

# Effects of Cyanobacteria Growth on Cd Morphology in Sediments

Jianhua Zhang<sup>1</sup>, Xuqing Chen<sup>2</sup>, Hanqi Wu<sup>3</sup>, Cunhao Du<sup>3</sup>, Jiahui Shi<sup>3</sup>, Lixiao Ni<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Provincial Bureau of Water Resources, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Wuxi Algae Treatment Office, Wuxi Jiangsu

<sup>3</sup>Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Email: \*nilixiao@hhu.edu.cn

Received: Aug. 2<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Aug. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Aug. 27<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

With the rising global climate and the increasing eutrophication of lakes, pollutants are continuously exchanged among sediments, interstitial water and aquatic organisms. The geochemical behavior of heavy metal pollutants between these three phases has a very important impact on water environment and ecological security. The morphological changes of heavy metal Cd in Taihu Lake sediments during cyanobacterial blooms were studied. It was found that the growth of *Microcystis aeruginosa* changed the redox potential environment in sediments of different depths, increased the diffusion rate of Cd from sediment to water system, and increased the release of reducible and acid-soluble Cd in sediments.

## Keywords

Sediment, *Microcystis aeruginosa*, Cadmium

# 蓝藻生长对沉积物中Cd形态变化影响

张建华<sup>1</sup>, 陈旭清<sup>2</sup>, 武晗琪<sup>3</sup>, 杜存浩<sup>3</sup>, 石佳惠<sup>3</sup>, 倪利晓<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>江苏省水资源服务中心, 江苏 南京

<sup>2</sup>无锡市蓝藻治理办公室, 江苏 无锡

<sup>3</sup>河海大学环境学院, 教育部浅水湖泊重点实验室, 江苏 南京

Email: \*nilixiao@hhu.edu.cn

收稿日期: 2019年8月2日; 录用日期: 2019年8月20日; 发布日期: 2019年8月27日

\*通讯作者。

文章引用: 张建华, 陈旭清, 武晗琪, 杜存浩, 石佳惠, 倪利晓. 蓝藻生长对沉积物中 Cd 形态变化影响[J]. 环境保护前沿, 2019, 9(4): 566-574. DOI: 10.12677/aep.2019.94078

## 摘要

随着全球气候不断上升,湖泊富营养化状态不断加剧,污染物质在沉积物,间隙水以及水生生物三相之间进行着不间断的交换,重金属污染物在这三相之间的地球化学行为对水环境和生态安全都有着极为重要的影响。本文研究了蓝藻水华爆发时太湖沉积物中重金属Cd的形态变化。研究发现铜绿微囊藻的生长改变了不同深度沉积物中的氧化还原电位,提高了Cd从沉积物内部向水体中扩散的速率,加大了沉积物中可还原态以及酸溶态Cd的释放。

## 关键词

沉积物, 铜绿微囊藻, Cd

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

作为水生生态系统的重要组成部分,发挥着沉积物重金属的地球化学循环中起重要作用。因为沉积物经常包含有机和无机矿物胶体,它们可以有效地吸附重金属。同时,在环境条件例如水流动扰动和厌氧的发生,重金属会重新进入水体,造成二次污染[1]。泥沙对湖泊的各种物质储存的地方,也是湖泊能量流动和物质循环的重要场所。不仅如此,沉淀物是主要的生活场所,底栖生物的食物来源,它们的污染物不仅会造成环境污染,甚至会造成生物死亡。因此,研究湖泊沉积物中重金属含量及其潜在生态风险,对正确评估湖泊生态环境质量及区域自然环境安全具有重要意义。

