基于主成分分析和模糊数学的黄河小浪底水质监测与评价

武 俐[1], 王祖恒[1], 王 亮[2], 赵同谦[1], 金新苗[1]

(1.河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454150; 2.河南省济源生态环境监测中心, 河南 济源 459000)

摘 要:[目的] 监测了黄河小浪底水库南山、大横岭、桐树岭 3 个断面,分析了黄河小浪底水库水质现状及潜在污染来源,以期为其环境改善提供帮助。[方法] 根据 3 个断面的水质实测数据,采用主成分分析选择主要评价因子,运用模糊评价法对水库水质进行评价。[结果] 通过主成分分析得到 6 个主要水质因子,分别是溶解氧(DO)、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})。其中 DO 和 BOD_5 属于Ⅰ类水,其值分别在 3.8～12.8 mg/L 和 0.9～1.7 mg/L 之间;NH_3-N 介于Ⅰ类水与Ⅱ类水之间,其值为 0.03～0.72 mg/L;TN 超过Ⅴ类水,其值在 2～4.88 mg/L 之间;TP 和 COD_{Mn} 属于Ⅱ类水,其值分别在 0.02～0.05 mg/L 和 1.8～2.7 mg/L 之间。通过模糊综合评判法得到水库主要污染物为 TN 和 TP,水质整体属于Ⅲ类水,达到了水质要求。[结论] 通过主成分分析与模糊综合评价法发现,小浪底水库水质基本满足要求,但存在 TN 和 TP 污染风险。

关键词:小浪底水库; 主成分分析; 模糊综合评价法; 潜在污染源

文献标识码:B **文章编号**:1000-288X(2020)05-0118-07 **中图分类号**:X824, X524

文献参数:武俐, 王祖恒, 王亮, 等.基于主成分分析和模糊数学的黄河小浪底水质监测与评价[J].水土保持通报,2020,40(5):118-124. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.018; Wu Li, Wang Zuheng, Wang Liang, et al. Monitoring and evaluation on water quality of Xiaolangdi reservoir in Yellow River based on principal component analysis and fuzzy mathematics [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(5):118-124.

Monitoring and Evaluation on Water Quality of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River Based on Principal Component Analysis and Fuzzy Mathematics

Wu Li[1], Wang Zuheng[1], Wang Liang[2], Zhao Tongqian[1], Jin Xinmiao[1]

(1. *Department of Resources and Environment, Hen'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan* 454150, *China*; 2. *He'nan Jiyuan Ecological Environment Testing Center, Jiyuan, He'nan* 459000, *China*)

Abstract: [Objective] Three sections of Xiaolangdi Reservoir (Nanshan, Dahengling, and Tongshuling) in the Yellow River were monitored. The present situanion of water quality and potential pollution sources of the reservoir were analyzed in order to provide help for its environmental improvement. [Methods] According to the measured water quality data of the three sections, a principal component analysis was performed to select the main evaluation factors, and the fuzzy evaluation method was used to evaluate the water quality of the reservoir. [Results] Six primary water quality factors were obtained from the principal component analysis: dissolved oxygen (DO), the 5-day biochemical oxygen demand (BOD_5), ammonia nitrogen (NH_3-N), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and the potassium permanganate index (COD_{Mn}). The DO concentration and BOD_5 belonged to class I, with values of 3.8—12.8 and 0.9—1.7 mg/L, respectively. The NH_3-N concentration ranged from 0.03 to 0.72 mg/L, which was between classes Ⅰ and Ⅱ. The TN concentration ranged from 2 to 4.88 mg/L, which was worse than the standard of class Ⅴ. The TP

收稿日期:2020-05-21 **修回日期**:2020-07-03

资助项目:国家自然科学基金河南省联合基金重点项目"南水北调中线工程水源地氮沉降特征及其生态效应"(U1704241);中原科技创新领军人才项目(194200510010)

第一作者:武俐(1978—),女(汉族),湖北省孝感市人,博士,副教授,主要从事有机污染物降解工作。Email:wuli@hpu.edu.cn。

通讯作者:赵同谦(1969—),男(汉族),河北省石家庄人,博士,教授,主要从事水生态系统保护与修复研究工作。Email:zhaotq69@163.com。

concentration and COD_{Mn} belonged to class Ⅱ, and their values were 0.02—0.05 and 1.8—2.7 mg/L, respectively. [Conclusion] Through a principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation, it was found that the water quality of Xiaolangdi Reservoir basically met the legislative requirements; however, there was a risk of TN and TP pollution.

