

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.018



双效工程菌 Y1 溶藻产物的急性毒性与健康风险评估

潘瑞松^{1,2}, 沈红池¹, 吴旭鹏¹, 蔡庆庆¹, 王明新¹, 张文艺¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州环保科技开发推广中心, 江苏 常州 213022)

摘要:为检测溶藻、藻毒素降解双效工程菌 Y1 溶藻产物的生物毒性,采用发光细菌测定急性毒性,利用 USEPA 推荐模型对水源水进行健康风险评估。结果表明, Y1 溶藻菌液能有效地抑制铜绿微囊藻的生长,并对发光细菌具有轻微的毒性。当叶绿素 a 浓度为 34.92 mg/m³ 时,增加投加量会使藻液毒性加强;当叶绿素 a 浓度大于 46.56 mg/m³ 时,加菌后藻液毒性明显降低。水源水中 MC-LR 的非致癌风险值为 2.89~4.87,通过 BAF 处理后能减少到 1.3,而加 Y1 菌强化后得到的 0.6 达到了健康风险评估安全标准。UV₂₅₄ 与致突变强度的预测模型表明经过处理的水中有机物无致突变性,说明 Y1 应用于水源水无生物毒性和致突变风险。

关键词:发光细菌;叶绿素;藻毒素;急性毒性;健康风险评估

中图分类号:X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)05-0141-06

Acute toxicity of the algae-lyng products and assessment on health risks of microcystin in drinking water sources

Pan Ruisong^{1,2}, Shen Hongchi¹, Wu Xupeng¹, Cai Qingqing¹,
Wang MingXin¹, Zhang Wenyi¹

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, P. R. China;
2. Changzhou Environmental Protection Technology Exploitation and Development Center, Changzhou 213022, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: In order to detect the toxicity of algicidal products and valuate the harm of microcystin in the water source to the human body, the luminescent bacteria was to determine the toxicity, USEPA recommended model provided a health risk assessment of source water. The results show that the strain Y1 inhibit the growth of microcystis aeruginosa effectively. The strain had a slight toxicity to the luminescent bacteria. When the concentration of chlorophyll a was 34.92 mg/m³, the increase of dosage could enhance the toxicity of algae. The toxicity of liquid algae added bacteria was significantly lower than that of the control group, when the concentration of chlorophyll a was greater than 46.56 mg/m³. The non carcinogenic risked index of MC-LR in the water source was 2.89~4.87, which was reduced to 1.3 after

收稿日期:2017-11-15

基金项目:国家自然科学基金(41571471),江苏省及常州市科技支撑项目(BE2016653、WS201621、CE20175009)

作者简介:潘瑞松(1968-),高级工程师,主要从事饮用水安全保障研究,E-mail:326664395@qq.com.

张文艺(通信作者),男,博士、教授,E-mail:zwy@cczu.edu.cn.

Received:2017-11-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 41571471), Jiangsu Province and Changzhou Science and Technology Support Project(No. BE2016653, WS201621, CE20175009)

Author brief: Pan Ruisong (1968-), senior engineer, main research interest: urban drinking water safety, E-mail: 326664395@qq.com.

Zhang Wenyi(corresponding author), PhD, professor, E-mail:zwy@cczu.edu.cn.

BAF treatment, even to 0.6 after adding strain Y1. It reached health risk assessment safety standards when the value was less than 1. Through the prediction model, it was found that the organic matter in treated water had no mutagenicity, it indicated that waters with strain Y1 had not biotoxicity and mutagenicity.

Keywords: luminescent bacteria; chlorophyll; microcystin; acute toxicity; health risk assessment

中国南方饮用水多取自于淡水湖泊、河流及水库。随着水体富营养化的加重,水源地蓝藻爆发日益频繁^[1-2]。蓝藻爆发不仅导致水质下降,还会产生藻毒素,其中微囊藻毒素(Microcystins, MCs)具有极强的肝、肠致癌毒素,严重危害着人们的健康,所以保护水源水迫十分急迫^[3-5]。生物法是近年来兴起的、利用溶藻细菌控制水体藻类繁殖的一种控藻方法,其基本控藻机制一是通过直接与藻接触杀藻,二是通过菌分泌的胞外物质杀藻^[6-7]。但对溶藻产物及藻溶解后生物残留物的急性毒性、健康风险和致突变鲜有研究^[8]。

