

# 遥感影像水体提取研究综述

王 航<sup>1,2,3</sup>, 秦 奋<sup>1</sup>

(1. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475004;

2. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004; 3. 韩山师范学院 地理科学系, 广东 潮州 521041)

**摘 要:** 水体时空分布特征对于水资源监测与应用具有重要意义, 为了快速、准确、高效地获取地表水体信息, 借助于遥感影像进行水体提取的方法受到国内外学者关注。该文通过梳理相关研究成果, 评述水体提取的 3 类方法: 阈值法、分类器法和自动水体提取法在模型构建、分割机理和模型适用性 3 方面的差异。通过进一步分析现存的各类问题, 指出水体物化特征与遥感光谱特征的关系研究是提高水体提取方法普适性的一条重要途径; 同时, 影像提取结果评价体系的标准化和规范化, 将有助于推进遥感水体提取应用范围和力度。

**关键词:** 水体提取; 水体指数; 阈值法; 分类器法; 自动水体提取

【中图分类号】P234

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2018)05-0023-10

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.05.005

## Summary of the research on water body extraction and application from remote sensing image

**Abstract:** The spatial and temporal distribution of water is of great significance to the monitoring and application of water resources. In order to obtain the surface water information quickly, accurately and efficiently, the method of extracting water by remote sensing image is paid by domestic and foreign scholars. In this paper, three methods of water extraction are reviewed: the threshold method, the classifier method and the automatic water extraction method, they were summarized by three aspects: model construction, segmentation mechanism and model applicability. By further analyzing the existing problems, it pointed out that the research on relationship between the water physicochemical properties and the remote sensing spectral characteristics is an important way to improve the universality of water extraction method, and also, the standardization of the image extraction results evaluation system will be helpful to promote the application of remote sensing water extraction.

**Keywords:** water extraction; water index; threshold method; classifier method; automatic water extraction

WANG Hang<sup>1,2,3</sup>, QIN Fen<sup>1</sup> (1. Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Kaifeng, Henan 475004, China; 2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China; 3. Geographical Science, Hanshan Normal University, Chaozhou, Guangdong 521041, China)



**作者简介:** 王航(1981—), 女, 河南禹州人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为水资源遥感。

E-mail: wanghang20001@163.com

**收稿日期:** 2016-08-29

**基金项目:** 国家基础建设项目(2015DKA32300-05, 2013BAC05B01);

韩山师范学院青年项目(LQ201303); 潮州市科技支撑项目; 韩山师范学院教授启动项目(QD20150115)

**通信作者:** 秦奋 教授 E-mail: qinfen@126.com

## 0 引言

随着高空间、高时间和高光谱分辨率遥感数据的出现, 以及水体遥感定量与反演研究的深入, 利用遥感数据提取水体信息, 已经成为当前水利遥感技术研究的重点<sup>[1]</sup>。围绕如何准确、快速提取水体这一问题, 国内外学者展开深入研究, 涌现出丰富成果, 提出多种计算机水体解译方法。为此, 本文查阅国内外遥感影像水体提取研究成果, 概括国内外主要水体提取方法和关注内容, 构建水体提取理论与技术体系框架; 并探讨水体

提取相关概念和内涵,提出遥感影像水体提取面临的挑战和发展趋势。

按照影像分割原理与方法的差异,将水体提取方法分为阈值法、分类器法和自动化法 3 类进行述评。

## 1 水体提取理论与图像分割方法

### 1.1 水体提取基础理论

从理论上讲,水体的光谱特性,主要由透射入水的光与水中叶绿素<sup>[2]</sup>、泥沙<sup>[3]</sup>、黄色物质<sup>[4]</sup>、水深<sup>[5]</sup>、水体热特征<sup>[6]</sup>相互作用的结果。一般说来,0.41  $\mu\text{m}$  处黄色物质有明显的吸收峰,因此 0.43~0.65  $\mu\text{m}$  为测量水体叶绿素的最佳波段;0.58~0.68  $\mu\text{m}$  对不同泥沙浓度出现峰值,所以近红外波段常被用来研究水中悬浮物浓度变化<sup>[7]</sup>。对于大气纠正而言,特别是对大气气溶胶散射的纠正,一般避开水汽和臭氧选用 0.70~0.71  $\mu\text{m}$  及 0.85~0.89  $\mu\text{m}$  两个波段<sup>[8]</sup>。

水体提取模型由影像原始波段或预处理得到的特征波段组合构建。通过对原始波段的修正<sup>[9]</sup>、及波段组合的缨帽变换<sup>[10-11]</sup>、主成分分析<sup>[12]</sup>、重采样<sup>[13]</sup>、信息熵计算<sup>[14]</sup>等方法,得到解译质量高的特征波段。水污染及水体富营养化研究的深入,一些学者从生物理化特性切入<sup>[15-17]</sup>,结合色彩系统理化进行波段处理<sup>[18-21]</sup>。

边缘是划分目标和背景的重要图像元素,也是图像分割的关键因素之一<sup>[22]</sup>。直方图法根据水体与背景地物波谱曲线的峰值差异确定分割阈值<sup>[23]</sup>,这种方法直观、操作简单,但主观性强。边缘划分方法利用分割算法搜索最优尺度,具有严谨的科学性和理论性,是较为常见的定量方法之一<sup>[24]</sup>。利用边缘信息进行阈值选取,主要考虑梯度边缘像素划为目标像素或背景像素的问题<sup>[25]</sup>,这一问题的研究最早应用于计算机图像处理。其基本思路为,首先利用抗噪性良好的形态学算法获得梯度图像并统计出梯度图像的直方图,依此计算出梯度的均值和标准差,以梯度值大于均值与标准差之和的梯度点作为大梯度边缘点,再以原始图像中的这些位置上像素的灰度级均值作为最终的分割阈值<sup>[26]</sup>。基于这一思路,文献<sup>[27]</sup>设计  $3 \times 3$  的搜索窗口,引入浮游藻类指数 FAI (floating algae index)<sup>[28]</sup>,对水陆交叉区域进行最优阈值获取。文献<sup>[29]</sup>通过计算每个像元分别与水体、非水体纯像元阈值的差值,绘制高误差与低误差百分偏差曲线,以曲线交叉点作为最优

