

阳澄湖入湖河道分类、污染特征分析及治理策略*

刘 帅¹, 谢茂嵘¹, 吕 文¹, 宋 娜², 杨 惠¹, 杨文晶¹, 姜 宇¹, 白瑞泉¹, 沈 逸¹, 史 书¹, 杨金艳^{1**}

(1: 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 苏州 215011)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要: 为进一步揭示阳澄湖入湖河道的污染物来源, 提出相应的治理对策, 以 2017—2021 年阳澄湖入湖河道水质监测数据为基础进行分析讨论。依据入湖水量选取 10 条主要入湖河道进行分析, 其中位于阳澄湖东岸的白曲港在七浦塘拓浚工程建成之前主导流向为出湖, 工程建成后, 通过 Pearson 相关分析证实了其流向与七浦塘引水时的水力关系, 因此白曲港被选为主要入湖河道。采用距平系数法、系统聚类法和物元分析法将阳澄湖主要入湖河道分为 3 个类别: 第 1 类别包括白荡、蠡塘河、北河泾、永昌泾 4 条河道, 第 2 类别包括涓泾塘、界泾和施家斗港 3 条河道, 第 3 类别包括南消泾、七浦塘和白曲港 3 条河道。使用因子分析法进行因子分析, 第 1 类别河道的因子为高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、溶解氧(DO)和总磷(TP), 第 2 类别河道的污染因子为 NH₃-N、总氮(TN)、pH、TP 和 DO, 第 3 类别河道的污染因子为 pH、TP、TN 和 DO。通过对上游河道水质情况分析、文件研究以及实地调查等方式得出第 1 类别河道区域的污染源主要为工业污染源和生活污染源, 第 2 类别河道区域污染源主要为工业污染源与种植业污染源, 第 3 类别河道污染源主要为陆地水产养殖污染源与种植业污染源。针对总体污染源情况, 建议通过控制点源污染、削减面源污染、增强上游河道治理、开展生态治理修复以及加强巡查监管等方式对各类别河道区域进行针对性治理, 以提高入湖河道水质, 为阳澄湖的系统性和整体性治理打好基础。

关键词: 阳澄湖; 入湖河道; 系统聚类; 物元分析; 因子分析; 污染源; 河道治理

Classification, pollution characteristics and treatment strategy of the inflow rivers into Lake Yangcheng*

Liu Shuai¹, Xie Maorong¹, Lv Wen¹, Song Na², Yang Hui¹, Yang Wenjing¹, Jiang Yu¹, Bai Ruiquan¹, Shen Yi¹, Shi Shu¹ & Yang Jinyan^{1**}

(1: Suzhou Branch of Jiangsu Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Suzhou 215011, P.R.China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: In order to further reveal the source of pollutants in the inflow rivers into Lake Yangcheng and put forward corresponding countermeasures, this paper analyzed and discussed the water quality monitoring data of the inflow rivers into Lake Yangcheng from 2017 to 2021. According to the water quantity into the lake, 10 main rivers were selected for analysis. Among them, Baiqu Port, located on the east bank of Lake Yangcheng, which was the main outflow direction before the completion of the Qiputang dredging project, was selected as the main inflow river after the completion of the project, confirmed by hydraulic relationship between its flow direction and Qiputang diversion with Pearson correlation analysis. By using anomaly coefficient method, system clustering method and matter-element analysis method, the main inflow rivers of Lake Yangcheng were divided into three categories. The first category included four rivers: Baidang River, Litang River, Beihejing River and Yongchangjing River. The second category included three rivers: Weijingtang River, Jiejing River and Shijiadougang River. The third category included three rivers: Nanxiaojing

* 2023-07-21 收稿; 2023-11-03 收修改稿。

江苏省苏州市水利水务科技项目(2020001, 2021006, 2022002)和苏州市科技发展计划(社会发展科技创新)面上项目(2022SS22)联合资助。

** 通信作者; E-mail: 184459173@qq.com。

River, Qiputang River and Baiqutang River. Factor analysis method showed that the factors of the first category of rivers were COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, DO and TP level, the pollution factors of the second category of rivers were $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, pH, TP and DO level, and the pollution factors of the third category of rivers were pH, TP, TN and DO level. Through the analysis of the water quality of the upstream river, document research, field investigation and other methods, it was concluded that the pollution sources in the first category of river areas were mainly industrial pollution sources and domestic pollution sources, the pollution sources in the second category of river areas were mainly industrial pollution sources and planting pollution sources, and the third category of river pollution areas were mainly land aquaculture pollution sources and planting pollution sources. In view of the overall pollution sources, it was recommended to carry out targeted management of various types of river areas by controlling point source pollution, reducing non-point source pollution, strengthening upstream river management, carrying out ecological management and restoration, and strengthening inspection and supervision, so as to improve the water quality of the river into the lake and lay a good foundation for the systematic and holistic management of Lake Yangcheng.

Keywords: Lake Yangcheng; inflow rivers; system clustering analysis; matter-element analysis; factor analysis; pollution sources; river management

随着经济社会发展与城市化进程的推进,国内外都面临着水体水质恶化以及湖泊富营养化水平不断提升的问题。该问题于 1940s 开始受到关注^[1-2],1960s 起,国外开始注重治理,比如美国的伊利湖^[3-5]、日本的霞浦湖^[6]等,但蓝藻水华问题都出现反复。我国湖泊富营养化问题同样显著,最典型的太湖 2007 年无锡沙渚水厂供水危机事件后^[7],太湖蓝藻治理工程持续推进,但蓝藻水华仍处于高发态势^[8-9];长江中下游地区的巢湖、武昌东湖等湖泊的富营养化问题也普遍存在^[10];洱海作为全国城市近郊保护最好的湖泊之一,近年来也开始进入富营养化初期阶段^[11]。作为中型浅水湖泊,阳澄湖的富营养化问题也开始加剧,1980s 阳澄湖水源水质为 II 类水,而到了 21 世纪,水质恶化为 III ~ IV 类,严重阻碍了该地区经济建设与可持续发展^[12]。

入湖河道直接连通湖泊,是陆地与湖泊生态系统进行物质交换的通道,在提高水体流动性的同时,可以携带大量生活污水、工业污水和农业面源污染进入湖泊,加重湖泊富营养化程度^[13]。2016 年通过对太湖的 16 条主要入湖河道分析发现,太湖流域入湖河道总氮、总磷和溶解性总氮、总磷浓度均高于湖体,外源补给对湖体营养盐浓度产生巨大影响^[14],不同区域入湖河道污染负荷差异显著,对湖体水质影响大^[15]。2021 年对大港河、乌溪河等 15 条入湖河道的监测发现,上述河流污染物对太湖污染物总量的贡献度高达 80%^[16]。洱海入湖河道的污染物负荷也尚未得到控制^[17],流域内的罗时江、永安江等主要入湖河流水体污染仍比较严重,且有加剧趋势^[18]。现有对阳澄湖入湖河道的研究多集中在阳澄湖或仅针对阳澄西湖的入湖河道水质及污染物入湖通量,杨惠等基于 2010—2014 年数据对阳澄湖入湖河道水质及污染物通量进行分析,发现阳澄湖主要入湖河道水质相较于 2010 年前得到提升,入湖污染物通量主要来自蠡塘河,直接入湖的总污染物通量大于外围入准保护区的总污染物通量^[19];王晋虎等分析了阳澄湖周边进出湖河道水量和入湖总磷通量趋势,发现阳澄湖入湖总磷通量主要来自西线入湖河道,其中 3 条河道占了西线入湖总磷通量的 91.3%,是阳澄湖西线总磷污染的主要来源^[20];孙瑞瑞等基于 2007—2019 年阳澄西湖逐月入湖河道水质监测数据,分析了其变化特征,发现入湖河道氨氮、总氮和高锰酸盐指数呈现下降趋势,主要入湖河道中,白荡与蠡塘河水水质较差^[21]。基于目前的研究现状与污染状况,亟需对阳澄湖入湖河道进行流域层面的分类研究,找出主要污染因子,探寻各类别河道的污染物来源,并提出相应治理策略,减少入湖污染物通量,改善阳澄湖水质。

系统聚类法、物元分析法是常用的对不同参数进行归类的方法。系统分析法的优点是操作简单,有多种计算类别之间距离的办法,可以根据研究对象某方面或者某些方面的亲疏程度将其分割成不同的类,在水库控制流域汛期、矿区含水层的指标优化、洪水分类和预报以及水质分类分析评价中有较多应用^[22-25]。在水质评价中,常常根据采样时间和采样点进行聚类,对监测点位进行分类,并分析水质的时空变化特征;或是根据各项评价指标进行聚类,讨论指标之间的相似性^[26-27]。早在 1987 年,张子安等就利用系统聚类法对珠江流域北江水系 8 条河流的水质状况进行分类评价,指示水体的清洁性^[28];邹海明等对淮河流域水质状况进行分析,使用该方法将 12 个代表性断面分为 6 组^[29];王雪峰等对登沙河流域水质断面进行分类,继而进一步对监测断面数量进行优化^[30]。物元分析法是求解不相容问题的一种方法^[31],相比于系统聚类法,物元分析法分析过程较为复杂,但应用范围广泛,包括风险评估、大气环境、公共管理等多个领域^[32-34],在水

