引文格式：杜建超,王鼎力,白晋颖,等. 基于PIE-Engine的长江干流水体提取方法与水质监测分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(1): 79-84. doi: 10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.01.017

基于PIE-Engine的长江干流水体提取方法与水质监测分析

杜建超[1]，王鼎力[1]，白晋颖[2]，李婷婷[2]
（1. 西安电子科技大学 通信工程学院，陕西 西安 710071；2. 航天宏图信息技术股份有限公司 西安分公司，陕西 西安 710199）

摘　要：利用遥感影像研究长江流域的水资源状况，对于长江流域的生态环境保护具有重要意义。基于2014—2023年30 m分辨率Landsat8遥感影像，利用PIE-Engine Studio平台和NDWI反演模型提取了长江干流的水体并计算了水域面积；通过计算叶绿素a浓度、水体透明度和悬浮泥沙浓度分析了长江干流水质。结果表明，长江水域面积的最大、最小值分别在2019年、2014年；叶绿素a浓度的最大、最小值分别在2021年、2014年；水体透明度的最大、最小值分别在2023年、2014年；悬浮泥沙浓度的最大、最小值分别在2021年、2022年。长江上游的水量小、水质好，沿着流域向下长江干流水量增大、水质变差；随着对长江流域的治理，干流水质呈逐年变好的趋势。

关键词：水体提取；遥感影像处理；水质分析；长江；PIE-Engine
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）01-0079-06

Extraction Method of Yangtze River Mainstream Water and Water Quality Monitoring Analysis Based on PIE-Engine

DU Jianchao[1], WANG Dingli[1], BAI Jinying[2], LI Tingting[2]
(1. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Xi'an Branch, PIESAT Information Technology Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

Abstract: Utilizing remote sensing image to study the water resource status of the Yangtze River basin is of great significance for ecological and environmental protection in this region. Based on Landsat8 remote sensing images with a 30 m resolution from 2014 to 2023, we utilized the PIE-Engine Studio platform and NDWI inversion model to extract water and calculate water area along the Yangtze River mainstream. Furthermore, we analyzed the water quality in the Yangtze River mainstream by calculating three water quality parameters, such as chlorophyll-a concentration, water transparency, and suspended sediment concentration. The results indicated that the water area of the Yangtze River was smallest in 2014 and biggest in 2019. The chlorophyll-a concentration was lowest in 2014 and highest in 2021. Water transparency was lowest in 2014 and highest in 2023. Suspended sediment concentration peaked in 2021 and was lowest in 2022. The findings reveal that the upstream of the Yangtze River has less water volume but better water quality. As the basin flows downstream, the water volume of mainstream gradually increases, and water quality gradually deteriorates. With the management and governance of the Yangtze River basin, the water quality of mainstream exhibits a trend of improving year by year.

Key words: water extraction, remote sensing image processing, water quality analysis, the Yangtze River, PIE-Engine

水是生命之源，不仅是人类日常生活的必需品，也是农业灌溉、工业生产、能源发电等领域不可或缺的资源[1-2]。长江全长约6 397 km，是我国最长的河流[3]。长江流域水生态问题是一个历史性、持续性问题，一直以来备受关注[4]，随着国家治理和保护力度的提升以及科技的发展，长江流域的生态环境得到较好的改善[5]。对长江流域的水体进行持续监测和分析，掌握水质污染状况并制定相应的治理方法，是保护长江生态环境的重要措施[6]。国际国内科技水平的高速发展为遥感数据的处理提供了平台和技术支持，特别是卫星遥感技术在水资源监测方面的应用，为水体分析提供了一种高效便捷的途径[7]。由公开文献[8-17]可知，目前基于遥感影像的水体提取和分析以内陆湖泊为主，对长江干流这种跨度较大的水体研究很少。因此，本文利用PIE-Engine平台和Landsat8卫星遥感数据提取了长江上中下游的水体，获取干流影像，并通过水体叶绿素a浓度、水体透明度和悬浮泥沙浓度3种水质参数进行水质分析，从而对长江干流水体进行有效监测，为生态建设和环境保护提供重要依据。

