

于桥水库富营养化评价及空间分布特征研究

徐媛, 谢汝芹, 卢蔚, 王玉秋

(南开大学 环境科学与工程学院 环境标准和污染过程教育部重点实验室, 天津 30007)

摘要: 基于天津市于桥水库 2000-2010 年水质数据, 结合卡尔森富营养化指数与 3 种 GIS 空间插值方法(反距离权重、径向基函数、普通克里金), 评价水库富营养化状态并对其空间分布特征及成因进行分析。结果表明: ①普通克里金插值方法下的指数半方差模型插值精度较高。②水库富营养化主要表现为氮污染超标, 有机污染较轻, 磷为限制因子, 在降雨集中的汛期(7-9月)水质营养状态空间差异显著。③水库整体水质呈中营养-轻富营养状态, 范围为 45.87~54.58, 水库北岸由于沿岸畜禽养殖污染已处于轻富营养状态, 南岸由于农业产生的面源污染呈现向富营养化转变的趋势, 反映了水库富营养化空间分布状况, 为建立有效的水库环境保护措施提供了新思路。

关键词: 水库富营养化; 空间插值; 空间分布特征; 于桥水库

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)01-0001-06

Evaluation and spatial characteristics of eutrophication in Yuqiao reservoir

XU Yuan, XIE Ruqin, LU Wei, WANG Yuqiu

(Key Laboratory of Environmental Pollution Control Process and Benchmark, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Three different methods of GIS spatial interpolation and Carlson eutrophication index were applied to analyze the status and spatial distribution characteristics of eutrophication and environmental factors in Yuqiao reservoir over past 11 years. The results showed that exponential semi-variogram model of OK was the best interpolation method compared through the result of cross-validation; eutrophication of Yuqiao reservoir was mainly contributed by excessive nitrogen loading, less influenced by organic pollution, limited by phosphorus, and the spatial difference of nutrients for the reservoir was significant during flood season; eutrophication status of Yuqiao reservoir is between nutrient and mesotropher and its value is from 45.87 to 54.58, the north shore of reservoir has been in mesotropher because of livestock and poultry farming pollution and the south shore of the reservoir has become mesotropher water and tend to be of eutrophication because of agricultural non-point pollution. The results reflect the spatial characteristics of eutrophication and provide a new guideline to establish effective environmental management measures for the protection of Yuqiao reservoir.

Key words: eutrophication of reservoir; spatial interpolation; characteristics of spatial distribution; Yuqiao reservoir

1 研究背景

湖泊水库及其流域是人类社会经济发展的最重要的场所和水源地, 流域内工业化与城市化的快速发展导致大量的氮、磷等营养盐流失到地表水体中,

加速湖泊老化, 水体的生态系统和生态功能受到阻碍, 由此引发的水体富营养化现象已成为当今世界最重要的环境问题之一。据联合国环境规划署(UNEP)调查表明, 全球范围内有 30%~40% 的湖泊和水库受到了不同程度的富营养化影响。目前在

收稿日期: 2013-11-01; 修回日期: 2013-11-21

基金项目: 环保部环境规划院水污染综合防治项目(2013A009)

作者简介: 徐媛(1982-), 女, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事流域水环境管理研究。

通讯作者: 王玉秋(1965-), 男, 黑龙江齐齐哈尔市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境管理决策与技术支持, 流域及水源地保护战略等研究。

我国 131 个主要湖泊中,已达富营养程度的湖泊 67 个,占 51.2%。在 39 个代表性水库中,达富营养程度的有 12 座,占 30%^[1]。湖泊水库等封闭水体环境中的氮、磷营养盐严重富集不但直接影响水生生态系统功能,而且引起的水质型缺水也严重地危害到水资源在饮用、工业、农业、娱乐和其他用途上的功能,制约区域经济社会发展。

