

马晓华,李双双,马青,等. 1981—2022 年陕西省最大冻土深度时空变化特征[J]. 陕西气象,2025(4):26–32.

文章编号:1006-4354(2025)04-0026-07

1981—2022 年陕西省最大冻土深度时空变化特征

马晓华¹,李双双¹,马青²,高星星¹,李明¹

(1. 陕西省气象台,西安 710014;2. 眉县气象局,陕西眉县 722300)

摘要:基于 1981—2022 年陕西省 93 个国家气象站历年逐月最大冻土深度资料及年平均温度资料,分析了陕西省最大冻土深度的时空分布特征,并利用相对标准差、趋势分析、低通滤波及相关分析等方法,探究气候变化对冻土的影响。结果表明:陕西冻土地貌分布广泛,最大冻土深度从南向北逐渐加深。在气候变暖背景下,陕西各站土壤冻结日推迟,冻土解冻日提前。最大冻土深度月际变化特征显著,从上一年 11 月到当年 2 月,最大冻土深度 50 cm 线南界南压,即最大冻土深度 50 cm 冻土范围由北向南增加,3 月冻土开始消融。陕西省年平均最大冻土深度呈波动下降的变化趋势,以 2 cm/10a 的速率减小。年最大冻土深度与年平均气温和年平均地温呈负相关,随着年平均温度的升高,最大冻土深度变浅。

关键词:冻土;最大冻土深度;气温;地温

中图分类号:P642.14

文献标识码:A

冻土是一种特殊的地质现象,它是由土壤中的水分在温度下降到 0℃或以下时凝结成冰而形成的。这种冻结的土壤层对气候变化非常敏感,而且冻土的退化和消融会对生态环境、经济建设和人类活动产生深远影响^[1]。

科学家们认为,过去数十年内冻土的变化主要是由全球变暖引起的^[2-3]。IPCC 第五次和第六次评估报告指出,随着地表平均温度的升高,大多数地区冻土层温度也在相应的升高,中国冻土整体呈退化趋势,且冻土的主要转型期发生在 20 世纪 80 年代中期^[4-5]。中国不同地区的最大冻土深度时空分布特征不完全一致,东部地区冻土随纬度带分布,青藏高原冻土随海拔高度呈垂直地带性分布,而西北地区冻土则介于两者之间^[6]。不同地区影响冻土的因素也不一致,李效珍认为气温、地形、地势是影响山西省大同市季节性冻土的主要因子^[7]。高思如认为西藏地区季节性冻土深度对年均气温的响应更显著^[8]。李万志对青海三

江源区冻土冻融特征研究表明季节性冻土在受气温变化影响的同时,还受地形、人类活动等其他因素影响^[9]。以往的研究区域主要在大西北的高原、高山及东北等冻土区^[10-13],鲜有对陕西省季节性冻土和冻土要素变化的研究。陕西境内山原起伏,地形复杂,高原约占 45%,山地约占 36%,冻土资源丰富,并且山地气候受城市热岛效应影响小,冻土能很好地响应气候变化。

最大冻结深度是季节冻土变化的主要指标,本文通过统计分析方法,探究陕西最大冻土冻结深度的时空变化特征,以期为陕西基础设施规划、生态系统影响评估、未来变化趋势预测提供科学依据。

1 资料及方法

由于陕西省部分站点冻土观测和温度观测资料缺测,且存在起始年份不同的问题,选取的资料包括 1981—2022 年陕西省 93 个国家气象站历年逐月最大冻土深度、年平均气温及地温(0 cm)

收稿日期:2024-06-05

作者简介:马晓华(1986—),女,汉族,陕西宝鸡人,硕士,高级工程师,主要从事短期天气预报及理论研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023G-25);陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-217)

数据。陕西自北向南横跨约 10 个纬度,北以“北山”、南以秦岭为界,将陕西分为陕北黄土高原、关中平原及陕南秦巴山地三大区域,涉及的范围和站点如图 1 所示。利用计算相对标准差、趋势分析、低通滤波及相关分析等方法^[14],分析气候变化对冻土带来的影响。

