

王欲敏,曾德芳,阙思思,等. 三峡库区水质及影响因素的典型相关分析[J]. 净水技术,2022,41(4):41-47,74.

WANG Y M, ZENG D F, QUE S S, et al. Water quality of the Three Gorges Reservoir area and canonical correlation analysis of influencing factors[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4):41-47,74.



扫我试试?

## 三峡库区水质及影响因素的典型相关分析

王欲敏,曾德芳\*,阙思思,罗晗郁,周文强

(重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074)

**摘要** 随着我国经济的高速发展,水环境的可持续发展成为十分重视的问题。三峡库区作为长江干流最重要的部分之一,其水质情况将直接或者间接影响长江流域的水环境状况,从而影响我国的经济。文章根据三峡库区 2008 年—2017 年 pH 值(7.63)、DO 含量(8.5 mg/L)、COD<sub>Mn</sub> 含量(1.71 mg/L)、氨氮含量(0.1 mg/L)的监测数据,以及潜在的多项水质影响因素的多方统计数据,利用典型相关分析法对筛选出的 6 项水质影响因素与 4 项水质指标间的两个整体系统的相关性进行研究。根据分析得出的典型相关系数(1.000、0.960、0.895)、典型相关模型以及典型结构分析和冗余分析的结果,证明了两个系统存在着显著的相关性。

**关键词** 长江航运 三峡库区 典型相关分析 长江水质 水质影响因素

**中图分类号:** TU991.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)04-0041-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.04.007

## Water Quality of the Three Gorges Reservoir Area and Canonical Correlation Analysis of Influencing Factors

WANG Yumin, ZENG Defang\*, QUE Sisi, LUO Hanyu, ZHOU Wenqiang

(Ministry of Education Key Laboratory of Water Conservancy and Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract** With the rapid development of our country's economy, the sustainable development of water environment has become an extremely important issue. Three Gorges Reservoir area is one of the most important parts of the Yangtze River main stream. Its water quality will directly or indirectly affect the water environment of the Yangtze River basin, which will affect our country's economic development. Based on the monitoring data of pH value(7.63), concentration of DO (8.5 mg/L), COD<sub>Mn</sub>(1.71 mg/L), ammonia nitrogen (0.1 mg/L) in water of Three Gorges Reservoir area from 2008 to 2017, as well as the multilateral statistical data of potential water quality influencing factors, the article used canonical correlation analysis method studies correlation of two overall systems between six selected water quality influencing factors and four water quality indices. According to the analysis of typical correlation coefficients (1.000, 0.960, 0.895), the canonical correlation model, and the analysis of typical structure result of redundancy analysis, it proved that there was a significant correlation between two systems.

**Keywords** Yangtze River shipping Three Gorges Reservoir area canonical correlation analysis water quality of Yangtze River water quality influencing factors

[收稿日期] 2020-12-16

[基金项目] 国家内河航道整治工程技术重点项目:长江航运发展及其经济驱动机理研究(SLK2017A04);重庆市人力资源和社会保障局省级项目:长江上游航运发展的空间驱动机理和分流模型研究(ex2018114);重庆市教育委员会科学技术研究项目:航运需求预测大数据决策模型构建及其应用(KJ1705146)

[作者简介] 王欲敏(1977—),女,副教授,研究方向为航运生态、航运管理等,E-mail:410298174@qq.com。

[通信作者] 曾德芳(1993—),女,硕士,研究方向为航运生态,E-mail:1392137622@qq.com。

## 1 背景

三峡库区位于我国长江上游下段,库区内地形复杂,山峦重叠,地形陡峻,谷深水急。三峡工程水利枢纽工程是综合治理长江中下游防洪问题而实施的项目。随着三峡库区经济的快速增长,水体污染负荷增加,地表径流影响整个库区水体,从而影响周边城市水环境质量<sup>[1]</sup>。2010年,三峡水库完成175 m水位蓄水后,河道干支流流速变缓、滞留时间延长、水体自净能力减弱,在污染物排放相同情况下,库区水环境受到了更严重的污染<sup>[2]</sup>,每年6月—9月为145 m防洪限制水位,水位变幅呈反季节变化,由此引发的水环境污染问题进一步突显<sup>[3]</sup>。据调查,三峡库区仅71%的水域符合水质标准,29%的水域受到严重污染,污染区域达30多 km,而三峡库区支流众多,不易监管。因此,保护和改善库区水质状况成为重中之重<sup>[1]</sup>。

研究表明,重金属对三峡库区的水体也造成了严重的污染,三峡工程修建完成后,由于大量的船舶聚集在库区,船舶的废气和废水直接排入水体,导致了水体重金属浓度的上升<sup>[4]</sup>。其他的非点源污染也是三峡水质恶化的重要原因,如农药<sup>[5]</sup>、磷污染物<sup>[6]</sup>、氨氮及 COD<sub>Mn</sub><sup>[7]</sup>等。水质恶化一直是三峡库区最为关注的问题,富营养化往往会威胁到该地区的可持续发展。

