

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.020

官厅水库水质评价及时空变化特征

杨荣金¹,王逸卓²,李秀红²,张一²,孙美莹²

(1. 中国环境科学研究院水生态环境研究所,北京 100012;

2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875)

摘要:针对官厅水库水质评价缺乏时空整体性动态分析的问题,选取2010—2017年官厅水库7个断面的7项污染物指标监测数据,采用主成分分析法、反距离权重法、Spearman秩相关系数法对官厅水库开展水质评价与时空变化特征分析。结果表明:水环境中有机污染与可还原污染并存,以氮磷元素为主导导致的水体富营养化是当前水库面临的最主要污染问题;官厅水库水质污染存在明显的区域性特点,出库区域水质较好,入库区域附近水质较差;年内不同时期官厅水库水质状况为汛期优于非汛期;2010—2017官厅水库总体水质变化情况波动较大,各断面水质年际变化呈现出不同规律。建议对水库水质实行分区管理,上游削减氮磷污染物的同时增大入库水量,入库区域扩大人工湿地。

关键词:水质评价;时空变化;主成分分析;反距离权重;Spearman秩相关系数;官厅水库

中图分类号:TV213.4;X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0135-07

Water quality evaluation and spatiotemporal variation characteristics of Guanting Reservoir // YANG Rongjin¹, WANG Yizhuo², LI Xiuhong², ZHANG Yi², SUN Meiyang² (1. Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In view of the lack of two-dimensional holistic spatiotemporal dynamic analysis of water quality evaluation of the Guanting Reservoir, the monitoring data of seven pollutant indicators from seven sections of the Guanting Reservoir from 2010 to 2017 were selected to carry out the water quality evaluation and investigate spatiotemporal variation characteristics of the water quality of the Guanting Reservoir using the principal component analysis method, inverse distance weight method, and Spearman rank correlation coefficient method. Results show that organic pollution and reducible pollution coexisted in the water environment, and the eutrophication caused by nitrogen and phosphorus was the most important pollution problem in the current state. The water pollution of the Guanting Reservoir had obvious regional characteristics, with the water quality being better in the outlet area and being worse near the inflow area, and the water quality of the Guanting Reservoir was better in the flood season than in the non-flood season. The overall water quality of the Guanting Reservoir fluctuated greatly from 2010 to 2017, and the interannual variation of the water quality of each section showed different trends. It is suggested to implement regional water quality management, reduce nitrogen and phosphorus pollutants in the upstream while increasing the amount of water into the reservoir, and expand the artificial wetland in the reservoir area.

Key words: water quality evaluation; spatiotemporal variation; principal component analysis; inverse distance weight; Spearman rank correlation coefficient; Guanting Reservoir

水库水质关系到饮用水安全^[1-2]。近年来,受自然环境变化及人类活动等综合作用的影响,库区水体污染日益严重,直接影响居民饮用水安全^[3-4]。

为改善水库水质污染状况,科学有效地建立水源地水环境管理制度,保障地区饮用水安全,完善区域内水资源系统的空间布局,必须对水库水环境进行客

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111002)

