

近 50 年来中国季节性冻土与短时冻土的 时空变化特征

陈博^{1, 2} 李建平¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 在中国冻土气象观测资料整理和分析的基础上, 研究了中国冻土分布的时空演变规律。主要分析了中国冻土分布的季节变化、冻土深度的空间变化, 以及冻结日期、解冻日期、冻结时间长度的空间分布特征, 同时也分析了以上各要素的时间变化特征。结果表明: 中国冻土分布广泛, 在我国东部的长江以北地区、西北地区及青藏高原地区均有分布; 其中季节性冻土具有显著的年内变化特征, 冻结一般从秋季开始, 冬末春初冻结的面积和深度达到最大, 春季逐渐开始融化, 夏季冻结的面积和厚度达到最小; 冻土的冻结过程和融化过程表现出各自不同的特征, 整个中国地区冻土的融化过程所持续的时间比冻结持续的时间长, 也更为复杂, 这与地形及土壤特性有着密切的关系; 近几十年来, 在全球变暖背景下, 中国冻土主要表现为最大冻土深度减小, 冻结日期推迟, 融化日期提前, 冻结持续期缩短, 以及冻土下界上升的总体退化趋势, 冻土的主要转型时期发生在 20 世纪 80 年代中期。

关键词 冻土 时空分布 变化趋势 年代际变化

文章编号 1006-9895 (2008) 03-0432-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

Characteristics of Spatial and Temporal Variation of Seasonal and Short-Term Frozen Soil in China in Recent 50 Years

CHEN Bo^{1, 2} and LI Jian-Ping¹

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Based on the quality control of daily meteorological observation data of frozen soil in China, the spatial and temporal variations of frozen soil have been investigated. The seasonal change of the frozen soil, the change of the frozen soil depth, the beginning dates and the ending dates are mainly analyzed.

The results show that frozen soil occurs in most of the territory in China, including the north of the Yangtze River, Northwest China and the Tibetan Plateau. The monthly variation of seasonal frozen soil is significant. The freezing process generally began in autumn, and reached the maximum of depth and area in the end of winter. In spring the frozen soil began to thaw and finished in the summer. The thawing and freezing processes of frozen soil demonstrated different characteristics and the thawing process persisted longer and more complicatedly than the freezing process. This has a very close relationship with soil characteristics and topographic factors. In the background of global warming in the last few decades, the frozen soil showed a degradation in China. The maximum of

收稿日期 2006-12-13, 2007-03-15 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403600, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200706005

作者简介 陈博, 男, 1983 年出生, 硕士, 主要从事中国冻土与气候关系的研究。E-mail: cb@mail.iap.ac.cn

frozen depth decreased, the beginning dates of soil freezing occurred later and the ending dates of soil freezing occurred earlier and the persisting of soil freezing shortened, as well as the soil base rose. It is in the mid 1980s that the significant abrupt change of the frozen soil happened.

Key words frozen soil, spatial and temporal distribution, tendency, interdecadal variation

1 引言

冻土, 一般是指温度在 0°C 或 0°C 以下, 并含有冰的各种岩土和土壤。按土的冻结状态保持时间的长短, 冻土一般可分为短时冻土(数小时、数日以至半月)、季节冻土(半月至数月)以及多年冻土(数年至数万年以上)^[1]。

冻土是地球系统五大圈层之一——冰冻圈的重要组成部分, 它覆盖全球陆地表面的很大面积, 地球上多年冻土、季节冻土和短时冻土区的面积约占陆地面积的 50%, 其中, 多年冻土面积占陆地面积的 25%^[2]。在北半球, 多年冻土约占陆地表面的 24%, 季节冻土约占 30%^[3]。在全球各大洲均有季节冻土发生, 在欧亚大陆, 系统冻结区(每年发生)南界一般可到 30°N , 在南半球季节冻土冻结面积比北半球小得多^[4]。

由于冻土分布广泛且具有独特的水热特性, 这使它成为地球陆地表面过程中的一个非常重要的因子。一方面, 冻土是气候变化的灵敏感应器, 气候变化将引起冻土地区环境和冻土工程特性的显著变化, 这一点正在被冰冻圈检测所证实。另一方面, 冻土的变化也反作用于气候系统, 因为冻土影响到陆地表面的热平衡, 当土壤冻结或消融时, 会释放或消耗大量的融化潜热, 土壤的热特性也随之改变^[4, 5]。同时, 冻土的变化也会对建立在其上的生态环境造成很大的影响^[6]。

冻土研究目前主要集中在北半球。过去数十年的研究表明, 多年冻土在普遍的融化, 季节冻土的范围在缩小, 在西伯利亚地区、北美的加拿大、阿拉斯加地区都观测到了地温升高, 冻土退化的事实^[6~9], 科学家们认为过去数十年永久冻土和季节冻土区的变化是气候增暖的结果^[10~12]。全球变暖导致了多年冻土的退化和消融, 从而导致存储在冻土中的碳的释放, 这又进一步加剧了全球变暖^[13, 14]。

在我国, 冻土也有广泛的分布, 季节性冻土和多年冻土影响的面积约占中国陆地总面积的 70%,

如果算上短时冻土其面积则要占到 90% 左右, 其中多年冻土约占 22.3%^[15], 冻土对我国人民生活和经济建设有着举足轻重的影响。对我国冻土的研究目前主要集中在青藏高原地区, 对高原以外地区的冻土时空分布特征、变化趋势以及年代际变化了解得不多。在全球变暖的背景下, 中国的冻土是否也随之出现了显著的退化现象, 而由此带来的一系列的生态退化问题将会引起更多的社会、经济问题和更为广泛的社会关注。由于我国的冻土研究主要利用样本较少的野外勘探资料, 因此观测资料成为首先要解决的问题, 本文通过对中国气象台站冻土观测资料的整理和分析, 揭示了中国冻土的时空变化特征, 以及在全球变暖背景下中国冻土的变化趋势。

2 资料及处理方法

2.1 观测资料来源

本文所用资料是由中国气象局提供的 476 个气象台站观测的逐日冻土气象观测资料。最早的冻土观测起始于 1955 年。气象台站主要通过冻土器进行冻土的测量, 承担冻土观测的气象站, 根据埋入土中的冻土器内水结冰的部位和长度, 来测定冻结层次及其上限和下限深度。冻土深度以“cm”为单位, 取整数, 小数四舍五入。

2.2 资料质量控制

由于站点资料的时间长度不一致, 许多站点由于各种原因存在较多的缺测年和超刻度的现象, 同时站点的撤销和迁移也对资料的质量造成一定的影响。基于上述原因, 在对冻土进行研究之前, 我们首先要对冻土的气象观测资料进行质量控制, 以确保资料的可靠性和准确性。

(1) 超刻度的处理: 当冻土的深度超过了冻土测量器的最大测量深度时, 视为超刻度。超刻度的记录是在最大测量深度上再加上 500 cm。全国一共有 94 个站点出现过超刻度现象, 这些站点主要分布在黑龙江、内蒙古、甘肃、新疆、青海、西藏 6 省, 超刻度的出现年数大多小于 5 年, 通过观察可

以看到超刻度现象绝大多数出现在 20 世纪 80 年代以前,在处理这些站点时,对于超刻度现象出现年数较少的,我们将超刻度的数值减去 500 cm。对于超刻度出现年数过多的,我们根据情况对这些站点做出取舍。

