

春季太湖水域无机氮湿沉降来源初探^{*}

王雪梅¹, 杨龙元², 秦伯强², 纪玲玲³, 金 辉¹

(1 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275
2 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008
3 解放军理工大学气象学院一系, 江苏 南京 211101)

摘 要: 对 2003 年春季太湖站降雨资料进行分析, 结果表明春季太湖水域 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的平均浓度分别为 0.9 和 1.6 mg/L。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与降雨量的相关系数是 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的两倍。利用气团后向轨迹分类法以及天气形势得到春季影响太湖流域的主要是海洋性降水, 春季海洋性降水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 沉降通量分别为 1.01 kg/Lm²、1.95 kg/Lm², 而大陆性降水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 沉降通量分别为 0.13 和 0.26 kg/Lm²。同时利用气团后向轨迹, 在海洋性过程中对云下气团进行分类, 结论是北方气团对太湖水域氮的输送及沉降负荷最大, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的沉降量分别占总沉降量的 53.5% 和 57.9%, 西南气团次之, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的沉降量分别占总沉降量的 34.6%、32.8%, 局地气团最小, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的沉降量分别只占总沉降量的 11.9%、9.3%。

关键词: 太湖水域; 无机氮来源; 湿沉降通量; 后向轨迹

中图分类号: P421.615 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 04-0093-05

在水体富营养化中, 氮素是关键因素之一, 除农业非点源污染和工业、城镇居民生活污水等点源污染的影响外, 大气氮素的沉降也是极为重要的外源性因素^[1], 研究大气氮沉降对水生生态系统影响最直接的方法是动态地监测含氮化合物的干、湿沉降, 计算其所占负荷, 分析其环境影响及重要性, 太湖的研究表明, 大气沉降氮的污染负荷已达 30%~40%^[2]。目前对氮素来源的研究通常是在直接测量的基础上, 借助于数值方法模拟大气氮在空间的分布与沉降, 考虑大气氮素来源综合的效果^[3-4]。除了区域数值模式外, 气团后向轨迹追踪模式也是研究氮素来源的一种有效方法^[5], 利用后向轨迹模式单纯地考虑过去几天影响监测点的气团轨迹, 针对源接收点的关系, 分析污染物的可能来源。在我国的大气沉降研究中, 对硫沉降的研究较多^[6-7], 但涉及大气氮沉降的问题较少, 本文利用气团后向轨迹模式, 结合 2003 年 3-5 月在太湖站收集的湿沉降中无机氮数据, 对太湖水域春季氮素来源作初步的研究。

1 方 法

1.1 湿沉降收集点

在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站 (简称太湖站) 和拖山站进行湿

沉降的收集。太湖站座落于太湖北部梅梁湾与西太湖主体水域交界处, 是国家级生态系统站, 在优化布点时充分考虑了此站点的代表性; 拖山位于太湖站东南面 7km 处的开阔水面之中的拖山岛, 利用两个站的观测资料能够反映降雨对太湖的影响。站区所在地属亚热带中部湿润季风气候, 年平均气温 15.5℃, ≥10℃ 的有效积温 4933.7℃, 年降雨量 1038mm, 年日照 2203h, 年平均太阳总辐射量 494×10⁵ J·cm⁻², 无霜期 242d。

1.2 采样方法

降雨接收装置为内径 15cm 高 1m 的雨量计 2 台, 雨量计不定期用稀盐酸、蒸馏水清洗, 以除去内部细小灰尘。收集春季所有降雨, 雨后从雨量计中记录雨量并取雨水样, 雨样装入聚乙烯瓶于 4℃ 冷藏贮存, 并在一周内完成测定。2003 年 3-5 月在 2 个站共采集 34 个雨样, 其中太湖站和拖山站各有 17 次降水, 有降雨监测记录表明 2 个站都是同时有降雨。

1.3 测定方法

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 等阴、阳离子用美国 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

^{*} 收稿日期: 2005-10-01
基金项目: 国家自然科学基金委与香港资助局合作项目 (N-HKUST612/01-40110734)
作者简介: 王雪梅 (1970 年生), 女, 副教授; E-mail: eeswxm@mail.sysu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

