

doi: 10.12029/gc20190212

党学亚, 常亮, 卢娜. 2019. 青藏高原暖湿化对柴达木水资源与环境的影响[J]. 中国地质, 46(2): 359–368.

Dang Xueya, Chang Liang, Lu Na. 2019. The impact of climatic warm-wet of the Tibetan Plateau on the water resources and environment in Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 46(2): 359–368(in Chinese with English abstract).

青藏高原暖湿化对柴达木水资源与环境的影响

党学亚^{1,2,3}, 常亮^{1,2,3}, 卢娜^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局干旱-半干旱地区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710054)

摘要:通过分析研究格尔木和德令哈两个典型流域气象要素、径流及全盆地土地覆盖类型面积的变化,发现青藏高原暖湿化对柴达木盆地水资源与环境的影响显著。研究区气温明显上升、干旱指数显著下降,暖湿化明显。2000—2016 年与 1960—1999 年相比,格尔木和德令哈年均气温分别上升了 1.7℃和 1.3℃、年均降水量分别增加了 2 mm 和 63 mm、年均径流量分别增加了 240×10^6 和 $90 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2000—2012 年全盆地裸地减少,草地、永久冰雪、水体面积、开放灌丛面积增加,植被生态向好发展。暖湿化促使降水量增加是河川径流量和水资源增加及生态环境改善的主要原因。现阶段暖湿化环境对盆地水资源开发利用和生态环境保护有利,但其对改善环境的可持续性需要进一步监测和研究。

关键词:青藏高原;气候暖湿化;柴达木盆地;水资源与环境

中图分类号:P641;P627 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)02-0359-10

The impact of climatic warm-wet situation of the Tibetan Plateau on the water resources and environment in Qaidam Basin

DANG Xueya^{1,2,3}, CHANG Liang^{1,2,3}, LU Na^{1,2,3}

(1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Engineering Research Center of water resources and environment, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Through studying the changes for meteorological factors, runoff and land cover in Golmud and Delingha in Qaidam Basin, it is found that the water resources and environment has been influenced significantly by climatic warm-wet situation in the Tibetan Plateau. In the study area, the temperature increases significantly, the drought index decreases significantly, and the climatic warm-wet situation is significant. From 2000 to 2016, the annual average temperature increased respectively 1.7 °C and 1.3 °C, annual average precipitation increased respectively 2 mm and 63 mm, annual average runoff increased respectively 240×10^6 and $90 \times 10^6 \text{ m}^3$, compared with 1960–1999, in Golmud and Delingha basin. From 2000 to 2012, the bare land in the whole basin decreased,

收稿日期:2018-09-04;改回日期:2019-01-20

基金项目:中国地质调查局项目“柴达木盆地巴音河—塔塔凌河流域 1:5 万水文地质调查”(DD20160291)。

作者简介:党学亚,男,1967,博士,教授级高级工程师,主要从事水文地质环境地质调查研究,研究方向为地下水资源与环境;

E-mail:474767944@qq.com。

the area of grassland, permanent ice, snow, water area and open shrub increased, and ecological vegetation was developed very well. The climatic warm-wet situation promotes the increase in precipitation, and it is the main reason for the increase of runoff, water resources, as well as the improvement of ecological environment. At the present stage, the warm-wet environment is beneficial to water resources development and ecological environmental protection in Qaidam Basin; nevertheless, the sustainable development of the water resources and environment needs further monitoring and deep research.

Key words: Tibetan Plateau; climatic warm-wet situation; Qaidam Basin; water resources and environment

About the first author: DANG Xueya, male, born in 1967, doctor, senior engineer, majors in hydrogeology and environmental geology survey and research; E-mail: 474767944@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. DD20160291).

1 引言

柴达木盆地位于青藏高原东北部(图1),总面积 $276.2 \times 10^3 \text{ km}^2$,是巨大的矿产资源和能源资源盆地,也是国家在建的最大循环经济试验区。其内部平原区面积 $130.5 \times 10^3 \text{ km}^2$,蕴藏着丰富的石油、天然气以及钾盐等盐湖矿产,是循环经济的核心布局区和工业园区所在地。但地处内陆腹地,干旱少雨、生态环境脆弱,循环经济试验区发展建设始终为水资源和生态环境两大因素所制约。20世纪中期,柴达木盆地的无序开发使区内土地严重沙化(许荣生等,1998;王昱,2005)。当今,面对生态文明建设要求和气候变化对青藏高原水资源与生态环境带来的强烈影响(蒲健辰等,2004;李治国,2012;戴升

等,2013;郑然等,2015;段安民等,2016;胡凡盛等,2017),柴达木盆地开发建设科学决策迫切需要水资源与生态环境变化依据支持。

气候变化的影响正如2007年IPCC(政府间气候变化专门委员会)第四次评估报告描述的那样——“从来没有像今天这样向人类展示着它的威力”(孙颖等,2007)。其对水资源与环境的影响备受科学界、环境智库、各国政府和社会公众关注(Piao Shilong等,2010;张秀琴等,2015;杜譔等,2018)。1988年以来,联合国的教科文组织、环境规划署、发展署,以及世界气象组织(WMO)、国际水文科学协会(IAHS)等陆续实施了一系列国际水科学方面的合作项目或研究计划,从全球、区域和流域等不同尺度研究变化环境下的水循环及其变化

