

近 51 年西安地温变化特征

曲静¹ 王昱² 张弘¹

(1 西安市气象局, 西安 710016; 2 陕西省临潼区气象局, 西安 710600)

摘要 利用 1961—2011 年西安 0~40 cm 浅层逐月平均地温、地面最高、最低温度和 1981—2011 年深层 80 cm、160 cm 和 320 cm 逐月平均地温观测资料, 采用气候倾向率、滑动 t 检验、功率谱等气候统计方法, 研究了西安平均地温的变化趋势、变化周期、气候突变和异常年份等。结果表明: 在全球气候变暖背景下, 西安各层年、季平均地温除夏季各浅层呈降温趋势外其余均为升温趋势, 升幅为 $0.11 \sim 0.56 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 0~20 cm 各层及 160 cm 平均地温升温率为春季最大, 40 cm、320 cm 为冬季最大, 80 cm 为秋季最大, 各层均为夏季最小。地面最高年平均温度呈略下降趋势, 最低呈明显升高趋势。浅层 0~40 cm 年平均地温存在显著的 2.3 年、3.6~4.6 年的变化周期以及 32 年的长周期震荡。年平均地温在 1993 年或 1994 年发生了突变; 浅层春季平均地温在 20 世纪 90 年代中后期发生了突变, 夏季在 20 世纪 70 年代末或 20 世纪 90 年代中期发生了两次突变, 秋冬季基本未出现突变; 深层各季在 20 世纪 90 年代中期发生了突变。年平均地温除 160 cm 未出现异常年份外, 80 cm 在 1993 年出现异常偏低年, 其余各层在 21 世纪 00 年代初中期出现异常偏高年; 春季多偏高年份, 夏季多偏低年份, 冬季异常年份最多。地温和气温变化的相关性达到 0.82 以上, 说明气温的变化是影响地温变化的主要因素。

关键词 地温 气温 气候突变 周期分析

引言

地温是衡量地表土壤热能的物理量, 其变化比气温变化更具有保守性和滞后性, 对大气环流和气候变化有重要影响^[1], 汤懋苍等^[2-4]对地温做了大量的研究, 使地温在气候预测中发挥越来越大的作用。近年来, 在全球变暖的大背景下, 有不少学者对地温的气候变化进行了研究: 杜军等发现拉萨地温均表现为极显著的升高趋势^[5-6], 陆晓波发现全国年平均地温的年代际变化大致经历了 3 个阶段, 即地温下降阶段、相对气候冷期和 20 世纪 90 年代后期的升温阶段^[7], 而系统研究西安地温变化的成果尚未见报道。本文采用气候倾向率、滑动 t 和 Yamamoto 检验、功率谱等气候统计分析方法^[8-12], 对西安近 51 年浅层地温和近 31 年深层地温的气候倾向率、变化周期、突变、异常年份等气候特征进行了分析, 以揭示其对气候变化的响应, 为应对气候变化提供决策依据。

1 资料与方法

选取 1961—2011 年西安 0 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 和 40 cm 各浅层逐月平均地温、地面最高、最低平均地温和 1981—2011 年深层 80 cm、160 cm 和 320 cm 逐月平均地温观测资料, 并按 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 月至翌年 2 月为冬季, 生成逐季序列以及年序列, 对缺测资料用多年平均值代替。

地温的气候倾向率采用一元线性方程分析方法, 且对趋势系数进行了显著性检验。地温的变化周期利用功率谱方法来分析其存在的显著周期。气候突变通过 Yamamoto、滑动 t 检验方法来分析地温的突变。采用距平大于标准差的 2 倍作为异常标准, 来分析地温的异常特征。

2 结果分析

2.1 气候倾向率

2.1.1 0~320 cm 地温气候倾向率

根据 1961—2011 年各浅层 0~40 cm 和 1981—2011 年深层 80 cm、160 cm、320 cm 的年、季平均地温气候倾向率分析(表 1),西安各层年、季平均地温除夏季各浅层呈降温趋势外其余均为升温趋势,升幅为 0.11~0.56 ℃/10a(均通过 0.05 以上的显著性检验)。其中,年平均地温增温幅度低于同期年平均气温,表明在气候变暖前提下,年平均气温比

