

# 气候变化与青藏高原工程设计

任国玉

(中国气象局气候研究开放实验室,国家气候中心,北京 100081)

[摘要] 最近半个世纪,青藏高原地面气候发生了一定变化,主要表现在地面平均气温明显上升,冬季、夜间和城镇区域气温上升尤其显著,多数地区降水量呈现不同程度增加。气候变暖对高原地区自然和人类系统产生了一定影响。预计未来青藏高原气候总体将继续趋向变暖,这可能对冰冻圈、河湖系统、陆地植被、农业自然条件、能源气候资源、交通和水利设施、城镇人居环境等产生明显影响。与生态保护和经济社会发展有关的各类大型工程的规划、设计和维护,需要考虑今后气候变化的可能影响,及早制定可行的适应性措施。

[关键词] 气候变化;适应;生态;环境;工程设计;青藏高原

[中图分类号] P46 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)09-0089-07

## 1 前言

青藏高原主要包括西藏自治区和青海省,也包含陇西南、川西和滇西北等面积不大的区域,平均海拔超过 4 000 m,具有独特的气候、地貌、水文和生物系统等自然地理条件<sup>[1,2]</sup>。

研究表明,过去半个多世纪青藏高原地面气候经历了较明显的变化,主要表现为气温显著上升,多数地区降水量有所增加,日照时间、平均风速和潜在蒸发量等也出现一定程度的改变<sup>[3-8]</sup>。尽管在增温速率、气候明显变暖的起始时间、降水增加的显著性、气候变化的原因以及其他相关科学问题上仍存在争议,但气候变暖的事实及其潜在影响已引起各方面的关注。从工程设计和建设的角度看,需要对青藏高原地区气候变化的趋势有充分了解,以便未雨绸缪,及早制定适应性规划和技术应对方案。

文章依据已有的研究发现和结论,总结归纳有关青藏高原地区气候变化的观测事实、原因和未来

可能趋势的科学认识,提出气候变化对本区工程建设和设计的可能影响,探讨工程领域应对气候变化影响的概念性适应框架。

## 2 青藏高原气候变化趋势

早期研究指出,最近半个世纪内青藏高原地区的气候变暖趋势比全国和全球平均显著<sup>[2,9-11]</sup>,而且明显变暖开始的时间也比我国东部地区早<sup>[9,12]</sup>。研究还认为,至少最近 50 年青藏高原和中国地区的气候变暖可能主要是大气中温室气体浓度增加引起的,未来地面气温还将继续上升<sup>[13-16]</sup>。伴随着地面气候变暖,青藏高原降水量也出现一定程度变化,多数地区趋于增加,致使气候具有向暖湿方向演化的特征<sup>[11,17-21]</sup>。

近年来利用更加完整观测资料的分析研究,一般证实了以上结论,但也发现了若干不同于原先报告的特征现象。表 1 总结了青藏高原近半个世纪地面气温和降水变化的主要特征。

[收稿日期] 2012-06-25

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑项目课题(2007BAC29B02);公益性行业专项资助(200801001 和 201206024)

[作者简介] 任国玉(1958—),男,辽宁沈阳市人,研究员,主要研究方向为气候变化与古气候;E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

表 1 1951—2004 年青藏高原气候变化主要观测事实

Table 1 Observed trends of surface air temperature and precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau during 1951—2004

气候指数	变化趋势	信度
平均气温	明显增加,年平均增暖速率为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;冬、秋季增温明显,最低气温上升明显,近20年来变暖更显著,东北部变暖较多,东南有降温现象	很高
最高气温、极端最高气温	增加不明显,20世纪90年代中以来有增温趋势;增暖主要发生在西北部,东南部和极西部出现降温现象	较高
最低气温、极端最低气温	非常明显增加,平均最低气温增加速率达到 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,主要增温在东部;极端最低气温增加速率高达 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,主要发生在东北、东南部和柴达木盆地	较高
降水量	多数台站增加10%左右,南部增加明显;近20年来增势趋缓,波动增大;冷季增多明显;夏季黄河源区减少	高

