

张龙斌,胡东北,王璐,等.北京地区冻土时空分布特征[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(6):127-132.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.06.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



北京地区冻土时空分布特征

张龙斌¹,胡东北^{2*},王璐¹,孟磊¹,郝亚明³

(1.北京市气象探测中心,北京 100089;2.新疆金锋华云气象科技有限公司,新疆 乌鲁木齐 830002;
3.库尔勒市气象局,新疆 库尔勒 841000)

摘要:基于1981—2021年北京地区6个气象站的逐日最大冻土深度、平均气温、平均地表温度及5、10、15、20、40、80 cm地温等资料,分析了近40年北京地区最大冻土深度的时空分布特征及其与气温和地温的关系。结果表明:北京地区最大冻土深度总体呈变浅趋势,气候倾向率为-2.3 cm/10 a,各站点最大冻土深度变浅趋势从西到东呈逐渐减弱趋势。北京地区最大冻土深度与40、80 cm地温相关性最好,与地表温度相关性较差。选取2021—2022年北京地区冻土进行对比试验,发现仪器安装至少一个冻融周期后与冻土人工观测吻合度更好,测温式冻土自动观测仪的观测精度与仪器安装位置的地下岩层、土质分布密切相关,需要在仪器稳定运行后根据当地情况优化算法和冻融阈值。

关键词:冻土;最大冻土深度;时空分布;测温式;自动观测

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)06-0127-06

冻土是指含有水分的岩土或土壤在温度降到0℃或0℃以下时而呈现冻结状态^[1-2],通常根据冻结状态的保持时间划分为短时冻土、季节性冻土和多年冻土三种类型^[3]。土壤冻结深度对农业活动及建筑、道桥、铁路、管道、堤坝、凿井等工程有直接影响^[4-7],关系人民的生命安全。同时,冻土在气候变化中具有高度敏感性,是研究气候变化的重要指标之一。我国对冻土的研究多集中于青藏高原和东北地区^[8-11],大量研究证实我国大部分地区近50年的年最大冻土深度和年平均冻土深度明显变浅,季节性冻土区的平均冻结初始日和平均融化终止日也呈现出明显的推迟和提前趋势^[12-17]。北京所处气候区为暖温带亚湿润区,在全球变暖的背景下,年平均气温及地温均呈上升趋势^[18-19]。目前关于北京地区最

大冻土深度系统性的研究还相对缺乏,而且已有的研究表明,近43年北京汤河口地区的最大冻土深度呈增加趋势,增幅为2.104 cm/10 a^[20],这与我国大部分地区最大冻土深度的变化趋势恰恰相反。由此可见,北京地区最大冻土深度的时空变化特征及气温、地温等环境因子对其影响还需要进一步研究。

我国地面气象观测业务中的冻土观测最早始于20世纪50年代,采用人工冻土观测器,需在每年的冻土冻结初始日之前安装,在融化终止日之后收回。因仪器安装不规范、操作不当以及观测过程中橡胶管频繁替换等原因,极易导致观测记录失真^[21]。北京地区国家基准气候站和国家基本气象站于2021年1月启用冻土自动观测仪,其他国家级气象站于2021年11月启用冻土自动观测仪,设备类型均为测温式。孙艳云等^[22-24]指出冻土人工观测的最大冻结深度与测温式冻土仪0℃线最深点相近,但存在一定偏差,人工冻土观测的“拐点”和完全融化时间晚于测温式冻土仪的“拐点”和完全融化时间。北京地区人工观测冻土数据与测温式冻土仪观测数据也证实两者之间存在偏差,故以人工观测冻土数据为

收稿日期:2023-02-21;修回日期:2023-07-17

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(42205091)

