

# 太湖水质的动态变化及 影响因子的多元分析<sup>\*</sup>

蔡启铭 高锡芸 陈宇炜 马生伟

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

Martin Dokulil

(奥地利科学院湖泊研究所)

**提要** 利用1991~1992年的监测资料,分析了太湖梅梁湾和局部西太湖水域水质的动态变化。用主成分分析方法揭示出各因子间的相互关系。结果表明:水质主要因子有明显的时空变化特征,沿南北方向从湾内向湾外,TP、TN、COD、Chl-a和电导率明显递减,且TP和TN含量有季节变化,冬季高于夏季,梁溪河口处更是如此。Chl-a含量与TP、TN含量密切相关,其变化基本与水温同步,时间上略后滞。主成分分析说明,TP、TN、SS(或SD)、水温与Chl-a是这一水域最重要的影响因子,Chl-a与SS的含量共同决定着太湖的透明度。

**关键词** 太湖 水质动态变化 主成分分析

太湖是我国的大型浅水湖泊,在水量调蓄、供水、养殖等方面起着重要作用。然而,随着这一地区工农业的迅速发展,大量污水排入太湖,致使湖水中营养盐大量增加,蓝藻水华连年爆发,水体生态状况变坏。因此,仔细监测和分析太湖水质现状与动态变化特征,对深入研究太湖富营养化的形成和预测太湖水环境状况具有重要意义。

本文利用1991年和1992年的监测资料,分析了水质多种因子的时空变化特征,并利用多元分析方法对主要因子的作用和相互关系做深入探讨。

## 1 监测水域

监测区包括太湖梅梁湾及其南面局部西太湖水域。梅梁湾位于太湖北端,是无锡市的主要供水源,有梁溪河及直湖港两条主要河流与之相连。由于环湖城镇和入湖河道的影响,梅梁湾成为太湖富营养化较严重的水域之一<sup>[1,2]</sup>。

监测区由北到南共设定10个固定采样点(图1)。从1991年10月至1992年10月,每月二次采样,监测项目包括物理、化学和生物等20多项水质要素。

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:49171017)。

收稿日期:1993年10月11日;接受日期:1994年6月27日。

作者简介:蔡启铭,男,1937年生,研究员。1960年北京大学地球物理系毕业,1980~1982年美国犹他大学气象系访问学者,主要从事湖泊学、大气物理研究,发表论文50多篇。

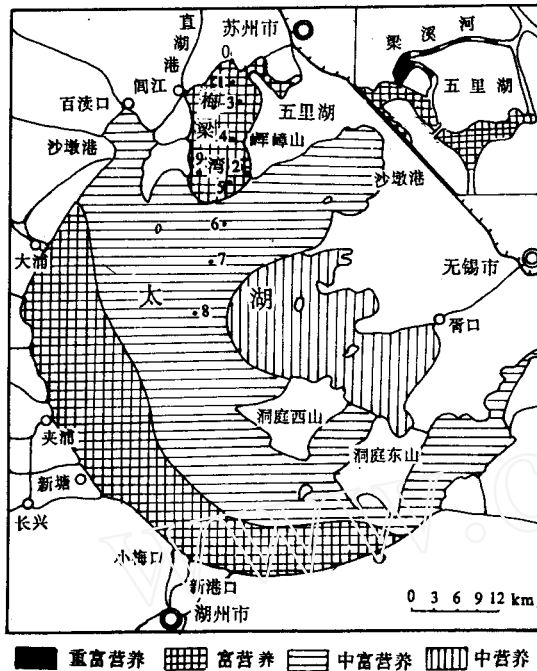


图1 监测水域和监测点分布

Fig. 1 Monitoring water area and sampling points

## 2 结果与讨论

### 2.1 主要水环境要素的时间与空间变化特征

图2给出了几个主要水质因子年平均随监测点位置的变化,可以清楚地看出从湾内向湾外沿南北方向,COD、TP、TN、Chl-a和电导率均有明显的减小.仅pH在4号点附近较高,第6、7、8三个监测点均在梅梁湾外,水质状况基本相同,趋于太湖中心的水质情况.图中垂直竖线段表示年离散度(标准差),总的来说也是湾内监测数据的离散度比湾外的大.可见,梅梁湾水质由于受无锡城乡入湖排污的影响,比太湖中心水域的差,也说明水的扩散冲淡作用是梅梁湾水质自净的重要过程.

