

兰州地区 500 余年来旱涝变化规律分析

赵 玉¹, 穆兴民^{1,2}, 蒋 冲³

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要:旱涝是影响兰州及其周边地区的频发性自然灾害。利用兰州地区 1470—2008 年间旱涝等级序列, 借助累积距平法、滑动 T 检验和小波分析等方法, 研究了 500 余年来兰州地区旱涝变化分布特征与发展规律。结果表明: 兰州地区旱涝演变存在 1580—1721 年、1757—1789 年、1891—1930 年的 3 个显著干旱阶段和 1533—1580、1721—1757 年、1789—1891、1953—1961 年的 4 个显著洪涝阶段, 且旱多于涝; 兰州地区旱涝序列存在年代际尺度和百年尺度的突变; 不同时间尺度上正负相位交替出现, 波动明显, 兰州地区旱涝变化的第一、二、三主周期分别为 108 a、39 a 和 13 a; 1951—2008 年, 由于气温升高、降水减少, 兰州地区旱涝气候变化表现为干旱化趋势。

关键词:气候变化; 干旱; 洪涝; 周期; 兰州地区

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)01-0132-05

Analysis on the Variation of Drought & Flood Grades from 1470 to 2008 in Lanzhou Area

ZHAO Yu¹, MU Xing-min^{1,2}, JIANG Chong³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Drought and flood are the main natural disasters surrounding Lanzhou area. We described the variation characteristics of drought & flood grades of Lanzhou area from 1470 to 2008 by performing the manners of accumulative departure analysis, running T -test and Morlet wavelet analysis. Results showed that the drought & flood severity has 3 obvious drought stages and 4 flood stages nearly the 539 years. The frequency of drought is larger than flood. There are two abrupt changes on 100-year scale and 14 abrupt changes on decadal scale in Lanzhou area. Positive and negative phrase appear alternately during different time scales. The major cycles of drought & flood grades transformation are 108 years, 39 years and 13 years, respectively. With the rising temperatures and decreasing precipitation, the drought & flood had been showing the dry trend from 1951 to 2008.

Key words: climate change; drought; flood; period; Lanzhou area

随着全球变暖及极端灾害天气频发, 气候变化对人类社会的可能影响受到了人们的空前关注。气候变暖加速了全球的水循环变化, 导致降水分布的变化, 使得一些地方变得湿润, 而另一些地方变得干旱, 同时也增加了极端水事件(干旱、洪涝)出现的可能性^[1]。

旱涝自然灾害是世界各国最主要的气象灾害, 特

别是在我国西北地区旱灾尤为频发。尽管我国大部分地区降雨量观测始于新中国成立初期, 但由于有丰富的旱涝事件变化的历史文档、书籍和记录, 无论是在数量上还是在质量上都是非常高的, 甚至可能是世界唯一的^[2], 从而使历史旱涝气候变化研究成为可能。中国国家气象局利用史志资料建立了我国 1470—1979 年的旱涝等级序列, 并出版《中国近五百

收稿日期: 2013-05-28

修回日期: 2013-07-07

资助项目: 中国科学院重大项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03)

作者简介: 赵玉(1987—), 女, 甘肃金昌人, 在读研究生, 研究方向: 水土保持与环境效应。E-mail: zhaoyu737@163.com

通信作者: 穆兴民(1961—), 男, 陕西华阴人, 博士, 研究员, 主要研究方向为水土保持、生态水文。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

年旱涝分布图集》^[3],随后一些学者先后两次将资料续补到 2000 年^[4-5]。王绍武等用经验正交函数法对我国降水量与旱涝等级资料进行了对比分析,认为旱涝等级资料是可靠的^[5]。我国基于历史旱涝序列进行旱涝变化规律的研究已有比较成熟的理论和方法。朱亚芬^[6]指出,自 1470 年以来我国北方旱涝存在明显的阶段性和区域性。龚志强等^[7]认为,重大干湿转折时期对应突变点比较集中。

