

象山港不同温度区围隔浮游生态系统 营养盐迁移—转化的模拟对比

杨红*, 李春新, 印春生, 储鸣
(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 为评估象山港海域电厂温排水对水体富营养化影响,以生态系统中氮、磷营养盐循环为主线,建立了适用于海洋围隔浮游生态系统的多变量的营养盐迁移—转化动力学模型。该模型包括浮游植物、浮游动物、溶解无机态营养盐、溶解有机态营养盐和生物碎屑5个模块,涉及溶解无机氮、磷酸盐、溶解有机氮、溶解有机磷、浮游植物、浮游动物和生物碎屑7个状态变量。利用2010年10月象山港其中一个温度区的围隔生态实验数据成功地进行了模型的验证,确定了相关参数的量值,并用该参数同时模拟3个不同温度区围隔氮、磷营养盐生物化学迁移—转化过程,进而得出温度对围隔浮游生态系统氮、磷营养盐迁移—转化影响的结论。结果表明,象山港电厂温排水加剧了受纳水体的富营养化程度。

关键词: 氮磷营养盐; 迁移—转化模型; 围隔; 温度; 象山港

中图分类号: Q 178.53; S 917

文献标志码: A

滨海电厂温排水对受纳水体富营养化的影响是目前受到普遍关注的问题之一。其中,利用建立数学模型的方法来研究氮、磷等营养盐在不同营养层次生物之间的迁移—转化动力学过程,已成为热点。中国近海海域主要是在20世纪90年代以后才得以发展和完善,主要涉及东海^[1],胶州湾^[2-4]、渤海^[5-6]、黄海^[7-8]、台湾海峡^[9]和莱州湾^[10]等。由于我国近海海域的海洋环境特点有别于国外其他海域^[11],在借鉴国外海洋生态动力学模型的基础上,应当根据我国近海海域海洋学和生态学特点,通过现场实验等建立模型并确定相关动力学过程及模型参数。其中,海洋围隔生态实验由于具有生态系统可控、与海洋自然状况相近、时间连续等特点^[12],与室内实验相比可获得较多的信息,往往用于营养盐等污染物迁移—转化过程的研究^[13],以及相关生态动力学参数的测定,从而为模型的建立、验证、改进等提供了一个有效的手段。

本研究利用2010年秋季在象山港进行的围

隔生态实验,在欧洲5国11个研究所共同研制的欧洲局域海生态模型(ERSEM)^[14]基础上,在不同温升区建立了其中一个围隔浮游生态系统氮、磷营养盐迁移—转化模型,并用该参数同时模拟3个不同温度区围隔氮、磷营养盐生物化学迁移—转化过程,进而得出温度对围隔浮游生态系统氮、磷营养盐迁移—转化影响的结论。

1 材料与方法

1.1 围隔实验情况

海洋围隔实验于2010年10月5日—19日在象山港国华电厂近岸海域进行,围隔采用漂浮式,主要由钢骨架和塑料袋(透明聚乙烯材料)组装而成。围隔袋为底面直径为1 m,高度为1 m的圆柱体。根据2009年夏季大潮落憩海表温升分布(图1),利用鱼排设定3个站点(图1),每个站点分别安置1个围隔,编号分别为M1(121°30'16"E,29°30'12"N)、M2(121°31'50"E,29°30'28"N)和M3(121°32'20"E,29°30'

收稿日期:2011-03-16 修回日期:2011-05-12

资助项目:科技部海洋公益性行业科研专项资金项目(200905010);上海市教委高校第五期海洋环境工程重点学科资助(J50702)

