

引用格式:李健锋,叶虎平,张宗科,等.基于 Landsat 影像的斯里兰卡内陆湖库水体时空变化分析[J].地球信息科学学报,2019,21(5):781-788. [Li J F, Ye H P, Zhang Z K, et al. Spatiotemporal change analysis of Sri Lanka Inland water based on landsat imagery[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(5):781-788.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180643.

基于 Landsat 影像的斯里兰卡内陆湖库水体时空变化分析

李健锋^{1,2,3}, 叶虎平^{2,3,5*}, 张宗科^{2,3}, 孔金玲¹, 魏显虎^{2,3}, Somasundaram Deepakrishna^{2,3,4}, 王法溧^{2,3,4}

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 3. 中国科学院中国—斯里兰卡水技术研究与示范联合中心, 北京 100085; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

Spatiotemporal Change Analysis of Sri Lanka Inland Water based on Landsat Imagery

LI Jianfeng^{1,2,3}, YE Huping^{2,3,5*}, ZHANG Zongke^{2,3}, KONG Jinling¹, WEI Xianhu^{2,3}, SOMASUNDARAM Deepakrishna^{2,3,4}, WANG Fali^{2,3,4}

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. China-Sri Lanka Joint Research and Demonstration Center for Water Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Sri Lanka is an important node on the Maritime Silk Road, where rainfall is abundant in quantity but uneven in terms of spatiotemporal distribution. There is obvious seasonal water shortage. Monitoring the changes of water cover area in inland lakes and reservoirs is important for guiding the development and utilization of water resources. To understand the spatial distribution characteristics and temporal variations of lakes and reservoirs in Sri Lanka, this paper, based on Landsat series imagery, analyzed and compared the precision of different water extraction models on the images, following which the optimal algorithm was determined. A typical reservoir was chosen to analyze the interannual and monthly variations of the water cover sizes. The optimal water extraction algorithm was applied to the inland lakes and reservoirs in 1995, 2005, and 2015. Lakes and reservoirs were divided into four grades by area. The number and area of lakes and reservoirs of different grades in each year were counted, and their spatiotemporal variation characteristics were examined. Conclusions can be made according to the results as the following statements: (1) The water body extraction model based on the Normalized Difference Water Index (NDWI) with threshold value from the Otsu method

收稿日期:2018-12-06;修回日期:2019-02-21.

基金项目:中国科学院中国—斯里兰卡水技术研究与示范联合中心项目,中国科学院中国-斯里兰卡联合科教中心;中国科学院战略性先导科技专项(XDA2003030202);国家发改委财政专项(2017ST000602)。[**Foundation items:** China-Sri Lanka Joint Research and Demonstration Center for Water Technology, China-Sri Lanka Joint Center for Education and Research, Chinese Academy of Sciences; The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.Xda2003030202; State Development And Reform Commission's Special Financial Projects, No.2017ST000602.]

作者简介:李健锋(1994-),男,陕西富平人,硕士生,主要研究方向为定量遥感。E-mail: ljf_chd@163.com

*通讯作者:叶虎平(1983-),男,浙江义乌人,博士,助理研究员,主要研究方向为水色遥感与水体光学模型。

E-mail: yehp@radi.ac.cn

(OTSU) had the best accuracy and was suitable for the water body extraction in Sri Lanka. The overall classification accuracy is above 97% and it has the lowest mis-extraction rate and the missing rate. (2) The water cover area of typical reservoir showed a fluctuatingly increase trend in Augusts from 1988 to 2018. The smallest water cover area occurred in 1992, and the largest was in 2013. The water cover area of reservoir was also of large intra-annual fluctuations. In 2017, the biggest water cover area appeared in February, while the smallest appeared in September, with a discrepancy of 2.24 times between the cover area in February and September, exactly the ends of local rainy season and dry season, respectively. (3) From 1995 to 2015, the number and area of lakes and reservoirs of different grades increased to some extent, and the trend of lake and reservoir water resources was increasing. Findings of the research will provide necessary data support for the management and planning of soil and water resources in Sri Lanka.

Key words: Sri Lanka; lakes and reservoirs; Maritime Silk Road; water body extraction; spatiotemporal change; OTSU

