

1975—2017年北京汤河口地区季节性冻土与气候变化的关系

吴琳¹ 单瑞娟¹ 王志刚²

(1 怀柔区气象局, 北京 101400; 2 丰宁满族自治县气象局, 承德 068350)

摘要: 目前, 关于北京冻土的研究较为少见。利用北京北部山区汤河口国家气象站, 1975—2017年的季节性冻土、气温和地温等资料, 对汤河口季节性冻土与气候变化的关系进行研究。结果表明, 汤河口近43年的气温有与全球变暖相反的变化趋势, 0~80 cm各层地温亦均呈下降趋势。汤河口季节性冻土的变化与我国季节性冻土呈退缩趋势的结论相反, 主要表现为: 最大冻土深度加深, 初冻日提前, 解冻日延后, 冻土日数增加。此外, 通过突变检验发现汤河口冻土季气温在1988年左右发生突变, 最大冻土深度的突变发生在2007—2009年, 且突变后冻土深度呈明显的加深趋势。将全球变暖“停滞”现象加入考虑后, 发现1998—2012年汤河口冻土季气温以 $-1.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著降低, 冻土以 $21.893\text{ cm}/10\text{ a}$ 的速率显著加深。近20年汤河口显著的变冷趋势可能是引起汤河口近43年冻土发展的重要原因。

关键词: 汤河口, 冻土, 气候变化, 全球变暖停滞, 北京山区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.007

Relationship between Seasonal Frozen Soil and Climatic Change in Tanghekou Area of Beijing during 1975–2017

Wu Lin¹, Shan Ruijuan¹, Wang Zhigang²

(1 Huairou Meteorological Bureau of Beijing, Beijing 101400 2 Fengning Meteorological Bureau of Chengde, Chengde 068350)

Abstract: At present, the research on permafrost in Beijing is relatively rare. Based on the data of seasonal frozen soil, air temperature and ground temperature from 1975 to 2017 at Tanghekou National General Meteorological Station in the northern mountainous area of Beijing, this paper studies the relationship between seasonal frozen soil and climate change in Tanghekou. The results show that in the past 43 years, the air temperature has exhibited the opposite trend to global warming, and the ground temperature in 0~80 cm layer also shows a decreasing trend. The change of seasonal frozen soil in Tanghekou is contrary to the conclusion that the seasonal frozen soil in China shows a shrinking trend. In Tanghekou, the maximum frozen soil depth is deepened, the first freezing day is advanced, the thawing day is delayed and the frozen soil days are increased. And by mutation test it is found that the mutation of the air temperature during Tanghekou permafrost season occurred around 1988. In addition, the mutation of the maximum permafrost depth occurred between 2007–2009, and the depth showed a significantly deepening trend after the mutation. Considering the phenomenon of global warming stagnation, it is found that during 1998–2012, the air temperature in Tanghekou frozen soil season decreased significantly at a rate of $-1.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, and the frozen soil deepened significantly at a rate of $21.893\text{ cm}/10\text{ a}$. The remarkable cooling trend of Tanghekou in recent 20 years may be an important reason for the development of frozen soil in the area in recent 43 years.

Keywords: Tanghekou, frozen soil, climate change, global warming stagnation, Beijing mountainous area

0 引言

我国的冻土资源分布十分广泛, 以往对冻土的研究范围主要集中在青藏高原、西部高山以及东北大小兴安岭等多年冻土区^[1-3], 对于季节冻土的研究较少。但近几年基于全球变暖的事实, 学界对新疆和西藏等地季节性冻土的研究逐渐增多^[4-7], 结果主要表现为: 在全球气候变暖的影响下我国季节性冻土总体呈退

化趋势, 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, 冻结持续期缩短等特征。

虽然目前的研究成果均表明冻土在气候变暖的背景下呈现退缩趋势, 但值得注意的是, 1998—2012年出现的全球气候变暖“停滞”现象得到了愈来愈多专家学者们的关注^[8-12]。此次全球变暖停滞是指, 1998年全球平均地表气温达到历史最高, 其后的十余年, 全球气温并未出现明显的上升趋势, 甚至出现微弱的下降趋势^[13]。地表气温在冬季呈下降趋势, 而在夏季则呈上升趋势^[14]。针对该时期中国的研究则表明, 在