(2) 站点的撤销和迁移:在冻土观测的站点中有将近 60 个站点由于撤站,从基本站降级为一般站。另有迁址等原因导致了冻土观测的中断,其中有 18 个站点是更换了站点后继续进行冻土观测,这些站点迁站后经纬度、海拔高度相近,由于冻土呈现的区域性特征,我们可以将这些站点的观测资料进行连接,使之具有更长的时间尺度。

(3) 站点资料的选取:从图 1 看到,中国气象观测的逐日冻土资料分布在除江西、广东、广西、贵州、重庆、香港、澳门、台湾以外的 25 个省市自治区。在 476 个站点中,冻土观测资料由于冻土观测的起始年度不同,以及冻土出现年数的不同,冻土资料中最长的是 51 年,最短的只有 1 年,因此,我们根据不同的要求对冻土资料进行整理。

首先,我们要找出具有观测年份较久且观测连续的站点资料,根据统计分析,全国具有连续的观测记录且时间尺度为 50 年(1955~2004 年)的站点有 63 个左右,45 年(1960~2004 年)的有 260 个左右,40 年(1965~2004 年)320 个左右,25 年(1980~2004 年)的有 350 个左右(图 1)。

从上面冻土资料时间长度的统计分析来看,

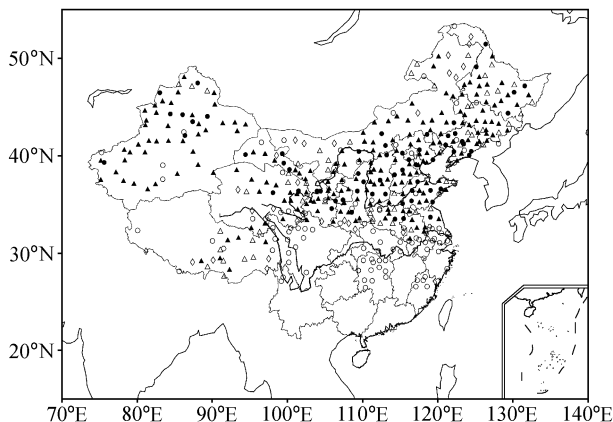


图 1 中国冻土观测站点分布图。观测长度:●: ≥ 50 年,▲: ≥ 45 年,△: ≥ 40 年,◇: ≥ 25 年,○: < 25 年

Fig. 1 The stations distribution of frozen soil in China. The stations have observation records more than or equal to 50 years (●), 45 years (▲), 40 years (△), 25 years (◇) and less than 25 years (○)

冻土资料时间尺度在 40 年左右的站点序列相对较长,分布也较广泛,能较好地反映中国冻土的变化情况。因此,我们选择时间尺度为 40 年的站点(320 个左右)来观察冻土的时空变化特征。从这些站点的分布来看,高原西部和藏北无人区缺乏站点资料,东北北部地区站点分布也较少,而这些地区是中国多年冻土的主要分布地区。因此,可以看到本文所选取的这些站点主要代表中国季节性冻土的分布情况。

3 中国冻土的空间分布特征

3.1 中国冻土分布的季节变化

本文利用中国冻土深度(指冻土的下界深度)的逐月分布(图 2)来观察中国冻土分布的季节变化。中国冻土冻结一般从秋季开始,9 月份,随着夏季风的南撤,东亚大陆冬季风开始占据主要地位,冷空气从北方入侵中国北部,中国的东北北部、新疆北部(阿尔泰山)和青藏高原东部率先开始冻结,可以看到除了大兴安岭、小兴安岭地区,其他地区的冻结深度都不超过 10 cm;到 10 月份,冻土的冻结面积显著增加,冻结南界延伸至河北、山西、陕西等省的南部地区以及中国西部大部分地区;11 月份,冻土的冻结深度有所加深,在黑龙江、内蒙古中北部以及新疆北部和青藏高原部分地区冻结深度达到了 25 cm,而在东北北部地区冻结深度超过了 50 cm。

随着冬季的到来,冻土的深度显著增加,范围也逐渐扩大到中国长江北部地区。12 月至下一年 2 月,随着冷空气不断南侵,气温不断下降,在中国东部大区和西北部大区冻土深度由北向南逐渐增加,青藏高原与同纬度的中国其他地区有着很大的不同,它的冻结深度明显大于同纬度中国东部地区。同时,在青藏高原的东南部,冻土的冻结深度梯度性很大,这可能是由于高原东南部巨大的垂直梯度差异造成的。

从全国范围来看,冻土深度在 2 月份达到最大,100 cm 冻结深度线相对 1 月份又往南推进了较大范围,中国东部地区冻结区域达到最大,冻结区域延伸至安徽、江苏南部、湖北和四川北部地区。在内蒙古、东北三省深度普遍达到了 100 cm 以上,在大兴安岭、小兴安岭地区和内蒙古中北部地区冻结深度达到了 200 cm 以上。在中国西北地区,除

了南疆地区在 50 cm 以下外, 其他地区的冻结深度都大于 50 cm, 新疆北部山区有超过 100 cm 深度的冻土。但是, 我们也看到在中国东部地区 10 cm 深度线有往北退的趋势, 新疆南部部分区域和青藏高原东南部相对 1 月份都出现冻土深度减小趋势, 也就是说在 2 月冻结区域北部冻土在加深的同时, 南部地区的冻土已经开始逐渐融化了。

从 3 月份至 5 月份, 随着气温的逐渐升高, 冻土在全国范围内向北消退。春季, 冻土主要表现为在冻结范围大面积缩小的同时, 伴随着冻结深度的减小。在东部地区, 冻结区域从江淮流域退至黄河以北地区; 西北地区冻土融化速度较快, 新疆南部盆地周边地区先于西北其他地区开始融化, 而甘肃、宁夏、内蒙古西部地区的冻土融化也要快于同

