

引用格式: Zhang Xiaochuan, Wang Jie. The Analysis of Eco-hydrological Structure of Shengjin Lake Wetland based on Spatial and Temporal Fusion Technology of Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1109-1117. [张晓川, 王杰. 基于遥感时空融合的升金湖湿地生态水文结构分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1109-1117.]  
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.5.1109

## 基于遥感时空融合的升金湖湿地生态水文结构分析

张晓川<sup>1,2,3</sup>, 王杰<sup>3,4</sup>

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601;

4. 安徽大学 湿地生态保护与修复安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 利用遥感技术开展湖泊湿地生态水文结构分析对维持其生态服务功能具有重要意义, 但受大气状况的影响会造成特定水位下可用高分辨率遥感影像的缺失, 而遥感时空融合技术为弥补这一缺陷提供了重要途径。以安徽省升金湖湿地为研究区, 根据改进后的时空自适应反射率融合模型(ESTARFM)模拟生成高时空分辨率遥感影像, 评价模拟遥感影像的数值精度, 进而分析了升金湖湿地的生态水文结构。结果表明: ① ESTARFM模型能够有效模拟不同水位下湖泊湿地的高分辨率遥感影像, 融合影像与真实影像在近红外波段、短波红外波段反射率的相关系数分别达到0.93和0.91, 且输入数据与融合数据的日期间隔越短, 模拟精度越高; ② 基于不同水体指数的水体提取效果表明, 新型组合水体指数(NCWI)更适用于湖泊湿地的水体信息提取; ③ 对升金湖湿地生态水文结构分析可知, 湿地中心区、适宜活动区和非适宜区分别约占该湿地总面积的32.8%、12.1%和55.1%。

**关键词:** 时空融合; 生态水文结构; 水体指数; 湿地中心区; 适宜活动区

**中图分类号:** P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)05-1109-09

### 1 引言

湖泊湿地作为重要的湿地类型, 孕育着大量的动植物资源, 具有调节气候、提供生物栖息地等多种功能<sup>[1]</sup>。湿地水文与生态环境关系密切, 作为河流、湖泊等水域生态系统的重要因素, 水文在一定程度上决定着水域生态系统的生物环境及功能等<sup>[2-3]</sup>。生态水文结构主要表现在生态系统中水体的演变过程, 进而反映生态系统的变化特征<sup>[4]</sup>。同时, 生态水文环境的变化对环境及人类活动也产生重要的影响<sup>[5]</sup>。20世纪90年代生态水文的研究逐渐形成。Eagleson<sup>[6]</sup>研究了生态水文过程在生态系

统动态中的作用机制。陈敏建等<sup>[5]</sup>通过湿地生态系统的研究, 提出了生态水文结构理论基础和研究方法, 通过湿地的径流场和生物多样性场之间的耦合关系划分湿地的中心区和活动区。杨爱明等<sup>[7]</sup>通过建立相关指标体系, 完成了我国水资源的分区等。傅伯杰<sup>[8]</sup>通过研究了水文与生态过程间的相互关系, 强调了生态水文的多过程、多尺度问题。孙倩莹等<sup>[9]</sup>通过水文模型定量评估了生态水文调节的功能。然而目前国内对湖泊湿地生态水文结构的研究仍比较缺乏, 同时由于我国地貌复杂、气候类型多样, 不同地域湖泊湿地生态水文条件会存在一定

收稿日期: 2019-03-20; 修订日期: 2020-04-26

基金项目: 安徽高校自然科学基金项目(KJ2019A0045), 安徽省自然科学基金项目(1608085QD82)资助。

作者简介: 张晓川(1995—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事遥感地学分析研究。E-mail: zhangxc@radi.ac.cn

通讯作者: 王杰(1984—), 男, 安徽合肥人, 博士, 讲师, 主要从事遥感地学分析研究。E-mail: wangjie@ahu.edu.cn

的差异<sup>[10]</sup>,对长江中下游湿地的生态水文结构分析还需要深入的研究。

卫星遥感技术为湖泊湿地生态水文结构分析提供了重要的数据源。Landsat 8- OLI数据具有较高的空间分辨率,但受卫星重访周期、大气条件等因素影响,难以获取整个湿地区域的高时间分辨率数据<sup>[11]</sup>。MODIS数据具有较高的时间分辨率,但像元空间异质性较大,在不同地物背景下的提取水体信息存在不足<sup>[12]</sup>。为解决这一问题,国内外学者提出遥感数据时空融合方法<sup>[13-15]</sup>,通过融合高空间分辨率 Landsat 数据和高时间分辨率 MODIS 数据,模拟生成新的高时空分辨率遥感数据,从而避免了单一数据源的局限性。Gao 等<sup>[16]</sup>提出了时空自适应反射率融合模型(STARFM),考虑了目标像元的空间及光谱相似性以及时间上的差异。然而,当目标像元内存在多种地物类型时,STARFM模拟结果会有明显的下降<sup>[15]</sup>。因此,Zhu 等<sup>[17]</sup>提出了改进后的时空自适应反射率融合模型(ESTARFM),利用目标像元在两个时间点的反射率趋势并结合光谱解混理论,能更好地模拟异质环境的地表反射率,从而解决了地表混合像元的空间异质性问题。ESTARFM不仅提高了融合影像的准确性,同时对于复杂的异质环境也能保留了更多的空间细节<sup>[18]</sup>,已被应用于水环境遥感监测研究中<sup>[19-20]</sup>。

