

太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究*

杨龙元 秦伯强 胡维平 罗淑葱 宋玉芝

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

提要 分析了 2002 年 7 月—2003 年 6 月太湖周边地区太湖站、拖山岛、东山站、无锡、苏州、湖州、常州、金坛等 8 个站、点大气 TN、TP 沉降通量和降水化学组成观测资料, 测定和计算了水气界面 TN、TP 的表现总沉降率(R_T)、湿沉降率(R_W) 和干沉降率(R_D)。太湖大气 TN 的年平均 R_T 为 4226 kg/(km²·a), TP 的年平均 R_T 为 306 kg/(km²·a)。大气 TN、TP 的年沉降负荷分别占由环湖河道等点污染源输入的 N、P 总负荷的 48.8%和 46.2%。指出形成太湖大气 TN 污染的主要途径是湿沉降, 而大气 TP 污染则主要来自气溶胶等固体物质的干沉降; 小雨携带入湖的大气 TN、TP 污染物通量高于中雨和大雨。TN 总沉降率曲线在春季 3—5 月出现高峰值的现象对太湖水体的富营养化具有潜在的促进影响。

关键词 太湖, 大气污染, 干湿沉降, 水气界面

中图分类号 P731

氮(N)、磷(P)等营养元素经大气传输进入海洋、湖泊是水体生态系统生物地球化学物质循环研究的重要组成部分。研究资料表明, 大气传输过程不仅能大量陆源物质进入水体, 而且其通量可能接近于由河流等点污染源输送注入水体的污染物通量, 从而对海洋、湖泊水体的富营养化产生重大影响(高原等, 1997; 王保栋等, 2002; 宋金明等, 2006)。太湖湖泊面积为 2428km², 实际水面面积为 2338 km², 平均水深 1.89m, 最大深度仅 4m。是典型的大型碟型浅水湖泊。由流域内大气污染引发的水气界面 N、P 污染物的干、湿沉降对湖泊水质的影响更为突出。太湖水体的富营养化污染已经危及到湖泊周边地区国民经济的稳定、持续发展(秦伯强, 1998)。杨龙元等(2001)曾就大气酸性沉降对太湖水环境的潜在影响进行了初步的观测研究, 指出太湖流域大气 N 化合物的污染对太湖水体富营养化的影响较大。但是 N、P 等营养元素经大气传输途径进入太湖水体生态系统的相关研究资料报道尚不多。作者参照 Peter 等(1995)和 Akkoyunlu 等(2003)介绍的采样分析方法, 测定了 2002 年 7 月—2003 年 6 月中

国科学院南京地理与湖泊研究所设立在太湖岸边的中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)、东太湖水体农业实验站(简称东山村)和太湖北部梅梁湾口拖山岛 3 个站点的大气 TN、TP 沉降率。结合太湖周边无锡、苏州、湖州、常州、金坛等 5 市提供的大气沉降物质观测资料, 计算了太湖周边地区大气 TN、TP 表现总沉降率、湿沉降率和干沉降率等参数与太湖水体经由水气界面接纳的 TN、TP 年污染负荷通量, 分析了影响太湖水体大气干、湿沉降率的环境因子和时空变化特征及其对湖泊水体富营养化污染的影响。为太湖富营养化污染的治理提供了基础资料和新思路。其中有关太湖流域大气降水化学组成及其时空变化特征等研究成果另文发表。

1 实验和方法

1.1 采样点

在太湖站、拖山岛、东山站及无锡、苏州、湖州、常州、金坛等市设立了 8 个降尘、降雨采样站点(图 1)。无锡、苏州、湖州、常州、金坛等市的降尘、降雨采样、化学组成测定分别由各市环境保护局组织人员按国家环保总局相关标准进

* 国家自然科学基金委与香港资助局联合资助项目, 40110734 号, N-HKUST612/01 号资助。杨龙元, 副研究员, E-mail: lyyang@niglas.ac.cn

