

DOI: 10.5846/stxb201805171089

胡俊, 沈强, 陈明秀, 池仕运, 胡菊香. 基于因子分析的南湾水库水源地浮游植物生物完整性评价. 生态学报, 2019, 39(10): - .

Hu J, Shen Q, Chen M X, Chi S Y, Hu J X. Phytoplankton index of biotic integrity based on factor analysis for water source assessment. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

基于因子分析的南湾水库水源地浮游植物生物完整性评价

胡 俊*, 沈 强, 陈明秀, 池仕运, 胡菊香*

水利部中国科学院工程生态研究所 水利部工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079

摘要: 目前, 国内开展的生态完整性评价工作多集中针对河湖, 基于鱼类和底栖动物开展, 针对水库的浮游植物生态完整性评价较少。为此, 于 2016 年在淮河流域饮用水源地水库—南湾水库, 开展了 3 次浮游植物调查, 在分析南湾水库浮游植物群落结构的基础上, 依据生物完整性理论, 采用因子分析方法对南湾水库开展了生态完整性评价。研究结果显示: 3 次调查中浮游植物种类数变化较小, 但所属种类存在明显的季节差异; 浮游植物密度 9 月份最高, 3 月密度最低, 而生物量则正好相反, 3 月最高而 9 月最低。进一步采用因子分析对群落数据进行分析, 筛选确定了 4 个公因子。其中, 因子 1 反映了群落的耐污特征与能力; 因子 2 表征了群落的多样性特征; 因子 3 表征了群落丰富度状况; 因子 4 表征了水体富营养状况。因子分析得分表明: 从时间上来看, 南湾水库 9 月水生态状况最差, 从空间上看, 则人口密度大的库湾区域水生态状况较差。因子得分较好地反映了水库不同时间与地点水生态状况的相对大小, 表明基于因子分析生物完整性评价能够较好地应用于南湾水库, 也适合推广应用于其它水体的生态评价工作中。

关键词: 南湾水库; 生物完整性; 因子分析; 浮游植物

Phytoplankton index of biotic integrity based on factor analysis for water source assessment

HU Jun, SHEN Qiang, CHEN Mingxiu, CHI Shiyun, HU Juxiang

Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, China

Abstract: Currently, studies on the assessment of ecological integrity mainly focus on the development of the fish or benthic index of biotic integrity for rivers and lakes, and there are few studies on phytoplankton in reservoirs. Therefore, the phytoplankton communities were investigated three times in the Nanwan Reservoir, a water supply reservoir in the Huaihe River Basin in 2016. An ecological integrity assessment was conducted based on the phytoplankton biological integrity using factor analysis. The results showed that the number of phytoplankton species in the three investigations changed marginally, but there was a clear seasonal difference among the species. The density of phytoplankton was the highest in September and the lowest in March, but the biomass was the highest in March and the lowest in September. The factor analysis was used to further analyze and assess the ecological status. Four common factors were identified in the factor analysis. Among them, factor 1 characterizes the characteristics and ability of the community to resist pollution, factor 2 characterizes the diversity of the community, factor 3 characterizes the richness of the community, and factor 4 characterizes the eutrophication of the water body. The factor scores showed obvious difference in different months. The ecological condition in March was the best.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51279112, 51409178)

收稿日期: 2018-05-17; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hujx@mail.ihe.ac.cn

Further, from the spatial point of view, the water ecological condition of the area with high population density was very poor. The factor score better reflects the relative size of the water ecological status of the reservoir at different times and locations. This indicates that the assessment of biological integrity based on factor analysis is suitable for the Nanwan Reservoir and can be applied to the ecological assessment of other water bodies.

Key Words: Nanwan Reservoir; biological integrity; factor analysis; phytoplankton

南湾水库水源是淮河流域重要的水源地水库之一。近年来,随着社会经济的迅速发展,污水排放和水土流失加剧,大量的有机物质和营养盐类进入水体,引起了南湾水库水体富营养化和污染饮用水水源等问题^[1],南湾水库的水质呈现恶化趋势^[2]。河流、湖库等生态系统的健康状况一直是水生态保护与管理工作中的重点,而南湾水库作为饮用水源地,其供水安全直接关系到人民群众生命健康和社会和谐稳定大局,所以生态状况受到更加广泛关注。

生态系统的健康评价可以从不同的角度提出不同的方法,例如从水文、栖息地等方向开展评估^[3-5]。在这些方法中,基于生物集合的生态健康评价是能够最为全面反映生态系统的状态及其演变趋势的方法^[6]。目前,广泛运用的基于生物集合构建的评价方法主要是依据生态完整性理论,将一系列描述生物个体、种类、种群的生物参数综合,以期系统全面反映水生态系统的总体现状及其演变趋势的生态完整性指数(index of biotic integrity, IBI)^[6-8]。IBI 最初选择鱼类构建^[8],但目前已发展出来许多基于其它生物类群的完整性指数。例如,底栖动物完整性指数(B-IBI: benthic-IBI)^[9-10]、浮游植物完整性指数(P-IBI: phytoplankton-IBI)^[11-12]、水生植物完整性指数(V-IBI: vegetation-IBI)^[13-14]。

相对于鱼类和底栖动物,围绕浮游植物开展生态完整性评价的工作较少^[11]。目前国内有关浮游植物的完整性评价工作包括了:蔡琨等^[11]以太湖为例,构建浮游植物生物完整性指数,对太湖水生态健康状况进行了分析评价;沈强等^[15]构建了浮游生物完整性指数对浙江饮用水源地进行了健康评价;谭巧等^[16]应用浮游植物完整性指数对长江上游宜宾至江津江段进行了河流健康评价。尽管我国浮游植物生态完整性评价工作较少,但是在我国水体,尤其湖泊水库等水体中富营养化导致浮游植物过度繁殖、水华暴发一直是我国面临的最大的水环境问题之一^[17]。所以,在我国围绕浮游植物开展生态完整性评价具有非常重要的科学意义与现实意义。

