

文章编号: 1672-8785(2025)05-0038-11

基于 Sentinel-2 卫星影像的水污染遥感动态监测 ——以石家庄市正定县滹沱河为例

陆家杰¹ 张 霞^{2,3*} 侯泽轩¹ 廖正雄¹ 薛一诺¹

李梦格¹ 郭佳茜⁴ 张 莉⁵ 杨静婷¹

(1. 河北地质大学土地科学与空间规划学院, 河北 石家庄 050031;

2. 河北省农业干旱遥感监测国际联合研究中心, 河北 石家庄 050031;

3. 河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031;

4. 河北地质大学政法学院, 河北 石家庄 050031;

5. 河北地质大学管理学院, 河北 石家庄 050031)

摘 要: 作为正定县的重要河流, 滹沱河的水污染状况影响经济社会发展及人民生活质量, 因此高效率监测水污染状况尤为重要。基于 Sentinel-2 卫星影像, 综合叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度、水体透明度三个指标构建水体主要污染物遥感反演模型, 并利用空间自相关模型对石家庄市正定县滹沱河进行水污染遥感动态监测。研究结果表明: 2019~2023 年期间, 叶绿素 a 浓度逐渐降低, 其中 2019 年上游的叶绿素 a 浓度最高; 悬浮物浓度较高区域逐渐从上游转移至下游; 水体透明度总体呈现先升后降的趋势; 水污染程度由上游污染集聚转变为中下游污染集聚; 正定县滹沱河的空间集聚程度先降后升, 且高-高集聚类型数量不断减少, 呈现出显著的空间正相关关系。选取高精度卫星数据, 融合水污染关键指标, 对滹沱河水污染状况进行动态监测, 揭示水污染的空间集聚分布特征, 为当地的水环境保护和治理提供了科学依据。

关键词: 滹沱河; 遥感; 叶绿素 a 浓度; 悬浮物浓度; 透明度

中图分类号: X832 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.05.006

Dynamic Monitoring of Water Pollution by Remote Sensing Based on Sentinel-2 Satellite Imagery: A Case Study of Hutuo River in Zhengding County, Shijiazhuang City

收稿日期: 2024-12-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42001300); 国家重点研发计划项目(2022YFB3903005); 河北省教育厅青年基金项目(QN2020212); 河北地质大学省级大学生创新创业训练计划资助项目(S202410077023)

作者简介: 陆家杰(2003-), 男, 广西桂林人, 本科, 主要研究方向为水污染遥感。

*通讯作者: E-mail: zhangxia396@hgu.edu.cn

LU Jia-jie¹, ZHANG Xia^{2,3*}, HOU Ze-xuan¹, LIAO Zheng-xiong¹, XUE Yi-nuo¹,

LI Meng-ge¹, GUO Jia-qian⁴, ZHANG Li⁵, YANG Jing-ting¹

(1. School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

2. Hebei International Joint Research Center for Remote Sensing of Agricultural Drought Monitoring, Shijiazhuang 050031, China;

3. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

4. School of Law and Politics, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

5. School of Business, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: As an important river in Zhengding County, the water pollution situation of Hutuo River affects economic and social development and people's quality of life. Therefore, it is particularly important to monitor the water pollution situation efficiently. Based on Sentinel-2 satellite imagery, a remote sensing inversion model of major water pollutants was constructed by integrating three indicators: chlorophyll-a concentration, suspended matter concentration, and water transparency. The spatial autocorrelation model was used to conduct dynamic remote sensing monitoring of water pollution in the Hutuo River in Zhengding County, Shijiazhuang City. The research results show that during the period from 2019 to 2023, the chlorophyll-a concentration gradually decreased, among which the chlorophyll-a concentration in the upper reaches is the highest in 2019; the area with high suspended matter concentration gradually shifted from the upper reaches to the lower reaches; the water transparency generally showed a trend of first rising and then falling; the degree of water pollution changed from upstream pollution agglomeration to mid- and lower reaches pollution agglomeration; the spatial agglomeration degree of Hutuo River in Zhengding County first decreased and then increased, and the number of high-high agglomeration types continued to decrease, showing a significant spatial positive correlation. By selecting high-precision satellite data and integrating key water pollution indicators, the water pollution status of the Hutuo River is dynamically monitored, revealing the spatial cluster distribution characteristics of water pollution and providing a scientific basis for local water environment protection and governance.

Key words: Hutuo river; remote sensing; chlorophyll-a concentration; suspended matter concentration; transparency

0 引言

作为河北省的重要河流, 滹沱河的水质直接影响沿岸经济社会发展和人民生活质量。近年来, 随着工业化和城市化进程的加速, 滹沱河的水污染问题日益严重, 给沿岸居民带来了极大的困扰。传统水质检测以人工采样为主, 即通过现场采样和实验室处理分析方式获取。与传统水质监测不同, 遥感监测可实现对水质的长期、快速、大面积、动态监测^[1]。研究河流水质的理化性质, 可以从评估水体环境质量、分析水体中元素的分布及其迁移规律、考察区域环境化学特征等多个方面着手^[2]。从概念上讲, 水质遥感反演的基本思想是先利用经验水质监测数据和相应的遥感影像数据建立模型(即正演建模), 然后根据该模型获得在较长时间或更宽空间内的水质分布(即反演建模)^[3]。

