of the single-factor evaluation indicated that the water quality of the MRSNWDP main channel was class III. The evaluation result was class I-II (based on mean and median) and class IV-V (based on maximum). If the total nitrogen was not taken into account. The comprehensive pollution index evaluation results showed that all sections of the main channel were between 0.16 and 0.30, and the evaluation results of all sections were qualified. The proportion of total nitrogen to pollution index of most sections was more than 50%. The fuzzy evaluation results showed that the membership degree of class I water quality standard was more than 0.7 class II water quality standard was between 0.14 and 0.17, respectively. The membership degree of III-V water quality standard was very low. The final evaluation results of water quality were all class I. Based on the three evaluation results, the water quality of the MRSNWDP main channel was generally good and can meet the water supply quality

收稿日期:2019-01-25 修回日期:2019-06-15 网络出版时间:2019-07-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190704.1143.002.html>

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108-001)

作者简介:孙甲(1985—),男,河南郑州人,工程师,主要从事水质监测管理方面研究。E-mail:109932671@qq.com

通信作者:尹炜(1978—),男,山东海阳人,教授级高级工程师,博士,主要从事水资源保护研究。E-mail:2000yinwei@163.com

requirements.

**Key words:** South-to-North Water Diversion Project; main channel of the middle route; single factor evaluation; composite pollution index; fuzzy evaluation of water quality

南水北调中线工程是缓解我国黄淮海平原水资源严重短缺、优化配置水资源的重大战略性基础设施。中线干线工程全长 1 432 km(其中天津输水干线 156 km),空间跨度大,水质影响因素多;同时,作为华北地区的重要饮用水水源,总干渠水质要求高。随着我国以水质为核心的目标约束管理机制逐步完善,水质综合评价对水环境质量管理起到支撑作用越来越突出。因此,全面认识总干渠的水质状况和变化特征,对于中线工程的稳定运行和优化管理都显得十分重要<sup>[1]</sup>。

选择合适的水质评价方法对于科学的水质管理十分重要。至今为止,水质评价方法概括起来分为以下几类。(1)单因子评价法:该方法最为简单,直接将单项指标与水质标准进行比较,按照最差的指标确定水质类别。(2)指数评价法:该方法利用单项指标的评价结果构建水质指数,Horton 于 20 世纪 60 年代首次提出水质评价的指数体系,即豪顿水质指数<sup>[3]</sup>;随后又出现了根据专家意见进行加权处理的 Brown 水质指数<sup>[4]</sup>,以及将各参数换算的污染指数相加并求均值的普拉特水质指数等<sup>[5]</sup>。(3)模糊评价法:这一类评价方法以模糊数学为基础,如郑德成<sup>[6]</sup>提出的环境质量评价模糊集理论,何玉冰<sup>[7]</sup>采用的加权平均复合水质评价模型等。(4)灰色评价法:该方法基于灰色关联度,如史晓新等<sup>[8]</sup>在灰色关联度的基础上构造了水环境质量灰色识别模型。另外,随着新算法和计算技术的快速发展,近些年还出现了基于人工神经网络和地理信息系统的水质评价方法<sup>[9-10]</sup>。总体来看,目前得到学者和水质评价工作者关注的典型水质评价方法包括单因子评价法、综合污染指数法、模糊数学评价法等<sup>[11-14]</sup>。不同评价方法各有优劣及其适用范围,单因子评价方法是各种综合评价方法的基础,该方法较为简单,使用最为广泛;综合污染指数法能对水质进行定性和定量描述,但指数本身无法反映主要的污染指标和关键水质因子;模糊数学评价法打破以往仅用一个确定性指标来评价水质的方法,适合对多因素、多层次的复杂问题进行评价<sup>[15]</sup>。

中线总干渠通水以来,水质监测工作持续开展,水质监测指标多,信息量大。如何通过科学合理的评价手段全面认识输水干渠水质的整体状况,是管

理部门面临的基本问题。目前,尚未有研究对总干渠的水质进行系统评价和分析,对于相关的评价方法在总干渠的适用性也缺乏深入的认识。为了客观、科学地反映南水北调中线总干渠水体水质状况,本研究以中线总干渠水质监测数据为基础,将单因子评价法、综合污染指数法、模糊数学评价法等几种方法相结合来对水体水质进行评价,为中线水质管理提供参考。

## 1 数据来源

选取南水北调中线 2015 年 1 月至 2018 年 5 月全线 8 个常规监测断面的逐月水质监测数据进行综合评价。监测断面分布见图 1,监测项目为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(以下简称《水质标准》)中规定的 24 项基本项目,包括监测指标为 24 项指数,包括水温、pH、溶解氧、高锰



图 1 南水北调中线总干渠水质监测断面分布

Fig. 1 Distribution and location of water quality monitoring sections in the middle route of South-to-North Water Diversion Project

酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷、总氮、铜、锌、氟化物、硒、砷、汞、镉、铬(六价)、铅、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性

剂、硫化物、粪大肠菌群。检测方法采用《水质标准》推荐的方法或相应的国家、行业标准,具体见表 1。

表 1 地表水环境质量标准基本项目分析方法

Tab. 1 Basic parameters analysis method for surface water environmental quality standards

