

中国主要小麦种植区雨养条件下 水分胁迫发生规律模拟

栗 健^{1,2}, 岳耀杰^{1,2,4}, 潘红梅^{3,4}

(1.北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2.北京师范大学区域地理研究实验室, 北京 100875;

3.民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4.京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 运用 EPIC(Environmental Policy Integrated Climate)作物生长模型模拟了 1961—2011 年中国各小麦种植区小麦生长过程,对中国各小麦种植区小麦生育期内水分胁迫规律进行了分析。结果表明:雨养条件下,全国 11 个小麦种植区的水分胁迫程度可分为 3 个等级;冬麦区(新疆冬麦区除外)和东北春麦区水分胁迫均值、发生频率均明显低于其他春麦区;南方的 3 个冬麦区(华南、西南、长江中下游),水分胁迫的程度、发生频率均低于其他麦区;黄淮、北部冬麦区水分胁迫规律相似,在 1、2 月和 5、6 月较高,而北部冬麦区水分胁迫程度和发生频率略高于黄淮冬麦区;北部、西北、北疆春麦区、新疆冬麦区在雨养条件下水分胁迫最为严重,如果没有灌溉,小麦几乎绝收,尤其是新疆冬麦区。

关键词: 小麦种植区;雨养;水分胁迫规律;EPIC 模型;中国

中图分类号: S423; S512.1 **文献标志码:** A

Simulation of water stress regularity in main wheat planting regions in China under rainfed conditions

LI Jian^{1,2}, YUE Yao-jie^{1,2,4}, PAN Hong-mei^{3,4}

(1. College of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Regional Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affair/Ministry of Education, Beijing 100875, China;

4. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This study simulates the growth process of wheat in main wheat growing regions of China from 1961 to 2011 using EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) model and analyzes the water stress in the growing period of wheat. The results reveal that the degree and frequency of water stress in winter wheat regions and Northeast spring wheat region except for Xinjiang winter wheat region are significantly lower than the other spring wheat regions. The degree and frequency of water stress in North, Northwest and Middle and lower Yangtze winter wheat regions in the south are lower than those in the other regions. The rule of water stress in Huanghuai and North winter wheat regions are similar, which shows that water stress is higher in January, February, May and June and North winter wheat region is a bit higher than Huanghuai winter wheat region in water stress degree and frequency. North, Northwest, North Xinjiang spring wheat regions especially Xinjiang winter wheat region are regions with most severe water stress.

Keywords: Water stress; wheat planting region; EPIC model; wheat; China

水分胁迫对粮食产量的影响是农业干旱风险评估的关键科学问题^[1]。目前国内外关于水分胁迫的研究主要有三种方法:盆栽试验、基于观测数据构建水分胁迫指数和作物模型模拟。有学者选用不同基因型的作物,在各生长阶段和不同水分胁迫程度下

进行盆栽试验,从而研究不同品种作物在各生长阶段的耐旱性或水分胁迫对于作物生长过程及产量的影响,以选择耐旱品种或指导灌溉^[2-5]。盆栽试验的方法,虽然可以人为控制水分胁迫的时间和程度,但不适合大尺度空间规律的研究,又因为只能在作

物生育期内几个关键时间点上进行观测,因此得到的观测结果在时间上是不连续的。基于遥感或地面观测数据,构建水分胁迫指标;如基于作物冠层气温差的水分胁迫指数(Crop Water Stress Index, CWSI);根据作物需水量与降水、作物蒸散量之间关系构建的作物水分亏缺指数(Crop Water Deficit Index, CW-DI)等,利用这些指标可进行农业干旱监测的研究^[6-9]。基于地面观测或遥感数据构建的水分胁迫指数,在时间和空间上均有较好的连续性,但无法排除其他因素的干扰(比如灌溉),因而不能真实反应当地气候土壤条件对农作物生长的影响^[10]。作物生长模型模拟作为一种系统分析方法,在帮助理解农业系统和天气、气候因子的相互作用方面起了很大作用,在水分胁迫的研究中也得到了广泛应用^[11-13]。作物模型模拟既能达到盆栽试验任意设定情景的要求,在输入气象、土壤、田间管理等数据后,又可以进行长序列的时空规律分析。刘明等^[14]利用 EPIC(Environmental Policy Integrated Climate)模型研究了黄淮海平原冬小麦在当地气候土壤条件下的水分胁迫规律,并提出了相应的灌溉策略。但该研究仅在一个气象站点进行模拟,在表示黄淮海平原区域水分胁迫规律上具有很大的不确定性,特别是在 EPIC 模型参数率定上直接采用了前人研究的参数^[15-16],没有对该参数的区域适用性进行验证。我国有 10 个小麦种植区^[17],进行全国水分胁迫规

