

文章编号: 1000-0240(2004)06-0729-07

# 中国冰川积累与水汽来源补给分析

张忠林<sup>1, 2</sup>, 何元庆<sup>1</sup>, 庞洪喜<sup>1</sup>, 卢爱刚<sup>1</sup>, 顾 娟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州交通大学 信息与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 利用冰川编目数据和 NCEP/NCAR 再分析资料, 对中国及周边地区水汽通量、中国冰川地理分布情况、大气环流途径和降水分布进行分析, 发现中国冰川水汽来源复杂, 不同地区各季节存在不同的大气环流控制。这说明不同地理位置的冰川所指示的气候信息是不同的, 大约以  $30^{\circ}$  N 和  $100^{\circ}$  E 为界, 中国西北部主要受西风环流影响, 冰川发育的水汽主要源于西风环流。以横断山脉为界, 横断山脉以西, 即  $30^{\circ}$  N 以南和  $100^{\circ}$  E 以西的区域, 主要受印度季风控制, 冰川发育水汽主要源于印度洋、阿拉伯海和孟加拉湾; 横断山脉以东区域, 受东亚季风控制, 冰川发育水汽主要来源于太平洋和南海; 横断山脉、念青唐古拉和青藏高原东部地区受印度季风和东亚季风共同控制, 冰川发育水汽主要来源于孟加拉湾和南海。不同地区冰芯积累量的变化与该地区夏季季风环流指数的变化具有较好的一致性。

**关键词:** 中国冰川; 季风环流; 水汽来源; 气候信息

中图分类号: P343.6 文献标识码: A

## 1 引言

全球陆地表面的近十分之一被冰川覆盖, 冰川从积累、运动到消融的全过程中, 在动力和热力作用下, 贯穿着水分和热量不断地收支变化, 与大气、冰床之间相互作用, 构成一个复杂的系统<sup>[1]</sup>。中国冰川编目表明, 中国共发育有冰川 46 298 条, 总面积  $59\ 406\ \text{km}^2$ , 冰储量约  $5\ 590\ \text{km}^3$ , 且主要分布于中国西部中低纬度地区, 是中低纬度山地冰川最发育的国家<sup>[2]</sup>。表 1 列出了各山系冰川数量分布情况。中国冰川中冰储量规模比较大的山系主要是: 昆仑山、天山、念青唐古拉山、喜马拉雅山和喀拉昆仑山等。

冰川的大规模扩展和收缩影响到全球环境的变化, 在冰川中储存着气候与环境变化的信息。同时冰川又是宝贵的淡水资源, 对西部干旱区工农业发展具有重要作用。冰川积累来源于大气降水, 大气降水受大气环流控制, 不同的区域其大气降水来源不同。冰芯积累量是冰川上降水量的直接记录, 并

且高分辨率冰芯记录保证了降水记录的连续性, 因此冰芯记录提供了一种恢复降水量变化的有效手段<sup>[3]</sup>。考虑到冰川主要分布在中国西部地区, 因此, 本文讨论区域仅限于西部地区。目前, 在中国西部已有 6 支冰芯积累量记录, 其地点分属于西部不同的区域, 利用冰芯研究成果可以对其局地气候和降水来源进行分析, 并使用冰川积累量的变化来反映区域降水的变化。

图 1 是按冰川面积进行统计的中国冰川地理分布图。图中阴影部分代表冰川分布状况, 阴影面积越大代表冰川覆盖面积越大。

根据地区降水量的差别, 我国冰川可划分为三类: 海洋型冰川、极大陆型冰川和亚大陆型冰川<sup>[4]</sup>。由于中国西部地区的水汽来源主要是西风带输送和季风环流输送, 而西风与季风的强度和范围及本地蒸发将决定局地水汽的收支及降水的多寡, 进而影响冰川的物质平衡。受低空海陆气压差和青藏高原的影响, 不同季节低空大气环流存在明显差异。平均而言青藏高原从 4~9 月为热源, 其它

收稿日期: 2004-03-10; 修订日期: 2004-09-01

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(人教字 2002-43); 国家自然科学基金重大项目(90302006); 国家自然科学基金青年创新群体项目(40121101)资助

作者简介: 张忠林(1965—), 男, 河北阜城人, 2001 年在兰州大学获硕士学位, 现为在职博士研究生, 主要从事计算机模拟研究。

E-mail: zzz-1@hotmail.com

表 1 中国各山系的冰川数量分布<sup>[2]</sup>Table 1 Number, area and volume of glaciers in various mountain systems of China<sup>[2]</sup>

