

# 太湖流域春季降水化学组成及其来源研究\*

王雪梅 杨龙元 秦伯强 林文实

(中山大学环境科学与工程学院 广州 510275)

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

**摘要** 利用野外监测与数值模拟方法分析了 2003 年 3—5 月在太湖站、拖山站、东山站降水化学成分, 计算了 2003 年春季太湖水气界面受纳的各离子平均沉降率, 阴离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度及沉降率最大,  $\text{NO}_3^-$  次之; 阳离子中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度及沉降率最大,  $\text{NH}_4^+$  次之。由离子浓度相关性分析可知太湖降水化学受区域人为污染影响较大。利用后向轨迹方法对太湖站的降水进行分类, 春季影响太湖流域的降水主要是海洋性降水, 占总降水量的 92.7%, 其中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  分别占春季总沉降量的 89.2%、88.1%、88.3%; 大陆性降水过程对沉降负荷的贡献不大, 但由于降水中离子浓度高, 降水酸度大, 其对生态系统的危害较大。对云下气团轨迹的分析表明, 3 种气团影响太湖降水化学组成, 即 NE 方向的输送、SW 方向的输送及局地气团。局地气团由于降水量小, 降水中离子浓度高, 降水酸度大, 其对生态系统的影响较大。在远距离输送的气团中北方气团的降水离子浓度和沉降量明显高于南方气团。

**关键词** 降水化学, 气团后向轨迹, 天气形势

**中图分类号** P731

降水化学组成主要来源于云内核化和云下冲刷过程。在云中的气溶胶具有大尺度的区域特征, 降水云下气溶胶的浓度与化学组成却在更大程度上代表当地的污染物来源分布特点和地形、气候的特点。由于自然条件的差异和人类活动的影响, 不同地区降水化学组成具有不同的特点; 同一地区在不同的季节, 由于天气形势不同、大气污染物输送途径不同, 降水化学成分也有很大的不同 (Bubennick, 1984)。大气降水能在较大空间范围内对不同生态类型同时产生影响, 具有与河流、径流等点、面源污染不同的作用方式 (俞志明等, 2004; 孙涛等, 2004; 李学刚等, 2005), 因此, 研究大气降水化学组成及其来源, 对分析生态系统元素循环和水体富营养化污染成因具有重要的意义。

太湖地处经济发达的长江三角洲, 近 20 年来, 伴随着周围城市化、工业化的发展和农业集约化程度的不断提高, 太湖富营养化十分严重, 已成为极其严重的生态灾害。在较早研究水体

富营养化的文献中 (秦伯强, 1998), 通常认为由大气输入内陆水体的营养元素负荷小于因河道 (点源)、径流 (面源) 输入被研究水体总污染负荷的 10%, 因此, 营养物质的输入作用常被研究水体富营养化的人们所忽视。但是, 随着人类活动的增强, 通过大气输入水体的营养元素负荷不断提高, 特别是氮的污染负荷已经上升至占被研究水体总输入负荷的 20%—30% (Paerl, 1995), 而太湖在地理位置上位于我国东部临海季风区, 夏季盛行东南风季风, 冬季盛行西北季风 (罗淑葱等, 2004), 春、秋季为风向过渡的季节。东南风控制时, 太湖主要受来自浙江、福建、江西、湖南等地远距离污染物输送的影响, 局地主要受上海、苏州、湖州、宜兴等地的影响; 东北季风控制时, 太湖主要受来自山东、安徽、河北、东北等地污染物远距离输送的影响, 局地主要受无锡、常州、南京等地的污染物影响。由于该地区人口密度大, 工农业高度发达, 氮的污染

\* 国家自然科学基金委与香港资助局合作项目“大气氮磷输入对湖泊水质的影响研究”课题资助, N-HKUST612/01 号和 40110734 号。王雪梅, 女, 副教授, 博士, E-mail: eeswxm@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2004-12-15, 收修改稿日期: 2005-12-02

负荷占太湖水体污染物质总输入负荷比值可高达 30%—40%<sup>1)</sup>。本文中作者对 2003 年春季太湖地区降水化学成分进行分析,并结合中尺度气象模式和轨迹模式,研究不同降水云团和云下气团对春季太湖降水化学组成的影响。

