# 青藏高原多圈层相互作用观测工程及其应用

马耀明

(中国科学院青藏高原研究所,北京 100101)

[摘要] 青藏高原作为地球的第三极,是“水—冰—气—生”多圈层体现最全,且相互作用最强烈的地区。高原强大的动力和热力作用显著地影响着东亚气候格局、亚洲季风进程和北半球大气环流。全球气候变化不仅影响到青藏高原本身的水圈与冰冻圈过程,改变青藏高原内部的生态系统与环境,影响该地区社会经济发展与人民生存条件,而且通过大气环流与水循环过程直接影响到东亚及周边国家的用水安全和自然灾害防护。正确认识青藏高原复杂地表多圈层相互作用规律的一条有效途径是在各种不同的下垫面上建立多圈层相互作用综合观测站(点)。在中国科学院和国家相关部门的支持下,过去的7年中,中国科学院青藏高原研究所与其他相关单位一道正在整个青藏高原面上逐步建立“青藏高原观测研究平台”以研究该地区复杂地表的多圈层相互作用规律。首先具体介绍中国科学院青藏高原研究所在高原上已经建立的5个综合观测研究站,然后介绍利用各个站点观测资料分析得到的多圈层相互作用(主要是地气相互作用)的研究结果,最后提出了青藏高原多圈层相互作用观测试验研究所面临的难题和可能的解决办法。

[关键词] 青藏高原;多圈层相互作用过程;观测结果

[中图分类号] P42 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)09-0028-07

## 1 前言

青藏高原素称地球的“第三极”[1],平均海拔高度达4 000 m以上,是世界上平均海拔最高的高原;东西跨度超过25个经度。地形独特、海陆作用强烈、大气环流复杂,造成青藏高原地区具有特殊的大气过程、水循环过程、生态过程和社会经济效应。这些特征使得青藏高原不仅是全球气候变化的敏感指示器,而且也决定了青藏高原以独特的方式响应全球气候变化。但这些独特的大气过程、水循环过程与生态过程,特别是对当前全球气候变化的响应,有待于深入的认识。此外,青藏高原还是研究气候水文生态过程的天然实验室。由于受人类活动影响相对较少,各种自然过程相对易于辨识,青藏高原成为开展多尺度、多要素综合研究的理想场所。青藏高原强大的动力和热力作用,显著地影响着高原内部的水圈与冰冻圈过程,改变青藏高原内部的生态系统与环境,影响该地区社会经济发展,同时影响着东亚气候格局、亚洲季风进程和北半球大气环流[2~5]。全球气候变化不仅影响到青藏高原的环境与人民生存条件,而且通过大气环流与水循环过程直接影响到东亚及周边国家的用水安全和自然灾害防护。

国内外科学家从20世纪50年代开始即认识到青藏高原对我国、东亚乃至整个北半球的气候环境有着非常重要的影响,在青藏高原地区开展了一系列大规模的针对高原地表过程与气候环境变化的综合观测试验研究[6~21],并且利用这些试验和科学考察的观测资料,通过资料分析、数值模拟和卫星遥感等方法,在青藏高原多圈层相互作用规律研究等方面已取得了一系列非常有意义的研究成果[6~21]。

然而,青藏高原本身是由“高原草甸、荒漠草原、高原湿地、高原农田、高原林地、冰川、雪山及高原湖泊”等具有多种不同下垫面特征的不同尺度大小的地理子系统构成的。这种复杂的多系统组成的

[收稿日期] 2012-06-25

[基金项目] 全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB951701);国家自然科学基金(40825015)

[作者简介] 马耀明(1964—),男,山西夏县人,研究员,主要研究方向为大气边界层观测与卫星遥感研究;E-mail:ymma@itpcas.ac.cn

下垫面结构会造成大尺度模式网格点上的非均匀性,需要由一些单点试验来推出网格点上的有效陆面过程参数。但是,以往所有的青藏高原多圈层相互作用观测研究均不是同时针对这些“高原草甸、荒漠草原、高原湿地、高原农田、高原林地、冰川、雪山及高原湖泊”等整个高原的不同下垫面的,故在其观测方案设计和观测项目等的设置上均未充分体现高原整体的特点,而且绝大部分观测试验都是在夏季进行的。也就是说,对“高原草甸、荒漠草原、高原湿地、高原农田、高原林地、冰川、雪山及高原湖泊”等各种子系统与大气之间等关键界面上的多圈层相互作用过程缺乏同步的、全面系统的、精细而定量的观测研究。

