

小溪港·望虞河对贡湖湾水质及微囊藻毒素-LR的影响

汪锋¹, 钱庄¹, 张雅晶², 张周² (1. 无锡市环境科学研究所, 江苏无锡 214121; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要 [目的]考察贡湖湾入湖河道对贡湖湾水质及MC-LR的影响。[方法]对贡湖水体及其主要入湖河道小溪港、望虞河进行了为期1年的水质监测(2014年6月—2015年5月),分析了高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、溶解氧(DO)及微囊藻毒素-LR(MC-LR)的时空分布特征。利用美国EPA推荐的模型——健康风险评估“四步法”对MC-LR进行非致癌评价。并采用SPSS软件分析了MC-LR与典型环境因子之间的相关性。[结果]研究区域内TN、TP是主要特征污染物,小溪港和望虞河水质氨、磷含量高于贡湖湾内部,小溪港、望虞河和贡湖湾内部MC-LR平均浓度分别为0.47、0.46和0.38 μg/L,入湖河流对贡湖湾水质污染有一定贡献。MC-LR的健康风险值HI_{cgw}在0.11~0.38,远低于基准值。MC-LR与TP呈显著正相关($P < 0.05$) ($R^2 = 0.628$);与TN呈正相关,但相关性不显著。TP可能是影响MC-LR生成的主要因素。[结论]贡湖湾水体的主要超标因子为氮和磷,并存在一定浓度MC-LR,有一定的健康风险。今后需控制营养盐浓度,从而控制MC-LR的健康风险。

关键词 贡湖湾;微囊藻毒素-LR;相关性分析;健康风险评估

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)21-0044-05

Effects of Xiaoxi Port and Wangyu River on Water Quality and Microcystin-LR in Gonghu Bay

WANG Feng¹, QIAN Zhuang¹, ZHANG Ya-jing² et al (1. The Environmental Science Research Institute of Wuxi, Wuxi, Jiangsu 214121; 2. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122)

Abstract [Objective] To investigate the influence of inflow channel of Gonghu Bay on water quality and MC-LR. [Method] Water parameters such as COD_{Mn}, TN, TP, NH₄⁺-N, DO and MC-LR as well as their spatial and temporal distribution were analyzed in Gonghu Bay and its inflow rivers (Xiaoxi Port and Wangyu River), from June 2014 to May 2015. The carcinogenic evaluation from MC-LR was further estimated with US EPA health risk assessment (four-step method). The correlation between MC-LR and typical environmental factors was evaluated with SPSS. [Result] TN and TP were the major pollutants in the study area. The nitrogen and phosphorus contents in the Xiaoxi Port and Wangyu River were higher than those in Gonghu Bay. The average concentrations of MC-LR in the Gonghu Bay, Wangyu River and Xiaoxi Port were 0.47, 0.46 and 0.38 μg/L respectively, indicating that inflow rivers contributed some pollutants to Gonghu Bay. The health risk value of MC-LR HI_{cgw} was 0.11-0.38, which was much lower than the reference value. There was a significant positive correlation between MC-LR and TP ($P < 0.05$) ($R^2 = 0.628$), and a positive correlation between MC-LR and TN without significance. TP may be the main factor affecting MC-LR generation. [Conclusion] Nitrogen and phosphorus were the major pollutant factors in Gonghu Bay. The existence of MC-LR in water exhibited certain health risk in Gonghu Bay. Nutrient concentration of the study area need to be controlled to lower the health risks of MC-LR in the future.

Key words Gonghu Bay; MC-LR; Correlation analysis; Health risk assessment

太湖是我国典型的浅水湖泊,平均水深低于2 m,是我国蓝藻暴发较严重的富营养化湖泊之一^[1]。根据2016年9月发布的太湖健康状况报告,太湖的6个湖区分别为五里湖、梅梁湖、竺山湖、贡湖、东太湖和湖心区,其中贡湖是无锡、苏州主要的饮用水源地。2015年太湖整体水质为轻度富营养化^[2]。水体富营养化程度主要基于水中营养盐浓度的贡献^[3-5],而在合适条件下富营养化水体易导致蓝藻水华的暴发。蓝藻水华发生时部分藻类会释放出微囊藻毒素(MC)而对贡湖水源地造成影响^[6-8]。通过毒理学和流行病学研究得出,MC是一种环状七肽的急性肝毒素^[9-10],分子量约为1 000,目前含量较多且存在普遍的有3种:微囊藻毒素-LR(MC-LR)、微囊藻毒素-RR(MC-RR)和微囊藻毒素-YR(MC-YR),其中MC-LR的出现频率最高^[11]。由于MC的毒性效应,对贡湖湾内及其入湖河流中MC的浓度分布及其与典型因子[水温、溶解氧(DO)、光照、pH、总氮(TN)、总磷(TP)等]的相关性进行分析具有重要意义^[12]。健康风险评估是通过计算有害因素对人体造成危害的概率来评价受该因素对人体健康的影响,将水环境被污染的严重程度与人

