

太湖水体有机污染与主要环境因子的响应*

范成新 袁静秀

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

叶祖德

(无锡市环境保护监测研究所, 无锡 214073)

提要 根据1987—1988年有关研究资料,分析太湖COD、BOD₅和TON的时空变化及其与TOC的关系,研究COD出入湖量和水文气象因子对湖体COD的影响。结果表明,COD是太湖有机污染的重要指标;在不同时期和湖区,其含量差异明显,丰水期低,枯水期高。各湖区污染排列为:五里湖>梅梁湖>湖心区>东太湖。进入太湖有机物量的增减,是COD在湖体中消长的主导因素,但水位和温度等条件因子对有机污染程度亦有重要影响。

关键词 太湖 有机污染 COD 时空变化 影响因素

近十几年来,太湖湖体常呈现局部有机污染(黄漪平等,1990;盛后宝等,1983),对上海、无锡、苏州等城市的饮用水源构成威胁。因此研究太湖有机污染变化规律及其影响因素,对保护太湖水源水质具有重要意义。

1 样品采集与分析

1987年5月、7月、9月、10月、12月和1988年3月在全太湖37个采样点采集湖体水样(图1),其中1987年5月、7月和1988年3月同步采集环太湖141条河道水样(袁静秀等,1993)。采样位置在水下0.5m。同时测定水温和流速、流向等。太湖水位取沿湖区6站水位平均值。该6水位站为:大浦口、百渎口、望亭(太)、胥口、吴淞和洞庭西山。

化学需氧量分析采用酸性高锰酸钾法(即结果为高锰酸盐指数COD_{Mn},简称COD),五日生化需氧量BOD₅,采用稀释-接种法。上述两种方法均为常规分析法¹⁾。总有机碳(TOC)用燃烧-红外法原理的岛津TOC-500仪器测定。总有机氮(TON)取总氮(TN)与无机氮(NH₃-N + NO₂⁻-N + NO₃⁻-N)差减值。

2 结果与讨论

2.1 太湖各有机污染物含量相互关系

1987年5月—1988年3月太湖COD、BOD₅和TON含量有相近的变化趋势和变幅(图2)。TOC为可体现一切有机的碳结构物质(荒木峻,1982)。分析太湖污染严重

*“七五”国家环保项目,75-59-04-06号。范成新,男,出生于1954年11月,副研究员。

无锡市环境保护监测研究所和江苏省水文总站提供部分资料,黄漪平、潘红玺和胡维平等同志参加该项工作,均此一并致谢。

收稿日期:1993年3月30日,接受日期:1994年2月28日。

1)按国家“地面水环境质量标准”(GB3838-88)。

时期(1988年3月)湖面35个测点 TOC 与其它有机污染物线性关系,得:

$$TOC(mg/L) = 1.098COD(mg/L) + 3.172 \quad r = 0.539$$

$$TOC(mg/L) = 0.858BOD_5(mg/L) + 5.379 \quad r = 0.411$$

$$TOC(mg/L) = 0.969TON(mg/L) + 6.660 \quad r = 0.403$$

其中 COD-TOC 关系最为显著

$$(r = 0.539 > r_{0.01,33} = 0.430),$$

得到的截距亦最小(3.172mg/L, 此量是不能为 COD 所体现的某些有机类碳含量)。另外图2中也反映 COD 与 BOD₅ 和 TON 有很好的对应关系,故本文选用 COD 为太湖代表性有机污染指标。

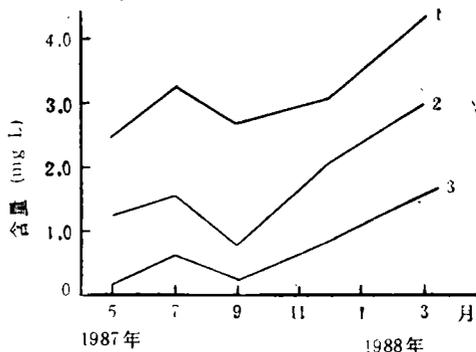
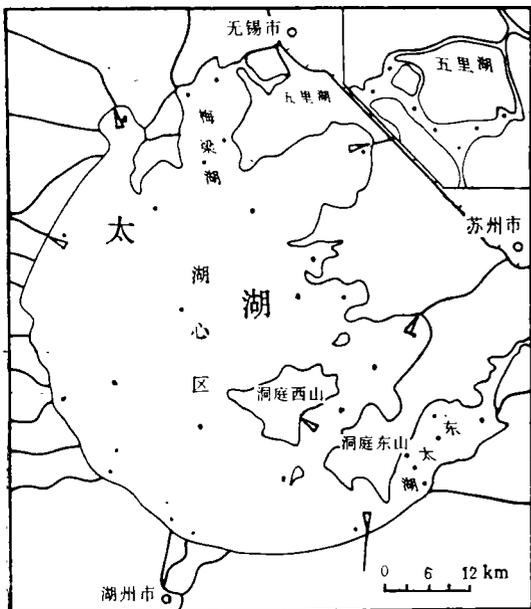


