

小球藻和铜绿微囊藻的高浓度 Chl-*a* 高光谱定量模型*

高艳, 周丰, 张巍, 张树才, 王学军

(北京大学环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 本研究将地物高光谱遥感技术应用于室内实验, 从而得到小球藻和铜绿微囊藻的高光谱特征。通过多种半经验方法, 如单波段、波段比值和微分法, 建立了两藻种最优的 Chl-*a* 高光谱定量模型, 并与室外情况进行了对比。结果表明: 小球藻的最优定量模型为 $Chl-a = 174.6 + 1138292 (R_{703})' + 2.3(10^9 [(R_{703})']^2 (p < 0.01))$, 相应的方法适宜性为: 一阶微分法 > 单波段法 > 波段比值法; 铜绿微囊藻的最优定量模型为 $Chl-a = 5299164 (R_{757})^{1.9773} (p < 0.01)$, 相应的方法适宜性为: 单波段法 > 波段比值法 > 一阶微分法; 从高光谱特征来看, 小球藻在 540 nm 和 700 nm 附近存在明显的特征波峰, 其位置随 Chl-*a* 浓度增大而向长波方向偏离, 铜绿微囊藻在 530 nm、660 nm 和 700 nm 附近存在 3 个较强的特征波峰, 在 610 nm 和 680 nm 附近存在明显的波谷; 与以往室外研究不同的是铜绿微囊藻的反射率在 400–500 nm 之间的 *R* 值并不低, 是因为没有非藻类颗粒物的影响, 总吸收明显降低。

关键词: 叶绿素; 高光谱; 小球藻; 铜绿微囊藻; 单波段法; 波段比值法; 一阶微分法

Hyperspectral quantitative models for Chlorophyll-*a* of *Chlorella vulgaris* and *Microcystis aeruginosa*

GAO Yan, ZHOU Feng, ZHANG Shucai, ZHANG Wei, WANG Xuejun

(MOE Laboratory of Earth Surface Processes, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, P. R China)

Abstract: Based on hyperspectral remote sensing measurement for *Chlorella vulgaris* and *Microcystis aeruginosa*, this in situ experiment addressed the hyperspectral characteristics of *Chlorella vulgaris* and *Microcystis aeruginosa* and determined their optimal hyperspectral quantitative models of chlorophyll-*a* (*Chl-a*) estimation. The study demonstrated that: (1) The optimal hyperspectral quantitative model of *Chlorella vulgaris* was $Chl-a = 174.6 + 1138292 (R_{703})' + 2.3(10^9 [(R_{703})']^2 (p < 0.01))$, and the suitability order of corresponding methods was spectral ratio > single band > reflectance first-derivative; the optimal hyperspectral quantitative model of *Microcystis aeruginosa* was $Chl-a = 5299164 (R_{757})^{1.9773} (p < 0.01)$, and the suitability order of corresponding methods was single band > reflectance first-derivative > spectral ratio; (2) According to hyperspectral characteristics of *Chlorella vulgaris*, two reflectance crests were around 540 nm and 700 nm and their locations moved right while Chl-*a* concentrations increased. For *Microcystis aeruginosa*, three reflectance wave crests were around 530 nm, 660 nm and 700 nm while two troughs were near 610 nm and 680 nm; (3) Compared with results of previous outdoor researches, the *Microcystis aeruginosa* reflectance with wavelength between 400 nm and 500 nm was relatively bigger, as for suspended substance and CDOM didn't exist in this indoor experiment.

Keywords: Chlorophyll-*a*, hyperspectral; *Chlorella vulgaris*; *Microcystis aeruginosa*; single band; spectral ratio; reflectance first-derivative

高光谱遥感技术已被逐步应用到水生生物监测当中, 如内陆湖泊叶绿素 (Chl-*a*) 监测^[1-6], 湖泊、河口

* 国家杰出青年科学基金(40525003)资助项目。2006-10-25 收稿, 2007-01-25 收修稿。高艳, 女, 1981 年生, 研究生; E-mail: goldeve@gmail.com.