收稿日期: 2021年4月29日; 修回日期: 2022年2月25日
第一作者: 吴琳(1992—), Email: 1094035069@qq.com

2000年以来我国也出现了类似的增温减缓现象,并且冬季对我国增温减缓的贡献最大^[15]。尽管如此,全球变暖趋缓仍存在很多争议,认为全球变暖速率在2000年之后的十几年内确实是偏低,但全球表面温度仍保持为增温趋势^[16]。此次温度变化趋势停滞并非史无前例,而可能是一个暂时现象^[17]。而冻土是气候变化的敏感指示器,气候变化对冻土有十分重要的影响,反过来冻土融冻过程产生的热量又将会影响气候变化^[18-20]。因此,2000年以来的气候变暖“停滞”现象可能将影响我国冻土的变化。

另外,在现有季节性冻土的文献中,鲜见针对北京市境内冻土的研究。而在北京气候变化方面则有大量的研究:北京有与全球气候变暖一致的气候趋势,表现为气温升高、夏季降水明显减少^[21];霜冻日数和气温年较差呈下降趋势,暖夜指数及热浪指数呈上升趋势,极端气温指数的气候变率均在加大^[22];并认为,城市化发展造成的热岛效应对北京气候变暖的影响非常显著,并且在未来全球变暖持续和快速城市化背景下北京地区城市热岛效应将进一步加剧等^[23]。但有关北京市内冻土对气候变化响应的研究却很少见。从北京的地形来看,其西、北和东北部群山环绕,山区面积占全市的61.4%,具有丰富的冻土资源。并且山区气候受城市热岛效应影响小,冻土能更好的反应自然大气的变化,更值得研究。因此,在气候变暖的大背景下,本文以汤河口为例,对北京山区冻土与气候变化的关系进行研究。通过突变检验方法,考虑气候变暖停滞现象,进而分析汤河口冻土的变化特征,以求对北京山区冻土情况有更多了解。

1 资料与方法

汤河口地处北京北部山区,属于暖温带大陆性季风气候,地势较高,处于云蒙山系之中,西接延庆,东临密云。汤河口气象站位于汤河口镇西梁的山顶之上,观测环境受人为因素的影响极小。并且自1974年建站以来从未迁站,其观测数据有良好的连续性。

汤河口气象站自1974年11月开始进行季节性冻土观测,因此利用1975—2017年的冻土逐日数据和逐月气温、地温数据,通过气候倾向率、Mann-Kendall检验、相关性分析等方法,研究汤河口季节性冻土变化特征,及其对气候变化的响应。

为便于研究,本文以上一年11月至当年3月作为一个冻土季分析,即文中“1988年”所指的时间段实际是1987年11月1日至1988年3月31日,其他年份以此类推。为保持数据的一致性与可比性,气温和地温数据的时间选取与此相同。同时为了确保冻土特征量

准确,冻土日数、初冻日和解冻日按实际冻土情况统计。汤河口冻土稳定存续的时间段一般为上一年的11月至当年3月。因此,为方便计算初始日和解冻日的变化趋势,记上一年11月1日为冻土开始冻结的第一日,当年3月1日为开始解冻的第一日。

文中所指冻土深度为下限冻土深度,并根据逐日冻土深度确定月和年度最大冻土深度。

2 结果与分析

2.1 冻土特征

对汤河口近43年冻土深度逐年数据进行统计,汤河口最大冻土深度的多年平均为84 cm,历史最小为62 cm,出现在1991年,最大为115 cm,出现在2012年。

近43年冻土逐日资料统计显示,如图1汤河口地区冻土始冻日最早出现在10月,解冻日最晚出现在4月。43年中10月始冻的仅有13年:1975、1979、1983、1985、1987、1988、1992、1998、2000、2003、2006、2011、2016年;4月冻土解冻的仅有11年:1977、1980、1991、1993、1996、2005、2009、2010、2011、2013、2016年。多数年份汤河口的土壤在11月始冻,3月解冻,且近43年的平均始冻日期为11月3日,平均解冻日期为3月29日。冻土季的冻土日数根据始冻日和解冻日的变化而不同(图2),平均冻土日数为156 d。