图1 太湖采样点(●)和水位站(△)分布

Fig. 1 Distributions of sampling points and water stage stations in Taihu Lake

图2 太湖中 COD(1), BOD₅(2), TON(3)含量的年变化

Fig. 2 Annual variations of the content of the different organic pollutants in Taihu Lake

2.2 有机污染时-空变化

1987年5月—1988年3月太湖4个主要湖区有机污染变化大体一致,呈上升、下降、再上升趋势(图3),但各湖区含量变幅有明显差异。五里湖位于无锡市边缘(见图1),受市区环境及旅游业影响较大,该湖已成为人工富营养湖体,水质亦严重恶化, COD 通常高于其它湖区,1988年3月,最大值高达 5.85mg/L。梅梁湖是无锡市主要饮用水源和游览水体,全年有机污染仅次于五里湖。在太湖水华易发期(6—9月),由于盛行东南风,大量自生及外来的藻类聚集于该湖区,造成盛夏以后, COD 仍维持较高水平。流入该湖区的直湖港河和梁溪河是太湖主要污染河道,它们对湖体有机污染的加重起着主要作用。湖心区水域开阔,远离污染源,是水体交换和净化的主要场所,故有机污染较轻。东太湖是太湖主要出水湖区,湖盆浅,水生植物生长茂盛,生物净化作用强,湖体对外来污染具有一定衰减作用。该湖区有机污染较小,年 COD 变幅仅在 2.40±0.50mg/L 范围内。

2.3 COD 负荷量对水体有机污染的影响

太湖污染源分为3部分:环湖河道、区间点源和区间非点源。据1987年5月、7月和1988年3月环湖141条河道实测流量和对应计算的COD负荷量(袁静秀等,1993),

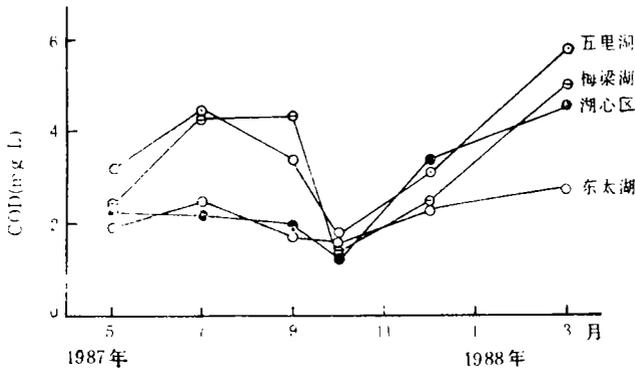


图3 太湖各湖区 COD 年变化

Fig. 3 Annual variations of COD in different regions in Taihu Lake

以及1987年5月—1988年4月出入湖的月平均流量,得到河道COD各月出入湖量。结合计算和估算区间各污染出入途径COD负荷量¹⁾,合计得到太湖1987年5月—1988年

3月COD月负荷量,结果绘于图4中。由图可见,太湖COD出入湖量不同时期差异很大。出湖最大时分布在雨季6—9月和春汛3月;入湖最大则集中在7—9月。对照同时期湖体COD实测变化(图4a),表明入湖COD量和湖体COD变化趋势较为吻合,两峰值均出现在7月和3月,10月入低谷。而出湖量与湖体则无明显对应趋势。显然,进入太湖有机污染物的增减,是COD在湖体中消长的主导因素之一。

2.4 水位和温度对水体有机污染的影响

2.4.1 各变量与湖体COD关系分析

太湖是一大型水体生态系统,其内部必然发生净化作用,使有机物质含量衰减。一般对于环境条件较稳定的湖体,有机物净化可近似用一级反应式表示(陈静生,1987):

$$-\frac{dC}{dt} = kt \text{ 或 } C = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

