

# 顾及黄土滑坡的兰州市不同等级降雨时空变化特征

张 珊<sup>1,2</sup>, 杨树文<sup>1,2</sup>, 王恒亮<sup>1,2</sup>

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070)

**摘 要:**降雨是诱发黄土滑坡的关键因子,不同等级的降雨及其时空分布特征影响和制约了降雨型黄土滑坡的发生和发展。利用兰州市 1965—2015 年逐日降水资料,采用 Mann-Kendall 突变性检验、滑动 t 检验、Morlet 小波变换等方法分析了不同等级降雨事件的降雨量、降雨日数和贡献率,以得到其突变性、趋势性、周期性和空间分布特征,从而为突发性滑坡研究提供数据支持。结果表明:兰州市以微雨、小雨和中雨事件为主,在时间尺度上,降雨量和降雨日数均具有突变性,且突变时间各异;近 50 年来各等级降雨日数、降雨量存在着明显的周期性震荡,变化周期均以 8 a 为主,该区未来几年都将处于降雨充沛期;年降雨量整体下降,其气候倾向率为  $-4.96 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。在空间分布上,年降雨日数呈现“两多一少”的规律,降雨量则为“两少一多”,不同等级降雨事件对不同地区降雨的影响程度不同;与黄土滑坡分布浅析可知降雨对诱发兰州市滑坡起到了重要的作用。

**关键词:**黄土滑坡; 降雨等级; Mann-Kendall 突变性检验; 滑动 t 检验; Morlet 小波变换

中图分类号: P626.61

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0184-08

## Spatiotemporal Variation of Rainfall for Different Categories in Lanzhou During 1965—2015 Considering Loess Landslide

ZHANG Shan<sup>1,2</sup>, YANG Shuwen<sup>1,2</sup>, WANG Hengliang<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Rainfall is the key factor causing the disaster of loess landslide. Rainfall for different categories and its spatiotemporal variation affected the occurrence and development of loess landslides. Based on daily precipitation data from 1965 to 2015 of Lanzhou, we analyzed rainfall for different categories including rain days, precipitation and precipitation contribution rate, used Mann-Kendall test, moving t-test and Morlet wavelet transformation to get its abrupt change, trend, periodicity and spatial distribution in the study. It provided data support for research on loess landslide paroxysmal disaster. The results indicated that the rainfall events were characterized as light drizzle, light rain and moderate rain in Lanzhou; and the rainfall and the number of rainfall days were all abrupt, and the mutation time is different. The overall annual rainfall was on the rise, consistent with the trend of moderate rainfall. In the past 50 years, there were obvious multi-time-scale periodic oscillations of rainfall; and the variation period of the number of rainfall days was 8-year, and the next few years would be abundant rainfall. The annual rainfall declined overall, and its climate tendency was  $-4.96 \text{ mm}/\text{decade}$ . In the spatial distribution, the number of annual rainfall days showed ‘two more and two less’, and precipitation showed ‘two less and two more’, and the degree of rain events of different grades had different impacts on rainfall in different areas. Analysis on the rainfall and loess landslide showed that rainfall played an important role in inducing landslide in Lanzhou.

**Keywords:** loess landslide; rainfall categories; Mann-Kendall test; moving t-test; Morlet wavelet transformation

受全球变暖的影响<sup>[1]</sup>,我国气温在持续上升,但降雨的年际变化特征突出,增减不一<sup>[2]</sup>,且各地区的

降雨存在明显的地域差异<sup>[3]</sup>。兰州市地处黄土高原,地质构造复杂,发育有大量褶皱、断裂,使得该区近年

来频发黄土滑坡地质灾害<sup>[4]</sup>,而降雨作为主要诱发因子,其时空变化特征的研究将为滑坡地质灾害预警和气候特征评估起到重要作用。

多年来,不同学者采用各种方法研究了不同地区的降水变化特征<sup>[5-10]</sup>,而针对兰州地区降雨的研究相对较少,其中杨瑜峰等<sup>[11]</sup>利用兰州站 55 a 逐日降水资料,分析了大雨及以上级别的极端降雨,揭示了降雨出现向极端化方向发展的趋势;郭红霞、王国庆等<sup>[12-13]</sup>用线性回归、趋势滑动等方法对该区降水进行趋势判别,但多着重于兰州市降雨时间变化特征的分析,而未见降水空间分布变化的分析,且相关研究均将年降水粗略等同为年降雨<sup>[11-16]</sup>。因此,本文定义了适用于兰州地区的降雨年,从不同等级降雨事件入手,选取降雨量、降雨日数和贡献率作为特征量,利用兰州多年逐日降雨数据,对研究区 1965—2015 年来降雨的时空变化特征进行研究,得到其突变性、趋势性、多时间尺度的周期震荡等年际变化和空间分布,并浅析其与滑坡关系,以期作为黄土滑坡灾害预警研究的气候背景依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究区概况与数据来源

研究区位于兰州市中南部(103°20′—104°01′E, 35°50′—36°15′N),由西向东覆盖 4 个行政区。兰州地处内陆季风区与非季风区的过渡地带,属于温暖和温和半干旱区,年均气温 5~9℃,降雨偏少且各月的降雨量分配很不均匀<sup>[17]</sup>。

