

文章编号: 1000 0534(2005) 05 0694 06

青藏铁路沿线地面气温和地温的年际变化趋势及与地形的关系

李栋梁, 柳苗, 钟海玲, 吴青柏

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 利用青藏铁路沿线常规气象观测站自建站至 2002 年月平均地面气温和地表温度, 通过插补建立了 1960—2002 年青藏铁路沿线各站各季及年平均温度资料完整的序列。分析表明, 青藏铁路沿线温度近 40 年来的变化是明显的, 升温最显著的是冬季、秋季, 升温率分别达到 $0.41^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 春季升温率只有 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。年平均气温和地温的升温率分别为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 地温的升高比气温要快。升温率与海拔高度呈负相关, 其相关系数为 -0.807 。升温率随海拔高度的升高而减小。盆地升温率比高山大。铁路沿线地温与气温变化间的相关系数达 0.767 。在相对冷期, 气温的波动幅度大于地温; 在相对暖期, 地温的升高明显比气温快。

关键词: 青藏铁路沿线; 气温; 地表温度; 升温率; 变化趋势

中图分类号: P423.3 **文献标识码:** A

1 引言

青藏高原是世界上最高大的高原, 平均海拔在 4000 m 以上, 号称世界第三极。青藏高原地区具有独特的地理特征, 地形、地表状况复杂, 是我国主要的寒区和冻土区, 也是全球气候变化中的一个独特的区域。修筑青藏铁路是一件利国利民的大事, 它的修建会对西藏地区、西部地区乃至全国的社会经济发展产生巨大的推动力, 对西藏地区的开发、建设及发展更是有着不可估量的作用。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 以上的地段约为 965 km, 占总长度的 86%, 其修建难度可想而知, 在这中间路基的冻土问题又成为青藏铁路修筑中的重大难题。青藏高原的气候变化对冻土的影响比较大, 这必然会影响到路基的稳定性。为了青藏铁路的安全畅通, 就必须研究全球气候变化背景下青藏高原气候、冻土的变化规律。

2001 年的 IPCC 报告中已经指出, 在 21 世纪, 全球变暖将比 20 世纪要明显的多, 其升温速度可

能是过去 1 万年里从未有过的。全球表面温度预计在 21 世纪的 100 年间上升 $1.4 \sim 5.8^{\circ}\text{C}^{[2-6]}$ 。李栋梁等^[7, 8]的研究指出, 在青藏铁路沿线(下称铁路沿线)地面气温变化受到自然变化(太阳活动强弱)和人类活动(大气 CO_2)的共同影响, 未来 21 世纪气候还将继续变暖, 但变暖的速率将明显比 1990 年代减缓。本文重点分析了铁路沿线各站的气温、地温年代际变化趋势及气温、地温与纬度、海拔、地形的关系。

2 资料及其预处理

资料选用了青藏铁路沿线自北向南的 7 个常规气象观测站自建站到 2002 年连续观测的地面年平均气温(表 1), 最低、最高气温及地温(地面 0 cm 温度, 下同)资料。由于青藏高原资料观测的连续性相对较差, 对缺测资料利用同期相关最好的邻近站通过线性回归方法进行了插补, 使其趋于完整。在分析近 40 年气温、地温变化趋势及其升温率的基础上, 进一步研究了温度变化倾向率与测站地理信息的关系。

收稿日期: 2005 01 04; 改回日期: 2005 05 18

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”项目(KZCX1 SW 04)资助

作者简介: 李栋梁(1957—), 男, 甘肃通渭人, 研究员, 博士生导师, 主要从事气候变化和预测、环境动力学等的研究

E-mail: lidl@lzb.ac.cn

表 1 青藏铁路沿线观测站情况

Table 1 The observation stations along Qinghai Xizang railway

站名	区站号	经度/°E	纬度/°N	海拔高度/m	资料起止年代
格尔木	52818	94.54	36.25	2807.6	1956—2002
五道梁	52908	93.05	35.13	4612.2	1959—2002
托托河	56004	92.26	34.13	4533.1	1959—2002
安多	55294	91.06	32.21	4800.0	1966—2002
那曲	55299	92.04	31.29	4507.0	1955—2002
当雄	55493	91.06	30.29	4200.0	1963—2002
拉萨	55591	91.08	29.40	3648.7	1951—2002

