

青藏铁路沿线 1966–2004 年 冻结与融化指数的变化趋势

姜逢清, 胡汝骥, 李 珍

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 利用日气温观测值计算了青藏铁路沿线 7 个主要气象站 1966–2004 年的年冻结与融化指数, 分析了这些指数的统计与分布特征, 并应用两种趋势检验方法: 非参数 Mann-Kendall 检验法和简单线性回归法分析了这些台站年冻结与融化指数的变化趋势。结果表明, 青藏铁路沿线多年平均冻结指数大致分布在 95~2300 °C·日之间, 多年平均融化指数大致在 630~3250 °C·日之间。7 个站点的冻结指数均呈减少趋势, 其线性倾向率分布在 -16.6~-59.1 °C·日/10a 之间; 融化指数均呈增加趋势, 其线性倾向率分布在 19.8~45.6 °C·日/10a 之间。MK 趋势检验的结果显示, 除格尔木表现出微弱的减少趋势外, 其他站点都呈现了 0.05 水平下的显著减少趋势; 年融化指数除格尔木和沱沱河表现出弱增加趋势外, 其他 5 个台站都显示出了 0.05 水平下的显著增加趋势。简单线性回归方法得到的趋势结果与 MK 趋势检验结果相一致。

关键词: 冻结与融化指数; 永久与季节冻土; 全球变暖; 趋势; 青藏铁路

1 引言

近年来, 与全球变暖同步, 青藏高原也存在显著的变暖趋势^[1-3]。青藏高原变暖对区域生态环境产生了明显的影响, 比较突出的是多年冻土区面积的萎缩、冻土活动层厚度的加大、草地的退化和沙漠化等^[4-6]。随着多年冻土区面积的萎缩和冻土活动层厚度的加大, 不仅区域水文、土壤和生物环境会发生明显地改变, 而且更严重的是区域土木工程环境稳定性, 如地基稳定度等也会显著降低^[7-9]。这样, 本区域人类的生产、生活无疑会受到比较大的影响, 其中最令人担忧的当属新修通的青藏铁路。因而, 对这类与区域气候变暖有关的冻土研究就显得异常迫切。虽然相关研究已开展了几十年, 尤其在有关这一区域的冻土环境变化及其影响的研究方面, 取得的成果更多, 但在区域冻结和融化指数长期变化趋势方面的研究不多, 仅有文献^[10]报道了所做的部分研究。鉴于年冻结和融化指数有助于永久冻土和季节冻土的分布评价、具有重要的工程意义并且是高纬度和中纬度高山区气候变化的有用指示器^[8-10], 所以本研究利用青藏铁路沿线 7 个主要台站的气温观测数据计算长期冻结和融化指数, 并利用参数和非参数检验法分析其变化趋势, 为铁路沿线区域的气候变化、冻土变化尤其是冻土活动层深度变化以及可能的生态环境演变研究与预测奠定必要的基础。

收稿日期: 2007-03-12; 修订日期: 2007-07-05

基金项目: 中国科学院新疆生态与地理研究所知识创新工程所长基金项目资助 [Foundation: Knowledge Innovation Project of Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS]

作者简介: 姜逢清 (1963-), 男, 湖南常德人, 副研究员, 博士, 主要从事区域气候与环境变化研究。

E-mail: jiangfengqing@gmail.com

2 数据与方法

2.1 数据

数据源于中国气象局国家气象中心资料室整编的全国逐日最高和最低气温值。选取青藏铁路沿线数据完整性较好的7个站点(图1),由北向南分别为格尔木、五道梁、沱沱河、安多、那曲、当雄和拉萨作为主要研究站点。数据年限为1966-2004年的39年。

总体上,所使用的数据质量比较好,但存在个别缺测现象。对缺测数据进行了适当插补,方法为:对单日缺测,用本站前后各1天的值取平均作为该缺测值;对两日以上连续缺测值,采用缺测站与相邻站进行线性回归的方法插补。值得说明的是,由于拉萨站1968年5月31日-10月31日无观测资料,导致该年相关指数的计算无法完成。为保证选择站点的完整性,本研究中利用与该站直线距离约100 km的当雄站的数据,经线性相关检查,发现两站的数据序列相关性很高,相关系数达0.95以上,因此,拉萨站的缺测数据也同样利用上述线性回归的方法做了插补。

