

台风引发的底泥扰动对水源水质的影响及保护建议

张孝忠^{1,2}, 陈卫^{1,2}, 周正协³, 何建荣³, 刘志刚^{1,2,3}, 陶辉^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 宁波市自来水有限公司, 浙江 宁波 315041)

摘要: 以水库水作为饮用水水源的宁波,在台风影响下水库水质污染类型复杂。通过对水库底泥和溪流底泥的对比研究发现,上游溪流底泥比水库底泥污染严重,溪流底泥中氨氮含量呈“表层低、底层高”分布;台风引发的上游溪流底泥扰动会引起水库水的浊度、氨氮、 COD_{Mn} 含量升高,水源水出现的污染与溪流底泥的扰动密切相关;水库底泥由于受到水源地良好的保护,受到扰动后,对上覆水水质的影响微弱;在台风影响下水源水出现的突发性铁污染与底泥扰动无关;为减弱上游流域底泥受到的潜在污染,可以在上游流域保护区内进行生态移民、退耕还林、建立生态缓冲带、关闭工业源等措施,防止各类污染物进入溪流底泥,从而减弱上游底泥在台风扰动下对水源水质造成的污染。

关键词: 水源水质; 台风; 底泥扰动; 水库; 上游溪流

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0050-06

Influence of Sediment Disturbance Caused by Typhoon on Source Water Quality and Protection Suggestions

ZHANG Xiao-zhong^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}, ZHOU Zheng-xie³, HE Jian-rong³,
LIU Zhi-gang^{1,2,3}, TAO Hui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes <Ministry of Education>, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Ningbo Water Supply Co. Ltd., Ningbo 315041, China)

Abstract: Reservoir water is used as the drinking water source in Ningbo, and the type of reservoir water pollution is complex under the influence of typhoon. It was found that, the upstream sediment contained more pollutants than the reservoir sediment. The ammonia nitrogen content in the upstream sediment was low in surface layer and high in bottom layer. The upstream sediment disturbance caused by typhoon resulted in the increase of turbidity, ammonia nitrogen, and oxygen consumption (COD_{Mn}) in the reservoir; thus, the pollution of source water was closely related to the disturbance of upstream sediment. The disturbed sediment in the reservoir had minimal influence on the water quality of the top layer, due to the comprehensive protection of water source. The abrupt iron pollution in the source water under the influence of typhoon was unrelated to the sediment disturbance. Ecological migration, returning farmland to forest, establishing ecological buffer zone, and shutting down industrial

sources could be implemented to control the pollution of sediment in the upstream of the river basin and to protect water quality in top layer in the reservoir under the disturbance of typhoon.

Key words: source water quality; typhoon; sediment disturbance; reservoir; upstream

我国海岸线绵延万里,是最易受台风侵袭的国家之一,据统计,平均每年会有7个台风登陆或者影响我国^[1-2]。台风具有明显的季节性,台风暴雨除了引发泥石流、山体滑坡等自然灾害外,还会对地表水尤其水库等饮用水水源造成巨大冲击,往往导致水库出现大面积流域型污染^[3-7]。以宁波为例,宁波是全球二十大最易受台风和山洪影响的港口城市之一,且全市以水库作为饮用水水源的覆盖率接近100%^[8-9]。台风来袭,水厂进水水质严重恶化,这给水厂制供水工艺带来巨大挑战^[10-11],最直观的表现就是水厂进水浊度短时间内迅速升高,增大混凝剂的消耗,给水厂的药剂存储带来一定压力^[12]。水质污染具有随机性和污染类型的不确定性,比如浊度单一污染,浊度和氨氮同时污染,浊度、耗氧量(COD_{Mn})及氨氮三者共同污染等。进水有机质增多,水厂常规工艺对有机物的去除效果有限,同时存在出水消毒副产物超标风险^[13-14]。不可否认,台风影响下,水厂进水出现的水质污染类型与水源地的实际状况密切相关,表现出鲜明的地域特征^[15-16]。因此,研究水源地的地域特征就变得十分重要。笔者通过分析近年来水厂在台风期间影响净水工艺的主要突变指标,遴选出浊度、氨氮、COD_{Mn}、铁和锰作为研究对象。

台风对水源地造成的影响可能包括如下方面:①台风引发强降雨冲刷库区周边山体表层土壤引发水土流失,泥水等随雨水进入水库继而污染水质;②水库底泥和上游溪流底泥扰动,促使底泥中污染物释放到上覆水体,进而污染水库水质。本研究主要基于底泥这一因素,探究台风期间底泥扰动对上覆水水质的影响并提出可行性应对方案。

