

我国最大冻土深度变化及初步解释*

刘小宁 李庆祥

(国家气象中心,北京 100081)

摘 要

利用我国年最大冻土深度数据集,分析了我国最大冻土深度的空间分布及年代际变化。结果表明,我国最大冻土深度 20 世纪 80 年代以来开始减小,90 年代显著减小。冻土深度减小的事实,反映了我国冬季极端最低气温升高与我国年平均日较差显著变小的趋势。冻土对气候变化具有敏感性。

关键词:最大冻土深度 气候变化 极端最低气温

引 言

近年来,全球气候变化和异常作为全球环境问题之一,已经成为气候科学研究中一个十分令人关心的问题。我国许多气候学家在气候变化研究进展、大气温室气体排放、气候变化观测事实研究、气候变化及其影响模拟与预测研究方面作了大量研究。在我国气候变化的观测事实研究中,许多是从大气中各要素的角度出发,譬如利用气温(最高、最低)、热带气旋、降水作过许多研究^[1~4]。而相应地,地球本身对于大气环境变化响应也是全球变化研究中一个重要部分,这方面研究尚不多。冻土是含有水分的土壤因温度下降到 0℃或以下呈冻结的一种现象。冻土是在岩石圈-土壤-大气圈系统热质交换过程中形成的,自然界许多地理地质因素参与这一过程,影响和决定冻土的形成和发展。气候是其中对冻土有重要作用的因素^[5]。因此,气候变化将影响冻土的地区分布和冰冻渗透深度。在冻土(尤其是永冻土)中,经常含有冰,而冰的储存形式有保存在土壤孔隙之中的冰到几米厚的纯冰构成的冰块。冻土含有冰的物理特性使其成为地球的一种独特构成的物质,且对气候变化具有敏感性^[6]。对于季节性冻土,出现在一年的冬季。当地面温度降到 0℃以下时,冰冻就从地表往下渗透到地面之中。根据研究,决定冰冻渗透的因子有气温、地温、地面覆盖性质、土壤含水量和土壤与积雪的热力特征。尤其是气温、降水、积雪对冻土均有不同程度的影响。因此,气候变化将影响冻土的地区分布和冰冻渗透深度。如果出现变暖,或其他因子没有变化,则季节性冻土的地区将减少或最大冻土深度将变浅。因此,在我国,冻土要素有无变化,气候变化对其有何影响,是值得研究的课题。

本文利用我国近 50 年来冻土观测资料,试图通过分析其最大冻土深度的空间分布及地区分布变化、最大冻土深度的年代际变化来解释冻土对气候变化的响应。

* 本文由国家科技基础性工作专项资金项目(2001 DE A30029)资助。

2002-03-01 收到,2002-11-10 收到修改稿。

1 资料及处理

文中资料来源于国家气象中心气象资料室。利用我国基本(准)气象站 389 个曾有冻土出现的观测资料(从建站到 2000 年,以年为时段),尤其是 20 世纪 90 年代以后的最新资料进行分析和计算。数据经过了国家气象中心气象资料室的质量检验。

为了分析各站最大冻土深度的相对变动程度,计算了各站最大冻土深度相对标准差(又称为离差系数或变差系数)^[7]。它是标准差与平均值的比值:

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (1)$$

式(1)中 S 为该站最大冻土深度的标准差, \bar{x} 为该站 1961~2000 年逐年最大冻土深度的平均值。

为了分析最大冻土深度的变化趋势,使用线性倾向估计方法^[8],用 x_i 表示逐年最大冻土深度,用 t_i 表示与 x_i 一一对应的逐年年份,建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程。

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其含义表示 x 与时间 t 之间的关系。其中回归系数 b 表示最大冻土深度的趋势倾向, $b > 0$ 说明随时间 t 增加的 x 呈上升趋势, $b < 0$ 说明随时间 t 增加 x 呈下降趋势,同时 b 值的大小反映上升或下降的速率。

回归系数 b 和常数 a 的计算公式为:

$$\left\{ \begin{aligned} b &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \\ a &= \bar{x} - b \bar{t} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

