

Fe(Ⅲ)对藻类生长及光谱特征的影响*

郑太辉^{1,2} 史 奕^{1**} 迟光宇^{1,2} 陈 欣¹

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 利用室内培养实验,研究不同 Fe(Ⅲ)浓度处理下太湖藻类叶绿素含量、藻类反射光谱随时间的变化规律。通过导数光谱技术、“红边”光学参数(红边位置)对藻类光谱信息进行定量提取,并与藻类叶绿素含量、藻体 Fe(Ⅲ)含量进行相关分析,建立了培养液 Fe(Ⅲ)浓度-藻类叶绿素含量-藻类光谱的定量关系。结果表明:适宜的 Fe(Ⅲ)浓度($18\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)有利于藻类生长及叶绿素合成,过高 Fe(Ⅲ)浓度($30\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)在培养前期能促进藻类叶绿素的合成,但在培养后期会抑制藻类叶绿素的合成,缺铁($0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)使叶绿素的合成受到显著的抑制;不同 Fe(Ⅲ)浓度下藻类光谱植被指数(SR_{705} 、 ND_{705})、红边位置与藻类叶绿素含量的相关性显著($P<0.05$)。

关键词 Fe; 藻类; 生长; 叶绿素; 光谱

中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)12-2471-06

Effects of Fe(Ⅲ) on the growth and spectral characteristics of algae. ZHENG Tai-hui^{1,2}, SHI Yi¹, CHI Guang-yu^{1,2}, CHEN Xin¹ (¹Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(12):2471–2476.

Abstract: An indoor culture experiment was conducted to study the temporal change patterns of chlorophyll content and reflectance spectra of algae from Taihu Lake under different Fe(Ⅲ) supply. Derivative spectrophotometry and red edge optical parameter were employed to quantitatively extract the algal spectral data, and correlation analysis was made between the algal spectral data and algal chlorophyll and Fe(Ⅲ) contents. Based on these, the quantitative relationship of supplied Fe(Ⅲ) concentration - algal chlorophyll content - algal spectra was established. The results showed that supplying appropriate concentration ($18\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) Fe(Ⅲ) was conducive to the algal growth and chlorophyll synthesis. High concentration ($30\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) Fe(Ⅲ) promoted the synthesis of algae chlorophyll at the prophase of culture, but inhibited it at the anaphase. Fe-deficiency significantly inhibited the synthesis of chlorophyll. Under different Fe(Ⅲ) supply, there existed significant correlations ($P<0.05$) between the vegetation indices SR_{705} and ND_{705} , red edge position, and the chlorophyll content of algae.

Key words: iron; algae; growth; chlorophyll; spectra.

长期以来,国内外一般通过控制外源性 N、P 等营养盐类的输入来防治水域富营养化,但效果并不显著。1990 年, Martin 提出“Fe”假说,认为 Fe 是 HNLC (high-nutrient, low-chlorophyll, 高营养盐、低叶绿素)海区水体浮游植物生长的限制因子。研究表明,湖泊水体中 Fe 含量过高或过低也会对藻类的生长及叶绿素、蛋白质等生化组成产生影响 (Lee *et*

al., 2009)。在一定范围内,藻类可能在这个区间内存在一个生长的“临界 Fe 浓度”,高于此浓度,藻类表现为细胞生长加快,并可能达到较高的密度,容易爆发水华 (吕秀平等, 2005)。由此可见,在湖泊富营养化治理过程中应考虑 Fe 的调控作用。

对湖泊水体中 Fe 的监测和识别是调控 Fe 浓度的前提,而遥感技术的出现为湖泊和近海藻类的监测提供了有效手段,在湖泊水体监测方面具有常规监测方法不可比拟的优越性 (Koppnen *et al.*, 2002;

