

多源雷达高度计全球典型湖泊水位变化 数据集 (2002–2016)

廖静娟^{1,2*}, 沈国状¹, 赵 云^{1,3}

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094;
2. 海南省地球观测重点实验室, 三亚 572029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要: 湖泊水位是反映区域和全球环境变化的重要指标。基于 ENVISAT/RA-2、Cryosat-2/SIRAL、Jason-2 三种星载雷达高度计的 GDR(Geophysical Data Record)数据和 MODIS 影像数据经湖泊边界提取、水位计算、水位异常值剔除、高斯滤波去噪、高程系统转换等过程, 提取了全球 118 个面积大于 400 km² 的湖泊 2002–2016 年的水位变化数据集。每个湖泊的 2002–2016 年水位年平均变化率采用简单线性回归计算得到。数据结果分别采用青海湖、鄱阳湖和北美五大湖的实测水位进行了水位提取精度验证, 提取精度可达分米-厘米级。该数据集涉及的 118 个湖泊, 位于亚欧大陆 57 个, 北美洲 31 个, 非洲 14 个, 南美洲 10 个, 大洋洲 6 个。数据集内容包括: (1) 118 个湖泊的 2002–2016 年水位变化数据, 包括湖泊的日观测水位、月平均水位和年平均水位。(2) 118 个湖泊的 2002–2016 年水位变化率数据。数据存储为.xlsx、.shp 格式, 由 126 个数据文件组成, 数据量为 3.71 MB (压缩为 1 个数据文件, 3.48 MB)。

关键词: 湖泊水位变化; 全球; 多源雷达高度计

DOI: 10.3974/geodp.2018.03.07

1 前言

湖泊作为重要的水资源组成部分, 不仅对地表水的供给和调节起着重要的作用, 还能反映气候变化和人类活动对区域和全球环境变化的影响^[1–5]。湖泊面积和水位是表征湖泊水量变化的重要参数。现今遥感技术已经解决了湖泊面积快速、有效、大范围监测的问题^[6–7], 但对湖泊水位进行高精度监测却不尽如人意。水文站观测方式是湖泊水位监测的传统方法, 该方法虽然能够获取连续、高精度的水位数据, 但也存在一些不利因素。首先, 受地理环境 and 经济条件所限, 水文站点的分布很不均匀, 尤其是在自然条件恶劣和人迹罕至的区域布设站点几乎不可行; 其次, 据统计全球水文站数量还在不断减少^[8–9]; 再次, 有不少国家和地区湖泊水文观测资料因各种原因并不公开。这些因素都严重阻碍了对全球及区域湖

收稿日期: 2018-09-03; 修订日期: 2018-09-16; 出版日期: 2018-09-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2016YFB0501501); 国家发展和改革委员会(2016-999999-65-01-000696-01)

*通讯作者: 廖静娟 O-2034-2018, 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室/海南省地球观测重点实验室, liaojj@radi.ac.cn

数据引用方式: [1] 廖静娟, 沈国状, 赵云. 多源雷达高度计全球典型湖泊水位变化数据集(2002–2016) [J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(3): 295–302. DOI: 10.3974/geodp.2018.03.07.

[2] 廖静娟, 沈国状, 赵云. 基于多源雷达高度计的全球典型湖泊水位变化数据集(2002–2016) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2018. DOI: 10.3974/geodb.2018.05.12.V1.

泊水位进行持续、有效监测研究的开展及成果的推广应用^[10]。

卫星测高技术是测量地球表面高程信息动态变化的有效手段，经数十年的发展，已经在湖泊水位变化监测等领域取得重要应用^[11-16]。为此，基于 ENVISAT/RA-2、Cryosat-2/SIRAL、Jason-2 三种星载雷达高度计的 GDR（Geophysical Data Record）数据和 MODIS 影像数据经湖泊边界提取、水位计算、水位异常值剔除、高斯滤波去噪、高程系统转换等过程，提取 118 个全球面积大于 400 km² 湖泊 2002-2016 年的水位变化，构成多源雷达高度计全球典型湖泊水位变化数据集。