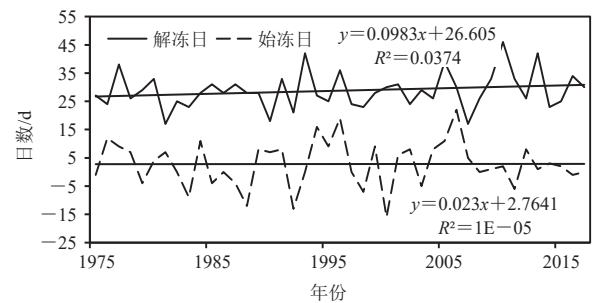


图1 1975—2017年汤河口冻土的初冻日和解冻日年际变化
Fig. 1 Annual variations of the initial freezing and thawing date in Tanghekou from 1975 to 2017

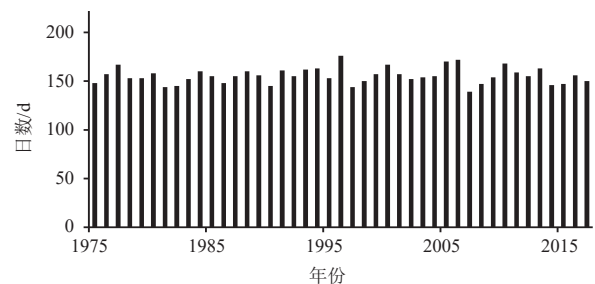


图2 1975—2017年汤河口冻土日数的年际变化
Fig. 2 Annual variations of the number of frozen soil days in Tanghekou from 1975 to 2017

根据各冻土特征量的线性拟合可知，最大冻土深度在以2.104 cm/10a的速率加深，始冻日以0.023 d/10a的速率提前，而解冻日以0.983 d/10a的速率延后，冻土日数以0.332 d/10a的速率增加。但4个特征量均未通过显著性检验，变化趋势不显著。

综上，汤河口的冻土整体呈发展趋势但不显著，最主要的表现为最大冻土深度加深，这与目前已有季节性冻土退化的结论相左。

2.2 冻土特征量与气温的变化关系

根据气温的线性回归方程气候倾向率可知，汤河口年平均气温以-0.062℃/10a的速率降低，冻土季平均气温以-0.099℃/10a的速率降低，冻土季降温趋势大于年降温，两降温趋势均未通过显著性检验。如图3，最大冻土深度与冻土季气温有非常好的对应关系，当气温降低时冻土加深，气温升高则冻土退缩。

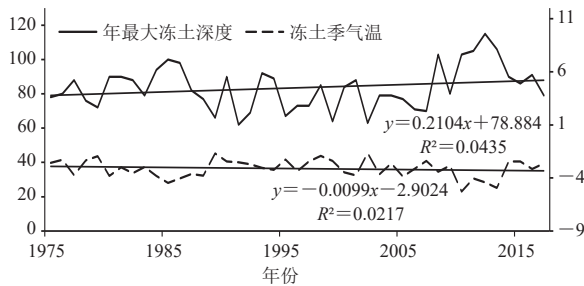


图3 1975—2017年汤河口冻土季气温和最大冻土深度的年际变化

Fig. 3 Annual variations of air temperature and the maximum frozen soil depth in Tanghekou frozen soil season from 1975 to 2017 (Solid lines show the maximum frozen soil depth and dotted lines show air temperature)

表1为各冻土特征量与冻土季气温、年平均气温的相关性检验，结果表明：除了初冻日以外，其余各冻土特征量与冻土季气温、年平均气温均呈负相关，且均通过0.01的显著性检验。其中最大冻土深度和冻土季气温的相关性为-0.727，明显高于与年平均气温的相关-0.440；解冻日与冻土季气温的相关系数为-0.589；而就冻土日数而言，与年平均气温和冻土季气温的相关性较为接近；初冻日与年平均气温、冻土季气温均无明显相关。说明冻土季气温是影响汤河口冻土深度变化和解冻日推迟到主要因素。

表1 冻土特征量与冻土季气温、年平均气温的相关性检验
Table 1 Correlation analysis between frozen soil features with air temperature in the permafrost season and annual air temperature

类别	最大冻土深度	冻土日数	初冻日	解冻日
冻土季气温/℃	-0.727*	-0.428*	0.112	-0.589*
年平均气温/℃	-0.440*	-0.446*	0.034	-0.491*