作者简介:张龙斌(1988—),男,工程师,主要从事气象观测设备数据分析研究。E-mail:404271264@qq.com

通信作者:胡东北(1986—),男,工程师,主要从事防雷工程建设、观测设备研究与气象科技服务研究。E-mail:303507413@qq.com

基准,开展测温式冻土仪观测数据的对比研究,可提升两种观测数据的一致率,进而确保冻土观测数据在时间序列上的延续性。

1 资料和方法

1.1 资料来源

选取 1981—2021 年北京地区 6 个气象站多个气象要素的逐日观测数据,包括最大冻土深度、平均气温、平均地表温度及不同深度的地温资料(5、10、15、20、40 和 80 cm)等,其中最大冻土深度是指每天观测到的冻土深度最大值。6 个气象站按照各自站点的海拔高度和地形特征等差异分为“城区站”和“郊区站”两类。城区站包括南郊观象台、丰台,郊区站包括平谷、密云、延庆、怀柔,分类标准参考北京地区城郊极端温度事件的相关研究^[23]。气象站的分布如图 1 所示。

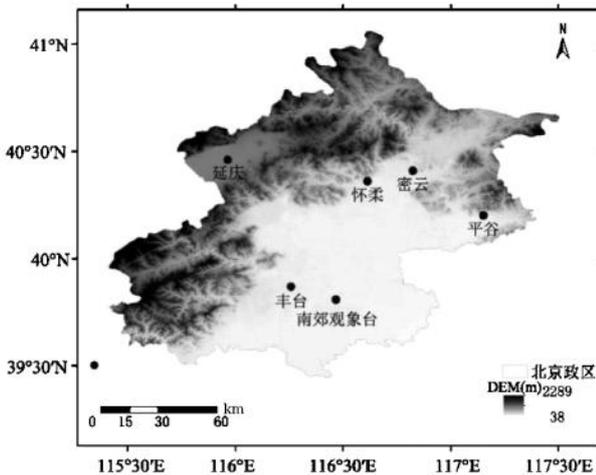


图 1 北京地区部分冻土气象观测站空间分布

选取北京地区 6 个气象站的人工观测数据和相应的冻土自动观测仪观测资料进行对比分析,如表 1 所示。其中,人工观测方法是每天在固定时间将冻土器的内管提起,通过测内管冰所在位置,结合管壁刻度线得到冻土深度。DTD4 型测温式冻土仪数据是由安装在地面以下不同深度的温度传感器自动观测得到,数据采集频率为每小时 1 次。

1.2 研究方法

采用线性回归法开展北京地区最大冻土深度等要素的气候变化趋势分析,公式为:

$$y = ax_i + b \quad (1)$$

其中: x_i 为某气象要素观测结果的时间序列, a 为斜率, b 为截距, a 表征气象要素随时间的变化趋势, $10a$ 代表气候倾向率,气候倾向率正数表示正增长、负数

表 1 各站冻土对比观测情况

台站	观测方式	时间段
南郊观象台	人工观测/DTD4 型测温式冻土仪	2021-01—2022-12
密云	人工观测/DTD4 型测温式冻土仪	2021-01—2022-12
延庆	人工观测/DTD4 型测温式冻土仪	2021-01—2022-12
丰台	人工观测/DTD4 型测温式冻土仪	2021-11—2022-12
平谷	人工观测/DTD4 型测温式冻土仪	2021-11—2022-12
怀柔	人工观测/DTD4 型测温式冻土仪	2021-11—2022-12

表示负增长。

采用 Mann-Kendall (MK) 突变检验方法监测近 40 年北京地区各气象站最大冻土深度的突变情况。MK 突变检验是一种可以判断气候序列中是否存在气候突变的典型方法,如果存在突变,还可以确定突变发生的时间。

