

# 近 45 年拉萨浅层地温对气候变化的响应

杜 军<sup>1</sup> 李 春<sup>2</sup> 廖 健<sup>3</sup> 拉 巴<sup>1</sup> 路红亚<sup>1</sup>

(1. 西藏自治区气候中心, 拉萨 850001;  
2. 西藏自治区气象局; 3. 西藏自治区气象台)

**提 要:** 利用 1961—2005 年拉萨 0~40cm 各层逐月平均地温, 采用气候倾向率、累积距平、信噪比等气候统计方法, 研究了近 45 年拉萨浅层平均地温的变化趋势、气候突变和异常年份等。结果表明: 浅层各季节平均地温均呈现极显著的升高趋势, 升温率为 0.43~0.60℃/10a, 春季最大, 夏季最小。各层年平均地温以 0.45~0.66℃/10a 的升温率显著上升, 40cm 深度的升温率最大, 与同时期平均气温的升温率比较, 地温比气温对气候变暖的响应更强。20 世纪 60 年代至 90 年代浅层年、季平均地温呈明显的逐年代升高趋势, 以冬、春季最为明显。20 世纪 60 年代到 80 年代中期为偏冷阶段, 80 年代后期至 90 年代地温为偏暖阶段。各浅层平均地温在 1986 年秋季均发生了突变, 冬季突变时间都出现在 1984 年。年平均地温除在 40cm 处 1999 年异常偏高外, 其它各层为异常偏低年份, 且发生在 20 世纪 60 年代。气温升高是影响地温上升的主要原因。

**关键词:** 浅层地温 气候倾向率 异常年份 气候突变

## Responses of Climatic Change on Soil Temperature at Shallow Layers in Lhasa from 1961 to 2005

Du Jun<sup>1</sup> Li Chun<sup>2</sup> Liao Jian<sup>3</sup> Lhak Pa<sup>1</sup> Lu Hongya<sup>1</sup>

(1. Tibet Climate Center, Lhasa 850001;  
2. Tibet Meteorological Bureau; 3. Tibet Meteorological Observatory)

**Abstract:** The variation trend, abrupt change and anomalous years of annual and seasonal mean soil temperature at shallow layers during the period of 1961—2005 in Lhasa were investigated by using modern statistical diagnostic methods such as linear trend analysis, accumulated variance and signal noise ratio methods. The main results are as follows: (1) In terms of linear trend, the

seasonal mean soil temperature at shallow layers displayed a significant increasing trend in Lhasa in past 45 years, and it indicated an increase of  $(0.43 \sim 0.60^{\circ}\text{C})/10\text{a}$  which was maximum in spring, minimum in summer. Also, the annual mean soil temperature at shallow layers had a significant increasing trend, and the rising rates were  $(0.45 \sim 0.66^{\circ}\text{C})/10\text{a}$ , specifically at the depth of 40cm. Compared to the air temperature, the rising range of soil temperature at 40cm was larger in the same period. (2) The inter-decadal variations of the annual and seasonal mean soil temperature in the shallow layers had an obvious increasing tendency from 1960s to 1990s, especially in winter and spring. The mean soil temperature was colder from 1960s to the middle of 1980s, but it was warmer from the end of 1980s to 1990s. (3) The abrupt change of mean soil temperature at different shallow layers occurred in autumn of 1986, and all the abrupt change of winter appeared in 1984. (4) Except for the annual mean soil temperature at 40cm was anomalously high in 1999, anomalous lower years occurred in the 1960s at the other shallow layers. Therefore, the increase of the soil temperature was mainly caused by the significant increase of air temperature.

