

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20180131001

姜锦林, 周军英, 刘仁彬, 等. 太湖重污染湖区和水源地水质概况及藻毒素污染环境风险[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(3): 60-71

Jiang J L, Zhou J Y, Liu R B, et al. General situation of water quality and environmental risks of algal toxins pollution in major polluted area and water sources of Lake Taihu [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(3): 60-71 (in Chinese)

太湖重污染湖区和水源地水质概况及藻毒素污染环境风险

姜锦林^{1,*}, 周军英¹, 刘仁彬^{1,2}, 单正军¹, 王晓蓉³

1. 国家环境保护农药环境评价与污染控制重点实验室, 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

2. 南京工业大学环境科学与工程学院, 南京 210009

3. 南京大学环境学院, 南京 210023

收稿日期: 2018-01-31

录用日期: 2018-05-22

摘要: 近年来太湖流域局部水质状况有所改善, 但太湖藻型生境条件还未根本改变, 水污染防治任务依然艰巨。确保太湖湖体水质稳定达标, 尤其是加强对太湖重点湖区和水源地重点污染物的调查研究十分重要。在此背景下, 本文调研了太湖重点湖区和水源地水质概况、藻毒素污染时空分布特征、环境影响因子和迁移转化规律, 并总结了藻毒素的环境和健康风险研究的最新进展, 指出了太湖西部湖区和饮用水源地的主要环境风险, 以及未来太湖藻毒素污染相关研究需解决的关键技术问题, 以期为促进太湖流域重点污染物的控制和治理, 确保太湖饮用水源地安全提供有益借鉴。

关键词: 藻毒素; 太湖; 环境风险; 水源地; 水质

文章编号: 1673-5897(2019)3-060-12 中图分类号: X52 文献标识码: A

General Situation of Water Quality and Environmental Risks of Algal Toxins Pollution in Major Polluted Area and Water Sources of Lake Taihu

Jiang Jinlin^{1,*}, Zhou Junying¹, Liu Renbin^{1,2}, Shan Zhengjun¹, Wang Xiaorong³

1. Key Laboratory of Pesticide Environmental Assessment and Pollution Control, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China

2. School of Environmental Sciences and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China

3. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Received 31 January 2018

accepted 22 May 2018

Abstract: In recent years, the local water quality has been improved in Lake Taihu Basin. However, algal habitat conditions have not changed fundamentally in Lake Taihu and therefore it is still an arduous task to prevent and control the eutrophication pollution. In order to control and guarantee the water quality, it is very important to carry out the investigation of the status of key pollutants in Lake Taihu, especially in its major polluted area and water sources area. In this review, we introduced the general situation of water quality, the temporal and spatial distribution characteristics, environmental impact factors, and the migration and transformation rules of algal toxins in Lake Taihu. We summarized the research advances in the environmental and health risks of algal toxins in Lake Taihu.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 21407056)

作者简介: 姜锦林(1984-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为蓝藻毒素和农用化学品的生态毒理学, E-mail: jjl@nies.org

Finally, we pointed out the main environmental risks of algal toxins in the western lake area and drinking water source area of Lake Taihu and the key technical issues of related studies in the further. This review provides useful references for promoting the control and treatment of key pollutants and ensuring the safety of drinking water source in Lake Taihu Basin.

Keywords: algal toxin; Lake Taihu; environmental risk; water source; water quality

我国正处于新型工业化、信息化、城镇化和农业现代化快速发展阶段,水污染防治任务繁重艰巨。水环境保护事关人民群众切身利益,事关全面建成小康社会,事关实现中华民族伟大复兴中国梦。为切实加大水污染防治力度,保障国家水安全,国务院于2015年4月正式发布“水十条”,明确提出全力保障水生态环境安全计划,以及强化饮用水水源环境保护、保障饮用水源安全、深化重点流域污染防治的要求,其中,提出到2020年,太湖、巢湖和滇池富营养化水平需有所好转。因此,加强对太湖流域,尤其是太湖重点湖区和水源地重点污染物的调查研究十分重要。

自2007年太湖水危机事件发生以来,国家和江苏省相继编制了《太湖流域水环境综合治理总体方案》和《江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案》,同时,太湖流域各地市也根据以上政策的部署,结合自身流域的特点积极开展了污染的蓝藻巡检和综合治理工作,连续5年实现国务院提出的“两个确保”的目标,即确保饮用水安全,确保不发生大面积湖泛。流域生态环境总体呈现出水质持续改善、污染稳定下降、生态逐步恢复的良好局面。但是太湖治理绝不是一个短期的过程,当前太湖水环境形势仍不容乐观,虽然近几年湖体富营养化趋势得到初步改善,但太湖藻型生境条件还没有根本改变,一旦外部条件适宜,太湖仍会出现较大面积蓝藻聚集,甚至发生湖泛。治理工作任重道远,需要确保湖体水质稳定达标,尤其要确保饮用水源安全。藻毒素作为太湖富营养化和蓝藻水华的重要特征污染物,其在太湖水体中的浓度监测、时空分布和影响因素等在近些年的太湖治理工作中没有得到重视,尤其是其经食物链对人体健康的影响及相关治理对策研究较少,相关研究亟需开展。

1 太湖及其水污染概况 (The general situation of Lake Taihu and its water pollution)

1.1 太湖背景资料

太湖流域地处长江三角洲南翼,北抵长江,东临东海,南滨钱塘江,西以天目山、茅山等山区为界。

流域面积约3.69万 km^2 ,行政区划分属江苏、浙江、上海和安徽3省1市。据2014年太湖流域水资源公报统计,2014年太湖流域总人口5993万人,占全国总人口的4.4%;GDP 63055亿元,占全国GDP的9.9%;人均GDP 10.4万元,是全国人均GDP的2.2倍。