图3是TP和TN含量随月份(时

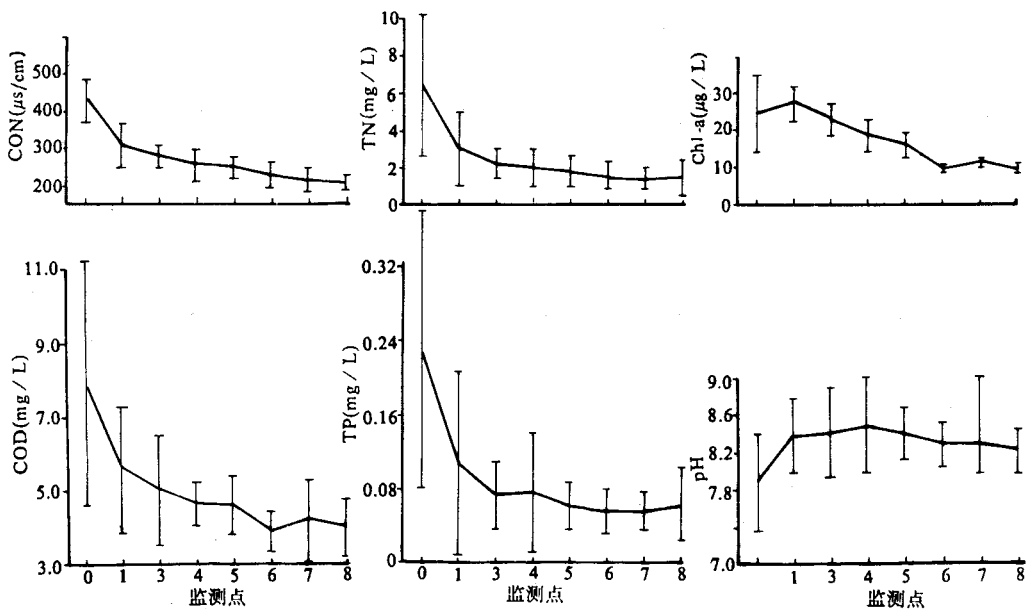


图2 几个主要水质因子年平均随监测点位置的变化

Fig. 2 Variation of annual mean values of main water quality factors with sampling points

间)和采样点(空间)变化的三维图,它能更清楚地显示出时、空变化特征。时间上,冬季湖水的 TP 和 TN 含量明显高于夏季。例如,1991 年 12 月,在 0 号监测点(梁溪河口)测到的 TP 和 TN 含量高达 0.7mg/L 和 12mg/L,而在 1992 年 6 月,相应的数值仅为 0.06mg/L 和 2.2mg/L。梁溪河水通常由太湖流入无锡市,但也常有逆向流动,特别是在冬季,太湖水位较低,梁溪河水更多地从城市流入太湖,无锡市的污染物比夏季更易排入太湖,造成河口的 N、P 含量增高是很自然的。