项目来源：教育部产学合作协同育人资助项目（230902313183709）；西安电子科技大学2023年教育教学改革研究资助项目（B2303）；西安电子科技大学通信工程学院2023本科教育教学改革资助项目。
第一作者简介：杜建超（1977—），博士，副教授，博士生导师，研究方向为图像处理算法及应用，E-mail：jcdu@xidian.edu.cn。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江流域的总面积约为1 800 000 km^2，占我国国土面积的18.8%；地形地貌多样，从西部的青藏高原，到中部的四川盆地和云贵高原，再到东部的长江中下游平原，地形变化明显。其中，长江干流是我国最长的河流，也是亚洲第一大河、世界第三大河。其发源于青海省西南部、青藏高原的唐古拉山脉主峰各拉丹冬雪山，自西而东先后流经青海、四川、西藏、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海共11个省、自治区和直辖市[18]。地理上长江干流分为上游、中游和下游三大部分：上游从源头到宜昌，长约4 504 km；中游从宜昌到湖口，长约955 km；下游从湖口到入海口，长约938 km。本文选取的研究区下游和中游如上所述，上游仅研究重庆至宜昌段，长约660 km。

1.2 数据来源

本文采用由美国地质调查局提供的Landsat8 Collection 2 Surface Reflectance（C2SR）数据集。该数据集是由2013年2月11日发射的Landsat8卫星拍摄的原始遥感影像数据处理后得到的[19]，在数据处理方法、数据质量和数据更新频率等方面都有所提升，在土地利用、植被监测等领域具有广泛应用[20]。C2SR数据集的时间范围为2013年3月至今，数据更新频率为16 d，空间范围覆盖全球，分辨率为30 m，具体波段数据见表1。本文采用B3、B4、B5波段进行水体提取和水质分析。对B3、B4、B5波段值进行先乘0.000 027 5再减去0.2的预处理，将原始像元值转换为地表反射率值，以更接近地表实际的反射特性[21]。

表1 Landsat8 C2SR卫星波段参数表

名称	波段	波长范围/μm	乘法比例因子	加性比例因子
B1	海岸波段	0.433~0.453	0.000 027 5	−0.2
B2	蓝色波段	0.450~0.515	0.000 027 5	−0.2
B3	绿色波段	0.525~0.600	0.000 027 5	−0.2
B4	红色波段	0.630~0.680	0.000 027 5	−0.2
B5	近红外波段	0.845~0.885	0.000 027 5	−0.2
B6	短波红外1	1.560~1.660	0.000 027 5	−0.2
B7	短波红外2	2.100~2.300	0.000 027 5	−0.2
B10	热红外波段	10.600~11.190	0.003 418 02	149

1.3 PIE−Engine平台

PIE−Engine是一个遥感计算云服务平台，可为用户提供地理空间数据分析和计算服务。该平台依托云计算技术，汇聚了海量的卫星遥感影像和地理要素数据资源，支持国际国内的遥感数据集成，并面向全国用户提供数据访问服务[22]。通过在线实时、按需计算的模式，PIE−Engine极大地降低了遥感影像处理时间和资源成本，实现了高效的遥感数据处理与分析。该平台涵盖的数据类型丰富多样，包括Landsat影像、哨兵影像、水体数据、农业数据和地物分类数据等，且数据持续更新，确保用户能获取最新、最全面的遥感信息[23]。

