



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.016

张欣,张保祥,时青,等.基于熵权多元联系系数的大沽河流域地表水环境健康评价[J].南水北调与水利科技,2017,15(3):94-99,119. ZHANG Xin, ZHANG Bao xiang, SHI Qing, et al. Health assessment of surface water environment in Dagu River basin based on entropy weight and multivariate connection number[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 94-99, 119. (in Chinese)

# 基于熵权多元联系系数的大沽河流域地表水环境健康评价

张欣<sup>1,2</sup>, 张保祥<sup>1,2</sup>, 时青<sup>3</sup>, 崔峻岭<sup>3</sup>

(1. 山东省水利科学研究院, 济南 250014; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室, 济南 250014;  
3. 青岛市水文局, 山东 青岛 266071)

**摘要:**为合理开发利用和保护大沽河流域水资源,构建了流域地表水环境健康评价指标体系和分级标准。基于集对分析理论,考虑各评价指标等级标准边界的不确定性,建立了熵权多元联系系数耦合计算模型。将该方法应用于大沽河流域,得到流域地表水环境健康评价指标联系系数计算结果。结果表明:2015年大沽河流域 $\tilde{N}$ 区(莱西市)、 $\tilde{O}$ 区(平度市)、 $\hat{O}$ 区(胶州市、黄岛区)、 $\hat{O}$ 区(即墨市、城阳区)以及 $\tilde{O}$ 区(莱阳市、招远市、莱州市)的地表水环境处于“健康”状态, $\tilde{O}$ 区(高密市)以及整个流域处于“亚健康”状态。青岛市大沽河综合治理工程的实施使得流域地表水环境得到较大地提高,为进一步提高整个流域的地表水环境健康水平,应针对流域开展水环境治理工作。

**关键词:**地表水环境健康;评价指标体系;分级标准;多元联系系数;熵权;大沽河流域

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)03-0094-06

## Health assessment of surface water environment in Dagu River basin based on entropy weight and multivariate connection number

ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao xiang<sup>1,2</sup>, SHI Qing<sup>3</sup>, CUI Jun ling<sup>3</sup>

(1. Water Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan 250014, China; 3. Hydrographic Bureau of Qingdao, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The health assessment index system and grading standards for surface water environment were put forward for rational exploitation and protection of water resources in Dagu River basin. A model coupling entropy weight and multivariate connection number was established based on the set pair analysis theory with consideration to the uncertainty of the boundary of grade standards for each index. The method was applied to Dagu River basin to obtain the connection numbers of the health assessment index of surface water environment. The results showed that the surface water environment of Regions  $\tilde{N}$  (Laixi),  $\tilde{O}$  (Pingdu),  $\hat{O}$  (Jiaozhou and Huangdao),  $\hat{O}$  (Jimo and Chengyang), and  $\tilde{O}$  (Laiyang, Zhaoyuan, and Laizhou) in 2015 were all healthy, but Region  $\tilde{O}$  (Gaomi) and the whole basin were sub healthy. The surface water environment of Dagu River basin has been greatly improved by the implementation of the comprehensive management program in Qingdao. The water environment treatment of the whole basin should be carried out in order to further improve the health of the surface water environment in Dagu River basin.

**Key words:** health of surface water environment; assessment index system; grading standard; multivariate connection number; entropy weight; Dagu River basin

收稿日期: 2016-08-22 修回日期: 2016-10-24 网络出版时间: 2017-05-06  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1647.022.html>

基金项目: 水利部公益性行业专项经费项目(201301089); 水利部“948”项目(201427); 山东省省级水利科研与技术推广项目

Funds: Public Welfare Industry Ministry of Water Conservancy Projects of Special Funds(201301089); "948" Project of Ministry of Water Resources(201427); Shandong Provincial Water Conservancy Research and Technology Promotion Project

作者简介: 张欣(1981-),女,山东广饶人,工程师,主要从事水资源水环境方面研究。E-mail: lszhangx@163.com

在人类活动和气候变化影响下,流域水环境系统成为一个开放、复杂的系统。目前,对于河流问题的研究已涉及水质评价、水环境健康风险评价、水环境承载力评估、河流生境评价、水体富营养状态、栖息地以及生态健康评价<sup>[1-9]</sup> 等许多方面。由于河流水质等评价具有单一性,很难全面反映河流的水环境健康状况,而现有的地表水环境健康评价多针对河流本身,缺乏与流域水环境治理目标相一致的系统评价体系<sup>[10]</sup>,同时在评价过程中存在较大的不确定性<sup>[11]</sup>,因此建立一套系统、合理的评价指标体系以及有效的定量评价模型是目前流域地表水环境健康评价研究的关键。本文从流域水环境的内涵出发,同时考虑水量、水质、污染源、水生态对流域水环境健康的影响,建立了流域水环境健康评价指标体系和熵权多元系数耦合评价模型,并在大沽河流域进行了应用,以期对流域水环境的科学治理提供参考。

