

海南岛南北近岸海湾浮游生物对尿素的生物可利用性比较研究

黄凯旋¹, 张云¹, 欧林坚¹, 吕颂辉¹, 吕淑果², 齐雨藻¹

(1. 暨南大学 赤潮与海洋生物学研究中心, 水体富营养化与赤潮防治广东省教育厅重点实验室, 广东 广州 510632; 2. 海南省环境科学研究院, 海南 海口 570206)

摘要: 2011年1~4月, 分3个航次对海南岛北部海口湾和南部陵水新村湾的尿素浓度和浮游生物脲酶活性开展调查研究, 结合相关理化环境因子, 比较分析海南岛南北部近岸海湾冬、春季尿素的可利用性及对浮游植物群落的影响。结果表明, 冬季(1~2月), 北部海口湾尿素浓度范围(以N计, 下同)为0.93~4.13 $\mu\text{mol/L}$, 显著高于南部陵水新村湾0.38~2.05 $\mu\text{mol/L}$ 。春季, 海南岛南北部尿素浓度均有所升高, 平均占总溶解态氮源的含量由冬季的5%~7%增加到24%~30%, 变化显著, 表明尿素是海南岛近岸海湾不可忽视的氮源。海南岛南北部海湾冬季大部分浮游生物样品脲酶活性低于检出限。春季, 海口湾平均脲酶活性为44 $\text{nmol}/(\text{L}\cdot\text{h}) \pm 23 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$, 呈现近岸入海口水体高于离岸的特征; 南部海湾平均脲酶活性升高到21 $\text{nmol}/(\text{L}\cdot\text{h}) \pm 10 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$, 新村湾养殖区水体的脲酶活性高于陵水湾。水温 and 浮游植物细胞丰度是影响海南岛脲酶活性冬、春季变化的重要因素。冬季, 海口湾浮游植物细胞丰度显著低于陵水新村湾; 春季, 海口湾浮游植物细胞丰度增长到 $5.09 \times 10^6 \text{ 个}/\text{L} \pm 7.45 \times 10^6 \text{ 个}/\text{L}$, 冬、春季变化显著。海南岛南北部硅藻和甲藻细胞丰度冬、春季的变化均与硝酸盐和DIP负相关, 而与脲酶活性和水温正相关, 尿素在不同程度上影响南北部细胞丰度的变化。

关键词: 尿素; 脲酶活性; 浮游植物; 海南岛

中图分类号: P735; Q178 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)10-0076-07

doi: 10.11759/hyxx20130628001

由于海洋生物尿素的再生率非常低, 陆源输入是海区尿素的主要来源^[1-3]。在河口和近岸海域, 尿素浓度的变化主要受农业尿素施肥、灌溉和降雨量等的影响。美国的研究发现, 春末农业施肥后, 或是台风洪水过后, 河口湾的尿素浓度显著升高^[1]。在南非 Krystna 河口湾, 夏季暴雨过后尿素浓度比冬季增加了4倍^[4]。海区中的尿素可以被浮游植物直接吸收利用, 在海洋氮循环中发挥重要作用^[1, 5]。不同种类的浮游植物在利用尿素的能力上存在差异, 海水中尿素浓度的增加可能有利于某些类群的生长, 如蓝细菌、甲藻等^[6-7], 对浮游生物群落结构产生一定的影响^[1, 8]。

海口湾位于海南岛北部海口市, 近年来藻华频繁发生, 其主要原因是龙昆沟和秀英沟入海排污口汇集了海口市的生活污水和工农业废水, 而海南最大的入海河流南渡江也位于海口湾东侧, 导致海口湾内氮磷营养盐和有机化合物污染严重^[9-10]。海南岛的养殖场大多集中在东、南部沿岸, 其中陵水新村湾是海南岛重点的海洋开发区。海水养殖是诱发藻华发生的重要原因之一, 由于投饵量大, 残存饵料中的氮磷造成水体的富营养化程度高, 使得陵水新村湾已成为海南近海藻华发生最严重的区域^[11-12]。

2011年冬季1月、2月, 以及春季4月, 研究者对海南岛北部海口湾和南部陵水新村湾开展调查采样, 比较研究海南岛北部和南部近岸海湾尿素浓度和浮游生物脲酶活性的冬、春季节变化特征, 分析尿素浓度的分布可能对浮游植物群落生物量和结构的影响, 为研判海南岛近岸水体中尿素污染程度及其可能对有害藻华发生的作用机制提供依据。