特别值得一提的是,联合国有关组织统计的1947—1980年全球造成人员死亡的10种严重自然灾害中,有5种是气象因素直接引起的灾害,3种主要是由气象因素引发的。在我国,气象灾害所造成的经济损失约占整个自然灾害经济损失的70 %以上(见图1,来源于 http://zwgk.cma.gov.cn/web/showsendinfo.jsp? id=1169)。青藏高原是我国自然灾害频发区,干旱、雪灾、洪涝、大风、雷电、冰雹等自然灾害尤为多发。更为关键的是,迄今为止,气候系统内部各圈层之间存在的复杂作用与反馈过程并没有完全弄清楚,需要科学的多圈层系统观测数据予以支撑。因此,在青藏高原腹地建立综合观测站是当务之急,观测站的建立将为青藏高原地区的天气预报和防灾减灾工程做出重要贡献。

鉴于此,在中国科学院和国家相关部门的支持下,过去的7年多时间里,中国科学院青藏高原研究所与其他相关单位一道正在整个青藏高原面上逐步建立“青藏高原观测研究平台”以研究该地区复杂地表的多圈层相互作用规律。

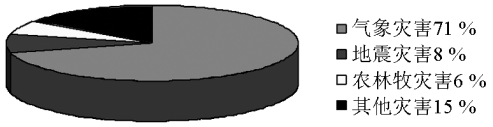



图1　主要自然灾害经济损失比例

**Fig. 1　The proportion of economic loss caused by major natural disasters**

文章首先具体介绍中国科学院青藏高原研究所在高原上已经建立的5个综合观测研究站,然后介绍利用各个站点观测资料分析得到的多圈层相互作用(主要是地气相互作用)的研究结果及应用实例,最后提出了青藏高原多圈层相互作用观测试验研究所面临的难题和可能的解决办法。

## 2　青藏高原多圈层综合观测研究台站介绍及数据采集流程

在中国科学院、中华人民共和国科学技术部、中国气象局、国家林业局、中华人民共和国教育部和西藏自治区人民政府等单位的支持下,在青藏高原的不同下垫面上正逐步建立“青藏高原观测研究平台”(TORP)以研究该地区复杂地表的多圈层相互作用规律(见图2)。中国科学院青藏高原研究所在TORP中所建立的5个综合观测研究站分别是中国科学院

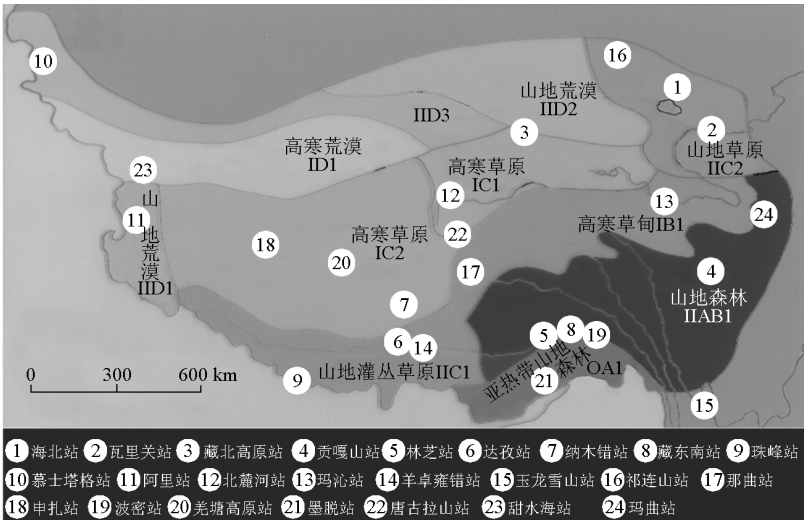
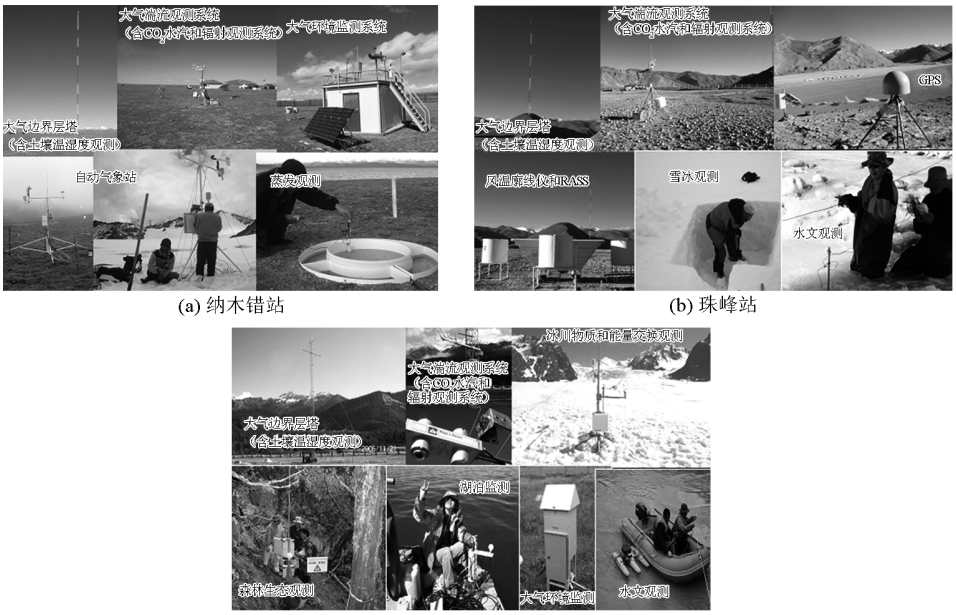