太湖位于长江三角洲的南缘,地处亚热带,古称震泽、具区,又名五湖、笠泽,是中国五大淡水湖之一,界北纬 $30^{\circ}55'40''\sim 31^{\circ}32'58''$ 和东经 $119^{\circ}52'32''\sim 120^{\circ}36'10''$ 之间,横跨江、浙两省,北临无锡,南濒湖州,西依宜兴,东近苏州。太湖湖泊面积2427.8 km^2 ,水域面积为2338.1 km^2 ,湖岸线全长393.2km。其西和西南侧为丘陵山地,东侧以平原及水网为主。太湖河港纵横,河口众多,有主要进出河流50余条。太湖水系呈由西向东泄泻之势,平均年出湖径流量为75亿 m^3 ,蓄水量为44亿 m^3 。

太湖流域地区虽然水资源相对丰沛,但由于经济发展较早,积聚了大量人口、工业高度集中、农业十分发达,区域水环境往往难以承受巨大的环境压力。目前的水质状况虽有局部改善,但不容乐观,河湖富营养化状况非常严重,同时太湖流域也存在许多重要的水源地,实施流域保护以满足太湖流域内供水、用水安全,具有十分重要的意义。

太湖近30年水质变化趋势如图1所示,水质指标数据来源于江苏省环保厅环境状况年度公报。从“七五”开始到“十三五”的近30年期间,总氮一直呈现高位波动,“十一五”以来有所下降,但一直处于劣V类;而总磷从20世纪90年代初期起急剧上升,“九五”之后呈波段式下降趋势。太湖富营养化指数在“八五”末期从轻度转变为中度富营养化,一直持续到“十一五”中期,自2009年起已下降至轻度富营养化水平。由此可见,近几年湖体富营养化趋势已得到初步扭转,但需要明确的是太湖藻型生境条件还没有根本改变,一旦外部条件适宜,太湖仍会出现较大面积蓝藻聚集,甚至发生湖泛。还需注意的是,近年来太湖水污染及蓝藻监测预警工作的监测项目基本集中在水温、透明度、pH、溶解氧、高

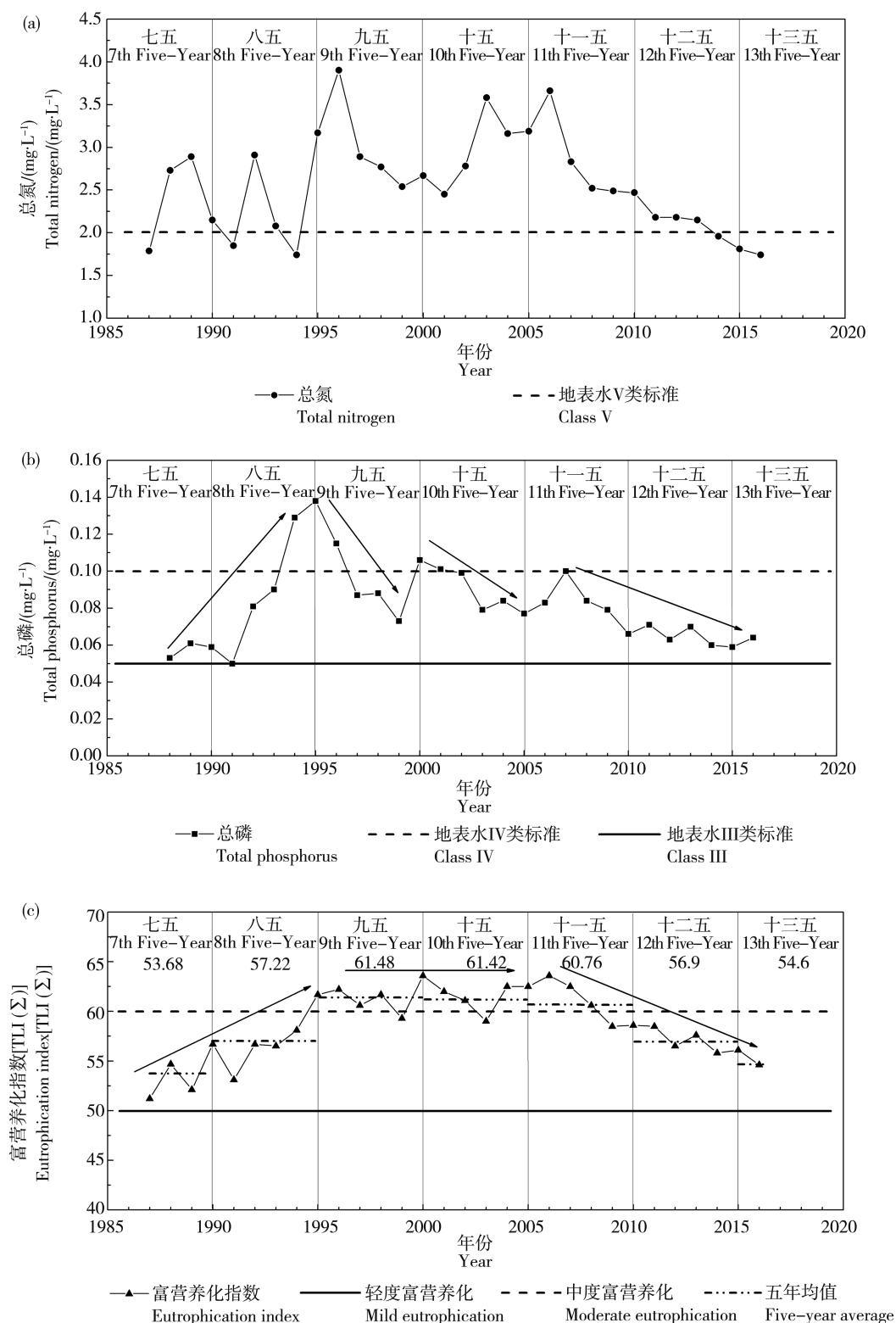


图1 太湖近30年水质变化趋势图

Fig. 1 Tendency chart of water quality in Lake Taihu in recent 30 years

锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮、叶绿素 a 和藻类密度等。而对于富营养污染和蓝藻水华的特征污染物,即不同类型的藻毒素含量的监测均不涉及,个别监

