

固原市主要农作物生育期有效降水与需水量特征

马芳^{1,2}, 张维江¹, 冯娜¹, 黄艳¹

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏海原县水务局, 海原, 宁夏 755200)

摘要:由于干旱地区常年降雨资源匮乏,为提高旱区降雨资源的高效利用及更加精准的掌握该地区主要农作物的水分供需平衡状况。采用美国农业部(USDA)土壤保持局推荐的有效降水量和联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的参考作物蒸散量计算方法、线性分析法、Mann-Kendall 检验法及小波分析法,研究了固原地区近 60 年 3 种主要农作物的有效降雨量及需水量的时空变化趋势。结果表明:(1) 3 种作物生育期平均有效降水分布在 68.8~177 mm,玉米和马铃薯生育期有效降雨量呈减小趋势,春小麦呈上升趋势,且有效降水周期呈大一小一大的变化规律;(2) 3 种作物生育期平均需水量主要分布在 233.7~439.3 mm,生育期需水量均呈上升趋势,分别为 2.4 mm/10 a, 0.8 mm/10 a, 2.3 mm/10 a,需水量周期也呈“大一小一大”的变化规律;(3) 马铃薯、玉米、春小麦的平均水分盈亏指数为 -38.0%, -57.5%, -58.7%,玉米和春小麦对灌溉的依赖程度较马铃薯高。综合考虑分析固原地区多年降水和作物需水分布特征的趋势,研究结果可以为该地区 3 种农作物合理种植及灌溉提供理论依据,同时为发展该地区主要特色农产品及提高农民经济收入提供数据支撑。

关键词:宁夏固原;有效降雨;作物需水量;水分盈亏指数

中图分类号:S161.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0205-08

Characteristics of Effective Precipitation and Water Requirements of Main Crops in Whole Growth Period in Guyuan

MA Fang^{1,2}, ZHANG Weijiang¹, FENG Na¹, HUANG Yan¹

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University,

Yinchuan 750021, China; 2.Haiyuan County Water Authority, Haiyuan, Ningxia 755200, China)

Abstract: Due to the perennial lack of rainfall resources in arid areas, it provides theoretical support for improving the efficient utilization of rainfall resources in arid areas and more accurately grasping the balance of water supply and demand of main crops in this region. In effective rainfall recommended by the United States Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Bureau and the amount of reference crop evapotranspiration calculation method recommended by UN's Food and Agriculture Organization (FAO), the linear analysis, Mann-Kendall test and the wavelet analysis method were used to examine spatial and temporal variations of effective rainfall and water demand evaluation trend of the three main crops nearly 60 years. The results are as follows. (1) The average effective precipitation in the growth period of the three crops ranged from 68.8~177 mm, the effective precipitation in the growth period of corn and potato showed the decreasing trend, and the effective precipitation in the growth period of spring wheat showed the increasing trend, and the effective precipitation period showed a big-small-big change pattern. (2) The average water demands of the three crops in the growth period mainly distributed in the range of 233.7~439.3 mm, and the water demands in the growth period showed an upward trend, which were 2.4, 0.8, 2.3 mm/decade, respectively. The water demand cycle also showed a 'big-small-big' change pattern. (3) The average water-deficit indexes of potato, maize and spring wheat were -38.0%, -57.5% and -58.7%, respectively, and maize and spring wheat

收稿日期:2021-01-08

修回日期:2021-02-03

资助项目:宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目“宁南山区生态恢复与水资源潜力开发与示范”(2018BEG02010)

第一作者:马芳(1994—),女(回族),宁夏海原人,硕士研究生,研究方向为干旱地区水资源调控理论与技术。E-mail:1421626967@qq.com

通信作者:张维江(1963—),男,宁夏银川人,博士,教授,博士生导师,主要从事干旱地区水资源调控研究。E-mail:zwjiang@nxu.edu.cn

were more dependent on irrigation than potato. These research results can provide theoretical basis for the rational planting and irrigation of three crops in Guyuan, and provide more bases for the development of the main characteristic agricultural products and the improvement of farmers' economic income.

Keywords: Guyuanof Ningxia; effective rainfall; crop water requirement; water loss index

全球气候变化,不仅对降水时空变化特点有影响^[1],并且还对作物需水及生长产生较大影响^[2]。干旱半干旱地区,水资源短缺是直接影响该地区农业和经济发展的关键性因素,全球气候变化影响着降雨时空变化特点,进一步影响着作物需水和生长。作物有效降水量与需水量是确定作物生育期灌溉工作量的主要参数,作物需水量也是农业用水中最主要的消耗部分^[3],其大小主要受到植物自身、气象因子、土壤结构等诸多因素的影响。固原是宁夏主要的粮食产区,受地理位置和气候条件的影响,作物生长期雨热同期,降雨时空分布不均,可利用的有效降雨量不足,对作物产量造成直接影响。

近年来,众多学者对不同地区有效降雨量和不同作物需水量进行了研究,魏钟博^[4]针对黑龙港流域地下水超采严重现象,对夏玉米生育期降水量及需水量进行时空分布规律研究,为夏玉米的高效利用降水资源提供依据;吴卫熊等^[5]对广西木薯有效降水和需水量进行分析,研究发现各生育阶段作物的需水现象差别较大,呈现出东南小、西北大的分布规律;张波等^[6]为合理配置贵州地区烤烟灌溉及水资源高效利用,分析了烤烟各生育期有效降雨、需水量及需水指数;陈超、陈伟、靳春香、曹永强等对小麦、棉花、玉米、烤烟、水稻生育期的有效降雨及需水量进行时间和空间的特征研究^[7-9,12,14],研究结果为各地区农田灌溉规划和管理提供了宝贵依据。但对宁夏固原地区主要农作物生育期有效降雨量及作物需水量等因素的变化规律研究较少。

因此,本文基于宁夏回族自治区固原市 1960—2018 年 2 个气象站日观测资料和农业气象站马铃薯、春小麦、玉米生育期的观测资料,系统分析 3 种作物生育期降水量、需水量和水分盈亏指数时间上和空间上的变化规律,以期 3 种作物生长过程中降水资源合理提供配置提供依据,进而提高降水资源的利用率。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区南部山区,坐标 105°20′—106°58′E, 35°14′—36°38′N,黄土丘陵地貌,海拔 1 500~2 200 m。属于典型的大陆暖温带气