通讯作者:杨红,E-mail:hyang@shou.edu.cn

38°N),其中 M3 为对照围隔。M1、M2 和 M3 依次远离电厂排水口。

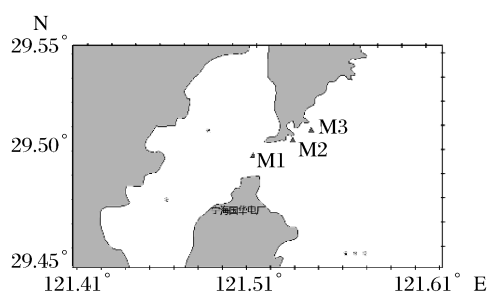


图 1 象山港围隔站位图

Fig. 1 Enclosures stations in the Xiangshan Bay

为更好地进行对比,实验开始时,统一从对照站位取相同体积的表层(深度为 0.5 m)海水分别加入 3 个围隔袋中,使得每个围隔袋内的水体结构与生物群落结构和对照站位自然海域表层浮游生态系统的状态基本一致。

1.2 采样和分析

试验期间于每天 9:00 使用 1 L 有机玻璃采水器分别采集 3 个围隔中层(深度为 0.5 m)水体的水样。其中,表层海水温度、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、和叶绿素(*Chl. a*)浓度等参数的测定均采用海洋调查规范中的方法。其中,用 *Chl. a* 浓度来表达浮游植物生物量。

透过海面的太阳光有效辐射强度平均为 $(99.8 \pm 11.9) \text{ W/m}^2$,盐度均为 (24.6 ± 0.10) ,浮游植物优势种为琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*),浮游动物则以太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)为优势种。

2 模型原理与建立

由于围隔袋不透水,模型中可视为物质守恒的保守系统。这样,在围隔生态系统中,则主要考虑浮游生态系统内部生物转化等过程对氮、磷营养盐循环的影响,而不考虑海—气界面交换、水动力交换等其他过程。

2.1 模型假设条件

由于围隔生态系统是典型的浮游生态系统,影响过程极为复杂,为简化起见将模型定义为(1)浮游植物和浮游动物分别单独作为 1 个状态变量,不考虑其种类、粒级等区别,以及种间竞争作用;(2)一般浮游植物优先选择吸收 $\text{NO}_3\text{-N}$ ^[15],本模型对溶解无机氮(dissolved

inorganic nitrogen, DIN)的吸收不区分 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$;(3)细菌作为隐含参量,不考虑分解者的组成及结构对营养盐迁移—转化的影响。

2.2 模型结构

该模型主要包括 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、溶解有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)、溶解有机磷(dissolved organic phosphorus, DOP)、浮游植物(phytoplankton, PPT)、浮游动物(zooplankton, ZPT)和生物碎屑(detritus, DPT) 7 个状态变量。物质流统一以 mg/L 表示。包括浮游植物、浮游动物、溶解无机态营养盐、溶解有机态营养盐和生物碎屑 5 个模块(图 2)。

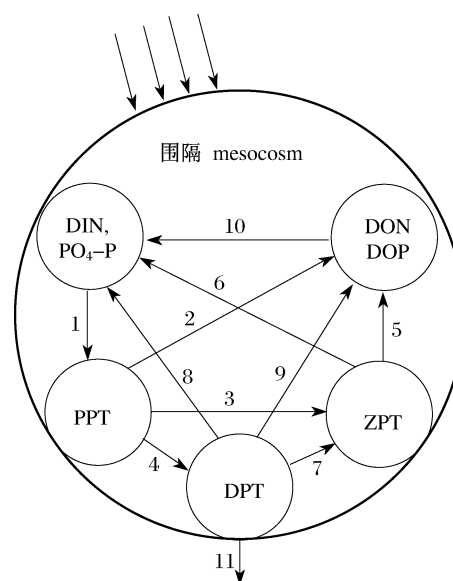


图 2 围隔生态系统氮、磷营养盐迁移—转化模型

1. 光合作用过程; 2. 浮游植物代谢过程; 3. 浮游动物对浮游植物摄食过程; 4. 浮游植物死亡过程; 5,6. 浮游动物代谢过程; 7. 浮游动物对生物碎屑摄食、死亡和粪便排泄过程; 8. 生物碎屑微生物降解转化为溶解无机态营养盐过程; 9. 生物碎屑微生物降解转化为溶解有机态营养盐过程; 10. 溶解有机态营养盐微生物降解过程; 11. 生物碎屑沉降过程

