

湛江湾大气湿沉降中营养盐的研究

陈法锦,陈淳青,周凤霞*,劳齐斌,朱庆梅,张书文 (广东海洋大学海洋与气象学院,广东省近海海洋变化与灾害预警重点实验室,广东 湛江 524088)

摘要: 于2015年5月~2016年4月对湛江湾的雨水样品进行了收集,测定了雨水中 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的浓度,分析了它们的浓度及湿沉降通量的变化情况,并讨论了湿沉降营养盐对海水生态系统的影响.结果表明,受厄尔尼诺影响,调查期间的年降雨量明显高于多年平均降雨量.雨水中 NO_2^- 和 SiO_3^{2-} 的浓度在夏季和秋季较高, NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的浓度在春季和冬季较高,它们的湿沉降通量均在秋季最高(平均超过全年湿沉降通量的50%).降雨量、不同来源的气团、当地的人类活动情况等是影响湛江湾湿沉降营养盐浓度和通量的主要因素,秋季湿沉降通量最高与该季节有超强台风过境有关.雨水每年给湛江湾带来的 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P和 SiO_3^{2-} -Si的量分别为2.04、292.4、8.13和45.8t.秋季雨水的沉降可能在短时间内对海水中的浮游植物生长有促进作用,其他季节的促进作用可能在短时间内不明显.

关键词: 大气湿沉降; 营养盐; 富营养化; 湛江湾

中图分类号: X131.1.X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)06-2055-09

Nutrients in atmospheric wet deposition in the Zhanjiang Bay. CHEN Fa-jin, CHEN Chun-qing, ZHOU Feng-xia*, LAO Qi-bin, ZHU Qing-mei, ZHANG Shu-wen (Guangdong Province Key Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction Technologies, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China). *China Environmental Science*, 2017,37(6): 2055~2063

Abstract: The nutrients in atmospheric wet deposition in the Zhanjiang Bay and their impacts on the marine ecosystems were studied based on the rainwater investigation from May 2015 to April 2016. The results showed that the rainfall during the year of investigation was significantly higher than the average annual rainfall due to the influence of El Nino. In rainwater, NO_2^- and SiO_3^{2-} concentrations were relatively high in summer and autumn, while NO_3^- and PO_4^{3-} concentrations were relatively high in spring and winter. The deposition fluxes of these nutrients were all highest in autumn, with a high average contribution (larger than 50%) to the wet deposition fluxes in a whole year. These seasonal variations were affected by rainfall, different sources of air masses, local human activities. A super typhoon passing by in autumn, which brought heavy rains, contributed much to the highest deposition fluxes of nutrients in autumn. The wet deposition could bring 2.04, 292.4, 8.13 and 45.8t/a of NO_2^- -N, NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P and SiO_3^{2-} -Si into the Zhanjiang Bay. Their deposition in autumn might cause phytoplankton to increase in seawater in short period, while in other seasons this phenomenon might be absent.

Key words: atmosphere wet deposition; nutrient; eutrophication; Zhanjiang Bay

大气湿沉降是除河流外另一向海洋输送营养盐的重要途径^[1-4].人类活动产生的氮高达140Tg/a^[5],但在大气中又有70%~80%的氮以大气干湿沉降途径返回到水体中^[6-7].降雨能加剧水体的富营养化,改变水体的营养盐结构和pH值,影响水体的初级生产力,对水体生态系统影响很大^[8-15].例如,日本海每年因大气氮沉降带来10%的新生产力^[16],而磷在东非维多利亚湖中的湿沉降量达40~60kg/(m²·a)^[17].可见湿沉降中氮、

磷的影响不可忽视.

人类活动对降雨中营养盐的浓度影响很大^[6,8].随着经济的快速发展,由于人类活动产生

收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41476066,41476010);广东省自然科学基金资助项目(2016A030312004);广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目(Yq2014004);广东海洋大学创新强校项目(GDOU2014050201);广东海洋大学校选项目(1312437)

* 责任作者, 讲师, fxzhou@gdou.edu.cn

的 NH_x 、 NO_x 等气体的释放量成倍增加,因而造成大气湿沉降中营养盐的量也随之增加^[6-8,18-19]. NH_x 主要来自农业施肥、工业生产以及生活中有机废弃物的排放, NO_x 主要来自化石燃料和生物体的燃烧^[6]. 近几十年来,我国汽车工业迅猛发展.1990年,我国 NO_x 的排放量为 8.42Mt,比 1950 年增长近 33 倍,排放强度最大的是我国中东部地区^[20].

目前,我国对于黄海、东海、长江口、珠江口、太湖等区域湿沉降中营养盐的研究已取得一定的成果^[21-25],但关于湛江湾湿沉降中营养盐的研究相对较少.湛江湾濒临南海,受台风影响较大,每年均有台风带来的强降雨^[26].湛江湾海水的富营养化情况也较明显^[27].所以研究湛江湾大气湿沉降中的营养盐及其对海水生态系统的影响有重要意义.本研究于 2015 年 5 月~2016 年 4 月对湛江湾的雨水样品进行了收集,测定了雨水中营养盐(NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-})的浓度,分析了湛江湾雨水中营养盐浓度和湿沉降通量随时间的变化情况,并讨论湛江湾湿沉降对海水生态系统的影响.