2 数据集元数据简介

基于多源雷达高度计的全球典型湖泊水位变化数据集^[17]的元数据简表见表 1。

表 1 基于多源雷达高度计的全球典型湖泊水位变化数据集元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	基于多源雷达高度计的全球典型湖泊水位变化数据集（2002-2016）
数据集短名	GlobeLakeLevelChange_2002-2016
作者信息	廖静娟 O-2034-2018, 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室/海南省地球观测重点实验室, liaojj@radi.ac.cn 沈国状 T-2721-2018, 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, shengz@radi.ac.cn 赵云 T-2734-2018, 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室/中国科学院大学, zhaoyun@radi.ac.cn
地理区域	全球
数据年代	2002-2016 年
数据格式	.xlsx、.shp
数据量	3.48 MB（压缩后）
数据集组成	全球 118 个面积大于 400 km ² 湖泊 2002-2016 年的日观测水位、月平均水位和年平均水位及年平均水位变化率
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2016YFB0501501）；国家发展和改革委员会（2016-999999-65-01-000696-01）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报》（中英文）发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[18]

3 数据研发方法

星载雷达高度计数据采用欧洲空间局的 ENVISAT/RA-2 和 Cryosat-2/SIRAL 数据,以及美国的 Jason-2 数据,其中 ENVISAT/RA-2 数据的获取时间为 2002–2012 年, Cryosat-2/SIRAL 获取时间为 2010–2016 年, Jason-2 获取时间为 2008–2016 年。三种星载雷达高度计均为 GDR 数据产品,而与之对应的 MODIS 影像数据采用 MODIS MOD13Q1 数据产品。

3.1 算法原理

对高度计的 GDR 数据进行处理,根据公式(1)获得湖面每个点的高程值 h_{ortho} 。

$$h_{ortho} = h_{alt} - R - \Delta R - h_{geoid} \quad (1)$$

式中, h_{alt} 代表卫星的高度, h_{geoid} 代表大地水准面高程, R 代表雷达高度计到水面的距离, ΔR 代表各项改正值,这里主要运用了干湿对流层改正、电离层改正、海况偏差和潮汐改正。

然后,对数据进行预处理。首先,利用 MODIS MOD13Q1 产品的 NDVI 波段,针对不同湖泊不同时相的影像,经过实验选取合适的阈值,在 ENVI 软件环境下,经过坐标投影转换、批量裁剪、密度分割、栅格矢量转换等处理过程,获得每个湖泊的矢量边界,提取每个湖泊 2002–2016 年的湖泊边界,对于边界变化较小,即小于高度计两个测量点间的距离的湖泊,采用了统一的边界,而对于湖泊边界变化较大的,采用相对实时的湖泊边界。其次,对湖面上所有的 20 Hz 的水位观测点,先目视解译剔除明显的异常水位,然后与总体水位平均值作差,再次目视解译剔除明显异常值。对于每一天的数据,用 3σ 准则剔除异常值后,将一天中的所有有效水位值取平均作为日观测水位。对整体日观测水位数据采用高斯滤波法去除噪声,得到较为干净的日观测水位序列,将日观测水位按月取平均得到月平均水位,按年取平均得到年平均水位。

3.2 技术路线

根据上述算法分别提取 Cryosat-2、Jason-2 和 ENVISAT/RA-2 三种高度计的水位,然后对提取的水位进行融合,得到 2002–2016 年湖泊的水位时间序列。由于 Cryosat-2、Jason-2 和 ENVISAT/RA-2 都是采用了 EGM96 的重力场模型,因此三种数据水位之间不需要进行高程系统的转换,但是这三种数据之间仍然存在着系统偏差,需要对其进行消除。Jason-2 数据与另外两种数据都有较长时间的重合部分,故以 Jason-2 数据为基准分别计算 Cryosat-2 和 ENVISAT/RA-2 两种数据的结果与 Jason-2 所得水位的平均差值,对日观测水位,根据上一步算出的差值,将这两种水位结果变换到与 Jason-2 相同的水平上来,对于有多个水位值的时间点,将这多个水位值(两个或三个)取平均作为该时间点的水位值,这样便得到由三种高度计数据融合而得的日观测水位时间序列,进而得到融合后的月平均水位序列及年平均水位序列;对获得的年平均水位序列作简单线性回归,得到 2002–2016 年的平均水位变化趋势。

根据水位序列与实测水位间的平均差值,将高度计获得的水位变换到与实测水位相同的水准面。进而通过计算雷达高度计提取的湖泊水位与对应实测水位间的相关性、均方根误差以及解算水位的个数,对比不同方法提取湖泊水位的精度。研究的技术路线如图 1。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

