

水华蓝藻胞外聚合物 作用及效应

徐华成 江和龙 著



科学出版社

水华蓝藻胞外聚合物作用及效应

徐华成 江和龙 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部介绍水华蓝藻胞外聚合物(EPS)作用及效应的专著。全书共分7章,内容包括水华蓝藻EPS的时空分布特征及其提取操作优化,基于三维荧光-平行因子分析的水华蓝藻EPS组分分析方法及其与蓝藻生物量的相关性,EPS在环境条件下的光及微生物降解、行为特征,基于表面热力学和扩展DLVO理论解析的EPS对水华形成的定量机理解析,EPS中荧光和非荧光物质与金属污染物的络合特征和机理,EPS与胶体颗粒的表面作用特征以及EPS和环境因子对胶体颗粒分散/团聚行为的影响及机理等。本书对认识水华蓝藻胞外聚合物作用及效应具有重要的价值,可加深对湖泊蓝藻水华成因及污染物循环过程的理解,同时对湖泊环境治理及科学预测并有效预防水华发生也具有重要指导意义。

本书可供湖泊学、生态学、环境科学与工程、生物地球化学和水环境管理等相关领域的研究人员和管理人员、高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水华蓝藻胞外聚合物作用及效应 / 徐华成, 江和龙著. —北京: 科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-058925-5

I. ①水… II. ①徐… ②江… III. ①蓝藻纲-藻类水华-研究 IV. ①Q949.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第218225号

责任编辑: 李涪汁 沈 旭 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年10月第一次印刷 印张: 8 3/4

字数: 180 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

蓝藻水华是指水体中蓝藻快速大量繁殖形成肉眼可见的蓝藻群体，且在水面漂浮积聚形成绿色藻席甚至藻浆的一种现象。蓝藻水华可降低水体透明度、减少水体植物多样性、导致湖泊生态灾害、危害人体健康等。蓝藻生长和水华形成主要受外界环境因子如温度、营养盐、pH、光照及水力学条件影响，近年来关于胞外有机质对水华蓝藻形成的促进作用逐渐受到研究者关注。胞外聚合物（EPS）是蓝藻细胞在其生长繁殖过程中产生的一种黏性生物大分子有机物质，可黏附聚集单个蓝藻细胞形成蓝藻群体，在适宜的环境条件下上浮至水面从而形成蓝藻水华。

此外，水华蓝藻 EPS 含有丰富的有机组分和官能团，可高效吸附/络合污染物，是污染物迁移转化的重要载体。蓝藻水华不同生消阶段 EPS 的结构组成及分子量分布具有显著差异性，可影响湖泊水体重金属的络合/释放特征：一方面，EPS 的芳香性、分子量、腐殖类及疏水性物质含量减小可降低污染物络合性能，提高水体自由态金属浓度；另一方面，随着 EPS 组分分解和结构重组，原本与有机质结合的重金属会经历释放、再结合过程，从而改变其形态分配特征。除此之外，由于其高分子量特征，EPS 还可高效吸附在胶体颗粒表面并改变胶体颗粒的分散/团聚环境行为，进而影响水体透明度和初级生产力。例如，水华蓝藻 EPS 既可通过表面电荷排斥和空间位阻效应促进胶体颗粒的分散，又可通过电荷中和或桥联作用抑制其分散行为。所以，水华蓝藻 EPS 具有明显的成华作用和环境效应，是近年来研究者关注的热点问题。通过对水华蓝藻 EPS 作用和效应的研究，可加深对湖泊蓝藻水华成因及污染物循环过程的理解，同时对湖泊环境治理及科学预测并有效预防水华发生也具有重要指导意义。

本书是作者及其所在团队近年来在水华蓝藻 EPS 分析及其作用和效应等方面的最新研究成果。全书共分 7 章：第 1 章由徐华成和江和龙完成，综述了湖泊富营养化和水华蓝藻 EPS 组成、来源及其水环境效应；第 2 章由徐华成完成，介绍了水华蓝藻 EPS 的时空分布特征及其提取操作优化；第 3 章由徐华成和江和龙完成，介绍了基于三维荧光-平行因子分析的水华蓝藻 EPS 组分分析方法及其与蓝藻生物量的相关性；第 4 章由徐华成和叶天然完成，介绍了 EPS 的光和微生物降解特征，以及 EPS 分子在环境条件下的行为特征；第 5 章由徐华成完成，介绍了表面热力学和扩展 DLVO 理论并以此解析 EPS 对水华形成的定量机理；第 6 章由徐华成和江和龙完成，介绍了 EPS 与金属污染物的络合特征和