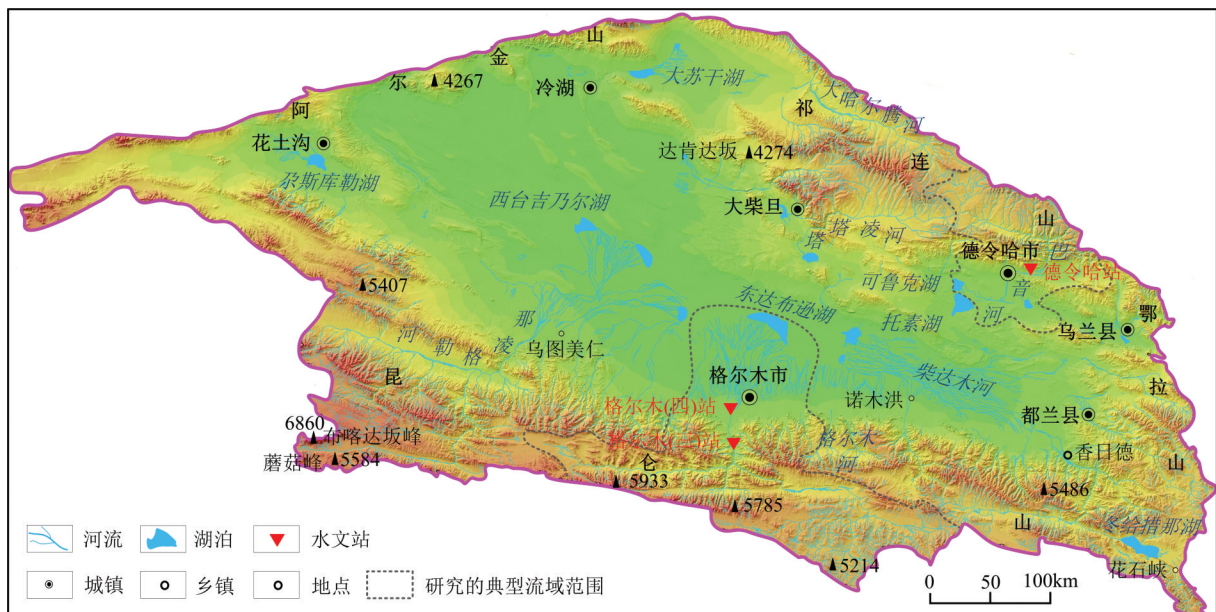


图1 柴达木盆地地势及水系分布图
Fig.1 Distribution of geomorphology and hydrographic net in Qaidam Basin

的检测与归因、水资源变化趋势、影响评估模型及气候变化的阈值等问题(陶涛等,2007;刘昌明,2008;王国庆等,2008;张彧瑞等,2012;宋晓猛等,2013;李峰平等,2013)。目前的研究正朝着气候变化对淡水资源的影响,变化环境下水安全、水资源的脆弱性、适应性管理(夏军等,2008,2011,2012,2015,2016)以及环境地质工作方向等方面扩展(张永双,2017;中国地质编辑部,2017)。目前,已有研究建立了GCMs气候模型和近30种耦合此气候模型的水文模型(王国庆等,2008),预测流域水资源未来的变化趋势(宋晓猛等,2013)。模型模拟的效果与适应性对于湿润半湿润地区较好,对于旱半干旱地区受模型结构和参数识别的不确定性影响仍然面临挑战(王国庆等,2008;於凡等,2008)。青藏高原作为全球气候变化的驱动机和放大器(潘保田等,1996),是专家学者们关注的重点,并从区域尺度对高原的气温、降水、湖泊和冰川变化开展了大量的研究工作,得出了较一致的认识:青藏高原在1997—2000年开始加快变暖并有湿化现象,气温升高(吴绍洪等,2005;戴升等,2013;郑然等,2015;段安民等,2016)、湖泊扩张(李治国,2012;董斯扬等,2014)与冰川退缩明显(蒲健辰等,2004;胡凡盛等,2017)。另外,刘晓东等(2009)基于IPCC-AR4的A1B情景、张人禾等(2015)基于IPCC-AR5的RCP情景的气候模型及物理统计模型预估了青藏高原气候未来的发展趋势,结果显示:在RCP2.6和RCP8.5情景下,2006—2035年年平均降水较1961—2005年将增加3.2%;在RCP4.5情景下,2016—2035年年平均降水将增加4.4%。同时指出,受自然条件差异的影响,气候变化对青藏高原水资源影响在各地有所不同。但过往针对柴达木盆地开展的研究不多且较为粗略。因此,本文选择盆地产业规模最大、水资源需求最强烈格尔木河流域和巴音河流域开展相关研究,利用柴达木盆地1:5万水文地质调查最新获得的气象水文数据序列与环境遥感监测数据,采用简单可靠的动态变化分析法,通过分析两流域控制性气象站降水量和水文站径流的动态变化特征,以及全盆地的土地覆盖类型面积变化特征,以期揭示青藏高原气候暖湿化对柴达木盆地水资源与环境的影响,为柴达木循环经济试验区建设提供参考依据。

2 研究区概况

柴达木盆地属于高寒干燥大陆性气候,自然环境以荒漠为特征。区内植被主要分布于平原区冲积扇前缘的地下水溢出带附近、河流的漫滩与阶地、湖泊周边,以及山区海拔在4200~4700 m的高原草甸和高山草甸地带。盆地中心地带的盐壳、盐湖,西北部的风蚀残丘和沙漠、戈壁荒漠以及祁连山、昆仑山高山积雪、冰川和高山裸岩、碎石带寒漠等地带基本无植被(陈志人,1987;马俊飞等,2008;朱文彬等,2010)。土地覆盖类型主要为裸地、草地、永久冰雪、开放灌丛、水体、耕地。研究区格尔木河流域、巴音河流域分别位于昆仑山北麓中部和祁连山南麓东部。两流域分别拥有柴达木盆地第二大河格尔木河和第四大河巴音河。

格尔木河由东、西两条支流汇合而成。东支发源于巴颜喀拉山北坡,河源海拔5692 m,河长317 km,集水面积10723 km²;西支发源于昆仑山北坡的狼牙山,河源海拔5400 m,河道长248 km,集水面积7527 km²。河水来源于冰雪融水、降水和地下水补给。该河流在其两支流汇合口下游6.8 km处有控制性水文站——格尔木(三)站,集水面积为18648 km²。

巴音河发源于祁连山脉的野牛山,河源海拔4900 m左右,接受降水和地下水补给。其切穿宗务隆山,流经泽林沟、德令哈、尕斯库勒戈壁,最后注入可鲁克湖和托素湖。该河流在出山口有控制性水文站——德令哈站控制。水文站以上河道长约200 km,集水面积7281 km²。