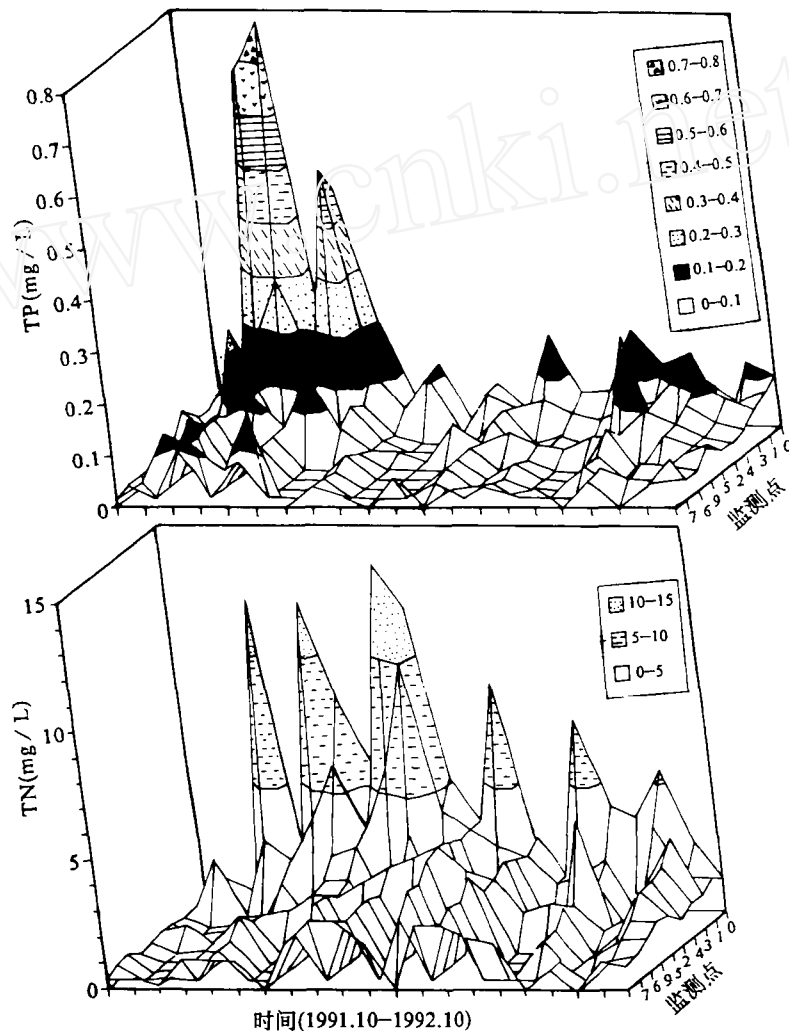


图 3 1991 年 10 月~1992 年 10 月各监测点 TP 和 TN 动态变化三维图  
Fig. 3 3-D dynamic variation of TP and TN from Oct. 1991 to Oct. 1992

为了更清楚地了解 TP 和 TN 含量的时间变化特征,选取 0、1 和 8 号点绘出图 4。可以看出,0 号点的 TP 和 TN 含量均随月份有很大的起伏,且二者的变化有很好的相关。不过,就其均值而言,TP 在 1991 年 11~12 月间为明显高值,进入春夏以后,TP 含量很快降低,直

到1992年10月,数值较小,而对TN,冬季与春季均较高,仅到5月以后TN含量才明显降低。对于1、8号采样点并无这样明显表现。由于0号点地处梁溪河口,其环境要素受城市河道排污影响大,因而TP与TN的起伏变化在一定程度上反映了城市排污的情况。8号点的位置远离河口,处于太湖中心,分析梅梁湾的水质特征时,它的数值可作为太湖背景值考虑。

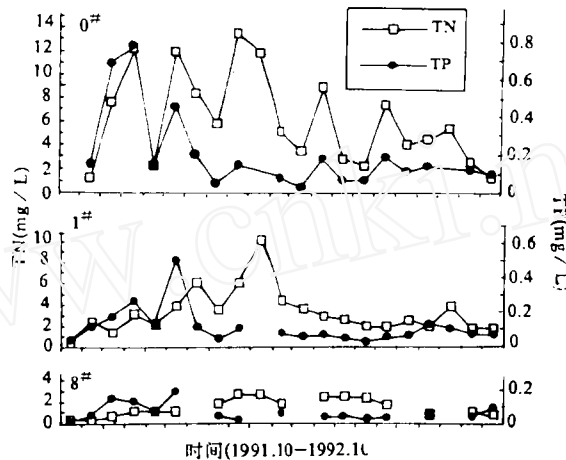


图4 三个监测点TP和TN含量随时间的变化特征

Fig. 4 Temporal variation of TP and TN at point 0, 1, and 8

图5表示SS(悬浮粒浓度)和SD(透明度)随时间的变化曲线,显然它们的数值也有很大变化,且二者变化位相相反,这是因为风浪,加上船只行驶的扰动,使湖水中的悬浮粒增加,透明度减少。与深水湖泊不同,太湖水中的悬浮粒是透明度的重要影响因子。