Keywords: Xiaolangdi Reservoir; principal component analysis; fuzzy comprehensive method; potential pollution source

小浪底水库位于黄河中游最后一段峡谷的出口处,是以调控黄河水沙为主要功能的大型水库[1]。水库自运行以来,平均入库年沙量为 2.92×10^8 t,排沙比为 20.2%[2]。每年 7 月,水库进行调水调沙,将黄河下游河床淤积的泥沙送入大海,同时减少水库的泥沙淤积[3]。水库蓄水拦沙期可改变黄河下游河道的水沙条件,使含沙量降低,中水流量持续时间增加[4]。下游河道受持续冲刷影响,游荡型河道主槽形态变化较大,平摊河宽与水深增加,横断面形态向窄深发展[5],部分河段崩岸明显[6]。小浪底水库水质的好坏直接影响着库区和黄河下游的水质以及下游地区的工、农业生产与居民健康。目前,对小浪底水库的研究多集中于水库蓄水拦沙对黄河下游泥沙量、过流能力和河床演变影响等方面[5,7],而对水库水质的评价与分析略显不足。

水库水质分析评价常用的方法有单因子水质标识指数法、综合水质标识指数法、综合营养状态法、模糊评价法、主成分分析法和 BP 神经网络法等,但各方法均有其局限性。例如单因子水质标识指数法无法综合反映水体状况;综合水质标识指数法评价指标的选取具有主观性;综合营养状态指数法评价指标单一,无法体现不同水体间的差异性;BP 神经网络评价指标选择具有主观性,定性评价结果不直观且计算较为复杂。而主成分分析法[8]可以在原始水质评价因子丢失最少的基础上,运用数学方法,从多个具有相关性的评价因子中筛选出主要评价因子;模糊评价法[9]可以体现水质从优到差变化的模糊特性。本研究采用主成分分析与模糊评价法相结合的方法,对小浪底水库水质状况进行监测和评价,分析水库水质现状与潜在污染源,以期为其环境改善提供帮助。

1　对象与方法

1.1　研究区概况

黄河小浪底水库位于三门峡水库下游 130 km,洛阳市以北 40 km 的黄河干流上,是黄河中下游库容量较大的峡谷型水库。水库面积达 272.3 km^2,控制流域面积为 6.94×10^5 km^2,占黄河流域面积的 92.3 %,涉及河南和山西俩省的 8 县(市)33 个乡镇[10-11]。水库正常水位 275 m,库容 1.27×10^{10} m^3,淤沙库容 7.55×10^9 m^3,调水调沙库容 1.05×10^9 m^3[2]。

1.2　研究方法

1.2.1　*样品采集与分析*　于 2018 年 1 月至 12 月对水库南山、大横岭和桐树岭 3 个监测断面进行为期一年的水质监测。采样时间为每月初,水样的采集与监测采用《水库采样技术指导(HJ495-2009)》和《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》进行,13 项监测指标分别为总氮(TN)、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、氟化物(F)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)和镉(Cd)。

1.2.2　*水质评价指标体系建立*　主成分分析可避免评价因子选择的随意性,使评价结果更客观[12]。通过线性组合,将多个原始变量转换为几个主要影响变量,确定影响水质的主要成分,只保留特征值大于 1 的主成分进行分析[8, 13]。选取断面 13 项水质检测指标作为初选评价因子,利用 R 语言对初选评价因子进行分析。主成分贡献率及因子载荷见表 1。

表 1　主成分贡献率及因子载荷

指 标	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
DO	0.584	−0.167	0.164	−0.560
COD_{Mn}	0.785	0.000	−0.384	0.000
BOD_5	0.000	0.192	−0.742	−0.296
NH_3-N	0.102	0.624	0.000	0.438
TN	0.280	0.726	−0.156	−0.221
TP	−0.305	0.776	0.000	0.000
Pb	0.811	0.309	0.112	0.000
COD	0.225	0.201	0.497	−0.595
Cu	−0.643	0.116	−0.377	0.120
Zn	0.000	0.000	0.000	0.797
F	0.000	0.244	0.798	−0.149
As	0.186	0.834	0.276	0.000
Cd	−0.217	0.186	0.333	0.685
特征值	2.356	2.542	1.991	2.154
贡献率/%	18.1	19.6	15.3	16.6
累积贡献率/%	18.1	37.7	53.0	69.6

注:DO 表示溶解氧;COD_{Mn}表示高锰酸盐指数;BOD_5 表示 5 d 生化需氧量;NH_3-N 表示氨氮;TN 表示总氮;TP 表示总磷;Pb 表示铅;COD 表示化学需氧量;Cu 表示铜;Zn 表示锌;F 表示氟化物;As 表示砷;Cd 表示镉。