论文研究使用的数据均为各气象站点的逐日降水数据,并用双累积曲线法进行了一致性检验与修正,其中,国家气象站兰州站的数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),建于河口镇、仁寿山和九洲台等 8 个自动气象站点的数据来源于市气象局。此外,为提高空间插值的精度,补充了兰州站附近的民和、皋兰、永靖等 5 个国家气象站点的降水数据(图 1)。除兰州站的研究时段为 1965—2015 年外,其余各站点均为 2007—2015 年。滑坡灾害点数据来源于实地调研以及 1:10 万《兰州市地质灾害调查与区划实际材料图》。

### 1.2 方法

为了量化研究各等级降雨对黄土滑坡的影响,根据相关文献<sup>[18]</sup>,论文按照日降雨量将降雨划分为 5 个等级:微雨(0.1~1 mm),小雨(1~10 mm),中雨(10~25 mm),大雨(25~50 mm)和暴雨(大于 50 mm)。其中,年(月)降雨日数即为该时段内日降雨量不小于 0.1 mm 的总降雨日数。将兰州站 1965—

2015 年历年逐日降水数据剔除降雪参数后进行统计分析,得到逐月降雨情况(表 1),可得到兰州市降雨事件主要发生在 3—10 月,因此,本文将其降雨年定义为当年 3 月 1 日到 10 月 30 日。

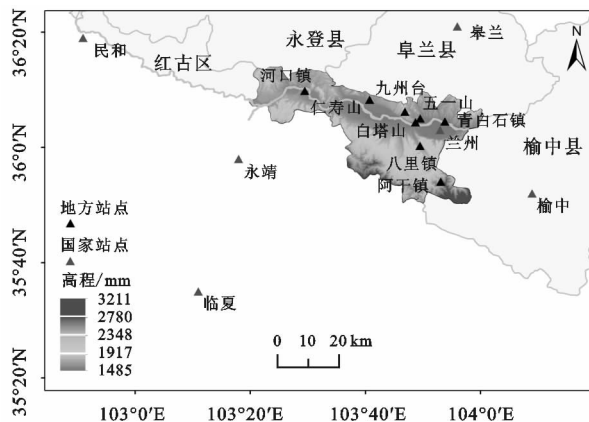


图 1 研究区地理位置及降雨站位置

为了分析年降雨、微雨、小雨和中雨的降雨量、降雨日数以及贡献率的变化特征,本文首先结合 Mann-Kendall 突变性检验、滑动 t 检验对兰州站降雨量和降雨日数进行突变分析,M-K 法不受降雨异常值影响,对样本的分布规律没有要求<sup>[19]</sup>。其次,根据小波分析原理<sup>[20-22]</sup>,将 Morlet 小波变换应用于降雨时间序列的多时间尺度周期分析,取其实部和小波系数方差来分析不同时间尺度的详细结构和变化趋势。最后,基于 ArcGIS 采用反距离权重法(IDW)插值分析降雨量、降雨日数和贡献率的空间分布。其中,小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部优化功能,能够剖析时间序列的内部精细结构,可以更精确地研究降雨的多时间尺度变化特征。

## 2 降雨时间演变特征

### 2.1 逐月降雨特征

通过对兰州市逐月降雨情况分析得出(表 1),该地区年均降雨日数约为 66 d,以小雨、微雨为主,中雨仅 7 d,大雨、暴雨降雨日数鲜少,雨季集中在 6—9 月,降雨等级以微雨、小雨和中雨事件为主,微雨在 3—10 月逐月均有发生,小雨多发于 5—9 月,中雨集中在 7 月、8 月,而相应的降雨强度值 7 月、8 月较高,5 月、6 月、9 月降雨强度次之,3 月值最低;兰州市年均降雨量近 300 mm,降雨年内每月均有降雨发生,且从 3 月起,月降雨量由最小值 8.64 mm 逐月阶梯式升高直至 8 月达到最大值 68.57 mm,随后又逐月下降至 10 月减少为 22.90 mm。由以上逐月规律可以得到,不同等级的降雨日数对月降雨量和降雨强度值均有影响。8 月为兰州市降雨年的代表月,其降雨日数、降雨强度、降雨量及其贡献率均为一年之最,7 月次之。

表 1 逐月降雨情况

月份	微雨 日数/d	小雨 日数/d	中雨 日数/d	大雨 日数/d	暴雨 日数/d	降雨 日数/d	降雨量/ mm	降雨量 贡献率/%	月降雨强度/ (mm · d <sup>-1</sup> )
1	0	0	0	0	0	0	0	0	—
2	≈0	0	0	0	0	0	≈0	≈0	—
3	2	2	0	0	0	4	8.64	2.9	2.16
4	3	3	0	0	0	6	17.92	6.0	2.99
5	4	4	0	0	0	8	36.57	12.2	4.57
6	3	5	1	0	0	9	40.59	13.5	4.51
7	3	6	2	0	0	11	60.92	20.3	5.54
8	1	7	3	0	0	11	68.57	22.9	6.23
9	4	5	1	0	0	10	43.75	14.6	4.38
10	4	3	0	0	0	7	22.90	7.6	3.27
11	≈0	≈0	0	0	0	0	≈0	≈0	—
12	0	0	0	0	0	0	0	0	—
年值	24	35	7	≈0	≈0	66	299.86		