针对库区水体污染问题,学者们开展了大量研究,如分析影响三峡库区富营养化的主要因素<sup>[8]</sup>、

研究三峡水库蓄水后水质的变化<sup>[9]</sup>、筑坝对库区水质的不同影响等<sup>[10]</sup>。而这些研究大多集中在评价库区水体污染的状态及影响因素、分析库区污染物的来源和输入特点等,对水质影响因素和水质指标(pH、DO、COD<sub>Mn</sub>、氨氮)之间的相关性研究较少。

鉴于此,本文收集了三峡库区水质指标和潜在的库区水质影响因素等相关历史资料数据,通过分析两者间存在的关系,找出影响库区水质的主要因素以及得出库区水质及其影响因素间的相关性。本研究有利于库区水污染的规划、管理和决策,同时,也能为后续的三峡库区水质趋势预测研究做铺垫。

## 2 数据及方法

### 2.1 指标数据的选取及数据来源

本文采用年平均值的方式归纳整理三峡库区10年间(2008年—2017年)具有代表性的水质指标数据及其潜在影响因素指标数据。水质指标选用《中国环境监测水质周报》<sup>[11]</sup>中的评价指标,包括pH、DO、COD<sub>Mn</sub>、氨氮;潜在的水质影响因素从《长江流域水资源公报》<sup>[12]</sup>、《长江泥沙公报》<sup>[13]</sup>及《长江三峡工程生态与环境监测公报》<sup>[14]</sup>中选出,主要包括降雨量、入库输沙量、出库输沙量、淤积量、工业废水排放量、城镇生活污水、三峡过闸货物量、船舶油污水、船舶油污水中石油类、船舶生活污水等。各类指标变量如表1所示,其具体数据如图1、图2、表2所示。

表1 三峡库区水质指标及其影响因素  
Tab. 1 Water Quality Indices and Influencing Factors in Three Gorges Reservoir Area

指标类型	指标名称	指标编码	指标单位	数据来源	检测方法
三峡库区水质指标	pH	$x_1$	无	《中国环境监测水质周报》	《地表水环境质量标准》 (GB 3838—2002)
	DO	$x_2$	mg/L		
	COD <sub>Mn</sub>	$x_3$	mg/L		
	氨氮	$x_4$	mg/L		
水质潜在影响因素	降雨量	$y_1$	mm	《长江流域水资源公报》	—
	入库输沙量	$y_2$	亿 t	《长江泥沙公报》	—
	出库输沙量	$y_3$	亿 t		
	淤积量	$y_4$	亿 t		
	工业废水排放量	$y_5$	亿 t	《长江三峡工程生态与环境监测公报》	—
	城镇生活污水	$y_6$	亿 t		
	三峡过闸货物量	$y_7$	万 t	《长江流域水资源公报》	—
	船舶油污水	$y_8$	万 t	《长江三峡工程生态与环境监测公报》	—
	船舶油污水中石油类	$y_9$	t		
	船舶生活污水	$y_{10}$	万 t		

