

太湖富营养化的驱动因子分析

李一平¹ , 逢 勇¹ , 吕 俊² , 王 超¹ , 王 华¹ , 刘 洋¹

(1. 河海大学环境科学与工程学院 , 江苏 南京 210098 ; 2. 广西壮族自治区水文水资源局 , 广西 南宁 530023)

摘要 将太湖 2001 ~ 2002 年的水质监测数据与空间数据结合 , 采用基于因子分析的主成分方法将太湖的水质参数概括为 5 个主成分 , 提取并反证了湖泊水质各个主成分的科学内涵 , 即水体营养指数、富营养化指数、植物生长环境指数、水体色度指数和水体酸碱指数 , 研究了各主成分的空间分布特征、意义以及月均值随时间的变化规律 , 指出水体营养指数和植物生长环境指数是太湖富营养化的主要驱动因子 , 水体色度指数和水体酸碱指数是太湖富营养化的次要驱动因子并可作为富营养化的指示因子。

关键词 太湖 ; 富营养化 ; 驱动因子 ; 因子分析 ; 主成分分析

中图分类号 : X821 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-198X(2004)06-0644-04

目前太湖流域因浮游植物过度生长而引起的湖泊富营养化 , 破坏了湖泊的生态系统 , 严重影响湖区工农业生产和人民生活水平。为了控制湖泊富营养化 , 就必须揭示其发生机理 , 分析富营养化发生的主要驱动因子 , 分析其变化规律。本文从研究水体中众多物理化学参数之间内部的依赖关系 , 探求观测数据中的基本结构入手 , 采用基于主成分分析的因子分析方法 , 将太湖众多的水质参数总结归纳为 5 个主成分 , 提取并反证了各个主成分的科学内涵 , 以达到以最少的信息丢失把众多的观测变量浓缩为少数几个因子的目的 , 并通过分析各个因子在太湖的时空分布和相互之间的关系确定太湖富营养化的主要驱动因子 , 力图在湖泊与其流域背景水污染的时空响应、表征与预测湖泊富营养化等方面做一些基础研究。

1 因子分析方法与意义

1.1 分析方法

本文采用主成分分析方法 , 在保证数据信息损失最小的前提下 , 经线性变换舍弃一小部分信息 , 以少数的综合变量取代原始采用的多维变量。具体分析步骤见文献 [1]。

1.2 分析数据的选取与整理

选取太湖 2001 ~ 2002 年 25 个监测点(图 1)每月 1 次的水质资料进行分析 , 监测项目为总氮(TN)、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、叶绿素 a(chl-a)、正磷酸盐(PO₄³⁻-P)、溶解氧(DO)、水温、pH 值、透明度(SD)、悬浮物(SS)等 14 个水质参数。

1.3 主成分分析结果

利用 Spss 统计分析软件^[1 2] , 采用 Varimax 直角转轴法对资料进行主成分分析 , 结果表明 , 前 5 个主成分累计反映了原始数据总信息量的 74.706% , 起到了既能精简数据又能较完

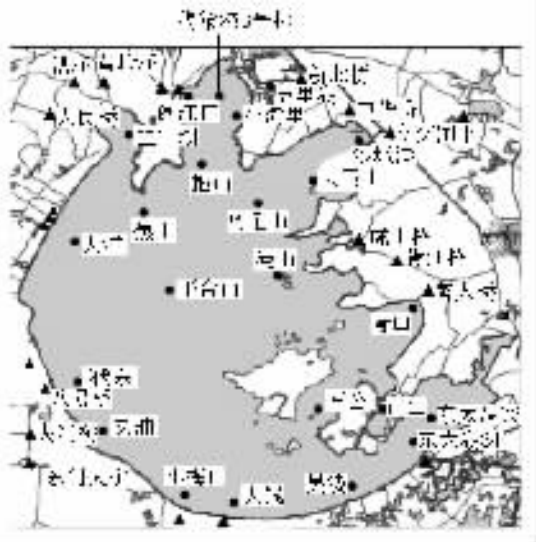


图 1 太湖水质监测点分布
Fig.1 Location of water quality monitoring points in Taihu Lake

整地保持信息量的作用,故抽取前 5 个因子作为分析对象.