1 材料与方法

1.1 环境背景

湛江湾位于雷州半岛东北侧,濒临南海,属于半封闭型海湾(图 1).该区域的降雨量随时间变化明显,一般在一年中的 8、9 月份降雨量最大,6 月份的降雨量次之^[28].湛江湾的降雨量主要受台风影响,台风的盛行期一般在 6~10 月,因而在这几个月份由台风带来的降雨量比重较大^[29].

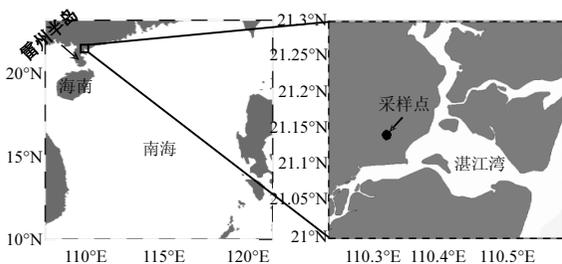


图 1 采样站位(黑点)

Fig.1 The location of the sampling station (black dot)

1.2 样品采集

本研究在如图 1 所示位置设置了 1 个固定采样点(110°18.8'E,21°8.6'N),该采样点位于广东海洋大学科技楼楼顶(高约 15m),周围无高大建筑和其他污染源.于 2015 年 5 月~2016 年 4 月采集湿沉降样品.采样点距湛江湾很近(约 3km),对采样点营养盐湿沉降情况的研究可以近似反映湛江湾营养盐湿沉降的状况.采集湿沉降样品所用的采雨器(直径 60cm)和保存湿沉降样品所用的聚乙烯瓶均预先在实验室内用 30%(v/v) 的 HCl 浸泡 24h,然后用超纯水(Dura 12,泽拉布仪器科技(上海)有限公司)冲洗干净,待干燥后用洁净的塑料袋包好,备用.为避免污染,将采雨器置于距楼顶 1.5m 高处,降雨之前打开,结束后立即取回(降雨量小于 0.5mm 视为无效降雨,未收集).采集后的水样用孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤,过滤后的水样储存在聚乙烯瓶中,冷冻保存,所有样品均在 3 个月内测定.每次采集水样时都记录降水体积和降水时间.

1.3 实验方法

本研究中,测定的项目包括 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} .这 4 种营养盐均用连续流动分析仪(San⁺⁺, 荷兰 Skalar)测定.其中, NO_2^- 采用重氮偶氮比色法; $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ 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.测得的 $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ 的浓度减去 NO_2^- 的浓度就可得到 NO_3^- 的浓度.实验过程中所用的水均为超纯水.

1.4 数据处理

以月份为统计单位,计算调查期间营养盐的月平均浓度.平均浓度采用浓度与降雨量的加权平均值,其计算公式如下:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

式中: C 为该时间段营养盐的平均浓度, $\mu\text{mol/L}$; n 为该时间段内降雨的次数; C_i 为该时间段内第 i 次降雨的营养盐浓度, $\mu\text{mol/L}$; Q_i 为第 i 次降雨的量,mm.营养盐的季节浓度平均值和年浓度平均值的计算方法与月平均浓度的计算方法一致.

营养盐的月湿沉降通量 $[\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})]$ 等于该时期内所有降雨量与营养盐浓度乘积的和.营

养盐的季湿沉降通量[mmol/(m²·季度)]和年湿沉降通量[mmol/(m²·a)]的计算方法同营养盐的月湿沉降通量计算方法一致。

2 结果与讨论

2.1 湛江湾的降雨量和雨水中营养盐的浓度

2015年5月~2016年4月在采样点(图1)共收集总降雨量为2131.5mm(图2)。在2月份,降雨量较少,未收集到有效样品。在10月份,降雨量最大,达到了437.9mm,占全年总降雨量的21%(图2)。主要原因是10月份有超强台风“彩虹”过境,给湛江湾带来了大量降雨。调查期间,湛江湾降雨量在不同季节的大小顺序为:秋(9~11月)>夏(6~8月)>冬(12月~次年2月)>春(3~5月)。降雨量主要集中在夏季和秋季,占全年总降雨量的75%,比多年平均降雨量(1523mm)偏高。2015年11月和2016年1月的降雨量也比往年偏大^[30](图2),主要原因是受厄尔尼诺的影响。据美国天气预报中心的信息,最近一次的厄尔尼诺开始于2014年10月,发展于2015年,2015年底~2016年4月厄尔尼诺处于衰亡阶段。前人的研究认为,厄尔尼诺现象会对中国降雨产生较大的影响,当厄尔尼诺处于发展阶段,中国江淮流域夏季降雨偏多,而黄河流域、华北及江南等地降水偏少;当厄尔尼诺处于衰亡阶段时正好相反^[31]。因此,调查期间的降雨量异常主要是受到厄尔尼诺现象的影响。

