

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0086

赵晗,刘玉春,吴迪,等.河北省5个县域冬小麦-夏玉米连作灌溉需水特性分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):185-194. ZHAO H, LIU Y C, WU D, et al. Analysis of irrigation water requirement characteristics for wheat-maize continuous cropping in the five counties of Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 185-194. (in Chinese)

# 河北省5个县域冬小麦-夏玉米连作灌溉 需水特性分析

赵晗<sup>1,3</sup>, 刘玉春<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2</sup>, 韩振中<sup>2</sup>

(1. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定, 071001; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京, 100054;  
3. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京, 100083)

**摘要:**利用河北平原区5个县域及周边的雨量站、气象站和农气站资料,综合考虑降水、土壤和作物特性,提出修正的SCS-CN模型用于计算作物有效降水量,采用FAO推荐的Penman-Monteith公式和作物系数法计算作物需水量,探讨研究区不同水文年份作物灌溉需水量的时空分布特性。结果表明:研究区冬小麦-夏玉米连作多年平均作物有效降水量、作物需水量和灌溉需水量分别为389、736和347 mm,丰水年、平水年和枯水年冬小麦-夏玉米连作灌溉需水量分别为321、382和423 mm;冬小麦生育期灌溉需水量271~350 mm,返青-拔节期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期灌溉需水量各占全生育期的26%、26%和29%,夏玉米全生育期灌溉需水量0~49 mm,抽雄期和成熟期分别占全生育期的52%和48%;作物有效降水量空间分布,石家庄3县西高东低,邯郸2县西低东高,作物需水量石家庄3县高于邯郸2县,研究区灌溉需水量空间分布不均,大致呈带状分布。

**关键词:**河北省;作物有效降水量;灌溉需水量;时空分布;冬小麦-夏玉米连作

中图分类号:TV93 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Analysis of irrigation water requirement characteristics for wheat-maize continuous cropping in the five counties of Hebei Province

ZHAO Han<sup>1,3</sup>, LIU Yuchun<sup>1</sup>, WU Di<sup>2</sup>, HAN Zhenzhong<sup>2</sup>

(1. Urban and Rural Construction College, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China; 3. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The data of five typical counties in Hebei plain were collected to analyses the irrigation water requirement characteristics of the wheat-maize continuous cropping system. Crop effective precipitation was calculated based on a modified SCS-CN model using precipitation, soil, crop conditions, among other factors. Crop water requirement was estimated by the Penman-Monteith equation and crop coefficient method recommended by FAO. Besides, the spatial and temporal distribution characteristics of irrigation water requirements in different hydrological years were also analyzed. The results showed that: the crop effective precipitation, water requirement and irrigation water requirement for the whole growing period of wheat-maize continuous cropping were 389, 736 and 347 mm, respectively, in the study area, the irrigation water requirement of wheat-maize continuous

收稿日期:2019-05-07 修回日期:2019-11-15 网络出版时间:2020-03-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20200312.1745.011.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405805-03);河北省科技计划(15227003D)

作者简介:赵晗(1993—),女,河北衡水人,主要从事灌溉排水理论与新技术研究。E-mail:18330227640@163.com

通信作者:刘玉春(1971—),女,副教授,博士,主要从事农业水土工程理论与技术的研究。E-mail:liuyuchun5@163.com

cropping in the wet, median, and dry water year was 321, 382 and 423 mm, respectively; the irrigation water requirement of winter wheat was 271-350 mm, the irrigation water requirement of the whole growth period was 26%, 26% and 29% respectively, in the period of turning green to jointing, jointing to heading and heading to maturity. The irrigation water requirement of summer maize was 0-49 mm accounting for 52% and 48% of the total fertility period, respectively; the spatial distribution of crop effective precipitation was decreased slowly from west to east in Shijiazhuang and increased gradually from west to east in Handan, the water requirement in three counties of Shijiazhuang was slightly higher than those in two counties of Handan, the irrigation water requirement had a zonal distribution in the study area.

**Key words:** Hebei Province; crop effective precipitation; irrigation water requirement; spatiotemporal distribution; wheat-maize continuous cropping

河北平原地处华北平原中北部,是我国重要的粮食产地之一,主要粮食作物有冬小麦、夏玉米、棉花、高粱等<sup>[1-2]</sup>,主要种植模式为冬小麦-夏玉米连作。河北平原水资源贫乏,地下水为主要的农业供水水源,近 40 年来对地下水的持续过量开采已使该地区出现了地下漏斗,并带来地面沉降、地面开裂等一系列问题。提高河北平原农业水资源利用效率、减少对地下水的开采是应对该区域水资源短缺、涵养地下水资源的重要措施,科学地分析该区域的作物灌溉需水量,对该区域的水资源管理、灌溉计划制定具有重要的指导意义。

20 世纪 80 年代我国学者根据气象和作物生长发育等资料利用 P-M 公式计算并绘制了我国主要作物需水量图<sup>[3]</sup>、全国范围内主要作物净灌溉需水量等值线图<sup>[4]</sup>,研究表明黄淮海地区冬小麦净灌溉需水量多年平均为 350~400 mm,华北地区夏玉米净灌溉需水量多年平均为 100~150 mm;李新红<sup>[5]</sup>通过分析湿润、半湿润代表地区冬小麦灌溉需水量特性,指出冬小麦灌溉需水量受降水或有效降水的影响;杨晓琳等<sup>[6]</sup>依据作物、土壤和气象参数利用 SIMETA W 模型计算了黄淮海地区冬小麦的灌溉需水量,结果表明燕山、太行山山前平原区平均 312 mm,海河低平原区平均 248 mm;胡玮等<sup>[7]</sup>分析了冀京津地区冬小麦灌溉需水量的时空变化特征,结果表明冬小麦全生育期灌溉需水量为 291~381 mm,平均 340 mm,拔节-抽穗期灌溉需水量 66~120 mm、90%需由灌溉补充。除以上区域尺度上对河北平原作物灌溉需水量的研究外,在田间尺度上根据灌溉试验资料、采用农田水量平衡原理,龚元石等<sup>[8]</sup>计算出华北平原灌溉需水量冬小麦为 200~350 mm,夏玉米为 0~100 mm;李鹏飞等<sup>[9]</sup>分析了华北平原北部地区农田缺水量的逐旬时空变化,结果表明 4—10 月该区域农田缺水量在 550 mm 以上。遥感技术为灌溉需水量的计算提供了新的方法,马林等<sup>[10]</sup>

根据降水数据、土壤参数和 ET Watch 计算的蒸散发量数据,采用水量平衡原理分析了华北平原的灌溉需水量空间分布,研究表明该地区多年平均灌溉需水量 178~308 mm,降水量、小麦和蔬菜种植面积是影响该区域灌溉需水量的主要驱动因子。