图2　青藏高原观测研究平台的综合观测研究台站分布

**Fig. 2　The stations layout on the TORP**

纳木错多圈层综合观测研究站(纳木错站)、中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站(珠峰站)、中国科学院藏东南高山环境综合观测站(林芝站)、中国科学院青藏高原研究所阿里荒漠环境综合观测研究站(阿里站)和中国科学院青藏高原研究所慕士塔格西风带环境综合观测研究站(慕士塔格站)。

纳木错站(30.77 °N,90.99 °E,海拔4 730 m)位于西藏当雄县纳木错乡纳木错湖东南岸,背靠念青唐古拉山脉雪峰,站本部建在高寒草甸下垫面上,观测仪器设置涵盖了高寒草甸、高原湿地、冰川、雪山及高原湖泊等下垫面类型(见图3a);珠峰站(28.21 °N,86.56 °E,海拔高度4 276 m)位于西藏定日县扎西宗乡巴松村,距珠峰登山大本营30 km,站本部下垫面为高山戈壁(内有稀疏草分布),观测仪器设置涵盖了高山戈壁、高寒草甸、冰川及雪山等下垫面类型(见图3b);林芝站(29.77 °N,94.73 °E,海拔3 324 m)位于西藏林芝县鲁朗镇北6 km 318国道西侧,距林芝地区首府八一镇75 km,下垫面为林间草地(见图3c),观测仪器设置涵盖了草地、高原林地、高原湿地、冰川、雪山及高原湖泊等下垫面类型;慕士塔格站(38.41 °N,75.04 °E,海拔3 660 m)位于新疆阿克陶县布伦口乡苏巴什村中巴国际公路1 662 km处,距离喀什市约190 km,下垫面为高寒荒漠(图略),观测仪器设置涵盖了高寒荒漠、高寒草甸、冰川、雪山及高原湖泊等下垫面类型;阿里站(33.39 °N,79.70 °E,海拔4 264 m)位于西藏日土县城以西约3 km处,下垫面为高寒荒漠草原(图略),观测仪器设置涵盖了高寒荒漠草原、高山戈壁、冰川、雪山及湖泊等下垫面类型。各站的多圈层相互作用过程主要观测仪器见表1。