机理,重点阐述了 EPS 中荧光和非荧光物质的络合特征;第 7 章由徐华成和许梦文完成,介绍了 EPS 与胶体颗粒的表面作用特征,重点阐述 EPS 和环境因子对胶体颗粒分散/团聚行为的影响及机理。

感谢国家自然科学基金项目“湖泊蓝藻胞外聚合物的分布特征、组分变化及其对水华形成的机理研究”(51209192)、“蓝藻水华对湖泊水体矿质胶体颗粒分散/团聚及界面吸附特性的影响及机理”(51479187)和中国科学院青年创新促进会(2016286)的资助。

作 者

2018 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 蓝藻水华及胞外聚合物	1
1.1 湖泊蓝藻水华	1
1.1.1 湖泊富营养化与蓝藻水华	1
1.1.2 蓝藻水华对水环境系统的危害	3
1.2 水华蓝藻胞外聚合物 (EPS)	4
1.2.1 EPS 组成、来源及性质	5
1.2.2 EPS 对水环境效应影响	7
参考文献	8
第 2 章 水华蓝藻 EPS 时空分布及提取	11
2.1 蓝藻水华过程中 EPS 时空分布特征	13
2.2 不同提取方法对 EPS 提取效率的影响	16
2.3 不同提取方法对 EPS 结构组成的影响	18
参考文献	19
第 3 章 蓝藻 EPS 形成过程及特征	24
3.1 EPS 组分光谱分析方法	24
3.1.1 EPS 光谱分析方法概述	24
3.1.2 平行因子分析方法	25
3.2 不同营养条件下蓝藻 EPS 含量和组分比较	26
3.3 基于三维荧光-平行因子解析的 EPS 组分分析	28
3.4 EPS 与蓝藻生物量生长关联性	31
参考文献	33
第 4 章 EPS 的降解特征及环境行为	36
4.1 蓝藻 EPS 的光化学降解	37
4.1.1 光化学过程对 EPS 絮体降解效率的影响	37
4.1.2 基于 EEM-PARAFAC 解析的 EPS 组分变化特征	38
4.1.3 二维相关光谱	41
4.1.4 光化学降解机理	45
4.2 蓝藻 EPS 的微生物降解特征	46

4.2.1	环境条件下微生物对 EPS 降解的效率及特征	46
4.2.2	微生物降解过程中 EPS 光谱性质变化	47
4.2.3	多糖浓度的变化	49
4.2.4	荧光组分变化	50
4.3	蓝藻 EPS 分散/团聚环境行为	53
4.3.1	环境电解质作用下 EPS 絮体粒径及电位变化	54
4.3.2	不同电解质条件下 EPS 絮体各组分和官能团变化	56
4.3.3	蓝藻 EPS 絮体团聚行为原位观察	61
	参考文献	62
第 5 章	EPS 促进蓝藻水华形成的热力学和能量机制	67
5.1	微生物颗粒表面热力学分析及界面自由能	67
5.1.1	表面热力学分析	67
5.1.2	扩展 DLVO 理论	69
5.2	EPS 提取操作对蓝藻颗粒聚集性能变化的影响	70
5.2.1	不同生境条件下蓝藻 EPS 含量和组成比较	70
5.2.2	EPS 提取操作对蓝藻颗粒聚集性能的影响	72
5.3	基于 DLVO 解析的 EPS 对蓝藻水华形成的促进作用	73
5.3.1	EPS 提取前后颗粒表面热力学变化	73
5.3.2	EPS 提取前后颗粒界面能量变化	74
5.3.3	机理解析	75
	参考文献	79
第 6 章	EPS 与金属污染物的络合过程及特征	82
6.1	EPS 荧光组分与金属离子的络合特征	83
6.1.1	EPS 中有机质和金属离子的分布特征	83
6.1.2	基于 EEM-PARAFAC 解析的水华蓝藻 EPS 组分分析	84
6.1.3	金属滴定过程中荧光组分变化特征	87
6.1.4	金属离子与 EPS 络合的条件稳定常数	89
6.2	EPS 非荧光组分对重金属络合的重要性	91
6.2.1	EPS 中荧光和非荧光组分分析	91
6.2.2	荧光组分的金属离子滴定特征	92
6.2.3	非荧光物质与金属离子的络合	95
6.2.4	EPS 中荧光及非荧光物质的重金属络合性能比较	97
	参考文献	98
第 7 章	EPS 对胶体颗粒的稳定效应及机理	102