在地面气温变化上,新的发现包括以下几点。

1) 过去 50 余年青藏高原的年平均气温上升速率与全国平均比较没有显著差异。例如, 1951—2004 年间青藏高原地区年平均气温上升幅度为  $0.93\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均增温速率为  $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 均比同期全国平均略小(见图 1, 其中实曲线为 11 点滑动平均, 虚直线为线性趋势, 趋势线的斜率  $k=0.173$ , 青藏高原定义为海拔 3 000 m 等高线包围的区域)。

最近 50 多年高原地区年平均地面气温上升趋势以西藏中南部和青海西北部为最高, 强于全国平均水平, 但高原的东南部区域升温趋势很弱, 部分地点甚至存在降温现象<sup>[18]</sup>。青藏高原作为一个整体, 过去半个多世纪年平均地面气温增加速率与全国平均差异不明显。如果剔除同期至少 23% 的城市化增温影响偏差<sup>[22]</sup>, 青藏高原实际年平均地面气温增加速率应当低于  $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 可能小于同期全球和中国平均增温速率。

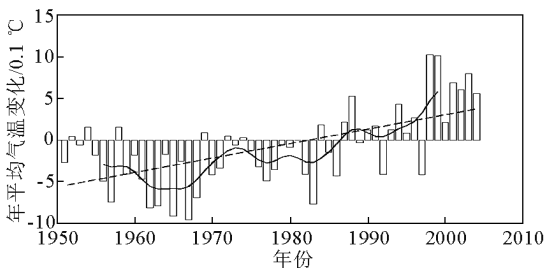


图 1 1951—2004 年青藏高原年平均气温距平变化

Fig. 1 Region-averaged annual mean temperature anomalies over the Qinghai-Tibet Plateau during 1951—2004

2) 青藏高原地面气温上升具有明显的季节性(见图 2, 其中实曲线为 11 点滑动平均, 虚直线为线性趋势,  $k$  为趋势线的斜率, 青藏高原定义为海拔 3 000 m 等高线包围的区域)。暖季升温没有冷季明

显, 这个特点和全国其他地区一致。但是, 不同于其他地区, 青藏高原地面气候变暖主要发生在冬季和秋季, 春季变暖较弱<sup>[23]</sup>, 又体现出一定的特殊性。

造成春季变暖不很明显的原因, 可能主要是由于 20 世纪 90 年代冬、春季降雪和积雪增多, 致使春季地面气温上升速率减缓。另外, 高原东部区域与我国西南其他地区一样, 处于春季弱降温地带<sup>[18, 24]</sup>, 也对整个高原地区春季升温相对缓慢具有一定贡献。

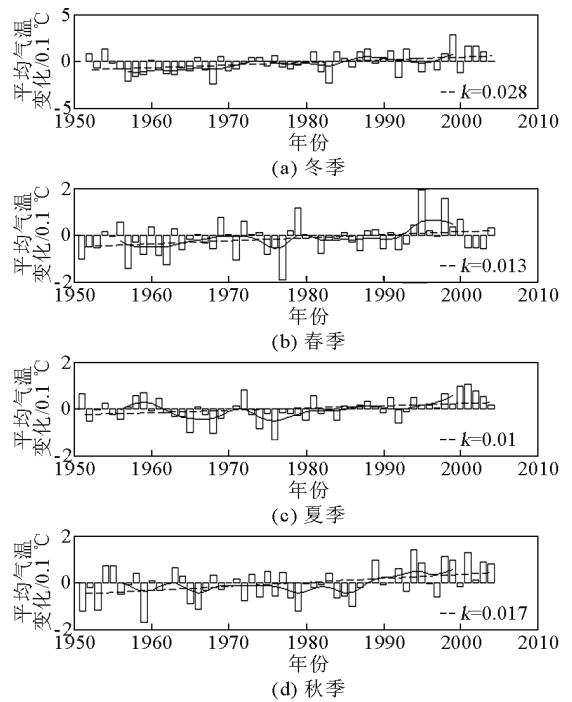


图 2 1951—2004 年青藏高原四季平均气温距平变化

Fig. 2 Region-averaged seasonal mean temperature anomalies over the Qinghai-Tibet Plateau during 1951—2004

