

文章编号: 1000-0534(2003)05-0431-09

青藏铁路沿线平均年气温变化趋势预测

李栋梁¹, 郭慧¹, 王文², 魏丽¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 兰州大学大气科学系, 甘肃兰州 730000)

摘要: 青藏铁路沿线年平均气温具有很好的互相关性, 特别是各站10年滑动平均气温序列互相关系数达到0.92, 以此建立了1935—2002年青藏铁路沿线平均年气温序列 T_w 。研究表明: T_w 对太阳黑子周期长度(SCL)和大气中 CO_2 浓度有滞后5年和15年的显著响应, 其相关系数分别为-0.76(SCL)和0.88(CO_2)。利用近1000年SCL的76、93、108、205和275年显著周期及均生函数模型预测了未来太阳活动周期的快慢: 21世纪前50年的SCL总体偏长, 活动周期放慢; 后50年SCL总体偏短, 活动周期加快。在考虑大气 CO_2 浓度倍增和气候自然变化情况下, 预测21世纪前50年 T_w 与20世纪最后10年(1990年代)相比, 其升温幅度在 $0.5^\circ C$ 左右; 与20世纪最后30年(1971—2000年)相比, 其升温幅度在 $1.0^\circ C$ 以内。这一升温幅度的概率为0.64~0.73。

关键词: 青藏铁路沿线; 年平均气温预测; 太阳黑子周期长度(SCL); 大气 CO_2 浓度

中图分类号: P423.3⁺2 **文献标识码:** A

1 引言

青藏高原是世界上最高大、地形最复杂的高原, 平均海拔在4000 m以上, 号称世界第三极, 是我国主要的寒区和冻土区。青藏铁路格尔木至拉萨段, 全长1118 km, 其中多年冻土区长度为632 km, 占全线总长度的57%; 全线海拔4000 m以上的地段长度约为965 km, 占总长度的86%。冻土是青藏铁路修筑中的重大难题, 其主要问题是路基的冻胀和融沉。因此, 青藏铁路成败的关键在路基, 路基成败的关键在冻土的冻胀与融沉, 融沉的关键问题之一是气候变暖。青藏铁路是百年大计, 必须考虑气候变化的影响。

由于青藏高原的特殊性, 其气候变化方面的研究工作很多, 最具系统性和代表性的工作有: 汤懋苍等^[1]主编的《青藏高原近代气候变化及对环境的影响》, 该书系统地总结了“八五”期间国家攀登计划项目“青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究”在青藏高原近代气候变化、趋势预测及对环境的影响方面所取得的主要成果。对我国(包括高原)未来数十年气温变化的预测结果为现在至2015年温暖, 2015—2038年较冷。秦大河^[2]总主编的《中国西部环境演变评估》, 通过对西部生态环境在

全球变化中的时空定位、演变规律、发展趋势和影响机理的研究, 揭示地质历史时期(晚新生代以来)西部自然环境演化过程、近2000年来西部地区环境演变与人类活动的关系, 特别是近50年来西部资源与环境的变化及其影响机制。对未来气候变化的预测分为自然变化和人类活动两方面讨论。影响自然变化的因子中着重考虑了太阳活动。根据太阳活动和西部气候变化的关系预测: 2010年和2030年青藏高原气温的自然变化将较目前变冷 $-0.8 \sim -0.5^\circ C$, 2050年变暖约 $0.2^\circ C$ 。 CO_2 增加所产生的温室效应对气候变化的影响倍受人们的关注。IPCC 2001报告指出^[3], 近100年来全球地面气温升高了 $0.4 \sim 0.8^\circ C$, 其中人为温室气体增加的影响是不容忽视的。考虑到人类活动排放到大气中的温室气体和硫化物气溶胶浓度增加, 估计未来达到加倍时的情景, 可能造成西部地区的气候将较目前明显变暖。预计到2050年, 青海变暖 $2.2^\circ C$, 西藏变暖 $2.3^\circ C$ 。将自然变化和人类活动的影响合成, 估计未来10~50年青藏高原可能变暖 $2.2 \sim 2.6^\circ C$ ^[2]。高学杰等^[4]、徐影等^[5]最近就温室效应对青藏高原及铁路沿线气候影响作了数值模拟, 结果表明, 在 CO_2 加倍的情况下, 这里的气温也将明显

收稿日期: 2003-04-23; 改回日期: 2003-05-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“青藏铁路工程与多年冻土相互作用及其环境效应”(KZCX1-SW-04)资助

作者简介: 李栋梁(1957—), 男, 甘肃通渭人, 研究员, 主要从事气候变化和预测、环境动力学等研究。E-mail: lidl@ns.lzb.ac.cn

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

升高, 升温值一般在 $2.6 \sim 2.8^{\circ}\text{C}$ 以上, 高于全国平均。青藏高原是全球气候变化的重要敏感区, 气候变化使青藏铁路的修筑面临着严峻的挑战。要确保铁路建筑的稳定性, 必须预测全球气候变化背景下青藏高原, 特别是铁路沿线未来气候变化趋势。在未来气候变化情景下进一步预测冻土的变化, 以及气候与冻土相互作用对铁路工程稳定性的影响。可见, 青藏铁路沿线未来气候如何变化是确保青藏铁路安全、稳定运营的一个重要问题。