## 1 研究区概况

大沽河源于烟台市招远阜山,自北向南,于青岛市胶州营房镇码头村南入胶州湾,干流全长 199 km,是胶东半岛的最大河流。大沽河流域总面积 6 131.3 km<sup>2</sup>(含南胶莱河 1 500 km<sup>2</sup>),地跨青岛、烟台、潍坊三市。北部为山区和浅山丘陵区,南部为山麓平原和平原洼地,地势北高南低,地形坡度由北向南逐渐变缓。流域地处北温带季风气候区域,具有明显的海洋性气候特点。多年平均降水量 674 mm,降水量年内分配不均,年降水量的 70% 集中在 6 月-9 月;降水量年际变化比较大,年最大降水量 1 456 mm(1964 年),是年最小降水量 342 mm(1981 年)的 4.3 倍,且丰枯水年连续出现;降水量地域分布不均,总的趋势是从南向北递减。大沽河水系包括主流大沽河及其小沽河、濰河、五沽河、流浩河及南胶莱河等诸多支流。流域内现有 61 个镇(街道办事处),总人口 456 72 万人,国民生产总值(GDP) 2 615.12 亿元,工业增加值 679.26 亿元。

随着经济社会的发展,流域内用水量增加,部分点源和面源污染物处理不达标或者未经处理就直接排入河流,威胁了河流生态系统健康。2012 年 2 月,青岛市委、市政府启动了大沽河治理工程,自大沽河产芝水库至入海口段和小沽河自北墅水库入大沽河段两侧及相关区域,重点实施并完成防洪、水资源开发、生态建设、环境保护、道路交通、小城镇与新农村示范建设、现代农业化基地建设等工程。通过大沽河的治理,沿岸群众的生产生活条件得到改善。

## 2 评价方法

### 2.1 评价指标体系及分级标准

流域水环境健康评价将水作为一个环境要素加以研究,它把水资源与人类活动都纳入整个生态系统范围中,体现了水与自然环境、人类社会的相互作用以及水域生态和人类发展协调的过程<sup>[12]</sup>。综合考虑大沽河流域水环境安全的主要影响因素,本着代表性、量化及可操作性等原则,本文从水量、水质、污染源和水生态入手,建立由 17 个指标构成的大沽河流域地表水环境健康评价指标体系。指标类型分为正向指标(越大越优)和反向指标(越小越优)两类。指标含义见表 1。

在参照地表水环境质量标准以往流域水环境评价分级标准的基础上<sup>[10,13-19]</sup>,根据各评价指标对流域地表水环境健康的影响程度,将健康级别分为“不健康 N 级”、“亚健康 0 级”、“健康 0 级”、“很健康 0 级”四个级别,结合大沽河流域实际情况,确定等级评价标准,建立大沽河流域地表水环境健康评价因子分级标准,见表 2。

### 2.2 评价模型

#### 2.2.1 集对分析原理

集对分析法(Set Pair Analysis, SPA)由我国学者赵克勤于 1989 年提出的一种处理不确定问题的系统分析方法<sup>[20]</sup>,其核心思想是把两个集合(集对)的确定性联系度和不确定性联系度联系在一起,对集对的某特性做同一性、差异性、对立性分析,建立两个集合的联系度表达式

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为联系度; $N$ 为特性总数; $S$ 为两个集合共同具有的特性数量; $P$ 为两个集合相对立的特性数量; $F$ 为既不相互对立又不为两个集合共同具有的特性数量; $a$ 为两个集合的同一度; $b$ 为差异度; $c$ 为对立度。 $j$ 为对立度系数,一般取  $j = -1$ ;  $i$ 为差异度系数,  $i \in [-1, 1]$ 。

对联系度表达式作不同层次的扩展,对  $bi$  项展开得到多元联系数,表达式为

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + b_{n-2}i_{n-2} + cj \quad (2)$$