* 国家自然科学基金资助项目(40801133)。

** 通讯作者 E-mail: shiyi@iae.ac.cn

收稿日期: 2010-05-04 接受日期: 2010-09-25

李国砚等,2008)。光谱信息是遥感监测的数据基础,植物光谱反射或发射特性是由化学和形态学特征决定的,这种特性与植物发育、含水量、叶绿素含量等密切相关。植物的营养状况能够在光谱反射率数据中有所体现。湖泊水体 Fe 浓度的波动会使藻类细胞的代谢活动发生变化,进而在反射光谱上有所反应(陈云和戴锦芳,2008;Liu *et al.*,2008)。国内外学者已经就内陆水体反射光谱特征和藻类叶绿素浓度之间的关系开展研究(刘剡等,2005),并建立了藻类叶绿素高光谱遥感模型。但在“化学元素-藻类光谱”的相互作用和影响关系方面鲜有报道,有待于进一步探索。因此,探讨“水体 Fe 浓度-藻类体内 Fe 含量-藻类光谱特征”相关关系,以期及时准确地反映湖泊水体 Fe 含量及分布信息,对阐明湖泊中水华爆发与 Fe 的关系、分析水华爆发的动态过程及建立湖泊富营养化遥感预警体系都具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 主要仪器及设备

UniSpec 光谱分析仪(测量范围为 320 ~ 1200 nm,光谱分辨率为 3 ~ 4 nm)、培养架、日光灯、温度计、300 ml 料培养杯、离心机、超声破碎仪等。

1.2 实验藻种

供试藻类采自太湖梅梁湾湖区,藻种以铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)为主,含有少部分四尾栅藻(*Scenedesmus quadricanda*)等其他藻类。

1.3 培养基配制及 Fe(Ⅲ)浓度梯度设定

实验以 BG11 培养基为基础,用 180 μmol · L⁻¹ 的柠檬酸铁铵溶液为母液,其他组分不变,配制成为不同 Fe(Ⅲ)浓度的培养基。设定 Fe(Ⅲ)浓度梯度为 0 μmol · L⁻¹,1 μmol · L⁻¹,18 μmol · L⁻¹(对照,BG11 培养基中 Fe(Ⅲ)浓度),30 μmol · L⁻¹。

1.4 培养方法和实验条件

藻种实验前进行扩大培养,在指数生长期时离心(4000 r · min⁻¹,20 min)收集细胞,采用无 Fe-BG11 培养基洗涤 2 ~ 3 次后进行饥饿培养。7 d 后离心收集细胞,并用少量无 FeBG11 培养基重悬,将重悬液作为藻液,接种到含不同 Fe(Ⅲ)浓度的培养基中,定容至 250 ml,接种密度为 1.0 × 10⁶ 个 · L⁻¹。培养期间温度为 21.5 °C ~ 26 °C,光照度为 2000 lx,光暗比为 12 h : 12 h。每天用玻璃棒定时缓慢搅拌 2 次,培养 14 d 后隔天测定藻类叶绿素含量并采集光谱数据,培养 30 d 后离心收集藻细胞用湿灰化法

测定藻体 Fe 含量。

1.5 叶绿素 a、b 的测定

离心收集细胞,用去离子水洗涤 3 次,倒掉上清液,然后加入丙酮与乙醇 1 : 1 比例混合液 2 ml,于暗处放置 24 h。然后,定容至 10 ml,用紫外分光光度计在 470 nm、537 nm、647 nm 和 663 nm 波长下比色。计算公式为(Sims *et al.*,2002):

Chla (mg · L⁻¹) = 0.01373A₆₆₃ - 0.000897A₅₃₇ - 0.003046A₆₄₇

Chlb (mg · L⁻¹) = 0.02405A₆₄₇ - 0.004305A₅₃₇ - 0.005507A₆₆₃

1.6 藻类光谱数据采集与分析

培养 14 d 后采用 UniSpec 光谱分析仪隔天提取藻类光谱信息,每个 Fe(Ⅲ)浓度梯度采集 9 次数据,然后对多次测量结果进行比较和分析,求取平均值。

植被指数和红边参数是遥感光谱手段监测植物状况的两种重要方法。其中,常用的植被指数有:比值植被指数(SRVI)、归一化植被指数(NDVI)和其他植被指数(Sims *et al.*,2002)(表 1)。比值植被指数又称绿度,以植物反射光谱近红外波段反射率值除以红光波段反射率值得到,能较好地反映植物生长状况的差异;归一化植物指数为植物光谱近红外波段反射率值与红外波段反射率值之差除以它们的和。