候,由于该地区四季温差较大,使得该地区灾害性天气偏多,其平均气温为 7.75℃,年降水量 450 mm 左右,年蒸发量 800~1 200 mm。

1.2 材料来源

气象资料来源:本文所用的数据均来自宁夏固原市 1960—2016 年 2 个气象站日观测资料,包括:降水量、温湿度、风速风向、日照时数(中国气象数据网: <http://data.cma.cn/site/index.html>)及当地农业气象等。

各作物生育期来源:春小麦的生育期来源于徐华军^[10]基于多年的分析宁夏各地区冬春小麦的资料,玉米和马铃薯来源于宁夏马铃薯、玉米种植规范。

1.3 研究方法

1.3.1 有效降水 有效降水量是指干旱地区,可以满足作物蒸发所消耗降雨量,不包括径流、渗漏至根区以外的区域及淋洗盐分所需要的深层渗漏部分^[11-12],因此使用 USDA 土壤保持局推荐的有效降水的方法计算^[13-14],其表达式为:

$$P_{ei} = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17 & (P < 8.3) \\ 4.17 + 0.1P & (P \geq 8.3) \end{cases} \quad (1)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_{ei} \quad (2)$$

式中: P_{ei} 为每日有效降水量(mm/d); P 为每日降水量(mm/d); P_e 为农作物全生育阶段有效降水总量(mm); n 为生育期旬分组数。

1.3.2 作物需水量 大量的试验研究表明,Penman-Monteith 公式与实际蒸散量最接近,因此本文选用 1998 年联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith^[15-16]公式计算,表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: ET_0 是作物每日蒸散量(mm/d); Δ 是温度和饱和水汽压拟合曲线的斜率值(kPa/℃); R_n 是作物表面的净辐射量[MJ/(m·d)]; γ 是湿度计常数(kPa/℃); T 是日平均气温(℃); u_2 为 2 m 高处风速(m/s); G 是土壤热通量(MJ/m² d); e_s 和 e_a 分别是空气中饱和水汽压和实际水汽压(kPa)。

通过采用 FAO(联合国与农业组织)对作物需水

量的认定,3 种农作物生育期需水量由需水系数与参考作物蒸散量乘积而得,表达式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (4)$$

式中: K_c 为作物系数; ET_0 为逐日作物蒸散量(mm)。

作物系数 K_c 采用 1998 年联合国粮农组织推荐的分段单值平均法^[17] 计算,联合国粮农组织把作物系数 K_c 按生育阶段划分为:初始生长期(从播种期到作物覆盖率接近 10%,此时的作物系数为 K_{cini})、快速发育期(从覆盖率 10%到充分覆盖之间,此时的作物系数从 K_{cini} 增加到 K_{cmid})、生育中期(从充分覆盖到成熟期开始,此时作物系数为 K_{cmid})和成熟期(从叶片开始逐渐变黄到收获或者成熟,此时作物系数从 K_{cmid} 线性减小至 K_{cend})^[18-20]。联合国粮农组织推荐使用的 K_c 主要针对半湿润气候条件下的平均值^[21]。对于特定的地区需要根据当地的土壤、气候和作物的高度进行修订,王静等^[22] 对作物系数针对宁夏当地农作物实际情况进行修订,因此本文采用作物系数修订后的公式计算,修订公式为:

$$\begin{cases} K_{c(tab)} < 0.45, K_c = K_{c(tab)} \\ K_{c(tab)} \geq 0.45 K_c, K_c = K_{c(tab)} + \left[0.04(U_2 - 2) - 0.04(RH_{min} - 45) \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_c 和 $K_{c(tab)}$ (K_{cini} , K_{cmid} , K_{cend}) 分别为修正前后不同生育期的作物系数; U_2 为不同生育期高度 2 m 处的日平均风速(m/s); RH_{min} 为不同生育期日最低相对湿度的平均值(%); h 为不同生育期作物的平均高度(m),表 1 为三种作物全生育周期。

表 1 三种作物全生育周期

作物	初生长期	生育中期	成熟期
马铃薯	5.10-6.5	6.6-8.20	8.21-9.20
春小麦	3.25-5.21	5.22-6.12	6.13-7.20
玉米	4.15-6.15	6.16-8.30	8.31-10.10

1.3.3 缺水量计算 缺水量也可以称为灌溉需水量,指作物生育期内同期需水和有效降水的差值,当 $W > 0$ 时,说明有效降水小于需水量,不能满足作物需水要求;相反, $W \leq 0$ 时,说明有效降水大于需水量,能满足作物需水要求^[23],表达式为:

$$W = ET_c - P_e \quad (6)$$

式中: ET_c 为作物生育期内需水量(mm); P_e 为作物全生育期内有效降雨量(mm)。

1.3.4 水分盈亏指数 水分盈亏指数能很好地反映农业旱情。水分盈亏指数(I_d)指作物某一生育期内农业有效雨量(P_e)与同一时期作物需水量(W)之差与作物需水量的比值^[23-24]。苏永秀等^[25] 通过建立水分盈亏指数模型运用于广西农业干旱监测业务,其

表达式为:

$$I_d = \frac{P_e - W}{W} \quad (7)$$

式中: P_e 为作物生育期内有效雨量(mm); W 为作物生育期内缺水量(mm)。

1.3.5 变异系数 变异系数可以直观衡量有效降水量和需水量年际间的稳定性。 n 年作物有效降水和需水量的变异系数按(C_v)式(8)–(9) 计算。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2} \quad (8)$$

$$C_v = S / x' \quad (9)$$

式中: S 为均方差; x_i 为第 i 年的需水量; x' 为需水量多年平均值^[26]。变异系数越大,越不稳定;变异系数越小,越稳定。

1.3.6 Mann-Kendall 突变检验 时间序列的分析中,Mann-Kendal 法不仅可以直观的反映时间序列的上升和下降趋势,而且可以精准计算时间序列的突变区域和突变点^[27]。

对于时间序列 Y (含 n 个样本),构造一个秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k R_i \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

$$\text{其中: } R_i = \begin{cases} +1 & y_i > y_j \\ 0 & y_i \leq y_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, i) \quad (11)$$

