

基于 ORYZA2000 模型的华北地区 旱稻干旱风险评估

薛昌颖^{1,2}, 胡程达²

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

摘要: 针对华北地区旱稻产量年际不稳定的问题, 利用作物生长模拟技术与数理统计相结合的方法, 对华北地区气候背景下旱稻生长季内干旱风险进行了定量评估。以模型模拟的雨养条件下实际蒸散量相对于潜在条件下的蒸散量(即需水量)的亏缺率(即水分亏缺指数), 以雨养条件下产量相对于潜在产量的损失率(即灾损指数)作为产量灾损强度评价指标, 从受旱程度以及产量损失两个角度构建干旱风险评估模型, 进行干旱风险评估。结果表明, 华北地区旱稻全生育期水分亏缺指数在 0.35~0.45 之间, 其中出苗~穗分化阶段指数值在各生育阶段中最高。干旱灾损指数变化在 0.24~0.50 之间, 其中河北的西北部、山东北部及河南的南部较高。就干旱强度风险及灾损风险而言, 空间分布趋势基本一致, 风险指数低的地区主要分布在河北北部、山东南部等地区, 河北中南部、河南大部等地风险指数较高; 就综合风险指数而言, 高值区主要分布在河南的西部和南部、山东北部以及河北中部的部分地区, 低值区主要分布在北京、天津、河北北部、山东大部以及河南北部的大部分地区。总体上看, 华北大部地区旱稻干旱综合风险较低, 但在农业生产实际中仍不能忽视高风险区的干旱应对及防御。

关键词: 旱稻; ORYZA2000 模型; 干旱强度; 产量灾损; 风险评估; 华北地区

中图分类号: S423; S511.6 **文献标志码:** A

Risk assessment of drought on upland rice in North China based on ORYZA2000 model

XUE Chang-ying^{1,2}, HU Cheng-da²

(1. Henan Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique of CMA, Zhengzhou, Henan 450003, China;

2. Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Pointed at the problem of yield instability of aerobic rice, using the method combined crop growth simulation technology with the mathematical statistics, carried out the quantity evaluation for the drought risk of the aerobic rice in growing season under the climate background of North China. Taking the deficit ratio related actual rainfed evapotranspiration to the potential evapotranspiration, as crop water deficit index (CWDI) and the loss rate related the rainfed yield to the potential yield as the disaster loss index for the evaluation index of yield disaster loss, established the drought risk evaluation model from two angles as the extent of drought and yield loss, and carried out the drought risk evaluation. The results showed that: The CWDI for whole growing period of aerobic rice in North China Region was between 0.35 and 0.45. In different growth stages, it was highest at the emergence to ear differentiation stage. The drought disaster loss index was change between 0.24 to 0.50. it was higher in Northwest of Hebei, North of Shandong and South of Henan. For the drought intensity risk and disaster loss risk, the space distribution trend was basic identical. The low risk index areas were major distributed in North of Hebei and South of Shandong and other regions. But the risk index was rather high in Mid-south of Hebei, most of Henan and so on. For the comprehensive risk index, the high value areas major distributed in West and South of Henan, North of Shandong and part areas of the Mid of Hebei, and low value areas major distributed in Beijing, Tianjin, North of Hebei, most of Shandong and most areas of North Henan. From overall look, the

收稿日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41005058)

作者简介: 薛昌颖(1979—), 女, 辽宁喀左县人, 高级工程师, 博士, 主要从事农业气象灾害及作物生长模型等方面的研究。

E-mail: xuecy9@163.com

comprehensive drought risk of aerobic rice was lower in most areas of North China. However, in the agricultural practice it could not be ignored for the response and defense to drought in high risk areas.

Keywords: upland rice; ORYZA2000 model; drought intensity; yield loss; risk assessment; North China region

旱稻是从水稻品种通过人工选育而产生的变异型,可以像小麦、玉米一样在旱地直接播种,一生无需淹水层,在干旱达到一定程度时辅以适量的灌水即可满足其生理需求;同时旱稻又具有“水陆两栖”的特点,在淹水条件下同样能正常生长并获得更好的产量水平。旱稻适宜在缺水的低洼地区或者有一定灌溉条件的地区种植^[1]。与水稻种植方式相比,由于旱稻无需播前的水田整地过程,生育期内无需水层,从而减少了由于侧渗、深层渗漏以及无效水面蒸发造成的水分损失,因此具有巨大的节水潜力^[2]。在水资源日益短缺的严峻形式下,为了发挥水资源特别是灌溉水资源的最大效益,国内外相继开展了旱稻研究,国际水稻研究所(International Rice Research Institute, IRRI)已将旱稻相关研究列入本世纪初的重点研究领域之一。在国内,中国农业大学、云南省农科院、辽宁省农科院及丹东农业科学院等多家院校和科研院所长期致力于旱稻育种及栽培研究,培育出了一系列旱稻新品种。2001 年我国首次召开了全国性旱稻生产的研讨会,2007 年 10 月中国农业大学与国际水稻研究所(IRRI)联合召开了“北京国际旱稻研讨会”,来自亚、欧、美洲等国家的科研机构或者大学的相关专家和国内从事旱稻研究的科研人员参加了此次会议,对国际旱稻的合作研究进行了充分的学术交流,展望了国际旱稻发展的趋势与前景。两次会议的召开对我国旱稻生产的发展起到了很大的促进作用。