富营养化评价^[7-17], 赤潮暴发预警^[18]等. 相比常规监测和常规遥感, 该技术具有监测尺度大、效率高、成本低及适宜长期动态监测的特点. 高光谱遥感水质监测的核心是通过水体反射光谱特征来反演水质参数和建立定量模型, 目前, 包括成像光谱和非成像光谱两类^[19]. 高光谱遥感技术的应用在叶绿素监测方面已经成为国内外研究热点^[19], 在非成像光谱方面, Gitlson 等^[1]利用地物光谱仪对俄罗斯、匈牙利、德国和保加利亚的 20 多个处于不同营养化状态的内陆水体测得大量反射光谱进行测定, 利用主成分分析方法选择波段组合, 分别建立了叶绿素、悬浮物和 CDOM 的多光谱统计估算模型. Quibell^[4]通过实验研究悬浮物质对藻类反射率的影响, 认为 710 nm 与 665 nm 波段组合估算叶绿素效果较好. Fraser^[8]对美国 22 个内陆湖的光谱反射率与叶绿素 a 和浑浊度的关系进行研究, 发现反射率光谱的一阶微分与叶绿素 a 浓度的相关性良好. 疏小舟等^[5]利用 GER-1500 型便携式地物光谱仪测量了太湖水体的光谱反射率并对水质参数进行分析, 发现叶绿素浓度与 700 nm 附近反射峰存在着良好的指数关系. 还有学者也使用近红外与红光波段的反射率比值和 690 nm 处光谱反射率的一阶微分值来估算湖泊叶绿素浓度^[6,15-18], 然而以往的研究多集中于室外, 其结果反映的是藻类总体效应, 且水体中悬浮物和黄色物质的光学效应存在干扰, 难以区分单一藻类的高光谱特征. 相比之下, 单一藻类的高光谱研究鲜有报道. 刘堂友等^[20]采用室内实验研究了韦氏微囊藻和斜生栅藻的高光谱特性并相应地建立了 Chl-a 的单波段定量模型, 但尚未尝试应用波段比和微分法建立高光谱与 Chl-a 的关系.

本研究选择我国水体中分布较为广泛的藻种^[15]——小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 和铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 为研究对象, 应用地物高光谱遥感技术通过室内实验研究单一藻种的高光谱特征, 并建立两藻种的高光谱特征与 Chl-a 的关系. 本研究中应用了 3 种半经验方法——单波段、波段比值和微分法, 在结果比较的基础上提出小球藻和铜绿微囊藻的 Chl-a 高光谱定量模型. 研究结果可为室外水体高光谱研究提供依据.

1 材料与方法

表 1 藻类 Chl-a 浓度数据

Tab. 1 Data sets of Chl-a concentration

样本	小球藻 ($\mu\text{g/L}$)	铜绿微囊藻 (mg/L)
1	191.60	187.72
2	176.07	178.20
3	164.63	169.49
4	150.87	155.89
5	141.29	147.76
6	132.19	136.33
7	121.07	126.95
8	115.08	116.65
9	103.43	108.49
10	96.14	96.19
11	86.65	87.72
12	79.82	77.09
13	70.21	67.41
14	62.02	58.32
15	52.45	48.75
16	42.36	37.56

实验所用藻种为小球藻和铜绿微囊藻 (中国科学院水生生物研究所藻种库), 并选择 BG11 作为培养基配方, 高温灭菌后将原种接种于 50 ml 三角瓶中, 置于 25℃ 恒温的光照培养箱中, 光照强度为 2000 lux, 每日光照时间为 12 h, 7-10 d 之后藻种逐级扩大到 10 L 容量瓶继续培养; 利用 ASD 公司的 FieldSpecHandHeld[®] 地物光谱仪提取高光谱信息, 其波段范围 325-1075 nm, 共 512 个波段, 光谱采样间隔为 1.6 nm, 光谱分辨率为 3.5 nm, 视场角为 25°; 采用内涂无光黑漆的圆桶 (深 1.1 m, 直径 0.8 m) 来模拟无限深水环境和防止入射光被桶壁反射至水面, 以此尽量消除其产生的测量误差, 实验光源为地物光谱仪自带的探照灯, 光头探测视角为 25°. 光谱测量位于水面 20-30 cm 处, 藻液离桶顶小于 50 cm, 确保实验前后遮光效应低. 在圆桶中先加入藻液, 然后逐次加入蒸馏水且搅拌, 每加一次蒸馏水, 重复测 15 次光谱 (4s/次), 取其平

均值, 同步采 1 次水样测量 Chl-a. 小球藻和铜绿微囊藻各进行 16 组光谱提取和 Chl-a 浓度测量. 最后, 为了保证样品 Chl-a 浓度的快速和准确测定, 采用 Turner Design 公司的 Aquafluor[®] 手持式荧光仪测量 Chl-a 浓

度^[21,22].

2 结果与讨论

2.1 Chl-*a* 浓度及高光谱特征

小球藻和铜绿微囊藻 Chl-*a* 浓度的实验结果见表 1,其浓度跨度分别为 42.36 – 191.6 (μg/L) 和 37.56 – 187.72 (μg/L),符合我国情况^[23].

