

文章编号:1000-0240(2012)03-0563-10

基于多源、多时相遥感影像的高原湖泊提取 及其不确定性

——以西藏羊卓雍错流域为例

田 园, 张雪芹, 孙 瑞

(中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 基于野外实地考察, 以西藏中南部羊卓雍错流域为例, 探讨了基于多源、多时相遥感影像的高原湖泊提取。目前计算机辅助分类方法在高原湖泊提取上存在很大的局限性, 目视解译方法虽然繁琐, 但能结合丰富的经验信息, 故而成为当今高原湖泊提取的较为现实与可行的方法。为此, 针对各季湖面特征的不同相态, 结合图像增强技术、DEM 等辅助信息和野外实地验证, 建立了高原湖泊不同时相的遥感解译标志。根据 1972—2009 年 Landsat、CBERS 和 HJ-1A/1B 等 3 种不同数据源的 37 幅遥感影像提取了流域内主要湖泊, 并分析了湖泊面积的年内与年际变化。在此基础上, 讨论了高原湖泊提取过程的不确定性, 包括遥感影像甄选、几何校正误差、数字化容差和目视解译经验等给结果带来的不确定性。结果表明: 引入高分辨率、多源遥感影像以及不受天气状况影响的微波影像有助于高原湖泊变化监测能力与解译精度的提高; 而综合考虑地形信息、湖泊不同时相特征, 适用于多种数据源的计算机自动解译算法研发, 将提高长时间序列高原湖泊提取的效率。

关键词: 高原湖泊提取; 解译标志; 不确定性分析; 羊卓雍错流域

中图分类号: P237 **文献标识码:** A

0 引言

遥感技术的观测目标主要是地表自然与人文要素, 它能实时、客观的反映陆地表层状况。作为自然要素之一, 湖泊的形成与消失、扩张与收缩是区域乃至全球气候变化和局部构造共同作用的结果^[1]。遥感技术则是获取湖泊信息的重要手段, 利用遥感影像可获得湖泊水域各项特征的变化, 包括湖泊水域分布、面积信息提取、水文相关参数反演等^[2-4]。特别是在全面、客观的了解大面积湖泊的动态变化方面, 相较于传统的湖泊监测方法, 遥感技术具有明显的优势, 尤其在缺少地面观测、自然环境恶劣的区域。其中, 青藏高原地表分布着地球上海拔最高、数量最多、面积最大、以盐湖为主的高山湖泊群^[5-6]。由于高寒缺氧、交通不便给多数高原湖泊的传统观测和实地调查带来不便, 加之高原湖泊观测站点稀

少, 且多数水文观测不连续, 这使得基于遥感影像的湖泊提取成为研究高原湖泊动态变化非常重要的技术手段^[7-12]。国内外利用遥感技术围绕流域内湖泊、环境、生态变化等议题开展了多方位研究^[13-15]。

高原湖泊的湖面特征存在明显的季节差异, 因而在湖泊变化研究中遥感影像的时间分辨率至少达到月。单一遥感数据源受制于卫星重访周期和研究区天气状况。为此, 需引入多源遥感影像以使影像之间在时相上能够相互补充。受资料开放程度所限, 整体看目前已有基于遥感的高原湖泊研究选取影像相对较少、时间尺度较短、时间分辨率较粗(多以年变化和年代变化为主)。近年来, 随着遥感技术的拓展以及遥感影像资料共享政策的实施(例如, Landsat 系列卫星数据逐步开放, 以及 CBERS、HJ 卫星数据推广), 使得利用多源、多时相的遥感卫星资料研究流域高原湖泊的年内变化与

收稿日期: 2011-11-08; 修订日期: 2012-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871044; 41171062)资助

作者简介: 田园(1987—), 女, 湖北武汉人, 2009 年毕业于北京林业大学, 现为在读硕士研究生, 主要从事遥感技术的气候变化研究应用。E-mail: kakajinbaoty@163.com

较长时间尺度的年际变化成为可能。另外,高原湖泊面积实测较困难,解译出的湖泊面积缺少参考值。因此,有必要探索湖泊提取的不确定性。故本文以藏南羊卓雍错流域为例,基于多数据源的 37 景遥感影像,结合实地考察、图像处理技术和 DEM 等辅助信息,提取了 1970—2009 年高原流域湖泊变化信息,并就结果的不确定性进行了讨论。

1 研究区概况与资料

1.1 研究区概况

羊卓雍错流域位于藏南浪卡子县和贡嘎县境内,介于 $90^{\circ}06' \sim 91^{\circ}41' E$ 、 $28^{\circ}08' \sim 29^{\circ}13' N$ 之间(图 1)。基于 SRTM DEM 数据,利用 ArcGIS 提取流域边界,我们得到流域面积约为 $11\,700\text{ km}^2$ 。该流域广义上包括羊卓雍错、沉错、空母错、巴纠错和普莫雍错等 5 个湖泊^[6]。流域位于喜马拉雅山北坡雨影区,属半干旱地带。流域降水比周围地区少,主要集中在 7—9 月,通常最大降水量出现在 8 月。流域日照时间长,相对湿度小、风速大,导致湖泊蒸发强度大。湖泊的湖面海拔均在 $4\,440\text{ m}$ 以上,湖周多为发育有现代冰川的高山所环绕。

流域内人口稀少,当地居民仍维持着较为传统的生活方式,人类生活对湖泊变化的影响较小。尽管流域内拥有世界海拔最高的羊卓雍错抽水蓄能电站,但从水利部门了解到,该水电站采用了总体上不动用羊卓雍错水量的发电设计,故水电站对羊卓雍错湖泊变化的影响暂可忽略。因此,湖泊变化可