作者简介:杨荣金(1971—),男,研究员,博士,主要从事生态环境保护战略、规划与政策研究。E-mail: yangrj@craes.org.cn

通信作者:李秀红(1975—),女,教授,博士,主要从事生态环境监测、评估、规划、管理与决策研究。E-mail: lixh@bnu.edu.cn

观、全面、科学的评价。

官厅水库地跨京冀两省,是反映永定河(河北—北京段)上下游之间流域资源环境最直观的区域。官厅水库曾作为除密云水库外北京市第二大饮用水水源地,后因严重污染问题退出了饮用水供水体系。随着北京市人口上升,密云水库作为当前唯一饮用水水源地,其供水压力与日俱增,未来可能难以支撑首都居民饮水用水需求。掌握官厅水库污染现状,识别主要污染因子,掌握水质时空变化特征与规律,是改善库区水环境质量、恢复其生态服务功能的前提。前人将研究重点放在上游入库河流水质评价上,对库区水体环境关注较少。彭福利等^[5]运用多元统计分析方法对官厅水库入库断面八号桥水质年际变化特征进行分析,得出丰水期水质优于枯水期,关键污染指标为总磷。高星琪等^[6]采用空间聚类分析、模糊综合评价法、综合判别分析等方法,对比桑干河、洋河、妫水河、清水河4条上游河流污染状况得出,洋河上游河水污染较严重,以总磷和浊度污染为主,污染物主要来自不合理使用化肥和有机农药,清水河和妫水河水质较好。杨大杰等^[7-8]利用综合水质标识指数评价法和单因子水质标识指数评价法对官厅水库水质进行评价,分析表明,未经处理的入库水体水质最差,但经过黑土洼人工湿地综合处理进入官厅水库库区后水质好转,出库水质达到国家标准,可满足北京市景观和工业用水要求。目前缺乏对官厅水库库区水质状况的空间分布特征以及较长时间序列的水质变化分析,难以全面掌握当前水库水质动态变化,因此本文通过主成分分析法、反距离权重法与 Spearman 秩相关系数法对官厅水库入库、库区、出库共7个断面2010—2017年各项水质指标数据进行分析,识别关键污染因子及其贡献程度,综合评价官厅水库整体以及不同区域断面水质状况、年内及年际水质变化特征,为上游河北省调节与优化入库流域产业布局、制定空间管控措施和下游北京市水源地污染防治提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

官厅水库(38°51'N~41°14.2'N、112°8.3'E~116°20.6'E)是在海河水系永定河上修建的第一座大型水库,位于河北省张家口市怀来县和北京市延庆县界内,设计总库容41.6亿m³,水库流域总面积4.34万hm²。主要入库支流有洋河、桑干河、妫水河。早在20世纪50—60年代,官厅水库水质良好,建成后成为京西工业区主要的供水水源和京西居民饮用水的重要来源。20世纪70—90年代,随着周

边地区社会经济的不断发展,官厅水库受到来自上游地区农业灌溉退水、畜禽养殖排污所造成的面源污染,以及沿河工业与城镇居民生活污水的影响,致使水质恶化,于1997年退出北京市生活饮用水供水体系^[9]。后虽经治理,于2007年恢复成为北京市备用水源地,但其水生态形势依然严峻。为全面分析官厅水库入库、库区与出库水质特征与变化,选取了八号桥、西湖橡胶坝、河口、永10008东表、妫大桥表、妫1018+1表、坝后7个断面作为研究采样点(图1)。

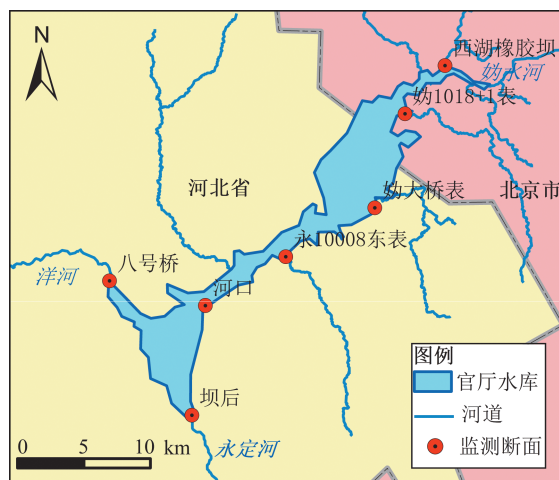


图1 官厅水库位置及监测断面

Fig.1 Guanting Reservoir location and monitoring sections

1.2 数据来源

监测数据来源于官厅水库管理处,选取了官厅水库八号桥、西湖橡胶坝、河口、永10008东表、妫大桥表、妫1018+1表、坝后7个断面的2010—2017年共计84组水质指标月均监测数据,包含pH值、总氮(TN)、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD₅)、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})7项监测指标。

1.3 研究方法

1.3.1 主成分分析法

主成分分析是一种将多维因子转换到同一系统中进行定量化研究的统计方法,在指标权重选取上有一定优越性,被广泛应用于河流水质评价中^[10]。旨在利用降维思想,把多污染指标转化为少数几个综合指标(主成分),其中每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息,且所含信息互不重复^[11]。这种方法在引进多个变量的同时将复杂因素归结为几个主成分,使问题简单化,得到的结果更加科学有效。主成分分析法运用在水质评价中,可在众多影响因素中筛选出主要污染指标,并在此基础上对水质综合指标进行量化排序^[12]。

1.3.2 反距离权重法

空间插值法被广泛用于资源管理、灾害管理和生态环境治理中,应用较多的有反距离权重法(inverse distance weight, IDW)、克里金法、样条函数法、趋势面法和多元回归等一系列模型方法。空间异质性是空间插值研究的隐含前提,要素的非均匀空间分布是进行空间插值的前提,空间相关性是空间插值研究的基础^[13]。

