

五里湖营养状况及治理对策探讨

李文朝 杨清心 周万平

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提要 1990—1991年对五里湖的调查表明,该湖已发展到富营养—重富营养阶段。湖水中TN、TP、Chl a、BOD₅和COD_{Cr}的平均含量分别达到2.25 mg/L、111 μg/L、31.8 μg/L、4.9 mg/L和17.5 mg/L,平均透明度只有0.51 m。表层底泥中氮、磷和有机质的含量分别高达0.181%、0.071%和2.51%,成为巨大的内源营养源;而外源营养物质则主要来自梁溪河和五里湖北岸各支流。以硅藻为主的浮游藻类年生产力约为5200 t/km²(鲜藻),是该湖有机污染的主要来源。治理应从污染源控制入手,在东北端河道上建闸拦污,在北岸建立环湖集污河道;废止航运和局部清淤以削减内污染源;在沿岸带恢复水生植被以固持底泥;在东部湖区建立拥有水生植被的水源保护区以改善中桥水厂的水源水质。

关键词 五里湖 富营养化 治理对策

五里湖是太湖西北部的一个湖湾,位于无锡市西南近郊,面积约5 km²,平均水深2 m左右。50年代时全湖水草繁茂,湖水清澈见底,水产丰盛^[1,2],到60年代初期仍保持着良好的水质和水生植被^[3]。自60年代后期围栏养殖以来,水生植被被毁,加之城市污水的大量输入,水体富营养化日趋加剧^[4-6]。夏季藻类水华严重影响了中桥水厂的生产 and 游乐业,渔产品也仅为单一的鲢、鳙鱼。本文旨在揭示五里湖湖水和底质的营养状况及其生物生态系统现状,并对富营养化成因和可能的治理途径进行初步探讨,为其综合治理提供基本依据。

1 工作方法

在五里湖沿主水流方向选择五个采样点(图1),于1990年8月至1991年12月每逢双月采集上下层混合水样,表层底泥样和生物样品,参照有关标准方法分析测试^[7-9]。同时对水深、流向和透明度(SD)等进行了测量。渔业资料来自五里湖联合养殖场。

2 结果与讨论

2.1 湖水营养状况

2.1.1 氮 湖水中总氮及三种不同化学形态氮的含量及其季节变化如图2所示,可以看出TN变幅在0.7—4.43 mg/L之间,平均含量为2.25±1.1 mg/L。水中的氮主要由有机氮

收稿日期:1992年9月7日,接受日期:1994年4月1日。

(ON)、铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)三种形态组成,它们分别占TN含量的46.4%,28.0%和19.1%。包含在藻体内的氮(NIA)是湖水中ON的一部分,约占10.5%。

藻类对无机氮(ION)的同化和藻类沉降是6—10月湖水中氮含量大幅度下降的主要原因之一,1990年8月湖水中氮含量及其组成沿水流方向的变化(图3)是一个很好的例证。在1—4号点上ION与NIA之和稳定在1mg/L左右,而NIA的迅速增加伴随着ION的相应减小。

2.1.2 磷 TP检出范围为29—220 $\mu\text{g/L}$,平均含量为 $111 \pm 33 \mu\text{g/L}$ 。冬季枯水期含量较低,而6月以后含量较高(图4),反映汛期入湖水流带入的磷在该湖磷平衡中起着重要作用。 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 平均含量为 $14 \pm 12 \mu\text{g/L}$,占TP的12.6%;包含在藻体内的磷(PIA)平均为 $11 \pm 15 \mu\text{g/L}$,占总磷的9.9%。 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 与PIA平均含量之比仅为1.27:1,1990年8月此比率降至0.61:1,反映在藻类高速增长期湖内的磷循环异常迅速。湖水中ION与 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 之比为78:1。有时达到

2095:1,这与藻体内的氮、磷比率10:1相差极为悬殊,表明湖水中ION相对过剩,而 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的较低含量在某些时段和某些湖区可能起到了限制藻类生长的作用。

