

doi: 10.6046/gtzyyg.2019.04.22

引用格式: 马小奇, 卢善龙, 马津, 等. 基于地形参数的湖泊水储量估算方法——以纳木错为例[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 167-173. (Ma X Q, Lu S L, Ma J, et al. Lake water storage estimation method based on topographic parameters: A case study of Nam Co Lake[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(4): 167-173.)

基于地形参数的湖泊水储量估算方法

——以纳木错为例

马小奇^{1,2}, 卢善龙¹, 马津³, 朱立平⁴

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 数字地球院重点实验室, 北京 100101; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018; 4. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101)

摘要: 湖泊水储量通常采用观测水位和实测水下地形数据相结合的方法进行估算, 因此对于无资料或资料匮乏区域很难获得湖泊水储量信息。为了探讨针对这一问题的解决方法, 以西藏自治区纳木错为例, 基于湖泊水面以上和水面以下地形具有相似性的特性, 利用湖泊水面以上的数字高程模型(digital elevation model, DEM)构建高程与面积的关系以及面积与体积增量的关系, 进而对湖泊水下高程—面积—体积增量递推计算, 最终构建面积—体积模型从而估算湖泊水储量。试验结果表明, 利用湖泊周围地形构建的基于面积的湖泊水储量估算模型具有较高的精度, 以纳木错湖盆 DEM 求得其湖面面积, 计算得其水储量为 1 115.70 亿 m³, 该结果与基于实测水深数据建立的纳木错水下地形 DEM 计算的水储量(1 019.50 亿 m³)相比, 绝对误差为 96.20 亿 m³, 相对误差为 9.40%。该文为无资料地区水上和水下的地形特征参量基本一致的自然湖泊水储量的估算提供了方法参考。

关键词: DEM; 水储量; 无资料地区; 湖泊; 纳木错

中图法分类号: P 237; TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2019)04-0167-07

0 引言

湖泊的水储量及其随时间的变化影响着湖泊生态系统的物理、化学及生物过程, 可作为降水和蒸发之间的平衡及地表水和地下水系统之间相互作用的指示性指标^[1-2]。准确监测和估算湖泊水储量对开展湖泊生态学、水文学研究和水资源调度管理具有重要意义。湖泊水储量的计算通常利用水下地形数据, 基于“3S”(遥感(remote sensing, RS)、全球定位系统(global positioning system, GPS)和地理信息系统(geographic information system, GIS))技术进行估算。Gleason 等^[3]利用现场测量 GPS 数据构建了面积—体积预测模型; Lane 等^[4]利用激光雷达数据和 ArcGIS 软件中的不规则三角网(triangulated ir-

regular network, TIN)多边形体积模型计算了美国佛罗里达州中北部独立湖泊的水量; Zhang 等^[5]利用多年遥感影像、纳木错水下地形和 GIS 技术, 给出了 1976—2009 年间纳木错水储量年度变化。上述方法可以准确地计算湖泊水储量及其变化, 但对于无资料地区而言, 受自然环境、资金和人力等因素的影响, 难以获取水下地形和水位等实测数据。截止目前, 全球范围内还有很大一部分湖泊水体没有实测数据用于其水储量的计算。

湖泊水面以下的湖盆和水面以上的湖盆环境是由相同的地质演化过程(如冰川作用、河流冲刷沉积等)形成的, 湖泊水下地形的起伏应该是水面以上周围地形的一个延续, 具有相似特征。因此, 湖泊周围地形高度的变化特征可能在其表面以下具有类似的变化特征^[6]。Sobek 等^[7]将瑞典湖泊数据集与 GIS 导出的地理和地形参数相结合, 基于地形图上

收稿日期: 2018-09-11; 修订日期: 2018-12-04

基金项目: 国家重点研发计划项目“国家水资源立体监测体系与遥感技术应用”(编号: 2017YFC0405802)、国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“青藏高原湖泊过程及其与大气相互作用的高分辨率模式发展和模拟研究”(编号: 91637209)和遥感科学国家重点实验室自由探索/青年人才项目“基于地形相似理论的湖泊水储量遥感估算方法研究”(编号: 2017YFC0405802)共同资助。

