

大气湿沉降对长江口水域营养盐的贡献

付敏^{1,2}, 赵卫红^{1*}, 王江涛³, 苗辉¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

摘要: 为研究我国长江口大气湿沉降对近海水域营养盐的贡献, 2004 年 6 月~2005 年 5 月于长江口水域崇明岛收集 31 个大气湿沉降样品, 采用分光光度法测定溶解性 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} . 结果表明, 大气湿沉降中营养盐月平均浓度变化较大, NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度较高. 营养盐湿沉降通量具有明显的季节性, 总无机氮(TIN)、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的湿沉降通量分别为 52.02、0.17、0.10 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, NH_4^+ 是 TIN 的主要贡献者, 占 TIN 的 70.9%. 由于大气湿沉降中营养盐的浓度和组成比例与长江口表层海水有显著的差别, 可使海水表层的营养盐结构、盐度、pH 等发生改变, 从而影响到浮游植物生长和种群结构, 甚至会引发赤潮.

关键词: 大气湿沉降; 长江口; 营养盐; 富营养化

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2703-07

Contribution of Atmospheric Wet Deposition to Nutrients in the Yangtze Estuary

FU Min^{1,2}, ZHAO Wei-hong¹, WANG Jiang-tao³, MIAO Hui¹

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The 31 wet deposition samples were collected at Chongming Island from June 2004 to May 2005 in the Yangtze Estuary, and dissolved species of nutrients (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} and SiO_3^{2-}) in the rainwater were analyzed by Spectrophotometry. The results showed that there were significant differences among monthly average concentration of nutrient elements, and the nitrogen content in the rainwater was rather high. The wet deposition flux was 52.02 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ for the total inorganic nitrogen (TIN), 0.17 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ for phosphate and 0.10 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ for silicate. The wet deposition fluxes for TIN were larger than that for PO_4^{3-} and SiO_3^{2-} . NH_4^+ was the dominant form of TIN, occupying 70.9% of TIN. The proportion of nutrients in the wet deposition and seawater had obvious differences. The rainwater can change the nutrients structure, salinity, pH, phytoplankton production and biologic community in the surface seawater, and this phenomenon may lead to the red tide directly.

Key words: atmospheric wet deposition; Yangtze Estuary; nutrient; eutrophication

大气湿沉降是指自然界发生的雨、雪、雹等降水过程, 具有速度快、突发性强等特点, 是陆源污染物和营养物质向海洋输送的重要途径^[1~4]. 各种营养元素和微量金属元素通过大气湿沉降输入海洋, 对海洋初级生产力产生重要影响^[5], 尤其是在人类活动影响较多的近岸海域, 营养盐的大气输入会加剧或导致水体的富营养化, 突发性、大量的营养盐大气输入会对浮游植物生长和种群结构产生重要影响, 甚至会引发赤潮.

我国自 20 世纪 80 年代开始对中国黄海和东海海域大气湿沉降中营养元素入海通量进行研究以来, 已取得了一些成果^[6~11]. 杨龙元、王雪梅等^[12, 13]对太湖地区大气湿沉降中营养元素进行了长时间的监测. 赵卫红等^[14]指出大气湿沉降营养盐年输入通量远小于河流, 但短期输入通量很大. 近年来长江口海区生态环境发生了较大的变化, 污染问题日趋严重, 赤潮频发. 目前广泛认为赤潮的发生与水体富营

养化有关, 大气湿沉降作为海水中营养盐的一个重要来源, 究竟对水体富营养化贡献有多大? 本研究于长江口崇明岛现场采集大气湿沉降样品, 对其进行营养盐浓度、营养盐通量、营养盐结构的分析. 研究内容对于认识我国沿海湿沉降对近海水域的营养盐贡献具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究在如图 1 中长江口海域的崇明岛设置了 1 个固定的采样点(121°36.5'E, 31°32.3'N), 于 2004 年 6 月~2005 年 5 月, 采集大气湿沉降样品 31 个.

采集湿沉降样品所用的采雨器和保存湿沉降样

收稿日期: 2007-10-11; 修订日期: 2008-02-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50339040); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-232)

作者简介: 付敏(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生态与环境, E-mail: fumin1121@163.com

* 通讯联系人, E-mail: whzhao@ms.qdio.ac.cn

品所用的聚乙烯瓶均先在实验室内用 1:5 的 HCl 浸泡数日,用 Milli-Q 水冲洗干净,待干燥后用洁净的塑料袋包好.为了避免污染,将采雨器安置在距离地面约 1.5 m 左右的高处,降水之前打开,结束后立即取回,测定样品的 pH 值(pHS-3B 型精密酸度计),之后用 0.45 μm 微孔膜过滤,将降水转移到聚乙烯瓶中,然后根据样品体积加入适量的 CHCl_3 (4%)^[15],振荡混匀,编号,冷冻保存;同时记录降水体积、降水时间,于实验室统一分析.

