

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.024.

马永永, 娄盼星, 惠英, 等. 近61年来陕西省不同地貌类型的降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5):154-161.

MA Yongyong, LOU Panxing, HUI Ying, et al. Characteristics of Precipitation Variability in Different Geomorphic Types in Shaanxi Province During Recent 61 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5):154-161.

近61年来陕西省不同地貌类型的降水变化特征

马永永^{1,2}, 娄盼星^{1,2}, 惠英^{1,2}, 肖贻青^{2,3}, 郑小华^{2,3}, 孙璐^{1,2}

(1.陕西省气象科学研究所, 西安 710016;

2.陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016; 3.陕西省气象台, 西安 710015)

摘要:[目的]获取陕西省主要地貌类型的降水变化特征,为陕西省的防灾减灾提供决策支撑。[方法]基于1961—2021年陕西省82个气象站逐日降水资料,采用线性倾向估计法和滑动平均法对陕西省近61年不同地貌类型降水的变化进行研究,并采用Mann-Kendal对降水量和降水日数进行突变性检验。[结果]山地地貌区年均降水量(851.88 mm)和年均降水日数(195.92d)最大,风蚀地貌区年均降水量(405.07 mm)和年均降水日数(85.20d)最少。黄土塬、丘陵和台地地貌区年降水量变化趋势为负值,其他地貌区年降水量变化趋势为正值。夏季降水量占比最大,除了台地地貌区外,其余地貌区夏季降水量均呈现上升趋势。各个地貌区降水日数最多的季节为夏季,所有地貌区年、春季和夏季降水日数都呈现下降趋势。黄土台原地貌区年降水日数在1968年存在突变。[结论]陕西省年降水量和年降水日数呈现南多北少的总体分布,其中大多数地貌区的夏季降水量在增加而降水日数在减少,未来应加强降水变化的机理研究。

关键词:降水量;降水日数;地貌类型;陕西省

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)05-0154-08

Characteristics of Precipitation Variability in Different Geomorphic Types in Shaanxi Province During Recent 61 Years

MA Yongyong^{1,2}, LOU Panxing^{1,2}, HUI Ying^{1,2}, XIAO Yiqing^{2,3}, ZHENG Xiaohua^{2,3}, SUN Lu^{1,2}

(1.Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China;

2.Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710016, China; 3.Shaanxi Meteorology Observatory, Xi'an 710015, China)

Abstract:[Objective] The aim of this study is to explore the precipitation variation characteristics of main geomorphic types in Shaanxi Province, and to provide decision-making support for disaster prevention and reduction. [Methods] Based on the daily precipitation data of 82 meteorological stations in Shaanxi Province from 1961 to 2021, the characteristics of precipitation variability in different geomorphic types in Shaanxi Province were investigated by linear trend regression and moving average, and the mutation in the trend of the precipitation and its duration was tested by the Mann-Kendall method. [Results] The largest average annual precipitation and precipitation days were found in the mountainous landform region (851.88 mm and 195.92 d), whereas the lowest appeared in the wind erosion landform region (405.07 mm and 85.20 d). The annual precipitation trend was negative in loess highland, hill and tableland, and positive in other geomorphic areas. Summer precipitation accounted for the largest proportion, and showed increasing trend in all geomorphic areas except for tableland. The season with the largest precipitation days in all geomorphic areas was

收稿日期:2022-11-12

修回日期:2022-12-08

资助项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究课题基金课题“地表土地利用类型/植被覆盖(LUCC)对陕西数值模式系统预报性能改进的研究”(2020K-3)

第一作者:马永永(1990—),男,河南平顶山人,工程师,博士,主要从事气候变化和区域数值模式研发研究。E-mail:ma-yong1990@163.com

通信作者:郑小华(1978—),女,陕西安康人,正研级高工,硕士,主要从事气候变化及气象防灾减灾研究。E-mail:42017195@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

summer. The annual, spring and summer precipitation days in all geomorphic areas showed decreasing trends. A mutation was detected in the annual precipitation days trend in loess tableland areas during 1968. [Conclusion] The annual precipitation and annual precipitation days were larger in the southern region than that in the northern region of Shaanxi Province, and the summer precipitation in most of the geomorphological areas was increasing while the precipitation days were decreasing. In the future, the study of the mechanism of precipitation change should be strengthened.

