J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(1):000-000
DOI 10.18307/2026.0100

长江经济带饮用水水源地湖库分布及近 20 年来水质变化*

张运林 [1-3**]，林伟鹏 [1-3]，王金玲 [1-3]，肖长垣 [1, 2]，张毅博 [1]，邓建明 [1-3]

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全全国重点实验室,南京 211135

2 中国科学院大学南京学院,南京 211135)

3 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要：湖泊和水库（简称湖库）是长江经济带绿色高质量发展的"动力源"，也是保障长江经济带沿线城市和京津冀豫饮用水安全的"压舱石"，明晰水源地湖库空间分布及其水质演化有助于提升饮用水安全保障能力。本文整合生态环境统计信息，构建了长江经济带沿线 11 个省市县级及以上集中式饮用水水源地数据集，分析发现 2025 年全部 1557 个县级及以上集中式饮用水水源地中湖库型水源地 762 个，占比 49.0%，分布在 23 个湖泊和 682 个水库，过去 10 年无论是地级还是县级集中式饮用水水源地中湖库型水源地数量和占比均有明显上升，凸显了湖库在保障城市饮用水安全中的关键作用；长时序 Landsat 卫星遥感反演结果显示，1986 年以来长江经济带饮用水水源地湖库透明度呈现显著上升趋势，从 1986 年的 1.41±0.78 m 提升至 2024 年的 1.94±1.35 m，水体整体变清，但湖泊和水库存在明显分异，其中湖泊透明度有所下降，而水库透明度则显著上升；47 个水源地湖库 2005-2024 年溶解氧、总氮、氨氮、总磷和生化需氧量 5 个关键水质指标长期定位监测显示，水源地湖库水质整体呈现显著改善，其中总氮和总磷分别由 2005 年的 1.90 mg/L 和 0.100 mg/L 降低到 2024 年的 1.30 mg/L 和 0.052 mg/L，但水源地水库总氮浓度没有明显改善甚至有所上升。当前，水源地湖库保护治理与可持续发展仍面临流域外源污染负荷过高和内源污染释放增加，氮磷营养盐超标及其引发的蓝藻水华，沉水植被退化和生物多样性下降、以及全球气候变化引起极端洪水和干旱频发等多重风险和挑战。
关键词：湖库、长江经济带、集中式饮用水水源地、水质、透明度

Distribution of drinking water source lakes and reservoirs in the Yangtze River Economic Belt and water quality changes over the past 20 years

Zhang Yunlin[1-3], Lin Weipeng[1-3], Wang Jinling[1-3], Xiao Changyuan[1, 2], Zhang Yibo & Deng Jianming[1-3]

(1 Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing (UCASNJ), Nanjing, 211135, P.R.China;

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, P.R.China)

Abstract: Lakes and reservoirs (collectively termed lake-reservoirs) are critical for both the green, high-quality development of the Yangtze River Economic Belt and for securing drinking water for its urban centers and the Beijing-Tianjin-Hebei-Henan region. Understanding the spatial distribution and water quality trends of these drinking water sources is therefore essential for enhancing security management. This study compiled a dataset of prefecture-level and county-level centralized drinking water sources across the belt's 11 provinces by integrating

---

* 2025-08-28 收稿；2025-10-21 收修改稿。

国家重点研发计划项目（2022YFC3204100）、江苏省生态环境科研项目成果转化与推广项目（2023003）和中国科学院学部咨询评议项目（2023-ZW-09-A-025）联合资助。

** 通信作者；E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn。

ecological and environmental statistics. The results reveal that, of the 1,557 centralized drinking water sources in 2025, 762 (49.0%) are lake-reservoir types, distributed across 23 lakes and 682 reservoirs. Over the past decade, the number and proportion of these sources have increased significantly, underscoring their growing importance. Long-term Landsat satellite remote sensing indicates that since 1986, the Secchi disk depth (SDD), a measure of water transparency, has shown a significant increasing trend across these water bodies, rising from 1.41 ± 0.78 m in 1986 to 1.94 ± 1.35 m in 2024. However, trends diverge between water body types, with lake transparency declining while reservoir transparency has improved markedly. Furthermore, an analysis of five key water quality parameters—dissolved oxygen, total nitrogen, ammonia nitrogen, total phosphorus, and biochemical oxygen demand—in 47 drinking water source lake-reservoirs from 2005 to 2024 shows an overall improvement. Concentrations of total nitrogen and total phosphorus decreased from 1.90 mg/L and 0.100 mg/L in 2005 to 1.30 mg/L and 0.052 mg/L in 2024, respectively. Despite this overall trend, total nitrogen concentrations in reservoirs have not improved significantly and have even increased in some instances. Consequently, the protection, governance, and sustainable development of these vital water sources continue to face challenges, including excessive external pollution loads, increased internal nutrient release, high nitrogen and phosphorus concentrations contributing to cyanobacterial blooms, degradation of submerged vegetation, biodiversity loss, and the increasing frequency of extreme hydrological events due to global climate change.
Keywords: lakes and reservoirs, Yangtze River Economic Belt, centralized drinking water sources, water quality, transparency

长江经济带作为中国最具战略价值的经济区域之一，覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 9 省 2 市，面积约占全国的 21%，人口和经济总量均超过全国的 40%。长江经济带独特的地理区位和资源禀赋，使其成为连接东部沿海与中西部内陆的核心纽带，也是国家生态文明建设与高质量发展的关键试验区。长江经济带以长江为纽带，串联起长三角、长江中游、成渝三大国家级城市群，并辐射黔中、滇中等区域性城市群，经济带内产业集聚、城市人口集中，其供水需求呈现总量刚性增长、时空分布失衡、安全风险加剧等复杂态势，并且新型城镇化建设对水源水质和水量均提出更高的要求。同时，随着城市化进程加速、工业化和农业集约化发展，长江经济带面临资源环境约束趋紧、水生态系统退化等严峻挑战[1]，尤其是广泛作为城市集中式饮用水水源地的湖库生态系统，其健康状况直接关系到区域可持续发展与民生安全。

湖泊和水库（简称湖库）作为长江经济带重要的地表水体，兼具防洪灌溉、饮用水安全、航运发电、旅游休闲、生态调节等多重生态服务功能，是流域水循环的核心环节[2]。长江经济带湖库众多，分布有我国五大淡水湖，江淮洪泛平原更是我国湖泊密度最大、淡水湖泊最集中的区域[3]。据统计共有湖泊 2000 余个、水库超 5 万座，其中许多湖库是周边城市的主要集中式饮用水水源地[4-6]。例如，鄱阳湖、洞庭湖、太湖等大型湖泊承担着数千万人口的供水任务，而三峡水库、丹江口水库等大型水库更是国家南水北调中线工程的关键节点。然而，受快速气候变化与强烈人类活动双重胁迫，过去三十年长江经济带沿线湖库生态系统正面临库容缩减、水体富营养化加剧、藻类水华频发、草型生态系统退化等突出水资源、水环境和水生态问题[7-11]，导致饮用水水源地水质生态风险显著上升。例如，2007 年太湖蓝藻水华引发无锡市供水危机[12]，2019 年安陆市城区水源地解放山水库发生“水华”造成自来水厂制水困难（https://baijiahao.baidu.com/s?id=1631851420180497151&wfr=spider&for=pc），2025 年丹江口水库及中线干渠尖头藻异常增殖，这些事件均凸显了水源地湖库水生态系统保护的重要性和紧迫性。

