

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.05.036

呼和浩特市近 60 年生长季地温变化特征分析

李寅龙¹, 刘星岑², 刘晓敏², 塞 丫², 王志楠²

(1. 内蒙古蒙草土壤科技有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 呼和浩特市气象局, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:为研究气候变化对呼和浩特市生长季地温的影响,使用呼和浩特市 6 个国家气象观测站 1961—2020 年 5~80 cm 土壤不同土层逐月平均温度资料,运用气候倾向率、小波分析、Mann-Kendall 检验等统计方法,分析该地区 60 年地温变化特征。结果表明,呼和浩特市生长季平均地温呈显著升高趋势,增幅为 0.21~0.59℃/10 a。不同土层平均地温的年际变化特征也呈上升趋势,经历了“冷—暖”的演变过程。20 世纪 60、70 年代为冷期,80 年代冷暖交替,90 年代至 21 世纪初期为暖期。地温变化普遍具有 5~10 a 周期。5~80 cm 土层平均地温分别在 1990、1986、1986、1988、1998、2005 年发生突变,20 cm 土层平均地温对气候变暖的响应更敏感。

关键词:地温;气候倾向率;小波分析;Mann-Kendall 检验;突变;呼和浩特市

中图分类号:P423.3;P193 文献标识码:A 文章编号:1671-3168(2023)05-0218-07

引文格式:李寅龙,刘星岑,刘晓敏,等. 呼和浩特市近 60 年生长季地温变化特征分析[J]. 林业调查规划,2023,48(5):218-224. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.05.036

LI Yinlong, LIU Xingcen, LIU Xiaomin, et al. Change Characteristics of Soil Temperature during Growing Season in Hohhot City in Recent 60 Years[J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(5): 218-224. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.05.036

Change Characteristics of Soil Temperature during Growing Season in Hohhot City in Recent 60 Years

LI Yinlong¹, LIU Xingcen², LIU Xiaomin², Saiya², WANG Zhinan²

(1. Inner Mongolia Mengcao Soil Technology Co., Ltd, Hohhot 010070, China;

2. Hohhot Meteorological Bureau, Hohhot 010020, China)

Abstract: To study the impact of climate change on the soil temperature during the growing season in Hohhot City, monthly average temperature data of different soil layers of 5–80 cm at six national meteorological stations from 1961 to 2020 were used to analyze the characteristics of soil temperature changes in the region over the past 60 years based on statistical methods such as climate tendency rate, wavelet analysis and Mann-Kendall test. The results showed that the average soil temperature during the growing season in Hohhot City was a significant upward trend, with an increase of 0.21–0.59℃/10 a. The interannual variation characteristics of average soil temperature in different layers also showed an upward trend, experiencing a “cold–warm” evolution process. The 1960s and 1970s were cold periods, the 1980s alternated between cold and warm periods, and the 1990s to the early 21st century were warm periods. The variation of soil temperature generally had a period of 5–10 years. The average soil temperature of the 5–80 cm layer had abrupt changes in 1990, 1986, 1986, 1988, 1998 and 2005, respectively. The average

收稿日期:2022-03-17.

基金项目:内蒙古科技重大专项项目(2020ZD0020);国家能源科技创新项目(CSIEKJ200700396).

第一作者:李寅龙(1985-),男,山西大同人,硕士,工程师.主要从事生态修复方面研究.

责任作者:刘星岑(1988-),女,内蒙古呼和浩特人,硕士,工程师.主要从事农业气象方面研究. Email:yingzhilianyu@163.com

soil temperature of the 20 cm layer was more sensitive to the response to climate warming.

Key words: soil temperature; climate tendency rate; wavelet analysis; Mann – Kendall test; abrupt change; Hohhot City

当前,全球气候以变暖为主要变化趋势,根据 IPCC 第五次评估报告,1880—2012 年全球平均地表温度升高了 0.85℃^[1]。气温变化主导着土壤温度产生主要变化^[2],从根本上来说,种子萌发、植物生长和农作物产量变化,主要由土壤温度决定,而气候变化对土壤温度最直接的反应是影响了土壤的热状态变化。因此研究地温的变化特征有助于揭示地温对农业生产和生态环境产生的影响^[5-6]。