目前, 对于利用遥感技术解决水体污染问题的探索, 国内外学者进行了多元化的丰富实践。国内研究大多基于 Landsat、GF、Sentinel 等高光谱卫星数据^[4-6], 综合运用地面水反射光谱, 建立其与污染浓度之间的物理模型^[7]; 通过线性光谱混合分析法^[8]、建立波段比值模型^[9]等途径, 选取合适波段数据, 对江、河、湖泊等微观尺度进行叶绿素 a^[10]、悬浮物浓度^[11]、有色可溶有机物^[12]和透明度^[13]等光学活性水质参数以及总氮、总磷、高锰酸盐指数、溶解氧、化学需氧量、生化需氧量等非光学活性水质参数反演研究^[14-15], 以获取水质信息。Zhao S H 等将我国环境系列卫星数据应用于内陆水体的水质监测和蓝藻水华富营养化预测^[16], Flink P 等利用高光谱数据分析瑞典湖泊叶绿素浓度分布^[17], Sun X 等在太湖、梁溪河和富春江验证高空间分辨率成像仪结合机

器学习在监测内陆水体水质方面的巨大潜力^[18]。相关研究为推进滹沱河水污染的精准识别提供了重要基础和有益借鉴,但在以下方面仍需作进一步研究:(1)由于多数研究只对单一水污染参数进行反演研究,可综合运用水污染主要参数并将其融合形成水污染“一张图”,此工作有待继续深化。(2)基于水污染的空间视角,有必要针对水污染集聚效应进行深入分析。

综合已有研究,水污染监测较多利用水体采样法进行监测。该方法费时费力且无法进行全面监测。目前滹沱河水污染监测研究较少,且滹沱河是石家庄的“母亲河”,是南水北调工程的承载河流,所以监测滹沱河水污染状况可为科学评估水环境质量、预警潜在的水生态风险以及制定精准有效的水环境保护与治理策略提供强有力的数据支撑。鉴于此,本文基于多时相 Sentinel-2 卫星影像数据,利用 ArcGIS 对滹沱河水体边界进行矢量化,选取叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度、水体透明度三个指标构建水体主要污染物遥感识别模型,最后对滹沱河 2014~2023 年水污染进行监测。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

石家庄市地处河北省的中南部区域(见图 1),属华北地区和环渤海经济区,被誉为“南北通衢,燕晋咽喉”。而作为石家庄“母亲河”的滹沱河,不仅是石家庄的重要饮水源地,而且还是北京市重要的应急水源地。其地理位置位于 $112^{\circ}16'E \sim 116^{\circ}6'E$ 、 $37^{\circ}27'N \sim 39^{\circ}25'N$,属海河流域中子牙河水系的一条支流,起源于山西省繁峙县五台山北部,穿越太行山脉后,流经石家庄市辖下的平山、灵寿、正定等多个区县。

河流是自然地理环境的重要组成部分,其演化对塑造地表形态和人类文明的发展起到至关重要的作用,对于一座城市的供水、灌溉、水运等必不可少。滹沱河流域有丰富的植被和繁多的物种,周边有许多自然生态保护区、公

园、灌溉农田等,推动了当地的经济发展。然而,近年来由于气候的多变加上部分区县再生水等排放并受人类活动影响,长期的工业化和城市化使得本身生态系统较脆弱的滹沱河的水质遭受严重损毁,河流流域的水污染问题日益突出。此外,受地下水长期超采和滹沱河作为纳污河流等影响,地下水水质恶化趋势一直未能得到有效遏制,严重危害该区域的饮水安全和可持续发展。对滹沱河水污染问题进行精准的数据监测,为治理污水问题提供有力的数据支撑,以不断优化治理体系,从而更高效地应对日益严重的水污染问题,为滹沱河恢复生机。

1.2 数据来源

本研究选取 Sentinel-2 多光谱图像作为遥感数据源,其来源于哥白尼数据空间生态系统(<https://dataspace.copernicus.eu>),数据获取时间范围为 2019 年、2021 年以及 2023 年。DEM 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)。

2 研究方法

2.1 Sentinel-2 遥感影像预处理

遥感影像预处理流程包括几何校正和图像拼接。几何校正是有理多项式系数(Rational Polynomial Coefficient, RPC)模型来消除影像中的几何畸变。基于地面点的三维坐标与像点二维坐标之间的比值多项式关系,通过选取地面控制点并建立 RPC 模型,对影像进行几何校正,确保影像与地理坐标系对齐。几何校正旨在消除由传感器、地形、大气等因素引起的几何误差。然后将多幅 Sentinel-2 遥感影像拼接成一个完整的影像,以覆盖整个目标区域。在拼接过程中对影像进行配准,利用影像上的特征点或特征线将多幅影像对齐到同一地理坐标系下。同时使用影像融合技术将配准后的影像无缝拼接在一起。在拼接过程中要考虑色彩平衡、亮度对比度等因素,确保拼接后的影像质量。完成拼接后,对拼接结果进行评估,检查拼接缝、色彩不一致等问题,再进行调整和优化。

