

· 综 述 ·

南海氮循环几个重要过程研究的新进展

杨进宇*, 高树基

(厦门大学 海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361102)

摘要: 边缘海连接陆地和开阔大洋, 是氮循环过程非常活跃和复杂的区域。南海是世界上最大的边缘海之一, 是研究边缘海氮循环的热点区域。重点总结和归纳了南海外源氮输入、上层水体氨氮动力学过程和颗粒态氮动力学过程的新进展: 南海氮循环过程广泛受到人为活动的影响, 表现为人为排放进入南海的外源氮持续增加; 南海上层水体氨氮的动力学过程与营养盐跃层有关, 并受到黑潮入侵的影响; 上层水体中不同颗粒态氮同位素信号高度相似, 表明氮元素的快速运转; 有别于其他陆架边缘海, 南海颗粒态氮同位素特征在向下传输过程中存在显著改变。

关键词: 南海; 海洋氮循环; 外源氮; 颗粒态氮动力学; 氨氮动力学

中图分类号: P 76

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2018)06-0741-07

对于大多数海洋生态系统而言, 氮元素是海洋初级生产力和输出生产力的主要限制因子之一, 其源汇格局对于调控海洋生物泵效率和大气 CO_2 浓度有重要意义^[1]。另外, 氮循环过程中会释放温室气体 N_2O , 其温室效应约为 CO_2 的 300 倍, 定量估算其释放通量对于评估大气温室效应和全球气候变化至关重要^[2]。工业革命(18 世纪 60 年代)以来, 人为排放的活性氮日益增加, 其经河流和大气传输进入海洋的通量已与海洋中生物固氮的通量相近^[3-4]。外源氮的输入可能干扰海洋中不同氮组分的相互转化, 改变海洋氮库的动态平衡, 影响氮与其他生源要素循环的相互耦合关系, 可能导致海洋生态系统的剧变, 该现象在边缘海将尤为显著, 从而引起关注^[5]。边缘海环境因子多变, 其内部氮循环过程, 尤其是相关定量和作用机制研究, 还存在诸多不确定性。此外, 需要进一步探索和评估边缘海氮循环过程对人为活动和气候变化的响应及反馈。

南海是西北太平洋最大的边缘海, 具有典型的热带-亚热带气候特征, 其表层环流和生物地球化学过程主要受东亚季风的影响^[6]。南海被人口密集的亚洲大陆和岛屿包围, 形成半封闭状态, 周边河流携带大量陆源物质汇入^[7]; 另一方面, 南海海盆区属于大洋主控型边缘海, 经吕宋海峡这唯一的深水通道与开阔的

西北太平洋进行水体和营养物质的交换^[8-9]。此外, 南海及其周边海域也是全球受到人为活动影响最为显著的区域之一^[4]。诸多过程相互影响使得南海的氮收支和内部循环过程相对复杂; 同时, 也使南海成为探究边缘海氮循环过程非常好的试验场^[10]。随着同位素示踪技术的发展和成熟, 其在南海氮循环研究中被广泛应用。本文中针对南海外源氮输入的变化, 上层水体中氨氮动力学过程, 以及颗粒态氮动力学过程的相关研究进行总结和归纳, 重点展示南海氮源、氮的内部循环和氮汇等过程的新进展。

1 南海外源氮输入的变化

1.1 南海外源氮输入通量

外源氮是指从海洋外部进入海洋内部的新生氮, 外源氮输入能够有效地改变海-气界面 CO_2 通量稳态平衡^[4]。对于边缘海来说, 河流输入、固氮作用和大气氮沉降是最为重要的外源氮输入途径(表 1)。南海周边河流输入无机氮通量约为 64.0 Gmol/a, 其中珠江和湄公河总贡献量高达 62%^[11]; 而河流输入的有机氮通量仅为 33 Gmol/a^[18]。河流携带的大量营养物质具有较高的氮磷比(摩尔比高达 80 : 1)^[18], 可能缓解或

收稿日期: 2018-07-23 录用日期: 2018-09-28

* 通信作者: jyyang@xmu.edu.cn

引文格式: 杨进宇, 高树基. 南海氮循环几个重要过程研究的新进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(6): 741-747.

