

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.016

桉树人工林对林区水库黑水的影响

罗凡^{1,2}, 李一平², 李燕¹, 李荣辉³, 许益新¹, 朱雅², 肖健¹, 吕业佳¹

(1. 广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045; 2. 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; 3. 广西壮族自治区水利科学研究院, 广西 南宁 530023)

摘要:以桉树人工林区水库——南宁市天雷水库周边种植的桉树、马尾松两种主要树种为研究对象,分别对比其凋落叶在蒸馏水、水库表层水样、水库底层水样浸泡下的水质特征,并结合2018年春(3月)、夏(7月)、秋(11月)、冬(12月)4个季节对水库近桉树林与马尾松林径流入库区水质情况,分析桉树凋落叶对林区水库黑水的影响。结果表明:桉树浸泡液呈现黄棕色甚至黑褐色,色度显著大于马尾松浸泡液,其单宁酸与溶解性有机碳(DOC)质量浓度分别达到1.14 mg/L和46.40 mg/L,均较马尾松高,水体色度与DOC、单宁酸均呈显著正相关关系,相关系数分别为0.83和0.94;近桉树林区库区的水体的有机质和Mn质量浓度也高于近马尾松林区库区;桉树凋落叶与缺氧的水库底层水体混合后,Fe、Mn质量浓度升高,分别达到1.21 mg/L和2.09 mg/L。

关键词:桉树人工林;凋落叶;林区水库;黑水;浸泡液;天雷水库

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)03-0098-07

Effects of *Eucalyptus* plantation on black water in forest reservoirs//LUO Fan^{1,2}, LI Yiping², LI Yan¹, LI Ronghui³, XU Yixin¹, ZHU Ya², XIAO Jian¹, LYU Yeji¹ (1. *Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China*; 2. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Guangxi Water Conservancy Science Research Institute, Nanning 530023, China*)

Abstract: Taking two main tree species, *Eucalyptus* and *Pinus*, planted around Tianbao reservoir in *Eucalyptus* plantation area as the study objects, we compared the water quality characteristics of the distilled water, surface water and bottom water of the reservoir in which the litter leaves soaked. Combined with the water quality in runoff area of the reservoir near *Eucalyptus* and *Pinus* forest in spring (March), summer (July), autumn (November) and winter (December) in 2018, this paper analyzed the effects of *Eucalyptus* Plantation on the black water of reservoir in forest area. The results showed that the soaking solution of *Eucalyptus* is yellow-brown or even black-brown in color, and its chroma was significantly higher than that of the soaking solution of *Pinus*. The concentration of tannic acid and dissolved organic carbon (DOC) is 1.14 mg/L and 46.40 mg/L, respectively, which are higher than that of *Pinus*. The chroma of water body was positively correlated with DOC and tannic acid, and the correlation coefficients were 0.83 and 0.94, respectively. The organic matter and Mn content of waters flowing into reservoir near *Eucalyptus* forest area were also higher than that near *Pinus* forest area. The concentration of Fe and Mn increased to 1.21 mg/L and 2.09 mg/L, respectively, when the leaves of *Eucalyptus* litter were mixed with the bottom water of anoxic reservoir.

Key words: *Eucalyptus* plantation; litter leaves; forest reservoir; black water; soaking solution; Tianbao reservoir

桉树(*Eucalyptus*),桃金娘科、桉属植物,一年中有周期性枯叶脱落的现象^[1]。因生长轮伐快、经济效益高等优点,近年来在我国南方省区大面积推广,以广西最为典型。广西地区水库众多,南宁市90%

的饮用水水源地水库周围都种植了桉树,桉树种植砍伐后很多水库都出现了不同程度的黑水现象^[2-3]。已有研究表明藻类等植物残渣的大面积聚集引起的水体富营养化^[4-5]、有机质含量^[6-7]升高,缺氧条件

基金项目:国家自然科学基金(51779072,51579071,51569006);国家重点研发计划(20165044902);宁夏回族自治区重点研发计划(20175046802)

作者简介:罗凡(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为湖库富营养化。E-mail:976749778@hhu.edu.cn.