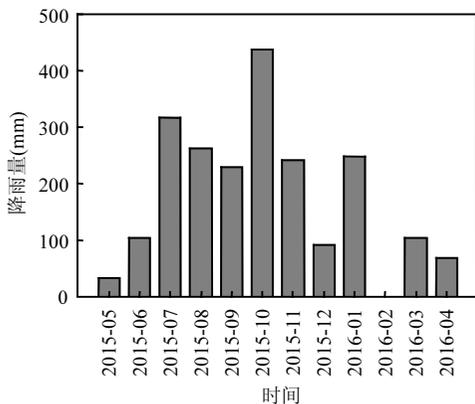


图2 降雨量的月变化情况

Fig.2 The change of rainfall in different month

由于2月份未采集到有效样品,在后面的内

容中,除特殊说明外,不考虑2月份的湿沉降。湛江湾湿沉降中营养盐月平均浓度的变化情况见图3。 NO_3^- 与 PO_4^{3-} 浓度变化情况相似,呈春、冬季较高,夏、秋季较低的特征;而 NO_2^- 与 SiO_3^{2-} 的浓度则是秋季最高,冬季最低(图3)。长江口湿沉降中 NO_3^- 和 SiO_3^{2-} 的浓度变化情况与本研究比较相似^[32]。雨水中 NO_3^- 的前体是大气中的氮氧化物,大气中的氮氧化物主要来源于汽车尾气、核电厂以及土壤微生物活动^[33-34]。降雨量较大时,空气中累积的氮氧化物浓度较低,导致雨水中 NO_3^- 的浓度较低;降雨量小时,空气中累积的氮氧化物浓度较高,导致雨水中 NO_3^- 的浓度也较高^[22]。大气中的硅主要来自于岩石、土壤的风化作用^[35],大气中沙尘颗粒在雨水中的溶解是雨水中硅的主要来源^[22,36]。雨水中 SiO_3^{2-} 的浓度在降雨量较大的时期较高,其中,在台风发生的月份最高(10月)(图2,图3),主要原因可能是台风导致岩石、土壤风化产生的颗粒物进入大气中的量较多,进而导致溶解在雨水中的颗粒物较多,因而造成雨水中 SiO_3^{2-} 的浓度较高^[22,36]。雨水中 NO_2^- 的来源与化石燃料的燃烧有密切关系^[37]。大气中磷的来源较少,主要以颗粒态存在,矿物沙尘是大气中磷的主要来源^[38-39]。雨水中 NO_2^- 和 PO_4^{3-} 的浓度随降雨量的变化没有明显的规律(图2,图3),影响因素可能多样,有待进一步研究。

对于湿沉降中的营养盐而言,除了降雨量外,其气团轨迹来源的差异也对雨水营养盐组分有较大影响。不少研究表明,陆地来源的气团会带来高浓度的营养盐,而海洋气团来源则相对低很多^[21,40-42]。为进一步研究不同气团来源对湛江湾湿沉降营养盐的影响,利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的气团反向轨迹模型对降雨期间的气团来源进行分析。相关研究表明,水汽输送量的最大值一般出现在距离地面2km高度附近^[43]。本研究选择气团的高度为1500m,将湿沉降发生期间的中间时刻作为起始时间,向后延伸72h作气团后向运行轨迹。通过分析湿沉降发生期间的气团运行轨迹,发现影响湛江湾湿沉降的气团大致分为3类(图4):A类气团来源于东南亚和海南省方向,B类气团来源于湛江以北的中国大陆,C

类气团来源于南海和东海海域.

A 类气团降水主要发生在西南季风主导的春季和夏季,约占总降水次数的 60%,是湛江湾湿沉降中主要的气团来源.这类气团一半源于 1000~1500m 的高空,途径泰国、老挝、越南和海南岛到达湛江湾.这些国家大多属于发展中国家,受到人类活动排放的大气污染物的影响,降水中营养盐含量较高,尤其是 NO_3^- 和 SiO_3^{2-} 明显高于其他气团轨迹来源(表 1).B 类气团来源于湖北、湖南、广西和粤西地区,这类气团主要发生在 7~10 月.此类气团影响的降水中的 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 浓度相对低于 A 类气团.C 类气团来源于南海和东海,主要发生在降雨量较大的夏季和秋季,期间带来的是洁净的海洋气源,受污染影响较小,该气团影响的降水中营养盐含量最低,这与黄海千里岛受海源气团影响带来湿沉降的结果和太平洋观测的结果相似^[21,44].总之,受到人类活动排放污染物的影响,来源于陆地方向的气团带来的降水中营养盐含量较高,而远离污染源的海源气团带来的降水中营养盐含量较低.