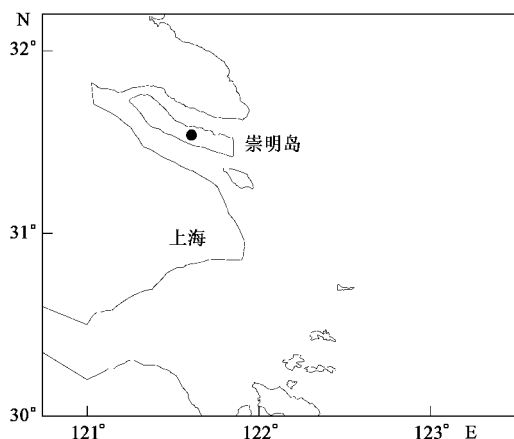


图 1 采样站位

Fig.1 Sampling station in the East China Sea

1.2 实验方法

本研究中,测定项目主要包括 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} .这 5 种营养盐组分均采用分光光度法在 SAN^{plus} Skalar 营养盐自动分析仪上测定,其中 NH_4^+ 采用靛酚蓝法测定; NO_2^- 采用重氮偶氮比色法; NO_3^- 采用 Cd-Cu 还原重氮偶氮比色法; PO_4^{3-} 采用磷钼蓝法; SiO_3^{2-} 采用硅钼蓝法,实验用水均为 Milli-Q 水,实验过程均实施质量控制.

2 结果与讨论

2.1 pH 值和盐度

2004 年 6 月~2005 年 5 月,全年在崇明岛共收集总降水量为 462.68 mm,夏(6~8 月)为 181.66 mm、秋(9~11 月)为 39.95 mm、冬(12~次年 2 月)为 162.61 mm、春(3~5 月)为 78.46 mm.夏、秋、冬、春的降水量分别占全年降水量的 39%、9%、35% 和 17%.观察降水量的季节变化,如图 2 所示,可以看出,在全年调查期间崇明岛降水主要集中在夏、冬两季,约占总降水量的 74% 左右,而秋季的降水量较少;降水频率也有相类似的变化.

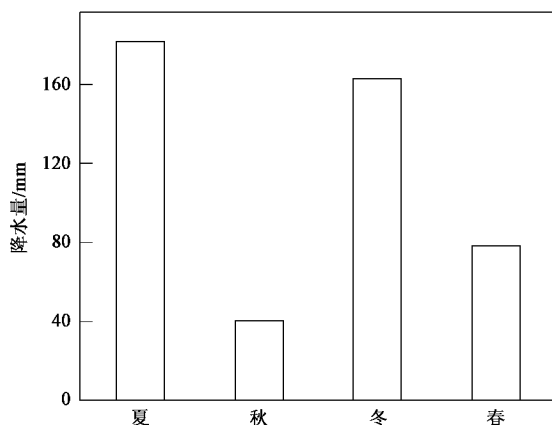


图 2 降水量的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of rainfall

观察 pH 值的季节变化,如图 3 所示.可以看出, pH 值的变化趋势与降水量没有明显的关系.研究表明,降水中 H^+ 的浓度与多种离子有关,降水的酸性是 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 等离子综合作用的结果^[16].Seinfeld 等^[17]认为在洁净的大气中,降水的 pH 值应该在 5.00~5.60 之间,本研究收集到的崇明岛全年降水 pH 值在 4.38~7.20 之间, pH 值的变化范围很大,说明由人类活动产生的污染物对大气湿沉降有影响.本研究以 pH 值 5.00 作为判断酸雨的标准^[18],31 个样品中酸雨频率为 16.1%.一般来说,冬季(12 月~次年 2 月)燃煤较多, NO_x 和 SO_2 等酸性气体排放量较高,最低 pH 值理应出现在冬季.而本研究中最低 pH 值出现在 3 月(春季),这可能由于冬季气候干燥,空气中有大量的沙尘颗粒,其中的 CaCO_3 等碱性颗粒可以中和大气中的酸性成分;再加上冬季土壤中化学肥料容易挥发,挥发的氨气是一种碱性气体,很容易中和空气中的酸性气体,使冬季降水的 pH 值变高.夏季大气湿沉降样品 pH 值最高,可能由于降水量大, H^+ 浓度得到了稀释.总之,降水可以改变海水表层的 pH 值,使得浮游植物种群之间产生激烈的竞争,对海洋生态系统造成一定的影响^[19].

