

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2021.0075

丛铭, 阳辉, 张晓静, 等. 单因子法与可变模糊法在水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 720-728. CONG M, YANG H, ZHANG X J, et al. Application of single factor method and fuzzy variable method in water quality assessment[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 720-728. (in Chinese)

单因子法与可变模糊法在水质评价中的应用

丛铭¹, 阳辉², 张晓静¹, 辛卓航^{1,3}, 张弛^{1,3}

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116023; 2. 西藏自治区水文水资源勘测局, 拉萨 850000;
3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 基于2019、2020年在辽河、大辽河入海河段及辽河口的水质监测数据, 分析河流、河口水质指标的时空变化规律, 并运用单因子评价法、可变模糊评价法对水质状况进行评价。整体而言, 基于可变模糊评价法的水质评价等级优于单因子评价法; 河流的主要污染指标为DO、高锰酸盐指数和总磷, 基于单因子法的评价结果为Ⅳ类、劣Ⅴ类, 可变模糊法评定等级为Ⅰ~Ⅲ类; 河口监测点的主要超标污染物为无机氮, 单因子评价结果为Ⅳ、劣Ⅳ类, 可变模糊评价法为Ⅱ、Ⅲ类; 单因子法基于最差指标的区间评定, 可变模糊法综合权衡各指标的影响, 在水环境管理中可根据目的不同考虑采用不同评价方法。

关键词: 水质评价; 可变模糊评价法; 单因子评价法; 水质监测; 水环境管理

中图分类号: X55 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



近年来, 随着社会经济发展和城镇化进程的加快, 大量工业废水、农田退水和居民生活污水排入水体, 造成河流和近海水体环境污染和生态退化问题严峻^[1-3]。水环境质量评价是水资源与水环境管理的基础工作^[4-5], 能够帮助管理者了解和掌握水体环境质量, 从而判别水质条件对河流河口的水环境、水生态健康和生物资源的影响, 及时采取控制污染的对策。如何客观、准确地反映水环境质量状况是关键问题。

目前常用的水质评价方法有单因子评价法^[6-7]、内梅罗指数法^[8]、综合污染指数法^[9]、可变模糊评价法^[10-11]等。我国地表水水质自动监测采用单因子评价法评价水体综合水质, 依照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[12], 用水质最差的单项指标所属类别来定义水体水质类别。然而, 水环境是一个多因子耦合的复杂动态系统^[13], 其污染程度是一个模糊的概念, 所以评价污染程度的分级界限也是模

糊的^[14], 仅仅根据最差的单项污染指标来定义类别往往产生“过保护”的片面评价^[6]。可变模糊理论通过构造隶属函数和模糊关系矩阵^[15], 有效地解决评价标准边界模糊问题, 给出更加客观、合理的水质综合评价结果。为此, 了解不同评价方法对水质状况的评价等级差异, 明确各方法的优势和问题点, 将有助于流域-海岸带水环境管理者做出更加科学、客观的管理决策。

辽河流域是我国七大流域之一, 受陆域污染带来的大量氮磷等生源物质以及重金属、石油类污染物影响, 河流及近岸海域水环境问题严峻^[16-20]。以辽河干流入海河段、大辽河入海河段及河口水域为研究对象, 基于监测的水质数据, 解析水质参数的时空变化特征, 运用单因子指数法及可变模糊评价法对水质状况进行评价, 探讨不同方法在水质评价中的适用性, 以期对陆海统筹的水环境评价及管理提供科学参考。

收稿日期: 2020-12-02 修回日期: 2021-04-10 网络出版时间: 2021-04-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210423.0958.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1407701); 国家自然科学基金(51809031)

作者简介: 丛铭(1997—), 女(满族), 辽宁鞍山人, 主要从事水环境研究。E-mail: 21906131cmcc@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 辛卓航(1987—), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 博士, 主要从事水环境与水生态研究。E-mail: xinzh@dlut.edu.cn

1 方法与数据

1.1 研究区域及水质监测

辽河流域(116°30'E~125°47'E, 38°43'N~45°N)(图1)流经吉林、辽宁、河北省和内蒙古自治区的部分城市,流域面积21.9万km²,地处温带、暖温带半湿润大陆性季风气候^[21]。辽河流域包含辽河和大辽河2个主要独立水系:大辽河发

源于辽东山地,接纳浑河和太子河后,于三岔河汇合后经大辽河由营口注入辽东湾;辽河为东、西辽河汇合为辽河干流,经双台子河由盘山县附近注入辽东湾。拥有辽河口国家级自然保护区,含有丰富的生物资源。因此,该区域入海河流及河口水域的水环境质量事关近岸水环境安全和水生态健康,需对水质状况进行合理评价,以制定科学的保护和治理措施。



图1 研究区域及水质监测点分布

Fig.1 Map of the study area and water quality monitoring sites

项目组于2019年9月、2020年6月分别对辽河干流下游、大辽河下游及辽河口区域的30个点位进行调查采样(图1),编号1~30号(其中:1~10号位于大辽河下游;11~20号位于辽河下游;21~30号位于辽河口)。基于近5年的《中国近岸海域生态环境质量公报》及文献^[22-23]可知:辽东湾主要超标污染物为无机氮和活性磷酸盐;辽宁入海河流的主要超标因子包括氨氮、总磷及高锰酸盐指数。此外,结合项目组现地监测发现,除前述指标外,研究区的溶解氧(DO)亦存在超标现象。因此,选取溶解氧(DO)、总磷、氨氮和高锰酸盐指数为入海河流的评价指标;选取溶解氧(DO)、活性磷酸盐和无机氮为河口水域的评价指标。DO采用YSI EXO2多功能水质多参数仪现场测定,活性磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法测定,无机氮为亚硝酸盐氮、硝酸盐氮以及氨氮三者之和,分别采用萘乙二胺分光光度法、镉柱还原法测定及纳氏试剂比色法测定,总磷采用钼酸铵分光光度法测定,高锰酸盐指数采用酸性KMnO₄法测定。对河流水环境质量的评价,依照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[12];对于河口水质评