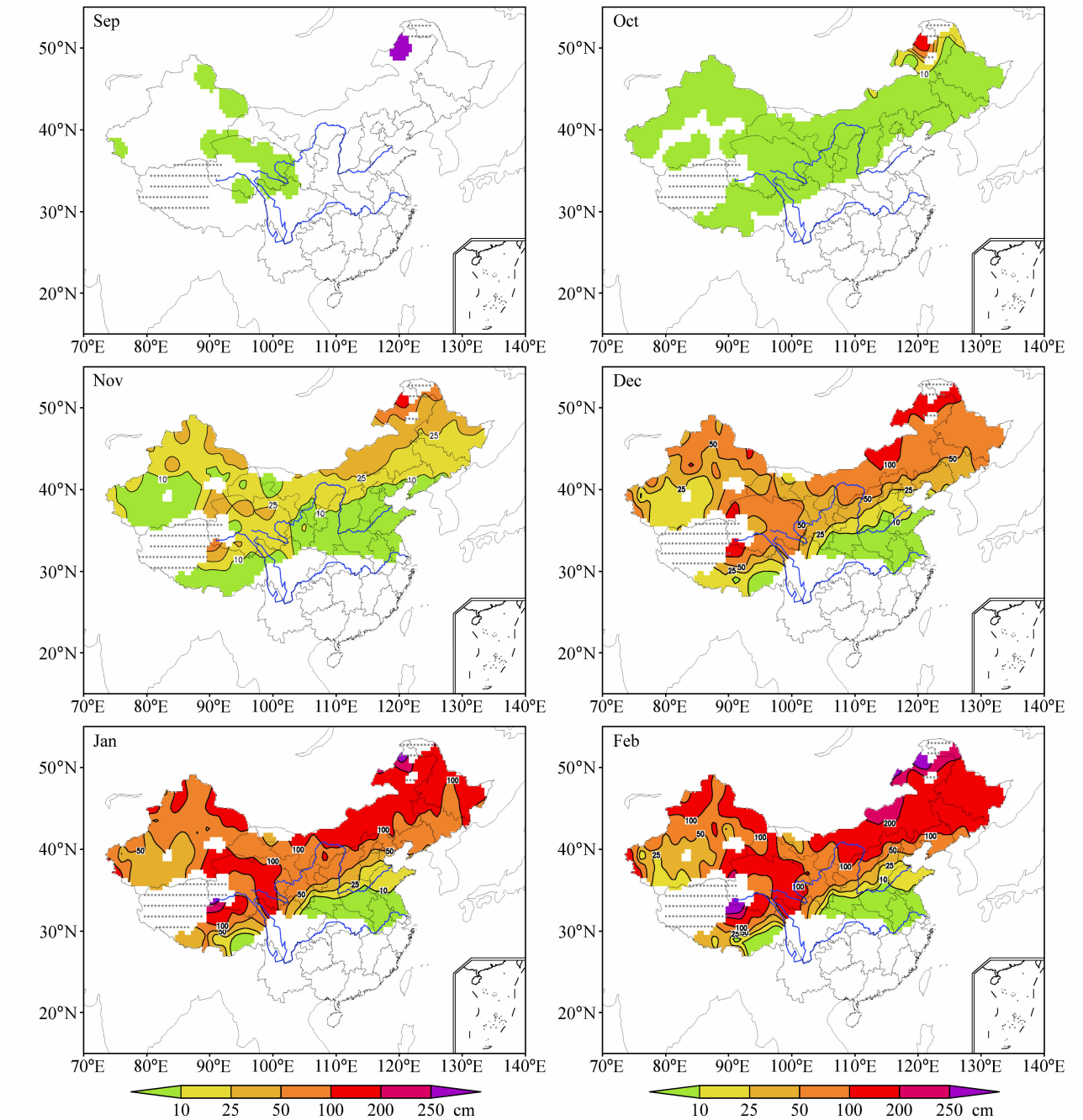


图 2 中国冻土深度逐月分布图。点线代表无资料区域(下同)

Fig. 2 The spatial distribution of monthly mean depth of frozen soil in China. The dotted lines mean the region of no data records (the same below)

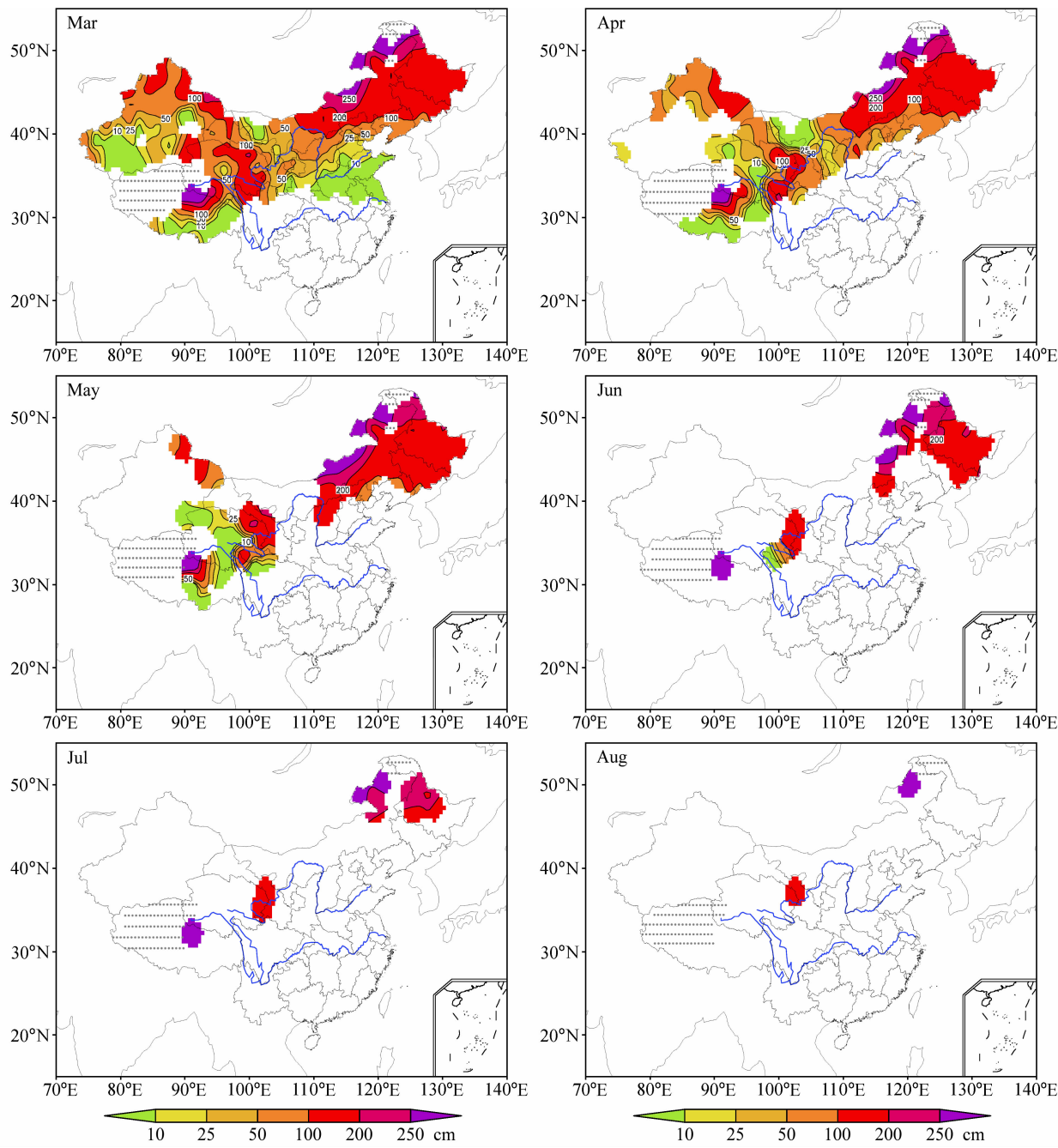


图 2 (续)

Fig. 2 (Continued)

纬度的东部地区,至 5 月份西北地区只有新疆北部山区还存在冻土。青藏高原地区冻土的融化区域是由高原东南部向青海省中部扩展,而在高原东北部地区,中部地区冻结深度仍较大。从冻结深度图上来看,在 4、5 月份中国有冻土存在的区域冻结深度仍较大,但通过冻土冻结厚度图(图略),我们看到在 4 月份开始,冻土的厚度分布明显不同于冻结深度的分布,虽然冻结深度仍较大,但冻结的厚度

已经明显减少,至 5 月份只有大兴安岭、小兴安岭地区以及青藏高原部分地区冻土厚度达到 100 cm 以上,其他冻结区域 50 cm 以下。这是由于一些地区冻土的融化一般从冻土的上层开始,自上而下,因此表现为冻土深度和厚度的不同。