收稿日期: 2004-12-15, 收修改稿日期: 2005-12-02

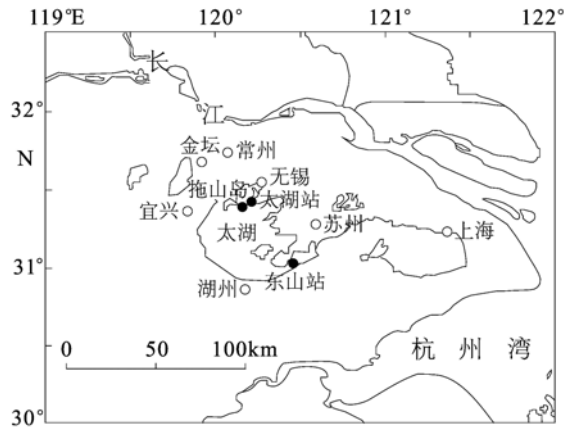


图 1 采样点示意图

Fig. 1 The sampling sites

行;太湖站、拖山岛、东山站等 3 点的降尘、降雨采样、分析由太湖站实验室负责实施。苏州市环保局同时提供市区内上方山、苏州市监测站、科委、拙政园、气象台、新苏旅社、彩香新村、南门、轧钢厂等 9 个采样点的大气降尘监测数据和上方山、苏州市监测站、科委等 3 个采样点每月 1 次的雨水全分析测定数据;湖州市环保局提供城北水厂、气象站、古山新村等 3 个采样点的大气降尘监测数据和城北水厂、塘甸等 2 个采样点每月 1 次的雨水全分析测定数据;常州市环保局提供常州工学院、常州市监测站、城建学校、中村等 4 个采样点的大气降尘和常州工学院、常州市监测站、城建学校等 3 个采样点每月 1 次的雨水分析测定数据。金坛市环保局提供金坛市监测站 1 个采样点的大气降尘和每月 1 次的雨水分析数据。本研究中太湖周边地区降尘采样点总数达 21 个,降雨采样点总数为 13 个。

1.2 分析测定

参照 Peter 等(1995)和 Akkoyunlu 等(2003)介绍的采样分析方法,大气干湿沉降总量的观测按国家环境保护总局公布的 GB/T15265-94 标准适当改动后用重量法进行。用内径为 $\phi 150$ mm 的标准玻璃降尘缸收集大气干湿沉降物。降尘缸放置在特制的高于地面 1.5 m 处的铁质采样架中。降尘缸口安设不锈钢网罩防鸟等飞禽活动干扰。自 2002 年 12 月起太湖站、拖山岛、东山站等 3 站均用双缸采集平行的双份样品,每月采降尘样品 1 次。降尘缸内收集液经定容后,分取 20 或 50ml 按湖泊富营养化调查规范(金相灿等, 1990)用过硫酸钾硝解法测定 TN、TP;将剩余全部液体加热蒸干,用感量为 0.01mg 的精密电子天平称重,

计算月降尘量;用土壤分析测定标准的高氯酸钾硝解法(钱君龙等, 1990)测定降尘干物质中的 TN、TP 含量。大气湿沉降采样在降雨开始约 5—10min 后进行。置洗净的 1L 大玻璃杯于高于地面 1.5m 处的铁质采样架中收集雨水样品。降雨结束后分别采集的雨水样品为 3 份。用 PHS-3C 型酸度计和 DDS-11C 型电导率仪分别测定第 1 份雨水样品的 pH 值和电导率(EC);第 2 份雨水样品置于比色管中,按过硫酸钾硝解-比色法(金相灿,等, 1990)同时测定 TN、TP 浓度;第 3 份雨水样品立即冷冻保存供测定阴、阳离子组成。样品解冻后用 Whatman GF/C 玻璃纤维滤纸过滤,美国 Dionex 公司生产的 DX-100 型离子色谱仪测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 等阴、阳离子的浓度。

1.3 计算

1.3.1 总沉降率 不考虑降尘缸收集液体内部可能发生的各种物理、化学、生物过程,测定液体的体积和 TN、TP 浓度,计算沉降通量,称之为表观总沉降率,简称总沉降率,以 R_T 表示。计算公式如下:

$$R_T = k_1 \times C_i \times V \times f / S \\ = 56.59 \times C_i \times V \times f \quad (1)$$