Keywords: precipitation; precipitation days; geomorphic type; Shaanxi Province

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次气候变化评估报告^[1]指出,气候变化已经在以多种方式影响着地球上每个区域,并且在未来几十年里,所有地区的气候变化都将加剧,气候变化正在加剧水循环,带来更强的降水和洪水,或者区域更严重的干旱。降水是对全球气候变化最为敏感的气象要素之一,是水文要素时空变化的重要影响因子^[2-4],降水是植被的重要天然水源,特别是在干旱区域,降水总量和时间的变化对土壤水分供应、水分胁迫以及植被的代谢和生理功能有显著影响^[5-6]。强降水还会通过山洪、洪水、城市内涝及其引发的滑坡、泥石流等灾害对生命安全、粮食安全、生态安全以及经济社会的发展造成影响^[7-8]。中国近年来极端强降水事件呈增多趋势,气候变化引起的极端事件频率与强度在增加^[2,9-11],造成的灾害风险、经济损失也在增加^[7,12]。陕西省位于我国西北部,境内山原起伏,地形复杂。在全省总土地面积中,黄土高原和丘陵约占全省土地面积的 45%,山地约占 36%,平原约占 19%^[13]。陕北黄土高原是我国黄土高原的中心部分,是我国土地资源条件较差、生态环境脆弱的贫穷地方之一^[14]。关中平原是由河流冲积和黄土堆积形成,土壤肥沃,河流纵横,是陕西省的粮食主产区,是我国北方重要的小麦和玉米产区和重点建设地区^[15]。陕南秦巴山地包括秦岭、巴山和汉江谷地,位于中国南北气候的过渡地带,是中国南水北调的重要水源地和生态功能限制开发地^[16]。复杂的地形造成了降水分布的不均匀状态,气象灾害频发,其中旱涝是陕西普遍而重大的气象灾害,突发性强降水或连续降水是诱发滑坡、崩塌、泥石流等灾害的主要原因之一^[17]。在全球气候变化的背景下,陕西省 1961—2010 年降水量呈现减少趋势^[18],汛期极端降水事件频次整体上呈微弱增加趋势^[19],年最大降水量和强降水发生频次均呈现增加趋势^[20]。陕西省地形起伏较大,现有的研究结果对省内降水变化的分析不够细致,根据地貌类型对不同地貌区降水变化特征的研究尚未见相关文献。

本研究基于陕西省 82 个气象站点 1961—2021 年近 61 年的观测事实,分析陕西省主要地貌类型的降水变化特征,进一步认识陕西省的降水情况,为了解陕西省生态环境、预测气候灾害、黄土高原地区植被恢复、秦岭保护、水资源的开发利用等提供参考,为因地制宜制定防灾减灾各项措施提供决策依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区为地处中国西北部地区东部的黄河中游的陕西省(105°29′—111°15′E, 31°42′—39°35′N),属内陆省份,地域南北长、东西窄,一般被分为陕北、关中和陕南。冬季受蒙古冷高压控制,寒冷干燥,夏季受西太平洋副热带高压和印度低压影响,炎热多雨,具有明显的大陆性季风气候特点。

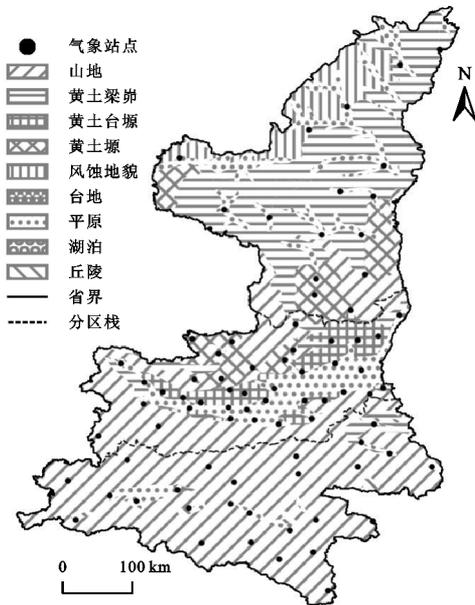
1.2 数据

本研究所采用气象资料来源于气象大数据云平台“天擎”,剔除数据缺省值较多的台站(缺省数据量占总数据的 5%以上),使用临近台站平均值来代替和补全缺省数据,最终选定 1961—2021 年 82 个气象站点的降水逐日数据作为初始值。通过对降水逐日数据求和来获得月、季和年降水量。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,将降水量 ≥ 0.1 mm 日数的总和定义为年降水日。

陕西省地形地貌数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn)的中国 1:400 万数字地貌数据集^[21]。由图 1 可知,陕西地貌主要分为山地、黄土梁峁、黄土台塬、黄土塬、风蚀地貌、台地、丘陵和平原,陕南主要地貌为山地,陕北主要地貌为黄土梁峁、黄土塬、风蚀地貌和山地,关中地区主要地貌为山地、平原、黄土台塬和黄土塬。

1.3 方法

采用逐月平均降水和日降水量 ≥ 0.1 mm 日数资料,利用线性趋势、滑动平均进行年降水量、四季降水量、年降水日数和四季降水日数的趋势估算,采用 t 检验进行趋势的显著性检验。采用 Mann-Kendal (M-K)非参数检验方法进行降水突变分析。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 研究区示意图

