

平均浓度为 $2.8 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Su et al, 2015), 并呈现由近岸向外海逐渐降低的分布规律, 在垂直分布上, 水体中溶解铁的浓度随深度的变化较小 (朱逊驰, 2018)。海洋浮游植物对营养盐的吸收利

用大致遵循 N/P 比为 16 : 1 (Walsh, 1996) 以及 N/Fe 比为 465 : 1 (Rueter et al, 1992), 而东海的 N/Fe 比为 5357 : 1, 因此东海区域藻类的生长可能会受到生物可利用铁的限制。

表 1 我国近年来赤潮发生情况
Tab. 1 The occurrence of red tide in China in recent years

年代 Year	全国赤潮 发生次数 Number of red tide occurrences in China	东海赤潮 发生次数 Number of red tide occurrences in East China Sea	东海赤潮次数 占全国比例 Number of red tide in East China Sea to that of in China/%	渤海赤潮 发生次数 Number of red tide occurrences in Bohai	黄海赤潮 发生次数 Number of red tide occurrences in Yellow Sea	南海赤潮 发生次数 Number of red tide occurrences in South China Sea	全国赤潮面积 Area of red tide in China/km ²
2000	28	11	39	7	4	6	10650
2001	77	34	44	20	8	15	15000
2002	79	51	65	13	4	11	10000
2003	119	86	72	12	5	16	14550
2004	96	53	55	12	13	18	26630
2005	82	51	62	9	13	9	27070
2006	93	63	68	11	2	17	19840
2007	82	60	73	7	5	10	11610
2008	68	47	69	1	12	8	13738
2009	68	43	63	4	13	8	14102
2010	69	39	57	7	9	14	10892
2011	55	23	42	13	8	11	6076
2012	73	38	52	8	11	16	7971
2013	46	25	54	13	2	6	4070
2014	56	27	48	11	2	16	7290
2015	35	15	43	7	1	12	2809
2016	68	37	54	10	4	17	7484
2017	68	40	59	12	3	13	2189
2018	36	23	64	3	1	7	1107
2019	38	31	82	2	2	3	1991

资料来源: 中国海洋生态环境状况公报 (<https://www.mee.gov.cn/hjzl/shj/jagb/>); 中国海洋灾害公报 (<http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgg/zghyghgb/>)。

Sources: China marine environmental bulletin (<https://www.mee.gov.cn/hjzl/shj/jagb/>); China marine disaster bulletin (<http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgg/zghyghgb/>).

3.3 东海赤潮区营养物质来源讨论

一般而言, 海洋表层的营养盐来自三个部分, 分别是近岸河流海流输送、海底营养盐上翻和大气输送。在近岸河流输送向东海赤潮提供营养物质的研究中, 通常认为长江和钱塘江等是营养物质的主要来源, 然而, 20 世纪 90 年代长江流域的几次大洪水, 尽管向海域输送了大量的营养物质, 但在洪泛期间与期后并未见有大规模的东海赤潮发生 (田荣湘和翁焕新, 2005)。Poulton (2002) 的研究表明: 通过河流输送的营养物质, 一旦当河水和海水相遇时, 沉积作用使大部分营养物质进入河口的沉积物中, 无法将赤潮藻所需要的营

养物质, 特别是铁等限制性营养元素输送到赤潮发生区。而且, 河流输送的溶解铁在河口混合过程中也会出现清除型行为, 相当大比例的溶解铁在盐度范围较低的河口被清除出水体 (Bergquist and Boyle, 2006; Stolpe and Hassellöv, 2007)。影响该海域的海流除去长江和钱塘江的冲淡水这一途径, 还有一部分来自台湾暖流, 另一部分来自外海的黑潮。海流的方向随大气环流的季节变化而发生南北方向的改变, 携带外海水的高温低溶解铁的台湾暖流会被输送至东海, 但是不足以提供赤潮爆发所需的足量的营养物质 (Tian et al, 2020)。

