

# 使用熵权法划分污染重点区域及识别主要污染因子

朱春燕<sup>1</sup>, 梁新强<sup>1</sup>, 周柯锦<sup>2</sup>, 郭茹<sup>1</sup>, 苑俊丽<sup>1</sup>, 金熠<sup>1</sup>, 茹秋凯<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 环境与资源学院环境保护研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省环境监测中心, 浙江 杭州 310015)

**摘要:** [目的] 对嘉兴市污染重点区域进行划分, 并探明该区域主要污染因子。[方法] 在嘉兴市及周边地区的主要河道上设置 29 个监测断面, 监测指标包括 COD<sub>Cr</sub>, 大肠杆菌总数, TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP。再利用熵权法将多个水质参数转化为一个综合指数, 通过对综合指数进行分析。[结果] 嘉兴市 TN, TP 超标严重, 浓度范围分别为 2.60~10.52 mg/L, 0.60~5.68 mg/L, 均超过地表水水质标准(GB3838—2002)中的 V 类标准。29 个监测点的水质综合指数范围为 1.61~8.69。嘉兴市的海盐县、平湖市交界处以及秀洲区中部综合污染最严重, 以此为中心向外污染程度逐渐降低, 桐乡、海宁西部及嘉善县北部相对污染最轻。研究区中 TP 为主要污染因子, COD<sub>Cr</sub>, 大肠杆菌总数次之。[结论] 在污染总体较严重的地区, 水质综合指数法可以较好地体现区域间污染程度的差异, 通过比较同一监测点不同水质参数对综合指数的贡献还可获得区域主要污染因子。

**关键词:** 水质综合评价; 熵权法; 水质分布; 重点污染因子

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)02-0213-06

中图分类号: X824

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.041

## Key Polluted Area Division and Main Pollution Factors Identification Using Entropy Method

ZHU Chunyan<sup>1</sup>, LIANG Xinqiang<sup>1</sup>, ZHOU Kejin<sup>2</sup>, GUO Ru<sup>1</sup>, YUAN Junli<sup>1</sup>, JIN Yi<sup>1</sup>, RU Qinkai<sup>1</sup>

(1. Institute of Environmental Science and Technology, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Zhejiang Province Environmental Monitoring Station, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

**Abstract:** [Objective] To find out the key polluted area and identify the main pollution factors of Jiaxing City. [Methods] We set up 29 monitoring sections in the main river in Jiaxing City and the surrounding area and indicators of COD<sub>Cr</sub>, E. coli, TN, TP and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N were monitored. These multiple water quality parameters were combined into a comprehensive index using entropy weight method. [Results] TN, TP of Jiaxing City outranged seriously of the quality standards(GB3838—2002) in V class standard. The concentrations ranged 2.60~10.52 mg/L, 0.60~5.68 mg/L. Comprehensive index of water quality of the 29 monitoring points ranged as 1.61~8.69. The most serious pollution of the region is at the junction of Haiyan County and Pinghu City, and Central Xiuzhou District. Other districts around the key polluted region had a decreased pollution. Tongxiang, Western Haining and the northern part of Jiashan County is relatively less polluted. TP was identified as the main pollution factors, COD<sub>Cr</sub>, E. coli followed. [Conclusion] In more serious polluted areas, water quality index method can better describe the pollution differences among different areas. The contribution of different water quality parameters to the comprehensive index can identify the main pollution factors.

**Keywords:** comprehensive water quality evaluation; entropy method; water quality distribution; main pollution factors

为满足日益多样的评价需求,同时也为了给水环境研究、水体污染控制管理等提供有效依据,信息熵、灰色理论、模糊数学等概念被引入水质评价体系,相应的评价方法也随之建立<sup>[1-2]</sup>,综合指数法便是其中

收稿日期:2014-02-27

修回日期:2014-04-08

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项“太湖流域(浙江片区)累积源强风险过程及机制研究”(2012ZX07506-006-03);国家自然科学基金项目(41271314)

