

河南省夏玉米生育期有效降雨量和 需水量时空分布特征

张 杰^{1,2}, 张 慧³, 陈丹丹^{1,2}, 李国领⁴, 张建涛^{1,2}, 臧贺藏^{1,2},
赵 晴^{1,2}, 胡 峰^{1,2}, 李国强^{1,2}, 郑国清^{1,2}

(1. 河南省农业科学院 农业经济与信息研究所, 河南 郑州 450002; 2. 河南省智慧农业工程技术研究中心,
河南 郑州 450002; 3. 河南中医药大学 管理学院, 河南 郑州 450046;
4. 河南省农业科学院 小麦研究所, 河南 郑州 450002)

摘要: 依据河南省 15 个夏玉米主产区 1961—2015 年的气象资料, 计算夏玉米生育期的需水量和有效降雨量, 进而得到夏玉米生育期的灌溉需水量, 并利用线性倾向估计和空间插值法对河南省夏玉米生育期降雨量、有效降雨量、需水量和灌溉需水量的年际变化趋势和空间分布特征进行分析, 以为河南省夏玉米生产中水资源合理分配和灌溉方案制定提供科学依据。结果表明, 在时间分布上, 1961—2015 年, 河南省夏玉米生育期降雨量和有效降雨量年际间整体上变化趋势平稳, 而需水量和灌溉需水量整体上呈明显的下降趋势。在空间分布上, 河南省夏玉米生育期年均降雨量整体上由东南向西北递减, 年均有效降雨量从西南向东北递减; 豫西夏玉米生育期年均需水量相对高于其他区域, 而豫北灌溉年均需水量明显高于其他地区。

关键词: 夏玉米生育期; 有效降雨量; 灌溉需水量; 时空分布; 河南省

中图分类号: S513; S273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2020)09-0173-08

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Effective Rainfall and Water Requirement of Summer Maize Growth Period in Henan Province

ZHANG Jie^{1,2}, ZHANG Hui³, CHEN Dandan^{1,2}, LI Guoling⁴, ZHANG Jiantao^{1,2},
ZANG Hecang^{1,2}, ZHAO Qing^{1,2}, HU Feng^{1,2}, LI Guoqiang^{1,2}, ZHENG Guoqing^{1,2}

(1. Agricultural Economy&Information Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;
2. Research Center for Smart Agriculture Engineering and Technology of Henan Province, Zhengzhou 450002, China;
3. School of Management, Henan University of Chinese Medicine of Henan Province, Zhengzhou 450046, China;
4. Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the meteorological data from 15 stations of summer maize producing areas in Henan Province during 1961 and 2015, the water requirement and effective rainfall in the whole growth period of summer maize were calculated, thus, the irrigation water requirement was obtained. The interannual variation and spatial distribution characteristics of summer maize rainfall, effective rainfall, water requirement and irrigation water requirement were analyzed by linear propensity estimation and spatial interpolation method in Henan Province. The results showed that in terms of time distribution, the rainfall and effective rainfall in summer maize growth period had no obvious change, while the water requirement and irrigation water requirement showed significant downward trend from 1961 to 2015. In terms of spatial distribution, the average annual rainfall in summer maize growth period decreased from southeast to northwest, and the

收稿日期: 2020-04-06

基金项目: 河南省重大科技专项(171100110600)

作者简介: 张 杰(1979-), 女, 黑龙江双鸭山人, 副研究员, 博士, 主要从事农业信息化研究。E-mail: mooncatmlz@126.com

通信作者: 郑国清(1964-), 男, 河南淅川人, 研究员, 博士, 主要从事农业信息技术研究。E-mail: zqzx@hnagri.org.cn

average annual effective rainfall decreased from southwest to northeast in Henan Province; the average annual water requirement of western Henan was higher than that of other regions, while the average annual irrigation water requirement of northern Henan was obviously higher than that of other regions.