站实验室负责。

1.4 气团后向轨迹

利用中尺度气象模式 MM5^[8] 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, 将 MM5 计算的风场结果作为后向轨迹模式的输入, 计算降雨前 5 天影响太湖站的气团后向轨迹, 并对降雨过程进行分类, 确定气团的来源。本研究分别计算了太湖站 500 米和 3000 米高度的后向轨迹, 用以反映云下输送过程和水汽输送过程气团的来源, 利用后向轨迹对降雨云团以及云下输送气团进行分类。

2 结果与讨论

2.1 湿沉降中氮浓度

对 2003 年 3-5 月太湖站和拖山站 34 次降雨资料的分析结果表明, 春季太湖的降雨中 NO₃⁻-N 浓度主要集中在 1.0 mg/L 以下, 而 NH₄⁺-N 浓度主

要集中在 1.0 mg/L 以上。春季太湖水域 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的平均浓度分别为 0.9 和 1.6 mg/L。王小治等^[9]在常熟生态站的监测结果显示 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的平均浓度为 1.0 和 1.3 mg/L, 降雨中氮浓度表现出年季差异。本次研究表明春季降雨中 NH₄⁺-N 的浓度明显大于年平均浓度, 可能由于太湖流域给小麦追施氮肥, 加之气温回升, 同时春季气候干燥, 氨挥发量加大的缘故。

降雨中氮浓度受空气氮浓度和降雨量两方面共同的影响, 随降雨量的增大, 湿沉降中氮浓度有所降低, 春季 34 次降雨中 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的浓度与降雨量之间的关系可用方程 $y=ax^b$ 来拟合 (图 1), 其相关系数 (R^2) 分别为 0.4 和 0.2 且均达到极显著水平 ($P=0.001$)。NO₃⁻-N 与降雨量的相关系数是 NH₄⁺-N 的两倍, 表明 NO₃⁻-N 浓度受降雨量的支配程度大, 而 NH₄⁺-N 浓度受降雨量的影响相对较小, 受其它因素影响较大。

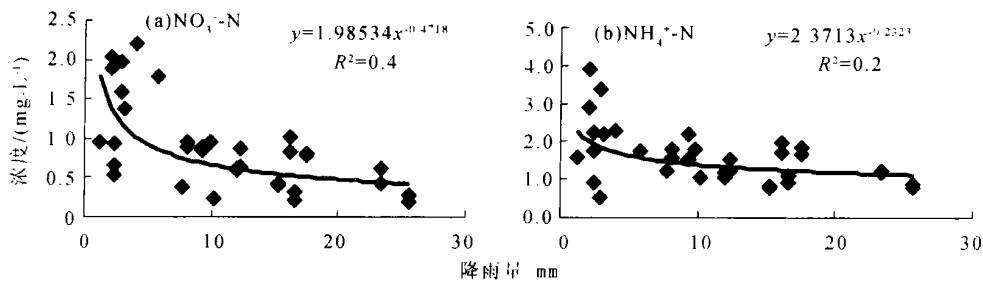


图 1 湿沉降中无机氮浓度与降雨量的关系

Fig. 1 Relationship of nitrogen concentration with amount of rainfall

拟合的降雨中氮浓度与降雨量的关系中, NO₃⁻-N 与降雨量的相关系数是 NH₄⁺-N 的两倍, 其相关系数 (R^2) 分别为 0.4 和 0.2。王小治等^[9]结果为 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 与降雨量的相关系数 (R^2) 分别 0.4205 和 0.2838。可见与年平均相比, 春季降雨中 NH₄⁺-N 浓度受降雨量的影响更小。

2.2 降雨云团输送及云团中无机氮的来源分析

为了降雨来源进行后向追踪, 选择太湖站 (17 次降雨) 作后向轨迹分析。图 2a 给出了利用后向轨迹模式计算的太湖站 3-5 月各降雨过程 3 000 m 08 时 5d 的后向轨迹, 用以表示太湖流域降雨云团的来源, 从图中可以看出影响春季太湖流域降雨的气团主要是来自西北方向的云团 (大陆性降雨) 和西南方向的云团 (海洋性降雨), 而且主要是海洋性降雨。图 3 是利用中尺度气象模式 (MM5) 模拟结果计算的两种降雨类型平均 700 hPa 等高线以及海平面气压分布, 由大陆性降雨天气形

势可见, 此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, 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, 华南已经是明显的西南气流控制, 太湖地区为小风控制, 此时北方无充足冷空气南下补充, 降雨量较小; 图 3 右边是海洋性降雨天气形势, 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, 从地面图可以看到明显的西南涡的影响, 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。