表 2 给出各站地温资料补充前(左下三角矩阵)和补充后(右上三角矩阵)的相关系数。由表可看出,补充前资料序列短,平均相关系数仅为 0.507,补充后为 0.542。不仅资料序列延长,平均相关系数也有所增大。首先表现在高原南部测站的相关系数增大,如拉萨与各站相关系数由补充前的 0.439 增加到 0.533;当雄平均相关系数由补充前的 0.439 增加到 0.485。其次是相邻站相关系数的增大,如五道梁与格尔木站相关系数由补充前的 0.745 增加到 0.877;那曲与安多相关系数由补充前的 0.729 增加到 0.873。

表 2 地温资料插补前后各站互相关系数

Table 2 The coefficient of coherency of 0 cm ground temperature among every station before and after interpolations

站名	格尔木	五道梁	托托河	安多	那曲	当雄	拉萨
格尔木	1.000	0.877	0.636	0.519	0.493	0.472	0.566
五道梁	0.745	1.000	0.737	0.512	0.564	0.425	0.484
托托河	0.499	0.714	1.000	0.294	0.465	0.180	0.261
安多	0.674	0.644	0.266	1.000	0.873	0.565	0.565
那曲	0.496	0.745	0.539	0.729	1.000	0.567	0.619
当雄	0.434	0.318	0.073	0.541	0.603	1.000	0.701
拉萨	0.572	0.232	0.070	0.498	0.594	0.667	1.000

注:左下三角矩阵为补充前的相关系数,右上三角矩阵为补充后的相关系数

3 温度变化趋势

3.1 气温的年代际变化

青藏铁路自北向南横跨高原,不同路段、不同地理位置气候的差异是显而易见的。铁路沿线 7 个站是否能代表铁路沿线的气温和地温的变化?李栋

梁等^[7,8]通过对 7 个站的相关系数及 10 年滑动平均相关系数分析后发现,铁路沿线 7 个常规气象站观测的地面年气温平均、地温平均都可以较好地代表其沿线平均年气温、地温的总体变化趋势。

表 3 列出铁路沿线各季、各年代及近 40 年的平均气温。由表可以看出,铁路沿线在近 40 年来的升温是极其显著的,年平均气温 1990 年代与多年平均相比上升了 0.5℃,是近 40 年中最暖的 10 年;1970 年代和 1980 年代持平;1960 年代偏低 0.5℃;在各季气候变化中,冬季的升温率总体虽然最大,但主要集中在 1960—1970 年代,1960 年代最冷,偏冷 0.6℃,1970、1980 和 1990 年代不仅与多年平均基本持平,而且保持平稳;1990 年代升温最显著的是春季,比其多年平均偏高 0.6℃,比前 30 年分别升高了 1.0、0.6 和 0.8℃;秋季升温也是显著的,1960 年代偏低 0.7℃,1970 年代和 1980 年代持平,到 1990 年代偏高 0.6℃;夏季升温最小,各年代的距平绝对值均不足 0.5℃。就年代间升温而言,1960—1970 年代的 20 年气温升高最快,主要表现在秋冬季,增温在 0.8℃,年平均在 0.6℃。这期间春、夏季总体保持稳定,增温不足 0.5℃。1970—1980 年代变化不明显。

表 3 铁路沿线各站各年代各季节地面平均气温的变化(℃)

Table 3 Interdecadal change of annual mean temperature in every season along Qinghai Xizang railway stations