该数据集为 118 个全球面积大于 400 km² 湖泊的 2002–2016 年水位变化序列，每个湖泊水位变化序列数据包括湖泊的日观测水位、月平均水位和年平均水位。每个湖泊的 2002–2016 年水位年平均变化率采用简单线性回归计算，数据集存储为.xlsx 文件和.shp 文件，由 126 个数据文件组成，数据量为 3.71 MB（压缩为 1 个数据文件，3.48 MB）。

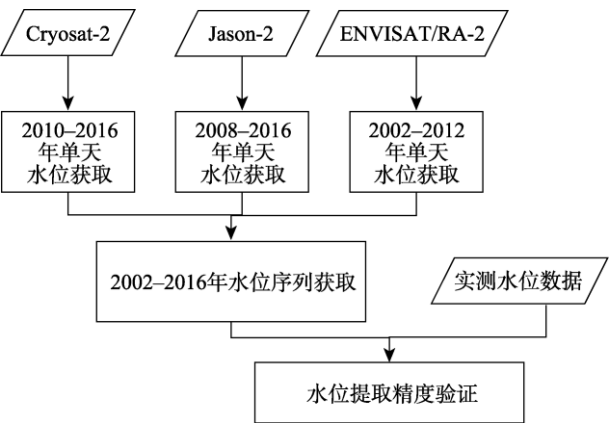


图 1 多源高度计湖泊水位序列获取技术路线

4.2 数据结果

全球 118 个面积大于 400 km² 的湖泊分别包括亚欧大陆 57 个、北美洲 31 个、非洲 14 个、南美洲 10 个和大洋洲 6 个，其中大于 1,000 km² 的为 93 个，小于 1,000 km² 的为 25 个。每个湖泊水位变化序列包括日观测水位、月平均水位和年平均水位序列。利用简单线性回归得到每个湖泊的 2002–2016 年水位年平均变化率（图 2，表 2），湖泊水位变化情况如下：

（1）亚欧大陆

共监测湖泊 57 个，其中 25 个水位呈下降趋势，32 个水位呈上升趋势。大部分湖泊 2002–2016 年水位年平均变化率在–20.0–30.0 cm/a 之间。水位上升最快的是色林错，为 37.7 cm/a；水位下降最快的为西南咸海，水位变化速率为–43.0 cm/a，且下降趋势显著。青藏高原湖区，湖泊水位整体呈明显的上升趋势，且 2010 年之后，水位变化相对变得平缓。中亚干旱-半干旱区域，湖泊水位整体呈下降趋势。拉多加湖、奥涅加湖等欧洲的 8 个淡水湖水呈上升趋势，东亚的湖泊水位则有升有降。

（2）北美洲

共监测湖泊 31 个，其中 9 个水位呈下降趋势，22 个水位呈上升趋势。水位变化最快的是阿马朱瓦克湖，为 42.8 cm/a。大部分湖泊 2002–2016 年水位年平均变化率在–10.0–10.0 cm/a 之间；整体上，水位变化速率不大。大奴湖、阿萨巴斯卡湖、伍拉斯顿湖等多个湖泊年际水位变化平缓，变幅小，水位相对稳定。

（3）非洲

共监测湖泊 14 个，其中 10 个湖泊水位上升趋势，4 个水位呈下降趋势。湖泊水 2002–2016 年水位年平均变化率集中在–10.0–20.0 cm/a 之间。图尔卡纳湖水水位变化最快，为 15.0 cm/a。

（4）南美洲

共监测湖泊 10 个，其中 7 个水位呈下降趋势，3 个水位呈上升趋势，分别为马拉开波湖、延基韦湖和兰科湖。大部分湖泊 2002–2016 年水位年平均变化率在–20.0–10.0 cm/a 之间。兰科湖水水位上升最快，为 20.5 cm/a。

（5）大洋洲

共监测湖泊 6 个，大部分湖泊季节性强，经常出现干涸断流的现象。除麦凯湖和弗罗姆湖 2 个湖泊水位有所上升外，其余 4 个湖泊整体水位均呈下降趋势。湖泊 2002–2016 年水位年平均变化率在 $-10.0\text{--}30.0\text{ cm/a}$ 之间。