序号	项目	分析方法	方法来源
1	水文	温度计法	GB 13195—91
2	pH 值	玻璃电极法	GB 6920—86
3	溶解氧	碘量法	GB 7489—87
4	高锰酸盐指数	酸性发	GB 11892—89
5	化学需氧量	重铬酸钾盐法	GB 11914—89
6	五日生化需氧量	稀释与接种法	GB 7488—87
7	氨氮	纳氏试剂比色法	GB 7479—87
8	总磷	钼酸铵分光光度法	GB 11893—89
9	总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB 11894—89
10	铜	原子吸收分光光度法	GB 7475—87
11	锌	原子吸收分光光度法	GB 7475—87
12	氟化物	离子色谱法	HJ/T 84—2001
13	硒	原子荧光法	SL 327.1—2005
14	砷	原子荧光法	SL 327.1—2005
15	汞	原子荧光法	SL 327.2—2005
16	镉	原子吸收分光光度法	GB 7475—87
17	铬(六价)	二苯碳酰二肼分光光度法	GB 7467—87
18	铅	原子吸收分光光度法	GB 7475—87
19	氰化物	吡啶-巴比妥酸比色法	GB 7487—87
20	挥发酚	蒸馏后 4-氨基安替比林分光光度法	GB 7490—87
21	石油类	红外分光光度法	GB/T 16488—1996
22	阴离子表面活性剂	亚甲基蓝分光光度法	GB 7494—87
23	硫化物	亚甲基蓝分光光度法	GB/T 16489—1996
24	粪大肠杆菌	多管发酵法、滤膜法	水和废水监测分析方法(第四版)

## 2 评价方法

### 2.1 单因子评价

单因子评价的基本思想是在所有参与水质评价的水质指标中,选择水质最差的单项指标所属类别来确定所属水域水质类别<sup>[16]</sup>。我国的水质监测公报多采用该方法评价水体综合水质。评价过程中,以《水质标准》中各项水质指标不同类别水体的标准浓度限值为依据,各评价项目监测值与相应的水质标准值比较,确定单项项目的水质类别,以评价项目中最劣类别代表其水质状况。

本研究选取《水质标准》中指定的溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总氮、总磷、铜、锌、氟化物、硒、砷、汞、镉、六价铬、铅、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂、硫化

物、粪大肠杆菌群等 22 项指标进行评价,对于监测结果低于检出限的水质指标,其水质类别视为 I 类,不再另做评价;pH 为区间范围,并没有 I ~ V 类水的分级标准,也不做评价。评价过程中,对多次监测结果取平均值、最大值和 1/2 中位数,再与标准限值比较。

### 2.2 综合污染指数法

综合污染指数法是采用综合污染指数法对水质状况进行分级评价。综合污染指数计算方法如式(1)和(2)。

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$K_i = \frac{P_i}{nP} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $P$  为综合污染指数;  $P_i$  为水质因子  $i$  的污染

指数;  $C_i$  为水质因子  $i$  的实测浓度(mg/L);  $S_i$  为水质因子  $i$  在《水质标准》中对应的标准限值(mg/L);  $K_i$  为水质因子  $i$  的污染分担率,表征各污染物的贡献并识别主要污染物;  $n$  为参评指标个数。

综合污染指数分级标准见表 2。综合污染指数计算过程中,考虑到总干渠为饮用水源地,水质标准按照《水质标准》中的 II 类计。各水质指标中,水温、pH 无明确标准限值,溶解氧属于低值污染型指标,因此除水温、pH、溶解氧 3 项指标外,其他 21 项指标均参与计算。各水质指标浓度为监测结果的平均值、最大值和 1/2 中位数分别进行评价分析。

表 2 综合污染指数分级标准<sup>[17]</sup>

Tab. 2 Comprehensive pollution index classification standards

综合污染指数	水质分级	水质状况阐述
$P < 0.8$	合格	多数项目未检出,个别检出也在标准内
$0.8 \leq P \leq 1.0$	基本合格	个别项目检出值超标
$1.0 < P \leq 2.0$	污染	相当一部分检出值超标
$P > 2.0$	重污染	相当一部分项目检出值超过标准数倍

### 2.3 模糊评价法

模糊数学自 1965 年创立以来快速发展,并在水环境评价中得到广泛应用。水环境质量中未污染、污染较重、污染严重等都是些相对模糊的定义,很难找出一个分明的界线。模糊集合就是用来刻画这些外延不明确的概念<sup>[18]</sup>。近年来模糊综合评判在水环境评价中得到很大的发展,各种不同的模糊综合评判方法在水环境评价中得到应用,如最大隶属度法则、绝对(相对)状态(或级别)特征值等<sup>[19]</sup>。本文采取陈守煜等<sup>[20]</sup>的最大隶属度评价方法,具体如下。

根据《水质标准》,评价标准分为 5 级(I 类, II 类, III 类, IV 类, V 类),水质指标为  $m$  项,因此有 5 级水质标准浓度矩阵

$$S_{m \times 5} = \begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{m1} & \cdots & s_{m5} \end{bmatrix} = (s_{ih}) \quad (3)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m; h=1, 2, \dots, 5$ 。

设有待分级评价的  $n$  个断面,每个断面也有水质指标  $m$  项,则有断面实测浓度矩阵

$$C_{m \times n} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} = (c_{ij}) \quad (4)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

矩阵(3)和(4)是水质模糊评价的数据基础。为了进行水体污染程度模糊评价,需要将矩阵(3)和

(4)转化为模糊矩阵,即矩阵的每个元素均取闭区间  $[0, 1]$  内的数。因此规定 I 类水质标准质量浓度在模糊矩阵中的对应元素为 1, V 类水质标准质量浓度在模糊矩阵中的对应元素为 0。II、III 和 IV 类水质标准质量浓度按照式(5)进行转换,使各元素均能够落到  $[0, 1]$  区间内。

$$e_{ih} = \frac{s_{i5} - s_{ih}}{s_{i5} - s_{i1}} \quad (5)$$

式中:  $s_{i1}$ 、 $s_{i5}$ 、 $s_{ih}$  分别为 I 类、V 类、 $h$  类水的水质标准浓度。根据式(5)可将矩阵(3)变换为水质标准模糊矩阵

$$E_{m \times 5} = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{m1} & \cdots & e_{m5} \end{bmatrix} = (e_{ih}) \quad (6)$$