1 材料与方 法

1.1 站位布 设

调查区域包括位于海南岛北部的海口湾(5个测站)和位于南部的陵水新村湾(6个测站)(图1)。其中1号测站为北部海口湾海甸溪入海口, 2号测站为龙

收稿日期: 2013-06-28; 修回日期: 2013-08-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428702); 国家自然科学基金项目(41176087; 41276153), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(21611205)

作者简介: 黄凯旋(1982-), 女, 广东海丰人, 实验师, 硕士研究生, 主要研究方向为近海环境与赤潮生态, 电话: 020-85221562, E-mail: babyblue02@163.com; 欧林坚, 通信作者, 女, 副研究员, 博士, E-mail: torangeou@jnu.edu.cn



图1 海南岛监测区域与测站布设

Fig.1 Monitoring areas and stations in Hainan Island

昆沟入海口, 3号测站为秀英沟排污口。6号测站为南部新村湾常规监测点, 7号测站为新村湾中心站, 8号为新村湾出海口, 9号陵水湾常规监测点。

1.2 采样时间

2011年冬季进行了2个航次的采样, 春季1个航次。海口湾采样时间分别为: 1月20日、2月25日和4月29日。陵水新村湾为1月18日、2月22日和4月26日。

1.3 调查项目及方法

水温和盐度由美国 YSI 6600V2 现场监测。总溶解态氮(TDN)、硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)、总溶解态磷(TDP)和磷酸盐(DIP)浓度采用荷兰 Skalar San⁺⁺连续流动分析仪测定。铵盐(NH_4^+)按照《海洋调查规范》^[13]测定。溶解无机氮(DIN)= $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$, 溶解有机氮(DON)= TDN-DIN, 溶解有机磷(DOP)= TDP-DIP。

尿素含量的测定仿照 Revilla 等^[8]的方法测定: 现场海水经 GF/F 膜过滤, 冻存。样品检测时加入显色试剂, 22°C±2°C 的黑暗环境下涡旋振荡 72 h, 在分光光度计 520 nm 波段下检测。所得尿素含量以 $\mu\text{mol/L}$ 表示。

脲酶活性的测定仿照 Solomon 等^[6]的方法为基础进行优化: 浮游植物颗粒经 20 μm 孔径筛绢过滤后, 采用 GF/F 滤膜收集, 液氮中保存。滤膜样品冰浴条件下破碎研磨, 离心后取上清液加入尿素储备液, 20°C 水浴下反应 1 h。待样品冷却至室温后, 加入苯酚溶液, 按照 NH_4^+ 的方法在分光光度计 640 nm 波长下检测样品。脲酶活性以 $\text{nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 表示。

浮游植物的采集、固定和计数均按《海洋调查规范》^[15]执行, 在日本 Olympus BX61 光学显微镜下进行浮游植物种类的鉴定和定量计数。

1.4 数据分析处理

使用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA, 置信区间 95%) 和多元线性逐步

回归分析。通过软件 Canoco 4.5 for Windows 的主成分分析(PCA)探讨浮游植物的类群、丰度与各因子的相互关系, 分析过程中数据经过 $y = \log(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 海南岛南北近岸海湾理化环境因子变化特征比较

如表 1 所示, 海南岛南北部近岸水体水温存在显著差异($P<0.01$)。陵水新村湾 1~2 月平均水温已达到 21.1~23.8°C, 明显高于北部的 16.7~18.6°C。至 4 月, 海口湾平均水温升至 23.1°C±0.6°C。海南岛南北近岸海湾铵盐平均浓度低于 2 $\mu\text{mol/L}$, 硝酸盐为 DIN 的主要成分, 占 DIN 含量的 90%以上。北部海口湾无机氮、无机磷污染严重, 冬季海口湾近岸海域(海甸溪、龙昆沟和秀英沟入海口)DIN 浓度超过 15 $\mu\text{mol/L}$, DIP 浓度范围为 1.4~3.7 $\mu\text{mol/L}$, N/P(专指 DIN/DIP)比值范围为 6~12。春季, DIP 平均浓度下降为 0.6 $\mu\text{mol/L}$ ±0.4 $\mu\text{mol/L}$, 为冬季的 1/4~1/3, 差异显著($P<0.05$), DIN 浓度仍保持较高水平, 随之 N/P 比值增加为 17。南部陵水新村湾 DIN 和 DIP 浓度均低于海口湾, 差异显著($P<0.01$), N/P 比值显示该海域可能存在磷限制, 1~2 月份陵水新村湾部分水体 DIP 浓度低于检出限, 以 DOP 为主要磷源。冬季海口湾和陵水新村湾的 DON 浓度均高于 DIN, 差异显著($P<0.05$), 范围为 7.2~41.5 $\mu\text{mol/L}$, 春季下降至 1.6~9.5 $\mu\text{mol/L}$, 冬、春季变化显著($P<0.05$)。

