# 基干现场光谱的潮滩表层沉积物叶绿素-a 含量遥感模式

# 邢前国,禹定峰,娄明静,吕迎春,李少朋,韩秋影

中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003

摘 要 提出了一种可实现潮滩表层叶绿素的现场快速、无损的光学检测方法。利用反射率光谱对我国潮滩表层沉积物叶绿素-a 浓度进行了观测试验。基于高光谱 650,675 及 700 nm 各波段的反射率,提出了用于叶绿素浓度反演的归一化底栖微藻差异指数(NDI-MPB)、及可消除呈直线或近似直线变化的背景噪声光谱的反射谷深度(T-depth)模型。研究结果表明,NDI-MPB 指数与表层沉积物(3 mm)中的叶绿素-a 浓度(2 22  $\sim$  49.36 mg·m<sup>-2</sup>)有极好的线性相关性(r>0.99);以叶绿素-a 浓度表征底栖微型藻类生物量,NDI-MPB可用于潮滩表层底栖微型藻类生物量的遥感监测。

关键词 底栖微藻;生物量;高光谱;遥感;潮滩;黄海

中图分类号: TP722. 4; X835 文献标识码: A

DOI: 10. 3964/j. issn. 1000-0593(2013)08-2188-04

### 引言

底栖微型藻类(microphytobenthos, MPB) 对潮间带及近海海洋生态系统有着十分重要的作用[1-3]。传统的潮滩底栖微藻调查,主要基于现场采样与实验室分析。因叶绿素浓度与底栖微藻生物量一致,在研究中可用来指示生物量[4]。研究表明,潮滩表层沉积物的真光层一般在 3 mm 左右[5];底栖微藻叶绿素含量在水平分布上具有强烈的空间异质性[2-6],在垂直分布上总体呈表层浓度最高、随深度增加而下降的特征[2];硅藻是底栖微藻的主要藻种,在沉积物颗粒物缝隙中能上下迁移,其生物量会因潮滩水分、温度、光照等环境条件变化而随时间变化。这些强烈的时空变化特征都对底栖微藻的现场采样提出了极高的要求,如,地点分布要广、采样数量要大、采样时间与深度要一致等。

因潮汐、海浪作用,潮滩是海陆相互交用最强烈、变化最迅速的区域,车、船通常难于进入,基于传统破坏式的现场采样调查方式,难于有效开展其资源普查与科学研究。遥感技术具有大尺度、快速、不改变原观测地表对象的特点,可弥补现有采样调查方法的不足。底栖微藻因其色素等光学活性成分及在沉积物表层发生光合作用的特点而适合用遥感观测,因此,光学遥感是一项潮滩底栖微藻观测极重要、且可行的手段。

利用遥感技术监测潮滩底栖微藻只有十多年的历史[7];

目前主要基于现场光谱及实验室模拟研究其生物量反演算法,并建立了几种经验算法<sup>[4]</sup>;模拟研究表明,宽波段多光谱难用于底栖微藻的反演,而高光谱则可实现具有不同潮滩底质特征的底栖微藻定量反演<sup>[8]</sup>。随着对地观测技术的发展,越来越多的高光谱成像仪搭载飞机、空间站、卫星等平台,可为海岸带潮滩提供高空间分辨率、高频次的观测<sup>[9]</sup>。

我国目前对潮滩的遥感相关研究主要为针对底质类型、盐沼植被等的监测<sup>[10]</sup>,尚未见利用高光谱对底栖微藻监测的报道。本研究将采用高光谱对我国潮滩叶绿素浓度进行遥感试验研究,以期提出潮滩底栖微藻的生物量反演模型。

# 1 实验部分

# 1.1 研究区域

研究观测点位于山东半岛北部四十里湾潮滩  $(37^{\circ}29'N, 121^{\circ}27'E)$ ,该区域岸上为烟台市民居、观光旅游区,外侧海域为养殖区域;该地为规则半日潮,潮位变化幅度为 2~m 左右。