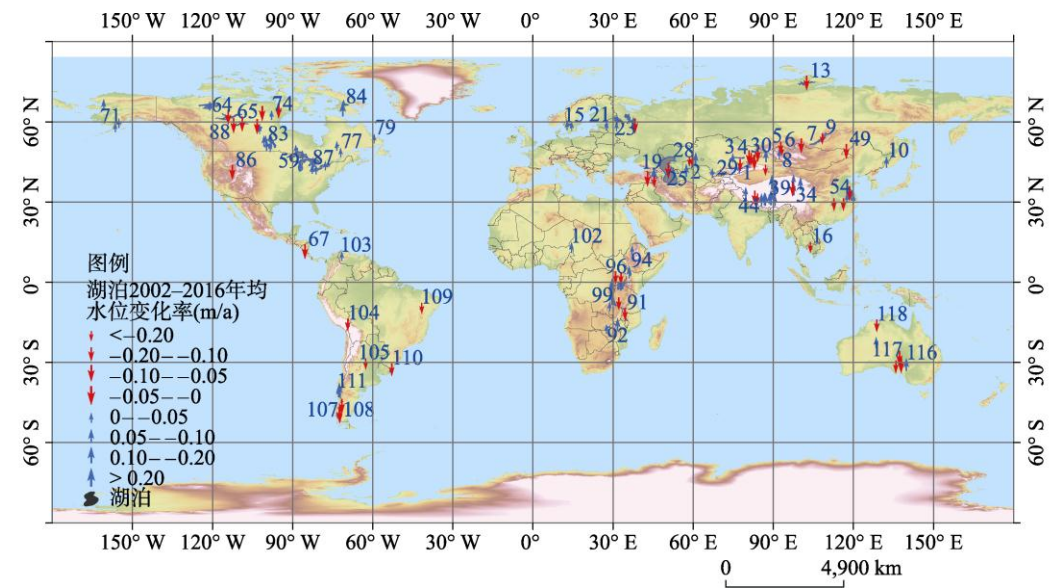


图 2 全球典型湖泊 2002–2016 年水位年均变化状况数据图

表 2 全球典型湖泊 2002–2016 年水位年均变化状况统计表

编号	湖泊名称	年变化率 (cm/a)	编号	湖泊名称	年变化率 (cm/a)
1	伊塞克湖	0.4	21	楚德湖	2.5
2	萨雷卡梅什湖	16.6	22	伊尔门湖	1.9
3	巴尔克什湖	1.7	23	白湖	4.0
4	阿拉湖	-8.4	24	斋桑湖	-2.0
5	乌布苏湖	-6.5	25	里海	-4.3
6	吉尔吉斯湖	-35.6	26	北咸海	12.4
7	库苏古尔湖	-0.2	27	东南咸海	-15.6
8	哈尔乌苏湖	4.8	28	西南咸海	-43.0
9	贝加尔湖	-13.3	29	卡普恰盖水库	-8.7
10	兴凯湖	7.4	30	萨瑟克湖	-0.7
11	拉多加湖	2.0	31	艾达尔库尔湖	0.2
12	奥涅加湖	2.3	32	青海湖	11.2
13	泰梅尔湖	-1.9	33	扎陵湖	-0.8
14	维纳恩湖	3.4	34	鄂陵湖	11.9
15	韦特恩湖	1.2	35	哈拉湖	7.4
16	洞里萨湖	-15.7	36	乌兰乌拉湖	35.0
17	尔米亚湖	-19.5	37	色林错	37.7
18	凡湖	-1.8	38	纳木错	5.6
19	塞凡湖	24.2	39	格仁错	2.8
20	雷宾斯克水库	-0.6	40	昂孜错	17.8