## 1 采样与研究方法

### 1.1 采样与分析

2003 年 3—5 月太湖流域降雨采样点设在太湖站、拖山站、东山站,它们与周围工业城市的相对位置见图 1。太湖站座落于太湖北部梅梁湾与西太湖主体水域交界处,周围地区多栽种桔树、桃林、杨梅及多种野生乔灌木植被;拖山站位于太湖站的东南面约 7km 的开阔水面之中,面积约 300 亩,降雨采样点设置在拖山站居民菜园之中;东山站的采样点设于鱼塘埂上。

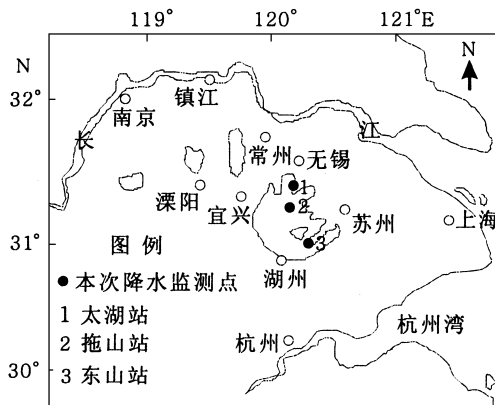


图 1 太湖降雨监测点示意图

Fig 1 Location of rainfall observation sites in Taihu Lake

降雨开始约 10min 后用洗净的 1L 大玻璃杯在高于地面 1.5m 处的铁质采样架中收集雨水样品。2003 年春季在 3 个站共采集 42 个雨样,降雨监测记录表明 3 个站都是同时有降雨,但由于人为原因对拖山站和东山站没有及时取样,造成 3 个站降雨次数的差异。

表 1 给出 2003 年 3—5 月各站降雨量的统计结果。PHS-3C 型酸度计和 DDS-11C 型电导率仪分别测定雨水样品的 pH 值和 EC 值,拖山站没有降水 pH 值的结果;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 等阴、阳离子组成用美国 Dionex 公司生产的 DX-100 型离子色谱仪测定。降雨采样、分析由中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖站实验室负责。本文作者只针对 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 进行分析。

### 1.2 气团后向轨迹与大气环流

利用美国空气质量实验室 HYSPLIT-4 (Draxler *et al.* 1998) 模式以及 FNL 气象数据计算每次降雨 08 时 (00GMT) 5 天的气团后向轨迹,本研究中分别计算了太湖站 500m 和 3000m 高度的后向轨迹,用以反映云下气团输送过程和云团的来源,利用后向轨迹对降雨云团以及云下输送气团进行分类。

利用中尺度气象模式 MM5<sup>2)</sup> 模拟 2003 年 3—5 月逐时东亚 (80°—140°E, 20°—50°N) 大气环流形势,由 NCEP/NCAR 全球 2.5°×2.5°再分析数据为 MM5 提供初始和边界条件,根据后向轨迹的分类,利用 MM5 输出结果计算不同降雨类型的平均天气形势与大气环流状况,结合后向轨迹的分类法,确定气团的来源。

表 1 各站降雨情况、离子浓度变化范围及其平均值 (μmol/L)

Tab. 1 Statistic results (μmol/L) of precipitation in different sites

项 目	太湖站		拖山站		东山站		三站总体离子浓度	
	变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均
pH	3.56—4.88	4.11			3.61—5.32	4.54	3.56—5.32	4.27
Na <sup>+</sup>	18.7—220.9	45.8	12.6—73.9	31.3	13.9—45.2	30.8	12.6—220.9	36.3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	60.59—255.9	106.2	58.2—294.1	104.6	40.6—245.9	85.5	40.6—294.1	99.3
K <sup>+</sup>	10.0—45.6	20.9	10.8—63.1	17.3	8.7—38.5	14.4	8.7—63.1	17.7
Mg <sup>2+</sup>	5.4—30.4	11.5	3.8—19.6	11.6	7.1—24.6	12.2	3.8—30.4	11.7
Ca <sup>2+</sup>	59.0—201.8	138.0	38.3—229.0	115.8	81.0—247.3	147.1	38.3—247.3	133.4
Cl <sup>-</sup>	6.3—64.3	17.8	10.0—56.9	20.7	5.4—76.6	32.2	5.4—76.6	23.2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	20.0—157.9	51.6	14.3—135.0	41.1	15.0—217.1	47.4	14.3—217.1	46.8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	22.0—284.8	68.3	19.2—234.4	71.8	29.2—220.5	59.8	19.2—284.8	66.9
降雨量 (mm)	198.9		167.7		170.9			
降雨次数	19		15		7			