注：*代表通过0.01显著性水平检验。

2.3 冻土深度与地温变化的关系

除了太阳辐射、降水以外，气温是地温变化的主要影响因素，而地温的变化又会直接影响到冻土变化。如表2所示，各层地温均呈降温趋势，且其中0、5、40和80 cm四层的降温幅度大于冻土季气温的降幅。且40和80 cm降温最显著，40 cm以-0.337℃/10a的幅度降温，通过0.01显著性检验，80 cm以-0.175℃/10a的幅度降温，通过0.05显著性检验。同时，从图4中40和80 cm地温与最大冻土深度的年际变化曲线中，可以看出两层地温曲线与最大冻土深度的变化有很好的对应关系。其中2007年后两层地温均开始下降，对应的冻土深度加深。

表2 0~80 cm各层地温的线性回归方程

Table 2 Regression analysis of ground temperature in 0~80 cm layer

土深/cm	回归方程	显著性水平
0	$y = -0.0144x - 1.9789$	-
5	$y = -0.0116x - 1.6542$	-
10	$y = -0.0045x - 1.3829$	-
15	$y = -0.008x - 0.7549$	-
20	$y = -0.0039x - 0.5245$	-
40	$y = -0.0337x + 1.474$	0.01
80	$y = -0.0175x + 3.3672$	0.05

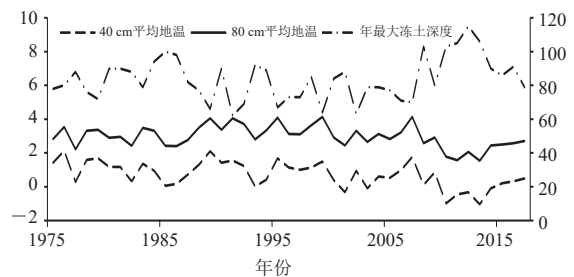


图4 1975—2017年汤河口40 cm地温和80 cm地温的年际变化
Fig. 4 Annual variations of 40 cm and 80 cm ground temperature in Tanghekou from 1975 to 2017

(Solid lines show the 80 cm ground temperature, dotted lines show 40 cm ground temperature, and blue lines show the maximum frozen soil depth)

表3为最大冻土深度与各层地温的线性回归方程。从表中可以看出，最大冻土深度与各层地温均呈显著的负相关，且与15 cm、80 cm深度地温的相关性均达0.8以上。

综上，汤河口的地温与气温的变化一致，均呈降温趋势。其中，40、80 cm深层地温的降温趋势显著，且与最大冻土深度的变化有很好的对应关系。其中80 cm地温与最大冻土深度的相关性达0.8以上。

2.4 最大冻土深度、气温及深层地温的突变检验分析

通过滑动t检验和M-K检验方法对最大冻土深度

表3 最大冻土深度与0~80 cm层地温的线性回归方程
Table 3 Regression analysis of the maximum frozen soil depth and the average ground temperature of each layer

土深/cm	回归方程	相关系数	显著性水平
0	$y = -0.0444x + 1.4125$	-0.569*	0.001
5	$y = -0.040x + 1.4287$	-0.690*	0.001
10	$y = -0.0392x + 1.796$	-0.751*	0.001
15	$y = -0.0449x + 2.8157$	-0.825*	0.001
20	$y = -0.0391x + 2.6577$	-0.759*	0.001
40	$y = -0.0462x + 4.5871$	-0.751*	0.001
80	$y = -0.0419x + 6.4797$	-0.802*	0.001

注：*代表通过0.01显著性水平检验。

和冻土季气温进行突变分析。首先，进行滑动 t 检验（如表4），将43年冻土（气温）划分为两个序列，分别将长度定为 $n_1=n_2=5$ 和 $n_1=n_2=10$ ，计算出两要素的 t 统计量序列，发现当 n 取不同值时，气温的突变年均是1988年，冻土深度的突变年均是2007年，且均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

表4 冻土季气温和最大冻土深度的滑动 t 检验结果
Table 4 Slide t test of air temperature in the permafrost season and maximum permafrost depth

项目	$n_1=n_2$	突变年	$ t_0 $	$n_1=n_2$	突变年	$ t_0 $
冻土季气温/ $^{\circ}\text{C}$	10	1988	3.137*	5	1988	4.812*
最大冻土深度/cm	10	2007	3.985*	5	2007	3.829*

