

降水对华北主要粮食作物灌溉需求影响特征

王电龙<sup>1,2</sup> 冯慧敏<sup>3</sup> 张宝忠<sup>2</sup> 魏征<sup>2</sup> 杜旭婷<sup>1</sup>

(1. 太原工业学院环境与安全工程系, 太原 030012;  
2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;  
3. 山西农业大学城乡建设学院, 太谷 030801)

**摘要:** 探明华北地区作物灌溉需求规律及主控因素是合理制定水资源规划,缓解该区地下水超采的重要依据。本文基于华北 60 个气象站近 50 年(1971—2020 年)逐日气象资料,采用 FAO 推荐的 Penman—Monteith 公式计算作物需水量,并分析降水对主要粮食作物(冬小麦和夏玉米)灌溉需求时空特征的影响。结果表明:在降水丰水年(25%),冬小麦作物灌溉需求指数  $I_{RI}$  以 0.50~0.75 区间的高度灌溉需求分布区为主,夏玉米则以 0.25~0.50 区间的中度灌溉需求分布区为主,分布面积比率分别为研究区的 92%、86%;在平水年(50%),冬小麦  $I_{RI}$  以大于 0.75 的极高灌溉需求分布区为主,分布面积比率占 56%,夏玉米仍以 0.25~0.50 的中度灌溉需求分布区为主,但分布面积比率扩大至 100%;在枯水年(75%),冬小麦极高灌溉需求分布面积比率增大至 97%,夏玉米则以 0.50~0.75 的高度灌溉需求分布区为主。降水量是影响  $I_{RI}$  的主控因素,随降水量的增大,不同区位  $I_{RI}$  均呈直线下降趋势,但对降水量变化的敏感性存在较大差异,其中,冬小麦以燕山山前平原、太行山前-冀中平原、中部-冀中平原和滨海平原最为敏感,降水量每增大 100 mm,  $I_{RI}$  降低 0.14,夏玉米则以中部-冀中平原最为敏感,降水量每增大 100 mm,  $I_{RI}$  降低 0.26。不同区位冬小麦和夏玉米  $I_{RI}$  均服从正态分布,但随降水量变化,分布参数变化明显。

**关键词:** 降水;灌溉需求指数;概率分析;粮食作物;华北平原

中图分类号: S274.3      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2023)01-0296-10      OSID: 

Impacts of Precipitation Change on Irrigation Demand of Major Grain Crops in North China Plain

WANG Dianlong<sup>1,2</sup> FENG Huimin<sup>3</sup> ZHANG Baozhong<sup>2</sup> WEI Zheng<sup>2</sup> DU Xuting<sup>1</sup>

(1. Department of Safety and Environmental Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030012, China  
2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China  
3. Collge of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** Finding out the laws of crop irrigation demand and the main control factors in North China Plain (NCP) is an important basis for rationally formulating water resources planning and alleviating groundwater overexploitation. Based on the daily meteorological data of 60 weather stations in the past 50 years, the Penman—Monteith formula recommended by FAO was used to calculate crop water demand, and the impact of precipitation on the spatiotemporal characteristics of irrigation demand of winter wheat and summer maize as the main grain crops was analyzed. The results showed that at the years with abundant precipitation (25%), the distribution of the irrigation water demand index  $I_{RI}$  for winter wheat in NCP was mainly in the high irrigation demand with  $I_{RI}$  from 0.50 to 0.75, and that of summer maize was mainly in medium irrigation demand with  $I_{RI}$  of 0.25~0.50, accounting for 92% and 86% of the NCP respectively. At the years with normal precipitation (50%), the  $I_{RI}$  for winter wheat and summer maize was mainly in the range of above 0.75 and 0.25~0.50, accounting for 56% and

收稿日期: 2022-10-08    修回日期: 2022-11-19  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41702263、52130906)、山西省高等学校科技创新项目(2021L559)、太原工业学院青年(后备)学科带头人支持计划项目(202104)和山西省水利科学技术研究与推广项目(2022GM020、2021LS010)  
**作者简介:** 王电龙(1981—),男,副教授,中国水利水电科学研究院博士后,主要从事水资源可持续利用研究,E-mail: sxndwdl@163.com  
**通信作者:** 张宝忠(1982—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangbaozhong333@163.com

100% of the NCP respectively. At the years with low precipitation (75%), the  $I_{RI}$  was mainly in extremely high irrigation demand for winter wheat, accounting for 97% of the NCP, and in high irrigation demand for summer maize. Precipitation was the main factor affecting  $I_{RI}$ . With the increase of precipitation, the  $I_{RI}$  showed a linear downward trend, but there were significant differences in sensitivity to precipitation changes for different locations of the NCP. For winter wheat, most sensitive regions were Yanshan piedmont plain, Taihang piedmont – Jizhong plain, Central – Jizhong plain and Coastal plain, and for every 100 mm increases in precipitation, the  $I_{RI}$  was decreased by 0.14, while summer maize was in the Middle – Jizhong plain, and for every 100 mm increases in precipitation, the  $I_{RI}$  was decreased by 0.26. The  $I_{RI}$  of winter wheat and summer maize all obeyed normal distribution, but with the change of precipitation, the distribution parameters were changed obviously.

**Key words:** precipitation; irrigation demand index; probability analysis; crop; North China Plain

0 引言

华北平原是我国小麦、玉米等粮食作物主产区，灌溉农业是主要用水户，灌溉水量占该区总水量的比率达 70% 以上<sup>[1]</sup>，由于连年大规模取水灌溉，部分区域地表水开发利用程度已接近 100%，多年平均地下水开采量达 130 亿 m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>，导致地下水水位下降、降落漏斗面积不断扩大、地面沉降、河道断流等一系列环境地质问题。农业灌溉用水强度与气候变化密切相关<sup>[3-7]</sup>，降水及气温等气象因子的变化均可显著增大（或减少）粮食作物灌溉需水，尤其是连续降水枯水年份或连续降水丰水年份<sup>[8-12]</sup>。近些年来，华北气候条件发生较大变化，多年平均降水量由 608 mm（1956—1979 年）降低到 528 mm（1980—2020 年），年平均气温以 0.25℃/（10 a）的增大速率升高，且空间分布极不均匀<sup>[13]</sup>。在此气候背景下，开展降水变化对华北主要粮食作物灌溉需求影响特征研究，对有针对性地提出华北农业区灌溉农业调控措施，合理开发利用区域水资源具有重要意义。

目前，已有较多针对不同区域灌溉需求时空特征及主控因素的研究成果，符娜等<sup>[14]</sup>基于灌溉需求指数研究了滇中烤烟需水量时空变化特征，并指出降水是影响该区净灌溉需水量的主要因素；刘小刚等<sup>[15]</sup>针对河南地区主要粮食作物的灌溉需水量进行了研究，指出该区灌溉需求指数随经纬度的增大而增大，且冬小麦对灌溉的依赖程度高于夏玉米；聂堂哲等<sup>[16]</sup>指出 1959—2015 年期间，黑龙江地区玉米灌溉需水量呈减小趋势。郑东方等<sup>[17]</sup>研究了云南省烤烟需水量及灌溉需求指数变化特征，认为该区灌溉需水量及灌溉需求指数随海拔的升高而增加。雷宏军等<sup>[18]</sup>认为气候变化是贵州省净灌溉需水量和灌溉需求指数升高的主控因素。从以上分析可以看出，目前已有研究成果多集中在气候变化对作物灌溉需水量或灌溉需求指数的定量或定性分析上。本文基于降水对作物需水的满足程度及作物产