青藏铁路沿线气候资料缺乏, 尤其是长序列的历史气候资料更少。以前关于中国西部、青藏高原气候变化的研究, 其资料多取自于高原周边山区树木年轮或冰芯记录, 这些资料是非常宝贵的, 它们可以较好地反映中国西部及青藏高原这样大范围的气候变化。青藏铁路是一个超大型线形工程, 它对于气候变化的要求更具体, 对气候变化预测的精度要求更高。本文利用青藏铁路沿线常规气象站建站至 2002 年的观测资料, 在研究其气候变化及其与太阳活动、 CO_2 浓度关系的基础上, 对青藏铁路沿线未来年平均气温变化进行了初步预测。

2 资料与方法

气象资料选用青藏铁路沿线自北向南的格尔木、五道梁、托托河、安多、那曲、当雄、拉萨 7 个常规气象观测站(表 1)建站至 2002 年连续观测的年平均气温资料, 建立青藏铁路沿线平均年气温序列; 太阳活动资料采用 Schove^[6] 建立的公元前 266 年至公元 2000 年共计 2267 年的太阳黑子周期长度(SCL)资料。温室气体采用 1935—1957 年 Siegenthaler 等^[7]、Nefel 等^[8]、Barnola 等^[9]、Etheridge 等^[10] 南极冰岩芯的 CO_2 浓度资料; 1958—2000 年采用 Keeling 等^[11] 在夏威夷 Mauna Loa 观象台观测的大气 CO_2 浓度。多数模式在预测未来增温值时, 都假定 CO_2 的递增率为 $1\%/a$ 。事实上从 1958—2000 年的 43 年间 CO_2 浓度仅增加 17.5%, 即使是 1991—2000 年的 10 年间也仅增加 4%, 可见上述假定是过大了。本文以此期间的线性增长率 $1.3 \times 10^{-6}/a$ 推算未来 100 年大气 CO_2 浓度。通过计算 SCL 的周期及其与青藏铁路沿线平均年气温的相关, 建立气温与 SCL 的拟合方程, 在 SCL 预测和 CO_2 浓度线性增长的基础上, 预测 21 世纪青藏铁路沿线平均年气温的变化趋势。

表 1 青藏铁路沿线器测资料代表站

Table 1 Representative stations with apparatus observational data along Qinghai-Xizang railway

站名	区站号	经度	纬度	海拔高度 /m	资料年代
格尔木	52818	$94^{\circ}54'E$	$36^{\circ}25'N$	2807.6	1956—2002
五道梁	52908	$93^{\circ}05'E$	$35^{\circ}13'N$	4612.2	1957—2002
托托河	56004	$92^{\circ}26'E$	$34^{\circ}13'N$	4533.1	1957—2002
安多	55294	$91^{\circ}06'E$	$32^{\circ}21'N$	4800.0	1966—2002
那曲	55299	$92^{\circ}04'E$	$31^{\circ}29'N$	4507.0	1955—2002
当雄	55493	$91^{\circ}06'E$	$30^{\circ}29'N$	4200.0	1963—2002
拉萨	55591	$91^{\circ}08'E$	$29^{\circ}40'N$	3648.7	1935—2002

3 青藏铁路沿线年平均气温的气候特点

3.1 沿线各站年平均气温的年代际变化

表 2 列出青藏铁路沿线气候代表站各年代平均气温。由表 2 可以看出, 青藏铁路沿线气候变暖是显著的, 40 年来气温升高均在 1.0°C 以上, 尤其是青藏铁路北端的格尔木, 年平均气温由 1960 年代的 3.6°C 上升到 1990 年代的 5.6°C , 升温率达到 $0.7^{\circ}\text{C}/10a$ 。其次是那曲, 升温率为 $0.5^{\circ}\text{C}/10a$ 。五道梁略有变暖, 但比格尔木、那曲的升温率要小得多, 仅 $0.2^{\circ}\text{C}/10a$ 。安多的升温更小, 而且近 30 年总体保持平稳。青藏铁路南端拉萨的资料年代较长, 自 1935 年至今, 平均来看, 1960 年代仍是近 70 年来最冷的 10 年, 比 1990 年代偏低 1.3°C , 比 1930 年代偏低 1.7°C 。近 40 年变暖明显, 但目前仍未达到 1930 年代和 1940 年代的温暖程度。

表 2 青藏铁路沿线各站年平均气温的年代平均($^{\circ}\text{C}$)

Table 2 Decadal average temperature of stations along Qinghai-Xizang railway. (Unit: $^{\circ}\text{C}$)

站名	年 代						
	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990
格尔木			3.7	3.6	5.1	5.1	5.6
五道梁			-5.6	-5.9	-5.4	-5.5	-5.2
托托河			-4.3	-4.4	-4.0	-4.0	-3.9
安多				-3.3	-2.8	-2.8	-2.8
那曲			-1.9	-2.2	-1.5	-1.2	-0.8
当雄				1.0	1.6	1.7	1.8
拉萨	8.8	8.6	7.7	7.1	7.6	7.9	8.4

3.2 沿线平均年气温序列的建立

青藏铁路自北向南横跨青藏高原, 不同路段、不同地理位置气候的差异是显而易见的^[12, 13]。为了气候预测的方便, 能否建立一条气温序列可粗略代表整个青藏铁路沿线。最简单易行的办法是将上述 7 站年平均气温求算术平均。从表 1 看出, 7 个观测站基本均匀分布在青藏铁路沿线, 即具有较好的空间代表性。考虑到测站资料年代不同, 沿线平均年气温序列的建立方法如下:

1966—2002 年, 用 7 站算术平均; 1935—1965 年, 有实测资料的站采用实测资料, 无实测资料的站利用其有资料时段(资料长度见表 1)与拉萨站建立的回归方程计算出该站气温的基础上, 再求其算术平均。

图 1 给出 1935—2002 年沿线平均年气温序列的演变曲线。以 1960 年代为界, 前期为由暖向冷变化, 后期为由冷向暖演变。1935—1954 年间, 除 1950—1952 年 3 年气温略偏低, 总体在暖位相。1930 年代(1935—1940 年)、1940 年代平均分别为 0.9 和 0.7 °C, 比 1935—2002 年平均分别高 0.7 和 0.5 °C; 1950 和 1970 年代正常略偏低, 1980 年代正常略偏暖, 最冷时期是 1960 年代, 比多年平均偏低 0.7 °C(表 3)。1955—1983 年间, 只有 1972 和 1974 年的气温略偏高, 总体以冷为主。自 1984 年以后,

青藏铁路沿线气温逐渐升高, 特别是 1998 和 1999 年, 沿线各站气温出现历史极值, 拉萨站与 1937、1946 和 1947 年持平。但在这样的暖期中, 也出现了像 1997 年异常的寒冷年份。近 20 年青藏铁路沿线气候在变暖, 但总体还未达到 1930 和 1940 年代的温暖程度, 而且 2000—2002 年气温较 1998 和 1999 年明显回落。

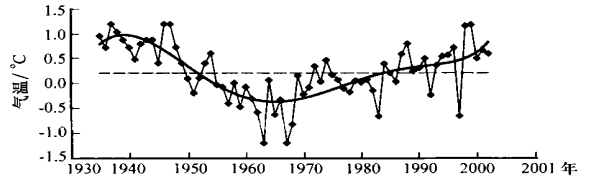


图 1 青藏铁路沿线平均年气温折线为实测值, 平滑曲线为多项式拟合

Fig. 1 Annual average temperature along Qinghai-Xizang railway. Broken line for the observed value, smooth curve for polynomial fitting

平均序列的时间变化能否代表沿线各站的气温变化, 代表性如何, 有多大程度的相关? 表 4 给出了沿线 7 站年平均气温及其 7 站平均气温(以下简称沿线平均年气温)逐年互相关系数(右上三角阵)与 10 年滑动平均互相关系数(左下三角阵)。就各站原始资料来说, 除托托河外, 其同期互相关系数

表 3 青藏铁路沿线平均年气温的年代际变化(°C)

Table 3 Decadal change of annual average temperature along Qinghai-Xizang railway. (Unit: °C)

年代	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1935—2000 年	1971—2000 年
气温/°C	0.91	0.70	-0.02	-0.51	0.07	0.18	0.46	0.21	0.23

表 4 青藏铁路沿线 7 站年平均气温逐年互相关系数(右上三角阵)及 10 年滑动互相关系数(左下三角阵)

Table 4 Correlation coefficient of year-to-year average temperature(trigonal matrix of upper right) and 10-year running average temperature(trigonal matrix of lower left) at 7 stations along Qinghai-Xizang railway

站名	格尔木	五道梁	托托河	安多	那曲	当雄	拉萨	平均序列
格尔木	1.00	0.61	0.23	0.48	0.73	0.56	0.66	0.85
五道梁	0.50	1.00	0.54	0.73	0.72	0.58	0.55	0.82
托托河	0.82	0.77	1.00	0.14	0.08	-0.10	0.10	0.41
安多	0.58	0.74	0.83	1.00	0.84	0.71	0.67	0.75
那曲	0.85	0.71	0.87	0.85	1.00	0.87	0.90	0.93
当雄	0.72	0.75	0.76	0.84	0.93	1.00	0.85	0.79
拉萨	0.85	0.72	0.83	0.77	0.98	0.92	1.00	0.90
平均序列	0.86	0.79	0.91	0.86	0.99	0.93	0.97	1.00

注: 相关显著水平 $\alpha_{0.05}=0.34$ $\alpha_{0.01}=0.44$

均超过 $\alpha_{0.01} = 0.44$ 的显著性水平。这里需要指出的是,托托河站 1985 年 10~12 月因积雪影响,气温异常偏低^[14]。这一异常现象影响了托托河与沿线各站年平均气温的相关系数。影响青藏铁路沿线年平均气温逐年互相关系数的另一个原因是青藏高原地域广大,不同地区的气候年际变化存在一定差异或滞后性,而年代际变化趋势可能比较一致。为此,本文对托托河站 1985 年冬季(10~12 月)气温参考周边测站(五道梁、安多、那曲)气温距平及本站多年平均值作了插值订正后,计算了青藏铁路沿线 7 站年平均气温 10 年滑动互相关系数(表 4 左下三角阵)。可以看出,其相关系数有明显增加,特别是托托河站,从订正前的平均 0.165 增加到 0.813,订正前托托河与唐古拉山以南基本无相关,甚至有个别站为负相关,与沿线年平均气温的相关也由 0.41 上升到 0.91,从而为建立沿线平均年气温序列打下良好基础。表 4 同时还给出了沿线平均年气温序列与各站气温序列的同期相关系数。

4 青藏铁路沿线年平均气温的预测

4.1 周期预测

对青藏铁路沿线年平均气温序列进行周期分析和均生函数模型预测。周期分析和均生函数模型预测方法,李栋梁等^[15]、魏凤英等^[19]已有具体介绍。由于篇幅所限,这里不在赘述。1935—2000 年的样本存在 29 年变化周期(超过 $\alpha_{0.05}$ 信度检验水平,图 2 中光滑曲线);利用该显著周期进行拟合预测青藏

