

基于水淹频率指数的滨岸带划定与生态格局研究 ——以长江干流中下游为例

王楠^{1,2}, 刘帅^{1,2}, 王雪蕾^{1,2}, 张浩彬^{1,2}, 赵瑞雪^{1,2},
李勇^{1,2}, 王晨^{1,2}, 陈华杰^{1,2}

1. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

2. 生态环境部卫星遥感重点实验室, 北京 100094

摘要: 滨岸带作为水陆生态系统的关键过渡区, 对维护河湖生态安全具有屏障作用, 其空间识别与动态监测是开展流域水生态保护与空间管控的重要基础。本文以长江干流中下游(宜昌至长江入海口)为研究区域, 基于GEE (Google Earth Engine) 平台, 利用多时相Sentinel-2影像构建水淹频率指数, 并采用阈值分区方法划定水位变幅区的内外边界, 提出了一种适用于大尺度河流的滨岸带遥感划定方法。结果表明: (1) 综合考虑岸线合理开发与生态空间保护的双重要求, 划定的长江干流中下游滨岸带平均宽度为608 m, 各流经城市滨岸带宽度为289—982 m; (2) 生态岸带比为45.9%, 空间上呈现“中游优于下游、右岸高于左岸、水位变幅区优于陆域缓冲区”的分布格局, 各流经城市生态岸带比为32%—66%; (3) 滨岸带开发利用率为54.1%, 以农业用地(33.7%)和工矿用地(7.2%)为主, 约87 km的硬质护岸工程集中分布于下游地区, 显著削弱了自然水陆交互过程; (4) 2022年—2023年, 生态用地净减少6.6 km², 滨岸带仍呈现“生态退、人工进”的发展趋势。研究表明, 基于水淹频率阈值的遥感方法可实现滨岸带范围的连续化、自动化识别, 为流域尺度滨岸带动态监测、水生态评估与空间管理提供了技术支撑, 对滨岸带生态空间保护具有重要参考价值。

关键词: 水淹频率, 生态空间, 滨岸带划定, 遥感, 长江干流中下游

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 王楠, 刘帅, 王雪蕾, 张浩彬, 赵瑞雪, 李勇, 王晨, 陈华杰. 2026. 基于水淹频率指数的滨岸带划定与生态格局研究——以长江干流中下游为例. 遥感学报, 30(7): 2042–2052

Wang N, Liu S, Wang X L, Zhang H B, Zhao R X, Li Y, Wang C and Chen H J. 2026. Delineating riparian zones and analyzing ecological patterns via inundation frequency: a case study of the middle-lower reaches of Yangtze River. National Remote Sensing Bulletin, 30(7): 2042–2052 [DOI:10.11834/jrs.20265458]

1 引言

滨岸带作为陆地生态系统和水生生态系统之间进行物质、能量和信息交换的过渡区域, 具有调节水文、拦截污染、净化水体、提供生物栖息地、提升生态系统完整性等作用, 是维护河湖生态环境安全的绿色生态屏障 (Naiman 和 Décamps, 1997; 王超等, 2018; 徐坚等, 2022)。滨岸带在空间上表现为邻近水体、边界模糊、边缘效应显著及线性分布等特征 (杨胜天等, 2007)。然而, 随着城市化和工业化的快速推进, 滨岸带被港口建设、工

业生产及农业开垦等人类活动占用 (Paterson 等, 2014; Follmann, 2015), 导致湿地萎缩、生态廊道断裂等问题, 威胁区域水生态环境安全 (Peng 等, 2017; Zhang 等, 2020; Lu 等, 2023; Li 等, 2024)。《中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》中明确提出“严格河湖水域岸线空间管控”“加强水源涵养区和生态缓冲带保护修复”, 凸显了滨岸带精准识别与动态监测在国土空间治理与保护中的战略意义。

如何实现大尺度、连续、客观地划定滨岸带空间范围, 是兼顾发展与保护双重要求下面临的

收稿日期: 2025-11-13; 预印本: 2026-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(编号:U23A2015)

第一作者简介: 王楠, 研究方向为水生态环境遥感监测与评价。E-mail: wangnann1106@163.com

通信作者简介: 王雪蕾, 研究方向为流域生态水文过程模拟和面源污染监测评估等。E-mail: wxlbnu@163.com

技术难点。现有研究多采用固定宽度法确定滨岸带范围（王雪蕾 等，2009；邹辉 等，2019；李胤 等，2024），该类方法虽然操作简便，但忽略了水文过程，导致划定结果与实际生态过程脱节。采用水文站观测数据推断淹没范围，虽能较好地反映水文驱动下的滨岸带空间范围，但是受水文站点分布不均匀、数据连续性不足、数据获取困难等限制，难以在大尺度河流系统中实现连续、精准的特征（文可 等，2022）。

近年来，卫星遥感技术的发展为解决这一难题提供了有效途径。随着 Landsat 8 陆地成像仪 OLI（Operational Land Imager）、Sentinel-2 等中分辨率影像数据的普及，以及 GEE（Google Earth Engine）等云计算平台的发展，大范围、长时间序列的水体动态监测变得高效可行（刘宇晨和高永年，2022；吴庆双 等，2022）。然而，当前研究多集中于水体提取或单一时段影像的岸线识别，缺乏基于水文过程的滨岸带范围动态划定方法；同时，针对长江等大型复杂流域，如何利用遥感技术实现滨岸带的连续化、自动化划定，并量化其生态空间格局，仍是亟待解决的技术问题。

基于此，本文以长江干流中下游为研究区，依托 GEE 平台，利用多时相 Sentinel-2 影像构建水淹频率指数，并采用阈值分区方法划定水位变幅区

边界，提出一种适用于大尺度河流的滨岸带遥感划定方法。研究旨在从遥感技术视角，突破传统滨岸带划定的静态化、碎片化局限，揭示长江干流中下游滨岸带生态空间分布特征及变化情况，为流域尺度滨岸带遥感动态监测、水生态评估与空间管理提供技术支撑。

2 研究区概况

作为国家“长江经济带”发展战略的核心载体，长江干流中下游是中国人口、城市和产业高度聚集的重要经济引擎，也是维护区域生态安全的关键屏障。经过近 20 年的治理，长江流域水环境质量显著改善，但河湖连通性下降、湿地面积萎缩、湖泊富营养化、滨岸带开发强度较高等生态环境问题仍然突出（李海生 等，2022）。

本文选定长江干流中下游（宜昌至长江入海口）为研究区，全长约 1774 km，流经湖北、湖南、江西、安徽、江苏及上海 6 省（市），涵盖宜昌、荆州、岳阳等 23 个城市。以江西鄱阳湖湖口为界，湖口以上为中游，干流河段长约 973 km；湖口以下为下游，干流河段长约 801 km。该区域属亚热带季风气候区，降水充沛，河网密布，江湖水系连通复杂，河道水位受自然水文周期与人类活动的双重影响，变幅显著，形成了类型多样、结构复杂的滨岸带生态系统。

