

DOI: 10.5846/stxb201901150125

张华,王浩,徐存刚.1967—2017 年甘肃省玉米需水量与缺水量时空分布特征.生态学报,2020,40(5):1718-1730.

Zhang H, Wang H, Xu C G. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of maize in Gansu Province from 1967 to 2017. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1718-1730.

1967—2017 年甘肃省玉米需水量与缺水量时空分布特征

张 华*, 王 浩, 徐存刚

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要:基于 1967—2017 年甘肃省 28 个气象站点的逐日气象数据,采用联合国粮食与农业组织 (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations) 推荐的作物系数法计算了玉米各生育阶段和全生育期的需水量,结合美国农业部土壤保持局 (SCS, Soil Conservation Service) 推荐的方法计算了玉米全生育期的有效降水量,进而得到需水量。并利用线性倾向估计、Mann-Kendall 检验和空间插值法对甘肃省玉米需水量和缺水量的年际变化趋势和空间分布特征进行分析。结果表明:1967—2017 年甘肃省玉米全生育期平均降水量、平均有效降水量、平均需水量和平均缺水量分别为 210.43、113.21、545.95 mm 和 421.00 mm;在时间上,51 年来,甘肃省玉米全生育期内的降水量和有效降水量整体上呈明显的下降趋势,而需水量和缺水量整体上没有明显的变化趋势,属于正常波动;在空间上,玉米全生育期的降水量和有效降水量整体上由东南向西北减少,而需水量和缺水量整体上由东南向西北增加。28 个站点中,51 年来只有甘南和岷县站点的有效降水量能满足玉米生长初期的需水要求,其他站点在任何生长阶段均不能满足玉米需水要求,需要进行人工灌溉。

关键词:玉米;有效降水量;需水量;缺水量;甘肃省

Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of maize in Gansu Province from 1967 to 2017

ZHANG Hua*, WANG Hao, XU Cungang

College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Based on the daily meteorological data of 28 meteorological stations in Gansu Province from 1967 to 2017, the water requirement in different growth periods and the whole growth period of maize were calculated using the crops coefficient method recommended by Food and Agriculture Organization of the United Nations. Meanwhile, the effective precipitation in the whole growth period of maize was calculated by using the method established by the U.S. Department of Agriculture Soil Conservation. Thus, the water deficit was obtained. The interannual variation and spatial distribution characteristics of water requirement and water deficit in Gansu Province were analyzed by linear propensity estimation, Mann-Kendall test and spatial interpolation method. The results showed that the average precipitation, average effective precipitation, average water requirement and average water shortage during the whole growth period of maize in Gansu Province from 1967 to 2017 were 210.43 mm, 113.21 mm, 545.95 mm, and 421.00 mm, respectively. In past 51 years, the precipitation and effective precipitation in the whole growth period of maize showed a significant downward trend, while the water requirement and water deficit had no obvious change, which were normal fluctuation. In terms of space, the precipitation and effective precipitation in the whole growth period of maize decreased from southeast to northwest in general. On the contrary, the water requirement and water deficit increased from southeast to northwest on the whole. Among the 28

基金项目:国家自然科学基金项目(41461011)

收稿日期:2019-01-15; 网络出版日期:2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghua2402@163.com

meteorological stations, only the effective precipitation of the Gannan and Minxian sites can meet the maize requirement water in the early growth stage in past 51 years. Other sites cannot meet the water requirement of maize at any stage of growth and require manual irrigation.

Key Words: maize; effective precipitation; water requirement; water deficit; Gansu Province

农业作为国家社会经济发展的基础产业,直接影响国家安全,水资源则是影响农业发展的重要因素^[1]。甘肃省地处干旱区,水资源短缺成为限制农业发展的首要因子^[2]。玉米是甘肃省主要的粮食作物,2017 年甘肃省玉米播种面积达到 $1.04 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省农作物播种面积的 27.84%^[3],较大的玉米播种面积加剧了甘肃省水资源短缺,因此精确量化玉米需水量和缺水量对农业水资源分配和农业发展具有重要意义^[4]。

目前,我国农业灌溉用水占全国总用水量的 70%以上,农业用水量大且利用效率低成为阻碍我国农业发展的原因之一^[5]。如何确定农作物生长阶段的需水量与缺水量成为提高农业用水效率、节约水资源的首要问题。作物需水量是指生长在大面积上的无病虫害作物,水分和肥力适宜时,在给定的环境中能取得高产潜力的条件下为满足植株蒸腾和棵间蒸发所需要的水量^[6]。研究作物需水量与缺水量时空特征是确定作物灌溉制度的前提条件,是农业灌溉工程设计的基本依据,更是保证农作物健康生长和水资源合理利用的重要环节。国内外学者对农作物需水量做了较多研究。第一种是直接计算需水量的方法,主要包括蒸发皿法(α 值法)、产量法和多因素法等,这些方法误差较大且不能计算各阶段作物需水量^[6]。第二种是通过参考作物需水量计算作物实际需水量的方法,主要包括布莱尼-克雷多公式、水汽扩散法公式、波比文-能量平衡法和 Penman-Monteith 公式法等^[7-10],其中 Penman-Monteith 公式法作为联合国粮食与农业组织(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)推荐的方法,考虑了影响蒸散的大气物理特性和植物生理机制,具有很好的物理基础,被国内外学者广泛应用^[11-12]。第三种是运用遥感方法测定作物需水量^[13],但是目前还处于探索阶段,精度还未能达到实际要求^[14]。众多学者主要对农作物需水量进行了较多的研究^[15-24],而农作物缺水量方面的研究并不多见,因此本文基于 1967—2017 年甘肃省 28 个气象站点的逐日气象数据,首先计算甘肃省 28 个气象站点玉米的全生育期需水量和各阶段需水量,再根据全生育期有效降水量获得缺水量,最后对甘肃省玉米需水量与缺水量进行时空分析,以期为甘肃省农业发展和农业水资源合理分配提供科学依据。

