

陈慧,黎小红,谢建枝,等.基于WQI和多元统计分析的官厅水库水质评价[J].环境科学与技术,2025,48(6):185-197. Chen Hui, Li Xiaohong, Xie Jianzhi, et al. Water quality evaluation of Guanting Reservoir based on WQI and multivariate statistical analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(6): 185-197.

基于WQI和多元统计分析的官厅水库水质评价

陈慧^{1,3}, 黎小红², 谢建枝², 阚海明¹,
徐恒康¹, 张微微^{1*}

(1.北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所,北京 100097;
2.北京市官厅水库管理处,河北 张家口 075441;
3.中国地质大学(北京)信息工程学院,北京 100083)

摘要:官厅水库自2007年恢复为北京备用水源地之后,进一步加强了全流域的生态环境治理与保护,库区水质在时间和空间上发生了变化。为深入评估官厅水库近10余年水质特征和明晰库区水体关键污染源,文章选取了水库8个监测断面2011-2020年9项水质指标,采用综合水质标识指数法(WQI)和多元统计分析探究了官厅水库水质的时空变化及主要污染源。结果表明:(1)2011-2020年官厅水库DO、BOD₅、COD、高锰酸盐指数和NH₃-N稳定在地表水Ⅲ类标准以内,TN和TP超出了地表水Ⅲ类标准;DO、BOD₅、NO₃⁻-N和TN指标季节差异显著,旱季显著高于雨季;COD、高锰酸盐指数和TP雨季高于旱季,但差异不显著。(2)雨季水质总体优于旱季,基本处于中等和良好水平,尤其自2016年以后水质整体呈现出逐年向好的良好态势,这归因于上游对水库的集中输水和引黄生态补水显著改善了入库口断面水质状况。(3)主成分分析表明,水库上游农业活动和工业生活污水排放等产生的氮磷集聚是官厅水库水质的主要污染源,有机污染物和自然过程也对库区水质产生了重要影响。(4)官厅水库水质在旱季和雨季均呈现空间异质性。旱季污染最严重的断面是2个入库断面和距离上游河岸带较近的1个库区断面,雨季污染最严重的断面为2个入库断面,均以氮磷污染为主;其余库区断面污染风险较低,以有机污染为主;出库断面水质相对清洁,但需关注潜在的氮污染。研究结果可为官厅水库水环境时空管理政策顶层设计以及污染管控措施制定提供重要的科学参考。

关键词:官厅水库; 水质评价; 旱季; 雨季; 综合水质标识指数; 多元统计分析

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.2318.24.338 **文章编号:**1003-6504(2025)06-0185-13

Water Quality Evaluation of Guanting Reservoir Based on WQI and Multivariate Statistical Analysis

CHEN Hui^{1,3}, LI Xiaohong², XIE Jianzhi², KAN Haiming¹,
XU Hengkang¹, ZHANG Weiwei^{1*}

(1. Institute of Grassland, Flowers and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;
2. Beijing Municipal Administration Division of Guanting Reservoir, Zhangjiakou 075441, China;
3. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Since the restoration of Guanting Reservoir as a backup water source for Beijing in 2007, the ecological environment governance and protection of the entire basin have been further strengthened, and the spatio-temporal characteristics of water quality in Guanting Reservoir has changed. Based on water quality indicators from eight monitoring sites over the period 2011-2020, the spatial and temporal characteristics and main pollution sources of water quality were evaluated using water quality index (WQI) and multivariate statistical analysis. The results indicated that from 2011 to 2020, DO, BOD₅, COD, permanganate index, and NH₃-N remained stable within the Class III standard for surface water, while TN and TP exceeded the Class III standard for surface water. There were significant seasonal differences in DO, BOD₅, NO₃⁻-N, and TN indicators, with the dry season significantly higher than the wet season. The concentrations of COD, permanganate index and TP were higher in the wet season than that in the dry season, but the differences were not significant. The water quality during the wet season were generally better than that during the dry season, and were basically at a moderate and good level. Especially,

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://tjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2024-12-31;修回2025-03-07

基金项目:北京市自然科学基金项目(8232028);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJXC20230406, KJXC20230305)

作者简介:陈慧(2000-),女,硕士研究生,研究方向为环境要素时空变化,(电子信箱)2004220014@email.cugb.edu.cn;*通讯作者,(电子信箱)zhangwei492@163.com.

the overall water quality has shown a good trend of improvement since 2016, which were attributed to the water supply from the upstream and the ecological replenishment of the Yellow River. Principal component analysis showed that the accumulation of nitrogen and phosphorus generated by agricultural activities and industrial domestic sewage discharge from upstream were the main source of pollution. Organic pollutants and natural processes also had significant impacts on the water quality of the reservoir. Spatial heterogeneity in water quality was observed in both dry and wet seasons. The two inflow sections in both seasons and the one reservoir section located closer to the upstream riparian zone in dry season experienced the most severe pollution, both of which were mainly affected by nitrogen and phosphorus pollution. Other reservoir sections exhibited lower pollution risks in both seasons, mainly due to organic pollutants. The outflow section had relatively clean water quality but requires attention to potential nitrogen pollution. These findings provide important scientific references for the top-level design of spatio-temporal water environment management policies and the formulation of pollution control measures in the Guanting Reservoir.

Key words: Guanting Reservoir; water quality assessment; dry season; wet season; comprehensive water quality index; multivariate statistical analysis

城市水库在雨水储存、地下水补给、为周边地区提供生活和生产用水以及维护生态平衡等方面发挥着至关重要的作用。然而,随着气候变化和城市化快速发展,城市水库逐渐成为污染源的汇,承载着上游流域污染物、营养物、有机物和悬浮固体的高负荷排放和聚集^[1,2]。上游流域的点源和非点源污染加剧了水库水质的变化。此外,地表径流和降水的季节性变化也会影响库区污染物的浓度,各类污染源对水库系统的实际贡献随季节而变化^[3-5]。因此,评估城市水库水质时空变化对于明晰库区水体关键污染源和制定相应的调控策略至关重要。

长期的水质监测产生了大量多样点、多指标、高频率且复杂的水质数据,包括物理、化学和微生物等各种参数,如何分析和解释水质信号的潜在特征存在一定的挑战。常用的水质评价方法主要包括单因子评价法、灰色系统评价法、模糊数学评价法、人工神经网络评价法、综合水质指数法(WQI)以及多元统计分析等^[6-8]。与传统的水质评价方法相比,WQI方法将多个参数组合在一起,有效地将其转化为一个反映水质状况的数值,从而提供了有关整体水质的综合信息^[9,10]。用以简化数据结构,提取潜在信息的多元统计方法也被大量应用在地表水质评价研究中,国内外研究利用描述性统计分析、方差分析(ANOVA)、相关分析(CA)、主成分分析(PCA)、层次聚类分析(HCA)以及Mann-Kendall检验等分析方法提取地表水质在季节或年际上的变化以及空间上的分布特征^[11,12]。研究表明,多元统计方法不仅能对大量复杂的监测数据集进行解释,而且有助于识别影响水环境质量的 key 因素^[13-15]。然而,多元统计方法应用于多变量水质评估,在单独使用时存在一些局限性^[16,17]。因此,需要结合多种不同的多元统计方法,以尽量减少局限性并保留其解释水质时空变异的优势^[18,19]。

官厅水库是新中国成立后修建的第一座大型水库,是阻挡永定河洪水威胁北京的重要屏障,目前为周边城镇提供家庭、农业和工业用水。官厅水库曾是北京重要的饮用水源地,因上游“三废”污染于1997年退出北京市饮用水供应系统^[20,21]。2000年以来,通过生态治理和上游集中输水等措施,于2007年逐渐恢复其备用水源功能^[22,23]。近10余年,水库进一步加强全流域的生态环境治理与保护,库区水质在时间和空间上势必发生着变化,其时空变化特征及污染源状况如何亟待分析,以便为今后库区水环境质量提升和生态服务功能改善提供参考。

官厅水库近10余年水质变化的研究相对较少,主要以多个监测断面简单水质评价和年际变化趋势的简单分析^[24,25]或者单个入库监测断面多元统计的深入分析^[21,26]为主。尽管这些研究对认识水库水质变化提供了帮助,但是对于整体系统了解官厅水库水质时空变化及污染源状况还存在一定的局限性,有必要对水库监测的多断面、多指标、高频率且复杂的水质数据进行深入挖掘。目前整合水质综合评价和多元统计分析对官厅水库多断面多指标水质时空变化的系统研究还鲜有报道。本研究选取官厅水库生态修复初期到显著改善时期(2011-2020年)8个代表性断面的9项水质指标数据,采用WQI综合水质评价以及ANOVA、CA、PCA和HCA等多元统计方法开展官厅水库水质时空变化特征及污染源分析,为官厅水库流域水环境时空管理政策顶层设计以及污染管控措施制定提供重要的科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

