

2011 年夏秋季辽东湾营养盐分布及环境容量研究^{*}

赵 骞^{1,2}, 张志锋¹, 王立军¹, 丁德文²

(1. 国家海洋环境监测中心 大连 116023; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

摘 要: 利用 2011 年夏季和秋季辽东湾海域水质现场调查资料, 讨论了整个辽东湾海域氮、磷营养盐的分布特征, 进而通过计算富营养化指数 (EI) 和氮磷比 (N/P) 对辽东湾富营养化现状进行了评价, 并估算了无机氮和活性磷酸盐的环境容量。结果显示, 无机氮 (DIN) 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度均呈现出河口大于远海、底层大于表层、秋季大于夏季的特征。夏秋季海水 EI 值均大于 1, 富营养化状况较为严重; 海水 N/P 值大于 16, 营养盐结构严重不平衡, 浮游植物生长处于显著的磷限制状况。整个辽东湾 $\text{PO}_4\text{-P}$ 环境容量仍有剩余, DIN 环境容量夏季仅有极少余量, 秋季已无余量, 需对 DIN 的入海负荷进行大力削减。

关 键 词: 辽东湾; 营养盐; 富营养化; 环境容量

辽东湾是渤海的三大海湾之一, 位于渤海东北部, 被大连、营口、盘锦、锦州和葫芦岛 5 个城市环绕, 沿岸主要有六股河、小凌河、大凌河、双台子河、大辽河、复州河等多条河流注入。近年来, 无机氮与活性磷酸盐已成为渤海主要的污染物质^[1], 大量营养盐随河流入海, 为辽东湾海域生物的生长繁衍提供了丰富饵料, 但同时也使辽东湾环境容量被逐步耗尽, 并带来了海水的富营养化问题, 使辽东湾海域生态系统平衡受到严重的威胁。

针对辽东湾营养盐的时空分布和富营养化问题, 学者们开展了大量的研究工作。在辽东湾营养盐时空分布问题上, 王毅等指出北部营养盐的含量普遍高于西部海域^[2]; 秦延文等指出北部海域污染最重, 东部海域污染最轻, 污染主要集中在锦州、盘锦、营口海域^[3]; 郭全发现溶解无机态营养盐垂直分布大都呈现随深度的增大含量逐渐增加的特点^[4]。王毅等和秦延文等都指出无机氮 (DIN) 和无机磷 (DIP) 具有相同的季节变化趋势, 即平水期 (10—11 月) 污染物含量最高、丰水期 (8—9 月) 含量次之、枯水期 (4—5 月) 含量最低; 赵骞等指出冬季营养盐的浓度高于夏季^[5]; 孙培艳指出 20 世纪

80 年代后的 15 年间无机氮 (DIN) 和无机磷 (DIP) 的浓度快速增加, 分别在 1995 年和 1997 年达到峰值, 随后二者呈明显的下降趋势^[6]; 秦彦文等指出 2004—2008 这 5 年间辽东湾海域无机氮和活性磷酸盐 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 污染较严重的是 2004—2006 年, 而 2007—2008 年营养盐的质量浓度呈下降趋势^[3]。关于辽东湾的富营养化问题, 郭全认为造成富营养化的主要化学污染物为无机氮和无机磷, 化学需氧量 (COD) 并不是主要化学污染物^[4]; 王焕松等指出影响辽东湾海域水体富营养化的关键因子为无机氮, 富营养化程度从海湾中部向近岸逐渐增加, 富营养化水平主要受入海河流冲淡水影响范围的控制^[7]; 田金等指出中东部辽河口、双台子河口和大凌河口海域处于富营养化状况, 西部锦州湾海域处于贫营养化状况^[8]。辽东湾富营养化时间变化趋势问题上, 田金等指出在 1999 年与 2006 年污染较为严重, 中间年份污染相对较轻^[8]。关于辽东湾的营养盐结构, Wang 等认为 2002 年夏季辽东湾海域主要处于磷限制状况^[9]; 田金等指出 1999—2006 年中辽东湾在大部分年份都处于磷限制状况^[8]; 而赵骞等认为 2000 年冬季和 2001 年春季辽东湾中南部处于氮限制

^{*} 基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目 (201005008, 201305043)。

状况^[5]。

以往研究主要集中于辽东湾的营养盐分布特征上，而基于营养盐分布开展的海洋环境容量研究比较少，且资料覆盖范围较为有限。本文利用 2011 年夏季和秋季辽东湾全海域的现场调查资料，对整个辽东湾的氮、磷营养盐分布和富营养化现状进行了分析，并且分别计算了辽东湾无机氮和活性磷酸盐的环境容量，为提出科学合理的入海污染物总量控制措施提供科学依据。

1 数据来源和分析方法

1.1 数据来源

2011 年 6 月（夏季）、10—11 月（秋季）分别对辽东湾海域进行了 2 个航次的调查，布设站位共 47 个，其中辽河口、双台子河口重点海域分别布设了 9 个和 7 个站位，完成了 COD 等参数的现场采集、样品的预处理和储存工作。（具体站位分布如图 1 至图 4 中黑点所示。）