近年来,地温变化越来越受到科学界的关注,国内外许多学者对地温的应用、分布规律及变化进行了深入的研究^[7-11]。前苏联、瑞士以及美国的学者研究发现地温呈上升趋势^[12-16],地温的变化与气温有较一致的同步性。而国内的主要研究发现中国年平均地温的年代际变化分 3 个阶段推进,分别为地温下降阶段、相对气候冷期和 20 世纪 90 年代后期升温^[17]。研究者同样也发现在中国大部分地区各层地温随气温升高呈升温趋势^[18-24]。诸多研究表明,在气候变暖的背景下,地温增温显著,由于研究时间尺度和所用方法不同,得出的地温变化存在差异。

呼和浩特市地处中国北部,属典型的蒙古高原中温带大陆性季风气候,日照充足,雨热同季,降雨主要集中在夏季,以玉米、马铃薯为主要农作物。目前,针对呼和浩特市的降水、气温等变化特征已有一些分析研究,但是系统研究土壤温度变化的成果甚少,特别是耕作层土壤地温的研究。因此研究呼和浩特地区近 60 年生长季地温变化趋势、周期变化规律和突变年份等特征,不仅对了解呼和浩特市未来气候变化趋势具有重要意义,也为指导该地区农业生产和结构调整提供决策依据。

1 研究区域与研究方法

研究数据来源于呼和浩特市呼和浩特、武川县、土默特左旗、托克托县、和林格尔县、清水河县 6 个国家气象观测站 1961—2020 年 4—9 月的逐月气象资料,包括 4—9 月 5、10、15、20、40、80 cm 土层深度平均地温和平均气温。月、年距平采用 1981—2020 年 40 年整编的平均值作为标准进行计算,分析地温的年际变化趋势。地温周期采用小波分析进行研究,利用 Mann-Kendall 非参数检验法分析突变特征(显著性水平取 $\alpha=0.05$)。

气候异常是气候要素的距平达到一定数量级的气候状况。采用《全国气候影响评价》标准^[25]评价地温,利用平均地温距平(P)与标准差(Q)比值来判断地温是否异常,当 $P/Q \leq -2$ 时异常偏低, $P/Q \geq 2$ 时异常偏高,并根据这一标准分析异常特征。

2 结果与分析

2.1 浅层地温的变化特征

2.1.1 浅层地温的气候倾向率

呼和浩特地区浅层地温的气候倾向率统计见表 1。

表 1 呼和浩特地区浅层地温气候倾向率统计
Tab. 1 Climate tendency rate of shallow soil temperature in Hohhot

土层深度/cm	气候倾向率/(℃·10 ⁻¹ ·a ⁻¹)						
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	平均值
5	0.54	0.39	0.33	0.29	0.28	0.27	0.35
10	0.54	0.40	0.33	0.28	0.27	0.25	0.35
15	0.56	0.42	0.34	0.29	0.27	0.25	0.35
20	0.59	0.47	0.39	0.33	0.32	0.29	0.40
40	0.54	0.43	0.40	0.35	0.31	0.22	0.38
80	0.43	0.47	0.38	0.36	0.29	0.21	0.36
平均值	0.54	0.43	0.36	0.32	0.29	0.25	0.36

注:表中各数据均达显著水平($P<0.05$)。下同。

由表 1 可知,呼和浩特地区 1961—2020 年生长季各月不同土层温度均呈升高趋势,增幅为 0.21~0.59℃/10 a,其中,土层深度 20 cm 增温幅度最大,为 0.29~0.59℃/10 a。土层深度 5、10、15 cm 增温幅度较为一致,增温幅度也最小,4—9 月月均气候倾向率均为 0.35℃/10 a。不同土层月平均地温的气候倾向率变化趋势不同,7 月随着土层深度增加,地温增温幅度变大;其余月份则随着土层深度增加,地温变幅呈先增加后减小的变化趋势,其中 6 月的拐点出现在 40 cm 土层深度,其余月份拐点出现在 20 cm 土层深度。不同土层地温均是 4 月增幅最大,9 月增幅最小。

呼和浩特地区 1961—2020 年生长季不同土层平均地温均表现为显著升高趋势,平均每 10 a 升高 0.25~0.54℃,其中,土层深度 20 cm 地温增幅最大;各月不同土层地温增幅不同,4 月、9 月以土层深

