

文章编号: 1001-4179(2022) 07-0042-08

引用本文: 章程焱, 董晓华, 杨少康, 等. 黄柏河东支流域水体氮磷含量遥感反演研究[J]. 人民长江, 2022, 53(7): 42-49.

# 黄柏河东支流域水体氮磷含量遥感反演研究

章程焱<sup>1,2</sup> 董晓华<sup>1,2</sup> 杨少康<sup>1,2</sup> 赵程铭<sup>1,2</sup> 薄会娟<sup>1,2</sup> 张庆玉<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 黄柏河是宜昌市生产、生活以及农业用水的重要来源,但大规模磷矿开采严重影响了其水体水质,因此需要对水体水质参数进行全流域实时监测。基于 Landsat8-OLI 遥感影像,根据 2014~2016 年 14 个站点的水体水质实际监测数据,使用人工神经网络建立黄柏河东支流域总磷和氨氮含量的反演模型,模拟了 2014~2016 年春季和冬季黄柏河东支流域水体的总磷和氨氮含量,并分析了总磷和氨氮含量的时空变化特征。结果表明:①对于 Landsat8-OLI 遥感数据,总磷的敏感波段为 4~7 波段,利用敏感波段建立的人工神经网络反演模型的精度较高,评价指标纳什系数和均方系数分别为 0.977 4 和 0.006 4;氨氮敏感波段为 1~3 波段,建立的模型精度低于总磷,评价指标纳什系数和均方系数分别为 0.714 5 和 0.004 5。②黄柏河东支流域 2014~2016 年总磷含量总体呈波动下降趋势,其中总磷含量较高区域分别为天福庙以及玄庙观库区;氨氮含量总体小幅度上升,2015 年 12 月尚家河与西北口库区氨氮含量达到 0.22 mg/L 和 0.27 mg/L。③黄柏河东支流域的总磷含量在春季最高,氨氮含量在冬季最高。④黄柏河流域的总磷和氨氮含量的空间分布存在一定的差异性,总磷在尚家河、天福庙、玄庙观库区的含量相对较高,氨氮在玄庙观与西北口库区的含量相对较高。研究成果可为该流域水环境治理提供依据。

**关键词:** 总磷; 氨氮; Landsat8-OLI; 遥感反演; 人工神经网络; 黄柏河

中图分类号: X824; TP79

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.07.007

## 0 引言

黄柏河是长江一级支流,在葛洲坝上游 2 km 处汇入长江,为宜昌市提供生产、生活以及农业灌溉用水,是该市的重要水源地之一<sup>[1]</sup>。研究表明近年来由于磷矿的大量开采,黄柏河流域水质遭到严重破坏,水质富营养化严重<sup>[2-4]</sup>。黄柏河的水质恶化影响了宜昌市供水安全,所以实现水体水质参数的大范围实时获取十分重要。

常用的水质监测手段主要为人工采样分析和自动

监测,但两种方法对人力和物力的消耗巨大并且无法获得在时间和空间上连续的数据,难以满足水质监测所要求的大范围以及实时性<sup>[5]</sup>。而遥感技术能够实现非接触式感知,可在短时间内实现大面积的信息获取,逐渐成为水质监测的重要手段<sup>[6]</sup>。针对遥感水质监测反演的方法主要为经验法(统计回归模型等)、半经验方法、半分析方法(生物光学模型)等<sup>[7]</sup>。岳程鹏等<sup>[8]</sup>基于 Landsat8 遥感影像建立了决定系数为 0.816 的二次多项式回归方程来反演乌梁素海浮游植物生物量。王丽艳等<sup>[9]</sup>基于 MODIS 数据建立了半经验模型

收稿日期: 2021-07-15

基金项目: 欧洲空间局/中国国家遥感中心项目(58516); 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02-09)

作者简介: 章程焱,男,硕士研究生,主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: 562585551@qq.com

通信作者: 董晓华,男,教授,博士生导师,博士,主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

和指数模型较好地反演了呼伦湖水体的总磷浓度以及富营养化状态评价。上述方法均是通过建立线性回归模型从而达到反演水质的目的,但传统的线性回归模型不能很好地反映水环境因强烈的非线性和不确定性所导致的变化规律<sup>[10]</sup>。

人工神经网络近年来在多源数据融合研究领域发展迅速,该方法具有较强的自学习性、自组织性和良好的适应性和容错性,其非线性映射能力能拟合任意复杂的非线性函数<sup>[11]</sup>。目前国内外专家学者通过建立神经网络模型对水质参数展开了研究。洗翠玲等<sup>[12]</sup>基于高分辨率多光谱影像比较了多元线性回归模型和人工神经网络模型对温瑞塘河总氮和总磷的反演效果,发现人工神经网络的反演效果好于多元线性回归模型。Song 等<sup>[13]</sup>基于 TM 数据建立了 BP 神经网络模型和线性回归模型,通过比较两种模型对水质参数的反演效果发现 BP 神经网络模型的反演效果更准确。马丰魁等<sup>[14]</sup>基于 Landsat8 影像数据建立 BP 神经网络模型对密云水库非结冰期的主要水质参数进行了反演。

综上所述,利用人工神经网络结合遥感影像可以更好地对水质参数进行反演。因此,本文基于 Landsat8-OLI 影像数据,建立人工神经网络模型对黄柏河东支流域的氨氮和总磷含量进行反演并分析其时空变化特征,为黄柏河东支流域的水质监测提供新思路。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区概况