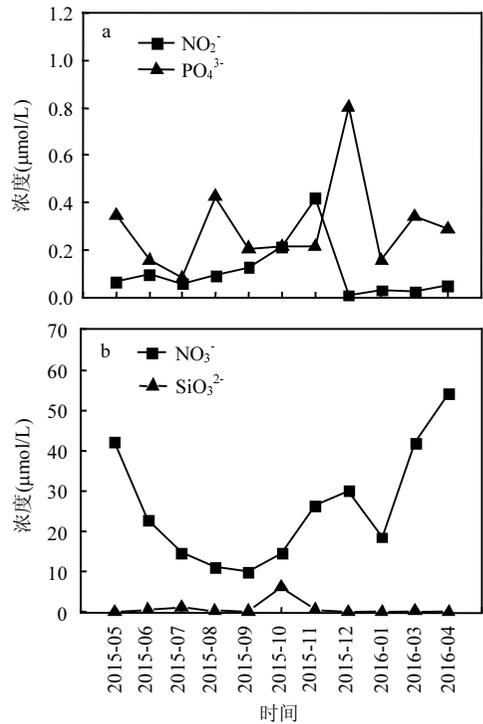
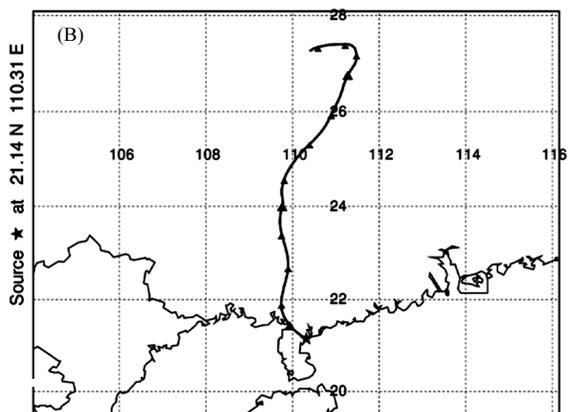
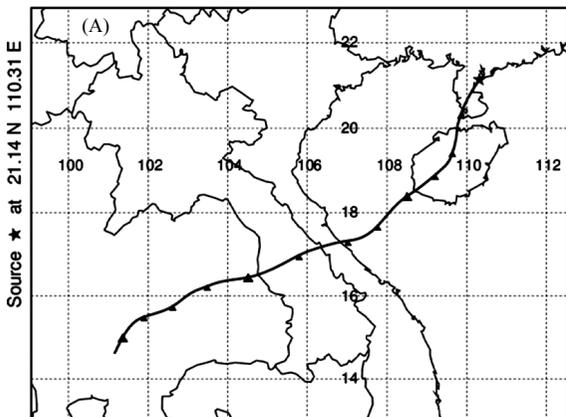


图3 营养盐月平均浓度的变化情况
Fig.3 Monthly average concentrations of nutrients

表 1 不同气团来源降水的化学组分

Table 1 Chemical component of rainwater from different back-trajectory sources

类别	次数	降雨量(mm)	NO_2^- ($\mu\text{mol/L}$)	NO_3^- ($\mu\text{mol/L}$)	PO_4^{3-} ($\mu\text{mol/L}$)	SiO_3^{2-} ($\mu\text{mol/L}$)
A	41	754.61	0.11	40.86	0.69	9.23
B	13	640.43	0.12	29.14	0.26	2.68
C	14	548.81	0.18	25.13	0.27	1.25



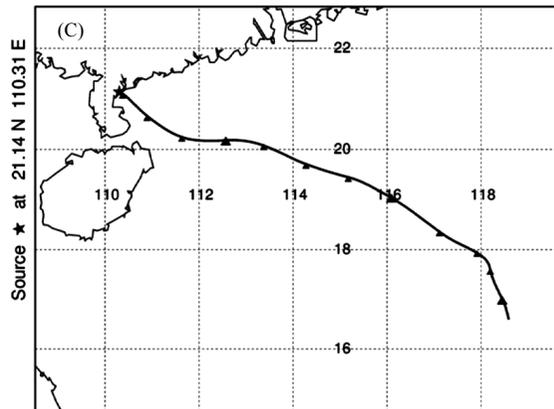


图 4 气团反向轨迹

Fig.4 The air mass back trajectory

表 2 不同区域大气湿沉降中营养盐的浓度($\mu\text{mol/L}$)Table 2 Atmospheric wet deposition of nutrients in different areas ($\mu\text{mol/L}$)

区域	时间		NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SiO_3^{2-}	文献
湛江湾	春季	范围 ^a	0.03~0.07	41.86~54.21	0.29~0.35	0~0.16	本研究
		均值 ^b	0.04	45.99	0.33	0.09	
	夏季	范围	0.06~0.10	11.10~22.90	0.08~0.42	0.27~1.06	
		均值	0.08	14.55	0.23	0.66	
	秋季	范围	0.13~0.42	10.01~26.35	0.21~0.22	0.13~6.10	
		均值	0.25	16.52	0.21	3.15	
	冬季	范围	0.01~0.03	18.56~30.10	0.16~0.80	0~0.04	
		均值	0.03	20.90	0.33	0.01	
2015-05~2016-04		范围	0.01~0.42	10.01~54.21	0.08~0.80	0~6.10	
		均值	0.14	19.50	0.25	1.56	
长江口	2000-05~2001-04	范围	0.017~0.38	3.61~58.66	0.0059~0.14	1.06~7.59	[32]
		均值	0.11	20.23	0.045	3.43	
		范围	-	-	0.04~0.42	-	[22]
太湖	2002-07~2003-06	范围	-	7.9~219	-	-	[33]
		均值	-	54	-	-	
北京	2005	均值	-	173.1	-	-	[34]
深圳	2004	均值	-	63.60	-	-	[47]
黄海	2009~2010	均值	-	52.42	-	-	[21]
	1992~1993	均值	-	35.5	0.103	4.14	[48]
东海	2009~2010	均值	-	24.30	-	-	[22]
珠江口	2006~2007	均值	-	37.14	-	-	[24]
韩国沿海	2004~2005	均值	-	23.00	-	-	[49]
日本沿海	2004	均值	-	11.60	-	-	[50]
太平洋	2008~2009	范围	-	0.16~18.0	-	-	[44]

注:^a营养盐浓度的季节变化范围和年变化范围分别是指在该季节和该年中不同月份营养盐月平均浓度的变化范围;^b营养盐的季节平均值和年平均值都是加权平均值,计算方法见1.4.

