

太行山前平原冬小麦生育期干旱分析 ——以保定市为例

沈彦军^{1,2}, 李红军¹, 雷玉平^{1*}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050022; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 对冬小麦生育期干旱进行精细分析, 可以为农业生产和水资源管理提供参考信息, 为降水、地下水动态以及作物耗水关系提供研究基础。采用有效降水和综合气象干旱指数(CI)方法, 分析了太行山前平原冬小麦56个生育期及各生育阶段(苗期、越冬期、返青期、拔节~成熟期)的平均有效降水和气象干旱发生频率。研究发现冬小麦生育期平均有效降水为55.43 mm, 分别占年有效降水和生育期降水量的13.6%和52.5%。其中, 5月和10月是生育期有效降水的主要贡献月, 平均有效降水量分别占到生育期有效降水量的35.7%、27.1%。生育期平均缺水350 mm以上, 并且有效降水的月际、年际间差异明显。逐月旱涝级别和频率分布显示, 生育期干旱平均发生频率为58.5%, 逐月发生干旱的频率均在50%以上。12月易发生轻旱, 2、3月易发生中旱, 4月易发生重旱。总体上, 太行山前平原冬小麦生育期及各生育阶段的有效降水都表现出非稳定性, 逐月平均有效降水量均不同程度小于需水量, 干旱发生频率冬后大于冬前。

关键词: 冬小麦; 有效降水; 综合气象干旱指数; 干旱频率; 太行山前平原

中图分类号: S161.3; S512.1⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0222-05

Drought analysis during growth season of winter wheat in piedmont region of Taihang Mountain ——A case study at Baoding city

SHEN Yan-jun^{1,2}, LI Hong-jun¹, LEI Yu-ping^{1*}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050022, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A precise analysis of drought in growth season of winter wheat can provide reference information for agricultural production and management of water resources, and theoretical foundation for study the relationship between precipitation, groundwater dynamics and crop water consumption. In this paper, we analyzed average effective precipitation and meteorological drought frequency during growth season of winter wheat and each growing stage (seedling, wintering period, recovery, elongating ~ mature), based on method of effective precipitation and meteorological drought composite index (CI). The results showed average effective precipitation during growth season was 55.43 mm. The percentage of effective precipitation in annual effective precipitation and growth season precipitation was 13.6% and 52.5%, respectively. October and May were main contribution of monthly total effective precipitation, and represented 35.7% and 27.1% of average effective precipitation in growth season, respectively. The average water shortage during growth season was more than 350mm. Monthly and annual effective precipitations were significantly different. Based on grade and frequency of monthly CI, average drought frequency of growth season was 58.5% and monthly frequency was more than 50%. December was susceptible to mild drought, February and March were susceptible to moderate drought, and severe drought mostly was observed in April. Overall, average effective precipitations during growth season of winter wheat and each growing stage were inconsistent. At different level, they could not meet water need in the piedmont region of Taihang Mountain. Post-winter drought occurred more frequently than pre-winter drought.

收稿日期: 2012-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971025)

作者简介: 沈彦军(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为3S技术与干旱指数研究。E-mail: shenyanjun860517@163.com。

* 通信作者: 雷玉平(1964—), 男, 副研究员, 主要研究方向为区域蒸散模拟与生态水文。

Keywords: winter wheat; the effective precipitation; comprehensive meteorological drought index (CI); drought frequency; the piedmont region of Taihang Mountain

太行山前平原是华北平原的粮食高产区,主要实行冬小麦-夏玉米一年两作制度。冬小麦生育期一般为10月中旬至次年6月上旬,恰处北方干旱季节。自然条件下作物水分主要源自生育期有效降水以及冬前土壤储水。全国作物需水量分布图及中国科学院栾城生态系统试验站大型蒸渗仪试验结果显示,该区冬小麦生育期需水量约为450 mm左右,远超过同期的降水量^[1-2]。生育期干旱对冬小麦生长影响较大,不仅是影响作物生长和灌溉制度的主要气象因子,同时也影响水资源年内分配以及地下水资源动态。因此,灌溉是保持作物稳产高产的关键,由此引发了地下水位下降、水资源短缺等问题。