目前,常见的生物完整性指数构建主要按照参照系确定、选择候选参数并进行筛选、评价量纲统一赋值、验证与修订等步骤来进行^[18]。这是一种先验分类(priori classification)的方法模式^[19],其核心是选择合理的参照区域后,进行指标筛选与评价。但是,在实际工作中,由于历史资料的匮乏或与类似待研究水体的参照区域难以找到,导致合理的参照是非常难以确定的。尤其是相对河流而言,湖库等水体的研究参照更难确定^[20]。因此,针对现有先验分类方法的不足,本研究拟以南湾水库为例,在目前 P-IBI 评价研究基础上,首次采用因子分析方法,尝试构建一种无须预定参照区域的后验模式方法^[19],开展南湾水库浮游植物生态完整性评价,更好认识南湾水库的水生态状况,为我国生态完整性评价方法推广提供更多技术支持。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域概况

南湾水库是淮河上游右岸一级支流淝河上的大型水库,水库大坝建于河南省信阳市西南笔架山与蜈蚣岭之间的淝河干流上,坝址位于河南省信阳市西南 8.5 km 南湾乡,地理位置为 32°08'N, 113°58'E。水库长度为 19 km,最大宽度 5.5 km,平均宽度 2.5 km;水库年均来水量为 $4.62 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均出水量为 $4.32 \times 10^8 \text{ m}^3$,水交换系数为 0.95。每年 5 月中旬—8 月底期间为汛期,其中 6、7、8 三个月为主汛期,水库补给系数(水库集雨区面积与水库面积之比)为 8.42^[21]。

1.2 采样点设置

根据水库功能区划和水生生物分布现状,以及流域土壤类型、植被、土地利用特征,将水库分为 9 个块,每个分区设一个采集点,共设置 9 个监测样点(图 1),具体采样点位置见表 1。

库区水生生物调查共进行了 3 次,调查时间为 2016 年 3 月、5 月和 9 月。

表 1 南湾水库水生生物监测样点信息

Table 1 Information of sample sites in Nanwan Reservoir

样点编号 Site code	样点名称 Site name	代表水域 The water area represented by the site	样点编号 Site code	样点名称 Site name	代表水域 The water area represented by the site
S1	跳伞台	坝前水域	S6	张家冲	支流淝河库湾
S2	八卦山	库中敞水区 1	S7	白云冲	支流沙河下游库湾
S3	槐树包	库中敞水区 2	S8	马家畈	支流沙河中游库湾
S4	双龙寺	支流董家河上游库湾	S9	杨沙荡	支流沙河上游库湾
S5	吴家冲	支流叶家河下游库湾			

1.3 采样方法

1.3.1 浮游生物调查

浮游植物定性样品用 25 号(200 目,孔径:0.064 mm)浮游生物网^[22]在表层 0.5 m 处以 20—30cm/s 的速度做“∞”形缓慢拖动 5—10 min,待水滤去后,打开阀门将收集物倒入贴有标签的标本瓶中。浮游植物定量样品采集 1.5 L 水样,按 1.5% 体积比原位加入鲁哥氏液固定。定性样品于光学显微镜下 10×40 倍观察,鉴定其种类。定量样品在室内静置 48 h 后,连续两次虹吸浓缩定容到 30 mL,然后取 0.1 mL 样品于计数框内进行视野法计数并鉴定种类^[23-24]。每一样品取样和计数至少 2 次,误差范围±15%。生物量采用细胞体积法推算^[22-24]。

1.4 备选评价指标

根据国内外有关浮游植物生物完整性指数研究实例^[11,15-16,25],本研究首先初步选择了 22 类指标(表 2)。这些指标大体上可以分为物种丰富度和组成、群落结构、生物多样性 3 个大类。然后,根据实际采样情况,对某些在实际工作难以直接确定或无统一标准的如敏感种之类的指标进行剔除后。其中,指标 13 由于与优势度计算存在部分重复,且除优势种外前两种密度变化范围过大或重复太多,所以未予采用;指标 14—19 则是因为缺乏统一标准,且研究区域无前期报道,因此也未予采用。各门类密度和密度百分比分别直接表示各门类绝对密度和相对密度(相对总密度比例),而相对密度更能反映各门类组成对群落的作用^[19],因而选择了本研究中所涉及的 7 个浮游植物门类的相对密度作为指标,最终确定 32 个指标开展分析。

1.5 因子分析

因子分析(Factor Analysis)属于多元统计分析技术的一种,其目的是通过研究众多变量之间的内部依赖关系,探求观测数据中的基本结构,并用少数几个假想的变量来表示其基本的数据结构。这些假想变量能够反映原来众多的观测变量所代表的主要信息,并解释这些观测变量之间的相互依存关系,这些假想变量称之为因子(Factors)。因子分析核心不是对原始变量的重新组合,而是对原始变量进行分解,分解为公共因子与