测点位的数据还仅来源于一些科研项目的开展,相关数据的缺乏使得管理部门对蓝藻水华的生态和健康危害缺乏深刻认识。太湖西部和北部全年大部分

时间都存在水华,即便是在冬季或者非水华期,也不能忽视微囊藻产毒能力的影响,Li 等^[1]对太湖南泉水域 2009 年 5 月至 12 月产毒微囊藻的环境丰度及其微囊藻毒素-LR 产毒能力进行研究,结果表明,太湖南泉水域全年大部分时间存在水华,产毒微囊藻为其优势藻,产毒微囊藻的环境丰度及其微囊藻毒素-LR 产毒能力的动态变化和水温密切相关,但值得注意的是冬季产毒微囊藻产毒能力显著增强,这提示在水华和非水华期内对蓝藻毒素的防治都应予以重视。

一直以来,太湖流域的西部和西北部片区都是太湖污染防治的重中之重,入湖水量占太湖总入湖水量的 70.9%,Ⅴ类和劣Ⅴ类入湖河流主要分布在这一区域,日趋严重的富营养化问题已经严重地制约这些区域的社会和经济的可持续发展。尤其是西北部的竺山湖、梅梁湾和五里湖等湖湾,水质基本都劣于Ⅴ类。由于污染,近 30 年来生物的多样性发生了巨大变化,太湖的大型水生植物类群退化,浮游植物种群数量不断减少,浮游动物单位个数也不断下降,底栖动物种类明显下降,而耐污的浮游和底栖动物种类数量呈逐渐增加趋势。在太湖的西部,河道污染物输入是太湖主要的外源污染,是流域点源、非点源污染的综合表现。基本上太湖流域 15 条主要入湖河流的污染负荷能占太湖入湖污染总负荷的 80% 以上,这些河流的入湖口绝大多数位于太湖西部和偏西北部。因此,保障西部湖区的水环境安全和水环境质量,具有十分重要的意义。

1.2 太湖湖库型饮用水源地分布和常规水质现状

太湖流域经过多年的开发和治理,尤其是 2007 年以后,流域内各省市根据《太湖流域水环境综合治理总体方案》、《太湖流域水资源综合规划》以及《太湖流域综合规划》等规划,进一步调整和完善流域饮用水水源地布局,初步形成了以长江、太湖—太浦河—黄浦江、山丘区水库及东苕溪为主,多源互补、互备的流域供水水源总体格局,提高了以太湖、长江和太浦河等优质水源作为取水水源的集中式饮用水水源地供水比重。其中,太湖湖库型水源地主要包括贡湖水源地、太湖金墅港水源地、太湖渔洋山水源地和太湖庙港水源地等。具体饮用水源地分布和水厂情况如表 1 所示,近 2 年太湖饮用水源地水质常规指标达标情况如表 2 所示。

1.3 太湖藻毒素污染现状

太湖水华特征污染物为微囊藻毒素(MCs),其

对人类健康的影响引起了社会的广泛关注。水体中藻类的生长和死亡均可引起藻毒素的释放,其中最常见毒素为微囊藻毒素-LR(MC-LR)和微囊藻毒素-RR(MC-RR)。MC-LR 作为迄今已发现的最强的促肝癌剂,主要作用于肝脏的肝细胞和肝巨噬细胞,较低剂量就可导致肝脏损伤^[2-5]。有流行病学调查发现,我国江苏海门、广西福绥等地原发性肝癌的高发均与饮水水中 MC-LR 有密切关系;饮水水中 MCs 污染与渔民肝脏血清酶的增高可能存在正相关。还有研究表明,太湖地区饮水水中 MCs 污染与小学生肝功能损伤之间具有正相关性^[6-7]。太湖作为环太湖城市主要饮用水水源地,了解其水体中 MCs 的污染状况显得尤为重要。

周伟杰等^[7]于 2009 年 7 月—2010 年 6 月期间,检测无锡、苏州和湖州三城市水源水及出厂水中 MC-LR 的含量,结果显示,水源水中 MC-LR 的浓度为 $(0.0739 \pm 0.0588) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,检出率为 60.0% (72/120),均显著高于出厂水的 $(0.0459 \pm 0.0437) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 28.8% (45/156)。水源水和出厂水中 MC-LR 含量的高峰均出现在 10 月份前后。无锡市水源水中 MC-LR 的含量和检出率均最高,其次是苏州市,湖州市最低,但三城市出厂水中 MC-LR 的含量均未超标。卫星遥感影像数据监测表明,自 2005 年以来,太湖贡湖湾每年有大面积蓝藻水华覆盖,尤其是 2007 年以后发生水华的频率明显增加。2009 年 7、8 月在贡湖湾发生大面积蓝藻水华。2009 年在贡湖湾研究区域内测得总磷(TP)最高达 $0.269 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水华暴发时的 Chl a 最高达 $703.04 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2009 年 3 月至 2010 年 2 月水源地水柱中溶解态微囊藻毒素浓度范围为 $\text{ND} \sim 0.554 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8]。本研究团队从 2015 年开始,定期监测太湖中竺山湖南、竺山湖中、百渎港、椒山和雅浦港等特定点位的溶解性总 MCs 浓度,结果如表 3 所示,可见竺山湖和西部湖区椒山点位溶解性总 MCs 含量相对较高。

