

葛道阔, 曹宏鑫, 马晓群, 等. 基于作物生长模型的小麦旱涝敏感性分析与损失评估[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1302-1309.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.06.017

基于作物生长模型的小麦旱涝敏感性分析与损失评估

葛道阔¹, 曹宏鑫¹, 马晓群², 张文宇¹, 张伟欣¹

(1. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 江苏 南京 210014; 2. 安徽省气象科学研究所, 安徽 合肥 230061)

摘要: 针对山东、河南、江苏和安徽 4 个小麦主产省小麦生产现状以及旱涝评估技术要求, 运用经改进的 WCSODS(小麦栽培模拟优化决策系统), 通过检索代表性站点 48 年(1961–2008 年)降水量、麦田初始土壤相对含水量和根层土壤相对含水量资料, 计算了上述 3 要素在平均状况和极端状况下对应的小麦产量的变化幅度, 进而进行了冬小麦旱、涝敏感性分析。在此基础上开展了研究区域的冬小麦旱、涝损失评估。结果显示, 从时间上看, 干旱损失随年代推移有降低的趋势, 而涝渍损失没有随年代变化的趋势。从空间上看, 干旱、涝渍损失均有明显的纬度分布特点, 不同的是, 干旱损失表现为北高南低, 而涝渍损失表现为南高北低。

关键词: 冬小麦; 模型; 旱涝; 敏感性分析; 损失评估

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)06-1302-08

Sensitivity analysis and damage assessment for wheat drought and waterlogged based on crop growth model

GE Dao-kuo¹, CAO Hong-xin¹, MA Xiao-qun², ZHANG Wen-yu¹, ZHANG Wei-xin¹

(1. Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Meteorological Science of Anhui Province, Hefei 230061, China)

Abstract: According to the production status of four major wheat producing provinces in Shandong, Henan, Jiangsu and Anhui and the technical requirements for drought and flood assessment, improved WCSODS (wheat cultivation simulation optimization decision system) was used to calculate the change range of precipitation, initial wheat field soil moisture, root zone soil moisture from 1961 to 2008 in representative sites under average and extreme conditions and to analyze the sensitivity. The damage assessment of drought and waterlogged for winter wheat in studied area. The results showed that the loss of drought had a trend of decreasing with time, but the loss of waterlogging didn't change with time. From the aspect of space, the loss of drought and waterlogging also had significantly zonal distribution characteristics, the difference was that the loss of drought in the northern region was higher than that of southern region, while the waterlogging loss in the southern region was higher than that of northern region.

Key words: winter wheat; model; drought and waterlogged; sensitivity analysis; yield loss assessment

收稿日期: 2016-05-17

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(13)3054]; 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006027)

作者简介: 葛道阔(1965-), 男, 江苏南京人, 研究员, 主要从事作物生长模型、作物气象与气候变化影响评价研究。(Tel) (025)84390194; (E-mail) gedaokuo@163.com

近 40 年来, 国内外开发的作物生长模型一般都是在有限年份、有限试点但足够详细的试验数据基础上研发的, 往往利用这些模型试图模拟大区域不同环境和管理条件下的作物生长发育, 以在大区域上用于监测作物生长、产量形成以及开

展灾损评估^[1-4]。要实现上述目标,前提是要获得在应用尺度上模型的各种输入变量的面广量大的特异性时空数据。由于受限于资金、人力等难于全面获得面广量大的特异性时空数据,仅仅惯用观测值和模拟值的根均方差(*RMSE*)等方法检验模型,并不可靠,也不全面,需要改进和发展多指标相互验证的综合检验方法^[5]。研究者发现,对于区域化作物旱涝灾损评估,作为一种经济、有效且可行的检验方案,可采用敏感性分析方法,即利用区域内代表性试点的尽可能长的历史资料,重点考虑输入变量的极端状况,并将模型运行结果与长系列历史记录比较,以判断模型总体上的准确性、可靠性,同时可判明旱涝敏感时段,从而将作物生长模型成功地应用于大区域。

目前,敏感性分析已经广泛应用于诸多领域,如系统科学、生态环境科学、经济学、物理学等^[6-7],同时形成了如局部分析法和全局分析法、定性方法和定量方法等诸多方法^[8]。如何选择合适的方法并合理地应用以及解释分析结果成为敏感性分析应用的关键。