**Key Words:** soil temperature at shallow layer linear trend anomalous years climate abrupt change

## 引 言

下垫面与大气的相互作用影响着各种尺度的天气、气候变化,而在陆气相互作用中,地面反照率、土壤温度和湿度对大气环流和气候变化有重要影响<sup>[1]</sup>。近来有不少学者对地温的气候变化进行了研究,根据分布在前苏联季节冻土和多年冻土区气象台站的地温观测结果,发现绝大多数气象台站 0.4m 深度上的年平均地温在近一个世纪以来呈升高趋势<sup>[2]</sup>;横穿阿拉斯加南北方向的多年冻土测温结果表明,从 20 世纪 80 年代后期到 1996 年间多年冻土上限处的温度升高了  $0.5 \sim 1.5^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>;中国大兴安岭阿木尔地区的多年冻土在 1970 年代至 1990 年代期间 0.2m 深度处的地温上升了  $0.8^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>;青藏铁路北部和南部地面温度的线性升温率较大,特别是青藏铁路南部的升温率平均达到  $0.56^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,铁路中部的线性升温率较小,平均为  $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ <sup>[5]</sup>;1970—2002 年近 30 年青藏

高原南部 0cm 地温呈增温趋势<sup>[6]</sup>;1961—1996 年雅鲁藏布江中游大部分地区浅层地温呈现上升趋势,且冬春较汛期升幅要高<sup>[7]</sup>。这些都表明了浅层地温升高趋势是很明显的。

近 40 年拉萨气候变暖趋势明显<sup>[8-10]</sup>,而系统研究拉萨浅层地温变化的成果尚未报道。本文运用气候学统计分析方法,对拉萨近 45 年浅层地温的变化趋势、气候异常和突变年份等气候特征进行分析,以揭示其对气候变化的响应。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文选取拉萨 1961—2005 年逐月 0cm、5cm、10cm、15cm、20cm 和 40cm 逐月地温观测资料,对缺测资料利用同期相关最好的邻近站(日喀则)通过线性回归方法或差值法、平均值进行插补,使其趋于完整。按 12—2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,

9—11 月为秋季生成逐季序列,以及年序列。此外,对浅层 6 个层次年、季平均地温作算术平均,得到平均的浅层地温序列。多年平均值采用 1971—2000 年的 30 年平均。

## 1.2 方法

### 1.2.1 气候倾向率

平均地温的气候倾向率采用一次线性方程表示,即:

$$T_i = a_0 + a_1 t_i \quad (1)$$

式中,  $T_i$  为平均地温,  $t_i$  为时间,  $a_1 \times 10$  为气候倾向率,表示平均地温每 10 年的趋势变化率。

### 1.2.2 累积距平和信噪比

气候突变是气象要素变化过程中存在的某种不连续现象,因此常用累积距平曲线来确定它,即使用指标:

$$C(t) = \sum_{i=1}^t (X_i - \bar{X}) \quad (2)$$

式中  $X_i$  为平均地温历年值,  $\bar{X}$  为平均地温多年平均值。若指标绝对值达到最大时,对所对应的  $t$  为突变年份。

为了检验转折是否达到气候突变的标准,对转折年份计算它们的信噪比<sup>[11]</sup>,计算公式如下:

$$S/N = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{S_1 + S_2} \quad (3)$$

式中,  $\bar{X}_1$ 、 $\bar{X}_2$  和  $S_1$ 、 $S_2$  分别为转折年份前后两阶段平均地温的平均值和标准差。当  $S/N$  大于 1.0 时认为存在气候突变,最大信噪比的时间定义为气候突变出现的时间。

## 2 统计结果分析

### 2.1 浅层地温的气候倾向率

根据近 45 年 0~40cm 浅层平均地温的气候倾向率分析(表 1),拉萨各层季节平均地温均呈显著的升高趋势,升幅为 0.31~0.87℃/10a(均通过 0.10 以上的显著性检