下形成的黑色金属硫化物,如黑色 FeS、MnS 等^[8-9],单宁酸或其与金属离子形成的络合物^[10-11]等,都可能造成水体颜色变黑。目前学术界已在凋落物分解与养分循环^[12]、凋落物与蒸馏水的浸泡或淋溶^[13-15]对桉树林区洼地或径流黑水的影响方面做了大量研究,Francis 等^[16]研究发现,桉树人工林区黑水富含 DOC,DOC 浸出量与许多因素相关,如树种、河道滩地凋落物的累积量^[17]等。在桉树采伐时期或凋落物密集的季节,桉树等植物残渣经过雨水或林间溪水浸泡,林区水体呈黑色^[13]。杨钙仁等^[13]对桉树林区洼地黑水的研究表明,桉树林区的黑水源于新鲜叶和嫩梢,新鲜叶累积越多,黑色越明显。伍琪等^[18]将桉树、杉、红椎凋落叶与蒸馏水混合浸泡 127 d,发现桉树凋落叶浸泡液较杉、松及红椎凋落叶单宁酸含量高,单宁酸等多酚物质的存在,使桉树凋落物分解的中间产物不容易被矿化,从而导致桉树浸泡液色度高,pH 值低。但水库垂向分层明显,上下水体环境区别较大,目前桉树凋落叶浸泡对林区水库黑水产生的影响机制仍不明确。本文采集林区水库的底层与表层原水水样,以及林区桉树与库区高密度种植的马尾松树的凋落叶,分别将不同树叶与水样两两混合浸泡,并将凋落叶与蒸馏水混合浸泡作为对照,探究凋落叶进入水库后对水库水质的影响,以明确桉树人工林对林区水库黑水产生的影响。

1 研究区概况

南宁市位于广西壮族自治区南部,北回归线的南侧,空气湿润,为亚热带季风气候,阳光充足,雨量丰沛,年平均气温在 21.6℃ 左右,年均降水量超过 1300 mm,夏季比冬季长很多,降雨多集中在 5—9 月。

天雹水库是南宁市可利江的源头,位于市西郊心圩镇,临近高新区(图 1)。水库最大水深 20 m,水库面积约 73.3 万 m²,集雨面积约 50.8 km²,总容量 1360 万 m³,有效库容 880 万 m³,目前供水人口超过 8 万人。水库入库水量主要来源于降雨,水库集雨区内桉树种植面积达 72%,砍伐历史超过 10 年;集雨区内除桉树树种外,马尾松数量最多。2018 年 3—12 月调查期间,水库水体在冬季 12 月初开始出

现泛黑现象。

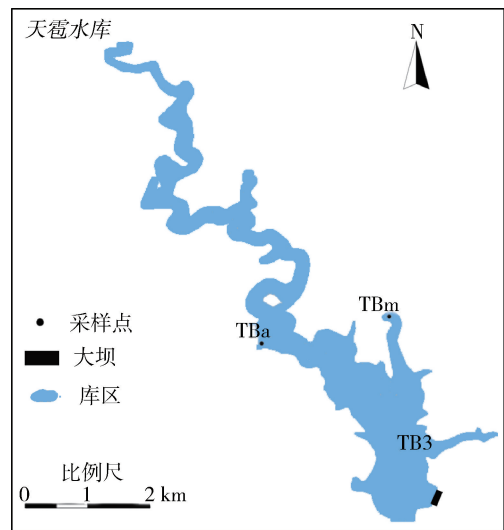


图 1 南宁市天雹水库及水样采集点示意图

Fig.1 Sketch map of Tianbao Reservoir and water sampling point in Nanning City

2 试验设计与分析方法

2.1 试验设计

水库主库区坝前的黑色现象最为明显,TB3 采样点水深约 18 m,采集水体泛黑前 0.5 m 水深的表层水样、17.5 m 水深的底层水样,浸泡试验开始前测定水样中 Fe、Mn、N、P 等营养盐、有机质等特征水质指标的质量浓度,水库原水的监测结果见表 1。

试验采用简单的树叶浸泡方法,将待用的桉树凋落叶与马尾松凋落叶挑除杂质,自然风干,剪碎成 1~2 cm。准备桉树凋落叶及马尾松凋落叶各 6 份,每份 6 g,在有氧条件即敞开口与空气直接接触和缺氧条件对透明罐加膜加盖密封^[15]下将树叶分别在透明塑料罐(容积为 5 L)盛装的蒸馏水、表层水样、底层水样中浸泡。试验在常温下共进行 6 d。将蒸馏水、表层水、底层水与浸泡水样进行对比,观测水体色度、营养盐(TN、TP、NH₃-N)、还原性物质(Fe、Mn、硫化物)和有机质(单宁酸、DOC)的变化规律。试验分组情况为:有氧条件下,蒸馏水+桉树叶(编号 CA),蒸馏水+马尾松叶(编号 CM);表层水+桉树叶(编号 BA)、表层水+马尾松叶(编号 BM);底层水+桉树叶(编号 DA)、底层水+马尾松叶(编号 DM);缺氧条件下,蒸馏水+桉树叶(编号

表 1 天雹水库表层与底层水样特征指标

Table 1 Characteristic indexes of surface and bottom water samples in Tianbao reservoir

水样	色度/度	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Fe})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mn})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{硫化物})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{单宁酸})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{DOC})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
表层水样	5	0.64	0.01	0.07	0.49	1.07	0.006	0.016	15.70
底层水样	10	1.64	0.02	0.78	0.67	1.87	0.014	0.036	15.70