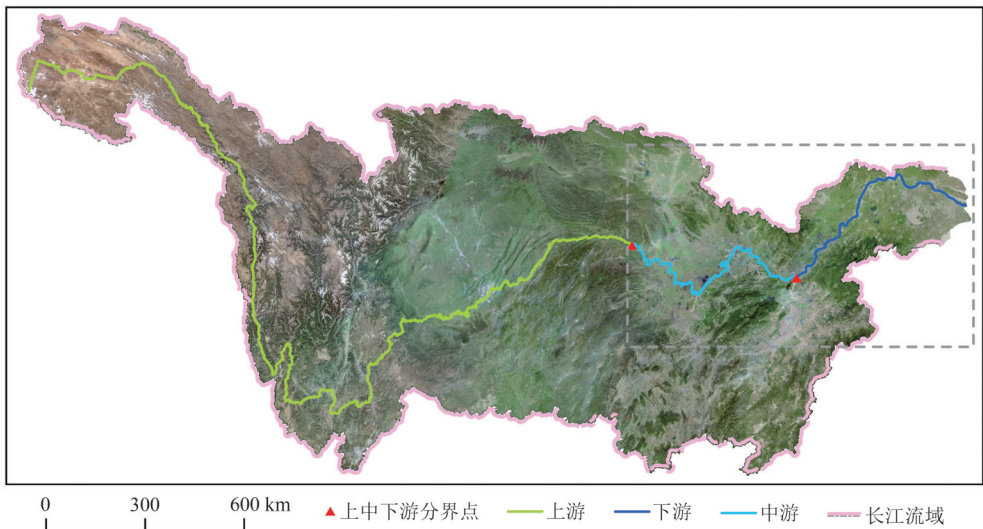


图1 长江干流中下游研究区范围(灰色虚线框)

Fig.1 Study Area in the middle-lower reaches of Yangtze River (Gray dashed box)

3 研究方法

为实现对大尺度河流滨岸带空间范围的精准、

连续划定，本文提出一种基于水文过程驱动的遥感识别方法。该方法通过构建多时相遥感水淹频率指数，建立从水文节律到空间边界的内在联系，

以突破传统划定方法的局限，实现滨岸带生态空间的客观识别。研究主要包括滨岸带范围划定和滨岸带生态空间分析等环节，技术路线如图2所示。

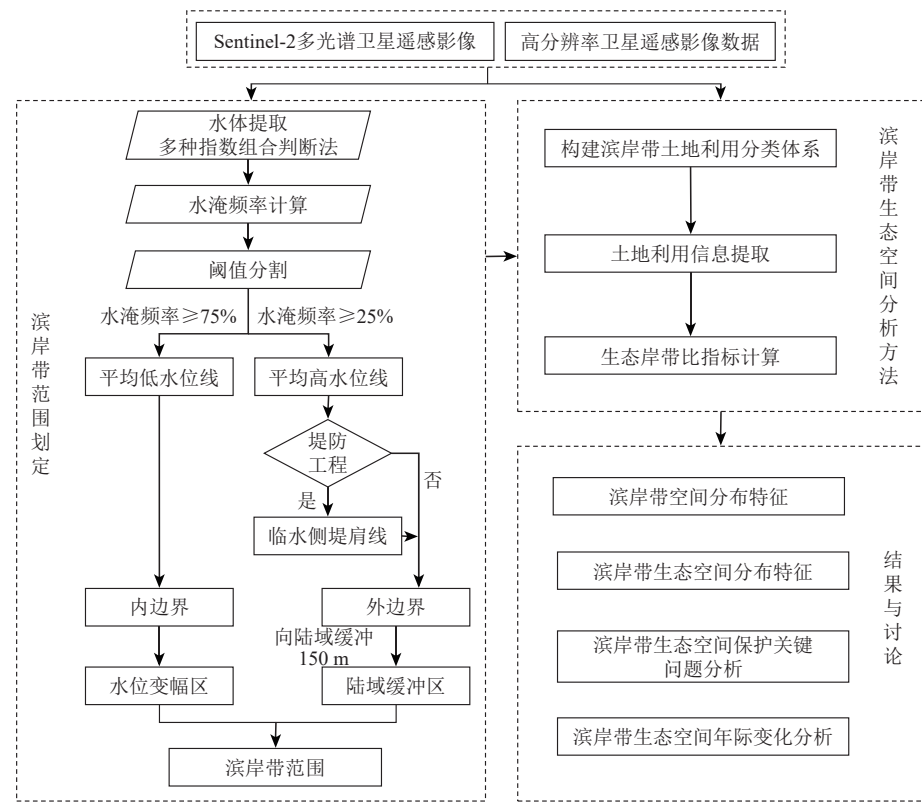


图2 技术路线图

Fig.2 Technical roadmap

3.1 滨岸带范围划定

3.1.1 划定思路

基于滨岸带的生态水文特征，将其划分为水位变幅区和陆域缓冲区（图3）。其中，水位变幅区代表受周期性淹没影响的区域，由内边界和外边界闭合形成：内边界取平均低水位线；外边界则考

虑实际防洪需求，在有堤防的河段外边界取临水侧堤肩线，在无堤防的河段外边界取平均高水位线。陆域缓冲区为自外边界向陆域方向缓冲150 m的区域，用以表征近岸人类活动的直接干扰带。这一划分方案既体现了水陆生态系统的过渡特征，也为后续的差异化管控提供了理论基础。

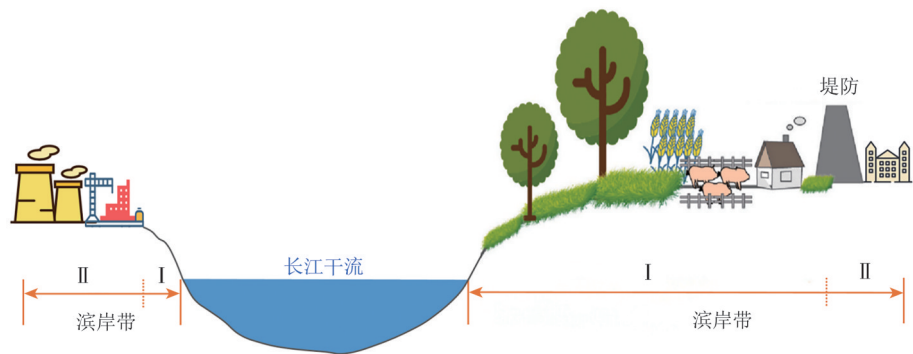


图3 滨岸带横向剖面示意图（I 水位变幅区；II 陆域缓冲区）

Fig.3 Schematic diagram of a riparian zone profile (I the water-level fluctuation zone; II the terrestrial buffer area)