与其他区域比较,湛江湾雨水中 NO_3^- 的浓度普遍低于内陆(北京、深圳、太湖)以及河口(长江口、珠江口),但高于太平洋区域(表 2),这一现象

基本符合人类活动对雨水中 NO_3^- 浓度影响的一般规律(内陆>近海>海洋)^[21,33,44-46].与东海、黄海以及韩国沿海相比,湛江湾雨水中 NO_3^- 的浓度略

低(表 2),主要原因可能是东海、黄海以及韩国沿海距离人口密集、人类经济快速发展的区域较近,陆地输送的物质对东海、黄海以及韩国沿海湿沉降的影响较大^[21,33].与 NO_3^- 相似, SiO_3^{2-} 的浓度也低于长江口和黄海(表 2).雨水中的硅主要来自大气中沙尘颗粒的溶解^[22,36],湛江湾位于中国大陆的较南端,空气中的沙尘颗粒可能低于长江口和黄海,这可能是湛江湾雨水中 SiO_3^{2-} 浓度较低的主要原因. PO_4^{3-} 的浓度高于长江口和黄海区域,这可能与湛江湾邻近区域独特的农业结构有关,有待进一步研究.

2.2 湛江湾营养盐的湿沉降通量

为了计算湛江湾营养盐的季湿沉降通量和年湿沉降通量,需要对 2016 年 2 月的降雨量及雨水中的营养盐浓度做出估计.据广东省气象局报道,广东省西部地区在 2016 年 2 月的降雨量的变化范围为 30~40mm,因此假定 2016 年 2 月湛江湾的降雨量为 35mm.根据 2016 年 1 月和 3 月湿沉降营养盐的平均浓度推断 2016 年 2 月份雨水中 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的浓度分别为 0.03、30.21、0.25 和 0.08 $\mu\text{mol/L}$.

调查期间,湛江湾 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的年湿沉降通量分别为 0.297、42.62、0.535 和 3.338 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (表 3).其中湿沉降通量最大的是 NO_3^- ,其次是 SiO_3^{2-} 、 NO_2^- 和 PO_4^{3-} 的湿沉降通量都很低.付敏等^[23]对长江口湿沉降中营养盐的研究发现了相似的研究结果. NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的湿沉降通量都在降雨量最大的秋季最高(图 2;表 3),它们在秋季的湿沉降通量占全年的百分比分别为 76%、36%、36% 和 86%,说明降雨量对这些营养盐的湿沉降通量影响显著,其他研究也发现了相似的结果^[22-23,51-52].通过 2.1 的分析发现的影响雨水中营养盐浓度的影响因素,可以推断营养盐的湿沉降通量除了受降雨量影响外,也受人类活动、不同来源的气团、台风等因素的影响.表 3 还给出了其他区域的营养盐年湿沉降通量.与其他区域相比,湛江湾的营养盐年湿沉降通量相对较高(表 3),然而湛江湾雨水中营养盐的浓度总体上相对较低(表 1),因此可以推断湛江湾营养盐较高的湿沉降通量主要与该区域

的降雨量大有关.湛江湾受台风影响较大,2015 年 10 月有超强台风过境,由台风带来的强降雨对湛江湾较高的营养盐湿沉降通量有重要贡献.

表 3 不同区域的营养盐湿沉降通量

Table 3 Wet deposition fluxes of nutrients in different areas

研究区域	时间	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SiO_3^{2-}
湛江湾	春季 ^a	0.008	9.289	0.066	0.018
	夏季	0.054	9.928	0.154	0.454
	秋季	0.226	15.01	0.194	2.859
	冬季	0.010	8.349	0.121	0.006
	2015~2016 ^b	0.297	42.62	0.535	3.338
长江口 ^[23]	2004~2005	0.06	14.67	0.17	0.10
东海近岸 ^[22,53]	2000~2003	-	-	0.07	1.95
	2008~2009	-	-	0.08	2.05
韩国沿海 ^[54]	-	-	20.97	-	-

注:^a季度湿沉降通量, $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{季度})$;^b年湿沉降通量, $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.

利用本研究计算得到的营养盐年湿沉降通量及湛江湾的水域面积(490 km^2)^[55]估算雨水给湛江湾带来的营养盐的量.估算得到湛江湾 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P 和 SiO_3^{2-} -Si 的湿沉降量(以元素计)分别为 2.04、292.4、8.13 和 45.8t/a.

2.3 湛江湾营养盐湿沉降对海水的影响

在其他条件适宜的情况下,营养盐浓度的增加往往导致浮游植物的量增加^[9,23,56-59].湿沉降具有间歇性和短暂性的特征.雨水沉降到海水表面后,能够在短时间内影响海水中的营养盐浓度或结构,进而在短时间内影响浮游植物的生长^[60].