CAQ)、蒸馏水+马尾松叶(编号CMQ)、表层水+桉树叶(编号BAQ)、表层水+马尾松叶(编号BMQ);底层水+桉树叶(编号DAQ)、底层水+马尾松叶(编号DMQ)。

2.2 样品采集与分析方法

为进一步验证桉树对水库黑水的影响,分别于2018年春(3月)、夏(7月)、秋(11月)、冬(12月)4个季节对天雷水库近桉树林与马尾松林径流入库区分别进行监测。如图1所示,靠近桉树林径流入库区的TBa采样点和靠近马尾松林径流入库区的TBm采样点,其水深均约3m。采样点断面均离取水口较远,受入库径流和取水口出流的影响小,理化特征较为稳定。水样中Fe、Mn质量浓度按GB11911—89《火焰原子吸收分光光度法》测定,硫化物质量浓度按GB16489—1996《亚甲基蓝分光光度法》测定,TN质量浓度按GB11894—89《碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》测定,TP质量浓度按GB11893—89《钼酸铵分光光度法》测定,NH₃-N质量浓度按HJ535—2009《纳氏试剂分光光度法》测定,DOC质量浓度按HJ501—2009《燃烧氧化-非分散红外吸收法》测定,单宁酸质量浓度采用紫外分光光度法测定^[19],色度按GB11903—89《铂钴比色法》测定。

3 结果与分析

3.1 凋落叶浸泡对水体色度的影响

水库原水的监测结果见表1,天雷水库TB3采样点底层水样色度高于表层。桉树与马尾松凋落叶浸泡液色度对比如表2所示,桉树叶浸泡对水体的色度影响显著大于马尾松叶;桉树浸泡液的平均色度为112度,而马尾松浸泡液平均色度只有7度。加入桉树凋落叶浸泡6d,底层水样色度较表层水样和蒸馏水显著升高;表层水与蒸馏水的最大色度值

为100度,而底层水的色度均大于140度。加入马尾松凋落叶浸泡6d,底层水色度也增大,但变化不显著。桉树叶在缺氧条件下浸泡的色度大于有氧条件下浸泡的色度;试验组BAQ的色度值较试验组BA升高20度,试验组DAQ的色度值较试验组DA升高10度,缺氧条件下底层浸泡水样呈现黑褐色,而在有氧条件下呈现黄棕色。蒸馏水浸泡凋落叶的水样在缺氧与有氧条件下色度相同,可能是浸泡时间较短的缘故。

3.2 凋落叶浸泡对水体营养盐质量浓度的影响

凋落叶浸泡过程中,由于微生物的分解作用,浸泡液也发生了养分含量变化^[20]。底层水样的TN、TP、NH₃-N质量浓度均高于表层水样,其中NH₃-N质量浓度达到表层的11.1倍(表1)。如表2所示,两种凋落叶在水中浸泡后,水体中TP质量浓度均升高,而TN质量浓度均减少,可能原因是微生物分解作用需要消耗大量氮元素,而在分解过程中会产生大量磷元素。缺氧条件下桉树凋落叶在底层水中浸泡后的TN、TP、NH₃-N质量浓度均比表层水低,可能由于缺氧条件下底层水体的水质条件更有利于营养盐的消耗。有氧条件下桉树叶在表层水样中浸泡后的TN和NH₃-N质量浓度较蒸馏水中浸泡后的质量浓度降低,可能由于表层水体中含有大量好氧、生命过程需要消耗大量氮元素的微生物。桉树叶浸泡的TP平均质量浓度(0.10mg/L)比马尾松叶浸泡的TP质量浓度(0.07mg/L)高,而两种凋落叶浸泡后水中TN、NH₃-N质量浓度对比不明显。综上,两种凋落叶浸泡后均会一定程度上增加水体中营养盐,尤其是TP,桉树凋落叶较马尾松凋落叶对水体营养盐浓度增加贡献更大;与蒸馏水相比,表层水、底层水还存在大量微生物,在浸泡过程中,表层水、底层水水体中的氮元素会被水中微生物消耗。