3 数据来源与处理

3.1 数据来源

3.1.1 气象水文数据来源

柴达木盆地四周高山环抱,内部平原区水资源主要来自山区河流的输入。山区因自然环境恶劣,缺少气象和水文观测站点,但两流域在河流出山口均设有水文站。同时两河的山前平原作为柴达木盆地主要城市格尔木市、德令哈市所在地均有专业的气象站。1960—2016年两地气象与水文观测积累了长达57年的资料序列。其中,降水量和气温数据可从<http://cdc.cma.gov.cn>(中国气象科学数据共享服务网)取得,蒸发量和水文数据采用中国地质

调查项目——柴达木盆地巴音河—塔塔凌河流域 1:5 万水文地质调查所收集的资料(德令哈缺失 2000—2010 年蒸发量数据,表 1)。

3.1.2 遥感数据来源

遥感数据采用 NASA 免费提供的 3 级陆地标准数据集 MCD12q1。它为 Terra 和 Aqua 数据联合开发的土地覆盖分类数据,空间分辨率为 500 m×500 m,每年一期。交叉验证分析结果表明其精度较高,达到了 75%。该数据包括 5 种分类方案,其中常用的为国际地圈与生物圈计划 IGBP 的土地覆盖分类系统(IGBP-Type 1)。其将全球分成水体、常绿针

叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、郁闭灌丛、开放灌丛、多树草原、稀树草原、草地、永久湿地、耕地、城市建设用地、耕地/自然植被镶嵌体、冰雪、裸地或极稀疏植被等 17 个土地覆盖类型。柴达木盆地现有 2000—2012 年 13 期土地覆盖类型数据。

3.2 数据分析处理

3.2.1 气象与水文数据处理

气象数据可直接用于动态分析和分段平均值统计。水文数据在格尔木站涉及到迁站造成数据不统一而不能直接利用的问题,需做还原和修正方

表 1 格尔木和德令哈主要气象要素历年观测值一览

Table 1 A list of annual observations of main meteorological elements in Golmud and Delingha

格尔木气象站								德令哈气象站							
年份	气温 /°C	年降水量/mm	蒸发量/mm	年份	气温 /°C	年降水量/mm	蒸发量/mm	年份	气温 /°C	年降水量/mm	蒸发量/mm	年份	气温 /°C	年降水量/mm	蒸发量/mm
1960	3.90	36.4	3027.4	1989	4.79	48.8	2598.1	1960	3.04	155.4	2306.8	1989	3.45	282.5	1717.6
1961	3.18	19.7	2910.0	1990	5.49	17.5	2740.4	1961	2.72	80.5	2174.5	1990	4.39	187.8	2056.6
1962	3.33	46.3	2821.0	1991	5.34	37.4	2665.9	1962	2.67	95.4	2296.4	1991	4.27	167.0	2079.5
1963	3.81	36.3	2943.6	1992	4.92	54.2	2455.3	1963	2.58	144.7	2210.0	1992	3.64	207.2	1928.5
1964	3.45	48.2	2843.1	1993	6.42	22.5	2485.1	1964	2.73	91.0	2247.5	1993	4.01	189.2	1846.2
1965	3.52	11.4	3002.0	1994	5.72	43.5	2449.7	1965	3.14	95.7	2312.7	1994	4.67	155.8	1889.6
1966	3.79	33.9	2956.2	1995	5.02	36.0	2361.2	1966	3.29	119.4	2286.1	1995	3.96	155.2	1972.6
1967	2.88	101.8	2545.6	1996	5.55	55.4	2304.2	1967	2.46	211.9	1973.9	1996	4.40	155.4	1975.6
1968	3.48	26.5	2749.9	1997	5.59	41.9	2220.4	1968	3.08	86.0	2203.0	1997	4.48	168.6	1919.0
1969	4.28	25.5	2777.6	1998	6.58	137.2	2076.2	1969	3.43	143.6	2225.3	1998	5.21	196.6	1954.0
1970	4.41	65.6	2447.9	1999	6.49	44.9	2155.5	1970	1.95	197.5	1994.9	1999	5.15	146.7	2010.3
1971	5.23	66.9	2602.7	2000	5.73	25.9	2124.6	1971	3.26	138.1	2217.8	2000	4.26	195.7	
1972	5.12	28.8	2501.9	2001	6.23	28.3	2012.8	1972	3.90	82.5	2255.3	2001	5.09	158.6	
1973	5.17	34.1	2679.3	2002	6.45	56.6	1945.8	1973	3.89	129.8	2532.0	2002	4.74	299.0	
1974	4.96	23.9	2684.8	2003	6.17	30.9	1901.1	1974	3.61	178.9	2422.2	2003	5.12	196.1	
1975	4.58	36.0	2516.9	2004	6.37	32.2	2028.2	1975	3.56	161.9	2405.3	2004	4.78	286.9	
1976	4.68	23.6	2572.8	2005	6.56	41.9	1670.5	1976	3.27	145.4	2410.6	2005	4.83	225.0	
1977	4.74	68.0	2621.8	2006	7.09	44.2	1671.8	1977	3.28	318.7	2298.9	2006	5.76	141.7	
1978	5.28	32.1	2832.4	2007	6.48	59.1	2049.9	1978	3.97	121.9	2520.2	2007	5.24	246.3	
1979	5.15	44.7	2778.0	2008	6.12	43.5	2046.0	1979	3.91	192.4	2653.5	2008	4.31	246.1	
1980	5.53	36.6	2915.5	2009	6.72	59.9	2097.0	1980	4.07	159.3	2346.0	2009	5.00	326.6	
1981	5.48	52.1	2759.9	2010	6.76	90.8	1907.8	1981	4.18	194.4	2188.0	2010	5.03	265.1	
1982	5.03	57.5	2151.3	2011	6.63	31.3	1923.4	1982	3.78	198.3	2226.9	2011	4.88	165.7	1416.7
1983	4.25	43.8	2240.8	2012	5.92	62.4	1768.3	1983	2.57	159.9	1720.3	2012	3.93	306.5	1305.9
1984	4.79	38.4	2502.5	2013	6.75	19.0	1968.6	1984	3.63	128.4	1919.6	2013	5.33	123.8	1450.8
1985	5.23	27.4	2630.0	2014	6.34	37.4	1898.2	1985	3.90	166.5	1951.8	2014	5.02	189.7	1398.1
1986	4.93	56.2	2499.7	2015	6.92	72.7	1859.6	1986	3.38	227.2	1865.0	2015	5.17	232.8	1370.1
1987	5.89	47.8	2463.3	2016	4.48	47.1	1929.4	1987	4.48	167.1	1942.9	2016	5.11	248.9	1421.2
1988	5.56	52.1	2506.7					1988	4.32	244.8	1863.0				