黄柏河位于长江中游北岸,为长江一级支流,流域面积约 1 900 km<sup>2</sup>。河流分东西两条支流,东支为干流发源于黑良山,全长约 130 km;西支为雾渡河发源于武郎寨,全长约 78 km,东西两条支流于两河口汇合成干流,长约 32 km,在葛洲坝上游 2 km 处注入长江。东支干流水资源较为丰富,建有东风灌渠和东山运河两大调(引)水工程。流域水资源利用情况较为复杂,受人类活动等影响程度较大<sup>[15]</sup>。

本文选取黄柏河东支流域作为研究区,流域地理位置如图 1 所示,东支流域依次建有 4 座梯级水库,为充分反映流域水质,实测水质监测数据采样点遵循覆盖全面、分布均匀、代表性强的原则进行选取。图 1 中红点显示了水库中采样点,依次是上游玄庙观水库,包括玄庙观库尾、黑沟河、玄庙观库首;天福庙水库,包括中游天福庙库尾、晒旗河入河口、神龙河入河口、干沟河入河口、天福庙库首;中下游西北口水库,包括西北口水库库尾、西北口水库库首;尚家河水库,包括下游尚家河水库库尾、牌渡河、水木溪、尚家河水库库首。

水库基本信息如表 1 所列。

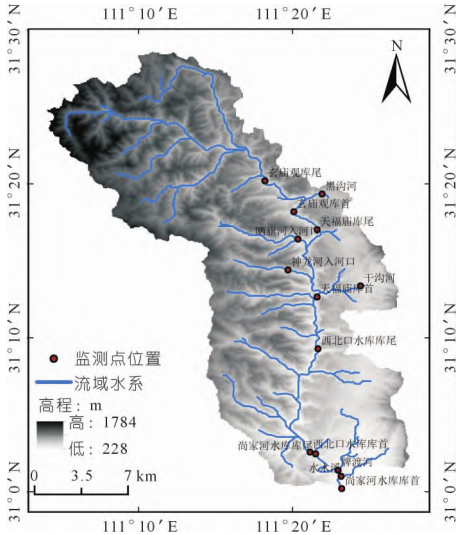


图 1 黄柏河东支流域概况以及采样点分布

Fig. 1 General situation of the east branch of Huangbai River and distribution map of sampling points

表 1 黄柏河东支水库信息

Tab. 1 Reservoir information of Huangbai River East Branch

水库名称	总库容/万 m <sup>3</sup>	集水面/km <sup>2</sup>	完工/年份
玄庙观水库	4054	380.0	2004
天福庙水库	6180	553.6	1978
西北口水库	21000	862.0	1991
尚家河水库	1646	937.0	1971

### 1.2 数据

研究选取的水质监测指标为 NH<sub>3</sub>-N(氨氮)、TP(总磷)。NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度是衡量水质质量的重要指标,它们的含量限制着大多数水生和陆地生态系统中营养物质的生长。所选水质参数指标的检测方法均采用国家标准(GB)<sup>[16]</sup>和行业标准(SL 或 HJ)<sup>[17]</sup>。氨氮和总磷含量的划分标准分别为:氨氮 I~V 类浓度为 0~0.15、0.15~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5、1.5~2.0 mg/L;总磷 I~V 类浓度为 0~0.02、0.02~0.1、0.1~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4 mg/L。总磷采用 723PC 可见光分光光度计检测,氨氮采用 S22 分光光度计检测。

研究选用的遥感数据来自 Landsat-8 陆地成像仪(OLI)影像数据通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)获取,空间分辨率为 30 m×30 m。选择天气晴朗、少云且与实测水质监测时间相近的遥感影像,经过筛选最后选取了 2014~2016 年共 6 期云量低于 20% 的遥感影像多光谱数据进行研究。

## 2 研究方法

### 2.1 遥感影像预处理和敏感波段提取

本研究首先对遥感影像依照黄柏河东支流域边界

进行裁剪得到流域影像;再进行辐射定标和大气校正,使遥感影像表达真实的反射率后通过归一化水体指数 NDWI 提取水域边界;最后将水体影像的 7 个波段导出 tif 图像便于后期模型的运用。

由于水体的光谱特征受到水中各种物质对光辐射的吸收和散射性质影响,因此遥感影像在各波段的反射率与水体中水质参数浓度的变化存在一定的联系。本研究将记录的采样点通过 ENVI-CLASSIC 软件离散到空间中,与影像叠加,得到各波段在采样点的反射率值并整理。再使用 SPSS 软件对 Landsat8-OLI 的 1~7 波段的反射率和氨氮与总磷含量的实测值各 84 组数据进行皮尔逊相关性分析,在进行相关分析的基础上,以保留最大信息量为原则筛选敏感波段使神经网络的拟合效果最优,得到水质参数的敏感波段组合如表 2 所列,结果显示总磷的敏感波段为 4~7 波段,氨氮的敏感波段为 1~3 波段。

表 2 水质参数敏感波段

Tab. 2 Sensitive band of water quality parameters

水质参数	敏感波段	皮尔逊相关系数 $r$
总磷	Band4~7	0.309** 0.351** 0.344** 0.379**
氨氮	Band1~3	0.215 0.216 0.229