1 材料和方法

1.1 样品采集

采用大口径底泥采样器采集位于取水口处和水库上游溪流底泥样品,整体采集表层10 cm的底泥样品,立即用冰盒(4℃)保存送至实验室,同时分别采集取样点处上覆水400 L。

1.2 试验方法

试验装置选用恒速搅拌器、圆形扰动装置($d =$

20 cm, $h = 40$ cm),将库区所取底泥整体移入圆形扰动装置,该装置最大蓄水量可达20 L,整体移入水库底泥,保持底泥厚度为10 cm,沿器壁用虹吸管缓缓注入采集自底泥采样点的水库水至装置35 cm高度处,注水过程中尽量保持底泥在小范围内微弱的扰动,静沉24 h后,测定底泥和上覆水中污染物含量,启动恒速搅拌器分设不同转速扰动上覆水体。扰动时间和底泥状态的确定基于近年来台风影响下降雨时间和底泥扰动状态,查阅资料得到“海葵”“菲特”“杜鹃”“泰利”影响宁波时间分别为10~12、7~9、8~10、4~6 h,底泥状态分别为泥水混合、泥水混合、泥水混合、泥水稳定。试验定性模拟台风影响下底泥扰动状态,分别以泥水相对稳定、底泥轻微泛起、泥水混合3种扰动方式模拟泥水状态,扰动时间设置为8 h。每组分设2组平行试验,每隔1 h取样1次。

1.3 分析项目及方法

底泥样品的pH值采用电极法测定,有机质采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法测定,氨氮采用氯化钾溶液提取-分光光度法测定,铁和锰含量采用ICP-AES法测定。水样的浊度采用2100N TURBIDIMETER浊度仪测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾法测定,铁采用二氮杂菲分光光度法测定,锰采用高锰酸钾分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 底泥污染物垂直分布和上覆水水质

试验过程中,底泥样品物化性质见表1。可以看出,上游溪流底泥污染物含量高于取水口(水库)底泥。随着深度的增加,溪流底泥样品中氨氮含量呈现出“表层低、底层高”的趋势,表层氨氮含量为23.10 mg/kg,10 cm处氨氮含量增加了6倍多;有机质含量随深度增加没有出现明显的变化,即两处底泥中有机质含量均比较均匀,但溪流底泥中有机质含量约是水库底泥中有机质含量的8倍;溪流底泥中的铁和锰含量随着底泥深度的增加均增加2倍多,而水库底泥中铁、锰含量伴随深度增加出现的增幅较小。

表1 底泥污染物含量的垂直分布特征

Tab.1 Vertical distribution characteristics of sediment pollutant content

| 项 目 | 深度/ cm | pH 值 | 有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 铁/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 锰/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|---------------|-----------|------|---|---|--|--|
| 水库底泥 (底泥1) | 0 | 8.79 | 19.36 | 5.85 | 0.52 | 0.73 |
| | 5 | 9.10 | 17.48 | 12.31 | 0.63 | 0.84 |
| | 10 | 9.05 | 14.56 | 19.44 | 0.66 | 0.89 |
| 溪流底泥 (底泥2) | 0 | 6.34 | 160.37 | 23.10 | 0.53 | 3.24 |
| | 5 | 6.27 | 170.48 | 99.63 | 1.24 | 6.92 |
| | 10 | 6.21 | 176.97 | 147.61 | 1.32 | 7.34 |

正常情况下上覆水的浊度、氨氮、 COD_{Mn} 、铁、锰、亚硝酸盐、pH 值分别为 0.85 ~ 2.01 NTU、 $< 0.05 \text{ mg/L}$ 、1.1 ~ 1.3 mg/L 、 $< 0.02 \text{ mg/L}$ 、 $< 0.02 \text{ mg/L}$ 、0.001 mg/L 、6.5 ~ 6.7。可以看出,台风来袭之前,上覆水水质较好,除了浊度略高于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定的出水限值外,其余指标均低于出水限值。正常情况下,水厂针对性处理的进水指标只有浊度。