本文以安徽省升金湖湿地为研究区,基于 Zhu 等<sup>[17]</sup>提出的 ESTARFM 模型,通过遥感时空融合技术模拟高时空分辨率的遥感影像,从中提取不同水位下的湖泊水体信息,进而分析该湿地的生态水文结构,为长江中下游湿地的水资源保护和合理利用

提供参考依据。

## 2 研究方法

### 2.1 时空融合模型

ESTARFM模型充分考虑了MODIS像元的空间异质性,通过引入转换系数以改进融合模拟结果。在假设各端元所占比例保持稳定的情况下,将MODIS混合像元的反射率变化分解为多个端元反射率变化的加权总和。通过构建以模拟像元为中心像元的一定大小移动窗口,在该移动窗口内,选取与中心像元有相似光谱特征的均一像元并对其赋予权重,进而获得中心像元值<sup>[17]</sup>。中心像元值可由式(1)表示:

$$L_b(x_{w'/2}, y_{w'/2}, T) = L_b(x_{w'/2}, y_{w'/2}, T') + \sum_{i=1}^n W_i \times v_i \times (M_b(x_i, y_i, T) - M_b(x_i, y_i, T')) \quad (1)$$

其中: $L_b$ 和 $M_b$ 表示波段 $b$ 的Landsat和MODIS数据, $w'$ 为移动窗口大小, $(x_{w'/2}, y_{w'/2})$ 表示模拟像元位置, $T, T'$ 为时间, $W_i$ 为第 $i$ 个与模拟像元光谱相似的像元权重, $v_i$ 表示第 $i$ 个与模拟像元相似光谱像元的转换系数, $n$ 为与模拟像元光谱相似的像元数目, $(x_i, y_i)$ 表示第 $i$ 个与模拟像元光谱相似的像元位置。

在ESTARFM模型中,选用前后时刻 $t_1, t_3$ 的Landsat和MODIS数据以及中间时刻 $t_2$ 的MODIS数据分别模拟 $t_2$ 的高分辨率数据: $L_{b,t}(x_{w'/2}, y_{w'/2}, t_2)$  ( $t=t_1, t_3$ )。将 $t_1, t_3$ 时刻模拟的 $t_2$ 时刻高分辨率数据加权计算获得更精度的 $t_2$ 时刻模拟数据,权重 $\varepsilon_t$ 计算如式(2)所示。由式(3)计算模拟的中心像元值进而得到模拟的高分辨率遥感数据。

$$\varepsilon_t = \frac{1 / \left| \sum_{j=1}^{w'} \sum_{i=1}^{w'} M_b(x_i, y_j, t) - \sum_{j=1}^{w'} \sum_{i=1}^{w'} M_b(x_i, y_j, t_2) \right|}{\sum_t (1 / \left| \sum_{j=1}^{w'} \sum_{i=1}^{w'} M_b(x_i, y_j, t) - \sum_{j=1}^{w'} \sum_{i=1}^{w'} M_b(x_i, y_j, t_2) \right|)}, t = t_1, t_3 \quad (2)$$

$$L_b(x_{w'/2}, y_{w'/2}, t_2) = \sum_t \varepsilon_t \times L_{b,t}(x_{w'/2}, y_{w'/2}, t), t = t_1, t_3 \quad (3)$$

### 2.2 水体信息提取

目前,水体指数法是最为常用的水体遥感信息提取方法。本文通过比较5种不同水体指数的水体提取效果(如表1),选择提取精度最高的水体指数用于提取不同水位下湿地的水体信息。表1中Blue、Green、Red分别为蓝光、绿光、红光波段反射率,NIR、SWEIR1、SWIR2分别为近红外、短波红外-1、短波红外-2波段反射率。

表 1 典型水体指数

Table1 Typical water indices

水体指数	计算公式
MNDWI <sup>[21]</sup>	(Green - SWIR1) / (Green + SWIR1)
EWI <sup>[22]</sup>	(Green - NIR - SWIR1) / (Green + NIR + SWIR1)
AWEI <sup>[23]</sup>	Blue + 2.5 × Green - 1.5 × (NIR + SWIR1) - 0.25 × SWIR2
NCWI <sup>[24]</sup>	(Green - SWIR1) / (NIR + Red)
NDWI <sup>[25]</sup>	(Green - NIR) / (Green + NIR)

### 3 研究区及数据处理

#### 3.1 研究区概况

升金湖湿地位于池州市境内的东至县和贵池区交界处(图1),属于典型的长江中下游湿地,也是国家级重要生态湿地,主要由上湖、中湖和下湖这3个湖区组成,孕育着大量的野生动植物保护资源。所在区域属于亚热带季风气候,夏季炎热潮湿,冬季寒冷干燥,年降水量1 600 mm,年平均气温16.14℃,气候温和,水体污染较少。