注:\* 表示显著性  $p < 0.05$ , \*\* 表示显著性  $p < 0.01$ 。

## 2.2 BP 神经网络模型构建

BP 神经网络是现阶段应用比较广泛的神经网络模型之一<sup>[18-19]</sup>。BP 神经网络学习分为多层前馈和反向误差修正两个阶段,正向前馈的过程如式(1)和式(2)所示,计算各层的输入、输出值,直至输出层的输出值。若输出值误差无法满足精度要求,则反向传播回网络结构中,如式(3)所示,调整神经元之间的连接权值使误差减小。

$$y_i^l = f(x_i^l) \quad (1)$$

$$x_i^l = \sum_{j=1}^{N_{l-1}} w_{ij}^l y_j^{l-1} + \theta_i^l \quad (2)$$

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) - \eta \left( \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \right) \quad (3)$$

式中:  $y_i^l$  为第  $l$  层第  $i$  个节点的输出值;  $l$  表示层数 ( $l = 1, 2, 3, \dots, L$ )  $L$  为总层数;  $x_i^l$  为第  $l$  层第  $i$  个节点的激活值;  $f(\cdot)$  为神经元激活函数;  $i, j$  表示节点数;  $N_{l-1}$  为第  $l-1$  层的节点数;  $w_{ij}^l$  为第  $l-1$  层第  $j$  个节点到第  $l$  层第  $i$  个节点的连接权值;  $\theta_i^l$  为第  $l$  层第  $i$  个节点的阈值;  $t$  表示反向传播的层数;  $\eta$  为学习率;  $E$  为定义的损失函数。

本研究采取 3 层前向传播的神经网络,隐含层与输出层神经元均采用 S 型函数“tansig”,训练函数采用默认函数“trainlm”,隐含层节点数通过试选法

确定。本研究将氨氮和总磷实测值 84 组数据作为输入层,构建 3 层神经网络,包括输入层、隐含层、输出层,将数据的前 2/3 组数据用于训练,后 1/3 组数据用于检验。同时,为了加快 BP 神经网络的收敛速度,本研究对样本进行归一化处理,使得输入、输出值在 0~1 之间。在模型建立时确定初始学习速率为 0.01,训练步数设定为 1 000,误差性能目标值为 0.000 1。经过反复调试得到最优神经网络结构:总磷为 4-6-1,氨氮为 3-4-1。模型的评价采用纳什效率系数(NSE)和均方误差(MSE),具体计算公式如下

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^T (Q_o^n - Q_m^n)^2}{\sum_{n=1}^T (Q_o^n - \bar{Q}_o)^2} \quad (4)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (5)$$

式中:  $Q_o^n$  和  $Q_m^n$  表示  $n$  个测点的观测值和模拟值;  $\bar{Q}_o$  表示观测值的平均值。NSE 取值范围为  $(-\infty, 1]$ , NSE 越接近 1 表示模型质量越好。 $\hat{y}_i$  代表模型输出的模拟值,  $y_i$  代表站点实测值,  $n$  为数据总量, MSE 范围为  $[0, +\infty)$ , 当模拟值与真实值完全吻合时等于 0; 误差越大, MSE 越大。

## 3 结果分析

### 3.1 BP 神经网络模型精度检验

为了直观地表现模拟值和实测值之间的误差,将检验期的实测值和模拟值绘制成散点图如图 2 所示。从图 2 中可以看出:总磷含量的模拟值与实测值比较接近,模拟值与实测值之间的差距较小且模拟值的总体变化趋势与实测值的变化相同,模拟效果较好。氨氮含量的模拟值在峰值的模拟上较好,模拟值的变化趋势与实测值的变化趋势大致相同,但在其他区段的模拟值与实测值的差距较大。综上所述,本研究建立的总磷含量的 BP 神经网络反演模型质量优于氨氮含量的 BP 神经网络反演模型。

采用 NSE 和 MSE 对模拟值和实测值进行评价来进一步验证 BP 神经网络的模拟效果,结果如表 3 所列。从计算结果来看,总磷和氨氮的 NSE 接近于 1,说明本研究建立的模型质量较好,其中总磷的 NSE 大于氨氮,说明总磷的反演模型质量优于氨氮的反演模型;从 MSE 来看,总磷和氨氮的值都接近于 0,说明总磷和氨氮的模拟值和实测值都比较接近。综上所述,本研究针对总磷和氨氮含量所建立的模型模拟结果可信度较高。