铁路沿线平均年气温目前处于极大值,就年代际变化来看,预计这一暖期可能维持到 2010 年左右。利用均生函数模型预测其未来 10 年平均气温要比多年平均偏低 0.28℃,比 1990 年代偏低 0.3℃(图 2 中虚折线所示)。综合周期与均生函数模型预测(图 2 中粗折线)自 1998 年温度出现极大值后,未来 10 年将逐渐回落。从已出现的 2000、2001 和 2002 年气温实况来看,其预测趋势与实况一致。

4.2 年平均气温变化与太阳黑子周期长度的关系

由于青藏高原气候环境条件差,长期以来为游牧民族生活地,历史文献记录在青藏铁路沿线主体几乎是空白。现有冰芯、树木年轮采集地距离青藏铁路较远^[17-18]。高原地区接收到的太阳总辐射量比我国同纬度平原要多近一倍^[19],可以想象青藏高原气温变化应该与太阳活动关系密切,对此冯松等^[20,21]的研究已经证实。

近 1000 年来太阳黑子周期长度(SCL)的变化(图 3)有 4 个时段其值小于 10 年,分别为公元 1373—1383 年、1760—1770 年、1980—1984 年和 1988—1997 年。自 1915 年以来 SCL 处于低值阶段,其值低于平均值(11.07 年),特别是自 1980 年代以来 10 年滑动平均的 SCL 值小于 10 年。1996 年为 9.3 年,是近 1000 年来的最低值。对近 1001—1990 年的 SCL 作谐波分析可以得到 76、93、108、205 和 275 年等 5 个最显著的周期(图略),利用这 5 个显著周期叠加与利用均生函数模型拟合并外推预测其未来 100 年的 SCL 的趋势,

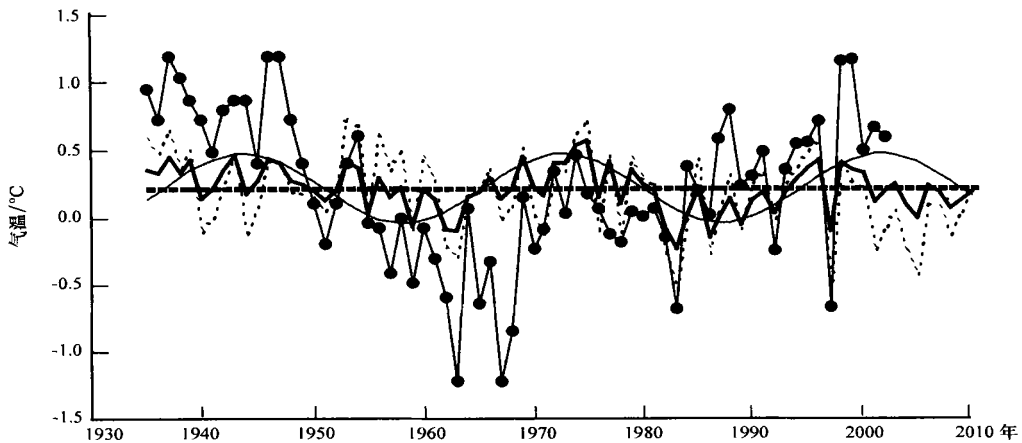


图 2 周期与均生函数模型模拟和预测的青藏铁路沿线平均年气温未来变化趋势

Fig. 2 The trend of annual average temperature along Qinghai-Xizang railway simulated and predicted by mean generating function model

可以看出两者拟合及对近 10 年的预测试验均非常好, 由此可以相信 SCL 外推预测的可靠性。

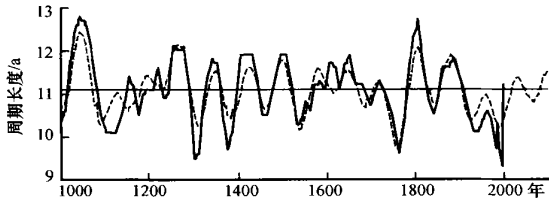


图 3 近 1000 年来 SCL(实线)及未来 100 年(虚线)趋势估计
Fig. 3 Changing trends of SCL in recent 1000 years (solid line) and future 100 years(dashed line)

表 5 列出标准化的 1935—2000 年青藏铁路沿线平均年气温 10 年滑动序列 T_w 与 SCL 的滞后相关系数(R)。由表 5 可以看出, T_w 与 SCL 为稳定的负相关。 R 大部在 -0.6 以上, 最大是 T_w 落后 SCL 7 年($\tau=7$)为 -0.787 。但应该注意到, 随着落后时间步长 τ 的加大, 参加计算相关系数的样本数在逐渐减少。由表 5 还可以看出, 当 τ 从 1 到 5, R 的增加($R_\tau - R_{\tau-1} = 0.04$)远大于样本每减少 1 而引起的信度水平的提高(0.004)。但当 $\tau > 5$ 时, R 的增加将明显减小。也就是说, T_w 落后 SCL 5 年的相关最好。因此, 利用 10 年滑动平均序列($N=57$ 年)建立 T_w 落后 SCL 5 年的线性方程, 即:

$$\hat{T}_{SCL} = -0.024 - 0.696 \times SCL_{t-5} \quad (1)$$

图 4 为 10 年滑动平均的 T_w 和 SCL 的标准化变化曲线, 其反相关表现的非常明显。SCL 在

1930 年代的短时段、1960 年代的长时段和 1990 年代的短时段, 青藏铁路沿线平均年气温 T_w 都有非常好的响应, 即对应有 1930 年代末与 1990 年代的暖期和 1960 年代的低温。

