

流域-河口-近海系统氮、磷营养盐输移研究综述

姜德娟, 毕晓丽

(中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 综述了流域-河口-近海系统氮、磷营养盐的主要来源、营养盐输移的影响因素等方面的研究, 介绍了当前营养盐输移研究的主要方法, 并概括了氮、磷营养盐在流域-河口-近海系统的整体性研究。在此基础上, 提出了该领域研究存在的主要问题及未来展望, 强调了将流域、河口与近海系统作为一个整体, 并充分发挥分布式模型的优势开展营养盐输移研究的重要性。

关键词: 流域-河口-近海系统; 氮、磷营养盐; 水污染; 影响因素

中图分类号: X14; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)03-0421-09

海岸带是地球表层岩石圈、水圈、大气圈与生物圈相互交接、物质与能量交换活跃的特殊地带, 在陆海相互作用、全球物质循环和气候变化中扮演着极为重要的角色^[1-2]。同时, 海岸带又是地壳结构稳定性差、各种因素影响频繁、生态环境极为脆弱的敏感区域^[3]。近几十年是中国乃至全球海岸带环境与生态发生显著变化的一个时期, 主要表现在: 在全球气候变化背景下, 沿海地区高强度的经济社会活动进一步加大对海岸带生态系统的冲击与压力; 土地利用变化、水库/大坝修建、跨流域调水、农药化肥大量使用、城市快速扩展等是陆地区域人类活动的主要表现, 并以入海河流为主要纽带, 对河口及近海环境与生态产生了深刻的影响; 同时, 渔业活动、水产养殖、海上航运、旅游休闲等直接发生在海域的人类活动也在不断加剧; 在上述各种因素的共同作用下, 海岸带区域的环境与生态问题不断凸显, 如, 海水入侵、海岸侵蚀、河口湿地萎缩、生物资源退化、近海富营养化、赤潮频繁爆发等, 已经对沿海地区的经济社会可持续发展及人类生存构成了严峻的威胁与挑战^[4-7]。

国际地圈生物圈计划 (IGBP) 委员会分别于 1990 年和 1992 年提出了全球海洋通量联合研究 (JGOFS) 和海岸带陆海相互作用 (LOICZ) 研究计划^[8]。其中, LOICZ 计划强调了外力或边界条件变化对海洋物质通量的影响与全球变化对海岸带社会和经济的影响两个主要研究内容^[11]; 而 JGOFS 计划则更加强调入海物质通量变化及其对人为干扰和全球变化的响应。2004 年, IGBP 又成立了综合海洋生物地球化学和生态系统 (MBER) 研究计划, 该计划相当于 JGOFS 的后续计划, 其目的是实施海洋中生物地球化学循环与食物网的整合研究。1995 年, 在联合国环境规划署 (UNEP) 的促动下, 多个滨海国家和地区策划和启动了保护海洋环境免受陆源污染的全球行动计划 (GPA), 倡导“从山顶到海洋”、“陆地与海洋统筹”的海洋环境保护理念, 以保护海洋环境免受陆源污染^[9]。1998 年, 联合国教科文组织政府间海洋学委员会和国际海洋研究科学委员会联合发起并推动实施了全球有害藻华生态学与海洋学 (GEOHAB) 计划, 该计划在 2009 年召开的第二次开放科学大会上重点探讨了营养盐污染与沿海富营养化等问题。

氮、磷是组成生命的最基本生源要素, 是海洋生物地球化学循环的物质基础, 在控制海洋植物生长和海洋初级生产力等方面具有十分重要的作用^[5]; 同时, 氮、磷又是引起水体富营养化的主要元素。近年来,

收稿日期: 2009-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40901028; 40801016); 中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室开放研究基金资助项目 (A0713)

作者简介: 姜德娟 (1979-), 女, 山东日照人, 博士, 主要从事流域模拟和滨海湿地生态研究。

E-mail: djjiang@yic.ac.cn

在人类活动和全球变化的共同作用下,全球氮、磷营养盐入海通量不断增加,已成为近海富营养化与赤潮频繁发生的主要原因之一,引起了沿海国家政府及相关领域学者的高度关注与重视。氮、磷营养盐从陆地到海洋的输移过程成为当前国内外环境科学、地球系统科学、生命科学、海洋科学和全球气候变化等研究领域共同关注的焦点问题之一,也是河口与近海污染控制亟待解决的重要科学问题之一^[5]。本文对该领域近年来的研究进展进行了综述,并指出该领域研究存在的主要问题及未来发展趋势。