式中:秩序列 S_k 是第 i 个时刻数值大于 j 个时刻时,数值个数的累加。时间序列的随机假设,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

其中, $UF_1 = 0$, $E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 分别是 S_k 的均值和方差,且 y_1, y_2, \dots, y_n 相互独立,它们具有相同连续分布,可以由式(13–14) 分别求出:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (13)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (14)$$

UF 呈标准正态分布,对于时间序列 $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 计算统计量,通过正态分布表查显著性水平 α ,当 $UF_i > U_\alpha$ 时,说明时间序列变化趋势显著,反之变化趋势不显著。

取时间序列 Y 的逆序(y_n, y_{n-1}, \dots, y_1),进行重复上述过程,计算 UB_k ,令 $UB_k = UF_k$ 且 $UB_1 = 0$ 。取 $\alpha = 0.05$,将 UF_k 和 UB_k 绘制在一张图上。当 UF_k 和 UB_k 的值均大于 0,表明序列呈上升趋势,反之呈下降趋势。当两者超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著,超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如 UF 和 UB 两条曲线出现交点,且交点在临

界线之间,则交点对应的时刻即是突变开始^[28]。

本文采用变异系数、小波方差、Mann-Kendall 突变检验等方法分析宁夏固原市马铃薯、春小麦、玉米 3 种作物生育期有效降水量和需水量逐年变异系数、气候倾向率及周期变化,探讨宁夏固原市马铃薯、春小麦、玉米 3 种生育期有效降水和需水量的变化规律。

2 结果与分析

2.1 3 种作物全生育期有效降雨量变化特征

图 1 为 1960—2018 年宁夏固原市 3 种作物的全生育期降水与有效降水的分布,通过分析 3 种作物全生育期降水年际变化趋势可得:马铃薯多年平均有效降水呈下降趋势,春小麦和马铃薯呈上升趋势。宁夏固原地区马铃薯全生育期降水量平均分布在 185~503 mm,平均降水量为 322 mm;全生育期有效降水量平均分布在 95~196 mm,平均有效降雨量为 132.5 mm,近 60 a 马铃薯全生育期年有效降水量的变化趋势介于 $-1.9 \sim -3.2$ mm/10 a;春小麦全生育期降水量平均值分布在 53.3~253.9 mm,平均降水量为 129.3 mm,全生育期有效降水量平均分布在 30.09~134.88 mm,平均有效降雨量为 68.8 mm,有效降水量变化趋势在 $-1.3 \sim 0.6$ mm/10 a;玉米全生育期降水量平均分布在 200.6~709.2 mm,平均降雨量为 378.9 mm;全生育期有效降水量平均分布在 117.43~287 mm,平均有效降雨量为 177 mm,有效降水变化趋势在 $-1.9 \sim -3.1$ mm/10 a。从图 1 中可以看出,由于宁夏南部山区降雨量主要集中在 6—9 月份,各作物生育期也不同,因此有效降雨量也有一定的差异。1960—2018 年玉米和马铃薯生育期有效降雨量呈减小趋势,春小麦刚好相反,通过显著性分析,3 种作物生育期有效降水量年际稳定性玉米(0.13)>马铃薯(0.15)>春小麦(0.21)。

分析结果见小波方差图(图 2),该图较好的反映出 3 种作物生育期有效降雨量时间序列的波动能量在时间尺度上的变化情况,由此来判定有效降雨量变化过程中的主周期^[29]。从图中可以看出,随时间的推移,3 种作物有效降雨量呈“大一小一大”的变化趋势,且年际间差异较大。对应结合小波方差图,分别对应 3 个明显的峰值。马铃薯对应 3 个峰值为:5, 13, 28 a, 28 a 时间尺度震荡最强烈,为第一个主周期,后两个峰值分别为 13 a 和 5 a,对应第二和第三主周期;春小麦 3 个峰值从大到小依次为 25, 10, 6 a, 其中 25 a 为第一个主周期;玉米为 28, 13, 6 a 的时间尺度,其中 28 a 为第一个主周期;对比分析 3 种作物的方差图与小波等值线,其分析结果均一致。