第一作者:朱春燕(1989—),女(汉族),浙江省嘉兴市人,硕士研究生,研究方向为非点源污染评价。E-mail:21114058@zju.edu.cn。

通信作者:梁新强(1979—),男(汉族),浙江省杭州市人,博士,副教授,主要从事流域生源要素控制工程与水质安全方面的研究。E-mail:liang410@zju.edu.cn。

之一。该方法通过特定方程将多个指标转换为一个综合指数,评价时同时考虑多个参数对监测断面水质的影响,既避免了信息的缺失,又解决了单因子评价结果中样本差异小等问题。根据综合指数的计算过程,综合指数法可进一步划分为算术平均法、迭加法、内梅洛指数法、层分析法、德尔菲法等<sup>[3-6]</sup>。为提升评价精度,不少研究者<sup>[7-9]</sup>对已有方程进行了改进,使得综合指数法的家族更为庞大。其中,熵权法引入熵的概念进行参数标准化、权重分配及综合指数计算,因其具有计算相对简便、结果客观准确等优点,是较为常用的水质综合指数法之一<sup>[10-12]</sup>。熵的概念最早出现在热力学中,1850年由Rudolf首次提出,表示能量在空间中分布的均匀程度,1948年被Claude引入到信息学中,用以表示信息的不确定性。在水质综合评价中,熵权法所得权重代表水质指标在空间分布上的均匀程度,水质指标在不同监测点浓度的差异性越小,空间分布越均匀,其熵值越大,能为区域间污染程度的比较提供的信息就越少,对应的权重值越小。水质指标监测值的分布特性决定了其在评价体系中的重要程度。与其他综合指数法相比,熵权法在权重分配时考虑了各个监测点之间的关系,而非依赖研究者的主观选择,其结果在进行区域间污染程度差异比较及重点污染区域划分时显得更为客观合理<sup>[13]</sup>。本研究在嘉兴及周边地区的主要河道中选取29个断面进行采样监测,监测指标包括化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>),总氮(TN),氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N),总磷(TP)和大肠杆菌总数(E. coli)。然后运用熵权法计算5项指标的权重及各个监测点的综合指数,分析得到嘉兴水体污染重点区域及嘉兴地区主要污染因子。同时利用ArcGIS对污染指数进行距离加权倒数(IDW)插值,获得可视化的水质污染分布情况,为水质管理措施的制定提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 评价区域概况

嘉兴市位于浙江省东北部,是杭嘉湖平原的重要组成部分。近几年,政府对污染控制的投入不断加强,而水质依旧有恶化趋势<sup>[14]</sup>。一方面,由于嘉兴地区经济的发展迅速,人口密度及工农业密度均有一定程度的上升,污染负荷也呈增长趋势;另一方面,嘉兴市处于太湖流域末端,该地水体还受上游来水水质的影响。2005年嘉兴市117个水功能区中仅有2个水质达标,整个区域污染严重。有研究<sup>[15]</sup>表明,当地水体污染主要属于富营养化物质污染,主要污染因子包括COD及营养盐,主要污染源为农田过量施肥、畜禽粪水排放<sup>[16-19]</sup>。

### 1.2 参评指标选择及分析

依据嘉兴地区水体污染特性,参评因子一方面选取化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)及总氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)4类营养盐指标,另选择大肠杆菌总数(E. coli)以体现畜禽污染程度。采样时间为2012年7月7—12日,共布设29个采样点,分布于嘉兴及周边水系,涉及京杭运河、长山河、平湖塘等河道。水样采集使用1L有机玻璃水样采集器,采集河流中间位置、距水表面20cm左右水样,每个监测点采集水样两份,采集后于4℃下冷藏保存,E. coli于采样当天测定,其他指标在24h内完成测定。水样预处理主要包括:

(1) 样品1。使用高密度聚乙烯瓶储存,水样中加0.1mol/L硫酸酸化,抑制微生物活性,削弱硝化、反硝化等反应的影响,用以监测COD<sub>Cr</sub>及TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP;

(2) 样品2。使用无菌玻璃瓶储存,加入10%的硫代硫酸钠(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)及15%乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA-Na<sub>2</sub>),去除余氯及金属离子,防止微生物活性受抑制,用以测定E. coli。

