

基于订正后的 *CI* 指数分析近 50 年干旱 对山西省玉米产量的影响

徐玲玲¹, 王建林¹, 宋艳玲², 郑昌玲¹, 方利³, 宋迎波¹

(1. 中国气象局国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 利用 1961—2010 年山西省气象站逐日气温和降水资料计算出逐日综合气象干旱指数 (*CI*); 通过对比 *CI* 指数与临近农田站 1992—2010 年的土壤墒情观测资料, 分区域和发育期订正了玉米发生干旱时的 *CI* 指数评判标准。同时结合近 50 年山西省玉米单产资料, 采用线性回归法分区域构建了山西省玉米干旱减产定量评估模型。结果表明, 玉米不同发育期发生干旱的 *CI* 指数评判标准与传统的气象干旱等级划分标准差异较大。以晋南区为例, 玉米播种至出苗期、拔节至抽雄期、乳熟至成熟期发生干旱的 *CI* 指数评判标准为 ≤ -1.2 , 出苗至拔节期为 ≤ -1.3 , 抽雄至乳熟期为 ≤ -0.9 。山西省玉米全生育期干旱累积指数与气象影响产量显著正相关, 相关系数分别达到 0.9335 (晋北区)、0.6929 (晋中区) 和 0.8041 (晋南区); 不同区域玉米干旱减产定量评估模型模拟的近 50 年玉米产量变化与实际气象影响产量通过 Pearson 相关性显著性检验, 能较为准确地评估玉米发生干旱时的产量损失。

关键词: 综合气象干旱指数 (*CI*); 气象干旱; 玉米产量; 山西省

中图分类号: S165+.27; S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0227-07

Impact of drought on maize yield of Shanxi Province during the past 50 years based on revised meteorological drought composite index

XU Ling-ling¹, WANG Jian-lin¹, SONG Yan-ling², ZHENG Chang-ling¹, FANG Li³, SONG Ying-bo¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China;

3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Daily meteorological drought composite indexes (*CI*) from 1961 to 2010 were calculated based on daily air temperature and precipitation data of observation stations in Shanxi Province. By comparison of *CI* with soil moisture status observation data from the near crop stations from 1992 to 2010, evaluation criterion of *CI* for maize in drought was revised according to the region and growth stages. Quantitative assessment model of maize drought losses in Shanxi province was also constructed based on the maize unit yield during the past 50 years. The results showed a significant discrepancy between evaluation criterion of *CI* for maize in drought and traditional classification of meteorological drought category was observed. For example, evaluation criterion of *CI* for maize in drought in Southern Shanxi was ≤ -1.2 for stages from seeding to emergence, jointing to teaselings and milky maturity to full maturity, ≤ -1.3 for stage from emergence to jointing, and ≤ -0.9 for stages from teaselings to milky maturity. Accumulative drought index of the whole growth stages and meteorologically influenced yield of maize were significantly positive correlated, with a coefficient of correlation of 0.9335 for Northern Shanxi, 0.6929 for Middle Shanxi and 0.8041 for Southern Shanxi. By using quantitative assessment model of maize drought losses in Shanxi province, simulated yield and actual yield passed the Pearson significance test, and production loss of maize in drought can be assessed more accurately with these models.

Keywords: meteorological drought composite index (*CI*); meteorological drought; maize yield; Shanxi Province

旱灾是我国影响面最广、影响力最为严重的气象灾害, 每年农作物受旱面积约 0.20~0.27 亿 hm^2 , 损失粮食 250~300 亿 kg, 占各种自然灾害损失总量的 60%^[1]。山西省地处我国华北平原西部和黄土

收稿日期: 2013-01-13

基金项目: 国家行业专项“气候变化背景下农业气象灾害对我国农业生产影响的评估技术”(GYHY201106021)

作者简介: 徐玲玲(1979—), 女, 山东泰安人, 博士, 高级工程师, 主要从事农业气象业务和科研工作。E-mail: xulingling2001@126.com。

高原东部黄河中游地区,属于暖温带大陆性半干旱季风气候。全省日照充足,光热资源较丰富;但各季降水分布极不均匀,呈现冬季干冷、降水稀少,夏季湿热、雨热同季的特点,大部分地区水资源不足^[2]。随着全球气候变暖、人口急剧增长和社会经济的不断发展,干旱已经成为山西省最严重的气象灾害,由此造成的经济损失也越来越严重^[3]。