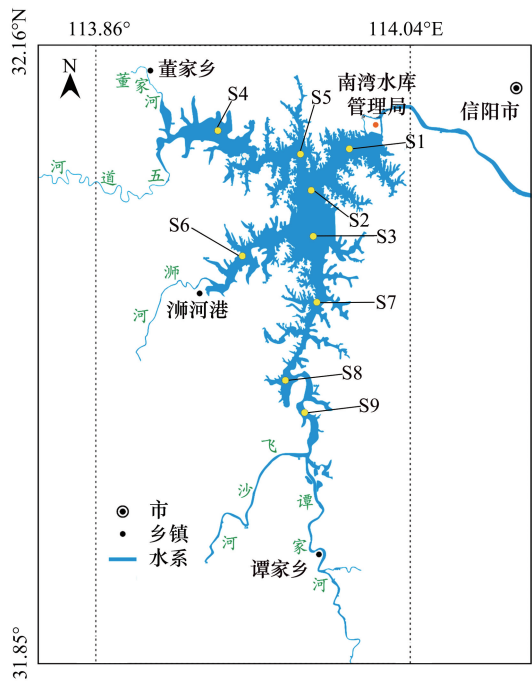


图 1 南湾水库采样站点示意图

Fig.1 Sketch map of Nanwan Reservoir with sampling sites

特殊因子两部分。

表 2 浮游植物评价参数
Table 2 The parameters of phytoplankton

序号 Number	指标 Indicator	说明 Explanation
1	藻类种类数	浮游藻类的总种类数目
2	藻类生物多样性指数	个体 Shannon's 多样性指数
3	藻类密度	浮游藻类的细胞密度
4	硅藻商	中心壳目硅藻种数/羽状壳目硅藻种数
5	水华藻类丰度	常见水华藻类(微囊藻、束丝藻、鱼腥藻、曲壳藻)与总藻类密度比
6	潜在产毒藻类丰度	淡水水体中能产生藻类毒素的藻类(微囊藻、束丝藻、鱼腥藻)与总藻类密度比
7	藻类平均体重	单个浮游藻类的平均体重
8	物种丰富度指数	Margalef 指数
9	优势度指数	Simpson 指数
10	均匀度指数	Pielou 指数
11	个体密度	浮游藻类的细胞密度
12	个体优势种	优势度>0.02
13	前三优势种个体%	优势度前三的个体密度与总密度之比
14	敏感种个体密度	
15	敏感种个体密度%	敏感种个体密度/总密度
16	耐污种个体密度	
17	耐污种个体密度%	耐污种个体密度/总密度
18	不可食藻个体密度%	难被浮游动物摄食的藻类/总藻类密度
19	浮游植物各门类密度	据实统计各门类浮游植物密度
20	浮游植物分类单元生物量	据实统计各门类浮游植物生物量
21	浮游植物各门类密度%	据实统计各门类浮游植物密度/总密度
22	浮游植物分类单元生物量%	据实统计各门类浮游植物生物量/总生物量

本研究采用因子分析缩减评价参数,通过寻找公因子来开展分析评价。具体分析过程中,采取主成分法(Principal Components Analysis)提取因子,并采用最大方差法(Varimax Rotation)旋转后,基于回归法(Regression Method)计算因子得分。所有分析均采用统计软件 IBM SPSS Statistics 22 完成。

2 结果

2.1 浮游植物概况

2.1.1 种类组成

3 次采样共鉴定浮游植物 148 种/属。其中,绿藻门浮游植物 59 种,蓝藻门浮游植物 35 种,硅藻门浮游植物 30 种(表 3)。这种较高的蓝绿藻门类组成与常见湖泊/水库中浮游植物组成相似^[26, 27]。总的来看,3 次采样的浮游植物种类较为接近,只是 5 月浮游植物种类略低,只有 66 种。

表 3 各季节浮游植物门类组成
Table 3 The phytoplankton compositions in the various seasons

采样时间 Sample date	硅藻门 Bacillariophyta	甲藻门 Dinophyta	金藻门 Chrysophyta	蓝藻门 Cyanophyta	裸藻门 Euglenophyta	绿藻门 Chlorophyta	隐藻门 Cryptophyta	合计 Total
3 月 March	21	4	3	10	6	26	2	72
5 月 May	12	3	1	19	3	26	2	66
9 月 September	13	3	2	17	2	31	4	72
合计 Total	30	6	3	35	9	59	6	148

从时间来看,3 次采样尽管物种总数接近,但是中各次采样的浮游植物门类组成差异还是较大(图 2)。例如,9 月蓝藻门浮游植物种类明显升高,而硅藻门种类则是明显下降。从空间分布来看,坝前和库尾浮游植物种类略高,各采样点均是绿藻门浮游植物种类最多,蓝藻门 9 月种类明显增多。

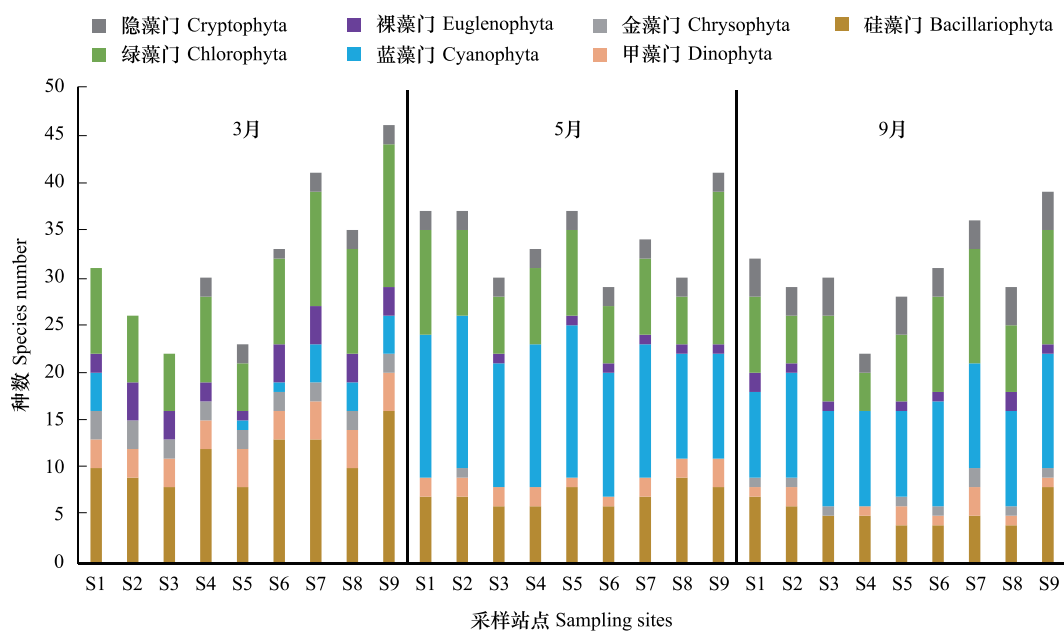


图2 各季节采样点浮游植物种类组成

Fig.2 The species compositions in the sites in the various seasons

2.1.2 密度和生物量

从图3可以看到,3次调查中,9月浮游植物密度最高,5月次之,3月最低。9月和5月主要是蓝藻密度显著升高,尤其是9月所有采样点中蓝藻密度组成高达90%以上。而浮游植物的生物量正好相反,9月浮游植物生物量最低,其次是5月,3月生物量最高。3月主要是裸藻和硅藻占优,即使在9月蓝藻生物量组成也并不占优。这与裸藻、硅藻个体质量较大,而蓝藻个体质量较小一致。

