

# 基于多光谱遥感技术的白洋淀水质演变监测方法研究

赵琳

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘要:** 基于哨兵2号多光谱卫星遥感数据, 结合白洋淀区实地采样数据, 对白洋淀淀区的水质参数进行定量反演, 获取淀区溶解氧、氨氮、总磷、总氮和化学需氧量五种参数的空间分布图, 掌握白洋淀水质整体情况。实验结果表明, 利用少量的水质实测数据, 建立遥感水质参数反演模型, 可以快速获取淀区水质连续空间分布图, 通过模型精度验证可知, 该方法可以取得较高的反演精度。

**关键词:** 哨兵2号; 水质反演; 白洋淀; 多光谱

中图分类号: TP79; X87

文献标识码: A

文章编号: 2096-4706 (2023) 03-0106-04

## Study on Monitoring Method for Water Quality Evolution in Baiyang Lake Based on Multispectral Remote Sensing Technology

ZHAO Lin

(China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Based on the remote sensing data of Sentinel 2 multispectral satellite, combined with the field sampling data of Baiyang Lake area, the water quality parameters of Baiyang Lake area are quantitatively retrieved, and the spatial distribution map of the five parameters of dissolved oxygen, ammonia nitrogen, total phosphorus, total nitrogen and chemical oxygen demand in Baiyang Lake area are obtained, so as to master the overall situation of the water quality of Baiyang Lake. The experimental results show that the continuous spatial distribution map of water quality in the lake area can be quickly obtained by establishing a remote sensing water quality parameter inversion model using a small amount of measured water quality data. The model accuracy verification shows that this method can achieve high inversion accuracy.

**Keywords:** sentinel 2; water quality inversion; Baiyang Lake; multispectral

## 0 引言

随着经济的高速发展, 每年有大量的工农业废水、污水未经处理排入江、河、湖、海, 特别是与人们日常用水密切相关的内陆河、近海河口等位置, 破坏了自然生态系统, 威胁到人类的正常用水<sup>[1]</sup>。近年来, 我国对水环境保护的关注度越来越高, 党中央对加强水生态环境保护做出了全面部署, 各地政府也制定了一系列举措。随着水环境保护和水污染治理等方面的关注度提升, 水质监测显得尤为必要和紧迫。

传统的水质监测方法需要在水域中布置大量的监测点, 通过对监测点的水质进行采样, 并将采集的水样进行化学分析, 得到水质参数信息, 此类方法消耗大量人力、物力, 且涵盖区域有限, 不能对整体水域的水质情况进行宏观监测与管理<sup>[2]</sup>。遥感技术手段具有实时、高效、连续性强、监测范围广、相对成本低等优点<sup>[3]</sup>, 利用遥感影像数据可以及时对大面积水域进行水质多参数监测, 有效弥补传统水质监测方法的不足。目前, 多光谱遥感技术已普遍应用于内陆水质监测, 且在水质参数定量化研究中具有明显的优势<sup>[4]</sup>。

不同水体由于其物质组成的状态不同, 各物质所对应的光谱曲线也会表现差异, 具体表现为对特定波长的吸收和反射不一样, 通常情况下, 能够反映出富营养化水体中光谱响

应特征的水质指标主要有:

(1) 浮游生物含量(叶绿素a浓度), 主要指的是各种藻类, 它是水体富营养化监测的基本参数。

(2) 氨氮、氮、磷等化学成分, 水域中的氮磷含量超标, 会造成水体的富营养化。如果不及时进行管理, 水质将急剧恶化, 演变为赤潮和水华。

(3) 高锰酸盐指数, 用来衡量水质的化学需氧量, 高锰酸盐指数越高, 表示水中有机污染物越多, 水中有机污染物主要来源于生活污水或工业废水的排放、动植物腐烂分解后流入水体产生的<sup>[5]</sup>。

本文将白洋淀作为研究区, 利用哨兵2号多光谱遥感数据对淀区水体的氨氮、总氮、总磷、化学需氧量和溶解氧5项水质参数进行定量反演研究, 分析光谱波段与水质参数浓度的相关性, 选取相关性最高的波段组合建立反演模型, 并对水质参数反演结果进行分析和评价, 结果表明, 基于哨兵2号多光谱遥感数据的水质反演精度可达到75%以上, 能够满足实际应用需求, 为开展水环境监测与治理提供科学准确的数据支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