2.2 扰动条件下上覆水浊度的变化特征

水库底泥和溪流底泥在受到扰动后上覆水浊度的变化见图1。

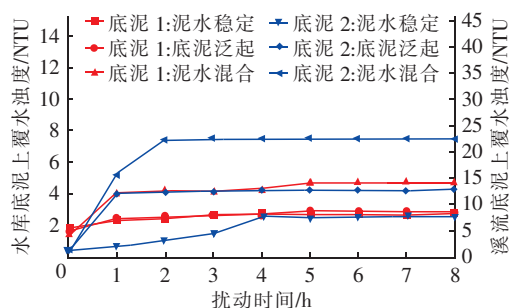


图1 底泥扰动下上覆水浊度的变化趋势

Fig.1 Variation trend of turbidity in overlying water under sediment disturbance

由图1可知,水库底泥和溪流底泥在受到扰动后上覆水浊度随时间的推移逐渐升高,且扰动强度越大,上覆水浊度升高越明显。台风影响下水库底泥受到扰动后对上覆水浊度的贡献率较低,当泥水处于混合状态时,水库底泥浊度最大升高至 4.7 NTU,较正常情况下上覆水浊度略有升高;而溪流底泥受到扰动后,上覆水浊度与正常情况下相比,浊度有较大的升高。当上游溪流底泥受到轻微扰动后,上覆水浊度由 0.97 NTU 最大升高至 8.2 NTU;当上游溪流底泥受到剧烈扰动,扰动装置内底泥处于泥水混合状态时,上覆水浊度最大升高至 22.8 NTU。

可以得知,台风影响下,水库源水浊度的突发性升高和溪流底泥的扰动呈正相关,溪流底泥扰动越剧烈,水源水浊度越高。

2.3 扰动条件下上覆水氨氮的变化特征

水库底泥和溪流底泥在受到扰动后上覆水氨氮的变化见图2。

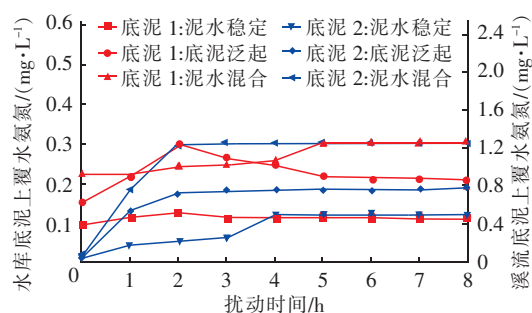


图2 底泥扰动下上覆水氨氮的变化趋势

Fig.2 Variation trend of ammonia nitrogen in overlying water under sediment disturbance

由图2可知,静沉 24 h 后,扰动装置中,水库底泥上覆水的初始氨氮含量较高,最低值接近 0.1 mg/L ,原因可能是水库底泥的泥沙含量较大,静沉 24 h 后装置内上覆水比同等条件下溪流底泥的上覆水浑浊,试验水质对氨氮浓度产生了影响。对比水库底泥和溪流底泥的扰动试验不难发现,水库底泥在 3 种扰动状态下,上覆水的氨氮含量升幅较小,这与水库底泥的氨氮含量较低有关。而台风影响下溪流底泥的扰动与水源水氨氮突发性污染密切相关。上游溪流底泥受到扰动后,上覆水的氨氮浓度先逐渐升高然后趋于平稳,原因是装置内底泥的氨氮含量呈“表层低、底层高”分布,台风影响下,表底层底泥会首先发生扰动而与上覆水进行混合,随着扰动时间的延长,深层底泥才会受到影响,因而上覆水氨氮浓度逐渐升高,当底泥中氨氮释放完毕后,上覆水的氨氮浓度不再升高。

2.4 扰动条件下上覆水 COD_{Mn} 的变化特征

水库底泥和溪流底泥在受到扰动后上覆水 COD_{Mn} 的变化见图3。

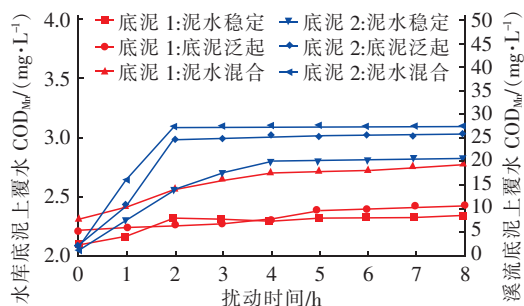


图3 底泥扰动下上覆水 COD_{Mn} 的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of COD_{Mn} in overlying water under sediment disturbance

