

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.022

基于 PCA 和 SVM 的遥感影像水体提取方法及验证

周 婷¹, 汪 炎², 邹 俊¹, 李 辰², 崔玉环³, 王笑宇¹, 谢传流¹, 夏 萍¹

(1. 安徽农业大学工学院, 安徽 合肥 230036; 2. 东华工程科技股份有限公司, 安徽 合肥 230024;
3. 安徽农业大学理学院, 安徽 合肥 230036)

摘要:针对内陆湖泊水质及光谱特性空间差异性大、支流水系结构复杂而导致的遥感影像水体提取精度低的问题,提出了结合光谱主成分分析(PCA)及支持向量机(SVM)的 PCA-SVM 水体提取算法。基于 GF-1 卫星遥感影像,对原始影像光谱波段特征进行 PCA 降维,从中优选熵、方差、差异性纹理特征向量,结合原始波段及归一化差分水体指数(NDWI),构建了 8 维特征向量,并基于 SVM 算法提取湖泊水体。以巢湖洪水期与非洪水期影像为研究实例,分别采用 NDWI 法、传统 SVM 算法及 PCA-SVM 算法对水体进行提取,并进一步基于 PCA-SVM 算法对 2020 年汛期巢湖洪水期淹没演变过程进行反演和跟踪,定量解析特征向量组合及 SVM 惩罚系数 C 对水体提取性能的影响。结果表明:PCA-SVM 算法提取的湖泊完整、支流连续,显著改善了含蓝藻水体漏提、建筑物误提等问题;洪水期和非洪水期提取结果的 F1 分数分别为 95.08% 和 97.95%,虚警率分别为 5.43% 和 1.13%,提取精度显著高于 NDWI 法和 SVM 算法。

关键词:遥感影像水体提取;归一化差分水体指数(NDWI);支持向量机(SVM);主成分分析(PCA);纹理特征向量;巢湖

中图分类号:TP79 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2023)02-0180-10

PCA and SVM-based algorithm of water area extraction from remote sensing images and its verification// ZHOU Ting¹, WANG Yan², ZOU Jun¹, LI Chen², CUI Yuhuan³, WANG Xiaoyu¹, XIE Chuanliu¹, XIA Ping¹ (1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. East China Engineering Science & Technology Co., Ltd., Hefei 230024, China; 3. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Considering the low accuracy of water area extraction from remote sensing images due to great spatial difference of water quality and spectral characteristics in inland lakes as well as complex tributary structures, a water area extraction algorithm combining spectral principal component analysis (PCA) and support vector machine (SVM) was proposed. Based on GF-1 satellite images, PCA dimensionality reduction analysis was conducted to derive texture feature vectors, including entropy, variance, and differentiation. Together with original 4-band spectrums and normalized difference water index (NDWI), an 8-dimensional optimal feature vector was constructed, and then water area was extracted using the SVM algorithm. With the GF-1 remote sensing image of Chaohu Lake area in flood and non-flood periods used as a case study, the NDWI method, traditional SVM algorithm, and PCA-SVM algorithm were applied to extracting lake water area. Furthermore, based on the PCA-SVM algorithm, the flooding evolution process of Chaohu Lake in the flood period of 2020 was inverted and tracked, and the influences of feature vector combination and the penalty parameter C of SVM were quantitatively analyzed. Results show that the lake area extracted with the PCA-SVM algorithm is complete with continuous tributaries, and mis-extractions due to blue algae and building confusions are significantly overcome; the F1 scores of the PCA-SVM algorithm in the flood and non-flood periods are 95.08% and 97.95%, and the false alarm rates are 5.43% and 1.13%, respectively, demonstrating a significant improvement of the PCA-SVM algorithm in extraction accuracy, as compared with the NDWI method and SVM algorithm.

基金项目:国家自然科学基金(U2243228);安徽省自然科学基金(2008085ME158,1808085ME158,2108085QE220);安徽农业大学稳定和引进人才科研资助项目(K2141004);工业废水及环境治理安徽省重点实验室开放基金(DHSZ202202)

作者简介:周婷(1985—),女,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zhouting@ahau.edu.cn

通信作者:夏萍(1964—),女,教授,博士,主要从事遥感信息化研究。E-mail: xiaping@ahau.edu.cn

Key words: water area extraction from remote sensing images; normalized difference water index(NDWI); support vector machines(SVM); principal component analysis(PCA); texture feature vector; Chaohu Lake

水体范围是流域水资源条件的重要指示因子,受降雨、蒸发及人类活动等因素影响,流域水体范围往往变化剧烈,尤其当发生暴雨洪涝造成河道湖泊淹没泛滥时,快速捕捉和跟踪水体范围演变过程对于提高灾害风险评估的速度、增强防灾减灾的能力显得尤为重要。传统由行政区逐级上报灾情信息的模式难以保证数据的时效性和准确性^[1],随着卫星遥感技术的迅速发展,基于遥感影像的水体提取为水资源及水环境监测提供了高效可靠的技术手段,在大空间尺度的水质反演、水环境监测、旱涝灾害预报中发挥着不可替代的作用^[2-3]。与传统调查手段相比,遥感影像具有重返周期短、效率高、覆盖面广、综合信息丰富等优势,近年来,在太湖^[4]、巢湖^[5]、滇池^[6]、鄱阳湖^[7]等主要内陆湖泊的水体提取方面得到了大量应用,取得了良好的效果。

内陆湖泊水质空间差异性大、光谱特性复杂,对遥感水体提取技术的抗干扰能力和稳健性提出了较高要求,水体提取方法大致经历了单波段阈值法^[8-9]、归一化差分水体指数(normalized difference water index, NDWI)法^[10-11]到机器学习法^[12-13]的发展历程。单波段阈值法和 NDWI 法仅根据像元本身光谱信息识别水体,操作便捷,但硬性阈值设置易导致蓝藻错提、细小支流漏提等问题。近年来,机器学习在分类预测及模式识别领域得到广泛应用,例如利用决策树提取山地和城市的水体能有效解决阴影、植被和建筑的错提问题^[14],但建立决策树模型仍需要具体分析光谱,设置精确阈值;BP(back propagation)神经网络对水体信息提取精度高^[15]、分类效果好,但构建标准的网络和训练模型复杂,难以快速实现水体提取。段秋亚等^[16-17]利用基于支持向量机(support vector machine, SVM)算法、面向对象法和 NDWI 法对鄱阳湖和三峡库区进行水体提取,结果表明 SVM 算法能够在训练精度和推广性能两方面实现平衡,避免了人为设置阈值的主观性,更适用于支流结构复杂、特征空间异质性强的水体提取。此外,模糊聚类算法^[18]、离散粒子群算法^[19]、卷积神经网络法^[20]、深度置信网络法^[21]等也被用于水体提取中,取得了良好的分类效果。综上,机器学习算法是当前遥感水体提取算法的研究前沿。