针对传统固定宽度法无法反映实际水文过程，以及基于水文站点观测数据有限的问题，本文提出基于多时相卫星遥感数据，构建每个像元的水淹频率指标。该方法将动态的水文过程转化为可量化的空间频率分布，建立从“高频淹没—低高程—近河道中心”到“低频淹没—高高程—近岸边”的空间梯度关系，从而实现基于生态水文过程的滨岸带功能边界识别。

表1 2018年1月至2022年12月的Sentinel-2有效影像月度统计

Table 1 Monthly statistics of valid Sentinel-2 images from January 2018 to December 2022

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合计
景数	171	173	204	203	162	114	134	285	281	273	319	387	2706

3.1.3 水体提取与水淹频率计算

在水体提取方法上，现有研究普遍采用的改进归一化水体指数 mNDWI (modified Normalized Difference Water Index) 算法虽然在开阔水域识别中表现良好，但在长江干流中下游水生植被茂盛、滩涂分布广泛的复杂环境中，其提取精度显著受限。为了克服这一局限，本文综合运用mNDWI、归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 和增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index) 指数组合判断算法进行水体识别，见式 (1)。该方法融合不同光谱指数的响应特征，有效减少植被引起的水体识别误差，且无需设置阈值，显著提升了复杂环境下水体识别的自动化程度与处理效率 (Chen 等, 2017; Zou 等, 2017; 谷娟 等, 2018; 苑春雨和刘昌华, 2024)。

$$\text{Water} = (\text{EVI} < 0.1) \text{ 且 } [(\text{mNDWI} > \text{NDVI}) \text{ 或 } (\text{mNDWI} > \text{EVI})] \tag{1}$$

式中，Water 为水体识别结果，满足条件的像元被判定为水体。

在逐景影像完成水体提取的基础上，计算每个像元在研究时段内的水淹频率，计算公式如下：

$$F_w = \frac{N_w}{N} \tag{2}$$

式中， F_w 为该像元的水淹频率，范围为 [0, 100%]； N_w 为监测时间段内该像元被识别为水体的次数； N 为监测时间段内有效监测总次数。

为评估水体提取精度，采用分层随机抽样方法，在覆盖开阔水体、浑浊水体，以及邻近水体的

3.1.2 数据选择与时序构建

为准确捕捉研究区的水文节律特征，基于 GEE 平台，本文获取了 2018 年 1 月至 2022 年 12 月的 Sentinel-2 多光谱卫星遥感数据 (影像云量阈值设为 20%)，累计有效影像 2706 景 (表 1)。丰水期 (6 月—9 月) 有效影像累计 814 景，约占总影像数的 30.1%，为水淹频率指数的稳健计算提供充分的数据保障。

裸地、建筑等易混淆非水体区域选取 500 个验证样本点 (图 4)。精度验证结果显示 (表 2)，总体提取精度为 92.8%。非水体误判主要源于光谱特征与水体相似的个别狭窄地物 (如小型船只、码头等)，但其空间占比低，不影响宏观格局分析。结果表明，该方法具有良好的可靠性与适用性。

3.1.4 水淹频率阈值确定与案例验证

在获取水淹频率空间分布的基础上，科学确定阈值是准确界定水位变幅区边界的关键环节。基于遥感识别水体动态变化的研究成果 (Zou 等, 2018; Xia 等, 2019)，并衔接《小型水电站水文计算规范》(SL 77—2013) 中径流频率划分的标准，选取 25% 和 75% 作为划分阈值：水淹频率不低于 75% 的区域界定为永久水体分布区，其外缘轮廓线定义为平均低水位线；水淹频率不低于 25% 的区域视为周期性淹没区域，其外缘轮廓线定义为平均高水位线。

通过上述方法，实现了水位变幅区内外边界的客观、连续划定，基于遥感手段揭示了水动力驱动的滨岸带空间动态特征。图 5 展示了基于 Sentinel-2 影像的典型河段案例，涵盖原始影像、水体提取结果、水淹频率分布、水位变幅区边界及陆域缓冲区的完整流程，直观呈现了从数据预处理到最终滨岸带范围划定的技术路径与实施效果。该方法能够有效解决大尺度流域中因水位动态变化导致滨岸带范围难以精准表征的技术难题，为滨岸带生态空间范围的科学识别提供了可靠的方法支撑。

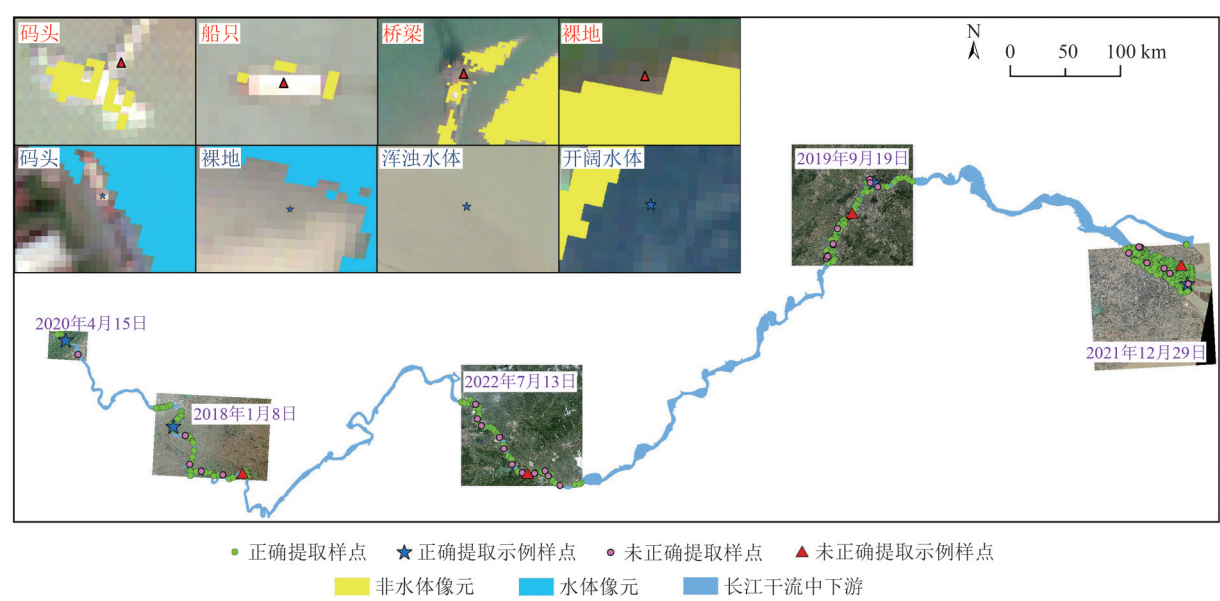


图4 水体提取精度验证样本点空间分布与结果局部放大图

Fig.4 Spatial distribution of validation sample points and local zoomed-in results for water extraction accuracy assessment