#### 1.2 采样与测定

2012 年 7 月 16 日上午 10:30 至下午 5:30,进行了定点、无损光谱动态观测、30 min 左右测一组光谱,共 11 组光谱数据。2012 年 9 月—10 月,选择滩面目视有绿色梯度差异的 7 个代表性采样点,各采集了 3 组光谱与 2 组表层沉积物平行样;对高潮线以上的没有藻的干燥沙滩进行了反射率测

收稿日期: 2012-12-05, 修订日期: 2013-02-25

基金项目:中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-Q07-01),国家自然科学基金项目(41106099)和中国科技部-欧空局第三期龙计划项目(EPHURSUS, ID: 10558)资助

作者简介: 邢前国, 1975 年生, 中国科学院烟台海岸带研究所副研究员 e-mail: qgxing@yic ac cn

定。也取了干燥无藻的沉积物,添加经滤膜(孔径为 0.45  $\mu$ m)过滤的海水,研究没有藻类的沉积物的反射率随水分含量的变化情况。潮滩泥沙样品取回实验室后还进行了底栖微藻种类人工鉴别及沉积物粒度分析(津岛 MasterSizer 激光粒度分析仪)。

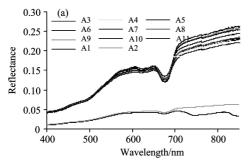
采用的光谱仪为 USB4000(Ocean Optics Inc.),波长范围为:  $345.3 \sim 1046.12 \text{ nm}$ ,光谱分辨率为 0.2 nm;先测反射参考板的辐亮度,再测滩面辐亮度,后者与前者的比值即为反射率,重复 3 次,取平均值。测滩面时,用直径 7 cm 的圆环确定采样区,光学探头的视场角  $14^\circ$ ,高度控制在 25 cm,垂直正对圆环中心,保证视场落在环形采样区内。测完光谱后,用刮刀取表层(真光层)3 mm 的沉积物,遮光保存,1 h 内带回实验室—20 °C 冻藏,供叶绿素浓度含量测定。冻藏的样品经 90%的丙酮溶液萃取等处理后,采用分光光度法测定萃取液叶绿素浓度,然后计算单位采样面积的叶绿素质量。

#### 1.3 光谱数据处理与分析

原始反射率光谱采用 9 点移动平滑处理,初步分析各单波段与叶绿素浓度的关系。与采用归一化植被指数 (NDVI) 提取高浑浊、高反射水体中藻类信息的方法类似,在本研究中,我们试采用归一化底栖微藻差值指数 (normalized difference index of microphytobenthos,NDI-MPB) 及 700 和 675 nm 的比值、差值等来表征潮滩表层叶绿素的浓度,其中NDI-MPB 的计算如式 1 所示。675 nm 处的反射谷也可采用基线面积的方法来表征叶绿素浓度 [11-12],考虑到后续的遥感的实用性与推广,用三个波段 (650,675 及 700 nm )构造了反射谷深度 (Trough-depth,T-depth)来表征叶绿素浓度,如图 1 所示,基于本构造原理,随波长呈直线或近似直线变化的背景噪声光谱可以消除,特别是  $600 \sim 800$  nm 间近似直线的沉积物反射光谱影响。

NDI-MPB=
$$(R_{700} - R_{675})/(R_{700} + R_{675})$$
 (1)

$$T-depth = (R_{700} - R_{650}) * 675/(700 - 650) - R_{675}$$
 (2)