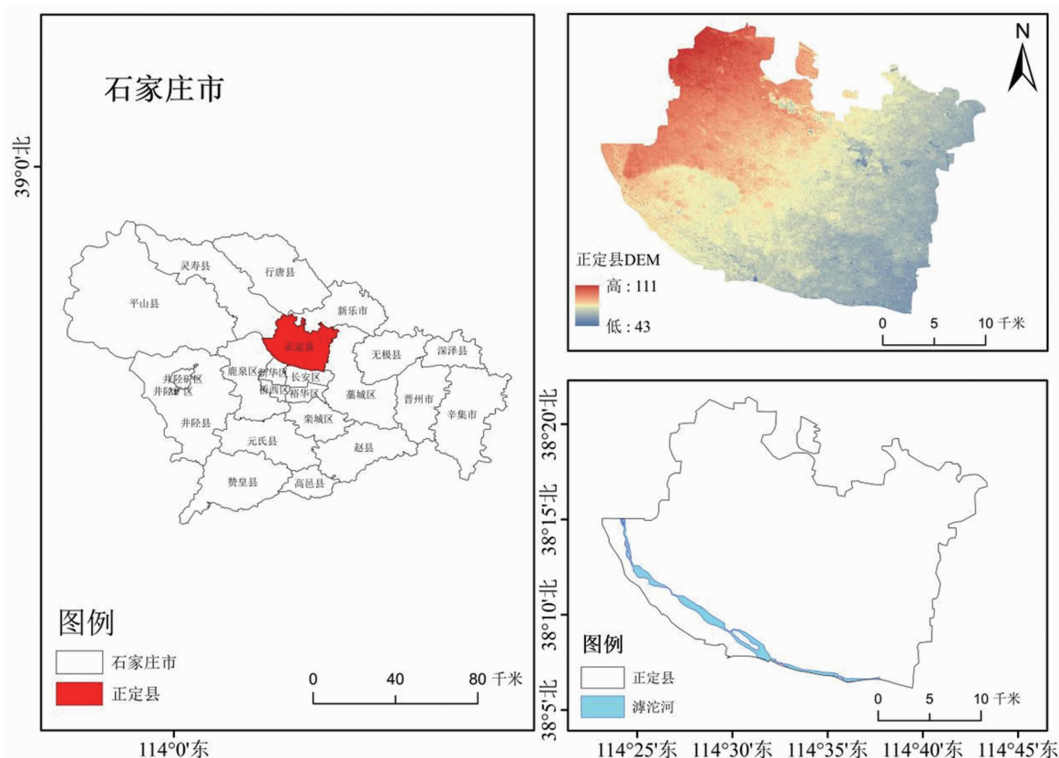


图 1 滹沱河的地理区位图(基于在国家自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 的标准地图制作, 底图无修改)

2.2 水体边界提取

对所获取的覆盖滹沱河流域的 Sentinel-2 遥感影像和 DEM 数据进行辐射校正, 以消除影像中的亮度失真, 从而确保影像的地理位置准确性; 进行图像增强以提高水体特征的可见度, 并进行目视解译, 根据水体在遥感影像上的特征手动勾绘出滹沱河的水体边界。完成初步勾绘后, 进行平滑处理以消除锯齿状边缘, 进行必要的微调以更贴近实际情况。将优化后的边界转换为矢量数据格式, 接着进行质量检查, 并将提取的滹沱河水体边界矢量数据导出为 shapefile 格式(见图 2)。

2.3 水体污染参数提取

光学遥感技术依据地物波谱的独特特征来区分不同地物, 借助遥感数据解析并反演目标地物的特征光谱, 以实现地对地物种类的精确划分与识别。水体光谱特征的变化主要受水质参数、水体固有状态以及外界多元因素的联合作用所影响。因此, 水质遥感监测的基本原理是利用遥感技术捕捉并分析水体光谱信息差异,

以精确反演水体中各物质的浓度。针对滹沱河水域的水质特点, 重点对叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度以及水体透明度三个关键的水质参数进行反演研究^[19-21]。

2.3.1 叶绿素 a 浓度

水体中叶绿素 a 是浮游植物进行光合作用的主要色素, 其含量直接反映了水体中浮游植物的生物量和活动状态, 是衡量水体富营养化程度和监测水污染的重要指标^[19]。本文利用反射率差异反演水体的叶绿素 a 浓度:

$$C_{Chl-a} = 4.089 \times (b_4/b_3)^2 - 0.746 \times (b_4/b_3) + 29.733 \quad (1)$$

式中, C_{Chl-a} 为叶绿素 a 浓度, 单位为 mg/m^3 ; b_4 为近红外波段, 该波段显著反映叶绿素 a 信息; b_3 为红光波段, 在此波段水体和植被均表现出较强的吸收能力。

