

水库内源污染蓄积过程及影响研究综述

许士国,汪天祥

(大连理工大学水利工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:针对我国 20 世纪五六十年代建设的大量水库在运行几十年后不同程度地出现了水质污染,且较点源污染、面源污染,内源污染更加隐蔽且难以控制的问题,总结了近年来国内外内源污染的研究成果,从污染物的入库来源、出库途径和蓄积影响因素 3 个方面探讨了水库内源污染迅速形成的原因,分析了内源污染对水库水质的作用和影响。指出研发适应性的样本采集设备,对内源污染物进出库情况和分布状态进行监测,解析内源污染源汇机制与效应,以及研究与应用内源污染综合治理技术是该领域今后的研究热点方向。

关键词:内源污染;水库;污染蓄积过程;水质;综述

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0162-06

Review of research on accumulation process and effect of internal pollution of reservoir//XU Shiguo, WANG Tianxiang(*School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: Varying degrees of water pollution have been found in lots of reservoirs built between the 1950s and 1960s in China after operation for several decades. Compared with point-source pollution and non-point source pollution, internal pollution is more difficult to find and control. Based on review of worldwide research on internal pollution, the cause of rapid formation of internal pollution of reservoirs is discussed from three aspects: the source, the discharge routes, and the factors of accumulation of pollutants. The impacts of internal pollution on the water quality of reservoirs are analyzed. It is pointed out that adaptive samplers, monitoring of internal pollutant transport in and out of reservoirs, distribution of pollutants, the sink-source mechanism of internal pollution, and internal pollution treatment technology should be further studied.

Key words: internal pollution; reservoir; accumulation process of pollution; water quality; review

水库作为重要的水利工程,在区域社会经济发展中扮演了重要的角色,不仅保障了下游地区的防洪安全,还能够提供饮用水、电力、渔业等资源。随着我国的城市化水平的提高,集中式饮用水源水库的需求进一步增大,同时对水质的要求也进一步提高,因此保障水质安全显得尤为重要。然而,在经济快速发展的过程中产生了大量的污染物,特别是经济发展初期,没有经过处理的废水、废弃物直接排放到水库、河道等天然水体,流域内的污染物及其次生污染物通过直接排放、降雨冲刷等途径越来越多地进入并蓄积在水库内部,成为供水安全的隐患,甚至会在无外源性污染物输入及上层水质较好的情况下爆发水质污染^[1-2]。目前,水源水库已经通过减少排放和污水回用等措施进行水污染治理,基本上控制住了点源污染,面源污染通过设置植物隔滤带、前置库等措施也取得了较好的治污效果^[3],但对于蓄积库内的内源污染,尚没有较好的防治办法。水库内源污染对水质的影响来自于外部的“入-出”蓄积过程和内部的“源-汇”转换过程 2 个层面。目前已有研究主要集中在 pH 值、温度、溶解氧等水体微环境因素与内源污染物吸附或释放的响应机制上,通过现场监测或短期的室内模拟,分析内源污染物的时空分布^[4]、界面运移^[5]、水体扰动^[6]、沉积形态^[7-8]、吸附释放^[9-10]等特性,提出了底泥疏浚^[11,1]、原位覆盖、扬水曝气^[2]等末端局部治理措施,取得了大量的研究成果。但对水库内源污染蓄积过程尚欠缺深入讨论,水库内源污染作为一个复杂的环境系统,实质上是库内的污染物(入库的污染物减去出库的污染物)在受到多因素综合影响下快速蓄积的结果,并在一定的条件下会释放出来,影响水库水质。本文系统地从污染物的入库来源、出库途径、蓄积影响因素,以及内源污染对水库水质的影响等方面进行