阈值,实现遥感影像上浅滩、潮汐带、湿地等区域水体提取。事实上,最优阈值的获取过程是一个矛盾平衡的过程,由于优化算法是采用采样的方式进行最优值搜索,虽然能够加快寻优速度,但在优化算法的寻优机制或准则函数连续性不佳的情况下,可能存在经过多次迭代仍不能找到最优值的风险。这种情况下,优化算法是以允许一定的错误率来换取处理速度的提高<sup>[22]</sup>。

因此,在水域边界清晰区域,直观性强、操作方法简单的直方图法成为获取分割阈值的较好选择。对于复杂区域的多种水体提取,可采用“全局-局部”划分策略,先将图像按一定的规则进行划分,在这些划分的子图像中分别自动完成阈值分割和最优选择<sup>[26,30-31]</sup>。

### 1.2 阈值法

阈值法也称为模型分类法,是基于水体光谱特征曲线,选择合适的波段构建模型,进行水体提取的分类方法;包括单波段法和多波段法,多波段法又分为谱间关系法和水体指数法。阈值分类方法的核心是阈值选取的准则函数,其描述了该方法依据哪一种知识作为阈值选取的标准,包括信息量、灰度值、分类误差、相关性等。

单波段法,主要利用水体在近红外或中红外波段强烈吸收的原理来识别水体信息。遥感影像水体研究初期,应用较为广泛。多波段法是综合遥感影像若干波段的光谱特征来识别水体的一种分类方法,包括谱间关系法和水体指数法。谱间关系法通过分析地物在遥感影像原始波段,或者原始波段转换得到的特征波段的光谱特征曲线,构建逻辑判断规则,来提取水体。相对于谱间关系法,水体指数法应用频次最高。指数法<sup>[32]</sup>通过比值运算得到特征指数,分析直方图以确定最佳阈值提取水体。最初由文献<sup>[33]</sup>提出,Mcfeeters 考虑到谱间关系法分析过程太复杂,且无法有效抑制背景信息,创建了归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI);文献<sup>[34]</sup>为了充分利用水体在红外波段的强吸收性,构建 NDWI<sub>3</sub> 模型。随着研究与应用的深入,学者们针对区域水系特点,提出了具有针对性的水体提取模型如:文献<sup>[35]</sup>提出改进的归一化差异水体指数(modified NDWI, MNDWI),用于城市区域水体提取;文献<sup>[36]</sup>提出增强型水体指数 EWI 用于半干旱地区的水系提取;文献<sup>[37]</sup>引入  $B_7$  波段构建新型水体指数模型 NWI (enhanced water index),进行水库、湖泊、网箱养殖区和海洋 4 种

水体提取实验; 文献 [38] 提出修订型归一化水体指数 RNDWI(revised NDWI), 用于消除山体、植被等阴影; 文献 [39] 通过高斯转换, 建立高斯归一化水体指数 GNDWI(GUSS NDWI)用于河流水体提取; 针对 MODIS 数据源, 文献 [40] 提出 CIWI(combined index of NDVI and NIR for water body identification)水体提取模型。文献 [29] 为了提高水体提取模型的普适性, 采集与分析新西兰、南非等全球区域的 312 个 TM 和 MODIS 水体样本, 构建 AWEI(automated water extraction index)模

型, 实现多种水体快速提取。文献 [41-45] 通过选用多种方法进行典型区域水体提取的对比研究, 探讨模型的适用性问题, 这些研究为后续学者快速选择合适的水体指数提供了借鉴与参考。

总之, 单波段法波段单一, 水体信息量受限, 随着多波段影像的发展, 逐渐被多波段法所取代。图像分割方法方面, 单波段法与指数法主要依据直方图统计结果, 进行反复尝试确定最优分割阈值, 而谱间关系法不用确定分割阈值, 因此更适合在光谱特征复杂的城市区域, 进行大尺度的快速水体提取(表 1)。

表 1 水体指数模型  
Tab 1 Model of The Water Index

模型名称	公式
NDWI	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$
NDWI <sub>3</sub>	$NDWI_3 = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$
MNDWI	$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$
EWI	$EWI = \frac{(Green - NIR - MIR)}{(Green + NIR + MIR)}$
NWI	$NWI = \frac{B_1 - (B_4 + B_5 + B_7)}{B_1 + (B_4 + B_5 + B_7)} \times C$
FNDWI	$FGreen = Green + S(C_{NIR} - NIR)$ $FNDWI = (FGreen - NIR) / (FGreen + NIR)$
AWEI	$AWEI_{nsh} = 4 \times (\rho_{band2} - \rho_{band5}) - (0.25 \times \rho_{band4} + 2.75 \times \rho_{band7})$ $AWEI_{sh} = \rho_{band1} + 2.5 \times \rho_{band2} - 1.5 \times (\rho_{band4} + \rho_{band5}) - 0.25 \times \rho_{band7}$
CWI	$CWI = (S_{at} - V) / (S_{at} + V)$ $V = 1.636\ 910D_2 - 3.396\ 809D_3 + 1.915\ 844D_4 - 0.156\ 084D_5 + 121(ETM)V = 1.373\ 179D_1 - 2.077\ 373D_2 + 0.704\ 194D_3 + 124(SPOT5)$ $Sat = \begin{cases} \frac{MAX(R,G,B) - MIN(R,G,B)}{MAX(R,G,B)} \\ MAX(R,G,B) \neq 0; \\ 0, MAX(R,G,B) = 0. \end{cases}$
CIWI	$CIWI = NDVI + NIR + C$ $NDVI = \frac{CH_2 - CH_1}{CH_2 + CH_1} \times C$ $NIR = \frac{CH_7}{CH_7} \times C, C \text{ 为常数, 取值 } 100.$
GNDWI	$GNDWI_{i,j} = \frac{NDWI_{i,j} - \overline{NDWI}}{\sigma}$

