

基于高分一号遥感影像的水体提取方法对比分析与改进

张珂^{1,2,3,4,5}, 吴星宇^{1,3}, 吴南^{1,3}, 黄轶铭¹, 张兆安^{1,3}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 江苏 南京 210098; 5. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:以高分一号遥感影像为数据源,以安徽省黄山市屯溪流域内的东方红水库为研究对象,采用单波段阈值法、两波段差值法、波段比值法、归一化差分水体指数(NDWI)法、归一化差分植被指数(NDVI)法共5种水陆像元度量方法,分别应用平均值法和最大类间方差迭代法两种阈值选取方法对东方红水库进行水体提取,探索最大类间方差迭代法在水体提取变量上的改进效果,在此基础上提出了一种改进的最大类间方差联合水体提取法,并对比了改进前后的水体提取效果。结果表明:改进后的水体提取方法可以很好地降低影像提取中产生的噪点,提高水体提取的精度,提取成果的平均相对误差为4.69%,决定系数为0.8579,相比于改进前平均相对误差降低了0.68%,决定系数提高了0.0539。

关键词:高分一号;水体提取;归一化差分水体指数;归一化差分植被指数;最大类间方差迭代法;东方红水库

中图分类号:TP79

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)04-0009-08

Comparative analysis and improvement of water body extraction methods based on GF-1 remote sensing images// ZHANG Ke^{1,2,3,4,5}, WU Xingyu^{1,3}, WU Nan^{1,3}, HUANG Yiming¹, ZHANG Zhaoan^{1,3} (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210098, China; 5. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the GF-1 remote sensing image as the data source and the Dongfanghong Reservoir in Tunxi Watershed, Huangshan City, Anhui Province as the research object, five kinds of water and land pixel measurement methods, including single band threshold method, two band difference method, band ratio method, normalized difference water index (NDWI) method, and normalized difference vegetation index (NDVI) method, were used to extract water body of the Dongfanghong Reservoir, respectively, using the average method and the maximum inter-class variance iteration method, to explore the improvement effect of the maximum inter-class variance iteration method on water body extraction variables. On this basis, an improved maximum inter-class variance joint water extraction method was proposed, and the water extraction effects before and after the improvement were compared. The results show that the improved water body extraction method can effectively reduce the noise generated in image extraction and improve the accuracy of water body extraction. The average relative error of the extraction results is 4.69%, with a determination coefficient of 0.8579. Compared with before improvement, the average relative error is reduced by 0.68%, and the determination coefficient is increased by 0.0539.

Key words: GF-1; water body extraction; normalized difference water index; normalized difference vegetation index; maximum inter-class variance iteration method; Dongfanghong Reservoir

遥感影像因其获取信息速度快、周期短、范围广等优点,已经成为水体信息提取领域的重要数据来

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006500);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B240203007);水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(524015222)

作者简介:张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源及水文气象研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

通信作者:吴星宇(2000—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:1317707157@qq.com

源^[1-5]。因水体与其他地物在不同波段的光谱特性有所差异,水体提取的方法主要包括单波段和多波段两种^[6],若只用一个波段提取水体则为单波段法,若同时利用多个波段则为多波段法^[7-8]。除此以外,决策树^[9]、支持向量机(support vector machine, SVM)^[10]等机器学习算法也可以较好地 从遥感影像中提取出水体信息。

高分一号(GF-1)卫星是我国第一颗高分辨率对地观测系统的卫星^[11]。该卫星所搭载的多光谱相机分辨率为 16 m,其波段范围包括蓝、绿、红、近红外波段和一个全色波段^[12]。目前很多水体提取方法中所用到的波段以蓝、绿、红、近红外波段为主,因此高分一号卫星可以很好地应用于水体提取领域。周婷等^[13]基于归一化差分水体指数(normalized difference water index, NDWI)并结合 SVM 算法对巢湖进行水体提取分析;范亚洲等^[14]在最大类间方差法的基础上,以 NDWI 多波段指数作为提取的依据,提出了迭代处理的改进方法;吴杰等^[15]在最大类间方差迭代法的基础上应用连通区域标记的方法提取最大连通区域作为水库面积范围,从而有效地去除了提取的噪点。通过最大类间方差迭代结合连通区域标记的方法可以非常有效地提取大部分水利工程的水体面积数据,但如果遇到影像范围内个别水利工程水体范围为多段不连续的特殊情况或需要在同一张影像中提取多个水利工程水体时,通过最大类间方差迭代并标记连通区域的方法所得到的效果可能不太理想。因此,本文以高分一号卫星遥感影像为数据基础,选取东方红水库为研究对象,分别采用单波段阈值法、两波段差值法、波段比值法、NDWI 法、归一化差分植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)法^[16-25]共 5 种水陆像元度量方法,分别用平均值法和最大类间方差迭代法选取阈值,对东方红水库进行水体信息提取,并比较分析这些方法的提取结果,探索最大类间方差迭代思路在水体提取变量上的改进,以期在不用预先分析水利工程分布及其水体面积轮廓的情况下降低噪点。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

