

# 近40年可可西里地区湖泊时空变化特征

姚晓军<sup>1,2</sup>, 刘时银<sup>2</sup>, 李龙<sup>1</sup>, 孙美平<sup>1</sup>, 罗晶<sup>1</sup>, 冯娅娅<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 以可可西里地区1970s地形图和1990s、2000-2011年Landsat TM/ETM+遥感影像为基础, 通过数字化和影像解译获取研究区83个面积大于10 km<sup>2</sup>湖泊变化数据, 并对湖泊变化成因进行了分析。研究表明: 1) 1970s初期至2011年, 可可西里地区湖泊经历了“先萎缩后扩张”的变化过程, 其中1970s-1990s期间湖泊面积普遍减小, 1990s-2000年湖泊出现扩张, 并在2000年恢复到1970s湖泊规模, 2000年之后湖泊面积急剧增大。2) 2000-2011年间, 可可西里地区不同规模等级湖泊整体呈扩张趋势, 但表现出一定的区域差异性。面积呈增加趋势的湖泊数量最多, 亦分布最广, 一些湖泊由于扩张迅速出现湖泊合并或湖水外泄情况; 面积呈减少趋势或波动起伏的湖泊数量较少, 零散分布在研究区中部和南部, 湖泊动态变化与其自身补给条件或与下游湖泊(河道)存在水力联系有关。3) 在研究时段内, 降水增多、蒸发减少是可可西里地区湖泊扩大的主要原因, 而气候变暖引起的冰川融水增加、冻土水分释放是次要原因。

**关键词:** 湖泊变化; 时空特征; 可可西里; 青藏高原

## 1 引言

湖泊作为陆地水圈的重要组成部分, 其水域变化是其所在流域水量平衡的综合结果, 能忠实记录湖区不同时间尺度气候变化和人类活动信息, 是揭示全球气候变化与区域响应的重要信息载体<sup>[1]</sup>。青藏高原湖区是地球上海拔最高、数量最多、面积最大的高原湖群区, 共有面积大于1.0 km<sup>2</sup>湖泊1055个, 面积41831.7 km<sup>2</sup>, 分别占我国湖泊总数量和总面积的39.2%和51.4%<sup>[2]</sup>。受自然条件恶劣、地域偏远、交通不便等因素影响, 青藏高原大多数湖泊受人类活动干扰程度低, 其变化主要反映的是自然环境因素的作用。

近50年来青藏高原气候和环境发生显著变化, 具体表现为气温呈上升趋势, 且研究时段距今越近, 增暖趋势愈加明显<sup>[3]</sup>; 降水变化在空间上存在一定差异性, 但多数地区呈增湿趋势<sup>[4]</sup>; 冰川普遍呈减薄退缩状态, 冰川融水增加<sup>[5]</sup>。受上述及其它要素影响, 青藏高原湖泊亦发生了显著变化<sup>[6]</sup>。借助遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术, 一些学者对青藏高原内陆地区湖泊变化研究发现, 青藏高原湖泊总体上呈扩张趋势, 1970s至2009年湖泊总面积增长27.3%, 且湖泊变化具有明显的区域分布特征, 其中藏北羌塘高原区湖泊出现先萎缩后扩张的变化, 色林错及周边区域湖泊处于持续扩张的状态, 而冈底斯山北麓的高山深谷湖则在近30年保持相对稳定的状态<sup>[7-8]</sup>。此外, 一些学者对青藏高原部分区域湖泊和典型湖泊变化亦开展了研究, 如青藏高原中部地区<sup>[9]</sup>、那曲地区<sup>[10]</sup>、羌塘地区<sup>[11]</sup>、班

收稿日期: 2013-03-21; 修订日期: 2013-04-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(41190084); 国家科技支撑计划项目(2012BAC19B07); 国家自然科学基金(41071044; 41261016); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-10-35) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41190084; National Science-technology Support Plan Project, No.2012BAC19B07; National Natural Science Foundation of China, No.41071044; No.41261016; Youth Teacher Scientific Capability Promoting Project of Northwest Normal University, No.NWNU-LKQN-10-35]

**作者简介:** 姚晓军(1980-), 男, 山西夏县人, 讲师, 博士研究生, 主要从事GIS与冰湖变化研究工作。

E-mail: xj\_yao@nwnu.edu.cn

戈错<sup>[12]</sup>、纳木错<sup>[13]</sup>、色林错<sup>[14]</sup>、羊卓雍错<sup>[15]</sup>、玛旁雍错<sup>[16]</sup>等。近年来,一些学者还开展了冰川湖泊编目和变化研究,如喜马拉雅山地区<sup>[17]</sup>、伯舒拉岭地区<sup>[18]</sup>、洛扎地区<sup>[19]</sup>、然乌湖流域<sup>[20]</sup>。这些研究成果一方面使人们对青藏高原湖泊变化有了更深认识,另一方面亦对青藏高原湖泊水资源利用及灾害防治提供了有益借鉴。

可可西里地区是青藏高原湖泊集中分布区之一,湖泊不仅是该区大气降水、冰雪融水以及泉水的归宿地,同时也是风化易溶物质和盐类矿物的聚集地,而且还是区内野生生物较稳固的水分涵养地和无机盐营养元素的汲取地,湖泊的这种功效在青藏高原腹地对于保持脆弱的高原生态环境结构有着重要的作用<sup>[21]</sup>。2011年9月,可可西里自然保护区腹地的卓乃湖湖水大量外溢,继而导致其下游库赛湖、海丁诺尔及盐湖发生湖水外溢事件<sup>[22]</sup>,并由此引发库赛河将成为长江北源的争议以及河道加宽对藏羚羊迁徙影响的讨论。本文通过对可可西里地区地形图和遥感影像的整理,结合遥感和地理信息系统技术获取该地区近40年主要湖泊变化数据,系统阐述湖泊变化特征。