### 1.3 分类器方法

分类器法主要基于某种算法规则进行图像类别划分, 研究频次最高的分别是支持向量机(support vector machine, SVM)、决策树和面向对象方法。

#### 1.3.1 支持向量机方法

SVM 分类是一种建立在统计学习理论基础上的机器学习方法<sup>[46]</sup>, 它通过解算最优化问题, 在

高维特征空间中寻找最优分类超平面, 从而解决复杂数据的分类问题<sup>[47-48]</sup>, 并在高光谱影像分类中得到广泛应用<sup>[49]</sup>。

SVM 性能的优劣, 主要取决于核函数类型选择和核函数参数设置<sup>[50]</sup>, 在核函数选择研究中, 核校准是一个行之有效的方法<sup>[51]</sup>。文献 [52] 通过对核矩阵的计算与人脸识别研究, 认为识别率最高、性能最好的是径向基核函数, 其次是多项

式核函数,最差的是 S 型核函数。文献 [53] 分别以平面点集分类、手写体汉字识别及双螺旋线识别为例,进行核函数特性分析,得到无论是低维、高维、小样本、大样本等情况,径向基核函数均适用,且具有较宽的收敛域,是较为理想的分类函数。文献 [54] 对比多波段影像和多转子 (unmanned aerial vehicle, UAV) 影像数据,运用 SVM 和逐步回归分析对美国佛罗里达地区的 HLB 被感染树木进行分类,得到:  $\sigma=1.3$  时,径向基函数的分类准确性要高于线性判别函数、和二次判别函数。关于径向基核函数的优化,多聚焦于两个主要参数惩罚因子 C 和核参数  $\gamma$  的研究上。文献 [55] 设置“好区”并用  $C\gamma = \tilde{C}$  来确定最优优化参数,以求得 SVM 的良好推广性。文献 [56] 以鄱阳湖 GF-1 影像为数据源,分别采用 NDWI、SVM 和面向对象方法进行对比研究,认为 SVM 法精度最高,且对区域复杂度的敏感性最低,适合于多种尺度和类型的水体提取。由于 SVM 自动寻找类间支持向量的能力强,有效地解决了中低影像混合像元问题。因此,许多学者在进行初始对象提取后,采用 SVM 方法更进一步地分类,特别是地物变化检测方面。文献 [57] 认为 SVM 分类精度在数字航空图上的表现要优于多波段影像,并以黑海东南部绿色走廊区域为例,监测景观覆盖变化情况。此外,由于 SVM 的良好空间维属性,在时空三维目标特征分析方面优势明显,文献 [58] 基于 SVM 构建的单时相迭代分类算法 ICM(iterative conditional mode),可以实现分类和变化信息同时提取的目的。

### 1.3.2 决策树方法

决策树分类是一种基于空间数据挖掘和知识发现的分类方法<sup>[59]</sup>,由决策树学习和决策树分类两个过程构成<sup>[60]</sup>,其算法的关键是分类属性的选择,最著名的算法是 ID3 系列,包括 ID3、C4.5、C5.0 3 个版本<sup>[61]</sup>。决策树算法的粒度属性和学习属性,以及算法的大数据快速归纳划分属性,非常适合于遥感图像分类需求<sup>[62]</sup>。文献 [12] 利用 Landsat 5TM 影像和 C4.5 算法建立决策树用于汉江上游的水域、水田及湿地等地类的提取,用户精度分别达到 73%、83% 和 77%。文献 [63] 以青藏高原上的龙羊峡库区为研究区,采用 ZY-1 02C 星图像,进行 NDVI、NDWI 和决策树方法的对比研究,得出决策树法虽然受山体阴影等地形影响较大,但是能有效消除冰雪和薄云等气候环境的干扰。决策树法不需要数据集正态分布的假

设,可以重复利用 GIS 数据库中的多源信息<sup>[64-65]</sup>,分类规则结构简单、直观、容易理解,亦便于后期判断和修正,有效地抑制训练样本噪音和解决影像数据属性缺失问题<sup>[66]</sup>,特别是引入数据挖掘算法构建最优组合的研究<sup>[67-69]</sup>,使决策树法具有更高的分类精度和适应能力。近年来,有一些学者提出随机森林分类法<sup>[70]</sup>,认为其比决策树方法更加稳健,泛化性能更加良好,其实质仍可以理解为决策树分类思想的改进。

采用决策树方法进行图像分类时,结点个数的控制及数据源特征值的确定对分类结果的精度有很大影响,通常情况下,随着结点个数的增加,精度趋于稳定,变化不大,但过多的结点数,会造成低的分类效果,结点数与类别数目基本一致<sup>[71]</sup>,较为合适,关于影像数据的特征分割值,一般依据特征波段的光谱特征手动确定<sup>[72-73]</sup>或自动获取<sup>[74]</sup>。

