

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.003

# 全球变化下九龙江河流-河口系统营养盐循环过程、 通量与效应

陈能汪

厦门大学环境与生态学院,福建省海陆界面生态环境重点实验室,近海海洋环境科学国家重点实验室,厦门 361102

**摘要:**河流-河口系统是陆地与海洋物质循环的重要通道。人类活动和气候变化已显著改变营养盐循环并产生一系列生态环境效应(富营养化、有害藻华、缺氧、酸化等)。本文基于现场观测、实验模拟和模型分析结果,总结亚热带中小型河流——九龙江河流-河口系统的营养盐(氮、磷、硅)含量和通量的长期变化及主控因素、水体反硝化作用、梯级电站水库对营养盐的滞留、气候变化(暴雨事件、升温)影响营养盐输送与循环等方面的研究进展,讨论营养盐变化的潜在生态环境效应。与大型河流相比,中小型河流对人类活动与气候变化的干扰更为敏感。最后提出全球变化下流域-近海生物地球化学过程研究的若干重点方向:(1)在不同时空尺度上捕捉营养盐变化信号,基于多学科交叉与综合研究,揭示复杂的营养盐循环过程与驱动机制。(2)评估中小型河流的独特性及其对全球或区域尺度气候与环境变化的影响。(3)深入研究河流水坝滞留、滨海湿地净化对近海生态系统的影响。

**关键词:**营养盐;富营养化;人类活动;气候变化;九龙江

**中图分类号:**X141 **文献标识码:**A

## Nutrient cycling processes, fluxes and effects in the Jiulong river-estuary system under global change

CHEN Nengwang

Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

**Abstract:** River-estuary is an important component of earth system linking land and ocean cycling of materials. Human activities and climatic change have substantially altered nutrient cycling accompanied by series of negative ecological effects (e.g., eutrophication, harmful algal bloom, hypoxia, acidification). Based on the recent studies using in-situ observation, experimental and modeling approaches as tools, this paper summarized current understanding of the subtropical Jiulong River-Estuary system in Southeast China, including long-term change in nutrients (nitrogen, phosphorus, silica) in terms of concentration and flux and controlling factors, aquatic denitrification, nutrient retention by cascade dam reservoirs, and impacts of climate change (storm events and warming) on nutrient delivery and cycling. Potential effects of nutrient variation on aquatic ecosystems are also discussed. Current results suggest that small and medium-sized rivers are more sensitive than large rivers to human and climate perturbation in terms of nutrient biogeochemistry and ecology. Research priorities on nutrient biogeochemistry of the watershed-estuary-coast continuum under global change were proposed: (1) Capture nutrient changes at various temporal and spatial scales through intensive field observation and reveal key processes and drivers of nutrient cycling using multidisciplinary integrated study approach. (2) Evaluate the uniqueness of small and medium-sized rivers and their role in regulating global or regional climate and environment. (3) Further study the nutrient retention by river dams and coastal wetlands and associated effects on the aquatic ecosystems.

**Key words:** nutrient; eutrophication; human activity; climate change; the Jiulong River

河流-河口系统是陆地与海洋物质循环的重要通道。在人类活动和气候变化(全球变化两大特征)干扰下,全球营养盐循环过程与通量发生显著变化,氮磷硅比例失衡,导致河流湖库-河口-近海水体富

**资助项目:**国家自然科学基金“亚热带暴雨事件的河海界面生物地球化学响应”(41376082);国家自然科学基金“亚热带典型河流-河口系统氮的反硝化过程与调控”(41076042);国家自然科学基金“亚热带河流-河口界面氨氮污染转运的主控过程”(41676098);NSFC 国际(地区)重大合作项目“九龙江流域-河口-近海系统耦合变动及环境生态效应”(40810069004);福建省自然科学基金“九龙江河流-河口界面无机磷和铵氮转化及其与颗粒物的关系”(2016J01197);中央高校基本科研业务费专项资金“海陆界面水动力、颗粒物与营养盐耦合”(20720160120);中央高校基本科研业务费专项资金“梯级电站库区群甲藻水华爆发的‘空间级联反应’机制”(2012121053)

**作者简介:**陈能汪(1976—),男,教授,主要从事环境生物地球化学研究,E-mail:nwchen@xmu.edu.cn

**收稿日期:**2017-05-31;**改回日期:**2017-12-20. 周立君编辑

营养化、有害藻华、低氧、酸化等一系列生态环境效应<sup>[1-6]</sup>。我国16个主要流域向海输送的营养盐(无机氮和无机磷)通量在1970—2000年间持续增加,预测2050年营养盐负荷及比值变化将增加近海富营养化和有害藻华的风险<sup>[7]</sup>。东部沿海地区人口密集,畜禽养殖、农业生产以及水土流失,加上工业和城市废水排放,湖泊、水库有害藻华和水环境形势十分严峻<sup>[8]</sup>。此外,全球营养盐循环的变化也直接影响陆地海洋碳的源汇格局和气候<sup>[9]</sup>。研究河流-河口系统营养盐生物地球化学过程、通量与效应,是全球环境变化研究领域的重要议题,是实现区域和全球环境可持续发展的科学基础。