论述,探讨水库内源污染蓄积过程和影响,为保障水库水质安全与内源污染源头治理提供新思路。

1 水库内源污染物入库来源

1.1 点源排放

水源水库上游的工业废水、生活污水等直接或间接排放进入水库的点源污染是水库局部内源污染物的主要来源,这些污染物通过上游河道或直接排放进入水库,在排放口附近污染沉积最为严重。以三峡库区为例,每年有 15 万 ~ 32 万 t 化学需氧量、约 2.8 万 t 氨氮随着城镇污水和工业废水注入水库,此外三峡库区船舶全年排放含油污水超过 82 万 t,排放污染物 103.1 t,其中石油类 33.7 t,悬浮物 69.1 t,生活污水总量约为 628 万 t,化学需氧量排放量约为 628 t^[3]。

1.2 降雨驱动

发生洪水时,冲进河道的垃圾、动物尸体、植物等随着水流直接进入水库,一部分被冲走,另一部分则沉积在库底形成内源污染。2010 年 7 月 31 日在距离丰满水库大坝 35 km 处的上游湖面上发现大量漂浮物,以玉米秸秆等为主,平均厚度约为 40 cm,最厚达 1 m,绵延数千米,最后都沉积入库;同时流域内溶解出的化肥、农药等随着洪水进入水库的污染物也增大了内源污染负荷。以尼尔基水库为例^[4],该库总库容 86.11 亿 m³,年均淹没耕地 28 170 hm²,进入水库的氮、磷分别为 16.58 t/a、5.43 t/a。此外,径流冲刷导致流域内的泥沙及其富含的污染物一同进入水库,逐渐积累在水库中,成为内源污染的主要来源之一。大伙房水库 1995 年一次大洪水的淤积量就达 2 229.98 万 m³,占总库容的 1%^[12],同年,在底泥受到扰动释放出的污染物和外源性污染物共同作用下,水库总磷质量浓度达 0.13 mg/L,远高于其他年份。降雨驱动下流域内的废弃物,溶解出的化肥、农药和泥沙等携带的污染物被冲入水库,随着流速的降低逐渐沉积在库底,积累形成内源污染,具有覆盖面广、污染量大的特点。

1.3 库内沉积

水库内的藻类、底栖动物、细菌等排泄物及其死亡后的尸体也增加了内源污染负荷。研究认为蓝藻水华的暴发促进了磷内源负荷的增加^[13]。此外,过度的养殖也会降低水库水质等级,例如,鲢鳙鱼每消化 100 g 饲料就可排放粪 25 ~ 30 g^[14]。网箱养鱼的饲料除去一部分被鱼消耗外,其余都沉入库底与鱼类粪便一起沉积成为内源污染,如黑龙滩水库一年沉积在库底的残饵、粪便就达 1 625 t,且网箱区底泥磷质量分数为 0.016 3,大于网箱周围区域的 0.006 ~

0.008^[15]。网箱养鱼不仅增加沉积物中的有机质、总氮、总磷,造成水体二次污染,而且还会形成一个 300 ~ 500 m 的环状污染区域^[16],导致库内局部区域污染负荷增加显著。

1.4 大气沉降

煤炭、废弃物的燃烧和工业废气的排放使氮、硫、有机物等各种污染物进入空气中,在大气迁移和干/湿沉降的作用下进入水体,并沉积在水体底部^[17-18],是部分内源污染物的主要来源,如贵州红枫湖水沉积物中的多溴联苯醚主要来源于大气沉降^[19]。

水源水库内源污染物来源广泛,其中外源性污染物入库是内源污染形成的根本,入库后大量的污染物逐渐以悬浮态或沉积态蓄积在库底,成为污染物的“汇聚库”,在长期的运行下库内蓄积的污染物越来越多,开始向水体释放成为污染物的“释放源”,这时即使限制外源性污染物的输入,在库内污染物的影响下水库仍维持高污染负荷状态。因此遵循水循环与水生态规律,建设流域生态系统,减少污染排放对降低水库内源污染有着重要作用。

