

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业源挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石油工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶性重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽琚,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析

刘心愿¹, 宋林旭^{1*}, 纪道斌^{1*}, 刘德富², 崔玉洁¹, 黄佳维¹, 赵冲¹, 唐咏春¹, 平明明¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 2016 年 5 月 24 日至 6 月 2 日香溪水库湾经历了 3 次不同强度的降雨, 对降雨前后库湾水流、水温、光学特性、叶绿素 a 浓度等因素进行分析. 结果表明, 5 月 27 日中雨期间, 较降雨前库湾上游来流量增加 1.9 倍, 库湾平均混合层深度增加 8.2 m; 6 月 1 日小雨期间, 较降雨前库湾平均混合层深度增加 1.6 m, 平均叶绿素浓度降低 $2.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 6 月 2 日大雨期间, 较降雨前库湾上游来流量增加 4 倍, 库湾平均混合层深度增加 7.9 m, 平均叶绿素浓度降低 $14.64 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 降雨导致上游来流量增加, 加快了藻类的迁移; 混合层深度增加破坏了藻类的生长环境, 是水华消退的主要原因. 降雨结束后, 在 2~3 d 适宜光照、温度条件下库湾水体水温分层恢复, 藻类快速生长繁殖, 导致库湾表层叶绿素 a 浓度回升, 降雨对水华的暴发具有阶段性抑制作用.

关键词: 三峡库区; 香溪河; 降雨; 蓝藻; 水华

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2018)02-0774-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201708203

Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis

LIU Xin-yuan¹, SONG Lin-xu^{1*}, JI Dao-bin^{1*}, LIU De-fu², CUI Yu-jie¹, HUANG Jia-wei¹, ZHAO Chong¹, TANG Yong-chun¹, PING Ming-ming¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: There were three rainfall events with different intensity in the Xiangxi Bay (XXB) from May 24 to June 2 in 2016. The factors such as hydrodynamics, water temperature, optical properties, and chlorophyll a concentrations during the rainfall events were analyzed. During the May 27 moderate rain period, the upstream flow of the reservoir bay increased by 1.9 times and the average mixing layer depth in the whole reservoir increased 8.2 m, compared to those before the rainfall event. During the June 1 light rain period, the average mixing layer depth in the whole reservoir increased 1.6 m and the average chlorophyll concentration reduced $2.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, compared with those before the rainfall event. During the June 2 heavy rain period, the upstream flow of the reservoir bay increased by 4 times, the average mixing layer depth in the whole reservoir increased 7.9 m and the average chlorophyll concentration reduced $14.64 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, compared with those before the rainfall event. The algae moved from the upstream to the downstream with water that reduced the concentration of algae in the XXB. The water temperature stratification weakened during the rain event and the average mixing layer depth in the whole reservoir increased, destroying the algal growth environment. After the rainfall, under suitable light and temperature conditions for 2-3 d, the water temperature stratification of the reservoir was recovered and rapid growth and reproduction of algae occurred. As a result, the chlorophyll concentrations in the reservoir increased. Rainfall has a periodic inhibitory effect on the outbreak of algal blooms; however, it cannot fundamentally solve the problem of tribal bay blooms.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; rainfall; cyanobacteria; bloom

三峡水库自 2003 年 6 月蓄水以来, 水库干流水体整体维持在 II 类, 但支流水体普遍存在不同程度的水体富营养化和水华问题, 水华优势藻种从河流型甲藻、硅藻向湖泊型的蓝绿藻演替^[1], 引起社会的广泛关注, 特别是蓝藻毒素的释放, 严重影响支流库湾水生态环境安全. 诸多研究表明^[2-4] 蓝藻水华的形成是适宜的光照、充足的营养盐及缓慢的水动力条件共同作用的结果. 受水库干流顶托作用, 香溪河库湾水流运动变缓, 大多小于 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[5,6], 出现一定程度上的水温分层现象. 现场观测结果表明: 降雨过程总是伴随着水华的消退,

降雨过程是影响藻类水华生消敏感动力学过程. 降雨过程通常伴随复杂的气象条件改变, 而除降雨本身从水-气界面对水体形成掺混扰动外, 降雨过程

收稿日期: 2017-08-24; **修订日期:** 2017-10-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2014CB460601); 国际科技合作与交流专项 (2014DFE70070); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51509086); 国家自然科学基金重大项目 (91647207); 国家自然科学基金项目 (51779128, 41501297); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07104-005-02)

作者简介: 刘心愿 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物迁移转化过程, E-mail: 848144686@qq.com

* 通信作者, E-mail: 280825327@qq.com; 394816707@qq.com

将导致上游来流及区间坡面汇流携带营养盐、泥沙等物质大量进入支流库湾, 大大地改变香溪河库湾中营养盐输移路径、转化规律、水温结构、环流模式等^[7], 进而影响库湾藻类水华消长过程. 由于降雨过程多生境因子协同作用, 加上香溪河库湾特殊的水动力背景条件, 致使水华消退过程机制尚不明晰, 有必要开展深入研究. 纪道斌等^[8]对藻类的迁移路径与混合层深度的改变未作深入讨论. 2016 年 5 月 24 日至 6 月 2 日对降雨前后香溪河库湾进行跟踪监测, 根据 Sverdrup^[9~11]提出的临界层理论, 分析了降雨期间三峡库区香溪河库湾水流、混合层深度、叶绿素 a 浓度特征, 尝试揭示降雨对香溪河库湾水华的消退机制.