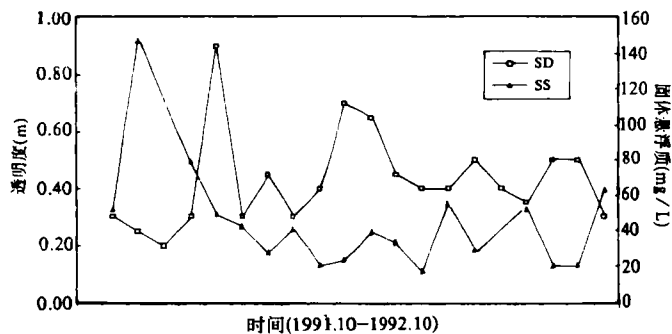


图5 第0号点SS和SD随时间的变化

Fig. 5 Temporal variation of SS and SD at point 0

图6是0、1和8号三个采样点水中叶绿素含量(Chl-a)随时间的变化曲线,图中横线给出相应时刻的水温(“+”符号所示)。与TP、TN的情况相同,Chl-a含量随月份也有很大的变化,不过变化趋势正好与TP、TN的情况相反,对于0、1号点,夏季高于冬季,其年变化总趋势与水温基本同步,在时间上却比水温略有后滞。在冬春季相对低值时期,Chl-a含量平均

值从  $25\mu\text{g/L}$  下降到  $5\mu\text{g/L}$  左右,最低值出现在 3~4 月,4 月份以后 Chl-a 逐渐增高,直到 9 月,夏季的 Chl-a 含量约维持在  $30\sim 35\mu\text{g/L}$  上下摆动。位于太湖中心的 8 号点情况略有不同,其夏季的 Chl-a 含量并不显著高于冬春季,除 10~12 月略低外,其值大约在  $10\mu\text{g/L}$  上下摆动,变化趋势与水温不同步。

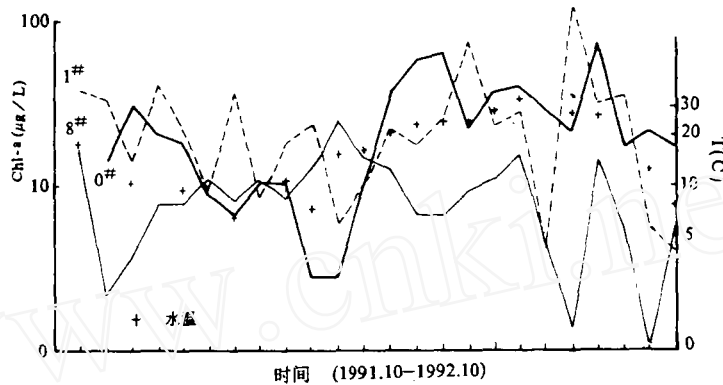


图 6 0、1 和 8 号三个监测点叶绿素 a 含量和水温随月份的变化

Fig. 6 Monthly variation of Chl-a and  $T_w$  at point 0, 1 and 8

Chl-a 含量与 TP 的关系如图 7。从逐次测值点聚图看,点子散乱,二者似无明显相关(图 7a),相关系数  $0.1\sim 0.2$ 。但如果对各监测点作年平均统计,除 0 号点外,Chl-a 与 TP 含量之间存在很好的相关,相关系数为  $0.76$ (图 7b)。对于 0 号点,TP 含量很高,Chl-a 含量并不随之相应变大,它反映了排污河口的水环境特征。

