DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.05.005

气候变化背景下我国湖库型水源富营养化控制与饮用水安全保障策略

曹晓峰，冀泽华，兰华春，刘会娟，曲久辉

（清华大学水质与水生态研究中心，北京 100084）

摘要：全球气候变化背景下湖库型水源面临不同程度的富营养化与蓝藻水华问题，对饮用水安全供给产生重要影响。本文通过分析我国现阶段湖库富营养化与湖库型水源地水质现状，从水源保护、净化工艺、管网配送与保障机制等方面，研判了全球气候变化背景下我国湖库型饮用水水源富营养化应对与饮用水安全保障面临的问题与挑战，提出四条针对性的饮用水安全保障策略建议：加强湖库型饮用水水源地环境保护与生态修复力度、推动全过程饮用水安全保障的科技支撑体系建设、构建基于大数据融合的饮用水安全保障智慧化监管平台、加快推动湖库型饮用水源水质安全保障体制机制创新，以期为气候变化影响下我国未来饮用水安全保障提供借鉴。

关键词：气候变化；饮用水；安全保障；湖库；富营养化

中图分类号：X-1　　**文献标识码：**A

Eutrophication Control of Lake/Reservoir Water Sources and Assurance of Drinking Water Safety in China Considering Global Climate Change

Cao Xiaofeng, Ji Zehua, Lan Huachun, Liu Huijuan, Qu Jiuhui

(Center for Water and Ecology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Lake and reservoir ecosystems face varying degrees of eutrophication and cyanobacterial bloom against the background of global climate change, which threatens the safety of drinking water supply. In this study, we reviewed the current status of eutrophication and water quality of lake and reservoir water sources in China, and explored the challenges from the aspects of water source protection, purification process, pipe network distribution, and guarantee mechanism. Four targeted suggestions were recommended for guaranteeing drinking water safety: (1) strengthening environmental protection and ecological restoration of lake and reservoir drinking water sources, (2) promoting the construction of a scientific and technological support system for guaranteeing drinking water safety in the entire process, (3) building an intelligent supervision platform based on big data fusion, and (4) accelerating the system and mechanism innovation for guaranteeing lake and reservoir drinking water safety.

Keywords: climate change; drinking water; safety guarantee; lake and reservoir; eutrophication

收稿日期：2022-08-05；**修回日期：**2022-09-07

通讯作者：曲久辉，清华大学水质与水生态研究中心教授，中国工程院院士，主要研究方向为水质与水生态关系及调控；E-mail: jhqu@rcees.ac.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“面向生态文明建设的水安全保障战略研究”（2021-XBDZ-05）

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

饮用水安全关系到广大人民群众的健康，是人类生存的基本需求。党中央、国务院高度重视饮用水安全保障工作，采取了一系列工程和管理措施，颁布实施了《中华人民共和国水法》《中华人民共和国水污染防治法》《饮用水水源保护区污染防治管理规定》等诸多法律法规，将饮用水安全保障提升到一个全新的高度。

近年来，在全球气候变化背景下，湖泊、水库面临不同程度的富营养化加剧和蓝藻水华频发问题，严重威胁到以湖库为水源地的饮用水供水安全，制约了人民群众对高品质饮用水的需求。蓝藻水华产生的藻毒素和藻源性嗅味物质将会直接影响水质安全，而含藻水进入饮用水处理工艺，还会严重影响混凝、沉淀、过滤和消毒单元的处理效率，严重时会导致饮用水厂的供水量大幅减少；此外，穿透滤池进入供水管网的藻细胞在一定厌氧条件下会发生腐化，从而腐蚀供水管网，进一步影响饮用水水质的化学稳定性和生物稳定性。因此，有效解决湖库富营养化及藻类大量生长对饮用水水质的影响成为饮用水安全保障的重要任务。目前，在长期气候变化与极端气候事件双重驱动下，湖库型水源地富营养化控制水平、饮用水处理工艺保障能力、供水管网输配管控水平、饮用水安全保障机制仍需进一步提升，饮用水安全保障形势仍十分严峻。