特征向量的构建对于机器学习算法提取水体效果具有重要影响。例如:在 NDWI 的基础上加入温度信息,能够有效消除纹理紊乱所引起的山区水体

识别噪声^[22];在光谱信息基础上结合极化特征和纹理特征进行建筑物提取,可以有效提高识别精度和效率^[23]。国内外研究表明,熵、对比度、相关性、同质性等纹理特征向量可弥补光谱特征的局限性^[24],融合纹理和光谱特征的特征向量能够达到远高于单纯光谱和单纯纹理的分类精度,在土地、植被识别中已得到了验证^[25]。由于纹理的表征指标众多,如何针对识别目标的特性优选最合适的纹理特征对于提高识别精度尤为重要^[26]。

为获取更加高效精准的遥感水体提取结果,本文在上述研究的基础上,以巢湖为实证背景,提出了结合主成分分析(principal component analysis, PCA)和 SVM 的遥感影像水体提取方法,可为水体提取算法优化提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

巢湖(31°25'28"~31°43'28"N, 117°16'54"~117°51'46"E)位于安徽省中部,是我国五大淡水湖之一,也是长江中下游重要的淡水资源和生态湿地,在流域蓄水防洪、气候调节及生态格局中发挥着重要作用^[27]。巢湖面积约 760 km²,年均水位约 7.5 m,湖水主要来源于地面径流补给,入湖支流有南淝河、派河、丰乐河、杭埠河、白石天河和兆河等,经裕溪河出湖注入长江(图 1)。

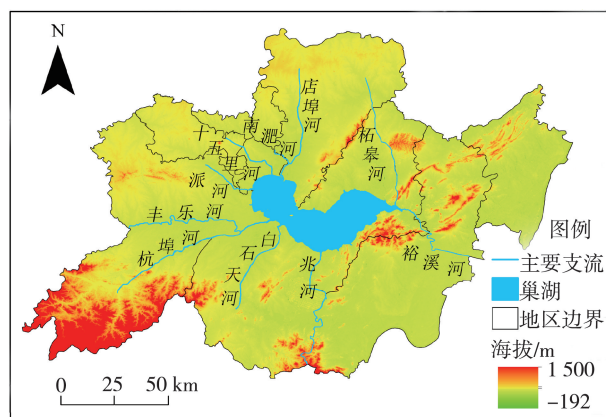


图 1 巢湖流域概况

Fig. 1 Overview of Chaohu Lake Basin

2020 年汛期,巢湖遭遇极端强度降雨,水位达到历史最高,洪水泛滥淹没了多处支流区域,此外,持续高温引发了湖区严重蓝藻,水量水质的急剧波动对流域水资源应急管理提出了严峻考验。因此,本文以 2020 年巢湖遥感影像为基础,对水体提取算

法进行应用和验证。

1.2 数据来源及预处理

以 GF-1 卫星影像为水体提取影像源,以 Sentinel-2 卫星影像水体提取结果为相对真值,进行模型构建及精度评价。GF-1 卫星发射于 2013 年,是我国自主研制的首颗高分专项卫星,具有定位精度高、传输速度快、测摆成像灵活等特点,具有蓝、绿、红外和近红外 4 个波段。Sentinel-2 卫星发射于 2015 年,具有 13 个较窄波段,能够更好地区分地物的光谱响应特性差异。GF-1 影像来源于陆地观测卫星数据服务平台 (<http://36.112.130.153:7777/DSSPlatform/index.html>), Sentinel-2 数据来源于欧洲航天局 (<https://scihub.copernicus.eu>)。

通过对 GF-1 和 Sentinel-2 影像进行比对筛选,分别选择洪水期(2020 年 8 月 16 日)和非洪水期(2020 年 11 月 10 日)晴空、云量少、研究区域完整的同步影像各 1 景,并对遥感影像进行辐射定标、大气校正、正射校正、图像镶嵌^[28-29]等预处理。

2 研究方法

2.1 技术路线

本文采用由粗到细的思路,首先通过粗提取定位主体水域,再基于 PCA 构造特征向量和 SVM 水体识别算法进行水体精细提取,并进行精度评价,总体技术路线如图 2 所示。

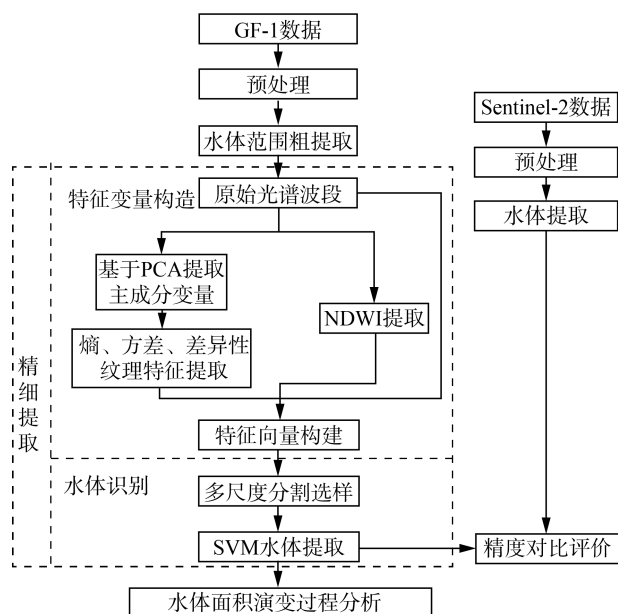


图2 水体提取技术路线

Fig.2 Flowchart of water area extraction

2.2 水体范围粗提取

为定位主体水域范围,首先基于 NDWI 对水体快速提取,同时采用 DEM 等高线对湖泊进行填充^[30],并利用形态学的膨胀运算^[31]弥合河流小裂

缝,平滑水体边界,得到众多像素值相同且位置相邻的像素点组成的连通域,选取面积最大的连通域作为水体范围粗提取结果。以巢湖洪水期为例,粗提取过程如图 3 所示。对比图 3(b)和图 3(c)能明显看出,经形态学的膨胀运算后湖泊周边和河流区域都进行了扩张,可以得到多个连通域;从图 3(c)中选取最大连通域作为粗提取结果,如图 3(d)所示。