### 1.3.3 面向对象方法

实验表明<sup>[75-77]</sup>在可见光-近红外范围内,平静水面仅有体反射辐射部分能量进入传感器,而粗糙波浪水面有表面反射和体反射两部分能量进入传感器,证明水体的光谱特性与水面粗糙度或纹理有关。高分影像的出现,使得水体提取可以兼顾到水面纹理信息,改变了基于单个像元分类的局面,促使基于目标分类的出现与完善<sup>[78]</sup>。面向对象法通过对影像的分割,使同质像元组成大小不同的对象,从而实现较高层次的遥感图像分类和目标地物提取<sup>[79]</sup>。面向对象方法对纹理特征的把握主要是分割对象内部同质性以及相邻对象的良好异质性。该思想的量化方法为:利用对象内部的标准差来表示对象内部的同质性,用空间相关性来表示相邻对象之间的异质性,使得内部同质性和对象之间的异质性达到最好的综合效果<sup>[80]</sup>。多尺度分割算法是现今面向对象软件常用方法<sup>[81]</sup>。但是该方法没有评价指标用于衡量最优程度,文献 [23] 提出以分割后影像区域对象矢量边界线与分类对象真实矢量边界的吻合程度为标准,进行最优分割尺度选择。文献 [82] 通过调节同质性指数和异质性指数的权重因子,得到改进的多波段模型计算最优分割尺度法,并以南京市 IKONOS 1M 影像进行最优分割尺度试验。采用面向对象法分类时,集于影像上多种属性特征的结合能够有效提高某些类别的分类精度,但不一定能提高区域分类总体精度<sup>[83-84]</sup>。这是因为过高的分辨率使得类别内部的光谱可变性增大,

从而导致总体分类精度的降低。因此, 面向对象法常通过与 SVM 法结合使用, 从而达到提高影像分类精度的目的<sup>[83]</sup>。

#### 1.4 自动化法

事实上, 阈值法、分类器法在背景地物简单, 水体物化构成相对一致的大面积水域、湖泊已初步实现快速自动提取; 然而现实中, 多数水体受泥沙、悬浮物、冰冻、深度的影响不同, 无法进行阈值法和分类器法的自动提取。“全局-局部”提取思路, 很好地解决了这一问题<sup>[39-40, 85]</sup>。实现“全局-局部”分类思路的典型应用是借助于 ARCGIS 水文分析模块生成水系图, 利用空间分析缓冲区工具在河道两侧进行缓冲扩张, 形成河流提取目标区域, 进行水体提取。结合径流、漫流模型生成的水系图, 一方面较为准确地锁定了河道(特别是城区细小河道、山区细小河道)位置, 降低水体信息提取过程中大环境背景信息的干扰; 另一方面, 可以修补由于误提、漏提所导致的河流断流, 形成一个相对完整的河网。具体提取算法基于分步迭代思想, 详见图 1 和图 2 所示。文献 [86] 采用“全局-局部”思路结合高斯归一化水体指数 GNDWI 进行巴尔喀什湖地区和长江中下游地区的水体提取, 生产精度分别达到 97.8% 和 95.9%。文献 [87] 通过引入视觉注意模型和水平集分割算法进行初始对象的提取, 接着采用改进的形状

曲线算法进行迭代分割, 最后用 SVM 分类方法进行水体变化检测, 借助于 GIS 技术整合了初始水体提取、迭代分割、变化检测 3 个模块, 实现了水体提取过程的自动化。

## 2 讨论

3 类方法主要借助于绿光、近红外或中红外波段信息进行水体提取。为了获得解译质量高的影像数据, 常通过对原始波段的辐射增强处理获取特征波段。在进行水体提取操作时, 均需采用图像分割算法进行。阈值法主要通过波段间的代数运算来增大水体与背景地物的差异, 从而进行水体提取。其模型构建及图像分割过程均基于单个像元计算进行。相比而言, 分类器法和自动水体提取法可以借助于多源数据、多重影像属性构建水体信息提取规则集, 亦可引入数据挖掘算法计算最优分割阈值, 无论是从影像信息的利用率方面或是最优阈值的获取方面均具有明显优势。而自动水体提取法能够高效、快速地进行大面积水体信息获取, 将受到更多学者的关注。总的来说, 3 种方法各有其适用范围, 又兼具一定的互补性。存在的问题及研究趋势如下。

1) 中低分影像具有良好的现势性和宏观性, 高分影像解译质量高, 获取周期长, 唯有加强多时空分辨率影像的拼接与融合处理, 才是实现快速、准确、大范围水体提取的前提。

2) 中低分影像基于像元灰度值建构水体提取方法与提取模型, 提取过程自动化程度高, 但提取结果易出现“椒盐现象”、不易矢量化、与多源数据整合困难等问题; 高分影像基于目标层次引入纹理、形状等属性特征, 提高了解译精度, 但存在解译过程人工干预多、数据计算量大等问题。

3) 现有水体提取方法多围绕像元值计算, 遥感影像中地物几何形状、邻近像元相关性等影像信息量<sup>[88-90]</sup>并未参与, 这种“信息孤岛”算法模式, 必然影响分类精度<sup>[91]</sup>。为此, 借助于遥感信息量论和“图谱耦合”理论, 引入“深度学习”<sup>[92]</sup>模式, 充分利用和挖掘影像上地物空间结构特征及空间邻接关系, 进行目标提取, 是一条提高影像解译精度的有效途径。

4) 已有水体模型大多基于影像上地物辐射特征创建, 缺乏水体内部物质光谱信息分析, 这是制约水体提取模型普适性的根本原因。因此, 在构建水体提取模型过程中, 通过借鉴叶绿素与遥感光谱间的数学模型<sup>[93]</sup>, 泥沙指数模型<sup>[94]</sup>、透明

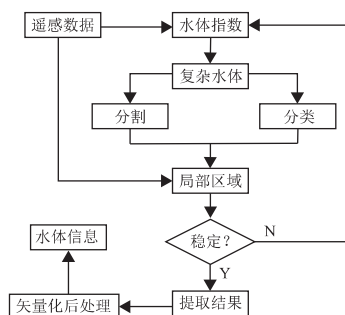


图1 水体提取流程

Fig 1 Flow Chart of Water Extraction

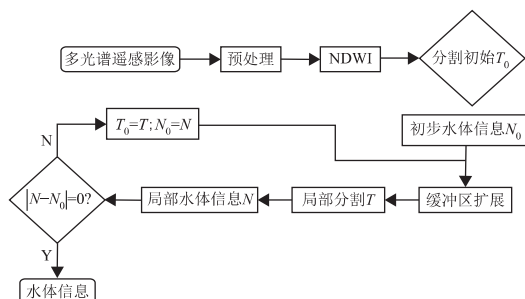


图2 局部自适应迭代水体提取流程

Fig 2 The Flow Chart of Local Adaptive Iteration

度与水体深度衰减关系模型<sup>[95]</sup>、浮游藻类指数、水体陆表过程模型等,进行水体物化特征与遥感光谱特征的关系研究,有助于提高水体提取模型的普适性。

