



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200213

黄海氮磷营养盐时空特征及影响过程分析

乌伊寒, 张晶, 赵亮, 陈创业
(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 利用物理-生物地球化学耦合模型, 模拟了黄海氮磷营养盐浓度及其结构的季节变化特征, 并量化分析了不同过程对该海域营养盐结构的影响. 氮磷营养盐浓度春夏低、秋冬高, 近岸高外海低, 底层高于表层; 氮磷比春夏高于秋冬季; 根据营养盐季节收支计算, 发现黄海内部生物过程在营养盐浓度及其结构的季节变化过程中起着至关重要的作用. 河流、大气、沉积物-水界面的营养盐输入是营养盐的重要补充过程, 不超过总氮、磷补充量的 33%. 黄海氮磷比由冬季到春季升高是由于磷含量的下降幅度大于氮的下降幅度; 夏季由于氮含量的上升幅度大于磷的上升幅度而继续升高; 秋季由于氮含量下降, 磷含量上升而下降.

关键词: 黄海; 营养盐; 分布特征; 影响因素; 数值模拟

中图分类号: X55, P72 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2021)05-0030-11

Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus and Its Influencing Processes in the Yellow Sea

WU Yihan, ZHANG Jing, ZHAO Liang, CHEN Chuangye

(College of Marine and Environmental Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In this study, a three-dimensional coupled biophysical model was established to simulate the seasonal variations of nitrogen and phosphorus concentrations and their structure in the Yellow Sea, and the different influencing processes on the nutrient structure in the Yellow Sea were quantitatively analyzed. The concentrations of nitrogen and phosphorus are lower in spring and summer, higher in autumn and winter. High concentrations occur in the coastal area and the bottom layer while low concentrations in the offshore area and the surface layer. The ratio of nitrogen to phosphorus in spring and summer is higher than that in autumn and winter. According to the nutrients seasonal budgets, the bio-process plays a critical role in the seasonal variation of nutrients concentrations and structure. River input, atmospheric deposition, and sediment release provide important supplement to marine nutrients, which is less than 33% of the total nutrients supplement. The increase of the ratio in the Yellow Sea from winter to spring is due to the decrease of phosphorus content which is greater than that of nitrogen; in summer, the ratio increases with the increase of nitrogen content which is greater than that of phosphorus; the ratio decreases in autumn because the nitrogen content decreases while phosphorus content increases.

Key words: Yellow Sea; nutrients; distribution characteristic; influence factors; numerical simulation

氮、磷、硅等营养盐是海水重要的生源要素^[1], 是海水浮游植物生命活动的物质基础^[2]. 营养盐作为海洋生态系统的物质基础, 其浓度和结构特征对海洋生态系统的物质循环和能量流动都有着重要影响. 营养盐的浓度及结构会影响浮游植物的群落结构^[3]. 适

宜的营养盐浓度及结构有利于浮游植物的生长, 营养盐结构的失调则会改变群落结构, 甚至引发有害藻华^[4]. 自 2000 年以来, 我国近海出现大规模有害藻华, 其藻种表现出多样化、小型化和有害化的趋势都与营养盐浓度和结构的变化相关^[5].

收稿日期: 2020-12-10; 修回日期: 2021-02-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC1401602)

作者简介: 乌伊寒(1995—), 女(蒙古族), 内蒙古通辽人, 硕士研究生; 通信作者: 赵亮, 教授, zhaoliang@tust.edu.cn

许多学者对黄海^[6]、长江口海域^[7]、东海赤潮高发区^[8]、南海海域^[9]以及沿岸海域^[10]营养盐进行了研究,发现营养盐浓度及结构随时间和空间的变化会对海区生态环境起关键作用.如江苏近岸较高的营养盐含量是黄海浒苔萌发和绿潮快速发展的重要物质基础,山东半岛南部低营养盐水平是限制绿潮持续发展的重要因素^[11].长江口营养盐浓度及结构的改变也是导致有害藻华大规模暴发及其优势种由硅藻向甲藻演变的主要原因^[5],长江口临近海域硝酸盐污染和高氮磷比与东海赤潮的暴发密切相关^[12].

黄海是我国半封闭陆架海区^[13],水体停留时间长,初级生产力高^[4],受周边人类活动影响大. Wei等^[14]发现黄海无机氮浓度从20世纪80年代持续上升,20世纪90年代中期上升最快,无机磷浓度在20世纪90年代中期之前存在下降趋势,之后逐渐上升.自20世纪80年代氮磷比不断上升,到20世纪末达到了大于16的水平.营养盐结构的变化不仅反映了营养盐状况的变化,还反映了海水中营养盐的再生、循环机制的改变^[8].海水营养盐的主要来源有河流输入、大气沉降、水体内碎屑的矿化、底界面的营养盐释放和邻近海域的营养盐输送^[15-17],黄海浮游植物的光合作用吸收和呼吸作用释放是营养盐最大的汇和源^[18].这些过程输入与消耗的营养盐不仅在浓度上不同,在营养盐结构上也不相同.王保栋等^[13,19-21]研究黄东海营养盐分布特征及其对浮游植物生长的限制状况,发现长江口以东及其东北部海域终年存在较大范围的营养盐高值区,也发现黄东海大部分海域浮游植物的生长受磷酸盐的限制;Wei等^[22]结合潮流作用研究了潮流对南黄海营养盐分布的影响;Liu等^[15-16,23-25]、Shi等^[26]对影响黄海营养盐浓度及结构的影响过程进行收支计算,研究河流输入、大气沉降、底界面释放、浮游植物生命活动等过程对黄海营养盐时空分布的作用.近几十年,由于沿海地区快速城市化和水产养殖的增长^[17],各过程营养盐浓度及结构都发生了巨大的变化,导致海水富营养化、海水酸化、有害藻华频现、浮游植物群落结构发生改变等^[23,27-31],对海洋生态环境安全造成了威胁^[32].研究黄海营养盐浓度特别是营养盐结构的变化和影响过程,对认识黄海生态环境有重要作用.

前人虽然已对黄海营养盐浓度及其结构进行了大量的研究,但对营养盐结构季节变化及其影响过程的研究相对较少.本文借助物理-生物地球化学耦合模型,模拟黄海氮磷营养盐浓度及其结构的时空分布特征,分析浮游植物初级生产、水体有机碎屑的再矿

化等内部过程和河流输入、大气沉降、沉积物-水界面交换、与邻近海域的水体交换等外部过程对该海域营养盐浓度及其结构的影响.

1 模型介绍

1.1 模型配置

采用 Zhao等^[33]和 Wang等^[34]建立并完善的物理-生物地球化学耦合模型(ECSECOM),蒋昊等^[18]在上述模型基础上,将有机碎屑(DET)分为了颗粒有机氮(PON)与颗粒有机磷(POP)分别参与循环,从而将氮和磷循环解耦.模型的初始场、强迫场和模型参数设置详见上述论文.利用此模型水动力模块提供的流速、生态模块提供的3种营养盐(溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP)、硅酸盐(DSi))、两种浮游植物(硅藻(DIA),鞭毛藻(FLA))和两种颗粒有机物(PON、POP)和生物硅(BSi)以及浮游植物的光合作用、呼吸作用、颗粒物的再矿化、沉积物-水界面营养盐的释放、河流径流和大气沉降过程对黄海氮磷营养盐浓度及其结构的季节变化特征的影响进行研究.