可进行动态分析和分段平均值统计。1959年1月1日至1990年8月格尔木水文站为格尔木(三)站(东经94°49′、北纬36°00′),集水面积为18648 km²;因修建乃吉里水库,1990年9月下迁37 km至出山口下游,为今天的格尔木(四)站(东经94°47′、北纬36°18′),集水面积扩大至19621 km²(图1)。之后,(四)站上游有温泉水库、大干沟水库、小干沟水库和乃吉里水库相继建成。对此,将观测数据还原统一至格尔木(三)站。鉴于后3个水库为峡谷型水库,水面面积小,库区蒸发损失可以忽略不计,还原主要考虑温泉水库蓄水变量、库区蒸发损失量,以及格尔木(三)站至乃吉里电站段的河道渗漏和库区渗漏。其中河水在两站之间的河道及乃吉里库区的渗漏量根据青海省柴达木综合地质勘测大队《格尔木河中下游冲洪积扇地下水数学模型及环境地质研究》报告,分别为43.68×10⁶ m³/a和53.29×10⁶ m³/a,二者合计为96.97×10⁶ m³/a。两站集水面积相为差973 km²,区间来水量为17.03×10⁶ m³/a。还原计算即采用此区间渗漏量和来水量。由此得到统一到格尔木(三)站的1960—2016年径流数据序列。

3.2.2 遥感数据处理

直接根据土地覆盖类型数据集MCD12Q1数

据,按国际地圈与生物圈计划(IGBP)的土地覆盖分类系统,分别统计各种类型2000—2012年的面积,分析其变化特征。

4 结果与讨论

4.1 盆地暖湿化分析

通过绘制1960—2016年的年降水量、气温、蒸发量及干旱指数历时曲线并计算变化趋势(图2)可见:①德令哈站降水量年际变化较大,而格尔木站变化不大;两站降水量均呈增加趋势,但德令哈站增加更为显著,梯度近乎是格尔木站的9倍。②两站气温年际历时曲线形态相似,均呈显著增大趋势,格尔木站的变化梯度略大于德令哈站。③两站的蒸发量和干旱指数均呈现减小趋势,蒸发量历时曲线形态十分相似,干旱指数曲线形态差异较大;格尔木站蒸发量和干旱指数减小的梯度明显大于德令哈站。

姚晓军(2013)、杜玉娥(2018)等研究发现,2000年为青藏高原可可西里气温升高、降水增加与湖泊扩张最显著的时间节点。据此,本文按1960—1999年与2000—2016年两个时段,进一步统计比较降水量、气温、蒸发量、干旱指数的变化(表2),结果

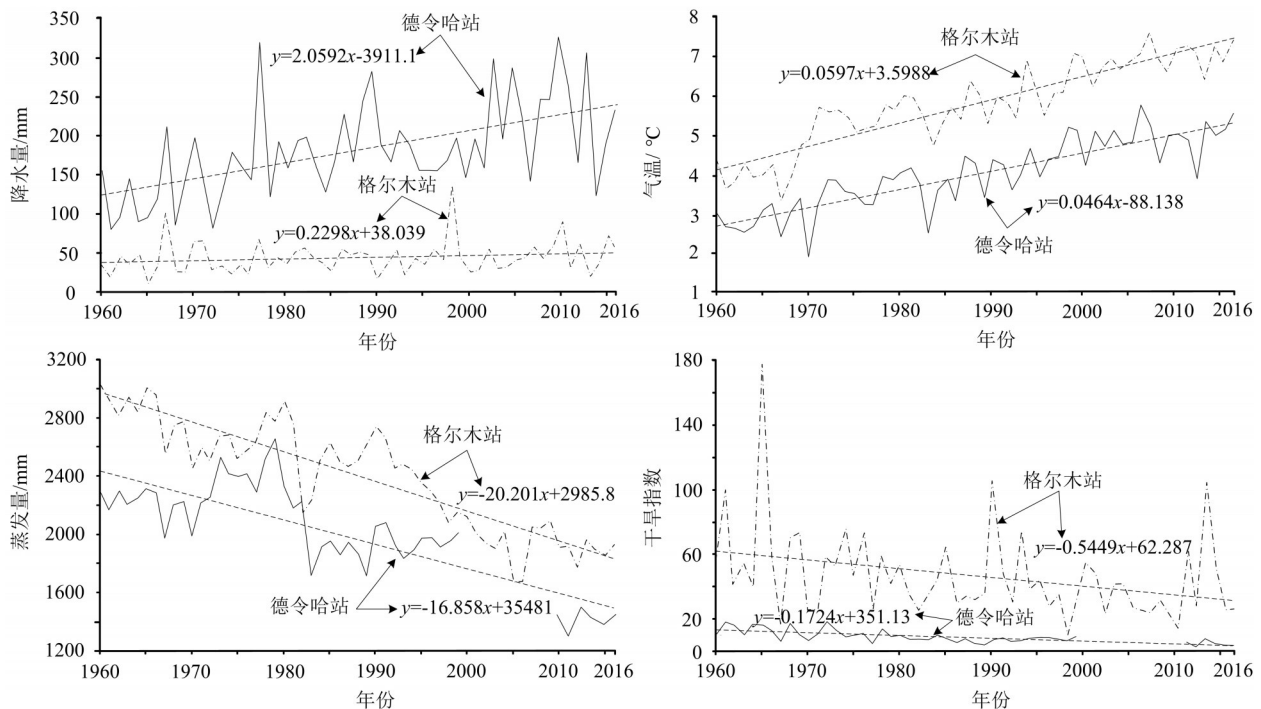


图2 格尔木与德令哈气象站要素历时曲线及其变化趋势图

Fig.2 Meteorological factors duration curve and changing trend of Golmud and Delingha