相对标准差(又称为离差系数或变差系数)能很好地反映全省范围各站最大冻土深度的相对变动程度^[15],计算公式为:

$$c_v = \frac{s}{x},$$

它是标准差与平均值得比值,式中 s 为该站最大冻土深度的标准差, x 为该站 1981—2022 年逐年最大冻土深度的平均值。

在统计最大土壤冻结深度出现的年代际频次及频率时,将各年代作为“组界”,如将 1981—1990 年作为一组,然后统计落入该组的最大土壤冻结深度出现的站数,即 1981—1990 年最大土壤冻结深度出现的频次,将频次除以总站数即得 1981—1990 年最大土壤冻结深度出现的频率。

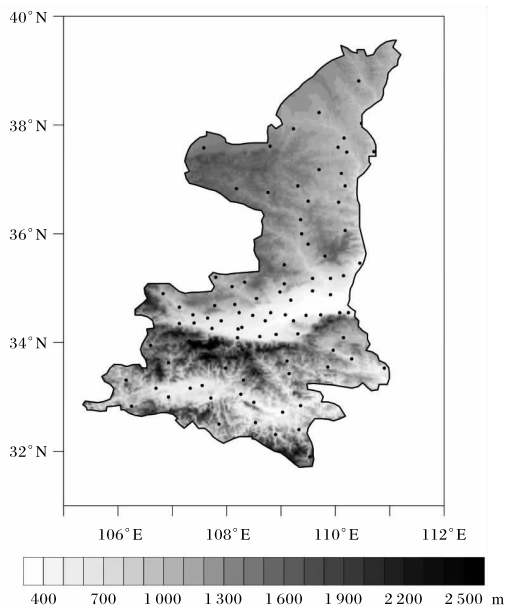


图 1 陕西省地形及国家气象站点分布
(审图号为 GS(2019)3333 号,下同)

2 最大冻土深度的空间分布特征

从 1981—2022 年陕西省逐年最大冻土深度统计各站土壤冻结的极端最大深度值(图 2),可

以看出陕西省各地均观测到冻土层出现,极端最大冻土深度自南向北逐渐加深,陕北地区在 60 cm 以上,极端最大冻土深度最大值出现在陕北榆林市吴堡县站(306 cm),发生在 2018 年 1 月 17 日。37°N 以北的榆林和延安地区冻土深度大多在 1 m 以上,关中北部地区冻土深度极值普遍在 30~60 cm,关中南地区及陕南地区冻土深度极值普遍在 0~20 cm。

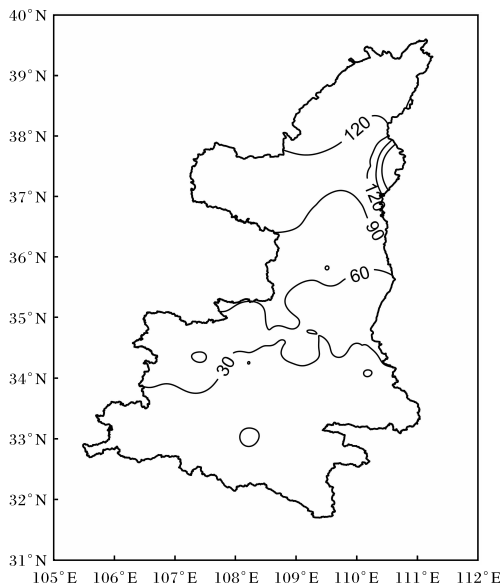


图 2 1981—2022 年陕西省土壤冻结的极端最大深度(单位:cm)