本研究在中国工程院重大战略咨询项目“面向生态文明建设的水安全保障战略研究”支持下，通过分析全球气候变化背景下我国湖泊富营养化应对及饮用水安全保障面临的问题与挑战，提出面向生态文明建设的饮用水安全保障策略与建议，为进一步提高我国饮用水安全的保障水平，引领国家水生态系统管理与保护提供参考。

二、我国湖库富营养化与饮用水水质现状

（一）我国湖库富营养化的总体情况

湖库是我国重要的战略水资源，在保障饮用水供给方面发挥着重要作用。作为我国三大城市集中式饮用水水源地类型之一，服务了全国 47.2%、近 7 亿人口的饮用水供给。但近三十年来，湖库富营养化及其引发的水华频发问题已严重威胁到水生态系统健康与饮用水安全保障 [1]。生态环境状况公报统计数据（见图 1）显示：开展营养状态监测的重要湖泊（水库）数量由 2001 年的 3 个上升到 2021 年的 209 个，近十年湖库中度、轻度富营养状态分别约占 4.8%、21.8%，中营养状态占 62.3%，贫营养状态占 11.0%，富营养状态湖泊比例略有上升，贫营养化湖泊比例略有下降。其中，洱海、丹江口水库等为中营养状态，太湖、巢湖、白洋淀等为轻度富营养状态，滇池等为中度富营养状态 [2]。

2001—2018 年，水利部门开展了较多数量的湖泊、水库营养状态监测。水资源公报数据（见图 2，图 3）显示：2001—2018 年间中营养湖泊占 28.7%，富营养湖泊占 70.6%，中营养水库占 67.5%，富营养水库占 31.6%，而在 2009—2018 年，富营养比例则有所上升，湖泊与水库分别占比达到 71.9% 与 32.2% [3]。