2 结果与分析

2.1 各地貌类型降水量的时间变化

由图2可知,山地、丘陵和台地地貌区年均降水量较大,分别为851.88 mm,817.07 mm和814.20 mm,而风蚀地貌区年降水量最小,为405.07 mm。这与各类地貌主要分布区域相关,山地、丘陵和台地地貌区主要位于陕南,而风蚀地貌区主要位于陕北,纬度差异造成了陕西省降水量南多北少的总体分布^[18,22]。山地、黄土台塬、黄土塬和平原地貌区年降水量最大的年份为2021年,分别达到了1294.84 mm,954.30 mm,885.41 mm和856.90 mm,丘陵和台地地貌区年降水量最大的年份为1983年,分别达到了1203.77 mm和1376.10 mm,风蚀地貌和黄土梁峁地貌区年降水量最大的年份为1964年,分别达到了712.85 mm和880.52 mm。山地、黄土梁峁、黄土台塬、台地和平原地貌区的年降水量最小的年份为1997年,分别为560.80 mm,401.08 mm,325.53 mm,441.50 mm和352.64 mm,黄土塬地貌区年降水量最小的年份为1995年,为366.29 mm,风蚀地貌区年降水量最小的年份为1965年,为136.95 mm,丘陵地貌区年降水量最小的年份为1999年,为563.83 mm。从五年滑动平均来看,各个地貌区年降水量在20世纪60年代初和21世纪10年代末都大于长期平均。黄土梁峁和风蚀地貌区年降水量在21世纪10年代末达到了峰值,而其他地貌区则是在20世纪80年代初。在20世纪末和21世纪初,各个地貌区年降水量都低于长期平均值,处于相对干旱期。各个地貌区年降水量在

21世纪以来都呈现出了上升趋势。

分别计算各个地貌区年均和季节降水量的线性趋势,结果见表1。夏季降水量在全年降水量中的占比最大,达到了44.17%~60.43%,其中风蚀地貌区占比最大,黄土台塬地貌区夏季降水量占比最小。而各个地貌区秋季降水量占全年降水量的22.89%~30.89%,春季降水量占全年降水量14.88%~21.78%,冬季降水量最少,占全年降水量2.07%~3.71%。不同类型地貌区的降水量变化趋势也有差异。黄土塬、丘陵和台地地貌区年均降水量变化趋势为负值,最大的是台地(-8.60 mm/10 a, $p > 0.1$),而其他地貌区年均降水量变化趋势为正值,趋势最大的为风蚀地貌(3.99 mm/10 a, $p > 0.1$),但所有地貌区的年均降水量变化趋势都不显著。春季降水量除风蚀地貌区呈不显著的上升趋势外,其余地貌区均呈下降趋势,黄土台塬地貌区的降水量下降速率最大且显著(-7.07 mm/10 a, $p < 0.05$)。与春季相似,秋季降水量除风蚀地貌区外均呈下降趋势,但下降趋势都不显著。夏季降水量除台地地貌区呈不显著的下降趋势外,其余地貌区均呈上升趋势,其中黄土塬地貌区(7.07 mm/10 a, $p > 0.1$)和平原地貌区(6.84 mm/10 a, $p < 0.1$)的上升速率最大。冬季降水量都呈上升趋势,但除风蚀地貌区外变化都不显著,以黄土塬地貌区的上升趋势率为最大,为1.14 mm/10 a ($p > 0.1$)。

2.2 各地貌类型降水日数的时间变化

由图3看出,1961—2021年陕西省各个地貌区年降水日数呈波动变化。山地地貌区年均降水日数最大,达到了195.92 d,风蚀地貌区年均降水日数最小,为85.20 d。各个地貌区年降水日数最大的年份都发生在1964年,山地、黄土梁峁、黄土台塬、黄土塬、丘陵、风蚀地貌、台地和平原地貌区的最大年降水日数分别为245 d,199 d,184 d,191 d,198 d,122 d,152 d和226 d。黄土台塬、黄土塬、丘陵、台地和平原地貌区的最小年降水日数发生在1995年,分别为87 d,97 d,122 d,97 d和129 d,黄土梁峁地貌区发生在1997年(119 d),山地地貌区发生在2013年(170 d),而风蚀地貌区发生在1972年(62 d)。从五年滑动平均来看,各个地貌区年降水日数在20世纪60年代初是过去61 a降水日数最多的时期,大于长期平均。在20世纪80—90年代初,山地、黄土台塬、丘陵、台地和平原地貌区的降水日数都多于常年平均。而在20世纪末和21世纪初,各个地貌区的年降水日数都低于常年平均,降水日数偏少,尤其是在1995—2000年期间,除了台地地貌区,各个地貌区的年降水日数都达到了过去61 a最低。