目前不同领域对干旱的定义不同,一般把干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱,而气象干旱是各类干旱发生的主要原因^[4]。气象干旱主要考虑降水、气温、蒸发、无降水连续日数等要素,常用的指标有降水距平百分率、降水 Z 指数、相对湿度指数、Bhalme - Mooley 指数等^[5-8];尤其是综合气象干旱指数同时考虑了降水和蒸发因子,且具有资料时间序列长、相对易获取等优点,已在国内干旱监测和评估业务工作中得到广泛的应用。例如,2000 年孙安键等^[9]用 Z 指数对华北平原地区夏季严重旱涝特征进行了诊断分析。2003 年朱自玺等^[5]曾分析了华北地区冬小麦全生育期和拔节期的降水距平与气象产量之间的回归关系。2012 年张婧^[10]等基于综合气象干旱指数分析了近 50 年河北省干旱时空分布特征。事实上,农业干旱的发生有着极其复杂的机理,涉及大气、作物、土壤、水体等多种因素,不同地域、不同作物的农业干旱指标差异巨大,仅用单一的气象干旱指标和评判标准很难精确地反映农业干旱的发生发展情况。本文从山西省玉米产量和气象干旱的角度出发,尝试利用近 20 年农田土壤墒情资料分区域和发育期订正玉米发生

干旱时的综合气象干旱指数评判标准,为山西省玉米干旱监测提供更加切合实际的指标;然后运用统计学方法推算玉米全生育期干旱累积指数,分析近 50 年干旱对山西省玉米产量的影响,最终构建山西省不同区域玉米干旱减产定量评估模型,为实现干旱导致玉米减产的定量化评估提供更为合理的依据。

1 资料和方法

1.1 区域划分及资料

为了便于分析,遵循气象地理区划为一级、产量水平为二级(以近 10 年单产平均值作为当地平均产量水平)、连片的原则将山西省划分为晋北区(大同、朔州、忻州)、晋中区(阳泉、吕梁、太原、晋中、长治)、晋南区(临汾、晋城、运城)三个亚区进行研究。

玉米产量资料为山西省 1961—2010 年以地级市为单位的玉米逐年平均单产($\text{kg}\cdot 667\text{m}^{-2}$),数据来源于山西省气候中心。玉米的发育期主要包括:播种、出苗、拔节~孕穗、抽雄~开花、灌浆~成熟等;山西省玉米发育期资料统一采用 2002—2004 年的平均值,亚区内发育期站点取其平均值(表 1)。为了使气象站点和土壤墒情站点资料更好地匹配,根据临近的原则筛选出 14 个气象站点和 11 个农田土壤墒情站参与统计,气象站点资料为 1961—2010 年逐日气温和降水量数据,用于计算逐日综合气象干旱指数;土壤墒情站点资料为 1992—2010 年 20 cm 土壤墒情观测数据(以土壤相对湿度百分比表示),可以较为直观地反映出作物根系的水分变化状况。

表 1 山西省区域划分及玉米主要发育期

Table 1 The regional division and major growth stages of maize in Shanxi Province

区域 Region	玉米单产 Yield per unit area ($\text{kg}\cdot 667\text{m}^{-2}$)	地区 Area	玉米主要发育阶段日期 Date of major growth stages for maize(m-d)					
			播种 Seeding	出苗 Emergence	拔节 Jointing	抽雄 Teaseling	乳熟 Milky maturity	成熟 Full maturity
晋北区 Northern Shanxi	< 375	大同、朔州、忻州 Datong, Shuozhou, Xinzhou	04-23	05-08	06-30	07-25	08-22	09-21
晋中区 Middle Shanxi	\geq 375	阳泉、吕梁、太原、 晋中、长治 Yangquan, Luliang, Taiyuan, Jinzhong, Changzhi	04-24	05-07	06-23	07-20	08-17	09-17
晋南区 Southern Shanxi	< 375	临汾、晋城、运城 Linfen, Jincheng, Yuncheng	05-03	05-15	06-28	07-21	08-16	09-13

1.2 研究方法

1.2.1 产量资料处理方法 夏玉米实际产量 Y 为农业技术产量 Y_t 和气象影响产量(负值即为气象灾害损失产量) Y_w 之和。农业技术产量采用 5 年滑动平均求得,气象影响产量即为实际产量与农业技术

产量之差,考虑到产量变化的可比性,通常用相对产量表述气象影响产量,即:

$$Y_{wi} = (Y_i - Y_{ti}) / Y_{ti} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Y_{wi} 为第 i 年的气象影响产量; Y_{ti} 为第 i 年的农业技术产量; Y_i 为第 i 年实际产量, $i = 1, 2, \dots, N$, 代