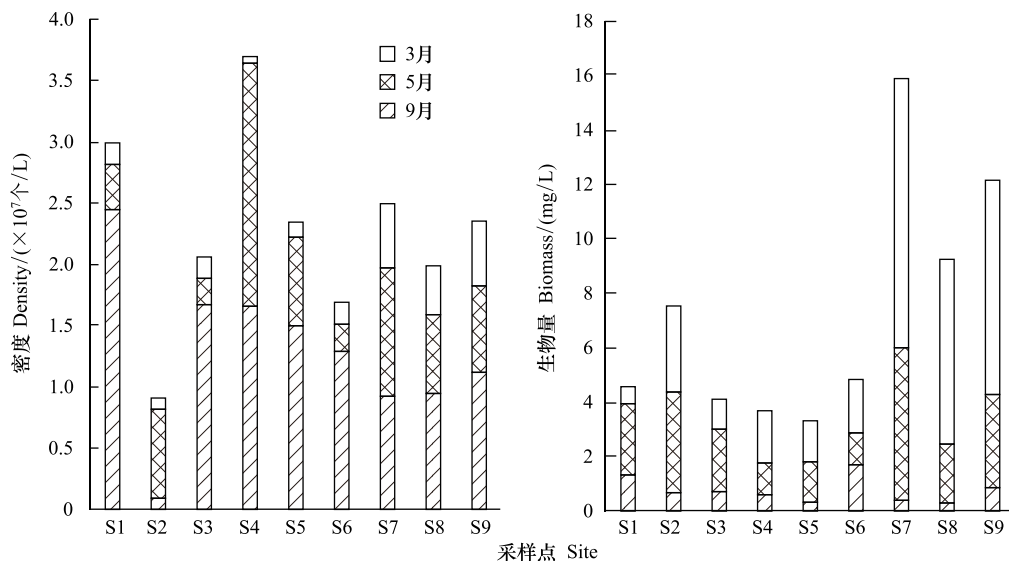


图3 浮游植物现存量变化图

Fig.3 The changes in the standing stock of phytoplankton

2.1.3 优势种

分析3月、5月和9月南湾水库浮游植物优势度前十的种类(表4),可以看到9月优势度前十种类均为蓝藻门浮游植物,而3月优势种主要是硅藻门浮游植物。这与前文描述的密度、生物量结果一致。

表 4 各季节浮游植物优势种分布

Table 4 The distributions of the dominant species in the various seasons

序号 Number	3 月 March			5 月 May			9 月 September		
	种类 Species	门 Pylum	优势度 Dominance	种类 Species	门 Pylum	优势度 Dominance	种类 Species	门 Pylum	优势度 Dominance
1	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira Granulata</i> Var. <i>Angustissima</i>	硅藻 Bacillariophyta	0.41	极小假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena Minima</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.61	漂浮浮丝藻 <i>Limnolrix Planctonica</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.94
	颗粒直链藻极狭变种螺旋 变形 <i>Melosira Granulata</i> Var. <i>Angustissima</i> F. <i>Spiralis</i>	硅藻 Bacillariophyta	0.36	莱德基泽丝藻 <i>Limnolrix Redekei</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.44	史密斯微囊藻 <i>Microcystis Smithii</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.61
3	浮球藻 <i>Planktosphaeria Gelatinosa</i>	绿藻 Chlorophyta	0.35	湖生假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena Linnetica</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.35	狭细贾丝藻 <i>Jauginema Angustissimum</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.60
	水华鱼腥藻 <i>Anabeana Flos-Aquae</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.32	挪氏微囊藻 <i>Microcystis Novacekii</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.29	坚实微囊藻 <i>Microcystis Firna</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.25
5	浮鞘丝藻 <i>Planktolynghya</i> Sp.	蓝藻 Cyanophyta	0.23	丝藻 <i>Ulothrix</i> Sp.	绿藻 Chlorophyta	0.28	柔细束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> Sp.	蓝藻 Cyanophyta	0.18
	鱼形裸藻 <i>Euglena Pisciformis</i>	裸藻 Euglenophyta	0.21	变异直链藻 <i>Melosira Varians</i>	硅藻 Bacillariophyta	0.26	颗粒颤藻 <i>Oscillatoria Granulata</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.16
7	莱德基泽丝藻 <i>Limnolrix Redekei</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.21	坑形细鞘丝藻 <i>Leptolynghya Foveolara</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.25	浮游长孢藻 <i>Dolichospermum Planktonica</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.13
	微型舟形藻 <i>Navicula Minima</i>	硅藻 Bacillariophyta	0.20	短线脆杆藻 <i>Fragilaria Brevistriata</i>	硅藻 Bacillariophyta	0.18	拉氏拟柱胞藻 <i>Cylindrospermopsis Raciborskii</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.12
9	倪氏拟多甲藻 <i>Peridiniopsis Niei</i>	甲藻 Dinophyta	0.18	线形舟形藻 <i>Navicula Graciloides</i>	硅藻 Bacillariophyta	0.17	微囊藻 <i>Microcystis</i> Sp.	蓝藻 Cyanophyta	0.12
	土生假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena Mucicola</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.18	依沙矛丝藻 <i>Cuspidolrix Issatschenkoi</i>	蓝藻 Cyanophyta	0.17	浮鞘丝藻 <i>Planktolynghya</i> Sp.	蓝藻 Cyanophyta	0.09

2.2 因子分析

综合考虑因子特征值,以及因子数量易解释性,并根据前期浮游植物候选指标分类方式,共筛选了前 4 个累积方差解释率为 74%的公因子(表 5)。这 4 个因子所含信息占总信息的 74%。采用最大方差法旋转后,第 1 公因子(F1)方差解释比例约为 32%,第 2 公因子(F2)方差解释比例约为 20%,第 3 公因子(F3)方差解释比例约为 13%,第 4 公因子(F4)方差解释比例约为 8%。