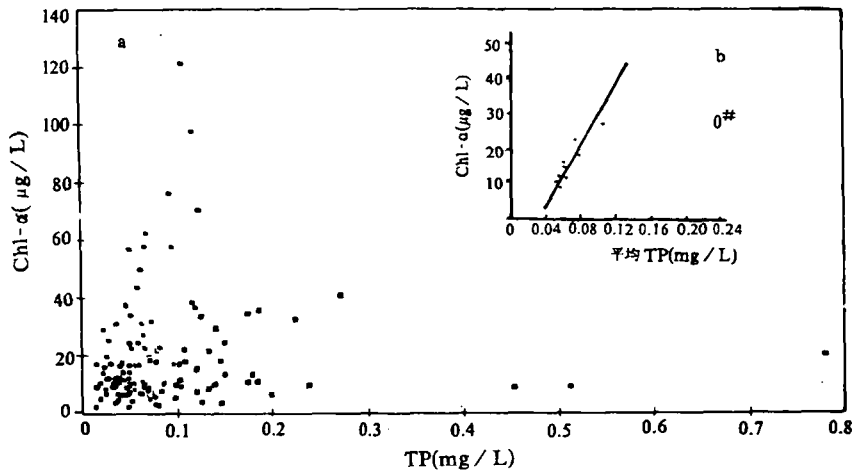


图 7 Chl-a 含量与 TP 含量的关系

Fig. 7 Relationship between Chl-a and TP

## 2.2 主成分分析

从以上几项主要因子的分析可以看出,我们面临的是一个包括不同因子在时间上和空

间上不断变化的错综复杂的问题。多元分析方法可以帮助从中寻找诸环境因子的相互联系和各因子的地位,其中主成分分析是多元分析中的重要方法之一。

我们测得的是各种环境因子随时间(月份)和空间(监测点位置)变化的数据阵,主成分分析的主要任务就是以某种最优方法综合这一数据阵的信息,并使其简化、降维而揭示它的主要结构,同时提出关于数据阵所提供信息的合理解释,以期回答要分析的问题。

数学上,先取某一变量(例如空间)固定。以“行”变化表示元素,“列”变化表示时间,则各种因子的一年监测数据构成一个样本数据阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

主成分分析就是要找出一个矩阵 $V$ ,使得 $V$ 及 $X$ 的线性组合构成一个新数据阵:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix}$$

这个新变量 $Z$ 就是原变量的主成分,它满足如下两个条件:(1)新变量中 $Z_i(i=1,2,\dots,m)$ 互相独立;(2)新变量能最大限度地、集中地反映原 $m$ 个变量的总方差,这样就可用较少的新变量描述原变量,达到简化、降维的目的。前 $k$ 个主成分的贡献是:

$$C(k) = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}$$

其中, $\lambda_i(i=1,2,\dots,m)$ 是与特征向量 $V$ 相应的特征值。矩阵 $V$ 的求法可参阅文献[3],这里仅给出主要计算结果。

表1~3是第0、4和6号监测点一年资料的主成分分析结果,代表了梅梁湾河口、湾内与湾外三种水域的情况。从表1看出,TP~TN、TP~CON(CON表示电导率)、pH~Chl-a、TN~CON、Chl-a~ $T_w$ 之间均有较高(>0.5)的正相关,而TP~SD、SS~SD、pH~TN则有较高的负相关。从主成分的系数(代表不同元素对主成分的贡献大小)来看,在第一主成分中,起重要作用的因子为CON、SD、TP和TN,可见对0号点,电导率、透明度、TP、TN共同对水质起着重要作用。在第二主成分中,只有悬浮质(SS)是明显的重要因素,在第三主成分中,起主要作用的有水温( $T_w$ )和TP。由于主成分间相互独立,三个主成分代表着三种的污染机制,第一主成分(其贡献率为42%)代表了影响梁溪河水质的主要因素——城市排污情况;第二主成分可以认为是风浪和沿河航道上船只对水体扰动的影响,水扰动使水中SS增加;第三主成分与天气和季节变化有关,结果说明TP随季节变化也比较敏感。

同样地,分析表2可以知道,对4号监测点(位于梅梁湾中心),TP~Chl-a、TN~Chl-a、pH~Chl-a、 $T_w$ ~Chl-a和 $T_w$ ~pH之间有较高的正相关,而SS~SD、SD~Chl-a有较高的负相关。说明对4号点,TN、TP和水温的变化对藻类的生长有明显的影响,另一方面,也说明悬浮质和藻类的数量均对太湖水体的透明度起着重要作用。从4号点的主成分组成来看,第一主成分中以SS、Chl-a系数数值较大,其次是TN和TP的系数。说明对该测点,首先是