质分类评价方面,弓晓峰等使用该方法将乐安河流域传统的 13 个监测点位分为 10 类,最终优化为 9 个监测断面^[35];王雪峰等除采用系统聚类法外,同样采用物元分析法对登沙河流域水质监测断面进行分类优化^[30];樊引琴等使用物元分析法将河段中 8 个监测断面分类后优化为 6 个^[36]。因子分析法可以将相同本质因子归入同一类,减少变量数目,找出主要因素,在水质分析中,此方法主要用于提取污染因子和识别污染源,卜红梅等使用因子分析法在金水河水质空间因子中提取出 3 个公因子,分别反映水体的离子浓度和硬度、含氮水平及含磷水平,并分析了金水河受各个因子的不同程度影响^[37];富天乙等通过因子分析法从太子河辽阳段的 16 个水质基础指标中筛选出 8 个作为重要指标,将其用于多断面、长时间大量样本的水质评价^[38];任岩等采用因子分析法分析了艾比湖流域地表水丰水期和枯水期水质分异特征,并对艾比湖流域水质进行污染源解析^[39]。本文将通过系统聚类法、物元分析法对入湖河道进行分类,采用因子分析法提取出主要污染因子,作为污染治理的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

阳澄湖(31°21′~31°30′N,120°39′~120°51′E)^[40]位于苏州市相城区、昆山市与工业园区交界处,水域总面积 117.4 km²,大部分湖体归属于相城区,湖中间美人腿、莲花岛以及阳澄湖半岛将其分为西湖、中湖与东湖 3 部分,西湖平均水深为 2.65 m,中湖为 1.80 m,东湖为 1.71 m,湖泊正常蓄水量达到 2.146 亿 m³^[41]。主要监测入湖河道有 13 条,分别为白荡、蠡塘河、北河泾、永昌泾、中泾港、渭泾塘、界泾、济民塘、鳗蛎港、施家斗港、南消泾、七浦塘和白曲港,依据 2017—2021 年水量分析,中泾港、济民塘、鳗蛎港五年平均入湖水量分别为 833 万、888 万、499 万 m³,占比均小于年入湖水量的 0.5%,各污染物通量占比同样小于 0.5%,故在本文进行分类分析时将此 3 条河道剔除。白曲港位于阳澄湖东岸,东西走向河道,在七浦塘拓浚工程建成之前主导流向为出阳澄东湖,因此在选择阳澄湖入湖河道时经常被忽略。七浦塘拓浚整治工程 2011 年启动^[42],2015 年 5 月 29 日顺利实现主体工程通水,2016 年 1 月 15 日,七浦塘工程江边枢纽正式开泵引水,标志着七浦塘拓浚整治工程全面建成。七浦塘工程设计目标为在两岸控制向阳澄湖送水期间,通过南消泾、七浦塘两条入湖河道入中湖平均流量为 50 m³/s,通过新开河等河道入东湖平均流量为 50 m³/s,即七浦塘引水时近一半由新开河等支河入东湖,另一半由南消泾等入中湖。通过实际监测,引水进入新开河后,水量主要分流至白曲港进入东湖。对白曲港与七浦塘(含南消泾)2017—2021 年间入湖月份的水量进行 Pearson 相关分析,泊松系数 $P < 0.01$,两者极显著相关(图 1),证实了白曲港入湖水量与七浦塘拓浚工程引水的水力关系。七浦塘工程竣工前,白曲港年入湖水量占总入湖水量的比例为 0.60%~4.95%,竣工后,占比升至 6.19%~11.16%,且年入湖水量远大于出湖水量,因此白曲港也被选为主要入湖河道。主要入湖河道监测点位如图 2 所示。

1.2 数据来源

2017—2021 年间,每月对入湖河道进行一次水质水量同步监测,水质参数包括水温(WT)、pH 值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD₅),其中 WT、pH 值、DO 浓度现场测定,其余参数添加固定剂后冷藏运输至实验室内进行测定,采样监测点位如图 2 所示。水质样品采集方法参照水环境监测规范(SL 219—2013);水质化验方法均采用国家标准分析方法:WT 测定采用颠倒温度计测定法(GB/T 13195—1991);pH 值测定采用玻璃电极法(GB/T 6920—1986);DO 浓度测定采用电化学探头法(HJ 506—2009);COD_{Mn} 浓度测定采用酸性高锰酸钾法(GB/T 11892—1989);

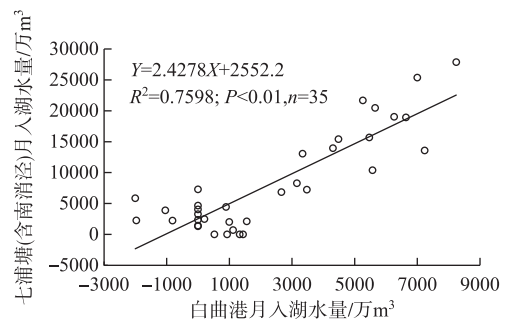


图 1 白曲港与七浦塘(含南消泾)月入湖水量的相关关系

Fig.1 The correlation of monthly inflow water quantity between Baiqugang River and Qiputang River (including Nanxiaojing River)

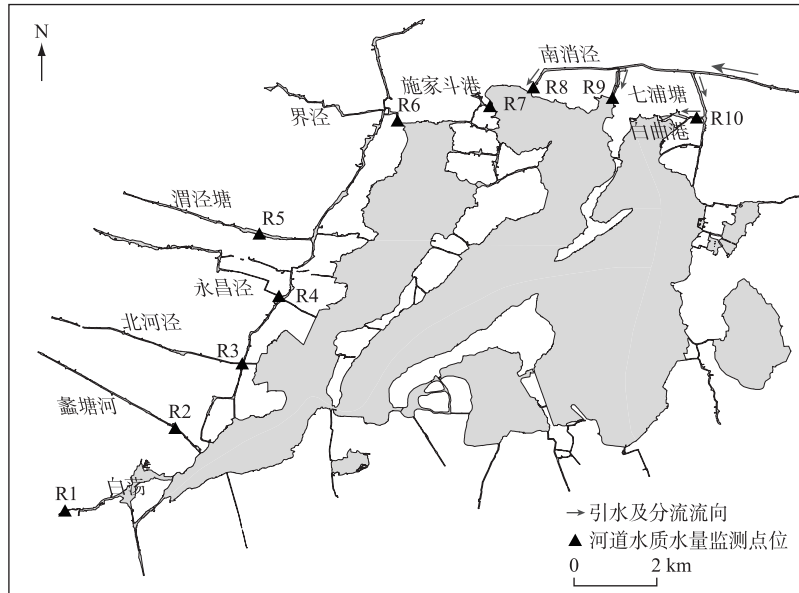


图 2 阳澄湖主要入湖河道监测点位

Fig.2 Monitoring sections of the main inflow rivers into Lake Yangcheng

$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度测定采用纳氏试剂分光光度法 (HJ 535—2009); TN 浓度测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (HJ 636—2012); TP 浓度测定采用钼酸铵分光光度法 (GB/T 11893—1989); BOD_5 浓度测定采用稀释与接种法 (HJ 505—2009)。水量监测依据水文巡测规范 (SL 195—2015)。各河流 2017—2021 年水质参数均值见表 1。

表 1 2017—2021 年阳澄湖入湖河道特征及水质、水量参数年均值

Tab.1 Characteristics and annual average values of water quality and water quantity parameters of Lake Yangcheng inflow rivers from 2017 to 2021

名称	采样点	WT/ ℃	pH	DO/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ / (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	BOD_5 / (mg/L)	水量/ 万 m^3
白荡	R1	20.0	7.94	6.75	4.4	0.94	2.93	0.154	3.6	34559
蠡塘河	R2	19.7	7.99	6.36	4.6	0.99	2.99	0.173	3.7	23837
北河泾	R3	19.8	7.95	6.65	4.7	0.82	2.72	0.178	3.6	2966
永昌泾	R4	19.8	7.89	5.96	4.4	0.81	2.85	0.174	3.5	2655
渭泾塘	R5	20.3	8.04	7.60	4.3	0.35	2.01	0.125	2.5	7242
界泾	R6	19.6	8.01	7.01	4.4	0.29	2.15	0.113	2.8	26555
施家斗港	R7	19.6	8.02	7.80	4.3	0.27	1.92	0.118	2.7	2885
南消泾	R8	19.6	8.19	8.54	4.0	0.22	1.94	0.093	2.2	42857
七浦塘	R9	19.6	8.12	8.59	3.8	0.17	1.84	0.096	2.1	14766
白曲港	R10	19.5	8.12	8.17	3.8	0.18	1.88	0.091	2.0	17543