河北省发生春旱的频率为60%~80%,初夏旱为55%~90%^[3],以降水缺少为主要特征。近年来,科技工作者对山前平原乃至华北地区冬小麦生育期干旱、降水等方面已做了很多研究。吴东丽、赵昕奕等研究发现华北冬小麦生育期干旱呈加重趋势^[4,5]。房全孝等研究发现山前平原栾城地区冬小麦播前和生育后期缺水严重^[6]。杨建莹研究得出冬小麦生育期内降水亏缺呈加重趋势,尤其是拔节~抽穗期,降水亏缺程度普遍加重^[7]。杨晓琳等^[8]对生育期需水与降水进行了耦合分析,耦合度较差,故冬小麦生育期降水需水矛盾突出。这些研究的共同特点是以降水量为分析要素,而对于山前平原农业实践而言,小量级的降水对缓解农业干旱,改善土壤墒情起不到有效的作用,缺乏有效降水过程乃是造成作物干旱的最主要原因。此外,水分对冬小麦生长的影响有两种,一种为水资源不足,另一种为有限的水资源在小麦各生育阶段的分配方式^[9]。因此有必要对冬小麦生育期的降水加以分析。文章基于有效降水和综合干旱指数CI,分析了太行山前平原冬小麦56个生育期及各生育阶段(苗期、越冬期、返青期、拔节~成熟期)的平均有效降水和气象干旱发生频率,试图理清冬小麦生育期干旱的分布和影响,为太行山前平原农业生产和水资源管理提供信息参考,同时也为进一步研究区域降水、地下水补给与作物耗水的关系提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

保定市位于太行山北部东麓,冀中平原西部,北纬38°10′~40°00′,东经113°40′~116°20′之间,地处

京、津、石三角腹地。年平均气温12℃,属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,热量充分,四季分明。年降水量多年平均527 mm,约67.6%的降水主要集中在7—9月且年际变化大,易出现旱、涝灾害。

1.2 数据来源

数据来自国家气象局中国地面气候资料保定站1955—2011年逐日气象数据。

1.3 方法

有效降水量指能够提供给作物蒸发蒸腾,从而减少作物对灌溉水需求的雨量^[10],通常指自然降水实际补充到小麦根层土壤中的净降水量。在微雨的情况下,植物截留量可达3 mm左右(见中国气象行业标准冬小麦干旱灾害等级QX/T 81-2007),降到土壤表层的水很快被蒸发消耗,起不到改善土壤墒情的作用。考虑到山前平原地形平坦,冬小麦生育期内降水量较小,强度也不大,故忽略径流量、深层渗漏量。本研究统计日降水大于10 mm为有效降水^[11]。根据冬小麦生育特性以及研究区的生产实践划分冬小麦生育期(1955—2011共57年,分56个生育期)分别统计有效降水量,通过对不同时间尺度(冬小麦生育期和各生育阶段)有效降水量进行对比分析,探讨冬小麦生育期的干旱特征。

综合气象干旱指数CI是利用近30 d和90 d的标准化降水指数,以及近30 d相对湿润指数进行综合而得。该指标既反映短时间尺度(月)和长时间尺度(季)降水量气候异常情况,又反映短时间尺度水分亏欠情况,适合实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估(见气象干旱等级国家标准GBT 20481-2006)。CI计算公式为:

$$CI = aZ_{30} + bZ_{90} + cM_{30} \quad (1)$$

式中, Z_{30} 、 Z_{90} 分别为近30 d和近90 d标准化降水指数SPI值; 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,由达轻旱以上级别 Z_{30} 的平均值除以历史出现的最小 Z_{30} 值得到,平均取0.4; b 为近90 d标准化降水系数,由达轻旱以上级别 Z_{90} 的平均值除以历史出现最小 Z_{90} 值得到,平均取0.4; c 为近30 d相对湿润系数,由达轻旱以上级别 M_{30} 的平均值除以历史出现最小 M_{30} 值得到,平均取0.8。

SPI指数是由McKee等^[12]1993年在评估美国科罗拉多干旱状况时提出的。采用Γ分布概率来描述降水量的变化,然后进行正态标准化处理,最终用累积频率分布来划分干旱。相对湿润指数由(2)式得:

$$M = \frac{P - PE}{PE} \tag{2}$$

式中, P 为某时段的降水量; PE 为某时段的可能蒸散量, 用 FAO Penman-Monteith 方法^[13] 计算。

研究选取保定气象站 1955—2011 年降水数据, 分 56 个生育期(10 月一次年 5 月)进行分析。通过

式(1), 利用平均气温、降水量计算逐月的综合气象干旱指数 CI 值, 根据 CI 值的大小划分干旱等级, 进行生育期旱涝频率分析。 CI 指数划分标准见表 1。频率计算方法为: $F = \text{发生某一等级干旱的月份记录数} / \text{总月份记录数} \times 100\%$ 。气象站位于保定东南平原, 可以体现太行山前平原的特点。