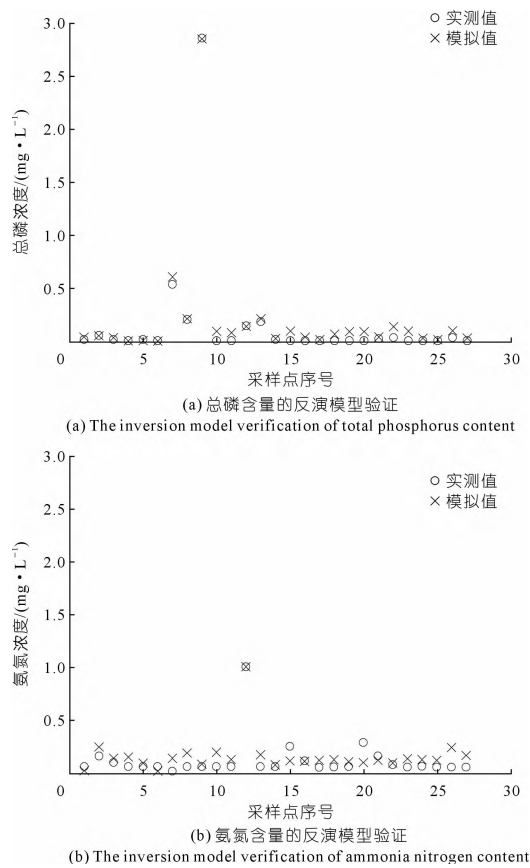


图 2 BP 神经网络结果验证  
Fig. 2 BP neural network result verification

表 3 纳什效率系数、均方误差  
Tab. 3 Nash efficiency coefficient mean square error

水质参数	NSE	MSE
总磷	0.9774	0.0064
氨氮	0.7145	0.0045

3.2 总磷和氨氮含量的年际及季节变化分析

3.2.1 年际变化

本研究基于构建的 BP 神经网络模型反演了 2014 ~ 2016 年黄柏河东支流流域春冬季总磷和氨氮的含量, 按时间取均值分析了 2014 ~ 2016 年黄柏河东支流流域各库区 3 ~ 4 月和 11 ~ 12 月总磷和氨氮含量的变化, 结果如图 3 所示。由图 3 可知: 黄柏河东支流流域各库区总磷含量呈下降趋势, 但仍有波动, 2014 年 3 月至 2015 年 12 月总磷污染主要集中在西北口以及天福庙库区, 2016 年 4 月各库区总磷含量显著增加且主要集中在天福庙以及玄庙观库区, 2016 年 4 ~ 11 月除尚家河外各个库区的总磷含量明显下降; 流域内氨氮含量呈上升趋势, 2015 年 12 月前西北口和尚家河库区的氨氮含量增加明显, 分别由 0.18 mg/L 和 0.12 mg/L 上升至 0.27 mg/L 和 0.22 mg/L。综上所述: 4 座水库的总磷含量呈波动下降趋势, 各水库总磷含量在 3 ~ 4

月份较高且主要集中在玄庙观、天福庙以及西北口库区处; 氨氮含量呈小幅度上升趋势, 一般在 11 ~ 12 月份含量较高且主要集中于西北口和尚家河库区。因此黄柏河东支流流域的水质风险依然存在, 需要切实开展保护与监测工作。

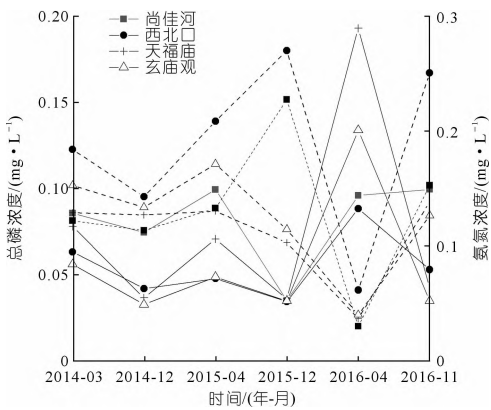


图 3 水质参数的时间变化( 实线为总磷, 虚线为氨氮)  
Fig. 3 Time change of water quality parameters ( the dotted line is total phosphorus ,the solid line is ammonia nitrogen)

3.2.2 季节变化

因黄柏河东支流流域所在区域夏、秋季对应的卫星遥感时间处于雨季, 遥感图像无法完全显示流域, 因此针对春季( 2014 年 3 月、2015 年 4 月、2016 年 4 月) 和冬季( 2014 年 12 月、2015 年 12 月、2016 年 11 月) 展开研究, 将结果按季节取平均值来研究黄柏河东支流流域各库区水体总磷和氨氮含量的变化, 结果如图 4 所示。分析可知: 春季黄柏河东支流流域各库区水体的总磷含量大于冬季水体中的总磷含量, 天福庙库区的总磷含量在春季的含量最高, 达到 0.28 mg/L, 属于 IV 类水质标准, 玄庙观库区在春季的总磷含量也较高, 达到 0.15 mg/L ,

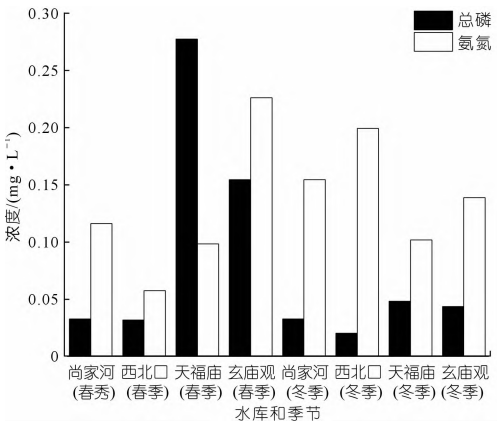


图 4 总磷和氨氮的季节变化  
Fig. 4 Seasonal changes of total phosphorus and ammonia nitrogen



属于Ⅲ类水质标准;春季水体中氨氮含量总体较低,只有玄庙观库区达到 $0.22\text{ mg/L}$ ,属于Ⅱ类水质标准,冬季水体中氨氮含量较高,总体处在 $0.15\sim 0.25\text{ mg/L}$ 之间,属于Ⅱ类水质标准。

