康世昌，郭万钦，吴通华，等.“一带一路”区域冰冻圈变化及其对水资源的影响[J].地球科学进展，2020，35(1)：1-17.DOI：10.11867/j.issn.1001-8166.2020.002.[Kang Shichang，Guo Wanqin，Wu Tonghua，et al. Cryospheric changes and their impacts on water resources in the Belt and Road regions[J]. Advances in Earth Science，2020，35(1)：1-17. DOI：10.11867/j.issn.1001-8166.2020.002.]

“一带一路”区域冰冻圈变化及其对水资源的影响*

康世昌[1,2,3]，郭万钦[1]，吴通华[1]，钟歆玥[4*]，陈仁升[5]，
许 民[1]，陈金雷[1]，杨瑞敏[6]

（1.中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室，甘肃 兰州 730000；2.中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心，北京 100101；3.中国科学院大学，北京 100049；4.中国科学院西北生态环境资源研究院甘肃省遥感重点实验室，甘肃 兰州 730000；5.中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室黑河上游生态—水文试验研究站，甘肃 兰州 730000；
6.兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：“一带一路”区域横跨亚洲、欧洲和非洲东部、北部，空间范围大。在全球气候变暖背景下，“一带一路”区域的冰冻圈正在发生快速变化，将对区域水资源、生态系统、北极航道等带来深刻影响。综述了近几十年来“一带一路”沿线和周边区域（包括亚洲、欧洲、北极和非洲等）冰冻圈要素（包括冰川、多年冻土、积雪、海冰、河冰和湖冰）的变化及其对水资源的影响，主要认知为：①绝大部分冰川面积萎缩、冰川物质平衡处于亏损状态，但存在区域差异；②多年冻土温度升高，冻土分布下限上升，活动层厚度增大，多年冻土整体处于退化状态；③积雪范围明显缩减、积雪深度总体呈增加趋势，积雪期缩短，即积雪首日延后、消融期提前，但变化存在显著区域差异；④北极夏季海冰范围快速减少、厚度减薄，多年冰减少，反映了海冰的快速萎缩，河/湖冰初冰日延后、消融日提前、冰封期缩短；⑤中国冰川融水径流显著增加，积雪融水和多年冻土退化也在不同程度上增加了流域径流，反映出冰冻圈变化对径流的重要影响。“一带一路”区域冰冻圈萎缩的现状及其对水资源的影响分析，将为应对气候变化和区域可持续发展提供重要科学支撑。

关 键 词：一带一路；冰冻圈变化；水资源

中图分类号：P343.6 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-8166(2020)01-0001-17

1 引 言

冰冻圈是指为地球表层连续分布且具一定厚度的负温圈层，亦称冰雪圈、冰圈或冷圈[1]。冰冻圈的组成要素包括冰川（含冰盖）、冻土（包括多年冻土和季节冻土）、积雪、海冰、河冰和湖冰等。冰冻圈作为气候系统的圈层之一，通过对地表能量平衡、水文循环、生态系统、地气交换及海平面变化等的重要作用，对全球气候系统变化带来强烈的反馈效应。目前，冰冻圈覆盖面积占全球陆地面积的

收稿日期：2019-11-12；**修回日期：**2019-12-15.

* **基金项目：**国家自然科学基金创新研究群体项目“冰冻圈与全球变化”（编号：41721091）；中国科学院前沿科学重点研究项目“北极冰冻圈变化与可持续发展”（编号：QYZDY-SSW-DQC021）资助.

作者简介：康世昌（1969-），男，甘肃陇西人，研究员，主要从事冰冻圈与气候变化研究. **E-mail：**shichang.kang@lzb.ac.cn

* **通信作者：**钟歆玥（1983-），女，辽宁沈阳人，助理研究员，主要从事冰冻圈与气候变化研究. **E-mail：**xyzhong@lzb.ac.cn

52%~55%，占海洋面积的5.3%~7.3%。其中，山地冰川、南极冰盖和格陵兰冰盖覆盖了全球陆表面积的10%，冻土占42%~45%，积雪占1.3%~30.6%，南极海冰范围最大时占全球海洋表面积的5.2%，北极海冰范围最大时占全球海洋表面积的3.9%[1,2]。

2013年中国政府提出建设“新丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”合作倡议。“一带一路”区域横跨亚洲、欧洲和非洲大陆，沿线和周边区域是全球冰冻圈集中分布的主要地区之一。在全球气候变暖背景下，冰川退缩、多年冻土退化、海冰范围萎缩等冰冻圈的快速变化将引发水资源减少、海平面上升、极端天气事件增多、灾害频发等生态和环境问题，深刻影响“一带一路”区域经济社会可持续发展，已受到各国的广泛关注。因此，综合分析“一带一路”区域冰冻圈要素变化事实及其对水资源的影响，具有重要科学和现实意义，为进一步提升冰冻圈变化对经济社会发展影响的认知及制定适应性管理措施提供重要支撑。

2 “一带一路”区域冰冻圈变化

2.1 冰川变化

“一带一路”沿线区域是全球冰川集中分布的地区之一。区域内冰川在过去几十年间发生了以面积整体萎缩、冰量持续损失等为特点的变化。但部分地区的冰川仍处于较稳定状态，其中少部分地区还出现了正的冰川物质平衡和冰川前进/跃动现象。

2.1.1 冰川分布

根据最新全球冰川编目（Randolph Glacier Inventory，RGI 6.0[3]），“一带一路”所在的欧亚大陆和非洲地区总计分布有冰川11.4×10^{4}条，总面积20.5×10^4 km^2（图1），分别占全球山地冰川总条数（21.55×10^{4}条）和总面积（70.57×10^4 km^2）的53.07%和29.06%。其中，青藏高原及其周边地区（图1中RGI分区13、14、15及10-4，下同）是“一带一路”的核心冰川分布区，冰川总条数和总面积分别占到“一带一路”冰川总数的85.64%和48.16%。挪威（8）及其所属斯瓦尔巴德群岛（7-1），以及俄罗斯法兰士约瑟夫地群岛（9-1）、新地岛（9-2）、北地群岛（9-3）等地区是该区域另一个主要冰川分布区，且冰川平均面积较大（条数仅占该区域总条数的5.61%），冰川总面积占该区域冰川总面积的43.24%。俄罗斯中东部地区（10-1、10-2、10-4和10-5）、欧洲阿尔卑斯山（11）和西亚地区（12）分布的冰川总面积分别占该区域冰川总面积的1.07%（总条数的4.07%）、1.02%（总条数的3.43%）和0.64%（总条数的1.65%）。而位于热带的非洲维多利亚湖周围地区（16-3）和赤道新几内亚地区（16-4）仅分别有36条和5条冰川，总面积仅为6.54 km^2。

2.1.2 冰川面积变化

全球变暖背景下，“一带一路”的冰川退缩显著。对已发表的资料分析表明（将不同时期的资料通过冰川变化率的外推归并为1975—2005年的冰川变化，图2），欧洲阿尔卑斯山地区（11-1）的冰川面积在1975—2005年总体萎缩了近40%[4~6]，西亚高加索地区的冰川面积也萎缩了约23%[7]，而远东地区勘察加半岛的冰川面积萎缩率达到44%[8]。相同方法获得的挪威1975—2005年冰川面积变化相对较小，仅为–9%[9]。而斯瓦尔巴德群岛[10]和俄罗斯北部乌拉尔山[11]等地区相同时期的冰川面积萎缩达到15%以上。

青藏高原及其周边地区的冰川也经历了不同程度的萎缩。采用上述方法获得的青藏高原西部纳伦河流域等地区[12,13]和东部祁连山地区[14]的冰川面积在1975—2005年都萎缩了约23%，相同时期内高原南部喜马拉雅山西段[15]和东段[16]以及天山西段[17~19]的冰川面积萎缩率也在15%以上。但高原内陆地区[20,21]、天山东段[22]与北部[23]以及阿尔泰山地区[24]的冰川面积萎缩率普遍在10%以下。处于热带地区的冰川，其面积萎缩幅度更加剧烈，如20世纪非洲冰川面积萎缩幅度超过80%[25]，印度尼西亚查亚峰的冰川在1850—2000年萎缩幅度也达到了88%[26]。

虽然“一带一路”沿线地区的绝大多数冰川处于持续退缩状态，但也有部分地区的冰川发生了前进现象。如新西兰有58条冰川在1983—2008年出现过前进现象[27]，而青藏高原帕米尔[28,29]、喀喇昆仑[30]和西昆仑地区[31]的数百条冰川也曾在过去几十年间出现前进。部分冰川前进现象是由冰川固有的周期性跃动引起[32]，但也有部分前进现象是在全球气候变暖背景下由于区域气候的反常变化所致[27,33,34]。

2.1.3 冰川物质平衡变化

“一带一路”地区冰川物质平衡变化也显示出与面积变化类似的空间分布特征。其中，冰川面积萎缩最大的阿尔卑斯山地区（表1），其冰川物质损失也非常严重，年均物质损失达到（0.69±0.12）[35]~（0.77±0.14）m w.e.（水当量）[36]。喜马拉雅山西段查谟克什米尔地区的冰川物质损失也较快，年均损失率达到（–0.66±0.09）m w.e.[37]。相对而言，中天

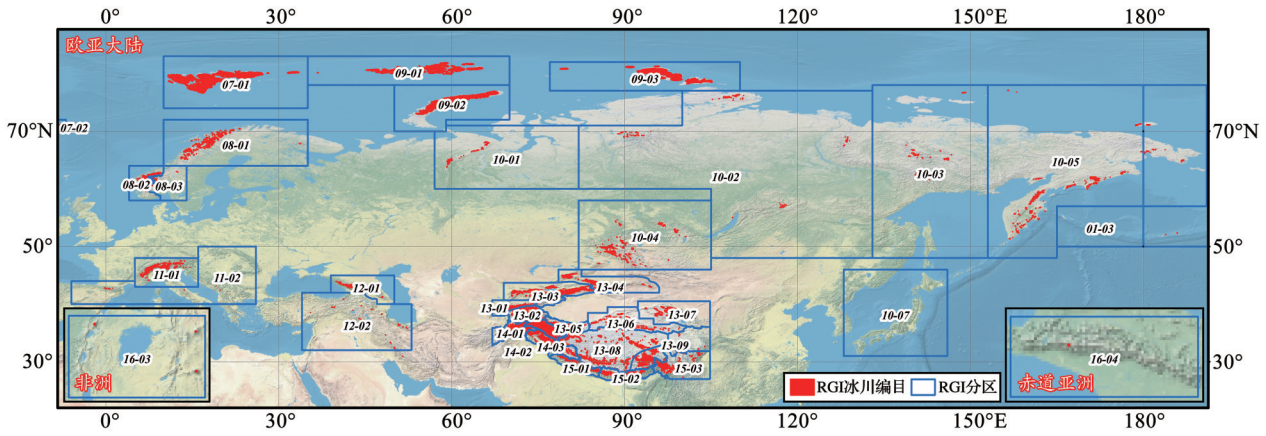


图 1　“一带一路”涵盖区冰川分布图(图中数字为 RGI 分区编号)

