

李少朋, 邢前国. 潮滩底栖微藻生物量垂直变化对其遥感反演模式的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(6): 1155-1159.

LI Shaopeng, XING Qianguo. Impacts of vertical distribution of microphytobenthos biomass in surface tidal flat sediments on its remote sensing retrieval algorithms[J]. Ecological Science, 2014, 33(6): 1155-1159.

潮滩底栖微藻生物量垂直变化对其遥感反演模式的影响

李少朋^{1,2}, 邢前国^{1,*}

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003
2. 中国科学院大学, 北京 100049

【摘要】 遥感信号与潮滩表层沉积物底栖微藻生物量的定量关系, 与定义生物量对应的沉积物深度相关。以叶绿素浓度表征沉积物底栖微藻生物量, 对烟台四十里湾潮滩表层沉积物柱样分别以 3 mm 和 1 mm 间隔分层, 分析研究其叶绿素垂直分布特征; 模拟、分析以指数衰减曲线斜率表征的叶绿素垂直分布变化对叶绿素浓度遥感反演模式的影响。结果显示, 潮滩表层 1 cm 和 3 cm 内, 叶绿素浓度均随着深度增加呈指数式衰减; 垂直衰减曲线斜率逐渐变大时, 沉积物表层 1 cm 内的叶绿素浓度逐渐降低, 基于叶绿素浓度与光谱指数 NDI-MPB 间回归方程的遥感反演模式亦发生变化。

关键词: 四十里湾; 底栖微藻; 叶绿素浓度; 垂直分布; 反射率; 潮滩

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2014.06.019 中图分类号: P736.2; P715.7 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2014)06-1155-05

Impacts of vertical distribution of microphytobenthos biomass in surface tidal flat sediments on its remote sensing retrieval algorithms

LI Shaopeng^{1,2}, XING Qianguo^{1,*}

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*) of microphytobenthos of tidal flat sediments core was measured with a resolution of 3 mm and 1 mm in day time at the Sishili Bay; and surface reflectance of tidal flat was simultaneously measured. Chl-*a* remote sensing retrieval algorithm was established on the regression with the NDI-MPB (Normalized difference index of microphytobenthos) which was based on the reflectance at 675 nm and 700 nm. In situ data showed that Chl-*a* (proxy of microphytobenthos biomass in this study) decreased in an exponential function with the increase in depth, and the vertical distribution of Chl-*a* might be characterized by the slope of the exponentially decreasing model of Chl-*a*. The impacts of variations in the vertical distribution of Chl-*a* on the remote sensing retrieval algorithms were simulated, and results showed that Chl-*a* retrieval algorithms changed with its vertical distribution.

Key words: Sishili Bay; microphytobenthos; chlorophyll concentration; vertical distribution; reflectance; tidal flat

1 前言

底栖微藻是潮间带生态系统的主要初级生产者^[1-3],

海岸带和河口潮间带普遍分布着密集的底栖微型藻类^[5], 在近海生态系统中具有十分重要的作用^[4]。底栖微藻的生物量通常以叶绿素浓度($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)来表征^[6]。潮

收稿日期: 2014-04-02; 修订日期: 2014-04-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA11020403)资助

作者简介: 李少朋(1988—), 男, 山东省聊城人, 硕士研究生, 主要从事环境遥感与地理信息系统方向研究

*通信作者: 邢前国, E-mail: qgxing@yic.ac.cn

滩作为海陆相互作用最强烈的区域,传统的现场采样调查方式通常难以有效对其开展资源普查和科学研究。而高光谱观测技术具有无损、迅速的特点,利用底栖微藻的光谱反射特征,能够有效的对潮滩底栖微藻生物量进行大范围、长时效监测^[7]。一般认为,遥感光学信号能够到达潮滩沉积物 3 mm 深左右^[8],因此,潮滩叶绿素垂直分布特征的差异可能会影响到遥感反演模式的构建,进而可能影响遥感技术对潮滩底栖微藻的监测效果。