1 河口 近海区域营养盐主要来源研究

国内外大量研究表明:陆源输送、大气沉降(干湿沉降)、与开放海域的海水交换、沉积物—水界面交换是河口与近海氮、磷营养盐输入的主要途径^[10-11]。在沿海地区,工农业比较发达,陆源输入成为营养盐的最主要来源^[11]。当前,陆源污染(Land-based marine pollution, LBMP)已是全球性的重大环境问题之一,据 UNEP 估算,全球范围 80%左右的海洋污染属于陆源污染,主要包括工业废水、污水、泥沙、油类、农药和化肥^[9]。随着点源污染排放控制能力以及污水处理技术的不断提高,非点源污染成为陆源输送的主要来源,特别是农业化肥的大量使用,已是许多海岸带区域陆源营养污染的最主要原因^[4],例如,在长江口,农业非点源氮是河口氮通量的主要来源^[12];在美国,农业非点源污染也是入海河流与海岸带地区的主要污染源,约 60%的入海河流与海湾遭受着中等到严重的污染^[4,13]。

河流在营养盐从陆地到海洋的输送过程中发挥了主要作用^[11-12, 14]。工业化以前全球每年通过河流输入到海洋的氮负荷约 3.5×10^7 t,工业化以后特别是 20 世纪 50 年代以来,河流入海的氮通量增至 7.6×10^7 t,据预测,到 2020 年,全球河流输入到海岸带的人造无机氮将是 1990 年的两倍多^[11,14]。在许多海岸带地区,河流输入已占到营养盐输入的大部分^[15],例如,在胶州湾,周边河流的营养盐入海通量是近海水体营养盐的重要来源^[16];在长江口,各种形式的氮、磷输出通量主要受径流量的控制^[12,17]。此外,海底地下水排放(SGD)特别是流域地下水排放也是营养盐陆源输送的一个重要途径,其对近海营养盐循环和初级生产力的影响不可忽视,特别是对海湾或泻湖等与外海水流交换不畅的小水体尤为重要^[18]。目前,国内外关于 SGD 的研究相对较少,但 SGD 对近海营养盐输入的重要性以及在量化方面的不确定性使得其已成为国内外研究的一个热点与难点,今后有待通过野外实验和模拟手段加强该领域的研究^[18-19]。

大气沉降也是近海营养盐的重要来源之一,是陆源天然和人为营养元素向海洋输送的重要通道之一。大气沉降物中含有多种类型的有机态和无机态氮,如 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、氨基酸等,对海洋环境与生态有着直接的影响^[7,15,20-21]。研究表明,大气沉降是美国几个河口氮输入量的重要组成部分:例如,对密西西比河口的研究证明大气沉降是河口 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的最大贡献者,占 NH_4 总负荷量的 57%~62%^[7]。国内相关研究也表明,大气湿沉降对中国黄海及东海海域海洋生产力和营养元素的生物地球化学循环具有十分重要的作用^[20];氮的降水输入是长江口高含量无机氮的主要来源^[21]。上述研究都证明了大气沉降尤其是湿沉降对近海营养盐输入的重要性,然而,这方面的研究总体尚处于起始阶段,今后迫切需要加强对河口及近海区域营养盐输入中大气沉降贡献率及其特征的研究。

海岸带海水与开放海域海水之间营养盐的交换是海岸带营养盐的另一个重要来源,这种来源在水交换不受限制的水域尤为重要;而在水交换受限制的水域(如海湾和内海)则差异较大,因为在这些水域,陆源营养盐输入的影响更为突出。例如,NSTF 研究发现,在水交换受限制的北海荷兰海岸和德国海岸,明显受 *Phaeocystis* 水华的影响,生态系统已显示出退化现象,而在北海的其它海域,几乎没有发现这种受影响的证据,该研究结果强调了海岸系统中物理海水交换的重要性^[22]。

沉积物是一个巨大的营养盐储藏库,沉积物—水界面的营养盐交换对水体中的营养盐循环、转移和贮存具有重要的调节作用。对于沉积物作为上覆水中营养盐的源或汇,以及沉积物释放的营养盐对水体初级生产力的贡献等问题,发达国家已做了广泛的研究^[23]。例如,Cowan 等^[24]对美国 Mobile 湾的研究表明,沉积物营养盐通量可提供浮游植物需氮量的 36%、需磷量的 25%。相对而言,国内在该方面的研究较少,已有的

研究主要集中于长江口^[25]、胶州湾^[16]、东海及黄海海域^[23], 而在其它大多海岸带区域, 沉积物 - 水界面之间营养盐交换的研究相对比较薄弱。

2 营养盐输移影响因素研究

就外界动力条件而言, 人类活动与全球气候变化是陆源营养盐迁移与输出的主要影响因素和驱动力。人类活动直接干扰了陆源物质的输移过程^[26], 导致营养盐入海通量发生显著变化, 其对河口及海岸带地区营养盐输送的影响作用越来越深刻; 土地利用方式及其变化、农药与化肥使用、水库和大坝的修建、废水排放、家畜养殖和化石燃料燃烧等是人类活动影响 N、P 营养元素迁移的主要方式, 其对陆源营养盐的输出过程、通量及形态组成具有显著影响^[5, 27-32]。据估算, 近几十年来, 人类活动使陆地进入海洋的全球氮、磷通量增加了 2~3 倍, 导致每年进入海洋沉积物的磷通量 (14Tg) 接近每年农田的磷肥使用量 (16 Tg); 人类活动使全球氮含量增加而导致富营养化的增长速度已经远超过人类活动使大气 CO₂ 浓度增加而导致全球变暖的增长速度^[4, 13]。在各种人类活动因素中, 土地利用是影响营养盐输移的一个关键性因素, 综合反映了人类活动对自然环境的作用, 其对土壤、植被、径流及化学物质输入输出等因素具有重要影响, 导致营养负荷的巨大差异^[29], 进而显著影响河口及近海区域的环境特征与水体营养盐状况^[33]。