安徽省黄山市屯溪流域的东方红水库是一个综合利用的中型水利枢纽工程,安徽省重点中型水库,总库容为 2 245 万 m³,坝址以上集水面积为 60.0 km²,集水区域范围为 117.93°N~118.04°N、29.97°E~30.08°E(图 1)。东方红水库集水区域内,水库上游的主要河流为东亭河和养栈河。

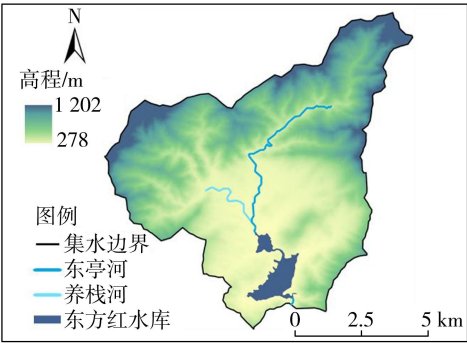


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of research area

1.2 数据来源

通过安徽省水信息系统网站(http://yc.wswj.net/ahsxx/LOL/?refer=upl&to=public_public)及安徽省水文局提供的屯溪流域水利工程资料,统计得到东方红水库水位、蓄水量、水体面积等特征数据,如表 1 所示。

表 1 东方红水库特征数据

Table 1 Characteristic data of Dongfanghong Reservoir

水位/m	蓄水量/ 亿 m ³	水体面积/ km ²	水位/m	蓄水量/ 亿 m ³	水体面积/ km ²
289.0	0.1100	1.61	293.0	0.1908	2.26
289.5	0.1189	1.68	293.5	0.2027	2.36
290.0	0.1278	1.76	294.0	0.2145	2.46
290.5	0.1376	1.84	294.5	0.2278	2.57
291.0	0.1475	1.92	295.0	0.2410	2.69
291.5	0.1580	2.00	295.5	0.2555	2.80
292.0	0.1685	2.09	296.0	0.2700	2.90
292.5	0.1797	2.17	296.6	0.2900	3.08

高分一号卫星遥感影像数据通过中国资源卫星应用中心网站(<https://www.cresda.com/zgzywxxyz/index.html>)下载得到。本文根据所采用的卫星遥感影像日期,查询到对应的水库水位数据并通过拟合关系进行换算,从而得到水库的水体面积。遥感影像信息及对应的东方红水库水位、水体面积如表 2 所示。

2 研究方法

2.1 高分一号遥感影像的预处理

本文所用的高分一号遥感影像均为 L1A 级产品,影像容易受到卫星传感器本身、大气、邻近地物等因素的干扰。在使用这些影像之前,需要经过辐射定标、大气校正、正射校正、几何配准以及研究区裁剪等预处理操作后方可使用,预处理方法见文献^[14]。

2.2 水陆像元度量方法

a. 单波段阈值法。将影像中的近红外波段光

谱值 B_{Nir} 作为分析变量,满足:

$$B_{\text{Nir}} < T_{\text{S}} \tag{1}$$

表 2 高分一号遥感影像相关信息

Table 2 Related information to GF-1 satellite images

景号	传感器	太阳高度角/(°)	太阳方位角/(°)	云量/%	水位/m	面积/km ²
20140118	WFOV2	37.1464	158.365	0	285.98	0.97
20141015	WFOV1	50.2403	161.459	0	288.10	1.38
20141020	WFOV4	49.1001	170.336	0	287.73	1.31
20141023	WFOV1	47.3511	161.960	0	287.69	1.30
20150831	WFOV2	66.8753	150.116	9	291.20	1.97
20151015	WFOV1	51.2174	167.036	0	289.87	1.71
20151020	WFOV4	49.4904	174.730	1	289.52	1.65
20151023	WFOV1	48.0436	165.546	1	289.58	1.66
20161111	WFOV1	41.8504	167.133	0	289.09	1.57
20161128	WFOV1	38.4654	170.642	0	289.37	1.62
20170413	WFOV4	68.1737	163.591	0	290.10	1.76
20170429	WFOV2	73.0916	148.982	0	289.73	1.69
20170511	WFOV1	75.4141	141.247	9	289.87	1.71
20171103	WFOV1	44.2272	166.516	0	289.60	1.66
20171219	WFOV4	35.9559	172.130	0	288.66	1.48
20171222	WFOV1	35.4304	165.017	0	288.68	1.49

式中 T_{S} 为单波段阈值法提取水体的阈值。遥感影像中 B_{Nir} 小于 T_{S} 的区域认定为水体,否则为非水体。

b. 两波段差值法。该方法提取水体的变量有两个,需要设定两个阈值,满足:

$$\begin{cases} B_{\text{R}} - B_{\text{Nir}} > T_{\text{D1}} \\ B_{\text{Nir}} < T_{\text{D2}} \end{cases} \tag{2}$$

