

青藏高原湖泊古今变化的遥感分析——以达则错为例*

乔程^{1,4}, 骆剑承¹, 盛永伟², 沈占锋¹, 李均力³, 郜丽静¹

(1: 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

(2: Department of Geography, UCLA, CA90095-1524)

(3: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

(4: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 青藏高原湖泊受人类活动干扰较少, 主要受气候变化导致的冰川融化和蒸发的影响, 是气候变化直观敏感的反应区。因此, 研究青藏高原湖泊变化对区域以至全球气候、环境变化的研究具有深远意义。本文在遥感影像的基础上发展了综合指数计算与空间分异的现存湖迭代提取方法, 对影像数据上的湖泊进行动态监测; 并结合 DEM 数据发展了半自动化的古岸线提取方法, 进而分析古湖泊的变化, 二者相结合直观全面地反映出了青藏高原湖泊的古今变化情况。并以达则错湖为例进行提取, 分析了其近 25 年以来以及大湖期以来的缩减情况。

关键词: 青藏高原; 达则错; 湖泊提取; 岸线复原; 变化检测

Analysis on lake changes since ancient and modern ages using remote sensing in Dagze Co, Tibetan Plateau

QIAO Cheng^{1,4}, LUO Jiancheng¹, SHENG Yongwei², SHEN Zhanfeng¹, LI Junli³ & GAO Lijing¹

(1: *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China*)

(2: *Department of Geography, University of California, Los Angeles, CA90095-1524, USA*)

(3: *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, P. R. China*)

(4: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

Abstract: Lakes on the Tibetan Plateau, which are rarely influenced by disturbance of human activities and mainly controlled by glacier melting and evaporation caused by climate change, are a typical study area of global climate and environment change. Remote sensing technology to monitor lake changes across the plateau has important significance to global climate and environment change research. This paper developed an iterative modern lake extraction method on remote sensing images using index calculation and spatial difference comprehensively, to detect lake changes dynamically; and developed a semi-automatic paleo-shoreline extraction method combined with DEM, so as to analyze paleo-lake change. Combining the two methods, we can clearly and completely get the lake changes across the Tibetan Plateau since the ancient and modern ages. Finally, we took Dagze Co as an example to proceed with the methods, and analyzed its shrinkage conditions since the latest 25 years and since the Great Lake Period.

Keywords: Tibetan Plateau; Dagze Co; lake extraction; shoreline recovery; change detection

随着全球变化研究的不断发展, 湖泊的变化越来越受到研究者的重视, 湖泊成为环境变化、生态系统等研究的重要载体。青藏高原上分布有地球上海拔最高、数量最多、面积最大的高原湖泊分布区^[1], 由于受人类活动干扰较少, 湖泊变化过程直接反映了自然条件下的区域气候变化, 被认为是进行湖泊学、古湖泊学以及气候变化研究的理想区域。

然而, 青藏高原高寒缺氧, 自然环境恶劣, 致使许多实地调查工作无法有效开展。遥感对地观测技术以

* 国家重点基础研究发展计划(863)项目(2009AA12Z123)、国家自然科学基金项目(40871203)和 NASA New Investigator Program (NNX06AE58G)联合资助。2008-12-31 收稿; 2009-08-17 收修改稿。乔程, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: qcirsa@163.com.

其覆盖范围广、快速以及多时相等特有优势成为青藏高原湖泊探测一种不可多得的有力途径。目前,利用遥感提取湖泊边界和面积等信息已成为研究湖泊的重要手段之一,如鲁安新等应用遥感手段研究了青藏高原南部湖泊近几十年来的变化情况;沈芳等利用多源遥感影像分析了青海湖最近 25 年的变化以及湖水面积萎缩的原因;刘瑞霞等利用 NOAA/AVHRR 数据,通过对混合象元进行处理定量估算了青海湖近 20 年的面积变化,并将其与该区的降水、气温和蒸发量做了分析^[2-4]。