Fig.1　Glacier distribution in the Belt and Road areas (the numbers in the figure are RGI partition numbers)

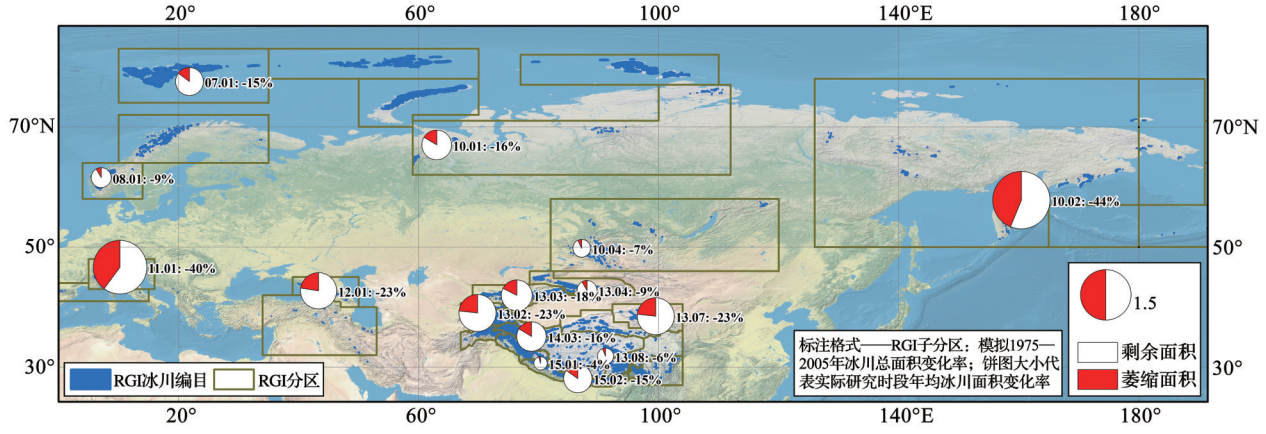


图 2　欧亚大陆冰川变化空间分布特征(1975—2005 年)

Fig.2　Spatial distribution of variations in glacier in Eurasia from 1975 to 2005

表 1　欧亚大陆冰川年均物质平衡特征

Table 1　Annual mean glacier mass balances in Eurasia

RGI 分区	地名	时段	年均冰川物质平衡/(m w.e./a)	RGI 分区	地名	时段	年均冰川物质平衡/(m w.e./a)
7-1	北斯瓦尔巴德 Vestfonna 冰帽	1980—2010 年	+0.09±0.15	13-2	西帕米尔高原	2000—2011 年	+0.14±0.13
	中斯瓦尔巴德迪克森地	1990—2009 年	−0.78±0.21	13-3	伊利切克冰川	1975—2007 年	−0.39±0.10
	东斯瓦尔巴德埃季岛	1970—2002 年	−0.50±0.02	13-4	乌鲁木齐河源 1 号冰川	1962—2009 年	−0.44±0.09
	斯瓦尔巴德群岛整体	1965—2007 年	−0.36±0.02	13-7	祁连山团结峰	1966—1999 年	−0.21±0.04
		2003—2008 年	−0.12±0.40	13-8	念青唐古拉山西段	2000—2014 年	−0.27±0.13
8-1	斯瓦提森冰帽西部	1985—2002 年	−0.12±0.09	14-1	兴都库什山	2003—2008 年	−0.21±0.07
9-1	法兰士约瑟夫地群岛	2003—2009 年	−0.07±0.06	14-2	喀喇昆仑山	1999—2008 年	+0.11±0.22
9-2	新地岛	2003—2009 年	−0.34±0.05			2003—2008 年	−0.07±0.04
9-3	北地群岛	2003—2009 年	−0.06±0.05	14-3	印度河源北部	1999—2011 年	−0.44±0.09
10-1	IGAN 和奥布鲁切夫冰川	1963—2008 年	−0.30±0.06		查谟克什米尔	2003—2008 年	−0.66±0.09
10-4	中国阿尔泰山	1959—2008 年	−0.43±0.03	15-1	喜马拉雅山中段	2003—2008 年	−0.38±0.06
11-1	意大利阿尔卑斯东部	1987—2009 年	−0.69±0.12	15-2	喜马拉雅山东段	2003—2008 年	−0.38±0.09
	瑞士阿尔卑斯	1985—1999 年	−0.77±0.14	15-3	岗日嘎布地区	1980—2014 年	−0.46±0.08

山[38,39]、阿尔泰山[40]和喜马拉雅山中段[37]及东段的年均冰川物质损失率较小,为 0.38~0.46 m w.e./a[41]。挪威北部[42]、俄罗斯乌拉尔山[11]、青藏高原中部[43]和东北部[44]地区以及兴都库什地区[37]的冰川物质

损失率更低(≤0.3 m w.e./a)。而被称为“帕米尔—喀喇昆仑异常”的部分地区甚至出现了正的物质平衡[29,33,45](表1)。

相较于其他地区,北极地区的冰川物质平衡状况较为复杂。部分区域,如斯瓦尔巴德群岛北部的Vestfonna冰帽在1980—2010年出现了正平衡[46],而相邻的中部迪克森岛和东部埃季岛地区在过去几十年间冰川物质损失率都超过了0.5 m w.e./a[10,47]。俄罗斯北极地区的冰川物质平衡状况类似。其中,新地岛在2003—2009年的冰川物质损失率达到了(0.34±0.05) m w.e./a,但相邻的北地群岛和法兰士约瑟夫地群岛的冰川物质损失率却都在0.1 m w.e./a以下[48]。这些情况说明冰川物质平衡状况具有极大的空间差异性。

2.2 多年冻土变化

“一带一路”沿线的多年冻土主要分布在青藏高原及周边区域、西伯利亚、欧洲阿尔卑斯山脉等地区。对有观测以来的多年冻土温度、分布和活动层变化进行评估显示,多年冻土温度升高,冻土分布下限上升,活动层厚度增大,反映出近几十年来“一带一路”区域多年冻土整体呈退化的状态。

2.2.1 多年冻土分布

多年冻土变化严重影响“一带一路”区域水循环、地表能量和水分平衡、地气碳交换、生态系统及工程建设[49,50]。在北半球和南半球60°S以北的陆地表面,多年冻土区的面积为13×10^6~18×10^6 km^2,如果包含南极洲和海底多年冻土,全球多年冻土区域预估面积为$(22\pm3)\times10^6$ km^2[51](表2)。陆地多年冻土主要分布在极地、亚极地高山,由北向南呈连续—不连续—岛状分布,具有纬度地带性分布规律。

2.2.2 多年冻土变化

IPCC第五次评估报告指出,自1950年起全球气温出现剧烈变暖趋势[52],“一带一路”地区多年冻土地温也呈现出相同变化(表3)。从1900s至21世纪初,青藏高原多年冻土区年平均气温每年上升0.016~0.036 ℃[53,54],地温增温率为0.11~0.98 ℃/10a[55],6 m处地温增温0.1~0.3 ℃[56],多年冻土上限地温为0.1~1.6 ℃,变化率达0.013 ℃/a[57]。近期研究发现多年冻土升温加剧[58],高原西南部地区变化比其他区域更显著。1900s中期至21世纪初,西伯利亚气温和多年冻土温度整体呈上升趋势。东西伯利亚气温以0.065~0.59 ℃/10a的速率升高,同一时期年平均地温也显著上升[59]。1980—1990年西伯利亚西北部10 m深多年冻土温度变化速率约为0.03 ℃/a,预测到2050年土壤温度可能达到1.5~2.0 ℃,到21世纪中期浅层(2~5 m)土温可达2.5~3.0 ℃;过去10~20年多年冻土上限处温度与气温呈一致性变暖,连续多年冻土区升温最大,融区升温最小,形成高温多年冻土区[60,61]。过去几十年,阿尔卑斯山多年冻土呈升温趋势,冻土顶板升温速率在0.04~0.07 ℃/a[62]。意大利8 m以下的多年冻土温度升高速率为0.01~0.1 ℃/a[63]。意大利、挪威南部和北部、冰岛和瑞士的冻土温度正在升高,多年冻土在过去几十年处于退化状态[64~67]。

表2 全球多年冻土主要分布区域和面积[51]

Table 2 Distribution and areas of permafrost over the world[51]

序号	国家/地区	多年冻土区域面积/($\times10^3$ km^2)	多年冻土面积/($\times10^3$ km^2)
1	俄罗斯	10 968(9 619~12 006)	6 966~9 541
2	加拿大	6 031(5 238~6 695)	3 637~4 978
3	中国	2 056(1 457~2 463)	673~1 676
4	美国	1 132(902~1 242)	530~877
5	蒙古	530(357~758)	165~394
6	格陵兰	297(282~303)	226~276
7	挪威	84(35~127)	25~65
8	吉尔吉斯斯坦	72(47~88)	19.6~54
9	瑞典	59(11.3~123)	4.7~43
10	印度	58(21~88)	7.8~65
11	塔吉克斯坦	54(30~62)	11.6~48
12	巴基斯坦	40(12.2~60)	4.4~43
13	哈萨克斯坦	39(27~49)	12.2~27
14	芬兰	34(0.9~97)	2.6~23
15	阿根廷	30(9.1~76)	3.5~33
16	阿富汗	27(12.4~40.8)	4.4~26
17	尼泊尔	15.7(10.5~19.5)	4.5~12.4
18	智利	14.0(3.5~37)	1.4~15.2
19	意大利	5.1(2.6~8.4)	0.8~3.2
20	朝鲜	4.7(0.7~12.5)	0.3~4.1
21	格鲁吉亚	4.7(2.4~7.6)	0.8~3.2
22	瑞士	4.5(2.3~6.6)	0.7~2.5
23	澳大利亚	3.6(1.7~6.3)	0.5~2.3
24	不丹	3.1(0.8~6.4)	0.3~3.2
25	乌兹别克斯坦	2.8(1.8~3.7)	0.6~1.8