1) 杨龙元, 秦伯强, 胡维平等, 太湖大气氮磷营养元素干湿沉降率研究. 海洋与湖沼 (待发表)

2) Grell G A, Dudhia J A, 1994 Description of the fifth generation Penn State NCAR Mesoscale model (MM5). NCAR

Technical Note, NCAR TN 398+ S TR: 115—117

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿沉降中离子浓度与相关性分析

表 1 给出了 3—5 月各站及三个站总体离子浓度变化范围及平均值,从该表中的三站总体平均可以看出, pH 值为 4.27, 酸雨频率为 100%。杨龙元等 2000 年春季在太湖站的监测结果显示(杨龙元等, 2001), 春季太湖站平均 pH 值为 4.6, 3 月、4 月酸雨频率为 100%, 而 5 月份的酸雨频率为 66.7%, 这说明太湖流域大气酸化污染有恶化的趋势。平均阴离子比重顺序为  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ , 浓度分别为 64.5、45.8、23.6  $\mu\text{mol/L}$ 。尽管有些雨样中  $\text{Na}^+$  浓度很高, 但平均阳离子的比重顺序为  $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ , 浓度分别为 135.0、97.1、37.0、17.7、11.8  $\mu\text{mol/L}$ 。在相邻省湖南的降水中(张龚等, 2003), 其阴离子的比重顺序与本地区相同, 而在阳离子的比重排序中, 虽然也是以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$  为主要阳离子, 但  $\text{NH}_4^+$  为首要阳离子, 这可能与湖南是农业省, 农业排放的  $\text{NH}_3$  量较江苏省大的缘故有关。降水中  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  的摩尔浓度比值为 1.4, 而 1992—1993 年江苏省降水中  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  的摩尔浓度比值为 3.98(杨龙元等, 2001), 由此可看出, 近 10 年来江苏省经济快速发展, 尤其是太湖流域因其独特的地理位置, 其经济发展速度比江苏北部地区更快, 该地区污染类型正在发生变化, 太湖水体受人为污染影响的现象十分显著。 $\text{Ca}^{2+}$  是主要的阳离子, 其浓度明显高于年平均值,  $\text{Ca}^{2+}$  的主要来源是土壤尘, 春季风速较大, 经过冬季后地面干燥, 很容易吹起扬尘, 同时春季也是我国北方沙尘暴常发期, 北方沙尘的输送也是造成春季太湖流域降水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度较大的原因之一。

从表 1 可以看出, 三个站降雨离子浓度变化范围都很大, 其中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  变化范围最大, 因此除了局地污染的影响外, 区域污染物的输送对该地区降雨化学组成的变化有明显的影响。

离子湿沉降率是离子浓度乘以降水量。2003 年春季在太湖流域的监测中  $\text{SO}_4^{2-}$  湿沉降贡献最大, 为 32%, 湿沉降率为 79.5  $\text{mg/m}^2$ ; 其次是  $\text{Ca}^{2+}$ , 为 29%, 湿沉降率为 69.4  $\text{mg/m}^2$ ;  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的沉降率分别为: 34.5、

21.2、10.9、10.6、8.9、3.6  $\text{mg/m}^2$ 。图 2 给出了  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  平均浓度与降雨量的相关趋势。由该图可以看出离子浓度与降雨量呈负相关, 降雨量越大一方面起了稀释作用, 另一方面降低了冲刷效率, 从而降低离子浓度, 杨龙元等<sup>1)</sup>对 2003 年太湖流域降水中总 N 的分析也得到了同样的结论。