而红边指植物光谱曲线在为 680 ~ 780 nm 的急剧变化区域,这是由叶绿素在红光区域的强吸收作用以及在近红外区间的强反射作用(受细胞结构影响)引起的(Moses *et al.*,2006)。当植被中叶绿素含量减少时,红边位置发生蓝移(向短波方向漂移)(Rock *et al.*,1988)。红边位置可以根据 Guyot 法求得,具体可描述如下(杨吉龙等,2001):

λ_{红边} = 700 + 40 × (R_{红边} - R₇₀₀) / (R₇₄₀ - R₇₀₀)

式中,R_{红边} = (R₆₇₀+R₇₈₀)/2,R₆₇₀、R₇₀₀、R₇₄₀和 R₇₈₀分别为波长 670、700、740 和 780 nm 处的光谱反射率。

表 1 用于估测植物叶绿素含量的植被指数
Tab.1 Vegetation indices for estimation of plant chlorophyll content

比值植被指数(SRVI)	归一化植被指数(NDVI)	其他指数
$SR_{680} = \frac{R_{800}}{R_{680}}$	$ND_{680} = \frac{(R_{800} - R_{680})}{(R_{800} + R_{680})}$	$mSR_{705} = \frac{(R_{750} - R_{445})}{(R_{705} - R_{445})}$
$SR_{705} = \frac{R_{750}}{R_{705}}$	$ND_{705} = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705})}$	$mND_{705} = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})}$

R_{xxx}为叶片在 xxx 波长处的光谱反射率。引自 Sims *et al.*,2002。

2 结果与分析

2.1 藻体内 Fe 含量和叶绿素含量变化规律

藻体 Fe 含量与培养液 Fe(Ⅲ)处理浓度关系如图 1 所示,关系式为 $y=0.1205e^{0.5435x}$ ($R^2=0.978$)。藻体 Fe 含量与培养液 Fe(Ⅲ)浓度呈指数相关关系,这是因为培养液 Fe(Ⅲ)浓度增加,使得部分藻体细胞失活,藻体大量富集 Fe。

从图 2 看出,缺铁($0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)使叶绿素的合成受到显著的抑制,表现为藻液呈黄色且藻体偏小;适宜的 Fe(Ⅲ)浓度($18 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)有利于藻类生长及叶绿素合成;而过高 Fe(Ⅲ)浓度($30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)在培养前期能促进藻类叶绿素的合成,但在培养后期会抑制藻类叶绿素的合成。高浓度 Fe(Ⅲ)对藻类前期叶绿素合成的促进作用可能与接种浓度或者是接种前的饥饿培养有关,而后期的抑制作用可能是由于过高 Fe(Ⅲ)浓度导致藻体内富集大量 Fe,从而诱使藻类产生毒素而发生自溶反应(Pivokonsky, 2000),也可能是如前文所述,受 Fe(Ⅲ)胁迫情况下,藻体内活性氧自由基(主要是强反应性

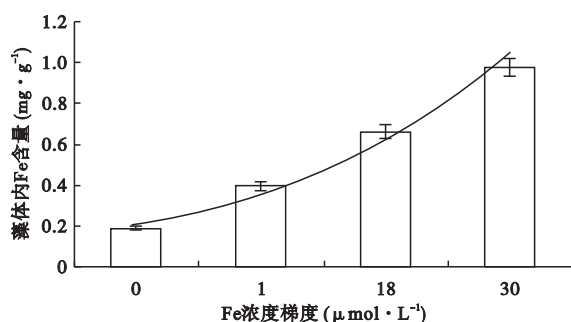


图 1 藻体内 Fe 含量与培养液 Fe(Ⅲ)浓度的关系
Fig.1 Relationship between Fe content in algae and Fe(Ⅲ) in culture medium