白洋淀, 属海河流域大清河南支水系湖泊, 位于雄安新区

收稿日期: 2022-11-25

区, 涉及安新县、雄县和容城县, 是华北地区最大的湿地生态系统, 如图 1 所示。白洋淀具有独特的自然景观, 淀区风光秀丽, 景色宜人, 素有“华北明珠”之称。白洋淀周边共有 8 条入淀河流, 流域面积 21 045 km<sup>2</sup>。白洋淀四周有堤防环绕, 东有千里堤, 南有淀南新堤, 西有障水埝和四门堤, 北有新安北堤, 堤防总长 203 km。淀内主要由白洋淀、马棚淀、烧车淀、藻荃淀等大小不等的 143 个淀泊和 3 700 多条沟壕组成。淀区面积中 75% 的水域在安新县境内, 构成了淀中有淀, 沟壕相连, 园田和水面相间分布的特殊地貌。

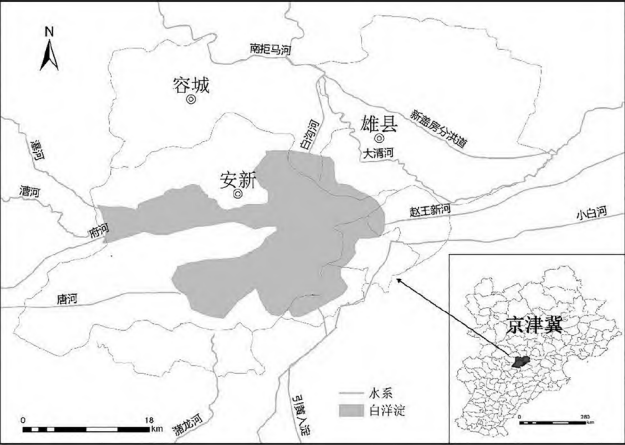


图 1 白洋淀地理位置示意图

1.2 数据源与数据处理

1.2.1 外业采样数据

2021 年 12 月 1 日至 2 日两天对白洋淀淀区进行实地采样并获取典型水体的样本, 并实时检测水体的溶解氧浓度, 将采集的样本送往实验室采用标准化学方法进行化验, 获取典型水体的氨氮、总氮、总磷、化学需氧量等水质参数浓度。实地采样点共 27 个, 用于本次模型建模的共 11 个, 用于验证模型精度的采样数据 9 个, 其余点不在影像范围内, 采样点位置空间分布如图 2 所示, 其中, 三角图标的数据作为已知模型集, 圆形图标的数据作为验证集。



图 2 实地采样点空间分布图

1.2.2 多光谱数据与处理

本次遥感数据采用的是 2021 年 12 月 5 日的哨兵 2 号多光谱数据。含有 12 个波段, 波段范围为 438 nm ~ 2 280 nm, 如表 1 所示。

表 1 哨兵 2 号多光谱卫星波谱基本信息

| 波段                      | 波长 (nm)       | 中心波长 (nm) | 空间分辨率 (m) |
|-------------------------|---------------|-----------|-----------|
| 1(Coastal)              | 433 ~ 453     | 443       | 60        |
| 2(Blue)                 | 458 ~ 523     | 490       | 10        |
| 3(Green)                | 543 ~ 578     | 560       | 10        |
| 4(Red)                  | 650 ~ 680     | 665       | 10        |
| 5(Red Edge)             | 698 ~ 713     | 705       | 20        |
| 6(Red Edge)             | 733 ~ 748     | 740       | 20        |
| 7(Red Edge)             | 773 ~ 793     | 783       | 20        |
| 8(NIR)                  | 785 ~ 900     | 842       | 10        |
| 8a(Vegetation Red Edge) | 850 ~ 880     | 865       | 20        |
| 9(Water Vapor)          | 935 ~ 955     | 945       | 60        |
| 10(SWIR-cirrus)         | 1 360 ~ 1 390 | 1 375     | 60        |
| 11(SWIR-1)              | 1 565 ~ 1 655 | 1 610     | 20        |
| 12(SWIR-2)              | 2 100 ~ 2 280 | 2 190     | 20        |

哨兵 2 号属于高分辨率多光谱成像卫星, 主要用于陆地监测, 可提供水覆盖、土壤和植被、内陆水路及海岸区域等图像, 还可用于紧急救援服务。包括 2A 和 2B 两颗卫星。哨兵 2 号多光谱影像包含 13 个光谱波段, 幅宽约 290 千米。两颗星互补重访周期可达 5 天, 而对于纬度较高的区域, 这一周期仅需 3 天 (本文研究区的哨兵 2 号多光谱影像周期为 3 天)。从可见光和近红外到短波红外, 具有不同的空间分辨率, 分别为 10 m、20 m 和 60 m。