度 80 cm 地温增幅最小,5 月、6 月以土层深度 5 cm 地温增幅最小,7 月、8 月以土层深度 10 cm 地温增幅最小。6 个站点不同土层的气候倾向率统计见表 2。各站点不同土层地温的气候倾向率均呈上升趋势,但增温幅度相差较大,增幅最大的是呼和浩特站,最小的是托克托县站。

2.1.2 生长季不同土层地温的年代变化特征

呼和浩特地区生长季不同土层平均温度呈上升趋势,且经历了“冷—暖”的历史演变过程,见图 1。

从图 1 可知,5、10、15、20 cm 土层的地温变化趋势较为一致,均是 20 世纪 60、70 年代为负距平,为冷期;80 年代冷暖交替;90 年代至 21 世纪初期为正距平,为暖期。距平最低值出现在 20 世纪 60 年代 4 月,最高值出现在 21 世纪初期 4 月。

表 2 6 个站点不同土层地温的气候倾向率统计

Tab. 2 Climate tendency rate of soil temperature in different layers at six stations

土层深度/cm	气候倾向率/($^{\circ}\text{C} \cdot 10^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)					
	武川县	土默特左旗	托克托县	和林格尔县	清水河县	呼和浩特
5	0.36	0.39	0.17	0.35	0.28	0.54
10	0.33	0.36	0.22	0.44	0.23	0.50
15	0.30	0.50	0.22	0.45	0.13	0.52
20	0.29	0.45	0.20	0.46	0.34	0.67
40	0.35	0.32	0.08	0.47	0.15	0.73
80	0.33	0.28	0.06	0.46	0.10	0.90
平均值	0.33	0.38	0.16	0.44	0.21	0.64

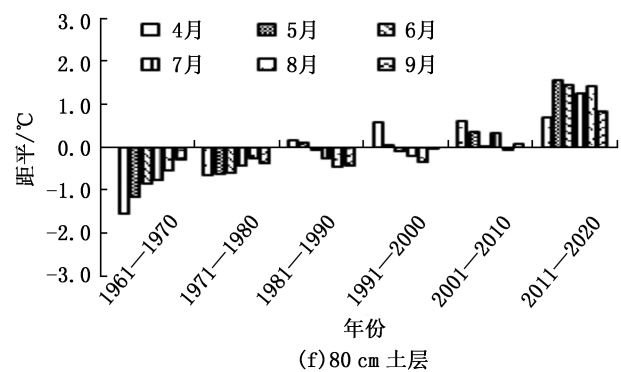
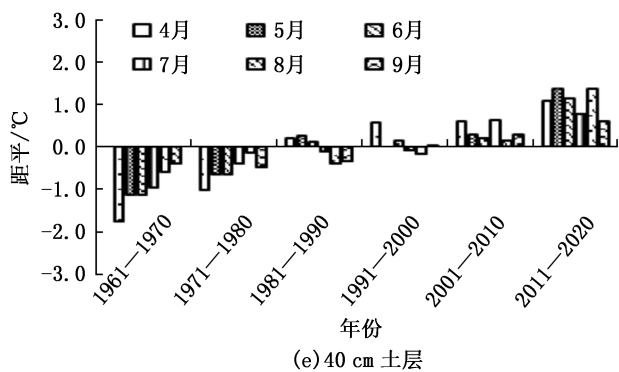
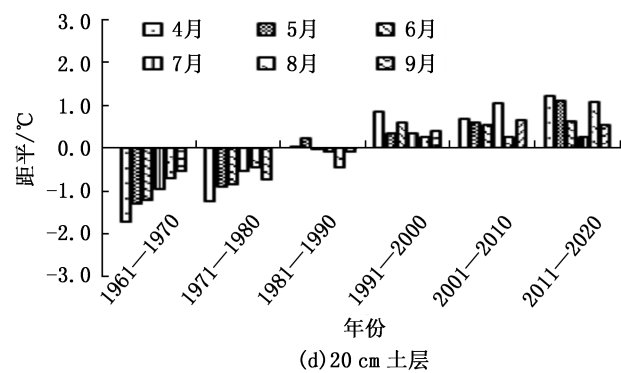
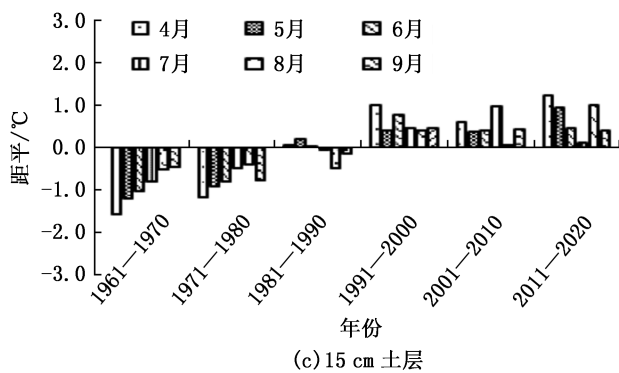
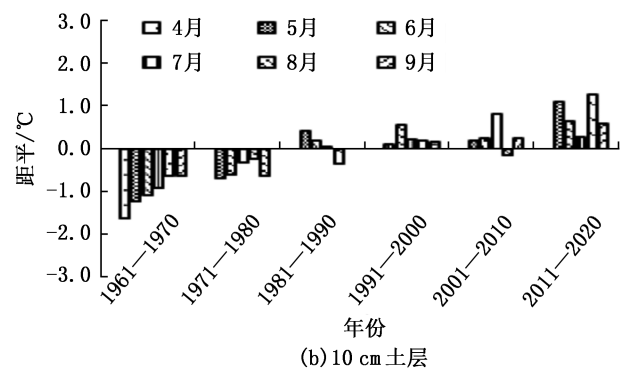
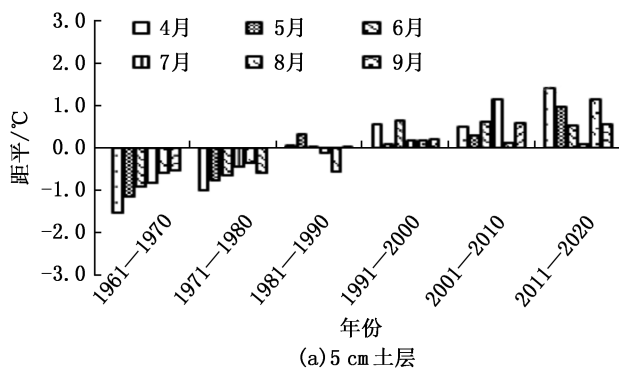