2 水库内源污染物出库途径

水源水库出于防洪兴利的目的,水量交换和湖泊有所不同,水库基于保障供水的目的,很少弃水,污染物主要由汛期溢流、底孔放水和水库取水等表层或者中层水体携带流出水库。

2.1 汛期溢流

防洪是水库最主要的任务之一,水库通过汛期溢流起到“错峰”的作用,保障下游安全。溢流时部分降雨径流输入水库的污染物和洪水扰动底部沉积的污染物通过溢洪道被冲出水库,一定程度上降低了水库负荷,但在“错峰”过程蓄积的污染物仍然大量蓄积在库底。

2.2 水库供水

水库的一项重要功能是保障供水,由于生活、灌溉、工业用水对水质都有要求,因此,通常取水口的位置在死水位之上,这部分取走的水并没有减少内源负荷。由于担心汛期后没有足够的水量,许多水库不开启底孔冲淤,使得库内污染物无法冲出水库,尤其是我国北方由于缺水严重,弃水机会很少,底孔泄流的机会更少,例如碧流河水库近 10 年没有底孔放水,这使得大量的污染物蓄积形成内源污染。

2.3 生态放水

当前生态环境问题受到普遍关注,通过底孔进行生态放水,保障下游河道生态需水,成为水库调度需要考虑的重要因素。随着底孔生态放水,一部分

淤积的污染物也将被带出水库,从而减少水库内源污染负荷。1978—1979 年冯家山水库通过底孔放水排出了洪峰输沙量的 23% ~ 65%^[20]。汛期底孔开启最好与坝前降低水位排水同步,以利于粗沙的排出^[21]。此外,辽宁省部分水库考虑到海水倒灌,在水库调度时通过底孔放水“压盐”,从而冲出部分沉积污染物,这也能减少水库内源污染负荷。

内源污染物出库途径主要受到水库运行管理方式的影响,因此研究内源污染蓄积分布规律及蓄积影响因素,优化水库调度与分质供水方法,对于降低内源污染负荷与保障优质供水有着重大意义。

3 水库内源污染蓄积影响因素

入库的污染物减去出库的污染物即为库内的污染物,其中一部分以生物吸收、水体交换、水库取水等形式消耗,另一部分逐渐沉积在库底形成内源污染,这个蓄积过程主要受到水库蓄污取清运行方式、水库水体交换率、污染物沉积特性、季节等因素影响。

a. 水库蓄污取清运行方式。污染物的入库过程和出库过程都受到水库运行方式的影响,不同的水库运行方式对污染物的积累速度影响显著。通常水库在汛前要排空,以便于在汛期蓄水,汛期洪水携带流域内的枯枝烂叶、河道垃圾及其次生污染物等冲入水库,逐渐沉积到库底,而正常的水库取水都是以小流量均匀地从水库中层或者上层取水,这种蓄污取清的运行方式使污染物大量沉积形成内源污染,并导致水库水质的恶化。目前,汛期水库常采用敞泄排水、蓄清排浑、异重流清淤等运行方式^[22],结合非汛期日常的水库发电、农业灌溉等运行方式可以减少一部分内源污染负荷^[23-27]。已有研究主要集中在坝前淤积的内源污染物的排出上,缺乏从整个库区的角度进行研究,今后应结合内源污染特征与冲淤规律优化水库运行方式,以减少水库内源污染负荷。

b. 水库水体交换率。水库的一个特点是水体交换率低,尤其是水源水库,为了保障供水,汛期以大流量蓄积入库,而日常供水以均匀的小流量出库。以大连市碧流河水库为例,该水库多年各月平均入库水量主要集中在汛期,7、8 月的入库水量占全年的 70% 左右,对应的出库水量则较为均匀,各月间差异相对较小。此外,水库底孔也很少开放,也不利于水体交换。和我国主要湖泊相比,水库的换水周期更长,水体交换率更低(表 1)。