式中, R_T 为总沉降率,以 $kg/(km^2 \cdot 月)$ 计。 k_1 为换算系数。 S 为降尘缸面积,以 m^2 计。当采用直径为 $\phi 150$ mm 标准玻璃降尘缸时,将 S 并入 k_1 中, k_1 取 56.59; C_i 为 TN 或 TP 浓度,以 mg/L 计; V 为干湿沉降物液体总体积,以 L 计; f 为采样时间系数,计算如下:

$$f = t/30$$

式中, t 为实际采样时段,以 $d(天)$ 计,精确到 0.1d。

1.3.2 湿沉降率 定义单位面积上由雨、雪、雾、露、雹等引起的大气中 TN、TP 污染物的月沉降通量为湿沉降率,以 R_W 表示。计算公式如下:

$$R_W = k_2 \times C_i \times V/A \\ = k_2 \times C_i \times h \quad (2)$$

式中, R_W 为湿沉降率,以 $kg/(km^2 \cdot 月)$ 计。 C_i 为第 i 次降雨组分浓度,以 mg/L 计; V 为降雨总体积,以 m^3 计; A 为降雨区面积,以 m^2 计; h 为降雨量,以 mm 计。 k_2' 、 k_2 为单位换算系数,当 R_W 以 $kg/(km^2 \cdot 月)$ 计, C_i 以 mg/L 计, h 以 mm 计时, k_2 取 1。湿沉降率 R_W 按式(2)按月降雨次数累计计算。在实际计算中,对于小雨,采样量少,相应化学组

成的分析测定困难时,可采用本月多次小雨的平均浓度值 C_i' 取代 C_i 计算湿沉降率。

1.3.3 表观干沉降率 表观总沉降率与湿沉降率的差称为表观干沉降率,简称干沉降率,以 R_D 表示,以 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ 计。计算式为:

$$R_D = R_T - R_W \quad (3)$$

2 结果和讨论

2.1 太湖大气 N、P 总沉降率

观测期间,太湖站、拖山岛、东山站等 3 个采样点测定的大气 TN、TP 年表观总沉降率分别波动在 3695—4538 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 181—395 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间(表 1)。3 站点相比,太湖站大气 TN、TP 年表观总沉降率最高,而东山站大气 TN、TP 年表观总沉降率最低,这与 3 站点的周边大气环境特征相符合的。太湖站坐落于太湖北部梅梁湾与西太湖主体水域交界处,周围地区由橘树、桃林、杨梅及多种野生乔灌木植被覆盖,可代表果园等林区大气环境的影响。定期喷洒的化肥、农药污染增加了大气中 N、P 等营养元素的沉降量;拖山岛位于太湖开阔水面之中,面积约为 300 亩。干湿沉降物和降雨采样点设置在拖山岛居民菜园之中,离人类活动强烈的大气污染源较远,雨水样品化学组成主要受四周太湖水面水环境参数的影响;东山站的采样点设于鱼塘埂上,周围广大区域内无重大人类活动污染源,机动车辆也甚少。监测数据可代表大水面养殖区域大气环境质量状况。因此,由太湖站、拖山岛、东山站 3 点基本上代表了太湖周边地区土地覆盖和大气环境的主要类型。测定的大气 TN、TP 的表观总沉降率具有较好的代表性。如用 3 站总沉降率的年平均均值进行估算,太湖水面面积按 2338 km^2 计时,则 TN 的大气年沉降负荷为 9881 t/a, TP 的大气年沉降负荷为 715 t/a。而太湖水体每年平均由河道输入的 TN、TP 污染物的入湖量分别为 20241.2t 和 1552.2t(黄漪萍等, 2001), 则太湖水面直接受纳的大气 TN、TP 污染物分别可占环湖河道年输

入污染物总量的 48.8%和 46.2%。由于太湖流域电力等能源供应的增长,汽车、船舶等陆、水运输能力的扩张,化肥农药的高频率、高剂量使用等面源污染的强化等人类活动干扰的日益加大,大气污染及传输造成的氮、磷营养元素干湿沉降负荷对太湖水体生态系统富营养化的影响不容忽视。

表 1 太湖大气 TN、TP 表观总沉降率(2002.7—2003.6)
Tab. 1 Total apparent deposition rates of atmospheric TN and TP in Taihu Lake between 2002.7—2003.6

观测站点	$R_T \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$	
	TN	TP
太湖站	4538	395
拖山岛	4445	341
东山站	3695	181
平均值	4226 ± 267	306 ± 64