官厅水库(38°51.0′~41°14.2′N,112°8.3′~116°20.6′E)位于北京市延庆区和河北省张家口怀来县交界处,于

1954年筑坝而成,水库及其上游流域总面积43 403 km²,总容量41.6×10⁸ m³。该区域属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年降水季节分配不均匀,全年降水的80%集中在夏季6-9月^[27]。根据气候特征,将1-5月和10-12月设为旱季,6-9月设为雨季。研究区域见图1。

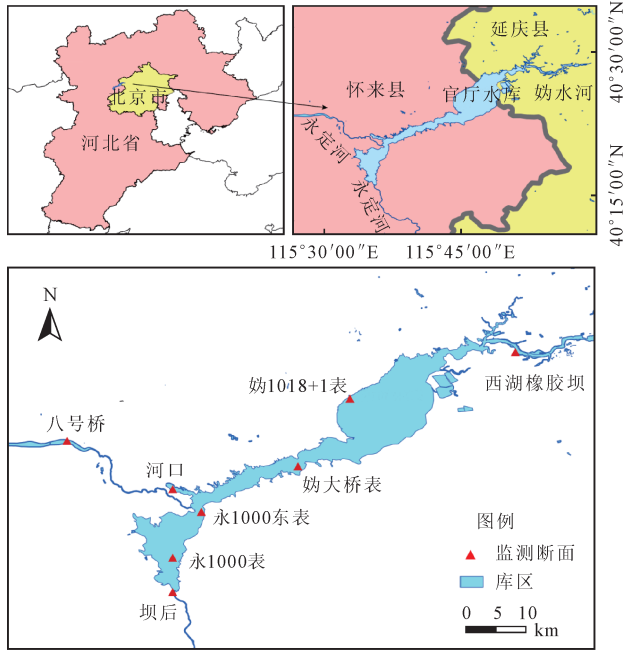


图1 官厅水库及监测断面

Fig.1 Guanting Reservoir and the monitoring sections

1.2 数据来源

为全面分析官厅水库水质变化特征,选取了官厅水库八号桥(BHQ)、河口(HK)、永1000表(Y1000)、永1008东表(Y1008)、坝后(BH)、妯大桥表(GDQ)、妯1018+1表(G1018+1)和西湖橡胶坝(XJB)8个断面2011-2020年水质指标月均监测数据。其中,入库断面为BHQ和XJB,库区断面有HK、Y1000、Y1008、GDQ和G1018+1,出库断面为BH。水质指标包括pH、溶解氧(DO)、五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧

量(COD)、高锰酸盐指数、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、总氮(TN)和总磷(TP)等9项,数据来源于北京市官厅水库管理处。水质监测过程中,样点的布设、样品的采集保存与运输、实验室分析、数据的整理与处理以及监测质量保证与质量控制均按照中华人民共和国生态环境部发布的《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91-2002)有关要求执行。此外,为保证研究结果的可靠性,在进行水质评价之前,对收集的数据进行预处理,包括数据频次一致性的检查、缺失值的检查与填补以及异常值的判断和处理等。通过检查,水质数据月监测频次一致且无缺失值,少数异常值的判断和处理按照中国国家标准化管理委员会发布的《数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理》(GB/T 4883-2008)执行。

1.3 基于WQI的水质评价方法

本研究采用Pesce等^[28]改进的WQI计算方法,具体公式如下:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \tag{1}$$

式中,*n*为纳入研究的水质参数总数,*C_i*为参数*i*的归一化值,*P_i*为参数*i*的权值,*P_i*的取值范围为1~4,这些数值在已有研究中得到验证^[29-31]。对于每个站点,确定了1个年度和2个季节性WQI值。为计算给定站点雨季和旱季的WQI,分别利用6-9月和除6-9月的数据计算水质参数平均值。将所有季节的值取平均值以计算年度WQI。WQI是一个从1到100的无量纲数字,在得分范围内,90~100为优秀,70~90为良好,50~70为中等,25~50为差,以此类推。数值越高,水质越好。本研究用于评价水质的参数如表1所示,包含了根据以往研究得出的相应水质指标的相对权重和参数的归一化因子^[28,32]。

表1 WQI计算中使用的水质指标归一化值(C_i)和相对权重(P_i)

Table 1 Normalised values (C_i) and relative weights (P_i) of water quality parameters used in WQI

指标	P _i	C _i										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
DO	4	≥7.5	>7	>6.5	>6	>5	>4	>3.5	>3	>2	≥1	<1
BOD ₅	3	<0.5	<2	<3	<4	<5	<6	<8	<10	<12	≤15	>15
COD	3	<5.0	<10	<20	<30	<40	<50	<60	<80	<100	≤150	>150
高锰酸盐指数	3	<1	<2	<3	<4	<5	<8	<10	<12	<14	≤15	>15
NH ₃ -N	3	<0.01	<0.05	<0.1	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5	<0.75	<1	≤1.25	>1.25
NO ₃ ⁻ -N	2	<0.5	<2	<4	<6	<8	<10	<15	<20	<50	≤100	>100
TN	2	<0.1	<0.2	<0.35	<0.5	<0.75	<1	<1.25	<1.5	<1.75	≤2	>2
TP	1	<0.01	<0.02	<0.05	<0.1	<0.15	<0.2	<0.25	<0.3	<0.35	≤0.4	>0.4

1.4 多元统计分析

采用ANOVA确定水质变量是否存在显著的季节差异。采用Pearson相关分析评价水质变量之间的

相关关系^[33]。利用PCA识别可能影响水库水质的因素^[19]。为检验水质数据的适用性,PCA分析之前进行Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和Bartlett球形度检

验。为使每个主成分的意义更加明确,采用 Varimax 最大方差法对因子进行旋转。采用 HCA 对监测断面进行空间聚类,选取 Ward 的欧几里得距离方法进行聚类^[34]。

2 结果与分析

2.1 水质指标基本统计

2011–2020 年旱季和雨季水质指标基本统计结果见表 2。官厅水库水体在旱季和雨季的 pH 均呈弱碱性。DO 旱季平均值为(10.38±1.52) mg/L,高于雨季平均值(8.89±1.92) mg/L,变异系数小,大多优于地表水环境质量 I 类标准。旱季和雨季的 BOD₅ 平均值分别为(2.29±0.99) mg/L 和(1.69±0.97) mg/L,旱季略高于雨季,尽管变异系数较大,但大多仍符合地表水环境质量 I 类标准。BOD₅ 水平均较低,DO 浓度较高,可见水库自净能力强且适合鱼类和其他水生生物生存。旱季和雨季的 COD 平均值分别为

(17.77±4.82) mg/L 和(18.07±5.25) mg/L,高锰酸盐指数平均值分别为(4.66±1.39) mg/L 和(5.00±1.55) mg/L,雨季略高于旱季,变异系数较小,基本都达到 I 类到 III 类水标准。NH₃-N 在旱季和雨季的平均值分别为(0.39±0.35) mg/L 和(0.34±0.14) mg/L,大多数满足地表水环境质量 II 类和 III 类标准。雨季 NO₃⁻-N 平均值为(0.89±1.40) mg/L,旱季 NO₃⁻-N 均值较雨季增长了 112%,为(1.89±2.21) mg/L,但均满足我国集中式生活饮用水地表水源地标准。旱季 TN 均值为(2.69±2.37) mg/L,是雨季的 1.5 倍,最大值为 10.07 mg/L,远远超出了地表水环境质量 III 类水标准,多为 IV 类、V 类和劣 V 类。雨季 TP 平均值高于旱季,分别为(0.09±0.09) mg/L 和(0.12±0.18) mg/L,超出了地表水环境质量 IV 类水标准。水库水体中 NH₃-N、NO₃⁻-N、TN 和 TP 的变异系数最大,说明这些指标离散程度较高,分布不均匀,在表征官厅水库水质时空变异方面具有较高的敏感性。

表 2 2011–2020 年不同季节水质指标统计量
Table 2 Statistics of water quality parameters in different seasons from 2011 to 2020