价,依照《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[24]。

1.2 水质评价方法

1.2.1 单因子评价法

单因子评价法根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的评价标准参数来划分水质的级别,用水质最差的单项指标所属类别来确定水体综合水质类别。单因子评价的详细方法步骤见《水质基准与水质标准》^[25]。

1.2.2 可变模糊评价法

可变模糊评价方法基于可变模糊统一模型,应用对立模糊集概念构建相对隶属度矩阵、确定各指标权重,最终得到综合相对隶属度值来评价样本的等级。以2019年9月河流样本为例说明具体步骤。

河流水质评价选取4个评价指标($m=4$),构成指标特征值向量 $U=(u_1, u_2, u_3, u_4)$,其中, u_1 为DO, u_2 为总磷, u_3 为氨氮, u_4 为高锰酸盐指数。《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)共有5个等级($s=5$),根据指标及分类标准值,构建标准区间矩阵 $I_{ab}=(\lceil a_{ih}, b_{ih} \rceil_h)$,其中 a_{ih}, b_{ih} 为分类标准的上下限, i 为评价指标($i=1, 2, \dots, m$), h 为分类级别

($h=1,2,\dots,s$)。根据 I_{ab} 构造变动区间的范围值矩阵 $I_{cd} = ([c_{ih}, d_{ih}]_{ih})$, 其中 c_{ih}, d_{ih} 为指标变动区间的

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [20, 7.5] & [7.5, 6] & [6, 5] & [5, 3] & [3, 2] \\ [0, 0.02] & [0.02, 0.1] & [0.1, 0.2] & [0.2, 0.3] & [0.3, 0.4] \\ [0, 0.15] & [0.15, 0.5] & [0.5, 1] & [1, 1.5] & [1.5, 2] \\ [0, 2] & [2, 4] & [4, 6] & [6, 10] & [10, 15] \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [20, 6] & [20, 5] & [7.5, 3] & [6, 2] & [5, 2] \\ [0, 0.1] & [0, 0.2] & [0.02, 0.3] & [0.1, 0.4] & [0.2, 0.4] \\ [0, 0.5] & [0, 1] & [0.15, 1.5] & [0.5, 2] & [1, 2] \\ [0, 4] & [0, 6] & [2, 10] & [4, 15] & [6, 15] \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} 20 & 7.5 & 5.5 & 3 & 2 \\ 0 & 0.02 & 0.15 & 0.3 & 0.4 \\ 0 & 0.15 & 0.75 & 1.5 & 2 \\ 0 & 2 & 5 & 10 & 15 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将 I_{ab}, I_{cd} 和 M 矩阵代入式(4)~(7), 计算出样本的 4 个指标对 5 个级别的相对隶属度矩阵 $\mu_A^{[14]}$ 。

当样本第 i 个指标的监测值 u_i 落在 m_{ih} 左侧时,

$$\mu_{\underline{A}}(u_i)_h = 0.5 \left[1 + \left(\frac{u_i - a_{ih}}{m_{ih} - a_{ih}} \right)^\beta \right], u_i \in [a_{ih}, m_{ih}] \quad (4)$$

$$\mu_{\underline{A}}(u_i)_h = 0.5 \left[1 - \left(\frac{u_i - a_{ih}}{c_{ih} - a_{ih}} \right)^\beta \right], u_i \in [c_{ih}, a_{ih}] \quad (5)$$

当 u_i 落在 m_{ih} 右侧时,

$$\mu_{\underline{A}}(u_i)_h = 0.5 \left[1 + \left(\frac{u_i - b_{ih}}{m_{ih} - b_{ih}} \right)^\beta \right], u_i \in [m_{ih}, b_{ih}] \quad (6)$$

$$\mu_{\underline{A}}(u_i)_h = 0.5 \left[1 - \left(\frac{u_i - b_{ih}}{d_{ih} - b_{ih}} \right)^\beta \right], u_i \in [b_{ih}, d_{ih}] \quad (7)$$

式中: $\mu_{\underline{A}}(u_i)_h$ 为相对隶属度矩阵 μ_A 中第 i 行第 h 列的元素, 表示 u_i 对第 h 个级别的相对隶属度; β 为大于 0 的指数, 通常可取 $\beta=1$ 即线性函数。

由于各单因子对综合水质的影响程度不同, 应根据污染物超标程度对水质影响大小分别给予不同权重。本文采用有序二元对比法确定各指标的权重 $w_i^{[14]}$ 。基于河流评价的 4 个水质指标, 确定指标集 $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$, 其中: p_1 为 DO; p_2 为总磷; p_3 为氨氮; p_4 为高锰酸盐指数。之后基于单因子评价的指标等级排序得到排序一致性标度矩阵 E, e_{ih} 为 E 的第 i 行第 j 列元素, 确定方法为 2019 年 9 月水质监测结果的主要决定性指标为 DO 和高锰酸盐指数, 有少数样本的决定指标为总磷, 将 4 个指标进行二元对比: p_1 比 p_2 重要, 则 $e_{12} = 1, e_{21} = 0$; p_1 比 p_3 重要, 则 $e_{13} = 1, e_{31} = 0$; p_1 和 p_4 同等重要, 则 $e_{14} = 0.5, e_{41} = 0.5$; p_2 比 p_3 重要, 则 $e_{23} = 1, e_{32} = 0$; p_4 比 p_2 重要, 则 $e_{42} = 1, e_{24} = 0$; p_4 比 p_3 重要, 则 $e_{43} = 1, e_{34} = 0$ 。