北京地区的最大冻土观测深度为 150 cm,为了便于评估测温式冻土仪观测数据质量,将冻土分为 150 层,0~1 cm 为第一层,1~2 cm 为第二层,以此类推。计算每一层冻土对比观测的一致率和误判值,公式为:

$$c = \frac{h_1}{h} \times 100\% \quad (2)$$

$$m = h_2 + h_3 \quad (3)$$

式中: c 为一致率, h_1 表示测温式冻土仪与冻土人工观测完全吻合的层数, h 表示冻土人工观测层数, m 为误判值, h_2 表示测温式冻土仪识别而冻土人工观测未识别的冻土层数, h_3 表示测温式冻土仪未识别而冻土人工观测识别的冻土层数。通过分析不同时期测温式冻土仪与冻土人工观测平均一致率和误判均值的变化趋势,研究地质条件、算法和阈值对测温式冻土仪观测数据质量的影响。

2 北京地区冻土时空分布特征

2.1 最大冻土深度变化特征

2.1.1 月变化

1981—2021 年北京地区 6 个站点的冻土通常在 11 月开始出现,翌年 3—4 月消融。各站点月最大冻土深度的平均值出现在 2 月,为 77 cm;其次是 1、3 月,分别为 74 和 67 cm;10 月最小,仅为 4 cm;11、12 月分别为 14 和 46 cm。除平谷站外,其余 5 站的

最大冻土深度均出现在2月,且深度均达到70 cm以上;平谷站的最大冻土深度出现在1月;延庆站的月最大冻土深度变化范围最大,为7~103 cm;平谷站的月最大冻土深度变化范围最小,为2~62 cm,(图2)。

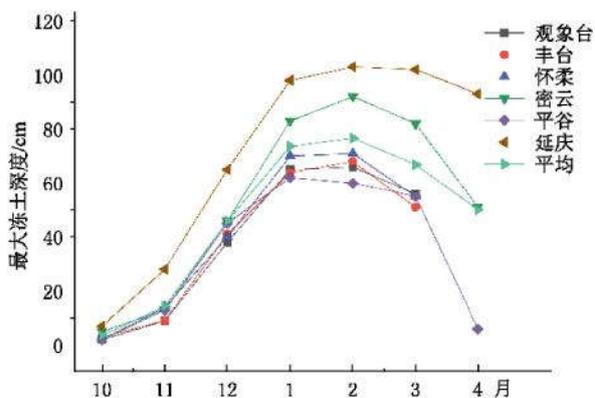


图2 1981—2021年北京地区6个站点10月—次年4月的冻土深度变化

2.1.2 年变化

1981—2021年北京地区6个站点年冻土深度最大值的平均值呈显著变浅趋势,其显著性值为0.027,气候倾向率为 $-2.3\text{ cm}/10\text{ a}$ (图3a)。城区站和郊区站年最大冻土深度均值变化趋势存在差异,城区站变浅趋势不显著,气候倾向率为 $-2.0\text{ cm}/10\text{ a}$;郊区站变浅趋势显著,气候倾向率为 $-2.5\text{ cm}/10\text{ a}$ (图3b)。其中延庆的变化速率最大,为 $-6.9\text{ cm}/10\text{ a}$;密云变化速率最小,为 $-0.1\text{ cm}/10\text{ a}$ 。分析冻土观测资料同期气温表明,郊区站气温以 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的趋势上升,城区站气温以 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的趋势上升。郊区站在气温上升趋势弱于城区站的情况下,其最大冻土深度变浅趋势却更显著。由此可见,郊区站最大冻土深度对温度变化的响应更敏感;从空间分布上看,气候倾向率从西到东逐渐减小。