由图3可知,台风影响下水厂进水 COD_{Mn} 突发性升高与底泥扰动有一定的关联。扰动越剧烈,同一底泥,上覆水中 COD_{Mn} 含量越高。其中,水库底泥扰动对水源水 COD_{Mn} 升高的作用不太明显,泥水混合状态下 COD_{Mn} 最大值低于 3 mg/L ,此时上覆水 COD_{Mn} 满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定的出水限值;而溪流底泥受到轻微扰动后,泥水相对稳定时,上覆水 COD_{Mn} 含量最大达到 21.2 mg/L ;剧烈扰动下,溪流底泥泥水混合时,上覆水 COD_{Mn} 含量最大达到 27.6 mg/L 。溪流底泥扰动后上覆水 COD_{Mn} 含量远高于水库底泥扰动下上覆水 COD_{Mn} 含量,原因是溪流底泥泥质差,有机质含量高。

2.5 扰动条件下上覆水铁、锰的变化特征

检测结果表明,水库底泥和上游溪流底泥受到扰动后,上覆水中铁的含量升高不明显,在 $0.04 \sim 0.08 \text{ mg/L}$ 之间;两处底泥处于泥水混合状态时,上覆水中铁含量最大达到 0.08 mg/L ,比初始状态的铁含量升高了 0.03 mg/L 。上覆水中铁含量与扰动强度也没表现出明显的规律,即台风影响下水源水出现的突发性铁污染与底泥扰动没有直接关系,其原因可能是强降雨冲刷库区周边山体表层土壤引发水土流失,泥土等随雨水汇入水库。

台风引发的溪流底泥扰动会显著增加上覆水的锰含量(见图4),台风影响下水源水出现的锰污染和溪流底泥扰动有直接关系,而水库底泥扰动对水源水锰含量的突发性升高作用微弱。溪流底泥受到轻微扰动时,泥水相对稳定情况下,扰动4 h 锰含量由 0.043 mg/L 上升到 0.38 mg/L ;剧烈扰动时,上

覆水锰含量升幅更大,扰动2 h 锰含量增加了 0.75 mg/L ;溪流底泥的上覆水锰浓度与扰动强度呈正相关,一般来说,扰动越剧烈,上覆水的锰含量越高,也更易达到平衡状态。而水库底泥受扰动后上覆水的锰含量变化不明显,锰浓度仅出现轻微变化。当试验中水库底泥处于底泥轻微泛起状态时,此时锰浓度有最高值;当扰动强度增大,泥水处于混合状态时,上覆水锰含量短时间内迅速升高到最大值 0.07 mg/L ,之后锰含量慢慢降至 0.05 mg/L 。

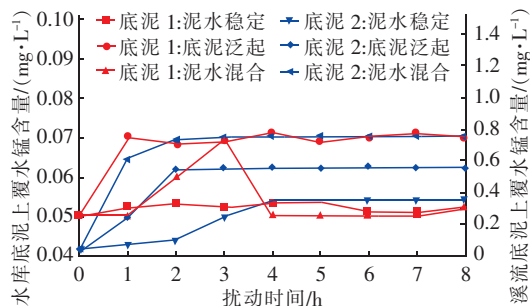


图4 底泥扰动下上覆水的锰含量变化趋势

Fig. 4 Variation trend of manganese content in overlying water under sediment disturbance

3 上游溪流污染源调查及保护对策

3.1 上游流域基本状况

周公宅—皎口水库地处甬江流域,流域地形以山地为主,河流主要从西南向北流,河道落差较大,两座大型水库梯级串联。流域主要有生活源污染、农业面源污染和工业源污染等。水库流域附近存在大量居民聚集区, COD_{Mn} 、氨氮主要源于生活污水的排放和生活垃圾。据统计,流入周公宅—皎口水库的 COD_{Mn} 约有40%来源于生活源污染^[17];氨氮主要来自农业面源污染,两岸流域上主要经济作物为竹笋、茶、贝母、花卉、苗木等,对化肥的需求大,造成氨氮污染;近年来宁波加强了对库区流域工业源的监管,但目前水库流域仍尚存一定数量足以破坏水体水质的工业污染源,主要是竹笋加工业。

3.2 上游流域保护对策

① 实施生态移民政策,加强对上游流域潜在污染物的控制。可以将水库流域附近常住人口且离水源较近的村落实施生态移民,搬迁或者关闭附近的畜禽养殖场,禁止上游流域内分散式畜禽养殖,杜绝污染物侵蚀上游溪流底泥。