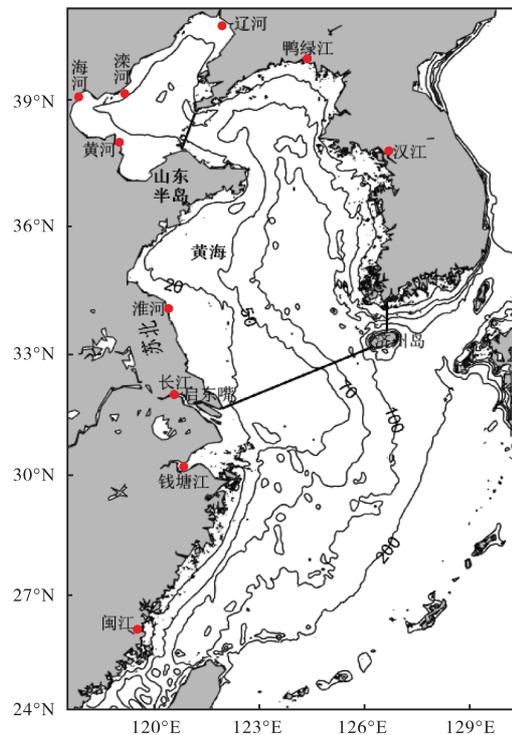


图1 生态模型计算区域和本文分析区域

Fig. 1 Simulated region of the model and the analyzed area in this paper

该模型运行了4年,可达到稳定状态,本文采用第4年数据进行分析.模型计算区域如图1所示,主

要包括渤海、黄海、东海,本文分析海域为黄海,取启东嘴到济州岛西南角断面和通过济州海峡的126.64°E断面为黄、东海分界线,取山东蓬莱到大连老铁山连线为渤、黄海分界线.鸭绿江、淮河和汉江这3条河流流入该分析海域.图中红点为河流入海口;启东嘴到济州岛西南角和通过济州海峡的126.64°E断面的粗实线为黄东海分界线,山东蓬莱到大连老铁山的粗实线为渤黄海分界线,分别用来计算黄海与东海、渤海之间的DIN、DIP及DIN/DIP通量;细实线为等深线,单位为m.

利用模型结果分析黄海氮磷营养盐及其结构的时空分布特征,以及利用模型内部过程计算各影响过程对黄海营养盐的贡献,如积分计算各源汇项的营养盐贡献(Q_1),上下界面交换过程(包括海-气界面,沉积物-水界面交换过程)的营养盐通量(Q_2),对于河流点源输入及侧界面交换(Q_3),据此定量分析各个过程对该海域营养盐的影响.

$$Q_1(t) = \iiint \Delta N(x, y, z, t) dx dy dz \quad (1)$$

$$Q_2(t) = \iint N_k(x, y, t) dx dy \quad (2)$$

$$Q_3(t) = \iint N_r(x, z, t) V_r(x, z, t) dx dz + \iint N_r(y, z, t) V_r(y, z, t) dy dz \quad (3)$$

其中: ΔN 为水体内部过程(PON、POP水体内的再矿化、浮游植物光合生产及呼吸释放), $\text{mmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; N_k 为大气DIN、DIP沉降通量,沉积物-水界面DIN、

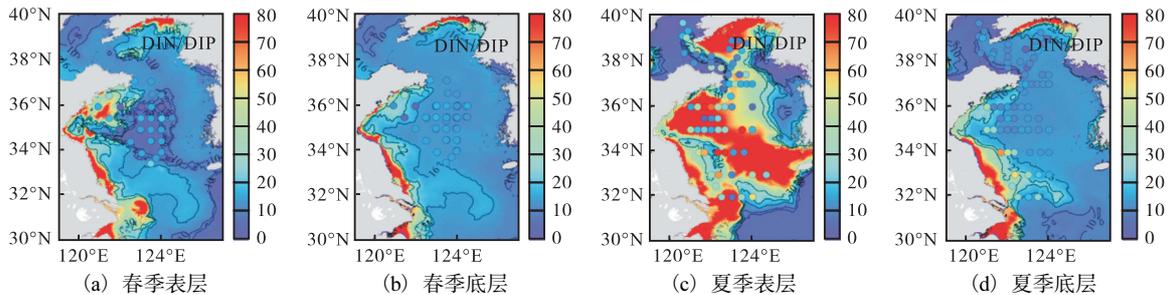


图2 模拟与实测黄海DIN/DIP分布(底图为模型模拟结果,圆点为现场观测结果)

Fig. 2 Model simulation and field investigation distribution of DIN/DIP in the Yellow Sea (The background is the result of the model; the dot is the result of situ observations.)

进一步利用文献发表数据^[35-38],对黄海DIN、DIP浓度及DIN/DIP进行了验证(表1),其验证结果显示DIN、DIP浓度的模型模拟值与实测值较为吻合.南黄海2013年6、11月DIN的观测浓度为 $(5.56 \pm 3.43) \text{mmol}/\text{m}^3$ 、 $(7.28 \pm 4.09) \text{mmol}/\text{m}^3$,模型模拟浓度依次为 $(5.96 \pm 3.16) \text{mmol}/\text{m}^3$ 、 $(9.57 \pm 5.74) \text{mmol}/\text{m}^3$.DIP观测浓度为 $(0.27 \pm 0.27) \text{mmol}/\text{m}^3$ 、 $(0.44 \pm 0.32) \text{mmol}/\text{m}^3$,模型模拟浓度为 $(0.30 \pm 0.27) \text{mmol}/\text{m}^3$ 、 $(0.59 \pm 0.40) \text{mmol}/\text{m}^3$.DIN、DIP两种营养

DIP释放通量, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; N_r 为侧边界的DIN、DIP浓度, mmol/m^3 , V_r 为侧边界法向流速, m/d .

1.2 模型验证

Zhao等^[33]、Wang等^[34]、蒋昊等^[18]对模型模拟的营养盐、叶绿素进行了验证,本文则利用2009年春季黄海水华航次(2009-03-24—2009-04-14)、2017年夏季渤海黄海航次(2017-08-29—2017-09-24)两个航次中现场实验测得的硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、铵盐($\text{NH}_4\text{-N}$)及DIP数据,对黄海氮磷比(DIN/DIP)数值模拟结果进行验证,定义实测DIN数据为硝酸盐、亚硝酸盐及铵盐之和(图2),其底图为模型模拟结果,圆点为现场观测结果.结果显示,模型较好地反映出黄海DIN/DIP的空间变化特征.如春季表底层DIN/DIP的模拟结果与实测结果均在山东半岛东南部近岸高,高于22,由近岸向外海逐渐降低;夏季表层DIN/DIP模型模拟结果在鸭绿江口、山东半岛东南部、长江口及其附近海域高于80,比实测结果高,长江口及其外海表底层DIN/DIP由近岸向外海递减特征的模拟较为一致.表层DIN/DIP的分布特征与谢琳萍等^[4]的研究一致.需要指出的是,用来验证黄海DIN/DIP的实测数据为航次数据,而本研究模型的结果是采用气候态强迫得到的,模型结果与实测数据之间不可避免存在一些差异,但是模拟结果基本能反映黄海DIN/DIP的时空特征.

盐浓度均为6月的小于11月的;6月和11月DIN/DIP观测值为48.00、20.40,模型结果为 44.31 ± 38.66 、 19.92 ± 12.72 ,11月份的均小于6月份的.对北黄海的观测与模拟结果进行比较,DIN、DIP两种营养盐浓度在2011年7月、2012年9月小,2007年1月大,DIN/DIP在9月大,1月小.总的来说,DIN、DIP两种营养盐春夏季浓度低于秋冬季,春夏季DIN/DIP较秋冬季高.DIN/DIP的模拟结果在南黄海较好,其值相差不大,而北黄海DIN/DIP的模拟值大

于实测结果.