2.2 海南岛南北近岸海湾尿素浓度分布及对浮游生物生长和脲酶活性变化影响的特征比较

海口湾 1~2 月份尿素浓度范围为 0.93~4.13 $\mu\text{mol/L}$, 4 月份平均浓度增加至 3.30 $\mu\text{mol/L}$ ±0.43 $\mu\text{mol/L}$ (表 2), 差异不显著($P>0.05$)。但尿素浓度占 TDN 含量由冬季的 2%~11% 增加到 24%±2%, 差异显著($P<0.01$)。

表 1 冬、春季海南岛近岸海湾环境理化因子

Tab.1 The physical and chemical factors in the coastal waters of Hainan Island during winter and spring

参数	海口湾			陵水新村湾		
	1月	2月	4月	1月	2月	4月
水温(°C)	16.7±0.2	18.6±1.8	23.1±0.6	21.1±1.1	23.8±0.6	26.8±0.7
盐度	31.7±0.9	31.6±0.9	32.6±0.1	33.4±0.1	30.4±7.1	33.97±0.1
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ (μmol/L)	16.5±6.1	16.9±3.3	9.8±1.2	6.8±6.0	5.6±3.0	4.4±1.0
NH ₄ ⁺ (μmol/L)	1.0±1.5	1.3±1.2	0.7±0.7	—	0.1±0.1	0.1±0.1
DIN(μmol/L)	17.5±7.5	18.1±4.4	10.5±1.8	6.8±6.0	5.7±3.0	4.5±1.0
DON (μmol/L)	23.1±11.8	22.3±7.5	3.3±0.4	23.2±6.4	13.5±4.0	4.6±3.2
DIP (μmol/L)	2.1±1.1	2.3±0.7	0.6±0.4	0.2±0.3	0.2±0.3	0.1±0.1
DOP (μmol/L)	0	0.01±0.02	0.2±0.3	0.4±0.2	0.6±0.2	0.5±0.1
N/P	9±0	8±1	17±2	—	—	73±34
TDN/TDP	21±5	18±2	16±5	54±14	26±8	16±6

表 2 冬、春季海南岛近岸海湾尿素浓度及浮游生物生长和脲酶活性情况

Tab.2 The urea concentrations, cell abundances and urease activities in the coastal waters of Hainan Island during winter and spring

参数	海口湾			陵水新村湾		
	1月	2月	4月	1月	2月	4月
尿素浓度(μmol/L)	2.34±0.97	2.05±1.28	3.30±0.43	1.53±0.30	1.19±0.66	2.71±1.99
尿素/TDN(%)	7±4	5±4	24±2	5±0	6±3	30±18
浮游植物细胞丰度(10 ⁶ 个/L)	0.09±0.04	0.4±0.27	5.09±7.45	2.68±3.31	1.60±1.18	4.86±3.82
甲藻细胞丰度(10 ⁴ 个/L)	0.02±0.04	0.05±0.042	0.30±0.52	2.88±4.33	4.17±3.13	0.39±0.39
脲酶活性(nmol/(L·h))	—	11±15	44±23	—	—	21±10

如图 2 所示, 2 号测站龙昆沟出海口冬、春季平均尿素浓度达到 2.93 μmol/L±0.70 μmol/L, 较高于其他测站(P>0.05)。海口湾冬季浮游植物细胞丰度较低, 1 月份平均细胞丰度仅为 0.09 × 10⁶ 个/L±0.04 × 10⁶ 个/L, 只有 1 号测站出现甲藻。4 月份, 该海湾浮游植物