(a) 纳木错站　(b) 珠峰站　(c) 林芝站

图3　纳木错站、珠峰站及林芝站地表状况及部分仪器设置

**Fig. 3　The instruments layout in the Nam Co Station, Qomolangma Station and Linzhi Station**

表1　综合观测研究台站的多圈层相互作用主要观测仪器设置

**Table 1　The main instruments in the comprehensive observation and research stations**

| 观测系统 | 布设站点 | 观测内容 |
|---|---|---|
| 大气边界层塔 | 珠峰站、纳木错站、林芝站 | 5层(20 m、10 m、4 m、2 m、1 m)风速、风向、空气温度及相对湿度;气压、地表温度、降雨量、短波向下和长波向上辐射;5层(-10 cm、-20 cm、-40 cm、-80 cm、-160 cm)土壤温湿度;2层(-10 cm、-20 cm)土壤热通量 |
| 大气湍流系统及辐射系统 | 珠峰站、纳木错站、林芝站、阿里站、慕士塔格站 | 风速、气温及湿度脉动量、感热及潜热通量;风速、温度及湿度的特征量 $CO_2$ 和水汽通量及稳定度参数;4分量辐射通量 |
| 自动气象站 | 阿里站、慕士塔格站 | 2 m风速、风向、空气温度及相对湿度;气压、地表温度、降雨量;4层(-5 cm、-20 cm、-60 cm、-100 cm)土壤温湿度;4分量辐射通量 |
| 无线电探空系统 | 珠峰站 | 0~15 000 m高空的风速廓线、温度廓线及湿度廓线 |

续表

| 观测系统 | 布设站点 | 观测内容 |
| --- | --- | --- |
| 风温廓线仪 | 珠峰站 | 风速廓线(风廓线雷达),包括水平风速、垂直风速和3个径向多普勒速度的垂直分布;温度廓线,包括虚温和垂直速度的垂直分布 |
| 气溶胶采样仪 | 珠峰站、纳木错站、林芝站、阿里站、慕士塔格站 | 大气气溶胶含量 |
| 自动水位计、机械式流速仪 | 珠峰站、纳木错站、林芝站、阿里站、慕士塔格站 | 河流及湖泊水位;河流流速 |
| 冰川蒸汽钻、差分GPS、冰川测厚雷达 | 珠峰站、纳木错站、林芝站、阿里站、慕士塔格站 | 冰芯钻取;冰川厚度变化;冰川厚度 |

截至目前,“青藏高原观测研究平台”仪器运行正常。所有这些野外台站的大气观测均实现了自动采集(见图4),野外台站探头实时采集数据都是通过数据采集器来收集,利用一定内存空间实现数据的临时存储,一段时间后,科研人员现场收集下载临时存储的数据,最后把数据存储到计算机中,以实现数据保存、分发和后期分析。

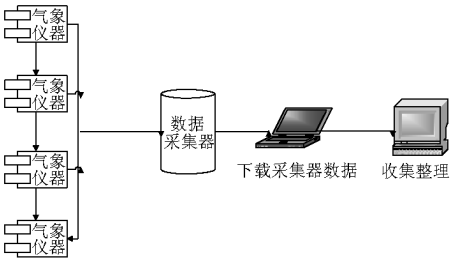



图4　青藏高原观测研究平台数据处理技术流程

**Fig. 4　Technical processes of the TORP**

## 3　观测系统在科学与社会经济发展中的重要作用

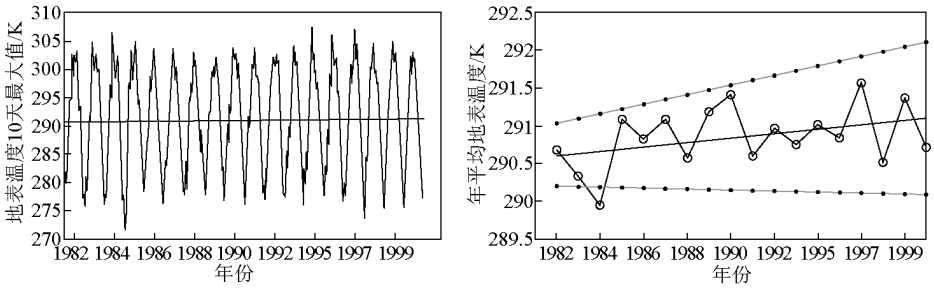
利用珠峰站平台,为2005年珠峰登顶及复测提供了强有力的科学探测数据。在珠峰大本营,择机释放了可达20 000 m高空的探测气球。高空探测气球带着无线电探空仪器缓缓升起,随后每10 s传回一组数据。30 min后,气球上升到8 848 m,此时显示的珠峰顶部的气象数据为大气压342 hPa,相当于北京的1/3,风力8.5级,温度-28 ℃。综合数据显示,该时段不适合登顶。这种探测气球直接获取从珠峰大本营到20 000 m高空的风力、风向、温度等大气物理参数的垂直分布,详实的探空数据为登山队员择机安全登顶提供了有力的支持。