大气湿沉降不仅可以改变海水的 pH 值,还可以改变海水的盐度.盐度也是影响藻类生长的一个重要因素,盐度太高或盐度太低都不利于藻类的生长.王保栋等^[20]研究了长江口及其临近海域表层盐度的平面分布,在长江口赤潮高发区内盐度约为 30 左右.而对于长江口海域优势赤潮浮游植物种类——中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)来说,在盐度为 19.2 左右的咸淡混合水中最适合其生长^[21].因此

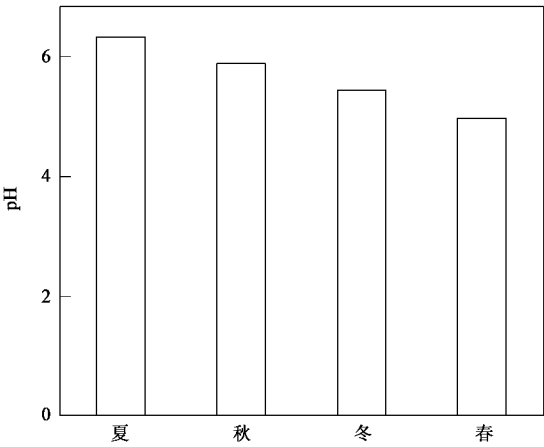


图 3 pH 值的季节变化
Fig.3 Seasonal variation of pH

降水可以在短时间内降低表层海水的盐度, 创造咸淡水混合的水体环境, 可能刺激浮游植物迅速繁殖. 另外, 降水过程还可以使海水中的溶解氧增加, 研究表明^[22] 水中的溶解氧昼夜差值达到一定程度时, 很容易发生赤潮.

2.2 营养盐浓度分析

以月作为统计单位, 计算调查期间营养盐月平均浓度. 月平均浓度采用浓度与降水量的加权平均值, 其计算方法如下:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

式中, n 为该时间段内降水的次数; c_i 为第 i 次降水的离子浓度 ($\mu\text{mol/L}$); Q_i 为第 i 次降水的降水量 (mm), 结果见图 4.