图 1 呼和浩特地区生长季浅层地温年代变化

Fig. 1 Chronological variation of shallow soil temperature in Hohhot during growing season

40 cm、80 cm 土层与 5~20 cm 土层相比地温变化略有差别,表现为 20 世纪 60、70 年代为负距平,为冷期;80、90 年代冷暖交替;21 世纪初期年代为正距平,为暖期。距平最低值出现在 20 世纪 60 年代 4 月,最高值出现在 21 世纪初期 5 月。总体来说,生长季不同土层土壤平均温度呈现逐年波动上升趋势

势,期间出现冷暖交替的阶段特征,4 月距平变化最明显,9 月变化最小。

2.2 地温的周期及突变特征

2.2.1 周期变化特征

地温的变化也表现出明显的周期特征,小波分析的实部图见图 2。

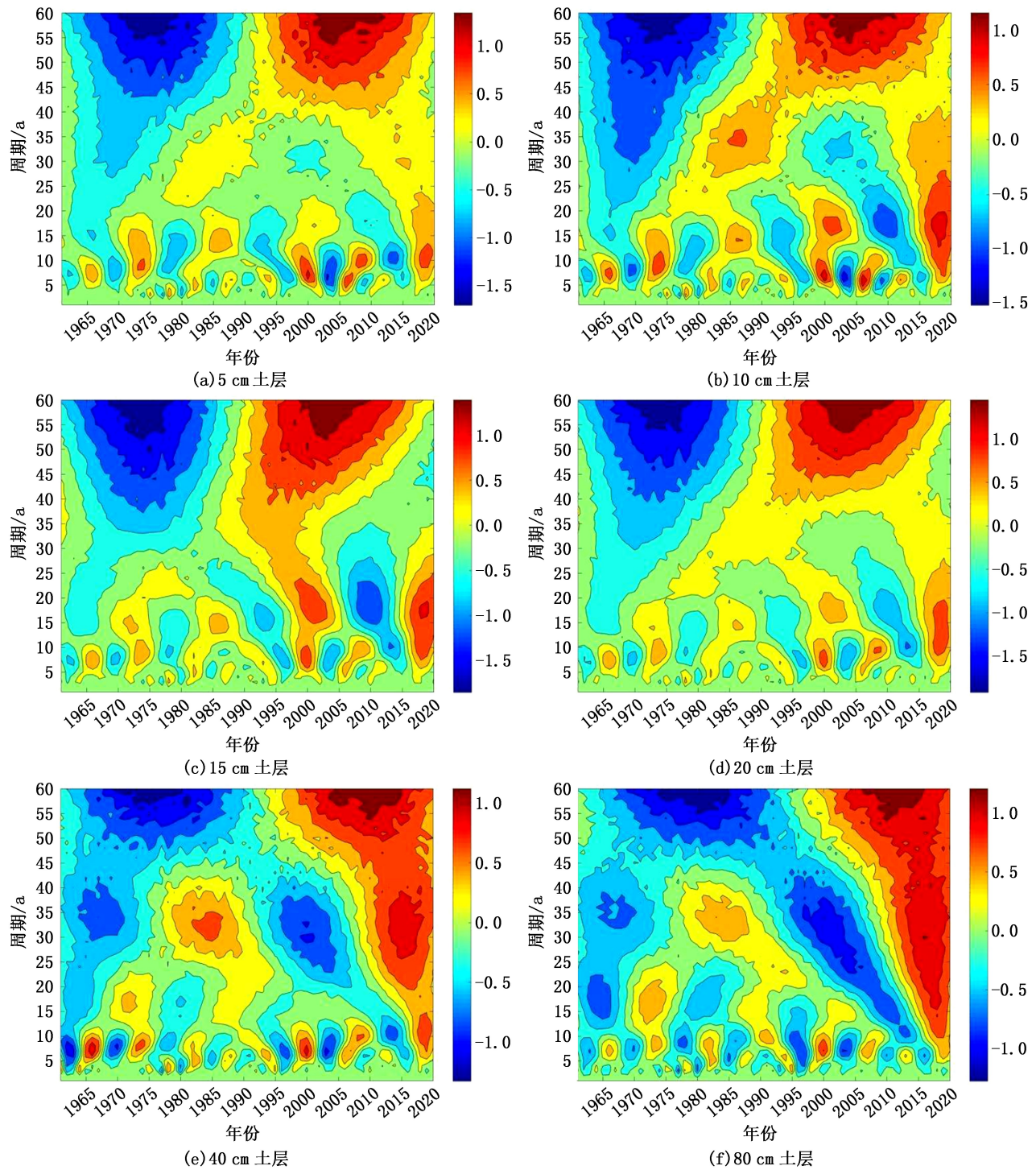


图 2 呼和浩特地区平均 5~80 cm 土层的地温小波变换实部
Fig. 2 Wavelet transform real part of 5~80 cm layer soil temperature in Hohhot

从图 2 可知,呼和浩特地区 5 cm 土层的地温存在 5~13 a 周期特征,震荡周期稳定,且在 60 a 中始终存在。10 cm 土层的地温存在 3~5 a、7~17 a 周期,其中 7~17 a 的震荡周期稳定,主要在 20 世纪 70 年代中期到 21 世纪初比较明显。15 cm 土层的地温存在 5~10 a、15~25 a 周期变化。20 cm 土层的地温存在 5~10 a、13~20 a 周期变化。40 cm 土层的地温存在 5~10 a、30~40 a 周期特征,其中 5~10 a 的震荡周期稳定,且在 60 a 中始终存在。80 cm 土层

的地温存在 5~10 a、15~20 a 周期特征,其中 5~10 a 的震荡周期稳定,且在 60 a 中始终存在,15~20 a 的震荡周期稳定,主要出现在 20 世纪 60 年代到 90 年代中期。5~80 cm 土层的浅层地温低频振荡周期的振幅较小,15~80 cm 土层的地温高频振荡周期的振幅较大。