国内外学者针对潮滩底栖微藻生物量垂直分布特征已经进行较多的研究。研究表明,底栖微藻生物量随着深度的增加呈指数式衰减^[8-9], Brotas 等^[5]提出的指数衰减模型能够很好的描述不同沉积物类型的叶绿素的垂直分布特征。Du 等^[8]和 Liu 等^[6]基于 1 cm 分层观测技术分别研究了潮滩 0 cm—10 cm 和 0 cm—5 cm 深度的叶绿素垂直衰减模式。沉积物表层 1 cm 内集中了大部分的底栖微藻生物量^[10-12],因此,以更高分辨率的分层技术对表层 1 cm 内的叶绿素浓度分布进行研究,能够为更加精确的构建潮滩表层底栖微藻遥感反演模式,利用遥感技术对潮滩表层叶绿素浓度进行监测提供科学参考。

潮间带表层底栖微藻空间异质性明显,叶绿素垂直分布特征也具有明显的空间异质性。本文采用 3 mm 和 1 mm 分层观测技术对烟台潮滩表层 3 cm 和 1 cm 深度的叶绿素垂直分布模式进行研究。我们通过模拟垂直指数衰减曲线斜率 b 值的变化,分析不同 b 值下叶绿素浓度与光谱反射率之间的相关性,进而分析了遥感模型对叶绿素垂直分布特征的敏感性。

2 材料和方法

2.1 研究区域

本研究的试验地点是烟台四十里湾(图 1),潮滩沉积物为沙质^[7]。该地为规则半日潮,潮位变化幅度为 2 m 左右。夏季水温通常为 24 °C—25 °C,冬季水温大致为 2.5 °C—3.0 °C,是具有典型季节特征的温带海湾。

2.2 采样与测量

2013 年 5 月 14 日、5 月 17 日和 6 月 4 日分别对烟台大学东门附近潮滩(37°28'35.706" N, 121°27'38.336" E)、黄海游乐城潮滩和逛荡河口潮滩(37°28'17.399" N, 121°27'58.848" E)进行采样,采样选择在低潮时进行。

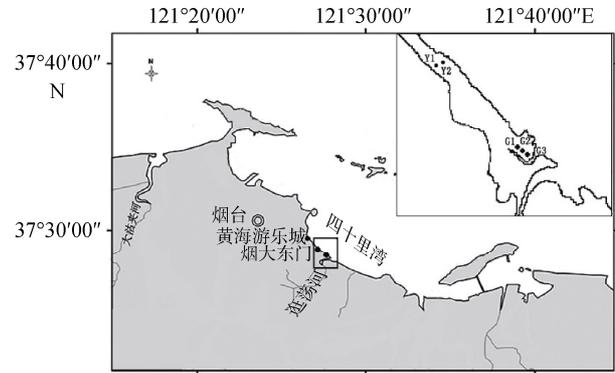


图 1 研究区与采样点

Fig. 1 Location of the study area and sampling points

选择滩面目视有明显绿色梯度差异的样点,利用经过处理的 60 mL 注射器($D=3$ cm)进行采样:将注射器插入滩面沉积物中,然后由注射器底端将柱状沉积物推出。取表层样时,切取柱状沉积物表层 3 mm 沉积物;取垂直样时,对柱状沉积物进行分层:3 mm 或 1 mm;将每层沉积物移入 50 mL 离心管,然后放入冰箱,在 3 °C 下冷藏保存,1 小时内对样品进行叶绿素浓度萃取。采取逛荡河口潮滩表层 3 mm 沉积物样品 5 个,黄海游乐城潮滩表层 3 mm 沉积物样品 4 个;共采取 3 mm 间隔分层柱样 3 个(Y1、Y2、G1),1 mm 间隔分层柱样 2 个(G2、G3)。

采表层样前,测潮滩沉积物反射光谱;采用的光谱仪为 USB4000(Ocean Optics Inc.),波长范围:345.3 nm—1046.12 nm,光谱分辨率为 0.2 nm;光学探头的视场角 8°,高度控制在 15 cm,垂直正对柱状沉积物中心,保证视场落在目标沉积物样上。测定沉积物光谱时,先测反射参考板的辐亮度,再测每层沉积物的辐亮度,保存两组数据,对两组数据进行平均处理,求出反射率(图 2),用于光谱波段组合 NDI-MPB 与估算的潮滩表层沉积物内叶绿素浓度的回归分析。