2.3.2 悬浮物浓度

悬浮物(Suspended Solids, TSS)是指不溶于水的无机物、有机物、泥沙及微生物等固体微粒在水中悬浮的状态^[19]。它们不仅影响水

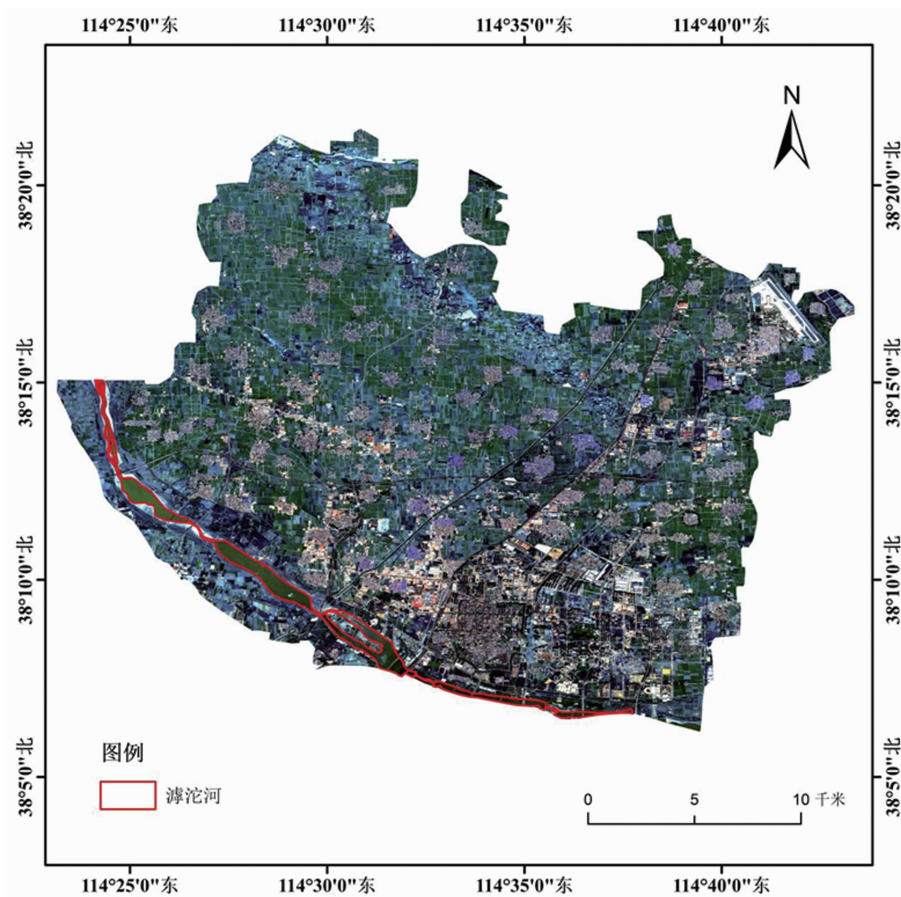


图 2 溲沱河水体边界提取

的透光率,阻碍水生植物的光合作用,而且还会影响水生生物的生命活动及微生物活动,破坏水体的生态平衡,甚至造成水质恶化。本文采用式(2)对溲沱河水中的悬浮物浓度进行反演:

$$C_{TSS} = 119.62 \times (b_3/b_2)^{6.0823} \quad (2)$$

式中, C_{TSS} 为悬浮物的浓度,单位为 mg/L; b_3 波段对悬浮物表现敏感; b_2 为绿波波段,在此波段悬浮物反射率较低。

2.3.3 水体透明度

水体透明度变化直接体现了水体中悬浮物、溶解有机物及微生物含量的多少。这些成分的增加会导致水体透明度下降,进而对水质产生不良影响^[19]。采用式(3)进行水体透明度反演:

$$Z_{SD} = 284.15 \times C_{TSS}^{-0.67} \quad (3)$$

式中, C_{TSS} 为反演获得的悬浮物浓度,单位为 cm。

2.4 空间自相关模型

全局莫兰指数 I 能够反映水污染水平在全域视角上的对象属性和空间联系^[22]。本文利用全局空间自相关分析溲沱河水污染的空间集聚特征。通过空间自相关及聚类 and 异常值分析,绘制莫兰指数及空间集聚分布图^[23]。其计算公式为

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中, n 为空间各数据数目; y_i 和 y_j 分别为空间对象在 i 和 j 两点的属性值; $\bar{y}$ 为 y_i 和 y_j 的均值; 空间权重矩阵表示空间对象在第 i 点和第 j 点之间的连接关系。

3 结果与分析

基于上述叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和水体透明度反演模型,选取 2019 年、2021 年和 2023 年覆盖溲沱河的遥感影像数据,研究溲沱河水污染年际之间的变化。