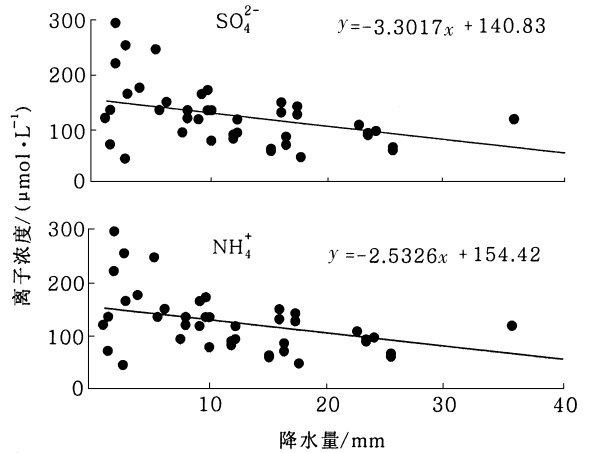


图 2  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$  降水浓度与降水量的关系

Fig 2 The relationship of  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  concentration to the precipitation

表 2 给出了利用 2003 年春季 3 个站点雨水监测资料计算出的不同离子间的相关系数。由表 2 所示,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  有较强的相关性(相关系数为 0.90), 这可能是由于它们在决定降水酸度中共同起作用的缘故。同时它们的浓度变化范围很大, 说明除局地污染源的影响外, 污染物远距离输送也影响太湖降水化学成分的组成。 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+$  有较强的相关性, 这说明它们在降水中主要以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、 $\text{CaSO}_4$  和  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  的形式存在。阳离子  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$  具有较高的相关系数, 表明土壤扬尘和施肥对其的影响。

$\text{Ca}^+/\text{Na}^+$  的比值也反映了陆地源与海洋源的相对影响, 本研究中  $\text{Ca}^+/\text{Na}^+$  的比值为 3.67, Norman 等(2002)利用后向轨迹对印度降水类型进行分类, 其中内陆海湾型的结果与本结果相当( $\text{Ca}^+/\text{Na}^+$  的比值为 3.77), 这表明春季太湖流域的降雨也受海洋的影响。 $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  是反映海洋影响的特征离子, 本研究中  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  的摩尔比值

1) 杨龙元, 秦伯强, 胡维平等, 太湖大气氮磷营养元素干湿沉降率研究·海洋与湖沼(待发表)

表 2 降雨离子相关系数

Tab 2 Correlation coefficient of ions in precipitation

离子	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Ca <sup>2+</sup>	1	0.70	0.57	0.69	0.60	0.63	0.22	0.68
Mg <sup>2+</sup>		1	0.92	0.89	0.96	0.66	0.02	0.77
Na <sup>+</sup>			1	0.84	0.87	0.59	0.06	0.67
K <sup>+</sup>				1	0.83	0.75	0.26	0.82
Cl <sup>-</sup>					1	0.58	0.1	0.69
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						1	0.59	0.90
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>							1	0.53
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>								1

为 1.56, 一般海盐中 Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> 的摩尔比值为 0.86 (Seinfeld 1986), Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> 的高比值说明除了海盐的影响外还有其他源的影响, 同时 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 具有较高的相关性 (相关系数为 0.87), 这表明 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 可能来自燃煤飞灰, 或海盐粒子沉降到地面后重新被扬起进入空气中。