律的研究,一要考虑气候、土壤等因素的区域分异规律,二要重视种植区间的小麦品种差异。反映在作物模型中,即需在不同的 wheat 种植区设定不同的小麦遗传参数,进行分区率定和验证,这是进行大区域水分胁迫规律研究的关键。

为此,本文选择全国 752 个气象站,利用 EPIC 模型,在对各小麦种植区的作物遗传参数进行率定的基础上,模拟了 1961—2011 年雨养情景下小麦的生长变化,分析了全国各小麦种植区水分胁迫的发生时间和规律。期望该项研究可为防御小麦干旱、制定灌溉策略以及合理调配水资源提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

根据中国小麦种植区划,全国划分为 10 个小麦种植区^[17-18](图 1),其中春麦区包括东北、北部、西北春麦区;冬麦区包括北部、黄淮、长江中下游、西南、华南冬麦区;此外还有青藏和新疆两个冬春兼播麦区。根据实际情况:北疆主要种植春小麦,南疆大部分地区适合强冬性小麦种植,青藏春冬麦区以种植春小麦为主,春小麦面积占全部麦田面积的 66% 以上^[18];同时为了计算方便,将新疆春冬麦区划分为北疆春麦区和新疆冬麦区,青藏春冬麦区划为春麦区。

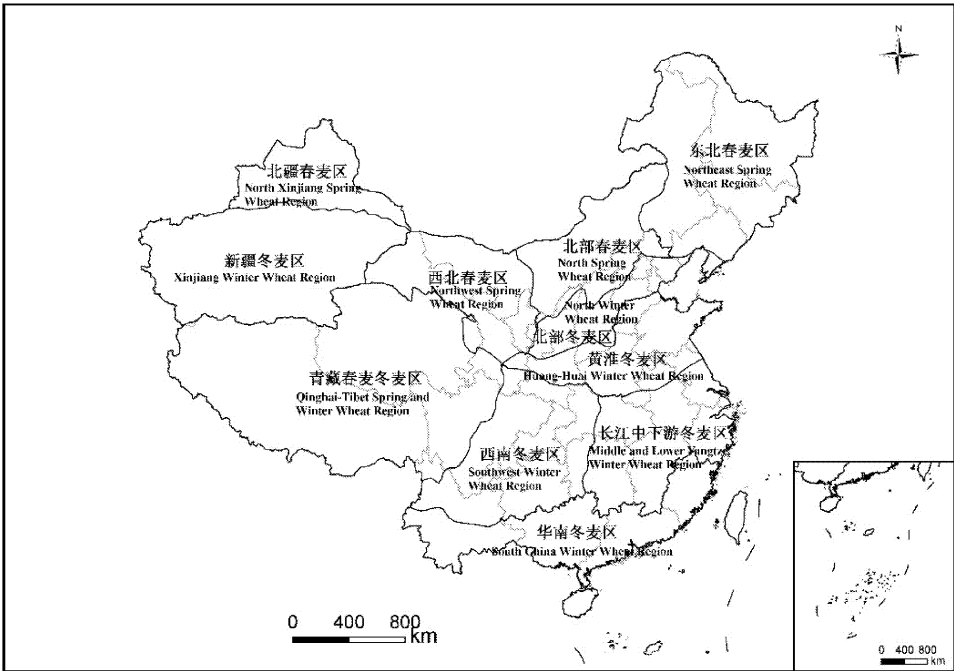


图 1 中国小麦种植区划图

Fig. 1 Planting regionalization of wheat in China

1.2 数据基础

研究所需的数据包括 EPIC 模型的输入和验证数据两部分(表 1)。其中日降水量、日最高(低)气温、日平均风速、日相对湿度、日照时数数据在全国

752 个气象站点均可获得,太阳辐射数据在 122 个站点有记录,其他站点的太阳辐射值根据日照时数通过 Angstrom – Prescott 公式估算得出^[19–20],原有的太阳辐射观测值予以保留。