式中 T_{D1} 、 T_{D2} 为两波段差值法中所设定的两个阈值。当对应波段计算结果同时满足上述两个不等式时,则为水体,若无法同时满足,则为非水体。

c. 波段比值法。将遥感影像中某两个波段的比值作为提取水体的变量,通常利用绿光波段和近红外波段光谱值的比值,满足:

$$B_{\text{G}}/B_{\text{Nir}} \geq T_{\text{R}} \tag{3}$$

式中: B_{G} 为绿光波段光谱值; T_{R} 为波段比值法提取水体的阈值。遥感影像中比值不小于 T_{R} 的区域认定为水体,否则为非水体。

d. NDWI 法。考虑绿光和近红外波段光谱值,NDWI 法计算公式为

$$I_{\text{NDW}} = (B_{\text{G}} - B_{\text{Nir}})/(B_{\text{G}} + B_{\text{Nir}}) \geq T_{\text{NDW}} \tag{4}$$

式中: I_{NDW} 为 NDWI 值; T_{NDW} 为 NDWI 法的阈值。 I_{NDW} 值不小于阈值的区域为水体,反之则为非水体。

e. NDVI 法。考虑近红外波段和红光波段光谱值,NDVI 法计算公式为

$$I_{\text{NDV}} = (B_{\text{Nir}} - B_{\text{R}})/(B_{\text{Nir}} + B_{\text{R}}) \leq T_{\text{NDV}} \tag{5}$$

式中: I_{NDV} 为 NDVI 值; B_{R} 为红光波段光谱值; T_{NDV} 为 NDVI 法的阈值。一般情况下,植被覆盖率越高的地方 I_{NDV} 就越大,岩石和裸土区域的 I_{NDV} 接近于 0,而水体区域的 I_{NDV} 往往小于 0^[26-27]。 I_{NDV} 值不大于

阈值的区域为水体,反之为非水体。

2.3 阈值选取方法

a. 平均值法。在一定的阈值取值范围内按某一方法遍历提取水体信息,计算提取结果与实测水体面积的相对误差,选择某一阈值,使得该阈值下各影像提取的水体面积平均相对误差最小,此阈值即为选取结果。

b. 最大类间方差迭代法。最大类间方差法由 Ostu 提出,该方法在高分一号卫星遥感影像上使用时需要先建立灰度图像,按照某一阈值将图像划分为两部分,分别认定为前景和背景。图像上两部分的划分效果通过它们之间的类间方差来衡量,该值越大说明划分得越好,反之则说明错分、漏分的概率越大。前景与背景之间的类间方差计算公式为

$$G = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2 \tag{6}$$

式中: G 为前景和背景间的类间方差; ω_0 为前景像元数在影像中所占比例; ω_1 为背景像元数在影像中所占比例; μ_0 为前景的平均灰度值; μ_1 为背景的平均灰度值; μ 为整个影像的平均灰度值。

影像类间方差随阈值分布曲线的最高峰往往无法与影像误差随阈值分布曲线的最低谷对应,所以单纯使用最大类间方差法还是会有漏提或者误提的情况出现。最大类间方差迭代法^[14]的思路是在最大类间方差法的基础上应用形态学膨胀算法对初步提取到的水体进行膨胀计算,得到一定范围的缓冲区,从而进行最大类间方差法提取;得到提取结果后再以提取结果为基础再次膨胀提取,进行多次迭代,选取两次迭代之间面积差绝对值最小的结果为最终

结果。

2.4 改进的最大类间方差联合水体提取法

最大类间方差迭代法可以通过多次改变提取范围从而改进影像类间方差随阈值的分布曲线,使最高峰位置尽可能与误差分布曲线的低谷接近并缩小噪点的面积。但噪点区域也会经历膨胀算法成为新的缓冲区范围,所以迭代过程中很难将误提的噪点去除。当提取范围内只有一个水库需要提取,水库水体轮廓已经大致确定,并且提取对象为单一连通的形状时,通过连通区域标记^[15]只提取最大面积的区域可以有效地去除噪点,对精度的提升效果明显。但如果上述前提不满足或者遇到某个噪点面积超过提取对象水体面积的极端情况时,连通区域标记的方法容易出现较大偏差。因此,本文在分析多种水体提取方法结果的基础上,提出了一种将 NDWI 法、NDVI 法、波段比值法、单波段阈值法、两波段差值法 5 种方法结合,并应用最大类间方差迭代法选取阈值的联合水体提取方法,该方法的水体提取流程如图 2 所示。在各方法提取图像对比中发现,选择不同的水体提取变量经最大类间方差迭代法提取成果中噪点的分布有所不同,改进后的方法先用 NDVI 法、波段比值法、单波段阈值法、两波段差值法 4 种方法,结合最大类间方差迭代法划定阈值,对预处理后的卫星遥感影像分别进行水体信息的初步提取。4 种方法提取得到的栅格赋上 1 的数值标签,没有