反距离权重的空间插值法是一种加权平均内插法,该方法认为任何一个观测值都对邻近的区域有影响,且影响程度随距离的增大而减小。水库水流流动性差,各区域水质状况不同程度受空间分布、地形、上游入库河流等因素的影响,导致库区水环境中各污染指标含量不均,存在空间异质性。采用 ArcGIS 空间分析模块的 IDW 空间插值工具,对官厅水库各断面水质评价结果进行插值,可有效开展官厅水库水质空间变化情况的研究^[14]。

1.3.3 Spearman 秩相关系数法

秩相关系数法又称等级相关系数法,是衡量时间序列变化趋势在统计上是否有显著性的常用方法,在污染物浓度变化趋势研究中得到广泛应用^[15-17]。秩相关系数法常用于检验水质指标数据序列与其响应时间序列间的相关性,从而判断水质序列在时间序列上是否存在变化趋势^[18]。

2 结果与分析

2.1 主要影响因素

对官厅水库各站点的 84 组月水质样本集进行主成分分析。在分析前,为排除数量级和量纲不同带来的影响,本研究对上述 7 个水质指标原始数据进行统计检验,得到 KMO 检验结果为 0.618,大于 0.5;Bartlett 球形检验结果显著性概率 P 小于 0.001,表明其差异检验值显著,说明样本数据适合进行主成分分析^[19]。利用 SPSS23 软件对月水质数据进行 Z-Score 标准化处理与主成分分析,得到各主成分的特征值和方差贡献率,如表 1 所示。

表 1 主成分特征值及方差贡献率

Table 1 Eigenvalue and variance contribution rate of principal components

主成分序号	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3.121	44.579	44.579
2	1.603	22.907	67.486
3	1.020	14.574	82.060
4	0.585	8.363	90.423
5	0.341	4.871	95.294
6	0.238	3.396	98.690
7	0.092	1.310	100.000

依据 Kaiser-Harris 准则,一般保留特征值大于 1 的主成分^[20]。表 1 中第 1、2、3 主成分的特征值分别为 3.121,1.603,1.020,故确定输出第 1、2、3 主成分。其方差贡献率分别为 44.579%,22.907% 和 14.574%,且方差累计贡献率为 82.06%,说明这 3 个主成分基本包含原数据集的大部分信息,可代替原 7 项指标^[21]。

表 2 是经过旋转后得到前 3 项主成分的荷载矩阵与主成分得分系数矩阵。由旋转后的主成分荷载矩阵可知,主成分 1 与总氮(0.863)、总磷(0.833)、氨氮(0.791)高度相关,可作为解释以氮磷元素为主的水体富营养化的污染指标^[22];主成分 2 与 pH 值(0.894)、高锰酸盐指数(0.842)高度相关,可作为解释水体可还原污染物对水体酸碱度影响的污染指标;主成分 3 与溶解氧(0.949)高度相关,可作为解释水体自净能力的特征指标^[23]。

通过对 7 个污染指标的筛选以及各主成分之间的贡献程度计算,可以看出目前影响官厅水库水质的主要污染指标及其影响程度从大到小排序为:总氮、总磷、氨氮、pH 值、高锰酸盐指数、溶解氧。水环境中有机污染与可还原污染并存,以氮磷元素为主导的水体富营养化是当前水库面临的最主要污染问题,这与上游农业灌溉退水与畜禽养殖排污、居民生活污水排放有关^[24]。

表 2 主成分荷载矩阵与得分系数矩阵

Table 2 Principal component load matrix and score coefficient matrix

指标	主成分荷载矩阵			主成分得分系数矩阵		
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
总氮	0.863	-0.255	-0.102	0.410	-0.198	-0.206
总磷	0.833	0.235	-0.042	0.355	0.100	-0.226
氨氮	0.791	0.115	0.431	0.258	-0.047	0.210
pH 值	-0.059	0.894	-0.016	-0.079	0.564	-0.145
高锰酸盐指数	0.215	0.842	0.176	0.008	0.484	-0.020
溶解氧	0.032	0.058	0.949	-0.163	-0.116	0.806
五生化需氧量	0.718	0.325	0.484	0.203	0.080	0.236