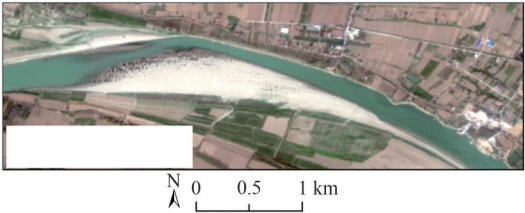
表2 水体提取结果精度评价			
Table 2 Accuracy assessment of water extraction results			
分类	样本个数	正确样本数	提取精度/%
开阔水体	207	207	100.0
浑浊水体	157	156	99.4
非水体	136	101	74.3
总计	500	464	92.8

3.2 滨岸带生态空间分析方法

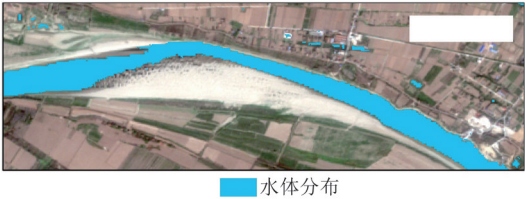
采用生态岸带比指标开展滨岸带生态空间分析，计算公式如下：

$$P_{ERZ} = \frac{A_{EL}}{A_{RZ}} \times 100 \tag{3}$$

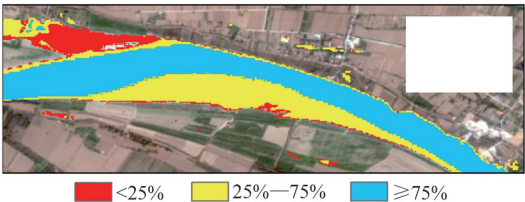
式中， P_{ERZ} 为生态岸带比（以百分比计）； A_{RZ} 为滨岸带范围面积（单位：km²）； A_{EL} 为滨岸带范围内生态用地面积（单位：km²）。



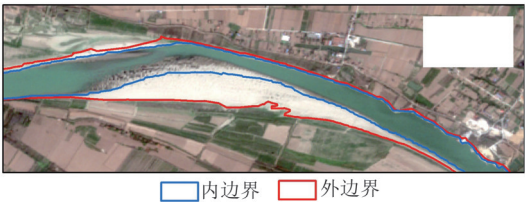
(a) 2022-11-10哨兵2影像
(a) Sentinel-2 image acquired on November 10, 2022



(b) 2022-11-10水体提取结果
(b) Water extraction result on November 10, 2022



(c) 2018年—2022年水淹频率结果
(c) Inundation frequency results from 2018 to 2022



(d) 水位变幅区内外边界提取结果
(d) Inner and outer boundaries of water-level fluctuation zone

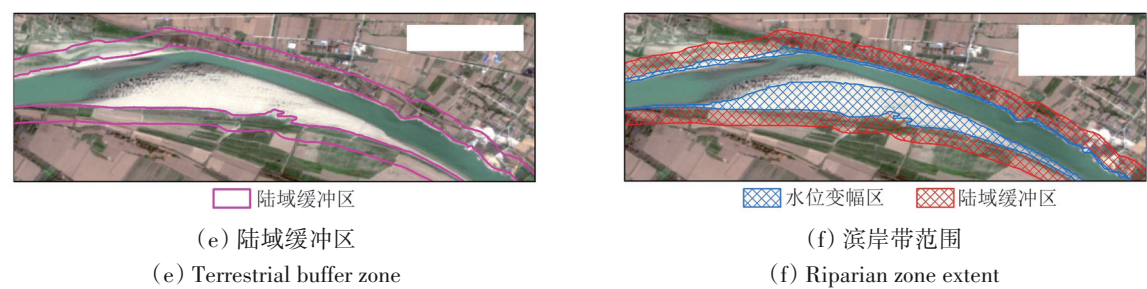


图5 基于水淹频率的滨岸带范围划定案例
Fig.5 A case study of the riparian zone delineation based on inundation frequency

生态用地面积的准确识别依赖于科学的土地利用分类体系。本文依据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)，结合滨岸带土地利用特征，构建了一套包含生态用地与开发用地两个一级类，以及水域、林草地等9个二级类的土地利用分类体

系(表3)。土地利用信息提取基于2022年—2023年空间分辨率优于2 m的卫星遥感影像数据，采用目视解译方法进行判读，并利用更高分辨率遥感影像和实地核查相结合的方式对结果进行验证。经验证，土地利用分类精度达到95%以上。

表3 滨岸带土地利用分类体系
Table 3 Land use classification system of the riparian zone

序号	一级类	二级类	定义
1	生态用地	水域	指陆地水域、沼泽等用地
2		林草地	指生长乔木、竹类、灌木的土地,包括绿化用地及河流沟渠的护堤林;生长草本植物为主的土地,包括公园绿地、防护绿地等
3		未利用地	指目前还未利用的土地,包括裸土地、沙地、盐碱地、冰川,以及永久积雪等其他土地
4	开发用地	工矿用地	指厂矿、大型工业区、油田、盐场、采石、采砂(沙、土)等用地
5		港口码头	指用于人工修建的客运、货运、捕捞及工程、工作船舶停靠及其附属建筑物的场地
6		生活用地	指用于生活居住、商业服务、教育科研、民生基础及其附属设施的土地
7		农业用地	指直接或间接为农业生产所利用的土地,包括耕地、园地、养殖水面等
8		交通用地	指用于运输通行的地面线路、场地等的土地,包括机场、铁路、桥梁、道路等,不包括港口码头
9		硬化堤坡	指采用混凝土、砌石等硬质或半硬质材料修建的河湖(库)堤坡水利工程,通常表面无植被覆盖

4 结果与讨论

4.1 滨岸带范围分布特征

滨岸带宽度是影响其生态功能的重要因素(杨胜天等, 2007)。长江干流中下游滨岸带资源分布不均匀,整体平均宽度为608 m,其中水位变幅区为主体部分,平均宽度为398 m,约占滨岸带平均宽度的65%。不同城市的滨岸带平均宽度为289—982 m(图6),其中咸宁市、黄冈市、常州市3市滨岸带宽度超800 m,上海市、无锡市、九江市、宜昌市等4市滨岸带宽度不足350 m,岸带资源相对匮乏。