表 1 黄海氮磷营养盐浓度平均值和氮磷比比较

Tab. 1 Comparison of the average value of nutrients and the ratio of nitrogen and phosphorus in the Yellow Sea

海域	数据类型	时间	DIN/(mmol·m ⁻³)	DIP/(mmol·m ⁻³)	DIN/DIP	数据来源
南黄海	观测	2013 年 6 月	5.56 ± 3.43	0.27 ± 0.27	48.00	[35]
	模型	2013 年 6 月	5.96 ± 3.16	0.30 ± 0.27	44.31 ± 38.66	
	观测	2013 年 11 月	7.28 ± 4.09	0.44 ± 0.32	20.40	[35]
	模型	2013 年 11 月	9.57 ± 5.74	0.59 ± 0.40	19.92 ± 12.72	
北黄海	观测	2007 年 1 月	7.00 ± 2.71	0.48 ± 0.21	16.30	[36]
	模型	2007 年 1 月	8.78 ± 2.17	0.55 ± 0.20	21.08 ± 12.59	
	观测	2011 年 7 月	3.16	0.20	—	[37]
	模型	2011 年 7 月	4.00 ± 1.51	0.18 ± 0.09	49.42 ± 41.57	
	观测	2012 年 9 月	4.50	0.19	24.00	[38]
	模型	2012 年 9 月	4.92 ± 1.63	0.22 ± 0.09	49.00 ± 36.25	

注: —为无数据.

浮游植物光合作用、呼吸作用、水体内部碎屑的再矿化、河流输入、大气沉降、沉积物-水界面释放以及断面上的水体交换等过程对黄海氮磷营养盐的收支贡献情况,与已发表的相关研究进行对比.对比验证结果显示,上述影响过程对黄海氮磷营养盐的收支贡献,与先前的研究结果基本吻合.黄海浮游植物通过光合作用消耗的 DIN 为 846.88 Gmol/a,与王保栋等^[19]、赵晨英等^[39]研究黄海浮游植物 DIN 年需求量 800 Gmol/a、(740 ± 77) Gmol/a 相近.黄海浮游植物对 DIP 的消耗量为 52.87 Gmol/a,与赵晨英等^[39]计算结果相近;沿岸河流向黄海输入的 DIN 为 8.47 Gmol/a,与赵晨英等^[39]得出的鸭绿江(3 Gmol/a)、汉江(2.6 Gmol/a)、淮河(2.75 Gmol/a)向

黄海输入的 DIN 总和 8.35 Gmol/a 也很吻合;通过大气干、湿沉降过程输入的 DIN 总量为 24.67 Gmol/a,与研究^[19,23]结果 25.3、25.2 Gmol/a 较一致,大气沉降过程带来的 DIP 总量为 0.29 Gmol/a,与文献^[23]结果 0.29 Gmol/a 完全一致.浮游植物呼吸作用、沉积物-水界面释放、PON 的再矿化、水体交换等过程对 DIN 的贡献情况均与研究^[18]结果一致.

2 结果与讨论

2.1 黄海氮磷营养盐的时空变化特征

黄海表、底层 DIN 浓度分布如图 3 所示,分别以 5 月、8 月、11 月和 2 月代表春、夏、秋、冬四季.

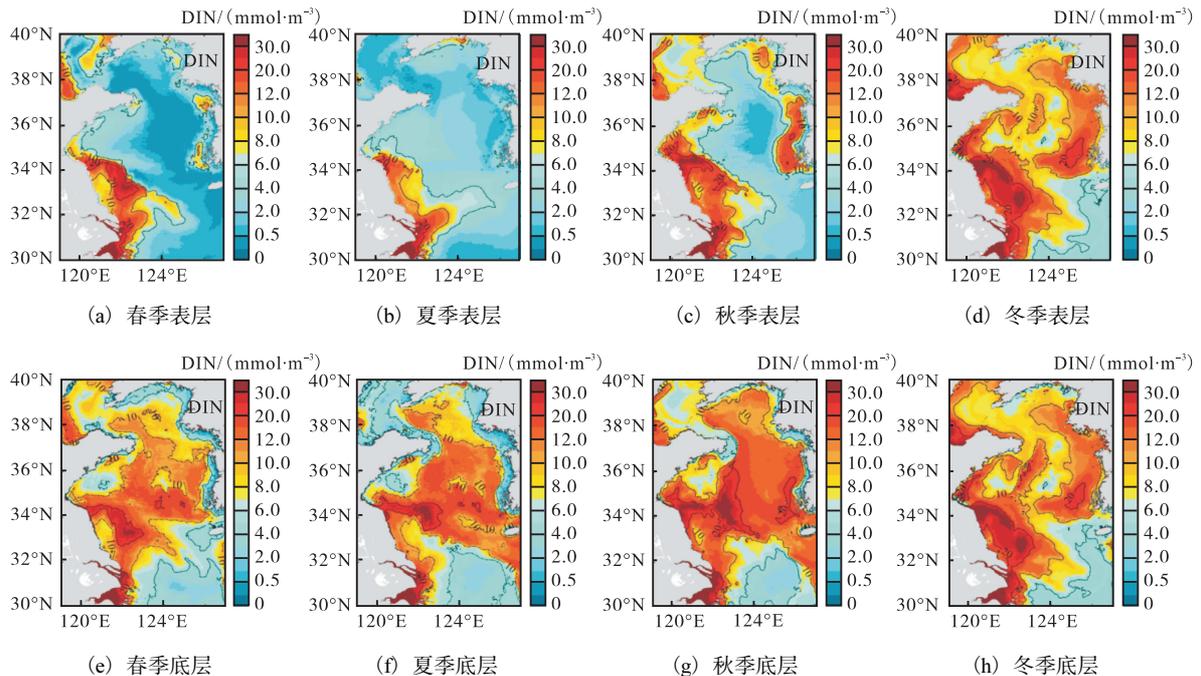


图 3 黄海 DIN 浓度分布

Fig. 3 Distribution of DIN concentration in the Yellow Sea

春季, 黄海 DIN 水柱平均浓度为 $(6.96 \pm 4.94) \text{ mmol/m}^3$. 由于黄海中央海域浮游植物的快速繁殖和生长消耗大量营养盐, 该海域表层 DIN 浓度锐减^[20], 低于 4 mmol/m^3 . 表层 DIN 浓度在南黄海西南部高, 与 Shi 等^[26]、Guo 等^[40]的结果一致, 浓度大于 10 mmol/m^3 , 东南部低, 低于 1 mmol/m^3 . 表层 DIN 浓度由近岸向深海有明显的梯度变化, 35°N 苏北沿岸附近有向岸的低 DIN 浓度舌状水体; 底层 DIN 浓度在近岸与表层差异较小^[24], 但在北黄海与南黄海中部高于表层, 其浓度大于 7 mmol/m^3 . 这是由于春季黄海上层水体开始增温, 垂直混合作用不能达至海底, 底层所保留下来的冬季时的营养盐难以向上扩散^[20].

夏季, 黄海 DIN 水柱平均浓度为 $(6.28 \pm 3.35) \text{ mmol/m}^3$. 表层 DIN 浓度在黄海西南部及鸭绿江口沿岸大于 5 mmol/m^3 , 其余海域小于 5 mmol/m^3 , 这与春季时的分布相似, 其成因亦然. 随着冲淡水的扩展, 长江口高浓度舌状区域向东北扩展^[20], 苏北沿岸浓度较春季有所降低. 山东半岛东部浓度降低, 朝鲜半岛沿岸 DIN 高浓度区域消失. 由近岸向深海的浓度梯度变化仍明显存在; 底层 DIN 浓度在长江口附近和苏北海浓度高, 浓度普遍大于 20 mmol/m^3 , 但长江口外海浓度相对较低^[13], 低于 5 mmol/m^3 . 黄海中央海域, 即黄海冷水团盘踞海域存在 DIN 浓度高值封闭区^[21], 其浓度大于 10 mmol/m^3 , 普遍高于表

层^[40], 这是自春季以来, 下、底层水体中的有机物分解产生了大量 DIN, 由于受温度、密度跃层的阻挡而难以向上扩散, 在底层逐渐积累的结果.