2.2 水质空间变化特征

主成分个数、各成分相关度与贡献程度确定后,需进一步确定各主成分的表达式和综合主成分函数,以开展水质综合评价^[25]。根据不同断面 2010—2017 年汛期与非汛期各主成分综合得分均值,依据 GB 3838—83《地表水环境质量标准》中规定的所选 7 个污染指标的 5 类水质临界数值,结合主成分分析得到的综合水质评价函数 F ,计算得出官厅水库水质等级分类标准为 I 类: $F \leq -0.746$; II 类:

$-0.746 < F \leq -0.543$; III 类: $-0.543 < F \leq -0.182$; IV 类: $-0.182 < F \leq 0.339$; V 类: $0.339 < F \leq 1.132$ 。根据水质等级分类标准,利用基于 ArcGIS 的 IDW 插值得到官厅水库水质空间变化,如图 2 所示,各水质等级不同时期所占面积如表 3 所示。

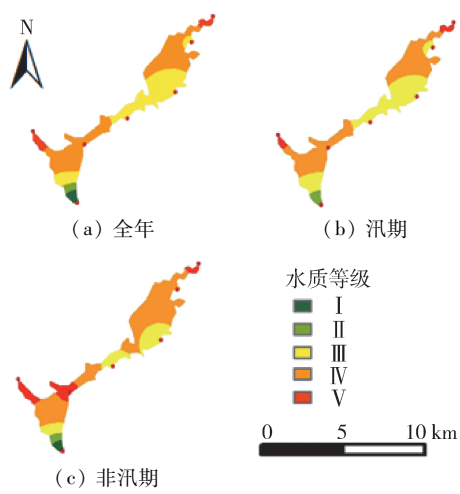


图 2 官厅水库不同时期水质空间变化

Fig. 2 Spatial variation of water quality for different periods in Guanting Reservoir

表 3 2010—2017 年官厅水库不同时期各水质等级区域面积均值 单位:km²

Table 3 Area statistics of five water quality grades in different periods of 2010—2017 in Guanting Reservoir unit: km²

水质等级	全年	汛期	非汛期
I	2.32	0.01	1.80
II	2.11	2.88	2.03
III	38.32	40.19	21.95
IV	54.70	55.59	64.92
V	4.62	3.45	11.40

从图 2(a)可以看出,入库断面八号桥与西湖橡胶坝水质状况最差,达 V 类水标准限值,出库断面坝后水质综合状况最佳,达 I 类水标准限值。结合第 1、2、3 主成分与各污染指标的相关性可知,入库断面上游洋河与奶水河存在以氮磷为主的有机污染,导致水体富营养化程度偏高,污染库区水质。河口(Ⅲ类水)、奶 1018 + 1 表(Ⅲ类水)断面距离上游河流入库断面较近,水质受上游来水影响较大,与库区永 10008 东表(Ⅲ类水)、奶大桥表(Ⅲ类水)断面相比主成分得分值较大。根据对图 2 与表 3 的综合分析,Ⅲ类水(全年占 37.5%、汛期占 39.4%、非汛期占 21.5%)和 IV 类水(全年占 53.6%、汛期占 54.5%、非汛期占 63.6%)占库区面积比重大,集中于库区中心位置。越靠近上游地区受工农业等人类活动影响越大,水质越差,向 V 类水过渡;靠近下游

出库区域水质向好,可达 I、II 类水的标准。

2.3 年内汛期与非汛期水质变化特征

根据官厅水库周边降水变化规律将每年 6—9 月作为汛期,其余月份作为非汛期。从汛期与非汛期水质空间变化图(图 2(b)(c))可看出两个时期均显现出上游入库区域水质较差、库区水质向好、下游出库水质提升的变化规律。对两个时期各等级水质面积进行统计显示,汛期达标水质(I~Ⅲ类水)面积明显大于非汛期。与汛期相比,非汛期Ⅲ类水面积缩减 45%;Ⅱ类水区域面积缩减 30%;I 类水面积虽增幅显著,但其影响范围与整个水库面积相比可忽略不计。非汛期水质未达标(Ⅳ、V 类水)区域面积显著增大,与汛期相比,Ⅳ类水面积增幅 17%,V 类水面积突增为原来的 2.3 倍,由此看出,官厅水库汛期水质优于非汛期。从图 2 可以看出,靠近上游入库断面的河口及周边区域水质由汛期时的Ⅲ类水转为非汛期时的 V 类水,奶 1018 + 1 表断面水质由Ⅲ类水转为Ⅳ类水,而其他断面水质等级保持不变,说明越靠近入库区水质污染变化越明显,这是由于汛期降水量与河道径流量增大,有利于水体中污染物稀释扩散。进入秋冬季后,河流处于非汛期,流域水温较低,水体流速和流量较汛期均有所降低,污染物无法及时随水流扩散稀释。靠近库区中心奶大桥表、永 10008 东表以及水库下游坝后断面水质变化受汛期与非汛期水量影响较小,全年水质变化波动幅度较小,水质状况稳定。