华北地区是我国重要的粮食生产基地,由于灌溉水资源的限制,水稻种植面积已大幅度缩减,而旱稻因其巨大的节水潜力和易于管理等特点在该地区获得了较快的发展;此外,旱稻可以在冬小麦收获后作为麦茬稻播种,实现稻-麦轮作^[3]。因此,旱稻在华北地区具有较大的发展潜力,仅河南省正阳县旱稻种植面积就由 2007 年的 1 333 hm² 迅速扩大到 2009 年的 13 400 hm² 以上^[4]。至 2002 年,我国旱稻种植面积达 19 万 hm²,其中约 8 万 hm² 主要分布在华北及黄淮海地区,占旱稻种植总面积的 42.1%^[1]。2001 年,国际水稻研究所与中国农业大学合作,在田间试验的基础上开展了旱稻在华北地区种植推广的适宜性、产量潜力及灌溉水分管理等方面的研究^[2,5]。研究表明,旱稻在该地区具有较高的产量潜力,但由于该地区降水年际波动大,而且降水在时

空分布上具有较大的不均匀性,旱稻产量也不稳定,旱稻生长季内的阶段性干旱是影响旱稻产量稳定的主要因素之^[5]。而针对区域范围内气候条件特别是降水资源对旱稻生产的影响,以及不同地区种植旱稻的干旱气候风险尚未开展相关的研究,旱稻在华北地区推广的气候适宜性方面尚缺乏科学理论的指导。

本文在已有研究的基础上,根据风险评估理论^[6],利用长期历史气象资料,以作物模型和地理信息系统技术为工具,系统分析华北地区旱稻不同生育阶段干旱造成的产量灾损风险水平。研究结果对有效利用气候资源、水资源,健康发展旱稻生产提供科学依据和理论指导,具有良好的应用前景。

1 资料与方法

1.1 资料

(1) 气象数据

本文用到的气象数据为华北地区主要气象观测站点 1971—2010 年逐日气象资料,主要包括降水量、最高温度、最低温度、平均温度、辐射量或日照时数、平均风速、平均水汽压,数据来源于中国气象科学数据共享服务网。通过对各站点数据资料完整性的筛选,最终选择 51 个站点作为本研究模型输入的气象数据,站点分布情况如图 1。

(2) 土壤参数

ORYZA2000 模型模拟土壤水分变化需要一定的土壤水文参数,主要包括饱和含水量、饱和导水率以及 van Genuchten 模型参数 α 、 l 和 n 。由于这些参数通常很难直接获得,本项目主要通过利用可获得的土壤粒级(砂粒、粉粒、粘粒)含量、容重、有机质、田间持水量、萎蔫系数等参数,根据文献^[7]提供的方法进行转换,以获得模型运行所需的参数数据。土壤粒级(砂粒、粉粒、粘粒)含量、容重、有机质、田间持水量、萎蔫系数等参数数据来源于中国科学院南京土壤研究所建立的全国土壤参数空间数据库,数据格式为栅格数据,其空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,分为 0~10、10~20、20~50 cm 和 0~100 cm 四个层次。各站点的土壤参数数据根据站点经纬度从空间数据库中提取。

1.2 旱稻品种介绍

本文用于区域作物模型模拟的旱稻代表品种分别为旱稻 277、旱稻 297 和旱稻 502。三个品种均由

中国农业大学农学与生物技术学院选育,并通过国家审定的旱稻品种。旱稻 277 属粳型旱稻中晚熟常规品种,适宜在黄淮地区作油菜茬、麦茬旱稻种植,全生育期平均为 113 d;旱稻 297 属粳型常规旱稻品

种,生育期 136 d 左右,适宜在东北地区南部、华北地区北部作一季旱稻种植;旱稻 502 属偏粳型常规旱稻品种,适宜在黄淮地区作油菜茬或麦茬种植,全生育期平均为 124 d。

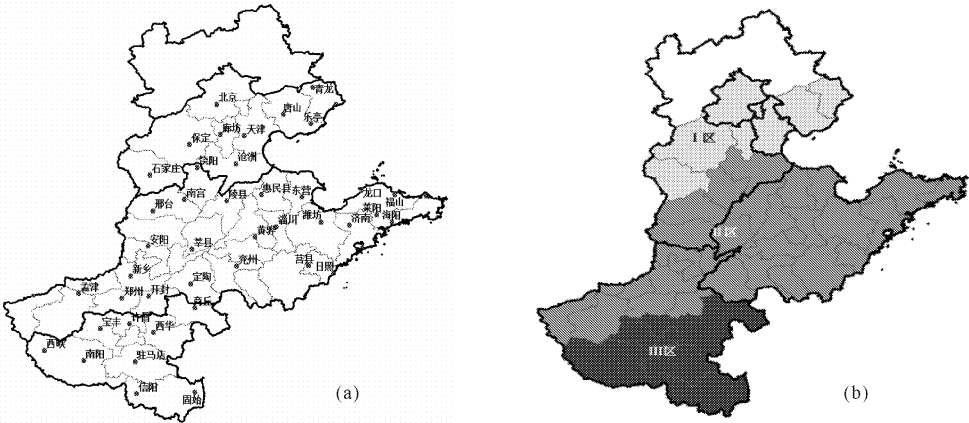


图 1 研究区域站点分布(a)及二级分区(b)