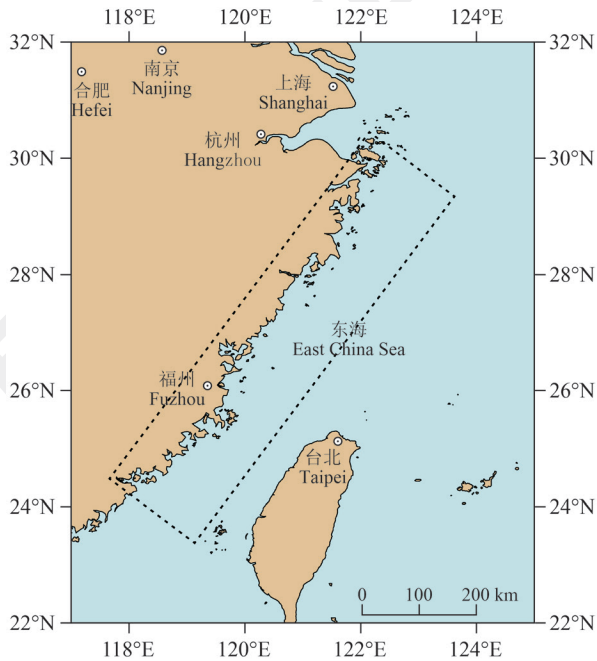


图1 东海赤潮高发区(虚线区域)

Fig. 1 Area with the high incidence of red tides in the East China Sea (dotted area)

另外,关于上升流输送营养盐可能性的研究表明:在冬季,在海洋的垂直方向上,由于海洋表面被冷却,造成上层海水温度低密度大,下层海水的温度高密度小,在重力和浮力的共同作用下产生对流运动。进入夏季后,由于表层海水被加热,造成温度高密度小的海水在上层,温度低密度大的海水在下层,因此不会产生热力影响的对流运动。虽然在夏季(6—10月)的浙江沿岸,有许多的非热力引起的上升流区(Liu and Gan, 2014),上升流带来丰富营养盐的同时,也带来了低温、高盐、缺氧的下层水,这些低温高盐缺氧的低层水,往往使上升流中心的生物量较少(雷鹏飞, 1984; 何德华等, 1987),而且,这种低温水在表层并非年年出现,而是时隐时现(许建平等, 1983)。随着全球变暖,海洋的分层越来越严重,混合层的深度也越来越浅,海洋中的上升流也会受到影响(Arrigo, 2005)。所以5、6月的东海,海水已进入夏季的垂直分层模式,即上层海水温度高密度小,下层海水温度低密度大,因此阻断了下层营养盐通过上翻向上输送。

由此可见,提供东海大规模赤潮发生所需的限制性营养物质来源,并非完全来自陆源输入和海域上升流,因此,必然还有其他的输入来源,而大气气溶胶输送有可能是重要的来源。夏季风

不断地从西南方带来暖湿气流,为东海赤潮的发生提供有利的水动力条件,而冬季风把西北部的气溶胶输送至东海上空,通过下沉气流把大气颗粒物沉降到海面,在大气颗粒物之间的胶结物中含有浮游植物所需要的铁、磷等限制性营养元素,当胶结物溶解于海水时,铁、磷被释放出来,为海洋生物提供营养成分,从而为赤潮爆发创造了有利的气象条件(翁焕新等, 2010)。

3.4 东海赤潮发生与大气气溶胶的输送

为了考察大气气溶胶输入对东海赤潮限制性营养元素的可能性, Tian and An (2013) 利用美国国家航空航天局(NASA)的逐日气溶胶资料(OMI A_i), 研究2005和2006年输送到东海上空的气溶胶与赤潮的关系时发现(表2), 在16次面积大于 300 km^2 的赤潮事件中, 有15次都与来自西北的气溶胶输送有关(图2), 二者的相关系数 R^2 达到了0.9807($P < 0.01$), 而且还与输送的路径有关。