续表

编号	湖泊名称	年变化率 (cm/a)	编号	湖泊名称	年变化率 (cm/a)
41	当惹雍错	19.0	80	马尼托巴湖	4.7
42	扎日南木错	12.7	81	温尼伯戈西斯湖	9.6
43	塔若错	-11.8	82	锡达湖	2.9
44	昂拉仁错	-2.6	83	多芬湖	6.1
45	班公错	5.8	84	阿马朱瓦克湖	42.8
46	博斯腾湖	-17.6	85	纳蒂灵湖	0.2
47	艾比湖	-3.9	86	大盐湖	-3.8
48	乌伦古湖	11.8	87	圣克莱尔湖	1.1
49	呼伦湖	-1.9	88	克莱尔湖	-2.0
50	赛里木湖	1.5	89	维多利亚湖	6.5
51	阿牙克库木湖	32.8	90	坦葛尼喀湖	12.0
52	洞庭湖	-6.1	91	马拉维湖	-7.0
53	鄱阳湖	-6.0	92	卡里巴水库	0.1
54	巢湖	2.5	93	卡布拉巴萨水库	13.7
55	太湖	0.9	94	图尔卡纳湖	15.0
56	高邮湖	5.3	95	艾伯特湖	-6.5
57	洪泽湖	-0.1	96	基奥加湖	-8.2
58	势必利尔湖	3.0	97	爱德华湖	2.7
59	密歇根湖	3.8	98	基伍湖	6.6
60	休伦湖	4.1	99	姆韦鲁湖	4.7
61	伊利湖	3.2	100	鲁夸湖	-9.2
62	安大略湖	0.5	101	塔纳湖	2.2
63	大熊湖	0.9	102	乍得湖	6.5
64	大奴湖	-0.1	103	马拉开波湖	1.8
65	阿萨巴斯卡湖	-0.3	104	的的喀喀湖	-6.9
66	温尼伯湖	4.5	105	奇基塔湖	-17.7
67	尼加拉瓜湖	-3.0	106	阿根廷湖	-8.0
68	尼皮贡湖	2.0	107	别德马湖	-4.2
69	塞拉维克湖	5.2	108	布宜诺斯艾利斯湖	-3.0
70	伊利亚姆纳湖	1.2	109	索布拉迪湖	-12.4
71	别恰罗夫湖	3.3	110	密林湖	-5.9
72	杜邦特湖	-0.9	111	延基韦湖	0.7
73	贝克湖	-1.6	112	兰科湖	20.5
74	亚斯凯德湖	0.1	113	艾尔湖	-3.4
75	伍拉斯顿湖	-0.3	114	盖尔德纳湖	-9.3
76	驯鹿湖	4.7	115	托伦斯湖	-2.9
77	圣让湖	0.2	116	弗罗姆湖	12.5
78	米斯塔西尼湖	0.3	117	麦凯湖	8.0
79	梅尔维尔湖	0.7	118	阿盖尔湖	-8.3

4.3 数据结果验证

利用获取的青海湖、鄱阳湖和北美五大湖的实测水位数据，开展了水位提取精度验证。其中，青海湖的实测水位为 2002~2012 年 5~10 月的日观测平均水位，据此分别计算了高度计数据获得的日观测水位与月均水位的精度（表 3）。结果表明，与实测水位相比，日观测水位的均方根误差为 0.185 m，相关系数为 0.907，月均水位的均方根误差为 0.177 m，相关系数为 0.93。

表 3 青海湖水位精度验证表

青海湖水位精度验证	均方根误差（m）	相关系数	对比点的个数
日观测水位与实测水位对比	0.185	0.907	170
月均水位与实测水位对比	0.177	0.930	63

与青海湖水位精度验证的方法类似,利用鄱阳湖鄱阳站 2005–2014 年 1–12 月全年的日观测平均水位进行水位提取精度验证。结果如表 4 所示,由于鄱阳湖水位本身变化大而复杂,与青海湖相比,提取水位的精度较低,仅达到 0.7 m 左右。

表 4 鄱阳湖水位精度验证表

鄱阳湖水位精度验证	均方根误差（m）	相关系数	对比点的个数
日观测水位与实测水位对比	0.872	0.816	243
月均水位与实测水位对比	0.746	0.864	119

利用美国 NOAA 网站^[19]提供的北美五大湖 2002–2016 年的月平均水位验证高度计提取的月均水位序列精度,结果如表 5 所示,可以看出高度计提取的大湖泊水位精度较高,能达到 0.1m 左右。

表 5 北美五大湖水水位精度验证表

序号	月平均水位精度验证	均方根误差（m）	相关系数	对比点的个数
1	势必利尔湖	0.108	0.878	172
2	密歇根湖	0.147	0.858	172
3	休伦湖	0.090	0.945	171
4	伊利湖	0.133	0.808	171
5	安大略湖	0.104	0.910	172