由此, 得到排序一致性标度矩阵

上下限。之后确定指标 i , 级别 h 在 $[a_{ih}, b_{ih}]_{ih}$ 中相对隶属度为 1 的点值 m_{ih} , 构成矩阵 $M^{[10]}$ 。具体表示为

$$E = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}, \text{各行和数为} \begin{bmatrix} 3 \\ 1.5 \\ 0.5 \\ 3 \end{bmatrix}$$

因此, 得到指标集在满足排序一致性条件下关于重要性的排序: DO=高锰酸盐指数>总磷>氨氮。

对指标进行关于重要性程度的二元比较, 确定语气算子, 得到相对隶属度值, 具体如下: 排序最重要的 DO、高锰酸盐指数与总磷相比, 因为单因子评价法中多数样本的等级由 DO 和高锰酸盐指数决定, 部分样本的等级由总磷决定, 因此语气算子处选择“略为”与“较为”之间; DO、高锰酸盐指数与氨氮相比, 氨氮在单因子评价法中的等级为 I 类, 对水质等级影响较小, 因此语气算子选择处于“明显”与“显著”之间。根据语气算子与相对隶属度的对应关系^[10], 处于“略为”和“较为”之间的相对隶属度为 0.600, 处于“明显”和“显著”之间的相对隶属度为 0.379, 可得 4 项评价指标的权向量为 $w' = (1.000 \ 0.600 \ 0.379 \ 1.000)$, 归一化权重向量为: $w = (0.336 \ 0.201 \ 0.127 \ 0.336)$ 。

最终, 计算样本对各个级别的综合相对隶属度 u_h' , 将其归一化后计算评价样本的级别特征值 H :

$$u_h' = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_{\underline{A}}(u_i)_h)]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i \mu_{\underline{A}}(u_i)_h]^p} \right\}^{\frac{\alpha}{p}}} \quad (8)$$

$$u_h = \frac{u_h'}{\sum_{h=1}^s u_h'} \quad (9)$$

$$H = \sum_{h=1}^c u_h h \quad (10)$$

式中: w_i 为指标权重; m 为识别指标数; α 为模型优化准则参数; u_h 为 u_h' 归一化后的综合相对隶属度, 取 $\alpha=1$ 为最小一乘方准则, p 为距离参数, 取 $p=1$ 为海明距离^[11]。

对于河流水质 5 级分类的评价标准来说: $1.0 \leq H \leq 1.5$, 属 I 类水; $1.5 < H \leq 2.5$, 属 II 类水; $2.5 <$

$H \leq 3.5$,属Ⅲ类水; $3.5 < H \leq 4.5$,属Ⅳ类水; $4.5 < H \leq 5.0$,属Ⅴ类水。

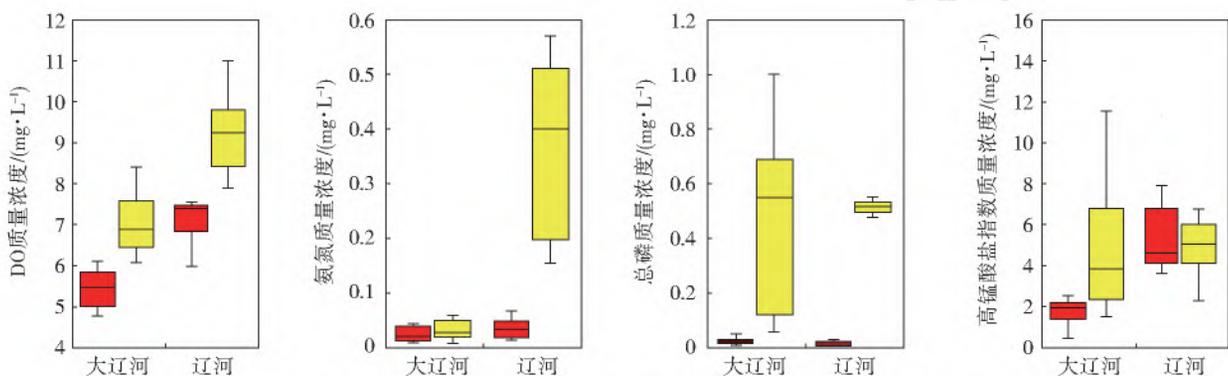
重复上述步骤,同理可计算出2020年6月河流水质所属等级,以及2019年9月、2020年6月的河口水质等级。对于河口水质评价,根据《海水水质标准》(GB 3097—1997),分4个等级: $1.0 \leq H \leq 1.5$,属Ⅰ类水; $1.5 < H \leq 2.5$,属Ⅱ类水; $2.5 < H \leq 3.5$,属Ⅲ类水; $3.5 < H \leq 4.0$,属Ⅳ类水。

此外,为探究不同权重确定方法对可变模糊评价结果的影响,本研究同时采用客观赋权法中的熵权法确定权重,其方法和原理在文献[26]中已有报道,由该方法得到河流样本的权向量为 $\mathbf{W} = (0.405 \ 0.235 \ 0.218 \ 0.142)$,河口样本的权向量为 $\mathbf{W} = (0.341 \ 0.492 \ 0.168)$ 。