水质指标测定方法参照地表水水质标准GB3838—2002。COD<sub>Cr</sub>采用重铬酸钾法,消煮2h后测定;TN, TP样品先经灭菌锅消解,再分别使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法测定;E. coli总数测定采用滤膜法;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用纳氏试剂比色法测定。

### 1.3 熵权法

熵权法计算水质指数的过程与其它各类综合指数法类似,可概括为:水质监测→分指数计算→确定权重→综合指数计算。具体运算过程见公式(1—6)。

(1) 分指数计算。该步骤的目的在于统一各指标的监测数值,使处于不同数量级别的数值转换为同一水平,便于多因子加和计算。此处采用的超标倍数法是以地表水水质标准为基准,将各监测值转换为标准值的倍数<sup>[3,20]</sup>(公式1)。

$$P_{ij} = C_{ij} / S_i \quad (1)$$

式中: $P_{ij}$ —— $i$ 项指标第 $j$ 个监测点的分指数; $C_{ij}$ —— $i$ 项指标第 $j$ 个监测点的实测值; $S_i$ —— $i$ 指标Ⅲ类水标准标准值。

(2)  $i$ 指标的权重 $\omega_i$ 。这是综合评价法中另一个重要概念,权重体现的是各个指标在评价体系中对评价结果的影响力,同样超标倍数的指标值,权重越大在综合指数中所占比例越大。熵权法中权重值与监测指标数目 $n$ 、监测点数 $m$ 都相关。首先利用熵值概念将各指标监测值进行标准化(公式2)并求得熵值

$e_i$ (公式 3),再计算得到初始权重,经归一化得到各指标的权重(公式 4—5)。

$$Q_{ij} = C_{ij} / (C_{i1} + C_{i2} + \dots + C_{im}) \quad (2)$$

$$e_i = \sum_1^m \left[ \frac{Q_{ij} \cdot \ln Q_{ij}}{\ln m} \right] \quad (0 \leq e_i \leq 1) \quad (3)$$

$$\omega_i' = 1 - e_i \quad (4)$$

$$\omega_i = \omega_i' / \sum_1^n \omega_i' \quad (5)$$

式中: $Q_{ij}$ ——监测值标准化结果; $e_i$ —— $i$ 指标的熵值; $m$ ——监测点数量,即样本量<sup>[19]</sup>; $\omega_i'$ —— $i$ 指标初始权重; $\omega_i$ —— $i$ 指标归一化后的权重。

(3) 综合指数  $P$ 。与其他加权法相同,为各指标权重与分指数乘积的和(公式 6)。

$$P_i = \sum_1^n (\omega_i \cdot P_{ij}) \quad (6)$$

式中: $P_i$ ——第  $j$  个监测点综合指数值; $n$ ——监测指标数目。

## 2 结果与分析

### 2.1 嘉兴地区水系水质概况

嘉兴市整体水质情况不容乐观,无法达到浙江水功能区水质目标(表 1)。从平均值来看,5 个数值中有 3 项指标超过 V 类水质标准(COD<sub>Cr</sub>:122.72 mg/L; TN:5.48 mg/L; TP:2.44 mg/L),E. coli(34 608 个/L)属于 V 类,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均浓度较低,仅为 0.23 mg/L,已达到 II 级标准。这几个指标中超标情况最严重的是 TN,TP 两项,浓度范围分别为 TN:2.60~10.52 mg/L,TP:0.6~5.68 mg/L,两者最小浓度均已超过 V 类水标准(TN:2 mg/L; TP:0.4 mg/L)。COD<sub>Cr</sub> 超标情况亦较严重,65.5%的监测断面超过 V 类标准,而 E. coli 超标情况相对较轻,处于劣 V 类的监测点占全部的 20.3%。氨氮浓度在 0.04~0.80 mg/L 之间,皆小于 III 类水限值(1 mg/L)。