表 1 模型基本输入和验证数据
Table 1 The input and validation data of EPIC model

数据名称 Data type	数据内容 Data content	数据来源 Data Source
气象数据 Meteorological data	1961—2011 年全国 752 个站点的日降水量、日最高(低)气温、日平均风速、日相对湿度、日照时数、122 个站点的日太阳辐射数据 Daily data: precipitation, temperature, radiation, wind speed, and relative humidity of 752 stations and solar radiation of 122 stations	中国气象局数据共享网 China meteorological data sharing service system of China meteorological administration
土壤空间分布数据 Soil distribution data	中国 1:100 万土壤类型图 1:1,000,000 soil map of China	中国科学院南京土壤研究所 Institute of Soil Science, Chinese Academy Sciences
土壤属性数据 Soil property data	与土壤空间分布匹配的土壤属性数据,包括土层分布、机械组成和有机碳含量等 Soil layers, texture data, and organic carbon and so on	中国土志 ^[21] Chinese Soil Genus Records
中国作物种植区划图 Crop planting zoning map of China	中国小麦种植区划图 Wheat planting regionalization map of China	中国农业科学院数据共享网 Data sharing net of Chinese Academy of Agricultural Sciences
作物播种收获时间数据 Crop seeds and harvest time data	小麦播种和收获日期 Crop seeds and harvest time data	参考文献[22] Reference [22]
农作物产量数据 Crop yield data	2000—2011 年全国农业气象站农作物产量资料数据集 Growth process of wheat recorded by agricultural stations of China.	中国气象局数据共享网 China meteorological data sharing service system of China meteorological administration

1.3 水分胁迫因子

水分胁迫(Water Stress, WS)是指因农作物体内水分发生亏缺影响了作物正常生长发育的生理现象。在 EPIC 模型中,水分胁迫是通过考虑作物生长过程中,水分的供给与需求的关系进行计算的。为了分析各种种植区自然降雨条件对小麦生长的影响,得到在无人工灌溉影响下的小麦水分胁迫变化规律,本文以各小麦种植区内气象、土壤等数据为输入,将施肥设定为自动施肥,病虫害管理也采用自动设置,使其对作物产量不产生影响。灌溉措施设置为雨养,以得到自然降雨条件下的水分胁迫。在作物生长期间,每天的水分胁迫均可以通过式(1)计算得到^[23]

$$WS_i = \frac{\sum_{l=1}^M u_{i,l}}{E_{pi}} \tag{1}$$

式中:WS 表示水分胁迫因子;u 表示土层*l*的水分利用量;*E_{pi}* 表示第*i* 天潜在植物水分利用量。*WS_i* 的值越小表示作物所受的胁迫越大,为了便于表示水分胁迫规律,用 *WS* = 1 – *WS_i* 作为新的水分胁迫因子,*WS* = 0 表示作物处在无水分胁迫状态,*WS* = 1.0 表示作物所受的水分胁迫最大。根据式(2) 计算

出各种种植区内所有站点在小麦生育期内每天的多年平均水分胁迫值,用来分析各种种植区小麦生育期内的水分胁迫规律,根据式(3) 计算出各种种植区内所有站点不同等级水分胁迫的发生频率,根据式(4) 计算出各种种植区内所有站点的多年平均小麦产量。

$$WS_{dr} = \frac{\sum_{k=1}^m (\sum_{j=1}^n (WS_{djk})/n)}{m} \tag{2}$$

$$F_{rl} = \frac{\text{sum}(WS_{rl})}{N_r} \tag{3}$$

$$Y_r = \frac{\sum_{s=1}^p (\sum_{y=1}^n (Y_{ys})/n)}{p} \tag{4}$$

式中:*WS_{dr}* 为小麦生育期内第*d* 天的水分胁迫多年平均值;*m* 为在种植区*r* 内第*d* 天存在水分胁迫的站点总数;*n* 为总年数;*WS_{djk}* 为站点*k* 第*j* 年第*d* 天的水分胁迫值;*F_{rl}* 为种植区*r* 内水分胁迫值大于等于*l* 的发生频率,sum(*WS_{rl}*) 为种植区*r* 内所有站点水分胁迫值大于等于*l* 的天数;*N_r* 为种植区*r* 内所有站点发生水分胁迫的总天数;*Y_r* 为种植区*r* 内所有站点的多年平均小麦产量(t·hm⁻²);*p* 为种植区*r* 内的站点总数;*Y_{ys}* 为站点*s* 第*y* 年的小麦产量(t·hm⁻²)。