1 材料与方法

1.1 研究区域

香溪河是三峡水库库首区域最大的支流, 位于 $110^{\circ}25' \sim 111^{\circ}06' \text{E}$ 、 $30^{\circ}57' \sim 31^{\circ}34' \text{N}$, 流域总面积 $3\,183 \text{ km}^2$, 发源于位于湖北省西北部的神农架国家森林公园, 年径流量 19.56 亿 m^3 , 多年平均流量 $63.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[12], 向南流经兴山县和秭归县, 在香溪镇(距三峡大坝 32 km)注入长江^[13]. 香溪河流域气候为亚热带大陆季风气候, 年降雨量为 $800 \sim 1\,400 \text{ mm}$, 降水分布不均匀, 夏季以暴雨为主, 河水暴涨暴落, 河流溪涧性特征明显, 洪峰历时一般为 $2 \sim 3 \text{ d}$ ^[14]. 2003 年三峡水库蓄水以后, 香溪河变成湖泊型支流, 优势藻种正从最初的河道型水华优势种(硅藻、甲藻)向湖泊型水华优势种(蓝绿藻)演替, 并多次暴发严重水华^[15].

1.2 监测方案

根据香溪河的地形地貌, 沿河道中泓线设 10 个监测点, 间距约 3 km, 从河口到上游依次记为 XX00 ~ XX09(见图 1), 此次由于水华情势分布, 故选取 XX00、XX02、XX04、XX06、XX08 为监测点.

监测指标包括有流速、水温、水深、叶绿素 a 浓度、水体透明度 SD、降雨量和气温. 水温、叶绿素 a 浓度用 EXO 多参仪从表层到水底连续均匀地进行监测; 水深和流速采用 Vector 三维点式流速仪现场测定; 水体透明度 SD 采用塞氏透明度板测量; 降雨量和气温由兴山县气象局提供.

1.3 临界层理论

真光层深度(Z_{eu})是植物光合作用能有效发生的水体深度, 一般取为水下光合作用有效辐射为水面 1% 处对应的深度^[16]. 不同水体真光层深度差异

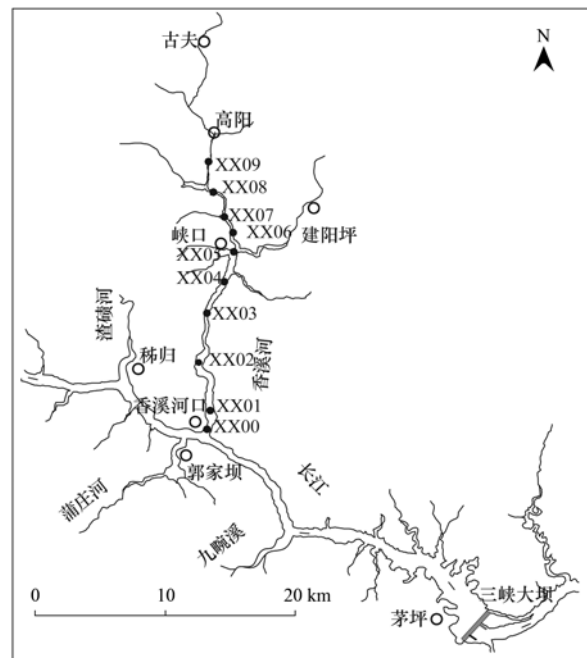


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites

显著, 针对三峡水库水体, 在已有研究基础上, 本研究采用透明度的 2.7 倍^[17]作为真光层深度, 即:

$$Z_{\text{eu}} = 2.7 \times \text{SD} \quad (1)$$

混合层深度 Z_{mix} 定义为水体上层垂直混合充分的水层, 水体密度或温度沿深度变化很小, 不同的混合层深度, 藻类生物量、光照和营养物质的分布有较大的差别^[18]. 不少学者从水温或水体密度角度^[19]对 Z_{mix} 计算进行研究, 针对三峡水库水体, 在已有的研究基础上, 采取表层水体温差 ≤ 0.5 、 1°C 处对应的水深^[20,21]. 本研究选取表层水体温差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 处对应的水深为混合层深度 Z_{mix} .

2 结果与分析

2.1 气象和流速特征

2.1.1 气象特征

根据国家降雨量分级, 表 1 为香溪河流域 2010 ~ 2014 年降雨分级结果, 从中可知, 流域以中小降雨为主, 其中小雨约占总数的 79.3%, 中雨约占 13.2%, 日降雨量超过 $25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的大雨仅占总量 7.5%.

2016 年 5 月 24 日至 6 月 2 日兴山县有不同程度降雨, 5 月 27 日中雨, 日降雨量 21 mm ; 6 月 1 日小雨, 日降雨量 9.4 mm ; 6 月 2 日大雨, 日降雨量 36.8 mm (见图 2). 兴山水文站监测数据显示, 降雨之前香溪河上游来流量为 $28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 5 月 27

表 1 香溪河流域 2010 ~ 2014 年降雨次数

Table 1 Rainfall profiles of Xiangxi Bay from 2010 to 2014

年份	小雨 (< 10 mm·d ⁻¹)	中雨 (10 ~ 25 mm·d ⁻¹)	大雨 (25 ~ 50 mm·d ⁻¹)	暴雨 (50 ~ 100 mm·d ⁻¹)	大暴雨 (> 100 mm·d ⁻¹)
2010	97	17	3	2	0
2011	91	16	9	2	1
2012	109	13	5	2	0
2013	86	17	7	1	0
2014	104	18	9	3	2

