

马文林,卫博,王思莹,等. 无机碳对铜绿微囊藻空间分布的影响研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):282-286.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.076

# 无机碳对铜绿微囊藻空间分布的影响研究

马文林,卫博,王思莹,张君枝

(北京应对气候变化研究和人才培养基地/城市雨水与水环境教育部重点实验室/北京建筑大学环境科学与工程系,北京 100044)

**摘要:**以研究不同无机碳浓度对铜绿微囊藻的垂直分布影响为目的,测定超富营养条件下不添加和添加 200、500 mg/L 无机碳浓度下 3 组试验柱内不同水深处铜绿微囊藻的藻密度、pH 值、叶绿素 a 含量、总氮(TN)浓度、总磷(TP)浓度的变化。结果表明,无机碳对藻的垂直分布有明显影响。与不添加系统相比较,添加 200 mg/L 无机碳,能够促进铜绿微囊藻的生长,而添加 500 mg/L 无机碳,反而抑制了藻的生长。总体情况都是上层长势最好,中层次之,下层最弱。叶绿素 a 含量、pH 值与藻密度有良好的相关性。TN、TP 浓度均随时间的增加而整体降低,但铜绿微囊藻生长对氮磷的利用,在垂直方向上表现出不同的规律趋势。

**关键词:**无机碳;铜绿微囊藻;垂直分布;富营养化

**中图分类号:**X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)24-0282-04

水体富营养化一直以来是我国湖泊治理的一大难题。城市里拥有的湖泊、景观水大多数都是浅水水体,大量藻类聚集在水体表面,既影响水质又影响城市美观。近年来,随着工业的发展,温室效应已经成为不争的事实。由于无机碳是藻类生长必须的元素,随着大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的升高,水中 CO<sub>2</sub> 和碳酸盐浓度会相应升高,势必会对藻类的生长产生影响。铜绿微囊藻是造成淡水水华的主要藻类<sup>[1]</sup>,其能产生微囊藻毒素污染水源,从而危害人类健康。由于其具有碳浓缩机制,能适应较低二氧化碳浓度环境,pH 值越高其生长优势越明显。且其具有上浮运动能力,当下层水体 CO<sub>2</sub> 浓度不足以满足其维持基础代谢所需的光合速率时,能上浮到表层水中,以获得更多的 CO<sub>2</sub> 用来光合作用,从而引发水华现象。因此,为了控制富营养化水藻在水体表面的泛滥生长,有必要研究水体不同垂直分层上的 CO<sub>2</sub>(碳酸盐)浓度和水藻的分布规律,探究碳源对藻类垂直分布的影响规律,明确营养盐的循环机制及限制浮游植物生长的生态因子。我国虽然有学者对藻类垂直分布做过研究,但大多集中在光照对藻类分布的影响上,无机碳对其影响研究非常少。

本试验以铜绿微囊藻为研究对象,以不同浓度碳酸氢钠溶液为试验环境,通过藻密度、叶绿素 a 含量、pH 值、碱度、总氮(TN)浓度、总磷(TP)浓度等指标来深入探讨无机碳对铜绿微囊藻垂直分布的影响和作用机理,以期揭示水中无机碳源对铜绿微囊藻生长特性影响提供理论基础,对控制地表水体富营养化起到借鉴作用,为修复富营养化水体提供理论参考。

收稿日期:2018-03-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(编号:51408022)。

作者简介:马文林(1968—),女,北京人,博士,教授,主要研究方向城市适应气候变化和水体富营养化修复研究。E-mail: mawenlin1130@126.com。

通信作者:卫博,硕士,主要从事城市适应气候变化和水体富营养化修复研究。E-mail: yjsweibo@126.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

取北京建筑大学大兴校区内的湖水作为试验用水,经检测,其 pH 值、总碱度、总氮浓度、总磷浓度和叶绿素 a 含量分别为 8.4、49.2 mg/L、1.43 mg/L、0.009 6 mg/L、12.6 μg/L。