验),其中 0~5cm 平均地温春、秋两季倾向率大于夏、冬季倾向率;10~20cm 平均地温冬、春季升温率高于夏、秋季升温率;40cm 平均地温却以春、夏两季升温幅度最明显,尤其是春季。从各浅层平均地温升温率来看,春、夏两季,以 40cm 深度地温升温率最大,该层次夏季地温升温率是 5~15cm 的 2 倍;秋季,以表层地温升温率最明显,为 0.58℃/10a;冬季平均地温的升温率以 10cm 最大、表层最小,前者是后者的 1.6 倍。从整个浅层平均而言,四季平均地温均呈现为极显著的升高趋势,升温率为 0.43~0.60℃/10a,以春季最大、夏季最小。

表 1 近 45 年拉萨浅层地温的气候倾向率  
(单位:℃/10a)

深度/cm	春季	夏季	秋季	冬季	年
0	0.54★	0.51▲	0.58★	0.37★	0.49★
5	0.52★	0.31△	0.54★	0.51★	0.45★
10	0.56★	0.33▲	0.51★	0.58★	0.50★
15	0.56★	0.34▲	0.50★	0.56★	0.48★
20	0.54★	0.42★	0.43★	0.53★	0.50★
40	0.87★	0.67★	0.52★	0.53★	0.66★
0~40 平均	0.60★	0.43★	0.51★	0.52★	0.52★

注:△通过 0.10 显著性检验,▲通过 0.05 显著性检验,★通过 0.01 显著性检验

就年平均而言,近 45 年拉萨各浅层平均地温均表现为极显著的升高趋势,平均每 10 年升高 0.45~0.66℃,其中 40cm 地温升幅最大(图 1)。与同时期平均气温的气候倾向率(0.43℃/10a)比较,0~20cm 浅层地温的

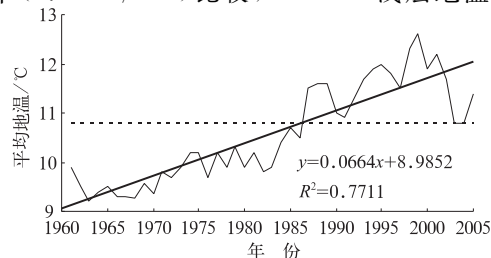


图 1 近 45 年拉萨 40cm 年平均地温的变化  
折线为历年值,点线为多年平均值,粗线为趋势值

倾向率略偏高,40cm 地温偏高0.23℃/10a,这表明 40cm 地温比气温对气候变暖的响应更强。

2.2 浅层地温的年代际变化特征

拉萨 10cm、20cm 和 40cm 浅层年、季平

均地温 1971—2000 年较 1961—1990 年的标准气候平均值偏高了 0.4~0.8℃,以春季表现的最为明显(见表 2)。

通过对 10cm、20cm 和 40cm 浅层平均地温序列作 9 点 2 次平滑的低通滤波,结果发现拉萨浅层平均地温不论是年还是四季(图

表 2 拉萨各年代际浅层平均地温的距平、平均值(单位:℃)

深度/cm	年代际	春季	夏季	秋季	冬季	年
10	1961—1970	-2.2	-1.4	-1.6	-1.8	-1.8
	1971—1980	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
	1981—1990	-0.2	0.4	0.2	0.0	0.1
	1990—2000	0.7	0.5	0.8	0.7	0.7
	1961—1990	<b>11.9</b>	<b>18.6</b>	<b>10.7</b>	<b>0.8</b>	<b>10.5</b>
20	1971—2000	<b>12.7</b>	<b>19.0</b>	<b>11.2</b>	<b>1.5</b>	<b>11.1</b>
	1961—1970	-2.0	-1.5	-1.4	-1.9	-1.9
	1971—1980	-0.6	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7
	1981—1990	0.0	0.4	0.0	0.1	0.1
	1990—2000	0.7	0.6	0.6	0.8	0.7
40	1961—1990	<b>11.1</b>	<b>17.7</b>	<b>11.2</b>	<b>1.6</b>	<b>10.4</b>
	1971—2000	<b>11.8</b>	<b>18.2</b>	<b>11.7</b>	<b>2.2</b>	<b>11.0</b>
	1961—1970	-1.2	-0.4	-0.8	-1.1	-1.0
	1971—1980	-0.9	-0.3	-0.5	-0.9	-0.7
	1981—1990	-0.2	-0.5	-0.3	-0.1	-0.3
	1990—2000	1.2	0.9	0.8	1.1	1.0
	1961—1990	<b>9.8</b>	<b>16.3</b>	<b>12.0</b>	<b>3.4</b>	<b>10.4</b>
	1971—2000	<b>10.4</b>	<b>16.7</b>	<b>12.4</b>	<b>3.8</b>	<b>10.8</b>