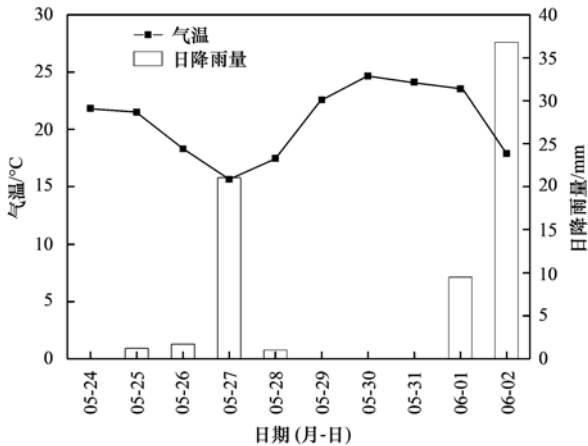


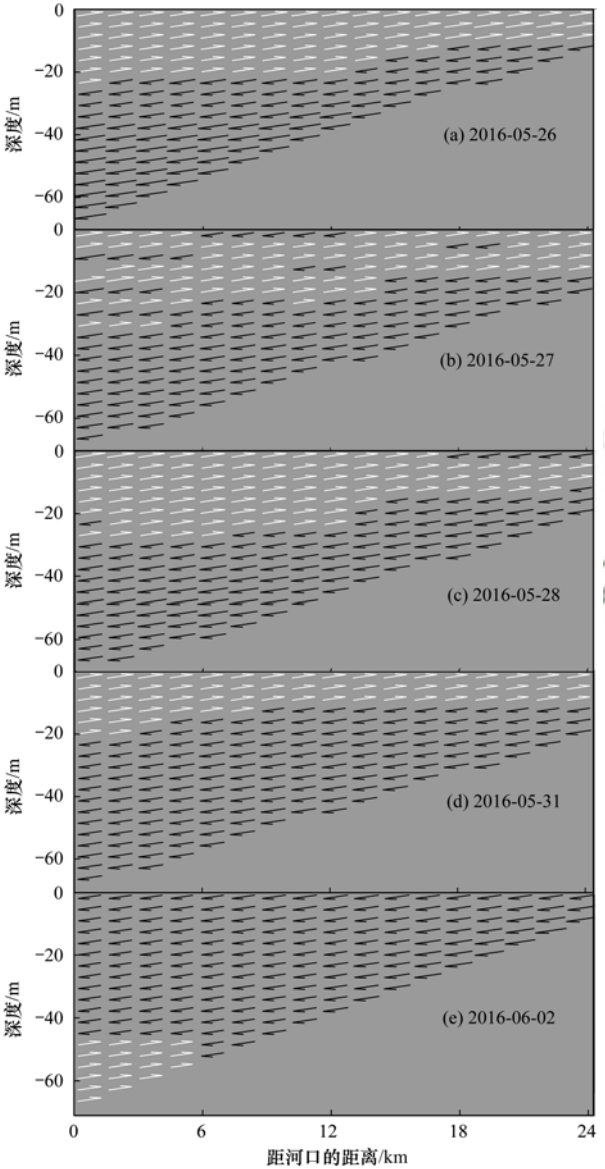
图 2 2016 年气温随降雨量变化

Fig. 2 Temperature versus precipitation in 2016

日降雨后，上游来流量骤增至 $54\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，增加近 2 倍，6 月 2 日强降雨后，上游来水最大流量骤增至 $112\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，增大 4 倍。气温因降雨而降低，5 月 27 日午时气温为 16°C ，较 5 月 24 日 26°C 降低了 10°C ；6 月 1 日午时气温为 24°C ，较 5 月 31 日降低了 0.5°C ；6 月 2 日午时气温为 18°C ，较 5 月 31 日 28°C 降低了 10°C 。湿度随降雨增大，5 月 27 日午时湿度为 90%，较 5 月 24 日 50% 升高了 40%；6 月 1 日午时湿度为 84%，较 5 月 31 日升高了 4%；6 月 2 日午时湿度为 96%，较 5 月 31 日升高了 10%。

2.1.2 水流特征

图 3 显示了 5 月 27 日和 6 月 2 日两次降雨前后香溪河库湾的流速时空分布。从中可见 5 次水流过程均出现了明显的异重流现象。5 月的 26、27、28 和 31 日长江干流水体均以表层异重流的形式倒灌入香溪河库湾，倒灌至距河口约 24 km，且上游来水均以顺坡底部异重流形式流向河口。5 月 27 日由于降雨水体紊流增加，倒灌平均深度由 15 m 加深到 27 m，上游来水平均流速也由 5 月 26 日的 $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $0.07\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。6 月 2 日，长江干流水体均以底层异重流的形式倒灌入香溪河库湾，倒灌至距河口约 3 km，上游来水平均流速为 $0.09\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，此次上游来水平均流速为监测期间峰值。



白色箭头表示水流由河口流向库湾上游，黑色箭头表示水流由库湾上游流向河口，箭头长度表示流速的大小

图 3 2016 年降雨前后香溪河库湾流速沿程纵剖面

Fig. 3 Longitudinal velocity profiles at a bay of Xiangxi River Reservoir before and after rainfall in 2016