***Corresponding author:** YE Huping, E-mail: yehp@radi.ac.cn

摘要:斯里兰卡是海上丝绸之路沿线重要节点,降雨量丰富但时空分布不均匀,存在明显季节性缺水,其内陆湖库水体面积变化监测对水资源开发利用具有重要指导作用。为了解斯里兰卡湖库水体空间分布特征与时间变化规律,本文基于 Landsat 系列影像数据,对比分析不同水体提取模型在影像上的水体提取精度,确定最优算法;选取典型湖库分析其面积年际和年内的动态变化特征。以 1995、2005 和 2015 年为基准研究年份,采用最优水体提取模型对全岛内陆湖库水体进行提取,利用面积将湖库分为 4 个等级,统计各年份不同等级湖库的数量和面积数据,分析其时空变化特征。研究结果表明:① 基于大津法(OTSU)的归一化水体指数(NDWI)水体提取模型提取水体的精度最高,总体精度在 97% 以上,误提率和漏提率最低,适合于斯里兰卡地区水体的提取;② 1988–2018 年同期 8 月的典型水库面积总体呈现波动增加的趋势,1992 年水库面积最小,2013 年水库面积最大;水库面积年内变化较大,其中 2017 年最大面积出现在 2 月,最小出现在 9 月,与雨季和旱季结束月份基本一致,且 2 月面积是 9 月面积的 2.24 倍;③ 1995–2015 年同期,斯里兰卡全国 4 个等级湖库的数量和面积不同幅度的增加,湖库水体资源量呈递增的趋势。研究结果可为斯里兰卡水土资源优化配置及水资源管理与规划提供科学依据。

关键词:斯里兰卡;湖库;海上丝绸之路;水体提取;时空变化;大津法(OTSU)

1 引言

斯里兰卡是“一带一路”尤其是“21 世纪海上丝绸之路”的重要参与国,其作为连接亚-非-欧海上航路的枢纽,具有重要的经济及地理意义。斯里兰卡属于热带季风性气候,由于中部的高山挡住了暖湿的西南季风,全国只有西南部分地区因锋面雨而形成湿润区(Wet Zone),大部分地区为干旱(Dry Zone)或半干旱区(Intermediate Zone)^[1]。干旱区内有明显的旱季与雨季,岛内水资源时空分布很不均衡,季节性缺水十分严重,地表水体面积变化波动性较大,水污染严重,存在较为严重的水源性疾病^[2]。因此,研究斯里兰卡内陆湖库水体的时空变化具有重要的意义,可为该国水资源保护、管理与规划提供科学依据。

自 20 世纪七八十年代起,遥感技术已经开始应用于地表水体的动态监测^[3-7]。与传统测量方法相比,遥感可提供实时的、动态的以及低成本的水体影像信息^[8]。然而,斯里兰卡属于热带地区岛国,温

度高且蒸发量大,近中午前后常形成各种云,致使对地观测卫星过境影像常年受云雾覆盖及云阴影影响,高质量覆盖陆地的有效影像或影像中无云的有效部分相对较少。Landsat 卫星系列由美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)于 1972 年发布,已运行 40 多年,积累了丰富的遥感存档数据,主要包括了 Landsat 1-3 MSS、Landsat 4-5 TM、Landsat 7 ETM+ 和 Landsat 8 OLI,具备较短时段、重复覆盖同一地区的能力^[9],可应用于水体的时空变化分析^[10]。近年来,针对不同传感器数据提取水体,国内外学者开展了广泛的研究。Bartolucci 等^[11]提出,近红外波段是提取水体信息的最佳波段。周成虎等^[12]研究发现,TM 影像中水体具有独特的谱间关系特征,即: $(TM2+TM3) > (TM4+TM5)$,该方法特别适合山区水体的提取;Mcfeeters 等^[13]基于归一化植被指数(NDVI)提出了归一化水体指数(NDWI)提取模型;徐涵秋等^[14]在 NDWI 基础上提出改进的归一化水体指数(MNDWI),尤其在城市

水体提取方面,MNDWI表现出了较高的精度,解决了水体提取中难以消除阴影的难题;闫霁等^[15]提出增强型水体指数(EWI),并结合GIS技术有效地提取半干旱地区的水系信息。在所有的水体提取方法中,水体指数法最为有效,具有高效和高精度的特点^[16]。一般情况下,为了从NDWI或MNDWI图像中提取水体,阈值往往设为0^[13-14],即NDWI或MNDWI图像大于0的像素被认为是水体。然而在实际应用中,不同传感器的多光谱图像在不同的地区和不同的时间具有不同的特点,特别是在斯里兰卡地区,水环境复杂,水体指数法的阈值普遍低于0,阈值的确定对提取结果有重要的影响。因此,水体指数法阈值的确定应根据每幅影像本身的特征来确定。大津法(OTSU)^[17]是一种被广泛应用的动态阈值确定方法,旨在最大化类方差,不受图像亮度和对比度的影响^[16],可实现每景影像阈值的动态确定。

本文以斯里兰卡全岛为研究区,选取Landsat系列卫星影像为分析数据源,通过对覆盖斯里兰卡东部和北部地区的两景Landsat8 OLI影像进行水体提取,对比分析了采用大津法(OTSU)确定阈值的水体指数(NDWI、MNDWI、EWI)提取算法、近红外(NIR)波段阈值法与最大似然监督分类法的提取精度;基于Landsat时间序列数据,分析典型湖库年际和年内的动态变化特征;以1995、2005和2015年为基准研究年份,分析斯里兰卡内陆湖泊水库(简称湖库)水体的时空变化。