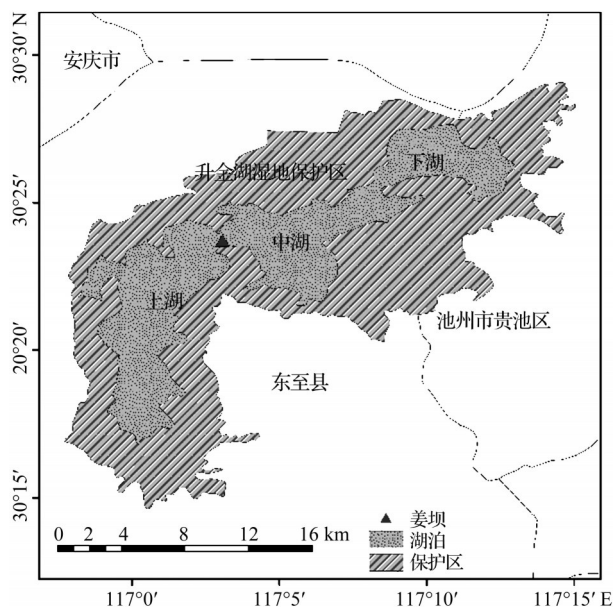


图1 升金湖湿地概况图

Fig.1 Map of Shengjin lake wetland

#### 3.2 研究数据及预处理

##### 3.2.1 升金湖实测水位数据

本文根据升金湖姜坝站点的实测水文资料(<http://yc.wswj.net/ahyc/>),统计得到2014年升金湖湿地的实测水位变化(图2)。其中,升金湖水位在夏季较高,冬季较低,对应的水位高度在7月份(丰水期)达到峰值,高度约为14.65 m,在1月份(枯水期)最低约为8.23 m。因而本文分别选取1月份和7月份这两个极值水位时期的遥感影像,用于分析升金湖湿地的生态水文结构。

##### 3.2.2 Landsat 和 MODIS 数据

采用 Landsat 8-OLI 影像作为较高空间分辨率遥感数据。MOD09A1 地表反射率产品是基于低观测角、无云或云阴影以及气溶胶的原则,选用8 d内最优像元作为产品的相应像元生成的。相较于MOD09GA 逐日反射率数据,该数据产品质量更

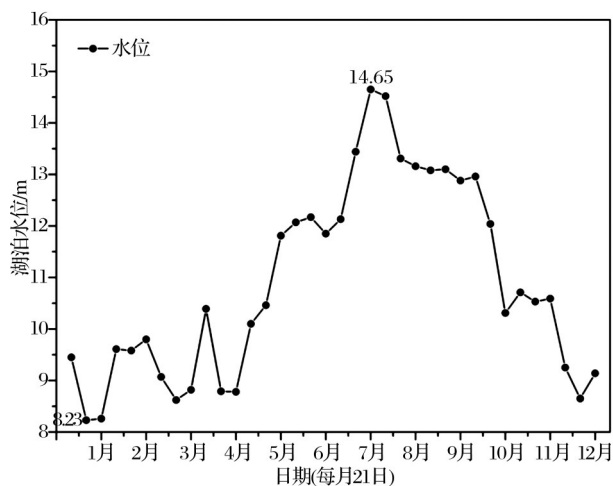


图2 2014年升金湖实测水位图

Fig.2 The map of measured water level of Shengjin lake in 2014

高<sup>[26]</sup>,因而本文采用空间分辨率为500 m的MOD09A1地表反射率影像作为高时间分辨率遥感数据。本文所用遥感数据如表2所示。

表2 Landsat 8-OLI和MOD09A1数据列表

Table 2 The list of Landsat 8-OLI and MOD09A1 data

实验类型	组别	Landsat 8-OLI(日期)	MOD09A1(日期)
精度验证	检验一组	2014/05/01 ( $t_1$ )	2014/05/01 ( $t_1$ )
		2014/10/24 ( $t_3$ )	2014/09/06 ( $t_2$ )
			2014/10/24 ( $t_3$ )
	检验二组	2014/08/05 ( $t_1$ )	2014/08/05 ( $t_1$ )
水文结构分析	枯水期	2014/10/24 ( $t_3$ )	2014/09/06 ( $t_2$ )
			2014/10/24 ( $t_3$ )
		2013/10/05 ( $t_1$ )	2014/03/14 ( $t_3$ )
		2014/03/14 ( $t_3$ )	2014/01/01 ( $t_2$ )
	丰水期		2014/01/09 ( $t_2$ )
			2014/01/17 ( $t_2$ )
		2014/05/01 ( $t_1$ )	2014/08/05 ( $t_3$ )
		2014/08/05 ( $t_3$ )	2014/07/12 ( $t_2$ )

##### 3.2.3 数据预处理

Landsat 8-OLI和MOD09A1来自不同的传感器,其数据格式、投影及空间分辨率等不相同,在数据融合前需要对数据进行预处理。

在ENVI软件下先对Landsat 8-OLI数据进行辐射校正,而后以1:50 000地形图作为基准对其进行几何校正,校正误差控制在0.5个像元以内,得到



Landsat 8-OLI地表反射率影像。由于MOD09A1数据产品是正弦曲线投影,本文用NASA提供的MRT(MODIS Reprojection Tool)工具将该类数据投影转换到与Landsat 8-OLI相同的坐标系,并重采样为30 m空间分辨率。最后对两种数据进行空间配准及波段匹配处理,以便后续的数据融合。具体流程如图3所示。