为研究湿沉降在短时间内对湛江湾海水生态系统的影响,需将湿沉降中的营养盐浓度和组成与海水中的进行比较.施玉珍等^[27]对 2011 年湛江湾海水中的营养盐进行了研究并给出了春、夏、秋、冬 4 个季节 $\text{DIN}(\text{NO}_2^-+\text{NO}_3^-+\text{NH}_4^+)$ 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 的浓度平均值(表 4).将本研究获得的湿沉降中营养盐的数据与施玉珍等^[27]给出的 2011 年湛江湾海水中的营养盐数据进行比较具有一定的意义.通过比较发现,不同季节湿沉降中 $\text{NO}_2^-+\text{NO}_3^-$ 的浓度普遍低于相应季节海水中 DIN 的浓度(表 4).由于没有获得湿沉降中 NH_4^+ 的数

据,无法判断雨水沉降到海水表面后在短时间内对海水中 DIN 浓度的影响情况.湛江湾湿沉降中不同季节的 SiO_3^{2-} 和 PO_4^{3-} 的浓度均低于相应季

节海水中相应营养盐的浓度(表 4),说明湛江湾湿沉降可能在短时间内导致湛江湾海水中 SiO_3^{2-} 和 PO_4^{3-} 的浓度降低.

表 4 不同季节湛江湾雨水和海水中的营养盐季节平均值的比较

Table 4 The comparison of average nutrients in rain and seawater of the Zhanjiang Bay in different seasons

项目	季节	$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ($\mu\text{mol/L}$)	DIN ($\mu\text{mol/L}$)	PO_4^{3-} ($\mu\text{mol/L}$)	SiO_3^{2-} ($\mu\text{mol/L}$)	$(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)/\text{P}$ (摩尔比)	N/P (摩尔比)	Si/P ^c (摩尔比)	Si/ $(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)$ (摩尔比)	Si/N ^c (摩尔比)
雨水 ^a	春	46.03	-	0.33	0.09	144	-	0.22	0.002	-
	夏	14.63	-	0.23	0.66	115	-	5.33	0.039	-
	秋	16.77	-	0.21	3.15	80	-	10.65	0.151	-
	冬	20.93	-	0.33	0.01	78	-	0.02	0.001	-
海水 ^b	春	-	51.4	2.90	31.3	-	20.8	10.79	-	0.61
	夏	-	24.3	2.58	17.6	-	10.9	6.82	-	0.72
	秋	-	41.3	3.42	38.8	-	6.29	11.35	-	0.94
	冬	-	36.8	0.48	25.4	-	91.6	52.9	-	0.69

注:^a 雨水中营养盐的数据为本研究所获得的数据;^b 海水中营养盐的数据来自施玉珍等^[27];^c 施玉珍等^[27]未给出不同季节海水中的Si/P和Si/N的平均值,本表中海水的Si/P和Si/N的季节平均值由施玉珍等^[27]给出的营养盐浓度的季节平均值估算得出.

浮游植物通常按一定的比值吸收利用水中的营养盐(N:P:Si=16:1:16,摩尔比; N= $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$, P= PO_4^{3-} , Si= SiO_3^{2-})^[61].某种营养盐的相对浓度较低可能会对浮游植物的生长起限制性作用^[62-63].调查期间,湛江湾雨水中的 $(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)/\text{P}$ 在春、夏、秋、冬4个季节的平均值分别为144、115、80、78,雨水中 NH_4^+ 的存在会使雨水中的N/P值高于 $(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)/\text{P}$ 值,表明湛江湾雨水对于浮游植物的生长需求来说具有较丰富的氮,磷相对较缺乏;Si/P在春、夏、秋、冬4个季节的平均值分别为0.22、5.33、10.65、0.02, Si/ $(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)$ 在4个季节的平均值分别为0.002、0.039、0.151、0.001,雨水中 NH_4^+ 的存在会使雨水中的Si/N值低于Si/ $(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)$ 值,表明湛江湾雨水对于浮游植物的生长需求来说硅也比较缺乏.湛江湾湿沉降与长江口湿沉降给当地海水中浮游植物生长带来的营养盐的结构组成比较相似^[23].施玉珍等^[27]基于2011年的调查数据发现,秋季湛江湾海水中的氮对浮游植物的生长存在一定程度的限制,由于湛江湾雨水在秋季含有相对较丰富的氮,因而秋季雨水的沉降可能在短时间内对湛江湾海水中的浮游植物生长有一定的促进作用.在冬季,湛江湾海水中的磷和硅比较缺乏^[27,62-63],冬季湛江湾雨水中的磷和硅

也比较缺乏,因而冬季湛江湾雨水的沉降可能在短时间内不能缓解这一现象,也就是说冬季雨水的沉降在短时间内可能对湛江湾海水中浮游植物生长的促进作用不明显.春季和夏季,湛江湾海水中的硅对浮游植物的生长存在一定程度的限制^[27,62-63],这两个季节湛江湾雨水中的硅也比较缺乏,湛江湾的湿沉降可能在短时间内不能缓解海水中的硅限制情况,说明春季和夏季湛江湾的湿沉降在短时间内可能对浮游植物生长的促进作用不明显.