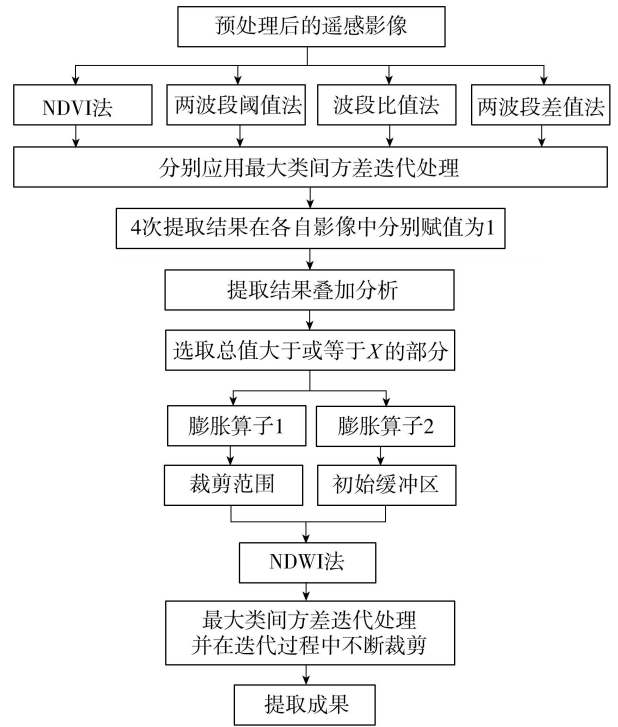


图 2 改进的最大类间方差联合水体提取法流程
Fig. 2 Improved maximum inter-class variance joint water extraction process

提取到水体的部分统一标为 0。然后将 4 种提取结果相同位置栅格上的标签进行叠加,划定某一个阈值 X 并将叠加结果大于或等于 X 的部分选取出来(本文在提取过程中 X 值选为 3)。这样所得的结果可以有效去除一部分的噪点,但可能会比实际水体面积偏小,因此将其用较小的膨胀算子进行形态学膨胀得到一个用于后续裁剪的范围。与此同时,再用另一个相对较大的膨胀算子对其进行形态学膨胀得到缓冲区,最终采用 NDWI 法经最大类间方差迭代法进行处理,并且每次迭代提取的结果都用裁剪范围进行裁剪,多次迭代后得到最终结果。

3 结果与分析

3.1 两种阈值选取方法的提取成果

分别使用 NDWI 法、NDVI 法、单波段阈值法、波段比值法、两波段差值对高分一号 2014—2017 年中抽取的 16 张卫星遥感影像进行水体提取,每张影像在应用各提取方法时,其提取阈值通过在一定范围内遍历提取。计算结果表明,NDWI 法的阈值为 -0.11 ;NDVI 法的阈值为 0.17 ;单波段阈值法的阈值为 $1\ 100$;波段比值法的阈值为 0.81 ;差值法的阈值为 -340 和 $3\ 000$,按照这些阈值提取的水体信息结果如表 3 所示。

先以平均值法的阈值选取结果为基础,对遥感影像进行初步提取,再应用形态学膨胀算法对其结果范围进行膨胀计算,从而适当扩大范围,用作进一步遍历计算类间方差的基础。经过多次计算比较,膨胀算子的选取除单波段法为 15×15 外,其余 4 种方法均为 30×30 。在经过膨胀计算得到的缓冲区范围内,灰度转换公式以每种方法的计算变量为基础,将阈值从最小灰度遍历到最大灰度,计算每次结果的类间方差,并选取类间方差最大的为提取结果。其中,两波段差值法因具有两个阈值,故而先用红外波段 B_{Nir} 进行初步提取,再以 $B_R - B_{Nir}$ 为基础转化为灰度并进行遍历计算。按照最大类间方差迭代法选取阈值提取的水体成果如表 3 所示。在采用最大类间方差迭代法选取阈值的情况下,不同水体提取方法处理得到的水体面积中 NDWI 法与 NDVI 法的提取成果最为接近,与另外 3 种方法提取成果的噪点分布和面积均有较大差异。

分别采用平均值法和最大类间方差迭代法选取阈值提取水体,其结果的平均相对误差以及与参考值的趋势线拟合决定系数 R^2 如表 4 所示。由表 4 可见,在相同的水体提取方法中,相比于平均值法选取阈值而言,采用最大类间方差迭代法可以有效提升水体提取的精度。单纯通过多张影像提取结果选取平