本研究利用中国最大的4个小麦主产省(山东、河南、江苏和安徽)代表性站点2010–2012年和2014–2015年小麦大田和盆栽的水分胁迫试验资料,获取小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)中相关子模型的参数,并建立干旱和涝渍胁迫订正因子的算法。进而通过检索代表性站点48年(1961–2008年)降水量、麦田初始土壤相对含水量和根层土壤相对含水量资料,分析上述3要素的平均状况和极端旱涝年份的变化幅度,进行逐年模拟冬小麦生长,开展冬小麦旱涝敏感性分析,并在此基础上开展冬小麦站点旱涝损失评估。

1 材料与方法

1.1 WCSODS 的模型输入

包括4个小麦主产省1998–2007年21个农业气象观测站的逐日气象资料、同期气候资料、土壤资料、小麦栽培资料,需输入的资料有6项:(1)小麦种植地点;(2)小麦品种类型;(3)纬度;(4)多年逐月平均或逐日气象资料(平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、降水量和降雨日数),WCSODS既可以通过自带的“天气发生器”模块将上述月平均值(总量)自动生成日值(有条件时可直接采用日值,则更为准确,以上省份多年多点逐日气象历史资料完整,本文直接采用日值);(5)土壤参数;(6)其他(种子发芽率、小麦田间出苗率等)。

1.2 建模方法

开展大田和盆栽水分控制试验,获取可用资料,探明小麦各主要生理、生态过程变化规律及其与环境因子之间的关系,进而借助数理统计分析方法,分别建立适合定量描述上述关系的数学表达式,并确定模型的参数。模型建立后,用独立于建模的其他试验资料对模型及其参数的算法进行测试检验和修正,确保其可靠性与严格性。采用MAE(绝对平均误差)及RMSE(均方差根)评价与测试本模型的预测性与精准度^[9-10]。

1.3 WCSODS 模型及其改进

1.3.1 小麦生育期模型 通过对4个小麦主产省多年农业气象作物观测资料和试验资料分析发现,本区域小麦出苗期受土壤相对含水量和温度的共同影响。表1显示了当10~20 cm土壤相对含水量<70%和>80%时,分别以代表性样点为例给出的二元线性回归模型拟合方程, x_1 为土壤相对含水量, x_2 为土壤温度。

表1 4个小麦主产省部分代表站点小麦播种-出苗期天数的二元线性回归模型

Table 1 The binary linear regression model of days from sowing to seedling for wheat in four major wheat producing provinces of representative sites

| 分区 | 代表性样点 | 土壤相对含水量<70% | 土壤相对含水量>80% |
|-------|-------|----------------------------------|---------------------------------|
| 山东主产区 | 临沂、莒县 | $Y = -0.12x_1 - 0.18x_2 + 15.38$ | $Y = 0.08x_1 - 0.62x_2 + 10.18$ |
| 河南主产区 | 郑州、商丘 | $Y = -0.04x_1 - 0.25x_2 + 14.38$ | $Y = 0.03x_1 - 0.67x_2 + 16.49$ |
| 江苏主产区 | 兴化、徐州 | $Y = -0.16x_1 - 0.12x_2 + 19.95$ | $Y = 0.43x_1 - 0.14x_2 - 24.45$ |
| 安徽主产区 | 蒙城、天长 | $Y = -0.15x_1 - 0.09x_2 + 20.45$ | $Y = 0.41x_1 - 0.14x_2 - 22.05$ |

Y:出苗期; x_1 :土壤相对湿度; x_2 :土壤温度。

1.3.2 干旱、涝渍对小麦叶面积指数 (LAI) 的影响 订正 重点考虑绿叶的以日为单位的相对衰老速率,采用干物质分配法计算。

1.3.3 净光合速率的渍水胁迫订正因子的确定 模型中主要考虑 3 个方面对小麦渍水胁迫的影响建立方程:(1)无水分逆境条件下土壤相对含水量的下、上临界指标;(2)根据试验资料拟合渍水持续天数;(3)根据试验资料拟合越冬前、返青后至抽穗前及抽穗后 3 个生育阶段对渍水的差异。

1.3.4 小麦物质分配的干旱、涝渍胁迫订正因子的确定 根据 MACROS 模型^[11],影响根冠比的干旱和渍水胁迫订正因子 ($DFrs$, WFr_s) 主要以净光合速率的胁迫订正因子加以确定,研究结果表明,根冠比反映了植株光合产物的调配和地上部与地下部相对生长的差异。作物遭受干旱胁迫时,根冠比增大,即地上部和根间碳水化合物分配将有利于根生长,渍水时土壤缺氧,根系生长首先受到抑制,根冠比降低。