小球藻在 540 nm 和 700 nm 附近存在明显的特征波峰(图 1),前者是由于叶绿素、胡萝卜素弱吸收,细胞和悬浮物颗粒的散射作用形成的^[1],后者被认为是 Chl-*a* 的荧光峰^[1,16],在 540 nm 波段处,反射率 *R* 随着浓度的增加而降低,而 700 nm 处则刚好相反,此外,由于 Chl-*a* 的荧光作用^[1,6],两个波峰的位置也随着 Chl-*a* 浓度增大而向长波(右)方向偏离.同时,在 660 nm 附近还存在明显的波谷,这是因为当藻类密度较高时水体光谱反射率曲线在该处出现谷值^[15].对于铜绿微囊藻(图 2),其光谱在 530 nm、660 nm 和 700 nm 附近存在 3 个较强的特征波峰,与小球藻不同的是,在 3 个波峰处其 *R* 值皆表现为随浓度的增加而增大.在 610 nm 和 680 nm 附近存在明显的波谷.从高光谱特征比较来看,660 nm 是区别于小球藻和铜绿微囊藻的特征波段,此特征波段可能是由两种藻的细胞大小和色素的差异引起的.此外,与以往室外研究比较来看^[1-17],铜绿微囊藻在 400 – 500 nm 之间的 *R* 值并不低,是因为没有非藻类颗粒物的影响,总吸收明显降低.

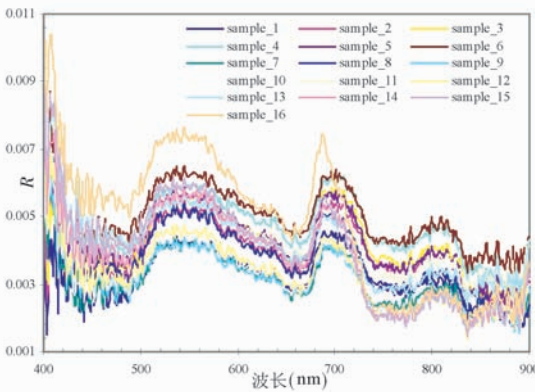


图 1 小球藻高光谱特征(λ:400 – 900 nm)

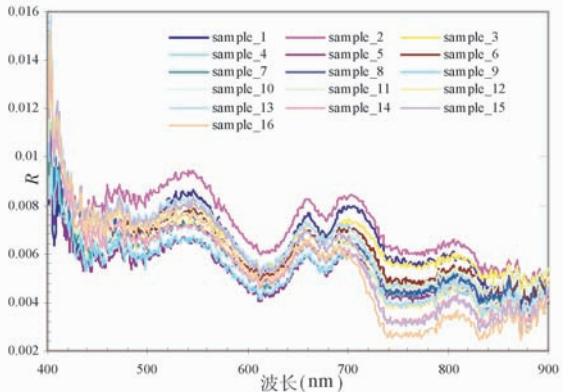


图 2 铜绿微囊藻高光谱特征(λ:400 – 900 nm)

Fig. 1 Hyperspectral characters of *Chlorella vulgaris*

Fig. 2 Hyperspectral characters of *Microcystis aeruginosa*

2.2 单波段法定量模型

小球藻和铜绿微囊藻在其各波段高光谱 *R* 值与其对应 Chl-*a* 浓度及浓度自然对数值的 Pearson 相关系数如图 3 和图 4 所示,在 400 nm 附近和大于 730 nm 的波段均存在较为显著的相关性,所以适宜采用单波段法建立 Chl-*a* 定量模型.其中小球藻和铜绿微囊藻分别在 403 nm 和 757 nm 处 Pearson 相关系数(绝对值)最大.但考虑到野外短波的遥感反射比难以提取,小球藻可以选择 741 nm 处建立 Chl-*a* 定量模型.

本研究分别采用了 5 种函数形式(一元线性函数、二次函数、对数函数、幂函数和指数函数)曲线拟合,并通过样本可决系数(R^2)、*F* 值和方程显著程度(*sig.*)对拟合优度进行判断,计算工具为 SPSS12.0.从拟合结果比较来看,小球藻和铜绿微囊藻分别采用二次函数和幂函数拟合效果比较好(图 5 和图 6),具体如下:

$$\text{小球藻: } Chl-a = -226 - 198033R_{741} - 25944697(R_{741})^2 (R^2 = 0.586, d.f. = 13, F = 9.216, sig. = 0.003) \quad (1)$$

$$\text{铜绿微囊藻: } Chl-a = 5299164(R_{757})^{1.9773} (R^2 = 0.876, d.f. = 14, F = 98.62, sig. = 0.000) \quad (2)$$

