

## 1976—2015 年柴达木盆地湖泊演变及其对气候变化和人类活动的响应\*

段水强<sup>1,2</sup>

(1: 青海省水文水资源勘测局, 西宁 810001)

(2: 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008)

**摘要:** 柴达木盆地众多的湖泊不仅对维持当地脆弱的生态环境具有极其重要的作用, 而且中心盐湖也是重要的矿产资源。进入 21 世纪以来, 受气候变化和人类活动的共同影响, 盆地湖泊发生了一系列重大变化。为科学认识这一问题, 选取了 1976—2015 年 6 期 Landsat 系列卫星影像, 解译了该区域 1 km<sup>2</sup> 以上的湖泊水面, 并分析了湖泊变化对气候和人类活动的响应。结果表明: 柴达木盆地湖泊面积总体上存在扩张 (1976—1990 年)—萎缩 (1990—2000 年)—扩张 (2000—2010 年)—萎缩 (2010—2015 年) 4 个阶段的变化过程, 2010 年湖泊面积最大, 2015 年湖泊又明显萎缩。就气候水文因素而言, 湖泊面积变化主要受山区降水径流的影响。湖面变化与前 3 a 的降水径流关系最为密切。进入 21 世纪以来, 气候变化与上游社会经济耗水、盐湖周边人为阻隔河湖连通、开采卤水、修建人工盐田、排放老卤等人类活动, 对盆地中心湖泊的空间格局、面积都产生了显著影响, 苦水沟、达布逊湖南部形成了新湖泊, 鸦湖、团结湖面积显著扩大, 东、西台吉乃尔湖逐渐萎缩、干涸, 一里平湖由以前的干盐湖在 2010 年一跃成为盆地最大的湖泊。针对盐湖大规模开发产生的负面影响, 提出了合理开发盐湖资源的建议。

**关键词:** Landsat 数据; 萎缩; 盐湖; 咸水湖; 干盐湖; 气候变化; 盐湖资源; 柴达木盆地

## Lake evolution in the Qaidam Basin during 1976–2015 and their changes in response to climate and anthropogenic factors

DUAN Shuiqiang<sup>1,2</sup>

(1: *Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, P.R.China*)

(2: *Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Xining 810008, P.R.China*)

**Abstract:** Lakes in the Qaidam Basin play a critical role in maintaining the fragile ecological environment. Moreover, the salt lakes in this region are important mineral resource. Since the beginning of the 21st century, lake area in this basin has changed drastically due to the driving of climate change and human activities. For further understanding lake evolution in this basin, lakes larger than 1 km<sup>2</sup> between 1976 and 2015 are derived from Landsat data. The results show that lake area in the basin has experienced four evolution stages, i.e. extension in 1976–1990, shrinkage in 1990–2000, extension in 2000–2010, and shrinkage in 2010–2015. The largest lake area is appeared in 2010. In terms of climatic and hydrological factors, the precipitation and runoff are the dominant factors for lake area variations. The change of lake area is most closely related to the precipitation and runoff in the first 3 years. Since 2000, both climate change and human activities such as water consumption in the catchment, blocking rivers and lakes connection around the lake, brine mining utilization, constructions of solar ponds have significant influence on the spatial pattern and size of the central lakes of the basin. A new lake was formed at Kushui River and south of Lake Dabuxun, the areas of Lakes Ya and Tuanjie were significantly expanded, the East and West Lake Taijinar shrank and dried, and the Lake Yiliping expanded from a playa to the largest lake in the Qaidam Basin in 2010. In view of the negative influence of the large scale exploitation of saline lakes, this paper puts forward some suggestions for the rational development of saline lake resources.

**Keywords:** Landsat data; shrinkage; salt lakes; saline lakes; playa; climate change; salt lake resources; Qaidam Basin

\* 国家自然科学基金项目 (41261004) 资助。2017-03-31 收稿; 2017-04-28 收修改稿。段水强 (1972~), 男, 高级工程师; E-mail: wdmixk@163.com.

内陆湖尤其是尾间湖泊,处于一个相对独立的内陆水分循环系统中,湖泊水域面积的变化是其所在流域水量平衡的综合结果,对气候变化和人类活动具有高度敏感性<sup>[1-4]</sup>。柴达木盆地地处青藏高原东北部,盆地内湖泊众多,星罗棋布。近年来,盆地的气温升高趋势明显强于青藏高原腹地以及全国和全球的平均水平,降水量、河川径流量也有明显增加<sup>[5-6]</sup>。同时盆地内水土资源、盐湖资源丰富,人类开发活动剧烈,严重影响着流域的自然水循环。受气候变化和人类活动的共同影响,进入21世纪以来,盆地湖泊在面积乃至空间格局上出现了很大变化。

在降水较少的内陆干旱地区,湖泊是维系区域生态系统的重要支撑。同时盆地中心的盐湖还是当地经济社会发展的重要支柱资源。柴达木盆地的湖泊变化不仅影响当地的经济建设和生态保护,而且对区域生态平衡乃至整个青藏高原的气候变化均有重要影响<sup>[7]</sup>。

有关柴达木盆地湖泊的近期变化已有一些研究成果<sup>[7-10]</sup>,但是以往成果或研究系列过短,难以反映较长时期的湖泊总体变化,或在湖泊的变化成因分析上集中于气候变化对湖泊的影响,而较少考虑人类活动的作用。为此,本文解译了1976—2015年6期Landsat卫星遥感数据,系统研究了40a来柴达木盆地1 km<sup>2</sup>以上湖泊面积的时空变化特征,部分湖泊根据更早的航拍地形图资料,面积数据追溯到1950s末。结合水资源开发利用调查,综合分析了柴达木盆地的湖泊变化特征及其对气候和人类活动的响应,旨在为当地的生态保护和盐湖资源开发提供参考。