党的十八大以来，在习近平生态文明思想指引下，长江经济带各省份共抓大保护，不搞大开发，扎实推进长江流域湖泊水资源保护、水污染治理、水环境改善和水生态修复并取得积极成效。2021 年国家发展与改革委员会发布《关于加强长江经济带重要湖泊保护和治理的指导意见》，进一步强化长江经济带重要湖泊保护和治理，明确饮用水水源地安全保障，着力提升城乡饮用水源安全保障水平。长江经济带作为我国生态优先、绿色发展的战略核心区，其饮用水水源地水质安全直接关系沿线 11 省市数亿居民的生命健康与区域经济社会可持续发展。然而，既有研究多聚焦于重点或者单个水源地基础信息和水质变化分析[12-14]，仍缺乏长江经济带全部县级及以上集中式饮用水水源地数据集，不利于水源地湖库水质和灾害风险的精细化管控。

因此，本研究聚焦长江经济带集中式饮用水水源地湖库，通过整合生态环境统计信息、卫星遥感和长期定位监测数据，构建长江经济带县级及以上集中式饮用水水源地数据集，阐明湖库型集中式饮用水水源地数量和占比动态变化，揭示水源地湖库透明度和氮磷等关键水质演化过程，彰显湖库在保障流域和区域饮用水安全中的核心作用，助力长江经济带高质量发展、饮用水安全提升和人民生命健康保障。

1 数据与方法

1.1 集中式饮用水水源地名录和湖库信息

为贯彻落实《中华人民共和国水污染防治法》（2017 修正）和《水污染防治行动计划》（“水十条”，国发〔2015〕17 号）有关要求，推进饮用水水源水质监测信息公开工作，2016 年 1 月，生态环境部印发《全国集中式生活饮用水水源水质监测信息公开方案》，提出自 2016 年 1 月起，地级及以上城市按月公开水源水质达标信息；自 2018 年第一季度起，所有县级行政单位所在城镇按季度公开水源水质达标信息；地级及以上城市、县级行政单位所在城镇每年还应公开水源年度监测信息。2018 年 3 月，生态环境部联合水利部

印发《全国集中式饮用水水源地环境保护专项行动方案》，要求地方各级人民政府建立信息公开制度。因此，自 2016 年以来全国各省市生态环境部门在其官方网站及时公布和动态更新县级及以上城市集中式饮用水水源地名录及水质达标状况。

针对长江流域集中式饮用水水源地，水利部 2022 年将 324 个向地级以上城市供水且供水人口大于 20 万的地表水水源地和年供水量 1.0×10^7 m^3 以上的地下水水源地等流域重要集中式饮用水水源地纳入《长江流域重要饮用水水源地名录》，涉及上海、江苏、安徽等 15 个省（自治区、直辖市），但县级集中式饮用水水源地名录和基础信息不全面，无法有效支撑长江经济带饮用水安全保障。为系统梳理长江经济带集中式饮用水水源地分布和变化，本研究从各省市生态环境部门网站等收集长江经济带沿线 11 个省市县级及以上集中式饮用水水源地信息。为体现不同类型集中式饮用水水源地占比动态变化，本文选取 2016 年和 2025 年两个典型时段进行对比分析，其中浙江省没有区分地级和县级集中式饮用水地；云南省和江西省 2016 年缺县级集中式饮用水水源地名录。此外，水源地湖库经纬度和面积等基础信息来自过去发布的湖泊和水库数据集[5,6]。

1.2 湖库透明度数据

水体透明度（Secchi disk depth：SDD）是指放入水中的黑白塞克盘能够看得见的最大深度[15]，透明度反映水体清澈程度和透光能力，是衡量水质变化和水生态系统健康的重要指标，也是湖库富营养化评价的关键指标，受到广泛关注和研究。过去我们构建了基于 Landsat 卫星的透明度遥感反演算法，发布了全国 1 km^2 以上湖泊的年均透明度数据集[16,17]。利用上述方法，本文重构了 1986-2024 年长江经济带所有水源地湖库透明度逐年数据集，用以表征和分析水源地湖库水质状况及长期变化趋势。由于部分水源地湖库面积太小，而 Landsat 卫星遥感 30 m 空间分辨率有限，致使像元点数量不足，加之岸边邻近效应影响，透明度反演误差和不确定性增加，本文仅选取面积大于 0.1 km^2 水源地湖库开展透明度遥感反演，包括湖泊 23 个，水库 327 个。

1.3 氮磷等关键水质参数

长期、连续和一致的监测数据在描述、分析和评价湖库水生态环境的长期趋势方面具有广泛的实用价值。为了评估长江经济带水源地湖库的水质动态变化，我们收集了 15 个水源地湖泊、32 个水源地水库共计 133 个监测站点 2005-2024 年逐月主要水质指标（图 1），包括溶解氧（DO）、总氮（TN）、氨氮（NH_3-N）、总磷（TP）、生化耗氧量（BOD）5 项关键指标，该数据集由中国环境监测总站（http://www.cnemc.cn/）公布，在以往研究中已被广泛使用[18-20]。TN、NH_3-N、TP 和 BOD 浓度采用生态环境部推荐的标准水和废水监测分析方法在实验室进行分析[21]。通过对比分析长江经济带水源地湖库关键水质指标，以期评估湖库水质状况、差异及其长期变化趋势。

1.4 统计分析方法

利用 SPSS 22 统计各指标年均值并进行线性趋势拟合，采用独立样本 *t* 检验评估水源地湖泊和水库透明度、氮磷营养盐等水质参数平均值差异，其中 $p\leq0.05$ 被认为统计上显著，$p\leq0.01$ 被认为统计上极其显著；利用 ArcGIS 9.2 绘制湖库型集中式饮用水水源地、水源地湖库以及透明度空间分布图，采用 OriginPro 2018 绘制各指标数据曲线图。

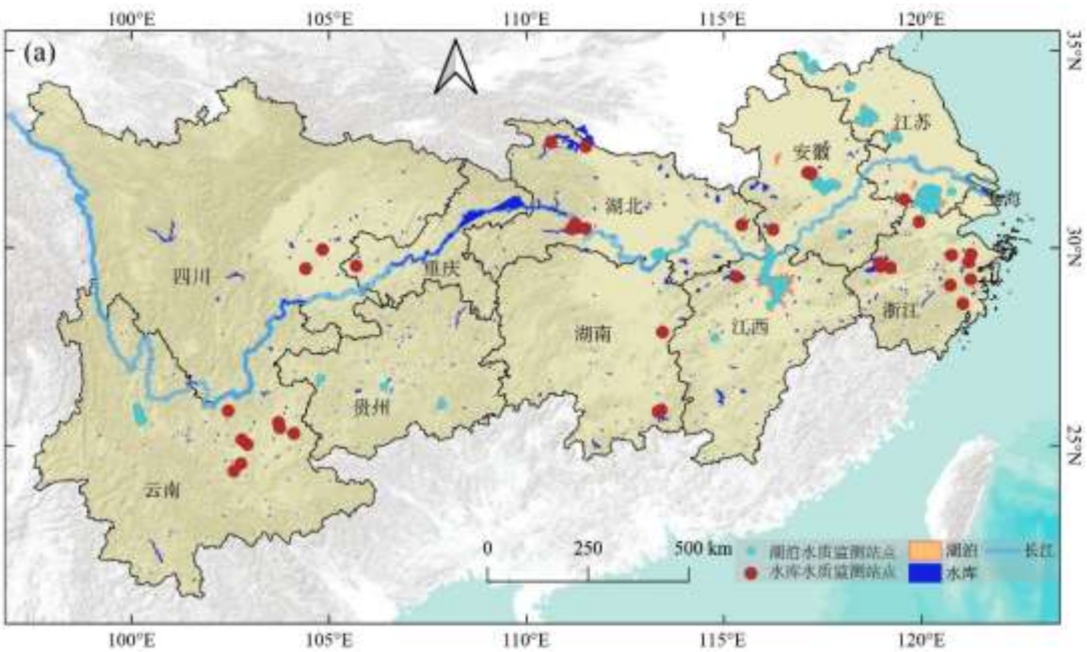

图 1 长江经济带开展长期水质监测的水源地湖库及其监测站点分布

Fig. 1 Spatial distributions of drinking water lakes and reservoirs, and sampling sites with long-term water quality monitoring