以往开展的相关研究通常利用实测数据、解译遥感影像等方法来提取湖泊信息以进行各种分析,但其中存在着工作量大、精度波动大以及时效性差等不足,且青藏高原湖泊类型多样复杂,大范围监测的应用需要普适性、快速且准确的算法。本文利用遥感影像实现了青藏高原现存湖泊水体的自动化提取,据此可对获得遥感影像以来湖泊的动态变化进行监测以及时序分析;并结合 SRTM DEM 数据发展了半自动化的古岸线提取方法,进而分析古湖泊的变化,二者结合直观全面地反映出了青藏高原湖泊的古今变化情况,为青藏高原湖泊遥感调查提供了一种更为宏观、有效的方法。

1 湖泊古今变化的综合遥感分析方法

1.1 现存湖泊提取方法

遥感监测水体的方法关键是将水体与周围陆地区别开来,从而准确地确定水体面积^[4]。由于水体和陆地的光谱差异比较明显,水陆界线清晰,因此对于水体遥感提取的研究开展较早,其应用水平也逐步深入^[5-7]。然而,以往水体提取方法大都采用统一的模型对所有对象进行一致处理,不适用于类型丰富的青藏高原湖泊。对此,本文依据符合区域分异客观规律的遥感地学分析分层分类理论,在指数计算基础上提出了“全域-局部”迭代转换的信息提取方法,通过对全域分割分类和局部分割分类的有机结合,并采用迭代算法实现对湖泊最佳边缘的逐步逼近,有效解决了上述存在的问题,其主要技术路线见图 1(湖泊提取部分)。

湖泊提取的方法体系包含了水体指数计算、全域信息提取、局部区域选择、局部信息提取等几个相互衔接的过程。首先,在原始遥感数据基础上,计算归一化差异水体指数(NDWI);其次,对 NDWI 数据进行直方图阈值分割,初步获得湖泊与陆地的分离,然后在分割图像上进行湖泊与陆地样本信息的自动选择,加入更多图像波段进行分类,获得全域范围湖泊信息的提取;之后,在全域提取的基础上,搜索各个湖泊单元的局部空间位置,并通过对各湖泊单元进行缓冲区分析,确定局部提取的各湖泊区域;最后,在各个局部区域内,不断迭代重复图像分割和分类的过程,逐步实现对湖泊精细边缘提取的逼近。

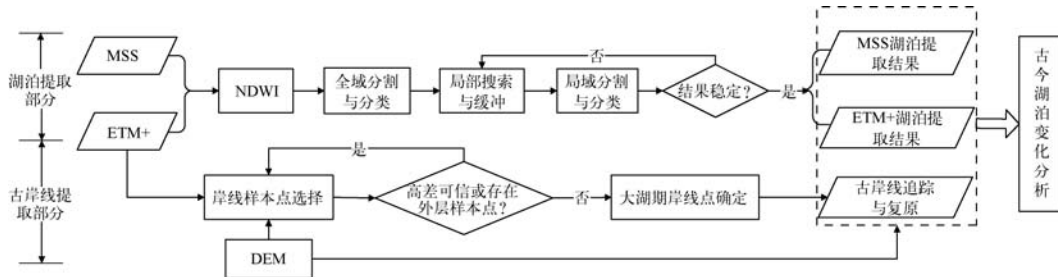


图 1 湖泊古今变化分析方法整体框架

Fig. 1 Whole flowchart of analysis on lake changes since ancient and modern ages

1.2 古岸线提取方法

古岸线是湖水退缩变化的最直接反映,具有连续、敏感和易被识别等优点,围绕现存湖泊呈环状分布,在高分辨率卫星影像上往往清晰可辨。每条古岸线都表征了一个水气稳态期,其中最外环岸线一般被认为是大湖期^[8-10]的岸线。大湖期岸线受后续湖水扩张与退缩以及环境变化的影响较小,以及其所处的最外围的位置,其表征性较为稳定且易于提取,成为湖泊岸线自动检测与提取的目标。

然而,受后续构造运动及环境变迁的影响,大部分现存古岸线通常是残缺的、不连续的,从卫星影像上自动甚至手动跟踪它们几乎是不可能的,此时地形数据对古湖泊重建很有帮助。据此,本文结合 ETM+ 遥感影像与 DEM 数据发展了一种湖泊古岸线半自动检测与追踪提取的方法,其主要技术流程见图 1(古岸线提