1.2 样品分析方法

依据《海洋监测规范》（HY003.4—91）的方法对 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 COD 进行检测。其中， NH_4^+-N 测定采用靛酚蓝分光光度法， NO_3^--N 测定采用镉柱还原比色法， NO_2^--N 测定采用萘乙二胺分光光度法，无机氮（DIN）为前三者之和； $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 测定采用磷钼蓝分光光度法；COD 测定采用碱性高锰酸钾法。

1.3 评价方法

1.3.1 富营养化指数

在我国近海富营养化评价中，应用最为广泛的是营养盐指数法^[10]。富营养化指数定义为：

$$EI = \frac{\rho_{\text{DIN}} \times \rho_{\text{DIP}} \times \rho_{\text{COD}}}{a} \times 10^6$$

式中： a 为常数，一般取 4 500。 ρ_{DIN} 、 ρ_{DIP} 、 ρ_{COD} 依次表示 DIN、DIP（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）、COD 的浓度，单位均为 mg/L 。当 $EI < 1$ 时，表明海域处于贫营养化状态；当 $EI \geq 1$ 时，表明海域处于富营养化状态， EI 值越大，海水富营养化越严重。

1.3.2 氮磷比值（N/P）

N/P（原子比）是考察营养盐结构的主要指

标。Redfield^[11] 研究发现一般大洋深层的 N/P 为 16 左右，与浮游植物元素组分的 N/P 大致相同，此值称为 Redfield 比值。人们还发现浮游植物生长繁殖过程中对无机氮和磷酸盐的摄取也基本依此比例进行^[12]，当水体中营养盐比例不平衡时，浮游植物的生长可能会受制于某一相对不足的营养盐，因此 N/P 常作为生态环境中氮或磷是否缺乏的判据。

2 辽东湾营养盐分布特征

2.1 营养盐浓度分布

2011 年辽东湾海域 DIN 浓度分布如图 1 所示。夏季 DIN 浓度为 0.06~1.92 mg/L ，秋季 DIN 浓度为 0.11~2.77 mg/L 。浓度高值集中于湾顶河口附近海域，并且由河口向外海逐渐减小，秋季中南部海域东岸略大于西岸。超过二类海水水质标准（图 1 中白线所示）的海域面积比例在夏季约为 1/3，在秋季超过 2/3。总体上看，辽东湾海域 DIN 浓度呈现出河口大于远海，底层大于表层，秋季大于夏季的特征，湾顶海域处于劣四类海水水质标准，DIN 污染非常严重。

2011 年辽东湾海域 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度分布如图 2 所示。夏季 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度为 0.002 4~0.087 9 mg/L ，秋季浓度为 0.004 6~0.050 7 mg/L 。超过二类海水水质标准（图 2 中白线所示）的浓度高值区，夏季集中在西北部海域，秋季集中东北部海域。总体上看，辽东湾 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度分布呈现出河口大于远海，秋季大于夏季的特征，较小面积海域超过二类海水水质标准，北部海域处于劣四类海水水质标准， $\text{PO}_4\text{-P}$ 污染比较严重。

在辽东湾近岸海域，入海河流是污染物的主要来源^[13]，在所有污染源中所占比例一般在 50%~70%^[14]。对于入海氮通量和磷通量，湾顶 4 条河流中大辽河是最主要贡献者^[15]，且辽河流域本身已处于富营养化状态^[16]。辽东湾北部湾顶入海河流密集且径流量大，陆源污染物携带大量营养盐入海，加之近岸水深较浅、水流较小，水交换条件较差，污染物不易扩散，因此湾顶河口及其邻近海域的营养盐浓度要高于海区中部。