兰州地区地处黄土高原西北部,是青藏高原、黄土高原和西北荒漠区的交接地带,同时也是东部季风区、西部干旱半干旱区和青藏高寒区三大自然区的过渡地带,是气候变化敏感区域^[8-9]。目前关于兰州地区历史旱涝气候演变的研究较少。姚辉等^[10]对甘肃省 1470—1987 年间历史旱涝的时空变化和年际变化特征做了深入的统计分析和研究,但是由于时间原因研究仅仅到 1987 年,近 20 多年由于经济的飞速发展对气候产生了很大影响,旱涝周期、趋势、变点特征可能会有新的变化,值得进一步的研究;同时有关学者^[10]采用功率谱方法对干旱频率作周期分析,但功率谱方法对数据的反应不敏感,可能出现一些伪周期,同时该方法不便于外延预报。霍云需等^[11]研究了兰州地区 1470—2009 年旱涝灾害的发生规律、周期性、阶段性和成因,但是未揭示旱涝演变的突变特征,同时在周期分析中只指出旱涝存在的主要周期,并未对不同时间尺度上的频谱作进一步的分析研究。鉴于此,本文在对兰州地区 1470—2008 旱涝等级序列进行正态性检验的基础上,分析兰州地区 500 余年来旱涝变化的阶段性、突变性、周期性等特征,并对兰州地区旱涝演变趋势进行初步预测。在历史旱涝特征分析的基础上,阐述 1951 年以来兰州地区旱涝演变同气候变化的关系,以期认识和了解兰州地区历史旱涝变化的特征和规律,为抗旱减灾提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

兰州地区 1470—2008 年旱涝等级资料来源于《中国近五百年旱涝分布图集》^[3]和《中国西北地区近五百年旱涝分布图集》^[12]。在旱涝等级中,1 级、2 级、3 级、4 级和 5 级分别对应涝、偏涝、正常、偏旱和旱。

1.2 分析方法

1.2.1 累积距平法 利用累积距平曲线可以明显地分辨时间序列的阶段性。累积距平法计算公式如下:

$$CA_j = \sum_{i=1}^j (X_i - \bar{X}) \quad (j \leq n, n \text{ 为序列长度}) \quad (1)$$

式中:CA_j——第 1 年至第 j 年旱涝等级值的累积距

平; \bar{X} ——整个序列的平均旱涝等级。CA_j 的正、负极值点可能出现突变,对每一个序列只提取信号最强的 1~3 个极值点,且不从首尾各 4 a 处提取^[13]。

1.2.2 小波分析 小波分析是进行气象要素时间序列周期分析的重要方法,它克服了傅里叶变换在单位分辨率上的缺陷,具有多分辨率分析的特点,在时、频域上都有表征信号局部信息的能力。通过小波系数可以反映旱涝等级序列在不同时间尺度下的变化特征。正的小波系数对应旱灾较严重时期,负的小波系数对应涝灾较严重时期;小波能越大,表明该时间尺度变化越明显^[14]。

旱涝等级函数 $f(t)$ 的连续小波变换表示为:

$$W_{f\varphi}(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi(s, \tau) dt \quad (2)$$

其中 $W_{f, \varphi}$ 称为小波变换系数。其小波能定义为 $|W_{f, \varphi}|^2$,反映了信号振幅能量的大小。

将小波系数的平方值在 τ 域上积分,就可得到小波方差,即:

$$\text{Var}(s, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(s, \tau)|^2 d\tau \quad (3)$$

1.2.3 滑动 T 检验 滑动 T 检验法可以简单直观的确定气候序列的突变特征^[15]。其原理如下:

将旱涝序列所代表的随机过程 $\{Y_t\}$ 划分成两个子旱涝序列 $\{Y_{1t}\}$ 和 $\{Y_{2t}\}$,令 μ_i , s_i^2 和 n_i 分别代表各旱涝等级 y_i 的平均值、方差和样本长度 ($i=1, 2$), n_i 可人为给定。