Citation: YANG J Y, GAO S J. Recent progresses in some important processes of nitrogen cycle in the South China Sea[J]. J

Xiamen Univ Nat Sci, 2018, 57(6): 741-747. (in Chinese)



表1 南海外源氮输入通量

Tab.1 External nitrogen supply to the South China Sea

外源氮输入途径	河流	通量/(Gmol · a ⁻¹)	文献
河流输入	珠江	15.4	[11]
	湄公河	24.1	
	其他河流	24.5	
	合计	64.0	
固氮作用		3~30	[12-15]
大气氮沉降		77~98	[4,16-17]

改变南海氮限制的状态. 然而, Voss 等^[12]的研究显示河流的影响会刺激固氮作用的发生, 因此河流携带的其他生源要素(如铁、镍等)可能发挥重要作用. 更多的研究显示河流仅能影响近岸陆架区的生物活动和有机埋藏^[12-19], 其对南海开阔海区的影响则相对有限. 南海海盆区(面积约为 1.4×10^6 km²)全年大部分时间处于寡营养盐状态^[20], 其高温、层化等环境条件有利于固氮生物生长^[21]. 采用不同方法估算的南海总固氮速率存在较大的时空变异, 约为 3~30 Gmol/a, 其中单细胞固氮藻贡献约 65% 的固氮速率^[12-15]. 然而, 南海固氮藻的丰度和生长速率均低于邻近的西菲律宾海^[13,15]. Wu 等^[22]推测南海表层水体生物可利用铁的含量较低, 从而限制了南海固氮生物的生长. 此外, 南海较高的大气氮沉降通量也可能是影响固氮生物生长的因素之一. Yang 等^[16]在南海北部东沙岛的观测显示大气沉降提供的总活性氮为 55~70 mmol/(m² · a)(77~98 Gmol/a), 这与 Kim 等^[17]根据南海周边陆地上观测的推导结果以及 Duce 等^[4]利用模型估算的入海氮沉降通量相似, 但远高于早期的观测结果(7~9 mmol/(m² · a))^[18]. 上述结果表明南海的大气氮沉降通量明显高于固氮作用固定的氮通量, 贡献约 20% 的新生产力, 是海盆区最主要的外源氮输入途径. 南海大气沉降中硝酸盐是主要成分, 其来源存在明显的季节变化, 与季风有密切关系, 表现为: 在冷季以人为活动来源为主, 而在暖季可能来源于闪电合成和土壤释放等天然过程以及生物体焚烧^[16,23]. 目前对南海大气中还原态氮(铵盐和有机氮)的主要来源了解较少. 有限的研究显示在北大西洋大气中还原态氮主要源自海洋, 说明大气中人为活动来源的氮贡献可能存在高估^[24-25]. 北大西洋大气中人为活动来源的氮主要源自北美大陆的排放, 其主要成分是氮氧化物(NO_x)^[26]; 而由东亚大陆产生的人为排放氮组分中氮氢化物(NH₃)的贡献可能超过 50%^[27]. 因此, 南海甚

至整个北太平洋的大气氮沉降中还原态氮的来源可能与北大西洋存在差异, 值得深入研究. 未来在南海及周边海域开展大气中还原态氮的稳定氮同位素和有机组成研究将有助于准确评估外源氮输入的贡献以及人为活动的影响.