指标	季节	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
pH	旱季	8.88	7.91	8.50	0.21	0.02
	雨季	8.90	7.60	8.51	0.29	0.03
DO/(mg·L ⁻¹)	旱季	14.97	7.08	10.38	1.52	0.15
	雨季	15.48	4.78	8.89	1.92	0.22
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	旱季	5.68	1.00	2.29	0.99	0.43
	雨季	4.98	0.53	1.69	0.97	0.57
COD/(mg·L ⁻¹)	旱季	29.87	8.13	17.77	4.82	0.27
	雨季	36.25	4.53	18.07	5.25	0.29
高锰酸盐指数/(mg·L ⁻¹)	旱季	6.96	0.88	4.66	1.39	0.30
	雨季	9.00	0.88	5.00	1.55	0.31
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	旱季	2.18	0.08	0.39	0.35	0.89
	雨季	0.95	0.10	0.34	0.14	0.42
NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	旱季	10.74	0.20	1.89	2.21	1.17
	雨季	7.11	0.01	0.89	1.40	1.57
TN/(mg·L ⁻¹)	旱季	10.07	0.90	2.69	2.37	0.88
	雨季	7.58	0.78	1.74	1.43	0.82
TP/(mg·L ⁻¹)	旱季	0.38	0.01	0.09	0.09	1.00
	雨季	0.93	0.01	0.12	0.18	1.51

2.2 水质指标的季节差异

图 2、图 3 和图 4 分别表示各指标旱季和雨季的总体差异以及在不同年份的季节差异和不同监测断面的季节差异。DO、BOD₅、NO₃⁻-N 和 TN 指标整体上季节差异显著,旱季显著高于雨季。除 2018 和 2019 年外,DO 在其他年份旱季和雨季差异显著,旱季高于雨季;同时 BHQ、XJB、HK、G1018+1 和 BH 断面 DO 的旱季显著高于雨季。BOD₅ 旱季和雨季有显著差异,尤其 2012–2015 年以及 2017–2018 年旱季显著高于雨季,库区 5 个断面旱季显著高于雨季。NO₃⁻-N 季节差异

显著,尤其 2011–2015 年和 2020 年旱季显著高于雨季,除 BH 外,其余断面旱季显著高于雨季。TN 旱季和雨季存在显著差异,主要在 2012、2014 和 2017 年以及断面 BHQ、XJB、HK、Y1000 和 Y1008,旱季显著高于雨季。pH、COD、高锰酸盐指数、NH₃-N 和 TP 整体上旱季和雨季不存在显著差异,但在个别年份和断面上旱季和雨季差异显著。其中 pH 在 2012 和 2017 年季节差异显著;COD 在 2014 和 2015 年旱季显著高于雨季,在 2016 和 2017 年雨季显著高于旱季;高锰酸盐指数在 2011 和 2013 年雨季显著高于旱季;TP 在 2019 年季

节差异显著;NH₃-N在2016年旱季显著高于雨季,在BH断面雨季显著高于旱季。旱季和雨季水质指标存在差异性主要与季节温度、降雨量以及人类活动外源输入等因素有关。官厅水库雨季集中在6-9月的夏季,这时期水库水体温度升高,氧气分子动能增加更易逸出水面,同时高温加速微生物代谢,耗氧量剧增,水库藻类过度繁殖消耗氧气,从而导致雨季DO和BOD₅的浓度低于旱季。雨季降雨量增加导致水库水量大幅上升,水体内氮浓度因稀释效应更强而显著降低;旱季降雨明显减少,农业灌溉等农业活动增加,使得总氮累积而浓度升高。雨季水量增加可以稀释污染物的浓度,但部分年份雨季地表径流可能伴随更多的工业或生活污水排放进入水库,输入的有机

污染物质远大于稀释能力,导致其COD和高锰酸盐指数浓度雨季显著高于旱季。

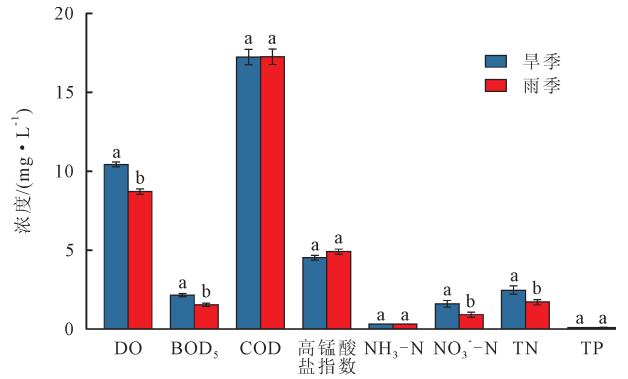
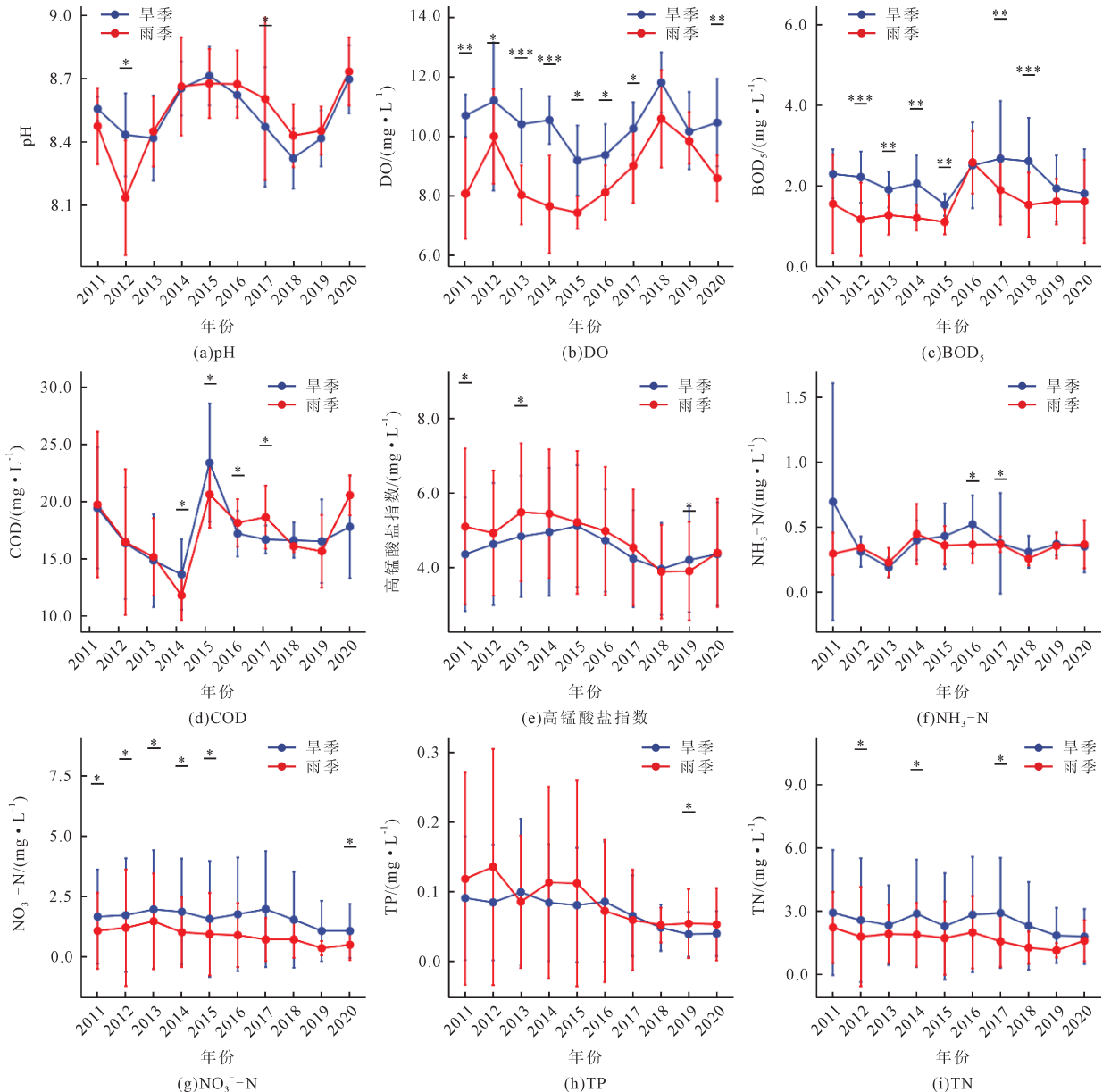
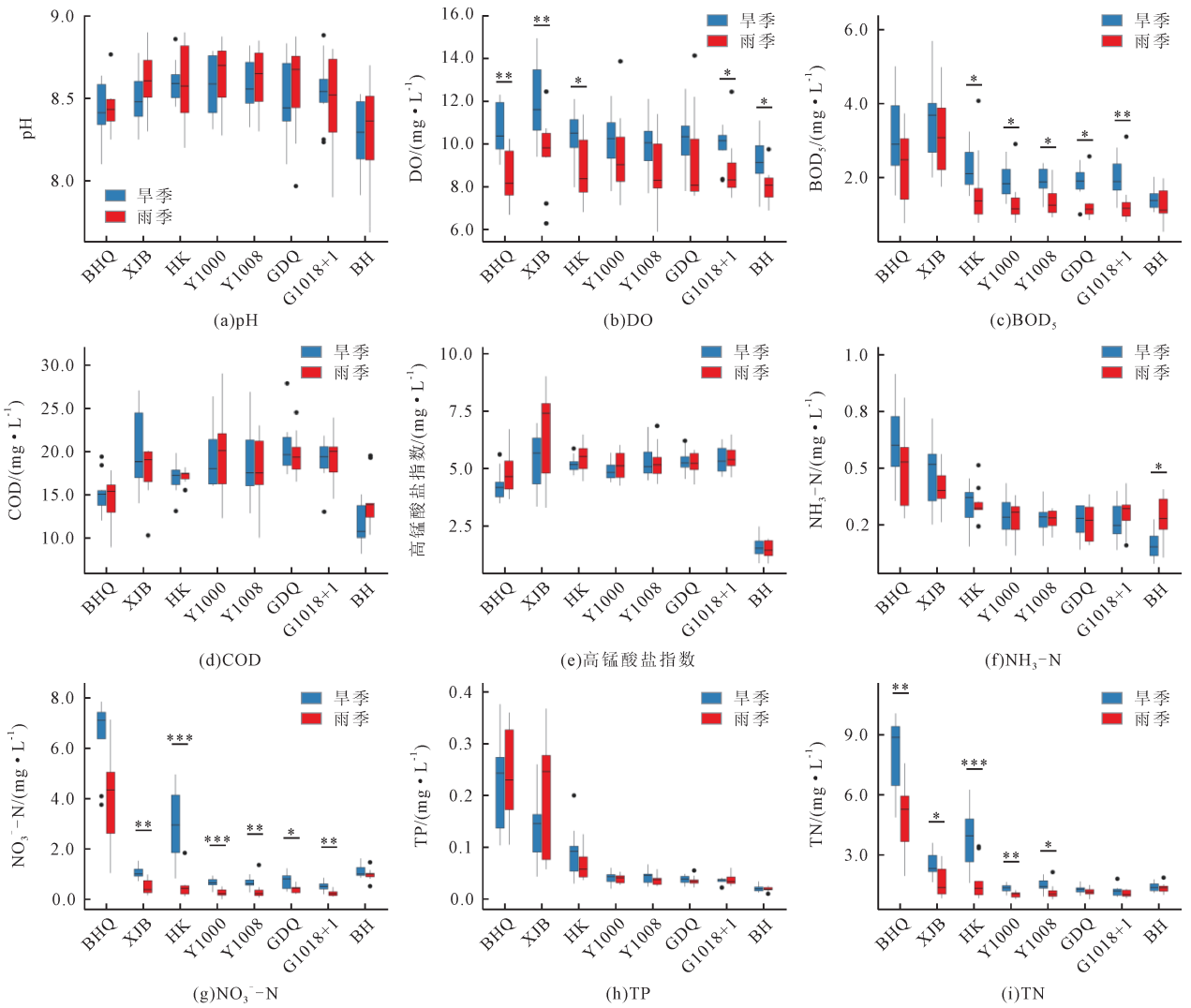