体健康状况联系起来,定量分析水华对人体健康的危害^[13]。健康风险评估模型主要包括美国环境保护署(EPA)推荐的模型——健康风险评估“四步法”、加拿大模式和英国模式^[14-15]。其中,健康风险评估“四步法”是被国际公认的健康风险评估方法,被很多国家采用。笔者对贡湖湾和入湖河流小溪港、望虞河水质进行了时空分布分析,并在此基础上进一步分析了MC-LR和其他典型环境因子的相关性,找出贡湖水体蓝藻水华暴发和MC-LR产生的主要原因,最后采用美国环境保护署(EPA)推荐的模型对MC-LR进行健康风险评估。

1 材料与方法

1.1 采样点的布设 贡湖是太湖东北部一个湖湾,南北长约17 km,东西宽约16 km,总面积约173.9 km²,平均水深1.82 m,容积3.48亿m³。小溪港和望虞河是太湖贡湖的2条主要入湖河流,小溪港和望虞河的水质直接影响贡湖湾的水质。笔者在研究区域设立了11个采样点,采样点布设如图1所示。在小溪港布设3个采样点,分别为小溪港入湖口(X₁),小溪港闸北侧(X₂),小溪港上游1 000 m处(X₃),用于考察小溪港对贡湖水质的影响;在望虞河布设2个采样点,分别为望虞河入湖口(W₁),望虞河上游500 m处(W₂),用于研究望虞河对贡湖水质的影响;在贡湖湾内均匀布设6个采样点(G₁~G₆),用于确定贡湖水体的水质情况及评价饮用水源地的现状。

基金项目 国家“十二五”水专项课题(2013ZX07101-014;2012ZX07101-006)。

作者简介 汪锋(1970—),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事环境质量管理 and 评价研究。

收稿日期 2017-05-11

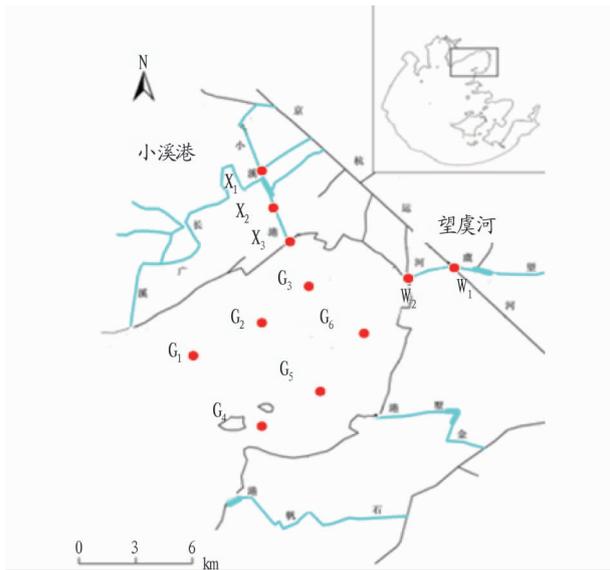


图1 贡湖湾采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Gonghu Bay

1.2 样品的采集与处理 水样采样时间为2014年6月—2015年5月,每月中旬采集1次。采集表面下0.5 m处水样,采集好的水样立即放入棕色玻璃瓶中,加入3 mol/L 硫酸溶液使其pH为2.0,避光低温存放在采样箱内。除DO、温度和pH在现场测定外,TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、叶绿素a(Chl-a)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})实验室测定,24 h内完成测定。

1.3 水质指标和MC-LR的测定 TN采用碱性过硫酸钾消解分光光度法(HJ 636—2012)测定,TP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用水杨酸显色光度法(HJ—665 2013)测定,Chl-a和 COD_{Mn} 采用分光光度法测定^[16],DO和pH采用哈希便携式DO测定仪现场测定。