其中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ 。

为了分析 x 与时间 t 之间线性相关的密切程度,计算了时间 t 与最大冻土深度之间的相关系数。

$$r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}} \quad (4)$$

为判断变化趋势的程度是否显著,进行了相关系数的显著性检验。若 $|r| > r_a$ 表示 x 随时间 t 的变化趋势显著,否则变化趋势不显著。计算了 $|r| \geq 0.2875$ 的站,即进行了 $r = 0.05$ 的显著性水平检验。

为了分析最大冻土深度的年代际变化,计算了各年代各站极端最大冻土深度出现的次数及频率。

将各年代作为“组界”,如 1961~1970 年为一组,然后计算落入该组的极端最大冻土深度出现的年份个数。即该组的“组频数”,也就是该年代极端最大冻土深度出现的频次

(频数),将该组的组频数次除以总数(总站数)即得该年代极端最大冻土深度出现的频率。

2 最大冻土深度的空间分布及其变化

在各站各年最大冻土深度数据集的基础上,计算了各站从建站到 2000 年的最大冻土深度的极端值。

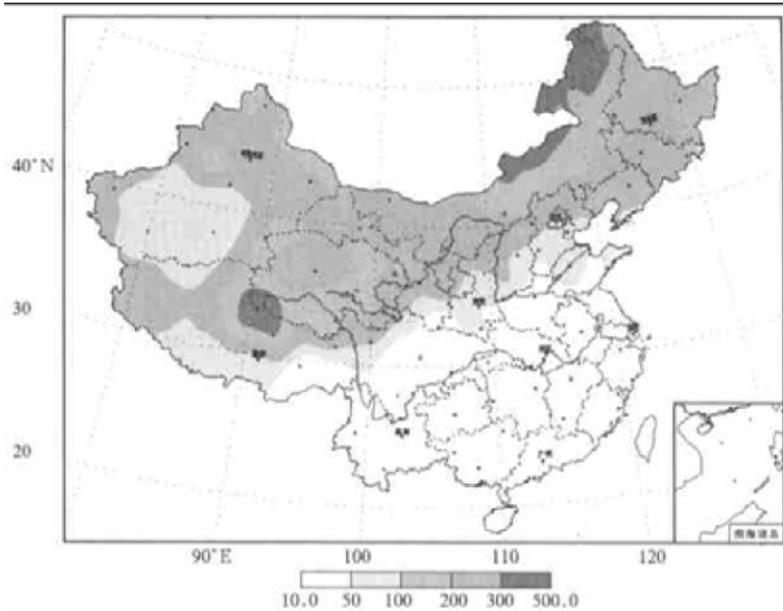


图 1 我国气象观测所记载的极端最大冻土深度(单位:cm)空间分布图

图 1 显示了自有冻土观测资料后,我国所记载的极端最大冻土深度空间分布图。从图中可以看出,我国东部 30°N 以南,没有观测到有冻土出现。河北北部、山西、陕西、四川西北部一线均出现过 1 m 以上的最大冻土。黑龙江大部、内蒙古中、西部、新疆北部、青藏高原、青海西部都曾出现过 2 m 以上的冻土。其中黑龙江的漠河、内蒙古的图里河、新巴尔虎右旗等我国最北部一线还曾出现过大于 4 m 的冻土。

为了反映最大冻土深度分布的平均状况,利用逐年的最大冻土深度值,计算了从 1961 年至 2000 年的各站最大冻土深度的平均值。由于平均的时段有 40 年,因此,所计算的平均最大冻土深度可以反映我国截止到 2000 年冻土深度的空间分布。从图 2 平均最大冻土深度分布图与极端最大冻土深度分布比较可以看到,其 1 m 线的南界已经大大向北收缩,东部地区从 40°N 退到 42°N 以北。平均 1 m 冻土的范围已经大大缩小。平均 2 m 以上的地区只有内蒙古的西北部及黑龙江的北部、青藏高原的一小部分地区。

