

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.008

水库水体的最大类间方差迭代遥感提取方法

范亚洲^{1,2}, 张珂^{1,2,3,4}, 刘林鑫^{1,2}, 晁丽君¹, 姚成²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;

4. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:针对利用遥感影像结合经验阈值提取水体信息需要进行大量试验,难以客观地确定水体与非水体分割阈值的问题,在最大类间方差法的基础上提出了最大类间方差迭代法来优化提取水库水体信息。基于高分一号(GF-1)卫星影像数据,使用归一化差分水体指数(NDWI)法初步提取了水体信息,通过形态学膨胀算法建立缓冲区,采用多次迭代最大类间方差法计算自适应阈值,用于分割水体与非水体,从而实现水体最优提取。实例验证结果表明,提出的优化方法可以有效地消除建筑等非水体地物信息的干扰,较准确地提取水库水体信息在不同时期的特征,总体分类精度与Kappa系数较最大类间方差法提取结果分别提高了9.36%和24.09%,综合精度平均提高了10.42%。

关键词:最大类间方差迭代法;卫星影像数据;归一化差分水体指数;水体最优提取

中图分类号:TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0050-06

Optimal extraction of reservoir water body from remote sensing images based on iterative inter-class variance maximization method // FAN Yazhou^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2,3,4}, LIU Linxin^{1,2}, CHAO Lijun¹, YAO Cheng² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Recourses, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. CMA-HHU Joint Laboratory for HydroMeteorological Studies, Nanjing 210098, China)

Abstract: To delineate the water body from remote sensing images using an empirical threshold, it requires many trials. However, it is difficult to make an objective determination on the selection of segmentation threshold between the water body and other features. Therefore, based on the iterative inter-class variance maximization method, this study proposed an iterative inter-class variance maximization method for the optimal extraction of the water bodies of reservoirs. We derived the preliminary water body information from the GF-1 satellite images using normalized difference water index (NDWI). Then we optimally distinguished the water and non-water bodies in the buffer zone, that is established by the morphological dilate algorithm, using the adaptive thresholds determined by the iterative inter-class variance maximization method. The results show that the method can effectively eliminate the influence of buildings and accurately obtain the characteristics of the water body information in the reservoir area during different periods. Compared with the results of iterative inter-class variance maximization method, the overall accuracy, Kappa coefficient, and comprehensive accuracy of the new method were improved by 9.36%, 24.09%, and 10.42%, respectively.

Key words: iterative inter-class variance maximization method; satellite image; normalized difference water index; optimal extraction of water body

水利设施是水资源管理与规划的重要设施^[1]。随着遥感技术在水利工程领域的广泛应用,

通过遥感影像提取水体信息已经成为水资源调查及宏观监测^[2-6]、复核库容曲线等领域中的关键技

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508101);江苏省杰出青年基金(BK20180022);江苏省“六大人才高峰”项目(NY-004);江苏省水利科技项目(2018055)

作者简介:范亚洲(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:yazhou_fan@hhu.edu.cn

通信作者:张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源、水文气象等研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

术^[7-8]。遥感影像提取水体信息的研究方法包括单波段阈值法^[9]、多波段谱间关系法^[10]、水体指数法以及决策树法^[11]等。王国兴等^[12]提取了新安江水库不同时相的水体面积,结合实测水位拟合了水位-面积关系曲线;曹明亮等^[13]通过遥感影像提取水库库区的水体面积,提出了小水库拦洪计算方法;曹荣龙等^[14]通过分析地物光谱特征构建了修订型水体指数,提取了密云水库水面面积的动态变化;张莉芳等^[15]基于遥感技术提取了柘林水库库区内的水体面积,进而对库容曲线进行复核;戚晓明等^[16]基于 21 景 ETM+ 遥感影像提取了洪泽湖的水面变化序列数据,并推导了洪泽湖库容曲线。上述研究均使用人工判读或经验确定的阈值来提取库区水体信息,并没有对分割阈值做出客观的判断。

高分一号(GF-1)卫星于 2013 年 4 月 26 日发射成功,搭载了两台 2 m 分辨率全色和 8 m 分辨率多光谱相机(PMS)外,还搭载了 4 台 16 m 分辨率多光谱相机(WFV),具有寿命长、效能高等特点^[17],提高了我国高分辨率影像数据的自给率^[18],为遥感影像信息提取及特征识别带来了新的机遇^[19]。本文开展了以 GF-1 卫星遥感影像为数据源的东方红水库库区水体信息优化提取研究,提出基于最大类间方差的库区水体迭代优化提取方法。