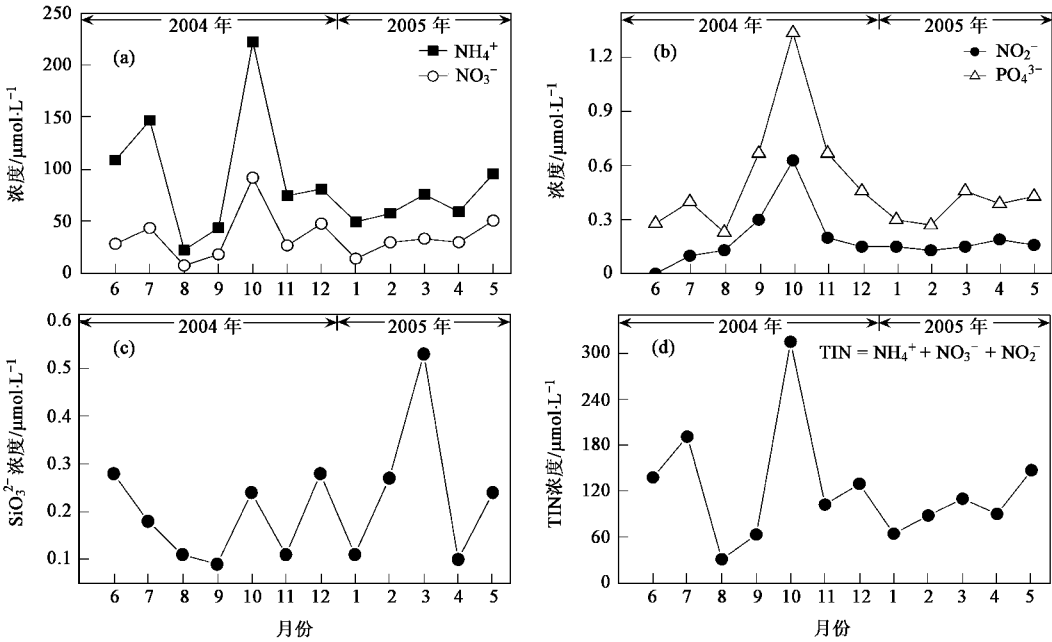


图 4 营养盐月平均浓度的变化
Fig.4 Monthly average concentration of nutrient elements

从图 4(a)可以看出, NO_3^- 浓度在 8 月份有最低值 $8.02 \mu\text{mol/L}$, 之后迅速升高, 至 10 月时达到一年中的最大值 $92.23 \mu\text{mol/L}$, 之后又迅速下降, 2~4 月之间变化趋势比较平缓, 浓度在 $30.20 \sim 33.81 \mu\text{mol/L}$ 之间相差不大, NO_3^- 浓度的最大值是最小值的 11.5 倍. NH_4^+ 整体变化趋势与 NO_3^- 相类似, 在 7 月有 1 个较高值 $147.21 \mu\text{mol/L}$, 8 月达到一年中的最小值 $22.90 \mu\text{mol/L}$, 10 月时有一年中最大值, 为 $222.55 \mu\text{mol/L}$, 之后浓度迅速降低, 11~次年 5 月变化趋势比较平缓, 浓度在 $49.80 \sim 96.17 \mu\text{mol/L}$ 之间,

其最大值与最小值之间相差约 10 倍. 从图 4(b)可以看出, NO_2^- 的浓度和 NO_3^- 、 NH_4^+ 的浓度相差 2~3 个数量级, 最大值 $0.63 \mu\text{mol/L}$ 出现在 10 月. 由于 NO_2^- 浓度比较低, 大气湿沉降对长江口水域表层海水中 NO_2^- 浓度起到了稀释的作用. PO_4^{3-} 在 8 月有一年中的最小值 $0.23 \mu\text{mol/L}$, 之后迅速增加, 在 10 月达到全年最大值, 为 $1.34 \mu\text{mol/L}$, 大约是最小值的 6 倍. 与 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度相比 PO_4^{3-} 的浓度一直比较低, 可能由于土壤中的磷肥较氮肥更难挥发, 且 PO_4^{3-} 的来源比较少.

从图 4(c)可以看出,全年降水中 SiO_3^{2-} 的浓度均比较低,范围在 $0.09 \sim 0.53 \mu\text{mol/L}$,最大值出现在 3 月.由于岩石的风化和土壤流失,使硅溶解于水中,随陆地径流输送到长江口水域,此水域中 SiO_3^{2-} 的浓度很高,而湿沉降中 SiO_3^{2-} 的浓度比较低,降水可以有效地稀释水域表层的 SiO_3^{2-} 浓度,从而改变表层水体营养盐结构.

总无机氮(TIN)是 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NO_2^- 的浓度总和,其中 NO_2^- 所占比例很小.崇明岛全年降水 TIN 中 71% 以 NH_4^+ 形式存在,29% 以 NO_3^- 形式存在.由图 4(d)可以看出 TIN 的变化趋势与 NH_4^+ 很相似,在 7 月时有 1 个较大值 $191.31 \mu\text{mol/L}$,之后迅速下降,在 8 月达到全年最小值 $31.05 \mu\text{mol/L}$,在 10 月有全年最大值 $315.41 \mu\text{mol/L}$,之后浓度迅速降低,然后月平均浓度变化趋于平缓.降水中高含量的 TIN 对浮游植物的生长有重要作用,霍文毅等^[23]在分析 1998 年 7 月胶州湾海域发生中肋骨条藻赤潮的原因时指出,赤潮发生前有一场降雨,且各站表层海水 TIN 的浓度明显增高,为赤潮的发生提供了必需的营养基础.

张国森等^[24]对长江口地区嵎泗群岛 2000 年 5 月~2001 年 4 月的大气湿沉降样品进行研究,降水中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的月均浓度都比 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 浓度高,这和笔者对崇明岛观测到的结果相同.嵎泗群岛的 TIN 组成在 7~10 月这段时期是 NO_3^- 的含量占优,占 TIN 的 61%~79% 之间,其余月份是 NH_4^+ 含量比较高,占 TIN 的 55%~75% 之间.由图 4(a)可以看出,崇明岛全年降水 TIN 组成中均是 NH_4^+ 含量占优,这和张国森等对嵎泗群岛的研究结果有所不同.

