



长江流域水域及消落区现状、变迁与渔业资源变动

王琳¹, 丁放¹, 曹坤¹, 袁立来¹, 毛智慧¹, 李慧峰²,
张孝勇¹, 李凯¹, 杨文波¹, 李小恕¹, 李慧琴¹, 张辉²,
吴金明², 杨海乐², 朱挺兵², 杨德国², 倪朝晖²,
李云峰², 林祥明^{1*}, 李应仁^{1*}, 危起伟^{2*}

(1. 中国水产科学研究院资源与环境研究中心, 农业农村部渔业遥感科学观测实验站, 北京 100141;
2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223)

摘要: 采用中-大尺度遥感监测手段, 对长江流域水域及消落区开展调查与分析, 重点阐述长江流域从自然水体为主向人工水面为主的变化趋势, 及其对长江流域天然渔业资源衰退的潜在影响。结果显示, 近 40 年全长江流域历史最大水面约 63 360 km², 最小水面约 26 396 km², 历史最大消落面积约 36 964 km²。2019—2020 年“一江两湖七河”最大水面约为 19 663 km², 最小水面约为 14 281 km², 消落区面积 6 337 km², 其中反季节性消落区 633 km²。2001—2020 年和 1984—2000 年两时段相比, 地表水减少水面中超过 80% 来自于具有自然水文情势的消落区, 而新增水面中, 由于水库充填导致的河流水面增加达 5 500 km², 致使长江流域水域类型组成结构发生了巨大转变, 自然水体占比不足 20 世纪 80 年代的一半, 而同时期的鱼类资源现存量也下降为 20 世纪 80 年代的一半。本研究首次明确反季节性消落区的概念, 探讨了长江流域河流梯级水库充填形成的反季节性消落区与鱼类“三场”(产卵场、索饵场和越冬场) 关键栖息地丧失的关系。

关键词: 水库充填; 消落区; 栖息地; 水文情势; 长时间序列; 多尺度遥感; 长江
中图分类号: S 931 **文献标志码:** A

长江流域多样化水域生境供给了超过 4 300 种的水生生物物种的生存和繁衍。“长江渔业资源与环境调查”专项(2017—2021)采集到鱼类共 20 目 39 科 323 种, 其中除 135 种历史有分布的鱼类未采集到之外, 还新采集到 15 种外来鱼类^[1]。长江流域鱼类种类之丰富居全国各水系之首^[2], 是我国最重要的养殖品种主体来源和种质资源宝库。然而, 随着 20 世纪 70 年代的钱塘江和 90 年代的长江赣江鲟绝迹, 2007 年的白鱈豚功能性灭绝,

及 2020 年的长江白鲟标志性灭绝, 2000 年以来长江流域的捕捞产量衰退至 20 世纪 50 年代的 1/4, 年产量不足 10 万 t, 经济渔业生物资源特别是大型经济鱼类全面走向枯竭, 导致长江干支流几乎“无鱼”^[3], 造成这些结果的主要原因来自于由水资源过度利用、水利工程建设造成的径流改变, 以及水体污染和外来物种入侵等导致的栖息地丧失或退化^[4-5]。上述状况使得包含了“河漫滩”、“洪泛平原”等自然消落区在内的河流、湖泊、湿地等长

收稿日期: 2022-10-01 修回日期: 2023-01-15

资助项目: 农业农村部财政专项“长江渔业资源与环境调查”(2017-2021); 中国水产科学研究院基本科研业务费(2018HY-ZD0101); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费(2020TD11)

第一作者: 王琳(照片), 从事渔业遥感方向研究, E-mail: angels121@cafs.ac.cn

通信作者: 林祥明, E-mail: linxm@cafs.ac.cn; 李应仁, E-mail: liyr@cafs.ac.cn; 危起伟, 从事水生生物多样性保护和利用研究, E-mail: weiqw@yfi.ac.cn



江流域现存的水生生物栖息地更加弥足珍贵。特别是近年来, 随着长江干流三峡大坝、向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德、观音岩、鲁地拉等十余座特大型水库的建设, 形成了庞大的新型库区人工消落带, 其调蓄引起的河流水文情势逆转和径流量改变, 造成了库区岸带生态环境及水生生物优势种群和组成结构的巨大改变, 也使之成为现阶段河流生态环境治理和生物栖息地修复关注的热点问题^[6-7]。

消落区 (water fluctuation zone) 又称消落带, 是地表呈现出水相和陆相交互变换的区域。按水体消涨变化频率, 水体消落可分为昼夜、月相、季节、年际或多年消落等几种类型。按形成原因, 可分为自然消落区和人工消落区。二者区别在于, 前者的水体消涨周期通常与降水、高山融雪等自然水文节律一致, 而后者往往随人为利用方式的调节, 使水文情势发生逆转, 水体的消涨变化表现为紊乱的或显著的反季节性特征。长江流域消落区分布范围广, 类型多样, 形成原因和功能各异, 数量众多, 生境复杂, 在维持河、湖(库)岸水生生物多样性及水域生态系统平衡, 充当生态安全屏障以保护河流、湖泊和水库生态系统健康、支撑区域经济发展等方面, 发挥着至关重要的作用^[8-9]。定量分析水体的消涨变化及其驱动因素对维护流域生态与环境安全具有十分重要的意义。对大空间范围来说, 遥感是唯一可行的环境变化监测手段^[10]。借助该技术可克服水体季节性消落造成的野外实地调查中所面临的人员不可到达性问题, 满足典型生境信息的定量获取要求。特别是近年来, 随着 GEE(Google earth engine) 等以全球卫星观测数据为支撑的云计算遥感数据服务平台的不断发展^[11-14], 一些基于该平台开展的区域乃至全球水体空间分布制图研究已获得了对长期水陆转变特征的初步结论^[15-17]。Pekel 等^[18]研究表明, 全球自 1984 年至 2015 年间损失了约 90 000 km² 的永久性水体, 同时新增了 184 000 km² 的永久水面, 除气候变化影响外, 大部分新增水面来自水库充填。而同时期, Donchyts 等^[19]也采用全球卫星遥感数据开展了关于全球地表水体变化的研究, 其结果显示自 1985—2015 年同时期, 全球约 173 000 km² 的水体转变为陆地, 同时 115 000 km² 的陆地转变为水体。上述两项研究结果存在较大差异, 主要原因在于 Pekel 等^[18]采用了空间分辨率更高的卫星遥感数据, 同时他们还将地表水进一步划分为永久性水体和季节性水体, 开展了永久水、季节性水及陆地之间转变的过程分析。

水陆之间的变化是地表变化中最剧烈和频繁的过程之一, 据刘宇晨等^[17]对长江流域地表水体提取和分析的研究结果显示, 长江流域仅 2017—2020 年, 处于水陆季节性变化的水体面积即达 13 403.86 km²。因此, 当我们分析地表水的类型组成结构及其改变对水生生物生境支持功能的影响时, 必须考虑季节性水体消落的巨大影响。而本研究进一步提出, 在考虑水体消涨变化的同时, 还应同时考虑消落的时段, 根据消落时段与自然水文周期涨落的一致性与否, 将自然水文情势的消落区和反季节性消落区进行区分, 特别要关注由于河流水库充填形成的新型反季节性消落区的影响, 它们不仅不具备对生物多样性维护及生物栖息地的生境支持功能, 反而会引发众多环境问题, 需要开展长期的治理和修复^[20-21]。本研究主要采用多尺度遥感观测技术结合实地调查, 对长江流域水域面积历史变迁、现状和类型组成(成因)开展监测与分析, 对消落区现状进行生境制图, 探讨长江流域近 40 年来水生态结构的转变对渔业资源衰退的潜在影响, 及反季节性消落区对土著鱼类“三场”关键栖息地丧失的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

长江流域跨越我国三级阶地和 6 种气候类型^[22], 从河源区河流的平均 5 700 m 海拔至长江口的 -15 m 海拔(采用 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 30 m digital elevation model (DEM) 数据处理获取, <http://srtm.csi.cgiar.org/>), 巨大的落差形成了由穿越高原夷平面的、峡谷的、丘陵的、平原的各种类型河段构成的, 包含了由沱沱河、通天河、金沙江、长江等一级干流, 雅砻江、岷江、嘉陵江、汉江等 4 个二级支流, 大渡河、乌江、沅江、湘江、赣江等 5 条三级支流, 以及 60 条四级支流和 524 条五级支流等(传统河流分级系统下)组成的河流总长度约 28.8 万 km(Open Street Map, <https://www.openstreetmap.org/>), 以及鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖、洪泽湖等众多湖泊在内所构成的庞大水系。

1.2 长江流域水域变化信息提取

主要采用欧盟委员会联合研究中心 (JRC) 提供的, 空间分辨率为 30 m, 时间分辨率为每月的, 长时间序列水体表面 GSW (global surface water, GSW) 数据集^[18], 开展长江流域近 40 年来地表水

面积的多年消涨变化分析, 掌握长期变化趋势及主要原因。JRC全球水体数据集^[18]中长江流域1984—2020年的历史月度水体数据 (monthly water history, MWH) 共3 456副, 每幅水体分布数据中包含陆地、水体、无效观测3种类型值。具体处理过程如下:

①首先, 对原始水体栅格数据按10 000×10 000像素范围进行标准图幅分割, 将1984—2000年及2001—2020年两时段内所有年份中同一月份的水体观测WD(water detection)数量之和, 与对应月份的各年有效观测VO(valid observation)数量之和相除, 得到研究区每个像元所在位置两时段内的多年逐月水体出现频率 $ISWOF_{month, i}$ (公式1和公式2);

②其次, 对两时段的逐月水体出现频率进行像素级差值计算 (公式3), 并对各月差值进行加权平均 (公式4), 获得两时段间水体出现频率增加和减少的百分比分布图 (数值分布范围介于-100%~+100%, 数值间隔±1%);

③最后, 将两时段水体出现频率差值变化百分比分布图与2020年最大水体分布范围叠加^[23-24], 通过人工目视随机选取确定新增及减少水体的范围样本, 分别统计新增水体及减少水体样本在水体出现频率差值变化百分比结果中的数值分布直方图, 确定水体出现频率增加百分比高于+30%和减少低于-30%的分布范围作为永久性增加和减少的水体, 变化率介于+1%~+30%及-1%~-30%之间的为季节性增加和减少的水体;

④对1984—2020年全部历史月度水体分布数据的分布范围做空间并集, 获得近40年全长江流域历史最大水面; 做空间交集, 获得历史最小水面; 对上述二者最大和最小历史水面做空间差值获得最大消落区分布范围。

$$ISWOF_{month, i(1984-2000)} = \frac{\sum_{n=1984}^{2000} WD_{month, i}}{\sum_{n=1984}^{2000} VO_{month, i}} \quad (1)$$

$$ISWOF_{month, i(2001-2020)} = \frac{\sum_{n=2001}^{2020} WD_{month, i}}{\sum_{n=2001}^{2020} VO_{month, i}} \quad (2)$$

$$ISWOF_{month, i, change} = ISWOF_{month, i(2001-2020)} - ISWOF_{month, i(1984-2000)} \quad (3)$$

$$ISWOF_{i, change} = \sum_{month=1}^{12} \frac{ISWOF_{month, i, change}}{12} \quad (4)$$