最终确定的 32 个指标及对应因子载荷(factor loadings)见表 6。可以看到,经旋转后各因子载荷值趋于两极分化,各因子特异性较为明显。各因子得分基于回归法计算并作图(图 4)。总因子得分根据各单因子的汇总计算得出(图 5)。由于所有数据因子分析前已经标准化,所以不同季节/采样点的因子得分可以直接比较大小。

表 5 因子分析信息汇总
Table 5 The information of factor analysis

因子成分 Component	初始特征值 Initial Eigenvalues			提取载荷平方和 Extraction Sums of Squared Loadings			旋转载荷平方和 Rotation Sums of Squared Loadings		
	总计 Total	方差百分比 % of Variance	累积 Cumulative/%	总计 Total	方差百分比 % of Variance	累积 Cumulative/%	总计 Total	方差百分比 % of Variance	累积 Cumulative/%
1	12.167	38.021	38.021	12.167	38.021	38.021	10.129	31.654	31.654
2	5.619	17.559	55.580	5.619	17.559	55.580	6.537	20.427	52.081
3	3.447	10.771	66.351	3.447	10.771	66.351	4.288	13.399	65.480
4	2.385	7.454	73.805	2.385	7.454	73.805	2.664	8.325	73.805
5	1.939	6.060	79.865						
6	1.328	4.150	84.014						
7	1.080	3.375	87.389						

F1: 第 1 公因子,the 1st factor; F2: 第 2 公因子,the 2nd factor; F3: 第 3 公因子,the 3rd factor;F4: 第 4 公因子,the 4th factor

表 6 旋转后因子载荷矩阵
Table 6 The rotated component loading

序号 Number	指标 Indices	成分因子载荷 Component loading			
		F1	F2	F3	F4
1	藻类种类数	-0.223	0.098	0.881	0.169
2	个体 Shannon's 多样性指数	0.236	0.887	0.275	0.089
3	藻类密度	-0.552	-0.591	-0.079	0.237
4	潜在产毒藻类丰度	-0.435	0.004	-0.02	0.185
5	藻类平均体重	0.746	0.407	0.136	0.189
6	个体 Margalef 指数	0.009	0.278	0.856	0.110
7	个体 Simpson 指数	0.316	0.888	0.22	0.005
8	个体 Pielou 指数	0.302	0.904	0.135	0.058
9	优势种	-0.290	-0.897	-0.18	0.030
10	藻类生物量	0.217	0.331	0.771	0.140
11	硅藻门种类百分比	0.808	0.306	0.091	-0.214
12	甲藻门种类百分比	0.715	0.194	0.055	-0.411
13	金藻门种类百分比	0.874	-0.173	-0.121	-0.212
14	蓝藻门种类百分比	-0.927	0.05	-0.182	0.195
15	裸藻门种类百分比	0.880	-0.019	0.008	0.109
16	绿藻门种类百分比	0.253	-0.312	0.594	0.068
17	隐藻门种类百分比	-0.568	-0.459	-0.204	0.016
18	硅藻门密度百分比	0.864	0.172	0.101	-0.036
19	甲藻门密度百分比	0.246	0.041	0.805	-0.098
20	金藻门密度百分比	0.685	0.167	-0.026	0.494

续表

序号 Number	指标 Indices	成分因子载荷 Component loading			
		F1	F2	F3	F4
21	蓝藻门密度百分比	-0.842	-0.446	-0.11	0.145
22	裸藻门密度百分比	0.883	0.097	-0.097	0.141
23	绿藻门密度百分比	0.484	0.436	-0.049	-0.578
24	隐藻门密度百分比	-0.198	0.807	-0.05	-0.089
25	硅藻门生物量百分比	0.152	-0.386	-0.311	-0.188
26	甲藻门生物量百分比	-0.189	0.252	0.758	-0.015
27	金藻门生物量百分比	0.580	0.110	0.098	0.449
28	蓝藻门生物量百分比	-0.457	-0.649	-0.299	0.202
29	裸藻门生物量百分比	0.862	0.098	-0.173	0.362
30	绿藻门生物量百分比	-0.108	-0.063	-0.156	-0.618
31	隐藻门生物量百分比	-0.493	0.614	-0.118	0.035
32	硅藻商	0.248	0.099	-0.079	-0.849