2.2 太湖大气 TN、TP 湿沉降率和干沉降率

2002 年 7 月—2003 年 6 月测定的太湖大气 TN 湿沉降率 R_W 为 3404 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 而 TP 湿沉降率 R_W 为 85 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 比文献(黄漪萍等, 2001)中估算的数值要大得多(表 2),表明太湖地区大气 TN 湿沉降量自 20 世纪 80 年代以来有了显著增长。表 2 数据说明大气湿沉降对太湖水体生态系统的影响主要表现为 TN 污染。2002 年 7 月—2003 年 6 月太湖北部地区总计降雨 984.5 mm, 属平水偏低年份。如考虑丰水年和枯水年不同年降雨量的影响, 引用太湖站年报中降雨量资料, 计算了 1999 年丰水年和 1997 年枯水年大气 TN、TP 湿沉降率。由于 1997—2002 年期间太湖流域未兴建大型火力发电厂, 局地大气污染源的分布格局和强度变化不大, 在计算时假设不同的观测年份内降雨具有与 2002 年相似的降水化学组成。由表 2 可看出太湖水体受纳的 TN 湿沉降率波动在 2705—3966 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间, 平均值为 3358 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; TP 湿沉降率则波动在 68—109 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间, 平均值为 87 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。由 R_W 值

表 2 太湖大气 TN、TP 表观湿沉降率和干沉降率

Tab. 2 The apparent wet and dry deposition rates of atmospheric TN and TP in Taihu Lake

年份	$Q(\text{mm})$	$R_W [\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$		$R_W [\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$		文献值(黄漪萍等, 2001) ¹⁾ [$\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]	
		TN	TP	TN	TP	TN	TP
2002—2003.6	984.5	3404	85	1134	311	1081 ± 108	24 ± 14
1999	1512.4	3966	109	1041	256		
1997	755.2	2705	68	291	97		
年平均值	1084.0	3358 ± 365	87 ± 12	822 ± 267	221 ± 64		

1) 按太湖湖水面积 2338 km^2 进行了单位换算

计算的太湖水体大气年湿沉降负荷量分别为 TN 7852t、TP 203t。TN 的大气湿沉降负荷数值是很大的。

在远、近距离大气污染物传输的影响下,太湖水体每年从大气沉降途径受纳 TN 9881t、TP 715t。其中经湖面降雨、雾等湿沉降途径带入 TN 7852t、TP 203t, 分别占 TN、TP 总沉降量的 79.5% 和 28.4%。因此,太湖水体由水气界面受纳的 TN 污染负荷主要来自湖面降雨、雪等大气湿沉降,而 TP 污染负荷则主要来自气溶胶等干沉降物质。

2.3 大气总沉降率 R_T 年变化特征

太湖站、拖山岛、东山站 3 个站点观测到的大气 TN 总沉降率 R_T 具有明显的季节变化特征(图 2), 3 站点的总沉降率曲线变化趋势基本一致。3 条曲线均为双峰型分布, 曲线的第 1 个沉降高峰出现在 2002 年 12 月, 此峰也许与进入冬季周边地区工业生产和居民生活采暖等局地污染源的强度增加有关, 但强度不大, TN 的月总沉降率波动在 300—400 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ 之间; 第 2 个沉降高峰出现在 2003 年 3—5 月期间, 此峰强度较大, 持续的时间也较长。TN 月总沉降率波动在 800—1000 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ 左右。2003 年 3—5 月, 3 站点的 TN 累积月沉降量约占年总沉降量的 57.4%—65.1%。造成此第 2 个峰值的原因除与该年度春季的降雨量较正常年份偏大有关以外, 也可能与春季气温转暖后农民春播大量施撒化肥, 果农喷洒农药等农、林业生产活动使大气中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、有机 N 等含 N 化合物增加及 3—5 月春季期间太湖周边地区梨花、桃花、油菜花、橘树花和各类野生草木花卉相继开放, 在风力的吹送下大量花粉输送进入太湖水域上空, 增加了大气沉降物中的有机 N 化物有关。王雪梅等(2006)用气团后向追踪法研究了太湖流域春季的大气环流特征, 发现太湖流域春季的成雨气团多数来源于我国西北地区和西南方孟加拉湾上空。因此, 我国西北地区在春季频繁发生的沙尘暴和长江流域北部冬季采暖期间的大气污染及贵州等西南地区的酸性污染气体, 也是造成太湖流域春季降雨组成中 TN、TP 浓度偏高的因素之一。3—5 月正值太湖水体温度逐渐上升, 藻类、浮游动物等生命活动加剧季节(杨龙元等, 2002), 大量大气 TN、TP 等营养盐类的输入恰好可提供藻类等初级生产者生长发育所需的营养物质, 特别是对远离岸边点、面污染源的西太湖湖心区开阔水域内藻类的