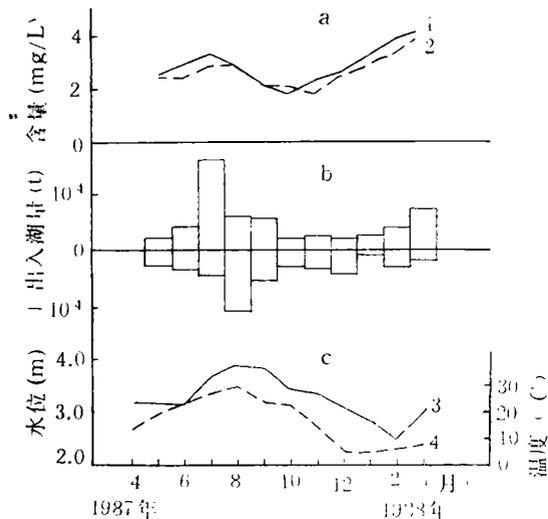


图4 太湖COD(a)、COD出入湖量(b)及水位和水温(c)年变化

Fig. 4 Annual variations of COD (a), COD inflow/outflow (b) as well as water stage and water temperature (c) in Taihu Lake

1. 计算值; 2. 实测值; 3. 水位; 4. 水温。

1) 范成新、叶祖德,1990,太湖污染源。国家75-59-04-06-01课题“进入太湖污染物类型、总量及分布研究”报告,中国科学院南京地理与湖泊研究所。

其中

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2)$$

式中, C 为湖体 t 时刻 COD(mg/L); C_0 为湖体初时刻 COD(mg/L); k 为反应速率常数 (d^{-1} 或 $月^{-1}$); t 为时间 (d 或 $月$); A 为指前因子; E_a 为有机反应表观活化能 (J); R 为气体常数 (8.314J/K); T 为绝对温度 (K, $T = 273.1 + ^\circ C$)。但湖泊又属开放体系。太湖处于亚热带平原水网地区,与外界环境不断有物质和能量交换,使得湖体中有机物负荷量 (L)、水位(水深 h + 湖底高程)和温度 (T) 常随时间处于激烈的连续变化中,故有 $C = f(L, h, T, t)$ 。太湖底部平坦,呈浅碟型湖体,其容积可近似为面积乘以水深,故湖体中的 COD 量在某一时刻可表达为: $L = C \cdot V = C \cdot S \cdot h$, 或

$$C = \frac{L}{S \cdot h} \quad (3)$$

式中, L 为湖体中 COD 总量 (g); S 为湖面积 (m^2); h 为平均水深 (m)。当某时刻为 $t = 0$ 时,则 $\frac{L}{S \cdot h} = C_0$, 式(1)可写成:

$$C = \frac{L}{S \cdot h} \exp[-Ae^{-E_a/RT} \cdot t] \quad (4)$$

若 L, h, T, t 有微小变化 $\Delta L, \Delta h, \Delta T$ 和 Δt 时,设 C 的变化量为 ΔC , 则式(4)的全微分为:

$$\begin{aligned} dC &= \frac{\partial C}{\partial L} dL + \frac{\partial C}{\partial h} dh + \frac{\partial C}{\partial T} dT + \frac{\partial C}{\partial t} dt \\ &= \frac{C}{L} dL - \frac{C}{h} dh - \frac{C \cdot t \cdot E_a}{RT^2} A \cdot e^{-E_a/RT} dT - C \cdot A \cdot e^{-E_a/RT} dt \end{aligned}$$

写成增量形式:

$$\Delta C = \frac{C}{L} \Delta L - \frac{C}{h} \Delta h - \frac{C \cdot t \cdot E_a}{RT^2} A \cdot e^{-E_a/RT} \cdot \Delta T - C \cdot A \cdot e^{-E_a/RT} \Delta t \quad (5)$$

令

$$\Delta C_L = \frac{C}{L} \Delta L \quad (6)$$

$$\Delta C_h = -\frac{C}{h} \Delta h \quad (7)$$

$$\Delta C_T = -\frac{C \cdot t \cdot E_a}{RT^2} A \cdot e^{-E_a/RT} \cdot \Delta T \quad (8)$$

$$\Delta C_t = -C \cdot A \cdot e^{-E_a/RT} \cdot \Delta t \quad (9)$$

则

$$\Delta C = \Delta C_L + \Delta C_h + \Delta C_T + \Delta C_t \quad (10)$$

$\Delta C_L, \Delta C_h, \Delta C_T$ 和 ΔC_t 分别为因 COD 负荷量、水位、温度和时间发生变化所产生的湖体 COD 含量的增量。由式(5)可见,湖体 COD 负荷量增量 ΔL (即外界 COD 出入湖变化量)对湖体 COD 含量的增量 ΔC 的贡献成正比;而水位、温度和时间的增量则与其贡献成反比。