综合生态环境与水资源公报数据分析结果，近十年我国湖库富营养化程度向好趋势不明显，在水环境质量改善方面仍面临压力。

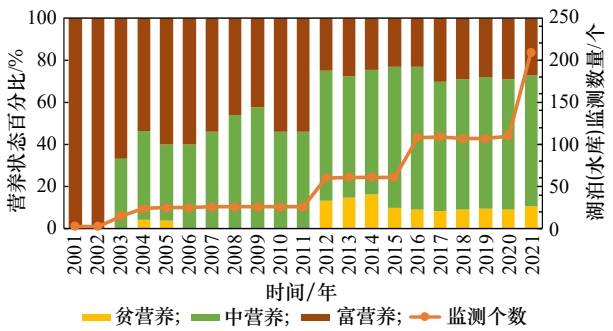

图 1　2001—2021 年我国重要湖库营养状态的变化情况

注：数据来源于生态环境状况公报。

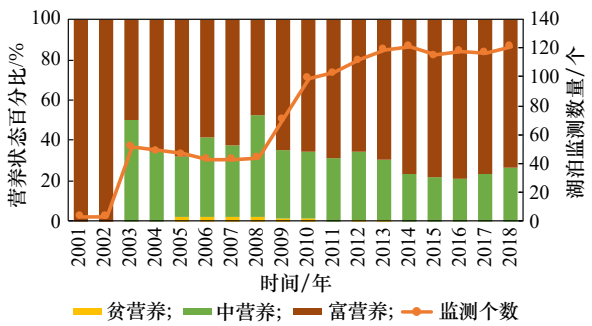

图 2　2001—2018 年我国重要湖泊营养状态变化情况

注：数据来源于水资源公报。

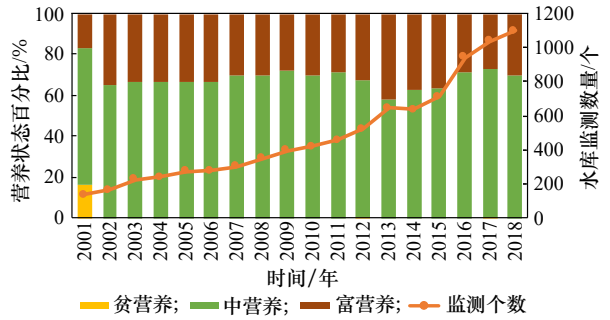

图3　2001—2018年我国重要水库营养状态变化情况

注：数据来源于水资源公报。

目前，《全国重要饮用水水源地名录（2016年）》中共有618个水源地，其中湖泊型饮用水水源地8个、水库型饮用水水源地271个，约占总数的45%（见图4）。以长江流域为例，湖库型水源地在流域210个重要水源地中占比33.8% [4]，是重要饮用水水源地的主要组成部分。湖泊型饮用水水源地虽然仅占比1.3%，但其中轻度富营养化湖泊有5个，中营养湖泊有3个，而在水库型饮用水水源地中，于桥水库为轻度富营养化状态，鹤地水库、崂山水库、磨盘山水库等为中营养状态（根据《2019中国生态环境状况公报》数据）。参考水资源公报对水库营养状态的监测结果，预计重要饮用水水源地的营养状态不容乐观，后续针对性工作有待进一步推进。

（二）我国饮用水水质达标的总体情况

2020年全国地级及以上城市集中式生活饮用水水源总体达标率为94.5%，地表水达标率为97.7%，主要超标指标为硫酸盐、高锰酸盐指数、总磷 [2]。而在2015—2020年，总体达标率平均为91.3%，地表水达标率平均为94.3%（见图5），表明近年来饮用水水源达标率持续提升。城市自来水厂出厂水质达标率由2009年的58.2%提升到2018年的近97%，城市供水普及率从2010年的96.68%增加到2020年的98.99% [5]。我国农村集中式供水受益人口比重稳步升高，“十三五”期间，水利部指导督促地方推进农村供水工程建设，截至2020年年底，全国共建成931万处农村供水工程，将农村自来水普及率从2010年的60%增加到2020年的83%，集中供水率达到88% [6]。相比城市，农村供水保障能力仍需进一步提升。

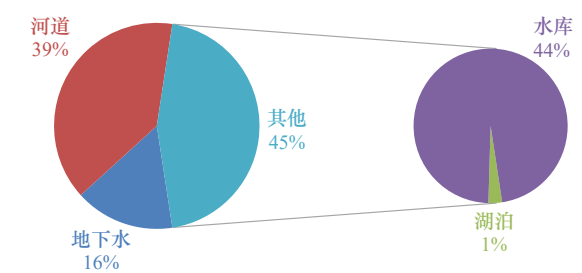

图4　我国重要饮用水水源地名录中湖库型水源地占比情况

三、全球气候变化背景下我国湖库型饮用水水源地富营养化控制与饮用水安全保障面临的问题与挑战

（一）湖库型饮用水水源地富营养化仍然严峻

1. 升温加速湖库富营养化

在自然状态下，湖泊会自发地从贫营养状态向富营养状态过渡，但是这种自然过程非常缓慢。气候变化造成的次生灾害增加导致水土流失，同时区域降雨变化，也会造成大量污染物被冲刷后随地表径流进入湖库中，加速湖库水体富营养化 [7]。研究表明，伴随全球气候变化进程，全球68%的大型湖泊夏季蓝藻水华强度增加，而我国西部区域湖泊增加明显 [8]。蓝藻水华爆发频次增加将导致水体嗅味物质含量升高、pH值上升。相比于地下水源，气候变化对湖库型饮用水水源地的影响更为显著，对我国饮用水安全造成严重威胁。

2. 面源污染仍是湖库型饮用水水源地的重要污染源

目前，我国化肥有效利用率仅为30%左右，未吸收的氮、磷大多通过地表径流进入地表水，是水体富营养化的主要因素 [9]。由于多数湖库饮用水水源地分布在比较偏僻的地区，监管工作不