4.2 滨岸带生态空间分布特征

长江干流中下游滨岸带生态空间分布呈现显

著的梯度性和结构性差异(图7)。从空间梯度来看,生态岸带比呈现“中游优于下游、右岸高于左岸”的空间特征,整体生态岸带比为45.9%。江西省和湖南省的生态岸带比较高,主要得益于鄱阳湖、洞庭湖流域分布有大面积滩涂湿地资源,滨岸带自然地貌保存较为完整,人类开发强度相对较低;湖北省、安徽省和江苏省的生态岸带比接近整体平均值,表明该地生态保护与开发压力处于相对平衡状态;上海市由于高度城市化导致滨岸带人工硬化严重,生态空间被大量基础设施挤占,生态岸带比最低,仅为34.4%。从市级行政区来看,中游的咸宁市、黄冈市和铜陵市生态岸带比低于40%,主要受农业生产活动干扰,下游的无锡市、泰州市生态岸带比同样不足40%,主要受密集的港口设施、工业用地扩张影响。

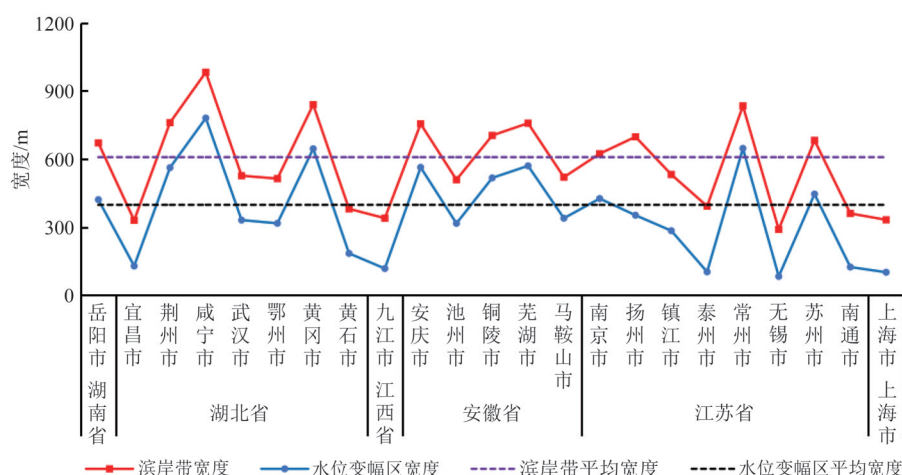


图6 长江干流中下游流经城市滨岸带宽度及水位变幅区宽度

Fig.6 Riparian zone width and water level fluctuation zone width of cities in the middle-lower reaches of Yangtze River

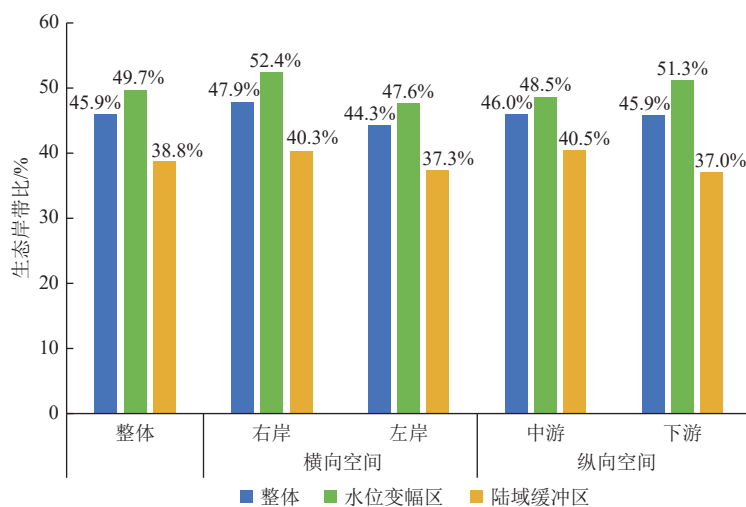


图7 长江干流中下游总体生态岸带情况

Fig.7 Ecological riparian zones situation in the middle-lower reaches of Yangtze River

从横向结构来看,整体呈现“水位变幅区生态化优于陆域缓冲区”的现象。水位变幅区整体生态用地占比为49.7%,较陆域缓冲区(38.8%)高出10.9个百分点,表明滨岸带生态修复成效在空间上存在不均衡。该格局与长江大保护战略、河湖长制等政策密切相关:以水域及临水岸线为核心对象的治理工程得以优先推进,沿岸生态修复措施(如生态护岸、“清四乱”等)取得一定成效;但缓冲区仍普遍受到农业扩张、城市开发等的土地利用压力,导致生态空间遭到挤压与破碎化。这一现象在经济发达的下游地区尤为突出,其水位变幅区生态用地占比达51.3%,较陆域缓冲区高14.3个百分点,表明在高度城市化区域,生态治理往往集中于“线”上工程,而难以实现“带”状空间的系统保护。

河流滨岸带的功能效应与生态岸带宽度呈正

相关,生态岸带宽度越宽,滨岸带的固岸、截污、过滤、栖息地营造等生态功能效果越显著(单楠等,2012)。整体生态岸带平均宽度为279 m,不同城市的生态岸带宽度范围为109—545 m(图8)。常州市、荆州市、岳阳市表现为“高宽度—高比例”,咸宁市、黄冈市表现为“高宽度—低比例”,宜昌市、黄石市、九江市表现为“低宽度—高比例”,无锡市、上海市、泰州市表现为“低宽度—低比例”。

4.3 滨岸带生态空间保护关键问题分析

4.3.1 滨岸带人工占用和干扰严重

长江滨岸带受到港口码头、工业、城市公园、农业种植等占用和干扰问题突出,开发利用率达54.1%(图9)。从利用类型来看,整体以农业用地为主,占比达33.7%,其中咸宁市、黄冈市和荆州市

等中游城市形成明显的农业生产带，农业面源污染入河风险高；工矿用地占比为7.2%，高度集中于下游的泰州市、无锡市、扬州市和上海市等城市；生活用地和交通用地占比分别为6.2%、4.1%，其中包含一定比例的滨江公园、绿道和观景平台中的铺装、步道、建筑基座等硬化设施。近年来，滨江城市积极推进滨江公园和城市滨江风光带建

设，挖掘滨岸带的旅游价值，但建设滨江公园过程中实施的堤岸及滨江滩硬化工程，破坏了长江水生动物栖息地，影响了长江生态系统的健康。港口码头虽占比不高（1.0%），但空间极化和枢纽效应突出，上海市（11.2%）和无锡市（8.9%）等城市占比远超其他城市。