MC-LR的测定采用全自动固相萃取-高效液相色谱法。采用HLB固相萃取柱(Waters,500 mg,6 mL)进行富集洗脱。富集条件:先用10.0 mL 甲醇(MeOH)和10.0 mL 去离子水活化固相萃取柱,萃取流速为3.0 mL/min;样品完全吸附后用10% MeOH溶液淋洗小柱,吹干后用5.0 mL MeOH减压洗脱,定容至1.0 mL。色谱条件:Shim-pack VP-ODS C18(250.0 mm × 4.6 mm,5 μm)色谱柱;柱温40 °C;二极管阵列检测器;检测波长238 nm;进样量10.0 μL;流速0.9 mL/min;流动相条件(等度洗脱):磷酸氢二钾缓冲溶液MeOH=43%:57%^[17]。

1.4 健康风险评价 目前国内外对MCs的毒性机制和健康风险问题评价体系尚不健全,MC-LR的致癌效应毒性参数为致癌斜率(SF),但由于目前国内外缺乏有权威的SF值,因此该研究使用美国EPA关于水环境健康风险评估模型——健康风险评价“4步法”定量评估MCs的非致癌健康风险问题,主要包括风险识别、暴露评估、毒性效应、风险表征4个步骤。根据现场调查结果,对现场多介质环境中的特征因子进行危害识别;确定现场多介质环境中特征污染因子对敏感人群的暴露途径、暴露时间、暴露强度及人群暴露参数(体重、日饮水量等);毒性效应是定量评估化学污染物暴露于人群环

境效应直接的关系;在危害识别、暴露评估、毒性效应的基础上,采用适当的风险计算模型,对污染特征因子对人体健康风险进行计算,并表征其风险的人群可接受程度。由于该研究区域为饮用水源地,因此风险评估中暴露途径以经口摄入为单一途径。经口摄入途径对水源地水体暴露量(CGWER_{nc})可以用式(1)表示:

$$\text{CGWER}_{\text{nc}} = \frac{\text{GWCR}_c \times \text{EF}_c \times \text{ED}_c}{\text{BW}_c \times \text{AT}_{\text{nc}}} \quad (1)$$

式中, CGWER_{nc} 表示饮用受影响水的暴露量[非致癌效应, $\text{L}/(\text{kg} \cdot \text{d})$], GWCR_c 表示每日饮水量(L/d),建议值为2; EF_c 表示暴露频率(d/a),建议值为350; ED_c 表示暴露期(a),建议值为300/365; BW_c 表示体重(kg),建议值为70; AT_{nc} 表示非致癌效应平均时间(d),建议值300。

经口摄入途径危害商(HI_{cgw})可以用式(2)表示:

$$\text{HI}_{\text{cgw}} = \frac{\text{CGWER}_{\text{nc}} \times C_{\text{gw}}}{\text{RfD}_o \times \text{WAF}} \quad (2)$$

式中, HI_{cgw} 表示经口摄入途径的危害商(无量纲); C_{gw} 表示水体中污染物浓度(mg/L); RfD_o 表示经口摄入剂量参考值 [$\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$],该研究采用0.04进行健康风险评价^[18];WAF表示暴露于水体中的参考剂量分配比例。

MC的危害商超过1,代表的场地区域划定为风险不可接受的污染区域。

1.5 数据分析方法 所有数据均采用Excel进行计算,采用SPSS 19.0对水质数据进行Spearman相关性分析,采用Origin 9.0对数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 贡湖水质的时空分布特征

2.1.1 空间变化特征。2014年6月—2015年5月,贡湖湾和小溪港、望虞河11个采样点的水质空间分布如图2所示。贡湖湾($G_1 \sim G_6$) COD_{Mn} 、TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和DO的平均浓度分别为5.940、0.620、0.043、0.091和8.800 mg/L。小溪港($X_1 \sim X_3$) COD_{Mn} 、TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和DO的平均浓度分别为6.290、1.550、0.099、0.084和8.560 mg/L。望虞河(W_1 、 W_2) COD_{Mn} 、TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和DO的平均浓度分别为6.210、1.780、0.110、0.093和8.720 mg/L。结果表明,贡湖湾内与入湖河流的 COD_{Mn} 整体在较低水平。对于营养盐指标(包括TN和TP),入湖河流小溪港和望虞河明显高于贡湖湾内部,表明入湖河道对贡湖湾的氮、磷有一定贡献。从年均数据来看,小溪港TN平均浓度为1.550 mg/L,为贡湖湾内的2.5倍;望虞河TN平均浓度为1.780 mg/L,为贡湖湾内的2.9倍。小溪港TP平均浓度为0.099 mg/L,为贡湖湾内的2.3倍,望虞河TP平均浓度为0.110 mg/L,为贡湖湾内的2.6倍。另外,整个调研区域DO浓度水平保持良好,浓度范围在8.030~9.030 mg/L,表明贡湖湾内和小溪港、望虞河具有良好的水动力特征和复氧条件。