当  $n=4$  时,得四元联系数表达式

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + cj \quad (3)$$

式中: $a, b_1, b_2, c \in [0, 1]$ ,且  $a + b_1 + b_2 + c = 1$ ;  $a$  为集对的同一度;  $b_1, b_2$  为集对的差异度;  $c$  为集对的对立度;  $i_1, i_2$  为差异度系数,取值区间为  $[-1, 1]$ ;  $j$  为对立度系数,取值为  $-1$ 。

表 1 大沽河流域地表水环境健康评价指标体系指标含义

Tab. 1 Meaning of the indexes of the index system for health assessment of surface water environment in Dagu River basin

目标层	要素层	指标层	表征内容	指标类型	指标定义
A 流域水环境健康状况	B <sub>1</sub> 水量	C <sub>1</sub> 水资源开发利用程度 (%)	水资源开发利用程度	反向指标	当地水的供水量与水资源总量的比值
		C <sub>2</sub> 人均水资源量/(m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	流域水资源数量	正向指标	多年平均当地水资源量与人口总数的比值
		C <sub>3</sub> 溶解氧/(mg·L <sup>-1</sup> )	水体污染程度	正向指标	溶解于水中的分子态氧
		C <sub>4</sub> 高锰酸盐指数/(mg·L <sup>-1</sup> )	水体污染程度	反向指标	以高锰酸钾(KMnO <sub>4</sub> )为氧化剂,处理水样时所消耗的氧化剂的量
	B <sub>2</sub> 水质	C <sub>5</sub> COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	水体污染程度	反向指标	以化学方法测量水样中需要被氧化的还原性物质的量
		C <sub>6</sub> BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	水体污染程度	反向指标	第 5 天好氧微生物氧化分解单位体积水中有机物所消耗游离氧的数量
		C <sub>7</sub> 氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	水体污染程度	反向指标	水中以游离氨(NH <sub>3</sub> )和铵离子(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )形式存在的氮
		C <sub>8</sub> 总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	水体污染程度	反向指标	水样经消解后将各种形态的磷转变成正磷酸盐后测定的结果,以每升水样含磷毫克数计量
B <sub>3</sub> 污染源	C <sub>9</sub> 污水处理率 (%)	对流域生态环境的控制能力	正向指标	处理的生活污水、工业废水量占污水排放总量的比重	
	C <sub>10</sub> 工业废水排放达标率 (%)	对流域生态环境的控制能力	正向指标	达标排放的废水与总排放废水的比例	
	C <sub>11</sub> 底泥平均污染指数	河流沉积物中重金属污染情况	反向指标	污染物的实测浓度与污染物评价参考值的比值	
	C <sub>12</sub> 化肥施用情况(kg/亩)	面源污染情况	反向指标	化肥使用量与耕地面积的比值	
	C <sub>13</sub> 河岸带植被覆盖率 (%)	河流生境	正向指标	河岸带植被覆盖情况	
	C <sub>14</sub> 河流横向连通率 (%)	河流生境	正向指标	具有连通性的水面面积或滨岸带长度占评价水体的比值	
	B <sub>4</sub> 水生态	C <sub>15</sub> 湿地保留率 (%)	河流生境	正向指标	流域内重要湿地的总面积与 20 世纪 80 年代前代表年份水体总面积的比值
C <sub>16</sub> 生态需水满足程度 (%)		地表水水文完整性	正向指标	生态用水量与生态需水量的比值	
C <sub>17</sub> 水土流失治理率 (%)		坡面生态系统状况	正向指标	经治理合格的水土流失面积占辖区内水土流失面积的比例	

表 2 大沽河流域地表水环境健康评价指标分级标准

Tab. 2 The grading standards for the health assessment indexes of surface water environment in Dagu River basin

指标	不健康Ⅲ级	亚健康Ⅱ级	健康Ⅰ级	很健康Ⅰ级
C <sub>1</sub>	40	30	20	10
C <sub>2</sub>	300	500	700	1000
C <sub>3</sub>	3	5	6	7.5
C <sub>4</sub>	10	6	4	2
C <sub>5</sub>	30	20	15	10
C <sub>6</sub>	6	4	3	2
C <sub>7</sub>	1.5	1	0.5	0.15
C <sub>8</sub>	0.3	0.2	0.1	0.02
C <sub>9</sub>	60	70	80	95
C <sub>10</sub>	70	80	90	95
C <sub>11</sub>	5	4	2	1
C <sub>12</sub>	40	30	20	10
C <sub>13</sub>	45	60	75	90
C <sub>14</sub>	60	70	80	90
C <sub>15</sub>	20	40	60	80
C <sub>15</sub>	45	60	75	90
C <sub>17</sub>	50	70	85	95