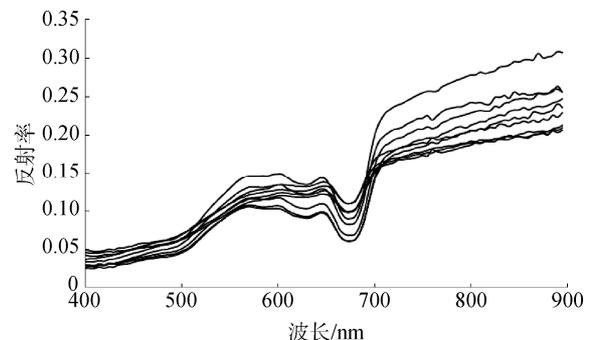


图 2 逛荡河口和黄海游乐城潮滩表层 9 个采样点光谱曲线
Fig. 2 Spectrum Curves of the Guangdang River Estuary and Huanghai Amusement City tidal flats

2.3 样品处理

叶绿素-*a* 浓度 (Chl-*a*)测定采用分光光度法。萃取沉积物中的叶绿素时, 首先往离心管中加入 90%丙酮, 在 3℃下于暗处静置萃取 24 h, 然后进行离心、提取上清液、定容工作, 利用紫外-可见分光光度计测定样品在 630 nm、647 nm、664 nm、750 nm 波长处的吸光值, 其中, 750 nm 处的测定用于校正提取液的浊度, 吸光值应小于 0.005, 否则上清液应重新离心。依照国标《GB 17378.7—2007 海洋监测规范 第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测》的计算公式计算叶绿素浓度($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

$$P_{\text{chl-a}} = (11.85E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630}) \times \frac{v}{V \cdot L} \quad (1)$$

$P_{\text{chl-a}}$ —样品中叶绿素-*a* 含量, 单位为微克每立方厘米($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$);

E_{664} 、 E_{647} 、 E_{630} —校正过的吸光度值;

v —样品提取液体积, 单位为毫升(mL);

V —样品取样体积, 单位为立方厘米(cm^3);

L —测定池光程, 单位为厘米(cm);

2.4 主要模型

2.4.1 NDI-MPB 指数

邢前国等^[7]利用底栖微藻在 700 nm 波段处的高反射特征和在 675 nm 处的强吸收特征提出 NDI-MPB 指数来反演底栖微藻叶绿素浓度: $NDI-MPB = (R700 - R675)/(R700 + R675)$ (2)

其中, $R700$ 和 $R675$ 分别是 700 nm、675 nm 处的光谱反射率。

2.4.2 指数衰减模型

Brotas 等^[5]提出的潮滩叶绿素-*a* 由表层向下的指数衰减模型: $C_z = C_0 \times \exp(-k \cdot z / v)$ (3)

其中 C_0 和 C_z 分别是最表层及深度为 z 处的叶绿素-*a* 浓度; k 表示叶绿素-*a* 转变为脱镁叶绿素的衰减系数; v 表示沉积物的平均掩埋速度; 该模型假设叶绿素垂直变化是由叶绿素-*a* 的衰减和沉积物的掩埋作用引起的, 而叶绿素-*a* 转化为脱镁叶绿素的衰减模式符合一级动力学公式。该模型可用于描述不同类型潮滩叶绿素垂直分布特征。

2.4.3 修正指数衰减模型

用叶绿素垂直衰减拟合曲线的斜率估算衰减系数 k 与沉积物平均掩埋速度 v 的比值^[5], Du 等^[8]用系数 b (叶绿素-*a* 垂直分布衰减曲线的斜率)代替了 k/v , 由此

$$\text{得出模型: } C_z = C_0 \times \exp(-b \times z) \quad (4)$$

利用此模型拟合 Nakdong 河潮滩叶绿素数据, 得到较好的效果。

3 结果与分析

3.1 叶绿素浓度垂直分布特征

整体看来(图 3), 不同沉积物深度范围内(3 cm 和 1 cm), 叶绿素含量均随着深度增加而降低。相同底质条件, 相同分层间隔, Y1 和 Y2, G2 和 G3, 两组数据显示, 虽然表层叶绿素浓度存在较大差异, 但是降低到一定深度后(图 3a 为 6 mm, 图 3b 为 2 mm), 叶绿素浓度随着深度增加变化不大, 趋势相对平稳, 两组数据的叶绿素浓度变化也接近一致。对于不同底质条件的叶绿素垂直分布则存在较大差异, 如图 3(a)所示, 逛荡河口样点 G1 与烟大东门潮滩样点 Y1、Y2 分层间隔相同, 但是 G1 的叶绿素含量在沉积物 3 cm 内普遍高于其他两点, 原因可能是逛荡河口潮滩受到污水影响, 潮滩表层营养盐丰富, 从而促进了微藻的生长繁殖。表层 1 cm 沉积物内, 叶绿素浓度在 0 mm—2 mm 内衰减最快, 在 2 mm 以下的叶绿素浓度分布趋于平稳, 无较