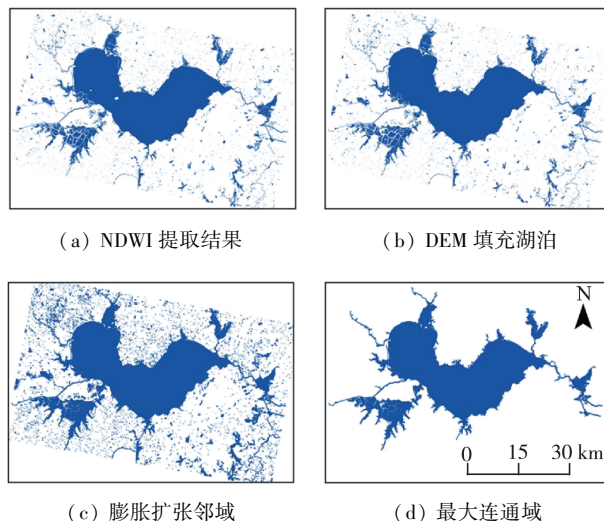


图3 巢湖水体粗提取过程

Fig.3 Rough extraction process of water area in Chaohu Lake

2.3 基于 PCA 的特征向量构建

由于 GF-1 影像原始的 4 组光谱波段难以全面表征水体特征,本文采用 PCA 对原始 4 波段进行主成分提取,构建光谱和纹理相结合的高维特征向量。PCA 通过正交变换将一组可能存在共线性的变量转换为线性不相关变量,在尽可能不减少原始波段信息的同时,起到降维和数据压缩的作用,其数学表达为

$$Y = \mu^T X \quad (1)$$

式中: Y 为变换后的主成分像元矢量; μ 为特征向量; X 为原始数据矩阵。

基于 PCA 主成分分量可计算得到灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM),该矩阵是描述纹理特征的常用方法。原始 GLCM 数据冗余较大、计算效率低,不宜直接作为区分纹理的特征,需从中提取特征向量来定量描述纹理特征。Haralick 等^[32]基于 GLCM 共提出了 14 种纹理特征向量,包括均值、方差、差异性、协同性、对比度、熵、角二阶矩、相关性等。但是,若将所有向量纳入特征向量仍会产生特征冗余,降低训练效率和精度。本文基于不同组合纹理特征向量的样本训练精度进行优化,选取熵、方差和差异性 3 个指标作为特征向量,分别代表纹理的复杂度、均匀性和

清晰度。

综上,本文构建了8维特征向量作为水体提取算法的输入变量,包括4组原始光谱波段、NDWI、熵、方差和差异性纹理特征。基于以上特征向量,对粗提取水体范围的影像进行多尺度分割,将同质像元作为同一单元,以提高后续SVM算法训练效率。以洪水期GF-1影像为例,多尺度分割结果如图4所示。

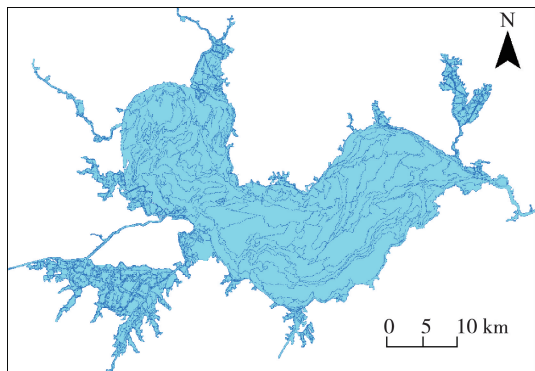


图4 基于特征向量的多尺度分割结果

Fig. 4 Multi-scale segmentation result based on feature vectors

2.4 基于SVM算法的水体提取

SVM算法是一种适用于小样本学习的机器学习算法^[33],在水体提取中,其主要思想是解决“水体/非水体”的二分类问题。SVM算法通过引入核函数将高维问题转化为低维问题,从而简化了计算量。SVM中的惩罚系数 C 和核函数参数 g 对SVM算法的分类性能起重要作用^[33],考虑 C 和 g 取值范围大,且没有固定经验公式,本文采用变步长试参法^[34]进行参数寻优。

2.5 精度评价

采用查全率(R)、查准率(P)、虚警率(F_a)和F1分数(F_1)^[35]4个指标对水体提取精度进行评价。其中, F_a 为提取水体范围内的错分率,F1分数为 R 和 P 的调和平均数。 R 、 P 和 F_1 为正向指标, F_a 为反向指标。各指标计算方法为

$$R = (A_T \cap A_M) / A_T \quad (2)$$

$$P = (A_T \cap A_M) / A_M \quad (3)$$

$$F_a = 1 - P \quad (4)$$

$$F_1 = 2RP / (R + P) \quad (5)$$

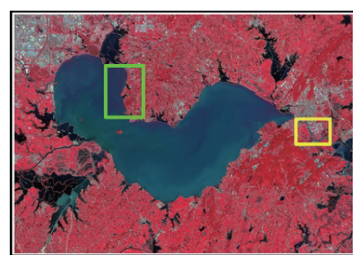
式中: A_T 为水体面积真值,即Sentinel-2影像所提取的水体面积; A_M 为待评价算法所提取的水体面积。

3 结果与分析

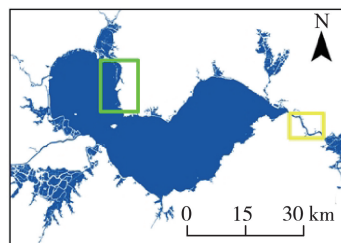
3.1 水体提取结果对比分析

分别采用NDWI法、SVM算法、PCA-SVM算法对GF-1影像中巢湖洪水期(2020年8月16日)和非洪水期(2020年11月10日)的水体进行提取,并将其与Sentinel-2影像所得到的相对真值结果进行对比。洪水期和非洪水期水体面积真值分别为1 008.66 km²和834.76 km²,水体提取结果如图5和图6所示。图5(a)、图6(a)为GF-1原始标准假彩色图像,其中红色代表植被,白灰等浅色代表建筑物,深蓝色代表水域。

从洪水期和非洪水期不同方法提取结果来看,NDWI法提取水体受水质不均匀性影响较大,西北湖区(图5(b)、图6(b)中绿框区域)和南湖区(图6(b)中橙框区域)大量聚集的含蓝藻水体被误判为