图2 水质指标旱季和雨季的差异
Fig.2 Differences between the dry and wet seasons for nine water quality parameters



注: *、**和***分别表示P<0.05、P<0.01和P<0.001的显著性水平。

图3 水质指标在不同年份的旱季和雨季差异
Fig.3 Differences between dry and wet seasons for nine water quality parameters in different years



注：*、**和***分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 的显著性水平。

图4 水质指标在不同监测断面的旱季和雨季差异

Fig.4 Differences between dry and wet seasons for nine water quality parameters at different monitoring sections

2.3 WQI水质时空评价

2.3.1 WQI水质时间变化

采用WQI对官厅水库8个断面2011-2020年水质的总体情况进行评价(图5)。总体来看,官厅水库旱季和雨季WQI平均值分别为70.92和72.12,

处于良好水平。除了2014、2016年以及断面BH外,其他年份和断面雨季WQI均值都高于旱季,可见官厅水库库区雨季水质比旱季略有改善,这主要是因为降水和径流会稀释和冲走部分污染物。

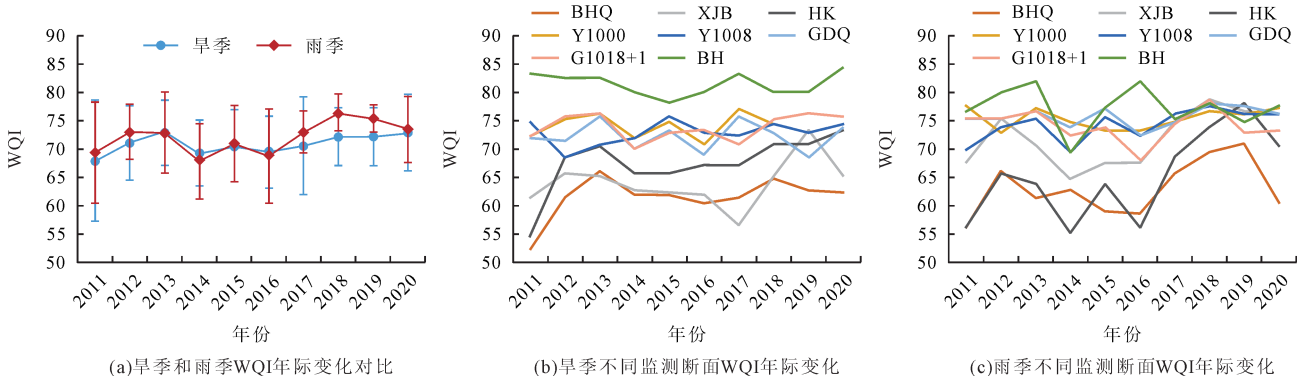


图5 旱季和雨季WQI年际变化

Fig.5 Inter-annual variation of WQI in dry and wet seasons

官厅水库WQI随时间变化趋势如图5所示。总体来看,2011-2016年旱季和雨季WQI均值各年份差异较小,中等和良好等级交替出现,并且旱季和雨季呈现出相同的时间变化趋势,具体表现为:从2011年中等水平逐步改善到2013年良好水平,继而下降到2014年最低中等水平,2015年恢复到良好水平,2016年水质又降低到中等水平。2017-2020年,旱季和雨季WQI均值都保持在良好水平且雨季水质远远优于旱季,但两者时间变化趋势有所差异,具体表现为:旱季WQI保持逐年提高的趋势,雨季WQI

在波动中上升,2018年达到最高值后开始下降。从站点年际变化来看,2016年以后入库断面BHQ和XJB的WQI均值呈现缓慢上升趋势,水质有明显的改善,其余断面的WQI均值呈平稳波动变化,水质改善趋势不明显。官厅水库水质的年际变化与上游集中输水和生态补水有一定的关系。从图6可以看出,官厅水库上游来水量对入库断面的影响呈线性关系,随着输水和生态补水量的增加,入库口水质得到显著改善,但补水对库区内水质和出库口水质的影响并不显著。