蓝藻在世界上分布最广,即便是在极端环境下,仍能够生存,具有强抗逆性。蓝藻是唯一的原核生物藻类,由于其细胞结构与光合细菌相似,又被称为蓝藻。因为生理生化的特性有所差异,蓝藻与其他藻类的吸附效果有所不同。目前,有多种重金属的蓝藻吸附研究。生物对重金属的选择性吸附和吸附效率很大程度上取决于其细胞壁的性质。藻类有多种吸附重金属的方式。一方面,藻类细胞壁带负电,具有较大的面积和粘性,粘度是由酸性粘多糖或果胶引起的,其能够吸附小颗粒和金属离子。另一方面,许多与金属离子结合的官能团(羟基、羧基、氨基、酰胺、磷酸等)都由细胞壁可以提供。同时,蓝藻还可以通过将金属离子与外多糖络合来降低重金属对藻类的毒性[2]。Jian-Zhong Chen [3]等研究了固定化的铜绿微囊藻在吸附柱中对重金属铅、镉、汞离子的吸附潜力,显示了高的去除率:对铬和汞的去除率达到90%,对铅的去除率达到80%,这项研究的结果表明微囊藻是一个潜在的吸附剂材料作为去除污染物中重金属在解决方案。在国内林荣根[4]首先运用缸式及柱式吸附方法研究了两种大型褐藻对溶液中Cu和Cd的吸附能力,以探索生物吸附法去除工业废水中重金属的可行性。陶梅平[5]的研究表明活藻对重金属也有较强的吸附能力。陈镜伊等[6]的研究表明蓝藻在生长期和复氧期可以有效降低沉积物中Cd的含量。

目前,对湖泊系统沉积物-水界面的污染物迁移转化国内外开展了广泛的研究,归纳起来主要集中于:吸附解吸动力学、营养元素的赋存形态、界面结构与特征、环境因子影响等方面。都是基于两相之间的研究,很少考虑到生物相的作用。在湖泊系统中,水华蓝藻随着环境的变化有其独特的生理过程,与此同时藻的生长变化也能对环境有所影响。藻在不同季节的生长过程中,微囊藻的活性变化很小,表

明微囊藻细胞在不同生理生长期都具备富集、携带污染物的能力。水华蓝藻爆发迁移过程必然对湖泊系统中重金属的迁移和形态变化造成影响。

因此, 本文对藻的生长过程对沉积物中重金属 Cd 的形态变化进行研究, 以期得到认识水华条件下 Cd 元素在水-沉积物-铜绿微囊藻迁移转化规律提供科学依据, 为重金属污染治理提供指导。

## 2. 实验材料与方法

### 2.1. 实验仪器及试剂

本实验主要使用以下仪器, 如表 1:

Table 1. Main experimental instrument

表 1. 实验主要仪器

仪器名称	型号
多参数水质仪	DZB-701
离心机	TOL-60B
火焰/石墨炉原子吸收仪	ZEE nit700
分光光度计	UV-2500
光照培养箱	GXZ-450A
灭菌锅	LDZX

重金属分析用试剂均为优级纯。溶液配制所用水均为去离子水, 玻璃、塑料瓶等器皿均在 10%稀盐酸溶液浸泡 48 h 后用去离子水反复冲洗烘干后使用。

### 2.2. 实验材料

#### 2.2.1. 沉积物采集及预处理

实验所用沉积物是于春、夏两季分别采自太湖梅梁湾。利用抓斗采泥器在 4 m<sup>2</sup> 区域内采集表层(0~10 cm)的沉积物约 30 L。沉积物采集后过 1 mm 筛, 冷藏保存, 在使用前于-20℃下保存一周。采集的水样过 0.45 μm 滤膜, 去除浮游植物, 冷藏保存。

#### 2.2.2. 铜绿微囊藻的培养

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB 905)在使用前培养到对数级, 购自中国科学院淡水藻类种子库。铜绿微囊藻的培养条件为: 光强 45 至 60 lx, 暗为 14:10, 温度为 25℃, 一天摇多次。培养基采用 BG-11 培养液。培养液成分见表 2 和表 3。

### 2.3. 实验方法

如图 1 所示, 实验在圆柱形有机玻璃柱(内径 8 cm; 高 55 cm)中进行, 另外制作一托盘杯(外径 8 cm; 高 12 cm)能刚好嵌入有机玻璃柱中。实验开始时在玻璃杯中添加沉积物至 10 cm 高处, 将杯体放入柱中后虹吸法小心加入 1.8 L BG-11 培养基, 土水比设置为 1:4。加入对数期藻液, 加入量使水柱中初始光密度(OD<sub>680</sub>)为 0.05, 另设若干对