活动层厚度变化是多年冻土退化的一个重要标志,“一带一路”地区活动层厚度呈迅速增加趋势,但不同区域空间差异较大。1980s以来青藏高原地区活动层厚度增加了0.15~0.67 m,变化率约为1.33 cm/a。其中,低温冻土区增长速率为5 cm/a,高温冻土区则高达11.2 cm/a,如桃儿九和安多增长速率高达16.6和12.4 cm/a[56,57,68]。西伯利亚活动层厚

度整体呈增加趋势,东西伯利亚以 0.3~1.0 cm/a 的速率增加[69],1956—1996 年俄罗斯多年冻土区活动层厚度增加约 20 cm[70]。位于阿尔卑斯山地区挪威南部的多年冻土活动层厚度在 1990 年以后显著增加,增长率为 2~87 cm/a[71],瑞士等其他地区活动层厚度也出现了不同程度的增加[71,72]。活动层的变化与冻土类型、海拔、地表类型和土壤成分密切相关,表现为高温冻土和低温冻土、高海拔地区和低海拔地区、高山草甸和高山草原以及细粒度土壤区域和粗粒度土壤区域之间的变化差异,且前一种类型的变化更加明显。青藏高原地区海拔每升高 100 m,活动层厚度平均增加 6.7 cm[57],西伯利亚无植被覆盖地区的活动层厚度呈增加趋势,增厚 100~150 cm[73],在阿尔卑斯山中南部多年冻土下界要低于其他地区,大约在海拔 2 000 m 以上就有多年冻土存在[74]。

表 3　多年冻土变化

Table 3　Variations of permafrost over the world

区域	地温变化	时段	活动层厚度变化	时段
青藏高原地区	0.017 ℃/a	1961—2000 年	1.33 m/a	1990—2010 年
昆仑山	0.0335 ℃/a	1996—2001 年	0.295 m/a	1996—2001 年
五道梁	0.007 ℃/a	1996—2001 年	0.22 m/a	1996—2001 年
北麓河	0.02 ℃/a	2005—2014 年	0.42 m/a	2005—2014 年
风火山	0.037 ℃/a	1996—2001 年	0.34 m/a	1996—2001 年
沱沱河	0.079 ℃/a	1980—2007 年		
唐古拉	0.017 ℃/a	1980—2007 年	3.53 cm/a	1980—2007 年
安多	0.062 ℃/a	1980—2007 年		
Corvatsch-Furtschellas	升高 1.0 ℃	1988—1994 年		
Schilthorn			0.63~1.13 m/a	1999—2006 年
挪威南部			0.03~0.33 m/10a	1860—2012 年
Janssonhaugen			0.18 m/a	2005—2006 年
Svalbard			0.26 m/a	2005—2006 年
意大利地区	0.01~0.10 ℃/a	2007—2013 年		
俄罗斯	0.5~2.0 ℃/a	1970—2009 年	0.57 cm/a	1956—1990 年
俄罗斯北极	升高 3 ℃	1955—2000 年		
东西伯利亚	0.065~0.59 ℃/a	1956—1990 年	0.3~1.0 cm/a	1950—2008 年
西西伯利亚北部	0.01~0.07 ℃/a	1996—1999 年		

全球气候变化对多年冻土热条件有明显影响。在“一带一路”地区,多年冻土的退化表现为地温升高、活动层变厚甚至局部地区多年冻土消失,这必将影响工程基础设施、地表和地下水文以及生态系统,甚至还将通过多年冻土释放碳来反馈气候变化。在高山地区,接近地表的多年冻土层可能会受到环境变化的影响,导致滑坡、热融滑塌等灾害的发生[51]。因此,有待进一步完善和健全“一带一路”沿线区域冻土监测和灾害研究,为经济社会可持续发展提供重要依据和参考。

2.3　积雪变化

“一带一路”区域积雪主要分布在欧亚大陆和北极地区。对欧亚大陆和北极积雪范围、深度和时间变化的评估结果表明,近几十年来,这些区域积雪范围明显缩减,雪深呈增加趋势,积雪期缩短,即首日延后、消融期提前,但积雪变化存在显著区域差异。

2.3.1　欧亚大陆和北极积雪分布

积雪是冰冻圈的重要组成部分,通过范围、动态和属性变化对大气环流和气候变化做出迅速反应,同时对地表能量平衡、水文过程、大气及海洋循环等具有显著影响和反馈作用,被认为是气候变化的重要指示器[75,76]。全球约有 98% 的季节性积雪位于北半球[77]。每年冬季,北半球陆地最大积雪范围约 47×10^6 km^2,占北半球陆地面积近 50%[78,79],占全球陆地面积的 8%[80]。“一带一路”区域贯穿亚欧非大陆,其中欧亚大陆是北半球积雪分布的主要地区,冬季积雪占北半球积雪总量的 60%~65%[81],而在北极地区每年的积雪期为 8~10 个月。俄罗斯境内大部分地区年平均最大积雪深度超过 40 cm,中国东北、北疆和青藏高原是我国三大积雪分布区,年平均最大积雪深度在 10 cm 以上,部分区域最大雪深可达 20~40 cm[82]。积雪变化对人类活动、生物多样性以

及生态系统过程都会造成直接影响，已成为制约欧亚大陆和北极地区经济社会发展的重要因素。

2.3.2 欧亚大陆和北极积雪变化

随着全球变暖，极端气候事件频发，欧亚大陆和北极地区积雪也在发生显著改变。从1920s中期至21世纪初，欧亚大陆和北极积雪范围呈减少趋势，尤其在1980s积雪范围减少的趋势最为显著[52,83,84]。从积雪范围的季节变化来看，1970s以来欧亚大陆春季积雪范围明显缩减，并成为3月北半球积雪范围减少的主导因素[83]。近50年来，北极地区5~6月积雪范围减少了约18%[85]。

作为积雪基本属性之一，积雪深度对气候系统具有显著作用，影响地表能量平衡、春季融雪径流、水资源补给以及人类经济社会活动。近几十年来欧亚大陆和北极多年平均（最大）积雪深度总体呈增加趋势[82]（图3），但具有显著区域差异。其中，欧亚大陆北部、俄罗斯平原东部和俄罗斯北极地区雪深明显增加，近50年增率为4~8 cm/10a，俄罗斯平原西部、中西伯利亚高原南部、俄罗斯远东地区雪深则显著减少[82,86~88]。对中国雪深变化研究发现，1957—2009年冬季雪深显著增加趋势位于中国西北，春季雪深总体呈减少趋势[89]。

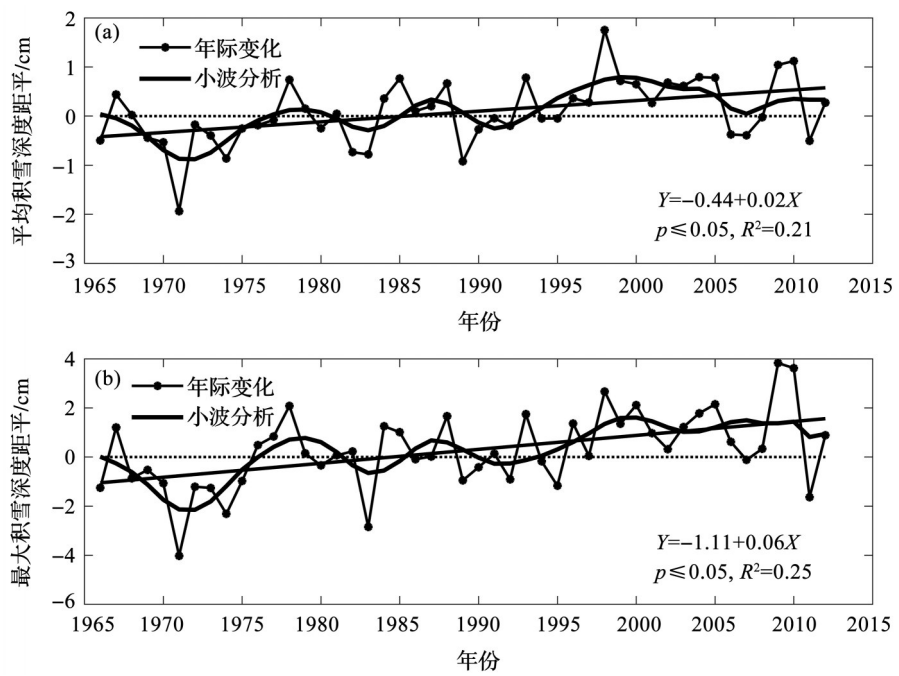


图3 欧亚大陆和北极年平均雪深（a）和最大雪深（b）年际变化[82]

Fig.3 Interannual variations of mean snow depth (a) and maximum snow depth (b) in Eurasia and Arctic[82]

积雪期是影响积雪范围变化的重要参数，通过积雪期的变化对地表能量平衡和地表反照率产生直接影响。由于积雪对气候变化高度敏感，积雪期也在发生显著变化。总体而言，北半球积雪天数总体呈缩减趋势，且在高海拔和高纬度地区缩减趋势更明显[90,91]。其中，泛北极地区陆表季节性积雪天数减少率为2~4 d/10a，并以春季积雪终日大幅提前为主（3.4 d/10a）[92]。中国积雪天数在冬季、春季和秋季略有增加，夏季明显缩短[93]。自1951年以来，欧亚大陆北部积雪天数缩减最显著的区域主要位于俄罗斯欧洲部分西部和南部[86,94]，但中西伯利亚高原和西西伯利亚平原积雪天数略有增加[86,87]。1980—2006年欧亚大陆积雪终日呈提前趋势，变化率为（2.6±5.6）d/10a[95]。

2.3.3 青藏高原积雪分布及变化

青藏高原积雪多呈斑状分布且多为瞬时累积，空间异质性强。1997—2012年青藏高原平均积雪覆盖率为16%，其中1月积雪范围最大，8月最小；积雪范围呈缩减趋势（−4%/10a）[96]。基于地面台站观测和被动微波遥感数据结果均显示，青藏高原自1960s以来，积雪深度年际变化总体呈现增加趋势[97,98]。季节上，雪深在冬季显著增加[99]，夏季明显减少[89]。空间变化上，青藏高原雪深呈现区域差异性。其中，东北部、北部和西部雪深呈增加趋势[89,97]，中部、东部和南部呈显著减少趋势[82,89]，且春季和秋季的减少趋势更明显[89]。青藏高原积雪在东部累积时间较长，东南部低海拔地区积雪期较短[100]。1961—2010年青藏高原积雪天数缩减率为