表 1 0 号点主成分分析结果

Tab. 1 Results of the principal components analysis at point 0

相关系数 (Correlation coefficients):

	TP	pH	TN	SS	CON	Chl-a	SD	$T_w$
TP	0.1							
pH	-0.32	1.0						
TN	0.64	-0.06	1.0					
SS	0.27	-0.06	-0.27	1.0				
CON	0.75	-0.48	0.86	-0.25	1.0			
Chl-a	-0.05	0.53	-0.41	-0.13	-0.03	1.0		
SD	-0.51	-0.04	-0.10	-0.64	-0.17	-0.05	1.0	
$T_w$	-0.33	0.37	-0.40	-0.35	-0.15	0.64	0.4	1.0

各主成分贡献 (Contribution of various principal components):

	特征值	累积贡献率	主成分系数							
			TP	pH	TN	SS	CON	Chl-a	SD	$T_w$
第一主成分	3.36	0.42	0.43	-0.09	0.40	-0.05	0.57	-0.22	0.52	-0.04
第二主成分	1.95	0.66	-0.38	-0.15	0.29	0.71	0.41	0.10	-0.27	0.01
第三主成分	1.54	0.86	0.48	0.29	0.09	0.19	-0.03	0.22	-0.29	-0.72

表 2 4 号点主成分分析结果

Tab. 2 Results of the principal components analysis at point 4

相关系数 (Correlation coefficients):

	TP	pH	TN	SS	CON	Chl-a	SD	$T_w$
TP	1.0							
pH	0.32	1.0						
TN	0.11	0.30	1.0					
SS	0.13	0	0.31	1.0				
CON	0.15	-0.12	0.13	-0.17	1.0			
Chl-a	0.58	0.78	0.63	0.29	-0.15	1.0		
SD	-0.48	-0.27	-0.27	-0.79	0.30	-0.53	1.0	
$T_w$	0.11	0.86	0.43	-0.10	0.27	0.59	0	1.0

各主成分贡献 (Contribution of various principal components):

	特征值	累积贡献率	主成分系数							
			TP	pH	TN	SS	CON	Chl-a	SD	$T_w$
第一主成分	3.36	0.42	0.31	0.08	0.37	-0.70	-0.23	0.42	0.20	0.08
第二主成分	1.91	0.66	0.43	-0.30	-0.35	-0.13	0.27	0.11		0.52
第三主成分	1.08	0.79	0.35	-0.08	0.24	0.59	-0.58	0.11	0.09	0.33
第四主成分	0.99	0.92	0.24	0.52	0.18	0.34	0.45	0.50	-0.18	-0.18

表 3 6 号点主成分分析结果

Tab. 3 Results of the principal components analysis at point 6

相关系数 (Correlation coefficients):

	TP	pH	TN	SS	CON	Chl-a	SD	$T_w$
TP	1.0							
pH	-0.49	1.0						
TN	-0.40	0.06	1.0					
SS	0.07	-0.46	-0.10	1.0				
CON	-0.15	0.38	0.43	-0.59	1.0			
Chl-a	-0.17	0.24	0.23	0.23	0.26	1.0		
SD	-0.24	0.47	-0.03	-0.80	0.57	-0.09	1.0	
$T_w$	-0.49	0.79	-0.09	-0.38	0.50	0.29	0.54	1.0

各主成分贡献 (Contribution of various principal components):

	特征值	累积贡献率	主成分系数							
			TP	pH	TN	SS	CON	Chl-a	SD	$T_w$
第一主成分	3.44	0.43	0.28	-0.40	0.12	0.65	-0.38	0.02	0.22	0.36
第二主成分	1.61	0.63	-0.44	0.10	-0.34	-0.08	-0.64	0.26	0.39	-0.21
第三主成分	1.21	0.78	-0.13	0.44	0.67	-0.22	-0.21	0.08	0.14	0.47
第四主成分	0.90	0.90	0.39	0.43	-0.25	0.01	0.17	-0.37	0.65	0.03