表年代。在此规定,气象影响产量 < 0 的年份为减产年; $0 \leq$ 气象影响产量 $\leq 3\%$ 的年份为正常波动年;气象影响产量 $> 3\%$ 的年份为增产年。

1.2.2 综合气象干旱指数的计算方法 综合气象干旱指数是基于标准化降水指数、相对湿润度指数和降水量建立的一种综合指数^[11],计算公式为:

$$CI = aZ_{30} + bZ_{90} + cM_{30} \quad (2)$$

式中, Z_{30} 、 Z_{90} 分别为近 30 d 和近 90 d 标准化降水指数; M_{30} 为近 30 d 相对湿润度指数; a 为近 30 d 标准化降水系数,平均取 0.4; b 为近 90 d 标准化降水系数,平均取 0.4; c 为近 30 d 相对湿润系数,平均取 0.8。基于 1961—2010 年山西省气象站点逐日气温和降水资料,计算出逐日综合气象干旱指数。

1.2.3 土壤墒情资料的处理方法 农田土壤墒情数据的观测频率为每 10 d 一次,无法与综合气象干旱指数的逐日数据进行匹配分析,因此采用线性内插的方法将 1992—2010 年土壤墒情资料处理成逐日数据。

1.2.4 玉米发生干旱时综合气象干旱指数判断标准的订正方法 研究表明:玉米生长过程中发生水分胁迫时的土壤相对湿度分别为:播种至出苗期($\leq 60\%$)、出苗至拔节期($\leq 55\%$)、拔节至抽雄期($\leq 60\%$)、抽雄至乳熟期($\leq 70\%$)、乳熟至成熟期($\leq 60\%$)^[12]。据此找出玉米不同发育期发生水分胁迫时的土壤墒情资料,采用一元线性法建立土壤墒情与对应日综合气象干旱指数的线性关系,据此订正玉米发生干旱的综合气象干旱指数的判断标准。

1.2.5 玉米全生育期干旱累积指数的计算方法 根据 1.2.4 订正后的玉米发生干旱时的综合气象干旱指数判断标准,反演 1961—2010 玉米生长季内不同发育期的农业干旱发生情况。规定不同发育期内,如果综合气象干旱指数连续 5 d 及以上小于干旱临界值,即认为有干旱发生,记为 i 次。同一发育期的干旱,用该阶段发生干旱的综合气象干旱指数累加值(CI_i)表示;全生育期干旱累积指数用各发育期发生干旱的 CI_i 加权求和:

$$C = \sum_{i=n_1}^{n_2} A_i \times CI_i \quad (3)$$

式中, C 为玉米全生育期干旱累积指数; A_i 为各发育期权重系数; n_1 、 n_2 为发育期的各个阶段; CI_i 为某一发育期玉米发生干旱的综合气象干旱指数累加值。

由于不同发育期发生干旱对玉米最终产量的影响不同,必须首先确定不同生育期的权重系数 A_i 。

选择不同发育期发生干旱且减产的年份($CI_i < 0$ 且 $Y_{wi} < 0$) 和未发生干旱且增产较明显的年份($C = 0$ 且 $Y_{wi} > 3\%$),计算不同发育期综合气象干旱指数累加值 CI_i 与气象影响产量 Y_{wi} 的相关系数;以某一发育期相关系数的绝对值除以全生育期不同发育阶段相关系数的绝对值之和作为该发育期的权重系数:

$$A_i = R_i / \sum_{i=n_1}^{n_2} R_i \quad (4)$$

式中, R_i 为不同发育期发生干旱与玉米产量的相关系数; A_i 为不同发育期的权重系数; n_1 、 n_2 为发育期的各个阶段。

1.2.6 玉米干旱减产定量评估模型的构建方法

选择发生干旱且减产的年份($C < 0$ 且 $Y_{wi} < 0$) 以及未发生干旱且增产较明显的年份($C = 0$ 且 $Y_{wi} > 3\%$),通过线性回归玉米全生育期干旱累积指数 C 与气象影响产量 Y_{wi} 的方法构建玉米干旱减产定量评估模型。利用 SPSS 软件对灾损模型模拟的玉米产量变化和实际气象影响产量进行 Pearson 相关性显著性双尾检验。