2.2 年冻/融指数计算方法

在文献中有许多气温冻结和融化指数的概念及计算方法。Frauenfeld等人2006年对

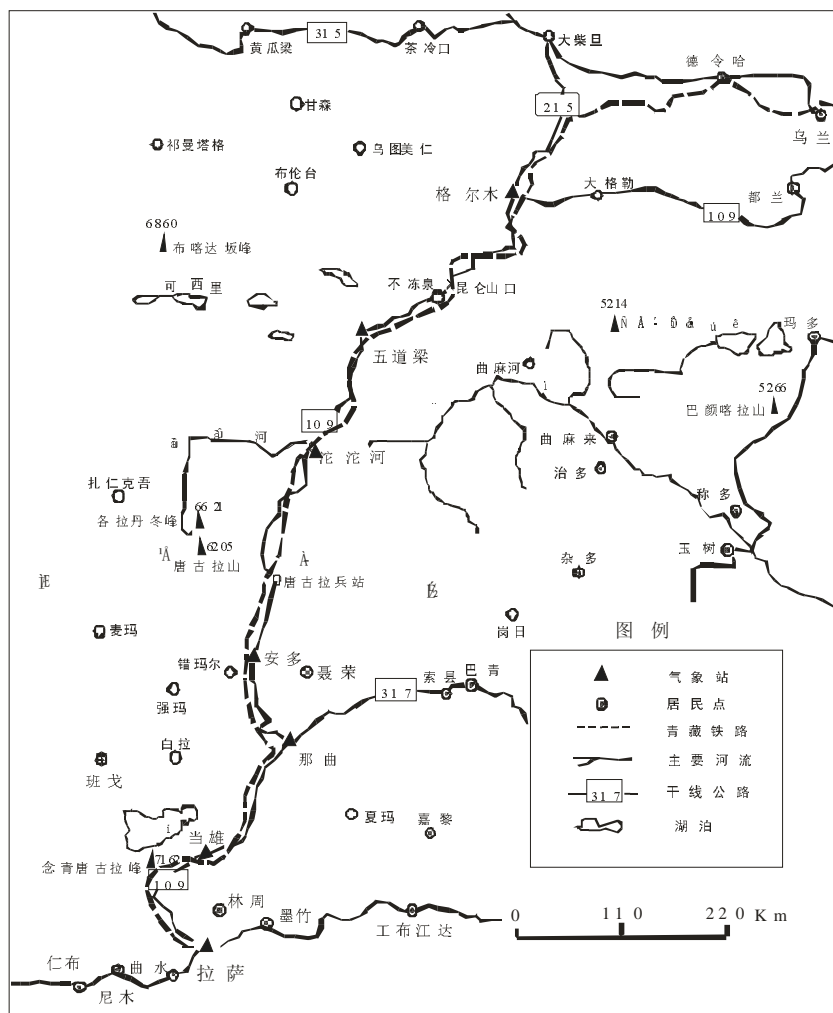


图1 研究区位置与所选研究站点分布

Fig. 1 Sketch map showing the study area and selected stations

这些概念和相应的计算方法做了详细述评^[10]。此外, 我国程国栋院士也提出了根据气温的年最大和最小月平均值计算铁路路基表面的融化指数与冻结指数的方法^[7]。一般情况下, 冻结与融化指数用日观测值来计算, 但对于一些缺乏有效数据的高纬度区和高山区, 也有利用月气温值来估计的^[9]。冻结和融化指数定义为给定时期内度日的累积数。融化指数低于冻结指数的区域可能由一些永久冻土所覆盖, 而具有小融化指数和非常大的冻结指数的区域可能下覆有连续永久冻土^[10]。

在本研究中, 依照 2006 年 Frauenfeld 等人介绍的方法, 利用日气温数据来计算上述两种指数, 冻结 (融化) 指数为冻结 (融化) 期所有温度低于 (高于) 0 °C 日数的日平均温度的和。一般冻结指数按下式计算:

$$FI = \int_{t_0}^{t_1} |T| dt, \quad T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= \sum_{i=1}^{N_F} |T_i| \quad T_i < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

方程中第一个等式为冻结指数的理论计算式, 其中 FI 为冻结指数, 相应于气温 T , 从冷季的开始 (t_0) 积分到结尾 (t_1)。第二个等式为计算冻结指数的经验公式, 将冻结指数简单地确定为温度低于冻结点的所有日数的日气温总和的绝对值, 式中, $i = 1, 2, 3, \dots, N_F$, 为年内温度低于冻结点日数; T_i 为日平均气温, 本文的日平均气温取日最高气温与最低气温的算术平均值, 即 $T_i = (T_{\max} + T_{\min})/2$ 。

类似地, 融化指数 TI 为从融化期开始 (t_1) 到结束 (t_2) 气温的积分 ((2) 式中的第一个等式), 或简单地, 温度高于冻结点所有日气温的总和 ((2) 式中的第二个等式), 其计算式如下:

$$TI = \int_{t_0}^{t_2} T dt, \quad T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= \sum_{i=1}^{N_T} T_i \quad T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, N_T$, 为年内温度高于冻结点日数, 其它符号与方程 (1) 中的相同。

一般来讲, 冻 / 融指数包括两种类型, 空气冻 / 融指数: 距地面 150 cm 高度处的冻 / 融指数; 地表冻 / 融指数: 地面 0 cm 处的冻 / 融指数。本文所指的冻结 - 融化指数仅指空气冻结 / 融化指数。

2.3 趋势检验方法

趋势在气候研究上非常重要, 并且在气候系统中普遍存在^[11]。以往的研究和分析中通常使用参数统计方法, 如滑动平均法和线性回归法等来估计趋势。这些方法的共同特点是对所分析的数据有正态性的要求。而非参数 Mann-Kendall 检验法对研究数据分布的正态性没有要求, 它是一种基于排序的方法, 适合于检测非线性趋势^[12]。本文使用两种方法检验度日数时间序列的趋势, 一为非参数 Mann-Kendall 检验法, 用于分析 7 个台站年冻结与融化指数时间序列的正或负趋势; 二为简单线性回归法, 用于分析 7 个台站年冻结与融化指数每 10 年的变化速率 (线性倾向率)。

由于序列相关性通过引入系统误差而对趋势的检验和解释产生影响^[11, 13], 因而在进行 MK 检验之前, 对所计算出的年融化 / 冻结指数时间序列做了迟滞 1a 的序列相关性检验。经检验发现, 沱沱河站的融化指数时间序列存在迟滞 1a 的序列相关性, 其相关的显著水平为 0.05; 那曲站的融化和冻结指数序列在 0.01 显著水平下存在迟滞 1a 的序列相关性, 而拉萨站的融化和冻结指数也都存在 0.05 显著水平下的迟滞 1a 的序列相关性。为消除序列相关性的影响, 对原融化和冻结指数序列值做预白化 (pre-whitened) 处理^[11], 处理后的

序列为: $(x_2-r_1x_1, x_3-r_1x_2, \dots, x_n-r_1x_{n-1})$, 其中 x_i 为原指数值, r_1 为原指数序列值与其迟滞 1a 值的相关系数。之后, 对这些预白化的序列做 MK 趋势和线性趋势检验, 对其他不存在序列相关性的时间序列可以直接进行 MK 趋势和线性检验。