由表 1 可知，有 4 个主成分特征值大于 1，累计贡献率为 69.6%。其中，第 2 主成分的贡献率最大，累计贡献率为 19.6%；第 3 主成分贡献率最小，为 15.3%。从各因子载荷值可以看出，第 1 主成分与 Pb，COD_{Mn}和 DO 密切相关；第 2 主成分中 As，TN，TP 和 NH_3-N 的载荷值较大；第 3 主成分与 F 和 BOD_5 密切相关；第 4 主成分与 Zn 和 Cd 密切相关。综上选择 TN，TP，BOD_5，NH_3-N，COD_{Mn}和 DO 6 个指标作为评价因子，进行综合水质分析。

1.2.3 *模糊综合评判法* 模糊综合评判法是基于模糊数学的水质评价方法，综合考虑了各水质因子之间的相关性，较为客观的反映水质因子对于水质的贡献程度[14-15]。在模糊综合评判中，数据与评价标准的处理方法、指标权重的确定方法和模糊模式的识别方法的选择尤为重要。分别采用归一化处理与线性内插法对实测数据与评价标准进行标准化，采用超标倍数法确定权重，加权海明距离法进行模糊模式的识别，计算评价对象隶属于评价标准等级的最小值来确定其质量等级[14, 16]。

水质监测数据归一化计算公式为：

$$f_{ij}=\begin{cases}0 & (X_{ij}\leqslant C_{1j})\\ \dfrac{X_{ij}-C_{1j}}{C_{tj}-C_{1j}} & (C_{tj}>X_{ij}>C_{1j})\\ 1 & (X_{ij}\geqslant C_{tj})\end{cases} \quad (1)$$

式中：f_{ij}代表第 j 个水质指标的第 i 个评价对象的标准化值；X_{ij}代表第 j 个水质指标的第 i 个评价对象的实测值；C_{1j}与 C_{tj}分别代表第 j 个水质指标的 1 级与 t 级水质标准值。

水质标准数据归一化计算公式为：

$$e_{ih}=\frac{C_{hi}-C_{1i}}{C_{ti}-C_{1i}} \quad (2)$$

式中：e_{ih}代表第 i 个水质指标的第 h 级标准的归一化值；C_{hi}，C_{1i}，C_{ti}分别代表第 i 个水质指标的第 h，1，t 级标准值。

评价指标权重的超标倍数法计算公式为：

$$w_i=\frac{x_i/S_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i}{S_i}} \quad (3)$$

式中：w_i 代表水质指标 i 的权重值；S_i 代表第 i 种水质指标 5 个类别标准的平均值；x_i 代表水质指标 i 的实际测量值。

模糊模式的识别方法加权海明距离法计算公式为：

$$D_w(A,B)=\sum_{i=1}^{m}w_i\mid\mu_A(x_i)-\mu_B(x_i)\mid \quad (4)$$

式中：$D_w(A,B)$代表 A 对 B 的加权海明距离；w_i 代表各水质指标的权重；$\mu_A(x_i)$代表水质监测数据的隶属度；$\mu_B(x_i)$代表水质标准的隶属度。

2 结果与讨论

2.1 水质评价参数的分析

根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)，6 项水质指标的质量标准见表 2。小浪底水库水体各水质因子质量浓度动态变化情况如图 1 所示。7 月，小浪底水库调水调沙后水位变低，南山采样点位于山坡，距离水面较远，8 月未能采到水样。