为了分析最大冻土深度的变化趋势,计算了全国有最大冻土深度资料 15 年以上的台站(共有 352 个)线性变化趋势项 b ,以此为依据绘制了我国最大冻土深度线性趋势分布图(图 3)。同时进行了相关系数显著性检验,其中有 234 个台站通过了 $r=0.05$ 的显著

性检验,占 66.5%。因此,图中所反映的我国最大冻土深度线性趋势大部分是显著的。

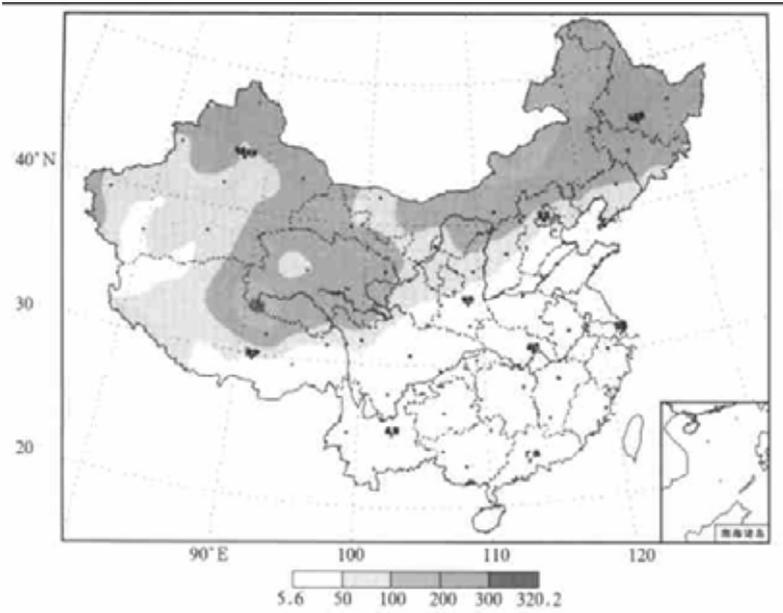


图 2 1961 ~ 2000 年我国平均最大冻土深度(单位 :cm)分布图

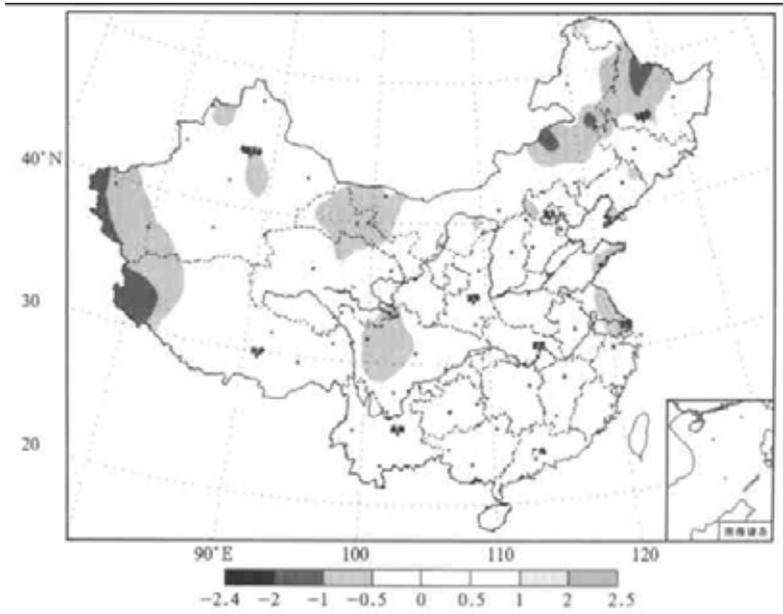


图 3 我国最大冻土深度线性趋势(单位 :cm/a)分布图

从图中可以看到,除青藏高原东部、云南东部到四川西部地区及新疆、黑龙江、内蒙古、陕西、山西北部局部地区以外,全国绝大部分地区的最大冻土深度呈下降趋势,即趋于

最大冻土深度减小的趋势。尤其是长江—淮河流域下游、山东半岛、内蒙古中西部、黑龙江北部、辽宁南部、甘肃西部、青藏高原西部、新疆中部地区下降趋势更为明显。

近 40 年来,最大冻土深度已经发生了变化,通过对冻土深度变化原因的分析,可以了解气候变化对冻土深度的影响,或者说,冻土是否对气候变化具有敏感性。因此,我们不仅关心最大冻土深度的绝对值的变化,也希望了解不同地区最大冻土深度变化的差异。

