



文章栏目：环境监测技术

DOI 10.12030/j.cjee.202108041

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

郭宇龙, 曾磊, 许海, 等. 湖泊连通河道蓝藻通量自动监测方法[J]. 环境工程学报, 2021, 15(12): 4077-4087.

GUO Yulong, ZENG Lei, XU Hai, et al. Automatic monitor of cyanobacterial particle flux in lake- connected river[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(12): 4077-4087.

湖泊连通河道蓝藻通量自动监测方法

郭宇龙^{1,2}, 曾磊³, 许海^{1,✉}, 陈旭清⁴, 郑建中⁵, 詹旭², 朱广伟¹

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

2. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122

3. 无锡市锡山区水利局, 无锡 214101

4. 无锡市蓝藻治理办公室, 无锡 214026

5. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 无锡 214026

第一作者: 郭宇龙 (1995—), 男, 硕士。研究方向: 湖泊生态。E-mail: guoyulong0201@163.com

✉通信作者: 许海 (1978—), 男, 博士, 副研究员。研究方向: 湖泊氮循环。E-mail: hxu@niglas.ac.cn

摘 要 湖库中蓝藻细胞一旦形成表层颗粒细胞团形式的水华, 就会具有较强的漂移扩散能力, 并能对水体景观形成明显影响, 成为河湖环境管理的重点关注对象。如何快速高效监测蓝藻颗粒的迁移通量, 已成为湖库连通河道水质管理的技术难点。为满足蓝藻水华较重湖泊连通河道蓝藻通量实时监控需求, 以太湖梅梁湾连通河道—梁溪河为例, 于 2019 年 6—8 月蓝藻水华季节, 监测了景宜桥断面蓝藻空间分布且逐日监测叶绿素 a 浓度, 并结合岸基式水质和蓝藻自动监测系统, 构建了人工监测蓝藻通量与自动监测参数之间的换算关系, 开发了梁溪河蓝藻通量的高频自动监测方法并分析了影响因素。结果表明, 在 U 型断面的流通河道中, 景宜桥断面的蓝藻在空间分布上呈表层高、底层低、滨岸带略高的特征, 近岸表层采样的自动监测系统获得的水体叶绿素 a 浓度比整个河道断面平均值高出 30%; 通过建立的蓝藻通量监测方法对比, 发现自动与人工监测蓝藻通量逐日变化整体上保持一致, 且总量与人工相当, 比值为 1.07, 精确反映了整个河道蓝藻通量的变化规律; 2 种监测方式的差异性分析表明, 原位水质和蓝藻自动监测系统对梁溪河蓝藻通量的实时监控有良好的效果, 此系统的应用实现了河道蓝藻通量的实时在线监测, 为蓝藻水华应急处置管理提供了关键技术支撑。

关键词 河湖连通; 调水工程; 蓝藻水华; 蓝藻颗粒; 自动监测; 河道治理

蓝藻水华及其大量堆积形成的湖泛灾害仍是太湖面临的主要环境问题^[1]。2007 年以后, 流域、相关省市水利部门及时通过水利调度改善太湖流域水环境, 在原“引江济太”的基础上增加了望虞河-贡湖湾-梅梁湾-五里湖-梁溪河的调水线路^[2-4], 此工程降低了蓝藻在北部滨岸带的堆积, 促进了河流生态系统的健康发展。然而, 无锡梁溪河在动态调水模式下的高输入性藻类与全河段岸边带蓝藻聚集仍是一重大环境问题, 调水带入的大量蓝藻颗粒对梁溪河产生了高负荷蓝藻通量冲击。余茂蕾等^[5]的研究表明, 2017 年 6—8 月梁溪河蓝藻通量超过 9 733 t 干物质, 相当于藻水分离站生产 64 889 t 湿藻泥, 超过无锡市全年的蓝藻打捞量。蓝藻进入河道不仅影响梁溪河“水十条”国

收稿日期: 2021-08-09; 录用日期: 2021-11-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 资助 (XDA23040201); 无锡市锡山区水利局委托任务 (JYJFCG2020-17); 国家水体污染控制与治理重大专项 (2017ZX07203001) 联合资助

考、省考断面的达标,同时也降低了梁溪河的生态环境效益^[6-7]。近些年相关部门投入了大量工作以控制蓝藻,如梅梁湾湾口加压灭藻阱的运行及打捞等方式在一定程度上减少了藻量。据相关资料表明,2019年6—8月梅梁湾进入梁溪河蓝藻通量较2017年同期下降了19%,但在蓝藻水华暴发期,常态化的水利调度仍会将大量蓝藻带入梁溪河,要将河口的蓝藻漂浮颗粒物全部打捞,目前在能力上和技术上均无法实现,而蓝藻水华的形成、漂移和堆积有时往往就发生在数小时或1~2 d的时间尺度上,而对蓝藻水华的逐日人工监控也难以实现,也无法捕捉蓝藻水华的快速变化。因此,开发蓝藻入河通量的自动高频监测方法,对进入梁溪河的蓝藻通量进行实时监测,根据蓝藻的聚集动态进行高效打捞会起到事半功倍的效果。

传统方法的监测范围、频率和时段非常有限,湖泊流域等水体水样的采集、保存及实验室分析往往无法立即获得水质数据。近年来,随着监测技术的迅速发展,各种在线检测仪器、传感器技术、无线通讯网络技术成为主流信息源,为水环境的在线监测和生物过程的研究提供了新的技术手段^[8],因而自动监测在地表水湖泊水库等水体的应用也越来越广泛,解决了以往传统监测方法中无法实时获取数据的问题。因此,为实时动态监测河道水质和蓝藻通量变化与提升太湖蓝藻水华清除与处置的管理效率,本研究在太湖蓝藻水华防控基础设施和信息化水平的基础上,结合无锡市蓝藻打捞与处置信息化平台,在梅梁湾与梁溪河交接处的景宜桥断面,设置了岸基式水质和蓝藻自动监测系统,以物联网感知技术为切入点,开发了水利调度过程中蓝藻通量实时自动监测方法,并分析验证了其可行性与代表性。本研究对于无锡滨湖河道水环境提升以及科学调控出湖水量和减少蓝藻水华大量进入连通河道有重要意义。