山系	最高峰海拔/m	冰川条数		冰川面积		冰储量	
		条数	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>3</sup>	%
阿尔泰山	4374	403	0.87	280	0.47	16	0.29
萨吾尔山	3835	21	0.05	17	0.03	1	0.01
天山	7435	9081	19.61	9236	15.55	1012	18.10
帕米尔	7649	1289	2.78	2696	4.54	248	4.44
喀拉昆仑山	8611	3454	7.46	6231	10.49	686	12.27
昆仑山	7167	7694	16.62	12266	20.65	1283	22.95
阿尔金山	6295	235	0.51	275	0.46	16	0.29
祁连山	5827	2815	6.08	1931	3.25	93	1.66
羌塘高原	6822	958	2.07	1802	3.03	162	2.90
唐古拉山	6621	1530	3.30	2213	3.73	184	3.29
岗底斯山	7095	3538	7.64	1766	2.97	81	1.45
念青唐古拉山	7162	7080	15.29	10701	18.01	1002	17.92
横断山	7514	1725	3.73	1580	2.66	97	1.74
喜马拉雅山	8848	6475	13.99	8412	14.16	709	12.68
总计		46298	100.00	59406	100.00	5590	100.00

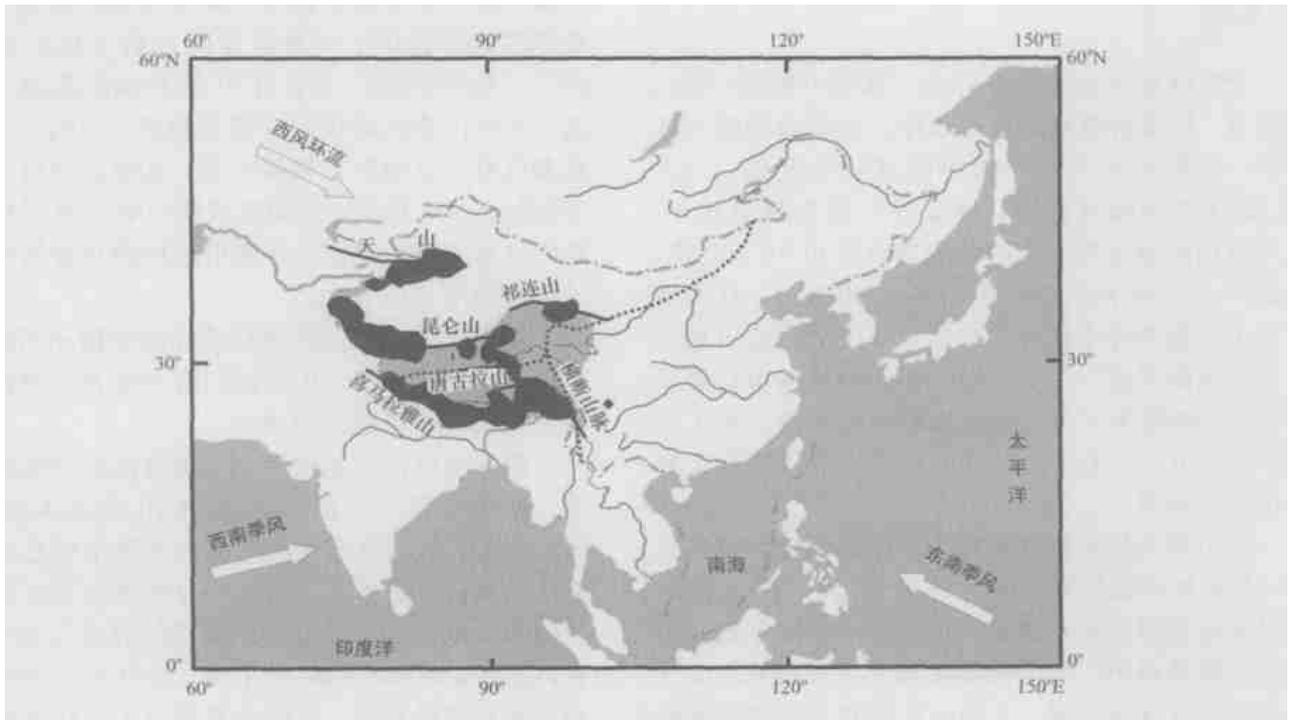


图 1 中国冰川地理分布

Fig. 1 A map showing the glacier distribution in China

月份为冷源，热源最强在 6~7 月份，冷源最强在 12 月份<sup>[5]</sup>。即 4~9 月低空盛行南风，促使印度季风爆发，季风携带大量水汽向陆地输送；其它月份