利用 1981—2022 年陕西省逐年最大冻土深度值统计各站土壤冻结的平均最大深度(图 3),平均最大冻土深度随纬度升高而递增,陕北地区土壤冻结的平均最大深度为 50~106 cm,最大值出现在最北部的榆林横山站,达 106 cm,关中地区土壤冻结的平均最大深度为 10~50 cm,而陕南地区土壤冻结的平均最大深度在 10 cm 以内,最小值出现在最南部的汉中站,仅 0.4 cm。土壤冻结的平均最大深度分布超 1 m 的范围位于榆林北部地区(图 3)。

陕西省各地区最大冻土深度极端值和平均值区域差异较大,极端最大冻土深度由南到北范围为 0~306 cm,平均最大深度范围为 0~106 cm。为了更好地反映全省范围各站最大冻土深度的相对变动程度,计算了每个站最大冻土深度的相对

标准差,如图4所示。关中北部地区、陕南的汉中、安康最大冻土深度相对标准差分别有0.5以上高值中心,即关中北部旬邑、陕南汉中及安康一带是最大土壤冻结深度变率最大的地区。陕北榆林及延安、关中宝鸡北部及南部山区、陕南商洛北部一带最大土壤冻结深度变化相对较小。

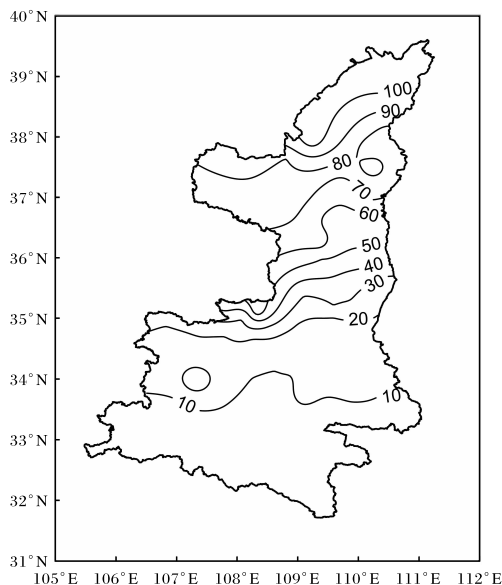


图3 1981—2022年陕西省土壤冻结的平均最大深度(单位:cm)