气候特征及其变化对营养盐的输移也具有十分重要的影响。径流是流域营养盐迁移与输出的基本动力条件, 气候条件, 特别是降水强度、降水时间、降水分布等因素通过对径流过程的控制作用而影响营养盐的输移过程^[34], 因此, 营养盐的迁移过程及入海通量特征与降水、径流的季节性、年际和年代际特征之间存在着极强的内在关联, 在许多海岸带区域特别是河口区域, 海洋初级生产力对径流输入量的变化具有十分敏感响应特征^[4]。此外, 通过大气降水和大气环流直接发生在海域的大气干湿沉降对海洋营养盐的循环、交换与收支平衡也有着重要的影响。泥沙与固体颗粒物是 N、P 营养盐输移的主要载体, 因此, 土壤侵蚀也构成陆地营养盐向海洋输移的主要动力, 对营养盐循环起着非常重要的作用^[30]。

就内在机制而言, 作为流域与海洋枢纽和通道的河口, 对入海营养盐等物质起到一定的净化和过滤作用, 例如, 在密西西比河口、哥伦比亚河口、亚马逊河口、长江口、黄河口等重要河口均发现磷酸盐缓冲机制的存在^[22, 35]。河口最大浑浊带^[36]、上升流^[37-38]、生物活动^[35, 39]和温、盐、流锋面^[35, 39-40]等河口的一些关键过程对河口营养盐的输送均具有重要意义。河口湿地在调节陆地与水生生态系统之间的营养盐通量方面也发挥重要作用, 例如, Simas 等^[41]的研究表明, 盐沼湿地是削减氮富集对河口影响的主要贡献者, 在葡萄牙 Tagus 海湾, 盐沼湿地植被对氮的去除量相当于 40 万人口 (占海岸带总人口的 20%) 产生的氮负荷量; 王军等^[42]的研究证明, 长江口滨岸湿地在延缓长江口水体富营养化的进程中发挥了重要作用, 全年净化水体中无机氮量达 12.1 万 t。然而当河口沉积物中的营养盐含量过高时, 或随外界条件的变化, 河口沉积物水界面的物质交换也可能导致河口由营养盐的汇转为源, 进而对河口及近海水体造成二次污染^[25, 41]。目前, 国内外对河口营养盐或富营养化方面的研究主要集中于温带区域, 而对热带和亚热带区域的研究则相对较少, 然而, 在这些区域, 营养盐及富营养化的表现方式与温带区域有着明显的差异, 因此, 有待加强这些区域的研究力度, 以丰富该领域研究的理论基础和实践经验^[4]。

3 营养盐输移的研究方法

关于河口及近海区域营养盐循环与收支等方面的研究大多采用水质分析法, 即野外采集海水和沉积物的样品, 带回实验室进行测试分析, 如戚晓红等^[23]对东、黄海沉积物 - 水界面营养盐交换速率的研究。此外, 也有部分研究采取数值模拟的方法, 如 Lancelet 等^[6]采用 MRO 模型, 模拟和研究 N、P 在浮游生物和以棕囊藻底栖界为主的生态系统中的循环。总体而言, 该方面的研究方法相对比较成熟, 但随着空间范围的延伸, 即, 将流域、河口及近海作为一个整体开展研究所应用的方法则差异巨大。因此, 本文重点介绍流域营

养盐迁移与输出的研究方法。

3.1 方法分类

流域营养盐输移研究的方法可概括为以下几个类型：试验法、监测法、示踪法、土壤侵蚀相关法以及模拟法。

试验法是利用野外或室内实验获取有关参数，开展营养盐输出与迁移过程的研究，例如，梁涛等^[28]利用小型人工降雨模拟器，研究了氮、磷随暴雨径流及径流沉积物的迁移过程，同时估算了总氮、总磷在 4 种典型土地利用类型（不施肥菜地、海棠果园、施肥玉米地和葡萄果园）下的流失速率。总的来说，试验法利于定量化研究，但研究尺度相对较小，一般适应于坡面流物质输移的机理研究，而无法扩展到较大空间尺度流域上的应用^[29,43]。

监测法是通过典型样区营养盐的野外监测，确定不同土地利用类型、土壤类型、化肥使用程度等因素与营养负荷之间的关系，并估算营养盐的负荷量，该方法也通常应用在中小尺度流域^[29]。营养盐监测的时间分辨率越高，越能提高营养盐不同来源的判断精度和准确度，例如 Garcia-Esteves 等^[44]以法国 Tê 河为研究对象，完成了一个水文年内每周 1 次、并且实现 1 d 之内由源头到河口的水样采集工作，由此明确识别了河流不同营养元素的主要来源。