Fig.1 The stations distribution in research region (a) and two level zoning (b)

1.3 研究区域分区

研究区域为华北地区,具体包括北京市、天津市、河北省(除承德和张家口)、山东省和河南省。根据研究区域气候及农业生产特点,结合旱稻生育期长度等特性,将研究区域进行了二级分区(见图 1b),主要分为三个区域,其中Ⅰ区为一季稻种植区,主要包括北京和天津两市全部,以及河北省的秦皇岛、唐山、廊坊、保定和石家庄五市,代表性适宜种植品种为旱稻 297;Ⅱ区和Ⅲ区为麦茬稻区,其中Ⅱ区主要包括河北省的沧州、衡水、邢台、邯郸 4 市,山东省全部,以及河南省的安阳、鹤壁、新乡、濮阳、焦作、济源、三门峡、洛阳、郑州、开封等黄河以北的地区,代表性适宜的种植品种为旱稻 277;Ⅲ区主要包括河南省许昌、平顶山、漯河、商丘、周口、南阳、信阳、驻马店等地区,代表性适宜的种植品种为旱稻 502。

1.4 ORYZA2000 模型简介及作物品种参数确定

ORYZA2000 水稻模型是 ORYZA 系列模型的最新版本,由国际水稻研究所与荷兰瓦赫宁根大学联合研制^[8]。ORYZA2000 模型依据 de Wit 的 4 级生产水平理论,从作物器官生理过程出发,以日为模拟时间步长,动态和定量地描述作物在光温潜在水平、水分限制水平、养分限制水平以及水分和养分共同限制水平上的水稻生长发育、产量形成、土壤水分和植株氮素的动态变化过程。模型中,温度是水稻发育期的主要驱动因子,分为基本营养期、光周期敏感期、孕穗期和子粒形成期 4 个主要发育期,根据各发育期的发育速率常数、热量单位日增量和光周期来

计算发育速率。模型中考虑了水分限制条件下土壤水分胁迫对叶片扩展和卷曲、叶片衰老、光合作用、干物质分配、根系生长以及小穗不孕等作物生长发育过程的影响。土壤水分模块实时动态模拟根层土壤水分的变化。模型提供了三个不同的土壤水分模拟模块,可以模拟水田、旱田等不同环境下的土壤水分变化过程,用户可以根据实际条件进行选择。模型运行需要输入逐日气象数据(辐射、最高温、最低温、风速、水汽压和降水)、作物品种参数、土壤数据以及相应的管理数据等。

在模型参数确定的基础上,利用获取的历史逐日气象数据和对应站点的土壤水文参数,分别模拟不同区域各站点在潜在和雨养条件下旱稻的生长发育过程,输出逐年气候条件下旱稻的潜在产量和雨养产量,以及对应的需水量和蒸散量数据。

1.5 风险评估方法

1.5.1 干旱强度风险 本文主要根据旱稻生育期的不缺水程度进行干旱强度风险评估。利用 ORYZA2000模型输出结果,可以获得旱稻各阶段的潜在蒸散量和仅靠自然降水条件下的实际蒸散量。潜在蒸散量即为水分充分满足情况下旱稻各生育阶段的最大蒸散量,即需水量 ET_m 。以雨养条件下实际蒸散量相对于潜在蒸散量的亏缺率(即水分亏缺指数),作为旱稻生育期干旱强度评价指标。水分亏缺指数(CWDI)计算方法如下:

$$CWDI = 1 - ET_a / ET_m$$

(1)

根据灾害强度风险评估原理,干旱强度风险是

水分亏缺指数等级及其出现概率的函数,将早稻生育期划分为播种 ~ 穗分化、穗分化 ~ 开花和开花 ~ 成熟三个主要阶段,各生育阶段干旱强度风险评估模型为^[9]:

$$I_m = \sum_{i=1}^n (CWDI_{mi} \times P_{mi}) \tag{2}$$

式中, I_m 为早稻某生育阶段干旱风险强度指数, $CWDI$ 为水分亏缺指数, P 为概率, m 取值为 1、2、3,分别代表播种 ~ 穗分化、穗分化 ~ 开花和开花 ~ 成熟三个生育阶段。

不同生育阶段缺水对最终产量造成的影响不同,全生育期干旱强度风险中考虑各生育阶段干旱风险的权重系数,全生育期干旱强度风险评估模型为^[10]:

$$I = \sum_{m=1}^3 (a_m \times I_m) \tag{3}$$

式中, I 为全生育期干旱风险指数; I_m 为播种 ~ 穗分化、穗分化 ~ 开花和开花 ~ 成熟三个生育阶段的干旱风险指数; a_i 为各生育阶段风险指数权重系数,根据各阶段水分亏缺指数与产量的相关关系来确定。