1.2 人为活动对南海外源氮输入的影响

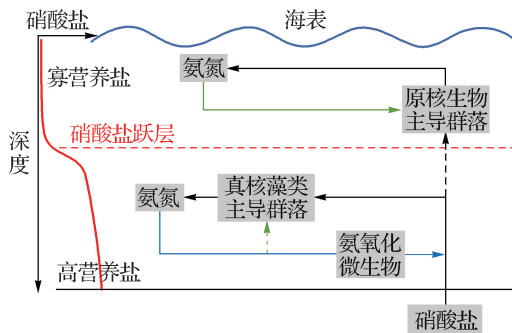
外源氮输入可能显著影响南海内部的生物地球化学过程. 总体上, 南海是一个氮限制的生态系统^[28-29], 外源氮输入的长期变化对于调控南海新生产力有重要意义. 人为活动对河流近岸区的影响尤为明显. 以珠江口区域为例, 近 20 多年来营养盐浓度明显上升, 尤其是氮盐($(1.4 \pm 0.3) \mu\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{a})$), 可能加剧了近岸区域的富营养化和缺氧状态^[30-31], 由此可能增强近岸水体的反硝化过程和温室气体(N₂O)的释放. 此外, Ren 等^[32]在南海根据珊瑚体内稳定氮同位素记录成功反演出人为活动经大气沉降对海洋氮储库的影响, 结果发现过去 40 年珊瑚礁体内稳定氮同位素组成($\delta^{15}\text{N}$)的减少与大气氮沉降(主要是燃煤引发)的增加密切相关. 现阶段在南海由大气氮沉降提供的外源氮能够增加约 460 mmol/(m² · a)的 CO₂ 吸收量(以光合作用中 $n(\text{C}) : n(\text{N}) = 6.6$ 计算), 与南海向大气释放的 CO₂ 通量^[33]处于同一量级. 这说明在工业革命之前(人为活动影响较弱), 南海释放的 CO₂ 通量可能是现在的 2 倍. 类似地, 模型研究显示未来人为活动的影响还将持续增加^[4], 南海作为 CO₂ 弱源的现状是否会改变, 值得关注^[16]. 沉积物中有孔虫体内的 $\delta^{15}\text{N}$ 记录显示冰期与间冰期的固氮作用存在明显差异, 全新世较强的固氮作用主要由水温变暖和层化加强所致^[14]. 在全球变暖和海洋酸化的大环境下, 固氮速率可能呈现下降的趋势, 在南海这种铁限制的海域可能更为显著^[34]. 然而, 南海大气氮沉降可能进一步对固氮生物生长产生负反馈, 这需要在今后的研究中加以验证.

2 南海上层水体的氨氮动力学过程

上层水体营养盐主要来源于有机物矿化产生的氨氮, 以及外源氮输入和次表层输入的新生氮(硝酸盐为主). 传统上认为浮游植物生长时吸收氨氮为再生生产力, 而利用硝酸盐的生长定义为新生产力. 新生产力的大小决定了有机物输出的效率. 然而, 氨氮氧化产生硝酸盐进而被浮游植物利用, 这一过程可能造成新生产力的高估^[35]; 同时, 还将直接影响上层海洋的氮储库形态, 进而影响浮游植物群落结构. 因此,

准确定量地研究上层水体中氨氮的动力学过程非常重要。

以往的研究显示表层水体的硝化作用会受到光抑制^[36]。然而, Wan 等^[37]在南海的研究发现:真光层内部氮消耗途径与硝酸盐浓度有关,并指出通过影响不同浮游植物种群对氨氮的亲合力,可以改变不同营养盐浓度下浮游植物和硝化菌对氨氮的竞争力。该研究成功地揭示了硝化作用被光抑制的假说与真光层内部活跃的硝化过程发生的矛盾,能够广泛适用于其他寡营养盐海域(图 1)。此外,该研究也更深入地阐释和预测了硝化作用和新生产力的紧密空间耦合关系,有助于定量评估真光层内部的硝化作用对新生产力估算的影响。



绿色箭头表示氨氮的吸收过程,蓝色箭头表示硝化作用。

图 1 真光层氨氮动力学过程的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ammonium dynamics in the euphotic zone

此外,南海上层水体的氨氮动力学过程还受到开阔大洋的影响。Xu 等^[38]揭示了在南海北部氨氧化速率的分布,发现氨氮浓度及其氧化速率与黑潮入侵有关;黑潮携带高含量的溶解有机物,在南海内部被分解从而提高了氨氧化速率,并为生物生长提供了额外的营养物质。该现象可能普遍存在于水平传输混合强烈的区域,如受黑潮和湾流等西边界流影响的东海和墨西哥湾区域,未来需要开展更多的研究来证实这一推测。

南海上层水体中 N_2O 处于过饱和状态,是 N_2O 的源(向大气释放 19.3 Mmol/d),而与之相邻的西菲律宾却是 N_2O 的汇^[39]。上层水体的硝化作用可能是南海上层水体中 N_2O 的主要产生过程。模型预测上层海洋层化将进一步加剧,从而限制下层营养盐的供给,未来以微微型原核生物为优势种的寡营养盐海域可能进一步扩大^[40]。这可能导致上层水体氨氮吸收速