2 研究区概况、数据源及研究方法

2.1 研究区概况

斯里兰卡是印度洋上的岛国,位于5°55'N-9°50'N,79°42'-81°53'E之间,在南亚次大陆南端,西北隔保克海峡与印度半岛相望。南北长432 km,东西宽224 km,国土面积为65 610 km²。平均年降雨量从东南海岸的不到1000 mm到高原西部斜坡的4500 mm以上。在季风季节,湿润地带(岛的西南角)1月和2月有一个短暂的旱季,余下的季节雨量充足。在干旱区(岛的北部,东部和东南部),有明显的湿润(10月至次年2月)和干燥季节。图1为斯里兰卡Landsat8 OLI 5、4、3波段遥感影像。

2.2 数据来源及处理

本文采用的数据包含Landsat 4-5 TM和Landsat 8 OLI数据共48景,其中用于水体提取算法比较

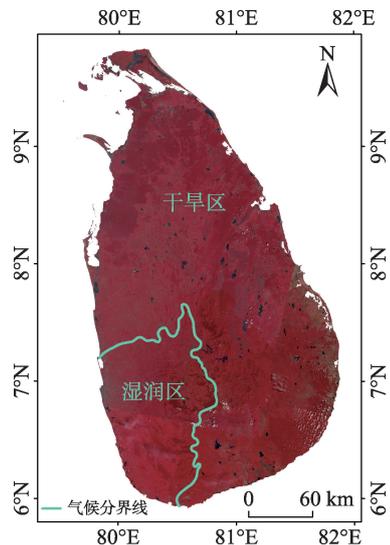


图1 斯里兰卡Landsat 8 OLI假彩色合成遥感影像(5、4、3波段)

Fig. 1 Landsat 8 OLI false color composite remote sensing image of Sri Lanka (5, 4, 3 bands)

的为斯里兰卡北部和东部地区2014年6月的两景Landsat 8 OLI影像;用于典型水库年际变化分析的为1988-2018年的5景Landsat 4-5 TM和2景Landsat 8 OLI影像,条带号为141055,影像集中在8月,4-6年为间隔期;用于典型水库年内月际变化分析的为2017年12景Landsat 8 OLI影像;用于全岛内陆湖库水体时空变化分析的包含9景1995年Landsat 4-5 TM、9景2005年Landsat 4-5 TM和9景2015年Landsat 8 OLI影像,每景影像时间都集中在2月左右。利用ENVI 5.3软件对每景影像进行辐射定标、大气校正和裁剪处理。

2.3 基于大津法(OTSU)的NDWI、MNDWI和EWI水体提取方法^[16-17]

针对水体边界的提取有以下2种方法:①利用边缘检测方法对要处理图像的地物边界直接进行提取;②先进行水体区域的提取,再采用一定的算法对提取的水体区域进行边界的转化,这是现阶段的主流方法,其中水体指数法是当前最有效的水体提取方法^[16]。常用的水体指数法有NDWI、MNDWI、EWI等。其主要思路是运用波段运算生成NDWI或MNDWI图像,利用合适的阈值,通过简单的分割算法对水体进行提取。NDWI、MNDWI和EWI的计算公式如下:

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR}} \quad (2)$$

$$EWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (3)$$

式中： ρ_{Green} 为遥感图像绿波段反射率； ρ_{NIR} 为近红外波段反射率； ρ_{SWIR} 为短波红外的反射率。

OTSU法使用的是聚类的思想把图像的灰度数按灰度级分成2个部分,使得两个部分之间的灰度值差异最大,每个部分之间的灰度差异最小,通过方差的计算来寻找一个合适的灰度级别来划分。假设NDWI、MNDWI或EWI图像的取值范围为 x 到 y ,其中 $-1 \leq x < y \leq 1$,基于OTSU算法所求阈值 t 可将NDWI、MNDWI或EWI图像分为水体(t 到 y)和非水体(x 到 t)两类。OTSU算法的最佳阈值 t 的计算如下:

$$\begin{cases} \delta^2 = P_{nw} \times (M_{nw} - M)^2 + P_w (M_w - M)^2 \\ M = P_{nw} \times M_{nw} + P_w \times M_w \\ P_{nw} + P_w = 1 \\ t = \text{Arg Max}_{x \leq t \leq y} \{P_{nw} \times (M_{nw} - M)^2 + P_w (M_w - M)^2\} \end{cases} \quad (4)$$

式中:水体 δ 为水体和非水体的类间方差; P_w 和 P_{nw} 分别是单个像素属于水体和非水体的可能性; M_w 和 M_{nw} 是水体和非水体的灰度平均值; M 是NDWI、MNDWI或EWI图像的灰度平均值。