1.3.5 小麦地上部干物质分配子模型 根据 WCSODS 的发育期模型对小麦发育期的阶段划分及发育指数 (DI) 取值,设播种为 0,出苗为 1.0,拔节为 1.5,抽穗为 2.0,成熟为 3.0。利用山东临沂,河南郑州,江苏兴化、徐州和安徽天长等地的试验资料拟合,建立小麦地上部干物质分配子模型,其中叶/地上部分分配系数与发育指数子模型见公式 1。它们可以较好地反映 4 个主产省小麦各生育阶段干物质分配系数 (PC) 与发育指数 (DI) 之间的关系。通过文献和试验资料分析发现,与无旱无涝 (CK) 相比,小麦叶分配系数 PC_1 在不同干旱、涝渍胁迫处理下往往有增加趋势,且与 CK 的比值变化较小,本研究 PC_1 分别取 1.17 和 1.15。

$$PC_1 = 5.15e^{-1.57DI} \quad (1)$$

1.3.6 小麦产量形成的干旱、涝渍胁迫订正因子的确定 原 WCSODS 的产量形成的模拟模型根据小麦抽穗之前和抽穗之后光合累积量向穗部转移的基本规律,分别设定其转移率 k_1 和 k_2 为 1/3 和 2/3。但大量试验结果表明, k_1 和 k_2 受干旱、涝渍影响显著,由试验资料拟合得到公式(2)、公式(3), k_{2D} 、 k_{2W} 分别为受干旱、涝渍影响时的抽穗后光合累积量向穗部转移的转移率, SW 为土壤相对含水量, d 为涝渍天数,受干旱、涝渍影响时的抽穗之前的转移率,则由公式(4)、公式(5)求得。

$$k_{2D} = 0.0059 \cdot SW + 0.2328 \quad (2)$$

$$k_{2W} = -0.0248 \cdot d + 0.8449 \quad (3)$$

$$k_{1D} = 1 - k_{2D} \quad (4)$$

$$k_{1W} = 1 - k_{2W} \quad (5)$$

1.4 冬小麦旱涝敏感性分析方法

通过对水分条件设置一定的变化幅度,模拟冬小麦生物量及产量对不同水分条件变化的敏感程度,进行小麦对旱涝的敏感性分析。水分条件由降水量、麦田初始土壤含水量和某发育阶段根层土壤含水量体现,变化幅度设为增加或减少 50%。由于不同的初始土壤水分含量不同可能造成小麦对水分变化敏感性的差异,因此假定 2 种初始土壤水分状况,即相对含水量分别为 40% 和 70%,代表土壤干旱和正常。

1.5 冬小麦旱涝灾损指数的定义

当冬小麦发生干旱或涝渍时,土壤湿度明显低于或高于正常值,作物的旱涝响应主要表现在生育过程中生长量(干质量)下降和最终产量降低。改进后的 WCSODS 模型可以模拟水分适宜条件和水分胁迫条件下的冬小麦生长过程,两者间的差异可以确定旱涝造成的冬小麦生长损失。冬小麦旱涝评估的方法是在评估日之前,利用实际发生的当年气象数据作为模型输入,而在评估日之后,则利用多年日平均气象数据。然后以水分胁迫造成模拟成熟期籽粒干质量的损失,定义冬小麦干旱灾损指数 (WDI) 和涝渍灾损指数 (WWI),分别为水分适宜生产条件下与实际水分下的小麦籽粒干质量 (kg/hm^2) 之差再与前者之比的百分数。

1.6 参数调试和确定

WCSODS 模型中,小麦品种参数包括模拟模型参数和作物性状参数,前者包括生育模型参数、叶龄动态模拟参数、叶面积与光合生产模型参数(包括光合作用参数和群体消光系数);其中生育期模型参数按播种~出苗、出苗~春化、春化~拔节、拔节~抽穗、抽穗~成熟 5 个不同生育阶段设置,与小麦生育期有关的参数共有 13 个,其功能和意义为: K_i ($i=1,2,3,4,5$) 为反映不同发育阶段发育特性的品种参数, P_i ($i=1,2,3,4,5$) 为不同发育阶段的增温促进系数, Q_3 为高温抑制系数, G_s 为感光系数, V_E 为小麦春化因子,其计算方法和取值随品种及温度的变化而变化,具体考虑过程和计算方法参见文献[12]。

作物性状参数包括穗粒结构参数、分蘖率参数和单株叶面积参数,单株叶面积参数中包括了小麦不同生育时期的叶面积特征值 F_{7S} (7 叶期)、 F_{TS} (分蘖期)、 F_{ES} (拔节期)、 F_{HS} (抽穗期)、 F_{MS} (成熟期),表 2 列出与本研究关系最为密切的品种参数。上述参数均因品种和生育期而异,根据当地多年种植资料调试确定。