试验用藻种为铜绿微囊藻,由中国环境科学研究院提供。

### 1.2 试验装置

本研究在实验室内的试验柱(图 1)中完成。试验柱的规格为高 160 cm、直径 60 cm、有 7 个出水口,从柱上端开始向下每 20 cm 处有 1 个出水口。试验柱上方安装 7 支 28 W 的日光灯,同时分别连接 7 个时间控制器,作为光照控制系统。通过人为控制来调节试验系统的光照度和照明时间。

### 1.3 接种

试验前向 2 根试验柱中各注入 150 L 湖水,通过向水中添加 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 调节水体的总磷浓度,使其浓度 ≥0.2 mg/L,同时添加 NaNO<sub>3</sub> 调节水体的总氮浓度,使其浓度 ≥2.0 mg/L,最终使试验体系的总氮、总磷均处于超富营养水平。根据王思莹等的试验成果<sup>[2]</sup>,在碱度为 2.46 mmol/L(NaHCO<sub>3</sub> 添加量为 200 mg/L)时,藻类生长情况最好,又由于实验室只有 2 根试验柱,因此本试验分 2 批进行,第 1 批试验以不添加 NaHCO<sub>3</sub> 溶液的试验柱为对照组(T<sub>200</sub>0 组),另外 1 根向其中添加 NaHCO<sub>3</sub> 溶液并使其浓度达到 200 mg/L 作为处理组(T<sub>200</sub>1 组);第 2 批试验仍以不添加 NaHCO<sub>3</sub> 溶液的试验柱为对照组(T<sub>500</sub>0 组),另外 1 根向其中添加 NaHCO<sub>3</sub> 溶液并使其浓度达到 500 mg/L 作为处理组(T<sub>500</sub>1 组)。铜绿微囊藻纯藻种经离心、洗涤处理后,定量接入各试验柱中。

### 1.4 培养

将接种好的 2 组试验柱在室温下培养,进行对比试验。本试验采用的光照度为 3 000 lx,光—暗周期为 12 h—12 h,将出水口 2、4、6 作为取样口,分别取得代表上、中、下 3 层水深中藻类分布情况的水样进行检测。

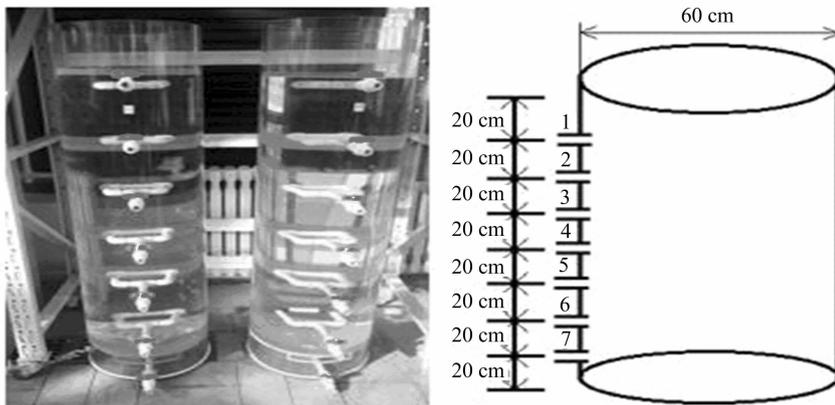


图1 试验柱构造示意

### 1.5 指标测定

在试验过程中每2 d采集水样测定试验体系中铜绿微囊藻的生物量,每2 d监测1次pH值、TN浓度、TP浓度和叶绿素a含量等指标,得到在不同无机碳浓度下水质变化和藻类生长情况,并且对各指标的变化曲线进行分析,以研究培养体系中无机碳浓度改变对藻类分布的影响规律。为了减少取样对水层分布的影响,按照依次从上到下的顺序采集水样,每个取样口每次的取样量约为110 mL。为弥补试验期间水量蒸发和取样带来的损失,每次采完水样之后都向各试验柱补充350 mL的蒸馏水。各指标测定方法见表1。