2.2 水温分层特征

图 4 为 2016 年 5 月 24 日至 6 月 2 日香溪河库湾水温分层变化，从 5 月 24 日至 6 月 2 日，香溪河

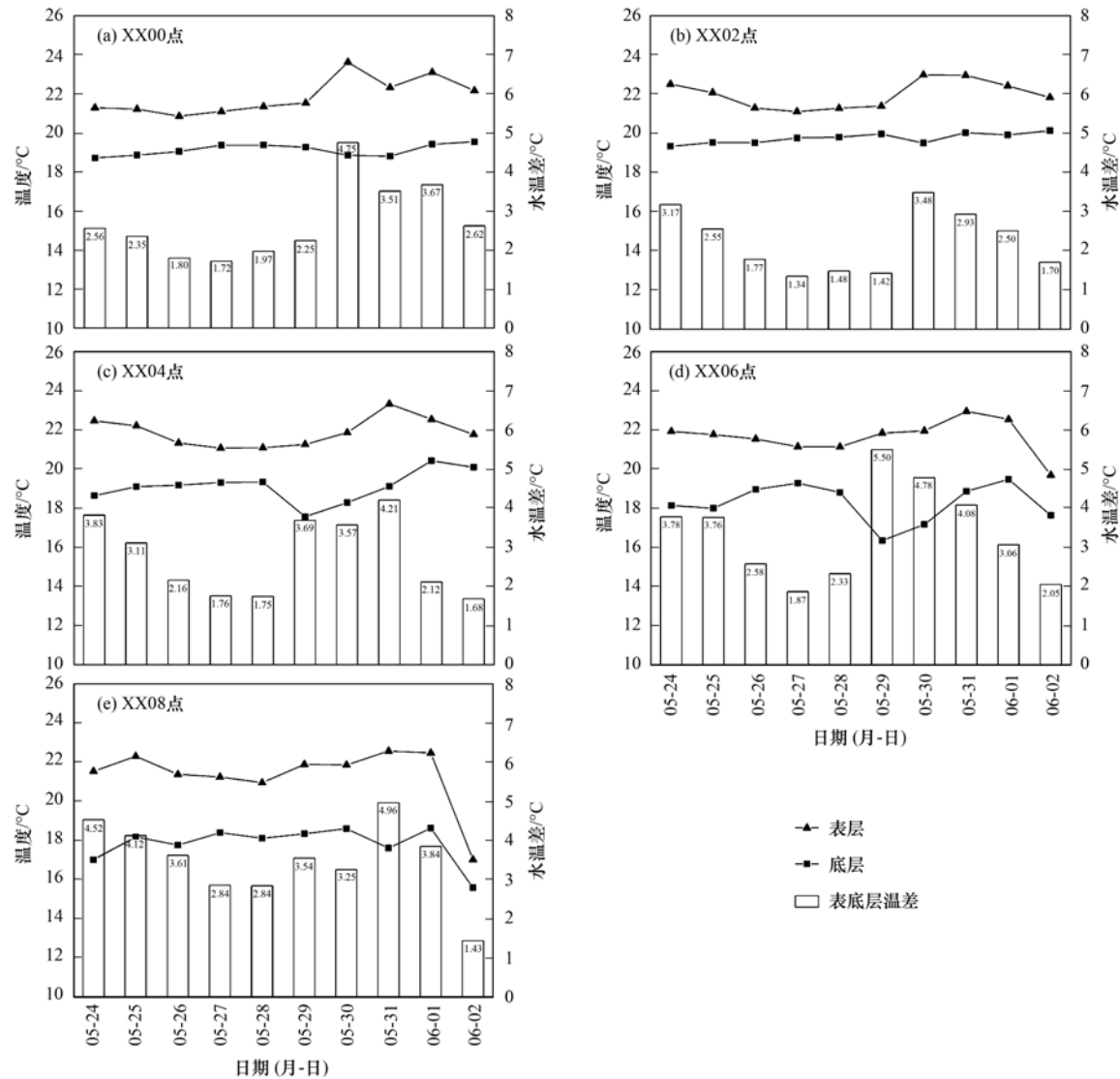


图4 各点位水温分层每日变化

Fig. 4 Daily variations in water temperature stratification at each point

库湾表层水温均呈先降低后升高再降低的趋势，表底层温差也呈相同的变化趋势。在5月27日、6月1日、6月2日降雨期间，表层水温均降低，导致香溪河库湾表底层温差也减小，在6月2日表底层水温差最小，分层最弱。XX06在6月2日表底层温差2.05℃较5月31日4.08℃降低2.03℃；XX08在6月2日表底层温差1.43℃较5月31日4.96℃降低3.53℃。降雨使香溪河库湾表层水温降低，以致表底层温差减少，水温分层减弱；且降雨对水温分层改变迅速，在短时间内就有明显效果。

2.3 叶绿素特征

表2为监测期间水华暴发时XX06表层藻类密度统计，从中可知，香溪河库湾在5月31日和6月1日暴发蓝藻，优势藻种为微囊藻。5月31日总蓝藻密度占总藻密度的94%，微囊藻密度占总蓝藻密

度的75%；6月1日总蓝藻密度占总藻密度的95%，微囊藻密度占总蓝藻密度的77%。

叶绿素a是一种常用的度量藻类生物量的化学指标。图5为降雨前后香溪河库湾表层叶绿素a浓度分布特征。香溪河库湾表层叶绿素a浓度整体呈减少后升高再减少的趋势。在5月27日、6月1日、2日降雨时，香溪河库湾表层叶绿素a浓度降低，在降雨停止后，叶绿素a浓度会重新升高。降雨前后距河口较近的XX00和XX02表层叶绿素a浓度一直保持在较低浓度($\leq 5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)，受降雨影响不大；XX04、XX06、XX08表层叶绿素a浓度随降雨变化明显。5月31日XX06表层叶绿素a浓度 $38.590 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ；XX08表层叶绿素a浓度 $40.350 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，均超过水华暴发阈值 $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，暴发水华。6月2日降雨期间XX06表层叶绿素a浓度下

表 2 水华暴发期间 XX06 表层藻类密度统计/cells·L⁻¹

日期 (月-日)	蓝藻		绿藻		硅藻		多甲藻
	微囊藻	席藻	小球藻	衣藻	小环藻	菱形藻	
05-31	2.3×10^8	7.8×10^6	8.0×10^6	2.2×10^6	6.7×10^6	2.0×10^6	0.9×10^6
06-01	1.9×10^8	5.6×10^6	5.8×10^6	1.0×10^6	5.1×10^6	1.2×10^6	0.4×10^6