九龙江是亚热带中小型河流的代表,福建省第二大河流,主要由北溪、西溪和南溪构成,流经龙岩、漳州在厦门入海。流域面积14741km<sup>2</sup>,年均气温19.9~21.1℃,降水量1400~1800mm,5—9月占全年雨量70%以上。北溪浦南站(控制面积8490km<sup>2</sup>)和西溪郑店站(3419km<sup>2</sup>)多年平均径流量分别为82.2亿m<sup>3</sup>和36.8亿m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>;平均径流系数0.58,高于珠江(0.53)、长江(0.49)和黄河(0.18)<sup>[11]</sup>。九龙江口是典型的東西走向沉溺型河口,东西长21km,南北平均宽6.5km。河口区以正规半日潮潮流为主,水力停留时间为2~3天<sup>[12]</sup>。九龙江流域是闽东南农业基地,化肥施用与畜禽饲料占流域氮输入总量的80%以上<sup>[13]</sup>;农业污染(包括畜禽)是总磷超标的主要原因<sup>[14]</sup>。流域内分布中小型水电站百余座,2009年以来北溪电站库区多次发生水华,直接威胁饮用水源安全<sup>[15]</sup>。20世纪90年代以来九龙江口和厦门湾的富营养化问题日益突出<sup>[16]</sup>。

本文主要总结九龙江河流-河口系统有关营养盐生物地球化学过程、通量与效应的研究进展,包括氮磷硅含量和通量的长期变化及主控因素、水体反硝化过程与机理、梯级电站水库对河流氮磷硅的滞留作用、气候变化对营养盐循环与输送的影响,并探讨九龙江营养盐变动的潜在生态效应,最后提出未来全球变化背景下流域-近海生物地球化学过程研究的重点。

## 1 九龙江河流-河口系统营养盐循环过程和通量

### 1.1 河流-河口氮磷含量与河流输送通量长期变化趋势

九龙江北溪(江东桥断面)、西溪(水头断面)氮

磷浓度呈台阶式上升趋势,20世纪80年代中期溶解无机氮(DIN)约0.5mg/L,90年代平均为0.8mg/L,2000—2009年平均为1.5mg/L,近几年高达2~4mg/L。总磷(TP)从2002年开始常规监测时的0.05mg/L左右增加到近5年平均约0.2~0.4mg/L,西溪浓度高于北溪<sup>[17]</sup>。九龙江口的DIN浓度也显著上升,与河流DIN输出通量相关<sup>[16]</sup>。与80年代的数据相比,九龙江口上、中游硝氮(NO<sub>3</sub>-N)和溶解活性磷(SRP)浓度增加2~3倍,而溶解硅(DSi)浓度变化不大,这与密西西比河氮磷浓度升高而DSi浓度大幅度下降的变化特征很不相同<sup>[11]</sup>。基于九龙江水质水量和流域社会经济数据集,应用流域营养盐输出模型(Global NEWS),模拟分析了1980—2010年九龙江两大干流(北溪和西溪)DIN的向海输送通量,并定量计算各种氮源对河流通量的贡献<sup>[18]</sup>。在改革开放和农业结构调整、城镇化(农转非,人口向城镇集中)等政策驱动下,近30年来九龙江流域人为氮素输入持续增加,其中61%~92%来自农田化肥、养殖粪污和生活污水等三大人为氮源。两大干流氮源构成和变化趋势略有不同(图1),西溪流域主要氮源是农田化肥(78%),而北溪流域除化肥流失(54%)外畜禽养殖污染的比重也较大(20%),这与近十年来流域上游地区迅速扩张的生猪养殖业有关。1980—2010年间北溪DIN年输送通量从3.4kgN/hm<sup>2</sup>增加到17kgN/hm<sup>2</sup>,西溪DIN通量从6.5kgN/hm<sup>2</sup>增加到31kgN/hm<sup>2</sup>;两干流向河口输送的DIN总量在30年间有近五倍的变化(从6×10<sup>3</sup>tN/a增加到28×10<sup>3</sup>tN/a),其中北溪和西溪分别贡献总通量的55%(流量占2/3)和45%(流量占1/3)<sup>[18]</sup>。

### 1.2 河流硅的输送过程及调控因素

河流硅含量主要受控于流域风化过程,但也受到人为活动的影响。通过九龙江17个支流站位、29个干流站位以及2个背景站位的多年观测,研究了DSi在子流域-支流-干流-河口空间梯度上的输送过程、通量和机制<sup>[19]</sup>。主要发现:(1)九龙江位于全球河流硅含量高值区,DSi平均含量为246±76μmol/L,显著高于全球平均值158μmol/L<sup>[20]</sup>;北溪和西溪两大干流的年均向海输送通量分别为59.3、95.0kg/ha,相当于全球平均(15.4kg/ha)<sup>[20]</sup>的4~6倍,这与九龙江流域广泛分布花岗岩(硅酸岩)和亚热带湿热气候条件有利于风化有关。(2)地质背景、长期的农业生产活动和土地利用变化共同控制支流DSi含量。流域内花岗岩、水稻土、耕地和

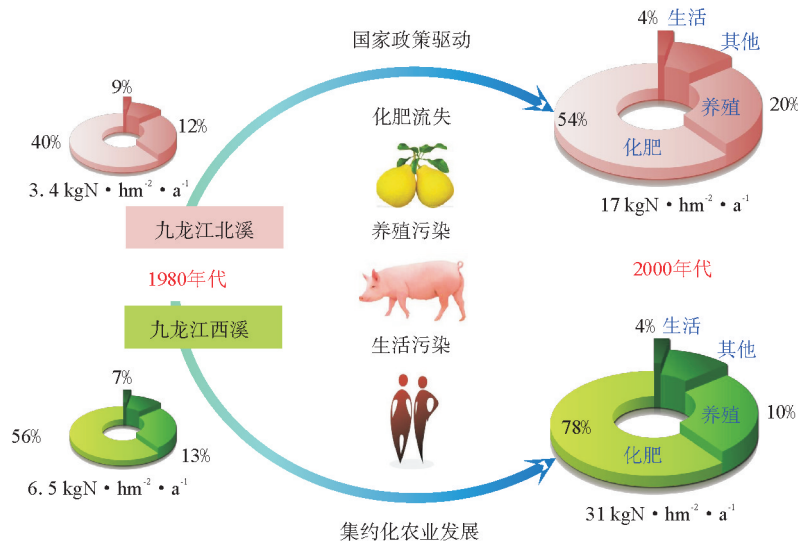


图 1 九龙江流域氮源结构及其对河流入海通量的贡献变化(1980s—2000s)<sup>[18]</sup>

Fig.1 Exported Nitrogen by source and relative contributions of the two tributaries of Jiulong River from 1980s to 2000s (after reference[18])