2.2 年际突变检验

由线性倾向估计进行趋势分析发现,兰州市降雨量、降雨日数年际波动较大,年降雨量整体呈下降趋势,其气候倾向率为-4.96 mm/10 a,下降趋势不明显,未通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验。由图 2 可知,除了微雨降雨事件外,兰州市降雨的 UF,UB 曲线在 1.96 置信线内交点均较多,证明其降雨年际变化不稳定,小雨尤为明显(小雨、中雨突变检验图略),结合 Mann-Kendall 突变性检验与滑动 t 检验(图略)可以判断降雨突变年份。年降雨日数在图 2 中 UF,UB 曲线在 1970—1982 年多次相交,表明 1970 年、1980 年、1982 年可能发生突变,根据滑动 t 检验显示其在

1979 年与 1982 年出现突变,表明其突变时间为 1982 年。年降雨量于 2003 年发生突变。微雨降雨日数经 M-K 检验于 1968 年发生突变,而滑动 t 检验则显示为 1987 年、2007 年、2011 年,这主要误差是因为两种方法均存在缺陷而形成的<sup>[6]</sup>,分析降水序列发现微雨日数的累计距平峰值出现在 2011 年,综合确定 2011 年为其突变年份。同理,微雨降雨量 M-K 与滑动 t 检验得到的突变时间不一致,结合其降雨累计距平,将其确定为 1981 年。小雨日数变化平缓,只表现为一种自然的震动。对不同等级降雨各突变点前后不同时间作滑动 t 检验(表 2)表明,当  $n$  取值不同时,  $|t_0|>t_\alpha$  均通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验。

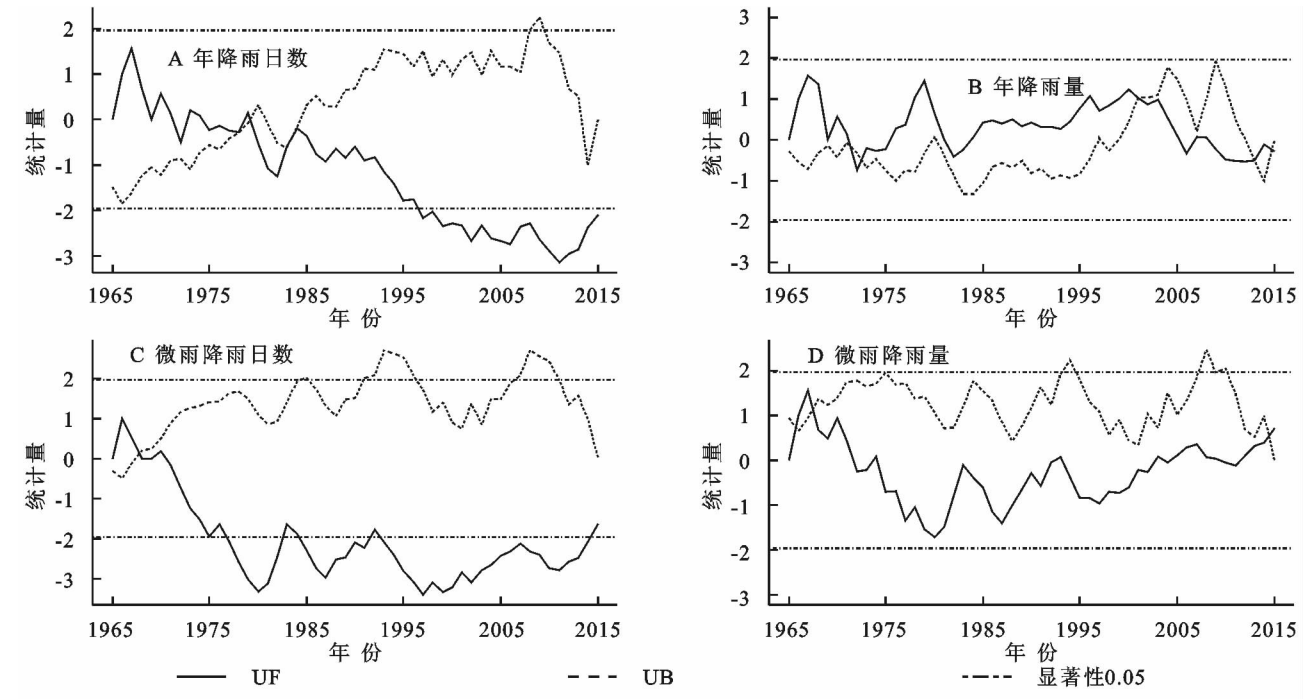


图 2 降雨日数及降雨量突变检验

表 2 不同等级降雨突变点显著性检验

突变点	年份	<i>n</i>	$ t_0 $	突变点	年份	<i>n</i>	$ t_0 $
年降雨日数	1982	3	3.74 *	小雨日数	1977	5	2.61 *
年降雨量	2003	3	3.77 *	小雨降雨量	1989	2	4.97 *
微雨日数	2011	3	3.19 *			2	4.47 *
		4	3.31 *			4	2.89 *
微雨降雨量	1981	2	5.35 *	中雨降雨量	1966	2	8.15 *