1 方法的提出

1.1 归一化差分水体指数法

归一化差分水体指数(normalized difference water index, NDWI)法由 McFeeter^[20]提出,根据水体在绿光波段上具有很强反射性、在近红外波段具有很强吸收性的特点,建立波段差异比值,从而增强水体信息,计算公式为

$$I_{NDWI} = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (1)$$

式中: I_{NDWI} 为归一化差分水体指数; λ_1 为 GF-1 卫星的绿光波段反射率; λ_2 为 GF-1 卫星近红外波段反射率。

通过地物光谱分析及水体提取实验,在突出库区主要水体信息的同时,为了较好地抑制植被等其他地物信息,本文将初始阈值设为 $T_0 = -0.2$,即 $I_{NDWI} > T_0$ 得到的结果为初步提取的水体信息。

1.2 最大类间方差迭代法及形态学膨胀算法

最大类间方差法是由 Otsu^[21]1979 年提出的一种无参数无监督的阈值分割算法^[22]。该算法根据图像的灰度特性,分割阈值从最小灰度值遍历到最大灰度值,在某一灰度值下,将图像分成背景和前景两部分,当两者类间方差最大时,背景和前景这两部分被错分的概率是最小的^[23],对应最大类间方差的

阈值即为所求的自适应阈值。

本文在最大类间方差法基础上,提出了最大类间方差迭代法来提高水体提取的精度。首先通过边缘检测的方法得到初步提取的库区水体信息范围,以此基于形态学膨胀算法建立库区水体的缓冲区^[24],再对缓冲区包围的区域应用最大类间方差法,自适应地确定库区水体与周边地物的分割阈值,最后通过多次迭代后计算得到优化提取的库区水体面积,水体优化提取流程见图 1。

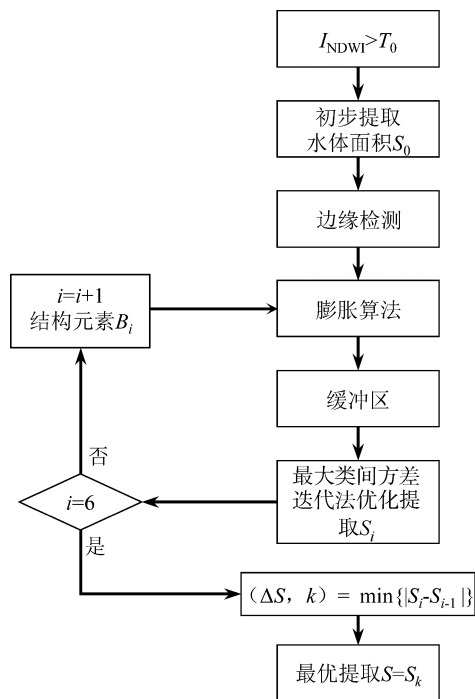


图 1 水体优化提取流程

Fig. 1 Flow chart of optimal extraction of water body

本文结构元素 B 是数值均为 1 的行列数相等且为奇数的矩阵,当其大小发生变化,经膨胀算法计算得到的缓冲区范围也会不一致,这导致了水体信息不断变化,尤其当结构元素太大时,会造成水体信息的误提。为了提取准确、稳定的库区水体信息,通过试验,本文对优化提取算法进行了 6 次迭代计算,迭代过程中结构元素的大小分别为 3×3 、 5×5 、 $\dots$ 、 13×13 。通过本文提出的最大类间方差迭代法计算得到的相邻水体面积,当两者差值的绝对值最小时(公式(2)),那么这一水体面积即为最优提取的水体面积(公式(3)),相应得到的结构元素最优,缓冲区为最优缓冲区。

1.3 精度评价方法

采用决定系数(coefficient of determination, R^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)来验证遥感提取水体面积与参考水体面积的一致性,同时为了验证水体信息的分类精度,各景影像均选取了水体和非水体各 100 个样本像元,由混淆

矩阵计算了各次优化结果及最优结果的总体分类精度 (overall accuracy, OA) 和 Kappa 系数 (Kappa coefficient, KC)。

为了统一 4 项基础评价指标,本文分别将各项指标归一化后取平均值建立综合指标,即平均归一化指数(average normalized index, ANI),RMSE 是水体遥感提取面积与参考水体面积之间误差的度量,因此最大值归一化后为 0,最小值归一化为 1。