则盛行北风，此时的水汽主要来源于高空的西风环流和局地蒸发。因此对西南地区而言，每年的降水主要是由季风降水产生的。图 2 表示近 50 a 夏季

500 hPa 平均水汽通量图, 从图中可以看到, 中国西部地区以  $30^{\circ}\text{N}$  为界, 北部主要受西风带影响; 东亚季风与印度季风则以南海为界向中国南部地区输送水汽. 所以在冰川发育的中国西部地区, 降水量的区域差异除了受当地地形控制之外, 主要受制于东亚季风、印度季风与中纬度西风环流. 冬季水汽主要来源于西风环流, 此时期降水普遍较少, 对冰川积累量贡献较小; 春夏季印度季风强盛, 由跨赤道气流经过阿拉伯海、印度和孟加拉湾, 携带大量水汽, 向东与东亚季风在南海相遇, 由于受东亚季风的压迫, 折向西北, 沿横断山脉, 沿河谷溯源而上, 向西北推进, 进入西藏东部和南部<sup>[6]</sup>. 东亚季风沿横断山脉向北, 转向东北, 主要影响到青海东部和祁连山东部地区, 与夏季 500 hPa 水汽通量图一致; 秋季印度季风消退, 东亚季风盛行, 跨过南海向西影响到孟加拉湾, 向北影响到藏东南. 由于各季节各地区降水量的不均匀性, 造成我国干湿气候界线空间变化<sup>[7]</sup>, 从而进一步对冰川类型边界变化产生影响, 同时又说明了不同的大气环流边界

变化所造成的水汽来源变化对冰川积累量将产生重要影响.

## 2 陆地降水与季风环流关系

图 1 中的上部虚线表示近似夏季季风边界<sup>[8]</sup>, 是西风环流控制区和夏季风作用范围分界线, 不同年份根据夏季风的强弱, 其分界线会南北偏移. 西风环流控制着中国西部和北部广大地区, 从  $30^{\circ}\text{N}$  东经  $100^{\circ}\text{E}$  向西北, 该区域冰川水汽主要来源于西风环流. 印度季风和东亚季风共同控制中国南部地区, 这两支季风近似边界以横断山脉为界. 印度季风强盛时, 东亚季风减弱, 其东部边界东移并跨过横断山脉. 印度季风减弱时, 东亚季风增强, 印度季风东部边界西移并退到横断山脉以西. 印度季风主要控制喜马拉雅山脉、青藏高原南部、东部和横断山脉西部地区. 东亚季风主要控制横断山脉和青藏高原东部部分地区. 各区域分布的冰川中, 其水汽主要来源于不同的大气环流.