注: \* 表示通过 0.05 显著性检验。

2.3 年际周期变化

兰州市降雨一直存在着明显的年际和多时间尺度的周期性变化。多时间尺度是指降雨变化并不存在真正意义上的周期性,而是时而以这种周期变化,时而以另一种周期变化,并且同一时段中又包含各种时间尺度的周期变化<sup>[20]</sup>。兰州市降雨在不同尺度上的震荡周期表明(图 3,部分图略),周期变化震荡的尺度最小 3 a 左右,最大 20 a 左右,各等级降雨日数与其降雨量的主要年际周期尺度大体相同。年降雨日数在其主尺度 8 a 上与微雨日数的周期变化比较接近,年降雨量的主周期尺度及对应的变化情况则与中雨量相似,说明微雨是影响年降雨日数的主要降雨等级,而中雨则是影响年降雨量的主要等级。

兰州市年降雨日数存在 5~8 a 和 3 a 左右的周期震荡,其中 8 a 左右的周期震荡最强,是其第一主周期,以该大尺度周期来看,年降雨日数目前正处于偏多期;微雨日数的年际变化以 8 a,11~12 a 和 16 a 为显著周期震荡,在 8 a 的相同周期尺度下,其变化与年降雨日数总体一致,均在 1982 年、1990 年、2014 年等显著偏多,在 1986 年、1994 年等年份显著偏少;小雨日数的主要周期在 6 a 和 11 a 左右,在两个周期尺度下,其降雨日数在未来几年均有偏少的趋势;中雨日数变化有 5~7 a,8~10 a 和 16~18 a 的周期震荡,其中 8~10 a 周期尺度的震荡最为显著。

年降雨量变化的震荡周期主要 6~8 a 左右,其最大尺度 8 a 左右的变化特征明显,1977 年、1985 年、2007 年、2015 年均为明显雨量充沛期,而 1973 年、1981 年、2004 年、2011 年期间年降雨量显著偏少,同时年降雨量自 20 世纪 80 年代开始存在 20 a 左右的周期震荡,降雨在 1986 年、2006 年均偏少,综合分析两种尺度下的周期变化可以看出,在未来几年兰州市降雨都将趋于充沛期;小雨降雨量变化周期很显著地表现在 11~12 a,在 1974 年、1986 年以及 1998 年的小波变换系数值均高于 1,即雨量明显偏多,在 2015 年处于突变点,未来几年很可能向降雨充沛期过度;中雨降雨量存在 7~8 a 和 17~18 a 的周期,其中 8 a 为第一主周期,且在该尺度下对应年份

的降雨量变化较显著,在中雨量周期的 3 种变化尺度下,中雨降雨量均在目前处于偏多时期。

3 降雨空间分布特征

3.1 年降雨空间分布

兰州市年平均降雨日数与降水量分布都很不均匀(图 4),由图 4A 可以看到,仅有兰州、阿干镇气象站附近地区的年降雨日数大于 60 d,河口镇、仁寿山、白塔山、五一山和八里镇附近的年降雨日数则均超过了 50 d,而九洲台附近地区降雨日数不足 40 d,整区的年降雨日数分布呈现“两多一少”的规律,“两多”即为研究区的西北区域降雨日数多,东南区域日数较多,最多多于 65 d,“一少”即为研究区中部区域降雨日数较少,最少日数少于 35 d。

降雨量分布与降雨日数分布情况不一致(图 4B),降雨量表现为“两少一多”,“两少”即为西固区北部与安宁区相连地区降雨较少,七里河东南区域降雨少,“一多”即为城关区与七里河区交界处地区降雨多。白塔山、兰州站和八里镇降雨量均较多,成为 3 个多雨中心,促使城关区与七里河区交界处形成兰州市降雨量较多区域,其中白塔山附近地区的年降雨量达到了 204 mm 以上,兰州站附近则超过了 265 mm;而年降雨日数较多的河口镇、仁寿山、五一山和阿干镇几个气象站附近区域的降雨量反而较少,河口镇、仁寿山与阿干镇附近的少雨区域相对较大,使得西固区、安宁区与七里河区东南部均存在一处少雨中心,西固区北部与安宁区相连成为兰州市面积最大的少雨地区,年降雨均少于 166 mm。由年降雨量与降雨日数分布存在不一致性,可以看出,年降雨日数不是影响年降雨情况的唯一特征因素。

3.2 降雨等级空间分布

兰州市多年来大雨、暴雨降雨事件鲜少,微雨、小雨、中雨是主要影响年降雨情况的降雨等级事件。由不同等级降雨对应的降雨日数和降雨量贡献率的空间分布情况可以看出(图 5,部分图略),研究区内微雨的年降雨日数最多,小雨次之,中雨较少,而对于年降雨量的贡献则主要来源于小雨和中雨,且不同等级降雨事件对不同地区降雨的影响程度不同。

