

惠州大亚湾大气湿沉降中氮营养盐 变化特征的研究

陈 瑾¹, 刘思言¹, 邓鉴峰¹, 陈中颖², 卢 平^{1*}, 李来胜¹

(1. 华南师范大学化学与环境学院, 广州 510655; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要:通过分析降水中氮营养盐质量浓度及其沉降通量变化特征,研究了大气湿沉降中氮营养盐对大亚湾水生生态系统的影响.结果表明,观测期间 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 TN 降雨量加权平均质量浓度分别为 0.474、0.536 和 1.23 mg/L,氮质量浓度在 8 月份出现了明显的峰值;湿沉降通量分别为 58.93、78.13 和 158.75 kg/(km²·月),其中无机氮占总氮含量的 86.34%,大亚湾大气湿沉降中氮营养盐主要以 $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{NO}_2^--\text{N}$ 的形式存在.与 2009 年的观测结果相比较,2012 年大气中氮的沉降通量增加了约 1 倍.通过大气湿沉降输入的氮营养盐在大亚湾水体富营养化过程中产生了重要作用,在研究水体富营养盐问题时应考虑降水的贡献.

关键词:湿沉降;氮营养盐;富营养化;惠州大亚湾

中图分类号:X511

文献标志码:A

doi:10.6054/j.jscnun.2014.06.112

Variation Characteristics of Wet Deposition of Nitrogen in Daya Bay, Huizhou

Chen Jin¹, Liu Siyan¹, Deng Jianfeng¹, Chen Zhongying², Lu Ping^{1*}, Li Laisheng¹

(1. School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510655, China;

2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environment Protection, Guangdong 510655, China)

Abstract: In order to understand the influence of nitrogen deposition on the aquatic ecosystem at Daya Bay, measurements of variations of concentration and deposition fluxes on precipitation were made. Results showed that, volume-weighted concentrations in wet deposition for ammonium nitrogen (NH_4^+-N), nitrate/nitrite nitrogen ($\text{NO}_3^--\text{N}/\text{NO}_2^--\text{N}$) and total nitrogen (TN) were 0.474, 0.536 and 1.23 mg/L, respectively, the nitrogen concentration peaked in August; their wet deposition fluxes were 58.93, 78.13 and 158.75 kg/(km²·month), respectively; inorganic nitrogen accounted for 86.34% of the total nitrogen. The nutrients in the atmosphere excited mainly in the form of $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{NO}_2^--\text{N}$. Compared with the observations in 2009, the deposition flux of nitrogen increased about 1 times in 2012. The inputs of nitrogen from the atmosphere represented an important role in the process of eutrophication at Daya Bay. Therefore, the contribution of precipitation should be considered in the research of eutrophication.

Key words: wet deposition; nitrogen nutrient; entrophication; Daya Bay

大气氮沉降是全球氮生物地球化学循环的一个重要部分,是氮营养盐进入海洋生态系统的重要渠道^[1].研究表明,大气氮营养盐的沉降,特别是氮湿沉降,已经成为河口、沿海海域和淡水水体富营养化的重要污染来源^[2-3].对美国东海岸 10 个河口的研究显示,大气沉降占总氮输入量的 15%~42%^[4];Krom 等^[5]对地中海营养盐输入量进行研究显示,

61% 的氮来自大气沉降,而地中海东部大气沉降中溶解性无机氮贡献了 20%~30% 的新生产力;新加坡滨海下游区域的氮沉降输入已使该区域转变成成为氮限制型的水体,其中主要贡献的湿沉降占到了总氮输入量 72.54%^[6].我国黄海表层 65% 的无机氮和 70% 的无机磷通过大气输送,由大气湿沉降输入的溶解性无机氮占该地区总氮输入的 58%^[7],降雨

中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 占其年初级生产力所需氮的 4.3% ~ 9.2%^[8]; 长江口水域的大气湿沉降中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是总无机氮的主要贡献者, 约占其含量的 70.9%, 降水能够在短时间内给长江口表层海水带来丰富的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 使得对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有强利用能力的浮游植物迅速繁殖起来, 可能会引发赤潮^[9]; 珠江口地区氮湿沉降中无机氮所占比例达到 64.0%, 已成为该区域水体外在和新增的污染负荷^[10].