假设 $H_0: \mu_1 = \mu_2$, 定义统计量:

$$T_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (4)$$

其中 $S_p^2 = [(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2] / (n_1 + n_2 - 2)$ 为两个子旱涝序列的联合方差。由于 T_0 服从 $t(n_1 + n_2 - 2)$ 分布,当给定信度 α 时,可得临界值 t_α ,计算实际的 T_0 统计量,在 H_0 假设下,若有 $|T_0| \geq t_\alpha$,即拒绝原假设,表明两段子样旱涝序列的均值有显著性差异。在给定的旱涝序列中,只要以某一给定时刻 t_c 为分点,不断滑动 t_c 的时间坐标,即不断变动 n_i ,就可连续地运用 t 检验,判定原假设 H_0 ,从中寻找差异最为显著(即在给定的 α 下,取最大的 T_0 ,且满足 $(|T_0| \geq t_\alpha)$ 的分界点,作为突变点。

2 结果与分析

2.1 旱涝时空分布特征

兰州地区近 539 a 旱涝等级分布特征如表 1 所示。近 539 a 来,涝和偏涝合计频率为 16.4%,平均 6 a 一遇;旱和偏旱合计频率为 29.4%,平均 3 a 一遇,可见早年次数多于涝年。为明确兰州地区旱涝等

级的分布密度曲线,计算序列的偏度系数 g_1 和峰度系数 g_2 。偏度系数表征分布形态与平均值偏离的程度,作为分布不对称的测度;峰度系数表征分布图形顶峰的凸平度^[16]。由偏度系数 $g_1=0.299>0$,峰度系数 $g_2=0.130>0$ 知,旱涝等级序的分布图形顶峰向左偏,坡度稍凸。为进一步判定兰州地区旱涝等级序列是否遵从正态分布或近似正态分布,做分布的统计检验。提出原假设 H_0 :兰州地区旱涝等级序列遵从正态分布。在给定显著性水平 $\alpha=0.05$,查正态分布表得知 $\mu_\alpha=1.96$ 。由于 $g_1=0.299<1.96$,且 $g_2=0.130<1.96$,因此接受原假设,即在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,兰州地区旱涝等级序列近似遵从正态分布。

表 1 兰州地区近 539 a 旱涝等级描述性特征分布表

		频次	频率/%	描述性特征	
旱 涝 等 级	涝	10	1.9	方差	0.776
	偏涝	78	14.5	标准差	0.881
	正常	291	54.0	偏度系数	0.299
	偏旱	105	19.5	偏度系数标准误差	0.105
	旱	55	10.2	峰度系数	0.130

2.2 旱涝演变过程

2.2.1 旱涝变化的阶段性 旱涝在历史上是交替出现的,但旱涝出现的频率并不均匀。兰州地区旱涝变化累积距平曲线如图 1 所示。根据曲线变化过程,累积距平曲线上升代表以旱为主的阶段,累积距平曲线下降代表以涝为主的阶段。

兰州地区 1470—2008 年的旱涝等级序列可以分为 3 个显著干旱阶段:1580—1721 年、1757—1789 年和 1891—1930 年,各干旱阶段内旱和偏旱出现的合计频率分别为 35.2%,48.5%和 32.5%;4 个显著洪涝阶段:1533—1580 年、1721—1757 年、1789—1891 年和 1953—1961 年,各洪涝阶段内涝和偏涝出现的合计频率分别为 18.8%,29.7%,22.3%和37.5%。

表 2 兰州地区旱涝等级序列变化的突变年份

$n_1=n_2=10$	$n_1=n_2=20$	$n_1=n_2=30$	$n_1=n_2=40$	$n_1=n_2=50$	$n_1=n_2=100$
1480					
1511	1514				
1551	1543*	1534*	1542*	1531*	
1561		1564			
1581*	1581*	1581*	1581*	1581*	1581
1591			1645		
1644	1647	1647	1682		
1722*	1721*	1722*	1722*	1722	
1732		1758*	1758		
1756	1790	1803	1791		1790
1831	1831	1833	1833	1804	
1842*	1872				
1870	1890	1900	1891	1892	
1931	1932	1932	1931		