等级降雨事件来看,微雨日数较多地集中在安宁区与七里河区东南部,小雨日数则主要发生在西固区西部与城关区,七里河区与城关区相连接的附近地区中雨日数偏多。各等级降雨事件的降雨量贡献率与其降雨日数的多少不一致,微雨对于降雨量的影响偏小,各地区的降雨量主要来源于小雨和中雨事件,而中雨降雨量的贡献率与其降雨日数分布大体相同。

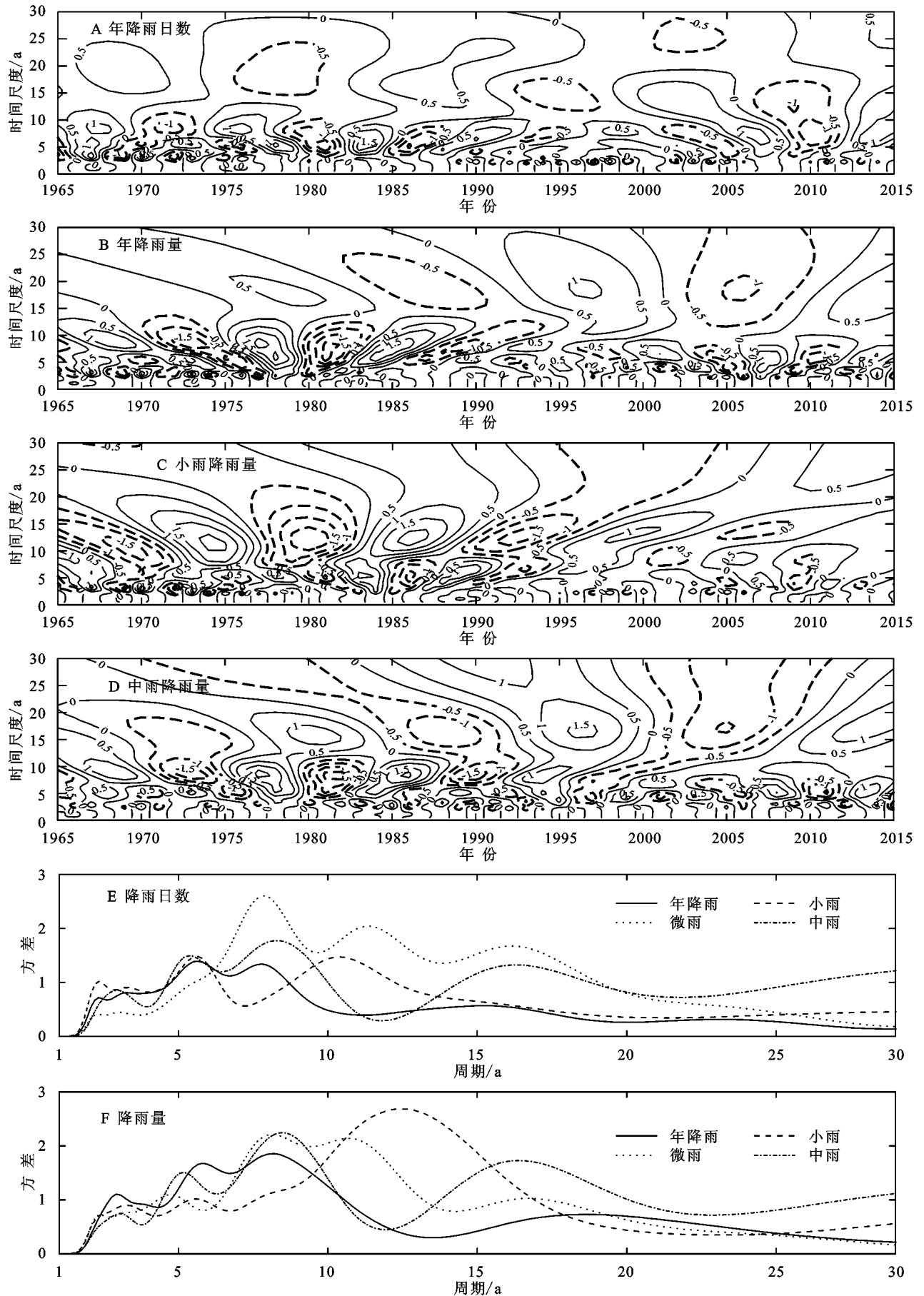


图 3 各等级降雨日数和降雨量变化周期的小波变化系数及方差

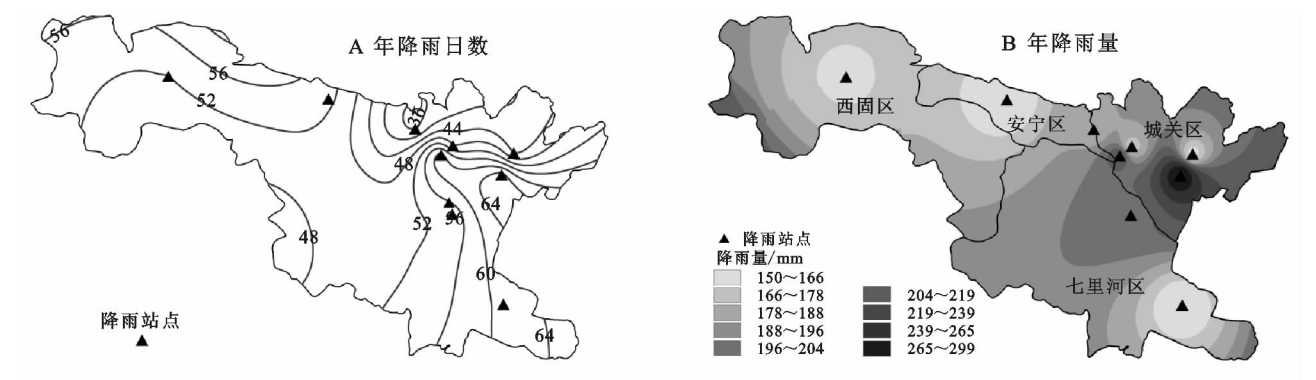


图 4 2007—2015 年降雨空间分布

兰州市微雨年降雨日数较多地区集中在仁寿山、兰州站、阿干镇附近区域,均多于 24 d,其中阿干镇附近在 32 d 以上;研究区内小雨年降雨日数超过 20 d 的地区有河口镇、白塔山、兰州站和阿干镇附近;中雨年降雨日数普遍低于 10 d。微雨降雨日数虽然多,但是其降雨量贡