由上面分析可以看出,各地最大冻土深度(包括极端值和平均值)的差异很大,从最北部的极端最大冻土深度的 4 m 到南部的极端最大冻土深度的几厘米。标准差反映每个站最大冻土深度的变动程度,它不能很好反映全国范围最大冻土深度的相对变动程度。而本文力图研究全国范围内的最大冻土深度的相对变化程度,因此比较各站最大冻土深度的变化时,用相对标准差(或称变差系数、离差系数)来表示更有代表性。

图 4 为我国最大冻土深度相对标准差分布图。从图中可以看到,在有冻土观测的地区,变化都在 0.1 以上。东部 $30^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{N}$ 地区达到 0.4 ~ 0.6,即黄河下游到长江下游地区是变化最大的地区之一。黑龙江大部、吉林、内蒙古西北部、新疆北部、青藏高原也是变化较大的地区。而黑龙江北部、吉林西部、辽宁、内蒙古东部、陕西北部、甘肃西部、青海西部、新疆南部地区是最大冻土深度变化比较小的地区。

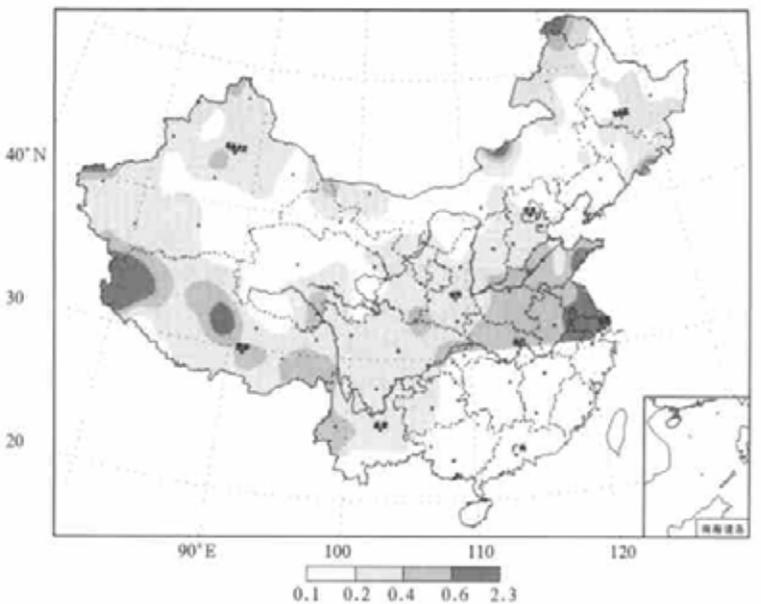


图 4 我国最大冻土深度相对标准差分布图

不难理解,冻土的深度与冬季气温关系密切。上述最大冻土深度变化的空间差异的分布与许多气候专家分析的我国近 40 年气温变化的空间差异的分布有相似之处。季劲钧等人^[1]在分析我国气候变化的空间差异中指出:冬季我国北方和东部增温明显,增温中心在新疆北部和东北。这些地区也正是上述分析指出的最大冻土深度变化大的地区之一。说明在我国冬季增温的气候变化中,最大冻土深度也发生了明显的变化。最大冻土深度变化的空间差异与近 40 年气温变化的空间差异分布的相似,反映了冻土要素对气候

变化具有敏感性,尤其是对冬季的气温变化。

3 最大冻土深度的年代际变化

为了分析最大冻土深度的年代际变化,计算了全国极端最大冻土深度出现的年代际频次(即各年代各站极端最大冻土深度出现的次数)及频率(表1)。由于表中所计算的站不包括极端最大冻土深度为 0.0 cm 的站,所以实际总站数为 376 个。

表 1 极端最大冻土深度出现频次频率

	年 代			
	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000
频次	137	99	90	50
频率(%)	36.4	26.3	24.0	13.3