作物有效降水量是分析作物灌溉需水量的关键,其计算方法根据研究尺度可分为农田小尺度计算和区域尺度计算两种。前者常用的计算方法为农田水量平衡法<sup>[11-12]</sup>,后者包括降水入渗系数  $\alpha$  法<sup>[13-14]</sup>,影响作物有效降水的各种因素均概化在降水入渗系数  $\alpha$  中;腾发量与降水量比率法<sup>[4,15]</sup>,仅考虑降水与腾发 2 个因素、未考虑区域地形地貌、土壤植被等因素;美国农业部提出的用于估算月尺度有效降水量的 SCS 法<sup>[7,16]</sup>,只与降水量有关。以上几种计算方法经验性较强,同一条件下不同方法计算结果存在差异<sup>[17]</sup>,对土壤、作物因素忽略或概化考虑,会影响计算精度。因此,结合研究区实际情况,综合考虑土壤类型、作物种类及降水特性,建立适宜的作物有效降水量计算模型,对研究该地区作物灌溉需水量具有重要意义。本研究以河北平原的 5 个县域为研究区,以冬小麦、夏玉米为研究对象,综合考虑区域尺度上有效降水影响因素进行有效降水量和灌溉需水量的时空分布特性分析,为研究区的水资源管理、灌溉计划制定提供参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

以河北平原石家庄的元氏、栾城和赵县,邯郸的馆陶和肥乡 5 个县域为研究区,分析有效降水量和冬小麦-夏玉米连作条件下的灌溉需水量。研究区属温带大陆性季风气候,日照充足,平均气温 12~13 ℃,年日照时数 1 900~2 300 h,全年无霜期 200~210 d,多年平均参照作物腾发量 1 000 mm 左右,多年平均降水量 490~550 mm,降水年内分配

不均,6—9月的降水量占全年总降水量的70%~90%。

### 1.2 数据来源

数据资料包括研究区栾城和馆陶2006—2015年、元氏2008—2010年、肥乡2012—2015年等4个县级气象站气象数据及石家庄、邢台、南宫、莘县和安阳等5个国家级气象站1958—2015年气象数据,包

括逐日降水量、平均气温、最高气温、最低气温、风速、相对湿度和日照时数等。除气象数据资料外,还包括5个县域及周边28个雨量站2006—2015年总计10年的逐日降水量数据。图1给出了研究区地理位置及相关气象站和雨量站等站点的分布情况。研究区冬小麦和夏玉米的生育期起止日期根据中国气象网的农业气象站数据资料总结归纳确定,见表1。

表1 研究区冬小麦和夏玉米生育阶段划分

Tab.1 Division of growth stages of winter wheat and summer maize in study area

作物	生育前期		快速发育期		生育中期		生育后期		全生育期	
	起止日期	生育期/d	起止日期	生育期/d	起止日期	生育期/d	起止日期	生育期/d	起止日期	生育期/d
冬小麦	播种-返青		返青-拔节		拔节-抽穗		抽穗-成熟		播种至成熟	
	10月1日— 2月25日	148	2月26日— 4月10日	44	4月11日— 5月2日	22	5月3日— 6月9日	38	10月1日— 6月9日	252
夏玉米	苗期		拔节期		抽雄期		成熟期		播种至成熟	
	6月10日— 7月15日	36	7月16日— 8月4日	20	8月5日— 8月31日	27	9月1日— 9月20日	20	6月10日— 9月20日	103

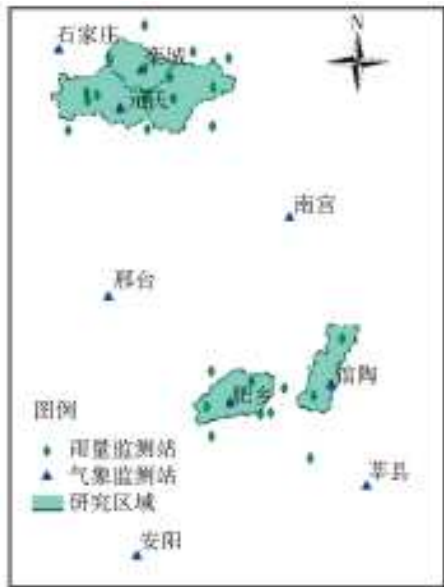


图1 研究区地理位置及监测站分布

Fig.1 Geographical location of the study area and distribution of meteorological stations

### 1.3 数据计算

#### 1.3.1 作物有效降水量估算方法

将农田中能够保存在作物根系层中并用于满足作物腾发耗水需求的那部分降水称为作物有效降水量<sup>[1]</sup>。被冠层截留、填洼和形成地表径流的降水不能用于满足作物的耗水需求;同时入渗到土壤中、但超过作物根系层可容水量的降水也不能用于满足作物的耗水需求。参考陈俊克等<sup>[18]</sup>提出的次降水有效降水量估算模型,本研究提出以下有效降水量估算公式为

$$P_e = \begin{cases} P - P_t - R & P - P_t - R < S \\ S & P - P_t - R \geq S \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P$ 为降水量,mm; $P_e$ 为有效降水量,mm; $P_t$ 为冠层截留量,mm,本研究采用经验值,冬小麦拔节期、抽穗期、乳熟期的冠层截留量 $P_t$ 分别为0.7、1.5和1.2mm<sup>[19]</sup>,夏玉米拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期的 $P_t$ 分别为0.8、1.8、2.9和2.6mm<sup>[20]</sup>;  $R$ 为地表径流量,mm,本研究采用SCS径流模型<sup>[21]</sup>计算地表径流量

$$R = \begin{cases} 0 & P < 0.2S \\ \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P \geq 0.2S \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S$ 为作物根系层可容水量,即农田中作物根系层可容蓄的降水入渗量,mm。 $S$ 的理论计算公式见式(3),式中需要土壤当前含水率 $\theta$ 的观测数据,由于 $\theta$ 是变化的并且很少有实时观测数据,因此很难用其进行 $S$ 的计算;美国农业部土壤保持局提出的SCS-CN径流计算公式中给出了关于 $S$ 的经验计算公式<sup>[21-22]</sup>为

$$S = 10\gamma H(\theta_f - \theta) \quad (3)$$

$$S = 25400 / CN - 254 \quad (4)$$

式中: $\gamma$ 为土壤容重,g/cm<sup>3</sup>; $H$ 为计划湿润层深度,m,本研究中冬小麦播种-返青、返青-拔节、拔节-抽穗和抽穗-成熟期的计划湿润层深度分别取0.35、0.55、0.70和0.90m<sup>[23]</sup>,夏玉米苗期、拔节期、抽雄期和成熟期的计划湿润层深度分别取0.35、0.45、0.70和0.80m<sup>[23]</sup>; $\theta_f$ 为田间持水率,以占干土重%计;CN为无量纲参数,反映土壤类型及前期土壤含水量,查表确定<sup>[24]</sup>。