献率却很小,均低于 8%;小雨降雨量对于各个地区的贡献率均高于 30%,除九洲台、兰州站和八里镇附近外,其他区域贡献率均在 50% 以上,阿干镇地区则高达 70%;中雨在相应地区的贡献率在 25%~60%,白塔山、青白石和八里镇附近均高于 50%。

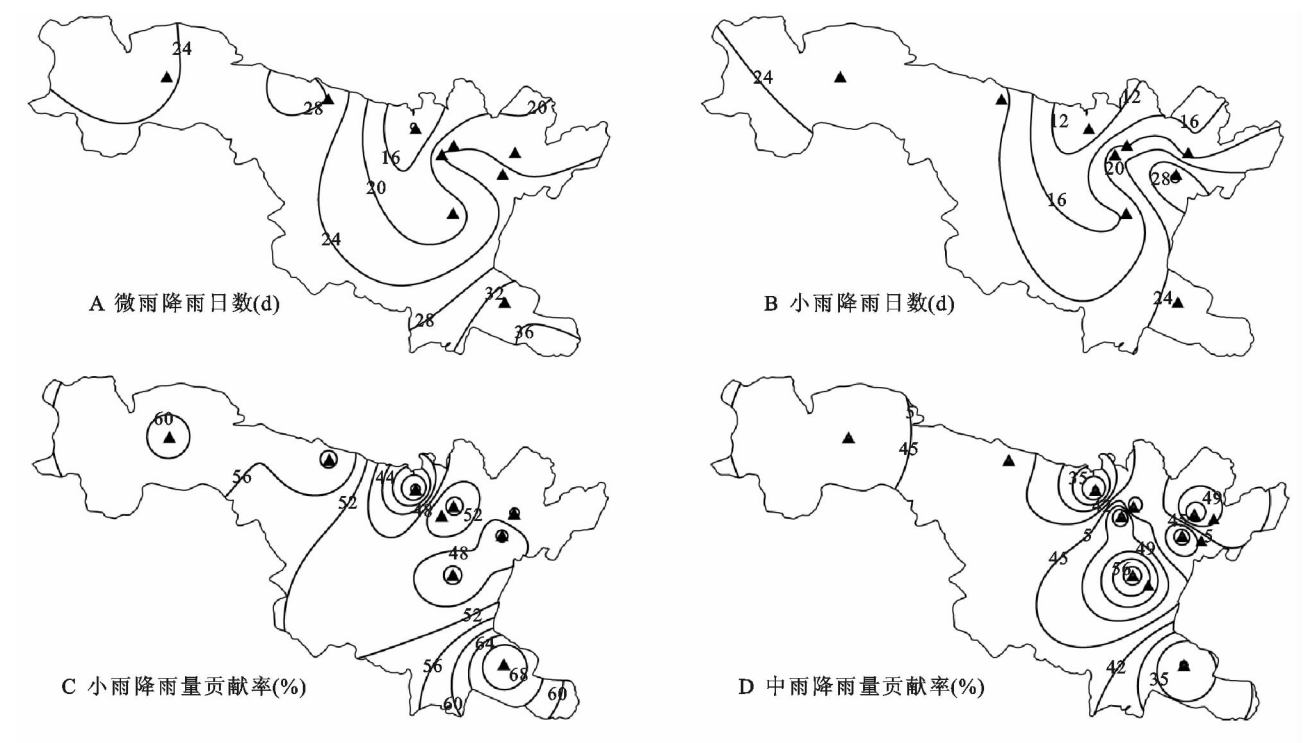


图 5 不同等级降雨空间分布

4 降雨与滑坡分布浅析

由搜集到的历年重大滑坡灾害统计分析发现,1965—2015 年,研究区内黄土滑坡灾害频发在 3—5 月和 9—11 月(图 6),而降雨仅集中在 6—9 月,调研分析发现,冬季填充于黄土孔隙中的冰由于气温回升在春天发生冻融,破坏了黄土斜坡的稳定性,因而 3—5 月多发黄土滑坡灾害,又由于 5 月降雨量显著增多,使得该月滑坡次数明显高于其他月份;滑坡在 9—11 月频发与降雨量充沛月份不一致则说明黄土滑坡具有滞后性。表 3 看出重大滑坡灾害集中在 2001—2003 年,2009—2012 年,而年际突变检验得到