2.1.3 Chl_a、SD、BOD₅和COD_{Cr} 湖水中Chl_a的检出范围为9.2—141.6 $\mu\text{g/L}$,平均含量为 $31.8 \pm 21.0 \mu\text{g/L}$ 。Chl_a含量呈现冬低夏高的年周期性变化(图5),年变幅达83.6 $\mu\text{g/L}$ 。湖水透明度(SD)实测值为0.22—0.90 m,平均值为 $0.51 \pm 0.16 \text{ m}$,其变化趋势与Chl_a相反,二者间有极显著的线性负相关($p < 0.01$),线性关系为:

$$\text{SD}(\text{m}) = 0.56 - 0.0026\text{Chl}_a(\mu\text{g/L})$$

因此,夏季藻类的快速生长和现存量的提高是湖水透明度下降的主要原因。

BOD₅变幅为2.1—11.0 mgO_2/L ,平均为 $4.9 \pm 1.0 \text{ mgO}_2/\text{L}$,变化趋势与Chl_a相似,二者间存在着极为显著的线性正相关($r = 0.779, p < 0.01$),反映藻类的呼吸耗氧在湖水生化耗氧中占有较大比例。COD_{Cr}含量6.8—70.5 mg/L ,平均含量 $17.5 \pm 2.7 \text{ mg/L}$ 。其变化趋势与BOD₅大致一致,但在1991年夏末秋初出现了异常高含量。COD_{Cr}是指湖水中可被重铬酸钾氧化的有机物和无机物全部被氧化时的耗氧量^[6],湖水中的藻类及其分泌物和它们的死亡残体及其分解产物是COD_{Cr}的重要部分。五里湖藻类平均生物量为13.9 mg/L ,折合有机碳0.61 mg/L ,在COD_{Cr}分析中全部氧化需耗氧1.63 mg/L ,占平均COD_{Cr}的9.3%,而湖

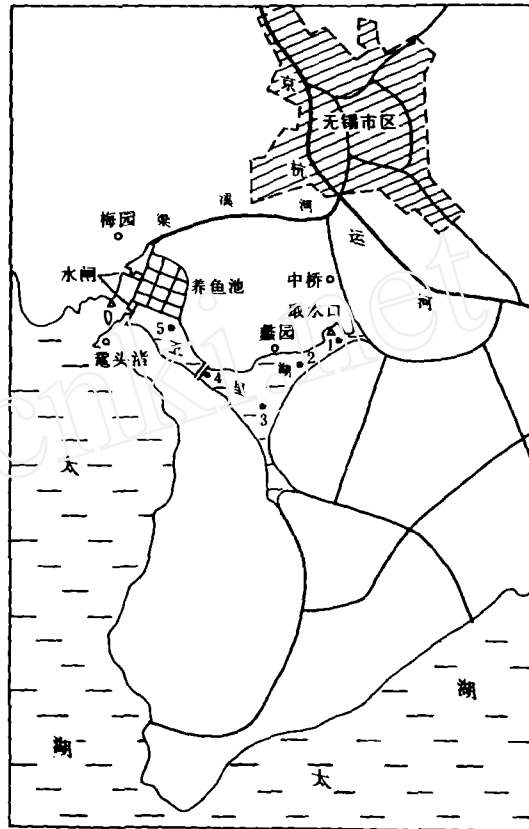


图1 五里湖及采样点布设示意图

Fig. 1 Wuli Lake and the sampling points (1 to 5)

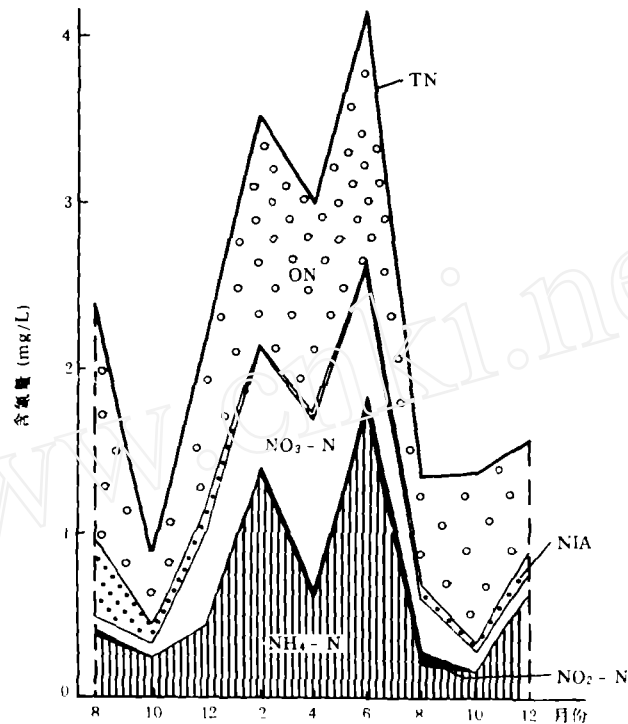


图2 1990年8月—1991年12月五里湖水中氮(TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)的含量及其季节变化