1.4 参数率定和验证

根据有关 EPIC 模型小麦敏感性参数的研究^[24-26],选择敏感性较高的 6 个参数进行率定。6 个参数分别为:能量-生物量转换系数(潜在光能利用率) *WA*、收获指数 *HI*、生长季峰值点 *DLAI*、生长中期作物生物量正常 N 含量 *BN2*、成熟所需的最大热量单位(积温) *PHU*、无胁迫下叶面积生长参数(2) *DLP2*。由于各种植区存在小麦品种、耕作日期等差异,在使用 EPIC 模型模拟时,需要分区对模型进行参数率定。本文选择 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona)算法^[27]进行参数率定。该算法可以有效地解决非线性约束最优化问题,能够一致、有效、快速地搜索到模型参数全局最优解。SCE-UA 算法的基本思路是将基于确定性的复合型搜索技术与自然界中的生物竞争进化原理相结合。利用 SCE-UA 算法进行参数率定的过程以及算法参数的设置可参考文献[28]~[29]。

本文将目标函数设置为: $Obj = |1 - d_y|$, 其中 d_y 为决定系数。

终止准则为:最大迭代次数为 5 000;目标函数和参数的收敛容许值均为 0.1。

寻优空间由参数的上下边界组成,可以根据模型推荐的参数范围来确定,也可以根据参数的物理意义和研究流域的特性人工给定。EPIC 模型本身对每个参数均给出了取值范围,但一般范围较宽泛,文献[24]根据前人研究或专家经验对 *WA*、*HI*、*PHU* 等 9 个参数给出了更精确的取值范围。本文参考以上研究成果,最终确定的需要率定的小麦参数的初

始值及上下限见表 2。

表 2 参数优化初始值及上下限
Table 2 Calibrated parameter boundary values

参数 Parameters	初始值 Initial value		下限 Lower limit	上限 Upper limit
	春小麦 Spring wheat	冬小麦 Winter wheat		
<i>WA</i> /(t·hm ⁻² ·MJ ⁻¹ ·m ⁻²)	30.0	35.0	30.0	45.0
<i>HI</i>	0.50	0.50	0.45	0.60
<i>DLAI</i>	0.60	0.60	0.10	1.00
<i>BN2</i>	0.0250	0.0230	0.0134	0.06
<i>PHU</i> /℃	1500	1500	1200	2400
<i>DLP2</i> /%	49.95	50.95	10.00	100.00

从每个种植区农业气象站数据中选择数据序列较好的一个典型站点进行参数的率定,该区其他站点的产量数据用作验证。将这些站点 2000—2011 年的日气象、土壤和田间管理数据输入 EPIC 模型,将输出的作物产量和实测作物产量进行拟合,通过模拟产量与实测产量进行对比验证,各种植区模型校验结果如表 3 所示,决定系数多在 0.5 以上,均方根误差大多在 10% 左右。精度较低的区域有华南冬麦区与东北春麦区,这两个区域斜率和决定系数接近 0,均方根误差远大于其他种植区。由于种植区内各站点之间的小麦品种仍有差异,一个站点小麦遗传参数在其他站点不一定适用,而且观测数据本身的误差和田间管理数据的准确程度等均会造成结果的偏差。但考虑到上述结果为很多站点的模拟结果,基本达到在宏观尺度应用的需求。

表 3 模型验证统计量
Table 3 Statistical index for validation

小麦种植区 Wheat planting region	斜率 Slop	决定系数 R^2 Determination coefficient	均方根误差/% Root mean square error
华南冬麦区 South China winter wheat region	- 0.03	0.02	29.58
西南冬麦区 Southwest winter wheat region	0.73	0.59	10.74
长江中下游冬麦区 Middle and lower yangtze winter wheat region	0.96	0.63	10.61
黄淮冬麦区 Huang-Huai winter wheat region	0.84	0.55	14.16
青藏高原春麦冬麦区 Qinghai-Tibet spring and winter wheat region	1.00	0.78	12.93
北部冬麦区 North winter wheat region	0.94	0.76	8.80
西北春麦区 Northwest spring wheat region	0.43	0.56	9.82
新疆冬麦区 Xinjiang winter wheat region	0.74	0.67	10.86
北部春麦区 North spring wheat region	1.80	1.00	7.28
北疆春麦区 North Xinjiang spring wheat region	0.79	0.88	10.12
东北春麦区 Northeast spring wheat region	0.17	0.17	17.80