## 1 研究区概况

柴达木盆地(34°41'~39°20'N,87°48'~99°18'E)是青藏高原东北部一个巨大的构造陷落盆地,东西长约800 km,南北宽约300 km,总面积27.6万 km<sup>2</sup>。盆地四周被高山环抱,南部为昆仑山,东北部为祁连山,西北部为阿尔金山和祁漫塔格山。盆地最高海拔6860 m,底部海拔2676~3200 m。柴达木盆地是我国著名的内陆干旱盆地之一,气候干燥,降水稀少。降水量由四周向盆地中心递减,四周山区年降水量在150~300 mm之间,盆地中心年降水量小于50 mm,西北部仅为25 mm,盆地内部蒸发能力则高达1800 mm以上。盆地现代冰川面积1761.1 km<sup>2</sup>,主要分布于南部昆仑山区<sup>[11]</sup>。

根据青海省水文水资源勘测局的评价成果,全盆地共有大小河流70多条,其中年径流超过1.0亿 m<sup>3</sup>的河流有10条,分别为:那棱格勒河、格尔木河、香日德河、大哈尔腾河、巴音河、诺木洪河、察汗乌苏河、塔塔棱河、斯巴利克河和阿达滩河。山区河流总径流量约49.6亿 m<sup>3</sup>。

受新构造运动的影响,柴达木盆地被分割成多个次一级盆地,进而形成多个辐合向心水系。盆地内大的水系包括阿尔斯库勒湖水系、苏干湖水系、马海湖水系、大柴旦湖水系、小柴旦湖水系、托素湖水系、都兰湖水系、台吉乃尔湖水系、达布逊湖水系、霍布逊湖水系等。盆地中部的湖泊,由于蒸发作用强烈,湖水高度浓缩,矿化度很高,多为盐湖,目前,除小柴旦湖未开发外,其他盐湖均已开发。可鲁克湖、托素湖位于巴音河下游,可鲁克湖是唯一位于盆地中心的淡水湖,托素湖则是盆地中心唯一的咸水湖。分布在昆仑山北麓海拔4000 m以上的山区湖泊,多为淡水吞吐湖,主要有库水浣、太阳湖、黑海、卡巴纽尔多、阿拉克湖、托素湖等,其中托素湖为盆地最大的淡水湖(图1)<sup>[12]</sup>。

## 2 资料和方法

### 2.1 遥感数据

从国际科学数据服务平台、美国USGS网站、地理空间数据云平台收集到研究区1976—2015年Landsat卫星MSS、TM、ETM<sup>+</sup>、OLI 6期数据,数据年份分别是1976年、1990年左右、2000年左右、2007年、2010年、2015年,由于受获取数据有限的制约,部分影像选取了与目标年相近的年份(表1)。数据时相集中于夏、秋季,基本代表了丰水期的面积。受云覆盖的影响,也有个别影像采用其他季节的数据,这使得湖泊变化研究存在一定的误差。

卫星遥感数据的级别是Level 1T,即经过了辐射矫正、地面控制点几何校正,并通过DEM高程模型进行了地形矫正。经波段组合、建立湖泊解译标志、人机交互判读、精度控制等环节<sup>[13]</sup>,完成了6期水面面积曾经大于1 km<sup>2</sup>的56处湖泊水面形态的解译。

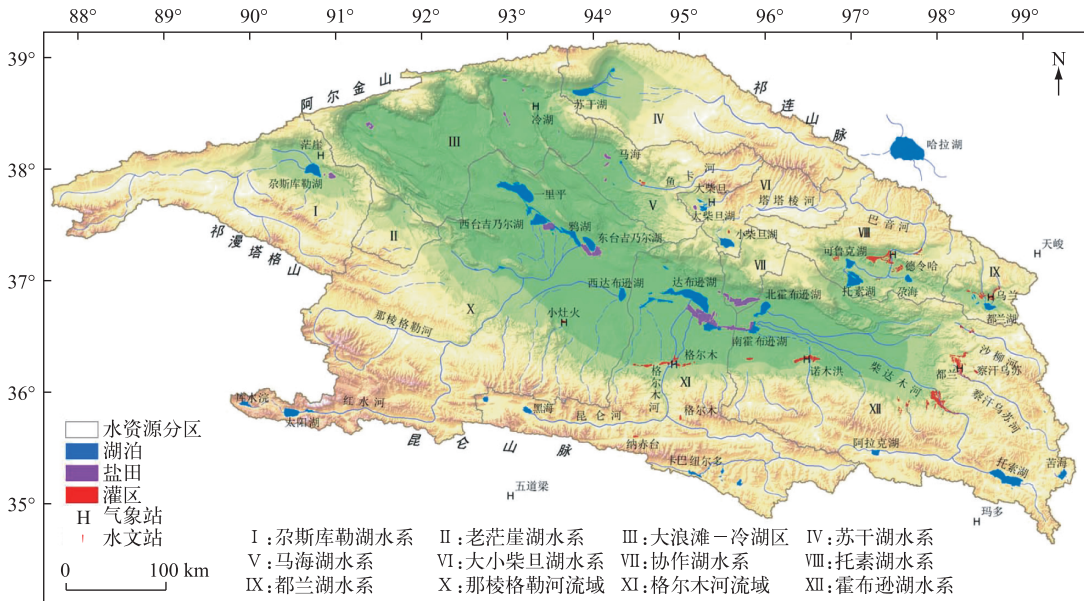


图1 柴达木盆地湖泊分布(2010年)

Fig.1 Location of the major lakes in Qaidam Basin(the year of 2010)