有研究发现在我国大气气溶胶的干湿沉降与赤潮事件有关(Jing, 1994)。大气沉降除了对我国近海富营养化有重要贡献之外, 其突发性特征可能使初级生产力在短期内大幅度增加, 从而影响赤潮发生。陈莹等(2010)发现, 我国近海包括东海, 大气沉降的营养盐和部分微量元素可能超出了河流的输入量。翁焕新等(2006)通过对东海优势赤潮藻种进行的模拟试验结果显示: 在东海海水为背景的条件下, 当铁和磷的含量分别达到 $50 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞密度快速增长, 细胞个体发育良好, 表明了藻细胞发育严格受铁、磷营养浓度的控制。大气铁的输送与河流输入一起, 通过增加氮磷比, 诱发严重的磷限制, 并使得痕量金属富集, 为东海中甲藻和硅藻的爆发提供条件(Mackey et al, 2017)。Meng et al (2016)通过在东海长江口外表层海水中添加不同成分的气溶胶发现, 叶绿素浓度分别在添加含铁和溶解无机氮的气溶胶后出现最高值和最低值。这一结果表明: 在氮相对磷过量的东海赤潮区, 气溶胶铁比无机氮对于促进初级生产力更为重要。矿物粉尘和人为气溶胶的输入可能导致浮游植物群落结构的显著变化。

另外,关于“在赤潮发生之前往往有晴好天气出现”的现象,已有的研究表明:这也与大气气溶胶输送营养物质直接相关联,通过对2005—2006

年赤潮发生期间的下沉气流分析显示,在我国东海上空气溶胶存在的范围,都对应有垂直下沉气流,由于空气气流垂直下沉运动形成晴朗天气,而空气气流垂直上升运动时形成云和雨(伍荣生,1999),这种下沉气流不仅为赤潮发生提供了有利的光照条件,更重要的是气溶胶随下沉气流,为赤潮藻的爆发性增殖提供铁等微量营养物质。翁焕新等(2006)通过对东海优势赤潮藻种的模拟试验表明:在低光照度下,藻细胞吸收铁和磷的量明显高

于在高光照度下藻细胞吸收铁和磷的量。在光照充分的晴朗天气,藻类生长对限制性铁、磷营养元素的需求量远低于光照不够充分的阴雨天气,这是赤潮往往发生在晴朗天气的根本原因。

综上所述,不难理解,引发东海赤潮的“营养”和“气象水文”两个必要条件,均与大气气溶胶输送铁等限制性营养元素相关联,这表明了大气气溶胶输送铁等可能对引发东海赤潮可能起到关键作用。

表 2 2005 年和 2006 年东海赤潮事件与气溶胶记录(翁焕新等,2010)

Tab. 2 Record of aerosol and ECS red tide events in 2005 and 2006 (Weng H X et al, 2010)