2 山西省玉米发生干旱时综合气象干旱指数判断标准的订正

2.1 CI 值与农田土壤墒情的关系

首先以晋南区为例分析综合气象干旱指数与农田土壤墒情的关系。1994 年和 1997 年是该区的典型干旱年^[2],6 月中旬至 9 月中旬玉米关键生育期(即 DOY162 至 DOY264)内 CI 值与土壤墒情的变化趋势基本保持一致:土壤相对湿度越低, CI 值越小;随着土壤相对湿度值的增加, CI 值呈上升趋势(图 1)。但是如图 1b 中虚线所示,农业上认为玉米乳熟至成熟期土壤相对湿度 $> 60\%$ 不会发生干旱,但对应的 CI 值 ≤ -0.6 却表示有干旱发生^[11]。因此,仅依据 CI 值 ≤ -0.6 来判断玉米是否发生旱情具有一定的片面性,利用农田土壤墒情对玉米发生干旱时的 CI 值判断标准进行订正是十分必要的。

2.2 玉米不同发育期发生干旱时 CI 值判断标准的订正

如图 2 所示,1992—2010 年晋南区共有 328 组玉米发生干旱时的 CI 值与土壤墒情数据样本。一元线性回归结果表明,二者呈正相关关系,农田旱情越严重,土壤相对湿度值越低,对应的 CI 值也越小,相关系数 R 达 0.605(在 0.01 水平上双侧显著相关)。回代玉米不同发育期发生干旱的土壤相对湿度临界值,可以得到玉米不同发育期发生干旱时

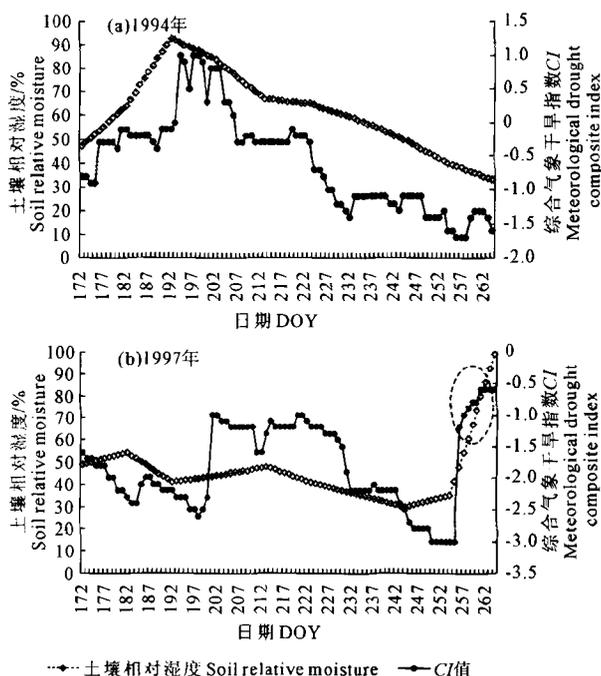
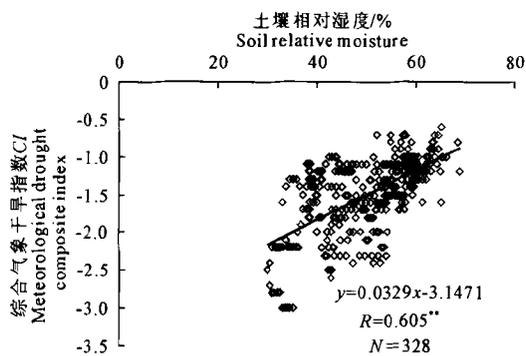


图 1 典型干旱年晋南区土壤相对湿度与综合气象干旱指数 (CI 值) 的变化趋势

Fig.1 Variation trends of soil relative moisture and meteorological drought composite index (CI) during typical drought years in Southern Shanxi

CI 值的临界值。晋南区玉米播种至出苗期、拔节至抽雄期、乳熟至成熟期发生干旱的综合气象干旱指数判断标准为 CI 值 ≤ -1.2 , 出苗至拔节期为 CI 值 ≤ -1.3 , 抽雄至乳熟期玉米生长对水分需求较少, 发生干旱的综合气象干旱指数判断标准为 CI 值 ≤ -0.9 ; 山西省不同区域玉米发生干旱的 CI 值判断标准略有差异(表 2)。



注: y 为 CI 值, x 为土壤相对湿度; * * 表示在 0.01 水平上双侧显著相关。

Note: y represents CI, x represents soil relative moisture; * * means significant correlation with bilateral 0.01 level.