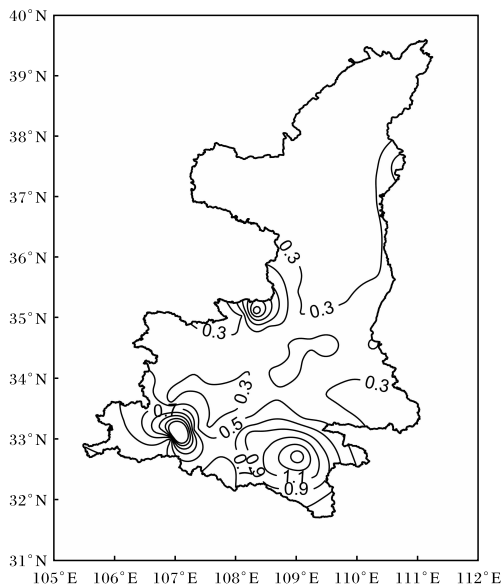


图4 陕西省最大土壤冻结深度的相对标准差

3 最大冻土深度的时间变化

3.1 逐月变化

陕西省土壤冻结出现在每年冬季,当地面温

度降到 0°C 以下时,冰冻从地表往下渗透。为便于研究,本文将上一年11月至当年3月作为一个冻土季。当陕西省进入冻土季时,此时西伯利亚高压系统增强,随着西风带波动的南移,引导更多的冷空气南下,影响我国北方地区,此时陕西地区冷空气活动变得频繁。由图5可知,11月陕西省西北部首先出现土壤冻结,最大冻土深度在20~60 cm,最大冻土深度50 cm位于陕北的榆林地区,关中、陕南普遍在10 cm以内。12月全省最大土壤冻结深度有所加深,土壤冻结面积明显增大,50 cm线南压到陕北延安以南地区,有4站最大冻土深度达1 m以上,其中吴堡最大为153 cm。1月陕北地区有11站最大冻土深度达1 m以上,吴堡站最大冻土深度为306 cm,50 cm线南压延伸到关中北部地区。随着气温的不断下降,2月土壤冻结深度急剧增加,陕北地区最大冻土深度达1 m以上的有12站,最大冻土深度榆林站144 cm,50 cm线与1月类似,伸展到关中北部地区,此时,随着冷空气的频繁侵入,温度不断下降,冻土深度也在进一步加深。3月陕北地区有6站最大冻土深度达1 m以上,府谷站最大冻土深度136 cm,50 cm线南界与2月相比向北收缩,整个关中、陕南地区最大冻土深度明显减小,3月陕西省大部分地区的土壤冻结已经开始逐步融化。

由于陕西冬季在一年四季中获得热量最少,加之受蒙古高压控制,陕北和关中地区天气晴朗而寒冷,最大冻土深度及冻结面积由11月开始到1月逐渐增加,2月稳定维持,随着温度上升,3月最大冻土深度开始减小。陕南地区受秦岭山地屏障的作用,气候温和而湿润,最大冻土深度基本维持在10 cm以内,变化不大,而且从月最大冻土深度出现的日期来看,土壤开始冻结的日期正在推迟,而冻土消融日期有提早的趋势。

3.2 年代际变化

由1981—2022年陕西省最大土壤冻结深度出现的年代际频次及频率(表1)可知,最大冻土深度出现的频次和频率随年代际变化较明显,1981—2000年最大冻土深度出现的频次和频率较高,2001—2020有所下降。最大冻土深度出现的频率从20世纪80年代的14.0%依次增加为