作为珠江三角洲的关键生态保护区, 大亚湾已连续 7 年处于亚健康状态, 水体底层缺氧现象明显, 局部面临无机氮污染的风险^[11], 大气沉降中营养盐的输入有可能成为污染主要来源之一. 本研究通过对降水中氮营养盐质量浓度及其沉降通量变化特征的研究, 探讨了大气氮湿沉降对大亚湾水生生态系统的影响, 对了解大气氮湿沉降对大亚湾海域的输入及其生态影响具有重要意义.

1.1 研究区域概况

2012 年 3—12 月在惠州市大亚湾开发区站 (22°44'32"N, 114°32'7"E) 进行样品的采集. 大亚湾位于惠州市东南, 被深圳大鹏半岛、惠阳南部沿海及惠东平海半岛三面环绕, 西南邻香港, 南接广阔的海域, 面积约为 488 平方公里. 大亚湾年平均气温约为 21.8 °C, 全年月均降雨量为 276 mm, 属典型的亚热带海洋性气候.

1.2 实验仪器

本研究的沉降采样设备采用中山大学研制的具有无线通信功能的大气氮磷干湿沉降采样系统, 系统包括 4 个大气氮磷干湿沉降现场采样器和 1 台用于远程数据处理的计算机, 现场采样器通过开通 GPRS 的手机卡实现无线通讯, 将降雨量数据、翻转盖板移动状态以及采样器故障信息传输至远程计算机. 现场采样器的结构和实物分别如图 1 和图 2 所示.

紫外可见分光光度计 (MAPADA 公司, UV3100-PC) 和离子色谱仪 (DIONEX 公司, ICS-900)

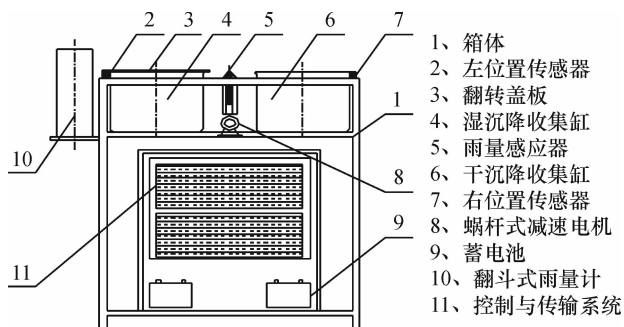


图 1 大气氮磷干湿沉降自动采样器结构示意图

Figure 1 Structure diagram of automatic sampler for atmospheric dry and wet deposition of nitrogen and phosphorus

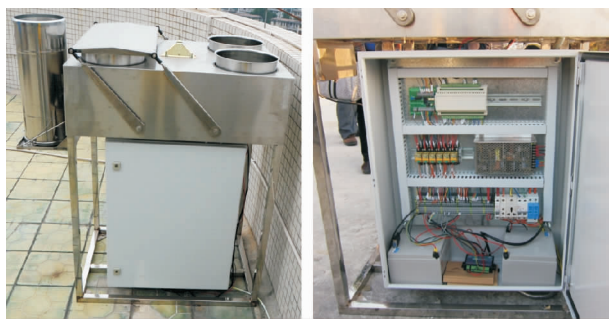


图 2 大气氮磷干湿沉降自动采样器实物

Figure 2 Object of automatic sampler for atmospheric dry and wet deposition of nitrogen and phosphorus

1.3 实验方法

1.3.1 采样方法 采用中山大学研制的自动采样器来收集大气中的雨水样品. 采样期间, 沉降缸不定期用稀盐酸和去离子水清洗, 沉降缸上覆盖挡板, 下雨时挡板会自动打开收集样品, 采样器上带有雨量器用于获得降雨量. 每月视降雨情况及其时间分布收集 2~7 个雨水样品. 所有样品均装入经预处理的聚乙烯塑料瓶, 取一部分样品现场测定 pH 值, 剩余样品于 4 °C 冰箱内保存, 尽快送实验室分析测定. 同时记录好相关气象数据.

1.3.2 测定方法 未过滤的雨水样品用过硫酸钾氧化消解, 紫外分光光度法测总氮 (TN)^[12]; 取雨水澄清液, 纳氏试剂分光光度法测氨态氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)^[13]; 样品经过 0.45 μm 的滤膜过滤后采用离子色谱法分析硝态氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) 和亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- \text{-N}$)^[14].

