

文章编号:0559-9350(2021)10-1217-12

大流量调度过程对水库缺氧区抑制阈值条件研究

刘 畅, 刘晓波, 周怀东, 李步东, 王世岩, 王 亮

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:大型水库在热分层期间出现的底部缺氧问题将严重影响湖库底层水体水质, 威胁水库供水安全。水库大流量调度引起的强水动力条件可有效削弱甚至完全消除库区缺氧现象。本文以引滦入津源头工程——大黑汀水库为例, 采用三维水动力-水质模型复演了水库缺氧区的演化过程, 发现大黑汀全库在缺氧区稳定发展时段的8月份有2/3区域出现缺氧现象。为应对缺氧引起的供水安全风险, 本文基于多情景分析方法给出了大流量调度过程抑制大黑汀水库缺氧现象的分级调度阈值条件。当大流量调度过程日均流量达到 $96.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 且持续时长 $15 \sim 30 \text{ d}$ 时, 大黑汀水库约70%~90%的缺氧区可得到抑制; 当流量达到 $115.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 且持续时长 $15 \sim 30 \text{ d}$ 时, 90%~100%的缺氧区可得到抑制, 库区缺氧现象将基本消除。

关键词:热分层; 缺氧区; 大流量调度; 阈值条件

中图分类号: X524, TV697

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20210110

1 研究背景

目前在全世界范围内, 水体缺氧现象发展迅速且日趋严重, 已经开始对水体内部水质环境、生物环境等造成明显不利影响。自从20世纪中叶以来, 公海中的缺氧区域已扩大了数百万平方公里。全球海洋大多数区域每10年损失的水体溶解氧总量达到了约 $(550 \pm 130) \times 10^{12} \text{ mol}^{[1]}$ 。全球范围内溶解氧浓度的下降, 将导致水体水生生物生产力、生物多样性和生物地球化学循环发生重大变化^[2]。

在内陆淡水水域, 深水湖库在热分层期间滞温层(Hypolimnion)内也普遍出现了缺氧现象^[3-4], 这一现象已成为湖泊学家研究的重要湖库水环境特征之一^[5]。热分层时期湖库水体滞温层在有机物分解及底质耗氧的影响下, 会消耗大量的氧气, 导致湖库底部缺氧^[6-7]。湖库底层沉积物中的氮、磷、铁和锰等元素在厌氧条件下将加速释放, 严重影响湖库底层水体水质, 破坏底层水体生物栖息环境, 从而改变关键的生物地球化学循环^[8], 最终将造成湖库水体水质恶化和富营养化^[9]。Elçi^[10]认为水库热分层导致了滞温层溶解氧含量大幅度下降, 从而引起库区水质恶化。Kraemer等^[11]认为湖库水体热分层会加剧水体缺氧, 并导致水体内部营养负荷发生显著变化, 从而影响水体生产力。Lee等^[12]研究了影响水库热分层及化学分层的主要环境因子及水库分层水质的季节性变化规律。贺冉冉等^[13]认为夏季底层水体缺氧, 导致了沉积物中氨氮向水体的释放。杨艳等^[14]的研究结果表明水体溶解氧浓度梯度是沉积物释放氨氮与磷酸盐的主要动力之一。胡鹏等^[15]研究了水体中溶解氧含量与其物理影响因素的关系。为研究湖库水体缺氧区的形成演化机理, 国内外学者开展了多方面的研究。Brezonik^[16]考虑了异地有机物输入对水体耗氧过程的贡献; Cornett等^[17]考虑了水体溶解氧耗氧过程与磷含量的关系; Charlton^[18]考虑了滞温层厚度对滞温层溶解氧补充的影响; 赵海超等^[19]分析了洱海水体溶解氧

收稿日期: 2021-01-25; 网络首发时间: 2021-08-24

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210823.1407.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401701); 国家自然科学基金项目(51679256); 重大水利工程生态安全保障及调控技术研究创新团队项目(WE0145B592017); 中国水利水电科学研究院科技项目(WE0163A052018, WE0163A042018, WE0145B422019, HTWE0202A242016)

作者简介: 刘畅(1977-), 高级工程师, 主要从事水利水电工程环境影响研究。E-mail: liuch@iwhr.com

及其与环境因子的关系,刘畅等^[20]研究了热分层状况、藻类生物量、水动力学等多种因素对库区水体缺氧区形成的驱动作用。

当大中型水库库区底部存在污染型沉积物时,即使水库外源污染得到有效控制,在热分层期间滞温层水体也会在沉积物耗氧作用的影响下出现缺氧问题^[21],我国水库多具有供水功能,取水口一般均处在缺氧区极易出现的区域,缺氧问题将对水库供水安全造成严重影响^[22]。为解决上述问题,部分学者探讨了抑制水体热分层和缺氧问题并改善水质的多种方法和手段^[23-26]。水库作为一种受人为调控影响较强的水体类型,其受人为运行调度过程的影响较大,大流量调度过程引起的库区强对流条件可以严重削弱甚至完全消除水体内的缺氧现象^[20]。因此,对缺氧问题严重的水库,采用适当的运行调度手段,可有效抑制其缺氧区的影响范围及程度。

本文以引滦入津工程源头水库——大黑汀水库为例,在库区水温及溶解氧系统监测基础上,构建全库区三维水动力学水质数学模型,模拟分析水库在热分层期间缺氧区的形成、发展、演化、消亡全过程,量化评价了水库调度过程对缺氧区分布范围的影响,着重分析采用高于正常调度水平的“大流量”调度对缺氧区的抑制效果,由此提出了遏制大黑汀水库缺氧现象的分级调度原则及阈值条件。

2 研究区概况及研究方法

2.1 研究区概况 大黑汀水库位于唐山市迁西县滦河干流上,是引滦枢纽工程体系中的骨干水库工程之一。水库总库容 3.37 亿 m^3 ,为大 II 型水利工程。该水库主要为唐山市、天津市及滦河下游工农业及城市用水提供水源。1980 年代至 1990 年代末,大黑汀库区水质良好,总体能够达到 III 类水质标准要求^[27]。2000 年后随着社会经济的发展,水库水质浓度呈现出明显增加趋势,加之库区存在的大规模网箱养殖,导致了库区水体及底质的严重污染^[28]。2016 年大黑汀水库的网箱养殖取缔后,水库水质出现了较明显的好转^[21],但库区水体在污染型沉积物的影响下,依然会在每年热分层期间出现严重的缺氧问题^[20],从而引起水库沉积物中污染物的明显释放,影响工程供水功能的发挥。大黑汀水库上游为引滦枢纽工程体系中的另一个重要水库工程——潘家口水库,该水库总库容 29.3 亿 m^3 ,为大黑汀水库的约 8.7 倍,其泄水水量是大黑汀水库的主要入库流量来源,决定了大黑汀水库的年内调度过程。因此,大黑汀水库具备利用上游大库泄水量改善库区水体溶解氧状况的基本条件,同时大黑汀水库又是引滦枢纽工程供水的总出口,库区水质状况的改善对于引滦入津工程供水水质提升具有十分重要的意义。