从水质的空间分布来看,除 COD_{Mn} 和DO指标整体较优以外,TN、TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 指标在贡湖湾内部采样点呈现明显的由外太湖向近岸湖体递增的趋势。这也进一步说明了入

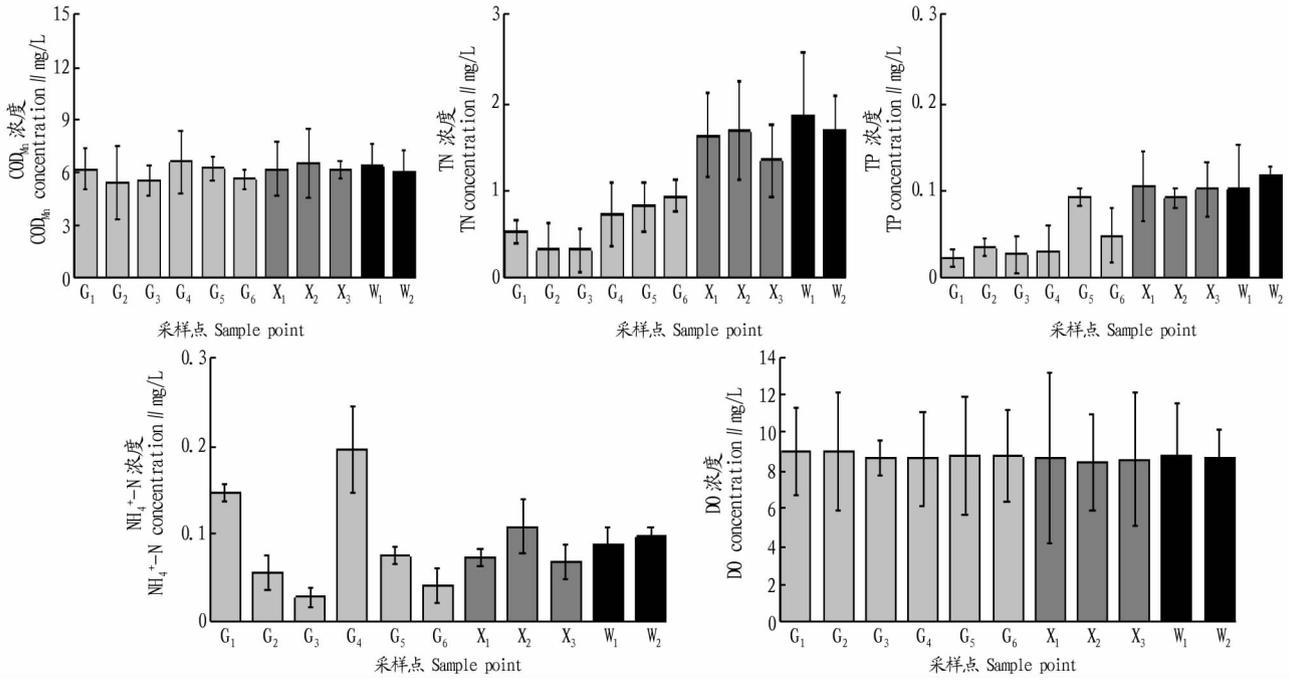


图2 贡湖湾水质的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of water qualities in Gonghu Bay

湖河道对贡湖湾污染物的输入。受望虞河水质影响较为明显的贡湖湾 G₆ 采样点 TN、TP 和 NH₄⁺-N 的年均指标分别为 0.940、0.049 和 0.042 mg/L,明显高于贡湖湾内部的平均水平。然而,受小溪港水质影响较为明显的贡湖湾 G₃ 采样点的体现出较低的 TN、TP 和 NH₄⁺-N 浓度水平。这可能是由于望虞河河道作为“引江济太”的清水通道,其频繁的调水使其对贡湖水水质产生较大影响,而小溪港和贡湖湾之间长期