注：*代表通过0.01显著性水平检验。

图5为冻土深度和气温的Mann-Kendall突变性检验，图中两者的UF和UB曲线在1.96置信区间内交点均较多，说明年际变化不稳定。气温的UF和UB曲线在置信区间内交点为1977、1979、1988、2005—2007，冻土深度的交点为：1976—1977、1985、2009。结合滑动 t 检验，认为气温的突变年在1988年左右，最大冻土深度的突变发生在2007—2009年。

对0~80 cm地温逐层的气候趋势进行M-K突变检验分析，发现0~20 cm地温无明显突变趋势（图略）。如图6所示，40、80 cm层地温UF和UB在置信区间内各有一个交点，分别为2000年、2007年。且40 cm的UF曲线在2004—2006、2010—2017年超出置信区间，说明40 cm地温在2000年后发生了显著降温；80 cm地温UF在2007年后小于0，说明80 cm在2007年之后转为降温期，从其距平的变化上来看（图略），2007年后的10年均均为负距平，说明80 cm地温在2007年之后进入了持续10年的降温期，且该时间点与最大冻土深度的突变点一致。

2.5 气候变暖“停滞”期汤河口冻土和气温的变化

考虑到近20年间受全球气候变暖“停滞”影响，对汤河口在气候变暖“停滞”期的表现进行分析。如

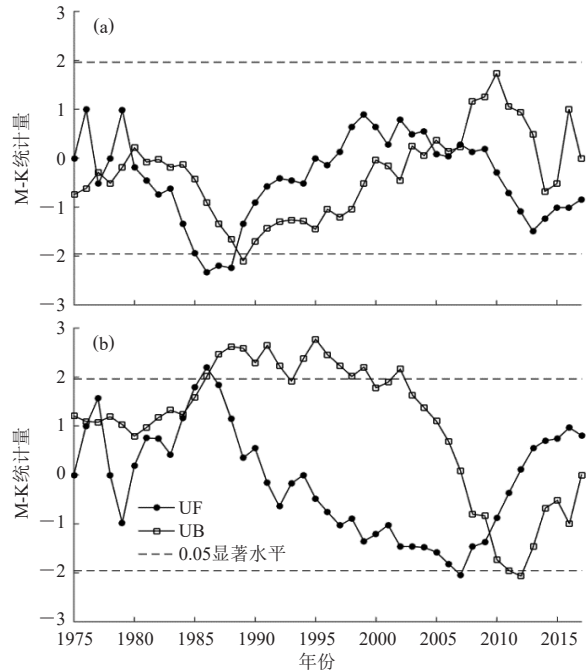


图5 1975—2017年冻土季气温(a)和最大冻土深度(b)变化的M-K检验

Fig. 5 Variations of air temperature in the permafrost season (a) and the maximum frozen soil depth (b) in Tanghekou after M-K mutation detection, 1975—2017

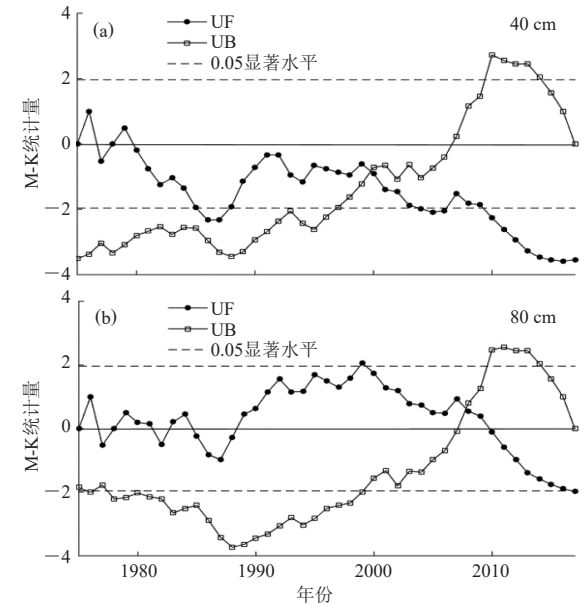


图6 1975—2017年40 cm和80 cm地温变化的M-K检验
Fig. 6 Variations of 40 cm and 80 cm ground temperature in Tanghekou after M-K mutation detection, 1975—2017