表 2 小麦光合作用、群体消光系数及适宜叶面积指数参数

Table 2 Parameters of photosynthesis, group extinction coefficient and leaf area index

| 试点 | 小麦品种 | 光合作用参数 | | | 群体消光系数 | | 叶面积指数参数 | | | | |
|------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | A_1 | A_3 | B_1 | E_1 | E_3 | F_{7S} | F_{TS} | F_{ES} | F_{HS} | F_{MS} |
| 山东临沂 | 临麦 2 号 | 4.81 | 4.83 | 1.00 | 0.50 | 0.47 | 7.22 | 41.8 | 53 | 118.0 | 47.0 |
| 河南郑州 | 温麦 6 号 | 4.82 | 4.84 | 1.06 | 0.46 | 0.46 | 7.20 | 42.0 | 53 | 118.2 | 47.5 |
| 江苏徐州 | 徐州 25 | 4.45 | 7.05 | 0.90 | 0.45 | 0.50 | 7.19 | 42.1 | 56 | 118.0 | 51.0 |
| 安徽凤阳 | 豫麦 18 | 5.82 | 6.19 | 1.21 | 0.39 | 0.48 | 7.18 | 42.3 | 54 | 120.5 | 48.0 |

F_{7S} : 7 叶期叶面积指数参数; F_{TS} : 分蘖期叶面积指数参数; F_{ES} : 拔节期叶面积指数参数; F_{HS} : 抽穗期叶面积指数参数; F_{MS} : 成熟期叶面积指数参数。

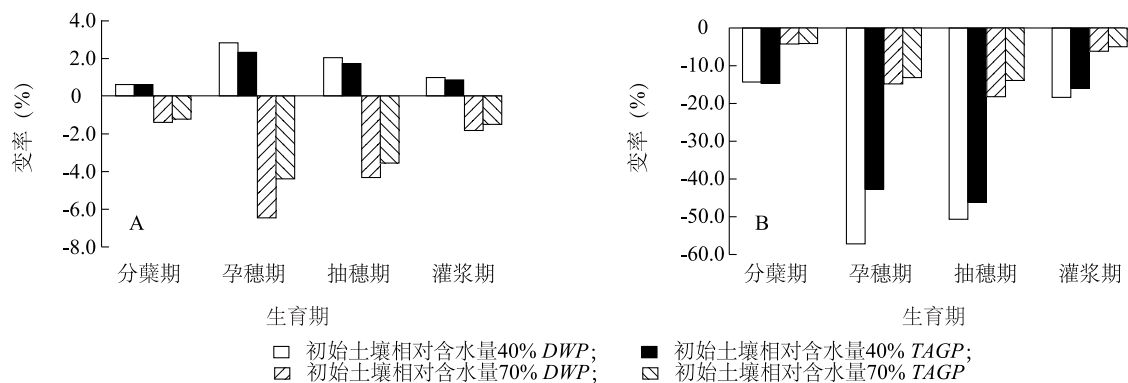
2 结果

2.1 小麦对降水量的敏感性

图 1 为降水量变化后小麦最终地上总干质量 ($TAGP$) 和麦穗干质量 (DWP) 的相对变率,即水分条件变化后,上述干质量相对于降水量不变时的变化百分比。由图 1A 可见,当冬小麦各发育期降水量增加 50% 时,若麦田初始土壤相对含水量 40%,则旱情缓解,地上总干质量和麦穗干质量有所增加;而若麦田初始土壤相对含水量 70%,则涝渍发生,地上总干质量和麦穗干质量减少,其中最敏感时段为孕穗期,其次是抽穗期。地上总干质量和麦穗干质量因涝渍减少幅度大于旱情缓解的增加幅度。当

利用 WCSODS 中的品种参数调试子系统,调试方法是在 WCSODS 的品种参数数据库中,选择各样点类型相同的某个小麦品种的各参数为初值,然后根据该样点试验资料,采用试错法对各遗传参数的初值进行逐个调试,并将模拟值与实际值作比较,直至误差小到满意为止。确定后的参数值见表 2。

降水量减少 50% 时(图 1B),若麦田初始土壤相对含水量 40%,则旱情加重,地上总干质量和麦穗干质量明显减少,表现敏感的孕穗期和抽穗期减幅达 43.4% ~ 58.7%;若麦田初始土壤相对含水量 70%,则旱情轻度发生,但地上总干质量和麦穗干质量有所减少,敏感时段也为孕穗期和抽穗期,减少幅度为 13.9% ~ 18.9%。其中凤阳、蒙城干质量减幅较小,而徐州干质量减幅较大。分析其原因,与各地冬小麦生长季的降水量有关。徐州冬小麦生长季降水量只有 245 mm,而凤阳和蒙城分别达到 335 mm 和 343 mm。当降水量减半时,降水量少的地区减产幅度必定大于降水量相对丰沛的地区。