2 实例验证

2.1 研究区概况与数据处理

安徽省屯溪流域东方红水库(图 2)地处新安江水系二级支流东亭河上,水库坝址以上的集水面积为 60.0 km²,主河道长 11.8 km,平均坡降为 21.0‰,总库容为 2445 万 m³,设计灌溉面积 30 km²,多年平均发电量 131 万 kW·h,是以防洪、灌溉为主,结合发电、城镇供水等综合利用功能的中型水利枢纽工程。

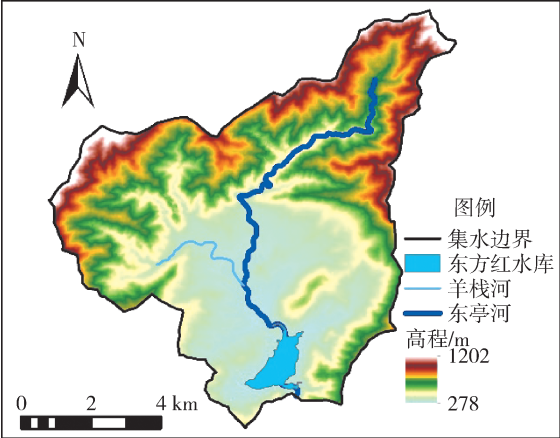


图 2 研究区示意图
Fig. 2 Map of the study area

2020 年 2 月陆面过程资料分布式数据存档中心(LP DAAC)公布了 1 弧秒分辨率 NASADEM 数据集产品 (<https://lpdaac.usgs.gov/news/release-nasadem-data-products/>),本文以此数据提取了研究区流域。通过现场查勘,收集了东方红水库库容曲线及 2015 年的水库水文资料。2015 年东方红水库集水流域平均降水量为 2411.6 mm,年平均降水频率为 15.1%,其中 1—2 月降水量较少,5—6 月降水量最大。为体现雨期前后库区水体信息的不同特征,选取了 2015 年 10 景卫星影像(表 1),数据源于中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com/CN/index.shtml>)提供的 GF-1 WFV 数据,影像空间分辨率为 16 m。

本研究采用的数据为 Level 1A 遥感影像(预处理级辐射校正影像产品),在后续分析前需对数据

进行预处理,包括辐射定标、大气校正^[25]、正射校正、配准及研究区裁剪。由于数据较多,对遥感影像数据分别处理会受到较大的人为影响,因此对影像进行了批量预处理。

2.2 水体提取结果

首先根据东方红水库的水位-面积关系(图 3)和每景影像对应日期的实测水位(表 1)推导相应日期水库的参考水体面积 A(表 2)。

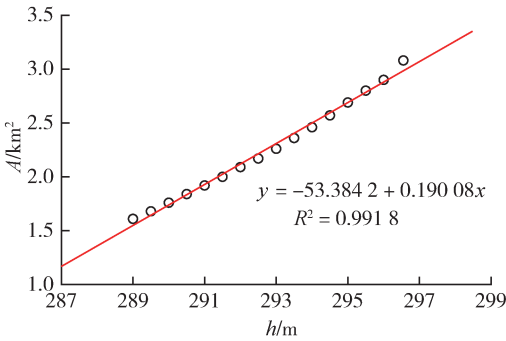


图 3 东方红水库水位-面积关系曲线
Fig. 3 Relationship between water level and water body area of the Dongfanghong Reservoir

表 1 影像数据集及实测库水位
Table 1 Information of image datasets and measured reservoir water levels

序号	影像	传感器	景中心经度	景中心纬度	云量/%	实测库水位/m
1	GF-1_20150102	WFV 4	117.218°E	30.169 5°N	0	286.33
2	GF-1_20150109	WFV 1	118.104°E	29.637 4°N	0	285.72
3	GF-1_20150207	WFV 2	118.26°E	29.279 2°N	2	283.62
4	GF-1_20150212	WFV 4	117.252°E	30.157 3°N	0	283.12
5	GF-1_20150513	WFV 4	118.429°E	30.157 7°N	10	291.55
6	GF-1_20150806	WFV 1	118.735°E	29.628 1°N	1	291.72
7	GF-1_20150831	WFV 2	118.403°E	29.278 7°N	9	291.20
8	GF-1_20151015	WFV 1	118.44°E	29.625 8°N	0	289.87
9	GF-1_20151020	WFV 4	117.573°E	30.188 1°N	1	289.52
10	GF-1_20151023	WFV 1	117.534°E	29.636 4°N	1	289.58