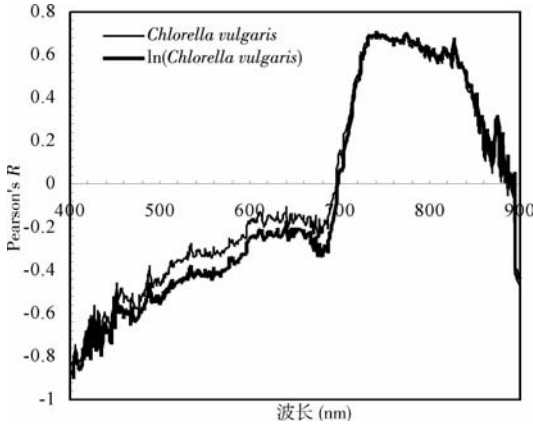


图3 小球藻的 R 值与 Chl- a 浓度、
浓度自然对数值的相关性

Fig. 3 Pearson's correlation between R
and Chl- a of *Chlorella vulgaris*

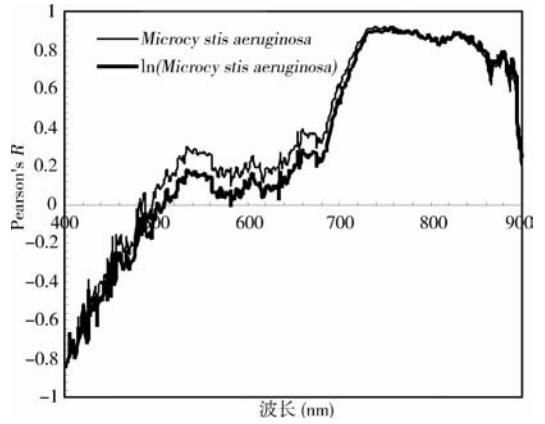


图4 铜绿微囊藻的 R 值与 Chl- a 浓度、
浓度自然对数值的相关性

Fig. 4 Pearson's correlation between R
and Chl- a of *Microcystis aeruginosa*

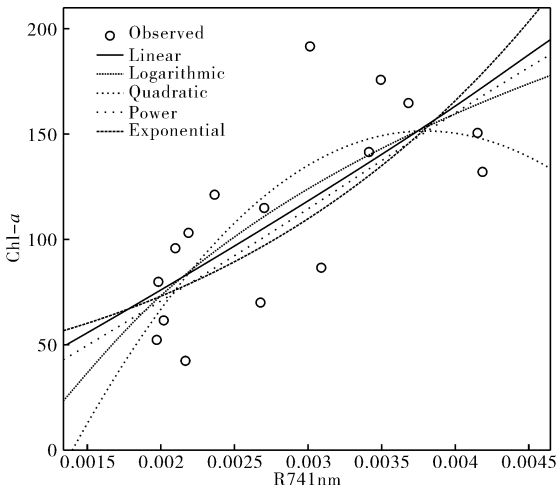


图5 小球藻 Chl- a 的单波段
(741 nm) 曲线拟合

Fig. 5 Curve fitting for Chl- a of *Chlorella*
vulgaris (403 nm)

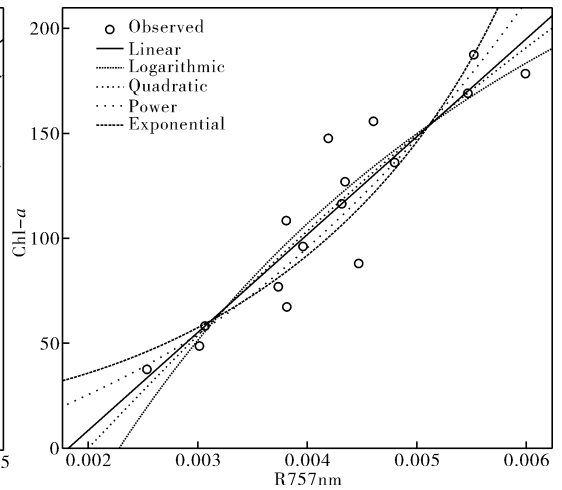


图6 铜绿微囊藻 Chl- a 的单波段
(757 nm) 曲线拟合

Fig. 6 Curve fitting for Chl- a of
Microcystis aeruginosa (757 nm)

2.3 波段比值法定量模型

以往的室外 Chl- a 研究, 往往利用 Chl- a 浓度与光谱响应间的明显特征, 选择不同波段比值来提取 Chl- a 浓度信息, 以此放大 Chl- a 吸收峰与 Chl- a 反射峰或荧光峰间的差异^[5, 15]. 由于小球藻和铜绿微囊藻在 650 - 700 nm 附近的吸收峰或荧光峰的位置存在漂移, 本文尝试采用近红外 R 最大值与红光 R 最小值之间的比值和近红外特征吸收峰 R 与红光荧光峰 R 之间的比值, 分别建立其与小球藻和铜绿微囊藻的 Chl- a 的定量关系. 图 7 和图 8 表明: 在比值 R 大于 1.5 之后, 浓度随着 R 的增加而增长相对更加明显.