1.4 数据处理方法

2012 年 3—12 月共收集 33 个雨水样品. 以月为统计单位, 采用下列式 (1)、(2) 计算氮湿沉降的月平均质量浓度和月沉降通量^[10]:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n r_i c_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (1)$$

$$S_w = RC, \quad (2)$$

式中, C 为当月氮湿沉降中营养盐质量浓度的加权平均值 (mg/L); S_w 为湿沉降的月通量 ($\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$); n 为当月降雨场次; r_i 为第 i 次降雨的降雨量 (mm); c_i 为第 i 次降雨时营养盐的质量浓度 (mg/L); R 为采样当月的总降雨量 (mm/月).

数据处理过程均在 Excel 2010, SPSS 16.0 及 Origin 8.0 中完成.

2 结果与讨论

2.1 氮营养盐质量浓度的变化及其主要影响因素

图 3 显示, 各营养盐质量浓度的月变化趋势非

常明显. 观测期间, 大亚湾的降雨量月均值为 160.0 mm, 降雨主要集中在 4—8 月, 约占全年降雨量的 75.94%. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的月均质量浓度分别为 0.474、0.536 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 略高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 约为珠江口横门的 0.58 倍和 1.06 倍^[15]. 总无机氮的月均质量浓度为 1.03 mg/L, 远

远高于水体富营养化阈值 0.5 mg/L^[16]. TN 在全年的月平均质量浓度、最大值和最小值分别为 1.23、2.79 和 0.256 mg/L. 比较观测期间内氮质量浓度的季节变化, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 皆以秋季最高, 春季次之, 而夏季最小.

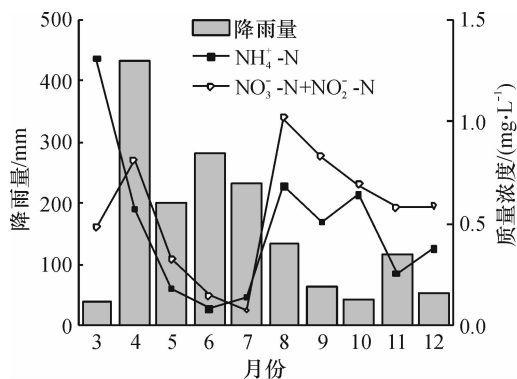


图3 大亚湾湿沉降中氮营养盐的质量浓度与降雨量的月变化趋势

Figure 3 Monthly variations of concentrations and rainfall of nitrogen in wet deposition at Daya Bay

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 TN 月均质量浓度的变化规律与降雨量的变化规律相反(图4). 在降雨量集中的春夏季, 各项氮营养盐指标的质量浓度较小; 而在降雨量较小的秋冬季, 氮的质量浓度反而较大. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 TN 的质量浓度与降雨量的 Pearson 相关系数分别为 -0.402, -0.212 和 -0.433, 说明降雨量是影响大气湿沉降中氮营养盐质量浓度变化的主要因素之一, 除此之外, 降雨类型和排放至大气中污染物质量浓度也是影响因素.

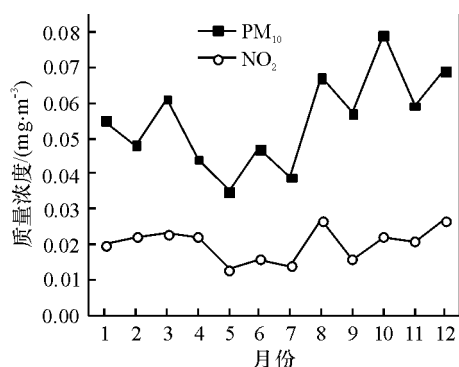


图4 2012年大亚湾空气中主要污染物质量浓度月均值变化趋势

Figure 4 Monthly average concentrations of main air pollutants at Daya Bay, 2012

图4为2012年大亚湾空气中主要污染物质量浓度月均值变化趋势(数据由大亚湾省控环境空气质量监测站提供). 3月、8月和10月份大气中的

PM_{10} 质量浓度较高, 降雨量较小, 雨水中氮的质量浓度较高; 4—7月份降雨量较大, 降水中氮的质量浓度较低. 虽然经过雨季的冲刷, 空气较清洁, 但8月份 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的质量浓度都有了明显的攀升, 这与该区域的降雨类型和区域污染特征是紧密相关的. 大气中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要来自农业活动, 农业活动具有明显的季节性, 其施肥一般都在雨季来临之前和雨季末期. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度峰值出现在8月份, 与农业施肥时间相吻合. 化石燃料燃烧是大气中 NO_x 最主要的来源, 大亚湾发达的石化工业导致了该区域大气中 NO_x 的含量处于较高水平. 另外, 大亚湾夏季盛行偏南风, 其西南方向为香港和深圳, 这2个地区的发达工业为大亚湾的大气输入了一定的 NO_x . 8月份和10月份, 大亚湾空气中的 NO_x 处于较高水平(图4), 这直接影响了大气湿沉降中 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度的变化. 在降雨冲刷、季风气候引起的大气传输和区域污染的共同作用下, 该区域的氮质量浓度在8月份出现了明显的峰值. 进入秋冬季节, 降雨量减小, 虽然大气中氮的质量浓度有所下降, 但仍处于较高的水平. 总的来说, 降雨量、降雨类型和排放至大气中氮污染物的质量浓度共同影响着大亚湾大气湿沉降中氮营养盐的质量浓度变化.