生长繁殖具有重要的影响。此现象可能对太湖水体生态系统富营养化和蓝藻水华的发生、发展具有潜在的促进意义。

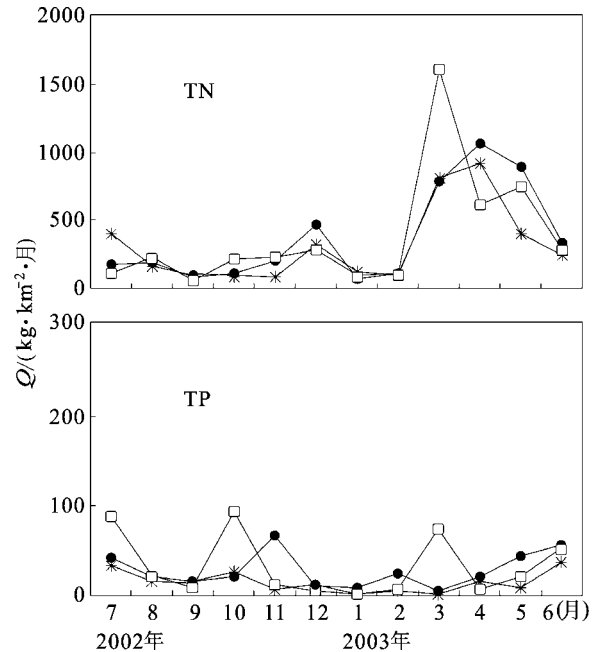


图 2 太湖大气 TN 和 TP 月总沉降率年变化曲线

*TH: 太湖站; ●TS: 拖山岛; □DS: 东山站

Fig. 2 The annual variation of total monthly deposition rate of atmospheric TN and TP in Taihu Lake

*TH: Taihu Station; ●TS: Tuoshan Island; □DS: Dongshan Station

太湖站、拖山岛、东山站 3 站点观测到的大气 TP 月总沉降率年变化曲线与 TN 的变化曲线有较大差异, 季节变化规律不明显。在拖山岛、东山站 2 曲线上虽然也有 2 个峰值出现, 但 2 站出现 TP 沉降峰值的时间并不相同, 时间也较短, 表明这些峰值是由采样点的局地环境因子的波动造成, 与太湖流域大气环流总趋势的影响关系不大, 并不具备能反映全太湖大气沉降特征的普遍意义。而太湖站 TP 月沉降量年变化曲线中则没有明显的峰值出现。TN、TP 总沉降率年变化曲线所表现出的差异也许与铵盐、硝酸盐等氮化合物易溶于水; 磷酸钙等正磷酸盐和磷酸氢盐的溶度积均较小, 难溶于水的物理化学特性有关。成雨气团在大气环流运动过程中能大量吸收、吸附沿途污染气体中的含氮物质, 增加雨水中各种含氮化合物的浓度, 并随气流输送至较远区域; 反之, 气溶胶中含磷颗粒污染物在气团输移过程中较易通过重力沉降、粒子间的碰并作用等沉降至地面而离开气团, 难以随气流输送至较远地区。因此, 太湖水域大气 TP 沉降通量受外源性污染源的影

响相对较小, 曲线的季节变化不如 TN 沉降曲线显著。

2.4 降雨类型的影响

2002年7月—2003年7月观测研究期间, 太湖站采集到降雨样品 59 个。如把日降雨量小于 10mm 的降雨定义为小雨, 10—40mm 的降雨定义为中雨, 大于 40mm 的降雨定义为大雨, 按此标准归类, 则计有小雨 28 个, 中雨 24 个, 大雨 7 个。太湖站不同类型降雨的 pH 值、电导率(EC)、TN、TP 的数值表现出明显差异。不同类型降雨的化学组成平均浓度见表 3。28 次小雨的平均降雨量为 5.7mm, 雨水样品 TN 的平均浓度高达 5.23mg/L, 约是大雨 TN 平均浓度的 3 倍、中雨 TN