注: * 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著水平。

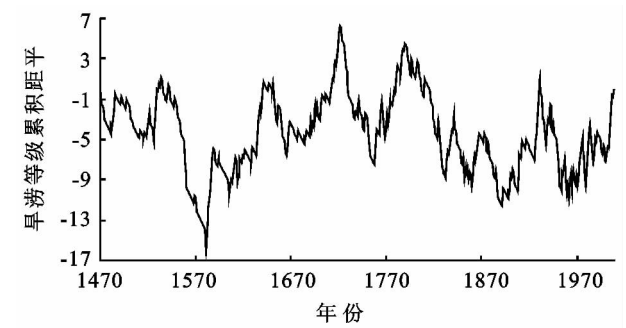


图 1 兰州地区近 539 a 旱涝等级距平累积曲线

2.2.2 旱涝变化的突变性 为表征兰州地区旱涝等级序列的突变特征,采用滑动 T 检验法对 1470—2008 年旱涝等级序列进行分析。分别取滑动步长为 10,20,30,40,50,100 a,以 $\alpha=0.05$ 作为判别突变的显著性水平,将检验出的突变年份列于表 2 中。为方便直观分析,文中取 $n_1=n_2=100$ a ($t_{0.05}=\pm 1.983\ 971$), $n_1=n_2=50$ a ($t_{0.05}=\pm 2.008\ 559$), $n_1=n_2=10$ a ($t_{0.05}=\pm 2.228\ 139$) 的旱涝等级序列滑动 T 检验的结果置于图 2 中。由表 2 和图 2 可知:兰州地区旱涝等级存在百年尺度的突变,超过 5%信度的点只有两个,其中最大负 T 值出现在 1581 年,为第一次世纪突变;最大正 T 值出现在 1790 年,为第二次世纪突变。根据这两个突变点可以将兰州地区的旱涝演变划分成 3 个大的世纪气候阶段 1470—1580 年、1581—1790 年和 1791—2000 年,其平均旱涝等级分别为:3.10,3.31,3.17。把每个旱涝期的平均旱涝等级小于 3.13 定为涝期,3.13~3.28 定为正常期,大于 3.28 定为旱期。则第一次世纪突变由涝阶段进入旱阶段,第二次世纪突变由旱阶段进入正常阶段。

兰州地区旱涝等级也存在年代际尺度的突变。1581 年附近的旱涝突变在 10~50 a 尺度上均达到 0.01 信度。1722 年附近的旱涝突变在 10~50 a 尺度上均有反映,除 50 a 尺度上达 0.05 信度外,其余时间尺度上均达 0.01 信度。

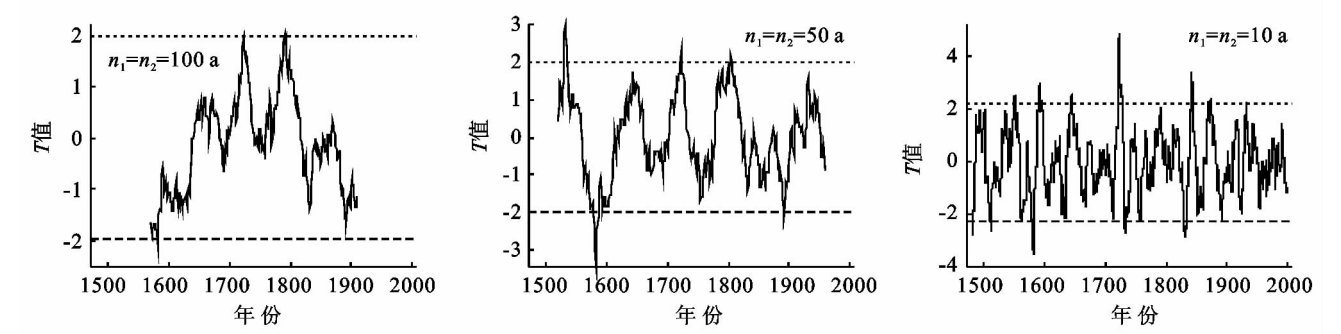


图 2 兰州地区旱涝等级滑动 T 检验值(虚线代表 5% 的信度线)