表1 遥感影像类型和接收日期

Tab.1 Dates and types of the used remote sensing images

第1期接收日期 (年-月-日)		第2~6期接收日期 (年-月-日)					
轨道号	MSS	轨道号	第2期 TM	第3期 ETM <sup>+</sup>	第4期 TM	第5期 TM	第6期 OLI
144/34	1976-10-20	134/34	1990-08-30	2000-06-14	2007-08-13	2010-08-05	2015-09-04
144/35	1976-10-20	134/35	1990-08-30	2000-07-03	2007-08-13	2010-07-20	2015-09-04
145/34	1976-11-08	135/34	1988-06-28	1999-09-23	2007-09-21	2010-09-13	2015-08-10
145/35	1976-11-08	135/35	1990-08-21	1999-07-21	2007-09-21	2010-09-13	2015-08-10
146/34	1976-04-05	136/34	1989-05-13	2001-10-21	2007-08-11	2010-07-18	2015-10-04
146/35	1976-11-27	136/35	1994-05-03	1999-09-14	2006-08-08	2010-08-27	2015-08-01
147/34	1976-07-07	137/33	1989-09-17	2001-10-28	2007-09-03	2010-09-02	2010-08-08
148/33	1976-10-24	137/34	1990-08-19	2001-10-28	2007-08-02	2010-08-26	2015-08-08
148/34	1976-10-24	137/35	1991-10-09	2001-01-13	2007-09-19	2010-07-25	2015-08-08
148/35	1976-11-11	138/33	1989-07-30	2001-10-03	2007-08-25	2010-09-02	2015-08-31
149/34	1976-11-30	138/34	1992-07-30	2002-10-06	2007-07-24	2010-09-02	2015-08-31
149/35	1976-11-30	138/35	1994-10-24	2002-05-15	2006-09-07	2010-09-02	2015-09-16
150/33	1976-11-13	139/34	1990-11-05	2000-11-08	2007-07-31	2010-08-24	2015-08-22
150/35	1976-10-26	139/35	1994-09-29	2000-10-07	2007-07-31	2010-08-08	2015-08-22

根据早期的航测地形图,量算了可鲁克湖、托素湖等8处湖泊1950s末的水面面积。

### 2.2 气候水文数据

选取了柴达木盆地内部茫崖、冷湖、大柴旦、德令哈、小灶火、格尔木、诺木洪、都兰站以及盆地周边天峻、玛多、五道梁共11处气象站进行气候变化的分析。水文分析选取资料质量较好的巴音河、格尔木河、察汗乌苏河3条河流的径流数据。资料系列均为1960—2015年。

茫崖站1987年进行了迁站,对因迁站而产生的气温、降水非均一现象,采用文献[14]中的方法进行订正。

### 2.3 社会经济与水资源开发利用数据

1990年以来的社会经济数据来源于《青海省国民经济和社会发展统计公报》、《海西州国民经济和社会发展统计公报》等,2000年以后的水资源开发利用数据来源于《青海省水资源公报》。

## 3 湖泊变化分析

在6个时期中只要有一次水面面积大于1 km<sup>2</sup>的湖泊,即纳入分析统计。水库、人工盐田不在湖泊中统计。

解译结果显示研究区共有标准以上湖泊56个,其中10 km<sup>2</sup>以上湖泊面积变化见表2。标准以上的湖泊数量、面积变化见表3、表4。

表2 柴达木盆地10 km<sup>2</sup>以上湖泊的面积变化  
Tab.2 Area variations of lakes over 10 km<sup>2</sup> in Qaidam Basin

水系	湖泊	类别	湖泊面积/km <sup>2</sup>						变化率/ %	
			1950s末	1976年	1990s	2000s	2007年	2010年		2015年
尕斯库勒湖水系	尕斯库勒湖	尾间湖		106.4	114.2	119.5	118.4	130.7	118.6	20.6
苏干湖水系	苏干湖	尾间湖		96.2	101.7	102.6	101.3	104.2	106.3	9.9
	小苏干湖	吞吐湖		11.8	11.6	11.6	11.5	11.3	11.7	4.6
大小柴旦湖水系	大柴旦湖	尾间湖		42.0	48.6	22.0	44.5	41.2	49.3	66.2
	小柴旦湖	尾间湖		42.4	44.6	44.4	71.8	97.4	88.8	84.8
巴音河流域	可鲁克湖	吞吐湖	58.0	56.0	56.6	55.1	56.5	55.7	55.1	2.8
	尕海	尾间湖	32.5	31.5	29.4	29.2	32.0	34.2	35.4	19.4
	托素湖	尾间湖	191.0	155.8	148.3	136.9	140.0	144.4	152.8	12.9
都兰湖水系	都兰湖	尾间湖	19.5	13.9	44.4	9.4	26.7	50.1	48.5	126.3
那棱格勒河流域	库水浣	吞吐湖		33.9	33.5	33.8	35.8	36.2	34.8	7.7
	太阳湖	吞吐湖		102.7	101.6	101.9	101.8	101.6	102.4	1.1
	彩云湖	吞吐湖		7.8	8.4	7.3	8.4	14.1	11.1	71.6
	西台吉乃尔湖	尾间湖		15.7	131.4	29.4	0.7	124.4	0	261.4
	东台吉乃尔湖	尾间湖	148.6	106.1	150.0	198.2	178.5	90.7	0	164.4
	鸦湖	尾间湖		1.6	3.1	5.4	4.8	94.7	126.8	317.7
	一里平湖	尾间湖		0	8.2	0	134.8	313.1	0.5	411.4
	苦水沟			0	0	0	45.6	85.8	138.7	308.1
	西达布逊湖	尾间湖		64.1	53.0	46.9	65.6	67.2	57.0	34.3
	小库赛湖	尾间湖		13.4	8.6	7.2	16.9	21.9	20.3	100.0
格尔木河流域	黑海	吞吐湖		39.1	38.0	38.7	38.9	40.4	37.1	8.6
	卡巴纽尔多	吞吐湖		30.6	29.1	29.7	30.1	30.3	29.0	5.6
	错拉巴鄂阿东	吞吐湖		13.9	14.2	13.9	14.5	14.3	13.7	6.1
	章江头木错	吞吐湖		20.4	20.6	16.4	12.8	21.5	20.8	46.1
	团结湖	尾间湖		1.0	2.1	85.0	119.2	77.8	12.2	238.6
	新湖	尾间湖		15.7	28.9	0	0	49.3	1.7	309.3
	东达布逊湖	尾间湖	341.4	257.8	230.1	36.4	169.7	294.7	189.6	131.5
	达布逊湖南部新湖	尾间湖		0	0	0	25.9	82.2	131.6	329.4
	托索湖	吞吐湖		239.5	235.3	229.2	233.4	243.5	246.9	7.4
	阿拉克湖	吞吐湖		35.4	36.2	35.3	37.4	38.2	39.4	11.1
柴达木河流域	北霍布逊湖	尾间湖	99.4	119.0	118.3	52.4	73.2	100.3	2.9	149.3
	南霍布逊湖	尾间湖	33.4	13.2	25.2	0	228.8	58.5	31.4	384.5
	苦海	尾间湖		47.5	49.3	48.7	48.8	47.7	47.7	3.7