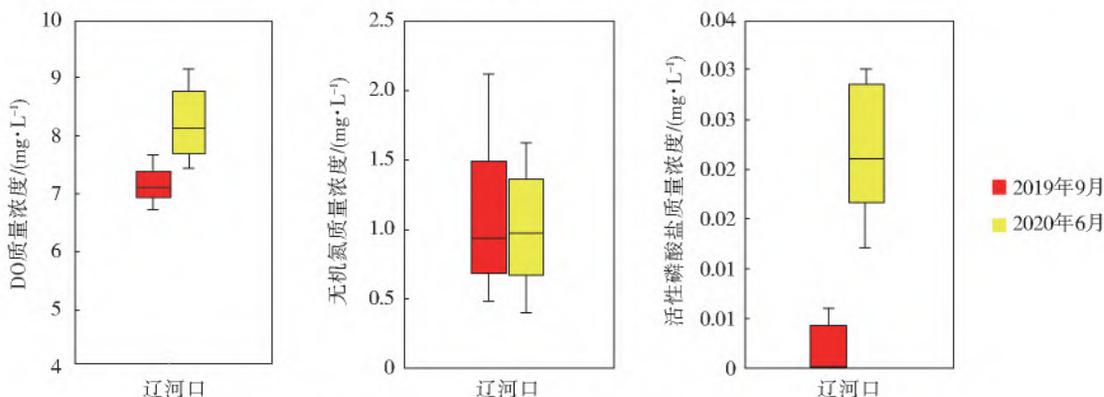
2 结果与讨论

2.1 水质时空变化分析

基于监测数据,对水质参数的时空变化规律进行分析,见图2。对于DO指标,大辽河监测点(1~10号)的DO质量浓度变化范围为4.78~8.42 mg/L,辽河(11~20号)为4.46~11.01 mg/L,辽河口(21~30号)为6.25~9.16 mg/L,整体上辽河DO最高,辽河口其次,而大辽河的DO质量浓度相对偏小,2020年6月的DO质量浓度普遍高于2019年9月。所有河流监测点位的DO均达到了Ⅳ类水标准($DO > 3.00$ mg/L),辽河口的DO质量浓度达到Ⅰ类海水水质标准($DO > 6.00$ mg/L)。



(a) 大辽河、辽河入海河段DO,氨氮,总磷及高锰酸盐指数的质量浓度分布



(b) 辽河口DO,无机氮及活性磷酸盐的质量浓度分布

图2 河流河口监测点位的水质时空变化规律

Fig. 2 Spatial-temporal variations of water quality indexes in the river and estuary

对于河流的氨氮指标,大辽河的变化范围为0.01~0.09 mg/L,辽河为0.01~0.57 mg/L。大辽河所有监测点位的氨氮质量浓度均满足Ⅰ类标准(氨氮 ≤ 0.15 mg/L)。辽河下游在两次监测中的氨氮质量浓度差异较大:2019年9月所有点位为Ⅰ类水体;2020年6月有1个点位为Ⅰ类水体,6个点位为Ⅱ类水体(氨氮 ≤ 0.50 mg/L),3个点位为Ⅲ类水体(氨氮 ≤ 1.00 mg/L)。对于辽河口,两次监测的

无机氮质量浓度相差不大:2019年9月变化范围为0.48~2.96 mg/L,点位均值为1.12 mg/L;2020年6月变化范围为0.43~1.62 mg/L,点位均值为0.98 mg/L。两次监测中,有10%的监测结果为Ⅳ类水体(无机氮 ≤ 0.50 mg/L),90%为劣Ⅳ类水体(无机氮 ≥ 0.50 mg/L),说明辽河口无机氮质量浓度较高,在监测时段内无机氮污染形势严峻。

对于河流的总磷指标,无论是大辽河还是辽河

下游,2020 年 6 月的监测质量浓度要高于 2019 年 9 月。2019 年 9 月所有监测点位的总磷达到 II 类标准(总磷 ≤ 0.10 mg/L)。2020 年 6 月,大辽河下游不同监测点位的质量浓度差异较大,从 0.06 mg/L 到 1.00 mg/L,其中,2 个点位为 II 类水体,1 个点位为 III 类水体(总磷 ≤ 0.20 mg/L),7 个点位为劣 V 类水体(总磷 > 0.40 mg/L)。2020 年 6 月的辽河下游总磷质量浓度较高,所有点位均为劣 V 类水体。这可能是由于流域下游分布了大面积灌区,5、6 月正值农作物耕作施肥期,随着降水、入渗等过程产生磷肥的流失,河流入海河段总磷质量浓度大幅提高。辽河口的活性磷酸盐质量浓度在 2019 年 9 月为 0~0.01 mg/L,点位均值为 0.002 mg/L;2020 年 6 月变化范围为 0.01~0.03 mg/L,点位均值 0.02 mg/L。监测结果表明河口活性磷酸盐质量浓度满足 II 类海水水质标准。

对于河流的高锰酸盐指数,大辽河的变化范围为 0.42~13.87 mg/L,均值为 3.48 mg/L,2020 年 6 月监测值要高于 2019 年 9 月。辽河下游高锰酸