2.2.3 旱涝变化的周期性 图 3A 为小波变换系数实部时频分布图。当小波系数为正时,代表早期,在图中用实线绘出;当小波系数为负时,代表涝期,在图中用虚线绘出;零线值表示旱涝转折。由图 3A 可知,旱涝演变存在着多时间尺度特征,总体来说,在旱涝演变过程中存在着 85~115 a、25~55 a 以及 3~13 a 共 3 类尺度的周期变化规律。其中在 85~115 a 尺度上出现了旱—涝交替的准 5 次震荡;在 25~55 a 时间尺度上存在准 15 次震荡;3~13 a 尺度的周期变化在

整个分析时段表现出稳定的旱涝交替特征。为表征不同周期的震荡能量,做小波变换系数模平方时频分布图 3B。3~15 a 时间尺度的能量最强、周期最显著,几乎占据整个时域,可见 3~15 a 时间尺度是影响兰州地区旱涝变化的主要时间尺度。25~55 a 和 85~115 a 时间尺度能量也较强,但其周期变化具有明显的局部性。由上述分析知,兰州地区旱涝变化在整个时域内受 3~11 a、25~55 a 和 85~115 a 共 3 个时间尺度波动变化的影响。

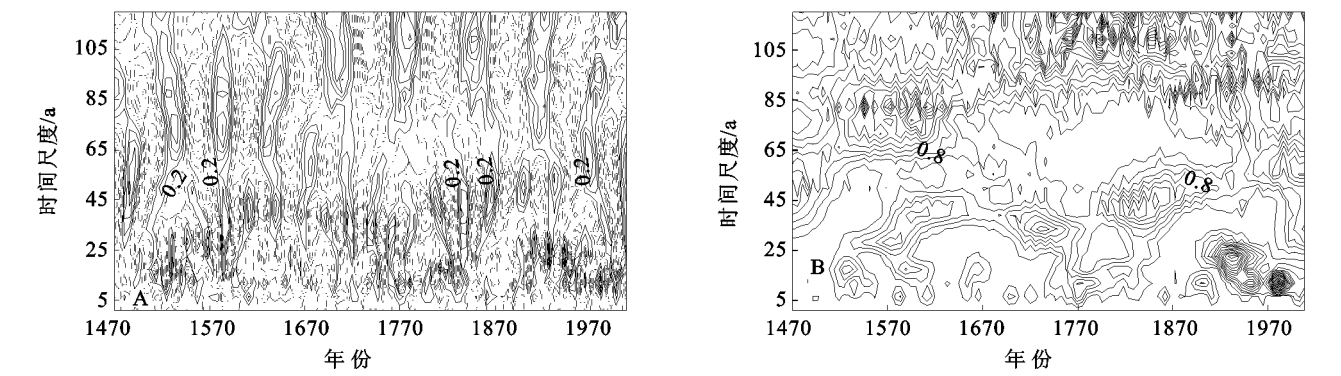


图 3 兰州地区小波分析的系数分布

将不同时间尺度下的小波系数代入公式(3)可得到旱涝变化的小波方差,以小波方差为纵坐标,时间尺度为横坐标,绘制小波方差图(图 4)。小波方差反映旱涝序列波动能量随时间尺度的分布情况,可用来确定旱涝演化过程中存在的主周期。图 4 中存在 3 个较为明显的峰值,它们依次对应着 13 a、39 a 和 108 a 的时间尺度。其中,最大峰值对应着 108 a 的时间尺度,说明 108 a 左右的周期振荡最强,为旱涝序列演变的第一主周期;第二、第三峰值分别对应着 39 a 和 13 a 的时间尺度,它们依次为近 500 余年来旱涝演变的第二、第三主周期。