图 2 晋南区玉米发生干旱时土壤相对湿度与 CI 值的关系
Fig.2 Relationship between soil relative moisture and meteorological drought composite index (CI) of maize in Southern Shanxi

表 2 山西省玉米发生干旱的 CI 值判断标准

Table 2 The standard of meteorological drought composite index (CI) for maize in Shanxi Province

玉米主要发育期 Major growth stages of maize	发生干旱的土壤相对湿度上限 ^[12] / % Upper limit of soil relative moisture for maize drought	发生干旱的 CI 值上限 Upper limit of CI for maize drought		
		晋北区 Northern Shanxi	晋中区 Middle Shanxi	晋南区 Southern Shanxi
播种 ~ 出苗 Seeding to emergence	60	-1.1	-1.1	-1.2
出苗 ~ 拔节 Emergence to jointing	55	-1.2	-1.2	-1.3
拔节 ~ 抽雄 Jointing to teaseling	60	-1.1	-1.1	-1.2
抽雄 ~ 乳熟 Teaseling to milky maturity	70	-0.8	-0.8	-0.9
乳熟 ~ 成熟 Milky maturity to full maturity	60	-1.1	-1.1	-1.2

3 山西省玉米干旱减产定量评估模型的建立及检验

3.1 近 50 年山西省玉米单产气象影响产量分析

1965—2010 年山西省晋北区玉米单产减产年有 13 a, 气象产量正常波动年有 2 a, 增产年有 31 a; 晋中区减产年为 18 a, 气象产量正常波动年有 2 a, 增产年有 26 a; 晋南区减产年为 16 a, 气象产量正常波动年有 5 a, 增产年有 25 a。统计不同年代不同区域减产年出现的频次可以看出, 20 世纪 70 年代为 2 次, 分别出现在晋北区和晋中区; 20 世纪 80 年代为 4 次, 分别出现在晋中区和晋南区; 20 世纪 90 年代

为 5 次, 出现在晋南区; 最近 10 年为 6 次, 出现在晋中区。总体来看, 近 50 年山西省玉米单产出现减产的年份呈上升趋势, 这与气候变暖背景下山西年降水量与主要降水期的降水量明显减少, 干旱趋势呈增多趋势是一致的。

3.2 玉米各发育期权重系数的确定

按照 1.2.5 中方法得到山西省玉米不同发育期的相关系数 R 和权重系数 A(表 3)。从表中可以看出, 由于玉米各生长发育阶段对水分的需要量及敏感程度不同, 不同发育阶段发生干旱对玉米最终产量影响的权重系数也不同。总体来看, 抽雄至乳熟期是玉米生长的需水关键期, 在此期间出现干旱对

玉米产量的影响最大;晋北区玉米乳熟至成熟期、晋中和晋南区玉米出苗至拔节期对水分缺少相对不敏感,出现干旱对玉米产量的影响最小,不同区域不同

发育阶段发生干旱对玉米最终产量影响的权重系数也略有差异。

表3 山西省玉米主要发育阶段相关系数(R)和权重系数(A)

Table 3 The correlation coefficient (R) and weight coefficient (A) of maize in Shanxi Province

区域 Region	系数 Coefficient	玉米主要发育阶段 Major growth stages of maize				
		播种~出苗期 Seeding to emergence	出苗~拔节期 Emergence to jointing	拔节~抽雄期 Jointing to teaselng	抽雄~乳熟期 Teaselng to milky maturity	乳熟~成熟期 Milky maturity to full mature
晋北区 Northern Shanxi	R	0.4607	0.4591	0.5748	0.6562	0.2581
	A	0.191	0.191	0.239	0.272	0.107
晋中区 Middle Shanxi	R	0.3411	0.2161	0.3874	0.4763	0.4804
	A	0.179	0.114	0.204	0.251	0.253
晋南区 Southern Shanxi	R	0.6066	0.4989	0.569	0.6461	0.5704
	A	0.210	0.173	0.197	0.223	0.197

3.3 山西省玉米干旱减产定量评估模型的建立

基于2.2订正后的玉米不同发育期发生干旱时的综合气象干旱指数评判标准和3.2确定的玉米各发育期权重系数,依据1.2.5加权求和得到山西省玉米全生育期干旱累积指数。选择发生干旱且减产的年份和未发生干旱且增产较明显年份,用一元线性拟合的方法建立山西省玉米干旱减产的定量评估模型。如图3所示,玉米气象影响产量与全生育期

干旱累积指数呈显著正相关关系,随着全生育期干旱累积指数的增加,玉米气象影响产量的损失量也逐渐增大,相关系数分别达到0.9335(晋北区)、0.6929(晋中区)和0.8041(晋南区)。