的微雨降雨日数和年降雨量分别在 2003 年、2011 年发生显著突变;小波分析得到的年降雨日数在主周期 8 a 和 15 a 变化尺度下,于 2012—2014 年,2000—2004 年显著偏多,而在次周期 6 a 尺度 2000—2003 年和 2007—2009 年均为降雨充沛年份。由时间上的一致性可以得到兰州市重大黄土滑坡灾害与降雨的突变性、周期性具有相关性。

表 3 历年重大滑坡灾害统计

年份	1986	1997	2001	2002	2003	2005	2006
滑坡次数	1	1	3	2	3	1	1
年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
滑坡次数	1	1	2	2	3	2	

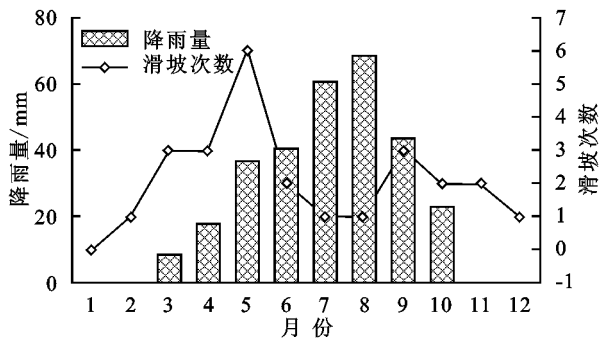


图 6 逐月重大滑坡灾害与降雨

将兰州市降雨与黄土滑坡灾害点的空间分布叠加如图 7 所示(部分图略),可以粗略地将兰州市划分为几个灾区:城关区为黄土滑坡重灾区,西固区为次重灾区,七里河区东南部为一般灾区,安宁区为轻灾

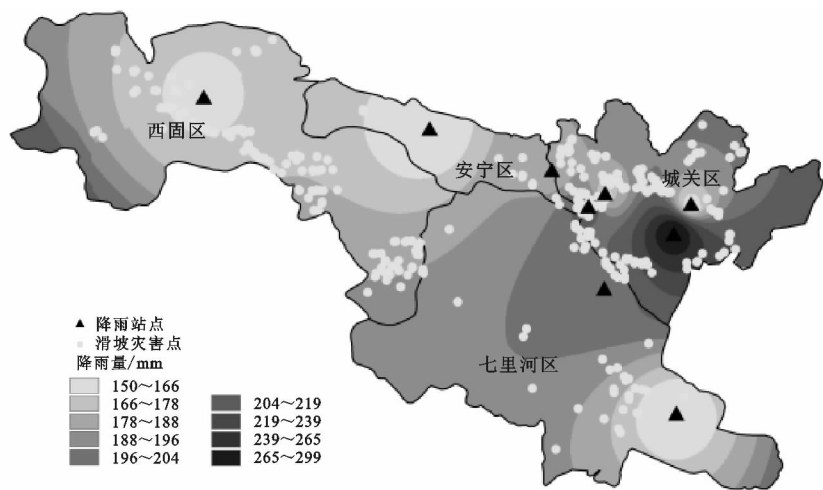


图 7 不同等级降雨与滑坡空间分布

## 5 结论

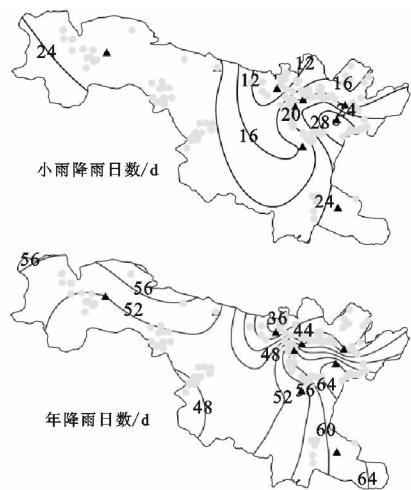
(1) 兰州市降雨等级以微雨、小雨和中雨事件为主,各月降雨分布很不均匀,8 月降雨日数、降雨量及其贡献率均为一年之最。

(2) 各等级降雨量和降雨日数均发生突变,且突变时间各异,在 0.05 显著性水平下,除小雨事件外,均通过显著性检验。

(3) 从各等级降雨主尺度周期对应的变化可知,影响年降雨日数变化周期的主要是微雨,而影响年降雨量的主要是中雨。除小雨日数在 6 a 左右震荡最显著外,其他降雨日均以 8 a 为第一主周期;各等级降雨量的周期变化依然 8 a 为主,中雨的主周期尺度较大为 11 a,兰州市未来几年都将处于年降雨充沛期。