### 2.2.2 熵权多元联系数耦合评价模型

本文将信息论中的熵值理论与多元联系数评价模型相结合,构造熵权多元联系数耦合计算模型并应用于流域地表水环境健康评价中。运用信息熵所反映数据本身的效用值来计算评价指标的权重,避免了人为主观因素的偏差,使得权重的确定更符合实际;多元联系数评价模型基于集对分析理论建立,具有较高的分辨率和较大的实用性,评价过程中不遗失数据中同信息,从而使得评价结果与实际情况更为相符。

(1) 构建评价指标集合。评价指标为  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$  ( $m$  为指标数), 则第  $j$  个评价样本的指标体系构成一个集合  $A = (x_{1,j}, x_{2,j}, x_{3,j}, \dots, x_{m,j})$ , 其中  $j=1, 2, \dots, n$  为评价样本。

(2) 权重的确定<sup>[21]</sup>。

构建  $m$  个指标  $n$  个事物的判断矩阵  $R = (x_{ij})_{mn}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ )。

将判断矩阵归一化处理, 得到归一化判断矩阵  $B$

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中:  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  分别为指标下不同事物中最优者和最差者。

» 对  $n$  个评价事物  $m$  个评价指标, 确定评价指标的熵为

$$H_i = - \frac{1}{\ln m} \left( \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (5)$$

式中:  $f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}}$ ,  $0 \leq H_i \leq 1$ , 因当  $f_{ij} = 0$  时  $\ln f_{ij}$  无意义, 因此对  $f_{ij}$  加以修正, 将其定义为

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + b_{ij})} \quad (6)$$

¼ 计算各个评价指标的熵权  $\omega$ 。

$$\omega = (\omega_i)_{1 \times m}, \omega_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}, \text{且满足 } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad (7)$$

(3) 构造集对  $H(A_j, B_k)$  ( $k = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, n$ )。

第  $j$  个评价样本的指标样本值构成一个集合  $A_j$ , 各级评价标准组成一个集合  $B_k$ , 集合  $A_j$  和集合  $B_k$  构成集对  $H(A_j, B_k)$ 。将流域地表水环境健康级别分为“不健康  $\tilde{N}$  级”、“亚健康  $\tilde{0}$  级”、“健康  $\hat{0}$  级”、“很健康  $\hat{0}$  级”四个级别。依据集对分析原理, 采用四元联系数描述流域水环境健康状态, 将健康状态等级“ $\tilde{N}$  级”定义为“同一度”, “ $\tilde{0}$  级”定义为偏同差异度, “ $\hat{0}$  级”定义为“偏反差异度”, “ $\hat{0}$  级”定义为“对立度”。

本次研究取  $k = 4$ , 即

$$\mu(A_j, B_4) = a_m + b_{m,1}i_1 + b_{m,2}i_2 + c_{mj} \quad (8)$$

由于不同的标准等级对“同、异、反”的隶属程度不同, 联系度的表达式也不尽相同, 评价指标相对于评价标准的联系度表达式如下<sup>[22]</sup>:

$$\mu_{mn} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j \\ \text{正向指标 } x \in [S_1, \infty); \text{反向指标 } x \in [0, S_1] \\ \frac{x - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{S_1 - x}{S_1 - S_2} i_1 + 0i_2 + 0j \\ \text{正向指标 } x \in [S_2, S_1); \text{反向指标 } x \in (S_1, S_2] \\ 0 + \frac{x - S_3}{S_2 - S_3} i_1 + \frac{S_2 - x}{S_2 - S_3} i_2 + 0j \\ \text{正向指标 } x \in [S_3, S_2); \text{反向指标 } x \in (S_2, S_3] \\ 0 + 0i_1 + \frac{x - S_4}{S_3 - S_4} i_2 + \frac{S_3 - x}{S_3 - S_4} j \\ \text{正向指标 } x \in [S_4, S_3); \text{反向指标 } x \in (S_3, S_4] \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j \\ \text{正向指标 } x \in [0, S_4); \text{反向指标 } x \in (S_4, \infty) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  分别为评价指标的等级界限值;  $x$  为评价指标的样本值;  $m$  为第  $m$  个评价指标;  $n$  为第  $n$  个评价样本。

根据流域水环境健康状态 4 级评价标准, 符合  $\tilde{N}$  级标准为同一度  $a$ , 可以将同一度  $a$  的系数看作 1; 符合  $\tilde{0}$  级标准为对立度  $c$ , 对立度系数  $j$  常取 -1; 而符合  $\hat{0}$ 、 $\hat{0}$  级标准定义为差异度。评价标准中等级分割点的差异度系数采用分析取值法确定, 分别取差异度系数  $i_1$ 、 $i_2$  为 1。