3.4 山西省玉米干旱减产定量评估模型的检验

将山西省1961—2010年逐年的玉米全生育期干旱累积指数(未发生干旱的年份玉米全生育期干旱累积指数取值为零)回代到3.3的灾损模型,可以得

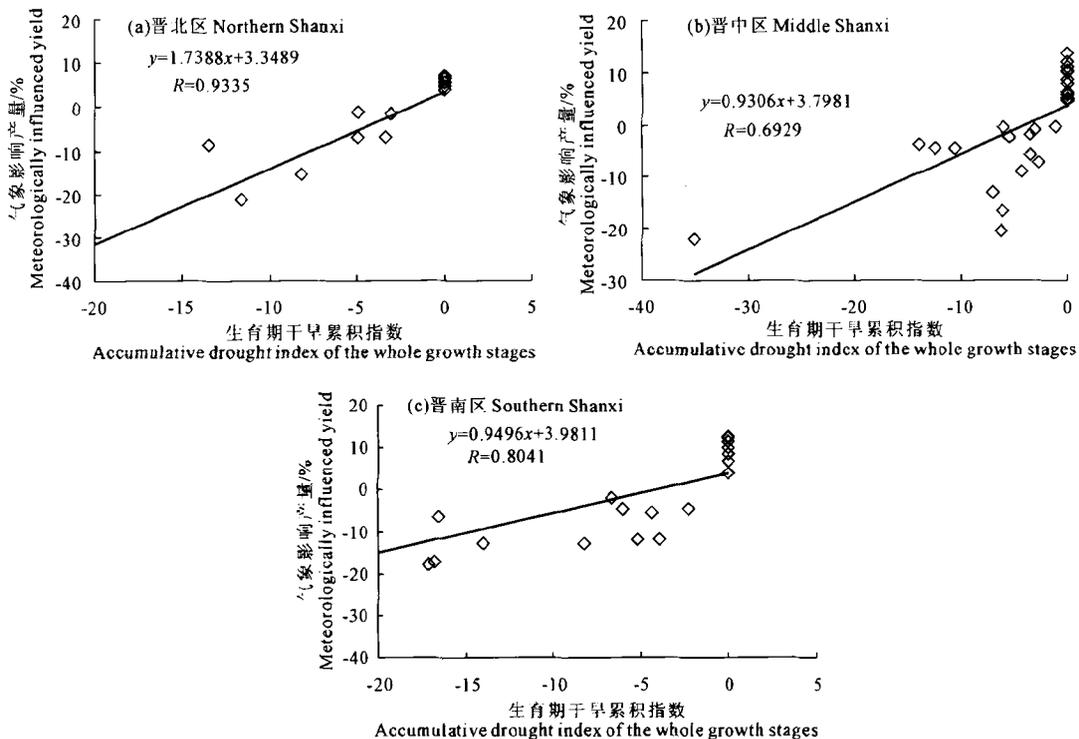


图3 山西省玉米减产年全生育期干旱累积指数与气象影响产量的关系

Fig.3 Relationship between the accumulative drought index of the whole growth stages and meteorologically influenced yield of maize during negative years in Shanxi

到 1961—2010 年的模拟玉米产量(以百分比表示)。通过比较模拟玉米产量和玉米实际气象影响产量可以对 3.3 的灾损模型进行检验。如图 4 所示, 1961—2010 年晋北区、晋中区、晋南区的玉米实际气象影响产量和灾损模型模拟的玉米产量变化趋势基

本一致, 相关系数依次为 0.566**、0.337* 和 0.626**, 分别通过了 Pearson 0.01、0.05 和 0.01 双侧显著相关性检验。基于 3.3 的灾损模型, 通过计算玉米全生育期干旱累积指数可以较为准确地估算干旱导致山西省玉米减产的损失量。