盐指数变化范围为 3.64~11.60 mg/L,均值为 5.31 mg/L,两次监测的质量浓度差别不大。

2.2 基于单因子评价法的水质评价

基于单因子评价法的评价结果见图 3。由结果可知:2019 年 9 月的河流监测点位(1~20 号)中,氨氮质量浓度满足 I 类水体,总磷为 I、II 类水体,DO、高锰酸盐指数是水质综合评价的主要决定性因子;20 个监测点位中,有 7 个属于 II 类水体,10 个属于 III 类水体,3 个属于 IV 类水体。2020 年 6 月的 20 个河流监测点位,DO 和氨氮处于 I~III 类水体水平,高锰酸盐指数处于 I~V 类,总磷为水质最差指标,是综合评价的决定性因子;20 个监测点位中有 2 个为 II 类水体,1 个为 III 类水体,另有 17 个属于劣 V 类水体。在 2019 年 9 月与 2020 年 6 月两次监测中,辽河口水域(21~30 号)的 DO 和活性磷酸盐质量浓度均呈现较好水质状况,属于 I、II 类水体;所有点位的无机氮质量浓度均较高,决定了两次监测的全部点位水质综合评价结果均为劣 IV 类水体。

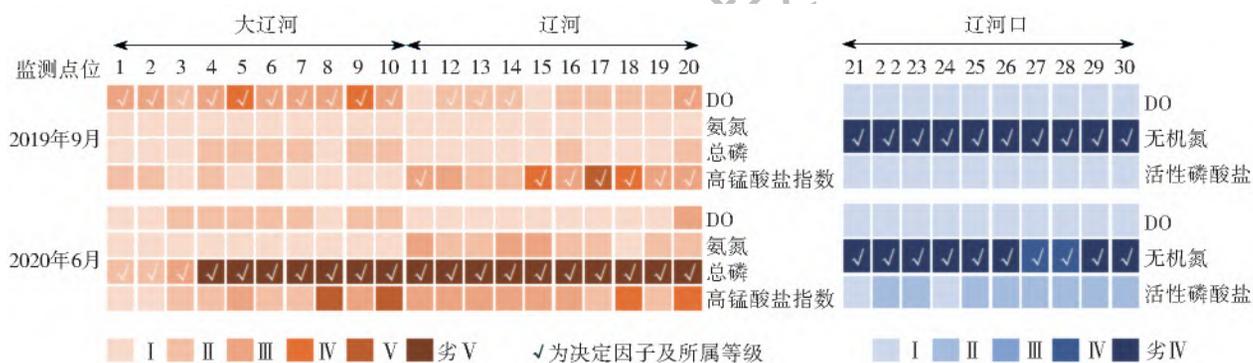


图 3 基于单因子评价法的水质评价结果

Fig. 3 Water quality grades assessed by the single factor method

2.3 基于可变模糊法的水质评价

基于 1.2.2 节可变模糊评价方法,计算得到基于有序二元对比法和熵权法的样本综合水质级别,见图 4。由图 4 可知:基于有序二元对比法的大辽河两次监测的样本中有 13 个样本为 II 类水体,5 个样本为 III 类水体,2 个样本为 IV 类水体;辽河两次监测的样本中有 9 个样本为 II 类水体,6 个样本为 III 类水体,5 个样本为 IV 类水体;辽河口两次监测的样本中有 17 个样本为 II 类水体,3 个样本为 III 类水体。基于熵权法得到的水质级别在 14 个点位与有序二元对比法确定的水质级别存在差异,整体上熵权法得到的级别较优。

2.4 水质评价结果对比分析

为探究单因子法与可变模糊评价法对河流、

河口区域水质评价结果的影响,图 5 比较了两种评价方法对河流、河口水质状况的评价结果(熵权法的评价结果仅展示了与二元对比法评价等级不同的点位)。整体来看,无论对于河流还是河口水域的监测点位,可变模糊评价方法的水质类别都要优于单因子评价方法。对于河流样本(图 5(a)),2019 年 9 月的 9 号点位基于单因子评价法的水质级别为 IV 类,可变模糊评价方法得到的水质级别为 II 类。这是由于样本中的 DO 质量浓度处于 IV 类水标准,但氨氮、总磷质量浓度和高锰酸盐指数对应的水质级别达到 I 类或 II 类标准,单因子法基于最差指标评定,而可变模糊评价法综合权衡了表现较好的指标等级。2020 年 6 月的河流样本中,两种评价方法结果差异较大,对于 4~20 号点位,单因子评价结果为劣 V 类水,而可变模

糊法评价结果为 I ~ IV 类水,这是由于样本中总磷指标为劣 V 类,高锰酸盐指数指标为 I ~ V 类,而 DO 和氨氮质量浓度对应 I ~ III 类水体,可变模糊评价法综合权衡了 DO 和氨氮的较优表现。对于河口水质样本(图 5(b)),模糊评价法的评价结果显

著优于单因子法。单因子法得到水质等级为 IV 类和劣 IV 类,而可变模糊评价法得到的水质类别为 II 类和 III 类,这是由于河口所有监测样本的无机氮质量浓度均对应劣 IV 类水,但 DO 和活性磷酸盐质量浓度满足 I、II 类海水水质标准。