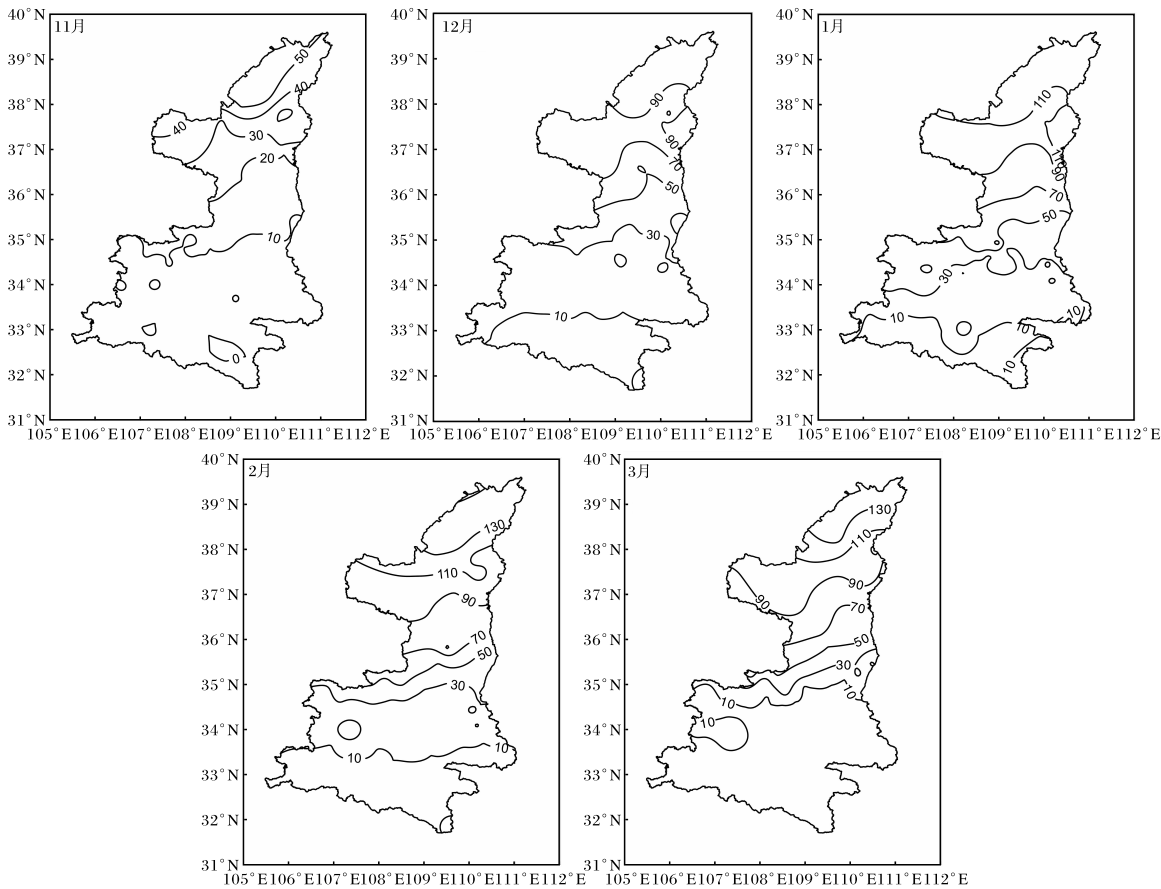


图 5 1981—2022 年陕西省月最大土壤冻结深度空间分布

表 1 1981—2020 陕西省最大土壤冻结深度出现的频次及频率

年代	1981—1990	1991—2000	2001—2010	2011—2020
频次/次	13	28	27	25
频率/%	14.0	30.0	29.0	27.0

30.0%、29.0%。前 30 年中最大冻土深度的出现频率最大,有 73%的站最大冻土深度出现在 2010 年前,只有 27%的站历史上的最大冻土深度出现在 2011—2020 年。各年代出现最大冻土深度的站数随年代的增加先增加后减少。2021—2022 仅华州站出现了四十二年以来的最大土壤冻结深度极值,为 43 cm,因站数较少,在表中不做统计。

1981—2022 年陕西省年平均最大冻土深度为 28 cm,全省年平均最大冻土深度最大值为 37 cm (2011 年),最大冻土深度最小值为 16 cm (2022 年)。近 42 a 陕西省逐年平均最大冻土深度呈显著减少趋势,年平均最大冻土深度减小速率约为 2 cm/10 a,通过 0.01 的显著性检验,变化趋势明显。1981—2022 年平均最大冻土深度呈波动下

降的变化,年代际变化特征较明显。相对于多年平均值而言,20 世纪 80—90 年代属偏深期,21 世纪以来属偏浅期(图 6)。

4 最大冻土深度变化的影响因素

决定冻土深度的直接影响因素有气温、地温、土壤水分、纬度、海拔高度、地形等,但不同地区影响冻土的主要因素不一致^[16-17]。气象因素中,冻土深度的深浅受温度、降水量等因素的影响,本文选用年平均气温、地温来分析陕西冻土最大冻结深度对气候的响应。