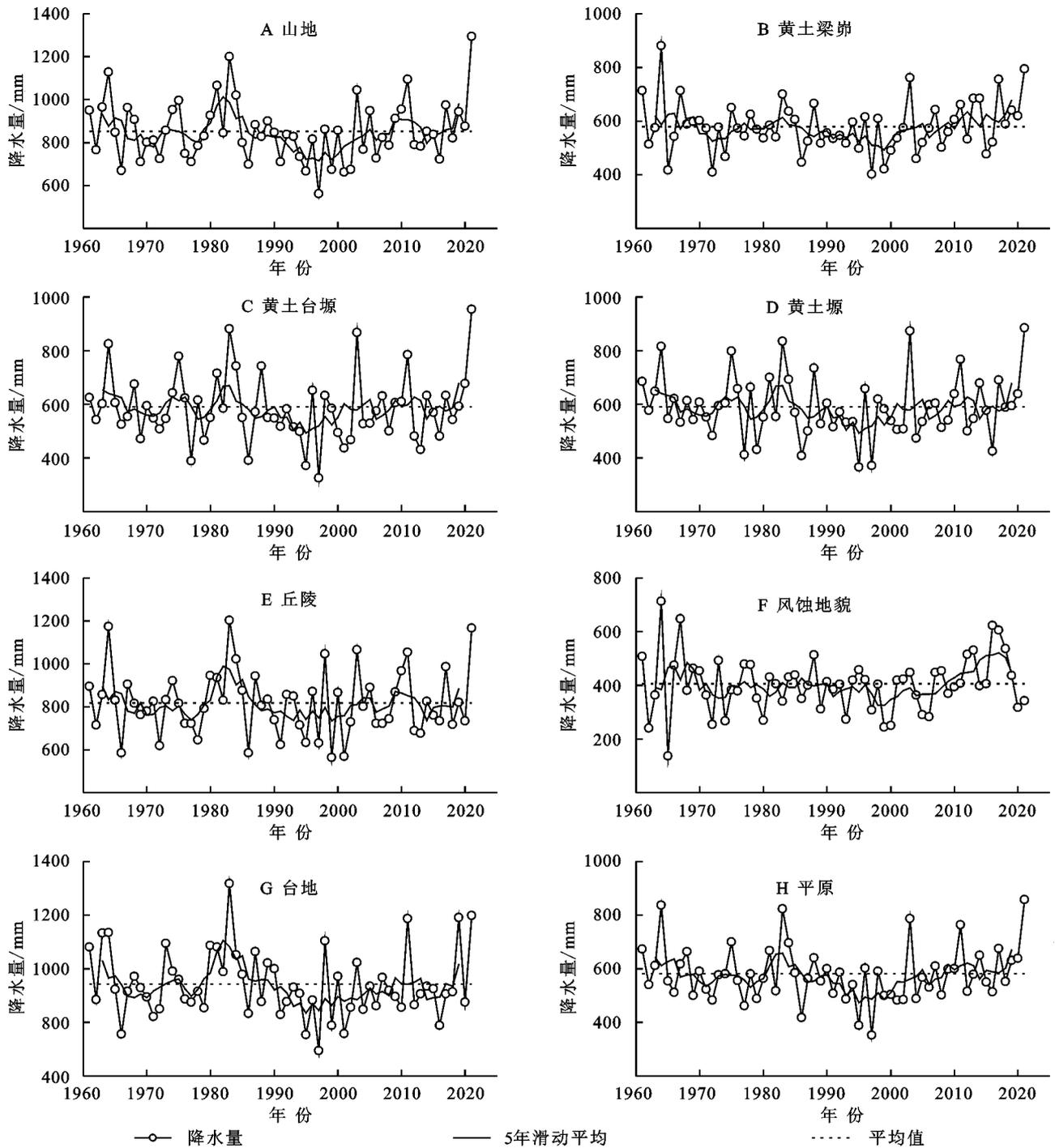


图 2 1961—2021 年陕西省不同地貌类型年降水量变化

表 1 不同地貌区年均及四季降水量和线性趋势

| 地貌类型 | 年均 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|------|--------------|---------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| 山地 | 851.88/1.50 | 181.02/−5.90 ^a | 394.28/6.32 | 243.62/−6.75 | 25.88/0.65 |
| 黄土梁峁 | 579.73/3.48 | 100.70/−3.09 | 308.02/6.42 | 150.91/−4.13 | 16.72/0.91 |
| 黄土台塬 | 584.48/0.12 | 121.58/−7.07 ^b | 258.17/6.37 | 178.62/−6.29 | 20.42/0.97 |
| 黄土塬 | 590.60/−0.73 | 113.24/−5.82 ^a | 282.81/7.07 | 169.75/−8.14 | 20.16/1.14 |
| 丘陵 | 817.07/−0.54 | 176.35/−6.81 ^a | 373.96/4.84 | 230.96/−5.11 | 30.30/0.68 |
| 风蚀地貌 | 405.07/3.99 | 60.29/1.02 | 244.77/1.33 | 92.72/2.25 | 8.39/0.64 ^a |
| 台地 | 814.20/−8.60 | 177.31/−6.68 | 360.33/−1.10 | 251.50/−7.84 | 19.02/0.43 |
| 平原 | 578.74/1.62 | 117.20/−5.46 ^a | 267.30/6.84 ^a | 171.63/−4.95 | 18.32/0.64 |