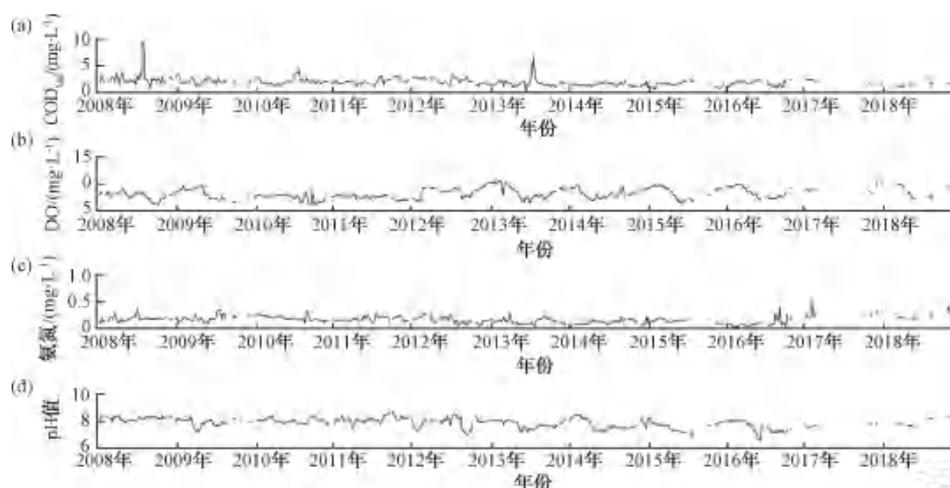


图1 三峡库区水质指标

Fig. 1 Water Quality Indices of Three Gorges Reservoir

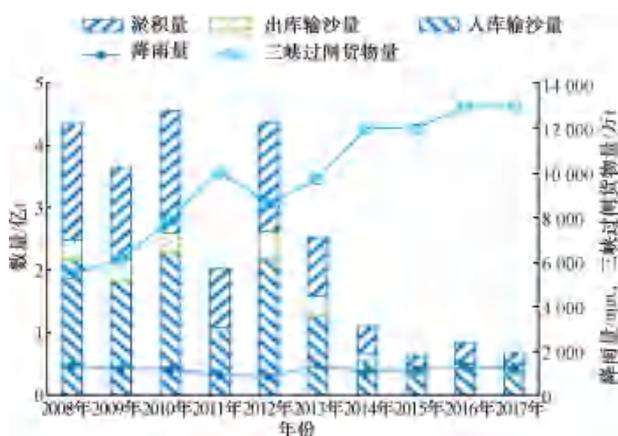


图2 三峡库区水质潜在影响因素

Fig. 2 Potential Influencing Factors of Water Quality in Three Gorges Reservoir Area

## 2.2 典型相关分析

典型相关分析<sup>[15-16]</sup>是研究两组变量之间相关关系的多元统计方法,与主成分分析类似,典型相关分析也是提取数组中具有代表性的综合变量,不同之处在于典型相关分析是从总体上把握两组变量的相关关系而不是一组变量。典型相关分析已在多个领域得到应用<sup>[17-19]</sup>,具体思路是通过将两组变量进行降维的方式,分别提取出两组变量中具有代表性的两个综合随机变量,得出的两个综合随机变量称为一对典型变量,利用这对典型变量的相关性来反映原来两组变量的相关关系。

典型相关分析基本定义如下。给定两个带有限矩的随机变量的列向量:  $X = (x_1, \dots, x_n)'$  和  $Y =$

表2 2008年—2017年三峡库区污水排放量

Tab. 2 Wastewater Discharge in Three Gorges Reservoir Area from 2008 to 2017

指标年份	工业废水/亿 t	城镇生活污水/亿 t	船舶油污水/万 t	船舶油污水中石油类排放量/t	船舶生活污水/万 t
2008年	5.58	5.93	41.20	37.87	404.60
2009年	4.86	6.23	41.30	37.43	399.70
2010年	3.19	6.15	48.13	41.18	400.50
2011年	1.91	6.72	49.59	45.25	388.90
2012年	1.73	7.31	51.02	46.75	397.10
2013年	1.90	7.87	50.00	55.20	393.80
2014年	2.12	7.94	43.90	46.10	374.00
2015年	2.12	8.15	39.40	37.90	371.70
2016年	1.36	12.12	30.21	26.42	277.30
2017年	1.06	12.52	18.00	1.40	238.70

$(y_1, \dots, y_m)'$ , 定义互协方差矩阵:  $\Sigma XY = \text{cov}(X, Y)$  为  $n \times m$  的矩阵, 求出向量  $a$  和  $b$  使得随机变量  $a'X$  和  $b'Y$  的相关性  $\rho = \text{corr}(a'X, b'Y)$  最大。其中两个随机变量  $U = a'X$  和  $V = b'Y$  是第一对典型变量。再寻求另一个最大化相关但与第一对典型变量不同的向量, 得出第二对典型变量, 此步骤会进行  $\min\{m, n\}$  次。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 影响因素分析

本文采用的相关分析方法是 Spearman(斯皮尔曼)等级相关分析<sup>[20]</sup>, 图3是在BP神经网络模型中完成的三峡库区水质及其影响因素的相关分析的结果。三峡库区的水质不是和所有的潜在影响因素都存在着相关性, 且不同的水质影响指标的影响程度和相关程度也不尽相同。由图3可知, 库区水质的影响因素主要有入库输沙量( $y_2$ )、淤积量( $y_4$ )、工业废水排放量( $y_5$ )、城镇生活污水( $y_6$ )、三峡过闸货物量( $y_7$ )和船舶生活污水( $y_{10}$ ), 这些影响因素与水质间都存在着较高的相关性, 而降雨量( $y_1$ )、出库输沙量( $y_3$ )、船舶油污水( $y_8$ )和船舶油污水中石油类( $y_9$ )与各类水质指标间的相关性水平较低。

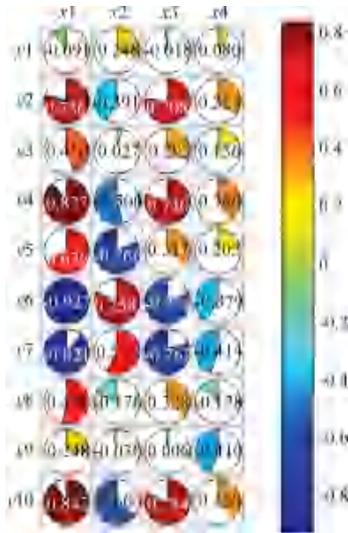


图3 相关分析结果

Fig. 3 Results of Correlation Analysis

**pH 的影响因素:** pH 与入库输沙量( $y_2$ )、淤积量( $y_4$ )、工业废水排放量( $y_5$ )和船舶生活污水( $y_{10}$ )存在正向相关性, 与城镇生活污水( $y_6$ )、三峡过闸货物量( $y_7$ )存在负向相关性。