均水平的阈值,虽然部分影像水体提取较为准确,但其提取精度并不稳定,非常容易出现相对误差很大或者很小的情况。此外,平均值法选取阈值时,虽

表 3 两种阈值选取方法的水体提取面积

Table 3 Water extraction area of two threshold selection methods

单位:km²
unit: km²

景号	参考值	平均值法					最大类间方差迭代法				
		NDWI 法	NDVI 法	波段比值法	单波段 阈值法	两波段 差值法	NDWI 法	NDVI 法	波段比值法	单波段 阈值法	两波段 差值法
20140118	0.97	1.42	1.49	1.38	0.76	1.21	1.17	1.13	1.20	1.12	1.00
20141015	1.38	1.39	1.37	1.38	1.49	1.43	1.43	1.37	1.31	1.52	1.41
20141020	1.31	1.34	1.29	1.33	1.32	1.31	1.32	1.27	1.25	1.33	1.20
20141023	1.30	1.23	1.20	1.22	1.41	1.29	1.34	1.27	1.25	1.47	1.33
20150831	1.97	1.57	1.54	1.56	1.55	1.53	2.12	1.99	2.10	1.90	1.60
20151015	1.71	1.55	1.58	1.54	1.78	1.62	1.74	1.69	1.56	1.80	1.66
20151020	1.65	1.42	1.38	1.41	1.68	1.46	1.52	1.47	1.41	1.62	1.46
20151023	1.66	1.50	1.44	1.50	1.80	1.56	1.56	1.52	1.47	1.78	1.61
20161111	1.57	1.51	1.54	1.51	1.69	1.58	1.69	1.59	1.51	1.79	1.53
20161128	1.62	1.54	1.54	1.53	1.78	1.61	1.64	1.59	1.51	1.83	1.57
20170413	1.76	1.22	1.21	1.22	1.23	1.27	1.82	1.57	1.79	1.43	1.29
20170429	1.69	1.47	1.43	1.46	1.62	1.49	1.92	1.86	1.76	1.74	1.58
20170511	1.71	1.30	1.41	1.30	1.67	1.49	1.98	1.84	1.97	1.84	1.66
20171103	1.66	1.53	1.51	1.53	1.74	1.57	1.61	1.59	1.52	1.81	1.59
20171219	1.48	1.47	1.46	1.47	2.07	1.60	1.43	1.40	1.39	1.66	1.39
20171222	1.49	1.56	1.61	1.55	1.75	1.66	1.50	1.50	1.44	1.75	1.51

然各水体提取方法平均相对误差能控制在 15% 以内,但提取结果与实测值间的 R^2 很低,相比较之下采用最大类间方差迭代法的 R^2 得到了明显的提升。

表 4 两种阈值选取方法的提取效果

Table 4 Extraction effect of two threshold selection methods

水体提取法	平均值法		最大类间方差迭代法	
	平均相对误差/%	R^2	平均相对误差/%	R^2
NDWI 法	12.35	0.0860	6.20	0.8040
NDVI 法	13.25	0.0413	5.37	0.8019
波段比值法	12.19	0.1216	7.97	0.7058
单波段阈值法	11.92	0.3063	9.54	0.6381
两波段差值法	9.56	0.2871	6.59	0.6367

3.2 改进的最大类间方差联合水体提取法提取成果

改进的最大类间方差联合水体提取法所用的膨胀算子 1 为 4×4 (用于裁剪区域),膨胀算子 2 为 30×30 (用于缓冲区),利用该方法提取的水体图像如图 3 所示。

将最大类间方差迭代法选取阈值下 5 种水体提取方法与改进的最大类间方差联合水体提取法提取结果进行对比分析,得到 R^2 和平均相对误差见表 5。由表 5 可见,改进的最大类间方差联合水体提取法可以进一步提高水体提取的精度,其平均相对误差为 4.69%, R^2 为 0.8579,相比于改进之前, R^2 提升了 0.0539,平均相对误差下降了 0.68%。

在采用最大类间方差迭代法选取阈值的各水体提取方法中,NDWI 法水体提取结果与参考值的趋势线拟合 R^2 最大,为 0.8040。将用最大类间方差迭

代法选取阈值的 NDWI 法与改进的最大类间方差联合水体提取法的提取成果进行对比,结果见表 6。

表 5 改进前后各方法 R^2 与平均相对误差对比

Table 5 Comparison of R^2 and mean relative error before and after improvement

提取方法	平均相对误差/%	R^2
最大类间方差联合提取法	4.69	0.8579
最大类间方差迭代 NDWI 法	6.20	0.8040
最大类间方差迭代 NDVI 法	5.37	0.8019
最大类间方差迭代波段比值法	7.97	0.7058
最大类间方差迭代单波段阈值法	9.54	0.6381
最大类间方差迭代两波段差值法	6.59	0.6367

利用改进的最大类间方差联合水体提取法中的叠置分析可以有效地去除大部分噪点,并为后续的 NDWI 法提供较为合适的初始缓冲区范围。图 4 为改进的最大类间方差联合水体提取法与最大类间方差迭代 NDWI 法提取图像部分结果对比,从图中可以看出经改进的最大类间方差联合水体提取法处理得到的结果影像中噪点量明显减少。