表 1 太湖各主要变量月增量对湖体 COD 的影响 (1987—1988)
Tab. 1 Effects of the monthly increment of main variables on COD (1987—1988) in Taihu Lake

月	C (mg/L)	V (10 ⁶ m ³)	L (10 ⁶ g)	h (m)	T (K)	ΔL (10 ⁶ g)	Δh (m)	ΔT (K)	Δr (month)	(mg/L)						δ
										ΔC _L	ΔC _h	ΔC _T	ΔC _r	ΔC	C + ΔC	
4	(3.00)	49.62	148.9	2.13	287.0	-9.16	0.03	5.5	1	-0.185	-0.042	-0.102	-0.161	-0.490	—	—
5	2.50	50.30	125.8	2.16	292.5	3.10	-0.06	4.9	1.033	0.062	0.066	-0.131	-0.243	-0.246	2.51	0.01
6	(2.90)	48.94	141.9	2.10	297.4	63.10	0.54	3.6	1	1.289	-0.708	-0.170	-0.467	-0.056	2.25	-0.65
7	3.35	61.19	205.0	2.64	301.0	38.72	0.22	1.5	1.033	0.632	-0.249	-0.120	-0.766	-0.503	2.84	-0.51
8	(2.82)	66.18	186.6	2.86	302.5	-16.77	-0.06	-4.1	1.033	-0.253	0.059	0.345	-0.816	-0.665	2.85	0.03
9	2.20	64.82	142.6	2.80	298.4	-1.905	-0.39	-2.4	1	-0.029	0.306	0.105	-0.415	-0.040	2.16	-0.04
10	1.82	55.97	101.9	2.41	296.0	-8.095	-0.10	-7.7	1.033	-0.145	0.068	0.227	-0.274	-0.166	2.16	0.34
11	(2.30)	53.70	123.5	2.31	288.3	-12.86	-0.28	-10.1	1	-0.150	0.279	0.164	-0.143	0.150	1.65	-0.65
12	2.60	47.35	123.1	2.03	278.2	0.475	-0.23	0.6	1.033	0.010	0.295	-0.004	-0.049	0.250	2.45	-0.15
1	(3.22)	42.13	135.7	1.80	278.8	16.43	-0.12	0.2	1.033	0.367	-0.215	-0.002	-0.066	0.084	2.85	-0.37
2	(3.86)	39.41	152.1	1.68	280.0	34.52	0.28	1.0	0.933	0.876	-0.643	-0.010	-0.085	0.138	3.30	-0.56
3	4.13	45.76	189.0	1.96	281.0	(8.00)	0.15	4.0	1.033	0.175	-0.316	-0.006	-0.113	-0.260	4.00	-0.13
4	—	49.16	—	2.11	285.0	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—

注: 括号内数字为内插值或估测值; Δr 取 30d 为 1 单位月 (month); m 月的增量 Δ 均表示自当前月 m 至次月 m+1 间各因素的变化或贡献量。

一般各有机化学反应的指前因子(以 $\log A$ 表示)在 3—23 之间(罗孝良等, 1985), 平均值约在 $\log A = 13$, 即 $A = 10^{13}$ 。另外对于大多数化学反应, 体系温度每提高 10°C , 反应速度将增大 2—4 倍(傅献彩等, 1979)。设某反应在常温下从 $15 \rightarrow 25^\circ\text{C}$, 即 $T_1 = 288\text{K}$, $T_2 = 298\text{K}$, $\Delta T = 10\text{K}$, k_2/k_1 取值 3, 应用式(2)计算得: $E = 78.4 \times 10^3\text{J}$ 。考虑室温反应下一般情况, 取 $A = 10^{13}$, $E_a = 78.4 \times 10^3\text{J}$, 代入式(8)、式(9), 各计算结果列于表 1。