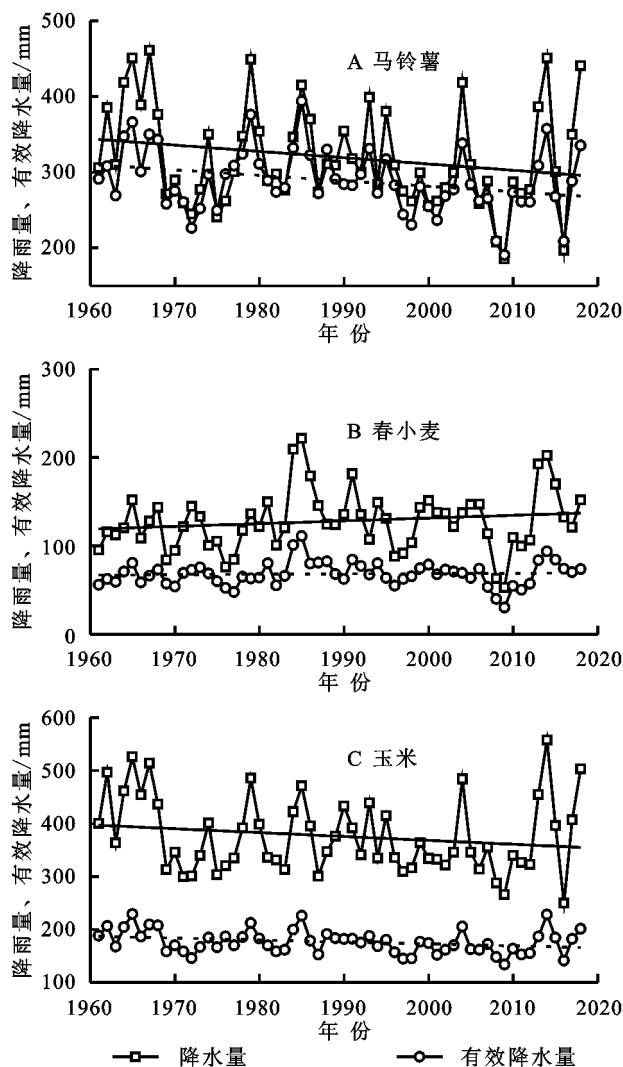


图 1 3 种农作物生育期降水量及有效降水量年际变化

2.2 3 种农作物需水量、缺水量的时空分布特征

根据已给定的公式计算出 3 种作物 1960—2018 年全生育期年平均需水量及缺水量,通过分析 3 种作物全生育期需水量及缺水量年际变化趋势可得:3 种作物多年平均需水量均呈上升趋势,具体见图 3。1960—2018 年近 60 年宁夏固原地区马铃薯全生育期的平均需水量为 376.2~472.3 mm,多年平均需水量为 439.3 mm。近 60 a 马铃薯生育期需水量逐年增加,每 10 a 增加 2.4 mm;缺水量与需水量年际变化体现出马铃薯全生育期缺水量每 10 a 增加 9.6 mm,最大缺水量出现于 2009 年,为 263.4 mm,最小值缺水量值出现于 1967 年,为 26.1 mm,差值为 273.3 mm,其多年平均缺水水量为 150.2 mm,2003 年需水量最大,为 472.3 mm;最小值于 1967 年出现,为 376.2 mm,差值为 96.1 mm。

春小麦生育期雨水量平均每 10 a 增加 0.8 mm,缺水量平均每 10 a 减少 2.7 mm。分析多年平均需水量及缺水量年际变化,缺水量年际变化趋势比较大,其中 2008 年缺水量值最大,为 194.6 mm;最小值

于 1984 年出现,为 49.3 mm,差值为 145.3 mm,多年平均缺水 137.5 mm;需水量最大值为 251 mm

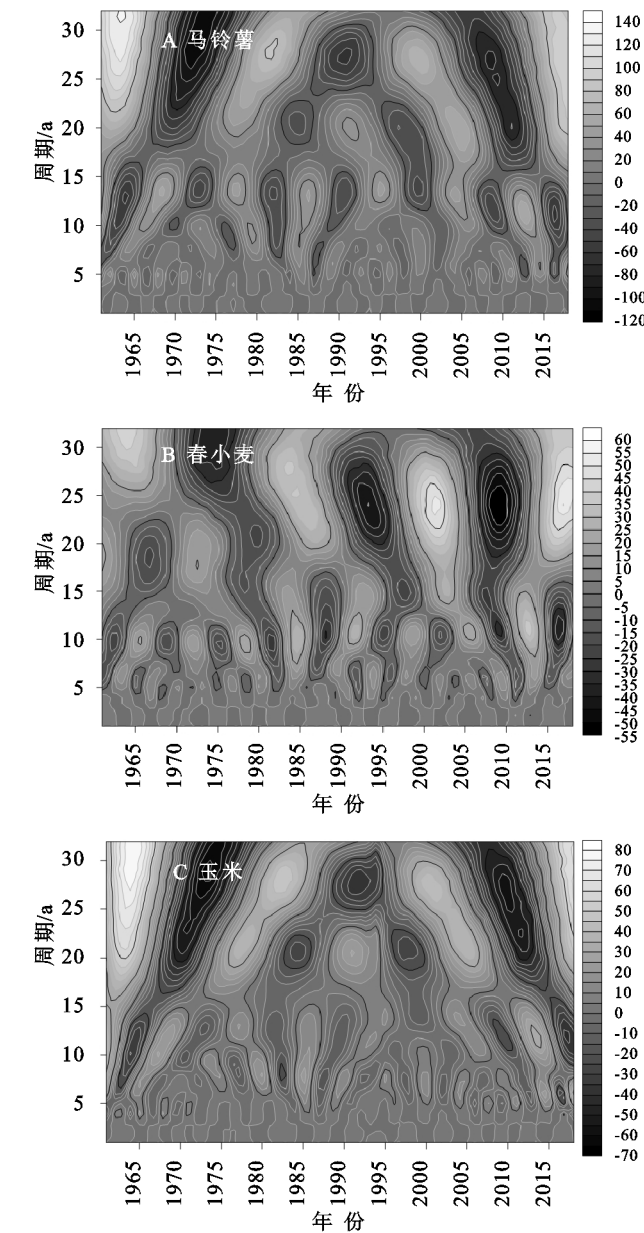
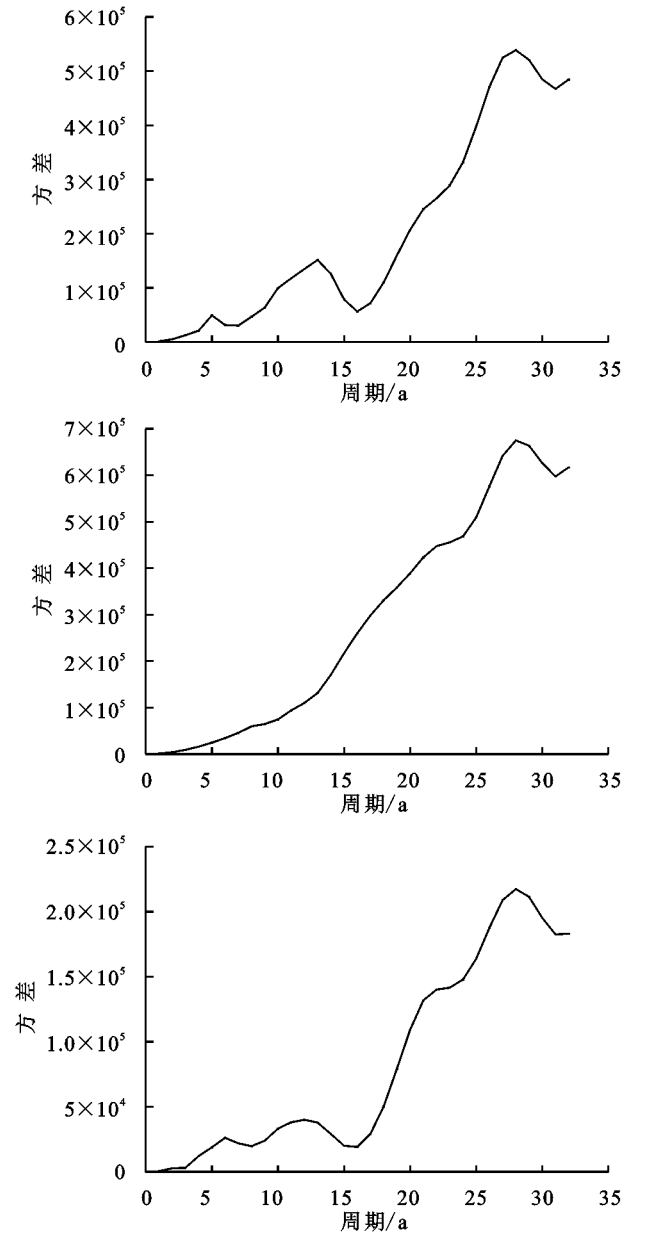