注: /前为降水量(mm), /后为变化趋势(mm/10 a), ^a表示 $p < 0.1$, ^b表示 $p < 0.05$ 。

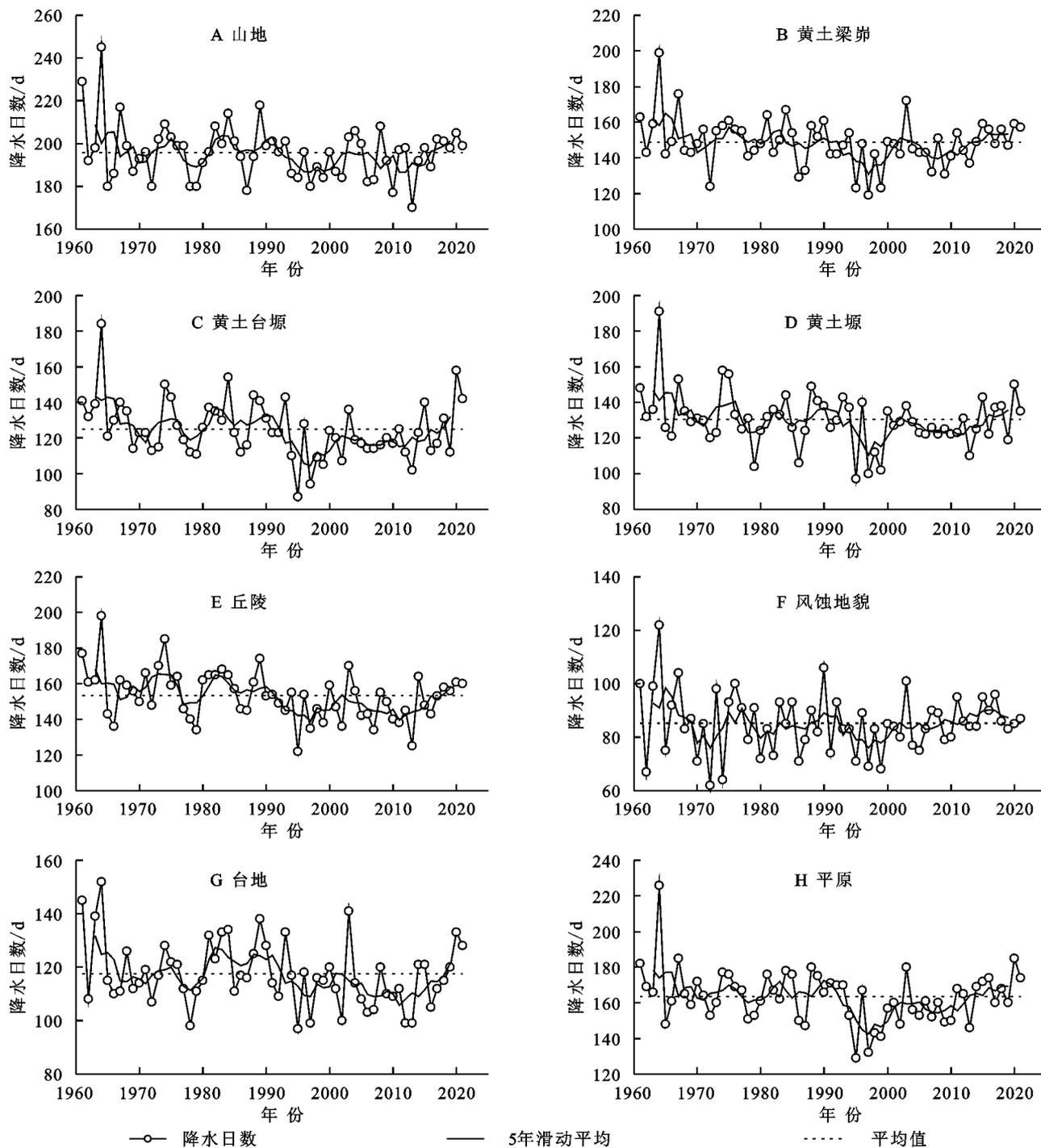


图3 1961—2021年陕西省不同地貌类型年降水日数变化

分别计算各个地貌区年降水日数和季节降水日数的线性趋势,结果见表2。各个地貌区的夏季降水日数最多,冬季降水日数最少。各个地貌区年降水日数都呈下降趋势,下降速率最大的是黄土台塬(-2.47 d/10 a, $p < 0.05$)和丘陵地貌区(-2.75 d/10 a, $p < 0.05$)。各个地貌区春季降水日数都呈下降趋势,其中黄土梁峁(-1.05 d/10 a, $p < 0.05$)和丘陵(-1.16 d/10 a, $p < 0.05$)地貌区的下降速率最大。秋季降水日数除风蚀地貌区外都呈下降趋势,但趋势不显著。与春季相似,夏季降水日数都呈下降趋势,其中黄土

台塬(-0.89 d/10 a, $p < 0.05$)、黄土塬(-0.82 d/10 a, $p < 0.05$)和平原地貌区(-1.05 d/10 a, $p < 0.1$)下降速率最大。冬季降水日数变化速率最小并且趋势不显著。