第一作者: 马小奇(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事水体遥感方面研究。Email: 2101160228@cugb.edu.cn。

通信作者: 卢善龙(1979-), 男, 副研究员, 主要研究方向为地表水资源遥感和湿地生态。Email: lusl@radi.ac.cn。

获取的地形参数预测湖泊的体积和深度,发现湖泊面积和湖泊边界以外 50 m 宽区域的最大坡度是湖泊体积和深度最重要的预测因子; Messenger 等^[8]开发了地理统计模型并基于湖泊周围的地形信息计算了全球 142 万个面积小于 500 km²的天然湖泊的平均深度,通过平均深度与湖面面积的乘积来计算湖泊体积。

青藏高原分布着海拔高、数量多、面积大的高原湖泊群。至今这些湖泊大多处于自然状态,受人类活动影响较小;同时由于高寒缺氧,自然条件差,人员设备难以到达,许多湖泊水位与水储量之间的关系仍难以确定。近年来虽然有很多关于高原湖泊水储量变化的研究,但鲜有关于湖泊净水储量估算的研究。Liao 等^[9]利用 1970 年的地形图和 Landsat MSS, TM 和 ETM + 卫星影像,提取高原主要湖泊的表面积,分析青藏高原 40 a 间湖面面积变化与气候变化之间的关系; Yang 等^[10]和朱立平等^[11]基于航天飞机雷达地形测绘任务 (shuttle Radar topography mission, STRM) 数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 和 Landsat 影像,估算了 1976—2013 年间青藏高原大于 50 km²湖泊的水量变化; Qiao 等^[12]和 Song 等^[13]将光学遥感影像、卫星测高数据和重力测量数据集成在一起,研究分析发现青藏高原的大部分湖泊水储量呈现出明显的上升趋势。本文以纳木错为例,介绍一种利用湖泊水面以上地形和湖泊水面面积数据构建面积—体积模型的湖泊水储量估算方法。

1 研究区概况及数据源

纳木错是青藏高原第三大的湖泊,地理范围在 E90°16′ ~ 91°03′, E30°30′ ~ 30°55′ 之间^[14], 位于西

藏自治区那曲地区当雄县,2000 年经 STRM DEM 测得湖面海拔为 4 724 m,水域面积为 1 944.30 km²,最大深度为 98 m^[15]。2005 年以前,纳木错流域内没有气象观测站或水文站;2005 年后中国科学院青藏高原研究所设立了纳木错观测研究站,逐步开展了一些常规参数的监测。研究人员在 2005—2007 年间进行了 3 次综合调查,得出了纳木错的水深资料^[15]。

本研究使用的 DEM 数据为 90 m 空间分辨率的 STRM DEM 数据,由美国国家航空航天局喷气推进实验室与美国国家影像与制图局联合测量获得^[16-18],来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://www.gscloud.cn>); 纳木错湖泊水面数据来源于卢善龙等^[19]以 MODIS MOD09Q1 为数据源提取的 2000—2012 年间青藏高原每 8 d 的湖泊水面数据集;验证数据参考 Wang 等^[15]发表的纳木错水下 DEM,该数据是基于 2005—2007 年间湖泊测深数据 (共 305 721 个测量点),通过等深线图绘制及水下 TIN 模型构建获得。

2 方法原理

假定湖泊水下为规则湖盆,如锥形湖盆 (水面与水深呈线性变化) 或杯型湖盆 (水面与水深呈非线性变化),则湖泊水下地形可以认为是水上地形的延续,具有相似性特征。湖泊水面以上一定范围内的地形特征参量 (如地形高差、平均高程和坡度等) 可以作为水下地形的表征指标。因此,通过分析和构建湖泊水面以上高程、平面面积、体积增量之间的函数关系能推导出水面以下水量与对应水面面积之间的数值关系模型 (图 1)。