Key words: Summer maize growth period; Effective rainfall; Irrigation water requirement; Spatial and temporal distribution; Henan Province

作物需水量计算是指导农田灌溉规划和管理的重要内容,作物需水量因土壤、气候、作物生长状况和管理方式等诸多因素的影响有所差异^[1]。近年来,众多学者对作物需水量进行了大量研究^[2-11]。聂堂哲等^[12-13]利用逐日气象数据分别对黑龙江省水稻和玉米需水量的时空分布特征进行了分析。张华等^[14-15]基于甘肃省 28 个气象站点 1967—2017 年的逐日气象数据,结合美国农业部土壤保持局推荐的方法,分析了甘肃省小麦和玉米需水量和缺水时空分布特征。黄志刚等^[16]应用 1970—2009 年气象数据,分析了松嫩平原近 40 a 玉米生长期内特别是需水关键期的水分盈亏和时空分布规律。曹永强等^[17-18]利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和分段单值平均作物系数法分析了冬小麦、夏玉米和棉花的有效降雨量及需水规律,同时结合《IPCC 排放情景特别报告》预估的未来气候情景(气温、降雨等)探讨了气候变化下未来河北省夏玉米需水量的时空演变规律。

河南省是农业大省,属暖温带-亚热带、湿润-半湿润季风气候,是我国玉米的重要产区。受地理位置和气候条件的影响,河南省夏玉米生育期(6—9月),降雨时空分布不均,自然灾害频繁,可利用的有效降雨量不足,对夏玉米产量造成直接影响^[19-21]。因此,明确夏玉米生育期内有效降雨量与需水量的时空分布特征,对河南省不同地区合理进行水资源配置、提高农田灌溉用水效率、保障夏玉米科学高效生产具有重要的指导和实践意义。目前,关于河南省夏玉米生育期需水量、降雨量的研究已有报道^[22-26],但未见关于夏玉米生育期灌溉需水量方面的研究。为此,基于河南省 1961—2015 年 15 个气象站点的逐日气象数据,根据地理位置将河南省分成 5 个区域,分析不同区域夏玉米生育期的降雨量、有效降雨量、需水量和灌溉需水量时空分布特征,以期为河南省夏玉米生产中水资源合理分配和灌溉方案制定提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

河南省位于我国中东部、黄河中下游,北纬

31°23′~36°22′、东经 110°21′~116°39′,东接安徽、山东省,北接河北、山西省,西接陕西省,南临湖北省。全省总面积为 16.7 万 km²,占全国总面积的 1.73%。耕地面积 811.1 万 hm²,人均耕地 0.085 hm²。全省多年平均水资源量 403.53 亿 m³,人均水资源量约 376 m³,不足全国平均水平的 1/5。据统计,2006—2015 年全省年平均气温为 12.7~16.2℃,年平均降雨量为 477.8~1 167.3 mm,年平均日照 1 468.0~2 246.6 h,年无霜期 207.9~271.7 d,适宜多种农作物生长。

1.2 数据来源

选取 1961—2015 年河南省下辖市、县 15 个气象站点的逐日气象观测资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、降雨量、日照时数、平均水汽压、相对湿度、平均风速以及各站点的经纬度信息。上述气象资料来自中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 需水量 夏玉米生育期需水量根据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 和作物系数法计算^[18,20],公式如下:

$$ET_c = ET_0 \times k_c$$

式中: ET_c 为作物需水量, k_c 为作物系数, ET_0 为参考作物蒸散量。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{\gamma + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中: R_n 是作物表面净辐射量, Δ 是饱和水汽压和温度关系曲线的斜率, T 是平均空气温度, e_s 是空气饱和水汽压, e_a 是空气实际水汽压, γ 是湿度计常数, U_2 是地面之上 2 m 处的风速。

夏玉米在播种—拔节期、拔节期—灌浆期、灌浆期—成熟期的作物系数参考前人^[25,27]的研究结果分别取值为 0.47、1.09、0.67。河南省夏玉米生育期为 6 月 15 日—9 月 26 日。

1.3.2 有效降雨量 有效降雨量采用美国农业部土壤保持局(USDA)推荐方法计算^[28],公式如下:

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

式中, P 为日降水量; P_e 为有效降雨量。

1.3.3 灌溉需水量 灌溉需水量即作物生育期内需水量与有效降雨量的差值, 公式为 $W_c = ET_c - P_e$ 。式中, W_c 为灌溉需水量。

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 对气象数据进行整理、计算; 利用 Matlab 软件分析夏玉米生育期需水量的年际变化趋势, 并进行 Mann-Kendall 趋势检验; 利用 ArcGIS 10.2 的空间分析功能对夏玉米生育期降雨量、有效降雨量、需水量、灌溉需水量进行空间插值并作图。

2 结果与分析

2.1 河南省夏玉米生育期降雨量和有效降雨量的时空分布特征

对河南省 1961—2015 年夏玉米生育期降雨量和有效降雨量进行统计, 见图 1。河南省夏玉米生育期多年平均降雨量为 416.45 mm, 年际间波动变化, 其中 1997 年的降雨量最低, 为 234.11 mm, 低于多年平均降雨量 43.78%; 2000 年的降雨量最高, 为 670.33 mm, 高于多年平均降雨量 60.96%。针对不同区域夏玉米生育期有效降雨量的时间分布进行分析发现, 1961—2015 年, 豫西(孟津、卢氏、三门峡和栾川站点)和豫北地区(安阳、新乡站点)夏玉米生育期降雨量均呈不显著的下降趋势, 豫东(商丘、开

封、西华站点)、豫南(南阳、西峡和驻马店站点)和豫中(许昌、郑州和宝丰站点)地区均呈不显著的上升趋势。

由图 1 可知, 河南省夏玉米生育期有效降雨量多年平均值为 132.65 mm, 年际变化总体呈下降趋势, 但下降趋势不明显。其中, 1997 年夏玉米生育期有效降雨量最低, 为 83.02 mm, 低于多年平均有效降雨量 37.41%; 2003 年夏玉米生育期有效降雨量最高, 为 186.05 mm, 高于多年平均有效降雨量 40.26%。2000 年河南省夏玉米生育期的降雨量最高, 但有效降雨量低于 2003 年, 为 173.92 mm, 这主要是因为 2000 年河南省多地出现罕见的特大暴雨, 时间间隔短, 强度大, 导致有效降雨量减少。

1961—2015 年河南省夏玉米生育期内年均降雨量和有效降雨量的空间分布如图 2 所示。河南省不同地区夏玉米生育期年均降雨量在 310.04 ~ 536.40 mm, 从西北向东南呈逐渐递增的趋势。豫西和豫北地区夏玉米生育期年均降雨量偏低, 分别为 376.22 mm 和 382.36 mm; 豫中和豫东地区夏玉米生育期年均降雨量分别为 410.02 mm 和 426.18 mm; 豫南地区夏玉米生育期年均降雨量最高, 为 504.87 mm。15 个站点中三门峡站点的夏玉米生育期年均降雨量最低, 为 310.04 mm, 低于河南省年均降雨量 25.55%; 驻马店站点的年均降雨量最高, 为 534.50 mm, 高于河南省年均降雨量 28.35%。

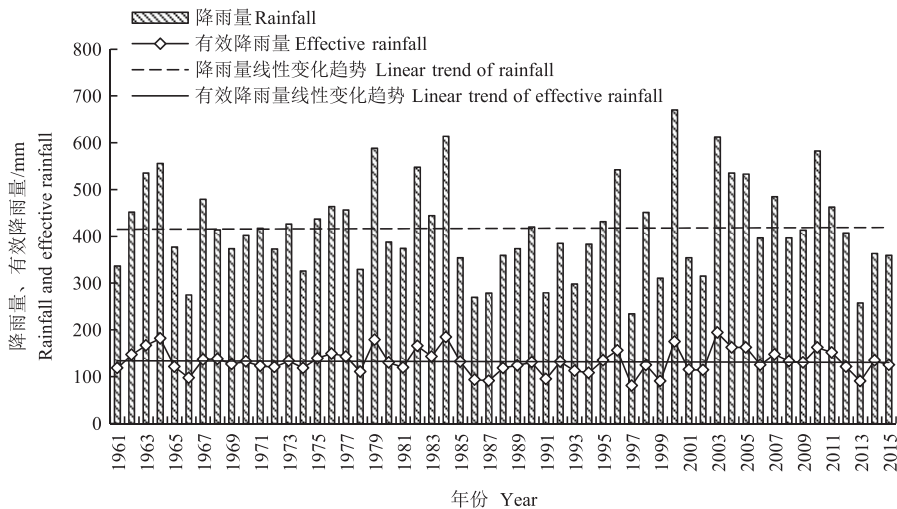


图 1 1961—2015 年河南省夏玉米生育期降雨量和有效降雨量的年际变化

Fig. 1 Interannual variation of rainfall and effective rainfall during summer maize growth period in Henan Province from 1961 to 2015