**DO 的影响因素:** DO 与工业废水( $y_5$ )、船舶生

活污水( $y_{10}$ )存在负向相关性, 随着城镇生活污水( $y_6$ )的增大, DO 也随之增加。

**COD<sub>Mn</sub> 的影响因素:** COD<sub>Mn</sub> 与入库输沙量( $y_2$ )、淤积量( $y_4$ )和船舶生活污水( $y_{10}$ )存在正向相关性, 与城镇生活污水( $y_6$ )、三峡过闸货物量( $y_7$ )存在负向相关关系。

**氨氮的影响因素:** 氨氮与其他任何影响因素都没有显著的相关性。

pH 逐年呈现下降趋势, 泥沙会吸附水体中的磷污染物<sup>[21-22]</sup>, 磷酸盐又是碱性, 因此, 随着泥沙含量的降低, 库区水体的 pH 也在减小; 工业废水排放量和船舶生活污水排放量的减少也使得 pH 下降, 说明三峡库区排放的工业废水和库区船舶生活污水总体呈碱性; 而城镇生活污水的增加使得 pH 下降, 说明城镇生活污水总体呈现酸性。

DO 主要受到水温、含盐量等的影响<sup>[23-24]</sup>, 库区 DO 与工业废水排放量呈负相关性、与城镇生活污水呈正相关性, 说明了库区工业废水和城镇生活污水的总体含盐量在降低; 此外, 库区航道等级的不断提升也可能是 DO 增加的因素。COD<sub>Mn</sub> 和 pH 的影响因素有些类似, 与库区的入库输沙量、淤积量以及船舶生活污水呈正向相关性, 与城镇生活污水和三峡过闸货物量呈负向相关性, 而 COD<sub>Mn</sub> 呈现逐年下降的趋势, 说明库区前 3 项因素比后两项因素对 COD<sub>Mn</sub> 的影响更大。

#### 3.2 典型相关分析

相关分析结构表明, 三峡库区水质受到许多因素的影响, 库区水质也与各种因素间相关, 虽然能够反映库区水质与其影响因素两两间的相关关系, 但并不能直接反映三峡库区的水质与其影响因素两整体的相关程度。因此, 本节运用典型相关分析将三峡库区水质和库区水质的影响因素作为两个整体进行分析, 进一步探究库区水质与其影响因素间的相关关系。其中仍将 pH、DO、COD<sub>Mn</sub> 及氨氮(4 项)用于表征三峡库区水质状况, 将对 4 项水质指标影响最显著的因素入库输沙量( $y_2$ )、淤积量( $y_4$ )、工业废水( $y_5$ )、城镇生活污水( $y_6$ )、三峡过闸货物量( $y_7$ )、船舶生活污水( $y_{10}$ )这 6 项表征水质影响因素。

##### 3.2.1 典型相关性及显著性检验

通过对三峡库区水质及其影响因素两组数据

进行典型相关分析,提取出 4 对典型相关变量,得出了 4 个典型相关系数,分别是 1.000、0.960、0.895、0.683。在总体系数是否为 0 的假设性检验中,前 3 个典型相关系数满足显著性要求 ( $P < 0.05$ ),意味着  $X$  和  $Y$  两组分析项之间有着紧密的正向相关关系,即三峡库区水质与其影响因素两整体间存在着显著的相关关系(表 3)。通过典型相关分析,得出的前两个典型相关系数系数(1.000)大于简单分析得出的相关系数,说明典型相关分析结果更能反映三峡库区水质及其影响因素间的关系。后续将重点考虑呈现出显著性的前 3 对典型变量。

表 3 典型相关性及其显著性检验

Tab. 3 Canonical Correlation and Significance Analysis

典型相关对	典型相关系数	$F$	$P$
1	1.000	-21 315.491	0.000
2	0.960	-0.738	0.000
3	0.895	0.000	0.000
4	0.683	0.292	0.839

### 3.2.2 标准化典型相关系数及典型相关模型

因各项指标的单位不同,为去除量纲的影响,需对数据进行标准化后再进行计算得出结果。前 3 个典型相关系数满足显著性要求,所以只需计算前 3 对典型相关变量,结合典型相关系数运用 SPSS 软件计算得出 3 对典型相关模型,如式(1)~式(3)。

第一对典型相关模型:

$$\begin{cases} U_1 = 0.701x_1 + 0.834x_2 - 0.901x_3 - 0.383x_4 \\ V_1 = 7.51y_2 - 7.837y_4 - 0.088y_5 - \\ 1.227y_6 + 0.915y_7 - 0.585y_{10} \end{cases} \quad (1)$$

第二对典型相关模型:

$$\begin{cases} U_1 = 1.625x_1 + 0.612x_2 - 1.474x_3 + 0.646x_4 \\ V_1 = 8.995y_2 - 9.884y_4 - 1.639y_5 - \\ 8.318y_6 - 0.737y_7 - 7.195y_{10} \end{cases} \quad (2)$$