量与需水满足程度对应关系，建立作物灌溉需求指数  $I_{RI}$  分级体系；探明不同降水条件下华北主要粮食作物不同分级  $I_{RI}$  空间变化特征；识别  $I_{RI}$  演变主控因素及不同分级  $I_{RI}$  转变对应的降水临界值；厘清降水变化对  $I_{RI}$  概率分布影响特征，预测不同区位、不同分级  $I_{RI}$  的概率，以期为缓解华北地区地下水超采趋势，保障国家粮食安全、水资源安全提供一定的理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华北农业区地处太行山脉以东，燕山山脉以南，地势平坦广阔，根据水文地质条件可分为 3 部分：山前冲积-洪积平原（山前平原）、中部冲积-湖积泛滥平原（中部平原）和东部冲积-海积滨海平原（滨海平原）。其中，山前平原又可以分为燕山山前平原、太行山前-豫北平原和太行山前-冀中平原等 3 部分，中部平原可以分为中部-冀中平原、中部-鲁北平原和中部-豫北平原等 3 部分（图 1）。

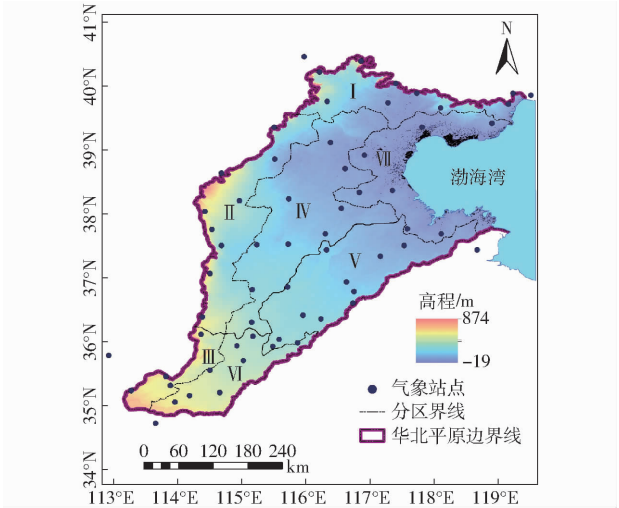


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study area

华北农业区属欧亚大陆东岸暖温带半干旱季

风气候区,多年平均降水量为 556.5 mm,且年内分配极不均匀,主要集中在 7—9 月,占年内总降水量的 75% 左右,多年平均气温介于 10 ~ 14℃ 之间(表 1)。该区是我国重要的粮食基地,以小麦为主的夏粮作物和以玉米为主的秋粮作物播种面积

占全区农作物总播种面积的 80% 以上,主要种植方式为冬小麦和夏玉米一年两季轮作种植。全区以地下水为主要灌溉水源,近 5 年平均农业用水开采量 132.34 亿 m<sup>3</sup>,占该区农业灌溉总用水量的 62.9%。

表 1 研究区多年平均气象特征  
Tab.1 Long term meteorological characteristics

| 区位           | 最高气温/℃ | 最低气温/℃ | 每日日照时数/h | 相对湿度/% | 风速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 降水量/mm |
|--------------|--------|--------|----------|--------|-------------------------|--------|
| 燕山山前平原(Ⅰ)    | 18.38  | 9.58   | 6.55     | 61.39  | 2.31                    | 636    |
| 太行山前-冀中平原(Ⅱ) | 20.15  | 9.15   | 7.41     | 59.75  | 2.42                    | 607    |
| 太行山前-豫北平原(Ⅲ) | 21.28  | 10.13  | 7.27     | 63.54  | 2.29                    | 533    |
| 中部-冀中平原(Ⅳ)   | 24.05  | 11.85  | 7.64     | 69.68  | 2.23                    | 511    |
| 中部-鲁北平原(Ⅴ)   | 22.56  | 11.56  | 7.26     | 65.60  | 2.66                    | 535    |
| 中部-豫北平原(Ⅵ)   | 22.97  | 12.28  | 6.40     | 68.61  | 2.34                    | 582    |
| 滨海平原(Ⅶ)      | 22.58  | 12.00  | 6.89     | 67.69  | 2.92                    | 567    |

1.2 数据来源

基本气象数据主要源自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),主要包括 1971—2020 年华北地区 60 个气象站逐日气象资料(图 1),主要包括:降水量  $P$ 、最高气温  $T_{\max}$ 、最低气温  $T_{\min}$ 、每日日照时数  $N$ 、相对湿度  $R_h$  及风速  $W_s$ 。

1.3 冬小麦及夏玉米需水量

采用作物系数法计算冬小麦和夏玉米需水量,计算式为

$$ET_c = \sum_{i=1}^n k_{ci} ET_{0i} \tag{1}$$

式中  $ET_c$ ——作物需水量,mm  
 $k_{ci}$ ——作物需水系数  
 $i$ ——计算时段,d  
 $n$ ——总计算时段,d  
 $ET_{0i}$ ——参考作物需水量,mm/d

其中,作物各生育阶段的需水系数采用刘钰等<sup>[19]</sup>的研究成果。

采用彭曼-蒙蒂斯(Penman - Monteith)公式计算参考作物需水量(Reference crop evapotranspiration),计算式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中  $\Delta$ ——饱和水汽压与温度关系曲线在  $T$  处的切线斜率,kPa/K  
 $R_n$ ——农作物冠层表面净辐射强度,MJ/(m<sup>2</sup>·d)  
 $G$ ——土壤热通量,MJ/(m<sup>2</sup>·d)  
 $\gamma$ ——湿度计常数,kPa/K  
 $T$ ——平均温度,℃

$U_2$ ——高度 2.0 m 处风速,m/s  
 $e_s$ ——饱和水汽压,kPa  
 $e_a$ ——实际水汽压,kPa

1.4 冬小麦及夏玉米净灌溉需水量及灌溉需求指数

将作物生育期内需水量  $ET_c$  与有效降水量  $P_e$  的差值定义为净灌溉需水量  $I_R$ ,将净灌溉需水量与作物需水量的比值定义为作物灌溉需求指数  $I_{RI}$ ,用以评估作物生长发育对灌溉的依赖程度,计算式为

$$I_{RI} = \frac{\sum_{j=1}^m (ET_{cj} - P_{ej})}{\sum_{j=1}^m ET_{cj}} \tag{3}$$

其中  $P_{ej} = \begin{cases} P_j & (P_j \leq ET_{cj}) \\ ET_{cj} & (P_j > ET_{cj}) \end{cases} \tag{4}$

式中  $P_j$ ——第  $j$  时段降水量,mm/旬  
 $P_{ej}$ ——作物生育期内有效降水量,mm/旬  
 $j$ ——计算时段,旬,按照刘钰等<sup>[19]</sup>的研究成果,在我国华北地区以旬为时段计算作物有效降水量满足规划设计精度要求  
 $m$ ——计算总时段,旬