表1 水质测定方法

指标	方法
藻类生物量	血球计数板
pH值	酸度计
TP	钼锑抗分光光度法
TN	TOC 总有机碳(总氮)分析仪
叶绿素a	乙醇法

## 2 结果与分析

### 2.1 不同无机碳浓度对铜绿微囊藻垂直分布的影响

$T_{200}0$  和  $T_{500}0$  这2个批次试验,除试验时间不一样外,其他试验条件都相同。根据对  $T_{200}0$  和  $T_{500}0$  的生物量生长观测结果可知,2个试验柱中铜绿微囊藻的生长情况十分相近,故对2个试验柱的生物量生长等观测数据进行平均,作为本研究的空白对照( $T_0$ )。不同无机碳浓度条件下铜绿微囊藻生长的垂直分布如图2所示。通过比较  $T_0$  和  $T_{200}1$  试验柱的铜

绿微囊藻生长曲线可知,二者都在第2天开始有生长迹象,在第12天开始衰亡,且  $T_{200}1$  试验柱的最高生物量明显高于  $T_0$ ,表明200 mg/L的碱度水平对铜绿微囊藻生长有促进作用。而高碱度条件的  $T_{500}1$  试验柱在第4天才开始生长,且在第10天就开始衰亡,表明500 mg/L的碱度水平不利于铜绿微囊藻生长。

藻类生长有一个适宜的碳酸盐强度范围,在这个范围以内时,水中碳酸盐浓度增加,能够促进水藻生长,一旦高出这个范围,碳酸盐浓度进一步增加,高的碳酸盐离子强度显现的对藻类生长的抑制作用将超过其作为碳源的生长促进作用,表现为水藻生长受阻,藻类生长启动晚、衰亡快。李娜认为,培养基中  $\text{HCO}_3^-$  浓度升高会导致细胞内  $\text{HCO}_3^-$  离子的积累,对细胞结构及某些酶的活性产生影响,抑制细胞生长<sup>[3]</sup>,与本研究结果一致。

比较各组试验柱中藻类生长达最大藻密度时上、中、下3层的藻密度占比,结果如图3所示。从图中可以看出,随着水中无机碳浓度的增加,上层水藻密度所占比例减小,中下层所占比例整体增加。对照组上、中、下3层藻密度占比线性回归方程的斜率为-4.940,而  $T_{200}1$  和  $T_{500}1$  组的回归方程斜率分别增大为-4.245和-3.055,说明添加无机碳可以改变藻类垂直分布特性,促进藻类在中下层生长。

究其原因,是因为在氮、磷营养充足情况下,水藻大量繁殖,水中  $\text{CO}_2$  被快速消耗,碳源成为水藻生长的制约因素。而空气中的  $\text{CO}_2$  首先溶解到表层水体中,然后向下层水扩散,使得表层水中  $\text{CO}_2$  浓度高于中层和下层,从而出现上层藻密度高,向下藻密度降低的趋势。而当提高水中无机碳浓