大黑汀水库承担着防洪、供水、发电等多重任务,受工程来水条件、调度运行规则、供水功能要求等诸多条件限制,并不能完全以遏制缺氧区为单一目的进行随意调度。因此本文采用数学模型手段,利用设定的多种工况条件,对水库利用汛期大流量泄水过程抑制库区缺氧区的流量阈值进行理论探讨,以期为进一步两库联合调度解决工程供水水质问题提供依据和参考。

2.2 研究方法

2.2.1 数学模型构建 本文应用由丹麦水利研究所(DHI)研发的 MIKE 系列软件开展相关研究工作,由于大黑汀水库缺氧区问题是涉及到水动力学、水温、水质的综合性三维问题,因此本文将使用 MIKE 系列软件中的 MIKE3 模块(三维水动力学、水温模拟)及 ECO Lab 模块(水体复杂溶解氧消耗过程模拟)进行模拟分析。

本文采用结构网格构建水库三维水下地形,模拟的计算区域范围东西向(大坝轴线方向)长度约 5.4 km,南北向(水库回水方向)约 15.0 km。在网格划分方面,网格大小为 108 m(横向)×135 m(纵向)。在垂向方向上,设定垂向网格高度为 2 m。模拟范围内参与计算的网格数量为 5530 个。构建完成的库区模型地形文件见图 1。

为模拟大黑汀水库在水温及水质综合作用下形成的库区溶解氧变化及缺氧区演化特征,本文选取 Eco Lab 模块中的 WQ with nutrients and chlorophyll-a 模板进行水库的缺氧区模拟计算。本模板包含

的主要水质过程包括大气复氧过程、光合作用产氧过程、植物呼吸氧气消耗过程、BOD降解过程、底质耗氧过程、BOD降解过程、硝化反硝化反应过程、磷的迁移转化过程等。

在水动力学边界条件方面，在水库库尾处给定水库日均精度的实测水位过程，在下游坝址处给定日均精度的下泄流量过程；在水温边界条件方面，在水库库尾处给定实测月均入库水温数据；在水质边界条件方面，在水库库尾处给定实测月均入库水质数据，主要指标包括BOD、叶绿素a、溶解氧、氨氮、硝酸盐氮及磷酸盐等；在气象边界条件方面，给定库区周边实测小时精度气象数据，主要指标包括气温、降雨、相对湿度、风速、风向等。

2.2.2 数学模型参数率定 根据大黑汀水库2017、2018年实测库区坝前垂向水温及溶解氧数据，选取2017年8—11月及2018年4—11月作为模型参数率定及库区缺氧区数值模拟时段。率定后的计算结果与实测数据对比作图见图2、图

3，各月水温及溶解氧模拟结果与实测数据间的平均误差率计算见表1。通过对比可知，模型计算结果符合实测数据分布状况，能够准确反应库区热分层、氧分层及缺氧区演化规律特征。

表1 模型水温及溶解氧模拟结果与实测结果误差率统计

日期	水温	溶解氧	时间	水温	溶解氧
2017.8	6.69%	17.15%	2018.6	17.79%	24.00%
2017.9	5.39%	23.06%	2018.7	8.89%	12.42%
2017.10	6.51%	29.54%	2018.8	3.21%	4.95%
2017.11	0.92%	2.91%	2018.9	1.96%	20.32%
2018.4	4.78%	2.20%	2018.10	2.61%	15.07%
2018.5	7.37%	3.18%	2018.11	5.81%	4.91%

3 结果与讨论

3.1 大黑汀水库缺氧区时空演化过程分析 根据对水库2010年至2017年库区水位及下泄流量过程数据分析，在2017年调度过程中，水库汛前调度径流量属于多年平均水平，汛期调度径流量属于相对较低水平(7月下泄总径流量0.35亿m³、8月下泄总径流量1.02亿m³)。在这种调度情形下，能够较清晰的体现水库在相对静水条件下(动力学干扰相对较小)缺氧区(水体溶解氧含量<2.0 mg/L的区域)的发生发展过程，因此利用模拟的2017年溶解氧计算结果对水库缺氧区连续演化过程进行分析。将水库缺氧区自产生至结束时的分布范围按每10 d作图见图4。同时统计各个时间段的缺氧区延伸长度、缺氧区面积等见图5。

通过数据分析可以看出，在热分层、水质状况、气象条件等因素的共同作用下，水库在年内的缺氧现象较为严重。水库的缺氧区持续时间接近半年，基本覆盖了热分层的全部过程时段。同时水库出现缺氧的规模较大，从数据可以看出，不论是缺氧区的延伸长度还是发生缺氧的库区面积在稳定期的8月份均达到了60%左右(延伸长度占全库回水长度的57.87%、缺氧面积占全库水面面积的62.44%)，即在年内的8月份，大黑汀全库约有2/3的区域出现了缺氧现象。作为引滦入津的源头水库，如此大规模的缺氧区分布将会对供水水质造成极大的安全隐患。

3.2 大流量调度条件对大黑汀水库缺氧区的抑制效果分析 根据本文前述内容，若要改善水库滞温层水体的水质状况，提高库区底部水体溶解氧含量、抑制水体缺氧区的范围至关重要。但从水库缺