基于降水量对作物需水的满足度及作物需水满足度与作物产量对应关系(按照任宪韶等<sup>[20]</sup>在太行山前-冀中平原的研究成果,在适宜的灌溉制度下,冬小麦与夏玉米作物需水满足度接近 75% 时,可达高产目标,小于 25% 则大幅减产,减产幅度达 40% 以上),对  $I_{RI}$  进行了如下分级: $I_{RI} < 0.25$ ,轻度灌溉需求,有效降水量可满足作物需水量 75% 以上; $I_{RI}$  为 0.25 ~ 0.50,中度灌溉需求,有效降水量可满足作物灌溉需水量 50% ~ 75%; $I_{RI}$  为 0.50 ~ 0.75,高度灌溉需求,有效降水量仅可满足作物需水量 25% ~ 50%; $I_{RI} > 0.75$ ,极高灌溉需求,有效降水量

不足作物需水量的 25%。

1.5 概率分析

首先,利用频率直方图初步分析不同区位  $I_{RI}$  的概率分布函数;其次,利用卡方  $\chi^2$  拟合检验法对拟定的概率分布函数进行显著性检验;最后,利用确定的概率分布函数进行不同区位、不同分级  $I_{RI}$  的概率分析。

1.6 相对贡献度分析

采用多元回归分析计算最高气温  $T_{\max}$ 、最低气温  $T_{\min}$ 、每日日照时数  $N$ 、相对湿度  $R_h$ 、风速  $W_s$  及降水量  $P$  等气象因素对  $I_{RI}$  影响的相对贡献度。本文利用 DPS 19.05 软件建立  $I_{RI}$  与  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 $N$ 、 $R_h$ 、 $W_s$ 、 $P$  的多元回归模型

$$I_{RI} = \alpha_0 + \alpha_1 T_{\max} + \alpha_2 T_{\min} + \alpha_3 N + \alpha_4 R_h + \alpha_5 W_s + \alpha_6 P \tag{5}$$

各气象因素对  $I_{RI}$  影响的相对贡献度为

$$C_i = \frac{|\alpha_i|}{\sum_{i=1}^6 |\alpha_i|} \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \tag{6}$$

式中  $\alpha_i$ —— $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 $N$ 、 $R_h$ 、 $W_s$  和  $P$  的线性回归系数  
 $C_i$ —— $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 $N$ 、 $R_h$ 、 $W_s$  和  $P$  的相对贡献度

2 结果与分析

2.1 不同降水年份冬小麦与夏玉米灌溉需求空间变化特征

2.1.1 冬小麦

采用式(1)~(4)计算华北地区 60 个县(市、区)1971—2020 年冬小麦灌溉需求指数;采用反距离权重插值法(IDW)得到降水丰水年(25%)、平水年(50%)和枯水年(75%)灌溉需求指数空间分布特征(图 2)。

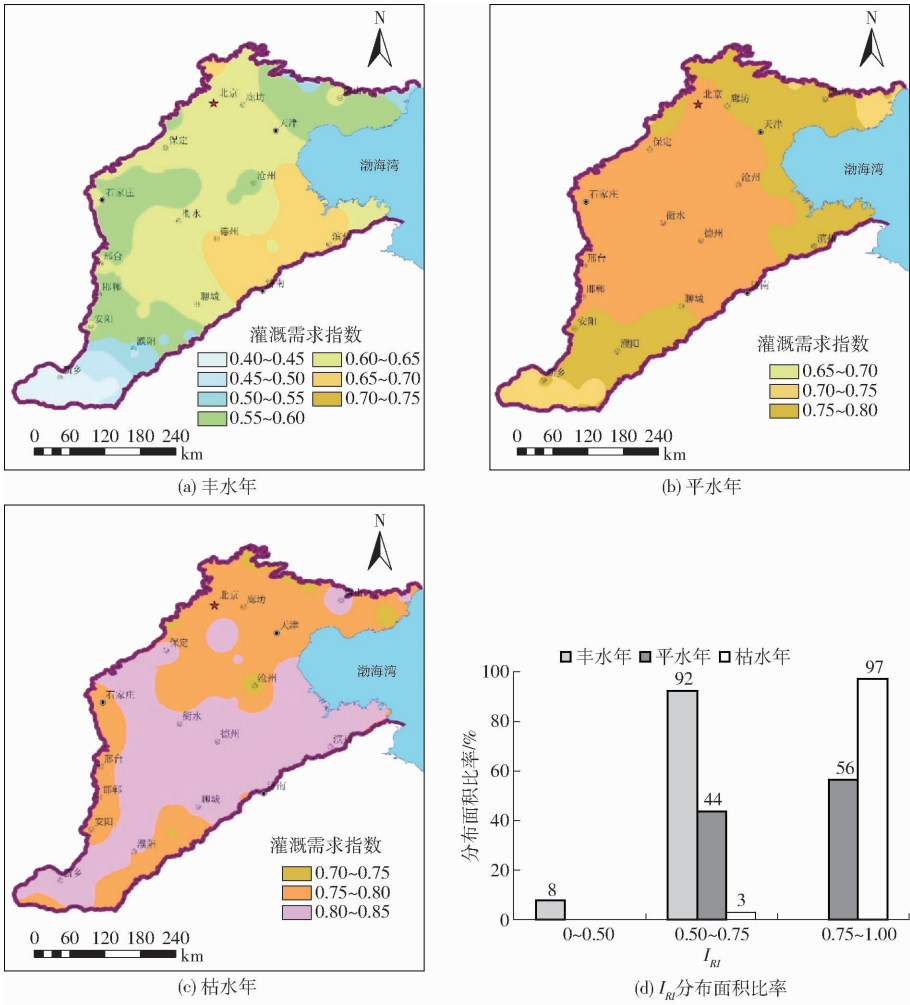


图 2 冬小麦灌溉需求指数空间特征

Fig.2 Spatial characteristics of  $I_{RI}$  of winter wheat

由图 2a 可以看出,在丰水年,冬小麦灌溉需求指数  $I_{RI}$  在 0.40~0.75 之间,且以  $I_{RI}$  在 0.50~0.75 之间的高度灌溉需求区为主,分布面积占华北全区 92%, $I_{RI}$  低于 0.50 的中度灌溉需求区仅占 8%,主

要分布在太行山前-豫北平原焦作、新乡一带。在平水年, $I_{RI}$  增大至 0.65~0.80 之间(图 2b),主要以  $I_{RI}$  大于 0.75 的极高灌溉需求区为主,占华北全区 56%;在枯水年, $I_{RI}$  较平水年份进一步增大(图 2c),

在 0.70 ~ 0.85 之间,高度灌溉需求区面积比率急剧减少至 3%,极高灌溉需求区骤升至 97%。

对丰水年份仍为极高、高度灌溉需求区,如燕山山前平原的唐山、廊坊一带、太行山前-冀中平原、太行山前-豫北平原的安阳一带、中部-冀中平原、中部-豫北平原的濮阳一带、中部-鲁北平原和滨海平原等区域,当地水资源承载力已无法支撑灌溉需求,应通过适当减少作物种植规模,调引客水等措施,缓解灌溉压力。