2 结果与讨论

2.1 湖库集中式饮用水水源地分布与变化

为提升人民群众饮水安全保障水平，国家采取了一系列饮用水水源地保护修复工程和管理措施，建立饮用水水源保护区制度，编制和发布饮用水水源地名录，开展重要饮用水水源地达标建设、生态隔离带建设、风险源评估和水质监测。我国集中式饮用水水源地可以分为湖库型、河流型和地下水型。统计分析长江经济带沿线 11 个省市集中式饮用水水源地数据集，结果显示共有 1557 个县级及以上集中式饮用水水源地，相比于已有研究和数据集，水源地数量大幅增加[13,22]，实现了数据动态更新，解决了传统水源地名录 5-10 年更新周期的滞后性问题，并补充完善了水源地湖库位置和面积等基础地理信息。从集中式饮用水水源地空间分布来看，水源地数量前三的分别是四川、云南和贵州（表 1），地处长江经济带上游，人口分布相对分散，单个集中式饮用水水源地服务人口相对较少，而上海市人口集中，尽管只有 4 个水源地，但服务了将近 2500 万人口。

表 1 长江经济带沿线 11 省市 2025 年不同类型水源地数量和占比
Tab.1 Number and proportion of different types of drinking water sources in 11 provinces along the Yangtze River Economic Belt in 2025

		湖库型	河流型	地下水型	总数	湖库型占比	河流型占比	地下水型占比
云南省	地级	42	4	2	48	87.5%	8.3%	4.2%
	县级及以上	171	51	9	231	74.0%	22.1%	3.9%
四川省	地级	14	34	1	49	28.6%	69.4%	2.0%
	县级及以上	61	180	3	244	25.0%	73.8%	1.2%
重庆市	地级	2	14	0	16	12.5%	87.5%	0.0%
	县级及以上	34	36	0	70	48.6%	51.4%	0.0%
贵州省	地级	22	3	1	26	84.6%	11.5%	3.8%
	县级及以上	128	31	21	180	71.1%	17.2%	11.7%
湖北省	地级	11	28	0	39	28.2%	71.8%	0.0
	县级及以上	66	87	1	154	42.9%	56.5%	0.6%
湖南省	地级	5	26	0	31	16.1%	83.9%	0.0
	县级及以上	44	102	7	153	28.8%	66.7%	4.6%
江西省	地级	7	27	0	34	20.6%	79.4%	0.0
	县级及以上	78	91	1	170	45.9%	53.5%	0.6%
安徽省	地级	9	21	10	40	22.5%	52.5%	25.0%
	县级及以上	40	59	24	123	32.5%	48.0%	19.5%
江苏省	地级	25	31	0	56	44.6%	55.4%	0.0%
	县级及以上	52	74	0	126	41.3%	58.7%	0.0%
浙江省	地级	/	/	/	/	/	/	/
	县级及以上	84	18	0	102	82.4%	17.6%	0.0%
上海市	地级	4	0	0	4	100.0%	0.0%	0.0%
	县级及以上	4	0	0	4	100.0%	0.0%	0.0%
合计	地级	141	188	14	343	41.1%	54.8%	4.1%
	县级及以上	762	729	66	1557	49.0%	46.8%	4.2%

注：上海市 4 个集中式饮用水水源地分别是青草沙水库、东风西沙水库、陈行水库和金泽水库，都属于过水性水库，本文均归为湖库型水源地

从水源地级别和类型来看，长江经济带沿线 11 省市 2025 年地级集中式饮用水水源地 343 个（扣除浙江省），其中湖库型、河流型和地下水型集中式饮用水水源地数量分别为 141 个、188 个和 14 个，各自占比分别为 41.1%、54.8%和 4.1%，河流型占比最高；县级及以上集中式饮用水水源地共有 1557 个，其中湖库型、河流型和地下水型集中式饮用水水源地数量分别为 762 个、729 个和 66 个，各自占比分别为 49.0%、46.8%和 4.2%，湖库型占比最高（表 1、图 2）。在河流水系密布和地表水资源丰沛的长江流域，地下水型水源地数量和占比非常低可以理解，但传统上一般认为河流型水源地占比最高[13,22]，2025 年地级集中式饮用水水源地中河流型占比也确实最高（但扣除湖库型水源地占比非常高的浙江省），超过 50%，但县级及以

上集中式饮用水水源地数据集显示湖库型水源地占比最高，已接近半壁江山，并且明显高于全国平均值40.8%[18]。空间上，上海、云南、贵州和浙江三省一市湖库型水源地占比非常高，均超过 70%，四川和湖南两省湖库型水源地占比较低，均低于 30%，其主要水源地类型为河流型。由于有些单个湖库其集中式饮用水水源地数量不止 1 个，如太湖分布有无锡、苏州和湖州等城市 9 个集中式饮用水水源地（贡湖锡东水源地、贡湖沙渚水源地、贡湖金墅湾水源地、镇湖上山水源地、渔洋山水源地、赤前水源地、北亭子港水源地、庙港水源地、湖州市太湖水源地），因此 762 个湖库型水源地实际分布在 23 个湖泊和 682 个水库（图 3），其中水库占绝对主导地位。

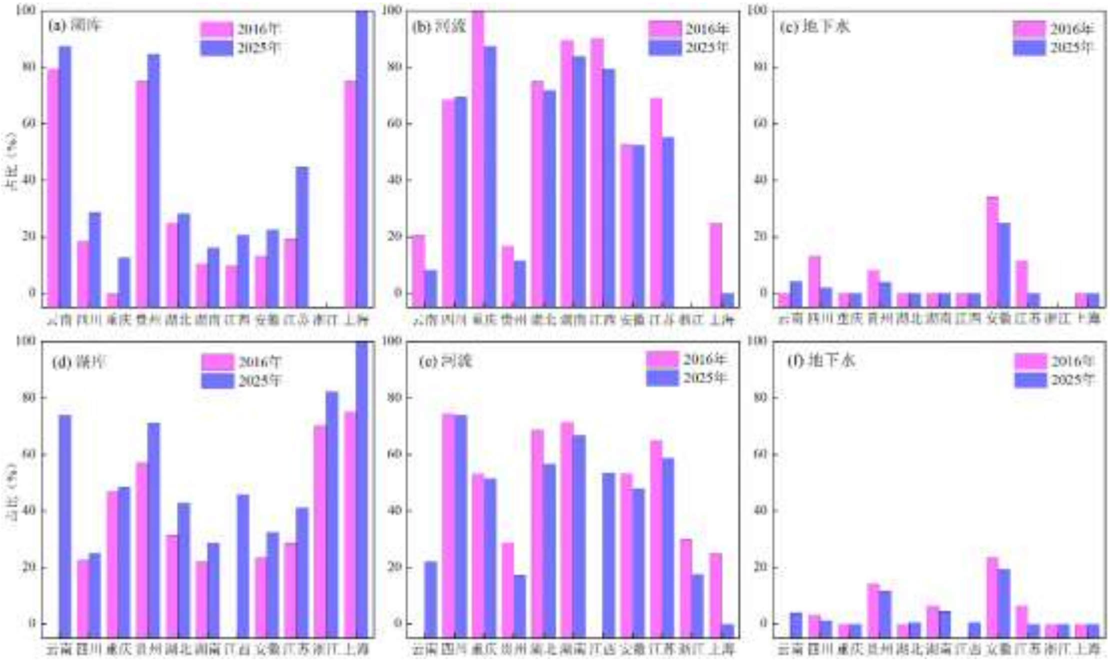

图 2 长江经济带沿线 11 个省市 2016 年和 2025 年地级（a-c）和县级及以上（d-f）不同类型集中式饮用水水源地占比变化（注：浙江省没有区分地级和县级集中式饮用水地；云南省和江西省 2016 年缺县级集中式饮用水水源地名录）