1.4 各因子的含义

F_1 (第一主成分)经过 Varimax 直角转轴法旋转之后,因子负载占 27.399%,反映的信息量最大.与第一主成分有关联的主要是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 BOD_5 ,代表了藻类生长所需的主要营养因子(TN 、 TP)和有机物(BOD_5)等,且氮素、磷素的因子载荷量均在 0.7 以上,给太湖水体提供了丰富的营养基础,故称 F_1 为太湖藻类生长的水体营养指数.

F_2 (第二主成分)旋转之后因子负载占 15.711%,反映的信息量也较大.与第二主成分有关联的主要是叶绿素 a、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 等,其中叶绿素占的比例最大,主要代表湖泊藻类状况,而藻类大量暴发正是湖泊富营养化最直接的表现,故称 F_2 为富营养化指数.

F_3 (第三主成分)旋转后因子负载占 12.547%,也具有较高的信息量.与第三主成分有关联的主要是水温、DO,主要代表了湖泊水体的物理环境状况.适宜的水温和 DO 含量是促使藻类生长的先决条件,与富营养化密切相关,故以下称 F_3 为植物生长环境指数.

F_4 (第四主成分)旋转后因子负载占 10.755%,与第四主成分有关联的主要是 SS、透明度,这两个水质参数的关系十分密切,水体 SS 高,则透明度低,它们主要代表了湖泊的物理性质,并且与人的感观有关,通过肉眼可以大致辨识,故称 F_4 为水体色度指数.

F_5 (第五主成分)旋转后因子负载占到 8.293%,与第五主成分有关联的主要是 pH 值,代表了湖泊水体的酸碱环境,称 F_5 为水体酸碱指数.

2 各因子空间分布特征及其揭示意义分析

对 2001~2002 年各监测点各月不同的主成分求均值,可得到各主成分的年均值.结合图 1,将各个主成分的年均值与空间数据结合,利用 Suffer 软件,采用 Kriging 空间内插法将太湖 25 个监测点的 5 个主成分的得分均值分别进行空间内插,可得到 5 个主成分得分值的年平均值在全太湖的分布图,如图 2 和图 3 所示.下面对每个主成分的空间分布和所揭示的意义进行简要分析.

2.1 水体营养指数(F_1)的分布与意义

从图 2(a)可以看出,水体营养指数最高的是梅梁湾,其次是竺山湖和贡湖北部,而西太湖的营养指数处于全湖平均水平,东太湖的营养指数较小,呈现为全湖最低水平.总的来说,呈现自北向南、自西向东以高营养程度向低营养程度扩散的趋势.营养物含量的增加是水体营养程度提高的前提.梅梁湾、竺山湖、贡湖一带受入湖污染源影响较大,该区有太湖主要入湖河道武进港、直湖港、梁溪河等,是太湖沿岸污染源最为集中的区域^[3,4],故营养指数高,东太湖营养指数较小,水生植被覆盖面积大^[5],说明 F_1 的高值与主要河流入湖口排污量以及水体自净能力密切相关.

2.2 富营养化指数(F_2)的分布与意义

从图 2(b)可以看出, F_2 高值区主要分布在北部湖区(如梅梁湾、五里湖)和西部岸边带,湖心区、南部沿岸区和东部沿岸区的 F_2 值居于全湖平均水平,低值区主要分布在东太湖湖域,整体上也呈现自北向南、自西向东以高营养程度向低营养程度扩散的趋势,这与 F_1 的分布趋势较为接近,充分说明湖泊水体的高营养水平对湖泊富营养化产生了很大影响.