1.5.2 干旱灾损风险 早稻干旱灾损风险是由生育期干旱造成的不同产量损失的灾损强度风险。本研究利用作物生长模型模拟结果,以模型模拟的雨养条件下产量相对于潜在产量的损失率(即灾损指数)作为产量灾损强度评价指标,从产量损失角度进行干旱灾损风险评估。灾损即由不利气象条件引起的减产,本研究的早稻灾损指数是指雨养条件下产量相对于潜在产量的损失率(K_y):

$$K_y = 1 - Y_a/Y_m \tag{4}$$

因此,灾损风险即为不同灾损指数等级及其出现概率的函数,如下式^[9]:

$$G = \sum_{i=1}^n (K_{yi} \times F_i) \tag{5}$$

式中, G 为灾损强度风险指数, F 为不同灾损指数等级出现的概率。

1.5.3 干旱综合风险 干旱综合风险一方面需考虑生育期内不同干旱强度出现的风险,另一方面还需考虑干旱造成的产量损失风险,因此,将各生育阶段干旱强度风险和产量灾损风险进行综合,构建干旱灾损综合风险评估模型:

$$M = I + G \tag{6}$$

式中, M 为干旱综合风险指数, I 和 G 分别为干旱强

度风险指数和灾损强度风险指数。

1.6 数据分布检验与概率计算

本研究中的数据分布检验和概率估算主要通过 Matlab 工具软件来完成。首先利用 Matlab 统计工具箱提供的 kstest 函数对需分析的数据序列进行 Kolmogorov - Smirnov 检验,确定数据序列是否符合正态分布,对不符合正态分布的数据进行 box - cox 转换,将其转换为正态分布;然后利用 Matlab 提供的正态概率分布函数 Normcdf 进行概率计算。

1.7 空间表达方法

数据结果的空间表达主要利用 ArcGIS 地里信息系统软件进行 Kriging 插值,生成空间栅格数据,得到相应的空间分布图。

2 结果分析

2.1 模型参数确定及验证

ORYZA2000 模型在早稻生长发育模拟及水氮管理等方面已有了较多的研究报道^[11-15],验证了该模型在模拟华北地区早稻生长发育方面具有较好的适应性。模型中大部分的作物参数是根据大量的试验结果分析得出,具有普适性,只有 10% 左右的作物参数需要根据具体的试验结果进行调试,这些参数包括发育速率、干物质分配系数、比叶面积、叶片相对生长速率、叶片死亡速率、茎同化物转移系数和最大粒重。其中早稻 297 的模型作物参数为作者根据北京地区早稻试验资料确定^[16],针对早稻 297 的模型参数已有多篇文章发表;早稻 277 和早稻 502 的模型参数主要根据在开封、安徽蒙城等地的试验资料确定^[17-19]。通过模型参数敏感性分析,对早稻生育期和产量影响最大的作物参数是发育速率,因此在北京、开封、蒙城等地试验资料的基础上,分别确定了早稻 297、早稻 277 和早稻 502 的发育速率模型参数(表 1)。图 2 为模型模拟的 LAI、生物量及产量与实测值的对比情况,可以看出该模型在模拟早稻的生长发育方面具有较好的适用性。

表 1 各区域代表品种的发育速率模型参数

Table 1 The model parameters of developing rate of typical varieties in each area/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$)

模型	HD297(Ⅰ区)	HD277(Ⅱ区)	HD502(Ⅲ区)
DVRJ	0.000581	0.000764	0.000721
DVRI	0.000758	0.000758	0.000758
DVRP	0.000686	0.000892	0.000779
DVRR	0.002063	0.002634	0.002168

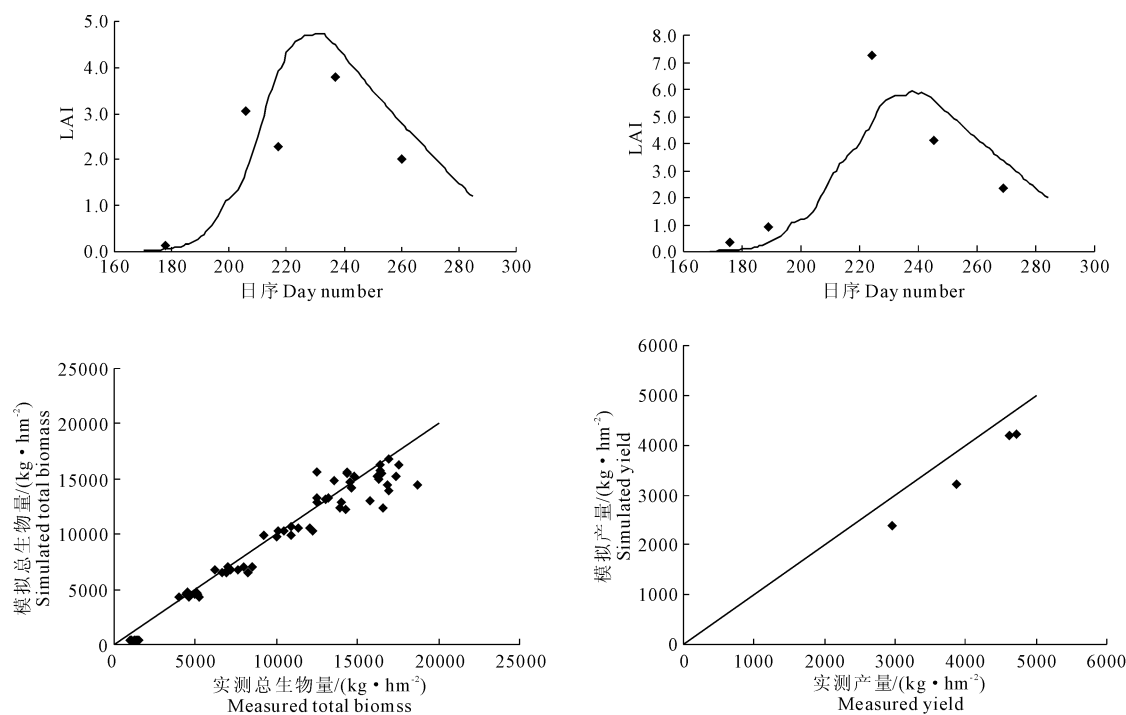


图 2 部分模型模拟值与实测值对比验证情况

Fig.2 Comparative verification between parts of model simulated values with measured values