4 结 论

a. NDWI 法、NDVI 法、波段比值法、单波段阈值法、差值法 5 种水陆像元度量方法最佳阈值的时间稳定性较低,在处理多张影像的情况下,采用平均值法选取阈值的精度不稳定。在采用平均值法选取阈值的情况下,5 种水体提取方法的提取成果 R^2 最高仅为 0.3063,平均相对误差最低为 9.56%。

b. 与平均值法相比,最大类间方差迭代法可以

更加稳定地提取水体,使得提取精度得到明显提高;法和 NDVI 法的水体提取精度相对较高,其余 3 种采用最大类间方差迭代法选取阈值的情况下,NDWI 水体提取方法的精度相对较低。采用最大类间

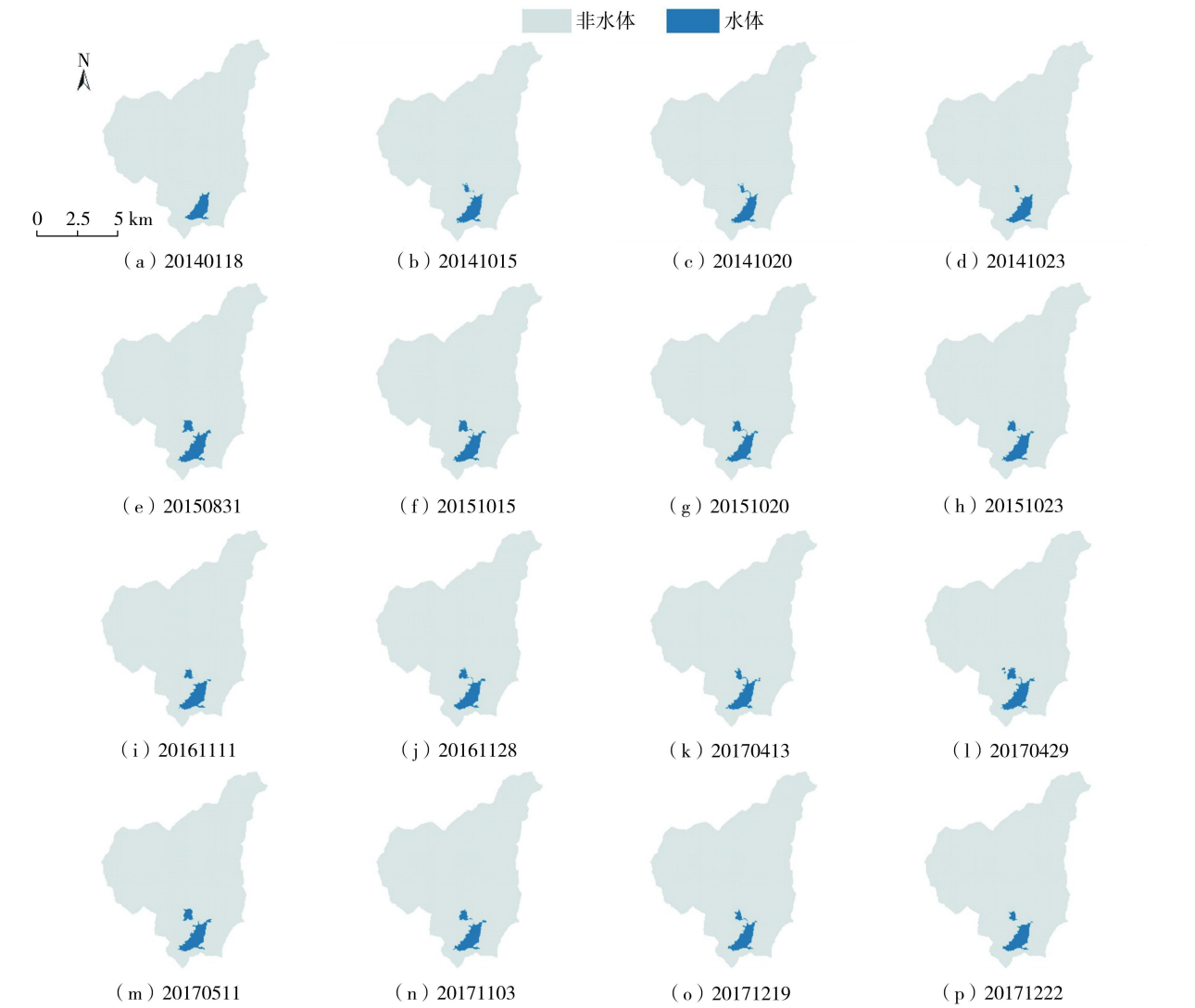


图 3 改进的最大类间方差联合水体提取法提取成果

Fig. 3 Extraction results of improved maximum inter-class variance joint water extraction method

表 6 改进的最大类间方差联合水体提取法与最大类间方差迭代 NDWI 法提取成果

Table 6 Extraction results of improved maximum inter-class variance joint water extraction method and maximum inter-class variance iterative NDWI method