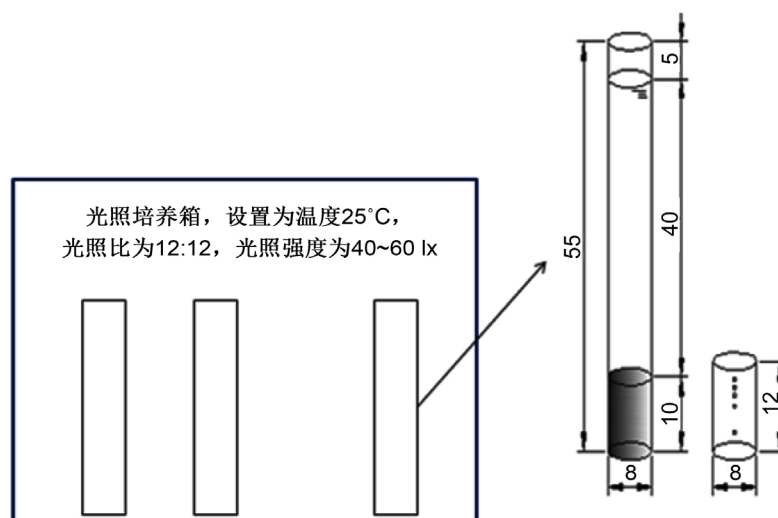
照组不添加藻液。将有机玻璃柱置于光照培养箱中培养, 培养箱条件设置为: 光照强度为 40~60 lx, 光暗比为 14:10, 温度 25℃, 实验周期 21 天。

**Table 2.** Preparation of BG-11 medium stock solutions  
**表 2.** BG-11 培养液的配制

瓶号	药品名	培养液(g/L)	母液(g/L)	配 1000 mL 培养液所需母液体积(mL)
1	NaNO <sub>3</sub>	1.5	150	10
2	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.04	4	10
3	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.075	7.5	10
4	柠檬酸	0.006	0.6	10
5	柠檬酸铁	0.006	0.6	10
6	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.02	2	10
7	Na <sub>2</sub> EDTA	0.001	0.1	10
8	CaCl <sub>2</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.036	18	2
9	A5 培养液	-	-	1

**Table 3.** Preparation of A5 stock solutions  
**表 3.** A5 培养液的配制

药品名	培养液(g/L)	母液(g/L)
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	$1.86 \times 10^{-3}$	1.86
ZnSO <sub>4</sub>	$2.22 \times 10^{-4}$	0.222
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	$3.9 \times 10^{-4}$	0.39
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	$2.86 \times 10^{-3}$	2.86
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	$7.9 \times 10^{-5}$	0.079
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	$4.94 \times 10^{-5}$	0.0494



**Figure 1.** Experimental units (cm)  
**图 1.** 实验装置图(图中长度单位为: cm)

#### 2.4. 实验指标及测定方法

沉积物中重金属 Cd 总量的测定: 利用三酸消解法消解, 石墨炉原子吸收分光光度计测定沉积物 Cd

总量。

沉积物中重金属 Cd 形态测定：采用 BCR 连续提取法对沉积物中重金属形态进行了分析[7]。形态分为水溶态、可交换态和碳酸盐结合态(B1)、铁锰氧化物结合态(B2)、有机/硫化物结合态(B3)和残余态(B4)。使用石墨炉原子吸收分光光度计测定各形态含量。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 沉积物中 Cd 的含量和形态

沉积物采集时上覆水温度为 20.5℃，pH 值为 8.16，DO 为 5.81 mg·L<sup>-1</sup>，上覆水 Cd 质量浓度为 0.065 μg·L<sup>-1</sup>，叶绿素 a 为 65.24 mg·m<sup>-3</sup>。实验开始时沉积物 Cd 的背景含量 2.54 mg·kg<sup>-1</sup>，含水率约为 65%。Cd 的各种形态含量列于表 4。酸溶态(B1)含量为 0.64208 mg·kg<sup>-1</sup>、可还原态(B2)含量为 0.56967 mg·kg<sup>-1</sup>、可氧化态(B3) 0.54643 mg·kg<sup>-1</sup> 及残渣态含量为 0.7849 mg·kg<sup>-1</sup>。分别占总量的 25.25%、22.40%、21.49%、30.86%。残渣态 Cd 在沉积物中含量最高，有机和硫化物结合态、碳酸盐结合态及铁锰氧化物结合态 Cd 含量相差无几。