3 结果及分析

3.1 提取算法结果比较

采用水体指数法(NDWI、MNDWI和EWI)、单波段阈值法(NIR)以及监督分类法(最大似然法)对两景实验影像进行水体的识别提取。利用水体指数法进行水体提取时,基于IDL 8.5平台编译的OTSU算法对3种指数法计算的图像进行自适应阈值 t 的确定。选取2幅影像中湖库类型最多、最典型的部分,其目视解译结果如图2(a)所示,5种方法水体提取的结果如图2(b)-(f)。通过提取结果与影像叠加对比,并结合目视解译结果发现,基于OTSU算法的NDWI水体提取模型提取效果最好,能够准确地识别出湖泊、水库以及海洋的边界;基于OTSU算法的

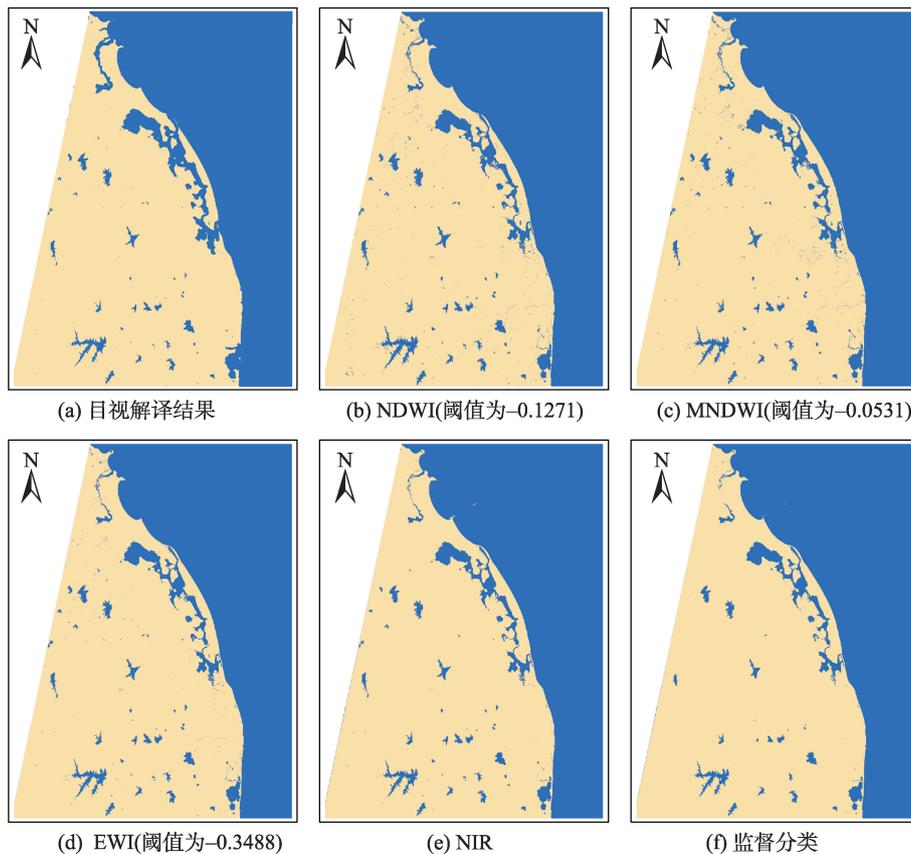


图2 2014年6月斯里兰卡东部水体提取结果

Fig. 2 Water extraction results in eastern Sri Lanka in June 2014

MNDWI 水体提取模型存在一定的过提现象,将一些湿地识别为水体;基于 OTSU 算法的 EWI 水体提取模型对小面积的浅水存在一定的漏提现象;NIR 算法对湖库等水体的边界提取不准确,同时存在明显的漏提现象;最大似然提取水体的结果最差,不能准确识别出水体边界,漏提和误提现象明显。

以 2 幅影像目视解译水体边界为基准,将基于 OTSU 的水体指数 (NDWI、MNDWI、EWI) 法与 NIR、最大似然法提取的边界与基准边界进行对比分析,每幅影像分别选取 100 个检验样本,通过计算混淆矩阵^[8],分别从错分率、漏分率和总体精度 3 个方面反映水体的提取精度,其统计结果如表 1。

从表 1 可以看出,基于 OTSU 的 NDWI 提取水体的总体精度优于其它方法,超过 97%,误提率和漏提率最低;基于 OTSU 的 MNDWI 和 EWI 提取水体时存在一定的误提现象,主要是由于沿海地区存在较多的湿地导致;NIR 和最大似然监督分类法提取水体的总体精度相比前 3 种提取算法较低,误提率和漏提率较高,不能有效的区分水体与低反射率的地物,存在漏提浅水区现象,水体边界提取不到位。总的来讲基于 OTSU 的 NDWI 水体提取模型精度最高,在后面的典型湖库和全岛湖库水体时空变化分析时采用该方法进行水体的提取。