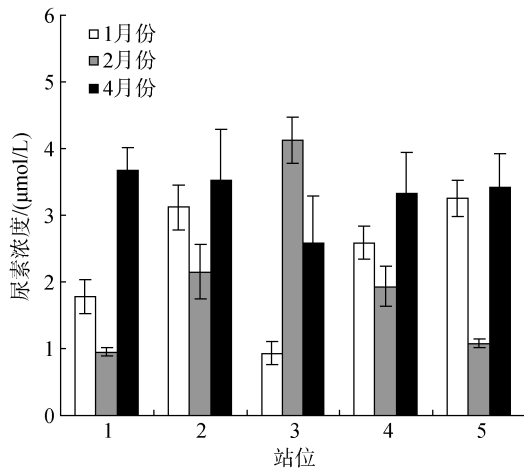


图 2 冬、春季海口湾近岸海域尿素浓度分布

Fig.2 The urea concentrations in the coastal waters of Haikou Bay during winter and spring

快速增长, 细胞丰度范围为 0.34 × 10⁶~13.32 × 10⁶ 个/L, 平均达到 5.09 × 10⁶ 个/L±7.45 × 10⁶ 个/L, 差异显著(P<0.05)。近岸水体 1~3 号测站出现螺旋环沟藻(*Gyrodinium spirale*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)和锥状斯氏藻(*Scrippsiella trochoidea*)等甲藻, 细胞丰度范围为 1.02 × 10³~7.20 × 10³ 个/L。冬季, 海口湾浮游生物脲酶活性同样处于较低水平, 1 月份, 海口湾所有测站浮游生物脲酶活性低于检出限, 2 月份仅在近岸的 1、2 号测站检测到脲酶活性(图 3)。4 月份海区脲酶活性增加到 44 nmol/(L·h)±23 nmol/(L·h), 差异显著(P<0.05), 其中 2 号测站龙昆沟出海口活性高达 84 nmol/(L·h)±17 nmol/(L·h), 呈现近岸脲酶活性高于离岸的特征, 该测站的硅藻和甲藻细胞丰度均高于其他测站。

陵水新村湾冬季尿素浓度范围为 0.38~2.05 μmol/L, 低于北部海口湾, 差异显著(P<0.05)。春季平均尿素浓度升高至 2.71 μmol/L±1.99 μmol/L, 占 TDN 含量由冬季的 3%~10%增加到 30%±18%, 差异显著(P<0.01)。其中养殖网箱附近的 7 号测站和 10 号测站尿素浓度高于 5 μmol/L(图 4), 7 号测站尿素浓度甚

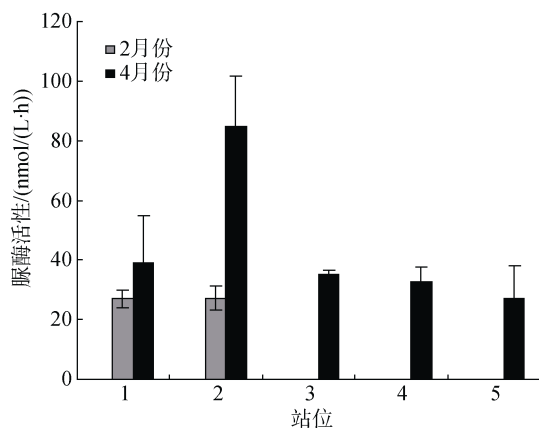


图3 冬、春季海口湾近岸海域脲酶活性分布

Fig.3 The urease activities in the coastal waters of Haikou Bay during winter and spring

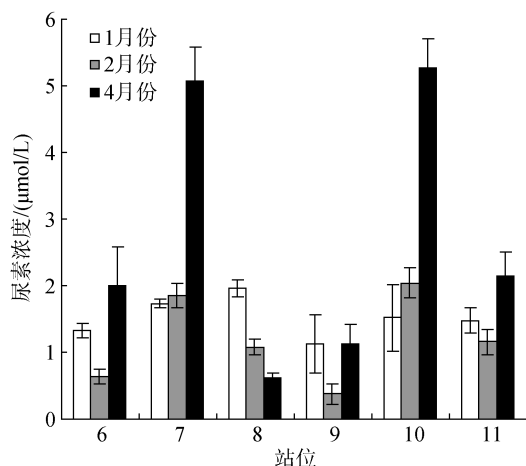


图4 冬、春季陵水新村湾近岸海域尿素浓度分布

Fig.4 The urea concentrations in the coastal waters of Lingshui-Xincun Bay during winter and spring