(3.5±1.2) d/10a,积雪首日延迟率为(1.6±0.8) d/10a,终日提前率为(1.9±0.8) d/10a[98]。积雪天数显著减少趋势主要分布于青藏高原西南部,增加趋势零星分布在高原北部和东南部局部地区[92]。研究表明,青藏高原积雪期的变化与气温密切相关,平均气温升高 1 ℃会导致融雪首日提前 4.5 d[101]。

积雪变化受多方因素影响。首先,气温和降水是积雪变化的主要驱动力,气候变暖导致气温升高,水汽输送模式发生改变,降水重新分配,从而导致欧亚大陆和北极地区降雪量变化,积雪期普遍缩短,春季积雪融化期提前。同时,积雪变化与大气环流作用密不可分,欧亚大陆和北极积雪受到季风、北大西洋涛动、北极涛动等大气信号影响,呈现不同区域变化差异。此外,雪中吸光性杂质也是加速雪冰消融的重要影响因子。当吸光性杂质沉积在雪冰表面会降低雪冰反照率,促进雪冰加速消融,从而缩短雪冰累积时间和范围[102~104]。

目前对积雪变化研究仍存在地面监测网络欠缺和遥感技术手段的难题,有待进一步完善和健全,以期为“一带一路”沿线区域积雪灾害监测和预警、水资源评估、经济社会可持续发展等提供重要依据和参考。

2.4　海冰、河冰和湖冰变化

“一带一路”沿线区域的海冰主要分布于北极,近几十年来夏季北极海冰范围快速缩小、厚度减薄,多年冰减少,海冰正处于快速萎缩中。“一带一路”沿线区域的河/湖冰主要分布在欧亚大陆的高纬度(北极)和高海拔地区(青藏高原),近几十年来河/湖冰呈现初冰日延后、消融日提前、冰封期缩短的趋势。

2.4.1　北极海冰分布

北极海冰空间分布具有不均匀性。44 年(1951—1994 年)海冰密度统计结果显示[105]:北冰洋中心海区(约 75°N 以北)为多年冰分布区,海冰常年不化;冰界线随经度变化,在鄂霍次克海区和拉布拉多海区可向南伸至 45°N 左右,而在挪威海附近明显北缩。海冰分布的纬向不均匀性主要与海陆分布、气候条件以及洋流等因素有关。海陆分布不均使得部分被陆地包围的海湾较同纬度开阔海洋拥有更多海冰;同纬度气候条件差异造成北美大陆东岸较西岸海冰密集度显著增加;大西洋暖流促使挪威海及临近海域海冰界线北缩。

2.4.2　北极海冰变化

由于高纬度地区较其他区域增温剧烈,北极气温的上升速率已是全球平均值增幅的 2 倍,从而导致了过去几十年北极海冰的加速融化[106]。同时,北极海冰的变化对气候也有重要影响[107,108]。海冰融化与气候变暖存在正反馈作用:随着海冰范围的缩减,海水面积随之加大,反照率减小,海水对辐射的吸收能力增强,从而使得海水温度升高,放大了升温效应,也使得海冰融化进一步加剧[107]。因此,对北极海冰范围、厚度、体积等监测具有重要的意义。

随着遥感技术的发展,对海冰的监测已从局部(1970s 以前)发展到大范围的连续观测。观测结果显示,北极海冰范围在 3 月达到年内最大值,9 月范围最小。最新数据表明,北极海冰范围尤其是 9 月的海冰范围在加速萎缩[109~111]。1979—2019 年北极海冰范围整体呈下降趋势(图 4)。其中,1979—2013 年,北极海冰范围缩减率为 52 600 km^2/a;进入 21 世纪以来缩减更加显著,缩减率为 6%/10a[110]。2015—2018 年,北极冬季海冰范围最高值处于历史最低水平,卫星记录中的 12 个海冰范围低值均发生在过去 12 年。

海冰厚度也在减薄[112],大多数冰层较厚的多年海冰已转变为较年轻较薄的季节性海冰。9 月北极海冰体积自 1979 年以来下降了 75%[92];1975—2012 年北极中部海冰厚度减少了约 65%[113]。总体上北极海冰中多年冰在减少。IPCC 第五次评估报告指出,1980—2011 年,北极多年冰正在以(0.8±0.2)×10^6 km^2/10a 的速度减小[52]。多年冰的减少预示着北冰洋夏季海冰的减少,并最终导致北极夏季无海冰。与之对应,北极地区一年冰所占比重呈显著增加趋势[92]。

北极海冰呈现融化日期提前[114]、融化期延长[115]的趋势。在 1979—2012 年,海冰消融首日的提前率为 6.6 d/10a,其中东西伯利亚海域海冰消融首日提前最为明显,变化率为−11.8 d/10a,但在白令海域海冰开始融化日期略有延后(3.3 d/10a)[116]。整个北极地区海冰融化期延长率为 5 d/10a,个别地区延长速率更大[116]。北极融化期延长使得北冰洋夏季反照率减弱,海水对热量的吸收加大,升温加剧。海冰的减少是由大气变暖和南部暖水的涌入造成的,如果全球升温幅度稳定在 1.5 ℃,北极夏季无冰发生的概率大约为 2%;如果稳定在 2 ℃,概率将上升至 19%~34%[92]。

2.4.3　欧亚大陆河/湖冰分布和变化

在“一带一路”沿线地带,河/湖冰主要分布在欧亚大陆北部,如芬兰、瑞典等北欧国家和俄罗斯,以及青藏高原地区(图 5)。河/湖冰在冬春季节形成并

发育，在夏季消融，冰的存在改变了冬春季水面与大气的能量交换，对区域气候产生重要影响[117]，是区域气候变化的敏感指示器[118]。湖泊面积约占全球陆地总面积的2%，是温室气体的重要来源，湖冰对湖泊温室气体等的释放具有重要影响[119]。此外，河冰阻塞河道形成的堰塞湖威胁着下游安全，冲刷和侵蚀河道又会危害工程建设[120]。因此，对河/湖冰的监测具有重要的理论与现实意义。

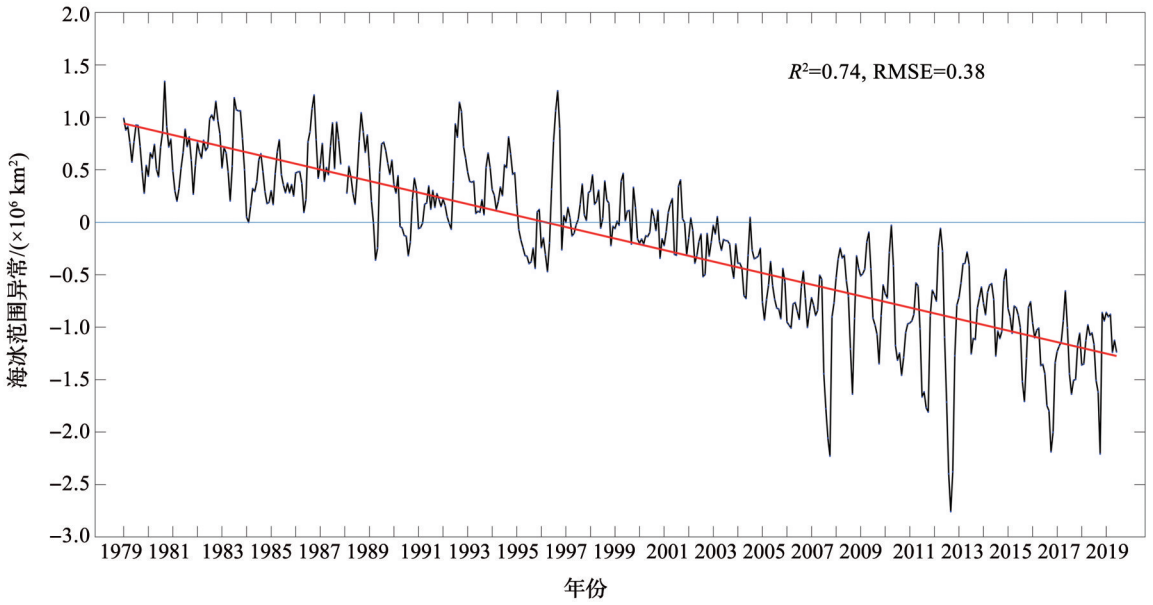


图4 1979—2019年北极年平均海冰范围异常（相对于1981—2010年平均）

Fig. 4 The Arctic sea ice extent anomaly in 1979-2019 (relatived to the 1981-2010 mean values)

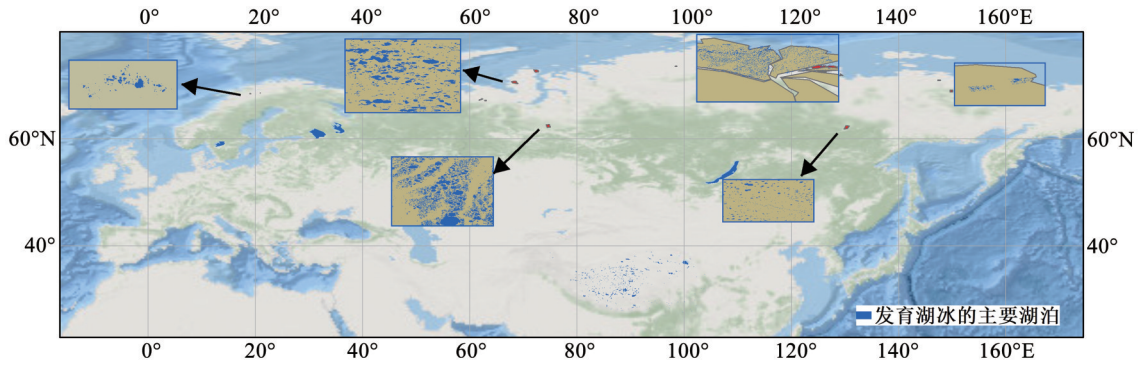


图5 “一带一路”沿线湖冰发育的主要湖泊

Fig. 5 Lakes with ice formation in the Belt and Road areas

对河/湖冰的监测包括：河/湖冰初冰日、完全冻结日、开始消融日、完全消融日、完全冰封期、湖冰存在期以及冰厚和组成等。利用野外监测和遥感手段研究发现，近几十年来北极地区河/湖冰呈初冰日延后、消融日提前、冰封期缩短的变化趋势。1864—1995年芬兰和俄罗斯东部河/湖冰初冰日延后0.7~11 d/100a，消融日提前2.1~9.2 d/100a[121]。1855—2005年北半球湖泊初冰日延迟0.3~1.6 d/10a，消融日提前0.5~1.9 d/10a，冰封期缩短0.7~4.3 d/10a[122]。青藏高原地区湖冰也显示初冰日延迟和消融日提前，如可可西里[123]、青海湖[124]和纳木错[125]，但其湖冰物候存在显著的空间差异[126]。与湖冰整体趋势不同的是，俄罗斯贝加尔湖湖冰出现冰封期提前、消融日延后的趋势[127]。在河/湖冰厚度变化上，北美地区的冰厚不断减薄[128]，但缺乏欧亚大陆湖冰厚度的数据报道。