2 研究方法

2.1 NDWI模型

NDWI是一种利用遥感影像的特定波段进行归一化差值处理，以突显影像中水体信息的指数，由Mcfeeters于1996年提出[24]。水体在B3波段具有较高的反射率，而在B5波段的反射率较低；植被、土壤、建筑物等其他地物在这些波段的反射率特性与水体不同，因此可通过比较这些波段的反射率来区分水体和其他地物。NDWI为B3和B5波段反射率之差与其反射率之和的比值，范围为−1~1，负值通常表示没有水体存在，正值表示水体存在，且值越高表示水体类型更稳定。为给出合适的NDWI分割阈值，本文采用对照参考法，以PIE平台提供的JRC Monthly Water History水体数据集为参照数据，计算同一时段同一区域内JRC和经NDWI反演Landsat8遥感数据得出的水体面积的交并比。交并比越大，说明两个水体区域重叠度越高，因此选取交并比最大时的NDWI分割阈值作为全局阈值。本文选取2020年长江上、中、下游3个局部区域进行实验来确定阈值。设置初始阈值为0，阈值增量为0.01，当阈值增到0.3时，交并比达到最大，因此本文将0.3作为判定水体的阈值，将NDWI值大于0.3的部分判定为水体。

2.2 长江水体提取方法

基于NDWI模型，本文在PIE−Engine平台上利用Landsat8 C2SR卫星遥感影像对长江水体进行提取。具体步骤包括：①确定可以使用并符合研究要求的数据源，研究区域为长江干流的重庆至上海段，研究时间为2014—2023年，因此在PIE−Engine平台中选择合适的Landsat8卫星数据；②划定感兴趣区域并加载卫星数据，由于整个长江流域的遥感影像数据量巨大，因此本文将长江干流划分为上、中、下游3个部分分别进行处理，以降低对计算机资源的要求，利用平台提供的框选工具在PIE−Engine中的数字地图上划定长江上、中、下游3个感兴趣区域，再加载相应的Landsat8 C2SR卫星数据，并经区域过滤、时间过滤、云量筛选、波段筛选、裁剪和拼接等操作得到感兴趣区域

的卫星影像和相关数据，分别加载不同年份的数据，以便后续对水质变化进行分析；③基于NDWI模型提取水体，计算加载的卫星影像数据的像素级NDWI值，将结果大于0.3的像素判定为水体像素，并通过掩膜操作对水体进行显示，再通过PIE-Engine平台提供的面积计算函数计算水域面积。

在水体研究中，叶绿素a浓度、水体透明度、悬浮泥沙浓度常被用来反映水体质量[25]。本文对这3个指标进行了计算，一方面对比了同一年份不同流域位置的水质情况；另一方面对比了同一流域在不同年份的水质情况。

2.3　水质评价参数

1）叶绿素a浓度是指水中叶绿素a的含量，通常以每升水体中叶绿素a的微克数来表示。叶绿素a浓度通过遥感影像反演模型获得，首先取样测得水体叶绿素a浓度的实际值，再基于卫星遥感数据提取水体表面反射率，最后通过波段敏感性分析构建合适的回归建模。常用的反演模式包括单波段、双波段比值、多波段组合等。本文采用B4与B5波段反射率的比值来构建叶绿素a浓度的反演模型[26]，计算公式为：

$$c_{\mathrm{Chl-a}}=-6.69\times\frac{\mathrm{B5}}{\mathrm{B4}}+7.22 \tag{1}$$

叶绿素a浓度可反映水体中藻类和悬浮物的生长状况，其值受水体类型、地理位置、季节变化、营养盐含量、有机污染物等[27]多种因素影响。叶绿素a浓度低于5 μg/L，表明水体富营养化程度较低，水质清洁；在5~10 μg/L之间，表明水体有轻微富营养化，水质一般；超过10 μg/L，表明水体富营养化程度高，水质差。

2）水体透明度是指光透入水中的深浅程度。水体透明度同样采用真实数据和卫星遥感数据构建反演模型，B4与B3波段反射率的比值能准确表达水体透明度指标，本文采用三次函数回归模型[28]，即

$$S_{\mathrm{DD}}=5.766-26.701\times\frac{\mathrm{B4}}{\mathrm{B3}}+45.625\times\left(\frac{\mathrm{B4}}{\mathrm{B3}}\right)^2-21.035\times\left(\frac{\mathrm{B4}}{\mathrm{B3}}\right)^3 \tag{2}$$