于桥水库位于天津市北部蓟县境内,是天津市生活饮用水和工农业用水的重要水源地。大量研究发现,于桥水库水质在引滦入津通水前期处于 I ~ II 类水质,1990 年之后,入库的污染负荷增加引起库内藻类大量繁殖导致水体富营养化,尤其以氮、磷为代表的富营养化污染日渐显著,水体中总氮(TN)浓度长年接近标准阈值,总磷(TP)浓度呈现逐年升高的趋势,表征水库水体营养状态的 TSI 指数也逐年上升,水库水体已经处于由富营养化向重度富营养化过度的边缘,并在 1997 年的 9 月份爆发了“水华”事件^[2]。空间插值方法利用离散样本数据空间范围内位置点的数据值,实现了空间数据的连续化,从而能为管理和决策提供科学依据,该方法目前已在土壤、降雨、气象等研究领域得到广泛应用^[3-5]。本文利用 GIS 空间插值方法(反距离权重、径向基函数和普通克里金插值),对于桥水库富营养化主要因子(总氮、总磷、化学需氧量及叶绿素 a)进行插值并验证,筛选出最优插值方法与参数,结合卡尔森富营养化指数分析方法对水库富营养化状态进行评价并分析其空间分布特征,从而制定出更好的于桥水库环境管理保护措施。

2 研究区域概况

于桥水库是引滦入津工程的重要调蓄水库,始建于 1959 年,是天津市生活饮用水和工农业用水的主要水源地,位于天津市北部蓟县城东 4km 处(40°02'N,117°25'E),是一座山谷型盆地水库(图 1),其正常蓄水平均水深 4.3 m,东西最长 30 km,南北最宽 8 km,总库容 15.59 亿 m³,控制流域面积约为 2 060 km²,其中沙河、淋河和黎河是汇入于桥水库的主要河流,河流总面积为 1 627 km²,水库南岸地势陡峭,北岸则是较为平坦的冲击平原。水库控制流域属温带大陆性季风性半湿润气候,年平均气温为 10.4 ~ 11.5℃,多年平均降水量为 748.5 mm,降雨主要集中在 6 ~ 9 月份。库区周边分布着 129 个与水库水环境密切相关的村庄,以农业为主的经济活动中产生的生活污水、果园和农田中的农药和化

肥污染也随地表径流注入水库;同时,来自上游和周边地区的大量污染物使库内水体 N、P 等营养盐含量不断增加,导致水库富营养化问题日趋凸显,直接影响到了天津市工农业用水和蓟运河以及渤海湾的水质,对天津市饮用水源地的安全构成了严重的威胁^[2]。



图 1 于桥水库及采样点分布图

3 材料与方法

3.1 采样与分析

依据地表水体水力特征,本研究在于桥水库库内以及库周共设置了 11 个监测点(图 1),参照国家地表水环境质量标准(NO. 3838 - 1988、NO. 3838 - 2002),采集水样并分析 2000 - 2010 年间(每年 4 - 11 月)包含总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)和叶绿素 a(Chl-a)在内的 11 项水质指标监测数据,监测频次为 1 次/月。

3.2 数据处理

数据分析处理采用 ArcGIS 9.3 地统计分析模块中反距离权重(IDW)、径向基函数(RBF)、克里金插值法(OK)对于桥水库富营养化主要影响因子(COD、TN、TP 和 Chl-a)浓度进行空间插值,选取最优插值方法,并结合卡尔森富营养化指数,对水库单项因子营养状态指数及富营养化综合指数空间分布进行插值研究,从而整体评价研究区域富营养化状况。最优插值方法的选取则通过交叉验证方法(Cross - Validation),采用相对平均误差(MBE)和均方根误差(RMSE)作为验证标准,其中 MBE 值接近于零, RMSE 值越小,插值效果越好^[6]。

3.2.1 插值交叉验证方法

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{z}(x_i) - z(x_i)] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{z}(x_i) - z(x_i)]^2} \quad (2)$$