图 2 3 种农作物生育期有效降水小波变化

玉米生育期需水量也呈逐年增加趋势,平均每 10 a 增加 2.3 mm,且缺水量年际变化趋势与需水量基本一致,每 10 a 增加 6.0 mm;缺水量年际变化较大,其中,玉米缺水量最大值和最小值同马铃薯一样均出现在 2009 年和 1967 年,分别为 298.3 mm 和 156.9 mm,差值 141.4 mm,多年平均缺水 240.5 mm;2003 年需水量最大,为 448.1 mm,1967 年需水量最小,为 365.9 mm,差值为 82.2 mm,多年平均需水量为 417.2 mm。

对 3 种作物进行全生育期需水量周期分析,从图 4 中可以看出,随时间的推移,3 种作物周期呈“大—小—大”的变化趋势,且年际变化差异较大。对应结

(1998 年),最小值为 190.3 mm(1967 年),差值为 60.7 mm,多年平均需水量为 233.7 mm。



合小波方差图,马铃薯对应 3 个明显的峰值,28 a 时间尺度对应最大的峰值,表明其震荡最强烈,为第一个主周期,12 a 和 4 a 分别对应第二、三个主周期;分析春小麦和玉米小波方差图,两种作物均对应一个明显的峰值,为 28 a 时间尺度,对比 3 种作物的小波方差图与等值线分析结果,均一一对应。

2.3 作物水分盈亏指数分析

水分盈亏指数^[30]是反映农田湿度和作物缺水饱和状态的主要指标,它从降水量和蒸散发两个影响因素去考虑,判定作物需水和供水情况,图 5 为 3 种作物的水分盈亏指数分析结果。

结果显示马铃薯、玉米、春小麦的平均水分盈亏

指数分别为 -38.0% 、 -57.5% 、 -58.7% ，可以看出，固原市近 60 年降水资源处于严重短缺的状态，3 种作物对灌溉需水的依赖程度均较高，尤其是春小麦。由 M-K 突变检验结果看出 3 种作物水分盈亏率的变化趋势都有突变点，马铃薯的水分盈亏率在 1998 年以前变化趋势较为稳定，1998 年以后开始出现下降趋势；春小麦从 1960—1987 年经历了升降升的变化趋势，1987 年以后突破显著性检验水平，水分盈亏率在一段时间内呈显著上升趋势；玉米的水分亏缺率在 1960—1970 年呈现升降升的变化趋势，在 1970 年以后呈下降趋势，1998 年左右突破显著性检验水平，表现为显著性下降趋势，说明玉米生育期内水分亏缺越来越严重。

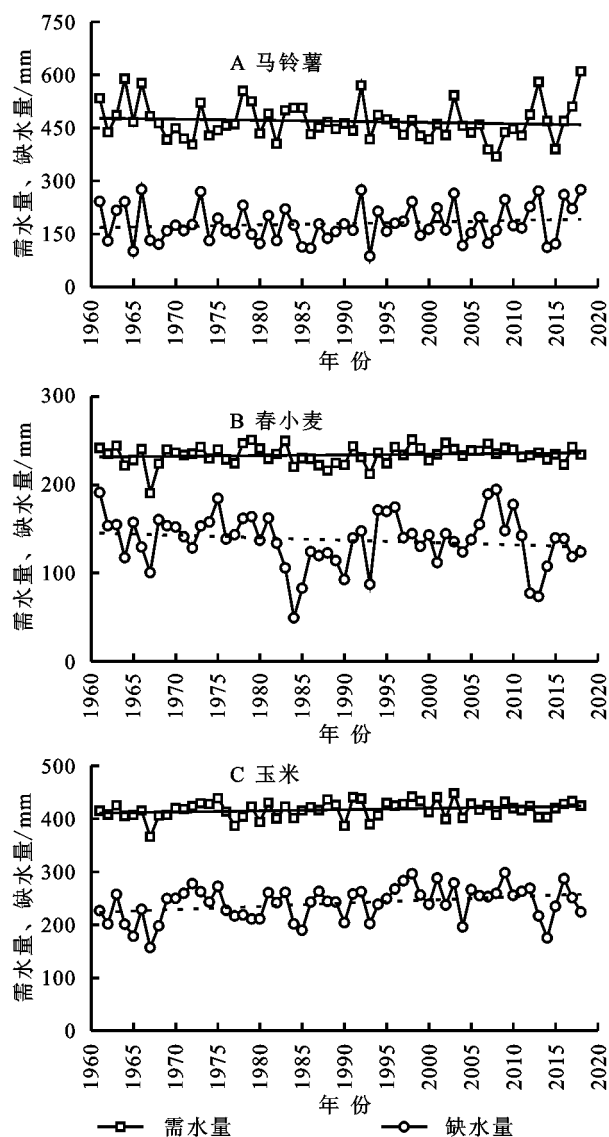


图 3 3 种农作物全生育期需水量与缺水率年际变化

3 讨论

宁夏固原年均降水量少、蒸发大，且降水主要分

布在 7—9 月份，属于典型的季节性降雨地区。近年来，由于全球气候的变化，使得固原地区干旱缺水、土壤水分流失严重加剧了生态环境的恶化，农业产量也受到严重影响。本文以固原地区为研究区域，通过对该地区主要农作物生育期作物系数进行校正，采用 Penman-Monteith 公式对该地区 3 种主要农作物生育阶段蒸发量进行计算，进而分析有效降雨量及作物生育期需水量的时空变化趋势及分布特征。