林地面积占比可以分别解释 47%~69% 的支流 DSi 含量差异。受地质因素影响,九龙江西溪和北溪中下游的硅酸盐含量显著高于北溪上游。上千年的农业耕作文明,形成特殊的水稻土(土-水)环境促进了硅酸盐岩风化和硅的溶出,土地利用变化(林地转为农用地)总体减少植被系统对硅的贮存能力,伴随水土流失过程,流域 DSi 向水体的输入增加。(3)流域农业开发活动和土地利用变化增加了硅的河流输送,但被大坝滞留和农作物系统贮存(特别是西溪作物生长季节)相抵消,加上九龙江 DSi 含量本底高,九龙江河口区自 80 年代以来 DSi 含量无显著变化。

### 1.3 河流-河口系统反硝化作用的时空变化、“热点时区”及其控制因素

建立膜进样质谱-N<sub>2</sub>/Ar 比值法,实现水体中反硝化终产物(溶存 N<sub>2</sub>)的直接测定,用 N<sub>2</sub> 净增量(实测浓度-平衡浓度)表征水体反硝化作用的强弱<sup>[21]</sup>。研究发现九龙江河流-河口反硝化作用存在明显的空间差异,反硝化作用“热点时区”主要分布在氮污染较重的北溪上游和西溪中下游(图 2);DIN 含量和水温总体控制了河流反硝化作用的季节差异<sup>[22]</sup>。同步观测溶存 N<sub>2</sub>O(温室气体)发现,九龙江河流 N<sub>2</sub>O 饱和度 112%~4133%、河口混合区 N<sub>2</sub>O 饱和度 197%~1605%,一年四季均为大气 N<sub>2</sub>O“源”。水体 N<sub>2</sub>O 的形成主要涉及硝化、反硝化过程,受 DO 和 DIN 的耦合控制<sup>[23,24]</sup>。综合水柱剖面观测和培养实验结果及氮功能菌丰度信息,阐明九龙江

北溪电站库区(西陂)反硝化产物 N<sub>2</sub> 有明显的垂向分布规律,沉积物-水界面 N<sub>2</sub> 的形成和释放过程主要受控于沉积物缺氧层的反硝化和厌氧氨氧化作用以及流动水团的综合影响<sup>[25]</sup>,而 N<sub>2</sub>O 主要来自水柱或沉积物好氧层的硝化作用<sup>[26]</sup>。九龙江河口混合区反硝化产物溶解 N<sub>2</sub> 净增量向海方向快速递减,河口上游存在强的反硝化信号(高的 N<sub>2</sub> 净增量),主要与河流无机氮输入有关;海域端的 N<sub>2</sub> 增量主要由上游输送并受潮水混合作用影响<sup>[27]</sup>。冬季枯水期无机氮含量高于夏季丰水期,但 N<sub>2</sub> 水-气通量总体是春、夏季较高,主要反映微生物驱动的生物地球化学过程与气温的季节变化<sup>[22,27,28]</sup>。

### 1.4 梯级电站调控河流营养盐向海输送过程与通量

我国是电站大坝数量最多的国家,梯级电站开发显著改变了河流水文和生物地球化学过程,进而调整营养盐从流域向海洋输送的过程与通量。基于现场观测、实验模拟和收支分析,发现九龙江北溪上游(雁石溪)无机磷在枯水期浓度最高,但流经梯级电站密集的干流河段(华安-浦南)时浓度明显降低;电站库区控制磷滞留的过程在湿热季节以生物吸收为主,在干冷季节以颗粒物沉积为主<sup>[29]</sup>。九龙江河流和库区沉积物磷均以铁结合态磷为主<sup>[30]</sup>。不同形态磷的水库“过滤”效应有差异,以西陂水库(湖泊区)为例,按全年计算颗粒态磷滞留 6%(汇),而无机磷反而增加 0.3%(源),总磷净滞留仅 1%<sup>[29]</sup>。