模糊矩阵(6)中第 1, 5 列分别为

$$e_1 = (e_{11} \ e_{21} \ \cdots \ e_{m1})^T = (1 \ 1 \ \cdots \ 1)^T = \mathbf{I} \quad (7)$$

$$e_5 = (e_{15} \ e_{25} \ \cdots \ e_{m5})^T = (0 \ 0 \ \cdots \ 0)^T = \mathbf{O} \quad (8)$$

类似的,可根据式(9)将溶解氧除外的水体污染实测质量浓度变换为实测质量浓度模糊矩阵中的对应元素,对于溶解氧则用式(10)进行变换。

$$f_{ij} = \begin{cases} 1 & c_{ij} \leq s_{i1} \\ \frac{s_{i5} - c_{ij}}{s_{i5} - s_{i1}} & s_{i1} < c_{ij} < s_{i5} \\ 0 & c_{ij} \geq s_{i5} \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{ij} = \begin{cases} 1 & c_{ij} \geq s_{i1} \\ \frac{c_{ij} - s_{i5}}{s_{i1} - s_{i5}} & s_{i1} > c_{ij} > s_{i5} \\ 0 & c_{ij} \leq s_{i5} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(9)和(10)可将矩阵(4)变换为污染指标实测浓度模糊矩阵

$$F_{m \times n} = \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{m1} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} = (f_{ij}) \quad (11)$$

第  $j$  个断面可用向量表示为

$$f_j = (f_{1j} \ f_{2j} \ \cdots \ f_{mj})^T \quad (12)$$

第  $h$  级水质的水质标准可用向量表示为

$$e_h = (e_{1h} \ e_{2h} \ \cdots \ e_{mh})^T \quad (13)$$

若考虑  $m$  项污染指标不同的权重  $w_i$ ,第  $j$  个断面与第  $h$  级水质标准之间的差异可用向量  $f_j$  与向量  $e_h$  之间的广义距离来表达。根据陈守煜等<sup>[20]</sup>的推导结果,第  $j$  个断面对第  $h$  级水质标准的隶属度  $u_{hj}$  可用式(14)计算

$$u_{hj} = \frac{1}{\sum_{k=1}^5 \left( \frac{\sum_{i=1}^m w_i |e_{ih} - f_{ij}|}{\sum_{i=1}^m w_i |e_{ik} - f_{ij}|} \right)^2} \quad (14)$$

式中:  $h=1, 2, \dots, 5; j=1, 2, \dots, n$ 。

按照上式计算得到不同断面对 5 级水质标准的隶属度,并根据隶属度最大值判断断面水质类别。参与计算的指标为氨氮、氟化物、高锰酸盐指数、溶解氧、生化需氧量、铜、锌、总氮、总磷等 9 项,其他指标无检出数据或没有明确浓度限值,不参与计算。

以污染物的超标情况确定权重<sup>[21]</sup>,计算方法为

$$w_i = \frac{\frac{c_i}{s_i}}{\sum_{i=1}^9 \frac{c_i}{s_i}} \quad (15)$$

式中:  $c_i$  为第  $i$  项指标所有断面监测浓度的平均值;  $s_i$  为第  $i$  项指标各级标准值的平均值。由于各个断面不同时间多次取样,为避免评价过程中某些不利情况下的污染问题被忽略,监测浓度取逐月监测浓度的平均值、最大值和 1/2 中位数分别进行评价分析。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 水质因子特征

各断面水质基本情况见表 3。24 项常规监测指标中,有检出数据的 13 项。硒、砷、汞、镉、铬(六价)、铅、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂、粪大肠杆菌等 11 项指标全部断面均没有检出。化学需氧量、锌、硫化物等 3 项指标部分断面没有检出。水质撤消标特征为:水温平均值的变化范围在 15.4~17.4 °C,基本呈现南高北低的变化趋势;pH 平均值稳定在 8.1~8.2,波动较小;溶解氧平均值在 8.4~10.5 mg/L,从南到北有逐渐增大的趋势;高锰酸盐指数平均值在 1.8~2.1 mg/L,波动较小;化学需氧量平均质量浓度为 7.9~8.9 mg/L,生化需氧量平均质量浓度为 0.9~1.8 mg/L;氨氮平均质量浓度为 0.05~0.07 mg/L,总氮平均浓度为 0.91~1.00 mg/L;总磷平均质量浓度为 0.01~0.02 mg/L;除团城湖断面外,铜和锌的质量浓度均在 0.01 mg/L 以下;氟化物平均质量浓度稳定在 0.2 mg/L 左右,硫化物平均质量浓度为 0.01 mg/L 左右。

#### 3.2 单因子评价

按照《水质标准》,对有检出数据的各项水质指标平均浓度进行水质类别评价,结果见表 4。以平均值和中位值作为评价数据时,评价结果基本相同,氨氮、氟化物、化学需氧量、硫化物、溶解氧、生化需氧量、铜、锌、总磷等指标均为 I 类;高锰酸盐指数在侯庄、北大岳、惠南庄 3 个断面为 II 类,其他断面为