1981—2021年北京地区年最大冻土深度的极

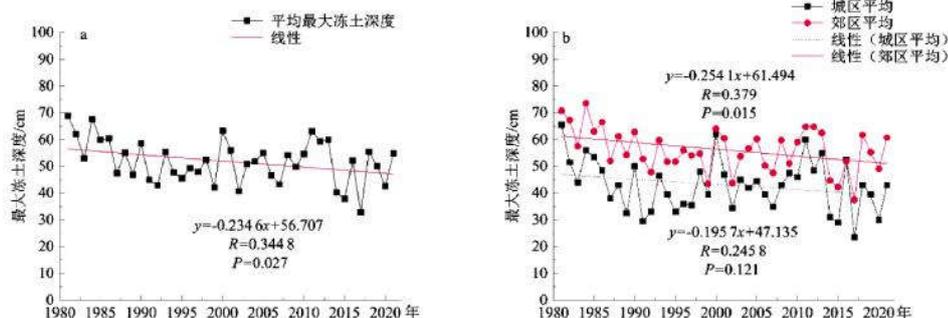


图3 1981—2021年北京地区(a)和城区与郊区(b)年最大冻土深度均值线性趋势

值出现时间有明显差异。极大值多数发生在20世纪80年代2月上、中旬;极小值最早出现时间一般是21世纪前后的10月下旬—11月上旬,最晚出现时间多数也在21世纪之后,一般为12月(表2)。

表2 1981—2021年北京地区各站最大冻土深度及冻结初期

站名	最大冻土深度/cm	出现时间	各站多年冻结初期	
			最早出现时间	最晚出现时间
观象台	66	1981-02-02	2015-10-31	1988-12-14
丰台	68	2000-02-07	1999-11-04	2019-12-21
平谷	62	2021-01-14	2002-10-27	2015-12-22
密云	92	2001-02-15	2016-11-01	2004-12-13
怀柔	71	1984-02-08	2002-10-28	2017-12-09
延庆	103	1984-02-20	1981-10-22	2008-12-04/ 2015-12-04

2.2 最大冻土深度对变暖的响应

2.2.1 平均气温、地温对最大冻土深度的影响

因2019—2021年部分气象台站地温数据缺失,选取1981—2018年北京地区日最大冻土深度与日平均气温、日平均地表温度及不同深度地温进行了相关性分析(图4)。北京地区日最大冻土深度与日平均气温呈负相关,相关系数为 -0.13 ;其中城区站为 -0.23 ,郊区站为 -0.07 ,表明不相关的出现概率最大不超过5%。6个气象站中,丰台站的日最大冻土深度与日平均气温的相关性最好,为 -0.28 ;南郊观象台站次之,相关系数为 -0.19 ;延庆站与密云站相关性最差,二者均呈正相关,相关系数分别为0.01和0.14,可能与郊区多山地、地质层相对复杂有关。北京地区日平均地表温度,5、10、15、20、40和80 cm地温与最大冻土深度呈明显的负相关;40、80 cm地温与最大冻土深度的相关性最好,相关系数分别为 -0.8 和 -0.84 ;其次是20 cm地温,相关系数为 -0.5 ;

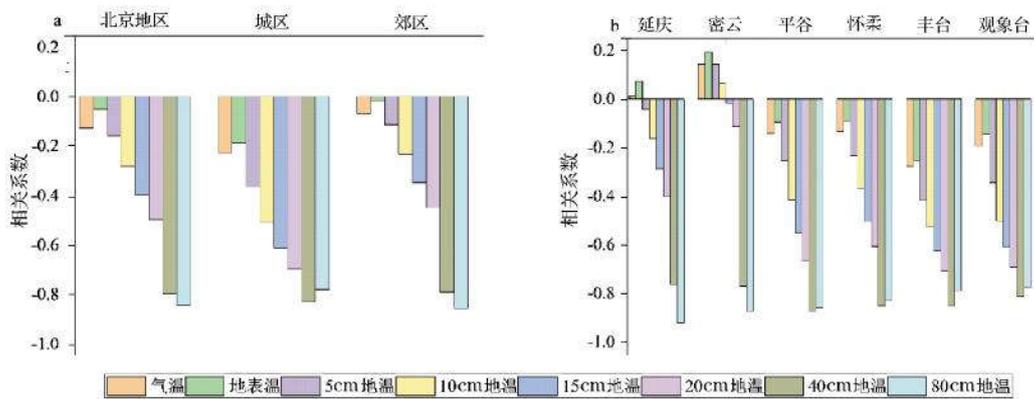


图4 1981—2018年北京地区(a)及6个气象站(b)最大冻土深度与各要素相关系数

地表温度与最大冻土深度相关性最差, 相关系数为-0.05;延庆、密云地表温度与最大冻土深度呈正相关, 相关系数分别为0.07和0.19;密云5、10 cm地温与最大冻土深度呈正相关, 相关系数分别为0.14、0.07。