取部分)。

古岸线提取方法将遥感影像与 DEM 数据套合使用,在遥感影像上由内向外手动选取外围岸线样本点,同时从 DEM 数据上读取各岸线相应的高程值,并计算相邻两条岸线之间的高差。不考虑地质构造运动等剧烈变化导致的岸线剧变,后续环境变化、当前采用的 DEM 数据时效性的差异以及噪声等造成的高差影响都在数米范围的较小置信区间内,在该范围之内向外追踪岸线,直至高差产生剧变或追踪至该湖泊区域最外层岸线时停止。此时采用可信区间内的最后一条岸线或最外层岸线作为所要提取的目标岸线,即大湖期岸线。如此追踪到最外层岸线的高程值后,便可在 DEM 上通过追踪闭合的岸线来复原古湖泊范围。

2 结果与分析

2.1 研究区及数据源概况

青藏高原湖泊范围在 $79^{\circ}-95^{\circ}\text{E}$, $28^{\circ}-38^{\circ}\text{N}$ 之间,覆盖全部高原腹地及内陆湖区域,且绝大部分都是低可达性的偏远湖。作为示范区的达则错(Dagze Co)位于藏北高原南部,西藏那曲地区尼玛县的一个断陷盆地内, $31^{\circ}49'-31^{\circ}59'\text{N}$, $87^{\circ}25'-87^{\circ}39'\text{E}$,是西藏自治区黑阿公路以北较大的深咸水湖,呈北东-南西向分布,东西两侧开阔,湖滨平原发育,南北两岸较窄,山体陡峭^[1]。

研究区数据采用从 GLCF 获取的 1976 年冬季的 Landsat MSS 影像、2000 年秋季 ETM+ 影像及相应 3 弧秒/80m 分辨率的 SRTM DEM 影像,其中, MSS 和 ETM+ 影像都经过了辐射校正。影像时相选择在雨季过后及冰川融水相对稳定的秋冬季,该时期湖泊比较稳定,湖面季节性波动不大。提取算法在自主研发的 SINCE2008 软件平台的支持下实现。

2.2 达则错现存湖提取

利用现存湖泊提取方法分别对两期影像中的达则错水体进行提取,以 ETM+ 影像为例,各步骤的提取效果如图 2 所示。

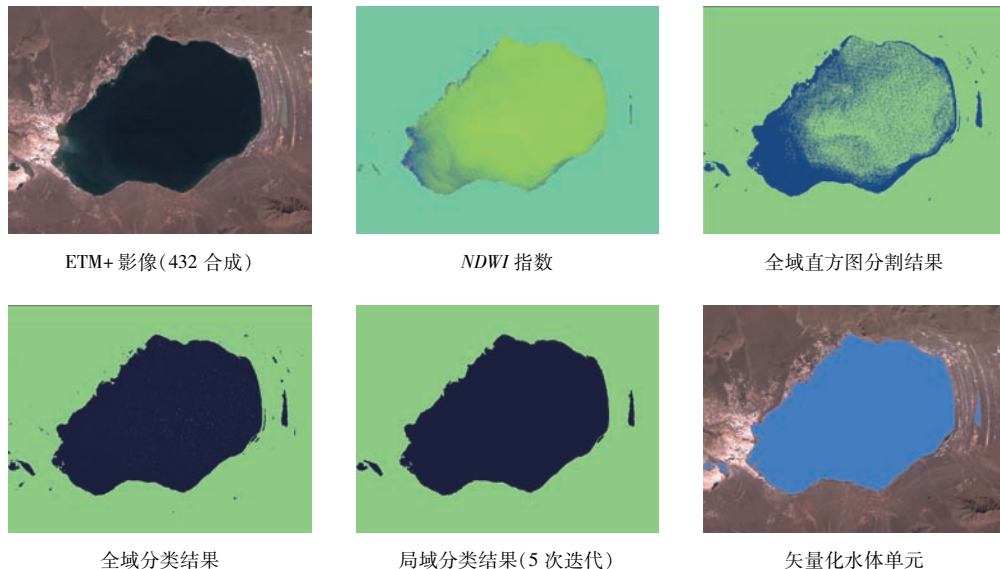


图 2 达则错现存湖泊信息提取试验(ETM+, 2000 年 10 月 30 日)