1 材料与方法

1.1 区域概况与采样点位

梁溪河(E120°14'22"~120°17'47", N31°33'10"~31°33'48")地处江苏省无锡市滨湖区,位于太湖东北方向,是市区内最大的内河,也是太湖北部湖区梅梁湾的一条主要出水河道^[9]。河道呈东西走向,河流总长度7 km,其作为天然纽带连接了蠡湖、京杭大运河、城区水系和太湖,是维系无锡市城区河道生态健康的重要廊道,在调活城区水系中发挥了重要作用。

1991年,相关部门在梁溪河入河口构建了犊山防洪控制工程,该工程持续发挥了挡污、防洪、引排水等作用;后来,为了能引排水,另构建了设计流量为 $50\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的梅梁湖泵站枢纽^[10-12],该枢纽在夏季持续抽引梅梁湾湖水进入梁溪河最后汇入京杭大运河,以改善太湖水环境。梁溪河上的景宜桥断面是市区主要出湖河道监测点位之一,也是省控断面之一,且景宜桥断面位于梁溪河入河口,选择该断面作为监测点能较为准确的反映梅梁湾调水对河道的影响,采样点位示意图见图1。

1.2 样品采集与分析

于2019年6—8月使用长1 m和直径20 cm有机玻璃柱逐日采集景宜桥断面左、中、右柱状水样并混混合装于桶中,分取水样,进行水质指标测定。测定指标包括水温(WT)、溶解氧(DO)、叶绿素a(Chl-a)、悬浮质(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)。其中,WT与DO使用EXO多参数水质测定仪测定,室内分析均按照《水和废水监测分析方法》^[13]进行,监测频次见表1。

1) 叶绿素a在水体中的垂直分布情况测定。藻水华时空动态的高度不确定性会影响样品的准确性,也会影响整个断面蓝藻通量数据的准确性。为了解叶绿素a在水中的分布情况,将景宜桥断面从左至右设置18个点位,对每个点位水体进行剖面测定。现场先使用SM-5A便携式声纳测深仪测出每个点位水深,将EXO多参数水质测定仪设置为自动测定并保存模式(每2 s记录1次数据),然后系上预先做好刻度的绳子,将EXO主机自表层水体(停顿约5 s)缓慢、匀速并垂直放到相

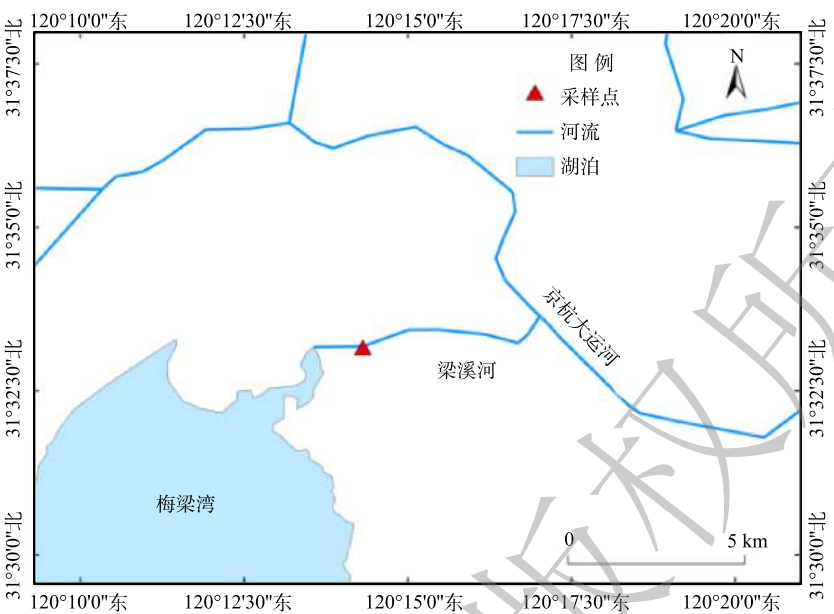


图 1 梁溪河采样点位示意

Fig. 1 Map of sampling sites of Liangxi River

应水深处，再对其余点位进行相同操作。打开 EXO 主机蓝牙，连接电脑用配套 KorEXO 软件筛选出每个点位叶绿素 a 数据并导出。

2) 蓝藻通量人工监测方法的建立。通常情况下，水体藻类的生物量以细胞密度或叶绿素含量来表示，但是因为形成水华的蓝藻大部分是以藻颗粒的形式存在，蓝藻打捞部门用的蓝藻打捞量一般是以质量的形式表达，因此，相较于叶绿素 a，每日梅梁湾排入梁溪河的蓝藻总质量即蓝藻通量更加直观，有利于蓝藻打捞部门及时了解藻情。

采集水样并量取 2 份定量水样，使用 25 目浮游生物网过滤后，再用纯水将生物网上的藻颗粒冲洗到滤器中，一份用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤，用热乙醇提取法^[14]测定叶绿素 a 浓度，定义为颗粒态叶绿素 a (Chl-a(P))；另一份用 550 ℃ 烧过的已知质量的 GF/F 膜过滤后烘干、称重且计算悬浮藻颗粒干质量 W_{pa} ，结合泵站调水流量，可得到梅梁湾排入梁溪河蓝藻通量。通过建立 Chl-a(P) 与 W_{pa} 之间的关系，即可通过叶绿素 a 估算出蓝藻通量。