表5所示：气温在近20年间（1998—2017年）有下降趋势，降温幅度为 $-0.409^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，冻土深度呈显著加深趋势，每10年加深11.805 cm；具体到1998—2012年，汤河口冻土季气温以 $-1.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率降低，冻土以 $21.893\text{ cm}/10\text{a}$ 的速率显著加深，均通过0.01的显著性

表5 汤河口最大冻土深度、气温不同时段的变化趋势
Table 5 Climate tendency rate of the maximum frozen soil depth and the air temperature in permafrost season

项目	1975—2017	1975—1997	1998—2017	1998—2012	2013—2017
最大冻土深度/cm	2.104	-4.140*	11.805*	21.893**	53
冻土季气温/($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)	-0.099	0.070	-0.409	-1.29**	3.94

注: *表示通过0.05的显著性检验, **表示通过0.01的显著性检验。

水平检验。2013—2017年, 气温又开始呈迅速回升的趋势, 冻土深度开始迅速减小。同时, 1975—1997年的23年间汤河口气温是以 $0.070^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率上升, 冻土深度以 $-4.140\text{ cm}/10\text{a}$ 的速率呈显著减小趋势。因此通过对不同时段内气温和冻土变化趋势的对比, 可以认为1998—2012年的显著降温可能是造成汤河口最近20年乃至近43年的气温下降、冻土加深的重要原因。

3 讨论与结论

目前, 虽然大量针对北京气候变化的研究均一致表明, 北京气候与全球变暖趋势变化一致。但这些研究大多以北京市观象台或者城区的气温为代表。在王佳丽等^[24]有关北京不同区域表面气温的变化特征以及观象台气温代表性的研究中发现: 北京市观象台的气温主要代表了城区, 对其他区域不具有代表性。考虑到北京城区城市化发展迅速, 以观象台为代表的城区受城市热岛效应的影响最大, 郊区次之, 南部山区较低, 而北部山区最低^[25]。对于地处北京山区的汤河口而言, 除了纬度、海拔、地形等自然因素, 城市化过程弱, 受城市热岛效应的影响非常小, 可能是造成其与观象台, 乃至北京其他区域气候不同的主要原因。

从目前国内有关季节性冻土的研究来看, 汤河口的冻土变化较为少见。为此, 笔者用同样的方法对北京市所有国家气象站的冻土和气温数据进行了处理分析, 发现大多数国家站的冻土变化均呈退缩趋势, 仅有北京城区的石景山气象站(海拔63 m)和位于北京西山的斋堂气象站(海拔440.3 m)与汤河口冻土有类似的变化趋势。但从全市站点的气温变化趋势上看, 仅有斋堂站出现了降温趋势。石景山站有升温趋势但冻土却加深, 结论矛盾。经了解, 该站地温场为回填土, 代表性较差, 所以该站冻土数据参考价值不大。所以全市范围内, 仅有斋堂与汤河口有相同的冻土变化特征, 斋堂站冻土季气温以 $0.035^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 降温, 年最大冻土深度以 $1.645\text{ cm}/10\text{a}$ 加深。虽然斋堂与汤河口相距较远, 不属于统一山系, 但有两个明显的共同点: 1) 两站均从1974年开始进行观测业务, 且建站至今从未迁站。2) 从地理环境上看, 两站均处在郊区, 且均在独立的山头之上, 周围环境受人为因素影响极

小, 探测环境保护良好。

那么, 汤河口、斋堂的气候变化又为何会与全球气候变暖相反呢? 现有研究认为当前全球的气候变暖在时间上是不均匀的, 有相对的冷期, 也有相对的暖期, 总体上是呈现出增暖趋势。相比于全球变化研究中使用的百余气候资料, 汤河口、斋堂的气候数据不足50年, 对气候变化的表现有所不足。为了寻求更长时间序列的数据来说明问题, 笔者也尝试分析了与汤河口同处于燕山丘陵区, 海拔735.1 m, 位于怀柔北部交界的丰宁满族自治县气象站超过60年(1956年建站)的连续观测数据, 发现近60年(1958—2017年)来丰宁站有较显著的升温趋势, 且冻土表现为减退。虽然丰宁与汤河口属于同一山系, 但表现并不一致。仔细分析其探测环境后发现, 丰宁站一直处于丰宁县的城区内。2009年迁站以前丰宁站(海拔661.2 m)周边小区围绕, 迁站后仍然在城区之内, 受城市热岛效应的影响较汤河口大。当然, 城市热岛效应可能是丰宁站与汤河口气候变化趋势相反的原因之一, 后续还需要进一步研究。所以, 暂时认为汤河口近40多年的降温趋势可能是近百年的气候变化中的冷期, 在未来更长时间序列中可能呈现出增暖趋势也未可知。