发光细菌是一种在自然状态下能够发出荧光的细菌,现广泛应用于水、土壤、沉积物等方面的毒性测定,是一种快捷、高效、廉价的毒性测试方法^[9-11]。健康风险评价是评价人体长期摄入某种有害物质后对人类造成的伤害^[12-14]。而为了确保居民饮用水安全,对含 MC 的水可能造成的危害进行健康风险评价是十分必要的。健康风险评价采用模型计算有毒物质对人群的影响,美国(USEPA)推荐的模型是较为常用的评估模型^[15-16]。

将已构建的溶藻和藻毒素双效工程菌 Y1 制成菌剂,利用发光细菌研究其对铜绿微囊藻降解产物的毒性。采用美国环保署 EPA 推荐的健康风险模型——有机物致突变强度的预测模型公式^[15]对水源水、曝气生物滤池(BAF)处理水和 Y1 菌剂强化处理水进行健康风险评估。

1 材料与方 法

1.1 菌剂培养基和菌种

1)菌种:采用本课题组专利“一种溶藻/藻毒素降解双效工程菌 Y1 及其构建方法(专利 201310419121.5)”中的菌剂 Y1 菌(*Bacillus sphaericus*, 保藏号 CGMCC NO. 7519)。

2)培养基:蛋白胨 10 g,牛肉膏 3 g, NaCl 15 g, 蒸馏水 1 L, pH 7.2~7.4。

1.2 铜绿微囊藻来源及培养

选用的藻种为铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*) FACHB-905,购于中科院武汉水生生物研究所国家淡水藻种库。将购买的藻静置于光照培养箱中培

养,培养箱条件:温度 28℃、光照强度 2 500 lx、光照周期比 12 h : 12 h。

1.3 菌剂 Y1 制备方法

用接种环取斜面培养基上的 Y1 菌置于高压灭菌后的液体培养基内在 140 r·min⁻¹ 的震荡箱内恒温震荡 24 h。

1)菌液投加比溶藻产物的急性毒性试验 将培养 18 h 的菌液分别以菌藻比 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20 的量投加,并于温度 28℃、光强 2 500 lx、光暗周期 12 h : 12 h 条件下,在光照培养箱中静置培养,取样测定叶绿素 a 的浓度和培养液急性毒性。

2)初始藻液质量浓度的溶藻产物急性毒性试验 将培养 18 h 的菌液分别以菌藻比 1 : 10 的量投加到不同初始浓度的新鲜藻液中,并于温度 28℃、光强 2 500 lx、光暗周期 12 h : 12 h 条件下,在光照培养箱中静置培养,取样测定叶绿素 a 的浓度和培养液急性毒性。

1.4 检测方法

1)叶绿素 a 的测定:Chla 测定^[17]:参照国家环保总局编的《水和废水监测分析方法(第四版)》,其中的丙酮用乙醇代替。

2)发光细菌急性毒性测定:发光细菌遇到毒性物质,发光会受到抑制。对照和样品均设两个平行管,将管子按照顺序排布,冻干菌剂用稀释液活化 15 min 后,加 100 μL 到每个试管中,过 15 min 后测空白。以 NaCl 稀释液作为对照,2 000 μL 待测样品加入 200 μL 调解液混匀,两个平行管每管 900 μL,过 15 min 后测发光亮。

$$cF = b/a$$

$$e\% = c \times cF - d/c \times cF \times 100\%$$

$$\text{相对发光度}\% = 1 - e$$

式中: a 为对照组的空白; b 为对照组测定数据; cF 为对照组的相对剩余发光度; c 为样品组的空白; d 为样品组测定数据; e 为光损。

1.5 BAF 处理水源水健康风险评估方法

国际癌症研究署(IARC)将化学物的分类为 I 级(致癌)、II A 级(很可能致癌)、II B 级(可能致癌)、III 级(无法归类)和 IV 级(很可能不致癌)。MC-LR 属于 II B 级,对人类致癌性证据有限^[18]。非致

癌风险值计算公式为^[19]

$$R = \frac{CDI}{RfD} \quad (1)$$

式中:RfD为MC-LR进入人体的参考剂量(mg/kg·d)。目前尚无MC-LR的RfD的值,国际上通用0.04 μg/(kg·d)作为其值;CDI为长期通过饮用水方式每日每千克体重下的摄入量 mg/(kg·d)。