## 2.2 降雨类型及对降水化学成分的影响分析

利用美国空气质量实验室 HYSPLIT-4 模式对太湖站 3—5 月各降雨过程 (共 19 次) 08 时 (00GMT) 做 5 天的后向轨迹分析, 3000m 高度的后向轨迹用于表示太湖流域降水云团的区域性来源。从后向轨迹分析可以看出春季太湖流域的降水有两类, 一是来自西北方向的云团, 定义为大陆性降水; 二是来自西南方向的云团, 定义为海洋性降水, 而春季影响太湖的区域性降水主要是海洋性降水 (共有 16 次)。从天气形势 (16 次平均 850hPa 等高线和流场图<sup>1)</sup>) 可以看出, 大陆性降雨过程主要是来自西伯利亚高压或兰州高压的南进与东移, 使华东地区受冷锋影响, 低压中心位于渤海湾, 此形势下气团由东北影响太湖地区。从高空形势可以看到, 中国东部受高压脊的控制, 经向环流较弱, 华南已经是明显受西南气流控制; 而海洋性降雨, 主要是青藏高原南支气流将孟加拉湾暖湿空气输送到江淮流域, 而青藏高原北支气流将北方冷空气输送南下, 在江淮一带形成一条浅薄的锋面, 给长江流域带来连绵的雨水, 降雨量比大陆性降雨过程大。从海平面气压图 (16 次平均海平面气压图<sup>1)</sup>) 可以看到, 降水明显受西南涡的影响, 同时西太平洋副高的

西进与北跳也会造成江淮流域的降雨过程, 此时水汽主要来自南海。表 3 给出了 2003 年 3—5 月两种类型降雨在太湖站的统计结果。

表 3 两种类型降雨统计结果

Tab 3 Statistics in two precipitation types

项目	频率 (%)	总降水量 (mm)	平均降水量 (mm)
大陆性降水	15.8	13.4	4.5
海洋性降水	84.2	171.1	10.7

从表 3 中可以看出, 2003 年春季影响太湖流域的降水主要来自孟加拉湾和南海的海洋性降水, 其频率为 84.2%, 而且其平均降水量大于大陆性降水, 占总降水量的 92.7%。

大陆性降水的云团主要来自内蒙古、山西、四川、安徽; 海洋性降水的云团主要经过云南、四川、贵州、湖南、江西、安徽等地, 从表 4 中的平均浓度结果分析, 大陆性降水离子浓度明显高于海洋性降水, 尤其是人为污染物 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的差别最大, 其大陆性降水与海洋性降水的摩尔比分别为 1.54、1.72、1.70, 主要原因一方面可能是由于大陆性降水的降水量小, 造成雨水中的污染物浓度高, 另一方面也可能由于来自北方的降水本身的污染物浓度较高而造成雨水的离子浓度高。

从沉降总量来看, 海洋性降水对春季太湖离子沉降负荷的贡献最大, 春季 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 总沉降量分别为 921.3、448.9、251.8 kg/km<sup>2</sup>, 分别占总沉降量的 89.2%、88.1%、88.3%。虽然大陆性降雨的平均离子浓度大, 由于降水量小,

1) <http://www.arl.noaa.gov>

表 4 大陆性降水和海洋性降水平均离子浓度 ( $\mu\text{mol/L}$ )、总沉降通量 ( $\text{kg}/\text{km}^2$ )Tab 4 Average ion concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) and total deposition flux ( $\text{kg}/\text{km}^2$ ) of continental and oceanic precipitation

项 目	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
大陆平均浓度	37.5	147.0	26.6	12.8	124.8	19.3	72.7	86.4
海洋平均浓度	44.6	86.6	18.0	10.2	120.8	16.8	42.3	56.1
大陆/海洋	0.84	1.70	1.48	1.26	1.03	1.15	1.72	1.54
大陆总沉降通量	11.6	33.5	13.9	4.1	67.0	9.0	60.5	111.3
海洋总沉降通量	175.4	251.8	120.0	41.8	826.8	100.4	448.9	921.3

其对太湖离子沉降负荷的贡献不大,但由于其降水酸度高,对局地生态系统的危害却不容忽视。

### 2.3 云下气团及对降水化学成分的影响分析

由于春季属于冬季风和夏季风转换的过渡季节,对流层中、上层西南气流和西北气流较弱,对对流层下层气流的引导作用不强,有时会造成对流层下层气流轨迹与对流层中、上层不同的现象。由于春季太湖流域的降水具有每次降水量不大、降水时间长、降水频率高的特点,这样的降

水特点可以增加云下冲刷效率,为了进一步研究不同来源气团对云下冲刷的作用,作者选择海洋性降水过程(此过程比例大),对此过程的降水做500m高度的气流后向轨迹。从后向轨迹图<sup>1)</sup>可以看出,云下气团主要是来自NE方向的输送(A类)、SW方向的输送(B类),作者把气团在监测点周围短距离往返轨迹归为局地输送(C类)。表5给出了三类云下气团输送降水平均离子浓度和总沉降量。