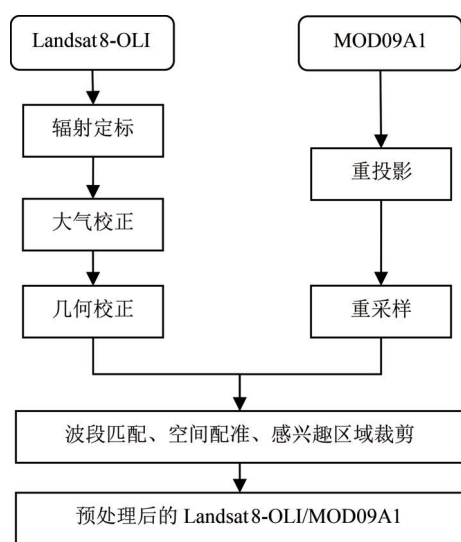


图3 数据预处理流程图

Fig.3 The flowchart of the data preprocessing

## 4 结果与分析

### 4.1 融合结果精度评价

为评价ESTARFM模型在湖泊湿地影像模拟中的适用性,分别选取表2中的检验一组、检验二组对应的遥感数据进行时空融合,模拟生成2014年9月6日的高分辨率遥感数据(图4)。从假彩色合成效果看,融合得到的遥感影像与真实Landsat 8-OLI影像中地表覆盖类型及其空间位置上相近,并能够较好地反映河流、湖泊等湿地水体的分布。

由于水体在近红外波段和中红外波段的吸收作用最强,其光谱反射率接近为零<sup>[21]</sup>,而植被、建筑物等非水体地物在近红外波段和中红外波段具有较高的反射率,因此这两个波段为区分水体和非水体区域提供了重要依据<sup>[24]</sup>。随机选取研究区内的1000个样点,分别对近红外(NIR)波段和短波红外(SWIR-1)波段影像进行精度验证,以定量评价遥感影像融合结果(图5)。检验一组中,融合影像与Landsat 8-OLI影像在NIR波段(图5(a))、SWIR-1波段(图5(c))的相关系数分别为0.92和0.87,均方根误差分别为0.068和0.044;检验二组中,两者在NIR波段(图5(b))、SWIR-1波段(图5(d))的相关系数分别为0.93和0.91,均方根误差分别为0.06和0.036。

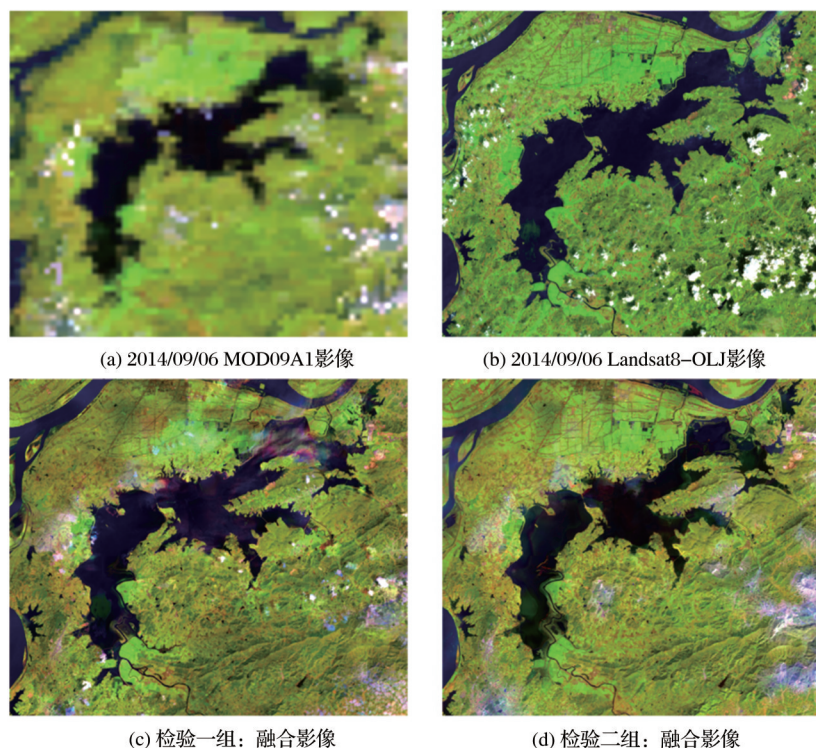


图4 融合影像与Landsat 8-OLI真实影像比较(2014年9月6日)

Fig.4 Comparison between fusion images and Landsat 8-OLI real image (September 6, 2014)