(4) 采用置信度来确定样本的等级, 即

$$\alpha = \sum_{i=1}^m \omega_i a_i + \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,1} i_1 + \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,2} i_2 + \sum_{i=1}^m c_i j > \lambda \quad (10)$$

式中:  $\omega$  为指标权重;  $\lambda$  为置信度一般在  $[0.5, 0.7]$  内取值, 本次研究  $\lambda = 0.6$ 。

### 3 评价结果分析

#### 3.1 流域评价分区及评价价值

为全面了解大沽河流域的水环境健康状况, 将流域分为 6 个区, 详见表 3、图 1。为更好地反映青岛市大沽河综合治理工程对大沽河水环境的影响, 本文分别对 2012 年和 2015 年大沽河流域各区水环境健康状况进行综合评价, 其中水质指标取自各分区监测断面各年 5 月和 8 月监测值的平均值。

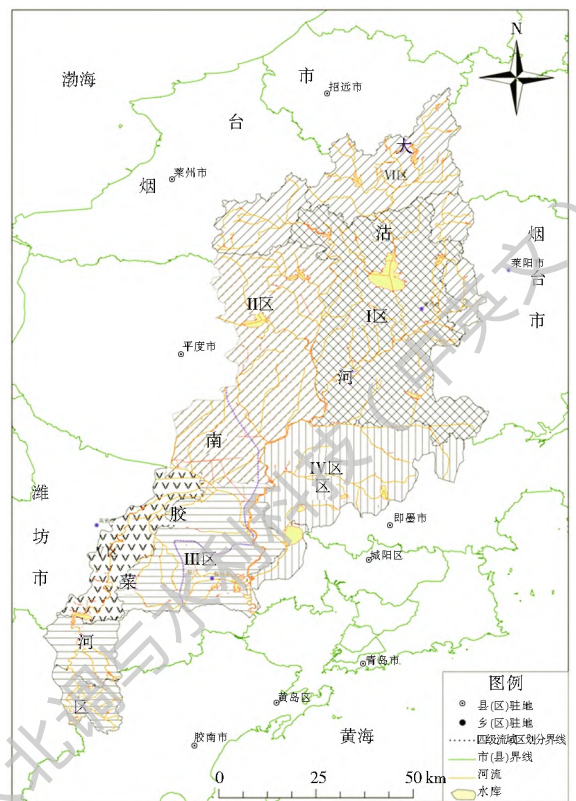


图 1 大沽河流域水环境健康评价分区

Fig. 1 The partition of surface water environmental health assessment in the Dagu river basin

表 3 大沽河流域水环境健康评价分区表

Tab. 3 Region division for health assessment of surface water environment in Dagu River basin

分区	行政区	面积/km <sup>2</sup>
N̂ 区	青岛市 莱西市	1 522
ò 区	青岛市 平度市	1 252. 5
ó 区	青岛市 胶州市、黄岛区	996. 2
ô 区	青岛市 即墨市、城阳区	1 010. 3
õ 区	潍坊市 高密市	374. 56
ö 区	烟台市 莱阳市、招远市、莱州市	975. 73
合计		6 131. 29

等资料, 计算确定各分区评价指标值, 见表 4。

### 3.2 评价结果及分析

利用构建的熵权多元联系系数耦合评价模型, 计算大沽河流域各分区的联系度。计算结果见表 5。

由表 5 可以看出, 2015 年大沽河流域水环境状态: N̂ 区(莱西市)、ò 区(平度市)、ó 区(胶州市、黄岛区)、ô 区(即墨市、城阳区)以及 õ 区(莱阳市、招远市、莱州市)处于“健康”状态; ö 区(高密市)和整个流域处于“亚健康”状态。相比 2012 年, 大沽河流域 ó 区、ô 区、ö 区的地表水环境状态得到不同程度的改善, 青岛市大沽河流域地表水环境健康水平较流域内其他地区高。

通过查阅统计年鉴、水资源公报、相关研究报告

表 4 大沽河流域水环境健康评价指标值

Tab. 4 The health assessment index values of surface water environment in Dagu River basin