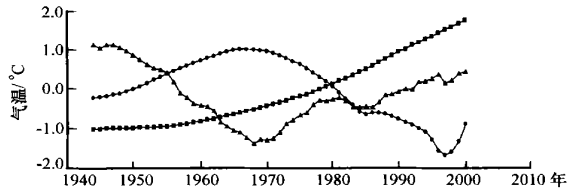


图 4 标准化 10 年滑动平均曲线

—●—: SCL, —▲—: T_w , —■—: CO_2

Fig. 4 10-year running average of standardized SCL and annual average temperature along Qinghai-Xizang railway

4.3 年平均气温与 CO_2 的关系

由于 CO_2 在大气中存留的时间很长, 其浓度的增加对气温的影响时间更长。因此, 在计算 T_w 落后 CO_2 浓度的相关时, 考虑的时间尺度也应更长一些。与表 5 类似, 表 6 给出了 10 年滑动平均青藏铁路沿线年气温 T_w 与 CO_2 浓度的滞后相关系数(R)。由表 6 可以看出, 在 T_w 与 CO_2 的相关中, T_w 落后 CO_2 19 年的相关最大, $R=0.903$ 。与表 5 的比较可知, T_w 与 CO_2 的相关在同期及落后 10 年内都比 T_w 与 SCL 差, 特别是同期表现为负相关 -0.019 。随着落后时间步长 τ 的加大, τ 每增加 1 年 R 增加约 0.07, 当 $\tau > 15$ 时, 相关系数的增加

表 5 10 年滑动平均的青藏铁路沿线年气温与 SCL 的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between 10-year running average of SCL and annual average temperature along Qinghai-Xizang railway

τ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	-0.546	-0.595	-0.639	-0.685	-0.729	-0.764	-0.784	-0.787	-0.774	-0.743	-0.693
$R_\tau - R_{\tau-1}$	—	0.049	0.044	0.046	0.044	0.035	0.020	0.003	-0.013	-0.031	-0.050

表 6 10 年滑动平均的青藏铁路沿线年气温 T_w 与 CO_2 的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between 10-year running average of atmospheric CO_2 and annual average temperature along Qinghai-Xizang railway

τ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	-0.019	0.029	0.077	0.132	0.194	0.261	0.331	0.403	0.475	0.545	0.615
$R_\tau - R_{\tau-1}$	—	0.048	0.048	0.055	0.062	0.067	0.070	0.072	0.072	0.070	0.070
τ	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
R	0.688	0.759	0.814	0.850	0.880	0.883	0.900	0.902	0.903	0.896	0.886
$R_\tau - R_{\tau-1}$	0.073	0.071	0.055	0.036	0.030	0.003	0.017	0.002	0.001	-0.007	-0.010

$R_{\tau} - R_{\tau-1}$ 小于样本减少所引起的信度水平的提高 (0.01)。即当 $\tau=15$ 时, 相关最好。因此, 建立 T_w 落后 CO_2 15 年的线性方程:

$$T_{\text{CO}_2} = 0.136 + 0.948 \times \text{CO}_2_{t-15}. \quad (2)$$

经标准化处理的 CO_2 浓度曲线在图 4 中已给出。由图可以看出, 1970 年代气候回暖以后, 两者的趋势比较一致。1960 年代以前 CO_2 的增长率较慢 (大约 $0.4 \times 10^{-6} / \text{a}$), 对高原气候变化的影响不明显, 在 1930 年代至 1970 年代以前 T_w 与 CO_2 为反位相, 即 CO_2 的增加对应的是非常明显的降温过程。在 1935—2000 年期间, T_w 与 CO_2 的同期表现为反相关, 或 5 年以内的相关不明显, 总体来说不如其与 SCL 的关系。 CO_2 排放对气候的影响主要表现在 10 年以后的滞后相关。

从以上简单的一元线性相关来看, SCL 对气温变化的影响更直接、更快, 一般在 SCL 出现极值后的 5 年内气温出现明显响应; 相比而言, CO_2 因在大气中的存留时间很长, 对气候变化的影响更主要的可能表现在其累积的滞后效应上。在 CO_2 出现增加的 10 年以后气温还会出现更明显的响应。综合考虑, 建立气温 T_w 与 SCL、 CO_2 的二元线性、对数及二次幂函数关系。比较发现, 对数和二次幂函数关系与线性关系的相关系数基本相当, 即没有因为函数关系的复杂而使相关系数有明显增加。因此, 依据与 (1) 和 (2) 式同样的原则 (相关系数表略), 在 SCL 和 CO_2 的共同作用下, 在 $\tau=10$ 时相关最好, 因此, 建立气温 T_w 与 SCL 和 CO_2 的二元线性回归模型:

$$T_{\text{CO}_2, \text{SCL}} = -0.007 - 0.476 \times \text{SCL}_{t-10} + 0.305 \times \text{CO}_2_{t-10}, \quad (3)$$

$T_{\text{CO}_2, \text{SCL}}$ 与 T_w 的相关系数为 0.75。(3) 式中 SCL 的系数为 -0.476, 其绝对值大于 CO_2 的系数为 0.305, 即综合考虑 SCL 对青藏铁路沿线平均年气温 T_w 的影响大于 CO_2 。