式中, n 代表年份, i 代表研究区范围内某一像素。

1.3 “一江两湖七河”消落区现状信息提取

开展长江流域重点水域消落区现状信息提取, 获得长江流域重要消落区名录。创新建立一套流域生态系统网格化管理、自动化数据采集与定量分析、成果自动归档的消落区分析方法, 采用10 m空间分辨率哨兵-2号高分辨率卫星遥感数据进行全流域覆盖, 获得调查河流、湖泊、水库的消落区的水文节律类型 (自然水文情势、反季节性)、分布位置、面积和生境现状等信息。具体地, 通过大津法^[25]分别提取丰水期和枯水期的水体范围, 通过人工目视解译消除由于建筑物、地形阴影、云阴影等造成的水体分布提取误差。进一步对枯水期水体和丰水期水体互做空间差值, 获得经过人工修正的高精度自然水文情势消落区和反季节性消落区的分布, 其中丰水期减枯水期获得的消落区为自然水文情势消落区, 枯水期减丰水期获得的消落区为反季节性消落区。

1.4 长江流域消落区实地调查及多尺度遥感观测数据获取

2017—2021年, 开展了1次自沱沱河至长江口干流、7条主要一级支流、洞庭湖、鄱阳湖的系统性的消落区实地调查, 收集和分析的数据如表1所示, 数据总量超过20 TB^[1]。此外, 还收集了来自中国科学院空天信息创新研究院湿地遥感研究组发布的The China Water Cover Map (2020/10 m)数据集^[26], 及1949年以来长江宜昌水文站和九江水文站的年最大水位和年平均水位数据 (<http://113.57.190.228:8001/#/web/Report/RiverReport>)。

2 结果

2.1 长江流域近40年水域变化状况及成因

近40年全长江流域历史最大水面约63 360 km², 历史最小水面约26 396 km², 历史最大消落面积约36 964 km², 占比接近历史最大水面面积的60%(图1)。

2001—2020年和1984—2000年两时段相比, 约8 750 km²的水体转变为陆地, 同时约18 700 km²的陆地转变为水体, 若同时考虑消落区分别向陆地和永久性水体的面积变化, 长江流域减少

表 1 研究区数据获取

Tab. 1 Data acquisition in study area

序号 no.	数据类型 data type	空间分辨率 spatial resolution	数据量 data volumes	空间范围 spacial scale	时间范围 time scale
1	SRTM高程数据	30 m、90 m	221副、18副	全流域	2000年
2	JRC水体分布数据	30 m	3456副	全流域	1984—2020年各月
3	Sentinel-2A卫星数据	10 m	1388景	全流域	2017—2020年丰水期和枯水期
4	PlanetScope卫星数据	3 m	4856景	31个重点河段	2020年3个季节
5	Skysat卫星数据	0.6~1 m	93副	31个重点河段	2020年3个季节
6	无人机航拍数据	3 cm	正射图像110958张	85个典型河(湖)段的196个断面 (包含第4项范围)	2020年3个季节
7	实地调查		256份	85个典型河(湖)段的196个断面	2020年3个季节

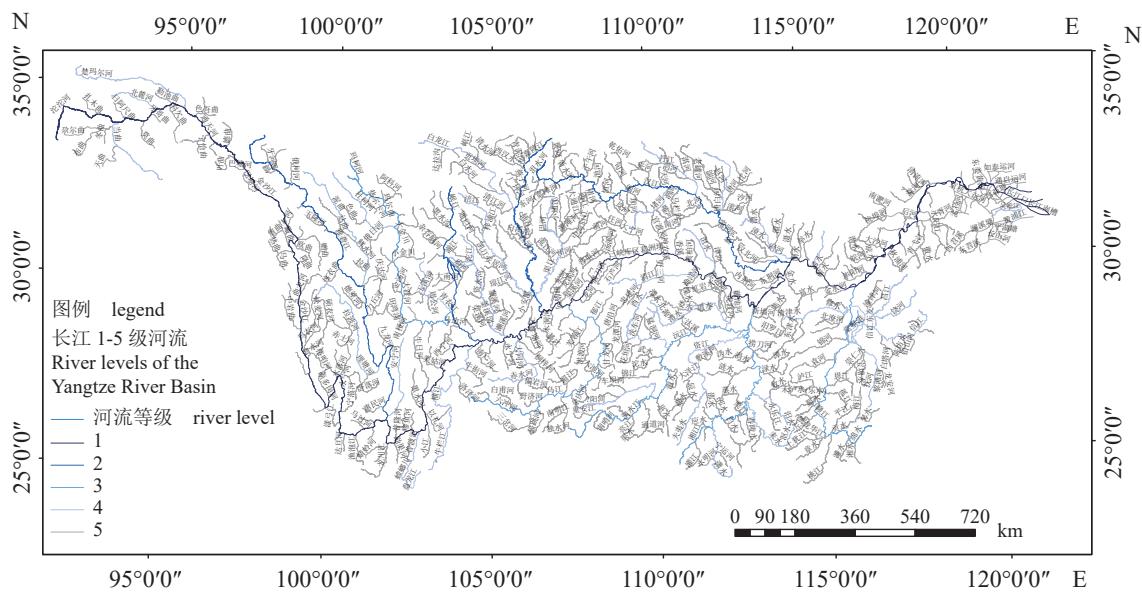


图 1 长江流域水体消涨变化研究范围

Fig. 1 Research range of the water fluctuation area in the Yangtze River basin

的水体面积约达 10 000 km², 新增水体约 20 000 km²。

按三级子流域总和的长江流域水体面积增加和减少的空间分布, 通天河流域和巢滁皖诸河流域的净新增水体面积最多, 增长均在 1 670 km² 上下, 分布在长江流域河源区及中下游长江干流沿线, 同时自葛洲坝沿长江干流至金沙江石鼓以下江段, 也有一定程度的水面增长分布(图 2)。另外, 巢滁皖诸河流域同时也是地表水面积净减少最显著的子流域, 两时段相比减少约 1 350 km², 其次是洞庭湖环湖区流域减少约 1 000 km²。水面减少的区域相对集中分布在长江中下游干流沿线。

长江上、中、下游水体变化表现出不同的结构特征, 来自不同的驱动因素。宜昌至河源区的长江上游水体面积呈现出以 6 300 km² 增加为主的趋势, 面积增加和减少的比例约达 5 : 1, 主要原

因来自受高山雪水融化造成的河源区湖泊面积增加, 及水库充填造成的河流面积增加为主(图 3-a、b); 湖口至宜昌的长江中游流域水面增加 9 000 km², 减少约 4 500 km², 面积增加和减少的比例约 2 : 1, 其中增加的水面以水稻田和养殖池塘的开发为主(图 3-c), 而减少的水面则主要受气候变化、三峡大坝建设、湖泊围垦及湿地植物定植扩张等因素影响, 以洞庭湖和鄱阳湖为典型代表区域, 湖泊所处子流域近几十年来呈现出永久水面不断下降, 消落区面积不断增加的趋势(图 3-d), 另外, 尽管我国水电站均会严格制定并实施下泄生态流量管理的环境保护措施, 但由于水坝建设造成的坝下河段减水仍是造成水面减少的因素之一(图 3-e)。长江下游流域水面增加和减少的面积均在 4 000 km² 左右, 比例约 1 : 1, 其中增加的水面主要来

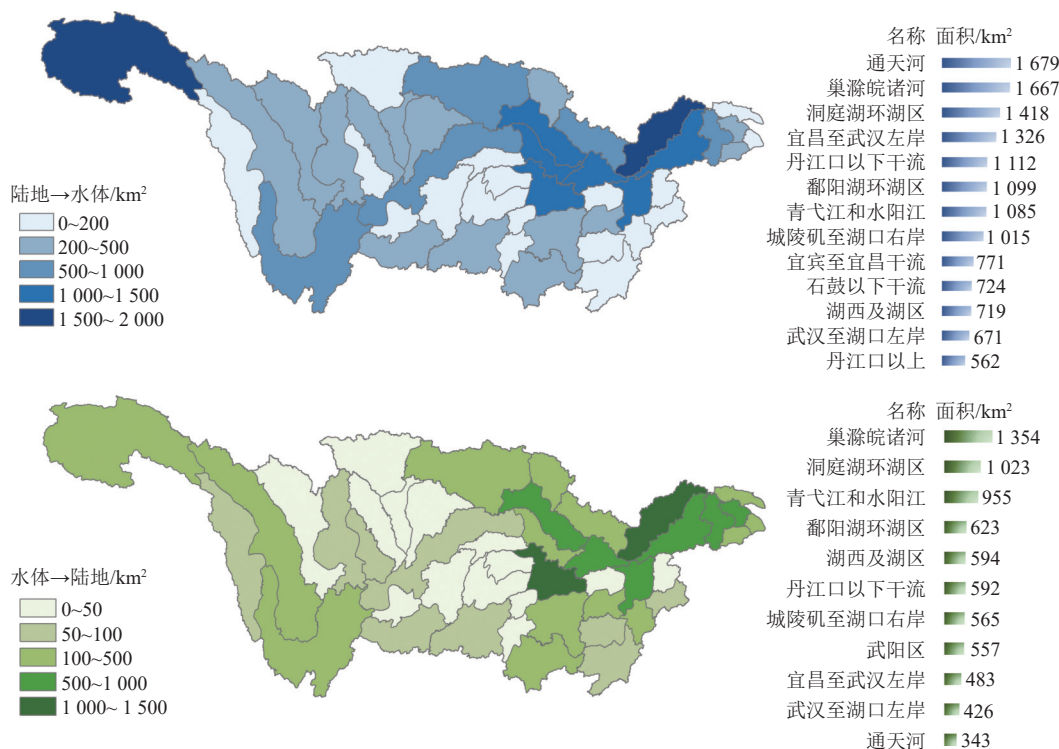


图 2 1984—2000 年和 2001—2020 年两时段间长江流域按三级子流域总和的地表水面积增加和减少的空间分布图
蓝色代表增加, 绿色代表减少

Fig. 2 Largest surface water and land changes over Yangtze River basin between 1984—2000 and 2001—2020 grouped by drainage basins

Increases of water area in blue; decreases of water area in green

自养殖池塘的开发, 而减少的水面除湖泊围垦造成的消落区减少之外, 还包括建设用地占用水面等因素影响 (图 3-f)。

从全流域来看, 新增水面主要包括陆地→永久水、陆地→消落区及消落区→永久水 (水体出现频率增加) 等 (表 2), 其中以陆地向消落区的变化为主, 增加的总面积约 14 700 km², 包括约 3 300 km² 河流库区消落带及 1 000 km² 的其他非河流性水库消落带、1 100 km² 湖泊消落区 (基本为江湖阻隔的人控湖泊)、2 100 km² 的湿地, 以及约 1 600 km² 的养殖池塘和 5 600 km² 的水稻田等; 其次, 陆地向永久水的转变共约 4 200 km², 其中, 河流永久性水体增加约 2 330 km², 占 55% 以上。另外, 还有约 1 550 km² 的消落区转变为永久水。而净减少的约 8 750 km² 自然水面中超过 90% 转变为农田利用地, 另外有约 1 550 km² 的永久水由于水体出现频率下降, 转变为消落区。