显示:①格尔木站年均降水量增加了2 mm、增率为4.5%,年均气温升高了1.7℃、增率为35.4%,年均蒸发量减少了670 mm、下降了25.8%,干旱指数由50.0下降至38.2。②德令哈站年均降水量增加了63 mm、增率为38.5%,年均气温升高了1.3℃、增率为36.1%,年均蒸发量减少了739 mm、下降了34.6%,干旱指数由9.8降低为4.9。这些气象指标的变化表明柴达木盆地出现了暖湿化。

4.2 径流变化分析

通过绘制1960—2016年格尔木和德令哈水文站年径流量历时曲线(图3)可见:两水文站径流曲线形态类似,同步变化特征明显。径流量均呈现显著增加趋势,与气温升高、降水量增大的趋势总体一致,与蒸发量、干旱指数减小的趋势相反,显然径流量的增加主要为暖湿化所致。

同样按1960—1999、2000—2016年两个时段统计径流变化发现:格尔木站平均径流量从 $750 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 增大到 $990 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 、增幅32.0%,德令哈站平均径流量从 $320 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 增大到 $410 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 、增幅

28.1%。

两站的径流量增减变化与两地各自降水量增减变化基本同步,尤其是德令哈地区同步性更高,显示出降水量多寡控制了河流径流大小。

4.3 土地覆盖类型面积变化分析

根据从NASA下载的MCD12Q1遥感数据,统计土地覆盖类型面积变化(表3,图4),结果显示:

2000—2012年13年间柴达木盆地的裸地减少了20807 km²,草地、永久冰雪、水体面积、开放灌丛分别增加了18951 km²、888 km²、169 km²、739 km²,生态植被明显向好发展。

盆地生态植被明显改善的变化趋势在时间轴上与降水增加一致性较高,显然与降水增加的影响有关,其中裸地面积在2006—2009年呈现增大趋势、草地面积在2007—2009年呈现减小趋势的同时,水体和永久冰雪面积却表现出相对稳定略有增加,说明降水增加对改善生态环境发挥了控制性作用。

4.4 环境条件变化对水资源影响分析

MCD12Q1数据显示2000年以来柴达木盆地水

表2 格尔木和德令哈气象要素特征值统计
Table 2 Statistical table of meteorological features in Golmud and Delingha

站点	时限	气温/(℃)	降水/mm	蒸发量/mm	干旱指数	备注
格尔木	1960—1999年	4.8	44	2600	50.0	① ↑表示增大或上升, ↓表示减小或下降; ②德令哈蒸发量2000 年以后时段为2011— 2016年平均值。
	2000—2016年	6.5	46	1930	38.2	
	变化率/%	35.4% ↑	4.5% ↑	25.8% ↓		
德令哈	1960—1999年	3.6	163.7	2133	9.8	
	2000—2016年	4.9	226.7	1394	4.9	
	变化率/%	36.1% ↑	38.5% ↑	34.6% ↓		

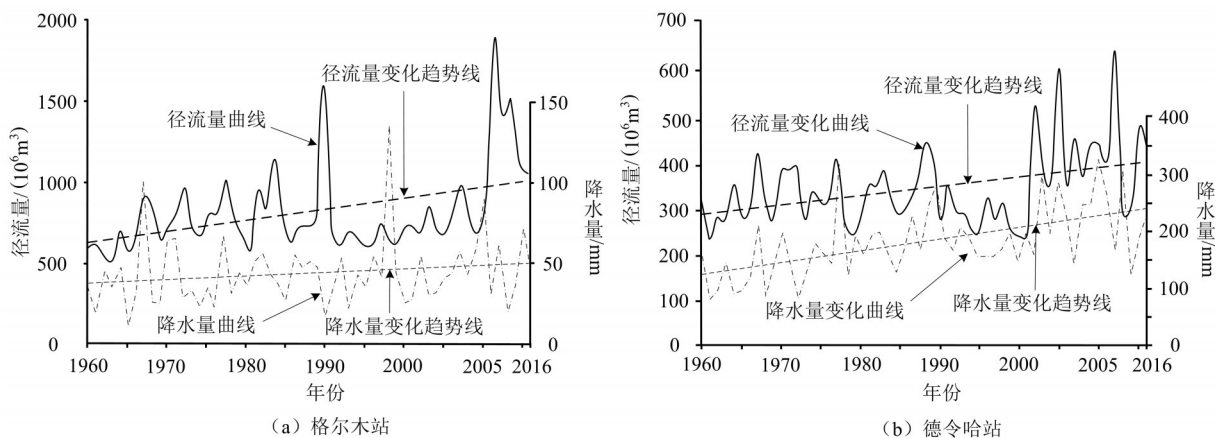


图3 格尔木与德令哈气象要素及径流量历时变化对比图
Fig.3 Duration curve of meteorological factors and river runoff in Golmud and Delingha station

表3 柴达木盆地2000-2012年主要的土地覆盖类型面积(km²)变化一览表
Table 3 Area change statistics of main land cover types from 2000 to 2012 in Qaidam Basin (km²)

年份	裸地	草地	永久冰雪	开放灌丛	水体	耕地
2000	217583	50857	1239	1276	1093	339
2001	215452	53494	1185	858	1198	271
2002	212938	55867	1321	797	1365	195
2003	210667	58196	1200	893	1319	201
2004	206179	61973	1573	1012	1483	251
2005	205628	62661	1433	1070	1355	308
2006	202623	65147	1533	1323	1556	266
2007	205039	63088	1446	1189	1406	243
2008	206857	61510	1461	789	1573	261
2009	209524	58325	1783	738	1730	331
2010	201238	66177	1716	970	1903	450
2011	198690	68389	2121	1035	1841	350
2012	196776	69808	2127	1445	1832	383