A: 降水增加 50%; B: 降水减少 50%。

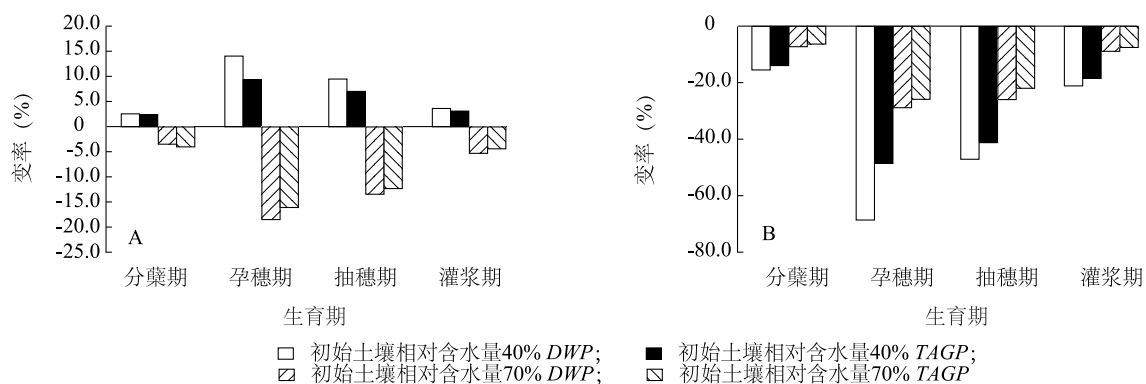
图 1 降水量变化后小麦最终地上总干质量 ($TAGP$) 和麦穗干质量 (DWP) 的变率

Fig. 1 The variability of total wheat final dry weight of shoot ($TAGP$) and ear dry weight (DWP) after changing in precipitation

2.2 小麦对麦田初始土壤相对含水量的敏感性

图 2 为麦田初始土壤相对含水量变化后(其后的水分条件保持正常状态)小麦最终地上总干质量(*TAGP*)和麦穗干质量(*DWP*)的相对变率。由图 2A 可以看出,在麦田初始土壤相对含水量增加 50% 情况下,初始土壤相对含水量由 40% 升至 60% 后,旱情缓解,小麦最终地上总干质量和麦穗干质量表现增加,其中孕穗期和抽穗期表现敏感,干质量增

加幅度为 7.1% ~ 14.0%,而初始土壤相对含水量由 70% 升至 105% 时,则造成严重涝渍,小麦最终地上总干质量和麦穗干质量减少,表现敏感的孕穗期和抽穗期干质量减少幅度为 12.4% ~ 18.9%。反之,在麦田初始土壤相对含水量减少 50% 的情况下,几乎所有试点都发生严重干旱,导致 *TAGP* 和 *DWP* 显著下降,以孕穗期和抽穗期受影响最大(图 2B)。



A: 初始土壤相对含水量增加 50%; B: 初始土壤相对含水量减少 50%。

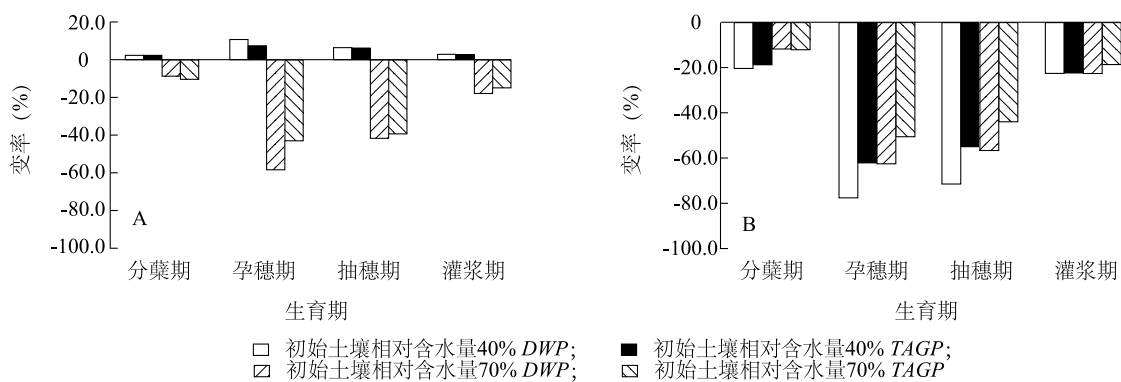
图 2 麦田初始土壤相对含水量变化后小麦最终地上总干质量(*TAGP*)和麦穗干质量(*DWP*)的变率