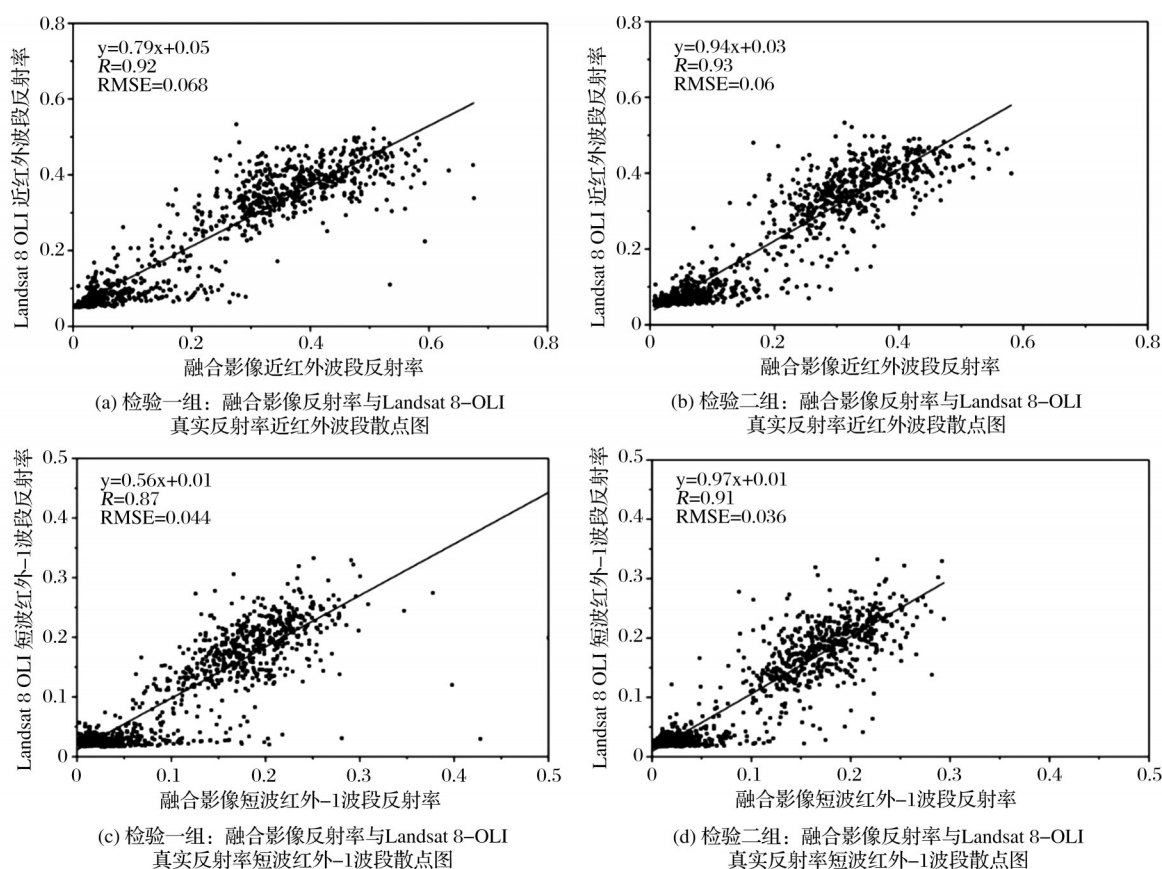


图5 融合影像反射率与 Landsat 8-OLI 真实反射率在近红外与短波红外波段的散点图

Fig.5 Scatter plots of the fusion image reflectance and Landsat8-OLI real reflectance for NIR and SWIR1 bands

从图5中可以看出,检验二组的融合精度要高于检验一组,其原因主要是两组融合实验中输入数据的日期不同。与检验一组相比,检验二组的 $t_i$ 日期与模拟遥感数据的日期更为接近,对应两个时期的地表覆盖类型及对应的光谱反射率更为相似。因而,ESTARFM模型适用于任意水位下湖泊湿地的高分辨率遥感数据模拟,而且输入影像与模拟影像的日期间隔越短,其融合精度越高。

## 4.2 湿地生态水文结构分析

### 4.2.1 水体信息提取方法确定

为确定适用于湖泊湿地水体信息的提取方法,本文选取质量较好的2014年5月1日的Landsat 8-OLI数据,分别对表1中的5种水体指数进行评价。为去除背景及其他非水体的影响,本文结合相邻日期的高分一号影像,确定每种水体指数在研究区的最佳分割阈值<sup>[27]</sup>。

图6中显示了分别采用5种不同水体指数提取研究区的水体范围的结果,其中红色边框表示利用新型组合水体指数(NCWI)提取湿地水体范围与其他水体指数提取结果的差异。通过目视解译发现,

与其他指数相比,NCWI在尽可能提取完整水体边界的同时,也能有效地去除非水体区域。

接下来本文选择相邻日期的高分一号影像数据,选取研究区的水体以及非水体样本作为检验样本,生成混淆矩阵定量评价5种水体指数的水体提取效果(表3)。结果表明,NCWI的总体精度为96.78%,Kappa系数为0.95,比其他4种水体指数都高,这表明新型组合水体指数(NCWI)更适合该湖泊湿地的水体信息的提取。分析其主要原因在于NCWI不仅能够有效地抑制植被和建筑物噪声,还能减少裸地信息的干扰<sup>[24]</sup>。

表3 不同水体指数水体提取精度评价

Table 3 Accuracy assessment of water body extraction by different water indices

水体指数	总体精度/%	Kappa系数	错分误差/%	漏分误差/%
AWEI	95.06	0.94	2.2	5.5
EWI	93.27	0.92	3.0	9.4
MNDWI	95.38	0.93	2.5	9.4
NCWI	96.78	0.95	1.5	4.8
NDWI	93.14	0.92	1.8	5.3