水体透明度可反映水中悬浮物，尤其是浮游植物的多少。水中悬浮物含量大，透明度就低；反之，透明度就高[29]。因此，水体透明度直接关系到水体的光传输能力。河流的水体透明度一般在几十厘米到几米之间。

3）悬浮泥沙浓度是指流体内部处于悬浮状态的颗粒浓度。由于悬浮泥沙在B4波段的特征最明显，因此本文构建的反演模型为[30]：

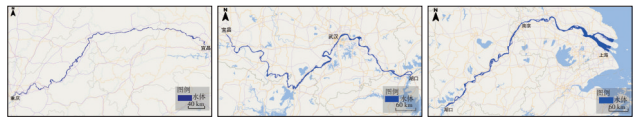
$$c_{\mathrm{SSC}}=617\,919\times(\mathrm{B4})^2-1\,245.8\times\mathrm{B4}+27.333 \tag{3}$$

悬浮泥沙浓度对确定水流挟沙能力和研究河口水流泥沙运动规律具有关键作用[31]。通常河流的悬浮泥沙浓度为几百到几千mg/L，浓度越大，表明水体受侵蚀、水土流失或人为活动的影响越大。

3　研究结果与分析

3.1　水体提取结果

长江上、中、下游水域的提取结果见图1，深蓝色曲线表示长江水域。在PIE-Engine平台上改变时间范围，可得到不同年份的水体提取结果，本文展示的是2020年的提取结果。



a 上游　　b 中游　　c 下游

图1　长江上、中、下游水域提取结果

审图号：GS(2024)0568

经过PIE-Engine计算得到的长江上、中、下游水域面积见表2，可以看出，长江干流的水域面积总体平稳，约为5 000 km²，2014年为最小值（4 703 km²），2019年达到最大值（5 128 km²）。分段观察可以发现，长江上游水域面积随时间变化的波动最平缓，中游次之，下游的波动最大。计算得到上、中、下游水域面积的标准差分别为24.041、95.767、110.661 km²，水域面积为上游＜中游＜下游，因此长江中下游容易发生洪涝灾害[32]。

表2　2014—2023年长江干流水域面积/km²

年份	上游水域面积	中游水域面积	下游水域面积	总和
2014	761	1 163	2 779	4 703
2015	766	1 277	2 790	4 833
2016	716	1 375	2 998	5 089
2017	746	1 466	2 780	4 992
2018	725	1 361	2 992	5 078
2019	702	1 401	3 025	5 128
2020	699	1 480	2 919	5 098
2021	726	1 443	2 770	4 939
2022	702	1 344	3 029	5 075
2023	729	1 313	2 939	4 981
年均值	727.2	1 362.3	2 902.1	4 991.6

3.2　精度评价

本文分别在长江上、中、下游各选取一个局部区域，计算2020年水体提取结果；并以PIE-Engine平台提供的JRC Monthly Water History数据集为验证数据，采用交并比、精确率、召回率和F_1-score进行精度评价。评价结果见表3，实验中NDWI值从0变化到0.5，增量为0.01，为简洁表中仅列出了NDWI增量为0.1时的结果，可以看出，当NDWI值为0.3时，交并比和F_1-score最大。

表3 水体提取精度评价

NDWI阈值	JRC/km²	本文/km²	交集/km²	并集/km²	交并比	精确率	召回率	F_1-score
0	153.029	159.598	152.959	159.668	0.958	0.958	0.999	0.978
0.1	153.029	156.371	152.892	156.508	0.977	0.977	0.999	0.988
0.2	153.029	154.168	152.715	154.482	0.989	0.990	0.997	0.994
0.3	153.029	152.963	152.675	153.317	0.996	0.998	0.997	0.997
0.4	153.029	149.274	149.092	153.211	0.973	0.998	0.974	0.986
0.5	153.029	140.706	140.578	153.157	0.917	0.999	0.918	0.957