2.2 旱稻需水量及各生育阶段水分亏缺指数分布

由图 3 知,根据模型模拟结果,华北大部分地区旱稻需水量在 500 ~ 600 mm 之间,河北北部及北京、天津等地由于是种植一季稻,生育期较长,需水量较大,在 600 ~ 700 mm 之间。而雨养条件下的实际蒸散量大部地区在 300 mm 左右,与需水量之间存在一定的差距。根据公式(1)计算,全生育期的水分亏缺指数大部分地区在 0.35 ~ 0.45 之间,河北西部、河南西北部的部分地区最高,在 0.45 ~ 0.65 之间。不同生育阶段间,以出苗 ~ 穗分化阶段最高,全区都在 0.45 ~ 0.65 之间,穗分化 ~ 开花阶段水分亏缺指数最小,大部地区都在 0.25 以下;开花 ~ 成熟期大部地区水分亏缺指数变化在 0.25 ~ 0.45 之间(图 4)。

2.3 旱稻产量潜力及灾损指数空间分布

根据模型模拟结果,华北地区旱稻产量潜力变化范围在 6 000 ~ 8 400 kg·hm⁻²(图 5)。河北大部、河南西部和北部以及山东西部等地最低,在 6 000 ~ 7 000 kg·hm⁻²之间,山东大部、河南中部和西南部部分地区为中值区,在 7 000 ~ 7 500 kg·hm⁻²之间,山东东部、河南南部为高值区,在 7 500 kg·hm⁻²以上。与潜在产量相比,华北地区旱稻雨养产量较低,最高值是 5 600 kg·hm⁻²,部分地区产量在 3 500 kg·hm⁻²以下,总体上东部地区雨养产量较高,一般在 4 000 kg·hm⁻²以上。

产量灾损指数变化范围在 0.24 ~ 0.50 之间,河

北的西北部、山东北部及河南的南部最高,在 0.45 ~ 0.50 之间,河北东北部、山东的南部和西部灾损指数较低,在 0.24 ~ 0.40 之间,其它地区变化在 0.40 ~ 0.45 之间。

2.4 干旱风险区划

在以上分析的基础上,根据式(3)和(5)分别计算了华北地区旱稻生育期干旱强度风险指数和灾损风险指数(图 6),在此基础上完成了华北地区旱稻干旱风险综合区划(图 7)。干旱强度风险指数变化在 0.33 ~ 0.50 之间,而灾损风险指数变化在 0.18 ~ 0.57 之间,从两个指数的变化范围可以看出干旱强度风险在空间上的差异小于灾损风险。从空间分布规律看,两个风险指数的空间分布趋势比较接近,风险指数低的地区主要分布在东部,如河北北部、山东南部等地区,干旱强度风险高值区主要分布在西部地区,如河北中南部,河南西部及南部等地,而灾损风险指数的高值区更主要分布在南部地区,如河南的南部和西部。

在综合考虑干旱发生强度风险及造成的产量灾损风险的基础,得到了华北地区旱稻干旱综合风险。根据分布结果,高风险值区主要分布在河南的西部和南部,山东北部以及河北中部的部分地区风险也较高,低风险区主要分布在北京、天津、河北北部、山东大部以及河南北部的大部分地区。总体上看,河北大部地区旱稻干旱综合风险都较低,但在农业生产实际中仍不能忽视高风险区的干旱应对及防御。

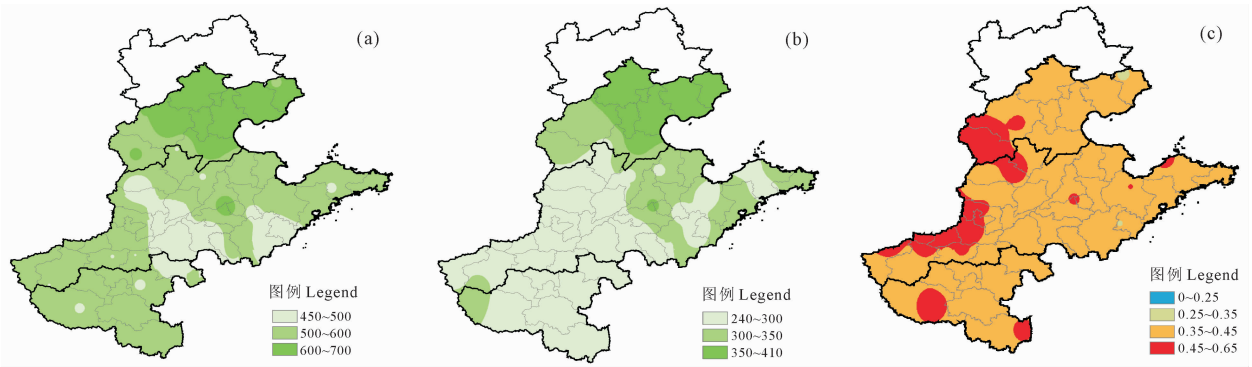


图 3 旱稻需水量(a)、雨养条件下实际蒸散量(b)及全生育期水分亏缺指数(c)分布
Fig.3 Water requirements of upland rice (a), rainfed actual evapotranspiration (b) and distribution of the water deficit index in whole growing duration (c)