3.2 典型湖库时间序列分析

斯里兰卡受印度洋季风和岛中部高山的地形

影响,除西南少部分地区是湿润区 (Wet Zone),其他地方都属于干旱区 (Dry Zone),旱季要比雨季要长的多^[1-2],斯里兰卡在干旱区修建了大量水利设施。为分析斯里兰卡干旱区湖库水面积的年际变化趋势及年内变化规律,以马杜鲁·奥亚 (Maduru Oya) 水库为代表进行时间序列分析。Maduru Oya 水库是斯里兰卡国内面积第二大水库,位于中部偏东地区,属于干旱区,并且是水源性不明原因慢性肾病 (CKDu) 高发区,主要用于灌溉和饮用水源。采用基于 OTSU 算法的 NDWI 水体提取模型对时间序列影像进行 Maduru Oya 水库边界的提取,利用 ArcGIS 10.3 软件统计其年际和年内变化情况。图 3(a) 和图 3(b) 分别为其年际和年内变化图。

由图 3(a)、(b) 可以看出, Maduru Oya 水库面积的年际变化起伏较小,年内变化起伏较大。1988–2018 年间水库面积在小幅波动的基础上总体上呈现增加的趋势,1992 年面积最小,为 27.40 km²,2013 年水库面积最大,为 42.95 km²。2017 年内月变化, Maduru Oya 水库最大面积出现在 2 月份,最小出现在 9 月份,2 月份面积是 9 月份面积的 2.24 倍,相差 31.64 km²,可见其年际变化幅度巨大。斯里兰卡干旱区 10 月到次年 2 月为湿润季节,3 月到 9 月为干燥季节,水库或湖泊的最大面积一般出现在湿润季节的结束月份 2 月,最小面积一般出现在干燥季节的结束月份 9 月,这与 2017 年 Maduru Oya 最大最

表 1 斯里兰卡 5 种水体提取方法的精度对比

Tab. 1 Accuracy comparison of the five water extraction methods in Sri Lanka (%)

方法	影像一			影像二		
	错分率	漏分率	总体精度	错分率	漏分率	总体精度
NDWI	2.07	0.89	97.82	2.18	0.68	98.03
MNDWI	4.26	1.89	94.16	3.92	2.13	92.94
EWI	3.85	2.01	95.07	3.57	1.75	92.67
NIR	4.62	8.95	90.53	5.16	9.03	90.14
最大似然	5.24	10.18	89.65	5.64	10.84	88.83

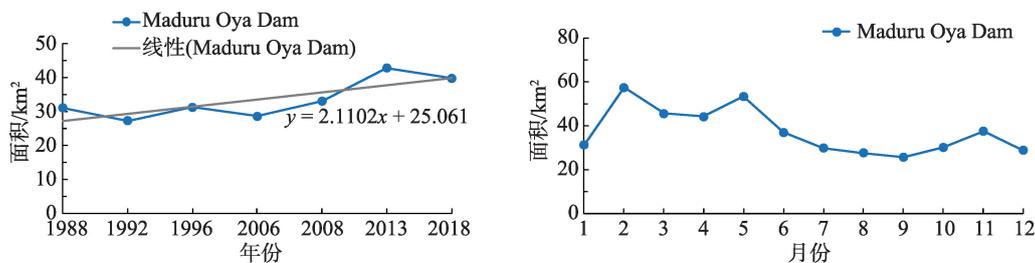


图 3 Maduru Oya 斯里兰卡水库面积年际和年内月际变化

Fig. 3 Interannual and monthly variations of the water area of Maduru Oya reservoir in Sri Lanka

小面积出现月份相符。从图3(b)可以看出,属于干燥季节的5月水库的面积出现大幅度的增加,根据气象资料显示,2017年5月斯里兰卡全国出现了持续性强风和大面积的暴雨^[19],从而导致水库面积的异常增加。总的来说,水库年内变化波动性较大,不考虑异常天气因素影响,10月到次年2月为面积增加期,2-9月为面积减少期。

3.3 全岛内陆湖库水体时空变化分析

为了提高全岛水体提取精度,基于OTSU算法对每个年份的所有影像进行自适应阈值的确定,不采用全局统一阈值,提取水体后对每个年份的提取结果进行镶嵌,得到覆盖斯里兰卡全国的1995、2005和2015年3期水体信息影像。经统计1995年全国水体面积为1653.91 km²,2005年为1964.52 km²,2015年为2136.57 km²。20年间斯里兰卡水体面积呈现大幅度的增长,增加了483.66 km²。为了进一步分析全岛内陆湖库的时空变化,基于ArcGIS 10.3软件,制作2015年目视解译河道的5 m缓冲区数据,剔除3期影像中的河流部分,保留潟湖。潟湖是被沙嘴、沙坝或珊瑚分割后与外海相分离的局部海水水域,由于与海水不完全隔绝或周期性隔绝,潟湖水质会经历咸化或淡化的过程^[20]。潟湖在斯里兰卡沿海地区普遍存在,具有泄洪、水产养殖、保护海岸等作用^[21]。提取的湖库水体及潟湖结果如图4所示。