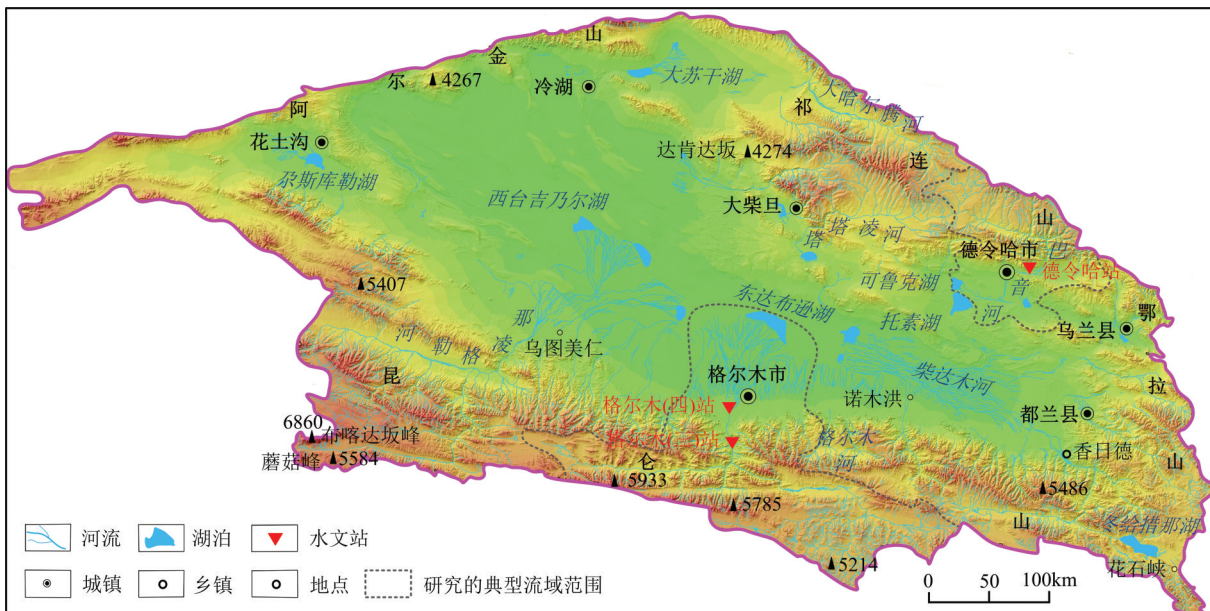


图4 柴达木盆地土地覆盖类型
Fig.4 Land cover types in Qaidam Basin

体与永久冰雪面积均有所增加,说明河川径流量增加的主控因素是山区降水量显著增加,冰川融化的贡献有限。与此同时盆地降水量、河川径流量、水域面积增大、气象站测得的蒸发量减小,表明进入内部平原的水资源增加。这与王洋等(2018)基于GRACE研究柴达木盆地水资源量呈现明显增加的

结果一致。但研究区的水体面积增大、植被面积增加势必增加蒸发量,而气象站所测的蒸发量在减小与其并不一致,说明气象站蒸发皿测得的潜在蒸发量减少并不代表近年来实际的总蒸发量一定减小。因此,暖湿化究竟使盆地内水资源量增加了多少,需要对全盆地水均衡进行分析研究,但目前受

观测数据不足的局限,本研究尚未涉及,建议给予关注。

5 结 论

(1)青藏高原暖湿化大背景下,柴达木盆地暖湿化明显。研究区降水量、河川径流量增大,水资源量增加,有利于区内水资源开发利用。

(2)暖湿化使柴达木盆地的裸地面积减少,草地、永久冰雪、水体、开放灌丛的面积增加,促使生态环境改善,有利于试验区生态环境保护。

(3)暖湿化促使降水增加是柴达木盆地河川径流量和水资源增加以及生态环境改善的主要原因,冰川融化非主要因素。

(4)暖湿化影响下全盆地生态环境改善、格尔木与德令哈地区水资源增加。其是否可持续向好发展,需要对降水、冰川和生态植被等方面全面系统地开展监测,研究判断是否存在大气环流将域外水源带进了柴达木盆地。现阶段,区内资源开发过程中对水资源和生态环境的保护绝不可掉以轻心。