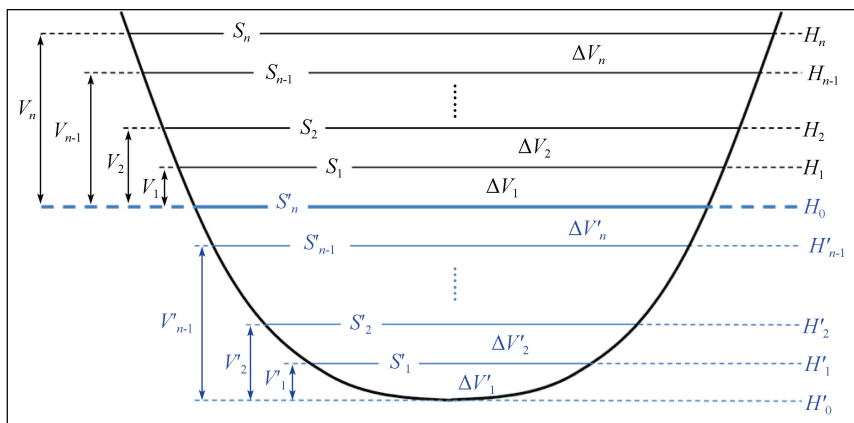


图 1 基于湖盆地形相似特征的湖泊水储量估算方法示意图

计算步骤如下:

1)以单个湖盆 DEM 数据为基础,计算湖面 H_0 以上等间距的不同高程平面的面积 $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 建立面积 S_i 与高程 H_i 的函数关系。

2)计算湖面以上等间距的不同高程平面至湖面间的体积 $V_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 利用

$$\Delta V_i = V_i - V_{i-1}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

计算单位高程增加对应的体积增量 $\Delta V_i, i = 1, 2, \dots, n$, 建立面积 S_i 与体积增量 ΔV_i 的函数关系。

3)假设体积增量为 0 时对应的面积为湖底面积,通过面积与高程的函数关系可近似求得湖底高程 H'_0 。

4)以湖底高程为起始高程,利用高程—面积函数关系、面积—体积增量函数关系等间距剖分至湖面 H_0 , 得到水面以下不同水位对应的湖泊面积与体积增量数据对 $(S'_i, \Delta V'_i), i = 1, 2, \dots, n$ 。

5)将体积增量逐级累加得到水面以下不同水位对应的湖泊体积 $V'_i, i = 1, 2, \dots, n$, 计算公式为

$$V'_i = V'_i + \Delta V'_{i-1}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

利用不同水位对应的水面面积与体积数据对 $(S'_i, V'_i), i = 1, 2, \dots, n$, 即可建立湖泊水面面积 S'_i 与体积 V'_i 的函数关系。

3 水储量估算模型构建

构建过程包括湖泊水面提取,数据统计,回归分析,高程—面积函数关系、面积—体积增量函数关系和面积—体积模型构建等步骤(图 2)。

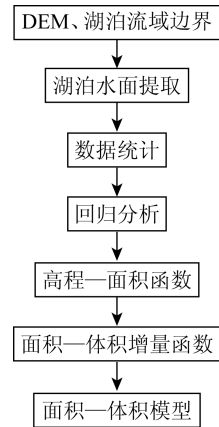


图 2 本文方法流程

Fig. 2 Process of the proposed method

3.1 水面以上单位高程变化对应体积计算

以纳木错湖盆范围 SRTM DEM 作为基础研究数据,对其进行等高线分析,发现纳木错湖面高程为 4 724 m。提取湖盆地中 4 724 m 等高线构建纳木错湖泊水面,面积为 1 944.30 km²(图 3)。