率增大,进而减弱硝化作用。然而,营养盐跃层深度的变化又会改变硝化菌的活跃空间。因此,南海 N_2O 的源汇格局变化值得关注。

3 南海颗粒态氮动力学过程

3.1 上层水体颗粒态氮同位素组成

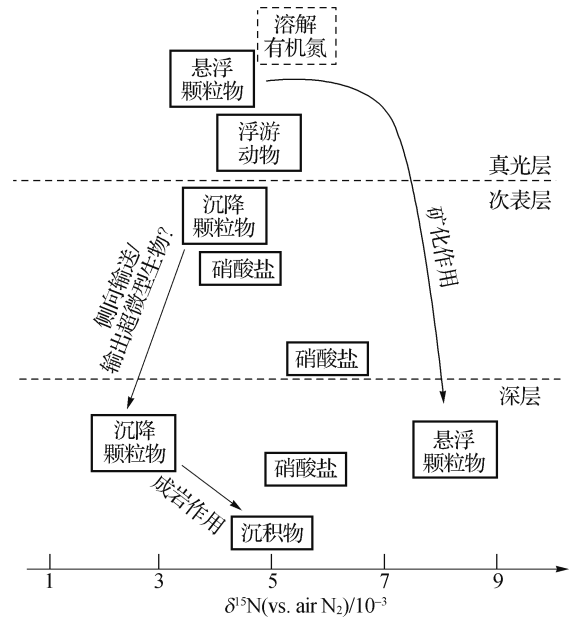
边缘海的颗粒有机物(POM)除了来源于海洋生物体的现场生产,陆源物质和大气沉降等也可能具有显著贡献。POM 的稳定同位素信号能够用来指示不同氮源,进而了解 POM 在水体中的动力学过程,以及反演现代和过去海洋的氮循环过程^[41]。通常情况下,边缘海由于具有较高的生产力和颗粒沉降速率,颗粒物的同位素信号能够较好地保存在水体和沉积物中^[42-43]。然而,POM 从生成到埋藏经历诸多复杂过程,稳定氮同位素信号对充分了解边缘海中 POM 沉降过程中的控制因素至关重要。Yang 等^[44]在南海北部海盆区的研究发现:在真光层底部收集的沉降颗粒物与次表层硝酸盐具有相似的 $\delta^{15}N$ (均为 $4 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$),表明次表层硝酸盐是提供颗粒物输出最主要的新生氮源;进一步比对发现上层 100 m 水体中不同种类 POM(悬浮和沉降颗粒物,以及不同粒径的浮游动物)具有高度相似的 $\delta^{15}N$,暗示上层水体中氮元素在不同颗粒组分间快速运转^[44]。这与在其他寡营养盐海域的研究结果有所不同,如 Montoya 等^[45]在北大西洋发现悬浮颗粒物的稳定氮同位素组成($\delta^{15}N_{PN}$)明显低于沉降颗粒物的稳定氮同位素组成($\delta^{15}N_{SP}$),且浮游动物的稳定氮同位素组成($\delta^{15}N_{ZOO}$)随粒径增加而增大。尽管造成上述差异的控制机制尚不清楚,但推测在南海溶解有机物氮可能有效地参与了上层水体氮动力学过程^[46]。Kao 等^[47]在南海北部海盆区发现上层 100 m 水体中悬浮颗粒物的氮含量和 $\delta^{15}N_{PN}$ ($2 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$)存在明显的季节变化,春、秋两季较低的 $\delta^{15}N_{PN}$ 对应于较低的颗粒物向下输出效率,暗示固氮作用可能是主导因素。因为大多数固氮藻(南海以固氮变形菌为主^[47])的沉降速率较慢,所以具有较轻同位素信号($\delta^{15}N_{PN}$ 较低)的颗粒物在上层水体中的停留时间较长。固氮作用信号是否能够有效地向下输出,以及以何种形式输出,需要进一步深入研究。相反地,在冬季或夏季台风期间,较强的水体混合常引发中等规模的硅藻藻华^[48],具有下层硝酸盐同位素信号的颗粒物能够快速有效地向下输出,从而造成真光层内部颗粒有机氮的储量反而较低^[18]。