References

- Chen Zhiren, Zhang Weiyang. 1987. The Characters of Ecosystem in Qaidam Basin and Its control Mechanism[J]. *Journal Arid Land Resources and Environment*, 1(2): 115–122 (in Chinese with English abstract).
- Dai Sheng, Shen Hongyan, Li Lin, Wang Zhengyu, Xiao Jianshe. 2013. Analysis on climatic transition characteristic from warm-dry to warm-wet in Qaidam Basin[J]. *Plateau Meteorology*, 32(1): 211–220 (in Chinese with English abstract).
- Dong Siyang, Xue Xian, You Quanguang, Peng Fei. 2014. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 26(4): 535–544 (in Chinese with English abstract).
- Du Xuan, Pei Yilin, Zhang Ruiwen. 2018. Summary on the research trends of major international environment think tanks in 2017[J]. *Environment and Sustainable Development*, (6):196–202 (in Chinese with English abstract).
- Du Yu'e, Liu Baokang, He Weiguo, Duan Shuiqiang, Hou Fujiang, Wang Zongli. 2018. Dynamic change and cause analysis of Salt Lake area in Hoh Xil on Qinghai-Tibet Plateau during 1976–2017[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(1): 47–54 (in Chinese with English abstract).
- Duan Anmin, Xiao Zhiqiang, Wu Guoxiong. 2016. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979–2014[J]. *Climate Change Research*, 12 (5): 374–381 (in Chinese with English abstract).
- Editorial board of Geology in China. 2017. Focus on the resources and environment, start the International Karst Science Program[J]. *Geology in China*, 44(1): 203–204.
- Hu Fansheng, Yang Taibao, Ji Qin, Wang Congqiang, Xu Aiwen. 2017. Relationship between the glacier and climate change in the Altun Mountain in recent four decades[J]. *Arid Land Geography*, 40(3): 581–588 (in Chinese with English abstract).
- Li Fengping, Zhang Guangxin, Dong Liqin. 2013. Studies for Impact of climate change on hydrology and water Resources[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 33(4): 457–464 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiguo. 2012. Glaciers and lakes changes on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change in the past 50 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 27(8): 1431–1443 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changming, Liu Xiaomang, Zheng Hongxing. 2008. Discussion on the impact of climate change on hydrology and water resources [J]. *Impact of Science on Society*, (2): 21–27 (in Chinese).
- Liu Xiaodong, Chen Zhigang, Zhang Ran. 2009. The A1B scenario projection for climate change over the Tibetan Plateau in the next 30–50 year (in Chinese) [J]. *Plateau Meteorol*, 28(3): 475–484 (in Chinese with English abstract).
- Ma Junfei, Lu Changhe, Wang Qian. 2008. Landcover classification of the Qaidam Basin based on MODIS NDVI time series data[J]. *Arid Land Geography*, 31(3): 442–448 (in Chinese with English abstract).
- Pan Baotian, Li Jijun, Cheng Fahu. 1995. Qinghai-Tibetan Plateau: a Driver and Amplifier of Global Climate Changes[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 31(3): 120–128(in Chinese with English abstract).
- Piao Shilong, Philippe Ciais, Huang Yao, Shen Zehao, Peng Shushi, Li Junsheng, Zhou Liping, Liu Hongyan, Ma Yuecun, Ding Yihui, Pierre Friedlingstein, Liu Chunzhen, Tan Kun, Yu Yongqiang, Zhang Tianyi, Fang Jingyun. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 467: 43–51.
- Pu Jianchen, Yao Tandong, Wang Ninglian, Su Zhen, Shen Yongping. 2004. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai-Tibetan Plateau during the past century[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(5): 517–522 (in Chinese with English abstract).
- Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Zhan Chesheng, Liu Chunzhen. 2013. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 44(7): 779–790 (in Chinese with English abstract).
- Sun Ying, Wang Chenke, Xu Hongmei, Yu Li, Luo Yong. 2007. Face the climate challenge——interpreting the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. *Disaster Reduction in China*, (7): 8–9 (in Chinese).

- Tao Tao, Xin Kunlun, Liu Suiqing. 2007. Summarization of climate changing effect on water resources management[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 18(6): 7-12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoqing, Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Li Yan, He Ruimin. 2008. Review on studies for climate change impacting on hydrology and water resources//Research Center for Climate Change [J]. China Water Resources, (2): 47-51 (in Chinese).
- Wang Yang, Wei Jiahua, Xie Hongwei. The variation of terrestrial water storage in the Qaidam Basin base on GRACE data[J]. South- to- North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 75-82 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu. The historical review and reflection on the development of Qaidam in the past 100 years[J]. Qinghai Social Science, 2005(1) : 40-46(in Chinese).
- Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, Yang Qing. 2005. Climate change in Tibetan Plateau during last three decades[J]. Acta Geographical Sinica, 60(1): 3-11(in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Thomas Tanner, Ren Guoyu, Cheng Xiaotao, Wang Jinxia, Wang Zhongjing, Yan Maochao, Liu Xiaojie, Ian Holman. 2008. Potential impacts of climate change on water resources in China: Screening for adaptation and management [J]. Advances in Climate Change Research, 4(4): 215- 219 (in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Liu Chunzhen, Ren Guoyu. 2011. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China [J]. Advances in Earth Science, 26 (1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Qiu Bing, Pan Xingyao, Weng Jianwu, Fu Guobin Ouyang Rulin. 2012. Assessment of water resources vulnerability under climate change and human activities [J]. Advances in Earth Science, 27(4) : 443-451 (in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Chen Junxu, Weng Jianwu, She Dunxian, Qiu Bing, Wan Long, Hong Si. 2012. Advances and future prospects of research in water resources vulnerability under climate change [J]. Advances in Climate Change Research, 8 (6): 391- 396 (in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Luo Xinping, Cao Jianting, Chen Junxu, Ning Like, Hong Si. 2015. Impact and assessment of climate change on the water resources vulnerability in the Eastern China Monsoon Region [J]. Advances in Climate Change Research, 11(1): 8- 14 (in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Shi Wei, Luo Xinping, Hong Si, Ning Like, Christopher J Gippel. 2015. Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change [J]. Advances in Water Science, 26 (2): 279-286 (in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Shi Wei. 2016. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 47 (3): 292-301 (in Chinese with English abstract).
- Xu Rongsheng, Sun Yusheng, Mu Dianchun, Guo Hua, Ma Weisheng, Li Zhao. 1998. Reflection on the development of Qaidam Basin[J]. Journal of Qinghai Nationalities (Social Edition), (1) :75- 81(in Chinese).
- Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Li Long, Sun Meiping, Luo Jing, Feng Yaya. 2013. Spatial-temporal variations of lake area in Hoh Xil region in the past 40 years [J]. Acta Geographica Sinica, 68(7): 886-896(in Chinese with English abstract).
- Yu Fan, Cao Ying. 2008. Research progress summarization for the impacts of global climate change to the regional water resources [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 19(4): 92-97(in Chinese with English abstract).
- Zhang Renhe, Su Fengge, Jiang Zhihong, Gao Xuejie, Guo Donglin, Ni Jian, You Qinglong, Lan Cuo, Zhou Botao. 2015. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century [J]. Chin. Sci. Bull., 60(32): 3036-3047 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuqin, Wang Yahua. 2015. A review of adaptive management research on China's water resources management under climate change[J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 24(12): 2061-2068(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Sun Lu, Yin Xiulan, Meng Hui. 2017. Progress and prospect of research on environmental geology of China: A review[J]. Geology in China, 44(5): 901- 912(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yurui, Ma Jinzhu, Qi Shi. 2012. Human Activities, Climate Change and Water Resources in the Shiyang Basin[J]. Resources Science, 34(10): 1922-1928(in Chinese with English abstract).
- Zheng Ran, Li Dongliang, Jiang Yuanchun. 2015. New characteristics of temperature change over Qinghai- Xizang Plateau on the background of global warming[J]. Plateau Meteorology, 34(6): 1531-1539(in Chinese with English abstract).
- Zhu Wenbin, Lv Aifeng, Jia Shaofeng. 2010. Study on Spatial distribution of vegetation coverage and its affecting factors in the Qaidam Basin based on NDVI[J]. Arid Zone Research, 27(5): 691-698(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈志人, 张维祥. 1987. 柴达木盆地生态系统的特征及其控制机理[J]. 旱区资源与环境, (2): 115-122.
- 戴升, 申红艳, 李林, 王振宇, 肖建设. 2013. 柴达木盆地气候由暖干向暖湿转型的变化特征分析[J]. 高原气象, 32(1) : 211-220.
- 董斯扬, 薛娴, 尤全刚, 彭飞. 2014. 近40年青藏高原湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 26(4): 535-544.
- 杜譔, 裴一林, 张睿文. 2018. 2017年全球主要环境智库研究动态综述[J]. 环境与可持续发展, (6): 196-202.
- 杜玉娥, 刘宝康, 贺卫国, 段水强, 侯扶江, 王宗礼. 2018. 1976-2017年青藏高原可可西里盐湖面积动态变化及成因分析[J]. 冰川冻土, 40(1) : 47-54.