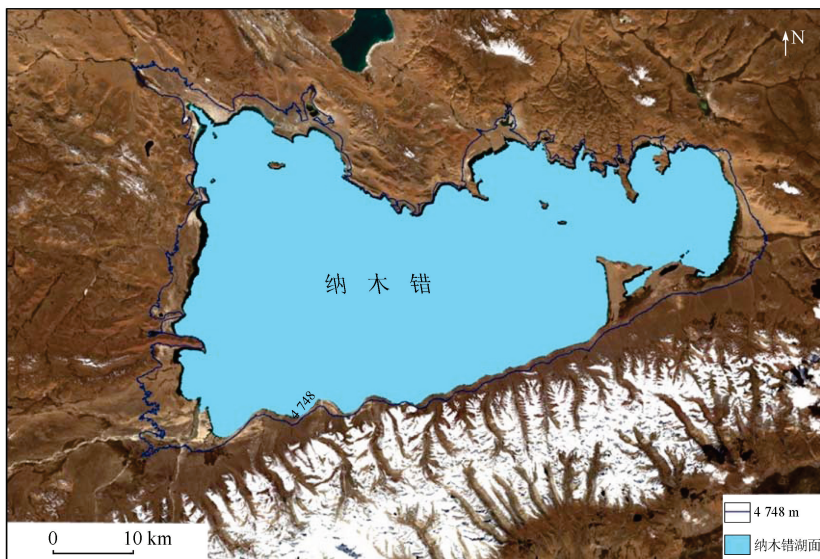


图 3 纳木错湖面及周围等高线图

Fig. 3 Contour of 4 724 m and 4 748 m and of Nam Co Lake and the maximum water surface in 2008

青藏高原的现代湖泊绝大多数为封闭的咸水湖和盐湖,在其周围广泛分布着湖泊收缩时残留的湖滨相砂砾石和湖蚀崖坎构成的古湖岸线或粉细砂黏土组成的湖积平原和阶地,依此可以重建古湖面的高度。纳木错湖泊扩张时形成的最高古湖岸线重建湖面的高度为数据 4 748 m^[20-21],以高程 4 724 m 对应

的水平面为起始参考平面,利用表面体积功能求取高程 4 724 ~ 4 748 m 间每上升 1 m 所在平面的面积及该平面至起始参考面的体积 V_i ,这部分体积即是水位上升至该高程时水储量的变化量。利用式(1)计算相邻 2 个参考面的体积增量 ΔV_i ,具体如表 1 所示,其中将 4 724 m 处体积视为 0.01 亿 m³。

表 1 纳木错湖水面以上单位高程变化对应的体积及体积增量

Tab.1 Calculated volumes in different elevation related to 4 724 m of Nam Co Lake

| 高程/m | 面积/km ² | 体积/亿 m ³ | 体积增量/亿 m ³ |
|-------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| 4 724 | 1 944.30 | 0.01 | 0.01 |
| 4 725 | 1 968.08 | 19.57 | 19.56 |
| 4 726 | 1 984.79 | 39.29 | 19.72 |
| 4 727 | 2 001.32 | 59.19 | 19.90 |
| 4 728 | 2 018.35 | 79.27 | 20.08 |
| 4 729 | 2 036.24 | 99.53 | 20.26 |
| 4 730 | 2 054.75 | 119.97 | 20.44 |
| 4 731 | 2 073.05 | 140.59 | 20.62 |
| 4 732 | 2 091.12 | 161.41 | 20.82 |
| 4 733 | 2 108.66 | 182.39 | 20.98 |
| 4 734 | 2 126.04 | 203.55 | 21.16 |
| 4 735 | 2 146.12 | 224.89 | 21.34 |
| 4 736 | 2 165.76 | 246.44 | 21.55 |
| 4 737 | 2 185.40 | 268.18 | 21.74 |
| 4 738 | 2 204.70 | 290.13 | 21.95 |
| 4 739 | 2 223.20 | 312.27 | 22.14 |
| 4 740 | 2 242.33 | 334.59 | 22.32 |
| 4 741 | 2 263.04 | 357.12 | 22.53 |
| 4 742 | 2 285.53 | 379.85 | 22.73 |
| 4 743 | 2 308.85 | 402.82 | 22.97 |
| 4 744 | 2 330.95 | 426.03 | 23.21 |
| 4 745 | 2 351.10 | 449.44 | 23.41 |
| 4 746 | 2 369.28 | 473.05 | 23.61 |
| 4 747 | 2 385.34 | 496.83 | 23.74 |
| 4 748 | 2 395.55 | 520.76 | 23.93 |

3.2 周围地形高程—面积—体积增量间的函数关系

统计分析表 1 中不同湖面高程对应水平面的面积,结果表明,两者呈强线性关系 ($R^2 = 0.9987$) (图 4),其表达式为

$S = 19.181H - 88672$ (3)