总之,崇明岛大气湿沉降中各营养盐浓度和长江口表层海水中营养盐浓度相比较,大气湿沉降会

使表层海水中 NH_4^+ 、 NO_3^- 的浓度增加,对表层海水中 NO_2^- 、 SiO_3^{2-} 的浓度起到了稀释的作用.

2.3 营养盐通量分析

2.3.1 营养盐月湿沉降通量

崇明岛地处长江口,研究崇明岛营养盐的湿沉降通量,其结果可以近似反映长江口湿沉降的状况.图 5 是崇明岛大气湿沉降中 TIN、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 月湿沉降通量的变化.计算公式如下:湿沉降通量 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$] = 离子月平均加权浓度 (mmol/L) $\times$ 全月降水量 (mm/month).

TIN 湿沉降通量 6 月份为 $8.77 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$,在 7 月份达到全年最高值 $12.89 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$,之后迅速降低,8~11 月变化缓慢,湿沉降通量在 $0.33 \sim 1.61 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$ 之间.12~次年 5 月湿沉降通量基本维持在一个较高的水平,此 6 个月湿沉降通量的平均值为 $4.25 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$.由图 5 可以看出,TIN 的湿沉降通量远远大于 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 的湿沉降通量,而且营养盐在夏季(6~8 月)的湿沉降通量明显高于其它季节,尤其高于秋季(9~11 月),这可能与降水量有着直接的关系.降水中的离子主要来源于大气中气溶胶颗粒和气体的溶解,夏季降水量大,对气溶胶粒子的清洗效率高,降水中离子的总量也就越多,使得夏季湿沉降通量高于其他季节. Whitall 等^[25]对美国北卡罗莱纳州 Neuse 河口地区湿沉降的研究也表明,该地区氮沉降通量季节性变化明显,其通量最大值也出现在夏季,对于 Neuse 河口对氮比较敏感的水体,过量的氮输入可导致赤潮暴发和鱼类死亡.近年来我国大气污染加剧,从而也影响到降水中的营养盐含量.以上海为例,1998~2003 年上海地区降水中 TIN 基本呈逐年升高的趋势,6a 雨水平均硝态氮浓

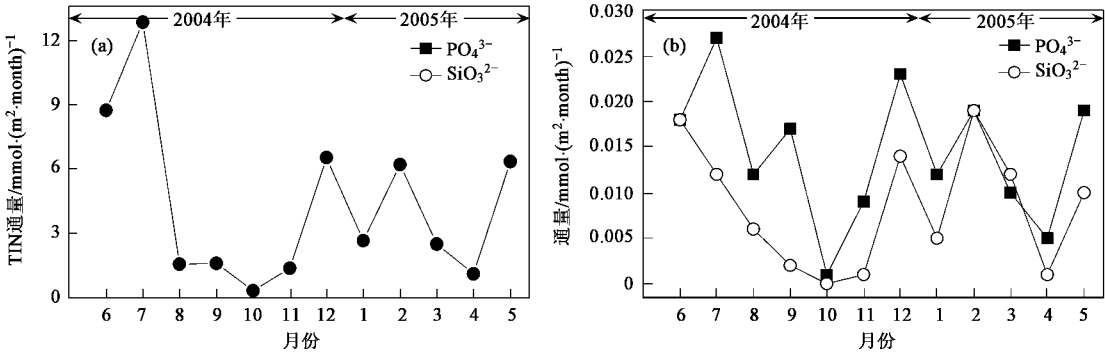


图 5 营养盐月湿沉降通量

Fig.5 Monthly variation of nutrient fluxes

度为 2.59 mg/L, 铵态氮浓度为 2.16 mg/L, TIN 浓度为 4.74 mg/L, 远大于富营养水体中氮浓度阈值(0.2 mg/L)^[26]。

总之, 大气传输过程不仅能使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质通量, 且具有突发性的特点, 对海洋水体的富营养化有重大影响^[27]。

2.3.2 营养盐年湿沉降通量

全年调查期间崇明岛地区可溶性无机氮、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的湿沉降通量分别为 52.02、0.17、0.10 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。其中湿沉降通量最大的是 NH_4^+ 为 37.29 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其次是 NO_3^- 为 14.67 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 而 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 的湿沉降通量都很低。崇明岛大气气溶胶中主要含 NH_4^+ 和 NO_3^- , 推测崇明岛大气湿沉降受到了当地土壤化肥挥发和工业废气排放的影响^[28]。大气氮湿沉降不仅能够引起水体酸化^[29], 而且会加重水体富营养化, 进而打破整个生态系统的平衡, 影响生态系统的稳定性。由于氮的降水输入被认为是海域高含量无机氮的主要来源^[30], 所以氮通过大气湿沉降向海洋的输送得到了广泛的研究, 表 1 是世界部分近海的大气氮沉降情况。