各种入库的污染物沉积在库底,在一定的条件下沉积在库底的污染物会释放出来,促进库内藻类

表 1 水库与湖泊换水周期^[28-29]

水库或湖泊名称	容积/亿 m ³	日均换水量/亿 m ³	换水周期/d
北京密云水库	43.8	0.026	1538
大连碧流河水库	7.1	0.017	420
广州流溪水库	3.8	0.026	148
江西鄱阳湖	25.9	0.438	59
湖南洞庭湖	17.8	0.890	20
江苏洪泽湖	2.4	0.090	27

生长并影响鱼类养殖,同时藻类、底栖动物、细菌等生物的死亡沉积又进一步加重了沉积负荷,漫长的水体换水周期加上这种沉积-释放-沉积的模式使得内源污染迅速形成。

c. 污染物沉积特性。通常入库污染物随着流速的降低,逐渐沉积在库内,沉积速率为每年数厘米,一般建库初期沉积率较大,之后逐渐减小,与水库淤积平衡演化趋势一致^[30],运行 50 年后,蓄积污染物的平均深度可达 0.5 m。依照粒径大小表现出不同的沉积形式:粒径小、质量小的悬浮在库底,形成悬浮层;粒径大、质量大的沉积在库底。粒径小的颗粒在吸附、絮凝的作用下可以变成大的颗粒沉降到库底。而沉积在库底粒径较大的颗粒在生物、水动力等因素的扰动作用下也可以变成粒径较小的悬浮态。研究表明悬浮态的污染物浓度是沉积态的数倍^[31]。受水力条件、库区地形、入库水量、含沙量等因素的影响,容易产生库尾集中淤积、沿程比较均匀的带状淤积、锥状淤积 3 种分布形式^[32]。各水库由于流域背景与库底地形不同导致内源污染分布不一,需要对不同水库的内源污染问题进行针对性的研究。

d. 季节影响。季节转变带来的暴雨扰动、温度变化等对内源污染有着深刻的影响。夏季突降暴雨引发上覆盖水体发生垂直运动,水体剧烈搅动,致使内源污染中的有毒物质扩散到水层中,威胁水体安全,例如红枫湖水库、百花湖水库、武汉龙阳湖渔场都因为突降暴雨发生了严重的“死鱼”事件^[33];此外,季节变迁导致库内水体温度变化,也促进了内源污染物在水库内部的交换。由于水在 4℃ 时密度最大,而冬春交际时温度升高,表层水体温度升高到 4℃,秋冬交际时温度降低,表层水体温度下降到 4℃ 时,表层水体下沉到等密度处,形成“翻库”^[34],并将污染物带至表层,研究表明水源水库春季释放的营养物促进了藻类的繁殖^[35]。对于深水水库,夏季往往会形成“温跃层”,减少了下层水体溶解氧的交换,使得溶解氧降低,如大伙房水库夏季水深 15 m 处溶解氧不足 4.0 mg/L^[34]。此外,我国北方地区漫长的“冰封期”阻止了溶解氧的交换,使

得水库底部长期处于厌氧状态,促进了库底污染物的释放。暴雨扰动和春秋两季的“翻库”将内源污染释放的污染物带至表层,促进了藻类的生长、繁殖和死亡,而藻类的死亡又加速了内源污染的积累。