以闸门封闭,水体之间无法正常交换,以地下潜水形式的水交换对污染物的贡献非常有限。综上所述,贡湖湾和其入湖河流(小溪港、望虞河)的主要超标因子为 TP 和 TN。入湖河道特别是望虞河对贡湖湾的营养盐输入有一定的贡献。

2.1.2 时间变化特征。2014 年 6 月—2015 年 5 月,贡湖湾内和小溪港、望虞河 11 个采样点的水质时间分布如图 3 所示。贡湖湾 COD_{Mn}、TN、TP 和 NH₄⁺-N 和 DO 的浓度分别为

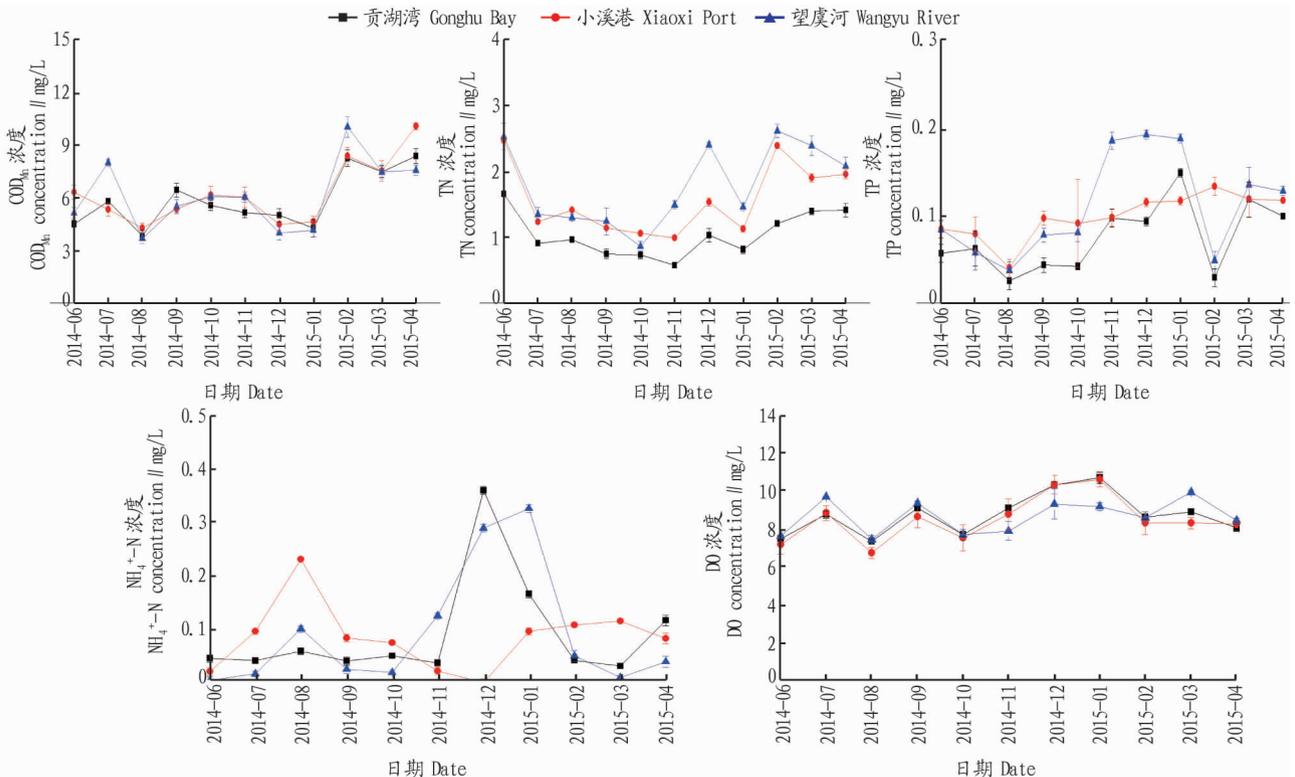


图3 贡湖湾水质的时间分布特征

Fig. 3 Temporal distribution of water qualities in Gonghu Bay

3.880~8.460、0.570~1.640、0.025~0.150、0.030~0.360 和 7.400~11.000 mg/L。小溪港 COD_{Mn}、TN、TP、NH₄⁺-N 和 DO 的浓度分别为 4.310~10.160、0.980~2.450、0.040~0.130、0.002~0.230、6.770~10.680 mg/L。望虞河 COD_{Mn}、TN、TP、NH₄⁺-N 和 DO 的浓度分别为 3.720~10.130、0.980~2.450、0.030~0.190、0.0055~0.320 和 7.500~10.000 mg/L。结果显示,贡湖湾内及其入湖河流(小溪港和望虞河)各水质指标随时间变化趋势一致。