在饮水途径暴露下,CDI的计算公式为

$$CDI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中:C为水源水中MC-LR所存在的浓度,mg/L;IR为成人饮水率,USEPA建议值为2 L/d;EF为暴露于致癌物质的频率,即接触含MC-LR水的频率,定该值为365 d/a;ED为接触MC-LR总共所持续的时间,USEPA推荐的数值为30 a;BW为摄入MC-LR的人体体重,通过国家标准设为60 kg;AT为接触引用水的时间,对于非致癌健康风险该值为ED×365 d/a^[20]。

1.6 有机物致突变强度的预测模型

研究表明水质参数如氮磷、COD、pH和UV₂₅₄等数值与致突变强度有密切联系。学者们就水质参数与致突变强度(Mutation Rate, MR)建立了多种模型^[21]。建立水质参数与致突变强度的预测模型能为水环境监测部门提供检测水质毒性强度的便捷方法。有关于UV₂₅₄与致突变强度的预测模型,在此模型中以UV₂₅₄数值作为自变量,以定量水样致突变强度为因变量。多项研究揭示了UV₂₅₄和温度与水质有机物致突变强度有较高的相关性。本研究采用多元回归方程

$$MR = 12.749 \times UV_{254} + 0.054 \times \text{temp} + 0.312,$$

引入UV₂₅₄和温度2个指标^[22]。

2 结果与讨论

2.1 菌液投加比例对溶藻产物的急性毒性

将初始叶绿素a浓度34.92 mg/m³的藻液加入不同菌量于28℃光照培养箱内培养6 d,测定空白样和加菌样的叶绿素a,发现加入菌剂Y1均能对铜绿微囊藻产生降解作用。随着时间的增加降解率提高,在第6 d叶绿素a的量均为0。在此基础上,研究不同菌藻比对发光细菌的毒性研究,以未加菌液的铜绿微囊藻为对比,在第3 d时,空白、1:10、1:5的相对放光度都降低了,而菌藻比1:20的相对放光度上升了,到了第6 d,各溶液的相对放光度继续减少,投菌量越多,对发光细菌的抑制作用越强,藻细胞经过Y1菌的降解毒性反而增强了。可

能的原因是藻量较少导致菌大量繁殖,而Y1菌为球形芽孢杆菌,球形芽孢杆菌能够作为杀蚊剂,具有一定的毒性^[23]。

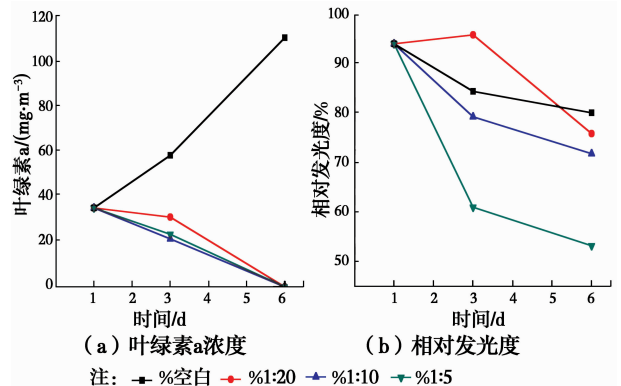


图1 菌藻比对溶藻产物毒性影响

Fig. 1 Effect of algae ratio on the acute toxicity of algae-lying products

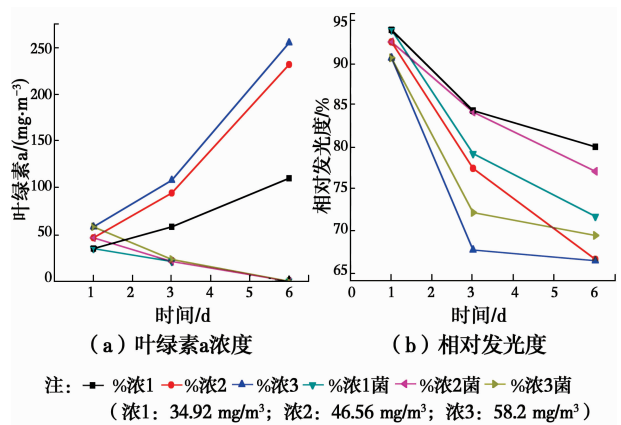


图2 不同初始浓度对溶藻产物毒性影响

Fig. 2 Effect of the initial *Microcystis aeruginosa* concentration on the acute toxicity of algae-lying products