6 月份至 8 月份,进入夏季后,冻土冻结范围进一步减小,到 8 月份中国的冻土融化区域达到最大,冻土只分布在东北北部大兴安岭、小兴安岭地

区以及青藏高原部分地区, 这些站点在土壤深层仍有冻结, 因此表现为较大的冻结深度, 但冻土的厚度已经进一步减小。

由图 2, 我们可以看到中国的冻土随季节的变化而变化, 不同区域的冻土分布呈现随纬度带状分布和随海拔高度呈垂直地带性分布的特征。中国的东部地区、西北地区、青藏高原地区有着不同的分布情况和季节变化, 这与周幼吾等^[1]提出的中国冻土区域的划分基本相同。

在中国东部冻土分布基本随纬度呈带状分布, 但并不完全平行于纬度线, 而是呈东北-西南的倾斜走向。这可能与气温的东西差异有关, 同时降水和土壤湿度的变化也会对冻土的分布产生重要影响。这一地区处于中国地势的第一阶梯和第二阶梯上, 绝大部分地区在海拔 1000 m 以下, 因为地形起伏不大, 热量条件随纬度变化十分显著。这一地区夏季季风影响很显著, 冬季则以西北风为主, 风向和降水均按季节而有显著的变化和交替。以上的气候条件都是造成中国东部冻土分布特征的基本原因。

在中国西北地区由于高耸的山脉和低陷的盆地相间, 地形上形成鲜明的对比。河西走廊与其南部的青藏高原地区冻结深度呈现明显的梯度性, 在新疆地区, 其北部阿尔泰山地区冻土深度明显高于附近同纬度地区, 在南疆地区塔里木盆地周边的冻土深度低于北疆地区, 这可能是由于盆地独特的气候特性以及水热条件在南北方向的变化造成的。同时, 我们可以看到西北地区冻土融化的速度要快于同纬度的中国东部地区和青藏高原地区, 一方面这是由于西北地区的地形造成的, 另一方面, 西北地区属于干旱区域, 降水和径流都较少, 也是冻融较早发生的原因。

青藏高原地区, 由于冻土观测的站点主要分布在高原中东部地区, 高原西部和藏北无人区缺乏站点资料, 所以分析的结果主要代表了高原中东部人类聚居区的冻土变化特征。从逐月分布图(图 2)上来看, 多年冻土的分布较少, 只有高原东部部分地区一年 12 个月都有冻土存在, 这可能是冻土观测站点基本分布在季节性冻土区和城市地区, 不能很好地反映多年冻土的变化情况。从图 2 上, 我们看到青藏高原冻土的普遍达到了 1 m 以上, 深度明显大于同纬度其他地区, 同时在青海地区中部地区

的冻结深度小于其周边的深度, 在 50~100 cm 之间。在高原东南部地区, 由于高山峡谷相间, 垂直梯度的变化导致冻土深度的变化梯度很大。

3.2 中国冻土冻结始日和终日的空间分布特征

本文根据中国气象局的《地面气象观测规范》^[16]中对年报表中对初、终日的选取标准, 设定上年 9 月 1 日后第一天冻土厚度不为零作为冻结始日, 以当年 8 月 31 日前最后一天冻土厚度不为零作为冻结终日。图 3a 是中国 40 年平均的开始冻结的日期分布, 从图中可以看到, 在中国东部地区开始冻结的日期由北向南逐渐推迟, 呈现带状分布, 冻结最早发生在东北北部和大兴安岭、小兴安岭地区, 由此往南, 冻结日期线基本呈东北-西南走向, 在内蒙古中部、山西和陕西等地区冻结日期要早于同纬度的东北、河北和山东等地。东部地区从上年 9 月初开始冻结, 一直到 11 月中旬才完成整个冻结过程, 这个过程用了将近 3 个多月的时间。在中国西北地区冻结的分布主要受地形的影响, 可以看到, 在新疆北部山区最早在 10 月中上旬开始冻结, 接着是内蒙古西部、甘肃和宁夏等地, 在 10 月下旬开始冻结, 南疆塔里木盆地周边地区相对较晚, 在 11 月上旬左右开始冻结, 整个过程用了不到 2 个月的时间。在青藏高原地区平均的冻结始日是由北向南逐渐推迟的, 青海北部和黄河源区冻结较早, 西藏东南部冻结较晚。

从图 3b 中国 40 年平均的解冻日期分布来看, 解冻的过程和冻结的过程表现了很大的不同, 解冻过程所花的时间明显长于冻结过程, 尤其在中国东部地区, 解冻过程持续了将近 6 个月时间, 同时也可以看到日期线的分布并不是呈现明显的带状分布的。

在中国东部地区, 冻结终日由南向北逐渐推迟, 我们可以看到冻结终日线 2 月上旬从江淮地区开始往北退, 而冻结始日期间在上年 11 月达到江淮地区, 期间有将近两个月的冻结持续期。东部地区的冻土解冻日期的分布较复杂, 在河北北部和内蒙古东北部都出现停滞区域, 其解冻的日期明显晚于邻近地区, 而在东北地区 and 东北平原的解冻日期早于周边的大兴安岭、小兴安岭地区, 可见地形的影响在这一地区起主要作用。在西北地区, 新疆南部塔里木盆地周边地区解冻较早, 3 月初就开始解冻, 甘肃、宁夏和内蒙古西部地区相对较晚, 而新

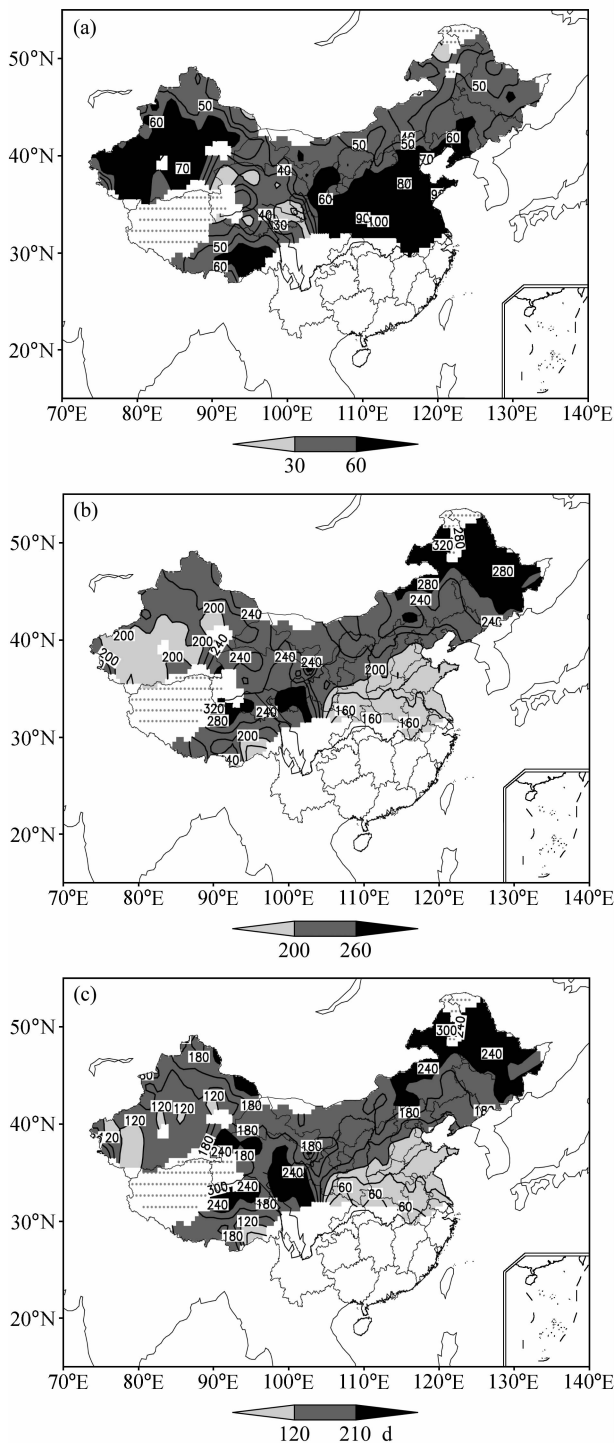


图3 中国40年(1965~2004)平均的冻土(a)冻结始日、(b)冻结终日及(c)冻结时间长度的空间分布。在(a)和(b)中,9月1日为起始日期,“60”表示10月30日,以此类推