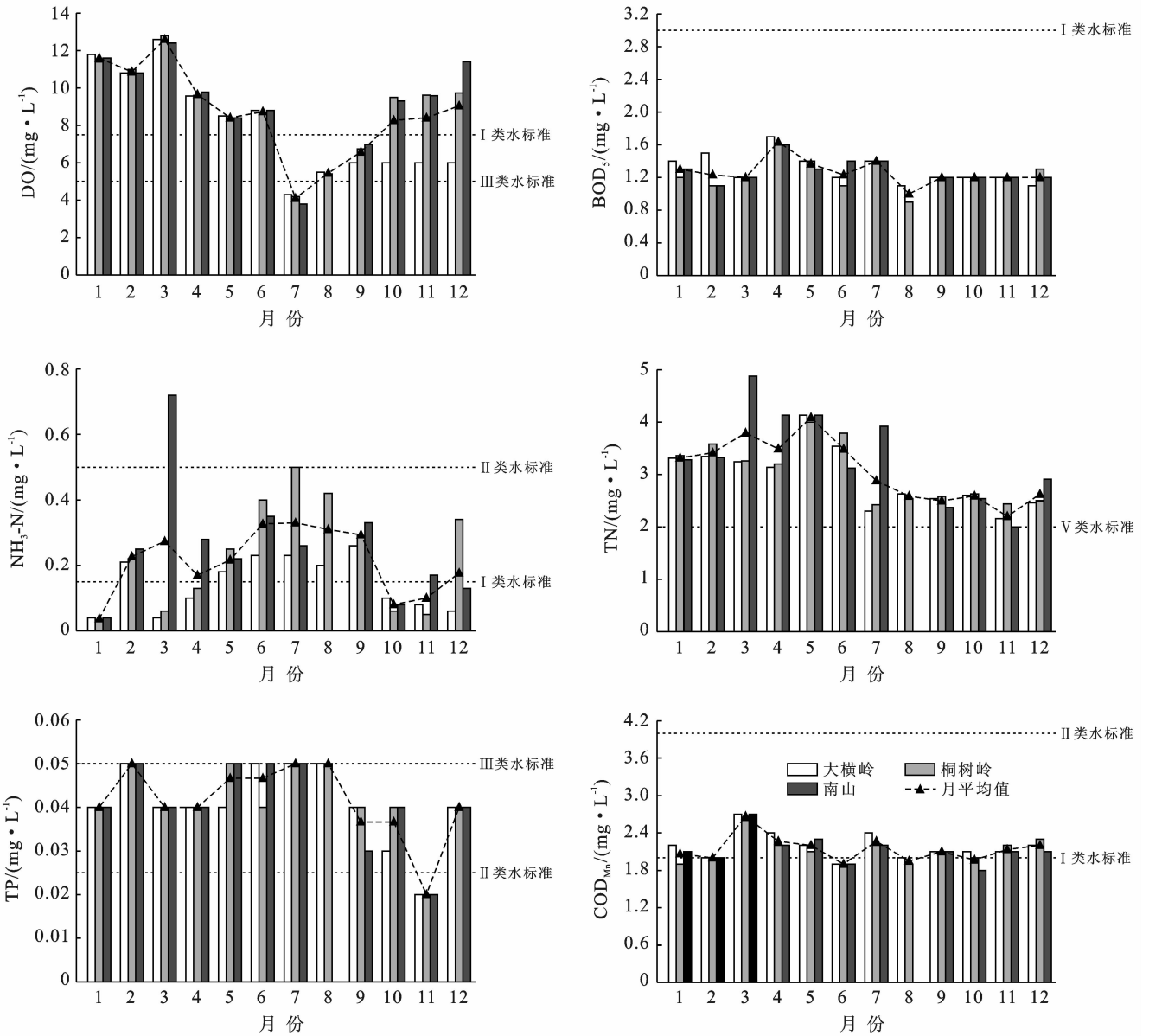
表 2 国家地表水环境质量标准

评价因子	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
DO(≥)	7.5	6	5	3	2
BOD_5(≤)	3	3	4	6	10
NH_3-N(≤)	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
TN(≤)	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
TP(≤)	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2
COD_{Mn}(≤)	2	4	6	10	15

从图 1 可以看出，6 项水质指标除 TN 低于Ⅲ类水标准，其余指标均高于Ⅲ类水标准。DO 的质量浓度在 3.8～12.8 mg/L 之间，除 7 月低于Ⅲ类水标准外，其余月份均满足Ⅲ类水标准。3 个断面在 1—9 月的 DO 质量浓度差异性不大，10—12 月大横岭的 DO 质量浓度远低于桐树岭和南山断面。BOD_5 的质量浓度在 0.9～1.7 mg/L 之间，满足Ⅰ类水标准，3 个断面的 BOD_5 质量浓度差异较小。NH_3-N 的质量浓度在 0.03～0.72 mg/L 之间，总体介于Ⅰ类水和Ⅱ类水之间，不同断面的 NH_3-N 质量浓度差异较大。TN 的质量浓度在 2～4.88 mg/L 之间，属于劣Ⅴ类水，表明 TN 污染十分严重。除 3 月南山断面的 TN 质量浓度偏高外，3 个断面在其余月份中 TN 的质量浓度差异较小。TP 的质量浓度在 0.02～0.05 mg/L 之间，基本介于Ⅱ与Ⅲ类水之间，不同断面的 TP 质量浓度差异性较小。COD_{Mn}的质量浓度在 1.8～2.7 mg/L 之间，满足Ⅱ类水标准，不同断面的 COD_{Mn}质量浓度差异较小。总体来看，除 NH_3-N 质量浓度外，小浪底水库 3 个断面水质指标质量浓度变化差异性较小，空间变化特征不明显。