夏季是浮游植物生长和繁殖的旺盛期，要消

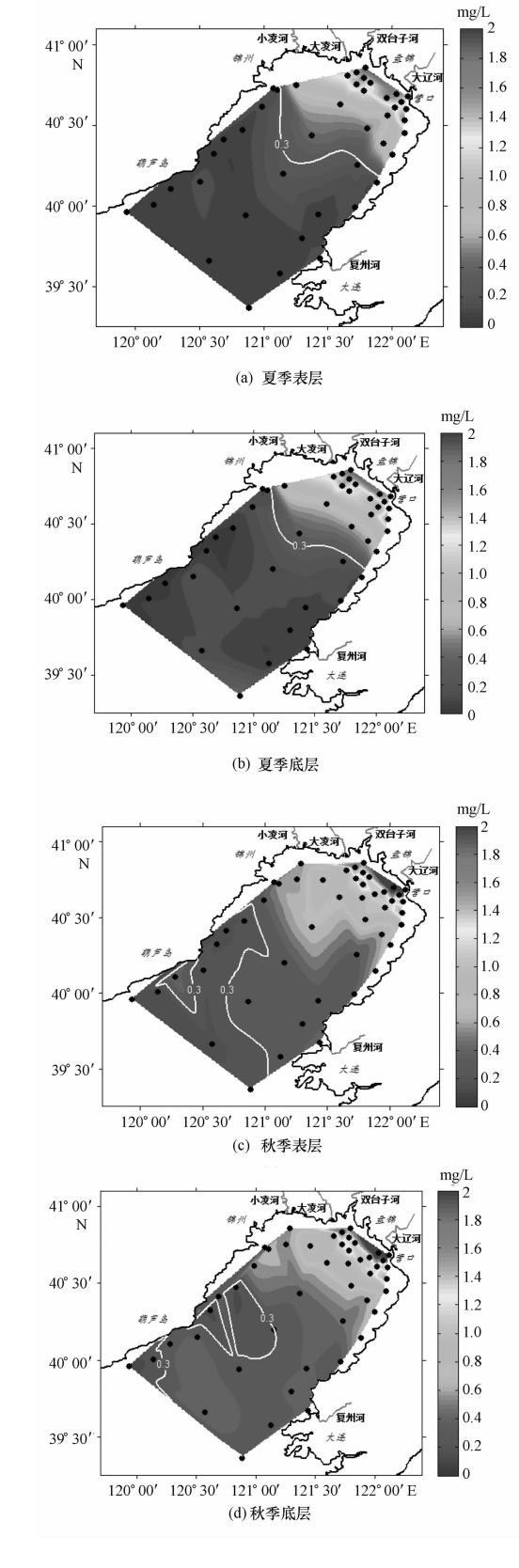


图 1 辽东湾 DIN 浓度分布

耗大量的营养盐；而秋季浮游植物不断死亡导致残骸增多，有机物在细菌的参与活动下不断分解，通过矿化作用补充的无机盐大量增加^[12]。因此秋

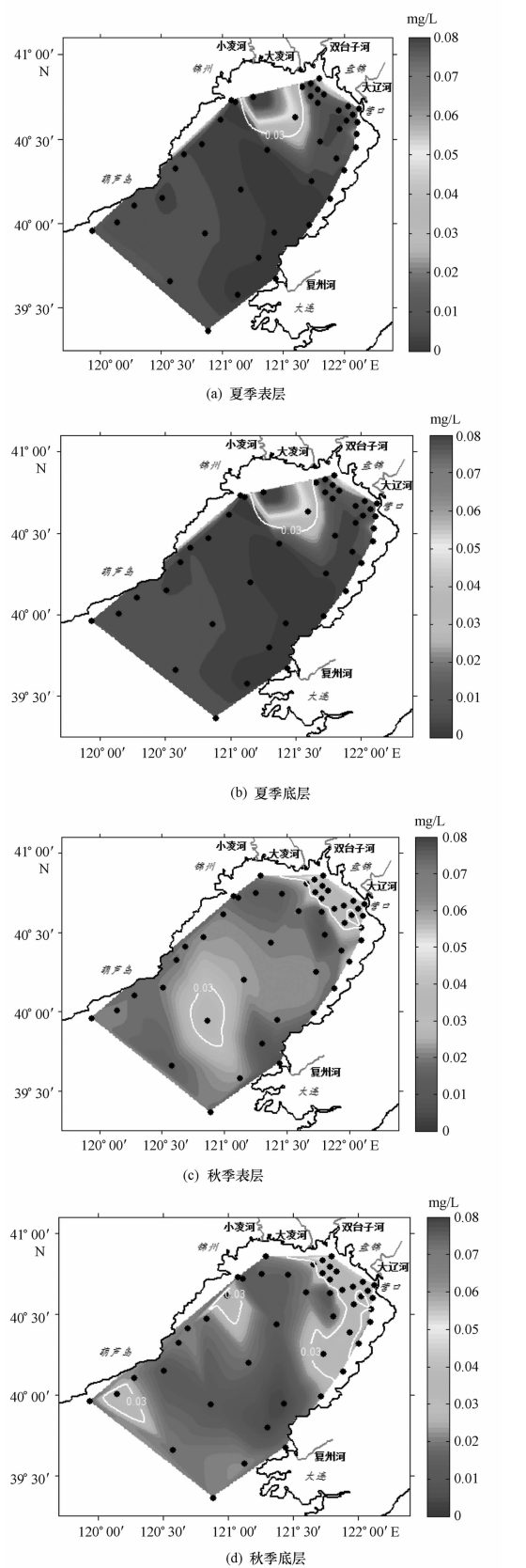


图 2 辽东湾 PO₄-P 浓度分布

季海区中部营养盐比夏季丰富，这体现了海洋生物化学过程对营养盐分布的影响。

2.2 富营养化指数分布

2011 年辽东湾海域富营养化指数 EI 分布如图 3 所示。夏季中南部海域 EI 值小于 1，北部

大面积海域 EI 值大于 1 且西北部大于东北部，最大值达到 25，超过田金等^[8] 研究结果（2006 年双台子河口 EI 值 7.5）的 3 倍。秋季除中部海域底层 EI 值小于 1 以外，绝大部分海水 EI 值均大于 1，且在大辽河口附近海域最大值超过 70，这说明辽东湾北部的富营养化程度已非常严重。