表 1 世界部分近海的大气氮沉降情况

Table 1 Inshore nitrogen inputted by wet deposition in the world		
海区	湿沉降通量 $/\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	资料来源
北大西洋沿岸	23	[31]
北海南部	71	[32]
特拉华湾	75	[33]
中国东海沿岸	52	本研究
中国黄海沿岸	21	[10]

比较氮素湿沉降通量的空间变化不难发现, 雨水样品中的氮含量高低受当地的经济水平发展和当地农业活动的影响, 一般认为采样地点临近工业、农业发达地区, 雨水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 含量就偏高。

营养盐可以通过大气湿沉降直接输入海洋, 还可以随雨水降到陆地, 通过地面径流间接输入到海洋中。降水对河口水域营养盐输入除了直接输入和间接输入外, 还通过冲刷和浸溶作用将陆地上大量的营养盐带入水体, 加速水体短期富营养化。因此大气湿沉降对海洋的营养盐输入通量还应包括很大部分陆地降水再流入, 而这部分以往往往都计算在河流中^[14]。实际大气湿沉降营养盐通量应大于计算的理论值, 表现出大气湿沉降对长江口水域营养盐贡

献的重要性。

2.4 营养盐结构分析

氮、磷、硅是海洋浮游生物生长繁殖所必需的营养物质。同时, 营养盐的组成结构对浮游植物的生长繁殖、种群竞争也能起到至关重要的影响。本研究调查期间, 崇明岛降水中 N:P 在 69.53 ~ 651.48 之间; Si:N 在 0.000 2 ~ 0.006 8 之间; Si:P 在 0.09 ~ 1.73 之间。降水样品中 Si:N 远远小于通常情况下海洋浮游植物生长所需要的 Si:N = 1:1, 而 N:P 远远大于浮游植物生长所需要的 N:P = 16:1, N:P 最大比值超过正常比值约 40 倍。近年来, 随着长江口地区人口的增长和工业的发展, 氮的排放量逐年增加^[34], 由于磷酸盐的来源有限, 所以大气湿沉降中 N:P 增加很快。同时, 耕作用的氮肥与磷肥施用比例达 10 ~ 20 或更高, 而且 N 相对于 P 更容易从土壤中流失^[8,9], 因此, 降水中有很高的 N:P 值, 这在一定程度上加剧了长江口及其临近海区的富营养化^[35]。

柴超等^[36]研究表明, 长江口门外海域 2004 年的 N:P 平均值为 46.7, Si:N 平均值为 2.2。本研究崇明岛降水中 N:P 年平均值为 301.4, Si:N 年平均值为 0.001 9。显然, 降水中的营养盐结构和正常海水中以及长江口表层海水中的营养盐结构差别很大。降水可带来大量的无机氮, Peierls 等^[37]认为无机氮在短期内对浮游植物生长的作用比有机氮更为重要, 因为无机氮可利用性高。为了证明大气湿沉降对浮游植物的这种刺激作用, Zou 等^[38]采集黄海海水于培养瓶中, 并加入相当海水体积 10% 的雨水, 24 h 后培养瓶中叶绿素 a 含量远远高于未添加雨水的对照组。Peierls 等^[37]也认为降水可以刺激细菌和浮游植物的生长。总之, 降水可以改变水体中营养盐的分布, 进而影响浮游植物的生长和种群结构, 大气湿沉降中大量的无机氮在降水的短期过程中输入水体可能和赤潮的突然暴发之间存在一定的联系。

从图 4(a)可以看出, 2004 ~ 2005 年崇明岛被调查的这 12 个月中, TIN 的组成均是 NH_4^+ 的含量占优。梅雪英等^[39]根据《上海市环境质量报告书》和《水资源公报》得到结果, 上海大气湿沉降 TIN 中 NO_3^- 所占比例稍高, NO_3^- 和 NH_4^+ 含量相差较小。这和本研究结果有所不同。崇明岛全年降水 TIN 中 70.9% 以 NH_4^+ 形式存在, 而长江口海水 TIN 中 84.3% ~ 98.4% 是以 NO_3^- 的形式存在^[40], 同时, Bronk 等^[41]认为当海水中存在高浓度的 NO_3^- 和 NH_4^+ 时, 浮游植物优先摄取 NH_4^+ , 只有在 NH_4^+ 不能