新华网2004年9月4日报道了青藏铁路沿线温度变化的规律,这项研究成果有助于解决青藏铁路建设中存在的冻土难题(见http://news.xinhua-net.com/)。气象专家解释说,青藏铁路沿线海拔落差2 000多米,沿途要穿越昆仑山、唐古拉山和念青唐古拉山,温度变化非常复杂。而长期以来冻土问题一直是青藏铁路建设中的重大难题,给青藏铁路路基的设计和保护增加了难度。弄清楚青藏铁路沿线的温度变化规律,就可以得到宝贵的理论和数据依据,对青藏铁路的设计施工及青藏高原的生态环境保护都具有重大的决策参考价值。

2009年2月,国务院审议并通过了《西藏生态安全屏障保护与建设规划》,包括天然草地保护、森林防火及有害生物防治、野生动植物保护及保护区建设、重要湿地保护、农牧区传统能源替代、防护林体系建设、人工种草与天然草地改良、防沙治沙、水土流失治理和生态安全屏障监测等工程。中国科学院在西藏的纳木错站、珠峰站、林芝站和阿里站全部纳入生态安全屏障监测工程台站体系。这必将为西藏生态安全屏障体系建设,特别是生态屏障的工程建设效益评估、生物和旅游资源的保护及区域可持续发展做出贡献。

青藏高原多圈层相互作用观测工程及其应用,正是结合中国科学院青藏高原研究所“青藏高原观测研究平台”在不同下垫面上设置的大气和土壤等方面的观测试验资料,研究青藏高原不同下垫面上地表参数(如:地表温度、地表反照率、土壤湿度和地表通量等),从而为改善大气环流模式中青藏高原地区陆面过程参数化方案提供依据,对提高青藏高原及其临近地区气候和亚洲季风形成、演化的研究水平,提高青藏高原及其临近地区天气和气候预报的准确性有所贡献。尤其是对西藏地区的天气预报及其气候预测做出实质性的贡献,对西藏高原的防灾减灾发挥积极作用。

结合“青藏高原观测研究平台”野外观测数据,笔者等利用AVHRR(advanced very high resolution radiometer,高级甚高分辨率辐射仪)遥感资料计算了1982—2000年青藏高原的地表温度变化[22],得出结论为:青藏高原10年的地表温度增温变率为0.26±0.16 K,空气温度10年的变率为0.29±0.16 K(见图5,其中实线代表线性拟合结果,点线代表95 %置信水平)。众所周知,青藏铁路路基对温度十分敏感,而笔者等这项结论对青藏铁路路基在气候变暖背景下的稳定性有着重要的参考价值。




(a) 1982—2000年青藏高原地表温度10天最大值合成时间序列

(b) 1982—2000年青藏高原年平均地表温度时间序列

图5　青藏高原地表温度的时间变化趋势

**Fig. 5　Temporal variations of land surface temperature over the Tibetan Plateau**

## 4　观测资料的初步分析

2005 年以来,中国科学院青藏高原研究所的科学家和工程技术人员在自然条件十分艰苦的青藏高原努力工作,获取了大量的多圈层相互作用连续观测资料。分析这些观测资料,笔者等得出以下一些初步的结果。

1)青藏高原的太阳辐射加热(包括向下的总辐射通量和净辐射通量)明显比其他地区强,总辐射通量经常有超太阳常数现象出现。珠峰站、纳木错站、林芝站、慕士塔格站和阿里站观测到的感热通量、潜热通量和地表向下的热通量三者很难与净辐射通量平衡,余差可达后者的 10 % ~20 %,甚至更高,估计是因为观测仪器(特别是潜热通量测量仪器)的测量误差影响和高原普遍存在的平流作用。高原上的季风约在 6 月中旬开始,9 月中旬结束。季风开始前, 地面感热通量大于潜热通量。此后,特别是在 7—8 月份, 潜热通量约为感热通量的两倍。