2.2.2 突变特征

通过对呼和浩特地区不同土层土壤温度进行 Mann-Kendall 突变检验,结果见图 3。

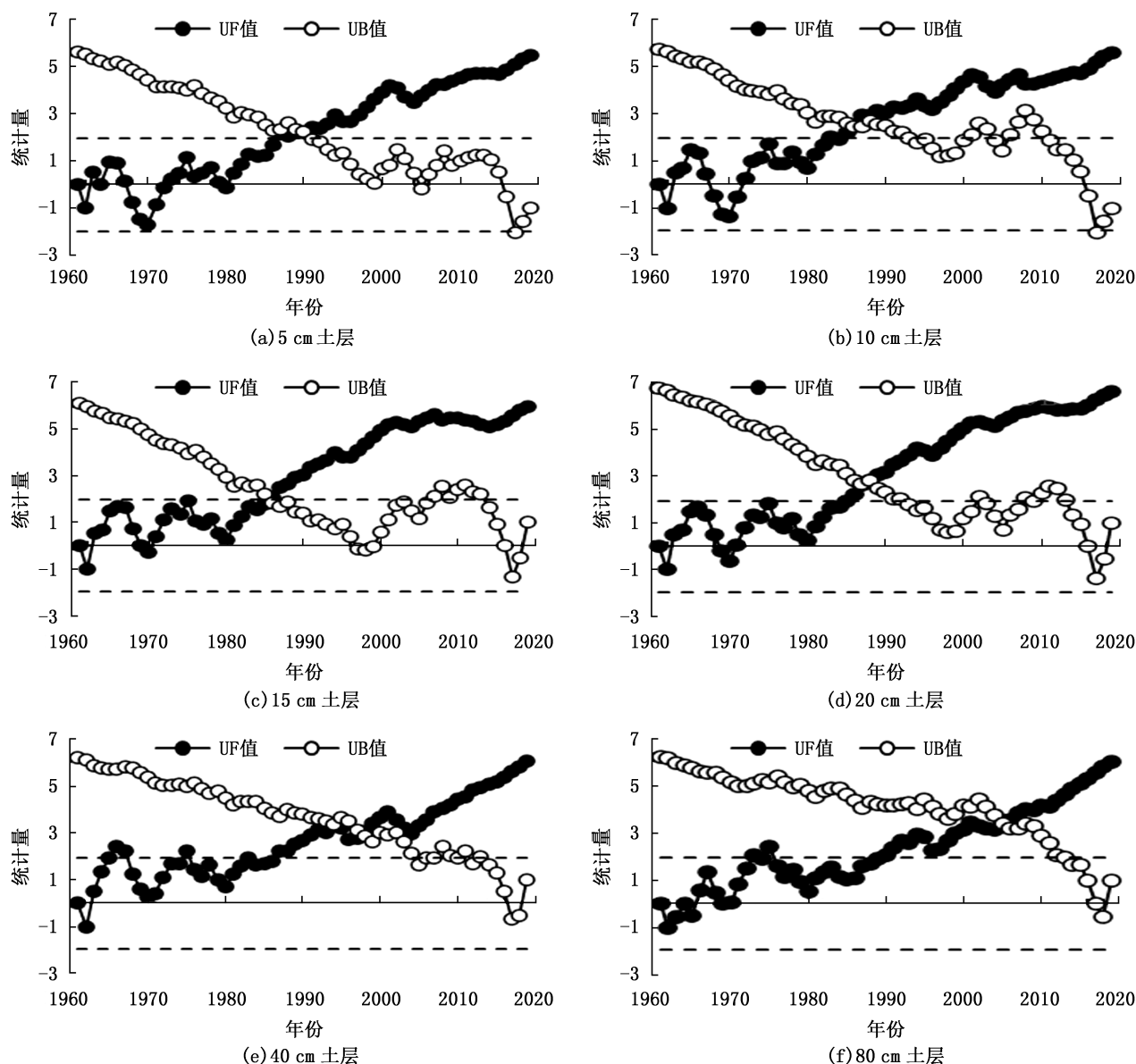


图 3 呼和浩特地区不同深度浅层土壤温度 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 3 Mann-Kendall mutation test of soil temperature in different depths in Hohhot

从图 3 可知,整个生长季 5~80 cm 土层平均地温分别在 1990、1986、1986、1988、1998、2005 年发生

突变;从月份来看,8 月不同土层突变点发生在 21 世纪初,其余月份多集中在 20 世纪 80、90 年代。整

体来看,近 60 年呼和浩特市生长季土层温度,除 5 cm 土层外,10~80 cm 不同土层温度发生突变的时间总体呈现随土层深度的加深而逐渐推迟的特点,这主要与土壤温度对气候变暖的响应随土层深度的加深