2.2 氮沉降通量的变化

观测期间, 大亚湾 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和

TN 的湿沉降通量分别为 58.93、78.13 和 158.75 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$, 无机氮占总氮含量的 86.34%, $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的贡献率要大于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 大亚湾大气氮湿沉降营养盐主要以 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的形式存在.

大亚湾 3 月和 7 月份大气中的氮盐主要以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主(图 5), 其他月份 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NO}_2^- \text{-N}$ 所占的比例为 50% 左右, 与国外一些海域的研究结果一致, 如美国长岛海峡^[17] 和地中海的特拉·什克莫

纳^[3]等, 而与我国大多数的研究相反, 如我国珠江口^[10], 长江口^[18], 东海^[19]等地, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 沉降通量均高于 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NO}_2^- \text{-N}$. 由于降雨量较大, TN 在 4 月份的沉降通量明显高于其他月份, 从季节的变化上看, TN 的沉降通量为春季 > 夏季 > 秋季, 与降雨量的分布相一致, 降雨量是影响湿沉降氮盐通量的最主要因素.

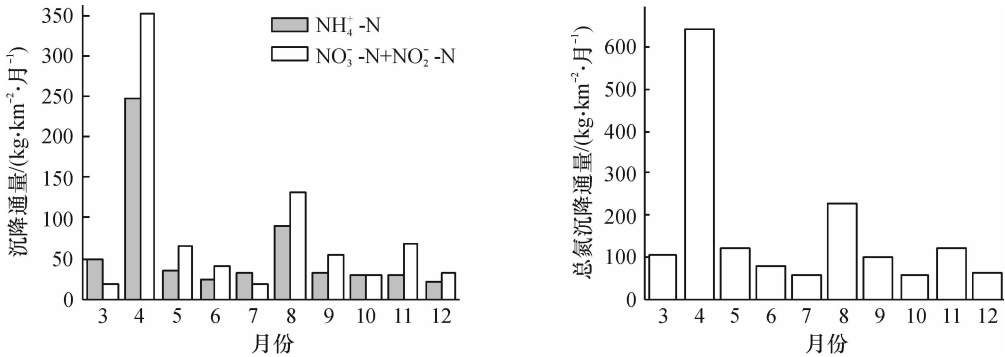


图 5 大亚湾湿沉降中氮营养盐沉降通量的月变化趋势

Figure 5 Monthly variations of deposition fluxes of nitrogen in wet deposit at Daya Bay

图 6 为大亚湾大气湿沉降中总氮沉降通量在 2009 年^[20] 及 2012 年(本研究) 月变化的比较, 由图可知, 总氮的沉降通量在两观测时期内的时间变化趋势基本一致, 但 2012 年大气湿沉降中的总氮的沉降通量比 2009 年增加了约 1 倍. 其原因一方面是降雨量的差异性导致的(一年的测量周期内仅收到 15 个样品, 其中由于 2008 年冬天大旱, 从 2008 年 9 月—2009 年 3 月只收集到 5 次降水样品), 另一方面也说明了自 2009 年以来, 大亚湾大气湿沉降中氮

营养盐的污染程度加重了, 这与大亚湾工业化的程度发展密切相关. 因此, 大亚湾大气中的氮化合物的排放应列为该地区大气污染的主要控制目标.

2.3 大气湿沉降中氮营养盐对大亚湾水生生态系统的影响

王朝晖等^[21] 于 2007 年 5 月—2008 年 4 月对大亚湾海域营养盐进行每月 1 次的周年调查, 大亚湾水域总氮的变化范围为 0.15 ~ 1.13 mg/L , 无机氮均值为 0.11 mg/L , 均小于湿沉降中总氮和无机氮的质量浓度值. 大亚湾海域没有大型河流注入, 大气湿沉降在补给该区域水生生态系统氮供应方面有一定作用.