## 2 研究区概况

可可西里地区位于青藏高原腹地,介于33°30′~36°29′N, 81°56′~94°06′E之间,面积约 $23.5 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图1)。在行政区划上,可可西里地区横跨青海省和西藏自治区,包括格尔木、治多、班戈、尼玛和改则等市(县)部分区域。地理上的可可西里是以可可西里山为主体的邻近山原湖盆地区,南北边缘为乌兰乌拉山和昆仑山脉的一部分,在海拔5500~6000 m以上的山地,发育有现代冰川<sup>[23]</sup>,区内中部较低缓,具有西部高而东部低的地势特点,平均海拔在4600 m以上。本区气候特点是气温低、降水少,且由东南向西北逐渐降低(减少),自然景观呈现高寒草甸—高寒草原—高寒荒漠更替<sup>[24]</sup>。区内生物区系种类少,但青藏高原特有种比例大,且种群数量多<sup>[25]</sup>。

可可西里地区处于羌塘高原内流湖区和长江北源水系交汇地带,区内湖泊众多,且多为咸水湖—半咸水湖,淡水湖和盐湖分布较少<sup>[24,26]</sup>。据统计,在可可西里地区,位于青海省境内面积大于 $1.0 \text{ km}^2$ 湖泊有107个,湖泊季节变化较大,通常5-9月为丰水期,10-4月为枯水期。本区域面积最大的湖泊为乌兰乌拉湖,面积约为 $544.5 \text{ km}^2$ 。

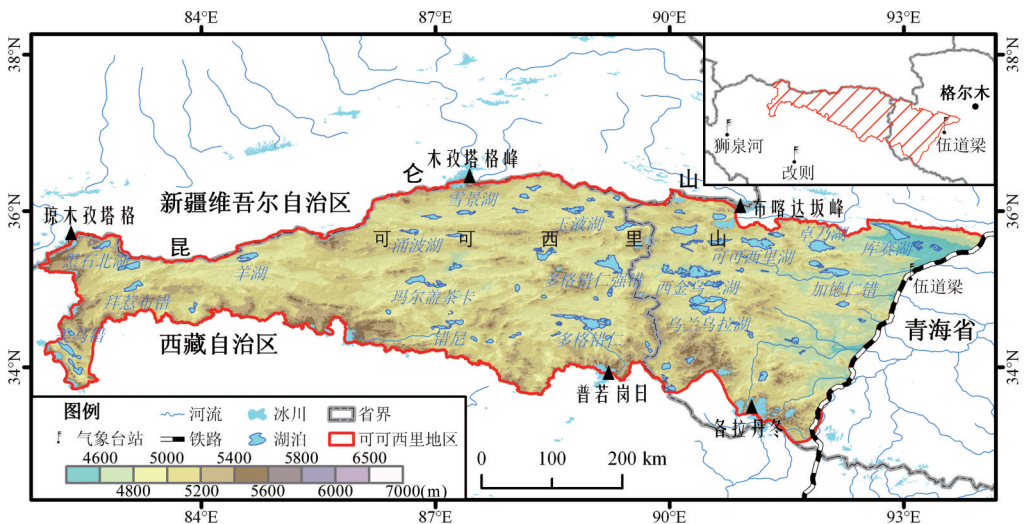


图1 可可西里地区位置

Fig. 1 Location of Hoh Xil region

### 3 数据与方法

#### 3.1 数据源

为获取可可西里地区湖泊近40年变化情况,共搜集和整理由中国人民解放军总参谋部测绘局编制的167幅1:10万地形图、USGS/NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov>)提供的224景空间分辨率为30 m的Landsat TM/ETM+遥感影像。鉴于研究区湖泊数量众多,本研究仅考虑面积大于10 km<sup>2</sup>的湖泊,据统计,可可西里地区面积大于10 km<sup>2</sup>的湖泊占总湖泊面积的93.87%,基本反映了该地区湖泊状况。经挑选,在本区域面积大于10 km<sup>2</sup>的湖泊共83个(表1),分布在59幅1:10万地形图上。这些地形图航摄时间主要集中在1970年和1971年,分别为19幅和22幅,其次是1960年(9幅)、1974年(5幅)和1973年(4幅),因此,地形图反映了可可西里地区湖泊在1970s初期状况。

Landsat TM/ETM+遥感影像包括1990s初期(1989-1991年)、2000-2011年逐年可获取的数据(表2)。采用Landsat TM/ETM+遥感影像作为湖泊数据的基本数据源有诸多优点,比如影像都经过正射校正处理,避免了数据预处理过程;影像数据可免费下载,这为湖泊参数获取提供了大量“备用”数据,一方面可有效避免Landsat ETM+遥感影像由于扫描行校正器故障(SLC-off)造成的坏带影响,另一方面可通过交叉验证方法提高湖泊识别的

表1 可可西里地区主要湖泊(面积>10 km<sup>2</sup>)  
Tab. 1 Lakes with more than 10 km<sup>2</sup> area in Hoh Xil region