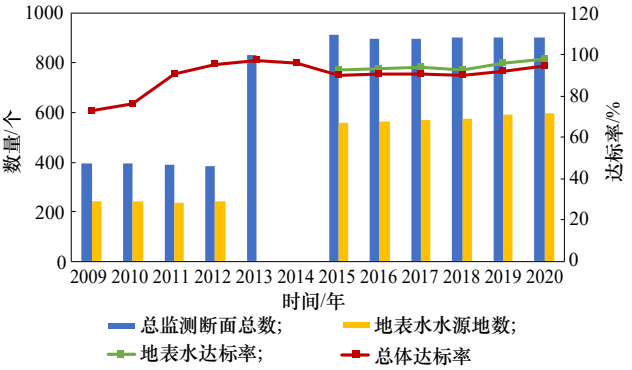

图5　我国地级及以上城市集中式生活饮用水水源达标率

到位，大量生活垃圾与养殖废弃物堆放、生活污水直排、水源地周边放牧等问题，都会严重影响饮用水水源地的水质安全，增加了水体富营养化的可能。在气候变化背景下，雨洪、干旱、高温等因素也进一步影响了富营养化水体中藻类的繁殖 [9]。通过分析 2002—2018 年我国 79 件突发的生活饮用水污染事件，发现水源地被污染占事件总数的 49.4% [10]。2018 年，全国集中式饮用水水源地环境保护专项行动排查县级以上饮用水水源地 2466 个，发现环境问题 6426 个 [11]，其中生活面源与农业面源分别占比 27%、16%（见图 6），生活面源、农业面源污染、工业企业排污仍是水源保护区存在的主要环境问题。

（二）饮用水处理工艺保障能力还需提升

1. 常规水处理工艺难以处理含藻水

常规饮用水处理工艺主要包括混凝、沉淀、过滤、消毒单元，其难以有效去除藻华爆发导致的异臭味物质、消毒副产物的前驱物和藻毒素等藻源性微量有机物。蓝藻水华的爆发，会导致水厂混凝效果下降、铝含量超标以及滤池堵塞等一系列问题。与此同时，由于水中大量藻类、有机物和氨氮的存在，使得消毒剂用量大大增加，同时大幅增加了消毒副产物的生成量。实际上，我国原建和新建供水厂以传统工艺为主，对溶解态蓝藻胞外聚合物的去除能力有限，去除率仅为 67.73% [12]，大多数水厂缺乏对含藻水特别是高藻水的处理能力。针对常规水处理工艺的局限性，同时要保证不同气候条件下安全的饮用水供给，必须加强含藻水的预处理，强化常规水处理工艺或者增加其他处理环节。