式(4)中未考虑作物品种和生育阶段,本研究将

S 的理论计算公式(式(3))和经验公式相结合,同时考虑研究区的土壤特性、作物类型和作物所处的生育阶段,对式(4)进行修正,建立修正经验模型。建立修正经验模型时,假设降水前的土壤含水率  $\theta$  在干旱、中等、湿润等土壤湿润程度时的值分别为田间持水率的 50%、65%、80%,考虑研究区的土壤特性、作物类型和作物所处的生育阶段,根据式(3)计算 S 理论值( $S_{理}$ );同时采用经验公式(4)确定土壤不同湿润程度时 S 经验值( $S_{经}$ );以  $S_{理}$  和  $S_{经}$  之间相关系数

最大为评价准则,确定 S 的修正经验公式为

$$S = a/CN - b \quad (5)$$

式中: $a$ 、 $b$  为经验常数,经统计分析确定。表 2 给出了研究区不同县域冬小麦和夏玉米在不同生育阶段的 S 修正经验公式,分析可见经验常数  $a$  和  $b$  值与式(4)中给定的值差异较大,采用修正后的经验常数进行计算,能够提高 S 的计算精度。计算时根据 SCS-CN 经验公式中给定的方法确定 CN 值,代入式(5)得 S,进而计算作物有效降水量  $P_e$ 。

表 2 研究区作物生育期根系层可容水量 S 修正经验公式

Tab. 2 Modified empirical formula for water capacity S at the root level of crops in study area

地点	生育阶段	冬小麦		夏玉米	
		修正后经验公式	$R^2$	修正后经验公式	$R^2$
元氏 栾城 赵县	初期	$S = 10114.28/CN - 69.01$	0.955	$S = 9621.52/CN - 63.77$	0.938
	发育期	$S = 15534.64/CN - 104.85$	0.955	$S = 10767.06/CN - 56.74$	0.975
	中期	$S = 19768.82/CN - 133.41$	0.955	$S = 19288.76/CN - 128.32$	0.939
	后期	$S = 24717.78/CN - 171.55$	0.955	$S = 22593.30/CN - 152.48$	0.955
馆陶	初期	$S = 9182.10/CN - 56.16$	0.846	$S = 9182.10/CN - 56.16$	0.846
	发育期	$S = 14429.74/CN - 88.26$	0.846	$S = 11805.95/CN - 72.21$	0.846
	中期	$S = 18364.20/CN - 112.32$	0.846	$S = 18364.20/CN - 112.32$	0.846
	后期	$S = 23611.84/CN - 144.41$	0.846	$S = 20988.02/CN - 128.35$	0.846
肥乡	初期	$S = 9271.00/CN - 62.57$	0.955	$S = 9271.00/CN - 62.57$	0.955
	发育期	$S = 14569.44/CN - 98.33$	0.955	$S = 11920.22/CN - 80.45$	0.955
	中期	$S = 18542.00/CN - 125.14$	0.955	$S = 18542.00/CN - 125.14$	0.955
	后期	$S = 23837.90/CN - 160.87$	0.955	$S = 21188.68/CN - 142.99$	0.955

### 1.3.2 作物需水量估算方法

作物需水量采用作物系数法进行计算<sup>[25]</sup>,根据研究区的气象数据利用式(6)和式(7)分析计算不同水文年份研究区冬小麦和夏玉米生育期作物需水量。

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (6)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

式中: $ET_c$  为作物需水量,mm/d; $ET_0$  为参照作物腾发量,mm/d,采用联合国粮农组织(FAO)推荐的 P-M 公式进行计算; $R_n$  为作物表面净辐射量, MJ/(m<sup>2</sup>·d); $G$  为土壤热通量密度, MJ/(m<sup>2</sup>·d); $T$  为日平均气温, °C; $u_2$  为地面以上 2 m 处风速, m/s; $e_s$  为饱和水气压, kPa; $e_a$  为实际水气压, kPa; $e_s - e_a$  为饱和气压亏缺量, kPa; $\Delta$  为水气压力曲线斜率, kPa/°C; $\gamma$  为湿度计常数, kPa/°C; $K_c$  为作物系数,本研究根据研究区气候条件,利用 FAO 推荐的分段单值平均法对冬小麦和夏玉米的作物系数进行了修正<sup>[26]</sup>,修正后的作物系数见图 2。

### 1.3.3 作物灌溉需水量估算方法

将各生育阶段的作物需水量与有效降水量的差值定义为作物灌溉需水量  $M_{IR}$ ,计算公式为

$$M_{IR} = \sum_{n=1}^N ET_{cn} - \sum_{n=1}^N P_{en} \quad (8)$$

式中: $M_{IR}$  为灌溉需水量,mm; $N$  为各生育阶段日数,d。

本研究中具有长系列降水数据的站点较少且较分散,各站点丰枯变化规律不同。与其他站相比,石家庄站距离栾城、元氏、赵县最近,有较好的代表性,在典型年选择时兼顾邯郸两县降水特性。因此利用石家庄气象站 1958—2015 年共 58 年的降水数据进行年降水量的频率分析,根据典型年法选择丰水年 25%、平水年 50% 和枯水年 75% 的典型年份(表 3),对研究区作物有效降水量、需水量和灌溉需水量进行分析计算。根据研究区逐日降水数据和气象数据分析计算各站点冬小麦和夏玉米生育期有效降水量及需水量。利用反距离权重法对各站点的作物有效降水量、需水量进行空间插值,得到其空间分布特性,进而分析研究区不同水文年份作物有效降水量、需水量和灌溉需水量的时空分布特性。

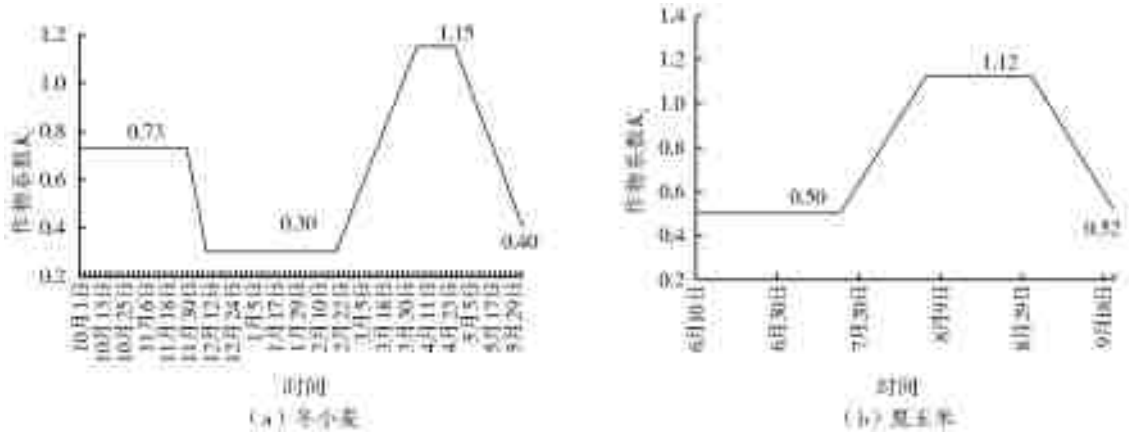


图2 研究区冬小麦和夏玉米的作物系数  $K_c$

Fig. 2 Crop coefficient of winter wheat and summer maize in study area

表3 研究区不同水文年的典型年份选取

Tab. 3 Typical years' selection for different hydrological years in study area

水文年份	理论降水量/mm	典型年份	实际降水量/mm
丰水年	621	2008—2009年	548
平水年	489	2010—2011年	471
枯水年	391	2014—2015年	398