表2 各试验组不同指标质量浓度

Table 2 Mass concentration of different indexes in each experimental group

试验组	色度/度	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Fe})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{硫化物})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mn})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{DOC})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{单宁酸})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
CA	100	0.67	0.6	0.51	0.73	0.013	0.03	45.0	60.00
BA	80	0.21	0.7	0.17	0.08	0.017	0.87	41.8	45.25
DA	140	0.34	0.8	0.25	0.56	0.017	1.81	42.5	53.30
CAQ	100	0.57	1.1	0.33	0.03	0.016	0.78	43.1	55.50
BAQ	100	0.59	1.5	0.34	0.23	0.014	0.88	52.1	65.50
DAQ	150	0.35	1.1	0.25	1.21	0.005	2.09	53.9	61.50
CM	5	0.45	0.5	0.31	0.01	0.008	0.01	32.0	0.40
BM	5	0.37	0.5	0.24	0.01	0.016	0.02	21.1	0.55
DM	8	0.59	0.6	0.47	0.49	0.013	1.07	24.6	1.80
CMQ	5	0.53	1.0	0.41	0.01	0.009	0.01	32.8	0.35
BMQ	6	0.53	0.9	0.47	0.01	0.001	0.01	33.3	0.50
DMQ	12	0.80	0.8	0.52	0.37	0.009	1.83	34.0	3.05

3.3 凋落叶浸泡对水体 Fe、Mn 质量浓度的影响

表层水样 Fe、Mn 质量浓度分别为 0.49 mg/L、1.07 mg/L, 底层水样的 Fe、Mn 质量浓度分别为 0.67 mg/L 和 1.87 mg/L(表 1)。如表 2 所示, 两种凋落叶在蒸馏水中浸泡后, Fe、Mn 质量浓度均增加, 其中桉树叶有氧条件下浸泡, Fe 质量浓度达到 0.73 mg/L; 缺氧条件下浸泡, Mn 质量浓度达到 0.78 mg/L, 说明两种植物浸泡均能产生少量的 Fe、Mn, 且桉树叶浸泡比马尾松叶浸泡对水中 Fe、Mn 质量浓度升高影响更显著; 凋落叶在蒸馏水中浸泡后, 硫化物质量浓度也均明显增加, 桉树叶凋落叶较马尾松升高明显; 桉树叶在有氧条件下浸泡, 底层水样与表层水样的 Fe、Mn 质量浓度均略微下降; 而桉树叶在缺氧条件下浸泡, 底层水样的 Fe、Mn 质量浓度升高, 分别为 1.21 mg/L 和 2.09 mg/L, 表层水样的 Fe、Mn 质量浓度下降, 分别为 0.23 mg/L 和 0.88 mg/L。

3.4 凋落叶浸泡对水体硫化物质量浓度的影响

如表 2 所示, 用蒸馏水浸泡马尾松和桉树叶时, 不论在有氧还是缺氧条件, 硫化物质量浓度均升高, 且浸泡桉树叶的质量浓度均大于马尾松。用水库原水在有氧条件下浸泡两种凋落叶时, 表层水样浸泡的硫化物质量浓度较底层水样的升高明显, 如浸泡桉树叶的表层水硫化物质量浓度由 0.006 mg/L 升高至 0.017 mg/L。用水库原水在缺氧条件下浸泡两种凋落叶时, 表层水体硫化物质量浓度升高, 但底层水体硫化物质量浓度降低, 桉树叶浸泡时底层硫化物质量浓度降低比马尾松显著, 而桉树叶在其他条件下浸泡的硫化物质量浓度均高于马尾松, 可能是缺氧条件下硫化物转变成 S^{2-} 与浸泡液中 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 结合形成不溶性黑色硫化物, 从而也增大了水体色度。

3.5 凋落叶浸泡对水体有机质质量浓度的影响

水体中有机碳对其生态系统的正常运转有重要作用, 水体对 DOC 有一定的承载能力, 当 DOC 质量浓度达到一定程度时就容易引发黑水产生^[21-22]。表层水样的单宁酸、DOC 质量浓度分别为 0.016 mg/L

和 15.70 mg/L, 底层水样的单宁酸、DOC 质量浓度分别为 0.036 mg/L 和 15.70 mg/L(表 1)。如表 2 所示, 两种凋落叶在浸泡后, 水体中 DOC 的质量浓度均显著上升, 桉树叶浸泡液 DOC 平均质量浓度达到 46.40 mg/L, 马尾松浸泡液 DOC 平均质量浓度达到 29.63 mg/L; 同时桉树叶浸泡液的单宁酸质量浓度也显著升高, 达到 1.14 mg/L, 这与杨钙仁^[13]与伍琪等^[18]研究结果一致。蒸馏水在有氧条件下浸泡桉树叶凋落叶后的单宁酸与 DOC 质量浓度较在缺氧条件下升高, 可能是由于有氧条件有利于凋落叶分解产生有机质, 但可能受浸泡时间短的影响, 差异并不明显。表层水与底层水在有氧条件下浸泡桉树叶凋落叶后的单宁酸与 DOC 质量浓度均较在缺氧条件下浸泡减少, 可能原因是缺氧环境能促进底层水与表层水中的微生物分解产生有机质。