从表 2 看出,初步提取的水体信息与参考水体面积相比,在雨期前 4 景影像(1 月和 2 月)水库缺水期有较大的误差,平均误差约为 0.80 km²,这首先是因为错提了库区浅水区大部分的裸地,其次本文依据的水位-面积关系曲线是在 289 m 以上,在缺水期通过拟合得到的参考库区水体面积会有所偏小,但是在雨期(5 月和 8 月)及雨期后(10 月)水库蓄水期提取的效果较好,平均误差约为 0.16 km²。在 6 次优化提取的结果中,仅 20150513 景影像的提取结果有所增大,其他影像的水体面积均有减小。根据本文对最优提取水体的定义,表 2 列出了各景影像的最优水体面积。

图 4 为初步提取的库区水体信息及最优缓冲区。从图 4 可以看出,NDWI 法结合经验阈值初步

表 2 库区参考水体面积及遥感提取水体面积

Table 2 Reference water body area and remote-sensing extracted water body area

影像序号	A/km^2	S_0/km^2	S_i/km^2						S_k/km^2
			$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	
1	1.0473	1.1735	0.9812	1.0043	1.0179	1.0286	1.0378	1.0478	1.0378
2	0.9314	1.2851	1.0752	1.0962	1.1159	1.1320	1.1364	1.1418	1.1364
3	0.5322	1.4728	0.8392	0.8499	0.8599	0.8689	0.8750	0.8812	0.8750
4	0.4371	2.1827	0.8125	0.8228	0.8312	0.8369	0.8435	0.8476	0.8476
5	2.0397	1.5107	1.5112	1.6202	1.6620	1.6945	1.7101	1.7262	1.7101
6	2.0720	1.8642	1.6625	1.7341	1.7787	1.8045	1.8258	1.8378	1.8378
7	1.9731	1.8591	1.5859	1.6581	1.7103	1.7457	1.7795	1.7902	1.7902
8	1.7203	1.8033	1.5429	1.5406	1.5711	1.6115	1.6348	1.6666	1.5406
9	1.6538	1.6353	1.4008	1.4761	1.4287	1.4510	1.4679	1.4820	1.4820
10	1.6652	1.6353	1.3752	1.4277	1.4523	1.4743	1.4963	1.5025	1.5025