2.2 长江流域重点河流近 40 年水面变化状况及成因

长江流域 1~4 级重点河流近 40 年水体最大

总面积约 16 900 km², 2000 年前后两时段相比, 水体出现频率保持不变的仅约 2 100 km², 净增加水面约 6 200 km², 净减少水面约 2 060 km², 其多年水面消涨也与整个长江流域水面变化相似, 呈现出总体增加的趋势。其中除位于长江流域上游的通天河、楚玛尔河、当曲、金沙江上游干流、杜柯河、鲜水河及赤水河等水域, 约有 770 km² 的增量, 主要来自气候变暖造成高山雪水融化导致的河流径流增加之外, 其余 5 500 km² 的增量基本均来自水库充填造成的河流水面增加 (图 4), 约占总增量的 89%, 其中三峡库区充填陆域面积最大, 约 675 km²、汉江上游丹江口水库充填陆域 436 km²、金沙江下游梯级水库群充填陆域面积 410 km² 等。

河流水面减少主要集中在长江中下游干流, 其中长江下游干流、中游干流、汉江下游干流、赣江下游干流、府河、澧水、抚河、资江下游干流等水域的水体面积减少最为显著。除长江下游干流外, 减少的河段集中分布在大型水库的下游, 成为受上游水库调度影响形成的减水河段 (图 3-e)。

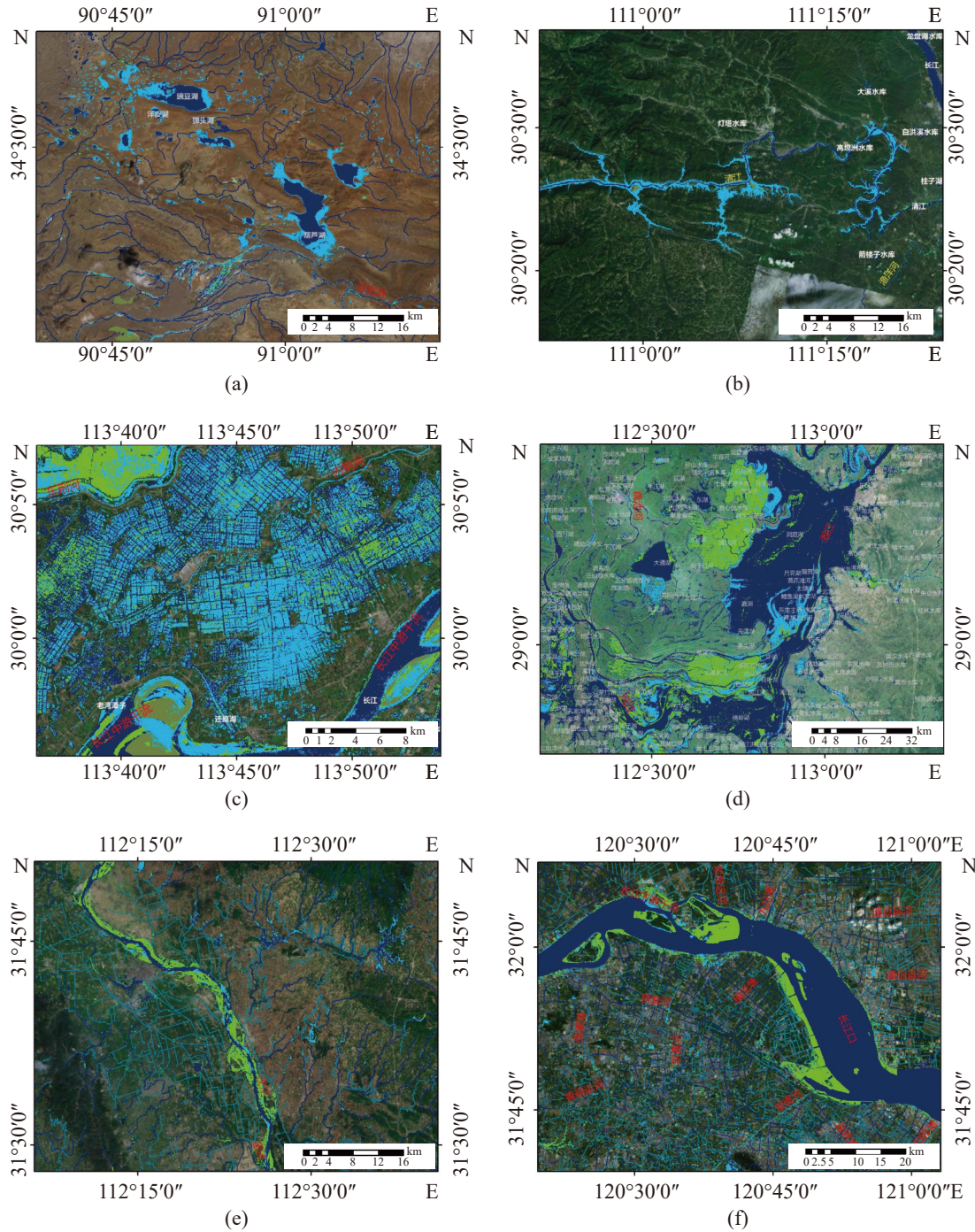


图3 1984—2000年和2001—2020年两时段间长江流域地表水演变的实例

蓝色代表新增, 绿色代表减少

Fig. 3 Examples of surface water changes over Yangtze River basin between 1984—2000 and 2001—2020

Increases of water area in blue; decreases of water area in green

宜昌至金沙江石鼓的长江干流上游江段梯级水库建设造成的水面增加, 及宜昌以下至长江口干流江段水面减少的空间分布对比特征十分显著(图5)。另外, 长江下游干流的水面减少同时还来自城市化建设对沿江水面的侵占(图3-f)。

2.3 “一江两湖七河”重点水域消落区现状

长江流域重点水域2019—2020年最大水面19 663 km²(包括洞庭湖和鄱阳湖), 最小水面约14 281 km², 消落区总面积6 337 km², 其中典型的反季节性消落带约633 km², 主要来自三峡库区

表 2 1984—2000 年和 2001—2020 年两时段间不同水生态类型的水体消涨面积变化

Tab. 2 Area of water changes between 1984—2000 and 2001—2020 for different ecotypes

	不变水面/km ² constant water surface		新增水面/km ² new water surface		减少水面/km ² reduced water surface			
	未受改变的 永久水	未受改变的 消落区	陆地至 永久水	陆地至 消落区	消落区转变为 永久水	永久水转变为 陆地	消落区转变为 陆地	永久水转变为 消落区
河流	6 533.16	874.43	2 331.23	3 314.51	636.02	14.19	104.30	248.56
水库	3 276.97	1 874.59	565.16	926.85	429.51	5.09	163.27	240.78
湖泊	9 281.03	1 660.63	513.48	1 100.00	189.13	1.53	14.46	280.83
养殖池塘	900.88	1 225.79	401.50	1 614.59	156.05	4.00	134.25	123.05
湿地	712.98	3 204.33	284.96	2 096.22	109.53	37.92	361.73	581.16
水稻田	108.64	1 002.61	110.69	5 591.81	29.10	345.14	7 561.74	81.82
合计	20 813.66	9 842.38	4 207.01	14 643.98	1 549.34	407.87	8 339.75	1 556.20

和丹江口水库(图 6)。在长江干流中,中游江段的消落区面积最大,约达 329 km²,仍基本为具有自然水文情势的自然消落区。标准河长下金沙江江段的消落区最少,其中尚符合自然水文情势的消落区面积 91 km²,主要分布在攀枝花市以上河段,反季节性消落带 43 km²,主要来自于溪洛渡水库。三峡库区全部为反季节性消落带,消落总面积约 158 km²。在长江主要支流中,汉江消落区面积最大,约 238 km²,主要为来自丹江口水库的反季节性消落带。

3 讨论

3.1 长江流域水生态结构改变及具有自然水文情势的消落区减少对天然渔业资源种群结构改变和渔业资源量衰退的潜在影响

水域类型组成结构和空间分布结构的改变及具有自然水文情势的消落区大幅减少是长江流域近几十年来水域变化最核心的特征之一。2020 年代自然水体的占比不足 30%,与 20 世纪 80 年代相比下降了近 50%。除净减少了 8 750 km²的自然水体之外,还有约 1 500 km²的水面从永久水衰退为消落区,这是长江流域天然渔业资源环境容量的绝对衰减,并且减少水面基本分布在长江流域渔业资源量最丰富的长江中下游流域,特别是两湖流域(图 2-b)。而在约 20 000 km²新增水面中,约 8 000 km²为养殖水面和水田,3 700 km²的非通江湖泊和水库,以及 6 200 km²的新增河流和 2 500 km²的季节性湿地。并且,在 6 200 km²的新增河流水面中,有 5 500 km²为河流水库建设充填陆域而来,另外 700 km²新增河流水面以及绝大多数新增湖泊和湿地仅分布在长江上游部分

山区河段及通天河流域的高原湖泊周边,它们对长江流域天然渔业资源的生境支撑功能非常有限。

2001—2020 年和 1984—2000 年两时段相比,地表水净减少水面中超过 80% 来自于具有自然水文情势的消落区(表 2),使得天然渔业资源的栖息环境容量大幅减少,而这一变化与长江流域渔业资源量的持续衰退趋势一致。从鱼类资源现存量来看,仅相当于 20 世纪 50 年代的 27.30%、60 年代的 30.89%、80 年代的 58.70%^[1]。从极端丰、枯水年份造成的水面变化影响来看(图 7),资源量与水文情势变化之间存在显著的依存关系,如 1954 年极端丰水年份的历史最高产量为 42.7 万 t,而 2011 年极端枯水年份最低产量仅 4.7 万 t。上述分析显示在叠加极端气候事件的影响下,具有自然水文情势的水体消落区的丧失与长江流域渔业资源长期衰退趋势具有明显的同步性。

另外,20 世纪 80 年代长江流域自然水面和人工水面的比例约为 2 : 1,目前转变为 1 : 2,长江流域水域类型的组成结构从自然水体为主导转向人工水面为主导,且由于梯级水库建设使长江流域重要河流形成了约 5 500 km²的新增充填水面,其对自然水文情势有逆转效应和迟滞效应^[27-28],如造成上游水量显著增加及下游河段水量显著减少(图 5),以及随之而来的水体生境的破碎化^[29]、流水向静水环境的改变、水位波动率和水体温度的改变^[30]、水质的下降^[31]、泥沙的输移规律改变^[32-33]及洪枯水周期和持续时间的改变等^[34],使水域生态系统的生物生境支持功能严重受损,进而对渔业资源组成结构及其优势物种分布的改变产生了极大的影响。据长江水生生物资源与环境本底状况调查结果显示^[1],鲤、鲫、鲢、黄颡鱼、