趋于滞后有关。

2.2.3 浅层地温的异常特征

对地温进行气候异常性分析,结果显示地温变化也表现出异常特征(表 3)。

表 3 1961—2020 年呼和浩特地区地温异常年份

Tab.3 Years of abnormal soil temperature in Hohhot from 1961 to 2020

月份	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	40 cm	80 cm
4 月	1962,1980(-)	1962(-)	1962,1980(-)	1962(-)	1996(-)	1996(-)
5 月	1962(-)	—	2018(+) 1962(-)	2018(+) 1962(-)	—	—
6 月	—	1969(-)	—	—	2005(+)	—
7 月	—	2010,2017(+) 1969(-)	1969(-)	—	2010(+) 2003(-)	—
8 月	2007(+) 1968,1969(-)	2016,2018(+) 1968,1969,1976(-)	1999,2016,2018(+) 1968(-)	2016,2018(+) 1962,1968,1969,1976(-)	—	2018,2019(+)
9 月	1967(-)	2017(+)	2017(+) 1967(-)	2017(+) 1967(-)	2017(+)	—
生长季	—	—	—	—	—	—

注:(-)表示地温异常偏低,(+)表示地温异常偏高,—表示地温无异常。

由表 3 可知,20 世纪 60、70、80 年代及 40 cm 土层的 2003 年 7 月均表现为地温异常偏低年份,地温异常偏高年份出现在 20 世纪 90 年代及 21 世纪初。4 月地温异常偏低年份出现在 20 世纪 60、80、90 年代,其他时间段无异常偏高年份。5 月 10、40、80 cm 土层地温无异常年份出现,其余土层地温异常偏低年份出现在 20 世纪 60 年代,地温异常偏高年份出现于 21 世纪初。6 月 60 年代在 10 cm 土层出现地温异常偏低,21 世纪初在 40 cm 土层出现地温异常偏高,其余土层地温无异常年份出现。7 月 5、20、80 cm 土层地温无异常年份,21 世纪初在 10、40 cm 土层地温出现异常偏高,异常偏低年份出现在 60 年代及 21 世纪初。8 月 40 cm 土层地温无异常年份出现,其余土层地温异常偏低年份出现在 60、70 年代,异常偏高年份出现在 90 年代及 21 世纪初。9 月 80 cm 土层地温无异常年份出现,其余土层地温异常偏低年份集中出现在 60 年代,地温异常偏高年份出现在 2017 年。生长季平均地温无异常年份。

3 结论与讨论

3.1 结论

1)呼和浩特市地区平均地温呈升高趋势,增幅为 0.21~0.59℃/10 a,其中,土层深度 20 cm 增温幅度最大。不同土层深度的月平均地温同样呈增温趋

势,4 月增幅最大,9 月份增幅最小。

2)呼和浩特市地区 5~80 cm 土层的平均地温均经历了“冷—暖”的历史演变过程。5~20 cm 土层 20 世纪 60、70 年代为冷期,80 年代冷暖交替,90 年代至 21 世纪初期为暖期;40、80 cm 土层 20 世纪 60、70 年代为冷期,80、90 年代冷暖交替,21 世纪初期年代为暖期。

3)呼和浩特市地区地温变化普遍具有 5~10 a 周期。5~80 cm 土层地温在 1990、1986、1986、1988、1998、2005 年发生突变。地温异常特征表现为异常偏低年份出现在 20 世纪 60、70、80 年代,地温异常偏高年份出现在 20 世纪 90 年代及 21 世纪初。

3.2 讨论

研究表明呼和浩特市地区 5~20 cm 浅层土壤平均温度呈上升趋势,并且经历了“冷—暖”的历史演变过程,这与诸多研究者对浅层地温变化趋势的分析和论证相一致。造成浅层地温上升的原因很多,其中最主要的因素是气温上升,这也是对全球气候变暖的最直接响应。40~80 cm 深层土壤的平均温度同样也呈现增温趋势,但是增幅小于浅层地温,且增温的时间上也滞后于浅层地温。这主要是由于热量从土壤表层传到深层需要一定时间,同时热量在通过土层时要被土壤吸收掉一部分。而该研究结果与程磊教授实验室^[26]提出的深层土壤对气候变