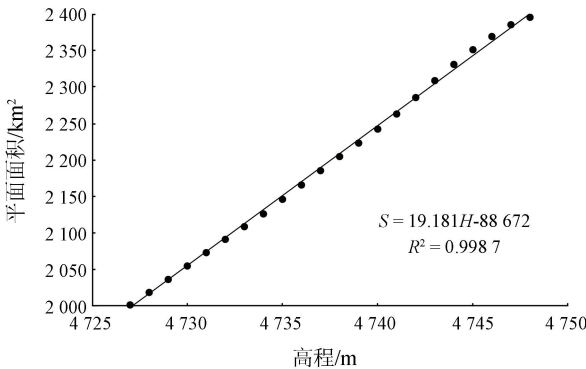


图 4 不同湖面高程与平面面积之间的函数关系

Fig.4 Functional relationship between elevation and surface area in different location above 4 724 m

采用同样的方法计算得到不同湖面高程对应的面积与体积增量之间的函数关系,两者之间同样呈强线性关系 ($R^2 = 0.9999$) (图 5),其表达式为

$\Delta V = 0.0101S - 0.2787$ (4)

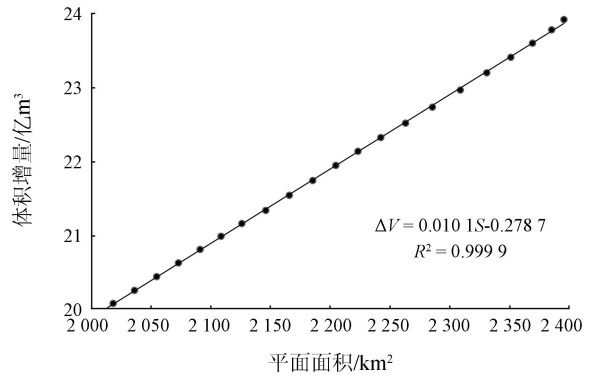


图 5 不同高程对应的平面面积与体积增量之间的函数关系

Fig.5 Functional relationship between surface area and volume increment in different elevation

3.3 面积—体积模型的构建

根据面积—体积增量函数(式(4))计算当体积增量为 0 时的水平面面积 S'_0 为 27.59 km²,此面积即为估算的纳木错湖底面积。利用高程—面积函数(式(3))计算面积趋向于 27.59 km²时对应的高程 H'_0 为 4 624 m,此高程为估算的湖底高程。

以估算的湖底高程 4 624 m 为起始,高差 1 m 为间距,计算水下不同高程对应的水平面面积 S'_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 至 4 724 m (湖面高程),求得不同水深对应平面的面积数据。利用式(4)求得水下不同水深平面对应的体积增量 $\Delta V'_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$),利用式(2)逐级累加即得到了纳木错不同水面面积对应的水储量 V'_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。利用 (S'_i, V'_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 数据进行回归分析,发现纳木错的湖面面积与湖水体积之间为标准的二次函数关系(图 6),模型公式为

$V = 0.0003S^2 - 0.0095S + 0.0831$ (5)

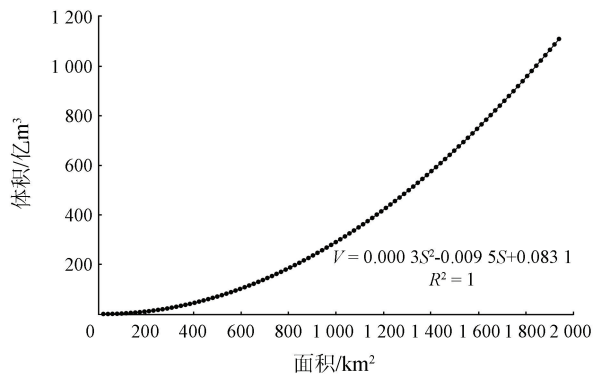


图 6 湖面面积与湖水体积的函数关系

Fig.6 Relationship between area and volume

4 精度评价与误差分析

4.1 模型精度评价

以 4 724 m 等高线提取的纳木错水面面积

(1 944.30 km²)为输入,利用式(5)估算求得纳木错湖水储量为 1 115.70 亿 m³。

参考 2005—2007 年间纳木错湖测深数据建立的水下地形图(图 7),通过 ArcGIS10.1 软件功能性表面工具集的表面体积功能计算得到纳木错的水储量为 1 019.50 亿 m³。以水下地形图求得水储量为实测值,可知本文模型估算的误差(实测值与模拟值的差值)为 -96.20 亿 m³,相对误差为 9.40%。