2.1.2 夏玉米

同冬小麦,采用式(1)~(4)计算研究区 60 个县(市、区)1971—2020 年夏玉米灌溉需求指数,采用反距离权重插值法(IDW)得到丰水年(25%)、平水年(50%)和枯水年(75%)夏玉米灌溉需求指数空间分布特征(图 3)。

由图 3a 可以看出,在丰水年,夏玉米灌溉需求指数  $I_{RI}$  在 0.20 ~ 0.50 之间,且以  $I_{RI}$  在 0.25 ~ 0.50 的中度灌溉需求分布区为主,分布面积占华北全区的 86%, $I_{RI}$  低于 0.25 的轻度灌溉需求分布区占 14%,主要分布在太行山前-豫北平原焦作一带;在

平水年, $I_{RI}$  较丰水年份增大至 0.25 ~ 0.50 之间(图 3b),研究区全区均属中度灌溉需求区,低度灌溉需求区全部消失;在枯水年, $I_{RI}$  以 0.50 ~ 0.75 之间的高度灌溉需求分布区为主,分布面积占华北全区的 84%,较平水年份, $I_{RI}$  在 0.25 ~ 0.50 之间的中度灌溉需求区急剧减少 90%,且出现了  $I_{RI}$  大于 0.75 的极高灌溉需求区,分布区占华北全区的比率为 6%,主要分布在中部-冀中平原的衡水一带。对枯水年份仍为中度、轻度灌溉需求的区域,如燕山山前部分区域(图 3c),灌溉压力较小,可适度扩大种植规模,增加粮食产能。

2.2 降水变化对冬小麦与夏玉米灌溉需求的影响

2.2.1 冬小麦

图 4 为研究区不同区位冬小麦灌溉需求指数  $I_{RI}$  与作物生育期内降水量相关关系。可以看出,不同区位  $I_{RI}$  与降水量均呈良好的线性关系( $P < 0.01$ ),随着降水量的增大, $I_{RI}$  直线降低,但敏感性略有差异,其中,燕山山前平原、太行山前-冀中平原、中部-冀中平原和滨海平原随生育期内降水变化敏感性最强,降水量每增大 100 mm,  $I_{RI}$  均降低

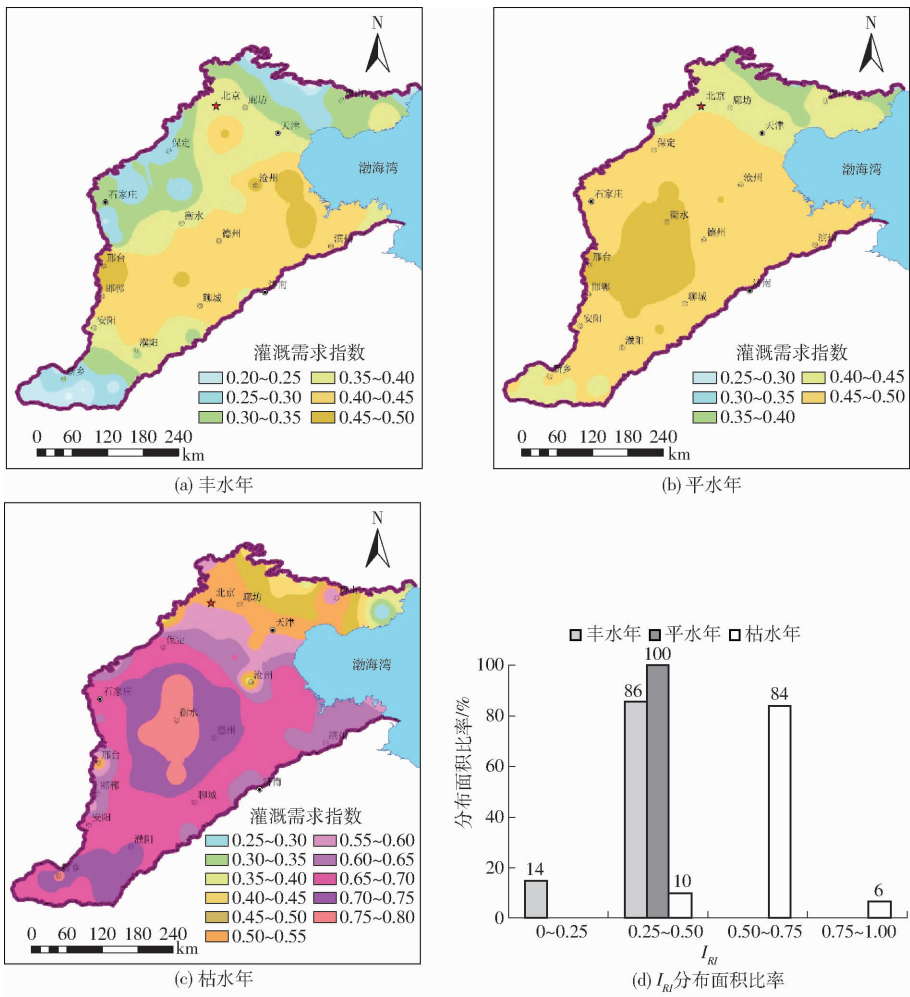


图 3 夏玉米灌溉需求指数空间特征

Fig. 3 Spatial characteristics of  $I_{RI}$  of summer maize

0.14, 其次为太行山前-豫北平原和中部-豫北平原, 降水量每增大 100 mm,  $I_{RI}$  降低 0.12, 中部-鲁北平原敏感性最低, 降水量每增大 100 mm,  $I_{RI}$  降低 0.11。

从图 4 还可以看出, 7 个区位冬小麦  $I_{RI}$  在 0.75 处的降水临界值均为 175 mm 左右, 即当降水量小

于 175 mm, 冬小麦  $I_{RI}$  均趋于大于 0.75, 灌溉需求过渡至极高灌溉需求;  $I_{RI}$  在 0.50 处的降水量临界值不尽相同, 其中, 燕山山前平原、太行山前-冀中平原、中部-冀中平原和滨海平原均在 350 mm 左右, 太行山前-豫北平原和中部-豫北平原在 400 mm 左右, 中部-鲁北平原则大于 400 mm。