示踪法是利用天然存在的稳定性 N、P 同位素作为示踪剂研究 N、P 营养盐的来源、输移过程。以氮为例，利用自然丰度¹⁵N 指示人类活动对河流、沿海海域富营养化的影响程度，判断河流及河口地区氮、磷营养盐的源和汇，综合研究氮、磷富营养化的关键生物地球化学过程等方面已有广泛的研究。例如，陈惟财等^[45]运用 N 同位素示踪法研究了九龙江流域 2 个典型小流域地表水中硝酸盐的来源，结果表明：2 个流域地表水中硝酸盐主要来自无机化肥与土壤有机氮，而有机肥的贡献则相对较小。

土壤侵蚀相关法是基于土壤流失通用方程 (USLE) 确定土壤侵蚀率并根据土壤组成来估算营养负荷的一种方法。例如，黄金良等^[46]基于 GIS 技术，结合 USLE 方程与营养盐输出模型，估算了九龙江流域溶解态和固态的氮、磷负荷；龙天渝等^[47]以 USLE 方程为基础，在 GIS 的支持下，估算了嘉陵江流域的土壤流失量，并应用吸附态非点源污染负荷模型，对流域吸附态氮、磷污染负荷进行了定量分析。土壤侵蚀相关法适用于坡面侵蚀，而在地形平缓地区，其估算的侵蚀率相对较低^[29]。

模拟法即采用模型进行营养盐的相关研究，模型又可以分为经验模型、概念模型和物理模型。经验模型不涉及营养盐输移的具体过程和机理，仅与模型的输入与输出有关系，多用于营养盐负荷量的估算，该类模型简单易操作，然而其对营养负荷估算的精度相对较低；概念模型是用概化的方法表达营养盐的输移过程，该类模型结构简单，模型参数具有一定的物理意义，但在某些方面又只能通过设置参数来表达；物理模型是根据营养物质流失、吸附、迁移、聚集等过程的机理，以数学建模的方法模拟不同类型营养物质在水文循环各个环节中迁移、转化的过程，以及在水文循环作用下，对水体所造成的影响^[48]，如 HSPF、ANSWERS、SWRRB、AGNPS、AnnAGNPS、CNPS、L-TIA、SWAT、LOAD、WATFLOOD、MIKE-SHE、BASINS、MONERIS 等模型^[34,48]。随着计算机和信息技术的发展，物理模型逐渐成为当今营养盐定量研究的热点，尤其是分布式模型，在营养盐输移模拟研究中发挥着极为重要的作用，其研究的空间尺度也正由小流域逐步向大流域扩展^[49-50]。因此，本文对分布式模型的应用与发展作更为详尽的介绍。

3.2 分布式模型

分布式模型考虑了流域内部的地理要素和地理过程在时间和空间上的差异，并以格网或子流域的空间单元划分方法将大区域或流域离散化成更小的地理单元^[48]。该类模型物理基础明确，能描述流域内营养盐的时空变化过程，也能有效揭示人类活动等因素对流域营养盐迁移和输出的影响。目前，应用比较广泛的分布式模型主要有 ANSWERS、AGNPS、AnnAGNPS、SWRRB、SWAT 等。

ANSWERS 模型是一个基于降水事件的分布式模型，用于评估和预测农业流域的水文和侵蚀过程，氮、磷等营养物质用化学浓度、产沙量和径流三者之间的关系进行模拟^[48]；AGNPS 模型是一个单降水事件的分布式模型，可以模拟集水区内径流、侵蚀和营养物质迁移等过程，之后发展为 AnnAGNPS 模型，可用于评

价流域内非点源污染的长期作用效果; SWAT模型是由美国农业部研究开发的一个基于 SWRRB 模型的时间连续的分布式模型, 适用于包含各种土壤类型、土地利用和农业管理制度的流域, 主要用来模拟和评估人类活动对水、沙、农业污染物的长期影响, 该模型对流域氮、磷模拟的基本过程包括氮的矿化作用、反硝化作用、挥发作用和植物吸收作用以及磷的矿化作用、固定作用和植物吸收作用。在众多模型中, SWAT模型属于免费软件, 而且具有功能强大、与 GIS系统兼容性良好等优点, 因而在营养盐输移模拟与研究中得到了广泛的应用 (如, 胡连伍等^[51], Bosch等^[31])。总的来说, 庞大的数据需求量一定程度上限制了各种分布式模型的应用, 然而随着 RS、GIS等信息技术的不断发展和应用, 已大大提高了分布式模型的有效性、实用性、可视化程度和可操作性, 因此, 在未来时期, 分布式模型将得到更加广泛的应用。