注:黑体数字为平均值

2),都经历了一个“冷—暖”的历史演变过程。20 世纪 60 年代到 80 年代中期为偏冷阶段;80 年代后期至 90 年代地温为偏暖阶段,其中 1993—2002 年 40cm 年平均地温连续 10 年偏高 0.7℃以上,特别是 1999 年异常偏高1.8℃;进入 21 世纪后,年平均地温呈下降趋势。

根据表 2 列出的拉萨浅层平均地温 10 年际距平和平均值可知:

(1) 拉萨 10cm、20cm 和 40cm 年平均地温,20 世纪 60 年代至 90 年代呈明显的逐年代升高趋势。1960 年代是最低的 10 年,年平均地温较多年平均值偏低 1.0~1.9℃,以 20cm 地温偏低最明显;1970 年代平均地温仍偏低,较多年平均值偏低0.7~0.8℃;

1980 年代地温较前 20 年明显升高,但属于正常;进入 1990 年代后,地温增高显著,较多年平均值偏高 0.7~1.0℃,为过去 40 年最高的 10 年。

(2) 20 世纪 60 年代至 70 年代,各浅层季节平均地温均偏低,尤其是冬、春季偏低的最为明显,较多年平均值偏低 0.6~2.2℃,其中 0~20cm 各层春季平均地温显著偏低 2.0~2.3℃。1980 年代各浅层平均地温较前 20 年有所升高,除 40cm 夏季平均地温仍偏低 0.5℃外,其它各季平均地温在±0.4℃以内,属于正常。进入 1990 年代后,季平均地温均呈现为一致的升高,较多年平均值偏高 0.5~1.2℃,以冬、春季最为明显。

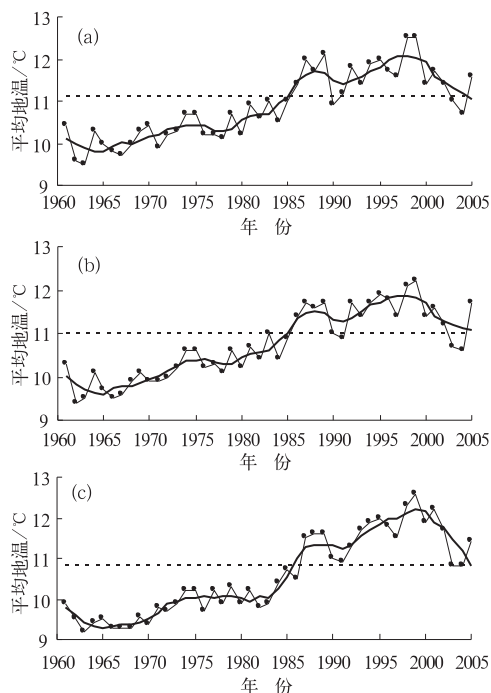


图 2 近 45 年拉萨浅层年平均地温的变化曲线  
(a) 10cm, (b) 20cm, (c) 40cm  
折线为历年值, 点线为多年平均值, 粗线为 9 点 2 次平滑值

### 2.3 浅层地温的气候突变

利用式(2)、(3)计算了拉萨浅层平均地温气候突变的年份(表 3), 结果表明: 40cm 年、季平均地温都发生了气候突变, 且出现在 20 世纪 80 年代中期, 即地温从一个相对偏冷期跃变为一个相对偏暖期。10cm、20cm 年平均地温均在 1985 年发生气候突变, 春、夏两季未出现气候突变现象, 秋、冬季平均地温突变时间分别出现在 1986 年和 1984 年。同样, 5cm 和 15cm 年、季平均地温也发生了突变, 具体突变时间与 10cm、20cm 相同。