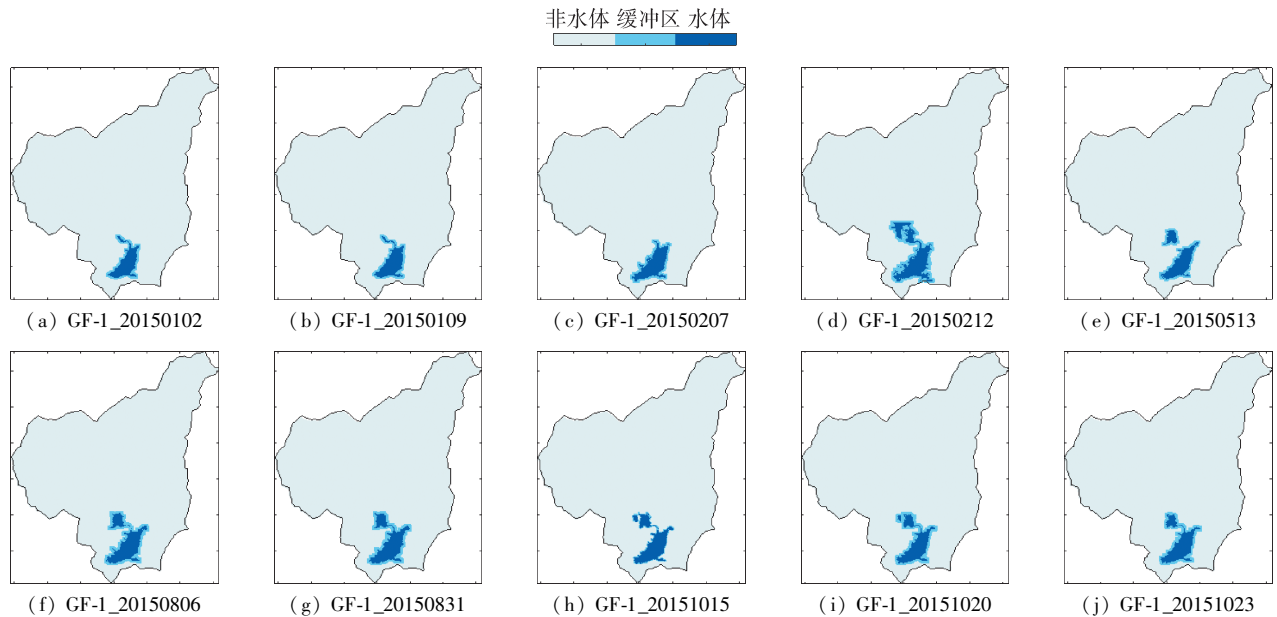


图 4 初步提取水体信息及最优缓冲区

Fig. 4 Initially extracted water bodies and associated optimal buffer zones

提取的水体信息在 20150207 景影像中混淆了库区水体和库区周边干涸的裸地,在 20150212 景影像中有大面积的裸地及建筑地物误提为水体信息。

图 5 为最优提取的水体信息,提取结果有效消除了影像中建筑等非水体信息的干扰,较准确地提取了东方红水库在雨期前(1 月、2 月)、雨期(5 月、8 月)及雨期后(10 月)的水体信息。1 月和 2 月降水较少,库区水体也随着补给下游而逐渐减少;5 月和 8 月降水量增大,库区的来水量大于出水量,水库开始蓄水,水体面积也随之增加,而且提取结果较好地保留了 8 月两景影像中细小河道的水体;10 月水库水体的面积趋于稳定。

2.3 精度分析

基于上述水体初步提取、6 次迭代提取以及最优提取的 3 类结果,表 3 为各类提取结果 4 项基础评价指标的计算结果,其中 R^2 和 RMSE 分别为十景影像水体提取面积与参考水体面积的决定系数和均

方根误差,OA 和 KC 分别是十景影像总体分类精度和 Kappa 系数的均值。从表 3 可以看到,本文定义的最优水体提取结果一致性方面相较初步提取结果显著提高, R^2 从 0.0139 提高到了 0.9720, RMSE 从 0.2822 km^2 减小到了 0.0592 km^2 ;总体分类精度与 Kappa 系数较初步提取分别提高了 9.36% 和 24.09%。此外,第二次和第三次迭代中水体提取的 R^2 分别为 0.9760 和 0.9721,而最优提取结果为 0.9720,且 RMSE 也比最优提取的结果小,可见这两次计算的提取结果一致性要高于本文最优提取结果,但最优提取的总体分类精度为 0.8940, Kappa 系数为 0.7880,分类精度比第二次和第三次都更加理想;同理,第六次迭代中的总体分类精度为 0.8995, Kappa 系数为 0.7990,虽然分类精度高于最优提取结果,但是一致性方面并不满意,最优水体提取结果的 R^2 和 RMSE 分别为 0.9720 和 0.0592 km^2 。