式中: $\hat{z}(x_i)$ 和 $z(x_i)$ 分别是第 i 个样本的预测值和观测值; n 为样本数。

3.2.2 富营养化评价方法 本文选取卡尔森指数作为富营养化评价指标,它是 1977 年由美国科学家卡尔森提出来,之后经过日本学者千崎守弘修正,以

叶绿素 *a* 为基准,对于不同参数的营养状态指数,按照各参数与基准参数的相关程度的某种关系进行综合加权,用相关加权营养状态法判断地表水体所处的营养状态^[7],然后通过表 1 评价研究区域的富营养化水平。所用公式如下:

$$TLI = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j)$$

(3)

式中:*TLI* 为综合营养状态指数;*TLI*(*j*) 代表第 *j* 种参数的单项营养状态指数;*m* 是参数个数;*W_j* 是第 *j* 种参数的营养状态指数的相关权重。

如果将叶绿素 *a* 对营养状态的重要性定为 1,假定第 *j* 个参数和叶绿素 *a* 的相关关系为 *r_{ij}*,第 *j* 个参数对营养状态指数的相对重要性归一化权重计算关系如下:

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2$$

(4)

式中:*r_{ij}* 为第 *j* 个参数与叶绿素 *a* 的相关关系(中国湖泊水库参数与基准参数的相关关系见表 2);*m* 是选出的主要参数的个数;各参数的营养状态表达式:

$$TLI \text{ (Chl-a)} = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chl-a})$$
$$TLI \text{ (TP)} = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$$
$$TLI \text{ (TN)} = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$$
$$TLI \text{ (COD)} = 10(0.109 + 2.66 \ln \text{COD})$$

表 1 水库水体富营养化分级标准

TLI	[0,30]	[30,50]	(50,60]	(60,70]	(70,100]
富营养化状态	贫营养	中营养	轻富营养	中富营养	重富营养

表 2 水库水体部分参数与叶绿素 *a* 的相关关系

参数	Chl-a	TP	TN	COD
<i>r_{ij}</i>	1	0.84	0.82	0.83
<i>r_{ij}</i> ²	1	0.7056	0.6724	0.6889

在本研究中,首先判断数据分布特征,对不符合正态的数据进行转化,使得转化后的数据符合正态分布,从而满足地统计分析要求,提高插值精度。数据分析处理主要采用 ArcGIS 9.3,SPSS 16.0 和 Microsoft Excel 2010 软件实现。

4 结果与分析

4.1 于桥水库富营养化统计分析

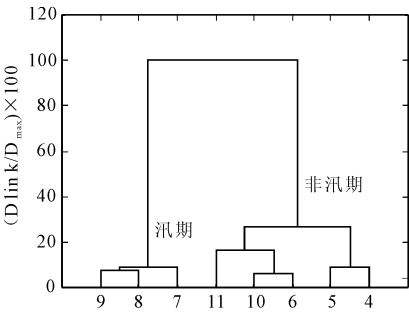
利用 SPSS 16.0 软件对于桥水库富营养化主要影响因子 TP、TN、COD、Chl-a 进行统计分析,结果见表 3。于桥水库作为天津市重要的饮用水水源地,

其水质需满足地表水环境质量标准中 3 类水标准,根据统计分析结果发现水库中总氮是 3 类水标准的 1.5 倍,总磷和 COD 没有超出 3 类水标准,因此水库富营养化以氮类污染为主,有机污染较轻,磷为限制因子。

采用最广泛的聚类方法(HCA)方法^[8]对监测时段(4-11月)进行划分,以欧氏距离平方度量样本间的距离,运用 Ward 算法产生具有层次的聚类树(图 2),从图 2 中可以看出,监测时段分为 2 组:时段 I:7-9 月份;时段 II:4-6 与 10-11 月份。参考库区内降水资料,降水主要集中在 6-9 月,约占全年降水量的 75%^[2],根据聚类结果,7-9 月份水质倾向于汛期,降雨期的 6 月份水质更倾向于非汛期,因此水库富营养化时间主要表现特征分为汛期与非汛期。