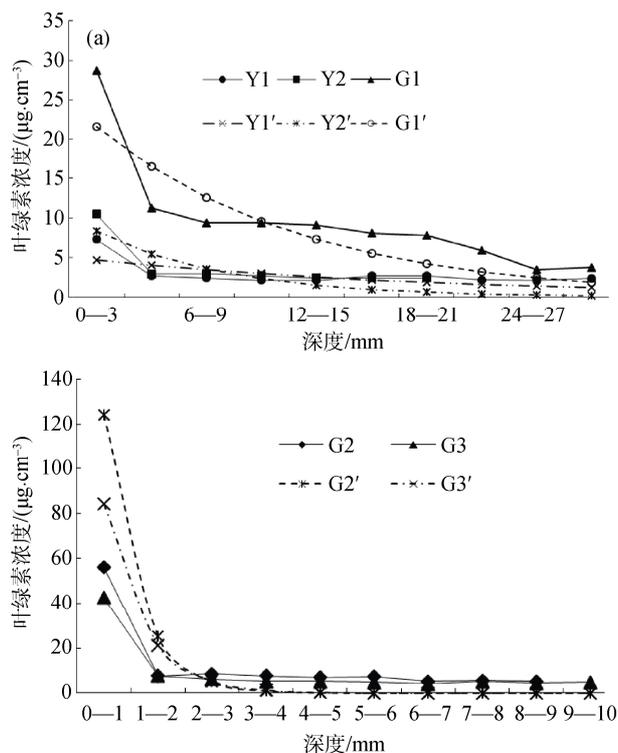


图 3 3 mm 分层叶绿素浓度垂直变化(a)和 1 mm 分层叶绿素浓度垂直变化(b)

Fig. 3 Variations in vertical distribution of Chl-*a* at 3 mm interval(a) and variations in vertical distribution of Chl-*a* at 1 mm interval(b)

大波动; 表层 3 cm 沉积物内, 叶绿素浓度在表层 0 mm—6 mm 内衰减最快, 三个样点在 6 mm 以下的叶绿素浓度分布都比较平稳, 无较大波动, 但 G1 的叶绿素含量在各个分层深度都明显高于 Y1、Y2 两点。沉积物表层 1 cm 的叶绿素含量占到其上层 3 cm 叶绿素总量的近 50%; 表层 2 mm 的叶绿素含量能占到表层 1 cm 叶绿素总量的 58% 以上, 浓度可达 $32.06 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

利用 Du 等^[8]修正后的指数衰减模型 $C_z = C_0 \times \exp(-b \times z)$ 对实测的沉积物垂直方向的叶绿素浓度进行拟合。如图 3 所示, Y1'、Y2'、G1'、G2'、G3' 分别是拟合结果曲线, 如表 1 所示, 该模型能够与观测数据很好的拟合 ($P < 0.05$), 显示四十里湾潮滩底栖微藻生物量随深度增加呈指数式衰减的模式。 b 与 Chla1 (沉积物表层 1 mm 的叶绿素浓度) 具有显著的正相关关系 ($P < 0.05$), 这与 Du 等^[8]和 Liu 等^[6]的研究结果较为一致; 其中, Du 等^[8]的 b 值取值范围: 0.07—1.65; Liu 等^[6]的 b 值取值范围: 0.1—0.93。

拟合结果中, G2、G3 的相关系数 r^2 值虽然很高, 但是潮滩表层 1 cm 内 1 mm 分层估算的叶绿素浓度 C_0 与 Chla1 相差很大(图 3b, 表 1), 而对 3 mm 分层的潮

表 1 模型拟合参数 C_0 、 b 、 r^2 的值以及最表层叶绿素浓度实测值 Chla1 , $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Tab. 1 Model parameters C_0 , b and r^2 , Chl-a in the surface of the sediment (Chla1), $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

采样点	分层间隔/mm	C_0	b	r^2	Chla1	P
Y1	3	5.07	0.05	0.40	7.28	<0.05
Y2	3	10.25	0.14	0.68	10.49	<0.05
G1	3	24.68	0.09	0.75	28.74	<0.01
G2	1	274.89	1.59	0.87	56.44	<0.01
G3	1	166.75	1.37	0.86	42.75	<0.01