通过图4可以看出,1995-2015年斯里兰卡湖库水体面积总体呈增长的趋势,潟湖面积也呈现增

加趋势,由于其不属于严格意义上的内陆淡水湖库,后面不计入相应的统计分析。经统计1995年斯里兰卡湖库水体总面积为1020.37 km²,2005年为1270.48 km²,2015年为1417.48 km²。20年间,斯里兰卡湖库水体面积呈现大幅度的增长,增加了397.11 km²。为了进一步分析全岛内陆湖库的时空变化,结合斯里兰卡湖库分布并参考文献^[22-23],将湖库水体按面积分为如下4个等级:I级湖库(<0.1 km²)、II级湖库(≥0.1~1 km²之间)、III级湖库(≥1~5 km²之间)和IV级湖库(≥5 km²)。各年份不同类型湖库数量和面积如图5所示,斯里兰卡9个省湖库总数量和面积统计结果如图6所示。

由图5(a)可以看出,1995-2015年4个等级湖库的数量都呈现出递增的趋势,湖库等级越低,增加的幅度越大。I级湖库的数量增加的最为明显,IV级湖库增加的最少,增加了11个。新增的IV级湖库其中7个由其它级别湖库转化而来,4个为新建的大型水库,分别是Rambukkam Oya、Weheragala、Daduru Oya和Mau Ara水库。由图5(b)可以看出,1995-2015年4个等级湖库的面积呈现出递增的趋势,IV级湖库的面积显著增加,增加了197.49 km²;湖库等级越高,总面积越大,2015年IV级湖库的总面积达到760 km²,占4个等级湖库总面积的54%。

由图6(a)、(b)可看出,1995-2015年斯里兰卡湖库数量和面积的增加主要集中在北方省、北中央省、东方省、萨巴拉加穆瓦省、乌瓦省以及中央省,湖库数量和面积增加的省均处于干旱地区,南方省湖