Fig. 2 Nitrogen (TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) content with their seasonal variation from Aug. 1990 to Dec. 1991 in the Wuli Lake water

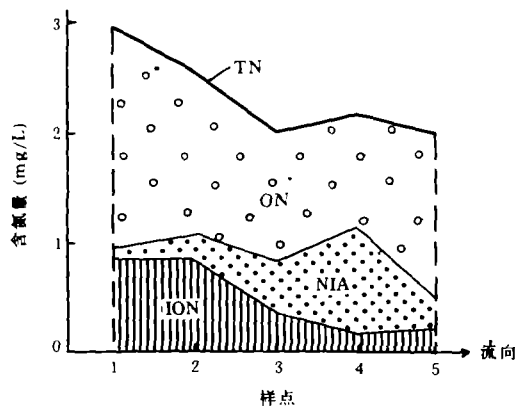


图3 1990年8月湖水中氮(TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量沿水流方向的变化

Fig. 3 The fluctuation of nitrogen (TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) content in different sites along the direction of water current

水中 $>0.45\ \mu$ 颗粒态悬浮物含量是藻类含量的10—20倍,其中大部分为藻类死亡残体。因而,藻类及其死亡残体是湖水中 COD_c 的主要组分。图5中 COD_c 含量的高峰期,明显滞后于 BOD_5 和Chl.a含量的高峰期,可能归因于湖水中藻类残体的积累效应。

湖水pH值为7.0—10.3,较高值出现在夏季,可能因藻类对 CO_2 的消耗所致。Eh值为+71~+335 mV, DO含量一般在8 mg/L以上,接近饱和。

2.2 底质营养状况

沿岸带底质较为坚硬,湖心区底质为乌黑色淤泥,深度达1 m以上,

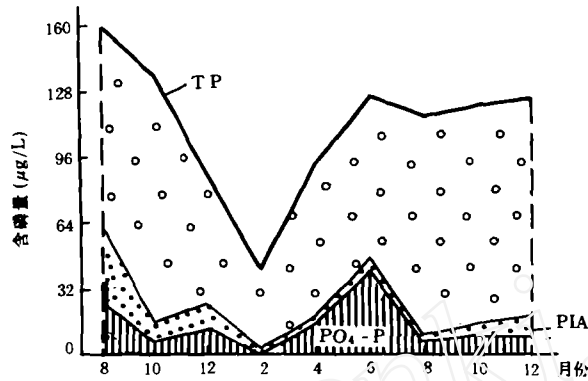
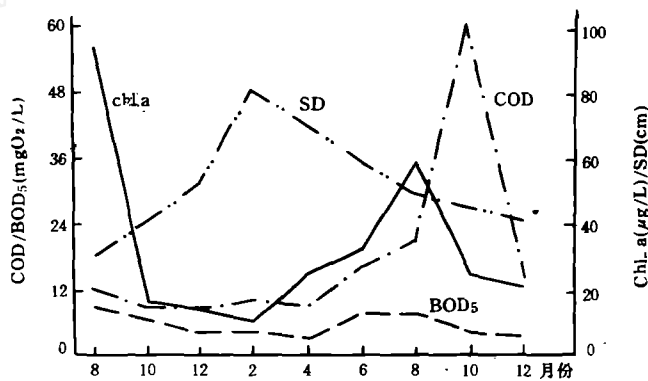


图4 湖水中磷含量及其组成

Fig4 Phosphorous content and its composition in of the lake water and its seasonal changes

图5 湖水中 Chl-a, SD, BOD₅ 和 COD_{Cr} 的季节变化Fig. 5 Seasonal changes of Chl-a, SD, BOD₅, COD_{Cr} in the lake water and SD value

氮、磷、有机质平均含量分别为0.181%, 0.071%和2.51%,在5个采样点上变化不大(表1)。肥沃的底泥是一个庞大的营养库,全湖0.1m厚表层底质中的氮、磷总贮量分别为258t和101t,而全湖湖水中的氮、磷总贮量分别为23.65t和1.15t,可见在深达1m以上底泥中贮存的氮、磷总量比湖水中的氮、磷总贮量高2—3个数量级。表层底质非常松软,干容重仅为0.285t/m³,呈半悬浮状态,遇风浪和船只搅动时易发生再悬浮而影响水质。