3) 蓝藻通量自动监测方法的建立。无锡市蓝藻打捞与处置信息化平台在梅梁湾与梁溪河交接处景宜桥断面设置了岸基式水质和蓝藻自动监测系统，采用传感器在线测量蓝藻参数值，并集成了流速仪、输配水系统和太阳能电源系统等。高扬程自吸泵通过浮船固定于水下 0.5 m 位置，可根据水位变化上下浮动。在线监测过程中，藻蓝素传感器测定的蓝藻细胞密度比叶绿素荧光探头测定的叶绿素精度更高，数据更可靠，因此本研究主要采用藻蓝素传感器在线测量蓝藻细胞密度来捕捉蓝藻生物量的变化。方法为通过实测的叶绿素 a 浓度估算出蓝藻通量，再将自动监测的藻量

表 1 相关参数监测频次		
Table 1 Monitoring frequency of indicators		
参数	监测方法	频率/(次·d ⁻¹)
WT	YSI水质检测仪	1
DO	YSI水质检测仪	1
Chl-a	热乙醇法	1
SS	重量法	1
TN、TP	过硫酸钾消解法	1
DTN、DTP	过硫酸钾消解法	1
流量	流速仪	1
藻密度	EXO总藻传感器	24

参数值与蓝藻通量线性拟合,建立公式,从而根据蓝藻传感器测得的藻细胞密度计算出进入河道的蓝藻通量。应用后每日监测数据通过云平台接收后存储进数据库,并在进行数据存储时,由系统自动进行日统计蓝藻通量的计算并将数据在信息化平台展示。具体步骤见图2。

2 结果与分析

2.1 河道断面叶绿素 a 空间分布特征

河道断面叶绿素 a 空间分布测定结果见图3。梁溪河的景宜桥断面河床两岸浅、中间深,整体呈U型。水体表、中及底层的流速与外界条件如风场的综合作用对 Chl-a 浓度空间分布影响较大,水柱中 Chl-a 质量浓度为 $3.95\sim 10.47\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水体 Chl-a 浓度沿表层至底层方向逐渐减小,存在显著分层现象,最大值在表层 0.3 m 处。除光合作用及藻类自身浮力外,水动力条件也是影响 Chl-a 浓度垂向分布的重要因素之一^[15]。监测期间泵站枢纽调水流量为 $26.32\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,流速低,湍流混合作用小,水动力扰动不足以使得水体中的藻类颗粒物混合均匀。在水平方向上,表层湖流对风场变化响应较大,Chl-a 浓度出现断层、团聚现象。监测期间,藻颗粒在右滨岸带聚集现象明显,这也与现场调查观测结果一致。右滨岸带整个水柱中的 Chl-a 浓度较左滨岸带高;中层及底层湖流对同步风场变化响应存在显著滞时,受水动力过程影响更大,每个点位之间 Chl-a 浓度差异不显著。

在U型断面的流通河道中,梁溪河水体 Chl-a 浓度在空间分布上呈表层高、底层低、滨岸带略高的特征,近岸表层采样的自动监测系统获得的水体叶绿素 a 浓度比整个河道断面平均值高 30%,会影响梁溪河河道蓝藻通量自动监测数据的准确性。

2.2 湖泊排水流量与入河道藻量的变化

根据调水流量,将藻密度均值转化为藻量,梁溪河景宜桥断面藻量与梅梁湾泵站排水流量在夏季的变化趋势见图4。梅梁湾泵站枢纽抽引梅梁湾水体进入梁溪河共计 90 d(2019 年 6—9 月)。其中:2019 年 6 月 4—6 月 5 日未排水,6 月 1—6 月 3 日期间以及 6 月 6 日—6 月 27 日期间维持在 $20\sim 30\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$;到 6 月 28 日,排水流量迅速升高到最高值($48.67\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$),一直持续到 7 月 8 日,之后又降到 $30\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。6、7、8 月排水流量均值分别为 26.0 、 30.3 和 $22.8\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,且瞬间监测值在 $0\sim 48.7\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 波动,3 个月平均排水流量为 $25.8\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,共计向梁溪河调水 $2.05\times 10^8\ \text{m}^3$,约占全年调水量的 35%,占 2019 年太湖夏季蓄水量的 0.3%。

在梅梁湾夏季藻情严重的情况下,梅梁湾排入梁溪河的藻量波动较大,整体变化趋势与流量类似。6—8 月藻量均值分别为 6、22 和 10 亿个 $\cdot\text{d}^{-1}$,总量为 1 163 亿个,其中最高值出现在 7 月 25 日(82 亿个)。因 6 月 4 日和 6 月 5 日未排水,故梅梁湾引入梁溪河的藻量为 0。梁溪河藻量也反映出梅梁湾蓝藻水华的情况。从排水流量变化来看,6 月排水流量均值比 8 月高,藻量均值却低于 8 月,可见 2019 年 8 月梅梁湾蓝藻水华情况较 6 月严重。