图 5 描述了兰州地区 13 a、39 a 及 108 a 周期的小波系数实部时间序列对比图。从图中可以看出,13 a 周期的小波系数实部曲线在整个时间阶段里出现规则的周期分布;39 a 周期的小波系数实部曲线表

现为全域性,且存在 3 个振幅相对较大的区域,分别在 1612 年、1715 年和 1837 年左右;108 a 周期的小波系数实部曲线并未表现出全域性,从 1645 年开始呈现规则的周期分布,1951 年后,108 a 周期小波系数的振幅变大,可以认为 1951—2058 年兰州地区旱涝灾害加剧,其中 1951—2004 年兰州地区以偏旱为主,2004—2058 年以偏涝为主。

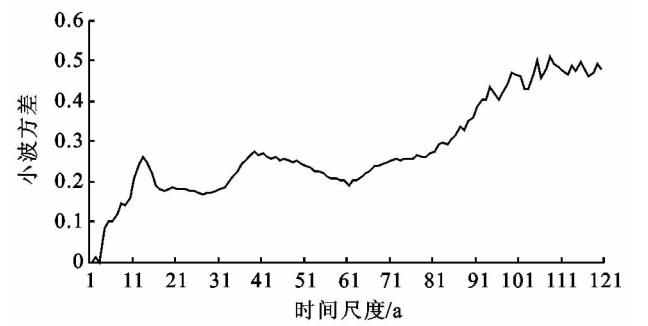


图 4 兰州地区 Morlet 小波变换方差

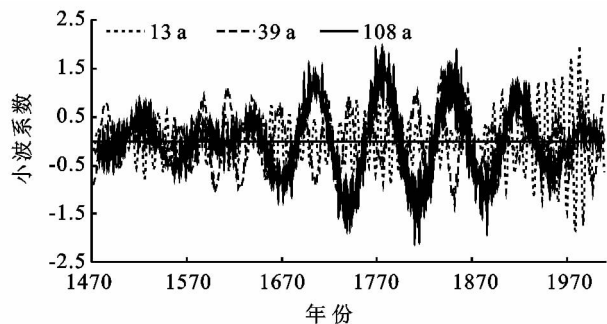


图5 兰州地区 13 a、39 a 及 108 a 周期的小波系数时间序列对比

3 讨论

3.1 1951—2008 年兰州地区旱涝演变与气候变化的关系

为确定 20 世纪 50 年代以来旱涝演化特征受气候变暖影响的发展趋势,本文采用兰州地区 1951—2008 年旱涝资料同气候资料进行对比分析。其中兰州地区 1951—2008 年的年均温和年降水量资料来源于中国气象数据科学共享服务网。对兰州地区 1951—2008 年旱涝等级进行 Mann-Kendall 趋势检验分析知, M-K 检验的 Z 值为 1.038, 未通过 0.05 水平显著性检验, 说明兰州地区 1951—2008 年间旱涝气候变化表现为干旱化趋势, 但不显著。

兰州地区 1951—2008 年年平均气温和降水距平如图 6 所示。1951—2008 年, 兰州地区平均温度呈上升趋势, 每 10 a 上升 0.393°C , 高于全球平均气温变化率(每 10 a 上升 $(0.13 \pm 0.03)^{\circ}\text{C}$), 同时高于同期西北地区气温变化率(每 10 a 约上升 0.32°C)^[17]。借助滑动 T 检验分析兰州地区 1951—2008 年气温知, 兰州地区年平均气温在 1986 年发生突变, 且之后的气温呈持续上升趋势。