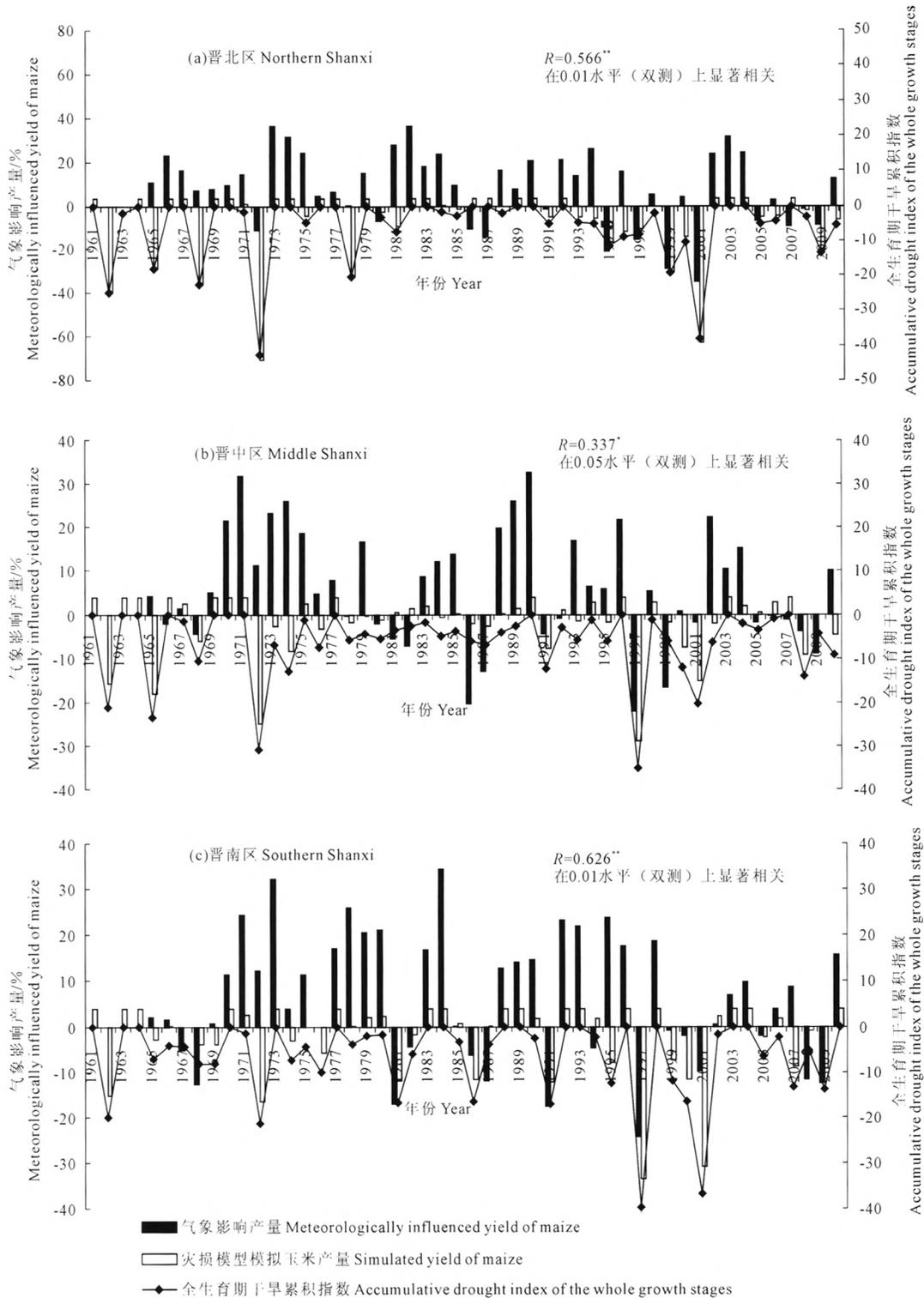


图 4 1961—2010 年山西省玉米气象影响产量、灾损模型模拟玉米产量和全生育期干旱累积指数的变化趋势

Fig.4 Variation trends of meteorologically influenced yield of maize、simulated yield of maize and accumulative drought index of the whole growth stages from 1961 to 2010 in Shanxi

4 结论与讨论

1) 玉米主要生长期综合气象干旱指数 CI 值与土壤墒情的变化趋势基本一致,利用农田土壤墒情资料订正玉米不同发育期发生干旱时的 CI 值判断标准是可行的。晋南区玉米播种至出苗期、拔节至抽雄期、乳熟至成熟期发生干旱的综合气象干旱指数判断标准为 CI 值 ≤ -1.2 ,出苗至拔节期为 CI 值 ≤ -1.3 ,抽雄至乳熟期为 CI 值 ≤ -0.9 。晋北区和晋中区玉米发生干旱的 CI 值判断标准略有差异。

2) 基于发生干旱且减产年份和未发生干旱且增产较明显年份的气象影响产量和玉米全生育期干旱累积指数,采用一元线性回归法建立山西省玉米干旱减产定量评估模型。晋北区为 $y = 1.7388x + 3.3489$ ($R = 0.9335$),晋中区为 $y = 0.9306x + 3.7981$ ($R = 0.6929$),晋南区 $y = 0.9496x + 3.9811$ ($R = 0.8041$),其中 y 为玉米气象影响产量, x 为玉米全生育期干旱累积指数。