表 3 水库富营养化因子统计值

水质指标	统计值			mg/L
	最大值	最小值	均值	Ⅲ类标准
TN	3.525	0.219	1.535	≤1.0
TP	0.170	0.005	0.036	≤0.05
COD	8.950	1.950	3.920	≤6
Chl-a	314.66	3.580	7.130	



D_{link}/*D_{max}* 为个案锁链距离与最大距离之比

图 2 于桥水库水体污染物的时间尺度聚类分析

4.2 最优插值方法选取

数据的正态性用 Shpiro-Wilk 检验,其中 TN 和 Chl-a 数据通过正态分布性检验,TP 和 COD_{Mn} 数据均呈偏态分布,经对数转换后的数据服从正态分布,满足了地统计分析要求。利用地统计分析过程中导出的交叉验证结果,计算出不同插值方法下各水质参数的 *MBE* 与 *RMSE*,结果见表 4。

从表 4 中可以看出,不同插值方法下各参数的 *MBE* 差异较 *RMSE* 显著。径向基函数插值下的完全规则样条法(CRS)结果显著优于张力样条(ST)和反转多重二次曲面法(IMQ);选取指数平方差模

型(Exp)的普通克里格插值精度显著高于球面(Sph)和高斯半方差模型(Gau)。对比各水质参数下的MBE与RMSE结果可以发现,4个水质指标的插值精度:TN,OK-Exp>OK-Sph>IDW;TP,RBF-CRS>OK-Exp>IDW;COD_{Mn},RBF-CRS>IDW>OK-Exp;Chl-a,OK-Exp>RBF-CRS>IDW。RBF-CRS与OK-Exp插值精度差异不显著,但由于普通克里格插方法反映了插值对象的空

间子相关性,因此OK方法下的指数半方差模型插值精度相对较高,并且避免了IDW法产生“牛眼”的现象,这主要是因为IDW法仅考虑预测点与样点的距离,而克里格方法不仅考虑距离,也将预测点与样本点的空间方位考虑在内^[3-4]。综合交叉验证比较结果,本文选取OK-Exp作为最优插值方法,对于桥水库富营养化单项因子营养状态指数及综合指数空间分布进行评价。

表4 不同插值方法交叉验证结果

插值 方法		MBE				RMSE			
		TN	TP	COD	Chl-a	TN	TP	COD	Chl-a
RBF	IDW	-0.004	-0.026	0.024	0.361	1.105	0.160	0.717	3.410
	CRS	0.005	-0.017	-0.001	0.152	1.098	0.161	0.688	3.385
	ST	-0.011	-0.026	0.003	0.242	1.087	0.160	0.689	3.368
	IMQ	-0.016	-0.026	0.078	0.249	1.131	0.156	0.713	3.521
OK	Sph	-0.001	-0.021	0.078	0.198	1.000	0.154	0.726	3.205
	Exp	0.000	-0.029	0.094	0.165	1.017	0.156	0.738	3.361
	Gau	0.008	0.027	0.056	0.172	0.972	0.151	0.713	3.118

注:1. CRS-完全规则样条径向基函数;ST-张力样条径向基函数;IMQ-反转多重二次曲面径向基函数;
2. 半方差模型:球面(Sph);指数(Exp);高斯(Gau)。

4.3 富营养化评价

综合状态指数(TLI)法是当前国内普遍使用的水库(湖泊)富营养化评价方法,同时采用了国际公认的水体富营养化状态划分标准,因此本文选取富营养化主要影响因子总磷、总氮、叶绿素a及化学需氧量4个参数对库区水体富营养化状况进行单项营养状态指数及综合营养状态指数进行评价。

4.3.1 单项营养指数空间分布特征 基于交叉验证结果选取的最优插值法OK-Exp,通过ArcGIS9.3软件中的栅格计算工具,得到单因子营养状态指数空间分布(图3)。从图中可以看出,TLI(TN)、TLI(TP)、TLI(COD)和LTI(Chl-a)空间分布特征呈现非均一性。