1.3 数据分析

相关性分析、方差齐性检验、系统聚类分析和因子分析采用 SPSS 22.0 软件进行, 聚类分析与因子分析前, 均需对数据进行 Z-score 标准化处理, 以消除量纲带来的影响, 标准化公式如下^[13]:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - \bar{x}}{SD} \quad (1)$$

式中, x 为测试值, \bar{x} 为平均值, SD 为标准偏差, x_{norm} 为计算后的标准化值。

聚类分析采用系统聚类,通过计算样品间的距离将相近的两类样品进行合并,重复合并步骤直至所有样品合并为一个大类,采用欧式平方距离计算相似度。除采用系统聚类分析对入湖河道进行分类外,还采用了物元分析法,使用 Excel 2016 进行分析。使用物元分析法进行分析可以有效解决水资源监测断面选择多项污染参数时不同指标优选的断面通常不能兼容的问题。使用以下步骤进行物元分析^[36,43]:

1) 通过数学期望值 C 分别与最佳值 A 以及最劣值 B 构建标准物元矩阵 R_{AC} 、 R_{CB} ,用极值 A 和 B 构建节域物元矩阵 R_{AB} :

$$R_{AC} = \begin{bmatrix} M_{AC} & Q_1(a_1, c_1) \\ & \vdots \\ & Q_m(a_m, c_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{CB} = \begin{bmatrix} M_{CB} & Q_1(c_1, b_1) \\ & \vdots \\ & Q_m(c_m, b_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{AB} = \begin{bmatrix} M_{AB} & Q_1(a_1, b_1) \\ & \vdots \\ & Q_m(a_m, b_m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, M 为对象, Q_1, Q_2, \dots, Q_m 为各项污染参数; a_1, a_2, \dots, a_m 为各项污染参数的最佳值; b_1, b_2, \dots, b_m 为各项污染参数的最劣值; c_1, c_2, \dots, c_m 为各项污染参数的期望值。

2) 建立每个监测断面的污染参数值与两个标准物元间的关联函数:

$$K_A(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - c_j}{c_j - a_j} \quad (5)$$

$$K_B(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - c_j}{c_j - b_j} \quad (6)$$

通过权值计算各监测断面所有污染参数的综合关联函数:

$$K_A(x_i) = \sum_{j=1}^m \omega_j K_A(x_{ij}) \quad (7)$$

$$K_B(x_i) = \sum_{j=1}^m \omega_j K_B(x_{ij}) \quad (8)$$

式中, x_{ij} 为 i 监测断面 j 污染参数的监测值; ω_j 为 j 污染参数的权值。

3) 以综合关联函数计算出的 $K_A(x_i)$ 为纵坐标轴、 $K_B(x_i)$ 为横坐标轴绘制各监测断面在坐标系内的点聚图,通过各点的位置和点之间的距离判断水质监测断面的分类。

2 结果与分析

2.1 各水质参数的年内变化趋势和距平系数

从各参数的年内变化趋势(图 3a)可以看出,高锰酸盐指数近 5 年月均浓度范围为 4.1~4.7 mg/L,年内变化整体较平稳,均符合 III 类水标准;氨氮低谷值为 0.30 mg/L,出现在 10 月,峰值为 0.76 mg/L,出现在 1 月,4~7 月间呈逐渐下降趋势,12 月回升;总氮的多年月平均浓度范围为 1.54~3.32 mg/L,峰值出现在 2 月,谷值出现在 8 月,年内变化趋势除秋季外与氨氮大致相同,总体呈现夏秋季节低、冬春季节高的特点,推测与冬春季节农业活动强度高以及夏秋季节水体反硝化能力强等有关;总磷多年月均浓度范围为 0.097~0.217 mg/L,8 月出现峰值,推测与河道底泥释放有关,12 月出现谷值,总体呈现夏秋季节高、冬春季节低的特点,与总氮的变化特征相反。

从算术平均值计算的高锰酸盐指数距平系数(图 3b)可以看出,7 条河道的高锰酸盐指数距平系数为正值,其中北河径最大,为 9.3%,其次为蠡塘河。永昌泾、涓泾塘和施家斗港 3 条河道为正值,但均小于 3%,南消泾、七浦塘和白曲港距平系数为负值,其绝对值均小于 12%;氨氮距平系数分异较大,最大的为蠡塘河,达

到 96.4%, 其次为白荡, 6 条河道距平系数为负; 总氮和总磷的距平系数差异不大, 较大值集中在白荡、蠡塘河、北河泾与永昌泾 4 条河道上, 其余 6 条河道均为负值。从各河道来看, 白荡、蠡塘河、北河泾和永昌泾 4 条河道各项参数距平系数均为正值, 渭泾塘、界泾和施家斗港的高锰酸盐指数距平系数为正, 其余为负, 南消泾、七浦塘和白曲港各项参数均为负。从各参数系数大小来看, 氨氮分异水平最高, 其次为总磷, 然后是总氮, 高锰酸盐指数差距最小。

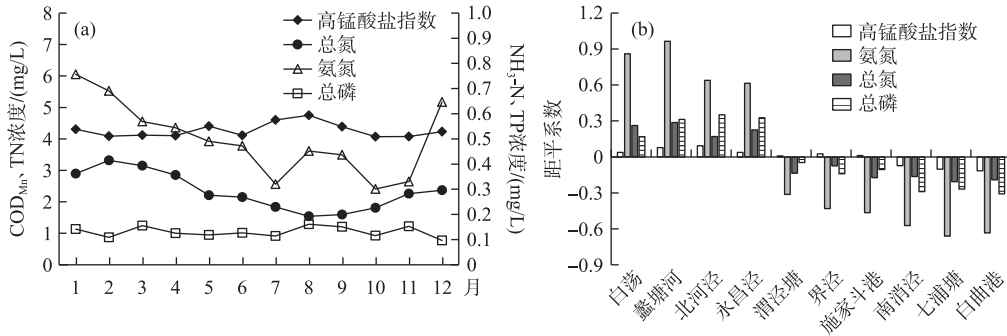


图 3 水质参数年内变化关系和距平系数

Fig.3 Annual variation and anomaly coefficient diagram of water quality parameters

2.2 聚类分析法分类

距平系数仅能够指示各条河道各项参数的分异, 但要将各项参数进行综合考量后进行分类, 需要使用更为专业的方法。以 2017—2021 年逐年年均值为数据基础, 选取参数 WT、pH 值、DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TN、TP 和 BOD₅, 使用系统聚类法对入湖河道进行划分。

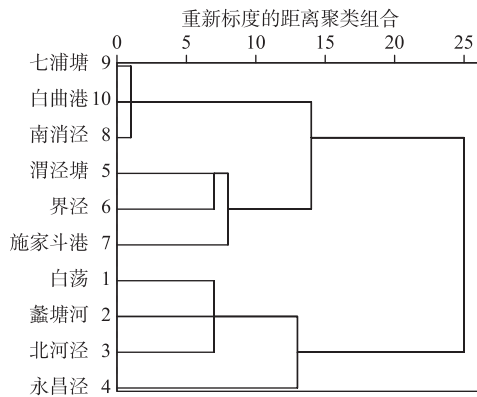


图 4 系统聚类分析结果

Fig.4 Results of system clustering analysis

如图 4 所示, 可以将监测断面分为 3 个类别。第 1 类包括 4 条河道, 即白荡、蠡塘河、北河泾与永昌泾, 白荡与蠡塘河、北河泾先归为一类, 后与永昌泾归为一类。以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 为评价标准, 这 4 条河均为 III 类水质, 决定综合类别的参数为 COD_{Mn} 和 NH₃-N, 河道 TN 不参评, 数值位于 2.50~2.99 mg/L 之间, 在所有环阳澄湖出入湖河道中, 水质最差; 第 2 类包括 3 条河道, 即渭泾塘、界泾与施家斗港, 渭泾塘与界泾先归为一类, 后与施家斗港归为一类, 这 3 条河道均为 III 类水水质, 但决定其综合类别的参数仅有 COD_{Mn}, 与第 1 类的区别主要是 NH₃-N、TN、TP、和 BOD₅ 数值下降, DO 数值上升; 第 3 类包括 3 条河道, 即南消泾、七浦塘与白曲港, 3 条河同时归为一类。这 3 条河水质类别为 II 类水, TN 浓度在 1.84~1.94 mg/L 范围内, 在所有入湖河道中水质最好。