平均浓度的 2 倍。观测期间, 太湖站小雨、中雨和大雨的累积年降雨量分别为 385.0mm、423.5mm 和 176.3mm, 据此求出不同类型降雨带入湖泊水体 TN、TP 的湿沉降污染负荷及百分比值(图 3)。太湖水体接纳的 TN 年湿沉降负荷中, 有 59.1%来自平均日降雨量小于 10 mm 的小雨; 而由大雨携带入湖的 TN 湿沉降负荷仅占年湿沉降量的 8.5%。太湖水体接纳的 TP 湿沉降负荷中, 有 46.8%来自平均日降雨量小于 10 mm 的小雨; 而由大雨携带入湖的 TP 湿沉降负荷占年总湿沉降量的 10.4%。可见日降雨量小于 10 mm 的小雨降雨量及其年度分布规律, 对太湖水体的富营养化污染有较大的影响。

表 3 太湖流域不同类型降雨的化学组成

Tab.3 Chemical composition of rainfall in different scales (light, medium and heavy) in Taihu Lake tributary region

降雨类型	降雨量 (mm)	pH 值	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
<10 mm	5.7	4.78	58.6	5.23	0.103
10—40 mm	19.2	4.52	42.5	2.60	0.085
>40 mm	54.2	4.53	31.3	1.64	0.050

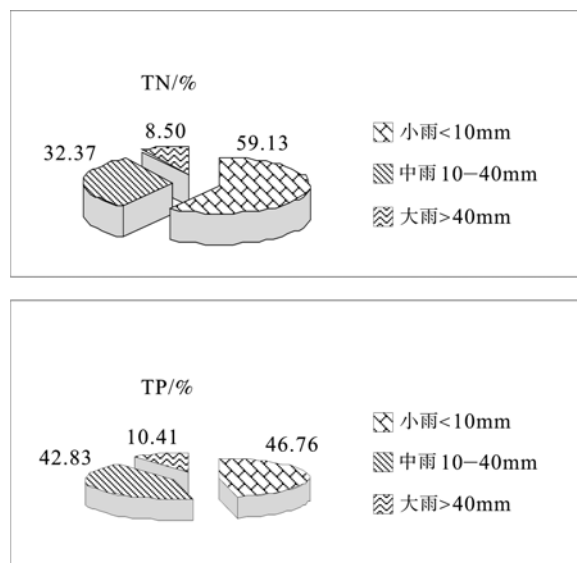


图 3 不同类型降雨沉降负荷百分比

Fig. 3 TN and TP proportions in rainfalls of different scales (light, medium and heavy)

2.5 大气 TN、TP 沉降负荷的空间分异特征

大气降尘 N、P 干湿沉降负荷的变化与人类活动的强弱和局地污染源的分布密切相关。依据无锡、苏州、湖州、常州和金坛等市环保局提供的大气降尘同步监测样品, 分析了降尘样品中的 TN、TP 含量, 计算了太湖周边区域测点大气降尘的 TN、TP 沉降率(图 4)。在太湖周边地区 8

个采样观测站点中, 大气降尘 TN 年平均月沉降率最高值出现在拖山岛上, 为 $121 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$, 最低值出现在苏州市, 为 $19 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$, 8 个采样观测站点的平均值为 $79 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$, 空间分异是比较显著的。位于太湖北部、西北部的无锡市、常州市和太湖站、拖山岛等 4 个站点大气降尘 TN 年平均月沉降率大于东部的苏州市和南部湖州市的大气降尘 TN 年平均月沉降率, 这可能与城市规模、主导产业类型及太湖流域的季风气候等因素有关。无锡市、常州市是太湖流域著名的大型工业城市, 人口众多, 交通发达, 建材、化工等乡镇企业密布, 大气污染相对较大, 大气降尘的 TN 年平均月沉降率波动在 $92.6\text{—}100.7 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ 左右。苏州市虽然也属太湖周边地区的大型城市, 但该市是全国著名的风景名胜城, 以旅游业为主的第三产业在该市的经济收入中占有较大比重, 城市管理方面对环境卫生和植树绿化等工作相对重视。同时, 苏州市位于太湖的东部, 太湖广阔水域对冬季盛行的含有较多大气污染物的西北气流有一定的稀释净化作用。而在夏季盛行东南风时, 苏州市又因位于太湖东部而首先受到从海洋上空输送来的较为清洁的气流的影响而将本地产生的污染物质传输至下风向地区。这些因素的共同作用使得苏州市的大气降尘污染物质