3) 青藏高原显著变暖开始的时间, 即地面气温

上升的跃变点,似乎不是全国最早的,晚于北方特别是东北地区,与南方多数地区大体一致,发生在20世纪80年代中期以后<sup>[6,24,25]</sup>。另外,高原地区的气候变暖速率随高度增加的现象可能也不明显<sup>[26,27]</sup>。

过去和近年的研究均认为,高原地面气温上升夜间比白天明显,气温日较差明显下降。但是,气温日较差下降在多大程度上起因于城镇化影响,目前还不清楚。在华北地区,国家基准气候站和基本气象站记录的气温日较差减少,几乎完全可由城市化因素解释<sup>[28]</sup>。此外,由于夏季平均气温增加小于冬季,高原地面气温年较差亦趋于减小。

近50年以来,青藏高原的降水量呈现一定程度的增加趋势(见图3,其中实曲线为11点滑动平均,虚直线为线性趋势,趋势线的斜率 $k=0.214$ ,高原的范围为海拔3000 m等值线包围区域),12月至次年5月即冬春季节降水量多有所增多,藏东南和川西地区增加显著;但20世纪80年代初以来,高原腹地区域夏季和全年降水量出现减少,黄河上游地区1987年以后夏季降水量减少更为明显<sup>[29]</sup>。因此,过去几十年高原地区降水量在多数地方有所增加,但总体趋势没有地面气温变化明显。

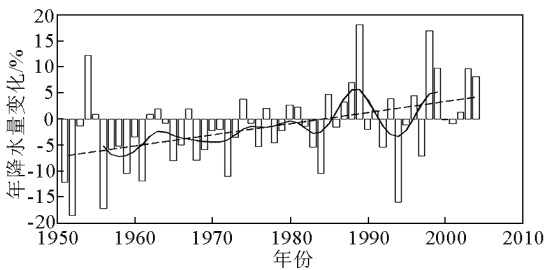


图3 1951—2004年青藏高原年降水量距平百分率变化

Fig. 3 Region-averaged percentage anomalies of annual precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau during 1951—2004

一般认为,青藏高原地面气温增加可能主要是对全球变暖的响应,与人类活动引起的大气中温室气体浓度上升有关。在 $\text{CO}_2$ 等温室气体浓度增加情况下,绝大多数全球气候模式模拟表明青藏高原地区降水量也增加了,说明过去50年高原地区降水量的趋势变化可能在一定程度上也是对全球变暖的响应<sup>[16]</sup>。但是,降水变化的驱动因子很复杂,观测到的降水增多还可能主要与年代到多年代尺度上气候的自然波动有关<sup>[16,30]</sup>。

预计,未来青藏高原气候将继续变暖。气候模

拟研究指出,到2050年前后青藏高原变暖幅度可能达到 $1.0\sim 3.0\text{ }^\circ\text{C}$ ;多数气候模拟也显示未来降水量趋于增加<sup>[16,20]</sup>。考虑到自然气候波动和局地人类活动的影响,到21世纪中期青藏高原地面年平均气温增加幅度可能接近 $1.0\sim 3.0\text{ }^\circ\text{C}$ 区间的下限,而降水量变化趋势仍难以预估。由于城市化的影响<sup>[22]</sup>,高原地区城镇建成区地面气温上升将比其他区域明显。

### 3 气候变化与工程设计问题

青藏高原地面气候变暖将对自然和人类系统产生影响。未来高原地区的冰冻圈、河湖系统、陆地植被、农业自然条件、能源气候资源、城镇人居环境等,均可能随着气候变化而改变,并进而对当地相关领域工程设计、维护和建设造成一定影响。

1) 冻土层融化。多年冻土对地面气温上升很敏感。未来的气候变暖可能引起或加速部分地区冻土层融化,对公路路面、铁路地基、桥梁、房屋建筑、输水渠道、水库坝基等带来潜在威胁。在工程设计和维护方面如何减轻冻土层融化导致的负面影响,需要认真思考和研究<sup>[31]</sup>。特别是在城镇区域和骨干交通沿线,由于叠加了局地尺度的城市热岛效应以及人类活动干预,冻土层融化对建筑物和交通设施的影响问题将变得更为突出。