表3 柴达木盆地湖泊数量和面积

Tab.3 Number and area of lakes in Qaidam Basin

年份	大于 1 km <sup>2</sup> 的湖泊数量	湖泊面积/km <sup>2</sup>		
		外围湖泊	中心湖泊	合计
1976 年	45	594.4	1198.7	1793.1
1990s	46	586.5	1393.2	1979.7
2000s	47	572.7	1092.7	1665.4
2007 年	44	591.6	1715.5	2307.1
2010 年	48	624.3	2156.8	2781.1
2015 年	47	614.4	1444.2	2058.6

表4 柴达木盆地湖泊面积变化

Tab.4 Change of lake area in Qaidam Basin

时段	面积变化/ km <sup>2</sup>	年均扩张面 积/km <sup>2</sup>	年均变化 率/%	分析 结果
1976—1990s	186.6	13.3	0.7	扩张
1990s—2000s	-314.3	-31.4	-1.6	萎缩
2000s—2007	641.7	91.7	5.5	扩张
2007—2010	473.9	158.0	6.8	扩张
2010—2015	-722.5	-144.5	-5.2	萎缩

1976—2015 年的 40 a 间,柴达木盆地湖泊总体上经历了扩张—萎缩—扩张—萎缩的变化过程. 1976—1990 年,湖泊略有扩张,1990—2000 年湖泊有所萎缩. 进入 21 世纪以后,湖泊面积变幅增大,前 10 a 湖泊大幅扩张,2010 年面积较 2000 年增加了 1115.7 km<sup>2</sup> (67.0%),远高于青藏高原其他地区的湖泊增长幅度<sup>[13,15-17]</sup>,但 2015 年湖泊面积较 2010 年则出现了显著萎缩.

40 a 来盆地湖泊面积变幅有明显差异. 外围山区湖泊以吞吐湖为主,面积相对稳定,40 a 来的面积变化率为 8.6%;盆地中心湖泊以尾间湖为主,面积变化较大,40 a 来的面积变化率平均达到 70.9%,东达布逊湖、东台吉乃尔湖、都兰湖的面积变化率都在 100% 以上,鸦湖、一里平湖、西台吉乃尔湖、团结湖、新湖、南霍布逊湖都在 200% 以上.

## 4 湖泊变化成因

### 4.1 湖泊对气候变化的响应

1960—2015 年,柴达木盆地内部 8 处气象站气温均呈显著上升趋势,变化倾向率介于 0.23~0.65℃/10 a 之间,平均为 0.43℃/10 a (图 2a),气温上升速率明显高于青藏高原的平均水平 (0.37℃/10 a)<sup>[6]</sup>、全国平均水平 (0.22℃/10 a)<sup>[17]</sup> 和全球平均水平 (0.13℃/10 a)<sup>[18-19]</sup>. 在升温的大背景下,盆地内部蒸发能力有显著的下降,平均倾向率为 76.2 mm/10 a (图 2b). 蒸发能力的减少主要与日照时数和风速的下降有很大关系<sup>[20]</sup>.

盆地湖泊的水量补给主要来源于山区,以天峻、德令哈、都兰、玛多、纳赤台、五道梁的平均降水量代表柴达木盆地山区的降水. 1960—2015 年山区降水量呈显著的上升趋势,变化倾向率介于 11.9~20.3 mm/10 a,平均为 16.1 mm/10 a (图 2c). 以巴音河、格尔木河、察汗乌苏河 3 条河流总径流量代表盆地河川径流变化. 1960—2015 年的年径流量亦呈显著的上升趋势 (图 2d).

气温对湖泊面积的影响是间接的. 在降水不变的情况下,气温升高的结果是陆地蒸散发增加、入湖径流补给减少、湖面蒸发消耗增加,湖泊面积减少. 而进入 21 世纪以来,在气温持续上升的情况下,盆地湖泊剧烈扩张,湖泊面积与前期气温的相关系数最高也仅为 -0.57 (前 2 a,图 3a),未通过 0.10 的显著性水平检验,相关性差.

1960—2015 年,柴达木盆地蒸发能力呈明显减少趋势,尤其在 1980s 明显减少,而湖泊面积仅在 2005—2015 年有明显增加. 湖泊面积与前期蒸发能力的相关系数最高也仅为 -0.58 (前 2 a,图 3a),未通过 0.10 的显著性水平检验. 水面蒸发虽然几乎是内流湖泊唯一的水量消耗方式,但其年际变化远较降水、径流为小,因此,蒸发并不是盆地湖泊变化的主要影响因素.

研究区湖泊多位于盆地中心,以内流湖为主,山区径流是湖泊水量最主要的补给来源. 从相关关系来看,湖泊面积与前期山区降水、径流存在很高的相关性,其中与前 3 a (含当年)的相关性最高,相关系数分别为 0.96 和 0.90,通过了 0.001 和 0.01 的显著性水平检验 (图 3b). 就气候水文因素而言,柴达木盆地湖泊面积主要受降水径流的影响.