2.3 营养盐结构

2011 年辽东湾海域氮磷比分布如图 4 所示。夏季和秋季表、底层海水 N/P 值几乎全部大于 16。夏季 N/P 高值集中在大辽河口和双台子河口海域，且辽东沿岸海域大于辽西沿岸海域，最大值超过 250，约为曲丽梅等^[12] 研究结果的 4 倍，王焕松等^[15] 研究结果的 1/2。秋季 N/P 高值集中在北部海域和复州河口附近海域，最大值超过 150。整个辽东湾海域营养盐结构严重不平衡，浮游植物生长处于显著的磷限制状况。

20 世纪 80 年代以来，陆源化肥用量剧增，但氮肥过量而磷肥不足^[17]。地表水把未被利用的过量氮肥汇入河流，使无机氮在丰水期从河流径流中得到大量补充，而磷酸盐的补充有限，导致 EI 值尤其是 N/P 值均呈较大值。因此，辽东湾海域的富营养化主要是由沿岸各入海河流输入大量陆源 DIN 引起的。

3 辽东湾环境容量研究

3.1 环境容量的定义

人类为了充分利用海洋的环境功能，规定了特定海域的水质、沉积物的环境质量标准，使得环境所能容纳的污染物的量被限制在一定的限度之内，该限度内所容纳的污染物量称为管理环境容量。已利用环境容量是指在现有污染物排放条件下，水体中所容纳的现有污染物总量。剩余环境容量是管理环境容量与已利用环境容量的差值，即在现有污染物排放条件下，水体中污染物浓度不超过环境质量标准限值条件下，水体中所能额外容纳的污染物量。本研究采用以下公式计算上述 3 种环境容量：