敏感地反映区域内气候变化的影响。

1.2 资料

高原湖泊面积变化信息的提取采用了 37 景来自 3 个系列卫星、5 个传感器的遥感影像(表 1)。数据源分别来自陆地资源卫星 Landsat(包括 MSS、TM 和 ETM+ 传感器)、中巴资源卫星(CBERS)和环境与灾害监测预报小卫星星座 A、B 星(HJ-1A/1B)。目前,已有运用这些数据源来提取湖泊信息的先例^[16-18]。遥感影像的选取原则是湖面范围内无云盖或极少云盖,尽可能保证一个月一景影像的密度。然而,数据选取结果虽然有 37 景之多,但鉴于传感器重访周期和流域雨季较高云盖率的限制,仍有许多年份缺乏月尺度影像,尤其是 20 世纪 80—90 年代,许多年份无任何影像。

作为雅鲁藏布以南封闭型内陆湖泊最为集中的区域,流域内水文资料匮乏。流域内最大湖泊羊卓雍错自 1974 年才开始有连续的水文资料;第二大湖泊普莫雍错东侧堆站的水文观测不连续;流域内其余相对较小的湖泊均无水文站。本研究所用湖泊水位资料,来源于羊卓雍错西北侧的白地水文站。此外,气象资料来自流域内浪卡子气象站;辅助判读信息主要依靠 2009、2010 年的野外考察以及(NASA 和 METI 合作推出的)地形数据 GDEM。

2 湖泊提取方法

2.1 方法甄选

湖泊提取技术的基本原理是利用水体和其他地

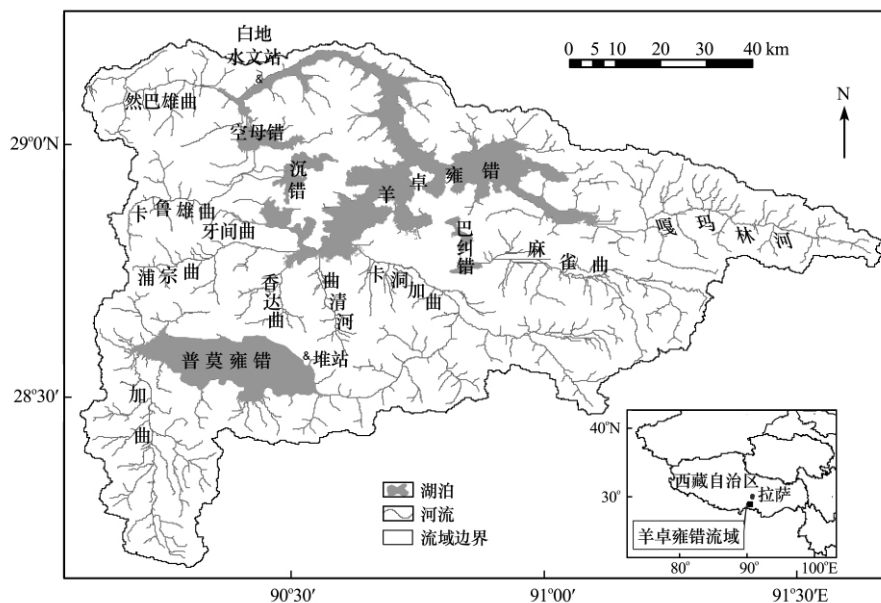


图 1 羊卓雍错流域示意图

Fig. 1 Map of the Yamzhog Yumco basin

表 1 卫星影像列表

Table 1 The employed satellite images

传感器(分辨率)	年份	日期(月-日)	传感器(分辨率)	年份	日期(月-日)		
MSS(80 m×80 m)	1972	10-18	ETM+(30 m×30 m)	2001	02月05		
		11-11			03-09		
		12-17			11-04		
	1977	01-04		2002	01-23		
		02-27			02-24		
		04-17			07-18		
		1989			01-19	10-22	
	TM(30 m×30 m)	1989		11-14	HJ-CCD(30 m×30 m)	2003	11-07
				2007			05-05
		2009		06-11		2008	01-10
10-17			03-15				
11-18			10-10				
1999			10-30	12-03			
ETM+(30 m×30 m)	1999	12-01	CBERS(19.5 m×19.5 m)	2009	03-10		
		2000			03-06	04-16	
	2000	04-07		1999	07-24		
		09-30			12-12		
		11-17			11-23		
		12-19					

物对太阳辐射反射特征差异,使水体在遥感影像上表现出与其他地物不同的色调和纹理特征^[19-20]。水体的反射率在可见光范围内较高(相对于其他波段而言),并随波长的增加而逐渐降低。到近红外和中红外红外波段,清澈水体的反射率几乎为零,红外辐射几乎全部被水体吸收,此时水体在遥感图像上呈暗色。相比研究区其他主要地物,光谱特征与水体有较大差异。例如冰川和积雪在可见光谱段均有较强反射率;裸土的反射率高于水体而低于冰雪;覆盖高山草甸的山体在绿光谱段有较强的吸收,而在近红外波段有较强的反射;滩地在整个波段内反射率较低,但略高于水体。光谱差异是水体提取的重要依据,利用水体在近红外波段的强吸收,可以区分这几种地物。需特别指出的是,山体阴影和云阴影的反射率较低,且与水体同样具有随波长增大而不断降低的特点^[21]。因此,不同地物光谱相近,是山体阴影和云阴影造成水体误判的主要原因。