1 研究区概况

甘肃省地处黄河中上游,地理范围在 $32^{\circ}31' - 42^{\circ}57' \text{N}$ 和 $92^{\circ}13' - 108^{\circ}46' \text{E}$ 之间。位于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原交汇地带,东西长 1655 km,南北宽 530 km,总面积 $45.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[25],大致可以分为河西地区、陇中地区、陇东地区、陇南地区和甘南地区(图 1)^[26]。2017 年,河西、陇中、陇东、陇南和甘南地区玉米种植面积分别达到 3010.4、2368.6、2751.0、1546.9 km^2 和 739.2 km^2 ^[3];河西、陇中、陇东、陇南和甘南地区农田灌溉用水量分别为 5.93×10^9 、 1.50×10^9 、 1.97×10^8 、 $2.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.17 \times 10^8 \text{ m}^3$,总体上河西地区农业用水以灌溉为主,其他地区以降水补给为主^[27]。根据甘肃 1967—2017 年 28 个气象站点资料显示,河西、陇中、陇东、陇南和甘南地区 51 年平均降水量分别为 119.25、348.22、441.47、446.53 mm 和 457.03 mm。省内年平均气温在 $0 - 16^{\circ}\text{C}$ 之间,年降水量在 36.6—734.9 mm 之间,大致从东南向西北递减,乌鞘岭以西降水明显减少,属于温带大陆性气候^[28]。省内植被类型丰富多样,自东南向西北依次为森林、草原和荒漠的水平分布类型,高海拔地区,植被的垂直地带性规律显著^[29]。甘肃省土壤类型丰富,主要以黄绵土为主,同时具有典型的垂直分布特征^[30]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究采用国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)发布的甘肃省 28 个地面气象观测站 1967—2017 年

表 1 甘肃省各站点玉米不同生长阶段作物系数

Table 1 Crop coefficients of different growth periods of maize at various sites in Gansu Province

甘肃省 Gansu Province	气象站点 Meteorological stations	生长初期作物系数 Crop coefficients at the beginning of growth	生长中期作物系数 Crop coefficients at mid-growth stage	生长末期作物系数 Crop coefficients at the end of growth
河西地区 Arid region of Hexi Corridor	马鬃山	0.38	1.35	0.50
	敦煌	0.35	1.27	0.42
	安西	0.36	1.29	0.44
	玉门镇	0.36	1.29	0.44
	鼎新	0.36	1.28	0.43
	金塔	0.35	1.27	0.41
	酒泉	0.35	1.25	0.40
	高台	0.33	1.22	0.39
	张掖	0.34	1.24	0.39
	山丹	0.35	1.26	0.41
	永昌	0.35	1.24	0.39
	民勤	0.36	1.27	0.41
	武威	0.34	1.23	0.37
	乌鞘岭	0.35	1.25	0.39
陇中地区 Semi-arid region of Longzhong	景泰	0.35	1.23	0.37
	皋兰	0.33	1.21	0.35
	靖远	0.32	1.20	0.34
	榆中	0.32	1.20	0.33
	临洮	0.31	1.17	0.31
	华家岭	0.34	1.23	0.36
	岷县	0.31	1.17	0.31
陇东地区 Loess plateau of Longdong	环县	0.33	1.19	0.32
	平凉	0.32	1.16	0.30
	西峰镇	0.32	1.17	0.31
陇南地区 Longnan humid region	武都	0.31	1.19	0.31
	北道	0.31	1.17	0.29
甘南地区 Gannan plateau	甘南	0.32	1.19	0.32
	临夏	0.31	1.16	0.29

2.2.2 玉米缺水量

玉米缺水量等于玉米生育期的需水量与同时期的有效降水量之差^[33],计算公式如下:

$$W = \sum_1^n ET_c - \sum_1^n P_e \quad (3)$$

式中, W 为玉米生育期总缺水量(mm); n 为玉米生育期日数(d); ET_c 为作物需水量(mm/d); P_e 为有效降水量(mm/d),即降水量中主要提供给作物蒸腾的水量^[34]。

有效降水量(P_e)采用美国农业部土壤保持局(SCS, Soil Conservation Service)推荐的方法^[34-35],其公式如下:

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17} & (P < 8.3 \text{ mm/d}) \\ 4.17 + 0.1P & (P \geq 8.3 \text{ mm/d}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_e 为有效降水量(mm/d), P 为实际降水量(mm/d)。

2.2.3 线性倾向估计

将玉米生育期降水量、有效降水量、需水量和缺水量(y)的长期变化趋势采用线性回归方程分析,其公

式为:

$$y = at + b \quad (5)$$

式中, t 为年份序号 ($t=1, 2, \dots, n$); b 为常数; a 为回归系数, 也称为倾向值, 其中若 $a>0$, 则说明随着时间 t 的增加 y 呈上升趋势, 若 $a<0$, 则说明随着时间 t 的增加 y 呈下降趋势^[36]。

2.2.4 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验的方法^[37], 本研究借助 MATLAB 软件对甘肃省玉米全生育期的降水量、有效降水量、需水量和缺水量进行检验。得到正序曲线 UF 与逆序曲线 UB, 当 UF 或 UB 值大于 0 时, 表明序列呈上升趋势, 相反, 表明序列呈下降趋势。当他们超过显著性水平线时, 则表明上升或下降趋势显著, 当 UF 与 UB 两条曲线出现交点时, 且交点在显著性水平线之间, 则表示该时刻为突变开始时刻。若交点位于显著性水平线之外, 或者存在多个明显交点, 则不能确定是否为突变点。若不能确定是否为突变点, 再用滑动 t 检验法(子序列最小取值为 5 年, 显著性水平为 $\alpha=0.01$) 对可能存在的突变点进行验证^[36]。

2.2.5 空间插值

将得到的玉米全生育期内和各生长阶段的降水量、有效降水量、需水量和缺水量数据, 运用 ArcGIS 10.2 中的反距离权重插值方法 (IDW, Inverse Distance Weighted) 进行空间插值, 得到相应的空间分布。

3 结果与分析

3.1 时间变化

3.1.1 玉米全生育期需水量与缺水量年际变化

根据 28 个气象站点降水量和有效降水量得到甘肃省玉米全生育期的降水量和有效降水量。1967—2017 年, 甘肃省玉米全生育期内的降水量在 105.73—294.80 mm 之间, 平均值为 210.43 mm, 最小年份为 2009 年, 最大年份为 1967 年; 有效降水量在 80.17—144.22 mm 之间, 平均值为 113.21 mm, 最小年份为 2009 年, 最大年份为 1967 年(图 2)。降水量和有效降水量整体上呈现下降趋势, 两者都通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验(表 2)。将玉米全生育期的降水量和有效降水量进行 Mann-Kendall 检验, 结果表明 1967—2017 年降水量整体呈现下降趋势; 在 2000 年后, 降水量与有效降水量出现明显的下降趋势; 其中两者的 UF 与 UB 曲线在 1990 年都出现交点, 且交点存在于显著性水平线之间, 表明玉米全生育期的降水量和有效降水量下降是突变现象, 突变开始的时间为 1990 年(图 3)。

