

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.012

强降雨对水源水库夏季蓝藻水华的影响

邱晓鹏^{1,2}, 黄廷林^{3,4}, 周石磊^{3,4}, 史建超^{3,4}, 曹 昕^{1,2}, 郑 兴^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 陕西省水资源与环境重点实验室, 陕西 西安 710048;

3. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055;

4. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 随着全球气候变暖,降雨形式对水库水质和蓝藻水华的影响受到了越来越多的关注。研究不同降雨形式对我国淮河流域水源水库藻类生长的影响有重要的意义和价值。于2012年和2014年的6~10月份对库区和入库径流进行野外监测,包括物理化学参数和浮游植物的变化,其中浮游植物群落组成用功能群法进行分析。2012年的总降雨量与2014年相近,但2012年强降雨次数更多,且降雨更集中,使得该水库营养盐水平提高,但并未破坏水库的分层。2012年夏季水库爆发蓝藻水华,优势功能群为M(代表种属微囊藻),冗余分析表明功能群M与总磷、总氮和水温呈显著正相关。2014年夏季的水库浮游植物生物量明显低于2012年同期,主要优势功能群为Tc和S2,硝态氮、温度和Schmidt指数是影响浮游植物群落结构的主要环境因子。研究表明,随着全球气候变暖和强降雨发生频率的升高,该水库夏季爆发蓝藻水华的风险会增大。

关键词: 降雨形式; 浮游植物群落结构; 功能群落; 总磷; 冗余分析

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)03-0349-08

Effects of heavy rainfall in summer on cyanobacterial blooms in source water reservoir

QIU Xiaopeng^{1,2}, HUANG Tinglin^{3,4}, ZHOU Shilei^{3,4}, SHI Jianchao^{3,4},
CAO Xin^{1,2}, ZHENG Xing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710048, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an 710055, China; 4. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Ministry of Education,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: With the global warming, the impacts of rainfall patterns on water quality and cyanobacterial blooms of reservoir have received more and more attention. It is of great significance and value to study the influence of different rainfall patterns on the growth of algae in the reservoir of the Huaihe River Basin of China. Field observations on reservoir and inflow runoff were performed during the two 5-month periods (from June to October in 2012 and 2014). Physico-chemical variables were monitored and phytoplankton dynamics and community composition were studied using functional groups. The total amount of rainfall was similar in 2012 and 2014, however, there were more heavy rainfall events in 2012. Our investigation shows that the heavy rainfall in 2012 resulted in high nutrient levels in the reservoir but did not destroy thermal stratifica-

收稿日期: 2020-09-01; 网络出版日期: 2020-09-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1746.026.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979217); 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-02); 陕西省教育厅重点实验室项目(18JS075)

第一作者: 邱晓鹏, 男, 博士, 讲师, 研究方向为微污染水源水处理、污水深度处理技术。E-mail: qiuxiaopeng@xaut.edu.cn

通信作者: 黄廷林, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水资源保护理论与技术、水源水质改善理论与技术、水环境修复等。E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

tion. Cyanobacterial blooms occurred in the summer of 2012. Group M, mainly represented by *Microcystis* spp., was dominant during algal blooms and positively correlated with total phosphorus, total nitrogen and water temperature. The phytoplankton biovolume in the summer of 2014 was lower than that in 2012. The dominant function groups were Tc and S2, with filamentous cyanobacteria being the representative species. Nitrate, water temperature and Schmidt index were the main environmental factors affecting phytoplankton community structure in 2014. With the global warming and the increasing frequency of heavy rainfall, the risk of cyanobacteria blooms in summer in this reservoir will increase.

Key words: rainfall pattern; phytoplankton community; functional groups; total phosphorus; RDA analysis

随着地表水源所占比例的提高,全球气候变暖背景下水源水库的蓝藻水华受到越来越多的关注。水华蓝藻的过量繁殖会降低水库溶解氧,释放大量的有害物质,降低生物多样性,破坏水生生态系统,恶化水源水质。蓝藻的爆发还会增加水源水中有机物的含量,造成水处理过程中药剂投加量增加、膜污染加重和消毒副产物的增加^[1]。此外,水华蓝藻释放的致嗅物(如二甲基异茨醇、土嗅素)和藻毒素(如微囊藻毒素、拟柱孢藻毒素)也严重威胁着人们的饮用水安全^[2]。因此,研究蓝藻水华爆发规律对于水源水库管理和饮用水安全有着重要意义。