Fig. 3 The spatial distribution of the mean (a) beginning dates, (b) ending dates and (c) lasting time of soil freezing for 40 years from 1965 to 2004 in China. In (a) and (b), the starting date is 1 Sep, “60” means 30 Oct and so on

疆北部阿尔泰山地区4月中下旬才开始解冻,相对最晚。这基本与冻土开始冻结路线相一致。在青藏高原地区、喜马拉雅山北麓、西藏东南部和青海东北部解冻较早,藏北高原和黄河源区解冻较晚。但整个高原地区相对于同纬度中国东部地区,其解冻时间晚了1~2个月的时间。

从图3c中可以看到,中国东部地区时间长度的跨度最大,由北向南时间长度逐渐减小,在大兴安岭、小兴安岭地区冻结时间长度有10个月以上,整个东北地区(除大兴安岭、小兴安岭外)都有半年以上,华北地区冻土时间分布呈带状分布逐渐减小,在江淮流域冻土的冻结时间只有2~3个月左右的时间。我国西北部地区,新疆南部冻结时间长度最短,有3~4个月左右,西北其他地区时间长度4~5个月左右。新疆北部地区时间长度最长,有半年以上的持续时间。青藏高原地区,高原地区冻结时间长达半年左右,远大于同纬度的中国东部地区。在喜马拉雅山北麓、西藏东南部和青海东北部冻结时间长度相对较短,而藏北高原和黄河源区解冻较晚。

4 中国冻土的总体变化趋势及其年代际变化特征

研究表明,在全球变暖背景下,近100年来中国年平均气温明显增加,升高了大约 0.58°C ^[17]。从40年(1951~1991)的极端温度变化来看,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,增温趋势最明显的区域在东北、华北北部、内蒙古中东部等地区^[18]。近几十年来,我国的冻土研究主要集中在青藏高原,青藏高原的冻土主要表现为地温显著升高、冻结持续日数缩短、最大冻土深度减小和多年冻土面积萎缩、季节冻土面积增大以及冻土下界上升等总体退化的趋势^[19~23]。同时,高荣等^[24]指出青藏高原在20世纪80年代冻结多偏早,解冻偏晚,冻结日数偏多,累计冻结厚度和最大冻结深度偏大;在90年代恰好相反,冻结多偏晚,解冻多偏早,累计冻结厚度和最大冻结深度偏小。这些变化也进一步影响了高原的生态环境^[25]。同时,马柱国,李新周等^[26~27]指出在20世纪70年代末以后,西北东部和华北地区变干趋势明显,北方大部分地区干旱现象严重,这在一定程度上也会对冻土产生影响。下面,通过对中国冻土

观测资料的分析, 观察其总体变化趋势。

4.1 中国冻土的变化趋势

最大冻土深度是地表土壤所能冻结到的最大深度。它的变化可以较好地反映中国冻土的变化情况。

利用稳健回归估计方法^[28]分析最大冻土深度的变化趋势, 从稳健回归线性趋势图(图 4a)上看, 全国大部分地区的回归系数是小于零的, 这说明全国大部分地区最大冻土深度都呈减小趋势, 趋势减小最大的区域为东北地区、内蒙古中部地区、新疆北部地区以及西藏北部地区, 最大的减小趋势达到了 1.5 cm/a 。但在青藏高原柴达木盆地北部、青海省东南部和内蒙古中西部的部分地区呈增加趋势, 在季节冻土区域的南部边缘地区, 例如甘肃、陕西、河南这些省份的南部地区平均冻结深度在 10 cm 以下, 冻土的变化趋势并不明显, 一些地方也有略微增加趋势。

同样, 利用稳健回归估计方法, 分析了具有 40 年时间尺度的冻结始日和冻结终日的线性变化趋势。

从图 4b 看到, 全国大部地区的回归系数是大于零的, 说明开始冻结的日期是在逐渐推迟的, 回归系数较大的区域在新疆北部阿尔泰山、新疆东南部和青海中部, 这些区域大部分都达到了 0.5 d/a , 部分区域达到了 1 d/a ; 在大兴安岭北部、青藏高原南部和新疆西南部部分地区冻结日期有提前的趋势。

同样, 从图 4c 看到全国大部地区的回归系数是小于零的, 说明冻土区域大部分地区都呈冻土解冻日期提前的趋势, 大部分区域以 -0.5 d/a 的速度提前解冻, 同样在大兴安岭北部、青藏高原南部和新疆南部部分地区冻结时间有推迟的趋势, 可以看到冻结提前与融化推迟的区域基本相同。冻结始日和冻结终日的变化趋势从另一个方面说明了我国的冻土有着较明显的退化趋势。

4.2 中国冻土的年代际变化特征

为了分析中国冻土的年代际变化情况, 我们对中国最大冻土深度做 EOF 分析, 第一模态的解释方差达到 34% , 能够较好地解释中国冻土时间变化的基本趋势, 从第一模态(图 5a)看, 全国大部分地区为同一符号的正值区, 呈现出全国范围内冻土退化的趋势, 这与线性趋势图的分布情况基本一致, 从时间序列(图 5b)来看, 在 80 年代中期冻土