另外, 汤河口近20年经历的冻土显著加深, 冻土季气温和地温明显偏低的现象, 可能与2000年来我国乃至全球经历的气候变暖“停滞”现象有关。2014年丁一汇等^[26]有关东亚冬季风的研究就表明中国冬季气温在1998年以来的10~15年中有明显的变暖趋缓现象。在气候变暖停滞期, 我国北方冬季出现明显的降温。而汤河口冻土季(11—3月)包含了冬季3个月, 有明显的冬季气候特点, 近20年冻土季明显降温和冻土显著加深, 且冻土季降温趋势明显大于全年变化, 也正好符合气候变暖趋缓的特征。并且在研究中还发现汤河口气温和冻土深度在近20的变化率明显大于历史其他时期, 这也可能是引起汤河口43年来气温表现与全球变暖不一致的原因。

总而言之, 汤河口的冻土及气候特征在全市范围内十分特殊。目前, 关于我国冻土的研究大多是基于全球变暖的气候基础, 结论一致的指向冻土呈退缩趋势。若将全球变暖“停滞”期加入考虑, 或许会发现更多像汤河口这样的“特例”, 希望本文能引起更多季节性冻土研究者对气候变暖停滞期的关注。

具体结论如下:

(1) 在气候变暖的大背景下, 近43年来汤河口地区气温却有下降趋势, 降幅不大, 年平均气温速率为 $-0.062^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 冻土季平均气温速率为

(下转88页)

化。1996年12月新疆气象局开始建设的《气象卫星综合应用业务系统》(9210工程)是新疆气象部门20世纪90年代的骨干工程,也是气象现代化建设的重要组成部分。工程的实施,从整体上提高了新疆气象业务水平。

4 结语

透过新疆地面气象观测的发展历史,不难看出,中华人民共和国成立后,新疆气象事业几乎从“一穷二白”开始,经过半个多世纪的建设,发生了翻天覆地的变化,取得了跨越式的发展。纵观气象事业走过的历程,正是新疆各族气象工作者在中国共产党的坚强领导下,克服重重困难,奋勇前进的历程。从一支笔、一张纸,到观测全面自动化,搭乘中国速度的快车,新疆气象事业立下了一个又一个里程碑。

(上接47页)

-0.099 °C/10 a。在气温的影响下,汤河口冻土最大冻土深度在以2.104 cm/10 a的幅度加深,整体呈发展趋势。

(2)除气温之外,各层地温亦呈降温趋势,其中深层地温降温趋势显著,且最大冻土深度与80 cm层地温的相关性最好。说明最大冻土深度对80 cm地温变化的响应最敏感。

(3)通过滑动 t 检验和M-K突变检验,发现汤河口冻土季气温在1988年左右发生突变,最大冻土深度的突变大约发生在2007—2009年。值得注意的是80 cm地温在2007年左右发生突变,与冻土深度突变点一致。而最大冻土深度的多年平均为84 cm,正处在80 cm地温探测的附近。两者更深层次的联系值得在未来进一步研究。

(4)近20年间(1998—2017年)汤河口气温以-0.409 °C/10 a速率显著的下降,最大冻土深度亦以11.805 cm/10 a显著加深。这20年的显著变冷趋势可能是影响汤河口43年来气温呈下降趋势、冻土呈加深趋势的重要原因。当然,这还需要深入的研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 赵林,刘广岳,焦克勤,等.1991—2008年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化.冰川冻土,2010,3(2):223-230.
- [3] 罗栋梁,金会军,林琳,等.青海高原中东部多年冻土及寒区环境退化.冰川冻土,2012,34(3):538-546.
- [4] 陈博,李建平.近50年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征.大气科学,2008,32(3):432-443.
- [5] 张山清,普宗朝,李景林,等.1961—2010年新疆季节性最大冻土深度对冬季负积温的响应.冰川冻土,2013,35(6):1419-1427.
- [6] 胡烈群,武鹏飞,梁凤超,等.新疆冬春季积雪及温度对冻土深度