表 2 模拟不同 b 值估算的沉积物表层 1 cm 内的叶绿素浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Tab. 2 Chlorophyll concentration in the top 1cm of sediment estimated by simulation of b values

C_0	C_1 (1 cm 厚表层沉积物的叶绿素浓度) ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)						NDI-MPB
	$b=0.1$	$b=0.3$	$b=0.5$	$b=0.7$	$b=0.9$		
6.45	14.97	8.26	6.88	6.56	6.48	0.17	
9.37	21.76	12.01	10.00	9.53	9.41	0.20	
14.53	33.75	18.63	15.51	14.78	14.60	0.21	
17.73	41.19	22.73	18.93	18.04	17.82	0.20	
22.81	53.00	29.25	24.36	23.22	22.93	0.34	
26.33	61.18	33.77	28.12	26.80	26.47	0.35	
33.22	77.19	42.60	35.47	33.81	33.39	0.37	
37.38	86.85	47.93	39.91	38.04	37.57	0.38	
43.07	100.06	55.22	45.98	43.83	43.28	0.38	
$C_0 = 2.9406e^{6.6302 \cdot \text{NDI-MPB}}$	$C_1 = 6.8319e^{6.6302 \cdot \text{NDI-MPB}}$	$C_1 = 3.7708e^{6.6302 \cdot \text{NDI-MPB}}$	$C_1 = 3.1395e^{6.6302 \cdot \text{NDI-MPB}}$	$C_1 = 2.9928e^{6.6302 \cdot \text{NDI-MPB}}$	$C_1 = 2.9552e^{6.6302 \cdot \text{NDI-MPB}}$		

滩表层 3 cm 内的叶绿素分布, 该模型具有很好的拟合的分层精度有关, 即, 分层精度对叶绿素的实际分布效果。这说明, 拟合所得的叶绿素垂直分布规律与人为观测有重要影响。

3.2 叶绿素垂直衰减特征对遥感反演模式的影响

根据 G1 采样点估算的表层叶绿素浓度 ($C_0=24.68$), 利用 Du 等^[8]修正后的指数衰减模型 $C_z = C_0 \times \exp(-b \times z)$ 计算得到不同 b 值条件下沉积物 3 cm 内的叶绿素浓度垂直分布特征(图 4)。由图 4 可知, 即使潮滩表层叶绿素浓度 (C_0) 相同, 其垂直衰减特征也可能存在较大差异。本文用叶绿素垂直衰减曲线的斜率 b 值来表征潮滩叶绿素垂直分布特征。

b 值是叶绿素垂直衰减曲线的斜率, 反映了叶绿素浓度垂直衰减模式的差异。潮滩沉积物真光层深度一般不超过 3 mm^[13-15]。本研究模拟 b 值变化, 利用表层 3 mm 的叶绿素浓度 (C_0) 估算黄海游乐城潮滩和逛荡河口潮滩 9 个采样点表层 1 cm 厚沉积物中的叶绿素浓度(表 2)。分析不同 b 值下沉积物表层 1 cm 内的叶绿素浓度与光谱指数 NDI-MPB 的相关性, 以及 b 值的变

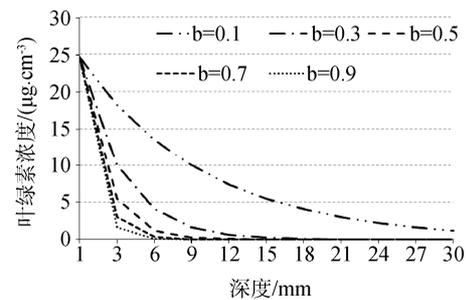


图 4 模拟不同 b 值的叶绿素垂直分布特征
Fig. 4 Vertical distributions of chlorophyll with different b values

化对叶绿素遥感反演模式的影响。由表 2 可知, 随着 b 值逐渐变大, 估算的沉积物表层 1 cm 内的叶绿素浓度呈一定规律下降。

对不同 b 值估算的表层 1 cm 内的叶绿素浓度与其对应的光谱数据进行分析, 建立两者之间的回归关系。计算得知, b 值变化不会影响叶绿素浓度与光谱指数 NDI-MPB 之间的相关性($R=0.92$, $P<0.01$); 指数式对叶绿素浓度和 NDI-MPB 的拟合效果最好, $R^2=0.84$ 。建立两者之间的回归方程, 可以看出, b 值不断变大, 指数型回归方程的系数逐渐变小, 而指数 x 的系数则保持不变。由以上分析可知, 潮滩表层 1 cm 内叶绿素的垂直分布特征差异会对遥感反演模式的构建产生影响。