4.1 最大冻土深度与气温的关系

近 40 年来陕西省年平均气温呈升高趋势,气候倾向率为 0.37 ℃/10 a,通过 0.01 的显著性检验(图 7a)。陕北榆林地区增温最为明显(图 7b),

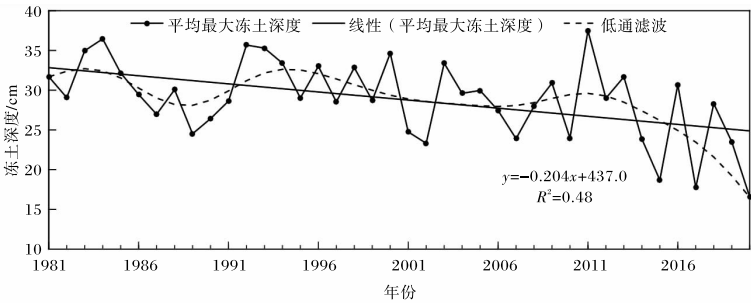


图 6 1981—2022 年陕西省逐年平均最大土壤冻结深度年际变化、线性趋势及 10 年低通滤波

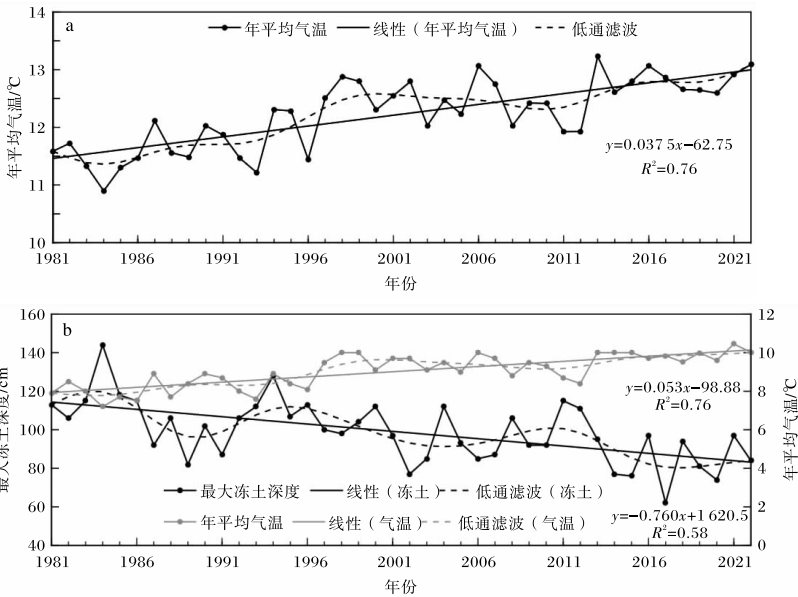


图 7 1981—2022 年陕西省(a)和榆林站(b)年平均气温和最大冻土深度年际变化图、线性趋势及 10 年低通滤波

从 80 年代初的年平均最低 7.2℃ 逐渐增加到近十年(2012—2022 年)的年均 10℃ 左右,40 年间增幅 2.8℃,气候倾向率为 0.53℃/10 a,通过 0.01 的显著性检验,而最大土壤冻结深度却逐渐变浅,气候倾向率为 -7.6 cm/10 a,通过 0.01 的显著性检验,两者变化趋势相反。陕西省各站年平均气温和最大冻土深度相关系数分布(图 8)表明,全省大部分地区年平均气温与年最大土壤冻结深度呈负相关,即年平均气温越高,年最大土壤冻结深度越浅,榆林北部、渭南东部、咸阳中部、宝鸡西部地区年平均气温与年最大土壤冻结深度相关性最为显著(相关系数绝对值大于 0.297,通过 0.05 显著性水平检验)。

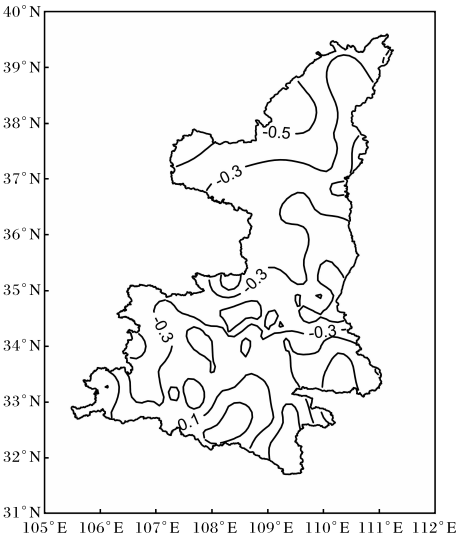


图 8 陕西省年平均气温与年最大土壤冻结深度相关系数

4.2 最大冻土深度与地温的关系

陕西省 1981—2022 年平均 0 cm 地温如图 9a 所示,全省平均地温总体呈上升趋势,气候倾向率为 $0.46^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,通过 0.01 的显著性检验。40 年间榆林地区增温最为明显(图 9b),从 1984 年年平均地温为 9.2°C ,到 2006 年达 12.5°C ,之后 10 a 一直维持高值 $11.0\sim 12.6^{\circ}\text{C}$ 。年平均地温变化呈升高趋势,气候倾向率为 $0.53^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,通过 0.01 的显著性检验,最大土壤冻结深度呈变浅