Fig. 2 Modern lake extraction of Dagze Co

从影像中可以看出达则错内部水体光谱响应并不十分均一,经 NDWI 计算后得到了相对均匀的水体信息,较明显地体现出湖水与陆地的差异。通过全域分割基本获得了水陆分离,水路边界较为完整地提取出来,但在湖泊内部存在较多与陆地的混淆;进一步加入多个波段进行全域分类后,显著提高了分类精度,但仍存在一些噪声,湖泊边界还不甚精准;再在局部湖泊区域内重复迭代地分割和分类,消除了噪声以及琐碎

水体的影响,获得了高精度的湖泊提取结果,进而可获得规整的矢量化水体单元。需补充说明的是,对于湖水提取过程中附近山体阴影造成的影响,通过 NDWI 就可有效地消除,从而可得到更为精确的湖泊水体信息。

2.3 达则错湖古岸线提取

鉴于 ETM+ 影像分辨率优于 MSS 影像,古岸线在 ETM+ 上表现较为清晰,因此采用其进行古岸线提取复原。在 ETM+ 影像上仍不能确定的古岸线,可利用更高分辨率的影像辅助进一步确认。利用古岸线提取方法,同样以达则错为示范区,结合采用 ETM+ 影像及 SRTM DEM 数据,确定出了其古岸线范围(图 3)。提取出的古岸线匹配了现存的最外层岸线弧段部分,并包含了现存湖及湖盆沉积物。值得一提的是,左侧岸边远处的一个较大的附属湖及其周围沉积物也较好地包含了进来。

2.4 达则错湖古今变化分析

上述已提取出达则错的现存湖及古岸线,并已获得了矢量化的结果图,经简单的统计计算并辅助 DEM 数据便可得其各时期的各项参数:1976 年达则错湖泊面积为 251.3km^2 ,湖面海拔 4468m ;2000 年现存湖面积为 242.5km^2 ,湖面海拔 4465m ,与现有统计数据湖面积 244.7km^2 ,海拔 4459m 较为一致^[1];大湖期古岸线高程值为海拔 4522m ,高于 2000 年湖面 57m ,该复原结果也与 20 世纪 70 年代进行的一个野外实地调查的湖水位下降 $50-60\text{m}$ 的结果相吻合^[11],进而得出古湖泊面积为 819.3km^2 。

统计数据及实地调查数据都验证了本文采用的现存湖及古岸线提取方法的有效性及精度的可信性,进而据此对达则错做详细的古今变化对比与分析。由图 4(红色岸线代表大湖期古岸线,蓝色代表 76 年湖泊范围,淡绿色代表 2000 年湖泊范围)可以看出,达则错自大湖期以来经历了显著的退缩,湖泊面积缩减超过 $2/3$,近 25 年来湖泊整体也呈现缩减趋势。同以 2000 年为基准,达则错近 25 年来湖泊面积缩减 8.8km^2 ,湖面水位下降 3m ;大湖期以来湖面缩减 576.8km^2 ,水位下降 57m 。依据许多文献中认为的大湖期结束于距今 2 万 5 千年来计算^[8-10],达则错近 25 年以来的年均湖面缩减率及水位下降率分别为 $0.352\text{km}^2/\text{a}$ 和 $120\text{mm}/\text{a}$,大湖期以来的分别约为 $0.0231\text{km}^2/\text{a}$ 和 $2.28\text{mm}/\text{a}$ 。由此可以明显看出,达则错近 25 年来的年均缩减率显著高于大湖期以来的缩减率,清晰地反映出了近几十年来气温升高导致的全球降水减少以及蒸发增大对其影响,对研究湖泊变化与气候、环境影响的关系有重要意义。