### 3.3 总磷和氨氮含量的空间变化分析

#### 3.3.1 总磷浓度的空间变化分析

图5显示为黄柏河东支流总磷含量的空间差异性。分析图5可以发现:黄柏河东支流的总磷含量在研究时间内总体为 $0.02\sim 0.1\text{ mg/L}$ ,属于Ⅱ类水质标准。2014年黄柏河东支流总磷含量得到明显改善,2014年3月黄柏河东支流水体总磷含量总体处于 $0.02\sim 0.1\text{ mg/L}$ ,属于Ⅱ类水质标准。其中天福庙段部分区域的总磷含量为 $0.1\sim 0.2\text{ mg/L}$ ,属于Ⅲ类水质标准,局部区域污染严重,总磷含量超过 $0.4\text{ mg/L}$ ,达到劣Ⅴ类水质标准;其次为玄庙观段,玄庙观部分区域处于 $0.1\sim 0.2\text{ mg/L}$ 的范围内,属于Ⅲ类水质标准。2014年12月玄庙观和天福庙库区的总磷含量得到明显改善,大部分区域属于 $0\sim 0.02\text{ mg/L}$ ,但在西北口库首区域附近和尚家河库尾和中游总磷含量较高,达到Ⅲ类水质标准。2015年黄柏河东支流水体总磷含量减少,总体处于 $0.02\sim 0.1\text{ mg/L}$ ,其中天福庙干沟河入口处和尚家河水木溪段总磷含量达到Ⅲ类水质标准。2016年4月天福庙干沟河河口处污染严重,达到劣Ⅴ类水质标准,西北口库区局部区域达到Ⅲ类水质标准。2016年11月上述区域的水质参数明显下降,达到Ⅰ类水质标准,但在西北口库区中部和尚家河库区库首处的总磷含量上升至 $0.1\sim 0.2\text{ mg/L}$ ,

属于Ⅲ类水质标准。总体来看,黄柏河东支流各个水库的总磷含量呈改善趋势,总磷含量在春季明显大于冬季,且污染主要集中于玄庙观中上段(库尾至黑沟河段)、天福庙库首(神龙河至库首段)以及尚家河库首(库首至牌渡河段)。

#### 3.3.2 氨氮浓度的空间变化分析

图6显示为黄柏河东支流氨氮含量的空间差异性。从图6可见,氨氮含量分布比较均匀,其中玄庙观和西北口库区的氨氮含量较高。2014年3月玄庙观库区黑沟河处和西北口库区中部的氨氮含量以 $0.15\sim 0.5$ 和 $0.5\sim 1\text{ mg/L}$ 为主,属于Ⅰ类和Ⅱ类水质标准,在同年12月上述区域的氨氮含量得到明显改善,远低于Ⅰ类水质标准阈值,但在西北口库区的近库尾处以及尚家河库区的库尾处氨氮含量达到Ⅱ类水质标准。2015年4月玄庙观中段和西北口库首段的氨氮含量升高,达到Ⅱ类水质标准,同年12月玄庙观中段的氨氮含量低于Ⅰ类水质标准阈值,但西北口库首段属于Ⅱ类水质标准范围的面积增大,并且尚家河库首至牌渡河的氨氮含量上升至 $0.15\sim 0.5\text{ mg/L}$ 。2016年4月黄柏河东支流各库区氨氮含量均小于Ⅰ类水质标准阈值,但在2016年11月西北口库区和尚家河部分区域氨氮含量明显上升,其中西北口库首处达到Ⅱ类水质标准,尚家河牌渡河至库尾处部分区域氨氮含量较高,属于Ⅱ类水质标准。从整体分布来看,玄庙观以及天福庙的氨氮含量呈改善趋势,而西北口与尚家河水库的氨氮含量逐渐上升,且在冬季这两座水库的氨氮含量明显大于春季,并且主要集中在西北口近

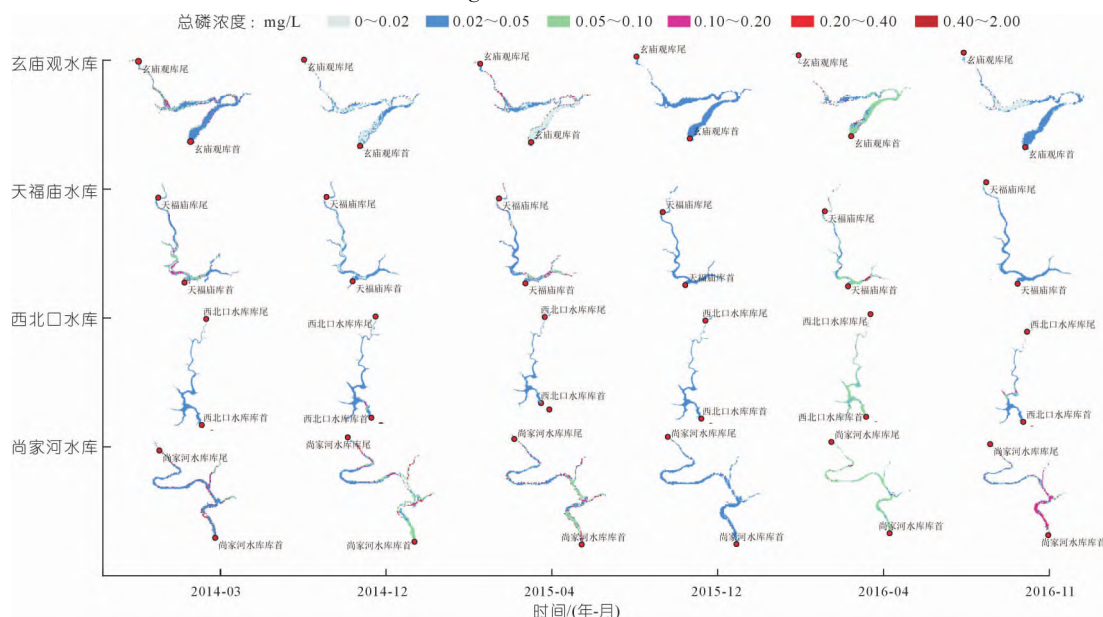


图5 黄柏河东支流总磷含量在不同季节的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of total phosphorus content in the east branch of Huangbai River in different seasons