评价指标	分项指标	2012 年							2015 年						
		N̂ 区	ò 区	ó 区	ô 区	õ 区	ö 区	流域	N̂ 区	ò 区	ó 区	ô 区	õ 区	ö 区	流域
水量	水资源开发利用程度(%)	29. 7	32. 8	51. 9	36. 9	65. 0	30. 0	41. 07	37. 2	38. 9	36. 5	44. 3	60. 2	29. 5	41. 1
	人均水资源量/(m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	413	387	248	282	304	476	352	404	383	285	239	304	473	348
水质	溶解氧/(mg·L <sup>-1</sup> )	7. 2	7. 5	6. 8	7. 4	5. 8	7. 4	7. 0	7. 9	8. 3	7. 3	7. 5	5. 7	7. 3	7. 3
	高锰酸盐指数/(mg·L <sup>-1</sup> )	4. 8	3. 7	9. 7	7. 3	4. 5	4. 3	5. 7	3. 9	4. 2	8. 0	5. 0	4. 4	4. 1	4. 9
	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	21. 6	10. 0	35. 7	24. 8	21. 2	21. 6	22. 5	16. 6	16. 5	25. 5	17. 6	20. 9	20. 9	19. 6
	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	3. 1	2. 3	4. 3	4. 6	4. 3	2. 7	3. 5	3. 4	3. 1	3. 2	3. 8	4. 1	2. 5	3. 4
	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0. 6	0. 2	4. 0	0. 5	0. 9	0. 4	1. 1	0. 8	0. 4	4. 1	0. 4	0. 9	0. 3	1. 2
	总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0. 16	0. 03	0. 39	0. 21	0. 19	0. 10	0. 18	0. 10	0. 14	0. 52	0. 10	0. 18	0. 09	0. 19
污染源	污水处理率(%)	80	75	80	72	71	68	74	90	85	90	80	75	75	83
	工业废水排放达标率(%)	80	75	85	82	77	75	79	95	91	93	85	80	80	87
	底泥平均污染指数	4. 5	4. 1	4. 6	3. 7	3. 3	2. 9	3. 9	4. 1	3. 9	4. 3	3. 5	3. 1	2. 9	3. 5
	化肥施用情况(kg/亩)	42	37	40	35	30	30	36	40	35	38	33	29	28	32
水生态	河岸带植被覆盖率(%)	68	70	75	70	70	60	69	85	80	82	85	72	65	77
	河流横向连通率(%)	65	65	70	65	60	65	65	81	86	89	82	70	72	80
	湿地保留率(%)	60	58	62	65	45	40	55	70	72	78	75	47	42	65
	生态需水满足程度(%)	70	65	62	60	68	75	67	80	78	75	70	72	79	75
	水土流失治理率(%)	75	80	70	65	70	70	72	80	83	75	70	71	75	75

表 5 大沽河流域水环境健康评价指标联系数计算结果

Tab. 5 Calculation of the connection number of health assessment index of surface water environment in Dagu River basin

分区	2012 年							2015 年						
	N̂ 区	ò 区	ó 区	ô 区	õ 区	ö 区	流域	N̂ 区	ò 区	ó 区	ô 区	õ 区	ö 区	流域
a	0. 1561	0. 1344	0. 4881	0. 2528	0. 2123	0. 0767	0. 2081	0. 1172	0. 0962	0. 3361	0. 1102	0. 1004	0. 0117	0. 1701
b <sub>1</sub>	0. 3628	0. 3464	0. 2548	0. 5014	0. 5759	0. 5343	0. 5502	0. 1829	0. 1680	0. 1742	0. 2956	0. 6037	0. 5194	0. 5643
b <sub>2</sub>	0. 4422	0. 2549	0. 2260	0. 1855	0. 2118	0. 2933	0. 2090	0. 4273	0. 5416	0. 2179	0. 4350	0. 2960	0. 3613	0. 2336
c	0. 0389	0. 2643	0. 0311	0. 0603	0. 0000	0. 0958	0. 0327	0. 2726	0. 1942	0. 2719	0. 1591	0. 0000	0. 1076	0. 0320
评价结果	健康	健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	健康	健康	健康	健康	亚健康	健康	亚健康

随着青岛市大沽河综合治理工程的实施, 大沽河流域通过建设污水处理厂、铺设配套污水管网、划分水源地保护区、开展农村污染集中整治、治理生态环

境、加强地表水环境监测监管能力建设等措施来改善地表水环境, 流域内点源污染逐步得到了更好地监测和控制, 城区的工业废水和生活废水排入污水

处理厂进行处理,大沽河干流的水质全部达标,水质、污染源和水生态指标得到有效地提升。而少量分散于市区外的工业废水通过自然沟渠进入大沽河支流,以及农业生产中氮、磷等养分流失造成流域部分支流水质污染,流域内部分地区水环境处于亚健康状态。