表 1 嘉兴市水系水质基本情况

序号	位置	COD <sub>Cr</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	E. coli/ (10 <sup>3</sup> 个·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )
1	松木漾桥	128.00	26.5	0.66	6.13	2.15
2	长山闸一号桥	76.80	28.0	0.64	4.93	2.84
3	王道宅桥	128.00	69.0	0.65	6.13	3.00
4	东塘桥	174.23	36.0	0.80	7.43	5.68
5	焦山门桥	197.69	27.5	0.19	5.85	2.79
6	龙凤大桥	177.78	87.5	0.69	6.34	2.52
7	红旗桥	149.34	168.3	0.08	7.37	2.90
8	南湖	125.87	21.5	0.13	9.00	1.99
9	塘汇	211.21	33.0	0.09	6.13	2.57
10	王江泾大桥	220.45	24.0	0.08	4.77	1.24
11	老洪溪大桥	117.34	5.5	0.08	2.82	0.97
12	新洪溪大桥	133.69	10.0	0.07	2.93	0.86
13	三店塘大桥	157.87	12.7	0.13	10.52	2.68
14	白水塘	199.12	41.5	0.19	7.70	2.04
15	陆斜塘大桥	106.67	43.0	0.07	3.63	0.76
16	池家浜水文站	204.81	36.0	0.06	4.39	0.65
17	红旗塘大坝	193.43	68.5	0.11	5.75	3.11
18	枫南大桥	197.69	53.5	0.09	6.07	2.95
19	青阳汇	170.67	25.0	0.12	8.51	5.25
20	小新村	60.45	32.0	0.18	7.21	5.09
21	严家坝	192.00	36.5	0.16	4.66	1.88
22	石门镇	25.60	30.0	0.16	4.77	2.68
23	西双桥	37.69	20.5	0.13	4.50	2.84
24	九里松桥	35.56	3.1	0.14	3.69	2.73
25	乌镇北	22.76	10.0	0.21	3.36	1.34
26	南浔	128.00	26.5	0.66	6.13	2.15
27	中塘桥	18.82	17.5	0.22	4.77	2.41
28	大麻渡口	31.37	6.0	0.10	2.60	1.67
29	五杭大桥	39.22	7.5	0.31	3.09	2.57
平均值		122.72	34.6	0.23	5.48	2.44
标准差		70.03	32.6	0.22	1.99	1.27
超 V 类水比例/%		65.5	20.7	0	100	100

吕升等人<sup>[14]</sup>的研究也显示嘉兴地区水质情况较差且有恶化趋势。虽然相关部门对工业畜禽等点源的控制力度不断加大,但由于农村生活污水,农田径流、侧渗等非点源难以监控管理,同时因养殖密度、农田施肥量较高<sup>[21]</sup>,N,P 流失问题仍相当严重。

监测结果同时表明,在使用传统的最差因子评价法时所有监测点均处于劣 V 类,无法进一步区分各点水质污染等级,综合指数法在当地的水质评价中确有其必要性。

## 2.2 嘉兴市重点污染区域划分

权重计算结果显示,参评指标中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的权重最大,为 0.31(表 2)。而从表 1 中也可看出,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的离散程度也比其他指标要高,标准差(0.22 mg/L)与平均值(0.23 mg/L)十分接近。这两者均表明  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在嘉兴水系中的分布不均匀性较高,更有利于比较区域间污染程度的差异,在重点污染区域的划分时可提供的信息也更多。E. coli 权重值仅次于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,为 0.27,其次为  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ (0.21),TP(0.14)。TN 权重值最小,仅为 0.07。从表 1 中可以看出 TN 实际超标情况严重,但离散度却相对较低,表明 TN 浓度在嘉兴水体中分布相对均匀,属于普遍型污染物。

表 2 参评指标的权重值

指标	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	E. coli	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	TN	TP
权重值	0.21	0.27	0.31	0.07	0.14