3.3 水质分析

基于水质参数的反演模型，本文在PIE-Engine平台分别计算了2014—2023年3个水质参数在长江干流上、中、下游以及整个干流的平均值（表4~6）。长江上游的水体叶绿素a浓度普遍较小，大多小于5 μg/L，但标准差达到0.478 μg/L；随着流域向下，叶绿素a浓度逐渐增大，但标准差逐渐降低，中游的年均值为5.044 μg/L，标准差为0.329 μg/L；下游的年均值为5.396 μg/L，标准差仅为0.190 μg/L。这是由于长江上游地区水流湍急、营养盐含量较低，浮游植物生长受到限制，因此叶绿素a浓度较低且不稳定，而随着河流向下游流动，水流速度变缓，加上工业废水和生活污水的排放增加了水体中的营养盐和有机物含量，浮游植物开始大量繁殖，叶绿素a浓度逐渐升高且呈稳定增长趋势。整个干流的水体叶绿素a浓度在2014年最小，在2021年最大，且有逐渐升高的趋势。

表4 长江干流叶a浓度平均值/μg·L⁻¹

年份	上游	中游	下游	整体平均值
2014	3.605	4.256	5.159	4.339
2015	4.649	4.951	5.097	4.899
2016	3.901	4.895	5.178	4.658
2017	4.462	5.199	5.493	5.051
2018	3.665	4.947	5.599	4.737
2019	4.264	5.071	5.476	4.937
2020	4.452	5.164	5.413	5.009
2021	5.039	5.450	5.490	5.326
2022	4.131	5.352	5.409	4.964
2023	4.814	5.153	5.652	5.206
年均值	4.298	5.044	5.396	4.913

由表5可知，上游的水体透明度最高，基本都在7 m以上；中游和下游的透明度明显降低，中游为5~6 m，下游为4~5 m。长江上游的人口稀少，工业和农业活动较少，水体受到污染程度较低，因此透明度较高，随着河流向下，营养化、城市污水等问题降低了水体透明度，特别是接近入海口的地方，河流的浑浊度最高，海水的回流带入大量悬浮物质，也会造成水体浑浊。长江干流整体的透明度随时间呈上升趋势，2014年最小，2023年最大，表明水质在逐步提升。

表5 长江干流水体透明度平均值/m

年份	上游	中游	下游	整体平均值
2014	6.331	5.041	4.256	5.209
2015	7.275	5.449	4.077	5.600
2016	7.418	5.266	4.706	5.797
2017	7.623	4.538	4.699	5.620
2018	7.652	5.774	4.306	5.910
2019	7.305	5.462	5.050	5.939
2020	7.625	5.616	4.574	5.938
2021	7.142	5.649	5.148	5.980
2022	7.604	6.304	5.038	6.315
2023	8.586	6.343	5.179	6.703
年均值	7.456	5.544	4.703	5.901

由表6可知，长江下游的悬浮泥沙浓度最大，上游次之，中游最小。上游的水流速度较快，河床多由岩石构成，且受到强烈的侵蚀作用，因此悬浮泥沙较多。与上游相比，中游的悬浮泥沙浓度大幅降低，这是因为中游河段的水流速度较缓，泥沙逐渐沉积在河床上使水质通透，而下游河段是入海通道且受工业建设影响，悬浮泥沙浓度再次升高。从时间跨度来看，长江干流的悬浮泥沙浓度随时间逐渐减小，2022年达到历史最低水平，表明水质在好转。