地温的响应更快、更强烈^[13-14];0 cm 地温夏季降温趋势较为明显;0~20 cm 各层平均地温升温率均为春季最大,说明春季表层平均地温上升趋势最明显,其次为冬季,这与西安气温的季节变化趋势一致^[15];40 cm 平均地温倾向率以冬季最大,春季次之;80 cm 平均地温倾向率为秋季最大,冬季次之;160 cm 平均地温倾向率为春季最大,秋季次之;320 cm 平均地温倾向率以冬季最大,春秋季节次之;各层均为夏季变幅最小;各深层季节变幅不大,为 0.38~0.56 ℃/10a。

表 1 西安地温气候倾向率 ℃/10a

深度/cm	冬季	春季	夏季	秋季	年
0	0.27	0.49	-0.18	0.20	0.20
5	0.21	0.42	-0.05	0.14	0.19
10	0.24	0.40	-0.05	0.18	0.19
15	0.21	0.37	-0.05	0.17	0.18
20	0.24	0.37	-0.01	0.22	0.21
40	0.22	0.20	-0.13	0.14	0.11
80	0.46	0.44	0.38	0.52	0.46
160	0.51	0.56	0.48	0.54	0.53
320	0.52	0.51	0.47	0.50	0.50

2.1.2 地面最高平均温度气候倾向率

1961—2011 年西安地面最高年平均温度变化,呈略下降趋势,每 10a 降温 0.12 ℃;最大值为 33.3 ℃,出现在 1977 年,较常年偏高 2.7 ℃。1961—2011 年各季地面最高温度线性趋势得出:春季呈明显上升趋势,升温速率为 0.84 ℃/10a;秋季变化不大,升温速率为 0.01 ℃/10a;夏、冬季呈明显的下降趋势,降温速率分别为 0.61 ℃/10a 和 0.46 ℃/10a。

2.1.3 地面最低平均温度气候倾向率

1961—2011 年西安地面最低年平均温度变化,呈明显升高趋势,每 10 年升温 0.51 ℃;1970 年、1974 年出现地面最低平均温度最小值,为 6.1 ℃,较常年偏低 1.4 ℃。各季地面最低温度线性趋势得出:冬季升温最明显,为 0.75 ℃/10a;春季升温 0.53 ℃/10a;秋季升温 0.44 ℃/10a;夏季升温 0.33 ℃/10a。

2.2 地温的变化趋势

2.2.1 年变化

图 1 为西安 1961—2011 年各浅层和 1981—2011 年各深层平均地温年内各月变化曲线,可以看出,各浅层春夏季平均地温随深度增加而降低,表明

热量由浅层向深层传递,是积蓄能量的过程,秋冬季平均地温随深度增加而升高,表明热量由深层向浅层传递,是释放能量的过程;各深层平均地温变化较浅层大致要滞后 1 个月。0~20 cm 各层月平均地温最高出现在 7 月,40 cm、80 cm、160 cm 各层最高出现在 8 月,320 cm 最高出现在 10 月;5~40 cm 各层最低出现在 12 月,0 cm、80 cm 最低出现在 1 月,160 cm、320 cm 最低分别出现在 2 月和 4 月。

2.2.2 年际和年代际变化

1961—2011 年西安地面 0 cm 年平均温度变化呈波动上升趋势,具有明显的阶段性。1961—1969 年平均温度相对较高,该时段平均温度为 15.56 ℃;1970—1996 年平均温度相对较低,该时段平均温度为 15.11 ℃;1997—2011 年平均温度较高,温度上升明显,该时段平均温度为 16.32 ℃。其中,1984 年、1993 年 0 cm 地面平均温度最低,为 14.3 ℃,2006 年最高,为 17.0 ℃。若按年代际划分,20 世纪 60 年代,0 cm 地面温度偏低 0.07 ℃,70 年代偏低 0.23 ℃,80 年代偏低 0.56 ℃,90 年代偏低 0.02 ℃,2001—2011 年偏高 0.80 ℃,增温显著。除 90 年代外,其余各年代际与气温的变化趋势基本一致^[16]。