② 退耕还林,建设生态缓冲带。在农作物和上游溪流之间建设生态缓冲带,阻拦耕地中的污染

物在台风影响下随降水流入水体。

③ 水源地保护区及其上游流域,关闭和取缔各种食品加工厂以及可能对水库水体造成污染的工程,源头控制各种工业污染源。

4 结论和展望

① 水库上游溪流底泥的污染物含量明显高于水库底泥,溪流底泥中氨氮含量呈现出“表层低、底层高”的趋势,溪流底泥中有机质含量约是水库底泥中有机质含量的8倍。

② 泥水受到扰动后,不同的混合状态对上覆水水质的污染不同。一般情况下,底泥受到的扰动越大,分散到上覆水中的污染物浓度越高。台风影响下,浊度的升高与上游溪流底泥受到扰动有关,水库底泥扰动对浊度贡献很低;上游溪流底泥受到扰动后,上覆水的氨氮、 COD_{Mn} 含量都出现了明显的升高,水库底泥受到剧烈扰动后,泥水处于混合状态时,上覆水中 COD_{Mn} 含量依旧低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定的出水限值。

③ 台风影响下水厂进水出现的铁污染与底泥扰动无关,其原因可能是强降雨冲刷库区周边山体土壤引发水土流失,泥土等随雨水汇入水库;上游溪流底泥受到扰动后,上覆水会出现锰污染。

④ 为减弱上游流域底泥受到的潜在污染,可以在上游流域保护区内进行生态移民、退耕还林、建立生态缓冲带、关闭工业源等措施,从而减弱上游底泥在台风扰动下对水源水质造成的污染。

参考文献:

- [1] Pan G, Chai F, Tang D L, *et al.* Marine phytoplankton biomass responses to typhoon events in the South China Sea based on physical-biogeochemical model[J]. *Ecol Model*, 2017, 356: 38-47.
- [2] Kim K O, Yuk J H, Jung K T, *et al.* Swell propagation caused by typhoon passage to the Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 79: 144-148.
- [3] Fakour H, Lo S L, Lin T F. Impacts of Typhoon Soudelor (2015) on the water quality of Taipei, Taiwan[J]. *Scientific Reports*, 2016. DOI:10.1038/srep25228.
- [4] Iwasaki S, Kato S. Analysis of prolonged water pollution caused by typhoon in Miyagawa River[J]. *Journal of Japan Society on Water Environment*, 2006, 29(11): 749-754.
- [5] Islam M M, Chou F N F, Liaw C H. Evaluation of dual-mode rainwater harvesting system to mitigate typhoon-induced water shortage in Taiwan[J]. *Water Sci Technol*, 2010, 62(1): 140-147.
- [6] Hsu S M, Tseng C M, Lin C C. Antecedent bottom conditions of reservoirs as key factors for high turbidity in muddy water caused by storm rainfall[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016. DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001241.
- [7] Lee C S, Lee Y C, Chiang H M. Abrupt state change of river water quality (turbidity): Effect of extreme rainfalls and typhoons[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 91-101.
- [8] Chen W, Zhou Z X, He J R, *et al.* Effect of typhoon with extreme precipitation on mountain reservoir drinking water treatment: a case study in Ningbo, China[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2017(2): 1-6.
- [9] 蓝雪春,程岚.宁波市水土保持区划研究[J].*中国水土保持科学*, 2017, 15(1): 141-147.
Lan Xuechun, Cheng Lan. Study on the regionalization of soil and water conservation in Ningbo City[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(1): 141-147(in Chinese).
- [10] Wang Q, Yu D, Xiong W, *et al.* Do freshwater plants have adaptive responses to typhoon-impacted regimes?[J]. *Aquatic Botany*, 2010, 92(4): 285-288.
- [11] 杨宗贵.某给水厂应对自然灾害引发异常情况的的生产实践[J].*给水排水*, 2007, 33(3): 56-57.
Yang Zonggui. Practice on deal with natural disaster in waterworks[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(3): 56-57(in Chinese).
- [12] Valipour R, Boegman L, Bouffard D, *et al.* Sediment resuspension mechanisms and their contributions to high-turbidity events in a large lake[J]. *Limnology & Oceanography*, 2017. DOI:10.1002/lno.10485.
- [13] 张婧,翟洪艳,季民.混凝对藻源有机物的去除及其消毒副产物的控制[J].*中国给水排水*, 2016, 32(3): 56-60.
Zhang Jing, Zhai Hongyan, Ji Min. Removal of algal organic matter and control of disinfection by-products by coagulation[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(3): 56-60(in Chinese).
- [14] Zha X S, Ma L M, Wu J, *et al.* The removal of organic

(下转第60页)