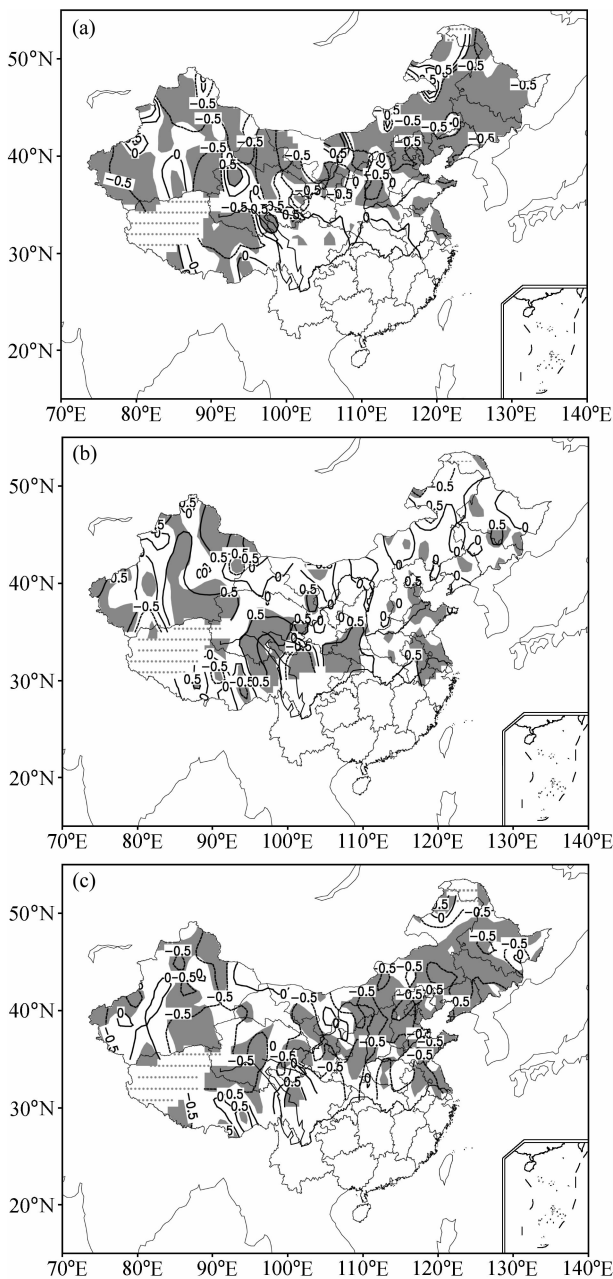


图 4 中国冻土的变化(1965~2004 年)线性趋势分布图: (a) 最大冻土深度; (b) 冻结始日; (c) 冻结终日。阴影为信度超过 95% 的区域

Fig. 4 The linear trend of (a) the maximum frozen soil depth, (b) the beginning dates and (c) the ending dates of soil freezing in China (1965 - 2004). Areas with 95% significance level are shaded

发生了明显的正负位相转换。这说明我国冻土在 80 年代中期开始显著的退化趋势。而郭志梅等^[29]指出, 中国北方地区在 20 世纪 80 年代中期发生了近 50 年来的一次较显著的变暖突变, 两者有较好的吻合。

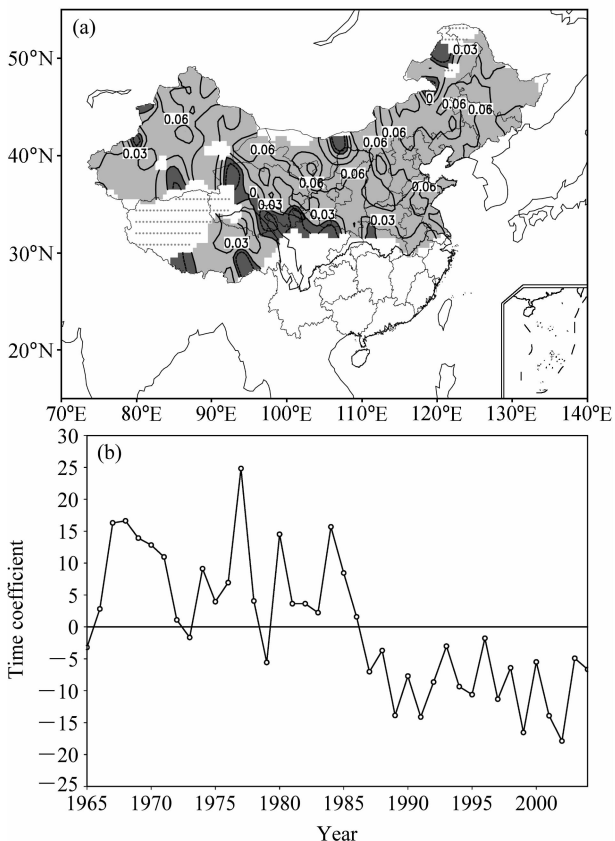


图 5 中国最大冻土深度 EOF 分解的第一模态: (a) 空间型 (深阴影 ≤ 0 , 浅阴影 > 0); (b) 时间系数序列

Fig. 5 The first mode of the EOF analysis of the maximum frozen soil depth: (a) The spatial eigenvector (dark shading: ≤ 0 , light shading: > 0); (b) time coefficients

下面, 分别在东部区域、西北区域和青藏高原地区挑选出代表性站点, 作最大冻土深度的区域平均的标准化变量序列。图 6 为中国东部、西北、青藏高原地区的区域平均的标准化变量序列, 从图中可以看到在这三个区域, 最大冻土深度总体上都是呈现减小趋势, 表明中国冻土总体上是呈退化趋势的, 同时也看到这三个区域在 80 年代中期都有明显的下降过程, 这说明在 1986 年左右中国冻土发生了转型, 这与上面 EOF 的分析的结果是一致的。这三个区域在趋势上总体相似, 但也有不同的地方, 可以看到, 在西北地区振幅相对较大, 转型相对最不明显, 同时在青藏高原地区可以看到从 1999 年开始, 其最大冻土深度再次出现了一个较大的减小趋势。

接着分别在东部区域、西北区域和青藏高原地区挑选代表性站点, 作冻结始日 (图 7) 和冻结终

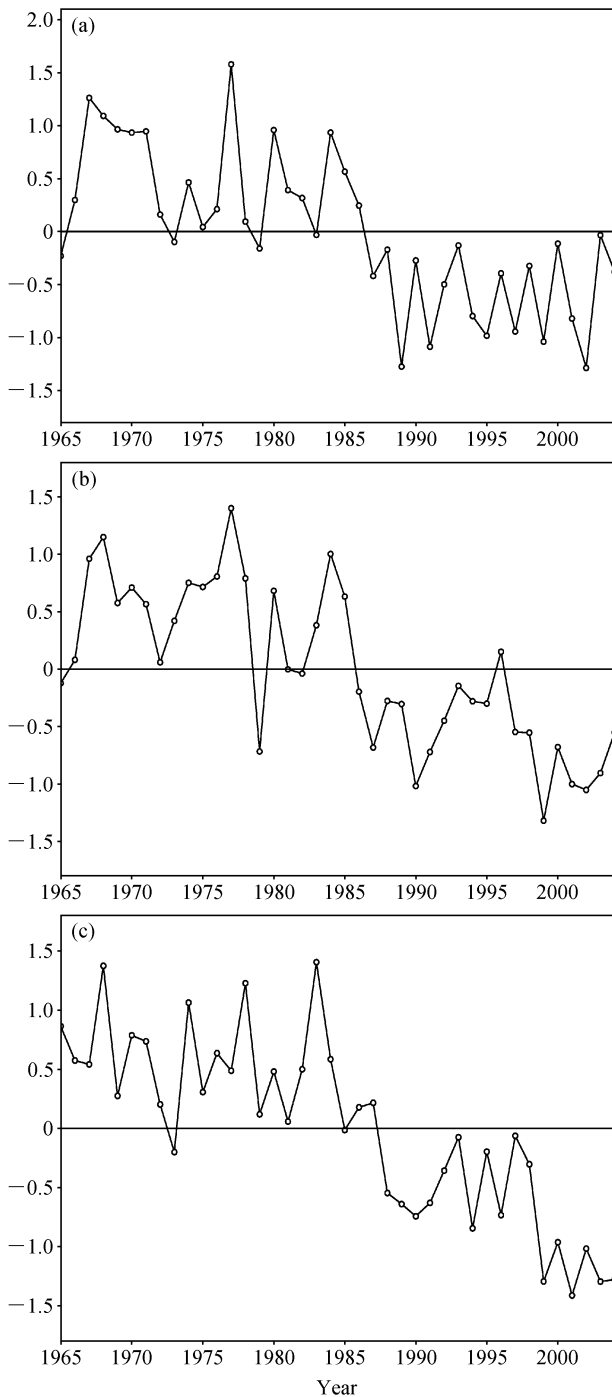


图 6 中国最大冻土深度区域平均的标准化序列: (a) 东部地区; (b) 西北地区; (c) 青藏高原地区

Fig. 6 The normalized regional mean maximum frozen soil depth in (a) eastern China, (b) northwestern China, and (c) the Tibetan Plateau