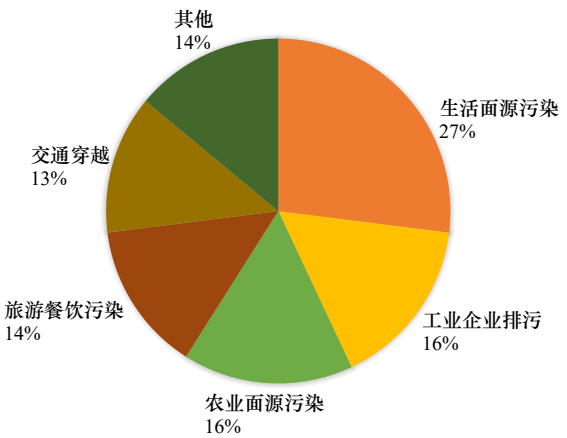

图 6　全国集中式饮用水水源地环境保护专项行动中存在问题比例

2. 面向不同区域的饮用水处理技术有待发展

以增温为主的气候变化对于我国南北方区域的水处理技术将产生不同影响，对于不同区域的饮用水处理技术与工程更新迭代提出了新的要求。目前针对长期气候变化的准确预测能力尚不完善，气候变化预测不确定性大，导致面向不同气候变化影响下的饮用水处理技术的发展方向仍有待探讨。温度升高对藻的繁殖乃至爆发有重要影响，对一些流动性较差的水库影响更为显著，如上海长江口青草沙水库产嗅藻爆发导致的土霉味问题，是我国此类水库务必解决的重大饮用安全保障问题。目前，在除嗅工艺中经常使用的活性炭吸附技术、臭氧－活性炭联用技术，对饮用水控嗅除嗅效果显著 [13]。更为有效和安全的新技术研发，将对气候变化下饮用水安全保障起到更为积极的作用。

（三）供水管网建设与输配管控亟待加强

1. 供水管网建设亟待提升

管网是供水工程的“动脉”。截至 2020 年年底，我国城市供水管道总长度达到 1×10^6 km。到 2035 年，我国早期建设的管网约 65% 的管龄将超过 30 年 [14]。但是近十几年来政府投入不足，供水管网系统更新欠账较多。自来水厂出水在管网输送和水池（箱）蓄储过程中，由于管道破损导致外界污染物进入和内部污染物繁殖等造成了二次污染。金属管道内容易发生电化学反应而产生结垢层，但我国目前 90% 以上供水管道是铸铁管、钢管，近几年新建的给水管道仍有 85% 采用金属管道。管径、管龄、腐蚀、运行压力、温度变化等都成为影响供水水质安全的重要因素。

2. 全过程水质监测能力不足

供水管网是一个巨大的反应器，输配过程发生的化学和生物学作用对水质产生重要影响。根据对占全国总供水量 42.44% 的 36 个城市调查结果显示，出厂水平均浊度为 1.3 度，而管网水增加到 1.6 度；色度由 5.2 度增加到 6.7 度；铁由 0.09 mg/L 增加到 0.11 mg/L；细菌总数由 6.6 cfu/mL 增加到 29.2 cfu/mL [15]。在气候变化条件下，气温、湿度、降水等因素的改变造成输配管网环境发生变化，水文水资源时空分布变化造成区域输配比例变化，以及气候变化造成的供水系统可靠性、恢复性和脆弱

性变化，都对饮用水安全保障的最终环节产生复杂影响，直接影响龙头水质。目前，供水行业生产管理信息化建设已有20多年的历史，但物联网、大数据、云计算等信息技术应用刚刚起步，不同时期建设、不同业务功能的系统信息孤岛现象仍然严重 [14]，尚未实现“从源头到龙头”全过程的高集成度水质实时在线监测预警。此外，由于区域需求差异，相关部门对智能化监测发展不够重视，导致水量、水质与需求不匹配，增加了饮用水安全管理的风险。

（四）饮用水安全保障体制与机制不健全

1. 缺乏专门的水源水质标准

现阶段水源水评价主要依据《地表水环境质量标准》（GB3838—2002），即：地表饮用水水源一级保护区内的水质，不得低于国家《地表水环境质量标准》II类标准；二级保护区内的水质，不得低于国家《地表水环境质量标准》III类标准，该标准规定与饮用水水质标准规定的指标之间存在一定的不一致性。国家层面尚未针对湖库型饮用水水源地特性、水源水质条件现状、未来气候变化等因素制定综合协调统一规范的饮用水水源水质评价体系，影响了饮用水水源地保护和水质安全保障的管理和策略的制定与实施。