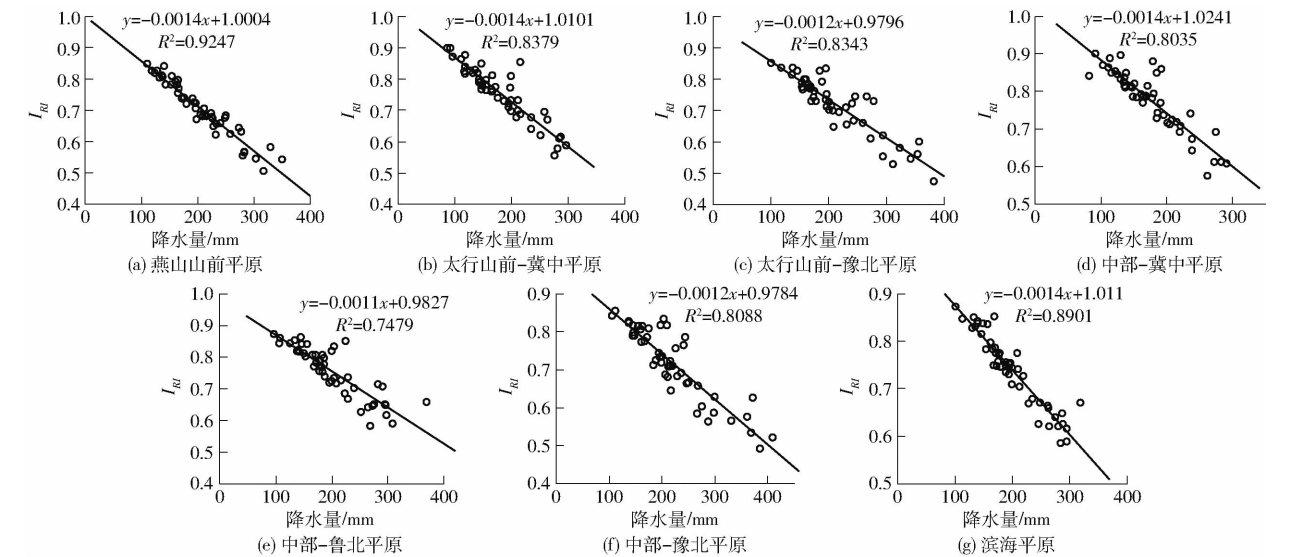


图 4 华北不同区位冬小麦灌溉需求指数与降水量相关关系

Fig. 4 Relationships between precipitation and irrigation water demand index of winter wheat in different regions of North China Plain

2.2.2 夏玉米

图 5 为夏玉米灌溉需求指数  $I_{RI}$  与作物生育期内有效降水量关系。由图 5 可以看出, 随着降水量的增大, 不同区位夏玉米灌溉需求指数  $I_{RI}$  均呈直线下降趋势 ( $P < 0.01$ ), 且中部-冀中平原敏感性最强, 降水量每增大 100 mm,  $I_{RI}$  降低 0.26, 其次为太行山前-冀中平原、中部-鲁北平原、滨海平原、燕山山

前平原、太行山前-豫北平原、中部-豫北平原, 敏感性分别为  $-0.25/(100\text{ mm})$ 、 $-0.22/(100\text{ mm})$ 、 $-0.22/(100\text{ mm})$ 、 $-0.20/(100\text{ mm})$ 、 $-0.18/(100\text{ mm})$  和  $-0.17/(100\text{ mm})$ 。从图 5 还可以看出, 当有效降水量增大至 175 mm 以上时, 燕山山前平原、太行山前-冀中平原、中部-冀中平原和滨海平原  $I_{RI}$  可降至 0.25 以下, 当有效降水量增大至 200 mm 以上时, 太

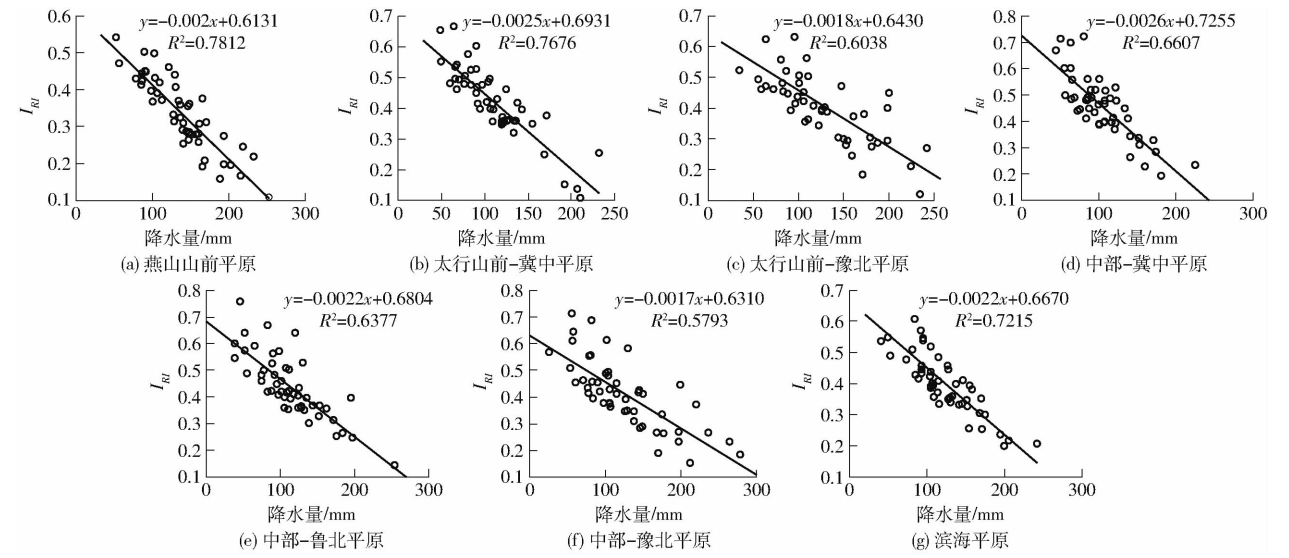


图 5 华北不同区位夏玉米灌溉需求指数与降水量相关关系

Fig. 5 Relationships between irrigation water demand index of summer maize and precipitation in different regions of North China Plain

行山前-豫北平原、中部-鲁北平原、中部-豫北平原  $I_{RI}$  可降至 0.25 以下;当降水量减少至 75 mm 以下时,除燕山山前平原外,其余 6 个分区  $I_{RI}$  均增大至 0.50 以上,当降水量减少至 50 mm 以下时,燕山山前平原  $I_{RI}$  亦增大至 0.50 以上,升至高度灌溉需求。

2.3 不同降水条件下  $I_{RI}$  概率分布

2.3.1 冬小麦

统计发现,华北 7 个区位冬小麦灌溉需求指数  $I_{RI}$  均呈正态分布 ( $P > 0.05$ ),但其分布参数随降水条件不同而存在明显差异(图 6,图中 GF 为正态分布曲线,CF 为累积频率曲线,下同)。在太行山前-豫北平原和燕山山前平原,多年平均降水量均大于 600 mm(表 1),正态分布的均值  $\mu$  均为 0.70,属高度灌溉需求,标准差为 0.09 和 0.10,  $I_{RI}$  大于 0.75 (极高灌溉需求)的概率分别为 0.33 和 0.30;在中部-豫北平原和滨海平原,多年平均降水量减少至 550 ~ 600 mm 之间,均值  $\mu$  则分别增大至 0.71 和 0.74,标准差分别为 0.10 和 0.07,  $I_{RI}$  大于 0.75 的概率大幅增大,分别为 0.36 和 0.43;在太行山前-冀中平原、中部-冀中平原和中部-鲁北平原,多年平均

降水量进一步减少至 500 ~ 550 mm 之间,均值  $\mu$  则进一步分别增大至 0.75、0.78 和 0.75,其标准差分别为 0.09、0.08 和 0.08,  $I_{RI}$  大于 0.75 的概率急剧上升,分别达到 0.52、0.43 和 0.51。