对于小球藻, 即使效果最优的情况下, 两种比值的拟合结果也不理想 (图 7 和图 8, R^2 分别为 0.476 和 0.462), 所以小球藻不适宜采用波段比值法; 而对于铜绿微囊藻, 两种比值的拟合结果皆比较理想 (图 9 和图 10), 具体结果如下:

$$R_{\max}/R_{\min}: \text{Chl-a} = 15.677 \left[\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right]^{4.1544} \quad (R^2 = 0.757, d.f. = 14, F = 43.52, sig. = 0.000) \quad (3)$$

$$R_{702}/R_{679}: \text{Chl-a} = 1.4361 \exp[2.7094(R_{702}/R_{679})] \quad (R^2 = 0.769, d.f. = 14, F = 46.51, sig. = 0.000) \quad (4)$$

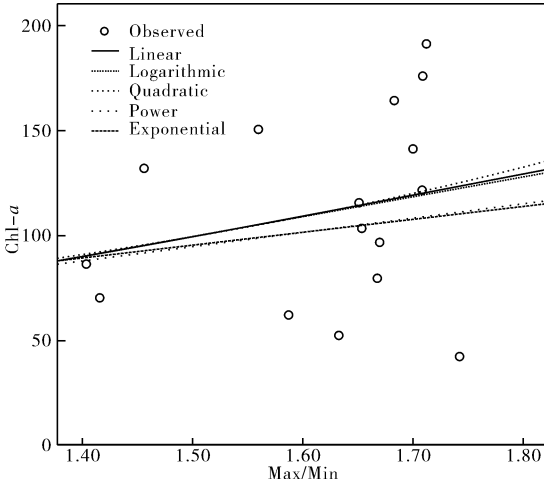


图7 小球藻 Chl-a 的波段比值
(R_{\max}/R_{\min}) 曲线拟合

Fig. 7 Curve fitting for Chl-a of *Chlorella vulgaris* (R_{\max}/R_{\min})

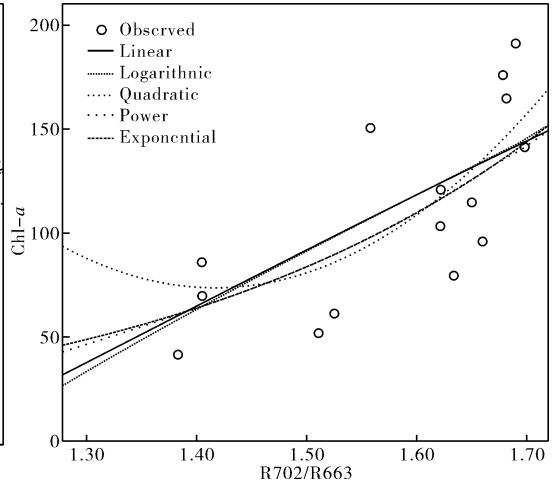


图8 小球藻 Chl-a 的波段比值
(R_{702}/R_{663}) 曲线拟合

Fig. 8 Curve fitting for Chl-a of *Microcystis aeruginosa* (R_{702}/R_{663})

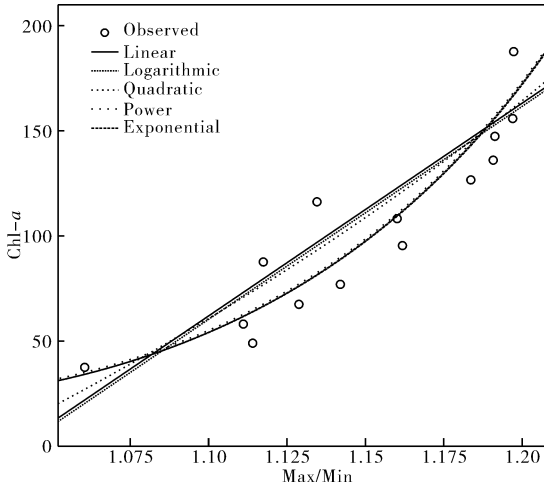


图9 铜绿微囊藻 Chl-a 的波段比值
(R_{\max}/R_{\min}) 曲线拟合

Fig. 9 Curve fitting for Chl-a of *Chlorella vulgaris* (R_{\max}/R_{\min})