季节	年 代				
	1960	1970	1980	1990	1961—2000 年
春季	0.1	0.5	0.3	1.1	0.5
夏季	9.5	9.7	10.0	10.2	9.9
秋季	-0.5	0.3	0.3	0.8	0.2
冬季	-11.0	-10.2	-10.2	-10.2	-10.4
年平均	-0.5	0.1	0.1	0.5	0.0

从图 1 给出的铁路沿线各季及年平均气温的年际变化、气温(Y)随时间(年份 X)变化的一阶线性趋势(粗直线)及其方程、气温序列与年份序列相关系数的平方。由图可看出,自 1960 年代起一直是逐渐升温的,1960 年代是一个相对低温时段,1970 年代温度开始回升,1980 年代中后期进入相对高温时段,1990 年代升温更明显,是近 40 年来最温暖的 10 年。比较各季来看,冬季、秋季的升温率最大,为 0.4℃/10a;春季、夏季的升温率最小,为 0.2℃/10a;年平均升温率为 0.3℃/10a。但就一阶线性趋势方程的拟合率来说,拟合(相关)最好的是

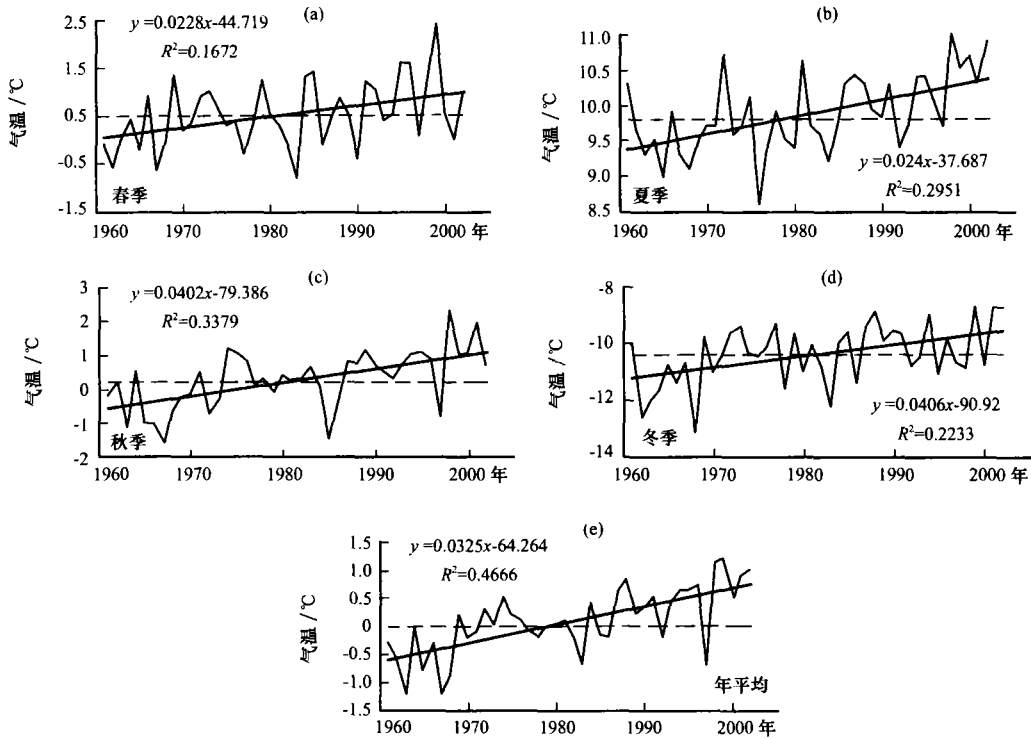


图 1 青藏铁路沿线各站平均的各季及年气温变化曲线
折线为实测值，直线为线性趋势

Fig. 1 Averaged surface air temperature change curves along Qinghai Xizang railway stations for seasons and years Broken line is the observed, straight line is linear trend