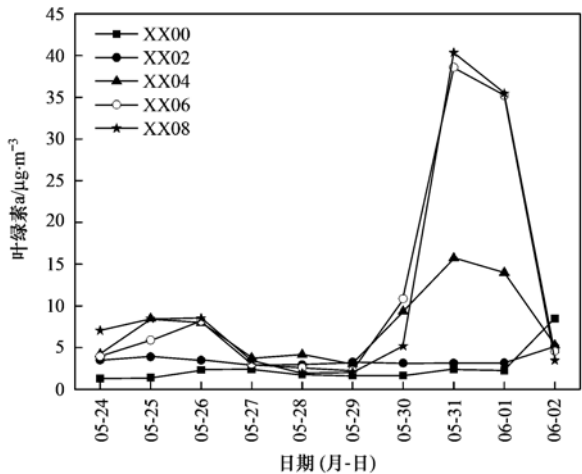


图 5 降雨前后库湾表层叶绿素 a 浓度分布

Fig. 5 Distribution of chlorophyll-a concentration at the surface of the reservoir bay before and after rainfall

降到 $6.157 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; XX08 表层叶绿素 a 浓度下降到 $3.630 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 香溪河库湾水华消退.

3 讨论

3.1 流速变化对藻类影响

降雨对藻类水华消退作用受到普遍认同^[22], 随着降雨强度增加, 藻类水华消退过程越明显. 而三峡水库支流库湾发生水华的主要诱因应归于水动力条件的改变. 有关水动力条件与藻类生长之间的关系已有一些研究^[23~27]. 就香溪河流域而言, 作为典型农林复合小流域, 河流汇流随降雨陡涨陡落^[12], 使香溪河库湾的水动力条件发生改变^[28]. 香溪河出现的分层异重流现象, 主要是温差异重流^[29,30]. 根据降雨前后香溪河库湾流速沿程纵剖面图的分析[图 3(a)和 3(d)], 可以得到未降雨时长江干流水体以表层异重流^[31,32]的形式倒灌进入香溪河, 香溪河上游来水以底部顺坡异重流流向河口; 这与[图 6(a)和 6(b)]未降雨时香溪河库湾叶绿素 a 浓度动态分布特征非常吻合. 在未降雨期间, 受表层异重流影响, 香溪河库湾表层水体藻类随倒灌水体逐步往库湾上游迁移; 由于干支流水体的交换, 库湾表层水体少量藻类随上游水体底部顺坡异重流形式流向河口[图 6(a)和 6(b)], 但由于

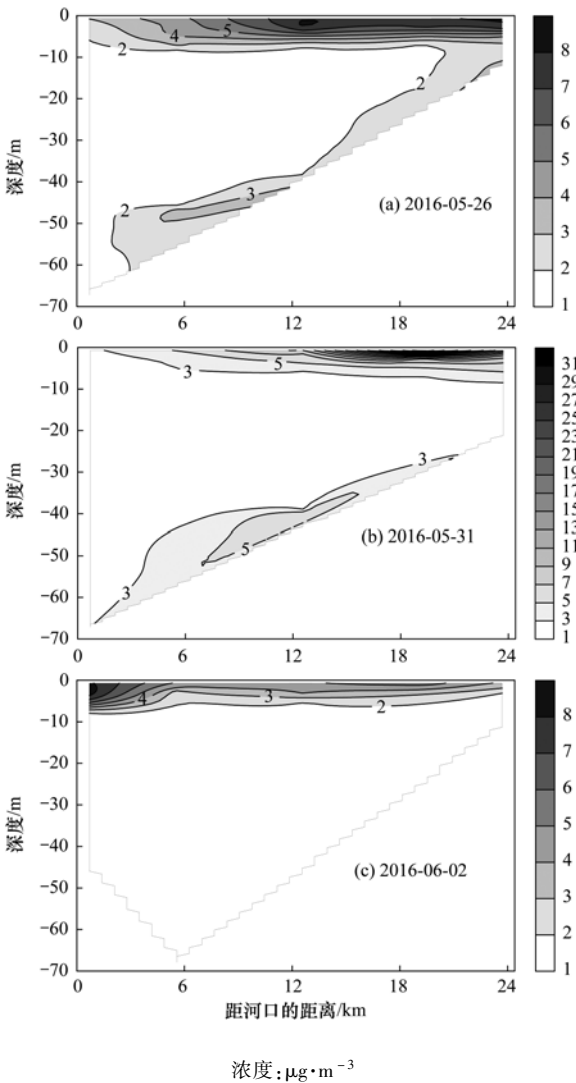


图 6 降雨前后库湾藻浓度动态分布

Fig. 6 Dynamic distribution of algae concentration at the reservoir bay before and after rainfall

库湾水体流速较慢^[5], 表层水体叶绿素浓度依然很高(图 5). 5 月 27 日中雨, 香溪河库湾异重流形式未发生改变[图 3(b)], 但库湾上游来流量增大, 加快了库湾水体的交换, 库湾表层水体藻类流向河口速率增大, 使得库湾上游表层叶绿素浓度降低(图 5). 6 月 2 日大雨, 受降雨影响库湾上游来流量骤增, 大量低温水体流入香溪河, 香溪河库湾异重流形式发生改变[图 3(e)], 库湾水体整体流向河口, 库湾表层水体藻类也随水流向河口方向迁

移, 致使河口处叶绿素 *a* 浓度增大[图 6(c)]. 流速的改变影响了藻类的迁移路径, 由于库湾上游回水末端为水华暴发敏感区域, 降雨导致的入流增加将有助于缓解该区域水华暴发, 但流速的增加并不是水华消失的根本原因.