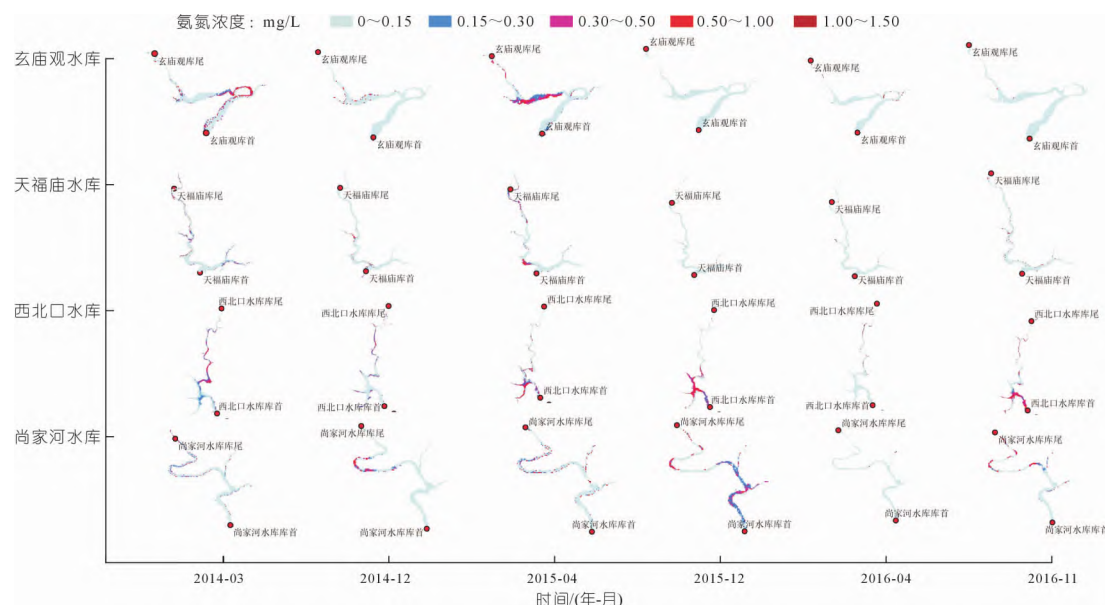


图6 黄柏河东支流流域氨氮含量在不同季节的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of ammonia nitrogen content in the east branch of Huangbai River in different seasons

库首处以及尚家河库区中段。

#### 4 讨论

目前已有众多学者对国内湖库水质参数进行了相关反演研究。王云霞等<sup>[20]</sup>以清水库为研究区域,利用 Landsat8 卫星 OLI 数据及实地观测数据,建立了适用于清水库总磷浓度的最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 遥感反演模型,其模型的平均相对误差为 6.06%。刘轩等<sup>[21]</sup>以丹江口水库为研究对象,基于哨兵 2 号卫星 (Sentinel-2) 遥感影像数据不同波段组合的反射率,结合总氮与氨氮的实测数据建立 BP 神经网络模型,其模型精度较高,  $R^2$  分别为 0.863 和 0.877。李敬等<sup>[22]</sup>利用阿哈湖国家湿地公园水库的实测水质数据,基于遥感技术和数理统计基本理论,结合 Sentinel-2 卫星的遥感数据,建立阿哈水库的总磷回归反演模型,其精度较为理想,均方根误差和平均绝对百分比误差分别为 0.108 mg/L 和 28.80%。吴欢欢等<sup>[23]</sup>以天津市海河下游段为研究对象,基于 Landsat8-OLI 遥感影像数据与实测总磷、氨氮、总氮浓度及电导率数据建立 BP 神经网络模型,其模型结果精度较好,  $R^2$  均大于 0.85, MAE 分别为 0.019, 0.09, 0.242, 0.411, RMSE 分别为 0.024, 0.118, 0.286, 0.562。本研究构建的模型精度较好,针对总磷和氨氮浓度的纳什系数和均方差系数分别为 0.977 4 和 0.006 4, 0.714 5 和 0.004 5。与上述学者的研究结果相比,总磷浓度反演的模型精度高于其他研究中模型的精度,氨氮浓度反演的模型精度与其他研究中的模型精度较接近,具备较高的合理性和可信度,可以用作黄柏河东支流主

要库区总磷和氨氮浓度的反演。

本文的研究结果表明,黄柏河东支流的总磷含量在 2014~2016 年之间总体呈波动下降趋势,氨氮含量总体呈上升趋势,因此需要加大对氨氮监测和治理力度。从氨氮含量和总磷含量的季节分布情况来看,冬季氨氮含量高于春季含量,这可能是因为冬季降雨量不足而导致氨氮含量上升。分析春季总磷含量高于冬季的情况,文献[24]认为由于黄柏河流域耕地面积较少,且大多是陡坡开垦地,当地农民在春季播种时会大量施用农药和化肥等有毒有害物质,所施用的农药化肥极易随着暴雨径流进入黄柏河水体。从空间分布的情况进行分析,总磷在流域内的污染主要体现在玄庙观与天福庙段的污染情况比较严重,这与两个库区周边存在大量磷矿开采点有关,这与文献[25]分析的结果相同。但与文献[25]得出的结论不同的是,本研究发现尚家河库区的总磷浓度相对较高,分析原因是尚家河库区周围存在水稻田,在种植培育的过程中需要施加磷肥。氨氮在玄庙观与西北口库区的污染情况严重,需要加大监测力度。总体来说,黄柏河东支流在经过治理后的总磷和氨氮含量逐渐降低,总磷和氨氮在大部分地区达到了Ⅰ类和Ⅱ类水质标准,但在少数地区仍然存在超标现象。