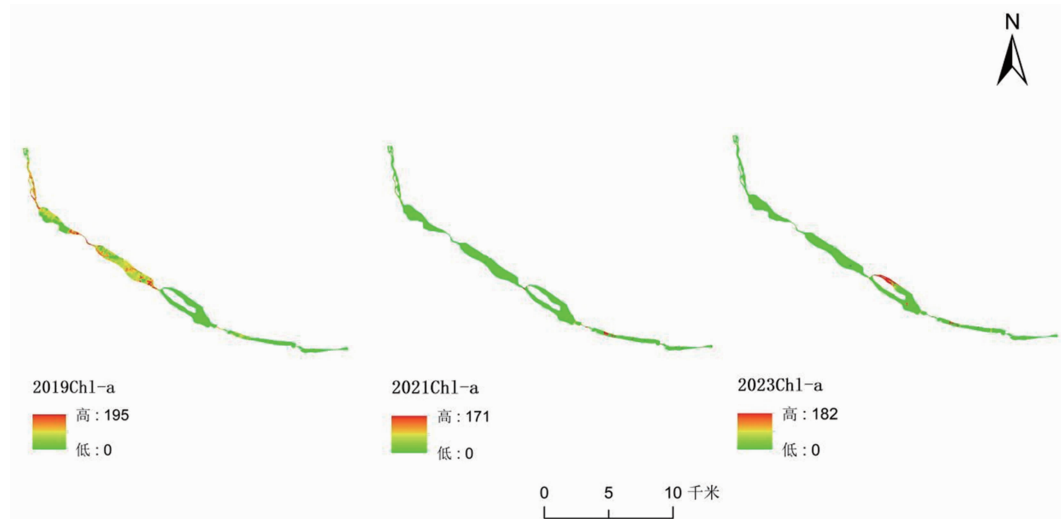


图 3 叶绿素 a 浓度反演结果

3.1 叶绿素 a 浓度反演结果

利用式(1)对叶绿素 a 浓度进行反演, 获得滹沱河叶绿素 a 浓度的空间分布图(见图 3)。2019 年的数据显示, 滹沱河的叶绿素 a 浓度在空间上分布不均, 下游区域的浓度显著降低, 处于相对较低的水平。相比之下, 中上游区域则呈现较高的叶绿素 a 浓度水平。2019 年“南水”为滹沱河开展首轮生态补水, 由于滹沱河中上游地区地势较高, 随着水量的增加, 水流速度变得相对较快, 导致水流对河床的冲刷作用增强, 从而携带更多的泥沙和营养物质。这些营养物质为藻类提供了生长条件, 使得中上游的叶绿素 a 浓度较高。而下游地区地势平坦, 水流速度减慢, 营养物质沉积, 藻类生长受限, 因此叶绿素 a 浓度相对较低。根据叶绿素 a 浓度分析, 2021 年滹沱河水质最好。因为石家庄市启动滹沱河生态修复三期工程, 相关工作取得了显著成效, 所以河流没有发生明显的叶绿素浓度过高现象, 只有下游出现零星超标。2023 年, 滹沱河流域的叶绿素 a 浓度分布呈集聚状, 集聚在流量较小的中游。根据叶绿素 a 浓度分析, 2021 年滹沱河的水质状况较好, 其次为 2023 年, 而 2019 年滹沱河的水质则相对较差。

3.2 悬浮物浓度反演结果

利用式(2)对悬浮物浓度进行反演, 获取

滹沱河悬浮物浓度的空间分布图(见图 4)。滹沱河悬浮物浓度的空间差异性在 2019 年较为显著, 中下游地段的悬浮物浓度高于中上游地段。反观 2021 年, 滹沱河上游区域的悬浮物浓度偏高, 中上游悬浮物浓度显著变低。2023 年, 滹沱河的悬浮物浓度由上游向中游逐渐增大, 大部分地区浓度比以前小, 下游变化不大。2019 年, 滹沱河中上游比中下游位置的悬浮物浓度低, 中上游地区河流侵蚀作用相对较弱, 而中下游地区由于水流速度减慢, 沉积作用增强, 导致悬浮物浓度较高。2021 年上游区域的悬浮物含量较高且分布均匀, 2023 年悬浮物浓度由上游向中下游逐渐递增, 由于该区域生态景区建成, 河床形态发生变化, 植被覆盖减少, 导致侵蚀作用加剧。上游地区侵蚀作用产生的悬浮物随水流向下游搬运, 在中游地区由于水流速度减慢而沉积, 但仍有部分悬浮物继续向下游扩散。

3.3 水体透明度反演结果

根据式(3), 利用 2019、2021 和 2023 年石家庄市滹沱河区域影像得到滹沱河区域的水体透明度空间分布图(见图 5)。从 2019 年到 2023 年, 水体透明度经历先升后降的过程。2021 年水体透明度有所提高, 但整体趋势仍在下降。2019 年, 水体透明度整体较低。这是因为上游区域的水体透明度较低, 而在中