## 2 结果与分析

### 2.1 作物生育期有效降水量

图3至图5给出了研究区不同水文年份冬小麦-夏玉米连作期、冬小麦生育期和夏玉米生育期有效降水量的空间分布。分析可见,研究区多年平均有效降水量为389 mm,其中冬小麦和夏玉米生育期有效降水量分别为58~139、266~317 mm,均值为105、284 mm,分别占全年有效降水量的28%和72%,冬小麦生育期有效降水量远低于夏玉米生育

期。石家庄3县冬小麦全生育期有效降水量空间分布较均匀,邯郸2县呈带状分布;各县夏玉米全生育期有效降水量,赵县中部、东部和肥乡西部地区较低为266~279 mm,栾城较高为306~317 mm,馆陶分布均匀为298~306 mm。

研究区丰水年、平水年和枯水年冬小麦-夏玉米连作期有效降水量分别为342~461、309~394和162~407 mm,均值为413、361和328 mm。冬小麦生育期丰水年、平水年和枯水年有效降水量分别为73~173、41~113和48~131 mm,均值为107、80和106 mm,冬小麦生育期在10月一次年6月为研究区降水的枯水期。有效降水量还受所选典型年内降水时空分布的影响,出现枯水年有效降水量>平水年情况。夏玉米生育期丰水年、平水年和枯水年有效降水量分别为240~320、256~316和115~304 mm,均值分别为306、281和222 mm。

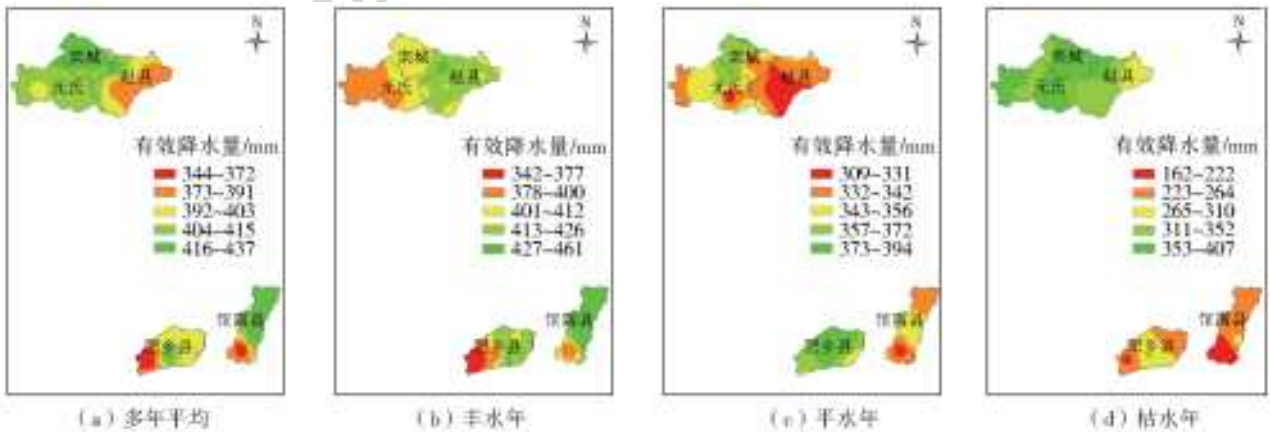


图3 研究区冬小麦-夏玉米连作期不同水文年份有效降水量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of effective precipitation in continuous cropping of winter wheat and summer maize during different hydrological years in study area

### 2.2 作物生育期需水量

图6至图8给出了研究区不同水文年份冬小麦-夏玉米连作期、冬小麦和夏玉米生育期需水量的

空间分布。分析可见,研究区冬小麦-夏玉米连作期多年平均作物需水量为736 mm,其中冬小麦和夏玉米生育期需水量分别为408~429、300~323 mm,

均值分别为 421、315 mm,分别占全年的 58%和 42%,冬小麦需水量略高于夏玉米。冬小麦全生育期需水量:栾城和赵县偏高,为 421~429 mm,空间分布较均匀;肥乡和馆陶偏低,为 408~420 mm。夏玉米全生育期需水量:栾城和赵县偏高,为 311~323 mm;肥乡和馆陶需水量为 300~304 mm;石家

庄的 3 县略高于邯郸的 2 县。

研究区丰水年、平水年和枯水年的作物需水量分别为 684~763、724~761 和 726~768 mm,均值分别为 734、743 和 751 mm。冬小麦生育期作物需水量丰水年、平水年和枯水年分别为 396~448、438~453 和 416~446 mm,均值分别为 428、446 和 429 mm。

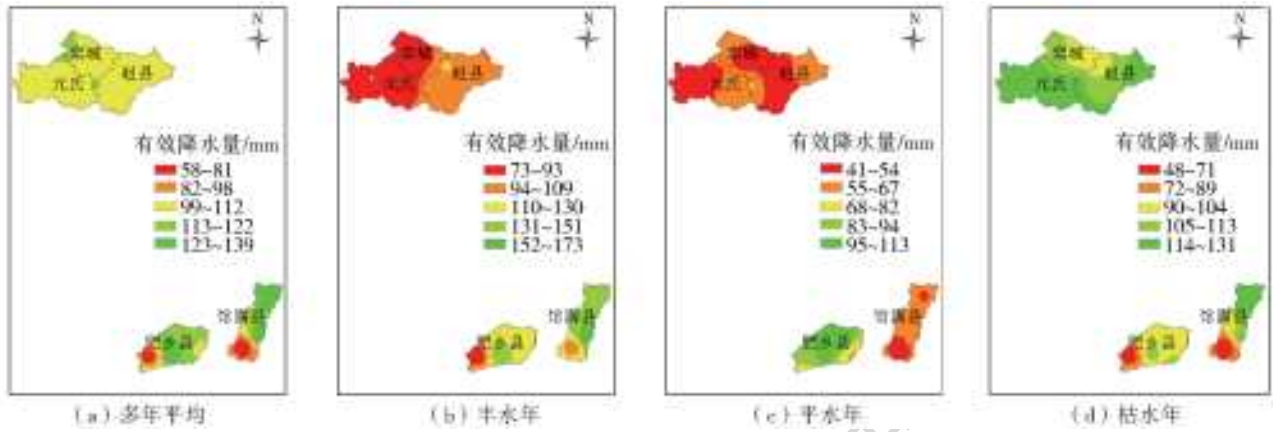


图 4 研究区冬小麦生育期(10 月 1 日—次年 6 月 9 日)不同水文年份有效降水量空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of effective precipitation in the growing period (from 10. 1 to 6. 9) of winter wheat during different hydrological years in study area