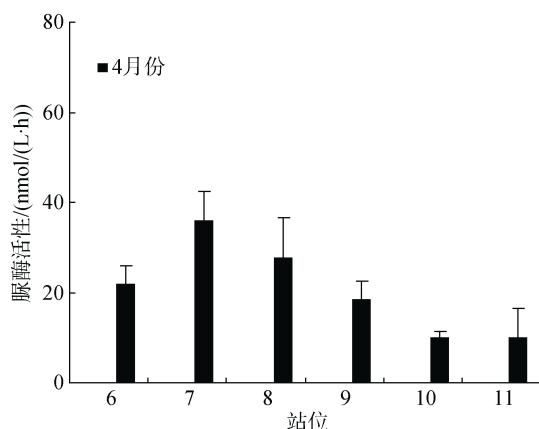


图5 春季陵水新村湾近岸海域脲酶活性分布

Fig.5 The urease activities in the coastal waters of Lingshui-Xincun Bay during spring

至高于硝酸盐的浓度, 占 TDN 含量的 49%。陵水新村湾冬季水温较高, 1~4 月份平均细胞丰度范围为

$1.60 \times 10^6 \sim 4.86 \times 10^6$ 个/L, 且呈现新村湾丰度高于陵水湾的特征。伪菱形藻(*Pseudonitzschia* spp.)是南部海区的优势种, 冬季平均细胞丰度即达到 $1.11 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^5$ 个/L, 春季增长到 4.59×10^6 个/L。新村湾养殖区附近的 7 号测站甲藻种类和细胞丰度高于其他测站, 主要种类为亚历山大藻(*Alexandrium* spp.)、裸甲藻(*Gymnodinium* spp.)和螺旋环沟藻。如图 5 所示, 1~2 月份, 陵水新村湾浮游生物脲酶活性均低于检出限, 春季平均脲酶活性增加到 $21 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h}) \pm 10 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$, 差异显著($P < 0.01$)。与海口湾情况相同, 在陵水湾内养殖区的 7 号测站, 其硅藻和甲藻细胞丰度最高, 脲酶活性也高于其他测站。

2.3 海南岛南北近岸海湾浮游植物和脲酶活性与海区理化因子的相关性分析

冬、春季海口湾近岸海域主要浮游植物类群(硅藻和甲藻)与理化因子进行 PCA 分析, 2 个主成分 PC1 和 PC2 累积贡献率达到 99.9%, 其中硅藻和脲酶活性对 PC1 的影响分别达到 0.935 和 0.870(表 3)。如图 6 所示, 硅藻和甲藻细胞丰度的变化与脲酶活性、水温和尿素正相关, 与硝酸盐和 DIP 为负相关。水温、脲酶活性以及尿素浓度的升高有利于海口湾浮游植物的生长。脲酶活性与理化因子的逐步回归分析显示, 海口湾冬、春季脲酶活性 93%的变化由水温、浮游植物细胞丰度和尿素浓度决定($P < 0.05$)。春季水温和浮游植物细胞丰度的明显升高也相应提高了脲酶活性, 促进浮游生物利用尿素的能力。

表3 冬、春季海南岛近岸海域浮游植物细胞丰度与理化因子主成分分析

Tab.3 Principal component analysis of cell abundances, physical and chemical factors in the coastal waters of Hainan Island during winter and spring

参数	海口湾		陵水新村湾	
	PC1	PC2	PC1	PC2
水温	0.715	0.173	-0.399	0.485
盐度	0.380	—	—	0.179
硝酸盐	-0.420	-0.115	-0.190	-0.248
铵盐	—	-0.117	0.150	0.344
尿素	0.510	0.280	—	0.298
脲酶活性	0.870	—	-0.144	0.805
DIP	-0.483	-0.246	0.191	-0.228
DOP	0.254	0.616	0.117	0.157
硅藻丰度	0.935	-0.287	0.493	0.829
甲藻丰度	0.819	-0.568	0.894	-0.318
累计贡献率(%)	97.5	2.4	53.8	39.7