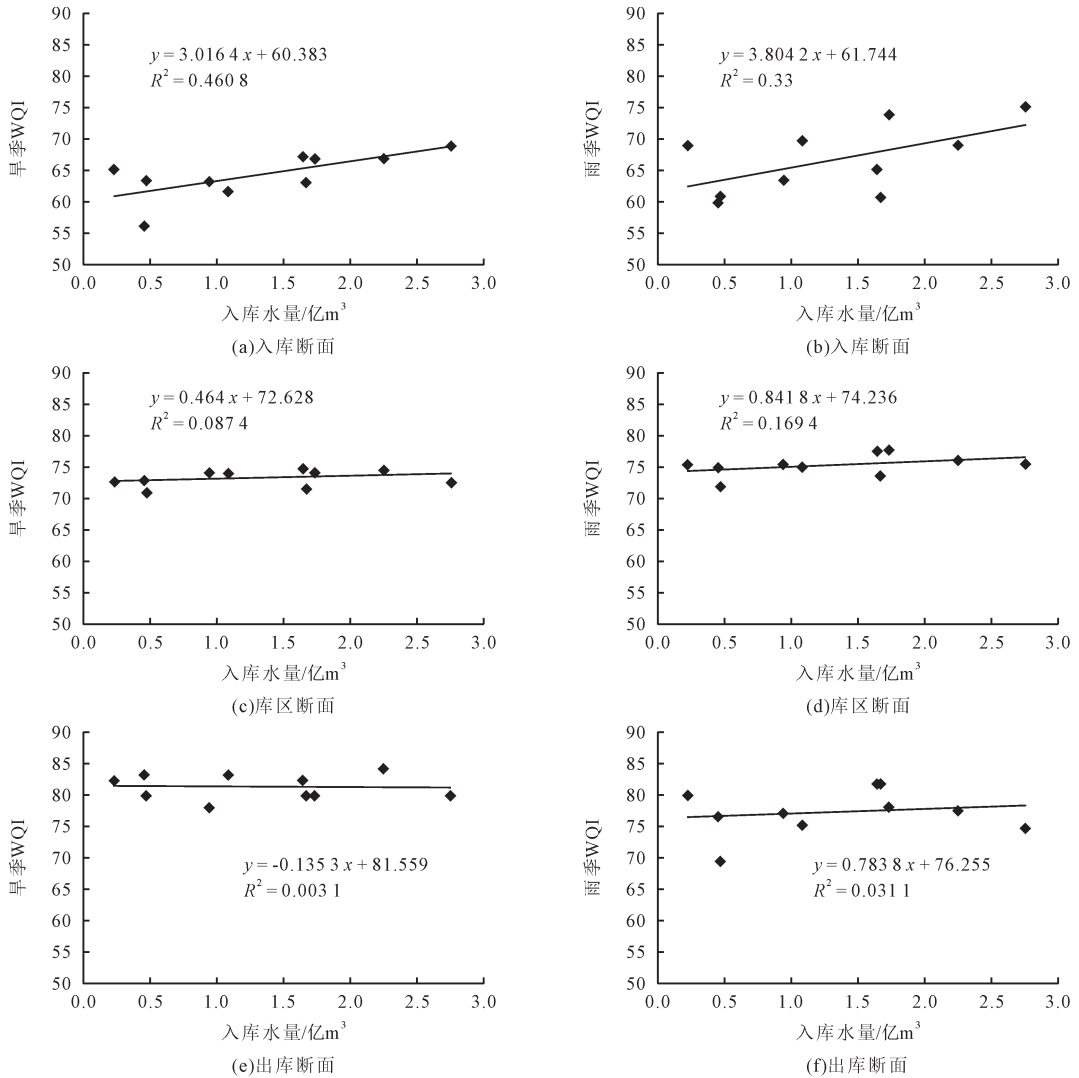


图6 旱季和雨季WQI与入库水量关系散点图
Fig.6 Scatter plot of the relationship between WQI and inflow in dry and wet seasons

2.3.2 WQI水质空间变化

WQI的空间变化情况见图7,WQI值的高低用不同颜色表示,可直观展示不同监测断面的水质差异。旱季各断面水质排序为BH(良好)>Y1000(良好)>G1018+1(良好)>Y1008(良好)>GDQ(良好)>HK(中等)>XJB(中等)>BHQ(中等);雨季各断面水质排序

为BH(良好)>GDQ(良好)>Y1000(良好)>Y1008(良好)>G1018+1(良好)>HK(良好)>XJB(中等)>BHQ(中等)。可以看出,不管是旱季还是雨季,官厅水库水质均表现出空间差异性。BH位于水库出口,在自然降雨和水体自身净化的作用下,水质最佳。受上游流域人类活动的影响,经河北怀来入库口BHQ水质

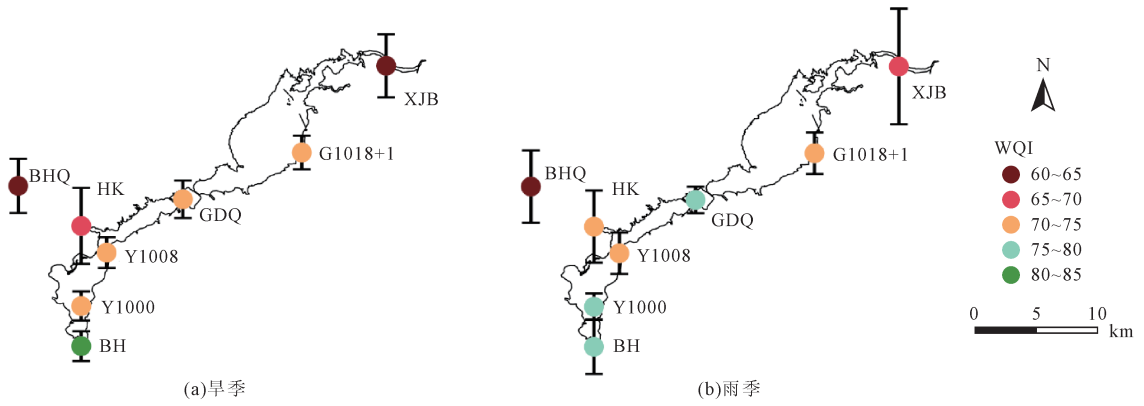


图7 旱季和雨季WQI空间分布
Fig.7 Spatial distribution of WQI in dry and wet seasons

状况最差,其次是延庆入库口 XJB 断面。尽管 HK 断面不属于上游来水的入库口,但因其距离上游河岸带较近,水质比库区断面略差,尤其在降雨少且污染物浓度聚集的旱季更为明显。其他 4 个库区断面,在旱季呈现出距离出库口越近水质越好的特点,而在雨季则未见明显的空间分布规律。

2.4 基于多元统计分析的水质污染特征

2.4.1 水质指标的相关性

利用 Pearson 相关分析检验了旱季和雨季不同水质指标之间的关系,结果见图 8。可以看出,水质指标间存在一般显著 ($P<0.05$)、非常显著 ($P<0.01$) 和极显著 ($P<0.001$) 的相关关系,同时旱季和雨季各指标间的相关关系有所不同。在旱季,pH、COD 和高锰酸盐指

数两两之间均呈现出极显著的正相关性。BOD₅ 与 NH₃-N、TN、TP 和 DO 存在极显著的正相关关系,与 NO₃⁻-N 有非常显著的正相关性。高锰酸盐指数与 TP 存在一般显著的正相关性,COD 与 NO₃⁻-N 存在一般显著的负相关性。TN、NO₃⁻-N、NH₃-N 和 TP 之间呈现出极显著的正相关关系。在雨季,pH 与 COD 和高锰酸盐指数呈现出非常显著的正相关性,与 DO 和 NO₃⁻-N 存在一般显著的负相关性。BOD₅ 与 NH₃-N 和 TP 呈现极显著的正相关关系,与 COD 和 TN 存在一般显著的正相关性。高锰酸盐指数与 COD 和 TP、与 BOD₅ 和 NH₃-N 分别存在极显著和非常显著的正相关关系。TN、NO₃⁻-N、NH₃-N 和 TP 之间呈现出极显著或非常显著的正相关关系。

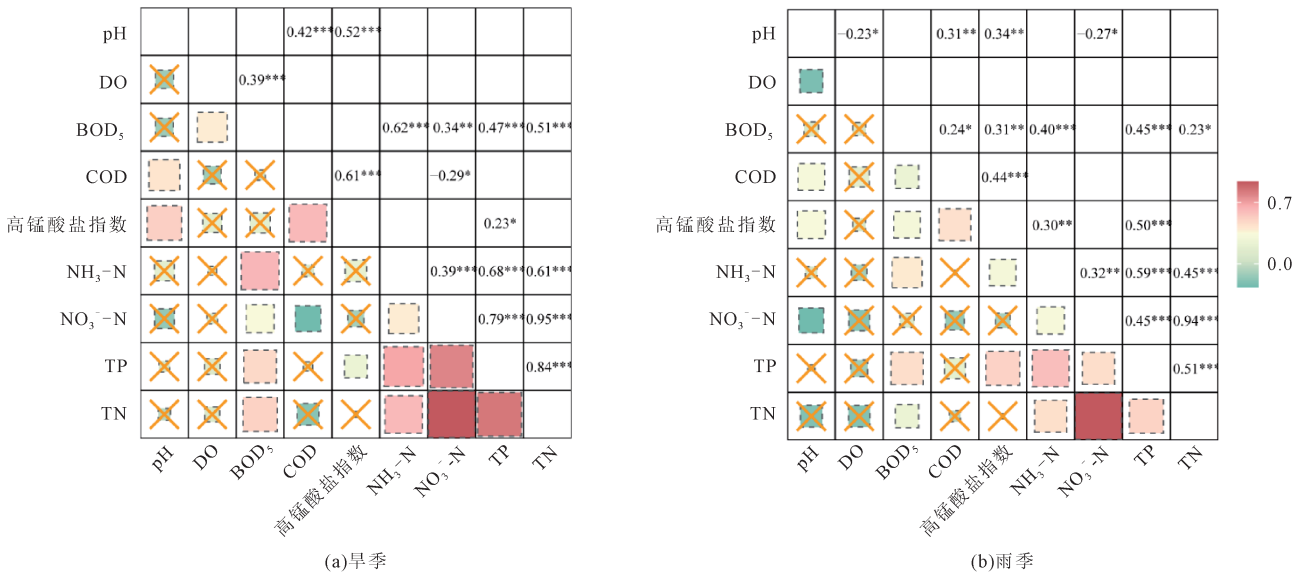


图8 旱季和雨季水质指标的相关性
Fig.8 Correlation of water quality parameters in dry and wet seasons