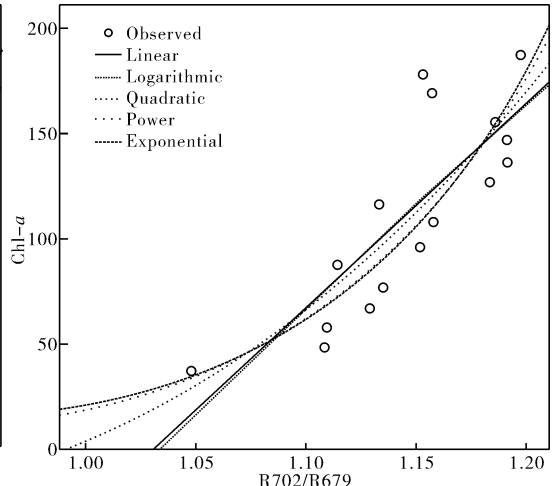


图10 铜绿微囊藻 Chl-a 的波段比值
(R_{702}/R_{679}) 曲线拟合

Fig. 10 Curve fitting for Chl-a of *Microcystis aeruginosa* (R_{702}/R_{679})

2.4 一阶微分法定量模型

对光谱的一阶微分处理可以去除部分线性或接近线性的背景,减少噪声光谱对目标光谱的影响^[3,19],研究表明,光谱的低阶微分处理对噪声影响敏感性较低,因而在实际应用中较有效^[16]。本次实验的高光谱采集的是离散型数据(间隔为 1.6 nm),因此光谱数据的一阶微分 $R(\lambda_i)$,可以近似表示为:

$$R(\lambda_i)' = \frac{dR(\lambda_i)}{d\lambda_i} \approx \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (5)$$

其中, λ_{i-1} 、 λ_i 、 λ_{i+1} 为相邻波长. 由上述公式计算的小球藻和铜绿微囊藻一阶微分光谱 (500 - 800 nm) 如图 11 和图 12 所示, 相应的 $R(\lambda_i)'$ 值与分别 Chl-a 浓度的 Pearson 相关性分如图 13 和图 14 所示.

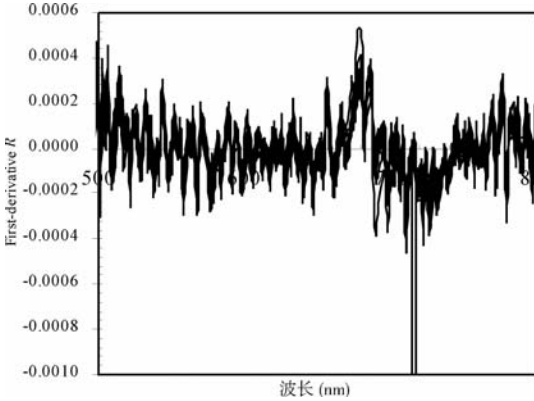


图 11 小球藻一阶微分光谱

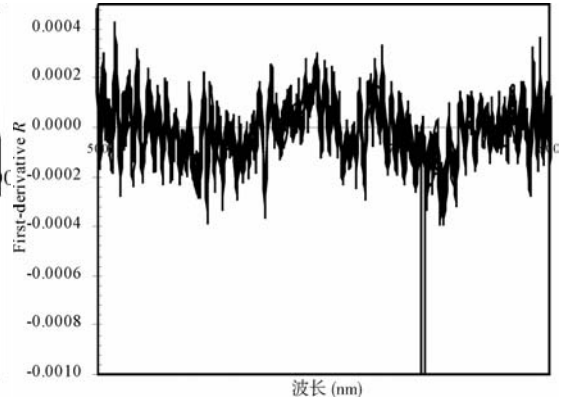


图 12 铜绿微囊藻一阶微分光谱

Fig. 11 First-derivative spectrum of *Chlorella vulgaris* Fig. 12 First-derivative spectrum of *Microcystis aeruginosa*