1961—2015 年河南省不同地区夏玉米生育期年均有效降雨量在 115.45 ~ 165.98 mm, 并从西南向东北递减。其中, 豫北地区夏玉米生育期的年均有效降雨量最低, 为 118.97 mm; 其次是豫东和豫中地

区, 夏玉米生育期年均有效降雨量分别为 127.83 mm 和 128.01 mm; 豫西地区为 135.31 mm; 豫南地区夏玉米生育期年均有效降雨量最高, 为 147.53 mm。各站点中以三门峡站点夏玉米生育期的年均有效降

雨量最低,为 115.45 mm,低于河南省夏玉米生育期年均有效降雨量 12.94%;栾川站点夏玉米生育期年均有效降雨量最高,为 165.98 mm,高于河南省夏玉米生育期年均有效降雨量 25.16%;西峡站点的年均有效降雨量次之,为 156.75 mm,驻马店站点的年均降雨量在各站点中最高,但其年均有效降雨量却低于栾川和西峡站点,为 149.24 mm,这主要是因为该地的降雨量较集中,

水灾频发所致。其他站点中卢氏、南阳、西华和宝丰站点的夏玉米生育期年均有效降雨量均高于河南省年均有效降雨量,主要集中在 133.18~138.50 mm;许昌、郑州、孟津和安阳站点的夏玉米生育期年均有效降雨量在 120.22~129.39 mm;开封、新乡和三门峡站点的夏玉米生育期年均有效降雨量则在 115.45~119.28 mm。

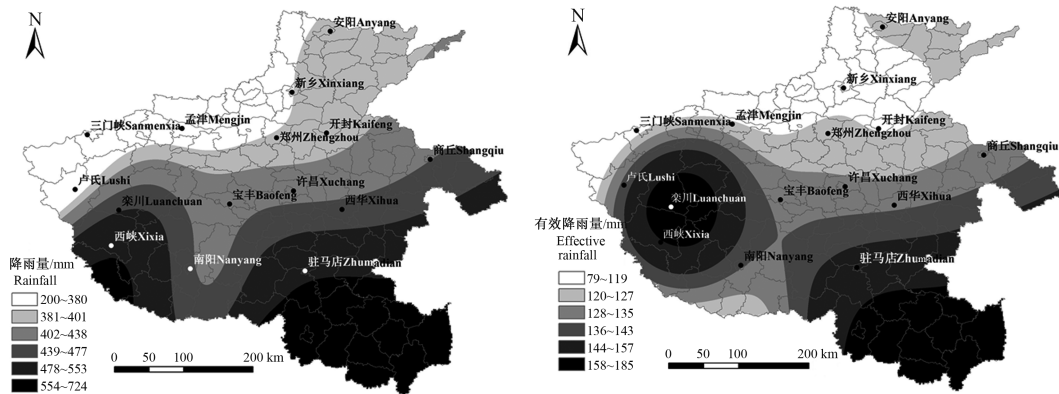


图 2 1961—2015 年河南省夏玉米生育期年均降雨量和有效降雨量的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of average annual rainfall and effective rainfall during summer maize growth period in Henan Province from 1961 to 2015

2.2 河南省夏玉米生育期需水量的年际变化趋势及空间分布特征

由图 3 可知,1961—2015 年河南省夏玉米生育期需水量总体呈下降趋势,多年平均需水量为 337.76 mm,每 10 a 下降幅度为 11.42 mm。研究区夏玉米需水量最小值出现在 2011 年,为 290.50 mm,低于