日期 Date		地点 Site	面积 Area/km ²
东海赤潮事件 Red tide events	气溶胶记录 Aerosol records		
4月1日 1st, April	/	浙江中南部海域 South central Zhejiang Province	3000
5月24日—6月1日 24th, May—1st, June	5月24日 24th, May	长江口外海域 Outer Yangtze River Estuary	7000
5月30日—6月9日 30th, May—9th, June	5月30日 30th, May	浙江平阳南麂列岛附近海域 Nanji Islands in Pingyang, Zhejiang Province	500
6月3—5日 3rd—5th, June	6月2—3日 2nd—3rd, June	浙江省桃花岛、虾峙岛至韭山列岛海域 Taohua Island, Xiazhi Island and Jiushan Islands in Zhejiang Province	2000
6月8日 8th, June	6月6日 6th, June	长江口外 Outer Yangtze River Estuary	2120
6月8—11日 8th—11th, June	6月6日 6th, June	浙江省嵊山至西绿华山海域 Shengshan and West Lühuashan in Zhejiang Province	1300
6月8—15日 8th—15th, June	6月6日 6th, June	浙江松兰山至檀头山一带海域(赤潮监控区外) Songlanshan to Tantoushan in Zhejiang Province (outside the red tide monitoring area)	1600
6月10—13日 10th—13th, June	6月6日 6th, June	浙江南韭山列岛海域 South Jiushan Islands in Zhejiang Province	2000
6月15—21日 15th—21st, June	6月15日 15th, June	长江口海域 Yangtze River Estuary	400
6月16日 16th, June	6月15日 15th, June	浙江舟山附近海域 Zhoushan Island in Zhejiang Province	300
5月3—8日 3rd—8th, May	5月2—4日 2nd—4th, May	浙江舟山外至六横岛东南海域 Outer Zhoushan and southeast Liheng Island in Zhejiang Province	1000
5月14—17日 14th—17th, May	5月11日 11th, May	长江口外海域 Outer Yangtze River Estuary	1000
5月20—27日 20th—27th, May	5月19、20、23、27日 19th, 20th, 23rd, 27th, May	渔山列岛附近海域 Yushan Islands	3000
6月12—14日 12th—14th, June	6月9—12日 9th—12th, June	浙江南部海域(洞头岛至北麂列岛) Coast of south Zhejiang Province (Dongtou Island and Beilu Islands)	2100
6月15—21日 15th—21st, June	6月15日 15th, June	渔山列岛、象山附近海域 Yushan Islands and Xiangshan coast	1000
6月24—27日 24th—27th, June	6月19日 19th, June	浙江中部渔山列岛至韭山列岛海域 Coast of middle Zhejiang Province (Yushan Islands and Jiushan Islands)	1200

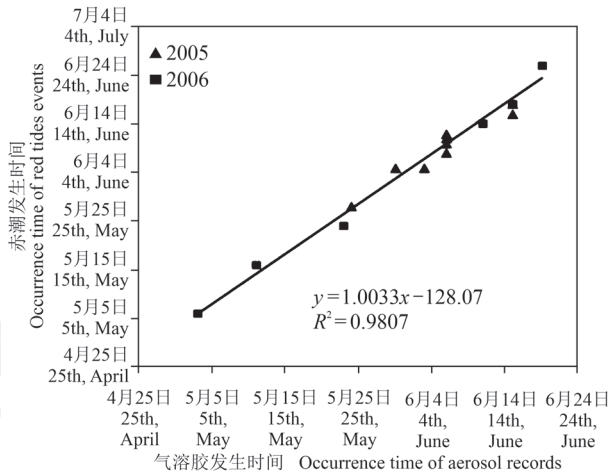


图2 东海赤潮与气溶胶发生时间的相关性

Fig. 2 Correlation between red tides in the East China Sea and aerosol occurrence time

4 总结与展望

气溶胶中溶解铁的输送对赤潮研究和海洋生物地球化学系统有着重要的影响。大量研究确定了铁对海洋生态系统以及全球大气的重要性, 并发现气溶胶中的铁在大气输送过程中发生酸溶解过程使得铁从不溶性转化成生物可利用性, 从而可能影响到赤潮发生。并对以下内容进行详细说明:

(1) 阐述了气溶胶中铁的酸溶解过程, 并对气溶胶以及大气环境中对酸溶解过程可能的影响因素进行探讨, 包括硫酸盐、草酸盐及氮元素对溶解过程的贡献。

(2) 对溶解铁的生物效应进行讨论, 表明生物有效性与溶解度的相关性以及不同来源的气溶胶中铁的溶解度的区别以及对初级生产力的影响。

(3) 归纳东海赤潮现状并总结赤潮发生的可能原因, 指出大气输送的重要性, 将气溶胶输送与赤潮发生结合分析, 初步验证了两者相关性, 为后续研究提供了有利的证据。