从各采样点的时间变化上看,TP、NH₄⁺-N 和 DO 的变化趋势为先增加后降低,2014 年 11、12 月和 2015 年 1 月浓度相对较高,而 TN 和 COD_{Mn} 的浓度变化趋势与之相反。TP 的浓度在冬季明显高于夏季,可能是由于冬季气温降低,随着水体中的藻类死亡,磷随着藻细胞的死亡释放到水体中,导致磷的含量升高^[19]。冬季 NH₄⁺-N 浓度有所上升,但是 TN 的含量却有所下降,研究区域内 TN 在 III~V 类标准,主要原因是部分有机氮沉积在底泥中,导致 TN 浓度有所降低。

从图 4 可见,贡湖湾及入湖河流(小溪港和望虞河)Chl-a 随时间变化趋势大致相同。2014 年 6 月—2014 年 10 月整体浓度较高,主要是由于夏季温度较高,适宜浮游植物生长,温度降低后破坏了蓝藻的生长环境,导致 Chl-a 含量逐渐减低。2014 年 12 月—2015 年 3 月,整体保持在低浓度状态;2015 年 3 月后,浓度快速升高。值得注意的是,Chl-a 和 TP 呈典型的负相关性,可能是由于蓝藻水华的快速生长能够较快地吸收水体中的磷,而蓝藻的死亡能够释放磷到水体中^[20]。

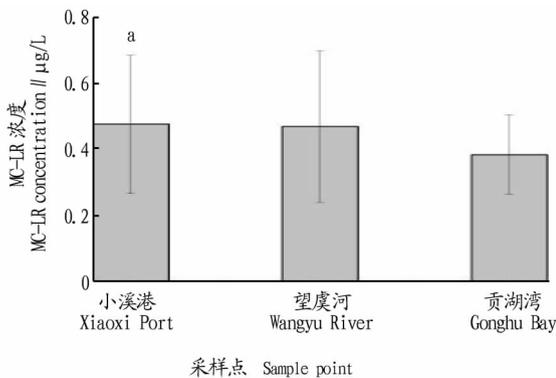


图 5 贡湖湾水体 MC-LR 浓度变化特征

Fig. 5 Characteristics of MC-LR concentration changes in Gonghu Bay

2.2 MC-LR 的健康风险评价 健康风险评价是以风险度为评价标准,定量描述环境污染对人体的危害。该研究区域中贡湖湾水体为轻度富营养化,存在蓝藻暴发和富集转移的风险,而且根据 MC-LR 分析结果,贡湖湾水体中有一定含量的 MC-LR 赋存。另外贡湖湾作为无锡和苏州的饮用水源地,污染物可能经口摄入对人体健康产生风险。基于以上原因,笔者以 MC-LR 为非致癌风险指标,采用危害商(HI)进行风险表征,通常认为 HI 以 1 为基准;若 HI > 1 表明对人体有危害,即暴露水平高于参考剂量者为可能有危险者;若 HI ≤ 1 则表明危害程度较小,即暴露水平等于或低于参考剂

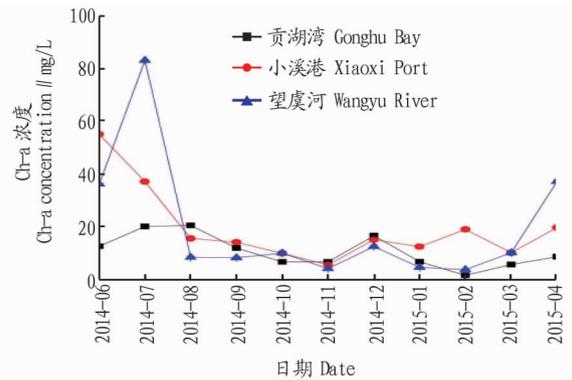
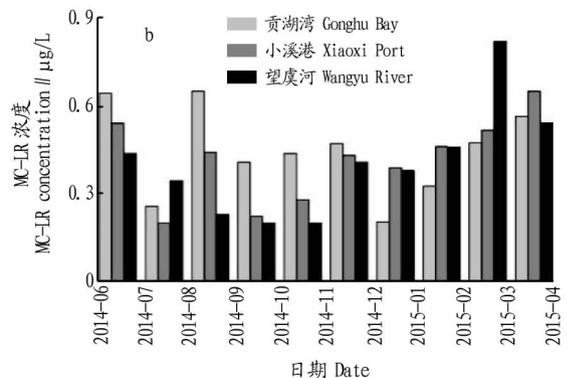