2.3 植物生长环境指数(F_3)的分布与意义

图 2(c)表明,东太湖的 F_3 值较高,说明该湖域水体中有足够的溶解氧来参与分解转化营养物,水体自净能力强,适合沉水植物、挺水植物等的生长,并且光合作用给水体提供氧气来源,而西太湖 F_3 值较低,说明该湖域溶解氧环境较差,可能与有机质分解消耗了大量的氧气而水体复氧能力不足有关.

2.4 水体色度指数(F_4)与水体酸碱指数(F_5)的分布与意义

全湖色度指数以东太湖为全湖最低,西太湖湖面开阔,波浪对湖底的作用较大,使水体中的颗粒物难以沉降,并容易使底泥发生再悬浮,影响透明度.东太湖水草丰盛,对水体有消浪、固持底泥作用,且水体的悬浮物因水生植物的阻滞作用而促进沉降,并且在光合作用上与藻类竞争,抑制了藻类的生长,这些也有助于水中悬浮物含量减少而透明度增加,故东太湖水体色度指数较低.水体酸碱指数反映了水体的酸碱度,梅梁湾、竺山湖、大浦和小梅口周围的水体酸碱指数较高,说明这一湖域水体碱性较强,故必须实行入湖污染源的

达标排放.

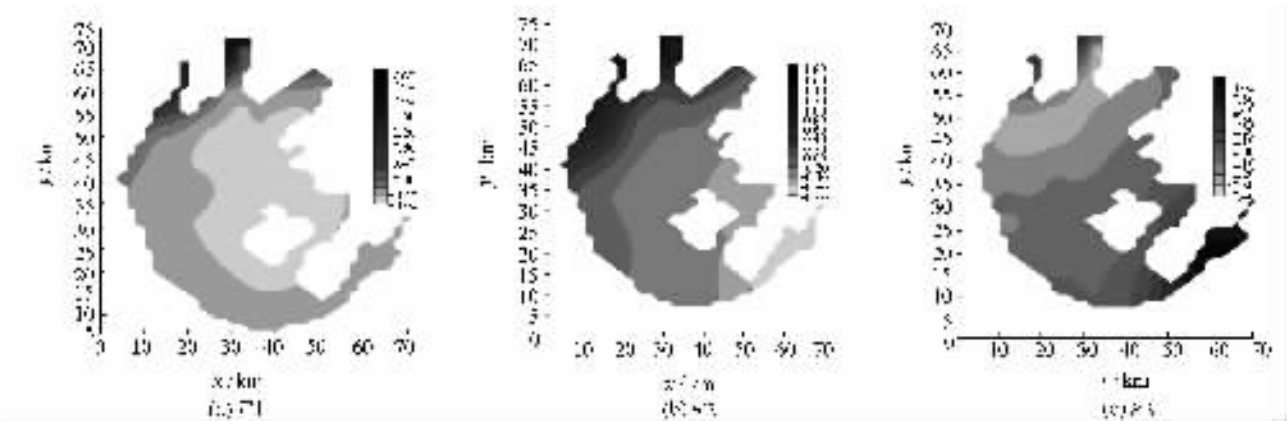


图 2 F1 ,F2 ,F3 年均值分布

Fig.2 Distribution of annual averaged values of F1 ,F2 and F3

3 各因子随时间变化特征和主要驱动因子分析

3.1 F1 ,F3 与 F2 的月均值随时间变化特征及相互关系分析

若对太湖水质主成分的各月求均值,则可得到主成分随时间的变化关系,F1 ,F3 与 F2 因子随季节变化关系见图 3 ,F4 ,F5 与 F2 月均值随季节的变化见图 4.