5 讨论和总结

湖泊水位是反映区域和全球环境变化的重要指标。本文基于 ENVISAT/RA-2、Cryosat-2/SIRAL、Jason-2 三种星载雷达高度计的 GDR 数据,提取了 118 个全球面积大于 400 km² 湖泊 2002–2016 年的日观测水位、月平均水位和年平均水位变化的数据,并分别利用了青海湖、鄱阳湖和北美五大湖的实测水位进行了水位提取精度验证,提取精度可达分米–厘米级。在此基础上,利用简单线性回归方法,计算了每个湖泊 2002–2016 年的水位年平均变化率,分析了不同区域湖泊的变化情况。

星载雷达高度计作为提取湖泊水位变化序列的有效手段,很好地弥补了水文站点分布不均和不易建立水文站点地区湖泊水位监测的难题。对于面积较大的湖泊,星载雷达高度计提取湖泊水位的精度可达厘米级,这在本文及许多研究中已得到证实^[11–12],但对于较小的湖泊,星载雷达高度计监测的精度还不尽如人意。随着新一代合成孔径干涉雷达高度计,如天宫二号搭载的三维微波成像高度计、Cryosat-2 SARin 模式高度计以及 SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 高度计等计划的实施,将对湖泊水位提取的精度有大幅度提升。目前,利用 Cryosat-2 SARin 模式的数据已在青藏高原等地的湖泊水位提取中取得了较好的应用,对于面积较小的湖泊提取精度达到了厘米级^[16,20]。因此,后续的工作将更加关注这些新型高度计的应用。

作者分工: 廖静娟对数据集的开发做了总体设计, 并撰写了数据论文; 沈国状和赵云采集和处理了高度计数据、设计了数据提取算法; 赵云完成了数据验证。

参考文献

- [1] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J]. 地理学报, 1990, 45(1): 1-86.
- [2] Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., *et al.* Lakes as sentinels of climate change [J]. *Limnology & Oceanography*, 2009, 54(6): 2283-2297.
- [3] Schindler, D. W. Lakes as sentinels and integrators for the effects of climate change on watersheds, airsheds, and landscapes [J]. *Limnology & Oceanography*, 2009, 54(6_part_2): 2349-2358.
- [4] 李均力, 陈曦, 包安明. 2003-2009 年中亚地区湖泊水位变化的时空特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1219-1229.
- [5] Song, C., Ye, Q., Cheng, X. Shifts in water-level variation of Namco in the central Tibetan Plateau from ICESat and Cryosat-2 altimetry and station observations [J]. *Science China*, 2015, 60(14): 1287-1297.
- [6] Gong, P. Remote sensing of environmental changes over China, a review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 2793-2801.
- [7] 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.
- [8] Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé M., *et al.* Preliminary results of Envisat RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 252-264.
- [9] Kleinherenbrink, M., Ditmar, P. G., Lindenbergh, R. C. Retracking Cryosat data in the SARIn mode and robust lake level extraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 38-50.
- [10] 万玮, 肖鹏峰, 冯学智等. 卫星遥感监测近 30 年来青藏高原湖泊变化[J]. 科学通报, 2014, 8(8): 701-714.
- [11] Morris, C. S., Gill, S. K. Evaluation of the TOPEX/Poseidon altimeter system over the Great Lakes [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1994, 99(C12): 24527-24539.
- [12] Birkett, C. M. The contribution of TOPEX/Poseidon to the global monitoring of climatically sensitive lakes [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(C12): 25179-25204.
- [13] Gao, L., Liao, J., Shen, G. Monitoring lake-level changes in the Qinghai-Tibetan Plateau using radar altimeter data (2002-2012) [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7: 073470.
- [14] 高乐, 廖静娟, 刘焕玲等. 卫星雷达测高的应用现状及发展趋势[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 978-983.
- [15] Liao, J., Gao, L., Wang, X. Numerical simulation and forecasting of water level for Qinghai Lake using multi-altimeter data between 2002 and 2012 [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(7): 609-622.
- [16] Jiang, L., Nielsen, K., Andersen, O.B., *et al.* Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using Cryosat-2 SARIn mode data [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 109-124.
- [17] 廖静娟, 沈国状, 赵云. 基于多源雷达高度计的全球典型湖泊水位变化数据集(2002-2016) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2018. DOI: 10.3974/geodb.2018.05.12.V1.
- [18] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [19] NOAA. Great Lakes environmental research laboratory [Z]. <https://www.glerl.noaa.gov//data/dashboard/GLWLD.html>.
- [20] Nielsen, K., Stenseng, L., Andersen, O. B., *et al.* Validation of CryoSat-2 SAR mode based lake levels [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 162-170.