熵权法计算所得综合指数分布在 1.61~8.69 之间(表 3)。污染最严重区域在秀洲区,为监测点 7(红旗桥),该点超标情况最严重的是 E. coli,监测值为 168 333 个/L,超标倍数高达 16.8,而 E. coli 在该点综合指数中所占的比例也最大,为 52.94%,使其成为该点首要污染因子。监测点 4(东塘桥)、19(青阳汇)、6(龙凤大桥)、17(红旗塘大坝)的污染也相对较严重,综合指数均都超过 6.0,分别为 7.47,6.70,6.63,6.45。这 4 个点中,龙凤大桥与红旗桥地理位置较近,首要污染因子亦是 E. coli,其余 3 个点主要污染因子则都是 TP。整个区域最小综合指数出现在嘉兴西北边部,最小值出现在监测点 26(南浔),综合指数为 1.61,其次是监测点 25(乌镇北)及监测点 28(大麻渡口),两者综合指数均小于 2,分别为 1.74 及 1.85。

考虑到嘉兴水系呈网状分布且十分密集,本研究使用 IDW 插值法对综合指数进行插值(图 1)。区域内每个插值点的数值由距它最近的 4 个监测点确定,

插值点周边监测点的数值越大,两者距离越近,插值点上的数值就越大。最终得到的结果分了 8 个等级,数值范围在 1.5~8.7 之间。分析结果显示,平湖市、海盐县交界区域及秀洲区部分区域所处污染等级最高,成为当地污染严重区域,需重点监管。以这几个区域为中心,向外延伸污染逐渐减轻。桐乡、海宁西部及嘉善县北部相对污染最轻。

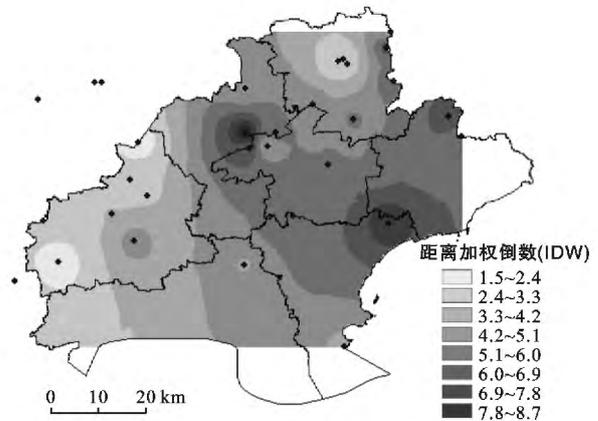


图 1 嘉兴市综合水质分布情况

## 2.3 主要污染因子识别

在综合指数评价体系中,一个指标在综合指数中所占的比重受其本身的超标情况以及权重的双重影响,单是超标严重或浓度分布不均匀的指标不一定是区域的重点污染因子。计算结果显示(表 3),29 个监测点中 TP 分指数占综合指数比重最大的有 62%,其次是  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和 E. coli 两个因子,分别为 31%及 14%的监测点的主要污染因子。 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  则因为本身超标不严重,占综合指数的比重最小,TN 则因为分布较为均匀,权重值小,在综合指数中发挥的作用也不明显。

获得区域主要污染因子后便可从该指标着手,逐步实现水环境的改善。本研究中的主要污染因子包含着两个信息:一是该指标超标严重,亟需进行控制管理;二是该指标地区之间存在较大差异,高污染区域中的污染源控制管理及水质提升均存在较大潜能。

以农田 P 流失为例,对嘉兴地区农业调查结果发现,即使是同一地区的农田,P 施肥量差异仍很大,施肥量(P)在 0~50 kg/hm<sup>2</sup> 不等,磷肥施用由农户的施肥习惯决定(氮肥施用量及农药的使用农户间差异不大)。这也许是导致嘉兴水系中 TP 含量分布不均的原因之一,适当减少高施肥负荷农田磷肥施用量,可以实现 TP 污染负荷减排,提升区域水质。