2.2.2 MK 突变检验

由表3可知,1981—2021年北京地区的6个气象站年最大冻土深度均值除延庆、怀柔外,其他各站均发生了突变。城区站发生突变的次数明显多于郊区站, 突变时间多出现在1995、2000、2015和2017年前后。北京地区郊区站不易发生突变,仅有平谷、密云2站发生突变,其中平谷于2006年1月1日进行了台站迁站, 迁移距离为2 100 m;密云于1989年1月1日进行了台站迁站, 迁移距离为34 m。平谷发生突变时间为2002、2009年, 出现在迁站前后的3~4 a,受迁站影响的可能性较大。密云发生突变为1991、1995、2008、2018年,其中1991年突变受迁站影响的可能性较大, 其他年份突变可能因观测环境变化、观测仪器性能不稳定等因素导致。

表3 1981—2021年北京地区各站年最大冻土深度均值突变次数及年份

站名	突变次数	突变年份
观象台	4	1984、1987、2015、2017
丰台	6	1995、2000、2003、2011、2016、2017
平谷	2	2002、2009
密云	4	1991、1995、2008、2018
怀柔	0	无
延庆	0	无

3 测温式冻土仪观测数据质量评估

从2021—2022年冻土观测记录来看,北京部分郊区的冻土人工观测与测温式冻土仪数据偏差较大

(误判均值达到5.95 cm),而城区差异较小(误判均值为2.5 cm),这可能源于测温式冻土仪在不同土质的气象台站采用了相同算法和阈值^[24]。2022年12月,北京地区气象台站对测温式冻土仪进行了算法优化和阈值调整,使得各气象台站平均一致率提升10%左右。

由图5可知,冻结初始期(11月)和融化终止期(3月)的平均一致率偏低,误判均值也较小。2022年11月的平均一致率高于2021年同期,误判均值低于2021年同期。测温式冻土仪经过一个冻融周期后,与冻土人工观测吻合度得到明显提升,平均一致率提升12.2%,误判均值无明显变化,保持在3 cm以下。2022年12月对测温式冻土仪进行了算法和

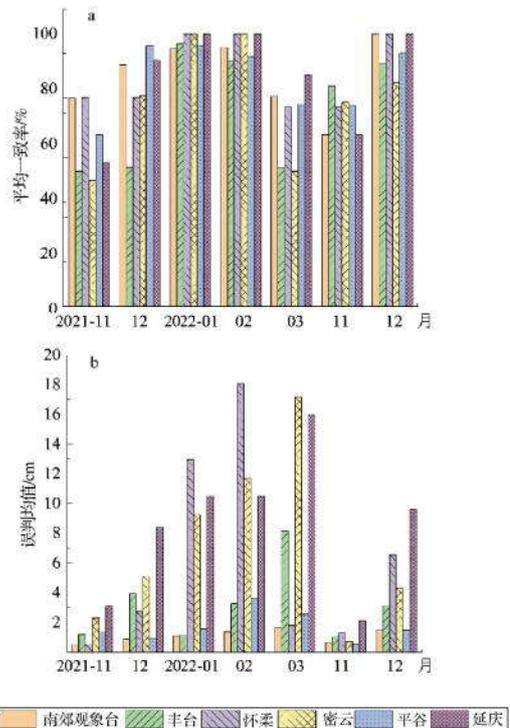


图5 2021—2022年北京地区测温式冻土仪与冻土人工观测的平均一致率(a)和误判均值(b)