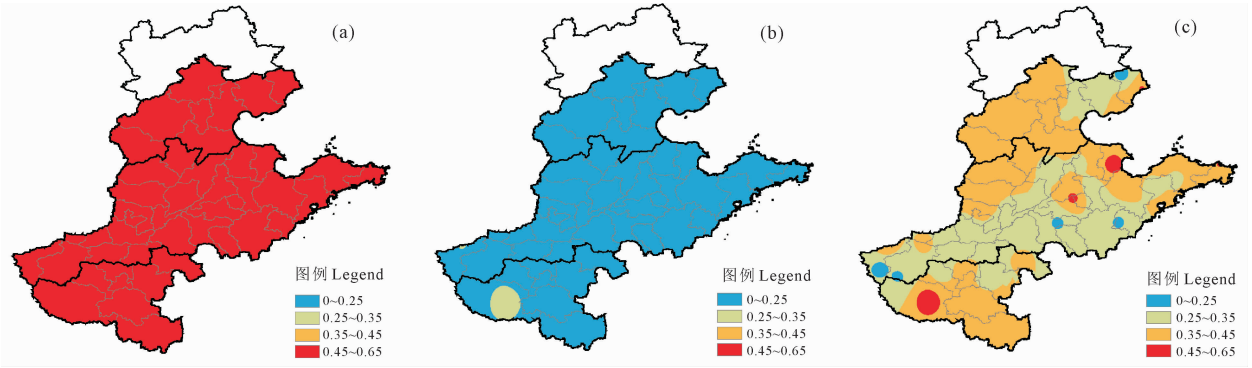


图 4 旱稻出苗~穗分化期(a)、穗分化~开花期(b)、开花~成熟期(c)水分亏缺指数分布
Fig.4 Distributions of water deficit index in the seedling to panicle differentiation stage (a), panicle differentiation to flowering stage (b) and flowering to ripening stage (c)

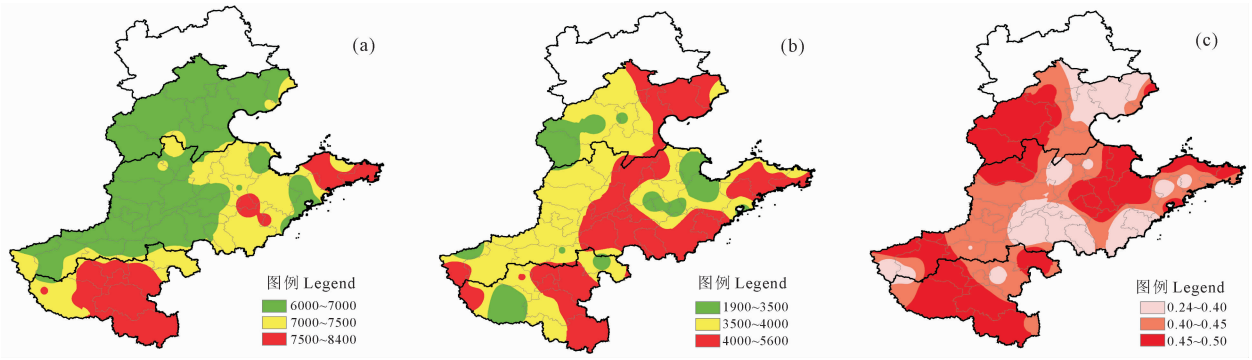


图 5 华北地区旱稻潜在产量(a)、雨养产量(b)及产量灾损指数(c)分布

Fig.5 Distribution of the potential yiel of upland rice in North China Region (a), rainfed yield (b) and the disaster yield loss index (c)

3 结论与讨论

本文基于作物生长模拟模型方法,分析了华北地区旱稻生产潜力及生育期水分供需情况,在此基础上根据风险评估理论构建了河南省旱稻干旱灾损风险评估指标和模型,进行了华北地区干旱风险分析及区划,主要得出以下结论:

(1) 华北大部分地区旱稻需水量在 500 ~ 600 mm 之间,而雨养条件下的实际蒸散量大部地区在

300 mm 左右,全生育期的水分亏缺指数大部分地区在 0.35 ~ 0.45 之间,河北省西部、河南西北部的部分地区最高。不同生育阶段间,以出苗~穗分化阶段干旱缺水最为严重。

(2) 华北地区旱稻产量潜力变化范围在 6 000 ~ 8 400 kg·hm⁻²,雨养产量则变化在 1 900 ~ 5 600 kg·hm⁻²,产量灾损指数变化范围在 0.24 ~ 0.50 之间,河北的西北部、山东北部及河南的南部较高。