Fig. 2 Changes in the proportion of different types of centralized drinking water sources at the prefecture-level (a-c), prefecture-level and county-level (d-f) of the 11 provinces along the Yangtze River Economic Belt in 2016 and 2025 (Note: Zhejiang Province does not distinguish between prefecture-level and county-level centralized drinking water sources; Yunnan Province and Jiangxi Province lacked a list of county-level centralized drinking water sources in 2016)

对比分析 2016 年和 2025 年不同类型集中式饮用水水源地数量占比变化，可以发现无论是地级还是县级及以上集中式饮用水水源地，长江经济带沿线 11 个省市过去 10 年湖库型水源地的占比均有所上升，即便是湖库型水源地数量和占比已很高的云南和浙江两省（表 1、图 2）。11 个省市平均起来，地级、县级及以上湖库型集中式饮用水水源地占比分别由 30.1%上升到 41.1%、36.9%上升到 49.0%，相伴随的是河流型和地下水型集中式饮用水水源地占比则有所下降。上述变化趋势与全国研究结果一致，也充分彰显湖库在保障长江经济带沿线省市城市供水和饮用水安全中的作用愈发凸显[18]。长江经济带所处的长江、淮河和钱塘江流域虽河网密布，但河流型水源地易受季节性流量变化、上游污染及干旱和洪水等极端气候水文事件影响，而湖库的封闭或半封闭水体特性赋予其更强的抗干扰能力和韧性。通过自然调蓄功能，湖库可有效缓冲干旱与洪涝等极端事件的冲击，维持相对稳定的水位与水质。例如，2022 年长江流域极端干旱期间，太湖、丹江口等大型湖库通过提前蓄水与科学调度，为周边无锡、苏州、上海以及南水北调中线沿线城市提供了关键水源，保障了一亿多人口的饮用水安全。

在人口密集、用地紧张的长三角地区，如上海和浙江，水源地湖库通过跨区域调水工程（如东太湖-金泽水库-上海引水工程、千岛湖-杭州-嘉兴供水工程），实现了水资源和优质水源的空间优化配置，支撑了区域产业集群与城市居民生活的双重需求[23,24]。另外，长江经济带水源地湖库还为京津冀豫提供了充足的优质水源。以丹江口水库为例，其作为南水北调中线工程的核心水源地，2014 年正式通水至今已累计向北方调水突破 700 亿 m^3，使沿线京津冀豫四省市直接受益人口超过 1.14 亿人，为沿线 26 座大中城市 200 多个县市区经济社会高质量发展提供了有力的水资源支撑和水安全保障，是保障北方受水区供水安全的“生命线”，成为跨流域水资源调配的典范[18]。这种“湖库水源地-输水网络-受水区”的联动模式，凸显了湖库在解决水资源时空分布不均和饮用水安全保障中的关键作用。

2.2 湖库透明度长期变化

研究分析了长江经济带 1986 年至 2024 年饮用水水源地湖库透明度的空间分布和长期趋势。总体而言，在研究的 350 个湖库中，221 个湖库的透明度在 39 年间呈现上升趋势，而 129 个湖库的透明度趋于降低，透明度上升的湖库明显多于透明度下降的湖库，表明湖库整体变清，与全国湖库长期变化趋势一致[18,25]。湖

库平均透明度从 1986 年的 1.41 ± 0.78 m 提升至 2024 年的 1.94 ± 1.35 m，增幅为 37.8%。空间格局分析表明，湖库透明度的长期变化存在较强的空间异质性，其中湖北与浙江等省份的多数水源地湖库透明度呈现升高的趋势。此外，对湖库长期平均透明度分析显示，湖泊与水库透明度分布和长期变化趋势存在明显分异。在 39 年的研究期间内，湖泊平均透明度（0.95 ± 0.19 m）显著低于水库平均透明度（1.78 ± 0.24 m）（*t*-test，$p \le 0.01$）；从 1986 年到 2024 年，湖泊透明度总体呈下降趋势，而水库的透明度有显著的改善，透明度变化速率分别为 -0.103 m/10a 和 0.182 m/10a（图 4）。由于大部分水库都位于山区和河流上游，流域植被覆盖度高，并远离城市和工业区，因此水质整体较好，水体透明度较高并且水资源丰沛，是城市集中式饮用水水源地优选，因此湖库型水源地中水库水源地占比也占绝对主导地位。同时，国际上研究也显示，平原和低海拔地区人口日益依赖山区优质水资源供给[26]。

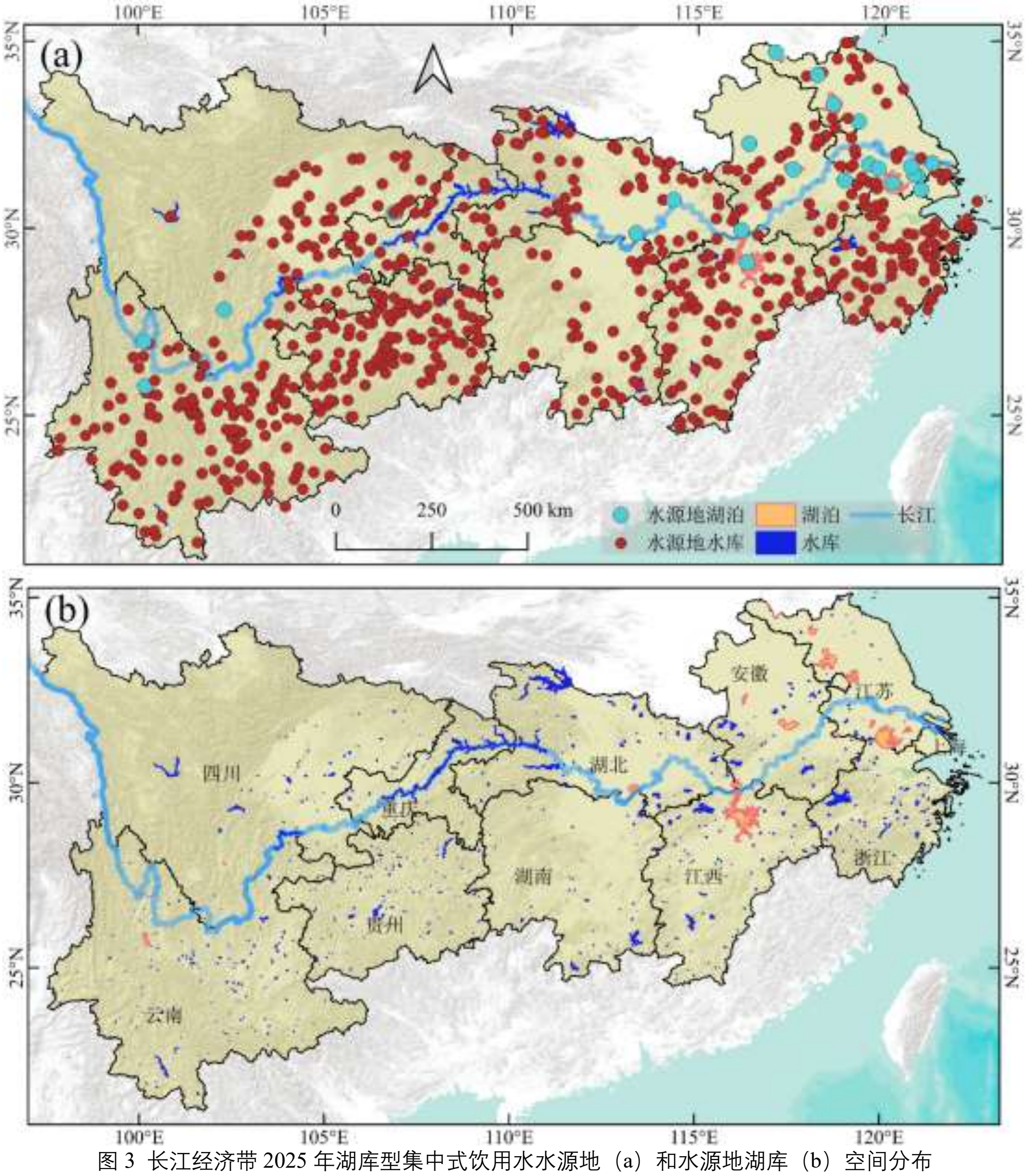

图 3 长江经济带 2025 年湖库型集中式饮用水水源地（a）和水源地湖库（b）空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of lake or reservoir-type centralized drinking water sources (a) and drinking water source lakes and reservoirs (b) along the Yangtze River Economic Belt in 2025