3 结果与讨论

3.1 冻结指数的变化趋势

利用方程 (1) 中的第二个等式计算了青藏铁路沿线 7 个主要台站 1966-2004 年的年冻结指数, 由这些指数的统计特征(表 1, 图 2)可见, 青藏铁路沿线的多年平均冻结指数大致分布在 95~2300 °C·日之间, 以五道梁站最大为 2271.7 °C·日、拉萨站最小为 95.4 °C·日, 格尔木站次之为 719.9 °C·日。本文计算出的多年平均冻结指数计算值(五道梁站 2271.7 °C·日、沱沱河站 2131.0 °C·日)与王家澄等人 1979 年的计算值(五道梁站 2576 °C·日、沱沱河站 2323 °C·日)^[14]基本一致。沱沱河站、安多站和拉萨站的最大值分别出现在 1985 年、1997 年和 1981 年, 其他 4 站均出现在 1967 年; 除格尔木站、当雄站和拉萨站的最小值分别出现在 1999 年、2001 年和 2001 年外, 其他 4 站均出现在 2003 年。7 个台站冻结指数的变幅以沱沱河站的最大, 拉萨站的最小, 分别为: 格尔木站 648.9 °C·日、五道梁站 666.0 °C·日、沱沱河站 1488.1 °C·日、安多站 909.7 °C·日、那曲站 816.1 °C·日、当雄站 493.6 °C·日和拉萨站 201.7 °C·日。年冻结指数的标准差分布在 51~268 °C·日

表 1 青藏铁路沿线 7 个主要台站的年融化与冻结指数的统计特征

Tab. 1 Statistical features of the annual freezing and thawing index for 7 stations along the Qinghai-Xizang Railway

| | | 最大值 | 最大值 | 最小值 | 最小值 | 多年平均值 | 标准差 |
|----------------|-----|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | 出现的年份 | | 出现的年份 | | |
| 冻结指数 (°C·日) | 格尔木 | 1145.6 | 1967 | 496.7 | 1999 | 719.9 | 153.6 |
| | 五道梁 | 2614.6 | 1967 | 1948.6 | 2003 | 2271.7 | 162.0 |
| | 沱沱河 | 3265.6 | 1985 | 1777.5 | 2003 | 2131.0 | 267.3 |
| | 安多 | 2390.7 | 1997 | 1481.0 | 2003 | 1773.5 | 195.9 |
| | 那曲 | 1964.1 | 1967 | 1148.0 | 2003 | 1439.6 | 193.8 |
| | 当雄 | 1111.5 | 1967 | 617.9 | 2001 | 855.3 | 151.0 |
| | 拉萨 | 222.2 | 1981 | 20.5 | 2001 | 95.4 | 51.7 |
| 融化指数 (°C·日) | 格尔木 | 3268.6 | 2003 | 2396.1 | 1967 | 2829.4 | 190.0 |
| | 五道梁 | 812.9 | 1998 | 469.7 | 1976 | 635.0 | 74.6 |
| | 沱沱河 | 1126.9 | 1998 | 718.5 | 1976 | 902.6 | 88.2 |
| | 安多 | 1239.9 | 1998 | 826.6 | 1976 | 998.4 | 86.4 |
| | 那曲 | 1486.4 | 1998 | 1000.4 | 1976 | 1215.9 | 116.1 |
| | 当雄 | 1952.7 | 1998 | 1496.6 | 1997 | 1692.3 | 99.4 |
| | 拉萨 | 3718.1 | 1999 | 2869.5 | 1967 | 3245.2 | 209.5 |

表 2 青藏铁路沿线冻结指数的年代际变化

Tab. 2 Decadal variation of the freezing index for 7 stations along the Qinghai-Xizang railway

| 站点 | 纬度 | 经度 | 海拔 (m) | 冻结指数 (°C·日) | | | | | | |
|-------|---------|---------|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------------|
| | | | | 60 年代* | 70 年代 | 80 年代 | 90 年代 | 00 年代* | 1971-2000 年 | 1966-2004 年 |
| 格尔木** | 36°25'N | 94°54'E | 2807.6 | 980.9 | 780.2 | 680.6 | 650.1 | 516.0 | 703.6 | 719.9 |
| 五道梁 | 35°13'N | 93°05'E | 4612.2 | 2370.4 | 2283.7 | 2301.1 | 2255.4 | 2085.3 | 2280.1 | 2271.7 |
| 沱沱河 | 34°13'N | 92°26'E | 4533.1 | 2190.1 | 2081.5 | 2270.6 | 2114.6 | 1873.0 | 2155.6 | 2131.0 |
| 安多 | 32°21'N | 91°06'E | 4800.0 | 1929.8 | 1786.7 | 1741.7 | 1799.7 | 1559.1 | 1776.0 | 1773.5 |
| 那曲 | 31°29'N | 92°04'E | 4507.0 | 1708.7 | 1477.9 | 1449.2 | 1345.1 | 1220.0 | 1424.0 | 1439.6 |
| 当雄 | 30°29'N | 91°06'E | 4200.0 | 969.5 | 860.6 | 855.4 | 845.6 | 723.5 | 853.9 | 855.3 |
| 拉萨 | 29°40'N | 91°08'E | 3648.9 | 139.5 | 109.8 | 106.1 | 73.9 | 31.0 | 96.6 | 95.4 |

*表中 60 年代的值 为 1966-1970 年的平均值; 00 年代的值 为 2001-2004 年的平均值. **格尔木的值 为预白化前的值.