$$E_s = \sum_i C_{Si} H_i S_i \tag{1}$$

$$E_o = \sum_i C_{Oi} H_i S_i \tag{2}$$

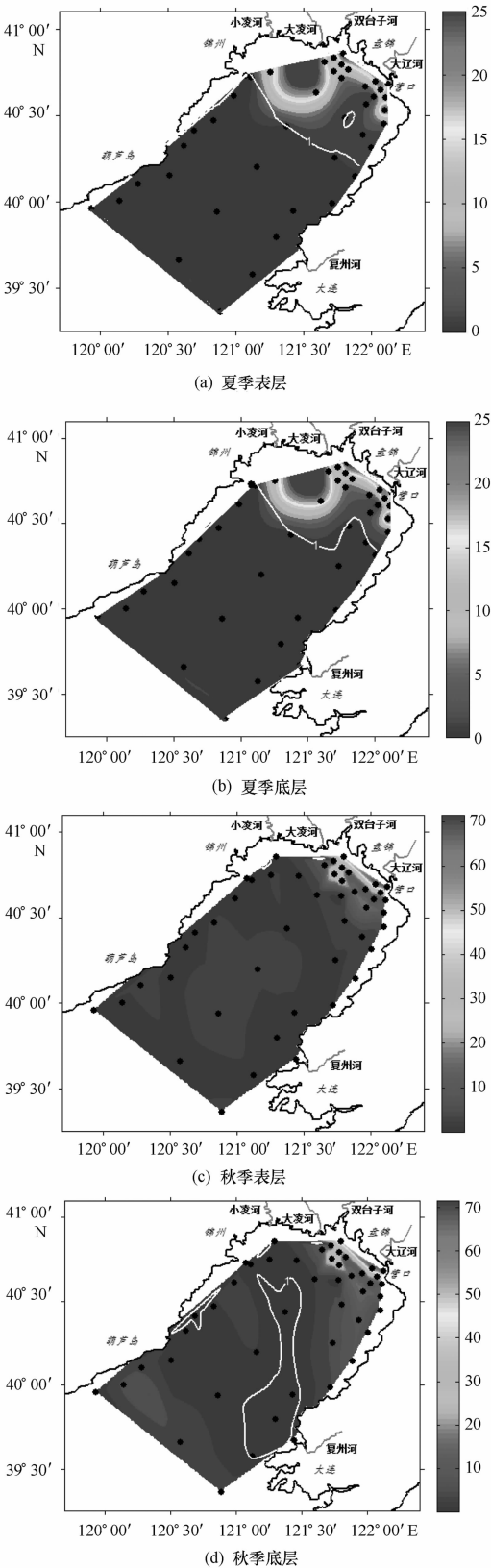


图 3 辽东湾富营养化指数 (EI) 分布

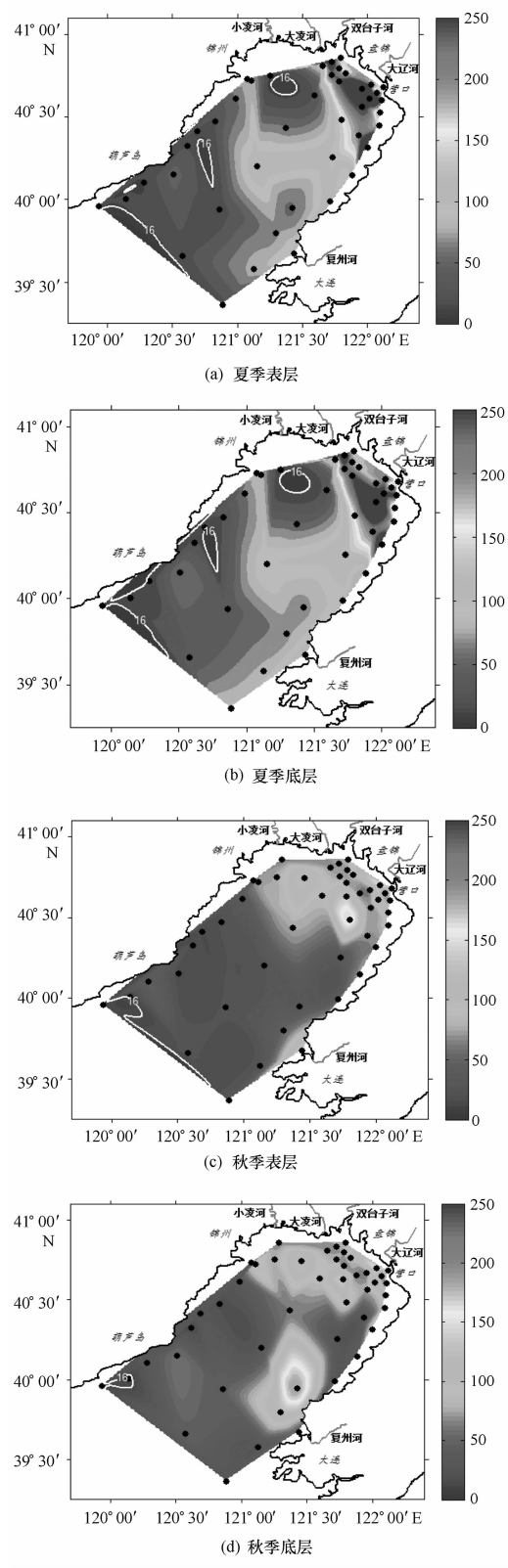


图 4 辽东湾氮磷比 (N/P) 分布

$$E_R = E_S - E_O \tag{3}$$

式中: E_S 为某种污染物的管理环境容量 (单位: t); E_O 为某种污染物的已利用环境容量 (单位: t); E_R 为某种污染物的剩余环境容量 (单位: t);

C_{Si} 为第 i 个计算网格内某种污染物的海水水质标准浓度 (单位: t/m^3); C_{Oi} 为第 i 个计算网格内某种污染物的现状平均浓度 (单位: t/m^3); H_i 为第 i 个计算网格的水深 (单位: m); S_i 为第 i 个计算网格的水平面积 (单位: m^2).

式 (1) 至式 (3) 表示的是某一区域水体的环境容量。在平面分布图上, 每个像素元表示的是单位面积的环境容量, 因此我们给出如下定义:

$$E_{Si} = C_{Si}H_i \tag{4}$$

$$E_{Oi} = C_{Oi}H_i \tag{5}$$

$$E_{Ri} = E_{Si} - E_{Oi} \tag{6}$$

式中: E_{Si} 为第 i 个计算网格内某种污染物的单位面积管理环境容量 (单位: t/m^2); E_{Oi} 为第 i 个计算网格内某种污染物的单位面积已利用环境容量 (单位: t/m^2); E_{Ri} 为第 i 个计算网格内某种污染物的单位面积剩余环境容量 (单位: t/m^2).

3.2 环境容量现状

根据最新的全国海洋功能区划, 分别计算了辽东湾近岸功能区内 DIN 和 $PO_4\text{-P}$ 的海洋环境容量。中部海域为保留区, 因此未计算环境容量。需指出的是, 图 1 和图 2 观测站点与岸线之间空白海域的浓度是由观测点浓度外插获得。

图 5 是辽东湾近岸海域 DIN 和 $PO_4\text{-P}$ 的单位面积管理环境容量。两者的分布形态均呈现湾顶海域较小, 东西近岸海域较大的特征。湾顶海洋功能区多为农渔业区和保留区, 海水水质执行二类标准, 且水深较浅, 因此水体可容纳污染物的量较小。单位面积管理环境容量值最大的功能区是长兴岛港口航运区, DIN 和 $PO_4\text{-P}$ 分别达到 $20\times 10^{-6} t/m^2$ 和 $1.7\times 10^{-6} t/m^2$, 此海域海水水质执行四类标准且水深较深, 因此水体可容纳污染物的量较多, 锦州湾港口航运区和鲅鱼圈港口航运区次之。