5)图像阈值分割一直是一个难题,现主要通过阈值分割的主观视觉效果和算法的运行效率做一个大致的评估。具体操作仍是试错法,虽然有学者提出了一些自动获取阈值的方法,也只是适用于“局部”分类,或者是以牺牲提错率来赢得水体提取速度,因此,最优阈值自动获取方法,将成为日后研究的重点。

6)如何全面比较分析这些分类算法的提取精度,在国际上也并没有统一的标准。通常以人工解译的水体作为真值,从漏提率<sup>[83]</sup>、误提率<sup>[56]</sup>、提取精度<sup>[64]</sup>,水体与城镇的区分度(division degree, DD)<sup>[38]</sup>,评价提取结果的准确程度。另外,像 ENVI、ERDAS 等专业软件,采用混淆矩阵报表进行精度评价,包含总体分类精度、Kappa 系数、制图精度、用户精度、错分误差和漏分误差几项参数<sup>[96]</sup>。这些方法仅能获得产品的相对精度,无法获得分类绝对精度<sup>[48]</sup>,且各评价指标算法不同,理论基础不同,各有其适用范围,却并没有形成统一的评价标准,不利于模型之间的对比,也势必影响模型的推广应用。制定统一的评价标准,规范数据质量评价体系,将会是遥感技术从实验走向实用,从区域应用到全球范围应用的标志。

### 3 结束语

随着空间观测技术的不断发展,水生态保护需求不断加大,水体提取相关研究和应用将被更多关注。文中所提出的各类水体提取方法,都依据一定的波段特征、阈值分割准则和不同的建模思路完成图像分类,适用于具有某种特性的影像,也都存在各自的局限性。因此,本文旨在归纳适用于具有共性和特性区域的提取思路,得出各自适用范围,而不可能得到一种终极的方法能够适用于所有的水体提取问题。唯有通过研究水体辐射过程模拟与反演,充分利用遥感影像地物空间相关性,进行陆表过程模型与多源数据的同化研究和多尺度信息集成研究,才能形成水体提取的系统化和全球化。

#### 参考文献

[1] 李艳华,丁建丽,闫人华.基于国产 GF-1 遥感影像的山区细小水体提取方法研究[J].资源科学,2015,37(2):408-416. (LI Yanhua, DING Jianli, YAN Renhua. Extraction of small river information based on China-made GF-1 remote sense images[J]. Resources Sci-

ence, 2015, 37(2):408-416.)

- [2] GITELSON A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water relationship of its magnitude and position with chlorophyll concentration[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(17): 3367-3373.
- [3] DEKKER A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing[M]. Amsterdam: Institute of Earth Sciences, 1993.
- [4] SALOMONSON V V, BARNES W L, MAYMON P W, et al. MODIS: advanced facility instrument for studies of the earth as a system[J]. Geoscience and Remote Sensing IEEE Transactions on 1989, 27(2):145-153.
- [5] CAMPBELL J B. Introduction to remote sensing[M]. New York: The Guilford Press, 1987.
- [6] 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005. (XU Xiru. Remote sensing physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2005.)
- [7] 赵英时. 遥感应应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (ZHAO Yingshi. Principle and method of remote sensing application analysis[M]. Beijing: Science Press, 2014.)
- [8] 李四海, 王宏, 许卫东. 海洋水色卫星遥感研究与进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 190-196. (LI Sihai, WANG Hong, XU Weidong. Research and progress in satellite ocean color remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2000, 15(2): 190-196.)
- [9] 周艺, 谢光磊, 王世新, 等. 利用伪归一化差异水体指数提取城镇周边细小河流信息[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 102-107. (ZHOU Yi, XIE Guanglei, WANG Shixin, et al. Information extraction of thin rivers around built-up lands with false NDWI[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(1): 102-107.)
- [10] 刘桂林, 张落成, 刘剑, 等. 基于 Landsat TM 影像的水体信息提取[J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(5): 644-650. (LIU Guilin, ZHANG Luocheng, LIU Jian, et al. Water body information extraction based on Landsat TM remote sensing imagery[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(5): 644-650.)
- [11] KAUTH R J, THOMAS G S. The tasseled cap: a graphic description of spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat[R]. Purdue-Pubs, Purdue university, 1976: 41-51.
- [12] 陈艳华, 张万昌. 地理信息系统支持下的山区遥感影像决策树分类[J]. 国土资源遥感, 2006(1): 69-74. (CHEN Yanhua, ZHANG Wanchang. GIS supported decision tree classification of remote sensing mages in mountainous areas[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2006(1): 69-74.)