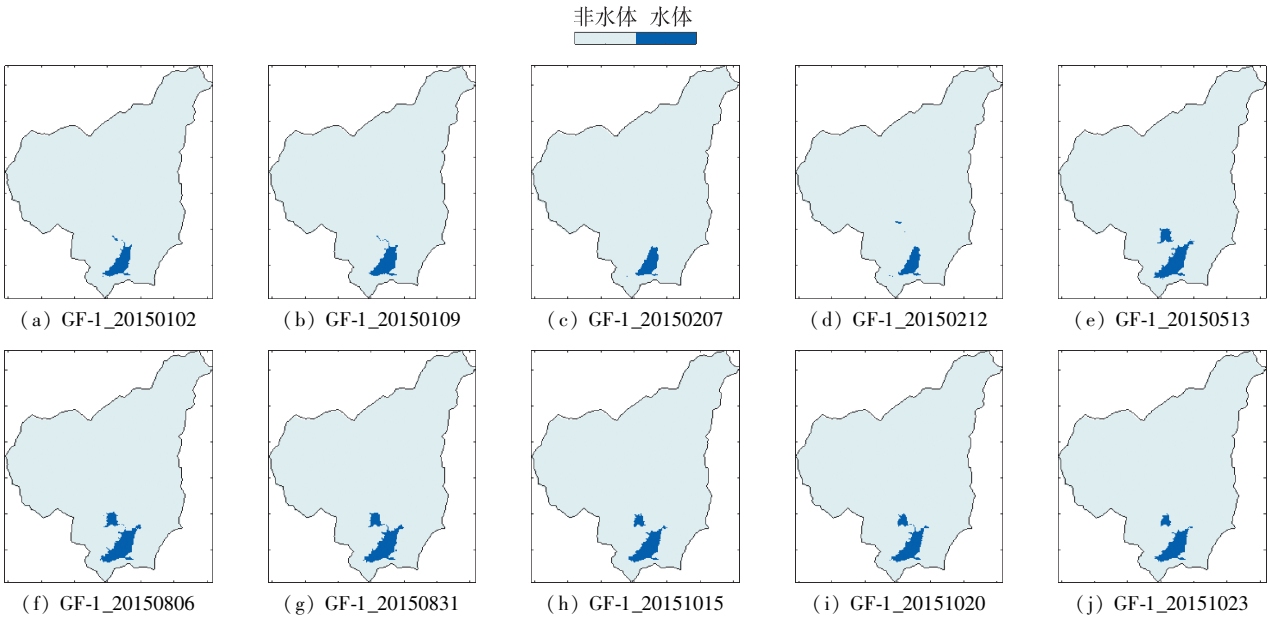


图5 最大类间方差迭代法最优提取水体信息

Fig.5 Optimally extracted water bodies by the iterative inter-class variance maximization method

表3 各类水体提取结果精度评价

Table 3 Accuracy evaluation of the extracted water body

水体提取过程	R^2	RMSE 值/ km ²	OA 值	KC 值	ANI 值
初步提取	0.0139	0.2822	0.8175	0.6350	
第一次迭代	0.9591	0.0616	0.8160	0.6320	0.0307
第二次迭代	0.9760	0.0509	0.8525	0.7050	0.7186
第三次迭代	0.9721	0.0567	0.8710	0.7420	0.6528
第四次迭代	0.9709	0.0596	0.8885	0.7770	0.6804
第五次迭代	0.9702	0.0616	0.8905	0.7810	0.6410
第六次迭代	0.9695	0.0631	0.8995	0.7990	0.6538
最优提取	0.9720	0.0592	0.8940	0.7880	0.7378

对比基础指标即可发现初步提取的结果较差,因此不参与 ANI 的计算,通过计算 ANI 发现,最优提取水体的整体精度最高,ANI 为 0.7378,相比第二次、第三次和第六次的迭代计算结果,精度分别提高了 2.67%、13.02% 和 12.85%,平均提高了 9.51%。

3 结 语

本文在最大类间方差法的基础上提出了水库水体的最大类间方差迭代遥感提取方法,并以东方红水库为研究区,对该方法进行了验证分析,结果表明,相较于通过经验阈值初步提取的水体面积信息,该方法较完整地提取了在不同时期库区水体的动态变化特征,在一致性方面水体提取精度显著提高;相较于各次迭代中的水体提取结果,本文提出的库区水体提取方法整体效果良好。但本文仅应用广泛的 NDWI 方法进行了水体提取试验,对于不同的水体提取方法,提取结果会有不同的精度,对此在未来的研究中仍需进一步深入探讨。

参考文献:

[1] 王志辉,易善桢.不同指数模型法在水体遥感提取中的比较研究[J]. 科学技术与工程,2007,7(4):534-537. (WANG Zhihui, YI Shanzhen. Comparison and research on the different index models used in water extraction by remote sensing[J]. Science Technology and Engineering, 2007,7(4):534-537. (in Chinese))

[2] ZHANG Ke, CHAO Lijun, WANG Qingqing, et al. Using multi-satellite microwave remote sensing observations for retrieval of daily surface soil moisture across China[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(2):85-97.

[3] 张珂,刘林鑫,晁丽君,等. 2000—2014 年云南省陆地生态系统水分利用效率的时空变化[J]. 水资源保护, 2019, 35(5):1-5. (ZHANG Ke, LIU Linxin, CHAO Lijun, et al. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5):1-5. (in Chinese))

[4] 王青青,张珂,叶金印,等. 安徽省土壤湿度时空变化规律分析及遥感反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2):114-118. (WANG Qingqing, ZHANG Ke, YE Jinyin, et al. Spatiotemporal analysis and remote sensing retrieval of soil moisture across Anhui Province, China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(2):114-118. (in Chinese))

[5] 牛明香,王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4):26-33. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image [J]. Water Resources