7.1 浅水湖泊胶体颗粒	102
7.1.1 胶体颗粒来源	102
7.1.2 胶体颗粒危害	103
7.2 水华蓝藻 EPS 与胶体颗粒界面作用特征	104
7.2.1 吸附实验	104
7.2.2 水华蓝藻 EPS 与胶体颗粒的吸附特征	106
7.3 EPS 对胶体颗粒环境稳定性的影响及机理	116
7.3.1 胶体颗粒分散/团聚行为的影响因素	116
7.3.2 胶体颗粒分散/团聚行为的理论基础	118
7.3.3 EPS 对胶体颗粒稳定性的影响特征	120
参考文献	125

第1章 蓝藻水华及胞外聚合物

1.1 湖泊蓝藻水华

1.1.1 湖泊富营养化与蓝藻水华

我国是一个多湖泊国家,这些数量众多的湖泊提供了防洪灌溉、水产养殖、用水供水及调节气候等功能,对社会进步和经济发展起到不可估量的作用,是人们生活中不可缺少的宝贵资源(金相灿和屠清瑛,1990;成小英和李世杰,2006;吴庆龙等,2008)。但是,近年来随着我国经济的发展和居民活动范围的扩大,大量农业、工业和生活污水进入湖泊水体,加上围湖造田、砍伐森林、过度网箱养鱼等行为造成湖泊生态环境急剧恶化,已逐渐呈现富营养化状态,特别是长江中下游人口密集地区(Ryding and Walter, 1992;董广霞和毛剑英,2005;黄智华等,2008;秦伯强等,2013)。湖泊富营养化问题已经影响到人们的生产生活和社会的可持续发展,并已成为我国水体的一个重要环境问题。

关于湖泊富营养化的定义,通常是指湖泊水体接纳过量的氮、磷等营养物质,造成藻类和其他水生生物大量繁殖,水体透明度和溶解氧含量显著下降,从而使水体的生态系统和水功能受到损害。另一种定义方法是由于过量的营养物质、有机物质和淤泥的进入,导致湖泊生物产量增加和湖体体积缩小的过程。该定义除营养盐外,还强调了有机物质和底泥的输入,因为有机物质可显著引起水体体积缩小和溶解氧消耗,并通过矿化作用从沉积物中释放营养物质。淤泥的输入可减小水域面积和水体深度,还能吸附营养盐和有机物质并沉积到水体底部,再次释放后极易引起水体生物的大量繁殖。当这些水生生物及藻类死亡后,释放的有机物和营养物会进一步加剧水体的富营养化程度。

湖泊水体富营养化原因可笼统地归因于天然富营养化和人为富营养化两种。在自然条件下,雨水对大气的淋洗和对地表的冲刷,以及水土流失等过程将营养物质带入湖泊水体即为天然富营养化。这一自然过程很缓慢,需要几千年甚至上万年才能完成。随着现代文明的发展,人类活动会极速加剧这一过程,特别是在人类对环境资源的开发利用和工农业快速发展的背景下,大量未经处理的工业废水和生活污水排入湖泊,导致水体营养物质含量快速增加和浮游生物大量繁殖,即人为富营养化。

根据《2014 年中国环境状况公报》显示（表 1-1），全国 62 个国控重点湖泊（水库）水质按功能高低划分为 5 类，仅有 3.4%的湖泊（水库）水质为Ⅰ类，有 30.4%的湖泊（水库）满足Ⅱ类水质，29.3%满足Ⅲ类水质，20.9%为Ⅳ类水质，6.8%为Ⅴ类水质，剩下的 9.2%为劣Ⅴ类水质。从水质整体状况来看，虽呈逐渐改善态势，但Ⅰ类水质正逐年减少且仍有 30%左右的湖泊（水库）处于富营养状态。这些富营养化湖泊水体的主要污染指标为总磷（TP）、化学需氧量（COD）和高锰酸盐指数（COD_{Mn}）等（中华人民共和国环境保护部，2015）。

表 1-1 2005~2014 年我国重点湖泊（水库）水质类别及主要污染指标

年度	总数	所占比例/%						主要污染指标
		Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类	劣Ⅴ类	
2014	62	3.4	30.4	29.3	20.9	6.8	9.2	COD、TP、BOD ₅
2013	62	4.7	35.1	22.5	13.1	5.1	19.5	NH ₄ -N、COD、COD _{Mn}
2012	62	8.1	20.9	32.3	25.8	1.6	11.3	TP、COD、COD _{Mn}
2011	26	3.8	15.4	23.1	34.6	15.4	7.7	TP、COD
2010	26	0	3.8	19.2	15.4	23.1	38.5	TP、TN
2009	26	0	3.9	19.2	23.1	19.2	34.6	TP、TN
2008	28	0	14.3	7.1	21.4	17.9	39.3	TP、TN
2007	28	0	7.1	21.4	14.3	17.9	39.3	TP、TN
2006	27	0	7.4	22.2	3.7	18.5	48.2	TP、TN
2005	28	0	7.1	21.4	10.7	17.9	42.9	TP、TN

