

福建漳江口红树林底质环境因子对 底栖微藻初级生产力的影响

邱勇^{1,2}, 王源勇¹, 谢聿原¹, 黄邦钦¹

(1. 厦门大学福建省海陆界面生态环境重点实验室、环境与生态学院, 福建 厦门 361102; 2. 泉州师范学院海洋与食品学院、福建省海洋藻类活性物质制备与功能开发重点实验室, 福建 泉州 362000)

摘要:本研究于2014年7月至2015年7月在福建漳江口红树林国家级自然保护区潮间带滩涂采集表层底质沉积物样品, 研究环境因子对红树林生境底质中的底栖微藻总初级生产力、群落呼吸速率和群落净生产力的影响和调控机制。结果表明, 红树林滩涂生境底质中底栖微藻总初级生产力为 $(2.4 \pm 0.8) \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 与温度正相关, 呈夏季高、冬季低的特点, 温度是影响底栖微藻总初级生产力的主要环境因子; 受红树林凋落物的影响, 红树林生境底质中群落呼吸速率较高, 使得秋、冬、春季一些月份群落净生产力出现负值, 群落净生产力全年均值为 $(0.5 \pm 1.8) \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 基本上处于二氧化碳收支平衡的状态。本研究显示底栖微藻的初级生产力影响了红树林生境底质的二氧化碳源汇格局, 在红树林湿地碳循环中扮演重要的角色。

关键词: 海洋生物学; 底栖微藻; 初级生产力; 净初级生产力; 群落呼吸; 红树林生境; 环境因子

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2019. 01. 006

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2019)01-0053-09

作为全球“蓝色碳汇”的主要贡献者, 潮间带湿地在减缓含碳温室气体排放, 降低全球温室效应方面具有重要潜力^[1]。底栖微藻的生物量和初级生产力可超过其上覆水的浮游植物的生物量及初级生产力, 据保守估计, 全球每年底栖微藻固定的碳储量约为每年0.5Gt^[2]。底栖微藻也是红树林生境底栖食物网中的重要一环, 是大型底栖动物和浮游桡足类的食物来源以及底质中细菌主要的碳来源^[3,4]。国内关于底栖微藻的初级生产力研究主要集中在温带潮间带湿地底栖微藻生物量的研究^[5-8], 在亚热带潮间带湿地开展的研究较少^[9], 而有实地测量初级生产力的研究更为罕见^[10-11]。红树林作为热带、亚热带特有的植被, 连接陆地和海洋的滨海生态交错带, 被认为是重要的碳库之一。红树林周期性被潮水浸淹, 其红树林生境底栖生态系统具有独特的群落结构和环境调控机制^[4,11-13]。因此, 研究红树林生境底栖微藻的初级生产力大小和季节变化规律, 阐明

其环境调控机制, 对于科学评价红树林湿地生态系统在全球碳循环中的地位具有重要作用, 同时也将为红树林碳汇研究提供一些参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和采样测量

漳江口红树林位于福建漳江口红树林国家级自然保护区内, 较少受到人为干扰。我们在红树植物外围距离成片红树植物不远的潮间带滩涂上设置红树林生境采样点(23.892°N, 117.492°E), 在2014年7月至2015年7月期间, 大致在每月上旬或下旬的退潮时测定环境因子、采集表层沉积物样品、采集间隙水样品和测定底栖微藻总初级生产力与群落呼吸速率。表层沉积物的采样使用改造过的注射器(体积50 cm³, 内径1.6 cm), 采集表层0~1 cm深的沉积物样品, 放入预先110℃灭菌的离心管中, 放入干冰盒中-20℃低温保存, 带回实验室后立即置于

收稿日期: 2018-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41466001); 近海海洋环境国家重点实验室自主课题资助项目(MELRI1603); 滨海湿地生态系统教育部重点实验室自主课题资助项目(WELRI201601)

作者简介: 邱勇(1988—), 男, 博士生; E-mail: fqyuyong@126.com

通讯作者: 黄邦钦(1964—), 男, 教授; E-mail: bqhuang@xmu.edu.cn

-80℃超低温冰箱中保存,待测。

1.2 环境因子测定方法

红树林生境的沉积物土壤的温度、盐度和 pH 值分别使用玻璃温度计、HI98331 型手持式土壤电导率仪和 HI99121N 型便携式土壤酸度计(意大利 HANNA 公司)测定。沉积物粒度采用 Marlven-Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定^[14-15],其实验步骤如下:将沉积物样品混合均匀,以保证样品具有代表性;粘土质粉砂或粉砂质粘土等细粒沉积物一般取样 0.10~0.29 g 于 50 cm³小烧杯中,加入 30% 的双氧水 15 cm³,待反应 24 h,直到气泡不再产生(若仍有气泡产生,需再加入适量双氧水直到反应完毕,以确保样品中有机质氧化完全),用镊子挑出较大的贝壳碎片,然后加入 3 mol/dm³ 的盐酸反应直至样品没有气泡冒出,去除钙质;经过以上步骤处理后,转移样品至离心管中,加入去离子水,离心,重复这个过程至少 3 次,确保样品完全洗净;加入 4% 六偏磷酸钠([NaPO₃]₆)溶液静置 24 h,使样品颗粒充分散开;最后在激光粒度仪上进行测量。