2 结果与分析

2.1 各小麦种植区水分胁迫规律

各种植区小麦生长时段内水分胁迫变化如图 2 所示,同时结合表 4 所示的各种植区的水分胁迫均值、标准差,可看出水分胁迫最严重的是新疆冬麦区,其在整个生育期内水分胁迫值均极高,绝大多数时段高于 0.8,均值达到了 0.89,在雨养条件下本区小麦几乎不能存活。其次是黄淮、北部冬麦区,西北、北部、北疆春麦区和青藏春麦冬麦区,这些种植区水分胁迫均值在 0.25 到 0.6 之间,属于中等水平,而标准差均大于 0.15,高于其他地区,说明这些地区水分胁迫年内变化较大,结合图 2 可以看出这些麦区普遍在小麦生育期的某一个或几个阶段水分胁迫值很高。黄淮、北部冬麦区由于在地理位置上十分相近,因此水分胁迫规律也十分相似:在 1 月、2 月、5 月、6 月水分胁迫值相对较高,5、6 月水分胁迫值高于 0.3,而 1、2 月水分胁迫值高于 0.5;北部冬麦区水分胁迫值要略高于黄淮冬麦区,较高胁迫值持续时间也略长。西北、北部、北疆 3 个春麦区,水分胁迫规律相似:在 5、6、7 三个月水分胁迫值较高且连续,均超过 0.5;比较 3 个春麦区高水分胁迫持续时间占整个种植区小麦生育期的时间比例,北疆春麦区>西北春麦区>北部春麦区。青藏春麦冬麦区在 9 月以前水分胁迫在 0.2~0.4 之间变化,波动不大,在 9 月份以后迅速升高,最高可达 0.8。

水分胁迫最轻的是华南、西南、长江中下游冬麦区和东北春麦区,这些地区水分胁迫在整个小麦生育期内均不高,均值均低于 0.2,且标准差普遍低于 0.1(西南冬麦区为 0.12),说明这些麦区在小麦生育期内的水分胁迫均处于很低的水平且波动不大。华南、长江中下游冬麦区、东北春麦区水分胁迫值始终较低,基本不超过 0.3。华南冬麦区在 3 月中旬和 5 月下旬,长江中下游冬麦区在 1 月上旬和 6 月上旬,东北春麦区在 3 月中旬和 6 月下旬均存在水分胁迫的极大值点,但胁迫值不高。华南、长江中下游冬麦区属于降水条件很好的地区,年降水量一般达到 1 500 mm 以上,而东北冬麦区土地肥沃,且小麦生育期降水在春麦区中最多,所以这些地区水分胁迫值普遍较低。西南冬麦区从 12 月开始到第二年 6 月水分胁迫值相对于其他时段均高,在 1 月上旬达到最高。总的来看,春麦区(东北春麦区除外)和新疆冬麦区水分胁迫值普遍高于其他冬麦区,对灌溉依赖很大,南方的冬麦区水分胁迫值始终不高,靠自然降水基本可以满足小麦生长需求,北方的冬麦

区水分胁迫高值集中在两个时期:1、2 月和 5、6 月。

表 4 各小麦种植区水分胁迫均值与标准差

Table 4 Mean value and standard deviation of water stress in each wheat region

小麦种植区 Wheat planting region	均值 Mean	标准差 Standard deviation
华南冬麦区 South China winter wheat region	0.10	0.06
西南冬麦区 Southwest winter wheat region	0.13	0.12
长江中下游冬麦区 Middle and lower Yangtze winter wheat region	0.06	0.04
黄淮冬麦区 Huang-Huai winter wheat region	0.28	0.18
青藏春麦冬麦区 Qinghai-Tibet spring and winter wheat region	0.39	0.16
北部冬麦区 North winter wheat region	0.35	0.25
西北春麦区 Northwest spring wheat region	0.55	0.12
新疆冬麦区 Xinjiang winter wheat region	0.89	0.11
北部春麦区 North spring wheat region	0.44	0.18
北疆春麦区 North Xinjiang spring wheat region	0.56	0.20
东北春麦区 Northeast spring wheat region	0.19	0.07

2.2 各小麦种植区水分胁迫发生频率规律

各种植区不同程度水分胁迫发生频率统计如表 5 所示,与 2.1 节的结果对比可以发现:水分胁迫最轻的 4 个麦区中,华南、西南、长江中下游冬麦区绝大多数胁迫值在 0.2 以下,超过了 80%(长江中下游冬麦区超过了 90%),虽然也有极少极端水分胁迫值($WS \geq 0.99$)出现,但这些地区多年平均粮食产量依然最高;而西南冬麦区雨养条件下粮食产量是 3 个麦区中最高的,东北春麦区虽然是春麦区中水分胁迫多年均值、各程度水分胁迫发生频率最低的麦区,且在春麦区中雨养条件下多年平均粮食产量最高,但由于水分胁迫在小麦出苗期左右相对严重,其产量只有 $3.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,这说明水分胁迫发生的时间对于产量有很大影响。