2.3 水生生物

2.3.1 浮游藻类 生物量变幅为0.99—116.94 mg/L,平均为13.9 mg/L,其中硅藻占57%为优势种,隐藻占17.1%,绿藻占14.5%,蓝藻只占5.8%。平均生物量的变化趋势与Chl-a浓度相一致,藻类组成上的季节性变化趋势为:冬季硅藻略有增加,春夏季节绿藻明显增多,而夏秋季节隐藻略有增高(图6)。硅藻门中以小环藻属(*Cyclotella*)和针杆藻属(*Synedra*)为主,隐藻门中以隐藻属(*Cryptomonas*)为主,绿藻门以栅列藻属(*Scenedesmus*)为主,蓝藻门以

色球藻属(*Chroococcus*)和微囊藻属(*Microcystis*)占优势。

表1 五里湖表层沉积物中氮、磷和有机质含量(占干重的百分比)

Tab. 1 Content of nitrogen, phosphorous and organic matter in the sediment of Wuli Lake (% of the dry weight)

样点	1	2	3	4	5	平均
全氮(%)	0.172	0.199	0.189	0.172	0.173	0.181
全磷(%)	0.066	0.077	0.072	0.070	0.072	0.071
有机质(%)	2.74	2.53	2.39	2.52	2.37	2.51

根据五里湖的面积、平均水深及藻类平均含量,全湖藻类平均总现存量为145.95 t。参照武昌东湖浮游藻类的年P:B系数179^①,五里湖藻类年生产力估算约为26125 t鲜藻,相当于每年同化碳1163 t,同化氮、磷分别为203 t和19.75 t。相当于五里湖藻类平均每40天和20天就能同化湖水中平均持有的氮量和磷量,可见藻类在该湖营养元素循环中占有主导地位。

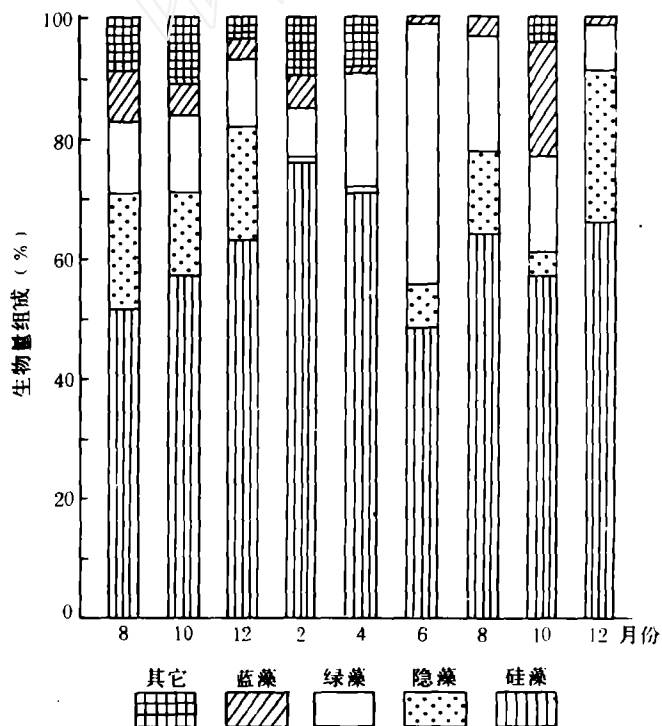


图6 藻类组成及其季节变化

Fig. 6 Composition of phytoplankton and its seasonal variation in Wuli Lake according to their biomass

2.3.2 浮游动物 平均生物量为0.522 mg/L,生物量无明显季节性变化。生物量组成中轮虫(Rotatoria)和桡足类(Copepoda)几乎占有均等的优势(34.6%和31.6%),原生动物(Protozoa)和枝角类(Cladocera)比例较小(19.6%和14.2%)。优势种类有针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、汤匙华哲水蚤(*Simoclanus clottii*)、中华窄腹水蚤(*Limnoluhona sinensis*)、砂壳虫(*Disflugia* spp.)、似铃壳虫(*Tutinnopsis* spp.)、卡刺蚤(*Daphnia longispina*)和多刺秀体蚤(*Diaphanosoma sarsi*)等。

五里湖的浮游动物与浮游植物平均生物量之比为1:25.2,而全太湖中此比率为1:20,高密度放养的鲢、鳙鱼对大型浮游动物的选择性滤食是该湖浮游动物生物量偏低的主要原因之一。