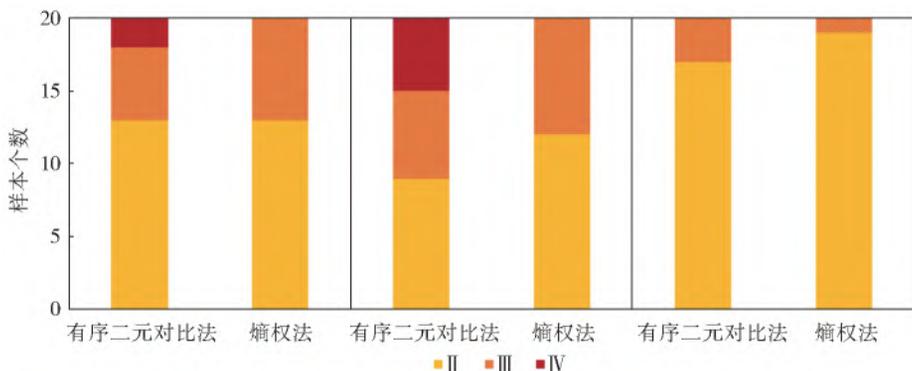


图 4 可变模糊法得到的综合水质级别

Fig. 4 Water quality grades based on fuzzy variable method

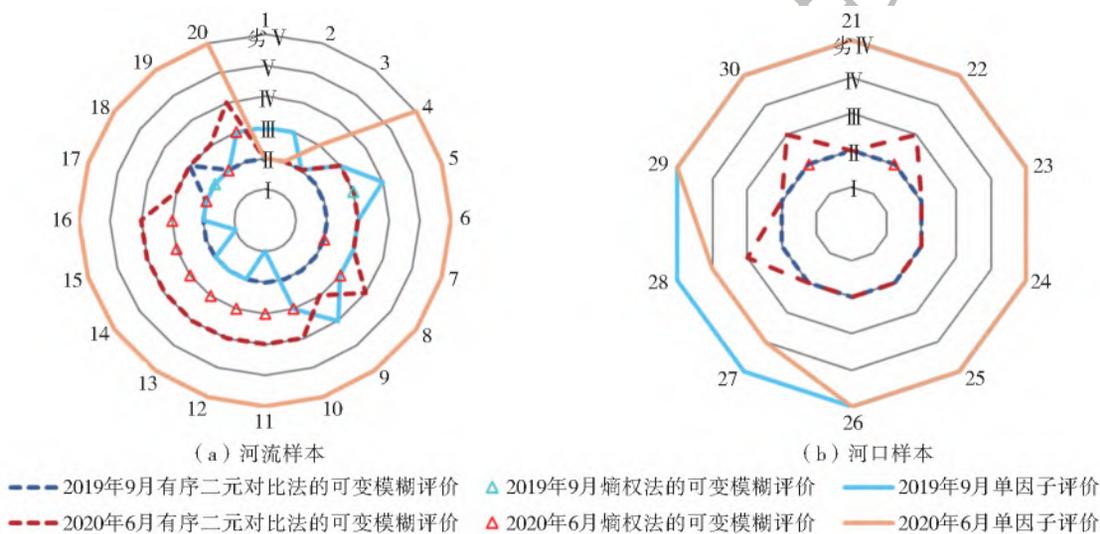


图 5 基于单因子法与可变模糊评价法的水质评价级别对比

Fig. 5 Comparison of water quality grades based on single factor method and fuzzy variable method

由对比结果可知,同样的水质监测结果,采用单因子评价法与可变模糊评价法得到的水质等级存在较明显的差异。单因子评价法用参评因子中最差因子的污染等级判定水体综合污染程度,简单易行,但往往产生“过保护”的评价结果。可变模糊评价法通过指标权重能够综合考虑各个指标对水质等级的影响,很好地解决了按照评价标准的区间限值硬性分级的问题,且该方法中采用有序二元对比法确定权重时结合了单因子评价法的指标优劣排序结果,使得权重向量结果更加客观、更能反映整体情况。因此,在水质管理中,可基于单因子法筛选出超标的环境因子优先治理,同时基于可变模糊法对多指标的综合评价结果,掌握整体的水质状况,确定是否需要进一步开展治理和防范。

3 结 论

(1) 对大辽河、辽河下游河流及辽河口的水域进行采样监测,2019 年的监测结果表明对于河流水体的主要污染决定因子为 DO 和高锰酸盐指数;2020 年 6 月的决定因子为总磷,有 85% 的河流监测点位的总磷质量浓度为劣 V 类。辽河口水质状况在两次监测变化不大,DO 和活性磷酸盐能够满足 I ~ II 类海水水域标准,无机氮为河口的主要污染因子,有 90% 的监测结果为劣 IV 类海水水质。

(2) 无论对于河流还是河口,基于可变模糊评价法所得到的水质级别要优于单因子评价法。尤其是 2020 年 6 月的河流 4~20 号点位,单因子评价结果为劣 V 类水,而可变模糊法评价结果为 I ~ IV 类水;对于两次监测的河口水质样本,单因子法得到水质

等级为Ⅳ类和劣Ⅳ类,而可变模糊法得到的水质类别为Ⅱ类和Ⅲ类。

(3)基于河流河口的两次监测数据说明了不同评价方法的水质评价级别差异较大,应引起水环境管理者的重视并在管理实践中统筹考虑。可变模糊评价法能够综合权衡各个指标对水质等级的影响,避免了以最差指标所属标准区间硬性分级的问题,更加科学和客观。单因子评价法能直观地反映出监测断面的主要污染因子,简单易行,且评价结果更加严格。在今后的研究中,应加强连续多点位的水质监测,从而系统识别不同点位的水质级别,明确分区域的主要环境问题,为陆海统筹的水环境治理及管理提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 马迎群,张雷,赵艳民,等.大辽河主要污染源营养盐输入特征[J].环境科学,2015,36(11):4013-4020. (MA Y Q,ZHANG L,ZHAO Y M,et al. Input characteristics and pollution assessment of nutrients pollution in the primary pollution source of the Daliao River[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2015, 36(11): 4013-4020. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 2015. 11. 010.
- [2] STROKAL M, YANG H, ZHANG Y, et al. Increasing eutrophication in the coastal seas of China from 1970 to 2050 [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 85(1): 123-140. DOI:10. 1016/j. marpolbul. 2014. 06. 011.
- [3] CHEN Y X, LIU R M, SUN C C, et al. Spatial and temporal variations in nitrogen and phosphorous nutrients in the Yangtze River estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(10): 2083-2089. DOI: 10. 1016/j. marpolbul. 2012. 07. 020.
- [4] 焦士兴,许萍.水环境质量的综合评价方法研究[J].云南地理环境研究,2004,16(2):63-66. (JIAO S X, XU P. Study on comprehensive assessment method of water environment quality and quantity[J]. Yunnan Geographic Environment Search, 2004, 16(2): 63-66. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1001-7852. 2004. 02. 015.
- [5] 王维,纪枚,苏亚楠.水质评价研究进展及水质评价方法综述[J].科技情报开发与经济,2012,22(13):129-131. (WANG W, JI M, SU Y N. Reviews of the progress in the research of water quality evaluation and the methods for water quality evaluation [J]. Sci-tech Information Development & Economy, 2012, 22(13): 129-131. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-6033. 2012. 13. 056.
- [6] 刘国东,丁晶.水环境中不确定性方法的研究现状与展望[J].环境科学进展,1996(4):46-53. (LIU G D,