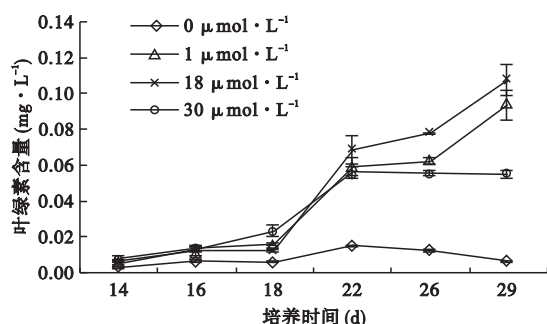


图 2 不同 Fe(Ⅲ)浓度下藻类叶绿素(a+b)含量随时间的变化
Fig.2 Chang of chlorophyll (a+b) content in alga under different Fe(Ⅲ) concentration

的·OH)增加所致。

关于 Fe(Ⅲ)胁迫下藻类产生自溶效应,国内外一些学者已经做过一些陈述,如连民等(2001)曾报道,高 Fe(Ⅲ)浓度可以促进铜绿微囊藻细胞的生长和光合作用,但与此同时,铜绿微囊藻毒素的合成会随着 Fe(Ⅲ)离子浓度的升高而缓慢上升。相反,植物缺 Fe 时,叶绿体的片层结构发生很大变化,叶绿体基粒数目减少,基粒类囊体的片层数目下降,基粒类囊体和基质类囊体排列混乱,严重时甚至使叶绿体发生崩解,从而使植物表现“失绿”现象(疏小舟等,2000;刘剋等,2005)。因此,Fe 对藻类的新陈代谢如叶绿素合成、电子传递以及氮固定等过程发挥着重要的作用(Rueter & Ades, 1987)。

本试验中得到有关 Fe 对藻类叶绿素影响方面的结果与前人的试验结果相似。刘静等(2009)通过设定 Fe(Ⅲ)浓度梯度($0, 0.01, 0.1, 1, 10, 30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),研究了不同 Fe(Ⅲ)浓度对铜绿微囊藻生长的影响,结果表明:当环境中的 Fe(Ⅲ)浓度 $<1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,铜绿微囊藻的生长和叶绿素的合成受到限制;在高 Fe(Ⅲ)浓度下($30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),发生了铜绿微囊藻生物量和叶绿素 a 含量在培养 21 d 后突然下降的现象,在吕秀平等(2005)的研究中也曾得到类似的结果。

2.2 Fe(Ⅲ)对藻类光谱的影响

2.2.1 不同 Fe(Ⅲ)浓度下藻类可见-近红外光谱特征 从图 3 可以看出,不同 Fe(Ⅲ)浓度下藻类原始反射光谱(可见-近红外区间)特征曲线形态相似,均在 530~550 nm 处出现一个较强的反射峰,在 680~710 nm 之间反射率呈现急剧上升趋势,该处称为光谱曲线的“红边”。相比较正常 Fe(Ⅲ)供应($18 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),Fe(Ⅲ)供应不足(Fe(Ⅲ)处理浓

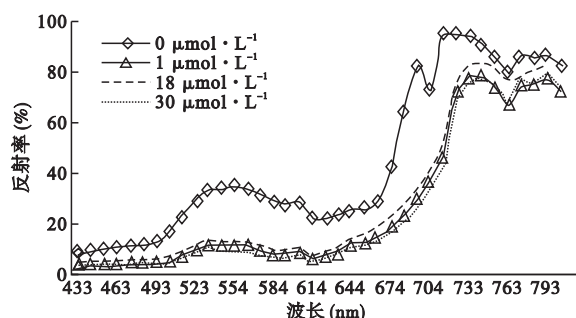


图 3 不同 Fe(Ⅲ)浓度下藻类原始光谱(可见-近红外区间)特征
Fig.3 Algal reflectance (visible-near infrared range) under different Fe(Ⅲ) concentration

度为 0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和过量(30 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 情况下藻类反射光谱特征均发生明显改变,最突出的表现为可见光区反射率增加、红边位置“蓝移”(向短波方向移动)。这是因为 Fe(Ⅲ) 供应不足和过量使藻类叶绿素合成受阻,藻体细胞内部组织逐渐受到损害,大量物质开始分解,导致可见光-近红外区藻体反射率升高。因此,藻类光谱可见-近红外光谱对于监测不同 Fe(Ⅲ) 浓度下藻类生长状况具有较好的应用价值。