2.4 水质年际变化特征

2.4.1 达标水质区域面积变化

根据 GB 3838—83《地表水环境质量标准》,官厅水库水质应达到Ⅲ类水标准。通过上述分类与统计方法对官厅水库 2010—2017 年Ⅲ类水及以上水质等级区域进行面积统计,结果如图 3 所示。

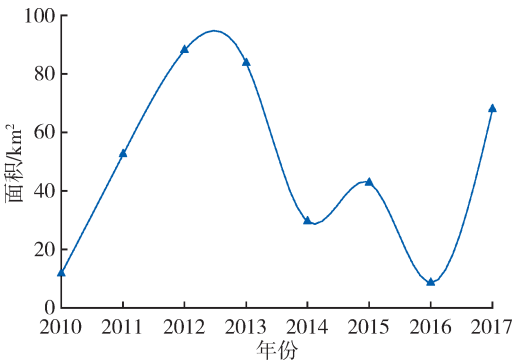


图 3 2010—2017 年水质达标区域面积变化

Fig. 3 Change of area with water quality reaching level-III standard from 2010 to 2017

由图 3 可知,2010—2012 年官厅水库水质达标区域面积持续增大,库区整体水质状况好转,2012

年水质达标区域面积达到 2010—2017 年间的最大值,占水库总面积的 86.3%。水质变好的原因为自 2009 年北京市政府与河北省合作实施京冀生态水源保护林建设,增强沿岸涵养水源功能并对上游来水起到净化作用;2010 年,随着永定河绿色生态发展带建设正式实施,官厅水库人工湿地的修建使库区水质在短时间内大幅上升。2013—2014 年库区水质达标区域面积整体呈减小趋势,至 2015 年出现小幅度上升,随后 2016 年面积缩小至最小值 8.61 km²。2013—2016 年官厅水库水环境质量恶化情况严重,这是由于永定河生态廊道建设中存在大量人为修复工程,在短时间内成效显著,但上游来水只减不增,污染物排放量居高不下,导致修复效果逐年减弱。2016 年后官厅水库水质迅速好转,2017 年达标区域面积增大至 67.95 km²,占水域总面积的 66.5%。其原因是 2017 年国家发改委、水利部、国家林业和草原局联合印发《永定河综合治理与生态修复总体方案》,同年开展了 15 项修复工程;另外由于降水量增大,加之京津冀协同一体化发展,上游加大水环境保护力度,官厅水库入库水量加大。北京拥有南水水源后,官厅水库放水频次降低,2017 年蓄水量接近 4.8 亿 m³,水面覆盖面积约 80 km²,达 2010—2017 年间最高水位,库区水质达标区域面积回升。但从总体来看,2010—2017 年官厅水库水质变化波动较大,2017 年仍存在 33.5% 不达标水质区域。

2.4.2 断面水质年际变化

采用 Spearman 秩相关系数法对官厅水库 7 个断面 2010—2017 年的主成分综合得分值进行分析,结果见表 4。不同断面主成分综合得分和水质等级随时间变化趋势如图 4 所示。

表 4 各断面主成分综合得分值秩相关系数与水质变化趋势

Table 4 Spearman rank correlation coefficients for comprehensive scores of principal components and water quality variation trend for different sections		
监测断面	秩相关系数	水质变化趋势
八号桥	-0.286	下降
西湖橡胶坝	-0.119	下降
河口	-0.357	下降
妣 1018 + 1 表	0.262	上升
妣大桥表	0.214	上升
永 10008 东表	0.071	上升
坝后	0.060	上升

从表 4 的秩相关系数和图 4 的折线变化趋势可以看出,总体上八号桥、西湖橡胶坝、河口断面水质较 2010 年有下降趋势,库区靠近上游河流入库断面的永 10008 东表、妣大桥表、妣 1018 + 1 表、坝后断