青藏公路和青藏铁路横穿高原腹地,经过数百千米的多年冻土地带。多年冻土退化导致的路基塌陷始终困扰着青藏公路的正常使用,未来气候变化背景下,局部路段问题会变得比较突出,需要针对不同路段提出相应的技术处理措施<sup>[32]</sup>;青藏铁路建设是我国主动适应未来可能气候变暖影响的首个大型工程案例<sup>[20,33]</sup>,但已采用的适应技术和措施不是一劳永逸的,需要今后根据变化的情况进行调整。

2) 冰川消融。青藏高原上分布着众多山地冰川,储存着宝贵的淡水资源。气候变化已致使多数山地冰川出现退缩现象,喜马拉雅山脉和高原东侧海洋性山地冰川退缩幅度更明显<sup>[34,35]</sup>。珠峰地区冰川从20世纪60年代中期开始处于退缩状态,东绒布冰川目前比40年前退缩近2000 m<sup>[34]</sup>。未来气候变暖可能引起多数山地冰川面积进一步减少。

冰川消融引起各大江河上游径流增加,湖泊水位上涨。个别冰碛湖水位的变化可能对下游地区造成一系列影响,其中冰碛湖溃决可能引起洪灾,给下游居民区带来潜在威胁。2000年6月10日,易贡

藏布发生特大溃决型洪水,使川藏公路全线中断,冲毁通麦大桥、解放大桥等桥梁10余座。在未来气候继续变暖的情况下,部分区域类似的溃决型洪水发生几率可能增加。

3) 陆地水文变化。山地冰川消融以及冻土融化可能在未来几十年内增加向雅鲁藏布江、澜沧江和长江等河流上游的融水供水量,径流量增加,湖泊水位上升;但在更久远的未来将导致融水供水量减少,给流域水资源的调控和利用带来新的问题。如果考虑降水量的变化,河川径流量和湖泊水位变化情况将更加复杂,不确定性也将增加。

河流径流年内变化进程可能发生改变。在未来几十年,青藏高原春、秋季地面气候变暖可能致使融水径流峰值提前,融水补给季节延长。

4) 生态系统演化。青藏高原分布着大面积高寒草地,山地生长着多种森林。气温升高、冻土融化、河湖水量变化将改变高寒草地土壤水分和养分循环,在气温、降水变化和人类活动的共同影响下,部分地区草地的干旱化和荒漠化可能加剧<sup>[36]</sup>。

青藏高原部分地区20世纪80年代以来夏季降水量减少,气温明显增高,干旱现象突出,加之人类活动增强,使牧草生长受到抑制,土地荒漠化加重。牧区草场的退化和沙化将直接影响畜牧业的可持续发展。

一般认为,气候变暖对于北极陆地和高山、高地区域的生物多样性保护将构成挑战<sup>[37]</sup>。青藏高原某些喜寒生物可能由于适合其生存的生活环境改变而面临困境,在人类活动干预和自然保护规划不健全的共同作用下,部分物种可能趋于灭绝。

5) 农业作物布局。地面气温升高增加了河谷低地农业生产所需要的热量资源,降低了低温冷害的风险,气候生长季有所延长,一年一熟种植的北界向北推移,可能使种植面积扩大。但增温可能使某些病虫害和杂草的地理分布范围扩大,从而影响农业产量的形成。干旱对农业生产的影响很大,但如果未来降水趋于增多,对农业生产也将产生有利影响。气候变化对高原上农业生产条件的影响总体上看利大于弊。

6) 建工材料性能改变。高原地区地面气温上升对各类工程的建工材料性能和寿命将产生一定影响;地面平均气温的升高对于工程施工期间建工材料灌注、铺装将具有一定正面影响;极端低温事件发生频率减少,可以增加各类工程建筑混凝土的力学

性能,增加混凝土的抗折、抗压强度,增强工程内部材料的抗腐蚀性和耐久性<sup>[38]</sup>;但城镇区域更频繁的高温事件与干旱事件结合作用,可能使各类工程材料干裂风险增加,内部微裂缝增多,给工程建设和维护带来新的问题<sup>[39]</sup>。由于高原地区基础气温偏低,未来近地面气候变暖预计对各类工程建工材料的影响总体上是有利的。