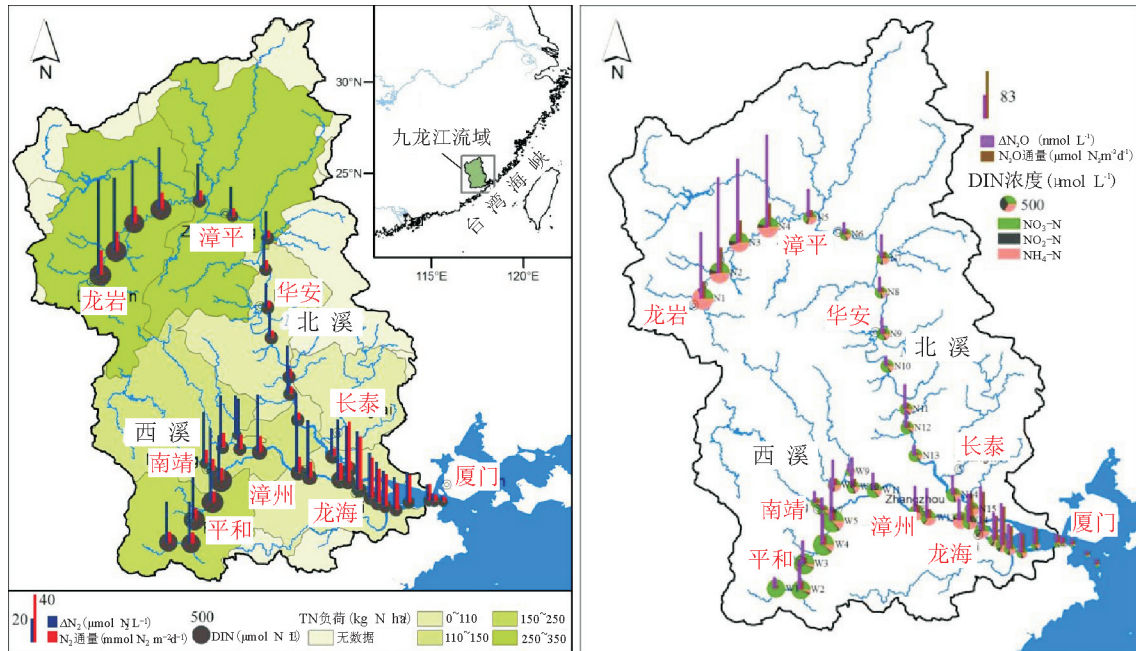


图2 九龙江河流-河口系统  $N_2$ 、 $N_2O$  净增量与水-气释放通量<sup>[22,23]</sup>

Fig.2 Net increase in dissolved  $N_2$  and  $N_2O$  and water-air emission fluxes from the Jiulong River-Estuary system (after references<sup>[22,23]</sup>)

类似地,库区反硝化脱氮量(99%  $N_2$  + 1%  $N_2O$ )只占无机氮输入负荷的1%<sup>[26]</sup>;估算整个九龙江河流系统通过水-气界面释放的氮通量(81tN/a)也只占河流无机氮向海输送通量的24%,与全球其他河流相比处于中等偏低水平<sup>[22]</sup>。九龙江北溪电站水库虽多,但河道脱氮(水质净化)作用有限,稳定氮同位素也显示北溪下游硝酸盐仍然以外源为主<sup>[31]</sup>。九龙江梯级电站大坝建设也影响溶解硅的向海输送通量,枯水期九龙江北溪大坝约滞留16%的向海通量,其他季节无明显滞留,与大坝库容较小、水停留时间较短有关(尤其是丰水期)<sup>[19]</sup>,这不同于大型河流(如长江、多瑙河等)大坝显著减少硅输送通量的特征<sup>[32-34]</sup>。

### 1.5 气候变化(暴雨事件与升温)改变河流营养盐输送与循环

气候变化预测未来某些地区的暴雨事件可能增多增强。暴雨(日雨量大于50mm)条件下河流流量快速增加(洪水脉冲),陆源各类营养元素通过地表径流与地下径流两大通道进入河流水网,并向下游汇集输送进入河口与近海。河道内的营养盐在涨水前期先于陆源物质达到河口,流域输出与河道迁移的综合信号在时间轴上展开,河流-河口-海湾空间梯度上营养盐浓度、形态及通量呈现复杂但有规律的时间变化。基于洪水期间高频率(2~3小时一

次)连续观测,分析2010—2014年不同量级的暴雨事件,主要发现:(1)强降雨事件(包括台风引起)河流营养盐含量的变动幅度更大,总体表现为氨氮(主要来自地表污染)先富集后稀释,硝氮(主要来自地下水)先稀释后富集的基本特征<sup>[35]</sup>;(2)流域无机磷与有机磷输出呈现不同模式,饱和产流情况下有机磷(DOP)冲刷富集效应更强,超渗产流情况下则是无机磷(DRP)更强<sup>[36]</sup>;(3)单场降雨事件河流氮磷输送通量比常态增加几倍到十几倍,氮磷比值也发生变化,洪水中的氨氮、磷酸盐相对增多,颗粒态磷显著增加<sup>[35,36]</sup>。河流营养盐的动态变化(富集、稀释)主要受控于气象水文条件(雨量大小和历时、空间分布、前期土壤含水量)和污染源(农田或人畜)以及径流通道(地表或地下)等。一年内仅几场降雨事件就能贡献50%以上的年通量,在小流域尺度上,降雨径流对氮输出的贡献更大<sup>[37,38]</sup>。

洪水将显著影响河口营养盐行为和入海通量,包括:大量颗粒物(流域土壤侵蚀和河床沉积物再悬浮)进入河口上游,大大增强了最大浑浊带信号(尽管其位置往下游移动10~15km),悬浮颗粒物(SPM)含量在盐度0~1psu范围出现峰值(高达500mg/L);随盐度和pH增加,颗粒磷大量解吸,中盐度区域磷的缓冲效应增强(无机磷浓度随盐度保持稳定甚至有所升高)。在河流输入、沉积物孔隙水释放和沿岸径流的综合影响下,河口上游盐度0~

5psu 梯度上氨氮有添加现象(不同于常态下的去除)。2014 年 5 月强降雨事件河口 DTN 和 TP 入海通量是常态的 2.5~4.5 倍。与常态相反,洪水影响期间河口-近海界面无机磷和氨氮通量小于河流-河口界面通量;颗粒磷(TPP)在最大浑浊带沉降或解吸为无机磷,即河流颗粒磷通过河口滞留与转化后向近海输出的通量显著减少。此外,洪水影响下河口的氮磷比值和氮硅比值有增加趋势<sup>[39]</sup>。

未来气候变化下升温或将加速沉积物碳、氮、磷的生物地球化学循环过程和沉积物-水界面交换通量。模拟实验表明,温度上升(5~35°C 梯度)显著增加九龙江北溪中游三个梯级电站库区沉积物的氨氮、无机氮和溶解有机碳的释放通量,同时增强沉积物耗氧和反硝化脱氮作用(硝氮吸附通量增加)<sup>[40]</sup>。无机磷从温度 5~25°C 时向沉积物吸附转变为高温(35°C)时从沉积物向上覆水释放。气-水温度回归模型预测全球变暖情景下未来该地区水温可上升 2.3°C,相应的库区沉积物氨氮释放通量将增加 7.0%~16.8%,硝氮吸收通量将增加 8.9%~28.6%,但总体上将增加营养盐(无机氮和磷)向下游输送的通量,进而可能加剧近海富营养化<sup>[40]</sup>。