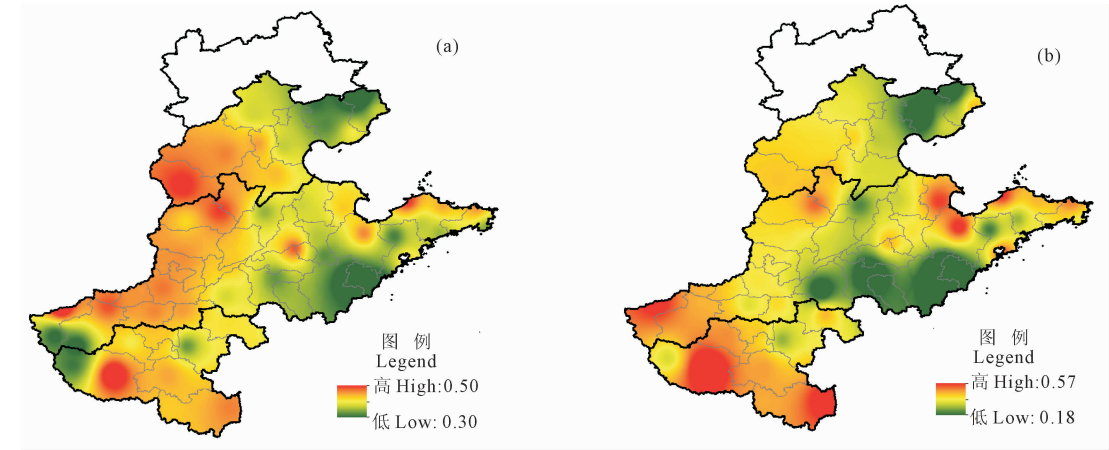


图 6 干旱强度风险指数(a)及灾损风险指数(b)分布
Fig.6 Distribution of drought intensity risk index (a) and disaster loss risk index (b)

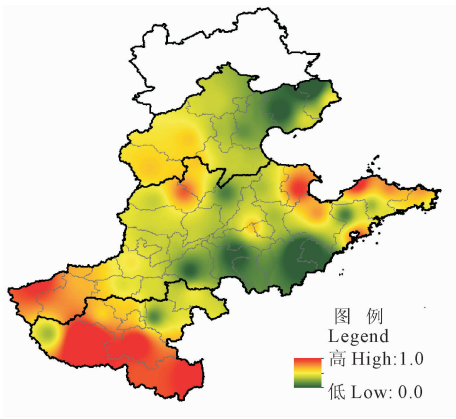


图 7 华北地区旱稻干旱综合风险区划
Fig.7 Comprehensive drought risk zoning for aerobic rice in North China Region

(3) 单一干旱强度风险及产量灾损风险的空间分布趋势比较接近,低值区主要分布在河北北部、山东南部等地区。干旱综合风险高值区主要分布在河南的西部和南部、山东北部以及河北中部的部分地区,低值区主要分布在北京、天津、河北北部、山东大部以及河南北部的大部分地区。

降水华北地区作物生育期水分消耗的主要来源,以降水作为主要供水来源进行干旱评估也是一段时期干旱研究的主要方法,但是由于受降水强度和时间分布的影响,作物生育期的降水并不完全用于作物的蒸散消耗,即降水对于作物而言有一定的有效性。本文基于作物模型模拟结果构建的水分亏缺指数是旱稻在自然降水条件下的实际耗水量,消除了降水中用于径流、下渗等无效的部分,更能反映作物的实际水分状态。河南西部和南部地区旱稻风险相对较高,根据模型的模拟过程看,主要是由于该地区初夏旱发生较频繁,在播种~出苗期这段时间

无降水后模型认为作物已无法继续生长而死亡。以南阳站为例,1971—2010 年的 40 年间,有 9 年模型输出的产量为零,即在这 9 年里作物由于严重受旱造成中途死亡。出现这一结果的主要原因是由于本文在进行模拟时,设置了固定播期,实际生产上一般会采取调整播期的方式降低初夏旱造成的影响,也可以降低干旱风险。根据本文的分析结果,大部地区旱稻生育期均有一定的水分亏缺,特别是生育前期,需要进行一定的补充灌溉。刘志娟^[20]、张秋平^[21]等以北京地区为例,分析了旱稻生育期降水与需水的耦合程度,结果表明在不同的降水年型下耦合度变化在 0.39~0.82 之间,生长季内各生育阶段均需灌溉水补充。这一结论在一定程度上验证了本文的结论。

本文的结论是完全基于各地自然气候资源条件的,未考虑各地的实际农业生产条件,特别是灌溉条件,因此研究结果还存在一定局限性。此外,今后还需根据风险评估结果,综合分析华北地区旱稻生产的适应性,提出旱稻在该区域内的发展前景和旱稻生产的适宜对策。

参 考 文 献:

[1] Wang H Q, Bouman B A M, Zhao D L, et al. Aerobic rice in northern China: opportunities and challenges[C]//Bouman B A M, Hengsdijk H, Hardy B, et al. Water-Wise Rice Production, Proceedings of the International Workshop on Water-Wise Rice Production. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute, 2002:143-154.

[2] Bouman B A M, Yang X G, Wang H Q, et al. Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China[J]. Field Crops Research, 2006,97:53-65.

[3] 熊 坤,孙 杰,阎世忠,等.豫东麦茬旱稻与气候条件的关系及其高产栽培技术[J].安徽农业科学,2007,35(23):7136.