黄淮、北部冬麦区水分胁迫多年平均值、不同程度水分胁迫发生频率均很相近,但多年平均粮食产量黄淮冬麦区却比北部冬麦区高出了 $1.57 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,说明除了水分胁迫,小麦品种、耕作日期对于雨养条件下的产量也有一定影响。西北、北部、北疆春麦区

虽然水分胁迫多年均值与黄淮、北部冬麦区相差不大(图 2),但这 3 个麦区雨养条件下多年平均粮食产量均很低,因为这些麦区的水分胁迫在 0.5 以上的频率超过了 50%(北部春麦区超过了 45%),尤其极端水分胁迫(≥ 0.99)的发生频率远大于黄淮、北部冬麦区。青藏春麦冬麦区虽然极端水分胁迫发生

频率达到了 2.63%,但 85% 以上的水分胁迫均不高于 0.5,且极端水分胁迫大都发生小麦成熟的时期(图 2),所以小麦产量高于西北、北部、北疆春麦区。新疆冬麦区雨养条件下多年平均粮食产量几乎绝收,水分胁迫在 0.5 以上的频率超过了 85%,尤其极端水分胁迫(≥ 0.99)的发生频率远大于其他麦区。

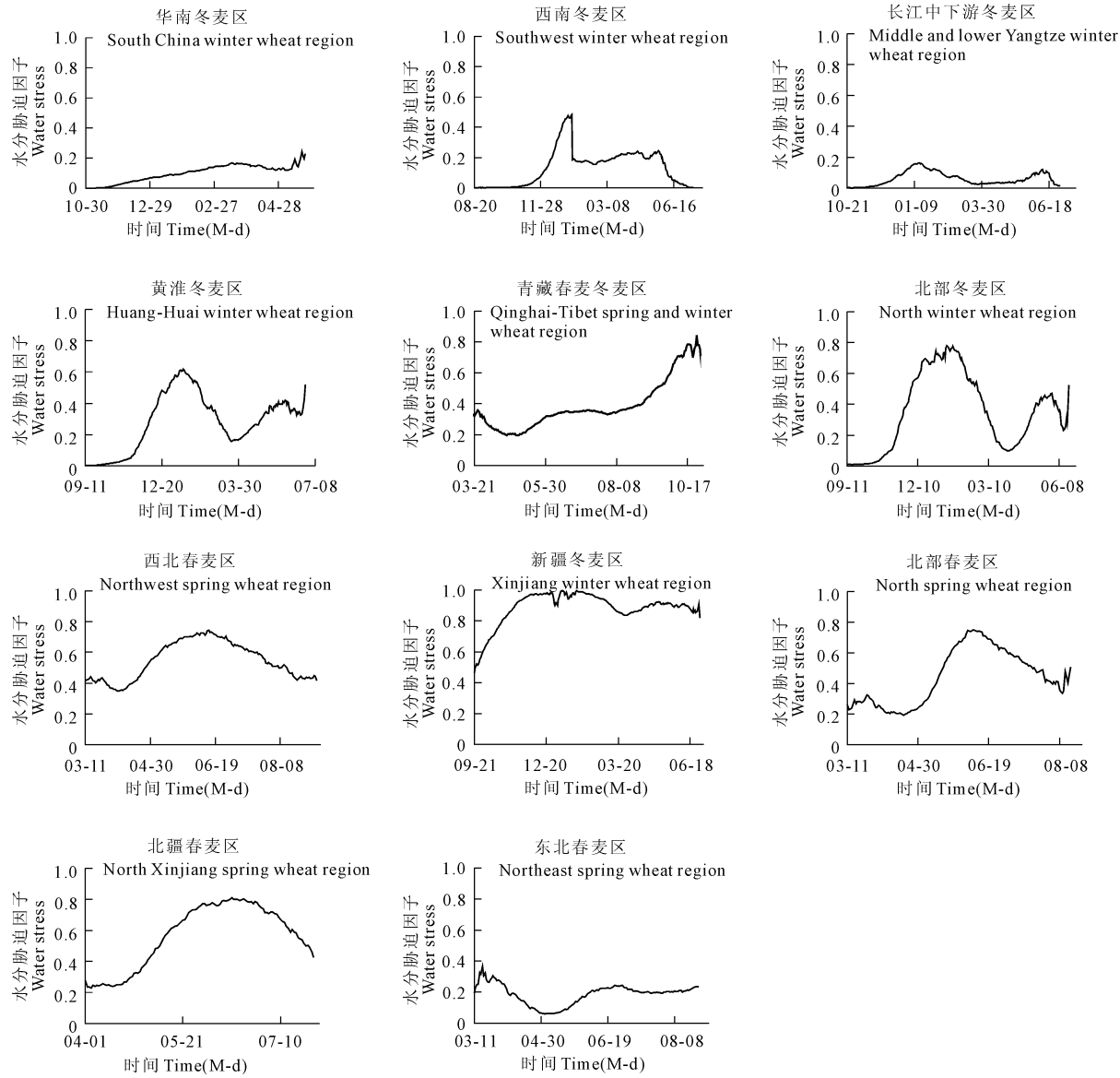


图 2 各小麦种植区雨养条件下水分胁迫变化

Fig.2 Water stress in rain-fed agriculture of each wheat region

3 讨 论

本文利用 EPIC 作物生长模型对中国各小麦种植区内小麦的水分胁迫进行了模拟,得到不同麦区的日水分胁迫值,对各种种植区水分胁迫值的年内与年际变化规律进行了分析,相比于试验方法^[3-5],本文得到了在各种种植区气候、土壤和小麦品种条件下,在时间和空间上都较为连续的水分胁迫规律。在模

型参数的率定和验证方面,进行了小麦遗传参数的分区率定和验证,使得模型在各个种植区内都能有很好的适用性,而以往研究在这方面比较欠缺,在使用其他学者提出的参数时,没有考虑到参数的区域适用性^[10,14]。由于单个站点的模拟结果在代表一个大区域的总体规律时具有片面性,可发现基于区域内一个站点模拟得到的规律与本文差异较大(文献[14]中的黄淮海平原与本文的黄淮冬麦区在区域

表 5 不同程度水分胁迫现象发生频率
Table 5 Frequency of water stress in different degrees

小麦种植区 Wheat planting region	WS 均值 Mean	频率 Frequency/%				粮食产量 Yield/(t·hm ⁻²)
		≥0.99	≥0.9	≥0.5	≥0.2	
华南冬麦区 South China winter wheat region	0.08	0.42	2.28	6.69	12.47	9.26