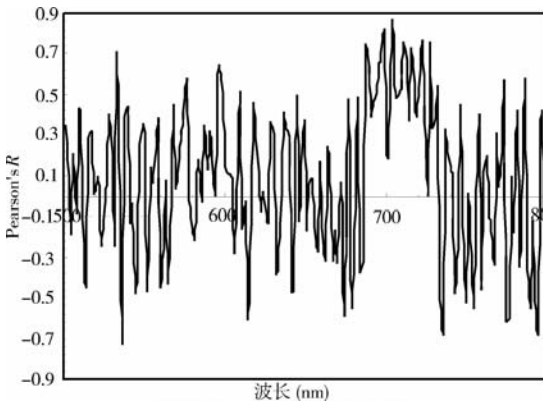


图 13 小球藻 R' 值与 Chl-a 浓度的相关性

Fig. 13 Pearson's correlation between R' and Chl-a of *Chlorella vulgaris*

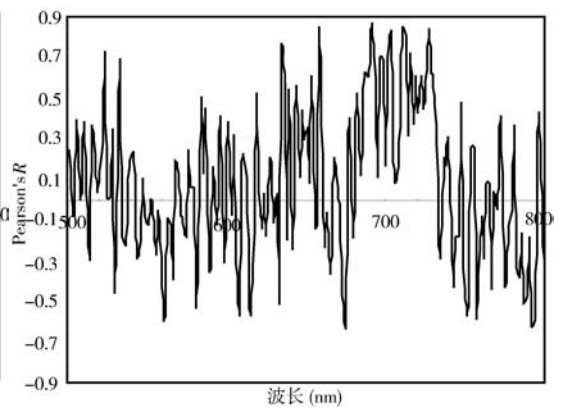


图 14 铜绿微囊藻 R' 值与 Chl-a 浓度的相关性

Fig. 14 Pearson's correlation between R' and Chl-a of *Microcystis aeruginosa*

对于小球藻和铜绿微囊藻, 其 Pearson 相关性皆在 687 - 727 nm 之间较为显著, 其中小球藻相关系数的最大值位于 703 nm, 为 0.851 (图 13), 而铜绿微囊藻相关系数的最大值位于 692 nm, 为 0.8667 (图 14), 此结果与室外研究比较近似 (大部分为 690 - 700 nm 之间) [5,6,15,16], 进一步证实了 690 - 700 nm 是藻类叶绿素一阶微分研究的特征波段. 本文针对两种藻种, 分别在 703 nm 和 692 nm 处进行拟合, 结果表明前者适合采用二次曲线 (图 15), 后者适合采用线性曲线 (图 16).

$$\text{小球藻: } \text{Chl-a} = 174.6 + 1138292 (R_{703})' + 2.3 \times 10^9 [(R_{703})']^2 \quad (6)$$

$(R^2 = 0.752, d.f. = 13, F = 19.75, sig. = 0.000)$

$$\text{铜绿微囊藻: } \text{Chl-a} = 198 + 772482 (R_{692})' \quad (R^2 = 0.751, d.f. = 13, F = 42.29, sig. = 0.000) \quad (7)$$

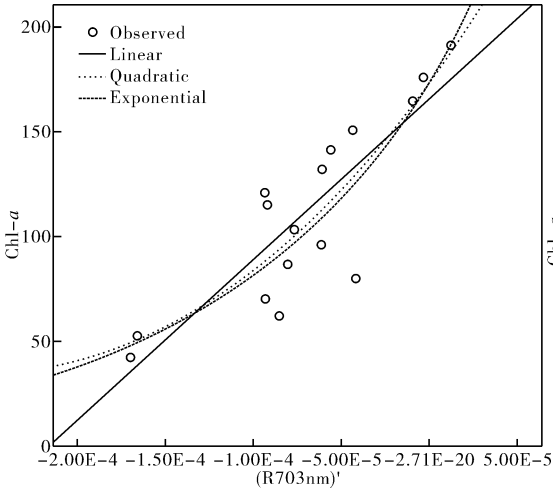


图 15 小球藻 Chl-a 的一阶微分曲线拟合
Fig. 15 Curve fitting of *Chlorella vulgaris*
based on first-derivative

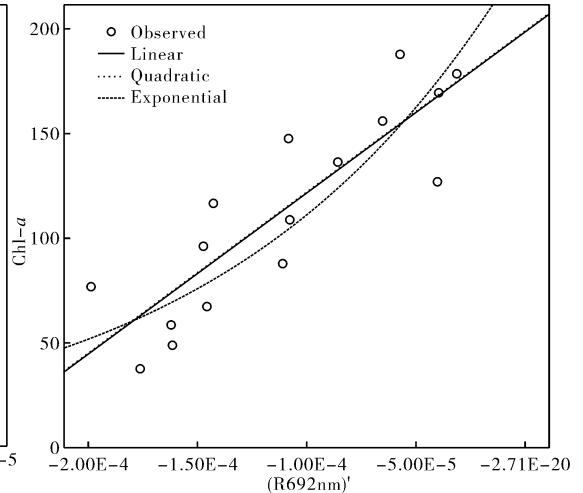


图 16 铜绿微囊藻 Chl-a 的一阶微分曲线拟合
Fig. 16 Curve fitting of *Microcystis aeruginosa*
based on first-derivative

2.5 定量模型比较

归纳起来,上述 3 种方法之间存在明显的差异. 从拟合方程的样本可决系数(R^2)来看,小球藻的最优定量模型确定方法为一阶微分法(703 nm),其次是单波段法(403 nm),而波段比值法不适宜;而对于铜绿微囊藻,最优的定量模型确定方法也是单波段法(757 nm),其次是波段比值法(R_{702}/R_{679}),再其次是一阶微分法(692 nm),但考虑计算方便,可以优先采用一阶微分法定量模型: $Chl-a = 198 + 772482 (R_{692})$:

3 结论

(1)通过室内实验研究和方法比选,分别建立适合小球藻和铜绿微囊藻的最优 Chl-a 高光谱定量模型,分别为 $Chl-a = 174.6 + 1138292 (R_{703})' + 2.3 \times 10^9 [(R_{703})']^2$ (一阶微分法)和 $Chl-a = 5299164 (R_{757})^{1.9773}$ (单波段法). 但考虑到计算方便,铜绿微囊藻还可以采用一阶微分法确定定量模型: $Chl-a = 198 + 772482 (R_{692})$: 这为野外水体混合藻种光谱分离提供了一定的理论依据.