2.3 降水突变性分析

对1961—2021年陕西省近61年8个地貌区年降水量序列进行M-K非参数突变检验,结果见图4。过去61a各个地貌区年降水量的UF统计量大部分年份都小于0,呈下降趋势。各个地貌区年降水量UF值在1964年左右大于0,除黄土梁峁、风蚀地貌

和平原地貌区外,年降水量 UF 值在 1983 年前后大于 0,黄土梁峁、风蚀地貌和平原地貌区年降水量 UF 值在 2020 年左右大于 0,表现出增加趋势。山地、黄土台塬、黄土塬和平原地貌区年降水量的 UF 统计量在 2002 年左右超出显著水平线,黄土塬地貌区年降水量的 UF 统计量在 1972 年左右超出显著水平线,

降水量表现出显著下降的趋势。如果 M-K 突变检验中正反序列存在多个交叉点,则这些交叉点不一定是突变点,只有一个交叉点且位于显著性水平线之间,才能确定该点为突变点^[23]。在 0.05 显著性水平线之间,各个地貌区年降水量 UF 与 UB 统计量都存在多个交点,因此,不存在突变现象。

表 2 不同地貌区降水日数和变化趋势

| 地貌类型 | 年均 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| 山地 | 195.92/-1.51 | 48.95/-0.49 | 71.48/-0.50 | 50.56/-0.52 | 24.93/0.09 |
| 黄土梁峁 | 148.82/-1.51 | 34.98/-1.05 ^b | 60.20/-0.44 | 38.79/-0.09 | 14.88/0.08 |
| 黄土台塬 | 124.95/-2.47 ^b | 30.34/-0.95 ^b | 46.08/-0.89 ^b | 34.34/-0.61 | 14.23/-0.16 |
| 黄土塬 | 130.38/-2.08 ^a | 31.00/-0.50 | 51.23/-0.82 ^b | 33.97/-0.61 | 14.22/-0.21 |
| 丘陵 | 153.41/-2.75 ^b | 39.26/-1.16 ^b | 52.92/-0.72 | 41.64/-0.85 | 19.58/0.03 |
| 风蚀地貌 | 85.20/-0.35 | 17.70/-0.45 | 38.54/-0.45 | 21.62/0.16 | 7.32/0.41 |
| 台地 | 117.43/-1.73 ^b | 30.70/-0.47 | 36.89/-0.35 | 36.69/-0.56 | 13.08/-0.27 |
| 平原 | 163.67/-1.82 ^a | 39.62/-0.42 | 64.30/-0.84 ^a | 43.36/-0.36 | 16.37/-0.26 |

注: /前为降水日数(d), /后为变化趋势(d/10 a),^a表示 $p < 0.1$,^b表示 $p < 0.05$ 。

与年降水量相似,过去 61 a 各个地貌区年降水日数的 UF 统计量大部分年份都小于 0,整体呈下降趋势。各个地貌区年降水日数 UF 统计量在 20 世纪 60 年代初有 1~2 a 大于 0,台地地貌区年降水日数 UF 值在 1985—1995 年左右大于 0,表现出增加趋势。黄土梁峁、黄土台塬、丘陵和平原地貌区的 UF 统计量自 20 世纪末开始超出显著水平线,黄土塬和台地地貌区年降水日数自 2010 年左右开始超出显著水平线,呈现出显著下降趋势。黄土台塬地貌区年降水日数正反序列曲线在 0.05 显著性水平线之间有一个突变点,见图 4C,突变时间在 1968 年左右,UF 值在 1968 年以后为负值且一直减小,年降水日数减少。而其他地貌区年降水日数在 0.05 显著性水平线内都存在多个交点,因此,不存在突变现象。

3 讨论

结果表明 1961—2021 年陕西省各个地貌区的年降水量和年降水日数整体呈现南多北少的特征,山地地貌区的年降水量和年降水日数较多,而黄土地貌区的年降水量和年降水日数较少。但是主要位于陕南的台地地貌区年降水量较多而年均降水日数却相对较少,表明台地地貌区的降水强度相对较大。山地、黄土梁峁、黄土台塬、风蚀地貌和平原地貌区的年降水量呈增加趋势,而年降水日数却呈现下降趋势。同时,年降水量主要集中在夏季,而除了台地地貌区外,各个地貌区夏季降水量都呈增加趋势,而夏季降水日数却在减少,表明这些地貌区过去 61 a 降水强度在增大,这与郑小华等^[20]对陕西极端强降水的研究结果相一致,

而黄河流域的河南省^[24]和山东省^[25]的暴雨同样呈增加趋势。这种降水结构向强降水转移的发展态势,对应的山洪和泥石流等自然灾害的风险也在增大。

本文从数理统计角度探讨了近 61 年来陕西省各种地貌区的降水变化情况,但对于各个地貌区降水变化的驱动机制如大气环流、地表状况和太阳活动等过程的影响以及降水变化对区域水循环过程、水资源分布及农业生产等的影响仍需进一步研究。另外,年降水量和降水日数的突变年份的确定是通过 M-K 检验得出的结论,没有经过其他方法验证,是本文不足之处。