2.4.2 水质指标的PCA分析

旱季和雨季 KMO 和 Bartlett 球度检验结果(表 3) 分别为 0.559 和 0.566、586.394 和 357.874 ($P<0.001$),

表明 PCA 适用于降低该水质数据集的维度。旱季和雨季 PCA 分析结果见表 4,包括提取的各因子(PC) 特征值和方差、累计解释的总方差以及水质参数在

注: *、**和***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 的显著性水平。

表3 不同季节KMO与Bartlett球形度检验

Table 3 KMO and Bartlett's test of sphericity in different seasons

季节	KMO	Bartlett χ^2	Bartlett P
旱季	0.559	586.394	0.000
雨季	0.566	357.874	0.000

各PC上的因子载荷。旱季和雨季均提取3个特征值大于1的主成分,分别可以解释78.057%和70.133%的总方差。参考以往研究^[15],将因子载荷的绝对值分为强载荷(>0.700)和中等载荷(0.500~0.700)。

在旱季,PC1解释了总方差的39.793%,TN、TP、NO₃⁻-N、NH₃-N有强的正载荷,BOD₅有中等正载荷。结合图4可以看出,TN、TP、NO₃⁻-N、NH₃-N和BOD₅的浓度最高均值都出现在承接上游流域来水的入库断面BHQ和XJB以及距离河岸最近的断面HK。因此,PC1主要反映了水库上游人类活动带来的营养污染物对水质的影响,包括生活污水点源污染,以及农业化肥使用、畜禽和水产养殖等产生的非点源污染。PC2中pH、COD和高锰酸盐指数具有强的正载荷,解释了总方差的24.360%,代表了工业废水和生活污水

等点源排放。PC3解释了总方差的13.904%,其中DO为强正载荷,表明了水库水体的自净能力,可以用藻类的光化学合成过程来解释;BOD₅为中等正载荷,代表有机污染物的贡献。

雨季得到的PC1与旱季相似,TN、NO₃⁻-N有强的正载荷,TP和NH₃-N有中等的正载荷,解释了总方差的32.996%,说明氮和磷等营养物质也是官厅水库雨季时期的主要污染物。PC2解释了总方差的23.668%,对高锰酸盐指数具有强正载荷,BOD₅和COD具有中等正向载荷,反映了工业废水、生活污水和人为活动产生的有机污染物对水库水质的影响。PC3中DO和pH分别有强的正向载荷和中等的负向载荷,解释了总方差的13.469%。这里,DO与pH呈现反比关系是一个自然过程,因为雨季温度高,一方面会降低氧气在水中的溶解度,另一方面更强的藻类光化学合成过程和更多的二氧化碳消耗导致了水库pH的升高。因此,雨季PC3主要反映了自然过程对水库水质的影响。

表4 不同季节水质指标因子载荷和特征值

Table 4 Component loading and eigenvalues from PCA in different seasons

指标	旱季			雨季		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
pH	0.031	0.763	-0.263	-0.295	0.440	-0.691
DO	-0.021	-0.078	0.891	-0.252	0.235	0.845
BOD ₅	0.532	0.079	0.671	0.335	0.604	0.132
COD	-0.101	0.826	-0.019	-0.171	0.698	0.036
高锰酸盐指数	0.073	0.854	0.237	0.059	0.819	-0.123
NH ₃ -N	0.747	0.259	0.189	0.626	0.391	-0.114
NO ₃ ⁻ -N	0.887	-0.286	-0.043	0.894	-0.209	0.021
TN	0.959	-0.144	0.065	0.926	-0.055	-0.006
TP	0.922	0.127	0.094	0.691	0.530	-0.038
特征值	3.581	2.192	1.251	2.970	2.130	1.212
贡献率/%	39.793	24.360	13.904	32.996	23.668	13.469
累积贡献率/%	39.793	64.152	78.057	32.996	56.664	70.133

2.4.3 监测断面空间聚类

针对旱季和雨季,官厅水库监测点空间聚类分析分别得到3个具有统计学意义的组(图9),各类指标在3个组的基本统计与差异显著性分析见表5和表6,每组监测点具有相似的水质特征。在旱季,第一组(G I)包括官厅水库出库口断面BH;第二组(G II)包括库区断面Y1000、Y1008、GDQ和G1018+1;第三组(G III)包括官厅水库洋河与桑干河汇流处入库断面BHQ、上游妨水河入库断面XJB和距离上游河岸最近库区断面HK。雨季与旱季分组相似,除HK断面由G III组变为G II组外,其他断面分组情况均未发生转变。旱季所有的水质指标在组间差异显著(表5),雨季除了DO,其他指标也均在组间表现出显著差异(表6)。不管是

旱季和雨季,G I组DO、BOD₅、COD、高锰酸盐指数、NH₃-N和TP水质指标均值都低于G II和G III组;G I组NO₃⁻-N和TN均值高于G II组;BOD₅、NH₃-N、NO₃⁻-N、TN和TP均值在G III组中最高,尤其氮磷指标NH₃-N、TN和TP超出了地表V类水标准限值;COD和高锰酸盐指数在G II组的均值显著高于G III和G I组。因此,在旱季和雨季,G III组对应污染最严重的入库区域,且受上游生活污水、工业废水、农业化肥使用、畜禽和水产养殖等的影响最大,氮磷污染风险最高。G II组对应污染相对较轻的库区,这里有更充沛的水循环和水自净条件来稀释上游流域带来的污染,但有机物污染风险仍然存在。G I组对应相对清洁的出库区域,但需要注意周边总氮排放的影响。

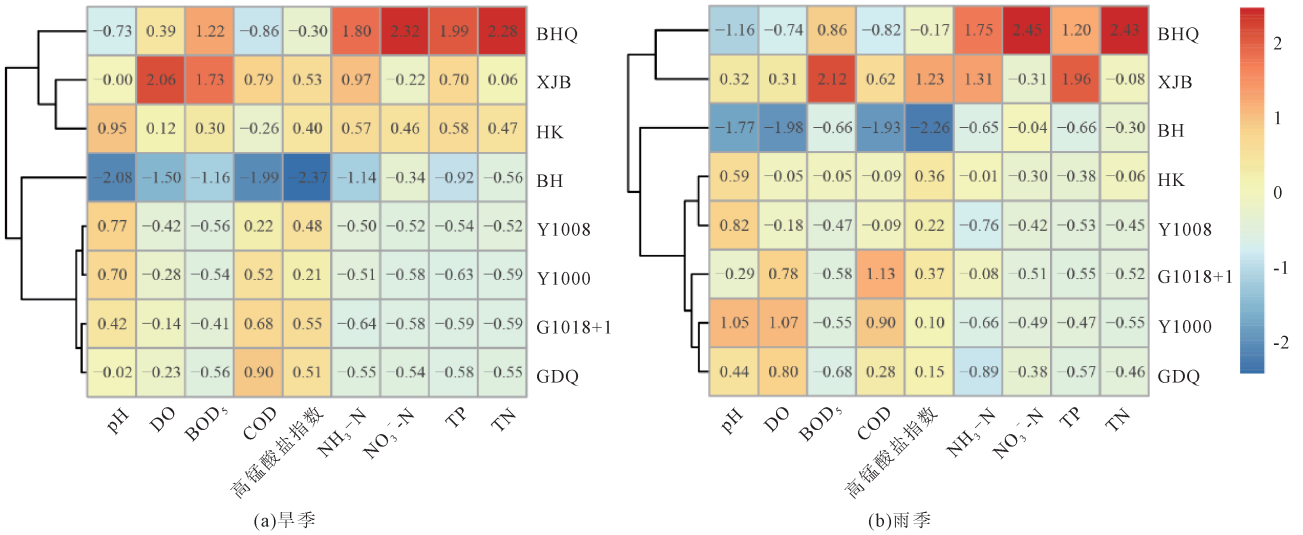


图9 旱季和雨季监测断面空间聚类
Fig.9 Spatial cluster analysis of monitoring sections in dry and wet seasons

表 5 旱季各聚类组水质指标的基本统计和方差分析
Table 5 Statistics and ANOVA for water quality parameters in the clusters during dry season

指标	G I 组		G II 组		G III 组		显著性检验	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	F	P
pH	8.281	0.221	8.602	0.170	8.520	0.167	13.401	0.000
DO	9.175	1.144	10.324	0.946	10.977	1.380	9.504	0.000
BOD ₅	1.392	0.231	1.816	0.424	2.874	1.035	25.878	0.000
COD	11.837	2.611	18.819	3.880	16.931	4.122	13.311	0.000
高锰酸盐指数	1.233	0.242	5.213	0.491	4.739	0.972	132.836	0.000
NH ₃ -N	0.163	0.070	0.280	0.091	0.435	0.165	23.473	0.000
NO ₃ ⁻ -N	1.095	0.140	0.585	0.200	3.222	2.628	23.381	0.000
TN	1.331	0.133	1.284	0.235	4.410	2.762	31.356	0.000
TP	0.017	0.002	0.035	0.008	0.139	0.081	44.853	0.000