表 1 综合气象干旱指数(CI)等级划分
Table 1 Classification of the comprehensive meteorological drought index(CI)

等级 Class	CI 值 CI Value	干旱影响程度 Drought extent
无旱 Drought-free	$-0.6 < CI$	降水正常或较常年偏多, 地表湿润, 无旱象
轻旱 Mild drought	$-1.2 < CI \leq -0.6$	降水偏少, 地表空气干燥, 土壤出现水分轻度不足
中旱 Moderate drought	$-1.8 < CI \leq -1.2$	降水持续较常年偏少, 土壤表面干燥, 土壤出现水分不足, 地表植物叶片白天有萎蔫现象
重旱 Severe drought	$-2.4 < CI \leq -1.8$	土壤出现水分持续严重不足, 土壤出现较厚的干土层, 植物萎蔫、叶片干枯, 果实脱落; 对农作物和生态环境造成较严重影响, 工业生产、人畜饮水产生一定影响
特旱 Extreme drought	$CI \leq -2.4$	土壤水分长时间严重不足, 植物干枯、死亡; 对农作物和生态环境造成严重影响、工业生产、人畜饮水产生较大影响

2 结果分析

2.1 有效降水总体特征

表 2 为保定站 1955—2011 年有效降水统计特征。由表可知, 57 a 平均有效降水为 407.9 mm, 冬小麦生育期平均有效降水为 55.43 mm, 仅占到年有效降水的 13.6%, 冬小麦生育期有效降水分布较

少。生育期变异系数小于各生育阶段, 其中, 3 月份(返青期)有效降水变化最大。各生育阶段有效降水最大、最小值差距较大, 最小值均为 0 mm, 年际间差异明显。生育期中, 越冬期(12 月~次年 2 月)和返青期(3 月)普遍干旱少雨, 这和山前平原此时段干旱少雨的气候条件一致。总体上, 冬小麦生育期及各生育阶段的有效降水量都表现出非稳定性。

表 2 保定站冬小麦生育期有效降水统计特征
Table 2 Statistical characteristics of effective precipitation in the growth season of winter wheat at Baoding station

生育期 Growth season	样本数 Sample	最小值/mm Minimum	最大值/mm Maximum	平均值/mm Average	标准差 Standard deviation	变异系数/% CV
1~12 月(年)	57	110.2	878.6	407.9	190.5	0.47
10 月~次年 5 月	56	0	215.6	55.43	46.5	0.80
10~11 月	56	0	129	19.44	28.2	1.40
12 月~次年 2 月	56	0	28	2.62	6.1	2.30
3 月	56	0	38.2	2.3	6.9	3.00
4 月	56	0	82.5	11.3	16.7	1.50
5 月	56	0	155.5	19.76	29.3	1.50

注: 日降水 ≥ 10 mm 为有效降水。
Note: The effective precipitation is defined as daily rainfall greater than or equal to 10 mm.

2.2 冬小麦生育期有效降水特征

2.2.1 生育期有效降水分析 冬小麦生育期降水及有效降水分布见图 1。生育期平均有效降水(55.43 mm)约占生育期降水量的 52.5%, 近一半降水为无效降水。56 个生育期中有近 61% 的年份有效降水低于平均水平。5 年滑动平均显示, 生育期有效降水量没有显著的趋势, 随机性较强。生育期

最大有效降水为 215.6 mm, 最小为 0 mm, 年际间差异显著。逐月份有效降水相关性分析表明, 5、10 月有效降水量与生育期总有效降水呈正相关, 相关系数达到 0.7。5 月和 10 月是生育期有效降水的主要贡献月(图 2), 平均有效降水量分别占到生育期有效降水量的 35.7%、27.1%。