3.2 混合层变化及其对藻类影响机理

Sverdrup^[9] 认为水温分层导致水体混合层深度 (Z_{mix}) 小于临界层深度是海洋春季暴发水华的根本原因, 为此建立了海洋春季水华暴发的临界层理论 (Critical Depth Theory). 该理论假设在营养盐充足的条件下, 浮游植物生长与水下光强成线性关系, 由于光强沿水深垂向呈指数衰减, 故浮游植物初级生产力在水下也呈指数型衰减. 另假设包括呼吸、捕食、沉降、分解等导致藻类生物量降低的广义呼吸作用垂向上为常数. 将生产力累计总量与广义呼

吸作用相等, 即累计净生产力为零时水深记为临界层深度. 若水体出现较强温度分层, $Z_{\text{mix}} \leq Z_{\text{eu}}$, 则浮游植物生长不受光照限制, 这时候就会暴发高强度水华; 反之, 若 $Z_{\text{mix}} > Z_{\text{eu}}$, 即在水温分层不显著的情况下, 浮游植物颗粒容易被掺混至真光层以下, 其接受光照的机会大大减小, 生长就受到光限制. 这一理论也被用来解释淡水湖泊水华的季节性暴发和演替的规律. 与临界层理论相对应, $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值也存在一个临界值, 低于临界值浮游植物生长会受光限制而不易暴发水华^[33,34]. Jensen 等^[35] 考虑日照时间长短的季节性变化, 将光混比 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 临界值定为一个范围: 0.2 ~ 0.35. 由于香溪河库湾地处亚热带, 日照时间长短存在显著季节性差异, 因此春、秋、冬季取 0.35, 夏季取 0.2^[36], 本文选取 0.35 作为临界值. 此次监测的 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 见图 7.

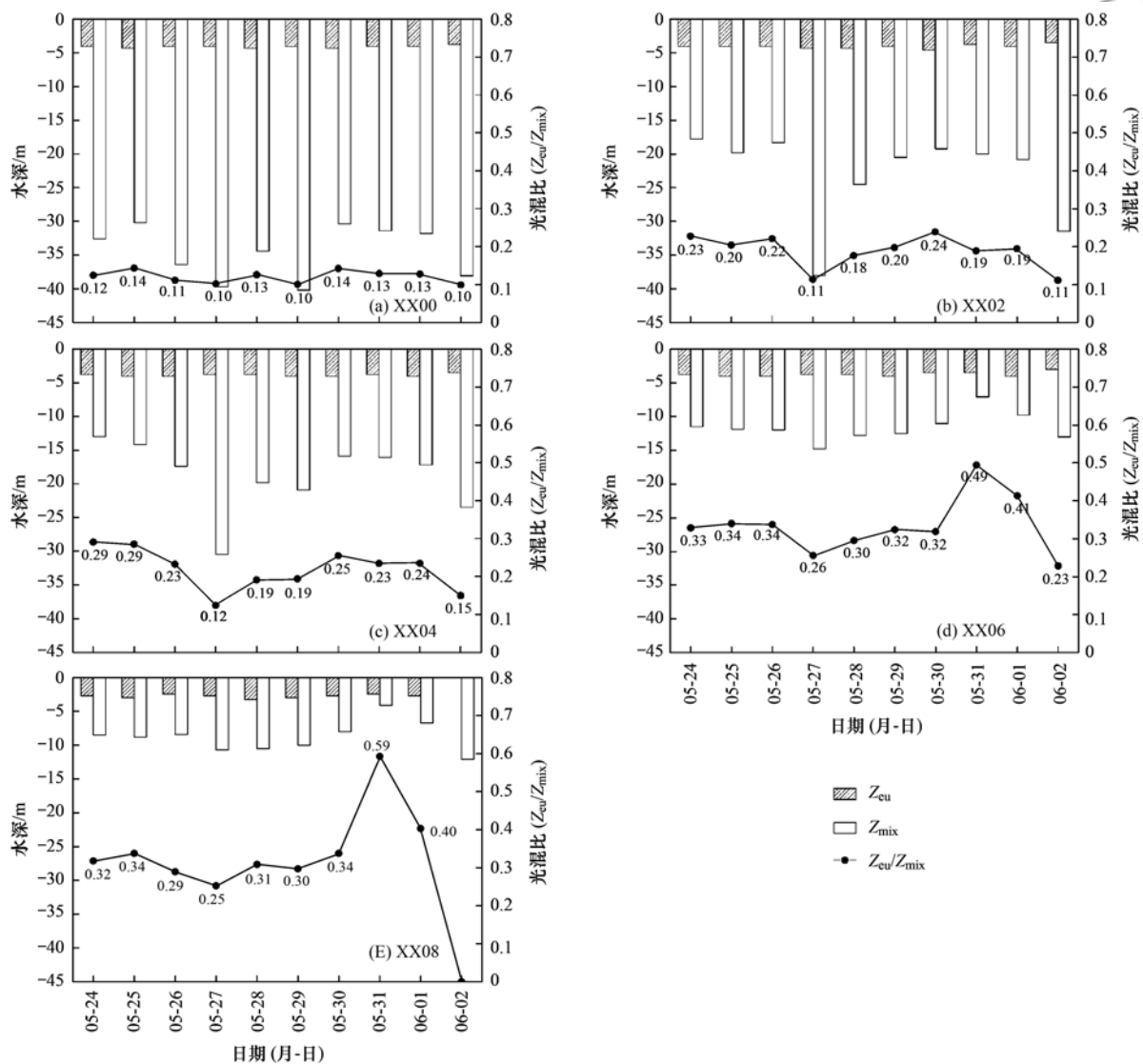


图7 各点位 Z_{eu} 、 Z_{mix} 、 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 的每日变化

Fig. 7 Daily variations in Z_{eu} , Z_{mix} , $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ at each point