水源水库蓝藻水华的爆发通常与适宜的温度、较长的停留时间、充足的营养盐等有关^[3]。《中国气候变化蓝皮书(2020)》表明,随着全球气候变暖,我国气候不稳定性增强,各区域降雨变化差异明显,强降雨事件发生日数增多。夏季强降雨会显著影响水库中浮游植物的生长环境,从而改变库区浮游植物的生物量和群落结构。部分研究表明,夏季强降雨会促进湖库蓝藻水华的爆发;Chen等^[4]报道了我国东南部某水库在强降雨后发生蓝藻水华,氨氮、溶解性总磷的浓度对藻类生物量影响较大;Simic等^[5]发现2014年强降雨后塞尔维亚 Sumarice 水库营养盐水平提高,导致蓝藻(水华束丝藻)大量爆发。然而,也有研究报道了强降雨可以缓解湖库蓝藻水华;刘心愿等^[6]研究表明强降雨会导致香溪河库湾混合层深度增加,从而抑制蓝藻水华;Caldero-Pascual等^[7]报道了爱尔兰某湖泊受强降雨的影响,营养盐水平发生改变、浮游动物数量增多、混合层深度增加,最终导致藻类叶绿素含量减少了两倍。湖库蓝藻水华对夏季降雨的响应,是水体热分层、氮与磷营养盐、水力停留时间等综合作用的结果。然而,目前有关降雨对我国淮河流域水源水库蓝藻水华影响的研究还鲜有报道,有必要探明不同类型降雨形式下影响蓝藻水华的关键环境因子。本研究以枣庄周村水库为研究对象,对比研究了水库藻类在降雨形式

不同的两个夏季的生长情况,并筛选出强降雨影响蓝藻水华的关键环境因子,以期水源水库管理和饮用水安全保障提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

周村水库位于山东省枣庄市,该水库最大库容为8 000万 m³,库区面积为6.5 km²,平均水深为13 m,最大水深为21 m。上游流域以农业和农村用地为主,流域面积为121 km²。该地区属温带亚湿润大陆性季风气候,全年最温暖的月份是7月(平均气温约为33℃),最冷的月份是1月(平均气温约-5℃)。水库上游有三条河流,即徐洼河、下拾河和西伽河。

1.2 采样与分析

于2012年和2014年的6月至10月对水库和入库径流进行采样分析,采样点如图1所示。



图1 周村水库采样点位置

Fig.1 Location of sampling sites in Zhouchun Reservoir

入库径流样品每月采集一次,水库坝前深水区样品每周采集一次。水温、pH和电导率由哈希HQ30D原位测量,透明度采用透明度盘法测定。总氮(TN)、氨氮(NH⁴-N)、硝态氮(NO³-N)和总磷(TP)的检测依据《水和废水监测分析方法》^[8]。用于浮游植物镜检的水样用鲁哥试剂进行固定,并用显微镜Olympus CX31进行镜检,浮游植物种属鉴别依据《中国淡水藻类——

系统、分类及生态》^[9],浮游植物功能群落分类参照文献^[10-11]。

水库降水、入库流量、出库流量和水位数据来源于枣庄市水利局。水库某月水力停留时间(HRT)为该月份平均库容与入库流量之比。采用 Schmidt 指数判断周村水库水体分层情况,当数值低于 49 J/m^2 时表明水体热分层遭到破坏^[12]。香农多样性指数的计算参照文献^[13]。浮游植物生物量的计算依据各藻种细胞平均尺寸,使用相应几何形状公式计算而得^[14]。利用软件 Canoco 分析浮游植物功能群落结构与环境因子的关系。首先对浮游植物功能类群进行去趋势分析(DCA),结果显示 2012 年最大梯度长度为 2.63,而 2014 年其值为 1.40。由于最大梯度长度均小于 3.0,所以选择冗余分析(RDA)研究

浮游植物与环境因子的关系。

2 结果

2.1 水文条件

如图 2 所示,2012 年(774.5 mm)和 2014 年(758.5 mm)的降雨量相近,但二者的降雨形式不同。2012 年降雨主要发生在 7~9 月份,而 2014 年降雨在 5~9 月份均匀分布。2012 年夏季发生 4 次强降雨事件($>50 \text{ mm}$),2014 年则没有强降雨事件。2012 年周村水库的月最大入库流量为 2 412 万 m^3 ,远高于 2014 年的 785 万 m^3 。出于库区防洪抗汛的需要,2012 年出库流量也大于 2014 年出库流量,这使得 2012 年夏季水库的 HRT 较低,其中 7 月份的 HRT 最低,为 43 天。