2 藻毒素时空分布特征、环境影响因子及其迁移转化研究进展 (Research progress on spatio-temporal distribution, migration and transformation of algal toxins, and its environmental factors)

太湖属于大型浅水湖泊,蓝藻水华发生受一系列因素影响,如温度、日光、水体扰动、pH 值和水体氮磷浓度等^[9]。到目前为止,人类活动和蓝藻发生之间的关系并没有被清楚认识。王经结等^[10]采用高效液相色谱法(HPLC)对太湖水体中溶解态微囊藻

表 1 太湖饮用水源地分布情况

Table 1 The distribution of drinking water sources in Lake Taihu

序号 Number	城市 名称 City	水源地 名称 Drinking water source	水厂名称 Water plants	水源所在地 (河、湖) Location of water source (river, lake)	水源地 类型 Type of water source	一级保护区		二级保护区		准保护区 Quasi-protected area
						First-grade protected area		Second-grade protected area		
						水域 Water area	陆域 Land area	水域 Water area	陆域 Land area	
1	无锡市 Wuxi	贡湖沙渚 水源地 Shazhu, Gonghu	中桥水厂、 贡湖水厂 Zhongqiao Water Plant, Gonghu Water Plant	太湖 Lake Taihu	湖泊 Lake	以取水口为中心， 半径 500 m 范围内的区域 Areas within a radius of 500 metres centered on the intake	一级保护区外，外延 2 500 m 范围的水域 Waters of 2 500 metres in extension outside the first-grade protected area	东起新港入湖口、北到新港河 埭沙桥，向西沿塘前路、 长泰路延伸至湖边的陆地 East from Xingang Estuary, north to Xingang River Lisha Bridge, westward along Tangqian Road and Changtai Road to the lake	二级保护区以外， 外延 1 000 m 的区域 Areas of 1 000 metres in extension outside the second-grade protected area	
2	无锡市 Wuxi	贡湖锡东 水源地 Xidong, Gonghu	贡湖锡东 水厂 Gonghu Xidong Water Plant	太湖 Lake Taihu	湖泊 Lake	以取水口为中心， 半径 500 m 范围内的区域 Areas within a radius of 500 metres centered on the intake	一级保护区外，外延 2 500 m 范围的水域 Waters of 2 500 metres in extension outside the first-grade protected area	东起望虞河、西至许仙港、 沿湖高速公路以南的陆地 East from Wangyu River, west to Xuxian Port, south of the Lake Expressway	二级保护区以外， 外延 1 000 m 的区域 Areas of 1 000 metres in extension outside the second-grade protected area	
3	苏州市 Suzhou	太湖金墅 港水源地 Jinshu Port, Lake Taihu	白洋湾水厂、 相城水厂 Baiyang Water Plant, Xiangcheng Water Plant	太湖 Lake Taihu	湖泊 Lake	分别以 2 个水厂取水口为 中心，半径 500 m 范围内 的区域 Areas within a radius of 500 metres centered on the intake of two water plants	一级保护区外，外延 2 000 m 范围的水域 Waters of 2 000 metres in extension outside the first-grade protected area	一级保护区边界到太湖 防洪大堤陆域范围 Boundary of the first-grade protected area to Lake Taihu flood control embankment	二级保护区以外， 外延 1 000 m 的区域 Areas of 1 000 metres in extension outside the second-grade protected area	
4	苏州市 Suzhou	太湖镇 湖水源地 Zhenhu, Lake Taihu	高新区 第二水厂 The Second Water Plant of High-tech Zones	太湖 Lake Taihu	湖泊 Lake	以取水口为中心， 半径 500 m 范围内的区域 Areas within a radius of 500 metres centered on the intake	一级保护区外，外延 2 000 m 范围的水域 Waters of 2 000 metres in extension outside the first-grade protected area	二级保护区水域与相对应 的本岸背水坡堤脚外 100 m 之间的陆域范围 The terrestrial area between waters of the second-grade protected area and the corresponding 100 meters outside the slope of the bank ' s downstream batter	二级保护区以外， 外延 1 000 m 的区域 Areas of 1 000 metres in extension outside the second-grade protected area	

续表1

[illegible]

表 2 2014 年和 2015 年太湖饮用水源地水质达标情况

Table 2 Water quality of Lake Taihu drinking water source in 2014 and 2015

序号 Number	城市名称 City	水源地名称 Drinking water source	年份 Year	水质达标情况 Water quality standard achievement
1	无锡市 Wuxi	贡湖沙渚水源地 Shazhu, Gonghu	2014	水质达标 Up to the Standard
			2015	水质达标 Up to the Standard
2	无锡市 Wuxi	贡湖锡东水源地 Xidong, Gonghu	2014	水质达标 Up to the Standard
			2015	水质达标 Up to the Standard
3	苏州市 Suzhou	太湖金墅港水源地 Jinshu Port, Lake Taihu	2014	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
			2015	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
4	苏州市 Suzhou	太湖镇湖水源地 Zhenhu, Lake Taihu	2014	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
			2015	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
5	苏州市 Suzhou	太湖渔洋山水源地 Yuyang Mountain, Lake Taihu	2014	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
			2015	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
6	苏州市 Suzhou	太湖浦庄水源地 Puzhuang, Lake Taihu	2014	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
			2015	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
7	苏州市吴江区 Wujiang District, Suzhou City	太湖庙港水源地 Miao Port, Lake Taihu	2014	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication
			2015	水质达标, Ⅲ类, 轻度富营养化 Up to the Standard, Class Ⅲ, mild eutrophication

表 3 2015 年和 2016 年上半年太湖特定点位溶解性总藻毒素 (MCs) 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 监测情况Table 3 The concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) of total soluble microcystins (MCs) at specific sites in Lake Taihu in 2015 and the first half of 2016