2.4.2 水位的影响 太湖历年平均水位变幅 1.26—1.76m(袁静秀, 1992), 1987 年 4 月—1988 年 3 月水位最大变幅为 1.18m(见图 4c), 有明显的丰、平、枯期。由表 1 可见, 1987 年 6—7 月, 水位上升 0.54m, 6 月的 ΔC_h 值为 -0.708mg/L ; 相反, 9—10 月水位下降 0.39m, ΔC_h 则达 0.306mg/L , 对 ΔC 贡献明显大于同期进出太湖 COD 负荷量 ($|\Delta C_L| = 0.029\text{mg/L}$)。枯水期, 湖容小, COD 偏高, 此时水位的变化对 ΔC 的贡献率增加。如 1988 年 2 月的 Δh 与 1987 年 7 月较为接近, 但对 ΔC 的贡献, 前者 (-0.643mg/L) 却为后者 (-0.249mg/L) 的 2.58 倍。由图 5 可清楚看出, 除 6 月(即 6—7 月, 下同)、9 月和 2 月的 Δh 外, 11 月和 12 月的 Δh 对 ΔC 的贡献亦较大, 超过同期的 ΔL , ΔT 和 Δt 。其中 12 月的 ΔC_h (0.295mg/L) 占全部贡献的 82.4%。表明, 在一定条件下, 水位对湖体有机物含量的变化具有重要的影响作用。

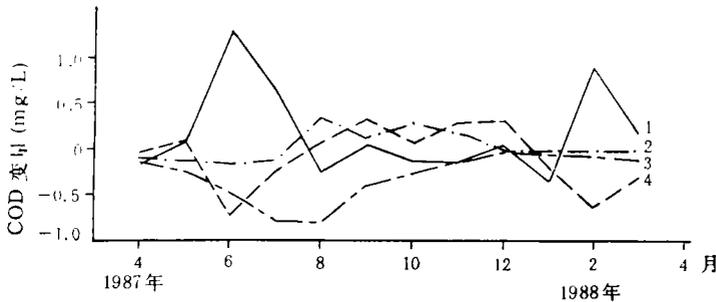


图 5 太湖各主要变量月增量对 ΔC 的贡献

Fig. 5 Contributions of the monthly increment of main variables to ΔC in Taihu Lake

1. ΔC_L ; 2. ΔC_T ; 3. ΔC_r ; 4. ΔC_h .

2.4.3 温度的影响 太湖历年最高水温 38.1°C , 最低水温 0°C , 平均水温 17.1°C , 平均变幅 34°C (袁静秀等, 1993)。1987—1988 年水温为 $0.4 \sim 34.5^\circ\text{C}$, 其月平均水温和水位有相似变化过程(图 4c)。故 ΔC_T 随水温的上升、下降和再上升而呈现负、正、负值。由表 1 和图 5 反映, 水温在下降时比上升时对 ΔC 的影响大, 8 月和 10 月时的 ΔC_T 分别达到 0.345 和 0.227mg/L , 均超过负荷量和水位变化对 ΔCOD 含量贡献的和, 即 $|\Delta C_T| > |\Delta C_L| + |\Delta C_h|$ 。其他时间, 包括温差达 10.1°C 的 11 月(至 12 月间), 其 ΔC_h 对 ΔC 的影响几乎被其他因素所掩盖。比较图 5 中 ΔC_T 和 ΔC_h 曲线变化可以看出, 水位比水温对湖体 COD 的影响显著, 但当水位变幅较小、水温偏高时, 温度的变化则可能更为重要。

2.5.4 自然净化对湖体有机污染的影响 由式(9)可分析, 自净对湖体 COD 的贡献

ΔC , 除主要与 Δt 大小有关外, 还与温度和初始含量有关, 但其结果不受任何因素影响, 恒为负值。这是因为有机物是一类非保守性物质, 在体系中的净化或自身衰减随时间推移而必然发生。除 6 月段外, 在平均水温约高于 20°C 的 5—10 月, $|\Delta C_i|$ 均分别大于 $|\Delta C_L|$ 、 $|\Delta C_T|$ 和 $|\Delta C_h|$ (图 4c 和图 5)。如 7—8 月间, 水温和 COD 均较高, 湖体净化作用加强, ΔC_i 达 -0.8mg/L 左右, 结果使湖体 COD 比期望值(约 4mg/L) 明显偏小, 见图 4a 和 4b; 而对水温较低、COD 较高的 12—2 月, COD 净入湖量虽小, 但因自净能力减弱, 实际 COD 则比期望值(约 2.5mg/L) 显著增加。上述结果表明, 有机物的自然净化是影响其在湖体中含量变化的另一个主要因素。