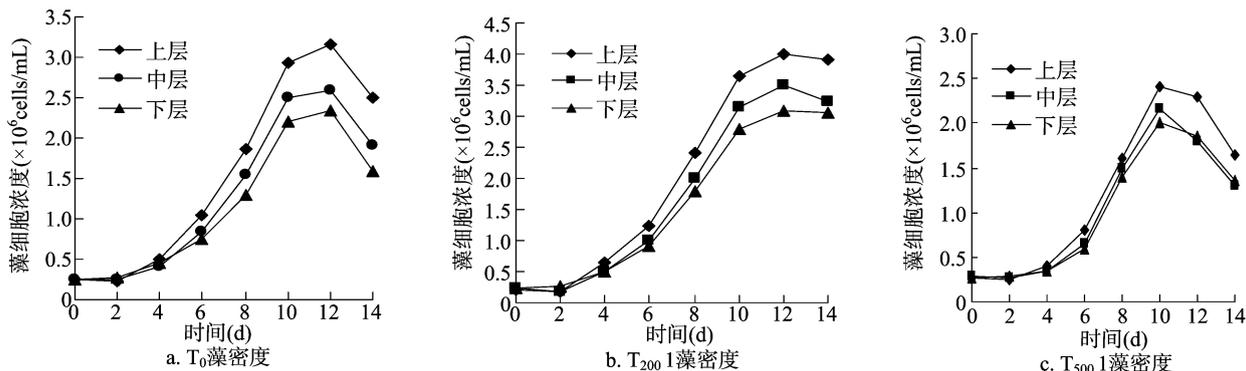


图2 无机碳浓度对不同水深处藻密度的影响

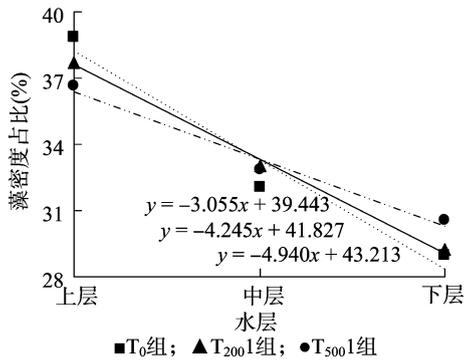


图3 不同水深处最大藻密度占比

度后,不同层之间的碳源强度及其对水藻生长制约性2个方面的差异都减弱,因此不同分层间的藻密度差异也减弱。

## 2.2 不同无机碳浓度对叶绿素a含量影响

根据试验观察,培养到第14天时, $T_0$ 、 $T_{500}$ 1试验柱中铜绿微囊藻开始出现发黄现象,而 $T_{200}$ 1试验柱这种现象不明显。结合图4及试验现象可知, $T_0$ 、 $T_{200}$ 1在第4天时进入对数期, $T_{500}$ 1在第12天进入衰亡期, $T_0$ 、 $T_{200}$ 1在14天开始衰

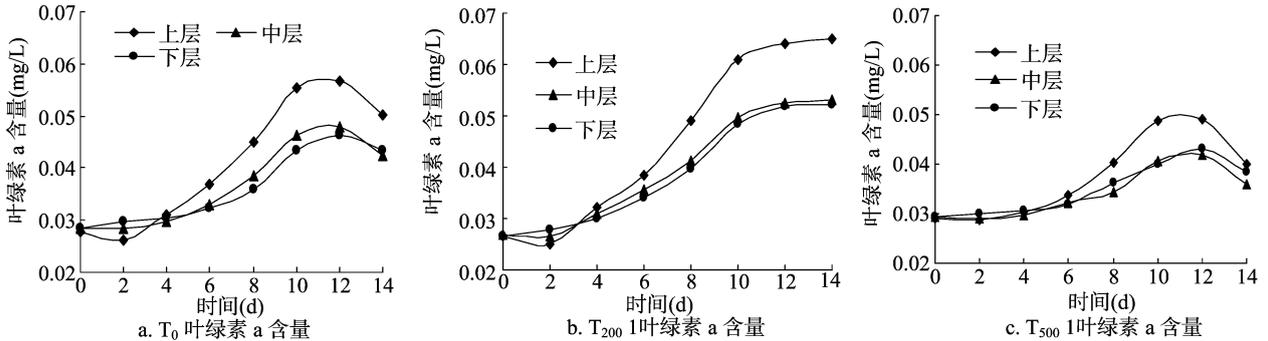


图4 无机碳对不同水深处叶绿素a含量的影响

## 2.3 不同无机碳浓度对水体pH值的影响

在添加不同浓度无机碳条件下,试验柱内不同水层的pH值随时间的变化情况如图5所示。试验初期,各组培养体系pH值由于添加 $\text{NaHCO}_3$ 的量不同而不同,添加 $\text{NaHCO}_3$ 越多的体系,其pH值整体越高。在不同无机碳浓度条件下,除 $T_{200}$ 1组上层pH值仍略有上升外,其余培养液pH值随时间都呈现先上升后下降的趋势,该结果与前人的研究结果<sup>[6]</sup>基本相似。在垂直层面上,各组各层面前12d的pH值均呈上升趋势。上层pH值上升最快,其最高点pH值也较中下层高。中下层最大pH值非常接近,在9.1左右。其变化规律与藻密度非常相似,均整体在第12天达到最大值。在第12天之后开始依次出现降低现象。铜绿微囊藻在对数生长期光合作用强烈,培养液中的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 被其吸收进行光合作用,使溶液pH值升高。在稳定和衰亡期光合作用减弱而呼吸作用增强,呼吸作用产生的 $\text{CO}_2$ 溶于水使培养液pH值降低。其平衡方程为 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ 。由于中下层光合作用较弱, $\text{CO}_2$ 吸收速率较低。说明pH值变化与光合效率有关,且水体高pH值有利于铜绿微囊藻生长<sup>[7]</sup>。