沉积物间隙水样品带回实验室用于测定营养盐。水样过滤前加入适量三氯甲烷(CHCl₃)于间隙水中,取 50 cm³水样,并用 0.45 μm 孔径的醋酸纤维膜过滤 2~3 遍后收集。经过处理后的样品用 Bran + Lubbe AA3 营养盐自动分析仪(德国 SEAL Analytical GmbH)测定溶解无机氮(DIN)和溶解无机磷(DIP),符合《海洋调查规范》^[16]要求,硝酸盐和亚硝酸盐浓度通过镉柱还原法将硝酸盐还原成亚硝酸盐,再用重氮化偶合比色法测定,溶解无机磷的测量采用磷钼蓝分光光度法。

1.3 底栖微藻生物量测定

采用高效液相色谱法(high-performance liquid chromatography, HPLC)测定红树林生境底栖微藻的叶绿素 *a* 含量(Chl *a*),测量步骤与方法参照李欣等(2013)所描述的微藻光合色素的测定方法^[9]并进行了一定的改进:将沉积物样品从 -80℃ 冰箱中取出,在冷冻干燥机(-70℃)中冷冻干燥 15~20 h,待样品完全干燥后称量干重,确保所有待测样品干重均在 8~10 g 之间。然后向离心管中加入 15 cm³ N,N-二甲基甲酰胺(DMF),避光并置于摇床上震荡 2~3 h 以保证萃取充分。然后根据陈纪新等(2003)所描述的方法^[17]获得底微藻群落 Chl *a* 生物量;使用岛津 LC20AGAO 高效液相色谱仪配备二极管阵列检测器(DAD)检测进行测定,根据色素峰的停留时间和扫描图谱定性 Chl *a*,其浓度通过外标法确定。

1.4 底栖微藻总初级生产力和群落呼吸速率测定

依照 Migné 等(2002)的方法,我们通过将一由聚氯乙烯(PVC)制成的透明密闭气罩罩在研究区域上,并确保气罩与底泥接触紧密。通过测定封闭体系中的二氧化碳变化获得底栖群落的生产力^[18]。在光照条件下封闭体系中的二氧化碳变化认为是由群落净生产力(net community production, NCP)造成的,变化速率为正代表测定区域二氧化碳的源(即 NCP 为负),反之是二氧化碳的汇(NCP 为正);无光条件下的二氧化碳变化(速率必须为正)则是由群落呼吸速率(community respiration, CR)决定的;底栖微藻总初级生产力(gross primary production, GPP)是二者的加和,即:GPP = NCP + CR。密闭气罩的上半部分为半个球体,直径为 30 cm,附在圆柱体上,圆柱高 15 cm,气罩的链接处使用硅脂密封以保证密闭性。实验时,圆柱部分插入底质中,此时气罩所罩住的气体体积根据插入的深度而定。密闭气罩中二氧化碳气体浓度的变化使用红外气体分析仪 Licor-820 记录,记录频率为 1 Hz。在自然光条件下测量时长为 15~20 min,ΔCO₂ 获得群落净生产力:

$$NCP = \frac{-\Delta CO_{2(NCP)} \times V}{A} \quad (1)$$

然后打开气阀使气罩内气体与外界平衡,用不透光的遮光膜遮住模拟暗环境,按照以上步骤重复测量,获得群落呼吸速率:

$$CR = \frac{\Delta CO_{2(CR)} \times V}{A} \quad (2)$$

式(1,2)中:ΔCO₂是单位时间内气罩中二氧化碳浓度的变化,单位是 mmol C/(dm³·h)。为了排除土壤扰动对测量的干扰,需要挑选变化稳定的浓度曲线求变化速率,*V*是气罩所罩住的气体体积(dm³),*A*是罩住的地表面积(m²)。为了保证数据的代表性,我们每次在研究区域附近随机另选两个点,重复如上实验,最终的结果将表现为 3 次实验的平均值和标准偏差。

1.5 数据分析和处理方法

本研究所有的数据统计和相关性分析均使用 SPSS 24.0 完成,均值检验采用 student *t*-test,皮尔森相关系数用于检验两个变量间是否线性相关,卡方检验用于比较沉积物的粒级组成。图表采用 Sigma-plot 12.5 进行绘制。

2 结果与讨论

2.1 红树林滩涂生境表层沉积物的温度、盐度和 pH 值

红树林滩涂生境底质表面土壤温度、盐度和 pH

值变化见图 1。在 2014 年 7 月到 2015 年 7 月期间,土壤温度变化范围是 18.2 ~ 36.8℃,平均温度为 (27.1 ± 6.0)℃,最高温度出现在夏季 7 月,最低温度出现在冬季 1 月份,总体上温度表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,与当地气候变化一致。盐度变化范

围是 10 ~ 25,平均盐度为 (20.4 ± 4.4),没有明显的季节特征。pH 呈弱碱性,变化范围是 7.3 ~ 8.3,平均 pH 值为 (7.7 ± 0.3),冬季 pH 值最高,不同季节 pH 具有显著差异 ($p < 0.05$)。