2.3 物元分析法分类

以 2017—2021 年年均值为数据基础, 选取参数 DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TN、TP 和 BOD₅ 进行物元分析计算, WT、pH 值没有分级标准所以不参与物元分析过程。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的各项参数分级标准计算平均值, 以参数平均数和各级标准值的平均值计算权值, 将各权值进行归一化处理得到各项参数的归一化权值 ω_j , 结果如表 2 所示。其中, S_j 表示 j 污染参数各级标准值的平均值, x_j 为 j 污染参数监测值的平均值, \bar{x}_j/S_j 表示指数超标算法的权值^[36]。

图 5 中各点位编号与河道对照关系参照表 1, 从图中物元分析结果可以看出, 阳澄湖入湖河道监测断面

可以分为3类。第1类包括4条河道,即白荡、蠡塘河、北河泾与永昌泾,位于第二象限, $K_A > 0$,符合最佳点条件,可以分为一类;第2类包括3条河道,即渭泾塘、界泾与施家斗港,位于第四象限内, $-0.5 < K_A < 0, 0 < K_B < 0.5$,距离8、9、10点较远,可以归为一类;第3类包括3条河道,即南消泾、七浦塘与白曲港,均位于第四象限,且在点聚图上距离较近,其 $K_B > 0$,符合最次点条件,可以分为一类。从聚类分析法与物元分析法得到的结果可以看出,两种方法最终均分为3类,且每一类别所包含的河道均保持一致,分类结果受到河道水质参数水平、土地利用类型以及周边污染源等因素的影响。

表2 污染参数归一化权值计算结果

Tab.2 Calculation results of normalized weights of pollution parameters

参数	S_j	\bar{x}_j/S_j	ω_j
DO	4.70	1.566	0.259
COD _{Mn}	7.4	0.578	0.096
NH ₃ -N	1.03	0.485	0.080
TN	1.04	2.230	0.369
TP	0.204	0.641	0.106
BOD ₅	5.2	0.549	0.091

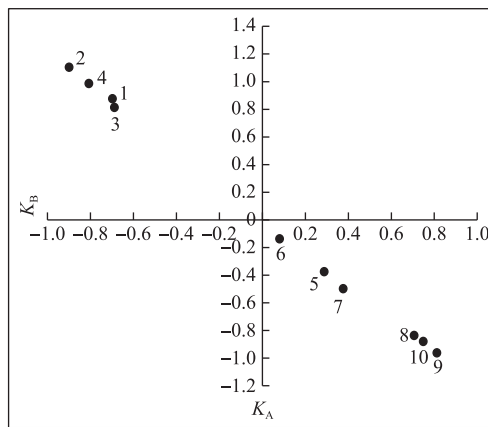


图5 各监测断面物元分析综合关联函数点聚图

Fig.5 Comprehensive correlation function point aggregation diagram of matter element analysis of each monitoring section

2.4 不同类别河道因子分析

对河道进行分类后,使用因子分析法找出分别影响这3类河道的主要因子。因子分析法可以将原有的多个变量进行浓缩,减少变量个数,提取出具有代表性的水质参数,找出影响环阳澄湖入湖河道水质的主要因素。选取 pH 值、DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TN、TP 和 BOD₅共7个因子参与因子分析,找出主要因素后通过成分得分系数矩阵与河道各参数的标准化值计算各河道因子得分。

2.4.1 第1类别河道主成分分析 从表3可以看出,前两个主成分特征值大于1,累积贡献达到81.31%,第1主成分贡献率较大,达到58.98%,其中COD_{Mn}与NH₃-N因子负荷占比较大,COD_{Mn}反映有机污染对河道水质的影响,同时BOD₅负荷也偏大,说明了工业以及生活有机物对第1类别河道的污染;本单位2021年监测结果显示,第1类别河道NH₃-N峰值浓度出现在1月,浓度为1.18 mg/L,溶解性总氮(DTN)峰值浓度出现在2月,为2.62 mg/L,NH₃-N年平均浓度为0.74

表3 第1类别河道水质参数旋转因子负荷
Tab.3 The first category of river water quality parameters rotated factor loadings structure

水质参数	主成分	
	F1	F2
pH 值	-0.247	-0.576
DO	0.049	-0.866
COD _{Mn}	0.905	-0.081
NH ₃ -N	0.904	0.209
TN	0.796	0.350
TP	0.264	0.765
BOD ₅	0.729	0.465
特征值	4.13	1.56
贡献率/%	58.98	22.33

mg/L,DTN 年平均浓度为 2.03 mg/L,NH₃-N 占 DTN 的比值为 36%。同朱广伟等对太湖北部湖区水体含氮水平的分析相比较,太湖北部湖区水体 DTN 浓度峰值出现在 2 月,NH₃-N 峰值出现在 1 月,浓度峰值出现时间相差 1 个月,NH₃-N 浓度峰值出现在干旱少雨、气温较低的春耕之前,DTN 浓度峰值与春耕活动强度峰值接近,表明春耕等春季面源污染对 TDN 影响较大,而 NH₃-N 更多受城镇生活污水影响^[44]。第 1 类别河道 NH₃-N、DTN 峰值出现时间与太湖北部湖区接近,推测其污染源类似,且第 1 类别河道 NH₃-N 占 DTN 的比值大于太湖北部湖区,表明第 1 类别河道 NH₃-N 主要受城镇生活污水的影响。第 2 主成分中 DO 以及 TP 因子负荷绝对值较大,DO 呈负相关。对于多数湖泊而言,磷是影响藻类繁殖的重要限制性营养元素,是湖泊富营养化状态形成的重要因子^[45-46],入湖河道直接连通湖泊,磷的影响不可忽视。综合得出第 1 类别河道主要受 COD_{Mn}、NH₃-N、DO 和 TP 的影响。

从因子得分可以看出盘根错节的各项污染因子对入湖河道污染程度的综合影响,表明其污染等级的高低^[13,47],从图 6 得出,4 条河道的综合污染分级排序为:蠡塘河>永昌泾>白荡>北河泾,在河道治理时可以作为参考。

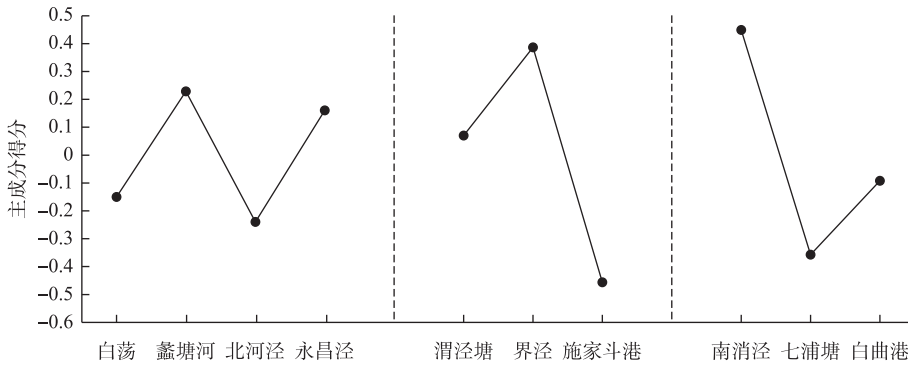


图 6 入湖河道主成分得分

Fig.6 Principle components scores for the inflow rivers

表 4 第 2 类别河道水质参数旋转因子负荷
Tab.4 The second category of river water quality parameters rotated factor loadings structure

水质参数	主成分		
	F1	F2	F3
pH 值	-0.065	-0.974	0.026
DO	0.075	-0.099	-0.839
COD _{Mn}	0.570	0.765	0.143
NH ₃ -N	0.920	0.151	0.131
TN	0.908	0.080	-0.121
TP	0.272	-0.064	0.845
BOD ₅	0.823	0.247	0.345
特征值	3.43	1.43	1.13
贡献率/%	48.99	20.44	16.08

2.4.2 第 2 类别河道主成分分析 从表 4 可以看出,前 3 个主成分特征值大于 1,累积贡献达到 85.51%,第 1 主成分贡献率较大,达到 48.99%,其中 NH₃-N 与 TN 因子负荷占比较大,显示入湖河道水体氮源的活动特征,外源营养盐通过第 2 类别河道输送进入阳澄湖西湖中部区域,水体 NH₃-N 与 TN 对第 2 类别河道影响最大;第 2 主成分中 pH 值因子负荷绝对值较大;第 3 主成分中 TP 与 DO 因子负荷绝对值较大,与第 1 类别水体的第 2 主成分类似。综合得出第 2 类别河道主要受 NH₃-N、TN、pH、TP 和 DO 的影响。3 条河道的综合污染分级排序(图 6)为:界泾>渭泾塘>施家斗港,近 5 年入湖流量排序与污染分级排序相同,界泾流量最大,约为渭泾塘的 3.5 倍。在第 2 类别河道治理中要尤为关注。