## 2 九龙江营养盐变动的潜在生态效应

全球变化下河流-河口系统营养盐含量水平、形态结构和循环通量发生变化,可影响初级生产力、食物网、生物多样性乃至整个水生生态系统的结构和功能,最终影响渔业、旅游等生态系统产品和服务<sup>[41,42]</sup>。营养盐氮磷增加是水体富营养化(有机质累积)的根本原因<sup>[1]</sup>。九龙江口厦门湾在 1980 年代开始出现赤潮,90 年代以来赤潮发生频率明显增加且常态化,这与九龙江(和厦门湾)流域大量人为污染排放引起氮磷富集及氮磷比值变化有关<sup>[16]</sup>。厦门湾自 50 年代以来浮游植物群落结构发生显著变化、多样性减少<sup>[43]</sup>。九龙江河流-河口系统氮磷比值远高于 Redfield 比值,由于氮增加较快,成为一个趋于磷限制的系统<sup>[44]</sup>;赤潮藻生物量与无机磷含量显著负相关<sup>[45]</sup>。由于河流氮、磷、硅输送通量非等比例增加,河口 DIN : DIP 和 DSi : DIP 比值趋于增加,浮游植物对磷和硅的输入将更为敏感<sup>[44]</sup>。在亚热带季风气候影响下,生态敏感期主要出现在前期积累的陆源污染通过径流携带进入水体且气温回升的时段,比如干湿交替的季节或强降雨事件之后。九龙江西陂库区叶绿素含量峰值(藻华)主要与流域氨氮和无机磷的径流冲刷输入有关<sup>[46,47]</sup>。九龙江

口、厦门湾的赤潮(有害藻华)通常发生在夏季洪水之后。基于河流-河口定点站的同步观测和浮标水质多参数资料分析,发现 2013 年 7 月“苏力”台风后,九龙江口下游和厦门湾的叶绿素含量对洪水的脉冲输入有响应,约 2 周后叶绿素达到峰值,期间水中的氨氮和无机磷明显被藻类消耗<sup>[39]</sup>。

九龙江北溪与西溪(两大干流)流域的人类活动强度(氮磷排放增加)、土地利用变化(下垫面缓冲能力)、地质风化背景、河流属性特征(水停留时间)有明显差异,其营养盐的源汇效应随时间演变、异化,叠加梯级电站开发对水沙的调控作用,以及气候变化下水文条件的极端化(枯水期延长、丰水期洪水事件增多增强),氮磷硅三大营养元素从流域向海洋输送的量级和结构有着十分复杂的变化趋势。像九龙江这样的中小流域与大流域不同,水库与河口湾对全球变化的响应程度更明显。若区分不同时间尺度,我们可以较好地把握营养盐循环的变化趋势,如改革开放 30 年来九龙江流域人为源排放显著增加了水体氮磷含量(硅变化较小)并加剧富营养化(近年来开始观测到河口上游季节性低氧现象);亚热带季风气候(气温、降水)加上陆源氮磷污染决定了生态敏感期;中小流域营养物质的存留时间短,尤其是洪季大部分营养物(包括溶解态和颗粒态)来不及参与生态系统循环就进入河口,而枯季在河道(水库)有较强的内循环过程(滞留)和调整。暴雨事件“脉冲”可导致短期(天、旬、月)内河口盐度、浊度和营养盐等环境参数的急剧变化,进而影响浮游植物和微生物群落结构与功能,或引发藻华(赤潮)。营养盐和有机质的动态变化将影响水生生态系统演变,我们已充分认识到富营养化水体更容易发生(有害)藻华<sup>[1,6]</sup>。同时,发现营养盐影响了九龙江河流-河口微生物的分布和群落结构,进而影响水生生态系统健康<sup>[48-50]</sup>。九龙江河流-河口生态系统对流域人为活动及气候变化的响应速度与程度是否存在拐点,是否演变为与大流域一样,哪些参数更为敏感,这些问题还需长期观测和系统研究。

## 3 全球变化下流域-近海生物地球化学过程研究展望

(1)加强现场观测,在不同时空尺度上捕捉营养盐变化信号,基于多学科交叉与综合研究,揭示复杂的营养盐循环过程与驱动机制。应关注短期、中期与长期流域营养盐输出通量变化与河流-河口系统营养盐含量和结构变化的输入-响应关系;将流域-

近海生态系统作为整体研究对象,从流域(土)-河流(水)界面、河流-河口界面、河口/海湾-近海界面、沉积物-水界面、水-气界面等,系统研究营养盐的颗粒相与溶解相或气相、有机态与无机态之间的循环转化过程与机理。国内外对河口物理过程、沉积动力过程、化学过程和生物过程有大量研究<sup>[51]</sup>,今后应更加关注气候变化对河口环境(如层化加强)、有机物及营养盐循环过程的影响<sup>[52]</sup>。要系统研究河流-河口界面(最大浑浊带)物理-化学-生物过程如何调控营养盐循环与输出,开展高时空分辨率观测,研究微生物驱动的有机质和营养盐耦合循环、颗粒物与营养盐相互作用、再悬浮等关键过程,揭示河口营养盐循环与输运的水动力机制和微生物驱动机制。河口营养盐循环转化及其非保守行为,除了受河流输入影响外,还与大气沉降<sup>[53]</sup>、沉积物孔隙水交换和地下水输入<sup>[54]</sup>、沿岸污染和湿地净化<sup>[55]</sup>有关,在不同时空尺度上捕捉这些过程是提升认识河流-河口系统营养盐循环的关键(图3)。