7) 风能资源变化。青海和藏北是我国风能资源比较丰富的地区。但是,与全国多数地区一样,过去50年青藏高原北部地表平均风速呈下降趋势<sup>[8,18]</sup>。观测的风速减少可能部分与全球气候变暖有关,部分由人为活动引起的气象观测场附近微环境变化所致。如果未来地表风速继续下降,将对青海和藏北地区的风电场建设造成若干不利影响。

8) 人居环境变化。青藏高原的城镇人口总体偏少,但城镇化速度将加快,城镇人口将不断增多。城镇建成区面积扩大会增强城市热岛效应,导致人口集中居住区地面气温特别是冬季和夜间气温升高。热岛效应将叠加在全球变暖趋势之上,致使城镇区域气候变暖比较明显,减轻冬季寒潮和冷空气影响,加剧夏季相对高温天气影响。

西宁、德令哈、格尔木、拉萨等较大城市不仅城市热岛效应日益明显,而且城区降水量和强降水事件频率可能增加,对城市防洪防涝工程和设施造成影响。城镇区域的平均风速和相对湿度下降,也将影响人类体感温度、人体健康和气候环境舒适度。

## 4 两点建议

加强青藏高原地区气候变化及其影响研究和监测,重新审视现有和计划中的重大工程项目设计标准、维护和管理方式,制定有效的适应措施,可以做到趋利避害,为促进高原地区经济和社会可持续发展提供技术支撑。

### 4.1 加强青藏高原气候、环境变化监测与研究

目前,科学研究对于青藏高原地区未来气候究竟如何变化还无法给出可靠的预测。这种局面对气候、生态与环境的监测和研究提出了迫切要求。只有加强监测,才能认识气候变化的规律,对未来的气候与环境变化做出科学预测。

青藏高原特别是藏西北地区的气候、环境监测工作非常薄弱。以长序列气象观测网为例,沿海省份平均1万 $\text{km}^2$ 台站数量可达7个以上,而西藏自治区平均3万 $\text{km}^2$ 台站数不足1个。这种情况无法

满足气候变化监测和研究工作需要。建议加大西藏和青海西部气候、生态与环境监测工作投入,增设地面气象自动站观测站点,加强卫星遥感监测,推进高原地区气候、生态与环境监测业务现代化。

在加强监测工作的基础上,进一步开展相关基础科学研究。特别要加强对不同时间尺度气温、降水和干旱事件等变化规律的研究,以及青藏高原陆面过程对我国其他地区气候与水文异常的影响评价,模拟全球气候变化背景下的高原区域气候响应,对未来10~50年的气候变化趋势做出科学预估,对气候变化的生态、环境效应进行系统评价。

#### 4.2 采取有效措施,主动适应气候变化的影响

1)自然生态保护。加强三江源、“一江两河”、藏北高原、青藏铁路沿线等地区的生态保护工作,建立必要的自然保护区,坚持实行退耕还林、退牧还草工程。

自然保护区规划需要考虑未来气候变暖的影响,为动植物迁移适应预留足够空间;在生态建设和恢复规划中重视气候与环境变化监测、预测信息,制定气候变化适应措施;国家对西藏和青海的生态、环境保护与建设要实行统一领导、统一规划,改变不同部门和地区各自为政的局面,形成有效合力,整体推进青藏高原地区自然生态保护中的气候变化适应工作。

2)自然灾害防御。针对未来可能出现的干旱、冰碛湖溃决、多年冻土融化等引发的自然灾害,要在科学预测和普查的基础上,评价灾害风险,在各类工程设计和建设前制定相应的适应措施;对于具有高风险的冰碛湖,应考虑采取避让、预警和防御性工程等综合防御策略;要建设完善干旱、强降水和暴雪等气象灾害监测预警系统和应急救援机制,减轻灾害损失。