(1)、(2) 式的简单相关表明, T_w 与 SCL 和 CO_2 的相关系数分别为 -0.764 和 0.880, 均远超过 $\alpha_{0.01}$ 信度检验水平。比较而言, 似乎 CO_2 比 SCL 的关系更好 (相关系数差为 0.1)。若分别剔除 CO_2 和 SCL 对 T_w 的影响后, 即使考虑 1959—2000 年期间 T_w 与 $T_w - T_{\text{CO}_2}$, 和 T_w 与 $T_w - T_{\text{SCL}}$ 的相关系数, 分别为

$R(T_w, T_w - T_{\text{CO}_2}) = 0.493$, $R(T_w, T_w - T_{\text{SCL}}) = 0.282$, 相关系数差为 0.21。说明在此期间 SCL 对 T_w 的影响还要大于 CO_2 的影响 (图 5)。

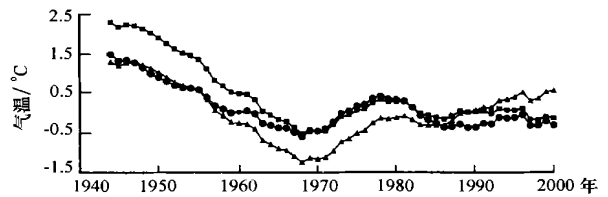


图 5 分别剔除 CO_2 (—■—)、SCL (—●—) 后青藏铁路沿线平均标准化年气温与原始标准化序列 (—▲—) 的比较

Fig. 5 Comparing with the standardized series of observed annual average temperature (—▲—) and regressive estimation along Qinghai-Xizang railway after eliminating of SCL (—●—) and CO_2 (—■—) influence respectively

4.4 利用 SCL 和大气 CO_2 预测未来年平均气温趋势

未来 100 年 SCL 的预测值是根据其近 1000 年来的周期变化 (图 2) 及均生函数模型进行预测的。前 50 年 SCL 总体偏长, 超过其平均长度 11.07 年, 2033 年前后出现极大值, 超过 11.3 年; 此后逐渐减小, 到 2068 年达到极小值, 其值短于 10.8 年; 接着开始逐渐变长, 到 2100 年超过 11.5 年。2050—2100 年期间 SCL 总体偏小。这一结果与冯松等^[1] 的结论基本一致。将 SCL 的估计值代入方程 (1), 由于 SCL 自 1996 年起开始变长至 2033 年前后达到极大值, 故由 SCL 影响所造成的青藏铁路沿线的降温于本世纪初开始, 至 2041 年前后达到最低 (-1.2 °C); 此后随着 SCL 的变短, 气温逐渐回升到 2077 年的 -0.6 °C。根据 SCL 预测的气温变化趋势也与文献 [1, 2] 是一致的。

1850 年 CO_2 浓度为 280×10^{-6} , 1958 年为 314×10^{-6} , 2000 年为 369×10^{-6} 。未来 CO_2 浓度的估计是根据 1958—2000 年实测值在此期间的递增速率 $1.3 \times 10^{-6} / \text{a}$ 按线性增长推算而得。照此推算, 预计 2050 年 CO_2 浓度为 431×10^{-6} , 2100 年为 493×10^{-6} 。将 CO_2 浓度的估计值代入方程 (2), 即得单纯由 CO_2 浓度增加所引起的青藏铁路沿线平均年气温的增温效应, 与 1990 年代相比, 2000—2050 年期间的增温幅度为 0.8~2.4 °C (表 7), 文献 [2] 到 2050 年增温幅度为 2.2~2.3 °C, 结果非常接近。估计 CO_2 浓度倍增 (浓度达到 560×10^{-6}) 时 (2151 年), 其所造成的增温达 6.8 °C。

SCL 和 CO₂ 对青藏铁路沿线平均年气温的影响不一致。未来 SCL 的变长使 T_w 降温, CO₂ 的增加使 T_w 升温。 T_w 对两影响因子的响应时间也有差异。表 7 给出了方程 (1)、(2) 和 (3) 的预测结果。

综合以上方法得出 2000—2090 年代青藏铁路沿线平均年气温的预测(表 7 综合结果)。与文献[2] 比较可以看出, 本文综合结果除 2000 年代比文献[2] 中相应的综合结果偏高 0.7℃外, 其余均偏低。到

表 7 不同预测方法预测的青藏铁路沿线平均年气温相对 1990 年代的增温及概率^[2]

Table 7 Decadal average temperature along Qinghai Xizang railway predicted by different methods corresponding to temperature rise and probability in 1990' s