2.2 初始藻液质量浓度对溶藻产物急性毒性影响

在初始叶绿素a浓度分别为34.92 mg/m³、46.56 mg/m³、58.2 mg/m³的藻液中投加1:10的Y1菌液,由图可知,Y1菌液对不同初始浓度的藻液均有降解效果。在第3 d分别降解至21.22 mg/m³、21.12 mg/m³、23.38 mg/m³,初始浓度高抑制效果更好,处理6 d后Y1菌均能将藻完全杀死。对于不同初始浓度的藻液进行发光细菌的毒性研究,从第1 d的数据可以看出,藻初始浓度越高对发光细菌的抑制能力越强。随着未加菌样叶绿素a浓度的提高,其相对放光度随之降低,藻浓度越高,相对放光度越低。加入1:10的Y1菌液后,浓度2和3的水样相对放光度虽然降低,但与对照组相比,其对发光细菌的毒性并没有那么强。菌液作用6 d后,处理组的相对放光度分别为71.75%、77.10%、69.

47%，而对照组为 80.02%，66.63%，66.47%。说明水样中微量的藻毒性较小，而藻浓度较高时，水中的藻毒素的含量因藻的代谢和破裂比低浓度时更高^[24]，Y1 菌剂是溶藻和降解藻毒素的双效工程菌，投加菌剂后既能溶解藻又将产生的藻毒素也降解了，能够有效的降低水质的急性毒性。

2.3 BAF 进出水源水健康风险评价

向其中一个 BAF 装置中投加 250 mL 1.87×10^5 cfu · mL⁻¹ 的 Y1 菌液。以 BAF 装置处理的进出水样中 MC-LR 质量浓度为基础，运用式(2)计算出 MC-LR 的长期摄入量并通过非致癌风险值计算式(1)计算出 R 值。通过 BAF 工艺处理过的水源水 MC-LR 浓度都下降了。由测定的藻毒素含量可知未加菌的 1 号 BAF 进水 MC-LR 浓度在 2.89~4.75 μg/L 之间，而加菌的 2 号 BAF 进水 MC-LR 浓度在 3.34~4.87 μg/L 之间，1 号出水浓度为 1.56~3.33 μg/L，2 号加菌处理后的浓度在 0.72~3.37 μg/L。水样中 MC-LR 的 R 值为 2.4~4.05，经过处理之后水样的毒性均减小了，1 号 BAF 工艺出水 R 值最低 1.3，最高 2.8，而加菌以后对 MC-LR 的去除效率更高，R 值为 0.6~2.8。

表 1 投菌和未投菌的 BAF 处理水中 MC-LR 浓度

Table 1 The concentration of MC-LR in the treated water of BAF with and without bacteria Y1

连续运行 d 数	未投 Y1 菌 / (μg · L ⁻¹)		投加 Y1 菌 / (μg · L ⁻¹)	
	进水	出水	进水	出水
1	3.11	2.92	4.38	3.37
2	3.74	3.1	3.97	2.48
3	2.89	2.18	4.36	2.15
4	3.11	2.30	3.35	1.86
5	4.75	3.33	4.87	2.18
6	3.31	2.25	3.34	1.32
7	3.11	2.16	3.35	1.60
8	3.41	2.30	3.95	1.60
9	3.51	2.30	3.95	1.26
10	3.11	1.66	3.35	0.73
11	3.53	1.66	3.55	0.83
12	4.13	1.56	3.55	0.72

通常认为 R 值 > 1 对人的身体有害，R 值 ≤ 1 对人的身体危害较小^[25]。通过上述计算可知处理前的水中 MC-LR 的 R 值均 > 1，原水中 MC-LR 含量超标严重影响人体健康，经过 BAF 处理后出水的 R 值明显减小，但由于原水样的 MC-LR 浓度过高，处理后的水样仍然损害人体，加菌处理的水样处理效

果比未加菌的样好，处理完的水最低 R 值达到 0.6，小于 1，符合要求。

2.4 有机物致突变强度的预测模型

从 3 月 28 日至 4 月 29 日中选取 8 d 测定水温和 Y1 菌强化后 BAF 装置的进出水 UV₂₅₄ 数值。通过测得的数据可知，经过处理后水的 UV₂₅₄ 远远小于进水值。UV₂₅₄ 数值能够很好的确定水中大分子有机物的量，这些大分子包括一些能致癌的芳香族化合物。通过回归方程计算得到不同 UV₂₅₄ 下的回复突变率 MR。通常认为 MR > 2 则有致突变性，而 MR ≤ 2 即为无致突变性。未经处理的源水 MR 在 2.24~3.06 之间，均大于 2 具有致突变性，而经过处理后水的 MR 在 0.46~0.85 之间，远远小于 2，基本清除致突变性。