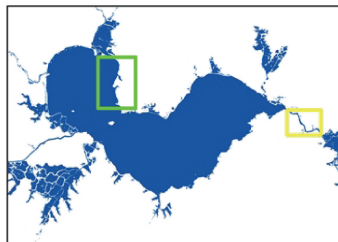
(a) 假彩色图像



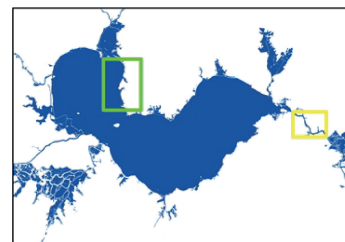
(b) NDWI法



(c) SVM算法



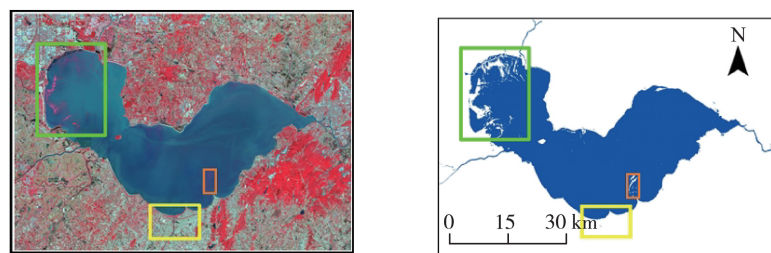
(d) PCA-SVM算法



(e) 真值

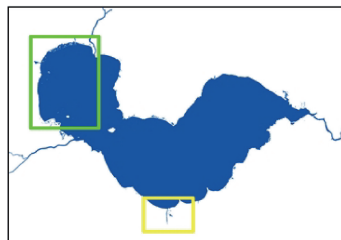
图5 不同算法的洪水期水体提取结果

Fig. 5 Results of water area extraction by different algorithms in flood period

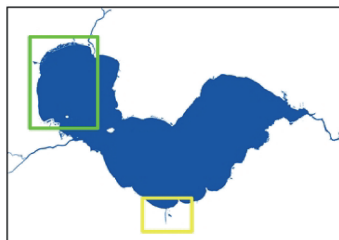


(a) 假彩色图像

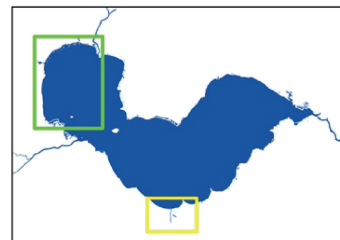
(b) NDWI 法



(c) SVM 算法



(d) PCA-SVM 算法



(e) 真值

图 6 不同算法的非洪水期水体提取结果

Fig. 6 Results of water area extraction by different algorithms in non-flood period

植被,存在严重的漏提现象;SVM 算法在巢湖湖区提取较准确,但在细小支流提取上存在断流现象(图 5(c)、图 6(c)中黄框区域),且均存在少量含蓝藻水体漏提(图 6(c)中绿框区域)。PCA-SVM 算法有效避免了蓝藻的干扰,蓝藻聚集区域水体提取完整(图 5(d)、图 6(d)中绿框区域),细小支流断流现象大幅降低(图 5(d)、图 6(d)中黄框区域),与真值水体在细节上最为接近。对上述 3 种方法所提取的水体面积及其与真值的误差率进行统计,结果如表 1 所示。可见,NDWI 法存在较为严重的漏提,SVM 算法较 NDWI 法有显著改进,PCA-SVM 算法的误差率最低。

表 1 不同算法提取的水体面积及误差率

Table 1 Water area extraction and error rates of different algorithms

算法	提取的水体面积/km ²		误差率/%	
	洪水期	非洪水期	洪水期	非洪水期
NDWI 法	809.63	781.81	19.73	6.34
SVM 算法	1021.35	800.20	1.26	4.14
PCA-SVM 算法	1019.64	819.22	1.09	1.86

3.2 精度评价

采用查全率 R 、F1 分数、查准率 P 、虚警率 F_a 对

不同方法精度进行统计,结果如表 2 所示。由表 2 可见,洪水期 PCA-SVM 算法各项指标均为最优,SVM 算法提取精度次之,NDWI 法最差。非洪水期 PCA-SVM 算法的 F1 分数和 R 指标最优,而 P 和 F_a 指标劣于 NDWI 法,是由于 NDWI 法存在大面积漏提,且 P 和 F_a 仅根据识别范围进行统计所致。综上分析可见,PCA-SVM 算法在洪水期和非洪水期水体提取精度均为最高。

3.3 2020 年汛期巢湖水体面积演变过程分析

2020 年 1—7 月巢湖累积降水量达 829 mm,为历史最大值,同时长江汛期水位居高不下,导致巢湖泄洪不畅,蓄水量超过历史最大值,沿湖大面积区域淹没。本文选取 GF-1 卫星 2020 年 5—9 月 10 景代表性影像,采用 PCA-SVM 算法对水体淹没范围进行提取,结果如图 7 所示。由图 7 可见,2020 年汛期巢湖水域面积表现为陡升缓降的变化趋势,淹没范围主要分布在西南部、东北部以及西北部,8 月 1 日达到最大值 1 049 km²。巢湖西南部的庐江县、东北部的巢湖市以及西北部的肥西、肥东县是主要受灾区^[36],实际淹没范围与淹没进程与图 7 反演结果基本一致。

表 2 不同方法的水体提取精度评价结果

Table 2 Results of accuracy evaluation of water area extraction by different algorithm

算法	R /%		F_1 /%		P /%		F_a /%	
	洪水期	非洪水期	洪水期	非洪水期	洪水期	非洪水期	洪水期	非洪水期
NDWI 法	73.67	92.83	81.73	95.87	91.78	99.12	8.22	0.88
SVM 算法	95.17	94.54	94.58	96.54	93.99	98.63	6.00	1.37
PCA-SVM 算法	95.60	97.03	95.08	97.95	94.57	98.87	5.43	1.13