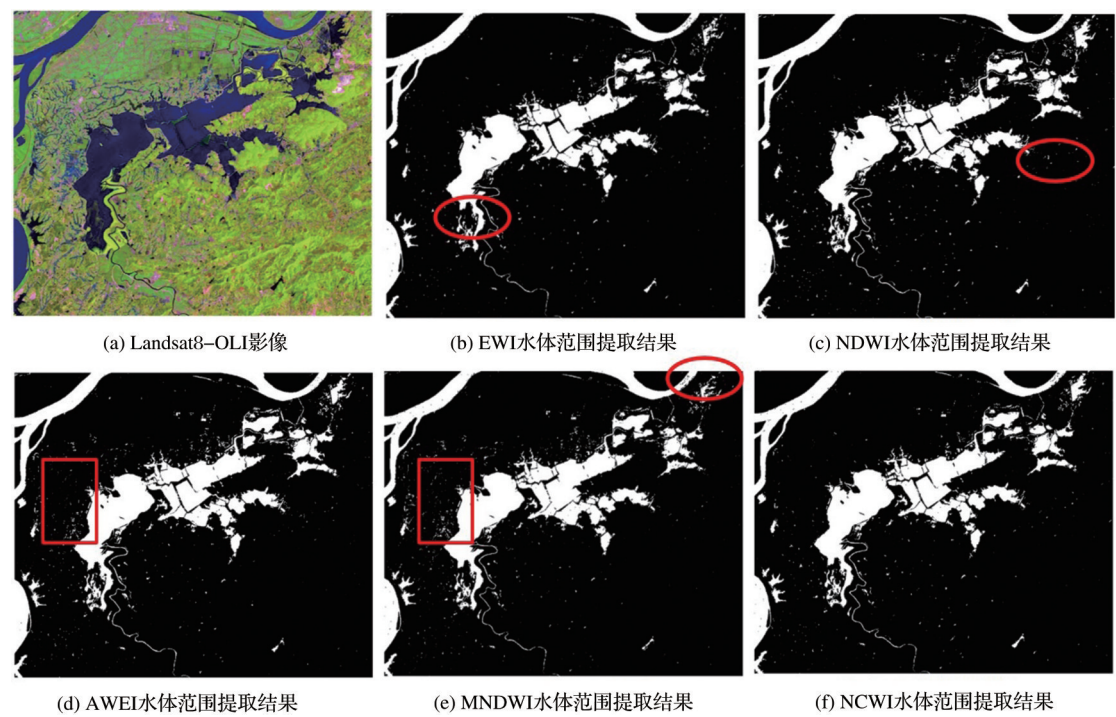


图 6 不同水体指数水体提取结果

Fig.6 Water body extraction by different water indices

4.2.2 湖泊湿地水文结构分析

湿地中心区是保证生态系统服务功能的最小水域,是湿地生存的最小范围<sup>[5]</sup>,根据枯水期时研究区最小水域范围确定湿地中心区。在不同湿地水文条件下,随着水位等因素的变化导致水体区域分布在丰水期扩大,而在枯水期消失的区域可表示为湿地的适宜活动区<sup>[27-29]</sup>,这部分区域也是湿地生物多样性最丰富区域。非适宜区(实验区)是表示除湿地中心区、适宜活动区以外的湿地保护区<sup>[27-29]</sup>,该湿地区域受水位波动的影响较小,常年保持相对稳定的地表覆盖类型。

在本文中,利用NCWI指数对融合模拟的不同极值水位时期高分辨率遥感影像进行水体范围提取,并统计对应的水域面积,从而获得各功能区的面积及比例(表4)。其中适宜活动区面积最小,湿地中心区面积次之,非适宜区面积最大,各个区域占湿地总面积比例分别为32.8%、12.1%、55.1%。

表 4 升金湖湿地生态功能区面积统计  
Table 4 The Statistics of eco-hydrological function area of Shengjin lake wetland

功能区	湿地 中心区	适宜 活动区	非适 宜区	总面积
面积/km <sup>2</sup>	106.89	39.26	179.13	325.28
比例/%	32.8	12.1	55.1	100

图7为根据不同极值水位下的水体范围生成的升金湖湿地生态水文结构图。从空间分布上看,湿地中心区主要分布在上湖、中湖地区,人为干扰较小,常年保持稳定的水域范围,具有较高的代表性和典型性,为维持湖泊湿地生物多样性提供基础条件。适宜活动区主要分布在上湖、下湖地区,且下湖区域较大,这主要是因为中湖周围为丘陵地形,地势起伏较大,不易被水淹没但易形成地表径流;而上湖和下湖地势平坦,且大多为淤积作用形成的湿地滩涂,湖泊水位上涨更易淹没这些地区。湿地非适宜区面积约为179.13 km<sup>2</sup>,地势相对较高,受水位波动的影响小,主要是农用地和居住区,为当地居民生存等提供必要的条件。

5 结 语

本文以升金湖湿地为研究区,利用ESTARFM模型将Landsat 8-OLI影像与MOD09A1地表反射率进行时空融合,模拟生成不同水位时期的高分辨率遥感数据,并通过水体信息提取分析该湿地的生态水文结构。

(1)利用ESTARFM融合方法能有效弥补在湿地生态水文结构分析中特定水位下遥感数据缺失的问题。融合后的高分辨率影像与真实Landsat影像在各波段间的相关性较高,其中近红外波段的相