3.2 颗粒态氮同位素信号的垂直分布

不同于其他边缘海,南海的POM在向下输出过程中似乎没有完好地保存原有的同位素信号特征(图2).研究发现南海深层水体中 $\delta^{15}\text{N}_{\text{SP}}$ 为 $2 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$ [44,49],低于真光层的 $\delta^{15}\text{N}_{\text{SP}}$ 和次表层硝酸盐稳定氮同位素组成($\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$).根据沉积物捕获器的数据显示,南海在3000 m以下收集到的颗粒氮通量可能高于上层水体,说明存在由陆架区侧向输入的POM的贡献[44].如Huh等[50]报道台湾岛东南部高屏溪每年往南海陆架汇入36~49 Mt颗粒物质,其中约85%经高屏峡谷输送到南海深海海盆;Liu等[51]通过分析海盆区沉积物中黏土矿物发现南海北部的颗粒物主要来源于台湾岛河流.这些侧向输入海盆的POM往往具有较轻的氮同位素特征[44].另外,Jiao等[52]首次在南海深层水中发现生活在表层水体中的原绿球藻(*Prochlorococcus*),推测是南海内部常发生的内孤立波等物理过程导致POM从表层向深层输出.这类单细胞原核生物具有较低的 $\delta^{15}\text{N}$ [53],因而这也是使得南海深层水中 $\delta^{15}\text{N}_{\text{SP}}$ 变低的可能机制.然而,至今还没有针对南海区域不同种群微生物的稳定氮同位素研究,尚无法评估该机制的重要性.未来加强流式分析-同位素质谱、特征氨基酸组分及其同位素组成的分析应用将有助于理解水柱中沉降颗粒物氮同位素信号的传输和转化过程.

深层水体中 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{SP}}$ 表现出显著差异.Saino等[54]发现南海深层水中 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 增加至 8×10^{-3} 左右,明显高于 $\delta^{15}\text{N}_{\text{SP}}$.两者的显著差异表明较小的悬浮颗粒物不是完全由较大的沉降颗粒的物理分解或水解产生的,两者可能有不同的来源.这与氨基酸组分[55]和蛋白组学[56]的分析结果相似,其结果显示深层悬浮颗粒物的来源有别于沉降颗粒物和表层悬浮颗粒物.Gaye等[55]推测深海中细小颗粒物(如悬浮颗粒物)的稳定氮同位素是由于其停留时间较长,与溶解有机物交换所致.开展全水柱的溶解有机物以及有机组分的 $\delta^{15}\text{N}$ 研究有望验证上述假设.

Kienast[57]发现南海表层沉积物和岩芯中 $\delta^{15}\text{N}$ 在上一个冰期-间冰期时相对稳定.然而,这一结果有悖于有孔虫体内同位素变化的分析结果[14].南海水体中 $\delta^{15}\text{N}_{\text{SP}}$ 的显著变化也表明在该区域利用其反演氮循环的历史变化可能存在问题.冰期-间冰期期间海盆区陆源物质的来源和贡献量存在较大变化[51],因此可能混淆沉积物中不同时期的氮同位素记录[58].上述发现对过去在边缘海重建氮循环过程的认识提出了新的挑战[38].



其中溶解有机物的 $\delta^{15}\text{N}$ 为估计值.

图2 南海不同种类颗粒物和硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$
(修改自文献[38])

Fig. 2 The $\delta^{15}\text{N}$ values of different particles and nitrate in the South China Sea (modified from reference[38])

4 展 望

南海氮循环研究起步较晚,尽管近年来已经取得了长足进步,但仍需在以下几个方面加强研究:

1) 硝酸盐同位素组成及其控制机制.硝酸盐是海洋中最大的固定氮储库,系统地分析其稳定氮、氧同位素的组成及时空分布有助于了解南海硝酸盐的动力学过程.北太平洋中层水最终进入南海[59],通过硝酸盐同位素可指征其归宿,这对反演南海和北太平洋氮循环在现代和历史上的变化有重要意义.

2) POM和溶解有机物的有机组分及其稳定氮同位素.这有助于厘清溶解有机物降解的分馏效应,揭示溶解有机物在参与水体中不同氮组分的相互转化中的作用,以及不同粒径颗粒物的来源和相互关系.

3) 南海上层水体硝化作用的季节变化.南海上层水体的营养盐水平和跃层及黑潮入侵南海的强度存在明显的季节变化,因此需要加强不同季节硝化作用强度及其对南海浮游植物群落、生物泵效率的影响,以及对 N_2O 产量的关系和贡献等方面的研究.