3)农业发展规划。西藏和青海部分河谷低地的热量条件将有所改善,各类熟制作物种植面积可适当增加。但要注意病虫害和杂草的防治,注意干旱灾害的可能威胁。应鼓励发展集约化现代农业,主动适应气候变化,减轻极端气候事件影响,增加粮食产量。部分地区草场产量可能增加,但由于土层瘠薄,载畜量仍然有限,要注意生态保护和牧业生产的良性互动。

4)交通设施建设。要密切监测气候变暖对主要公路、铁路、桥梁等交通设施的影响,采取进一步工程 and 政策措施防治冻土退化对现有路基稳定性的

破坏作用。城镇区域的交通设施可能面临更大威胁,需要及早做出预防。对于未来的交通设施建设,要充分注意区域和局地气候变暖的影响,注意预防可能的冰碛湖溃决对道路和桥梁带来的破坏。

5)水利水电建设。未来30~50年内各大河上游的融水径流量可能增加,这在增加山麓和盆地绿洲水资源供应量的同时,也会带来汛期洪水威胁,应加强防护;还要注意气候变化引起的径流峰值和洪峰的季节性变动。

到21世纪中后期,随着融水径流量减少,加之气候自然变异的影响,部分流域面临的水文干旱风险可能加大,应有所准备。要重视气候和水资源变化趋势监测和预测,为流域水资源调控和管理提供可靠信息,为南水北调西线工程设计提供科技支撑。

6)城镇发展规划。城镇区域的气候变暖将更为明显。应注意气候变暖、变干、风速减弱对城市建设和人类生活、健康的影响,制定相应的适应性措施,趋利避害。多数城镇内未来冬季的取暖能源需求将降低,但部分大中城市区域夏季降温能源需求可能提高。西宁等较大城市区域,还要十分注意预防由于降雨强度增加引发的城市洪水和内涝问题。

致谢:本文在徐祥德院士的建议和鼓励下完成。笔者也感谢杜军、陆采荣、初子莹提供的支持与帮助。

#### 参考文献

- [1] 孙鸿烈,郑度.青藏高原形成演化与发展[M].广州:广东科学技术出版社,1998.
- [2] 郑度,林振耀,张雪芹.青藏高原与全球环境变化研究进展[J].地学前缘,2002(1):95-102.
- [3] 刘晓东,侯萍.青藏高原及邻近地区近30年气候变暖与海拔高度的关系[J].高原气象,1998,17(3):24-28.
- [4] 姚莉,吴庆梅.青藏高原气候变化特征[J].气象科技,2002,30(3):163-164.
- [5] 李跃清.近40年青藏高原东侧地区云、日照、温度及日较差的分析[J].高原气象,2002,21(3):327-332.
- [6] 李林,朱西德,秦宁生,等.青藏高原气温变化及其异常类型的研究[J].高原气象,2003,22(5):524-530.
- [7] 韦志刚,黄荣辉,董文杰.青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J].大气科学,2003,27(2):157-170.
- [8] You Q, Kang S, Flügel W A, et al. Decreasing wind speed and weakening latitudinal surface pressure gradients in the Tibetan Plateau[J]. Clim Res, 2010, 42:57-64.
- [9] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during the recent decades[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(14):1729-1742.
- [10] 姚檀栋,刘晓东,王宁练.青藏高原地区的气候变化幅度问