蓝藻水华是水体富营养化过程中常见的一种自然现象，而且也是发生最多、影响最大的水华类型。蓝藻水华的发生机制可归为两个方面：一类是物理、化学等非生物学因素，包括光照、温度、营养盐、气候条件等；另一类是水华蓝藻的生理生态策略等生物学机制（黄玉瑶，2001；陈兰周等，2003；胡鸿钧，2011；秦伯强等，2013）。但是需要指出的是，蓝藻水华的形成并不是某一影响因素单独作用的结果，而是这些影响因素相互作用的综合体现。

主要的物理因素如下：①水体滞留时间，当水的流速小于水华藻类的生长速度，藻类容易聚集上浮至水面形成蓝藻水华；②水体混合程度，当湖泊水体混合尤其是垂向混合幅度较弱时有利于蓝藻颗粒聚集进而诱发蓝藻水华；③光照，光照条件是促进蓝藻水华发生的重要因素，蓝藻细胞通过吸收太阳光辐射来完成光合作用，提高其生物量并最终形成蓝藻水华；④温度，当水体温度低于 20℃时不利于蓝藻水华的形成，相反，当温度升高时则有利于蓝藻水华形成。

化学因素：①pH，浮游植物的群落组成受 pH 的影响，当 pH<6.0 时有利于真核藻类的生长，但当 pH>8.0 时则有利于蓝藻的生长；②N 和 P 等生源要素输入，氮磷生源要素输入是影响蓝藻水华形成的要素因子，N/P 比值不超过 20 时，

容易形成蓝藻水华；③盐度，某些水华种类的生长与持续时间受盐度的影响，适宜的盐度范围可促进藻类的生长和蓝藻水华的形成。

生物学影响因素：①固氮能力，在贫营养的条件下，有些具有异形胞的蓝藻，如拟柱孢藻、鱼腥藻、束丝藻，可以通过固定空气中氮气作为氮源，供给蓝藻细胞生长；②低光补偿机制，蓝藻除了含有叶绿素与类胡萝卜素外，还含有藻蓝素和藻红素，故其在较弱光照条件下也可以充分吸收太阳光，如蓝藻可以吸收波长 500~650nm 的橙色光，而其他藻类则不能利用该区间的太阳光；③自主浮力调节机制，水华蓝藻具有调节细胞沉浮的结构——伪空胞，可根据外界环境的光照条件，通过控制伪空胞的破裂与合成来自主调节细胞浮力，如低光照时通过增加伪空胞的数量来增大浮力，从而用于获得更多的光照，而强光照时则通过减少伪空胞内蛋白质含量来降低浮力；④无机碳浓缩机制，在低浓度的 CO_2 环境下，水华蓝藻为了能够持续稳定地生长，能够最大限度地吸收利用环境中的无机碳源，藻细胞内 CO_2 的浓度比外界环境要高几百倍甚至几千倍，从而可以维持蓝藻的生长状态；⑤休眠机制，水华蓝藻在冬季等条件不利的情况下，会产生休眠体沉入沉积物底泥中，等来年气温升高时，休眠体经过复苏、萌发、繁殖、上浮，再次形成水华；⑥奢侈消费机制，当环境中有过量的磷、氮等营养物时，藻类就会表现出奢侈吸收，以可贮存利用的形式储藏在细胞内，当环境中的营养盐缺少时，水华蓝藻可以利用细胞储存的营养盐进行繁殖，而不会因为环境中营养物缺乏影响其生长；⑦生态位替补竞争机制，水华蓝藻暴发时，往往不是单一蓝藻种类，通常都是几种、十几种甚至几十种，在环境变化条件下一个物种不适应时，另一种最适合、竞争力最强的物种就会成为水华的优势种；⑧产毒机制，蓝藻毒素是蓝藻的次级代谢产物，许多水华蓝藻都可以产生蓝藻毒素，如微囊藻毒素、节球藻毒素、拟柱孢藻毒素等，这些毒素能抑制其他竞争者的生长或者能防止捕食者的捕食。

1.1.2 蓝藻水华对水环境系统的危害

当蓝藻水华发生时，大量蓝藻堆积在水面形成蓝藻藻浆，引起水体透明度下降、溶解氧减少、鱼虾大量死亡等恶性生态灾害。同时，水华蓝藻腐烂衰亡时也会释放出大量藻毒素和恶臭气体，给水生生物和人类健康安全带来极大的威胁。蓝藻水华的危害主要有以下几个方面。