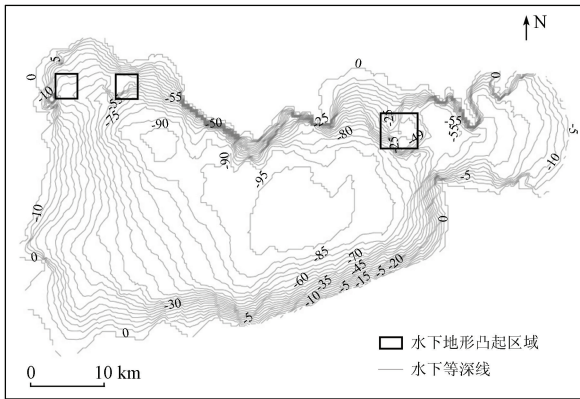


图 7 纳木错水下地形图

Fig. 7 Underwater topography of Nam Co Lake

4.2 模型误差分析

本文在面积—体积模型的构建过程中利用面积—体积增量函数(式(4))估计纳木错湖底的面积 S_0' 为 27.59 km²,利用高程—面积函数(式(3))计算湖底高程 H_0' 为 4 624 m。根据计算时间段纳木错湖面的高程(H_0 为 4 724 m)可得模型估计的纳木错湖最大深度为 100 m,该深度比实测最大水深(98 m^[16])深 2 m。湖泊最大深度相对误差约为 2%,这一深度差异是模型对不同深度处模拟误差的累积。

为了进一步分析模型模拟结果随水深变化的情况,计算并分析了水下 95 m 至水面范围内不同水面面积及对应体积增量的模型估算结果与实测结果之间的差异,如图 8—9 所示。水深在 0~20 m 范围内,模型对水面面积与体积增量的估计值比实测值大,且随着深度的增加差异逐渐减少;水深在 20~60 m 范围内,模型对水面面积和体积增量的估计均比实测小,且在 40 m 水深左右随着深度的增加差异逐渐减少,之后呈缓慢增加趋势;水深在 60~80 m 范围内,不同深度对应的面积误差与体积增量误差出现突增,且随着深度的增加误差逐渐增大;水深在 80~95 m 范围内,不同深度的面积误差与体积增量误差出现回落,且随着深度的增加误差逐渐减少。

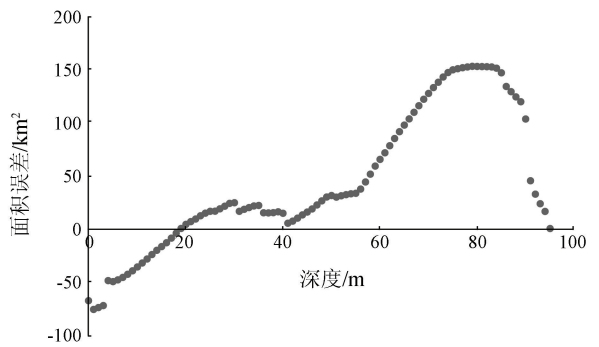


图 8 不同水深与对应水平面面积误差

Fig. 8 Errors between model calculated and TIN derived surface areas in different water depths

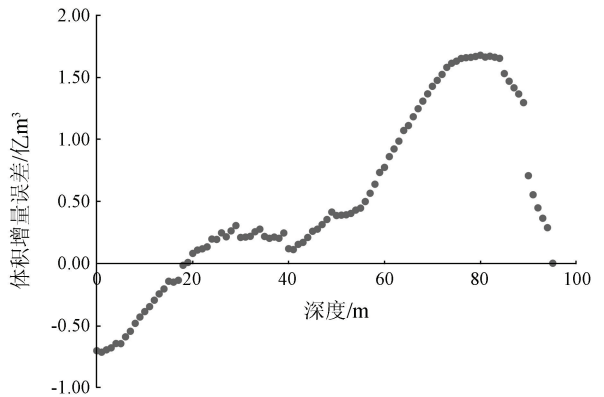


图 9 不同水深与对应单位深度范围内的体积增量误差

Fig. 9 Errors between the model calculated and TIN derived volumes in different water depths and related changed volumes