I 类;铜在团城湖断面为 II 类,其他断面为 I 类;总氮在所有断面均为 III 类。由于总氮浓度偏高,最终各断面水质类别的评价结果均为 III 类。以最大值作为评价数据时,评价结果变差,各断面氨氮和高锰酸盐指数基本为 II 类,铜和总磷 II 类断面增加,生化需氧量在团城湖断面还出现了 III 类增加,总氮为 IV 类和 V 类,最终评价结果为 IV 类或 V 类。作为饮用水源地,中线总干渠的水质目标需执行《水质标准》中 II 类水体的标准,因此按照单因子评价方法,总干渠水质处于超标状态。若不考虑总氮,基于平均值和中位值的评价结果则为 II 类或者 I 类,满足水质目标,但根据最大值评价的结果不能满足水质目标。

#### 3.3 综合污染指数评价

综合污染指数评价结果见表 5。各断面综合污染指数在 0.15~0.30,河南境内断面总体低于河北和北京天津断面,最高出现在北京的惠南庄。按照分级标准,各断面均为合格,说明总干渠水质总体良好。以最大值作为评价数据时,综合污染指数明显高于以平均值和中位值的评价结果,但并未影响最终的水质分级结果。对主要污染因子及其污染分担率的分析表明,总氮对大部分断面污染指数的分担率都在 50% 以上,是最重要的污染指标。除总氮外,生化需氧量和高锰酸盐指数对陶盆、兰河北、纸坊河北、侯庄、北大岳等断面的综合污染指数分担率较高,化学需氧量和生化需氧量对惠南庄、团城湖和天津外环河等断面的综合污染指数分担率较高。

#### 3.4 模糊评价

水质模糊评价结果见表 6。所有断面对 I 类水质标准的隶属度基本都在 0.7 以上,对 II 类水质标准的隶属度在 0.14~0.17,对 III 类水质标准的隶属度基本都在 0.07~0.1,对 IV 类和 V 类水质标准的隶属度均不超过 0.03。以平均值和中位值作为评价数据时,各断面对 I 类水质的隶属度总体高于以最大值作为评价数据的评价结果,而对 II 类水质的隶属度总体低于以最大值作为评价数据的评价结果。总体来看,各断面对 I 类到 V 类水质标准的隶属度依次降低,对 I 类水质标准的隶属度具有绝对的优势。按照隶属度最大的原则,各断面水质最终的评价结果均为 I 类。

#### 3.5 不同评价方法结果比较

单因子评价结果相对严格,按照最差的水质指标判断水质类别,导致最终评价结果为 III 类(按照平均值和中位值评价),IV 类甚至是 V 类(按照最大值进行评价)。从评价结果看,除总氮外,总干渠其他

表3 南水北调中线总干渠主要监测断面水质因子基本特征

Tab. 3 The basic characteristics of water quality factors in the main canal of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project

序号	水质指标	项目	陶岔	兰河北	纸坊河北	侯庄	北大岳	惠南庄	团城湖	天津外环河
1	水温	最大值	29.80	29.20	29.7	31.1	32.5	31.5	30.2	29.80
		中位值	16.35	17.25	16.8	16.9	16.9	15.8	15.9	16.25
		平均值	17.20	17.40	17.2	16.5	16.2	15.4	16.2	15.90
		标准偏差	7.00	8.00	8.3	9.5	10.1	10.5	9.8	10.00
2	pH 值	最大值	8.6	8.8	8.6	8.7	8.6	8.6	8.4	8.5
		中位值	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	8.3	8.2	8.1
		平均值	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.1	8.1
		标准偏差	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
3	溶解氧/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	12.0	12.8	12.4	13.4	12.6	13.9	14.0	15.2
		中位值	7.9	8.6	8.8	8.8	9.2	9.5	10.1	9.3
		平均值	8.4	9.0	9.2	9.5	9.4	9.9	10.5	10.3
		标准偏差	1.5	1.5	1.4	1.8	1.7	1.9	1.7	2.4
4	高锰酸盐指数/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	2.3	2.7	2.8	2.8	3.1	2.9	2.5	2.8
		中位值	1.7	1.9	1.9	2.1	2.1	2.0	1.9	1.9
		平均值	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.1	1.9	2.0
		标准偏差	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2
5	化学需氧量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	—	—	—	—	—	10.0	11.0	9.0
		中位值	—	—	—	—	—	9.5	9.0	8.0
		平均值	—	—	—	—	—	8.8	8.9	7.9
		标准偏差	—	—	—	—	—	1.5	1.5	1.2
6	生化需氧量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	2.7	2.4	2.4	2.4	2.6	2.9	1.7	3.4
		中位值	2.0	1.7	1.7	0.9	0.7	0.9	0.6	0.8
		平均值	1.8	1.5	1.6	1.0	0.9	1.0	0.8	1.2
		标准偏差	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.7
7	氨氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	0.17	0.15	0.20	0.19	0.29	0.19	0.08	0.17
		中位值	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06
		平均值	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07
		标准偏差	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.01	0.04
8	总磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
		中位值	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
		平均值	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
		标准偏差	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.01
9	总氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	1.76	1.36	1.59	1.62	1.6	1.37	1.32	1.41
		中位值	0.98	0.92	0.96	0.89	0.97	0.94	0.92	0.88
		平均值	1.00	0.93	0.97	0.96	1.00	0.95	0.93	0.91
		标准偏差	0.21	0.22	0.21	0.22	0.22	0.22	0.23	0.24
10	铜/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	0.003	0.005	0.004	0.008	0.008	0.027	0.028	0.027
		中位值	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003	0.015	0.004
		平均值	0.001	0.001	0.001	0.004	0.003	0.005	0.015	0.006
		标准偏差	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.007	0.018	0.013
11	锌/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	0.008	0.011	0.006	0.004	0.010	0.013	0.013	0.032
		中位值	0.003	0.004	0.004	0.004	0.009	0.007	0.008	0.009
		平均值	0.004	0.004	0.004	—	0.009	0.008	0.008	0.013
		标准偏差	0.002	0.003	0.002	—	0.002	0.004	0.003	0.014
12	氟化物/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	0.30	0.27	0.30	0.24	0.25	0.31	0.26	0.26
		中位值	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21
		平均值	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21
		标准偏差	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02
13	硫化物/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值	—	—	—	0.012	0.012	0.012	—	0.013
		中位值	—	—	—	0.010	0.010	0.009	—	0.013
		平均值	—	—	—	0.010	0.010	0.009	—	—
		标准偏差	—	—	—	0.004	0.002	0.004	—	—