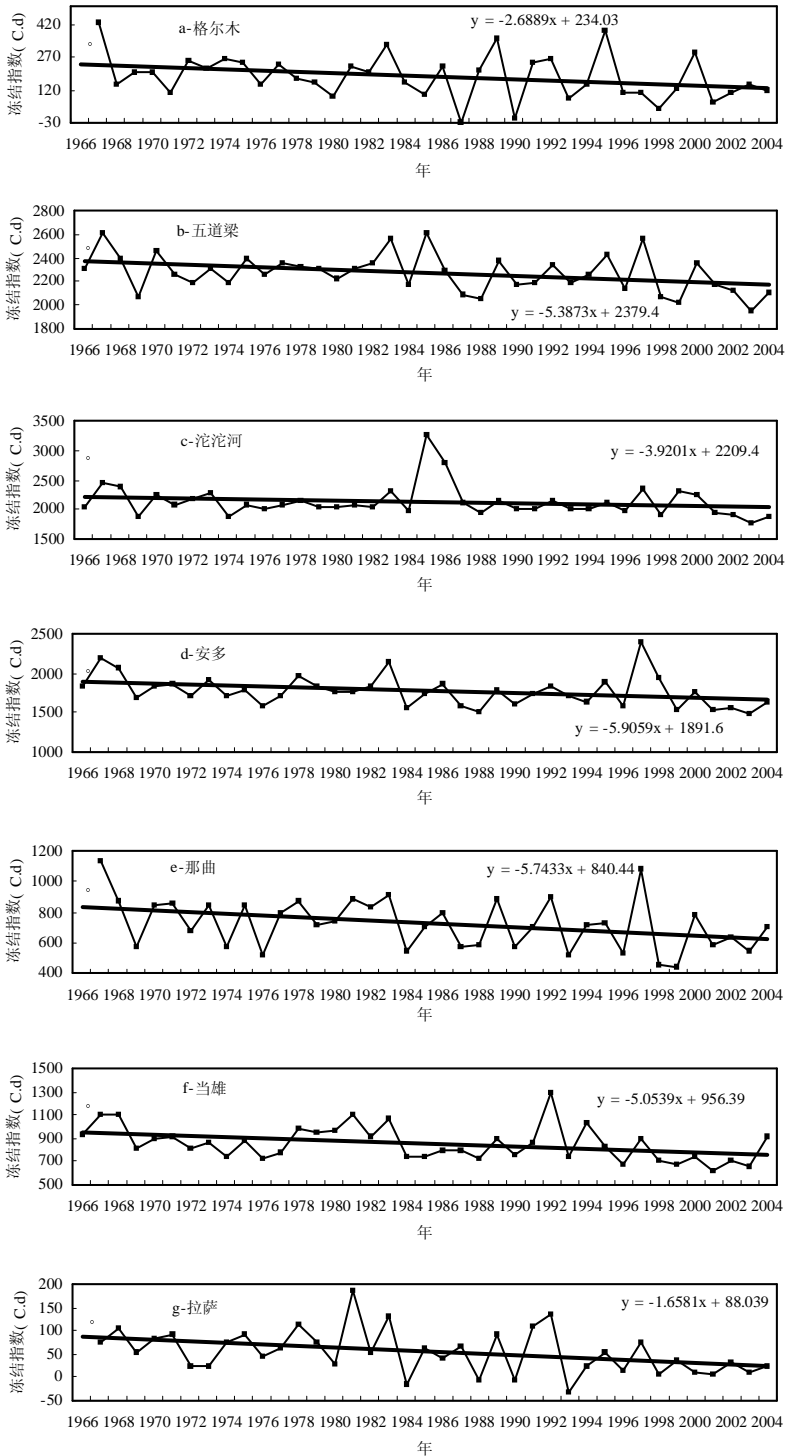


图 2 1966-2004 年青藏铁路沿线冻结指数的变化及线性趋势 (格尔木、那曲和拉萨的冻结指数值为预白化后的值)

Fig. 2 Variations and linear trends of the air freezing index from 1966-2004 for 7 stations along the Qinghai-Xizang Railway

之间,以沱沱河站的最大,拉萨站的最小(表1)。由此说明,沱沱河的年冻结指数的年变率最大,而拉萨的年变率最小。

总体上,在南北走向的青藏铁路沿线,年冻结指数表现出南部和北部低,而中部高的特征。这种分布大致与南部和北部的海拔低、中部的海拔高相一致,也就是说,年冻结指数存在随海拔高度的升高而增大的特征。只是安多出现了例外,虽然安多的海拔在7个站点中最高达4800 m,但其年冻结指数却不是最高的(表2)。原因可能与安多站所在的特殊位置有关。与位于河谷平原区且位置偏北的沱沱河站相比,安多站由于地处唐古拉山的南坡且位置偏南,在冬季能接收到更多的太阳辐射能和纬度的综合影响,其年平均冻结指数要明显小于沱沱河站。实际上,安多站附近为青藏高原北部连续多年冻土分布区和南部岛状多年冻土分布区的分界线^[14],可能就与上述海拔和纬度综合作用有关。

从年代际变化来看(表2),沱沱河与五道梁20世纪70年代的平均年冻结指数值略低于80年代的值。若忽略之,则青藏铁路沿线7个站点的冻结指数自20世纪60年代以来大致上逐渐减少。7个站点90年代平均年冻结指数值与60年代相比,偏少65.6~363.6 °C·日,与1971-2000年30年平均值相比,除安多偏多23.7 °C·日外,其他台站都偏少,偏少量在8.3~80.0 °C·日之间。90年代值与70年代和80年代值相比也明显偏少。而本世纪初几年的平均年冻结指数值与20世纪90年代比减少也比较明显,偏少量在42.9~241.6 °C·日之间。

从1966-2004年青藏铁路沿线7个主要气象站点冻结指数的变化及线性趋势(图2)可见,7个主要气象站点的冻结指数均呈现减少趋势。减少的线性倾向率分别为:格尔木 -26.9 °C·日/10a、五道梁 -53.9 °C·日/10a、沱沱河 -39.2 °C·日/10a、安多 -59.1 °C·日/10a、那曲 -57.4 °C·日/10a、当雄 -50.5 °C·日/10a和拉萨 -16.68 °C·日/10a,其中五道梁、安多、那曲、当雄和拉萨的线性倾向率达到了0.05的显著水平(图3b)。

从1966-2004年青藏铁路沿线冻结指数的趋势检验结果(图3)可见,所有站点的冻结指数都存在减少趋势。从MK检验的结果(图3a)来看,除格尔木站表现出微弱的减少趋势外,其他站点都显示出了0.05水平下的显著减少趋势。从线性回归趋势分析结果(图3b)来看,除格尔木与沱沱河减少趋势不显著外,其他5个台站均在0.05水平下呈现显著的减少趋势。对比图3a与图3b可知,7台站年冻结指数变化趋势的MK检验与线性趋势检验具有几乎相同的结果。二者的一致性说明,检验结果可靠,7台站所表现出的变化趋势成立。但是,格尔木站是所考虑的7个台站中唯一被两种检验方法探测出变化趋势不明显的台站。