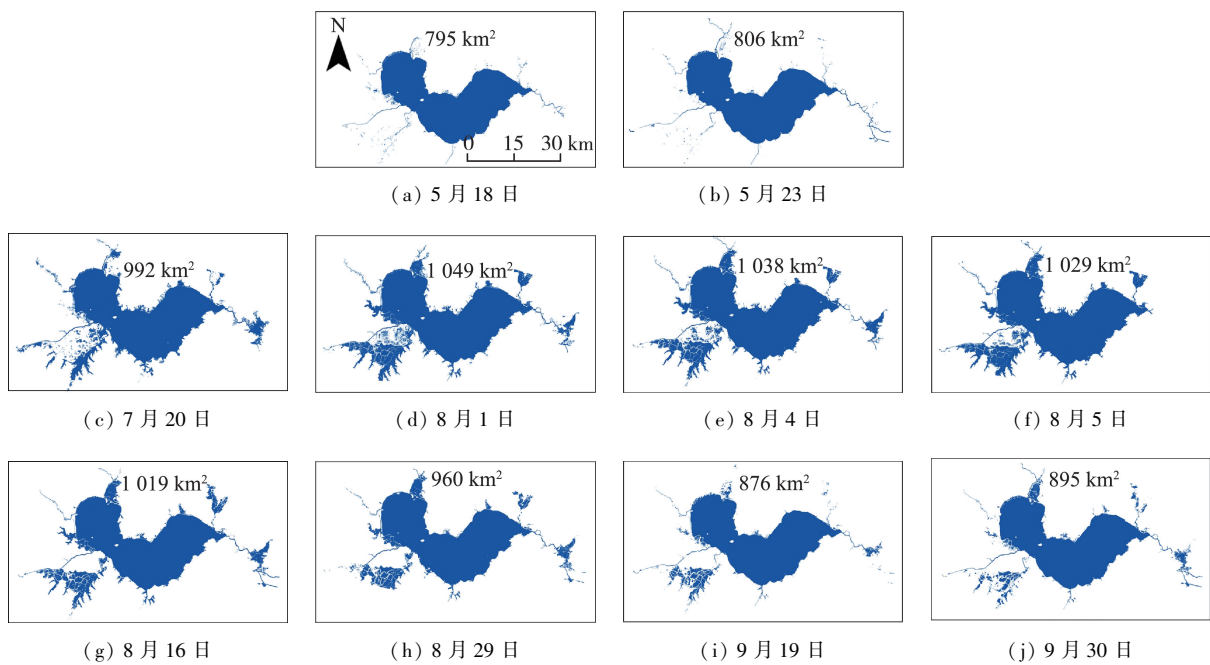


图7 2020年汛期巢湖水体范围演变

Fig. 7 Evolution of water area in Chaohu Lake during flood season in 2020

4 讨论

4.1 3种方法提取结果细节分析

对图5和图6的提取结果进行细节对比,讨论各方法的识别性能,选取建筑区、含蓝藻水体、细小河流3种识别难度较高的典型区域进行对比,结果如图8和图9所示。

从洪水期和非洪水期建筑区淹没水体提取细节来看,NDWI法和SVM算法的提取结果中均存在建筑误提(图8(b)和(c))或水体漏提(图9(l)和(m))问题。NDWI法提取误差由阈值选取不精确导致,SVM算法提取误差则由分类器逐像元分类的椒盐效应^[37]导致。从含蓝藻水体的提取结果来看,NDWI法存在严重的含蓝藻水体漏提现象(图8(g)、图9(g)),SVM算法也存在小部分含蓝藻水体漏提问题(图8(h)、图9(h))。从河流提取结果来看,NDWI法提取效果较差,部分细小支流明显被漏提(图9(l)),且存在公路误提为支流的问题(图8(l))。可见,在影像源相同的情况下,PCA-SVM算法的水体提取轮廓精细度显著高于其他算法,具有较好的抗干扰能力和细小水体识别能力,显著降低了漏提、误提比例。

由以上细节对比分析可见,PCA-SVM算法较同类算法在复杂水质条件及水体边界条件下提取结果更精准,稳健性更强,可为复杂环境下水资源精细化管理和旱涝风险评估提供准确可靠的依据。

4.2 PCA-SVM算法主要影响因素分析

PCA-SVM算法取得了较同类算法更加精准的

水体提取效果,其中,纹理特征向量的构造及SVM中的惩罚系数 C 对算法性能起着重要作用。为阐明上述参数对PCA-SVM算法的影响方式和影响程度,通过控制变量试验定量分析二者对模型性能的影响。

a. 特征向量组合的影响。在诸多表征影像纹理特征的向量中,若选择特征过少,则分类速度快,但精度不高;若选择特征过多,则特征冗余会导致分类效率低且效果差,选择适当的特征组合尤为重要^[38]。在前文GF-1影像4波段和NDWI的基础上,增加不同的纹理特征组合,分别构建特征向量并进行SVM训练。训练精度结果显示,不同特征向量组合的训练精度存在显著差异,其中本文所选取的熵、方差、差异性组合的特征向量训练精度最高,达92%。

b. SVM中惩罚系数 C 的影响。作为平衡分类泛化性能和拟合性能的惩罚系数,在SVM分类性能中起着重要作用。为阐明惩罚系数对SVM算法精度的影响,以洪水期水体提取为例说明SVM中的惩罚系数的率定过程。首先在 $[10^{-4}, 10^4]$ 区间内以10为倍数步长进行大范围粗略搜索,以F1分数作为性能评价指标,可见随着 C 取值的逐渐增加,训练时长逐步降低,而F1分数呈现先增后降的趋势,当 C 取值0.1时F1分数最高(图10(a))。进一步在0.1附近以0.01为步长进行进一步精细搜索,发现 C 取值0.1时F1分数最高(图10(b))。因此,洪水期SVM算法的最优 C 值取0.1。由以上分析