### 4.2 社会经济发展与水资源开发利用

建国以前,柴达木盆地主要是游牧区,1949 年人口仅 1.95 万人,耕地面积只有 2000 hm<sup>2</sup>. 建国以后,随着国营农场的建立,种植业得到发展. 开垦面积在 1950s 末曾达到 8.6 万 hm<sup>2</sup>,均为绿洲灌溉农业. 1980s 后,

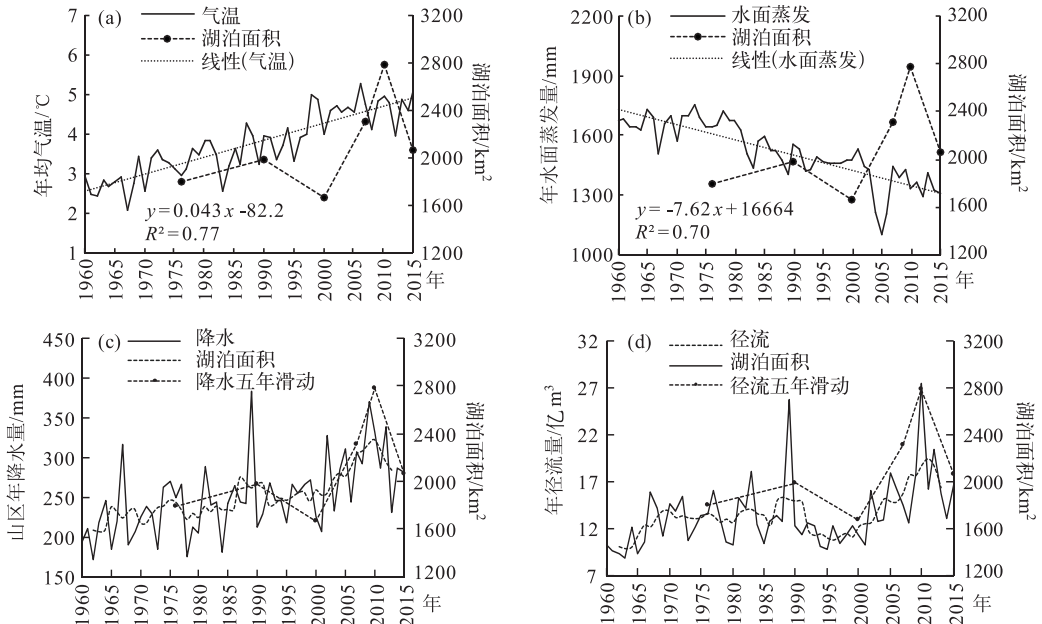


图2 1976—2015年年均气温(a)、降水量(b)、蒸发量(c)、径流量(d)与湖泊面积过程线

Fig.2 Variations in annual mean air temperature (a), annual precipitation (b), annual evaporation (c) and annual runoff (d) in comparison with the total area of lakes in the Qaidam Basin during 1976–2015

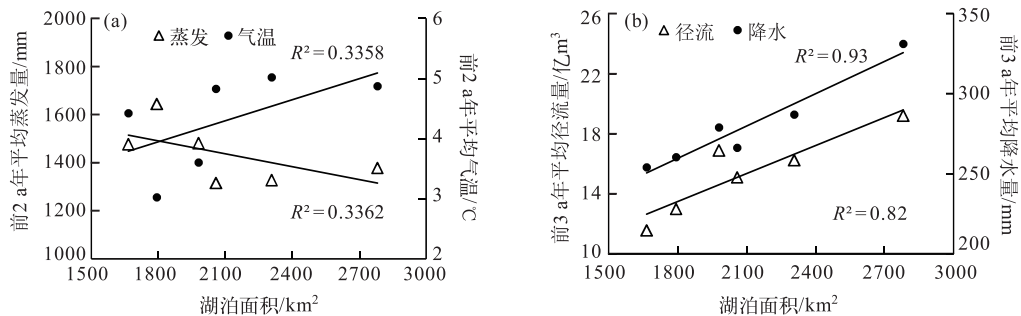


图3 湖泊面积与气候水文要素的相关性

Fig.3 Relationship of lakes area, climate and runoff

盆地石油天然气、盐湖资源、金属以及煤炭资源的开采迅速发展,人口也急剧增加. 2015年常住人口47.4万人,农业灌溉面积5.4万 $\text{hm}^2$ . 盆地淡水用量约10亿 $\text{m}^3$ ,水资源开发利用程度平均达到了20%以上,巴音河流域等水系的水资源开发利用已经超过了50%. 除淡水外,盐湖企业卤水开采量也达8.5亿 $\text{m}^3$ .

### 4.3 人类活动对湖泊的影响

上游人类耗水、湖口闸门调控以及盐湖开发均对柴达木盆地的湖泊产生了显著影响.

4.3.1 上游用水减小了入湖水量,造成湖泊萎缩 以巴音河流域为例. 巴音河位于柴达木盆地北部,河流出宗务隆山、流经德令哈市后,在戈壁滩上大量渗漏,潜入地下东西分流,东支注入尕斯库勒湖,西支在郭里木再次溢出,汇流成河,向西流入可鲁克湖,再经可鲁克湖天然调节后,由连通河排泄至托素湖. 巴音河出山口平均年径流量3.4亿 $\text{m}^3$ ,流域水资源总量4.85亿 $\text{m}^3$ .

1956年以来,可鲁克湖、尕斯库勒湖的面积变化相对较小,位于河流尾间的托素湖变化很大. 1956年托素湖面

积为 191 km<sup>2</sup>, 1976 年萎缩至 155.8 km<sup>2</sup>, 1999 年继续萎缩至 136.9 km<sup>2</sup>, 44 a 共萎缩了 54 km<sup>2</sup> (图 4). 托素湖湖区年降水量约为 80 mm, 湖水的年蒸发量约为 1300 mm. 显然, 湖面降水对湖泊的补给微弱, 湖面的变化完全取决于上游来水的多少和湖面蒸发的变化.

50 多年来巴音河径流呈显著的上升趋势, 倾向率为 0.19 亿 m<sup>3</sup>/10 a, 通过了  $\alpha=0.001$  的显著性检验. 水面蒸发量在 1983 年发生了明显的下降突变, 1956—1982 年, 水面蒸发量平均为 1506 mm, 1983—2015 年平均为 1228 mm. 在河流出口口径流增加、盆地蒸发能力下降的情况下, 托素湖持续萎缩, 显然是人类耗水所致. 解放前巴音河流域灌溉面积仅 48.9 hm<sup>2</sup>, 1954 年组建了德令哈农场, 1959 年灌溉面积即达到 1 万 hm<sup>2</sup> 左右, 之后最高达到 1.33 万 hm<sup>2</sup>, 农业灌溉用水由近乎零突然上升到近 1.9 亿 m<sup>3</sup>[21], 全社会总用水量保持在 2~2.6 亿 m<sup>3</sup>, 水资源开发利用程度达到 50% 左右. 上游人类耗水减少了下泄水量, 打破了尾间湖泊原有的水量平衡, 可以发现 1960s 是上游用水量增长最快的时期, 也是托素湖萎缩最快的时期. 2000 年以后, 由于上游降水径流增加, 湖泊面积才有所恢复.