2.3 氮磷等关键水质长期变化

长江经济带水源地湖库的水环境和水质安全直接关系到沿线 11 省市人口的饮用水安全和区域生态安全。近年来，流域经济快速发展叠加城镇化进程加速，工业废水、农业面源污染和生活污水排放使得水环境压力持续增大，湖库富营养化及引发的蓝藻水华和水源地水质风险日益增加，严重威胁饮用水源质量和供水安全。2005 年以来，国家相继实施了《水污染防治行动计划》、《重点流域水污染防治规划》等重大环保政策，并在长江经济带重点推进了水源地保护和水环境综合治理工程。

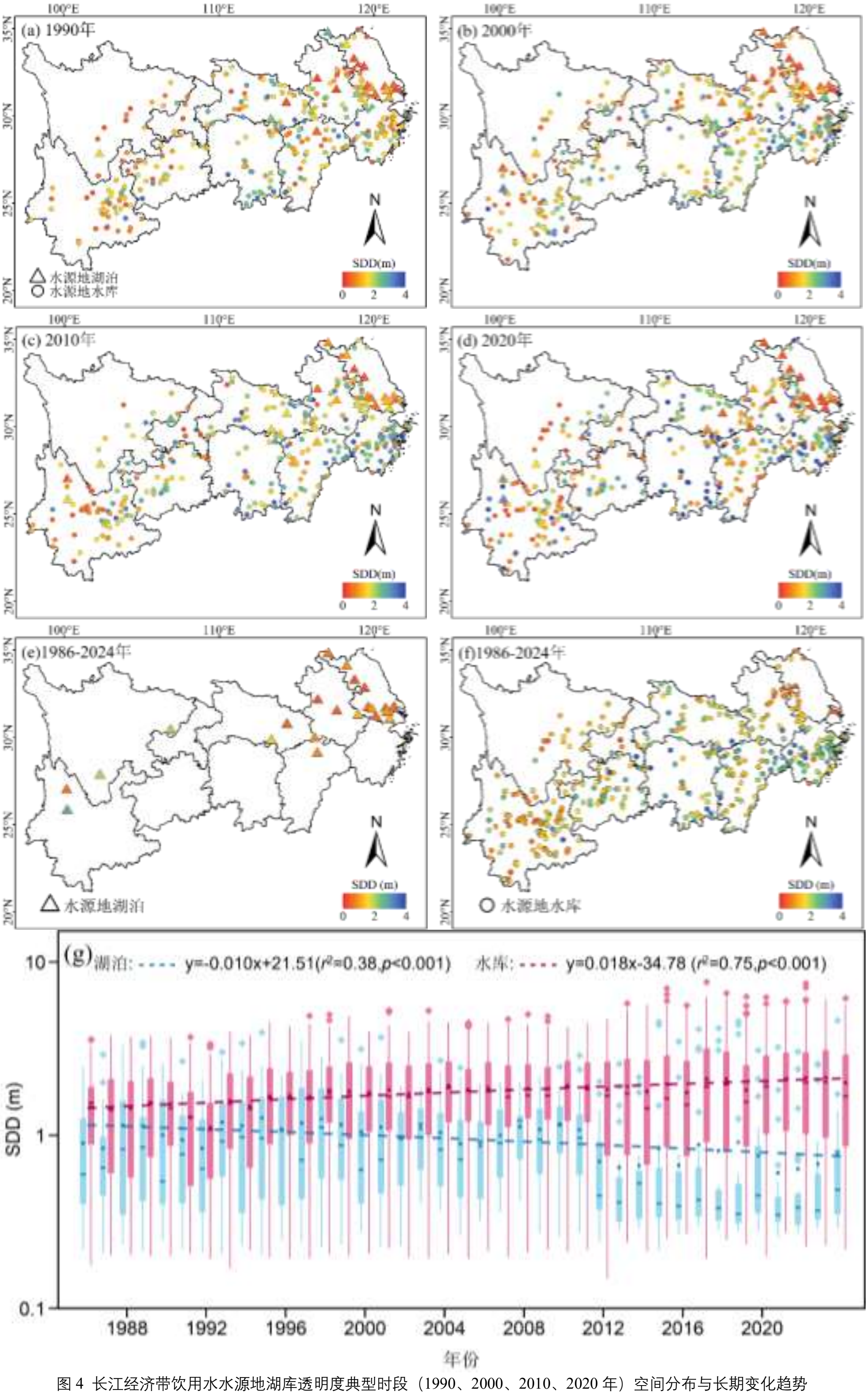

图 4 长江经济带饮用水水源地湖库透明度典型时段（1990、2000、2010、2020 年）空间分布与长期变化趋势

Fig. 4 Spatial distribution of transparency during four typical periods (1990, 2000, 2010, 2020) and long-term trends of transparency at drinking water sources lake and reservoir in the Yangtze River Economic Belt

本文基于 2005-2024 年间长江经济带水源地湖库水质（以溶解氧、总氮、氨氮、总磷和生化需氧量为指标）的长期变化趋势，系统评估过去 20 年水环境治理政策和工程实施的成效。研究结果表明，湖库水质改善显著，溶解氧明显上升，而总氮、氨氮、总磷和生化需氧量则显著下降，其中总氮和总磷分别由 2005 年的 1.90 mg/L 和 0.100 mg/L 降低到 2024 年的 1.30 mg/L 和 0.052 mg/L，分布降低了 31.6%和 48.0%；进一步对比分析发现，湖泊水体的总氮、氨氮、总磷和生化需氧量浓度均显著下降（$p < 0.001$），其中氨氮的改善最为明显（图 5）；而水库水体中除总氮外，其余三项指标亦呈现显著降低趋势。这主要得益于农田氮磷使用量的大幅减少，以及城市生活污水处理环境基础设施建设和工业污染源治理投入的显著增加[18,19]。值得注意的是，水库总氮浓度未呈现显著变化（$p > 0.05$）。相较于湖泊较强的水体交换能力，水库具有长期水力滞留特征，氮循环复杂，同时，水库初始总氮浓度较低（平均 0.81 mg/L），限制了其下降空间。总体而言，水库各指标浓度显著低于湖泊，具有较好的本底水质条件。如 2005-2024 年，水源地水库总氮、氨氮、总磷和生化需氧量浓度多年平均值分别为 0.93 mg/L、0.104 mg/L、0.020 mg/L 和 1.38 mg/L，显著低于水源地湖泊多年平均值 1.57 mg/L、0.298 mg/L、0.076 mg/L 和 2.50 mg/L（*t*-test，$p \le 0.01$）。从水质改善效果来看，湖泊整体优于水库，反映湖泊治理强度和成效更明显，但由于长江经济带湖泊大多位于江淮洪泛泛平原，属于富营养化浅水湖泊，尽管改善成效明显，就绝对浓度而言仍明显偏高，2024 年总氮和总磷平均浓度分别为 1.46 mg/L 和 0.065 mg/L，显著高于藻类快速生长和藻华形成的氮磷阈值（分别为 0.80 mg/L 和 0.050 mg/L）[27]，因此氮磷水质下降对藻类生物量的控制和由此带来的透明度的改善非常有限。更为重要的是，长江经济带广泛分布的浅水湖泊水下光环境和透明度主要受制于无机悬浮颗粒物浓度，受控于沉水植被分布和风浪扰动引起的沉积物再悬浮影响[28-31]。过去这些年长江经济带湖泊尽管氮磷浓度有所下降，水环境质量有所改善，但草型生态系统并没有得到有效恢复，甚至出现沉水植被退化趋势和草藻生态系统转换[7,32,33]，降低了对沉积物再悬浮的固化和抑制作用，一定程度上增加无机颗粒物浓度和水体浑浊度，进而造成湖泊透明度的下降[28,31]，这很好解释了湖泊水质改善效果优于水库，而透明度不但没有升高反而有所降低（图 4、图 5）。