哨兵 2 号多光谱卫星遥感影像由欧空局发布, 其发布的哨兵 2 号 L1C 级多光谱数据 (MSI) 是经过正射校正和几何精校正的大气表观反射率产品, 并没有进行大气校正。因此, SA-2 的数据处理主要包括: 大气校正、数据重采样和去云处理<sup>[4]</sup>。具体如下:

(1) 大气校正, 利用欧空局发布的专门生产 L2A 级数据的插件 Sen2cor 对 L1C 级数据进行大气校正处理, 得到 L2A 级数据, 主要包含经过大气校正的大气底层反射率数据、气溶胶厚度 (Aerosol Optical Thickness, AOT)、大气水蒸气 (Water Vapour Map, WVM) 等。

(2) 数据重采样, 哨兵 2 号数据包含 10 米、20 米和 60 米三种分辨率的波段数据, 需要将 60 米和 20 米的数据重采样至 10 米, 以提高数据的整体分辨率。这里主要的使用工具是欧空局提供的 Sen2Res 插件。

(3) 水体提取, 基于多光谱数据, 计算改进的归一化水体指数, 提取值大于 0 的范围, 即水体范围。改进的归一化水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)<sup>[5]</sup> 能够最大程度地抑制居民地和土壤等噪声, 突出水体, MNDWI 的计算公式如式 (1):

$$MNDWI = \frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR} \quad (1)$$

其中, GREEN 表示绿波段, 在哨兵 2 号影像中对应第 3 波段, MIR 对应中红外波段, 在哨兵 2 号影像中对应第 11 或第 12 波段。

通过计算影像的 MNDWI, 设定合适的阈值, 区分影像中水体与非水体, 进而提取白洋淀水体范围, 并进行裁剪。

### 1.3 水质反演

#### 1.3.1 水质反演模型构建

以 11 个实地采样监测数据为已知建模集, 求取其与多光谱影像中不同波段、波段倒数及波段比值之间的相关性, 找出相关性最高的波段因子, 以其为基础进行建模, 不同水质参数对应的相关性最高的波段关系及相应的建模结果如表 2 所示。

表 2 水质反演模型

| 水质参数  | 波段因子 $X$  | 反演模型                    | $R$  |
|-------|-----------|-------------------------|------|
| 氨氮    | $b_6/b_5$ | $y=-0.843\ 1x+0.953\ 8$ | 0.74 |
| 总氮    | $b_2/b_3$ | $y=-9.504\ 6x+12.212$   | 0.69 |
| 总磷    | $b_1/b_4$ | $y=-0.0387x+0.078\ 4$   | 0.62 |
| 化学需氧量 | $b_2/b_4$ | $y=-33.25x+57.567$      | 0.45 |
| 溶解氧   | $b_3/b_4$ | $y=6.280\ 1x+1.047\ 6$  | 0.72 |

模型评价因子使用常见的模型决定系数  $R$ , 其计算公式为式 (2):

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

#### 1.3.2 水质反演精度评价

基于上述反演模型, 将 2021 年 12 月 5 日的哨兵 2 号影像数据进行反演, 并使用实地采集的采样点水质数据进行验证。

在此基础上, 采用统计参数对水质参数的反演精度进行检验, 包括平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) [6], 二者公式如式 (3) 和式 (4):

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y - X}{X} \times 100\% \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - X)^2}{n}} \quad (4)$$

$X$  表示水质参数实测值,  $Y$  表示水质参数预测值,  $n$  表示参与计算的样本个数, RMSE 受测量值中的最值对应的误差的影响很大, 标准误差能很好反映模型的精度, RMSE 的值越接近于 0, 说明模型拟合效果越好, 反演精度越高。