1) 对生态系统的影响

水体是一种生物与环境、生物与生物之间相互依存和制约的复杂生态系统，系统中的物质循环和能量流动处于相对稳定和动态平衡的状态。但是，蓝藻水华的发生会打破这种稳定平衡状态。由于藻类的过量繁殖，水面被藻类遮盖，

阳光难以进入深层水体,抑制了深层水体内生物的光合作用,降低了水体溶解氧浓度。此外,死亡藻体沉到底部加剧了底部溶解氧的消耗,使水体大面积处于厌氧状态,影响水体生物的正常生长、发育和繁殖,破坏了原有的生态平衡。

2) 对水域景观和水产养殖的影响

洁净宽阔的水域是人们旅游所向往和青睐的地方,但在水华暴发区域,水面漂浮着大量藻类生物及死去的水生动物,破坏了旅游区的秀丽风光,使原本的地产价值和旅游消费受到严重损失。

除影响旅游业发展外,蓝藻水华暴发还危害水产养殖和捕捞业。有些藻类的分泌液或死亡后分解产生的黏液可附着在鱼虾贝类的鳃部,造成这些鱼虾贝类窒息死亡。同时,当这些鱼虾贝类食用了含有毒素的藻类后,会直接或间接地在体内积累毒素甚至中毒死亡。此外,藻类死亡后的分解过程还会大量消耗水体中的溶解氧,使水生生物窒息死亡。

3) 对城镇供水的影响

湖泊、水库通常是城镇供水水源,但当这些湖泊、水库暴发蓝藻水华后会 对城镇居民的稳定供水带来极大的隐患,具体表现有:①水中大量的藻类和水生生物可使滤池堵塞,降低过滤效率,破坏其正常运行。同时,水生浮游动物和其他一些水生生物可穿过水处理构筑物进入供水系统,水体中微生物如线虫、苔藓虫等会在配水系统中大量繁殖,造成滤网、阀门、水表等堵塞失效。②藻类产生的微量有机物会降低絮凝效率,造成出水浑浊。③蓝藻水华区域的湖库底部常处于缺氧状态,水体中 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 浓度较高,使供水水质下降及洗涤剂变色。此外,沉积物厌氧发酵产生的甲烷气体及水中过量的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 都会影响加氯消毒等处理工艺,造成出水水质恶化。

4) 对人体健康的危害

全世界已有很多关于蓝藻水华对人和动物产生危害的报道。蓝藻毒素是蓝藻的次级代谢产物,可作用于人和动物的皮肤、肝脏、神经等部位。例如,人类在游泳、洗澡时接触到含有藻毒素的水体可引起皮肤过敏,长期饮用含藻毒素的水体可引发肝癌。此外,藻毒素还可以在鱼虾贝类等水生生物体内积累,并通过食物链的累积效应对人体健康产生毒害。

1.2 水华蓝藻胞外聚合物 (EPS)

胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 是在一定环境条件下,

由微生物细胞分泌的，包被在微生物表面和位于微生物聚集体之间的一种三维胶状高分子聚合物，同时还包括环境中有机物的水解产物、某些微生物细胞脱落物和微生物细胞自溶所释放的物质等（Xu et al., 2013, 2014）。环境中不同微生物所产生 EPS 的组成及含量会有所差别，但主要是由蛋白质和糖类组成，还包括少量的核酸和腐殖酸等。EPS 广泛存在于微生物细胞表面和微生物聚集体间，在稳定微生物群体空间构型、微生物细胞间的信息交流、形成保护层抵御有害物质入侵和微生物与环境介质相互作用（吸附、吸收、络合）等方面发挥着重要作用（Ge et al., 2014）。

湖泊水体蓝藻细胞颗粒产生的 EPS 可将单个蓝藻颗粒黏附聚集成蓝藻群体，并在适宜条件下上浮至水面形成蓝藻水华。根据蓝藻 EPS 与细胞结合的紧密程度，可将 EPS 分为三种形态，即紧密结合态 EPS（TB-EPS）、松散结合态 EPS（LB-EPS）和溶解态 EPS（SL-EPS）（图 1-1）。SL-EPS 分布于蓝藻胶群体最外层，多以胶体状或溶解性分子形式存在，极易分散到水相，是水体中溶解性有机质的重要来源。TB-EPS 位于蓝藻胶群体内层，与细胞表面结合紧密，稳定地附着于细胞壁外，具有一定的外形。LB-EPS 位于 TB-EPS 外层，结构比较松散，属于可向周围环境扩展、无明显边缘的黏液层。LB-EPS 和 TB-EPS 也会在一定的水动力条件下剥离脱落下来，释放到水中。不同形态的 EPS 与细胞间的黏附效果和结合状态的差异性主要与其含量和有机组分有关。一般来说，TB-EPS 中糖类含量较高，LB-EPS 中蛋白质和腐殖酸含量较高，而 SL-EPS 中单糖和腐殖酸含量较高（Hu et al., 2003; Li and Yang, 2007）。