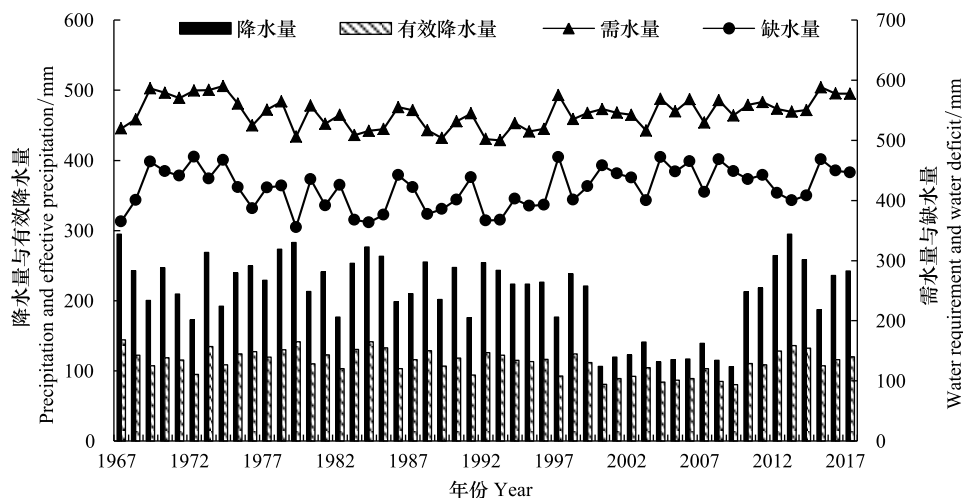


图 2 甘肃省玉米全生育期降水量、有效降水量、需水量和缺水量年际变化

Fig.2 Interannual variation of precipitation, effective precipitation, water requirement and water deficit during the whole growth period of maize in Gansu Province

根据 28 个气象站点需水量和缺水量得到甘肃省玉米全生育期的需水量和缺水量。1967—2017 年,甘肃省玉米全生育期的需水量在 499.99—590.34 mm 之间,平均值为 545.95 mm,最小年份为 1993 年,最大年份为 1974 年;缺水量在 355.64—472.68 mm 之间,平均值为 421.00 mm,最小年份为 1979 年,最大年份为 1972 年(图 2)。需水量与缺水量整体上处于上升趋势,但未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,属于正常波动(表 2)。将玉米全生育期的需水量和缺水量进行 Mann-Kendall 突变检验,结果表明 1967—1978 年玉米需水量处于上升趋势,1978—2014 年处于下降趋势;UF 与 UB 曲线存在 4 个交点,交点位于 1968 年、1971 年、1974 年和 2015 年,再经过滑动 t 检验,最终确定 1974 年为突变点,这表明 1974 年是玉米需水量由上升到下降的突变点(图 3)。

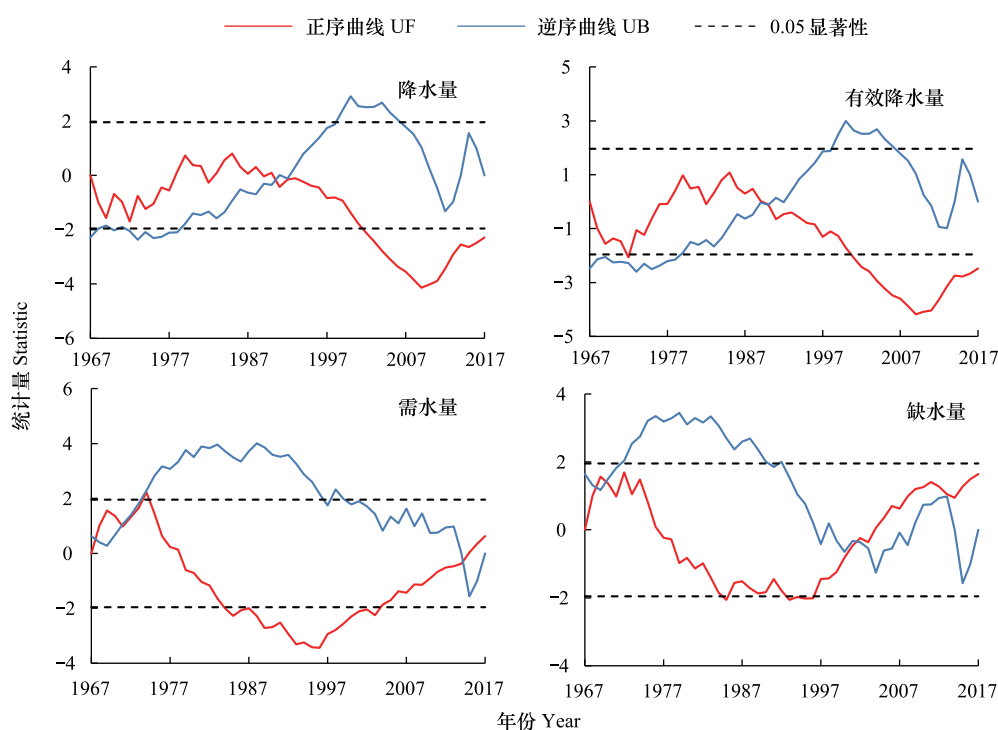


图 3 甘肃省玉米全生育期降水量、有效降水量、需水量和缺水量的 Mann-Kendall 检验

Fig.3 Mann-Kendall test of precipitation, effective precipitation, water requirement and water deficit during the whole growth period of maize in Gansu Province

3.1.2 玉米各生长阶段需水量与缺水量年际变化

1967—2017 年,甘肃省玉米生长初期降水量在 19.92—100.04 mm 之间,平均值为 48.78 mm;有效降水量在 15.14—49.31 mm 之间,平均值为 28.64 mm;需水量在 81.34—101.01 mm 之间,平均值为 61.85 mm;缺水量在 32.02—81.94 mm 之间,平均值为 61.85 mm(图 4)。降水量与有效降水量均呈下降趋势,但未能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,变化趋势不明显;需水量与缺水量呈上升趋势,但未能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,变化趋势亦不明显(表 2)。

1967—2017 年,甘肃省玉米生长发育期降水量在 31.43—170.03 mm 之间,平均值为 85.08 mm;有效降水量在 23.95—75.02 mm 之间,平均值为 43.77 mm;需水量在 196.86—250.40 mm 之间,平均值为 224.47 mm;缺水量在 127.13—215.90 mm 之间,平均值为 180.70 mm(图 4)。降水量与有效降水量呈下降趋势,通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,下降趋势明显;需水量与缺水量呈上升趋势,但未能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,变化趋势不明显(表 2)。