模型检验和评价结果如表 3 所示。

表 3 反演结果及评价

| 水质参数  | 值 (mg/L) | P2    | P3    | P8    | P11   | P12   | P13   | P16   | 枣林庄   | 郭里口   | MRE  | RMSE |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 氨氮    | 实测值      | 0.09  | 0.18  | 0.26  | 0.11  | 0.33  | 0.44  | 0.32  | 0.27  | 0.03  | 1.15 | 0.14 |
|       | 反演值      | 0.31  | 0.32  | 0.30  | 0.26  | 0.25  | 0.22  | 0.23  | 0.18  | 0.16  |      |      |
| 总氮    | 实测值      | 4.72  | 2.83  | 1.23  | 1.01  | 2.51  | 1.78  | 3.03  | 2.71  | 1.31  | 0.51 | 1.10 |
|       | 反演值      | 2.57  | 3.70  | 1.73  | 2.55  | 1.79  | 2.48  | 3.43  | 3.41  | 2.42  |      |      |
| 总磷    | 实测值      | 0.03  | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.04  | 0.02  | 0.04  | 0.02  | 0.02  | 0.01 | 0.01 |
|       | 反演值      | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.04  |      |      |
| 化学需氧量 | 实测值      | 7.00  | 5.00  | 11.00 | 13.00 | 12.00 | 15.00 | 17.00 | 9.00  | 8.00  | 0.41 | 4.89 |
|       | 反演值      | 9.85  | 6.19  | 13.40 | 14.81 | 14.75 | 11.63 | 8.94  | 16.13 | 15.90 |      |      |
| 溶解氧   | 实测值      | 13.60 | 11.10 | 9.80  | 8.61  | 10.63 | 8.57  | 8.91  | 9.61  | 12.10 | 0.13 | 1.74 |
|       | 反演值      | 10.19 | 9.74  | 10.24 | 9.26  | 9.91  | 9.93  | 9.54  | 8.29  | 9.16  |      |      |

## 2 水质反演结果与分析

基于上述构建的水质反演模型, 对白洋淀淀区的氨氮、总氮、总磷、化学需氧量和溶解氧等水质参数进行水质反演, 得到对应的空间分布图, 如图 3 所示。

氮是水体中主要营养物质之一, 在水体中主要以氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、有机氮等形式存在。四者可相互转化, 四者之和称为总氮 (Total nitrogen, TN)。对于氨氮指标, 反演结果显示 2021 年 12 月 5 日白洋淀淀区氨氮浓度变化范围为 0 ~ 0.70 mg/L; 第 I 类、第 II 类和第 III 类地表水环境质量的氨氮浓度标准分别为 0.15 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L, 从图 3 中可看出, 淀区北部的烧车淀、中部的东淀头村附近以及南部的金龙淀、孟家淀和邱庄村附近水质较差, 氨氮浓度达到 0.3 ~ 0.4 mg/L, 而其余区域氨氮浓度较低, 可以得到 II 类水标准。

总氮是衡量水体受污染程度的重要指标。反演结果显示 12 月 5 日白洋淀淀区总氮浓度变化范围为 0 ~ 10.60 mg/L; 对于总氮指标, 第 III 类、第 IV 类和第 V 类地表水环境质量标准分别为 1.0 mg/L、1.5 mg/L、2.0 mg/L, 从图中可看出, 位于淀区中部的丝网淀、池淤淀、大麦淀、石侯淀和范峪淀等以及淀区北部的烧车淀、荷叶淀等区域的水质较好, 能达到 V 类, 局部达到 IV 类; 而淀区南部的金龙淀、孟家淀和邱庄村附近水质较差, 总氮浓度达到 3 ~ 4 mg/L, 局部达到 4 mg/L 以上, 该区域村落较多, 污染源多为生活污水, 如洗菜污水、洗澡污水、洗衣服污水、洗衣粉/肥皂 (含大量磷和氮) 等。另外, 12 月气温降低, 使得污泥活性降低, 导致水体总氮浓度进一步升高。

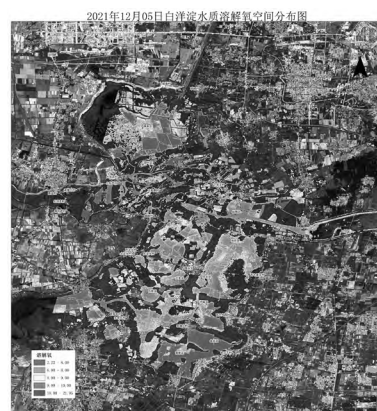
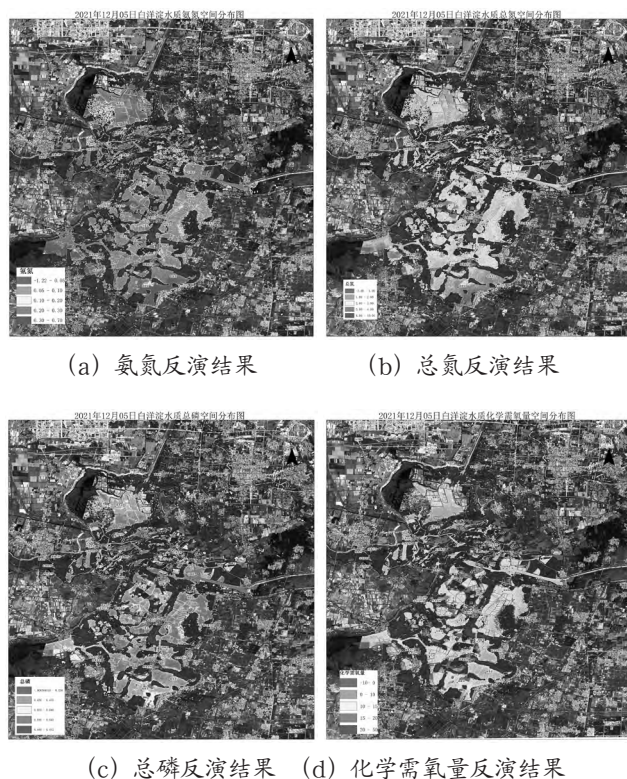
总磷含量也是水质评价的重要指标之一。水体中总磷浓度的升高, 会促使水中各类浮游动植物大量繁殖, 导