秋季, 黄海 DIN 水柱平均浓度为 $(9.08 \pm 5.38) \text{ mmol/m}^3$. 表层 DIN 浓度近岸高外海低, 且向外海有一定梯度. 苏北沿岸、长江口东北高值区较夏季有所扩展. 朝鲜半岛近岸 DIN 浓度回升且浓度较高, 大于 7 mmol/m^3 , 黄海中部浓度低, 大部分区域小于 5 mmol/m^3 , 北黄海沿岸高值区较夏季也有所扩展; 底层 DIN 浓度高值出现在长江口附近、苏北沿岸及黄海中部, 均大于 10 mmol/m^3 , 且中部高值区成因与夏季亦然, 其范围较夏季有所扩大. 近岸 DIN 浓度表底差异不大.

冬季, 黄海 DIN 水柱平均浓度为 $(12.65 \pm 6.59) \text{ mmol/m}^3$. 表层 DIN 浓度在黄海中部及东南部的其他海域均较高, 高于 7 mmol/m^3 . 南黄海西南部海域, 存在 DIN 浓度高值区, 普遍高于 20 mmol/m^3 , 且有向北扩展的特征. 朝鲜半岛西南角近岸海域 DIN 浓度亦较高, 高于 20 mmol/m^3 ; 由于冬季强烈的混合作用, 温度、密度跃层消失, 黄海底层 DIN 浓度与表层差异不大, 其分布与表层非常一致^[20,40]. 总的来看, 黄海 DIN 浓度的时空分布特征与 Wei 等^[22]的研究结果基本一致.

黄海表、底层 DIP 浓度分布如图 4 所示.

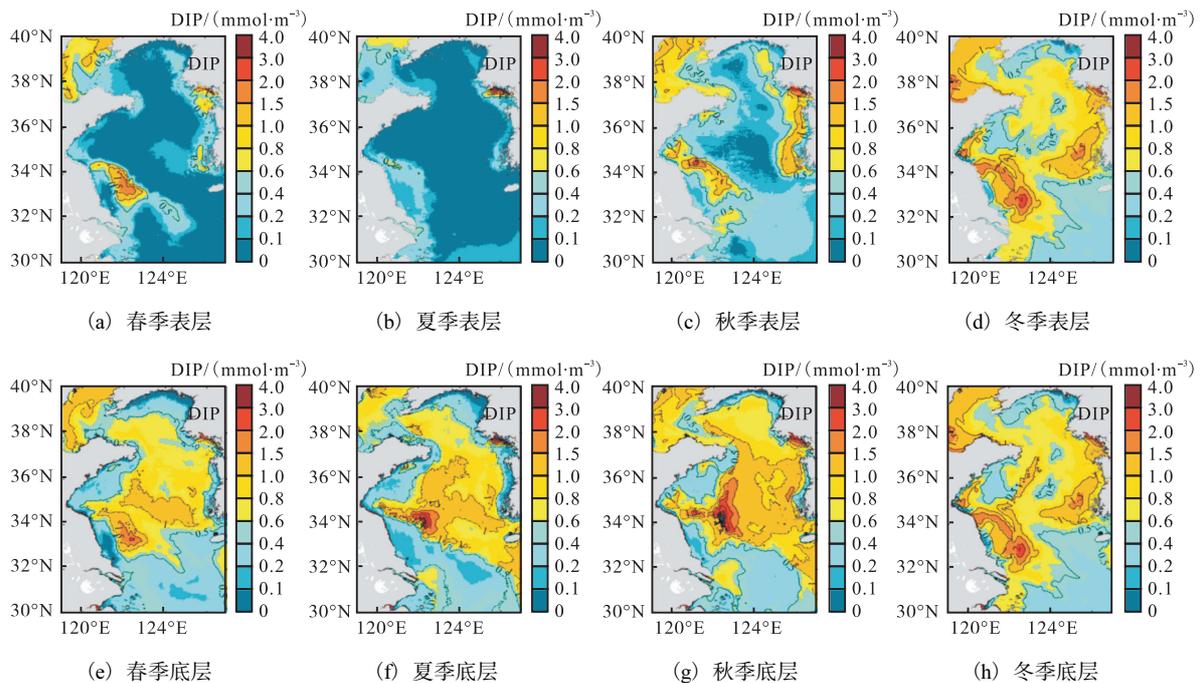


图 4 黄海 DIP 浓度分布

Fig. 4 Distribution of DIP concentration in the Yellow Sea

春季, 黄海 DIP 水柱平均浓度为 $(0.36 \pm 0.33) \text{ mmol/m}^3$. 与 DIN 一致, 黄海表层中央海域浮游植物对 DIP 的大量消耗, 使非近岸海域 DIP 浓度锐减, 浓度普遍低于 0.1 mmol/m^3 . 表层 DIP 浓度在南黄海西南部高^[6], 浓度大于 0.5 mmol/m^3 ; 底层 DIP 浓度高于表层, 黄海中部浓度大于 0.5 mmol/m^3 , 原因与 DIN 一致, 同样是由于春季黄海上层水体开始增温, 垂直混合作用不能达至海底, 底层所保留下来的冬季时的营养盐难以向上扩散. 近岸 DIP 浓度的表底分布差异较小, 这也与 DIN 浓度的垂直分布相似.

夏季, 黄海 DIP 水柱平均浓度为 $(0.28 \pm 0.42) \text{ mmol/m}^3$. 表层 DIP 浓度在黄海西南部, 即苏北沿岸较高, 但其量值较春季时明显降低, 浓度低于 0.4 mmol/m^3 . 大部分海域浓度低于 0.1 mmol/m^3 , 与春季时的分布相似, 其成因亦然. 成山头附近浓度降低, 朝鲜半岛沿岸 DIP 高浓度区域也消失. 与 DIN 分布明显不同的是, DIP 在长江口外不存在舌状扩展; 底层 DIP 浓度在苏北外海高于 4 mmol/m^3 , 长江口外海浓度低于 0.5 mmol/m^3 . 黄海中央海域, 即黄海冷水团盘踞海域与 DIN 一样, 仍存在 DIP 浓度高值封闭区, 其浓度大于 0.5 mmol/m^3 , 普遍高于表层浓度^[40]. 这仍是自春季以来, 下、底层水体中的有机物分解产生了大量 DIP, 由于受温度、密度跃层的阻挡

而难以向上扩散, 在下、底层逐渐积累的结果.

秋季, 黄海 DIP 水柱平均浓度为 $(0.52 \pm 0.38) \text{ mmol/m}^3$. 表层 DIP 浓度仍是近岸高外海低. 苏北沿岸、长江口东北部高值区较夏季有所扩展, 其浓度大于 0.5 mmol/m^3 . 朝鲜半岛近岸 DIP 浓度回升且浓度高于 1 mmol/m^3 , 黄海中部海域浓度低^[39], 低于 0.5 mmol/m^3 . 北黄海沿岸高值区较夏季有所扩展; 底层 DIP 浓度高值区出现在黄海中部, 成因与夏季亦然, 其范围较夏季有所扩大. 水深较浅的沿岸区域 DIP 浓度表底差异仍较小, 与 DIN 浓度分布一致.