第三对典型相关模型:

$$\begin{cases} U_1 = -1.469x_1 - 0.043x_2 + 0.9x_3 + 0.758x_4 \\ V_1 = 4.12y_2 - 3.915y_4 + 0.181y_5 - \\ 0.644y_6 - 0.298y_7 - 1.932y_{10} \end{cases} \quad (3)$$

根据典型相关模型方程,第一对典型相关变量中,典型变量  $U_1$  主要由 pH( $x_1$ )、DO( $x_2$ ) 和 COD<sub>Mn</sub>( $x_3$ ) 所主导,典型系数为 0.701、0.834 和 -0.901,其中最具主导作用的是 COD<sub>Mn</sub>;典型变量  $V_1$  由入库输沙量( $y_2$ )和淤积量( $y_4$ )主导,典型系数为 7.510 和 -7.837。考虑到入库输沙量的典型系数符号为正,pH 和 DO 的典型系数符号为正,COD<sub>Mn</sub> 的典型系数符号为负,可以认为入库输沙量的增大会使 pH、DO 增加,使 COD<sub>Mn</sub> 减小;同样考虑到淤积量典型系数符号为负,可以认为淤积量的增大会使 pH、DO 减小,使 COD<sub>Mn</sub> 增加。

第二对典型变量中,典型变量  $U_2$  由 pH( $x_1$ )、COD<sub>Mn</sub>( $x_3$ ) 起主导作用,典型系数为 1.625 和 -1.474;典型变量  $V_2$  由入库输沙量( $y_2$ )、淤积量( $y_4$ )、城镇生活污水( $y_6$ )和船舶生活污水( $y_{10}$ )起主导作用,对应的典型系数为 -8.318、-7.195、8.995 和 -9.884。考虑到入库输沙量的典型系数符号为正,pH 和 COD<sub>Mn</sub> 典型系数符号分别为正和负,可以认为入库输沙量的增大会使 pH 增加,使 COD<sub>Mn</sub> 减小;同样考虑到城镇生活污水、船舶生活污水和淤积量的典型系数符号为负,认为城镇生活污水、船舶生活污水和淤积量的增大会使 pH 减小,使 COD<sub>Mn</sub> 增加。

第三对典型变量中,典型变量  $U_3$  主要由 pH( $x_1$ )起主导作用,典型系数为 -1.469;典型变量  $V_3$  由入库输沙量( $y_2$ )和淤积量( $y_4$ )起主导作用,对应的典型系数为 4.120 和 -3.915。考虑到入库输沙量的典型系数符号为正,pH 的典型系数符号为负,可以认为入库输沙量的增大会使 pH 减小;考虑到淤积量和 pH 的典型系数符号相同,认为淤积量的增大会使 pH 增加。

通过 3 对典型相关模型方程得出的模型可以看出,pH 对  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  这 3 个典型变量起着主导作用,可以认为 pH 在这 4 项水质指标中是最能反映三峡库区水质状况的指标;同样的,对  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  这 3 个典型变量同时起到主导作用的指标是入库输沙量和淤积量,可以认为在三峡库区水质的影

响因素中入库输沙量和淤积量是占有最大比重的两项指标。

### 3.2.3 典型结构分析

典型结构分析是通过典型载荷和交叉载荷的数值来衡量原始变量与典型变量的相关程度和方向,典型载荷是反映原始变量与自身典型变量间的相关关系的指标,其数值的绝对值越大,代表原始变量对自身典型变量的解释程度越高,而交叉载荷则是原始变量对另一个典型变量的相关关系指标。

典型载荷计算如式(4)~式(7)。

$$\begin{aligned} \text{cov}(x_i, u_j) &= \text{cov}(x_i, a_{1j}x_1 + a_{2j}x_2 + \dots + a_{pj}x_p) = \\ &= \text{cov}(x_i, a_{1j}x_1) + \text{cov}(x_i, a_{2j}x_2) + \dots + \\ &= \text{cov}(x_i, a_{pj}x_p) = \sum_{k=1}^p a_{kj}\sigma_{x_i, x_k} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\rho(x_i, u_j) = \sum_{k=1}^p a_{kj}\sigma_{x_i, x_k} / \sqrt{\sigma_{x_i, x_i}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(y_i, v_j) &= \text{cov}(y_i, b_{1j}y_1 + b_{2j}y_2 + \dots + b_{pj}y_p) = \\ &= \text{cov}(y_i, b_{1j}y_1) + \text{cov}(y_i, b_{2j}y_2) + \dots + \\ &= \text{cov}(y_i, b_{pj}y_p) = \sum_{k=1}^p b_{kj}\sigma_{y_i, y_k} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho(y_i, v_j) = \sum_{k=1}^p b_{kj}\sigma_{y_i, y_k} / \sqrt{\sigma_{y_i, y_i}} \quad (7)$$