(4) 秋季多年平均降水下降趋势显著,整个时间序列 UFK 曲线均小于 0,1991 年和 2006 年是突变点,1991—2006 年降水量下降趋势发生突变。空间变化与夏季类似,减少中心依然是环县、延安、西峰镇、平凉和临汾, β 值均为 $-0.8 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

(5) 冬季多年平均降水量整体呈明显上升趋势,1981 年以后 UFK 值超出置信线,降水量变化趋势发生突变。空间上降水变化呈缓慢上升趋势,由西北向东南上升幅度逐渐变大。最大上升中心华山, β 值仅为 $0.95 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 李 勉,姚文艺,李占斌.黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J].地球科学进展,2005,20(1):74-20.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 张建兴,马孝义,赵文举,等.黄土高原地区干旱长期变化趋势及预测[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):1-6.
- [4] Loukas A, Vasiladias L. Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly region, Greece[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, (4):719-731.
- [5] 王位泰,张天峰,姚玉璧,等.黄土高原夏半年降水气候变化特征对作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):154-158.
- [6] 闵 山,钱永甫.中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J].水科学进展,2008,19(6):763-771.
- [7] 方红远,甘升伟,余莹莹.区域供水系统干旱历时特性综合分析[J].水科学进展,2007,18(1):95-101.
- [8] 刘引鸽.陕北黄土高原降水的变化趋势分析[J].干旱区研究,2007,24(1):49-55.
- [9] 段建军,王小利,高照良,等.黄土高原地区 50 年降水时空动态与趋势分析[J].水土保持学报,2009,23(5):143-146.
- [10] 王万忠,焦菊英,郝小品.黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系[J].水科学进展,1999,10(2):165-169.
- [11] 殷水清,谢 云.黄土高原地区中小流域日降雨空间分布特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(1):89-91.
- [12] 李 志,郑粉莉,刘文兆.1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J].自然资源学报,2010,25(2):291-299.
- [13] 朱清科,张 岩,赵磊磊,等.陕北黄土高原植被恢复及近自然造林[M].北京:科学出版社,2012.
- [14] 郑宝明,田承志,王 煜,等.黄土丘陵沟壑区第一副区小流域坝系建设理论与实践[M].郑州:黄河出版社,2004:4-6.
- [15] 王金星,张建云,李 岩,等.近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J].水科学进展,2008,19(5):656-660.
- [16] 夏 军,王渺林.长江上游流域径流变化与分布式水文模拟[J].资源科学,2008,30(7):962-967.
- [4] 庞振凤.麦茬直播优质早稻高产栽培技术[J].河南农业,2009, (8):56.
- [5] Yang X G, Bouman B A M, Wang H Q, et al. Performance of temperate aerobic rice under different water regimes in North China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74:107-122.
- [6] 李世奎,霍治国,王道龙,等.中国农业灾害风险评价与对策[M].北京:气象出版社,1999.
- [7] Wosten J H M, Lilly A, Nemes A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soil[J]. Geoderma, 1999, 90:169-185.
- [8] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA2000: modeling lowland rice [M]. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, and Wageningen University and Research Centre, Wageningen, Netherlands, 2001.
- [9] 王素艳,霍治国,李世奎,等.北方冬小麦干旱灾损风险区划[J].作物学报,2005,31(3):267-274.
- [10] 薛昌颖,霍治国,李世奎,等.北方冬小麦产量灾损风险类型地理分布[J].应用生态学报,2005,16(4):620-625.
- [11] 薛昌颖,杨晓光,Bouman B A M,等.ORYZA2000 模型模拟北京地区早稻的适应性初探[J].作物学报,2005, 31(12):1567-1571.
- [12] 薛昌颖,杨晓光,邓 伟,等.利用 ORYZA2000 模型分析北京地区早稻产量潜力及需水特征[J].作物学报,2007,33(4):625-631.
- [13] Xue C Y, Yang X G, Bouman B A M, et al. Optimizing yield, water requirements, and water Productivity of aerobic rice for the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2008,26(6):459-474.
- [14] 李亚龙,崔远来,李远华,等.基于 ORYZA2000 模型的早稻生长模拟及氮肥管理研究[J].农业工程学报,2005,21(12):141-146.
- [15] Feng L P, Bouman B A M, Tuong T P, et al. Exploring options to grow rice under water-short conditions in northern China using a modeling approach. I: Field experiments and model evaluation[J]. Agricultural Water Management, 2007,88:1-13.
- [16] 薛昌颖.北京地区早稻非充分灌溉模式及灌溉降低干旱风险研究[D].北京:中国农业大学,2008.
- [17] 李亚龙.水稻和早稻水肥综合调控的田间试验及数值模拟研究[D].武汉:武汉大学,2006.
- [18] 阎 静.早稻苗期的氮素吸收及不同品种和稻麦系统的氮素效应[D].北京:中国农业大学,2010.
- [19] 余 珏.直播早稻播量对产量影响和稀播条件下分蘖发生及成穗规律[D].北京:中国农业大学,2008.
- [20] 刘志娟,杨晓光,薛昌颖,等.华北地区早稻产量适应性及耗水特征分析[J].中国生态农业学报,2008,16(5):1143-1148.
- [21] 张秋平,杨晓光,薛昌颖,等.北京地区早稻作物需水与降水的耦合分析[J].农业工程学报,2007,23(10):51-56.

(上接第 185 页)