名称	面积 (km <sup>2</sup> )		名称	面积 (km <sup>2</sup> )		名称	面积 (km <sup>2</sup> )	
	1970s	2000s		1970s	2000s		1970s	2000s
乌兰乌拉湖	552.30	564.05	多格错仁	369.38	476.00	西金乌兰湖	351.83	383.61
可可西里湖	305.81	319.51	库赛湖	265.03	274.38	卓乃湖	260.00	264.98
勒斜武担湖	229.55	245.56	多格错仁强错	210.50	302.95	加德仁错	148.52	206.29
美马错	138.04	146.21	拜惹布错	127.62	137.25	饮马湖	107.72	108.46
阿鲁错	104.72	104.88	太阳湖	101.04	102.59	向阳湖	98.31	100.19
黑石北湖	94.26	99.59	碱水湖	89.24	128.52	明镜湖	87.53	91.42
雀莫错	86.44	89.22	玉液湖	80.87	116.28	玛尔盖茶卡	80.08	139.16
错达日玛	77.29	72.52	羊湖	75.44	114.06	波涛湖	73.22	72.38
永红湖	70.34	70.47	苟鲁山克错	68.82	60.89	错尼	66.66	130.24
可考湖	63.69	62.11	玛章错钦	61.74	68.18	劳日特错	58.94	59.08
若拉错	57.68	139.57	涌波湖	56.53	60.03	雪景湖	52.78	71.67
雪莲湖	51.22	54.74	得雨湖	47.66	55.30	振泉湖	43.70	62.20
雪环湖	41.92	42.56	雪梅湖	39.66	46.48	永波湖	37.74	40.47
确旦错	37.29	32.25	海丁诺尔	35.58	45.60	围山湖	33.85	35.18
库水流	33.54	35.73	银波湖	33.12	40.40	盐湖	32.65	42.82
仙鹤湖	32.34	37.10	黄水湖	30.82	28.29	葫芦湖	29.98	32.12
岛湖	29.06	52.82	链湖	27.51	34.84	苟鲁错	26.05	21.40
青蛙湖	25.54	25.45	N34.31E89.07 <sup>7</sup>	25.34	①	龙舟湖	23.83	②
东月湖	23.32	24.50	朝阳湖	22.98	68.40	恰贡错	22.87	26.28
吐坡错	22.45	③	荷花湖	21.32	22.97	淡冰湖	20.94	④
桃湖	20.18	25.96	太平湖	20.17	25.30	移山湖	18.58	22.11
亚克错	18.21	2.82	恒梁湖	17.85	19.44	豌豆湖	17.63	18.16
节约湖	17.37	17.42	白滩湖	17.03	20.86	月亮湖	16.02	27.78
葫芦池	15.80	80.09	浩波湖	15.33	19.47	玉盘湖	15.26	18.80
映天湖	14.92	16.70	燕子湖	14.92	17.37	N35.17E91.55 <sup>5</sup>	14.66	14.13
N3412E89.44 <sup>4</sup>	13.82	16.76	宰日子下湖	12.81	11.86	浅水湖	12.64	⑤
玛日阿错	12.57	11.69	万安湖	12.21	18.24	双莲湖	10.62	30.02
高台湖	10.29	10.78	N35.31E93.12 <sup>6</sup>	10.34	⑥			

注: \*表示该湖泊暂无命名,用其质心经纬度表示;①与多格错仁合并;②与葫芦池合并;③与错尼合并;④与若拉错合并;⑤与多格错仁合并;⑥与海丁诺尔合并。

表2 本研究所选用的 Landsat TM/ETM+遥感影像  
Tab. 2 Landsat TM/ETM+ images used in this study

轨道号 (行/列)	影像获取时间
137035	1991/10/09; 2000/10/09; 2001/10/28; 2002/10/15; 2003/12/21; 2004/11/05; 2005/12/26; 2006/11/11; 2007/10/05; 2007/11/14; 2008/12/18; 2009/12/21; 2010/11/22; 2011/11/25
138035	1990/11/14; 2000/12/27; 2001/10/03; 2002/10/06; 2003/10/09; 2004/12/30; 2005/12/27; 2006/12/20; 2007/01/29; 2007/11/21; 2008/10/22; 2009/11/26; 2010/10/12; 2011/10/31
138036	1990/11/14; 2000/12/27; 2001/10/03; 2002/10/06; 2003/10/09; 2004/10/19; 2004/12/30; 2005/12/17; 2006/11/02; 2006/11/10; 2007/11/21; 2008/12/01; 2008/12/09; 2009/10/25; 2010/12/25; 2011/12/18
138037	1990/11/14; 2000/10/16; 2001/10/19; 2002/10/22; 2003/10/09; 2004/10/11; 2005/12/17; 2006/12/20; 2007/10/20; 2008/01/16; 2008/12/17; 2009/10/25; 2010/12/31; 2011/12/18
139035	1989/11/02; 2000/10/07; 2001/10/26; 2002/10/13; 2003/12/19; 2004/11/03; 2005/11/22; 2006/10/08; 2007/10/11; 2008/12/16; 2009/11/01; 2010/12/06; 2011/10/22
139036	1989/10/01; 2000/10/07; 2000/11/16; 2001/11/11; 2002/10/13; 2003/10/16; 2004/10/18; 2005/11/22; 2006/09/30; 2006/11/09; 2007/12/30; 2008/12/16; 2009/11/01; 2010/12/06; 2011/10/22
139037	1990/11/05; 2000/12/18; 2001/11/11; 2002/12/16; 2003/10/16; 2004/11/19; 2005/11/14; 2005/12/08; 2006/11/09; 2007/12/30; 2008/12/16; 2009/12/03; 2010/12/06; 2011/12/09
140035	1992/09/30; 2000/11/07; 2001/10/01; 2002/10/04; 2003/10/07; 2004/10/25; 2005/12/15; 2006/10/07; 2007/11/03; 2008/12/07; 2009/10/23; 2009/11/24; 2010/11/27; 2011/11/14
140036	1992/11/17; 2000/10/08; 2000/11/07; 2001/10/01; 2002/10/04; 2003/10/07; 2004/10/25; 2005/12/15; 2006/10/07; 2006/10/31; 2007/09/24; 2007/12/05; 2008/12/07; 2009/09/29; 2010/11/11; 2011/11/30
141035	1989/01/24; 2000/10/29; 2001/11/01; 2002/10/11; 2003/10/14; 2004/11/17; 2005/11/20; 2006/10/06; 2007/11/26; 2008/11/12; 2009/10/30; 2010/12/04; 2011/12/23
141036	1989/01/24; 2000/10/13; 2000/11/30; 2001/11/01; 2001/12/03; 2002/10/11; 2003/10/14; 2004/11/17; 2005/11/20; 2006/10/06; 2007/12/28; 2008/11/12; 2009/10/30; 2010/10/17; 2010/11/02; 2011/12/23
142036	1989/03/04; 2000/10/28; 2001/11/16; 2002/11/03; 2003/11/22; 2004/12/10; 2005/12/13; 2006/10/29; 2007/11/17; 2008/11/03; 2009/11/06; 2010/11/17; 2011/11/28
143035	1989/01/22; 2000/11/04; 2001/11/23; 2002/11/26; 2003/11/29; 2004/11/15; 2005/11/18; 2006/10/12; 2007/12/26; 2008/10/25; 2009/12/31; 2010/10/15; 2011/11/19
143036	1989/01/22; 2000/11/04; 2001/11/23; 2002/11/26; 2003/11/29; 2004/11/15; 2005/12/20; 2006/11/21; 2007/12/26; 2008/11/10; 2009/12/31; 2010/11/16; 2011/12/21
144035	1990/08/20; 2000/12/29; 2001/11/14; 2002/10/16; 2003/11/20; 2004/12/08; 2005/12/11; 2006/11/12; 2007/10/30; 2008/11/01; 2009/12/14; 2010/11/07; 2011/11/26
144036	1992/10/12; 2000/12/13; 2001/11/14; 2002/11/01; 2003/11/04; 2004/12/08; 2005/11/25; 2006/12/30; 2007/12/01; 2008/12/03; 2009/12/06; 2010/12/01; 2011/11/26