3) 1961—2010年晋北区、晋中区、晋南区的玉米实际气象影响产量和干旱减产定量评估模型模拟的玉米产量显著相关,相关系数分别为 0.566^{**} 、 0.337^{*} 和 0.626^{**} 。基于建立的山西省玉米干旱减产定量评估模型,通过计算玉米全生育期干旱累积指数可以较为准确地实现玉米发生干旱减产损失的定量评估。

4) 尝试利用农田土壤墒情资料分区域和作物发育期订正发生农业干旱时的综合气象干旱指数评

判标准,既可以利用气象资料时间序列长、连贯性好以及相对易获取的优点,又在一定程度上克服了单一气象干旱指标无法准确判断农业干旱发生情况的局限性,为反演和分析长时间尺度上农业干旱的发生发展情况以及实现干旱对作物产量影响损失的定量评估提供了依据和途径。

参考文献:

- [1] 姚玉璧,张存杰,邓振镛.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):185-189.
- [2] 周晋红,李丽平,秦爱民.山西气象干旱指标的确定及干旱气候变化研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):240-247.
- [3] 刘庚山,郭安红,安顺清,等.帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J].自然灾害学报,2004,13(4):21-26.
- [4] 王劲松,郭江勇,周跃武,等.干旱指标研究的进展与展望[J].干旱区地理,2007,30(1):61-67.
- [5] 朱自玺,刘荣花,方文松,等.华北地区冬小麦干旱评估指标研究[J].自然灾害学报,2003,12(1):145-150.
- [6] 朱业玉,王记芳,武鹏.降水Z指数在河南旱涝监测中的应用[J].气象与环境科学,2006,(4):20-22.
- [7] 王劲松,郭江勇,倾继祖.一种K干旱指数在西北地区春旱分析中的应用[J].自然资源学报,2007,22(5):709-717.
- [8] 杨小利,刘庚山,杨兴国,等.甘肃黄土高原帕尔默旱度模式的修订[J].干旱气象,2005,23(2):8-12.
- [9] 孙安键,高波.华北平原地区夏季严重旱涝特征诊断分析[J].大气科学,2000,24(3):393-402.
- [10] 张婧,梁树柏,许晓光,等.基于CI指数的河北省近50年干旱时空分布特征[J].资源科学,2012,34(6):1089-1094.
- [11] 中国气象局政策法规司.气象标准汇编[S].北京:气象出版社,2008:33-53.
- [12] 信乃途,崔读昌,高亮之,等.中国农业气象学[M].北京:中国农业出版社,1998:567-575.

(上接第226页)

参考文献:

- [1] 陈玉民.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [2] Liu Changming, Zhang Xiying, Zhang Yongqiang. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,111(2):109-120.
- [3] 朱自玺,刘荣花,方文松,等.华北地区冬小麦干旱评估指标研究[J].自然灾害学报,2003,(1):145-150.
- [4] 赵昕奕,刘继韩.黄淮海平原冬小麦生长期旱情分析[J].地理科学,1999,(2):86-90.
- [5] 吴东丽,王春乙,薛红喜,等.华北地区冬小麦干旱时空分布特征[J].自然灾害学报,2012,(1):18-25.
- [6] 房全孝,王建林,于舜章.华北平原小麦-玉米两熟制节水潜力与灌溉对策[J].农业工程学报,2011,(7):37-44.
- [7] 杨建莹.华北冬小麦生育期及水分亏缺变化研究[D].北京:中国农业科学院,2011.
- [8] 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,(3):356-362.
- [9] 刘昌明,周长青,张士锋,等.小麦水分生产函数及其效益的研究[J].地理研究,2005,(1):1-10.
- [10] 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,(12):6-12.
- [11] 杨金虎,王润元,姚玉璧,等.甘肃省年有效降水次数的异常特征分析[J].干旱区研究,2006,(1):109-114.
- [12] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Pre-prints, 8th Conference on Applied Climatology, 17 - 22 January, Anaheim, California, American Meteorological Society, 1993,179-184.
- [13] Allen R. REF - ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations[S]. Moscow: University of Idaho, 2000.
- [14] 张喜英,裴冬,胡春胜.太行山山前平原冬小麦和夏玉米灌溉指标研究[J].农业工程学报,2002,(6):36-41.
- [15] 刘昌明,张喜英,由懋正.大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J].水利学报,1998,(10):37-40.