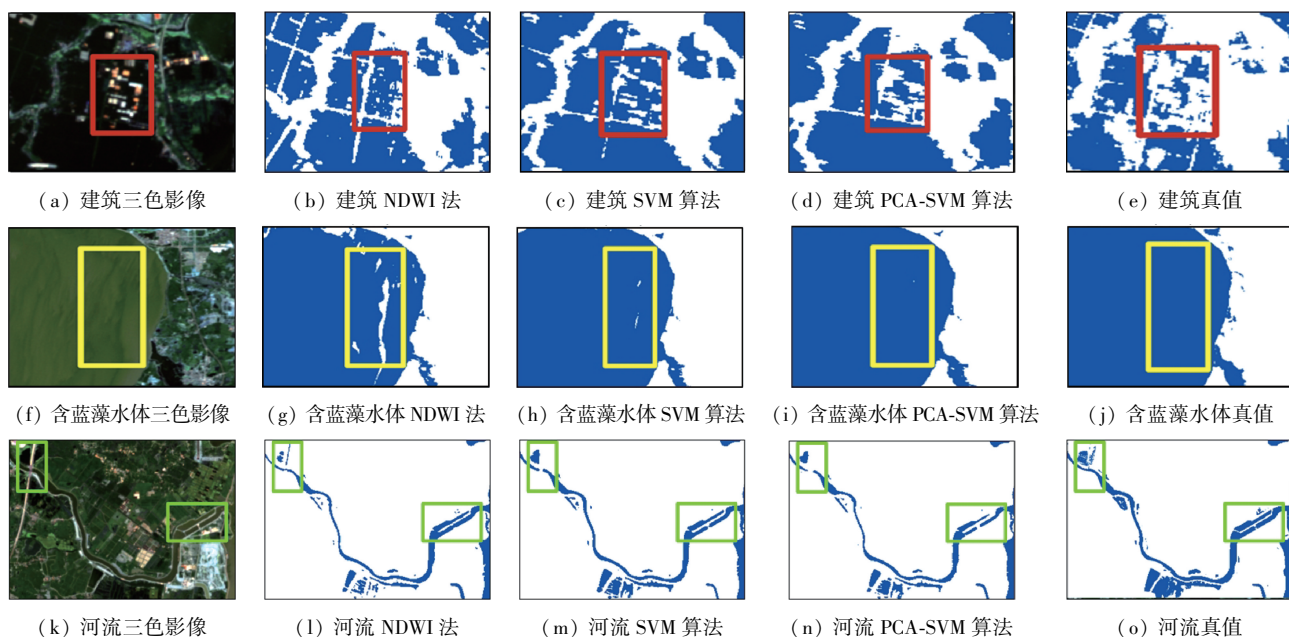


图 8 不同算法的洪水期水体提取细节对比

Fig. 8 Comparison of water area extraction details of different algorithms in flood season

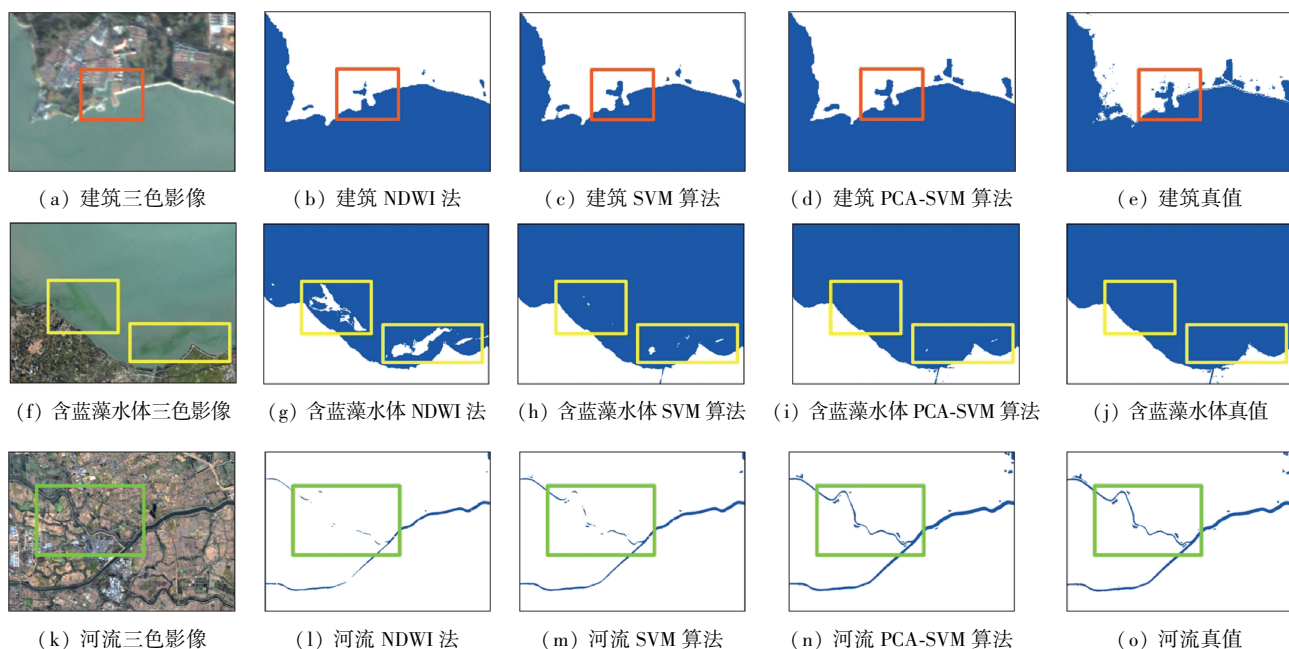


图 9 不同算法的非洪水期水体提取细节对比

Fig. 9 Comparison of water area extraction details of different algorithms in non-flood season

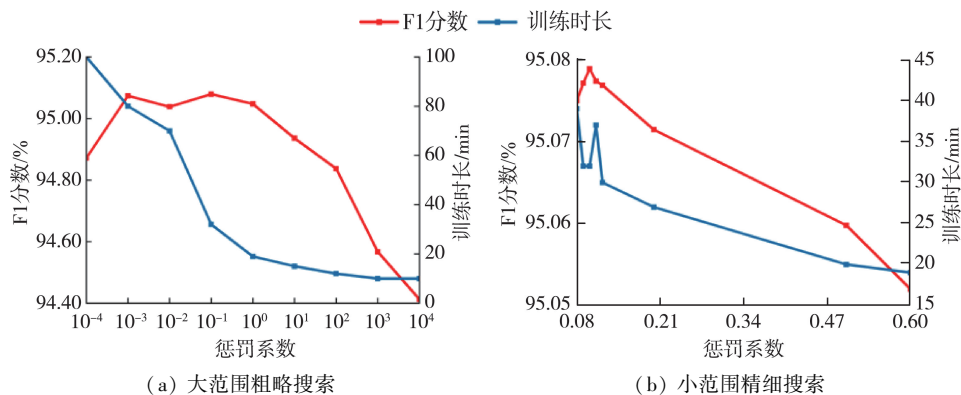


图 10 不同惩罚系数提取精度和训练时间对比

Fig. 10 Comparison of extraction accuracy and training time with different penalty coefficients

过程及图 10 结果可见,即使其他因素保持不变,惩罚系数的取值对于水体提取效果依然具有显著作用。若惩罚系数取值不当,SVM 算法可能过于追求误差最小而导致过拟合或过于追求泛化能力而导致训练不足,则 PCA-SVM 算法的识别精度可能大幅降低,训练时长也可能大大增加。