分别对 $T_0$ 组、 $T_{200}$ 1组、 $T_{500}$ 1组藻密度和pH值进行相关性分析,其线性相关系数分别为0.960 0、0.944 6、0.976 0,说明藻密度和pH值具有很好的正相关性。学者金香琴通过对

亡。在 $T_0$ 、 $T_{200}$ 1试验柱中,上层叶绿素含量在开始几天波动明显,先降低再升高。从曲线的走势来看,各组叶绿素a含量的变化与藻密度的变化(图2)趋势大体一致。3组叶绿素a含量从高到低的排列顺序整体为 $T_{200}$ 1 >  $T_0$  >  $T_{500}$ 1,表明在 $T_{200}$ 1最有利于藻类光合作用;各组叶绿素a含量分层情况整体表现为上层最高,中层次之,下层最低;且随着无机碳添加量的增加,3层叶绿素a含量间的差距逐渐缩小。

分别对 $T_0$ 、 $T_{200}$ 1、 $T_{500}$ 1组藻密度和叶绿素a含量相关性进行分析,各组的线性相关系数 $R^2$ 分别为0.995 7、0.997 2、0.958 7,可以看出,各浓度的藻密度和叶绿素a含量存在正相关性且相关系数均在0.9以上。学者傅鑫廷通过对长春湖南湖叶绿素a含量垂直分布研究同样得出,叶绿素a在上层水中含量较高,在下层水中含量较低,但藻类和叶绿素a含量的相关性较差<sup>[4]</sup>,分析原因可能是本试验有充足的碳源,且在室温下进行,而其在冰封条件下进行,影响了叶绿素a的形成。因此可用叶绿素a含量来表示藻类含量的高低,尤其在藻类爆发、藻类密度难以统计时<sup>[5]</sup>。

新立城水库叶绿素a的垂直分布研究同样得出,叶绿素a的垂直分布与pH值呈极显著正相关关系<sup>[7]</sup>,间接支持了本结论。培养液高pH值有利于微囊藻生长,微囊藻生长又使水体pH值进一步上升,形成一个恶性循环,使微囊藻爆发式生长。当pH值从高位下降时微囊藻生长也减弱。因此水体中pH值变化和微囊藻密度的变化是交互作用的结果,互为因果关系。

在蓝藻水华的发生条件中,pH值也是很重要的因素之一。陈建中等研究认为,铜绿微囊藻偏好较高pH值,但pH值超过9时铜绿微囊藻最终生长量有所下降<sup>[8]</sup>。在夏季,由于藻类大量生长,经常会出现水体碳源不足,pH值增大的情况。铜绿微囊藻往往不会受到此种条件的影响,是因为它相对于其他藻种,对无机碳有更高的亲和能力,能适应碱性水环境,所以在这种情况下,铜绿微囊藻成为了水环境中的优势藻种而大量增长<sup>[9]</sup>。

## 2.4 TN、TP浓度变化情况

由图6可知,无论是否添加无机碳,试验柱内各层的TN、TP浓度呈现类似的变化趋势,即随着培养时间的延长而整体下降。同时,藻生物量的增加量,与氮磷的吸收量呈正相关关系。将各培养组的TN、TP浓度变化情况(图6)与铜绿微囊藻生长曲线(图2)相比较,可以看出,在第4~10天,铜绿微囊藻生长速度快,各培养组TN、TP浓度普遍呈快速下降趋势,