注：“—”表示没有检出。24项水质指标中，硒、砷、汞、镉、铬(六价)、铅、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂、粪大肠杆菌等11项指标全部断面均没有检出，因此没有列入表中。

表 4 南水北调中线总干渠主要监测断面水质类别单因子评价结果

Tab. 4 Single factor evaluation results of water quality in the main canal of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project

评价数据	断面	氨氮	高锰酸盐指数	氟化物	化学需氧量	硫化物	溶解氧	生化需氧量	铜	锌	总氮	总磷	断面水质类别	断面水质类别 (总氮不参评)
平均值	陶岔	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
	兰河北	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
	纸坊河北	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
	侯庄	I	II	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	II
	北大岳	I	II	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	II
	惠南庄	I	II	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	II
	团城湖	I	I	I	I	I	I	I	II	I	III	I	III	II
	天津外环河	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
最大值	陶岔	II	II	I	I	I	I	I	I	I	V	II	V	II
	兰河北	I	II	I	I	I	I	I	I	I	IV	II	IV	II
	纸坊河北	II	II	I	I	I	I	I	I	I	V	II	V	II
	侯庄	II	II	I	I	I	I	I	I	I	V	II	V	II
	北大岳	II	II	I	I	I	I	I	I	I	V	I	V	II
	惠南庄	II	II	I	I	I	I	I	II	I	IV	I	IV	II
	团城湖	I	II	I	I	I	I	I	II	I	IV	I	IV	II
	天津外环河	II	II	I	I	I	I	III	II	I	IV	I	IV	III
中位值	陶岔	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
	兰河北	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
	纸坊河北	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
	侯庄	I	II	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	II
	北大岳	I	II	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	II
	惠南庄	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I
	团城湖	I	I	I	I	I	I	I	II	I	III	I	III	II
	天津外环河	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	I

表 5 南水北调中线总干渠主要监测断面综合污染指数评价结果

Tab. 5 Comprehensive pollution index evaluation results of main monitored sections in the main canal of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project

评价数据	断面	综合污染指数	主要污染因子(K <sub>i</sub> )	水质分级结果
平均值	陶岔	0.17	总氮(56.1%),生化需氧量(16.9%),高锰酸盐指数(12.3%)	合格
	兰河北	0.16	总氮(55.0%),生化需氧量(15.2%),高锰酸盐指数(14.1%)	合格
	纸坊河北	0.16	总氮(56.3%),生化需氧量(15.5%),高锰酸盐指数(14.2%)	合格
	侯庄	0.16	总氮(57.0%),高锰酸盐指数(15.7%),生化需氧量(10.2%)	合格
	北大岳	0.16	总氮(57.9%),高锰酸盐指数(15.6%),生化需氧量(8.8%)	合格
	惠南庄	0.19	总氮(48.6%),化学需氧量(15.0%),生化需氧量(13.3%)	合格
	团城湖	0.17	总氮(51.1%),化学需氧量(16.2%),生化需氧量(13.1%)	合格
	天津外环河	0.18	总氮(48.8%),化学需氧量(14.1%),生化需氧量(13.1%)	合格
最大值	陶岔	0.29	总氮(57.1%),生化需氧量(14.6%),高锰酸盐指数(9.3%)	合格
	兰河北	0.25	总氮(52.3%),生化需氧量(15.4%),高锰酸盐指数(13.0%)	合格
	纸坊河北	0.28	总氮(54.7%),生化需氧量(13.8%),高锰酸盐指数(12.0%)	合格
	侯庄	0.28	总氮(55.7%),生化需氧量(13.8%),高锰酸盐指数(12.0%)	合格
	北大岳	0.29	总氮(53.8%),生化需氧量(14.4%),高锰酸盐指数(12.9%)	合格
	惠南庄	0.29	总氮(44.4%),生化需氧量(15.7%),高锰酸盐指数(11.7%)	合格
	团城湖	0.25	总氮(50.3%),化学需氧量(14.0%),生化需氧量(11.9%)	合格
	天津外环河	0.30	总氮(45.0%),化学需氧量(18.1%),高锰酸盐指数(11.2%)	合格
中位值	陶岔	0.17	总氮(55.5%),生化需氧量(18.4%),高锰酸盐指数(12.0%)	合格
	兰河北	0.16	总氮(54.6%),生化需氧量(16.4%),高锰酸盐指数(14.2%)	合格
	纸坊河北	0.16	总氮(57.4%),生化需氧量(16.4%),高锰酸盐指数(14.2%)	合格
	侯庄	0.15	总氮(56.9%),高锰酸盐指数(16.8%),生化需氧量(9.6%)	合格
	北大岳	0.16	总氮(58.4%),高锰酸盐指数(15.8%),生化需氧量(7.0%)	合格
	惠南庄	0.18	总氮(48.9%),化学需氧量(16.5%),生化需氧量(13.0%)	合格
	团城湖	0.17	总氮(51.9%),化学需氧量(16.9%),生化需氧量(13.4%)	合格
	天津外环河	0.17	总氮(47.9%),化学需氧量(14.6%),生化需氧量(13.0%)	合格