DING J. A review and prospect of uncertainty methods employed in the water environment[J]. Advances in Environmental Science, 1996(4):46-53. (in Chinese)) DOI:10. 1007/BF02951625.

- [7] 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]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2008, 17(5): 729-733. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-8227. 2008. 05. 012.
- [8] 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. (LI M S, ZHANG J H, LIANG N, et al. Comparisons of some common methods for water environmental quality assessment[J]. Progress in Geography, 2012, 31(5): 617-624. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: DLKJ. 0. 2012-05-013.
- [9] 弥艳,常顺利,师庆东,等.艾比湖流域2008年丰水期水环境质量现状评价[J].湖泊科学,2009,21(6):891-894. (MI Y, CHANG S L, SHI Q D, et al. Aquatic environmental quality assessment in Ebinur Lake catchment during high flow period, 2008 [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(6): 891-894. (in Chinese)) DOI:10. 18307/2009. 0621.
- [10] 张婷,刘静玲,王雪梅.白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J].环境科学学报,2010,30(2):261-267. (ZHANG T, LIU J L, WANG X M. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(2): 261-267. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: HJXX. 0. 2010-02-006.
- [11] 陈守煜,郭瑜.水质综合评价的模糊可变集合方法[J].水资源保护,2005,21(6):23-26. (CHEN S Y, GUO Y. Application of variable fuzzy sets method in comprehensive evaluation of water quality[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(6): 23-26. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2005. 06. 005.
- [12] 国家环境保护总局. 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. (State Environmental Protection Administration. GB 3838—2002: Environmental quality standards for surface water[S]. Beijing: China Environmental Press, 2002. (in Chinese))
- [13] 冯峰,许士国,周志琦.应用可变模糊集理论评价达拉特旗地表水水质[J].水资源保护,2009,25(1):44-47. (XU F, XU S G, ZHOU Z Q. Evaluation of surface water quality in Dalate Banner with fuzzy variable assessment method[J]. Water Resources Protection,

- 2009,25(1):44-47. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SZYB.0.2009-01-011.
- [14] 劳期团. 模糊数学方法在水库水质综合判别中的应用[J]. 中国环境科学,1989,9(3):225-229. (LAO Q T, Application of fuzzy mathematics method in comprehensive discrimination of reservoir water quality[J]. China Environmental Science,1989,9(3):225-229. (in Chinese)) DOI:10.1007/BF02006184.
- [15] 陈守煜. 系统模糊决策的可变集理论与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,2017. (CHEN S Y, Variable set theory and application for system fuzzy decision making [M]. Dalian:Dalian University of Technology Press,2017. (in Chinese))
- [16] 惠秀娟,杨涛,李法云,等. 辽宁省辽河水生态系统健康评价[J]. 应用生态学报,2011,22(1):181-188. (HUI X J, YANG T, LI F Y, et al. Health assessment on aquatic ecosystem in Liaohe River of Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(1):181-188. (in Chinese)) DOI:10.13287/j.1001-9332.2011.0005.
- [17] 马溪平,吕晓飞,张利红,等. 辽河流域水质现状评价及其污染源解析[J]. 水资源保护,2011,27(4):1-4. (MA X P, LYU X F, ZHANG L H, et al. Assessment of water quality and source apportionment of pollution in Liaohe River basin [J]. Water Resources Protection,2011,27(4):1-4. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2011.04.001.
- [18] 孙炳双,杨肖肖,杨维. 双台子河流域综合水质评价方法的对比研究[J]. 环境科学与管理,2013,38(6):46-52. (SUN B S, YANG X X, YANG W, Comparison of water quality assessment methods in Shuangtaizi River [J]. Environmental Science and Management,2013,38(6):46-52. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1673-1212.2013.06.011.
- [19] 赵洁,徐宗学,刘星才,等. 辽河河流水体污染源解析[J]. 中国环境科学,2013,33(5):838-842. (ZHAO J, XU Z X, LIU X C, et al. Source apportionment in the Liaohe River basin [J]. China Environmental Science, 2013,33(5):838-842. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2013.05.011.
- [20] WANG J, YE S Y, EDWARD A L et al. Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the Shallow Sea wetland of the Liaodong bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 120(1/2):347-354. DOI:10.1016/j.marpolbul.2017.05.051.
- [21] 乔会婷. 湿地植物对湖泊及河口水动力特性影响的数值模拟研究[D]. 大连:大连海洋大学,2018. (QIAO H T, Numerical simulation of the effects of wetland plants on the hydrodynamic characteristic of lakes and estuaries [D]. Dalian:Dalian Ocean University, 2018. (in Chinese))
- [22] 陈芸,赵骞,徐广鹏. 基于人工神经网络的夏季辽东湾北部河口区富营养化评价[J]. 海洋湖沼通报,2017(5):48-57. (CHEN Y, ZHAO Q, XU G P. Eutrophication assessment of estuary area in th northern part of Liaodong bay in summer based on artificial neural network method [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017(5):48-57. (in Chinese)) DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2017.05.007.
- [23] 李卫卫,孙昭晨,梁书秀. 辽河口区径流对污染物漂移扩散的影响[J]. 海洋环境科学,2019,38(2):294-302. (LI W W, SUN Z C, LIANG S X, Effects of the Liaohe River discharge on the dispersion of pollutants [J]. Marine Environmental Science, 2019,38(2):294-302. (in Chinese)) DOI:10.13634/j.cnki.mes.2019.02.019.
- [24] 国家环境保护总局. GB 3097—1997:海洋水质标准[S]. 北京:中国标准出版社,2008. (State Environmental Protection Administration. GB 3097—1997: Sea water quality standard [S]. Beijing: Standards Press of China,2008. (in Chinese))
- [25] 夏青,陈艳卿,刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京:中国标准出版社,2004. (XIA Q, CHEN Y Q, LIU X B. Water quality standard and water quality standard [M]. Beijing, Standards Press of China,2004. (in Chinese))
- [26] 邹志红,孙靖南,任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报,2005,25(4):552-556. (ZHOU Z H, SUN J N, REN G P. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4):552-556. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0253-2468.2005.04.022.