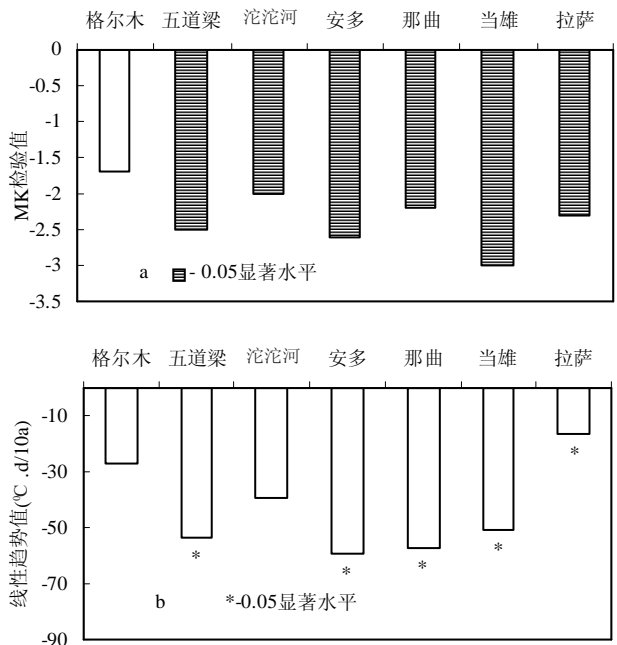


图3 1966-2004年青藏铁路沿线冻结指数的MK检验(a)和线性趋势检验(b)结果(图中负值指示减少趋势)。Fig. 3 Results of MK trend test (a) and linear regression (b) to the air freezing index for 7 stations along the Qinghai-Xizang Railway

表 3 青藏铁路沿线融化指数的年代际变化

Tab. 3 Decadal variation of the thawing index for 6 stations along the Qinghai-Xizang railway

| 站点 | 纬度 | 经度 | 海拔 (m) | 融化指数 (°C·日) | | | | | | |
|-------|---------|---------|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------------|
| | | | | 60 年代* | 70 年代 | 80 年代 | 90 年代 | 00 年代* | 1971-2000 年 | 1966-2004 年 |
| 格尔木** | 36°25'N | 94°54'E | 2807.6 | 2539.7 | 2789.2 | 2780.8 | 2937.5 | 3143.2 | 2835.8 | 2829.4 |
| 五道梁 | 35°13'N | 93°05'E | 4612.2 | 592.7 | 603.8 | 607.4 | 684.6 | 710.6 | 631.9 | 635.0 |
| 沱沱河** | 34°13'N | 92°26'E | 4533.1 | 863.5 | 872.1 | 867.8 | 955.2 | 983.0 | 898.4 | 902.6 |
| 安多 | 32°21'N | 91°06'E | 4800.0 | 950.3 | 958.5 | 991.9 | 1046.4 | 1054.4 | 999.0 | 998.4 |
| 那曲 | 31°29'N | 92°04'E | 4507.0 | 1095.7 | 1150.1 | 1202.4 | 1310.9 | 1327.0 | 1221.1 | 1215.9 |
| 当雄 | 30°29'N | 91°06'E | 4200.0 | 1635.3 | 1658.8 | 1674.2 | 1746.7 | 1756.3 | 1693.2 | 1692.3 |
| 拉萨 | 29°40'N | 91°08'E | 3648.9 | 2999.9 | 3102.1 | 3223.2 | 3423.0 | 3519.9 | 3249.4 | 3245.2 |

*表中 60 年代的值为 1966-1970 年的平均值; 00 年代的值为 2001-2004 年的平均值. **格尔木、沱沱河和拉萨的值为预白化前的值.

3.2 融化指数的变化趋势

利用方程 (2) 计算的青藏铁路沿线 7 个主要台站年融化指数的统计特征(表 1)分析, 青藏铁路沿线的多年平均融化指数大致分布在 630~3250 °C·日之间, 以拉萨站最大为 3245.2 °C·日, 格尔木站次之为 2829.4 °C·日、五道梁站最小为 635.0 °C·日。本文的多年平均冻结指数计算值(五道梁站 635.0 °C·日、沱沱河站 902.6 °C·日)与王家澄等人 1979 年的计算值(五道梁站 476 °C·日、沱沱河站 717 °C·日)^[4]大致接近。除格尔木站和拉萨站的最大值分别出现在 2003 年和 1999 年外, 其他 5 站均出现在 1998 年; 除格尔木站、当雄站和拉萨站的最小值分别出现在 1967 年、1997 年和 1967 年外, 其他 4 站均出现在 1976 年。7 个台站融化指数的变幅以格尔木的最大, 沱沱河的最小, 分别为: 格尔木 872.5 °C·日、五道梁 343.2 °C·日、沱沱河 300.3 °C·日、安多 413.3 °C·日、那曲 486.0 °C·日、当雄 456.1 °C·日和拉萨 848.6 °C·日。年冻结指数的标准差分布在 74.6~209.5 °C·日之间, 以拉萨的最大, 五道梁的最小(表 1)。由此说明, 拉萨站的年冻结指数的年变率最大, 而五道梁站与沱沱河站的年变率较小。

大致上, 沿南北走向的青藏铁路, 年融化指数呈现出南部和北部高, 而中部低的特征。这种分布大致与南部和北部的海拔低、中部的海拔高相反, 也就是说, 年融化指数存在随海拔高度的升高而减小的特征。只有安多出现了例外, 虽然安多的海拔在 7 个站点中最高达 4800 m, 但其年融化指数却不是最低的(表 3)。原因主要在于融化指数除了受海拔的控制外, 还受纬度的制约。此外, 融化与冻结指数在总体上受海拔和纬度综合影响的特征也能从两种指数的比值上看出。比较表 1 中的融化和冻结指数可以发现, 两种指数的比值也存在南部和北部大, 中部小的特征。格尔木和当雄的多年平均融化指数与多年平均冻结指数的比值分别为 3.93 和 1.98, 而拉萨的比值更大为 34.0, 说明拉萨站的冻土融化潜力要远远冻结潜力, 这与拉萨站位于季节冻土区^[4]相混合吻合; 其他站点的融化指数均比冻结指数小, 相应的比值为五道梁 0.28、沱沱河 0.42、安多 0.56 和那曲 0.84。除了海拔和纬度综合影响外, 站点所在地的坡向、周边地形以及局部地热出露等因素也会对上述指数的分布规律造成影响。