冬季, 黄海 DIP 水柱平均浓度为 $(0.76 \pm 0.39) \text{ mmol/m}^3$. 表层 DIP 浓度在苏北浅滩存在 DIP 浓度高值区, 大于 1 mmol/m^3 . 朝鲜半岛西南角近岸海域 DIP 浓度亦较高, 高于 1 mmol/m^3 ; 由于冬季强烈的混合作用, 温度、密度跃层消失, 黄海底层 DIP 浓度与其表层分布非常一致^[40].

对比 DIP 与 DIN 的分布, 发现 DIP 的分布与 DIN 最明显的不同是夏季表层 DIP 在长江口外没有舌状扩展, 可能是被局地消耗所致, 反映了 DIN 与 DIP 的不同作用.

2.2 黄海 DIN/DIP 时空变化特征

调查海域表底层水体 DIN/DIP 的空间分布特征如图 5 所示.

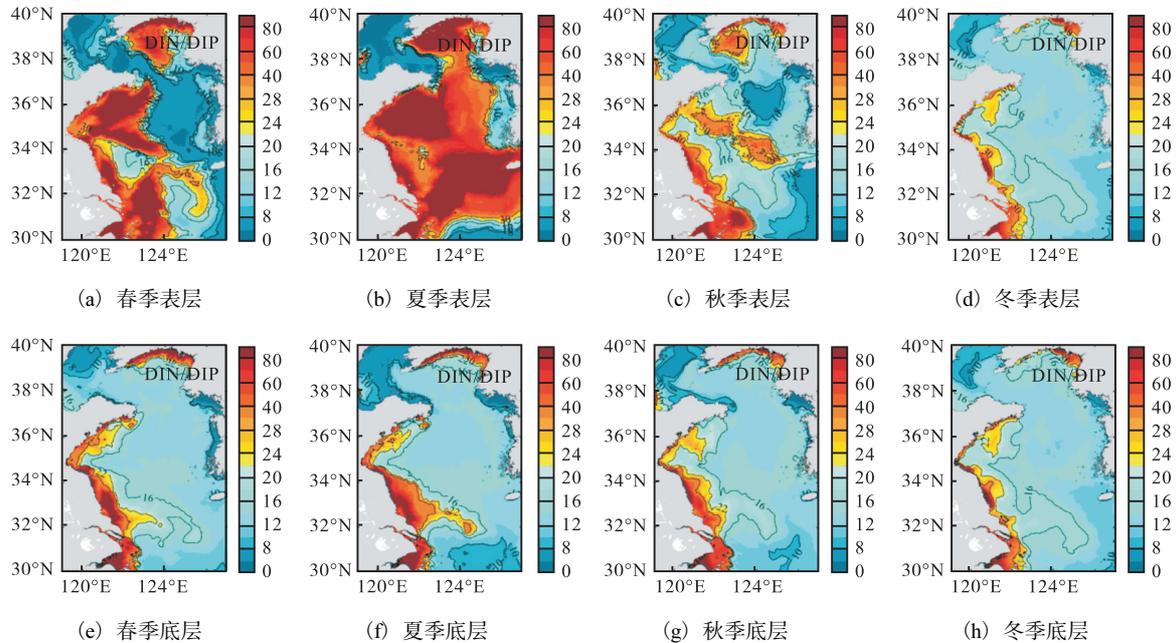


图 5 黄海 DIN/DIP 分布

Fig. 5 Distribution of DIN/DIP in the Yellow Sea

春季, 黄海 DIN/DIP 的水柱平均值为 39.73 ± 36.57 . 表层水体 DIN/DIP 在鸭绿江沿岸及其外海、

山东半岛东南部及其外海、苏北近岸高于 22, 最高值出现在鸭绿江口, 这与鸭绿江径流的 DIN 输入有

关^[16-17], 低值区则出现在山东半岛北部及南黄海中部海域, 低于 10; 底层 DIN/DIP 在鸭绿江口、山东半岛东南部及江苏沿岸较高, 但高值区范围比表层明显减小。

夏季, 黄海 DIN/DIP 的水柱平均值为 52.21 ± 32.37 。表层水体高 DIN/DIP 的特性更加明显, 这是由于表层 DIN 浓度相比春季上升, 而 DIP 浓度相比春季下降, 因此夏季 DIN/DIP 有所升高, 且高值区范围较春季有所扩大, 大部分海域 DIN/DIP 高于 30, 长江口北部、山东半岛东南部及鸭绿江口沿岸海域 DIN/DIP 高于 80, 而朝鲜半岛近岸海域 DIN/DIP 低于 22。由于 DIN 与 DIP 的不同作用, 长江口水体中的 DIN 和 DIP 在输运过程中被消耗后, 过剩的 DIN 显示出东北向的舌状分布, 这是长江口高值 DIN/DIP 向东北扩展的原因; 底层 DIN/DIP 分布与春季相似。

秋季, 黄海 DIN/DIP 的水柱平均值为 23.10 ± 14.03 。表层 DIN/DIP 在鸭绿江口及辽东半岛西南部及其外海、苏北沿岸、由山东半岛东南部中部指向济州岛的海域存在 DIN/DIP 高值区, 大于 30。南黄海

中部海域 DIN/DIP 低于 10; 底层水体 DIN/DIP 的分布与表层水体有一定的差异, 但与春夏季分布相似, 只是扩展范围相比较小。

冬季, 黄海 DIN/DIP 的水柱平均值为 19.51 ± 12.21 。由于水体垂直混合加强, 表、底层水体性质趋于一致, 水体 DIN/DIP 分布变化不大。DIN/DIP 高值区主要分布在鸭绿江口、山东半岛南部、苏北近岸, 大于 22。近岸海域的 DIN/DIP 较低, Guo 等^[40]的研究也显示, 冬季近岸海域 DIN/DIP 明显低于其他季节, 与本文结果一致。

2.3 影响黄海 DIN/DIP 的过程分析

影响氮磷营养盐浓度及其结构的过程包括水体内部过程和外部过程, 分别计算了浮游植物初级生产、水体有机碎屑的再矿化等内部过程和河流输入、大气沉降、沉积物-水界面交换、与邻近海域的水体交换等外部过程对该海域 DIN、DIP 及 DIN/DIP 的影响。