注: \*表示遥感影像传感器类型为 Landsat TM, 未标注表示遥感影像传感器类型为 Landsat ETM+.

质量。由于内陆湖季节性变化大<sup>[7, 24]</sup>, 且多在9-11月期间湖泊水位达到最大值<sup>[9]</sup>, 因此尽量选择这一时段的遥感影像。受云(雪)覆盖、数据缺乏或数据质量差等因素影响, 部分湖泊被遮挡或难以提取, 因此一些遥感影像获取月份存在差异。经统计, 224景 Landsat TM/ETM+遥感影像获取时间集中在10-12月, 其中11月影像数量最多, 共81景, 其次是10月(68景)、12月(63景)、1月(6景)、9月(4景)、8月(1景)和3月(1景)。

此外, 选用伍道梁、改则和狮泉河3个气象台站资料作为研究区湖泊变化气候背景参考, 数据由中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 提供。可可西里地区两次冰川编目数据由科技部科技基础性工作专项“中国冰川资源及其变化调查”项目组提供。

### 3.2 研究方法

首先利用宽幅扫描仪对167幅地形图进行扫描生成栅格图像(分辨率为300dpi), 然后在 ArcGIS 9.3 软件环境下完成地形图配准、判读和数字化等过程。在地形图配准时, 采用公里网作为控制网, 投影统一采用高斯-克吕格投影, 数字化精度控制在一个像元之内, 生成后的矢量数据最终投影转换为 Albers 正轴等积双标准纬线割圆锥投影。

在 ENVI 4.7 软件环境下以地形图为基准对 Landsat TM/ETM+遥感影像进行几何校正, 影像校正结果精度平均误差控制在半个像元以内, 最大误差控制在一个像元以内。尽

管目前国内外已有不少利用遥感技术提取湖泊范围的自动化方法,如水体指数法、波段比值法、“全局—局部”分步迭代水体信息提取方法<sup>[27-28]</sup>等,但这些方法通常对遥感影像质量要求较高。由于本研究对遥感影像的获取时间有一定要求,且2003年之后的Landsat ETM+遥感影像存在坏带,需要其它Landsat TM/ETM+遥感影像作为补充,因此采用人工目视解译方法。在ArcGIS 9.3软件下对遥感影像进行假彩色组合,湖泊边界解译参考科技部科技基础性工作专项“中国湖泊水质、水量与生物资源调查”制定的原则<sup>[2]</sup>,采用屏幕数字化方式获取湖泊边界矢量数据,精度控制在一个像元之内。

鉴于目前尚无法获取研究区降水与湖面蒸发实测资料,本文利用伍道梁、改则和狮泉河3个气象站观测资料计算潜在蒸散发,以此作为表征研究区湖泊水面蒸发变化趋势参考<sup>[29]</sup>。潜在蒸散发是指在供水充分情况下的区域蒸散发能力,本文采用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式计算潜在蒸散发量,具体公式见参考文献[30]。

## 4 结果与讨论

### 4.1 可可西里地区湖泊变化总趋势

经地形图数字化和遥感影像解译,可可西里地区83个湖泊1970s初期总面积为5873.91 km<sup>2</sup>,1990s初期为5263.71 km<sup>2</sup>,2000年为5952.38 km<sup>2</sup>,2011年为7446.94 km<sup>2</sup>。结合图2可知,可可西里地区湖泊面积经历了“先降后升”过程,这与李均力等研究结果基本一致<sup>[7]</sup>。具体而言,1970s初期至1990s初期,湖泊总面积大幅下降,共减少610.20 km<sup>2</sup> (10.39%);1990s初期至2000年,湖泊面积有所增加,并略超过1970s初期湖泊面积;2000年之后,湖泊面积呈快速上升趋势,面积较前一阶段猛增1494.56 km<sup>2</sup> (25.11%),尤其是2001-2002年、2009-2011年期间增率明显超过其它阶段。

在可可西里地区面积大于10 km<sup>2</sup>的湖泊中,1970s初期面积超过500 km<sup>2</sup>的湖泊只有1个,即乌兰乌拉湖(552.30 km<sup>2</sup>);面积介于250~500 km<sup>2</sup>的湖泊共5个,分别是多格错仁(369.38 km<sup>2</sup>)、西金乌兰湖(351.83 km<sup>2</sup>)、可可西里湖(305.81 km<sup>2</sup>)、库赛湖(265.03 km<sup>2</sup>)和卓乃湖(260.00 km<sup>2</sup>),这6个湖泊占该地区湖泊总面积的比重超过1/3。面积介于100~250 km<sup>2</sup>的湖泊共8个,介于50~100 km<sup>2</sup>的湖泊共20个;面积介于10~50 km<sup>2</sup>的数量最多,共49个,但其面积仅占可可西里地区湖泊总面积的19.60%。1970s初期至2011年,可可西里地区面积增加最多的湖泊是多格错仁强错、多格错仁和若拉错,增幅分别达到146.63 km<sup>2</sup>、106.62 km<sup>2</sup>、106.29 km<sup>2</sup>;面积减少最多的湖泊是卓乃湖和亚克错,分别减少89.57 km<sup>2</sup>和14.42 km<sup>2</sup>。