- Protection, 2020, 36(4): 26-33. (in Chinese))
- [6] 玉苏普江·艾麦提, 阿里木江·卡斯木, 阿布都沙拉木·热合曼. 基于 RS 和 GIS 的艾比湖湿地信息提取及面积动态分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 57-61. (AMAT Yusupjan, KASIMU Alimujiang, RAHMAN Abdusalam. Information extraction and dynamic area change in Ebinur Lake Wetland based on RS and GIS[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 57-61. (in Chinese))
 - [7] 方刚. Landsat8 卫星 OLI 影像水体信息的自动提取研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1284-1288. (FANG Gang. Automatic extraction of water body information based on landsat 8 satellite OLI image[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(6): 1284-1288. (in Chinese))
 - [8] 韩栋, 杨晓梅, 纪凯. 小卫星遥感影像自动提取水体方法研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(1): 51-54. (HAN Dong, YANG Xiaomei, JI Kai. The research on the method of automatically extracting water body information from small satellite images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(1): 51-54. (in Chinese))
 - [9] 陆家驹, 李士鸿. TM 资料水体识别技术的改进[J]. 遥感学报, 1992, 7(1): 17-23. (LU Jiaju, LI Shihong. Improvement of the techniques for distinguishing water bodies from TM data[J]. Journal of Remote Sensing, 1992, 7(1): 17-23. (in Chinese))
 - [10] 钟春棋, 曾从盛, 柳铮铮. 基于谱间特征与比值型指数的水体影像识别分析[J]. 地球信息科学学报, 2008, 10(5): 663-669. (ZHONG Chunqi, ZENG Congsheng, LIU Zhengzheng. Study on terrestrial water information identified based on the analysis of spectral signature and ratio index[J]. Journal of Geo-Information Science, 2008, 10(5): 663-669. (in Chinese))
 - [11] 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 and Resources, 2014, 26(2): 43-47. (in Chinese))
 - [12] 王国兴, 李士鸿. 应用遥感资料获取库区水下地形的方法研究[J]. 河海大学学报, 1998, 26(6): 91-94. (WANG Guoxing, LI Shihong. Application of remote sensing data to extraction of underwater topography of reservoir[J]. Journal of Hohai University, 1998, 26(6): 91-94. (in Chinese))
 - [13] 曹明亮, 周惠成, 张弛, 等. 基于遥感数据的小水库塘坝拦洪计算方法研究与应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(8): 1063-1069. (CAO Mingliang, ZHOU Huicheng, ZHANG Chi, et al. Research and application of flood detention modeling for ponds and small reservoirs based on remote sensing data[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(8): 2138-2144 (in Chinese))
 - [14] 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 reservoir's 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. (in Chinese))
 - [15] 张莉芳, 潘华海, 单定军, 等. 基于遥感技术的柘林水库库容曲线复核[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 1-6, 22. (ZHANG Lifang, PAN Huahai, SHAN Dingjun. Remote sensing technology-based re-checking of reservoir storage capacity curve of Zhelin Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(6): 1-6, 22. (in Chinese))
 - [16] 戚晓明, 杨兰, 白夏, 等. 基于遥感数据的洪泽湖库容曲线推求[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 77-83. (QI Xiaoming, YANG Lan, BAI Xia. Water level-capacity curve of Hongze Lake based on remote sensing data[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 77-83. (in Chinese))
 - [17] 黄帅, 丁建丽, 李艳华. 面向对象的国产 GF-1 遥感影像水体信息提取研究[J]. 人民长江, 2016, 47(5): 23-28. (HUANG Shuai, DING Jianli, LI Yanhua. Study of water information extraction based on domestic GF-1 remote sensing image by using object-oriented method[J]. Yangtze River, 2016, 47(5): 23-28. (in Chinese))
 - [18] 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. Extraction of water information based on China-made GF-1 remote sense image[J]. Resources Science, 2015, 37(6): 1166-1172. (in Chinese))
 - [19] 刘书含, 顾行发, 余涛, 等. 高分一号多光谱遥感数据的面向对象分类[J]. 测绘科学, 2014, 39(12): 91-94. (LIU Shuhan, GU Xingfa, YU Tao, et al. Object-oriented classification method based on GF-1 multi-spectral remote sensing image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(12): 91-94. (in Chinese))
 - [20] MCFEETER 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.
 - [21] OTSU N. A thresholding selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic, 1979, 9(1): 62-66.
 - [22] 徐蓉, 张增祥, 赵春哲. 湖泊水体遥感提取方法比较研究[J]. 遥感信息, 2015, 3(1): 111-118. (XU Rong, ZHANG Zengxiang, ZHAO Chunzhe. Different method used in extraction of lake water body based on MODIS data[J]. Remote Sensing Information, 2015, 3(1): 111-118. (in Chinese))

(下转第 60 页)