多年平均值 13.99%;最大值出现在 1966 年,为 410.62 mm,高于多年平均值 21.57%。将河南省夏玉米需水量变化趋势分为 2 个阶段,1961—1990 年,呈明显下降趋势;1991—2015 年,下降趋势平缓。

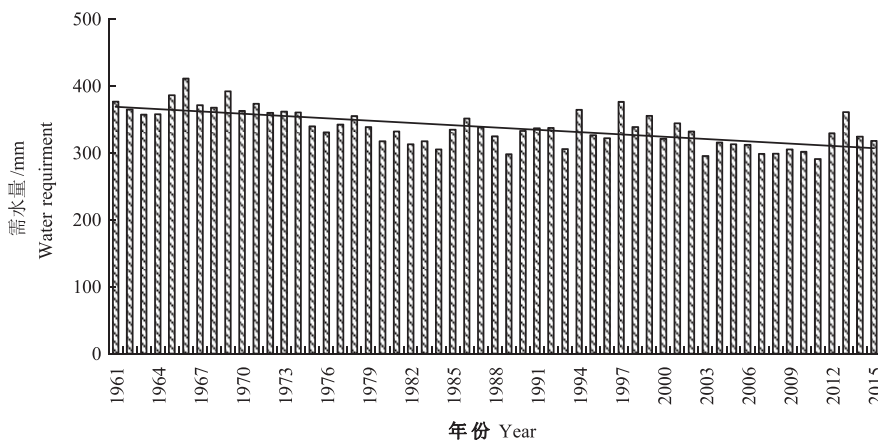


图 3 1961—2015 年河南省夏玉米生育期需水量年际变化
Fig. 3 Interannual variation of water requirement during summer maize growth period in Henan Province from 1961 to 2015

1961—2015 年河南省夏玉米生育期年均需水量空间分布如图 4 所示。河南省不同地区夏玉米生育期年均需水量为 312.69~389.08 mm,各个区域

差异不明显,其中,豫西地区夏玉米生育期年均需水量略高,为 341.42 mm;豫东、豫南、豫北和豫中地区夏玉米生育期年均需水量分别为 337.67、336.43、337.80 mm

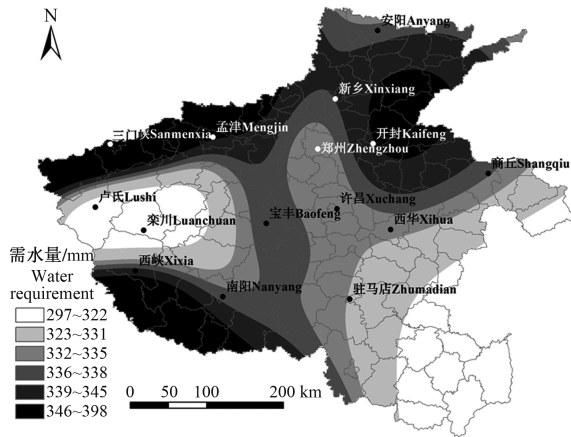


图 4 1961—2015 年河南省夏玉米生育期年均需水量的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of average annual water requirement during summer maize growth period in Henan Province from 1961 to 2015

和 334.02 mm。对 15 个站点的夏玉米生育期年均需水量进行分析发现, 栾川和卢氏站点夏玉米生育

期年均需水量较低, 分别为 312.69 mm 和 316.52 mm; 三门峡站点夏玉米生育期年均需水量最高, 为 389.08 mm。其他站点中孟津、开封、西峡和新乡站点的夏玉米生育期年均需水量均在 339.12 ~ 347.38 mm, 高于河南省年均需水量 337.71 mm; 南阳、宝丰、安阳、商丘、许昌、西华和郑州站点的夏玉米生育期年均需水量则在 330.80 ~ 337.34 mm, 均低于河南省年均需水量。

2.3 河南省夏玉米生育期灌溉需水量的年际变化趋势及空间分布特征

1961—2015 年河南省夏玉米生育期灌溉需水量的年际变化如图 5 所示, 整体呈明显减少趋势, 每 10 a 减少 10.95 mm, 多年平均灌溉需水量为 205.09 mm。2003 年夏玉米生育期灌溉需水量最低, 为 99.37 mm, 低于多年平均灌溉需水量 51.55%; 1966 年灌溉需水量最高, 为 314.00 mm, 高于多年平均灌溉需水量 53.10%。