化响应存在滞后效应一致,主要是由于全球气候系统处于动态变化中,同时受土壤热传导率及土壤厚度等影响,导致底层土壤温度变化相对于表层土壤存在滞后效应。

研究发现呼和浩特地区 20 cm 浅层地温对气候变化响应要比其他土层更加敏感,说明 20 cm 土层在浅层中更具代表意义,这与强玉柱等^[5]的研究结果相类似,但在大多数研究中尚未出现相似结果。这可能是因为 20 cm 土层正好位于深层和浅层土壤之间。在以后的研究中,应针对该层进行重点分析,以期能更清楚地找出其中原理。

参考文献:

- [1] 李莹,高歌,宋连春. IPCC 第五次评估报告对气候变化风险及风险管理的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 261-265.
- [2] 王晨晨,王珍,张新杰,等. 增温对荒漠草原植物群落组成及物种多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 43-49.
- [3] LIU Y G, WANG N L, WANG L G, et al. Variation of cloud amount over China and the relationship with ENSO from 1951 to 2014[J]. International of Journal of Climatology, 2016(36): 2931-2941.
- [4] 裴洪芹,孙成武,吴凌志. 近 48 年临沂浅层地温的变化特征[J]. 中国农业气象, 2009, 30(增 1): 38-41.
- [5] 陈超,周广胜. 1961-2010 年阿拉善左旗气温和地温的变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 91-103.
- [6] 强玉柱,蒲金涌,刘扬,等. 天水市 50 年浅层地温变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35): 317-322.
- [7] 杜军,李春,廖健,等. 近 45 年拉萨浅层地温对气候变化的响应[J]. 气象, 2007, 33(10): 61-68.
- [8] 张菲,邢小霞,李仁杰,等. 利用地温构建菏泽牡丹花期预测模型[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 87-89.
- [9] 李栋梁,钟海玲,吴青柏,等. 青藏高原年地表温度的变化分析[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 291-298.
- [10] 宋同清,肖润林,彭晚霞,等. 白三叶草间作对亚热带丘陵茶园地温及生产的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1): 45-48.
- [11] 曹兴,魏文寿,陈荣毅,等. 古尔班通古特沙漠腹地秋季浅层地温特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(2): 26-31.
- [12] 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[C]//Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost. Canada: Yellowknife, 1998: 313-317.
- [13] HAEBERLI W, HOCLZLE M, KELLER F. Monitoring the long-term revolution of mountain permafrost in the Swiss Alps[C]//Proceedings of Sixth International Conference on Permafrost. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1993: 214-219.
- [14] 任兆鹏,卢宇坤,谢丰. 东北半干旱地区夏季能量水分传输过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(3): 122-130.
- [15] 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.
- [16] HU Q, FENG S. A daily soil temperature dataset and soil temperature climatology of the contiguous United States[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003(42): 1139-1156.
- [17] 陆晓波,徐海明,孙丞虎,等. 中国近 50 a 地温变化特征[J]. 南京气象学报, 2006, 29(5): 706-712.
- [18] 李栋梁,柳苗,钟海玲,等. 青藏铁路沿线地面气温和地温的年际变化趋势及与地形的关系[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 694-699.
- [19] 胡军,杜军,边多,等. 西藏地温的年际和年代变化[J]. 地理学报, 2007, 62(9): 925-934.
- [20] 孙丽,李志江,李岚,等. 1959—2008 年辽宁省浅层地温变化趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(23): 12869-12870.
- [21] 张翠华,张文煜,郭立平. 河北石家庄浅层地温变化特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 78-81.
- [22] 杨平,陈少华,顾欣. 近 50 年黔东南浅层地温时空变化特征分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37(11): 54-58.
- [23] 周绍毅,劳炜,苏志,等. 1961-2010 年广西浅层地温变化特征[J]. 西南农业学报, 2012, 25(4): 1372-1375.
- [24] 李焕,王欢,吐尔逊,等. 新疆阿勒泰地区近 50 a 暖季浅层地温变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(4): 37-42.
- [25] 陈红. 全国气候影响评价[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [26] 深层土壤对气候变化响应或存滞效应[J]. 浙江气象, 2018, 39(2): 49.

责任编辑: 陈旭