- 段安民,肖志祥,吴国雄. 2016. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 12(5): 374-381.
- 胡凡盛,杨太保,冀琴,王聪强,许艾文. 2017. 近40a阿尔金山冰川与气候变化关系研究[J]. 干旱地区地理, 40(3): 581-588.
- 李峰平,章光新,董李勤. 2013. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 44(4): 457-464.
- 李治国. 2012. 近50a气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化[J]. 自然资源学报, 27(8): 1431-1443.
- 刘昌明,刘小莽,郑红星. 2008. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学对社会的影响, (2): 21-27.
- 刘晓东,程志刚,张冉. 2009. 青藏高原未来30~50年A1B情景下气候变化预估[J]. 高原气象, 28(3): 475-484.
- 马俊飞,吕昌河,王茜. 2008. 基于MODISNDVI时序数列的柴达木盆地土地覆盖分类研[J]. 干旱地区地理, 31(3): 442-448.
- 潘保田,李吉均,陈发虎. 1995. 青藏高原:全球气候变化的驱动机与放大器[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 31(3): 120-128.
- 蒲健辰,姚檀栋,王宁练,苏珍,沈永平. 2004. 近百年来青藏高原冰川的进退变化[J]. 冰川冻土, 26(5): 517-522.
- 宋晓猛,张建云,占车生,刘春蓁. 2013. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 44(7): 779-790.
- 孙颖,王长科,许红梅,於琰,罗勇. 2007. 直面气候挑战——解读政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告[J]. 中国减灾, (7): 8-9.
- 陶涛,信昆仑,刘遂庆. 2007. 全球气候变化对水资源管理影响的研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 18(6): 7-12.
- 王国庆,张建云,刘九夫,李岩,贺瑞敏. 2008. 气候变化对水文水资源影响研究综述[J]. 中国水利, (2): 47-51.
- 王洋,魏佳华,解宏伟. 2018. 基于GRACE的柴达木盆地水储量变化[J]. 南水北调与水利科技, 16(1): 75-83.
- 王昱. 2005. 对近百年开发柴达木的历史回顾与反思[J]. 青海社会科学, (1): 40-46.
- 吴绍洪,尹云鹤,郑度,杨勤业. 2005. 青藏高原近30年气候变化趋势[J]. 地理学报, 60(1): 3-11.
- 夏军,Thomas Tanner,任国玉,程晓陶,王金霞,王忠静,严茂超,刘晓洁, Ian Holman. 2008. 气候变化对中国水资源影响的适应性评估与管理框架[J]. 气候变化研究进展, 4(4): 215-219.
- 夏军,刘春蓁,任国玉. 2011. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 26(1): 1-12.
- 夏军,邱冰,潘兴瑶,翁建武,傅国斌,欧阳如林. 2012. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. 地球科学进展, 27(4): 443-451.
- 夏军,陈俊旭,翁建武,余敦先,邱冰,万龙,洪思. 2012. 气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望[J]. 气候变化研究进展, 8(6): 391-396.
- 夏军,雒新萍,曹建廷,陈俊旭,宁理科,洪思. 2015. 气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. 气候变化研究进展, 11(1): 8-14.
- 夏军,石卫,雒新萍,洪思,宁理科, Christopher J Gippel. 2015. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水利科学进展, 26(2): 279-286.
- 夏军,石卫. 2016. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报, 47(3): 292-301.
- 许荣生,孙欲声,穆殿春,郭华,马维胜,李朝. 1998. 开发柴达木盆地的反思[J]. 青海民族学院学报(社会科学版), 1: 75-81.
- 姚晓军,刘时银,李龙,孙美平,罗晶,冯娅娅. 2013. 近40年可可西里地区湖泊时空变化特征[J]. 地理学报, 68(7): 886-896.
- 於凡,曹颖. 2008. 全球气候变化对区域水资源影响研究进展综述[J]. 水资源与水工程学报, 19(4): 92-97.
- 张人禾,苏凤阁,江志红,高学杰,郭东林,倪健,游庆龙,兰措,周波涛. 2015. 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展[J]. 科学通报, 60: 3036-3047.
- 张秀琴,王亚华. 2015. 中国水资源管理适应气候变化的研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 24(12): 2061-2068.
- 张永双,孙璐,殷秀兰,孟晖. 2017. 中国环境地质研究主要进展与展望[J]. 中国地质, 44(5): 901-912.
- 张彧瑞,马金珠,齐识. 2012. 人类活动和气候变化对石羊河流域水资源的影响——基于主客观综合赋权分析法[J]. 资源科学, 34(10): 1922-1928.
- 郑然,李栋梁,蒋元春. 2015. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象, 34(6): 1531-1539.
- 中国地质编辑部. 2017. 聚焦资源环境问题,启动国际岩溶大科学计划[J]. 中国地质, 44(1): 203-204.
- 朱文彬,吕爱锋,贾绍凤. 2010. 基于NDVI的柴达木盆地植被空间分异规律及影响因素[J]. 干旱区研究, 27(5): 691-698.