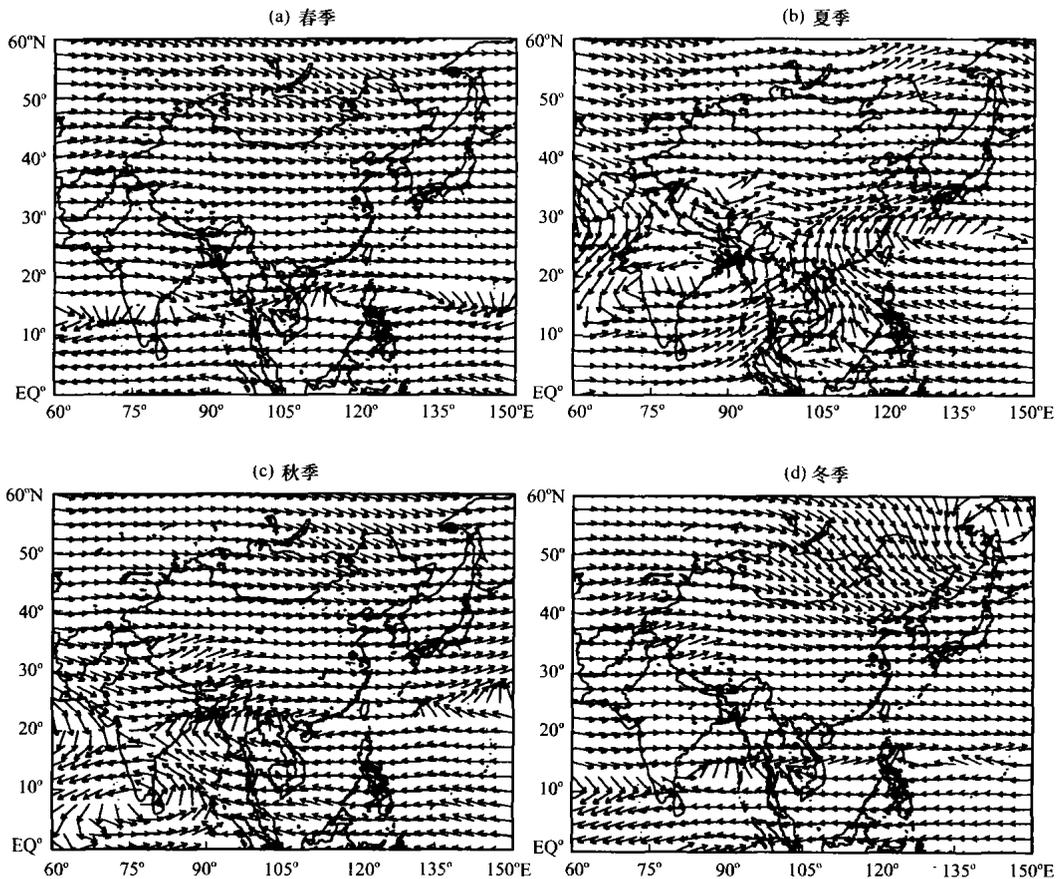


图 2 500 hPa 水汽通量图

Fig. 2 Vapor fluxes at 500 hPa

## 2.1 东亚季风控制区

东亚季风区的夏季水汽输送来源比较复杂,主要有:1)印度季风流经孟加拉湾推向我国江淮流域输送;2)沿西太平洋副热带高压西南侧东南季风气流带来的水汽;3)沿 $105^{\circ}\text{E}$ 附近流经我国南海的跨赤道气流带来的水汽;4)由中纬度西风带扰动带来的水汽.并且东亚季风经向输送大于纬向输送<sup>[9]</sup>.利用东亚季风指数<sup>[10]</sup>与陆地降水资料<sup>[11]</sup>进行相关分析,发现东亚季风强弱与西藏地区东部和横断山脉地区降水具有一定的相关性.

## 2.2 印度季风控制区

印度季风区的水汽输送主要来源于索马里急流经阿拉伯海转向带来的水汽输送,以纬向输送为主<sup>[9]</sup>.对于中国西南地区和青藏高原南坡,来自阿拉伯海和孟加拉湾的水汽是最主要的来源<sup>[12]</sup>.夏季高原西部还有一条从印度北部经仲巴、定日伸向高原腹地的水汽输送带<sup>[13]</sup>.来自印度洋及阿拉伯海的水汽云团可以经过印度半岛腾空跨入高原<sup>[14]</sup>.印度季风在夏季较强,利用陆地夏季降水<sup>[11]</sup>与印度季风指数 $WS1$ <sup>[15]</sup>进行相关分析,发现印度季风

强弱与喜马拉雅山脉中东部和西藏地区东部具有一定的相关性.印度夏季风降水量和年降水量与喜马拉雅山中段3支冰芯积累量的变化一致<sup>[3]</sup>.经研究发现达索普冰芯准确地记录了印度东北部季风降水变化<sup>[16]</sup>.

## 2.3 东亚季风与印度季风共同控制区

随着夏季的到来,印度季风达到一年中最强,其控制范围由印度半岛向东,跨过中南半岛到达南海,受来自太平洋的东亚季风的压迫,在南海交汇,促使南海季风爆发.交汇后的两股水汽将南海和孟加拉湾暖湿气流输送到高原东南部,并继续向北向西输送<sup>[13]</sup>.到达中南半岛后,被横断山脉切分成多条水汽通道,其西支沿横断山脉西侧向印度东北部和青藏高原东南部输送<sup>[6]</sup>;中支沿横断山脉河谷向西北输送;东支则沿横断山脉东侧向北输送.如图2,秋季印度季风向西向南回撤,东亚季风西移,此时横断山脉南部受东亚季风影响较大.横断山脉是印度季风和东亚季风的分界区,对该地区各气象站降水数据进行对比,发现变化差异较大<sup>[18]</sup>,可见该地区水汽输送来源比较复杂.青藏高原上的