于桥水库中总氮营养状态指数范围是60.772~71.327,随库中水体流动方向呈现逐渐降低的趋势,入库口富营养化指数较高,尤其表现在水库东部的南岸与北岸(淋河与果河入库口),这表明水库水体中的氮营养盐主要来源于水库上游流域及库周流域的农业面源污染,调查发现流域内每年N肥年均施用量(底肥+追肥)约为600 kg/hm²,大量的含氮营养物随着地表径流进入水体,导致进入水库的氮污染物负荷比较大^[2,9-10]。

总磷营养状态指数水平相对稳定,范围为48.703~49.689,磷污染主要集中在库中坝下区域,据调查

研究发现,该区域富集畜牧养殖业污染^[11]。叶绿素a与化学需氧量范围分别为43.276~54.117、29.291~41.582,均呈现由水库中心到南北两岸逐渐增加的趋势,在东马坊及九百户区域二者指数均达到高点,这可能是因为影响二者的污染源主要分布在水库北岸和南岸,北岸沿岸为畜禽养殖场,而南岸沿岸主要为传统的耕作农业,养殖废水与土地肥料通过地表径流进入水库,导致近水域叶绿素和化学需氧量水平升高,随着水力条件变化逐渐衰减。

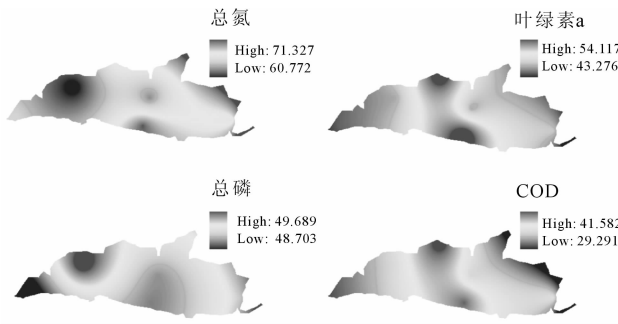


图3 于桥水库水质主要影响因子营养状态指数空间分布

4.3.2 基于时间特征的营养状态指数空间分布 参考水库水体富营养化时间表现,结合最优插值方法对汛期与非汛期的营养状态空间分布特征进行评价,结果见图4。

从图4中可以看出,TN在监测时段内(4-11

月)的营养状态指数最小值为 61.289,表明水库无论在汛期和非汛期氮类污染均比较严重,汛期内 TN 营养状态水平保持在 63.261 左右,差异不显著,均表现出由入库口到出口逐渐衰减的趋势,揭示出水库水体 TN 营养水平主要受水体流动等水力条件影响^[12],其污染主要来自于水库上游调水。

于桥水库中 TP 营养水平在时间与空间上均差异均比较显著。TP 营养指数数值差异在汛期较非汛期显著(汛期:40.429 ~ 84.593;非汛期:36.705 ~ 51.897),非汛期营养指数在果河入口沿岸、淋河入口沿岸及水库北岸较大,呈由沿岸到水库中心逐渐降低的趋势;汛期 TP 营养指数除了水库北岸东马坊附近水域较高与库内若干点较低外,整体水质相对稳定。TP 在时间与空间上的差异性与水体环境及水库地形相关,于桥水库是典型的浅碟型水库,在

降雨集中的汛期阳光充足,水温较高,再加上风浪等因素,增加了底栖生物的活动,扰动了间隙水,加速底泥中营养盐的释放^[13],因此汛期的总磷污染较非汛期严重。

在两个水期内,库内水体 COD 数值差异不显著,汛期与非汛期的指数范围分别是 28.226 ~ 40.737、27.783 ~ 34.579,降雨集中的汛期时间段内叶绿素 a 浓度较大;从空间上看,汛期内水库水体 COD 营养水平主要受南岸沿岸的农业面源污染影响,非汛期主要来自北岸沿岸的畜禽养殖业污染。总氮营养状态指数在两个水期内均存在从入库口到出口的趋势。水库中叶绿素 a 在非汛期的营养状态比较稳定,指数范围是 42.100 ~ 42.168;在汛期时间段内水库出口与坝下监测断面区域营养水平较高,最高值达到 50.985。