图 4 贡湖湾 Chl-a 浓度的时间分布特征

Fig. 4 The temporal distribution of Chl-a concentration in Gonghu Bay

2.1.3 贡湖湾及其入湖河流 MC-LR 的变化特征。贡湖湾内和小溪港、望虞河 MC-LR 的平均浓度整体较低(图 5a),其中贡湖湾内 MC-LR 浓度仅为 0.38 µg/L,小溪港的 MC-LR 平均浓度为 0.47 µg/L,望虞河平均浓度为 0.46 µg/L,贡湖湾内部 MC-LR 低于其入湖河流。虽然研究区域内入湖河流和贡湖水体中 MC-LR 的平均浓度较低,但是从时间分布上来分析,MC-LR 的时间分布具有一定的规律性。由图 5b 所示,在监测时间内,MC-LR 浓度呈现先降低后升高的趋势。对照图 4 可知,从 2014 年 6 月—2016 年 10 月,由于温度降低藻类数量减少,MC-LR 也随之逐渐降低;2014 年 11 月—2015 年 1 月,整体水体保持稳定,在 0.4 µg/L 左右波动;至 2015 年 3 月,随时气温的升高,MC-LR 浓度呈现增加的趋势。



量为不大可能有危险者。以贡湖湾内 MC-LR 浓度为基准,将 MC-LR 浓度带入式(1),计算通过经口摄入途径的 CGWERnc,然后通过式(2)计算出经口摄入途径的 HI_{cgw}。图 6 为贡湖湾经口摄入危害商 HI_{cgw} 特征变化。贡湖湾内 MC-LR 的健康风险值 HI_{cgw} 在 0.11~0.38,远低于于基准值 1。但是由于研究区域内 MC-LR 变化范围较大、地域敏感性,需要一步控制水体富营养程度,控制其风险。

2.3 MC-LR 浓度与水质指标的相关性 进一步对贡湖湾 MC-LR 浓度和其他环境因子之间的相关性进行分析发现,MC-LR 与 TP 显著正相关($P < 0.05$)(表 1, $R^2 = 0.628$),表

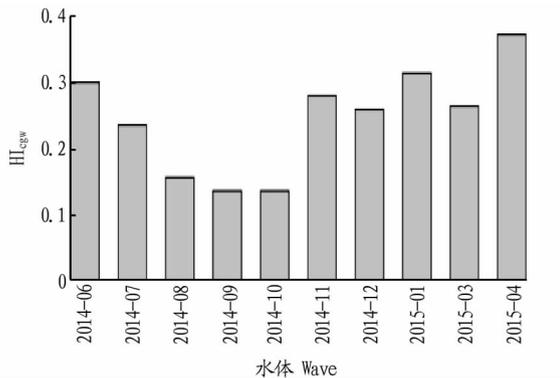


图6 贡湖湾水体 MC-LR 危害商

Fig. 6 The HI of MC-LR in Gonghu Bay

表1 MC-LR 与其他环境因子间的相关性分析

Table 1 The correlation analysis between MC-LR and other aquatic factors

指标 Index	MC-LR	COD _{Mn}	TP	TN	Chl-a	NH ₄ ⁺ -N	DO
MC-LR	1.000						
COD	-0.395	1.000					
TP	0.628*	-0.019	1.000				
TN	0.503	0.484	0.126	1.000			
Chl-a	0.045	-0.301	-0.161	0.132	1.000		
NH ₄ ⁺ -N	-0.230	-0.329	0.425	0.060	0.096	1.000	
DO	-0.555*	-0.154	0.584*	-0.225	-0.237	0.586*	1.000