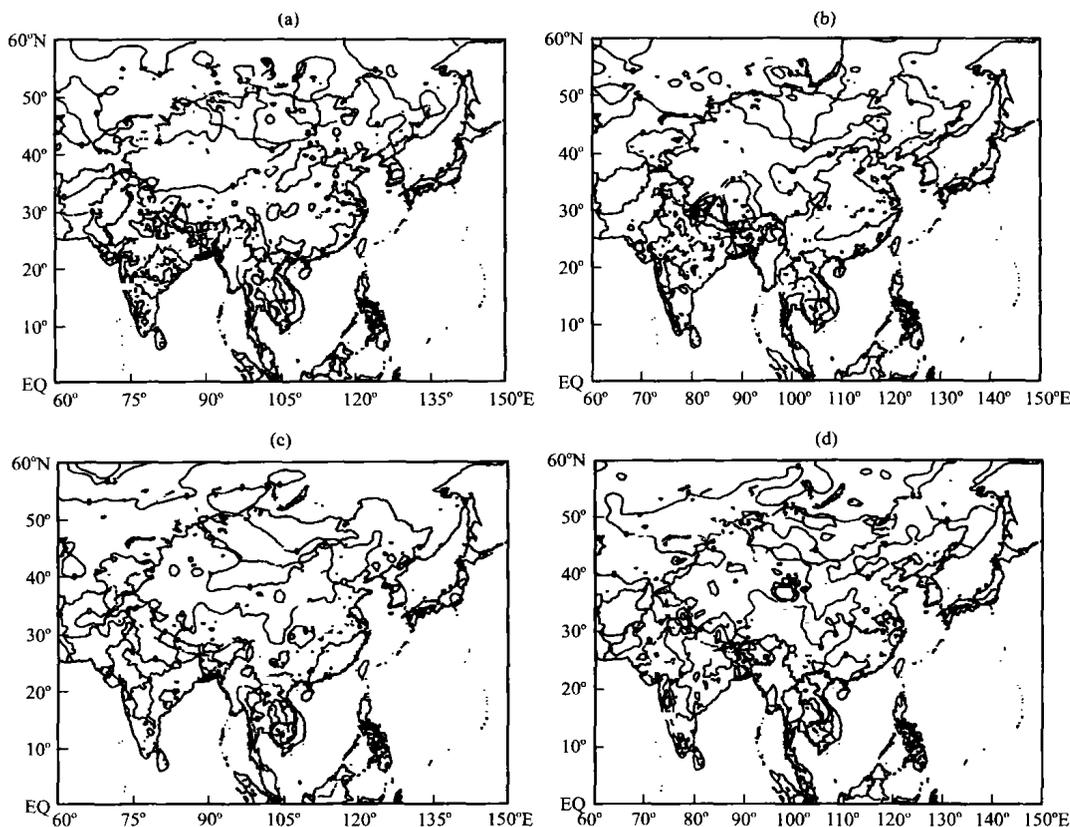


图3 季风指数与陆地降水相关性分析

(a, b, c, d 分别代表印度季风指数、南海季风指数、东亚季风指数、西风指数)

Fig. 3 The correlation between monsoon indexes and precipitation

降水主要集中在夏季, 利用南海季风指数  $WSI^{[1]}$  与陆地降水资料<sup>[1]</sup> 进行相关分析, 得到南海季风强弱与西藏地区东部和喜马拉雅山脉中部关系显著, 与横断山脉具有一定的相关性. 印度季风在春夏季较强, 而东亚季风在夏秋季较强.

### 2.4 西风带控制区

由于青藏高原海拔较高, 阻挡了南边的水汽来源, 所以新疆地区水汽来源主要靠东西方向的水汽输送. 昆仑山和祁连山是青藏高原的北界, 而唐古拉山横亘于青海省和西藏自治区之间, 它是太平洋与印度洋流域的重要分水岭. 唐古拉山的小冬克玛

底冰川, 祁连山的敦德冰帽和西昆仑山的古里雅冰帽所记录的降水量变化趋势一致, 相位不同<sup>[17]</sup>. 利用陆地夏季降水<sup>[1]</sup> 与西风指数<sup>[2]</sup> 进行相关分析, 发现西风指数与中国西北地区的降水具有一定的相关关系.

### 3 大气环流与冰川积累量的关系

迄今为止恢复积累量的冰芯共有 6 支<sup>[3]</sup>: 东绒布冰芯、远东绒布冰芯、达索普冰芯、古里雅冰芯、敦德冰芯、小冬克玛底冰芯. 通过对冰川积累过程中的水汽来源进行分析, 可明确各冰川所携带的气