交叉载荷计算如式(8)~式(11)。

$$\begin{aligned} \text{cov}(x_i, v_j) &= \text{cov}(x_i, b_{1j}y_1 + b_{2j}y_2 + \dots + b_{pj}y_p) = \\ &= \text{cov}(x_i, b_{1j}y_1) + \text{cov}(x_i, b_{2j}y_2) + \dots + \end{aligned}$$

$$\text{cov}(x_i, b_{pj}y_p) = \sum_{k=1}^p b_{kj}\sigma_{x_i, y_k} \quad (8)$$

$$\rho(x_i, v_j) = \sum_{k=1}^p b_{kj}\sigma_{x_i, y_k} / \sqrt{\sigma_{x_i, x_i}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(y_i, u_j) &= \text{cov}(y_i, a_{1j}x_1 + a_{2j}x_2 + \dots + a_{pj}x_p) = \\ &= \text{cov}(y_i, a_{1j}x_1) + \text{cov}(y_i, a_{2j}x_2) + \dots + \\ &= \text{cov}(y_i, a_{pj}x_p) = \sum_{k=1}^p a_{kj}\sigma_{y_i, x_k} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\rho(y_i, u_j) = \sum_{k=1}^p a_{kj}\sigma_{y_i, x_k} / \sqrt{\sigma_{y_i, y_i}} \quad (11)$$

由表4可知,pH( $x_1$ )、DO( $x_2$ )和COD<sub>Mn</sub>( $x_3$ )与第一典型变量 $U_1$ 的相关性很高,典型载荷系数(相关系数)为-0.832、0.717和-0.861,说明pH、DO和COD<sub>Mn</sub>可以很大程度反映三峡库区的水质状况。在交叉载荷中,pH、DO和COD<sub>Mn</sub>与第一典型变量 $V_1$ 同样具有很强的相关程度,说明三峡库区水质影响因素对pH、DO和COD<sub>Mn</sub>的影响程度最大。水质影响因素入库输沙量( $y_2$ )、淤积量( $y_4$ )、工业废水排放量( $y_5$ )和三峡过闸货运量( $y_7$ )与第一典型变量 $V_1$ 具有很强的相关程度,典型载荷系数为-0.719、0.731、-0.679和-0.737,说明4项指标在三峡水质影响因素中占有主导地位;在交叉载荷中,入库输沙量( $y_2$ )、淤积量( $y_4$ )、工业废水排放量( $y_5$ )和三峡过闸货运量( $y_7$ )与第一典型变量 $U_1$ 同样有着很强的相关程度,说明这4项指标对三峡库区水质状况的影响最为显著,典型变量的关系结构如图4所示。

表4 典型结构分析  
Tab.4 Typical Structure Analysis

变量	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$x_1$	-0.832	0.237	-0.393	-0.832	0.228	-0.352
$x_2$	0.717	-0.079	0.635	0.717	-0.075	0.568
$x_3$	-0.861	-0.164	0.059	-0.861	-0.158	0.053
$x_4$	-0.550	0.650	0.522	-0.550	0.624	0.468
$y_1$	-0.719	-0.177	-0.151	-0.719	-0.170	-0.135
$y_2$	0.471	-0.060	0.759	0.471	-0.058	0.679
$y_3$	0.731	0.050	0.262	0.731	0.048	0.234
$y_4$	-0.292	-0.060	-0.819	-0.292	-0.057	-0.733
$y_5$	-0.679	-0.062	-0.239	-0.679	-0.060	-0.214
$y_6$	-0.737	0.038	-0.254	-0.737	-0.036	-0.228

### 3.2.4 典型冗余度分析及解释能力

典型冗余度<sup>[25]</sup>反映的是各典型变量对各变量组方差解释的百分比,第一典型冗余表示典型变量

对自身变量组解释的百分比,第二典型冗余表示典型变量对另一变量组解释的平均比例,典型相关系数的平方表示两组典型变量间共同变异的百分比。

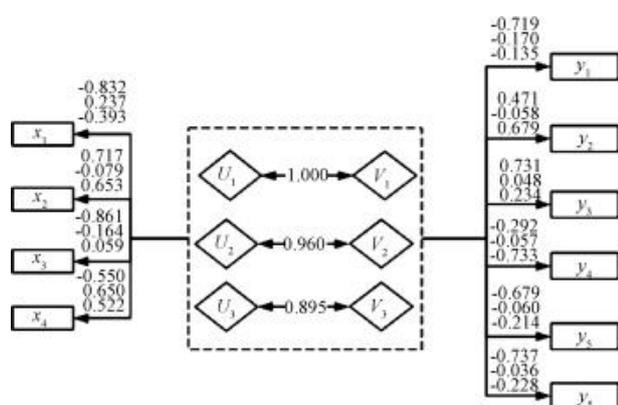


图4 相关变量关系结构图

Fig. 4 Structure Diagram of Relationship among Related Variables

典型冗余度分析结果如表5所示。

表5 典型变量的解释能力  
Tab. 5 Explanatory Ability of Typical Variables

典型变量	第一典型冗余	第二典型冗余	典型相关系数的平方
$U_1$	0.563	0.563	1.000
$U_2$	0.128	0.112	0.922
$U_3$	0.208	0.167	0.801
$U_1+U_2+U_3$	0.899	0.842	—
$V_1$	0.394	0.394	1
$V_2$	0.007	0.008	0.922
$V_3$	0.195	0.243	0.801
$V_1+V_2+V_3$	0.596	0.645	—