5 结 语

本文针对内陆湖泊水质及光谱特性空间差异性大、支流水系结构复杂的特征,提出了遥感影像 PCA-SVM 水体提取算法,并以巢湖为研究区,对方法进行了验证。通过与 NDWI 法、SVM 算法提取结果对比得出,PCA-SVM 算法提取水体边缘轮廓完整、湖泊和河流区域连通,蓝藻、建筑物等干扰信息被大幅过滤,水体提取精度显著提升,在 2020 年汛期巢湖洪水淹没演变过程中表现出可靠的反演效果。本文方法可为流域水资源调查评价、旱涝灾情评估及风险管理提供精确高效的决策依据,并可扩展至其他多类型地物分类问题中,为大尺度资源调查及管理工作提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 周月华,彭涛,史瑞琴.我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):494-501. (ZHOU Yuehua, PENG Tao, SHI Ruiqin. Research progress on risk assessment of heavy rainfall and flood disasters in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 494-501. (in Chinese))
- [2] 王波,黄津辉,郭宏伟,等.基于遥感的内陆水体水质监测研究进展[J].水资源保护,2022,38(3):117-124. (WANG Bo, HUANG Jinhui, GUO Hongwei, et al. Progress in research on inland water quality monitoring based on remote sensing[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 117-124. (in Chinese))
- [3] 何振芳,郭庆春,邓焕广,等.南水北调调蓄湖泊水质参数遥感反演及其影响因素[J].水资源保护,2021,37(3):87-95. (HE Zhenfang, GUO Qingchun, DENG Huanguang, et al. Remote sensing inversion of water quality parameters and its influencing factors in a storage lake of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 87-95. (in Chinese))
- [4] 王琳,谢洪波,文广超,等.基于 Landsat8 的含蓝藻湖泊水体信息提取方法研究[J].国土资源遥感,2020,32(4):130-136. (WANG Lin, XIE Hongbo, WEN Guangchao, et al. A study on water information extraction method of cyanobacteria lake based on Landsat8 [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(4): 130-136. (in Chinese))
- [5] 王东海,王心源,黄海波,等.基于 Landsat TM/ETM +

影像的面状水体特征研究:以巢湖流域面状水体为例[J].测绘与空间地理信息,2009,32(1):44-50. (WANG Donghai, WANG Xinyuan, HUANG Haibo, et al. Study on the characterization of the surface-water based on Landsat TM/ETM + Images: a case study of the surface-water in the Chaohu Lake Basin [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2009, 32(1): 44-50. (in Chinese))

- [6] 胡琳,甘淑,袁希平,等.滇池不同空间分布水体的高光谱特征差异分析[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(4):695-700. (HU Lin, GAN Shu, YUAN Xiping, et al. Difference analyses on hyperspectral characteristics of spatial distribution of different water bodies in Dianchi Lake [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2020, 42(4): 695-700. (in Chinese))
- [7] 王庆,廖静娟.基于 SAR 数据的鄱阳湖水体提取及变化监测研究[J].国土资源遥感,2010,22(4):91-97. (WANG Qing, LIAO Jingjuan. Water area extraction and change detection of the Poyang Lake using SAR data [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 22(4): 91-97. (in Chinese))
- [8] FRAZIER P S, PAGE K J. Water body detection and delineation with Landsat TM data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(12): 1461-1467.
- [9] 陈文倩,丁建丽,李艳华,等.基于国产 GF-1 遥感影像的水体提取方法[J].资源科学,2015,37(6):1166-1172. (CHEN Wenqian, DING Jianli, LI Yanhua, et al. Extraction of water information based on China-made GF-1 remote sense image [J]. Resources Science, 2015, 37(6): 1166-1172. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 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].中国图像图形学报,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. (in Chinese))
- [12] 沈金祥,杨辽,陈曦,等.面向对象的山区湖泊信息自动提取方法[J].国土资源遥感,2012,24(3):84-91. (SHEN Jinxiang, YANG Liao, CHEN Xi, et al. A method for object-oriented automatic extraction of lakes in the mountain area from remote sensing image [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2012, 24(3): 84-91. (in Chinese))