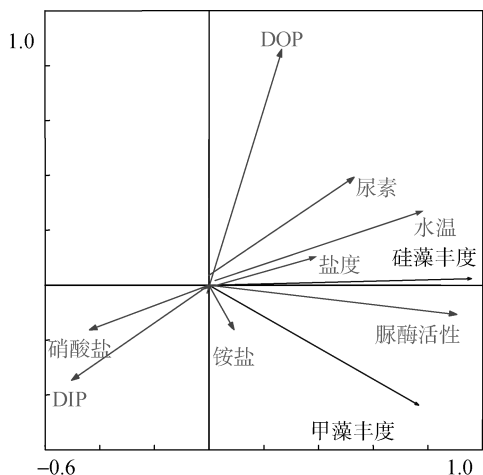


图 6 冬、春季海口湾浮游植物种类丰度与理化因子的 PCA 二维排序图

Fig.6 Two-dimension graph of PCA plot with species richness and environment variables in the coastal waters of Haikou Bay during winter and spring

冬、春季陵水新村湾 2 个主成分 PC1 和 PC2 累积贡献率达到 93.5%，甲藻和硅藻对 PC1 的影响最大，分别为 0.894 和 0.493(表 3)。与浮游植物硅藻和甲藻成正相关的因子为脲酶活性、水温和铵盐浓度，硝酸盐和 DIP 浓度为负相关(图 7)。在陵水新村湾，水温、脲酶活性和铵盐浓度的升高同样有利于促进该海湾浮游植物的生长。冬、春季南部海湾浮游生物脲酶活性 91% 的变化与水温和浮游植物细胞丰度相关性显著($P < 0.01$)。

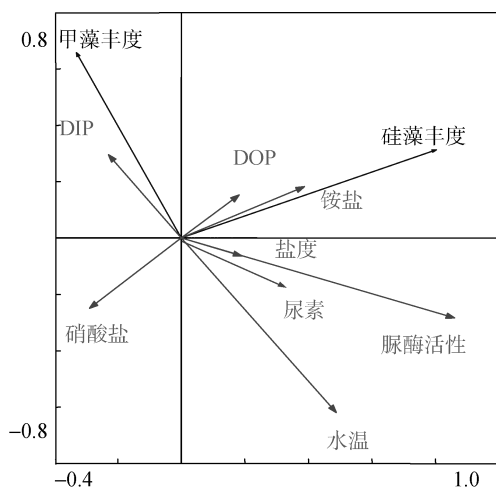


图 7 冬、春季陵水新村湾浮游植物种类丰度与理化与理化因子的 PCA 二维排序图

Fig.7 Two-dimension graph of PCA plot with species richness and environment variables in the coastal waters of Lingshui-Xincun Bay during winter and spring

3 讨论

在海南岛，硝酸盐仍是海区主要的氮源，铵盐浓度均值低于 $2 \mu\text{mol/L}$ ，尿素浓度高于铵盐。国外的调查研究发现，海区中尿素的浓度一般低于 $1 \mu\text{mol/L}$ ，通常情况下低于硝酸盐和铵盐的浓度^[1,4,14]。我国近岸海域，杭州湾邻近海域春季平均尿素浓度为 $1.14 \mu\text{mol/L}$ ，大亚湾四季尿素浓度变化范围为 $1.57\sim 4.32 \mu\text{mol/L}$ ^[15-16]，海南岛尿素浓度高于国外、杭州湾和大亚湾海域。海南岛近岸海湾春季尿素浓度比冬季有所升高，虽然浓度升高变化不显著，但随着北部海口湾 DIN、DON 和南部陵水新村湾 DON 浓度的显著下降，尿素占 TDN 含量由春季的 5%~7% 升高至 24%~30%，差异显著。在南部新村湾内，尿素浓度甚至高于硝酸盐，可见，尿素是海南岛近岸海区不可忽视的重要氮源。每年的 11~4 月份是海南岛的少雨干旱季节，降雨量只占全年的 10%~30%，5~10 月份为多雨季，且 7~10 月份为台风盛行期。伴随台风而来的暴雨将陆源污染物通过径流输入河口和近岸海域^[17]。陆源输入是海区尿素的主要来源，由此可以推测，届时海南岛近岸海湾尿素浓度将进一步升高。