从冗余分析结果可知,两组变量(X、Y)的第一典型冗余为0.899和0.596;第二典型冗余为0.842和0.645,表明这3对典型变量均能较好预测自身组内变量,也能有效预测对方的变量组,说明了三峡库区水质及其影响因素不仅能被自身的典型变量解释,同时也能被对方的典型变量解释。而3对典型相关变量的共同解释百分比(1.000、0.922、0.801)均高于0.700,再次说明三峡库区水质与其影响因素间存在着相关关系,且相关性非常显著。

#### 4 结论及展望

通过对三峡库区的4项水质指标及其潜在的水质影响因素进行相关分析,结果表明,影响三峡库区水质的因素主要为库区入库输沙量、淤积量、工业废水排放量、城镇生活污水、过闸货物量、船舶生活污

水。本研究对三峡库区的4项水质指标(pH、DO、COD<sub>Mn</sub>、氨氮)与6项水质影响因素(工业废水排放量、城镇生活污水、过闸货物量、船舶生活污水、入库输沙量、淤积量)两个整体间进行了典型相关分析,得出3对典型相关变量及3个典型相关系数。它们的典型相关系数(1.000、0.960、0.895)均大于简单相关分析得出的所有相关系数,说明要研究三峡库区的水质及其影响因素间的关系,需先从两个整体系统进行分析,再逐步分析系统中每个指标间的单一关系。

在典型相关模型中,pH对 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 这三个典型变量起着主导作用,即pH在这4项水质指标中是最能反映三峡库区水质状况的指标;入库输沙量和淤积量对 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 这三个典型变量同时起到主导作用,即入库输沙量和淤积量在三峡库区水质的影响因素中占有最大比重的两项指标。在典型结构分析中,得出pH、DO及COD<sub>Mn</sub>能够很大程度反映三峡库区的水质状况,且受水质影响因素的影响程度最大;工业废水排放量、三峡过闸货运量、入库输沙量和淤积量在三峡水质影响因素中占有主导地位,且对库区水质状况的影响最显著。在冗余分析中,再次得出三峡库区4项水质指标与6项水质影响因素间存在显著的相关性。

三峡库区还有其他的水质评价指标,且影响库区水质状况的因素也远不止本文所涉及的,因此,在三峡库区水质影响因素方面研究还有待加深。另外,水质指标间以及水质影响因素间可能存在着内部的影响,如pH会影响COD<sub>Mn</sub>的含量,入库输沙量也对淤积量产生影响,因此,还需考虑将两个部分进行整体的相关性分析,才更能说明二者的联系。

#### 参考文献

- [1] 李智. 三峡库区水质监测及化学特征分析[J]. 化工管理, 2019(14):36-37.
- [2] 苏丽萍,何熙. 浅谈三峡库区水环境污染及治理[J]. 广东化工, 2015,42(19):123-124.
- [3] 张丽,胡天鹏,张慧迪,等. 三峡库区重庆段城区沿江水质特征与健康风险[J]. 湖北理工学院学报, 2019,35(4):18-23.
- [4] 王健康,周怀东,陆瑾,等. 三峡库区水环境中重金属污染研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014,12(1):49-53.

(下转第74页)