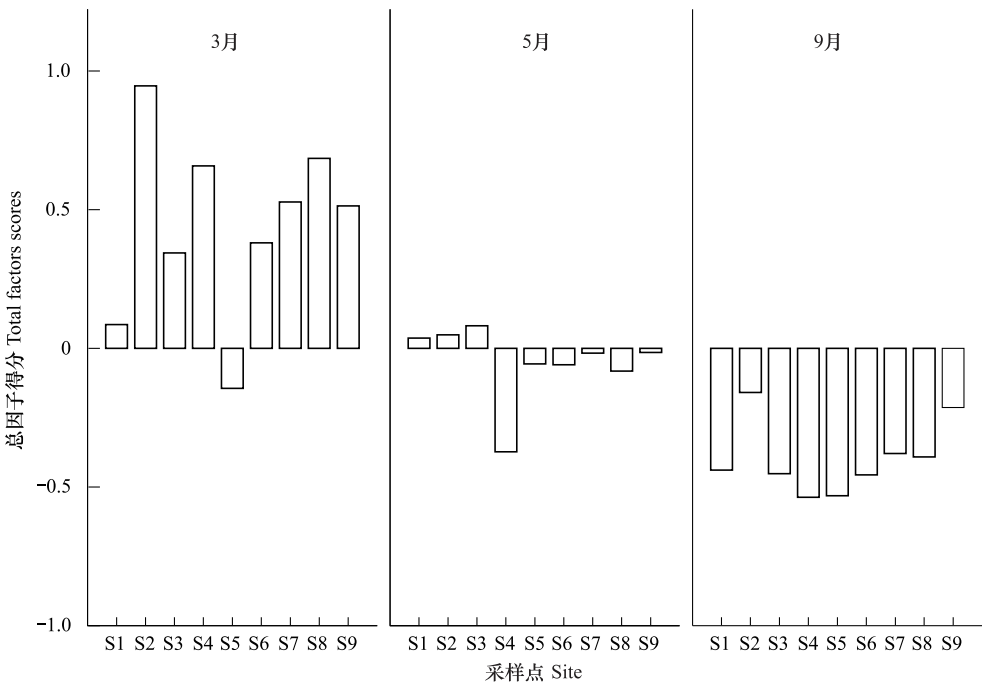


图4 总因子得分

Fig.4 The total factors scores

3 讨论

3.1 公因子生态学意义分析

最早提出的生物完整性指数是以鱼为对象,由种类结构、营养结构与数量和体质状况三类,共计由 12 个指标构建的^[8]。国内研究在其基础上结合研究实际,对具体指标进行了修订,并进行了不同的分类^[28-31]。浮游植物完整性指数研究中,不同学者的分类存在较大不同,具体指标可多达数十余项。例如,沈强等^[15]将其分类物种丰富度参数、群落结构组成参数、群落营养结构参数三大类,共计 22 个候选指标;蔡琨等^[11]分为群落多样性、群落物种丰度、群落均匀性和耐污能力及特性四类,并且将细胞与个体分开,共计 51 个候选指标;Lacouture 等^[12]提出 38 个候选指标,但是并没有将指标分类。

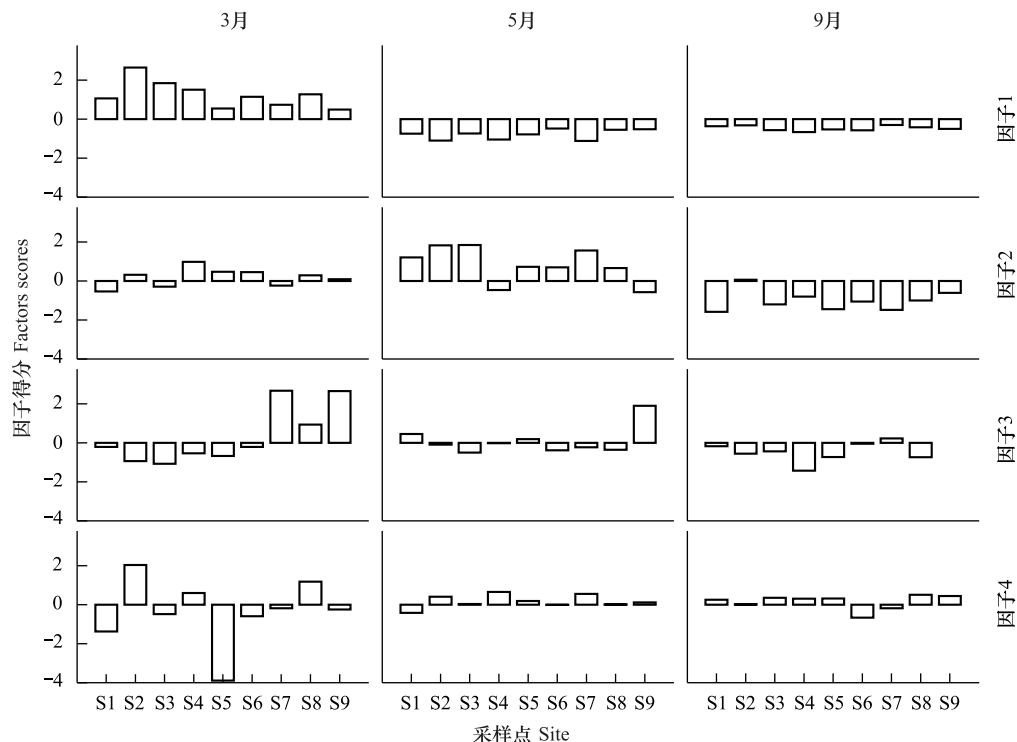


图5 不同季节条件下各采样点因子得分图

Fig.5 The factors scores in the various seasons

因此,本研究中通过对各因子主要载荷系数进行分析,并根据前期相关研究成果,对四个公因子的意义进行了辨析,可以看到四个公因子的生态学涵义还是比较明显:1)因子一(F1):主要是与硅藻门种类和密度百分比、金藻门种类百分比、裸藻门种类、密度与生物量百分比、甲藻门种类百分比以及藻类平均体重成正相关关系,而与蓝藻门种类、密度百分比是高度负相关作用。金藻门浮游植物通常只有在清洁水体才会出现^[32],而蓝藻是我国湖泊等水体的主要水华藻类,其种类或密度增多,意味着水体富营养化严重^[33],其相关指标多作为耐污能力及特性指标^[11, 15];平均重量升高,表明大型藻增多,通常体型小的藻类,如蓝藻、绿藻和黄藻等,生长快,吸收营养盐迅速,沉降速率低,总氮和总磷是影响该功能群的最重要环境变量^[32, 34]。这恰好与上述蓝藻门密度、种类负相关的结论一致。所以,该因子反映了群落所处水环境的污染状况。结合载荷系数符号,可以看到其分值越大,表明群落所处水环境越好;2)因子二(F2):主要与 Pielou 指数、Simpson 指数、Shannon 多样性指数、隐藻门密度为高度正相关,而与优势度呈高度负相关。多样性越好,均匀度越高,优势度必然越低。因此,该因子代表了群落的生物多样性,该因子分值越高,表明群落生物多样性越高;3)因子三(F3):主要与藻类种类数、Margalef 指数正相关。因此,该因子表征了群落丰富度特征;4)因子四(F4):主要与硅藻商呈负相关。硅藻商越大,意味着水体富营养化越严重^[35]。所以,该因子代表了水体富营养状况。