4 结论

研究表明, 潮滩底栖微藻生物量随着深度的增加亦呈指数式衰减。对于四十里湾沙质潮滩, 基于 3 mm 分层的表层 3 cm 内的沉积物和基于 1 mm 分层的表层 1 cm 内的沉积物叶绿素变化特征均符合这一规律。经过验证, 指数衰减模型能够较好地估算 3 mm 分层的叶绿素浓度, 对 1 mm 分层的沉积物叶绿素浓度估算效果较差。

指数衰减曲线斜率 b 值可以用来表征潮滩叶绿素垂直分布特征。模拟 b 值, 利用垂直衰减模型估算潮滩表层 1 cm 内的叶绿素浓度; 结果表明, b 值不断变大, 表层 1 cm 内的叶绿素浓度呈一定规律递减。 b 值的变化不会改变潮滩表层 1 cm 内叶绿素浓度与光谱指数 NDI-MPB 之间的相关性。但是, 潮滩底栖微藻垂直分布特征的差异, 直接影响构建的潮滩表层遥感反演模式, 这对实际应用中如何分层采样及正确评估表层沉积物叶绿素的浓度有参考价值。

需要指出的是, 本研究中用分光光度法测定的叶绿素- a 浓度表征底栖微藻的生物量与实际有一定出入, 这主要是受微藻优势种不同及脱镁叶绿素等影响。

参考文献

- [1] MACINTYRE H L, GEIDER R J, MILLER D C. Microphytobenthos: The ecological role of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. I. Distribution, abundance and primary production[J]. *Estuaries*, 1996(19): 186–201.
- [2] UNDERWOOD G J C, KROMKAMP J. Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries[J]. *Advances in Ecological Research*, 1999(29): 93–153.
- [3] HONEYWILL C, PATERSON D, HAGERTHEY S. Determination of microphytobenthic biomass using pulse-amplitude modulated minimum fluorescence[J]. *European Journal of Phycology*, 2002, 37(4): 485–492.
- [4] 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]. *海洋水产研究*, 2007, 28(5): 74–82.
- [5] BROTAS V, SERÓDIO J. A mathematical model for the vertical distribution of chlorophyll-a in estuarine intertidal sediments[J]. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 1995(29): 315–321.
- [6] LIU Weiqu, ZHANG Jielong, TIAN Guanghong, et al. Temporal and vertical distribution of microphytobenthos biomass in mangrove sediments of Zhujiang (Pearl River) Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(4): 82–88.
- [7] 邢前国, 禹定峰, 姜明静, 等. 基于现场光谱的潮滩表层沉积物叶绿素- a 含量遥感模式[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2188–2191.
- [8] DU G, SON M, AN S, et al. Temporal variation in the vertical distribution of microphytobenthos in intertidal flats of the Nakdong River estuary, Korea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010(86): 62–70.
- [9] FORSTER R M, KROMKAMP J C. Modelling the effects of chlorophyll fluorescence from subsurface layers on photosynthetic efficiency measurements in microphytobenthic algae[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004 (284): 9–22.
- [10] 李万会. 潮滩湿地沉积物中叶绿素- a 浓度的变化特征及其与沉积物特性之间的关系初探[D]. 上海: 华东师范大学, 2006: 11–56.
- [11] 宁修仁, 刘子琳, 蔡昱明. 象山港潮滩底栖微型藻类现存量及初级生产力[J]. *海洋学报*, 1999, 21(3): 98–105.
- [12] 商翔, 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.
- [13] PATERSON D M, WILTSHIRE K H, MILES A, et al. Microbiological mediation of spectral reflectance from intertidal cohesive sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998(43): 1207–1221.
- [14] DU G, CHUNG I K. Estimation of areal production of intertidal microphytobenthos based on spatio-temporal community dynamics and laboratory measurements[J]. *Ocean Science Journal*, 2009(144): 189–197.
- [15] KROMKAMP J C, MORRIS E P, FORSTER R M, et al. Relationship of intertidal surface sediment chlorophyll concentration to hyperspectral reflectance and chlorophyll fluorescence[J]. *Estuaries and Coastal*, 2006, 29(2): 183–196.