根据 2011 年夏、秋季辽东湾海域 DIN 和 $PO_4\text{-P}$ 浓度的调查结果, 分别计算了两个季节 2 种污染物的单位面积已利用环境容量, 如图 6 所示。夏季 DIN 单位面积已利用环境容量高值区位于湾顶海域, 且东部大于西部, 最大值出现在双台子河口, 约为 $10\times 10^{-6} t/m^2$; 秋季高值区位于辽东湾东部和北部海域, 最大值出现在大辽

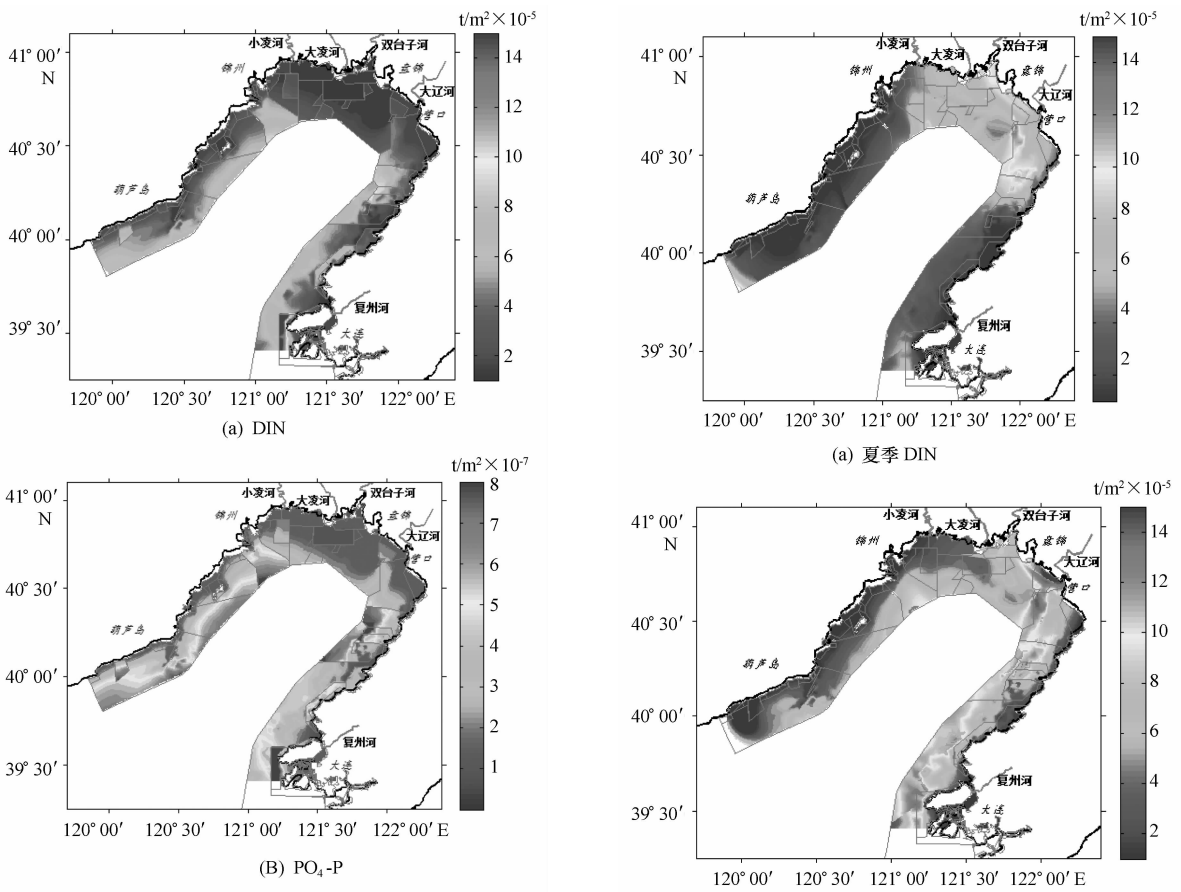


图 5 辽东湾近岸海域单位面积管理环境容量

河口, 约为 $16 \times 10^{-6} \text{ t/m}^2$ 。PO₄-P 夏季单位面积已利用环境容量高值区位于小凌河口外海, 约为 $0.9 \times 10^{-6} \text{ t/m}^2$; 秋季高值区位于辽东湾东部沿岸, 最大值出现在长兴岛外海, 约为 $0.85 \times 10^{-6} \text{ t/m}^2$ 。

根据辽东湾近岸海域管理环境容量和已利用环境容量的计算结果, 可得到剩余环境容量分布 (图 7)。夏季 DIN 剩余环境容量的负值区集中在湾顶海域, 其他海域环境容量仍有余量; 秋季仅在辽西沿岸海域有余量, 其他海域均为负值。PO₄-P 夏季剩余环境容量负值区集中在小凌河口外海, 其他海域仍有余量; 秋季负值区主要位于双台子河和大辽河口海域, 其他海域仍有余量。