空间分析显示，长江经济带沿线 11 个省市的水质参数变化幅度具有一定的空间异质性，反映了人类活动与气候变化压力的区域差异（图 6）。2019-2024 年与 2005-2009 年对比数据显示，氨氮浓度在所有省市均呈现下降趋势，且下降幅度显著，反映点源污染控制政策的普遍成效；而湖北、贵州、江西和上海的总氮以及四川、浙江两省的生化需氧量却呈现逆势上升，凸显了水源地水质治理的复杂性和长期性。定量分析表明，总氮、氨氮、总磷及生化需氧量的平均浓度分别从 2005-2009 年的 1.29 mg/L、0.323 mg/L、0.055 mg/L 和 2.02 mg/L，降至 2019-2024 年的 1.12 mg/L、0.056mg/L、0.035 mg/L 和 1.37 mg/L，降幅分别达 13.1%、82.5%、37.2%和 32.0%，表明长江经济带水源地湖库水质整体得到显著改善，也揭示了不同污染物控制进程的差异性。但我们也注意到，从目前中国环境监测总站长期定位监测数据来看，仅涉及 15 个水源地湖泊和 32 个水源地水库，还远远没有覆盖长江经济带 23 个水源地湖泊和 682 个水源地水库，未来需要强化监测，及时掌握和了解全流域乃至全国饮用水水源地水质变化，保障饮用水安全。

太湖和巢湖作为国家十五以来“三河三湖”治理重点区域，其水环境变化历来受到广泛关注，由于严重的湖泊富营养化和频繁蓝藻水华暴发，巢湖已退出合肥市主城区饮用水水源地，只保留巢湖市的县级集中式饮用水水源地。图 7 显示太湖和巢湖 2005 年以来水质变化，整体呈现显著改善，但各水质指标在太湖和巢湖的表现不完全一样。太湖总氮、氨氮和生化需氧量下降非常显著，分别达 61.4%、96.4%和 37.1%，总磷改善相对缓慢，为 30.3%；而巢湖氨氮、总磷和生化需氧量下降非常显著，分别降低 89.9%、68.7%和 39.1%，总氮改善相对缓慢，为 24.8%。具体而言，太湖的氨氮浓度、巢湖的氨氮与总磷浓度较 2005 年水平降幅显著高于流域平均水平，特别是太湖 2024 年水质全面达到III类，为有监测数据以来最好水平，首次全年达到国家良好湖泊标准，反映出重点湖泊治理修复取得了显著成效。

整体上，长江经济带水源地湖库水质呈现明显改善，标志着环境治理与水资源管理取得了积极成效。同时，饮用水水源地水库透明度的提升也一定程度上反映了水环境质量改善，进而促使越来越多的城市选择水库作为集中式饮用水水源地（图 2），水库传统的发电、农业灌溉、水产养殖等功能逐步让位于饮用水安全保障。如为了保障南水北调中线工程的顺利实施，丹江口水库于 2005 年启动大坝加高工程，历时 8 年丹江口大坝从 162 米加高至 176.6 米，正常蓄水位升至 170 米，2014 年启动给京津冀豫供水。又如千岛湖（新安江水库）20 世纪 50 年代最初建设时旨在发电，为上海提供稳定电力供应，2019 年 9 月千岛湖配水工程正式通水运行，目前每年为浙江省杭州市和嘉兴市的 1000 多万市民提供 9.78×10^8 m^3一、二类水优质水源。