2. 饮用水安全管护制度与风险控制体系尚不完善

依据《中华人民共和国水法》《中华人民共和国水污染防治法》等有关法律法规要求，国内水源地保护发挥了至关重要的作用，但仍存在法规制度不完善、水源地监管需要加强的问题。相比国外发达国家在水源保护、水质安全绿色管理方面长期实践形成的诸多法律、立法体系，如美国的《安全饮用水法》，日本的《河川法》《水质污染防治法》，欧盟的四大基础法律《欧盟水框架指令》《饮用水源地地表水指令》《饮用水水质指令》与《城市污水处理指令》，德国的《水库水水源保护区条例》《湖水水源保护区条例》等[16,17]，目前，我国国家层面尚未出台饮用水水源地保护专项法规，现行法律法规之间并没有形成一个完整的法律保障体系，缺乏对饮用水水源地保护的全面统筹。不同部门之间协调不力、权责划分不清，难以形成监管合力，一定程度上影响了饮用水水源地保护工作的有效开展 [18]。同时，气候变化增加了水文、水资源、水环境、水生态等要素对饮用水安全影响的不确定性风险，我国在应对气候变化影响的饮用水安全保障制度方面的研究还相对薄弱。如何准确预测未来气候变化带来的饮用水安全风险并根据不同气候情景建立饮用水安全保障机制，对饮用水安全保障工作进行系统指导、评价、考核及科学决策，仍需大量的基础研究和工程探索。

3. 饮用水安全保障资金投入多元化机制亟待健全

近些年来，部分地方政府受财力限制，难以保障水源地安全达标建设工作经费，净水工艺升级改造和输配管网更新欠账较多。同时，水价受到居民承受能力等因素制约而难以及时调整到位，供水企业普遍处于微利甚至亏损状态，无力投入到供水设施更新改造和建设中。国家层面也尚未打通城市饮用水水源地保护投资渠道，投资保障机制不健全，制约了水源地安全保障达标建设工作的进度。如西藏、贵州等地由于缺乏专项经费，导致水源地达标建设等工作开展难度大 [18]。

四、全球气候变化背景下我国湖库型饮用水水源富营养化控制及饮用水安全保障策略与建议

（一）加强湖库型饮用水水源地环境保护与生态修复力度

在复杂多变的气候变化和环境污染形势下，湖库水源作为一个开放性、关联性和功能性的水体，受多种环境因素和生产生活过程影响，也与相关流域的环境质量关系密切，需要从生态系统完整性的角度进行综合规划和系统治理，加强空间管控，治理湖库富营养化，构建水生态安全格局。流域综合治理应从绿色发展角度，发展绿色农业，减少农药化肥使用量。同时加强陆域控源减排，强化湖库周边生态建设，推动点源、面源污染防控，深入改善湖泊生境，防控湖泛，降低水华爆发风险，保障水源水质安全。

（二）推动“从源头到龙头”全过程饮用水安全保障的科技支撑体系建设

为保证饮用水水源的质量，应该重点针对影响

健康的污染指标确定水质风险水平，并以此作为取用的科学依据，突破目前以简单水体分类指数为依据的判别方法的局限。同时根据气候变化趋势，判断不同污染物在对应情景下的变化情况，构建完善的评判方法，加强对湖库型水源保护、治理和生态修复的科技支撑。开展污染负荷削减、藻类水华控制、湿地和缓冲带修复、水力调控等多种技术创新，形成多元的富营养化防控体系，特别是构建生物操纵、物化控制等蓝藻水华绿色控制技术体系。强化常规处理，提升深度处理工艺水平，针对原水水质和工艺运行缺陷，从水处理药剂、工艺参数、处理设施和运行管理等方面进行单元工艺和净水全过程优化，突破技术瓶颈，研发藻毒素、嗅味物质等多污染物协同控制净水新技术。积极推进老旧管网维护与升级改造工程建设，科学制定入区、入户管网管材的替代更新规划，保证龙头水水质达标。打造国家级饮用水安全保障科技创新平台，推动“政、企、校、研、用”密切合作，实现人力资源、智力资源、科研平台共享，创新饮用水安全保障的关键技术、材料和装备，全链条、系统化地支撑饮用水安全保障工程。