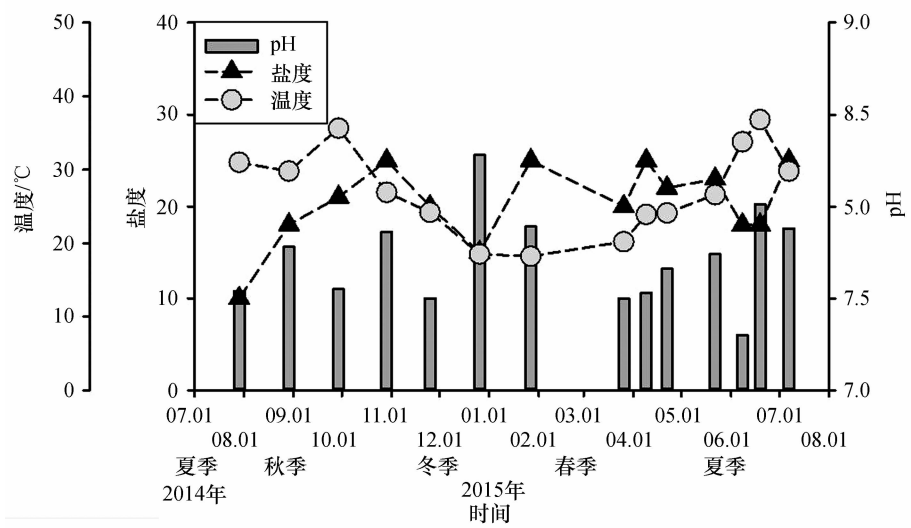


图 1 红树林滩涂生境表层底质温度、盐度和 pH 值变化

Fig. 1 Changes of temperature, salinity and pH of surface sediment at the intertidal mudflat of mangrove forest

2.2 红树林滩涂生境表层沉积物粒级分布

红树林滩涂生境沉积物主要为粘土质粉砂类型,由图 2 可知在采样期间红树林滩涂生境沉积物主要由粉砂(4 ~ 63 μm)和黏土(< 4 μm)构成,而中砂(> 63 μm)所占比率极低,仅为 0% ~ 3.9%,显著低于粉砂 68.8% ~ 71.5% 和黏土 27.3% ~ 31.0%

($p < 0.05$)。底质沉积物的中砂、粉砂和黏土平均含量比率分别为 (0.5 ± 1.0)%、(70.0 ± 0.9)% 和 (29.5 ± 1.2)%,粉砂含量比率最高,不同季节底质粒级分布比率没有显著差异 ($p > 0.05$),没有明显季节变化。

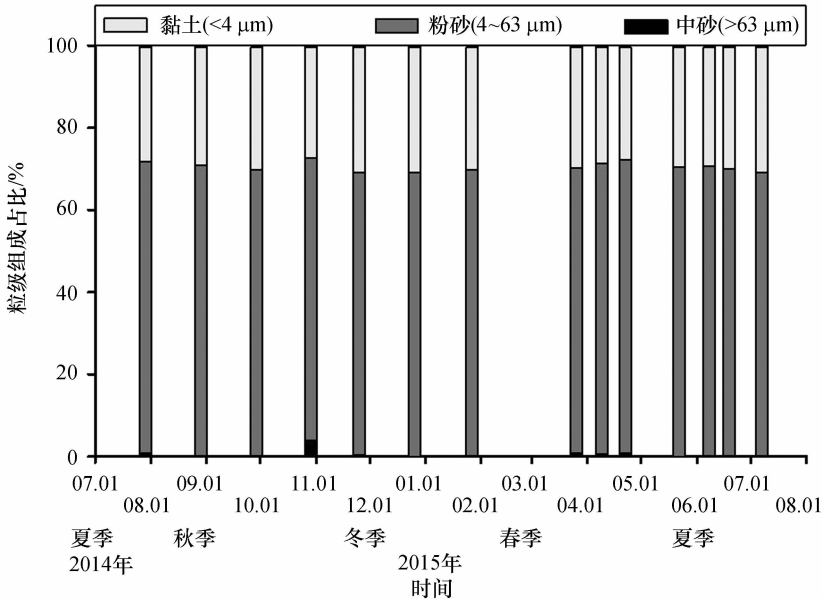


图 2 红树林滩涂生境表层底质沉积物粒级组成比率变化

Fig. 2 Change of grain size composition of surface sediment at the intertidal mudflat of mangrove forest

2.3 红树林滩涂生境表层底质营养盐

采样期间,红树林滩涂生境表层底质溶解无机氮(DIN)含量的变化范围是28~126 nmol/dm³,平均DIN含量为(74±28) nmol/dm³;表层底质溶解无机磷(DIP)含量的变化范围是1~5 nmol/dm³,平均DIP含量为(3±1) nmol/dm³(图3). DIN和DIP均

呈现春季和秋季高,夏季和冬季相对较低的特点,而且两者变化趋势一致($p < 0.01$). 比较不同采样时间的氮磷比(N/P)可知,N/P变化范围是9.8~47.2,平均N/P值为(25.7±11.4),其中N/P最高值出现在4月份,最低值出现在8月份,总体上呈冬季和春季高,夏季和秋季低的特点.