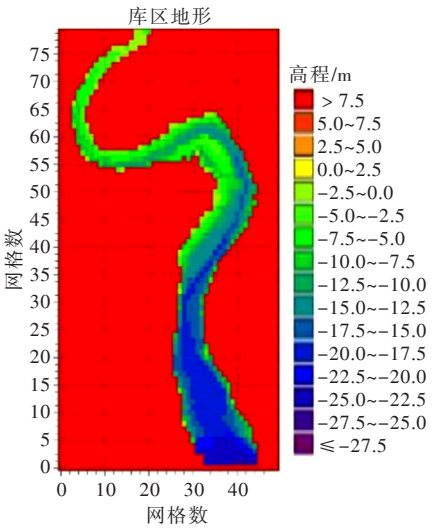


图1 大黑汀水库库区模型地形

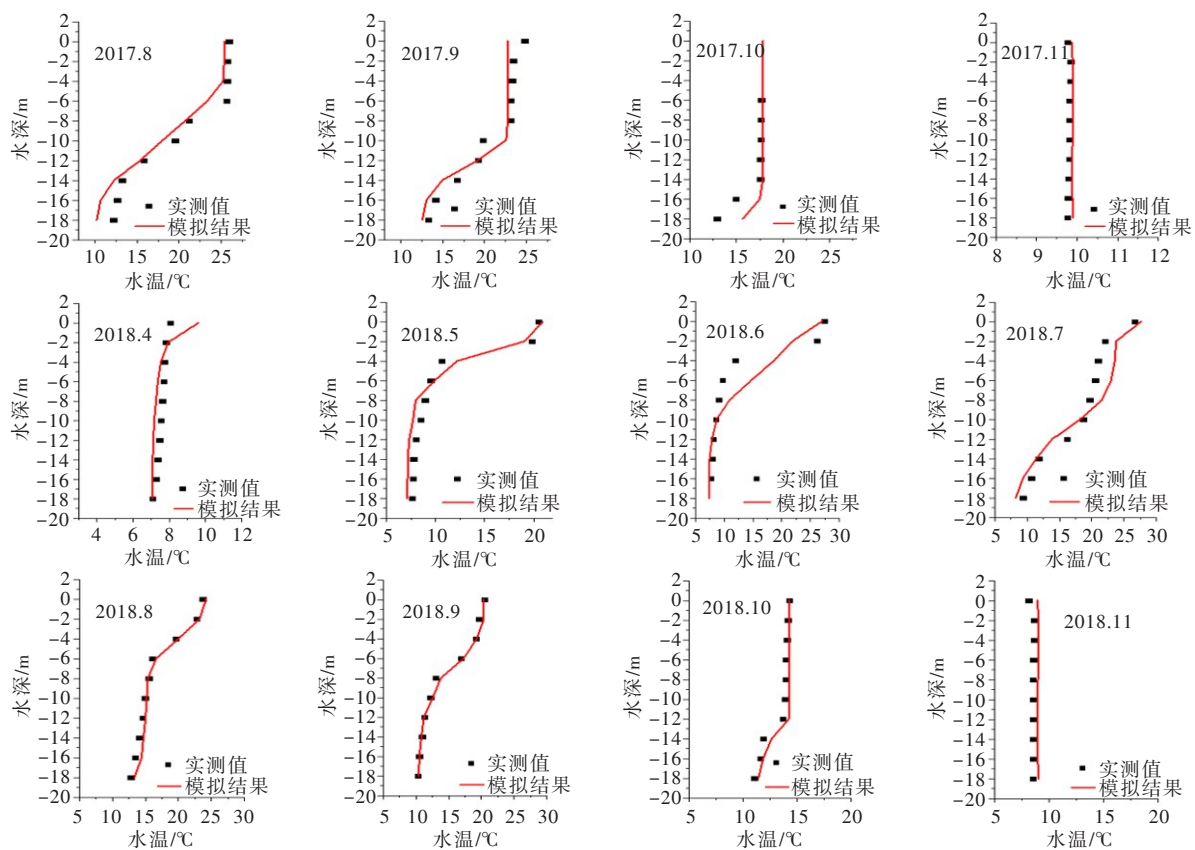


图2 大黑汀水库坝前水温率定结果

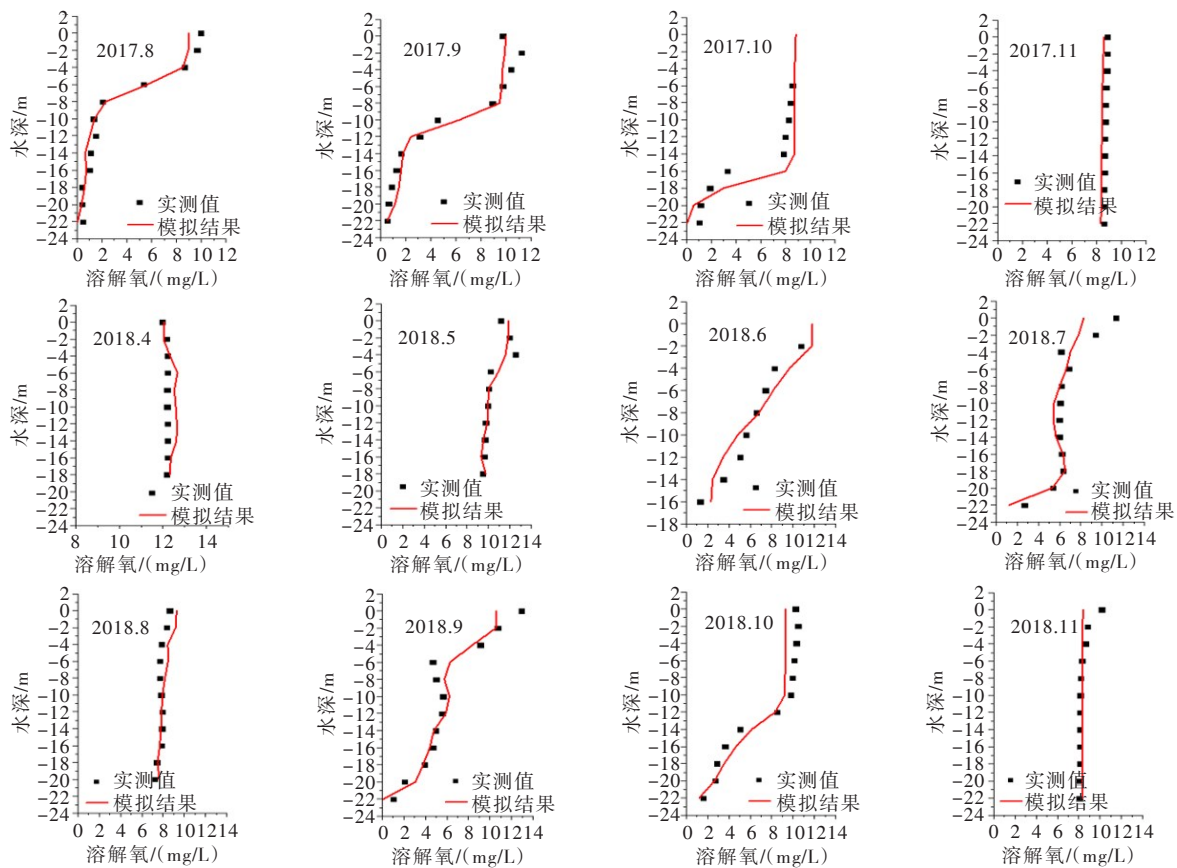


图3 大黑汀水库坝前溶解氧率定结果

氧区的形成与演化机理分析,对气象、地形、水温、底质污染程度等驱动因素进行人工干预的可能性较小(深水水库大规模清淤难度依然较大),一般的深水曝气技术又存在着运行成本高,影响范围有限的局限性。而水库在调度期间的水动力学条件变化对于库区溶解氧分层结构及缺氧区的影响十分显著,大流量调度过程可以严重削弱甚至完全消除水体内的缺氧现象^[20]。因此在汛期配合泄洪等大流量调度手段抑制水库水体缺氧现象存在一定的可操作性。但水库受运行调度规则、来水条件等的因素限制,也不能以抑制缺氧区为单一目的进行随意调度,同时库区水资源条件有限,用于缓解缺氧现象的调度水量也应当控制在一定的合理范围内。因此本文以设定的多种工况情景对大黑汀水