由表 1 可见,极端最大冻土深度出现的频率逐年代际明显下降。从 20 世纪 60 年代的 36.4% 依次下降为 26.3%、24.0%、直至 90 年代的 13.3%。也就是说,有 62.7%(约为 2/3)的站,其极端最大冻土深度出现在 20 世纪 80 年代前,反之,只有 37.3%(约为 1/3)的站,在 20 世纪 80 年代以后出现过该站历史上的极端最大冻土深度;而只有 13.3% 的站在 20 世纪 90 年代以后极端最大冻土深度达到过该站历史上的极大值。也就是说,各年代出现极端最大冻土深度的测站数,随年代的增加而减少。这进一步说明极端最大冻土深度在全国大部分台站是逐年代减小的。

为了更深入地了解各地区各年代最大冻土深度的变化,又分区计算了各区各年代最大冻土深度的距平和标准差(表 2)。

其中 50、54 区代表了东北、华北地区;51 区代表了新疆、青藏高原西北地区;52、53 区代表了甘肃、青海、宁夏、山西北部、陕西地区;55、56 区代表西藏、青藏高原南部、四川西部、云南西北部地区。

表 2 各区各年代最大冻土深度的距平和标准差

区号	距 平				标准差			
	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000
50、54	5.3	6.4	-0.4	-9.7	16.6	16.2	19.0	13.9
51	5.4	5.7	4.8	-11.8	20.0	14.0	12.4	23.4
52、53	5.4	6.9	-1.0	-6.1	16.0	15.4	13.4	14.2
55、56	12.6	-0.8	-3.2	-3.6	8.7	9.9	7.6	7.2
平均	7.1	4.6	0.05	-7.8	15.3	13.9	13.1	14.6

从分区的统计结果看,各区最大冻土深度距平都呈下降趋势,基本上是从 20 世纪 80 年代前的正距平下降到 80 年代后的负距平,且下降幅度比较大。其中距平变化最大的区发生在 51 区,即新疆大部及青藏高原西北部,从 20 世纪 60 年代到 20 世纪 90 年代距平下降达 17.2 cm;变化最小的区是 52、53 区,即西北地区的中部、北部,包括甘肃、青海、宁夏、陕西、山西北部,下降达 11.5 cm;50、54 区和 55、56 区的变化在两者之间。进入 20 世纪 90 年代以后,变化最大的区域为 51 区,达 -11.8 cm,次大区为 50、54 区,即东北、华北

北部,为 -9.7 cm ;最小区为55 56区,即青藏高原区,为 -3.6 cm 。

从各区各年代际距平变化可看出,20世纪60年代以来不同地区变化速度也有差异。在东北、华北北部(50 54区),20世纪80年代以前均为正距平,20世纪80年代后为负距平,20世纪90年代达 -9.7 cm ;西北中部(52 53区)其变化趋势与东北、华北北部基本一致;而新疆地区(51区),在20世纪90年代以前还是正距平,20世纪90年代以后负距平猛降到 -11.8 cm ,变化十分巨大;青藏高原南部及西南地区西部(55 56区)在20世纪60年代有着明显的正距平,自20世纪70年代开始逐年代下降,直至20世纪90年代的 -3.6 cm ,其最大下降时期在20世纪70年代。从总体看,冻土深度的减小是从20世纪80年代开始的;其开始的地区从东北、华北、西北中部,20世纪90年代延伸到新疆地区;各地区冻土深度减小最快的时间段发生在20世纪90年代,其最快的地区发生在新疆地区。

从全国平均来看,最大冻土深度距平自20世纪60年代以来一直呈明显下降趋势,而且下降的幅度逐年代际增加。20世纪70年代较20世纪60年代下降了 2.5 cm ;20世纪80年代较20世纪70年代下降了 4.5 cm ;20世纪90年代较20世纪80年代下降了 7.75 cm 。这反映了我国的最大冻土深度逐年代际减小加速的状况。