2)青藏高原地区地面为强热源,夜晚为弱冷源,而日平均仍为强热源。即早上日出后地面加热场逐渐加强,在中午 14:00(北京时间,下同)左右加热强度最大,而后逐渐减弱,傍晚日落以后地面就转换成冷源。就全年而言,夏季的加热场强度明显大于冬季。

3)在珠峰北坡地区,Monin-Obukhov 相似定律同样适用。拟合得到了珠峰北坡曲宗地区近地层无因次风速分量方差以及温度和湿度归一化标准差和静力学稳定度的函数关系。珠峰的曲宗地区能量平衡各分量(净辐射通量、感热通量、潜热通量和土壤热通量)以及地面加热场具有明显的季节变化和日变化规律。尤其是在西南季风的影响下,曲宗地区感热通量和潜热通量在季风爆发前后具有明显相反的变化趋势。其他特征参数(波文比和地表反射率)在西南季风爆发前后的变化规律也十分明显。

4)大气边界层结构日变化明显,白天混合层发展,可达地面 2 000 m 以上。对高原干、湿季的转换及其边界层特征而言,湿季的形成与大气环流密切相关,高空副热带西风急流带北移和西南及东南季风气流对水汽的输送是湿季形成的必要条件。在干季里,藏北高原空气干燥、温度高,大气边界层高度最高可发展到 3 550 m 左右,地—气能量交换以感热通量为主,并有逆湿现象;在湿季里,空气潮湿、温度较低、大气边界层高度很少能发展到 2 300 m 左右,地—气能量交换中潜热通量明显增加。青藏高原珠峰和改则地区都有明显的常位温层存在。

5)用不同方法求得了青藏高原地面阻曳系数 $C_D$、感热和潜热通量整体输送系数 $C_H$ 和 $C_q$、动力学粗糙度 $z_{0m}$、热力学粗糙度 $z_{0h}$ 及热输送附加阻尼 $kB^{-1}$ 等地表特征参数。发现热量总体输送系数 $C_H$ 明显大于动量总体输送系数(地面阻曳系数 $C_D$),动力学粗糙度 $z_{0m}$ 比热力学粗糙度 $z_{0h}$ 大一个量级。青藏高原热输送附加阻尼 $kB^{-1}$ 有明显的变化趋势。所以在高原卫星遥感参数化方案和数值模式中不能将其当作常数,而应在不同时次输入不同的值。

6)整个青藏高原地区区域上的地表反射率、地表温度、净辐射通量、土壤热通量、感热通量、潜热通量和地面加热场分布具有明显的地域差异和季节变化特征,这与青藏高原的复杂下垫面分布相关。

7)青藏高原土壤温度变化有明显的特点。该地区近地表层地温既受区域性因素(高度、经度、纬度)控制,同时又受局地因素的影响。也就是说,高原稀疏植被地表比裸地地温高,短期薄层雪盖起到了降低地温的作用,青藏高原不同地点、不同深度土

壤温度随时间的变化可能与降雪、反照率、长波辐射、凝结潜热等的反馈过程及土壤湿度有关。由于土壤湿度等的影响,较潮湿的地方下层土壤从开始冻结到完全冻结需要一个较长的时间。在藏北高原地下 40 cm 以上土壤温度均存在着明显的时间变化,其变化为正弦曲线,与太阳辐射的时间变化一致,但存在着不同的时间滞后。地表状况、土壤干湿程度及土壤组分等的差异对土壤温度的时间变化振幅及热通量有影响。同时认为在青藏高原,由于挖坑埋设探测仪器等对土壤温度场的扰动可在 5 天左右的时间内基本消除。