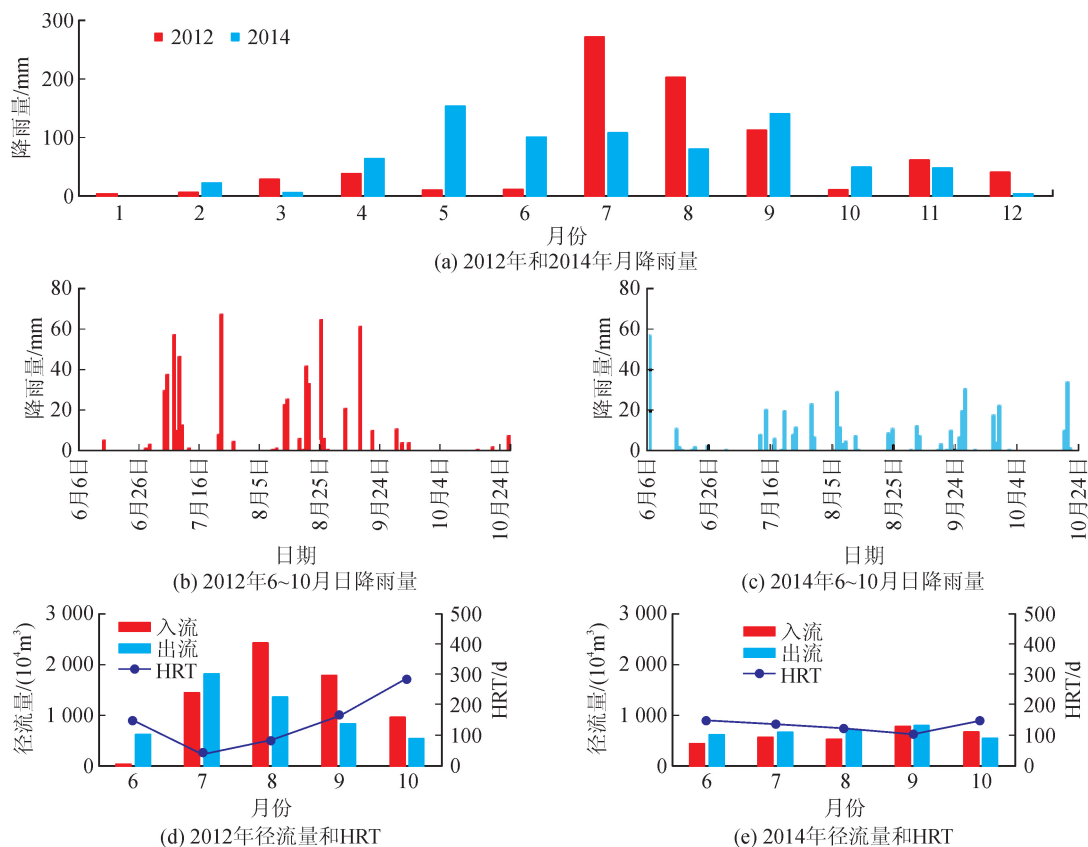


图 2 周村水库水文条件

Fig. 2 Hydrological conditions of the Zhoucun Reservoir

2.2 入库径流营养盐负荷

2012 年和 2014 年周村水库三条入库径流的氮、磷营养盐浓度均远高于库区水平,总氮浓度的变化范围为 $2.38 \sim 13.88 \text{ mg/L}$,总磷浓度的变化范围为 $0.023 \sim 4.184 \text{ mg/L}$ 。夏季入库径流氮、磷负荷如图 3 所示。下拾河和西伽河的氮源以硝态氮为主,而徐洼河的氮源以氨氮为主。通过营养盐负荷计算可知,硝态氮是周村水库主要的外源氮源。

2012 年周村水库总氮负荷在 7~9 月份骤然升高,且明显高于 2014 年同期。此外,2012 年入库径流总磷负荷在 7 月、8 月份也高于 2014 年同期。

2.3 库区理化因子

受夏季集中降雨的影响,周村水库水位在 2012 年夏季变化较大,由 123.46 m 升至 127.14 m 。而 2014 年夏季库区水位变化平缓,从 124.43 m 降至 123.95 m ,如图 4(a)所示。2012 年 6~10 月份库区

水温与2014年同期库区水温相近,2012年8月份库区最高水温为31.2℃,略高于2014年同期的29.1℃,如图4(b)所示。采用Schmidt稳定指数表征库区分层情况,2012年和2014年夏季水库Schmidt稳定指数均远高于49 J/m²,表明水库始终处于稳定分层状态,2012年的集中强降雨并未破坏周村水库的水体热分层,如图4(c)所示。