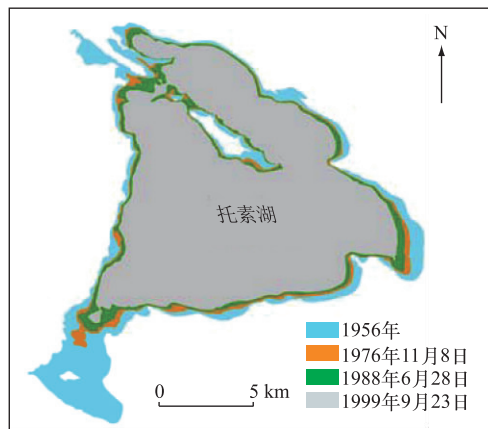


图 4 托素湖 1956、1976、1988、1999 年湖面变化

Fig.4 Area variation of Lake Tuosu in 1956, 1976, 1988 and 1999

4.3.2 湖口建闸, 控制湖泊变化 托素湖是香日德河上游的一大型吞吐湖. 1962 年香日德农场在托素湖出湖口建闸, 调节湖水的季节下泄, 水位的年调节幅度一般在 0.5 m 以内. 根据 1962—1986 年不连续的水位记录, 湖水位总体稳定. 2008—2009 年受泄水闸减少水流下泄的人为影响, 湖水位上升了约 2 m, 面积也相应扩大, 2015 年湖泊面积为 246.9 km<sup>2</sup>, 较 2007 年增加了 13.5 km<sup>2</sup>.

4.3.3 人为阻隔河湖连通、开采卤水、建设人工盐田、排放老卤等盐湖开发行为, 对盆地盐湖的空间格局、功能、面积产生了较大影响 (1) 人为阻隔河湖连通. 以那棱格勒河流域为例. 那棱格勒河是柴达木盆地最大的河流, 位于柴达木盆地西南部, 平均年径流量为 10.34 亿 m<sup>3</sup>. 那棱格勒河以前多注入东、西台吉乃尔湖, 很少有水能进入一里平, 一里平常为干盐湖. 东、西台吉乃尔湖, 一里平湖区地下卤水中液态锂矿藏丰富. 自 2003 年开始, 湖区相继入驻了 3 家盐湖企业, 为便于开采地下

卤水, 企业均修建了阻水坝, 阻断河水进入湖区, 东、西台吉乃尔湖也由盐湖逐渐向干盐湖转化.

2003 年, 中信国安科技发展有限公司在西台吉乃尔湖区南部、东部修建阻水堤, 将河水经苦水沟排向一里平[22], 此后的几年间, 西台吉乃尔湖仅在汛期有水. 2008 年, 青海锂业在东台吉乃尔湖也修筑围堤 33 km, 完全封堵了入湖通道, 2011 年东台吉乃尔湖完全干涸. 由于上游缺少水库调蓄, 面对洪水, 两家盐湖企业竞相修建、加高阻水堤, 造成洪水宣泄不畅. 上游来水一部分滞留于鹤湖地区, 一部分被排往下游一里平地区. 一里平湖位于西台吉乃尔湖西北方, 1976 和 2001 年均均为干盐湖, 1992 年 7 月面积也仅为 8.2 km<sup>2</sup>, 2007 和 2010 年, 受东、西台吉乃尔湖阻水影响, 一里平湖水面面积分别增长到了 134.8 和 313.1 km<sup>2</sup>. 一里平由以往的干盐湖一跃成为 2010 年盆地面积最大的湖泊. 2013 年, 五矿集团入驻一里平, 修建阻水坝封堵了入湖通道. 2015 年, 东、西台吉乃尔湖, 一里平湖 3 处盐湖均已成为干盐湖, 河水则滞留于鹤湖、苦水沟 (图 5), 鹤湖、苦水沟 2015 年的水面面积分别达到了 126.8 和 138.7 km<sup>2</sup>.

格尔木河流域是盆地盐湖生产最集中、钾肥产量最大的地区. 由于青海盐湖集团阻水堤的作用, 在达布逊湖南部形成了新的湖泊, 近年来的面积不断扩大 (图 5), 2015 年面积达到了 131.6 km<sup>2</sup>.

(2) 开采卤水与建设人工盐田压缩了天然盐湖的空间. 柴达木盆地盐湖工业始于 1980s, 1989 年钾肥产量仅 5 万 t, 2001 年产量达到 103.5 万 t, 2004 年以后发展加速, 2010 年钾肥产量达到 584.5 万 t, 2015 年达到 849.4 万 t (图 6), 当年的采卤量约为 8.5 亿 m<sup>3</sup>. 另外, 用于晒卤的盐田迅速扩张, 面积由 1989 年的 17.4 m<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 664.9 km<sup>2</sup>, 2015 年达到了 1006.1 km<sup>2</sup> (图 6). 卤水的大量开采与人工盐田的迅速扩张均压缩