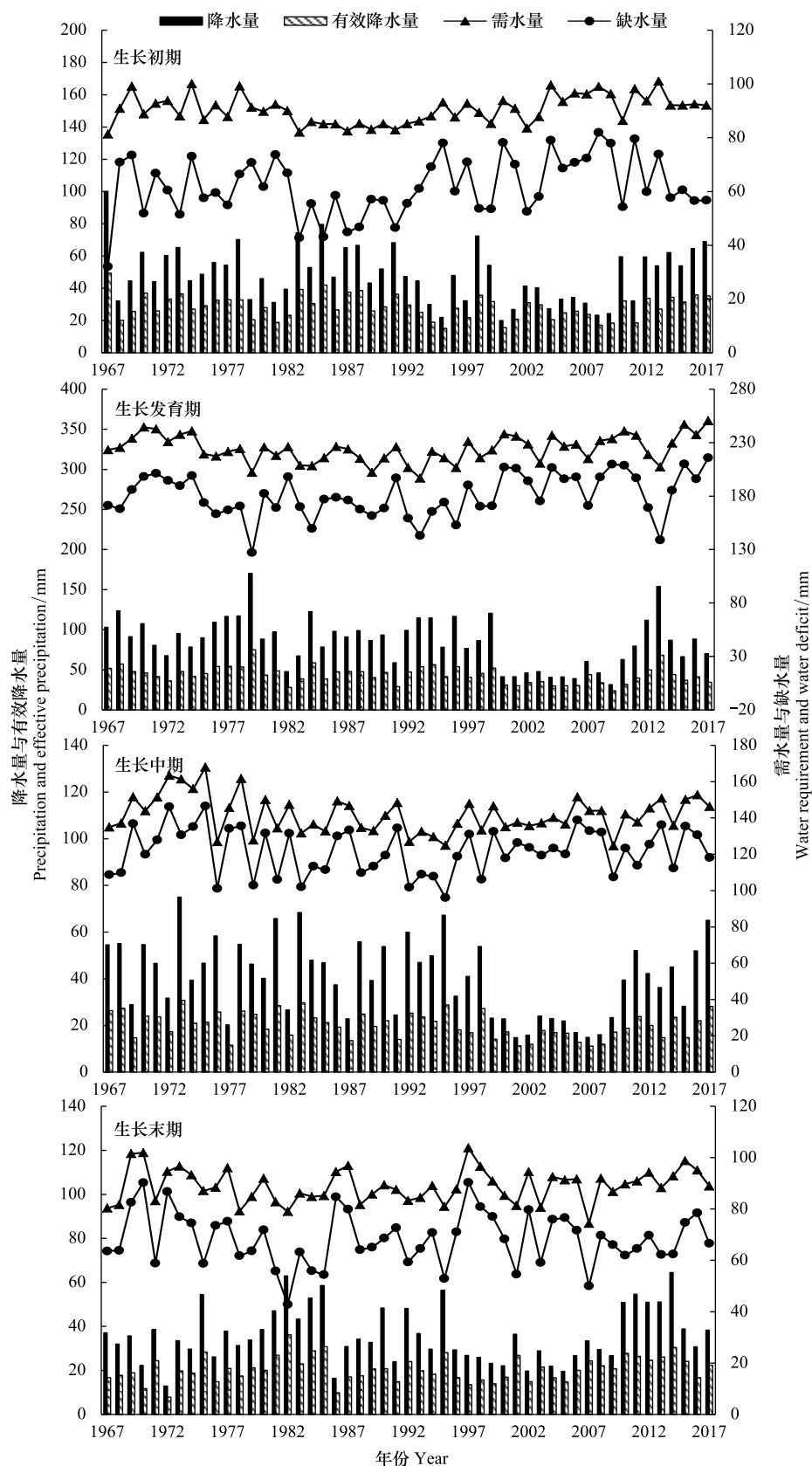


图 4 甘肃省玉米各生育阶段降水量、有效降水量、需水量和缺水量的年际变化

Fig.4 Interannual variation of precipitation, effective precipitation, water requirement and water deficit during the different growth period of maize in Gansu Province

1967—2017 年,甘肃省玉米生长中期降水量在 14.83—74.95 mm 之间,平均值为 40.58 mm;有效降水量在 11.07—30.75 mm 之间,平均值为 20.19 mm;需水量在 124.53—167.86 mm 之间,平均值为 141.97 mm;缺水量在 96.10—146.51 mm 之间,平均值为 121.78 mm(图 4)。降水量与有效降水量呈下降趋势,通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,下降趋势明显;需水量呈下降趋势,缺水量呈现上升趋势,两者均未能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,变化趋势不明显(表 2)。

1967—2017 年,甘肃省玉米生长末期降水量在 12.93—64.48 mm 之间,平均值为 35.99 mm;有效降水量在 7.84—36.17 mm 之间,平均值为 20.62 mm。需水量在 74.36—103.80 mm 之间,平均值为 89.02 mm;缺水量在 42.84—90.31 mm 之间,平均值为 68.41 mm(图 4)。降水量、有效降水量均呈上升趋势,但两者未能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,变化趋势不明显;需水量呈上升趋势,缺水量呈下降趋势,但两者也未能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,变化趋势亦不明显(表 2)。

表 2 甘肃省玉米各生长阶段降水量、有效降水量、需水量和缺水量线性倾向估计

Table 2 Estimation of linear tendency of precipitation, effective precipitation, water requirement and water deficit in different growth stages of maize in Gansu Province

生长阶段 Growth stage	项目 Item	线性倾向估计 Linear tendency estimate	倾向值 Propensity value	相关系数 Correlation coefficient
生长初期 Early growth	降水量	$y = -0.2659x + 55.69$	-0.27	0.23
	有效降水量	$y = -0.0988x + 31.209$	-0.10	0.20
	需水量	$y = 0.0901x + 88.145$	0.09	0.25
	缺水量	$y = 0.1889x + 56.937$	0.19	0.25
生长发育期 Vigorous period	降水量	$y = -0.7421x + 104.37$	-0.74	0.36 *
	有效降水量	$y = -0.2515x + 50.309$	-0.25	0.36 *
	需水量	$y = 0.1137x + 221.52$	0.11	0.13
	缺水量	$y = 0.3651x + 171.21$	0.37	0.27
生长中期 Medium growth	降水量	$y = -0.3535x + 49.772$	-0.35	0.32 *
	有效降水量	$y = -0.1229x + 23.38$	-0.12	0.33 *
	需水量	$y = -0.1221x + 145.14$	-0.12	0.18
	缺水量	$y = 0.0008x + 121.76$	0.00	0.00
生长末期 End of growth	降水量	$y = 0.068 + 34.219$	0.07	0.08
	有效降水量	$y = 0.076x + 18.641$	0.08	0.20
	需水量	$y = 0.0344x + 88.129$	0.03	0.08
	缺水量	$y = -0.0415x + 69.488$	-0.04	0.06
全生育期 Whole growth period	降水量	$y = -1.2934x + 244.05$	-1.29	0.35 *
	有效降水量	$y = -0.3972x + 123.54$	-0.40	0.35 *
	需水量	$y = 0.1161x + 542.93$	0.12	0.07
	缺水量	$y = 0.5194x + 407.5$	0.52	0.23