总的来说，近几十年来河/湖冰初冰日延后、消融日提前，冰封期正在不断缩短，但缺乏对冰厚乃至冰量时空变化的研究。因此，在进一步工作中，应将重点放在欧亚大陆河/湖冰厚度时空变化特征

的研究上。

2.5　水资源变化

受地理位置、气候等因素的影响,“一带一路”沿线地区水资源分布不均,西亚、北非水资源相对匮乏;受气候变化和经济社会发展等因素的影响,干旱区域河川径流多以减少为主,北部以冰雪融水供给的河流径流量呈增加趋势。“一带一路”沿线区域的冰冻圈水资源主要分布在欧亚大陆,是河流径流的重要来源和补给。近几十年来中国冰川融水径流绝对变化量和相对变化量显著增加,反映出冰川消融和物质亏损对径流变化的重要影响。此外,春季雪冰径流产生期提前,导致径流年内分配发生改变。

2.5.1　冰冻圈区域水资源分布

冰冻圈水资源是维系“一带一路”沿线绿洲经济发展和寒区生态系统稳定的重要保障。例如,青藏高原及其毗邻的喜马拉雅山脉地区被称为“亚洲水塔”,为下游地区几十亿人民的生产生活提供水源保障;欧洲冰雪资源最为集中的阿尔卑斯山脉为欧洲提供了 90% 以上的饮用、灌溉与水力等水资源[129,130]。中国冰川、多年冻土和积雪储存的水量总计约 14.5×10^3 km^3,其中,冰川储水量占 35.8%,多年冻土地下冰占 64.0%,积雪水当量约 0.2%[131]。根据多年冻土活动层底部至 10 m 深度的含冰量观测,青藏高原多年冻土每年融化释放的水量为 5~11 km^3,中国多年冻土融水年总量为 6~14 km^3[132,133]。

欧亚大陆冰雪水资源较为丰富,在区域水资源中占有主导地位。欧洲主要河流的径流有 40% 以上来自冰雪融水(图 6),亚洲地区融水径流约为 243 km^3,中亚山区雪冰消融产生的径流占该区总径流的 40%~70%[18]。中国境内的冰川每年提供的融水量达 615×10^8 m^3[134]。其中,西藏约集中了全国冰川融水径流总量的 58%,居首位;其次为新疆,约占 33%[134]。从各山系冰川融水径流水资源的数量来看(表 4),念青唐古拉山区最多,约占全国冰川融水径流总量的 35%;其次是喜马拉雅山和天山,分别占 12.7% 和 15.9%;阿尔泰山最小,不足 1%[135]。由于区域气候系统、冰川规模、地形条件等的差异,冰川融水对河流的补给比重各地不同(表 5)。新疆冰川融水径流占出山径流的 25.4%,西藏占 8.6%,青藏高原外围向高原内部的冰川融水径流补给随着干旱度的增强和冰川面积的增大而递增。就内流水系来说,甘肃河西、准噶尔盆地、柴达木盆地等冰川融水补给比重为 17%~28%,而塔里木河水系则上升到 38.5%[136]。外流水系同样存在冰川融水补给比重随干旱度增强而递增的分布趋势,由西藏东南部的雅鲁藏布江、澜沧江、怒江、察隅河等冰川融水补给比重不足 10%,到西部印度河水系的狮泉河、象泉河、朋曲等增加到 40%~50%。中国冰川融水径流总量的 60% 左右汇入外流河流域,约 40% 汇入内陆河流域[134]。研究显示,1961—2012 年中国平均融雪径流深高值区主要分布在青藏高原、新疆和东北三大积雪区中降水量较多的地区,特别是在藏东南地区;此外,由于受短期强降雪量影响,中国南部部分地区平均积雪融水量也较大。1961—2012 年中国平均融雪径流量约为 820×10^8 m^3[137]。

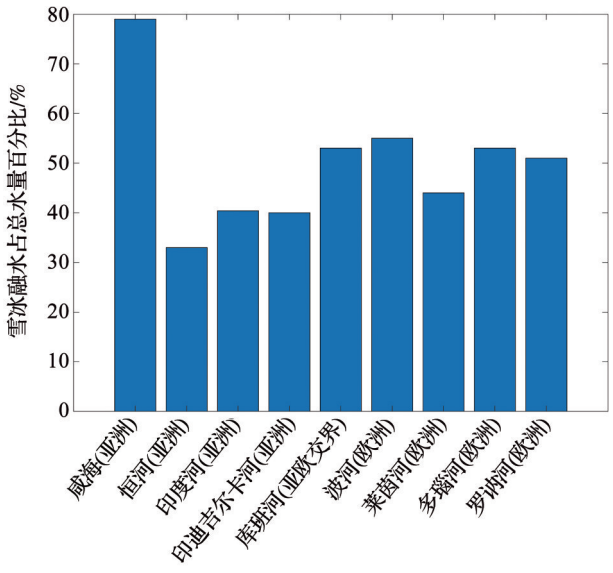


图 6　欧亚大陆不同流域雪冰融水占总水量比例(数据来自参考文献[130])

Fig. 6　Ratio of meltwater from snow and ice to total runoff in different watersheds over Eurasia (data from reference[130])

2.5.2　冰冻圈水资源变化

进入 21 世纪以来,由于气温升高导致全球冰川融水径流发生了变化。中国内流水系中,塔里木河水系冰川融水径流绝对变化量最大,与 1960s 相比,2000s 融水径流增加了 59.34×10^8 m^3;青藏高原内流水系相对变化量最大,与 1960s 相比,2000s 冰川融水相对增加 162.1%;外流水系由于恒河水系冰川面积最大,其冰川融水变化也是最大的,平均增加量约为 2.87×10^8 m^3/a。中国西部从 1960s 的 517.65×10^8 m^3 增加到 1990s 的 695.48×10^8 m^3,2000s 后更是 46 年冰川融水径流量最大的时期,平均融水径流量达 794.67×10^8 m^3,高出多年平均值 26.2%。表 6 为

表 4 中国西部山区冰川融水径流量[135]

Table 4 Glacier runoff in mountains in western China[135]

山脉	冰川融水径流量/($\times10^8$ m^3)	占中国冰川融水径流量比重/%
祁连山	11.32	1.9
阿尔泰山	3.86	0.6
天山	96.30	15.9
帕米尔	15.35	2.5
喀喇昆仑山	38.47	6.4
昆仑山	61.87	10.2
喜马拉雅山	76.60	12.7
羌塘高原	9.29	1.5
冈底斯山	9.41	1.6
念青唐古拉山	213.27	35.3
横断山	49.94	8.3
唐古拉山	17.59	2.9
阿尔金山	1.39	0.2

内流水系、外流水系以及整个中国西部冰川融水径流总量变化[134,136,138]。

受降雪量增加影响,新疆地区积雪融水径流量增加明显,2000s以来,东北地区融雪径流量也明显增加,而青藏高原以及其他地区呈现明显减少趋势。从流域尺度看,1960—2012/2014年中国东北和青藏高原东部多数流域积雪融水呈现下降趋势;而东北山区流域、青藏高原西部以及天山等较冷流域的积雪融水则呈现增加趋势。由此,在中国西部和东北地区降水量增多的背景下,全球变暖、雪线上升尚未导致较冷地区特别是雪线以上地区积雪量及其融水径流的减少。但这种增加趋势在2010年以来,逐渐转变为减少趋势或变化不显著[137]。

表 5 中国典型流域冰川径流量[134, 136]

Table 5 Glacier runoff in typical watersheds in China[134, 136]

流域	冰川融水径流量/($\times10^8$ m^3)	冰川融水占流域径流比重/%
河西水系	11.94	16.5
准格尔盆地	33.65	26.9
伊犁河	37.14	19.2
塔里木盆地	126.50	38.5
柴达木盆地	13.51	28.4
哈拉湖	0.11	3.4
羌塘高原	29.18	11.9
长江	15.52	8.8
黄河	1.74	0.8
额尔齐斯河	7.73	7.7
澜沧江	4.43	4.0
怒江	24.26	5.9

表 6 中国西部冰川融水变化[134, 136, 138] (单位:$\times10^8$ m^3)

Table 6 Variations of glacier melt in western China[134, 136, 138] (unit:$\times10^8$ m^3)

流域水系	1961—1970年	1971—1980年	1981—1990年	1991—2000年	2001—2006年
印度河	5.36	7.39	7.96	10.76	12.58
恒河	260.16	298.02	312.22	341.06	379.41
怒江	23.45	24.60	25.43	29.54	35.70
澜沧江	3.83	3.96	4.07	4.52	5.30
黄河	1.75	1.82	1.77	1.91	2.19
长江	17.04	18.75	18.68	22.54	28.47
额尔齐斯河	3.23	3.33	3.32	3.50	3.63
外流水系合计	314.83	357.87	373.45	413.83	467.27
塔里木盆地	121.05	136.73	139.26	157.85	180.39
哈拉湖	0.11	0.12	0.13	0.15	0.16
甘肃河西内陆河	8.12	9.06	9.12	11.67	14.76
柴达木盆地	7.36	8.23	8.62	11.45	14.52
天山准噶尔盆地	17.92	18.81	18.65	20.76	22.73
吐—哈盆地	2.39	2.36	2.40	2.59	3.12
新疆伊犁河	21.16	22.55	22.86	24.79	26.91
青藏高原内流区	24.73	35.13	40.68	52.38	64.81
内流水系合计	202.82	233.00	241.71	281.64	327.40
总计	517.65	590.87	615.16	695.48	794.67