8)采用涡度相关法对珠穆朗玛峰北坡高寒草甸生长季(2005 年 5—7 月、10、11 月)与非生长季(2006 年 2 月、3 月)的 $CO_2$ 通量进行观测。结果表明,在生长季 $CO_2$ 通量存在明显的日变化,08:00—19:00 为 $CO_2$ 净吸收,20:00 至次日 9:00 为 $CO_2$ 净排放。6 月,$CO_2$ 通量峰值出现在 11:00 左右,为 $-0.61\ g\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$;7 月,$CO_2$ 通量峰值出现在 14:00,达到 $-0.86\ g\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$。从月变化来看,5 月为 $CO_2$ 净排放,月总量为 $89\ g\cdot m^{-2}$;6 月和7 月均为 $CO_2$ 净吸收阶段,月吸收总量分别为 $70\ g\cdot m^{-2}$、$104\ g\ m^{-2}$;10 月植物枯黄,生态系统转为碳排放,月排放量约为 $50\ g\ CO_2\ m^{-2}$,与次年3 月份月总量($52\ g\ CO_2\ m^{-2}$)接近;11 月与次年2 月的月排放量接近(分别是 $23\ g\ CO_2\ m^{-2}$、$25\ g\ CO_2\ m^{-2}$)。非生长季(2 月)$CO_2$ 通量日变化振幅很小,除 14:00—19:00少量的 $CO_2$ 净排放外($0.14\ g\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$左右),其余时间 $CO_2$ 通量接近于零。

9)在整体升温的背景下,青藏高原纳木错流域冰川整体呈退缩趋势,1970—2007 年,流域内冰川面积减少 $37.1\ km^2$,占流域冰川面积的 18.2 %,变化率为 $-1.0\ km^2/a$。在冰川面积减少的同时,纳木错湖的面积却增加了 $72.6\ km^2$,增加速率为 $2.0\ km^2/a$。纳木错湖泊水位在夏季升高非常显著,与湖泊面积的扩张是一致的[23]。

10)藏东南许多海洋性冰川表面覆盖有表蹟物。观测分析发现,该地区冰川消融约在厚度为 1 cm时最大,当表蹟物厚度小于 4 cm 时起到促进消融的作用,而大于此值时则会抑制冰体消融,表蹟物厚度大于 15 cm 以后消融较弱,冰川表面日均消融率为 9.6 ~ 51.7 mm/d[24]。

## 5 结语

首先介绍了 TORP 建立的背景和台站分布,然后详细介绍了中国科学院青藏高原研究所在青藏高原地区已经建立的 5 个综合观测研究站、各个台站的数据采集流程、观测平台典型的应用成果和观测系统在科学与社会经济发展中的重要作用。最后利用各个站点观测资料和卫星遥感资料等分析得到多圈层相互作用(主要是地气相互作用)的研究结果。这些结果为在这一地区进行高原本身气候系统多圈层相互作用变化研究及其对东亚和南亚的影响研究提供了一些较为有用的基础认识。

但是青藏高原是由“高原草甸、荒漠草原、高原湿地、高原农田、高原林地、冰川、雪山及高原湖泊”等各种下垫面所组成,已经建立的多圈层相互作用观测台站只是代表了其中的某几种下垫面,而且已经建立的台站还只是选在地形相对较为平坦开阔、海拔相对较低的地方,其代表性仍有待探讨。要解决这一问题,还需建立更多的综合观测研究台站,然而这在自然条件十分艰苦的青藏高原,其难度可想而知。

另外,文章利用点上观测计算得到的 $C_D$、$C_H$、$z_{0m}$、$z_{0h}$、$kB^{-1}$等地气相互作用参数,各个台站能量通量分布规律,流域水文及冰川变化特征等,它们具体在整个高原上区域代表性如何?如何将其应用到模式中?青藏高原复杂地形组成的各个气候小系统之间的多圈层相互作用过程如何观测?它们之间相互作用又是如何影响高原本身和周边天气和气候的?这些问题都有待进一步深入探讨。要想真正理解整个青藏高原气候系统多圈层相互作用规律,仍然有很长的路。

致谢:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所马伟强副研究员、中国科学技术大学仲雷副教授在成文过程中做了大量的工作,特此感谢。

参考文献

[1] Qiu J. The third pole[J]. Nature, 2008, 454(24):393 - 396.

[2] 叶笃正,高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979:1 - 278.

[3] 周明煜,徐祥德,卞林根,等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究[M]. 北京:气象出版社,2000:1 - 97.

[4] Wu G, Zhang Y. Tibetan Plateau forcing and timing of the monsoon onset over south Asia and the south China sea[J]. Month Weather Review,1998,126(4):913 - 927.