Table 4. Results analysis on the fraction of cadmium

表 4. 沉积物中 Cd 的形态分析结果

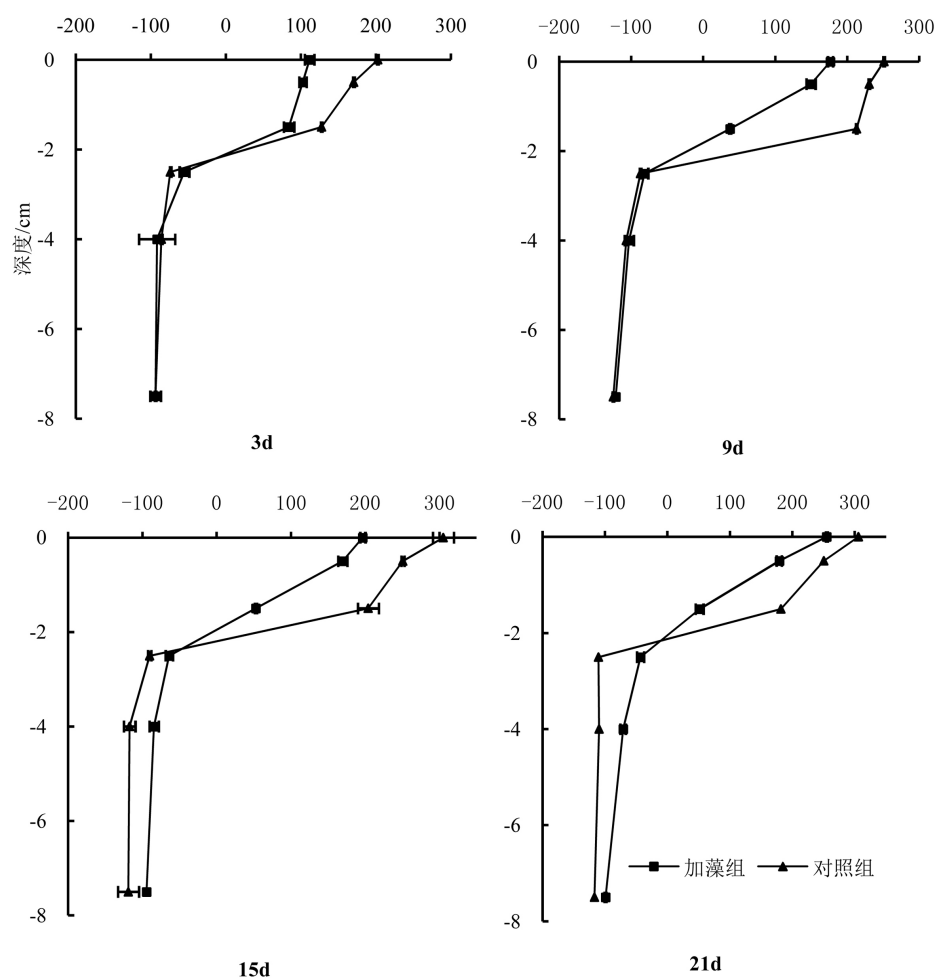
形态	含量/mg·kg <sup>-1</sup>	比例
B1	0.64208	25.25%
B2	0.56967	22.40%
B3	0.54643	21.49%
残渣态	0.7849	30.86%