利用 3 种农作物生育期的气候条件对作物系数进行修正，能提高有效降雨量与需水量的计算精准度，更好地反映研究区的实际情况；针对降水变化趋势，近年来大多学者采用 M-K 检验法，从年降水天数、年均降水量等单变量的角度去分析^[31-32]，对于特定农作物在生育期的水分盈亏率研究较少，而本文针对研究区的 3 种主要农作物全生育期水分盈亏进行了分析。

研究发现 3 种作物全生育期内有效降水与作物需水的时间分布不均衡，导致该地区在某一时段内会出现严重干旱缺水的情况，且 3 种作物生育期需水量差异较大，水分盈亏较严重，有效降水量均不能满足作物水分需求，分析原因主要受 3 种农作物生育周期和气象因子的影响较大；尤其是春小麦缺水现状最为严重，春小麦生育周期主要分布在 3—7 月份且生育期内以小降雨为主，单次降雨量不能满足春小麦生长发育；玉米比马铃薯生育周期较长，生育期内降雨较为集中，但主要以大降雨为主，过大的降雨量来不及入渗至作物根区，利用率低，同样导致玉米和马铃薯生育期缺水严重。李伟君等^[33]、居辉^[34]分析全球气候变化对我国农作物影响，研究表明气候变化对小麦的影响最大，且建议应大面积的种植水稻代替玉米；雷学锋等^[35]研究发现马铃薯花序形成后与降水对产量的影响很大，建议提前或推后播种期。所以本文从时间和气候变化的角度分析，建议研究区进一步优化农作物的种植结构：考虑春小麦生育期降水较少，不利于春小麦的生长，故可以适当减少春小麦的播种面积，增加马铃薯的播种面积或引进其他品种的春小麦；针对马铃薯和玉米可以采用间套作的种植模式或针对玉米可以进行双垄沟覆膜节水集水灌溉技术。

气候因子对农作物需水影响较大，从当前变化不定的气候条件可以看出，干旱地区农业水源除天然降雨外，灌溉水仍是农业生产的主要补给水源，若在农作物主要需水时期供给有效的水量，在一定程度上可以使农作物提高增产效益；另外精准了解不同作物生育阶段有效降雨和需水量的现状，为避免灌溉水过度浪费，可以采用适当的节水灌溉措施，如膜下滴灌、沟灌等。