年代际变化上, 除五道梁 20 世纪 70 年代的平均年冻结指数值略低于 80 年代的值外, 青藏铁路沿线 7 个站点的融化指数自 20 世纪 60 年代以来大致上逐渐增多(表 3)。7 个站点 90 年代平均年冻结指数值与 60 年代相比, 偏多量在 91.7~423.1 °C·日之间, 与 1971-2000 年 30 年平均值相比, 偏多量在 47.5~173.6 °C·日之间。90 年代值与 70 年代和 80 年代值相比也明显偏多。21 世纪初几年的平均年融化指数值与 20 世纪 90 年代比增多也比较明显, 偏多量在 8.0~205.7 °C·日之间。

从 1966-2004 年青藏铁路沿线 7 个主要气象站点融化指数的变化及线性趋势(图 4)可见, 7 个主要气象站点的融化指数均呈现增加趋势。增加的线性倾向率分别为: 格尔木

19.8 °C·日 /10a、五道梁 34.1 °C·日 /10a、沱沱河 25.6 °C·日 /10a、安多 34.2 °C·日 /10a、那曲 37.5 °C·日 /10a、当雄 39.7 °C·日 /10a 和拉萨 45.6 °C·日 /10a, 其中五道梁的线性倾向率达到了 0.001 的显著水平, 安多、那曲和当雄的线性倾向率达到了 0.01 的显著水平, 而沱沱河和拉萨的线性倾向率达到了 0.05 的显著水平 (图 5b)。

由 1966-2004 年青藏铁路沿线年融化指数的趋势检验结果(图 5)可见, 所有站点的年融化指数都存在增加的趋势。从 MK 检验的结果 (图 5a)来看, 除格尔木和沱沱河表现出微弱的增加趋势外, 其他 5 个台站都显示出了 0.05 水平下的显著增加趋势。从线性回归趋势分析结果 (图 5b) 来看, 除格尔木增加趋势不显著外, 其他 6 个台站均呈现出了显著的增加趋势, 其中五道梁站的显著水平最高达 0.001。将图 5a 与图 5b 对比可知, 7 个台站年融化指数变化趋势的 MK 检验与线性趋势检验具有几乎相同的结果。二者的一致性说明, 检验结果基本可信, 所检测出的 6 台站的变化趋势成立。此外, 格尔木站是所考虑的 7 个台站中唯一被两种检验方法检验出变化趋势不明

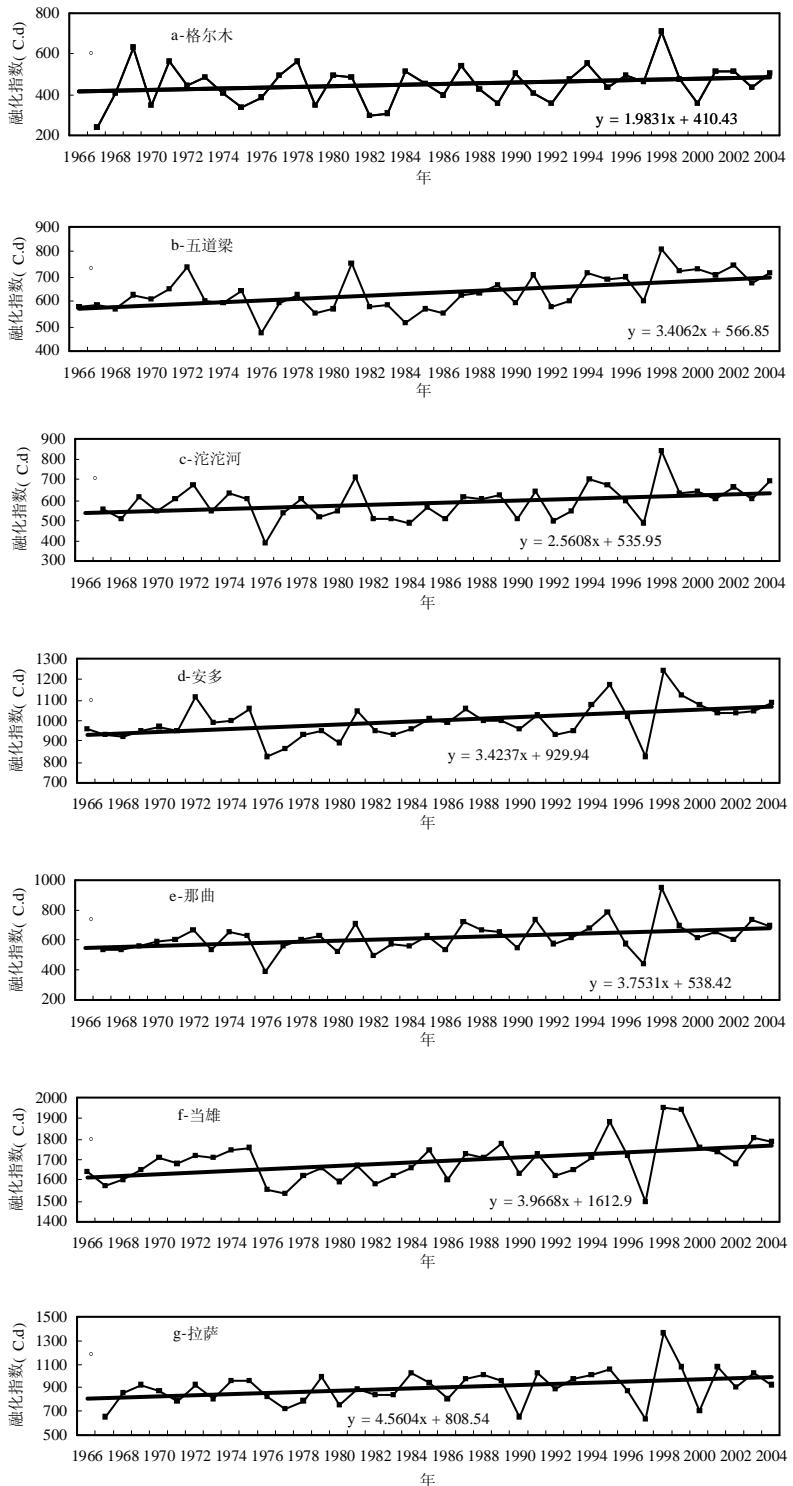


图 4 1966-2004 年青藏铁路沿线融化指数的变化及线性趋势 (图中格尔木、沱沱河、那曲和拉萨的融化指数为预白化后的值)
Fig. 4 Variations and linear trends of the air thawing index from 1966-2004 for 7 stations along the Qinghai-Xizang Railway