分析水库水质指标月均浓度变化发现，DO 月均质量浓度波动较大，3 月份最高(12.6 mg/L)，7 月最低(4.1 mg/L)，3—7 月呈下降趋势，7—12 月呈上升趋势，其变化可能与自然环境水温影响有关[17]。BOD_5 月均质量浓度较稳定，4 月最高(1.63 mg/L)，8 月最低(1 mg/L)。NH_3-N 月均质量浓度有一定波动，7 月最高(0.33 mg/L)，10 月最低(0.1 mg/L)，

7—9 月浓度变化不明显。TN 月均质量浓度变化不大,5 月最高(4.1 mg/L),11 月最低(2.2 mg/L),变化趋势可能与降雨量和农业活动有关[17]。TP 月均质量浓度较稳定,2 月最高(0.05 mg/L),11 月最低(0.02 mg/L),其中 8—11 月质量浓度呈下降趋势可能与浮游植物生长吸收有关[18]。COD_{Mn} 月均质量浓度变化不明显,3 月最高(2.7 mg/L),6 月最低(1.9 mg/L)。总体来看,6 项水质指标的平均质量浓度在 6—8 月处于较高水平,10—12 月份较低,其余月份处于中等水平。



注:DO 为溶解氧;BOD_5 为 5 d 生化需氧量;HN_3-N 为氨态氮;TN 为总氮;TP 为总磷;COD_{Mn} 为高锰酸盐指数。

图 1　小浪底水库水体各水质因子质量浓度动态变化

2.2　水质评价参数的权重计算结果

根据上述公式(3)计算各评价参数的权重结果见表 3—5。

从各监测断面评价因子的权重计算结果(表 3—5)可以看出,TN 的权重结果最高,其次为 DO 和 TP。DO 代表水体自净能力,其值越高说明水体水质越好[15];TN 和 TP 是表征水体富营养化的指标,其值越高表明水体水质越差[19],说明小浪底水库的主要污染因子为 TN 和 TP,属于富营养化污染。

当水体中 TN 和 TP 质量浓度分别高于 0.20 mg/L 和 0.02 mg/L 时,存在发生富营养化的风险[18]。从表 3—5 可以看出,不同时间不同采样断面的 TN 和 TP 质量浓度均远超限值,说明在一定的条件下水体有爆发富营养化的风险。当 N/P<7 时,TN 是水体富营养化的限制因子;当 N/P>30 时,TP 是水体富营养化的限制因子[20]。本研究 TN/TP 介于 46～

122 之间，远高于 30，因此，TP 是水库水体富营养化的限制因子。另外，水体中浮游生物群落的分布易受到水体理化条件的影响，其中蓝藻、硅藻、绿藻浮游植物群落对水体变化敏感，TN/TP 变化直接影响着水体浮游植物群落的结构组成[21-22]。有研究表明，当 TN/TP＜25 时，适合蓝藻生长，当 TN/TP＞25 时，绿藻和硅藻生长较快[23-24]，这一现象与小浪底水库主要藻类是绿藻和硅藻相符[10, 22]。

表 3 大横岭断面各水质指标权重

月份	DO	BOD_5	NH_3-N	TN	TP	COD_{Mn}
1	0.37	0.03	0.01	0.47	0.07	0.04
2	0.33	0.03	0.03	0.46	0.09	0.04
3	0.39	0.02	0.01	0.45	0.07	0.05
4	0.32	0.04	0.02	0.48	0.08	0.05
5	0.26	0.03	0.03	0.56	0.07	0.04
6	0.28	0.03	0.04	0.51	0.09	0.04
7	0.20	0.05	0.05	0.48	0.14	0.07
8	0.23	0.03	0.04	0.50	0.12	0.05
9	0.28	0.03	0.05	0.47	0.10	0.05
10	0.37	0.03	0.02	0.45	0.07	0.05
11	0.41	0.03	0.02	0.42	0.05	0.06
12	0.38	0.03	0.01	0.43	0.09	0.05

表 4 桐树岭断面各水质指标权重

月份	DO	BOD_5	NH_3-N	TN	TP	COD_{Mn}
1	0.36	0.03	0.00	0.48	0.07	0.04
2	0.34	0.03	0.03	0.48	0.09	0.04
3	0.36	0.03	0.01	0.47	0.07	0.05
4	0.36	0.05	0.02	0.46	0.07	0.04
5	0.31	0.03	0.03	0.50	0.08	0.04
6	0.33	0.03	0.06	0.49	0.07	0.03
7	0.38	0.04	0.08	0.36	0.10	0.05
8	0.38	0.03	0.07	0.38	0.10	0.04
9	0.39	0.04	0.05	0.40	0.08	0.05
10	0.40	0.04	0.01	0.42	0.08	0.04
11	0.43	0.04	0.01	0.42	0.04	0.05
12	0.39	0.04	0.06	0.38	0.08	0.05