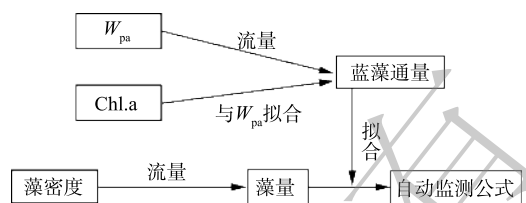


图2 蓝藻通量自动监测方法建立

Fig. 2 Establishment of automatic monitoring method for cyanobacteria flux

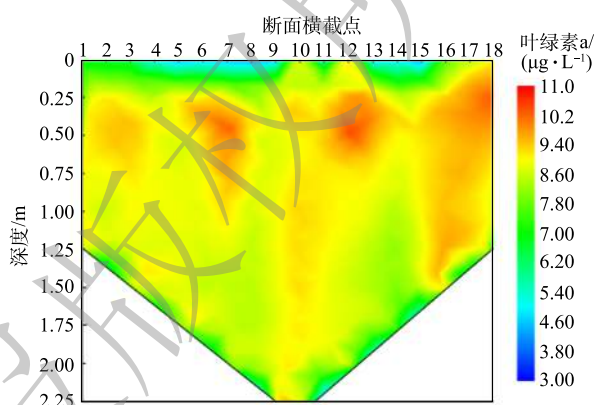


图3 叶绿素 a 空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of Chl-a

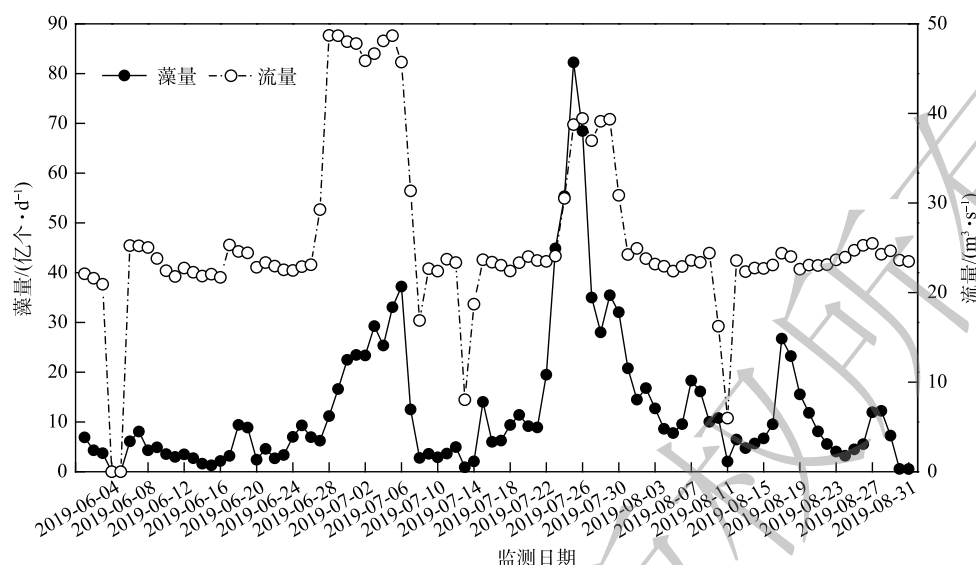


图 4 调水流量与藻量变化

Fig. 4 Variation of water diversion flow and algae amount

2.3 景宜桥断面水质变化

由梅梁湾向梁溪河调水带进的大量蓝藻水华也会影响河道水质。梁溪河景宜桥断面营养盐变化见图 5。梁溪河水体氮、磷营养盐及叶绿素 a 浓度受梅梁湾的来水影响显著，变化趋势明显。叶绿素 a 往往作为藻类现存量的表征，可直接反映水体的富营养化程度。调水在改善梅梁湾与梁溪河水质的同时，大量的蓝藻颗粒物也随之进入梁溪河，对梁溪河造成了高藻通量的冲击。2019 年监测期间，颗粒态叶绿素 a 浓度高值出现在 7 月末的几日，峰值高达 $488 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，3 个月均值为 $54.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由于梁溪河蓝藻水华颗粒物直接来源于梅梁湾，可见 2019 年夏季梅梁湾蓝藻水华程度较为严重。

TN、TP 均呈先明显升高后降低的趋势。其中，6 月份整体保持稳定，7 月份和 8 月份的波动较大。采样期间 TN、TP 出现 2 次峰值，均出现在 7 月 24 日与 8 月 17 日，2 次峰值对应的 TN 质量浓度分别为 $13.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $13.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TP 质量浓度分别为 $1.205 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.017 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这是由于同时间内调水带入了大量蓝藻水华颗粒物，蓝藻自身储存了大量的氮、磷，因而加重了梁溪河氮、磷营养盐含量。溶解性营养盐是藻类生长容易吸收利用的形式，其浓度变化可直接影响着藻类的生长。夏季梁溪河水体 DTN 与 DTP 前期升高趋势较为明显，至 8 月 11 日逐渐下降，均值分别为 $1.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.103 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，DTN/TN 和 DTP/TP 分别为 41% 和 37%。由此可见，颗粒态氮是梁溪河水体氮、磷的重要形态，说明梅梁湾蓝藻水华颗粒物对梁溪河水体水质影响较大。

2.4 由湖泊排入河道的蓝藻通量

梅梁湾逐日排入梁溪河的蓝藻通量根据式 (1) 进行计算；结合流量，将自动监测的藻密度值转化为藻量，根据式 (2) 进行计算。将 6 月 1—6 月 30 日人工高频监测的蓝藻通量和自动监测的藻量进行线性拟合，结果见图 6，其关系见式 (3)。可见，原位传感器自动监测获得的藻密度及藻量可较好的反映出梁溪河河道藻情变化。

$$A_f = W_{pa} V \times 24 \times 60 \times 60 \times 0.001 \quad (1)$$

式中： W_{pa} 为悬浮藻质量浓度， $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ； V 为流量， $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