景号	参考值/km ²	最大类间方差迭代 NDWI 法		改进的最大类间方差联合水体提取法	
		计算值/km ²	相对误差/%	计算值/km ²	相对误差/%
20140118	0.97	1.17	19.90	1.14	16.67
20141015	1.38	1.43	3.66	1.40	1.61
20141020	1.31	1.32	1.05	1.30	-0.60
20141023	1.30	1.34	2.88	1.32	1.52
20150831	1.97	2.12	7.59	1.82	-7.72
20151015	1.71	1.74	1.31	1.67	-2.81
20151020	1.65	1.52	-7.70	1.51	-8.45
20151023	1.66	1.56	-5.80	1.55	-6.61
20161111	1.57	1.69	8.23	1.60	2.22
20161128	1.62	1.64	1.02	1.60	-1.13
20170413	1.76	1.82	3.27	1.52	-13.76
20170429	1.69	1.92	13.77	1.72	1.83
20170511	1.71	1.98	15.37	1.75	2.25
20171103	1.66	1.61	-3.12	1.61	-3.45

20171219	1.48	1.43	-3.88	1.42	-4.26
20171222	1.49	1.50	0.60	1.49	0.23

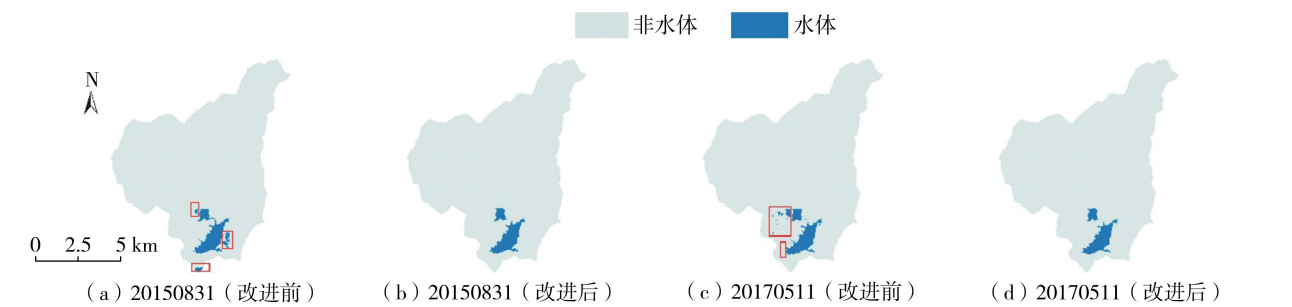


图 4 改进的最大类间方差联合水体提取法与最大类间方差迭代 NDWI 法部分提取成果

Fig. 4 Partial extraction results of improved maximum inter-class variance joint water extraction method and maximum inter-class variance iterative NDWI method

方差迭代法选取阈值的情况下,5 种水体提取方法的提取成果 R^2 最高可达到 0.804 0,平均相对误差最低为 5.37%,但仍无法有效去除影像提取的噪点。

c. 改进的最大类间方差联合水体提取法增加了多种水体提取变量结果叠置分析的处理,可以很好地降低影像提取中产生的噪点,提高水体提取的精度。改进的最大类间方差联合水体提取法提取成果的 R^2 为 0.857 9,平均相对误差为 4.69%,相比于改进之前的 R^2 提升了 0.053 9,平均相对误差下降了 0.68%。

参考文献:

[1] 郇晓曼,仲臣. Landsat-8 遥感影像不同水体提取方法适用性分析[J]. 黑龙江工程学院学报,2021,35(4):1-5. (TAI Xiaoman,ZHONG Chen. Applicability analysis of different water extraction methods from Landsat-8 remote sensing images[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology,2021,35(4):1-5. (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] CHEN F,CHEN X,VAN DE VOORDE T, et al. Open water detection in urban environments using high spatial resolution remote sensing imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2020,242:111706.

[4] 赵金龙,李剑萍,李万春. 基于 WEU-Net 模型的贺兰山东麓滞洪区水体信息提取[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):18-26. (ZHAO Jinlong,LI Jianping, LI Wanchun. Water body information extraction for flood detention area in the eastern foot of Helan Mountain based on WEU-Net model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):18-26. (in Chinese))

[5] JIN S, LIU Y, FAGHERAZZI S, et al. River body extraction from sentinel-2A/B MSI images based on an

adaptive multi-scale region growth method[J]. Remote Sensing of Environment,2021,255:112297.

[6] 查力,宫辉力,胡卓玮,等. 高分影像水体信息提取对比研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2015,36(4):85-89. (ZHA Li,GONG Huili,HU Zhuowei, et al. The comparative research of water extraction based on high resolution imagery[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2015,36(4):85-89. (in Chinese))

[7] 周斌,李航,李晶,等. 高分一号遥感数据的水体面积监测[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(9):13-16. (ZHOU Bin,LI Hang,LI Jing, et al. Water body area monitoring based on GF-1 remote sensing data[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022,45(9):13-16. (in Chinese))

[8] 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.