如图4(d)~(f)所示,周村水库库区营养盐水平明显受降雨和外源汇入的影响。2012年库区总氮浓度在7月初强降雨事件发生后显著增长,由1.0 mg/L增至2.6 mg/L,而2014年夏季库区总氮浓度变化不大,变化范围为0.47~0.79 mg/L。硝态氮与总氮的变化趋势相近,在2012年其浓度由0.23 mg/L升高至2.28 mg/L,而2014年硝态氮浓度一直处于较低水平(0.02~0.17 mg/L)。由库区硝态氮和总氮的浓度及变化规律可知,周村水库库区氮源以硝态氮为主,库区总氮浓度的变化受入库径流影响较大。2012年7月、8月份库区总磷浓度为0.060~0.087 mg/L,高于2014年的0.040~0.064 mg/L。

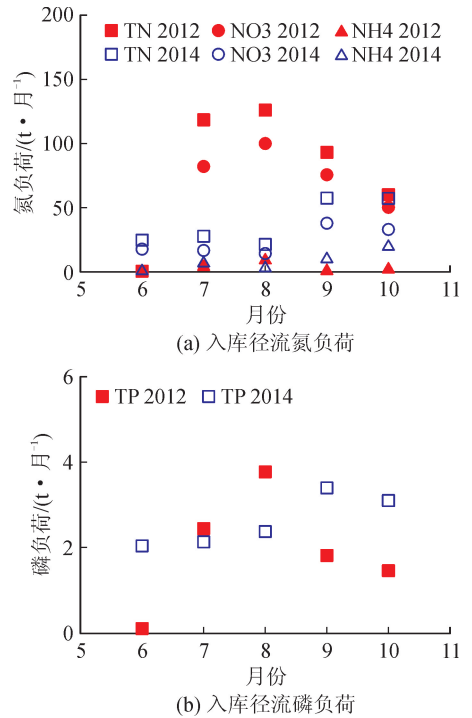


图3 2012年和2014年周村水库入库径流营养盐负荷
Fig. 3 Inflow nutrient load in the reservoir of 2012 and 2014

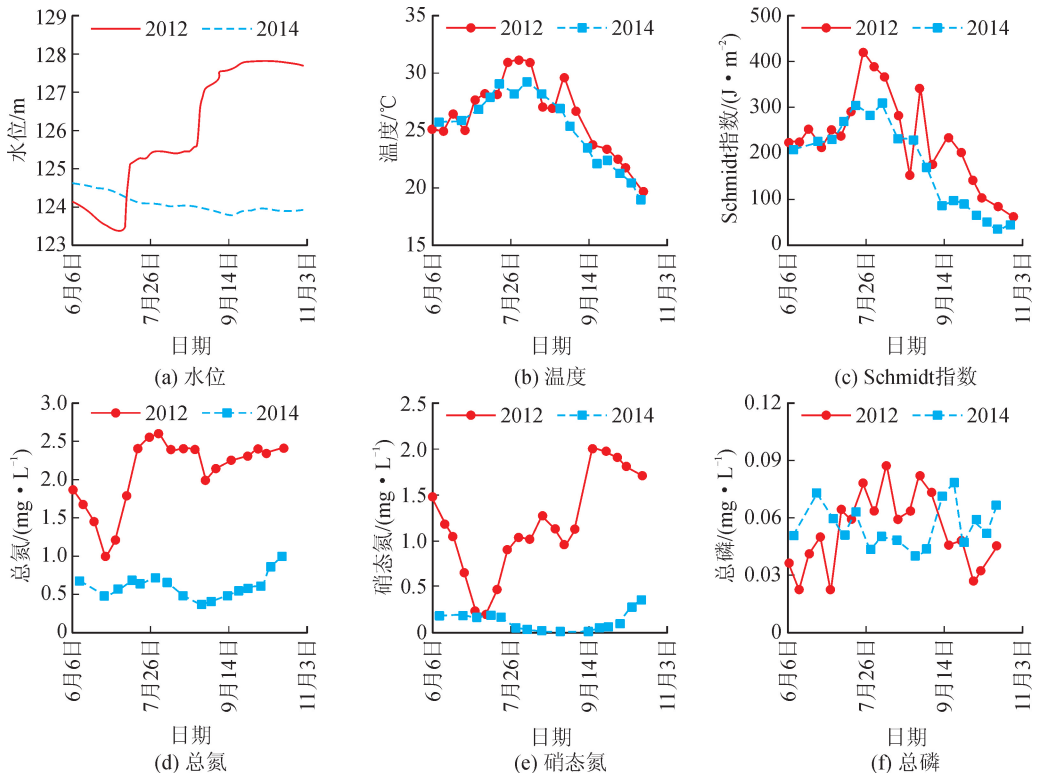


图4 2012年和2014年夏季周村水库物理环境因子变化

Fig. 4 Temporal changes of physiochemical factors in Zhoucun Reservoir in the summer of 2012 and 2014