- 分析[J]. 山东国土资源, 2016, 32(9): 30-35. (CUI Aiping, YU Cuicui. Analysis on dynamic characteristics of discharge and influence factors in Baimai Spring group [J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(9): 30-35. (in Chinese))
- [4] 裴捍华, 杨亲民, 郭振中, 等. 山西岩溶水强径流带的成因类型及其水文地质特征[J]. 中国岩溶, 2003(3): 55-60. (PEI Hanhua, YANG Qinmin, GUO Zhenzhong, et al. Hydrogeologic characteristics and formation of strong seepage flow zones of karst water in Shanxi [J]. Carsologica Sinica, 2003(3): 55-60. (in Chinese))
- [5] MIAO Jinjie, LIU Guoliang, CAO Bibo, et al. Identification of strong karst groundwater runoff belt by cross wavelet transform [J]. Springer Netherlands, 2014, 28(10): 2903-2916.
- [6] AN L, REN X, HAO Y, et al. Utilizing precipitation and spring discharge data to identify groundwater quick flow belts in a karst spring catchment [J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(10): 10-25.
- [7] 张宝柱, 陈振东. 明水泉岩溶水系统分析[J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(1): 52-58. (ZHANG Baozhu, CHEN Zhendong. The analysis of Mingshui Spring karst-water system in Shandong [J]. Journal of Hebei GEO University, 1996, 19(1): 52-58. (in Chinese))
- [8] 刘永红, 郑萍萍, 周明春. 章丘市泉群保护与泉水资源利用工程[J]. 山东水利, 2007(2): 44-45. (LIU Yonghong, ZHENG Pingping, ZHOU Mingchun. Spring group protection and spring water resource utilization project in Zhangqiu City [J]. Shandong Water Resources, 2007(2): 44-45. (in Chinese))
- [9] 刘伟, 袁传芳, 胡祖忠. 浅析明水泉的形成与保护[J]. 上海水务, 2005(4): 49-50. (LIU Wei, YUAN Chuanfang, HU Zuzhong. On the formation and protection of Mingshui Spring [J]. Shanghai Water, 2005(4): 49-50. (in Chinese))
- [10] 曹敏, 沈立成, 肖琼, 等. 基于 SPSS 的岩溶地下水水质变化及其影响因素: 以重庆市金佛山表层岩溶地下水为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2012, 35(2): 82-87. (CAO Min, SHEN Licheng, XIAO Qiong, et al. Application of factor analysis in the assessment of influence factors of karst groundwater quality: a case from epikarst groundwater at Jinfo Mountain in Chongqing [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2012, 35(2): 82-87. (in Chinese))
- [11] 王茂枚, 束龙仓, 季叶飞, 等. 济南岩溶泉水流量衰减原因分析及动态模拟[J]. 中国岩溶, 2008(1): 19-23. (WANG Maomei, SHU Longcang, JI Yefei, et al. Causes of spring's of flux attenuation and simulation of spring's regime: a case in Jinan karst spring area [J]. Carsologica Sinica, 2008(1): 19-23. (in Chinese))
- [12] 季叶飞, 邹靖, 顾锦, 等. 降水入渗补给滞时的确定及其在泉流量模拟与预测中的应用[J]. 水文, 2008, 28(6): 30-32. (JI Yefei, ZOU Qing, GU Jing, et al. Determination of precipitation recharge lag time: application in spring flow simulation and prediction [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(6): 30-32. (in Chinese))
- [13] 叶海东, 闫晋卫. 柳林泉域岩溶水强径流带的成因类型及水文地质条件分析[J]. 工程勘察, 2008(增刊2): 206-208. (YE Haidong, YAN Jingwei. Analysis on the genetic type and hydrogeological conditions of karst water strong runoff zone in Liulin spring area [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(Sup2): 206-208. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-05-16 编辑: 熊水斌)

(上接第 55 页)

- [23] 贾祎琳, 张文, 孟令奎. 面向 GF-1 影像的 NDWI 分割阈值选取方法研究[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 95-100. (JIA Yilin, ZHANG Wen, MENG Linghui. A study of selection method of NDWI segmentation threshold for GF-1 image [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(1): 95-100. (in Chinese))
- [24] 李科, 杜琳. 基于膨胀算法的缓冲区分析的设计与实现[J]. 测绘科学技术学报, 2005, 22(3): 229-231. (LI Ke, DU Lin. An algorithm of buffer zones based on algorithm of dialation [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2005, 22(3): 229-231. (in Chinese))
- [25] 王中挺, 李小英, 李莘莘, 等. GF-1 星 WFV 相机的快速大气校正[J]. 遥感学报, 2016, 20(3): 353-360. (WANG Zhongting, LI Xiaoying, LI Shenshen, et al.

Quickly atmospheric correction for GF-1 WFV cameras [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3): 353-360. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-07-08 编辑: 彭桃英)