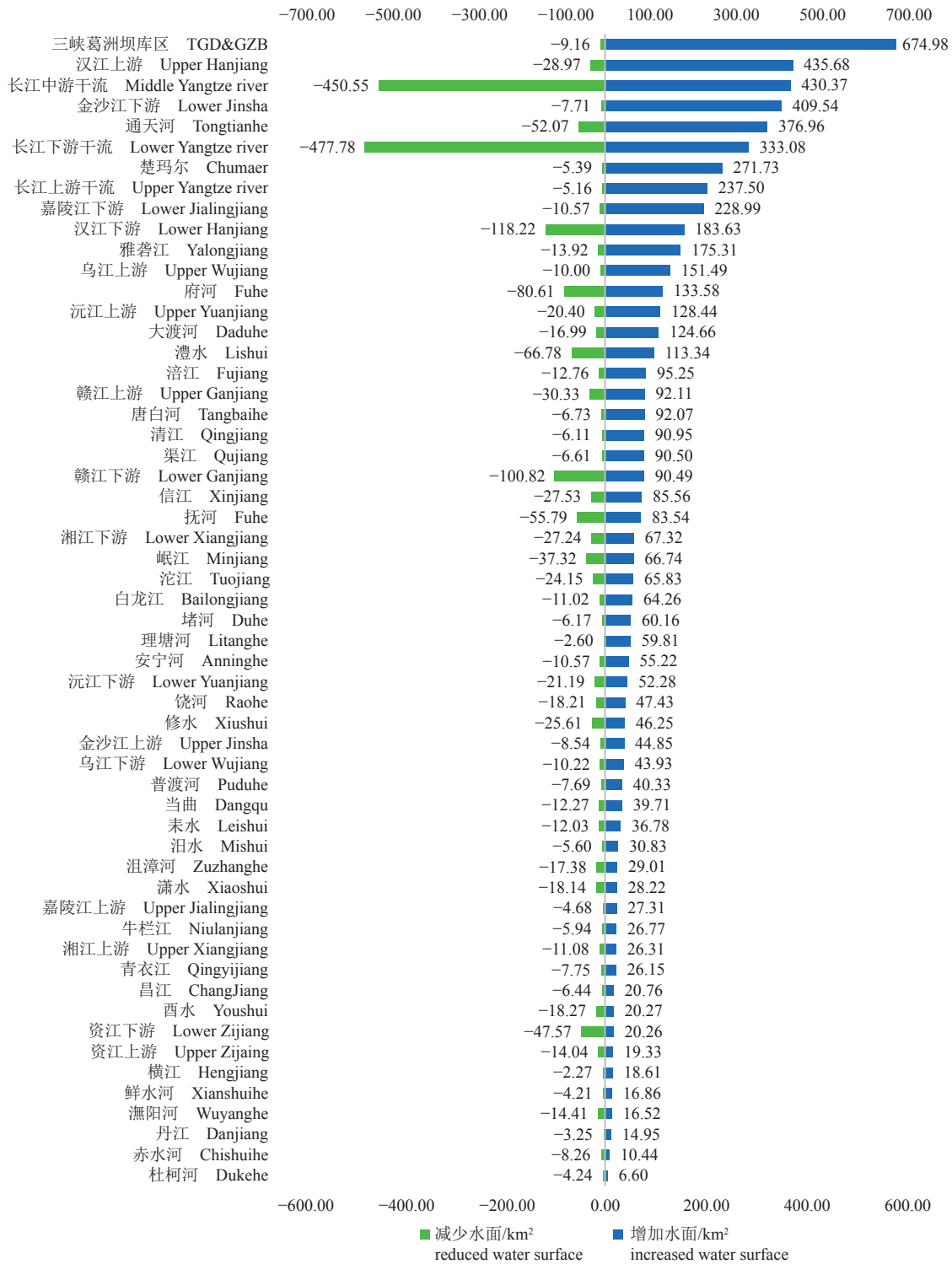


图 4 1984—2000 年和 2001—2020 年两时段长江流域重要河流净减少水面面积和新增充填的陆域水面面积

Fig. 4 Examples of surface water changes between 1984—2000 and 2001—2020

短颌鲚、鲇、蛇鮈、草鱼、光泽黄颡鱼、鲮、鳊、铜鱼、翘嘴鲮、鳊、鳙为流域性优势种，渔获重量占比达到 50%，数量占比达到 45%。从长江鱼类资源历史变迁来看，定居性鱼类比例处于持续

增加趋势。比较不同水域，区域优势类群变化最为明显的均处在水利工程建设形成的水库水域，如三峡库区铜鱼类渔获比例大幅下降，短颌鲚、银鱼等域内外来种渔获比例大幅上升；金沙江下

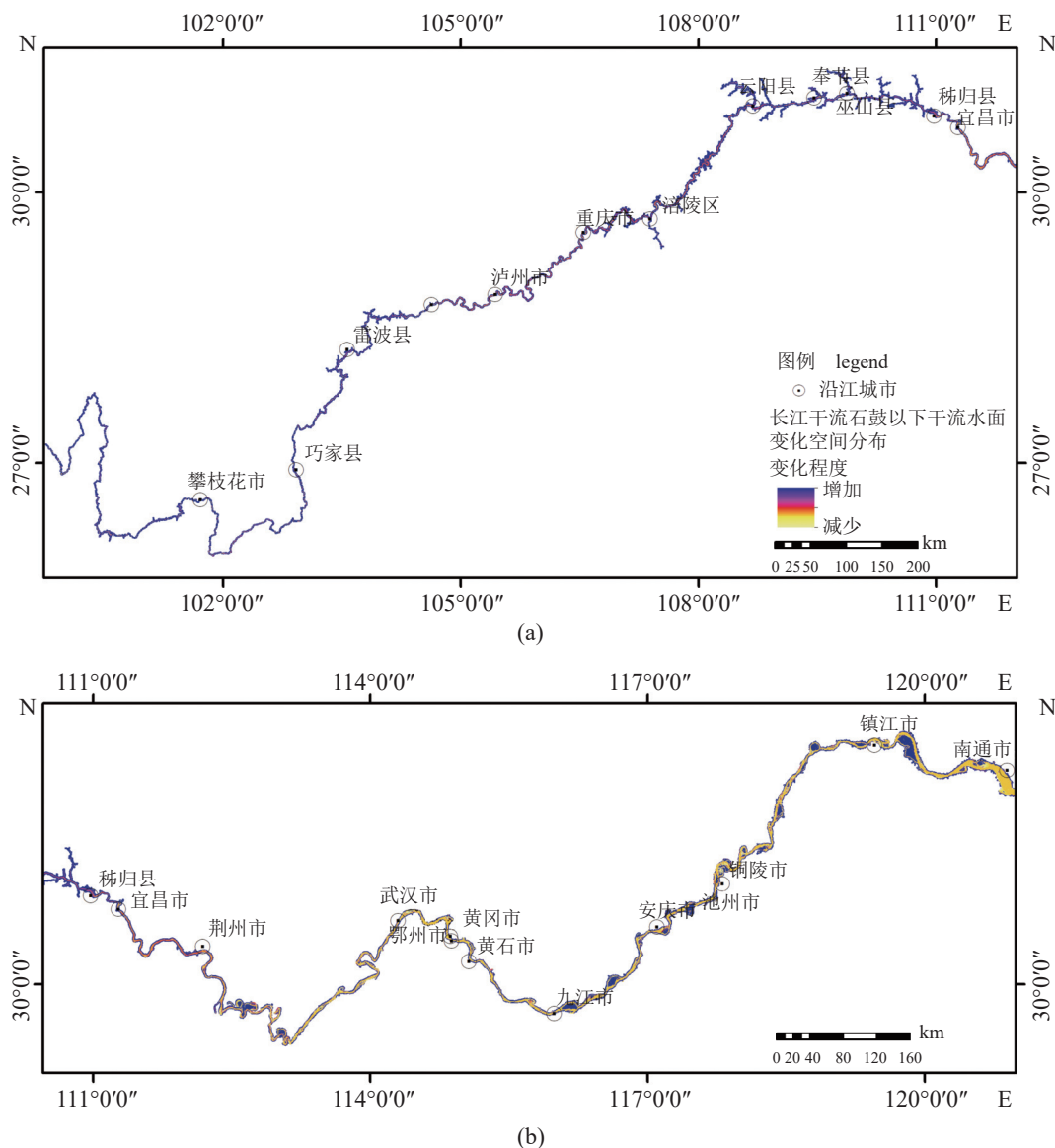


图 5 长江干流水面变化情况示意图

(a) 宜昌至金沙江石鼓的长江干流上游江段梯级水库建设造成的水面增加; (b) 宜昌以下至长江口干流江段的水面减少

Fig. 5 Water surface changes of main stream of the Yangtze River

(a) increase caused by the construction of cascade reservoirs in the upper reaches from Yichang to Shigu; (b) reduction in the section from Yichang to the Yangtze River estuary

游梯级库区蓄水后四大家鱼、鲇等鱼类比例持续上升, 原分布种圆口铜鱼、裂腹鱼类等特有种比例持续下降; 长江中下游鲂属鱼类比例有较大比例上升, 原经济鱼类如四大家鱼、鳊等资源持续下降; 长江口鱼类资源量持续下降; 两湖仍维持鲤、鲫等定居性鱼类为主要经济鱼类。