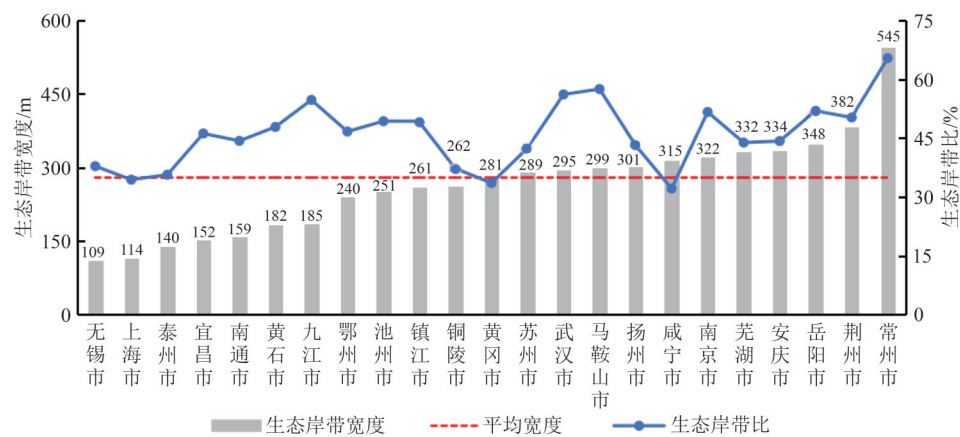


图8 长江干流中下游流经城市生态岸带宽度及生态岸带比情况

Fig.8 Width of the ecological riparian zones and ecological riparian ratio situation along cities in the middle-lower reaches of Yangtze River

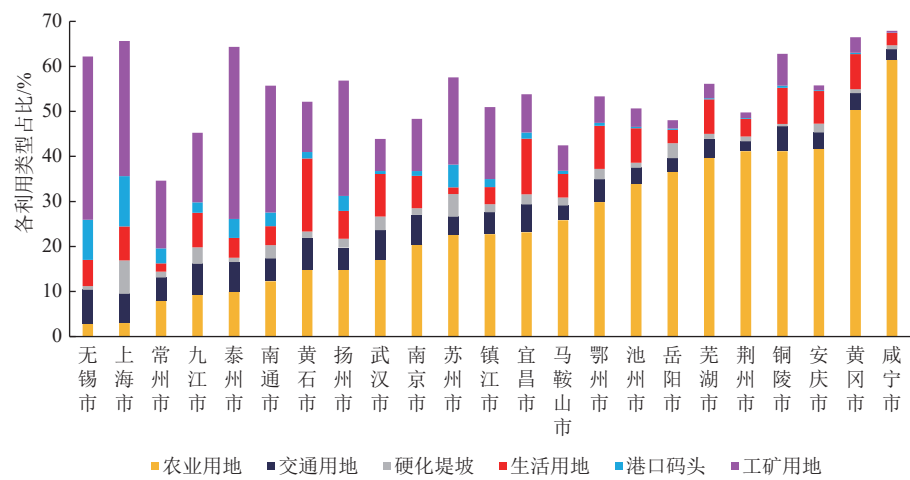


图9 长江干流中下游流经城市滨岸带开发利用情况

Fig.9 Development and utilization of the riparian zone along cities in the middle-lower reaches of Yangtze River

从横向结构来看，水位变幅区开发利用率（50.8%）低于陆域缓冲区（60.2%）。其中，农业用地、硬化堤坡和港口码头等利用类型主要集中在水位变幅区，而工矿用地、生活用地和交通用地则相反。

4.3.2 河道硬质护岸破坏自然水陆交互作用

长江干流中下游干流密集实施的护岸、护滩等河势控制工程，一定程度上破坏了长江水生动物生境，影响长江生态系统健康。长距离的岸堤

固化、建坝等严重阻碍上下游生物信息交流与遗传信息传递，导致生态廊道功能急剧下降，引发生态系统失衡与生态功能退化。分析监测结果可知，滨岸带硬化堤坡长度约87 km，主要分布在下游的江苏省（37.9 km）、上海市（11.8 km）。自然状态下，河堤水陆交错带的土壤和植被中含有大量动植物、微生物，既可以为水生动物提供饵料和重要的产卵场所，又能促进水体与土壤的自由渗透交换，发挥滞洪补枯的作用。然而，密集且大

规模的混凝土硬化护岸、护滩工程, 严重影响了滨岸带的生态功能。

4.4 滨岸带生态空间年际变化分析

2022年—2023年, 长江干流中下游滨岸带土地利用类型发生变化的区域面积为42.7 km², 占总面积的1.8%, 其变化呈现“生态空间缩减、人类活动扩张”的特征(图9)。从用地类型的净变化量来看, 生态用地缩减6.6 km², 主要转化为农业用地和工矿用地; 生活用地、港口码头和交通用地分别缩减0.9 km²、0.5 km²和0.1 km²。相反, 农业用地净增加6.9 km², 新增部分主要由生态用地转入, 硬化堤坡和工矿用地分别扩张0.7 km²和0.5 km², 说明人类活动对临水空间的占用增强, 农业开垦

和堤岸硬化是导致滨岸带生态空间萎缩的主要驱动因素。

从横向结构来看, 水位变幅区生态用地、港口码头、生活用地缩减和农业用地、硬化堤坡扩张; 陆域缓冲区则表现为生态用地、工矿用地扩张和农业用地、生活用地、交通用地缩减。从市级行政区来看, 咸宁市、池州市等表现为农业主导型变化, 生态用地显著缩减, 同时农业用地大幅增加; 苏州市等表现为产业调整型变化, 工矿用地大幅增加, 港口码头显著减少; 九江市等表现为港口扩张型, 在港口码头显著增加的同时生态用地显著减少; 常州市、无锡市等各类型用地变化幅度很小, 土地利用格局相对稳定。