但目前相关研究仍有限, 为深入了解大气气溶胶输送铁等对引发东海赤潮的关键作用过程, 可以采用大气科学与生物地球化学研究手段相结合的方法, 首先以长时间尺度的东海赤潮与气溶胶事件实际观察数据为基础, 通过数值分析建立两者之间的时空关系, 然后通过对东海赤潮发生区域大气颗粒物、海水和赤潮藻进行同步取样, 利用同位素示踪技术, 定量分析大气气溶胶输送的铁等营养物质与赤潮藻爆发性增殖之间存在的

潜在联系, 再利用天气预报模式(WRF)和嵌套网格空气质量模式(NAQPMS)(王自发等, 2008)模拟大气气溶胶对铁等的输送及其沉降量, 最终分析评估大气气溶胶铁、磷输送对引发东海赤潮的关键作用, 并在此基础上探索建立由天气预报模式和嵌套网格空气质量模式支撑的可以类似于气象预报的赤潮预警预报系统。研究成果可能将在揭示赤潮的发生机理方面具有重要的学术意义, 在赤潮的预警预报方面提供了新的参考, 对有效防治赤潮灾害具有深远的实际意义。

需要说明的是, 赤潮的发生是一个复杂的过程, 还有许多没有考虑和讨论到的因子。如 Tian et al (2018) 提出的 Fe-P 的共同作用, Paerl (1997) 提出的 Fe-N 的配合作用等。但在我国东海的特殊地理位置上, 既有丰富的自然气溶胶的源地, 又有产生大量人为气溶胶的条件, 还有西风带的输送条件和季风提供的洋流条件等, 为研究赤潮灾害提供了丰富的科学资源。进一步的研究有待加强。

参考文献

- 陈莹, 庄国顺, 郭志刚. 2010. 近海营养盐和微量元素的大气沉降 [J]. *地球科学进展*, 25(7): 682-690. [Chen Y, Zhuang G S, Guo Z G. 2010. Atmospheric deposition of nutrients and trace elements to the coastal oceans: a review [J]. *Advances in Earth Science*, 25(7): 682-690.]
- 郭琳. 2013. 亚洲沙尘的长途传输对东海气溶胶中微量元素及其沉降的影响 [D]. 上海: 复旦大学. [Guo L. 2013. Effects of Asian dust on the atmospheric input of trace elements over the East China Sea [D]. Shanghai: Fudan University.]
- 何德华, 杨铭, 方绍锦, 等. 1987. 浙江沿岸上升流区浮游动物生态研究——I. 生物量及主要类群丰度 [J]. *海洋学报*, 9(1): 79-92. [He D H, Yang G M, Fang S J, et al. 1987. Study on zooplankton ecology in the upwelling area of Zhejiang Province — I. biomass and abundance of main taxa [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 9(1): 79-92.]
- 雷鹏飞. 1984. 浙江沿海上升流区无机总氮、溶解氧及生物量之间关系的初步探讨 [J]. *水产学报*, 8(3): 203-209. [Lei P F. 1984. The interrelationship among total inorganic nitrogen, dissolved oxygen and biomass in the coastal upwelling zone of Zhejiang [J]. *Journal of Fisheries of China*, 8(3): 203-209.]
- 田荣湘, 翁焕新. 2005. 赤潮灾害与大气尘埃铁输送的关系 [J]. *自然灾害学报*, 14(3): 38-43. [Tian R X, Weng