致水体中污染物增多、溶解氧含量下降,水质恶化转变为富营养化的状态。反演结果显示淀区总磷浓度变化范围为 $0 \sim 0.072 \text{ mg/L}$ ;对于总磷指标,第Ⅱ类、第Ⅲ类、第Ⅳ类地表水环境质量标准分别为 $0.025 \text{ mg/L}$ 、 $0.05 \text{ mg/L}$ 、 $0.1 \text{ mg/L}$ ,淀区水质可以达到Ⅲ类水。整个淀区总磷含量变化不大,且含量较小,水质较好。主要原因为气温较低,沉积物需氧量降低,不会引起磷的释放。

化学需氧量是反映有机污染物对养殖水体污染程度的一个重要指标,也作为水体有机物相对含量的综合指标之一。反演结果显示淀区化学需氧量浓度变化范围为 $0 \sim 50 \text{ mg/L}$ ;对于化学需氧量指标,第Ⅱ类、第Ⅲ类、第Ⅳ类地表水环境质量标准分别为 $15 \text{ mg/L}$ 、 $20 \text{ mg/L}$ 、 $30 \text{ mg/L}$ ,淀区水质可以达到Ⅲ类水,大部分区域达到Ⅱ类水标准。整个淀区化学需氧量指标变化不大,水质较好。

溶解氧是各种水生生物赖以生存的必要条件之一,也是水产养殖环境中最重要的和衡量水质好坏的生态因子之一,随着养殖水体溶解氧浓度的降低( $< 2 \text{ mg/L}$ ),将会出现大面积死鱼现象。反演结果显示淀区化学需氧量浓度变化范围为 $2.22 \sim 21.95 \text{ mg/L}$ ;对于溶解氧指标,第Ⅰ类、第Ⅱ类、第Ⅲ类地表水环境质量标准分别为 $7.5 \text{ mg/L}$ 、 $6 \text{ mg/L}$ 、 $5 \text{ mg/L}$ (大于等于),淀区水质可以达到Ⅱ类水,大部分区域达到Ⅰ类水标准。



(e) 溶解氧反演结果

图3 各水质参数反演结果空间分布图

### 3 结论

本文基于哨兵2号多光谱遥感技术,结合实地采样数据,对白洋淀淀区的典型水质参数(氨氮、总氮、总磷、化学需氧量和溶解氧)进行建模分析,反演淀区水质参数空间分布情况,通过与实测数据进行对比分析验证反演结果的精度,证实了模型的可靠性以及方法的可行性。主要研究结论如下:

(1) 多光谱遥感数据能够有效反演水质参数,精度可以达到75%以上,并且基于多光谱遥感技术的水质参数反演可以实现水环境监测在空间上的连续,反映出各区域之间的差异,为水环境监测技术的发展提供一个新思路。

(2) 多光谱遥感技术具有重访周期高、监测范围广、成本低等特点,能够实现定期数据的灵活获取,对重点水体进行动态监测。

#### 参考文献:

- [1] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (3): 92-98.
  - [2] 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.
  - [3] 唐国强, 龙笛, 万玮, 等. 全球水遥感技术及其应用研究的综述与展望 [J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45 (10): 1013-1023.
  - [4] 王歆晖, 田华, 季铁梅, 等. 哨兵2卫星综合水质指标的河流水质遥感监测方法 [J]. 上海航天(中英文), 2020, 37 (5): 92-97+104.
  - [5] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究 [J]. 遥感学报, 2005 (5): 589-595.
  - [6] 陈瑶, 黄长平, 张立福, 等. 水体COD光谱特性分析及遥感反演模型构建 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (3): 824-830.
- 作者简介: 赵琳(1989—), 女, 汉族, 山西长治人, 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 水利遥感。