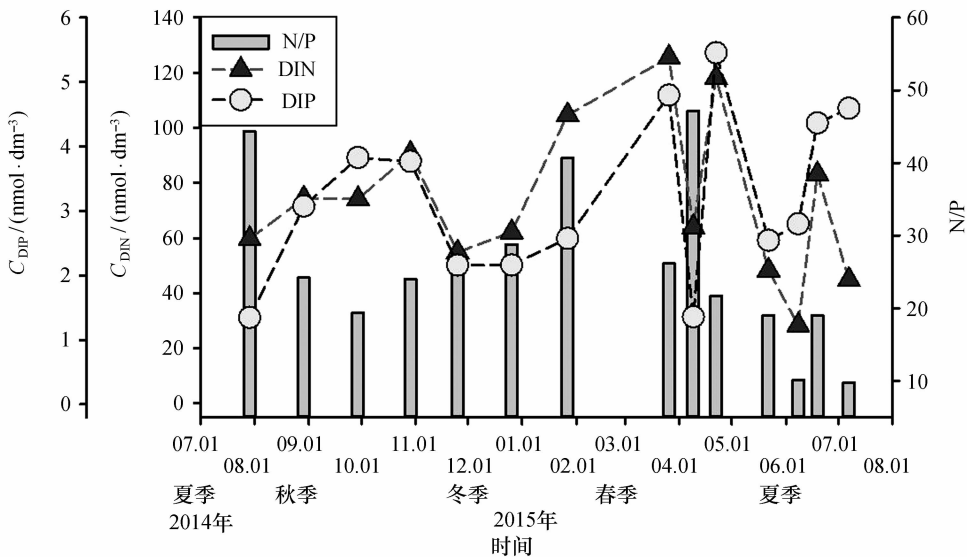


图3 红树林滩涂生境表层底质溶解无机氮、溶解无机磷含量和氮磷比变化

Fig.3 Changes of dissolved inorganic nitrogen and dissolved inorganic phosphorus at the intertidal mudflat of mangrove forest

2.4 红树林滩涂底栖微藻总初级生产力、群落呼吸速率和群落净生产力及其与环境因子的关系

调查期间红树林滩涂生境底栖微藻总初级生产

力(GPP)和叶绿素a(Chl a)含量变化见图4. 在调查期间,GPP变化范围是1.2~3.8 mmol C/(m²·h),调查期间平均GPP为(2.4±0.8)mmol C/(m²·h),

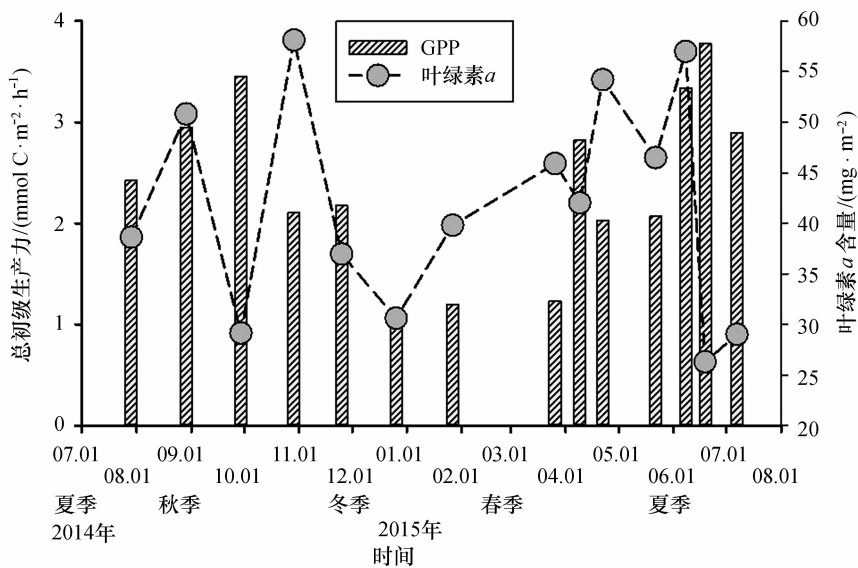


图4 红树林滩涂底栖生境微藻叶绿素a生物量和总初级生产力变化

Fig.4 Change of Chl a and gross primary production of microphytobenthos at the intertidal mudflat of mangrove forest

最高值出现在夏季 6 月份,最低值出现在冬季的 12 月份,呈夏季>秋季>春季>冬季的特点,季节变化明显.底栖微藻 Chl *a* 生物量变化范围是 26.3~58.1 mg/m²,变化趋势大体上与初级生产力相同,呈夏季高于冬季的特征.同时群落呼吸率(CR)也呈现出显著的季节变化特征(图 5),CR 变化范围是 0.1~4.0 mmol C/(m²·h),平均 CR 为 (1.9±1.4) mmol C/(m²·h),其中最高值出现在在冬季 1 月份,最低值出现在夏季 8 月,且大致呈春季和冬季高,夏季和秋季低的特点,与 GPP 的季节变化相反.图 6 展示了 NCP,其变化范围是 -2.8~3.2 mmol C/(m²·h),平均 NCP 为(0.5±1.8)mmol C/(m²·h),最大值出现在