表 5 南山断面各水质指标权重

月份	DO	BOD_5	NH_3-N	TN	TP	COD_{Mn}
1	0.37	0.04	0.01	0.47	0.07	0.04
2	0.34	0.03	0.04	0.47	0.09	0.04
3	0.29	0.03	0.08	0.51	0.05	0.04
4	0.28	0.04	0.04	0.53	0.07	0.04
5	0.25	0.03	0.03	0.55	0.09	0.04
6	0.29	0.04	0.06	0.47	0.10	0.04
7	0.13	0.04	0.04	0.62	0.10	0.05
9	0.30	0.05	0.07	0.46	0.08	0.05
10	0.36	0.04	0.02	0.44	0.09	0.05
11	0.42	0.05	0.04	0.39	0.05	0.06
12	0.40	0.04	0.02	0.46	0.08	0.04

通过控制水库中 TN 和 TP 含量，可降低水库发生富营养化的风险。在库区周边一定范围内限制化肥的施用量，倡导发展无公害农业，适当控制旅游业；重点加强 TN 排放消减力度；发展水生生态养殖，选择与调整鱼类品种与比例，减少水体藻类生物量。

2.3 模糊综合评判法计算结果

根据上述公式(1)—(4)，将各水质监测数值代入相应公式计算，得各断面水环境质量综合评价结果，见表 6—8。

小浪底水库属于集中饮用水地表水源地二级保护区，因此以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类要求作为标准。根据表 6—8 可知，不同时间不同采样断面所有的水质级别达到Ⅲ类水质要求的比例为 82.9%，基本满足Ⅲ类水质要求。而 2011—2015 年，黄河小浪底水库为劣Ⅴ类水，处于污染状态[11]，近年来，水体质量明显提升，与当地政府对水库水体的保护与治理有关。整体来看，水库不同断面水质级别变化不大，空间变化特征不明显。

表 6 大横岭断面各月水质评价结果

月份	隶属度 $D_w(A,B)$					综合水质类别
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
1	0.480	0.500	0.452	0.500	0.509	Ⅲ
2	0.485	0.494	0.440	0.486	0.505	Ⅲ
3	0.464	0.488	0.449	0.510	0.527	Ⅲ
4	0.493	0.497	0.445	0.482	0.495	Ⅲ
5	0.577	0.550	0.464	0.449	0.415	Ⅴ
6	0.535	0.522	0.446	0.460	0.457	Ⅲ
7	0.631	0.491	0.345	0.317	0.359	Ⅳ
8	0.616	0.465	0.343	0.358	0.376	Ⅲ
9	0.524	0.452	0.404	0.442	0.466	Ⅲ
10	0.459	0.483	0.454	0.512	0.530	Ⅲ
11	0.420	0.467	0.457	0.538	0.567	Ⅰ
12	0.443	0.471	0.440	0.511	0.547	Ⅲ

采用同一时间不同断面的隶属度均值做水质类别评价分析，发现水库水质在 5 月份为Ⅴ类水，7 月份为Ⅳ类水，11 和 12 月份达到Ⅰ类水标准，其余月份为Ⅲ类水。5 月水库水质较差可能是因为受黄河上游农业耕作影响。有研究表明，农业活动和人类活动对黄河水质有影响[25]，农药化肥的过度施用导致黄河中上游渭河流域 4 月水质 TN 超标严重[26]，黄河水质从上游至下游逐渐变差[27]，农业活动高峰期会使小浪底水库水体污染加重[17]。4 月和 5 月农业活动高峰期使小浪底水库上游来水 TN 质量浓度增高，水质变差。由于受水体自净作用影响，TN 质量浓度自水库上游向下游逐渐减少，南山断面水质为Ⅴ类

水,而水库下游的桐树岭断面水质为Ⅲ类水。7 月水库水质为Ⅳ类水劣于Ⅲ类水的原因与水库调水调沙活动有关,调水调沙期间,水库水量大量减少,严重影响水体质量[28],其中 DO 的质量浓度远低于其他月份,南山断面为Ⅴ类水,大横岭和桐树岭断面为Ⅳ类水。而调水调沙活动结束后,3 个断面的水质逐渐达到水质要求,其中 11 月水质达到Ⅰ类水标准。