Fig. 2 The variability of total wheat final dry weight of shoot(*TAGP*) and ear dry weight (*DWP*) after changing in initial soil moisture in wheat field

2.3 小麦对根层土壤相对含水量的敏感性

图 3 为各生育阶段的根层土壤相对含水量变化后小麦最终地上总干质量(*TAGP*)和麦穗干质量(*DWP*)的变率。可以看出,一般情况下,无论麦田初

始土壤相对含水量多寡,不同生育阶段根层土壤相对含水量增减 50% 都将导致最终地上部分总干质量和麦穗干质量不同程度的变化,对不同生育阶段的影响程度,均为孕穗期>抽穗期>灌浆期>分蘖期。



A: 土壤相对含水量增加 50%; B: 土壤相对含水量减少 50%。

图 3 根层土壤相对含水量变化后小麦最终地上总干质量(*TAGP*)和麦穗干质量(*DWP*)的变率

Fig. 3 The variability of total wheat final dry weight of shoot(*TAGP*) and ear dry weight (*DWP*) after changing in soil moisture root layer

土壤相对含水量增加 50% (图 3A),若初始土壤相对含水量 40%,干旱缓解,地上部分总干质量

有小幅增加,若初始土壤相对含水量 70%,土壤则处于过湿状态,地上部分总干质量明显下降;而土壤

相对含水量减少 50% (图 3B),若初始土壤相对含水量 40%,旱情明显加剧,地上部分总干质量减少幅度最大,而初始土壤相对含水量 70% 时,土壤相对含水量减少 50%,旱情普遍发生,地上部分总干质量降低。穗干质量变化程度大于地上部分总干质量。分析不同区域冬小麦生长对根层土壤相对含水量的敏感性发现,在降水量相对较少,即土壤初始水分状况较低的地区,冬小麦对根层土壤水分减少的敏感性明显高于对土壤水分增加的敏感性;从整个区域冬小麦干质量平均变化看,冬小麦对土壤水分减少亦比对土壤水分增加更为敏感。

2.4 基于作物生长模型的冬小麦站点旱涝损失评估

利用 4 个主产省各个试验站点历年 (1973—

2008 年)逐日气象数据驱动改进后的 WCS DOS 模型,计算全生育期旱涝灾损指数,则可进行站点冬小麦旱涝灾害评估。

I 区的山东沂源和 II 区的河南郑州、III 区的江苏东海干旱灾损指数分别为 33.4%、27.0% 和 22.8%,而 IV 区的安徽淮南、六安,河南信阳和江苏兴化干旱灾损指数为 0.2%~6.7% (图 4A);4 个主产省不同冬小麦区中,处于 IV 区的安徽六安的涝渍灾损指数明显高于其他站点,为 23.1%,其他站点为 0.4%~12.9% (图 4B)。

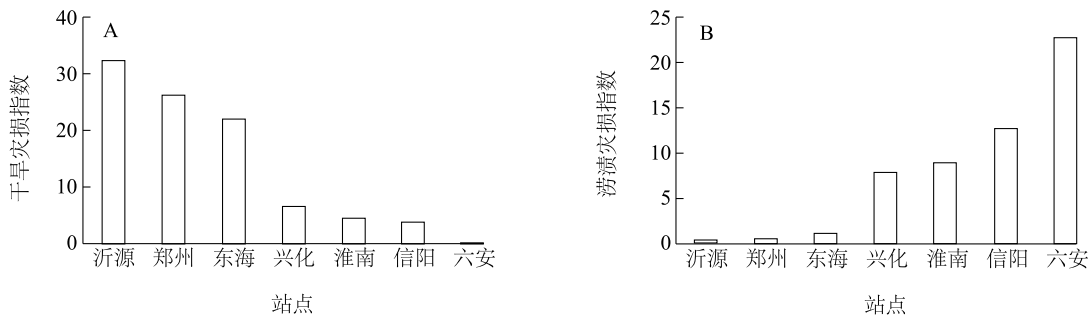
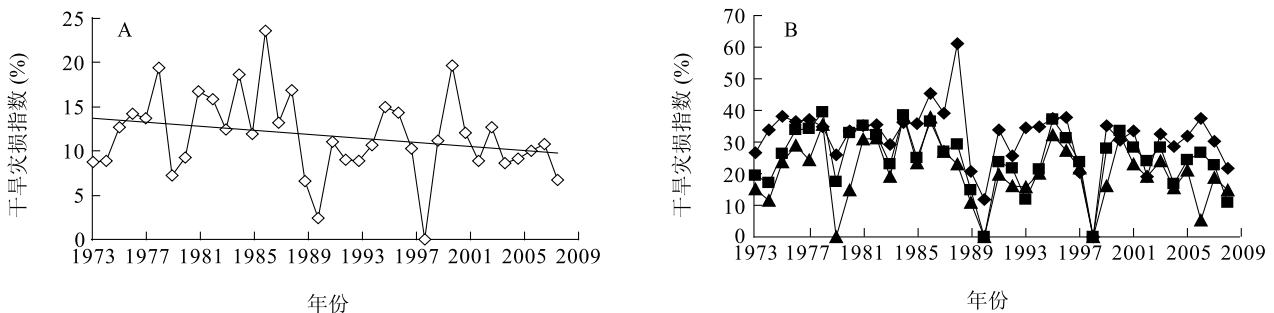