(B1: 酸溶态, B2: 可还原态, B3: 可氧化态)。

#### 3.2. 铜绿微囊藻生长对沉积物氧化还原电位的影响

水深 0 处(此处氧化还原电位即上覆水氧化还原电位)定义为水 - 沉积物界面处，在实验开始时，沉积物氧化还原电位是相同的，不同深度沉积物氧化还原电位变化如图 2 所示。加藻组和对照组的上覆水氧化还原电随时间均呈上升趋势，最大值分别为：255 mv、305.5 mv。加藻组的上覆水氧化还原电位在实验周期内都低于对照组，最大差值出现在第 15 天，差值为 105 mv，对照组上覆水氧化还原电位变化不是太大。在 0~2 cm 深度区间两组沉积物氧化还原电位都随时间呈上升趋势，0~1 cm 区间加藻组和对照组最大值分别为：179 mv、255 mv，最大差值为 81 mv，1~2 cm 区间最大差值为 82 mv。以上两个区间加藻组氧化还原电位均小于对照组。加藻组都处于弱还原状态而对照组都处于弱氧化状态。在 0~3 cm 深度区间两组都表现出氧化还原电位随深度增加而减小的趋势，3 cm 深度以下区间氧化还原电位随沉积物深度变化不大。但两组之间的同深度差值随时间变化略有增大。

水环境中氧化还原电位控制因素有很多，上覆水中 pH 值、溶解氧浓度、和沉积物中硫化物和有机质含量和微生物活动都能够影响沉积物氧化还原电位的变化[8]。水柱中溶解氧浓度和 pH 值的变化必然会引起上覆水氧化还原电位的改变。研究表明，水中的溶解氧浓度与氧化还原电位有关，溶解氧浓度升高，氧化还原电位也会随之升高，pH 值越低也能够导致氧化还原电位升高[9]。在本实验中加藻组上覆水氧化还原电位低于对照组上覆水氧化还原电位，可能是由于加藻组 pH 值较高的影响，且实验表明，pH 值对氧化还原势的影响大于溶解氧，同时由于藻类的生长抑制了水体其他微生物的生长，这就导致了水体中氧化还原电位的差异。沉积物中的氧化还原电位主要受到沉积物中的微生物的多少和代谢活动强弱



**Figure 2.** Vertical profiles of ORP of sediment in different layers for two experimental treatments (The negative number in the figure indicates the depth of the sediment)

**图 2.** 不同时间不同深度沉积物氧化还原电位(图中负数表示沉积物深度)

的影响, 有机质可以为微生物活动提供碳源和代谢活动的电子接受体从而加强微生物的活动[10]。加藻组沉积物由于藻类生长死亡下沉等原因有机质含量高, 微生物活性的增加降低了氧化还原电位, 改变沉积物中氧化还原条件能够作用沉积物-水界面的重金属释放[11]。

### 3.3. 铜绿微囊藻的生长对沉积物中 Cd 形态的影响

实验结束后测定了表层沉积物 Cd 各形态的变化, 结果如图 3 所示。实验结束后与初始沉积物相比, 空白组和加藻组表层沉积物总 Cd 质量均有所下降, 分别为初始值的 88.6%、83.8%。Cd 的主要结合形态, 酸溶态、可还原态、可氧化态均受到较大影响。残渣态 Cd 质量浓度最高且变化较小, 空白组、加藻组分别为初始值的 95.5%、94.3%。酸溶态空白组、加藻组分别为初始值的 82.9%、75.1%, 可还原态空白组、加藻组分别为初始值的 90.4%、73.7%, 可氧化态空白组、加藻组分别为初始值的 82.9%、87.7%。加藻组与空白组相比, 酸溶态和可还原态 Cd 加藻组均比空白组减少较多, 说明铜绿微囊藻对这两种形态 Cd 影响较大。

由图 4 可知本实验材料沉积物中酸溶态 Cd 最易释放, 该形态释放量最多。加藻组可还原态释放量大于对照组, 这是由于藻类生长给沉积物创造了一个还原环境。可氧化态释放量对照组大于加藻组, 一方