西南冬麦区 Southwest winter wheat region	0.13	0.95	3.50	10.73	19.07	11.20
长江中下游冬麦区 Middle and lower Yangtze winter wheat region	0.06	0.00	0.15	3.30	9.81	10.60
黄淮冬麦区 Huang – Huai winter wheat region	0.25	0.26	3.15	21.06	42.64	8.55
青藏春麦冬麦区 Qinghai – Tibet spring and winter wheat region	0.32	2.63	7.71	24.31	52.65	5.35
北部冬麦区 North winter wheat region	0.26	0.22	3.96	21.87	42.01	6.98
西北春麦区 Northwest spring wheat region	0.58	10.78	29.71	57.32	78.57	1.51
新疆冬麦区 Xinjiang winter wheat region	0.84	41.64	65.93	87.57	95.89	0.30
北部春麦区 North spring wheat region	0.47	3.33	18.09	45.23	68.15	2.20
北疆春麦区 North Xinjiang spring wheat region	0.57	7.95	30.52	57.17	75.25	1.06
东北春麦区 Northeast spring wheat region	0.16	0.32	2.31	9.90	25.69	3.13

范围上相近)^[14],在反映区域水分胁迫时空规律上,采用区域内所有气象站点模拟结果的均值更能反映区域的总体规律。

本文对作物生长模型在时空规律研究的应用上进行了尝试,对于制定分区域、分生育期合理的灌溉策略有一定指导作用。本文仍有以下需要改进之处:首先,在反映空间规律上采用区域站点数据的均值,研究结果会受站点分布情况的影响,而利用空间栅格数据作为输入,采用空间作物生长模型进行模拟,能够更好地反映作物水分胁迫的时空规律;其次,模型虽将气候、土壤、作物遗传特性、耕作日期等因素综合考虑在内计算出作物的水分胁迫状态,但要制定相应的应对策略,仍需要进一步分析上述要素对于某地区、某一时段水分胁迫的影响程度。

4 结 论

本文利用 EPIC 作物生长模型模拟各种植区小麦在雨养条件下的生长过程,为了得到各种植区真实、准确的水分胁迫规律,采用 SCE – UA 方法在各种植区对小麦遗传参数进行了率定和验证。分析各小麦种植区的水分胁迫规律可以发现:

1) 中国 11 个小麦种植区,按雨养条件下水分胁迫程度可分为三个等级:整个小麦生育期水分胁迫均极高的新疆冬麦区;在小麦生育期的某一个或几个阶段水分胁迫值很高的黄淮、北部冬麦区,西北、北部、北疆冬麦区和青藏春麦冬麦区;小麦生育期内水分胁迫值均很低的华南、西南、长江中下游冬麦区和东北春麦区。

2) 冬麦区(新疆冬麦区除外)和东北春麦区水分胁迫均值、发生频率均明显低于其他春麦区。南方的 3 个冬麦区(华南、西南、长江中下游)和东北春麦区,由于降水条件或土壤条件均好于其他麦区,所以水分胁迫的程度、发生频率均低于其他地区。黄淮、北部冬麦区水分胁迫规律相似,均在 1、2 月和 5、6 月较高,而北部冬麦区水分胁迫程度和发生频率略高于黄淮冬麦区。这些地区在雨养或在水分胁迫严重的个别时期给予一定的灌溉就可以保证小麦的产量。北部、西北、北疆春麦区、新疆冬麦区在雨养条件下水分胁迫最为严重,如果没有灌溉,小麦几乎绝收,尤其是新疆冬麦区。

3) 雨养条件下水分胁迫对小麦产量有决定性的影响,此外小麦品种、耕作日期对于产量也有一定的影响。因此在应对农业干旱措施上除了制定合理的灌溉策略以外,还应该优选耐旱品种,合理选择耕作时间。

参 考 文 献:

[1] Wu H, Wilhite D A. An operational agricultural drought risk assessment model for nebraska, USA[J]. Natural Hazards, 2004,33(1):1-21.
[2] 王淑英,张国宏,李兴茂,等.水分胁迫下不同基因型旱地冬小麦生理变化及其与抗旱性的关系[J].西北农业学报,2010,19(10):40-44.
[3] 单长卷,欧行奇.四个冬小麦品种拔节期对水分胁迫的响应及其抗旱性[J].江苏农业学报,2008,24(3):245-250.
[4] 李尚中,王 勇,樊廷录,等.水分胁迫对冬小麦生长发育和产量的影响[J].甘肃农业科技,2007,(10):3-6.
[5] 韩会玲,康凤君.水分胁迫对棉花生产影响的试验研究[J].农

- 业工程学报, 2001, 17(3): 37-40.
- [6] Méndez – Barroso L A, Garatuza – Payán J, Vivoni E R. Quantifying water stress on wheat using remote sensing in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6): 725-736.
- [7] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 47(1): 69-75.
- [8] 赵福年, 王瑞君, 张虹, 等. 基于冠气温差的作物水分胁迫指数经验模型研究进展[J]. *干旱气象*, 2012, 04: 522-528.
- [9] 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 28-34.
- [10] 刘明, 武建军, 吕爱锋, 等. 黄淮海平原雨养条件下冬小麦水分胁迫分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 427-432.
- [11] Caverio J, Farre I, Debaeke P, et al. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(4): 679-690.
- [12] Steduto P, Hsiao T C, Raes D, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 426-437.
- [13] Rinaldi M. Application of EPIC model for irrigation scheduling of sunflower in Southern Italy[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(3): 185-196.
- [14] 刘明, 武建军, 吕爱锋, 等. 黄淮海平原典型区冬小麦水分胁迫规律与灌溉策略[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 40-44.
- [15] Fang W H, Wang Z Q, Shi P J, et al., Modelling the effect of climate trend change on wheat growth and yield in North China by EPIC [C]//Proceeding of International Disaster Reduction Conference, Harbin, China: Qunyan Press, 2007: 254-259.
- [16] 王志强. 基于自然脆弱性评价的中国小麦旱灾风险研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2008.
- [17] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(5): 886-895.
- [18] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(二)[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(6): 1140-1147.
- [19] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924, 50(210): 121-126.
- [20] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation[J]. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 1940, 64(1940): 114-118.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土种志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [22] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.
- [23] Singh V P. Computer models of watershed hydrology[M]. Littleton: Water Resources Publications, 1995.
- [24] Wang X, He X, Williams J R, et al. Sensitivity and uncertainty analyses of crop yields and soil organic carbon simulated with EPIC[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2005, 48(3): 1041-1054.
- [25] Wu J, Yu F S, Chen Z X, et al. Global sensitivity analysis of growth simulation parameters of winter wheat based on EPIC model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 136-142.
- [26] Liu J G. A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(3): 411-422.
- [27] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. *Water resources research*, 1992, 28(4): 1015-1031.
- [28] Duan Q Y, Gupta V K, Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1993, 76(3): 501-521.
- [29] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V K. Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 158(3): 265-284.