2.4.3 第 3 类别河道主成分分析 从表 5 可以看出,前两个主成分特征值大于 1,第 3 主成分接近 1,且其贡献率

仍在 13%以上,故纳入计算,共选取 3 个主成分,累积贡献达到 81.9%,第 1 主成分贡献率较大,达到 48.11%,pH 值因子负荷绝对值较大,其次是 TP,河道 TP 浓度对第 3 类别河道影响较大;第 2 主成分中 TN 因子负荷绝对值较大,代表河道氮源的影响;第 3 主成分中 DO 因子负荷绝对值较大。综合得出第 3 类别河道主要受 pH、TP、TN 和 DO 的影响。3 条河道的综合污染分级排序(图 6)为:南消泾>白曲港>七浦塘,与近

5 年入湖流量排序相同,南消泾流量约为七浦塘和白曲港的 3 倍,白曲港流量略大于七浦塘;从距平系数图与物元分析点聚图也可以看出,七浦塘的综合水质在第 3 类河道中处于最优状态。

3 讨论

3.1 污染源分析

3.1.1 上游来水水质 通过分析表 6 中上游河道来水水质情况可以看出在上游监测断面与入湖河道监测断面中间水质的变化情况,白荡上游河道为元和塘,与爱格豪路桥相比,白荡 DO 浓度下降, NH₃-N、TN、TP 和 BOD₅ 浓度均有不同幅度上升, NH₃-N 浓度上升幅度最大,增幅为 129%,永昌泾河道水质变劣同样较为明显, NH₃-N 由 II 类水变为 III 类水,增幅为 145%,考虑到上游黄埭镇与黄桥街道工业污染源排放量较大,推测两监测断面中

有较大污染源汇入,在进行水质治理时需要可能对可能存在的点源、面源、内源进行摸排;同属于第 1 类别的河道中,蠡塘河与北河泾入湖监测断面各项参数有升有降, DO、COD_{Mn}、TP、BOD₅ 浓度略有下降, NH₃-N、TN 浓度略微上升,水质的变化受到水质治理工程、河道自净能力与点源面源污染的相互竞争影响;第 2 类别与第 3 类别河道变化幅度较小,推测在两监测断面中没有新的大型污染源汇入。杨惠等分析了 2010—2014 年阳澄湖直接入湖的总污染物通量与外围入准保护区的总污染物通量的关系(外围指元和塘以西的阳澄湖入湖河道上游地区,准保护区范围包含第 1 类别河道区域与第 2 类别河道区域),发现总体上外围流入西部准保护区的污染物并没有通过河网自身的净化作用进行有效降解,反而与准保护区内产生的污染物叠加,使部分河道水质参数浓度水平上升,从而导致了更多的污染物进入阳澄西湖^[19],与本研究结果一致。

表 6 2017—2021 年阳澄湖入湖河道上游监测断面特征及水质参数年均值

Tab.6 Characteristics and annual average values of water quality parameters of upstream monitoring sections of Lake Yangcheng inflow rivers from 2017 to 2021

断面名称	河道	WT/ ℃	pH	DO/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	BOD ₅ / (mg/L)
爱格豪路桥	元和塘	19.6	8.10	7.83	4.3	0.41	2.29	0.121	2.5
黄埭东大桥	蠡塘河	20.0	7.95	7.08	4.8	0.87	2.69	0.219	3.9
大湾桥	北河泾	21.8	8.07	7.44	5.0	0.71	2.58	0.203	3.8
永昌泾闸	永昌泾	20.7	8.14	7.95	4.2	0.33	1.86	0.116	2.5
冶长泾大桥	渭泾塘	19.8	8.09	7.74	4.0	0.26	2.02	0.118	2.5
界泾桥	界泾	20.9	8.10	7.50	4.4	0.30	2.19	0.128	2.5
兆良路桥	七浦塘	20.0	8.19	8.91	3.7	0.22	2.10	0.108	2.1

3.1.2 第 1 类别河道区域污染源分析 根据《苏州市相城第二次全国污染源普查数据分析报告》,对 2018 年各别河道区域进行污染源排放统计(表 7),第 1 类别河道区域所有污染源中,化学需氧量(COD)、NH₃-N 与 TP 最高排放源均为生活污染源, TN 的最高排放源为工业污染源。根据《江苏统计年鉴》《苏州统计年鉴》《中国县域统计年鉴》等相关统计文件,相城区下辖 7 个街道和 4 个镇,人口流动性较大,城镇人口比重逐年增加,2021 年末相城区城镇人口相较于 2016 年末增加了 9.08 万人,增幅为 10.72%。进入 21 世纪以来,相城区依托相城区经济技术开发区(2014 年升级为国家级经济技术开发区,澄阳街道)、相城区高新技术产业开发区(元和街道)和高铁新城(北河泾街道)板块,大力发展经济,人口虹吸效应明显,第 1 类别河道区域人口数已达 35 万,超过相城区常住人口的 40%,居民生活污水产量相应增加;第 1 类别河道区域着力

表 5 第 3 类别河道水质参数旋转因子负荷
Tab.5 The third category of river water quality parameters rotated factor loadings structure

水质参数	主成分		
	F1	F2	F3
pH 值	-0.855	-0.104	0.194
DO	-0.019	0.165	-0.912
COD _{Mn}	0.465	0.670	0.024
NH ₃ -N	0.211	0.640	0.620
TN	0.076	0.899	-0.194
TP	0.831	0.153	0.421
BOD ₅	0.734	0.506	0.231
特征值	3.37	1.42	0.952
贡献率/%	48.11	20.21	13.60

布局智能车联网、工业互联网等 6 大新经济特色产业, 规上企业集中在各园区内, 以潘阳工业园、经开区澄阳片区布局最为集中, 产业以电子信息和精密器械为主^[48]。除此之外, 元和塘西岸分布有大量居民区, 东岸分布有纺织企业; 蠡塘河周边分布众多商业区、科技公司以及蠡口家具城家具制造产业, 工业污水产量较大。生活污染源与工业污染源带来的 COD、NH₃-N、TP 排放量对应第 1、2 主成分中 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 因子。综合分析, 第 1 类别河道所处区域常住人口集聚, 工业产业发达, 主要污染源为生活污染源与工业污染源。

表 7 各类别河道区域污染源排放测算统计*

Tab.7 Statistical table for the calculation of pollution source emissions in various river areas

区域	污染源	COD/t	NH ₃ -N/t	TN/t	TP/t
第 1 类别河道区域	工业污染源	98.77	9.61	29.37	0.86
	生活污染源	232.41	13.05	26.24	1.62
	农业污染源	27.71	0.25	1.85	0.19
第 2 类别河道区域	工业污染源	297.43	22.27	73.71	2.98
	生活污染源	108.64	7.21	13.59	0.71
	种植业	265.21	4.44	27.28	4.22
第 3 类别河道区域	工业污染源	5.18	0.50	1.54	0.04
	生活污染源	7.88	0.40	0.90	0.05
	种植业	29.61	0.27	1.97	0.20
	水产养殖业	90.97	4.83	19.90	2.96

* 农业污染源包含种植业、畜禽养殖业和水产养殖业, 表中仅列出主要污染源。

3.1.3 第 2 类别河道区域污染源分析 根据统计结果, 第 2 类别河道中 COD、NH₃-N、TN 最高排放源为工业污水, TP 最高排放源为农业污染源中的种植业, 生活污染源占比最小。第 2 类别河道区域范围内有一园三基地, 即漕湖产业园(苏相合作区)、太平街道省级精密制造业产地、阳澄湖镇新材料产业基地和渭塘镇中国汽车零部件(苏州)产业基地, 带来大量工业污染输入, 工业污染源排放量超过第 1 类别河道区域, 对应第 1 主成分的 NH₃-N 与 TN 因子。若考虑到两区域上游, 即元和塘以西区域各街道、乡镇工业污染源排放量, 黄桥街道与黄埭镇的工业污染源排放量并入第 1 类别河道进行计算, 其结果将反超第 2 类别河道区域。依据《苏州市相城区土地利用总体规划(2006—2020 年)调整方案》, 覆盖第 2 类别河道区域范围的各乡镇耕地保有量为: 太平街道 917.76 hm²、渭塘镇 854.57 hm²、阳澄湖镇 3312.14 hm², 总计占全区比例为 49.41%; 基本农田保护任务目标为: 太平街道 817.24 hm²、渭塘镇 573.82 hm²、阳澄湖镇 2878.57 hm², 总计占全区比例为 48.14%。第 2 类别河道区域农业活动面积大、范围广, 产生的农业面源污染较多, 与主成分中的 TP 因子对应。