图 6 为影响黄海 DIN 和 DIP 各个过程的四季收支示意图, 图 7 为黄海 DIN/DIP 的四季收支示意图。

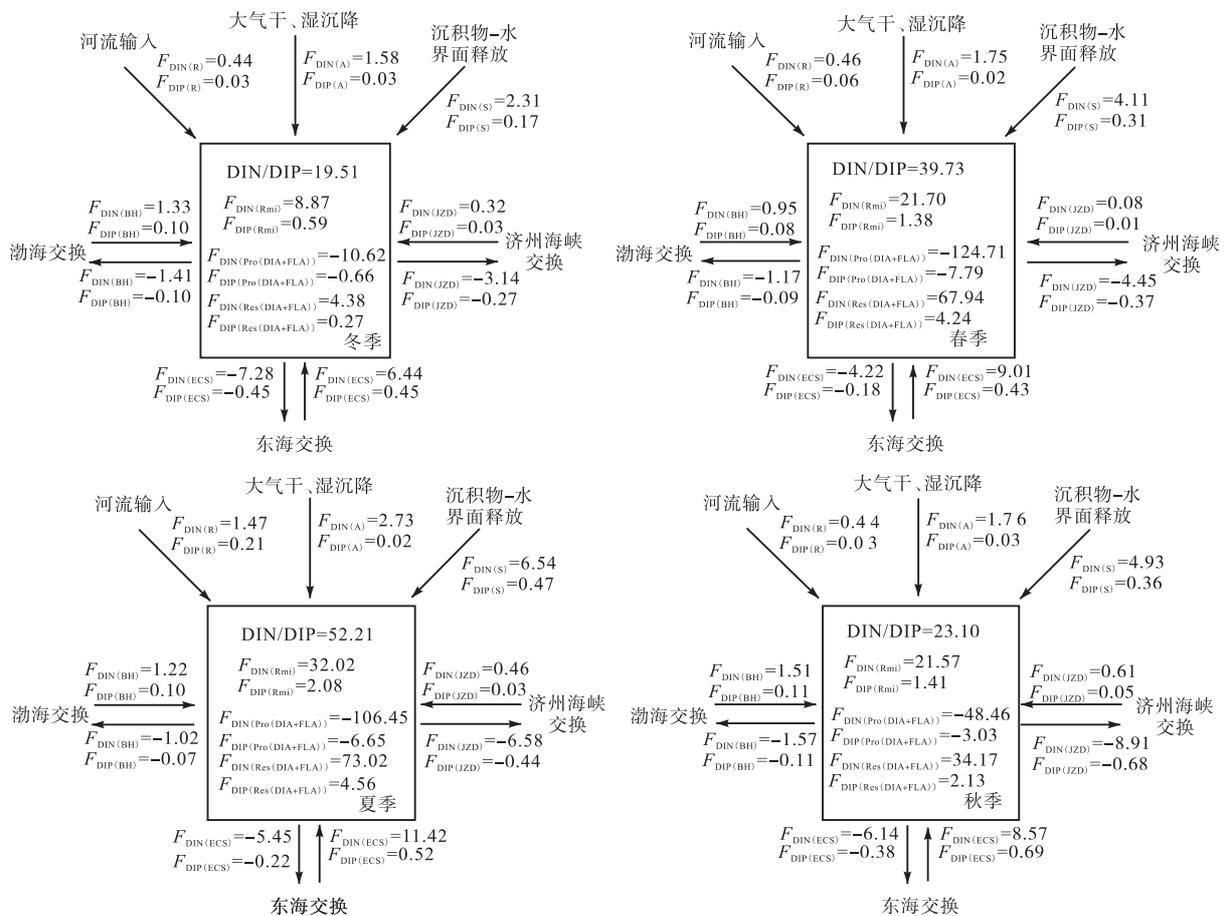


图 6 黄海 DIN、DIP 四季收支示意图

Fig. 6 Budgets of the DIN, DIP in the Yellow Sea for each season

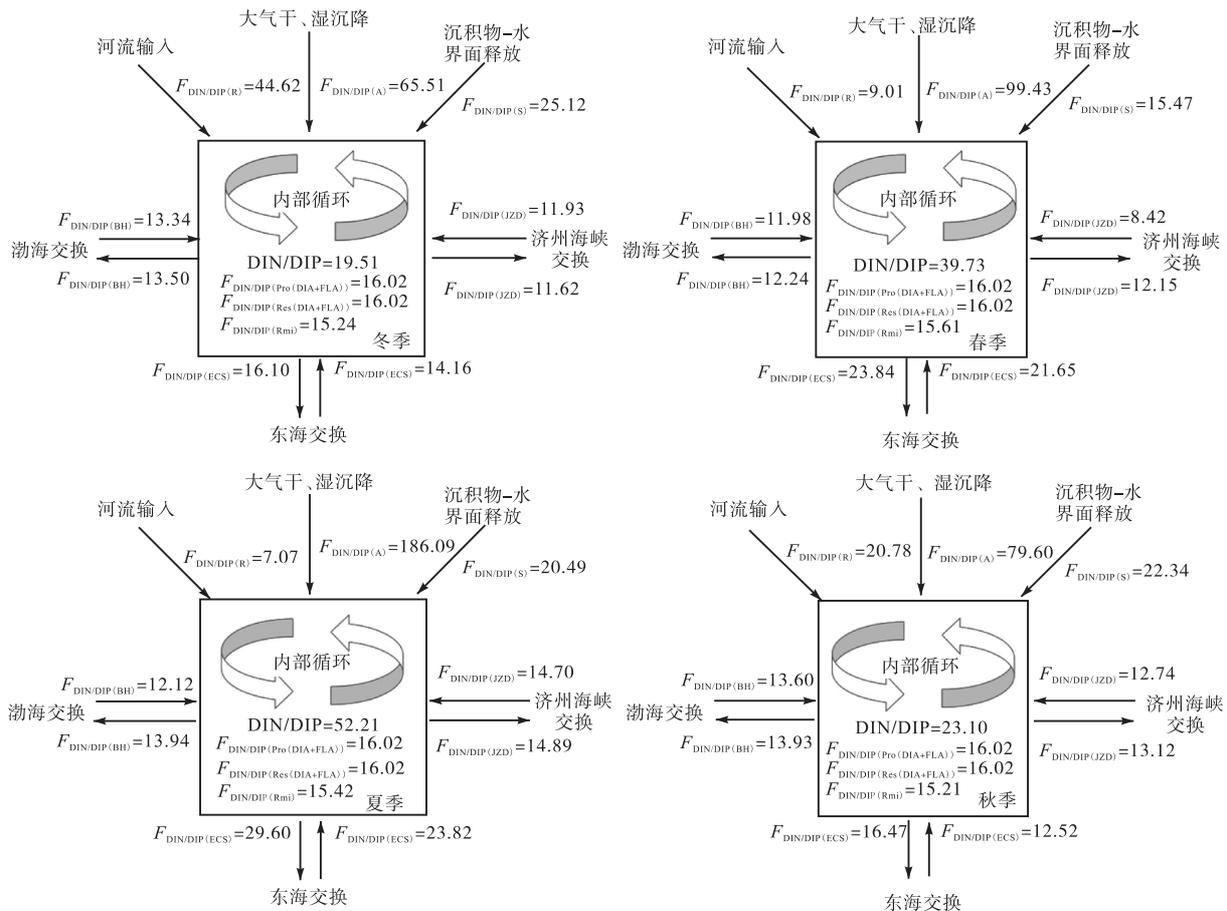


图 7 黄海 DIN/DIP 四季收支示意图

Fig. 7 Budget of the DIN/DIP in the Yellow Sea for each season

图中 F 代表各过程的贡献, 单位为 10^6 kmol/月 , R 代表河流输入, A 代表大气干湿沉降, S 代表沉积物-水界面释放, BH 代表渤海与黄海的交换, ECS 代表东海与黄海的交换, JZD 代表通过济州海峡的交换, Pro 代表浮游植物的生产消耗, Res 代表浮游植物的呼吸释放, Rmi 代表水体 PON 、 POP 的再矿化释放. 需指出的是, 河流输入是鸭绿江、淮河和汉江这 3 条河流的总和. 黄海 DIN 、 DIP 收支统计见表 2.

冬季, 黄海海域 DIN/DIP 的平均值为 (19.51 ± 12.21) . 河流与大气输入的 DIN 为 $0.44 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $1.58 \times 10^6 \text{ kmol/月}$, 大气输入的 DIN 为河流的 3 倍以上, 而 DIP 的输入均为 $0.03 \times 10^6 \text{ kmol/月}$, 因此, 大气 DIN/DIP 大于河流; 沉积物-水界面与碎屑的再矿化为黄海补充 DIN 约 $2.31 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $8.87 \times 10^6 \text{ kmol/月}$, DIP 约为 $0.17 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $0.59 \times 10^6 \text{ kmol/月}$, 碎屑的再矿化所释放的营养盐是沉积物-水界面释放的 3 倍以上, 而 DIN/DIP 要小于沉积物-水界面; 黄海向邻近海域输送的 DIN 和 DIP 为 $3.74 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $0.25 \times 10^6 \text{ kmol/月}$; 浮游植物

的净生产对两种营养盐的消耗量是 $6.24 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $0.39 \times 10^6 \text{ kmol/月}$.