2.3.2 夏玉米

图 7 为夏玉米灌溉需求指数  $I_{RI}$  概率分布图。由图 7 可以看出,不同区位夏玉米灌溉需求指数亦服从正态分布 ( $P > 0.05$ ),且分布参数随降水条件的不同亦存在较大差异。在降水量最低的中部-冀中平原和中部-鲁北平原(多年平均降水量仅为 511 mm 和 533 mm,表 1),正态分布均值  $\mu$  分别为 0.45 和 0.44,属中度灌溉需求,  $I_{RI}$  小于 0.25 (低度灌溉需求)概率分别为 0.04 和 0.06,大于 0.50 (高度、极高灌溉需求)的概率分别为 0.35 和 0.40;当降水量增大至 580 mm 以上时(例如中部-豫北平原),均值  $\mu$  减小至 0.41,  $I_{RI}$  小于 0.25 概率增大至 0.11,大于 0.50 的概率则减小至 0.25;当降水量增大至 636 mm (例如燕山山前平原),均值  $\mu$  减小至 0.33,  $I_{RI}$  小于 0.25 概率增大至 0.22,大于 0.50 的概率则减小至 0.05。

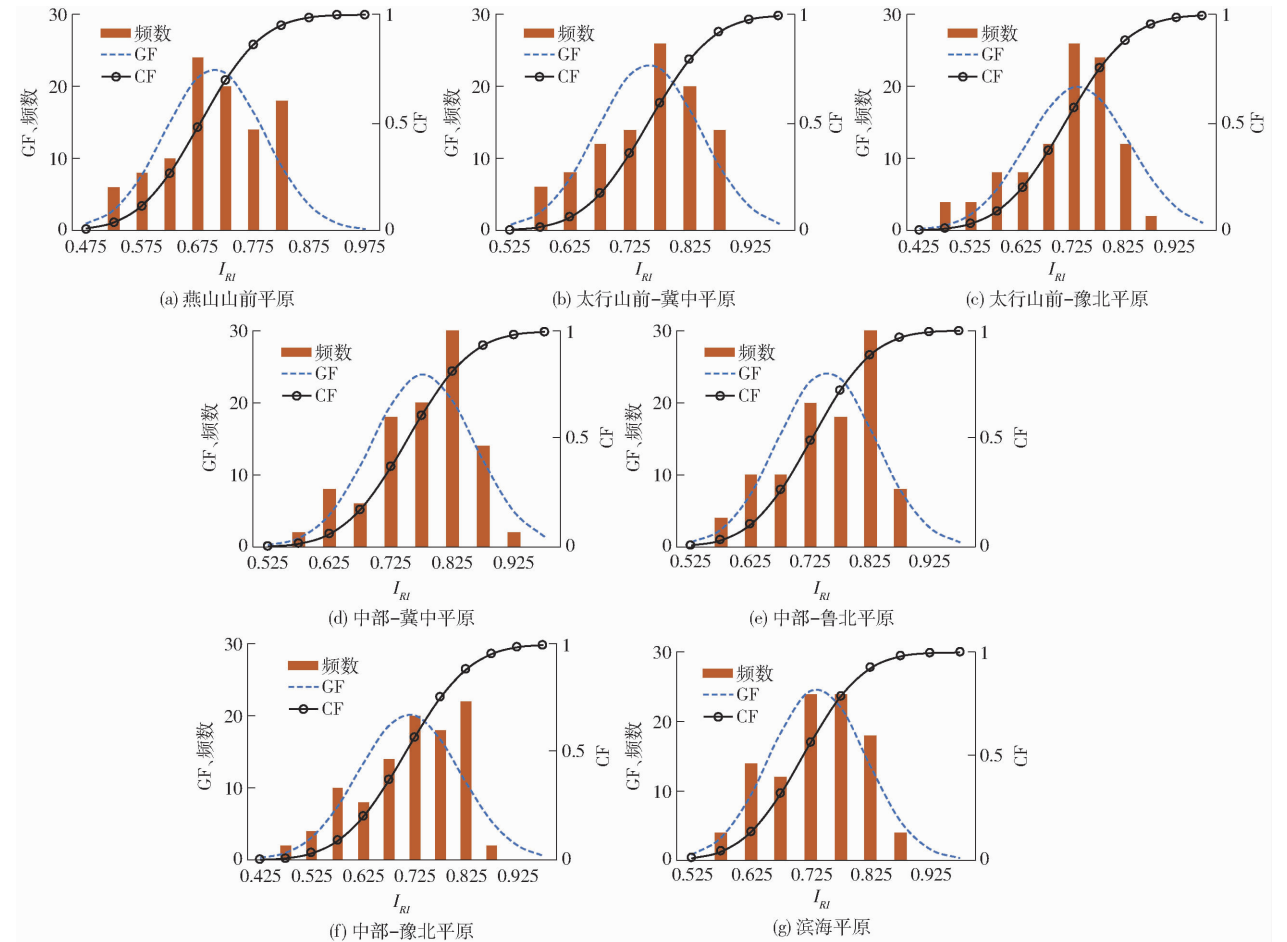


图 6 华北不同区位冬小麦灌溉需求指数概率分布

Fig. 6 Statistical distributions of winter wheat  $I_{RI}$  for different regions of North China Plain