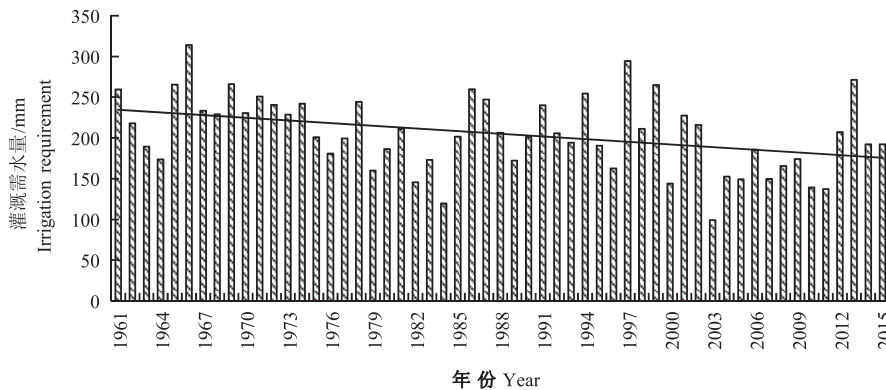


图 5 1961—2015 年河南省夏玉米生育期灌溉需水量的年际变化
Fig. 5 Interannual variation of irrigation requirement during summer maize growth period in Henan Province from 1961 to 2015

1961—2015 年夏玉米生育期年均灌溉需水量空间分布如图 6 所示。不同地区夏玉米生育期年均灌溉需水量在 146.71 ~ 226.09 mm。豫南地区夏玉米生育期年均灌溉需水量最低, 为 188.90 mm; 豫北地区夏玉米生育期年均灌溉需水量最高, 为 218.83 mm; 豫东、豫西、豫中地区夏玉米生育期年均灌溉需水量差异不大, 分别为 209.83、206.11、206.00 mm。从 15 个气象站点的夏玉米生育期年均灌溉需水量来看, 栾川站点的夏玉米生育期年均灌溉需水量最低, 为 146.71 mm; 三门峡站点的夏玉米生育期年均灌溉需水量最高, 为 273.63 mm。其他站点中孟津、开封、新乡、安阳、郑州和商丘站点的夏玉米生育期年均灌溉需水量在 205.34 ~ 226.09 mm, 均高于河南省年均灌溉需水量 205.09 mm; 宝丰、许昌、南阳、西华、西峡、驻马店和卢氏站点的夏玉米生

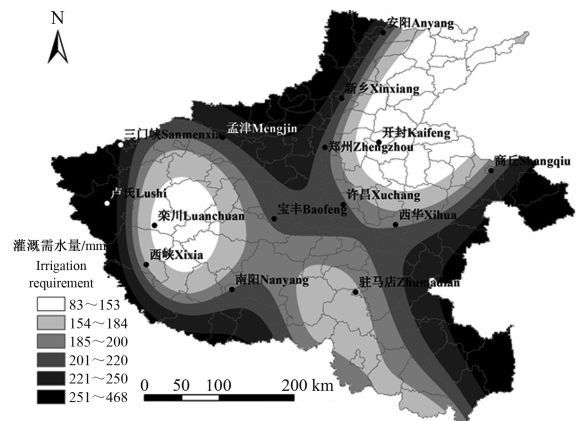


图 6 1961—2015 年河南省夏玉米生育期年均灌溉需水量的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of average annual irrigation requirement during summer maize growth period in Henan Province from 1961 to 2015