3.1.4 第 3 类别河道区域污染源分析 河道区域范围横跨相城区和昆山市两个行政区, 根据统计结果, 主要输入为水产养殖输入, 其次为种植业带来的 COD、TN、TP 输入。21 世纪以来, 阳澄湖湖体水产养殖面积逐渐缩小, 最高峰时达到 94.67 km², 目前仅有 10.67 km² 左右, 湖体养殖面积缩减后, 大量养殖企业和养殖户转移阵地至湖堤进行池塘养殖。蟹塘净化塘和养殖塘水质波动范围大, 2020 年 4 月, 净化塘和养殖塘 TN 分别达到 3.31 和 4.53 mg/L^[49], 远超七浦塘引水时水质浓度。阳澄湖沿湖而建的养殖塘面积逐年扩大, 有不少池塘里的水一年一换, 养殖废水通过河道或面源回流到北部湖体中, 过剩的饵料在湖底腐烂, 释放导致湖库富营养化的控制性元素氮磷, 形成新的污染。水产养殖业污染源对应主成分中的 TN、TP 因子。

3.2 河道治理对策

3.2.1 强化管网建设, 严格控制点源污染 相城区普查的工业企业中, COD 排放量较高的为化学纤维制造业、纺织业和金属制品业; NH₃-N 排放量较高的为纺织业、电子设备制造业和金属制品业; TN 排放量较高的为纺织业、电子设备制造业和金属制品业; TP 排放量较高的为纺织业、金属制品业和电子设备制造业。综合看来, 工业污染排放量较高的企业类型为纺织业、金属制品业、电子设备制造业和化学纤维制造业, 应在第 1 类别与第 2 类别河道区域范围内对相应的企业进行改造升级, 淘汰落后产能, 降低污染物排放量, 将 COD、NH₃-N、TN、TP 的排放削减率提升至 85% 以上, 并作为对工业行业污染排放的监管依据。相城区工业

污染源与生活污染源排放基本接管至集中式污水处理厂和农村分散式污水处理设施,2016年底,苏州市污水处理率为95.08%,之后逐年上升,至2020年,达到97.02%,2021年有所回落,降至96.34%,针对第1类别与第2类别河道中产生的大量工业污染源与生活污染源,应继续加强管网建设,增设污水处理厂,提高接管率和污水处理率;近年来相城区污水处理厂主要水污染物排放限制标准逐年提高,2002年发布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中规定2005年底前修建的污水厂,一级标准中A标准TN限值浓度为15 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 限值为5(8)mg/L(括号外数值为水温 $>12^\circ\text{C}$ 时的控制指标,括号内数值为水温 $\leq 12^\circ\text{C}$ 时的控制指标,后文同),TP限值为1 mg/L,2006年开始修建的污水厂TP限值为0.5 mg/L;B标准中,2005年底前修建的污水厂TN限值浓度为20 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 限值为8(15)mg/L,TP限值为1.5 mg/L,2006年开始修建的污水厂TP限值为1 mg/L。2007年发布的《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2007)与2018年替代版标准《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)将各项污染指标限制标准进一步增强。2023年3月,《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440—2022)正式实施,其中A标准COD限值为30 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 限值为1.5(3)mg/L, TN限值为10(12)mg/L,TP限值为0.3 mg/L,将限值推到新的高峰。对于已建污水厂,应根据最新标准,严格执行,降低污染物排放浓度,削减进入入湖河道的污染量;新建污水厂在建设时应进行充分论证,在保证处理效能优于最严标准的同时加快建设进度;控制各类型污水处理厂按标准分区分级排放^[50]。通过对点源污染的控制可以降低第1类别与第2类别河道区域的 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 水平。

3.2.2 削减面源污染,加强养殖污染治理 针对第2类别河道区域产生的大量以及第3类别河道产生的小部分种植业污染源进行治理,使用高效率、低残留、低毒性的农药发展化肥减施工程,通过施用肥料增效剂和土壤改良剂增加土壤中的养分固持,从源头减少养分流失^[51],从而进一步降低化肥的使用。可以针对面源污染设置田间、田边和田后生态缓冲带区,建立河岸植被缓冲带,实现对污染物的去除和对污水的净化^[52];对于第3类别河道区域影响最大的水产养殖污染源,可以优化投饵方式,养殖废水循环利用,推广低密度生态养殖工程,设置植物生态浮床—沉水植物组合系统净化水质,沉水植物可以选择苦草、轮叶黑藻和马来眼子菜等,浮床植物选择水生常绿鸢尾等,吸收水体中过多的营养元素^[53],从而达到污染物的最小排放,有效降低第3类别河道区域的TN、TP因子水平;完善畜禽养殖体系,通过土地类型调整划分适养区,在适养区范围内推行规模养殖,采用新兴科技手段对养殖过程中产生的畜禽粪便及生产垃圾进行统一无害化处理或还田利用^[54-55],对养殖废水进行跟踪,禁止直接排入河道内,在限养区建设粪污集中收集、集中处理服务模式,禁养区范围内全面去养殖化。

3.2.3 增强上游治理,促进河道水质修复 溯源各河道上游水质至望虞河,摸排各入湖河道水质变化特征,针对上游来水较差的河道,制定针对性的措施,实施一河一策。根据河道淤泥淤积深度等主要因素,采取排干清淤、水下清淤或环保清淤中的最优清淤办法,对上游河道及主要入湖河道进行疏浚清淤^[56],主要集中在第1类别和第2类别河道区域,降低区域内内源氮磷营养盐的释放;厘清引调水期间、丰平枯期间望虞河、七浦塘至阳澄湖的水力关系,在水质发生明显变化时及时通过追溯水力关系锁定上游污染源范围,按需设置背景断面、对照断面、控制断面和削减断面,精准查找污染源,进行针对性管控与治理。

3.2.4 推广公众教育,开展生态治理修复 可以推广节水型生活方式,按规定进行垃圾分类,减少生活污水排放,降低生活污水对第1类别与第2类别河道区域的影响。应开展生态治理与修复,对河道现有岸线进行整治,构建河堤植物群落,主要包括水生、湿地物种和陆生物种,建立和恢复河流生态缓冲带^[52,57];可利用自然湿地或人工推土、挖填等方式修建人工湿地,增加水陆过渡带,尽量模仿自然模式为湿地生态系统创造基础条件,发挥湿地保护生物多样性以及净化水体等自然、生态和环境功能^[58];可以通过可调式沉水植物网床技术吸附沉降悬浮颗粒、吸收氮磷、分泌化感物质抑制藻类生长^[59],改善水体环境,完善河道生态体系。河道治理是一项复杂的系统工程,需要所有人共同参与和努力。因此,应该推广环保理念,让公众认识到环保的重要性,提高公众的环保意识和环保素质。应加强公众教育,通过各种形式的宣传和教育,让公众了解入湖河道的重要性和治理的必要性,从而营造出全社会共同关注和参与环保的氛围^[60]。同时注意入湖河道治理不仅仅是清理河道垃圾和废水,更重要的是还原生态系统平衡,因此,应该鼓励和支持河道沿岸的居民和企业参与河道生态修复工作,并建立生态补偿机制^[61-62],通过给予相关方面一定的经济奖励来激励居民和企

业积极参与河道生态修复,从而促进入湖河道的健康发展。

3.2.5 加强巡查监管,完善数据监管体系 入湖河道通常是周边工业、农业和生活废水的主要排放口,废水会对入湖河道造成严重的污染,例如 2021 年生态环境保护督察组暗访发现在黄埭镇大寨河东新社区段不到 1 km 的河段有多处大小排口进行污水直排,抽测的两排口 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别高达 282、47.6 和 247、43.1 mg/L,远超地表水Ⅲ类水限值,因此,应加强对入湖河道的巡查和监管,及时发现并处理违规排放行为,建立行政与司法系统间的促进和有效配合^[63]。此外,应建立完善的污染源监测体系,对入湖河道进行实时监测和数据分析,及时发现和解决污染问题^[64]。