$$N = A_d V \times 60 \times 60 \times 24 \times 0.1 \quad (2)$$

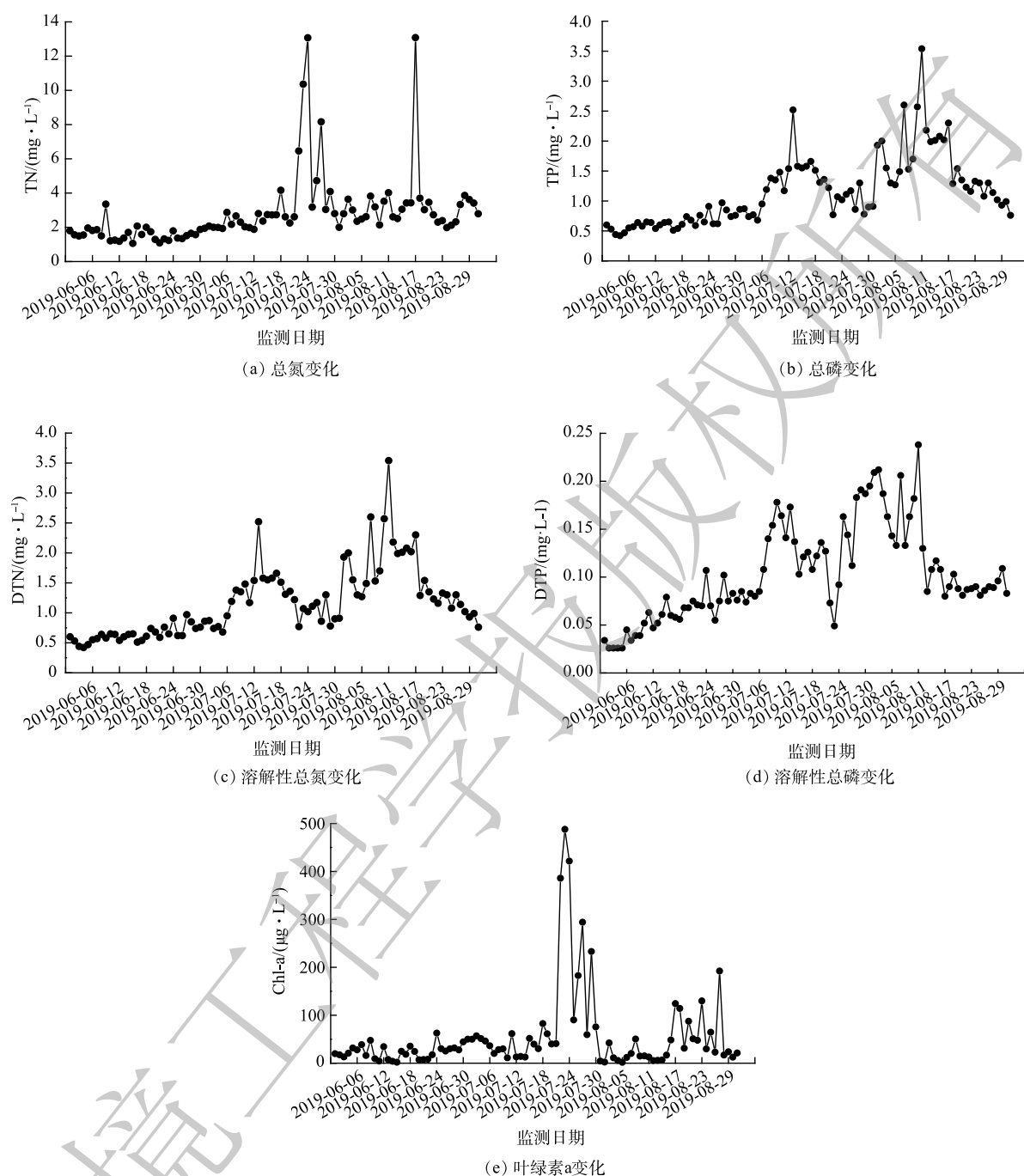


图5 景宜桥断面水质变化

Fig. 5 Change in water quality of Jingyi bridge section

式中： N 为藻量，亿个· d^{-1} ， A_d 为藻密度，百万个· L^{-1} 。

$$A_f = 4.78N + 31.82, R^2 = 0.81 \quad (3)$$

梁溪河水体藻颗粒在空间分布上呈表层高、底层低、滨岸带略高的特征(图3)，因此，系统采集0.5 m水深样品计算出的通量值会高于整个U型断面。为使系统监测的蓝藻通量更接近真实蓝藻通量，需扣除部分通量值。结合1.2中提及的方法，利用叶绿素a空间分布测定中叶绿素a浓度，估算出蓝藻通量随水深变化。其中，水下0.5 m水深通量为51.84 $t \cdot d^{-1}$ ，而整个水柱中通量为51.69 $t \cdot d^{-1}$ ，

因此，需扣除约 0.3% 的通量值。

根据校正后蓝藻通量的监测方法，将 2019 年 7 月 1 日—8 月 31 日自动监测获得的通量数据与人工监测通量进行对比，结果见图 7。可以发现，2 种监测方式获得的蓝藻通量变化趋势整体一致，高值均在 7 月末的几天出现，瞬时值在 0~450 t·d⁻¹ 变化。在湖泊藻情严重的情况下，受梅梁湾持续来水的影响，梁溪河每日接纳的蓝藻通量巨大，自动与人工监测蓝藻通量均值分别为 105 t·d⁻¹ 和 98 t·d⁻¹ 且总量相当，分别为 6 524 t 和 6 077 t，自动监测比人工高出 6.8%。若按照 85% 含水率处置藻泥来计 算，则梅梁湾排入梁溪河的藻泥重分别估算为 43 490 t 和 40 511 t，分别约占无锡市全面打捞量 (50 000 t) 的 87% 和 81%。就比值来看，2 种监测方式获得的通量堆积比约在 50%，自动监测蓝藻通量总量与人工的比值为 1.07。2 种监测方法蓝藻通量数据变化趋势基本一致，说明国家“十三五”水专项无锡市蓝藻打捞与处置信息化平台在江苏无锡梁溪河景宜桥设置的水质和蓝藻自动监测系统对梅梁湾排入梁溪河的蓝藻通量有良好的实时监控效果。