湖泊提取的方法主要分为计算机自动解译与目视解译。其中,计算机自动解译又可分为单波段法和多波段法^[22]。单波段法是利用水体在红外波段

的强吸收特性来设置合适的阈值提取湖泊。实验表明,该方法简单易行,但是识别精度低。多波段法综合了多个波段的水体光谱特征,利用阈值法、指数法、决策树法、神经网络分类等提取湖泊。该方法提取精度相对较高,能在一定程度上结合经验知识。但实验结果显示,高原湖泊提取过程仍受到山体阴影、云影、湖面相态不统一以及不同数据源带来的色调和纹理差异等干扰。

羊卓雍错流域各湖泊的深度、盐度、悬浮物性质和含量以及冬季水体表面的相态均不统一。这导致湖泊间的光谱差异,并反映在影像的色调和纹理上,进而导致计算机自动分类的不准确。特别是羊卓雍错呈树枝状分布,沿岸多湖汊、岬湾,湖中分布多处岛屿。这些复杂的形态特征增加了湖泊提取的难度。流域湖泊季节变化明显,尤其在冬季,部分湖泊有结冰的现象。随时相的不同,结冰的程度亦存在差异。据水文记载和多年遥感影像,流域湖泊结冰期大致为11月至次年4月。其中,羊卓雍错出现局部冰面;普莫雍错冰面主要出现于12月至次年4月,冰面自2月逐渐从西侧开始融化;巴纠错湖面存在大面积冰面,通常在次年1月几乎全部

冻结; 沉错和空母错冰面主要出现在 1—3 月, 多局部结冰. 冬季湖面相态的复杂特征使得单波段法和多波段法均难以获取准确的湖泊信息.

目前, 湖泊的计算机自动提取的方法主要针对部分典型的平原湖泊, 不具有普适性, 且在不同分辨率的影像上难以得到一致的结果, 解译出的湖泊边界仍需要经验判读加以修正. 计算机自动解译的自动化程度更高、操作便捷、且不受人为判断的影响, 但应用在高原地区, 其提取精度受湖泊相态、山体阴影、不同影像分辨率和色调的干扰. 尽管目视解译耗时长、工作量大, 但该方法在高原这一特殊下垫面的湖泊提取中能得到更为精确的结果. 基于多源、多时相遥感影像的高原湖泊提取, 已有运用人工目视解译的方法的先例, 并且得到了较为准确的结果^[23-24]. 鉴于不同传感器的波段设置 (CBERS 和 HJ 仅设置了 4 个波段), 本文选取近红外、红光和绿光波段进行假彩色合成用以判读湖泊区域.

2.2 解译标识的建立

目视解译需要针对不同时相分别建立解译标识. 羊卓雍错流域湖泊表面相态和湖周环境随季节的变化存在明显差异. 根据湖泊表面相态主要分为两个时期, 即结冰期和非结冰期. 结冰期的湖泊表面呈局部结冰或全部结冰, 湖周植被少, 部分湖岸有积雪; 非结冰期的湖面为水体, 湖周植被在雨季较多, 部分湖岸有滩地、沼泽.

2009 年和 2010 年的全流域野外考察为湖泊的目视解译提供了不可或缺的参考. 通过经验判读和野外验证, 将影像上的图斑与实际地物对应, 根据图斑的色调、形状、纹理结合地理位置等因素建立高原湖泊在不同时相的解译标志 (表 2). 解译标志

的正确性则利用 GPS 测量特征地物的位置, 进而与影像上同一地物相对应来校准.

2.3 数据处理

遥感数据成像中存在辐射误差和几何畸变, 因此, 在应用遥感数据之前需进行图像预处理, 包括辐射校正和几何校正等. 本文用到的遥感数据已经过辐射校正和几何粗校正 (Landsat 影像为 Level 1T, CBERS 和 HJ 影像为 2 级产品). 为了将像元值转化为有物理意义的辐射亮度, 并消除地形、信号传输对影像造成的畸变, 在运用影像提取湖泊之前需要对数据进行定标、大气纠正和几何精校正 (校正误差控制在 0.5 个像元内). 采用拉伸或边缘增强等方法对经过以上预处理的图像进行变换, 以突出水体信息. 利用 DEM 建立流域三维地形, 结合野外考察的定点观测, 在 ArcGIS 中采用人工数字化的方式, 判读并提取湖泊边界. 湖泊矢量多边形的面积利用 ArcGIS 提供的 XTools 拓展模块计算.

3 湖泊提取结果

3.1 流域湖泊的年内变化

湖泊面积年内变化是季节干湿、冷暖变化的综合反映^[25]. 受气候季节变化影响, 湖泊面积年内波动表现为周期性扩张与萎缩^[26-27]. 不同气候因子对湖泊变化的影响已另有它文专门讨论, 在此不再赘述.