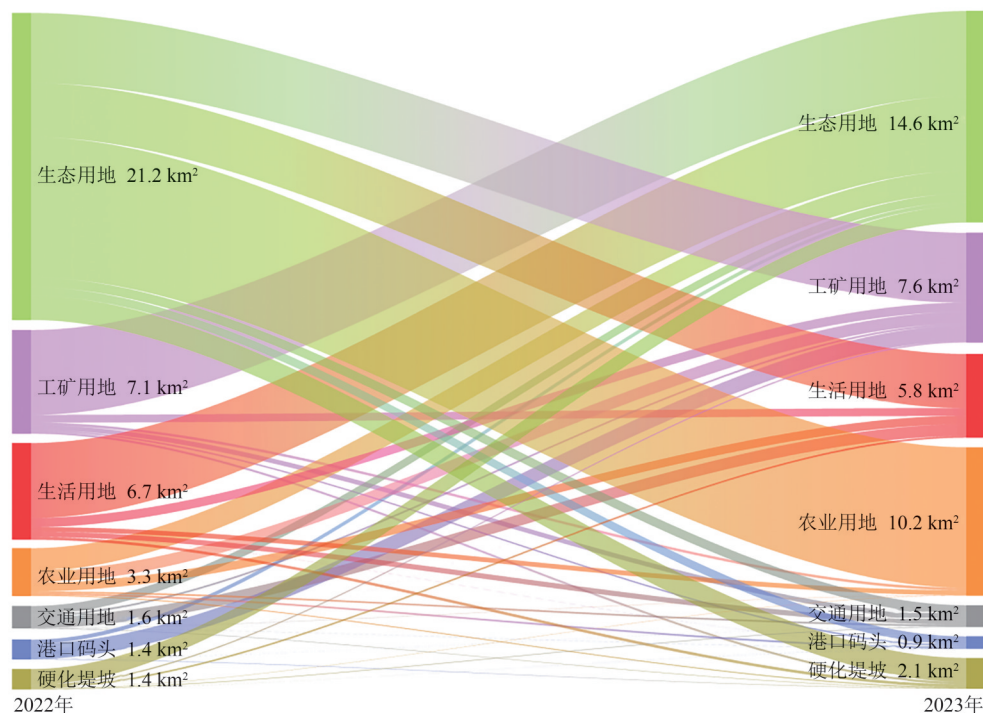


图10 2022年—2023年长江干流中下游滨岸带土地利用类型面积变化

Fig.10 Area change of land use types in the riparian zones of the middle-lower reaches of Yangtze River from 2022 to 2023

5 结论

针对大尺度河流滨岸带范围难以精准、连续划定的技术难题, 本文提出并验证了一种基于水淹频率指数的大尺度遥感识别方法, 并成功应用于长江干流中下游干流的生态格局分析, 主要结论如下。

(1) 研究证实了基于时序遥感水淹频率动态划定滨岸带的可行性。该方法通过设定水淹频率阈值, 客观界定了水位变幅区的内外边界, 首次

实现了对长江干流中下游滨岸带空间范围的连续、自动化提取。与传统固定宽度法相比, 该方法体现了水文过程对滨岸带空间结构的驱动作用, 为大尺度河湖滨岸带生态空间的精准识别提供了可推广的技术范式。

(2) 揭示了长江干流中下游滨岸带生态空间存在显著的梯度性与结构性差异。明确指出了“中游优于下游、右岸高于左岸、水位变幅区优于陆域缓冲区”的整体格局, 反映了自然地理背景与人类开发强度的空间异质性。其中, 上海市等

下游高度城市化区域陆域缓冲区的生态空间挤压尤为突出，揭示了当前“线状治理”模式的局限性，强调了推进“带状保护”的系统性修复战略的紧迫性。

(3) 量化评估了长江滨岸带保护面临的核心压力与演变趋势。研究表明，农业用地和工矿用地是滨岸带生态空间最主要的占用类型，而下游密集分布的硬质护岸工程则严重阻碍了自然的水陆交互过程。2022年—2023年的动态监测更清晰地显示了“生态退、人工进”的逆向发展趋势，表明在持续的经济社会发展压力下，滨岸带生态空间保护的形势依然严峻，亟须纳入更严格的国土空间管控体系。

本文提出的方法在长江干流中下游得到了成功验证，未来可推广至全国不同水文与地貌特征的流域，以检验其普适性，为国家尺度的河湖滨岸带生态空间保护与修复政策提供技术支撑。

参考文献 (References)

- Chen B Q, Xiao X M, Li X P, Pan L H, Doughty R, Ma J, Dong J W, Qin Y W, Zhao B, Wu Z X, Sun R, Lan G Y, Xie G S, Clinton N and Giri C. 2017. A mangrove forest map of China in 2015: analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131: 104-120 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.011]
- Follmann A. 2015. Urban mega-projects for a 'world-class' riverfront—the interplay of informality, flexibility and exceptionality along the Yamuna in Delhi, India. *Habitat International*, 45: 213-222 [DOI: 10.1016/j.habitatint.2014.02.007]
- Gu J, Qin Y, Wang X, Ma J Y, Guo Z H, Zou L J and Shen X H. 2018. Changes in inundation frequency in Poyang Lake and the response of wetland vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 38(21): 7718-7726 (谷娟, 秦怡, 王鑫, 马静宇, 郭仲皓, 邹乐君, 沈晓华. 2018. 鄱阳湖水体淹没频率变化及其湿地植被的响应. *生态学报*, 38(21): 7718-7726) [DOI: 10.5846/stxb201710231898]
- Li H S, Yang Q P and Zhao Y M. 2022. Focusing on water eco-environment problems and sustainably promoting ecological conservation and restoration of the Yangtze River. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 12(2): 336-347 (李海生, 杨鹤平, 赵艳民. 2022. 聚焦水生态环境突出问题, 持续推进长江生态保护修复. *环境工程技术学报*, 12(2): 336-347) [DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220091]
- Li Y, Deng M J, Fang G H, Lu Y Y, Sun C R and Zhu Z H. 2024. Ecosystem health evaluation based on land use change—case study of the riparian zone of the Yangtze River in Jiangsu Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2): 206 [DOI: 10.1007/s10661-024-12358-y]
- Li Y, Wang Y J, Song K, Zhan Y T and Yang L P. 2024. Analysis of spatiotemporal changes and driving Forces of ecological quality in the main stream of the Yangtze River (Jiangsu Section) from 2000 to 2020 based on RSEI and Geo Detector. *Remote Sensing Technology and Application*, 39(6): 1478-1489 (李胤, 王玉军, 宋珂, 詹雅婷, 杨礼平. 2024. 基于遥感生态指数与地理探测器的长江干流岸带(江苏段)2000~2020年生态质量时空变化及其驱动因子分析. *遥感技术与应用*, 39(6): 1478-1489) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2024.6.1478]
- Liu Y C, Gao Y N. 2022. Surface water extraction in Yangtze River Basin based on sentinel time series image. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(2): 358-372 (刘宇晨, 高永年. 2022. Sentinel时序影像的长江流域地表水体提取. *遥感学报*, 26(2): 358-372) [DOI: 10.11834/jrs.20211287]
- Lu Y Y, Li Y, Fang G H, Deng M J and Sun C R. 2023. Ecological risk assessment and management for riverfront development along the Yangtze River in Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, 155: 111075 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111075]
- Naiman R J and Décamps H. 1997. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 28(1): 621-658 [DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621]
- Paterson S K, Loomis D K and Young S E. 2014. The human dimension of changing shorelines along the U.S. north atlantic coast. *Coastal Management*, 42(1): 17-35 [DOI: 10.1080/08920753.2013.863724]
- Peng J, Liu Y X, Li T Y and Wu J S. 2017. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China. *Ecological Indicators*, 72: 399-410 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.08.024]
- Shan N, Ruan X H and Feng J. 2012. Research advances in optimized design of water ecological shelter zones width. *Advances in Water Science*, 23(4): 581-589 (单楠, 阮晓红, 冯杰. 2012. 水生态屏障适宜宽度界定研究进展. *水科学进展*, 23(4): 581-589) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2012.04.009]
- Wang C, Yin W, Jia H Y, Lei J S and Xu J F. 2018. Review on the influence mechanism of riparian zone to the river ecosystem. *Ecological Science*, 37(3): 222-232 (王超, 尹炜, 贾海燕, 雷俊山, 徐建峰. 2018. 滨岸带对河流生态系统的影响机制研究进展. *生态科学*, 37(3): 222-232) [DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.03.029]
- Wang X L, Liu C M, Yang S T, Mannaerts C M, Gao Y F and Li Q. 2009. Effect of nitrogen removal simulated by RIP_N model to a riparian zone in Guangting reservoir catchment. *Environmental Science*, 30(9): 2502-2511 (王雪蕾, 刘昌明, 杨胜天, Mannaerts C M, 高云飞, 李茜. RIP_N模型对官厅水库库滨带去氮效应的流域尺度模拟分析. *环境科学*, 30(9): 2502-2511) [DOI: 10.13227/j.hjck.2009.09.029]
- Wen K, Yao H M, Gong Z Q, Na Z L, Wei Y M, Huang Y, Chen H Q, Liao P R and Tang L P. 2022. Influence of inundation frequency change on enhanced vegetation index of wetland vegetation in Poyang Lake, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46(2): 148-161 (文可, 姚焕玫, 龚祝清, 纳泽林, 韦毅明, 黄以, 陈华权, 廖鹏任, 唐丽萍. 2022. 水淹频率变化对鄱阳湖增强型植被指数的影响. *植物生态学报*, 46(2): 148-161) [DOI: 10.17521/cjpe.2021.0033]
- Wu Q S, Wang M X, Shen Q, Yao Y, Li J S, Zhang F F and Zhou Y M.