表 3 近 45 年拉萨浅层年、季平均地温的突变年份

深度/cm	春季	夏季	秋季	冬季	年
5	/	/	1986	1984	1985
10	/	/	1986	1984	1985
15	/	/	1986	1984	1985
20	/	/	1986	1984	1985
40	1986	1986	1986	1984	1986

注: “/”表示无突变

总之, 各浅层平均地温在 1986 年秋季均发生了突变, 冬季突变时间都出现在 1984 年。0~20cm 各浅层年平均地温突变时间均发生在 1985 年(图 3)。

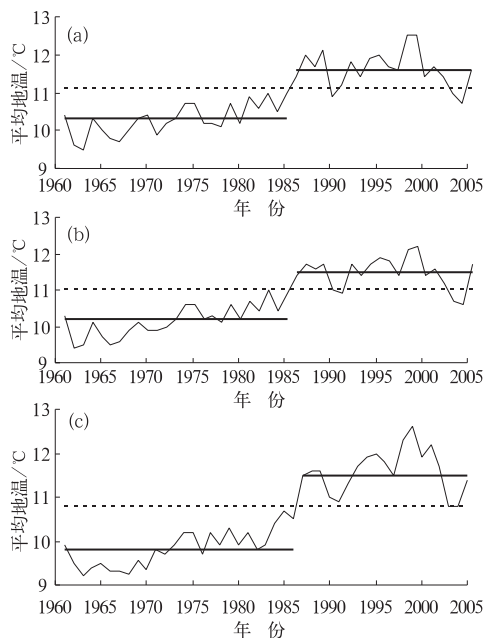


图 3 拉萨浅层年平均地温的变化及其突变  
(a) 10cm, (b) 20cm, (c) 40cm  
折线为历年值, 点线为多年平均值,  
粗线为突变前后时段平均值

### 2.4 浅层地温的异常特征

根据对近 45 年拉萨各浅层年、季平均地温的异常年份分析来看(表 4)有以下特征。

(1) 浅层春季平均地温多异常年份, 异常偏低年均发生在 20 世纪 60 年代, 其中 1963 年 0~20cm 异常偏低最为明显, 较多年平均值偏低 2.6~3.1℃, 尤其是 5cm 平均地温; 1990 年代春季浅层平均地温各出现了 1 次异常偏高, 分别出现在 1995 年和 1999 年。在夏季, 大部分浅层的平均地温未出现异常, 仅是表层在 1986 年, 20cm 深度在 1962 年分别发生异常偏高和异常偏低现象。秋季, 10~20cm 各层平均地温均在 1966 年出现了异

表 4 近 45 年拉萨浅层年、季平均地温的异常年份

深度/cm	春季	夏季	秋季	冬季	年
0	1963,1967(-)1995,1999(+)	1986(+)	1972(-)1998,2003(+)	1982(-)	1962,1963,1967(-)
5	1963,1967(-)1995,1999(+)	/	1989,1998(+)	1999(+)	1963(-)
10	1963,1967(-)1995,1999(+)	/	1966(-)1998(+)	1971(-)	1962,1963(-)
15	1963,1967,1968(-)1995,1999(+)	/	1966(-)1989,1998(+)	/	1963,1966,1967(-)
20	1962,1963,1967(-)1995(+)	1962(-)	1966,1967(-)1989,1998(+)	1971(-)	1962,1963,1966,1967(-)
40	1963,1970(-)1999(+)	/	1965(-)1998(+)	1963,1966,2003(-)	1999(+)