- 题[J]. 科学通报,2000,45(1):98-106.
- [11] 杜 军,马玉才. 西藏高原降水变化趋势的气候分析[J]. 地理学报,2004,59(3):375-382.
- [12] 冯 松,汤懋苍,王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报,1998,43(6):633-636.
- [13] 赵宗慈,丁一汇,徐 影,等. 人类活动对20世纪中国西北地区气候变化影响检测和21世纪预测[J]. 气候与环境研究,2003,8(1):26-34.
- [14] 徐 影,丁一汇,李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化[J]. 高原气象,2003,22(5):451-457.
- [15] 段安民,吴国雄,张 琼,等. 青藏高原气候变暖是温室气体排放加剧结果的新证据[J]. 科学通报,2006,51(8):989-991.
- [16] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2007:167.
- [17] 任国玉,吴 虹,陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报,2000,11(3):322-330.
- [18] 任国玉,郭 军,徐铭志,等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报,2005,63(6):942-956.
- [19] 杜 军. 西藏高原近40年的气温变化[J]. 地理学报,2001,56(6):682-690.
- [20] 秦大河. 中国西部环境演变评估(综合报告)[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [21] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [22] 张爱英,任国玉,周江兴,等. 我国地面气温变化趋势中的城市化影响[J]. 气象学报,2010,68(6):957-966.
- [23] 王 楠,李栋梁,张 杰. 青藏高原气温变化的研究进展[J]. 干旱气象,2010,25(3):265-269.
- [24] 王少鹏,王志恒,朴世龙. 我国40年来增温时间存在显著的区域差异[J]. 科学通报,2010,55(16):1538-1543.
- [25] 丁一汇,张 莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学,2008,32(4):794-805.
- [26] You Q, Kang S, Pepin N, et al. Relationship between trends in temperature extremes and elevation in the eastern and central Tibetan Plateau, 1961—2005[J]. Geophys Res Lett, 2008, 35: L04704, doi:10.1029/2007GL032669.
- [27] 任 雨,张雪芹,彭莉莉. 青藏高原1951—2006年气温距平序列的建立与分析[J]. 高原气象,2010,29(3):572-578.
- [28] 周雅清,任国玉. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响[J]. 高原气象,2009,28(5):1158-1166.
- [29] 李 林,陈晓光,王振宇,等. 青藏高原区域气候变化[J]. 气候变化研究进展,2010(3):181-186.
- [30] 徐祥德,陶诗言,王继志,等. 青藏高原——季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报,2002,60(3):257-266.
- [31] 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(6):521-531.
- [32] 赵 林,程国栋,俞祁浩,等. 气候变化影响下青藏公路重点路段的冻土危害及其治理对策[J]. 自然杂志,2010(1):9-12.
- [33] 南卓铜,程国栋. 未来50~100年青藏高原多年冻土变化情景预测[J]. 中国科学(E辑),2004,34(6):528-534.
- [34] 刘时银,丁永建,李 晶,等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应[J]. 第四纪研究,2006,26(5):762-771.
- [35] 杨 威,姚檀栋,徐柏青,等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩[J]. 科学通报,2008,53(17):2091-2095.
- [36] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等. 气候变化国家评估报告(II):气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展,2006,2(2):51-56.
- [37] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability[M]// Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [38] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [39] 陈 宇,姜 彤,黄志全,等. 温度对沥青混凝土力学特性的影响[J]. 岩土力学,2010,31(7):2192-2196.

# Climate change and the engineering projects of the Qinghai-Tibet Plateau

Ren Guoyu

(Laboratory for Climate Studies, CMA, National Climate Center, Beijing 100081, China)

[**Abstract**] Evident change in climate of the Qinghai-Tibet Plateau occurred in the past half century. Surface air temperature significantly increased, and annual and summer precipitation rose in most parts of the plateau. The change in climate has in some extent affected the human and natural systems. Expected warming in the coming decades will have complicated impacts on glacial, frozen ground, hydro-cycle, ecosystems, agricultural production, energy climatic resources, transportation, hydro-engineering projects and inhabitant environment. It is therefore necessary, in such areas as the construction of large engineering projects, to plan for cost-benefit adaptation to climate change. A framework of adaptation measures for different fields of engineering construction is discussed in this paper.

[**Key words**] climate change; adaptation; ecosystem; environment; engineering projects; Qinghai-Tibet Plateau

---

(上接 88 页)

## The engineering techniques for agricultural drought and their application

Li Yuzhong<sup>1</sup>, Wang Chunyi<sup>2</sup>, Cheng Yannian<sup>1</sup>

(1. Institute of Agro-environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

[**Abstract**] The impact of drought on crop growth and development were introduced, and an overview of the main engineering measures of agricultural disaster prevention and mitigation was given. These projects include watershed harvest engineering, water storage engineering, mulching for reducing evaporation engineering, water-saving irrigation engineering, artificial rainfall anti-drought engineering, drought resistant seed coating engineering, and the application effects of these engineering were also described.

[**Key words**] agricultural drought; engineering mitigation; drought resistant seed coating engineering