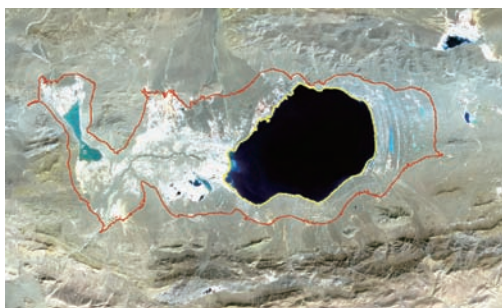


图 3 达则错古岸线复原示意

Fig. 3 Reconstruction of paleo shoreline of Dageze Co

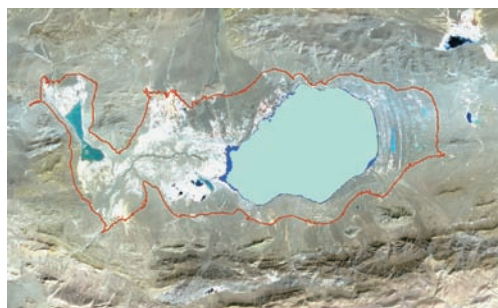


图 4 达则错古今变化对比

Fig. 4 Contrast of lake changes since ancient and modern ages of Dageze Co

需要说明的是,虽然达则错在整个地质历史年代里整体呈现缩减趋势,但并不代表其一直在缩减,期间或许也存在扩张期,可依据地质测年来进一步详细确定;近几十年来的湖泊动态变化可采用本文方法利用遥感影像对其进行时序监测与分析,并可获得年内湖泊的季节性变化。青藏高原湖泊主要受降水、冰川融水以及蒸发的影响,而该区域降水较少相比之下其影响可以忽略,因此表明达则错受蒸发的消耗大于冰川融水的补给,整体呈缩减趋势,尤其在近几十年来受全球气候变化的影响表现更为明显^[12-13]。

3 结论与展望

(1) 文中所采用的现存湖体及古岸线提取方法是具普适性、可推广的。湖泊提取中的局部处理方法是

逐一定位到单个水体区域迭代进行的,因此更具贴切性,且还适用于冰期水体的提取。

(2) 综合考虑影像的质量、时序性、易获得性以及研究区覆盖范围广的特点,该研究采用了 Landsat 系列卫星影像作为数据源。其中也存在混合象元问题,利用文中方法可将其控制在一个象元以内;采用的 DEM 数据时相与影像数据不完全一致,所读取的高程数据可能存在一定的误差。

(3) 青藏高原幅员辽阔,湖泊类型丰富,湖泊变化主要受冰川融水与蒸发的控制,不同湖泊变化可能有所不同,虽然达则错整体呈缩减趋势,但仍有湖泊是扩张的,因此,需进一步对青藏高原湖泊整体进行研究,从宏观上全面把握湖泊整体的动态变化。

(4) 本文为青藏高原湖泊的动态变化研究提供了一种快速、有效的方法。青藏高原湖泊主要受冰川融水与蒸发的自然因素影响,此二者又是与气候变化密切相关的,因此,青藏高原湖泊的变化是对气候变化直观敏感的反映,也对后续研究其与区域以至全球气候、环境变化具有深远意义。

4 参考文献

- [1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 鲁安新, 王丽红, 姚檀栋. 青藏高原湖泊现代变化遥感方法研究. 遥感技术与应用, 2006, 21(3): 173-177.
- [3] 沈芳, 匡定波. 青海湖最近 25 年变化的遥感调查与研究. 湖泊科学, 2003, 15(4): 289-296.
- [4] 刘瑞霞, 刘玉洁. 近 20 年青海湖湖水面积变化遥感. 湖泊科学, 2008, 20(1): 135-138.
- [5] 盛永伟, 肖乾广. 应用气象卫星识别薄云覆盖下的水体. 环境遥感, 1994, 9(4): 247-255.
- [6] 杜云艳, 周成虎. 水体的遥感信息自动提取方法研究. 遥感学报, 1998, 2(4): 264-269.
- [7] 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. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [8] Zheng MP, Meng YF, Wei LJ. Evidence of the pan-lake stage in the period of 40-28 kaBP on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2000, 74(2): 266-272.
- [9] Jia YL, Shi YF, Wang SM *et al.* Lake-expanding events in the Tibetan Plateau since 40 kaBP. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2001, 44(Supp): 301-315.
- [10] 李炳元. 青藏高原大湖期. 地理学报, 2000, 55(2): 174-182.
- [11] 关志华, 陈传友, 区裕雄. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984: 238.
- [12] 李世杰, 李万春, 夏威夷等. 青藏高原现代湖泊变化与考察初步报告. 湖泊科学, 1998, 10(4): 95-96.
- [13] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候暖干化趋势与未来发展. 地理学报, 1991, 45(1): 1-12.