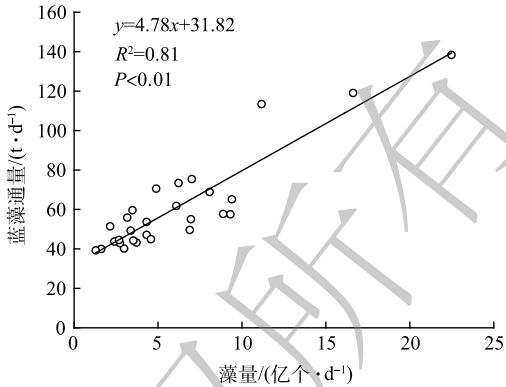


图 6 藻量与蓝藻通量线性拟合
Fig. 6 Linear fitting between algal amount and cyanobacteria flux

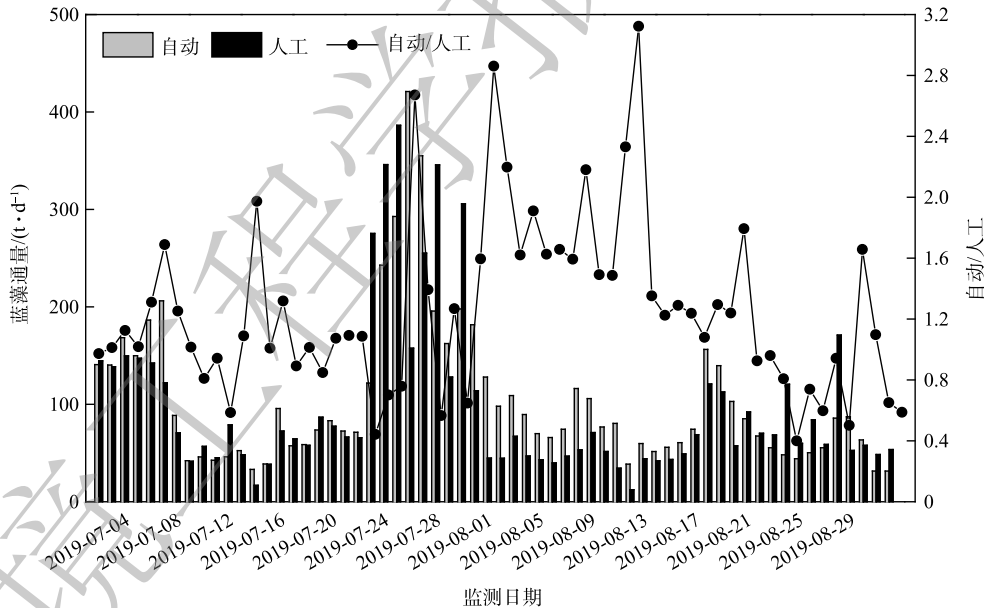


图 7 梁溪河藻通量变化
Fig. 7 Variations of cyanobacteria flux in Liangxi River

2.5 传感器自动监测误差性分析

水体中的蓝藻颗粒在分布不均匀的情况下，采样方式和采样数量的差异造成了原位自动传感器监测的蓝藻通量数据相较于人工监测偏大 (图 7)。为了解 2 种监测方式数据的相关性与差异性，将 2019 年 7 月 1 日—8 月 31 日获得的蓝藻通量数据按人工监测和自动监测方法分为 2 组，进行配对样本 *t* 检验。检验结果表明，2 种监测方式下的蓝藻通量数据相关系数为 0.723，且 Sig.<0.01，说明在监测期间内，传统与自动 2 种方式所获得的数据结果呈显著相关。

对传统监测方法和自动监测方法得到的2组结果分别进行了均值和标准差计算,并在此基础上,针对同一监测指标的2组结果进行了配对样本 t 检验。假设2组数据不存在显著差异性,检验结果表明, $t=0.953$,Sig.为 $0.344>0.01$,表明配对的2组数据之间无显著差异。

3 讨论

3.1 蓝藻通量的影响因素

藻类生物量主要受营养盐、温度、光照等环境因子控制^[16-18],同时也受水动力扰动强度和光照刺激下细胞生理变化的影响^[19-20]。由湖泊排入河道的蓝藻通量直接受水量大小的影响,蓝藻通量又是根据叶绿素a与藻密度计算出的结果。因此,对Chl-a、藻密度与各环境因子做皮尔逊线性相关分析,结果见表2。Chl-a浓度或藻密度主要与排水流量、水温、溶解氧及营养盐浓度呈显著相关。

表2 叶绿素a、藻密度与各环境因子的相关矩阵

Table 2 Correlation matrix among Chl-a, algal density and environmental factors

	流量	水温	溶解氧	总氮	总磷	Chl-a	藻密度
流量	1.00						
水温	0.691**	1.00					
溶解氧	-0.078	0.047	1.00				
总氮	0.183	0.273	-0.390**	1.00			
总磷	0.413**	0.545**	-0.210	0.616**	1.00		
Chl-a	0.446**	0.468**	-0.373**	0.769**	0.899**	1.00	
藻密度	0.515**	0.337*	-0.364*	0.609**	0.724**	0.745**	1.00