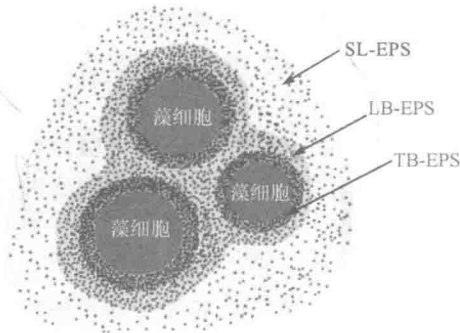


图 1-1 EPS 与蓝藻细胞结合形态分布示意图

1.2.1 EPS 组成、来源及性质

EPS 通常含有蛋白质、多糖、核酸、脂类、腐殖酸和富里酸等物质，这些有机组分表面一般带有多种官能团，如羧基、羟基、氨基和酰胺基等。同时，

不同基质条件下产生的 EPS 也含有一些无机成分,如各种形态的钙、镁、铁等。微生物细胞种类是引起 EPS 结构组成差异性的最主要影响因子,此外一些其他因素如培养基、环境条件、过程参数、提取和分析方法等也是造成 EPS 结构组成差异性的重要原因。

EPS 的来源途径主要有:微生物细胞的分泌物、细胞衰亡产生的物质和从周围环境中吸附的物质等。活细胞会主动分泌产生并释放 EPS,如革兰氏阴性菌可主动释放细胞膜外层中的脂多糖,这种细胞物质的释放可能是由于不断更新的新陈代谢过程。细胞死亡和自溶释放的化合物是 EPS 的另一来源,如胞内有机聚合物聚- β -羟基烷链酸酯(PHA)或糖原,本来是作为能源或细胞壁和细胞膜成分,但是随着细胞死亡和自溶后可释放到胞外。此外,微生物细胞在新陈代谢过程中还会吸附、吸收环境介质中的有机/无机生源要素至细胞表面,这是微生物细胞 EPS 的另一个重要来源(Plude et al., 1991; Otero and Vincenzini, 2003; Parikh and Madamwar, 2006)。

EPS 作为高分子量有机聚合物具有许多特有的属性,如吸附性、亲/疏水性、环境降解性、生物活性等。在这些诸多属性中,对生态系统和环境污染物影响最为显著的是 EPS 的吸附性和亲/疏水性特征。

1) 吸附性质

吸附性质是 EPS 的一种最主要性质。由于 EPS 絮体表面含有大量金属和有机物质吸附位点,如蛋白质上的烷烃物质、脂肪族化合物以及糖类中的疏水性区域等,这些吸附位点的存在使 EPS 能够轻易地与许多物质发生相互作用。EPS 能够通过络合作用吸附重金属, EPS 中的蛋白质、糖类和核酸等物质都能与重金属构成络合体。大量研究表明,微生物表面 EPS 含量的升高可以增加其对金属离子的吸附性能。除重金属离子外,微生物 EPS 絮体还能吸附一些单一和/或复合污染物。如有研究表明,微生物 EPS 絮体可吸附约 60% 的苯、甲苯、二甲苯等复合污染物,而仅有 40% 的污染物被微生物细胞表面吸附。

2) 亲/疏水性质

EPS 含有多种带电基团(如羧基、羟基等)和非极性基团(如芳香族化合物、蛋白质中脂肪族化合物和糖类中疏水区域),是同时包含有亲水性和疏水性基团的两性物质。EPS 的亲/疏水性显著影响微生物细胞的亲/疏水性和它们对环境介质中的作用,亲水性和疏水性基团的相对比值与 EPS 的成分组成和官能团含量有关。有研究还表明, EPS 中的疏水区域对有机污染物的吸附具有积极作用。此外, EPS 主要通过两种途径结合水:一是静电相互作用,主要是由于水分子的永久偶极与 EPS 中的基团如羧基和羟基的永久或诱导偶极之间存在静