(2)从高光谱特征来看,小球藻在 540 nm 和 700 nm 附近存在明显的特征波峰,其位置随 Chl-a 浓度增大而向长波方向偏离,且在 540 nm 波段处,反射率随浓度增加而降低,而 700 nm 处则刚好相反;对于铜绿微囊藻,其光谱在 530 nm、660 nm 和 700 nm 附近存在 3 个较强的特征波峰,在 610 nm 和 680 nm 附近存在明显的波谷. 相比之下,660 nm 是区别于小球藻和铜绿微囊藻的特征波段. 与以往室外研究不同的是:铜绿微囊藻在 400 - 500 nm 之间的 R 值并不低,是因为没有非藻类颗粒物的影响,总吸收明显降低. 同时,在以后的实验工作中,将会对藻的细胞大小和色素引起的光谱变化进行实验和理论方面的进一步探索.

(3)基于室内实验,本研究集中探讨了小球藻和铜绿微囊藻的各自高光谱特征. 然而野外皆为混合藻类水体,所以有必要进一步开展混合藻种光谱分离及其 Chl-a 多元定量模型的研究.

致谢:感谢北京沃特兰德公司提供 Aquafluor 手持式荧光仪和中国科学院水生生物研究所陈伟博士在藻类培养方面提供的指导.

4 参考文献

- [1] Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyfi F *et al.* Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**: 1269 - 1295.
- [2] Hoogenboom H J, Dekker A G, Althuis I J A. Simulation of AVIRIS Sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **6**: 333 - 340.

- [3] Rundquist D C, Han L, Schalles J F *et al.* Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, **6**: 195 – 200.
- [4] Quibell G. The effect of suspended sediment on reflectance from freshwater algae. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, **12**: 177 – 182.
- [5] 疏小舟, 尹 球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. *遥感学报*, 2000, **4**: 41 – 45.
- [6] 吴 倩, 林 蕾, 王学军等. 福海叶绿素含量的人工神经网络反演模型. *地理与地理信息科学*, 2004, **20**: 27 – 30.
- [7] George D G, Malthus T J. Using a compact airborne spectrographic imager to monitor phytoplankton biomass in a series of lakes in north Wales. *Science of the Total Environment*, 2001, **26**: 215 – 226.
- [8] Fraser R N. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska Sand Hills lakes. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**: 1579 – 1589.
- [9] Flink P, Lindell T, Ostlund C. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes. *Science of the Total Environment*, 2001, **26**: 155 – 169.
- [10] Pulliainen J, Kallio K, Eloheino K *et al.* A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data. *Science of the Total Environment*, 2001, **26**: 79 – 93.
- [11] Thiemann S, Kaufmann H. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data (a semilempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany). *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**: 228 – 237.
- [12] Liu D, Zhang Y, Zhang B *et al.* Effects of sensor noise in spectral measurements on chlorophyll-a retrieval in Nanhu Lake of Changchun, China. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2006, **20**: 547 – 557.
- [13] Vos R J, Hakvoort J H M, Jordans R W J *et al.* Multiplatform optical monitoring of eutrophication in temporally and spatially variable lakes. *Science of the Total Environment*, 2003, **312**: 221 – 243.
- [14] Dall'Olmo G, Gitelson A, Rundquist D C *et al.* Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **96**: 176 – 187.
- [15] 李素菊, 吴 倩, 王学军等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系. *湖泊科学*, 2002, **14**: 228 – 234.
- [16] 段洪涛, 张 柏, 宋开山等. 查干湖叶绿素 a 浓度高光谱定量模型研究. *环境科学*, 2006, **27**: 503 – 507.
- [17] 焦红波, 查 勇, 李云梅等. 基于地面实测光谱的太湖水体富营养化水平估算. *湖泊科学*, 2006, **18** (3): 343 – 348.
- [18] Kutser T, Metsamaa L, Strömbeck N *et al.* Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **67**: 303 – 312.
- [19] 蒲瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 刘堂友, 匡定波, 尹 球. 藻类光谱实验及其光谱定量信息提取研究. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**: 213 – 217.
- [21] Yahel G, Post A F, Fabricius K *et al.* Phytoplankton distribution and grazing near coral reefs. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**: 551 – 563.
- [22] Tittel J, Zippel B, Geller W *et al.* Relationships between plankton community structure and plankton size distribution in lakes of Northern Germany. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**: 1119 – 1132.
- [23] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.