年平均(0.6831)，其余依次为秋季(0.5813)，夏季(0.5432)，冬季(0.4725)和春季(0.4089)。即使拟合(相关)最差的春季也已通过 $\alpha_{0.01}$ 显著性水平检验 ($N=42$, $\alpha_{0.01} = 0.3932$)。表 4 给出了铁路沿线各站年平均气温在不同年代的平均距平。由表 4 可看到，各站点的气温变化及升温分布极不均匀，如格尔木气温 40 年升高了 2.0℃；其次是那曲，升温 1.4℃；最小是托托河和安多升温才 0.5℃。各个年代升温有所不同，在 1960—1970 年代升温比较大，而到了 1970 年代末至 1980 年代中期，升温较小，部分站甚至没有升温；到 1980 年代末，升温又开始加强。不过，有个别站如安多，其升温在 1960—1970 年代是很快的，但自 1970 年代起，一直是比较平稳。表 4 最后一行为铁路沿线 7 站各年代的平均值，反映各年代铁路沿线平均的相对冷暖。

3.2 铁路沿线气温变化与纬度的关系

铁路沿线气温变化随着纬度的不同，有着较大的变化。那曲和托托河两站海拔相差仅为 26 m，根据海拔高度差引起的温度差约在 0.1~0.15℃，因此两地的温度差可以认为是由纬度差所致。但由

表 2 中可见，铁路沿线各站的升温率与纬度之间的相关系数并不大。随着纬度的降低，温度有一定的升高，最低温度和最高温度也是随纬度的降低而升高，其值约为 $1^\circ\text{C}/1^\circ\text{lat}^{10}$ 。然而升温率并没有完全随纬度的减小而升高。铁路沿线各站升温率随纬度的减小先降低(北部)，而后升高(南部)，其极点是托托河，主要原因是安多、那曲、当雄的海拔要

表 4 青藏铁路沿线各站各年代平均年气温距平(°C)
Table 4 Annual mean air temperature anomaly(°C) of every station along Qinghai Xizang railway

站点	年代					40年平均
	1960	1970	1980	1990	1990—1960	
格尔木	-1.2	0.2	0.3	0.8	2.0	4.9
五道梁	-0.4	0.1	-0.0	0.3	0.7	-5.5
托托河	-0.2	0.2	-0.3	0.3	0.5	-4.2
安多	-0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	-2.9
那曲	-0.8	-0.1	0.2	0.6	1.4	-1.4
当雄	-0.5	0.1	0.3	0.8	1.6	
拉萨	-0.7	-0.1	0.1	0.6	1.3	7.7
平均	-0.59	0.06	0.09	0.44	1.03	0.0

高于拉萨, 由此产生了升温率的变化较大, 造成了升温率较低。

3.3 铁路沿线气温变化与海拔高度的关系

温度一般是随着高度的增加而降低的, 但由于地形等原因会出现逆温^[1], 而升温率与海拔高度的关系又是如何呢? 从表5可以看出, 铁路沿线各站的海拔高度及其相应的增温率。图2进一步给出了增温率随海拔高度变化的一阶线性趋势(粗直线)及其方程、增温率序列与海拔高度序列相关系数的平方。 X 前的系数 -0.0002 表明, 随着海拔高度的升高增温率是不断减小的, 两者的拟合(相关)系数为 -0.807 , 超过了95%信度检验。海拔高度与升温率的负相关较好, 这充分表明了在铁路沿线温度增长率随海拔高度升高而降低, 气候变暖的速率随海拔高度的升高而趋于减缓。而且铁路沿线温度增长率随海拔高度升高的减缓速率要大于整个高原的平均情况^[11]。

表5 青藏铁路沿线海拔高度与气温升温率

Table 5 Surface air temperature warming rate and altitude along Qinghai Xizang railway stations

站点	格尔木	五道梁	托托河	安多	那曲	当雄	拉萨
海拔高度 x/m	2807.6	4612.2	4533.1	4800.0	4507.0	4200.0	3648.7
升温率 y / ($^{\circ}C/10a$)	0.615	0.197	0.08	0.173	0.461	0.267	0.423