多年冻土退化势必会影响冰冻圈流域的产流、入渗和蒸散发过程,以及流域的地下水系统等。多年冻土活动层变厚或者季节冻土减薄,不仅增加了水分深层入渗,增加了深层壤中流,而且扩大了地下

水库容,导致流域基流增加,具体表现在年内冬季径流增加、秋季退水曲线变缓,从而有效调节了流域径流的年内甚至年际分配,具体表现为流域干季特别是冬季径流增加、最大月径流量减少、干季(11月至翌年4月)/湿季(5~10月)径流量比例增大等现象[137]。

3　未来冰冻圈变化的影响与研究展望

作为气候系统影响最直接和最敏感的圈层,冰冻圈快速变化及其与其他圈层的相互作用和影响日趋显著,正在对人类经济社会系统产生着广泛而深远的影响。基于上述“一带一路”区域冰冻圈变化事实,考虑冰冻圈变化的综合性影响,未来研究可从以下几个方面进行深入探讨。

3.1　冰冻圈变化及其与气候系统的关系

对“一带一路”区域冰冻圈要素的分布仍存在认知不足,特别是多年冻土分布,未来需扩大冰冻圈监测网的密度和范围,提高对冰冻圈要素时空变化趋势的进一步认识;发展地球气候系统模式中的冰冻圈分量模型,阐明冰冻圈各要素之间的相互作用机理;在此基础上,加强对影响冰冻圈变化的关键气候驱动因素的探测和归因研究,揭示冰冻圈和气候系统的相互作用和影响机制。

3.2　冰冻圈变化对水资源的影响

“一带一路”区域涵盖的大多数大江大河以及干旱区内陆河重要的水塔大多数发源于冰冻圈地区。在未来冰冻圈持续萎缩的态势下,流域产流过程、径流量和水量平衡将发生变化,势必会对干旱区水资源、生态与环境安全以及经济社会可持续发展产生深远影响。鉴于此,应开展不同类型冰川、多年冻土、积雪水资源对气候变化的响应机理、影响评估及预测,从而揭示冰冻圈水资源对地表水及河流水文过程的影响,科学规划区域水资源的分配、利用以及开发,正确认识区域气候对冰冻圈水资源的调控作用。

3.3　冰冻圈变化对生态系统和碳循环的影响

冰川和多年冻土中储存有大量有机碳,随着气候变化进一步加快,这些不同来源的有机碳将在冰川消融和多年冻土退化时重新得以释放,进而改变大气温室气体含量并加速气候变化。同时,原本封存于冰川中的重金属污染物在全球变暖驱动下,将随冰川的快速退缩进行二次释放,从而对生态环境产生负面影响[103]。此外,冰冻圈变化还将改变高山区生物栖息地范围,影响物种存活能力,某些物种范围的缩小和灭绝将导致区域生物多样性的减少[139]。因此,研究冰冻圈变化对生态系统和碳循环的影响具有深远意义。但由于目前长期观测站点不足、监测方法和技术存在一定缺陷,量化研究相对薄弱,对生态系统碳源汇效应和关系的调节,以及影响生态系统碳交换的生物地球化学过程和机制的研究需要在改进的基础上,通过完善整体地球系统模型得以实现。

3.4　冰冻圈变化的灾害风险

冰冻圈变化对人类及其生存环境造成破坏性的事件即为冰冻圈灾害。冰崩、冰川跃动、冰川泥石流、冰湖溃决、多年冻土区冻融作用造成的冻胀和热融灾害、海岸侵蚀、雪灾和风吹雪灾害、春季冰川和融雪洪水等都是冰冻圈变化造成的直接或间接灾害形式,严重威胁着公共设施和人民生命财产安全。“一带一路”区域是冰冻圈灾害多发区,其中北线中蒙俄经济走廊主要受冻土灾害影响,中巴经济走廊和新亚欧大陆桥则受雪崩、冰崩、冰雪融雪洪水灾害影响,“海上丝绸之路”的诸多小岛国、海岸带将受海平面上升的威胁。随着冰冻圈灾害频率和强度增加,应最大限度地减轻冰冻圈变化带来的负面影响,从灾害类型、暴露度和脆弱性等角度制定不同的应对策略和措施,做好防灾减灾风险评估与管控[139]。

3.5　冰冻圈变化影响的适应与对策

冰冻圈变化与“一带一路”区域经济社会发展息息相关,如何适应冰冻圈快速变化带来的影响是政策决策者需要解决的首要问题。通过构建“一带一路”区域冰冻圈“星—空—地”监测网络和预警平台,在认清冰冻圈变化影响范围、对象、程度和规律基础上,确定适应性评估方法,考虑冰冻圈所在区域的成本效益,对长期效用进行系统评估,继而提出应对措施和实施方案,风险管控和政策调控双管齐下,做出应对冰冻圈变化的经济社会可持续发展适应性决策。

4　结　语

在全球变暖背景下,“一带一路”沿线区域的冰冻圈变化及其对水资源的影响凸显。“一带一路”区域冰川在过去几十年间发生了以面积整体萎缩、数量大幅度缩减、冰川冰量持续损失等为特点的变化。但少部分地区出现了正的冰川物质平衡和冰川前进/跃动现象。多年冻土总体呈现退化趋势,表现为多年冻土面积减少、活动层增厚、地温逐渐升

高、多年冻土分布下限上升等特征。积雪呈现范围明显缩减、雪深增加、积雪期缩短、首日延后、消融期提前趋势，但积雪变化存在显著区域差异。北极夏季海冰范围快速减少、厚度减薄，多年冰减少，反映了海冰的快速萎缩。河/湖冰初冰日延后、消融日提前、冰封期缩短。近几十年来中国冰川融水径流绝对变化量和相对变化量显著增加，积雪融水和多年冻土退化也在不同程度上促进了流域径流的变化，反映出冰冻圈变化对径流的重要影响。

“一带一路”区域冰冻圈的快速变化不仅影响着该区域自身，同时也会通过地—气—能—水交换、水汽输送、反照率反馈等机制进一步扩大，继而通过大气、洋流环流过程对其他圈层产生广泛影响。尽管地面、卫星观测资料较过去已有改善，但长期系统的监测网络在观测范围、要素、密集度上仍存在较大缺口。此外，目前气候模型对冰冻圈分量变化的预估还存在很大不确定性。这些问题的改进和发展，依赖于更好地理解冰冻圈多要素协同变化对气候、生态、水文系统的作用机理与反馈影响，以及多圈层互馈机制的交互作用。以期通过自然和人文科学研究的交叉融合，多角度系统评估冰冻圈要素变化的影响与适应，为区域经济社会可持续发展提供有效途径和政策决策支撑。

参考文献（References）：

[1] Qin Dahe. An Introduction to Cryosphere Science [M]. Beijing: Science Press, 2017.[秦大河 . 冰冻圈科学概论[M]. 北京：科学出版社，2017.]

[2] Editing Commission of the Third National Report on Climate Change of China. The Third National Report on Climate Change of China [M]. Beijing: Science Press, 2015.[《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会 . 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京：科学出版社，2015.]

[3] Consortium R. Randolph Glacier Inventory—A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0[R]. Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA, 2017.

[4] Paul F, Kääb A, Maisch M, *et al*. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(21). DOI:10.1029/2004GL020816.

[5] Lambrecht A, Kuhn M. Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the New Austrian Glacier Inventory [J]. *International Glaciological Society*, 2007, 46(1): 177-184.

[6] Paul F, Andreassen L M, Winsvold S H. A new glacier inventory for the Jostedalsbreen region, Norway, from Landsat TM scenes of 2006 and changes since 1966 [J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(59): 153-162.

[7] Tielidze L G. Glacier change over the last century, Caucasus Mountains, Georgia, observed from old topographical maps, Landsat and ASTER satellite imagery [J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(2): 713-725.

[8] Lynch C M, Barr I D, Mullan D, *et al*. Rapid glacial retreat on the Kamchatka Peninsula during the early 21st century [J]. *Cryosphere*, 2016, 10(4): 1 809-1 821.

[9] Paul F, Frey H, Le Bris R. A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results [J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(59): 144-152.

[10] Kaab A. Glacier volume changes using ASTER satellite stereo and ICESat GLAS laser altimetry: A test study on Edgeøya, Eastern Svalbard [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46: 2 823-2 830.

[11] Shahgedanova M, Nosenko G, Bushueva I, *et al*. Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia, 1950-2008 [J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(211): 953-964.

[12] Liu S, Ding Y, Shangguan D, *et al*. Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim river basin, northwest China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 91-96.

[13] Kriegel D, Mayer C, Hagg W, *et al*. Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn Basin, Central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 51-61.

[14] Bie Qiang, Qiang Wenli, Wang Chao, *et al*. Monitoring the glacier variation in the upper reaches of the Heihe River based on remote sensing in 1960-2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 574-582.[别强，强文丽，王超，等 . 1960—2010 年黑河流域冰川变化的遥感监测 [J]. 冰川冻土，2013，35(3)：574-582.]

[15] Ye Q, Kang S, Chen F, *et al*. Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537-545.

[16] Liu S, Shangguan D, Ding Y, *et al*. Glacier changes during the past century in the Gangrigabu mountains, southeast Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 187-193.

[17] Li B, Zhu A-X, Zhang Y, *et al*. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(178): 425-432.

[18] Aizen V, Aizen E, Glazirin G, *et al*. Simulation of daily runoff in Central Asian alpine watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 238(1/2): 15-34.

[19] Hagg W, Hoelzle M, Wagner S, *et al*. Glacier and runoff changes in the Rukhk catchment, upper Amu-Darya Basin until 2050 [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 62-73.

[20] Ye Q, Yao T, Kang S, *et al*. Glacier variations in the Naimona'nyi region, western Himalaya, in the last three decades [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 385-389.

[21] Wu Y, Zhu L. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co Catchment, central Tibetan Plateau,

during 1970-2000 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2): 177-189.

[22] Wang Y, Hou S, Liu Y. Glacier changes in the Karlik Shan, eastern Tien Shan, during 1971/72-2001/02 [J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 39-45.

[23] Niederer P, Bilenko V, Ershova N, *et al*. Tracing glacier wastage in the Northern Tien Shan (Kyrgyzstan/Central Asia) over the last 40 years [J]. *Climatic Change*, 2008, 86(1): 227-234.