#### 4 结语

本文综合考虑影响流域水环境安全的水量、水质、污染源和生态等主要因素,建立了流域地表水环境健康评价指标体系及分级标准。基于集对分析理论,考虑各评价指标等级标准边界的不确定性,构建了熵权多元联系数耦合计算模型,为避免直接确定联系度中差异不确定系数,采用置信度确定健康等级,得到流域地表水环境健康评价结果。对大沽河流域地表水环境健康评价结果表明,青岛市大沽河综合治理工程的实施对于改善大沽河流域地表水环境健康状态起到了重要的作用。考虑流域的整体性,下一步应在整个流域内开展水资源开发及水系治理,进行整个流域生态修复,建设农村分散式生活污水处理设施,控制农业面源污染,加强地表水环境质量监测,进一步提高流域水生态与环境安全保障水平。

#### 参考文献(References):

- [1] Lermontov A, Yokoyama L, Lermontov M, et al. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1188-1197. DOI: 10.1016/j.ecolind.2009.02.006
- [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. (LI Ming sheng, ZHANG Jianhui, LIANG Nian, et al. Comparisons of some common methods for water environmental quality assessment [J]. *Progress in Geograpy*, 2012, 31(5): 617-624. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2012.05.010
- [3] 苏伟, 刘景双, 王洋. 第二松花江干流水环境健康风险评价[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 79-85. (SU Wei, LIU Jingshuang, WANG Yang. Water environmental health risk assessment of the second Songhua River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 79-85. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2007.01.010
- [4] 方晓波. 钱塘江流域水环境承载能力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. (FANG Xiaobo. Research on water environmental carrying capacity of Qiantang river watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese))
- [5] 王强, 袁兴中, 刘红, 等. 基于河流生境调查的东河河流生境评价[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1548-1558. (WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al. Stream habitat assessment of Dong river, China, using river habitat survey[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1548-1558. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201210201458
- [6] Szoszkiewicz K, Buffagni A, Davy Bowker J, et al. Occurrence and variability of river habitat survey features across Europe and the consequences for data collection and evaluation[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 566(1): 267-280. DOI: 10.1007/s10750-006-0090-7
- [7] 张洪, 林超, 雷沛, 等. 海河流域河流富营养化程度总体评估[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(8): 2336-2344. (ZHANG Hong, LIN Chao, LEI Pei, et al. Evaluation of river eutrophication of the Haihe River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8): 2336-2344. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j.hjxxb.2015.0025
- [8] 夏霆, 朱伟, 姜谋余, 等. 城市河流栖息地评价方法与应用[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(12): 2095-2104. (XIA Ting, ZHU Wei, JIANG Mouyu, et al. Assessment of urban river habitats application and methodology[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(12): 2095-2104. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0253-2468.2007.12.026
- [9] 孙博. 基于熵权模糊元模型的河流生态健康综合评价[J]. *人民珠江*, 2015, 36(6): 95-100. (SU N Bo. River ecosystem health evaluation of fuzzy matter element model based on entropy weight[J]. *Pearl River*, 2015, 36(6): 95-100. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2015.06.026
- [10] 朱伟, 夏霆, 姜谋余, 等. 城市河流生态环境综合评价方法探讨[J]. *水科学进展*, 2007, 18(5): 736-744. (ZHU Wei, XIA Ting, JIANG Mouyu, et al. Comprehensive assessment of water environment for urban stream[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 736-744. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2007.05.017
- [11] 祝慧娜, 袁兴中, 梁婕, 等. 河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(3): 516-521. (ZHU Huina, YUAN Xingzhong, LIANG Jie, et al. An integrated model for assessing the risk of water environmental pollution based on fuzziness[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(3): 516-521. (in Chinese))
- [12] 蒋旭光, 司春棣. 基于模糊层次法的跨流域调水工程水环境安全评价研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(10): 36-39, 43. (JIANG Xuruan, SI Chundi. An evaluation of water environment security based on fuzzy hierarchy entropy for transbasin water transfer projects[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(10): 36-39, 43. (in Chinese))
- [13] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. (GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water[S]. (in Chinese))
- [14] 衣俊琪. 辽北地区典型河流水生态功能区水生态系统健康评价[J]. *中国农村水利水电*, 2014(8): 67-72. (YI Junqi. The aquatic ecosystem health assessment of typical river aquatic eco-functional zones in the north of Liaoning province[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(8): 67-72. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2014.08.018
- [15] 郜雷群. 流域健康综合评价方法及其应用研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2011. (GAO Lei qun. Study on comprehensive evaluation method for watershed health and it's application[D]. Zhengzhou: North China institute of water resources and electric power, 2011. (in Chinese))