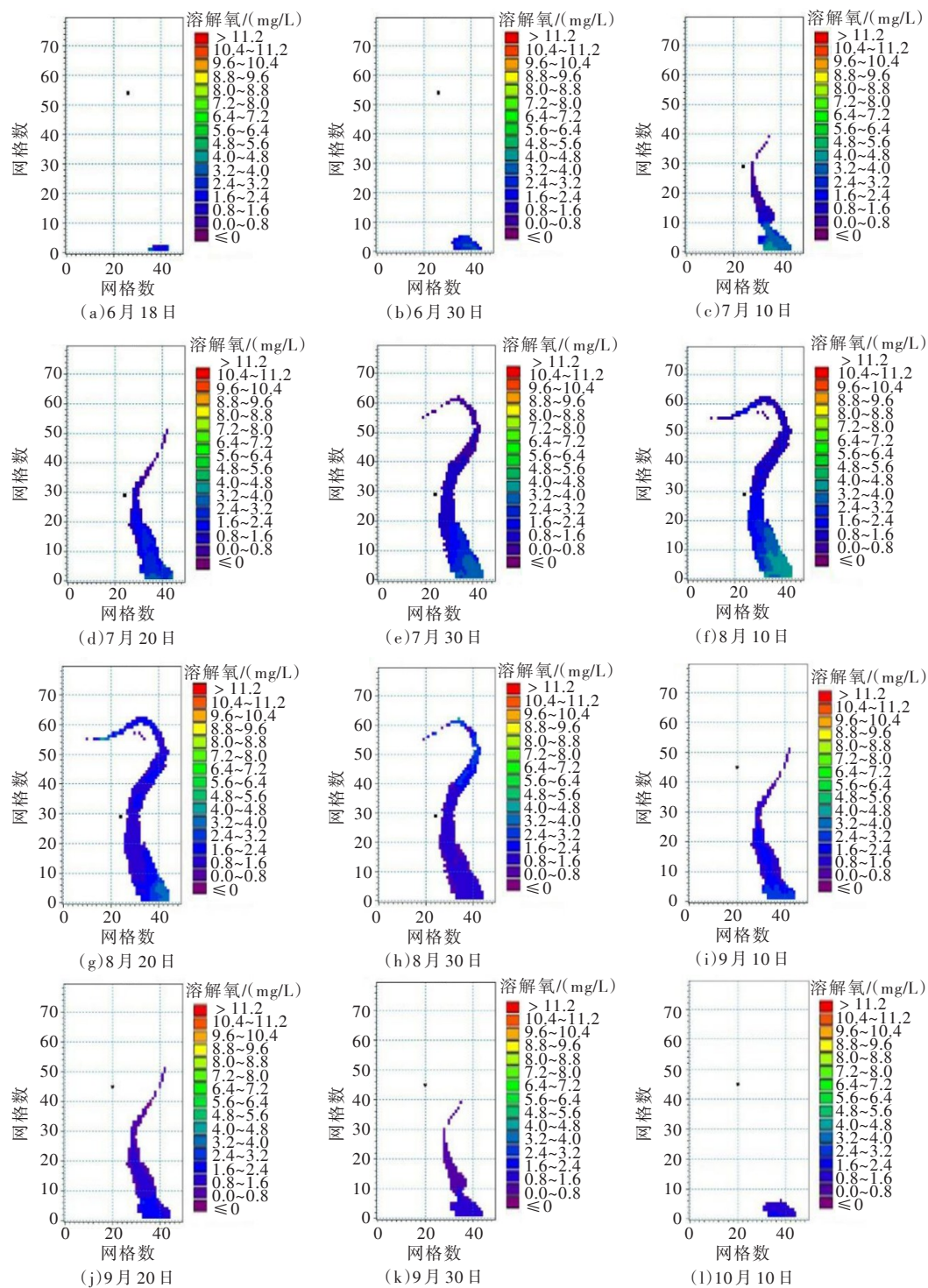


图4 大黑汀水库年内缺氧区时空演化过程

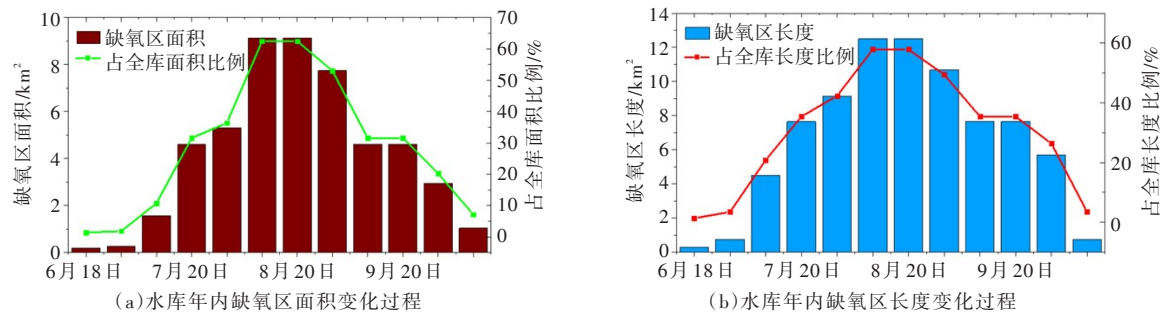


图5 大黑汀水库年内缺氧区面积与延伸长度变化特征

库在大流量调度过程中的缺氧区抑制效果进行研究，对抑制缺氧区的流量条件进行理论探讨，以期获得兼顾库区水量条件及溶解氧改善效果的最佳流量阈值条件。

大黑汀水库缺氧区一般形成于年内6月中下旬，7月份进入发展期，8月份处于稳定期且缺氧问题最为严重。而根据水库历年调度(2010—2018)，在每年7月中旬至8月下旬均会出现较明显的大流量泄水过程。本文则利用水库每年在7—8月间的泄水过程，针对库区缺氧最严重时段，对调度抑制缺氧区的流量阈值进行研究。本研究结合水库调度特征，设定了3种泄水过程情景分析缺氧区抑制效果(见表2)。其中情景1设定为水库大流量泄水过程发生在8月1日至30日。在此基础上，考虑到大黑汀水库来水时机及来水量变化，提出情景2和情景3，情景2设定为水库泄水量充足，但泄水出现的时间提前，大流量过程发生在7月15日至8月15日；情景3设定为水库上游来水不足，调度过程无

表2 抑制大黑汀水库缺氧区模拟情景及工况设定

情景	情景指标	工况				
		1	2	3	4	5
情景 1	下泄时段	8月1日—8月30日				
	日均流量/(m³/s)	57.9	77.2	96.5	115.7	154.3
	总径流量/亿 m³	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
情景 2	下泄时段	7月15日—8月15日				
	日均流量/(m³/s)	57.9	77.2	96.5	115.7	154.3
	总径流量/亿 m³	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
情景 3	下泄时段	8月1日—8月15日				
	日均流量/(m³/s)	57.9	77.2	96.5	115.7	154.3
	总径流量/亿 m³	0.74	1.0	1.3	1.5	2.0