深入阅读

- 白月东,1986.新疆气象史话(续一).新疆气象,17(12):40.
 黄鹏度,1987.新疆气象史略.新疆气象,22(8):45-47.
 李冬梅,2021.中瑞西北科学考察团对新疆近代气象发展作用的探究.气象科技进展,11(1):73-76.
 李冬梅,任宜勇,张静,2019.20世纪上半叶苏联在新疆开展气象活动的研究.气象科技进展,9(5):71-76.
 史玉光,马力,1999.蓬勃发展的新疆气象业务——新疆气象业务发展20年的回顾与展望.新疆气象,22(01):35-39.
 王岩,胡雄,王德琛,1984.PC-1500袖珍计算机在地面气象测报工作中的应用.气象,7(7):30-33.
 新疆维吾尔自治区地方志编纂委员会,1995.新疆通志第十卷(气象卷),乌鲁木齐:新疆人民出版社.
 张家宝,1995.总结历史经验 再创气象辉煌.新疆气象,18(4):1-8.
 张家宝,张加生,1992.弘扬艰苦奋斗精神 发展新疆气象事业.气象,15(11):3-9.
 张学文,张家宝,2006.新疆气象手册.北京:气象出版社.

(作者单位:新疆维吾尔自治区气象档案馆)

的影响分析.冰川冻土,2014,36(1):48-54.

- [7] 杜军,建军,洪健昌,等.1961—2010年西藏季节性冻土对气候变化的响应.冰川冻土,2012,34(3):512-521.
- [8] 王绍武,罗勇,唐国利,等.近10年全球变暖停滞了吗?气候变化研究进展,2010,6(2):95-99.
- [9] 王绍武,罗勇,赵宗慈,等.全球变暖的停滞还能持续多久?气候变化研究进展,2014,10(6):465-468.
- [10] 宋斌,智协飞,胡耀兴.全球变暖停滞的形成机制研究进展.大气科学学报,2015,38(2):145-154.
- [11] 赵宗慈,罗勇,王绍武,等.全球变暖中的科学问题.气象与环境学报,2015,31(1):1-5.
- [12] 林霄沛,许丽晓,李建平,等.全球变暖“停滞”现象辨识与机理研究.地球科学进展,2016,31(10):995-1000.
- [13] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling? Geophysical Research Letters, 2009, 36: L08706.
- [14] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. Nature, 2013, 501: 403-407.
- [15] 杜勤勤,张明军,王圣杰,等.中国气温变化对全球变暖停滞的响应.地理学报,2018,73(9):1748-1764.
- [16] 苏京志,温敏,丁一汇,等.全球变暖趋缓研究进展.大气科学,2016,40(6):1143-1153.
- [17] Met Office. The recent pause in global warming (2): what are the potential causes? IPCC Fifth Assessment Report, 2013: 22.
- [18] 王绍令,赵秀锋,郭东信,等.青藏高原冻土对气候变化的响应.冰川冻土,1996,18(S1):157-165.
- [19] 李新,程国栋.冻土-气候关系模型评述.冰川冻土,2002,24(3):315-321.
- [20] 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.
- [21] 谢庄,王桂田.北京地区气温和降水百年变化规律的探讨.大气科学,1994,18(6):683-690.
- [22] 郑作芳,丁海燕,范水勇.北京1960—2009年气候变暖及极端气温指数变化特征.气候变化研究进展,2011,7(3):189-196.
- [23] 刘海涛,杨洁,叶彩华.全球变暖下1951—2014年北京地区的季节变化.中国农学通报,2016,32(27):141-148.
- [24] 王佳丽,张人禾,王迎春.北京不同区域表面气温的变化特征以及北京市气象台气温的代表性.气候与环境研究,2012,17(5):563-573.
- [25] 初子莹,任国玉.北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响.气象学报,2005,63(4):534-540.
- [26] 丁一汇,柳艳菊,梁苏洁,等.东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系.气象学报,2014,72(5):835-852.