2.2.2 不同 Fe(Ⅲ) 浓度下藻类光谱植被指数、红边位置变化规律 从表 2 可以看出,培养 16、26 和 29 d 时,植被指数 SR_{680} 、 SR_{705} 、 ND_{680} 、 ND_{705} 、 mSR_{705} 、 mND_{705} 均随培养液 Fe 浓度的增加呈先增加后减少的趋势,培养液 Fe 浓度为 18 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时各指数达到最大值。培养 18 和 22 d 时,植被指数 SR_{705} 、 ND_{705} 、 mSR_{705} 、 mND_{705} 随培养液 Fe 浓度的增加而增加。培养液 Fe 浓度为 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,指数 SR_{705} 、 ND_{705} 、 ND_{680} 、 mSR_{705} 在培养前 26 d 呈总体增加的趋势,培养液 Fe 浓度为 18 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,指数 SR_{705} 、 ND_{705} 、 ND_{680} 、 mSR_{705} 均在培养 26 d 时达到最大值,表现出与该 Fe 浓度处理藻类叶绿素含量相似的变化规律;培养液 Fe 浓度为 30 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,指数 SR_{705} 、 ND_{705} 呈现先增加后减少的趋势,在培养 26 d

达到最大,表现出与该 Fe 浓度处理藻类叶绿素含量相似的变化规律。

植被指数 SR_{705} 、 ND_{705} 与藻体叶绿素含量相关性显著($P<0.05$),而 SR_{680} 、 ND_{680} 、 mSR_{680} 、 mSR_{705} 与藻体叶绿素含量的相关性不显著(表 3)。这可能基于两点原因,一是从图 2 可知,波长>714 nm 的波段由于正好处于叶绿素等色素吸收以及藻类细胞结构内部散射引起的近红外高反射区的交接区域内,所以造成藻体叶绿素含量与该区域内藻体反射光谱相关性较差;二是相对较低的叶绿素浓度,就能对 660~680 nm 处光谱进行饱和性吸收,从而影响了指数 SR_{680} 、 ND_{680} 和 mSR_{680} 对较高浓度叶绿素的敏感性(Sims *et al.*, 2002)。而植被指数 SR_{705} 、 ND_{705} 与藻体叶绿素含量、蛋白质含量相关性显著,这是因为需要相对较高浓度的叶绿素才能对 500 nm 或者 700 nm 处光谱进行饱和性吸收(Yoder *et al.*, 1994; Datt, 1998; 1999)。

从表 2 可以看出,1 和 18 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度 Fe(Ⅲ) 处理下藻类光谱红边位置均呈整体向长波方向偏移的现象,0 和 30 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度 Fe(Ⅲ) 处理下藻类光谱红边位置均呈先“红移”(向长波方向移动)后“蓝移”的现象。培养 18~29 d,藻类光谱红边位置均随培养液 Fe(Ⅲ) 浓度的增加呈先增后减

表 2 不同 Fe(Ⅲ) 浓度下藻类光谱植被指数 SR、ND、mSR 和红边位置随时间的变化规律
Tab. 2 Change of SR, ND and mSR vegetation indices and red edge position under different Fe(Ⅲ) concentration