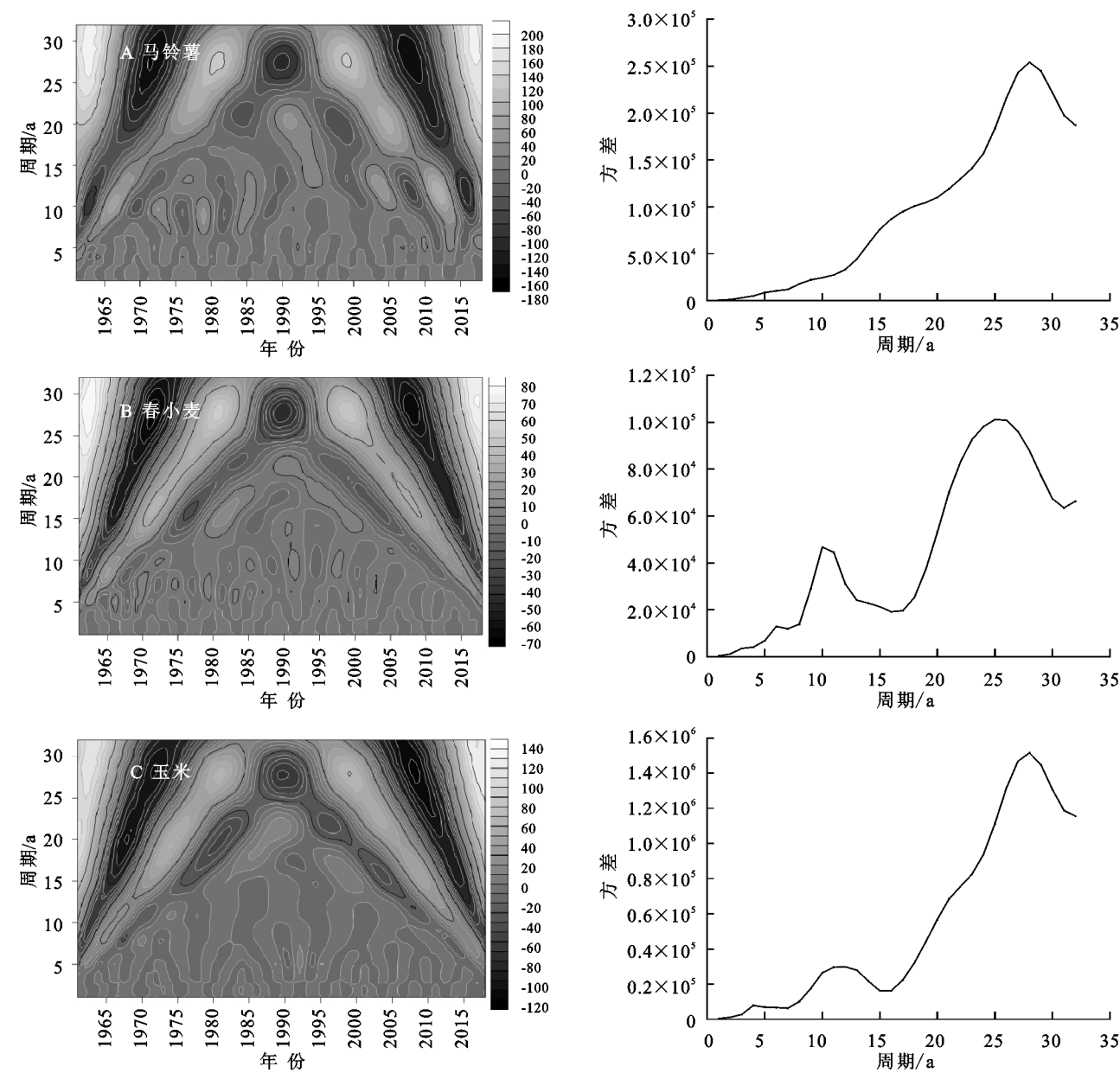


图 4 3 种农作物生育期需水量小波变化

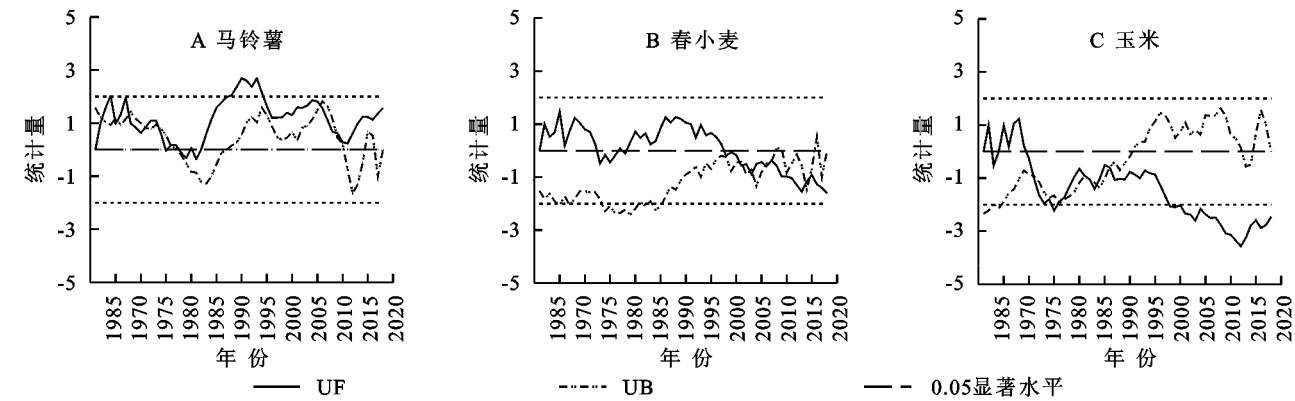


图 5 3 种作物生育期平均水分亏缺率 M-K 突变检验

本文主要针对 3 种作物生育期的需水量受降水量的变化进行分析,根据以往的研究表明,作物的需水量不仅仅只是随一种因素的呈相关关系,其他气象因子共同作用对 3 种作物需水量如何影响,还需进一步研究。

4 结论

(1) 3 种作物有效降雨量研究表明,近 60 年固原地区马铃薯全生育期有效降雨平均分布在 95~196

mm,春小麦全生育期有效降水量为 22.1~134.88 mm,玉米全生育期有效降水量为 117.43~287 mm;从整体分析,3 种作物全生育期有效降雨量玉米>马铃薯>春小麦,有效降水量均呈现出“大一小一大”的周期变化趋势。

(2) 3 种作物生育期需水量均呈上升趋势:马铃薯全生育期需水量最大值出现于 2003 年,为 472.3 mm;最小值出现于 1967 年,为 376.2 mm,差值为 96.1 mm,多年需水量为 439.3 mm;春小麦生育期需水量平均每 10 a 增加 0.8 mm,需水量最大值发生于 1998 年,为 251 mm,最小值发生于 1967 年,为 190.3 mm,差值为 60.7 mm,年均需水量为 233.7 mm;玉米生育期需水量平均每 10 a 上升 2.3 mm,需水量最大值发生于 2003 年,为 448.1 mm,最小值发生于 1967 年,为 365.9 mm,差值为 82.2 mm,多年平均需水量为 417.2 mm。

(3) 作物生育期水分盈亏指数:马铃薯、玉米、春小麦的平均水分盈亏指数为-38.0%,-57.5%和-58.7%,可以看出玉米和春小麦对灌溉需水的依赖较高。

参考文献:

- [1] 张德禹,范吴明,周丽丽,等.嫩江流域春季解冻期土壤侵蚀对气候变化的响应[J].水土保持研究,2009,16(6):112-115.
- [2] 任国玉,姜彤,李维京,等.气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J].水科学进展,2008,19(6):772-779.
- [3] 李尤亮,王杰,曹言,等.金沙江干热河谷区(云南境内)夏玉米需水量的变化特征[J].中国农村水利水电,2019(10):117-122.
- [4] 魏钟博,边大红,杜雄,等.黑龙港流域夏玉米生育期降水、需水和干旱时空分布特征[J].农业工程学报,2020,36(9):124-133.
- [5] 吴卫熊,莫明珠.1958—2015 年广西木薯有效降雨量和需水量的变化规律[J].节水灌溉,2020(2):80-82.
- [6] 张波,裴兴云,曹华,等.贵州烤烟需水量及灌溉需求指数特征[J].水土保持研究,2019,26(5):215-221.
- [7] 陈超,庞艳梅,潘学标.气候变化背景下四川省单季稻水分盈亏的变化特征[J].自然资源学报,2014,29(9):1508-1519.
- [8] 陈伟,陈丽,孙从建,等.黄土高原东部主要作物需水量空间分布规律[J].水土保持研究,2020,27(5):166-171,176.
- [9] 靳春香.近 50 年辽宁省玉米全生育期有效降水与需水量变化特征研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [10] 徐华军.气候变化背景下宁夏冬、春小麦产量和气象灾害特征比较研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [11] 曹永强,李维佳,朱明明.河北省冬小麦、棉花全生育期缺水时空特征分析[J].水土保持研究,2018,25(6):348-356.