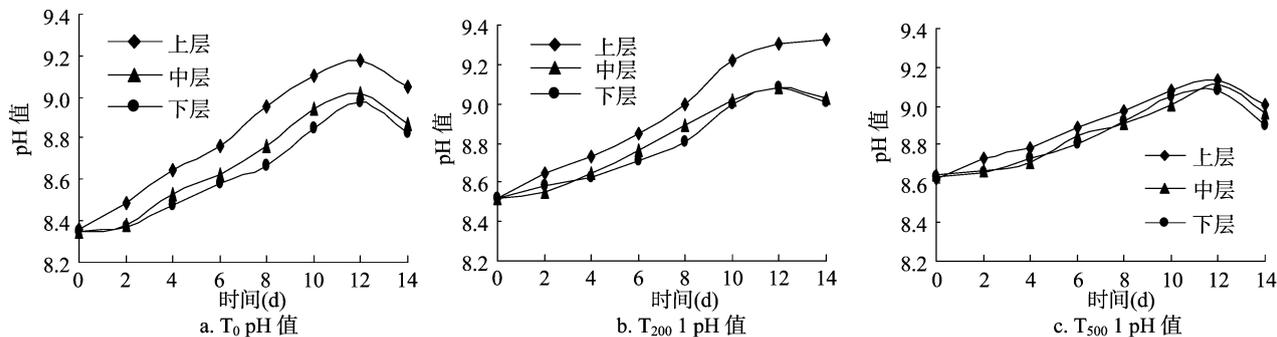


图5 不同深度水体的铜绿微囊藻 pH 值变化趋势

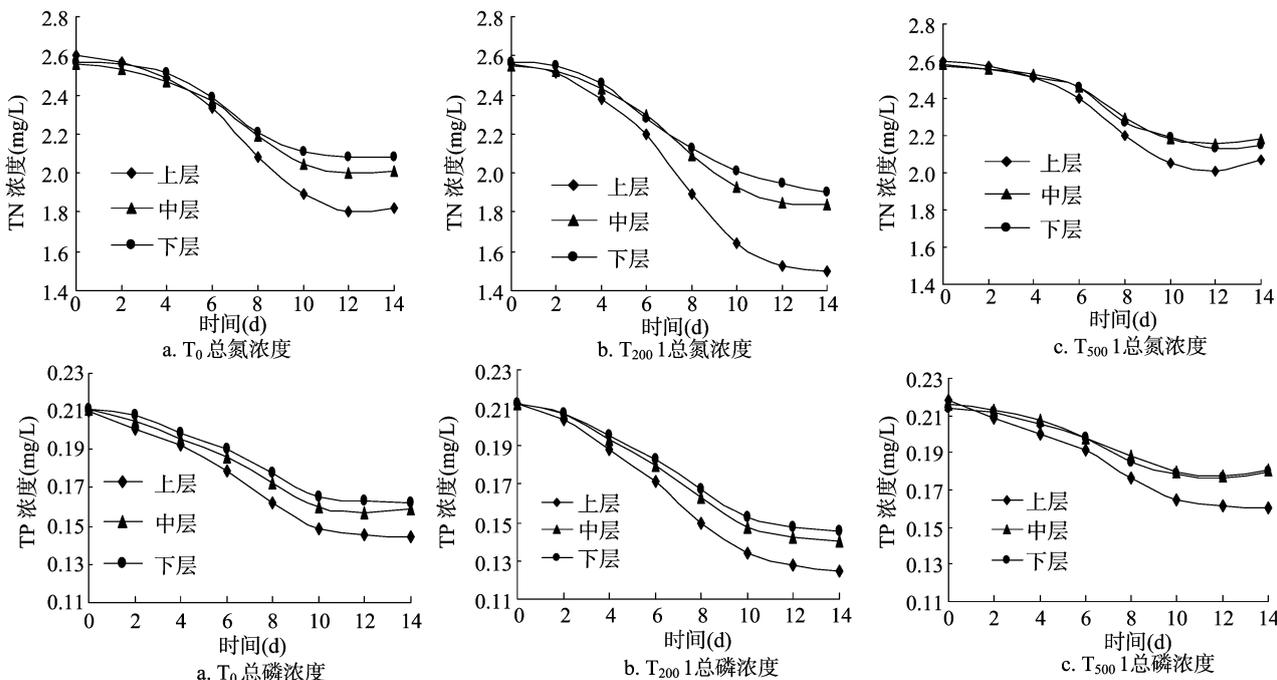


图6 不同水深处 TN、TP 浓度的变化

在第 12 天以后,铜绿微囊藻生长变缓,甚至其生物量出现下降现象,各组的 TN、TP 浓度趋于稳定或小幅回升。比较组间差别,第 12 天各组培养液中 TN 浓度的高低与其最高生物量呈负相关。从利用率上来看,上层由于光合作用强,各组对 TN、TP 的利用率都是最高的,但中下层却很接近。特别是  $T_{500}$  1 组,中、下 2 层的总氮浓度变化十分相似,且出现下层利用量超过中层的情况。