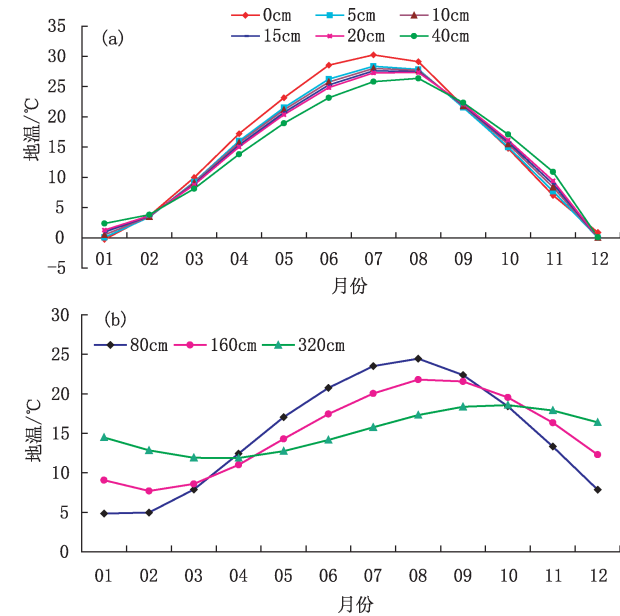


图 1 西安平均地温年变化:(a)1961—2011 年浅层,
(b)1981—2011 年深层

1961—2011 年浅层 0~40 cm 年平均地温为 14.81~15.52℃。20 世纪 60—90 年代浅层年平均地温均低于多年平均地温,除 60—70 年代夏季,70 年代秋季、90 年代冬季高于多年平均地温外,各年代其余季平均地温均低于多年平均地温。2001—2011 年年、季平均地温均呈现不同程度的升高趋势。其中,年平均地温 20 cm 升幅最大,为 0.21℃/10a;各季以春季表现最为明显,0 cm 平均地温升幅最大,为 0.49℃/10a,冬、秋季次之,夏季最少。

1981—2011 年深层 80 cm、160 cm、320 cm 年平均地温为 14.83~15.21℃,变幅不大。20 世纪 80—90 年代深层年、季平均地温均低于多年年、季平均地温,2001—2011 年年、季深层平均地温均呈现明显的升高趋势。其中,年平均地温较多年均值偏高 0.61℃;各季偏高 0.58~0.67℃,以春季表现最为明显,冬季次之。

2.3 地温的变化周期

利用功率谱分析西安地温的变化周期,当功率谱估计值大于红噪音检验标准谱时,说明所对应的周期是显著的。由图 2 可见,1961—2011 年西安浅层 0~40 cm 年平均地温存在显著的 2.3 年、3.6~4.6 年的变化周期以及 32 年的长周期震荡;1981—2011 年深层仅 80 cm 年平均地温存在显著的 2 年的变化周期。同样可以得到 1961—2011 年西安浅

层 0~40 cm 各季的变化周期:春、夏季存在 2.1~2.7 年、4 年的变化周期以及 32 年的长周期震荡,秋季存在 3.6~4 年的变化周期,冬季存在 4~4.6 年的变化周期和 32 年的长周期震荡;1981—2011 年深层春季 80 cm、160 cm 和夏季 160 cm 均存在 2.6 年的变化周期,秋季 80 cm、160 cm 存在 2 年和 4.5 年的变化周期,冬季 160 cm、320 cm 存在 2 年的变化周期。均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