从各区各年代际标准差结果分析可得出同样的结论。东北、华北北部(50 54区),在20世纪80年代最大冻土深度的变率最大;新疆区(51区)在20世纪90年代最大冻土深度的变率最大;西北中部(52 53区)在20世纪60年代最大冻土深度的变率最大;青藏高原南部及西南地区西部(55 56区)在20世纪70年代最大冻土深度的变率最大。进入20世纪90年代之后,新疆区最大冻土深度的变率最大,达 23.4 cm ;其次为西北中部和东北、华北中部;青藏高原与西南西部变率最小。

4 最大冻土深度变化的初步解释

我国多年冻土面积占国土面积的 22.3% ,在世界上占第三位。其中高海拔多年冻土面积则居世界之最,季节冻土及短时冻土遍布大部分国土。冻土与我国气候、经济、人民生活有着密切的关系。因此,冻土变化的原因是值得探讨的。

对冻土形成的条件研究表明,从冻土热物理学观点来看,冻土是在岩石圈-土壤-大气圈系统热质交换过程中形成的,自然界许多地理地质因素参与这一过程,影响和决定冻土的形成和发展。气候是其中对冻土有重要作用的因素^[5]。地质构造、地形对冻土的形成起着重要作用,但是这个因素近几十年基本是没有变化的。另一个重要因素就是气候,而气候变化的确定性已经被证实。在气候因素中,地表面辐射-热量平衡与冻土有密切的关系。冻土的冻结发生在地表对外的长波辐射大于吸收辐射的期间,即辐射平衡具有稳定负值的期间,地面温度在此期间降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。而年平均气温反映了各地区地表辐射-热量平衡和大气环流的特点。年平均气温在20世纪80年代以来明显上升的状况已经为充分的资料及分析所证实。

根据王绍武最新制作的中国1880~1999年平均气温资料序列^[9],近20年中国气温回升猛烈。

国外研究表明,全球陆面温度升高过程中多数地区的最低温度升高高于最高温度的升高。根据任福民、翟盘茂对1951~1990年季极端温度变化线性趋势的全国分布的研究^[10],极端最低温度在四季均表现为增温趋势,其中增温最强的是冬季;其增温中心在东北南部、内蒙古中部、华北、江淮流域、华南沿海和新疆北部,10年增温超过 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这些地区与本文图4中的最大冻土深度相对标准差分布有比较好的一致:即相对标准差在0.4以上的地区有江淮流域、东北南部、内蒙古中部;相对标准差在0.2以上的地区包括了华北、新疆北部。

根据翟盘茂的研究^[3],我国年平均日较差有显著变小的趋势,尤以冬季为明显。在其制作的“我国年平均温度日较差变化趋势的空间分布图”中可看出,每10年变化达到了 $-0.7\sim-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地区分布与最大冻土深度相对标准差分布(图4)有着惊人的相似之处。最大冻土深度相对标准差达0.2以上地区,基本为年平均日较差每10年变化达 $-0.7\sim-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 地区。即主要分布在东北东部、内蒙古西部及华北东部、江淮地区。尤其是我国东部黄河下游到长江下游地区,其年平均温度日较差每10年变化达 $-0.7\sim-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而东部 30°N 到 37°N 这一地区也正是最大冻土深度相对标准差达 $0.4\sim0.6$ 的地区,是变化最大的地区之一。

年平均日较差显著变小的原因主要是我国最低温度升高引起的。根据翟盘茂的分析,其最低温度变化最大的地区为东北、华北、新疆北部、黄河及长江上游,每10年变化达 $0.3\sim0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而正是在这一地区,在20世纪90年代以前(因为翟盘茂的资料到1990年),东北、华北地区最大冻土深度年代际变化达 3.95 cm ,黄河上游地区最大冻土深度年代际变化达 4.7 cm 。