比较单位水藻生长对氮、磷的吸收情况(表 2)发现,随着无机碳浓度升高,水深变化对藻类利用氮、磷的影响不同。3 个试验组单位铜绿微囊藻对氮的利用均表现为上层明显高于中下层。对磷的利用,在对照组和  $T_{200}$  1 组,水深几乎不影响铜绿微囊藻对磷的利用;而在  $T_{500}$  1 组,出现了和氮利用相同的趋势,上层对磷的利用明显高于中下层;总体随着无机碳浓度升高,上层对磷的吸收量逐渐升高,而中、下层对磷的吸收量逐渐下降。由于未查阅到其他研究人员做过类似研究,在本研究中也未针对氮磷的这种变化进行机理研究,垂直分布上氮磷的这种变化规律的作用机理有待今后深入研究。

### 3 结论

铜绿微囊藻生长有一个适宜的碳源强度范围。200 mg/L

表 2 不同水层单位铜绿微囊藻对氮磷的吸收量

水层	$T_0$ (mg/10 <sup>6</sup> cell)		$T_{200}$ 1 (mg/10 <sup>6</sup> cell)		$T_{500}$ 1 (mg/10 <sup>6</sup> cell)	
	N	P	N	P	N	P
上层	0.254 0	0.020 6	0.257 5	0.021 0	0.245 8	0.023 8
中层	0.215 4	0.020 8	0.200 0	0.020 0	0.195 3	0.017 7
下层	0.285 0	0.020 9	0.200 0	0.020 6	0.220 0	0.019 0

无机碳浓度是该藻适宜的生长条件,3 个试验组单位铜绿微囊藻生长旺盛。过高无机碳浓度(500 mg/L),超出其生长适宜范围,将会对 3 个试验组单位铜绿微囊藻生长产生抑制。提高水中无机碳浓度,3 个试验组单位铜绿微囊藻垂直分布比例差异减小,促进 3 个试验组单位铜绿微囊藻在中下层水中的生长。

在水中氮磷充足的情况下,水藻生长导致的总氮、总磷浓度变化趋势相似。上层对氮磷的利用率均高于中下层,但中下层为了光适应会增加对磷的吸收。

在高无机碳浓度条件下,铜绿微囊藻的垂直分布比例更加接近。本研究可为人们提供一种新思路,治理富营养化水体时,可通过向水体中添加可分解底泥中有机质的益生菌,提高水中碳源浓度,满足下层水藻对 CO<sub>2</sub> 的需求,消除表层水

姜海玲,张立福,郑世欣,等. 基于通用光谱模式分解(UPDM)算法的光谱指数一致性研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):286-290.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.077

# 基于通用光谱模式分解(UPDM)算法的光谱指数一致性研究

姜海玲<sup>1,2</sup>, 张立福<sup>2</sup>, 郑世欣<sup>1</sup>, 王欣玉<sup>1</sup>, 苏姣姣<sup>1</sup>, 社会石<sup>1</sup>

(1. 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 吉林四平 136000;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所/遥感科学国家重点实验室/高光谱遥感应用研究室, 北京 100101)

**摘要:** 由于传感器之间的光谱尺度差异和空间分辨率、成像几何、大气校正精度等因素的共同影响,不同传感器下光谱指数的一致性会受到不同程度的影响。研究选取了 HJ 和 MODIS 卫星遥感数据,通过通用光谱模式分解(universal pattern decomposition method,简称 UPDM)算法将卫星 HJ1A-CCD2(简称 HJ)数据进行光谱重构,从而模拟生成对应的 MODIS 数据,然后分析光谱指数在原始 HJ、原始 MODIS 和模拟 MODIS 数据之间的差异大小,探讨 UPDM 算法在不同程度上减小了光谱尺度引起的光谱指数的不确定性,即提高了其一致性。研究结果表明:针对模拟 MODIS 和原始 MODIS 数据,光谱指数的确定系数平均值为 0.460 3,差值平均值为 0.811 6,与原始 HJ 和原始 MODIS 相比较,一致性有所提高并且差异性变小,减小的差异性即看作是光谱尺度对光谱指数的影响,因此可判断 UPDM 算法削弱了光谱指数的光谱尺度不确定性,即提高了不同传感器间光谱指数的一致性。研究可为植被理化参量高光谱定量反演模型的构建及精度的提高提供一定的理论基础。