表3 各情景条件下大黑汀水库8月缺氧区分布面积及延伸长度对比

工况	缺氧区分布	情景1	情景2	情景3
常规调度	分布面积/km²	7.74	7.74	7.74
	延伸距离/km	10.68	10.68	10.68
工况1 57.9m³/s	分布面积/km²	4.61	5.78	6.05
	延伸距离/km	7.05	8.10	9.8
工况2 77.2m³/s	分布面积/km²	2.60	4.30	4.61
	延伸距离/km	3.51	5.35	7.05
工况3 96.5m³/s	分布面积/km²	0.85	2.21	2.21
	延伸距离/km	0.75	2.55	2.55
工况4 115.7m³/s	分布面积/km²	0	0.85	0.85
	延伸距离/km	0	0.75	0.75
工况5 154.3m³/s	分布面积/km²	0	0	0
	延伸距离/km	0	0	0

法维持较长时间,大流量过程发生在8月1日至8月15日。针对每种情景均设定5种工况,分别模拟在5种泄水量情景下的库区缺氧区变化情况。本次模拟以水库2017年实际调度过程为基础,在设定情景外的年内其余时段,保持真实水库调度过程。水库缺氧区在各情景及工况下的缺氧区空间分布范围、分布面积及沿库区方向的延伸距离见图6、表3,各情景及工况条件下,库区坝前垂向溶解氧结构见图7。图表中数据均为缺氧区稳定期末期(8月30日)的库区溶解氧状况。以下将根据模型模拟结果对大流量调度过程对缺氧区的抑制效果进行分析和讨论。

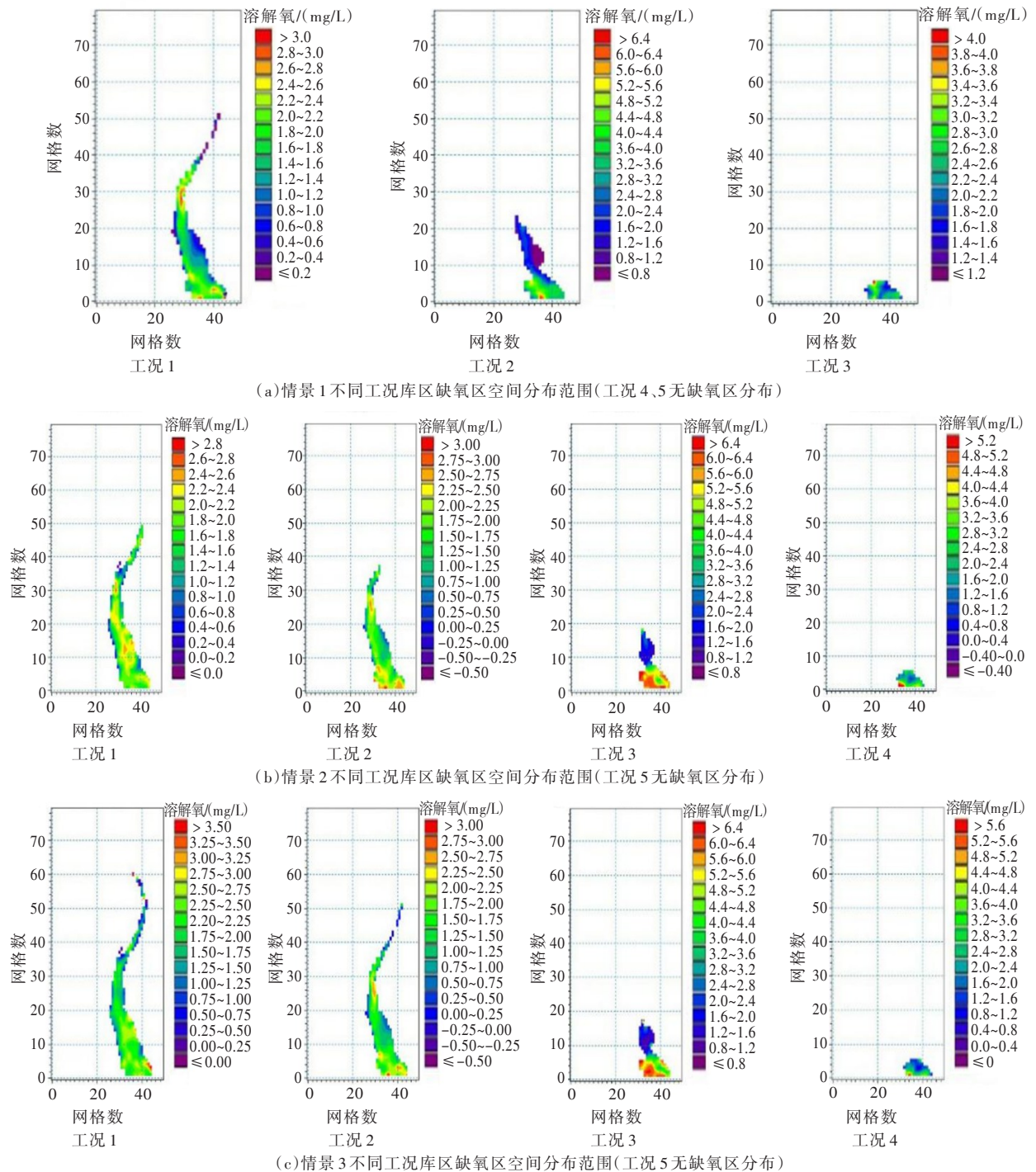


图6 大黑汀水库在不同调度情景下库区缺氧区空间分布情况

(1)在各情景泄水条件下,调度过程均会对水库坝前溶解氧结构产生较为明显的影响,坝前缺氧区的厚度、各层水体溶解氧含量及溶解氧垂向结构特征等方面均出现了明显的变化(图7)。不同下泄