注：“+”为异常偏高，“-”为异常偏低，“/”为无异常

常偏低,1998 年异常偏高;5cm、15cm 和 20cm 在 1989 年也出现了异常偏高现象。在冬季,40cm 平均地温以异常偏低年份为主,主要出现在 1960 年代;1971 年 10cm、20cm 地温异常偏低,表层地温 1982 年异常偏低;低温异常偏高年份仅发生在 5cm 深度处,即 1999 年。

(2) 就浅层年平均地温而言,除 40cm 平均地温在 1999 年异常偏高外,其它各层为异常偏低年份,均发生在 20 世纪 60 年代,其中 1963 年异常偏低最为明显,这是因为当年春季 3—4 月份出现了较长时间的低温寡照天气使得地温特别低。

## 2.5 浅层地温与气温、降水及土壤冻土深度的关系

气温的变化不可避免地首先直接表现在地表温度的变化上,大气与地面间热交换关系的变化直接体现在地表温度上,地表温度的变化实际上是气候变化对多年冻土热状况影响最迅速的具体体现,也是引起多年冻土热状况变化的能量表现<sup>[12]</sup>。通过对近 45 年拉萨季、年平均气温与同期浅层平均地温的相关分析(表略),结果发现各相关系数均在 0.573 以上(通过 0.01 显著性检验),其中年平均气温与 40cm 年平均地温的相关系数达 0.823。而同时期拉萨年、季平均气温均呈现显著的升高趋势,升幅为 0.33 ~ 0.54℃/10a,气温的显著增高在很大程度上解释了地温呈现为明显升高趋势的原因。

同样,分析了拉萨年、季降水量与同期浅层平均地温的相关系数,除夏季外,其它季节

和年降水量与浅层平均地温相关性不大。夏季 0~20cm 平均地温与降水量呈较为显著的负相关,40 cm 平均地温与降水量呈不显著的正相关;但近 25 年夏季 0~20cm 平均地温与降水量相关系数达 -0.659(通过 0.01 显著性检验,图 4),40 cm 平均地温与降水量相关系数为 0.402(通过 0.05 显著性检验)。近 25 年夏季降水增加(6.9mm/10a,通过 0.05 显著性检验),0~20cm 平均地温却呈现为不同程度的降温趋势,而 40cm 平均地温仍表现为明显的增温趋势。可见,由于近 25 年夏季降水的增加,近 45 年 0~20cm 平均地温升温趋势有所减缓,而对 40cm 平均地温的升温态势影响比较小。此外,为何“40cm 地温升幅最大”的问题也就迎刃而解了。

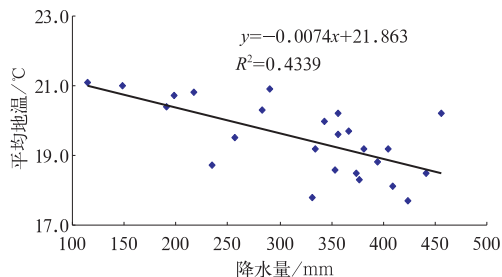


图 4 拉萨夏季 0~20cm 平均地温与降水的散点图

多年冻土是气候变化的敏感指示器<sup>[13]</sup>,而季节性冻结和融化层在温度年变化层的上部更接近地表,对气候变化更为敏感,反应更为迅速。由于拉萨平均地温的显著升高,土壤最大冻土深度也表现为明显的变浅趋势,平均每 10 年变浅 1.7cm(通过 0.01 显著性检验)。就年代际变化而言,20 世纪 90 年代最大冻土深度比 1960 年代变浅了 5.5cm。以上表明气温、地温的显著升高对土壤冻土

深度变浅起着非常重要的作用。

### 3 结 论

运用气候学统计分析方法,对拉萨近 45 年浅层地温的变化趋势、气候突变、异常年份等进行了分析,得到一些有意义的结论。

(1) 拉萨季节各浅层平均地温均呈显著的升高趋势,升幅为  $0.31\sim 0.87^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在春、夏两季以 40cm 地温升温率最大;秋季以表层地温升温率最明显,为  $0.58^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;冬季平均地温的升温率以 10cm 最大、表层最小,前者是后者的 1.6 倍。从整个浅层平均而言,四季平均地温均呈现为极显著的升高趋势,升温率为  $0.43\sim 0.60^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,以春季最大、夏季最小。