2.3.3 底栖动物和水生植物 由于水质污染和围栏养鱼,五里湖的大型底

① 中国科学院水生生物研究所四室。武昌东湖的浮游生物。湖泊水库渔业增产科技资料汇编,1976年。

栖动物的水生植物几乎绝迹。但作为污染指示物种的水丝蚓(*Limnodrilus* spp.)和摇蚊幼虫(*Tendipes* spp.),密度高达每平方米数千条。在个别河口和小湖湾有人工放养的风眼莲(*Eichhornia crassipes*)它们生长良好,密度可达20 kg/m²。

2.3.4 鱼类 该湖由五里湖联合养殖场经营鲢、鳙的围栏养殖,产量600—750 kg/hm²,其中鲢、鳙鱼各占一半左右。其它鱼类已不再放养,自然繁殖的鲤、鲫鱼较多见,也有极少量草、青、鳊鱼。鲢、鳙鱼对藻类的饵料系数如按40估算^①,每km²湖面产鱼60—75 t,需消耗藻类2400—3000 t,五里湖藻类年生产力约5200 t/km²,就是说藻类年生产量的一半左右已被滤食性鱼类所利用,这对于限制藻类数量具有重要意义。

2.4 营养状况的综合评价

选用相关加权的综合营养状态指数法^[9],对五里湖ChLa等主要水质参数的营养状态指数计算结果如表2示。

可见,只有BOD₅和SD与ChLa有较好的相关。利用这三项参数,依照计算式:

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^3 W_j \cdot TLI(j)$$

求得此湖水质的相关加权综合营养状态指数为62.66,即富营养状态。但因湖内滤食性鱼类养殖密度高达60—75 t/km²,这对浮游藻类形成了较强的捕食压力,对ChLa以及其紧密相关的BOD₅和SD产生了一定影响,使得其TLI值偏低。相反,TN和COD的TLI值较高,这比较真实地反映了此湖水质的营养状况。对这个浅而小的湖湾来说,外源污染物的输入,它们在湖底的沉积以及在船只和风浪等的扰动下发生再悬浮,这是湖水中维持较高COD和TN含量的根本原因。而TP却略有例外,TLI(TP)甚至低于TLI(ChLa),较为合理有解释是:磷可能是该湖藻类生长的限制因子。

表2 五里湖水质营养状态指数(TLI)计算表
Tab.2 Trophic state index(TLI) of the water of Wuli Lake

项目	平均含量	TLI 计算式	TLI 值	r _j	w _j
TN(mg/L)	2.25	54.53+16.941 n	68.26	0.030	
TP(μg/L)	111	-17.82+16.241 n	58.66	0.108	
COD _i (mg/L)	17.5	1.09+26.611 n	77.25	0.031	
BOD ₅ (mg/L)	4.9	21.18+25.791 n	62.17	0.779	0.33
Chla(μg/L)	31.8	25+10.861 n	62.57	1.000	0.54
SD(m)	0.51	51.18-19.41 n	64.24	-0.498	0.13

在与该湖区邻接的梅梁湾水域,以微囊藻为主的蓝藻占据绝对优势。而在五里湖则以硅藻门的小环藻和针杆藻占优势,这说明这里的水质已达重富营养。同时,表层底泥中氮、磷及有机物含量亦分别高达0.181%、0.071%和2.51%,说明富营养化已发展到了由富营养向重富营养过渡后期。

2.5 治理对策探讨

五里湖是无锡市的风光游览胜地,也是重要的饮用水源。目前严重的污染和富营养化已直接危及水质和生态环境,夏季乌黑的底泥上浮,藻类水华严重,湖区空气中有强烈的腥臭味;

① 唐 渝、盖玉欣.太湖浮游植物资源及其开发利用.1981.

湖水中过多的藻类和超标数倍的氨氮含量使得中桥自来水厂的生产十分困难,即使在加氯量高达 17 mg/L 的情况下也难以保证正常生产和合格的水质。因此,为了保护水质和生态环境,急需对五里湖进行综合治理。

2.5.1 断流截污 外源污染物主要来自无锡市区和北岸郊区。直通市区的梁溪河上虽已建闸拦污,但它的一条支流自蠡桥直通五里湖东端,成了该湖主要的外污染源,其入湖口附近的湖水污染严重,氨氮常超过 10 mg/L。中桥自来水厂恰从这里取水,饮用水源受到严重污染。同时,五里湖与梁溪河之间为一乡镇工业发达区,其污水通过数条小河直排五里湖。故应在东端河道建闸拦污,并在北岸修建集污河道,封闭北岸湖堤,这样可以削减绝大部分外源污染负荷。