3 结论

受厄尔尼诺影响,2015年5月~2016年4月湛江湾的降雨量(2132mm)明显高于多年平均降雨量(1523mm).秋季台风过境给湛江湾带来了大量降雨.湛江湾雨水中的营养盐具有明显的变化特征, NO_2^- 和 SiO_3^{2-} 的浓度在夏季和秋季较高, NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的浓度在春季和冬季较高.降雨量、人类活动、不同来源的气团、台风等可能是导致它们发生季节变化的主要原因.营养盐的湿沉降通量也具有明显的季节变化特征. NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 在秋季的湿沉降通量占全年的百分比分别为76%、36%、36%和86%,秋季台风过境带来的大量降雨是营养盐湿沉降通量

在该季节最高的重要原因.雨水每年给湛江湾带来的 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P和 SiO_3^{2-} -Si的量分别为2.04、292.4、8.13和45.8t.湛江湾雨水含有相对较丰富的氮,秋季雨水的沉降可能在短时间内促进海水中浮游植物的生长,其他季节雨水沉降的促进作用可能在短时间内不明显.

参考文献:

- [1] Duce R A, Laroche J, Altieri K, et al. Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean [J]. *Science*, 2008, 320(5878):893-897.
- [2] Anderson K A, Downing J A. Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen, phosphorus and silicon in an agricultural region [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2006, 176(176):351-374.
- [3] 林久人, 祁建华, 谢丹丹, 等. 海洋降水中无机离子浓度及湿沉降通量——中国海及西北太平洋降水的研究 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1706-1715.
- [4] 高会旺, 张英娟, 张 凯. 大气污染物向海洋的输入及其生态环境效应 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3):326-330.
- [5] Galloway J N. Acid deposition: Perspectives in time and space [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1995, 85(1):15-24.
- [6] 谢迎新, 张淑利, 冯 伟, 等. 大气氮素沉降研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4):897-904.
- [7] Galloway J N. The global nitrogen cycle: Past, present and future [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, 48(Suppl 2):669-678.
- [8] 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):208-210.
- [9] 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(1):111-121.
- [10] 李世清, 李生秀. 陕西关中湿沉降输入农田生态系统中的氮素 [J]. *农业环境保护*, 1999, 18(3):97-101.
- [11] 徐仁扣. 我国降水中的 NH_4^+ 及其在土壤酸化中的作用 [J]. *农业环境保护*, 1996, 15(3):139-140, 142.
- [12] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响 [J]. *林业科学*, 2001, 37(4):111-116.
- [13] Nosenko N. Fertilized to death [J]. *Nature*, 2003, 425:894-895.
- [14] Winchester J W, Escalona L, Meng F J, et al. Atmospheric deposition and hydrogeologic flow of nitrogen in northern Florida watersheds [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(11): 2215-2222.
- [15] 李 巍, 李 佳, 候锦湘, 等. 贵州龙里实验区酸性降水特征及变化趋势 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(2):155-160.
- [16] Kang J, Cho B C, Lee C B. Atmospheric transport of water-soluble ions (NO_3^- , NH_4^+ , and nss-SO_4^{2-}) to the southern East Sea (Sea of Japan) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(11):2369-2377.
- [17] Tamatamah R A, Hecky R E, Duthie H. The atmospheric deposition of phosphorus in Lake Victoria (East Africa) [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(2):325-344.
- [18] Holland E A, Detenner F J, Braswell B H, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1):7-43.
- [19] Rabalais N N. Nitrogen in aquatic ecosystems [J]. *Ambio*, 2002, 31(2):102-112.
- [20] 王文兴, 王 玮, 张婉华, 等. 我国 SO_2 和 NO_x 排放强度地理分布和历史趋势 [J]. *中国环境科学*, 1996, 16(3):161-167.
- [21] 韩丽君, 朱玉梅, 刘素美, 等. 黄海千里岩岛大气湿沉降营养盐的研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(7):1174-1184.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 余 辉, 张璐璐, 燕姝雯, 等. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率 [J]. *环境科学研究*, 2011, 24(11):1210-1219.
- [26] 杨新华. 湛江市的干旱状况及水资源的可持续利用 [J]. *华中农业大学学报:社会科学版*, 2001, 4:19-23.
- [27] 施玉珍, 张瑜斌, 孙省利. 湛江湾富营养化分布特征及与环境因子的关系 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(12):90-96.
- [28] 李福胜, 张 仲, 李 斌. 湛江市1951~2011年暴雨气候的变化特征 [J]. *广东气象*, 2012, 34(6):35-37.
- [29] 刘瑜华. 湛江市暴雨洪水与海潮灾害特点及防治对策分析 [J]. *建材与装饰*, 2007, 7:382-384.
- [30] 肖仕鼎, 黄其叙, 陈红宏. 湛江市水文特征 [J]. *广东水利水电*, 2008, 2:52-60.
- [31] 赵振国. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响, *大气科学*, 1996, 20:422-428.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 胡 敏, 张 静, 吴志军. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用 [J]. *中国科学B辑*, 2005, 35(2):169-176.
- [35] 胡 洋, 余 辉, 李中强. 湿沉降对湖泊水质及初级生产的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(1):75-80.
- [36] 韩贵琳, 刘丛强. 贵阳地区雨水化学与Sr同位素地球化学 [J]. *环境化学*, 2005, 24(2):213-218.
- [37] Chen H Y, Chen L D. Importance of anthropogenic inputs and continental-derived dust for the distribution and flux of