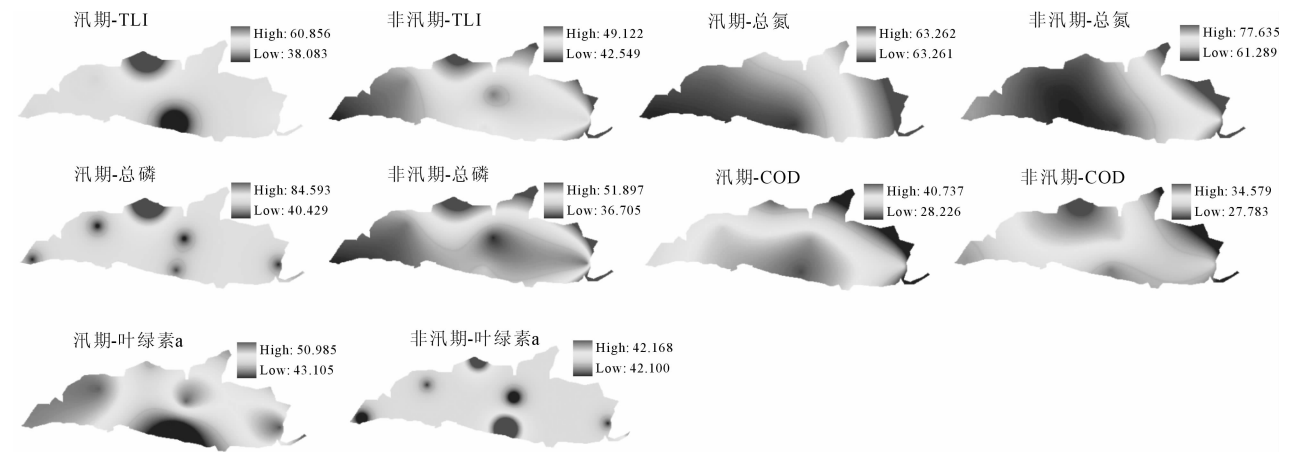


图 4 于桥水库富营养化主要影响因子分水期的营养状态空间分布

4.3.3 于桥水库富营养化综合评价 采用卡尔森富营养化评价方法,综合单项因子营养状态指数,对水库多年的富营养化水平进行整体评价,结果见图 5。营养状态指数(TLI)范围是 45.87 ~ 54.58,于桥水库整体水质处于中营养—轻富营养状态,水库入口和出口大部分水体处于呈中营养状态,水库北岸的坝下与东马坊监测断面附近水体呈现轻富营养状态,揭示出水库水质富营养化主要受北岸沿岸畜禽养殖污染;南岸九百户监测断面附近水质状态仅此于北岸,存在富营养化趋势,这可能与沿岸附近耕地农业化肥的大量使用造成的农业面源污染有关。两岸沿岸大量的畜禽养殖点、居民区、农田等形成围库之势^[12],加上水库湖滨带破坏比较严重,造成大量农业、畜牧业和生活污水未经处理直接随地表径流进入水库^[6],是库区水体中氮、磷营养盐的主要来源,对水库造成严重污染,引起水体富营养化,因此,

于桥水库管理部门应加强对沿岸排污的监管和治理,截断外源、控制内源并适当在水库沿岸设置保护带以保护水库水质。

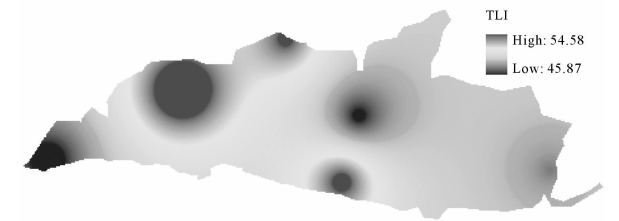


图 5 于桥水库富营养化综合指数分布

综上所述,于桥水库富营养化已有一定程度的体现,且主要为磷控制型。表现在:①水库单项营养状态指数评价中总氮显著高于总磷,总氮营养状态指数随水流方向递减,具有一定的水力特征,而总磷富营养化主要表现在北岸,受畜禽养殖业影响。②