9 月份,最低值出现在 1 月份,且冬季和春季 NCP 为负数,表现为二氧化碳的源,而夏季和秋季月份为正数,表现为二氧化碳的汇.相关性分析结果显示(表 1),红树林生境底栖微藻群落 Chl *a* 与底质中 DIN 含量显著正相关($r = -0.539, p < 0.01$),与其他环境因子(温度、盐度、pH、DIP 等)均无显著相关性.而 GPP 与温度显著正相关($r = 0.815, p < 0.01$),也与 DIP 呈正相关关系($r = 0.400, p < 0.05$),但与其他环境因子均无显著相关性($p > 0.05$).而 CR 与各环境因子均无显著相关系($p > 0.05$).NCP 与温度显著正相关($r = 0.672, p < 0.01$),与其他环境因子无显著相关性($p > 0.05$).

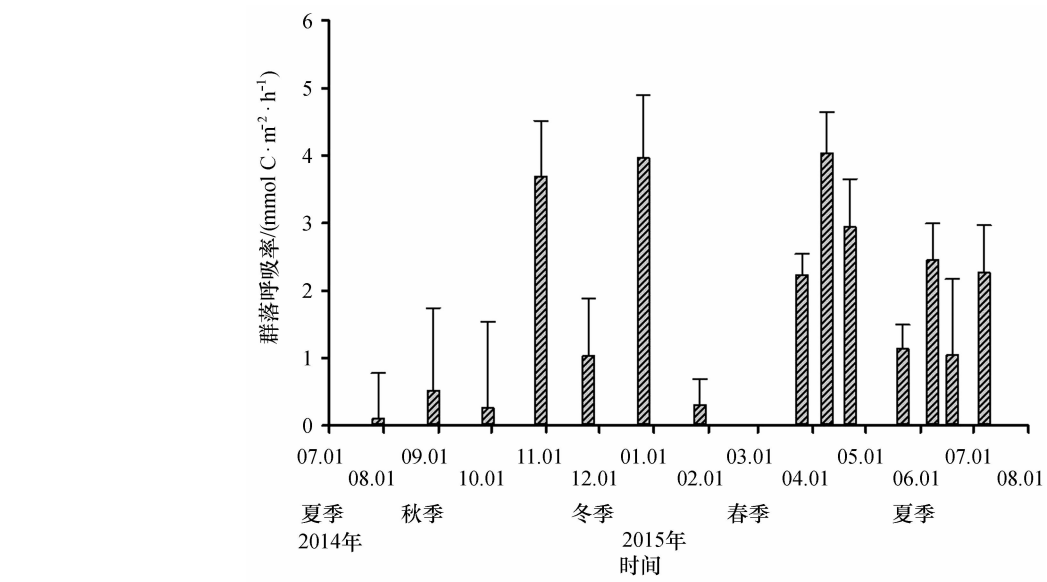


图 5 红树林滩涂生境底质群落呼吸率变化
Fig. 5 Change of community respiration at the intertidal mudflat of mangrove forest

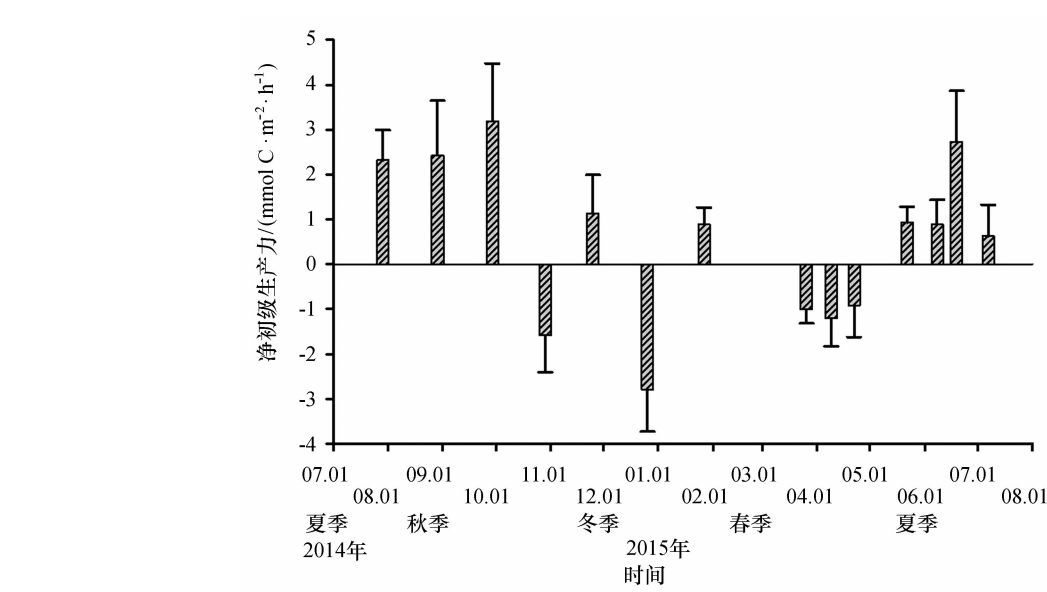


图 6 红树林滩涂生境底栖微藻群落净初级生产力变化
Fig. 6 Change of net community production of microphytobenthos at the intertidal mudflat of mangrove forest