注:主要污染因子为污染分担率前 3 的水质指标

表 6 南水北调中线总干渠主要监测断面水质类别模糊评价结果

Tab. 6 Fuzzy evaluation results of water quality categories of main monitored sections in the main canal of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project

评价数据	断面	隶属度					评价结果
		I类	II类	III类	IV类	V类	
平均值	陶岔	0.717	0.154	0.098	0.020	0.011	I类
	兰河北	0.749	0.145	0.080	0.017	0.009	I类
	纸坊河北	0.731	0.150	0.090	0.019	0.010	I类
	侯庄	0.733	0.151	0.088	0.018	0.010	I类
	北大岳	0.714	0.156	0.099	0.020	0.011	I类
	惠南庄	0.741	0.148	0.084	0.017	0.009	I类
	团城湖	0.748	0.145	0.080	0.017	0.009	I类
	天津外环河	0.758	0.142	0.075	0.016	0.009	I类
最大值	陶岔	0.694	0.166	0.107	0.022	0.011	I类
	兰河北	0.726	0.158	0.087	0.018	0.010	I类
	纸坊河北	0.708	0.163	0.098	0.020	0.010	I类
	侯庄	0.711	0.163	0.096	0.020	0.010	I类
	北大岳	0.691	0.168	0.108	0.022	0.011	I类
	惠南庄	0.719	0.161	0.091	0.019	0.010	I类
	团城湖	0.726	0.158	0.088	0.018	0.010	I类
	天津外环河	0.736	0.155	0.082	0.017	0.009	I类
中位值	陶岔	0.707	0.158	0.103	0.021	0.011	I类
	兰河北	0.739	0.150	0.084	0.017	0.009	I类
	纸坊河北	0.721	0.155	0.095	0.019	0.010	I类
	侯庄	0.723	0.155	0.092	0.019	0.010	I类
	北大岳	0.703	0.160	0.104	0.021	0.011	I类
	惠南庄	0.731	0.153	0.088	0.018	0.010	I类
	团城湖	0.739	0.150	0.084	0.018	0.009	I类
	天津外环河	0.749	0.147	0.079	0.017	0.009	I类

各项水质指标良好。目前,地表水环境质量标准中对于总氮的质量浓度限值受到广泛的关注<sup>[22-24]</sup>。地表水环境质量标准中基本项目对总氮浓度进行了限定,针对集中式生活饮用水地表水源地,则对硝酸盐氮进行了补充限定<sup>[25]</sup>。当前,南水北调中线总干渠目前已经成为我国北方地区重要的饮用水水源地,按照集中式生活饮用水源补充项目中对硝酸盐的标准限值(10 mg/L)评价,总干渠硝酸盐氮浓度完全满足浓度标准要求。因此,单因子评价条件下,虽然总氮导致总干渠总体评价结果为III类甚至更差,但是总干渠的饮用水水源地功能并不受到影响。

相对单因子评价,综合污染指数评价更加全面,避免了单因子评价的总氮问题。我国自1974年开始用综合污染指数综合评价水质污染以来,对水体综合污染指数的研究发展很快,目前使用的计算公式就有10余种<sup>[26-28]</sup>。根据计算方法,综合污染指数可分为平均型和叠加型<sup>[29]</sup>。叠加型指数将所有水质指标的污染指数累加,理论依据是水体总的污染作用是各种污染物共同作用的结果。平均型指数是在叠加型指数的基础上除以参评的指标个数,表征水体中各项水质指标的平均相对污染程度。由于叠

加型指数受到参评指标数量的影响,不易划定分级标准;平均型指数消除了评价指标数量的影响,有利于评价结果的分级和不同断面的污染程度的对比。本研究采用了平均型综合污染指数,从综合污染指数评价结果看,总干渠水体水质优良,其不足之处在于分级标准具有较大的主观性,分级的结果与《水质标准》中的5类水体没有明确的对应关系。

模糊评价方法综合性最强,能够避免个别指标的过度影响,反映了总干渠水质的总体状况。模糊评价的基本思路是由监测数据建立各指标对各级标准的隶属度集,形成隶属度矩阵。再把因子权重集与隶属度矩阵相乘,得到模糊集,获得综合评判集<sup>[30]</sup>。参评指标中,汞、镉、砷、铅等重金属以及氰化物、挥发酚等毒害物质对水质安全影响较大,应赋予相对较高的权重<sup>[31-32]</sup>。由于中线总干渠水体中只有总氮、高锰酸盐指数的质量浓度相对较高,毒害物质基本未检出,不会对干渠总体水质安全造成影响。因此本研究为简化计算,在模糊评价过程根据污染物超标情况计算了指标权重。从评价结果分析,模糊评价结果并未受到总氮、高锰酸盐指数等个别水质指标的影响,评价结果显示总干渠水质为I类,优



于单因子和综合污染指数评价结果。

#### 4 结 论

(1)首次对南水北调中线总干渠通水运行以来的水质状况进行了系统评价,其中单因子评价结果显示中线总干渠水质为 I 至 II 类(基于平均值和中位值,总氮不参评)和 II 至 III 类(基于最大值,总氮不参评),总氮对总干渠的单因子评价结果具有显著的影响,但并不影响总干渠的饮用水水源地功能。

(2)综合污染指数评价结果表明,总干渠各断面综合污染指数在 0.16~0.30,各断面评价结果均为合格,说明总干渠水质总体良好。总氮对大部分断面污染指数的分担率都在 50%以上,除总氮外,生化需氧量、高锰酸盐指数、化学需氧量是污染分担率相对较高的指标。