- [13] 张毅, 陈成忠, 吴桂平, 等. 遥感影像空间分辨率变化对湖泊水体提取精度的影响[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 335-342. (ZHANG Yi, CHEN Chengzhong, WU Guiping, et al. Effects of spatial scale on water surface delineation with satellite images[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 335-342.)
- [14] XU Han, YAN Qin, XU Banlin, et al. The best band selection and quality assessment of multisource remote sensing image fusion[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(3): 72-74.
- [15] 周冠华, 柳钦火, 马荣华, 等. 半分析模型反演混浊太湖水体叶绿素  $a$  [J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 53-159. (ZHOU Guanhua, LIU Qinhua, MA Ronghua, et al. Inversion of chlorophyll- $a$  concentration in turbid water of lake Taihu based on optimized multi-spectral combination [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(2): 53-159.)
- [16] OLMO G D, GITELSON A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll concentration in turbid productive waters[J]. Experimental Results, Applied Optics, 2005, 44(3): 412-422.
- [17] GITELSON A A, OLMO G D, MOSES W, et al. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll in turbid water: validation [J]. Remote Sensing of Environ, 2008, 112(9): 3582-3593.
- [18] ZENG Zhiyuan. A preliminary analysis of remotely sensed radiation characteristics of ground features I: methodology and results[J]. Pedosphere, 1991(1): 289-300.
- [19] ZENG Zhiyuan. A preliminary analysis of remotely sensed radiation characteristics of ground features II: result discussion[J]. Pedosphere, 1991(1): 301-313.
- [20] 曾志远. 卫星遥感图像计算机分类与地学应用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. (ZENG Zhiyuan. Satellite remote sensing image computer classification and geoscience application research [M]. Beijing: Science Press, 2004.)
- [21] 朱宝山, 张绍华, 徐大龙, 等. 综合水体指数及其应用 [J]. 测绘科技学报, 2013, 30(1): 19-23. (ZHU Baoshan, ZHANG Shaohua, XU Dalong, et al. Comprehensive water index and its application[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(1): 19-23.)
- [22] 吴一全, 孟天亮, 吴诗娅. 图像阈值分割方法研究进展 20 年 (1994—2014) [J]. 数据采集与处理, 2015, 30(1): 1-23. (WU Yiquan, MENG Tianliang, WU Shihua. Research progress of image thresholding methods in recent 20 years (1994—2014) [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(1): 1-23.)
- [23] 于欢, 张树清, 孔博, 等. 面向对象遥感影像分类的最优分割尺度选择研究[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(2): 353-360. (YU Huan, ZHANG Shuqing, KONG Bo, et al. Optimal segmentation scale selection for object-oriented remote sensing image classification[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(2): 353-360.)
- [24] LIU Ping, CHEN Bin, RUAN Bo. Image thresholding segmentation based on edge information[J]. Computer Applications, 2004, 24(9): 28-30.
- [25] SANG Nong, ZHANG Tianxu, CAO Zhiguo. Segmentation of FLIR images with edge constraint[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(7): 1027-1031.
- [26] ZHANG Aihua, YU Shengsheng, ZHOU Jingli. A local-threshold segment algorithm based on edge detection [J]. Mini-Micro Systems, 2003, 24(4): 661-663.
- [27] LIAN Feng, HU Chuanmin, CHEN Xiaoling, et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010 [J]. Remote Sensing of Environment, 2012(121): 80-92.
- [28] HU Chuanmin, LEE Zhongping, MA Ronghua, et al. Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake China [J]. Journal of Geophysical Research, 2010(115): C04002.
- [29] 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(1): 23-35.
- [30] SHI Jichuan, ZHANG Hong, RAY N. Solidity based local threshold for oil sand image segmentation [C]// IEEE Conference on Image Processing. Cairo: IEEE, 2009: 2385-2388.
- [31] HE Huang, LI Qingwu, FAN Xi. Adaptive local threshold image segmentation algorithm[J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(1): 10-13.
- [32] KOPONEN S, PULLIAINEN J, KALLIO K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MSERIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(1): 51-59.
- [33] MCFEETERS S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [34] OUMA Y, TATEISHI R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley Lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(15): 3153-3181.
- [35] 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, 9(5): 589-595. (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.)
- [36] 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区水体信息的研究[J]. 遥感信息,2007(6):62-67. (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.)
- [37] 丁凤. 一种基于遥感数据快速提取水体信息的新方法[J]. 遥感技术与应用,2009,24(2):167-171. (DING Feng. A new method for fast information extraction of water bodies using remotely sensed data[J]. Remote Sensing Technology and Application,2009,24(2):167-171.)
- [38] 曹荣龙,李存军,刘良云,等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学,2008,33(2):158-160. (CAO Ronglong, LI Cunjun, LIU Liangyun, et al. Extracting Miyun reservoirs water area and monitoring its change based on a revised normalized different water index[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008,33(2):158-160.)
- [39] 沈占锋,夏列钢,李均力,等. 采用高斯归一化水体指数实现遥感影像河流的精确提取[J]. 中国图象图形学报,2013,18(4):421-428. (SHEN Zhanfeng, XIA Liegang, LI Junli, et al. Automatic and high-precision extraction of rivers from remotely sensed images with Gaussian normalized water index[J]. Journal of Image and Graphics,2013,18(4):421-428.)
- [40] 莫伟华,孙涵,钟仕全,等. MODIS 水体指数模型(CIWI)研究及其应用[J]. 遥感信息,2007(5):15-23. (MO Weihua, SUN Han, ZHONG Shiquan, et al. Research on the CIWI model and its application[J]. Remote Sensing Information,2007(5):15-23.)
- [41] 吴际通,谭伟,喻理飞. 基于 TM\_ETM 影像的不同水体指数对比研究[J]. 测绘科学,2013,38(4):93-95. (WU Jitong, TAN Wei, YU Lifei. Comparative study of different water indexes based on TM/ETM+ imagery[J]. Science of Surveying and Mapping,2013,38(4):93-95.)
- [42] QIAO Cheng, SHEN Zhanfeng, WU Ning, et al. Remote sensing image classification method supported by spatial adjacency[J]. Journal of Remote Sensing,2011,15(1):88-99.
- [43] XIA Shuang, RUAN Renzhong, YAN Meichun. Study on information extraction method of water body based on TM imagery[J]. Journal of Nanjing Forestry University,2012,36(4):29-35.
- [44] 吉红霞,范兴旺,吴桂平,等. 离散型湖泊水体提取方法精度对比分析[J]. 湖泊科学,2015,27(2):327-334. (JI Hongxia, FAN Xingwang, WU Guiping, et al. Accuracy comparison and analysis of methods for water area extraction of discrete lakes[J]. Journal of Lake Sciences,2015,27(2):327-334.)
- [45] 徐涵秋. 从增强型水体指数分析遥感水体指数的创建[J]. 地球信息科学,2008,10(6):776-780. (XU Hanciu. Comment on the enhanced water index(EWI): a discussion on the creation of a water index[J]. Geo-Information Science,2008,10(6):776-780.)
- [46] VAPINK V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York:Springer Verlag,2000.
- [47] 贾坤,李强子,田亦陈,等. 遥感影像分类方法研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2011,3(10):2618-2633. (JIA Kun, LI Qiangzi, TIAN Yichen, et al. A review of classification methods of remote sensing imagery[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,3(10):2618-2633.)
- [48] TSENDBAZAR N E, BRUIN S D, MORA B, et al. Comparative assessment of thematic accuracy of GLC maps for specific applications using existing reference data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2016,44:124-135.
- [49] 贾明明,刘殿伟,王宗明,等. 面向对象方法和多源遥感数据的杭州湾海岸线提取分析[J]. 地球信息科学学报,2013,15(2):262-269. (JIA Mingming, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al. Coastline changes in Hangzhou bay based on object-oriented method using multi-source remote sensing data[J]. Journal of Geo-Information Science,2013,15(2):262-269.)
- [50] SERPICO S B. Support vector machines for remote-sensing image classification [C]//Europto Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics. [S. l.]:[s. n.],2001:160-166.
- [51] CRISTIANINI N, TAYLOR J S. On kernel target alignment in proc. neural information processing systems[M]. Cambridge, MA:MIT Press,2002.
- [52] 朱树先,张仁杰. 支持向量机核函数选择的研究[J]. 科学技术与工程,2008,8(16):4513-4517. (ZHU Shuxian, ZHANG Renjie. Research for selection of kernel functions used in support vector machine[J]. Science Technology and Engineering,2008,8(16):4513-4517.)
- [53] 李盼池,许少华. 支持向量机在模式识别中的核函数特性分析[J]. 计算机工程与设计,2005,26(2):302-304. (LI Panchi, XU Shaohua. Support vector machine and kernel function characteristic analysis in pattern recognition[J]. Computer Engineering and Design,2005,26(2):302-304.)
- [54] GARCIA R F, S S, MAJA J M, et al. Comparison of two aerial imaging plat forms for ident cation of Huanglongbing-infected citrus trees[J]. Computers & Electronics in Agriculture,2013(91):106-115.
- [55] 林升梁,刘志. 基于 RBF 核函数的支持向量机参数选择[J]. 浙江工业大学学报,2007,35(2):163-167. (LIN Shengliang, LIU Zhi. Parameter selection in SVM with