育期年均灌溉需水量在 178.02~203.84 mm,均低于河南省年均灌溉需水量。

3 结论与讨论

本研究结果表明,1961—2015 年河南省夏玉米生育期年均降雨量在空间上从东南向西北呈逐渐递减趋势,这与杨森等^[26]对 1982—2012 年河南省夏玉米生育期降雨量时空变化的研究结果一致。本研究夏玉米生育期年均有效降雨量则从西南向东北递减,这说明虽然豫东地区的年均降雨量仅次于豫南地区,但年均有效降雨量明显低于其他区域位列第 4。本研究有效降雨量计算方法与杨森等^[26]的计算方法不同,但研究结果中,河南省夏玉米生育期的年均有效降雨量整体空间分布相似,均是豫南地区年均有效降雨量最高,豫北地区最低。

本研究结果表明,豫西地区的夏玉米生育期年均需水量略高于其他地区,豫东、豫南、豫北和豫中地区的年均需水量没有差异;年均灌溉需水量则是豫北>豫东>豫西>豫中>豫南,其中豫北地区的年均灌溉需水量最高,豫南地区的年均灌溉需水量最低,豫东、豫西和豫中地区的年均灌溉需水量没有明显差异。1961—2015 年河南省夏玉米生育期需水量和灌溉需水量均呈减少趋势,这与刘小刚等^[25]的研究结果一致。其中,夏玉米生育期最大需水量为 410.62 mm,出现在 1966 年;最低需水量为 290.55 mm,出现在 2011 年。灌溉需水量最大为 314.00 mm,出现在 1966 年;最小灌溉需水量为 99.37 mm,出现在 2003 年。1961—2015 年,总体上河南省夏玉米生育期有效降雨量均小于需水量,不能满足夏玉米生长需求,需要人工灌溉。

参考文献:

- [1] 张淑杰,周广胜,李荣平. 基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6):695-704.
ZHANG S J, ZHOU G S, LI R P. Daily crop coefficient of spring maize using eddy covariance observation and its actual evapotranspiration simulation[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(6):695-704.
- [2] DRERUP P, BRUECK H, SCHERER H W. Evapotranspiration of winter wheat estimated with the FAO 56 approach and NDVI measurements in a temperate humid climate of NW Europe[J]. Agricultural Water Management, 2017, 192:180-188.
- [3] 刘钰,汪林,倪广恒,等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):6-12.
LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12):6-12.
- [4] 尹海霞,张勃,张建香,等. 近 50 年来甘肃省河东地区春玉米干旱时空特征分析[J]. 资源科学, 2012, 34(12):2347-2355.
YIN H X, ZHANG B, ZHANG J X, et al. Spatial-temporal characteristics of drought and spring maize in eastern Gansu[J]. Resources Science, 2012, 34(12):2347-2355.
- [5] 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.
HE J O, LING X X, ZHANG J S, et al. Temporal-spatial variation of crop water requirement and frequency of drought and waterlogging disasters during maize growth stages in low hilly plain area of Hubei Province in last 35 years[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(10):1536-1547.
- [6] 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[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2):359-363.
LI C Q, LI B G, HONG K Q. Trend of crop water requirement in recent 35 years in Hebei Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2):359-363.
- [7] 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[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10):3305-3313.
LUO N N, BARKER B. Temporal and spatial evolution of cotton crop water demand and its meteorological impact factors in northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10):3305-3313.
- [8] 宋妮,孙景生,王景雷,等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6):1693-1700.
SONG N, SUN J S, WANG J L, et al. Spatial and temporal changes of water requirement of winter wheat in Henan Province and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6):1693-1700.
- [9] 陈超,庞艳梅,潘学标,等. 1961—2012 年中国棉花需水量的变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12):2107-2119.
CHEN C, PANG Y M, PAN X B, et al. Characteristics of