4 结论

(1) 陕西省 1961—2021 年的年均降水量出现南多北少的情况,山地地貌区的年降水量最多,而风蚀地貌区的年降水量最少。黄土塬、丘陵和台地地貌区年降水量呈不显著的下降趋势,其他地貌区年降水量表现为不显著的上升趋势。夏季降水量占比最大,除台地地貌区呈现不显著的下降趋势外,其余地貌区均呈现上升趋势。春季和秋季降水量除风蚀地貌区呈现不显著的上升趋势外,其余地貌区均呈现下降趋势。所有地貌区冬季降水量都呈现上升趋势。

(2) 山地地貌区年均降水日数最多,风蚀地貌区年均降水日数最少。各个地貌区在 20 世纪 60 年代初为降水日数较多的时期,在 20 世纪末到 21 世纪初为降水日数较少的时期。各个地貌区年、春季和夏季降水日数都呈现下降趋势,除风蚀地貌区外秋季降水日数都呈下降趋势,而冬季降水日数变化速率最小并且趋势不显著。

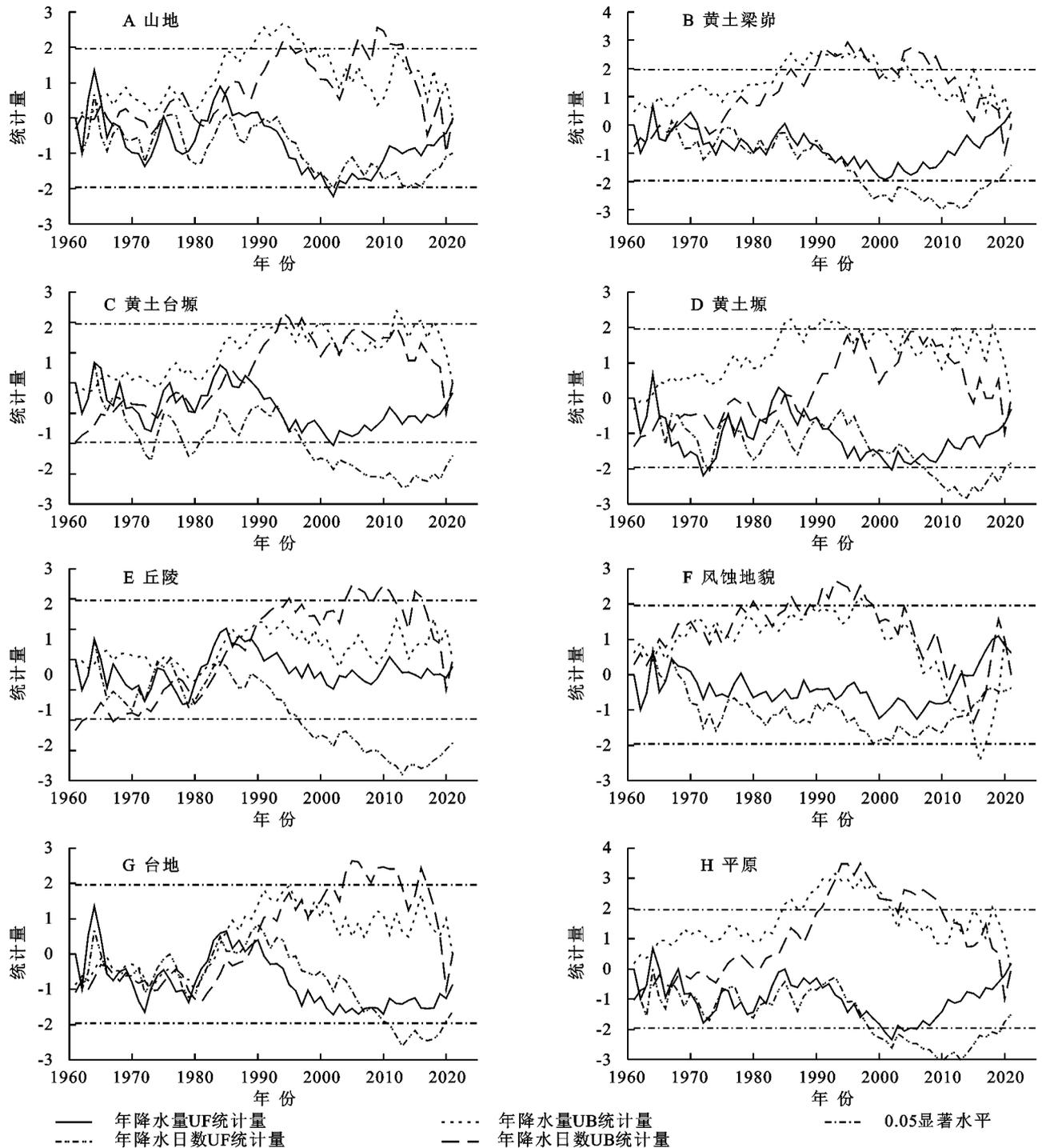


图4 1961—2021年陕西省不同地貌类型年降水量和年降水日数的M-K检验

(3) M-K非参数突变检验表明,黄土台塬地貌区年降水日数在1968年存在突变,降水日数减少,而其他地貌区年降水量和降水日数不存在显著突变。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1335-1347.
- [3] Ljungqvist F C, Krusic P J, Sundqvist H S, et al. Northern Hemisphere hydroclimate variability over the past twelve centuries [J]. Nature, 2016, 532(7597): 94-98.
- [4] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change [M]. Dordrecht: Springer, 1999.
- [5] Gu L, Pallardy S G, Hosman K P, et al. Impacts of precipitation variability on plant species and community water stress in a temperate deciduous forest in the central US [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 217: 120-136.

- [6] Guo B, Zhang J, Meng X, et al. Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN[J]. *Scientific Reports*, 2020,10(1):1-17.
- [7] 李莹,赵珊珊.2001—2020 年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究[J].*气候变化研究进展*,2022,18(2):154-165.
- [8] Tellman B, Sullivan J A, Kuhn C, et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods [J]. *Nature*, 2021,596:80-86.
- [9] 刘凯,聂格格,张森.中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究[J].*地球科学进展*,2020,35(11):1113-1126.
- [10] Li L, Yao N, Liu D L, et al. Historical and future projected frequency of extreme precipitation indicators using the optimized cumulative distribution functions in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,579:124170.
- [11] 叶殿秀,王遵娅,高荣,等.1961—2016 年我国区域性暴雨过程的客观识别及其气候特征[J].*气候变化研究进展*,2019,15(6):575-583.
- [12] 马铮,王国复,张颖娴.1961—2019 年中国区域连续性暴雨过程的危险性区划[J].*气候变化研究进展*,2022,18(2):142-153.
- [13] 陕西省土壤普查办公室.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992:13-16.