表 7　桐树岭断面各月水质评价结果

月份	隶属度 $D_w(A,B)$					水质类别
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
1	0.496	0.511	0.457	0.499	0.504	Ⅲ
2	0.497	0.506	0.448	0.490	0.503	Ⅲ
3	0.482	0.497	0.451	0.503	0.518	Ⅲ
4	0.469	0.488	0.450	0.507	0.531	Ⅲ
5	0.518	0.517	0.451	0.479	0.482	Ⅲ
6	0.507	0.512	0.456	0.491	0.493	Ⅲ
7	0.621	0.457	0.299	0.298	0.379	Ⅳ
8	0.560	0.390	0.280	0.378	0.440	Ⅲ
9	0.470	0.398	0.386	0.477	0.530	Ⅲ
10	0.433	0.471	0.445	0.526	0.567	Ⅲ
11	0.422	0.473	0.462	0.548	0.578	Ⅰ
12	0.405	0.443	0.435	0.534	0.595	Ⅰ

表 8　南山断面各月水质评价结果

月份	隶属度 $D_w(A,B)$					水质类别
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
1	0.483	0.502	0.454	0.504	0.517	Ⅲ
2	0.487	0.497	0.443	0.492	0.513	Ⅲ
3	0.547	0.535	0.445	0.464	0.453	Ⅲ
4	0.547	0.531	0.461	0.467	0.453	Ⅴ
5	0.574	0.545	0.453	0.445	0.426	Ⅴ
6	0.496	0.494	0.433	0.476	0.504	Ⅲ
7	0.739	0.594	0.418	0.301	0.261	Ⅴ
9	0.505	0.448	0.417	0.466	0.495	Ⅲ
10	0.457	0.479	0.443	0.507	0.543	Ⅲ
11	0.396	0.448	0.455	0.554	0.604	Ⅰ
12	0.473	0.502	0.470	0.541	0.572	Ⅲ

3　结论

(1) 黄河小浪底水库 TN,TP,BOD_5,NH_3-N,COD_{Mn}和 DO 这 6 项指标中,除 TN 低于Ⅲ类水标准外,其余指标均高于Ⅲ类水标准。整体上,南山、大横岭和桐树岭断面水质指标质量浓度空间变化差异不明显。

(2) 主成分分析与模糊综合评价表明,水库水体的主要污染因子为 TN 和 TP,属于富营养化污染。TN/TP 范围为 46～122,TP 是水库富营养化限制因子,应引起重视。可通过控制水库中 TN 和 TP 含量,降低水库发生富营养化的风险。

(3) 水库水质状况基本满足Ⅲ类水质要求。水库水质级别空间变化特征不明显。受黄河上游农业活动影响,5 月水库水质较差,7 月水质劣于Ⅲ类水与水库调水调沙活动有关。

[参　考　文　献]

[1] 张永领,杨小林,张东. 小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站 pCO_2 特征及扩散通量[J]. 环境科学,2015,36(1):40-48.

[2] 陈翠霞,安催花,罗秋实,等. 黄河水沙调控现状与效果[J]. 泥沙研究,2019,44(2):69-74.

[3] 胡春宏. 我国多沙河流水库"蓄清排浑"运用方式的发展与实践[J]. 水利学报,2016,47(3):283-291.

[4] 申冠卿,李勇,张原锋,等. 小浪底水库拦沙对黄河下游河道的减淤作用[J]. 人民黄河,2020,42(6):1-6.

[5] 余阳,夏军强,李洁,等. 小浪底水库对下游游荡河段河床形态与过流能力的影响[J]. 泥沙研究,2020,45(1):7-15.

[6] 张诗媛,夏军强,李洁,等. 近期黄河下游游荡河段床面下切与横向展宽的定量关系[J]. 泥沙研究,2020,45(2):8-15.

[7] 齐璞,孙赞盈,齐宏海. 小浪底水库建成后黄河下游防洪形势变化研究[J]. 科学,2019,71(3):38-42.

[8] 李国华,李畅游,史小红,等. 基于主成分分析及水质标识指数法的黄河托克托段水质评价[J]. 水土保持通报,2018,38(6):310-314.

[9] 张琦,李松森,夏慧琳. 基于模糊综合评判模型的东北三省水资源承载力研究[J]. 水土保持通报,2019,39(5):179-188.

[10] 刘翠翠. 小浪底水库水质和微生物多样性研究[D]. 郑州:河南农业大学,2014.

[11] 王国重,李中原,张继宇,等. 小浪底水库水环境质量评估[J]. 安全与环境学报,2018,18(5):2013-2020.

[12] 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.