4) 人工标记技术在氮循环过程研究中的应用.目前,利用不同氮组分的同位素人工标记技术能够有效地定量不同氮循环过程的速率,有助于揭示不同氮循

环过程与多环境因子的相互关系^[60],该技术应该被广泛应用于现场工作中。

5) 南海南部的氮循环过程. 目前大多数研究还集中在南海北部,对南部的认识相当匮乏. 南海南部是南海水团年龄最老的区域,应关注其与北部海域的对比研究。

6) 气候变化与人为活动对氮循环过程的影响. 气候变化和人为活动使得海洋生物地球化学过程处在持续变化中,氮循环过程亦是如此. 关注氮循环过程对外界环境的响应和反馈将是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] FALKOWSKI P G. Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean[J]. *Nature*,1997,387(6630):272-275.
- [2] FREING A, WALLACE D W R, BANGE H W. Global oceanic production of nitrous oxide [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012,367(1593):1245-1255.
- [3] SHARPLES J, MIDDELBURG J J, FENNEL K, et al. What proportion of riverine nutrients reaches the open ocean? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(1): 39-58.
- [4] 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.
- [5] GRUBER N, GALLOWAY J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*,2008,451(7176): 293-296.
- [6] LIU K K, CHAO S Y, SHAW P T, et al. Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study[J]. *Deep Sea Research Part I*, 2002,49(8):1387-1412.
- [7] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L, ALBERTIN C S. Flux and fate of fluvial sediments leaving large islands in the East Indies[J]. *J Sea Res*,1999,41(1):97-107.
- [8] DAI M, CAO Z, GUO X, et al. Why are some marginal seas sources of atmospheric CO₂? [J]. *Geophys Res Lett*, 2013,40(10):2154-2158.
- [9] DU C, LIU Z, DAI M, et al. Impact of the Kuroshio intrusion on the nutrient inventory in the upper northern South China Sea: insights from an isopycnal mixing model [J]. *Biogeosciences*,2013,10(10):6419-6432.
- [10] LIU K K, TSENG C M, WU C R, et al. The South China Sea [M] // Carbon and nutrient fluxes in continental margins: a global synthesis. Berlin: Springer, 2010: 124-146.
- [11] SMITH S V, SWANEY D P, TALAUE-MCMANUS L, et al. Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean [J]. *BioScience*, 2003, 53 (3):235-245.
- [12] VOSS M, BOMBAR D, LOICK N, et al. Riverine influence on nitrogen fixation in the upwelling region off Vietnam, South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33(7): L07604.
- [13] LEE CHEN Y L, CHEN H Y, LIN Y H, et al. The relative contributions of unicellular and filamentous diazotrophs to N₂ fixation in the South China Sea and the upstream Kuroshio [J]. *Deep Sea Research Part I*, 2014,85:56-71.
- [14] KAO S J, TERENCE YANG J Y, LIU K K, et al. Isotope constraints on particulate nitrogen source and dynamics in the upper water column of the oligotrophic South China Sea [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012,26(2):GB2033.
- [15] LEE CHEN Y L, CHEN H Y, TUO S H, et al. Seasonal dynamics of new production from *Trichodesmium* N₂ fixation and nitrate uptake in the upstream Kuroshio and South China Sea basin [J]. *Limnol Oceanogr*, 2008, 53 (5):1705-1721.
- [16] YANG J Y T, HSU S C, DAI M H, et al. Isotopic composition of water-soluble nitrate in bulk atmospheric deposition at Dongsha Island: sources and implications of external N supply to the northern South China Sea [J]. *Biogeosciences*,2014,11(7):1833-1846.
- [17] KIM T W, LEE K, DUCE R, et al. Impact of atmospheric nitrogen deposition on phytoplankton productivity in the South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2014, 41(9): 3156-3162.
- [18] CHEN C T A, WANG S L, WANG B J, et al. Nutrient budgets for the South China Sea basin [J]. *Mar Chem*, 2001,75(4):281-300.
- [19] HU J F, PENG P A, JIA G D, et al. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China [J]. *Mar Chem*, 2006, 98 (2/3/4):274-285.
- [20] WONG G T F, TSENG C M, WEN L S, et al. Nutrient dynamics and N-anomaly at the SEATS station [J]. *Deep Sea Research Part II*, 2007,54(14/15):1528-1545.
- [21] WONG G T F, CHUNG S W, SHIAH F K, et al. Nitrate anomaly in the upper nutricline in the northern South China Sea: evidence for nitrogen fixation [J]. *Geophys Res Lett*,2002,29(23):12.
- [22] WU J F, CHUNG S W, WEN L S, et al. Dissolved inorganic