阈值调整后,各气象站平均一致率较去年同期明显提升,误判均值仅有丰台、密云较去年同期低,与冻土人工观测结果趋于一致。

因各气象站土质及地下岩层、土层分布存在明显差异,其土壤冻融条件不同,各站测温式冻土仪观测数据质量还需进一步优化,应考虑根据观测环境及对比观测记录来设定各气象站的算法或阈值,以实现观测数据质量的提升。

4 结论

本文分析了北京地区不同站点的年最大冻土深度均值变化,以及冻土最大深度与气温、地表温度及5、10、15、20、40、80 cm地温间的相关性,以及测温式冻土仪观测数据与人工观测数据的差异。得出如下结论:

(1)北京郊区的年最大冻土深度均值显著高于城区,且呈现从东南向西北递增的空间分布特征。从时间序列上看,北京地区年最大冻土深度均值正在以 $-2.3\text{ cm}/10\text{ a}$ 的速率变浅,其中延庆站变浅趋势最明显,达到 $-6.9\text{ cm}/10\text{ a}$ 。平谷、密云站变化速率偏小,分别为 -0.5 、 $-0.1\text{ cm}/10\text{ a}$ 。郊区站气温上升趋势弱于城区站,但最大冻土深度变浅趋势却更显著,可见郊区站最大冻土深度对温度变化的响应更敏感。此外,从空间分布上看,北京地区最大冻土深度气候倾向率从西到东呈逐渐减小趋势。

(2)北京地区冻土最大深度与40、80 cm地温的相关性最好,与浅层地温和气温的相关性次之,与地表温度的相关性最差。

(3)测温式冻土仪自仪器安装完成后,经过一个冻融周期后能够与人工观测达到较好的一致性。测温式冻土仪在不同地质环境下采用相同算法产生的测量误差存在差异,郊区站的误差明显大于城区站,最大误判均值达15 cm左右。

为了更准确地反映各地区土壤实际冻结情况,应根据不同土层结构特征,采用特定的算法和阈值,并保证场地及设备运行正常。

因现阶段的技术和资料积累不足等原因,尚未形成不同地质条件下测温式冻土仪融冻参数特征的明确结论。今后将通过长时间对比试验,积累多年观测资料,在确保对比观测环境一致性的条件下,针对不同地质条件开展更细致的研究,以获取分别适用于不同气象台站的本地化融冻参数。

参考文献:

[1] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,

2003.

- [2] 陶世银,龚梅竹,贺敬安,等.青海省季节性冻土分布特征及在防雷接地工作中的应用[J].气象与环境科学,2022,45(5):95-104.
- [3] 周幼吾.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.
- [4] MA W, CHEN T. Analysis of permanent deformations of railway embankments under repeated vehicle loadings in permafrost regions[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2015, 7(6):0645-0653.
- [5] CAO W, SHENG Y, CHOU Y L. The status evaluation of the permafrost environment along the Chaida'er-Muli Railway in southern Qilian Mountains in northern Qinghai Province, China[J]. J Mt Sci, 2016, 13(12):2124-2134.
- [6] MU Y H, CHAI M T, LI G Y. Thermal influence of ponding and buried warm-oil pipelines on permafrost: a case study of the China-Russia crude oil pipeline[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2020, 12(2):59-70.
- [7] ZHANG T, LI H P, HU C C, et al. Review and prospect of the effects of freeze-thaw on soil geotechnical properties[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2021, 13(5):349-356.
- [8] LI L, YANG H, ZHAO Z, et al. An observational maximum seasonal freeze depth changes for a province[J]. International Journal of Global Warming, 2019, 18(2):138-154.
- [9] WANG C H, ZHAO W, CUI Y. Changes in the seasonally frozen ground over the eastern Qinghai-Tibet Plateau in the past 60 years[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8:270.
- [10] ZOU D F, ZHAO L, SHENG Y, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2017, 11(6):2527-2542.
- [11] 丁抗抗,张浩宇,杨洪斌,等.1959—2018年沈阳地区冻土时空变化特征[J].气象与环境学报,2019,35(6):101-108.
- [12] 冯晓莉,李红梅,罗斯琼,等.1961—2020年三江源地区季节性冻土冻融特征分析[J].高原气象,2022,41(2):295-305.
- [13] 刘志刚,吴东丽,邵长亮,等.2019年辽宁及内蒙古地区冻土自动观测及其分钟数据的时间一致性检测[J].气象与环境学报,2022,38(2):97-104.
- [14] MA D, LUO S Q, GUO D L, et al. Simulated effect of soil freeze-thaw process on surface hydrologic and thermal fluxes in frozen ground region of the Northern Hemisphere [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2021, 13(1):18-29.
- [15] 井立红,高婧,秦榕,等.塔城地区1960—2018年季节性冻土的变化特征及影响因子分析[J].沙漠与绿洲气象,