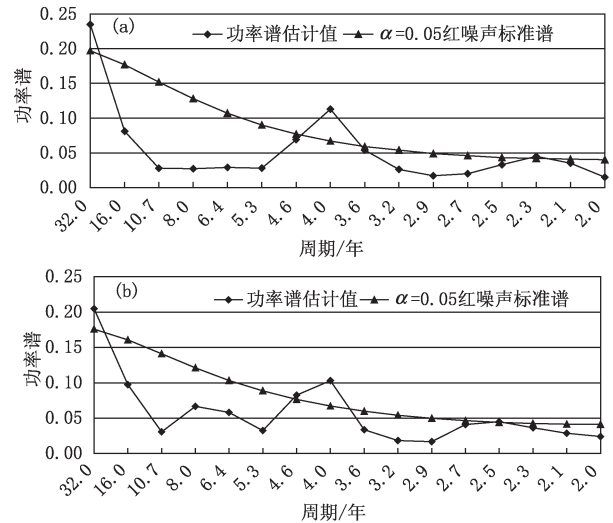


图 2 1961—2011 年西安年平均地温功率谱:
(a) 0~20 cm, (b) 40 cm

2.4 地温的气候突变

利用 Yamamoto 法和滑动 t 检验方法计算了西安年、季平均地温气候突变的年份(表 2)。结果表明:当两子序列长度均取 $n_1 = n_2 = 10$,给定显著性水平 $\alpha=0.01$ 时,Yamamoto 法发现西安年平均地温除 5~15 cm 外,均在 1993 年或 1994 年发生了突变;春季均在 1995—1997 年发生了突变;夏季除 10~20 cm 外,浅层在 1980 年、深层在 1993 年或 1994 年发生了突变;秋冬季节 0~80 cm 外,均在 1994 年发生了突变。而滑动 t 检验法发现西安年平均地温均在 1992—1994 年发生了突变;春季均在 1994 年或 1995 年发生了突变;夏季浅层均在 1979 年、15 cm、20 cm 和 40 cm 地温还在 1993 年或 1994 年也发生了突变,深层在 1992—1994 年发生了突变;秋季除 0~80 cm 地温外,均在 1993 年发生了突变;冬季除 5~20 cm 地温外,均在 1998 年或 1994 年发生了突变。总体来说,西安年平均地温在 1993 年或 1994 年发生了突变,这是一次由冷向暖转变的

突变,与西安年平均气温自 1993 年起气温急剧变暖的气候变化趋势基本一致^[17-18]。浅层春季在 20 世纪 90 年代中后期发生了突变;夏季在 70 年代末、90

年代中期发生了两次突变;秋冬季平均地温变化相对平稳,基本未出现突变;深层各季在 90 年代中期发生了突变。

表 2 西安年、季平均地温的突变年份

	方法	0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	40 cm	80 cm	160 cm	320 cm
春季	Yama	1997	1997	1997	1997	1996	1997	1996	1995	1995
	滑动 <i>t</i>	1994	1994	1995	1994	1994	1994	1995	1994	1994
夏季	Yama	1980	1980	/	/	/	1980 1994	1994	1993	1994
	滑动 <i>t</i>	1979	1979	1979	1979 1993	1979 1994	1979 1993	1993	1992	1994
秋季	Yama	/	/	/	/	/	/	/	1994	1994
	滑动 <i>t</i>	/	/	/	/	/	/	/	1993	1993
冬季	Yama	/	/	/	/	/	/	/	1994	1994
	滑动 <i>t</i>	1998	/	/	/	/	1998	1998	1994	1994
年	Yama	1994	/	/	/	1994	1994	1994	1993	1994
	滑动 <i>t</i>	1993	1994	1994	1993	1993	1994	1993	1992	1993

注:“/”为无突变。

2.5 地温异常年份

气候异常是气候要素的距平达到一定数量级(如 1~3 倍均方差以上)的气候状况。世界气象组织对气候异常提出两种判别标准,一是距平超过标准差的 2 倍以上,二是它出现的概率为 25 年以上一遇。本文采用距平大于标准差的 2 倍作为异常,分析地温的异常特征。

对西安年、季平均地温的异常年份进行分析,得到以下结论(表 3):春季,除 40 cm 地温未出现异常年份外,其他各层平均地温以异常偏高年居多,主要出现在 2007 年;夏季,除 40 cm、80 cm 和 320 cm 地温未出现异常年份外,其他各层平均地温以异常偏低年居多,主要出现在 1983 年;秋季,除 40 cm、80 cm 和 160 cm 地温未出现异常年份外,其他各层平均地温异常偏高年主要出现在 1977 年,0 cm 和 10 cm 地温还在 1981 年和 1992 年出现异常偏低年;冬季除 320 cm 地温未出现异常年份外,其他各层平均地温异常偏高年主要出现在 2007 年,异常偏低年出现在 1968 年和 1977 年,异常年份最多。