#### 5 结论

本研究结合 Landsat8-OLI 遥感影像数据与地面实际监测数据建立的 BP 神经网络模型,比较成功地实现了黄柏河东支流 2014 年 3 月和 12 月,2015 年 4 月和 12 月,2016 年 4 月和 11 月总磷和氨氮含量的

反演,并针对两者在时间和空间上的变化进行了分析,得到结论如下:

(1) 针对总磷和氨氮的敏感波段,总磷为 4~7 波段,氨氮为 1~3 波段。建立的 BP 神经网络模型的模拟值与实测值比较接近,进一步对建立的模型进行验证,纳什系数和均方误差表明研究构建的对总磷和氨氮的反演模型模拟效果较好。

(2) 黄柏河东支流域的总磷含量虽然在 2014~2016 年间存在年际波动,但总体在下降;氨氮的含量总体在上升,需要注意加大对氨氮含量的监测和控制力度。

(3) 从季节变化分析,春季总磷含量大于冬季总磷含量,而春季氨氮含量小于冬季氨氮含量。

(4) 黄柏河东支流域的总磷和氨氮含量的空间差异性明显,总磷含量在春季尚家河、天福庙段与玄庙观库区会出现较高的情况,且污染主要集中于玄庙观中上段(库尾至黑沟河段)、天福庙库首(神龙河至库首段)以及尚家河库首(库首至牌渡河段)。氨氮含量在西北口与玄庙观库区较高。建议加大上述区域的监测治理力度,找出污染源,采取有针对性的治理措施。

#### 参考文献:

- [1] 刘勇兵,阮力,靳鹏.黄柏河东支流域水资源保护措施研究[J].中国农村水利水电,2017(7):129-130,136.
- [2] 李琼,刘佳,李永凯.黄柏河流域水库底泥内源磷释放对水质影响分析[J].人民长江,2019,50(3):60-65.
- [3] 张幼成,李琼,刘佳.黄柏河水质变化调查分析[J].资源节约与环保,2018(4):70-77.
- [4] 周红英,向坤,阚红涛,等.宜昌市黄柏河水华成因及防治[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2013,31(3):357-360.
- [5] 岳佳佳,庞博,张艳君,等.基于神经网络的宽浅型湖泊水质反演研究[J].南水北调与水利科技,2016,14(2):26-31.
- [6] 赵希.遥感技术在水文水资源领域中的应用分析[J].环境与发展,2020,32(12):62-63,66.
- [7] 曹引.湖库水质遥感和水动力水质模型数据同化理论方法研究[D].南昌:东华大学,2019.
- [8] 岳程鹏,李兴,包龙山,等.基于 Landsat8 OLI 遥感数据反演乌梁素海浮游植物生物量[J].灌溉排水学报,2020,39(8):122-128.
- [9] 王丽艳,李畅游,孙标.基于 MODIS 数据遥感反演呼伦湖水体总磷浓度及富营养化状态评价[J].环境工程学报,2014,8(12):

5527-5534.

- [10] CHEN S, FANG G, HUANG X, et al. Water quality prediction model of a water diversion project based on the improved artificial bee colony-back propagation neural network[J]. Water, 2018, 10(6): 806.
- [11] 司源,董飞,廉秋月,等.基于多源监测与数据融合的水质动态评价方法[J].人民黄河,2021,43(2):88-94.
- [12] 冼翠玲,张艳军,张明琴,等.基于高分辨率多光谱影像的温瑞塘河水质反演模型研究[J].中国农村水利水电,2017(3):90-95.
- [13] SONG K, WANG Z, BLACKWELL J, et al. Water quality monitoring using Landsat Thematic Mapper data with empirical algorithms in Chagan Lake, China[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2011, 5(1): 053506.
- [14] 马丰魁,姜群鸥,徐黎丹,等.基于 BP 神经网络算法的密云水库水质参数反演研究[J].生态环境学报,2020,29(3):569-579.
- [15] 刘君龙,陈进,周晓明,等.考虑水文情势变化的黄柏河流域纳污能力[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):84-91.
- [16] 国家环境保护总局.地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 水利部.地表水资源质量评价技术规程:SL 395-2007[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [18] 蒋宗礼.人工神经网络导论[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [19] 张艺聪.基于 BP 神经网络的郑州农业灌溉用水预测[J].科学技术创新,2021(2):96-98.
- [20] 王云霞,杨国范,林茂森,等.基于 landsat 卫星影像的水库水体总磷质量浓度反演研究[J].灌溉排水学报,2017,36(4):105-109.
- [21] 刘轩,赵同谦,蔡太义,等.丹江口水库总氮、氨氮遥感反演及时空变化研究[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):829-838.
- [22] 李敬,王立,何成,等.基于 Sentinel-2 卫星数据的库塘型国家湿地公园水库总磷含量时空分布特征分析[J].复旦学报(自然科学版),2021,60(2):200-206.
- [23] 吴欢欢,国巧真,臧金龙,等.基于 Landsat 8 与实测数据的水质参数反演研究[J].遥感技术与应用,2021,36(4):898-907.
- [24] BO H, DONG X, LI Z, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff variation of the intensive phosphate mined Huangbai River Basin, China[J]. Water, 2019, 11(10): 2039.
- [25] RETA GL, DONG X, SU B, et al. The influence of large scale phosphate mining on the water quality of the Huangbai River Basin in China: dominant pollutants and spatial distributions[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38(2): 366-377.