2002 年和 2009 年分别是过去 40 a 遥感解译出流域湖泊总面积的最大、最小年, 且这 2 a 可用于分析的遥感影像景数较多 (分别有 6、7 景), 故选用这 2 a 湖泊的提取结果 (表 3), 用以分析流域内湖泊的年内变化规律具有一定的代表性. 在有可用影

表 2 羊卓雍错流域不同时相的遥感影像解译标志

Table 2 Interpretation signals of the satellite images of the Yamzhog Yumco basin in different time phases

时相	类型	色调	形状	纹理	间接标志
非结冰期	湖区	蓝黑, 蓝色	面状, 不规则弧形边界	较均一	分布于山谷, 低海拔区域
	河流	深蓝色	细线, 不规则曲条状	较均一	部分与湖泊相连
	滩地	灰绿色	不规则絮状	不均一	环绕部分湖区
	裸土	黄褐色	不规则面状	较均一	分布在山体上
	植被	粉红、红色	不规则面状	较均一	分布在山体上和平原区
结冰期	水体	深蓝、蓝黑色	面状, 不规则弧形边界	均一	多分布在湖泊中央
	湖冰	深蓝, 白色裂纹	块状, 表面分布裂痕	不均一	成片存在与水体互相交融
	裸土	黄褐色	不规则面状	较均一	分布于湖周与山体上
	冰雪	白色, 边缘呈浅蓝色	不规则团状、面状	较均一	多集中在高海拔山区

表 3 2002、2009 年羊卓雍错流域内各湖泊面积变化距平

Table 3 Monthly anomalies of lake surface areas in the Yamzhog Yumco basin in 2002 and 2009

年份	月份	羊卓雍错/km ²	沉错/km ²	空母错/km ²	巴纠错/km ²	普莫雍错/km ²	总面积/km ²
2002	1	-4.97	-0.75	-0.14	-1.26	-0.81	-7.93
	2	-7.36	-0.28	-0.34	-1.90	-1.16	-11.05
	7	-6.30	-0.18	-0.02	-1.43	-1.64	-9.56
	10	10.41	0.68	0.66	2.17	2.69	16.61
	11	6.36	0.25	-0.20	1.43	0.93	8.77
	12	1.86	0.28	0.04	0.98	0.00	3.16
2009	3	14.80	0.73	0.25	3.57	-0.14	19.20
	4	2.10	0.11	-0.43	1.61	0.10	3.48
	6	1.01	-0.07	-0.28	-0.29	-0.83	-0.47
	7	-2.27	-0.05	0.51	-3.02	0.44	-4.40
	10	0.75	-0.05	0.56	1.01	1.51	3.78
	11	-2.37	-0.04	0.67	0.03	0.48	-1.22
	12	-14.01	-0.64	-1.27	-2.91	-1.55	-20.38

像的月份中, 2002 年 1、2、7 月流域内各湖泊面积均为负距平。其中, 羊卓雍错、空母错、巴纠错的湖泊面积在 2 月达到最小, 沉错在 1 月最小, 普莫雍错在 3 月达到最小; 10 月至 12 月各湖泊面积大体为正距平, 流域内湖泊的最大面积均出现在 10 月。

与 2002 年的湖泊面积波动相似, 2009 年 3、4、10、11 月各湖泊面积以正距平为主, 羊卓雍错、沉错和巴纠错均在 3 月达到最大面积; 6、7、12 月则以负距平为主, 除巴纠错外, 其余各湖泊面积均在 12 月达到最小。气象资料显示, 2009 年流域降水量比过去 40 a 平均年降水量减少了 34.1%, 7—9 月降水量仅占 2002 年同期的 51.8%。根据白地水文站的水位观测资料, 2009 年 1—12 月羊卓雍错水位呈显著直线下降趋势, 3 月水位分别比 6、7、10、11、12 月高 0.33 m、0.36 m、0.39 m、0.58 m、0.76 m, 且本应最可能出现大湖面的 6—9 月平均水位却比过去 5 a 同时段平均水位低 1.38 m。结合气象、湖泊水位资料, 尽管 2009 年流域范围内缺少 1、2、5、8、9 月份的可用影像, 但仍可说明 2009 年 3 月份湖泊出现大湖面是合理的。羊卓雍错在 2009 年水位下降的可能原因是降水的显著减少。水位、降水量变化从一个侧面佐证了本研究解译结果的准确性。

3.2 流域湖泊的年际变化

将 37 幅遥感影像中提取的湖泊面积按年进行平均, 得到各湖泊近 40 a 的年际变化。受遥感影像

资料限制, 本文选取的资料并不连续, 部分月份的简单平均在理论上并不能代表湖泊面积的年际变化。然而, 遥感解译得到的羊卓雍错湖泊面积变化与白地水文站记录的水位变化有较好的一致性(图 2), 二者 Pearson 相关系数为 0.88, 并在 0.01 水平上显著相关。这说明本文解译出的羊卓雍错湖泊面积变化趋势能较好地代表湖泊水位变化趋势, 即可以用来分析湖泊变化的整体趋势。以上分析表明, 作为获取湖泊变化信息的手段, 前述湖泊提取方法适用于缺少观测站点的青藏高原湖泊提取。羊卓雍错水位于 1980 年前后达到近 40 a 最高, 据此可推测湖泊面积当时亦达到最大。水位和湖泊的最小值均出现在 2009 年。

流域内各湖泊之间存在相互联系, 故现将流域内湖泊作为一个整体, 来讨论长时间尺度上流域湖泊的面积变化。根据 37 幅遥感影像资料, 整个流域湖泊多年平均总面积为 985.06 km², 流域湖泊面积年际间波动比较大(图 3)。除 1990 年外, 在整个研究时段流域湖泊总面积变化规律与羊卓雍错湖泊面积变化(图 2)基本一致, 二者 Pearson 相关系数达到 0.90, 并在 0.01 水平上显著相关。而且, 羊卓雍错面积变化对流域湖泊总面积变化起着主导作用, 其多年平均贡献率为 70.0%。特别是在 1989 年, 相较于 1978 年, 羊卓雍错的萎缩量甚至大于整个流域的萎缩量, 其他湖泊不同程度的扩张则在一定程度上弱化了羊卓雍错对整个流域湖泊面积减小的影响。尽管 1980 年代到 1990 年代流域遥感影像普