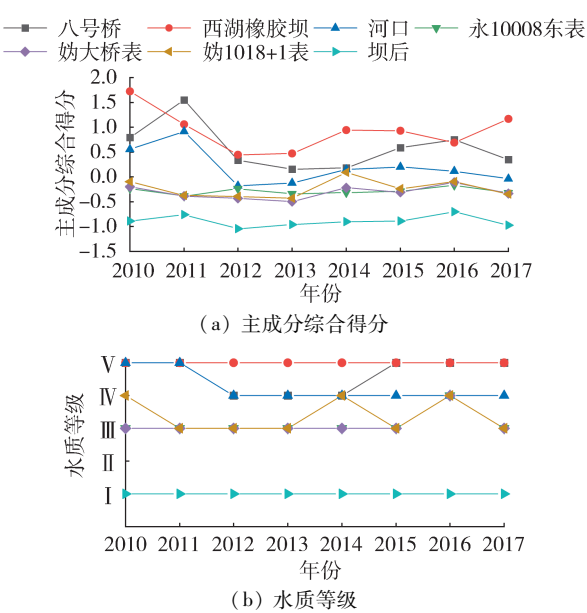


图 4 各断面主成分综合得分与水质等级年际变化
Fig. 4 Interannual variations of comprehensive scores of principal components and water quality grade for different sections

面水质较 2010 年有上升趋势。根据单尾检验, $t = 0.05$ 时,临界值为 0.738,各断面秩相关系数均小于临界值,表征水质变化的主成分综合得分值与时间序列无显著相关性,说明水环境变化除受自然影响外,更易受外界人为工程措施与地方政策的影响,水生态系统自我调节能力有限。

由图 4 可知,八号桥断面水质维持在Ⅳ、Ⅴ类,根据其主成分综合得分值可看出,2011 年得分值为近 8 年最大值 1.55,水质状况最差;自 2011 年后水质好转,由Ⅴ类水转为Ⅳ类水;八号桥断面主成分得分值在 2015—2016 年经历了小幅度上升后下降,水质维持在Ⅴ类水。河口断面水质主成分得分值变化趋势与八号桥相似,自 2011 年主成分得分值达到最高值 0.92 后开始下降,水质由Ⅴ类水转为Ⅳ类水,这与 2010 年后实施的生态廊道修复工程有关,在八号桥入库口修建人工湿地在短期内使八号桥与河口附近水质提升,后续因为降水量与入库水量的波动导致这 2 个断面水质波动。西湖橡胶坝断面水质一直处于Ⅴ类水标准限值,自 2010 年主成分得分值达到最大值 1.70 后,其得分值在 0.45 ~ 1.17 间波动,总体呈下降趋势,这与妣水河入库口未实施相应修复工程有关。库区内永 10008 东表、妣大桥表、妣 1018 + 1 表断面水质综合得分值波动较小,妣 1018 + 1 表断面水质受妣水河入库水质影响较大,水质在Ⅲ、Ⅳ类水标准限值范围内波动;永 10008 东表与妣大桥表断面靠近库区中心,水质基本维持在Ⅲ类水,说明库区内中心水质状况较靠近上游入库断

面区域更为稳定;出库断面坝后的主成分得分值在2012年达到最小值-1.12,于2016年达到最大值-0.63,总体维持在Ⅰ类水。

3 结 论

a. 主成分分析表明,影响官厅水库水质的关键因子的贡献程度从大到小依次为总氮、总磷、氨氮、pH值、高锰酸盐指数、溶解氧。官厅水库水环境中以氮磷为主的有机污染与可还原污染并存,水体富营养化是当前水库面临的最主要的水质问题。

b. 官厅水库水质时空差异较大,空间上总体呈现出上游河流入库区域附近水质劣于下游出库区域水质;上游来水成为库区污染物主要来源,污染物在入库湿地区域大量沉积,导致周边水质下降。时间上的特点为汛期水质优于非汛期水质,说明水量增大有利于污染物稀释。从年际变化特征来看,各断面水质呈现出不同规律,入库区域断面水质随时间变化波动较大,总体呈轻微好转趋势;库区中心至出库区域断面水质随时间变化相对稳定。2010—2017年总体水质情况为先降后升,但至2017年仍存在33.5%水质不达标区域。

c. 根据官厅水库近年来水质评价结果与时空变化特征,建议实施分区管理。上游地区可优先对农业化肥施用采取管控措施,削减入库氮磷含量,同时开展节水措施,提高水资源利用率,增大入库水量,有效稀释库区污染物;上游河道周边实施湿地恢复工程,增强水源涵养功能,截留污染物。入库河流实现水质、水量两方面提升,将有利于恢复官厅水库及其下游河道生态服务功能,缓解北京市工农业发展 with 城市居民用水压力。

参考文献:

[1] GU X J, XUE D J, CAI H X, et al. Feature analysis and comparison on ecological risk of eutrophication in lakes and reservoir in Taoge River [J]. Environmental Monitoring & Forewarning, 2011, 3(3): 13-17.