由上述模式模拟的后向气团轨迹可以看出, 2003 年春季影响太湖流域的降雨主要是来自孟加拉湾和南海的海洋性降雨, 其频率为 84.2%, 降雨量为 171.1 mm; 而大陆性降雨频率仅为

15.8%, 降雨水量为 13.4 mm。

由图 2a 的后向轨迹图可以明显看到, 大陆性降雨的云团主要来自内蒙古、山西、四川、安徽; 海洋性降雨的云团主要经过云南、四川、贵州、湖南、江西、安徽等地, 从大陆性降雨和海洋性降雨平均氮浓度的计算结果来看, 大陆性降雨氮浓度明显高于海洋性降雨, 大陆性降雨中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$

N 的质量浓度为 1.02 和 1.94 mg L^{-1} ; 海洋性降雨中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的质量浓度分别为 0.59 和 1.14 mg L^{-1} 。而大陆性降雨氮的沉降量却明显低于海洋性降水, 主要原因可能是由于大陆性降雨的降雨量小, 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雨本身的污染物浓度较高而造成雨水的离子浓度高。

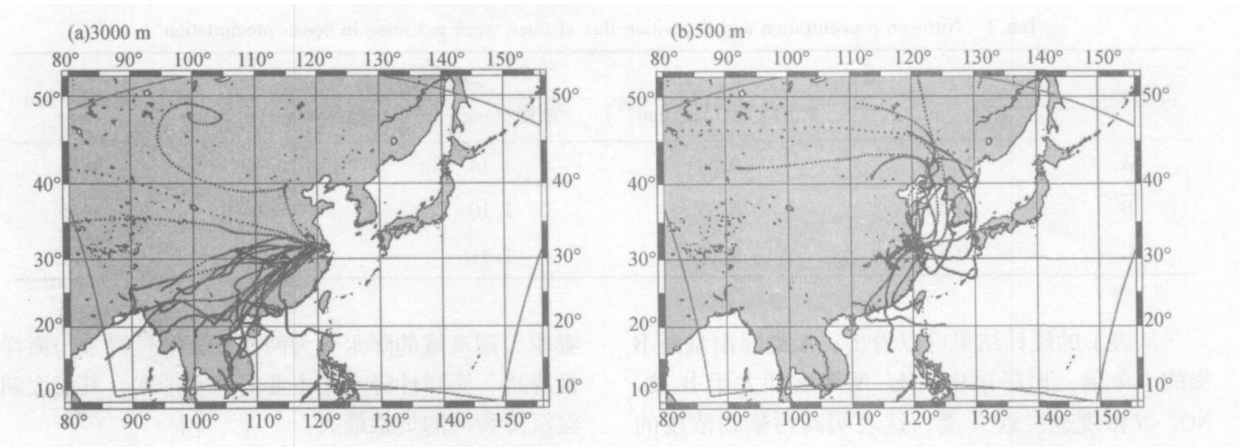


图 2 气团后向轨迹
Fig. 2 Backward trajectory

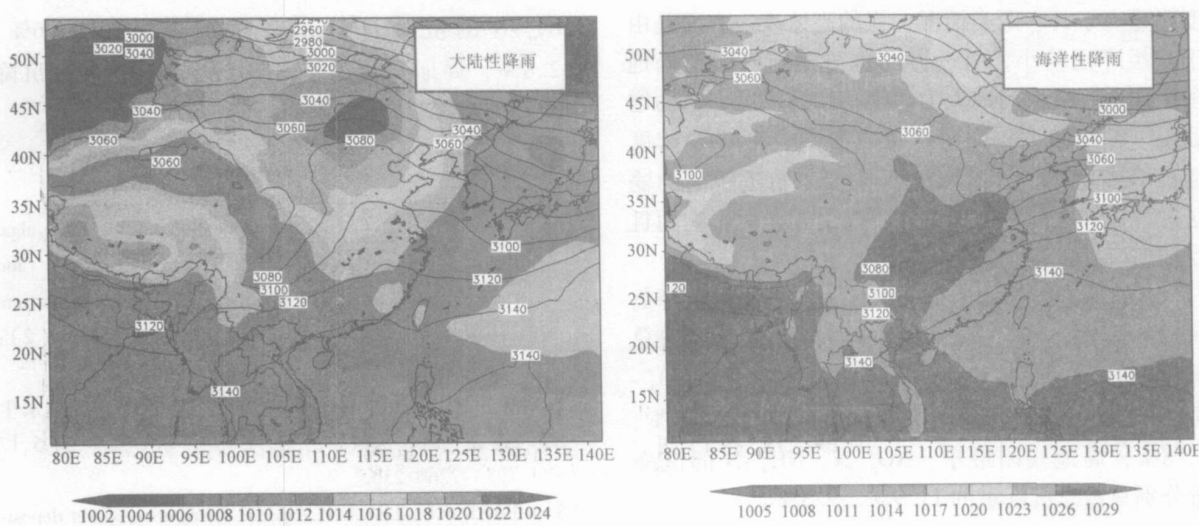


图 3 平均 700 hPa 等高线和海平面气压 (阴影为海平面气压)
Fig. 3 Averaged height contour in 700 hPa and sea level pressure (shadow is SLP)

从沉降通量来看, 海洋性降雨对春季太湖氮沉降负荷的贡献最大, 春季海洋性降水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 沉降通量分别为 1.01、1.95 kg km^{-2} , 而大陆性降水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 沉降通量分别为 0.13、0.26 kg km^{-2} , 明显小于海洋性降水。虽然大陆性降雨的平均离子浓度大, 但由于其降雨量小, 其对太湖离子沉降负荷的贡献并不大, 然而由于其在降雨中浓度高, 对局地生态系统的危害却不

容忽视。
2.3 云下气团输送及降雨中无机氮的来源分析
上述根据高空气流后向轨迹分析了不同云团迁移过程对降雨化学的影响, 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。春季太湖流域的降雨具有每次降雨

量不大、降雨时间长、降雨频率高的特点，这样的降雨特点增加了云下冲刷效率，为了进一步研究降水对不同云下气团的冲刷作用，我们选择海洋性降雨过程（此过程氮沉降通量最大），对此过程的降雨绘出 500 m 高度的气流后向轨迹，表示云下气流的输送，图 2b 给出了 500 m 高度 5 d 气团后向轨