(2)通过对比研究,评估中小型河流的独特性及其对全球或区域尺度气候与环境变化的影响。与大型河流相比,中小型河流汇水面积小,水停留时间短,从陆向海的迁移路径短,营养盐滞留率相对较

低,单位流域面积的营养盐输出通量或输出比(河流输送占流域输入比例)较高,水库-河口-海湾水体对人为干扰和气候变化的响应更快。需要总结各种大小、地理纬度不同的中小河流流域的共性和特性,动态监控营养盐循环的状态和演化方向。中小型河流流量小,但数量众多,水面分布广,在区域或全球尺度营养盐和碳循环收支中的贡献不可忽略。我国中小河流流域往往是农业发达、氮磷污染较重的区域。水体富营养化的同时也加速碳循环过程,水体排放的温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)或促进全球气候变暖<sup>[56]</sup>。亟需相关部门加快建设中小河流水质水文等基础监测设施,加强营养盐与碳的耦合循环过程与通量研究,科学评估中小河流在全球或区域气候变化和环境变化中的作用,为完善现有全球气候变化预测并制定相关政策提供科学基础。

(3)发挥团队作用,深入研究河流水坝滞留、滨海湿地净化对近海生态系统的影响。梯级电站建设显著改变河流水文过程和生物地球化学过程<sup>[57,58]</sup>。河流湖库化和富营养化,库区对氮磷硅形态的不同滞留作用将对下游生态系统产生难以预测的影响。由于筑坝河流生态系统的复杂性和异质性,水库对下游生态的影响可能需要很长时间才能反映出

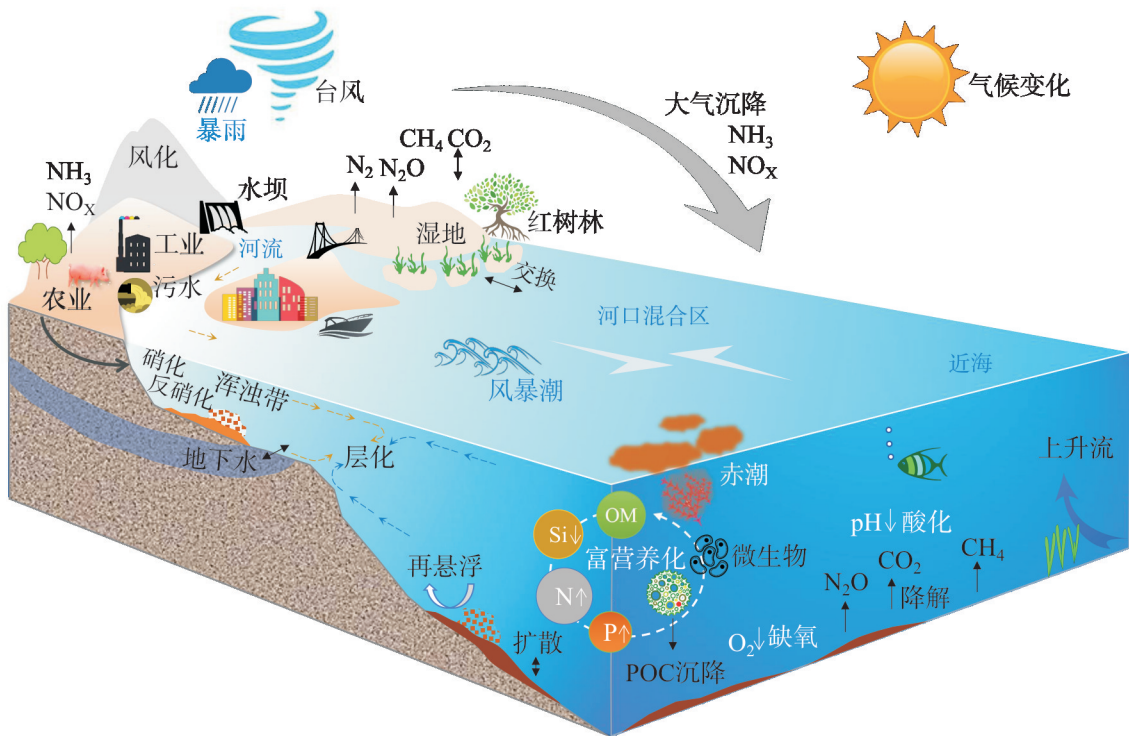


图3 全球变化下流域-河口-近海营养盐与碳循环过程及生态环境效应概念图

Fig.3 A conceptual diagram of nutrient and carbon cycling and associated ecological effects across the watershed-estuary-coast continuum under global change

来<sup>[59]</sup>。梯级电站水库类似一个个“过滤器”,调节着河流营养盐的物理、化学形态和输运时间,扮演“源”与“汇”的角色,这种角色可能随季节或者在年际间发生变化。此外,化肥施用后在流域土壤或地下水的积累使得氮磷向水体的输移存在不确定的“滞后”效应<sup>[60,61]</sup>。海洋生态系统结构与功能的演替,受控于物质循环、能量流动、信息传递等多种正负反馈机制。在全球变化背景下,流域-河口-近海关系的复杂性和高度动态变化特征,决定了流域营养盐的水坝、土壤等滞留对近海生态系统的影响,营养盐与碳循环变化及其生态环境效应的演变是一个科学难题。此外,应高度关注滨海湿地(如红树林、盐沼等)对营养盐的过滤作用,系统研究城市化、围填海等人为活动影响下湿地碳氮耦合循环机理与“蓝碳”功能变化。未来需要发挥水文、物理、化学、生物、生态、地理等多学科组成的重大研究团队作用,加快推进野外营养盐在线监测技术、多种同位素联合示踪技术、现代分子生物学技术和流域-近海生态模型集成模拟技术等的发展和运用,通过长期观测、科学试验和动态模拟,逐步提高水环境与水生态的定量预测能力,科学指导流域-近海生态系统的调控与综合管理实践,逐步提升海陆统筹和区域可持续发展能力。