表 6 雨季各聚类组水质指标的基本统计和方差分析
Table 6 Statistics and ANOVA for water quality parameters in the clusters during wet season

指标	G I 组		G II 组		G III 组		显著性检验	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	F	P
pH	8.288	0.340	8.590	0.236	8.498	0.224	6.358	0.003
DO	7.689	1.312	8.918	1.322	8.730	1.854	2.935	0.059
BOD ₅	1.144	0.401	1.280	0.496	2.392	1.050	21.342	0.000
COD	13.028	4.077	18.421	3.602	16.465	4.919	8.048	0.001
高锰酸盐指数	1.172	0.253	5.258	0.550	5.454	1.643	62.568	0.000
NH ₃ -N	0.232	0.076	0.286	0.073	0.457	0.150	25.955	0.000
NO ₃ ⁻ -N	0.917	0.306	0.330	0.268	2.451	2.296	23.736	0.000
TN	1.300	0.163	1.154	0.413	3.394	2.099	30.698	0.000
TP	0.018	0.009	0.040	0.014	0.233	0.134	64.401	0.000

3 讨论

3.1 水质季节差异与污染来源

以往研究表明,地表水质在雨季和旱季存在显著或不显著的差异,与旱季相比,雨季期间水质通常较好^[35-37]。本研究显示,官厅水库DO、BOD₅、TN和NH₃-N这4项指标存在显著的季节差异,其余指标在个别年份或站点存在显著的季节差异,雨季水质参数水平相对较低。WQI综合水质评价同样表明雨季的水质优

于旱季,这与以往研究结论基本一致。官厅水库雨季洪水径流占全年的75%,雨季径流量高于其他季节,平均径流量约为27 m³/s^[24],相较于旱季增长约58%。根据北京市水务局官网公布的雨情数据统计^[38],官厅水库2011-2020年雨季和旱季的平均降雨量分别为322 mm和104 mm(图10),降水大多集中在雨季,占全年降水量的75%。雨季期间的高径流量和快速流动稀释了污染物,以及雨水补给增强了水体的自净能力,这些因素使得水体中的污染物浓度降低,水质

得以改善。相反,旱季降水量和径流量减少,水体的稀释能力减弱,污染物浓度上升导致水质面临污染风险。已有研究表明,旱季降水减少,农业灌溉和生活用水的需求增加,大量水资源被取用,进一步减少了河道中的水量,使得污染物更加集中^[39]。

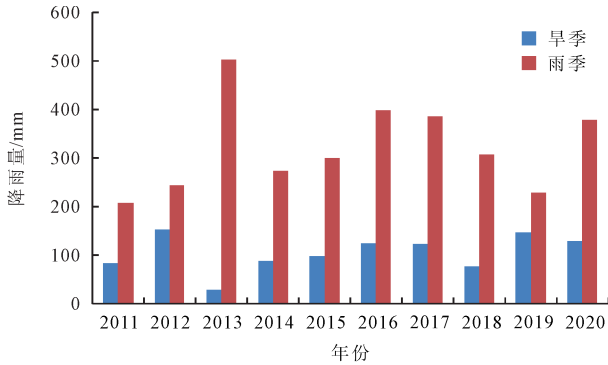


图10 2011-2020年旱季和雨季降雨量

Fig.10 Rainfall during the dry and wet seasons from 2011 to 2020

水质指标的相关分析与主成分分析有助于认识水体的主要污染特征及其污染来源。本研究通过对官厅水库旱季和雨季的水质数据进行深入分析,发现了一些关键的污染特征,对于理解水库水质变化的驱动因素以及制定有效的管理策略至关重要。研究表明,旱季和雨季的首要污染物是氮磷污染,其次是有机物污染。氮磷污染主要由过量的营养物质(尤其是氮和磷)引起,这些营养物质通常来源于农业径流、城市污水和工业排放。在旱季,由于水流减少,污染物在水体中的浓度更高,虽然雨季降雨有助于稀释这些营养物质,但同时也会将大量来自农田和城市的氮、磷等污染物冲刷进入水库,尤其使入库口断面BHQ和XJB产生更严重的氮磷富集问题。有机污染在旱季和雨季中的角色也非常关键,主要来源于周边生活污水和工业废水中的有机物质,如BOD₅、COD等指标所示。因此,针对官厅水库不同季节水质的差异及污染来源分析,应实施有针对性的水质管理和控制措施,重点加强旱季库区上游及周边各类污染源排放的监管力度,调整农业结构与施肥计划,着力减少旱季氮磷营养物质的污染。同时还应完善雨季水土保持措施,通过建设湿地、雨水花园或其他生态工程来过滤和处理污染物,以尽量降低雨季污染风险。

3.2 水质时空变化

官厅水库2011-2020年水质WQI评价的时间变化表明,从2011-2020年虽在2014年和2016年有小幅波动,但整体表现出水质逐年改善的良好态势。2016年以来,为落实《永定河综合治理与生态修复总体方案》,京冀两地协同开展了多项湿地生态修复工程,包括黑土洼湿地、八号桥湿地和妫水河湿地等。同时,河北、山西的集中输水和引黄河水入官厅水库,

官厅水库上游来水量逐年增加,2019年上游来水量翻倍。入库口生态修复与跨区域调水直接助力了库区水质的持续净化,对比近4年(2017-2020年)的水质参数变化,水质有明显改善,尤其是TN和TP浓度大幅降低。此外,官厅水库上游产业结构由工农业向第三产业的转变也对水库水质产生了积极的影响。统计数据显示,2011-2020年,官厅水库上游流域张家口市和北京延庆区妫水河上游乡镇,第三产业产值占比增加,而工业产值占比、农作物播种面积、农林牧渔业产值占比均呈下降趋势。库区上游产业结构的优化可以减少区域内工农业污染物入河负荷,间接促进了库区水质的改善。

WQI在旱季和雨季的空间特征和聚类分析表明,官厅水库水质在旱季和雨季均呈现出空间差异性。研究发现,不管是旱季还是雨季,官厅水库上游流域人类活动对入库断面水质的影响最直接,距离上游河岸越近,受人类活动影响越大,水质面临污染风险越高。这与杨荣金等^[25]的研究相符,他们认为上游入库断面往往因周围集中的工业和农业活动而受到较重的污染。此外,本研究通过对比不同季节断面的空间聚集特征,还发现距离河岸带最近的库区断面在旱季时期的污染风险与入库断面一致,而在雨季时期的污染风险已大大降低。这是对以往研究的补充,充分说明旱季时期不仅要重视入库断面的氮磷污染,还要加强河岸带周边库区断面的氮磷排放管控。结合官厅水库水质空间异质性和关键污染源,建议优先考虑上游地区和库区周边的控制措施,特别是侧重于规范农业化肥的施用及减少农村生活污水和畜禽养殖的污染,以降低水体中的氮磷含量,这对于维持水库的生态平衡和预防富营养化至关重要。

4 结论

(1)2011-2020年官厅水库DO、BOD₅、COD、高锰酸盐指数和NH₃-N稳定在地表水Ⅲ类标准以内,TN和TP超出了地表水Ⅲ类标准。各指标在旱季和雨季存在差异,主要表现在:DO、BOD₅、NO₃⁻-N和TN指标季节差异显著,旱季显著高于雨季;pH、COD、高锰酸盐指数、NH₃-N和TP整体上雨季和旱季差异不显著,但在个别年份和断面上存在显著差异。

(2)通过WQI综合评价,2011-2020年官厅水库雨季水质优于旱季,基本处于中等和良好水平,尤其自2016年以后水质整体呈现出逐年向好的良好态势,这归因于上游对水库的集中输水和引黄生态补水。随着输水和生态补水量的增加,入库口水质得到显著改善,但补水对库区内水质和出库口水质的影响并不明显。

(3)主成分分析表明,官厅水库自恢复为备用水源地以来, TN、TP、NO₃⁻-N 和 NH₃-N 是旱季和雨季的首要污染物,水质的变化主要受上游人类活动带来的氮磷营养污染物质的影响;其次是 BOD₅、COD 和高锰酸盐指数,主要包括生活污水和工业废水这类点源排放的有机污染物影响;最后,水体本身的自然过程对水库水质也有一定影响。