春季是浮游植物开始生长和繁殖的时期, 特别是春季后期表层海水中的营养盐消耗较多, 但由于温跃层的存在使表层海水得不到富含营养盐底层水的补充^[22], 而此时通过入海河流输送到大亚湾的营养盐较少, 因此湿沉降的作用显得尤为重要. 研究指出降水中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 更容易被浮游植物吸收和利用^[23]. 本研究的观测期间, TN 在春季的沉降通量最大, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 也在 3 月份出现年度最大质量浓度值, 通过湿沉降输入到大亚湾表层水的氮营养盐大量增加, 雨水中的微量金属元素也能促进浮游植物的生长, 因此推断, 湿沉降可能是引发大亚湾春季水体的

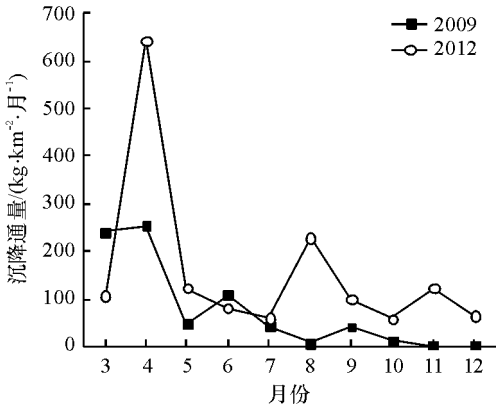


图 6 大亚湾大气湿沉降中总氮沉降通量在 2009 年及 2012 年的月变化

Figure 6 Monthly variation of deposition fluxes of total nitrogen in wet deposition at Daya Bay in 2009 and 2012

富营养化的主要因素之一. 文献研究表明, 大亚湾水域在秋季的水质是一年中最低的, 特别是某些区域氮浓度严重超标^[24], 营养盐浓度的增加导致了该区域浮游植物密度大幅增加^[25]. 在本研究观测期间, 由于秋季降雨量小, 导致秋季 TN 的沉降通量小, 通过湿沉降对该区域营养盐的输入量较春季小, 但大气中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的质量浓度在秋季最高, 在合适的水温和光照下, 大气湿沉降也可能给大亚湾表层水体带来污染. 由此可见, 大气湿沉降输入的氮化合物在大亚湾水体富营养化过程中可能产生重要作用, 在研究水体富营养盐问题时应考虑降水的贡献.

3 结论

(1) 惠州大亚湾大气降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 TN 的降雨量加权平均质量浓度分别为 0.474、0.536、1.23 mg/L, 其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度都以秋季最高, 春季次之, 而夏季最小. 大亚湾大气湿沉降中氮营养盐的质量浓度变化受降雨量、降雨类型和排放至大气中氮污染物质量浓度的共同影响.

(2) 惠州大亚湾大气降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 TN 的湿沉降通量分别为 58.93、78.13、158.75 kg/(km² · 月), 无机氮占总氮含量的 86.34%, 大亚湾大气湿沉降中氮营养盐主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的形式存在.

(3) 与 2009 年相比, 2012 年大气湿沉降中总氮的沉降通量增加了约 1 倍, 主要是降雨量的差异性导致的, 另外也说明了大亚湾大气湿沉降中氮营养盐的污染程度加重了, 这与大亚湾工业化程度发展密切相关.

(4) 通过大气湿沉降输入的氮营养盐在大亚湾水体富营养化过程中产生了重要作用, 在研究水体富营养盐问题时应考虑降水的贡献.

参考文献:

[1] 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(1-4): 351-374.

[2] Herut B, Krom M D, Pan G, et al. Atmospheric input of nitrogen and phosphorus to the Southeast Mediterranean:

Sources, fluxes, and possible impact [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(7): 1683-1692.