4 参考文献

- [1] Edmondson WT, Anderson GC, Peterson DR. Artificial eutrophication of Lake Washington. *Limnology and Oceanography*, 1956, **1**(1): 47-53. DOI: 10.4319/lo.1956.1.1.0047.
- [2] Hasler AD. Eutrophication of lakes by domestic drainage. *Ecology*, 1947, **28**(4): 383-395. DOI: 10.2307/1931228.
- [3] Davis CC. Evidence for the eutrophication of Lake Erie from phytoplankton records. *Limnology and Oceanography*, 1964, **9**(3): 275-283. DOI: 10.4319/lo.1964.9.3.0275.
- [4] Freeman KS. Forecasts aid HABs response. *Environmental Health Perspectives*, 2011, **119**(12): A510. DOI: 10.1289/ehp.119-a510.
- [5] Steffen MM, Davis TW, McKay RML *et al.* Ecophysiological examination of the Lake Erie *Microcystis* bloom in 2014: Linkages between biology and the water supply shutdown of Toledo, OH. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 6745-6755. DOI: 10.1021/acs.est.7b00856.
- [6] Tomioka N, Imai A, Komatsu K. Effect of light availability on *Microcystis aeruginosa* blooms in shallow hypereutrophic Lake Kasumigaura. *Journal of Plankton Research*, 2011, **33**(8): 1263-1273. DOI: 10.1093/plankt/fbr020.
- [7] Qin BQ, Zhu GW, Gao G *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112. DOI: 10.1007/s00267-009-9393-6.
- [8] Zhu GW, Shi K, Li W *et al.* Seasonal forecast method of cyanobacterial bloom intensity in eutrophic Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1421-1431. DOI: 10.18307/2020.0504. [朱广伟, 施坤, 李未等. 太湖蓝藻水华的年度情势预测方法讨论. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1421-1431.]
- [9] Li CY, Shi CF, Fang JQ *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the typical inflow river of Taihu Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(2): 182-187. [李丛杨, 史宸菲, 方家琪等. 太湖入湖河流氮磷时空分布特征. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(2): 182-187.]
- [10] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]
- [11] Chen XH, Qian XY, Li XP *et al.* Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988-2013 and analyses of its socio-economic drivers. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 70-78. DOI: 10.18307/2019.0622. [陈小华, 钱晓雍, 李小平等. 洱海富营养化时间演变特征(1988—2013年)及社会经济驱动分析. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 70-78.]
- [12] Yang JD, Shen Z, Chen MD *et al.* Research on comprehensive improvement countermeasures of Yangcheng Lake water environment. *China water & Waste water*, 2010, **26**(6): 6-10. [杨积德, 沈楨, 陈美丹等. 阳澄湖水环境综合整治对策研究与分析. 中国给水排水, 2010, **26**(6): 6-10.]
- [13] Wang SH, Jiang X, Jin XC. Classification and pollution characteristic analysis for inflow rivers of Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2834-2839. DOI: 10.13227/j.hjcx.2011.10.024. [王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析. 环境科学, 2011, **32**(10): 2834-2839.]
- [14] Zha HM, Zhu MY, Zhu GW *et al.* Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China. *Environment Science*, 2018, **39**(3): 1102-1112. DOI: 10.13227/j.hjcx.201707184. [查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析. 环境科学, 2018, **39**(3): 1102-1112.]
- [15] Zhu MY, Zhu GW, Wang YP. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 409-415. DOI: 10.13227/j.hjcx.2011.02.031. [朱梦圆, 朱广伟, 王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响. 环境科学, 2011, **32**(2): 409-415.]
- [16] Wand Q, Wu YD, Ding QL *et al.* Temporospatial variations and influential factors of water quality in the flowing river systems of western Taihu Lake Basin. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2699-2707. [王倩, 吴亚东, 丁庆玲等. 西太湖入湖河流水系污染时空分异特征及解析. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2699-2707.]
- [17] Zhang TL, Gu SX. Study on comprehensive harness scheme of rivers entering Erhai Lake. *Yangtze River*, 2018, **49**(4): 6-10. [张天力,

- 顾世祥. 洱海入湖河道综合整治规划研究. 人民长江, 2018, **49**(4): 6-10.]
- [18] Bai XY, Hu XZ, Pang Y. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 200-207. DOI: 10.18307/2015.0202. [白献宇, 胡小贞, 庞燕. 洱海流域低污染水类型、污染负荷及分布. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 200-207.]
- [19] Yang H, Chen J, Tan JH. Analysis of water quality change and pollutant flux of river channels into Yangcheng Lake. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(2): 129-132, 138. [杨惠, 陈江, 谈剑宏. 阳澄湖入湖河道水质变化及污染物通量分析. 水资源保护, 2016, **32**(2): 129-132, 138.]
- [20] Wang JH, Gu XQ, Yu Y. Analysis on the change of total phosphorus flux in Yangcheng Lake surrounded rivers. *Journal of Green Science and Technology*, 2021, **23**(2): 110-112, 160. [王晋虎, 古向前, 俞悦. 阳澄湖环湖河道总磷通量变化分析. 绿色科技, 2021, **23**(2): 110-112, 160.]
- [21] Sun RR, Lyu W, Gu LS *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of water quality in rivers flowing into West Yangcheng Lake. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(4): 105-108, 116. [孙瑞瑞, 吕文, 顾林森等. 阳澄西湖入湖河道水质时空变化特征. 水资源保护, 2021, **37**(4): 105-108, 116.]
- [22] Gao B, Liu KL, Wang YT *et al.* Application of system clustering method to dividing flood season of reservoir. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2005, **36**(6): 1-5. [高波, 刘克林, 王银堂等. 系统聚类法在水库汛期分期中的应用. 水利水电技术, 2005, **36**(6): 1-5.]
- [23] Yin XX, Xu GQ, Gui HR *et al.* Analyzing for sources of inrush-water in Wanbei Mining Area by systemic clustering and stepwise distinguishing. *Coal Geology & Exploration*, 2006, **34**(2): 58-61. DOI: 10.1016/S1872-2040(06)60004-2. [殷晓曦, 许光泉, 桂和荣等. 系统聚类逐步判别法对皖北矿区突水水源的分析. 煤田地质与勘探, 2006, **34**(2): 58-61.]
- [24] Ji ZS, Liu XY, Wang J *et al.* Classification forecast and interval forecast for water level of Fenshuijiang Station based on systematic clustering. *Water Resources and Power*, 2023, **41**(2): 11-14. [姬战生, 刘小勇, 王军等. 基于系统聚类的分水江站水位分类预报和区间预报. 水电能源科学, 2023, **41**(2): 11-14.]
- [25] Zhou F, Hao ZJ, Guo HC. Temporal and spatial distribution patterns of marine water quality in Eastern Hong Kong. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(9): 1517-1524. DOI: 10.3321/j.issn:0253-2468.2007.09.018. [周丰, 郝泽嘉, 郭怀成. 香港东部近海水质时空分布模式. 环境科学学报, 2007, **27**(9): 1517-1524.]
- [26] Singh KP, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti River (India) using multivariate statistical techniques—A case study. *Analytica Chimica Acta*, 2005, **538**(1/2): 355-374. DOI: 10.1016/j.aca.2005.02.006.
- [27] Kannel PR, Lee S, Kanel SR *et al.* Chemometric application in classification and assessment of monitoring locations of an urban river system. *Analytica Chimica Acta*, 2007, **582**(2): 390-399. DOI: 10.1016/j.aca.2006.09.006.
- [28] Zhang ZA, Qi YZ, Lin ZZ. The application of the systematic cluster analysis method to evaluate the water quality of Beijiing River system of Pearl River valley. *Acta Ecologica Sinica*, 1987, **7**(1): 1-11. [张子安, 齐雨藻, 林宗振. 应用系统聚类分析的方法评价珠江流域北江水系的水质状况. 生态学报, 1987, **7**(1): 1-11.]
- [29] Zou HM, Jiang LF, Li FR. Water quality and cluster analysis of Huaihe River basin in 2004. *Water Resources Protection*, **23**(1): 60-62. [邹海明, 蒋良富, 李粉茹等. 2004年淮河流域水质状况和聚类分析. 水资源保护, 2007, **23**(1): 60-62.]
- [30] Wang XF, Xin ZH, Liu QN *et al.* Optimization of water quality monitoring sections in Dengsha River watershed. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021, **33**(1): 18-22. [王雪峰, 辛卓航, 刘启宁等. 登沙河流域水质监测断面优化研究. 环境监测管理与技术, 2021, **33**(1): 18-22.]
- [31] 蔡文. 物元分析. 广州: 广东高等教育出版社, 1987.
- [32] Li ZY. Optimization of atmospheric environmental monitoring sites by matter element analysis. *Research of Environmental Sciences*, 1996, **9**(6): 45-48. DOI: 10.13198/j.res.1996.06.49.lizy.010. [李祚泳. 用物元分析法优选大气环境监测点. 环境科学研究, 1996, **9**(6): 45-48.]
- [33] Tian YQ, Li H, Ai J. Study on the risk assessment model for workplace based on matter element analysis. *Journal of Safety and Environment*, 2011, **11**(2): 242-245. [田彦清, 李华, 艾菁. 基于物元分析的作业场所风险评估模型研究. 安全与环境学报, 2011, **11**(2): 242-245.]
- [34] Shao WQ, Du YC, Lu SM. Performance evaluation of port supply chain based on fuzzy-matter-element analysis. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2016, **31**(4): 2159-2165. DOI: 10.3233/jifs-169055.
- [35] Gong XF, Chen CL, Zhao J *et al.* Optimized points selection of the water quality monitoring in the Le'an River Basin of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5): 545-549. DOI: 10.18307/2006.0518. [弓晓峰, 陈春丽, 赵晋等. 鄱阳湖乐安河流域水质监测优化布点. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 545-549.]
- [36] Fan YQ, Li H, Liu TT *et al.* Application of matter element analysis method in optimized sections of water quality monitoring. *Yellow River*, 2012, **34**(11): 82-84. [樊引琴, 李娅, 刘婷婷等. 物元分析法在水质监测断面优化中的应用. 人民黄河, 2012, **34**(11): 82-84.]
- [37] Bu HM, Liu WZ, Zhang QF. Application of multiple statistical analysis to spatial-temporal variations of water quality of the Jinshui River.