[2] 刘翔. 湖库水体富营养化的评价与模拟研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2015.

[3] 武瞰, 郭飞, 杨明儒. 2002—2017年霞窝水库及入库河流水质相关性分析和影响因素[J]. 环境工程, 2019, 37(10): 206-210. (WU Min, GUO Fei, YANG Mingru. Water quality correlation analysis and influencing factors in the Shenwo Reservoir and its joint rivers during 2002-2017[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(10): 206-210. (in Chinese))

[4] BORDALO A A, TEIXEIRA R, WIEBE W J. A water quality index applied to an international shared river

basin: the case of the Douro Rive [J]. Environmental Management, 2006, 38(6): 910-920.

- [5] 彭福利, 张永勇, 李茜, 等. 官厅水库入库断面水质多指标评价与演变特征分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(1): 65-74. (PENG Fuli, ZHANG Yongyong, LI Qian, et al. Multi-index evaluation and evolution characteristic analysis of water quality at inlet section of Guanting Reservoir[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(1): 65-74. (in Chinese))
- [6] 高星琪, 董志, 李令军, 等. 官厅水库上游河流水质空间变异多元统计分析[J]. 湿地科学, 2019, 17(1): 106-111. (GAO Xingqi, DONG Zhi, LI Lingjun, et al. Multivariate statistical analysis on spatial variability of water quality in Guanting Reservoir upstream rivers[J]. Wetland Science, 2019, 17(1): 106-111. (in Chinese))
- [7] 杨大杰, 谢建枝. 模糊综合评价法在地表水源地水质评价中的应用: 以北京市官厅水库水质评价为例[J]. 人民长江, 2014, 45(增刊2): 81-83. (YANG Dajie, XIE Jianzhi. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in water quality evaluation of surface water sources: a case study of Guanting Reservoir in Beijing [J]. Yangtze River, 2014, 45(Sup2): 81-83. (in Chinese))
- [8] 杨大杰, 徐磊. 官厅水库水质现状分析与趋势预测[J]. 北京水务, 2009(2): 30-32. (YANG Dajie, XU Lei. Analysis and trend prediction of water quality in Guanting Reservoir [J]. Beijing Water, 2009(2): 30-32. (in Chinese))
- [9] 杨荣金, 张一, 李秀红, 等. 创新永定河流域生态补偿机制, 助力京津冀协同发展[J]. 生态经济, 2019, 35(12): 134-138. (YANG Rongjin, ZHANG Yi, LI Xiuhong, et al. Innovation of ecological compensation mechanism in Yongding River Basin to promote the coordinated development of Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Ecological Economy, 2019, 35(12): 134-138. (in Chinese))
- [10] 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 Mingsheng, ZHANG Jianhui, LIANG Nian, et al. Comparisons of some common methods for water environment assessment[J]. Progress in Geography, 2012, 31(5): 617-624. (in Chinese))
- [11] 周及, 关卫省, 付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 79-84. (ZHOU Ji, GUAN Weisheng, FU Lintao. Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 79-84. (in Chinese))
- [12] 王广博, 徐翠兰, 黄蕊, 等. 江苏沿海地区围垦动态与土地利用变化驱动力研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 163-170. (WANG Guangbo, XU