显的台站。

以上 7 站点年冻结指数的减少趋势和融化指数的增加趋势与本区域气温升高、年温差减小有很大的关系。相关研究表明, 自 20 世纪 70 年代以来, 青藏高原增温明显, 升温率达 0.01~0.03 °C/a, 年平均气温普遍升高了 0.2~0.4 °C, 尤其是冬季气温升值幅度大^[1,3,4]。冬季升温使得冻结指数减小, 而夏季升温促使了融化指数的增加。也有研究显示, 本区域 20 世纪 80 年代与 90 年代相比, 土壤冻结多偏早, 解冻多偏晚, 冻结日数偏多, 累积冻结厚度和最大冻结深度偏大^[15]; 高原东北部、高原东南部和高原南部区冻土厚度表现出变薄趋势^[16], 说明 80 年代至 90 年代, 上述区域存在冻土退化的现象和趋势。这与本研究所揭示的年冻结指数逐渐减少和融化指数逐渐增加的结果比较一致。

值得注意的是, IPCC 第 3 次评估报告认为, 随着人类温室气体排放量的增加, 未来 100 年全球气温将会持续升高, 升高的幅度大致在 1.4-5.8 °C^[17]。受其影响, 青藏铁路及其所在高原区也存在继续升温的可能。有模拟研究表明, 在人类活动引起的温室气体不断增加的情况下, 未来 50 年或更长时期内, 青藏铁路沿线及其所在青藏高原会持续变暖, 变暖的幅度大致在 1.6~3.0°C 之间 (B2 排放情景)^[18]; 王文等人利用事件概率回归估计模式预测的结果显示, 相对于 20 世纪 90 年代而言, 青藏铁路沿线平均最高 (最低) 气温到 2050 年升高 0.4 °C (2.4 °C) 的概率为 66% (74%); 到 2100 年升高 1.4 °C (6.9 °C) 左右的概率为 85% (62%)^[19]。未来继续变暖将会导致融化和冻结指数时间和空间分布格局的变化, 而两种指数的变化又预示着研究区域冻土状况会有比较明显的改变。据 Wu 等人 2006 年的研究, 如果未来 50 年气温升高 1 °C, 青藏铁路路基下永冻层的温度会上升, 但对永冻层的影响较小, 若升温达 2.6 °C, 沿线永冻层就会经受显著的变化, 尤其是在极端不稳定和不稳定永冻层路段, 永冻层变化更剧烈, 退化更严重, 从而导致路基变形和沉降^[20]。为应对上述可能的气候变暖或融化指数增加, 进而导致对青藏铁路工程破坏情况的发生, 加强与铁路沿线冻土相关的科学研究、新技术的开发以及气象参数的监测与分析就显得十分必要。

4 结论

通过上述分析, 可以得出以下几点主要结论:

(1) 青藏铁路沿线的多年平均年冻结指数大致分布在 95~2300 °C·日之间, 以五道梁最大为 2271.7 °C·日、拉萨最小仅为 95.4 °C·日, 格尔木次之为 719.9 °C·日。沱沱河年冻结指数的年际变率最大, 而拉萨的年际变率最小。多年平均融化指数大致分布在 630~3250 °C·日之间, 以拉萨最大为 3245.2 °C·日, 格尔木次之为 2829.4 °C·日、五道梁

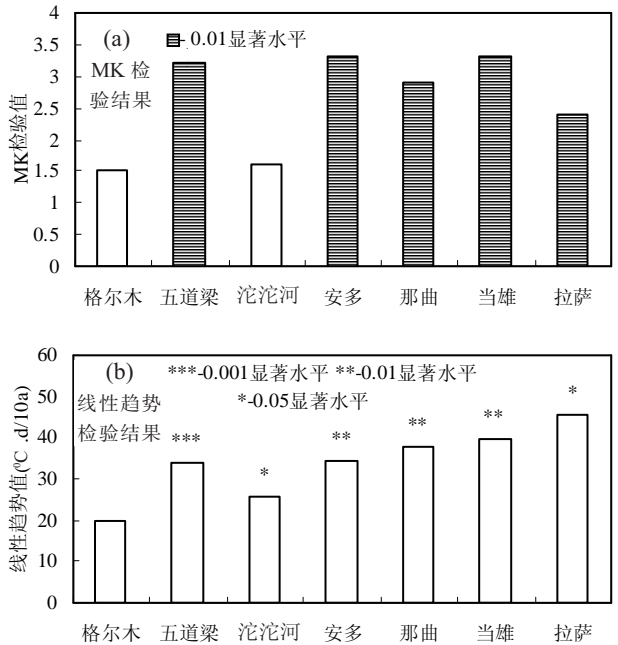


图 5 1966-2004 年青藏铁路沿线 7 个站点融化指数的趋势检验结果. 图中正值指示增加趋势.