满足其生长的情况下才能摄取 NO_3^- , 许多藻类营养吸收动力学实验也证明了这一点. 值得注意的是, 中国与日本、美国降水化学特性有很大不同, 雨水中离子总浓度以中国为最高, 分别比日本和美国高 1.3 倍和 2.5 倍, 且中国雨水中 NH_4^+ 的浓度特别高^[42], 说明中国大气湿沉降中的离子浓度受陆地源影响很大, 因此必须采取措施降低大气中 NH_4^+ 的浓度. 总之, 降水能够在短时间内给长江口表层海水带来丰富的 NH_4^+ , 使得对 NH_4^+ 有强利用能力的浮游植物迅速繁殖起来, 可能会引发赤潮.

3 结论

(1) 2004 年 6 月 ~ 2005 年 5 月崇明岛的降水量主要集中在夏、冬两季, 约占总降水量的 74% 左右, 而秋季的降水量较少, 降水频率也有类似的变化; 营养盐的平均浓度季节变化显著, 最大值往往出现在降水量与降水频率较少的秋季, 而最小值一般出现在夏季. 以 pH 值 5.00 作为判断酸雨的标准, 崇明岛降水样品中酸雨频率为 16.1%.

(2) 营养盐湿沉降通量具有明显的季节性, TIN 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的湿沉降通量分别为 52.02、0.17、0.10 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. TIN 中 70.9% 以 NH_4^+ 形式存在, 和海水中的 TIN 的组成相差很大, 降水能够在短时间内给表层海水带来丰富的 NH_4^+ , 使得对 NH_4^+ 有强利用能力的浮游植物迅速繁殖起来, 可能导致有害赤潮的暴发.

(3) 大气湿沉降中 N:P:Si 的组成比例与长江口表层海水有显著的差别, 降水会改变海水表层的营养盐结构、盐度、pH 等, 从而影响到浮游植物生长和种群结构, 甚至会引发赤潮.

致谢: 本研究样品采集得到了中国水产科学院东海水产研究所陈亚瞿研究员的大力协助, 在此表示衷心感谢.

参考文献:

- [1] 刘昌岭, 任宏波, 陈洪涛, 等. 黄海及东海海域大气降水中的重金属[J]. 海洋科学, 2003, **27**(9): 64-68.
- [2] 宋宇然, 于志刚, 陈洪涛, 等. 青岛地区大气湿沉降中营养盐的初步研究[J]. 科技信息, 2006, **2**: 11-12.
- [3] 张国森, 陈洪涛, 张经, 等. 东、黄海大气湿沉降中常量阴离子组分的研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, **22**(2): 159-162.
- [4] Anderson K A, Downing J A. Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen phosphorus and silicon in an agricultural region[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2006, **176**: 351-374.
- [5] Ferreira J G, Wolff W J, Simas T C, *et al.* Dose biodiversity of