表 2 有机物致突变强度

Table 2 Mutagenicity of organic compounds

日期	进出水	UV ₂₅₄	温度 / °C	MR
3 月 28 日	进水	0.136	13.5	2.77
	出水	0.024		0.62
3 月 29 日	进水	0.138	15.8	2.92
	出水	0.041		0.83
4 月 1 日	进水	0.082	17.5	2.30
	出水	0.042		0.85
4 月 5 日	进水	0.078	17.2	2.24
	出水	0.036		0.77
4 月 21 日	进水	0.108	19.5	2.74
	出水	0.016		0.52
4 月 22 日	进水	0.112	24.4	3.06
	出水	0.018		0.54
4 月 26 日	进水	0.121	19.8	2.92
	出水	0.016		0.52
4 月 29 日	进水	0.108	21.9	2.87
	出水	0.012		0.46

3 结论

1) 由于 Y1 菌为球形芽孢杆菌具有一定毒性，当藻浓度过低时加入 Y1 菌剂的毒性要比不加菌高。而藻浓度越高，对发光细菌毒性越大，加菌后叶绿素 a 浓度降低，对发光细菌的毒性也随之降低，分析说明溶藻产物对发光细菌的毒性并不大。

2) 健康风险评价模型分析表明，未经 BAF 处理过的水中 MC-LR 的 R 值为 2.4~4.05，对人体的伤害很大，处理过后的水 R 值明显减少为 1.3~2.8，

加 Y1 菌的 BAF 出水 MC-LR 的 R 值最低达到 0.6, 低于基准值, 无健康风险。UV₂₅₄ 与致突变强度的预测模型分析表明, 处理前的水中有机物 MR > 2, 具有致突变性, 而经过处理的水 MR 远小于 2, 基本无致突变性, 说明 Y1 应用于水源水无生物毒性和致突变风险。

参考文献:

- [1] 周国鼎. 蓝藻污染的危害及防治[J]. 污染防治技术, 2008, 21(1): 86-88.
ZHOU G D. Effect of cyanobacteria pollution and control methods [J]. Pollution Control Technology, 2008, 21(1): 86-88. (in Chinese)
- [2] 陈建中, 郭玲, 汤玲燕, 等. 蓝藻毒素影响植物生长发育及其机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 724-728.
CHEN J Z, GUO L, TANG L Y, et al. Advances and its mechanism in the effect of cyanobacterial toxins on plant growth [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 724-728. (in Chinese)
- [3] TAKUMI S, SHIMONO T, IKEMA S, et al. Overexpression of carboxylesterase contributes to the attenuation of cyanotoxin microcystin-LR toxicity [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2017, 194: 22-27.
- [4] 黎雷, 高乃云, 殷娣娣, 等. 控制饮用水原水中藻类、藻毒素的水厂处理工艺[J]. 中国给水排水, 2008, 24(6): 20-24.
LI L, GAO N Y, YIN D D, et al. Treatment processes in water works for removal of algae and algal toxins from raw water [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(6): 20-24. (in Chinese)
- [5] 朱小奕, 陈瑾, 张建英. 水环境中藻毒素生态风险的物种敏感性分布评价[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(3): 131-139.
ZHU X Y, CHEN J, ZHANG J Y. Assessing ecological risk of cyanotoxins based on interspecies correlation estimation and species sensitivity distributions [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(3): 131-139. (in Chinese)
- [6] 母锐敏, 贾静静, 张盛至. 溶藻细菌 FSI 的溶藻效果与机制初探[J]. 微生物学杂志, 2015, 35(6): 16-20.
MU R M, JIA J J, ZHANG S Z. Initial investigation on algicidal effect and mechanism of algae-lytic bacteria FSI [J]. Journal of Microbiology, 2015, 35(6): 16-20. (in Chinese)
- [7] ROTH P B, TWINER M J, MIKULSKI C M, et al. Comparative analysis of two algicidal bacteria active against the red tide dinoflagellate *Karenia brevis* [J]. Harmful Algae, 2008, 7(5): 682-691.
- [8] 孔赞, 朱亮, 徐向阳, 等. 溶藻菌发酵液及其溶藻产物的生物急性毒性试验[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 913-918.
KONG Y, ZHU L, XU X Y, et al. Acute toxicity of the fermentation broth of algae-lytic bacteria and its products [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(5): 913-918. (in Chinese)
- [9] 张述伟, 孔祥峰, 姜源庆, 等. 生物监测技术在水环境中的应用及研究[J]. 环境保护科学, 2015, 41(5): 103-107.
ZHANG S W, KONG X F, JIANG Y Q, et al. Review of application and research of biological monitoring technologies in aquatic environment [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(5): 103-107. (in Chinese)
- [10] 黄灿克, 刘婷婷, 汤晓畏. 发光细菌毒性法在饮用水水质评估与预警中的应用[J]. 环境监测与预警, 2015, 7(3): 4-7.
HUANG C K, LIU T T, TANG X W. Application of the photobacteria toxicity detection method in water quality assessment [J]. Environmental Monitoring and Forewarning and Early Warning of Drinking Water, 2015, 7(3): 4-7. (in Chinese)
- [11] GIROTTI S, FERRI E N, FUMO M G, et al. Monitoring of environmental pollutants by bioluminescent bacteria [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 608(1): 2-29.
- [12] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 74-79.
NI B, WANG H B, LI X D, et al. Water environmental health risk assessment in lake sources of drinking water [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(1): 74-79. (in Chinese)
- [13] 季文佳, 杨子良, 王琪, 等. 危险废物填埋处置的地下水环境健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4): 548-552.
JI W J, YANG Z L, WANG Q, et al. Health risk assessment of groundwater in hazardous waste landfill disposal [J]. China Environmental Science, 2010, 30(4): 548-552. (in Chinese)
- [14] 王伟琴, 金永堂, 吴斌, 等. 水源水中微囊藻毒素的遗传毒性与健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4): 468-476.
WANG W Q, JIN Y T, WU B, et al. Assessment on genotoxicity and health risks of microcystin in drinking water sources [J]. China Environmental Science, 2010, 30(4): 468-476. (in Chinese)
- [15] ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY U S.

- Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (part A) [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989: 1-7.
- [16] 杨彦,于云江,魏伟伟,等.常州市浅层地下水重金属污染对城区、城郊居民健康风险评价[J].环境化学,2013,32(2):201-211.
- YANG Y, YU Y J, WEI W W, et al. Health risk assessment of heavy metals in shallow groundwater in urban and suburban areas of Changzhou [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32 (2): 201-211. (in Chinese)
- [17] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002:250-253.
- State Environmental Protection Administration "Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods" Editorial Board. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 250-253. (in Chinese)
- [18] 孟元华,朱鹏飞,龚燕,等.太湖水产品中微囊藻毒素-RR的污染状况及初步健康风险评估[J].食品安全质量检测学报,2016,7(5):1794-1797.
- MENG Y H, ZHU P F, GONG Y, et al. Pollution status and preliminary health risk assessment of microcystin-RR in aquatic products of Taihu lake[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2016, 7(5): 1794-1797. (in Chinese)
- [19] EPA U. S. Superfund public health evaluation manual [R]. EPA/ 540/186060, 1986.
- [20] REZAITABAR S, SARI A E, BAHRAMIFAR N, et al. Transfer, tissue distribution and bioaccumulation of microcystin LR in the phytoplanktivorous and carnivorous fish in Anzali wetland, with potential health risks to humans [J]. Science of The Total Environment, 2017, 575: 1130-1138.
- [21] USEPA. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment [S]. Washington DC: 2005.
- [22] 金涛.江苏某地长江、太湖水源饮用水中有机物的致突变性、雌激素活性及其健康风险评价[D].武汉:华中科技大学,2013.
- JIN T. The mutagenic and the estrogenic activity of organic compounds and health risk assessment in source water and finished water from the Yangtze River and Taihu Lake in Jiangsu Province [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [23] 李新社,曾建德,陆步诗,等.球形芽孢杆菌对酒曲害虫黑菌虫的毒杀效果[J].农药,2008,47(3):217-218.
- LI X S, ZENG J D, LU B S, et al. Insecticidal effectivity of bacillus sphaericus to main daqu insect alphetobius diaperinus panzer [J]. Agrochemicals, 2008, 47(3): 217-218. (in Chinese)
- [24] PATRICK O I. Oxidative stress biomarkers in clarias gariepinus (Burchel, 1822) exposed to Microcystin-LR [J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2017, 6(1): 69-75.
- [25] 张明,唐访良,徐建芬,等.杭州贴沙河微囊藻毒素污染特征及健康风险评估[J].环境监测管理与技术,2016,28(1):27-31.
- ZHANG M, TANG F L, XU J F, et al. Characteristics and health risk assessment of microcystins pollution in Tiesha River [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2016, 28(1): 27-31. (in Chinese)

(编辑 胡玲)