4 内源污染对水库水质的影响

内源污染物在低溶解氧、pH 值大于 10 或小于 4、水体扰动等条件下,容易将蓄积的污染物重新释放至水体,降低水库水质甚至暴发污染事件。调查表明,20 世纪 80 年代以来河北洋河水库由于内源污染的释放每年夏季都暴发水华^[36-37],2007 年吉林新立城水库由于内源沉积磷释放暴发了蓝藻^[38],2008 年汤河水库由于内源污染释放暴发了硫化氢污染事件^[1,39],2009 年贵州阿哈水库由于内源污染释放导致了鱼类死亡^[33,40],2012 年辽宁碧流河水库由于内源污染释放导致汛期水库底层水体出现白色絮状物质。此外。研究表明汾河水库的沉积物中富含的 PAHs 能够引起中度的负面生物效应,从而引起水库的生态环境改变^[41]。红枫湖水库和百花湖表层沉积物中 Hg、Cd、Pb、Cr、Cu、As 等重金属的调查表明这两个水库蓄积的重金属对库底的生物能够产生中度的生态风险^[42]。内源污染物能够释放营养盐、重金属、难降解持久性有机污染物等多种不同的污染物质,持久地在富营养化、毒理性、富集性多个方面影响水库水质。以上诸水库是兼具防洪、供水等多种功能的大型水源水库,大多于 20 世纪 60 年代建成,仅运行 40~50 a,就迅速地蓄积形成内源污染,导致水库水质安全事件暴发。因此,内源污染问题不容忽视,需要从外部的蓄积过程及内在的释放机制方面进行深入研究。

5 水库内源污染研究发展趋势

水库内源污染是流域及库内污染长期蓄积而形成的,会对水库的生态环境造成不同程度的影响。采集代表性的样本来掌握水库实际的环境状态,并通过研究污染释放机制从而研发针对性的治理技术是今后内源污染研究的热点。

5.1 研发适应性的样本采集设备

水库水体内部呈现水体、悬浮物、沉积物共存的状态,污染物在不同介质中的赋存形态和迁移转化方式都有所差异。采集代表性的样本是研究内源污染问题的基础。水库样本采集通常是水下操作,由于水下流态、地形复杂,难以控制水下采集过程,降低了样本的代表性。对于水体采样而言,充分的水交换以确保采集到指定深度的水样并以原状保存是样本采集的关键,多数采水器都能满足充分水交换

的需求,但均存在样品二次转移或样品预干扰的情况。水中悬浮物的含量可借助于超声波、遥感等技术等进行解析,借助于差量法也可以分析出其吸附的污染物质。但受限于悬浮物含量低且结构形态容易破损,难以在短时间内采集具有时效性的浓缩悬浮物样本,不能满足悬浮物深入分析的需求。而且沉积物表层含水率大,难以支撑过重的采集设备,但当前主流的采集设备多为重力式,不仅耗费人力,采样成功率也较难保证。因此,建议针对水库复杂的采样条件和所采集样本的需求研发适应性的采集设备,为内源污染研究提供技术支持。

5.2 内源污染物进出库情况和分布状态监测

内源污染是污染物入库和出库的差值蓄积而成,需要根据不同水库的特点选择代表性指标进行监测,分析内源污染形成原因和分布状态。考虑到污染物的不同来源(如点源排放、非点源输入、库内沉积、大气沉降等),应加强对入库河道、库区分层水体、雨水的监测。对于出库水体除常规的取水口水质监测外,还应加强汛期溢流及底孔放水的水质监测。同时还应对水库的内源污染分布进行调查,包括监测污染物在水体、悬浮物、沉积物中的含量与分布,及时识别出水质的污染风险,以便于和污染物进出库情况相验证。通过积累长期的监测资料,以便准确掌握内源污染物的蓄积过程和分布状态,为内源污染问题研究提供数据支撑。此外,监测时还需要结合时序变化、空间差异、特殊事件等因素及时优化调整监测方案。

5.3 解析内源污染源汇机制与效应

污染物在水体、悬浮物、沉积物中的分布决定了内源污染的吸附和释放方向,即源汇机制,不同的作用机制会对水库水体产生不同的水环境效应。需要从吸附动力学过程、等温吸附过程、单因素释放模拟、多因素释放通量模拟等方面解析识别内源污染源汇机制。在此基础上结合现场监测和水动力模拟分析内源污染吸附或释放过程对水体污染负荷和生态环境的影响。除此之外,长期的大尺度的环境效应和内源污染输移、转化、蓄积模型也需要进一步研究,为水库水质保障提供理论基础。