- H X. 2005. Relationship between harmful algal bloom and transport of iron in atmospheric dust [J]. *Journal of Natural Disasters*, 14(3): 38–43.]
- 王自发, 庞成明, 朱江, 等. 2008. 大气环境数值模拟研究新进展 [J]. *大气科学*, 32(4): 987–995. [Wang Z F, Pang C M, Zhu J, et al. 2008. IAP progress in atmospheric environment modeling research [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32(4): 987–995.]
- 翁焕新, 孙向卫, 陈静峰, 等. 2006. 铁和磷对原甲藻和隐藻暴发性增殖的限制与协同影响 [J]. *自然科学进展*, 16(6): 705–711. [Weng H X, Sun X W, Chen J F, et al. 2006. Limiting and synergistic effects of iron and phosphorus on fulminant proliferation of *Protodinoflagellates* and *Cryptoalgae* [J]. *Progress in Natural Science*, 16(6): 705–711.]
- 翁焕新, 田荣湘, 季仲强, 等. 2010. 冬季风输送大气颗粒物与东海赤潮的潜在关系 [J]. *科学通报*, 55(33): 3226–3235. [Weng H X, Tian R X, Ji Z Q, et al. 2010. Potential relationships between atmospheric particulate matter transported by monsoons and red tides in the East China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(33): 3226–3235.]
- 伍荣生. 1999. 现代天气学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社. [Wu R S. 1999. Modern synoptic principles [M]. Beijing: Higher Education Press.]
- 许建平, 曹欣中, 潘玉球. 1983. 浙江近海存在沿岸上升流的证据 [J]. *海洋湖沼通报*, (4): 17–25. [Xu J P, Cao X Z, Pan Y Q. 1983. Evidence for the coastal upwelling off Zhejiang [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (4): 17–25.]
- 张善发, 王茜, 关淳雅, 等. 2020. 2001—2017 年中国近海水域赤潮发生规律及其影响因素 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 56(6): 1129–1140. [Zhang S F, Wang Q, Guan C Y, et al. 2020. Study on the occurrence law of red tide and its influencing factors in the offshore waters of China from 2001 to 2017 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 56(6): 1129–1140.]
- 周名江, 朱明远. 2006. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展 [J]. *地球科学进展*, 21(7): 673–679, 764–765. [Zhou M J, Zhu M Y. 2006. Progress of the project “ecology and oceanography of harmful algal blooms in China” [J]. *Advances in Earth Science*, 21(7): 673–679, 764–765.]
- 朱逊驰. 2018. 中国近岸到陆架区典型水体中溶解铁的生物地球化学过程 [D]. 上海: 华东师范大学. [Zhu X C. 2018. Biogeochemical processes of dissolved iron in typical waters in the nearshore to continental shelf area of China [D]. Shanghai: East China Normal University.]
- Abram N J, Gagan M K, McCulloch M T, et al. 2003. Coral reef death during the 1997 Indian ocean dipole linked to Indonesian wildfires [J]. *Science*, 301(5635): 952–955.
- Aguilar-Islas A M, Wu J F, Rember R, et al. 2010. Dissolution of aerosol-derived iron in seawater: leach solution chemistry, aerosol type, and colloidal iron fraction [J]. *Marine Chemistry*, 120(1/2/3/4): 25–33.
- Arrigo K R. 2005. Marine microorganisms and global nutrient cycles [J]. *Nature*, 437(7057): 349–355.
- Baker A R, Jickells T D. 2006. Mineral particle size as a control on aerosol iron solubility [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(17): L17608. DOI: 10.1029/2006GL026557.
- Bergquist B A, Boyle E A. 2006. Iron isotopes in the Amazon River system: weathering and transport signatures [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1/2): 54–68.
- Boyd P W, Watson A J, Law C S, et al. 2000. A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization [J]. *Nature*, 407(6805): 695–702.
- Chen Y, Siefert R L. 2004. Seasonal and spatial distributions and dry deposition fluxes of atmospheric total and labile iron over the tropical and subtropical North Atlantic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 109(D9): D09305. DOI: 10.1029/2003JD003958.
- Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, et al. 1996. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean [J]. *Nature*, 383: 495–501.
- Cwiertny D M, Baltrusaitis J, Hunter G J, et al. 2008. Characterization and acid-mobilization study of iron-containing mineral dust source materials [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D05202. DOI: 10.1029/2007jd009332.
- Elsner M, Schwarzenbach R P, Haderlein S B. 2004. Reactivity of Fe(II)-bearing minerals toward reductive transformation of organic contaminants [J]. *Environmental Science & Technology*, 38(3): 799–807.
- Faust B C, Hoigné J. 1990. Photolysis of Fe(III)-hydroxy