3.2 基于公因子的评价

从总因子得分来看(图5),3次调查及各次调查中不同采样点得分差异还是比较明显。从时间上来看,南湾水库3月份生态状况最好,9月水库水生态状况最差,这与其它南湾水库的调查结果一致^[2, 36-37]。进入春季后,河水开始逐步升温,河流所在区域农业以水稻耕作为主,稻田整理、施肥、施药,通过退水排入河流,河水升温、营养成分丰富以及汛期地表径流挟挟营养物质进入河流和水库等都有利于水中藻类生长^[38],而进入夏季后,南湾水库由于暴雨径流汇水进入水库,入库河流流量增大。同时,随着水温增高以及良好的光照条件等,藻类及迅速繁殖^[33]。这都导致了南湾水库夏季水环境较差^[2, 39]。从空间来看,则可以看到库湾生态状况要差些,尤其是库湾采样点 S4、S5、S6 是生态状况最差的3个位置。即使在3月整个水库生态状况较好的时

期,这3个位置的生态状况也属于中下水平。S4、S5、S6分别位于董家河、叶家河、狮河库湾,而这3个库湾恰好是库周人口最为密集、化肥入水量最高的区域之一^[40],并且它们所在的入库支流水质也是比较差的,尤其是董家河支流^[41]。所以,这3个位置生态状况最差,与其较为严重的面源污染及较差的入库河流水质状况相符。

除了分析总因子得分外,通过对各个单因子得分的分析,还可以进一步研究浮游植物群落不同特征的变化。从图5可以看到,F1在3月份明显高于其它两季。根据F1的生态学意义,说明从浮游植物群落特征来看,3月水质应好于其它两季,这与已有的水质研究结论一致^[42, 43]。由于F1解释比例最高,达到31%,这也暗示了南湾水环境状况对浮游植物群落的重要影响。F2在5月平均分最高,这可能与水温升高、汛期的来临,藻类种类数开始增加有关。不过,在进入9月后蓝绿藻大量生长繁殖,抑制其它藻类生长^[33]。因而九月份浮游植物群落多样性反而开始降低,这与也同期浮游植物群落物种丰富度在9月较低(F3得分最低)一致。不过值得注意的是,3月库中种类丰富度低值出现较多,这可能与气温较低有关,而库尾丰富度相对较高,则主要是与库尾受到来水河流影响较大,浮游植物种类较多有关。F4则在5月和9月差别不明显,而在3月份各采样点之间差异较大。从F1、F3、F4来看,采样点S4、S5、S6在3次采样因子得分都较低,所以总因子得分也较低。不过它们群落多样性(F2)在春季相对要好些,其原因应是当时水温较低,较为丰富的外源营养使得浮游植物生长较好,从而在一定时期提高了群落多样性。总之,通过分析不同的因子,在了解整体生态状况的同时,也有助于了解不同群落特征的表现,从而能够更有针对性的指出相应的保护与管理措施。

3.3 基于因子分析的完整性评价应用

目前,国内关于生物完整性评价的均是采用先验分类(priori classification)的方法模式^[19]开展的,与本研究相比关于初始指标的选择是完全一致的,但是与本研究最大的不同是先验分类的模式要求预先确定参考点/受损点,然后完成指标筛选并赋分评价,最后再对指标进行自验和修订。生态完整性评价的核心是“一个良好的水域生态环境,必然存在一个完善的生物群落结构”^[44]。我国由于前期工作基础薄弱,历史资料匮乏,且实际操作中很难找到合适的参照水体。因此,多数研究偏好于采用水质指标评价结果直接作为参照依据^[10-11, 15]。然而,水质指标复杂多样,水质综合评判本身也是复杂而困难的,而且研究表明基于水质或栖息地等其它指标确定的参照/受损点自验复核时准确度并不高^[45]。国内大部分研究^[10-11, 15, 29, 31],实际上都缺乏自验证和修订这一步,使得研究并不完备,从而限制了相关方法的评估效果和广泛应用。相比而言,本文首次基于因子分析方法开展生态完整性评价方法,是一种后验模式的方法。这种方法并不需要预先确定参考点,因而非常适合于难以确定参照/受损点,或样点数相对较少的工作。此外,所有数据在因子分析时进行了标准化,所以各样点之间的生态状况差别可以直接采用因子得分进行比较,并且除了采用基于总因子得分综合评价生态状况外,还能根据单个因子得分对不同样点/时期之间生态状况进行精细比较分析。由于后验模式不受参照设定的影响,其方法的可靠性更多地受制于备选指标,当然这是所有评价方法都会遇到的问题。随着更多地备选指标的提出以及对备选指标认识的不断地深入,评价的科学性和准确性也将得到不断的提高。

4 小结

基于现有浮游植物生态完整性指数的构建指标,采用因子分析方法对南湾水库的生态状况开展生态完整性评价。研究结果显示,通过总因子得分及单因子得分不仅能够较好地评估南湾水库的总体水生态状况,而且还能够通过分析单个因子得分开展更加精细的分析,并且通过比较得分可以直接比较出不同时期、不同站位生态站位的相对大小。这种基于因子分析后验式评价方法避免了设定参照/受损点,以及筛选、得分、验证步骤相对繁琐的问题,非常有助于将生态完整性评价更好推广运用到水体水生态评价工作之中。

参考文献 (References):