3.2 消落区的鱼类“三场”关键栖息地功能及水库建设影响分析

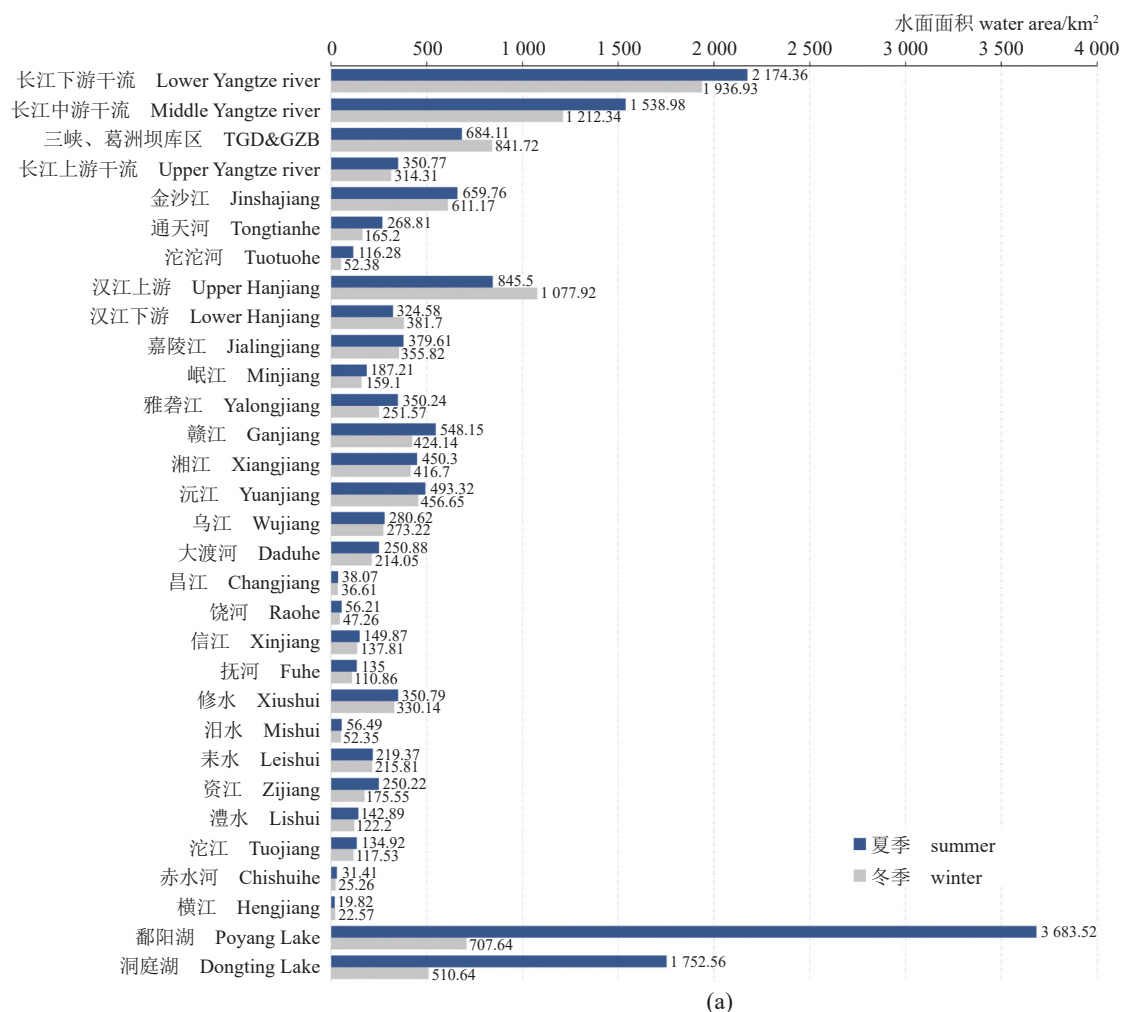
未受人类活动干扰的自然水文情势消落区具

有独特的生态功能, 在生物多样性维系、生物栖息地提供、径流调节、污染物截留与转移、景观美学、改善区域气候等方面具有重要价值^[8, 35], 特别是与鱼类的产卵、索饵、越冬及洄游等关键生活史过程的顺利完成息息相关^[36]。比如, 受河流丰、枯水影响形成的辫状河流中的多重复合滩, 蜿蜒河流中的自由交替滩、滚动滩、牛轭湖内滩、溪口滩、碛石滩(险滩)、江心洲, 以及河口冲淤形成的三角洲等^[37-38], 由于其独特且适宜的流速、流场、水深、卵石及沙砾底质等条件, 为许多土

著或经济鱼类提供了适宜的产卵和索饵环境^[39]。再如, 由河流、湖泊、湿地等组成的洪泛平原消落区是陆地淡水生态系统中生物多样性最高的区域之一, 同时也是最易受到威胁的生态系统类型之一^[40], 它包括了处于流水或静水中的, 且受到洪水周期性涨落影响的栖息地^[41]。洪水脉冲理论^[41-42]认为洪泛平原往往同时受到外部能量输入(洪水的周期性干扰)和自身波动(如鱼类的觅食行为, 植被的自身生长波动等)的共同影响。其中, 不同频率的输入能量(水文节律变化)为物种提供了不同生境的机会, 它是该类生态系统中大型植物和鱼类等生物生活史过程的主导因素^[41-47]。

然而近年来, 大型水库建设形成的新型的反季节性人工消落带, 由于造成了岸带生态环境的巨大改变, 使之成为消落区生态环境治理和生物生境修复关注的热点问题^[48]。尤其是梯级水库群的建设, 由于造成水文情势的逆转和径流量的改变, 使土著鱼类关键栖息地加速丧失。比如, 金

沙江中下游已建成的 10 座水电站, 共造成约 410 km² 的永久水和反季节性消落区的增加(表 3)。其中, 下游已建成的溪洛渡水电站充填面积最大约 110 km², 其次是乌东德水电站和向家坝水电站, 充填面积分别约 79 和 77 km², 金沙江中游的鲁地拉水电站充填陆域面积约 45 km²。梯级水电工程建设极大地改变了金沙江的水文形势, 对金沙江圆口铜鱼和裂腹鱼类等的重要生活史过程的完成产生了根本性的影响^[49-50]。20 世纪 70 年代, 圆口铜鱼曾是长江上游重要的经济鱼类之一, 在重庆、宜宾等地区可占渔产量的 7%~8%, 在金沙江下游数量更多, 是当地渔业的主要捕捞对象, 约占渔产量的 50% 以上。据历史调查资料^[51-52], 圆口铜鱼的产卵场在金沙江四川省屏山县以上至云南省鹤庆县朵美地区之间均有分布, 其中以红岩子至石溪滩、新市镇至冒水孔、桧溪至锅圈滩等处较为集中。然而, 张轶超^[53]在 2007 年和 2008 年的



(图 6 Fig. 6)

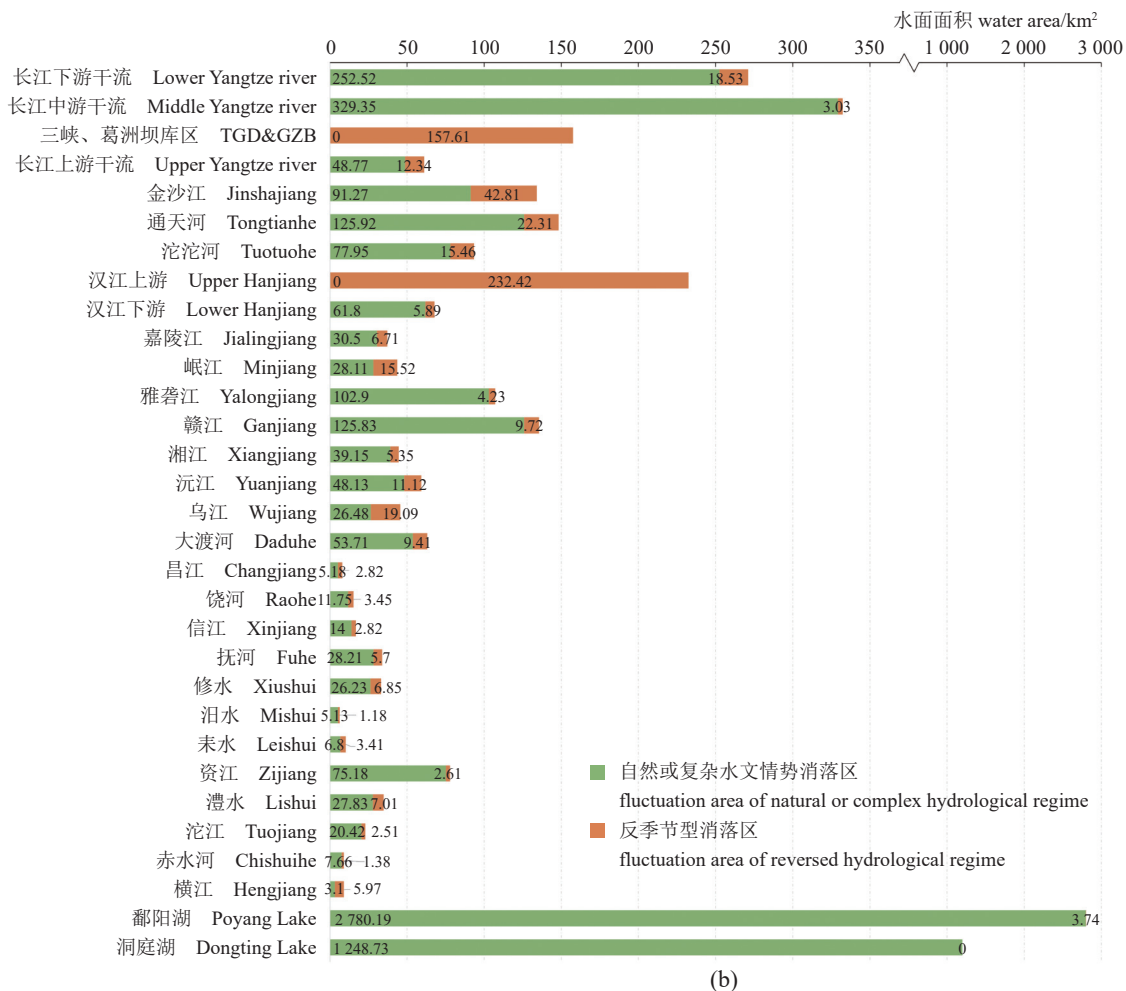


图 6 长江流域重点河流夏季、冬季水体面积及消落区状况

Fig. 6 Summer, winter, or hydro-fluctuation areas of the key waters in Yangtze River basin

早期资源调查结果表明, 在溪洛渡水库 2007 年 11 月 7 日第一次截流之后, 圆口铜鱼规模最大的产卵场的位置向上移动了约 200 km。至 2010 年, 唐会元等^[54] 的调查发现, 金沙江中游鲁地拉水电站下游圆口铜鱼产卵场发生了向下游移动的情况。随着 2011—2021 年金沙江下游向家坝、溪洛渡、乌东德及观音岩等水电站的相继建设, 金沙江下游的圆口铜鱼产卵场目前主要分布在溪洛渡坝址下游江段^[55], 及观音岩以下部分江段^[56]。而自巧家至宜宾柏溪之间的江段, 已无其产卵场分布^[57]。再如, 金沙江裂腹鱼类通常喜好在砾石底质的急流浅滩处产卵^[58], 这类浅滩通常分布在河流坐弯处的凸岸消落区, 产卵下沉后被水冲入砾石缝隙中发育。据颜文斌等^[59] 开展的金沙江裂腹鱼类全人工模拟产卵试验判断, 历史上整个金沙江干流的河弯凸岸砾石滩均散布有裂腹鱼类的产卵场, 然而由于当前金沙江中下游地区水电开发密集,

金沙江中下游已基本不存在适合裂腹鱼类产卵的适宜场所。

鄱阳湖作为中国最大的洪泛平原淡水湖泊, 因其枯水一线、丰水一片的自然水体消落变化景观享誉世界^[60-61], 同时也是长江流域资源现存量 and 捕捞量最大的水域^[1]。长江流域近 40 年水域变化分析结果显示 (图 2), 鄱阳湖流域的水面增减变化同时发生, 且变化幅度均较大。目前关于鄱阳湖水体长期变化趋势研究中已形成的共识是, 近年来鄱阳湖永久性水体淹没面积在不断下降^[62]。本研究分析进一步表明, 近 40 年来鄱阳湖永久水体面积减少超过 1 600 km², 其中近一半的减少量发生在 2001—2010 年, 而同期消落区面积扩张了近一倍 (图 8-a), 同时秋季水位显著下降 (图 8-b), 而同时期的水体面积也明显减少, 这与三峡库区 9—11 月初的蓄水时间一致^[4, 63]。随着主湖区永久水向消落区的转变, 在每年 4—6 月需要一定水深