图3为近40年间可可西里地区不同面积等级湖泊面积、数量构成与变化情况,显然,1970s初期至1990s初期,除面积介于100~250 km<sup>2</sup>的湖泊面积略有增加之外,各等级湖泊面积均呈下降趋势。对这一规模等级8个湖泊面积进一步分析发现,除加德仁错面积增大之外,其余7个湖泊面积均呈减少状态,只是前者面积增加(38.46 km<sup>2</sup>)超过了后者面积减少(21.90 km<sup>2</sup>)。从数量上来看,面积介于50~100 km<sup>2</sup>和10~50 km<sup>2</sup>两个等级的湖泊数量发生了变化,这主要是由

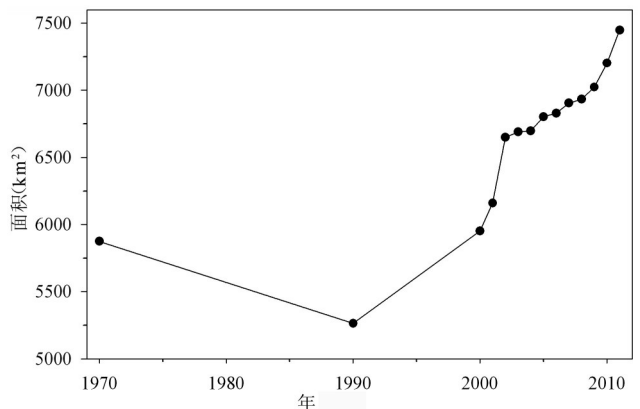


图2 1970-2011可可西里地区湖泊面积变化  
Fig. 2 The area variation of lakes in Hoh Xil region during 1970-2011

于玛尔盖茶卡和雪景湖面积急剧下降,二者分别减少了 $57.53\text{ km}^2$ 和 $7.19\text{ km}^2$ ,而由前一等级降为后一等级。因此,在这一阶段,可可西里地区湖泊无论是总面积,还是各等级湖泊面积整体呈下降趋势。1990s初期至2000年,除乌兰乌拉湖所在等级面积略有下降之外,其余各等级面积均呈增加趋势;面积介于 $50\sim 100\text{ km}^2$ 和 $100\sim 250\text{ km}^2$ 湖泊数量分别增加了2个(朝阳湖和雪景湖)和1个(玛尔盖茶卡),面积介于 $10\sim 50\text{ km}^2$ 的湖泊数量相应减少了3个。2000-2011年,面积 $>100\text{ km}^2$ 的3个等级湖泊面积呈显著增加趋势,除面积 $>500\text{ km}^2$ 湖泊仍仅有乌兰乌拉湖之外,其余两个等级湖泊数量分别增加为6个和16个;面积 $<100\text{ km}^2$ 的2个等级面积和数量均有所减少,其中面积介于 $10\sim 50\text{ km}^2$ 的湖泊数量减少了13个;然而,这种变化趋势并不意味着这2个等级湖泊面积呈下降趋势,反而是湖泊面积增大使其在统计时被划分为更高一级所导致,与上述湖泊面积在这一阶段呈快速增加趋势结论一致。

#### 4.2 可可西里地区湖泊空间变化特征

为进一步深入探讨可可西里地区湖泊变化过程,对2000-2011年各湖泊面积变化分析发现,并非所有湖泊均呈增加趋势,而是存在一定的差异性。根据湖泊变化状态,共分为面积增加、面积减少、面积先增加后减少、面积先增加后平稳、面积先减少后增加、面积先增加后减少再增加和面积波动强烈7类。需要指出的是,一些湖泊由于快速扩张而合并,至2011年,研究区湖泊数量由1970s初期的83个湖泊变为77个,其中若拉错与淡冰湖合并,多格错仁与浅水湖、N34.31E89.07湖合并,葫芦池与龙舟湖合并,错尼与吐坡错合并,海丁诺尔与N35.31E93.12湖合并。

由可可西里地区湖泊面积变化趋势分布图(图4)可知,面积呈增加状态的湖泊在可可西里地区分布最广,数量最多,共45个,主要位于研究区北部、西部和中部地区;其次是面积先增加后平稳类型,共10个,分布在区域东部和南部;面积先增加后减少的湖泊共7个,在区域内分布较零散;面积先增加后减少再增加的湖泊共5个,多与面积呈增加状态的湖泊靠近;其余3种变化状态类型湖泊各3个,主要分布在可可西里地区南部和中部,其中面积呈减少趋势的湖泊是高台湖、节约湖和朝阳湖,面积波动强烈的湖泊是阿鲁错、浩波湖和亚克错,面积先减少后增加的湖泊是青蛙湖、确旦错和永红湖。根据地形图和《中国湖泊志》记载资料<sup>[26]</sup>,面积波动强烈的湖泊多位于流域上游,并与下游湖泊有水力联系,如阿鲁错湖水由西北端外泄注入美马错,浩波湖与映天湖之间有水道连通;或者湖泊补给极贫,如亚克错滨湖无河流,亦无泉水出露,湖泊甚至在1990年干涸,2000年之后波动十分强烈,2011年仅为 $3.79\text{ km}^2$ 。面积呈减少趋势和面积先减少后增加的湖泊多为季节性外泄湖,或无常年性河流注入,补给较小。如节约湖为季节性外泄湖,出流经东部时令河外泄入明镜湖,永红湖湖水流入西金乌兰湖,确旦错以泉水补给为主。