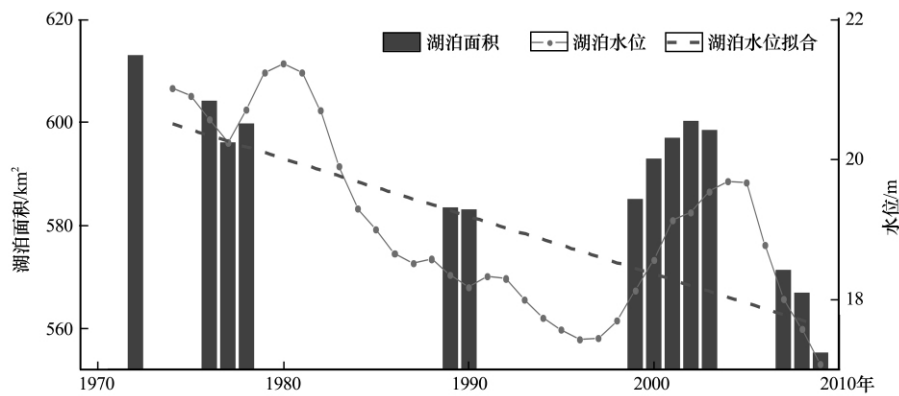


图2 1970—2009年羊卓雍错湖泊面积变化与湖泊水位

Fig. 2 Variations of the lake surface area and the lake level of the Yamzhog Yumco

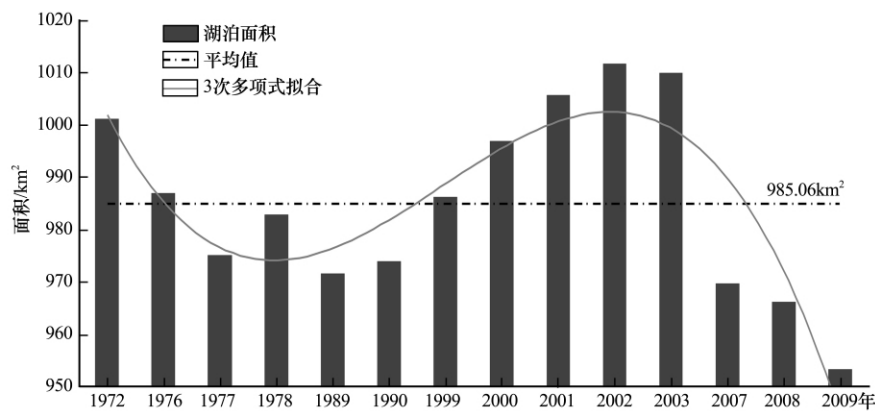


图3 羊卓雍错流域内湖泊总面积变化

Fig. 3 Variation of the total lake surface area in the Yamzhog Yumco basin

遍缺乏,但可根据羊卓雍错的水位变化,间接推测出流域湖泊总面积在该时间段内呈逐渐减少趋势。

1999—2003年流域为高湖面,流域湖泊总面积在2002年达到最高值(1 011.78 km²),这是21世纪以来流域气温、乃至整个高原气温升高显著、且流域降水在2000年前后偏高^[28]等共同作用的结果:气温升高导致冰川消融,进而补给湖泊;降水的增加则直接补给湖泊。

近年来,流域湖泊萎缩比较显著,并在2009年达到最低值(953.22 km²)(图3)。分析表明,羊卓雍错和巴纠错湖泊萎缩是近几年流域湖泊面积萎缩的关键,两湖对流域湖泊面积变化的贡献率为85.2%。以2009年为例,羊卓雍错和巴纠错的总萎缩量超过了流域湖泊总面积的萎缩量,普莫雍错和沉错的扩张仅补偿了很小一部分湖面萎缩。流域内其他较小湖泊在过去40年则呈不同程度的增长趋势,增长集中在1980年代至1990年代。流域主要湖泊羊卓雍错与青海湖、达则错等湖泊面积减小的趋势一致;而空母错,沉错、普莫雍错则呈现出面

积增大的变化趋势,与巴木错、色林错、纳木错等湖泊的变化趋势一致^[29-32]。同一时期,全球其他区域的高山湖泊亦发生了与青藏高原相似的变化,它们共同反映了高山湖泊对气候变化的敏感性和特殊性^[33-35]。近年来流域湖泊总面积的迅速萎缩,加大了未来该流域水资源的不稳定性。目前,羊卓雍错抽水蓄能电站已停用,使得水电站已不能为拉萨地区缺电问题提供帮助。

4 不确定性分析

湖泊提取过程中,由主、客观因素造成的不确定性将影响到对高原湖泊变化的正确认识。基于遥感影像的高原湖泊提取的不确定性主要来源于4个方面:遥感影像甄选、几何校正偏差、数字化容差、目视解译经验。