4 流域 河口 近海系统的整体性研究

目前, 氮、磷营养盐输移研究大多将流域、河口、近海作为单一对象开展, 而进行系统性和整体性研究的较少, 例如, 有些研究仅以河口与近海为研究对象, 因此难以准确识别营养盐的主要来源, 无法为有效控制河口、近海营养盐的输入通量提供强有力的依据, 对河口及近海的富营养化问题只能采取末端治理的方法和措施; 有些研究则只局限于营养盐在陆地区域 (流域) 的迁移与输出过程, 未能与河口、近海区域的相关研究进行有效结合, 无法准确认识和评价陆源营养盐输入对河口、近海区域环境与生态的影响, 因此, 也难以将源头控制、过程控制与末端治理有效地结合起来。这些都限制了河口与近海富营养化问题应对策略与控制措施的制定与实施, 也阻碍了海岸带的综合管理与区域的可持续发展。

近年来, 越来越多的学者已认识到这一不足, 并意识到营养盐源头控制的科学性与重要性, 特别是陆源输入对海岸带区域的深刻影响, 以及流域水文情势和淡水输入对河口富营养化的长期控制作用^[4]。例如, Hobbie^[27]提出, 以富营养化控制为目标的海岸带管理必须更清楚地认识由周边陆地以非点源方式汇入的氮; Paerl等^[52]提出从流域角度减少氮、磷流失的双重战略; Wade等^[10]将流域、河口与海洋作为一个整体研究了欧洲海岸带的入海氮通量; Newton等^[8]则进一步强调了将流域、河口与近海作为一个连续体进行综合研究的科学性和重要性; Wolanski等^[53]提出, 河口和海岸带水体的成功管理需要采取基于生态水文学的流域方法开展研究, 即从整个流域的角度控制土壤侵蚀和营养盐流失来恢复河口的生态健康。

中国在长江“流域 河口 近海”系统也进行了一系列的深入研究, 如中国科学院重大项目“中国海陆海相互作用及其环境效应”, 揭示了 20世纪 60年代以来长江溶解无机氮、磷含量的时序变化规律、入海通量及其与流域施肥的密切相关性; 973项目“中国典型河口 近海陆海相互作用及其环境效应”; 深入系统地研究了我国长江入海物质 (水、沙、生源要素和重要污染物) 通量及其对流域自然变化和人类活动的响应机制; 中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国主要河口及邻近陆架海域陆海相互作用研究”, 从流域生物地球化学循环的角度, 系统地阐明了长江流域氮的输入源以及氮在陆-水、水-气等界面的交换过程和通量^[54]。

5 结 语

氮、磷营养盐过剩而引起的富营养化问题已是世界大多数河口与海岸带地区普遍存在的问题, 如何准确识别营养盐的主要来源以及营养盐输送的过程与特征, 进而有效控制营养盐的输入通量, 是解决河口及近海富营养化问题面临的重大难题, 也是海岸带综合管理决策方案制定和实施的基础。本文的综述表明: 陆源输送、大气沉降、与开放海域的海水交换、沉积物—水界面交换是河口与近海氮、磷营养盐输入的主要来源; 人类活动与全球气候变化是营养盐迁移与输出的主要影响因素, 河口 (湿地) 对营养盐的输送也发挥重要作用; 分布式模型在营养盐输移模拟研究中具有广泛的应用前景。

然而, 目前仍然存在许多问题有待进一步研究, 例如, 大气沉降对河口或近海营养盐输入的贡献在多数研究中往往被忽视, 海底地下水排放对营养盐输送的作用研究仍然较少, 沉积物—水界面的营养盐交换研究

近年来才得以开展等,这些都是需要进一步加强的研究方向。此外,多数研究存在研究对象(区域)整体性和系统性不足的问题,但近年来已有越来越多的学者认识到该问题,并从流域-河口-近海系统的整体性开展营养盐的输移研究,这将为河口与近海富营养化的控制以及海岸带区域的综合管理奠定重要基础。

综上所述,在未来时期,将“流域-河口-近海”系统作为一个有机整体,充分发挥分布式模型的优势,开展系统营养盐输移规律与机制,营养盐的主要来源、影响因素以及输出通量等方面的研究,并在这方面研究的基础上,在流域范围实施调控性为主的措施,在河口及海岸带区域则强调适应性为主的措施,建立陆地与海洋之间的联系,建立陆地水文研究与海洋环境生态研究之间的联系,建立流域综合管理与海岸带综合管理之间的联系,加强多学科的交叉研究,推动 LOICZ、JGOFS、GPA 等国际计划及前沿领域的研究进展,该研究思路将成为有效解决过去、当前以及未来由人为因素产生的海岸带环境问题的一种范式转移,也是当前以及未来时期海岸带环境与生态领域科学研究的一个重要发展趋势,研究成果将为河口-近海区域环境与生态的保护、恢复和治理提供更有力的科学依据与技术支持。

参考文献:

- [1] 沈焯庭,朱建荣.论我国海岸带陆海相互作用研究[J].海洋通报,1999,18(6):11-17.(SHEN Huan-ting,ZHU Jian-rong. The land and ocean interactions in the coastal zone of China[J]. Marine Science Bulletin, 1999, 18(6): 11-17. (in Chinese))
- [2] 周洁.海岸带综合管理实践的新进展[J].海洋信息,2003,(4):17-18.(ZHOU Jie. New research progress of the practice in the integrated coastal zone management[J]. Marine Information, 2003, (4): 17-18. (in Chinese))
- [3] 杨晓梅,周成虎,杜云艳,等.海岸带遥感综合技术与实例研究[M].北京:海洋出版社,2005.(YANG Xiao-mei,ZHOU Cheng-hu,DU Yun-yan, et al. Remote sensing integrative technology and case studies of the coastal zone[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005. (in Chinese))
- [4] FLEMER D A, CHAMPM A. What is the future fate of estuaries given nutrient over-enrichment, freshwater diversion and low flows [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52: 247-258.
- [5] 晏维金.人类活动影响下营养盐向河口-近海的输出和模型研究[J].地理研究,2006,23(5):825-835.(YAN Wei-jin. Summary of human activities on global nutrient export from watersheds to estuaries and coastal water: biogeochemical cycles and modeling[J]. Geographical Research, 2006, 23(5): 825-835. (in Chinese))
- [6] LANCELOT C, GYPENS N, B LLEN G, et al. Testing an integrated river-ocean mathematical tool for linking marine eutrophication to land use: The phaeocystis-dominated belgian coastal zone (Southern North Sea) over the past 50 years[J]. Journal of Marine Systems, 2007, 64: 216-228.
- [7] HYFIELD E C G, DAY J W, CABLE J E, et al. The impacts of re-introducing Mississippi River water on the hydrologic budget and nutrient inputs of a deltaic estuary[J]. Ecological Engineering, 2008, 32: 347-359.
- [8] NEWTON A, CELY J. Land ocean interactions in the coastal zone, LOICZ: Lessons from Banda Aceh, Atlantis and Canute[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007: 1-4.
- [9] UNEP. The global programme of action for the protection of the marine environment from land-based activities[EB/OL]. [2009-03-31]. <http://www.gpa.unep.org/>.
- [10] WADE A J, NEAL C, WHITEHEAD P G, et al. Modelling nitrogen fluxes from the land to the coastal zone in European systems: A perspective from the NCA project[J]. Journal of Hydrology, 2005, 304: 413-429.
- [11] 刘亚林,刘洁生,俞志明,等.陆源输入营养盐对赤潮形成的影响[J].海洋科学,2006,30(6):66-72.(LIU Ya-lin, LIU Jie-sheng, YU Zhiming, et al. Influence of riverine nutrients on HAB [J]. Marine Sciences, 2006, 30(6): 66-72. (in Chinese))
- [12] 沈志良.长江氮的输送通量[J].水科学进展,2004,15(6):752-759.(SHEN Zhi-liang. Nitrogen transport fluxes in the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 752-759. (in Chinese))
- [13] HOWARTH R W, SHARPLEY A, WALKER D. Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for nutrient over-enrichment of coastal waters[J]. Estuaries, 2002, 25(4b): 656-676.
- [14] FIELD J H, HEMPEL G, SUMMERHAYES C P. Ocean 2020 science, trends, and the challenge of sustainability[C]//BOOM H L. Nitrogen, Phosphorus and Eutrophication in the Coastal Waters. Washington D C: Island Press, 2002: 42-43.