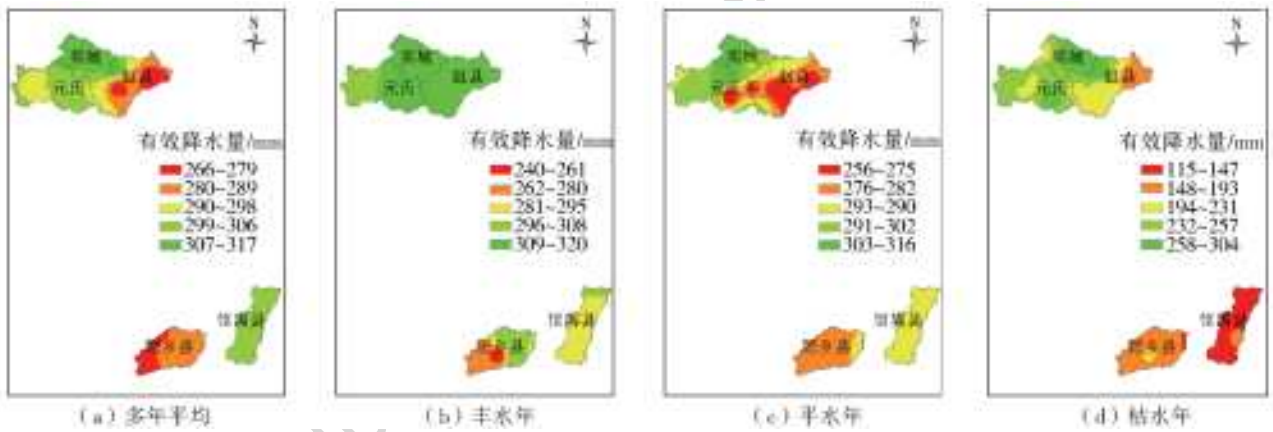


图 5 研究区夏玉米生育期(6 月 10 日—9 月 20 日)不同水文年份有效降水量空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of effective precipitation in the growing period (from 6. 10 to 9. 20) of summer maize during different hydrological years in study area

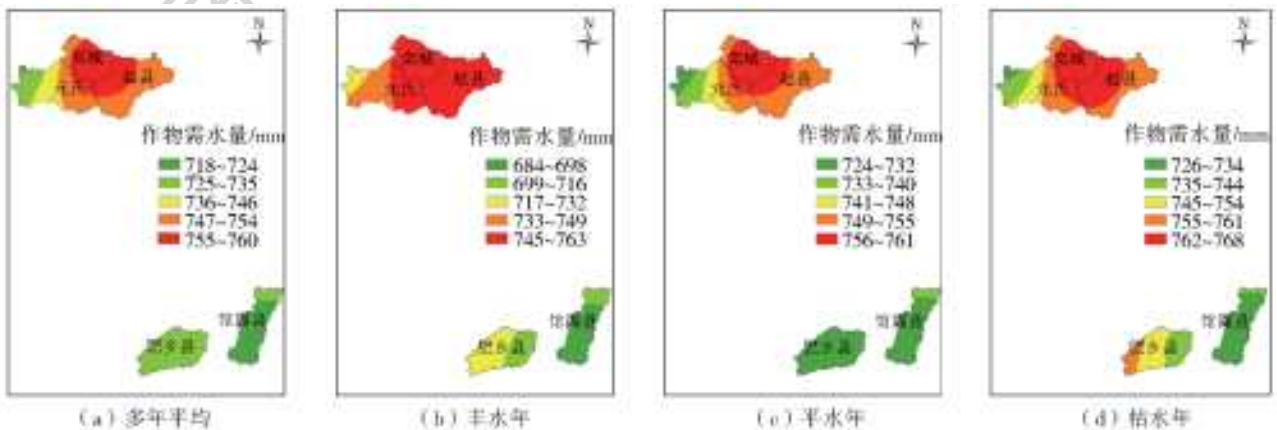


图 6 研究区冬小麦-夏玉米连作期不同水文年份需水量空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of water requirement in continuous cropping of winter wheat and summer maize during different hydrological years in study area

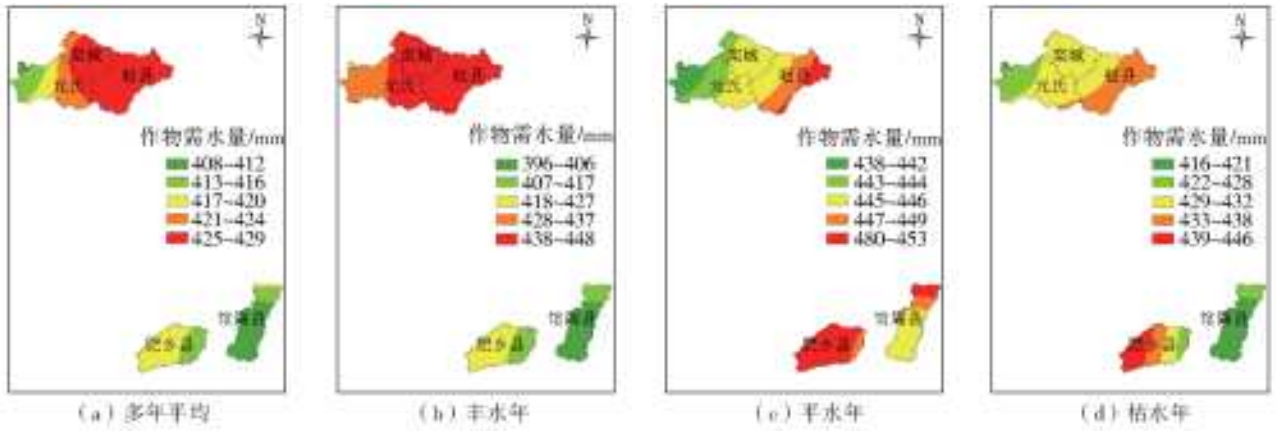


图7 研究区冬小麦生育期不同水文年份需水量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of winter wheat water requirement during different hydrological years in study area