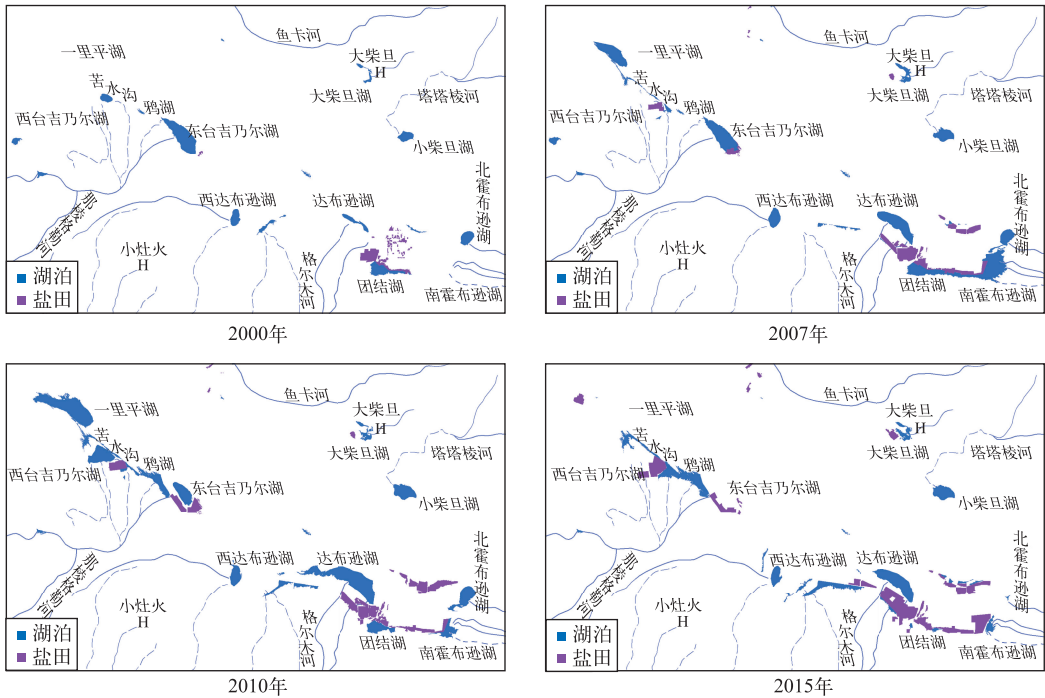


图5 柴达木盆地尾间湖泊与盐田的空间变化

Fig.5 Spatial variation of the rump lakes and solar pond in Qaidam Basin

了天然盐湖的空间。

(3)老卤排放造成湖泊扩张. 盐湖企业排放的老卤量逐年上升,2010年,盆地老卤排放量约为3亿m<sup>3</sup>,主要集中在格尔木河下游. 该地区的老卤一部分被排往团结湖,一部分被排往东侧的南霍布逊湖. 团结湖1990年以前为季节性卤水湖,面积常在1~2 km<sup>2</sup>左右,由于排入的老卤量持续增加,该湖也变为常年性湖泊,湖面持续扩大,2001年达到85.0 km<sup>2</sup>,2007年达到119.2 km<sup>2</sup>,与南霍布逊湖连为一体. 南霍布逊湖以前仅接受柴达木河等的补给,湖面积多在50 km<sup>2</sup>以下,2007年,大量的老卤通过排卤渠和团结湖进入该湖,湖面积则达到了228.8 km<sup>2</sup>,湖泊也由河流尾间湖变成了老卤排放湖. 2010年之后,企业利用老卤回补晶间卤水,老卤无处排放的问题才得以解决.

### 5 结论

1)1976—2015年的40 a间,柴达木盆地湖泊总体上经历了扩张—萎缩—扩张—萎缩的变化过程. 1976—1990年,湖泊略有扩张,1990—2000年湖泊有所萎缩. 21世纪的前10 a湖泊剧烈扩张,2010年面积较2000年增加了1115.7 km<sup>2</sup>(67.0%),远高于青藏高原其他地区的湖泊增长幅度,但2015年湖泊面积较2010年则出现了显著萎缩.

2)40 a来盆地湖泊面积变幅有明显差异. 外围山区湖泊以吞吐湖为主,面积相对稳定,40 a的面积变化

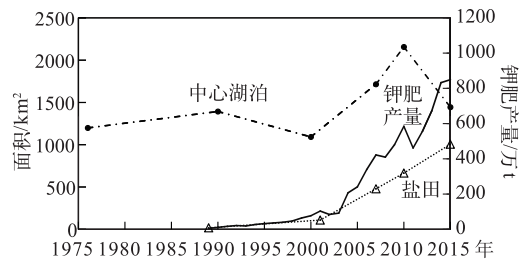


图6 柴达木盆地中心湖泊面积、盐田面积和钾肥产量变化

Fig.6 Variation of central lake area, solar pond area and potash yield in Qaidam Basin



率为 8.6%；盆地中心湖泊以尾间湖为主，面积变化较大，面积变化率平均达到 70.9%，东达布逊湖、东台吉乃尔湖、都兰湖面积变化率都在 100% 以上，鸦湖、一里平湖、西台吉乃尔湖、团结湖、新湖、南霍布逊湖都在 200% 以上。盆地中心的湖泊面积变化率居青藏高原之首。

3) 盆地盐湖湖底比较平缓，地形起伏不大，多数湖泊水深在几十厘米到一米以内。来水的丰枯变化可以造成湖缘线大幅度的扩大和收缩。地形平坦是柴达木盆地盐湖面积多变的地学原因。就气候水文因素而言，柴达木盆地湖泊面积变化主要受山区降水和径流的影响，湖面变化与前 3 a 的降水径流关系最为密切。

4) 2000—2015 年，盆地湖泊面积先急剧扩张，后显著萎缩，这与气候变化过程是同步的。而作为盐湖开发强度重要指标的钾肥产量、盐田面积在此期间则急剧增加，与湖泊面积变化过程并不同步，表明目前盐湖资源开发对盆地湖泊总面积影响尚不显著。但从局部来看，上游社会经济耗水、盐湖周边人为阻隔河湖连通、开采卤水、修建人工盐田、排放老卤等盐湖开发活动，对湖泊的空间格局、面积都产生了显著影响，出现了苦水沟、达布逊湖南部新生湖等湖泊，鸦湖、团结湖面积也显著扩大，同时东、西台吉乃尔湖逐渐萎缩、干涸，一里平湖由以前的干盐湖在 2010 年一跃成为盆地最大的湖泊，2015 年又干涸。