- 农业大学学报, 1997(2): 108-113.
- [19] NIELSEN N E B S A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake[J]. Agronomy Journal-Abstract, 1978, 70(5): 695-698.
- [20] 田霄鸿, 李生秀, 王清君. 几种作物  $\text{NO}_3^-$  吸收动力学参数测定方法初探[J]. 土壤通报, 2001(1): 16-18, 31-49.
- [21] WIJFFELS R H, LEENEN E J T M, TRAMPER J. Possibilities of nitrification with immobilized cells in waste-water treatment: Model or practical system? [J]. Water Science and Technology, 1993, 27(5-6): 233-240. DOI: 10.2166/wst.1993.0503.
- [22] 童君, 吴志超, 张新颖, 等. 自然通风沸石生物滴滤池脱氮机理[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1435-1440.
- [23] CACCO G, FERRARI G, SACCOMANI M. Pattern of sulfate uptake during root elongation in maize: Its correlation with productivity[J]. Physiologia Plantarum, 1980, 48(3): 375-378. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1980.tb03271.x.
- [24] 唐艺璇, 郑洁敏, 楼莉萍, 等. 3种挺水植物吸收水体  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  的动力学特征比较[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 614-618.
- [25] 张熙灵, 王立新, 刘华民, 等. 芦苇、香蒲和蘆草3种挺水植物的养分吸收动力学[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2238-2245.
- [26] 谢静, 吕锡武, 李洁. 6种湿地植物吸收污水中氮和磷的动力学[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4067-4072.
- [27] 巩佳佳, 吕锡武, 杨子萱, 等. 4种冷季型禾草吸收氮磷营养盐的动力学特性[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 60-64.
- [28] 檀香逸, 吕锡武, 杨子萱, 等. 不同水培观赏植物对氮素的吸收动力学特性分析[J]. 水处理技术, 2018, 44(6): 42-45, 51.
- [29] 邓振山, 李买平, 郝雷, 等. 巨菌草内生细菌多样性及其促生特性[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1213-1221.
- [30] 吕路芳, 姜宁, 潘春媛, 等. 杂交狼尾草与羊草、玉米秸秆 CNCPS 和 GI 特性评价[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019(22): 109-113.
- [31] 宣朴, 徐利远, 岳春芳, 等. 皇竹草组织培养再生植株研究[J]. 中国草地, 2001(1): 42-46.
- [32] 刘水香. 养殖好牧草——甜象草[J]. 湖南农业, 2015(1): 20-20.
- [33] 谢勇丽, 曾霞, 赵永生, 等. 组合湿地净化农村散户生活污水研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(7): 124-127.
- [34] 王琳, 隋春晓, 展威. 潮汐流人工湿地处理高速公路服务区污水研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(9): 136-139, 198.
- [35] 陈静, 汪晓军, 周松伟, 等. 生物沸石吸附及原位再生处理低温含氨氮废水[J]. 水处理技术, 2019, 45(2): 92-96.
- [36] 徐祥熙, 王荣震, 徐立荣, 等. 不同水力条件下人工湿地处理效果中试研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021(3): 1-6.

## (上接第47页)

- [5] YONG Z. Pesticide pollution to water environment of Three Gorges Reservoir area[C]. Wuhan: International Conference on Challenges in Environmental Science & Computer Engineering, 2010.
- [6] 周琴, 辛小康, 尹炜, 等. 三峡水库磷污染特性及变化趋势研究[J]. 三峡生态环境监测, 2019, 4(1): 16-21.
- [7] 娄保锋, 臧小平, 吴炳方. 三峡水库蓄水运用期化学需氧量和氨氮污染负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(10): 1268-1273.
- [8] CAI Q H, HU Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30(1): 7-11.
- [9] DAI H, DAI D. Changes and countermeasures of reservoir water quality after storage of Three Gorges Reservoir[M]. 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-89465-0\_388.
- [10] ZHAO P, TANG X, TANG J, 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.
- [11] 《全国主要流域重点断面水质自动监测周报》要点摘登[N]. 人民长江报, 2019-01-02(52).
- [12] 《2015年长江流域及西南诸河水资源公报》要点摘登[N]. 人民长江报, 2016-12-24(7).
- [13] 《2016年长江泥沙公报》摘要[N]. 人民长江报, 2017-08-19(7).
- [14] 《长江三峡工程生态与环境监测公报》发布[J]. 环境保护, 1999(7): 39-39.
- [15] 黄良美, 陈蓓, 陆晓艳, 等. 广西综合环境质量的典型相关分析[J]. 生态学报, 2019, 38(11): 3450-3459.
- [16] 陈才扣, 彭倩倩, 孙强强. 一种改进的典型相关分析方法及其应用[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 388-390.
- [17] 刘鸿斌, 宋留. 废水处理过程的典型相关分析建模方法研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(1): 101-108.
- [18] 柴伟, 纪镐南. 污水处理出水 BOD 区间预测建模[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(2): 71-76.
- [19] 张群. 云南省产业结构与生态环境质量的典型相关分析[J]. 现代商业, 2018(5): 106-107.
- [20] 王晓燕, 李美洲. 浅谈等级相关系数与斯皮尔曼等级相关系数[J]. 广东轻工职业技术学院学报, 2006, 5(4): 26-27.
- [21] 王晓青, 吕平毓, 胡长霜. 三峡库区悬移质泥沙对 TP、TN 等的吸附影响[J]. 人民长江, 2006(7): 15-17, 112.
- [22] 郭劲松, 杨程, 吕平毓, 等. 三峡库区悬浮态泥沙对磷酸盐的吸附特性研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006(6): 75-78.
- [23] 饶胡敏, 黄旺银. 影响水体中溶解氧含量因素的探讨[J]. 盐科学与化工, 2017, 46(3): 40-43.
- [24] 曹杰杰. 浙江省长潭水库溶解氧的时空分布特征及影响因素分析[J]. 江西农业学报, 2011, 23(10): 151-153.
- [25] LONG J, LIAO H K, LI J, et al. Relationships between soil and rocky desertification in typical karst mountain area based on redundancy analysis[J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 2131-2131.