表 1 红树林生境底栖微藻生物量、总初级生产力、群落呼吸速率和群落净生产力与环境因子相关性分析
Tab.1 Correlation analysis of biomass (Chl *a*), total primary production, community respiration rate and community net productivity of microphytobenthos with environmental factors at the intertidal mudflat of mangrove forest

项目	微藻生物量(Chl <i>a</i>)		总初级生产力		群落呼吸速率		群落净生产力	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
<i>C</i> _{DIN}	-0.539**	0.004	0.191	0.340	0.003	0.989	0.109	0.588
<i>C</i> _{DIP}	-0.273	0.169	0.400*	0.039	0.047	0.815	0.198	0.322
N/P	0.284	0.151	-0.347	0.076	0.070	0.730	-0.254	0.202
温度	-0.166	0.407	0.815**	0.000	-0.267	0.178	0.672**	0.000
盐度	0.247	0.215	-0.190	0.343	0.239	0.229	-0.287	0.146
pH	0.031	0.879	-0.298	0.131	0.269	0.175	-0.372	0.056

注:“**”表示 $p < 0.01$,相关性极为显著;“*”表示 $p < 0.05$,相关性显著

2.5 讨论

以往对底栖微藻初级生产力的测量主要采用放射性碳同位素示踪法^[10-11].但由于放射性物质的环境危害性,这种方法不适合于在红树林开展研究.本研究采用测量土壤大气界面二氧化碳交换速率的方法^[18],虽然有同时测样量低的缺点,但其优点突出:① 测量步骤简单,且安全可靠;② 可同时获得总初级生产力、群落呼吸速率和群落净生产力,更适合于红树林生态系统的碳循环研究.

在研究期间,测定的红树林生境土壤温度的季节变化(图 1)与亚热带地区气温的变化相一致.作为光合作用的三要素(光照、温度和营养盐)之一,温度是影响固碳酶活性的关键因素,进而调控底栖藻类的总初级生产力^[19].Blanchard 等(1997)研究认为 25℃是底栖微藻光合作用的最适温度^[20],也有研究认为底栖微藻光合作用的最佳温度在 10 ~ 20℃之间^[21],穆文华等(2014)应用脉冲振幅调制叶绿素荧光技术研究厦门大嶝岛潮间带底栖微藻的光合活性,发现 27℃时光合电子传递速率达到最高,高温如 35℃则会伤害底栖微藻光合活性^[22].本研究结果显示,红树林潮间带滩涂底栖微藻的 GPP 与温度呈显著正相关($p < 0.01$),温度的升高促进了底栖微藻群落的整体初级生产力,同时 Chl *a* 与温度无显著相关关系且 *r* 为负值,说明单位 Chl *a* 初级生产力也随着温度的升高而增加.值得注意的是,当土壤温度达到 35℃时,如 2014 年 10 月份或 2015 年 6 月份的测点,GPP 并未受到抑制.穆文华等(2014)也认为底栖微藻光合活性的最适温度与环境温度是一致的,体现了底栖微藻对环境的适应性,他们研究中发现的 27℃最适温度与厦门区域 5 月份潮间带土壤温度是相当的,因此当土壤温度上升到 27℃以

上,底栖微藻可通过自身的适应或群落演替,以适应温度的变化,同时提高 GPP^[22].

由于福建漳江口红树林调查区处于东山湾靠里的位置,盐度变化相对较小(图 1),对初级生产和底栖微藻生物量均无显著影响(表 1).而营养盐是生物体生长繁殖的重要限制因子,虽然有研究指出沉积物中的营养盐较为丰富,一般不会成为底栖微藻的限制因子^[23],但需要根据现实情况进行分析,漳江口红树林潮间带滩涂的 N/P 比值大部分时间都大于 16(图 3),一般认为 16:1 是最适宜藻类生长的 Redfield 比值,因而本研究中的底栖微藻的生长可能受到磷限制^[24],这与本研究结果中 GPP 与 DIP 显示出显著的正相关关系相符(表 1).有研究发现在营养盐输入增强时,底栖微藻的生物量及生产力会增加^[25].

沉积物粒径在红树林滩涂生境中的变化会受到很多因素的影响,包括沉积物来源、水动力条件和一些生物因素的扰动等^[26].沉积物的粒径也有可能对近岸浅水系统中底栖初级生产力的分布造成影响^[27],漳江口红树林生境潮间带滩涂底质沉积物主要由粉砂和黏土构成(图 2),有研究发现泥质底质中的底栖微藻生物量显著高于砂质底质^[28].红树林是生产力极高的生态系统,红树生境凋落物是形成红树林土壤的重要来源,为底栖生态系统提供了丰富的营养来源,也促进了土壤里微生物活动的发展,因而群落呼吸作用强.本研究结果显示,秋、冬和春季的 CR 较高(图 5),于是这几个季节出现较多 NCP 为负的情况.从全年的情况看,平均 CR 为 $(1.9 \pm 1.4) \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均 NCP 虽然为正,但数值较小,二氧化碳的收支接近于平衡.