4.1 遥感影像甄选

基于遥感影像的高原湖泊提取首先要对不同时期、不同来源的遥感影像进行甄选。本研究虽已采用了来自3个系列卫星的37幅遥感影像,但数据

在时相上仍不能满足较高的时间分辨率。因受工作量和财力所限, 目前未引入其他卫星的影像。此外, 青藏高原云盖率较高, 尤其在雨季(7—9月)这个高原湖泊水量增长的关键阶段, 满足云盖条件的卫星遥感影像数量十分有限。这使得仅依靠遥感影像对湖泊面积年内、年际变化的认识难以全面、客观。随着项目的进一步开展, 研究将引入不受阴雨天气影响的微波遥感影像^[36-37], 这可以补充光学影像缺失的变化信息, 将更加准确和深入的认识高原流域湖泊变化。

4.2 几何校正误差、数字化容差

几何校正误差与数字化容差的大小与湖泊提取过程中所采用的遥感影像的空间分辨率高低有关。其中, 几何校正就是将不同时相、不同来源的遥感影像配准到同一地理坐标系下, 使得不同影像之间能够相互比较。本实验的配准精度控制在 0.5 个象元内, 但不同分辨率遥感影像的绝对配准精度有所不同, 这部分误差贡献将通过分辨率参数引入最大不确定性计算中。

数字化中的容差是指在遥感影像上确定一个矢量点位置时, 该点可能落在象元内的不同位置, 即在象元内或者在象元边缘。不同分辨率的影像, 点位置产生的容差则不同。鉴于矢量点落在象元内的位置不能确定, 故在此仅计算最大偏差。根据 Williams 等^[23]的研究, 某一矢量点由于几何校正和容差产生的最大误差可以用式(1)计算。点误差最终会积累, 并反映在面状地物的提取上。根据 Hall 等^[38]和 Ye 等^[39]的研究, 面积上的最大不确定性可以利用式(2)计算。影像分辨率是最大不确定计算的重要参数(p), 几何校正误差与数字化容差均会因分辨率不同而不同, 最终误差积累表现在面积提取的不确定性上(A)。

$$L = \sqrt{\sum p^2} + \sqrt{\sum r^2} \quad (1)$$

$$A = \sum p^2 \times \left[\frac{2L}{\sqrt{\sum p^2}} \right] \quad (2)$$

式中: p 为影像分辨率; r 为配准产生的几何误差; L 为矢量点的误差; A 为多边形面积的最大误差。经计算, 湖泊面积的最大不确定性为 $\pm 0.13 \text{ km}^2$, 占流域湖泊总面积的不足千分之一。因此, 这部分不确定性对湖泊变化研究的影响极小。

4.3 目视解译经验

高原湖泊目视解译过程的误差主要来自混合象元, 特别是湖泊边界成分复杂而造成的边界模糊

(湖岸沼泽、滩地与湖泊的界限不清, 以及结冰期湖泊边界难觅)的人为判断。此外, 卫星入射角、大气状况、土壤湿度、物候等因素都会在不同程度上导致光谱差异, 造成“同谱异物”和“异物同谱”的情况。这类问题部分可通过引入适当的图像匹配、图像增强技术和辅助信息(主要包括利用 DEM 建立流域三维可视地形和 GPS 定点观测)加以判断。其中, 目视解译过程中人为经验对湖泊边界的判定误差难以量化和控制。一方面, 不同解译者对湖泊边界的判断不可能在任何时候都完全相同; 另一方面, 数字化过程中会不可避免地存在判断误差和手工误差。因此, 目视解译过程给结果带来的误差难以评估。

为了最大程度地降低目视解译过程中的误差, 提高判读者的经验至关重要, 并为避免不同解译者的判读差异, 影像解译的参与者尽量控制到最低。野外实地验证则有助于提高湖泊边界的判读经验。经过连续 2 a 野外考察和验证, 本实验于 2009、2010 年 7 月在湖岸建立了 42 个 GPS 验证点(包括特征地物和随机采样点), 并与 2009 年 7 月 TM 影像的提取结果进行对比。结果显示, 野外实验中, 湖岸 GPS 验证点的位置与数字化提取的湖泊边界比较吻合。这与水位资料共同验证了本文基于多源、多时相遥感影像的湖泊提取、湖泊边界判读的准确性和可靠性。

5 结论与讨论

目前, 计算机自动解译在高原湖泊提取上具有很大的局限性, 目视解译的方法较为适合高原湖泊的提取。本文基于 37 景多源、多时相遥感影像, 结合野外实验, 建立了青藏高原羊卓雍错流域湖泊不同时相的解译标志, 并进而提取了流域内主要湖泊信息, 分析了流域湖泊近 40 a 的年内和年际变化规律。在此基础上, 重点探讨了不确定性, 包括遥感影像甄选、几何校正偏差、数字化容差、目视解译经验等 4 个方面。未来研究中, 需采用不受天气影响的微波影像, 以在空间和时间上提高高原湖泊变化提取的精度, 更好地捕捉湖泊变化的细节信息; 以及引入高空间分辨率的遥感数据, 通过提高影像分辨率来减小几何纠正和数字化容差带来的最大误差。同时, 结合多源卫星资料, 开展针对湖泊不同时相特征的实地考察验证。对于目视解译提取湖泊方法较耗时耗力的问题, 今后研究应致力于开发针对高原湖泊不同时相特征、结合高原特殊地形、以

及适用于多分辨率数据源遥感影像的高原湖泊提取算法。这将有助于遥感影像资料在高原众多湖泊变化研究的应用与推广,并获取湖泊变化的长时间序列,以补充缺乏观测的高原湖泊资料,为更好地探讨高原湖泊对气候变化的响应提供支持。

参考文献 (References):