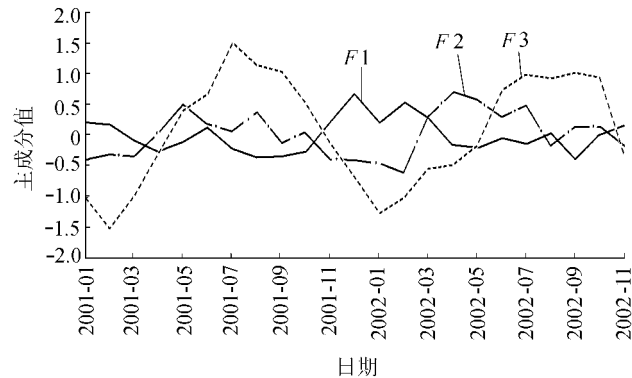


图 3 F1 ,F3 与 F2 月均值的变化关系

Fig.3 Variation of monthly averaged values of F1 ,F3 and F2

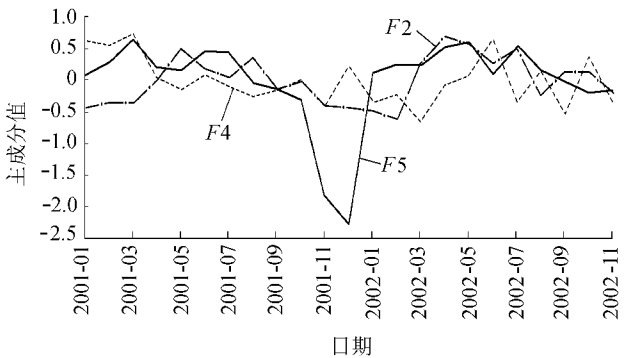


图 4 F2 ,F4 与 F5 月均值的变化关系

Fig.4 Variation of monthly averaged values of F2 ,F4 and F5

从图 3 可以看出 ,F1 高值出现在 11 月至次年 3 月,其中以 12 月份为最高,此期间太湖的水位最低,处于枯水期,营养物质在湖内浓度较高,指数较低的月份出现在 4 月、5 月和 8 月、9 月,其中 8 月份达到全年最低. F2 的分布亦具有较强的规律,在冬季 11 月至次年 2 月较低,而在春季 5 月和秋季 8 月出现两次高峰值,全年变化周期性较为明显. F3 随季节变化特别大,其整体变化趋势是冬季小,夏季大.

F1 与 F2 的变化关系表明,当 F1 出现高峰值时,F2 刚好位于峰谷,而当 F1 位于峰谷时,F2 刚好位于高峰值,两者的变化趋势刚好相反. 分析其原因,可能因为 F1 主要包括氮磷,而氮磷是藻类光合作用合成自身物质不可缺少的营养物质. 在冬季,由于温度的限制作用,水体中藻类生物量较低,故消耗的氮磷等营养物质也就较少,则水体中氮磷的现存量就大. 在夏季,温度适宜藻类的生长,水体中藻类生物量较大,消耗了大量的氮磷等营养物质,故水体中 F1 较低. 由此,表现出了 F1 与 F2 在全年总体上呈现相反的变化趋势,说明水体中丰富的营养物质是太湖富营养化的必备条件,有时表现为富营养化的限制性因子,故 F1 是太湖富营养化的主要驱动因子之一. F2 与 F3 的变化曲线表明,两者具有相同的变化趋势. 在冬季,由于水温较低,限制了藻类的生长;在夏季,水温适宜,藻类大量生长. 故温度是太湖藻类生长全年变动的主要影响因子,故主成分 F3 也是太湖富营养化的主要驱动因子之一.