预测方法	年代									
	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2080	2090	
方程(1)	0.4 (-0.1~0.8)	-0.4 (-0.5~-0.3)	-0.8 (-1.0~-0.6)	-1.1 (-1.2~-1.0)	-1.2 (-1.3~-1.1)	-1.0 (-1.1~-0.8)	-0.7 (-0.8~-0.6)	-0.7 (-0.8~-0.6)	-1.0 (-1.2~-0.8)	
概 率	0.75	0.84	0.84	0.87	0.88	0.58	0.54	0.49	0.46	
方程(2)	0.8 (0.6~1.0)	1.2 (1.0~1.4)	1.6 (1.4~1.8)	2.0 (1.8~2.2)	2.4 (2.2~2.5)	2.7 (2.5~2.9)	3.1 (2.9~3.3)	3.8 (3.7~4.0)	4.2 (4.0~4.4)	
概 率	0.26	0.31	0.34	0.37	0.39	0.41	0.42	0.44	0.44	
方程(3)	0.7 (0.5~0.9)	0.4 (0.2~0.6)	0.2 (0.1~0.3)	0.0 (-0.1~0.1)	0.0 (-0.1~0.1)	0.2 (0.0~0.3)	0.5 (0.3~0.6)	0.8 (0.7~0.9)	0.8 (0.7~0.9)	
概 率	0.71	0.85	0.58	0.84	0.73	0.71	0.67	0.64	0.64	
综合结果	0.6 (0.5~0.7)	0.4 (0.3~0.5)	0.3 (0.2~0.4)	0.2 (0.2~0.3)	0.3 (0.2~0.4)	0.5 (0.3~0.7)	0.8 (0.7~1.0)	1.2 (1.1~1.3)	1.2 (1.1~1.3)	
概 率	0.5~0.7	0.6~0.9	0.5~0.6	0.6~0.8	0.6~0.7	0.5~0.7	0.5~0.7	0.5~0.6	0.4~0.6	
文献[2] SCL		-0.8		-0.5		0.2				
文献[2] CO ₂		0.7~0.8		1.5		2.2~2.3				
文献[2] 综合		-0.3~0.1		0.8~1.2		2.2~2.7				

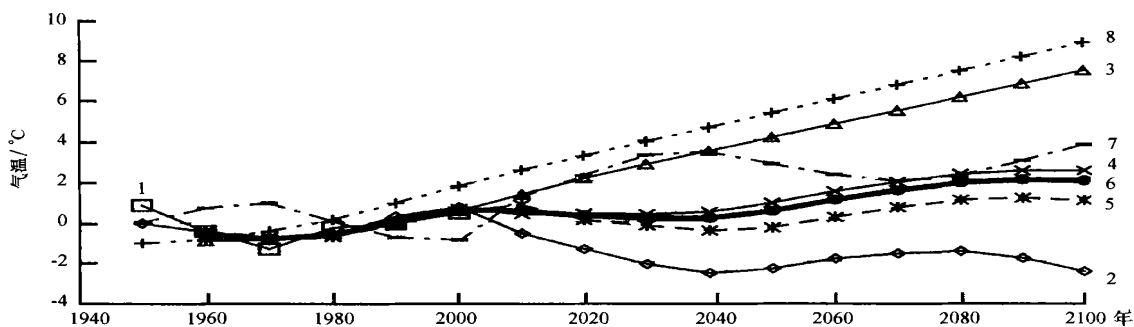


图 6 1944—2100 年 SCL、CO₂ 及青藏铁路沿线平均年气温变化拟合值和预测值

- 1: 10 年滑动平均实测青藏铁路沿线温度 T_w ; 2: 根据方程(1)计算的 T_{SCL} ; 3: 根据方程(2)计算的 T_{CO_2} ;
- 4: 方程(1)和(2)的平均值; 5: 根据方程(3)计算的 T_{SCL, CO_2} ; 6: 综合预测; 7: SCL 及其估计; 8: CO₂ 及其估计

Fig. 6 Simulation and prediction of standard SCL, CO₂ and annual average temperature along Qinghai-Xizang railway from 1944 to 2100. 1: 10-year running average standard annual temperature observed along Qinghai-Xizang railway; 2 and 3: 10-year running average standard temperature simulated and predicted along Qinghai-Xizang railway by equations (1) and (2), respectively; 4: Mean results of equations (1) and (2); 5: 10-year running average standard temperature simulated and predicted along Qinghai-Xizang railway by equation (3); 6: Mean results of equations (1), (2) and (3); 7: SCL's 10-year running average

standardization; 8: CO₂'s 10-year running average standardization

2050年这一偏差达 2°C 以上。究其原因,本文对SCL和 CO_2 是根据其影响能力(回归系数与相关系数)的大小确定其对青藏铁路沿线平均年气温变化的贡献,而文献[2]则重点考虑了 CO_2 的影响。

图6给出经标准化处理的,各种预测方法得出的1944—2000年(拟合值)及2001—2100年(预测值)各年代平均曲线。从2001和2002年历年实况或1992—2001年和1993—2002年平均来看,其预测偏差均在 0.1°C 以内。综合预测青藏铁路沿线平均年气温的10年滑动平均的最近一个极大值出现在1998—2007年间,目前气温在极值附近摆动。

5 结论与讨论

(1) 青藏铁路沿线7个常规气象站观测的年气温平均可以较好的代表其沿线平均年气温的总体变化趋势,1935年以来的变化具有显著的29年周期。

(2) 近1000年来的太阳黑子周期长度的变化存在非常显著的76、93、108、205和275年的周期振荡,利用这5个显著周期及均生函数模型可对SCL的变化进行模拟和预测:2001—2100年间的前50年SCL总体偏长,后50年总体偏短。2033年前后出现极大值,超过11.3年;2068年为极小值短于10.8年;2100年超过11.5年。

(3) 10年滑动的青藏铁路沿线平均年气温与SCL有落后5年的显著负相关,与大气 CO_2 有落后15年的显著正相关。未来50年SCL的影响可能使青藏铁路沿线气温降低,而 CO_2 的增加有利于沿线气温升高。经比较认为,青藏铁路沿线平均年气温对SCL的响应更快,更敏感, CO_2 的影响则表现得更加滞后和长远。