- Cuilan, HUANG Rui, et al. Research on driving forces of reclamation dynamics and land use change in coastal areas of Jiangsu Province [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (2): 163-170. (in Chinese)
- [13] 孙惠玲, 廖泽波, 段立曾, 等. 基于空间插值算法的阳宗海夏季水质参数空间分布规律研究[J]. 长江科学院报, 2017, 34 (3): 30-34. (SUN Huiling, LIAO Zebo, DUAN Lizeng, et al. Spatial distribution regularity of water quality parameters of Yangzong Lake in summer based on spatial interpolation algorithm [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34 (3): 30-34. (in Chinese)
- [14] 郑兰香. 宁夏典型抽水型水库水质评价及模拟预测研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [15] 杨盼, 卢路, 王继保, 等. 基于主成分分析的 Spearman 秩相关系数法在长江干流水质分析中的应用[J]. 环境工程, 2019, 37 (8): 76-80. (YANG Pan, LU Lu, WANG Jibao, et al. Analysis of water quality trend in the main stream of the Yangtze River based on principal component analysis [J]. Environmental Engineering, 2019, 37 (8): 76-80. (in Chinese)
- [16] 王艺霖, 苏程佳, 陈晓宏, 等. 磨刀门水道枯水期咸潮变化趋势及成因[J]. 水资源保护, 2019, 35 (2): 37-43 (WANG Yilin, SU Chengjia, CHEN Xiaohong, et al. Change trend and cause of salt tide in Modaomen Channel during dry seasons [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (2): 37-43. (in Chinese)
- [17] 王文鹏, 陈元芳, 刘波. 长江上游时空相关气候要素的区域趋势诊断[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45 (1): 14-21. (WANG Wenpeng, CHEN Yuanfang, LIU Bo. Regional climatic trend analysis in upper Yangtze River with consideration of both temporal and spatial correlation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (1): 14-21. (in Chinese)
- [18] 汪凌佳. 杭州市近十五年主要地表水水环境质量状况研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [19] 傅德印. 因子分析统计检验体系的探讨[J]. 统计研究, 2007 (6): 86-90. (FU Deyin. Exploring the statistical test system of factor analysis [J]. Statistical Research, 2007 (6): 86-90. (in Chinese)
- [20] 张文彤. SPSS11 统计分析教程(高级篇) [M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002: 190-193.
- [21] SHRESTHA S, KAZAMA F, NAKAMURA T. Use of principal component analysis, factor analysis and discriminant analysis to evaluate spatial and temporal variations in water quality of the Mekong River [J]. Journal of Hydroinformatics, 2008, 10 (1): 43-56.
- [22] 刘修英, 黄功学, 郑志宏, 等. 贾鲁河郑州段水质评价和污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36 (4): 40-46 (LIU Xiuying, HUANG Gongxue, ZHENG Zhihong, et al. Water quality evaluation and pollution source apportionment to Zhengzhou section of Jialu River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4): 40-46. (in Chinese)
- [23] 廖宁, 李洪, 李嘉, 等. 基于主成分分析的西南山区典型河道型水库富营养化评价讨论[J]. 中国农村水利水电, 2019 (11): 104-109. (LIAO Ning, LI Hong, LI Jia, et al. Eutrophication evaluation of typical river reservoirs in southwest mountainous areas based on principal component analysis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (11): 104-109. (in Chinese)
- [24] 李靖洁. 官厅水库流域水污染控制对策研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2011.
- [25] 周密, 陈龙赞, 马振. 基于变权重的水质综合评价体系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47 (1): 20-25. (ZHOU Mi, CHEN Longzan, MA Zhen. Study on the comprehensive evaluating system of water quality based on variable weight [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (1): 20-25. (in Chinese)
- (收稿日期: 2020-07-22 编辑: 施 业)

(上接第 134 页)

- [22] HAN Longxi, JI Hong, HUO Fei, et al. A new modeling approach to non-point source pollution load spatial distribution for plain river network in China [J]. Food Journal of Agriculture & Environment, 2013, 11 (1): 928-932.
- [23] 林高松, 李适宇, 江峰. 考虑污染源强随机变化的感潮河流环境容量优化[J]. 水科学进展, 2006, 17 (3): 317-322. (LIN Gaosong, LI Shiyu, JIANG Feng. Optimization of waste load allocation with stochastic pollutant discharge in a tidal river basin [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (3): 317-322. (in Chinese)
- [24] 张剑, 付意成, 韩会玲. 浑太河流域动态水环境容量设计水文条件研究[J]. 中国农村水利水电, 2017, (3): 75-80. (ZHANG Jian, FU Yicheng, HAN Huiling. Hydrological condition design for the dynamic calculation of water environmental capacity (WEC) in Huntai River watershed [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (3): 75-80. (in Chinese)
- [25] 韩梓流, 逢勇. 基于京杭运河五牧断面水质达标的水环境容量计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27 (4): 81-87. (HAN Xinliu, PANG Yong. Water environment capacity calculation based on water quality standards at Wumu section in the Grand Canal [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27 (4): 81-87. (in Chinese)
- (收稿日期: 2021-04-21 编辑: 施 业)