培养天数 (d)	Fe(Ⅲ) 浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	SR_{680}	SR_{705}	ND_{680}	ND_{705}	mSR_{705}	mND_{705}	红边位置 (nm)
16	0	1.58	1.11	0.22	0.05	1.13	0.06	682.36
	1	2.94	1.78	0.49	0.28	1.97	0.33	710.78
	18	4.25	2.27	0.62	0.39	2.52	0.43	707.54
	30	3.64	2.07	0.57	0.35	2.38	0.41	711.78
18	0	1.70	1.24	0.26	0.11	1.27	0.12	659.52
	1	3.11	1.90	0.51	0.31	2.00	0.33	709.20
	18	2.97	2.00	0.50	0.33	2.19	0.37	711.19
	30	3.17	2.06	0.52	0.35	2.23	0.38	712.62
22	0	1.43	1.13	0.18	0.06	1.15	0.07	624.14
	1	3.02	1.86	0.50	0.30	1.97	0.33	710.94
	18	2.92	1.96	0.49	0.33	2.07	0.35	714.28
	30	2.93	2.05	0.49	0.34	2.19	0.37	709.24
26	0	1.51	1.20	0.20	0.09	1.23	0.10	687.49
	1	3.55	2.11	0.56	0.36	2.26	0.39	706.94
	18	3.78	2.41	0.58	0.41	2.62	0.45	711.47
	30	3.15	2.09	0.52	0.35	2.26	0.39	711.07
29	0	1.62	1.34	0.24	0.14	1.37	0.16	686.47
	1	2.81	1.83	0.48	0.29	1.96	0.32	710.37
	18	3.15	2.03	0.52	0.34	2.18	0.37	726.52
	30	2.81	1.92	0.47	0.32	2.04	0.34	711.65

表 3 藻类光谱植被指数、红边位置与叶绿素含量的相关性
Tab.3 Correlative coefficient between vegetation indices, red edge position and chlorophyll content of algae

	植被指数						红边位置
	SR ₆₈₀	SR ₇₀₅	ND ₆₈₀	ND ₇₀₅	mSR ₆₈₀	mSR ₇₀₅	
叶绿素含量	0.353	0.552 *	0.393	0.456 *	0.431	0.434	0.817 * *

* * $P<0.01$, * $P<0.05$ 。

趋势,18 μmol · L⁻¹ 浓度 Fe(Ⅲ) 处理下藻类光谱红边位置呈现最大值。红边位置与藻类叶绿素有极显著的相关性($P<0.01$,表 3)。

大量研究表明,随着叶绿素含量的提高,红边位置会产生“红移”现象;反之,产生“蓝移”现象(Horler *et al.* ,1983;Curran *et al.* ,1992)。具体原因是,藻类叶绿素减少将导致叶绿素吸收减弱,吸收波段变窄,红光范围变小,红边振幅和红边峰值面积随之减少,使藻类光谱曲线红边发生“蓝移”(Miller *et al.* ,1990);反之,藻类叶绿素增加,藻类光谱曲线红边发生“红移”。另外,藻类叶绿素含量的减少,导致叶绿体萎缩,藻类细胞内部散射面积减少,从而使藻类光谱近红外反射率降低。在本实验中,缺铁(0 μmol · L⁻¹)使藻类叶绿素合成受到明显抑制,导致低浓度 Fe(Ⅲ) 处理下藻类光谱红边位置发生“蓝移”;高 Fe(Ⅲ) 浓度 (30 μmol · L⁻¹) 先促进藻类叶绿素合成,后抑制藻类叶绿素合成,导致高浓度下藻类光谱红边位置先发生“红移”后发生“蓝移”;适宜 Fe(Ⅲ) 浓度 18 μmol · L⁻¹) 有利于藻类叶绿素合成,该浓度下藻类光谱红边位置在整个培养期间发生“红移”。

3 结 论

适宜的 Fe(Ⅲ) 浓度有利于藻类生长及叶绿素合成,过高 Fe(Ⅲ) 浓度在培养前期能促进藻类叶绿素的合成,但在培养后期会抑制藻类叶绿素的合成。缺铁使叶绿素的合成受到显著的抑制。

不同 Fe(Ⅲ) 浓度下藻类原始反射光谱 (可见-近红外区间) 特征曲线形态相似,均在 530 nm 处出现一个较强的反射峰,为 680 ~ 710 nm 反射率呈现急剧上升趋势。藻类光谱“红边”位置随藻体 Fe 含量的增加而向长波方向移动;但在 Fe(Ⅲ) 供应不足 (培养液 Fe(Ⅲ) 浓度<1 μmol · L⁻¹) 或者过量 (培养液 Fe(Ⅲ) 浓度>18 μmol · L⁻¹) 情况下,藻类光谱“红边”位置明显向短波方向移动,即“红边”位置