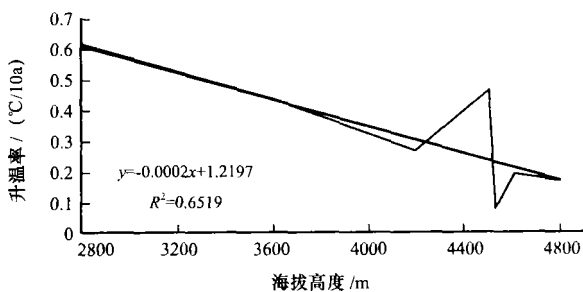


图2 青藏铁路沿线升温率与海拔高度的关系

Fig. 2 The relationship between air temperature warming rate and altitude along Qinghai Xizang railway stations

3.4 铁路沿线气温变化与地形的关系

从地形上看, 青藏铁路共穿过4个盆地, 3座高山, 即柴达木盆地、通天河盆地(亦称为“长江源盆地”)、那曲河谷盆地(亦称“怒江源盆地”)、拉萨河谷盆地, 三座高山为昆仑山、唐古拉山和念青唐古拉山。沿线各站分别位于盆地与高山之间, 其中

格尔木、托托河、那曲、拉萨均位于河谷盆地中, 五道梁、安多、当雄位于高山与盆地之间。从表5中可以得出格尔木、托托河、那曲、拉萨的平均升温率为 $0.39^{\circ}C/10a$, 其中升温最大的是格尔木, 达到了 $0.62^{\circ}C/10a$ 。升温率最小的为托托河, 为 $0.08^{\circ}C/10a$ 。托托河在1982年冬季由于特大积雪影响, 气温异常偏低^[12], 导致了1980年代的升温不明显, 使其升温率较其他各个盆地站要小。位于高山站的五道梁、安多、当雄的平均升温率为 $0.21^{\circ}C/10a$ 。总体上来说, 铁路沿线平均升温率为 $0.32^{\circ}C/10a$, 但盆地站的升温率比高山站的大86%。由进一步分析还可看出, 在铁路沿线由盆地(高山)向高山(盆地)过渡中, 气温升温率的减小(增大)在不同高度、不同纬度差异很大。从格尔木到五道梁, 海拔升高了1804.6 m, 纬度降低了 1.2° , 气温升温率的减小为 $0.19^{\circ}C/10a \cdot km \cdot lat$, 但托托河例外; 从安多到那曲, 海拔高度降低了293.0 m, 纬度降低了 0.87° , 气温升温率的增加为 $1.13^{\circ}C/10a \cdot km \cdot lat$; 从当雄到拉萨, 海拔高度降低了551.3 m, 纬度降低了 0.82° , 气温升温率的增加为 $0.35^{\circ}C/10a \cdot km \cdot lat$, 即海拔高度越高, 气温升温率的减小越明显。

4 铁路沿线地温变化趋势及与气温的关系

表6列出铁路沿线各站各年代平均地温及其升温率。与表4比较可以看出, 地温和气温一样在近40年的升温是比较显著的, 平均1990年代比1960年代升温 $1.1^{\circ}C$, 升温率为 $0.36^{\circ}C/10a$ (图3), 特别是在1980—1990年代温度升高了 $0.6^{\circ}C$ 。铁路沿线地温升温最明显的仍然在两端的格尔木和拉萨。总体来说, 地温的升温率比气温的升温率要高(格尔木和那曲除外)。

从图3及表6中可以看出, 铁路沿线地温从1960年代至2000年一直是逐渐升温的, 升温幅度比较明显, 但并不是均匀升温的。1960年代是一个相对低温时段, 但升温较快; 1970年代温度继续回升, 但升温并不明显; 1980年代中后期进入相对高温时段, 升温进入一个快速时期; 1990年代继续变暖, 是近40年来最温暖的10年。