- [15] 柴超, 俞志明, 葛蔚. 河口海岸带地区营养盐收支及模型研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(2): 65-69. (CHAI Chao, YU Zhiming, GE Wei. Budget of nutrients and model in estuaries and coastal zone[J]. Marine Sciences, 2008, 32(2): 65-69. (in Chinese))
- [16] 周召千, 刘素美, 戚晓红, 等. 胶州湾潮滩沉积物 水界面交换对海湾营养盐的影响[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 422-426. (ZHOU Zhao-qian, LIU Su-mei, QI Xiao-hong, et al. Influence of exchanges at sediment-seawater interface on nutrient loads in tidal flat of Jiaozhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(5): 422-426. (in Chinese))
- [17] SHEN Z L, LIU Q. Nutrients in the Changjiang River[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 153(1): 27-44.
- [18] SLOMP C P, VAN CAPPELLEN P. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact[J]. Journal of Hydrology, 2004, 295: 64-86.
- [19] 朱新军, 刘贯群, 王淑英, 等. 白沙河流域地下水及营养盐向海湾输送[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(1): 67-72. (ZHU Xin-jun, LIU Guan-qun, WANG Shu-ying, et al. Estimation of groundwater and nutrients flux from Baisha Watershed into Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(1): 67-72. (in Chinese))
- [20] 刘昌岭, 陈洪涛, 任宏波, 等. 黄海及东海海域大气湿沉降(降水)中的营养元素[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(3): 26-30. (LIU Chang-ling, CHEN Hong-tao, REN Hong-bo, et al. Nutrient elements in wet deposition (precipitation) from the Yellow Sea and the East China Sea regions[J]. Marine Environmental Science, 2003, 22(3): 26-30. (in Chinese))
- [21] 沈志良, 刘群, 张淑美, 等. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(5): 465-473. (SHEN Zhi-liang, HU Qun, ZHANG Shu-mei, et al. The dominant controlling factors of high content inorganic N in the Changjiang River and its mouth[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(5): 465-473. (in Chinese))
- [22] 彭晓彤, 周怀阳. 海岸带营养盐生物地球化学研究评述[J]. 海洋通报, 2002, 21(3): 70-77. (PENG Xiao-tong, ZHOU Huai-yang. A review of nutrient biogeochemistry research of the coastal zone[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(3): 70-77. (in Chinese))
- [23] 戚晓红, 刘素美, 张经. 东、黄海沉积物 - 水界面营养盐交换速率的研究[J]. 海洋科学, 2006, 30(3): 9-15. (QI Xiao-hong, LIU Su-mei, ZHANG Jing. Sediment-water fluxes of nutrients in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Marine Sciences, 2006, 30(3): 9-15. (in Chinese))
- [24] COWAN J L W, PENNOCK J R, BOYNTON W R. Seasonal and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen fluxes in Mobile Bay, Alabama (USA): Regulating factors and ecological significance[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 141: 229-245.
- [25] 陈振楼, 王东启, 许世远, 等. 长江口潮滩沉积物 - 水界面无机氮交换通量[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 328-336. (CHEN Zhen-lou, WANG Dong-qi, XU Shi-yuan, et al. Inorganic nitrogen fluxes at the sediment-water interface in tidal flats of the Yangtze Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2): 328-336. (in Chinese))
- [26] SALOMONS W, TURNER K. Catchment-coastal region research[J]. Regional Environmental Change, 2005, 5: 50-53.
- [27] 孟伟, 雷坤, 郑丙辉译. 河口科学: 研究与实践的综合方法[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. (HOBBIE J E. Estuarine science: A synthetic approach to research and practice[M]. Washington D C: Island Press, 2000. (in Chinese))
- [28] 梁涛, 王红萍, 张秀梅, 等. 官厅水库周边不同土地利用方式下氮、磷非点源污染模拟研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 483-490. (LIANG Tao, WANG Hong-ping, ZHANG Xiu-mei, et al. Simulation study of non-point source pollution under different land use in Guanting Reservoir watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 483-490. (in Chinese))
- [29] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 西沓河流域不同土地利用类型营养盐输出系数估算[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 1-4. (LI Zhao-fu, YANG Gui-shan, LI Heng-peng. Estimation of nutrient export coefficient from different land use types in Xitiaoxi Watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 1-4. (in Chinese))
- [30] ESEN E, USLU O. Assessment of the effects of agricultural practices on non-point source pollution for a coastal watershed: A case study in Watershed, Turkey[J]. Ocean & Coastal Management, 2008, 51: 601-611.
- [31] BOSCH N S. The influence of impoundments on riverine nutrient transport: An evaluation using the soil and water assessment tool[J]. Journal of Hydrology, 2008, 355: 131-147.
- [32] WESTON N B, HOLL BAUGH J T, JOYE S B. Population growth away from the coastal zone: Thirty years of land use change and nutrient export in the Altamaha River, GA[J]. Science of Total Environment, 2009, 407(10): 3347-3356.
- [33] ELSDON T S, DE BRUN M B, DIEPEN N J, et al. Extensive drought negates human influence on nutrients and water quality in