- estuarine phytoplankton depend on hydrology? [J]. Ecological Modelling, 2005, **187**: 513-523.
- [6] 刘昌岭, 陈洪涛, 任洪波, 等. 黄海及东海海域大气湿沉降(降水)中的营养元素[J]. 海洋环境科学, 2003, **22**(3): 26-30.
- [7] 叶仙森, 张勇, 项有堂. 长江口海域营养盐的分布特征及其成因[J]. 海洋通报, 2000, **19**(1): 89-92.
- [8] Zhang J, Liu M G. Observations on nutrients and sulphate in atmospheric wet deposition over the northwest Pacific coastal oceans-Yellow Sea[J]. Marine Chemistry, 1994, **47**: 173-189.
- [9] Zhang J, Zhang G S, Liu S M. Dissolved silicate in coastal marine rainwaters: Comparison between the Yellow Sea and the East China Sea on the impact and potential link with primary production[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **110**(D1): 6304.
- [10] 张金良, 于志刚, 张经, 等. 黄海西部大气湿沉降(降水)中各元素沉降通量的初步研究[J]. 环境化学, 2000, **19**(4): 352-356.
- [11] 万小芳, 吴增茂, 常志清, 等. 南黄海和东海海域营养盐等物质大气入海通量的再分析[J]. 海洋环境科学, 2002, **21**(4): 14-18.
- [12] 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[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 104-110.
- [13] 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): 249-255.
- [14] 赵卫红, 王江涛. 大气湿沉降对营养盐向长江口输入及水域富营养化的影响[J]. 海洋环境科学, 2007, **26**(3): 208-216.
- [15] 刘嘉麒, Keene W C, 霍文强, 等. 背景降水[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 11-14.
- [16] 毕木天, 陈旦华, 栗新, 等. 广州市白云山、电视塔春季酸性降水的研究[J]. 环境化学, 1992, **11**(6): 26-33.
- [17] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change[M]. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 1998. 10-30.
- [18] 刘嘉麒. 降水背景值与酸雨定义研究[J]. 中国环境监测, 1996, **12**(5): 5-9.
- [19] Soares A, Pearson J. Short-term physiological response of mosses to atmospheric ammonium and nitrate[J]. Water Air and Soil Pollution, 1997, **93**: 225-242.
- [20] 王保栋. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的输运[J]. 黄渤海海洋, 1998, **16**(2): 41-47.
- [21] 李金涛, 赵卫红, 杨登峰, 等. 长江口海水盐度和悬浮体对中肋骨条藻生长的影响[J]. 海洋科学, 2005, **29**(1): 34-37.
- [22] 王正方, 张庆, 吕海燕, 等. 长江口溶解氧赤潮预报简易模式[J]. 海洋学报, 2000, **22**(4): 125-129.
- [23] 霍文毅, 俞志明, 邹景忠. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2001, **32**(5): 311-318.
- [24] 张国森, 陈洪涛, 张经, 等. 长江口地区大气湿沉降中营养盐的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1107-1111.
- [25] Whitall D, Brad H, Hans P. Importance of atmospherically deposited nitrogen to the annual nitrogen budget of the Neuse River estuary, North Carolina [J]. Environment International, 2003, **29**: 393-399.
- [26] 张修峰. 上海地区大气氮湿沉降及其对湿地水环境的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(6): 1099-1102.

[27] Luo L, Qin B, Yang L, *et al.* Total inputs of phosphorus and nitrogen by wet deposition into Lake Taihu, China [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 63-70.

[28] Cornell S E, Mace K, Coeppicus S, *et al.* Organic nitrogen in Hawaiian rain and aerosol [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, **106**: 7973-7983.

[29] Krusehe A V, Camargo P B, Cerri C E, *et al.* Acid drain and nitrogen deposition in a subtropical watershed (Piracicaba): Ecosystem consequences [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **121**: 389-399.

[30] 沈志良, 刘群, 张淑美, 等. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素 [J]. *海洋与湖沼*, 2001, **32**(5): 465-473.

[31] Galloway J N, Howarth R W, Michaels A F, *et al.* Nitrogen and phosphorus budgets of the North Atlantic Ocean and its watershed [J]. *Biogeochemistry*, 1996, **35**(1): 3-25.

[32] Spokes L, Jickells T D, Rendell A R, *et al.* High atmospheric nitrogen deposition events over the North Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1993, **26**(12): 698-703.

[33] Russell K M, Galloway J N, Macko S A, *et al.* Sources of nitrogen in wet deposition to the Chesapeake Bay region [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**: 2453-2465.

[34] Galloway J N. Acid deposition perspectives in time and space [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **85**: 15-24.

[35] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 (I . 秋季营养限制情况) [J]. *海洋学报*, 2000, **22**(4): 60-66.

[36] 柴超, 俞志明, 宋秀贤, 等. 三峡工程蓄水前后长江口水域营养盐结构及限制特征 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 64-69.

[37] Peierls B, Paerl H W. Bioavailability of atmospheric organic nitrogen deposition to coastal phytoplankton [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**: 1819-1823.

[38] Zou L, Chen H T, Zhang J. Experiment examination of the effects of atmospheric wet deposition on primary production in the Yellow Sea [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, **249**: 111-121.

[39] 梅雪英, 张修峰. 上海地区氮素湿沉降及其对农业生态系统的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, **15**(1): 16-18.

[40] 周俊丽, 刘征涛, 孟伟, 等. 长江口营养盐浓度变化及分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 139-144.

[41] Bronk D A, Glibert P M, Ward B B. Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production [J]. *Science*, 1994, **265**: 1843-1846.

[42] 黄美元, 植田洋匡, 刘帅仁. 中国和日本降水化学特性的分析比较 [J]. *大气科学*, 1993, **17**(1): 27-38.