- phosphorus, dissolved iron, and *Trichodesmium* in the oligotrophic South China Sea[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(1):8.
- [23] XIAO H W, XIE L H, LONG A M, et al. Use of isotopic compositions of nitrate in TSP to identify sources and chemistry in South China Sea [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109:70-78.
- [24] ALTIERI K E, FAWCETT S E, PETERS A J, et al. Marine biogenic source of atmospheric organic nitrogen in the subtropical North Atlantic[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113(4):925-930.
- [25] ALTIERI K E, HASTINGS M G, PETERS A J, et al. Isotopic evidence for a marine ammonium source in rainwater at Bermuda[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(10):1066-1080.
- [26] US Environmental Protection Agency. National air pollutant emission trends 1900—1998[R]. [S. l.]:US Environmental Protection Agency, 2000.
- [27] LIU X, ZHANG Y, HAN W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, 494 (7438): 459-462.
- [28] WONG G T F, KU T L, MULHOLLAND M, et al. The SouthEast Asian time-series study (SEATS) and the biogeochemistry of the South China Sea: an overview [J]. *Deep Sea Research Part II*, 2007, 54 (14/15): 1434-1447.
- [29] DU C, LIU Z, KAO S J, et al. Diapycnal fluxes of nutrients in an oligotrophic oceanic regime: the South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(22):11510-11518.
- [30] XU J, YIN K, LEE J H W, et al. Long-term and seasonal changes in nutrients, phytoplankton biomass, and dissolved oxygen in Deep Bay, Hong Kong[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(2):399-416.
- [31] QIAN W, GAN J, LIU J, et al. Current status of emerging hypoxia in a eutrophic estuary: the lower reach of the Pearl River Estuary, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 205:58-67.
- [32] REN H, CHEN Y C, WANG X T, et al. 21st-century rise in anthropogenic nitrogen deposition on a remote coral reef[J]. *Science*, 2017, 356(6339):749-752.
- [33] ZHAI W D, DAI M H, CHEN B S, et al. Seasonal variations of air-sea CO₂ fluxes in the largest tropical marginal sea (South China Sea) based on multiple-year underway measurements[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10 (11): 7775-7791.
- [34] HONG H, SHEN R, ZHANG F, et al. The complex effects of ocean acidification on the prominent N₂-fixing cyanobacterium *Trichodesmium* [J]. *Science*, 2017, 356 (6337):527-531.
- [35] YOOL A, MARTIN A P, FERNÁNDEZ C, et al. The significance of nitrification for oceanic new production [J]. *Nature*, 2007, 447(7147):999-1002.
- [36] HERRIGAN S G, CARLUCCI A F, WILLIAMS P M. Light inhibition of nitrification in sea-surface films[J]. *J Mar Res*, 1981, 39(3):557-565.
- [37] WAN X S, SHENG H X, DAI M, et al. Ambient nitrate switches the ammonium consumption pathway in the euphotic ocean[J]. *Nat Comm*, 2018, 9(1):915.
- [38] XU M N, ZHANG W J, ZHU Y F, et al. Enhanced ammonia oxidation caused by Lateral Kuroshio intrusion in the boundary zone of the northern South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2018, 45(13):6585-6593.
- [39] TSENG H C, CHEN C T A, BORGES A V, et al. Distributions and sea-to-air fluxes of nitrous oxide in the South China Sea and the West Philippines Sea[J]. *Deep Sea Research Part I*, 2016, 115:131-144.
- [40] BOYCE D G, LEWIS M R, WORM B. Global phytoplankton decline over the past century[J]. *Nature*, 2010, 466(7306):591-596.
- [41] ROBINSON R S, KIENAST M, ALBUQUERQUE A L, et al. A review of nitrogen isotopic alteration in marine sediments[J]. *Paleoceanography*, 2012, 27(4):PA4203.
- [42] KIENAST S S, CALVERT S E, PEDERSEN T F. Nitrogen isotope and productivity variations along the northeast Pacific margin over the last 120 kyr: surface and subsurface paleoceanography[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(4):7.
- [43] THUNELL R C, SIGMAN D M, MULLER-KARGER F, et al. Nitrogen isotope dynamics of the Cariaco Basin, Venezuela [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18:GB3001.
- [44] YANG J Y T, KAO S J, DAI M, et al. Examining N cycling in the northern South China Sea from N isotopic signals in nitrate and particulate phases[J]. *J Geophys Res:Biogeosciences*, 2017, 122(8):2118-2136.
- [45] MONTOYA J P, CARPENTER E J, CAPONE D G. Nitrogen fixation and nitrogen isotope abundances in zooplankton of the oligotrophic North Atlantic [J]. *Limnol Oceanogr*, 2002, 47(6):1617-1628.
- [46] KNAPP A N, SIGMAN D M, LIPSCHULTZ F, et al. Interbasin isotopic correspondence between upper-ocean bulk DON and subsurface nitrate and its implications for marine nitrogen cycling [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25:GB4004.
- [47] ZHANG Y, ZHAO Z, SUN J, et al. Diversity and distribution of diazotrophic communities in the South China