* 表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验

3.1.3 各站点玉米需水量与缺水量年际变化

1967—2017 年,甘肃省 28 个站点玉米全生育期的降水量倾向值在 -4.52—0.59 之间,有 25 个站点处于下降趋势,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的有马鬃山、高台和武威等 14 个站点;有效降水量倾向值在 -1.41—0.75 之间,有 22 个站点处于下降趋势,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的有武威、乌鞘岭和靖远等 12 个站点。综上所述,甘肃省大部分站点玉米全生育期的降水量和有效降水量处于下降趋势,且主要集中在陇中、陇南和陇东地区。1967—2017 年,甘肃省 28 个站点玉米全生育期需水量倾向值在 -2.27—2.17 之间,有 8 个站点处于减少趋势,其中通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点有安西、玉门镇、景泰和皋兰 4 个站点,有 20 个站点处于上升趋势,其中通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点有马鬃山、高台等 10 个站点;缺水量倾向值在 -2.23—2.42,有 6 个站点处于下降趋势,通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验的有安西、玉门镇和景泰 3 个站点,22 个站点处于上升趋势,通过 $\alpha=$

0.05显著性检验的有马鬃山、高台等 9 个站点。综上所述,甘肃省大部分站点玉米全生育期的需水量和缺水量都处于增加趋势,主要集中在陇中和河西地区(图 5)。

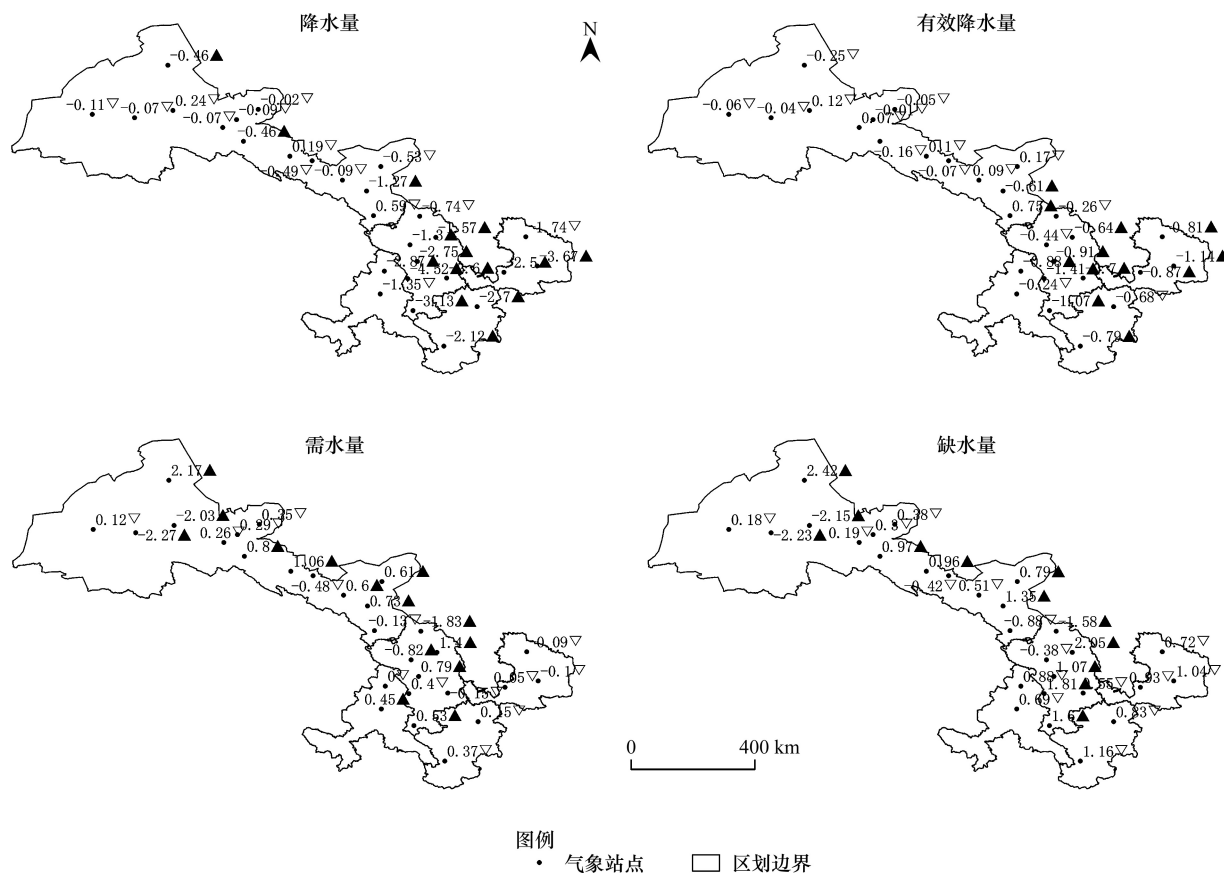


图 5 甘肃省各站点玉米全生育期降水量、有效降水量、需水量与缺水量倾向值

Fig.5 Propensity value of precipitation, effective precipitation, water requirement and water deficit during the whole growth period of maize at each meteorological site in Gansu Province

▲和▽分别表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验和未通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验

3.2 空间分布

3.2.1 玉米全生育期需水量和缺水量空间分布

甘肃省 28 个站点中,玉米全生育期 51 年的平均降水量在 21.81(高台)—429.84(岷县) mm 之间,各站点 51 年的平均降水量为 210.43 mm;全生育期 51 年平均有效降水量在 16.24(高台)—229.65(岷县) mm 之间,各站点 51 年平均有效降水量为 113.21 mm;全生育期 51 年平均需水量在 367.08(甘南)—845.38(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均需水量为 545.95 mm;全生育期 51 年平均缺水量在 57.24(皋兰)—805.59(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均缺水为 421.00 mm。由以上可知,甘肃玉米在全生育期都缺水,并且河西地区缺水严重。整体上,降水量和有效降水量从东南向西北减少,两者大体上分布一致,而需水量和缺水量则从东南向西北增加,两者大体上分布一致;降水量、有效降水量、需水量和缺水量的空间差异明显(图 6)。