5.4 内源污染综合治理技术的研究与应用

水库内源污染是外源污染输入和库内污染蓄积的结果,具有时序变化性和空间差异性。对于不同污染特点、不同污染水平、不同环境条件的水库,应当分别研究适应性的内源污染综合治理技术。可以综合运用清淤、原位覆盖、曝气、换水等工程技术治理内源污染,构建生态流域系统,以便从源头减少污染入库,同时加强库内渔业、旅游等管理,从而形成

一套内源污染综合治理的技术。此外,还应加强生态修复技术在内源污染治理方面的应用研究,综合利用多种污染治理技术来提高水库水质等级。

6 结 语

水库内源污染已经成为供水安全隐患。在人类活动的影响下,污染物通过各种途径进入水库,如点源排放的污染物通过上游河道或直接排放进入水库;网箱养鱼产生的污染物沉积在库底;在降雨的驱动下,河道废弃物、洪水淹没耕地浸出的污染物、流域内的泥沙、土壤携带的污染物随径流进入水库;水库内自身生物新陈代谢沉积和大气中污染物沉降在水库中。入库的污染物减去出库的污染物后在多因素的影响下逐渐积累形成内源污染,并会在一定的条件下释放出来,增大水质安全隐患。由此可知内源污染来源广泛,蓄积影响因素复杂,需要进行深入系统的研究,从而为保障水库生态环境安全提供理论与技术支撑。

参考文献:

[1] 张峰,武迪. 汤河水库局部水体水质异常原因分析对策 [J]. 农业与技术,2010,30(2): 67-69. (ZHANG Feng, WU Di. The local peasants reservoir water abnormal cause analysis and countermeasures [J]. Agriculture & Technology,2010,30(2): 67-69. (in Chinese))

[2] HONG Q, SUN Z, CHEN L. Small-scale watershed extended method for non-point source pollution estimation in part of the Three Gorges Reservoir Region [J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2012,9(4): 595-604.

[3] SEQUEIROS O E, CANTERO M, GARCIA M H. Sediment management by jets and turbidity currents with application to a reservoir for flood and pollution control in Chicago, Illinois [J]. Journal of Hydraulic Research,2009,47(3): 340-348.

[4] GRUCA-ROKOSZ R, TOMASZEK J A. Methane and carbon dioxide in the sediment of a eutrophic reservoir: production pathways and diffusion fluxes at the sediment-water interface [J]. Water Air and Soil Pollution,2015, 226(2): 1-16.

[5] FAIRBAIRN D J, KARPUZCU M E, ARNOLD W A, et al. Sediment-water distribution of contaminants of emerging concern in a mixed use watershed [J]. Science of the Total Environment,2015,505: 896-904.

[6] RUTTENBERG K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. Limnol Oceanogr, 1992, 37(7): 1460-1482.

[7] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in lake erlen sediment [J]. Water Research,2000,34(7):2037-2042.

[8] 易朝路. 长江中下游静态水体污染后底泥吸附方式与内源污染治理 [J]. 水资源保护,2002,18(3): 24-26. (YI Chaolu. Absorption pattern of sediment in polluted still waters and control of authigenic pollution in the middle and lower Yangtze River [J]. Water Resources Protection,2002,18(3): 24-26. (in Chinese))

[9] 丛海兵,黄廷林,李创宇,等. 于桥水库沉积物内源污染特性研究 [J]. 水资源保护,2006,22(4): 20-23. (CONG Haibin, HUANG Tinglin, LI Chuangyu, et al. Study on internal pollution of sediments in Yuqiao Reservoir [J]. Water Resources Protection,2006,22(4): 20-23. (in Chinese))

[10] 高慧琴,刘凌,闫峰,等. 底泥疏浚对湖泊内源磷释放的短期效应研究 [J]. 水资源保护,2011,27(3): 33-37. (GAO Huiqin, LIU Lin, YAN Feng, et al. Short-term effect of sediment dredging on endogenous phosphorus release [J]. Water Resources Protection,2011,27(3): 33-37 (in Chinese))

[11] QIAN B, LIU L, YAN W M, et al. In situ microsensor study of long-term environmental effect of sediment dredging in the shallow lake [J]. Asian Journal of Chemistry,2012,24(10): 4408-4414.