- China's cotton water requirement from 1961 to 2012[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(12): 2107-2119.
- [10] 庞艳梅,陈超,潘学标. 1961—2011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.
- PANG Y M, CHEN C, PAN X B. Variation characteristics of maize effective precipitation and water requirement in Sichuan basin during 1961—2010[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 133-141.
- [11] 杨晓琳,黄晶,陈阜,等. 黄淮海地区玉米需水量时空变化特征比较研究[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(5): 26-31.
- YANG X L, HUANG J, CHEN F, *et al.* Comparison of temporal and spatial variation of water requirements of corn in Huang-Huai-Hai farming system region [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 26-31.
- [12] 聂堂哲,张忠学,齐智娟,等. 1960—2015年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 279-290.
- NIE T Z, ZHANG Z X, QI Z J, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of rice water requirement in Heilongjiang Province during 1960—2015[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 279-290.
- [13] 聂堂哲,张忠学,林彦宇,等. 1959—2015年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 217-227.
- NIE T Z, ZHANG Z X, LIN Y Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of maize water requirement in Heilongjiang Province during 1959—2015[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 217-227.
- [14] 张华,王浩. 1967—2017年甘肃省小麦需水量和缺水量的时空特征[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(5): 1094-1104.
- ZHANG H, WANG H. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of wheat in Gansu Province from 1967 to 2017[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(5): 1094-1104.
- [15] 张华,王浩,徐存刚. 1967—2017年甘肃省玉米需水量与缺水量时空特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1717-1730.
- 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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(5): 1717-1730.
- [16] 黄志刚,肖焯,张国,等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2368-2381.
- HANG Z G, XIAO Y, ZHANG G, *et al.* Estimation and prediction of maize irrigation water requirement based on climate change in Songnen Plain, NE China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2368-2381.
- [17] 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.
- CAO Y Q, ZHU M M, LI W J. Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei Province over 60 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 560-570.
- [18] 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.
- CAO Y Q, LIU M Y, ZHANG L F. Variation characteristics of water demand of summer maize crop and possible future trends in Hebei Province [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2019, 37(2): 46-52.
- [19] 高晓容,王春乙,张继权,等. 东北地区玉米主要气象灾害风险评估模型研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(21): 4257-4268.
- GAO X R, WANG C Y, ZHANG J Q, *et al.* A risk assessment system of the main meteorological disasters for maize in Northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(21): 4257-4268.
- [20] 成林,刘荣花. 河南省夏玉米花期连阴雨灾害风险区划[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 3075-3079.
- CHENG L, LIU R H. Disaster risk zoning of continuous rain during florescence of summer maize in Henan Province, Central China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(12): 3075-3079.
- [21] 韩宇平,蒋亚茹,肖恒. 河南省夏玉米生育期间主要气象灾害发生频率分析与未来预估[J]. *中国农村水利水电*, 2018(3): 148-154.
- HAN Y P, JIANG Y R, XIAO H. Analyzing and projecting the frequency of main meteorological disasters in the growth period of summer maize in Henan Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(3): 148-154.
- [22] 邵晓梅,严昌荣. 黄河流域主要农作物的降水盈亏格

- 局分析[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1): 40-44.
- SHAO X M, YAN C R. Study on the pattern of water requirements of main crops and rainfall in the Yellow River basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(1): 40-44.
- [23] 周迎平, 胡正华, 崔海羚, 等. 1971—2010 年气候变化对河南省主要作物需水量的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2013, 5(6): 515-521.
- ZHOU Y P, HU Z H, CUI H L, *et al.* Effect of climate change on main crop water requirements in Henan province during 1971—2010[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 5(6): 515-521.
- [24] 李喜平. 河南省夏玉米生长季水分供需时空变化特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 796-802.
- LI X P. Temporal and spatial variation about water requirement during growth season of summer maize in Henan Province[J]. Arid Meteorology, 2013, 31(4): 796-802.
- [25] 刘小刚, 符娜, 李闯, 等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188-197.
- LIU X G, FU N, LI C, *et al.* Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188-197.
- [26] 杨森, 李会云, 寇艳玲, 等. 1982—2012 年河南省夏玉米生育期降水量时空变化格局分析[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(1): 28-33.
- YANG S, LI H Y, KOU Y L, *et al.* Analysis on the temporal-spatial variation patterns of precipitation of summer maize growth period in Henan Province during 1982 to 2012[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(1): 28-33.
- [27] 马建琴, 李鹏飞, 刘蕾. 河南地区夏玉米作物系数试验研究[J]. 节水灌溉, 2016(4): 24-27.
- MA J Q, LI P F, LIU L. An Experimental study on crop coefficient of summer maize in Henan Province [J]. Water Saving Irrigation, 2016(4): 24-27.
- [28] Food and Agriculture Organization of the United Nations. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.