图 4 4 个主产省一些代表站点冬小麦干旱灾损指数 (A) 和涝渍灾损指数 (B) 的多年平均

Fig. 4 The average of drought disaster damage index (A) and waterlogged disaster damage index (B) for many years in four major wheat producing provinces of representative sites

图 5 和图 6 为 4 个主产省部分代表站点冬小麦干旱灾损指数和涝渍灾损指数的历年变化。从站点干旱灾损指数逐年平均值看,1973 年至 2009 年冬小麦干旱程度有降低趋势。干旱最为严重的年份主要包括 2000、1986 和 1978 年,1981、1982 年干旱亦较为严重。1988 年, I 区的山东沂源干旱最为严重,

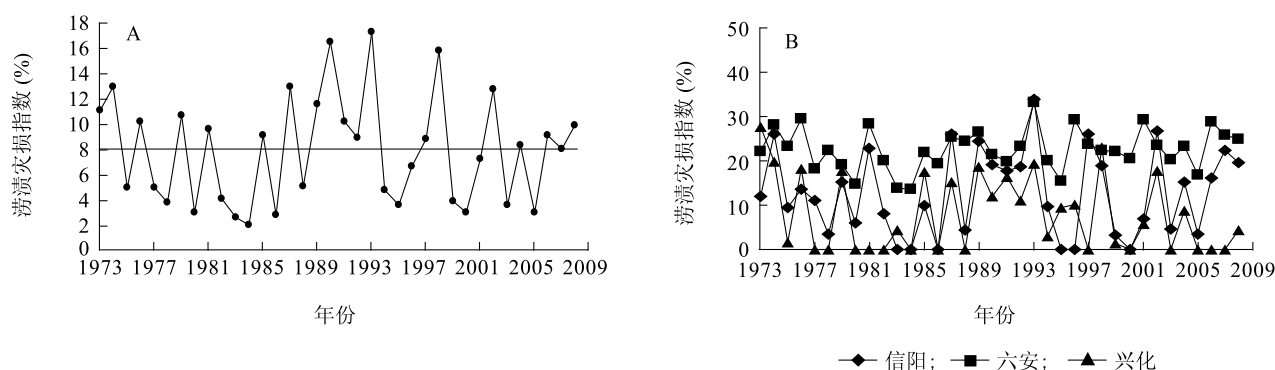
II 区和中部平原冬麦区也有不同程度干旱,平均而言也较为严重。以上均与实际的典型干旱发生年较为吻合。1998 和 1990 年,全流域几乎未发生干旱,平均而言,冬小麦涝渍灾损指数没有随年代变化趋势,但年际波动大,其中,2002、1998 和 1993 等年份涝渍严重,与实际的典型涝渍年较为吻合。



A: 平均值; B: 站点值。

图 5 4 个主产省部分代表站点冬小麦干旱灾损指数的历年变化

Fig. 5 Yearly change value of drought disaster damage index for many years in four major wheat producing provinces of representative sites



A:平均值;B:站点值。

图6 4个主产省部分代表站点冬小麦涝渍灾损指数的历年变化

Fig. 6 Yearly change value of waterlogged disaster damage index for many years in four major wheat producing provinces of representative sites