以上分析表明:造成最大冻土深度随年代际减小的原因与气候变化有关,而气候变化与我国冬季极端最低气温的明显增高及由此引起的年平均日较差显著变小有着密切的关系。

如前所述,我国最大冻土深度无论是空间分布还是年代际变化,在近40年来,尤其是20世纪90年代之后,都发生了较大变化,同时这一变化与温度,尤其是最低气温变化比较一致。冻土深度的南线北抬与最大冻土深度的减小,反映了我国北方,尤其是东北、华北北部、新疆地区冬季变暖的事实。根据政府间气候变化专业委员会评估“气候变化2001:综合报告”指出:从全球看,在仪器记录时期(1861~2000年),20世纪90年代很可能是最暖的十年,表现在其物理指标永久冻土在极地、亚极地和山地一些地区解冻、变暖和退化^[6]。

冻土深度减小反映了我国北方大部及我国东部地区冬季气候变暖的事实,尤其与20世纪90年代很可能是最暖的十年^[6]的结论相一致。这进一步说明了冻土要素对气候变化响应的敏感性。

5 小结

(1) 最大冻土深度空间分布变化表明,我国东部 30°N 以南,没有观测到有冻土出现。河北北部、山西、陕西、四川西北部一线均出现过 1 m 以上的最大冻土。冻土深度较大的

地区有黑龙江大部、内蒙古中、西部、新疆北部、青藏高原、青海西部(2 m 以上),其中黑龙江的漠河、内蒙古的图里河、新巴尔虎右旗等我国最北部一线还曾出现过大于 4 m 的冻土。东部 30° N 到 37° N 地区,即黄河下游到长江下游地区是冻土深度变化最大的地区之一。

(2) 最大冻土深度的年代际变化分析表明,自 20 世纪 80 年代以来绝大多数地区最大冻土深度开始减小,20 世纪 90 年代后,全国各地冻土深度减小幅度更为显著。

(3) 我国绝大多数地区最大冻土深度在减小,但是各个地方减小的速度不同,反映了在全球变暖和人为活动作用增强的情况下,由于各地具体情况不同,冻土对其它要素变化的反映各不相同。

(4) 最大冻土深度减小的原因是复杂的,但从冻土深度减小的事实,至少反映了我国冬季极端最低气温升高与我国年平均日较差显著变小的趋势。这些都表明冻土对气候变化具有敏感性。

参 考 文 献

- 1 季劲钧,曾昭美,严中伟,等. 本世纪全球和中国气候变化中的空间差异. 见:丁一汇主编. 中国的气候变化与气候影响研究. 北京:气象出版社,1997.170~178.
- 2 曾昭美,严中伟. 本世纪全球增暖的显著性分析. 应用气象学报,1999,10(增刊):23~33.
- 3 翟盘茂,任福民. 我国最高、最低温度变化规律研究. 见:丁一汇主编. 中国的气候变化与气候影响研究. 北京:气象出版社,1997.199~206.
- 4 Sun Anjian, Liu Xiaoning, Gao Bo. Change trends of extreme climate events in china. *Acta Meteor. Sinica*,1998,12(2):129~141.
- 5 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土. 北京:科学出版社,2000.9.
- 6 政府间气候变化专门委员会. 气候变化的可能影响. 第 II 工作组为政府间气候变化专门委员会准备的报告. 223~248.
- 7 谭冠日,严济远,朱瑞兆编著. 应用气候. 上海:上海科学技术出版社,1985.39.
- 8 魏凤英编著. 现代气候统计诊断预测技术. 北京:气象出版社,1999.43.
- 9 王绍武主编. 现代气候学研究进展. 北京:气象出版社,2001.138.
- 10 任福民,翟盘茂. 1951~1990 年中国极端气温变化分析. 大气科学,1998,22(2):217~227.

CHANGE OF MAXIMUM FROZEN SOIL DEPTH IN CHINA AND ITS PRIMARY EXPLANATION

Liu Xiaoning Li Qingxiang

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

With the annual maximum frozen soil depth data of China, analysis is made of the special distribution and decadal change during the recent 50 years. The results show that the an-

nual maximum frozen soil depth in China began to decrease since the 1980s , and decreased more distinctly during the 1990s . The decreasing of the maximum frozen soil depth is in accordance with the climate change (rising of minimum temperature and decreasing of the annual average daily temperature range) . It indicates that the maximum frozen soil depth is sensitive to the climate change in China .

Key words : Maximum frozen soil depth Climate change Minimum temperature