[12] WU J, YANG L H, ZHONG F, et al. A field study on phytoremediation of dredged sediment contaminated by heavy metals and nutrients: the impacts of sediment aeration [J]. Environmental Science and Pollution Research,2014,21(23): 13452-13460.

[13] 钱易. 论三峡水库水污染的防治 [J]. 资源环境,2004,6(3):3-6. (QIAN Yi. The prevention and control of water pollution in the Three Gorges Reservoir [J]. Resource & Environment,2004,6(3):3-6. (in Chinese))

[14] 张静波,谢伟光,马季喆,等. 控制内源污染是保护尼尔基水库的有效途径 [C]//中国水利学会 2005 学术年会论文集: 水环境保护及生态修复的研究与实践. 北京:中国水利学会,2005:167-170.

[15] 王在兴. 大伙房水库志 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[16] 谢平. 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制 [J]. 中国科学:地球科学,2005,35(增刊2) 11-23. (XIE Ping. The shallow lakes phosphorus load seasonal changes biological drive mechanism [J]. Science China: Earth Sciences,2005,35(Sup2):11-23. (in Chinese))

[17] DAVID E, JOSEPH R, TOMASS O. Aquaculture and water quality [M]. Louisiana: World Aquaculture Society,1991.

[18] 林永泰,张庆,杨汉运,等. 黑龙江水库网箱养鱼对水环境的影响 [J]. 水利渔业,1995,10(6): 6-10 (LIN Yongtai, ZHANG Qin, YANG Hanyun, et al. Cage aquaculture on water environment of Heilongtan Reservoir [J]. Water Conservancy Related Fisheries,1995,10(6): 6-10. (in Chinese))

[19] 李万庆,李金中,吴雷,等. 于桥水库网箱养鱼对水质的影响分析 [J]. 城市环境与城市生态,1999,12(4): 33-35 (LI Wanqing, LI Jinzhong, WU Lei, et al. The effect of