就年平均地温而言,以异常偏高年份居多,浅层异常偏高年主要出现在 21 世纪 00 年代初中期,深层 80 cm 地温在 1993 年出现异常偏低年,160 cm 地温未出现异常年份,320 cm 地温在 2007 年出现异常偏高年。

2.6 地温对气温变化的响应

分析 1981—2011 年的年平均气温与同期 0~320 cm 年平均地温相关性,气温与地温呈明显正相关(相关系数 0.82~0.95),且通过 0.01 的显著性检验。其中,年平均气温与 0 cm 年平均地温相关系数达 0.95,年平均气温与浅层 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 和 40 cm 年平均地温相关系数为 0.91~0.94,与深层 80 cm、160 cm 和 320 cm 年平均地温相关系数为 0.82~0.88,说明气温对 0 cm 地温的影响作用最为明显,地温受气温升高的影响也呈升高趋势。此外随着深度的增加气温与地温的相关性也在降低。

3 结论

(1)近年来西安平均地温年内各月变化,春夏季平均地温随深度增加而降低,秋冬季平均地温随深度增加而升高。

(2)西安年、季平均地温除夏季各浅层呈降温趋势外,其余均为升温趋势,升幅为 0.11~0.56 ℃/10a。就季节而言,0~20 cm、160 cm 平均地温升温率为春季最大,40 cm、320 cm 为冬季最大,80 cm 为秋季最大,各层均为夏季最小。地面最高年平均温度呈略下降趋势,最低呈明显升高趋势;春季地面平均最高温度和冬季地面平均最低温度升温较明显。

表 3 西安不同深度年、季平均地温的异常年份

	春季	夏季	秋季	冬季	年
0 cm	2007(+)	1983(－)	1977(+)	1968(－)	2006(+)
		1984(－)	1981(－)	1977(－)	
			1992(－)	2007(+)	
5 cm	2007(+)	1980(－)	1977(+)	1968(－)	2006(+)
		1983(－)		1977(－)	
				2007(+)	
10 cm	2004(+)	1983(－)	1977(+)	1968(－)	2002(+)
	2007(+)		1981(－)	1977(－)	2006(+)
			1992(－)	2007(+)	
15 cm	2007(+)	1983(－)	1977(+)	1968(－)	2002(+)
				1977(－)	
				1999(+)	
				2007(+)	
20 cm	2007(+)	1983(－)	1977(+)	1968(－)	2002(+)
				1977(－)	
				2002(+)	
				2007(+)	
40 cm	/	/	/	1968(－)	1973(+)
				1977(－)	
				1999(+)	
				2007(+)	
80 cm	1988(－)	/	/	2007(+)	1993(－)
160 cm	1988(－)	1981(+)	/	2007(+)	/
	2007(+)				
320 cm	2007(+)	/	2010(+)	/	2007(+)

注：(＋)为异常偏高,(－)为异常偏低,/为无异常。

(3)西安年平均地温各层 20 世纪各年代均偏低,21 世纪以来呈现明显的升高趋势。季节平均地温的变化中,各层均以春季表现最为明显。

(4)近 51 年西安浅层 0~40 cm 年平均地温存在显著的 2.3 年、3.6~4.6 年的变化周期以及 32 年的长周期震荡。

(5)用滑动 t 检验法和 Yamamoto 法发现,浅层年、季平均地温夏季突变最早,发生在 20 世纪 70 年代末期,其余各层平均地温突变均发生在 20 世纪 90 年代,秋季浅层、80 cm 及冬季 5~15 cm 平均地温未发生突变。

(6)浅层异常偏高年份多发生在 21 世纪 00 年代初中期,异常偏低年份多发生在 20 世纪 60 年代

末、70 年代中后期及 80 年代初期,40 cm 春、夏、秋季平均地温未发生异常年份;深层以异常偏高年份居多,主要发生在 21 世纪 00 年代中后期,80 cm 夏、秋季,160 cm 秋季和 320 cm 夏、冬季平均地温未发生异常年份;冬季发生异常年份最多,春季、年平均地温以异常偏高年份居多,夏季以异常偏低年份居多。

(7)气温上升是影响西安地温上升的主要原因,气温对地温的影响作用随着深度的增加在减小。

参考文献

[1] 李崇银. 气候动力学引论[M]. 北京:气象出版社,1995.