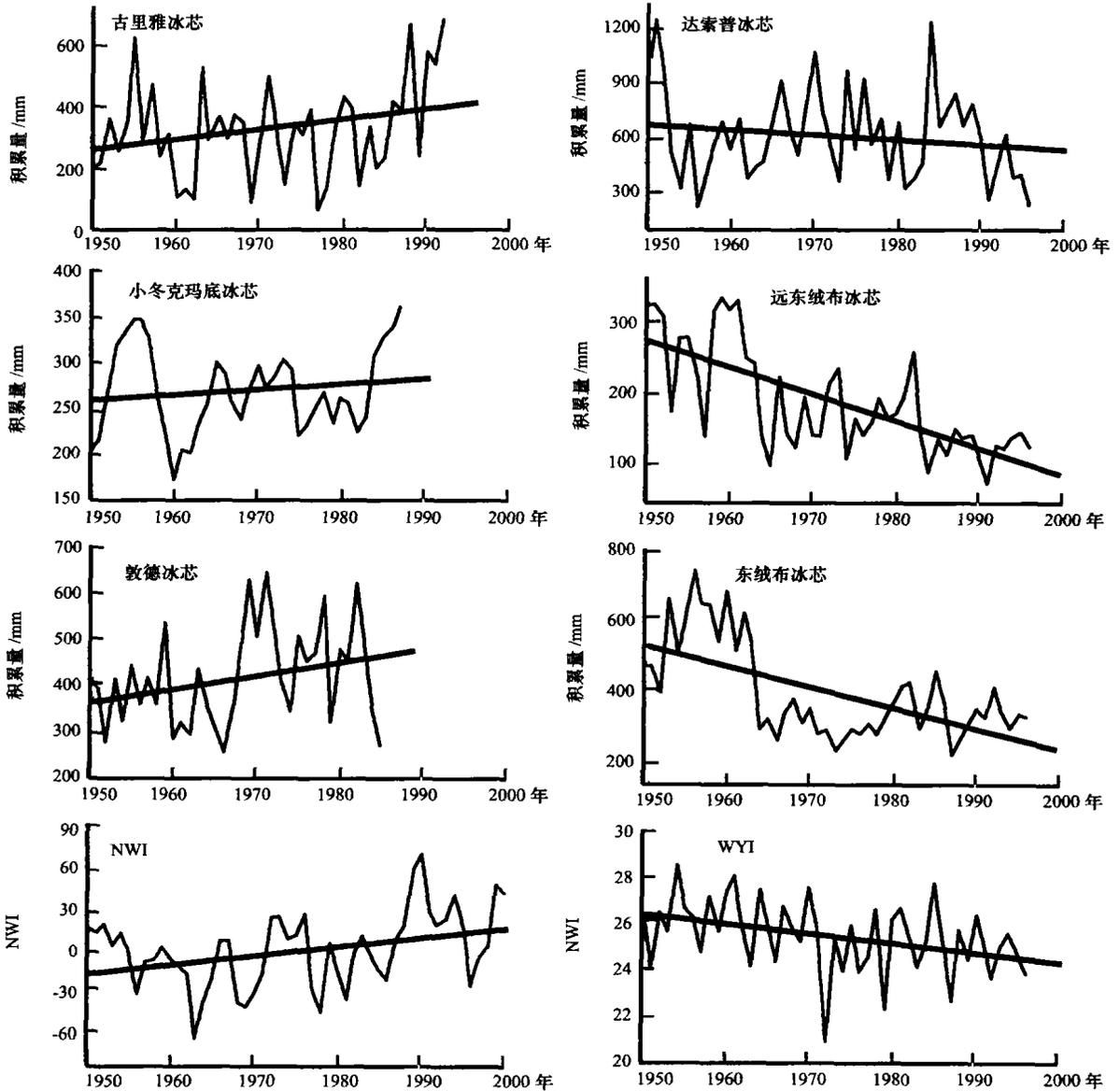


图 4 近 50 a 来冰芯积累量与季风指数关系

Fig. 4 Comparison between the glacial accumulation rates recorded in the ice cores from Guliya ice cap, Xiao Dongkemadi Glacier and Dunde ice cap and the monsoon indexes during the recent 50 years