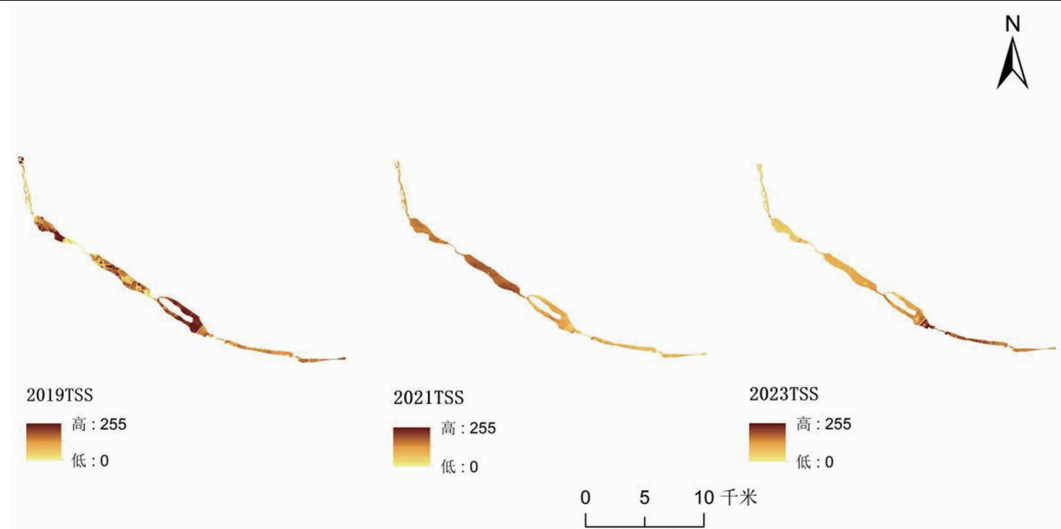


图 4 悬浮物浓度反演结果

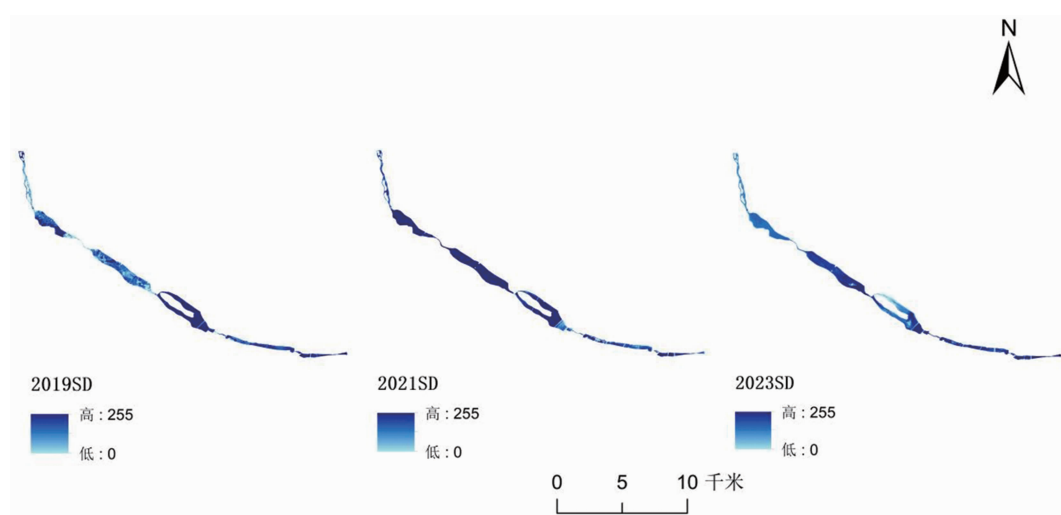


图 5 水体透明度反演结果

下游的水体透明度明显升高(与乡村振兴示范园项目规划有关,当地在中下游建设现代化智慧农场)。2021 年,水体透明度整体有所提高,仅在南部部分区域较低。这表明该期间内水质有所改善,政府启动滹沱河生态修复三期工程,加大对水资源的保护力度,实施一系列措施来减少污染物排放。2023 年,洪水多发重发。7 月底 8 月初,由于降水量增大,降水补给引起滹沱河水体透明度再次下降,北向南呈现出低-高-低-高的趋势。由于周边营养物质进入水中,藻类和浮游植物繁殖旺盛,因此水体透明度降低,水质再次恶化,导致透明度再次降低。

3.4 水污染时空演化

3.4.1 水污染动态演化

为了更直观地反映滹沱河水域的水污染程度,基于叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和水体透明度构建水污染指数评价体系:从红色到绿色表示水体污染程度由高到低(见图 6)。

2019 年,滹沱河呈现上游水域污染较重、下游水域污染较轻的分布格局。2020 年上游污染程度较高的水域向下游迁移,中游的水域水体污染程度降低,下游出现高污染水域。2021 年,高污染水域出现在中游北侧的支流,而上游的污染程度降低,下游污染程度较高的水域面积变大。整体来看,从 2019 年到 2023

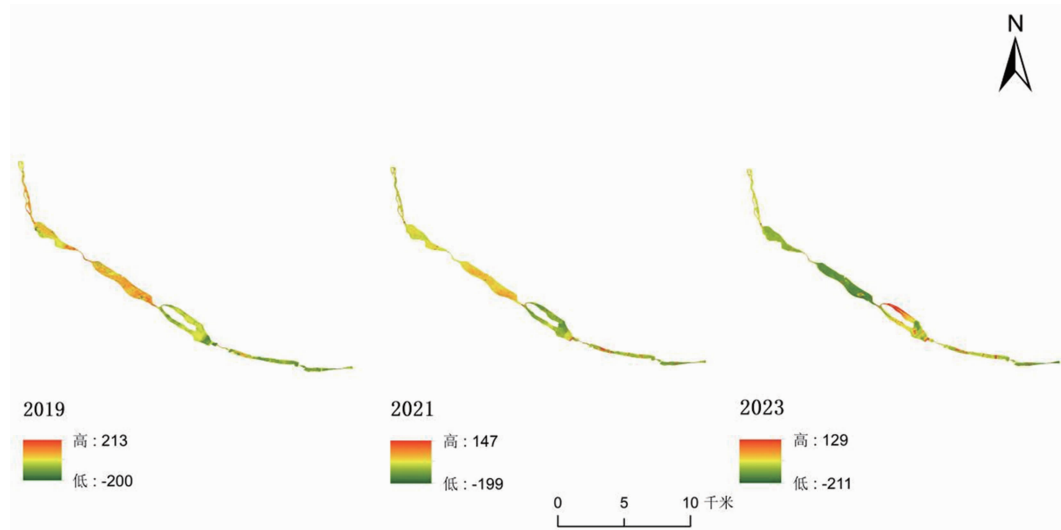


图 6 滹沱河水污染程度图

表 1 滹沱河水污染集聚类型数量

年份	不显著	高-高	高-低	低-高	低-低
2019 年	1347	346	8	64	360
2021 年	1693	56	9	32	335
2022 年	1544	130	10	19	422