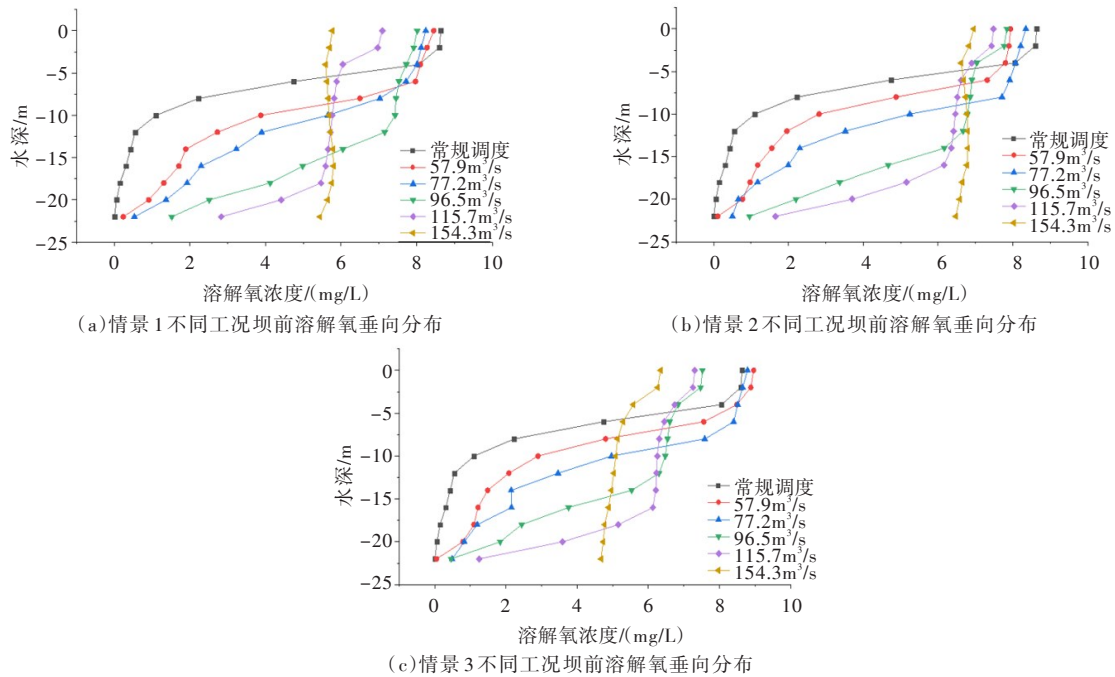


图7 不同调度情景及工况条件下库区坝前垂向溶解氧分布

流量级别条件下的水库坝前溶解氧结构变化明显。随着下泄流量的不断增加，水体溶解氧含量在垂向的掺混显著加强，中层及底层水体的溶解氧浓度逐渐增加。水体缺氧区厚度逐步降低。以情景1为例，坝前缺氧区厚度由常规调度情景下的约12 m下降至工况4、5的完全消失。

(2)情景1条件下不同的调度规模均可以对坝前缺氧区产生抑制效果，在日均调度规模由 $57.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $96.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，水库表层及中层水体的溶解氧逐渐掺混，但底层水体一直存在着一定的缺氧区域。当日均下泄流量达到 $115.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，水库坝前水体溶解氧掺混充分，缺氧状态被完全抑制。与情景1相比，情景2和情景3由于调度结束时间的提前或调度总径流量的减小，缺氧区的抑制效果相较情景1有一定程度的下降。当泄洪流量达到 $115.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，库区坝前底部还存在着一定的缺氧现象。仅当泄洪流量达到日均 $154.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时才可完全消除库区内的缺氧区。

(3)对比相同调度日均流量条件下情景1、情景2及情景3在8月的坝前溶解氧结构特征可以看

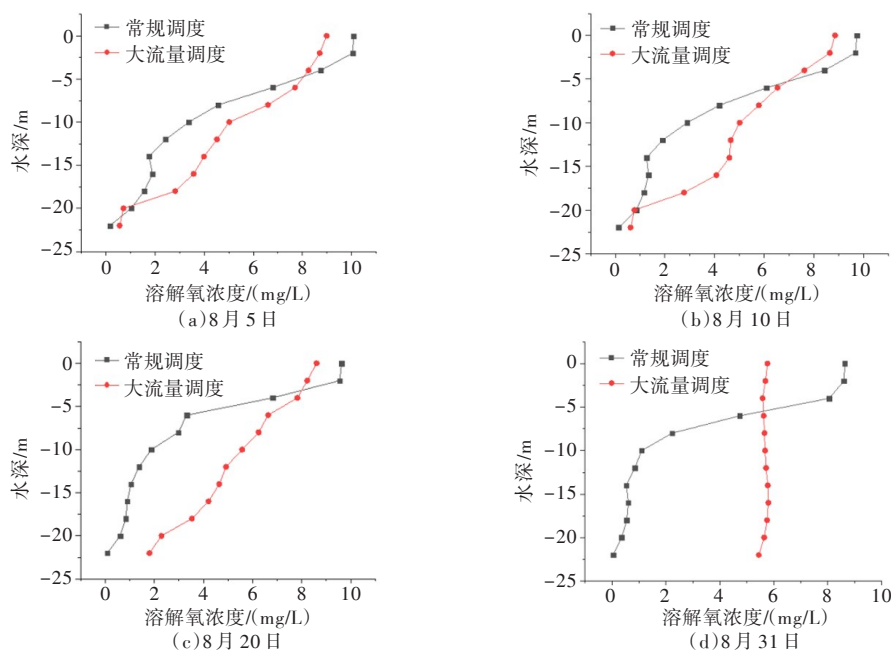


图8 大流量调度对水库缺氧区的抑制过程(情景1工况5)

出，情景1对坝前溶解氧状况的改善作用最为明显。情景2的改善作用有所下降。情景3改善作用相对最弱。但总体而言，3种情景下的结果差别不大，均能够达到较好的缺氧区抑制效果。

(4)根据常规调度条件下水库缺氧区时间连续演化分析结果，年内8月中旬至下旬是水库缺氧区发展的顶峰阶段。为分析大流量调度过程对水库缺氧区发展的抑制过程，选取情景1调度过程中前期、中期及末期的溶解氧结构与常规调度过程情景对比作图，见图8(选取工况5，即154.3 m³/s过程进行对比)。从图8可以看出，如果不进行大流量调度，水库缺氧区在8月份是处在不断发展并逐渐稳定加强的过程中，至月底时会发展为年内的缺氧程度最高值。而实施大规模调度后，会明显的抑制不断发展的缺氧区，将年内缺氧区发展最迅速的时段转变为缺氧区的衰减时段，将对抑制水库缺氧问题起到至关重要的作用。

(5)大流量调度过程对大黑汀水库在缺氧区平面上的分布也产生了较明显的抑制作用。与常规调度过程相比，缺氧区的分布面积及延伸长度均有了明显的降低(表3)。在情景1条件下，水库缺氧区的分布面积由常规调度的7.74 km²下降至工况3的0.85 km²直至最后下降至工况4的无缺氧区；延伸距离由常规调度的10.68 km下降至工况3的0.75 km直至最后下降至工况4的无缺氧区。情景2条件下，8月份大黑汀水库缺氧区的分布面积及延伸距离分别由7.74 km²及10.68 km下降至工况4的0.85 km²及0.75 km直至最后下降至工况5的无缺氧区。在情景3条件下，8月份大黑汀水库缺氧区的分布面积及延伸距离也分别由7.74 km²及10.68 km同样下降至工况4的0.85 km²及0.75 km直至最后下降至工况5的无缺氧区。从以上数据可以看出，当水库结合泄洪开展大规模调度时，可对全库的缺氧区分布产生明显影响。当径流量规模过程达到一定程度并持续一段时间后时，可使得大黑汀水库全库进入无缺氧区状态。