迹，从图中可以看出，云下气团的是输送主要来自 NE 方向的输送（A 类）、SW 方向的输送（B 类），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 1 给出了 3 类云下气团输送降雨平均离子浓度和总沉降量。

表 1 海洋性降雨过程 3 类气团平均氮浓度与氮沉降量
Tab. 1 Nitrogen concentration and deposition flux of three types gas mass in ocean precipitation

氮素 降雨类型	NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N		降雨量 /mm
	浓度 / (mg · L ⁻¹)	氮沉降量 / (kg · hm ⁻²)	浓度 / (mg · L ⁻¹)	氮沉降量 / (kg · hm ⁻²)	
A	0.54	0.54	1.14	1.13	98.6
B	0.61	0.35	1.10	0.64	58.5
C	0.89	0.12	1.31	0.18	14.1

从表 1 的统计结果可以看出，A 类降雨量是 B 类的 1.7 倍，而降雨中 NH₄⁺-N 浓度却大于 B 类，NO₃⁻-N 浓度也接近 B 类，这表明高污染物浓度的北方气流不断补充南下，使云下冲刷效率没有因为降雨量的增加而减小，造成在较大降雨量情况下也维持高的降雨浓度。在局地气团中（C 类），氮浓度明显高于其它两类情况，氮的高浓度一方面是由于 C 类降雨量小，另一方面也可能与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，NO₃⁻-N 浓度增长率最大，这说明 NO₃⁻-N 主要来自近距离的输送过程，其在降雨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，北方气团对太湖湿氮沉降负荷贡献最大，NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的沉降量分别占总沉降量的 53.5%、57.9%，西南气团次之，NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的沉降量分别占总沉降量的 34.6%、32.8%，局地气团最小，NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的沉降量分别只占总沉降量的 11.9%、9.3%。

3 结 论

（1）通过对 2003 年 3 月 - 5 月太湖站、拖山站降雨中氮浓度分析，NO₃⁻-N 浓度主要集中在 1.0 mg/L 以下，而 NH₄⁺-N 浓度主要集中在 1.0 mg/L 以上。春季太湖水域 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的平均浓度分别为 0.9 和 1.6 mg/L。NO₃⁻-N 与降雨量的相关系数是 NH₄⁺-N 的两倍，表明 NO₃⁻-N 浓度受降雨量的支配程度大，而 NH₄⁺-N 浓度受降雨量的影响相对较小，受其它因素影响较大。