- [1] Ke Changqing. A review of monitoring lake environment change by means of remote sensing[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2004, **4**: 81–86. [柯长青. 湖泊遥感研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2004, **4**: 81–86.]
- [2] Robert C F, Kenneth M H, Wendy R E. Satellite remote sensing classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North Slope of Alaska[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**: 116–126.
- [3] Wang Haibo, Ma Mingguo. A review of monitoring change in lake water areas based on remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(5): 674–684. [王海波, 马明国. 基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2009, **24**(5): 674–684.]
- [4] Yang Ying, Ruan Renzong. Extraction of plain lake water body based on TM imagery[J]. *Remote Sensing Information*, 2010, **3**: 60–64. [杨莹, 阮仁宗. 基于 TM 影像的平原湖泊水体信息提取的研究[J]. *遥感信息*, 2010, **3**: 60–64.]
- [5] Zheng M P. An Introduction to Saline Lakes on the Qinghai-Tibet Plateau [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1997: 1–18.
- [6] Guan Zhihua, Chen Chuanyou, Qu Yuxiong, *et al.* Rivers and Lakes of Xizang [M]. Beijing: Science Press, 1984: 161–168. [关志华, 陈传友, 区裕雄, 等. 西藏河流与湖泊 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 161–168.]
- [7] Wu Y H, Zhu L P. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co catchment, central Tibetan Plateau, during 1970–2000 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, **18**: 177–189.
- [8] Bian D, Bian M C R, Li L, *et al.* The response of lake change to climate fluctuation in north Qinghai-Tibet Plateau in last 30 years[J]. *Journal of Geographical Sciences*. 2009, **19**(2): 131–142.
- [9] Zhu L P, Xie M P, Wu Y H. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**: 1294–1303.
- [10] Niu Yifang, Li Caixing, Xi Xiaohuan, *et al.* Plateau lake variation monitored by satellite remote sensing and the relation to climate change[J]. *Arid Land Geography*, 2008, **31**(2): 284–290. [牛沂芳, 李才兴, 刁晓环, 等. 卫星遥感检测高原湖泊水面变化及与气候变化分析[J]. *干旱区地理*, 2008, **31**(2): 284–290.]
- [11] Zhang Shuping, Zhang Hucai, Chen Guangjie, *et al.* Climate and glacier changes and lake response in the Ngangla Ringsto catchment in Western Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 267–276. [张淑萍, 张虎才, 陈光杰, 等. 1973–2010 年青藏高原西
- 部昂拉仁错流域气候、冰川变化与湖泊响应[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 267–276.]
- [12] Liu Xiaochen, Xiao Cunde. Preliminary study of the Jiemayangzong Glacier and lake variations in the source regions of the Yarlung Zangbo River in 1974–2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(3): 488–496. [刘晓尘, 效存德. 1974–2010 年雅鲁藏布江源头杰玛央宗冰川及冰湖变化初步研究[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(3): 488–496.]
- [13] Ye Q H, Zhu L P, Zheng H X, *et al.* Glacier and lake variation in the Yamzhog Yumco Basin, southern Tibetan Plateau, from 1980 to 2000 using remote-sensing and GIS technologies[J]. *Journal of Glaciology*, 2007, **53**: 673–676.
- [14] Lu Anxin, Wang Lihong, Yao Tandong. The study of Yamzho Lake and Chencuo Lake variation using remote sensing in Tibet Plateau from 1970 to 2000[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, **21**(3): 173–177. [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[J]. *遥感技术与应用*, 2006, **21**(3): 173–177.]
- [15] Yu Shumei, Liu Jingshi, Yuan Jinguo. Vegetation change of Yamzho Yumco Basin in Southern Tibet based on SPOT-VGT NDVI[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1570–1574. [于树梅, 刘景时, 袁金国. 基于 SPOT-VGT NDVI 的西藏羊卓雍错流域地表覆被变化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1570–1574.]
- [16] Bartolucci L A. Field measurements of the spectral response of nature waters[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, **43**(5): 595–598.
- [17] Li J, Narayanan R M. A shape-based approach to change detection of lakes using time series remote sensing images[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(11): 2466–2477.
- [18] Ma M, Wang X, Veroustraete F, *et al.* Change in area of Ebinur Lake during the 1998–2005 period[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, **28**(24): 5523–5533.
- [19] Ryu J H, Won J S, Min K D. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat; a case study in Gomsu Bay, Korea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 442–456.
- [20] Luo Jiancheng, Sheng Yongwei, Shen Zhanfeng, *et al.* Automatic and high-precise extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(4): 610–615. [骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 分步迭代的多元光谱遥感水体信息高精度自动提取[J]. *遥感学报*, 2009, **13**(4): 610–615.]
- [21] Chen Huangfang, Wang Jinliang, Chen Zhong, *et al.* Comparison of water extraction methods in mountains plateau region from TM image[J]. *Remote sensing technology and application*, 2004, **19**(6): 479–484. [陈华芳, 王金亮, 陈忠, 等. 山地高原地区 TM 影像水体信息提取方法比较——以香格里拉县部分地区为例[J]. *遥感技术与应用*, 2004, **19**(6): 479–484.]
- [22] Wang, Haibo, Ma Mingguo. A review of monitoring change in lake water areas based on remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(5): 674–684. [王海波, 马明国. 基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2009, **24**(5): 674–684.]