三峡水库蓄水后, 水库干流及其支流流速急剧下降, 香溪河库湾的平均流速降至 $0.0012 \sim 0.0037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[37], 导致水体滞留时间大幅延长, 有助于水温分层的发育^[38]. 春季气温和太阳辐射强度急剧上升, 导致表层水体快速升温而底部相对滞后, 从而导致水温出现分层^[39], 是三峡水库支流库湾春季水华暴发的根本原因. 而随着水体混合层深度不断扩大, 水温分层减弱, 浮游植物颗粒容易被掺混至真光层以下, 其接受光照的机会大大减小, 生长就受到光限制^[40~44]. 降雨期间上游大量低温来水由底部进入香溪河库湾, 导致水体掺混、涡旋, 水温分层减弱^[42,44]. 随着降雨强度增加, 坡面汇流流量增加, 并携带大量泥沙进入水体, 致使水体混合层加深, 垂向扰动增强^[24,45], 水温分层减弱. 这与本次监测的(图7)混合层深度随时间变化过程(图4)、水温分层变化过程完全相符, 在靠近香溪河库湾上游的 XX06 和 XX08 在降雨期间受上游来水影响更为显著. 在临界层理论中^[6], 真光层深度的大小直接影响到藻类的生长, 而在此次监测中香溪河库湾水体真光层深度均小于混合层深度, 且降雨前后变化不大(图7). 故临界层理论不能对 5 月 31 日 XX06、XX08 暴发水华做出解释, 而 Jensen 等^[35]所提出的光混比 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 临界值却完全符合本次香溪河库湾水华暴发规律(图7). 在降雨过程中, 混合层 Z_{mix} 骤降是光混比 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 突增的直接原因(图7). 降雨过程能通过增加水体混合层深度来减弱水温分层(图4、7), 破坏藻类的生长繁殖环境^[33,34], 是水华消失的根本原因, 降雨强度越大、水华抑制作用越明显. 但当温度升高时, 混合层深度减少, 藻类重新繁殖, 进而暴发水华(图5). 降雨的抑制作用表现为阶段性, 并不能从根本上解决三峡库区支流库湾水华暴发问题.

4 结论

(1) 香溪河库湾上游来流量随着降雨程度的加深而增加, 香溪河库湾倒灌模式也会随之发生改变, 但流速的变化仅改变了藻类的迁移路径, 并不是水华消失的根本原因.

(2) 不同程度的降雨对库湾水体真光层影响不大, 但中、大降雨会使库湾平均混合层深度增加 8 m 左右. 水体混合层加深, 水温分层减弱, 改变了藻类生长环境, 是水华消失的根本原因.

(3) 降雨的抑制作用表现为阶段性, 短时期内对香溪河库湾水华浓度的降低有明显作用. 但随着

降雨结束, 在 2~3 d 适宜光照、温度条件下, 混合层深度减少, 水温分层加剧, 藻类重新繁殖, 进而暴发水华.

致谢: 刘振宇教授在文章的修改和润色中给予了极大帮助, 生态水工学课题组的王耀耀、方海涛等在野外采样及试验分析中给予了大力支持, 谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环保部. 长江三峡工程生态与环境监测公报 (1997-2009) [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/shj/sxgb/>, 2010-02-24.
- [2] 焦世珩. 三峡库区低流速河段流速对藻类生长的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
Jiao S J. The effects of velocity of flow to the growth of algae in low current area of the Three Gorges [D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [3] 杨敏, 张晟, 胡征宇. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华暴发特性及成因探析[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 371-378.
Yang M, Zhang S, Hu Z Y. Characteristics and preliminary regulating factors of cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3): 371-378.
- [4] 田泽斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2083-2089.
Tian Z B, Liu D F, Yang Z J, et al. Cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir [J]. China Environmental Science, 2012, 32(11): 2083-2089.
- [5] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5 m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(4): 358-369.
Yang Z J, Liu D F, Ji D B, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4): 1114-1125.
- [6] 李崇明, 黄真理, 张晟, 等. 三峡水库藻类“水华”预测[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 1-6.
Li C M, Huang Z L, Zhang S, et al. Risk forecast of algal bloom in the Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 1-6.
- [7] Berger S A, Diehl S, Stibor H, et al. Water temperature and mixing depth affect timing and magnitude of events during spring succession of the plankton [J]. Oecologia, 2007, 150(4): 643-654.
- [8] 纪道斌, 李媛, 孔松, 等. 典型暴雨洪水对三峡水库香溪河库湾水华的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013, (6): 39-44.
Ji D B, Li Y, Kong S, et al. The influence of a typical storm flood on the water bloom in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (6): 39-44.
- [9] Sverdrup H U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton [J]. Ices Journal of Marine Science, 1953, 18(3): 287-295.
- [10] Fonseca B M, Bicudo C E D M. Phytoplankton seasonal variation