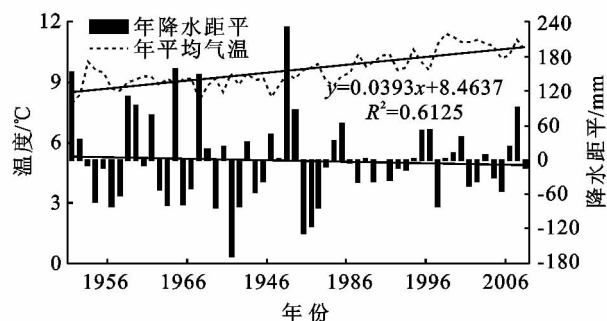


图6 1951—2008 年兰州地区年平均气温和降水距平

1951—2008 年, 兰州地区降水呈下降趋势, 每 10 a 下降 4.3 mm。其中年降水最大值出现在 1978 年, 为 546.7 mm; 年降水最小值出现在 1971 年, 为 149.5 mm。

兰州地区旱涝特征自 1951 年以来表现为干旱化趋势, 是由于气温升高、降水减少的缘故。

3.2 兰州地区旱涝演变同太阳活动的关系

气候变化直接影响着旱涝的发生频率, 而太阳活动则直接影响植被、水文等。因此, 太阳活动与旱涝演化之间存在间接关联^[18]。王涌泉^[19]探讨了黄河流域大旱、大涝与太阳黑子活动强弱的关系, 得出“谷峰大水”、“强湿弱干”的结论。王云璋等^[20]借助瓦尔德迈尔(Waldmeier)整理的苏黎士天文台 1610—1960 年的太阳黑子观测结果和中国科学院紫金山天文台太阳室提供的太阳黑子相对数, 点绘了 1700—1890 年的年平均黑子数演变曲线, 指出太阳黑子变化的周期性十分明显, 其周期的平均长度约为 11.2 a(短到 7.3 a, 长达 13.3 a), 太阳活动与黄河流域旱涝的关系主要表现为延时效应, 并以延后 7~8 a 的关系最显著。兰州地区旱涝演变的 13 a、39 a 和 108 a 主周期基本上为太阳活动 11 a 周期的整数倍。可见兰州地区旱涝演变的周期受太阳黑子活动的影响。

4 结论

(1) 兰州地区早年多于涝年。据旱涝等级发生频率, 兰州地区近 531 a 来涝和偏涝占 16.3%, 旱和偏旱占 29.7%。涝和偏涝的出现频次远小于旱和偏旱的出现频次。

(2) 兰州地区的旱涝演变存在 1580—1721 年、1757—1789 年、1891—1930 年的 3 个干旱阶段和 1533—1580 年、1721—1757 年、1789—1891 年、1953—1961 年的 4 个洪涝阶段。由滑动 T 检验知, 兰州地区旱涝等级序列存在着百年尺度和年代际尺度的旱涝转换突变。

(3) 兰州地区旱涝也存在周期性特征: 主周期分别为 108 a、39 a 和 13 a。从周期性的时间变化看, 3~15 a 周期在绝大部分时段都比较明显, 而 85~115 a 周期随时间变化明显。对兰州地区旱涝气候变化进行趋势预测知, 兰州地区 21 世纪上半叶可能以偏涝为主。

参考文献:

- [1] Chen C K. A preliminary study on the climate fluctuations during the last 5,000 years in China [J]. Science in China, 1973, 2(5): 169-189.
- [2] 中国气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集[M]. 北京: 地图出版社, 1981.
- [3] 张德二, 刘传志. 《中国近五百年旱涝分布图集》续补(1980—1992 年)[J]. 气象杂志, 1993, 19(11): 41-45.
- [4] 张德二, 李小泉, 梁有叶. 《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补(1993—2000 年)[J]. 应用气象学报, 2003, 17(3): 381-388.

下土壤水分运动规律, 分析了灌水均匀度, 从提高灌水效率角度出发提出了优化灌水沟断面及尺寸, 得出的主要结论有:

(1) 沟灌土壤水分入渗湿润锋推进与沟型、沟中水深、土壤性质等有关, 相同沟型情况下, 沟的底宽越大, 竖向湿润锋推进速度就越快, 沟深相同, 水深越大, 竖向湿润锋推进越快越远。沟中灌溉水对水平向湿润锋推进的影响主要由水位来决定, 无论沟宽窄与深浅, 只要水位相同, 水平向湿润锋推进速度相同, 湿润垄的宽度也相同。