2.5.2 废止航运 五里湖是兼有饮用水源功能的游览型湖泊,目前繁重的航运负荷不仅引起了严重的油污染,而且频繁地高强度搅动底泥引起表层沉积物的再悬浮而污染水体。同时航运给外源污染物的入湖控制造成困难,且这一措施对这一地区的航运影响不大。

2.5.3 湖内综合治理 即使在断绝外湖污染之后,湖内底泥贮存的大量营养物质仍将使得湖水质难以恢复,这就需要采取一系列的辅助措施。处于 2 m 水深以下的肥沃淤泥多为厌氧状态,这有利于磷的释放,可通过局部清淤将它们排入沿岸低圩区,也可将其堆积在沿岸带以形成浅水区,使它们处于较高的氧化状态。在沿岸带逐步恢复水生植被,利用水生植物的促淤、固持底泥和对营养吸收的功能以及克藻功能来改善水质。同时调节鲢鱼的放养密度,以达到抑制藻类的目的。

2.5.4 建立水源保护区 实验证明,拥有水生植被的水源保护区对于净化湖水质是十分有效的。建议将蠡园以东划为水源保护区,拦网加以封闭保护,禁止航运和一切渔业活动,并在此区内恢复水生植被,使其成为天然的水质净化场。这样可有效地改善中桥水厂的水源水质,降低生产成本并提高自来水质量。

3 小 结

五里湖的富营养化已发展到由富营养向重富营养过渡阶段的后期,水体污染及生态环境的破坏已严重危及城市供水和游乐业,急待治理。东端河道和北岸各河口是污水入湖的主要通道。东端河道上建闸拦污并封闭北岸所有入湖河道,是控制外源污染的有效途径;废除航运和局部清淤可以部分削弱内污染负荷;适当调节鲢鱼放养密度并在沿岸带恢复水生植被,可以从内部起到抑制藻类和净化水体的作用;在湖东部建立有水生植被的水源保护区是在短期内解决中桥自来水厂水源污染问题的途径之一。

参 考 文 献

- 1 朱树屏等. 太湖北部湖水中几种理化性质的周年变化. 海洋与湖沼, 1959, 2(3), 146—162.
- 2 伍献文等. 五里湖 1951 年湖泊学调查. 水生生物学集刊, 1962, 1(1), 63—113.
- 3 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社, 1965, 1—84.

- 4 江苏省环境保护局等.太湖环境质量调查研究.上海师范学院学报(自然科学版环境保护专集),1983,27—171.
- 5 孙顺才等.太湖.北京,海洋出版社,1993:196—243.
- 6 杨清心等.太湖藻类水华盛发期水质富营养化状况的 Fuzzy 聚类分析.南京林业大学学报(生态专集),1991,15,121—127.
- 7 国家环保局编.水和废水监测分析方法(第3版).北京,中国环境科学出版社,1989.
- 8 美国公共卫生协会等编著,宋仁元等译.水和废水标准检验法(第15版).北京,中国建筑工业出版社,1985.
- 9 金相灿、屠清瑛主编.湖泊富营养化调查规范(第2版).北京,中国环境科学出版社,1990.

STUDIES ON EUTROPHICATION OF WULI LAKE AND POSSIBLE RESTORATION STRATEGIES

Li Wenchao Wang Qingxin Zhou Wanping

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

Abstract

According to the surveys from 1990 to 1991, the Wuli Lake entered a eutrophic period, which seriously affected drinking water supply and entertainment. The mean concentration of TN, TP, Chl_a, BOD and COD in the lake water were 2.25 mg/L, 111 μg/L, 31.8 μg/L, 4.9 mg O₂/L and 17.5 mg O₂/L respectively. The water had a mean SD of only 0.51 m. The mud in the bottom contained 0.18% of nitrogen, 0.071% of phosphorous and 2.51% of organic matter. The phytoplankton dominated by diatom gave an annual productivity of 52 t/hm² (fresh algae), the main source of organic matter in the lake. To restore this lake, the pollutant input should be cut off by building sluice gates on its rivers and setting up waste water dispersing system around the lake. The mud should be removed from the lake bottom and water transport forbidden. Re-establishing aquatic vegetation in the littoral zone would effectively promote the restoration of water quality and environment. It may be a good way to improve the drinking water quality in a short time by setting up a water source protective area in the eastern part of the lake and recovering aquatic vegetation in it.

Key Words Wuli Lake, eutrophication, restoration strategies