从总氮与总磷的比值来看,平均值为 42.6,表明水库中氮含量远远高于磷。因此于桥水库富营养化主要体现为氮类污染超标,而磷为限制性营养盐。

5 结 语

(1)于桥水库富营养化主要体现为氮污染超标,有机污染较轻;库内总氮浓度与总磷浓度的比值平均为 42.6,表明水库富营养化为磷控型;富营养化在采样期内的时间特征主要表现为汛期(7-9月)和非汛期(4-6月,10,11月)。

(2)结合最优插值方法(OK-Exp)与卡尔森富营养化指数,分析了于桥水库单因子营养状态指数以及综合营养指数空间分布特征,结果发现水库总氮营养状态指数范围是 60.772~71.327,随库中水体流动方向呈现逐渐降低的趋势,主要来自上游入库河流及库周农业面源污染;总磷营养状态指数分布相对稳定,范围为 48.703~49.689,污染主要来自于坝下区域的畜牧养殖业;于桥水库的综合营养状态指数范围是 45.87~54.58,已经呈现中营养-轻富营养状态,在水库北岸尤为严重。

(3)从基于时间特征的富营养化空间分布研究发现,汛期内营养状态的空间差异较非汛期显著,非汛期内营养状态均表现为水库北岸沿岸和水库入口高而水库出口低的趋势。于桥水库富营养化水平主要受库周流域内经济活动影响,因此,控制水库周边非点源污染,建立合理的土地利用模式与科学的农业生态系统管理措施降低农业面源污染,引导库周居民环保的生活行为方式等措施对有效管理水库水质十分重要。

参考文献:

- [1] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. 环境科学与技术,2010,33(3): 92-98.
- [2] 陆海明,尹澄清,王夏晖,等. 于桥水库周边农业小流域

氮素流失浓度特征[J]. 环境科学学报,2008,28(2): 349-355.

- [3] Froeschke J, Stunz G W, Wildhaber M L. Environmental influences on the occurrence of coastal sharks in estuarine waters [J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 407: 279-292.
- [4] Monestiez P, Dubroca L, Bonnin E, et al. Geostatistical modeling of spatial distribution of *Balaenoptera physalus* in the northwestern mediterranean sea from sparse count data and heterogeneous observation efforts [J]. Ecological Modelling, 2006, 193(3): 615-628.
- [5] 何文英,毕孟飞,李泽利,等. 新安江流域降雨量空间插值方法和参数筛选[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(1): 130-134.
- [6] Li J, Heap A D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors[J]. Ecological Informatics, 2011, 6(3): 228-241.
- [7] 张小东. 福建省棉花滩水库富营养化状况评价及分析[J]. 水生态学杂志,2012,33(5): 20-24.
- [8] Zhou F, Liu Y, Guo H C. Application of multivariate statistical methods to water quality assessment of the water-courses in Northwestern New Territories, Hong Kong [J]. Environ Monit Assess, 2007, 132(1-3): 1-13.
- [9] 吴光红,曹珊珊,于雅琴,等. 天津典型水环境表层沉积物中营养盐含量及动态特征[J]. 环境科学,2009,30(3): 726-732.
- [10] 李俊然,陈利顶,傅伯杰,等. 于桥水库流域地表水非点源 N 时空变化特征[J]. 地理科学,2002,22(2): 238-242.
- [11] 金丹越,黄艳菊. 天津于桥水库主要环境问题及其防治对策[J]. 环境科学研究,2004,17(S1): 77-79+85.
- [12] 刘洪波,朱梦玲,王精志,等. 水库水动力对水体富营养化影响[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2): 19-21.
- [13] 丛海兵,黄廷林,李创宇,等. 于桥水库沉积物内源污染特性研究[J]. 水资源保护,2006,22(4): 20-23+61.