Migné 等(2016)在法国 Arcachon 湾用土壤大气

界面二氧化碳交换速率法测量底栖藻类初级生产力和底栖群落呼吸速率,结果显示泻湖潮间带滩涂以自养为主且是二氧化碳的汇,尤其是在中潮带,在无海草覆盖的采样点,其 NCP 在春季和夏末达到高值,最高达到 $9.9 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,若干倍于本研究的测值,与 Chl *a* 生物量之间的差异相当.同时他们还归纳了过去十多年来在法国沿海不同潮间带滩涂测量得到的数据,发现在不同地点、不同底质条件(泥质和砂质)、不同潮间带位置(高、中、低潮带)和有海草覆盖情形下,最大 CR 范围是 $0.1 \sim 7.0 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,时空变异性极大^[29];本研究结果中漳江口红树林潮间带滩涂的最大 CR 为 $4.0 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,处于他们数据中较高的水平.更为关键的是,在他们的数据集中,多数采样点都是高度自养状态即强的二氧化碳的汇,最大 NCP 范围是 $-0.1 \sim 14.6 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而漳江口红树林潮间带最大 NCP 是 $3.2 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均值是 $0.5 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,基本上处于二氧化碳收支平衡的状态.但值得注意的是,他们的研究只有冬末、春季和夏末几个时间段,对于本研究而言,在夏季和初秋这个时间段,漳江口红树林潮间带滩涂也是属于强的二氧化碳的汇.因此,完整的季节分布数据对于是否能较准确地衡量一个系统全年平均

NCP 是非常关键的.此外,在国内山东的乳山湾和浙江的象山港潮滩也开展了底栖藻类 GPP 的研究^[10-11],最大 GPP 分别为 $7.7 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $3.8 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (仅中潮区),与本研究结果基本上数量级一致.目前,对潮间带滩涂生产力的已有研究多集中于温带区域,热带和亚热带区域的研究较少.在撒哈拉沙漠区域沿海滩涂的研究发现,十一月份和一月份光滩的全天 NCP 都为负值^[30].这些数据显示,潮间带滩涂生产力可能存在纬度上的变化规律,研究和发现这种规律需要在热带和亚热带开展更多类似的研究.

3 结论

本研究表明,福建漳江口红树林潮间带滩涂生境底质的环境因子均有显著的季节变化,其中温度是影响红树林滩涂生境底质中底栖微藻总初级生产力的主要环境因子,营养盐也是影响底栖微藻生物量和总初级生产力的重要因素.红树林湿地是重要的碳库之一,但由于功能的区别,红树树冠和其外围底质有着自养作用和异养作用的明显区分.本研究发现,在红树林外围的光滩生境,底栖微藻的光合作用平衡了异养作用,使全年的群落净生产略高于零,进而影响红树林湿地生态系统的碳的源汇格局.

参考文献:

- [1] 仲启铨,王开运,周凯,等.潮间带湿地碳循环及其环境控制机制研究进展[J].生态环境学报,2015,24(1):174-182.
- [2] CAHOON L B, NEARHOOF J E, TILTON C L. Sediment grain size effect on benthic microalgal biomass in shallow aquatic ecosystems[J]. Estuaries,1999,22(3):735-741.
- [3] JONGE V N D, BEUSELOM J E E V. Contribution of resuspended microphytobenthos to total phytoplankton in the EMS estuary and its possible role for grazers[J]. Netherlands Journal of Sea Research,1992,30(30):91-105.
- [4] 徐姗楠,陈作志,李适宇.红树林水生动物栖息地功能及其渔业价值[J].生态学报,2010,30(1):186-196.
- [5] 姜祖辉,陈瑞盛,王俊.胶州湾红岛潮间带底栖微藻种类组成及其生物量变化[J].渔业科学进展,2007,28(5):74-81.
- [6] 商栩,管卫兵,张经.长江口盐沼湿地底栖微藻的分布特征及其对有机质产出的贡献[J].海洋学报,2009,31(5):40-47.
- [7] 王丹丹,高抒,杜永芬,等.江苏如东海岸互花米草盐沼沉积物叶绿素 *a* 分布特征[J].生态学杂志,2012,31(9):2247-2254.
- [8] 徐帅帅,邸宝平,王玉珏,等.我国典型潮间带底栖硅藻群落空间分布特征[J].海洋学报,2017,39(6):95-113.
- [9] 李欣,徐松立,肖武鹏,等.厦门筴筴湖潟湖底栖微藻光合色素的时空变化特征及与环境因子的关系[J].应用海洋学报,2013,32(1):79-87.
- [10] 宁修仁,刘子琳.象山港潮滩底栖微型藻类现存量的初级生产力[J].海洋学报,1999,21(3):98-105.
- [11] 尹晖,孙耀,石晓勇,等.乳山湾东流区滩涂底栖微藻现存量 and 初级生产力[J].渔业科学进展,2006,27(3):62-66.
- [12] 刘均玲,黄勃,梁志伟.东寨港红树林小型底栖动物的密度和生物量研究[J].海洋学报,2013,35(2):187-192.
- [13] 邱勇,李俊,黄勃,等.影响东寨港红树林中光背团水虱分布的生态因子研究[J].海洋科学,2013,37(4):21-25.
- [14] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation[C]//TUCKE M. Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85.
- [15] MILLIMAN J D, SHEN H T, YANG Z S, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1):37-45.