- Sea deep basin with mesoscale cyclonic eddy perturbations[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 78(3): 417-427.
- [48] LIU G, CHAI F. Seasonal and interannual variability of primary and export production in the South China Sea: a three-dimensional physical-biogeochemical model study [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, 66(2): 420-431.
- [49] GAYE B, WIESNER M G, LAHAJNAR N. Nitrogen sources in the South China Sea, as discerned from stable nitrogen isotopic ratios in rivers, sinking particles, and sediments[J]. *Mar Chem*, 2009, 114(3/4): 72-85.
- [50] HUH C A, LIU J T, LIN H L, et al. Tidal and flood signatures of settling particles in the Gaoping submarine canyon (SW Taiwan) revealed from radionuclide and flow measurements[J]. *Mar Geol*, 2009, 267(1): 8-17.
- [51] LIU Z, ZHAO Y, COLIN C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [52] JIAO N, LUO T, ZHANG R, et al. Presence of *Prochlorococcus* in the aphotic waters of the western Pacific Ocean[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(8): 2391-2400.
- [53] FAWCETT S E, LOMAS M W, CASEY J R, et al. Assimilation of upwelled nitrate by small eukaryotes in the Sargasso Sea[J]. *Nat Geosci*, 2011, 4(10): 717-722.
- [54] SAINO T, HATTORI A. Geographical variation of the water column distribution of suspended particulate organic nitrogen and its ^{15}N natural abundance in the Pacific and its marginal seas[J]. *Deep Sea Research Part A*, 1987, 34(5/6): 807-827.
- [55] GAYE B, NAGEL B, DÄHNKE K, et al. Amino acid composition and $\delta^{15}\text{N}$ of suspended matter in the Arabian Sea: implications for organic matter sources and degradation [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7689-7702.
- [56] DONG H P, WANG D Z, DAI M, et al. Characterization of particulate organic matter in the water column of the South China Sea using a shotgun proteomic approach [J]. *Limnol Oceanogr*, 2010, 55(4): 1565-1578.
- [57] KIENAST M. Unchanged nitrogen isotopic composition of organic matter in the South China Sea during the last climatic cycle: global implications [J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(2): 244-253.
- [58] ZHENG L W, HSIAO S S Y, DING X D, et al. Isotopic composition and speciation of sedimentary nitrogen and carbon in the Okinawa Trough over the past 30 ka[J]. *Paleoceanography*, 2015, 30(10): 1233-1244.
- [59] YOU Y, CHERN C S, YANG Y, et al. The South China Sea, a *cul-de-sac* of North Pacific Intermediate Water [J]. *J Oceanogr*, 2005, 61(3): 509-527.
- [60] XU M N, WU Y, ZHENG L W, et al. Quantification of multiple simultaneously occurring nitrogen flows in the euphotic ocean [J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(4): 1021-1038.

Recent Progresses in Some Important Processes of Nitrogen Cycle in the South China Sea

YANG Jinyu*, GAO Shuji

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Marginal seas, connecting land and open ocean, are the regions in which nitrogen cycle processes are highly dynamic and complicated. The South China Sea (SCS) is one of the biggest marginal seas in the world, which becomes one of the hot-spot regions for the study on nitrogen cycle. Here, recent research progresses in the processes of N sources and sinks, as well as the N internal cycle in the SCS are summarized, which is specifically focused on supply of external nitrogen, ammonium consumption in the euphotic zone, and particulate nitrogen dynamics in the water column. External nitrogen inputs have increased during recent decades mainly due to human activities. Ammonium dynamics is associated with the nitracline depth, and is also influenced by the intrusion of Kuroshio waters. High similarity in nitrogen isotopes among various types of particles in the euphotic zone implies rapid N turnover in the ecosystem. The significant change in particulate N isotope during its downward transfer makes the SCS different from most other marginal seas.

Key words: South China Sea; marine nitrogen cycle; external nitrogen; particulate nitrogen dynamics; ammonium dynamics