日 (图 8) 的区域平均的标准化变量序列。从区域平均的结果来看, 东部地区、西北地区 and 青藏高原地区冻结始日曲线都呈上升趋势, 冻结终日曲线都

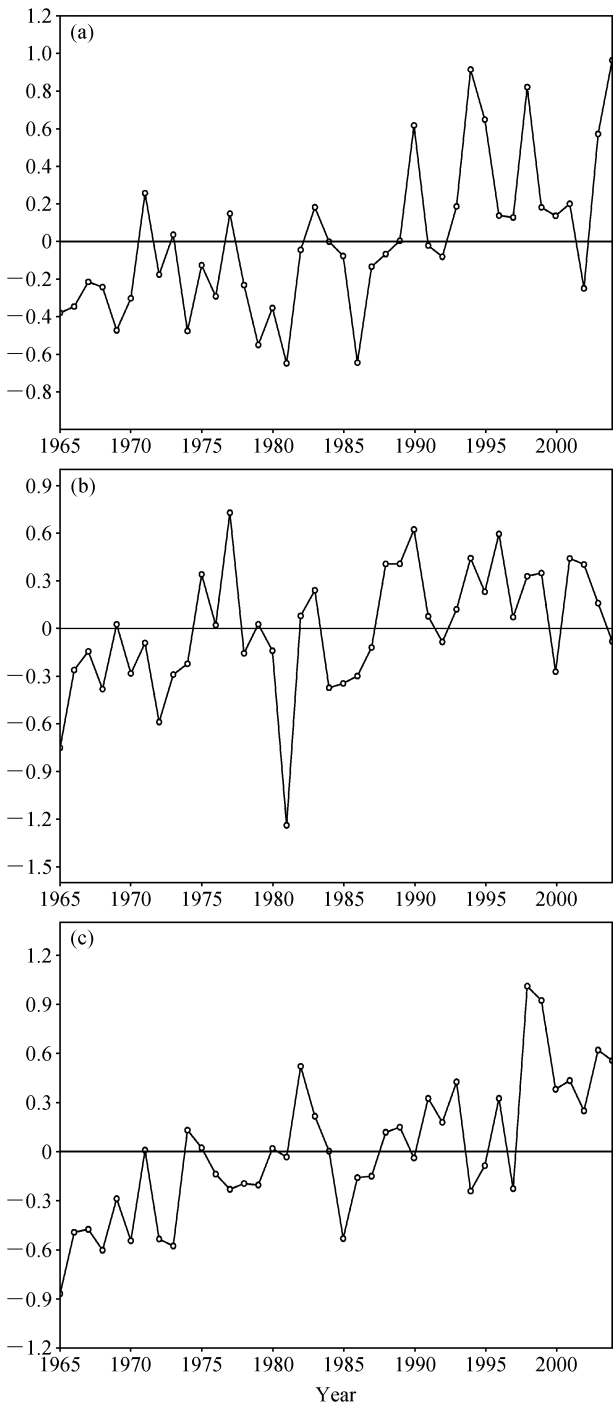


图 7 同图 6，但为冻土的冻结始日

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the beginning dates of soil freezing

呈下降趋势，说明冻土冻结日期不断推迟，解冻日期不断提前。这与线性趋势分析的结果一致。

可以看到，冻结始日和终日的转型年代比最大冻土深度晚，一般出现在 80 年代末期。冻土始日和终日的变化趋势也有不同，冻土终日曲线表现出的转型趋势较为明显，中国东部地区和西北地区都

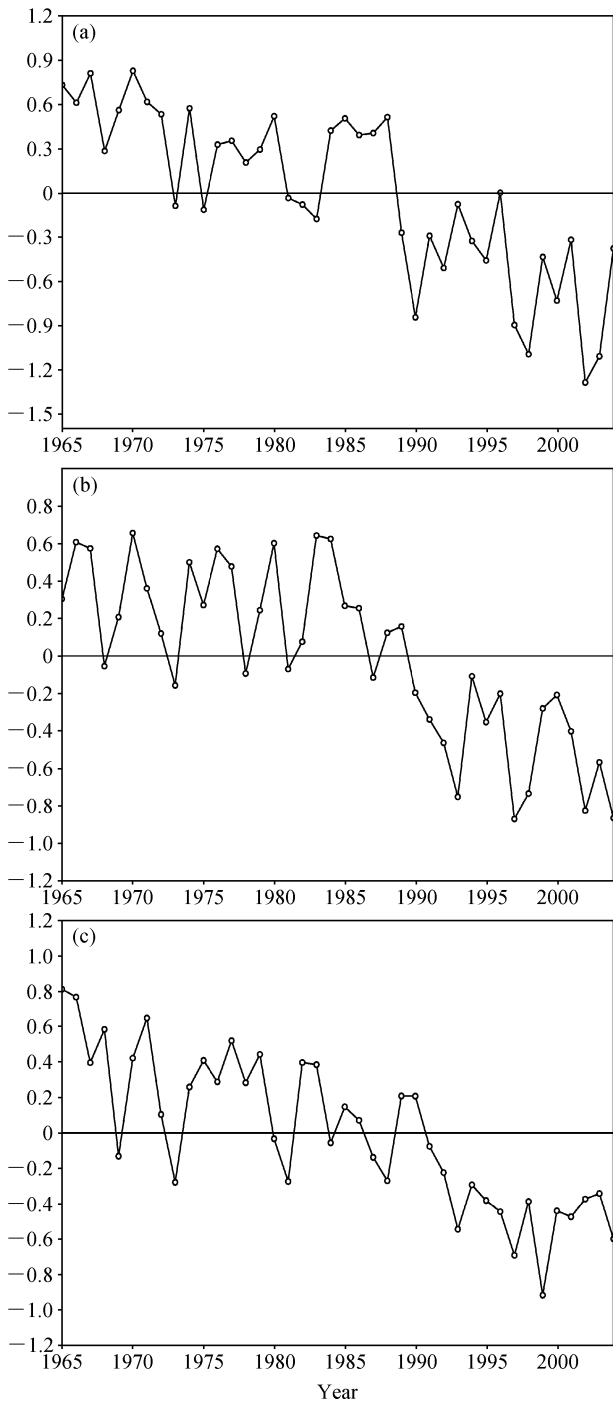


图 8 同图 6，但为冻土的冻结终日

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the ending dates of soil freezing

有较为明显的正负位相的转换，青藏高原则是一直减小的趋势。而冻土始日曲线，除了东部地区转型较明显外，青藏高原和西北地区都没有很明显的转型年份，青藏高原表现的是一直增长的趋势，而西北地区则呈现出缓慢增长的趋势。由于冻结始日和终日的气候影响系统不同，这些差异可能是影响系