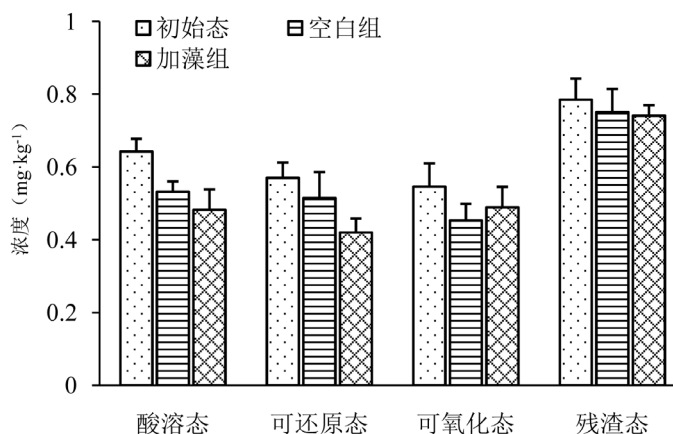


Figure 3. Cadmium concentrations of cadmium fractions after exposure time

图 3. 实验结束沉积物 Cd 各形态含量

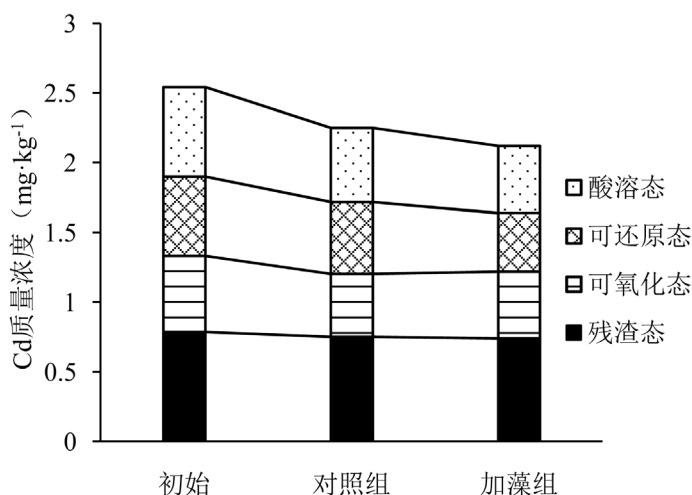


Figure 4. The forms of Cd at the end of the experiment

图 4. 实验结束 Cd 形态

面因为对照组处于弱的氧化环境，另外一方面加藻组沉积物中有机物增多，加大了有机物结合的 Cd 的释放。沉积物中残渣态 Cd 含量高难于释放，加藻组残渣态 Cd 释放量大于对照组，可能是由于结合在晶格的金属被藻吸附带出沉积物。

在水生态系统中藻类生长可以改变上覆水及沉积物环境条件影响重金属迁移，另外一个方面藻类可以对重金属进行吸附富集，影响重金属在界面的交换通量。本实验中加藻组上覆水 pH、沉积物氧化还原电位均不同与对照组，加藻组 pH 呈碱性，对照组 pH 为中性；加藻组沉积物呈还原态而对照组呈弱氧化态。在藻类的生长和死亡过程能够产生大量有机质，为微生物提供碳源，以改变系统的微生物活性和结构，这些都对沉积物金属的释放作用产生一个复杂的耦合效应。因此藻类生长对重金属在水环境体系的迁移产生重要影响。

### 3.4. Cd 在沉积物 - 水界面的迁移机制

由图 5 和图 6 可知铜绿微囊藻对上覆水镉形态影响明显。在本实验中加藻组上覆水溶解性 Cd 质量浓度大约为总 Cd 质量浓度的 30%，对照组上覆水 Cd 浓度基本上都是溶解性 Cd。藻积累的 Cd 后可以向更

高级生物链转移, 增加 Cd 的毒性危险。富集重金属的水华蓝藻可以随着水流发生漂移至另外一个区域, 导致重金属发生迁移影响环境安全。

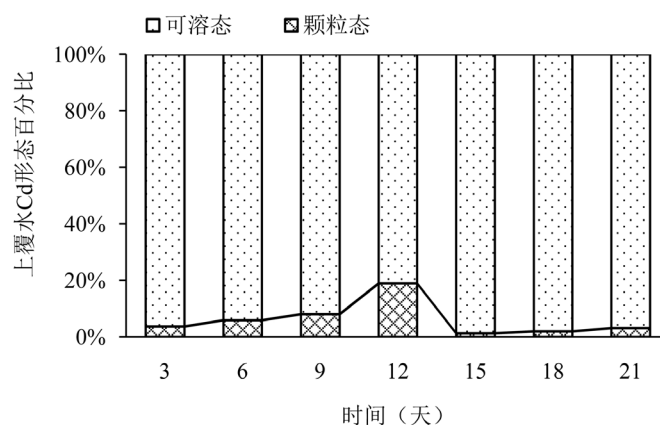


Figure 5. The fraction of cadmium in the over water of control group  
图 5. 对照组不同时间上覆水 Cd 形态百分比