4 讨论

树叶在水体中有两个阶段的分解过程, 第一个阶段属于物理过程, 为易溶的复合物在水中的快速溶解; 第二个阶段属于分解作用, 为树叶自身依靠微生物作用等的缓慢分解^[23-24]。林区桉树秋冬季落叶增多且其砍伐期一般在冬季, 秋冬季桉树大量凋落叶等物质被径流带入水库水体, 因此探究桉树叶凋落叶对水库水质的影响尤为重要。凋落叶在浸泡的前 3 d 干物质被迅速淋洗, 30 d 后分解速率趋于稳定^[25]。伍琪等^[18]研究表明, 在桉树叶和松树叶浸泡的第 12 ~ 127 天, 桉树叶浸泡液色度始终大于松树叶。本研究浸泡时间为 6 d, 包含干物质被迅速淋洗的过程, 在短暂的浸泡过程中也反映了凋落叶对水体水质的影响。对两种凋落叶浸泡液的各项指标进行相关分析, 相关系数见表 3。色度与 TP、DOC、单宁酸均呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.56、0.83 和 0.94。由此可见, 当水体中 TP、DOC 和单宁酸尤其是 DOC 和单宁酸质量浓度越高时, 色度越大, 颜色越明显。这与杨钙仁等^[14]的研究结论

表 3 枯树叶浸泡液各指标相关系数

Table 3 Correlation coefficient of dry leaf soaking solution

指标	色度	TP	TN	NH ₃ -N	Fe	Mn	硫化物	DOC	单宁酸
色度	1								
TP	0.56 *	1							
TN	-0.36	-0.38	1						
NH ₃ -N	-0.31	-0.08	0.79 **	1					
Fe	0.39	-0.05	0.21	0.023	1				
Mn	0.42	0	0.31	0.10	0.86 **	1			
硫化物	0.23	0.10	-0.03	0.05	-0.32	-0.02	1		
DOC	0.83 **	0.82 **	-0.48	-0.20	0.08	0.10	0.05	1	
单宁酸	0.94 **	0.59 *	-0.31	-0.25	0.19	0.24	0.28	0.87 **	1

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

一致:大量单宁酸的存在,会影响凋落叶分解中产物的矿化,从而使得浸泡液色度高。TP 与 DOC、单宁酸也呈显著正相关关系,相关系数分别为 0.82、0.59,可能原因是凋落叶被分解产生有机质的同时也会有 P 元素产出。NH₃-N 与 TN, Fe 与 Mn, DOC 与单宁酸均呈显著正相关关系,相关系数分别为 0.79、0.86 和 0.87,一定程度上说明凋落叶浸泡在水中后对水体中 Fe 与 Mn 的影响以及对 DOC 与单宁酸的影响具有连带性。

天雹水库的水主要来源于降雨及降雨径流汇入,降雨径流将林区地表的凋落物、泥沙等物质冲刷进入水库,从而影响水库水质。4 次监测数据(表 4)表明,春季(3 月)径流入库区水体水质最好,营养盐、Fe、Mn、硫化物质量浓度以及单宁酸与 DOC 等有机质质量浓度均较低,原因可能是由于春季降水量少,林区树木处于生长时期,凋落物少;4 次监测结果显示,TBa 采样点水体中 Mn、单宁酸、DOC 质量浓度基本高于 TBm 采样点,这与室内凋落物浸泡结果一致。夏季(7 月)处于汛期,雨量增多,径流冲刷进入水库的污染物质也增多,除 TP 及单宁酸、DOC 外,其他指标值均为 4 个季节的最高。秋季(11 月),林区凋落物增多,径流入库区水体的单宁酸与 DOC 质量浓度升高,由于 11 月采样前,库区刚经历过降雨,因此表层大部分污染物质的质量浓度高于底层,尤其是单宁酸与 DOC 质量浓度, TBm 采样点表层的单宁酸、DOC 质量浓度分别为 0.41 mg/L 和 15.10 mg/L,底层分别为 0.24 mg/L 和 12.40 mg/L, TBa 采样点表层单宁酸、DOC 质量浓度分别为 0.64 mg/L 和 20.10 mg/L,底层分别为 0.38 mg/L 和 17.70 mg/L。冬季(12 月)径流入库区内水体污染物质除 TP 与硫化物外,其余污染物质质量浓度均较秋季低,可能是由于径流入库区物质向主库区输移。

表 4 径流入库区水体水质指标

Table 4 Water quality index of runoff inflow reservoir area

		mg/L					
采样时间	采样点	TP	Fe	Mn	硫化物	单宁酸	DOC
3 月	TBm	0.03	0.13	0.01	0.016	0.14	2.20
	TBa	0.02	0.08	0.02	0.007	0.15	2.30
7 月	TBm	0.80	0.05	0.06	0.020	0.04	0.35
	TBa	0.85	0.04	0.17	0.017	0.03	0.40
11 月	TBm	0.85	0.04	0.06	0.005	0.08	0.33
	TBa	1.16	0.02	0.10	0.005	0.09	0.51
12 月	TBm	0.42	0.11	0.03	0.008	0.16	0.02
	TBa	0.46	0.07	0.03	0.006	0.06	0.01