的年平均月沉降率相对较小。湖州市、金坛市在城市规模、人口和工业生产水平等方面均低于太湖北部的无锡、常州市,大气降尘的 TN 年平均月沉降率在 50.2—54.6 kg/(km²·月)之间,大气降尘 TN 污染较无锡、常州市为小。但二市的 TN 年平均月沉降率均大于位于东部的大型城市苏州市。除受局地污染源分布等自然地理位置因素的影响外,湖州、金坛市的城市管理和大气环境污染治理水平尚需进一步改进也是一个不容忽视的因素。

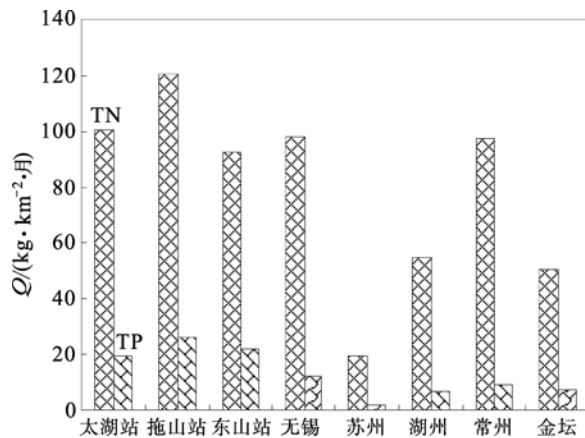


图 4 太湖周边区域大气降尘 TN、TP 沉降率比较

Fig. 4 The comparison in deposition rate for atmospheric TN and TP in adjacent areas of Taihu Lake

太湖周边地区 8 个采样观测站点大气降尘 TP 年平均月沉降率比 TN 年平均月沉降率小得多,平均值为 13 kg/(km²·月)。空间分异以太湖站、拖山岛和东山站等 3 个太湖湖边区观测点高于无锡、苏州、常州、湖州和金坛等离湖岸相对较远的城镇区观测点为主要特征。太湖站、拖山岛和东山站等 3 个太湖湖边区测点 TP 年平均月沉降负荷平均值为 23 kg/(km²·月),约是无锡、苏州、常州、湖州和金坛等离湖岸相对较远的 5 个城镇区观测点 TP 年平均月沉降负荷平均值 7 kg/(km²·月)的 3 倍。造成这一反常现象的原因除承担采样、分析测定任务的实验室间存在着一定的系统误差外,也可能与近地面大气中昆虫等生物源的活动强度在草木茂盛的湖边地区大于水泥等建筑材料覆盖的城镇区有关。Peter 等(1995)认为,昆虫死亡后的遗体会将大量有机磷化合物传输进入湖泊水体中。这一现象对湖泊水体造成的污染影响有待于在今后研究中进一步深入探讨。

3 结论

2002 年 7 月—2003 年 6 月太湖周边地区 8 个站点大气干湿沉降量和降雨水化学组成观测资料表明,太湖水体大气 TN、TP 的总沉降率分别为 4226 kg/(km²·a)和 306 kg/(km²·a)。全湖 TN 的年沉降负荷为 9881t/a, TP 的年沉降负荷为 715t/a,分别为入湖河道年输入污染物总量的 48.8%和 46.2%。

不同类型的降雨携带入湖的大气氮、磷污染物在数量上有显著差异。降雨量小于 10 mm 的小雨携带入湖的 TN、TP 污染物分别占大气年湿沉降量的 59.1%和 46.8%;而降雨量大于 40 mm 的大雨携带入湖的 TN、TP 污染物仅占大气年湿沉降量的 8.5%和 10.4%。太湖水体每年由湿沉降途径带入 TN 7852t/a,占 TN 表观干湿沉降总量的 79.5%。雨、雪、雾、露等大气湿沉降是太湖水体接纳 TN 污染负荷的主要途径;太湖水体由湿沉降途径带入 TP 203t/a,占 TP 干湿沉降总量的 28.4%。干沉降是湖泊水体接纳大气 TP 污染负荷的主要形式。

太湖站大气 TN 湿沉降率具有明显的季节变化特征。TN 在 2003 年春季累积月沉降量约占观测研究期间年总沉降量的 60%。大气干湿沉降物在春季出现 TN 的高沉降率现象对太湖水体的富营养化污染的发展具有潜在的促进影响。