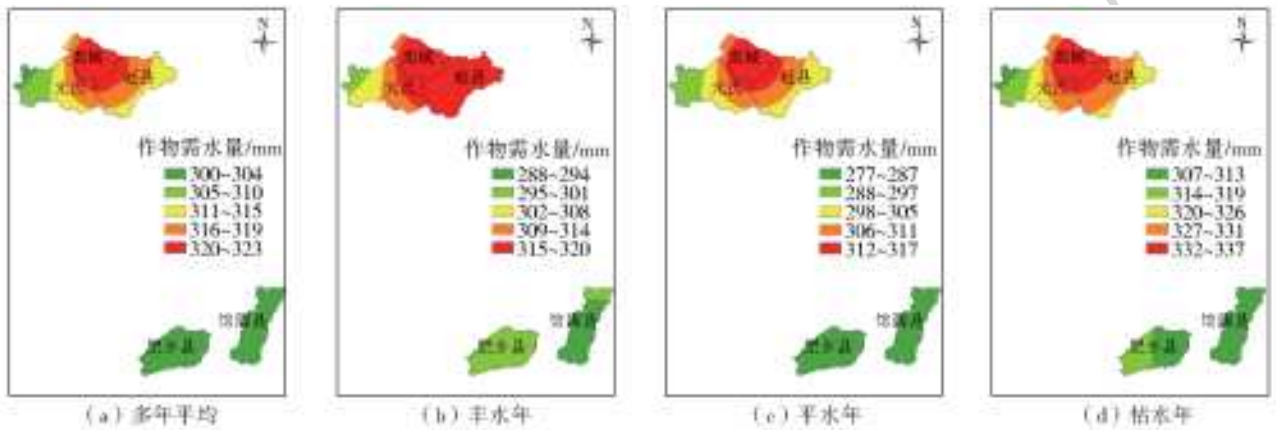


图8 研究区夏玉米生育期不同水文年份需水量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of summer maize water requirement during different hydrological years in study area

夏玉米生育期作物需水量丰水年、平水年和枯水年分别为 288~320、277~317 和 307~337 mm, 均值分别为 306、297 和 322 mm。

### 2.3 作物生育期灌溉需水量

图9至图11给出了研究区不同水文年份冬小麦-夏玉米连作期、冬小麦和夏玉米生育期灌溉需水量的空间分布。研究区冬小麦-夏玉米连作期多年平均灌溉需水量 347 mm, 其中冬小麦和夏玉米

灌溉需水量分别为 271~350、0~49 mm, 平均为 316、31 mm, 分别占全年灌溉需水量的 90%和 10%。冬小麦全生育灌溉需水量: 栾城、元氏和赵县空间分布较均, 为 271~314 mm; 肥乡和馆陶西部地区偏高, 为 329~350 mm; 馆陶中部及北部地区偏低, 为 271~293 mm。夏玉米全生育灌溉需水量: 赵县较高为 27~49 mm; 馆陶较低, 为 0~6 mm。

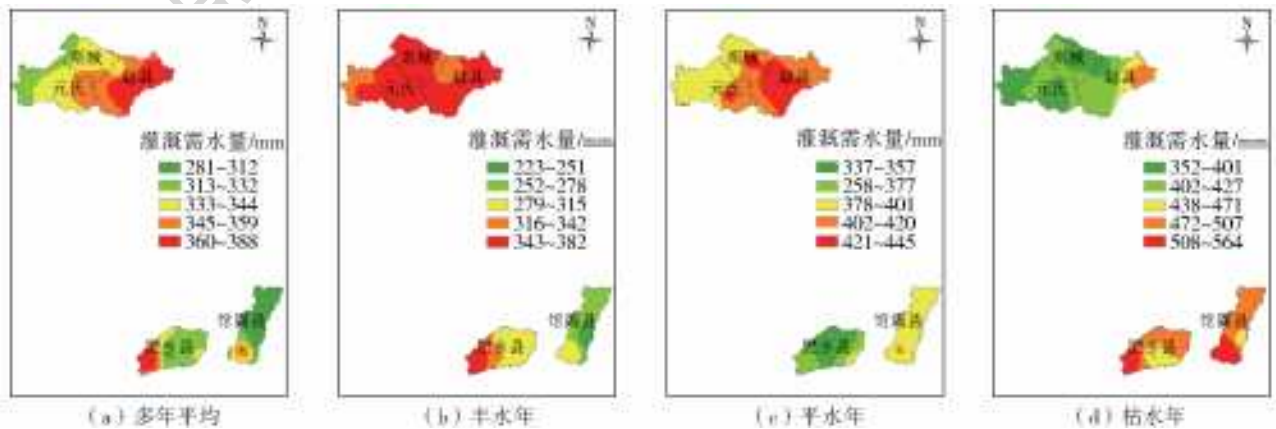


图9 研究区冬小麦-夏玉米连作期不同水文年份灌溉需水量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of irrigation water requirement in continuous cropping of winter wheat and summer maize during different hydrological years in study area

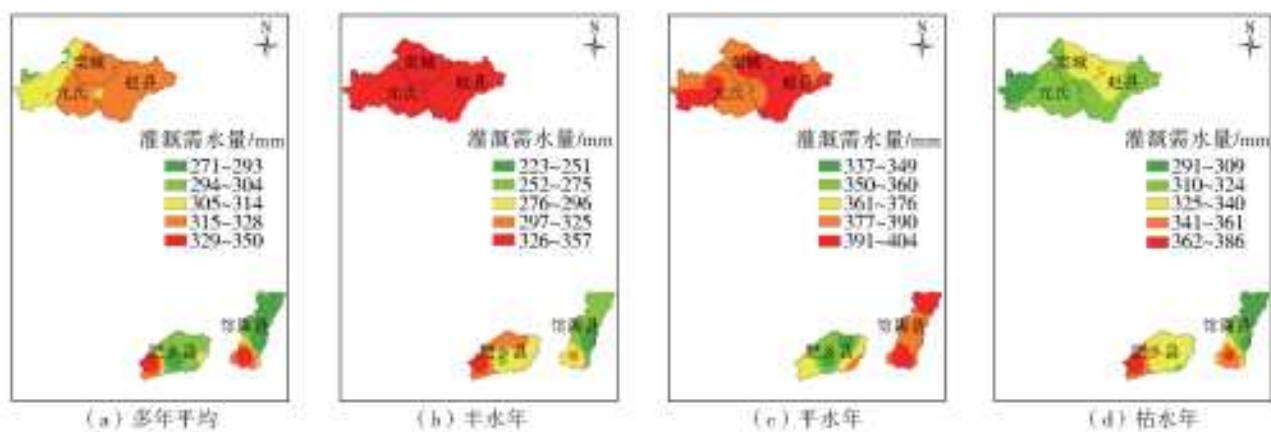


图 10 研究区冬小麦生育期不同水文年份灌溉需水量空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of irrigation water requirement of winter wheat during different hydrological years in study area