- RBF kernel function[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(2): 163-167.)
- [56] 段秋亚, 孟令奎, 樊志伟, 等. GF-1 卫星影像水体信息提取方法的适用性研究[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 79-84. (DUAN Qiuya, MENG Lingkui, FAN Zhiwei, et al. Applicability of the water information extraction method based on GF-1 image[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015, 27(4): 79-84.)
- [57] GUNEROGLU N, ACAR C, DIHKAN M, et al. Green corridors and fragmentation in South Eastern Black Sea coastal landscape[J]. Ocean & Coastal management, 2013(83): 67-74.
- [58] DESHENG L, KELLY M, GONG P. A spatio-temporal approach to monitoring forest disease spread using multi-temporal high spatial resolution imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(2): 167-180.
- [59] LI D, CHENG T. KDG-knowledge discovery from GIS: propositions on the use of KDD in an intelligent GIS[Z]. 1994.
- [60] 李德仁, 王树良, 李德毅, 等. 论空间数据挖掘和知识发现的理论与方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 221-223. (LI Deren, WANG Shuliang, LI Deyi, et al. Theories and technologies of spatial data mining and knowledge discovery [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(3): 221-223.)
- [61] QUINLAN J R. Simplifying decision trees[J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1999, 27(3): 221-234.
- [62] 邱凯昌, 李德仁, 李德毅. 基于空间数据发掘的遥感图像分类方法研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(1): 42-48. (DI Kaichang, LI Deren, LI Deyi. Study of remote sensing image classification based on spatial data mining techniques[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(1): 42-48.)
- [63] 胡卫国, 孟令奎, 张东映, 等. 资源一号 02C 星图像水体信息提取方法[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 43-47. (HU Weiguo, MENG Lingkui, ZHANG Dongying, et al. Methods of water extraction from ZY-1 02C satellite imagery[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(2): 43-47.)
- [64] 申文明, 王文杰, 罗海江, 等. 基于决策树分类技术的遥感影像分类方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 333-337. (SHEN Wenming, WANG Wenjie, LUO Haijiang, et al. Classification methods of remote sensing image based on decision tree technologies [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(3): 333-337.)
- [65] MONINGER W R, ARCHER. A prototype expert system for identifying some meteorological phenomena [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1988, 5(1): 144-148.
- [66] 沙占江, 曾永年, 马海州, 等. 遥感和 GIS 支持下的龙羊峡库区土地沙漠化动态研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 48-50. (SHA Zhanjiang, ZENG Yongnian, MA Haizhou, et al. Dynamic monitoring of desertification with RS and GIS in Longyangxia reservoir area [J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(1): 48-50.)
- [67] 易沁砾, 卓莉, 叶涛, 等. 决策回归树提取水稻面积的关键特征波段[J]. 遥感信息, 2015, 30(3): 80-84. (YI Miluo, ZHUO Li, YE Tao, et al. Key input features in CART decision tree for paddy rice discrimination [J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(3): 80-84.)
- [68] 史泽鹏, 马中文, 马友华, 等. 基于 J48 决策树算法的遥感土地利用变化分析[J]. 遥感信息, 2014, 29(1): 78-84. (SHI Zepeng, MA Zhongwen, MA Youhua, et al. Land use change of remote sensing based on J48 decision tree algorithm [J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(1): 78-84.)
- [69] CRASTO N, HOPKINSON C, FORBES D L, et al. A LiDAR-based decision-tree classification of open water surfaces in an Arctic delta[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 164(46): 90-102.
- [70] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [71] 日本遥感研究会编. 遥感精解[M]. 刘勇卫, 贺雪鸿, 译. 北京: 测绘出版社, 1993. (Japan Remote Sensing Research Institute. Precision remote sensing solution [M]. LIU Yongwei, HE Xuehong, translation. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1993.)
- [72] SHARMA R, GHOSH A, JOSHI P K. Analysing spatio-temporal footprints of urbanization on environment of Surat city using satellite-derived bio-physical parameters[J]. Geocarto International, 2013, 28(5): 420-438.
- [73] WANG Shaowei, ZHANG Xiaoxiang, YANG Xiao-ying. Land use classification based on remote sensing image in Taihu lakeside sensitive area[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(1): 114-121.
- [74] CHEN Li, LIN Hui, SUN Hua, et al. Studies on information extraction of forest in Zhuzhou city based on decision tree classification[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(1): 46-51.
- [75] TEHRANY M S, PRADHAN B, JEBUR M N. Remote sensing data reveals eco-environmental changes in urban areas of Klang valley, Malaysia: contribution from object based analysis[J]. Indian Society of Remote Sensing, 2013, 41(4): 1-11.
- [76] CHENG Qian, CHEN Jinfeng. Research on the extraction method of land cover information in southern coastal land of Hangzhou bay based on GF-1 image[J]. Journal of Nat-