(下转第 119 页)

- flow travel distance[ C]// Proceedings of the 48th Canadian Geotechnical Conference. [ S. l. ]: [ s. n. ], 1996: 643-650.
- [ 14] M CLELLAN P J, KAISER P K. Application of two parameter model to rock avalanches of the Mackenzie mountains [ C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Landslide. [ S. l. ]: [ s. n. ], 1984: 135-140.
- [ 15] CUNDALL P A, STRACKO D L. A discrete numerical model for granular assemblies[ J]. Geotechnique, 1979, 29( 1): 47-65.
- [ 16] 刘忠玉, 马崇武, 苗天德, 等. 高速滑坡远程预测的块体运动模型[ J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19( 6): 742-746. ( LIU Zhongyu, MA Chongwu, MIAO Tiande, et al. Kinematic block model of long run out prediction for high speed landslides[ J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19( 6): 742-746. ( in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-6915. 2000. 06. 012
- [ 17] EGASHIRA S, HONDAB N, ITOH C T. Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow [ C]// Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science. [ S. l. ]: [ s. n. ], 2001: 645-650. DOI: 10. 1016/S1464-1917( 01) 00062-9
- [ 18] MANZELLA I, LABIOUSE V. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non constrained gravel flows[ J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41( 1): 133-151. DOI: 10. 1007/s00603-007-0134-y
- [ 19] 马宗源, 廖红建, 张骏. Bingham 型黏性泥石流流体的三维数值模拟[ J]. 西安交通大学学报, 2008, 42( 9): 1146-1150. ( MA Zongyuan, LIAO Hongjian, ZHANG Jun. Three dimensional numerical simulation of bingham viscous debris flow fluid[ J]. Journal of Xi'an jiaotong university, 2008, 42( 9): 1146-1150. ( in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0253-987X. 2008. 09. 018
- [ 20] 齐超, 邢爱国, 殷跃平, 等. 东河口高速远程滑坡碎屑流全程动力特性模拟[ J]. 工程地质学报, 2012, 20( 3): 334-339. ( QI Chao, XING Aiguo, YIN Yueping, et al. Numerical simulation of dynamic behavior of Donghekou rock slide debris avalanche[ J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20( 3): 334-339. ( in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9665. 2012. 03. 005
- [ 21] 中国地质环境监测院. 云南新平县地质灾害详细调查成果报告[ R]. 2007, 106-111. ( China Institute of Geoenvironment Monitoring. Report on the findings of geological hazard in Xinping county, Yunnan province[ R]. 2007, 106-111. ( in Chinese))

( 上接第 99 页)

- [ 16] 沈海波. 青山湖流域水环境评价研究[ D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013. ( SHEN Haibo. Qingshan basin water environment assessment study[ D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2013. ( in Chinese))
- [ 17] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[ J]. 水科学进展, 2005, 16( 3): 349-355. ( ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health[ J]. Advances in Water Science, 2005, 16( 3): 349-355. ( in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2005. 03. 007
- [ 18] 熊文, 黄思平, 杨轩. 河流生态系统健康评价关键指标研究[ J]. 人民长江, 2010, 41( 12): 7-12. ( XIONG Wen, HUANG Siping, YANG Xuan. Research on key evaluation indexes of healthy river ecological system[ J]. Pearl River, 2010, 41( 12): 7-12. ( in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4179. 2010. 12. 002
- [ 19] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 等. 健康河流的评价指标和评价标准[ J]. 水利学报, 2006, 37( 3): 253-258. ( CHEN Leihua, LIU Heng, ZHONG Huaping, et al. Indicators and criteria for evaluation of healthy rivers[ J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37( 3): 253-258. ( in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2006. 03. 001
- [ 20] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[ M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000. ( ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application[ M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. ( in Chinese))
- [ 21] 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应用[ J]. 水利学报, 2009, 40( 3): 257-262. ( MENG Xianmeng, HU Heiping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality[ J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40( 3): 257-262. ( in Chinese))
- [ 22] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析[ M]. 北京: 科学出版社, 2010. ( WANG Wensheng, LI Yueqing, JIN Jiliang, et al. Set pair analysis of hydrology and water resources [ M]. Beijing: Science Press, 2010. ( in Chinese))