Fig. 2 Modeling nitrogen and phosphorus transport and transformation in pelagic ecosystem in mesocosm

1. photosynthesis; 2. phytoplankton excretion; 3. zooplankton grazing; 4. phytoplankton mortality; 5,6. zooplankton excretion; 7. zooplankton grazing, mortality and excretion; 8,9. Indicate detritus biodegradation by microorganism; 10. dissolved organic nutrients biodegradation by microorganism; 11. detritus sedimentation.

浮游植物模块 浮游植物模块主要考虑浮游植物光合作用带来的正增长以及代谢、死亡、被

浮游动物摄食负增长等 4 个过程,由方程(1)表示为

$$\partial C_{PPT}/\partial t = (\mu_{PPT-G} - \mu_{PPT-E} - \mu_{PPT-D})C_{PPT} - \mu_{PPT-Z}C_{ZPT} \quad (1)$$

浮游动物模块 浮游动物模块主要考虑浮游动物对浮游植物和生物碎屑摄食的正增长以及其死亡、代谢的负增长等 4 个过程,考虑到围隔实际情况,浮游动物和浮游植物浓度均很低,忽略掉浮游动物对浮游植物的摄食作用,可应用方程(2)表示:

$$\partial C_{ZPT}/\partial t = (\delta_{DPT-Z} - \mu_{ZPT-D} - \mu_{ZPT-N})C_{ZPT} \quad (2)$$

溶解无机态 N、P 营养盐 溶解无机态营养盐模块主要包括浮游植物对 DIN 和 PO₄-P 吸收的负增长及浮游动物代谢和溶解有机态营养盐微生物降解带来的负增长 3 个过程,可分别应用方程(3),(4)表示:

$$\partial C_{DIN}/\partial t = -\mu_{PPT-G}C_{PPT} + r_{ZPT-N}\mu_{ZPT-N}C_{ZPT} + \mu_{DON-B}C_{DON} \quad (3)$$

$$\partial C_{PO_4-P}/\partial t = (-\mu_{PPT-G}C_{PPT} + r_{ZPT-N}\mu_{ZPT-N}C_{ZPT})r_{N/P} + \mu_{DOP-B}C_{DOP} \quad (4)$$

溶解有机态 N、P 营养盐 溶解有机态营养盐模块主要包括浮游植物和浮游动物代谢、生物碎屑微生物降解等正增长过程和溶解有机态营养盐微生物降解的负增长共 4 个过程,可分别应用方程(5),(6)表示:

$$\partial C_{DON}/\partial t = \mu_{PPT-E}C_{PPT} + (1 - r_{ZPT-N})\mu_{ZPT-N}C_{ZPT} + \mu_{DPT-B}C_{DPT} - \mu_{DON-B}C_{DON} \quad (5)$$

$$\partial C_{DOP}/\partial t = [\mu_{PPT-E}C_{PPT} + (1 - r_{ZPT-N})\mu_{ZPT-N}C_{ZPT} + \mu_{DPT-B}C_{DPT}]/r_{N/P} - \mu_{DOP-B}C_{DOP} \quad (6)$$

生物碎屑模块 生物碎屑模块主要包括浮游植物和动物死亡的正增长过程及生物碎屑沉降和微生物降解的负增长 3 大过程,可应用方程(7)表示:

$$\partial C_{DPT}/\partial t = [\mu_{ZPT-D} + (1 - \delta_{PPT-Z})\mu_{PPT-Z} - \delta_{DPT-Z}\mu_{DPT-Z}]C_{ZPT} + \mu_{PPT-D}C_{PPT} - (\mu_{DPT-B} + \mu_{DPT-S})C_{DPT} \quad (7)$$