监测时间 Monitoring time	竺山湖南 South of the Zhushan Lake	竺山湖中 Middle of the Zhushan Lake	百淩港 Baidu Port	椒山 Jiao Mountain	雅浦港 Puya Port
2015 年全年平均 (每月监测 1 次) Annual average for 2015 (once per month)	0.97±0.72 ^a	0.32±0.26	0.21±0.11	1.12±0.79	0.21±0.11
2016.1.6	0.30	0.44	0.38	0.33	0.22
2016.2.25	0.22	0.10	0.11	0.18	0.12
2016.3.3	0.20	0.14	0.16	0.11	0.15
2016.4.5	0.11	0.10	0.092	0.12	0.10
2016.5.6	0.23	0.18	0.11	0.22	0.091
2016.6.3	0.31	0.17	0.29	0.30	0.13

注:a, 2015 年 12 个月的数值以平均值±标准偏差形式表示。

Note: a, the annual average of 2015 expresses as the mean value ± standard deviation.

毒素(MC-LR 和 MC-RR)浓度进行检测,结果表明,MCs 表底层浓度基本一致,在一天之内的变化没有明显规律;冬季 MCs 浓度较高;位于竺山湾和西部沿岸地区的 2 个点的 MCs 浓度在一年之中变动较大;MC-LR 浓度一般大于 MC-RR,但在 8、9 两月出现相反的结果;水中溶解性 MCs 与总氮呈显著正相关,与总磷无显著相关性;在蓝藻暴发期,MC-LR 与总氮、总磷、悬浮固体(SS)、总有机碳和蓝藻生物量呈显著正相关。魏代春等^[11]于 2013 年 6—10 月间分析水体中 3 种微囊藻毒素(MC-LR、MC-RR 和 MC-YR)与总氮、总磷、Chl-a 和高锰酸盐指数等富营养指标的相关性,结果表明,太湖 MCs 污染较严重,其浓度的空间分布特征为:梅梁湾>贡湖、西部沿岸区>湖心区>胥湖区、南部湖区,并以 MC-LR 浓度最高;MC-LR、MC-RR、MC-YR 及 MCs 均与高锰酸盐指数、总氮、总磷、Chl-a 呈显著正相关;结合饮用水中 MC-LR 和 MCs 的标准限值分析得出,太湖 Chl-a 的阈值是 $12.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。为评估太湖营养率和营养限制的关系,Ma 等^[12]研究了太湖近无锡处常量营养元素富集对浮游植物生物量和生长率的影响,发现同时添加 N 和 P 比单独添加 N 或 P 使浮游植物生长率更高,且 N 为试验期间太湖浮游植物生长的限制性因子。研究表明,当 $\text{TN} : \text{TP} \leq 18.9 \sim 56.7$ 时,N 为限制性因子;而当 $\text{TN} : \text{TP} > 18.9 \sim 56.7$ 时,P 为浮游植物生长限制性因子。

太湖中宇宙研究表明,由风力带来的水力扰动(turbulence)对太湖产毒微囊藻竞争优势和产 MCs 能力有显著影响,可能增加水体 MCs 暴露风险。在扰动条件下,水体总毒素浓度和胞外溶解性毒素含量显著增加,比平静水体相关毒素浓度增加 3~4 倍。并且短期的扰动有利于产毒微囊藻种群增长,生物量的累积同时也增加了 MCs 的积累。更甚者,强力的扰动增加微囊藻团体的机械损伤,增加了细胞裂解,导致更多的胞内毒素泄露^[13]。

前期研究表明,太湖所有产 MCs 藻基因型全部属于微囊藻(*Microcystis*),水华期间产毒微囊藻基因型比非水华期间更加多样化^[14]。李大命等^[15]应用荧光定量 PCR 对冬季太湖不同湖区底泥表面有毒微囊藻和总微囊藻种群丰度进行调查,并基于 PCR-DGGE 技术对底泥中有毒微囊藻群落结构进行分析。结果表明,微囊藻在太湖底泥表面分布广泛,所有采样点都检测到有毒微囊藻存在,冬季太湖不同湖区表层底泥中有毒微囊藻群落结构相似性较高,

综合分析定量 PCR 结果和底泥中叶绿素 a 和藻蓝素浓度的测定结果,发现 2010 年冬季太湖蓝藻越冬主要集中在梅梁湾、竺山湾、贡湖湾和湖心。

MCs 的一个重要环境归趋与沉积物密切相关^[16],研究发现,当 MCs 可以结合在沉积物颗粒表面的特定位点时,发生吸附行为。沉积物的 MCs 吸附能力已有不少研究报道,至少约 7%~10% 的 MCs 可被水中的悬浮颗粒物吸附^[17]。沉积物对 MCs 在一定程度上的解毒行为对于太湖这样典型的浅水型湖泊非常有意义,因为存在天然的强湖水-沉积物交互行为。但是太湖沉积物对溶解性 MCs 去除的具体贡献值和影响因素,至今尚未明确。其中还牵涉到沉积物中微生物对藻毒素的降解,过程非常复杂。

天然水体中,MCs 的另一个重要降解途径为生物降解^[18],湖水中藻毒素的细菌降解已被众多研究者报道,同时,多株具备藻毒素降解能力的细菌已从太湖水体、沉积物等多种环境介质中分离获得。强化毒素降解能力工程菌的筛选,是未来降低湖泊水体藻毒素生态风险的一条可行措施,但目前相关研究还仅停留在实验室阶段,尚未获得工程应用。

3 藻毒素健康风险研究进展 (Research progress on health risk of algal toxin)