(4) 综合预测结果表明,未来50年青藏铁路沿线平均年气温还将继续上升,但变暖的速度将明显比1990年代减缓,变暖幅度与1990年代相比在 0.5°C 左右,与1971—2000年的平均相比,在 1.0°C 以内。这一升温幅度的概率为 $0.64\sim 0.73$ 。

(5) 由于人类活动影响(如温室气体等未来变化)的不确定性。气候变化的不确定性仍很大,未来有些年份、甚至有些年代极有可能要超出我们上述的估计。

致谢:汤懋苍研究员对本文提出了宝贵意见,在此深表感谢。

参考文献

- [1] 冯松, 汤懋苍. 未来30年和300年气候变化趋势预测[M]. 见: 汤懋苍, 程国栋, 林振耀主编. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响(第十章). 广州: 广东科学技术出版社, 1998. 209—222
- [2] 秦大河总主编. 中国西部环境演变评估[M]. 见: 丁一汇主编. 中国西部环境变化的预测(第二卷). 北京: 科学出版社, 2002. 16—46
- [3] Houghton J T, Y Ding, D J Griggs. Climate Change 2001[M]. The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 99
- [4] 高学杰, 李栋梁, 赵宗慈. 温室效应对青藏高原及青藏铁路沿线气候影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 458—463
- [5] 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
- [6] Schove D Justin. The sunspot cycle in 649B. C. to A. D. 2000[J]. J Geophys Res, 1955, 60: 127—146
- [7] Siegenthaler U, H Friedli, H Loetscher et al. Stable-isotope ratios and concentration of CO_2 in air from polar ice cores[J]. Annals of Glaciology, 1988, 10: 1—6
- [8] Neftel A, H Friedli, E Moor et al. Historical CO_2 record from the Siple station ice core[M]. In: Boden T A, D P Kaiser, R J Sepanski et al. eds. Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. Oak Ridge: Carbon Dioxide Inf. Anal. Cent., 1994. 11—14
- [9] Barnola J M, M Anklin, J Porcheron et al. CO_2 evolution during the last millennium as recorded by Antarctic and Greenland ice[J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 1995, 47: 264—272
- [10] Etheridge D M, L P Steele, R L Langenfelds. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO_2 over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn[J]. J Geophys Res - Atmosphere, 1996, 101: 4115—4128
- [11] Keeling C D, T P Whorf. Atmospheric CO_2 records from sites in the SIO air sampling network[M]. In: Trends: A compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA. 2000
- [12] 李生辰, 唐红玉, 马云仑等. 青藏高原冬、夏季月平均气温及异常分布研究[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 520—529
- [13] 汤懋苍, 钟海玲, 李栋梁. 青藏铁路沿线的四季划分及其温度变化分析[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 440—450
- [14] 汤懋苍, 白重瓌, 刘晓东. 高原近代气候变化的事实分析[M]. 见: 汤懋苍, 程国栋, 林振耀主编. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响(第六章). 广州: 广东科学技术出版社, 1998. 123—143
- [15] 李栋梁, 谢金南, 王蕾等. 甘肃河东年降水量的周期变化[J]. 高原气象, 2000, 19(3): 295—303
- [16] 魏凤英, 曹鸿兴. 长期预测的数学模型及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 9—12
- [17] 姚檀栋, 秦大河, 田立德等. 青藏高原2ka来温度与降水变化——古里雅冰芯记录[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(4): 348—353
- [18] 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. 中国科学(D辑), 1997, 27(5): 447

— 452

- [19] 张家诚, 林之光. 中国气候[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 331
- [20] 冯松, 汤懋苍. 近 2500 年的太阳活动与气温变化[J]. 第四纪研究, 1997, 17(1): 28–36
- [21] 冯松, 汤懋苍. 太阳活动百年尺度的跃变与气候跃变的相关分析[J]. 高原气象, 1998, 17(3): 266–270
- [22] 王文, 李栋梁. 青藏铁路沿线超长期气候变化的概率预测方法[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 495–498

Prediction of Annual Average Temperature Change along Qinghai-Xizang Railway

LI Dong-liang¹, GUO Hui¹, WANG Wen², WEI Li¹

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

2. Department of Atmospheric Sciences of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The annual average temperature of the stations along Qinghai-Xizang railway correlated well each other, especially the correlation of 10-year running average series of them is 0.92. According to the result, the annual average temperature series along Qinghai-Xizang railway (T_{rw}) from 1935 to 2000 are constructed. The results show that there is notable response between T_{rw} and the sunspot cycle length (SCL) and atmospheric carbon dioxide concentrations (CO_2) with lagging 5 and 15 years, respectively. The correlation coefficient between them respectively is -0.76 (SCL) and 0.88 (CO_2). Using 76 a, 93 a, 108 a, 205 a and 75 a significant cycle of SCL and the model of mean generating function, the fast and slow periods of the future SCL is predicted, and the values of SCL in the former 50 years in 2000 will be higher as a whole, and will be lower in the latter 50 years. Considering double CO_2 concentrations and the climatic change, T_{rw} of 21st century is forecasted to warm up about $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ as compared with the last 10 years in 20th century (1990's), and about $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ as compared with the last 30 years of 20th century (1971–2000).

Key words: Along Qinghai-Xizang railway; Annual average temperature; Sunspot cycle length (SCL); Atmospheric carbon dioxide concentrations (CO_2)