3.2.2 玉米各生长阶段需水量和缺水量空间分布

甘肃省 28 个站点中,玉米生长初期 51 年平均需水量在 57.50(甘南)—130.15(鼎新) mm 之间,各站点 51 年平均需水量为 90.49 mm;玉米生长初期 51 年平均缺水量在 -11.95(岷县)—125.40(鼎新) mm 之间,各站点 51 年平均缺水为 61.85 mm。整体上,需水量和缺水量由西北向东南递减;在甘南和岷县部分地区降水量基本可以满足玉米需水量的要求,其他地区需要进行人工灌溉,尤其是河西地区。甘肃省 28 个站点中,玉

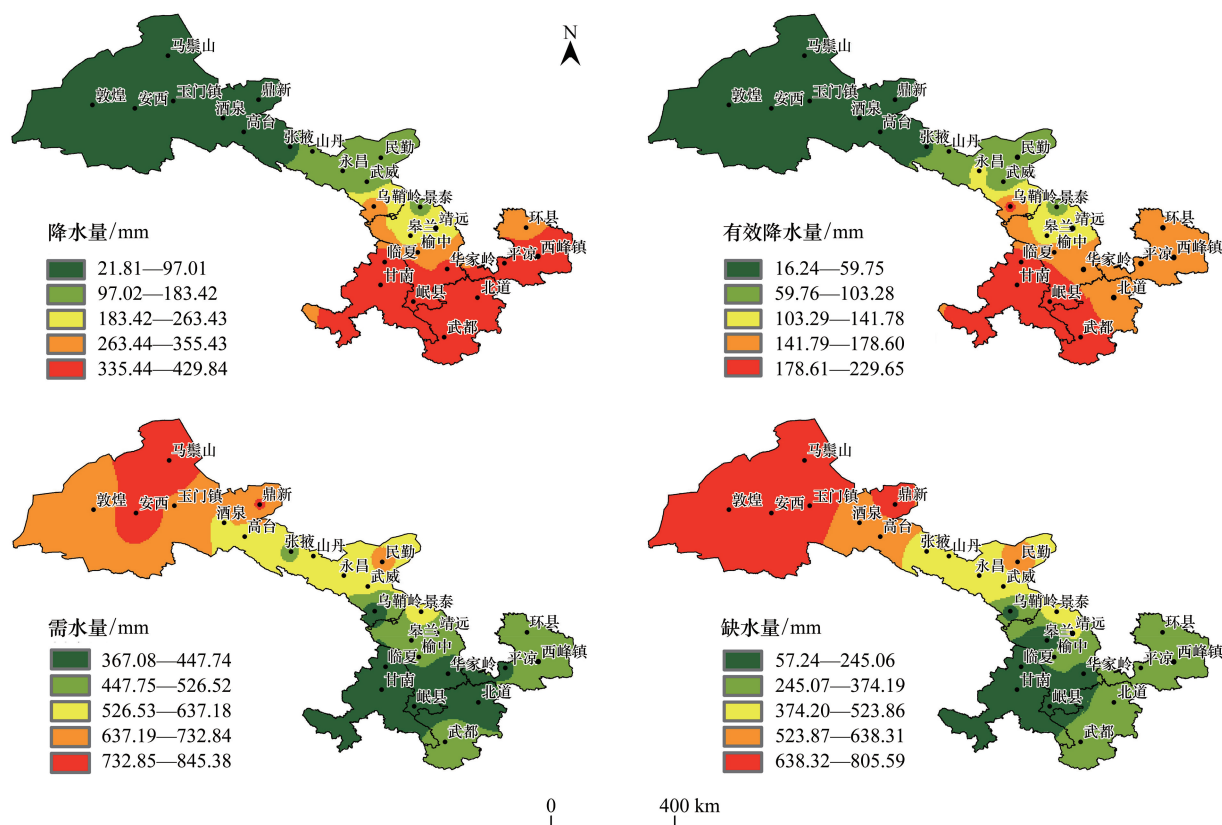


图 6 玉米全生育期降水量、有效降水量、需水量和缺水量的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of precipitation, effective precipitation, water requirement and water deficit during the whole growth period of maize

玉米生长发育期 51 年平均需水量在 137.95(张掖)—344.62(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均需水量为 224.47 mm;玉米生长发育期 51 年平均缺水量在 61.69(甘南)—323.30(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均缺水为 180.70 mm。整体上,需水量和缺水量由西北向东南递减。在玉米生长发育期,降水量不能满足玉米生长的需求,甘肃玉米在生长发育期全部缺水(图 7)。

甘肃省 28 个站点中,玉米生长中期 51 年平均需水量在 96.41(甘南)—222.47(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均需水量为 141.97 mm;玉米生长中期 51 年平均缺水量在 60.30(甘南)—95.53(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均缺水为 121.78 mm。甘肃省 28 个站点中,玉米生长末期 51 年平均需水量在 59.97(岷县)—149.95(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均需水量为 89.02 mm;玉米生长末期 51 年平均缺水量在 19.71(岷县)—146.10(马鬃山) mm 之间,各站点 51 年平均需水量为 68.41 mm。玉米生长中期和生长末期的需水量和缺水量整体上都从西北向东南递减。在生长中期和生长末期,降水量均不能满足玉米生长需求(图 7)。

4 讨论

本研究根据甘肃省 28 个气象站点 1967—2017 年的逐日气象数据,运用 FAO 推荐的作物系数法,首先计算了玉米全生育期的需水量,其次根据玉米全生育期的有效降水量得出玉米缺水量,最后对需水量和缺水量进行了时空分析。定量化分析甘肃省玉米需水量和缺水量,可以为甘肃省农业发展提供科学的指导。

研究发现 1967—2017 年玉米全生育期的降水量呈下降趋势,这与前人研究的结果大致相同^[38-39],这表明甘肃省近年来,降水量整体上呈现下降趋势是不争的事实。研究计算甘肃省 51 年玉米平均需水量为 549.95 mm,刘宏谊等人的研究结果认为 1960—2000 年甘肃省全生育期玉米平均需水量为 526.00 mm^[40],两者结果