电相互作用；二是氢键作用，水分子和聚糖中的羧基基团形成氢键。

1.2.2 EPS 对水环境效应影响

1) 对颗粒聚集和蓝藻水华形成的影响

EPS 是决定蓝藻细胞表面性质的关键物质。它通过与一价、二价阳离子之间的静电作用使颗粒黏附聚集在一起，因此对蓝藻细胞聚集体的性能有极其重要的作用。EPS 的成分及含量必然影响着颗粒聚集体的传质、表面特性及聚集性能等。①传质性：EPS 直接覆盖在蓝藻细胞表面或填充在颗粒聚集体中间，将蓝藻细胞黏结起来。因此蓝藻细胞表面 EPS 含量的多少与分布特征显著影响着颗粒聚集体的传质性能。由于在 EPS 絮体中物质的扩散系数要比水中的低，EPS 作为一种覆盖物会影响到营养物质的摄入以及蓝藻细胞代谢产物的输出。②表面电荷和疏水性：一般认为微生物聚集体的疏水性和表面电荷与 EPS 的组分和含量有关。EPS 各组分的物理化学性质不同，既有疏水基团又有亲水基团，对蓝藻细胞表面的疏水性产生不同的影响。一般来说，EPS 絮体中各组分的相对含量（如蛋白质/多糖）对微生物表面的疏水性影响比单个组分含量的影响要大，如蛋白质/多糖的比值与微生物疏水性成正相关，而与其表面负电荷成负相关。③聚集性能：由于 EPS 直接覆盖于蓝藻细菌细胞外，其特殊位置和化学组成对颗粒聚集体和蓝藻水华形成具有重要影响。一般认为，如果蓝藻颗粒间表面负电荷足够大，絮体间较强的排斥力会导致颗粒难以聚集，而如果 EPS 絮体中含有大量的氢键或疏水性物质及阳离子物质，其分子间或分子内氢键和架桥作用则有利于颗粒聚集及蓝藻水华的形成。

2) 对环境中胶体/纳米颗粒的稳定性

我国是一个浅水湖泊众多的国家，多数湖泊平均水深仅 2m 左右。对于此类湖泊，其沉积物在风浪等水动力扰动下极易发生再悬浮，造成水体含有大量胶体颗粒。此外，随着纳米技术的飞速发展和纳米材料的广泛应用，大量纳米产品进入人们的生活，其在生产使用过程中必然会产生大量的纳米颗粒并排放到湖泊水环境中，也会使湖泊水体含有大量的胶体颗粒。蓝藻水华 EPS 可通过吸附作用负载在这些胶体类颗粒表面，影响颗粒的环境行为。一方面，EPS 絮体的存在会增加颗粒间的静电斥力，从而提高胶体稳定性；另一方面，EPS 也与水体中的电解质离子发生耦合并形成架桥作用，吸附网捕水体中的颗粒物，从而引起胶体类颗粒的聚集沉降。

3) 对供水水质的影响

蓝藻 EPS 会影响饮用水处理工艺及效果,蓝藻 EPS 中的多糖等黏性组分易黏附在滤料表面,堵塞滤料缝隙,缩短过滤周期,影响过滤工艺效果。

除影响饮用水处理工艺外,蓝藻 EPS 也会污染管网系统。对我国部分城市的管网水水质调研结果表明,出厂水经管网及二次供水设施输送后,水质合格率下降近 20%,主要是因为细菌总数增加了近 4 倍。管网系统内的细菌等微生物生长累积到一定程度会聚成生物膜,而蓝藻 EPS 的存在会大大促进管网中生物膜的生长。我国大部分水厂采用的传统饮用水处理工艺,对水源水蓝藻 EPS 的去除效率很低,这是促进细菌等微生物在管网中生长的重要原因。

4) 对污染物毒性和生物有效性的影响

重金属的毒性和生物有效性取决于重金属的形态,自由离子态重金属对水生生物和植物的毒性远大于结合态。EPS 是由微生物分泌、包裹于细胞外的一种高分子聚合物,含有多种带负电荷基团,比如 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{SH}$ 等,这些基团被认为是结合重金属的活性点位,能够与水环境中的金属离子和其他污染物以静电结合和有机络合的方式形成络合物,在生物吸附重金属过程中扮演着重要的角色。一些研究发现,重金属 $\text{Cr}(\text{III})$ 和有机酸络合物能够较为持久地存在于水体环境中。此外,当重金属与 EPS 等有机配体发生络合后,可减少金属离子在沉积物和悬浮颗粒物表面的吸附,使更多的金属离子以有机结合态的形式存在于水体中,从而降低金属离子的潜在生物毒性 (Raungsomboon et al., 2006)。