- [3] Zhai S, Yang L, Hu W, et al. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in Northern Lake Taihu, China [J]. *Environmental Management*, 2009, 44(3): 542-551.
- [4] Castro M S, Driscoll C T. Atmospheric nitrogen deposition to estuaries in the mid-Atlantic and northeastern United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(15): 3242-3249.
- [5] Krom M, Herut B, Mantoura R F C, et al. Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: Implications for phosphorus limitation [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(5): 1582-1592.
- [6] He J, Balasubramanian R, Burger D F, et al. Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in Singapore [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(16): 2760-2768.
- [7] Zhang J, Chen S, Yu Z, et al. Factors influencing changes in rainwater composition from urban versus remote regions of the Yellow Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1999, 104(D1): 1631-1644.
- [8] Chung C S, Hong G H, Kim S H, et al. Shore based observation on wet deposition of inorganic nutrients in the Korean Yellow Sea coast [J]. *The Yellow Sea*, 1998, 4(1): 30-39.
- [9] 付敏, 赵卫红, 王江涛, 等. 大气湿沉降对长江口水域营养盐的贡献 [J]. *环境科学*, 2008, 29(10): 2703-2709.
- Fu M, Zhao W H, Wang J T, et al. Contribution of atmospheric wet deposition to nutrients in the Yangtze Estuary [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2703-2709.
- [10] 陈中颖, 李开明, 林文实, 等. 珠江口大气氮磷干湿沉降通量及其污染特征 [J]. *环境污染与防治*, 2010(32), 11: 53-57.
- Chen Z Y, Li K M, Lin W S, et al. Atmospheric dry and wet deposition of nitrogen and phosphorus in the Pearl River Estuary [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2010(32), 11: 53-57.
- [11] 广东省海洋与渔业局. 2010 年广东省海洋环境质量公报 [R]. 2011: 43. <http://www.gdofa.gov.cn/index.php/Catagories/view?id=167361>
- [12] 中华人民共和国环境保护部. 水质-总氮的测定-碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (HJ 636-2012)

- [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 1-8.
- [13] 中华人民共和国环境保护部. 水质-氨氮的测定-纳什试剂分光光度法(HJ 535-2009)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [14] 国家环境保护总局. 大气降水中氟、氯、亚硝酸盐、硝酸盐、硫酸盐的测定-离子色谱法(GB 13580.5-92)[S]. 北京: 中国环境科学出版, 1992: 18-20.
- [15] 樊敏玲, 王雪梅, 王茜, 等. 珠江口横门大气氮、磷干湿沉降的初步研究[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 51-56.
- Fan M L, Wang X M, Wang Q, et al. Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus into the Hengmen of Pearl River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(1): 51-56.
- [16] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- [17] 朱玉梅, 刘素美. 东海大气湿沉降中营养盐的研究[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2724-2731.
- Liu Y M, Liu S M. Nutrients in atmospheric wet deposition in the East China Sea[J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2724-2731.
- [18] Luo Y, Yang X, Carley R J, et al. Atmospheric deposition of nitrogen along the Connecticut coastline of Long Island Sound: A decade of measurements[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(28): 4517-4528.
- [19] 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.
- Zhang G S, Chen H T, Zhang J, et al. Nutrient elements in the atmospheric wet deposition in Changjiang River estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1107-1111.
- [20] 邹伟, 王珩瑜, 高建玲. N, P 通过大气干湿沉降方式向大亚湾输入量研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(6): 843-846.
- Zou W, Wang H Y, Gao J L. Fluxes of N and P into Daya Bay by atmospheric deposition[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(6): 843-846.
- [21] 王朝晖, 杨宇峰, 宋淑华, 等. 大亚湾海域营养盐的季节变化及微表层对营养盐的富集作用[J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 307-315.
- Wang Z H, Yang Y F, Song S H, et al. Seasonal changes in nutrients and their accumulation in the surfacemicro layer in Daya Bay, South China Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(2): 307-315.
- [22] 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 II: 春季的营养限制情况[J]. 海洋学报, 2001, 23(3): 57-65.
- Pu X M, Wu Y L, Zhang Y S. Nutrient limitation of phytoplankton in the Changjiang Estuary II. Condition of nutrient limitation in spring[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(3): 57-65.
- [23] 孙晓欣, 李定龙, 徐智焕. 大亚湾大鹏澳海域浮游植物对营养盐添加的响应[J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2013, 25(2): 7-11.
- Sun X X, Li D L, Xu Z H. Response of phytoplankton to nutrients addition in dapeng'ao sea area of the Daya Bay[J]. Journal of Changzhou University: Natural Science Edition, 2013, 25(2): 7-11.
- [24] 彭云辉, 孙丽华, 陈浩如, 等. 大亚湾海区营养盐的变化及富营养化研究[J]. 海洋通报, 2002, 21(3): 44-49.
- Peng Y H, Sun L H, Chen H R, et al. Study on eutrophication and change of nutrients in the Daya Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(3): 44-49.
- [25] Wang Y, Lou Z, Sun C, et al. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(11): 1871-1879.
- 【中文责编: 成文 英文责编: 李海航】