[24] Shahgedanova M, Nosenko G, Khromova T, *et al*. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D6). DOI:10.1029/2009JD012976.

[25] Moelg T, Cullen N J, Hardy D R, *et al*. East African glacier loss and climate change: Corrections to the UNEP article "Africa without ice and snow" [J]. *Environmental Development*, 2013, 6(1): 1-6.

[26] Klein A G, Kincaid J L. Retreat of glaciers on Puncak Jaya, Irian Jaya, determined from 2000 and 2002 IKONOS satellite images [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52: 65-79.

[27] Mackintosh A N, Anderson B M, Lorrey A M, *et al*. Regional cooling caused recent New Zealand glacier advances in a period of global warming [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14 202.

[28] Kotlyakov V, Osipova G, Tsvetkov D. Monitoring surging glaciers of the Pamirs, central Asia, from space [J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 48(1): 125-134.

[29] Yao T, Thompson L, Yang W, *et al*. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663.

[30] Quincey D J, Glasser N F, Cook S J, *et al*. Heterogeneity in Karakoram glacier surges [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(7): 1 288-1 300.

[31] Yasuda T, Furuya M. Dynamics of surge-type glaciers in West Kunlun Shan, Northwestern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(7): 2 393-2 405.

[32] Harrison W D, Post A S. How much do we really know about glacier surging?[J]. *Annals of Glaciology*, 2003, 36: 1-6.

[33] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y, *et al*. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011 [J]. *The Cryosphere*, 2013, 7: 1 885-1 886.

[34] Lang C, Fettweis X, Erpicum M. Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979-2013 despite the Arctic warming [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9: 83-101.

[35] Carturan L, Filippi R, Seppi R, *et al*. Area and volume loss of the glaciers in the Ortles-Cevedale group (Eastern Italian Alps): Controls and imbalance of the remaining glaciers [J]. *The Cryosphere*, 2013, 7: 1 339-1 359.

[36] Paul F, Haeberli W. Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2). DOI: 10.1029/2008GL034718.

[37] Kääb A, Berthier E, Nuth C, *et al*. Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas [J]. *Nature*, 2012, 488(7 412): 495.

[38] Wang P, Li Z, Li H, *et al*. Comparison of glaciological and geodetic mass balance at Urumqi Glacier No. 1, Tian Shan, central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 114: 14-22.

[39] Shangguan D, Bolch T, Ding Y, *et al*. Mass changes of Southern and Northern Inylchek Glacier, Central Tian Shan, Kyrgyzstan, during ~1975 and 2007 derived from remote sensing data [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9: 703-717.

[40] Wei J F, Liu S Y, Xu J L, *et al*. Mass loss from glaciers in the Chinese Altai Mountains between 1959 and 2008 revealed based on historical maps, SRTM, and ASTER images [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(2): 330-343.

[41] Wu K, Liu S, Jiang Z, *et al*. Recent glacier mass balance and area changes in the Kangri Karpo Mountains from DEMs and glacier inventories [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12: 103.

[42] Haug T, Rolstad C, Elvehøy H, *et al*. Geodetic mass balance of the western Svartisen ice cap, Norway, in the periods 1968-1985 and 1985-2002 [J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(50): 119-125.

[43] Li G, Lin H. Recent decadal glacier mass balances over the Western Nyainqentanglha Mountains and the increase in their melting contribution to Nam Co Lake measured by differential bistatic SAR interferometry[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 149: 177-190.

[44] Xu J, Liu S, Zhang S, *et al*. Recent changes in glacial area and volume on Tuanjiefeng Peak Region of Qilian Mountains, China [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8: e70574.

[45] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 322.

[46] Möller M, Finkelnburg R, Braun M, *et al*. Variability of the climatic mass balance of Vestfonna ice cap, northeastern Svalbard, 1979-2011 [J]. *Annals of Glaciology*, 2013, 54(63): 254-264.

[47] Małecki J. Elevation and volume changes of seven Dickson Land glaciers, Svalbard, 1960-1990-2009 [J]. *Polar Research*, 2013, 32: 18 400.

[48] Moholdt G, Wouters B, Gardner A S. Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(10). DOI:10.1029/2012GL051466.

[49] Cheng Guodong, Zhao Lin. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Xizhang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(16): 521-531.[程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题 [J]. 第四纪研究, 2000, 20(16): 521-531.]

[50] Zhao L, Marchenko S, Sharkhuu N, *et al*. Regional changes of permafrost in Central Asia[C]// Proceedings of the Extended Abstracts, Proceedings Ninth International Conference on Permafrost. Institute of Northern Engineering. Fairbanks: University of Alaska, 2008.

[51] Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation [J]. *The Cryosphere*, 2012, 6:

1 547-1 582.

[52] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.

[53] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1 729-1 742.

[54] Wang B, Bao Q, Hoskins B, *et al*. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(14). DOI:10.1029/2008GL034330.

[55] Wu Tonghua. Study on the Response of Frozen Soil to Global Climate Change in Tibetan Plateau [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005.[吴通华. 青藏高原冻土对全球气候变化响应研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.]

[56] Cheng G, Wu T. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112: 93-104.

[57] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, *et al*. Temporal and spatial variations of the active layer along the Qinghai-Tibet Highway in a permafrost region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(30): 2 864-2 871.[李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏公路沿线多年冻土区活动层动态变化及区域差异特征 [J]. 科学通报, 2012, 57(30): 2 864-2 871.]

[58] Xu Xiaoming, Zhang Zhongqiang, Wu Qingbai. Simulation of permafrost changes on the Qinghaig Peak region of Qilian Mountains, China [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 10(5): 1-17.

[59] Anisimov O, Reneva S. Permafrost and changing climate: The Russian perspective [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2006, 35(4): 169-176.

[60] Pavlov A. Current changes of climate and permafrost in the Arctic and sub-Arctic of Russia [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1994, 5(2): 101-110.

[61] Pavlov A, Moskalenko N. The thermal regime of soils in the north of western Siberia [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, 13(1): 43-51.

[62] Isaksen K, Sollid J L, Holmlund P, *et al*. Recent warming of mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2). DOI: 10.1029/2006JF000522.

[63] Pogliotti P, Guglielmin M, Cremonese E, *et al*. Warming permafrost and active layer variability at Cime Bianche, Western European Alps [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9: 647-661.

[64] Visconti G, Beniston M, Iannorelli E D, *et al*. Global Change and Protected Areas [M]. Springer Press, 2001. DOI: 12.100710-306-48051-4.

[65] Farbrot H, Etzelmüller B, Schuler T V, *et al*. Thermal characteristics and impact of climate change on mountain permafrost in Iceland [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F3). DOI: 10.1029/2006JF000541.

[66] Gisnås K, Etzelmüller B, Lussana C, *et al*. Permafrost map for Norway, Sweden and Finland [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, 28: 359-378.

[67] Myhra K, Westermann S, Etzelmüller B. Modelled distribution and temporal evolution of permafrost in steep rock walls along a latitudinal transect in Norway by CryoGrid 2D [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, 28: 172-182.

[68] Wu Q, Zhang T. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D9). DOI: 10.1029/2009JD012974.

[69] Brutsaert W, Hiyama T. The determination of permafrost thawing trends from long-term streamflow measurements with an application in eastern Siberia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D22). DOI:10.1029/2012JD018344.

[70] Frauenfeld O W, Zhang T, Barry R G, *et al*. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D5). DOI:10.1029/2003JD004245.

[71] Christiansen H, Humlum O. Interannual variations in active layer thickness in Svalbard [C] //Proceedings Ninth International Conference on Permafrost, 2008.

[72] Hilbich C, Hauck C, Hoelzle M, *et al*. Monitoring mountain permafrost evolution using electrical resistivity tomography: A 7-year study of seasonal, annual, and long-term variations at Schilthorn, Swiss Alps [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F1). DOI:10.1029/2007JF000799.

[73] Malevsky-Malevich S, Molkentin E, Nadyozhina E, *et al*. Numerical simulation of permafrost parameters distribution in Russia [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2001, 32(1): 1-11.

[74] Sattler K, Anderson B, Mackintosh A, *et al*. Estimating permafrost distribution in the maritime Southern Alps, New Zealand, based on climatic conditions at rock glacier sites [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2016, 4: 4.

[75] Brown R D, Goodison B E. Interannual variability in reconstructed Canadian snow cover, 1915-1992 [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(6): 1 299-1 318.

[76] King J C, Pomeroy J W , Gray D M, *et al*. Snow-Atmosphere Energy and Mass Balance [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.

[77] Armstrong R L, Brodzik M J. Recent Northern Hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3 673-3 676.

[78] Robinson D A, Dewey K F, Heim Jr R R. Global snow cover monitoring: An update [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(9): 1 689-1 696.

[79] Strategy I G O. Cryosphere Theme Report: For the Monitoring of Our Environment from Space and from Earth [R]. Geneva: World Meteorological Organisation, 2007.

[80] Barry R, Gan T Y. The Global Cryosphere: Past, Present and Future [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.

[81] Parkinson C L. Earth's cryosphere: Current state and recent changes [J]. *Annual Review of Environment Resources*, 2006, 31: 33-60.

[82] Zhong X, Zhang T, Kang S, *et al*. Spatiotemporal variability of snow depth across the Eurasian continent from 1966 to 2012 [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12: 227-245.

[83] Brown R D, Robinson D A. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922-2010 including an assessment of uncertainty [J]. *The Cryosphere*, 2011, 5: 219-229.

[84] AMAP. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere [R]. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011.

[85] Callaghan T V, Johansson M, Brown R D, *et al*. The changing face of Arctic snow cover: A synthesis of observed and projected changes [J]. *Ambio*, 2011, 40: 17-31.

[86] Bulygina O, Razuvaev V, Korshunova N. Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades [J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4: 045026.

[87] Bulygina O, Groisman P Y, Razuvaev V, *et al*. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6: 045204.

[88] Wegmann M, Orsolini Y, Dutra E, *et al*. Eurasian snow depth in long-term climate reanalyses [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11: 923-935.

[89] Ma Lijuan, Qin Dahe. Spatial-temporal characteristics of observed key parmeters for snow cover in China during 1957-2009 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 1-11.[马丽娟, 秦大河. 1957—2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1-11.]

[90] Hernández-Henríquez M A, Déry S J, Derksen C. Polar amplification and elevation-dependence in trends of Northern Hemisphere snow cover extent, 1971-2014 [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10: 044010.