(2) 近 45 年拉萨各浅层年平均地温均表现为极显著的升高趋势,平均升高  $0.45\sim 0.66^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,40cm 地温升幅最大。与同时期平均气温的气候倾向率比较,0~20cm 浅层地温的倾向率略偏高,40cm 地温偏高  $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,这表明 40cm 地温比气温对气候变暖的响应更强。这说明气温的显著增高在很大程度上是影响地温明显升高的原因。

(3) 拉萨浅层 10cm、20cm 和 40cm 浅层平均地温不论是年还是四季,都经历了一个“冷——暖”的历史演变过程。20 世纪 60 年代到 80 年代中期为偏冷阶段,1980 年代后期至 1990 年代地温为偏暖阶段。进入 21 世纪后平均地温呈下降趋势,这主要由于夏季降水量的明显增加,日照时数显著减少造成的<sup>[14]</sup>,但近地面的气温仍表现显著的升温趋势,与 21 世纪中国大部分地区气温依然在变暖是一致的。

(4) 各浅层平均地温在 1986 年秋季均发生了突变,冬季突变时间都出现在 1984 年。0~20cm 各浅层年平均地温突变时间均发生在 1985 年。

(5) 年平均地温除 40cm 在 1999 年异常偏高外,其它各层为异常偏低年份,且发生在 20 世纪 60 年代。夏季大部分浅层的平均地温未出现异常。在冬季,40cm 平均地温以异常偏低年份为主,主要出现在 20 世纪 60 年代,低温异常偏高年份仅发生在 5cm 深度处,即 1999 年。

### 参考文献

- [1] 李崇银. 气候动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1995, 290-296.
- [2] Gilichinsky D A, Barry R G, Bykhovets S S, et al. A century of temperature observations of soil climate: methods of analysis and long-term trends [R]. In: Lewkowicz A G, Allard M, eds. Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, June 23-27, 1998, Yellowknife, Canada. 1998. 313-317.
- [3] Osterkamp T E, Romanovsky V E. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1999, 10 (1): 17-37.
- [4] Gu Zhongwei, Zhou Youwu, Liang Fengxian, et al. Permafrost features and their changes in Amur area, Daxinganling Prefecture, Northeastern China [R]. In: Proceedings of Sixth International Conference on Permafrost, July 5-29, Beijing, 1993. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1993, 1: 204-209.
- [5] 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.
- [6] 建军, 余锦华, 达琼. 近 30 年青藏高原年平均 0cm 地温的分布和变化特征[J]. 气象, 2006, 32(12): 64-69.
- [7] 向毓意, 杜军. 西藏浅层地温气候特征分析及与降水的关系[J]. 成都气象学院学报, 1999, 14(1): 20-25.
- [8] 徐宗学, 张玲, 黄俊雄, 等. 西藏地区气温、降水及相对湿度的趋势分析[J]. 气象, 2007, 33(7): 82-88.
- [9] 张顺利. 西藏 30 年温度变化的气候特征[J]. 气象, 1997, 23(2): 21-24.
- [10] 杜军, 周顺武, 唐叔乙. 西藏近 40 年气温变化的气候特征分析[J]. 应用气象学报, 2000, 11(2): 221-227.
- [11] 黄嘉佑. 气候状态变化趋势与突变分析[J]. 气象, 1995, 21(7): 54-57.
- [12] 李述训, 南卓铜, 赵林. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 109-115.
- [13] Pavlov A V. Current change of climate and permafrost in the Arctic and Sub-Arctic of Russia [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1994, 5: 101-110.
- [14] 杜军, 边多, 胡军, 等. 西藏近 35 年日照时数的变化特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 492-500.