3.1 藻毒素饮用水安全性评估

饮用水是供给居民生活的用水,是水资源的一种;水源地的作用是涵养与供给水源,包括一定的水域和陆域,是水依托的生态环境。饮用水水源地的范围一般较小,其功能主要是提供饮用用水。城市化进程的加快和经济的快速发展带来了许多水环境问题,水环境问题制约部分地区的社会发展和经济增长。其中饮用水水源地水安全问题在水环境问题中尤为突出。对水源地做出合理的风险评估有利于水源地的保护,有利于水源地的管理。美国环境保护局(USEPA)选取 15 个指标组成指标体系(Indexing System),其中包括 7 个饮用水源状况(condition)指标,8 个生态系统脆弱性(vulnerability)指标,对流域内饮用水源的风险进行总体评价。国内已有水源地安全相关评价指标,主要包括水量、水质和生态三个方面。目前太湖饮用水源地微囊藻毒素安全性评估开展较少,几个水源地均有藻毒素检出,但经过自来水厂常规处理(曝气、过滤和加氯杀菌等)后,能去除约 80% 的溶解性毒素。但低浓度藻毒

素长期暴露对人体健康的风险,尚未清楚认识,加之当前太湖水环境形势仍不容乐观,因此,大力开展太湖典型水源地藻毒素含量的水环境安全评估,意义重大。

3.2 藻毒素的水生生物累积风险

在有毒蓝藻出现的水体中,MCs在水生生物体内的累积,特别是在鱼体内各种器官(组织)中的分布与累积及其季节变化特征,直接关系到人类的食品安全。在太湖流域,淡水水产品占日常食物消费总量较大,且有毒蓝藻水华频繁发生,因此,水产品的MCs污染对人类健康的影响不容忽视^[5]。Zhang等^[19]在2005年6月至11月期间于太湖梅梁湾捕获了分属不同营养级的6种鱼类,研究了其不同组织器官中MCs的含量,发现MCs(MC-RR+MC-YR+MC-LR)在鱼体肝脏和肠道中的含量从高到低排序为:滤食性鱼类>杂食性鱼类>肉食性鱼类;肌肉中含量排序为:杂食性鱼类>滤食性鱼类>肉食性鱼类。其中,鲤鱼肌肉中的MCs含量超过了世界卫生组织(WHO)规定的 $0.04 \mu\text{g MC-LR}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ BW}$ 的每日可耐受摄入量(TDI)限值。

Chen等^[20]于2005年8月测定了太湖蓝藻水华湖区获得的多种脊椎生物(鱼、龟、野鸭和水鸟)中MCs的累积情况,滤食性鱼类白鲢肠道中MCs含量达到了 $235 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$,但其他生物肠道中MCs含量均未超过 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$ 。鲫鱼肝脏中检测出最高的MCs含量($150 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$),其次是白鲢和翘嘴鲇,鲤鱼中最低($3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$)。龟、野鸭和水鸟肝脏中MCs浓度为 $18\sim 30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$ 。值得注意的是,夜鹭和绿头鸭性腺、鸟蛋蛋黄和蛋白中检测出了较高浓度的MCs,显示出MCs对水鸟和野鸭胚胎的潜在毒性。

软体动物(蚌、螺)是重要的底栖动物,主要摄食水体中悬浮的或基质表面附着的藻类,因而,在发生有毒蓝藻水华的水体中,容易摄取和累积MCs。软体动物是底栖动物食性鱼类(如鲤鱼、青鱼等)的饵料,MCs可通过食物链传递给鱼类。在太湖流域,螺、蚌类和鱼类被广泛食用,因此,软体动物MCs污染导致的食品安全问题不容忽视;此外,含MCs的软体动物还可被鸟类食用而危及生态安全。2003年和2004年对太湖梅梁湾中4种淡水蚌(背角无齿蚌、背瘤丽蚌、三角帆蚌和褶纹冠蚌)体内各种器官的3种MCs(MC-LR、MC-YR和MC-RR)的季节变化特征研究后发现,所有蚌体内各器官中的MCs含

量的季节变化很大,而肝胰腺和肠道中MCs含量均在7、8月份出现明显的高峰值。在分析的28个蚌足样品中,有15个(54%)超过WHO建议的TDI值(每日 $0.04 \mu\text{g MC-LR}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ BW}$),表明了太湖蓝藻水华区软体动物食用风险不容忽视。值得庆幸的是,由于MCs的亲水性很强,暂未发现MCs在水生态系统中有生物放大作用。

3.3 藻毒素在农作物中的累积风险

近年来,富营养化湖区经常将含蓝藻水华的水用于农业灌溉,而且蓝藻资源化还田行为也日益增多,1995年K6s等^[21]首次报道MC-LR及蓝藻粗提物能够抑制芥菜幼苗的生长,因此,蓝藻毒素对作物的危害及其健康风险开始引起研究者的兴趣,但是从已有的研究报道来看,不同作物对微MCs的耐受度和响应情况并不一致,还没有研究报道对此给出明确的解释^[22],鉴于此,针对MCs在农作物中的累积及其毒性效应和健康风险的研究,能为农业生产中寻找合理的应对措施提供理论支持,以保证农产品安全。

我国的滇池、巢湖和太湖等地区,由于湖泊富营养化严重,会有大量的MCs随着农业灌溉用水进入农田。目前已有学者对水稻、菠菜、茼蒿、油菜和白菜等在MCs暴露下的相关毒理效应进行了初步研究^[22-27],但对毒性机理的研究还不够深入,且剂量效应关系的研究结果有时也有出入。大部分研究多关注MCs暴露下毒素在植物组织中的累积以及对植物的营养生长和光合作用的毒性效应和机理,如MCs暴露导致叶绿素含量下降、Chl a/Chl b比值改变、叶绿体超微结构受到一定损伤等^[26-27],但对水华频发区域的藻毒素经农作物对人体造成的健康风险关注不够。