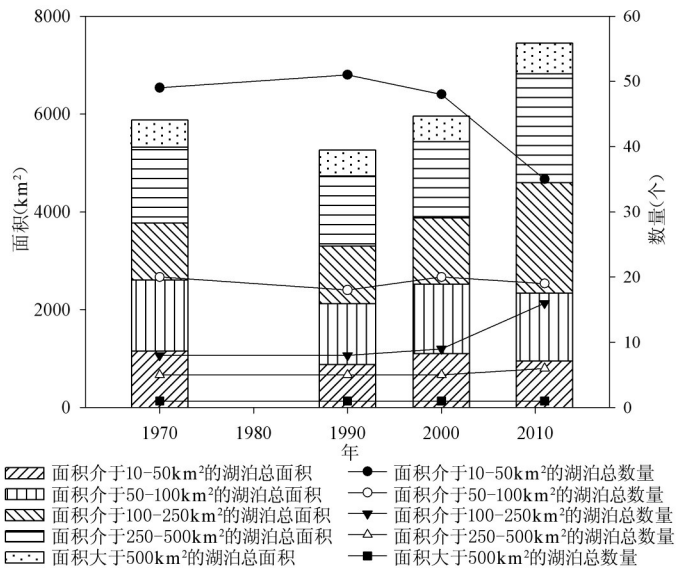


图3 可可西里地区不同规模湖泊面积与数量变化

Fig. 3 Variation of area and number of different-sized lakes in Hoh Xil region



407.5 mm, 改则气象台站年降水量为262.0 mm和252.7 mm, 远高于台站各自其他年份降水量, 相应湖泊面积也在这2个年份出现骤升。结合图1可知, 可可西里地区湖泊位于 $81^{\circ}56'E$ 以东, 而狮泉河气象台站( $80^{\circ}05'E$ ,  $32^{\circ}56'N$ )较其余两个台站距研究区距离过远可能是湖泊变化与其降水变化并无关系的主要原因。

由于可可西里地区湖泊多数为内陆湖, 其湖水损失主要取决于湖面蒸发。王志杰等<sup>[29]</sup>对呼伦湖水面蒸发量计算发现, 湖面蒸发与根据气象台站资料利用Penman-Monteith公式计算的潜在蒸散发具有良好的线性关系, 因此本文采用该方法分别计算伍道梁、改则和狮泉河3个气象台站年潜在蒸散发量。图6为上述3个气象台站年潜在蒸散发变化, 显然, 在研究时段内, 3个气象台站年潜在蒸散发均呈下降趋势, 其中改则气象台站年潜在蒸散发减少趋势最为显著, 速率为 $-2.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 狮泉河气象台站次之, 减少速率为 $-1.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 伍道梁气象台站年潜在蒸散发减少速率最小, 为 $-1.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。进一步分析发现, 2000-2011年期间, 3个气象台站年平均潜在蒸散发量均小于研究时段内多年平均值, 表明研究区潜在蒸散发整体呈下降趋势。综上所述, 在研究时段内, 降水增加和蒸发减少导致湖泊输入增多而输出减少, 这应是可可西里地区湖泊面积发生变化的主要原因。

#### 4.3.2 冰川与冻土变化对湖泊变化的影响

除降水之外, 冰川融水和冻土中的水分释放也是青藏高原湖泊补给的主要形式<sup>[7,12]</sup>。根据中国冰川目录<sup>[23]</sup>和最新一期冰川目录资料, 可可西里地区1970s初期冰川面积为 $2423.60 \text{ km}^2$ , 2000s末期减少为 $2243.35 \text{ km}^2$ , 共减少 $180.25 \text{ km}^2$ , 表明可可西里地区冰川整体上呈退缩状态。在整个研究区, 除太阳湖距马兰冰帽距离较近(约 $2.13 \text{ km}$ )之外, 其余湖泊距冰川均较远, 若考虑冰川融水沿途水分蒸发与下渗, 以及部分湖泊并无冰川融水注入, 冰川融水对湖泊的补给应十分有限。对伍道梁地区冻土变化监测发现, 自1980s以来, 该地区冻土厚度变薄, 活动

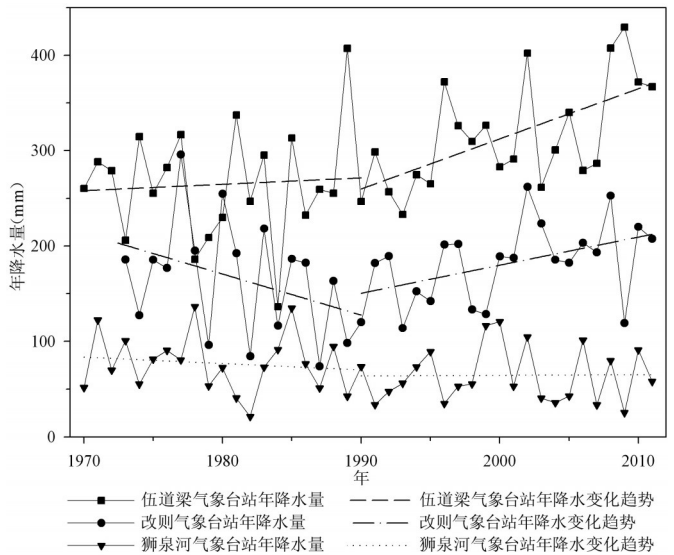


图5 1970-2011年伍道梁、改则和狮泉河气象台站降水变化  
Fig. 5 Precipitation variation observed in Wudaoliang, Gerze and Shiquanhe meteorological stations during 1970-2011

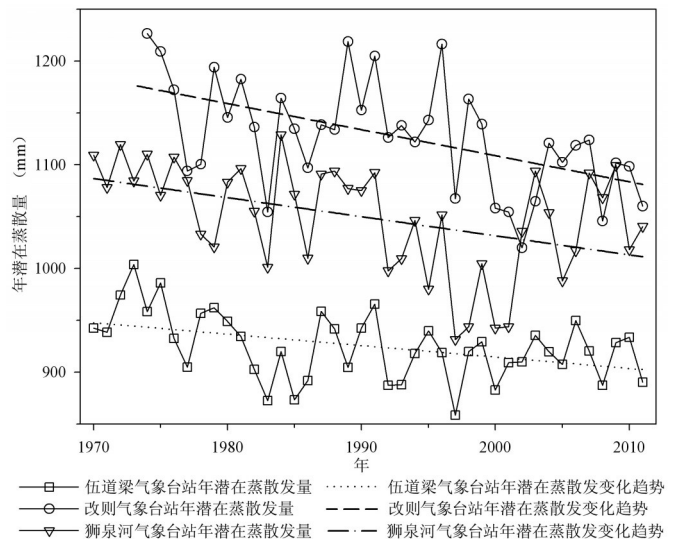


图6 1970-2011年伍道梁、改则和狮泉河3个气象台站年潜在蒸散发变化

Fig. 6 The variation of potential annual evaporation calculated from Wudaoliang, Gerze and Shiquanhe meteorological stations during 1970-2011