[9] 郑心玥,郭青霞. 基于 GF-1 号遥感影像的微小水体信息提取研究:以岔口流域为例[J]. 湖北农业科学, 2021,60(5):131-137. (ZHENG Xinyue,GUO Qingxia. Research on information extraction of small water body based on GF-1 remote sensing image: take Chakou watershed as an example[J]. Hubei Agricultural Sciences,2021,60(5):131-137. (in Chinese))

[10] 付伟锋,张福友,李慧,等. 基于 GF-1B 遥感影像的水库水体提取方法研究[J]. 水利技术监督,2022(12):83-86. (FU Weifeng,ZHANG Fuyou,LI Hui, et al. Analysis of reservoir water body extraction method based on GF-1B remote sensing image[J]. Technical Supervision in Water Resources,2022(12):83-86. (in Chinese))

[11] 赵海峰,徐伟,王志飞,等. 高分一号卫星电源分系统设计与在轨应用[J]. 电源技术,2022,46(10):1192-1194. (ZHAO Haifeng,XU Wei,WANG Zhifei, et al. Design and in-orbit application of power subsystem for GF-1 satellite[J]. Chinese Journal of Power Sources,2022,46

- (10):1192-1194. (in Chinese))
- [12] 黄汝根,孙祥鹏,牟舵.基于“高分一号”遥感影像水体提取方法的对比分析[J].人民珠江,2017,38(3):66-70. (HUANG Rugen, SUN Xiangpeng, MU Duo. Comparison and analysis of water extraction methods in Guangzhou city using GF-1 [J]. Pearl River, 2017, 38 (3):66-70. (in Chinese))
- [13] 周婷,汪炎,邹俊,等.基于PCA和SVM的遥感影像水体提取方法及验证[J].水资源保护,2023,39(2):180-189. (ZHOU Ting, WANG Yan, ZOU Jun, et al. PCA and SVM-based algorithm of water area extraction from remote sensing images and its verification [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):180-189. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 吴杰,董小涛,张珂,等.基于高分一号卫星数据的库区淹没频率分析方法[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):9-14. (WU Jie, DONG Xiaotao, ZHANG Ke, et al. An analysis method of reservoir inundation frequency based on GF-1 satellite data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5):9-14. (in Chinese))
- [16] 刘宝康,王仁军,黄炳婷,等.基于高分一号WFV数据的哈拉湖水体识别模型研究[J].地理信息世界,2020,27(6):69-74. (LIU Baokang, WANG Renjun, HUANG Bingting, et al. A water identification model of Hala Lake based on GF1-WFV data [J]. Geomatics World, 2020, 27 (6):69-74. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 陆家驹,李士鸿.TM资料水体识别技术的改进[J].环境遥感,1992(1):17-23. (LU Jiaju, LI Shihong. Improvement of the techniques for distinguishing water bodies from TM data [J]. Remote Sensing of Environment China, 1992(1):17-23. (in Chinese))
- [19] 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,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]. Geo-Information Science, 2008, 10 (5): 663-669. (in Chinese))
- [20] 邓劲松,王珂,邓艳华,等.SPOT-5卫星影像中水体信息自动提取的一种有效方法[J].上海交通大学学报(农业科学版),2005,23(2):198-201. (DENG Jinsong, WANG Ke, DENG Yanhua, et al. An effective way for automatically extracting water body information from SPOT-5 images [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2005, 23 (2):198-201. (in Chinese))
- [21] 王培培.基于ETM影像的水体信息自动提取与分类研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2009,30(6):75-79. (WANG Peipei. Automatic extraction and classification of water body from ETM image [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2009, 30(6):75-79. (in Chinese))
- [22] YANG X, ZHAO S, QIN X, et al. Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening [J]. Remote Sensing, 2017, 9(6):596.
- [23] 谢志钢.大伙房水库水体精确提取及变化检测[J].东北水利水电,2019,37(6):21-24. (XIE Zhigang. Accurately extraction and variation detection of water body for Dahuofang reservoir [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2019, 37(6):21-24. (in Chinese))
- [24] 汪金花,张永彬,孔改红.谱间关系法在水体特征提取中的应用[J].矿山测量,2004(4):30-32. (WANG Jinhua, ZHANG Yongbin, KONG Gaihong. Application of spectro-photometric method in extracting the water characteristics [J]. Mine Surveying, 2004 (4):30-32. (in Chinese))
- [25] 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))
- [26] 赵哲,况润元,廖启卿.基于Landsat 8影像的赣抚尾间区水体提取研究[J].测绘地理信息,2019,44(2):97-100. (ZHAO Zhe, KUANG Runyuan, LIAO Qiqing. Study on the water extraction based on Landsat 8 Imagery in the area of Tail-Streams of Gan River and Fu River [J]. Journal of Geomatics, 2019, 44(2):97-100. (in Chinese))
- [27] 杨果果,高原,周蕾.水体信息遥感自动提取与演变分析:以南京城区为例[J].测绘与空间地理信息,2016,39(10):35-39. (YANG Guoguo, GANG Yuan, ZHOU Lei. Automatically remote sensing information extraction of water body and evolution analysis: taking Nanjing City as an example [J]. Geomatics & Spatial Information