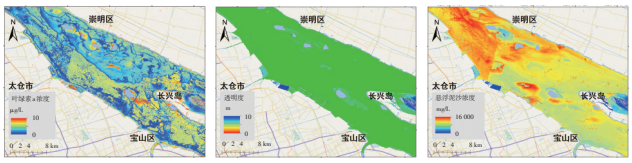
采砂作业通常会导致悬浮泥沙的增加，根据《长江泥沙公报》[33]，2017年长江上游干流的采砂量为125万t，相较于2016年，减少了41.3%；2017年长江干流崩岸长度为18 044 m，相较于2016年，减少了

表6 长江干流悬浮泥沙浓度平均值/mg·L⁻¹

年份	上游	中游	下游	整体平均值
2014	7 562.637	5 189.017	11 551.634	8 101.096
2015	9 714.815	3 023.947	11 458.474	8 065.745
2016	9 175.182	5 374.710	11 007.003	8 518.965
2017	5 922.218	3 710.482	8 728.442	6 120.381
2018	6 105.311	7 340.064	8 385.284	7 276.886
2019	7 673.328	6 934.751	8 067.187	7 558.422
2020	7 598.041	3 851.981	7 933.257	6 461.093
2021	9 385.473	8 694.136	8 691.324	8 923.644
2022	5 422.612	4 135.991	8 268.325	5 942.310
2023	6 345.735	3 481.485	8 027.215	5 951.478
年均值	7 490.535	5 173.656	9 211.814	7 292.002

41.7%，因此2017年长江上、中游的悬浮泥沙浓度大幅降低。2022年长江遭遇百年一遇枯水，造成长江干流输沙量骤减，2022年长江干流的崩岸长度也仅有1 440 m，是2021年的8.4%，相应的2022年长江上、中游的悬浮泥沙浓度也大幅降低。

以长江流域上海区域为例，2023年的叶绿素a浓度、水体透明度和悬浮泥沙浓度分别为5.9 μg/L、4.6 m和9 288.1 mg/L，表明上海区域的藻类和悬浮物生长较多，有轻微的富营养化，悬浮泥沙较多，透明度较低，水质呈中等偏下等级。在PIE-Engine平台绘制的水质专题图见图2。



a 叶绿素a浓度　　b 透明度　　c 悬浮泥沙浓度

图2　上海水质专题图

审图号：GS(2024)0568

4 结 论

本文通过PIE-Engine平台提取了长江干流的水体，计算了2014—2023年长江干流水域面积，并进行了水质分析，形成以下结论：

1）长江干流水域面积基本保持在5 000 km²，上、中、下游面积分别约为720、1 360、2 900 km²。上游面积和波动幅度均较小，中、下游更易发生崩岸、洪涝灾害。《长江泥沙公报》也显示长江干流中、下游发生崩岸的次数和长度高于上游。

2）长江水域水质呈上游高、下游低的态势。长江上、中、下游的叶绿素a浓度分别约为4.3、5.0、5.4 μg/L，悬浮泥沙浓度分别约为7 490、5 173、9 211 mg/L，说明上游流速快、受工业影响小、水质较好、透明度较高，而下游的叶绿素a浓度和悬浮泥沙浓度都较大，透明度也最低，这与水流速度降低、工业活动增多有关。

3）长江干流的水质逐年向好，透明度呈逐年上升趋势，相较于2014年，2023年的透明度增加了28.68%；悬浮泥沙浓度呈逐年下降趋势，相较于2014年，2023年的悬浮泥沙浓度降低了26.53%。相信随着环保措施的加强，长江水质将得到进一步改善。

参考文献

[1] Venkatesan G, Sasikumar S, Karthick P, et al. Assessing Water Quality in the Cooum River Basin: A Comprehensive Review of Methodologies and Findings[J]. Asian Journal of Water Environment and Pollution, 2024, 21(6): 9-14

[2] 卫孟茹, 霍军军, 姚立强, 等. 长江经济带水资源空间均衡性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6 291-6 300