- Chinese))
- [13] 程明跃,叶勤,张绍明,等. 基于模糊加权 SVM 的 SAR 图像水体自动检测[J]. 计算机工程,2009,35(2):219-221. (CHENG Mingyue, YE Qin, ZHANG Shaoming, et al. Water automatic detection from SAR image based on fuzzy weighted SVM[J]. Computer Engineering,2009,35(2):219-221. (in Chinese))
 - [14] LU Zhao, WANG Daqing, DENG Zhengdong, et al. Application of red edge band in remote sensing extraction of surface water body: a case study based on GF-6 WFV data in arid area[J]. Hydrology Research,2021, 52(6): 1526-1541.
 - [15] 杨文亮,杨敏华,祁洪霞. 利用 BP 神经网络提取 TM 影像水体[J]. 测绘科学,2012,37(1):148-150. (YANG Wenliang, YANG Minhua, QI Hongxia. Water body extracting from TM image based on BPNN[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(1): 148-150. (in Chinese))
 - [16] 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 Natural Resources,2015,27(4):79-84. (in Chinese))
 - [17] 骆剑承,周成虎,梁怡,等. 支撑向量机及其遥感影像空间特征提取和分类的应用研究[J]. 遥感学报,2002,6(1):50-55. (LUO Jiancheng, ZHOU Chenghu, LEUNG Yee, et al. Support vector machine for spatial feature extraction and classification of remotely sensed imagery [J]. Journal of Remote Sensing,2002,6(1):50-55. (in Chinese))
 - [18] 洪亮,黄雅君,杨昆,等. 复杂环境下高分二号遥感影像的城市地表水体提取[J]. 遥感学报,2019,23(5):871-882. (HONG Liang, HUANG Yajun, YANG Kun, et al. Study on urban surface water extraction from heterogeneous environments using GF-2 remotely sensed images[J]. Journal of Remote Sensing,2019,23(5):871-882. (in Chinese))
 - [19] 李志红,李旺平,王玉,等. 基于离散粒子群算法的 2 种新型水体提取方法的对比与验证[J]. 地球信息科学学报,2021,23(6):1106-1117. (LI Zhihong, LI Wangping, WANG Yu, et al. Comparison and verification of two new lake water extraction methods based on discrete particle swarms optimization algorithm[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(6): 1106-1117. (in Chinese))
 - [20] 白岗岗,侯精明,韩浩,等. 基于深度学习的道路积水智能监测方法[J]. 水资源保护,2021,37(5):75-80. (BAI Ganggang, HOU Jingming, HAN Hao, et al. Intelligent monitoring method for road inundation based on deep learning[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):75-80. (in Chinese))
 - [21] 夏天,杨学志,艾加秋. 基于 GLCM-GMRF 纹理特征和深度置信网络的 SAR 图像分类[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(4):480-486. (XIA Tian, YANG Xuezhi, AI Jiaqiu. SAR image classification based on GLCM-GMRF texture feature and deep belief network [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2020,43(4):480-486. (in Chinese))
 - [22] KAPLAN G, AVDAN U. Water extraction technique in mountainous areas from satellite images [J]. Journal of Applied Remote Sensing,2017, 11(4): 046002.
 - [23] 马肖肖,程博,刘岳明,等. 基于极化特征和纹理特征的 PolSAR 影像建筑物提取方法[J]. 中国科学院大学学报,2019,36(5):682-693. (MA Xiaoxiao, CHENG Bo, LIU Yueming, et al. PolSAR remote sensing image method for building extraction based on polarization and texture characteristics [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(5): 682-693. (in Chinese))
 - [24] MYINT S W, LAM N, TYLER J. An evaluation of four different wavelet decomposition procedures for spatial feature discrimination in urban areas[J]. Transactions in GIS,2002,6(4):403-429.
 - [25] 姜青香,刘慧平. 利用纹理分析方法提取 TM 图像信息[J]. 遥感学报,2004,8(5):458-464. (JIANG Qingxiang, LIU Huiping. Extracting TM image information using texture analysis [J]. Journal of Remote Sensing, 2004,8(5):458-464. (in Chinese))
 - [26] 范宇宾,郭唯娜,柯长青. 纹理特征辅助的 SAR 影像冰川识别[J]. 冰川冻土,2019,41(6):1326-1334. (FAN Yubin, GUO Weina, KE Changqing. Texture-assisted glacier recognition based on SAR image [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2019,41(6):1326-1334. (in Chinese))
 - [27] 胡旻琪,张玉超,马荣华,等. 巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析[J]. 环境科学,2018,39(11):4925-4937. (HU Minqi, ZHANG Yuchao, MA Ronghua, et al. Spatial and temporal dynamics of floating algal blooms in Lake Chaohu in 2016 and their environmental drivers [J]. Environmental Science,2018,39(11):4925-4937. (in Chinese))
 - [28] 董连凤. 高光谱影像预处理技术研究[D]. 西安:长安大学,2007.
 - [29] LAI Yuequn, ZHANG Jing, SONG Yongyu, et al. Comparative analysis of different methods for extracting water body area of Miyun Reservoir and driving forces for nearly 40 years [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2020,48(3):451-463.
 - [30] 张珂,吴南,徐国鑫,等. GF-1 遥感影像结合等高线消除云层干扰的连续水体重建法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):295-302. (ZHANG Ke, WU

- Nan, XU Guoxin, et al. An extraction method for continuous water body through cloud interference removal using GF-1 remote sensing and DEM[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(4): 295-302. (in Chinese))
- [31] 范亚洲, 张珂, 刘林鑫, 等. 水库水体的最大类间方差迭代遥感提取方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 50-55. (FAN Yazhou, ZHANG Ke, LIU Linxin, et al. Optimal extraction of reservoir water body from remote sensing images based on iterative inter-class variance maximization method. [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 50-55. (in Chinese))
- [32] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I. Textural features for image classification [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, SMC-3(6): 610-621.
- [33] ZHANG Fangfang, ZHANG Bing, LI Junsheng, et al. Comparative analysis of automatic water identification method based on multispectral remote sensing [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 1482-1487.
- [34] 王兴玲, 李占斌. 基于网格搜索的支持向量机核函数参数的确定[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(5): 859-862. (WANG Xingling, LI Zhanbin. Identifying the parameters of the kernel function in support vector machines based on the grid-search method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(5): 859-862. (in Chinese))
- [35] 顾炼, 许诗起, 竺乐庆. 基于 FlowS-Unet 的遥感图像建筑物变化检测. [J]. 自动化学报, 2020, 46(6): 1291-1300. (GU Lian, XU Shiqi, ZHU Leqing. Detection of building changes in remote sensing images via FlowS-Unet [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(6): 1291-1300. (in Chinese))
- [36] 新华社. 决战“悬湖”: 直击超历史洪水下巢湖保卫战 [EB/OL]. (2020-07-29) [2022-01-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-07/29/content_5530835.htm.
- [37] 裴欢, 孙天娇, 王晓妍. 基于 Landsat 8 OLI 影像纹理特征的面向对象土地利用/覆盖分类[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 248-255. (PEI Huan, SUN Tianjiao, WANG Xiaoyan. Object-oriented land use/cover classification based on texture features of Landsat 8 OLI image [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 248-255. (in Chinese))
- [38] 李王娟, 孔钰如, 杨小冬, 等. 基于特征优选随机森林算法的农耕地土地利用分类[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 244-250. (WANG Lijuan, KONG Yuru, YANG Xiaodong, et al. Classification of land use in farming areas based on feature optimization random forest algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 244-250. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-01-13 编辑: 施业)

(上接第 151 页)

- [17] 谈戈, 夏军, 李新. 无资料地区水文预报研究的方法与出路[J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 192-196. (TAN Ge, XIA Jun, LI Xin. Hydrological prediction in ungauged basins[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 192-196. (in Chinese))
- [18] 王浩, 严登华, 贾仰文, 等. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 479-489. (WANG Hao, YAN Denghua, JIA Yangwen, et al. Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 479-489. (in Chinese))
- [19] CROW W T, WOOD E F. The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using ensemble Kalman filtering: a case study based on ESTAR measurements during SGP97[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(2): 137-149.
- [20] LU Hui, KOIKE T, YANG Kun, et al. Improving land surface soil moisture and energy flux simulations over the Tibetan Plateau by the assimilation of the microwave remote sensing data and the GCM output into a land surface model[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17: 43-54.
- [21] HAN E, MERWADE V, HEATHMAN G C. Implementation of surface soil moisture data assimilation with watershed scale distributed hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2012, 416-417: 98-117.
- [22] 张珂, 张企诺, 陈新宇, 等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 94-101. (ZHANG Ke, ZHANG Qinnuo, CHEN Xinyu, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 94-101. (in Chinese))
- [23] SHI Chunxiang, XIE Zhenghui, QIAN Hui, et al. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(9): 1430-1440.
- [24] DEE D P, DA SILVA A M. Data assimilation in the presence of forecast bias [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1998, 124(545): 269-295.
- [25] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1): 35-45.

(收稿日期: 2022-01-17 编辑: 熊水斌)