- [16] 国家海洋局. 海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查:GB/T 12763.4—2007[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [17] 陈纪新,黄邦钦,贾锡伟,等. 利用光合色素研究厦门海域超微型浮游植物群落结构[J]. 海洋环境科学,2003,22(3):16-21.
- [18] MIGNÉ A, DAVOULT D, SPILMONT N, et al. A closed-chamber CO₂-flux method for estimating intertidal primary production and respiration under emersed conditions[J]. Marine Biology, 2002, 140(4):865-869.
- [19] RAVEN J A, GEIDER R J. Temperature and algal growth[J]. New Phytologist, 2010, 110(4):441-461.
- [20] BLANCHARD G F, GUARINI J M, GROS P, et al. Seasonal effect on the relationship between the photosynthetic capacity of intertidal microphytobenthos and temperature[J]. Journal of Phycology, 2010, 33(5):723-728.
- [21] SALLEH S, MCMINN A. The effects of temperature on the photosynthetic parameters and recovery of two temperate benthic microalgae, *Amphora* cf. *coffeaeformis* and *Cocconeis* cf. *Sublittoralis* (Bacillariophyceae)[J]. Journal of Phycology, 2011, 47(6):1 413-1 424.
- [22] 穆文华,谢聿原,黄邦钦. 厦门大嶝岛潮间带底栖微藻叶绿素荧光对温度和光照变化的响应[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(3):318-325.
- [23] 杜国英,郑异教,许恒龙. 基于河口潮间带底栖微藻群落水平的环境质量状态评价[J]. 海洋学报, 2015, 35(6):112-120.
- [24] SAÑUDOWILHELMY S A, TOVARSANACHEZ A, FU F X, et al. The impact of surface-adsorbed phosphorus on phytoplankton Redfield stoichiometry[J]. Nature, 2004, 432(7 019):897.
- [25] AXELRAD D M, HICKMAN N J, GIBBS C F. Microalgal productivity as affected by treated sewage discharge to Port Phillip Bay[J]. Port Phillip Bay Environmental Study Werribee Project (PO1), Environmental Studies Series, 1979,241:100-120.
- [26] 李万会,丁平兴. 滩涂沉积物中叶绿素 *a* 浓度与沉积特性的关系[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2007,2007(4):26-33.
- [27] GARRIGUE C. Distribution and biomass of microphytes measured by benthic chlorophyll *a* in a tropical lagoon (New Caledonia, South Pacific)[J]. Hydrobiologia,1998,385(1/3):1-10.
- [28] CARTAXANA P, MENDES C R, LEEUWE V, et al. Comparative study on microphytobenthic pigments of muddy and sandy intertidal sediments of the Tagus estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006,66(1/2):225-230.
- [29] MIGNÉ A, DAVOULT D, SPILMONT N, et al. Spatial and temporal variability of CO₂ fluxes at the sediment-air interface in a tidal flat of a temperate lagoon (Arcachon Bay, France)[J]. Journal of Sea Research, 2016, 109:13-19.
- [30] CLAVIER J, CHAUVAUD L, AMICE E, et al. Benthic metabolism in shallow coastal ecosystems of the Banc d'Arguin, Mauritania[J]. Marine Ecology Progress Series, 2014, 501:11-23.

Effects of environmental factors on primary production of microphytobenthos in the mangrove system of Zhangjiang Estuary, Fujian Province

QIU Yong^{1,2}, WANG Yuan-yong², XIE Yu-yuan², HUANG Bang-qin¹

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Fujian Province Key Laboratory for the Development of Bioactive Material from Marine Algae, College of Oceanology and Food Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: During the period from July 2014 to July 2015, we collected the surface sediment samples from the intertidal mudflat of the Fujian Zhangjiang Estuary Mangrove National Nature Reserve in the subtropical area. We are aiming to reveal the influence of environmental factors on the gross primary production of microphytobenthos, community respiration, and net community production, and its underlying mechanism. The results showed that the annually-average gross primary production of microphytobenthos was $(2.4 \pm 0.8) \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the variability was positively correlated with temperature with character of higher value in summer but lower in winter. Temperature has been considered as the major environmental factor controlling the change of gross primary production in the study area. The community respiration rate in the sediment of mangrove forest tends to be high because of litter-

fall. Thus, the community generally shows higher frequency of negative net production in some months of autumn, winter and spring. However, the annually-average net community production was $(0.5 \pm 1.8) \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, indicating the balanced state of CO_2 budget. Our study shows that the pattern of CO_2 source and sink in the sediment of mangrove habitats is profoundly affected by the primary productivity of microphytobenthos, which has played important roles in the carbon cycling of mangrove ecosystem.

Key words: marine biology; microphytobenthos; gross primary production; net community production; community respiration; mangrove habitats; environmental factor

DOI:10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2019. 01. 006

(责任编辑:方建勇、肖 静)