- fish-flue on waterquality in Yuqiao Reservoir[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 1999, 12(4): 33-35. (in Chinese))
- [20] ARGIRIADIS E, RADA E C, VECCHIATO M, et al. Assessing the influence of local sources on POPs in atmospheric depositions and sediments near Trento (Italy) [J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 32-40.
- [21] SHOTBOLT L A, THOMAS A D, HUTCHINSON S M. The use of reservoir sediments as environmental archives of catchment inputs and atmospheric pollution[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(3): 337-361.
- [22] 周玮, 朱淮武. 贵州红枫湖表层沉积物中多溴联苯醚的分布研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2010, 27(2): 29-32. (ZHOU Wei, ZHU Huaiwu. A study of the distribution of PBDEs in the surface sediment of the Hongfeng Lake in Guizhou Province [J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2010, 27(2): 29-32. (in Chinese))
- [23] 范家骅, 杜国翰. 水库泥沙问题[J]. 水利学报, 1985, 16(6): 22-29. (FAN Jiaye, DU Guohan. Reservoir sediment problems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16(6): 22-29. (in Chinese))
- [24] 许德凤, 朱启贤. 龚嘴水电站坝前泥沙淤积与底孔排沙[J]. 水力发电, 1998(4): 44-49. (XU Defeng, ZHU Qixian. Sediment deposit before the dam in Gongzui Hydropower Station and sediment flushing of bottom hole [J]. Water Power, 1998(4): 44-49. (in Chinese))
- [25] 李昆鹏, 马怀宝, 王瑞, 等. 三门峡水库降水冲刷机理与规律研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 36-39. (LI Kunpeng, MA Huabao, WANG Rui, et al. Research on water level downfall erosion mechanism and law of Sanmenxia Reservoir [J]. Yellow River, 2012, 34(10): 36-39. (in Chinese))
- [26] 范晓艳, 周孝德, 李林. 水库运行方式改变对水温的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 152-155. (FAN Xiaoyan, ZHOU Xiaode, LI Lin. Influence of water temperature with different operation mode of reservoir[J], Journal of Water Resource & Water Engineering, 2010, 21(3): 152-155. (in Chinese))
- [27] 李志勤. 水库水动力学特性及污染物运动研究与应用[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [28] 聂祥. 广东省典型供水水库沉积物中磷形态与释放特征[D]. 广州: 暨南大学, 2009.
- [29] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [30] ABRIL J M, BRUNSKILL G J. Evidence that excess Pb-210 flux varies with sediment accumulation rate and implications for dating recent sediments [J]. Journal of Paleolimnology, 2014, 52(3): 121-137.
- [31] PETERSSON K. Phosphorus characteristics of settling and suspended particles in Lake Erken[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 266(1): 79-86.
- [32] 周之豪, 沈曾源, 施熙灿, 等. 水利水能规划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [33] 王长娥. 贵州省红枫湖-百花湖和阿哈水库污染源的现状调查、分析与评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2009.
- [34] 徐镜波. 我国北方几个蓄水水体溶解氧的初步调查[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 1986, 5(1): 73-80. (XU Jingbo. First research to the dissolved oxygen in lakes in Northern China [J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 1986, 5(1): 73-80. (in Chinese))
- [35] TROJANOWSKA A A, IZYDORCZYK K. Phosphorus fractions transformation in sediments before and after cyanobacterial bloom: implications for reduction of eutrophication symptoms in dam reservoir [J]. Water Air Soil Pollution, 2010, 211(10): 287-298.
- [36] LI Z L, YU J W, YANG M. et al. Cyanobacterial population and harmful metabolites dynamics during a bloom in Yanghe Reservoir, North China [J]. Harmful Algae, 2010, 9(5): 481-488.
- [37] 蔡金榜, 李文奇, 刘娜, 等. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 886-893. (CAI Jinbang, LI Wenqi, LIU Na, et al. Character istics of contaminated sediments in Yanghe Reservoir [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 886-893. (in Chinese))
- [38] 尹华, 昌镜伟, 章光新, 等. 新立城水库水体富营养化成因及治理对策[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2010, 42(1): 152-156. (YI Hua, CHANG Jingwei, ZHANG Guangxin, et al. The reason and control measures of Xinlicheng Reservoir eutrophication [J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2010, 42(1): 152-156. (in Chinese))
- [39] YIN X N, YANG Z F, YANG W, et al. Optimized reservoir operation to balance human and riverine ecosystem needs: model development, and a case study for the Tanghe Reservoir, Tang River Basin, China [J]. Hydrological Processes, 2010, 24(4): 461-471.
- [40] HE T R, ZHU Y Z, YIN D L, et al. The impact of acid mine drainage on the methylmercury cycling at the sediment-water interface in Aha Reservoir, Guizhou, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(7): 5124-5138.
- [41] TIAN Y Z, LI W H, SHI G L, et al. Relationships between PAHs and PCBs, and quantitative source apportionment of PAHs toxicity in sediments from Fenhe Reservoir and Watershed [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 248(1): 89-96.
- [42] WU B B, WANG G Q, WU J, et al. Sources of heavy metals in surface sediments and an ecological risk assessment from two adjacent plateau Reservoirs [J]. Plos One, 2014, 9(7): 1-14.

(收稿日期: 2014-04-15 编辑: 骆超)