太湖位于我国长江三角洲的中心,是我国长江中、下游平原湖群中的大型浅水富营养化湖泊的典型。由于长江三角洲地区经济高度发达、人口众多、人类活动对长江三角洲地区浅水湖群水体生态系统的干扰强烈,特别是以火力发电厂、汽车运输和石油化工工业和化肥、农药的大面积施放等点、面大气污染日趋严重,大气 N、P 干湿沉降对太湖水体生态系统的影响对于长江三角洲区域内的其他浅水湖泊和东部沿海地区海域的水体富营养化污染治理也有一定的参考意义。因此必须重视大气 N、P 干、湿沉降对于该区域内湖泊富营养化过程及其控制机理的影响研究。

致谢 无锡市环保局丁建清,苏州市环保局成国兴,湖州市环保局姚玉鑫,常州市环保局章建宁和金坛市环保局靳一兵等先生为本研究提供降雨、降尘采样和分析测定资料;南京大学环境科学学院罗军为本研究提供离子色谱分析条件;中

国科学院南京地理与湖泊研究所张路博士绘制采样点图, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 王雪梅, 杨龙元, 秦伯强等, 2006. 太湖流域春季降水化学组成及其来源研究. 海洋与湖沼, 37(3): 249—255
- 王保栋, 单保田, 战 闰等, 2002. 黄、渤海无机氮的收支模式初探. 海洋科学, 26(2): 33—36
- 杨龙元, 梁海棠, 胡维平等, 2002. 太湖北部滨岸区水生植被自然修复观测研究. 湖泊科学, 14(1): 60—66
- 杨龙元, 秦伯强, 吴瑞金等, 2001. 酸雨对太湖水环境潜在影响的初步研究. 湖泊科学, 13(2): 135—142
- 宋金明, 李学刚, 邵君波等, 2006. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为. 海洋与湖沼, 37(4): 370—376
- 金相灿, 屠清瑛, 1990. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 178—215

- 秦伯强, 1998. 太湖水环境面临的主要问题、研究动态与初步进展. 湖泊科学, 10(4): 1—9
- 钱君龙, 张连弟, 乐美麟, 1990. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷. 土壤, 22(5): 258—262
- 高原, Robert A. D, 1997. 沿海海气界面的化学物质交换. 地球科学进展, 12(6): 553—563
- 黄漪萍, 范成新, 濮培民等, 2001. 太湖水环境及其污染控制. 北京: 科学出版社, 200—201
- Akkoyunlu B O, Tayanc M, 2003. Analyses of wet and bulk deposition in four different regions of Istanbul, Turkey. Atmospheric Environment, 37: 3571—3579
- Park S U, Lee Y H, 2002. Spatial distribution of wet deposition of nitrogen in South Korea. Atmospheric Environment, 36: 619—628
- Peters N E, Reese R S, 1995. Variations of weekly atmospheric deposition for multiple collectors at a site on the shore of Lake Okeechobee, Florida. Atmospheric Environment, 29(2): 179—187

THE ATMOSPHERIC DEPOSITION OF NITROGEN AND PHOSPHORUS NUTRIENTS IN TAIHU LAKE

YANG Long-Yuan, QIN Bo-Qiang, HU Wei-Ping, LUO Lian-Cong, SONG Yu-Zhi
(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Nanjing 210008)

Abstract Taihu Lake is the third largest freshwater lake of China in southern part of Jiangsu Province, nurturing the most economically developed region including Shanghai, Suzhou, Wuxi, Changzhou cities and so on with high-density population and well-developed industry near Changjiang (Yangtze) River delta. However, this region suffered from environmental pollution and eutrophication by excessive atmospheric nitrogen and phosphorus deposits. To better understand the negative impact for remediation, wet and dry atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus and chemical composition of rainwater were sampled and measured from 2002 to 2003 in the lake and the surrounding areas. Results show that the annual average R_t (total apparent deposition rate) was 4226 for TN and 306 for TP in $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$. The annual atmospheric load of TN and TP accounted for 48.8% and 46.2% respectively of total point pollution sources from tributary rivers. Atmospheric rainfall was recognized as a major source of TN into Taihu Lake, whereas atmospheric TP is mainly resulted from dry deposition of solid material in aerosol. The amounts of atmospheric nitrogen and phosphorus pollutants deposited into Taihu Lake by light rain were higher than by heavier rain, and the value of R_T peaked in spring (May to March). The current situation may aggravate the eutrophication in the lake area and damage relating aquatic ecosystem in Yangtze River delta.

Key words Taihu Lake, Atmospheric Pollution, Wet/dry deposition, Atmosphere-water interface