- [12] 朱明明.河北省主要作物全生育期有效降雨量及需水规律研究[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2017.
- [13] Petra Doll, Stefan Siebert. Global modeling of irrigation water requirements [J]. Water Resources Research, 2002,38(4):1-8.
- [14] 曹永强,朱明明,李维佳.河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J].生态学报,2018,38(2):560-570.
- [15] 温忠辉,张刚,鲁程鹏,等.基于作物需水的灌溉用水量核算方法及应用[J].南水北调与水利科技,2015,13(2):370-373.
- [16] 曹永强,刘明阳,张路方.河北省夏玉米需水量变化特征及未来可能趋势[J].水利经济,2019,37(2):46-52,87.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements ~ FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [18] 庞艳梅,陈超,潘学标.1961—2010 年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征[J].农业工程学报,2015,31(S1):133-141.
- [19] 刘钰, Pereira L S.对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J].农业工程学报,2000,16(5):26-30.
- [20] 王梅,杨倩,郑江华,等.1963—2012 年新疆棉花需水量时空分布特征[J].生态学报,2016,36(13):4122-4130.
- [21] 何俊欧,凌霄霞,张建设,等.近 35 年湖北省低丘平原区玉米需水量及早涝时空变化[J].作物学报,2017,43(10):1536-1547.
- [22] 王静,张晓煜,马国飞,等.1961—2010 年宁夏灌区主要作物需水量时空分布特征[J].中国农学通报,2015,31(26):161-169.
- [23] 马凤莲,温永菁,李春强,等.冀北地区近 50 a 马铃薯需水量及水分盈亏时空变化特征[J].中国生态农业学报:中英文,2020,28(5):713-723.
- [24] 陈东东,栗晓玮,张玉芳,等.四川省水稻关键生育期不同等级干旱评估研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,2017,42(10):69-77.
- [25] 苏永秀,李政,吕厚荃.水分盈亏指数及其在农业干旱监测中的应用[J].气象科技,2008,36(5):592-595,681-682.
- [26] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社,1993.
- [27] 张璐,周跃. Mann-Kendall 检验及其在河流悬沙浓度时间序列分析中的运用[J].亚热带水土保持,2007(4):13-16.
- [28] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992(4):482-493.
- [29] 张建成.基于多变量 M-K 检验的大凌河流域降水趋势分析[J].黑龙江水利科技,2020,48(1):29-33.

- [6] Wang L, Yu H, Yang M L, et al. A drought index: The standardized precipitation evapotranspiration runoff index[J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 651-668.
- [7] Bong C H J, Richard J. Drought and climate change assessment using standardized precipitation index (SPI) for Sarawak River Basin[J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(4): 956-965.
- [8] Liu Y, Zhu Y, Ren L L, et al. A multiscalar palmer drought severity index [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(13): 6850-6858.
- [9] 宋琳琳, 张强, 任余龙, 等. PDSI 及 sc_PDSI 干旱指数在中国西南地区适用性分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 242-251.
- [10] 景朝霞, 夏军, 匡洋, 等. 基 CI 指数的渭河流域干旱时空演变特征研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(7): 86-91, 95.
- [11] 温庆志, 孙鹏, 张强, 等. 非平稳标准化降水蒸散指数构建及中国未来干旱时空格局[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1465-1482.
- [12] 鲁帆, 肖伟华, 严登华, 等. 非平稳时间序列极值统计模型及其在气候—水文变化研究中的应用综述[J]. 水利学报, 2017, 48(4): 379-389.
- [13] Bazrafshan J, Hajabi S. A non-stationary reconnaissance drought index(NRDI) for drought monitoring in a changing climate[J]. Water Resources Management, 2018, 32(8): 2611-2624.
- [14] Liu Y, Yang X L, Ren L L, et al. A new physically based self-calibrating palmer drought severity index and its performance evaluation[J]. Water Resources Management, 2015, 29(13): 4833-4847.
- [15] 姚曼飞, 党素珍, 孟美丽, 等. 基于 Copula 函数的泾河流域水沙丰枯遭遇频率分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 192-196, 202.
- [16] 林娴, 欧阳昊, 陈晓宏, 等. 基于 Copula 函数的组合变量联合概率分布研究及应用[J]. 水文, 2017, 37(1): 1-7.
- [17] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 206-214.
- [18] 姚蕊, 孙鹏, 张强, 等. 基于 Copula 淮河流域水文干旱频率分析及影响研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2019, 55(6): 755-763.
- [19] 周秉根, 陈建业, 何俊杰, 等. 2009—2010 年冬春季节我国西南地区持续干旱的成因分析[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2012, 35(1): 52-55.
- [20] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 2018[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 82-87.
- [21] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. 地理学报, 2011, 69(9): 1179-1190.
- [22] 牛文娟, 苟思, 刘超, 等. 横断山地区 1979—2015 年干旱时空分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(S2): 97-103.
- [23] 左冬冬, 侯威, 颜鹏程, 等. 基于游程理论和两变量联合分布的中国西南地区干旱特征研究[J]. 物理学报, 2016, 63(23): 53-64.
- [24] 李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区 1960—2008 年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 563-579.
- [25] 朱国锋, 何元庆, 蒲焘, 等. 1960—2009 年横断山区潜在蒸发量时空变化[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 905-916.
- [26] 万云霞, 张万诚, 肖子牛. 近百年云南纵向岭谷区气温的时空变化特征[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 183-188.
- [27] 丁文荣. 横断山区典型干旱河谷干湿状况演变特征及影响因素研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11): 6-10.
- [28] 王飞, 王宗敏, 杨海波, 等. 基于 SPEI 的黄河流域干旱时空格局研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1169-1183.
- [29] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5882-5893.

(上接第 212 页)

- [30] 徐盼盼, 王海科, 钱会, 等. 铜川市降水变化及趋势预测分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 82-86, 90.
- [31] 李楠, 孙培良, 韩雪蕾, 等. 鲁西地区冬小麦需水量、有效降雨及缺水量变化特征[C]// 合肥: 第 35 届中国气象学会年会 S6 应对气候变化、低碳发展与生态文明建设, 2018.
- [32] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349: 350-363.
- [33] 李祎君, 王春乙. 气候变化对我国农作物种植结构的影响[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(2): 123-129.
- [34] 居辉, 熊伟, 许吟隆, 等. 气候变化对我国小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1340-1343.
- [35] 雷学锋, 王桂芳. 固原市不同播期马铃薯生物量特征及其与气象因子的关系研究[J]. 现代农业科技, 2018(23): 82-83.