- water-soluble nitrogen and phosphorus species in aerosol within the atmosphere over the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008,113:D11303.
- [38] Ridame C, Guieu C. Saharan input of phosphate to the oligotrophic water of the open western Mediterranean sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002,47(3):856-869.
- [39] Anderson L D, Faul K L, Paytan A. Phosphorus associations in aerosols: What can they tell us about P bioavailability [J]. *Marine Chemistry*, 2010,120(1-4):44-56.
- [40] Avila A, Alarcón M. Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in NE Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 1999,33(11):1663-1677.
- [41] Harrison R M, Grenfell J L, Peak J D, et al. Influence of air mass back trajectory upon nitrogen compound composition [J]. *Atmospheric Environment*, 2000,34(10):1519-1527.
- [42] 王茜,王雪梅,钟流举,等.珠江口无机氮沉降规律及大气输送的研究 [J]. *环境科学学报*, 2009,29(6):1156-1163.
- [43] 张学文.气流对物质和能量输送量的垂直分布 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2009,3(2):1-5.
- [44] Jung J Y, Furutani H, Uematsu M. Atmospheric inorganic nitrogen in marine aerosol and precipitation and its deposition to the North and South Pacific Oceans [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2011,68(2):157-181.
- [45] Zhang J, Zhang G S, Bi Y F, et al. Nitrogen species in rainwater and aerosols of the Yellow and East China seas: Effects of the East Asian monsoon and anthropogenic emissions and relevance for the NW Pacific Ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011,25(3):GB3020.
- [46] 郑丹楠,王雪松,谢绍东,等.2010 年中国大气氮沉降特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(5):1089-1097.
- [47] 牛彧文,何凌燕,胡敏.深圳大气降水的化学组成特征 [J]. *环境科学*, 2008,29(4):1014-1019.
- [48] Zhang J, Chen S Z, Yu Z G, et al. Factors influencing changes in rain water composition from urban versus remote regions of the Yellow Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999,104(D1):1631-1644.
- [49] Jung J Y, Jang Y W, Arimoto R, et al. Atmospheric nitrogen deposition and its impact to Lake Sihwa in Korea from January 2004 to September 2005 [J]. *Geochemical Journal*, 2009,43(5):305-314.
- [50] Network Center for EANET. Data report on the acid deposition in the East Asian region 2004 [Z]. Niigata: Network Center for EANET, 2005.
- [51] Whitall D, Hendrickson B, Paerl H. Importance of atmospherically deposited nitrogen to the annual nitrogen budget of the Neuse River estuary, North Carolina [J]. *Environment International*, 2003,29(2):393-399.
- [52] 王江飞,周柯锦,汪小泉,等.杭嘉湖地区大气氮、磷沉降特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(9):2754-2763.
- [53] Zhang G S, Zhang J, Liu S M. Characterization of nutrients in the atmospheric wet and dry deposition observed at the two monitoring sites over Yellow Sea and East China Sea [J]. *Atmospheric Chemistry*, 2007,57:41-57.
- [54] Lee B K, Hong S H, Lee D S. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korean peninsula [J]. *Atmospheric Environment*, 2000,34:563-575.
- [55] 林应信,詹进源,史建辉,等.中国海湾志 [M]. 北京:海洋出版社, 1999:187-188.
- [56] 施玉珍,赵利容,柯盛,等.湛江湾海域营养盐的时空分布特征及潜在性富营养化研究 [A].//热带海洋科学学术研讨会暨第八届广东海洋湖沼学会、第七届广东海洋学会会员代表大会论文及摘要汇编 [C]. 2013:390-396.
- [57] Paerl H W. Enhancement of marine primary production by nitrogen-enriched acid rain [J]. *Nature*, 1985,315(6022):747-749.
- [58] 杜俊民,陈立奇,张远辉,等.台风“碧利斯”在厦门海域的酸沉降特征及其氮、磷营养盐对海洋的输入评估 [J]. *台湾海峡*, 2008,27(3):339-346.
- [59] 滕吉艳,史贵涛,薛文杰,等.崇明东滩大气湿沉降酸性特征 [J]. *环境化学*, 2010,29(4):649-653.
- [60] Zou L, Chen H T, Zhang J. Experimental 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.
- [61] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A, et al. The influence of organisms on the composition of sea-water [M]. *The Sea: Ideas and observations on progress in the study of the seas*, volume 2. New York, London: Interscience, 1963:26-77.
- [62] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, et al. Changes in nutrient structure of river - dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995,40(3):339-356.
- [63] Dortch Q, Whittedge T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions [J]. *Continental Shelf Research*, 1992,12(11):1293-1309.

致谢: 本实验的现场采样工作由广东海洋大学海洋与气象学院的研究生协助完成,在此表示感谢。

作者简介: 陈法锦(1981-),男,广东湛江人,副教授,博士,主要从事海洋生物地球化学研究.发表论文 20 余篇。