整体而言,当水深在 60 m 以内时,湖泊地形呈单一变化趋势,模型能较好地反映地形特征,模型估算的体积误差较小;当水深超过 60 m 后,地形变化逐渐复杂,特别是在湖泊西北和东北 3 个水下地形凸起区域(图 7 黑框区域),地形变化显著,单一趋势变化的模型无法正确刻画这种起伏变化的水下地形特征,模型估算结果误差急剧增加。而当深度超过 83 m 时,因实际地形又趋于单一,模型结果误差再次减小。

5 结论

1) 本研究基于湖盆地形的相似特性,构建了一种基于湖泊水面以上地形高程、面积和体积增量数值关系的湖泊水储量估算方法。该方法具有不依赖于实测水深测量数据的特点,为无资料地区水上和水下的地形特征参量基本一致湖泊水储量计算提供了一种简单而高效实用的技术途径。

2) 利用该方法基于纳木错湖盆 DEM 求得水面面积为 1 944.30 km²时水储量为 1 115.70 亿 m³,该

结果与基于实测水深数据建立的纳木错水下地形 DEM 计算的水储量 1 019.50 亿 m^3 相比,绝对误差为 96.20 亿 m^3 ,相对误差为 9.40%。

3) 本文构建的纳木错水储量估算模型,可用于纳木错多年水储量监测,在水下地形和水位数据匮乏的无资料地区,利用该方法构建的水储量估算模型只要获得湖泊水面面积即可估算出水储量,对于水量变化监测具有实用意义。

4) 对于水下和水下地形相似性较弱的湖泊,因模型模拟方式难以准确刻画其复杂的水下地形特征,本文方法的应用仍具有一定的局限性。但对于这类湖泊利用本文构建的水储量模型只需有可靠的水面面积变化数据,便可求得精度较高的水储量变化数据。

5) 青藏高原面积大于 1 km^2 的湖泊有 1 055 个^[22],但目前只有 30 多个湖泊有实测水下地形数据。未来的研究中,将以这些有实测数据的湖泊为参考,针对不同面积大小、不同类型的湖泊研究和构建相应的湖泊水储量估算模型,并最终形成可用于整个高原区湖泊水储量估算的技术方法体系。

参考文献 (References):