盆地盐湖的大规模开发也产生了负面影响，典型的如团结湖，无序排放的老卤水一片汪洋，淹没了公路，包围了企业生活区。那棱格勒河下游的企业竞相修建阻水堤，阻断了河湖连通，不给洪水出路，造成洪水冲毁堤防，淹没生产区，企业停产，并引发了群体性械斗事件。针对上述问题，建议要从整个盐湖开发的大局作长远考虑，科学统筹规划开发利用方案，合理确定盐湖开发规模。那棱格勒河流域，应明确盐湖的开发顺序，留足蓄水空间，给洪水以出路，并在上游修建大型调节水库，减少汛期洪水下泄，减轻盐湖生产区的洪水压力。

## 6 参考文献

- [ 1 ] Ding YJ, Liu SY, Ye BS *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 ] Bai J, Chen X, Li JL *et al.* Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975-2007: a remote-sensing analysis. *J Lake Sci*, 2011, **23**(1): 80-88. DOI: 10.18307/2011.0113. [白洁, 陈曦, 李均力等. 1975—2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 80-88.]
- [ 3 ] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. DOI: 10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [ 4 ] Zhang G, Yao T, Xie H *et al.* Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau. *Chinese Sci Bull*, 2014, **59**(24): 3010-3021.
- [ 5 ] Li L, Shen HY, Li HM. Regional differences of climate change in Qaidam basin and its contributing factors. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(4): 641-649. [李林, 申红艳, 李红梅等. 柴达木盆地气候变化的区域显著性及其成因研究. 自然资源学报, 2015, **30**(4): 641-649.]
- [ 6 ] Li L, Chen XG, Wang ZY *et al.* Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 2010, **6**(3): 181-186. [李林, 陈晓光, 王振宇等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. 气候变化研究进展, 2010, **6**(3): 181-186.]
- [ 7 ] Xu HJ, Yang TB. Climate factors change and its impact on lake area and vegetation growth in the Qaidam basin during 1981-2010. *Progress in Geography*, 2013, **32**(6): 868-879. [徐浩杰, 杨太保. 1981—2010 年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应. 地理科学进展, 2013, **32**(6): 868-879.]
- [ 8 ] Zhang C, Hai L, Chen L. Remote sensing monitoring and analysis of lake water surface changes in the Qaidam Basin. *Yellow River*, 2010, **32**(12): 54-55. [张超, 韩琳, 陈亮. 柴达木盆地湖泊水面变化遥感监测分析. 人民黄河, 2010, **32**(12): 54-55.]
- [ 9 ] Lu N. Changes of lake area in Qaidam basin and the influence factors. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(8): 83-87. [卢娜. 柴达木盆地湖泊面积变化及影响因素分析. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(8): 83-87.]

- [10] Fang HB, Zhao FY, Zhang ZD *et al* eds. Remote sensing investigation and evolution research of modern ecological geological environment in Tibetan plateau. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 115-129. [方洪宾, 赵福岳, 张振德等. 青藏高原现代生态地质环境遥感调查与演变研究. 北京: 地质出版社, 2009: 115-129.]
- [11] Yang HA, An RZ. The distribution of existing glaciers in the Qaidam basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, **8**(2): 171-175. [杨惠安, 妥瑞珍. 柴达木盆地现代冰川的分布及其数量统计. 冰川冻土, 1986, **8**(2): 171-175.]
- [12] Liu YH ed. Rational utilization of water resources and protection of ecological environment in Qaidam Basin. Beijing: Science Press, 2000: 13-31. [刘燕华. 柴达木盆地水资源合理利用与生态环境保护. 北京: 科学出版社, 2000: 13-31.]
- [13] Duan SQ, Fan SX, Cao GC *et al*. The changing features and cause analysis of the lakes in the source regions of the Yellow River from 1976 to 2014. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, **37**(3): 745-756. [段水强, 范世雄, 曹广超等. 1976—2014年黄河源区湖泊变化特征及成因分析. 冰川冻土, 2015, **37**(3): 745-756.]
- [14] Zhu XD, Li L, Li QX *et al*. Homogenization treatment of Qinghai Province historical climate data station migration. *Journal of Qinghai Meteorology*, 2010, (2): 6-9. [朱西德, 李林, 李庆祥等. 青海省历史气候资料迁站资料的均一化处理. 青海气象, 2010, (2): 6-9.]
- [15] Duan SQ, Liu T, Cao GC *et al*. Expansion of the lakes and its causes in the source region of the Yangtze River. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(1): 15-22. [段水强, 刘弢, 曹广超等. 近期长江源区湖泊扩张特征及其成因. 干旱区研究, 2015, **32**(1): 15-22.]
- [16] Duan SQ, Cao GC, Liu T *et al*. The recent expansion features and the cause of formation of the lakes in Qinghai Qiangtang Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(5): 1237-1247. [段水强, 曹广超, 刘弢等. 青海羌塘盆地近期湖泊扩张特征及成因. 冰川冻土, 2013, **35**(5): 1237-1247.]
- [17] Dong SY, Xue X, You QG *et al*. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 535-544. DOI:10.18307/2014.0407. [董斯扬, 薛娴, 尤全刚等. 近40年青藏高原湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 535-544.]
- [18] Ding YH, Ren GY, Shi GY *et al*. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **3**(1): 3-8. [丁一汇, 任国玉, 石广玉等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, **3**(1): 3-8.]
- [19] Hartmann DL, Klein Tank AMG, Rusticucci M *et al*. Observations: atmosphere and surface. In: Climate Change 2013: The physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2013: 159-254.
- [20] Chen YN, Li Z, Fan YT *et al*. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. 地理学报, 2014, **69**(9): 1295-1304.]
- [21] Delingha Local Chronicles Compilation Committee ed. Delingha annals. Beijing: Local Records Publishing House, 2004: 162-169. [德令哈地方志编纂委员会. 德令哈市志. 北京: 方志出版社, 2004: 162-169.]
- [22] Zhang XY, Ma HZ, Gao DL *et al*. Dynamic changes of K, Li and B in hydrochemistry in brine of the mining area of Xitaijinair salt lake during the initial period of mining. *J Lake Sci*, 2007, **19**(6): 727-734. DOI: 10.18307/2007.0616. [张西营, 马海洲, 高东林等. 采卤初期西台吉乃尔盐湖矿区卤水中钾、锂、硼水化学动态变化. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 727-734.]