2.6 COD 的估算及误差

由图 4a 可见, 1987 年 4 月—1988 年 3 月各月的 $C + \Delta C$ 计算值变化趋势与实际情况较为一致, 但量值上有误差。令计算误差 $\delta = (C + \Delta C)_m - (C_{\text{实测}})_{m+1}$, 则 δ 最大为 0.34mg/L , 最小为 -0.65mg/L (见表 1), 平均相对误差约 11%。分析图 4a 还可发现, 计算含量大多小于实测含量, 即计算曲线位于实测线下方, 且似有一个月段的相位差, 平移后两曲线可重合。造成估算值误差的单侧偏离或滞后的原因可能来自于:

(1) 指前因子 A 和表观活化能 E_a 的估算。太湖水体中各类有机物有上千种, 每个母体化合物在转变为它的子体时都有各自的 A 和 E_a 。另外不同时期有机化合物数量和浓度各不相同, 因此借用平均 A 和 E_a 难免引入误差。

(2) 用一级机理代替各类自净反应(如光分解、化学分解等)而产生的误差。

(3) COD 负荷量 L 的估算。太湖有机污染源除环湖河道外有 8 大种类(表 2), COD 负荷量在各种类中的分配差异较大。根据污染性质选择不同的计算或估算方法, 因而引入不同的计算误差。环湖河道、湖面降水、沿岸农田和工厂矿山等污染来源的负荷量计算依据实测资料, 计算精度较高, 这几种污染途径控制着太湖 90% COD 入湖量。其它途径均采用资料统计并经析算而获得, 精度较低, 误差较大。虽然它们仅占入湖量的 10%, 但引起的传递误差和累积误差反映在对湖体 COD 拟合影响上不容忽视。

表 2 太湖各类污染源 COD 负荷量统计(1987)¹⁾

Tab. 2 Statics of COD load from all kinds of pollution sources (1987) in Taihu Lake

污染源种类	负荷量(t)	占总量(%)	计算方法
环湖河道	32 359	59.52	测量计算
湖面降水	7 183	13.21	测量计算
沿岸农田	5 151	9.48	土地类型试验计算
城乡居民	4 836	8.90	统计估算
工厂矿山	4 234	7.79	排放物调查计算
牲畜家禽	355	0.65	统计估算
游客	136	0.25	统计估算
宾馆和疗养院	61	0.11	统计估算
湖面船只	51	0.09	统计估算
合计	54 366	100	—

1) 同第15页脚注 1)。

(4) 水位和水温的测定和计算误差, 以及 Δt 取值大小的合理性等等, 均可对 COD

的估算产生影响。

参 考 文 献

- 陈静生主编, 1987, 水环境化学, 高等教育出版社(北京), 278—285。
 罗孝良等编译, 1985, 化学反应速率常数手册(第二分册), 四川科学技术出版社(成都), 17—41。
 袁静秀, 1992, 太湖水情特征, 湖泊科学, 4(4): 20—21。
 袁静秀、黄漪平, 1993, 环太湖河道污染物负荷量的初步研究, 海洋与湖沼, 24(5): 485—493。
 黄漪平、范成新, 1990, 江苏太湖, 中国湖泊富营养化, 中国环境科学出版社(北京), 194。
 盛后宝等, 1983, 污染源调查及评价, 太湖环境质量调查研究, 上海师范学院学报, 环境保护专辑: 17—26。
 傅献彩、陈瑞华, 1979, 物理化学(下册), 人民教育出版社(北京), 204—206。
 荒木峻(日)等编著, 赵连生等译, 1982, 水污染的自动分析, 中国建筑工业出版社(北京), 134—135。

RESPONDENCE OF THE ORGANIC POLLUTION IN TAIHU LAKE TO THE MAINLY ENVIRONMENTAL FACTORS

Fan Chengxin, Yuan Jingxiu

(*Nanjing Institute of Geography & Limnology, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Ye Zude

(*Wuxi Environmental Protection Institute, Wuxi 214073*)

ABSTRACT

Based mainly on 1987—1988 data, this analysis on the spatio-temporal variations of COD, BOD and TON of Taihu Lake, the relationship between them and TOC, and the influences of COD inflow and/or outflow of the lake and hydrometeorological factors on COD content there, showed that COD is an important organic indicator of pollution in Taihu Lake. In different periods and lake regions, the COD varied obviously low during high-water and high during low-water, and that lake regions in decreasing pollution order was Wuli Lake > Meiliang Lake > the open lake > East Taihu Lake. The decrease and increase of organic pollutant inflow are dominant factors in the growth and decline of organic pollution in the lake. However, the water stage, temperature, and other factors also have important impact.

Key words Taihu Lake Organic pollution COD spatial and temporal variations Influence factors