其中,  $R_{700}$ ,  $R_{675}$  及  $R_{650}$  分别为 700, 675 及 650 nm 处的反射率。

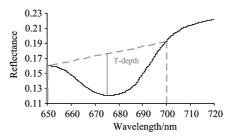


Fig 1 Schematic of trough depth (T-depth) in the red spectrum

### 2 结果与讨论

#### 2.1 潮滩与光谱变化

潮滩露出过程中,滩面颜色随时间发生变化,出现由底栖微藻所致的淡绿或棕色斑块;鉴定表明,潮滩上底栖微藻主要是具有运动能力的硅藻,包括圆筛藻、菱形藻、双眉藻、羽纹藻等。粒度分析表明该区域沉积物中值粒径为  $0.2~\mathrm{mm}$  左右。深度为  $3~\mathrm{mm}$  的表层沉积物  $7~\mathrm{rh}$  个样点的叶绿素含量范围  $2.22\sim49.36~\mathrm{mg}\cdot\mathrm{m}^{-2}$  (平均为  $13.60~\mathrm{mg}\cdot\mathrm{m}^{-2}$ ),若以沉积物湿重计,其含量范围为  $2.5\sim24~\mathrm{mg}\cdot\mathrm{g}^{-1}$ ;测定的叶绿素含量在我国其他学者 [2] 的观测结果区间内。

2012 年 7 月 16 日,利用定点监测的潮滩光谱随潮落过程的变化如图 2(a) 所示,其中 A1 为水深为 7 cm 左右时的光谱,其反射率值最低,且在 810 nm 处可见与底部有关的反射峰; A2 测定时滩面含水近饱和状态,与 A1 一样在 675 nm 处有反射谷,但在 810 nm 处无明显反射峰, 700 nm 以长的反射率近似直线, A2 可视为滩面刚露出的初始状况;  $A3\sim A11$  为滩面刚露出 1 h 后的反射率,可见反射率增加, 675 nm 反射谷增强, 700 nm 以长的反射率均近似直线。不含叶绿素(微藻)的具有不同含水率的沉积物反射率光谱如图 2 (b) 所示,在  $600\sim800$  nm 间近似直线,其 T-depth 指数为0; NDI-MPB 也可用于检测底栖微藻的存在与否,但其阈值不好确定。

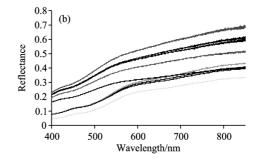


Fig 2 Reflectance of surface sediments with algae (a) and without algae (b)

#### 2.2 潮滩表层叶绿素反演模型

基于实测的潮滩表层沉积物叶绿素-a 浓度及同步采样的光谱,我们首先进行了单波段相关性分析,结果表明,其最大相关的波段在  $675~\mathrm{nm}~\mathrm{b}(r=0.~84)$ ,其线性拟合方程如图  $3(\mathrm{f})$ 所示。如图  $3(\mathrm{a})$ — $(\mathrm{c})$ 所示,波段差值 $(R_{700}-R_{675})$ 、反

射谷深度(T-depth)、归一化底栖微藻差异指数(NDI-MPB)及波段比值( $R_{700}/R_{675}$ )与叶绿素-a 浓度之间可用线性或指数式极好地拟合,这是因为这些参数均采用了 675~nm 处与叶绿素的特征吸收相关波段,但要明显优于单波段。T-depth与 R700-R675 本质上均为差值,与叶绿素-a 浓度呈非线性关

系,用指数式拟合较好;NDI-MPB 及 R700/R675 则均采用了比值进行处理,线性方程拟合效果更好;其中 NDI-MPB 拟合的决定系数( $R^2$ )达 0. 993 3,我们可用如式 3 所示的线性模型进行潮滩表层沉积物叶绿素-a 浓度的反演(本式已在我们其他观测中得到验证,这里不再详述)。若以 NDVI 指

数采用的 750 nm 替代 700 nm 的反射率,NDI-MPB 指数与叶绿素-a 浓度同样呈现类似的线性关系( $R^2=0.9936$ ),这与国外相关观测[5] 结果一致。

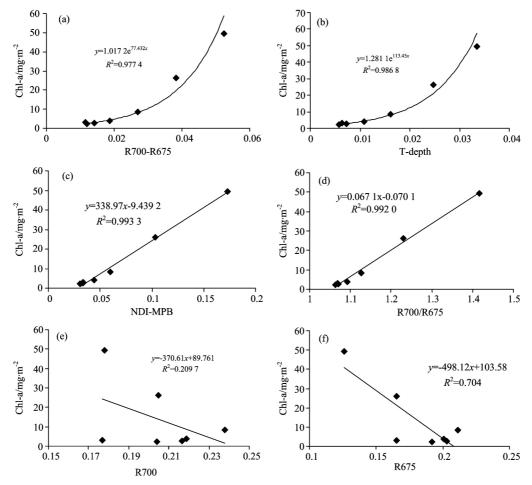


Fig 3 Retrieval modes of chlorophyll-a concentration in the surface layer of tidal flat