注:**在0.01水平(双侧)上显著相关,*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

浅水湖泊水动力过程是决定短期蓝藻水华分布的重要因素。水动力过程对蓝藻水华颗粒物的迁移扩散有直接影响,2019年7月1日—8月31日期间泵站枢纽以平均 $24.89\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的流量向梁溪河排水,改变了水体的流动状态。相关分析结果显示,Chl-a、藻密度与排水流量呈显著正相关($P<0.01$)。这说明,在梅梁湾夏季蓝藻水华情势严重的情况下,扩散到梁溪河的蓝藻通量大小受到水动力的影响强烈,水量大,则会输入更多的蓝藻进入梁溪河。水动力过程也影响着蓝藻水华的生长消亡历程。有研究表明,不同流速对铜绿微囊藻的生长、消亡有着不同程度的影响^[21]。梁溪河河道较为规则,水流方向由泵站至景宜桥,最终汇入京杭大运河,水体流速快,因此,不利于蓝藻在河道原位生长繁殖。

水温是影响藻类生长的环境因子之一。陈宇炜等^[22]对梅梁湾藻类与相关因子的分析表明,温度与梅梁湾藻类总生物量呈显著相关。温度对梅梁湾藻类的生长有直接的影响,在蓝藻颗粒物扩散到景宜桥断面过程中,采样期间平均水温为 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$,非常适合太湖蓝藻的生长繁殖,进而影响排入梁溪河的蓝藻通量。

溶解氧是参与浮游植物代谢过程的重要物质。随着浮游植物的生长,叶绿素a浓度升高。就现场采样记录观察,梁溪河表层水体常被蓝藻水华覆盖,导致水面下光照减弱,光合作用降低。浮游植物主要以呼吸作用为主,消耗溶解氧,使得两者呈负相关关系,可见溶解氧是水体叶绿素a含量变化的被动因子。

在绝大多数情况下,氮、磷营养盐是蓝藻生长的主要物质基础^[23-25]。本研究中,Chl-a、藻密度与营养盐呈显著正相关。这主要是因为蓝藻自身含有大量的氮磷,形成藻类生物量与自身储存氮磷之间的自相关关系。由于梁溪河蓝藻水华直接来源于梅梁湾的调水,可见叶绿素a浓度的波动在很大程度上受水文因子的影响。以上结果说明,排水流量与水温是影响蓝藻通量的主要因素。

3.2 自动监测传感器优势及改进建议

传感器自动监测在环境监测领域的应用越来越广泛, 利用无线传感器网络技术来进行水环境监测, 能够很好地克服传统水环境监测方法实时性差、耗费大、测面积小等缺点^[26]。此外, 自动监测采用原位高频率监测, 突破了传统的湖沼学研究方法^[8]。

梁溪河水质与蓝藻水华自动监测系统采用无线传感器网络, 可实时采集水样并连续在线监测蓝藻通量, 且景宜桥断面位于梁溪河入河口, 有效避免了蓝藻水华颗粒物因长距离的流动而造成蓝藻含量大量削减的情况。传感器探头还可每小时监测 1 次水质, 可获得相应指标的昼夜变化数据, 具有一定实用性。总体来说, 自动监测在梁溪河水质与蓝藻水华监控、趋势分析和水污染预警预报等方面具有人工监测不可替代的作用。

造成自动与传统的人工监测存在差异的因素有测定原理、仪器精度和灵敏度及采样位置、采样方式几个方面。为评价水环境质量, 要求所确定的原位监测站址能充分地反映所测水域的质量状况及该水域质量变化的时间性和空间性^[27], 需要根据河宽和水深按照左中右、上中下确定采样垂线的数量和垂线上采样点的数量。依照 2 种监测采样方式, 梁溪河水质和蓝藻自动监测系统采用近岸表层采样, 而人工采集监测断面左中右 1 m 深度水柱混合样, 这是 2 种监测方式的蓝藻通量存在差异的重要原因。为使蓝藻水华自动监测数据更加准确完善, 提出以下建议。

1) 采样位置的优化。采样方式的不同影响了采样的代表性, 在一些流量不大的水体上采样结果差异不大, 而在大江大河上, 自动监测与手工监测相比可能会存在差异。由于梁溪河水质与蓝藻自动监测系统仅在近岸表层设置了一个采样点, 在便于维护和不妨碍通航的情况下, 高扬程自吸泵应最大限度地伸向河中央, 所采集的样品才能更好地代表整个断面, 在水位太低情况下也可防止配水出现问题。另外, 由于高扬程自吸泵抽取水下 0.5 m 上下水样, 此深度的藻颗粒含量较高, 因此, 自吸泵在伸向河中央的情况下, 可进一步放到更深一处的位置。

2) 定期维护输水通路。配水系统长期放置于水中, 平时进入管道的有大量底泥悬浮杂质, 这些悬浮物会形成淤泥并附着在自吸泵和输水通道的管壁上, 可能会造成输水通路的堵塞, 导致测定的藻密度等指标含量与实际存在误差。因此, 可定期取自吸泵及输水通道进行清洗, 若出现生锈腐蚀情况也应及时更换配水系统。

4 结论

1) 在 U 型断面的流通河道中, 夏季梅梁湖泵站以平均 $24.89 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的流量向梁溪河调水, 改变了河道水体的流动状态; 景宜桥断面水体中蓝藻颗粒在空间上整体呈表层高、底层低、滨岸带略高的特征。

2) 通过数据对比验证, 自动监测蓝藻通量与人工监测获得的数据显著相关, 2 种监测方法下获得的蓝藻通量总体变化趋势一致, 说明构建的梁溪河蓝藻通量自动监测方法获取蓝藻通量的效果较好, 可取代人工高频监测方法。

3) 调水流量和水温是影响梅梁湖排入梁溪河蓝藻通量的重要因素。流速大小影响着藻颗粒在水体中的分布, 在叶绿素 a 浓度分布不均匀情况下, 采样方式是导致自动与人工监测结果存在差异的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 王成林. 太湖蓝藻水华及藻源性“湖泛”形成机制的气象因素研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [2] 马倩, 田威, 吴朝明. 望虞河引长江水入太湖水体的总磷、总氮分析[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 207-212.