2022. Small water body extraction method based on Sentinel-2 satellite multi-spectral remote sensing image. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(4): 781-794 (吴庆双, 汪明秀, 申茜, 姚月, 李俊生, 张方方, 周亚明). 2022. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取. *遥感学报*, 26(4): 781-794 [DOI: 10.11834/jrs.20229340]
- Xia H M, Zhao J Y, Qin Y C, Yang J, Cui Y P, Song H Q, Ma L Q, Jin N and Meng Q M. 2019. Changes in water surface area during 1989-2017 in the Huai River Basin using Landsat data and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(15): 1824 [DOI: 10.3390/rs11151824]
- Xu J, Li G Z, Zheng H, Luan H L, Liu T H and Yang W J. 2022. Ecological functional zoning of the riparian zone of five rivers in Poyang Lake Area based on remote sensing. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 39(7): 154-162 (徐坚, 李国忠, 郑航, 栾华龙, 刘同宦, 杨文俊). 2022. 基于遥感的鄱阳湖五河滨岸带生态功能分区研究. *长江科学院院报*, 39(7): 154-162 [DOI: 10.11988/ckyyb.20210297]
- Yang S T, Wang X L, Liu C M, Sheng H R and Li Q. 2007. Recent advances in the study of riparian ecosystems. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(6): 894-905 (杨胜天, 王雪蕾, 刘昌明, 盛浩然, 李茜). 2007. 岸边带生态系统研究进展. *环境科学学报*, 27(6): 894-905 [DOI: 10.3321/j.issn:0253-2468.2007.06.002]
- Yuan C Y, Liu C H. 2024. GEE-based monitoring of long time-series changes of lake water bodies in the Yangtze-Huai River Basin. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 38(2): 23-27, 36 (苑春雨, 刘昌华). 2024. 基于 GEE 的长江—淮河流域湖泊水体长时序变化监测. *黑龙江工程学院学报*, 38(2): 23-27, 36 [DOI: 10.19352/j.cnki.issn1671-4679.2024.02.004]
- Zhang H, Sun J, Deng W and Peng L. 2020. Ecosystem health: assessment framework, spatial evolution, and regional optimization in South-west China. *Chinese Geographical Science*, 30(1): 142-156 [DOI: 10.1007/s11769-020-1101-8]
- Zou H, Duan X J, Chen W X. 2019. Classification, spatial distribution and protection issues of the natural shoreline of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28(11): 2649-2656 (邹辉, 段学军, 陈维肖). 2019. 长江自然岸线分类划定、空间分布及保护状况研究. *长江流域资源与环境*, 28(11): 2649-2656 [DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201911011]
- Zou Z H, Dong J W, Menarguez M A, Xiao X M, Qin Y W, Doughty R B, Hooker K V and Hambright K D. 2017. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984-2015. *Science of the Total Environment*, 595: 451-460 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.259]
- Zou Z H, Xiao X M, Dong J W, Qin Y W, Doughty R B, Menarguez M A, Zhang G L and Wang J. 2018. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(15): 3810-3815 [DOI: 10.1073/pnas.1719275115]

Delineating riparian zones and analyzing ecological patterns via inundation frequency: a case study of the middle-lower reaches of Yangtze River

WANG Nan^{1,2}, LIU Shuai^{1,2}, WANG Xuelei^{1,2}, ZHANG Haobin^{1,2}, ZHAO Ruixue^{1,2},
LI Yong^{1,2}, WANG Chen^{1,2}, CHEN Huajie^{1,2}

1. Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China

Abstract: The riparian zone serves as a critical ecotone between terrestrial and aquatic ecosystems, playing a vital role in maintaining riverine ecological security and regulating water-land interactions. Accurate delineation and dynamic monitoring of riparian zones are fundamental for watershed-scale ecological protection and spatial management.

This study developed a novel remote sensing method for large-scale riparian zone delineation based on the inundation frequency index, using multi-temporal Sentinel-2 imagery and the GEE (Google Earth Engine) platform. By constructing a water inundation frequency index and implementing a threshold-based partitioning approach, we objectively defined the inner and outer boundaries of the water-level fluctuation zone in the middle-lower reaches of the Yangtze River.

(1) The delineated riparian zone has an average width of 608 m, ranging from 289 m to 982 m across different urban sections; (2) the ecological riparian ratio is 45.9%, exhibiting distinct spatial patterns of “middle reaches > lower reaches,” “right bank > left bank,” and “water-level fluctuation zone > terrestrial buffer zone;” (3) the development utilization rate of riparian zones is 54.1%, primarily occupied by agricultural land (33.7%) and industrial-mining land (7.2%); and (4) approximately 87 km of hardened embankments are concentrated in the lower reaches, substantially disrupting natural land-water interactions. Furthermore, we observed a net reduction of 6.6 km² in ecological land area during 2022–2023, indicating a continuing trend of “ecological retreat and artificial expansion.”

This study confirms that the inundation frequency-based remote sensing method enables continuous, automated, and large-scale delineation of riparian zones, providing robust technical support for watershed-scale ecological assessment and spatial management strategies.

Key words: inundation frequency, ecological space, delimitation of riparian zone, remote sensing, middle-lower reaches of Yangtze River

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U23A2015)