- [1] Medina C, Gomez - Enri J, Alonso 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(1 - 4): 34 - 48.
- [2] Brooks R T, Hayashi M. Depth - area - volume and hydroperiod relationships of ephemeral (vernal) forest pools in southern New England [J]. *Wetlands*, 2002, 22(2): 247 - 255.
- [3] Gleason R A, Tangen B A, Laubhan M K, et al. Estimating Water Storage Capacity of Existing and Potentially Restorable Wetland Depressions in a Subbasin of the Red River of the North [R]. USGS Northern Prairie Wildlife Research Center, 2007.
- [4] Lane C R, D'Amico E. Calculating the ecosystem service of water storage in isolated wetlands using LiDAR in north central Florida, USA [J]. *Wetlands*, 2010, 30(5): 967 - 977.
- [5] Zhang B, Wu Y, Zhu L, et al. Estimation and trend detection of water storage at Nam Co Lake, central Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(1 - 2): 161 - 170.
- [6] Heathcote A J, del Giorgio P A, Prairie Y T. Predicting bathymetric features of lakes from the topography of their surrounding landscape [J]. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 2015, 72(5): 643 - 650.
- [7] Sobek S, Nisell J, Fölster J. Predicting the depth and volume of lakes from map - derived parameters [J]. *Inland Waters*, 2011, 1(3): 177 - 184.
- [8] Messenger M L, Lehner B, Grill G, et al. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo - statistical approach [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13603.
- [9] Liao J, Shen G, Li Y. Lake variations in response to climate change in the Tibetan Plateau in the past 40 years [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(6): 534 - 549.
- [10] Yang R, Zhu L, Wang J, et al. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013 [J]. *Climatic Change*, 2017, 140(3 - 4): 621 - 633.
- [11] 朱立平, 乔宝晋, 杨瑞敏, 等. 青藏高原湖泊水量与水质变化的新认知 [J]. *自然杂志*, 2017, 39(3): 166 - 172.
Zhu L P, Qiao B J, Yang R M, et al. A new cognition of the variation of water and water quality in the Qinghai - Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2017, 39(3): 166 - 172.
- [12] Qiao B, Zhu L, Wang J, et al. Estimation of lakes water storage and their changes on the northwestern Tibetan Plateau based on bathymetric and Landsat data and driving force analyses [J]. *Quaternary International*, 2017, 454: 56 - 67.
- [13] Song C, Huang B, Ke L. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi - mission satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 135: 25 - 35.
- [14] 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.
Guan Z H, Chen C Y, Ou Y X, et al. Rivers and Lakes in Tibet [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1984.
- [15] 卢善龙, 肖高怀, 贾立, 等. 2000—2012 年青藏高原湖泊水面时空过程数据集遥感提取 [J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 181 - 187. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2016. 03. 28.
Lu S L, Xiao G H, Jia L, et al. Extraction of the spatial - temporal lake water surface dataset in the Tibetan Plateau over the past 10 years [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(3): 181 - 187. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2016. 03. 28.
- [16] Wang J B, Zhu L P, Daut G, et al. Investigation of bathymetry and water quality of Lake Nam Co, the largest lake on the central Tibetan Plateau, China [J]. *Limnology*, 2009, 10(2): 149 - 158.
- [17] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The shuttle Radar topography mission: A new class of digital elevation models acquired by spaceborne Radar [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, 57(4): 241 - 262.
- [18] van Zyl J J. The shuttle Radar topography mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography [J]. *Acta Astronautica*, 2001, 48(5 - 12): 559 - 565.
- [19] Slater J A, Garvey G, Johnston C, et al. The SRTM data "finishing" process and products [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, 72(3): 237 - 247.
- [20] 李炳元. 青藏高原大湖期 [J]. *地理学报*, 2000(2): 174 - 182.
Li B Y. The great lake period of the Qinghai - Tibet Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000(2): 174 - 182.
- [21] 蒋瑛. 基于 RS 和 GIS 的青藏高原高湖面与现在湖面对比研究 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2013.
Jiang Y. Using RS and GIS Research of Comparison Between the Ancient Lake Level and the Lake Level Nowadays on Qinghai - Tibet Plateau [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2013.
- [22] 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量, 面积与空间分布 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(3): 394 - 401.
Ma R H, Yang G S, Duan H T, et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(3): 394 - 401.

Lake water storage estimation method based on topographic parameters: A case study of Nam Co Lake

MA Xiaoqi^{1,2}, LU Shanlong¹, MA Jin³, ZHU Liping⁴

(1. Key Laboratory of Digital Earth Institute, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Lake water reserves are often estimated according to water level observation and manually – measured underwater topography data. As for the lakes which lack data, it is really difficult to obtain the information of lake water reserves. In order to explore the solution of this problem, the authors chose the Nam Co Lake in Tibet as a study case. Based on the features of topography similarities between the above lake level and the under lake level, the authors made use of SRTM DEM of above the lake level to construct the relationship between the elevation and the area, the area and the volume increment. In turn, the elevation – area – volume increment of the lake’s underwater was recalculated. Finally, the authors constructed the area – volume model to calculate the lake water reserves. The result shows that the calculation is of high relative accuracy. According to the area of the lake by using the DEM of the Nam Co Lake basin, the authors calculated the lake water reserves, which reach 111.570 billion m³. This result is compared with the calculated water reserves of 101.950 billion m³ in the Nam Co Lake underwater terrain digital elevation model established based on measured water depth data, and its absolute error is 9.620 billion m³ whereas its relative error is 9.40%. The results obtained by the authors provide a reference for the estimation of natural lake water reserves with consistent water and underwater topographic parameters in data – absent areas.

Keywords: DEM; water reserves; no data area; lakes; Nam Co Lake

(责任编辑: 张 仙)