总体而言, 辽东湾近岸海域 DIN 的管理环境容量总量为 46 477 t, PO₄-P 的管理环境容量总量为 4 136 t (表 1)。夏、秋两季 PO₄-P 的环境容量均有剩余, 夏季大于秋季。DIN 的夏季剩余环境容量仍有极少余量, 但秋季已利用环

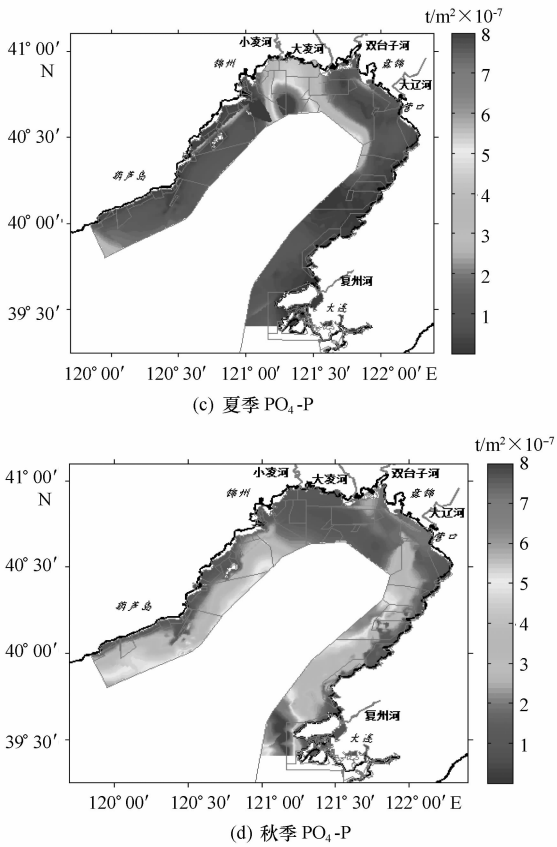


图 6 辽东湾近岸海域单位面积已利用环境容量

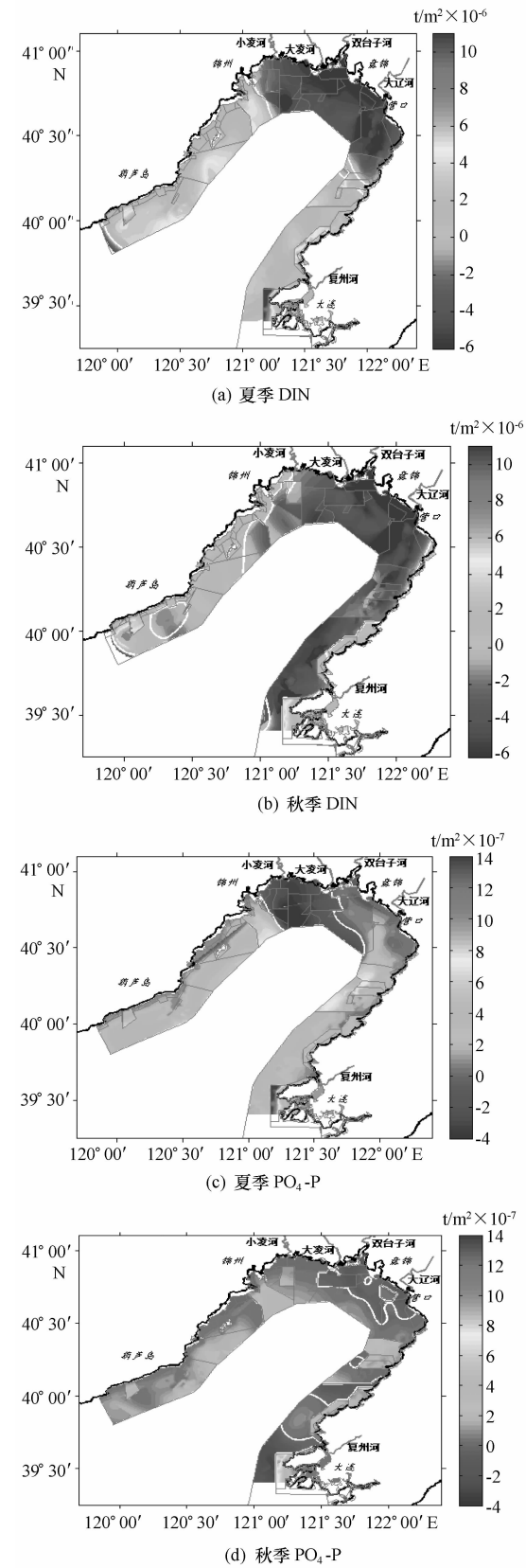


图 7 辽东湾近岸海域单位面积剩余环境容量

境容量已远远超出管理环境容量, 因此需要大力削减 DIN 的人海负荷, 严格实施 DIN 入海总

量控制。这与乔璐璐等^[18] 的辽东湾氮、磷环境容量均有大量剩余的研究结果存在较大差别, 主要原因可能是调查数据和海上功能分区不同。本文在不同功能区中采用不同的水质标准作为管理目标, 能够更加细致地分析辽东湾环境容量的区域差异, 进而更合理地统计出整个辽东湾的环境容量总量。