(4)官厅水库水质在旱季和雨季均呈现出空间差异性。旱季污染最严重的断面是入库断面 BHQ 和 XJB 以及距离上游河岸带最近的库区断面 HK,雨季污染最严重的断面是2个入库断面 BHQ 和 XJB,均以氮磷污染为主;其余库区断面在旱季和雨季的污染风险较低,以有机物的污染为主;旱季雨季出库断面 BH 水质相对清洁,但需关注潜在的氮污染。

[参考文献]

- [1] Mamun M, An K G. Stream health assessment using chemical and biological multi-metric models and their relationships with fish trophic and tolerance indicators[J]. *Ecological Indicators*, 2020,111:106055.
- [2] Han Q, Tong R Z, Sun W C, et al. Anthropogenic influences on the water quality of the Baiyangdian Lake in North China over the last decade[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,701:134929.
- [3] 梁兰唯,孙雯雯,王倩,等. 云南昭通渔洞水库枯水期水质及其变化特征[J]. *环境科学与技术*, 2024,47(S1):198-206.
Liang Lanwei, Sun Wenwen, Wang Qian, et al. Characteristics and variation of water quality during dry season in Yudong Reservoir of Zhaotong in Yunnan Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024,47(S1):198-206.
- [4] 张涛,陈求稳,易齐涛,等. 太湖流域上游平原河网区水质空间差异与季节变化特征[J]. *湖泊科学*, 2017,29(6):1300-1311.
Zhang Tao, Chen Qiuwen, Yi Qitao, et al. Spatial and seasonal variations of water quality in the upstream plain river networks of the Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017,29(6):1300-1311.
- [5] Arya M S, Biju A, Benchamin D. Assessment of spatial and temporal variations in water quality using multivariate statistical analysis in the Munroe Island, Kerala, India[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(5):751-763.
- [6] Das A. Multivariate statistical approach for the assessment of water quality of Mahanadi basin, Odisha[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022,65:A1-A11.
- [7] 任春坪,郑丙辉. 高原湖泊水质变化趋势及驱动因素研究:以四川邛海为例[J]. *湖泊科学*, 2024,36(3):756-769.
Ren Chunping, Zheng Binghui. Trend recognition and driving factors of water quality change in plateau lakes: a case study of Lake Qionghai, Sichuan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024,36(3):756-769.
- [8] 刘彦龙,郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. *环境科学*, 2022,43(3):1332-1345.
Liu Yanlong, Zheng Yi'an. Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River Basin[J]. *Environmental Science*, 2022,43(3):1332-1345.
- [9] Wang L Q, Wang X P. A holistic assessment of spatio-temporal pattern and water quality in the typical basin of North-east China using multivariate statistical methods[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022,168:1009-1018.
- [10] 徐若诗,逢勇,罗缙,等. 基于WQI的南水北调东线江苏段水质评价及时空分布特征[J]. *环境科学*, 2024,45(9):5227-5234.
Xu Ruoshi, Pang Yong, Luo Jin, et al. Water quality evaluation and spatial-temporal distribution characteristics of the East Route of the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province based on WQI[J]. *Environmental Science*, 2024,45(9):5227-5234.
- [11] Li T Y, Li S Y, Liang C, et al. A comparative assessment of Australia's Lower Lakes water quality under extreme drought and post-drought conditions using multivariate statistical techniques[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,190:1-11.
- [12] 侯元松,谢志磊,田永莉,等. 2003-2020年黄河内蒙古段干流水质演变趋势[J]. *环境科学*, 2024,45(7):3965-3972.
Hou Yuansong, Xie Zhilei, Tian Yongli, et al. Evolution trend of water quality in the Inner Mongolia section of the Yellow River from 2003 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2024,45(7):3965-3972.
- [13] Varol M, Gökot B, Bekleyen A, et al. Spatial and temporal variations in surface water quality of the dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey[J]. *Catena*, 2012,92:11-21.
- [14] 毛德华,周滢,周懿琳. 1990-2016年湘江流域水质时空变化及驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2024,45(7):3953-3964.
Mao Dehua, Zhou Ying, Zhou Yilin. Analysis of spatiotemporal variation and driving factors of water quality in the Xiangjiang River basin from 1990 to 2016[J]. *Environmental Science*, 2024,45(7):3953-3964.
- [15] Varol M. Spatio-temporal changes in surface water quality and sediment phosphorus content of a large reservoir in Turkey[J]. *Environmental Pollution*, 2020,259:113860.
- [16] Chen J B, Lu J. Effects of land use, topography and socio-economic factors on river water quality in a mountainous watershed with intensive agricultural production in East China[J]. *PLoS One*, 2014,9(8):e102714.
- [17] Güler C, Thyne G D, McCray J E, et al. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002,10(4):455-474.
- [18] Zhou F, Huang G H, Guo H C, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in

- eastern Hong Kong[J]. *Water Research*, 2007,41(15):3429–3439.
- [19] Chen J B, Li F Y, Fan Z P, et al. Integrated application of multivariate statistical methods to source apportionment of water courses in the Liao River Basin, Northeast China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016,13(10):1035.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 张一璇,史常青,杨浩,等. 永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和导水率研究[J]. *生态学报*, 2019,39(18):6681–6689.
Zhang Yixuan, Shi Changqing, Yang Hao, et al. Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of Guanting Reservoir in Yongding River Watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(18):6681–6689.
- [23] 马振刚,李黎黎,张俊贵. 官厅和密云水库水域面积变化及影响因素比较研究[J]. *干旱区研究*, 2023,40(8):1229–1239.
Ma Zhengang, Li Lili, Zhang Jungui. Comparative study on water area changes and influencing factors in the Guanting and Miyun Reservoirs[J]. *Arid Zone Research*, 2023,40(8):1229–1239.
- [24] 程鹏,孙明东,郝韶楠. 基于最简水质综合评价指数的官厅水库上游河流水质评价[J]. *生态环境学报*, 2023,32(2):372–380.
Cheng Peng, Sun Mingdong, Hao Shaonan. Water quality assessment of upstream rivers of Guanting Reservoir based on the simplest water quality index[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023,32(2):372–380.
- [25] 杨荣金,王逸卓,李秀红,等. 官厅水库水质评价及时空变化特征[J]. *水资源保护*, 2021,37(6):135–141.
Yang Rongjin, Wang Yizhuo, Li Xiuhong, et al. Water quality evaluation and spatiotemporal variation characteristics of Guanting Reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2021,37(6):135–141.
- [26] 李琳琳,夏瑞,陈焰,等. 近年官厅水库奶水河入库断面水质演变分析[J/OL]. *环境科学*, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202405038>.
Li Linlin, Xia Rui, Chen Yan, et al. Water Quality Evolution in the Guishui River Section of Guanting Reservoir in Recent Years[J/OL]. *Environmental Science*, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202405038>.
- [27] 焦晨泰,宋世雄,黄庆旭,等. 基于 Google Earth Engine 平台的官厅水库流域开放水体动态研究[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2021,57(5):639–647.
- [28] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River[J]. *Water Research*, 2000,34(11):2915–2926.
- [29] Debels P, Figueroa R, Urrutia R, et al. Evaluation of water quality in the Chillán River (Central Chile) using physico-chemical parameters and a modified water quality index[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005,110(1/2/3):301–322.
- [30] Ali Turan Koçer M, Sevgili H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms[J]. *Ecological Indicators*, 2014,36:672–681.
- [31] Zhao P, Tang X Y, Tang J L, et al. Assessing water quality of Three Gorges Reservoir, China, over a five-year period from 2006 to 2011[J]. *Water Resources Management*, 2013,27(13):4545–4558.
- [32] Kannel P R, Lee S, Lee Y S, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007,132(1/2/3):93–110.
- [33] Li M J, Liu Z W, Zhang M D, et al. A workflow for spatio-temporal hydro-chemical analysis using multivariate statistical techniques[J]. *Water Research*, 2021,188:116550.
- [34] Rezaei A, Hassani H, Hassani S, et al. Evaluation of groundwater quality and heavy metal pollution indices in Bazman basin, southeastern Iran[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019,9:100245.
- [35] Giao N T. Analysis of surface water quality using multivariate statistical approaches: a case study in Ca Mau Peninsula, Vietnam[J]. *Pollution*, 2022,8(2):463–477.
- [36] Rahman K, Barua S, Imran H M. Assessment of water quality and apportionment of pollution sources of an urban lake using multivariate statistical analysis[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021,5:100309.
- [37] Obayemi O E, Komolafe O O. Environmental assessment of Esa-Odo reservoir based on water quality index and multivariate analysis[J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2023,9(5):135.
- [38] 北京市水务局. 雨情[EB/OL]. <https://nsbd.swj.beijing.gov.cn/csyq1.html>, 2025-03-05.
- [39] Rani N, Sinha R K, Prasad K, et al. Assessment of temporal variation in water quality of some important rivers in middle Gangetic Plains, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011,174(1/2/3/4):401–415.