- Resources Science*, 2009, **31**(3): 429-434. [卜红梅, 刘文治, 张全发. 多元统计方法在金水河水水质时空变化分析中的应用. 资源科学, 2009, **31**(3): 429-434.]
- [38] Fu TY, Zou ZH, Wang XJ. Water quality assessment for Taizi River watershed in Liaoyang section based on multivariate statistical analysis and water quality identification index. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(2): 473-480. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.02.032. [富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水水质评价研究. 环境科学学报, 2014, **34**(2): 473-480.]
- [39] Ren Y, Zhang F, Wang J *et al.* Spatio-temporal characteristics and source identification of surface water pollutants in Lake Ebinur Watershed, Xinjiang. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1143-1157. DOI: 10.18307/2017.0512. [任岩, 张飞, 王娟等. 新疆艾比湖流域地表水丰水期和枯水期水质分异特征及污染源解析. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1143-1157.]
- [40] Gui ZF, Xue B, Yao SC *et al.* Water quality status and influencing factors of Yangcheng Lake, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, **31**(12): 1487-1492. [桂智凡, 薛滨, 姚书春等. 阳澄湖水水质现状及原因探讨. 地理科学, 2011, **31**(12): 1487-1492.]
- [41] Shen GH, Zhang RQ, Gao XP. Analysis of water quality change trend in Yangcheng Lake. *Water Resources Research*, 2014, **35**(3): 41-43. [沈国华, 张仁泉, 高晓平. 阳澄湖水水质变化趋势分析. 水资源研究, 2014, **35**(3): 41-43.]
- [42] Gu LH, Lai XJ. Simulation study of water environment influence on Yangcheng Lake River networks by Qipu River water diversion project. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(2): 88-95. [顾炉华, 赖锡军. 七浦塘引水对阳澄湖河网水环境影响的模拟研究. 水资源保护, 2018, **34**(2): 88-95.]
- [43] Gan Y, Yin S, Wang H *et al.* Modification of matter element analysis and its application in optimization design of water quality monitoring section in the mainstream of Liaohe River. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2017, **29**(3): 8-12. [甘宇, 殷实, 王辉等. 物元分析法的改进及在辽河干流水质监测断面优化中的应用. 环境监测管理与技术, 2017, **29**(3): 8-12.]
- [44] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-*a* concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI: 10.18307/2018.0201. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 2005—2017年北部太湖水体叶绿素 *a* 和营养盐变化及影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.]
- [45] Qin BQ. Shallow Lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.]
- [46] Zhu GW, Zou W, Guo CX *et al.* Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005-2018; Implications for future phosphorus reduction target management. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 21-35. DOI: 10.18307/2020.0103. [朱广伟, 邹伟, 国超旋等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005—2018年)及其对未来磷控制目标管理的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 21-35.]
- [47] Wu HY, Gan YY, Jin K. A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002-2021; Practices, achievements and future challenges. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1393-1412. DOI: 10.18307/2022.0500. [吴浩云, 甘月云, 金科. “引江济太”20年: 工程实践、成效和未来挑战. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1393-1412.]
- [48] 范蓉. 苏州市相城区工业企业用地评价分析[学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- [49] Zhang XJ, Lu RJ, Zhang J *et al.* Temporal and spatial characteristic and its influencing factors of total nitrogen concentration in Yangcheng Lake. *Environmental Pollution & Control*, 2022, **44**(3): 374-380. [张晓婕, 卢仁杰, 张健等. 阳澄湖水水质总氮浓度时空变化特征及影响因素分析. 环境污染与防治, 2022, **44**(3): 374-380.]
- [50] Yu C, Wang KJ, Ge J *et al.* Analysis of urban non-point source pollution control in Dianchi Basin. *Water & Wastewater Engineering*, 2002, **48**(3): 45-53. [余诚, 王凯军, 葛敬等. 城市面源污染治理综合解决方案思考: 以滇池为例. 给水排水, 2002, **48**(3): 45-53.]
- [51] Chang ZZ, Huang HY, Jin HM *et al.* Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China; Reuse of nitrogen and phosphorous in agricultural wastes. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(10): 1901-1907. [常志州, 黄红英, 靳红梅等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——氮磷养分循环利用技术. 农业环境科学学报, 2013, **32**(10): 1901-1907.]
- [52] Liu RX, Wang LY, Sun F *et al.* Research progress in riverine ecological buffer zone for control of agricultural non-point source pollution. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16**(1): 25-39. DOI: 10.12030/j.cjee.202103195. [刘瑞霞, 王立阳, 孙菲等. 以农业面源污染阻控为目标的河流生态缓冲带研究进展. 环境工程学报, 2022, **16**(1): 25-39.]
- [53] Luo ST, Zhang YJ, Li JY *et al.* Effect of combination of submerged macrophyte with ecological floating bed on aquacultural pollution controlling. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, **27**(2): 87-94. DOI: 10.1016/S1671-2927(11)60313-1. [罗思亭, 张饮江, 李娟英等. 沉水植物与生态浮床组合对水产养殖污染控制的研究. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(2): 87-94.]
- [54] Gao D, Chen TB, Liu B *et al.* Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention. *Geographical Research*, 2006, **25**(2): 311-319. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.02.015. [高定, 陈同斌, 刘斌等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略. 地理研究, 2006, **25**(2): 311-319.]
- [55] Zhou HB, Ding JT, Meng HB *et al.* Survey and development analysis of resource utilization technology of livestock and poultry wastes in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, **38**(9): 237-246. [周海宾, 丁京涛, 孟海波等. 中国畜禽粪污资源化利用技术应用调研与发展分析. 农业工程学报, 2022, **38**(9): 237-246.]
- [56] Bao JP, Zhu W, Min JH. Technology of dredging and sludge treatment in small and medium-sized river regulation. *Water Resources Protec-*

- tion, 2015, **31**(1): 56-62, 68. [包建平, 朱伟, 闵佳华. 中小河道治理中的清淤及淤泥处理技术. 水资源保护, 2015, **31**(1): 56-62, 68.]
- [57] Yin K, Liu HJ, Wang G *et al.* Overview on habitat monitoring methods under watershed ecological space management. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1581-1590. DOI: 10.13227/j.hjkk.202007287. [阴琨, 刘海江, 王光等. 流域水生态空间管控下生境监测方法概述. 环境科学, 2021, **42**(3): 1581-1590.]
- [58] Zhang XQ, Li YM, Li EK *et al.* Research on urban river training and environment rehabilitation program based on ecology. *Yellow River*, 2013, **35**(2): 36-38, 77. [张先起, 李亚敏, 李恩宽等. 基于生态的城镇河道整治与环境修复方案研究. 人民黄河, 2013, **35**(2): 36-38, 77.]
- [59] Wu JY, Wen WK, Wu HL *et al.* Effect of adjustable submerged plant bed nets on water quality purification in river channel—A case of Gonghu Jinshu Port in Suzhou. *Wetland Science*, 2014, **12**(6): 777-783. [吴建勇, 温文科, 吴海龙等. 可调式沉水植物网床净化河道中水质的效果——以苏州市贡湖金墅港断头浜为例. 湿地科学, 2014, **12**(6): 777-783.]
- [60] Ouyang YP, Liu XF. Inspiration of US great environment protection concept to water ecology and environment protection of Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2015, **46**(19): 97-100. [欧阳院平, 刘先锋. 美国大环保理念对长江水生态环境保护的启示. 人民长江, 2015, **46**(19): 97-100.]
- [61] Yang GM, Min QW, Li WH *et al.* Scientific issues of ecological compensation research in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(10): 4289-4300. [杨光梅, 闵庆文, 李文华等. 我国生态补偿研究中的科学问题. 生态学报, 2007, **27**(10): 4289-4300.]
- [62] Ouyang ZY, Zheng H, Yue P. Establishment of ecological compensation mechanisms in China: Perspectives and strategies. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(3): 686-692. DOI: 10.5846/stxb201212071759. [欧阳志云, 郑华, 岳平. 建立我国生态补偿机制的思路与措施. 生态学报, 2013, **33**(3): 686-692.]
- [63] Fu GW. Countermeasures for water and soil heavy metal pollution in China. *China Environmental Science*, 2012, **32**(2): 373-376. [傅国伟. 中国水土重金属污染的防治对策. 中国环境科学, 2012, **32**(2): 373-376.]
- [64] Wang JX, Chen MM, Tang GG *et al.* Discussion on China's pollution source monitoring system reform. *Environmental Protection*, 2014, **42**(21): 24-27. [王军霞, 陈敏敏, 唐桂刚等. 我国污染源监测制度改革探讨. 环境保护, 2014, **42**(21): 24-27.]