2.3 主要过程

浮游植物光合作用主要有温度、光照强度和营养盐 3 个效应。其中,温度效应给定为指数关系。光照强度对浮游植物光合作用的影响采用 Steele 方程^[16]表达。太阳辐射进入海水后,光照强度随深度增加而呈指数衰减,衰减速率取决于

水体的消光系数,在围隔生态系统中,消光系数主要考虑叶绿素浓度的影响。同时浮游植物伴随着呼吸作用、体外分泌等生物代谢活动,模型将二者简化为一项,主要考虑光照强度起到的决定性的作用。浮游动物代谢产物包括溶解有机态营养盐和溶解无机态营养盐,在这里,由于模型不区分浮游动物种类,可简为与浮游动物生物量成一定比例关系。有机态营养盐和生物碎屑的微生物降解过程用 1 个简单的依赖温度的指数方程表示,不区分其中具体的生物化学过程。同样,浮游植物和浮游动物的死亡速率也考虑为温度的函数。具体的迁移—转化内部过程详见表 1。

表 1 氮、磷营养盐迁移—转化方程主要过程

Tab. 1 Primary equations of nitrogen and phosphorus transport and transformation

名称 function	表达式 equation	表达式及描述 equation definition
μ_{PPT-G}	$3.5k_{PPT-G}$	浮游植物光合作用速率
μ_{PPT-E}	$0.25\mu_{PPT-G}$	浮游植物代谢速率
μ_{PPT-D}	$k_{PPT-D}e^{(L_{PPT-D}T)}$	浮游植物死亡速率
μ_{DPT-Z}	$k_{DPT-Z}C_{DPT}/(C_{DPT} + K_{SDPT})$	浮游动物摄食生物碎屑速率
μ_{ZPT-D}	$k_{ZPT-D}e^{L_{ZPT-D}T_T}$	浮游动物死亡速率
μ_{ZPT-N}	$k_{ZPT-N}e^{L_{ZPT-N}T_T}$	浮游动物代谢速率
μ_{DON-B}	$K_{DON-B}e^{L_{DON-B}T_T}$	溶解有机氮微生物降解速率
μ_{DPT-B}	$K_{DPT-B}e^{L_{DPT-B}T_T}$	生物碎屑微生物降解速率
μ_{DPT-S}	V_{DPT-S}/H	生物碎屑的沉降速率
μ_{DOP-B}	$K_{DOP-B}e^{L_{DOP-B}T_T}$	溶解有机磷微生物降解速率

2.4 模型参数

模型参数是模型成果的关键因素,其可靠性对于模型模拟结果的合理性、准确性等起着重要的作用。由于诸参数与流动无关,可根据有关的现场监测资料和国内外研究的经验参数,其中,除采用围隔实验中测定的参数外,尽可能选择相关现场或实验室测定的参数。在此基础上应用 STELLA 9.0.3 软件,根据象山港对照区(M3)围隔生态实验结果,通过模拟结果对参数进行优化,并最终确定模型参数。模型中主要参数列于表 2。