悬浮质、藻类数量,然后是 TN、TP 对水质有重要影响。由于 4 号点的位置已远离梁溪河口,距间江口也有相当距离,湖水对河口排污的冲淡作用在一定程度上降低了该点水质对 TN 和 TP 变化的敏感反应。另一方面,4 号点水面开阔,风浪较大,扰动使水中悬浮质增多,结果相对地,其悬浮质浓度与藻类数量的影响就显得更大一些。至于 SS 的系数为负,可以从 SS ~SD 为负相关来理解,即水中悬浮质增高,水的浊度增加,使透明度降低,水质变差。4 号点第二主成分的情况与 0 号点的第三主成分类似,水温和 TP 的主成分系数较大,它可以设想为受天气和季节变化的影响。6 号点的主成分分析结果见表 3,较高的正相关发生在  $T_w$  ~ pH、 $T_w$  ~SD、COD~SD 之间,较高的负相关有 SS~SD 和 SS~CON,也即是相关性高值均围绕着非生物的因子 SS 和  $T_w$ ,这显示了梅梁湾外太湖开阔水域的特点。从第一主成分各因子主成分系数比较也可明显地看出,仅 SS 的系数较大,说明悬浮质是 6 号点水质的主要影响因子。由于 6 号点位于梅梁湾外,风浪较大,风浪扰动使水中悬浮质含量增加,这一结论是合理的。6 号点第二主成分以电导率和 TP 的系数较大,且为负值,其原因还待进一步分析。第三主成分以水温和 TN 的系数较大,也同样可以设想为季节变化的影响。

### 3 结 语

根据 1991~1992 年的监测资料,本文着重分析了太湖北部梅梁湾水域的水质动态变化规律和影响因子。由于所用的资料时间较短,分析结果还是初步的,但总的看来,揭示出的现



象有其合理性。

(1)水质因子在空间和时间上均有变化与起伏,不同水域有其不同的主要影响因子。

(2)磷是这一水域的重要水质因子,长时间(例如年)平均值显示:Chl-a 含量与 TP 有较好的相关,仅梁溪河口例外,这里的 TP 含量极高,但 Chl-a 含量并不明显地随之增加。

(3)在开阔水域,水中悬浮质含量是不可忽视的水质因素。对于太湖,SS 和 Chl-a 含量两者共同地决定着水的透明度 SD。

(4)相关分析和主成分分析显示:TP、TN、悬浮物(或透明度)、水温和 Chl-a 是太湖最重要的水质因子和影响因素。

### 参 考 文 献

- 1 金相灿、刘鸿亮、屠清瑛、章宗涉、朱 董主编. 中国湖泊富营养化. 北京:中国环境科学出版社,1990. 185~194
- 2 蔡后建等. 太湖梅梁湾口浮游植物初级生产力及其相关因素关系的研究. 湖泊科学,1994,8(4). 340~347
- 3 胡国定、张润楚. 多元数据分析方法. 天津:南开大学出版社,1990. 149~181

## DYNAMIC VARIATIONS OF WATER QUALITY IN TAIHU LAKE AND MULTIVARIATE ANALYSIS OF ITS INFLUENTIAL FACTORS

Cai Qiming Gao Xiyun Chen Yuwei Ma Shengwei

*(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)*

Martin Dokulil

*(Institute of Limnology, Austria)*

### Abstract

Dynamic variation of water quality in Meiliang Bay and part of west Taihu Lake has been analysed based on the data from 1991 to 1992. Principal Component Analysis is used to reveal the mutual relationships of various factors. It is shown that there exists an obvious spatial and temporal variation in the main factors of water quality. Annual values of TP, TN, CON, Chl-a and conductivity decrease evidently from inner Meiliang Bay to the outer from north to south. TP and TN fluctuate seasonally with much higher value in winter. This is particularly true for the mouth of Liangxi River. In addition, the Chl-a has a synchronous variation with water temperature, although being lagged a little, and closely relates to TP and TN. Finally, the results from Principal Component Analysis show that TP, TN, SS (or SD), water temperature and Chl-a are the most influential factors to water quality in this area, and both suspensions and algae can contribute to the transparency in Taihu Lake.

**Key Words** Taihu Lake, dynamic variation of water quality, principal component analysis