（2）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两类，大陆性降水与海洋性降水，海洋性降水是主要的降水形式，其对太湖湿沉降负荷的贡献最大。

（3）北方气团对太湖水域氮的输送及沉降负荷最大，NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的沉降量分别占总沉降量的 53.5%、57.9%，西南气团次之，NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的沉降量分别占总沉降量的 34.6%、32.8%，局地气团最小，NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的沉降量分别只占总沉降量的 11.9%、9.3%。

参考文献:

[1] HANS W P. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as “ new ” nitrogen and other nutrient sources[J]. Limnol Oceanogr 1997 42(5 part 2): 1154 - 1165.

[2] 宋玉芝, 秦伯强, 杨龙元, 等. 大气湿沉降向太湖水生生态系统输送氮的初步估算[J]. 湖泊科学, 2005 17 (3): 226 - 230

[3] PARK S U, LEE Y H. Spatial distribution of wet deposition of nitrogen in South Korea[J]. Atmos Environ, 2002 36(4): 619 - 628

[4] 王雪梅, 杨龙元, 秦伯强, 等. 太湖流域春季降水化学组成及其来源研究[J]. 海洋与湖沼, 2006 37(3): 271 - 276

[5] NOMAN M, DAS S N, PILLA I A G, et al. Influence of air mass trajectory on the chemical composition of precipitation in India[J]. Atmos Environ 2002 35: 4223 - 4235.

[6] 王雪梅, 韩志伟. 重庆市不同天气型下地面 SO₂ 浓度分布[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2000 39(5): 91 - 96

[7] 胡正义, 王体健, 曹志洪, 等. 大气干沉降向农田生态系统输入硫素通量定位观测研究 [J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 357 – 364

[8] GRELL G A, DUDHIA J A. Description of the fifth generation Penn State NCAR Mesoscale model(MM 5) [R]. NCAR Technical Note NCAR TN 398+ S TR, 1994 115 – 117.

[9] 王小治, 朱建国, 高人, 等. 太湖地区氮素湿沉降动态及生态学意义: 以常熟生态站为例 [J]. 应用生态学报, 2004 15(9): 1616 – 1620

Sources of Inorganic Nitrogen in Wet Deposition in Taihu Lake in Spring

WANG Xuemei¹, YANG Long-yuan², QN Bo-qiang², JILing-ling³, JIN Hui¹

(1. School of Environmental Science and Engineering Sun Yat sen University, Guangzhou 510275,

2 Nanjing Institute of Geography and Limnology Nanjing 21008

3 Meteorology Institute PLA Tech & Sci University Nanjing 211101)

Abstract Eutrophication in Taihu Lake region has become a serious problem as the economy developed rapidly in the Yangtze River Delta district. 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. In this paper, the precipitation data in spring of 2003 in Taihu Lake station and Tuoshan station were analyzed to study the inorganic nitrogen deposition flux and its origin. The averaged $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration is 0.9 and 1.6 mg/L, respectively. The relative coefficient between $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and amount of rain fall is two times as $\text{NH}_4^+ \text{-N}$. The oceanic precipitation is the dominate using Taihu Lake station data according to backward trajectory and synoptic pattern results. The deposition flux in the oceanic precipitation of $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ is 1.01, 1.95 kg km^{-2} , respectively, whereas the deposition flux in the continental precipitation of $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ is 0.13, 0.26 kg km^{-2} , respectively. Under the oceanic precipitation, three air masses under cloud were identified according to backward trajectory results. Air mass came from NE has the highest contribution to total nitrogen deposition flux. The air mass came from SW is the second one. The local air mass has the lowest contribution compared to others. The ratios of NE, SW, local air mass $\text{NO}_3^- \text{-N}$ contribution to total nitrogen deposition flux are 53.5%, 34.6% and 11.9%, respectively. For $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, the ratios are 57.9%, 32.8%, 9.3%, respectively. Although the local one weighed small, it impacted on the ecosystem mostly, demonstrated by the highest concentrations of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, followed by the NE air mass then SW ones.

Key words Taihu Lake; inorganic nitrogen source; wet deposition flux; backward trajectory