(3)模糊评价结果显示,所有断面对 I 类水质标准的隶属度基本都在 0.7 以上,对 II 类水质标准的隶属度在 0.14~0.17,对 III 至 V 类水质标准的隶属度很低。从评价结果分析,模糊评价结果并未受到总氮、高锰酸盐指数等个别水质指标的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] 胡莲,邹曦,袁玉洁,等.三峡水库百岁溪浮游植物群落结构及水质评价[J].三峡生态环境监测,2018,3(4):23-30. (HU L,ZOU X,YUAN Y J, et al. Evaluation of phytoplankton community structure and water quality in Baisui Stream of the Three Gorges Reservoir[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges,2018,3(4):23-30. (in Chinese)) DOI: 10.19478/j.cnki.2096-2347.2018.04.05.
- [2] 王树磊,李建.南水北调中线水源地水质自动监测站网优化研究[J].三峡生态环境监测,2018,3(1):82-84. (WANG S L, LI J. Network optimization of water quality automatic monitoring station in water resource area of the Mid-route of South-to-North Water Transfer [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges,2018,3(1):82-84. (in Chinese)) DOI: 10.19478/j.cnki.2096-2347.2018.01.13.
- [3] 夏青.水质基准与水质标准[M].北京:中国标准出版社,2004. (XIA Q. Water quality criteria and water quality standards[M]. Beijing:China Standards Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 郑英铭.对水利部门作水质评价的某些看法[J].水文,1984(3):33-36. (ZHENG Y M. Some opinions on water quality evaluation in water conservancy department [J]. Hydrology,1984(3):33-36. (in Chinese))
- [5] 薛巧英.水环境质量评价方法的比较分析[J].环境保

- 护科学,2004,30(4):64-67. (XUE Q Y. Comparison and analysis of the methods on water environment quality assessment [J]. Environmental Protection Science,2004,30(4):64-67. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6216.2004.04.023.
- [6] 郑成德.环境质量评价模糊集理论与模式研究[J].四川环境,1997(4):64-68. (ZHENG C D. The fuzzy theory and model of environmental quality assessment [J]. Sichuan Environment,1997(4):64-68. (in Chinese))
- [7] 何玉冰.模糊聚类法及相似优先比在河流水质评价中的应用[J].河南大学学报(自然科学版),1997(2):21-25. (HE Y B. Application of fuzzy sets theory and similarity priority ratio for evaluations of water quality [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 1997(2):21-25. (in Chinese))
- [8] 史晓新,夏军.水环境质量评价灰色模式识别模型及应用[J].中国环境科学,1997(2):127-130. (SHI X X, XIA J. Grey-mode identification model for water environmental quality assessment and its application [J]. China Environment Science,1997(2):127-130. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-6923.1997.02.007.
- [9] 郭劲松,王海霞,龙腾锐.神经网络在水质规划和管理中的应用[J].重庆环境科学,2002,24(4):69-72. (GUO J S, WANG H X, LONG T R. Application of artificial neural network on water quality planning and management [J]. Chongqing Environmental Science, 2002,24(4):69-72. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-2842.2002.04.023.
- [10] 马蔚纯,张超.基于GIS的水质数值模拟——以上海市苏州河为例[J].地理学报,1998,65(s1):67-75. (MA W C, ZHANG C. The numerical simulation of water quality of Shuzhou Creek based on GIS [J]. Acta Geographica Sinica,1998,65(s1):67-75. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0375-5444.1998.z1.009.
- [11] 陆卫军,张涛.几种河流水质评价方法的比较分析[J].环境科学与管理,2009,34(6):174-176. (LU W J, ZHANG T. Comparison and analysis of several appraisal methods for river water quality [J]. Environmental Science and Management, 2009,34(6):174-176. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2009.06.049.
- [12] 安乐生,赵全升,刘贯群,等.代表性水质评价方法的比较研究[J].中国环境监测,2010,26(5):47-51. (AN L S, ZHAO Q S, LIU G Q, et al. Comparative study on representative water quality assessment methods [J]. Environmental Monitoring in China, 2010,26(5):47-51. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6002.2010.05.013.
- [13] 尹海龙,徐祖信.河流综合水质评价方法比较研究