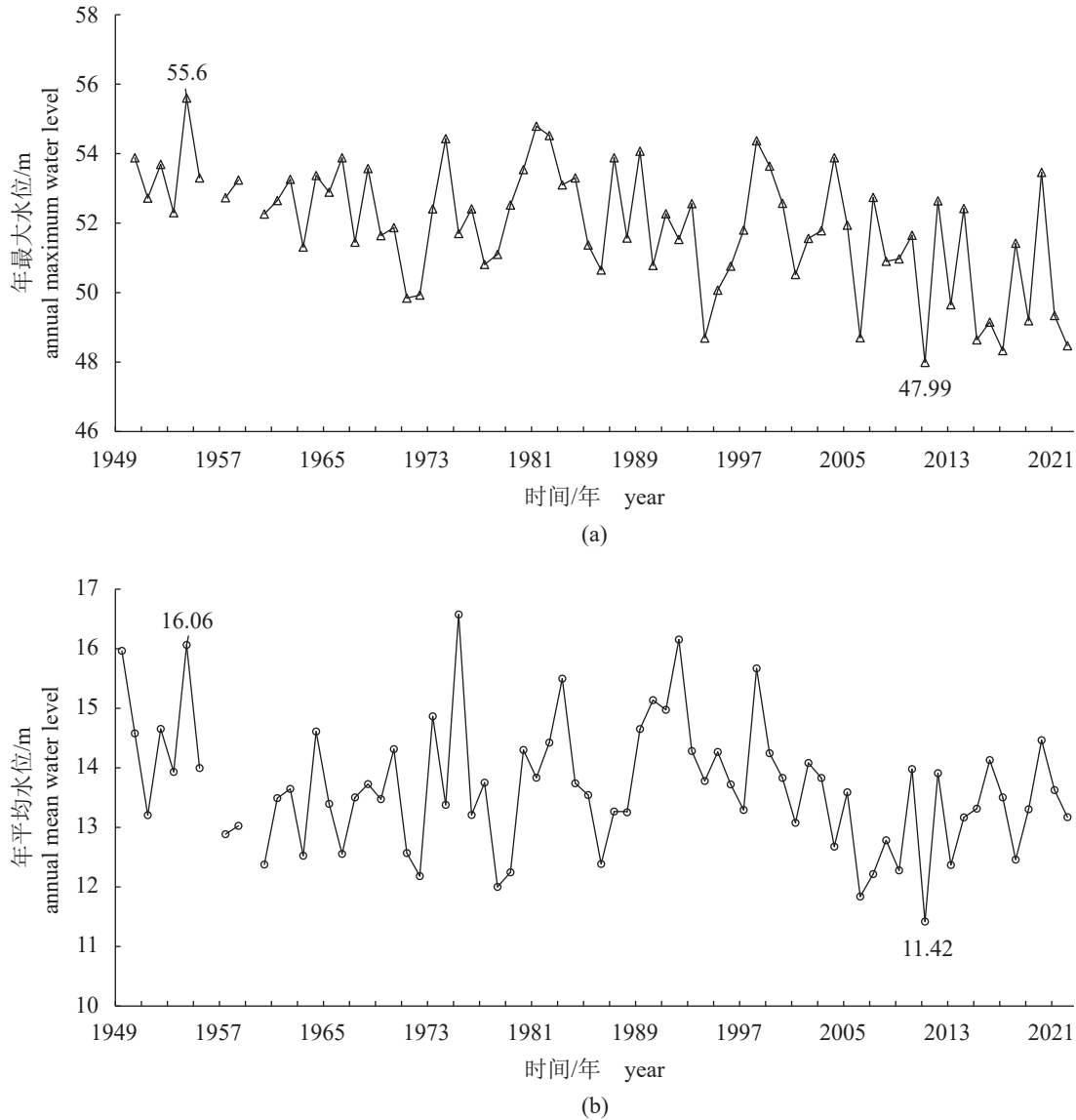


图 7 1949 年以来长江流域宜昌水文站 (a) 和九江水文站 (b) 年最大水位和年平均水位变化

Fig. 7 Variations in the annual maximum and average water levels of Yichang(a) and Jiujiang(b) stations during 1949—2021

支持的鱼类产卵季节, 特别是 5 月, 鄱阳湖水体出现频率近 40 年来也呈现出显著的下降趋势(图 8-c), 揭示了在自然通江洪泛湖泊中, 即使是永久水体向着具有自然水文情势消落区的转变, 也是水域栖息地功能退化的表现, 特别是鄱阳湖春夏之际的这一改变, 将使流域内鱼类早期资源补充过程受损。上述改变将造成鄱阳湖鱼类栖息地的直接丧失, 使鄱阳湖作为长江中下游河流性鱼类和海河洄游性鱼类越冬场、索饵场和洄游通道^[64], 及湖区定居性鱼类的产卵场、索饵场的功能不断下降^[65]。杨海乐等^[1]研究表明, 当前长江中下游四大家鱼的年产卵总量仅相当于 20 世纪 80 年代的

24.86%, 早期资源量的衰退较长江流域总资源量的下降更为严重^[1]。

3.3 水域变化及消落区空间观测方法的误差分析和应用前景

水体分布数据的提取精度及无效观测数据的占比等, 会对本文所开展的水域面积长期变化和消落区制图精度产生影响, 因此获取高精度的水体分布输入数据十分重要。本文所采用的 GSW 数据集^[18]是借助多种高精度辅助数据集如数字高程模型、冰川分布、城市分布、岩浆分布等, 采用专家系统、可视化分析和证据推理算法, 由欧

表 3 金沙江中下游已建成水电站陆域充填面积

Tab. 3 Land filling area of completed hydropower stations in the middle and lower reaches of Jinsha River

序号 no.	电站名称 name of hydropower station	充填陆域面积/km ² filled land area	建成年代 completion time
1	梨园	11.11	2016年8月
2	阿海	16.12	2014年6月
3	金安桥	14.67	2011年3月
4	龙开口	12.79	2014年1月
5	鲁地拉	44.71	2013年6月
6	观音岩	40.17	2021年12月
7	金沙	3.43	2021年10月
8	乌东德	79.21	2021年6月
9	溪洛渡	110.09	2015年10月
10	向家坝	77.24	2014年7月
	合计	410.17	

洲委员会联合研究中心的空间科学团队历时近两年, 利用 Earth Engine 10000 台计算机连续运算 45 d, 获得的长时间序列水体分布数据。其精度评价结果显示, 不同数据源提取的水体分布用户精度分别为 99.45% (Landsat 5)、99.35% (Landsat 7) 和 99.54% (Landsat 8), 生产者精度分别为 97.01% (Landsat 5)、95.79% (Landsat 7) 和 96.25% (Landsat 8), 可满足本研究对水体分布输入数据的精度要求。同时, 本文采用哨兵-2 号 10 m 高空间分辨率卫星遥感数据提取的 2019—2020 年长江流域重点水域水体分布数据, 其结果全部经过人工

目视检查和修正, 可作为评价其他数据成果精确度的参考样本集。另外, 本研究所获取的 3 m 空间分辨率 PlanetScope 卫星遥感图像、0.6~1 m 超高空间分辨率的 Skysat 卫星编程拍摄数据, 以及来自全长江流域 26 家单位共同完成的大量低空无人机航摄测量数据, 均可为中-大尺度水体和消落区分布数据的提取和精度验证提供丰富的训练样本集和验证样本集^[66]。

地表水体变化的复杂性及渔业资源与环境定量观测需求的增长, 给基于高时频海量遥感数据驱动的水生生物生境定量分析提出了新的需求。Song 等^[67]认为, 卫星遥感数据无法为长期变化行为提供精度可靠的信息, 这是因为在过去很长一段时间中, 同时具备高空间分辨率、高时间分辨率, 且不依赖于大气条件所限制的卫星观测能力相对缺乏, 同时有效观测积累的长时间序列卫星数据在解决区域整体问题时, 其支撑能力仍稍显不足。然而, 在现阶段海量遥感观测数据爆发式增长、高度集成的强大的云计算平台日新月异的发展背景下^[68], 绕过包含大量参数和精细复杂地表物理过程模拟, 直接从观测数据到定量产品的方法, 目前已在全球尺度研究中取得了不菲的成绩^[18, 69-72]。特别是, 随着未来纳群卫星星座及低轨卫星技术的不断发展^[73], 以及低空无人机技术大范围应用成本的不断下降^[74], 将很可能形成以“日更新”的高频纳群卫星星座数据, 乃至厘米级无人机航摄测量数据支撑的高性能云计算平台的

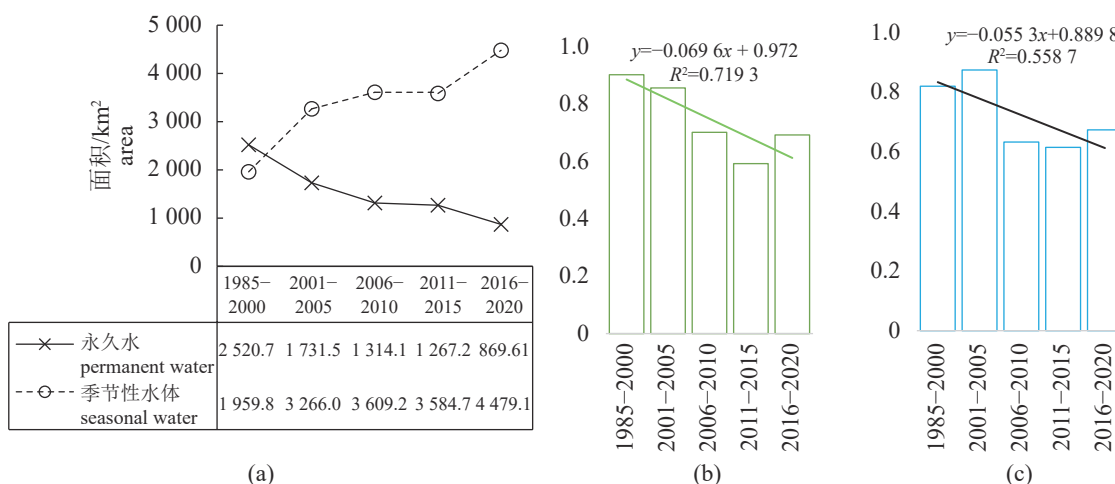


图 8 鄱阳湖 1985—2020 年各时段永久水体和季节性水体面积变化 (a), 及鄱阳湖多年水体出现频率 [(b)9 月, (c) 5 月]

Fig. 8 Area change of permanent water body and seasonal water body of Poyang Lake from 1985 to 2020(a) and integral monthly surface water occurrence frequency of the main Poyang Lake[September (b); May (c)]