- [23] Williams R S, Hall D K, Sigurosson O, *et al.* Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973–1992 [J]. *Annals of Glaciology*, 1997, **24**: 72–80.
- [24] Ye Qinghua, Yao Tandong, Zheng Hongxing, *et al.* Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco basin in Tibet [J]. *Geographic Research*, 2008, **27**(5): 1178–1190. [叶庆华, 姚檀栋, 郑红星, 等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 2008, **27**(5): 1178–1190.]
- [25] Oswald C J, Rouse W R. Thermal characteristics and energy balance of various-size Canadian Shield Lakes in the Mackenzie River Basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, **5**: 129–143.
- [26] Vinebrooke R D, Thompson P L, Hobbs W, *et al.* Glacially mediated impacts of climate warming on alpine lakes of the Canadian Rocky Mountains [J]. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 2010, **30**: 1449–1452.
- [27] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Ye Baisheng, *et al.* Climate Implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(5): 624–632. [丁永建, 刘时银, 叶柏生, 等. 近 50 年中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(5): 624–632.]
- [28] Ren Yu, Zhang Xueqin, Peng Lili. Construction and analysis of mean air temperature anomaly series for the Qinghai-Xizang Plateau during 1951–2006 [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, **29**(3): 572–578. [任雨, 张雪芹, 彭莉莉. 青藏高原 1951–2006 年气温距平序列的建立与分析[J]. *高原气象*, 2010, **29**(3): 572–578.]
- [29] Shao Zhaogang, Zhu Dagang, Meng Xiangang, *et al.* Characteristics of the change of major lakes on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 25 years [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, **26**(12): 1633–1645. [邵兆刚, 朱大岗, 孟宪刚, 等. 青藏高原近 25 年来主要湖泊变迁的特征[J]. *地质通报*, 2007, **26**(12): 1633–1645.]
- [30] Zhu Dagang, Meng Xiangang, Zheng Daxing, *et al.* Changes of rivers and lakes on the Qinghai-Tibet Plateau in the past 25 years [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, **26**(1): 22–30. [朱大岗, 孟宪刚, 郑达兴, 等. 青藏高原近 25 年来河流、湖泊的变迁及其影响因素[J]. *地质通报*, 2007, **26**(1): 22–30.]
- [31] Qiao Cheng, Luo Jiancheng, Sheng Yongwei, *et al.* Analysis on lake changes since ancient and modern ages using remote sensing in Dagze Co, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(1): 98–102. [乔程, 骆剑承, 盛永伟, 等. 青藏高原湖泊古今变化的遥感分析——以达则错为例[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(1): 98–102.]
- [32] Ma Yingzhao, Yi Chaolu, Wu Jiazhang, *et al.* Lake surface expansion of Nam Co during 1970–2009: Evidence of satellite remote sensing and cause analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(1): 81–88. [马颖钊, 易朝路, 吴家章, 等. 1970–2009 年纳木错湖泊面积扩张的遥感卫星观测证据及原因之商榷[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(1): 81–88.]
- [33] Huggel C, Kaab C, Haeblerli W, *et al.* Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(2): 316–330.
- [34] Fujita K, Suzuki R, Nuimura T, *et al.* Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya [J]. *Journal of Glaciology*, 2008, **54**: 220–228.
- [35] Parker B R, Vinebrooke R D, Schindler D W. Recent climate extremes alter alpine lake ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, **105**(35): 12927–12931.
- [36] Medina C E, Gomez E, Alosa J J, *et al.* Water volume variations in Lake Izabal (Guatemala) from in situ measurements and ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) data products [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **382**: 34–48.
- [37] Yin Z Y, Zhang X Q, Liu X D, *et al.* An assessment of the biases of satellite rainfall estimates over the Tibetan Plateau and correction methods based on topographic analysis [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, **9**: 301–326.
- [38] Hall D K, Bayr K J, Schner W, *et al.* Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893–2001) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **86**: 566–577.
- [39] Ye Q H, Kang S C, Chen F, *et al.* Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, **52**(179): 537–545.

Extracting Alpine Lake Information Based on Multi-Source and Multi-Temporal Satellite Images and Its Uncertainty Analysis

—A Case Study in Yamzhog Yumco Basin, South Tibet

TIAN Yuan, ZHANG Xueqin, SUN Rui

(*Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: The research on the lake extraction from satellite images and the extracted lake size variation can provide reliable method and indispensable information to understand the variation of alpine lakes with the accelerating warming. As a case study in Yamzhog Yumco Basin in southern Tibet, the method of extracting alpine lakes from multi-source and multi-temporal satellite images was explored with field survey experience. Analysis showed that automatic classification was hard to satisfy the accuracy for the investigation on the variation of alpine lake size. Although the visual interpretation took more load and time, it had better results by adopting more experience and consequently was a practical way to delineate the boundary of alpine lakes. Thus, the signals of image interpretation were built with the consideration of the characteristics of lake surface in different seasons and topographic information. Accordingly,

the boundary of five major lakes in Yamzhog Yumco Basin were digitalized based on 37 scenes of satellite images from Landsat, CBERS and HJ-1A/1B during the period of 1972—2009. Then, the lake surface area was calculated and analyzed at seasonal and annual time scale. The uncertainty of lake extraction was discussed from four respective including images selection, geometric correction, tolerance in digitalization and misjudgment. In the future, higher resolution and microwave multi-temporal satellite images are expected to enhance the ability to monitor lake variation in detail at both of temporal and spatial scale. More advanced automatic interpretation arithmetic is urgent to be developed with the consideration of different feature of alpine lake in different seasons and multi-source images, which would help to deepen the understanding of long-term alpine lake variation.

Key words: extraction of lake information; signals of image interpretation; uncertainty analysis; Yamzhog Yumco basin