统的变化趋势所导致的。

5 小结

本文通过对冻土气象观测资料的整理, 分析了中国冻土的时空变化特征以及总体变化趋势, 主要结论可概括如下:

(1) 中国冻土分布十分广泛, 季节性冻土和多年冻土影响的面积约占中国陆地总面积的 70%。在我国东部区域, 从最北端的大小兴安岭地区到长江流域都有冻土分布, 在个别年份冻土的范围扩展到浙江、湖南和福建等省份; 在西北地区, 青藏高原地区都有广泛的多年冻土和季节性冻土的分布。中国东部地区冻土的分布主要表现为随纬度呈带状分布, 而青藏高原冻土分布主要表现为随海拔高度呈垂直地带性分布, 西北地区则两者兼而有之。

(2) 中国季节性冻土具有显著的年内变化特征, 季节性变化明显, 冻结主要从 9 月开始, 由北向南逐渐推进, 在冬末春初我国的冻土面积和深度都达到最大, 北方部分地区以及青藏高原部分地区冻结深度超过了 100 cm, 部分地区超过了 200 cm。在夏季, 季节性冻土面积不断减少, 8 月份达到最小。而秋季、春季则是过渡季节, 秋季冻土面积和深度不断增加, 春季则相反。

从冻结时间长度来看, 大兴安岭、小兴安岭地区和青藏高原地区的季节冻结区冻结时间长度最长, 其时间长达半年以上, 江淮流域冻土的冻结时间最短, 只有 2~3 个月左右的时间。

(3) 在全球变暖背景下, 近几十年来, 中国地区的冻土总体表现为最大冻土深度减小, 冻结时间推迟, 融化时间提前, 冻结持续日缩短, 多年冻土面积萎缩, 以及冻土下界上升的总体退化趋势。冻土的主要转型时期发生在 20 世纪 80 年代中期。同时, 在一些地区的冻土也有不同的变化, 例如在东北大兴安岭部分地区、青藏高原的柴达木盆地北部地区、青海东南部部分地区, 冻土是总体呈增加的趋势。

通过以上分析, 可以看到冻土对气候变化具有敏感性, 而中国冻土发生变化的同时也会导致陆地表面的热平衡发生变化, 这势必会对整个东亚地区的大气环流产生影响。由于陆地热平衡的变化是具有缓变性的, 因此这一影响可能也是渐变的, 对于这个问题有待于进一步的研究。

致谢 国家信息中心气象资料室提供了中国逐日冻土资料, 特此致谢!

参考文献 (References)

- [1] 周幼吾, 郭东信, 程国栋, 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000
Zhou Youwu, Guo Dongxin, Cheng Guodong, et al. *Geocryology in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [2] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 1999, **23** (2): 147~149
- [3] Williams P J, Smith M W. *The Frozen Earth*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 306pp
- [4] 张宇, 吕世华, 孙菽芬. 冻土过程在 CCM3 模式中的气候效应. 高原气象, 2004, **23** (2): 192~199
Zhang Yu, Lü Shihua, Sun Shufen. Climatic effects of frozen soil process in CCM3. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (2): 192~199
- [5] 李新, 程国栋. 冻土气候关系模型评述. 冰川冻土, 2002, **24** (3): 315~321
LI Xin, Cheng Guodong. Review on the interaction models between climatic system and frozen soil. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2002, **24** (3): 315~321
- [6] Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, et al. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change*, 2001, **48**: 551~579
- [7] Osterkamp T E. Establishing long-term permafrost observatories for active-layer and permafrost investigations in Alaska: 1977 - 2002. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003, **14**: 331~342
- [8] Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*, 2005, **68**: 135~152
- [9] Jorgenson M T, Shur Y L, Pullman E R. Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L02503, doi: 10.1029/2005GL024960
- [10] Anisimov O A, Nelson F E. Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change. *Global Planetary Change*, 1996, **14**: 59~72
- [11] Anisimov O A, Nelson F E. Permafrost zonation and climate change in the northern hemisphere: Results from transient general circulation models. *Climatic Change*, 1997, **35**: 241~258
- [12] Lawrence D M, Slater A G. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L24401, doi: 10.1029/2005GL025080
- [13] Moosavi S C, Crill P M, Pullman E R, et al. Controls on CH₄ flux from an Alaskan boreal wetland. *Global Biogeo-*

- chem. *Cycles*, 1996, **10**: 287~296
- [14] Zimov S A, Schuur E A G, Chapin F S III. Permafrost and the global carbon budget. *Science*, 2006, **312**: 1612~1613
- [15] Zhao Lin, Cheng Guodong, Ding Yongjian. Studies on frozen ground of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, **14** (4): 411~416
- [16] 中国气象局编. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003
- China Meteorological Administration. *The Norm of Surface Meteorological Observation*. Beijing: China Meteorological Press, 2003
- [17] Wang Shaowu, Zhu Jinhong, Cai Jingning. Interdecadal variability of temperature and precipitation in China since 1880. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 307~313
- [18] 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**: 217~227
- Ren Fumin, Zhai Panmao. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951 - 1990. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 217~227
- [19] 朱林楠, 吴紫汪, 刘永智. 青藏高原东部的冻土退化. 冰川冻土, 1995, **17** (2): 120~124
- Zhu Linnan, Wu Ziwan, Liu Yongzhi. Permafrost degradation in the east of Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 1995, **17** (2): 120~124
- [20] 王绍令. 青藏高原冻土退化研究. 地球科学进展, 1997, **12** (2): 164~167
- Wang Shaoling. Study of permafrost degradation in the Qinghai-Xizang Plateau. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1997, **12** (2): 164~167
- [21] 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
- Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, **56** (5): 523~531
- [22] 高荣, 韦志刚, 董文杰, 等. 20 世纪后期青藏高原积雪和冻土变化及其与气候变化的关系. 高原气象, 2003, **22** (2): 191~196
- Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie, et al. Variation of the snow and frozen soil over Qinghai-Xizang Plateau in the late twentieth century and their relations to climatic change. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (2): 191~196
- [23] 李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示. 冰川冻土, 2005, **27** (3): 320~328
- Li Ling, Zhu Xide, Wang Qingchun, et al. Mapping and analyses of permafrost change in the Qinghai plateau using GIS. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2005, **27** (3): 320~328
- [24] 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
- Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie. Interannual variation of the beginning data and the ending data of soil freezing in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2003, **25** (1): 49~54
- [25] 王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40 年来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应. 冰川冻土, 2001, **23**: 346~352
- Wang Genxu, Li Qi, Cheng Guodong, et al. Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2001, **23**: 346~352
- [26] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征. 大气科学, 2005, **29**: 671~681
- Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 671~681
- [27] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系. 大气科学, 2006, **30**: 277~284
- Li Xinzhou, Ma Zhuguo, Liu Xiaodong. Inter-decadal characteristics of aridification over northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 277~284
- [28] 王彤, 何大卫. LTS 回归与 M 估计稳健性的比较. 中国卫生统计, 1999, **16** (2): 79~81
- Wang Tong, He Dawei. Comparison of M-estimator and LTS estimator in regression. *Chinese Journal of Health Statistics* (in Chinese), 1999, **16** (2): 79~81
- [29] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征及其突变性. 干旱区地理, 2005, **28** (2): 176~182
- Guo Zhimei, Miao Qilong, Li Xiong. Change characteristics of temperature in North China since recent 50 years. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2005, **28** (2): 176~182