3.4 藻毒素对人类健康的危害

除了在水产品中累积,MCs还具有其他人体暴露途径。有研究表明,在经常接触蓝藻水华的35位巢湖渔民血清中检测到MCs,平均浓度 $0.39 \text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$,相当于巴西血透析事件死亡病人的1/87,其日摄入量为 $2.2\sim 3.9 \mu\text{g MC-LR equivalent}$,可见MCs污染已不容小觑^[3]。目前,研究较少涉及MCs对太湖流域人群健康的风险评价,已有的研究结果差异也较大,鉴于目前太湖MCs的污染情况,科学评估太湖水源地MCs的健康风险已迫在眉睫。

有研究发现,相同MCs剂量下,水华浮沫中提取的物质比MCs标准品的毒性更强,一般认为这是

由于混合提取物中有协助 MCs 进入生物体的物质,增强了 MCs 的生物利用率。因此,仅通过 MCs 标准品得出的毒性评估结果往往低于实际的暴露情景。1998 年,WHO 采纳了 Fawell 等的实验结果,他们进行了为期 13 周的小白鼠 MC-LR 毒性试验,得出最大无作用剂量(NOAEI)为 $40 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TDI 为 $0.04 \mu\text{g MC-LR} \cdot \text{kg}^{-1} \text{BW}$,饮用水中 MC-LR 质量浓度指导值为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ [9]。而利用该评估模型对 NO-AEL 进行推导的过程中,只考察了肝的病理变化以及相关酶的活性,仅适用于肝的慢性损伤及癌前病变,并未涉及其他器官。而许多研究都证明 MCs 对肾脏、心脏、生殖系统和神经系统等有损伤作用,因此,需要进一步全面研究 MCs 对人体的毒性效应,以得出 MCs 真实的安全剂量。

4 太湖重污染湖区和饮用水源地主要环境风险问题 (Major environmental risks in heavily polluted lake area and drinking water source of Lake Taihu)

(1)富营养化形势严峻,水质仍需进一步改善。目前,太湖水源地水质普遍呈现富营养化,蓝藻时有暴发。贡湖水源地的营养盐浓度(主要指总磷、总氮)仍偏高,只要温度、水流和光照等生境条件适宜,蓝藻依旧可能暴发,这一现象即使在采取非常严格的治理措施的情况下,仍会延续相当长的时间。金墅港水源地、渔洋山水源地总氮浓度超过《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中Ⅲ类标准($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。太湖 V 类和劣 V 类入湖河流主要分布在太湖西部区域,日趋严重的富营养化问题已经严重制约这些区域的社会和经济的可持续发展,尤其是竺山湖等地,水质基本都劣于 V 类。

(2)太湖水污染及蓝藻预警监测注重常规水质指标,而对于富营养污染和蓝藻水华的特征污染物藻毒素的含量缺乏持续性暴露评估,也缺乏复杂介质中痕量藻毒素的定性定量测定技术。日常巡检监测项目基本集中在水温、透明度、pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮、叶绿素 a 和藻类密度等,对不同类型的藻毒素含量的监测严重不足,个别监测点位的数据还仅来源于一些科研项目的开展,监管的缺乏使得管理部门对蓝藻水华的生态和健康危害的评估缺乏基础数据。

(3)缺乏对太湖蓝藻水华主要衍生污染物的形成机理、影响因子和迁移转化规律的研究。对太湖重污染区域和水源地,迫切需要开展水体藻毒素的

污染程度、分布特征和环境过程的研究。结合常规水质指标监测,分析其产生和变化与各种环境因子之间的关系,揭示太湖重点区域藻毒素分布的时空差异性原因。

(4)对太湖水源地藻毒素的水环境安全仍缺乏有效评估,需要开展水源地水质安全和人类健康风险评估。太湖有毒蓝藻水华仍频繁发生,虽然,目前对水华蓝藻的藻毒素研究较多,但对水质安全的威胁认识不足。渔产品中的 MCs 含量普遍较高甚至很高,其对人类健康的潜在威胁不容忽视,产毒蓝藻及死亡分解过程中所产生的 MCs 在水生动物体内的累积及食用风险急需评估,此外,严重富营养化区域农作方式导致藻毒素在粮食作物中残留,由此造成的人类健康风险也不容忽视。

(5)饮用水源地突发水华污染事件的应急处置机制尚需进一步完善,多部门联动和上下城市间的信息沟通也有待加强。管理和监测部门需要进一步强化水华主要衍生污染物的监测和快速有效处置,保证饮用水安全。建立完善的蓝藻水华预警体系与专家决策支持,提升应急能力,采取有效的蓝藻消减工程措施均是太湖水源地取水安全的重要保障。

参考文献 (References):