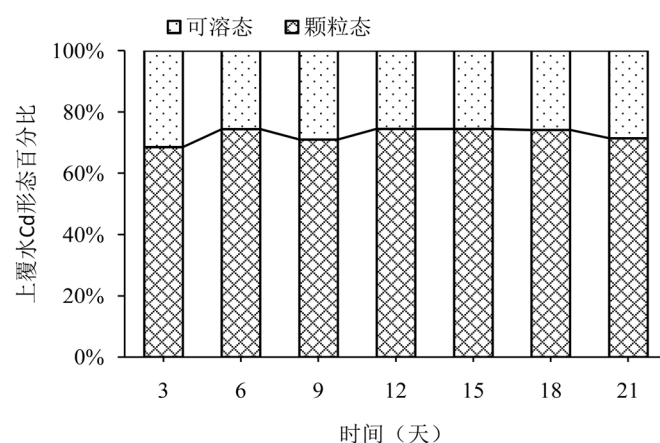


Figure 6. The fraction of cadmium in the over water of algae group  
图 6. 加藻组不同时间上覆水 Cd 形态百分比

#### 4. 结论

根据上述结果分析得出以下结论:

1) 蓝藻水华爆发生长及死亡过程都对沉积物中 Cd 含量及形态产生重大影响, 不同深度沉积物中的氧化还原电位环境受到铜绿微囊藻的生长的影响, 氧化还原电位环境改变增加了 Cd 从沉积物内部向水系扩散的速率, 增加了沉积物中还原性和酸溶性 Cd 的释放。

2) 蓝藻对重金属的吸附能力强于普通藻类, 蓝藻的细胞壁与植物的细胞壁不同, 它的主要成分是肽聚糖, 其可以络合大量的金属离子。重金属离子也可以被蓝藻分泌的胞外物质吸附络合。藻体死亡后同样能吸附大量的重金属。在自然条件下, 蓝藻吸附的重金属很难再次释放出来。

#### 基金项目

国家自然科学基金(No. 51779079), 江苏省自然科学基金(No. BK20181313), 江苏省水利科技项目(2018037)。



## 参考文献

- [1] 姜会敏, 郑显鹏, 李文. 中国主要湖泊重金属来源及生态风险评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 108-112.
- [2] 陈思嘉, 郑文杰, 杨芳. 蓝藻对重金属的生物吸附研究进展[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(4): 103-106.
- [3] Chen, J.-Z., Tao, X.-C., Xu, J., et al. (2005) Biosorption of Lead, Cadmium and Mercury by Immobilized *Microcystis aeruginosa* in a Column. *Process Biochemistry*, **40**, 3675-3679. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.03.066>
- [4] 林荣根, 黄朋林, 周俊良. 两种褐藻对铜和镉的吸着及洗脱研究[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(4): 8-13.
- [5] 陶梅平. 活性藻类吸附重金属的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [6] 陈镜伊, 唐婉莹, 尹洪斌, 等. 蓝藻的消长过程对镉污染沉积物的生物有效性[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 328-332.
- [7] 江江, 李玉成, 王宁, 等. 巢湖蓝藻聚集对重金属迁移释放的影响[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3): 558-566.
- [8] 吴金浩, 刘桂英, 王年斌, 等. 辽东湾北部海域表层沉积物氧化还原电位及其主要影响因素[J]. 沉积学报, 2012(2): 333-339.
- [9] 刘德福. 氧化还原电位、pH 值与水体自净能力的关系[J]. 上海环境科学, 1985(2): 22-23.
- [10] 王江涛, 齐红菊, 李宁, 等. 青岛及周边海区沉积物的氧化还原环境[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009(S1): 184-188.
- [11] Miao, S., Delaune, R. and Jugsujinda, A. (2006) Influence of Sediment Redox Conditions on Release/Solubility of Metals and Nutrients in a Louisiana Mississippi River Deltaic Plain Freshwater Lake. *Science of the Total Environment*, **371**, 334-343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.07.027>

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)