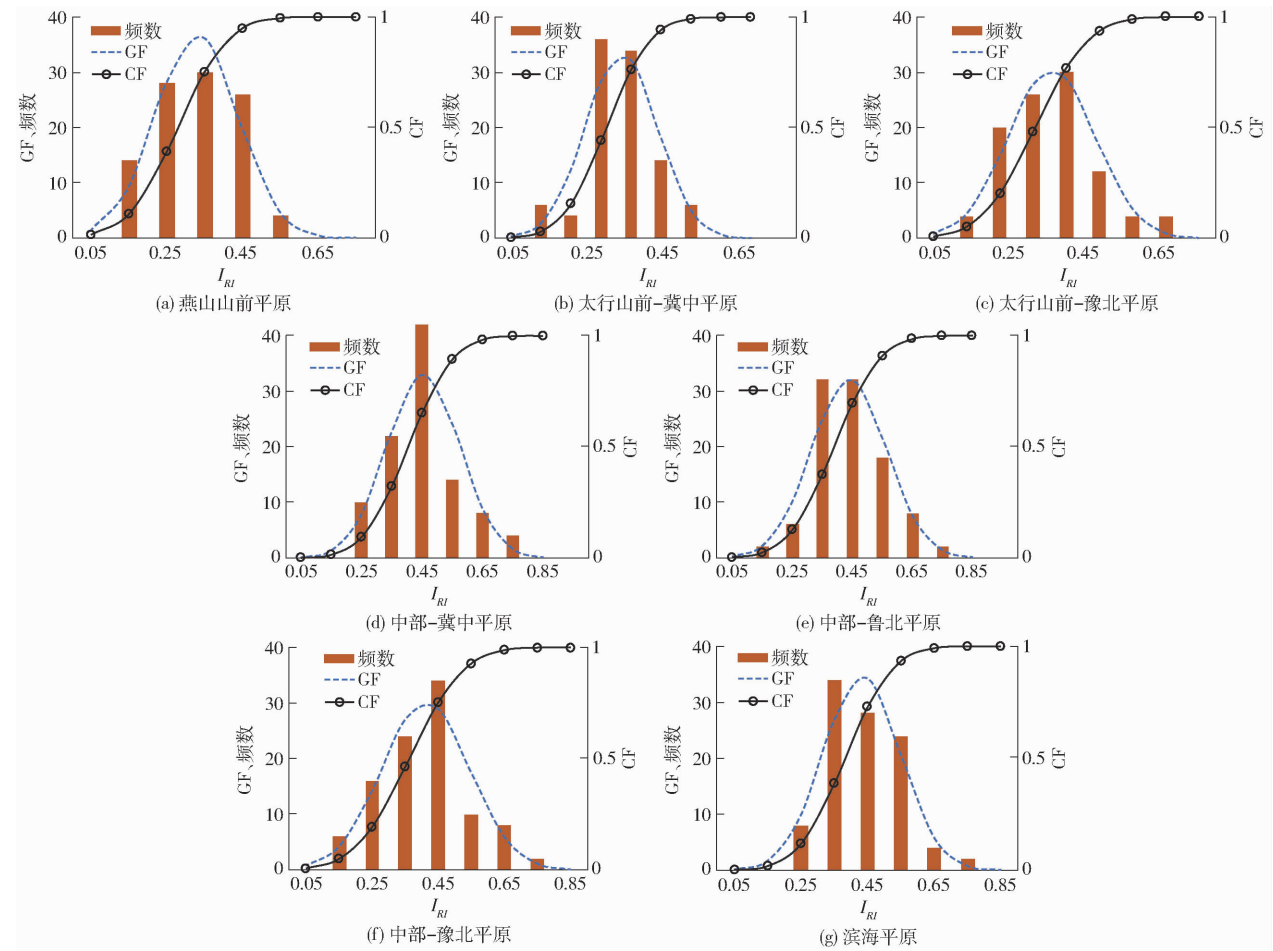


图 7 华北不同区位夏玉米灌溉需求指数概率分布

Fig. 7 Statistical distributions of summer maize  $I_{RI}$  for different regions of North China Plain

3 讨论

由图 2~7 可以看出,降水量变化对华北主要粮食作物-冬小麦和夏玉米灌溉需求影响显著,与现有国内外学者研究成果相同<sup>[21-27]</sup>。由图 4 和图 5 还可以看出,研究区不同区位冬小麦和夏玉米的灌溉需求指数  $I_{RI}$  对降水量变化的敏感性存在明显差异,这是因为  $I_{RI}$  除受降水量  $P$  影响外,还受最高气温  $T_{\max}$ 、最低气温  $T_{\min}$ 、每日日照时数  $N$ 、相对湿度  $R_h$  及风速  $W_s$  等因素的影响。由式(5)、(6) 计算得到上述各气象参数对  $I_{RI}$  变化影响相对贡献度(表 2、3)。

由表 2 可以看出,降水量对冬小麦  $I_{RI}$  影响的相对贡献度最大,可见在作物生长关键期,适当开展人工增雨作业,可有效降低  $I_{RI}$ ,缓解灌溉压力。其次是相对湿度  $R_h$ 、每日日照时数  $N$ 、最高气温  $T_{\max}$  和最低气温  $T_{\min}$ ,且不同区位上述气象参数对  $I_{RI}$  影响的相对贡献度及气象参数本身数值(表 1) 均存在较大差异,由此造成不同区位冬小麦  $I_{RI}$  对降水量变化敏感程度不同。同样,由于各气象参数对不同区位夏玉米  $I_{RI}$  的相对影响贡献度(表 3) 及气象参数本身数值亦均存在明显的空间差异,导致了不同区位夏玉米  $I_{RI}$  对降水量变化敏感程度存在差异。

表 2 不同区位气象参数对冬小麦  $I_{RI}$  影响相对贡献度

| Tab. 2 Relative contribution degree of meteorological factors on $I_{RI}$ of winter wheat |            |            |        |        |        |        | % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|---|
| 区位                                                                                        | $T_{\max}$ | $T_{\min}$ | $N$    | $R_h$  | $W_s$  | $P$    |   |
| 燕山山前平原                                                                                    | 7. 83      | 7. 89      | 17. 73 | 19. 45 | 12. 03 | 35. 08 |   |
| 太行山前-冀中平原                                                                                 | 7. 09      | 7. 71      | 13. 39 | 18. 26 | 14. 37 | 39. 17 |   |
| 太行山前-豫北平原                                                                                 | 9. 41      | 3. 08      | 14. 51 | 25. 91 | 6. 81  | 40. 29 |   |
| 中部-冀中平原                                                                                   | 9. 24      | 9. 14      | 15. 17 | 16. 43 | 11. 98 | 38. 04 |   |
| 中部-鲁北平原                                                                                   | 7. 58      | 9. 66      | 14. 59 | 21. 54 | 9. 84  | 36. 78 |   |
| 中部-豫北平原                                                                                   | 10. 99     | 6. 18      | 18. 05 | 25. 46 | 2. 02  | 37. 31 |   |
| 滨海平原                                                                                      | 5. 29      | 11. 76     | 13. 22 | 17. 00 | 13. 64 | 39. 09 |   |

表 3 不同区位气象参数对夏玉米  $I_{RI}$  影响相对贡献度

| Tab.3 Relative contribution degree of meteorological factors on $I_{RI}$ of summer maize |           |           |       |       |       | %     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 区位                                                                                       | $T_{max}$ | $T_{min}$ | $N$   | $R_h$ | $W_s$ | $P$   |
| 燕山山前平原                                                                                   | 22.39     | 7.34      | 13.63 | 20.94 | 8.35  | 27.35 |
| 太行山前-冀中平原                                                                                | 20.87     | 1.75      | 16.64 | 18.75 | 15.51 | 26.48 |
| 太行山前-豫北平原                                                                                | 21.49     | 5.36      | 18.53 | 25.78 | 0.73  | 28.11 |
| 中部-冀中平原                                                                                  | 21.08     | 6.22      | 15.92 | 18.04 | 14.15 | 24.60 |
| 中部-鲁北平原                                                                                  | 21.78     | 1.35      | 15.28 | 22.66 | 12.89 | 26.04 |
| 中部-豫北平原                                                                                  | 20.78     | 6.36      | 18.49 | 23.08 | 3.98  | 27.30 |
| 滨海平原                                                                                     | 23.50     | 3.73      | 13.56 | 23.75 | 7.50  | 27.96 |

4 结论

(1)在丰水年,冬小麦以  $I_{RI}$ 在 0.50 ~0.75 区间的高度灌溉需求分布区为主,夏玉米则以  $I_{RI}$ 在 0.25 ~0.50 区间的中度灌溉需求分布区为主,分别占全区 92%、86%;在平水年,冬小麦以  $I_{RI}$ 大于 0.75 的极高灌溉需求分布区为主,占全区 56%,夏玉米仍以  $I_{RI}$ 在 0.25 ~0.50 的中度灌溉分布区为主,但分布面积比率扩大至 100%;在枯水年,冬小麦极高灌溉需求分布区比例增大至 97%,夏玉米则以  $I_{RI}$ 在 0.50 ~0.75 的高度灌溉需求分布区为主,分布面积占全区的 84%。对极高、高度灌溉需求分布区,尤其是在丰水年仍为极高、高度灌溉需求的区域,应通过适当减少作物种植规模,调引客水等措施,缓解灌溉压力;反之,在中度、轻度灌溉需求分布区,尤其是在枯水年仍为中度、轻度灌溉需求的区域,则可以适度扩大种植规模,增加粮食产能,保障