表 3 综合指数  $P_j$  及各个指标所占比重

序号	位置	COD <sub>Cr</sub> /%	E. coli/%	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/%	TN/%	TP/%	综合指数
1	松木漾桥	31.70	17.37	4.93	10.46	35.53	4.17
2	长山闸一号桥	19.51	18.82	4.90	8.63	48.14	4.06
3	王道宅桥	22.35	31.89	3.42	7.38	34.96	5.91
4	东塘桥	24.07	13.16	3.33	7.07	52.36	7.47
5	焦山门桥	39.32	14.48	1.14	8.02	37.04	5.19
6	龙凤大桥	27.69	36.07	3.24	6.81	26.19	6.63
7	红旗桥	17.74	52.94	0.29	6.03	22.99	8.69
8	南湖	32.99	14.92	1.03	16.26	34.81	3.94
9	塘汇	41.01	16.96	0.53	8.20	33.30	5.32
10	王江泾大桥	54.84	15.80	0.60	8.18	20.58	4.15
11	老洪溪大桥	53.71	6.66	1.10	8.90	29.63	2.26
12	新洪溪大桥	55.74	11.04	0.88	8.42	23.93	2.48
13	三店塘大桥	35.34	7.52	0.88	16.23	40.03	4.61
14	白水塘	39.51	21.80	1.14	10.53	27.02	5.20
15	陆斜塘大桥	35.75	38.15	0.71	8.39	17.00	3.08
16	池家浜水文站	54.54	25.37	0.48	8.06	11.55	3.88
17	红旗塘大坝	30.94	29.00	0.53	6.34	33.20	6.45
18	枫南大桥	34.04	24.39	0.47	7.20	33.90	5.99
19	青阳汇	26.28	10.19	0.56	9.03	53.95	6.70
20	小新村	11.20	15.69	1.01	9.20	62.91	5.57
21	严家坝	42.57	21.42	1.07	7.12	27.82	4.66
22	石门镇	7.96	24.69	1.50	10.22	55.62	3.32
23	西双桥	11.91	17.15	1.24	9.80	59.90	3.27
24	九里松桥	13.91	3.21	1.65	9.95	71.28	2.64
25	乌镇北	13.54	15.74	3.77	13.77	53.18	1.74
26	南浔	15.96	39.88	0.77	17.72	25.67	1.61
27	中塘桥	7.09	17.45	2.50	12.38	60.58	2.74
28	大麻渡口	17.46	8.84	1.68	9.98	62.04	1.85
29	五杭大桥	15.01	7.60	3.58	8.15	65.65	2.70

### 3 结论

(1) 嘉兴水体中仅 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 超标情况相对较轻, COD<sub>Cr</sub>, E. coli 分别有 65.5%, 20.7% 的监测点超过 V 类限值, TN, TP 超标最为严重, 浓度范围分别为 2.60~10.52 mg/L, 0.6~5.68 mg/L, 均超过 GB3838—2002 中的 V 类标准值, 最差因子评价体系下嘉兴市 29 个监测点水质均为劣 V 类。

(2) 参评的 5 个指标中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 熵权最大, 为 0.31, 其他指标依次为 E. coli(0.27), COD<sub>Cr</sub>(0.21), TP(0.14) 及 TN(0.07)。表明这些指标的分布均匀程度依次升高, 在重点污染区域划分过程中发挥的作用则依次降低。

(3) 嘉兴地区污染重点区域为海盐县、平湖市交界处及秀洲部分区域, 污染程度以这两个区域为中心向外逐渐降低, 桐乡、海宁西部及嘉善县北部相对污染最轻。

(4) 本评价体系中嘉兴地区 TP 为主要污染因子, 一方面其超标严重亟需控制, 另一方面它的浓度分布不均匀, 高污染区域具有较大减排潜能。COD<sub>Cr</sub>, E. coli 在综合指数中占的比重仅次于 TP。可优先从重点污染因子入手, 开展减排控污工作, 逐步改善全区水质。而对于整体超标严重而地区差异不明显的指标, 如 TN, 则需要整体规划, 设定全局性的污染控制方案。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郭树宏, 张江山. 基于熵权的改进密切值法在地面水水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2008, 7(3): 75-77.
- [2] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061.
- [3] 葛仁英, 韩正玉. 海阳港附近海域污染现状评价[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(4): 26-31.
- [4] 王顺久, 张欣莉. 环境质量评价中关键因子识别的方法研究[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 43-47.