- ural Resources, 2015, 30(2): 350-360.
- [77] 郭建聪, 李培军, 肖晓柏. 一种高分辨率多光谱图像的多尺度分割方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(2): 306-310. (GUO Jiancong, LI Peijun, XIAO Xiaobo. A hierarchical segmentation method for multispectral imagery[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(2): 306-310.)
- [78] YU Q. Object-based detailed vegetation mapping using high spatial resolution imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(7): 799-811.
- [79] 吴小娟, 肖晨超, 崔振营, 等. “高分二号”卫星数据面向对象的海岸线提取法[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(4): 84-92. (WU Xiaojuan, XIAO Chenchao, CUI Zhenying, et al. Coastline extraction based on object-oriented method using GF-2 satellite data[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(4): 84-92.)
- [80] 何敏, 张文君, 王卫红. 面向对象的最优分割尺度计算模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1): 106-109. (HE Min, ZHANG Wenjun, WANG Weihong. Optimal segmentation scale model based on object-oriented analysis method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(1): 106-109.)
- [81] HAY G J, BLASCHKE T, MARCEAU D J, et al. A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 57(5): 327-345.
- [82] LIU Z, XINHUI L I, SHEN R, et al. Selection of the best segmentation scale in high-resolution image segmentation[J]. Computer Engineering & Applications, 2014, 50(6): 144-147.
- [83] JEBUR M N, SHAFRI H Z M, PRADHAN B, et al. Per-pixel and object-oriented classification methods for mapping urban land cover extraction using SPOT 5 imagery [J]. Geocarto International, 2014, 29(7): 792-806.
- [84] PROCTOR C, HE Y, ROBINSON V. Texture augmented detection of macrophyte species using decision trees[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 80(3): 10-20.
- [85] 朱长明, 骆剑承, 沈占锋, 等. DEM 辅助下的河道细小线性水体自适应迭代提取[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 277-283. (ZHU Changming, LUO Jiancheng, SHEN Zhanfeng, et al. River linear water adaptive auto-extraction on remote sensing image aided by DEM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(2): 277-283.)
- [86] 夏列钢, 沈占锋, 李均力, 等. 复杂背景下多样水体遥感自动解译[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(11): 1513-1519. (XIA Liegang, SHEN Zhanfeng, LI Junli, et al. Automatic interpretation of diverse water bodies from remotely sensed images in complex background[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(11): 1513-1519.)
- [87] SUI H G, CHEN G, HUA L. An automatic integrated image segmentation, registration and change detection method for water-body extraction using HSR images and GIS data[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013, 40(7): 237-242.
- [88] SUI H G, CHEN G, HUA L. An automatic integrated image segmentation, registration and change detection method for water-body extraction using HSR images and GIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 40(7): 237-242.
- [89] WOODCOCK CE, STRAHLER A H, JUPP D L B. The use of variograms in remote sensing II: real digital images[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 349-379.
- [90] CURRAN P J. The semivariogram in remote sensing—an introduction[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24(3): 493-507.
- [91] 宫鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 13-23. (GONG Peng. Some frontier issues in remote sensing science and technology[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 13-23.)
- [92] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (DENG Shubin. ENVI remote sensing image processing method[M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [93] HEDGER R D, OLSEN N R B. Coupling remote sensing with computational fluid dynamics modeling to estimate lake chlorophyll a concentration[J]. Remote Sensing Environ, 2002, 79: 116-122.
- [94] 刘洋洋, 沈芳, 李秀珍. 长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2019-2027. (LIU Yangyang, SHEN Fang, LI Xiuzhen. Phytoplankton light absorption properties during the blooms in adjacent waters of the Changjiang estuary [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2019-2027.)
- [95] 李军, 朱建华, 高飞, 等. MODIS 和 GOCI 卫星遥感反射率产品在浑浊海区交叉检验分析[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(1): 15-20. (LI Jun, ZHU Jianhua, GAO Fei, et al. Cross-check analysis on MODIS and GOCI satellite remote sensing reflectances in turbid sea areas[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(1): 15-20.)
- [96] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2015, 313(5786): 504-507.

(责任编辑: 邓国臣)