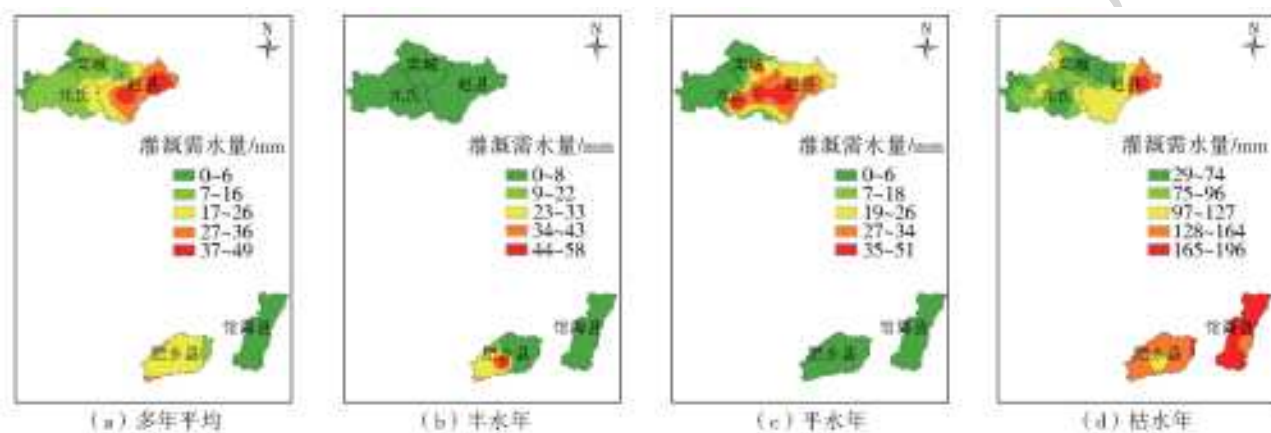


图 11 研究区夏玉米生育期不同水文年份灌溉需水量空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of irrigation water requirement of summer maize in different hydrological years in study area

研究区冬小麦-夏玉米连作期丰水年、平水年和枯水年灌溉需水量分别为 223~382、337~445 和 352~564 mm, 均值分别为 321、382 和 423 mm; 冬小麦灌溉需水量分别为 223~357、337~404 和 291~386 mm, 均值分别为 321、366 和 323 mm; 夏玉米灌溉需水量分别为 0~58、0~51 和 29~196 mm, 均值分别为 0、16 和 100 mm。

图 12、13 分别给出了研究区冬小麦和夏玉米不同生育期多年平均灌溉需水量空间分布。冬小麦播种-返青期、返青-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-成熟期灌溉需水量分别为 60、82、81 和 93 mm, 分别占冬小麦全生育期灌溉需水量的 19%、26%、26% 和 29%; 冬小麦不同生育期灌溉需水量, 栾城、元氏和赵县大致为西低东高, 肥乡和馆陶呈西高东低分布。

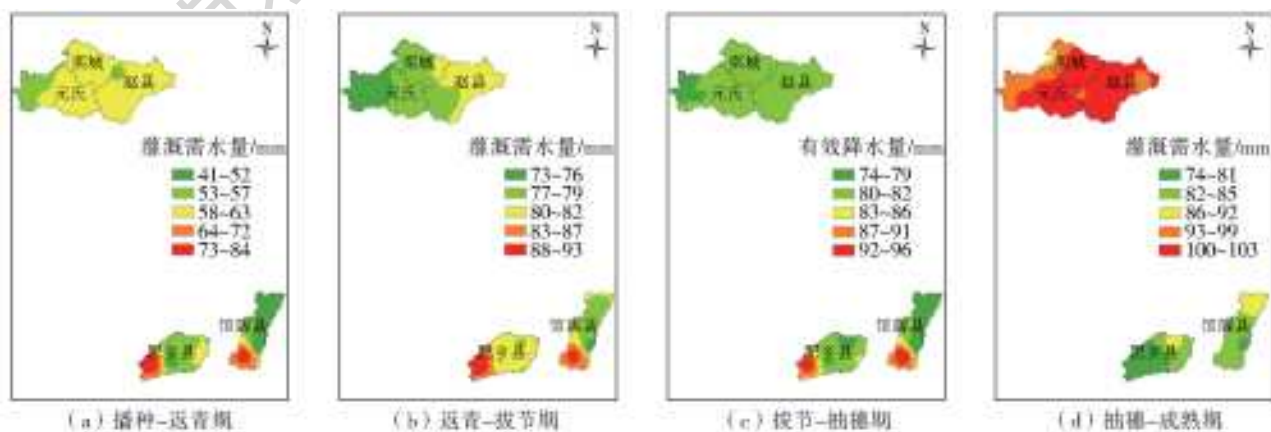


图 12 研究区冬小麦不同生育期多年平均灌溉需水量空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of average annual irrigation water requirement in different growth stages of winter wheat in study area

夏玉米苗期、拔节期不需要灌溉, 抽雄期和成熟期灌溉需水量分别为 16、25 mm, 分别占夏玉米



全生育期灌溉需水量的52%和48%。夏玉米抽雄期灌溉需水量:栾城、元氏和赵县偏小,平均10 mm;肥乡偏大,平均23 mm;馆陶呈西高东低

分布特点,平均16 mm。夏玉米成熟期灌溉需水量:栾城、元氏和赵县平均26 mm;肥乡和馆陶平均35 mm。

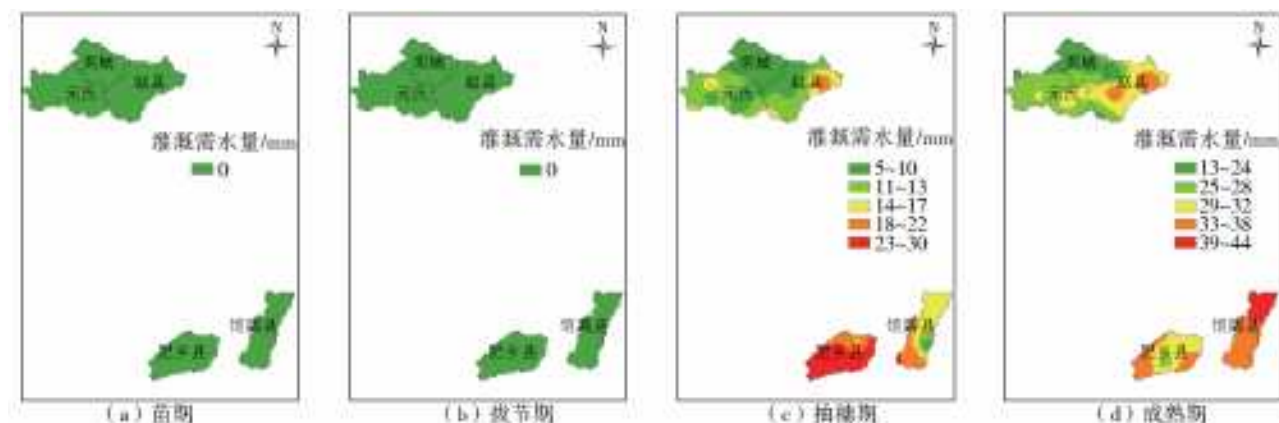


图 13 研究区夏玉米不同生育期多年平均灌溉需水量空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of average annual irrigation water requirement in different growth stages of summer maize in study area