Fig. 5 Results of MK trend test (a) and linear regression (b) to the air thawing index for 7 stations along the Qinghai-Xizang Railway

最小为 $635.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 。拉萨的年冻结指数的年变率最大，五道梁与沱沱河的年变率较小。

(2) 在南北走向的青藏铁路沿线，年冻结指数表现出南部和北部低，中部高的特征。这种分布大致与南部和北部的海拔低、中部的海拔高相一致。而年融化指数呈南部和北部高，中部低的特征，大致与南部和北部的海拔低、中部的海拔高相反。此外，两种指数的比值也存在南部和北部大，中部小的特征。

(3) 年代际变化上，除沱沱河与五道梁 20 世纪 70 年代的平均年冻结指数值略低于 80 年代的值外，7 个站点的冻结指数自 20 世纪 60 年代以来大致上逐渐减少；除五道梁 20 世纪 70 年代的平均年冻结指数值略低于 80 年代的值外，7 个站点的融化指数自 60 年代以来大致上逐渐增多。

(4) 对年冻结指数的 MK 趋势检验发现，除格尔木表现出弱减少趋势外，其它站点都呈现了 0.05 水平下的显著减少趋势；年融化指数除格尔木和沱沱河表现出微弱的增加趋势外，其它 5 个台站都显示出了 0.05 水平下的显著增加趋势。7 台站年融化与冻结指数变化的线性趋势检验与 MK 检验结果几乎相同。7 台站的冻结指数均呈减少趋势，其线性倾向率分布在 $-16.6\sim-59.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}/10\text{a}$ 之间；融化指数均呈增加趋势，其线性倾向率分布在 $19.8\sim45.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}/10\text{a}$ 之间。

参考文献 (References)

- [1] Niu Tao, Liu Hongli, Song Yan et al. Study on decade change of climate shift from warm-dry period to warm-wet period over Tibetan Plateau. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(6): 763-771. [牛涛, 刘洪利, 宋燕等. 青藏高原气候由暖干到暖湿时期的年代际变化特征研究. *应用气象学报*, 2005, 16(6): 763-771.]
- [2] Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over "Sanjiangyuan" Region in recent 43 years. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 79-85. [李林, 李凤霞, 郭安红等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 79-85.]
- [3] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20: 1729-1742.
- [4] Wu Q, Liu Y. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 38: 85-92.
- [5] Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling et al. Effects of climate change on permafrost and environment in cold region of China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 161-173. [金会军, 李述训, 王绍令等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响. *地理学报*, 2000, 55(2): 161-173.]
- [6] Wang S, Jin H, Li S et al. Permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau and its environmental impacts. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, 11: 43-54.
- [7] Cheng Guodong, Jiang Hao, Wang Keli et al. Thawing index and freezing index on the embankment surface in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 603-607. [程国栋, 江灏, 王可丽等. 冻土路基表面的融化指数与冻结指数. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 603-607.]
- [8] King L, Herza T, Hartmanna H et al. The PACE monitoring strategy: A concept for permafrost research in Qinghai-Tibet. *Quaternary International*, 2006, 154/155: 149-157.
- [9] Zhang T, Osterkamp T E, Stamnes K. Effects of climate on the active layer and permafrost on the north slope of Alaska, U.S.A. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, 8: 45-67.
- [10] Frauenfeld O W, Zhang Tingjun, James L. McCreight. Northern Hemisphere freezing/thawing index variations over the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 2007, 27: 47-63.
- [11] Partal Turgay, Ercan Kahya. Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes*, 2006, 20: 2011-2026.
- [12] Yue S, Pilon P, Caradias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259: 254-271.
- [13] Serrano A, Materos V L, Garcia J A. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Phys. Chem. Earth (B)*, 1999, 24(1/2): 85-90.
- [14] Wang Jiacheng, Wang Shaoling, Qiu Guoqing. Permafrost along the Qinghai-Xizang Highway. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(1): 18-32. [王家澄, 王绍令, 邱国庆. 青藏公路沿线的多年冻土. *地理学报*, 1979, 34(1): 18-32.]
- [15] Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie. Interannual variation of the beginning date and the ending date of soil freezing in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(1): 49-54. [高荣, 韦志刚, 董文杰. 青藏高原

土壤冻结始日和终日的年际变化. 冰川冻土, 2003, 25(1): 49-54.]

- [16] Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 523-531. [王澄海, 董文杰, 韦志刚. 青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征. 地理学报, 2001, 56(5): 523-531.]
- [17] Houghton J T, Ding Y (eds.). *Climate Change 2000. The Scientific Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001. 770.
- [18] Xu Ying, Zhao Zongci, Li Dongliang. The simulated result analyses on climate changes over Qinghai-Xizang Plateau and along the railway in the coming 50 years. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(5): 700-707. [徐影, 赵宗慈, 李栋梁. 青藏高原及铁路沿线未来 50 年气候变化的模拟分析. 高原气象, 2005, 24(5): 700-707.]
- [19] Wang Wen, Li Dongliang, Cheng Guodong. The prediction and probability estimation of mean maximum and minimum air temperature along Qinghai-Xizang Railway. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(3): 304-310. [王文, 李栋梁, 程国栋. 青藏铁路沿线平均最高最低气温变化趋势预测及其概率估计. 高原气象, 2005, 24(3): 304-310.]
- [20] Wu Qingbai, Li Shuxun, Liu Yongzhi. The impact of climate warming on permafrost and Qinghai-Tibet Railway. *Engineering Sciences*, 2006, 4(2): 92-97.

Variation Trends of the Freezing and Thawing Index along the Qinghai-Xizang Railway for the Period 1966-2004

JIANG Fengqing, HU Ruji, LI Zhen

(*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China*)

Abstract: Yearly freezing and thawing index for seven main stations along the Qinghai-Xizang Railway were calculated based on daily maximum and minimum temperature records for the period 1966-2004. Statistical characteristics and variations of the annual freezing and thawing index for these stations were outlined. Trends in annual freezing and thawing index for these stations were analyzed using two methods, namely a non-parametric trend test method, i.e. the Mann-Kendall test and a simple linear regression method. The results show that the mean annual freezing index for these stations ranges from 95 to 2300 °C, and the mean annual thawing index ranges from 630 to 3250 °C. The mean annual freezing index of the seven stations exhibited decreasing trends with linear tendencies ranging from -16.6 to -59.1 °C/10a, and the mean annual thawing index of the seven stations showed increasing trends with linear tendencies ranging from 19.83 to 45.6 °C/10a. The results of the MK trend test show that the significant decreasing trends in the annual freezing index for most stations except for Golmud were detected at the 0.05 significant level. The increasing trends in the annual thawing index for four stations except Golmud and Tuotuohe were determined by the MK method at the 0.05 significant level. Golmud was the only station where no significant trends in both the annual freezing and thawing index were found. Results from the simply linear regression method are similar with that from the MK test.

Key words: freezing and thawing index; global warming; trends; the Qinghai-Xizang Railway