诞生, 届时将可能获取近实时的超高精度水体分布观测数据, 从而使基于空间观测方法的渔业资源与环境监测精度得到巨大的提升, 获得传统监测方法无法获取的新认识。

4 结论

消落区是地球表面呈现出水相和陆相交互变换的区域, 也是地表变化中最频繁和复杂的过程之一, 其中不同频率的输入能量(水文节律变化)为物种提供了不同生境的机会, 对区域生物多样性的维持至关重要。然而, 近年来, 由于河流水库充填及水田开发等对天然渔业水域, 特别是对自然消落区的挤压, 对渔业资源的衰退产生了巨大的影响。首先, 长江流域自1984年至2020年以来减少的10 000 km²水体中, 超过80%来自于具有自然水文情势消落区面积的损失, 另外除净减少了8 750 km²的自然水体之外, 还有约1 500 km²的水面从永久水衰退为消落区, 这是长江流域天然渔业资源环境容量的绝对衰减, 历史同期天然鱼类资源现存量衰退至20世纪80年代的1/2, 而早期资源现存量更仅剩余20世纪80年代的1/4。其次, 本文对长江流域水域长期变化及消落区变化分析的结果显示, 流域水生态类型的组成结构发生了巨大的改变, 20世纪80年代长江流域自然水面和人工水面的比例约为2:1, 目前转变为1:2, 2020年代自然水体在地表水体中的占比不足30%, 仅为20世纪80年代的1/2, 同时新增水面中由于水库充填导致的河流水面增加达5 500 km², 上述因素致使长江流域的水域类型组成结构从自然水体为主导转向人工水面为主导, 这一转变造成长江流域水文情势发生了巨大改变, 如适宜流水性的鱼类生境大幅衰减, 同时库区形成导致喜缓流性鱼类生境显著增加, 定居性鱼类比例呈持续增加的趋势。水生态系统结构决定了水生态系统功能, 受水生态系统功能支持的渔业资源环境容量的提高及资源量的恢复, 需要全流域各有关部门的共同重视。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

[1] 杨海乐, 沈丽, 何勇凤, 等. 长江水生生物资源与环境本底状况调查(2017-2021)[J/OL]. 水产学报, 2023, <https://www.china-fishery.cn>

47(2): 029301.

Yang H L. Status of aquatic organisms resources and their environments in Yangtze river system (2017-2021)[J/OL]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(2): 029301.

- [2] Ye S W, Li Z J, Liu J S, *et al.* Distribution, endemism and conservation status of fishes in the Yangtze River basin, China[M]//Grillo O. Ecosystems Biodiversity. IntechOpen, 2011: 41-66.
- [3] Zhang H, Kang M, Shen L, *et al.* Rapid change in Yangtze fisheries and its implications for global freshwater ecosystem management[J]. *Fish and Fisheries*, 2020, 21(3): 601-620.
- [4] Wang J D, Sheng Y W, Tong T S D. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 251-269.
- [5] 王鲁海, 黄真理. 中华鲟(*Acipenser sinensis*)生存危机的主因到底是什么?[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 924-940.
- Wang L H, Huang Z L. What is actually the main cause for the survival crisis of Chinese sturgeon?[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 924-940 (in Chinese).
- [6] 潘晓洁, 万成炎, 张志永, 等. 三峡水库消落区的保护与生态修复[J]. *人民长江*, 2015, 46(19): 90-96.
- Pan X J, Wan C Y, Zhang Z Y, *et al.* Protection and ecological restoration of water-lever-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir[J]. *Yangtze River*, 2015, 46(19): 90-96 (in Chinese).
- [7] 刘云峰. 三峡水库库岸生态环境治理对策初探[J]. *重庆工学院学报*, 2005, 19(11): 79-82.
- Liu Y F. On improving countermeasures for the ecology on the bank of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2005, 19(11): 79-82 (in Chinese).
- [8] 张建春. 河岸带功能及其管理[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 143-146.
- Zhang J C. Riparian functions and its management[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(6): 143-146 (in Chinese).
- [9] 邓红兵, 王青春, 王庆礼, 等. 河岸植被缓冲带与河岸带管理[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 951-954.
- Deng H B, Wang Q C, Wang Q L, *et al.* On riparian forest buffers and riparian management[J]. *Chinese*

- Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 951-954 (in Chinese).
- [10] 宫鹏. 拓展与深化中国全境的环境变化遥感应用[J]. *科学通报*, 2012, 57(22): 2793-2801.
- Gong P. Remote sensing of environmental change over China: A review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2793-2801 (in Chinese).
- [11] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [12] Kumar L, Mutanga O. Google Earth Engine Applications[M]. Basel: MDPI, 2019.
- [13] Oliphant A J, Thenkabail P S, Teluguntla P, *et al.* Mapping cropland extent of Southeast and Northeast Asia using multi-year time-series Landsat 30-m data using a random forest classifier on the Google Earth Engine Cloud[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 81: 110-124.
- [14] Zurqani H A, Post C J, Mikhailova E A, *et al.* Geospatial analysis of land use change in the Savannah River Basin using Google Earth Engine[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 69: 175-185.
- [15] Deng Y, Jiang W G, Tang Z H, *et al.* Long-term changes of open-surface water bodies in the Yangtze River basin based on the Google Earth Engine cloud platform[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(19): 2213.
- [16] Li Y, Niu Z G. Systematic method for mapping fine-resolution water cover types in China based on time series Sentinel-1 and 2 images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 106: 102656.
- [17] 刘宇晨, 高永年. Sentinel时序影像的长江流域地表水体提取[J]. *遥感学报*, 2022, 26(2): 358-372.
- Liu Y C, Gao Y N. Surface water extraction in Yangtze River Basin based on sentinel time series image[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2): 358-372 (in Chinese).
- [18] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [19] Donchyts G, Baart F, Winsemius H, *et al.* Earth's surface water change over the past 30 years[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(9): 810-813.
- [20] 江进辉, 杨荣华, 王凯. 水库消落区生态保护与治理方案研究[J]. *水电与新能源*, 2020, 34(2): 20-22.
- Jiang J H, Yang R H, Wang K. Ecological protection and management scheme for reservoir water level fluctuation zone[J]. *Hydropower and New Energy*, 2020, 34(2): 20-22 (in Chinese).
- [21] 戴方喜, 许文年, 陈芳清. 对三峡水库消落区生态系统与其生态修复的思考[J]. *中国水土保持*, 2006(12): 6-8.
- Dai F X, Xu W N, Chen F Q. Pondering over falling zone ecosystem of Sanxia Reservoir and its ecological rehabilitation[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2006(12): 6-8 (in Chinese).
- [22] Sayre R, Karagulle D, Frye C, *et al.* An assessment of the representation of ecosystems in global protected areas using new maps of World Climate Regions and World Ecosystems[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00860.
- [23] 夏军, 陈进, 王纲胜, 等. 从2020年长江上游洪水看流域防洪对策[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(1): 1-8.
- Xia J, Chen J, Wang G S, *et al.* Flood control strategies for the River Basin enlightened by the 2020 Upper Yangtze River Floods[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(1): 1-8 (in Chinese).
- [24] 陈敏. 2020年长江暴雨洪水特点与启示[J]. *人民长江*, 2020, 51(12): 76-81.
- Chen M. Characteristics and enlightenment of rainstorm and flood in Yangtze River in 2020[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(12): 76-81 (in Chinese).
- [25] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [26] Li Y, Niu Z G. China Water Cover Map (2020/10 m)[EB/OL]. Science Data Bank, 2022. (2022-10-17).<https://zhuanlan.zhihu.com/p/574501626>.
- [27] 黎云云, 畅建霞, 涂欢, 等. 黄河干流控制性梯级水库联合运行对下游水文情势的影响[J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1183-1190.
- Li Y Y, Chang J X, Tu H, *et al.* Impact of controlling cascade reservoir joint operation on hydrologic regimes in the lower Yellow River[J]. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1183-1190 (in Chinese).
- [28] 段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016,

- 25(1): 120-130.
- Duan W X, Guo S L, Wang J. Impact of upper Yangtze River large-scale cascade reservoirs on flow regime at Yichang station[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 120-130 (in Chinese).
- [29] 杨志, 陶江平, 唐会元, 等. 三峡水库运行后库区鱼类资源变化及保护研究[J]. *人民长江*, 2012, 43(10): 62-67.
- Yang Z, Tao J P, Tang H Y, *et al.* Research on fish resources variation and protection in reservoir area of TGP after its operation[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(10): 62-67 (in Chinese).
- [30] 郭文献, 王鸿翔, 夏自强, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(6): 182-187.
- Guo W X, Wang H X, Xia Z Q, *et al.* Effects of Three Gorges and Gezhouba reservoirs on river water temperature regimes[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(6): 182-187 (in Chinese).
- [31] 卓海华, 吴云丽, 刘旻璇, 等. 三峡水库水质变化趋势研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(6): 925-936.
- Zhuo H H, Wu Y L, Liu M X, *et al.* Trend study of water quality in the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(6): 925-936 (in Chinese).
- [32] 陈进, 黄薇. 梯级水库对长江水沙过程影响初探[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(6): 786-791.
- Chen J, Huang W. Preliminary study on the change of water flow and sediment process in the Changjiang River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(6): 786-791 (in Chinese).
- [33] 易雨君. 长江水沙环境变化对鱼类的影响及栖息地数值模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- Yi Y J. Impacts of changing flow and sediment on fish and habitat modeling of the Yangtze River[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008 (in Chinese).
- [34] 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡梯级水库对长江中下游水文情势影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(12): 7-10.
- Guo W X, Wang H X, Xu J X, *et al.* Effects of three gorges cascade reservoirs on river hydrological regimes of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(12): 7-10 (in Chinese).
- [35] Gregory S V, Swanson F J, McKee W A, *et al.* An ecosystem perspective of riparian zones: Focus on links between land and water[J]. *BioScience*, 1991, 41(8): 540-551.
- [36] Pusey B J, Arthington A H. Importance of the riparian zone to the conservation and management of freshwater fish: A review[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2003, 54(1): 1-16.
- [37] Crosato A. Analysis and modelling of river meandering[D]. Delft: Delft University of Technology, 2008.
- [38] 钱宁. 河床演变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- Qian N. Fluvial Processes Study[M]. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese).
- [39] Richardson J S, Taylor E, Schluter D, *et al.* Do riparian zones qualify as critical habitat for endangered freshwater fishes?[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2010, 67(7): 1197-1204.
- [40] Tockner K, Stanford J A. Riverine flood plains: Present state and future trends[J]. *Environmental Conservation*, 2002, 29(3): 308-330.
- [41] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river-floodplain systems[J]. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 106(1): 110-127.
- [42] Middleton B A. Flood Pulsing in Wetlands: Restoring the Natural Hydrological Balance[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [43] 卢晓宁, 邓伟, 张树清. 洪水脉冲理论及其应用[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(2): 269-277.
- Lu X N, Deng W, Zhang S Q. Flood pulse concept and its application in river-floodplain system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 269-277 (in Chinese).
- [44] Agostinho A A, Bonecker C C, Gomes L C. Effects of water quantity on connectivity: The case of the upper Paraná River floodplain[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2009, 9(1): 99-113.
- [45] Linhoss A C, Muñoz-Carpena R, Allen M S, *et al.* A flood pulse driven fish population model for the Okavango Delta, Botswana[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 228: 27-38.
- [46] 刘旭颖, 关燕宁, 郭杉, 等. 基于时间序列谐波分析的鄱阳湖湿地植被分布与水位变化响应[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(1): 195-206.
- Liu X Y, Guan Y N, Guo S, *et al.* Response on wetland