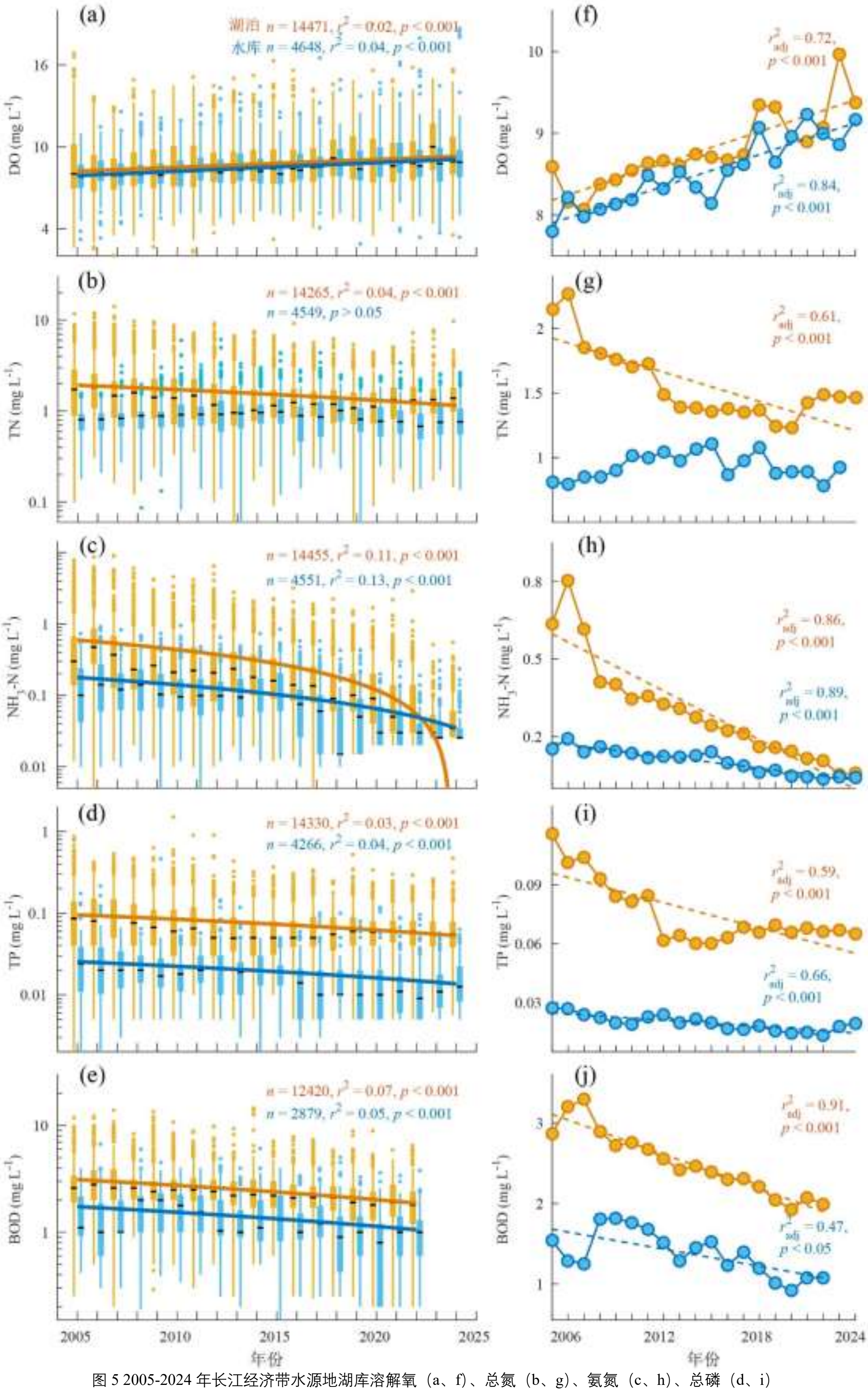

图 5 2005-2024 年长江经济带水源地湖库溶解氧（a、f）、总氮（b、g）、氨氮（c、h）、总磷（d、i）和生化需氧量（e、j）长期变化趋势

Fig. 5 Long term trend of dissolved oxygen (a, f), total nitrogen (b, g), ammonia nitrogen (c, h), total phosphorus (d, i), and biological oxygen demand (e, j) of drinking water source lakes and reservoirs along the Yangtze River Economic Belt from 2005 to 2024

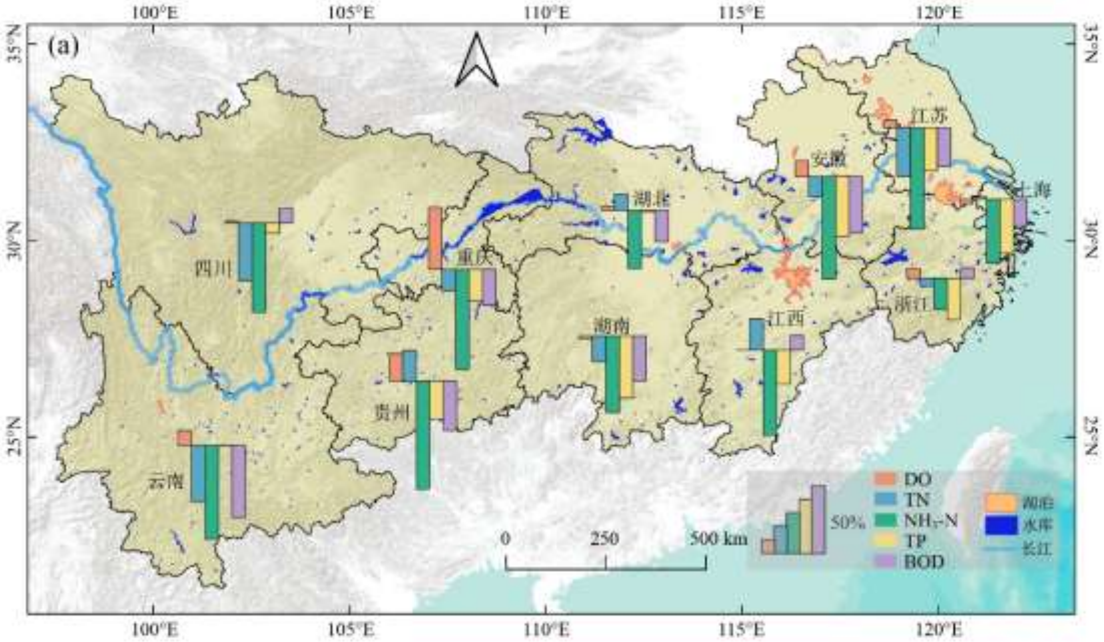

图 6 长江经济带沿线 11 个省市溶解氧、总氮、氨氮、总磷和生化需氧量 4 关键水质参数 2019-2024 年相比于 2005-2009 年变化

Fig. 6 The percent changes of four water quality parameters of drinking water source lakes and reservoirs in 11 provinces along the Yangtze River Economic Belt in 2019–2024 compared to that in 2005–2009. DO: dissolved oxygen, TN: total nitrogen, NH4 -N: ammonia nitrogen, TP: total phosphorus, BOD: biochemical oxygen demand.

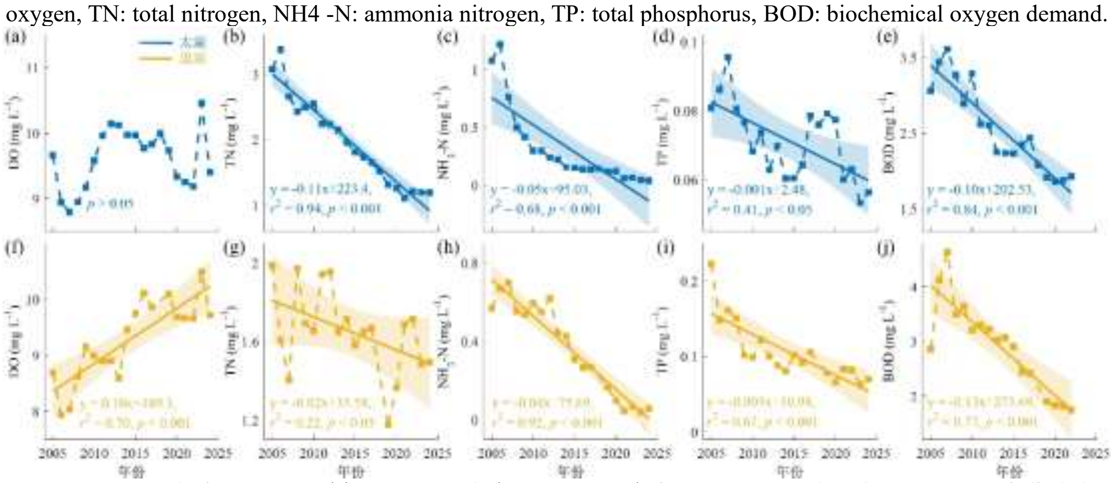

图 7 2005-2024 年太湖和巢湖总氮（a、e）、氨氮（b、f）、总磷（c、g）和生化需氧量（d、h）长期变化趋势

Fig. 7 Long term trend of total nitrogen (a, e), ammonia nitrogen (b, f), total phosphorus (c, g), and biological oxygen demand (d, h) of Lake Taihu and Lake Chaohu from 2005 to 2024

3 结论与展望

长江是我国重要的战略水源地，事关国家发展和长治久安，保护好长江流域饮用水水源地是强化流域治理管理、保障长江经济带“共抓大保护，不搞大开发”国家重大战略落地见效的重要基础。本文研究结果显示，湖库凭借其调蓄能力、水质持续改善及抵御极端干旱和洪水的韧性等，已成为长江经济带城市饮用水安全的“压舱石”，在全部 1157 个县级及以上集中式饮用水水源地中湖库型水源地占比接近 50%，未来还有望继续提升。2016-2025 年湖库型集中式饮用水水源地数量和占比均显著提升，其中地级、县级及以上湖库型集中式饮用水水源地占比分别由 30.1%上升到 41.1%、36.9%上升到 49.0%，并且湖库透明度显著提升、氮磷等关键水质持续改善，这不仅反映了区域水资源管理策略的转型，更预示着未来在保障民生、支撑经济与维护生态平衡中，湖库将持续发挥不可替代的核心作用。

然而，为保障洁净水源供给，水源地湖库保护治理与可持续发展仍面临诸多问题和严峻挑战。流域外源污染负荷过高叠加内源污染释放仍是湖库水质继续趋好的主要威胁，当前部分湖库（如太湖、巢湖）氮磷营养盐超标及其引发的微囊藻水华问题尚未根本解决，同时尖头藻等弥散性新型水华不断扩张[18,34,35]。与此同时，沉水植被退化、外来物种入侵和生物多样性下降等生态退化风险日益凸显[7,36-38]。例如，根据太湖健康状况报告[39]，2020-2024 年环太湖河流总氮和总磷负荷分别是 33871 吨和 1801 吨，相比于 2010-2014 年的 46879 吨和 2141 吨已分别下降了 27.7%和 15.9%，但当前总磷入湖负荷仍是国家发改委《太湖流域水