#### 3 结 论

2012 年夏、秋季节,在我国北黄海四十里湾,开展了露出潮滩的野外现场光谱测量以及采样分析。基于现场观测及采样分析数据,以叶绿素-a浓度表征底栖微型藻类生物量,对我国潮滩表层沉积物底栖微型藻类生物量的遥感反演模型进行了研究,构造了可消除呈直线或近似直线变化的背景噪

声光谱的反射谷深度的反射率深度(T-depth)概念模型,该模型可用于诊断底栖微藻的存在与否;基于高光谱 675 和 700 nm 两波段反射率,提出了可用于潮滩表层底栖微型藻类生物量反演的归一化底栖微藻差异指数 (NDI-MPB)模型。需要指出的是,这里的经验线性模型适用的潮滩叶绿素浓度范围为  $2.22\sim49.36~mg\cdot m^{-2}$ ,对于底栖微藻生物量更高的状态则可能需进一步进行修正。

# References

- [1] MacIntyre H L, Cullen J J. Marine Ecology Progress Series, 1996, 145(1): 245.
- [2] NING Xiu-ren, LIU Zi-lin(宁修仁,刘子琳). Acta Oceanologica Sinica(海洋学报), 1999, 21(3): 98.
- [3] Krumme U, Keuthen H, Barletta M, et al. Ecotropica, 2008, 14: 121.
- [4] Kazemipour F, Launeau P, Méléder V. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 1.
- [5] Kromkamp J C, Morris E P, Forster R M, et al. Estuaries and Coasts, 2006, 29(2): 183.
- [6] Spilmont N, Seuront L, Meziane T, et al. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 95(4): 470.

- [7] Serôdio J, Cartaxana P, Coelho H, et al. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8): 1760.
- [8] Barillé L, Mouget J L, Méléder V, et al. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(4): 1034.
- [9] Xing Q, Lou M, Chen C, et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, doi: 10.1109/ JSTARS. 2013. 2238659.
- [10] Zhou D, Li Y, Zhang C, et al. Environmental Informatics Archives, 2005, 3: 411.
- [11] Ma W, Xing Q, Chen C, et al. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(22): 7479.
- [12] Combe J P, Launeau P, Carrère V, et al. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 371.

# Using In-Situ Reflectance to Monitor the Chlorophyll Concentration in the Surface Layer of Tidal Flat

XING Qian-guo, YU Ding-feng, LOU Ming-jing, LÜ Ying-chun, LI Shao-peng, HAN Qiu-ying Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract An optical monitoring method is proposed for the rapid, non destructive measurements of chlorophyll concentration (Chl-a) in the surface sediments of emerged tidal flat, and it can be further applied in remote sensing work. Hyperspectral reflectance of intertidal sediments were measured in day time at the tidal flats of the Sishili Bay, the Northern Yellow Sea, and surface sediments (3 mm) were sampled for the in-door measurements of Chl-a. On the basis of the reflectance at 650, 675 and 700 nm, the indices of normalized difference index of microbenthos (NDI-MPB) and trough depth (T-depth) were proposed for the measurements of microphytobenthos biomass. T-depth can be used to remove the linear background spectral noises and indicate the existence of microphytobenthos; Good linear relationship was observed between NDI-MPB and Chl-a content in sediments (2. 22~49. 36 mg • m<sup>-2</sup>, r> 0.99), which may be used to monitor the biomass of microphy to benthos.

Keywords Microphytobenthos; Biomass; Hyperspectra; Remote sensing; Tidal flat; Yellow sea

(Received Dec. 5, 2012; accepted Feb. 25, 2013)