- in a shallow stratified eutrophic reservoir (Garças Pond, Brazil) [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **600**(1): 267-282.
- [11] Godlewska M, Mazurkiewicz-Boroń G, Pociecha A, *et al.* Effects of flood on the functioning of the Dobczyce Reservoir ecosystem [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **504**(1-3): 305-313.
- [12] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 267-275.
- Song L X, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Study on non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir area based on SWAT [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 267-275.
- [13] 黄真理, 李玉梁, 李锦秀, 等. 三峡水库水环境容量计算[J]. *水利学报*, 2004, **35**(3): 7-14.
- Huang Z L, Li Y L, Li J X, *et al.* Water environmental capacity for the reservoir of Three Gorges Project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(3): 7-14.
- [14] 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 等. 高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 555-560.
- Cui Y J, Liu D F, Song L X, *et al.* Phosphorus output characteristics under different rainfall-runoffs in Gaolan River [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 555-560.
- [15] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生消机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- Yang Z J. The mechanisms of algal blooms and its operation method through water level fluctuation under the situation of the bidirectional density currents in tributaries of the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [16] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [17] Tibby J. Development of a diatom-based model for inferring total phosphorus in southeastern Australian water storages[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, **31**(1): 23-36.
- [18] Chen X C, Wang X D, Wu D Y, *et al.* Seasonal variation of mixing depth and its influence on phytoplankton dynamics in the Zeya Reservoir, China [J]. *Limnology*, 2009, **10**(3): 159-165.
- [19] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E. An optimal definition for ocean mixed layer depth [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, **105**(C7): 16803-16821.
- [20] Price J F, Weller R A, Pinkel R. Diurnal cycling: observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, **91**(C7): 8411-8427.
- [21] Kunz T J, Diehl S. Phytoplankton, light and nutrients along a gradient of mixing depth: a field test of producer-resource theory [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(6): 1050-1063.
- [22] 王兴雨. 蓝藻水华暴发期间微囊藻基因型组成的时空变化及其相关环境因子[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- Wang X Y. Spatiotemporal variation in *Microcystis* genotype composition and related environmental factors during cyanobacterial blooms [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [23] 谢平, 窦明, 夏军. 南水北调中线工程不同调水方案下的汉江水华发生概率计算模型[J]. *水利学报*, 2005, **36**(6): 727-732.
- Xie P, Dou M, Xia J. Water bloom occurrence probability calculation model in Hanjiang River under different water transfer schemes of the middle route of South to North Water Transfer Project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, **36**(6): 727-732.
- [24] Sin Y, Wetzel R L, Anderson I C. Spatial and temporal characteristics of nutrient and phytoplankton dynamics in the York River estuary, Virginia: analyses of long-term data [J]. *Estuaries*, 1999, **22**(2): 260-275.
- [25] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 7-11.
- Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 7-11.
- [26] 黄程, 钟成华, 邓春光, 等. 三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(2): 453-457.
- Huang C, Zhong C H, Deng C G, *et al.* Preliminary study on correlation between flow velocity and algae along Daning River's backwater region at sluice initial stages in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(2): 453-457.
- [27] 王红萍, 夏军, 谢平, 等. 汉江水华水文因素作用机理——基于藻类生长动力学研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 282-285.
- Wang H P, Xia J, Xie P, *et al.* Mechanisms for hydrological factors causing algal blooms in Hanjiang River——based on kinetics of algae growth [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(3): 282-285.
- [28] 彭成荣, 陈磊, 毕永红, 等. 三峡水库洪水调度对香溪河藻类群落结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1863-1871.
- Peng C R, Chen L, Bi Y H, *et al.* Effects of flood regulation on phytoplankton community structure in the Xiangxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1863-1871.
- [29] 周志德. 20 世纪的泥沙运动力学[J]. *水利学报*, 2002, **33**(11): 74-77, 83.
- Zhou Z D. Advancement of sediment transport mechanics in the 20th Century [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, **33**(11): 74-77, 83.
- [30] 王光谦, 方红卫. 异重流运动基本方程[J]. *科学通报*, 1996, **41**(18): 1715-1720.
- Wang G Q, Fang H W. Basic equations for density current [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, **41**(16): 1402-1408.
- [31] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, **40**(1): 101-112.
- Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, **40**(1): 101-112.
- [32] 邓云, 李嘉, 罗麟, 等. 水库温差异重流模型的研究[J]. *水利学报*, 2003, **34**(7): 7-11.
- Deng Y, Li J, Luo L, *et al.* Temperature prediction model for reservoirs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, **34**(7): 7-11.
- [33] Morris I. The physiological ecology of phytoplankton [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publishing, 1980.

- [34] Scheffer M, Rinaldi S, Gagnani A, *et al.* On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, Turbid Lakes [J]. *Ecology*, 1997, **78**(1): 272-282.
- [35] Jensen J P, Jeppesen E, Olrik K, *et al.* Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish Lakes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, **51**(8): 1692-1699.
- [36] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [37] 雒文生, 谈戈. 三峡水库香溪河库湾水质预测 [J]. *水电能源科学*, 2000, **18**(4): 46-48.
Luo W S, Tan G. Three Gorges Reservoir Xiangxihe Bay water quality prognosis [J]. *Hydroelectric Energy*, 2000, **18**(4): 46-48.
- [38] Sullivan B E, Prah F G, Small L F, *et al.* Seasonality of phytoplankton production in the Columbia River: a natural or anthropogenic pattern? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**(7): 1125-1139.
- [39] 朱伯芳. 库水温度估算 [J]. *水利学报*, 1985, (2): 12-21.
Zhu B F. Prediction of water temperature in reservoirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, (2): 12-21.
- [40] 田泽斌, 刘德富, 姚绪姣, 等. 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(5): 700-707.
Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal Succession of phytoplankton function grouping in Xiangxi Bay [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(5): 700-707.
- [41] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.
Yang Z J, Liu D F, Ma J, *et al.* Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.
- [42] 吴攀, 邓建明, 秦伯强, 等. 水温和营养盐增加对太湖冬、春季节藻类生长的影响 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(10): 1064-1071.
Wu P, Deng J M, Qin B Q, *et al.* Effects of enhanced water temperature and nutrient concentration on algal growth in winter and spring season in Lake Taihu, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(10): 1064-1071.
- [43] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
Chen Y, Yang Z J, Huang Y L, *et al.* Research on the influence of mixing layer depth on algal growth [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- [44] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展 [J]. *水利学报*, 2016, **47**(3): 443-454.
Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454.
- [45] Cloern J E. Tidal stirring and phytoplankton bloom dynamics in an estuary [J]. *Journal of Marine Research*, 1991, **49**(1): 203-221.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)