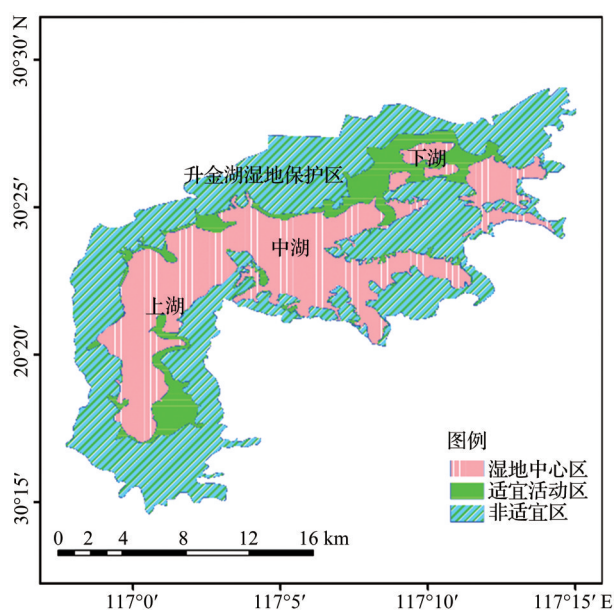


图7 升金湖湿地生态水文结构图

Fig.7 The eco-hydrological structure of Shengjin lake wetland

关系数和均方根误差可达到0.93和0.06,短波红外波段的相关系数和均方根误差可达到0.91和0.036,且输入影像与模拟影像的日期间隔越短,模型的融合精度越高。

(2)通过对NDWI、MNDWI和NCWI等5种水体指数提取湿地水体信息效果的比较得知,NCWI最适用于湖泊湿地的水体信息提取,Kappa系数为0.95,总体精度达到96.78%。

(3)结合实测水文资料,确定丰水期和枯水期两个极值水位时期水域变化情况,分析了升金湖湿地生态水文结构。其中湿地中心区、适宜活动区和非适宜区分别占升金湖湿地总面积的32.8%、12.1%和55.1%。

本文通过对2014年不同水位下的湿地水体信息提取,分析了升金湖湿地的生态水文结构。然而,由于区域地理环境、气候条件的变化,湖泊水位的年内变化在不同年份可能会存在差异,导致湿地各功能区空间分布出现差异。本研究将进一步探究长时间序列下升金湖湿地各功能区的空间特征变化。

#### 参考文献(References):

- [1] Liu Hongliang. Lake Eutrophication Control [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.[刘鸿亮.湖泊富营养化控制.[M].北京:中国环境科学出版社,2011.]
- [2] Chen Kaiqi, Tao Jie. Research on Eco-hydrology of River

Habitat[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):52-56.

[陈凯麒,陶洁.河流生物栖息地的生态水文学研究[J].水资源保护,2015,31(6):52-56.]

- [3] Gorla L, Perona P. On Quantifying Ecologically Sustainable Flow Releases in a Diverted River Reach[J]. Journal of hydrology, 2013, 489: 98-107.
- [4] Homa E S, Brown C, McGarigal K, *et al.* Estimating Hydrologic Alteration from Basin Characteristics in Massachusetts [J]. Journal of hydrology, 2013, 503: 196-208.
- [5] Chen Minjian, Wang Liquan, Feng Huali, *et al.* Theory and Analysis of Wetlands' Eco-hydrological Configuration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2887-2893.[陈敏建,王立群,丰华丽,等.湿地生态水文结构理论与分析[J].生态学报,2008,28(6):2887-2893.]
- [6] Eagleson P S. Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [7] Yang Aimin, Tang Kewang, Wang Hao, *et al.* Eco-hydrological Regionalization in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2008, 39(3):332-338.[杨爱民,唐克旺,王浩,等.中国生态水文分区[J].水利学报,2008,39(3):332-338.]
- [8] Fu Bojie. Thoughts on the Recent Development of Physical Geography[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1):1-7.[傅伯杰.新时代自然地理学发展的思考[J].地理科学进展,2018,37(1):1-7.]
- [9] Sun Qianying, Gao Yanni, Zhang Linbo, *et al.* Assessment of Ecological and Hydrological Regulation Service of Land Use in Xiamen City[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1):66-73.[孙倩莹,高艳妮,张林波,等.基于土地利用的厦门市生态水文调节服务评估[J].环境科学研究,2019,32(1):66-73.]
- [10] Xu Ligang, Lai Xijun, Wan Rongrong, *et al.* Review of the Development of Lake Wetlands Eco-hydrology and Case Studies, 2019, 38(8):1171-1181.[徐力刚,赖锡军,万荣荣,等.湿地水文过程与植被响应研究进展与案例分析[J].地理科学进展,2019,38(8):1171-1181.]
- [11] Tianyu L, Qingmin M. A Mixture Emissivity Analysis Method for Urban Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Data[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 179: 63-71.
- [12] Feng L, Hu C, Chen X, *et al.* Assessment of Inundation Changes of Poyang Lake Using MODIS Observations between 2000 and 2010 [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121(2):80-92.
- [13] Cai Dewen, Niu Zheng, Wang Li. Adaptability Research of