降低 DIN 、 DIP 含量的过程为浮游植物的光合作用和黄海向临近海域的营养盐输送过程, DIN 、 DIP 的总损失量为 $9.98 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $0.64 \times 10^6 \text{ kmol/月}$, 其中浮游植物的净生产对营养盐的消耗是最主要的消耗过程, 占总损失量的 62.53%、60.94%; 而总补充量为 $13.20 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $0.82 \times 10^6 \text{ kmol/月}$, 其中碎屑的再矿化所释放的 DIN 、 DIP 含量比河流、大气、沉积物-水界面释放过程输入的 DIN 、 DIP 含量大很多, 占 DIN 补充量的 67.20%, DIP 补充量的 71.95%. 上述过程整体为黄海增加 DIN 、 DIP 约 $3.22 \times 10^6 \text{ kmol/月}$ 、 $0.18 \times 10^6 \text{ kmol/月}$.

春季, 随着温度的升高, 黄海浮游植物净生产对两种营养盐的消耗增大, 均为冬季的 9 倍以上; 碎屑的再矿化所释放的营养盐含量较冬季有所升高, 占总 DIN 、 DIP 输入量的 76.90%、77.97%, 而 DIN/DIP 变化不大; 水体的交换补充 DIN 约 $0.20 \times 10^6 \text{ kmol/月}$, DIP 的损失为 $0.13 \times 10^6 \text{ kmol/月}$; 河流输入的 DIN 比

起冬季稍有增加,而 DIP 为冬季的 2 倍,因此其 DIN/DIP 下降至 9.01;大气沉降以 DIN/DIP 为 99.43 向黄海输入的营养盐仅占总 DIN、DIP 输入量的 6.20%、1.13%;沉积物-水界面释放的营养盐为冬季的 1.8 倍左右,但其 DIN/DIP 从冬季的 25.12 下降至 15.47. 各过程对黄海营养盐的补充量不能满足损失

量, DIN、DIP 的总损失量为 28.54×10^6 kmol/月、 1.90×10^6 kmol/月,比冬季依次降低8.86 倍、10.56 倍.

因此,春季 DIN 的降低幅度小于 DIP 的降低幅度,黄海 DIN/DIP 较冬季上升,上升至 (39.73 ± 36.57) .

表 2 黄海 DIN、DIP收支统计

Tab. 2 Statistics of DIN, DIP budgets in the Yellow Sea

营养盐	内容	冬季	春季	夏季	秋季
DIN/ (10^6 kmol/月)	浮游植物净生产消耗	-6.24	-56.76	-33.42	-14.29
	与邻近海域交换	-3.74	0.20	0.04	-5.93
	河流输入	0.44	0.46	1.47	0.44
	大气沉降	1.58	1.75	2.73	1.76
	沉积物-水界面释放	2.31	4.11	6.54	4.93
	PON 的再矿化	8.87	21.70	32.02	21.57
	损失量	-9.98	-56.76	-33.42	-20.22
	补充量	13.20	28.22	42.80	28.70
	总量	3.22	-28.54	9.38	8.48
	DIP/ (10^6 kmol/月)	浮游植物净生产消耗	-0.39	-3.54	-2.09
与邻近海域交换		-0.25	-0.13	-0.08	-0.32
河流输入		0.03	0.06	0.21	0.03
大气沉降		0.03	0.02	0.02	0.03
沉积物-水界面释放		0.17	0.31	0.47	0.36
POP 的再矿化		0.59	1.38	2.08	1.41
损失量		-0.64	-3.67	-2.17	-1.21
补充量		0.82	1.77	2.78	1.83
总量		0.18	-1.90	0.61	0.62

夏季,由于温度的进一步升高,黄海内部碎屑的再矿化所释放的营养盐较春季有所升高,占总 DIN、DIP 输入量的 74.81%、74.82%;河流的 DIN、DIP 输入量是春季的 3 倍和 3.5 倍,其 DIN/DIP 下降至 7.07;沉积物-水界面以与春季相近的 DIN/DIP 释放的营养盐较春季也有所增加;水体交换过程使 DIN 得到补充,使 DIP 损失;浮游植物的净生产对营养盐的消耗较春季有所下降,其中 DIA 的生产对营养盐的消耗较春季有所降低,而 FLA 对营养盐的消耗与释放都较春季有所上升,也就是说夏季黄海浮游植物中 FLA 的量较春季有所升高;通过大气沉降输入的营养盐较春季增加了约 0.98×10^6 kmol/月,占总 DIN 输入量的 6.38%,其 DIP 与春季水平相当,占总 DIP 输入量的 0.72%,其 DIN/DIP 从春季的 99.43 上升至 186.09.

秋季,黄海 DIN/DIP 降至 23.10 ± 14.03 . 黄海内部碎屑以 DIN/DIP 为 15.21 再矿化所释放的营养盐要比夏季少,与春季水平相当,占总 DIN、DIP 输入量的 75.16%、77.05%;浮游植物的净生产所消耗的营养盐比夏季减少了一半以上,消耗的营养盐依次为 14.29×10^6 kmol/月、 0.89×10^6 kmol/月;河流输入的营养盐有所减少,依次减少至 0.44×10^6 kmol/月、 0.03×10^6 kmol/月, DIP 减少程度大于 DIN 的减少程度,其比值从夏季的 7.07 上升至 20.78;沉积物-水界面以 DIN/DIP 为 22.34 释放的含量较夏季有所减少;秋季向临近海域输送营养盐含量全年最高,约为 5.93×10^6 kmol/月、 0.32×10^6 kmol/月;通过大气输入的营养盐比夏季有所减少,为 1.76×10^6 kmol/月,而 DIP 较夏季有所上升,约 0.03×10^6 kmol/月,其 DIN/DIP 从夏季的 186.09 下降至 79.60.

最终,黄海营养盐得到了补充, DIN、DIP 的总补充量为 9.38×10^6 kmol/月、 0.61×10^6 kmol/月. 与春季相比其 DIN 的增长幅度大于 DIP,因此 DIN/DIP 由春季的 39.73 ± 36.57 上升,最终上升至 52.21 ± 32.37 .

上述过程对黄海营养盐的补充量大于其损失量,对两种营养盐贡献约为 8.48×10^6 kmol/月、 0.62×10^6 kmol/月,与夏季相比 DIN 含量降低,而 DIP 含量上升,因此秋季黄海海域 DIN/DIP 下降.

3 结 论

利用物理-生物地球化学耦合模型,给出了黄海氮磷营养盐及其结构的时空分布特征,研究了水体内部过程和外部过程对该海域 DIN/DIP 的影响,得到如下主要结论:

(1) 黄海 DIN、DIP 浓度及 DIN/DIP 存在明显的季节变化特征. 春夏季 DIN、DIP 浓度低于秋冬季; 春夏季 DIN/DIP 高于秋冬季,其峰值出现在夏季.

(2) 营养盐浓度及其结构的水平分布存在空间差异. 营养盐浓度在近岸高,外海低,底层高于表层; DIN/DIP 在浮游植物生命活动强的区域较高,在鸭绿江口、长江口附近海域呈现高 DIN/DIP 的特点.