- [J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733. (YIN H L, XU Z X. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods[J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 729-733. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-8227. 2008. 05. 012.
- [14] 郭劲松, 王红, 龙腾锐. 水资源水质评价方法分析与进展[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(6): 1-3. (GUO J S, WANG H, LONG T R. Analysis and development of water quality evaluation method [J]. Chongqing Environmental Science, 1999, 21(6): 1-3. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-2842. 1999. 06. 001.
- [15] 汪尚朋, 李江云, 郑旭荣, 等. 水质模糊评价的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 49-51. (WAGN S P, LI J Y, ZHENG X R, et al. Discussion on the water quality fuzzy evaluation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(1): 49-51. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2005. 01. 015.
- [16] 曾永, 樊引琴, 王丽伟, 等. 水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 45-45. (ZENG Y, FAN Y Q, WANG L W, et al. Comparison of fuzzy comprehensive method and single factor index method for the water quality evaluation [J]. Yellow River, 2007, 29(2): 45-45. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2007. 02. 020.
- [17] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 185-190. (SUN T, ZHANG M X, LI M M, et al. River water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(4): 185-190. (in Chinese))
- [18] 李如忠. 水质评价理论模式研究进展及趋势分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(4): 369-373. (LI R Z. Progress and Trend analysis of theoretical methodology of water quality assessment [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2005, 28(4): 369-373. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-5060. 2005. 04. 008.
- [19] 钱程, 穆文平, 王康, 等. 基于主成分分析的地下水水质模糊综合评价[J]. 水电能源科学, 2016(11): 31-35. (QIAN C, MU W P, WANG K, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality based on principal component analysis [J]. Water Resources and Power, 2016(11): 31-35. (in Chinese))
- [20] 陈守煜, 陈晓冰. 水质模糊评价理论与模型[J]. 环境科学学报, 1991, 11(1): 1-8. (CHEN S Y, CHEN X B. Theory and applied model of the water quality fuzzy assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1991, 11(1): 1-8. (in Chinese))
- [21] 代雪静, 田卫. 水质模糊评价模型中赋权方法的选择[J]. 中国科学院大学学报, 2011, 28(2): 169-176. (DAI X J, TIAN W. Choice of determining weights method in fuzzy synthetic evaluating model for water quality [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(2): 169-176. (in Chinese))
- [22] 殷明, 施敏芳, 刘成付. 丹江口水库水质总氮超标成因初步分析及控制对策[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 35-36. (YIN M, SHI M F, LIU C F. Preliminary analysis and control of TN in Danjiangkou reservoir [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(7): 35-36. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6504. 2007. 07. 01.
- [23] 郭燕, 邹孝, 谭钦文, 等. 西河水库总氮超标的原因简析[J]. 四川环境, 2012(s1): 28-30. (GUO Y, ZHOU X, TAN Q W, et al. The analysis of abnormal total nitrogen concentration of Xihe reservoir [J]. Sichuan Environment, 2012, (s1): 28-30. (in Chinese))
- [24] 文永勤, 何向红. 浅谈白荻沟水库饮用水源水质总氮超标分析及应对措施[J]. 陕西水利, 2015(2): 147-148. (WEN Y Q, HE X H. Analysis of total nitrogen in drinking water of Baidigou reservoir and countermeasures [J]. Shanxi Water Resource, 2015, (2): 147-148. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-9000. 2015. 02. 071.
- [25] 王平. 对 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》中总氮标准值的探讨[J]. 科技信息: 学术研究, 2008(9): 616. (WANG P. Discussion on the standard value of total nitrogen in GB 3838-2002 environmental quality standard for surface water [J]. Science, 2008(9): 616. (in Chinese))
- [26] 梁德华, 蒋火华. 河流水质综合评价方法的统一和改进[J]. 中国环境监测, 2002, 18(2): 63-66. (LIANG D H, JIANG H H. Unifying and improving the comprehensive assessment methods of river water quality [J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(2): 63-66. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6002. 2002. 02. 020.
- [27] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 257-262. (MENG X M, HU H P. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality [J]. Shuili Xuebao, 2009, 40(3): 257-262. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn. 0559-9350. 2009. 03. 001.
- [28] 姜发军, 许铭本, 陈宪云, 等. 北部湾海域水质综合污染指数和浮游植物多样性指数评价[J]. 广西科学, 2014(4): 376-380. (JIANG F J, XU M B, CHEN X

- Y, et al. Assessment of Beibu Gulf pollution by water comprehensive pollution index and phytoplankton diversity index[J]. Guangxi Science, 2014(4): 376-380. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-9164. 2014. 04. 010.
- [29] 关伯仁. 水污染指数的综合问题[J]. 环境污染与防治, 1980(2): 13-16. (GUAN B R. The problem of water pollution index[J]. Environmental Pollution & Control, 1980(2): 13-16. (in Chinese))
- [30] 李秋元, 刘东. 组合权重模糊模型在区域地下水水质评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2014(3): 1-4. (LI Q Q Y, LIU D. Application of the fuzzy model based on the combined weight in the evaluation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(3): 1-4. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2014. 03. 001.
- [31] 王涛, 魏亚妮, 钱会. 权重对水质模糊综合评价的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 87-90. (WANG T, WEI Y N, QIAN H. Influence of different weights on fuzzy comprehensive evaluation method for water quality[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(2): 87-90. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2010. 02. 024.
- [32] 钱会, 席文娟. 基于 AHP 权重的模糊评价法在水质评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 100-103. (QIAN H, XI W J. Application of fuzzy evaluation method based on AHP to water quality evaluation[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(3): 100-103. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2012. 03. 029.

(上接第 61 页)

- [20] DU W, FAN Y, TANG X. Two-part pricing contracts under competition; the South-to-North Water Transfer Project supply chain system in China[J]. International Journal of Water Resources Development, 2016, 32(6): 895-911.
- [21] HSU N, CHENG K. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2002, 128(2): 102-112.
- [22] LI Y, ZHANG C, CHU J, et al. Reservoir operation with combined natural inflow and controlled inflow through inter-basin transfer-A case study of Biliu Reservoir in northeastern China [C]// AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2015.
- [23] AHMADIANFAR I, ADIB A, TAGHIAN M. Optimization of multi-reservoir operation with a new hedging rule: application of fuzzy set theory and NSGA-II [J]. Applied Water Science, 2017, 7(6): 3075-3086.
- [24] 张弛, 陈晓贤, 李昱, 等. 跨流域引水受水水库最优调度决策的理论分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 492-504. (ZHANG C, CHEN X X, LI Y, et al. Analytical analysis for optimal operation of the recipient reservoir in inter-basin water transfer projects [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 492-504. (in Chinese))
- [25] SHARIF M, SWAMY V S V. Development of LINGO-based optimisation model for multi-reservoir systems operation [J]. International Journal of Hydrology Science and Technology, 2014, 4(2): 126-138.