3.3 大黑汀水库缺氧区改善阈值分析 通过以上对采取大流量调度措施后，各情景条件下大黑汀水库缺氧区变化情况的分析可以看出，在不同的调度时段、调度时长及调度水量情景下，大黑汀水库的缺氧现象均会受到明显的抑制。但从结果分析可以看出，不同情景、不同径流总量条件下的缺氧区抑制效果均有一定差异。同时水库受水资源条件、供水要求等的限制，也不能为抑制缺氧区无限增加下泄流量水平，因此本文根据上述研究结果，分析提出抑制大黑汀水库缺氧区的分级阈值条件。

(1)情景1条件下，当泄洪流量达到115.7 m³/s或154.3 m³/s的流量级别时，大黑汀水库在8月份的缺氧现象可得到完全的消除。而在工况3条件下，当日均流量96.5 m³/s时，全库缺氧区分布情况已得到了明显的改善。根据模拟计算结果，在该工况条件下，全库缺氧区分布面积已降低到0.846 km²，延伸距离也缩减至0.75 km，相较正常调度情景下的缺氧区分布面积及延伸距离，近90%的库区缺氧区已得到了明显的抑制(见表4)。这说明在此调度规模条件下，调度措施已取得了明显的预期效果。

表4 情景1工况3条件下8月水库缺氧区面积及距离分析

	正常调度缺氧区	情景1工况3	占正常调度缺氧区比例	缺氧区缓解比例
缺氧面积分析	7.74km ²	0.846km ²	10.9%	89.1%
缺氧距离分析	10.68km	0.75km	7.02%	92.9%

(2)情景2和情景3条件下，当泄洪流量达到154.3 m³/s的流量级别时，大黑汀水库在8月份的缺氧现象可得到完全的消除。而当日均流量96.5 m³/s时，全库缺氧区分布情况均得到了明显的改善。在两种情景下的全库缺氧区分布面积已降低到2.21 km²，延伸距离也缩减至2.55 km，相较正常调度情景下的缺氧区分布面积及延伸距离，超过70%的库区缺氧区已得到了抑制(见表5)，同时水库坝前缺氧区顶部高程已位于水库供水泄水口高程以下，因此调度措施的实施效果依然较为明显。

表5 情景2及情景3工况3条件下8月水库缺氧区面积及距离分析

	正常调度缺氧区	情景2、情景3工况3	占正常调度缺氧区比例	缺氧区缓解比例
缺氧面积分析	7.74km ²	2.21km ²	28.6%	71.4%
缺氧距离分析	10.68km	2.55km	23.8%	76.1%

(3)当大流量调度过程达到日均 115.7 m³/s 时，调度过程持续 15 ~ 30 d，不论在何种情景下均可以使大黑汀水库缺氧区基本得到完全抑制和消除；当大流量调度过程达到日均 96.5 m³/s，且调度过程持续 15 ~ 30 d 时，可以使大黑汀水库大部分缺氧区得到抑制或消除，同样可达到较好的缺氧区抑制效果。

(4)对比各种情景可以看出，大流量调度过程产生的时机十分重要，同样是达到 70% 以上和 90% 以上的抑制效果(情景 2、情景 3)，由于情景 3 的调度作用于水库缺氧区发展最为迅速和稳定的关键期，即使比情景 2 减少约 15 d 的调度期，依然可以达到与情景 2 基本相同的效果。情景 1 固然达到的效果最为理想，但也会产生较情景 3 多一倍的下泄水量，因此对于水资源相对紧张的北方地区水库而言，并非最优方案。综合来看，情景 3 综合考虑了库区抑制缺氧区的需要和水库水资源条件的限制，是相对较优的调度方案。

综合上述分析结果，提出分级的大黑汀水库缺氧区抑制阈值条件(表 6)。即将水库缺氧区抑制的阈值条件分为良好及完善两级，当大规模调度过程日均流量达到 96.5 m³/s、总调度时长在 15 ~ 30 d 时为大黑汀水库缺氧区抑制的良好阈值，此时水库约 70% ~ 90% 的缺氧区将有望得到抑制，库区大部分区域水体的溶解氧状况将得到改善；当大规模调度过程日均流量达到 115.7 m³/s、总调度时长在 15 ~ 30 d 时为大黑汀水库缺氧区抑制的完善阈值，此时水库约 90% ~ 100% 的缺氧区将得到抑制，库区将基本消除水体缺氧现象。

表 6 大黑汀水库缺氧区抑制调度分级阈值

阈值分级	调度推荐时段	日均流量/(m ³ /s)	持续时间/d	缺氧区抑制预期效果
良好	7月中旬至8月下旬	96.5	15~30	抑制 70%~90%
完善		115.7	15~30	抑制 90%~100%

根据对大黑汀水库自 2010 至 2018 年的汛期(7 月至 8 月)实际下泄流量分析，近 10 年水库 7、8 两月的下泄总径流量均值为 4.30 亿 m³，即使排除 2018 年下泄水量(2018 年为丰水年，汛期两月下泄水量达 13.3 亿 m³)，多年均值也达到了 2.85 亿 m³。而本文推荐的调度过程总水量范围在 1.3 亿 ~ 3.0 亿 m³ 之间。水库正常的调度水量基本可满足抑制缺氧区的调度需求，水库可在保障防洪安全和供水需求的基础上，在每年汛期通过适当的调度手段，抑制水体缺氧现象的发生，保障水库供水水质安全。

4 结论

(1)大黑汀水库在库区热分层、底质污染及气象条件等的共同作用下，在年内出现了较为严重的缺氧现象。水库的缺氧区持续时间接近半年，基本持续了热分层的全部过程时段。同时水库出现缺氧的规模较大，在年内的 8 月份，大黑汀全库约有 2/3 的区域出现了缺氧现象。作为引滦入津的源头水库，如此大规模的缺氧区分布将会对供水水质造成极大的安全隐患。

(2)水库在调度期间的水动力学条件变化对于库区溶解氧分层结构及缺氧区的影响十分显著，大流量调度过程会对水库坝前溶解氧结构产生较为明显的影响，可对水库坝前缺氧区产生明显抑制效果，同时还能够使水库缺氧区的分布面积及延伸长度明显降低。

(3)当水库大规模调度过程日均流量达到 96.5 m³/s、总调度时长在 15 ~ 30 d 时为大黑汀水库缺氧区抑制的良好阈值，此时水库约 70% ~ 90% 的缺氧区将有望得到抑制；当大规模调度过程日均流量达到 115.7 m³/s、总调度时长在 15 ~ 30 d 时为大黑汀水库缺氧区抑制的完善阈值，此时水库约 90% ~ 100% 的缺氧区将得到抑制，库区将基本消除水体缺氧现象。