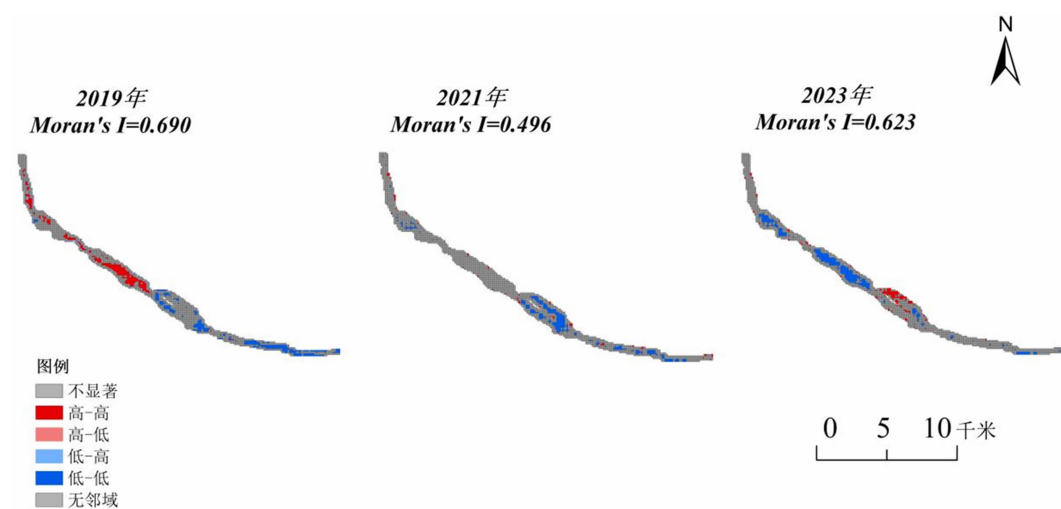


图 7 滹沱河水污染空间自相关图

年, 石家庄的水污染状况呈现出逐年改善的趋势。2019~2023 年水污染由上游污染集聚转变为中下游污染集聚。高污染区域逐渐减少, 而低污染区域逐渐增多。政府完成了滹沱河污染综合治理, 加大了对水污染治理的投入。企业引入污水净化技术, 减少了工业污染物的排放。公众环保意识的提高也促进了水质的改善。

3.4.2 水污染时空相关性

为了揭示不同时期的滹沱河水污染在空间上是否呈现集聚效应, 本文运用空间自相关模型探析正定县滹沱河在局部视角上的空间联系与集聚特征(见图 7), 并统计各集聚类型不同时期的数量(见表 1)。2019~2023 年, 正定县滹沱河空间集聚程度先降后升, 莫兰指数 I 先由 0.690 降至 0.496, 再由 0.496 上升至 0.623, 且

高-高集聚类型数量不断减少,表现出显著的空间正相关关系,水污染聚集效应愈加减弱。

滹沱河水污染高-高集聚区由 2019 年的上游区域转至 2021 年和 2023 年的下游区域。这是由于 2020 年滹沱河旅游生态景区建成,不仅提升了滹沱河的旅游价值和生态吸引力,而且在一定程度上改变了沿岸地区的环境条件和人类活动模式,带动下游地区的经济活动和人口流动,进而影响水质状况和污染物的排放格局。其中 2021 年成为近五年内滹沱河沿线生态环境相对较好的一年。这主要得益于石家庄市 2021 年出台并实施了《滹沱河沿线生态环境保护工作方案》,针对沿岸环境问题的专项排查与整改、水质定期监测与评估、雨水与污水的分流处理等,全面提升了滹沱河沿线的生态环境质量。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于多时相 Sentinel-2 卫星监测得到 2019 年、2021 年和 2023 年滹沱河相关影像,并对叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和水体透明度进行反演推算,得到水污染变化图。具体结论如下:

(1)基于叶绿素 a 浓度反演结果,2019~2023 年,滹沱河水质以 2021 年最佳,2019 年较差,2023 年中游集聚,整体呈现波动改善趋势。2021 年水质最佳,归因于有效的水污染治理;2019 年水质相对较差,中上游因地势与水流条件利于藻类生长,叶绿素 a 浓度高;2023 年虽然中游出现叶绿素 a 浓度集聚,但整体仍呈改善趋势,优于 2019 年,显示了水质管理的一定成效。

(2)基于悬浮物浓度反演结果,2019~2023 年,滹沱河悬浮物浓度的空间分布经历了显著变化,总体趋势为由上游向中下游递增,但 2023 年大部分地区浓度有所下降,反映出河床形态变化与生态景区建设对水质的影响。

(3)基于水体透明度反演结果,2019~

2023 年,滹沱河透明度总体呈现先升后降趋势。滹沱河透明度波动受人类活动与自然因素的共同影响,先因乡村振兴项目与生态修复工程提升,后遭 2023 年洪水事件冲击而下降,揭示了生态保护与自然灾害应对的双重挑战。

(4)基于所构建的水污染指数评价体系,2019~2023 年滹沱河水污染状况总体呈现改善趋势,空间集聚程度先降后升但集聚效应减弱。滹沱河水污染状况逐年改善,得益于政府加强环保法规执行、增加污染治理投入、推广清洁生产技术以及公众环保意识的提升。同时,空间自相关模型分析显示,水污染集聚效应减弱,高污染区域向中下游转移。这与旅游生态景区建成后改变沿岸环境条件和人类活动模式有关。

4.2 讨论

本研究采用 Sentinel-2 遥感影像对石家庄市正定县滹沱河进行水体污染监测,通过遥感图像拼接、几何校正预处理,并利用遥感影像矢量化提取水域边界。基于遥感影像的光谱信息和反演模型计算叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和水体透明度等水体污染参数,构建水体主要污染物遥感识别模型,并融合水污染主要参数指标;利用空间自相关模型对滹沱河水污染进行动态监测。但本研究具有一定的局限性,大气中的水汽、气溶胶、云层等吸收和散射遥感信号,且随时间和空间变化,使得遥感数据在获取和校正过程中面临极大的不确定性。大气校正算法的适用性和准确性仍有待提高,特别是在极端天气条件下,算法的局限性尤为突出。不同季节的水温、光照强度、溶解氧含量等参数的差异,会导致水体反射光谱的显著变化,从而影响遥感监测的准确性。遥感数据受到空间限制,导致数据覆盖不全或质量下降;水生植物的生长状态和水面覆盖情况变化干扰水质参数的提取。同时,风浪、水流等动态因素会改变水体的表面粗糙度和光学特性。未来的研究应更加注重技术创新和方法优化,利用三维大气模型、水文模型等空间大模型,更准