2.4 浮游植物生物量和群落结构

由图5(a)可知,2012年周村水库夏季爆发浮游植物,其最大生物量发生在8月29日,高达46.76 mm³/L。2014年库区未爆发水华,浮游植物生物量峰值出现

在8月27日(7.57 mm³/L)。2014年库区浮游植物生物量除在6月份与2012年相近,在7~10月份均远低于2012年同期。

2012年夏季与2014年夏季的浮游植物多样性

也有明显区别,如图 5(b)所示。受水华爆发的影响,2012 年 7 月、8 月份库区浮游植物香农指数从 2.92 急剧降低至 0.93,而后随着水华的消退在 9 月、10 月份逐渐回升。而 2014 年库区浮游植物香农指数的变化范围为 2.3~3.2,说明 2014 年库区浮游植物一直保持较高水平的多样性。

2012 年和 2014 年周村水库夏季浮游植物共检出 71 种,按功能群类群可归为 21 类。按照生物量大于总生物量的 5% 划分,得到 14 个优势功能类群,其代表藻种如表 1 所示。

周村水库 13 个优势功能类群的季节演替规律如图 6 所示。

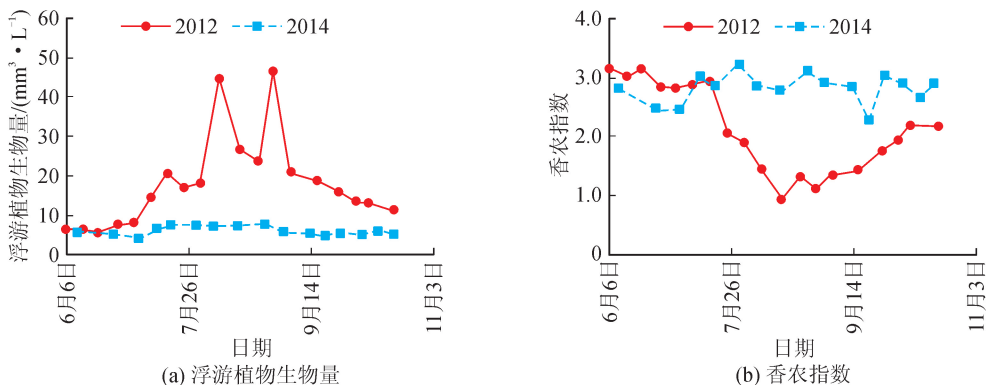


图 5 2012 年和 2014 年夏季周村水库浮游植物生物量和香农指数

Fig. 5 Biovolume and Shannon index for phytoplankton in Zhoucun Reservoir in the summer of 2012 and 2014

表 1 周村水库优势功能类群和代表种属

Tab. 1 Representative species of the dominant functional groups in Zhoucun Reservoir

优势功能类群	代表藻种	优势功能类群	代表藻种
C	梅尼小环藻、星杆藻	X1	椭圆小球藻、普通小球藻
D	肘状针杆藻、尖针杆藻	X2	莱茵衣藻、卵形衣藻
F	新月肾形藻、粗肾形藻湖生卵囊藻、单生卵囊藻、水溪绿球藻	Tc	蜂巢席藻、层理席藻、纸形席藻、大型鞘丝藻、湖泊鞘丝藻、赖氏鞘丝藻
H1	阿氏项圈藻、水华鱼腥藻	S2	钝顶螺旋藻、方胞螺旋藻
J	微小四角藻、弯曲栅藻、二形栅藻、四尾栅藻、被甲栅藻	Y	嗜蚀隐藻、卵形隐藻
L ₀	湖沼色球藻、小形色球藻、银灰平裂藻、中华尖头藻	W1	裸藻属
M	铜绿微囊藻、不定微囊藻		