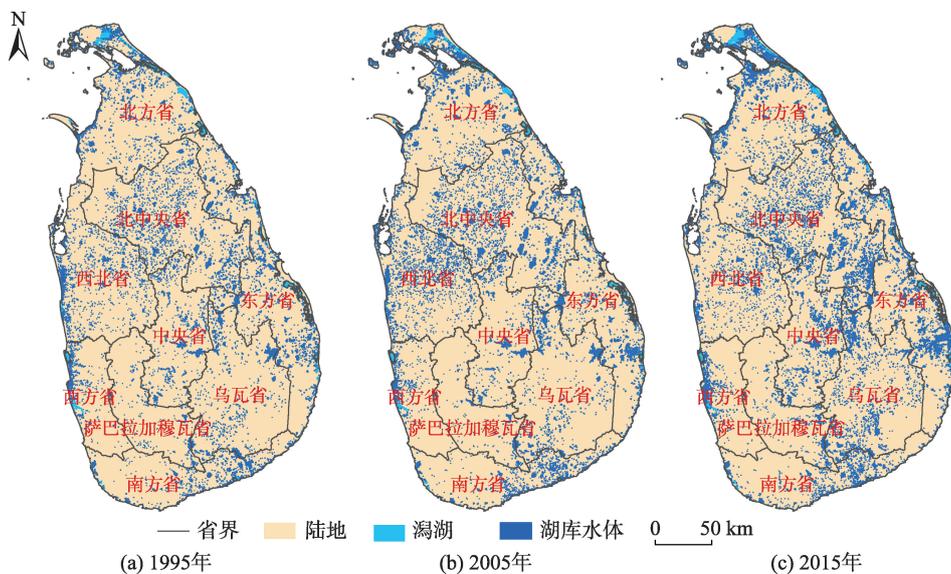


图4 1995、2005和2015年斯里兰卡湖库水体和潟湖分布

Fig. 4 Water extraction results of Sri Lanka in 1995、2005 and 2015

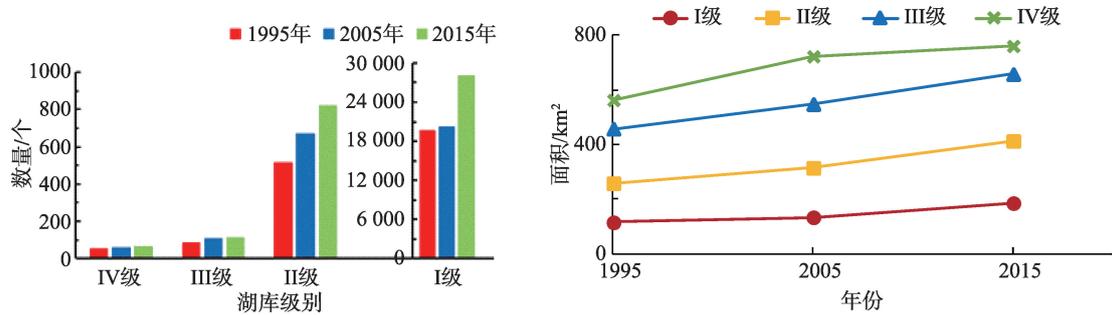


图5 1995、2005和2015年斯里兰卡湖库数量及面积统计

Fig. 5 Statistics on the number and area of lakes in Sri Lanka in 1955, 2005 and 2015

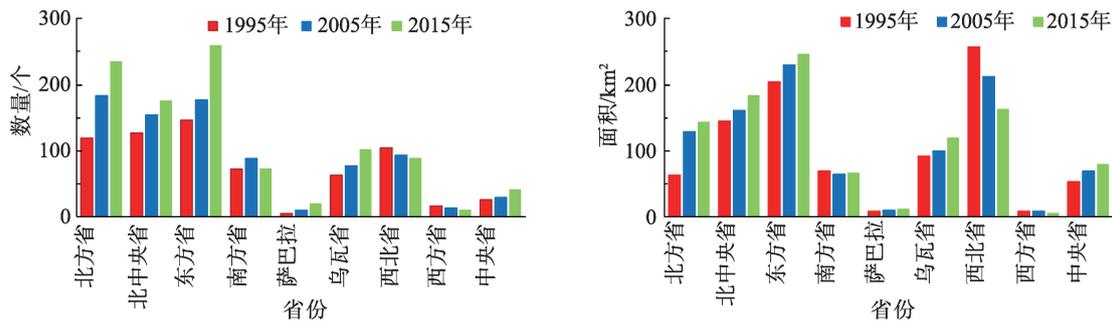


图6 1995、2005和2015年斯里兰卡各省湖库数量及面积统计

Fig. 6 Statistics on the number and area of lakes in each province in Sri Lanka in 1955, 2005 and 2015

库的数量和面积基本上保持不变;西北省和西方省湖库的数量和面积略有减少。在湖库数量和面积减少的省份,主要与同期局地降雨量减少有关;湖库数量和面积增加的省份主要是同期局地降雨量增加,兴建水利设施等多种因素共同作用结果。近些年斯里兰卡为支持地区的农业灌溉、水产养殖及地方经济发展新建了大量的水利设施,可起到对流域雨季和旱季水量分布的调节作用。总的来说,4个等级的湖库数量和面积呈现出不同幅度的增加,斯里兰卡地表湖库可利用水体资源量呈现出增加的趋势。

4 结论

本文以斯里兰卡为研究区,基于 Landsat 系列数据,采用大津法(OTSU)算法进行自适应水体指数阈值的确定,对比分析基于 OTSU 的水体指数(NDWI、MNDWI、EWI)提取模型与 NIR 和最大似然法在提取斯里兰卡东部和北部地区影像水体的精度;以 Maduru Oya 水库作为典型水体,分析其面积年际和年内的动态变化特征;以 1995、2005 和 2015 年为基准研究年份,采用基于 OTSU 的单个影像自适应阈值 NDWI 模型提取水体,统计各年份不

同级别湖库的数量和面积数据,系统探讨分析了其时空变化特征,得出了以下结论:

(1) OTSU 算法可用于确定提取斯里兰卡水体时水体指数算法的阈值,从目视判读与定量分析两个角度对比分析 5 中水体提取算法,基于 OTSU 的 NDWI 水体提取模型提取水体的精度最高,总体精度在 97% 以上,误提率和漏提率最低,适合于斯里兰卡地区水体的提取。

(2) 1988–2018 年 Maduru Oya 水库同期 8 月份面积在小幅波动的基础上总体呈现增加的趋势,1992 年面积最小,为 27.40 km²,2013 年水库面积最大,为 42.95 km²;与年际变化相比,2017 年水库年内面积变化波动性巨大,最大面积出现在 2 月份,最小出现在 9 月,2 月面积是 9 月面积的 2.24 倍,相差达 31.64 km²,不考虑异常天气因素影响,10 月到次年 2 月为面积增加期,2 月到 9 月为面积减少期。

(3) 1995–2015 年斯里兰卡 4 个等级的湖库数量和面积呈现不同幅度的增加,湖库等级越低,数量增加的幅度越大,IV 级湖库的面积显著增加,20 年间增加了 197.49 km²;湖库数量和面积的增加主要集中在北方省、北中央省、东方省等干旱省份,总体上斯里兰卡湖库水体资源量呈现出增加的趋势。