(4) 空间分布来看,不同等级降雨事件对不同地区降雨的影响程度不同,年降雨量的贡献则主要来源于小雨和中雨;降雨量分布与降雨日数分布情况不一致,年降雨日数分布呈现“两多一少”的规律,降雨量

区。滑坡点在降雨较丰沛、降雨日数较多的城关区、西固区南部较为聚集,并随着降雨等值线的层层递进,滑坡点越发密集,研究区大部分黄土滑坡灾害的空间分布与降雨量、降雨日数的分布具有相关性,说明降雨充沛或降雨日数变化较大的区域易发滑坡。结合降雨贡献率的分布情况可看出,城关区降雨量偏多,其贡献率多源于小雨中雨事件,因而成为该区黄土滑坡的主要诱因,而其余滑坡聚集区均为年雨量少而降雨日数偏多,说明连绵阴雨对诱发滑坡也起到了重要的作用。但实地调研分析发现,降雨相对较少的西固区中部、七里河区南部也发生较多滑坡。综上所述,在时间上降雨的突变性、周期性与滑坡集中时间段具有相关性,在空间上降雨充沛或降雨日数偏多地区与滑坡分布表现出一致性。



则表现为“两少一多”。

(5) 兰州市降雨的突变性与周期性均与滑坡均有相关性,降雨充沛或降雨日数偏多均与滑坡的时空特征具有一致性。

以上研究使得对于研究区降雨时空变化特征有了更全面的认识,将为降雨型黄土滑坡提供理论支持,然而其变化只限于整体性特征,考虑到兰州市复杂的地形环境,研究区内不同地区的降雨特征会有差别,如何准确细分区域使得研究更为细致可靠将是下一步要进行的工作。

### 参考文献:

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Summary for policy-makers in climate change 2007: the physical science basis[J]. Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.
- [2] 张国宏,李志才,宋燕,等. 中国降水量变化的空间分布特征与东亚夏季风[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 34-42.
- [3] 董旭光,顾伟宗,孟祥新,等. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 661-671.
- [4] 张珊,杨树文,杨猛,等. 兰州市降雨型黄土滑坡灾害空

- 间分布特征[J]. 测绘科学, 2016, 41(12): 142-146, 211.
- [5] 郭慧, 李栋梁, 林纾, 等. 近 50 多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1165-1175.
- [6] 向亮, 郝立生, 安月改, 等. 51 a 河北省降水时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(1): 56-65.
- [7] 张健, 满志敏, 宋进喜, 等. 1765—2010 年黄河中游 5—10 月面降雨序列重建与特征分析[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1101-1113.
- [8] 徐维新, 古松, 苏文将, 等. 1971—2010 年三江源地区干湿状况变化的空间特征[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 46-55.
- [9] 王晓, 李佳秀, 石红彦, 等. 1960—2011 年云南省极端气温事件的时空分布及趋势预测[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1816-1824.
- [10] 吕乐婷, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 近 50 年东江流域降雨径流变化趋势研究[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 514-520.
- [11] 杨瑜峰, 江灏, 赵红岩, 等. 兰州雨量谱的气候变化与极端化趋势[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 328-333.
- [12] 郭红霞, 汪艳林, 李瑞雪, 等. 近 57 年兰州市气温降水变化特征及突变分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(1): 34-36.
- [13] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 黄河兰州上游地区降水、气温变化及趋势诊断[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(1): 77-81.
- [14] 唐亦汉, 陈晓宏. 近 50 年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 476-482.
- [15] 彭素琴, 杨兴国, 柯晓新, 等. 甘肃河东地区降雨特征分析研究[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 73-78.
- [16] 李相虎, 张奇, 邵敏. 基于 TRMM 数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1164-1170.
- [17] 丁祖全, 黎志恒. 兰州市地质灾害与防治[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2009: 3-5.
- [18] 郭军, 任国玉, 李明财. 近 47 年环渤海地区不同级别降水事件变化[J]. 地理研究, 2010, 29(12): 2271-2280.
- [19] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义与检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [20] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 115-116.
- [21] Gaucherel C. Use of wavelet transform for temporal characterization of remote watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(3): 101-121.
- [22] 刘东, 付强. 基于小波变换的三江平原低湿地井灌区年降水序列变化趋势分析[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 380-384.

~~~~~

(上接第 183 页)

- [11] 段超宇. 基于 SWAT 模型的锡林河流域融雪径流模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [12] 陈素华, 闫伟兄, 乌兰巴特尔, 等. 干旱对内蒙古草原牧草生物量损失的评估方法研究[J]. 草业科学, 2009, 26(5): 32-37.
- [13] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.
- [14] 张强, 邹旭凯, 肖凤劲, 等. GB/T20481-2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-17.
- [15] Patel N R, Chopra P, Dadhwal V K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index[J]. Meteorological Applications, 2010, 14(4): 329-336.
- [16] 张苗苗. 基于 SPI 的近 51 a 晋北地区旱涝变化及干旱事件时空特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 138-144.
- [17] 车少静, 李春强, 申双和. 基于 SPI 的近 41 年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 137-143.
- [18] 刘璇. 气候条件对典型草原牧草生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业, 2017(14): 99-99.