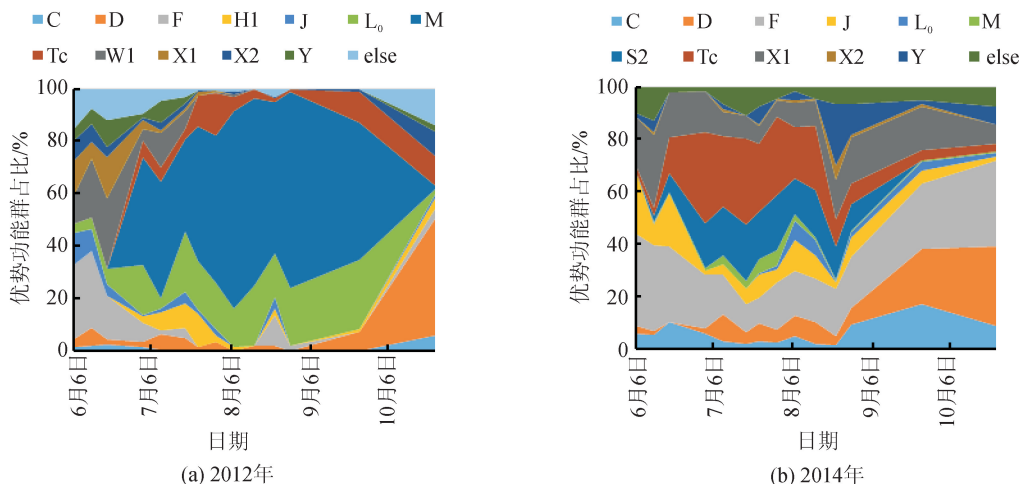


图 6 2012 年 2014 年夏季周村水库浮游植物群落结构的季节演替

Fig. 6 Seasonal succession of phytoplankton community in Zhoucun Reservoir of 2012 and 2014

2012年6月份,周村水库优势功能群为F、W1和X1。在7月上旬,随着强降雨事件的发生,库区优势功能群落迅速转变为M和L₀,二者最高可占总群落的75%和26%。直到10月份,功能群M和L₀所占比例降低,功能群C、D和X2逐渐占优。2014年周村水库优势功能群不同于2012年,7月、8月份优势功能群为Tc和S2,二者最高可占浮游植物群落的35%和21%。6月、9月、10月份优势功能群主要为X1和F。采用RDA分析探讨浮游植物群落结构演替与环境因子的关系。蒙特卡洛检验结果表明,总磷、总氮和温度是影响2012年夏季周村水库浮游植物群落结构的关键环境因子,而硝态氮、温度和Schmidt指数是2014年的重要环境因子。如图7所示,2012年RDA分析的前两个典范轴的累积解释率为94.3%(轴1和轴2分别为90.5%和3.8%)。功能群M与总磷、水温和总氮呈正相关。2014年RDA分析的前两个典范轴的累积解释率为91.8%(轴1和轴2分别为83.2%和8.6%),水温和Schmidt指数对浮游植物群落结构的影响较大而对硝态氮的影响较小。功能群Tc和S2与水温和Schmidt指数呈正相关。

3 讨论

周村水库在2012年7月上旬强降雨事件之后爆发了蓝藻水华,优势功能类群为M和L₀,其中功能群M优势明显。本次蓝藻水华的爆发与库区氮、磷营养盐水平的提高有关。功能类群M的代表种属主要为微囊藻,而功能类群L₀则主要为色球藻,二者均属于蓝藻门。功能类群M更适宜生长在富营养化和静止的水体中,而功能类群L₀则更适应不同的生长环境,从贫营养到富营养、从中型到大型各类深水和浅水湖库^[10-11]。已有大量研究报道了这两种功能群同时在淡水系统中占主导地位^[15-16]。本研究中,2012年夏季水库蓝藻水华爆发,功能群M和L₀生物量的增加与库区总氮和总磷浓度的升高同时发生,这表明氮、磷营养盐水平的提高促进了库区浮游植物的发生。由图7可知,优势功能群M与总磷、总氮呈正相关,而优势功能群L₀与总磷呈正相关,如图7(a)所示。2012年7~10月份水库总氮浓度一直在2.0 mg/L以上,总磷浓度为0.028~0.087 mg/L。已有研究表明,湖库水体中总氮浓度大于0.88 mg/L、总磷浓度大于0.021 mg/L时,就有浮游植物的风险^[17]。这说明2012年夏季周村水库氮、磷元素对浮游植物生长而言一直是充足的。而2014年只有总磷浓度超过阈值而总氮浓度偏低,

因此,氮元素是影响2014年周村水库浮游植物群落演替的重要因素,如图7(b)所示。

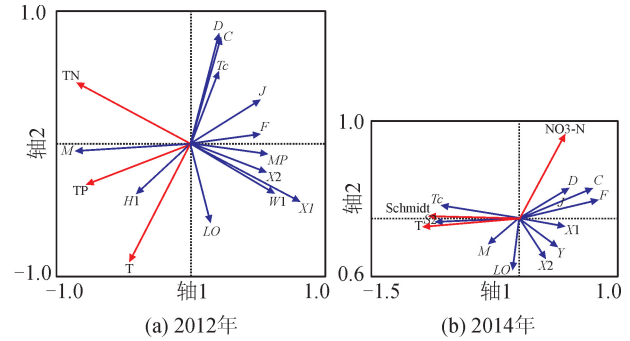


图7 2012年2014年周村水库夏季浮游植物优势功能类群与环境因子的RDA双标图
Fig. 7 RDA biplot of dominant phytoplankton functional groups and environmental factors in summer of 2012 and 2014