Application of single factor method and fuzzy variable method in water quality assessment

CONG Ming¹, YANG Hui², ZHANG Xiaojing¹, XIN Zhuohang^{1,3}, ZHANG Chi^{1,3}

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The rapid social-economic development has caused serious water environmental pollution, and water quality assessment

is the basis of environmental water management. However, different assessment methods may yield different water quality grades results. The downstream reaches of the Liao River, Daliao River, and the estuary were focused on Water quality assessment was conducted based on several pollutants, and the applicability of the different methods was discussed. This study may provide scientific references for water quality assessment and management for the terrestrial-marine system.

In September 2019 and June 2020, 30 sites in the downstream reaches of the Liao River, Daliao River, and the estuary were sampled. Dissolved oxygen (DO), total phosphorus, ammonia nitrogen, and permanganate index were selected as the evaluation indexes for rivers, and dissolved oxygen (DO), active phosphate, and inorganic nitrogen were selected as the evaluation indexes of estuarine waters. The single factor method and fuzzy variable method were selected for water quality assessment. The single factor method defines the grade of the worst single index as the comprehensive water quality grade. The fuzzy variable method uses the concept of opposite fuzzy sets to construct the relative subordinate degree matrix and to determine the weight of each index. Finally, the comprehensive relative subordinate degree was used to evaluate the water quality grade. Two methods were applied to determine the weights of indexes, i. e., the ordered binary comparison method and the entropy weight method.

Results of single factor method showed that in the rivers, DO and permanganate indexes were the major pollutants in 2019, and the water quality varied from Grades II to IV for all sampling sites. In 2020, the total phosphorus was the major pollutant, and 17 sampling sites have the water quality inferior to Grade V. For the estuary, water quality for all sampling sites was inferior to Grade IV due to the high mass concentrations of inorganic nitrogen. As for the fuzzy variable method, the water quality of the river water varied from Grade II to IV, the estuary water were Grade II and III based on the ordered binary comparison method. Likewise, the water quality grades based on the entropy weight method were better than the ordered binary comparison method. In comparison, the water quality grades obtained by the fuzzy variable method were generally superior to single factor method both for the rivers and estuary water samples. The results proved that the fuzzy variable method can comprehensively consider the impact of each index on water quality grade by the index weight. The single factor evaluation method often produces "over-protection" results, but it can better reflect the strict requirements of water environment management and is more simple and feasible to implement.

Overall, the results indicated that the water quality grades obtained by the fuzzy variable method were generally superior to single factor method. The major pollutants of river water were DO, permanganate index and total phosphorus, and the water quality grades were IV and inferior to V based on the single factor method, while I to III based on fuzzy variable method. The major pollutants in the estuary were inorganic nitrogen. The single factor method is assessed based on the grade of the worst index, while the fuzzy variable method weighs the impacts of all indexes. Water quality grades using different assessment methods should be comprehensively considered in water environmental management.

Key words: water quality assessment; fuzzy variable assessment method; single factor method; water quality monitoring; water environment management

(上接第 707 页)

From 2015 to 2017, the vegetation area decreased by 82.94 km², accounting for 38.82% of the original area, and the water area decreased by 0.01 km². From 2017 to 2019, the vegetation area increased by 205.53 km², accounting for 157.27% of the original area, and the water area increased by 1.79 km², accounting for 10.86% of the original area. The total number of plaques first increased and then decreased, and the patch density fluctuated greatly. Edge density, aggregation degree, weighted average shape index also showed an upward trend. On the whole, the establishment of the construction team of the Grand Canal cultural belt and the river chief system by the staff of Beijing Municipality has achieved good results in the strict control of the water quality and the greening along the Grand Canal.

The qualitative and quantitative evaluation of the comprehensive treatment results of the Beijing section of the Grand Canal is realized, and the actual situation of the study area is directly reflected through remote sensing images and column statistical charts. Combined the results with the landscape pattern index analysis of the study area, the scientificity and accuracy of the evaluation process are ensured, mobilizing the enthusiasm of the staff, reducing the risk of corruption to a certain extent, and promoting innovation of China's administrative system.

Key words: the Grand Canal; river chief system; remote sensing image; landscape pattern index; supervision and evaluation