[5] Ma Y, Zhong L, Su Z, et al. Determination of regional distributions and seasonal variations of land surface heat fluxes from Landsat-7 enhanced thematic mapper data over the central Tibetan Plateau area[J]. Journal of Geophysics Research-Atmospheres,

2006, 111, D10305, doi: 10.1029/2005JD006742.
[6] 叶笃正,高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979:89-101.
[7] Yanai M, Li C. Mechanism of heating and the boundary layer over the Tibetan Plateau[J]. Month Weather Review, 1994, 122(2): 305-323.
[8] 孙鸿烈,郑 度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州:广东科技出版社,1998:1-357.
[9] 徐祥德,周明煜,陈家宜,等. 青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图[J]. 中国科学(D辑),2001,31(5):428-440.
[10] 卞林根,陆龙骅,逯昌贵,等. 1998年夏季青藏高原辐射平衡分量分析[J]. 大气科学,2001, 25(5):577-588.
[11] 陶诗言,陈联寿,徐祥德,等. 第二次青藏高原大气科学实验理论研究进展[M]. 北京:气象出版社,1999:1-14.
[12] Li W, Chen L. Characteristics of the seasonal variation of the surface total heating over the Tibetan Plateau and its surrounding area in summer 1998 and its relationship with the convection over the subtropical area of western pacific[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(3):343-348.
[13] Ma Y, Ishikawa H, Tsukamoto O, et al. Regionalization of surface fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using satellite remote sensing[J]. J Meteor Soc Japan, 2003, 81(2): 277-293.
[14] 吴国雄,毛江玉,段安民,等. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展[J]. 气象学报,2004, 62(5):528-540.
[15] 郑 度,姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应[M]. 北京:科学出版社,2004:1-564.
[16] 李跃清. 青藏高原气象学研究文集[M]. 北京:气象出版社,2004.
[17] 吴国雄,刘屹岷,刘 新,等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局[J]. 大气科学,2005,29(1):47-56.
[18] 马耀明,姚檀栋,王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展[J]. 高原气象,2006,25(2):344-351.
[19] 郑 度,姚檀栋. 青藏高原隆升及其环境效应[J]. 地球科学进展,2006,21(5):451-458.
[20] 余武生,田立德,马耀明,等. 青藏高原降水中稳定氧同位素研究进展[J]. 地球科学进展,2006,21(12):1314-1323.
[21] Ma Y, Zhong L, Wang B, et al. Determination of land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using the MODIS and in-situ data[J]. Atmos Chem Phys, 2011, 11: 10461-10469, doi: 10.5194/acp-11-10461-2011.
[22] Zhong L, Su Z, Ma Y, et al. Accelerated changes of environmental conditions on the Tibetan Plateau caused by climate change[J]. Journal of Climate, 2011, 24(24): 6540-6550.
[23] 陈 峰,康世昌,张勇军,等. 纳木错流域冰川和湖泊变化对气候变化的响应[R]. 拉萨:中国科学院纳木错多圈层综合观测研究站,2008:45-51.
[24] 杨 威,姚檀栋,徐柏青,等. 表蹟对藏东南海洋性冰川消融和物质平衡的影响[R]. 林芝:中国科学院藏东南高山环境综合观测站,2008:149-158.

# The observation of water-ice-air-ecosystem interactions and its application over the Tibetan Plateau area

Ma Yaoming
(Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

[**Abstract**] The Tibetan Plateau, with the most prominent and complicated terrain on the globe and an elevation of more than 4 000 m on average above sea level, is often called the "Third Pole". Due to its topographic character, the plateau surface absorbs a large amount of solar radiation energy (much of which is redistributed by cryospheric processes), and undergoes dramatic seasonal changes of surface heat and water fluxes. Like the Arctic and Antarctica, the Tibetan Plateau area is one of the most sensitive areas responding to global climate change due to its high altitude and the presence of permafrost and glaciers, which are most sensitive to global warming. The effective way to understand water-ice-air-ecosystem interactions over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau is to establish the comprehensive research stations over the different land surfaces of the Tibetan Plateau. With support from various agencies in the People's Republic of China, the Tibetan Observation and Research Platform (TORP) is now implementing. Firstly, 5 comprehensive observation and research stations established by the Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, are introduced. Then the preliminary observational results are shown in the paper. Finally, the difficulty in observation and study of water-ice-air-ecosystem interactions of the Tibetan Plateau and the possible solutions are presented.

[**Key words**] Tibetan Plateau; water-ice-air-ecosystem interactions; preliminary observational analysis results