参 考 文 献

- 陈兰周,刘永定,李敦海. 2003. 盐胁迫对爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)生理生化特性的影响[J]. 中国沙漠, 23(3): 285-288.
- 成小英,李世杰. 2006. 长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析[J]. 科学通报, 51(7): 848-855.
- 董广霞,毛剑英. 2005. 淮河流域污染“久治不愈”原因浅析及治理措施建议[J]. 中国环境监测, 21(6): 75-78.
- 胡鸿钧. 2011. 水华蓝藻生物学[M]. 北京: 科学出版社.
- 黄玉瑶. 2001. 内陆水域污染生态学原理与应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 黄智华,薛滨,逢勇. 2008. 江苏固城湖流域 1951~2000 年农业非点源氮、磷输移的数值模拟研究[J]. 第四纪研究, 28(4): 674-682.
- 金相灿,屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社.
- 金相灿,朱萱. 1991. 我国主要湖泊和水库水体的营养特征及其变化[J]. 环境科学研究, 4(1): 11-20.

- 秦伯强, 高光, 朱广伟, 等. 2013. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 58(10): 855-864.
- 阮晓东, 刘俊新. 2013. 活性污泥 TB-EPS 的絮凝特性研究: 絮体的成长、破碎与再凝聚[J]. 环境科学学报, 33(3): 655-663.
- 沈志良. 2004. 长江氮的输送通量[J]. 水科学进展, 15(6): 752-759.
- 孙小静, 秦伯强, 朱广伟. 2007. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J]. 中国环境科学, 27(3): 341-345.
- 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 等. 2014. 混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究[J]. 环境科学, 35(5): 1781-1787.
- 吴庆龙, 谢平, 杨柳燕, 等. 2008. 湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究[J]. 地球科学进展, 23(11): 1115-1123.
- 熊志鹏. 2016. 信息菌素选择性抑制蓝藻生长的研究[D]. 南昌: 江西师范大学.
- 叶守泽, 夏军, 郭生练, 等. 1994. 水库水环境模拟预测与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 虞孝感. 2003. 长江流域可持续发展研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 2010. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. 环境科学与技术, 33(3): 92-98.
- 中华人民共和国环境保护部. 2015. 2014 中国环境状况公报[R].
- Ryding S O, Walter R. 1992. 湖泊和水库富营养化控制[M]. 朱萱, 等译. 北京: 中国环境科学出版社.
- Böhm G A, Pfleiderer W Böger P, et al. 1995. Structure of a novel oligosaccharide-mycosporine-amino acid ultraviolet A/B sunscreen pigment from the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune*[J]. The Journal of Biological Chemistry, 270(15): 8536-8539.
- De Philippis R, Margheri M C, Materassi R, et al. 1998. Potential of unicellular cyanobacteria from saline environments as exopolysaccharide producers[J]. Applied and Environmental Microbiology, 64(3): 1130-1132.
- DePinto J V, Verhoff F H. 1977. Nutrient regeneration from aerobic decomposition of green algae[J]. Environmental Science and Technology, 11(4): 371-377.
- Diamel G, Saad M, Nouredine A M, et al. 2014. Coagulation and chlorination of NOM and algae in water treatment: a review[J]. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 2(6-1): 23-24.
- Force E G, McCarty P L. 1970. Anaerobic decomposition of algae[J]. Environmental Science and Technology, 4(10): 842-849.
- Ge H M, Xia L, Zhou X P, et al. 2014. Effects of light intensity on components and topographical structures of extracellular polysaccharides from the cyanobacteria *Nostoc* sp.[J]. Journal of Microbiology, 52(2): 179-183.
- Hu C X, Liu Y D, Paulsen B S, et al. 2003. Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain[J]. Carbohydrate Polymers, 54(1): 33-42.
- Li X Y, Yang S F. 2007. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. Water Research, 41(5): 1022-1030.
- Lin C S, Wu J T. 2014. Tolerance of soil algae and cyanobacteria to drought stress[J]. Journal of Phycology, 50(1): 131-139.
- Otero A, Vincenzini M. 2003. Extracellular polysaccharide synthesis by *Nostoc* strains as affected by N source and light intensity[J]. Journal of Biotechnology, 102(2): 143-152.
- Parikh A, Madamwar D. 2006. Partial characterization of extracellular polysaccharides from cyanobacteria[J]. Bioresource Technology, 97(15): 1822-1827.
- Plude J L, Parker D L, Schommer O J, et al. 1991. Chemical characterization of polysaccharide from the slime layer of the cyanobacterium *Microcystis flos-aquae* C3-40[J]. Applied and Environmental Microbiology, 57(6): 1696-1700.