候信息,通过对冰川和冰芯的研究,更好地恢复过去气候的变化,更深入地领会气候将来的变化趋势.在中国西部地区大气环流受海陆气压差变化的影响,高耸的青藏高原更加大了对其各季节的影响.由于青藏高原在不同季节分别表现为冷源或热源,冷热源的变化在很大程度上对大气高空气流和水汽输送产生重要影响.此外,气温的变化对冰川的积累产生重要影响,通过西南地区6个气象站的温度和降水资料发现,近50 a的气温和降水普遍呈上升趋势<sup>[18]</sup>.冰川积累量总体受气温与降水的共同作用,即在变化上与气温呈反相关,与降水呈正相关,冰川积累对温度的敏感性远大于降水的影响<sup>[19]</sup>.对处于季风区的3支冰川冰芯积累量进行分析,发现冰芯积累量普遍出现了下降趋势;中北部的3支冰芯积累量呈现上升趋势<sup>[3]</sup>.图4反映了季风区冰川和非季风区冰川积累量与季风环流变化趋势.WYI代表的印度季风指数<sup>[20]</sup>在逐渐减弱,季风区达索普冰芯、东绒布冰芯和远东绒布冰芯积累量出现了下降趋势;NWI代表的北半球西风环流指数<sup>[21]</sup>逐渐增强,非季风区的古里雅冰芯、小冬克玛底冰芯和敦德冰芯的积累量出现了增加的趋势.由此可以看出,冰芯积累量变化趋势与控制该地区的季风环流的指数变化趋势具有较好的对应关系,这说明非季风控制区的降水量有增加的趋势,这无疑对中国西北部地区的气候变化产生积极影响.

#### 4 结论

由于季风环流强弱的年际变化,导致控制区域范围的变化,并进一步导致冰川水汽补给的变化.可见冰川水汽来源非常复杂,不同地区各季节存在不同的大气环流控制.这说明不同地理位置的冰川所指示的气候信息是不同的,以 $30^{\circ}\text{N}$ 和 $100^{\circ}\text{E}$ 为界,中国西北部主要受西风环流影响,冰川发育的水汽主要源于西风环流.以横断山脉为界,横断山脉以西,即 $30^{\circ}\text{N}$ 以南和 $100^{\circ}\text{E}$ 以西的区域,主要受印度季风控制,其冰川发育水汽主要源于印度洋、阿拉伯海和孟加拉湾;横断山脉以东区域,受东亚季风控制,冰川发育水汽则主要来源于太平洋和南海;横断山脉、念青唐古拉和青藏高原东部地区受印度季风和东亚季风共同控制,冰川发育水汽主要来源于孟加拉湾和南海.边界附近的冰川变化在冰川与气候变化的研究中具有重要的地位,其具体代表的气候意义需要进一步进行深入研究.通过

对已获得的冰芯积累量资料进行分析,发现冰芯积累量的变化与季风环流指数的变化具有较好的一致性.

#### 参考文献(References):

- [1] Shi Yafeng, Huang Maohuan, Ren Binghui. An Introduction to the Glaciers in China [M]. Beijing: Science Press, 1988. 1—243. [施雅风,黄茂桓,任炳辉.中国冰川概论[M].北京:科学出版社,1988.1—243.]
- [2] Liu Chaohai, Shi Yafeng, Wang Zongtai, *et al.* Glacier resources and their distributive characteristics in China— a review on Chinese Glacier Inventory [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 106—112. [刘潮海 施雅风,王宗太,等.中国冰川资源及其分布特征——中国冰川目录编制完成[J].冰川冻土,2000, 22(2): 106—112.]
- [3] Hou Shuguai, Qin Dahe, Yao Tandong, *et al.* Recent change of the ice core accumulation rates on the Qinghai— Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(20): 1746—1749.
- [4] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimate of the response of glaciers in China to the global warming— up in the 21th Century [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(4): 434—438. [施雅风,刘时银.中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估[J].科学通报,2000, 45(4): 434—438.]
- [5] Zhao Ping, Chen Longxun. The feature of the heat source of atmosphere on the Tibetan Plateau and its relation to the precipitation in China [J]. Science in China (Series D), 2001, 31(4): 327—332. [赵平 陈隆勋.35年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系[J].中国科学(D辑), 2001, 31(4): 327—332.]
- [6] Xie An, Song Yanyun, Mao Jiangyu, *et al.* Climatological characteristics of moisture transport during summer monsoon over South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research, 2001, 6(4): 425—434 [谢安,宋焱云,毛江玉,等.南海夏季季风期间水汽输送的气候特征[J].气候与环境研究, 2001, 6(4): 425—434.]
- [7] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, *et al.* Spatial change of dry and wet climate boundary in China in the recent 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 731—736. [杨建平,丁永建,陈仁升,等.50a来我国干湿气候界线的空间变化分析[J].冰川冻土, 2002, 24(6): 731—736.]
- [8] Wei K, Gasse F. Oxygen isotopes in lacustrine carbonates of West China revisited; implications for post glacial changes in summer monsoon circulation [J]. Quaternary Science Reviews, 1999, 18: 1315—1334.
- [9] Huang Ronghui, Zhang Zhengzhou, Huang Gang, *et al.* Characteristics of the water vapor transport in East Asian Monsoon region and its difference from that in South Asian Monsoon region in Summer [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(4): 460—469. [黄荣辉,张振洲,黄刚,等.夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J].大气科学, 1998, 22(4): 460—469.]
- [10] Shi Neng, Yang Yongsheng. Main characteristics of East Asian summer/winter monsoon index for 1873—1996 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1998, 21(2): 208—214. [施能,杨永胜.1873—1996年东亚冬、夏季风强度指数及其主要