[3] 温姗姗, 王智晨, 翟建青, 等. 基于N-CMIP6的长江流域气温和降水未来预估[J]. 人民长江, 2024, 55(8): 69-78

[4] 刘兆孝. 新时期长江流域水资源保护规划及管理工作的思考[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(4): 1-7

[5] 陈进, 刘志明. 近年来长江水功能区水质达标情况分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 1-6

[6] Peng X, Chang K. Sustainable Development and Management of Water Resources in the Yangtze River Basin[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Green Energy, Environment and Sustainable Development, 2020: 7

[7] 郜玉青, 曹永强, 么嘉棋, 等. 基于卫星遥感的兴凯湖水资源特征变化研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(4): 397-410

[8] 厉芳婷, 胡菡, 刘韬, 等. 基于深度学习的遥感影像地表水时空监测与分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(9): 52-56

[9] 岑铭. 基于GEE平台的广西地表水时空特征分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(2): 17-22

[10] 吴常雪, 田碧青, 高鹏, 等. 近40年鄱阳湖枯水期水体面积变化特征及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 177-184

[11] 肖茜, 杨昆, 洪亮. 近30 a云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 1 083-1 096

[12] Xu Y Y, Lin J, Zhao J W, et al. New Method Improves Extraction Accuracy of Lake Water Bodies in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 365-377

[13] Li Y X, Li S H, Peng S Y, et al. Extraction of Plateau Lake Water Bodies Based on an Improved FCM Algorithm[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2021, 41(1): 1 727-1 740

[14] Guo J, Wang X P, Liu B, et al. Remote Sensing Extraction of Small Water Bodies on the Loess Plateau[J]. Water, 2023, 15(5): 866

[15] 李慧真, 王雨辰, 段高雨, 等. 基于GEE的黄河口表层悬浮泥沙浓度时空分布及其影响因素分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(8): 178-190

[16] Yunus A P, Masago Y, Hijioka Y. Analysis of Long-term (2002—2020) Trends and Peak Events in Total Suspended Solids Concentrations in the Chesapeake Bay Using MODIS Imagery[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 113 550

[17] 陶慧. 中国近30年湖泊秋季悬浮物浓度时空演变及其驱动因素[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2023

[18] 郭贤, 张玉平, 张永灵, 等. 2000—2022年长江流域地表温度时空变化特征研究[J]. 绿色科技, 2024, 26(17): 176-182

[19] Crawford C J, Roy D P, Arab S, et al. The 50-year Landsat Collection 2 Archive[J]. Science of Remote Sensing, 2023, 8:100 103

[20] Vermote E, Justice C, Claverie M, et al. Preliminary Analysis of the Performance of the Landsat8/OLI Land Surface Reflectance Product[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185(Iss2):46-56

[21] 潘越. 基于遥感和水动力模型的鄱阳湖水体叶绿素a浓度变化及驱动力分析[D]. 南昌:江西师范大学,2024

[22] Liu W X, Dai X A, Wang M L, et al. Area Changes and Influencing Factors of Large Inland Lakes in Recent 20 Years: A Case Study of Sichuan Province, China[J]. Water, 2022, 14(18):2 816

[23] 陈柯兵,孙思瑞. 基于国产PIE-Engine和AI Earth遥感云平台的三种水域信息提取方法对比研究[C]//2022(第十届)中国水利信息化技术论坛论文集,2022:7

[24] McFeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1 425-1 432

[25] 黄振辉,杨小红,王力哲,等. 小样本下大冶湖非光学活性水质参数反演与时空变化分析[J]. 长江流域资源与环境,2024,33(1):102-113

[26] 杨广普,江涛,赵永芳,等. 基于长时序遥感影像的胶州湾秋季叶绿素a浓度变化及其影响因素研究[J]. 海洋学报,2019,41(1):183-190

[27] 娄保锋,周正,苏海,等. 鄱阳湖营养水平关键指标时空分布特征及适宜控制标准[J]. 湖泊科学,2023,35(3):897-909

[28] 殷子瑶,江涛,杨广普,等. 1986—2017年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J]. 海洋科学,2020,44(4):21-32