（三）构建基于大数据融合的饮用水安全保障智慧化监管平台

根据气候变化，创建面向未来复杂多变气候情景的具有中国特色的饮用水安全保障的监管模式。全面加强湖库型水源地、水处理、供给过程到水龙头的水质监控，协调水利、生态环境、卫生、住建等不同部门，构建基于大数据融合的“从源头到龙头”全过程水质实时一体化智慧化监测、评估、预警、决策平台。同时加强水华突发、极端气候事件下应急备用水源与管网建设，形成有效的水质监测预警应急调度业务化平台，实现业务化运行，推动“从中央到地方”多层级多部门饮用水安全保障的智慧化监管技术体系，做到科学调度、稳定供水，提高饮用水安全应急保障能力。

（四）加快推动湖库型饮用水安全保障体制机制创新

应借鉴国际上现行的安全饮用水法，尽快制定适合我国国情的饮用水安全保障标准体系与法律法规，推动饮用水水源地管理治理能力现代化、法制化。尽快制定我国地表饮用水源水质标准，优化湖库型饮用水水源保护条例，逐步改善湖库水质并以水生态系统健康为最终恢复目标。落实湖库型饮用水水源地主管部门各级责任，从水质到水量、从源头到龙头、从净化到输配、从控制到监管，全面制定配套气候变化的饮用水供水系统科学化管理条例，构建以“湖长制”为抓手，推进“一源一策”组织实施，建立多水源地保护管理多部门协同、上下游组织协调、联防联控机制，形成合力。进一步建立健全水源地安全达标建设与风险评估监督考核机制，加大水源地问题清单核查比重，定期组织开展水源地问题评估与整改落实，强化湖库型水源供水需求与水质安全保障，实施严格监管。拓宽湖库型水源地保护管理多渠道投融资渠道，适量吸纳民营资本，加大机构建设、系统监测、综合治理、联合执法等方面的经费支持，建立水源地保护资金投入与生态补偿长效保障机制。加强饮用水水源地安全信息公开与宣传引导，健全环境治理全民行动体系，拓展公众参与水源地保护、管理与决策的途径和方式，强化公众参与。

五、结语

我国湖库型饮用水安全保障工作刻不容缓，应科学、系统地解决水源保护、净化工艺、管网配送与保障机制等方面存在的问题。建议将水源地保护修复、全过程饮用水安全保障关键技术突破、饮用水水质一体化智慧监管与饮用水安全保障体制机制创新作为重点举措，全方位实现以湖库为水源的饮用水安全保障。

在全球气候变化大背景下，考虑到湖库生态系统的敏感性，饮用水复合污染的生态与健康风险控制应成为湖库型水源地水质安全保障中必须高度关注的新挑战。未来除需深入推进湖库富营养化与水华治理外，应深化饮用水新污染物的生态风险、病原微生物介水传播的健康风险以及气候变化带来的更大不确定性风险控制研究，创新构建全过程绿色、高效的饮用水污染物控制技术体系，进一步巩固加强湖库型饮用水安全保障水平，助力生态文明建设。

参考文献

[1] Zhang Y L, Deng J M, Qin B Q, et al. Importance and vulnerability of lakes and reservoirs supporting drinking water in China [J]. Fundamental Research, 2022:1–9. https: //doi.org/10.1016/j.fmre.2022.01.03.

[2] 中华人民共和国生态环境部. 中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020.
Ministry of Ecological Environment of the PRC. Bulletin on China's ecological environment [R]. Beijing: Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China, 2020.

[3] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2018.
Ministry of Water Resources of the PRC. Bulletin on China's water resources [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2018.

[4] 胡爽. 长江流域重要饮用水水源地管理实践及制度保障对策 [J]. 长江技术经济, 2020, 3: 23–29.
Hu S. Management practice and system guarantee countermeasures of important drinking water sources in the Yangtze River Basin [J]. Technology and Economy of Changjiang, 2020, 3: 23–29.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. China urban-rural construction statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.