冬季，北部海口湾无机氮、磷营养盐明显高于南部陵水新村湾，但由于水温低于 20°C ，浮游植物细胞丰度却显著低于南部，甲藻种类和细胞数极少，大多数样品脲酶活性低于检出限。春季，随着水温、尿素占 TDN 含量的显著升高。海口湾浮游植物快速增长，冬、春季变化显著。近岸水体海甸溪、龙昆沟和秀英沟排污入海口均出现几种常见赤潮甲藻，如螺旋环沟藻、海洋原甲藻和锥状斯氏藻等。与此同时，海口湾脲酶活性显著升高，特别是冬、春季尿素浓度均保持较高水平的龙昆沟出海口，其细胞丰度和脲酶活性均达到海口湾最高值。海口湾冬、春季硅藻和甲藻细胞丰度的变化与脲酶活性、水温和尿素正相关，与硝酸盐和 DIP 负相。水温、脲酶活性以及尿素浓度的升高有利于海口湾浮游植物的生长。回归分析显示，海口湾冬、春季脲酶活性变化由水温、浮游植物细胞丰度和尿素浓度决定。春季水温和浮游植物细胞丰度的明显升高也相应地提高了脲酶活性，促进浮游生物利用尿素的能力。

南部陵水新村湾冬季浮游植物细胞丰度已经达到 $1.60\sim 2.68 \times 10^6$ 个/L，脲酶活性均低于检出限，可能与伪菱形藻为南部海区的优势种有关，国外研究发现硅藻单位细胞内的脲酶活性低于其他种类^[1,18]。春季，

随着温度和细胞丰度的进一步提高,脲酶活性变化显著。在南部陵水新村湾,脲酶活性同样与水温 and 浮游植物细胞丰度相关性显著。浮游生物的尿素吸收速率和脲酶活性决定了其利用尿素的能力。Solomon 等^[14]的研究发现,受到水温、营养盐状况和浮游植物群落结构等环境因素的影响,脲酶活性具有季节和空间的变化特征。高的脲酶活性分布在较高的水温、低浓度的硝酸盐、高浓度的铵盐和尿素的水体中。冬季,在海南岛北部海口湾低水温、高硝酸盐和南部低铵盐、低尿素的水体中,脲酶活性低。春季,随着南北部海湾水温、细胞丰度和尿素浓度的进一步升高,硝酸盐的下降,脲酶活性变化显著。

4 结论

2011 年 1~4 月份,分三个航次对海南岛北部海口湾和南部陵水新村湾共 11 个测站开展调查研究,得出以下结论:

1) 冬季,北部海口湾尿素浓度范围为 0.93~4.13 $\mu\text{mol/L}$,高于南部陵水新村湾的 0.93~4.13 $\mu\text{mol/L}$,差异显著。春季,海南岛南北部尿素浓度均有所升高,平均占 TDN 含量由冬季的 5%~7% 显著增加到 24%~30%,尿素是总溶解态氮源的重要组成。

2) 海南岛南北部海湾冬季大部分样品浮游生物的脲酶活性低于检出限,春季海口湾和陵水新村湾平均脲酶活性分别升高至 44 $\text{nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})\pm 23 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 和 21 $\text{nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})\pm 10 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$,变化显著。水温和浮游植物细胞丰度是影响海南岛脲酶活性冬、春季变化的重要因素。

3) 冬季,海口湾浮游植物细胞丰度显著低于陵水新村湾;春季,海口湾浮游植物增长到 5.09×10^6 个/L $\pm 7.45 \times 10^6$ 个/L,季节变化显著。海南岛南北部硅藻和甲藻细胞丰度冬、春季的变化均与硝酸盐和 DIP 负相关,而与脲酶活性和水温正相关,尿素在不同程度上影响南北部细胞丰度的变化。

参考文献:

[1] Glibert P M, Harrison J, Hei C A, et al. Escalating worldwide use of urea—a global change contributing to coastal eutrophication [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77: 441-463.

[2] Lomas M W, Trice T M, Glibert P M, et al. Temporal and spatial dynamics of urea uptake and regeneration rates, and concentrations in Chesapeake Bay [J].

Estuaries, 2002, 25: 469-482.

[3] Helguen S, Slawyk G, Corre P L. Seasonal patterns of urea regeneration by size-fractionated microheterotrophs in well-mixed temperate coastal waters [J]. *Journal of Plankton Research*, 2005, 27: 263-270.

[4] Switzer T. Urea loading from a spring storm-Knysna estuary, South Africa [J]. *Harmful Algae*, 2008, 8: 66-69.

[5] Zehr J P, Kudela R M. Nitrogen cycle of the open ocean: from genes to ecosystems [J]. *Annual Review Marine Science*, 2011, 3: 197-225.