确地模拟和预测大气和水体的动态变化, 辅助遥感数据在时间和空间上的连续性和完整性, 从而提高遥感数据的校正精度和解释能力。融合卫星遥感、无人机遥感、地面监测、气象数据等多源数据, 构建更加全面、立体的水质监测网络, 实现对水质变化的实时监测和预警。开发智能算法和机器学习技术, 提高数据处理与分析的自动化和智能化水平。

滹沱河的水治理是一个关乎生态恢复、区域协调和社会可持续发展的系统性挑战。滹沱河水污染治理需从源头入手, 强化水资源保护和污染源管控, 特别是加强对农业面源污染和工业废水排放的精准治理, 同时大力推广绿色生产和清洁技术, 减少水体负荷。生态修复是滹沱河水治理的核心, 采取工程和非工程措施, 促使滹沱河生态系统恢复到较为自然的状态, 实现其生态完整性和可持续性, 包括水体生态修复、缓冲带建设和污染治理三部分内容。治理工作还需建立跨区域、跨部门的协同机制, 实现治理资源和政策的最优配置, 推动区域间的联动合作。“以滹沱河为中心, 按照分层理念对城市用地布局进行重构, 向南北外层扩展, 打造融合两岸、河城相依、城环水抱的‘一河两岸’城市总体格局”, 实现“以水带绿, 以绿养水”的目标。滹沱河的治理不仅需要硬件设施的投入, 更需要制度建设和长效机制保障, 确保治理措施落实到位, 形成水生态保护的长远合力。滹沱河的治理成效不仅关乎流域的生态恢复, 更将对整个地区的经济发展、社会和谐以及居民福祉产生深远影响。

为了实现对更多尺度较小的河流的水污染监测, 后续需更注重技术创新与方法优化, 融合多源数据, 利用大尺度模型与智能算法, 提升水污染监测的精确性、实时性和智能化水平。

参考文献

- [1] 王思梦, 秦伯强. 湖泊水质参数遥感监测研究进展 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1228–1243.
- [2] 马杰, 侯毅凯, 张安兵, 等. 城市河流水质监测空间特征研究——以滢阳河为例 [J]. *江西化工*, 2024, **40**(5): 95–99.
- [3] Wang X Y, Wu Y. Water quality monitoring and evaluation using remote sensing techniques in China: A systematic review [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2019, **5**(1): 47–56.
- [4] 葛建强. 基于 Landsat-9 的江苏近岸海洋水质遥感反演研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [5] 汪雨豪, 李家国, 汪洁, 等. 基于 GF-2 影像的苏州市区水质遥感监测 [J]. *科学技术与工程*, 2020, **20**(14): 5875–5885.
- [6] 王世瑞, 沈芳, 魏小島. Sentinel-2/MSI 深度学习超分辨率重建及河湖水质遥感反演 [J]. *遥感信息*, 2023, **38**(3): 16–24.
- [7] 王林, 白洪伟. 基于遥感技术的湖泊水质参数反演研究综述 [J]. *全球定位系统*, 2013, **38**(1): 57–61.
- [8] 林剑远, 张长兴, 尤红建. 基于固有光学量的高光谱数据反演城市河网水质 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, **39**(12): 3761–3768.
- [9] 张带琴. 基于多源遥感信息的鄱阳湖叶绿素浓度反演模型研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [10] Bresciani M, Stroppiana D, Odermatt D, et al. Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the water framework directive in European perialpine lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(17): 3083–3091.
- [11] Williamson A N, Grabau W E. Sediment concentration mapping in tidal estuaries [C]. Washington D C: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 1974.
- [12] 陈军, 王保军, 孙记红, 等. 基于 Landsat/TM 影像提取太湖 CDOM 浓度空间分布 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(1): 34–38.
- [13] Yin Z Y, Li J S, Liu Y, et al. Water clarity changes in Lake Taihu over 36 years based on Landsat TM and OLI observations [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, **102**: 102457.
- [14] 陈艳, 刘绥华, 王堃, 等. 基于 Landsat 卫星影像的草海水质遥感反演及营养状态评价 [J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(3): 24–31.

- [15] 杜程, 李得林, 李根军, 等. 基于高原盐湖光谱特性下的溶解氧反演应用与探讨 [J]. *自然资源遥感*, 2021, **33**(3): 246–252.
- [16] Zhao S H, Wang Q, Li Y, et al. An overview of satellite remote sensing technology used in China's environmental protection [J]. *Earth Science Informatics*, 2017, **10**(2): 137–148.
- [17] Flink P, Lindell L T, Östlund C. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1–3): 155–169.
- [18] Sun X, Zhang Y L, Shi K, et al. Monitoring water quality using proximal remote sensing technology [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **803**: 149805.
- [19] 彭保发, 陈哲夫, 李建辉, 等. 基于 GF-1 影像的洞庭湖区水体水质遥感监测 [J]. *地理研究*, 2018, **37**(9): 1683–1691.
- [20] 朱利, 李云梅, 赵少华, 等. 基于 GF-1 号卫星 WFV 数据的太湖水质遥感监测 [J]. *国土资源遥感*, 2015, **27**(1): 113–120.
- [21] 孙微, 曹宇佳, 马新文, 等. 基于 Sentinel-2 和 ZH-1 遥感影像的松北区水质监测 [J]. *地理信息世界*, 2021, **28**(1): 118–123.
- [22] 王鹏程, 张利国, 卢玉兰, 等. 广西耕地“非粮化”时空演变及影响因素研究 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, **44**(5): 187–197.
- [23] 冯应斌, 杨溪源. 基于土地利用变化的贵州省耕地显性边际化时空演变及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2023, **43**(6): 263–271.