注: * 表示在 0.05 水平显著相关

Note: * stands for significant correlation at 0.05 level

3 结论

(1) 贡湖湾主要超标因子为 TP 和 TN, 望虞河对贡湖湾的营养盐输入有一定的贡献。

(2) 气温变化导致的水体微生物和藻类活性变化是影响贡湖湾及其入湖河道水质变化的因素之一。

(3) 贡湖湾中 MC-LR 经口摄入非致癌风险评估 HI_{0.5g/L} 尽管危害程度较小, 但也存在一定风险。

(4) 贡湖湾和其入湖河流中 MC-LR 浓度与 TP 呈显著的正相关性, 表明磷是限制藻类生长以及 MCs 产生的主要影响因素。

参考文献

- [1] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 21-26.
- [2] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅, 等. 太湖健康狀況报告(2015) [R/OL]. [2017-01-21]. <http://www.tba.gov.cn/tba/content/TBA/lygh/thjzkzkg/000000000010567.html>.
- [3] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [4] QIN B Q, XU P Z, WU Q L, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia, 2007, 581(1): 3-14.
- [5] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 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, 2010, 33(3): 92-98.
- [6] 吴溶, 崔莉凤, 卢珊, 等. 温度光照对铜绿微囊藻生长及藻毒素释放的影响[J]. 环境科学与技术, 2010(S1): 33-36.
- [7] 侯翠荣, 贾瑞宝. 化学氧化破坏藻体及胞内藻毒素释放特性研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(13): 98-101.
- [8] 耿志明, 王澎, 刘嵩民. 太湖水体微囊藻毒素变化及其与理化因子的关系[J]. 江西农业学报, 2012, 24(7): 104-109.

明 TP 是可能影响 MC-LR 生成的主要因素。MC-LR 与 TN 也具有正相关性 ($R^2 = 0.503$), 但是关系不显著。有学者针对不同水体发现 MC-LR 与 TP 和 TN 呈显著的正相关, 这可能是由于氮、磷是蓝藻生长主要营养成分, 也是 MC-LR 合成的主要氮源。该研究中贡湖湾水体中 MC-LR 仅与 TP 呈显著正相关, 可能是由于整个太湖近年来处于磷限制状态, 磷是限制藻类生长以及 MCs 产生的主要影响因素^[21]。另外, MC-LR 与 DO 呈显著的负相关性 ($P < 0.05$, $R^2 = -0.555$); MC-LR 与 Chl-a 没有明显的相关性。可能是由于贡湖是一个开放的水体, 受到多方面的环境影响, 是物理、化学和生物因素的共同作用。

- [9] 罗民波, 沈新强, 杨良, 等. 微囊藻毒素对小白鼠肝脏的毒理效应[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(3): 55-60.
- [10] SONG L R, SANO T, LI R H, et al. Microcystin production of *Microcystis viridis* (cyanobacteria) under different culture conditions[J]. Phycological research, 1998, 46(S2): 19-23.
- [11] FEURSTEIN D, HOLST K, FISCHER A, et al. Oatp-associated uptake and toxicity of microcystins in primary murine whole brain cells[J]. Toxicology and applied pharmacology, 2009, 234(2): 247-255.
- [12] 王经结, 杨佳, 鲜敬鸣, 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.
- [13] 韩冰, 何江涛, 陈鸿汉, 等. 地下水有机污染人体健康风险评估初探[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 224-229.
- [14] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 547-553.
- [15] 葛仙梅, 朱铁才. 饮用水源地的水华对人体健康风险评估[J]. 环境与发展, 2014, 26(3): 166-167.
- [16] 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: 中国环境出版社, 2002.
- [17] 王蕾, 李小艳, 张惠, 等. 高效液相色谱-质谱法测定蓝藻中的微囊藻毒素[J]. 食品工业科技, 2007, 28(3): 197-199.
- [18] 王靖国, 邹华, 张强, 等. 太湖微囊藻毒素的时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2014, 27(7): 696-703.
- [19] HUANG T L, LI X, MA W X, et al. Dynamic characteristics of nutrients and causal analysis in eutrophic reservoir: A case study of Shibianyu reservoir [J]. Desalination and water treatment, 2014, 52(7/8/9): 1624-1635.
- [20] WU P, QIN B Q, YU G, et al. Effects of nutrient on algae biomass during summer and winter in inflow rivers of Taihu Basin, China [J]. Water environment research, 2016, 88(7): 665-672.
- [21] YE R, SHAN K, GAO H L, et al. Spatio-temporal distribution patterns in environmental factors, chlorophyll-a and microcystins in a large shallow lake, Lake Taihu, China [J]. International journal of environmental research and public health, 2014, 11(5): 5155-5169.