(2) 入渗初期, 累计入渗量较好符合 Kostikov 公式描述的幂函数形式。在入渗后期, 线性关系能更好地描述累计入渗量与历时的变化规律。在土壤性质等条件相同情况下, 累计入渗量由灌水沟湿周来决定。

(3) 采用交汇入渗时竖向湿润锋距离来衡量横向灌水均匀度, 相同沟深与水深情况下, V 形沟横向灌水均匀度优于梯形沟; 相同断面情况下, 沟中水位越高越有利于提高横向灌水均匀度。

参考文献:

- [1] 张新燕, 蔡焕杰, 王健. 沟灌二维入渗影响因素实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 38-41.
 - [2] 张永久. 河西绿洲灌区春小麦垄作栽培产量效应及其影响机制的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
 - [3] Kostikov A V. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for stud-
-
- (上接第 136 页)
- [5] 王绍武, 赵宗慈. 近五百年我国旱涝史料的分析[J]. 地理学报, 1979, 34(4): 331-341.
 - [6] 朱亚芬. 530 年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变[J]. 地理学报, 2003, 58(增): 100-107.
 - [7] 龚志强, 支蓉, 封国林, 等. 中国近 530 年干湿变化及其持续性特征研究[J]. 气象学报, 2009, 67(2): 307-320.
 - [8] Li J J, Feng Z D, Tang L Y. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Process and Landforms, 1988, 13(2): 125-135.
 - [9] 刘现彬, 夏郭胜, 贾佳, 等. 兰州九州台黄土磁性特征及其古气候意义研究[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 761-770.
 - [10] 姚辉, 徐国昌. 甘肃省近 520 年旱涝特征及干旱频率变化[J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(1): 68-74.
 - [11] 霍云雷. 兰州地区近 540 年旱涝灾害研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 1-5.
 - [12] 白虎志, 董安祥, 郑广芬. 中国西北地区近五百年旱涝分布图集[M]. 北京市: 气象出版社, 2010.

ying it from a dynamics point of view for purposes of amelioration[J]. Transactions of the Sixth Commission of International Society of Soil Science: part A, 1932, 6: 17-21.

- [4] Hopmans J W. Stochastic description of field measured infiltration data[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32: 1987-1993.
- [5] Scaloppi E J, Merkley G P, Willardson L S. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995, 121(1): 57-69.
- [6] 聂卫波, 马孝义, 王术礼. 沟灌入渗湿润体运移距离预测模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 20-25.
- [7] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 模拟垄沟灌溉土壤水分入渗特性试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 24-28.
- [8] 孙景生, 康绍忠, 崔文军. 不同沟灌条件下土壤入渗参数的估算[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(4): 46-50.
- [9] 聂卫波. 畦沟灌溉水流运动模型与数值模拟研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [10] Šimunek J, Šejan M, van Genuchten M T. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, version 2. 0[M]. Colorado School of Mines, 1999.
- [11] 张吉孝, 张新民, 刘久如, 等. 用 HYDRUS-2D 和 RETC 数值模型反推土壤水力参数的特点分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(5): 161-166.
- [13] 李刚, 何大明, 叶长青. 云南红河流域径流的时空分布变化规律[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 41-49.
- [14] 竹磊磊, 李清平, 李娜. 近 539 年河南省旱涝变化分析[C]. 第 26 届中国气象学会年会气候变化分会场论文集, 2009.
- [15] 伊云鹤, 吴绍洪, 陈刚. 1961—2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2147-2157.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京市: 气象出版社, 2007.
- [17] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805.
- [18] 郭瑞, 查小春. 泾河流域 1470—1779 年旱涝灾害变化规律分析[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 90-95.
- [19] 王涌泉. 太阳活动与黄河洪水关系的探讨[J]. 人民黄河, 1981(4): 23-29.
- [20] 王云璋, 张元东. 黄河流域旱涝与太阳活动关系的初步探讨[J]. 人民黄河, 1983(6): 45-50.