地温与气温在近40年的变化具有很好的一致性(见图3, 图1), 原始序列的相关系数达到了0.8825。由于地温和气温都有非常明显的线性趋势, 是否会过分夸大这种相关性? 为此, 图4给出

表 6 青藏铁路沿线年地温的年代际平均(°C)及其升温率¹⁾(°C/10a)

Table 6 The interdecadal mean ground temperature (°C) along Qinghai Xizang railway and its ascending rate (°C/10a)

测站	年 代					升温率	40年平均
	1960	1970	1980	1990	1990—1960		
格尔木	7.1	7.8	8.0	8.4	1.3	0.423	7.8
五道梁	-1.6	-1.3	-1.9	-0.7	0.9	0.233	-1.4
托托河	-0.6	-0.3	-0.8	0.2	0.8	0.188	-0.3
安多	0.4	0.7	0.9	1.3	0.9	0.284	0.8
那曲	2.0	2.3	2.2	3.0	1.0	0.305	2.4
当雄	5.0	4.7	6.0	6.1	1.1	0.476	5.4
拉萨	10.2	10.6	11.3	11.9	1.7	0.584	11.0
平均	3.2	3.5	3.7	4.3	1.1	0.360	3.7

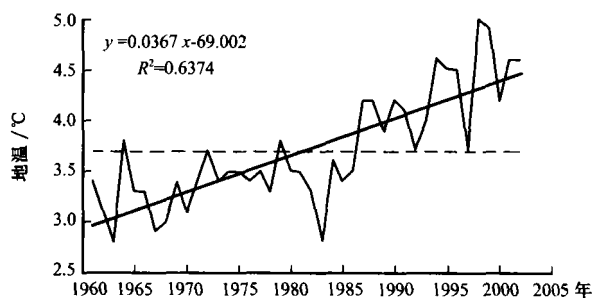


图 3 青藏铁路沿线平均年地温变化

Fig. 3 Annual mean ground temperature changes along Qinghai Xizang railway stations

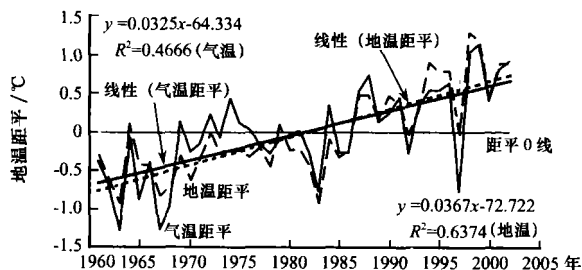


图 4 青藏铁路沿线平均年地温距平(虚线)与气温距平(实线)变化

Fig. 4 Annual mean ground temperature anomaly (dashed line) and air temperature anomaly changes (solid line) along Qinghai Xizang railway stations

了两个序列的距平,其线性趋势方程的斜率(升温率)与原始资料序列(图3,图1)相同,地温(虚线)大于气温(实线),截距之差即为原始资料序列的平均值。根据图4给出的线性倾向率分别对年平均地温和气温去掉线性趋势,然后求其自然变化的相关系数,结果为0.7667,略小于原始序列。这进一步

说明地温与气温在演变过程中,既有一致的长期趋势,又有非常好的年际相关性(图略)。经过对地温和气温的变化趋势、幅度范围的分析,可以进一步发现,地温与气温的升温率及变化虽然趋于一致,但平均地温比气温要高 3.6°C 。在1960—1970年代气候相对偏冷时期,气温变化的波动振幅比地温大;在1980—1990年代气候相对暖期,地温的增长幅度要大于气温。从图4可以看出,1963,1967,1983和1997年出现了异常低温,这是因为这些年的冬季出现大范围、长时间雪灾使地温和气温都特别低。

5 结论

通过对青藏铁路沿线各站的气温、地温进行比较分析后,得出以下结论:

(1) 青藏铁路沿线气温在近40年来的变化是极其显著的,主要表现在冬季和秋季的变暖,升温率分别达到了 $0.41^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,春季升温率最小,只有 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。年平均气温和地温的升温率分别为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。除格尔木和那曲外,铁路沿线地温的升高均比气温要快。

(2) 青藏铁路沿线各站的升温率与海拔高度呈负相关,其相关系数为 -0.807 。升温率随海拔高度的升高而减小,而且盆地升温率比高山的大。

(3) 地温变化与气温有很好的关系,其相关系数达到了0.767。在近40年中的相对冷期,气温的波动幅度大于地温;在后期相对暖期,地温的升高明显比气温快。

参考文献

[1] 汤懋苍,钟海铃,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
- [2] Houghton J T, G J Jenkins, J Ephraums et al. Climate Change[R]. The IPCC Scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 364
- [3] Houghton J T, B A Callander, S K Vamey et al. Climate Change[R]. The Supplementary Report to the IPCC Scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 220
- [4] Houghton J T, L G Meira Filho, B A Callander et al. The Science of Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 572
- [5] Houghton J T. The IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES) [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 120
- [6] Houghton J T, Ding Y eds. Climate Change 2000[R]. The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 770
- [7] LI Dongliang, GUO Hui, WANG Wen et al. Effects of sun spot cycle length and CO₂ on air temperature along Qinghai Xizang Railway and air temperature's trend prediction[J]. Science in China(Series D), 2004, 47(Supp.): 131-141
- [8] 李栋梁, 郭慧, 王文等. 青藏铁路沿线平均年气温变化趋势预测[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 431-439
- [9] 李栋梁, 钟海玲, 吴青柏等. 青藏高原地表温度的变化分析[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 291-298
- [10] 李栋梁, 郭慧, 李跃清等. 青藏高原及铁路沿线地表温度变化趋势预测[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 685-693
- [11] ZHU Wenqin, CHEN Longxun, ZHOU Zijiang. Several characteristics of contemporary climate change in the Tibetan Plateau[J]. Science in China(Series D), 2001, 44(Supp.): 410-420
- [12] 瞿章, 王可丽. 1982年8月—1983年7月青藏高原及其邻近地区的环流和天气[J]. 高原气象, 1985, 4(4, 增刊): 21-35

Interdecadal Change Trend of Surface Air and Ground Temperatures along Qinghai Xizang Railway and Relationship between the Change and Terrain

LI Dong liang, LIU Miao, ZHONG Hai ling, WU Qing bai

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

Abstract: The monthly mean surface air temperature, 0 cm ground temperature of weather stations along Qinghai Xizang railway from beginning to 2002 are analyzed. Seasonal and annual mean temperature data are found from 1961 to 2002 by using interpolation. The analyzed result showed that the variation of temperature is obviously along Qinghai Xizang railway in recent 40 years. The temperature ascending rate is the most obvious in winter and autumn. The temperature ascending rates are 0.41 °C/10a and 0.40 °C/10a respectively. The temperature ascending rate in spring is only 0.23 °C/10a. The ascending rates of annual mean air temperature and 0 cm ground temperature are 0.33 °C/10a and 0.37 °C/10a respectively, and 0 cm ground temperature ascending rate is faster than air temperature ascending rate. The temperature ascending rate have anticorrelation with sea level elevation, and its coherency coefficient is 0.807. The temperature ascending rate decrease with sea level elevation increasing. The temperature ascending rate in basin is higher than temperature ascending rate in mountain. There is 0.767 coefficient of coherency between the variations of 0 cm ground temperature and air temperature. In comparatively colder times, the fluctuation extent of air temperature is bigger than the fluctuation extent of 0 cm ground temperature. In comparatively warmer times, the ascending of 0 cm ground temperature is faster than air temperature.

Key words: Along Qinghai Xizang railway; Air temperature; 0 cm ground temperature; Temperature ascending rate; Variation trend