国家粮食安全。

(2)降水是影响研究区不同区位冬小麦和夏玉米  $I_{RI}$ 的主控因素。随降水量的增大,冬小麦和夏玉米  $I_{RI}$ 均呈直线下降趋势,但不同区位  $I_{RI}$ 对降水变化敏感性不同,冬小麦以燕山山前平原、太行山前-冀中平原、中部-冀中平原和滨海平原最为敏感,降水量每增大 100 mm, $I_{RI}$ 均降低 0.14,夏玉米则是中部-冀中平原敏感性最强,降水量每增大 100 mm, $I_{RI}$ 降低 0.26。在作物生长关键期,应抢抓有利天气时机,适时开展人工增雨作业,以缓解灌溉压力。

(3)研究区不同区位冬小麦和夏玉米  $I_{RI}$ 均服从正态分布,但随降水条件的不同,分布参数变化明显。降水量减小,正态分布均值  $\mu$  增大,冬小麦  $I_{RI}$ 大于 0.75(极高灌溉需求)的概率呈明显增大趋势,小于 0.25(轻度灌溉需求)的概率则呈减少趋势,夏玉米  $I_{RI}$ 大于 0.50(高度、极高灌溉需求)的概率呈增大趋势,小于 0.25 的概率呈减少趋势。

参 考 文 献

[1] 张光辉,严明疆,田言亮,等. 中国主要粮食基地地下水保障能力与评价理论方法[M]. 北京:科学出版社, 2018:247-278.

[2] 张光辉,费宇红,刘春华,等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报,2013,29(1):1-10.

ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LIU Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 1-10. (in Chinese)

[3] ZHU Xiufang, ZHAO Anzhou, LI Yizhan, et al. Agricultural irrigation requirements under future climate scenarios in China [J]. Journal of Arid Land,2015,7(2): 224-237.

[4] YANG Yanzhao, FENG Zhiming, HUANG Heqing, et al. Climate-induced changes in crop water balance during 1960—2001 in Northwest China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 127: 107-118.

[5] MA Lin, YANG Yanmin, YANG Yonghui, et al. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in North China Plain[J]. Journal of Remote Sensing, 2011,15(2):332-339.

[6] 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 Ni, SUN Jingsheng, WANG Jinglei, et al. Temporal and spatial variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6):1693-1700. (in Chinese)

[7] 王卫光,孙凤朝,彭世彰,等. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 90-98.

WANG Weiguang, SUN Fengchao, PENG Shizhang, et al. Simulation of response of water requirement for rice irrigation to climate change[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 90-98. (in Chinese)

[8] NUMAN M. Impacts of climate change on water resources availability and agricultural water demand in the west bank[J]. Water Resource Management, 2009, 23:2015-2029.

[9] 冯大博,魏晓妹,降亚楠,等. 基于 STELLA 和气候变化情景的灌区农业供需水量模拟[J]. 农业工程学报,2015, 31(6):122-128.

FENG Dongpu, WEI Xiaomei, JIANG Ya'nan, et al. Simulation of agricultural water supply and demand at irrigation district under climate change using STELLA[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(6):122-128. (in Chinese)

[10] 胡玮,严昌荣,李迎春,等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014,34(9): 2367-2377.

- HU Wei, YAN Changrong, LI Yingchun, et al. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2367–2377. (in Chinese)
- [11] FOUAD H S, MAHMOUD S A, FURAT A, et al. Sensitivity of irrigation water requirement to climate change in arid and semi-arid regions towards sustainable management of water resources[J]. *Sustainability*, 2021, 13: 13608.
- [12] 冯慧敏, 张光辉, 王电龙, 等. 石家庄农业区地下水位对灌溉用水响应特征[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(10): 751–756.
- FENG Huimin, ZHANG Guanghui, WANG Dianlong, et al. Response characteristics of irrigation water impact on groundwater level under climate change in Shijiazhuang agricultural region[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition)*, 2016, 36(10): 751–756. (in Chinese)
- [13] 张光辉, 费宇红, 王金哲, 等. 华北平原农业与地下水适应性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 26–29.
- [14] 符娜, 李闯, 刘艳伟, 等. 基于灌溉需求指数的滇中地区烤烟需水量时空变化分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 155–161.
- FU Na, LI Chuang, LIU Yanwei, et al. Temporal and spatial variation analysis of water requirement of tobacco in middle of Yunnan Province based on irrigation requirement index[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 155–161. (in Chinese)
- [15] 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): 188–195.
- LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, 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): 188–195. (in Chinese)
- [16] 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 Tangzhe, ZHANG Zhongxue, LIN Yanyu, 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. (in Chinese)
- [17] 郑东方, 许嘉阳, 卢秀萍, 等. 云南省烤烟需水量及灌溉需求指数的时空特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2091–2098.
- ZHENG Dongfang, XU Jiayang, LU Xiuping, et al. Spatial and temporal characteristics of flue-cured tobacco water requirement and irrigation requirement index in Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 2091–2098. (in Chinese)
- [18] 雷宏军, 乔姗姗, 潘红卫, 等. 贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需求指数时空分布[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 115–121.
- LEI Hongjun, QIAO Shanshan, PAN Hongwei, et al. Temporal and spatial distribution of agricultural irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(12): 115–121. (in Chinese)
- [19] 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 Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 6–12. (in Chinese)
- [20] 任宪韶, 户作亮, 曹寅白, 等. 海河流域水资源综合评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 170–175.
- [21] WANG Nan, WU Jiujiang, GU Yuhui, et al. Factors influencing the spatiotemporal variability in the irrigation requirements of winter wheat in the North China Plain under climate change[J]. *Agronomy*, 2022, 12: 1987.
- [22] WU Dong, FANG Shibo, LI Xuan, et al. Spatial-temporal variation in irrigation water requirement for the winter wheat–summer maize rotation system since the 1980s on the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 214: 78–86.
- [23] LUO Xiping, XIA Jun, YANG Hong. Modeling water requirements of major crops and their responses to climate change in the North China Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(4): 3531–3541.
- [24] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. *水利学报*, 2004, 35(2): 77–82, 87.
- LIU Xiaoying, LIN Erda. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(2): 77–82, 87. (in Chinese)
- [25] 魏琛琛, 任树梅, 徐子昂, 等. 灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 251–260, 236.
- WEI Chenchen, REN Shumei, XU Ziang, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation water amount on greenhouse gas emissions and spring maize growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7): 251–260, 236. (in Chinese)
- [26] 陈先冠, 冯利平, 马雪晴, 等. 不同播期和灌水条件下冬小麦生物量变化与产量模拟[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 349–357.
- CHEN Xianguan, FENG Liping, MA Xueqing, et al. Biomass change and yield simulation of winter wheat under different sowing dates and irrigation conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 349–357. (in Chinese)
- [27] 李森, 魏红义, 武继承, 等. 不同降水年型下免耕对冬小麦氮素积累与产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 277–284.
- LI Sen, WEI Hongyi, WU Jicheng, et al. Effects of no-tillage on nitrogen accumulation and yield of winter wheat under different precipitation patterns[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 277–284. (in Chinese)