- [5] 叶招莲. 河流环境综合评价方法改进及研究[J]. 水科学与工程技术, 2008(4):37-39.
- [6] 姚延娟, 吴传庆, 王雪蕾, 等. 地表饮用水源地安全指数及快速评价方法[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(1):186-190.
- [7] 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.
- [8] 寇文杰, 林健, 陈忠荣, 等. 内梅罗指数法在水质评价中存在问题及修正[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4):39-41.
- [9] 薛巧英, 刘建明. 水污染综合指数评价方法与应用分析[J]. 环境工程, 2004, 22(1):64-66.
- [10] 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.
- [11] 周荣喜, 单欣涛, 杨杰, 等. 基于熵权的区间型多属性决策方法在湖泊水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3):910-917.
- [12] 陈强, 杨晓华. 基于熵权的 TOPSIS 法及其在水环境质量综合评价中的应用[J]. 环境工程, 2007, 25(4):75-77.
- [13] 张先起, 梁川, 刘慧卿. 基于熵权的属性识别模型在地下水水质综合评价中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005, 37(3):28-31.
- [14] 吕升, 陈吉, 苏营营. 嘉兴市地表水质主要影响因素及治理对策分析[J]. 绿色科技, 2012(12):158-162.
- [15] 夏立忠, 杨林章. 太湖流域非点源污染研究与控制[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1):45-49.
- [16] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护, 2010, 26(3):87-90.
- [17] 刘庄, 李维新, 张毅敏, 等. 太湖流域非点源污染负荷估算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(S1):45-48.
- [18] 浙江省水利厅, 浙江省环境保护局. 浙江省水功能区、水环境功能区划分方案[R]. 浙江 杭州: 浙江省环境保护局, 2005.
- [19] 王靖, 张金锁. 综合评价中确定权重微量的几种方法比较[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(2):52-57.
- [20] 何雪琴, 温伟英. 海南三亚湾海域水质状况评价[J]. 台湾海峡, 2001, 20(2):165-170.
- [21] Ye Yushi, Liang Xinqiang, Chen Yingxu, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. Field Crops Research, 2013, 144:212-224.

(上接第 212 页)

- [8] 徐大伟, 刘春燕, 常亮. 流域生态补偿意愿的 WTP 与 WTA 差异性研究: 基于辽河中游地区居民的 CVM 调查 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(3):402-409.
- [9] Willig R D. Consumer's surplus without apology [J]. The American Economic Review, 1976, 66(4):589-597.
- [10] Hanemann W M. Willingness to pay and willingness to accept: How much can they differ? [J]. American Economic Review, 1991, 81(3):635-647.
- [11] Coursey D L, Hovis J L, Schulze W D. The disparity between willingness to accept and willingness to pay measures of value [J]. The Quarterly Journal of Economics, 1987, 102(3):679-690.
- [12] Horowitz J K, McConnell K E. A review of WTA/WTP studies [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2002, 44(3):426-447.
- [13] 牛海鹏, 张安录. 耕地保护的外部性及其测算: 以河南省焦作市为例[J]. 资源科学, 2009, 31(8):1400-1408.
- [14] 陈琳, 欧阳志云, 王效科, 等. 条件价值评估法在非市场价值评估中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(2):610-619.
- [15] Loomis J B, Walsh R G. Recreation Economic Decisions, Comparing Benefits and Costs[M]. Pennsylvania: Venture Publishing, Inc, 1997.
- [16] Freeman A M. The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Method [M]. Beijing: China Renmin University Press, 1993.
- [17] Horowitz J K, McConnell K E. Willingness to accept, willingness to pay and the income effect [J]. Journal of Economic Behavior & Organization, 2003, 51(4):537-545.
- [18] Arrow K, Solow R, Portney P R, et al. Report of the NOAA panel on contingent valuation [M]. Washington D C: Resources for the Future, 1993.
- [19] 崔相宝, 苗建军. 条件价值评估: 一种非市场的价值评估技术[J]. 武汉理工大学学报: 社会科学版, 2005, 18(6):802-807.
- [20] 徐赫. 基于 CVM 与 TCM 的城市滨水空间游憩价值评估研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2010.
- [21] 阮氏春香. 森林生态旅游非使用价值的 CVM 有效性研究[D]. 江苏 南京: 南京林业大学, 2011.