- estuaries[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 3033-3043.
- [34] 刘凌, 贺国庆. 西江流域硝酸盐氮输出规律研究[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 654-660. (LIU Ling, HE Guo-qing. Study on nitrate-N export changes of the Xijiang River[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 654-660. (in Chinese))
- [35] GAO L, LID J, DNG P X. Nutrient budgets averaged over tidal cycles off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77: 331-336.
- [36] SHEN ZL, ZHOU SQ, PEIS F. Transfer and transport of phosphorus and silica in the turbidity maximum zone of the Changjiang estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(3): 481-492.
- [37] PEIS F, Shen ZL, LAWS EA. Nutrient dynamics of upwelling area in the Changjiang (Yangtze River) estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(3): 569-580.
- [38] NAUSCH M, NAUSCH G, LASS H U, et al. Phosphorus input by upwelling in the eastern Gotland Basin (Baltic Sea) in summer and its effects on filamentous cyanobacteria[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 83: 434-442.
- [39] 李峥, 沈志良, 周淑青, 等. 长江口及其邻近海域磷的分布变化特征[J]. *海洋科学*, 2007, 31(1): 28-36. (LI Zheng, SHEN Zhi-liang, ZHOU Shu-qing, et al. Distributions and variations of phosphorus in the Changjiang estuary and its adjacent sea areas[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(1): 28-36. (in Chinese))
- [40] GAO L, LID J, DNG P X. Quasi-simultaneous observation of currents, salinity and nutrients in the Changjiang (Yangtze River) plume on the tidal timescale[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 75(1/2): 265-279.
- [41] SMAS T C, FERREIRA J G. Nutrient enrichment and the role of salt marshes in the Tagus estuary (Portugal) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 75: 393-407.
- [42] 王军, 陈振楼, 王东启, 等. 长江口滨岸湿地无机氮界面交换通量量算[J]. *地理学报*, 2006, 61(7): 729-740. (WANG Jun, CHEN Zhen-lou, WANG Dong-qi, et al. Calculation of inorganic nitrogen fluxes in the Yangtze Estuary Tidal Wetland[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 729-740. (in Chinese))
- [43] 王建中, 刘凌, 宋兰兰. 坡地氮磷流失过程模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 531-536. (WANG Jian-zhong, LIU Ling, SONG Lan-lan. Simulation of nitrogen and phosphorus loss in sloping field[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 531-536. (in Chinese))
- [44] GARCIA-ESTEVEZ J, LUDWIG W, KERHERVE P, et al. Predicting the impact of land use on the major element and nutrient fluxes in coastal Mediterranean rivers: The case of the Tê River (Southern France) [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22: 230-248.
- [45] 陈惟财, 陈伟琪, 张珞平, 等. 九龙江流域地表水中硝酸盐来源辨析[J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1484-1487. (CHEN Wei-cai, CHEN Wei-qi, ZHANG Luo-ping, et al. Identifying sources of nitrate in surface water of Jiulong River Watershed[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1484-1487. (in Chinese))
- [46] 黄金良, 洪华生, 张珞平. 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 866-871. (HUANG Jin-liang, HONG Hua-sheng, ZHANG Luo-ping, et al. Nitrogen and phosphorus loading of agricultural non-point sources in Jiulong River Watershed based on GIS[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 866-871. (in Chinese))
- [47] 龙天渝, 刘腊美, 李崇明, 等. GIS 的嘉陵江流域吸附态氮磷污染负荷研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2008, 30(3): 87-91. (LONG Tian-yu, LIU La-mei, LI Chong-ming, et al. A GIS-based study of the pollution load of adsorbed nitrogen and phosphorus in Jialing River Basin[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2008, 30(3): 87-91. (in Chinese))
- [48] 赖格英, 于革. 流域尺度的营养物质输移模型研究综述[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(5): 574-578. (LAIGe-ying, YU Ge. An overview: Development of nutrient transport models at catchment scale[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(5): 574-578. (in Chinese))
- [49] 程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 黄河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 384-391. (CHONG Hong-guang, YUE Yong, YANG Sheng-tian, et al. An estimation and evaluation of non-point source pollution in the Yellow River basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 384-391. (in Chinese))
- [50] 张金存, 芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 286-292. (ZHANG Jin-cun, RUI Xiao-fang. Discussion of theory and methods for building a distributed hydrologic model[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 286-292. (in Chinese))

- [51] 胡连伍,王学军,罗定贵,等.不同子流域划分对流域径流、泥沙、营养物模拟的影响:丰乐河流域个案研究[J].水科学进展,2007,18(2):235-240. (HU Lian-wu, WANG Xue-jun, LUO Ding-gui, et al. Effect of sub-watershed partitioning on flow, sediment and nutrient predictions: Case study in Fengle river watershed[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 235-240. (in Chinese))
- [52] PAERL H W, VALDESL M, JOYNER A R, et al. Solving problems resulting from solutions: evolution of a dual nutrient management strategy for the eutrophying Neuse River Estuary, North Carolina[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38: 30.
- [53] WOLANSKIE, BOORMAN L A, CH? CHARO L, et al. Ecohydrology as a new tool for sustainable management of estuaries and coastal waters[J]. Wetlands Ecology and Management, 2004, 12: 235-276.
- [54] 胡敦欣,王凡. JGOFSL O ICZ中国委员会阶段工作总结 [EB/OL]. [2009-03-20] <http://www.qdio.ac.cn/bicz/documents/JGOFSL O ICZ委员会阶段工作总结.doc>. (HU Dun-xin, WANG Fan. Stage work summary of Chinese JGOFSL O ICZ committee. <http://www.qdio.ac.cn/bicz/documents/JGOFSL O ICZ委员会阶段工作总结>. (in Chinese))

Review of studies on nitrogen and phosphorus transport in the continuum of watersheds, estuaries and offshore areas*

JANG De-juan, BIXiao-li

(Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, China)

Abstract: The paper reviews the main sources of nitrogen and phosphorus nutrients, as well as their transports in watersheds, estuaries and offshore areas. The leading methods of simulating nutrient transports are introduced, and the comprehensive studies on nitrogen and phosphorus transport in an integrated system of watersheds, estuaries and offshore areas are also summarized. Finally, the main problems and future prospects on the issues of eutrophication are discussed, the coupling of watersheds, estuaries and offshore areas should be focused, and the advantages of distributed models should be taken full in the study of nutrient transports in future.

Key words: watersheds-estuaries-offshore areas; nitrogen and phosphorus nutrients; water pollution; impact factors

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40901028; No. 40801016) and the Open Foundation of State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, CAS (No. A0713).