表 1 辽东湾近岸海域环境容量

指标	管理环境 容量	已利用环境 容量	剩余环境 容量
夏季 DIN	46 477	46 216	261
秋季 DIN		68 678	−22 201
夏季 PO ₄ -P	4 136	1 676	2 460
秋季 PO ₄ -P		3 215	921

4 结论与讨论

本研究利用 2011 年夏季和秋季辽东湾海域水质现场调查资料, 讨论了整个辽东湾海域氮、磷营养盐分布特征, 并通过计算富营养化指数和氮磷比对辽东湾富营养化现状进行了评价, 进而估算了辽东湾无机氮和活性磷酸盐的环境容量, 得到以下结论: ① 辽东湾海域 DIN 和 PO₄-P 浓度均呈现出为河口大于远海, 底层大于表层, 秋季大于夏季的特征, 大面积海水超过二类海水水质标准, 污染非常严重。② 辽东湾海域夏、秋季绝大部分海水 E 值均大于 1, 北部河口最大值超过 70, 富营养化状况非常严重。辽东湾海域夏、秋季表、底层海水 N/P 值大于 16, 最大值超过 250, 营养盐结构严重不平衡, 浮游植物生长处于显著的磷限制状况。③ 辽东湾近岸海域 DIN 和 PO₄-P 的单位面积管理环境容量呈现出湾顶海域较小, 东西近岸海域较大的特征。单位面积已利用环境容量夏季高值区位于湾顶海域, 秋季高值区位于辽西沿岸海域。单位面积剩余环境容量的负值区主要集中在湾顶和东岸部分海域, 其他海域环境容量仍有余量。整个辽东湾 PO₄-P 环境容量仍有剩余, DIN 环境容量夏季仍有极少余量, 秋季严重超载, 因此需要大力削减 DIN 的人海负荷, 严格实施 DIN 入海总量控制。

针对目前辽东湾富营养化水平超高、营养盐结构严重失衡、无机氮环境容量已无剩余的现状,辽东湾沿岸各市需采取有效措施加大氮排放的控制力度,如减少化肥的施用量,提高化肥的使用效率,提高污水处理厂脱氮效率等,对入海氮污染物实施严格的总量控制。

参考文献

[1] 赵亮,魏皓,冯士筌. 渤海氮磷营养盐的循环和收支[J]. 环境科学,2002,23(1):78—81.

[2] 王毅,张天相,徐学仁,等. 辽东湾北部至辽西沿岸海域营养盐分布及水质评价[J]. 海洋环境科学,2001,20(2):63—65.

[3] 秦延文,郑丙辉,张雷,等. 2004—2008 年辽东湾水质污染特征分析[J]. 环境科学研究,2010,23(8):987—992.

[4] 郭全. 渤海夏季营养盐和叶绿素分布特征及富营养化状况分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.

[5] 赵骞,田纪伟,赵仕兰,等. 渤海冬夏季营养盐和叶绿素 a 的分布特征[J]. 海洋科学,2004,28(4):34—39.

[6] 孙培艳. 渤海富营养化变化特征及生态效应分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2007.

[7] 王焕松,雷坤,李子成,等. 辽东湾海域水体富营养化的模糊综合评价[J]. 环境科学研究,2010,23(4):413—419.

[8] 田金,宋伦,王年斌,等. 辽东湾北部海域营养状况与趋势评价[J]. 海洋通报,2007,26(6):113—118.

[9] WANG X L,CUI Z G,GUO Q,et al. Distribution

of nutrients and eutrophication assessment in the Bohai Sea of China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2009,27(1):177—183.

[10] 邹景忠,董丽萍,秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. 海洋环境科学,1983,2(2):41—53.

[11] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. Am Sci,1958,46:561—600.

[12] 曲丽梅,姚德,丛丕福. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J]. 环境科学,2006,27(2):263—267.

[13] 袁宇,朱京海,侯永顺,等. 辽东湾入海污染物调查及海域水质安全分析[J]. 中国安全科学学报,2008,18(2):12—16.

[14] 刘娟. 渤海化学污染物入海通量研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2006.

[15] 王焕松,雷坤,李子成,等. 辽东湾北岸主要入海河流污染物入海通量及其影响因素分析[J]. 海洋学报,2011,33(6):110—116.

[16] 张龙军,夏斌,桂祖胜,等. 2005 年夏季环渤海 16 条主要入海河流的污染状况[J]. 环境科学,2007,28(11):2409—2415.

[17] 郭卫东,章小明,杨逸萍,等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 台湾海峡,1998,17(1):64—70.

[18] 乔璐璐,刘容子,鲍献文,等. 经济增长下的渤海环境容量预测[J]. 中国人口、资源与环境,2008,18(2):76—81.