本文的研究结果可为斯里兰卡水土资源优化配置研究及水资源管理与规划提供必要的本底数据,以满足我国“一带一路”战略对空间大数据的需求。但还存在一些不足,本文水体的提取是基于30 m分辨率的Landsat影像,因此识别水体的最小面积约为900 m²,面积小于900 m²的水体可能无法进行有效提取,湖库数量和面积的统计是基于30 m分辨率的,之后应利用多源遥感数据,如Sentinel-2、GF-2号影像等,进行斯里兰卡地区更高分辨率水体信息的提取及时空变化分析。

参考文献(References):

- [1] Burt T P, Weerasinghe K D N. Rainfall distributions in Sri Lanka in time and space: An analysis based on daily rainfall data[J]. *Climate*, 2014,2(4):242-263.
- [2] Wickramagamage P. Seasonality and spatial pattern of rainfall of Sri Lanka: Exploratory factor analysis[J]. *International Journal of Climatology*, 2010,30(8):1235-1245.
- [3] Chen Q, Zhang Y, Ekroos A, et al. The role of remote sensing technology in the EU water framework directive (WFD) [J]. *Environmental Science & Policy*, 2004,7(4):267-276.
- [4] Feng L, Hu C, Chen X, et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,121(2):80-92.
- [5] Du Y, Xue H P, Wu S J, et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011,92(4):1248-1255.
- [6] 王卫红,黄琳,夏列钢.多时相HJ-1数据补充的水体分布时序变化监测[J].*地球信息科学学报*,2015,17(9):1110-1118. [Wang W H, Huang L, Xia L G. Monitoring water distribution changes based on the supplemented multi-temporal HJ-1 Data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015,17(9):1110-1118.]
- [7] 郝贵斌,吴波,张立福,等. ESTARFM模型在西藏色林错湖面积时空变化中的应用分析(1976-2014年)[J].*地球信息科学学报*,2016,18(6):833-846. [Hao G B, Wu B, Zhang L F, et al. Temporal and spatial variation analysis of the area of Siling Co Lake in Tibet based on ESTARFM (1976-2014)[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016,18(6):833-846.]
- [8] Griffith J A. Geographic techniques and recent applications of remote sensing to landscape-water quality studies [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2002,138(1-4):181-197.
- [9] Woodcock C E, Allen R, Anderson M, et al. Free access to landsat imagery[J]. *Science*, 2008,320(5879):1011-1011.
- [10] 李均力,胡汝骥,黄勇,等. 1964-2014年柴窝堡湖面积的时序变化及驱动因素[J].*干旱区研究*,2015,32(3):417-427. [Li J L, Hu R J, Huang Y, et al. Spatial-temporal characteristics of Chaiwopu lake area change and its driving factors from 1964 to 2014[J]. *Arid Zone Research*, 2015,32(3):417-427.]
- [11] Bartocci L A. Field measurement of the spectral response of nature waters[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977,XIII(5):595-598.
- [12] 周成虎,骆剑承,杨晓梅,等.遥感影像地学理解与分析[M].北京:科学出版社,2001:68-86. [Zhou C H, Luo J C, Yang X M, et al. Geological understanding and analysis of remote sensing images[M]. Beijing Science Press, 2001:68-86.]
- [13] 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.
- [14] 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 H Q. 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.]
- [15] 闫霏,张友静,张元.利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J].*遥感信息*,2007(6):62-67. [Yan P, Zhang Y J, Huang Y, Zhang Y. 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.]
- [16] Du Y, Zhang Y, Ling F, et al. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band[J]. *Remote Sensing*, 2016,354(8):1-19.
- [17] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979,9(1):62-66.
- [18] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991,37(2):270-279.
- [19] Lin A K C. On improvement of the computation speed of Otsu's image thresholding[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2005,14(2):023011.
- [20] Johannes R E. Words of the lagoon: Fishing and marine lore in the Palau district of Micronesia[M]. California: University of California Press, 1981.
- [21] Silva E I L, Katupotha J, Amarasinghe, et al. Lagoons of Sri Lanka: From the origins to the present[M]. Colombo: International Water Management Institute, 2013.
- [22] Fang J, Rao S, Zhao S. Human-induced long-term changes in the lakes of the Jiangnan Plain, Central Yangtze[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005,3(4):186.
- [23] 罗玲,毛德华,王宗明,等.松嫩平原西部湖泊与水库/坑塘动态变化及驱动因素分析[J].*农业工程学报*,2015,31(22):285-291. [Luo L, Mao D H, Wang Z M, et al. Analysis of dynamics and driving forces of lakes and reservoirs in western Songnen plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(22):285-291.]