2012年和2014年不同的降雨形式造成这两年周村水库夏季入库径流量和营养盐负荷差异显著。Trenberth等^[18]研究表明,强降雨因为减少了渗滤作用,其在流域内形成的径流量更大。如图2所示,2012年频繁的强降雨事件导致周村水库的入库流量明显高于2014年同期。此外,由于防洪需要,2012年周村水库加大了出库流量,从而降低了水力停留时间(HRT)。由径流的水质监测结果可知,2012年和2014年周村水库上游入库径流污染均较严重,其总氮和总磷浓度均远高于库区水平,这表明较短的HRT会增加周村水库库区营养盐浓度。如图4所示,周村水库7月份总氮浓度升高了1.4 mg/L,而总磷浓度升高了0.055 mg/L。2012年较集中的强降雨不仅增加了周村水库的入库径流量,也导致库区HRT降低,二者的综合作用使得水库氮、磷浓度在夏季显著提高。

2012年周村水库的强降雨并未破坏库区水体分层,这为蓝藻水华爆发提供了必要条件。稳定的热分层可以使得库区变温层水体温度升高^[19],促进蓝藻的生长。热分层还可为浮游植物生长提供一个稳定的水力条件,这也更有利于功能类群M的繁殖。已有研究表明,功能类群M的代表种属微囊藻常在分层水体占主导地位,而在水体混合时失去竞争优势^[10-11]。此外,分层还导致水库恒温层形成厌氧条件,加速库底沉积物的营养盐(氨氮、正磷酸盐、铁、锰等)的释放^[20],这也为浮游植物的生长提供了必要的养分。

浮游植物的生物多样性反映了藻类群落结构的稳定性,经常被用来评估水生态系统的健康^[21]。营养盐或其他环境胁迫通常被认为是影响浮游植物多

样性的主要因素^[22]。随着 2012 年夏季蓝藻水华的爆发,周村水库浮游植物多样性迅速下降,这说明 2012 年较集中的强降雨会导致周村水库生态环境的恶化。与之相反,2014 年夏季浮游植物多样性则始终保持较高水平。

综上所述,2012 年的强降雨并未破坏周村水库热分层,引起库区水体混合。较集中的降雨增大了入库径流量,提高了水库氮、磷营养盐水平,导致 2012 年夏季蓝藻水华爆发。2014 年降雨分布更均匀,入库径流对库区营养盐浓度影响较小,库区营养盐水平较低,未发生浮游植物。联合国政府间气候变化专门委员会第 5 次评估报告显示,我国年降雨量和强降雨事件的频率都将增加。若强降雨不能破坏水库热分层,且水库上游营养盐污染严重,在强降雨频发的未来该类水库发生蓝藻水华的几率将会增加。为了控制水源水库的浮游植物,需要加强对水源地上游流域的管理力度,减少入库径流污染,同时需开发可原位降低湖库营养物水平的新技术。

4 结 论

本文对比了两种不同的降雨形式对周村水库夏季物理化学因子和浮游植物的影响,主要结论如下:

1) 周村水库 2012 年较 2014 年降雨更集中。2012 年夏季的强降雨事件使得水库入库氮、磷营养盐负荷明显高于 2014 年同期。

2) 2012 年夏季周村水库库区总氮和总磷浓度分别为 2.01~2.60 mg/L 和 0.06~0.87 mg/L,远高于 2014 年同期;2012 年的强降雨事件并没有破坏水库热分层。

3) 2012 年夏季周村水库爆发蓝藻水华,其优势功能群 M 与总氮、总磷和温度呈正相关;而 2014 年夏季周村水库未爆发浮游植物,其群落结构主要受温度、硝态氮和 Schmidt 指数的影响。

参考文献:

[1] ZAMYADI A, HO L, NEWCOMBE G, et al. Fate of toxic cyanobacterial cells and disinfection by-products formation after chlorination[J]. *Water Research*, 2012, 46(5): 1524-1535.

[2] PHAM T, TRAN T H Y, HOANG N S, et al. Co-occurrence of microcystin- and geosmin-producing cyanobacteria in the Tri An Reservoir, a drinking-water supply in Vietnam[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2020, 193(4): 299-311.

[3] HUISMAN J, CODD G A, PAERL H W, et al. Cyanobacterial blooms[J]. *Nature Reviews Microbiology*,

2018, 16(8): 471-483.