[2] 周亚军,汤懋苍.用地温做年度降水预报的一种改进[J]. 高原气象,1989,8(3):228-240.

[3] 汤懋苍,张建.季平均 3.2 m 地温距平场在汛期预报中的应用[J].高原气象,1994,13(2):178-187.

[4] 汤懋苍,董文杰.利用气象地温资料反演大地热流[J].地球物理学报,1992,35(6):733-739.

[5] 杜军,胡军,杨勇,等.近 45 年拉萨深层地温变化趋势分析[J].应用气象学报,2008,19(1):96-99.

[6] 胡军,杜军,边多,等.西藏地温的年际和年代际变化[J].地理学报,2007,62(9):925-934.

[7] 陆晓波,徐海明.中国近 50 年地温的变化特征[J].南京气象学院学报,2006,29(5):706-712.

[8] 蒙桂云,喻彦.1961—2005 年西双版纳浅层地温对气候变化的响应[J].气象科技,2010,38(3):316-320.

[9] 马洪亮,马燕,薛福民.天山天池近 49 年气候变化特征[J].气象科技,2010,38(2):209-213.

[10] 刘志宏,郑崇伟,刘寒.近 50 年大连地区地面气温特征分析[J].科技创新导报,2012,(33):136-137.

[11] 沃晓棠,孙彦坤,玄明君,等.气候变暖背景下扎龙湿地气候变化特征[J].气象科技,2011,39(1):38-43.

[12] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社,1999.

[13] 周正朝,胡娜娜,周华.西安市气温和降水变化趋势分析[J].干旱区研究,2012,29(1):27-33.

[14] 陈超,周广胜.1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征[J].生态学报,2013,33(7):2043-2053.

[15] 刘小艳,宁海文,杜继稳,等.近 56 年来西安市气温突变与致灾效应[J].干旱区资源与环境,2009,23(11):94-98.

[16] 万红莲.近 60 年来西安市气温与降水量变化的关系研究[J].江西农业学报,2010,22(1):81-83.

[17] 车慧正,张小曳,李扬等.近 50 年来城市化对西安局地气候影响的研究[J].干旱区地理,2006,29(2):53-58.

[18] 徐小红,余兴.西安近 50 年气候变化初步分析[J].陕西气象,2005,(5):11-15.

Characteristics of Soil Temperature Variation in Xi'an in Recent 51 Years

Qu Jing¹ Wang Yu² Zhang Hong¹

(1 Xi'an Meteorological Service, Xi'an 710016; 2 Lintong Meteorological Service, Xi'an 710600)

Abstract: Based on monthly average soil temperature at the depths of 0 to 40 cm and the maximum and minimum 0-cm temperature from 1961 to 2011 and monthly average soil temperature at the depth of 80 cm, 160 cm, and 320 cm from 1981 to 2011, using the statistical diagnostic methods such as linear trend analysis, moving *t*-test and power spectrum, the variation trends and variation periods of average soil temperature, climate abrupt change, and anomalous years in Xi'an are studied. The results show that under the background of global warming, the annual and seasonal soil temperature at various levels, except in the near-surface layer, showed warming trends, with the heating rate being 0.11 to 0.56 °C per 10 years. At the levels of 0 to 20 cm and 160 cm, the average soil temperature rising rate reached its maximum in spring; at the level of 40 cm and 320 cm, the largest was in winter, and at 80 cm that is in autumn; the minimum was in summer for all layers. The annual maximum surface temperature decreased slightly, and the minimum increased obviously; there was periodic variation in the annual mean soil temperature in the layer of 0 to 40 cm with the periods being 2.3 years and 3.6 to 4.6 years, as well as a long-term oscillation of 32 years. There appeared abrupt changes in annual mean soil temperature in 1993 or 1994. There appeared anomalous high annual mean soil temperature at various levels in the early and middle 2000s, except at 160 cm (no anomalous years) and 80 cm (anomalously low). Anomalous high soil temperature appeared mainly in spring, and anomalous low mainly in summer. The correlation between soil temperature at each depth and air temperature was greater than 0.82, which shows that air temperature variation is the main factor leading to soil temperature variation.

Key words: soil temperature, air temperature, climate abrupt change, periods analysis