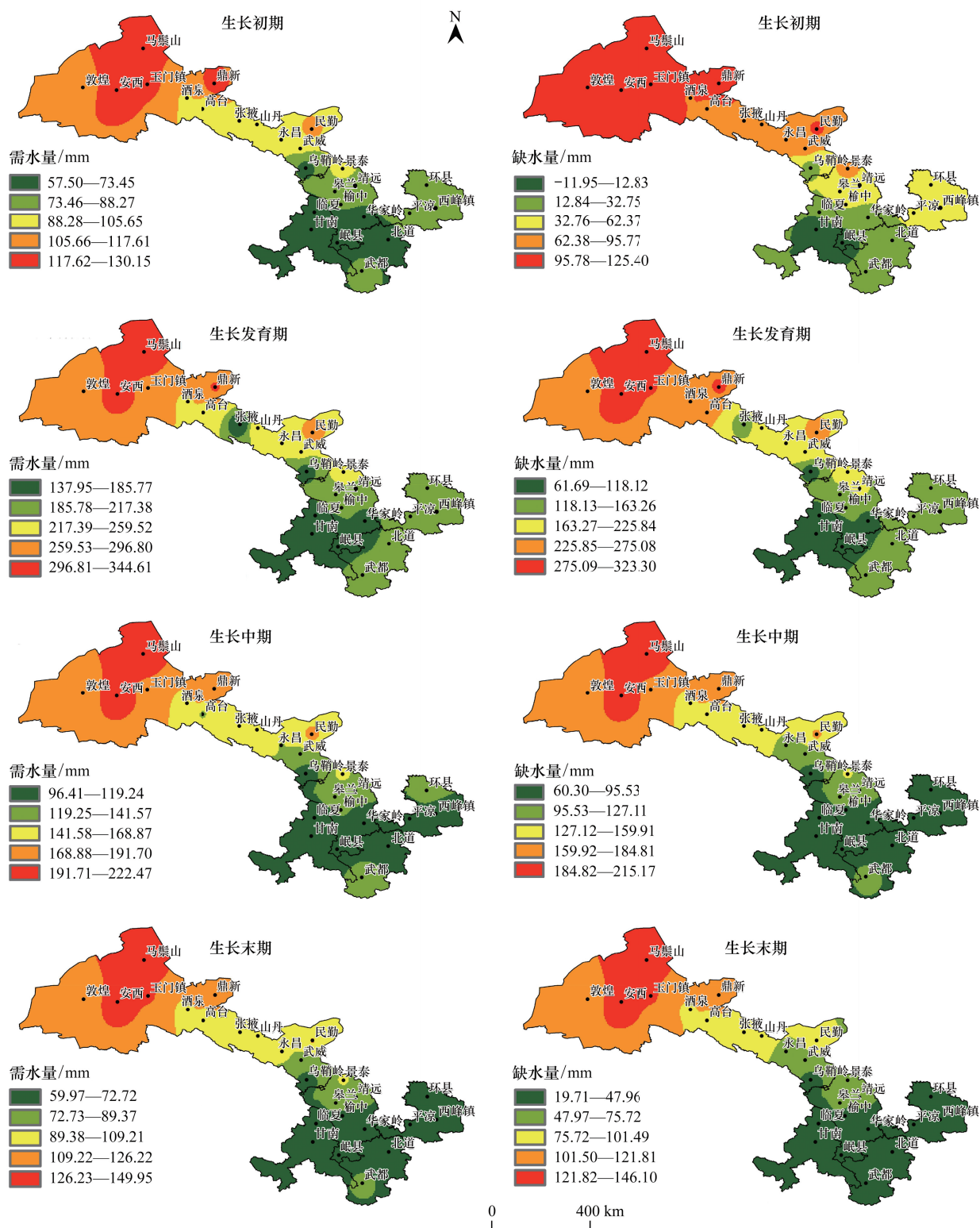


图7 玉米各生长阶段的需水量和缺水量的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of water requirement and water deficit during the different growth periods of maize

接近。肖俊夫等人的研究认为中国玉米需水量在 400—700 mm 之间^[41], 本文的研究结果也符合。河西、陇中、陇东、陇南和甘南地区 51 年需水量与缺水量的整体上都无明显变化。河西地区 51 年需水量与缺水量分别

围绕 637.80 mm 与 550.11 mm 上下波动;陇中地区 51 年需水量与缺水量分别围绕 465.45 mm 与 313.42 mm 上下波动;陇东地区 51 年需水量与缺水量分别围绕 468.69 mm 与 338.13 mm 上下波动;陇南地区 51 年需水量与缺水量分别围绕 465.67 mm 与 302.63 mm 上下波动;甘南地区 51 年需水量与缺水量分别围绕 382.44 mm 与 171.18 mm 上下波动,整体上,河西地区需水量与缺水量明显高于其他地区,陇中、陇东和陇南地区需水量与缺水量接近,甘南地区需水量与缺水量均为最少。相关研究表明需水量主要与相对湿度呈负相关关系,与气温、日照时数和风速呈正相关关系^[5]。河西、陇中、陇东、陇南和甘南地区 51 年玉米全生育期内日平均相对湿度分别为 45%、62%、62%、63% 和 69%,日平均气温分别为 17.41、14.82、17.21、19.53℃ 和 12.07℃,平均日照时间分别为 9.1、7.2、7.1、6.8 h 和 6.6 h,日平均风速分别为 2.73、1.95、2.17、1.69 m/s 和 1.49 m/s,在这种气象因素的影响下,形成了甘肃省各片区需水量与缺水量分布格局。尽管陇中、陇东、陇南和甘南地区基本属于雨养农业区,但是由于甘肃省降雨量的季节分配很不均匀,降水主要集中在夏秋两季,容易造成水土流失和洪涝灾害,威胁农作物的生长,因此导致这些地区的农业对水利灌溉设施十分依赖。

关于作物需水量的研究较为成熟,有关作物缺水量的研究,在国内并不多见。缺水量更能反映一个地区农作物全生育期内所需要的人工灌溉用水量,本文利用美国农业部土壤保持局推荐的方法计算缺水量,可为甘肃省玉米精细化灌溉提供科学参考。但是在实际生产中,降水的时间与作物需水时间不一定相同,即玉米生长过程中需水与降水可能存在一定时差,因此在指导农业生产的过程中,既要合理的利用有效降水,也要注重观察,保证灌溉的时效性。本研究一方面未能考虑到自然降水形成的土壤底墒水对需水量的影响,另一方面,也未能将人工灌溉用水量在玉米生长过程中进行空间上的量化,研究结果存在一定误差。为了更加合理的指导农作物精细化灌溉,考虑土壤底墒水和人工灌溉用水量的影响是下一步研究的重要内容之一。

5 结论

1967—2017 年甘肃省玉米全生育期平均降水量、平均有效降水量、平均需水量和平均缺水量分别为 210.43、113.21、545.95 mm 和 421.00 mm。整体上甘肃省 51 年来玉米全生育期的有效降水量均小于玉米需水量;28 个站点中,51 年来只有甘南和岷县两个站点的有效降水量能基本满足生长初期的玉米需水,其他站点在任何生长阶段都不能满足玉米需水要求,需要进行人工灌溉。甘肃省 51 年间玉米全生育期内的降水量和有效降水量整体上呈明显的下降趋势,而需水量和缺水量没有明显的变化趋势,属于正常的波动。