表 5 三类云下气团输送降水平均离子浓度 ( $\mu\text{mol/L}$ )和总沉降量 ( $\text{kg}/\text{km}^2$ )Tab 5 Average ion concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) and total deposition ( $\text{kg}/\text{km}^2$ ) in three types of under-cloud air mass

项 目	降水总量 (mm)	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	
平均浓度	A	98.6	45.5	86.6	17.9	10.8	144.5	20.9	38.7	57.6
	B	58.5	48.9	83.5	19.2	9.7	93.8	10.1	43.3	50.7
	C	14.1	19.7	99.4	13.2	7.7	67.1	15.6	63.4	67.6
总沉降	A	98.6	103.2	145.0	69.0	25.5	569.6	72.0	236.7	545.0
	B	58.5	65.8	83.0	43.8	13.7	219.5	20.7	156.9	285.0
	C	14.1	6.4	23.8	7.3	2.6	37.7	7.7	55.3	91.3

从表5的统计结果可以看出,A类降水量是B类的1.7倍,而降水中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 浓度却是B类中的1.54、1.14、1.04、2.06、1.11倍,这表明高污染物浓度的北方气流不断补充南下,使云下冲刷没有因为降水量的增加而减小,造成在大降水量情况下也维持高的降水浓度,从而可以得出北方气团 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 以及尘的污染较南方空气重的结论。从 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 高浓度可以明显看出北方沙尘输送对太湖地区降水化学元素浓度的影响,这与一般认为沙尘在500—1500m高空输送的研究结果相吻合。从表5中也

可以看出,还海洋性降水与大陆性降水 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度几乎相等,这表明春季雨水云下冲刷作用对降水中污染物浓度的影响较大,海洋性降水中高 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度主要来自云下的冲刷作用。A类云下气团降水中 $\text{NO}_3^-$ 浓度略小于B类云下气团,与 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 相比,北方空气中 $\text{NO}_x$ 的污染较轻。从污染源分布也可以看出, $\text{NO}$ 的污染主要集中在城市周围,局地污染较强。在局地气团中(C类), $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 浓度明显高于其他两类情况,而 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度明显小于其他两类情况,这说明春季太湖流域降水的高 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 主要来自远距

1) <http://www.arl.noaa.gov>

离的输送,人为污染物的高浓度一方面是由于C类降水量小,另一方面也可能是由于气团在局地多次往返,造成局地人为污染物的高浓度,从而增加云下冲刷效率;同时也可以看到,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度增长率最大,说明NO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来自近距离的输送过程,其在降水中的浓度不仅受工业源影响,而且受局地机动车尾气的影响很大。

从沉降总量来看,A类气团对太湖湿沉降离子负荷贡献最大,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的沉降量分别占总沉降量的59.2%、52.7%、57.6%,B类气团次之,C类最小。

### 3 结论

通过对2003年3—5月太湖站、拖山站、东山站降水化学成分分析结果表明:2003年春季太湖降水pH平均值为4.27,酸雨率为100%,太湖流域大气酸化污染有恶化的趋势;降水平均阴离子中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度最高,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度次之;在阳离子中,Ca<sup>2+</sup>浓度最高,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>浓度次之;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>摩尔比值为1.4与1992—1993年江苏省降水数据3.98(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>摩尔比值)相比明显减小,太湖水体受人为污染影响的现象十分明显。

利用气团后向轨迹分类法以及天气形势将春季太湖流域的降水分为两类,大陆性降水与海洋性降水,海洋性降水是春季的主要降水形式,其对太湖湿沉降负荷的贡献最大。不同气团的云下冲刷作用相差很大,局地气团的云下冲刷作用最强,虽然对沉降负荷的贡献不大,由于其降水量小,降水中离子浓度高,降水酸度大,其对生态系统的影响较大;在迁移气团的影响中北方气团的云下冲刷作用较强,北方气团的气态污染物浓度明显高于南方气团,其中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>的沉降量分别占总沉降量的59.2%、52.7%、57.6%、68.9%,Ca<sup>2+</sup>浓度达到144.5μmol/L,明显看出春季北方沙尘输送对降雨中阳离子的影响;