- [3] 朱喜. 调水改善无锡城市水环境探讨[J]. *水资源保护*, 2002, 18(2): 57-59.
- [4] 展永兴. 调水引流在太湖水环境综合治理中发挥的作用分析[J]. *水利规划与设计*, 2010, 23(3): 15-18.
- [5] 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 603-613.
- [6] 周吉, 张小稳, 刘琳, 等. 利用望虞河实施引江济太的成效分析及建议[J]. *江苏水利*, 2015, 36(4): 51-52.
- [7] 孙永明, 陈宝华. 梅梁湖泵站进水引渠水工模型试验研究[J]. *江苏水利*, 2007, 28(3): 25-26.
- [8] 秦伯强, 朱广伟, 张运林, 等. 高频无线自动监测技术在湖泊蓝藻水华监测和预测中的应用[J]. *科研信息化技术与应用*, 2010, 1(3): 61-70.
- [9] 石亚东. 直湖港水利工程对太湖(梅梁湖)影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [10] 唐一率. 梁溪河水质改善的调水引流效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [11] 王苏, 沈挺, 洪国喜, 等. 太湖横山水利枢纽生态调水成本测算[J]. *江苏水利*, 2019, 40(8): 31-36.
- [12] 郑建中, 王苓, 尤征懿, 等. 调水引流对太湖无锡水域湖流的影响[J]. *水利水电自动化*, 2009, 27(4): 47-50.
- [13] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [14] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(5): 550-552.
- [15] 吴挺峰, 朱广伟, 秦伯强, 等. 前期风场控制的太湖北部湖湾水动力及对蓝藻水华影响[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 409-415.
- [16] 秦伯强, 张运林, 杨桂军, 等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制[J]. *科学通报*, 2016, 61(7): 759-770.
- [17] 刘霞. 太湖蓝藻水华中长期动态及其与相关环境因子的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [18] 邱立云. 富营养化湖泊环境影响因子相关性分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [19] 王华, 逢勇. 藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真[J]. *环境科学*, 2008, 29(4): 884-889.
- [20] 梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 455-462.
- [21] 曹巧丽, 黄钰玲, 陈明曦. 水动力条件下蓝藻水华生消的模拟实验研究与探讨[J]. *人民珠江*, 2008, 29(4): 8-10.
- [22] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(1): 63-71.
- [23] XU Y, WANG G, LI Y R. Dynamics of the water bloom-forming Microcystis and its relationship with physicochemical factors in Lake Xuanwu(China)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, 17: 1581-1590.
- [24] 许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2230-2236.
- [25] 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.
- [26] 吴烈国. 基于无线传感器网络的水环境监测系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [27] 崔长俊, 张喜双, 王桂荣, 等. 水质自动监测站建设的要求与管理的思考[J]. *环境科学与管理*, 2007, 32(2): 18-19.

(责任编辑: 曲娜)

Automatic monitor of cyanobacterial particle flux in lake- connected river

GUO Yulong^{1,2}, ZENG Lei³, XU Hai^{1,*}, CHEN Xuqing⁴, ZHENG Jianzhong⁵, ZHAN Xu², ZHU Guangwei¹

1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

3. Wuxi Xishan District Water Resources Bureau, Wuxi 214101, China

4. Wuxi Blue algae Control Office, Wuxi 214026, China

5. Wuxi Branch of Jiangsu Bureau of Hydrology and Water Resources, Wuxi 214026, China

*Corresponding author, E-mail: hxu@niglas.ac.cn

Abstract The cyanobacteria blooms in the form of surface granular cell mass formed by cyanobacteria cells in lakes have a strong ability of drift and diffusion, and a significant impact on water landscape, which has become the focus of environmental management of rivers and lakes. How to quickly and efficiently monitor the migration flux of cyanobacteria particles has become a technical difficulty in the water quality management of the river-connected lakes and reservoirs. In order to meet the demand for real-time monitoring of cyanobacteria flux from lake-connected river with serious cyanobacteria bloom, the Liangxi river which is a connected river of Meiliang Bay of Taihu Lake was taken as an example. The spatial distribution of cyanobacteria particulate and daily concentration of chlorophyll a in Jingyiqiao were monitored during the cyanobacteria bloom season from June to August 2019. Combined with the shore-based water quality and cyanobacteria automatic monitoring system, the conversion relationship between manual monitoring of cyanobacteria flux and automatic monitoring parameters was determined. A high frequency automatic monitoring method for cyanobacteria flux in Liangxi river was developed and its influencing factors were analyzed. The results show that in the U-shaped circulation river, the spatial distribution of cyanobacteria particulate in Jingyi bridge was characterized by high in surface layer, low in bottom layer and slightly high at the coastal zone. Through the near-shore surface sampling, the concentration of chlorophyll a by the water auto-monitoring system was 30% higher than the average value of the river; Through the comparison of the established monitoring methods, the daily variation of cyanobacteria flux by auto-monitoring and manual monitoring was consistent on the whole, and the total amount was equal to that by manual monitoring, their ratio was 1.07, which accurately reflected the rule of cyanobacteria flux in the river. The analysis of the differences between the two monitoring methods shows that both the in-situ water quality and cyanobacteria auto-monitoring system had a good effect on the real-time monitoring of cyanobacteria flux in Liangxi river, this system application realized the real-time on-line monitoring of cyanobacteria flux in the river, and provided a key technical support for the emergency management of cyanobacteria bloom.

Keywords river-lake connectivity; water transfer project; cyanobacteria bloom; cyanobacterial particle flux; auto-monitoring; river pollution control