趋势,气候倾向率为 $-7.6\text{ cm}/10\text{ a}$,通过 0.01 的显著性检验,两者变化趋势相反。与气温类似,全省大部分地区年平均地温与年最大冻土深度呈负相关(图 10b),即年平均地温越低,年最大冻土深度越深,榆林、延安北部及东南部、铜川南部、渭南大部、咸阳大部、宝鸡西部及北部、西安北部、汉中西北部局地年平均地温与年最大冻土深度相关性最为显著(相关系数绝对值大于 0.297,通过 0.05 显著性水平检验)。

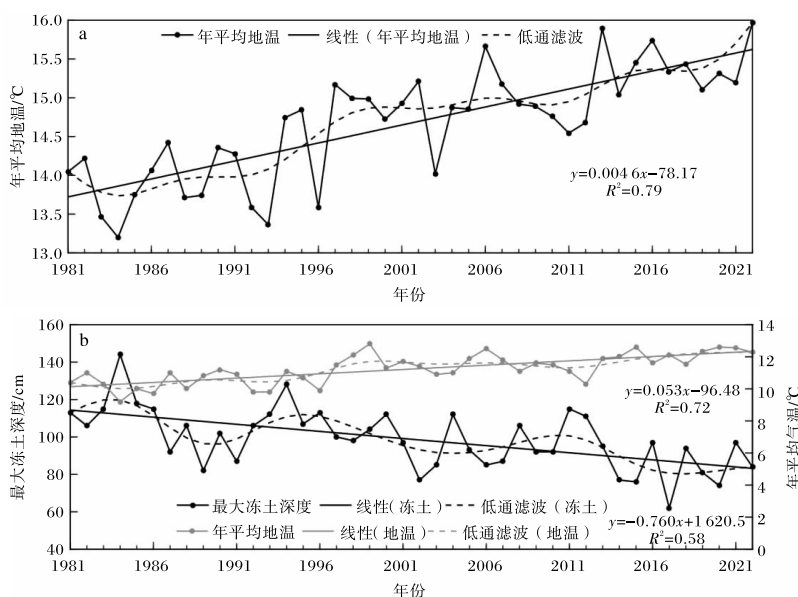


图 9 1981—2022 年陕西省(a)和榆林站(b)年平均地温和最大冻土深度
年际变化、线性趋势及 10 年低通滤波

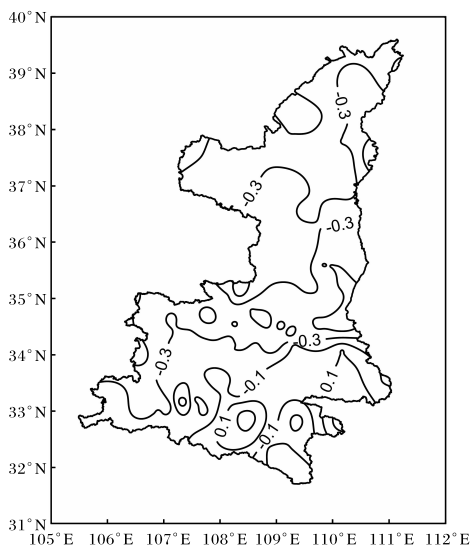


图 10 陕西省年平均地温与年最大土壤
冻结深度相关系数

近 40 年来,陕西省最大冻土深度空间分布和年代际变化显著,尤其是 20 世纪 90 年代之后;同时这一变化与温度、地温变化相关性较高。冻土深度的南线北抬与最大冻土深度的减小反映了陕西省冬季变暖的事实。季节性冻土在陕西中北部一些地区解冻和退化,进一步说明了冻土对气候变化响应的敏感性。