- complexes as sources of OH radicals in clouds, fog and rain [J]. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, 24(1): 79–89.
- Fung I Y, Meyn S K, Tegen I, et al. 2000. Iron supply and demand in the upper ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(1): 281–295.
- Gao S, Hegg D A, Hobbs P V, et al. 2003. Water-soluble organic components in aerosols associated with savanna fires in southern Africa: identification, evolution, and distribution [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13). DOI: 10.1029/2002jd002324.
- Graham B, Mayol-Bracero O L, Guyon P, et al. 2002. Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia 1. characterization by NMR and GC-MS [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20): 8047. DOI: 10.1029/2001JD000336.
- Hofstetter T B, Schwarzenbach R P, Haderlein S B. 2003. Reactivity of Fe(II) species associated with clay minerals [J]. *Environmental Science & Technology*, 37(3): 519–528.
- Hsu S C, Gong G C, Shiah F K, et al. 2014. Sources, solubility, and acid processing of aerosol iron and phosphorous over the South China Sea: East Asian dust and pollution outflows vs. Southeast Asian biomass burning [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(15): 21433–21472.
- Ito A, Shi Z. 2016. Delivery of anthropogenic bioavailable iron from mineral dust and combustion aerosols to the ocean [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(1): 85–99.
- Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate [J]. *Science*, 308(5718): 67–71.
- Jing Z. 1994. Atmospheric wet deposition of nutrient elements: correlation with harmful biological blooms in northwest Pacific Coastal Zones [J]. *AMBIO*, 23(8): 464–468.
- Kundu S, Kawamura K, Lee M, et al. 2010. Comparison of Amazonian biomass burning and East Asian marine aerosols: bulk organics, diacids and related compounds, water-soluble inorganic ions, stable carbon and nitrogen isotope ratios [J]. *Low Temperature Science*, 68: 89–100.
- Laskin A, Gaspar D J, Wang W H, et al. 2003. Reactions at interfaces as a source of sulfate formation in sea-salt particles [J]. *Science*, 301(5631): 340–344.
- Li W J, Xu L, Liu X H, et al. 2017. Air pollution-aerosol interactions produce more bioavailable iron for ocean ecosystems [J]. *Science Advances*, 3(3): e1601749. DOI: 10.1126/sciadv.1601749.
- Liu Z Q, Gan J P. 2014. Modeling study of variable upwelling circulation in the East China Sea: response to a coastal promontory [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 44(4): 1078–1094.
- Ma C J, Tohno S, Kasahara M. 2005. A case study of the size-resolved individual particles collected at a ground-based site on the west coast of Japan during an Asian dust storm event [J]. *Atmospheric Environment*, 39(4): 739–747.
- MacKey K R M, Kavanaugh M T, Wang F J, et al. 2017. Atmospheric and fluvial nutrients fuel algal blooms in the East China Sea [J]. *Frontiers in Marine Science*, 4: 2. DOI: 10.3389/fmars.2017.00002.
- Mahowald N M, Kloster S, Engelstaedter S, et al. 2010. Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(22): 10875–10893.
- Martin J H, Coale K H, Johnson K S, et al. 1994. Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean [J]. *Nature*, 371(6493): 123–129.
- Martin J H, Fitzwater S E, Gordon R M. 1990. Iron deficiency limits phytoplankton growth in Antarctic waters [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 4(1): 5–12.
- Martin J H, Fitzwater S E. 1988. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic [J]. *Nature*, 331: 341–343.
- Meng X, Chen Y, Wang B, et al. 2016. Responses of phytoplankton community to the input of different aerosols in the East China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 43(13): 7081–7088.
- Meskhidze N. 2003. Iron mobilization in mineral dust: can anthropogenic SO₂ emissions affect ocean productivity? [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(21): 2085. DOI: 10.1029/2003GL018035.
- Muezzinoglu A, Cizmecioglu S C. 2006. Deposition of heavy metals in a Mediterranean climate area [J]. *Atmospheric Research*, 81(1): 1–16.
- Oakes M, Ingall E D, Lai B, et al. 2012. Iron solubility related to particle sulfur content in source emission and ambient fine particles [J]. *Environmental Science & Technology*, 46(12): 6637–6644.