[13] Kale A, Bandela N, Kulkarni J, et al. Factor analysis and spatial distribution of water quality parameters of Aurangabad District, India. [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, 10: 100345.

[14] 张彦波. 模糊综合评价法在地表水环境质量评价中的应用:以西安市曲江池水环境为例[J]. 西安石油大学学报(社会科学版),2016,25(4):1-6.

[15] 田野,李畅游,赵胜男,等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价[J]. 水土保持通报,2016,36(5):162-166.

[16] 陈攀,韩丽娟.不同模糊组合模型在水质评价中的应用比较[J].人民黄河,2018,40(12):100-105.

[17] 朱东方,赵开楼,白泉.小浪底水库水质分析与预测[J].山东化工,2019,48(17):109-111.

[18] 叶许春,孟元可,张永生,等.三峡库区香溪河回水区营养状态变化特征与驱动因子[J].水资源保护,2018,34(4):80-85.

[19] 邹伟,朱广伟,蔡永久,等.综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见[J].湖泊科学,2020,32(1):36-47.

[20] 李冰.氮磷营养盐与藻类生长相关性研究[D].济南:山东建筑大学,2013.

[21] Huang Wei, Zhu Xuyu, Zeng Jiangning, et al. Responses in growth and succession of the phytoplankton community to different N/P ratios near Dongtou Island in the East China Sea[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2012,434/435:102-109.

[22] Song Jie, Hou Chuanying, Liu Qi, et al. Spatial and temporal variations in the plankton community because of water and sediment regulation in the lower reaches of Yellow River[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261:120972.

[23] 刘莲,周小玉,赵良杰,等.氮磷比率对两种蓝藻和两种绿藻生长的影响[J].上海海洋大学学报,2014,23(4):573-581.

[24] Wang Yijie, Cai Yanpeng, Yin Xinan, et al. Succession of phytoplankton functional groups in Macau's two shallow urban border reservoirs under multiple changing factors[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,264:121553.

[25] 武雪萍,蔡典雄,梅旭荣,等.黄河流域农业水资源与水环境问题及技术对策[J].生态环境,2007,16(1):248-252.

[26] 武玮,徐宗学,于松延.渭河流域水环境质量评价与分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(2):275-281.

[27] Zhao M M, Wang Shaomei, Chen Yipeng, et al. Pollution status of the Yellow River tributaries in middle and lower reaches[J]. Science of the Total Environment, 2020,722:137861.

[28] 侯传莹,易雨君,宋劼,等.小浪底水库水沙调控对下游河道水质的影响[J].人民黄河,2019,41(8):32-37.

(上接第111页)

[6] 俞亚勋,赵建华.甘肃省春季沙尘暴强弱年份大气环流特征对比分析[J].干旱气象,2003,21(3):48-57.

[7] 中国气象局预测减灾司.沙尘暴监测预警服务研究[M].北京:气象出版社,2002.

[8] 丁荣,张德玉,梁俊宁,等.甘肃河西走廊中部近45 a来大风沙尘暴气候背景分析[J].中国沙漠,2006,26(5):792-796.

[9] 张正偲,董治宝.黑河流域中游沙漠风能环境与风沙地貌[J].中国沙漠,2014,34(2):332-341.

[10] 彭小清,张廷军,潘小多,等.祁连山区黑河流域季节冻土时空变化研究[J].地球科学进展,2013,28(4):497-508.

[11] 张存杰,宁惠芳.甘肃省近30年沙尘暴、扬沙、浮尘天气空间分布特征[J].气象,2002,28(3):28-32.

[12] 刘洪兰,张强,张俊国,等.1960—2012年河西走廊中部沙尘暴空间分布特征和变化规律[J].中国沙漠,2014,34(4):1102-1108.

[13] 刘洪兰,白虎志,张俊国.河西走廊中部近53年降水变化及未来趋势预测[J].干旱区研究,2011,28(1):146-150.

[14] 王式功,王金艳,周自江,等.中国沙尘天气的区域特征[J].地理学报,2003,58(2):193-200.

[15] 张莉,任国玉.中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析[J].测绘科技动态,2003,61(6):744-749.

[16] Liu Xiaodong, Yin Zhiyong, Zhang Xiaoye, et al. Analyses of the spring dust storm frequency of Northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004,109(D16210):1-16.

[17] 赵红岩,杨瑜峰,梁东升,等.中国北方沙尘暴与地温场的相关分析[J].中国沙漠,2007,27(3):509-513.

[18] Zhou Xiuji, Xu Xiangde, Yan Peng, et al. Dynamic characteristics of spring sandstorms in 2000[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2002,45(10):921-930.