- 2019,13(3):88-93.
- [16] 张小平,秦璐,范卫东,等.山西最大冻土深度时空分布特征[J].干旱气象,2022,40(1):49-54.
- [17] 杨帅,侯奇奇,耿雪莹,等.1974—2016年河北省最大冻土深度及其与温度的关系[J].干旱气象,2020,38(3):380-387.
- [18] 郑祚芳,丁海燕,范水勇,等.北京1960—2008年气候变暖及极端气温指数变化特征[J].气候变化研究进展,2011,7(3):189-196.
- [19] 姜晓,魏东平.联合气象地温资料分析北京地区的气候变化[J].科技导报,2010,28(7):22-27.
- [20] 吴琳,单瑞娟,王志刚,等.1975—2017年北京汤河口地区季节性冻土与气候变化的关系[J].气象科技进展,2022,12(4):43-47.
- [21] 胡树贞,刘志刚,吴东丽,等.冻土自动观测仪性能比对分析[J].气象水文海洋仪器,2020(4):4-7.
- [22] 孙艳云,苗传海,丛郁,等.人工冻土观测的冻点对应的土壤温度研究[J].气象与环境学报,2021,37(3):102-109.
- [23] 杨萍,刘伟东,侯威,等.北京地区城郊极端温度事件的变化趋势及差异分析[J].气候与环境研究,2013,18(1):80-86.
- [24] 司轩昂,杨平,刘健鹏,等.土质对人工冻土冻结温度影响的试验研究[J].地质与勘探,2021,57(5):1166-1172.

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Frozen Soil in Beijing

ZHANG Longbin¹, HU Dongbei², WANG Lu¹, MENG Lei¹, HAO Yaming³,

(1.Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100089, China;

2.Xinjiang Jinfeng Huayun Meteorological Technology Co. Ltd, Urumqi 830002, China;

3.Korla Meteorological Bureau, Korla 841000, China)

Abstract This paper examined the relationship between the spatial and temporal distribution characteristics of the maximum depth of frozen soil, air temperature and ground temperature in Beijing over the past 40 years. Data from six meteorological observation stations in Beijing from 1981 to 2021 were collected, including daily maximum depth of frozen soil, average air temperature, average ground surface temperature and the ground temperature data at the depths of 5, 10, 15, 20, 40 and 80 cm. The results indicated that the maximum depth of frozen soil generally became shallower from west to east across the meteorological observation stations, with a climate tendency rate of $-2.3 \text{ cm}/10 \text{ a}$. The maximum depth of frozen soil in Beijing showed a weak correlation with ground surface temperature and a stronger correlation with ground temperatures at the depths of 40 and 80 cm. By selecting the comparative test data of frozen soil in Beijing from 2021 to 2022, this study revealed that the instrument demonstrates better agreement with manual observation of frozen soil after one freezing and thawing cycle. The data quality of the temperature measurement type for frozen soil automatic observation equipment was directly influenced by the subterranean rock formations and soil distributions at the installation location. After the instrument achieved stable operation, it was necessary to optimize the algorithm and the threshold value for freezing and thawing in accordance with the local conditions.

Key words frozen soil; maximum depth of frozen soil; spatial and temporal distribution; temperature measuring type; automatic observation