### 参考文献 (References)

- [1] Nixon S W. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns[J]. *Ophelia*, 1995, 41(1): 199-219.
- [2] Gruber N, Galloway J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 293-296.
- [3] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [4] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. *Science*, 2008, 321(5891): 926-929.
- [5] Wallace R B, Baumann H, Grear J S, et al. Coastal ocean acidification: The other eutrophication problem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 148: 1-13.
- [6] Smith V H, Joye S B, Howarth R W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 351-355.
- [7] Strokak M, Yang H, Zhang Y C, et al. Increasing eutrophication in the coastal seas of China from 1970 to 2050[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 85(1): 123-140.
- [8] 陈能汪, 章颖瑶, 李延风. 我国淡水藻华长期变动特征综合分析[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1994-1998. [CHEN Nengwang, ZHANG Yingyao, LI Yanfeng. An integrated analysis of dynamic characteristics of harmful algal bloom in fresh water in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(8): 1994-1998.]
- [9] Mackenzie F T, Ver L M, Lerman A. Century-scale nitrogen and phosphorus controls of the carbon cycle[J]. *Chemical Geology*, 2002, 190(1-4): 13-32.
- [10] 黄秀琴. 九龙江流域水文特性[J]. *水利科技*, 2008(1): 16-17, 20. [HUANG Xiuqin. Hydrologic characteristics of the Jiulong River watershed[J]. *Water Conservancy Science and Technology*, 2008(1): 16-17, 20.]
- [11] Yan X L, Zhai W D, Hong H S, et al. Distribution, fluxes and decadal changes of nutrients in the Jiulong River Estuary, Southwest Taiwan Strait[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(18): 2307-2318.
- [12] Cao W Z, Hong H S, Yue S P. Modelling agricultural nitrogen contributions to the Jiulong River estuary and coastal water[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2-4): 111-121.
- [13] Chen N W, Hong H S, Zhang L P, et al. Nitrogen sources and exports in an agricultural watershed in Southeast China [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 87(2): 169-179.
- [14] Huang J J, Lin J, Zhang Y Z, et al. Analysis of phosphorus concentration in a subtropical river basin in southeast China: Implications for management[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 81: 29-37.
- [15] Li Y, Cao W Z, Su C X, et al. Nutrient sources and composition of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jiulong River, Southeast China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 63(5-12): 249-254.
- [16] Chen N W, Peng B R, Hong H S, et al. Nutrient enrichment and N: P ratio decline in a coastal bay-river system in southeast China: The need for a dual nutrient (N and P) management strategy[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 81: 7-13.
- [17] 陈能汪, 王龙剑, 林晖, 等. 九龙江流域经济发展与河流水质时空关联分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(1): 19-25. [CHEN Nengwang, WANG Longjian, LIN Hui, et al. A spatio-temporal correlation analysis of water quality and economic growth in the Jiulong River Basin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(1): 19-25.]
- [18] Yu D, Yan W J, Chen N W, et al. Modeling increased riverine nitrogen export: Source tracking and integrated watershed-coast management[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(2): 642-652.
- [19] Chen N W, Wu Y Q, Wu J Z, et al. Natural and human influences on dissolved silica export from watershed to coast in Southeast China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(1): 95-109.
- [20] Dürr H H, Meybeck M, Hartmann J, et al. Global spatial distribution of natural riverine silica inputs to the coastal zone [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(3): 597-620.
- [21] 陈能汪, 吴杰忠, 段恒轶, 等. N<sub>2</sub>:Ar 法直接测定水体反硝化产物溶解 N<sub>2</sub>[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(12): 2479-2483. [CHEN Nengwang, WU Jiezhong, DUAN Hengyi, et al.