- [4] CHEN Nengwang, MO Qiongli, KUO Yiming, et al. Hydrochemical controls on reservoir nutrient and phytoplankton dynamics under storms[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 301-310.
- [5] SIMIC S B, DORDEVIC N B, MILOSEVIC D. The relationship between the dominance of Cyanobacteria species and environmental variables in different seasons and after extreme precipitation[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2017, 190(1): 1-11.
- [6] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 774-782. LIU Xinyuan, SONG Linxu, JI Daobin, et al. Effect of the rainfall on extinction of cyanobacteria bloom and its mechanism analysis[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 774-782.
- [7] MARIA C P, ELVIRA D E, ELEANOR J, et al. Effects of consecutive extreme weather events on a temperate dystrophic lake: A detailed insight into physical, chemical and biological responses[J]. *Water*, 2020, 12(5): 1411.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] REYNOLDS C S, HUSZAR V, KRUK C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.
- [11] PADISAK J, CROSSETTI L O, NASELLI-FLORES L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 621(1): 1-19.
- [12] WANG Sheng, QIAN Xin, HAN Boping, et al. Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China[J]. *Water Research*, 2012, 46(8): 2591-2604.
- [13] XIAO Lijuan, WANG Tian, HU Ren, et al. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir[J]. *Water Research*, 2011, 45(16): 5099-5109.
- [14] ROTT E. Some results from phytoplankton counting intercalibration[J]. *Aquatic Sciences*, 1981, 43(1): 34-62.
- [15] DAVIS T W, BERRY D L, BOYER G L, et al. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms [J]. *Harmful Algae*,

- 2009, 8(5): 715-725.
- [16] YU Li, KONG Fanxiang, ZHANG Min, et al. The dynamics of microcystis genotypes and microcystin production and associations with environmental factors during blooms in Lake Chaohu, China [J]. *Toxins*, 2014, 6(12): 3238-3257.
- [17] HUO Shouliang, HE Zhuoshi, MA Chunzi, et al. Stricter nutrient criteria are required to mitigate the impact of climate change on harmful cyanobacterial blooms [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 698-704.
- [18] TRENBERTH K E, DAI A, RASMUSSEN R M, et al. The changing character of precipitation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84 (9): 1205-1217.
- [19] BOEHRER B, SCHULTZE M. Stratification of lakes [J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(2): 620-628.
- [20] DENT S R, BEUTEL M W, GANTZER P, et al. Response of methylmercury, total mercury, iron and manganese to oxygenation of an anoxic hypolimnion in North Twin Lake, Washington [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2014, 30(2): 119-130.
- [21] MCCANN K S. The diversity-stability debate [J]. *Nature*, 2000, 405: 228-233.
- [22] GROVER J P, CHRZANOWSKI T H. Limiting resources, disturbance, and diversity in phytoplankton communities [J]. *Ecological Monographs*, 2004, 74 (3): 533-551.

(责任编辑 卢 秀)

(上接第 341 页)

- [27] 冯令艳, 崔崇威, 袁一星. 砂滤/炭滤工艺对原水中腐殖质类有机物的去除效能 [J]. *中国给水排水*, 2013, 29(23): 73-75.
- FENG Lingyan, CUI Chongwei, YUAN Yixing. Removal of humic substances from surface water by sand/carbon filtration process [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(23): 73-75.
- [28] SUDO R, ISLAM M S, SAZAWA K, et al. Removal of dissolved humic acid from water by coagulation method using polyaluminum chloride (PAC) with calcium carbonate as neutralizer and coagulant aid [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, 3(2): 770-774.
- [29] REZAEI R, SAFARI M, GHANBARI R, et al. The simultaneous removal of turbidity and humic substances from water using the enhanced coagulation process [J]. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 2017, 5(2): 85-92.
- [30] 高圣华, 张晓, 张岚. 饮用水中病毒的健康危害与控制 [J]. *净水技术*, 2020, 39 (3): 1-8.
- GAO Shenghua, ZHANG Xiao, ZHANG Lan. Health hazards and control of viruses in drinking water [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(3): 1-8.
- [31] 黄慧婷, 曹新垠, 王敏, 等. 基于流式细胞仪方法评价饮用水紫外/氯消毒效果 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 22-25, 30.
- HUANG Huiting, CAO Xinkai, WANG Min, et al. Evaluation of effect of UV/chlorine disinfection for drinking water treatment by flow cytometry [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(9): 22-25, 30.
- [32] BRAUN K, FABRIS R, MORRAN J, et al. Drought to flood: a comparative assessment of four parallel surface water treatments during the 2010-2012 inflows to the Murray-Darling Basin, South Australia [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 488: 36-45.

(责任编辑 周 蓓)