[91] Huang X, Deng J, Wang W, *et al*. Impact of climate and elevation on snow cover using integrated remote sensing snow products in Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 274-288.

[92] AMAP. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) [M]. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017.

[93] Huang X, Deng J, Ma X, *et al*. Spatiotemporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China [J]. *The Cryosphere*, 2016, 10: 2 453-2 463.

[94] Shmakin A. Climatic characteristics of snow cover over North Eurasia and their change during the last decades [J]. *Ice and Snow*, 2010, 1: 43-57.

[95] Peng S, Piao S, Ciais P, *et al*. Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1): 014008.

[96] Shen S S, Yao R, Ngo J, *et al*. Characteristics of the Tibetan Plateau snow cover variations based on daily data during 1997-2011 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 120: 445-453.

[97] Bai Shuying, Shi Jianqiao, Shen Weishou, *et al*. Spatial and temporal variations of snow and influencing factors in Tibet Plateau based on remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(6): 954-962.[白淑英, 史建桥, 沈渭寿, 等. 卫星遥感西藏高原积雪时空变化及影响因子分析 [J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6): 954-962.]

[98] Xu W, Ma L, Ma M, *et al*. Spatial-temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 1 521-1 533.

[99] Shi Jianqiao. Spatial and Temporal Variations of Snow and Influencing Factors in Tibetan Based on Remote Sensing and GIS [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.[史建桥. 基于遥感和 GIS 的青藏高原积雪时空变化及影响因子分析 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2014.]

[100] Chu Duo, Yang Yong, Luobu Jiancan, *et al*. The variations of snow cover days over the Tibetan Plateau during 1981-2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(6): 1 461-1 472.[除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 1981—2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1 461-1 472.]

[101] Xiong C, Shi J, Cui Y, *et al*. Snowmelt pattern over high-mountain Asia detected from active and passive microwave remote sensing [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14: 1 096-1 100.

[102] Zhang Y, Kang S, Sprenger M, *et al*. Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12: 413-431.

[103] Kang S, Zhang Q, Qian Y, *et al*. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the third pole region: Current progresses and future prospects [J]. *National Science Review*, 2019, 6(4): 796-809.

[104] Zhong X, Kang S, Zhang W, *et al*. Light-absorbing impurities in snow cover across Northern Xinjiang, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(254): 940-956.

[105] Wang Daiwei, Yang Xiuqun. Temporal and spatial patterns of Arctic sea ice variations [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2002, 60(2): 129-138.[汪代维, 杨修群. 北极海冰变化的时间和空间型 [J]. 气象学报, 2002, 60(2): 129-138.]

[106] Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, *et al*. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis [J]. *Climatic Change*, 2012, 110(3/4): 1 005-1 027.

[107] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification [J]. *Nature*, 2010, 464(7 293): 1 334-1 337.

[108] Gao Y, Sun J, Li F, *et al*. Arctic sea ice and Eurasian climate: A review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32: 92-114.

[109] Comiso J C, Meier W N, Gersten R. Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122: 6 883-

6 900.

[110] Meier W N, Hovelsrud G K, Van Oort B E, *et al*. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 185-217.

[111] Perovich D K, Richter-Menge J A. Regional variability in sea ice melt in a changing Arctic [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373: 20140165.

[112] Perovich D K, Richter-Menge J A. Loss of sea ice in the Arctic [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 417-441.

[113] Lindsay R, Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9: 269-283.

[114] Wang L, Derksen C, Brown R, *et al*. Recent changes in pan-Arctic melt onset from satellite passive microwave measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(3): 522-528.

[115] Mortin J, Svensson G, Graversen R G, *et al*. Melt onset over Arctic sea ice controlled by atmospheric moisture transport [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 6 636-6 642.

[116] Bliss A, Anderson M. Arctic sea ice melt onset from passive microwave satellite data: 1979-2012 [J]. *The Cryosphere Discussions*, 2014, 8: 3 037-3 055.

[117] Cordeira J M, Laird N F. The influence of ice cover on two lake-effect snow events over Lake Erie [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 2 747-2 763.

[118] Likens G E. Plankton of Inland Waters [M]. New York: Academic Press, 2010.

[119] Walter K M, Smith L C, Stuart Chapin Iii F. Methane bubbling from northern lakes: Present and future contributions to the global methane budget [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1 856): 1 657-1 676.

[120] De Munck S, Gauthier Y, Bernier M, *et al*. River predisposition to ice jams: A simplified geospatial model [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17: 1 033-1 045.

[121] Magnuson J J, Robertson D M, Benson B J, *et al*. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere [J]. *Science*, 2000, 289(5 848): 1 743-1 746.

[122] Benson B J, Magnuson J J, Jensen O P, *et al*. Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855-2005) [J]. *Climatic Change*, 2012, 112(2): 299-323.

[123] Yao X, Li L, Zhao J, *et al*. Spatial-temporal variations of lake ice phenology in the Hoh Xil region from 2000 to 2011 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1): 70-82.

[124] Cai Y, Ke C Q, Duan Z. Monitoring ice variations in Qinghai Lake from 1979 to 2016 using passive microwave remote sensing data [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 120-131.

[125] Gou P, Ye Q, Che T, *et al*. Lake ice phenology of Nam Co, Central Tibetan Plateau, China, derived from multiple MODIS data products [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, 43(6): 989-998.

[126] Kropáček J, Maussion F, Chen F, *et al*. Analysis of ice phenology of lakes on the Tibetan Plateau from MODIS data [J]. *The Cryosphere*, 2013, 7: 287-301.

[127] Kouraev A V, Semovski S V, Shimaraev M N, *et al*. Observations of Lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 240-253.

[128] Arp C D, Jones B M, Lu Z, *et al*. Shifting balance of thermokarst lake ice regimes across the Arctic Coastal Plain of northern Alaska [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(16). DOI:10.1029/2012GL052518.

[129] Immerzeel W W, Van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, 328(5 984): 1 382-1 385.

[130] Kaser G, Großhauser M, Marzeion B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(47): 20 223-20 227.

[131] Ren Jiawen, Ye Baisheng, Ding Yongjian, *et al*. Initial estimate of the contribuiton of cryospheric changes in China to sea level rise [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(14): 1 084-1 087.[任贾文,叶柏生,丁永建,等. 中国冰冻圈变化对海平面上升潜在贡献的初步估计[J]. 科学通报, 2011, 56(14): 1 084-1 087.]

[132] Qin Dahe, Chen Yiyu, Li Xueyong. Assessment of Climate and Environment Changes in China (II): Measures to Adapt and Mitigate the Effects of Climate and Environment Changes [M]. Beijing: Science Press, 2005.[秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变(下卷): 气候与环境变化的影响与适应, 减缓对策 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.]

[133] Zhao Lin, Liu Guangyue, Jiao Keqin, *et al*. Variations of the permafrost in the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains since 1991 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 223-230.[赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991—2008 年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 223-230.]

[134] Xie Zichu, Wang Xin, Kang Ersi, *et al*. Glacial runoff in China: An evaluation and orediction for the future 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 457-466.[谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来 50a 变化趋势预测[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 457-466.]

[135] Shi Yafeng. Glacier and Envrionment in China [M]. Beijing: Science Press, 2000.[施雅风. 中国冰川与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]

[136] Gao X, Ye B, Zhang S, *et al*. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961-2006 in the Tarim River Basin, China [J]. *Science in China* (*Series D*), 2010, 53: 880-891.

[137] Chen Rensheng, Zhang Shiqiang, Yang Yong, *et al*. The Impacts of Cryospheric Changes on Runoff in Cold Regions of Western China [M]. Beijing: Science Press, 2019.[陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.]

[138] Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, *et al*. Recent changes

of glacier runoff in the Hexi Inland riber basin [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(31): 344-350.[高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化 [J]. 水科学进展, 2011, 22(31): 344-350.]

[139] Hock R, Rasul R, Adler C, *et al*. High mountain areas[R]// Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, *et al*. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2019.

Cryospheric Changes and Their Impacts on Water Resources in the Belt and Road Regions*

Kang Shichang[1,2,3], Guo Wanqin[1], Wu Tonghua[1], Zhong Xinyue[4*], Chen Rensheng[5], Xu Min[1], Chen Jinlei[1], Yang Ruimin[6]

(1.*State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 2.*Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; 3.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 4.*Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 5.*Qilian Alpine Ecology and Hydrology Research Station, Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 6.*College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: "Belt and Road" regions include Asia, Europe and eastern and northern Africa, with a wide spatial distribution. The cryosphere is undergoing rapid changes in the Belt and Road regions with global warming, and has an important impact on water resources, ecosystems and Arctic waterways in these regions. This article reviewed recent cryospheric changes and associated impacts on water resources in the Belt and Road regions during the last decades. The main cognitions are as follows: ① Most glaciers are shrinking and glacier mass balances are most negative, but there are regional differences in the changes of glaciers. ② Global temperature rise has resulted in permafrost degradation, including a rise in permafrost temperature and decreasing permafrost thickness as well as an increase in active layer thickness. ③ There is a significant decrease in snow cover extent and an increase in snow depth. Snow cover duration has shortened, the onset of snow cover has delayed, and the end of snow cover has advanced. However, there are still obvious regional differences in the changes of snow cover. ④ Arctic sea ice has declined precipitously in both extent and thickness in summer, and multi-year sea ice has decreased, indicating the precipitous retreat of sea ice. The freeze-up date of some lakes has been delayed, the break-up date has advanced, and the ice cover duration of river/lake ice has significantly shortened. ⑤ Glacial runoff has increased significantly in China. Snowmelt and permafrost degradation have also increased the basin runoff, which indicates the important impact of cryospheric changes on runoff. This study will provide a baseline and important scientific support for addressing climate change and regional sustainable development.

Key words: The Belt and Road; Cryospheric changes; Water resource.

* **Foundation item:** Project supported by the Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China "Cryosphere and climate change" (No. 41721091); The Frontier Science Key Project of Chinese Academy of Sciences "Cryospheric changes and sustainable development in the Arctic" (No. QYZDY-SSW-DQC021).

First author: Kang Shichang (1969-), male, Longxi County, Gansu Province, Professor. Research areas include cryosphere and climate change. **E-mail**: shichang.kang@lzb.ac.cn

* **Corresponding author:** Zhong Xinyue (1983-), female, Shenyang City, Liaoning Province, Assistant professor. Research areas include cryosphere and climate change. **E-mail**: xyzhong@lzb.ac.cn