- $N_2$ : Ar method for direct measurement of denitrification product (dissolved  $N_2$ ) using membrane inlet mass spectrometry (MIMS)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(12): 2479-2483.]
- [22] Chen N W, Wu J Z, Chen Z H, et al. Spatial-temporal variation of dissolved  $N_2$  and denitrification in an agricultural river network, southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 1-10.
- [23] Chen N W, Wu J Z, Zhou X P, et al. Riverine  $N_2O$  production, emissions and export from a region dominated by agriculture in Southeast Asia (Jiulong River)[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 208: 37-47.
- [24] Wang J N, Chen N W, Yan W J, et al. Effect of dissolved oxygen and nitrogen on emission of  $N_2O$  from rivers in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 103: 347-356.
- [25] 陈朱虹, 陈能汪, 吴殷琪, 等. 河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量[J]. *环境科学*, 2014, 35(9): 3325-3335.[CHEN Zhuhong, CHEN Nengwang, WU Yinqi, et al. Sediment-water flux and processes of nutrients and gaseous nitrogen release in a China river reservoir[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(9): 3325-3335.]
- [26] Chen N W, Chen Z H, Wu Y Q, et al. Understanding gaseous nitrogen removal through direct measurement of dissolved  $N_2$  and  $N_2O$  in a subtropical river-reservoir system[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 70: 56-67.
- [27] Wu J Z, Chen N W, Hong H S, et al. Direct measurement of dissolved  $N_2$  and denitrification along a subtropical river-estuary gradient, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 66(1-2): 125-134.
- [28] 陈能汪, 吴杰忠, 洪华生. 九龙江河口区夏季反硝化作用初探[J]. *环境科学*, 2011, 32(11): 3229-3234.[CHEN Nengwang, WU Jiezhong, HONG Huasheng. Preliminary results concerning summer-time denitrification in the Jiulong River Estuary[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(11): 3229-3234.]
- [29] Lu T, Chen N W, Duan S W, et al. Hydrological controls on cascade reservoirs regulating phosphorus retention and down-river fluxes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(23): 24166-24177.
- [30] 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 等. 九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义[J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3430-3436.[LU Ting, CHEN Nengwang, CHEN Zhuhong, et al. Characteristics of sediment phosphorus in the Jiulong River-reservoir system and its ecological significance[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3430-3436.]
- [31] Cao W Z, Huang Z, Zhai W D, et al. Isotopic evidence on multiple sources of nitrogen in the northern Jiulong River, Southeast China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 37-43.
- [32] Li M T, Xu K Q, Watanabe M, et al. Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(1-2): 3-12.
- [33] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure[J]. *Nature*, 1997, 386(6623): 385-388.
- [34] Humborg C, Pastuszak M, Aigars J, et al. Decreased silica land-sea fluxes through damming in the Baltic Sea catchment-significance of particle trapping and hydrological alterations[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(2): 265-281.
- [35] Chen N W, Wu J Z, Hong H S. Effect of storm events on riverine nitrogen dynamics in a subtropical watershed, southeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 431: 357-365.
- [36] Chen N W, Wu Y Q, Chen Z H, et al. Phosphorus export during storm events from a human perturbed watershed, southeast China: Implications for coastal ecology[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 166: 178-188.
- [37] Cao W Z, Hong H S, Zhang Y Z, et al. Anthropogenic nitrogen sources and exports in a village-scale catchment in Southeast China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, 28(1-2): 45-51.
- [38] Chen N W, Hong H S. Nitrogen export by surface runoff from a small agricultural watershed in southeast China: seasonal pattern and primary mechanism[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 106(3): 311-321.
- [39] Chen N W, Krom M D, Wu Y Q, et al. Storm induced estuarine turbidity maxima and controls on nutrient fluxes across river-estuary-coast continuum[J]. *Science of the Total Environment*, 2018 (Accepted).
- [40] Zhou X P, Chen N W, Yan Z H, et al. Warming increases nutrient mobilization and gaseous nitrogen removal from sediments across cascade reservoirs[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 490-500.
- [41] Chen N W, Hong H S. Integrated management of nutrients from the watershed to coast in the subtropical region[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(2): 233-242.
- [42] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [43] Chen B H, Xu Z H, Zhou Q L, et al. Long-term changes of phytoplankton community in Xiagu waters of Xiamen, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(6): 104-114.
- [44] Wu G J, Cao W Z, Huang Z, et al. Decadal changes in nutrient fluxes and environmental effects in the Jiulong River Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(2): 871-877.
- [45] Xu L, Hong H S, Wang H L, et al. The biogeochemistry of photosynthetic pigments in the Jiulong River Estuary and Western Xiamen Bay[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19(2): 164-171.
- [46] Mo Q L, Chen N W, Zhou X P, et al. Ammonium and phosphate enrichment across the dry-wet transition and their ecological relevance in a subtropical reservoir, China[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, 18(7): 882-



- 894.
- [47] Chen N, Mo Q, Kuo YM, et al. Hydrochemical controls on reservoir nutrient and phytoplankton dynamics under storms [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 301-310.
- [48] Liu L M, Yang J, Zhang Y Y. Genetic diversity patterns of microbial communities in a subtropical riverine ecosystem (Jiulong River, southeast China)[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 678 (1): 113-125.
- [49] Hu A Y, Wang H J, Li J W, et al. Archaeal community in a human-disturbed watershed in southeast China: diversity, distribution, and responses to environmental changes[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(10): 4685-4698.
- [50] Hu A Y, Yang X Y, Chen N W, et al. Response of bacterial communities to environmental changes in a mesoscale subtropical watershed, Southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 746-756.
- [51] 沈焕庭. 我国河口最大浑浊带研究的新认识[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(2): 210-212. [SHEN Huanting. New understanding of estuarine turbidity maximum in China[J]. *Advances in Earth Science*, 1995, 10(2): 210-212.]
- [52] Statham P J. Nutrients in estuaries-An overview and the potential impacts of climate change[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 434: 213-227.
- [53] Chen N W, Hong H S, Huang Q J, et al. Atmospheric nitrogen deposition and its long-term dynamics in a southeast China coastal area[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1663-1667.
- [54] Hong Q Q, Cai P H, Shi X M, et al. Solute transport into the Jiulong River estuary via pore water exchange and submarine groundwater discharge: New insights from  $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Th}$  disequilibrium[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 198: 338-359.
- [55] Cao W Z, Yang J X, Li Y, et al. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium conserves nitrogen in anthropogenically affected subtropical mangrove sediments in Southeast China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 155-161.
- [56] Moss B, Kosten S, Meerhof M, et al. Allied attack: climate change and eutrophication[J]. *Inland Waters*, 2011, 1(2): 101-105.
- [57] Zhang Z Y, Huang Y L, Huang J L. Hydrologic alteration associated with dam construction in a medium-sized coastal watershed of southeast China[J]. *Water*, 2016, 8(8): 317.
- [58] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, 64(1): 55-65.
- [59] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 384-396. [LIU Congqiang, WANG Fushun, WANG Yuchen, et al. Responses of aquatic environment to river damming—from the geochemical view[J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2009, 18(4): 384-396.]
- [60] Sebiló M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(45): 18185-18189.
- [61] Haygarth P M, Jarvie H P, Powers S M, et al. Sustainable phosphorus management and the need for a long-term perspective: The legacy hypothesis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8417-8419.