(3) 根据营养盐的季节收支计算,发现黄海内部生物过程在营养盐浓度及其结构的季节变化中起着至关重要的作用. 河流输入、大气干湿沉降、沉积物-水界面的营养盐释放过程是黄海营养盐的重要补充过程,与邻近海域的营养盐交换过程通过影响内部过程来改变营养盐含量. 浮游植物的净生产所消耗的 DIN、DIP 占总营养盐损失量的 62.53% ~ 100%、60.94% ~ 96.46%; 碎屑再矿化所释放的 DIN、DIP 占总 DIN、DIP 补充量的 67.20% ~ 76.90%、71.95% ~ 77.97%,但其 DIN/DIP 在 15.21 ~ 15.61,在四季均低于黄海 DIN/DIP 的平均值;而河流输入、大气沉降、沉积物-水界面释放 DIN、DIP 仅占总 DIN、DIP 补充量的 22.40% ~ 32.80%、22.03% ~ 28.05%,其中大气沉降 DIN/DIP 全年均比黄海平均值高.

(4) 黄海 DIN/DIP 从冬季到春季升高是由于 DIP 含量的下降幅度大于 DIN 的下降幅度,夏季继续升高是由于 DIN 含量的上升幅度大于 DIP 的上升幅度,秋季其比值的下降是由于 DIN 含量下降,而 DIP 含量上升所致.

致谢: 感谢国家自然科学基金(41876018)、天津市自然科学基金(19JCZDJC40600)对本项目的支持.

参考文献:

- [1] 于子洋. 2011—2013 年南黄海及东海北部海域营养盐分布规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [2] 张辉, 石晓勇, 张传松, 等. 北黄海营养盐结构及限制作用时空分布特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(4): 773-780.
- [3] 张海波, 王丽莎, 石晓勇, 等. 渤海中部营养盐季节变化及限制统计分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1579-1588.
- [4] 谢琳萍, 孙霞, 王保栋, 等. 渤海营养盐结构及其潜在限制作用的时空分布[J]. 海洋科学, 2012, 36(9): 45-53.
- [5] 于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等. 中国近海有害藻华研究现状与展望[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 768-788.
- [6] 高生泉, 林以安, 金明明, 等. 春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构[J]. 东海海洋, 2004(4): 38-50.
- [7] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 II. 春季的营养限制情况[J]. 海洋学报, 2001(3): 57-65.
- [8] 王修林, 孙霞, 韩秀荣, 等. 2002 年春、夏季东海赤潮高发区营养盐结构及分布特征的比较[J]. 海洋与湖沼, 2004(4): 323-331.
- [9] 袁梁英. 南海北部营养盐结构特征[D]. 厦门: 厦门大学, 2005.
- [10] 韦桂峰. 广东大亚湾西南部海域营养盐结构的长期变化[J]. 生态科学, 2005(1): 1-5.
- [11] 张海波, 刘珂, 苏荣国, 等. 2018 年南黄海浒苔绿潮迁移发展规律与营养盐相互关系探究[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 30-39.
- [12] ZHOU M J, SHEN Z L, YU R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River[J]. Continental shelf research, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [13] 王保栋. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制[J]. 应用生态学报, 2003(7): 1122-1126.
- [14] WEI Q S, YAO Q Z, WANG B D, et al. Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea[J]. Continental shelf research, 2015, 111: 184-196.
- [15] LIU S M, ZHANG J, CHEN H T, et al. Factors influencing nutrient dynamics in the eutrophic Jiaozhou Bay, North China[J]. Progress in oceanography, 2005, 66(1): 66-85.
- [16] LIU S M, HONG G H, ZHANG J, et al. Nutrient budgets for large Chinese estuaries[J]. Biogeosciences, 2009, 6(10): 2245-2263.
- [17] LIU S M, LI L W, ZHANG G L, et al. Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) estuary[J]. Journal of hydrology, 2012, 430: 103-110.
- [18] 蒋昊, 赵亮, 张晶. 黄海溶解无机氮及颗粒有机氮收支与转化模型[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 3981-3991.

- [19] 王保栋,单宝田,战闰,等. 黄、渤海无机氮的收支模式初探[J]. 海洋科学,2002,26(2):33-36.
- [20] 王保栋,王桂云,郑昌洙,等. 南黄海营养盐的平面分布及横向输运[J]. 海洋学报,1999(6):3-5.
- [21] 王保栋. 南黄海营养盐的垂直分布特性及其垂向输运规律[J]. 海洋环境科学,1999(1):13-18.
- [22] WEI Q S, YU Z G, WANG B D, et al. Coupling of the spatial-temporal distributions of nutrients and physical conditions in the southern Yellow Sea[J]. Journal of marine systems, 2016, 156: 30-45.
- [23] 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]. Journal of atmospheric chemistry, 2007, 57(1):41-57.
- [24] 刘素美,张经,陈洪涛. 黄海和东海生源要素的化学海洋学[J]. 海洋环境科学,2000(1):68-74.
- [25] LIU S M, ZHANG J, CHEN S Z, et al. Inventory of nutrient compounds in the Yellow Sea[J]. Continental shelf research, 2003, 23(11/12/13):1161-1174.
- [26] SHI X Y, QI M Y, TANG H J, et al. Spatial and temporal nutrient variations in the Yellow Sea and their effects on *Ulva prolifera* blooms[J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2015, 163(A):36-43.
- [27] BRICKER S B, LONGSTAFF B, DENNISON W, et al. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: a decade of change[J]. Harmful algae, 2008, 8(1):21-32.
- [28] HEISLER J, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus[J]. Harmful algae, 2008, 8(1):3-13.
- [29] GLIBERT P M, ALLEN J I, BOUWMAN A F, et al. Modeling of HABs and eutrophication[J]. Status, advances, challenges, 2010, 83(3/4):262-275.
- [30] QU H J, KROEZE C. Past and future trends in nutrients export by rivers to the coastal waters of China[J]. Science of the total environment, 2010, 408(9):2075-2086.
- [31] LI R H, LIU S M, LI Y W, et al. Nutrient dynamics in tropical rivers, lagoons, and coastal ecosystems of eastern Hainan Island, South China Sea[J]. Biogeosciences, 2014, 11(2):481-506.
- [32] GENG H X, YU R C, ZHANG Q C, et al. Tracing the settlement region of massive floating green algae in the Yellow Sea[J]. Journal of oceanology and limnology, 2019, 37(5):1555-1565.
- [33] ZHAO L, GUO X Y. Influence of cross-shelf water transport on nutrients and phytoplankton in the East China Sea: a model study[J]. Ocean science discussion, 2011, 7(1):111.
- [34] WANG Y C, GUO X Y, ZHAO L, et al. Seasonal variations in nutrients and biogenic particles in the upper and lower layers of East China Sea Shelf and their export to adjacent seas[J]. Progress in oceanography, 2019, 176: 102138.
- [35] SONG J W, ZHANG C S, SHI X Y. Distribution and influence factors of dissolved inorganic nutrients in the Southern Yellow Sea and Yangtze Estuary in summer and autumn[J]. Ocean university China, 2016, 46(9):71-77.
- [36] LI C X, YANG G P, WANG B D. Biological production and spatial variation of dimethylated sulfur compounds and their relation with plankton in the North Yellow Sea[J]. Continental shelf research, 2015, 102:19-32.
- [37] 李延伟,胡莹莹,陈淑梅. 夏、秋季北黄海营养盐的时空分布特征及其影响机制[J]. 中国环境科学, 2013, 33(6):1060-1067.
- [38] DUAN L Q, SONG J M, YUAN H M, et al. Distribution, partitioning and sources of dissolved and particulate nitrogen and phosphorus in the north Yellow Sea[J]. Estuarine coastal & shelf science, 2016, 181: 182-195.
- [39] 赵晨英,臧家业,刘军,等. 黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7):2115-2127.
- [40] GUO C C, ZHANG G C, SUN J, et al. Seasonal responses of nutrient to hydrology and biology in the southern Yellow Sea[J]. Continental shelf research, 2020, 206:104207.

责任编辑:郎婧