[29] 周燕,禹定峰,刘晓燕,等. 基于GOCI数据的胶州湾水体透明度遥感反演及日变化研究[J]. 国土资源遥感,2021,33(2):108-115

[30] 韩仕龙. 基于QAA算法的黄河口悬浮泥沙浓度半分析模型[D]. 武汉:湖北工业大学,2016

[31] 贾淇文,章桂芳,唐世林,等. 2013—2018年珠江河口伶仃洋水域悬浮泥沙季节性变化分析[J]. 中山大学学报(自然科学版),2021,60(5):59-71

[32] 严夏青. 基于多源遥感数据长江干流水体面积时空变化特征的研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2022

[33] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报[EB/OL]. (2024-08-20)[2024-11-15]. http://www. cjw. gov. cn/zwzc/zjgb/cjnsgb/

(上接第78页)

决。例如，在利用计算机编程实现算法的过程中，本初子午线与赤道交点处，求解大地线会出现奇异情况，通常给定一个极小值，在不影响计算精度的前提下规避奇异。当大地线遇到国际经纬线的划分规则时，应根据不同情况分类判断加以处理。大地线内插前进方向方位角与点位大地坐标在求解过程中应满足本初子午线以东自0°逐渐增大，以西开始为负值减小，E180°与W−180°两经线重合时，通常记录为−180°00′00″，当大地线穿越南北极或长度大于10 000 km时其方位角发生转向。上述问题是本文相对之前学者分析更深入的内容。综上所述，本文算法在大地线解算和表达中获得了良好的效果，表明其在大地线解算与可视化场景中具有实际应用价值。

参考文献

[1] 施一民. 现代大地控制测量[M]. 北京:测绘出版社,2003

[2] 史国友,周晓明,贾传荧. 贝塞尔大地主题正解的改进算法[J]. 大连海事大学学报,2008,34(1):15-19

[3] 岑铭. 基于大地主题解算方法的无人机偏航距修正探讨[J]. 广西水利水电,2016(4):15-17

[4] 胡泽明,岳春生,程娟. 嵌入式GIS导航系统中快速偏航算法的设计与实现[J]. 测绘科学,2011,36(4):164-165

[5] 肖英楠. 基于核相关滤波的无人机偏航角跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2021,29(7):145-148

[6] 王志明,李锁乐. 机载LiDAR技术支持下的荒漠地区1∶10 000地形图测绘与研究:以内蒙古阿拉善地区为例[J]. 测绘通报,2019(4):91-95

[7] 孔祥元,郭际明,刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2014

[8] 冯琰,施一民. 基于区域性椭球面数字地面模型的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2003,31(8):964-967

[9] 李陆勋. 椭球膨胀法在区域控制网投影计算中的应用[J]. 测绘通报,2012(5):41-43

[10] 刘洋,高井祥,姚一飞,等. 椭球膨胀法在地面实际球面面积计算中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(12):1 377-1 381

[11] 柴军兵,丁翔宇,彭永超,等. 椭球膨胀法在GPS测量中的应用[J]. 测绘通报,2009(12):34-36

[12] 董浩,刘会通. 载机偏航运动对大视场红外扫描装置成像质量影响的仿真分析[J]. 红外与激光工程,2015,44(3):810-815

[13] 魏保峰,陈国平,李宁,等. 昆明2000平面坐标系统设计与实现[J]. 地理空间信息,2023,21(5):102-106

[14] 刘军,王鹤. 基于MATLAB的大地测量计算实验系统设计与实现[J]. 地理空间信息,2023,21(12):111-114

[15] 邹娟茹,孙兴华,唐红涛,等. 基于三维空间的地理要素表达新形式[J]. 地理空间信息,2021,19(7):39-41