甘肃省河西地区需水量与缺水量明显高于其他地区,陇中、陇东和陇南地区需水量与缺水量接近,甘南地区需水量与缺水量最少。玉米全生育期的降水量和有效降水量在空间上由东南向西北减少,而需水量和缺水量在空间上由东南向西北增加,降水量和有效降水量与需水量和缺水量在空间上构成了一种相反的对对应关系。这主要与甘肃省内相对湿度、气温、日照时数和风速的空间特征有关。

参考文献 (References):

- [1] 金巍,刘双双,张可,孔伟. 农业生产效率对农业用水量的影响. 自然资源学报, 2018, 33(08): 1326-1339.
- [2] 杨艳昭,封志明,林耀明. 甘肃省小麦水分平衡及其时空分布模式. 地理研究, 2005, 24(06): 853-859.
- [3] 甘肃省统计局. 2018 统计年鉴. <http://www.gstj.gov.cn/>. (2019-07-31).
- [4] 刘晓英,李玉中,郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因. 农业工程学报, 2005, 21(10): 155-159.
- [5] 尹海霞,张勃,王亚敏,张亚宁,王强,赵一飞. 黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析. 资源科学, 2012, 34(03): 409-417.
- [6] 康绍忠,蔡焕杰. 农业水管理学. 北京: 中国农业出版社, 1996: 101-118.
- [7] Pereira L S, Alves I. Crop water requirements//Hillel D, ed. Encyclopedia of Soils in the Environment. Amsterdam: Elsevier, 2005: 322-334.
- [8] Rao A V R K, Wani S P, Singh P, Srinivas K, Rao C S. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. Biomass and Bioenergy, 2012, 39: 175-181.
- [9] 司建华,冯起,张艳武,常宗强,张凯. 荒漠-绿洲芦苇地蒸散量及能量平衡特征. 干旱区研究, 2010, 27(02): 160-168.
- [10] 吴家兵,关德新,张弥,韩士杰,金昌杰. 涡动相关法与波文比-能量平衡法测算森林蒸散量的比较研究——以长白山阔叶红松林为例. 生

态学杂志, 2005, 24(10): 1245-1249.

- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 37-58.
- [12] 王瑶, 赵传燕, 田凤霞, 王超. 黑河中游春小麦需水量空间分布. 生态学报, 2011, 31(09): 2374-2382.
- [13] Abdul Karim S N A, Ahmed S A, Nischitha V, Bhatt S, Kiran Raj S, Chandrashekarappa K N. FAO 56 Model and Remote Sensing for the Estimation of Crop-Water Requirement in Main Branch Canal of the Bhadra Command area, Karnataka State. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2013, 41(4): 883-894.
- [14] 马灵玲, 占车生, 唐伶俐, 姜小光. 作物需水量研究进展的回顾与展望. 干旱区地理, 2005, 28(4): 531-537.
- [15] 胡志桥, 田霄鸿, 张久东, 包兴国, 马忠明. 石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究. 干旱地区农业研究, 2011, 29(03): 1-6.
- [16] 宋妮, 孙景生, 王景雷, 陈智芳, 刘祖贵. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素. 应用生态学报, 2014, 25(06): 1693-1700.
- [17] 符娜, 刘小刚, 张岩, 杨启良. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律. 生态学杂志, 2014, 33(07): 1895-1901.
- [18] 郑东方, 许嘉阳, 卢秀萍, 许自成, 李军营, 逢涛, 张雅杰, 王佩雯. 云南省烤烟需水量及灌溉需求指数的时空特征. 应用生态学报, 2015, 26(07): 2091-2098.
- [19] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 张立祯. 1961—2012 年中国棉花需水量的变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2107-2119.
- [20] 王梅, 杨倩, 郑江华, 刘志辉. 1963—2012 年新疆棉花需水量时空分布特征. 生态学报, 2016, 36(13): 4122-4130.
- [21] 罗那那, 巴特尔·巴克. 北疆地区棉花作物需水量时空演变及其气象影响因子. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3305-3313.
- [22] 高晓容, 王春乙, 张继权, 薛绪掌. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化. 农业工程学, 2012, 28(12): 101-109.
- [23] 李春强, 李保国, 洪克勤. 河北省近 35 年农作物需水量变化趋势分析. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 359-363.
- [24] Hanafi M M, Shahidullah S M, Niazuddin M, Aziz Z A, Mohammad C H. Crop water requirement at different growing stages of pineapple in BRIS soil. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2010, 8(2): 914-918.
- [25] 史英栋. 甘肃省农业生物质能潜力评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [26] 冯绳武. 甘肃地理概论. 兰州: 甘肃教育出版社, 1989: 182-250.
- [27] 甘肃省水利厅. 2017 年甘肃省水资源公报. (2018-11-02). http://slt.gansu.gov.cn/xxgk/gkml/nbgh/szygb/201811/t20181102_113548.html.
- [28] 甘肃年鉴编委会. 甘肃年鉴-2009. 北京: 中国统计出版社, 2009: 34-35.
- [29] 刘普幸, 卓玛兰草. 甘肃省 1960—2008 年潜在蒸散量时空变化及其影响因子. 自然资源学报, 2012, 27(09): 1561-1571.
- [30] 李东. 甘肃省三大土壤侵蚀类型侵蚀强度分布规律研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [31] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
- [32] 甘肃省气象局业务管理处. 甘肃省农业气象观测资料汇编(1981—1985). 兰州: 兰州大学出版社, 1988: 7-97.
- [33] Brouwer C, Heibloem M. Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs, Irrigation Water Management. Training Manual vol. 3. Rome: FAO, 1986.
- [34] Food and Agriculture Organization of the United Nations. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.
- [35] Döll P, Siebert S, 2002. Global modeling of irrigation water requirements. Water Resources Research, 38(4): 8-1-8-10.
- [36] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999: 62-76.
- [37] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002: 133-290.
- [38] 武金慧, 李占斌, 沈中原. 甘肃省近 50 年降水量及气候变化趋势研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 24-29.
- [39] 白冰, 薛万孝, 孔令旺, 王锋瑞, 俞洁. 甘肃省 1963—2012 年气候变化特征. 高原山地气象研究, 2013, 33(02): 41-45.
- [40] 刘宏谊, 马鹏里, 杨兴国, 杨启国. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析. 干旱地区农业研究, 2005, 23(01): 39-44.
- [41] 肖俊夫, 刘战东, 陈玉民. 中国玉米需水量与需水规律研究. 玉米科学, 2008, 16(04): 21-25.