从图7可以看出,站点平均干旱灾损指数(图7A)、涝渍灾损指数(图7B)与实际减产率的相关系

数分别为0.617 2 ($P < 0.05$)和0.665 6 ($P < 0.01$),均能较好地反应冬小麦的实际减产情况。

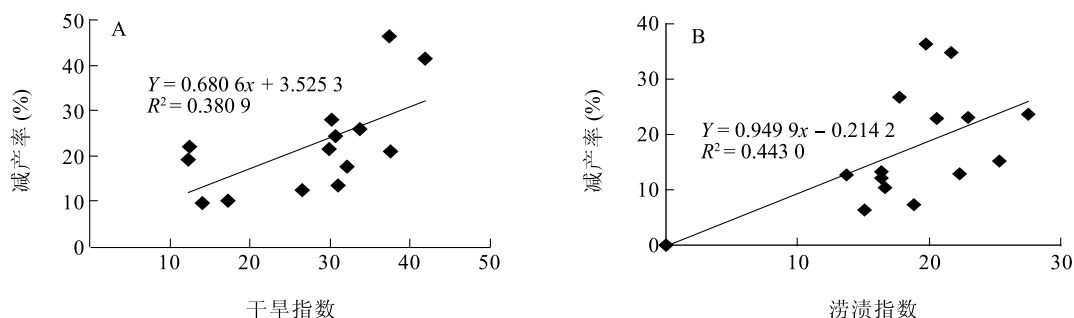


图7 4个主产省冬小麦干旱灾损指数(A)、涝渍灾损指数(B)与实际减产率的相关关系

Fig. 7 Correlation between drought disaster damage index (A), waterlogged disaster damage index (B) and the actual rate cut in four major winter wheat producing provinces

3 讨论

通过各代表站点小麦不同发育期对降水量、麦田初始土壤相对含水量和根层土壤相对含水量的敏感性分析确定了小麦受旱涝灾害影响的敏感时段。小麦对干旱和涝渍的敏感时段为拔节孕穗期以及抽穗开花期,小麦产量积累比整个地上部干质量积累对水分变化更为敏感。其原因可能与此阶段为小麦营养生长和生殖生长并进阶段,是冬小麦各产量因素建成的关键时期。通过对比代表站点不同发育期降水量、初始土壤相对含水量和根层土壤相对含水量变化后麦穗干质量(DWP)和总干质量(TAGP)的变率,尤其是敏感时段孕穗期、抽穗期的DWP变率,可以发现,干旱发生时干质量的变化大于涝渍发生

时,由此可见,从4个小麦主产省的平均状况而言,小麦生产对干旱的敏感性要高于对涝渍的敏感性。利用4个主产省代表站点干旱灾损指数和涝渍灾损指数的多年平均值以及历年变化值开展评估,结果显示,从时间上看,干旱损失随年代推移有降低的趋势,而涝渍损失没有随年代变化的趋势。从空间上看,干旱和涝渍损失均有明显的纬度分布特点,不同的是,干旱损失表现为北部高于南部,而涝渍损失表现为南部高于北部。干旱灾损指数、涝渍灾损指数均能较好地反应冬小麦的实际减产情况。

需要着重说明的是,尽管WCSODS本身具有机理性强和通用性强的特性,但限于小麦旱涝机理研究的深度、广度以及品种、类型的特异性,本研究的旱涝胁迫订正还有一定的经验成分。不同小麦种植

区在使用这个模型之前,应根据当地资料,重新调整模型参数,以期提高小麦旱涝损失评估的准确性。

参考文献:

- [1] 高亮之. 农业模型学基础[M]. 香港: 天马图书有限公司, 2004.
- [2] DE WIT C T. Photosynthesis of leaf canopies[M]. Wageningen: PUDOC Press, 1965.
- [3] JONES J W, KEATING B A, PORTER C H. Approaches to modular model development[J]. Agricultural Systems, 2001, 70(2/3): 421-443.
- [4] 马玉平, 王石立, 张 黎. 基于升尺度方法的华北冬小麦区域生长模型初步研究[J]. 作物学报, 2005, 31(6): 697-705.
- [5] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [6] TONG C. Self-validated variance-based methods for sensitivity analysis of model outputs [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(3): 327-267.
- [7] FREY H C, PATIL R. Identification and review of sensitivity analysis methods [J]. Risk Analysis, 2002, 22(3): 553-377.
- [8] IMAN R L, HELTON J C. An investigation of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models[J]. Risk Analysis, 1988, 8(1): 71-90.
- [9] 葛道阔, 曹宏鑫, 张利华, 等. WCSODS 中小麦生育期模型在淮河流域旱涝胁迫环境下的改进[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(4): 722-727.
- [10] JANSSEN P H M, HEUBERGER P S C. Calibration of process-oriented models[J]. Ecological Modeling, 1995, 83(1): 55-66.
- [11] PENNING DE VRIES F W T, JANSEN D M, TEN BERGE H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops[M]. Wageningen and IRRI: PUDOC Press, 1989.
- [12] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS) [J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 65-72.

(责任编辑:陈海霞)