春季太湖流域湿尘降中云下冲刷作用很强;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来自近距离源的输送,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>主要来自远距离的输送。

### 参 考 文 献

- 孙涛 陶建华, 2004 波浪作用下渤海湾近岸海域污染物的输移扩散规律. 海洋与湖沼, 35(2): 120—129
- 张 龚, 曾光明, 蒋益民等, 2003. 湖南省大气湿沉降化学研究. 中国环境监测, 19(5): 7—12
- 李学刚, 宋金明, 李 宁等, 2005. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征. 海洋与湖沼, 36(6): 562—571
- 杨龙元, 秦伯强, 吴瑞金, 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
- 罗激葱, 秦伯强, 朱广伟, 2004 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算. 海洋与湖沼, 35(1): 491—496
- 俞志明, Waser N A D, Harrison P J 2004. 不同氮源对海洋微藻氮同位素分馏作用的影响. 海洋与湖沼, 35(6): 524—529
- 秦伯强, 1998 太湖水环境面临的问题、研究动态和初步成果. 湖泊科学, 10(4): 73—78
- Daxler R R, Hess G D 1998 An overview of the HYSPLIT 4 modelling system for trajectories dispersion, and deposition. Australian Meteorological Magazine, 47: 295—308
- Norman M, Das S N, Pillai A G *et al* 2002. Influence of air mass trajectory on the chemical composition of precipitation in India. Atmospheric Environment, 35: 4223—4235
- Paerl H W, 1995. Coastal eutrophication in relation to atmospheric nitrogen deposition. Current perspectives. *Opheia* 41: 237—259
- Seinfeld JH, 1986 Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. Wiley, New York, 738

## CHEMICAL COMPOSITION AND ORIGIN OF SPRING RAINWATER IN TAihu LAKE

WANG Xue-Mei, YANG Long-Yuan, QIN Bo-Qiang, LIN Wen-Shi

(School of Environmental Science and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou, 510275)

(Nanjing Institute of Geography and Linnology, Nanjing 210008)

**Abstract** Eutrophication in Taihu Lake region has become a serious problem as the economy in the Yangtze River Delta district developed rapidly. In addition to the materials from river point-sources and runoff area-sources, the nutritive elements input from the lake outskirt also increased step by step in recent years. The nutrition elements input from the ambient can influence the different ecosystems in the lake in different ways from what river point-sources and runoff area-sources do. The significance of this study on the ambient input of nutritive elements is to understand the element circulation and origins of the eutrophication in Taihu Lake. In this paper, chemical compositions in the precipitation collected in several stations in the lake between March and May 2003 were analyzed. The results show that the average pH value in the spring 2003 was 4.27, and the frequency of acid rain reached 100%, showing a worsen trend in acidity in outskirt of the lake region. Our result indicates that the largest ion of concentration and deposition flux was in  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NO}_3^-$  for anions, and  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NH}_4^+$  for cations. The mole ratio of  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  in the rainfall was 1.4, while it was 3.98 during 1992–1993. Analysis on the correlation among ions suggests that the chemical composition of the rain falls was influenced largely by anthropogenic emissions. We used backward trajectory method to identify different rain falls, finding that most rain fall in the spring was oceanic types, taking 92.7% of the total. In the oceanic precipitation, the contribution to the total deposition fluxes of  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , and  $\text{NH}_4^+$  were 89.2%, 88.1%, and 88.3% respectively. Although continental rainfall contribution was minor to the total deposition flux, the ion concentrations were much higher than that from oceanic rainfall, resulting in a serious damage to the local ecosystem. Analysis on the air mass under cloud with backward trajectory method revealed that the air masses have influenced the chemical composition, including those from NE, SW directions and local ones. Although the local one weighed small, it impacted on the ecosystem mostly, demonstrated by the highest ion concentrations, followed by the NE air mass then SW ones.

**Key words** Precipitation chemistry, Air mass backward trajectory, Weather situation, Taihu Lake