- Paerl H W. 1997. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: importance of atmospheric deposition and groundwater as “new” nitrogen and other nutrient sources [J]. *Limnology and Oceanography*, 42(5part2): 1154–1165.
- Poulton S W. 2002. The low-temperature geochemical cycle of iron: from continental fluxes to marine sediment deposition [J]. *American Journal of Science*, 302(9): 774–805.
- Rueter J G, Hutchins D A, Smith R W, et al. 1992. Iron nutrition of *Trichodesmium* [M]// Marine Pelagic Cyanobacteria: *Trichodesmium* and other Diazotrophs. Dordrecht: Springer Netherlands: 289–306.
- Schroth A W, Crusius J, Sholkovitz E R, et al. 2009. Iron solubility driven by speciation in dust sources to the ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2: 337–340.
- Shi Z B, Krom M D, Jickells T D, et al. 2012. Impacts on iron solubility in the mineral dust by processes in the source region and the atmosphere: a review [J]. *Aeolian Research*, 5: 21–42.
- Stockwell W R. 1989. Chemistry of the natural atmosphere [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 70(25): 661.
- Stolpe B, Hassellöv M. 2007. Changes in size distribution of fresh water nanoscale colloidal matter and associated elements on mixing with seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(13): 3292–3301.
- Su H, Yang R J, Zhang A B, et al. 2015. Dissolved iron distribution and organic complexation in the coastal waters of the East China Sea [J]. *Marine Chemistry*, 173: 208–221.
- Summers D P. 2005. Ammonia formation by the reduction of nitrite/nitrate by Fe: ammonia formation under acidic conditions [J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 35: 299–312.
- Tian R X, An J L. 2013. Relationship between aerosol transport routes and red tide occurrences in the East China Sea [J]. *Environmental Earth Sciences*, 69: 1499–1508.
- Tian R X, Chen J F, Sun X W, et al. 2018. Algae explosive growth mechanism enabling weather-like forecast of harmful algal blooms [J]. *Scientific Reports*, 8: 9923. DOI: 10.1038/s41598-018-28104-7.
- Tian R X, Lin Q, Li D W, et al. 2020. Atmospheric transport of nutrients during a harmful algal bloom event [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 34: 101007. DOI: 10.1016/j.rsma.2019.101007.
- Walsh J J, Steidinger K A. 2001. Saharan dust and Florida red tides: the cyanophyte connection [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C6): 11597–11612.
- Walsh J J. 1996. Nitrogen fixation within a tropical upwelling ecosystem: evidence for a Redfield budget of carbon/nitrogen cycling by the total phytoplankton community [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C9): 20607–20616.
- Yang T J, Chen Y, Zhou S Q, et al. 2020. Solubilities and deposition fluxes of atmospheric Fe and Cu over the northwest Pacific and its marginal seas [J]. *Atmospheric Environment*, 239: 117763. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117763.
- Zhang D Z. 2004. Size change of Asian dust particles caused by sea salt interaction: measurements in southwestern Japan [J]. *Geophysical Research Letters*, 31(15): L15102. DOI: 10.1029/2004GL020087.