[6] 水利部等九部门印发关于做好农村供水保障工作的指导意见 [EB/OL]. (2021-08-19) [2022-08-18]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/19/content_5632047.htm.
Ministry of Water Resources along with nine other departments. issued guideline to safeguard rural water supply [EB/OL]. (2021-08-19). [2022-08-18]. http://www. gov. cn/xinwen/2021-08/19/content_5632047.htm.

[7] Sinha E, Michalak A M, Balaji V. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes [J]. Science, 2017, 357(6349): 405–408.

[8] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s [J]. Nature, 2019, 574(7780): 667–670.

[9] 刘健利. 水源型水库水质研究进展与我国代表性水库现状 [J]. 净水技术, 2019, 38(12) : 1–5.
Liu J L. Research progress on water quality of water source reservoirs and current status of representative reservoirs in China [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(12) : 1–5.

[10] 孟洁, 雍明媛, 翟雪莉, 等. 2002—2018年我国突发生活饮用水污染事件回顾性分析 [J]. 医学动物防制, 2021, 37(3): 216–219.
Meng J, Yong M Y, Zhai X L, et al. Retrospective analysis of accident incidents caused by drinking water pollution in China from 2002 to 2018 [J]. Journal of Medical Pest Control, 2021, 37(3): 216–219.

[11] 中华人民共和国生态环境部. 水源保护区发现环境问题6426个 [EB/OL]. (2022-08-18) [2022-09-05]. http: //m. news. cctv. com/2018/08/09/ARTIVxku0q31gNmi8tZkXQk5180809.shtml.
Ministry of Ecology and Environment of the PRC. 6426 environmental issues found in water source protection area [EB/OL]. (2022-08-18)[2022-09-05]. http: //m.news.cctv.com/2018/08/09/ARTIVxku0q31gNmi8tZkXQk5180809.shtml.

[12] 潘嵘. 游离态蓝藻胞外聚合物的分泌释放规律及其在水处理过程中的迁移去除研究 [D]. 扬州: 扬州大学(硕士学位论文), 2019.
Pan R. Research on the secretion and release of free cyanobacterial extracellilar polymeric substance and its migration during water treatment [D]. Yangzhou: Yangzhou University(Master's thesis), 2019.

[13] 李鹏程, 朱加林. 现代化饮用水安全保障体系构建研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 42(2): 50–53.
Li P C, Zhu J L. Research on the construction of modern drinking water safety assurance system [J]. Engineering and Technological Research, 2021, 42(2): 50–53.

[14] 张金松, 韩小波, 靳军涛. 饮用水安全保障体系现代化的思考与实践 [J]. 给水排水, 2019, 45(2): 1–3, 57.
Zhang J S, Han X B, Jin J T. Consideration and practice on the modernization of drinking water security system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(2): 1–3, 57.

[15] 喻青. 给水管网细菌学研究与水质模拟 [D]. 天津: 天津大学(硕士学位论文), 2007.
Yu Q. Bacteriology research and simulation of water quality in the distribution network [D]. Tianjin: Tianjing University (Master's thesis), 2007.

[16] 张敏, 刘磊, 蓝艳, 等. 美国饮用水水源地保护经验及其对我国的启示 [J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 156–160.
Zhang M, Liu L, Lan Y, et al. American experience in drinking water source protection and its implications to China [J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(2): 156–160.

[17] 王亦宁, 双文元. 国外饮用水水源地保护经验与启示 [J]. 水利发展研究, 2017, 17(10): 88–93.
Wang Y N, Shuang W Y. Experience and enlightenment of protection of drinking water sources abroad [J]. Water Resources Development Research, 2017, 17(10): 88–93.

[18] 彭才喜, 邓志民. 新时代重要饮用水水源地安全保障评估思考 [J]. 水利水电快报, 2021, 42(2): 50–53.
Peng C X, Deng Z M. Thoughts on safety assurance assessment of major drinking water sources in the New Era [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(2): 50–53.