**关键词:** 光谱指数;通用光谱模式分解;一致性;MODIS 卫星;HJ 卫星

**中图分类号:** P237;S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)24-0286-05

植被遥感中,光谱指数一直被看作是监测或评价植被生长发育状况的有效指标,因此在植被理化参量反演中,光谱指数的一致性也自然成为备受关注的问题<sup>[1-3]</sup>。针对不同传感器,光谱指数存在一定的差异性,这种差异是由光谱通道设置、传感器空间分辨率、成像条件等多种因素共同造成的<sup>[2-5]</sup>。针对如何剔除其他因素的影响,研究光谱尺度对光谱指数一致性的影响及弱化光谱指数的光谱尺度不确定性,引入一种多/高光谱数据分析方法——通用光谱模式分解

(universal pattern decomposition method,简称 UPDM)算法。利用基于 UPDM 的光谱重构算法将 UPDM 空间与卫星传感器空间进行转换<sup>[1,6]</sup>,消除不同传感器之间光谱指数本身的不确定性<sup>[6-7]</sup>,并计算光谱尺度引起的差异占传感器总体差异的比例,对光谱指数一致性研究具有重要的意义。

## 1 通用模式分解 UPDM 算法

UPDM 通用光谱模式分解算法是由 Zhang 等提出的一种与传感器无关的多/高光谱遥感数据的分析方法,最早被应用于陆地卫星(landsat)的多光谱扫描仪(MSS)和专题成像仪(TM)的数据分析中<sup>[8-9]</sup>。4 参数 UPDM 将遥感数据每个像元的光谱反射率值(亮度值)分解为标准水体、植被、土壤和附加标准模式的线性组合,附加模式一般选择的是介于植被绿叶和枯叶之间的黄叶<sup>[10]</sup>。用公式表达为

$$R_i \rightarrow C_w \cdot P_{iw}(i) + C_v \cdot P_{iv} + C_s \cdot P_{is} + C_4 \cdot P_{i4} + r_i \quad (1)$$

收稿日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金(编号:41701424);遥感科学国家重点实验室开放研究基金(编号:OFSLRSS201716);吉林省教育厅项目[编号:吉教科文合字(2016)第 172 号];吉林省四平市科技发展规划(编号:2016059)。

作者简介:姜海玲(1986—),女,吉林敦化人,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为高光谱遥感基础理论及应用。E-mail: hai.ling.1986@163.com。

体藻类大量生长的情况,避免水华的出现。

## 参考文献:

- [1] 孙晓庆,董树刚. 藻类的生理生态学研究进展[J]. 海洋湖沼通报,2007(增刊1):195-206.
- [2] 王思莹,张君枝,马文林. 超富营养水平下初始碱度对铜绿微囊藻生长影响的研究[J]. 绿色科技,2015(2):203-206.
- [3] 李娜. CO<sub>2</sub>浓度与铜绿微囊藻生长关系的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:20-21.
- [4] 傅鑫廷. 低温及冰封条件下富营养化水体藻类分布规律研究[D]. 长春:吉林大学,2009:18-19.

- [5] 张如美,孙晓斌. 对叶绿素 a 测定方法的改进[J]. 环境监测管理与技术,2002,14(2):31.
- [6] 吴剑,孔倩,杨柳燕,等. 铜绿微囊藻生长对培养液 pH 值和氮转化的影响[J]. 湖泊科学,2009,21(1):123-127.
- [7] 金香琴. 长春地区不同湖泊(水库)叶绿素 a 垂直分布特征研究[D]. 长春:东北师范大学,2006:14-15.
- [8] 陈建中,刘志礼,李晓明,等. 温度、pH 和氮、磷含量对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的影响[J]. 海洋与湖沼,2010,41(5):714-718.
- [9] 胡传林,万成炎,吴生桂,等. 蓝藻水华的成因及其生态控制进展[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(12):1471-1477.