表 2 主要模型参数
Tab. 2 Model in primary parameters

符号/单位 parameter/unit	定义 definition	取值 value	出处 reference
K	海水消光系数	0.5	*
$I_{opt}/(W/m^2)$	浮游植物生长最佳光合有效辐射	95	*
$k_{PPT-G}/(d)$	浮游植物生长速率常数	2.0	*
$k_{PPT-D}/(d)$	浮游植物死亡速率常数	0.02	*
$k_{ZPT-D}/(d)$	浮游动物死亡速率常数	0.02	*
$k_{ZPT-N}/(d)$	浮游动物代谢速率常数	0.1	*
$k_{DPT-Z}/(d)$	浮游动物摄食生物碎屑速率常数	0.7	[17]
$k_{DON-B}/(d)$	溶解有机氮微生物降解速率常数	0.01	[18]
$k_{DOP-B}/(d)$	溶解有机磷微生物降解速率常数	0.03	[18]
$k_{DPT-B}/(d)$	生物碎屑微生物降解速率常数	0.06	[19]
r_{ZPT-N}	浮游动物代谢物无机营养盐比重	0.75	[18]
$K_{sDPT}/(mmol/m^3)$	生物碎屑被摄食的半饱和常数	0.7	[17]
L_{PPT-G}	浮游植物生长温度效应系数	0.065	*
L_{PPT-D}	浮游植物死亡温度效应系数	0.065	*
L_{ZPT-D}	浮游动物死亡温度效应系数	0.06	[17]
L_{ZPT-N}	浮游动物代谢温度效应系数	0.027	*
L_{DPT-B}	生物碎屑微生物降解温度效应系数	0.06	[19]
δ_{PPT-Z}	浮游动物捕食浮游植物同化系数	0.8	[19]
δ_{DPT-Z}	浮游动物捕食生物碎屑同化系数	0.7	[19]
V_{DPT-S}	生物碎屑沉降速率	0.5	[17]
H	围隔水深	1	*
$r_{N/P}$	Redfield 比值	16	[19]

注: * 表示在原初始值基础上通过围隔实验得出的参数。

Notes: * indicates the optimized parameter by mesocosm.

3 模拟结果验证与模型参数分析

模型在 STELLA 9.0.3 软件环境下开发运行,软件可将变数间复杂的关系以图形方式表现,有着良好的可靠性。时间步长为 1 d,积分算法采用龙格—库塔法。应用该模型模拟运行对照区

(M3) 围隔生态系统中 DIN, PO_4 -P 浓度和浮游植物生物量(用 *Chl. a* 表示) 3 个主要状态变量的变化。用实测值与模拟结果作对比模拟结果(图 3-a, b, c)表明, DIN、 PO_4 -P 浓度和浮游植物生物量模拟结果与实验结果基本吻合,相关性较好 ($R > 0.8, P < 0.05$), 该模型基本能反映象山港围隔浮游生态系统各状态变量的变化,说明所确定的模型参数基本能够反映象山港海域的地域化特征。

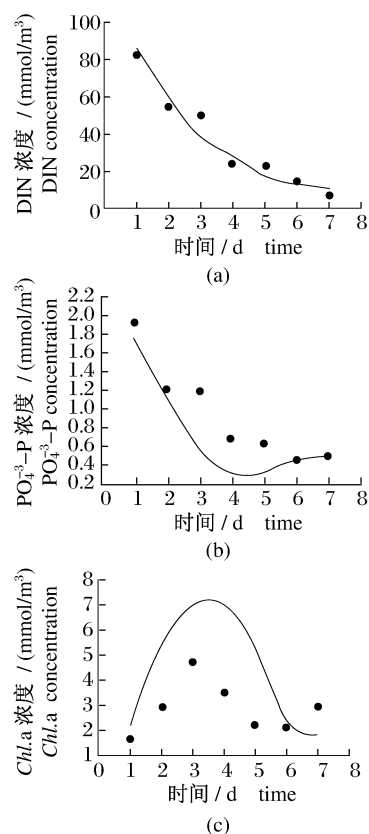


图 3 象山港海洋围隔生态实验 DIN, PO_4 -P 和 *Chl. a* 结果及模型模拟结果

Fig. 3 Simulation results of variations of state variables and mesocosm experiment data for DIN, PO_4 -P and *Chl. a* in Xiangshan Bay

4 3 个不同温度区围隔模拟的对比

3 个围隔所测的表层海水温度存在相应的递减: $M1 > M2 > M3$, 以 2010 年 10 月 10 日连续站测定的温度作为修正, 平均温度依次为 $(26.81 \pm 0.15) ^\circ C$ 、 $(24.64 \pm 0.19) ^\circ C$ 、 $(22.19 \pm 0.13) ^\circ C$ 。实验期间, 以晴天为主。3 个围隔温度随时间的变化趋势基本一致, 除第二天温度稍高外, 其余 6 d 的温度变化趋势基本持平。