- vegetation distribution to hydrology regularity based on harmonic time series analysis[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(1): 195-206 (in Chinese).
- [47] 周静, 万荣荣, 吴兴华, 等. 洞庭湖湿地植被长期格局变化(1987-2016年)及其对水文过程的响应[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(6): 1723-1735.
- Zhou J, Wan R R, Wu X H, *et al.* Patterns of long-term distribution of typical wetland vegetation (1987-2016) and its response to hydrological processes in Lake Dongting[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(6): 1723-1735 (in Chinese).
- [48] 谭淑端, 王勇, 张全发. 三峡水库消落带生态环境问题及综合防治[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(S1): 101-105.
- Tan S D, Wang Y, Zhang Q F. Environmental challenges and countermeasures of the water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(S1): 101-105 (in Chinese).
- [49] 李婷, 唐磊, 王丽, 等. 水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响——以溪洛渡至向家坝河段为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1473-1485.
- Li T, Tang L, Wang L, *et al.* Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1473-1485 (in Chinese).
- [50] 高少波, 唐会元, 乔晔, 等. 金沙江下游干流鱼类资源现状研究[J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(1): 44-49.
- Gao S B, Tang H Y, Qiao Y, *et al.* Status of fishery resources in the mainstream of the lower reaches of Jinsha River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(1): 44-49 (in Chinese).
- [51] 湖北省水生生物研究所鱼类研究室. 长江鱼类 [M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- Fish Laboratory, Hubei Institute of Hydrobiology. The Yangtze River Fish[M]. Beijing: Science Press, 1976 (in Chinese).
- [52] 刘乐和, 吴国犀, 王志玲. 葛洲坝水利枢纽建成后长江干流铜鱼和圆口铜鱼的繁殖生态[J]. *水生生物学报*, 1990, 14(3): 205-215.
- Liu L H, Wu G X, Wang Z L. Reproduction ecology of *Coreius heterodon* (Bleeker) and *Coreius guichenoti* (Sauvage et Dabry) in the Mainstream of the Changjiang River after the Construction of Gezhouba Dam[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, 14(3): 205-215 (in Chinese).
- [53] 杨志, 乔晔, 张轶超, 等. 长江中上游圆口铜鱼的种群死亡特征及其物种保护[J]. *水生态学杂志*, 2009, 2(2): 50-55.
- Yang Z, Qiao Y, Zhang Y C, *et al.* Estimate on Population Mortality of *Coreius guichenoti* and its Conservation in the middle and upper Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(2): 50-55 (in Chinese).
- [54] 唐会元, 杨志, 高少波, 等. 金沙江中游圆口铜鱼早期资源现状[J]. *四川动物*, 2012, 31(3): 416-421, 425.
- Tang H Y, Yang Z, Gao S B, *et al.* Status of fish resources of early life history stages of *Coreius guichenoti* in the middle reaches of the Jinsha River[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2012, 31(3): 416-421, 425 (in Chinese).
- [55] 高少波, 唐会元, 陈胜, 等. 金沙江一期工程对保护区圆口铜鱼早期资源补充的影响[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(2): 6-10.
- Gao S B, Tang H Y, Chen S, *et al.* Effects of the first phase of Jinsha River Hydropower Project on fish recruitment: Early life history stages of *Coreius guichenoti* in the Upper Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(2): 6-10 (in Chinese).
- [56] 王导群, 田辉伍, 唐锡良, 等. 金沙江攀枝花江段产漂流性卵鱼类早期资源现状[J]. *淡水渔业*, 2019, 49(6): 41-47.
- Wang D Q, Tian H W, Tang X L, *et al.* Early fish resources of drifting egg fish in Panzhihua section of Jinsha River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2019, 49(6): 41-47 (in Chinese).
- [57] 何勇凤, 朱永久, 龚进玲, 等. 金沙江中下游圆口铜鱼遗传多样性与种群历史动态分析[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(1): 37-47.
- He Y F, Zhu Y J, Gong J L, *et al.* Genetic diversity and population demography of *Coreius guichenoti* from the middle and lower reaches of the Jinsha River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(1): 37-47 (in Chinese).
- [58] 陈永祥, 罗泉笙. 四川裂腹鱼繁殖生态生物学研究——V、繁殖群体和繁殖习性[J]. *毕节师专学报*, 1997(1): 1-5.
- Chen Y X, Luo Q S. A study of the reproductive ecology and biology of *Schizothorax kozlovi* - V, breeding

- population and breeding habits[J]. *Journal of Bijie Teachers College*, 1997(1): 1-5 (in Chinese).
- [59] 颜文斌, 朱挺兵, 吴兴兵, 等. 短须裂腹鱼产卵行为观察[J]. *淡水渔业*, 2017, 47(3): 9-15.
- Yan W B, Zhu T B, Wu X B, *et al.* An observation of spawning behavior of *Schizothorax wangchiachii*[J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, 47(3): 9-15 (in Chinese).
- [60] Dronova I, Gong P, Wang L. Object-based analysis and change detection of major wetland cover types and their classification uncertainty during the low water period at Poyang Lake, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3220-3236.
- [61] Wang L, Dronova I, Gong P, *et al.* A new time series vegetation-water index of phenological-hydrological trait across species and functional types for Poyang Lake wetland ecosystem[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125: 49-63.
- [62] Li Q Y, Lai G Y, Devlin A T. A review on the driving forces of water decline and its impacts on the environment in Poyang Lake, China[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, 12(5): 1370-1391.
- [63] Zhang Z X, Chen X, Xu C Y, *et al.* Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 510-521.
- [64] 李慧峰, 曹坤, 汪登强, 等. 鄱阳湖通江水道越冬时期鱼类群落的栖息地适宜性分析[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(3): 341-354.
- Li H F, Cao K, Wang D Q, *et al.* Habitat suitability analysis of fish community in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River in winter[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(3): 341-354 (in Chinese).
- [65] 张志永, 刘枚, 彭安成, 等. 鄱阳湖鱼类生境面临的主要问题及修复措施探讨[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(1): 134-136.
- Zhang Z Y, Liu M, Peng A C, *et al.* Main problems and restoration measures of fish habitat in Poyang Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(1): 134-136 (in Chinese).
- [66] 宫鹏, 张伟, 俞乐, 等. 全球地表覆盖制图研究新范式[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1002-1016.
- Gong P, Zhang W, Yu L, *et al.* New research paradigm for global land cover mapping[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1002-1016 (in Chinese).
- [67] Song C Q, Ke L H. Recent dramatic variations of China's two largest freshwater lakes: Natural process or influenced by the Three Gorges Dam?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 2086-2087.
- [68] 董金玮, 李世卫, 曾也鲁, 等. 遥感云计算与科学分析——应用与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Dong J W, Li S W, Zeng Y L, *et al.* *Remote Sensing Cloud Computing and Scientific Analysis - Application and Practice*[M]. Beijing: Science Press, 2020 (in Chinese).
- [69] Jia K, Jiang W G, Li J, *et al.* Spectral matching based on discrete particle swarm optimization: A new method for terrestrial water body extraction using multi-temporal Landsat 8 images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 1-18.
- [70] Yang X, Pavelsky T M, Allen G H. The past and future of global river ice[J]. *Nature*, 2020, 577(7788): 69-73.
- [71] Murray N J, Phinn S R, Dewitt M, *et al.* The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 222-225.
- [72] Nienhuis J H, Ashton A D, Edmonds D A, *et al.* Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain[J]. *Nature*, 2020, 577(7791): 514-518.
- [73] 刘洁, 于洋. 商业遥感卫星及应用发展态势[J]. *中国航天*, 2022(8): 24-30.
- Liu J, Yu Y. Development of commercial remote sensing satellites and their applications[J]. *Aerospace China*, 2022(8): 24-30 (in Chinese).
- [74] 吴永亮, 陈建平, 姚书朋, 等. 无人机低空遥感技术应用[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(4): 120-125.
- Wu Y L, Chen J P, Yao S P, *et al.* Application of UAV low-altitude remote sensing[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(4): 120-125 (in Chinese).

Status and transition of surface water fluctuation zones in the Yangtze River basin and fishery resource change

WANG Lin¹, DING Fang¹, CAO Kun¹, YUAN Lilai¹, MAO Zhihui¹, LI Huifeng²,
ZHANG Xiaoyong¹, LI Kai¹, YANG Wenbo¹, LI Xiaoshu¹, LI Huiqin¹, ZHANG Hui²,
WU Jinming², YANG Haile², ZHU Tingbing², YANG Deguo², NI Zhaohui²,
LI Yunfeng², LIN Xiangming^{1*}, LI Yingren^{1*}, WEI Qiwei^{2*}

- (1. *Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fishery Resource and Environment Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China;*
2. *Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China*)

Abstract: The water fluctuation zones are widely distributed in the Yangtze River Basin, with diverse types, different kinds of formation, various functions and complex habitats. The intensive analysis of the historical changes, current situation and component types of the water fluctuation zones is of great significance for maintaining the aquatic biodiversity and ecosystem balance along the banks of rivers and lakes, and protecting the ecological and environmental security of the Yangtze River system. In this paper, the medium-large scale remote sensing monitoring method is used to investigate and analyze the water area and the fluctuation area of the Yangtze River Basin, focusing on the change trend from the natural water body to the artificial water surface, and its potential impact on the decline of the natural fishery resources in the Yangtze River Basin. The results show that, in the past 40 years, the historical maximum water surface of the whole Yangtze River Basin is about 63,360 km², the minimum water surface is about 26,396 km², and the historical maximum ebb and flow area is about 36,964 km². From 2019 to 2020, the "One River, Two Lakes and Seven Rivers" region had a maximum water surface of 19,663 km², a minimum water surface of 14,281 km², and a fluctuation area of 6,337 km², including an anti-seasonal fluctuation area of 633 km². Compared to period of 2001-2020 and period 1984-2000, more than 80% of the reduction of surface water was due to the loss of the area of seasonal natural water fluctuation, while the increase that resulted from reservoir filling was up to 5500 km². As a result, the structure of water ecosystem in the Yangtze River basin changed dramatically. The proportion of natural water body and fish resources was less than half of that in the 1980s. Furthermore, this study clarified the concept of anti-seasonal artificial water fluctuation area for the first time, and investigated the relationship between the anti-seasonal artificial water fluctuation zone formed by the filling of cascade reservoirs in the Yangtze River Basin and the loss of fish critical habitat.

Key words: reservoir filling; water fluctuation zone; habitats; hydrological regime; long time series; multiscale remote sensing; the Yangtze River

Corresponding authors: LI Yingren. E-mail: liyr@cafs.ac.cn;

LIN Xiangming. E-mail: linxm@cafs.ac.cn;

WEI Qiwei. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

Funding projects: This research was funded by the Project of Yangtze Fisheries Resources and Environment Investigation from the MARA, China (2017-2021); the Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS, China (2018HY-ZD0101); Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS, China (2020TD11)