3.2 F4 ,F5 与 F2 月均值随时间变化特征及相互关系分析

由图 4 可知 ,F4 月均值在冬季和夏季比较大 ,在春秋季节相对要小一些 ,并且在冬夏季的变化趋势与 F2 的变化趋势比较相似 ,在冬秋季两者变化关系则不是很密切 .究其原因 ,F2 值越大 ,说明水体中藻类现存量越大 ,藻类漂浮于水体中就直接影响了水体悬浮物含量和透明度的大小 ,故藻类含量对水体的色度变化起到了绝对的主导作用 ,而在冬季 ,藻类含量低 ,太湖水位也较低 ,入湖水质和底泥悬浮对水体色度的影响较大 ,故两者关系不太密切 .由于 F4 没有 F1 与 F2 对富营养化起的直接作用大 ,故可作为太湖富营养化的次要因子和指示因子 .F5 是鉴别水质优劣的重要标志 ,清洁的水质 pH 值近中性 ,富营养化水域水质 pH 值一般为中性—弱碱性 .由化学式 $2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 可知 ,当藻类迅速繁殖时消耗大量的 CO_2 进行光合作用后 ,平衡向右移动 ,使水中积累了大量的 CO_3^{2-} ,促使 pH 值上升 ,相反在植物呼吸过程中会积累 CO_2 ,使平衡向左移动 ,pH 值下降 ,故 F5 能够与 F2 变化趋势保持大致相似 .由于 F5 也不能直接驱使太湖产生富营养化 ,故称之为次要驱动因子 ,也可作为富营养化的指示因子 .

4 结 论

- a. 本文利用因子分析的思路 ,结合主成分分析方法 ,将太湖 14 个水质参数分成了 5 个主成分 ,分别为水体营养指数、富营养化指数、植物生长环境指数、水体色度指数和水体酸碱指数 .
- b. 利用 Surfer 软件 ,采用 Kriging 空间内插法得到了 5 个因子的年平均值在全太湖的分布图 ,图上反映的信息比较切合太湖实际 ,有助于直观地了解相关信息 .
- c. 分析了各个因子月均值随时间的变化关系 ,并探求了其中的变化规律 .
- d. 通过分别比较 F1 ,F3 ,F4 ,F5 月均值与 F2 月均值随时间的变化关系曲线 ,发现 F1 和 F3 是太湖富营养化的主要驱动因子 ,F4 和 F5 是次要驱动因子 ,并可作为太湖富营养化的指示因子 .

参考文献 :

[1] 郭志刚 . 社会统计分析方法 [M] . 北京 : 中国人民大学出版社 ,1999 .25—135 .
[2] 卢纹岱 ,朱一力 ,沙捷 ,等 . SPSS for Windows 从入门到精通 [M] . 北京 : 电子工业出版社 ,1998 .35—315 .
[3] 孙顺才 ,黄漪平 . 太湖 [M] . 北京 : 海洋出版社 ,1993 .10—235 .
[4] 太湖环境质量调查协作组 . 太湖环境质量调查研究 [J] . 上海师范大学学报 ,1980 (环境保护专集) 95—127 .
[5] 杨清心 . 富营养条件下沉水植物与浮游藻类相互抑制关系的研究 [J] . 湖泊科学 ,1996 (增刊) :17—24 .

Analysis of driving factors to eutrophication in Taihu Lake

LI Yi-ping¹ , PANG Yong¹ , Lü Jun² , WANG Chao¹ , WANG Hua¹ , LIU Yang¹

(1. College of Environmental Science and Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China ;
2. Hydrology and Water Resources Bureau of Guangxi Province , Nanning 530023 , China)

Abstract :By combination of water quality monitoring data with spatial data of Taihu Lake for 2001-2002 , five principal components , including the nutrient index , eutrophication index , plant growth index , chrominance index , and pH index , were extracted from the water quality parameters of Taihu Lake by use of the principal component analysis method based on factor analysis , and the significance of the five components to the water quality of the lake was verified . Besides , the spatial distribution characteristics and significance of the principal components and the variation of their monthly averaged values were studied . It is concluded that the nutrient index and plant growth index are the key driving factors to the eutrophication of Taihu Lake , and that the chrominance index and pH index are the secondary driving factors and can be taken as indictors of the eutrophication of Taihu Lake .

Key words :Taihu Lake ; eutrophication ; driving factor ; factor analysis ; principal component analysis