层增厚, 冻结持续天数缩短<sup>[35]</sup>, 但冻土层中地下冰融化真正能转入可流动的地下水比例很小<sup>[36]</sup>。因此, 冰川融水和冻土中的水分释放可能是引起可可西里地区湖泊扩张的原因之一, 但应非决定性因素。

## 5 结论

(1) 近40年来, 可可西里地区湖泊经历了“先萎缩后扩张”的变化过程, 83个面积大于10 km<sup>2</sup>的湖泊面积由5873.91 km<sup>2</sup>增加为7446.94 km<sup>2</sup>, 共增加1573.03 km<sup>2</sup>。1970s初期至1990s初期, 湖泊面积减少610.20 km<sup>2</sup>; 1990s初期至2011年, 湖泊面积增加2183.23 km<sup>2</sup>, 其中2000-2011年湖泊扩张速度明显增强。

(2) 2000-2011年期间, 可可西里地区湖泊整体呈扩张趋势, 但呈现出一定的区域差异性。面积增加的湖泊数量最多, 约占湖泊总数的1/2以上, 呈团簇状分布在区域北部、中部和西部, 部分湖泊出现合并或湖水外溢情况。面积呈减少或波动起伏的湖泊数量较少, 零星分布在区域中部和南部, 湖泊动态变化与其自身补给条件或与下游湖泊(或河道)之间存在水力联系有关。

(3) 受资料限制, 本文尚无法从水量平衡角度给出可可西里地区湖泊水量变化及各输入输出要素变化量值, 初步分析认为可可西里地区湖泊动态变化主要与气候变化有关, 其中降水增加(或减少)和湖面蒸发减少(或增加)是导致湖泊扩张(或萎缩)的决定性因素, 而气候变暖引起的冰川融水增加、冻土水分释放是次要原因。

## 参考文献 (References)

- [1] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Ye Baisheng et al. Climatic implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 623-632. [丁永建, 刘时银, 叶柏生等. 近50a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 623-632.]
- [2] Ma R, Yang G, Duan H et al. China's lakes at present: Number, area and spatial. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(2): 283-289.
- [3] Song Ci, Pei Tao, Zhou Chenghu. Research progresses of surface temperature characteristic change over Tibetan Plateau since 1960. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1503-1509. [宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960年以来青藏高原气温变化研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1503-1509.]
- [4] Jiang Yongjian, Li Shijie, Shen Defu et al. Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971-2008. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1503-1512. [姜永见, 李世杰, 沈德福等. 青藏高原近40年来气候变化特征及湖泊环境响应. *地理科学*, 2012, 32(12): 1503-1512.]
- [5] Yao T, Thompson L, Yang W et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 663-667.
- [6] Li Zhiguo. Glaciers and lakes changes on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change in the past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1431-1443. [李治国. 近50a气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1431-1443.]
- [7] Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Jiancheng et al. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 311-320. [李均力, 盛永伟, 骆剑承等. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 311-320.]
- [8] Shao Zhaogang, Zhu Dagang, Meng Xiangang et al. Changes of rivers and lakes on the Qinghai-Tibet Plateau in the past 25 years and their influence factors. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(1): 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. *地质通报*, 2007, 26(1): 1633-1645.]
- [9] Lei Y, Yao T, Bird B W et al. Coherent lake growth on the central Tibetan Plateau since the 1970s: Characterization and attribution. *Journal of Hydrology*, 2013, 483: 61-67.
- [10] Bian Duo, Yang Zhigang, Li Lin et al. The response of lake area change to climate variations in north Tibetan Plateau during last 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 510-518. [边多, 杨志刚, 李林等. 近30年来西藏那曲地区湖泊变化对气候波动的响应. *地理学报*, 2006, 61(5): 510-518.]
- [11] Wan Wei, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi et al. Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of

- Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 874-881. [万玮, 肖鹏峰, 冯学智等. 近30年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 874-881.]
- [12] Zhao Yuanyi, Zhao Xitao, Zheng Mianping et al. The denivellation of Bankog Co in the past 50 years, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 876-884. [赵元艺, 赵希涛, 郑绵平等. 西藏班戈错近50年来的湖面变化. *地质学报*, 2006, 80(6): 876-884.]
- [13] Zhang B, Wu Y, Zhu L et al. Estimation and trend detection of water storage at Nam Co Lake, central Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2011, 405: 161-170.
- [14] Bian Duo, Bian Baciren, La Ba et al. The response of water level of Selin Co to climate change during 1975-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 313-319. [边多, 边巴次仁, 拉巴等. 1975-2008年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应. *地理学报*, 2010, 65(3): 313-319.]
- [15] Chu Duo, Pu Qiong, Zhu Liping et al. Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40a. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 494-502. [除多, 普穷, 朱立平等. 近40a西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 494-502.]
- [16] La Ba, Bian Duo, Ci Zhen et al. Study on the change of lake area and its causes in the Mapangyong Co basin in Tibet. *Arid Zone Research*, 2012, 29(6): 992-996. [拉巴, 边多, 次珍等. 西藏玛旁雍错流域湖泊面积变化及成因分析. *干旱区研究*, 2012, 29(6): 992-996.]
- [17] Wang Xin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 29-36. [王欣, 刘时银, 姚晓军等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目. *地理学报*, 2010, 65(1): 29-36.]
- [18] Wang W, Yao T, Yang X. Variations of glacial lakes and glaciers in the Boshula mountain range, southeast Tibet, from the 1970s to 2009. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(58): 9-17.
- [19] Li Zhiguo, Yao Tandong, Ye Qinghua et al. Monitoring glacial lake variations based on remote sensing in the Lhozhag district, eastern Himalayas, 1980-2007. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 836-846. [李治国, 姚檀栋, 叶庆华等. 1980-2007年喜马拉雅东段洛扎地区冰湖变化遥感研究. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 836-846.]
- [20] Xin Xiaodong, Yao Tandong, Ye Qinghua et al. Study of the fluctuations of glaciers and lakes around the Ranwu Lake of southeast Tibetan Plateau using remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 19-26. [辛晓东, 姚檀栋, 叶庆华等. 1980-2005年藏东南然乌湖流域冰川湖泊变化研究. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 19-26.]
- [21] Hu Dongsheng. Lakes survey in Kekexili region. *Journal of Salt Lake Science*, 1994, 2(3): 17-21. [胡东生. 可可西里地区湖泊概况. *盐湖研究*, 1994, 2(3): 17-21.]
- [22] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping et al. Changes of Kusai Lake in Hoh Xil region and causes of its water overflowing. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 689-698. [姚晓军, 刘时银, 孙美平等. 可可西里地区库赛湖变化及湖水外溢成因. *地理学报*, 2012, 67(5): 689-698.]
- [23] Shi Yafeng. A Concise Glacier Inventory of China. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005: 54-100. [施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 54-100.]
- [24] Hu Dongsheng. Investigation and study on lake resources in Kekexili region. *Arid Land Geography*, 1992, 15(3): 50-58. [胡东生. 可可西里地区湖泊资源调查研究. *干旱区地理*, 1992, 15(3): 50-58.]
- [25] George B S, Kang A, Hashi T D et al. A winter wildlife survey in the northern Qiangtang of Tibet Autonomous Region and Qinghai Province, China. *Acta Theriologica Sinica*, 2007, 27(4): 309-316.
- [26] Wang Sumin, Dou Hongshen. Records of Chinese lakes. Beijing: Science Press, 1998: 398-502. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 398-502.]
- [27] McFeeters S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [28] 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. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 610-615. [骆剑承, 盛永伟, 沈占锋等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取. *遥感学报*, 2009, 13(4): 610-615.]
- [29] Wang Zhijie, Li Changyou, Jia Keli et al. Calculation and characteristics of Hulun Lake surface evaporation. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(3): 88-95. [王志杰, 李畅游, 贾克力等. 呼伦湖水面蒸发量计算及变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 88-95.]
- [30] Allen R G, Perreira L S, Raes D. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, 1998.
- [31] 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. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55: 1294-1303.
- [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. *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. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 81-88.]
- [33] Chu Duo, Pu Qiong, Wang Dui et al. Water level variations of Yamzho Yumco Lake in Tibet and the main driving forces. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(2): 239-247. [除多, 普穷, 旺堆等. 1974-2009年西藏羊卓雍错湖泊水位变化分析. *山地学报*, 2012, 30(2): 239-247.]
- [34] Yang Rihong, Yu Xuezheng, Li Yulong. The dynamic analysis of remote sensing information for monitoring the expansion of the Selincuo Lake in Tibet. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2003, 56: 64-67. [杨日红, 于学政, 李玉龙. 西藏色林错湖面增长遥感信息动态分析. *国土资源遥感*, 2003, 56: 64-67.]
- [35] Zhao Lin, Cheng Guodong, Li Shuxun et al. Process of freezing and thawing of permafrost active layers near Wudaoliang on Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1205-1211. [赵林, 程国栋, 李述训等. 青藏高原伍道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程. *科学通报*, 2000, 45(11): 1205-1211.]
- [36] Yao Tandong. *Dynamic Characteristics of Cryosphere in the Central Tibetan Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 199-206. [姚檀栋. 青藏高原中部冰冻圈动态特征. 北京: 地质出版社, 2002: 199-206.]

## Spatial-temporal variations of lake area in Hoh Xil region in the past 40 years

YAO Xiaojun<sup>1,2</sup>, LIU Shiyin<sup>2</sup>, LI Long<sup>1</sup>, SUN Meiping<sup>1</sup>, LUO Jing<sup>1</sup>, FENG Yaya<sup>1</sup>

(1. *College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;*

2. *State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)*

**Abstract:** As one of the areas with numerous lakes on the Tibetan Plateau, the Hoh Xil region plays an extremely important role in the fragile plateau eco-environment. Based on topographic maps in the 1970s and Landsat TM/ETM+ remote sensing images in the 1990s and the period from 2000 to 2011, the data of 83 lakes with the area above 10 km<sup>2</sup> were obtained by digitization method and artificial visual interpretation technology, and the causes for lake variations were also analyzed. Some conclusions can be drawn as follows. (1) From the 1970s to 2011, the lakes in the Hoh Xil region firstly shrank and then expanded. In particular, the area of lakes generally decreased during the 1970s-1990s. Then the lakes expanded during the 1990s-2000 and their area was slightly higher compared with the 1970s. The area of lakes dramatically increased after 2000. (2) From 2000 to 2011, the lakes with different area scales in the Hoh Xil region showed an overall expansion trend. Meanwhile, some regional differences were also discovered. Most of the lakes expanded and were widely distributed in the northern, central and western parts of the region. Some lakes merged together or overflowed due to their rapid expansion. A small number of lakes with the trend of area decrease or strong fluctuation were scattered in the central and southern parts of the study area. And their variations were related to their own supply conditions or hydraulic connection with the downstream lakes or rivers. (3) The increase in precipitation was the dominant factor resulting in the expansion of lakes in the Hoh Xil region. The secondary factor was the increase in melt water from glaciers and frozen soil due to climate warming.

**Key words:** lake variation; spatial-temporal characteristics; Hoh Xil region; Tibet Plateau