- 特征[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 208—214.]
- [11] <http://www.cdc.noaa.gov/cdo/ncp.reanalysis.derived.table.html>
- [12] Bai Zhaoye, Xu Guochang. The Weather in Northwest China [M]. Beijing: Meteorology Press, 1988. 1—442. [白肇烨, 徐国昌. 中国西北天气[M]. 北京: 气象出版社, 1988. 1—442.]
- [13] Zhang Jijia, Zu Baozhen, Zu Fukang, *et al.* Advance of Meteorology About Tibetan Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1988. 1—268. [章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 青藏高原气象学进展[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 1—268.]
- [14] Lin Zhengyao, Wu Xiangding. A study of the path of vapor transportation in the Tibetan Plateau [J]. Geogr. Res., 1990, 9(3): 33—39. [林振耀, 吴祥定. 青藏高原水汽输送路径探讨[J]. 地理科学, 1990, 9(3): 33—39.]
- [15] Wang B, Fan Z. Choice of South Asian summer monsoon indices [J]. Bult. Amer. Meteor. Soc., 1990, 80: 629—638.
- [16] Yao Tandong, Duan Keqin, Tian Lida, *et al.* Accumulation record of Dapusuo ice-core and the precipitation variety in the Indian summer monsoon covered area in the last 400 years [J]. Science in China (Series D), 2003, 30(6): 619—627. [姚檀栋, 段克勤, 田立德, 等. 达索普冰芯积累量记录和过去 400a 来印度夏季风降水变化[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 30(6): 619—627.]
- [17] Yao Tandong, Jiao Keqin, Yang Meixue. Variation of the Guliya ice core accumulation records during the past 400 a [J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(12): 1161—1165. [姚檀栋, 焦克勤, 杨梅学. 古里雅冰芯中过去 400 a 降水变化研究[J]. 自然科学进展, 1999, 9(12): 1161—1165.]
- [18] He Y, Zhang Z, Wilfred H T. Changing features of the climate and glacier in China's monsoonal temperate glacier region [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D17): 4530—4539.
- [19] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, *et al.* A Summary of 40 year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at headwater of Tirmqi River, Tianshan, China [J]. Journal of glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 117—123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40 年观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117—123.]
- [20] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: selectively interactive systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1992, 118: 877—926.
- [21] Zhang Xiangdong, Zhu Jinhong. Evidences of dominant atmospheric circulation variability in the context of global warming [A]. 13th Symposium on Global Change and Climate Variations [C]. 2002. <http://ams.confex.com/ams/annual2002/techprogram/meeting-annual2002.htm>.

## Accumulation and Moisture Sources of the Glaciers in China

ZHANG Zhong-lin<sup>1, 2</sup>, HE Yuan-qing<sup>1</sup>, PANG Hong-xi<sup>1</sup>, LU Ai-gang<sup>1</sup>, GU Juan<sup>1</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** Using the data of Chinese Glacier Inventory and NCEP/NCAR, the vapor flux and the atmospheric circulations around China, distribution features of glaciers and precipitation patterns in China have been analyzed in this paper. There are various atmospheric circulations controlling the climate in China. Accordingly, the glacier distribution in different regions has been influenced by different climatic conditions. The westerly dominates mainly in Northwest China in the scope of 30°N and 100°E and carries vapors to the glaciers in this region. Southwest China, east to the Hengduan Mountains and north to 30°N, is mainly controlled by the southwest monsoon, which brings moisture to the

glaciers there from Indian Ocean, Arabian Sea and the Bay of Bengal. Southeast China, west to the Hengduan Mountains, is influenced mainly by southeast monsoon, where the vapors to the glaciers, especially to those glaciers on the east slopes of the Hengduan Mountains, come from Pacific Ocean and the South China Sea. Both southwest monsoon and southeast monsoon dominate jointly in the Hengduan Mountains, the Nyainqentanglha Range and the eastern Tibetan Plateau, where the moistures to the glaciers are mainly from the Bay of Bengal and South China Sea. There is a very good accordance between the variations of the accumulation rates and the local summer monsoon indices in various regions.

**Key words:** glaciers in China; monsoon; moisture sources; climatic pattern