用已确定的上述部分参数对其他条件相同而分属不同温度区的3个围隔生态系统中DIN、 PO_4 -P浓度和浮游植物生物量3个主要状态变量的变化进行模拟(图4-a,b,c),应用F检验法检验结果表明,3组参数两两之间总体方差均无显著性差异,其显著性水平为0.05,置信度为95%。

结果表明,不同温度区围隔浮游植物生物量的变化表明在一定的范围内,浮游植物生物量与水温较显著的线性相关关系,随温度的增加而增加,即M1 > M2 > M3;相应的,DIN浓度随温度的增加而减少,即M3 > M2 > M1。

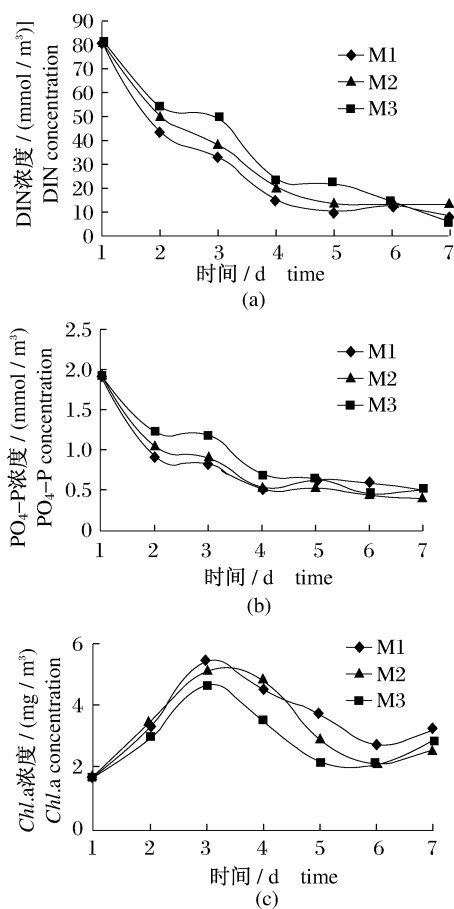


图4 象山港不同温度区围隔DIN、 PO_4 -P和Chl. a模拟结果

Fig. 4 Simulation results of mesocosm that belong to different temperature section for DIN, PO_4 -P and Chl. a in Xiangshan Bay

5 结论

本文根据象山港海洋围隔生态实验结果,以氮、磷营养盐循环为基础,建立了围隔浮游生态系

氮、磷营养盐迁移—转化动力学模型。通过所建立的围隔动力学模型,成功地模拟了2002年10月上旬围隔浮游生态系统中氮、磷营养盐生物化学迁移—转换过程,确定了相关参数的量值,模拟结果与实际变化基本吻合,说明模型逻辑结构及其相关动力学方程基本合理,所确定的模型参数也基本能够反映象山港海域的地域化特征,从而为揭示象山港海域浮游生态系统营养盐迁移—转化动力学机制提供科学基础。

同时,用已确定的参数对其他条件相同而分属不同温度区的3个围隔生态系统中DIN、 PO_4 -P浓度和浮游植物生物量3个主要状态变量的变化进行模拟,模拟结果表明,不同温度区围隔DIN、 PO_4 -P浓度随温度的增加而减少,即M3 > M2 > M1;相应的,浮游植物生物量与水温较显著的正相关关系,随温度的增加而增加,即M1 > M2 > M3。表明随着温度的增高,海域富营养化趋于严重,即象山港电厂温排水加剧了受纳水体的富营养化程度。

参考文献:

- [1] 章守宇,刘莲,杨红. 东海磷营养盐变动模型的建立与应用[J]. 水产学报,2003,27(3):265-272.
- [2] CHEN C, JI R, ZHENG L, *et al.* Influences of physical processes on the ecosystem in Jiaozhou Bay-A coupled physical and biological model experiment [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (C12):29925-29949.
- [3] WAN Z W, YUAN Y L, QIAO F L. 2-Order turbulence closure plankton ecosystem dynamics model and its application [J]. Journal of Hydrodynamics Series: B-English Edition, 2001, 13 (3):17-23.
- [4] 吴增茂,翟雪梅,张志南,等. 胶州湾北部水层—底栖耦合生态系统的动力数值模拟分析[J]. 海洋与湖沼,2001,32(6):588-597.
- [5] WEI H, SUN J, MOLL A, *et al.* Phytoplankton dynamics in the Bohai Sea-observations and modelling[J]. Journal of Marine Systems,2004,44 (3-4):233-251.
- [6] 高会旺,王强. 1999年渤海浮游植物生物量的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2004,34(5):867-873.
- [7] 张书文,夏长水. 黄海冷水团水域物理—生态耦合数值模式研究[J]. 自然科学进展,2002,12(3):315-319.

- [8] 田恬,魏皓,苏健,等. 黄海氮磷营养盐的循环和收支研究[J]. 海洋科学进展,2003,21(1):1-11.
- [9] HONG H S, SHANG S L. A dynamic box model of bioactive elements in the southern taiwan strait[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1994,12(2):120-129.
- [10] 李克强,王修林,韩秀荣. 莱州湾围隔浮游生态系统氮、磷营养盐迁移—转化模型研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2007,37(6):987-994.
- [11] 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(1):65-69.
- [12] 陆贤崑. 海洋围隔生态系实验在海洋污染控制中的应用[J]. 环境科学,1987,8(4):78-83.
- [13] 郑忠明,陆开宏,蔡惠风,等. 固定化微生物修复养殖池塘污染底泥的围隔试验[J]. 水产学报,2009,34(3):462-469.
- [14] BARETTA J, EBENH H W, RUARDIJ P. The European regional seas ecosystem model, a complex marine ecosystem model[J]. Netherlands Journal of Sea Research,1995,33(3-4):233-246.
- [15] 林军,朱建荣,张经,等. 长江口外海区浮游植物生物量分布及其与环境因子的关系[J]. 水产学报,2011,35(1):74-87.
- [16] CUI M C, ZHU H. Coupled physical-ecological modelling in the central part of Jiaozhou Bay II. Coupled with an ecological model [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2001, 19: 21-28.
- [17] FASHAM M, DUCKLOW H, MCKELVIE S. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer[J]. Journal of Marine Research, 1990,48(3):591-639.
- [18] CHAPELLE A, LAZURE P, MENESGUEN A. Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem-sensitivity analysis [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1994,39(6):529-548.
- [19] JONES R, HENDERSON E. The dynamics of nutrient regeneration and simulation studies of the nutrient cycle [J]. Journal du Conseil, 1987, 43(3):216.

Contrast of simulation nutrients transport and transformation with pelagic ecosystems of mesocosm in different temperature sections in Xiangshan Bay

YANG Hong* , LI Chun-xin, YIN Chun-sheng, CHU Ming

(*College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: To assess the effects of cooling water from power plant on eutrophication in Xiangshan Bay Harbor, a dynamic model for nitrogen and phosphorus transport and transformation in mesocosm was established, in which 7 state variables (DIN, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, DON, DOP, phytoplankton, zooplankton and detritus) were included. Logically it had 5 modules—phytoplankton, zooplankton, dissolved inorganic nutrients, dissolved organic nutrients and detritus. Not only the results showed that this model could simulate the variations of nitrogen and phosphorus nutrients in the pelagic ecosystem in mesocosm properly, based on the experiment data from one temperature section in Xiangshan Bay in October 2010, but also the conclusion was drawn that the effect of temperature elevation on Nitrogen and Phosphorus Transport and Transformation from simulation of mesocosms that belong to three different temperature sections. The results show that the cooling waters increased eutrophication of the receiving water in Xiangshan Bay.

Key words: nitrogen and phosphorus nutrients; transport and transformation model; mesocosm; temperature; Xiangshan Bay

Corresponding author: YANG Hong. E-mail: hyang@shou.edu.cn