- spatial and Temporal Remote Sensing Data Fusion Technology in Crop Monitoring[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(6):927-932.[蔡德文,牛铮,王力.遥感数据时空融合技术在农作物监测中的适应性研究[J].遥感技术与应用, 2012, 27(6):927-932.]
- [14] Shen H, Huang L, Zhang L, *et al.* Long-term and Fine-scale Satellite Monitoring of the Urban Heat Island Effect by the Fusion of Multi-temporal and Multi-sensor Remote Sensed Data: A 26-Year Case Study of the City of Wuhan in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 172: 109-125.
- [15] Li X, Foody G M, Boyd D S, *et al.* SFSDAF: An Enhanced FSDAF that Incorporates Sub-pixel Class Fraction Change Information for Spatio-temporal Image Fusion [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 237 (C). doi: 10.1016/j.rse.2019.111537.
- [16] Gao F, Masek J, Schwaller M, *et al.* On the Blending of the Landsat and MODIS Surface Reflectance: Predicting Daily Landsat Surface Reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44:2207-2218.
- [17] Zhu X, Chen J, Gao F, *et al.* An Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model for Complex Heterogeneous Regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2610-2623.
- [18] Dong Shiyuan, Zhang Wenjuan, Xu Junyi, *et al.* Study of the Improved Similar Pixel Selection Method on ESTARFM[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 185-193.[董世元, 张文娟, 许君一, 等. ESTARFM 相似像素选取方法的改进研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 185-193.]
- [19] Hao Guibin, Wu Bo, Zhang Lifu, *et al.* Temporal and Spatial Variation Analysis of the Area of Siling Co Lake in Tibet based on ESTARFM (1976~2014) [J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(6):833-846.[郝贵斌, 吴波, 张立福, 等. ESTARFM 模型在西藏色林错湖面积时空变化中的应用分析(1976~2014年)[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6):833-846.]
- [20] Michishita R, Chen L, Chen J, *et al.* Spatiotemporal Reflectance Blending in a Wetland Environment [J]. International Journal of Digital Earth, 2015, 8(5): 364-382.
- [21] Xu Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.
- [22] Yan Pei, Zhang Youjing, Zhang Yuan. A Study on Information Extraction of Water System in Semi-arid Regions with the Enhanced Water Index (EWI) and GIS based Noise Remove Techniques[J]. Remote Sensing Information, 2007(6): 62-67.[闫霏, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息, 2007(6):62-67.]
- [23] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, *et al.* Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 23-35.
- [24] Nie Xinran, Liu Rong, Nie Aiqiu, *et al.* Study on a New Combined Water Index Model based on TM Image [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(24):374-378.[聂欣然, 刘荣, 聂爱球, 等. 基于TM影像的新型组合水体指数模型研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24):374-378.]
- [25] 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): 1425-1432.
- [26] Vermote E F, Kotchenova S Y. MOD09 (Surface Reflectance) User's Guide [EB/OL]. <http://modis-sr.ltdri.org>, 2008.3, 2017.7.
- [27] Zhang Nannan, Lin Yixin, Zang Shuying. Relationships between Phytoplankton Community in Different Functional Regions and Environmental Factors in Zhalong Wetland, Heilongjiang Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3):554-565.[张囡囡, 刘宜鑫, 臧淑英. 黑龙江扎龙湿地不同功能区浮游植物群落与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3):554-565.]
- [28] Liu Jiping, Ma Changdi. The Spatial Variation in the Patch Stability of Marshes in Xianghai between 1985 and 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):1261-1269.[刘吉平, 马长迪. 1985~2015年向海沼泽湿地斑块稳定性的空间变化[J]. 生态学报, 2017, 37(4):1261-1269.]
- [29] Zhou Linfei, Xu Haotian, Zhang Jing. Landscape Pattern Change and Division of Function Zones in Linghekou Wetland Nature Reserve [J]. Wetland Science, 2016, 14(3):403-407.[周林飞, 徐浩田, 张静. 凌河口湿地自然保护区景观格局变化及功能区划分[J]. 湿地科学, 2016, 14(3):403-407.]



## The Analysis of Eco-hydrological Structure of Shengjin Lake Wetland based on Spatial and Temporal Fusion Technology of Remote Sensing

Zhang Xiaochuan<sup>1,2,3</sup>, Wang Jie<sup>3,4</sup>

(1.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3.School of Resources and Environmental Engineering, University of Anhui, Hefei 230601, China;

4.Anhui Province Key Laboratory of Wetland Ecosystem Protection and Restoration, Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Analyzing the eco-hydrological structure of the lake wetland by remote sensing is of great significance for maintaining its ecological service function. However, the available high-resolution remote sensing images at specific water levels may be absent due to the influence of atmospheric conditions, and the spatial-temporal fusion technology in remote sensing is an important approach to compensate for this deficiency. Shengjin lake wetland in Anhui province was used as the research area in our study. The high spatial-temporal resolution remote sensing images were simulated by the Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model (ESTARFM), and the numerical accuracy of simulated images were evaluated by comparing with real Landsat8-OLI images. Moreover, five water indices were evaluated and the optimal water index was selected to extract the water information. Finally, the high-resolution remote sensing images at specific water level were simulated to extract the water information and analyze the eco-hydrological structure of Shengjin lake wetland. The results showed that: (1) ESTARFM could effectively simulate high-resolution remote sensing images. The correlation coefficients between fusion images and real images in near-infrared band and short-wave infrared band reached 0.93 and 0.91 respectively, and the Root Mean Square Error(RMS) were 0.06 and 0.036 respectively. Additionally, the shorter the date interval between the input images and the fusion images is, the higher the simulation accuracy will be; (2) The water extraction results of lake wetland were evaluated by different water indices and the New Combined Water Index (NCWI) had the highest accuracy with Kappa coefficient of 0.95 and overall accuracy of 96.78%; (3) The NCWI was adopted to extract water body information in High-resolution remote sensing images at different water levels. According to the analysis of Eco-hydrological structure of Shengjin lake wetland, the wetland central area, appropriate activity area and inappropriate activity area were approximately accounted for 32.8%, 12.1% and 55.1% of the total wetland area respectively.

**Key words:** Spatial and temporal fusion; Eco-hydrological structure; Water indices; Wetland central area; Appropriate activity area