[6] Solomon C M, Alexander J A, Glibert P M. Measuring urease activity in aquatic environmental samples [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2007, 5: 280-288.

[7] Anderson D, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences [J]. *Estuaries*, 2002, 25: 704-726.

[8] Revilla M, Alexander J, Glibert P M. Urea analysis in coastal waters: comparison of enzymatic and direct methods [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2005, 3: 290-299.

[9] 陈春华,王路,王道儒.海口湾秀英浴场水质状况及其影响机制分析[J]. *海洋学报*, 1996, 18(3): 45-52.

[10] 李鹏山,林国尧,谢跟踪,等.海口湾近岸海域水质状况分析与评价[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2002, 23(1): 108-114.

[11] 潘英姿,宋福,高吉喜,等.海南省近岸海域水生生态污染研究 [J]. *环境科学研究*, 2007, 20(1): 58-63.

[12] 王红勇,唐天乐,黄飞.海南省赤潮状况及防治对策 [J]. *中国水产*, 2010, 1: 65-66.

[13] GB/T 12763.4—2007. 海洋调查规范. 北京: 中国标准出版社, 2007: 5-11.

[14] Solomon C M, Collier J L, Berg G M, et al. Role of urea in microbial metabolism in aquatic systems: a biochemical and molecular review [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2010, 59: 67-88.

[15] 黄爽,石晓勇,张传松,等.2010 年春季杭州湾邻近海域尿素含量及平面分布[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(1): 58-61.

[16] 张云,黄凯旋,欧林坚.2013. 大亚湾海域尿素与浮游

- 生物脲酶活性研究[J]. 生态学报, 2014, 33(1): 90-96.
- [17] 陈春华, 李巧香. 海口湾的台风及其对海水水质的影响机制分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(2): 59-65.
- [18] Fan C, Gliber P M, Burkholde J M. Characterization of

the affinity for nitrogen, uptake kinetics, and environmental relationships for *Prorocentrum minimum* in nature blooms and laboratory cultures [J]. Harmful Algae, 2003, 2: 283-299.

Comparative study on urea bioavailability by plankton in the southern and northern coastal waters of Hainan Island

HUANG Kai-xuan¹, ZHANG Yun¹, OU Lin-jian¹, LÜ Song-hui¹, LÜ Shu-guo², QI Yu-zao¹

(1. Research Center for Harmful Algae and Marine Biology, Jinan University; Key Laboratory of Aquatic Eutrophication and Control of Harmful Algal Blooms, Guangdong Higher Education Institute, Guangzhou 510632, China; 2. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 570206, China)

Received: Jun., 28, 2013

Key words: urea; urease activity; phytoplankton; Hainan Island

Abstract: Field cruises were carried out on the southern and northern coastal waters of Hainan Island to survey the variation of urea concentrations and urease activities together with other environmental parameters during January to April, 2011. Results showed that the urea concentrations in the northern Haikou Bay (from 0.93 $\mu\text{mol/L}$ to 4.13 $\mu\text{mol/L}$) were significantly higher than those in the southern Lingshui-Xincun Bay during the winter. During the April, the urea concentrations increased significantly to 24%~30% of total dissolved nitrogen, which showed that urea was as one important nitrogen source in the coastal waters of Hainan Island. The urease activities of most plankton samples in the winter were below the detection limit. In the spring, the urease activities of Haikou Bay and Lingshui-Xincun Bay increased significantly to $44 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})\pm 23 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$ and $21 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})\pm 10 \text{ nmol}/(\text{L}\cdot\text{h})$ respectively. The urea concentrations and the urease activities in the nearshore waters where sewage draining and the aquaculture area located were higher than in the other waters. The urease activities during the winter and spring were mostly affected by water temperatures and cell abundance of phytoplankton. Cell abundances of Haikou Bay were significantly lower than Lingshui-Xincun Bay during the winter. In April, cell abundances of Haikou Bay increased significantly to $5.09 \text{ cells}/\text{L}\pm 7.45 \times 10^6 \text{ cells}/\text{L}$. Cell abundances of diatom and dinoflagellates in the Hainan Island waters during the winter and spring were negative correlated with nitrate and DIP concentrations, while positive correlated with urease activities and water temperatures. The urea concentrations affected the variation of cell abundances at different degrees. Increasing water temperature, urease activities and urea concentrations were propitious to the growth of phytoplankton in the Hainan Island during the spring.

(本文编辑: 张培新)