(编辑:刘媛)

## Remote sensing inversion of water nitrogen and phosphorus in East Branch of Huangbai River

ZHANG Chengyan<sup>1,2</sup>, DONG Xiaohua<sup>1,2</sup>, YANG Shaokang<sup>1,2</sup>, ZHAO Chengming<sup>1,2</sup>, BO Huijuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingyu<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of the Ministry of Education for the Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Huangbai River is an important water source for production living and agriculture in Yichang City, Hubei Province, but large-scale phosphate mining has seriously affected its water quality. Therefore, it is necessary to conduct real-time monitoring.

ring of water quality parameters in the whole basin. Based on landsat8 – OLI remote sensing images ,according to the actual water quality monitoring data of 14 stations from 2014 to 2016 ,the artificial neural network was used to establish an inversion model of total phosphorus and ammonia nitrogen in the east tributary of Huangbai River. The total phosphorus and ammonia nitrogen contents in the whole water body of the eastern branch of Huangbai River were analyzed in spring and winter from 2014 to 2016 ,and the temporal and spatial variation characteristics of total phosphorus and ammonia nitrogen content in the eastern branch of Huangbai River were analyzed. The results showed that: ① For landsat8 – OLI remote sensing data ,the sensitive bands of total phosphorus were 4 ~ 7 ,and the artificial neural network inversion model established by sensitive bands had high accuracy ,and the evaluation indexes of Nash coefficient and mean square error coefficient were 0.9774 and 0.0064 ,respectively; the ammonia nitrogen sensitive band were 1 ~ 3 band ,the accuracy of the established model was lower than that of total phosphorus ,and the Nash coefficient and mean square error coefficient of the evaluation indicators were 0.7145 and 0.0045 ,respectively. ② The total phosphorus content in the eastern tributary of Huangbai River showed a fluctuating downward trend in general from 2014 to 2016 ,however higher total phosphorus content were at Tianfumiao and Xuanmiaoguan Reservoir respectively. The overall ammonia nitrogen content increased slightly. In December 2015 ,the ammonia nitrogen content in the Shangjiahe Reservoir and Xibeikou Reservoir area reached 0.22 mg/L and 0.27 mg/L. ③ The total phosphorus content in the east tributary of Huangbai River was the highest in spring ,and the ammonia nitrogen content was the highest in winter. ④ The spatial distribution of total phosphorus and ammonia nitrogen in Huangbai River Basin was different to some extent. The content of total phosphorus was relatively high in Shangjiahe , Tianfumiao and Xuanmiaoguan Reservoir areas ,and the content of ammonia nitrogen was relatively high in Xuanmiaoguan and Xibeikou Reservoir areas. The research results can provide basis for the water environment management of the basin.

**Key words:** total phosphorus; ammonia nitrogen; Landsat8 – OLI; remote sensing inversion; artificial neural networks; Huangbai River

(上接第19页)

- [20] 杜雪剑. 汶川某特大型泥石流特征及成灾机理研究[D]. 成都: 成都理工大学 2016.
- [21] 刘鑫磊, 唐川, 黄勋, 等. 基于数值模拟的震区溃决型泥石流流入流点选取探讨[J]. 地球与环境 2019, 47(2): 211 – 217.
- [22] 罗恒, 沈军辉, 李本松, 等. 螺子沟泥石流对九绵高速公路的危害分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报 2018, 16(4): 307 – 313.
- [23] 周文婷, 邵瑞华, 张雅洲, 等. 台风强降雨及雨后泥石流对广东高州水库生态环境的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报 2018, 29(3): 60 – 69.
- [24] 张宏宝. 酒钢黑沟矿区南沟泥石流研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学 2002.

(编辑: 刘媛)

## Prediction and prevention of debris flow disaster in Daping gully of Guangzhou City based on shallow water flow model

ZHENG Wei<sup>1</sup>, YIN Peijie<sup>2</sup>

(1. Shenzhen High Speed Engineering Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Rainstorm is an important factor leading to debris flows in mountainous areas ,prediction on debris flow erosion range under different rainfall conditions is still the focus of debris flow prevention and control. In order to prevent and reduce disasters , it is necessary to design a reasonable dam scheme. Taking the debris flow of Daping gully in Guangzhou City as an example ,the movement process and prevention of debris flow are numerically simulated by using the shallow water flow modeling technology with complex topographic conditions. The results are as follows: ① the flow depth and velocity of debris flow increase with the decrease of rainfall frequency under different rainfall thresholds. When the rainfall frequency is 0.5% ,the length of debris flow accumulation along the river channel will be 800 m ,which is of great danger. ② Danger levels of the gully are clarified based on flow depth according to the simulation results ,and a debris flow hazard index( HI) is proposed. ③ Combined with the Terrain Reconstruction Technology ,different retaining dams are simulated. In the simulation ,retaining dams with different heights are set at points A and B in the gully ,and the best scheme is to set a retaining dam of 15 m at point A. The research results can provide reference for similar cases at home and abroad.

**Key words:** debris flow; debris flow hazard index; numerical simulation; retaining dam; shallow water flow model; Guangzhou City