- [1] 陈向明,张海震,邹法俊,孙朝琴,吴善兵,于清,余国忠. 水库区域经济结构对水库水质的影响分析——以河南省信阳市南湾水库为

- 例. 商丘师范学院学报, 2009, 25(9): 119-122.
- [2] 于刚. 南湾水库水质及富营养化特征分析. 河南水利与南水北调, 2013, (4): 3-4.
- [3] 董哲仁. 国外河流健康评估技术. 水利水电技术, 2005, 36(11): 15-19.
- [4] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展. 科技导报, 2008(17): 82-88.
- [5] 文伏波, 韩其为, 许炯心, 胡春宏, 陈吉余, 李国英, 董哲仁, 王光谦. 河流健康的定义与内涵. 水科学进展, 2007, 18(1): 140-150.
- [6] 胡俊, 沈强, 陈明秀, 池仕运, 胡菊香. 生态监测指标选择的探讨. 中国环境监测, 2014, 30(4): 166-170.
- [7] Karr J R, Chu E W. Biological Monitoring And Assessment: Using Multimetric Indexes Effectively. Washington: University of Washington, 1997.
- [8] Karr J R. Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [9] Kerans B L, Karr J R. A Benthic Index Of Biotic Integrity (B-IBI) For Rivers Of The Tennessee Valley Ecological Applications, 1994, 4(4): 768-785.
- [10] 池仕运, 俞建军, 陈晖, 胡菊香, 陈胜, 马沛明, 陈威. 供水型水库底栖动物完整性指数的构建. 水生态学杂志, 2012, 33(2): 6-15.
- [11] 蔡琨, 秦春燕, 李继影, 张咏, 牛志春, 李旭文. 基于浮游植物生物完整性指数的湖泊生态系统评价——以 2012 年冬季太湖为例. 生态学报, 2016, 36(5): 1431-1441.
- [12] Lacouture R V, Johnson J M, Buchanan C, Marshall H G. Phytoplankton Index of Biotic Integrity for Chesapeake Bay and Its Tidal Tributaries. Estuaries and Coasts, 2006, 29(4): 598-616.
- [13] Miller S J, Wardrop D H, Mahaney W M, Brooks R P. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetlands in central Pennsylvania. Ecological Indicators, 2006, 6(2): 290-312.
- [14] 谢楚芳, 舒潼, 刘毅, 任文彬, 蒋金辉, 杨劼. 以植被生物完整性评价梁子湖湖滨湿地生态系统健康. 长江流域资源与环境, 2015, 24(08): 1387-1394.
- [15] 沈强, 俞建军, 陈晖, 胡菊香, 陈明秀, 郑金秀, 李聃, 张俊芳. 浮游生物完整性指数在浙江水源地水质评价中的应用. 水生态学杂志, 2012, 33(2): 26-31.
- [16] 谭巧, 马芊芊, 李斌斌, 吕红健, 付梅, 姚维志. 应用浮游植物生物完整性指数评价长江上游河流健康. 淡水渔业, 2017, 47(3): 97-104.
- [17] 黄文钰, 吴延根, 舒金华. 中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议. 湖泊科学, 1998, 10(3): 83-90.
- [18] 王备新, 杨莲芳, 刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价. 生态学杂志, 2006, 25(6): 707-710.
- [19] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols For Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [20] Beck M W, Hatch L K. A review of research on the development of lake indices of biotic integrity. Environmental Reviews, 2009, 17(NA): 21-44.
- [21] 杨杰. 南湾水库志. 北京: 中国档案出版社, 2005.
- [22] 章宗涉, 黄祥飞, 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [23] 胡鸿钧, 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [24] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [25] Kane D D, Gordon S I, Munawar M, Charlton M N, Culver D A. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health. Ecological Indicators, 2009, 9(6): 1234-1247.
- [26] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪, 谢卫东, 王晓奕. 鸣翠湖浮游植物群落结构及富营养化特征. 湖北农业科学, 2011, 50(22): 4590-4595.
- [27] 岳强, 黄成, 史元康, 陈燕飞, 冯子凌, 李红娟. 粤北 2 座不同营养水平水库浮游植物功能类群的季节演替. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 432-438.
- [28] 刘明典, 陈大庆, 段辛斌, 王珂, 刘绍平. 应用鱼类生物完整性指数评价长江中上游健康状况. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 1-6, 10-10.
- [29] 朱迪, 陈锋, 杨志, 俞建军, 陈晖. 基于鱼类生物完整性指数的水源地评价. 水生态学杂志, 2012, 33(2): 1-5.
- [30] 林鹏程, 刘飞, 高欣, 刘焕章. 鱼类生物完整性评价体系的构建及其在赤水河的应用. 淡水渔业, 2014, 44(6): 81-86+92.
- [31] 张赛赛, 高伟峰, 孙诗萌, 孙航, 张远, 丁森, 王伟. 基于鱼类生物完整性指数的浑河流域水生态健康评价. 环境科学研究, 2015, 28(10): 1570-1577.
- [32] Reynolds C S. The Ecology of phytoplankton. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2006.
- [33] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 龙胜兴. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(10): 3020-3030.
- [34] 胡初, 蓝于倩, 肖利娟, 韩博平. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. 湖泊科学, 2015, 27(1): 11-23.
- [35] 邓洪平, 陈锋, 王明书, 刘长坤. 嘉陵江下游硅藻群落结构及物种多样性研究. 水生生物学报, 2010, 34(2): 330-335.
- [36] 余国忠, 苏华, 刘向春, 赵承美, 郜慧, 黄昆. 信阳市大型水库功能演变对水库水质的影响——以南湾水库为例. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2009, 22(1): 115-119.

- [37] 潘开宇, 黄荣静, 胡志华, 胡安华, 杜晓刚, 陈道广, 彭益望, 吴献. 信阳市五大水库浮游植物群落调查研究. 信阳农业高等专科学校学报, 2006, 16(4): 98-100.
- [38] 贾昌虎, 邹法俊, 陈向明, 孙朝琴, 吴善兵, 于清, 余国忠. 河南省南湾水库浮游藻类的演替特征研究. 焦作师范高等专科学校学报, 2010, 26(1): 75-78.
- [39] 邹法俊, 王世香, 孙朝琴, 吴善兵, 陈向明, 余国忠. 河南省南湾水库浮游蓝藻动态特征研究. 安徽农业科学, 2009, 37(36): 8018-8020.
- [40] 任彧, 田洁玫, 陈杰, 王海洋. 南湾水库水源地保护区污染源调查评价. 安徽农业科学, 2018, 46(4): 57-61, 96-96.
- [41] 王超. 南湾水库及入库河流水质现状与控制对策. 江西农业学报, 2012, 24(8): 137-140.
- [42] 李自荣. 南湾水库水质状况调查及治理对策. 水利渔业, 2007, 27(5): 65-66, 116-116.
- [43] 尤宾. 综合水质标识指数法在南湾水库水质评价中的应用. 治淮, 2011, (12): 72-73.
- [44] Karr J R, Dudley D R. Ecological perspective on water quality goals. Environmental Management, 1981, 5(1): 55-68.
- [45] 周莹, 渠晓东, 赵瑞, 马淑芹, 张远, 殷旭旺. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较. 环境科学研究, 2013, 26(4): 410-417.