### 3 结论与讨论

(1)研究区冬小麦-夏玉米连作期多年平均有效降水量389 mm,其中冬小麦和夏玉米生育期有效降水量分别占连作期的27%和73%;丰水年、平水年和枯水年冬小麦-夏玉米连作期有效降水量分别为413、361和328 mm。研究区冬小麦生育期多年平均有效降水量为105 mm。胡玮等<sup>[7]</sup>利用1961—2010年气象资料,根据美国农业部推荐的SCS法计算冀京津地区冬小麦生育期多年平均有效降水量为64 mm。姬兴杰等<sup>[27]</sup>、白芳芳等<sup>[28]</sup>利用SCS法计算得到河南省1981—2010、1951—2013年冬小麦生育期有效降水量多年平均值分别为115、202 mm。对比可知,本研究计算结果与SCS法计算成果存在差异,有效降水量主要受降水时空分布的影响,不同时间序列条件下所计算的有效降水量之间会存在差异。此外,SCS法利用降水量计算有效降水量,而本研究提出的计算方法综合考虑了研究区的降水、土壤和作物特点,符合地区实际特性。

(2)研究区多年平均冬小麦-夏玉米连作期作物需水量多年平均值为736 mm,冬小麦和夏玉米生育期作物需水量分别为421、315 mm,与前人研究<sup>[29]</sup>基本一致,丰水年、平水年和枯水年连作期需水量分别为734、743和751 mm,枯水年作物需水量偏大,但不同水文年份间作物需水量差异不大。本研究采用P-M公式和作物系数法计算作物需水量,考虑的是充分灌溉条件下的作物需水量,若结合土壤水分条件,考虑水分胁迫的影响,可得到非充分灌溉条件下作物需水量,对制定作物节水灌溉制度更具有指导意义。

(3)研究区冬小麦-夏玉米连作期多年平均灌溉需水量为347 mm,其中冬小麦和夏玉米生育期灌溉需水量分别为316、31 mm,与已有研究成果<sup>[5,10]</sup>有些许差异,这是由作物需水量与有效降水量计算方法不同导致的,但结果范围基本一致。冬小麦播种-返青期、返青-拔节期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期灌溉需水量分别为60、82、81、93 mm;夏玉米需水阶段为抽雄期和成熟期,分别为16、25 mm。冬小麦是研究区冬小麦-夏玉米连作生产方式下的灌溉管理重点。本研究中冬小麦生育期枯水年灌溉需水量小于平水年,其原因是,冬小麦生育期属枯水期,其期间内降水量对全年降水丰枯影响不大,但所选择的枯水年典型年内冬小麦生育期降水量偏大,作物有效降水量偏大,从而使得该年冬小麦灌溉需水量偏小。此外,本研究利用石家庄站58年降水频率分析结果选择3个典型年代表研究区降水特征,利用28个雨量站10年降水数据计算有效降水量并进行空间插值得到区域有效降水空间分布特征,28个雨量站降水丰枯特性未必全部与典型年一致,可能造成冬小麦生育期枯水年有效降水量大于平水年,使得枯水年冬小麦灌溉需水量小于平水年。

#### 参考文献:

- [1] 袁再健,许元则,谢枬乐. 河北平原农田耗水与地下水动态及粮食生产相互关系分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 904-910. DOI: 10. 13930/j. cnki. cjea. 140754.
- [2] 黄让堂,王旭,姚治君. 河北平原水资源特点和缺水状况[J]. 资源科学, 1987, 9(3): 73-80.
- [3] 陈玉民,郭国双. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1995.

- [4] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.002.
- [5] 李新红. 全国农业灌溉需水量及区域特性研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- [6] 杨晓琳,宋振伟,王宏,等. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 356-362. DOI: 1671-3990 (2012) 03-0356-07.
- [7] 胡玮,严昌荣,李迎春,等. 冀京津冬小麦灌溉需水量时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 648-654. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2013.06.005.
- [8] 龚元石,陆锦文, B HUWE, 等. 华北平原主要农作物灌溉需水量的估算[J]. 中国农业大学学报, 1993(s1): 82-91.
- [9] 李鹏飞,冯瑶,赵昕奕. 2002-2011 年华北平原北部农田缺水时空分布特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 1112-1118. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2015.121.
- [10] 马林,杨艳敏,杨永辉,等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 324-339. DOI: 1007-4619 (2011) 02-324-16.
- [11] 杨燕山,陈渠昌,郭中小,等. 内蒙古西部风沙区耕地有效降雨量适宜计算方法[J]. 内蒙古水利, 2004(1): 67-70. DOI: CNKI;SUN;NMSL. 0.2004-01-026.
- [12] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [13] 金菊良,原晨阳,蒋尚明,等. 基于水量供需平衡分析的江淮丘陵区塘坝灌区抗旱能力评价[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 534-541. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.05.014.
- [14] 张丽. 基于供需平衡的灌区水资源合理配置研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007.
- [15] 蔡甲冰,刘钰,蔡林根,等. 灌区灌溉设计频率分析计算方法研究[J]. 灌溉排水, 2001(4): 30-31, 46. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2001.04.008.
- [16] 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(S1): 133-141. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.zl.016.
- [17] 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2007(3): 27-30, 34. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2007.03.007.
- [18] 陈俊克,缴锡云,庄杨,等. 次降雨有效降雨量的影响因素及其估算模型[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 15-20. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2017.04.003.
- [19] 任庆福,翁白莎,裴宏伟,等. 石津灌区冬小麦关键生育期逐时降水的变化特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 92-104. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.09.013.
- [20] 郝芝建,范兴科,吴普特,等. 喷灌条件下夏玉米冠层对水量截留试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 25-27. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.09.013.
- [21] United States. Soil Conservation Service. SCS national engineering handbook, section 4: hydrology [M]. Washington, DC, 1969.
- [22] 刘贤赵,康绍忠,刘德林,等. 基于地理信息的 SCS 模型及其在黄土高原小流域降雨-径流关系中的应用[J]. 农业工程学报, 2005(5): 93-97. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2005.05.022.
- [23] 赵永. 作物需水量计算方法比较与非充分灌溉预报研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2004.
- [24] 张改英. 基于 SCS-CN 方法的水文过程计算模型研究[D]. 南京:南京师范大学, 2014.
- [25] ALLEN R G, SMITH M, PERRIER A, et al. An update for the definition of reference evapotranspiration [J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering-J ENVIRON SCI HEALTH A, 1994, 43: 1-35.
- [26] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2000.05.007.
- [27] 姬兴杰,成林,朱业玉,等. 河南省冬小麦需水量和缺水量的时空格局[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3268-3277. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0289.
- [28] 白芳芳,乔冬梅,庞颖,等. 河南省冬小麦各生育期水分亏缺的空间分布及降水量突变检验[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 100-108. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2017.06.018.
- [29] 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. DOI: 1671-3990 (2009) 02-0359-05.