环境综合治理总体方案》确定的总磷环境容量 3 倍以上。此外，全球气候变化和极端气候事件也加剧湖库干旱和洪涝风险，增加水资源供给的不确定性[40-42]。因此，未来需进一步强化湖泊科学研究、技术研发和流域管理，深入理解水源地湖库水质和藻华风险形成机制，研发经济高效的内外源污染负荷削减技术，构建绿色低碳流域发展模式；利用多源卫星遥感、人工智能与物联网技术实现水质实时监测与预警，提升饮用水水源地监督管理能力；加强湖泊健康和水生态评价体系构建，将生物多样性、水生态功能等指标纳入考核，着力提升湖泊健康水平；完善流域生态补偿机制，探索"谁保护、谁受益"的激励模式。此外，湖库作为"绿色基础设施"，其调蓄功能在应对水资源短缺和全球气候变化中具有不可替代的战略价值，通过提升湖库气候韧性，可为长江经济带水安全保障提供重要支撑。

4 参考文献

[1] 胡春宏，张双虎. 长江经济带水安全保障与水生态修复策略研究. 中国工程科学, 2022, 24(1): 166-175.

[2] 张运林，秦伯强，朱广伟, et al. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. 科学通报, 2022, 67(30): 3503-3519.

[3] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.

[4] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊生态环境研究报告. 北京：科学出版社, 2023.

[5] Song C, Fan C, Zhu J, et al. A comprehensive geospatial database of nearly 100 000 reservoirs in China. Earth System Science Data, 2022, 14(9): 4017-4034.

[6] 马荣华，杨桂山，段洪涛, et al. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学:地球科学, 2011, 41(3): 394-401.

[7] 张运林，张毅博，周永强, et al. 生态文明建设以来长江中下游湖泊水生态环境变化. 人民长江, 2023, 54(1): 14-23.

[8] 羊向东，董旭辉，陈旭, et al. 长江经济带湖泊环境演变与保护,治理建议. 中国科学院院刊, 2020, 35(8): 977-987.

[9] 朱广伟，秦伯强，许海, et al. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1510-1524.

[10] Wang S M, Qin B Q, Wen B Q, et al. Climate change influences on algal bloom intensity in lakes in the Yangtze River Basin, China from 1985 to 2022. J Hazard Mater, 2025, 495: 139027.

[11] 邓安军，陈建国，胡海华, et al. 我国水库淤损情势分析. 水利学报, 2022, 53(3): 325-332.

[12] Qin B, Zhu G, Gao G, et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management. Environ Manage, 2010, 45(1): 105-112.

[13] 邓瑞，邓志民，王孟, et al. 长江流域重要饮用水水源地保护长效机制. 长江科学院院报, 2024, 41(7): 8-15.

[14] 李思悦，张全发. 运用水质指数法评价南水北调中线水源地丹江口水库水质. 环境科学研究, 2008, 21(3): 61-68.

[15] Preisendorfer R W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters. Limnol Oceanogr, 1986, 31(5): 909-926.

[16] Zhang Y, Zhang Y, Shi K, et al. Remote sensing estimation of water clarity for various lakes in China. Water Res, 2021, 192.

[17] Zhang Y, Shi K, Sun X, et al. Improving remote sensing estimation of Secchi disk depth for global lakes and reservoirs using machine learning methods. Giscience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1367-1383.

[18] Zhang Y, Deng J, Zhou Y, et al. Drinking water safety improvement and future challenge of lakes and reservoirs. Science Bulletin, 2024, 69: 3558-3570.

[19] Zhou Y Q, Ma J R, Zhang Y L, et al. Improving water quality in China: Environmental investment pays dividends. Water Res, 2017, 118: 152-159.

[20] Huang J C, Zhang Y J, Arhonditsis G B, et al. How successful are the restoration efforts of China's lakes and reservoirs?. Environ Int, 2019, 123: 96-103.

[21] Agency S E P. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. China Environmental Science Press, Beijing: 2002.

[22] 邓瑞，邓志民，王孟, et al. 长江流域饮用水水源地名录管理的思考和建议. 人民长江, 2023, 54(5): 67-72.

[23] 戴晶晶，陈红，彭焱梅, et al. 太浦闸水量水质联合调度对金泽水库水质影响. 水利水运工程学报, 2017, (4): 20-27.

[24] 王立彪，张奔，冯伟华, et al. 千岛湖水源对余杭区供水的影响. 给水排水, 2021, 47(7): 20-25.

[25] Liu D, Duan H T, Loiselle S, et al. Observations of water transparency in China's lakes from space. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 92.

[26] Viviroli D, Kummu M, Meybeck M, et al. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. Nature Sustainability, 2020, 3(11): 917-928.

[27] Xu H, Paerl H W, Qin B, et al. Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. Environ Sci Technol, 2015, 49(2): 1051-1059.

[28] Zhang Y, Qin B, Zhu G, et al. Effect of sediment resuspension on underwater light field in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: A case study in Longgan Lake and Taihu Lake. Science in China Series D, 2006, 49(S1): 114-125.

[29] Shi K, Zhang Y, Zhu G, et al. Deteriorating water clarity in shallow waters: Evidence from long term MODIS and in-situ observations. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 68(1): 287-297.

[30] 张运林, 秦伯强, 朱广伟. 过去 40 年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1348-1359.

[31] Liu X, Zhang Y, Yin Y, et al. Wind and submerged aquatic vegetation influence bio-optical properties in large shallow Lake Taihu, China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118: 713-727.

[32] Xu Y, Luo J H, Duan H T, et al. Satellite-based risk assessment: Shifting from macrophyte- to phytoplankton-dominated states in lakes of Yangtze Plain. Ecol Indicators, 2025, 178: 114096.

[33] Zhang Y, Liu X, Qin B, et al. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu Implications for lake ecological restoration. Scientific Reports, 2016, 6: DOI: 10.1038/srep23867.

[34] Wu Z X, Yang S Q, Shi J Q. Overview of the distribution and adaptation of a bloom-forming cyanobacterium <i>Raphidiopsis raciborskii</i>: integrating genomics, toxicity, and ecophysiology. Journal of Oceanology and Limnology, 2022, 40(5): 1774-1791.

[35] Xiao L J, Xie J, Tan L, et al. Iron enrichment from hypoxic hypolimnion supports the blooming of Raphidiopsis raciborskii in a tropical reservoir. Water Res, 2022, 219.

[36] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, et al. 近 70 年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, 33(4): 957-973.

[37] 杨芷萱, 黎云祥, 朱广伟, et al. 2003—2023 年太湖蓝藻水华面积变化的影响因子分析. 湖泊科学, 2025, 37(3): 734-751.

[38] 曹晓峰, 冀泽华, 兰华春, et al. 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. 中国工程科学, 2022, 24(5): 34-40.

[39] 水利部太湖流域管理局. 2024 太湖健康状况报告[R]. 2024: 1-28.

[40] Zhang Y, Ren Z, Zhou Y, et al. Varied responses of inland waters to compound heatwave-drought events in the Yangtze River Basin. Sci Total Environ, 2025, 996(996): 180185.

[41] Wang R, Li X H, Zhang Q, et al. Projection of drought-flood abrupt alternation in a humid subtropical region under changing climate. Journal of Hydrology, 2023, 624.

[42] Woolway R I, Zhang Y L, Jennings E, et al. Extreme and compound events in lakes. Nature Reviews Earth & Environment, 2025, 6(9): 593-611.