(4)本文主要是根据大流量过程对水库缺氧的影响机理，通过数学模型手段，对抑制大黑汀水库缺氧区的流量条件及流量持续时间条件进行定量化的探讨和分析，以期在考虑水库水资源量限制条件的基础上，提出能够满足库区缺氧现象控制的调度最佳调度阈值条件。这种分析主要是希望得出抑制水库缺氧区的最低限值条件，而要将这种阈值条件转化为水库实际可操作的调度条件，还需要对水

库的实际调度规则、兴利限制条件、水位限制条件、上游潘家口水库调度条件等多种因素进行综合考虑。本文的目的是希望能够为下一步水库抑制缺氧区的调度过程制定提供基础量化的数据依据。

参 考 文 献:

- [1] SCHMIDTKO S, STRAMMA L, VISBECK M . Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades[J] . Nature, 2017, 542(7641): 335–339 .
- [2] BREITBURG D, LEVIN L A, OSCHLIES A, et al . Declining oxygen in the global ocean and coastal waters[J] . Science, 2018, 359(6371): eaam7240 .
- [3] HAO W, HE Y, LI Q, et al . Summer hypoxia adjacent to the Changjiang Estuary[J] . Journal of Marine Systems, 2007, 67(3/4): 292–303 .
- [4] 杜彦良, 彭文启, 刘畅 . 分层湖库溶解氧时空特性研究进展[J] . 水利学报, 2019, 50(8): 990–998 .
- [5] RIPPEY B, MCSORLEY C.Oxygen depletion in lake hypolimnia[J] . Limnology & Oceanography, 2009, 54(3): 905–916 .
- [6] CORNETT R J, RIGLER F H . Hypolimnetic oxygen deficits: their prediction and interpretation[J] . Science, 1979, 205(4406): 580–581 .
- [7] PARR L B, MASON C F . Causes of low oxygen in a lowland, regulated eutrophic river in Eastern England[J] . Science of the Total Environment, 2004, 321(1/3): 273–286 .
- [8] PENA M A, KATSEV S, OGUZ T, et al . Modeling dissolved oxygen dynamics and hypoxia[J] . Biogeosciences, 2010, 7(3): 933–957 .
- [9] MUELLER B, BRYANT ,MATZINGER A, et al . Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes[J] . Environmental Science & Technology, 2012, 46(18): 9964–9971 .
- [10] ELI E . Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J] . Limnology, 2008, 9(2): 135–142 .
- [11] KRAEMER B M, ANNEVILLE O, CHANDRA S, et al . Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change[J] . Geophysical Research Letters, 2015, 42(12): 4981–4988 .
- [12] LEE Y G, KANG J H, KI S J, et al . Factors dominating stratification cycle and seasonal water quality variation in a Korean estuarine reservoir[J] . Journal of Environmental Monitoring, 2010, 12(5): 1072–1081 .
- [13] 贺冉冉, 罗淑葱, 朱广伟, 等 . 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响[J] . 生态与农村环境学报, 2014, 26(4): 344–349 .
- [14] 杨艳, 邓伟明, 何佳, 等 . 溶解氧对滇池沉积物氮磷释放特征影响研究[J] . 环境保护科学, 2018, 44(5): 36–41 .
- [15] 胡鹏, 杨庆, 杨泽凡, 等 . 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J] . 水利学报, 2019, 50(6): 679–686 .
- [16] BREZONIK P L . Chemical Kinetics and Process Dynamics in Aquatic Systems[M] . Florida: Lewis Publishers. 1994 .
- [17] CORNETT R J, RIGLER F H . The areal hypolimnetic oxygen deficit: an empirical test of the model[J] . Limnology and Oceanography, 1980, 25(4): 672–679 .
- [18] CHARLTON M N . Hypolimnion oxygen consumption in lakes: discussion of productivity and morphometry effects [J] . CAN . J . FISH, 1980, 37(10): 1531–1539 .
- [19] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 等 . 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J] . 环境科学, 2011, 32(7): 99–106 .
- [20] 刘畅, 刘晓波, 周怀东, 等 . 水库缺氧区时空演化特征及驱动因素分析[J] . 水利学报, 2019, 50(12): 1479–1490 .
- [21] 王佰梅, 王潜, 张睿昊 . 网箱养鱼清理对潘大水库水质影响分析[J] . 海河水利, 2017(5): 14–15, 26 .
- [22] 李步东, 刘畅, 刘晓波, 等 . 大型水库热分层的水质响应特征与成因分析[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 156–164 .
- [23] 盛传明, 练继建, 刘昉, 等 . 深水水库下泄低温水治理挡水幕布受力研究[J] . 水利学报, 2016, 47(12): 1548–1557 .

- [24] 高学平, 宋清林, 孙博闻. 控制幕运行方式改善下泄水温及其成因研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(1): 45-52.
- [25] 孙昕, 叶丽丽, 刘伟, 等. 分层水库曝气诱导内波特性及消减分层效果[J]. 水利学报, 2014, 45(10): 1247-1255.
- [26] 黄廷林, 谭欣林, 李扬, 等. 金盆水库热分层特性及扬水曝气系统运行效果研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(2): 270-284.
- [27] 王少明, 邢海燕, 王立明. 潘家口和大黑汀水库水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2003(2): 25-27.
- [28] 王燕, 邢海燕, 赵恩灵, 等. 潘家口、大黑汀水库水污染现状及治理措施浅析[J]. 海河水利, 2016(3): 17-19.

Study on the threshold condition to suppress anoxic zone by large flow operation process

LIU Chang, LIU Xiaobo, ZHOU Huaidong, LI Budong, WANG Shiyan, WANG Liang

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: The hypoxia in large reservoirs during the thermal stratification period will seriously affect its water quality, threatening the water supply safety of the reservoir. The strong convection conditions caused by the large flow discharge process can seriously weaken or even completely eliminate the hypoxia in the reservoir. Taking Daheiting reservoir as an example, the evolution process of anoxic area in Daheiting reservoir is inversed by using a three-dimensional mathematical model. It is found that hypoxia occurs in about 2/3 area of Daheiting reservoir in August, the stable development period of the anoxic area. In order to reduce the risk of water supply safety caused by hypoxia, through the analysis of each scenario, this paper gives the hierarchical threshold conditions to suppress anoxic zone in Daheiting reservoir. The results show that when the average daily flow reaches $96.5\text{m}^3/\text{s}$ and the total dispatching time is 15~30 days, it is a good threshold for the suppression of the anoxic zone of the Daheiting Reservoir. At this time, about 70%~90% of the anoxic zone will hopefully be suppressed. When the average daily flow rate reaches $115.7\text{m}^3/\text{s}$ and the total scheduling time is 15~30 days, it is the perfect threshold. At this time, about 90%~100% of the anoxic zone will be suppressed, and the hypoxia phenomenon in the reservoir area will be basically eliminated.

Keywords: thermal stratification; anoxic zone; large flow operation process; threshold condition

(责任编辑: 杨虹)