5 结论

本文分析了 1981—2022 年陕西省 93 个国家气象站最大冻土深度的时空分布特征,并分析了陕西省冻土对气候变化的响应情况,结果如下。

(1)陕西冻土地貌分布广泛,全省大部分台站均有观测到冻土,最大冻土深度自南向北逐渐增加。随着气候变暖,全省各站土壤冻结日推迟,冻

土解冻日提早。

(2)陕西省最大冻土深度月际变化特征显著。11月从西北部地区率先开始冻结;12月最大冻土深度加深、冻结面积显著增加;1月份冻土深度50 cm线南压;2月份最大冻土深度显著增加,冻土深度50 cm线与1月类似;3月份冻土开始逐渐消融,冻土深度50 cm线南界较2月向北收缩,关中、陕南地区最大冻土深度明显减小。

(3)陕西省年平均最大冻土深度呈波动下降的趋势,年平均最大冻土深度减小速率约为2 cm/10 a,年代际变化特征较明显,相对于多年平均值而言,20世纪80—90年代属偏深期,21世纪以来属偏浅期。

(4)陕西省大部分地区年平均气温、年平均地温与年最大冻土深度呈负相关,即年平均温度越高,最大冻土深度越浅,年平均温度越低,最大冻土深度越深。

冻土的冻结过程是一个相当复杂的现象,这个过程受到多种因素的影响,本文仅针对温度开展了一些关于陕西省季节性冻土的研究,未来还需从人类活动、下垫面变化等其它方面开展研究。同时,目前陕西特别是黄土高原地区冻土站点稀疏,现有资料不能很好反应陕西季节性冻土变化特征,后期还需加密时空观测,使分析结果更加精准,更好地了解陕西季节性冻土的变化情况,以便为陕西的环境保护和可持续发展提供科学依据。

参考文献:

- [1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [2] ANISIMOV O A, NELSON F E, Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change [J]. Global and Planetary Change, 1996,14(1):59-72.
- [3] LAWRENCE D M, SLATER A G. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century[J]. Geophysical Research Letters, 2005,32(24):230-250.
- [4] 沈永平,王国亚. IPCC 第一次工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.
- [5] 牟翠翠,张国飞,效存德,等. IPCC 第六次评估报告解读:多年冻土变化及其影响[J]. 冰川冻土,2023,45(2):306-317.
- [6] 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[J]. 大气科学,2008,32(3):432-443.
- [7] 李效珍,何正梅,韩登云,等. 大同市季节性冻土的分布与变化特征[J]. 中国农业气象,2011,32(增刊):59-62.
- [8] 高思如,曾文钊,吴青柏,等. 1990—2014年西藏季节冻土最大冻结深度的时空变化[J]. 冰川冻土,2018,40(2):223-230.
- [9] 李万志,马海玲,庞昕玮,等. 气候变暖背景下青海三江源区季节冻土冻融特征研究[J]. 冰川冻土,2023,45(4):1233-1241.
- [10] 王绍令,赵秀锋,郭东信,等. 青藏高原冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土,1996,18(增刊):157-165.
- [11] 李林,朱西德,汪青春,等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示[J]. 冰川冻土,2005,27(3):320-328.
- [12] 晁华,徐红,王当,等. 近50年来辽宁省冻土的时空变化特征[J]. 气象科技,2017,45(1):115-120.
- [13] 吴琳,单瑞娟,王志刚. 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.
- [14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(2版)[M]. 北京:气象出版社,2007:43-49.
- [15] 刘小宁,李庆祥. 我国最大冻土深度变化及初步解释[J]. 应用气象学报,2003,14(3):299-307.
- [16] 冯同飞,杨涛,王晓燕,等. 气候变化对黄河源区水文情势的影响[J]. 水电能源科学,2016,34(7):11-15.
- [17] 杨小利,王劲松. 西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J]. 土壤通报,2008,39(2):238-243.