“蓝移”。

不同 Fe(Ⅲ) 浓度下藻类光谱植被指数 (SR₇₀₅、ND₇₀₅)、“红边”位置与藻类叶绿素含量的相关性显著($P<0.05$)。说明经验植被指数 SR₇₀₅、ND₇₀₅ 以及红边光学参数 (红边位置) 对研究受 Fe(Ⅲ) 影响下藻类生长和叶绿素含量的变化规律方面具有较好的应用价值。

由于水体、水体悬浮物、藻类密度、藻种等因素也会影响藻类光谱信息,因此,有待于进一步实验来探讨这些因素对藻类光谱的影响作用。

参考文献

陈 云,戴锦芳. 2008. 基于遥感数据的太湖蓝藻水华信息识别方法. 湖泊科学, **20**(2): 179–183.

李国砚,张仲元,郑艳芬,等. 2008. MODIS 影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用. 湖泊科学, **20**(2): 160–166.

连 民,刘 颖,俞顺章. 2001. 氮、磷、Fe、锌对铜绿微囊藻生长及产毒的影响. 上海环境科学, **20**(4): 166.

刘 静,盛海君,徐轶群,等. 2009. Fe³⁺ 对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响. 环境科学与技术, **32**(1): 35–39.

刘 剋,黄家柱,张 强. 2005. 太湖水体藻类叶绿素浓度高光谱遥感监测研究. 南京师范大学学报(自然科学版), **28**: 97–101.

吕秀平,胡晗华,张 栩,等. 2005. Fe³⁺ 对浮游颤藻生长和光合作用的影响. 水生生物学报, **29**(3): 318–322.

疏小舟,尹 球,匡定波. 2000. 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, **4**(1): 41–46.

杨吉龙,李家存,杨德明. 2001. 高光谱分辨率遥感在植被监测中的应用综述. 世界地质, **20**(3): 307–313.

Curran PJ, dungan JL, Gholz HL. 1992. Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, **39**: 3–13.

Datt B. 1998. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b, and total carotenoid content in *Eucalyptus* leaves. *Remote Sensing of Environment*, **66**: 111–121.

Datt B. 1999. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: Tests using *Eucalyptus* leaves. *Journal of Plant Physiology*, **154**: 30–36.

Horler DHN, Dockray M, Barber J. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, **4**: 273–288.

Koppnen SM, Brezonik PL, Olmanson LG, *et al.* 2002. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, **82**: 38–47.

- Lee J, Park JH, Shin YS, *et al.* 2009. Effect of dissolved organic matter on the growth of algae, *Pseudokirchneriella subcapitata*, in Korean lakes: The importance of complexation reactions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **72**: 335–343.
- Liu S, Liu X, Hou J, *et al.* 2008. Study on the spectral response of *Brassica campestris* L. leaf to the copper pollution. *Science in China Series E: Technological Science*, **51**: 202–208.
- Miller JR, Hare EW, Wu J. 1990. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, **11**: 1755–1773.
- Moses AC, Skidmore AK. 2006. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*, **101**: 181–193.
- Pivokonsky M, Kloucek O, Pivokonska L. 2000. Evaluation of the production, composition and aluminum and iron complexation of algogenic organic matter. *Water Research*, **40**: 3045–3052.
- Rock BN, Hoshizaki T, Miller JR. 1988. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment*, **24**: 109–127.
- Rueter JG, Ades DR. 1987. The role of iron nutrition in photosynthesis and nitrogen assimilation in *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae). *Journal of Phycology*, **23**: 452–457.
- Sims DA, Gamon JA. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, **81**: 337–354.
- Yoder BJ, Waring RH. 1994. The normalized difference vegetation index of small Douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentrations. *Remote Sensing of Environment*, **49**: 81–91.
-
- 作者简介** 郑太辉, 1985年生, 男, 硕士研究生。主要从事植物光谱效应方面研究。E-mail: ztaihui@163.com
- 责任编辑** 李凤芹
-