两种林区的径流入库区水体夏季的铁锰质量比分别为 4 和 3,均大于 1,而秋季分别为 0.1 和 0.6,均小于 1,可能原因是夏季降雨较多,大量林区土壤中的 Fe 通过入库径流进入水库^[26],而秋季水体铁

锰质量比小于 1,可能原因是 Fe 迁移至主库区,Fe 的迁移能力比 Mn 强。天雹水库水温分布呈稳定分层型^[27],在水温分层条件下,表层水体处于有氧环境,底层水体处于缺氧环境。而凋落叶浸泡结果显示,缺氧条件下,桉树叶浸泡在底层水体中,水体 Fe、Mn 质量浓度均升高,而在有氧条件下,水体 Fe、Mn 质量浓度均降低,而无论缺氧还是有氧条件,桉树叶浸泡在表层水体的 Fe、Mn 质量浓度均减小,因此凋落叶在水中分解时受到水中不同种类的微生物影响,且当桉树叶冲刷进入水库并沉积在水库底层时,会使水库底层的 Fe、Mn 质量浓度升高。而桉树叶浸泡液中含有的大量单宁酸可与金属离子结合,发生络合反应,当其与铁盐溶液相遇时,水体变为蓝黑色。这与太湖藻类高密度聚集,死亡分解产生有机质、硫化物与底泥中的重金属化合而形成致黑物质,最终导致“湖泛”的原因类似^[28]。

由此可见,桉树凋落物被径流携带进入水库后,水库水体及表层沉积物的有机质含量均升高,在水体微生物的分解作用下产生了大量单宁酸和 DOC,直接导致了水体色度升高。同时桉树凋落叶被冲刷进入缺氧的底层水体后,会导致水体中 Fe、Mn 质量浓度增加,一定条件下,会与水体中的 S²⁻ 形成黑色的金属硫化物,或与水中的单宁酸结合形成黑色金属络合物,最终导致水库水体呈现黑色。饮用水源地水质安全与否与人们生活密切相关,为降低林区桉树凋落物等植物残渣给饮用水安全带来的风险,可在径流入库区设置防护网,或在雨季来临前将林区桉树残渣进行清理,并运离库区。

5 结 论

a. 桉树浸泡液的色度显著大于马尾松,单宁酸与 DOC 质量浓度也均比马尾松高。水体色度受凋落叶浸泡时分解的 DOC 与单宁酸影响较大,色度与 DOC、单宁酸均呈显著正相关关系,因此当桉树凋落叶进入水库后会增大水库水体的色度,使得水体颜色呈深色。

b. 当桉树凋落叶冲刷进入水库后,缺氧条件会促使水体黑色变得更加明显,尤其当桉树凋落叶与缺氧的水库底层水体混合后,Fe、Mn 质量浓度升高。桉树叶与底层水体混合对水体色度的影响显著高于表层水体,而 Fe、Mn 是氧化还原的敏感元素,还原状态下易与 S²⁻ 形成黑色金属硫化物,经过桉树林区的入库径流进入缺氧的底层水体时,会增大水库水体泛黑的风险。

参考文献:

[1] YANG X, LI D, MCGROUTHER K, et al. Effect of *Eucalyptus*

- forests on understory vegetation and soil quality [J]. Journal of Soils & Sediments, 2017, 17(9) : 2383-2389.
- [2] 王贺亚. 基于 3S 技术的广西典型水库集水区桉树人工林及其生态系统服务功能的时空动态格局研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [3] 李一平, 罗凡, 李荣辉, 等. 桉树人工林区水体泛黑机理研究进展 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2019, 47(5) : 393-401. (LI Yiping, LUO Fan, LI Ronghui, et al. Review on the mechanism of blackwater in *Eucalyptus* plantation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5) : 393-401. (in Chinese)).
- [4] 徐磊, 逢勇, 黄亚文, 等. 壳聚糖改性黏土作用下湖泛致黑悬浮物的沉降特性研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32(5) : 97-102. (XU Lei, PANG Yong, HUANG Yawen, et al. Study on deposition of algal bloom-induced black suspended matter using chitosan-modified clay [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5) : 97-102. (in Chinese)).
- [5] 陈荷生. 太湖宜兴近岸水域“湖泛”现象初析 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4) : 33-37. (CHEN Hesheng. Black water aggregation in Yixing inshore water area of Taihu Lake [J]. Advances in Science and Techology of Water Resoures, 2011, 31(4) : 33-37. (in Chinese)).
- [6] 李佐琛, 段洪涛, 申秋实, 等. 藻源性湖泛发生过程 CDOM 变化对水色的影响 [J]. 湖泊科学, 2015, 27(4) : 616-622. (LI Zuoshen, DUAN Hongtao, SHEN Qiushi, et al. Major progress in microbial ecology of hypoxia in the shallow eutrophic lakes The changes of water color induced by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) during the formation of black blooms [J]. Journal of Lake Science, 2015, 27(4) : 616-622. (in Chinese)).
- [7] KERRY J, BELLWOOD D. The effect of coral morphology on shelter selection by coral reef fishes [J]. Coral Reefs, 2012, 31(2) : 415-424.
- [8] 申秋实, 范成新, 王兆德, 等. 湖泛水体沉积物-水界面 $Fe^{2+} / \Sigma S^{2-}$ 迁移特征及其意义 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(6) : 1175-1184. (SHEN Qiushi, FAN Chengxin, WANG Zhaode, et al. Effects of Fe^{2+} and ΣS^{2-} transportation at sediment-water interface to the black bloom for mation [J]. Journal of Lake Science, 2016, 28(6) : 1175-1184. (in Chinese)).
- [9] 刘国锋, 范成新, 张雷, 等. 藻源性黑水团环境效应 III : 对水-沉积物界面处 Fe-S-P 循环的影响 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(12) : 3199-3206. (LIU Guofeng, FAN Chengxin, ZHANG Lei, et al. Environment effects of algae-caused black spots III : impacts on Fe- S- P cycle in water-sediment interface [J]. China Environmental Science, 2014, 34(12) : 3199-3206. (in Chinese)).
- [10] 张娟, 逢波, 计融, 等. 什邡地震灾区茶水变黑现象分析及处理方法 [J]. 环境与健康杂志, 2008(6) : 471. (ZHANG Yuan, PANG Bo, JI Rong, et al. Analysis and Treatment of black tea in Shifang earthquake-stricken area [J]. Journal of Environment and Health, 2008, 25(6) : 471. (in Chinese)).
- [11] 连成叶. 蓝黑墨水字迹褪变机理探讨 [J]. 福建师范大学学报 (自然科学版), 2008, 24(2) : 47-49. (LIAN Chengye. Study on color fading mechanism in blue-black ink handwriting [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2008, 24(2) : 47-49. (in Chinese)).
- [12] HERNÁNDEZ J, PINO A D, SALVO L, et al. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay [J]. Forest Ecology & Management, 2009, 258(2) : 99.
- [13] 杨钊仁. 桉树人工林对林区地表水的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [14] 杨钊仁, 于婧睿, 苏晓琳, 等. 桉树人工林黑水发生环境及其对鱼类的影响 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(2) : 445-450. (YANG Gairen, YU Jingrui, SU Xiaolin, et al. Occurrence of black water in cut-over areas of *Eucalyptus* plantation and its effect on fish [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(2) : 445-450. (in Chinese)).
- [15] 杨钊仁, 张秀清, 蔡德所, 等. 广西主要人工林凋落物分解过程及其对淋溶水质的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(1) : 9-16. (YANG Gairen, ZHANG Xiuqing, CAI Desuo, et al. Litter decomposition of dominant plantations in Guangxi and its effects on leachate quality. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1) : 9-16. (in Chinese)).
- [16] FRANCIS C, SHEIDON F. River red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) organic matter as a carbon source in the lower Darling River, Australia [J]. Hydrobiologia, 2002, 481 : 113-124.
- [17] HOWITT J A, BALDWIN D S, REES G N, et al. Modelling blackwater: predicting water quality during flooding of lowland river forests [J]. Ecological Modelling, 2007, 203(3/4) : 229-242.
- [18] 伍琪, 任世奇, 项东云, 等. 四种南方常见速生树种凋落叶浸泡实验研究 [J]. 生态科学, 2018, 37(6) : 60-66. (WU Qi, REN Shiqi, XIANG Dongyun, et al. Comparative study on soak characteristic of litters in four different southern fast-growing tree species [J]. Ecological Science, 2018, 37(6) : 60-66. (in Chinese)).
- [19] 刘小为. 单宁酸与给水处理过程相关的若干化学行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [20] SOARES J V, ALMEIDA A C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil [J]. Journal of Hydrology, 2001, 253(1) : 130-147.
- [21] DUAN H, LOISELLE S A, LI Z, et al. A new insight into black blooms: synergies between optical and chemical factors [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2016, 175 : 118-125.