- [14] 中国科学院遥感应用研究所.陕北黄土高原地区遥感应用研究[M].北京:科学出版社,1991:1-2.
- [15] 赵业婷.基于 GIS 的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [16] 石育中,杨新军,王婷.陕南秦巴山区可持续生计安全评价及其鲁棒性分析[J].*地理研究*,2016,35(12):2309-2321.
- [17] 陕西省气象局《陕西气候》编写组.陕西气候[M].西安:陕西科学技术出版社,2009:8-12.
- [18] 刘政鸿.陕西省近 50 年来降水量时空变化特征分析[J].*水土保持研究*,2015,22(2):107-112.
- [19] 王雯燕,王丽,李国平,等.陕西省汛期极端降水时空演变特征[J].*干旱气象*,2016,34(6):952-957.
- [20] 郑小华,娄盼星,刘环,等.陕西极端降水时空变化特征研究[J].*沙漠与绿洲气象*,2019,13(4):9-16.
- [21] 程维明,周成虎.中国 1:400 万数字地貌数据集[DB/OL].国家青藏高原科学数据中心, DOI: 10.11888/Geogra. tpd.270602.2014.
- [22] 路培,吴发启.陕西省近 30 年降水变化特征分析[J].*水土保持研究*,2013,20(4):64-68.
- [23] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2013:63-66.
- [24] 张志高,张凯昭,蔡茂堂,等.1960—2019 年河南省降水结构时空变化特征[J].*水土保持研究*,2022,29(4):159-166.
- [25] 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.

~~~~~

(上接第 153 页)

- [25] 田香姣,程金花,杜士才,等.2 种土地利用方式下的优先流特征[J].*水土保持学报*,2014,28(3):37-41.
- [26] 张东旭,张洪江,程金花.基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J].*农业机械学报*,2017,48(12):214-220,277.
- [27] 阮芯竹.重庆四面山不同土地利用类型优先路径特征[D].北京:北京林业大学,2016.
- [28] Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2015,237:9-20.
- [29] Abou Najm M R, Jabro J D, Iversen W M, et al. New method for the characterization of three-dimensional preferential flow paths in the field[J]. *Water Resources Research*, 2010,46(2),Doi:org/10.1029/2009WR008594.
- [30] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2010,393(1):53-64.
- [31] 刘畅,周明华,张博文,等.张家口坝上地区土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].*土壤与作物*,2021,10(3):333-343.
- [32] 王佩佩,苏雪萌,周正朝,等.黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2021,35(5):16-23.
- [33] 高朝侠,徐学选,宇宙子,等.黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J].*应用生态学报*,2014,25(6):1578-1584.
- [34] 杜晓晴,牛健植,侯琨,等.华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J].*中国水土保持科学*,2015,13(3):51-57.
- [35] 武亚楠,张英虎,张振明,等.黄河三角洲湿地植物根区优先流区和基质流区土壤特性分布差异[J].*北京师范大学学报:自然科学版*,2021,57(1):69-75.
- [36] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2010,24(1):33-36.