- [1] Li X Q, Yuan J, Yang F, et al. Environmental abundance and microcystin-LR production ability of toxic microcystis in Nanquan region of Lake Taihu [J]. Journal of South-east University (English Edition), 2010, 26(1): 96-99
- [2] Codd G A, Morrison L F, Metcalf J S, Cyanobacterial toxins: Risk management for health protection [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2005, 203: 264-272
- [3] 姜锦林, 宋睿, 任静华, 等. 蓝藻水华衍生的微囊藻毒素污染及其对水生生物的生态毒理学研究[J]. 化学进展, 2011, 23: 246-253
- [4] Jiang J L, Song R, Ren J H, et al. Advances in pollution of cyanobacterial blooms-producing microcystins and their ecotoxicological effects on aquatic organisms [J]. Progress in Chemistry, 2011, 23: 246-253 (in Chinese)
- [5] Jiang J L, Wang X R, Shan Z J, et al. Proteomic analysis of hepatic tissue of *Cyprinus carpio* L. exposed to cyanobacterial blooms in Lake Taihu, China [J]. Plos One, 2014, 9(2): e88211
- [6] 谢平. 水生动物体内的微囊藻毒素及其对人类健康的潜在威胁[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 166-185
- [6] 吴庆龙, 谢平, 杨柳燕, 等. 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, 2008, 23: 1115-1123
- Wu Q L, Xie P, Yang L Y, et al. Basic study on formation mechanism and prevention of ecological disasters of cyanobacteria Shui Hua in lakes [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23: 1115-1123 (in Chinese)
- [7] 周伟杰, 丁新良, 钮伟民, 等. 环太湖城市水源水及出厂水中微囊藻毒素污染监测[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29: 332-334
- Zhou W J, Ding X L, Niu W M, et al. Monitoring of microcystins pollution in source water and finished water in cities around Taihu Lake [J]. Environmental Health, 2012, 29: 332-334 (in Chinese)
- [8] 马荣华, 孔繁翔, 段洪涛, 等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 687-694
- Ma R H, Kong F X, Duan H T, et al. Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(6): 687-694 (in Chinese)
- [9] World Health Organization. Cyanobacterial Toxins: Microcystin-LR in Drinking-water, Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality [S]. Geneva: World Health Organization, 2003
- [10] 王经结, 杨佳, 鲜啟鸣, 等. 太湖微囊藻毒素时空分布特征及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 513-519
- Wang J J, Yang J, Xian Q M, et al. Characteristic of microcystin distributions and its relationships with environmental factors in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 513-519 (in Chinese)
- [11] 魏代春, 苏婧, 纪丹凤, 等. 基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4530-4536
- Wei D C, Su J, Ji D F, et al. Research on the threshold of Chl-a in Lake Taihu based on microcystins [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4530-4536 (in Chinese)
- [12] Ma J R, Qin B Q, Wu P, et al. Controlling cyanobacterial blooms by managing nutrient ratio and limitation in a large hyper-eutrophic lake: Lake Taihu, China [J]. Journal of Environmental Science, 2015, 27: 80-86
- [13] Zhou J, Qin B Q, Han X X, et al. Turbulence increases the risk of microcystin exposure in a eutrophic lake (Lake Taihu) during cyanobacterial bloom periods [J]. Harmful Algae, 2016, 55: 213-220
- [14] Ye W J, Liu X L, Tan J, et al. Diversity and dynamics of microcystin—Producing cyanobacteria in China's third largest lake, Lake Taihu [J]. Harmful Algae, 2009, 8: 637-644
- [15] 李大命, 孔繁翔, 于洋, 等. 冬季太湖表层底泥产毒蓝藻群落结构和种群丰度[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6551-6560
- Li D M, Kong F X, Yu Y, et al. The community structure and abundance of microcystin-producing cyanobacteria in surface sediment of Lake Taihu in winter [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6551-6560 (in Chinese)
- [16] Chen W, Song L R, Gall N Q, et al. Sorption, degradation and mobility of microcystins in Chinese agriculture soils: Risk assessment for groundwater protection [J]. Environmental Pollution, 2006, 144: 752-758
- [17] Song H H, Reichwaldt E S, Ghadouani A. Contribution of sediments in the removal of microcystin-LR from water [J]. Toxicon, 2014, 83: 84-90
- [18] Dziga D, Wasylewski M, Wladyka B, et al. Microbial degradation of microcystins [J]. Chemical Research in Toxicology, 2013, 26: 841-852
- [19] Zhang D W, Xie P, Liu Y Q. Transfer, distribution and bioaccumulation of microcystins in the aquatic food web in Lake Taihu, China, with potential risks to human health [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407: 2191-2199
- [20] Chen J, Zhang D, Xie P, et al. Simultaneous determination of microcystin contaminations in various vertebrates (fish, turtle, duck and water bird) from a large eutrophic Chinese lake, Lake Taihu, with toxic microcystis blooms [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407: 3317-3322
- [21] Kós P, Gorzó G, Surányi G, et al. Simple and efficient method for isolation and measurement of cyanobacterial hepatotoxins by plant tests (*Sinapis alba* L.) [J]. Analytical Biochemistry, 1995, 225: 49-53
- [22] 刘碧波, 吴烨, 耿俊杰, 等. 微囊藻毒素对水稻、高粱和玉米毒性的研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40: 258-261
- Liu B B, Wu Y, Geng J J, et al. Toxicity of microcystins to rice, sorghum and maize [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2012, 40: 258-261 (in Chinese)
- [23] Chen J Z, Ye J Z, Zhang H Y, et al. Freshwater toxic cyanobacteria induced DNA damage in apple (*Malus pumila*), rape (*Brassica napus*) and rice (*Oryza sativa*) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190: 240-244
- [24] Chen J, Han F X, Wang F, et al. Accumulation and phytotoxicity of microcystin-LR in rice (*Oryza sativa*) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 76: 193-199
- [25] Chen J, Zhang H Q, Hu L B, et al. Microcystin-LR-in-

- duced phytotoxicity in rice crown root is associated with the cross-talk between auxin and nitric oxide [J]. *Chemosphere*, 2013, 93: 283-293
- [26] 张慧, 姜锦林, 张宇峰, 等. 微囊藻毒素-LR 和铜绿微囊藻裂解液对营养生长期水稻生理生化效应[J]. *中国环境科学*, 2017, 37: 3134-3141
- Zhang H, Jiang J L, Zhang Y F, et al. Physiological and bio-chemical effects of pure MC-LR and *Microcystis aeruginosa* crude extracts on *Oryza sativa* L. at vegetative stage [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37: 3134-3141 (in Chinese)
- [27] 时玥, 姜锦林, 邓正栋, 等. 微囊藻毒素-LR 和铜绿微囊藻裂解液对水稻光合作用的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37: 4284-4293
- Shi Y, Jiang J L, Deng Z D, et al. Effects of pure MC-LR and *Microcystis aeruginosa* crude extracts on photosynthesis of *Oryza sativa* L. [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37: 4284-4293 (in Chinese) ◆