- [22] VITHANA C L, SULLIVAN L A, SHEPHERD T. Effect of schwertmannite and jarosite on the formation of hypoxic blackwater during inundation of grass material[J]. Water Research, 2017, 124C: 1-10.
- [23] POZO J, BASAGUREN A, ELÓSEGUI A, et al. Afforestation with *Eucalyptus globulus* and leaf litter decomposition in streams of northern Spain [J]. Hydrobiologia, 1998, 373-374: 101-110.
- [24] JANSSEN M A, WALKER K F. Processing of riparian and wetland plant litter in the River Murray, South Australia [J]. Hydrobiologia, 1999, 411: 53-64.
- [25] 陈书秀, 江明喜. 三峡地区香溪河流域不同树种叶片凋落物的分解[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2905-2912. (CHEN Shuxiu, JIANG Mingxi. Leaf litter decomposition dynamics of different tree species in Xiangxi River watershed, the Three Gorges region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2905-2912. (in Chinese))
- [26] 施媛媛, 李一平, 罗凡, 等. 桉树人工林区水库底泥氮、磷和有机质时空分布特征[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 69-75 (SHI Yuanyuan, LI Yiping, LUO Fan, et al. Distribution of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of reservoir in *Eucalyptus* plantation [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 69-75. (in Chinese))
- [27] 李一平, 罗凡, 郭晋川, 等. 我国南方桉树(*Eucalyptus*)人工林区水库突发性泛黑形成机理初探[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 15-24. (LI Yiping, LUO Fan, GUO Jinchuan, et al. Mechanism of "black-water" occurrence in the reservoirs with *Eucalyptus* plantation, southern China [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 15-24. (in Chinese))
- [28] 盛东, 徐兆安, 高怡. 太湖湖区“黑水团”成因及危害分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 41-44. (SHENG Dong, XU Zhaoan, GAO Yi. Case and impact analysis of black water cluster in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 41-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-06-12 编辑: 彭桃英)

(上接第 88 页)

- [10] 吕小央, 张松贺, 刘凯辉, 等. 水生植物-生物膜体系的生态功能与互作机制研究进展[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 20-25. (LYU Xiaoyang, ZHANG Songhe, LIU Kaihui, et al. Advances in ecological function and interaction mechanism of aquatic macrophyte-biofilm system [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 20-25. (in Chinese))
- [11] HE D, REN L, WU Q. Epiphytic bacterial communities on two common submerged macrophytes in Taihu Lake: diversity and host-specificity [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(2): 237-247.
- [12] KLANCNIK K, GRADINJAN D, GABERSCIK A. Epiphyton alters the quantity and quality of radiation captured by leaves in submerged macrophytes [J]. Aquatic Botany, 2015, 120: 229-235.
- [13] CAI X, GAO G, YANG J, et al. An ultrasonic method for separation of epiphytic microbes from freshwater submerged macrophytes [J]. Journal of Basic Microbiology, 2014, 54(7): 758-761.
- [14] PANG S, ZHANG S, LYU X, et al. Characterization of bacterial community in biofilm and sediments of wetlands dominated by aquatic macrophytes [J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 242-250.
- [15] CATTANEO A, GALANTI G, GENTINETTA S, et al. Epiphytic algae and macroinvertebrates on submerged and floating-leaved macrophytes in an Italian lake [J]. Freshwater Biology, 1998, 39(4): 725-740.
- [16] KUCZYNSKA N, MESSYASZ B, NAGENGAST B, et al. A comparative study of periphyton communities on reed complex and *Chara tomentosa* in three shallow lakes of Wielkopolska area, Poland [J]. Biologia (Lahore, Pakistan), 2005, 60(4): 349-355.
- [17] JACOBS J L, SUNDIN G W. Effect of solar UV-B radiation on a phyllosphere bacterial community [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(12): 5488-5496.
- [18] LI A, YANG S, LI X, et al. Microbial population dynamics during aerobic sludge granulation at different organic loading rates [J]. Water Research, 2008, 42(13): 3552-3560.
- [19] YUAN X, QIAN X, ZHANG R, et al. Performance and microbial community analysis of a novel bio-cord carrier during treatment of a polluted river [J]. Bioresource Technology, 2012, 117: 33-39.
- [20] 翟一帆, 袁青彬, 胡南. 养猪废水处理系统微生物群落结构变化及影响因素研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 88-94. (ZHAI Yifan, YUAN Qingbin, HU Nan. Study on structure variation and influencing factors of microbial community in swine wastewater treatment system [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 88-94. (in Chinese))
- [21] UEKI A, AKASAKA H, SUZUKI D, et al. *Paludibacter propionicigenes* gen. nov., sp. nov., a novel strictly anaerobic, gram-negative, propionate-producing bacterium isolated from plant residue in irrigated rice-field soil in Japan [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, 56: 39-44.
- [22] BERGMANN G T, BATES S T, EILERS K G, et al. The under-recognized dominance of verrucomicrobia in soil bacterial communities [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(7): 1450-1455.

(收稿日期: 2020-01-05 编辑: 彭桃英)