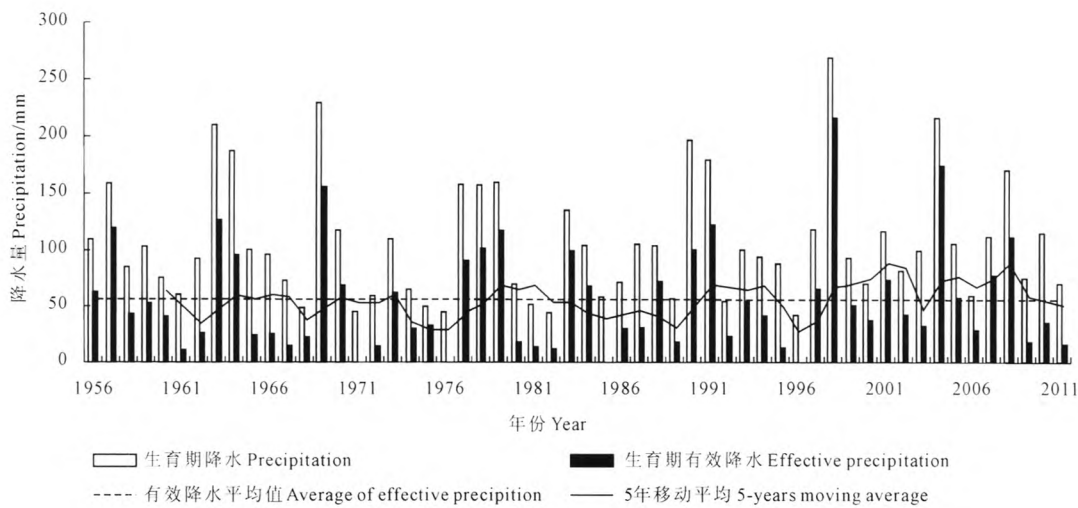


图 1 1955—2011 年冬小麦生育期降水及有效降水分布

Fig.1 Distribution of precipitation and effective precipitation in the growth season of winter wheat (1955—2011)

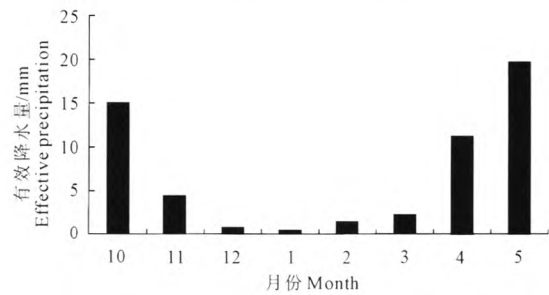


图 2 冬小麦生育期逐月平均有效降水

Fig.2 Monthly average effective precipitation during the growth season of winter wheat

有效降水不同年型分析:1998、2004 年为丰水年(有效降水极大值年份),生育期有效降水分别为 215.6 mm 和 174.6 mm,主要来自 4、5、10 月份。其中 1998 年 5 月有效降水达到 156 mm,是降水的主要贡献月;2004 年 10、11 月有效降水均达到 50 mm 以上,4、5 月均为 20 mm 以上。1971、1976、1985、1996 为枯水年(有效降水极小值年份),冬小麦生育期降水量均在 42 mm 以上,但 4 个生育期中各月有效降水均为 0mm。降水以单次小量形式分布在各个月份中,对冬小麦生长无益。2005 年为平水年(有效降水平均值年份),有效降水为 57.2 mm,全部集中于 5 月,其它月份有效降水均为 0 mm。整体上,56 个生育期中,冬小麦生育期有效降水的次数和总量较少且各生育阶段分配不均。研究显示,冬小麦需水量是在适宜土壤水分条件下达到最高产量时需要消耗的水量。太行山前平原冬小麦需水量约为 450 mm 左右^[1, 14],平均缺水量在 350 mm 以上,生育期季节干旱严重。因此有必要对生育期各生育阶段进行分析。

2.2.2 各生育阶段分析 10—11 月是冬小麦的苗期,有效降水的多少是冬小麦出苗、长势和冬前分蘖的基本保证。56 个生育期中,10~11 月多年平均有效降水为 19.44 mm,最大、最小值分别为 117.3 mm 和 0 mm,年际间差异较大,超过 60% 的年份,有效降水低于平均值。有效降水不能满足冬小麦越冬耗水需求,须通过灌溉补充。

12 月~次年 2 月为冬小麦越冬期。多年平均有效降水仅为 2.62 mm,56 个生育期中有 46 个生育期有效降水为 0 mm。这和太行山前季风气候是一致的,越冬季节基本无雨雪补给,多数年份越冬期表现为气象干旱。

3 月大致为冬小麦的返青和起身期。研究表明,山前平原冬小麦 3 月份耗水量约占生育期总耗水量的 6%,最高产量水平下约为 30 mm 左右^[15],此阶段有效降水的多少关系到返青阶段的保苗情况。56 个生育期中,有效降水多年平均为 2.3 mm,最大值为 38.2 mm,其中有 49 个生育期有效降水为 0 mm。除个别极值年份,此时段有效降水一直少于需水量。

4~5 月为冬小麦拔节~成熟的关键时期,平均有效降水为 31 mm。其中,4 月份多年平均有效降水仅为 11.3 mm,最大值年份达到 82.5 mm,56 个生育期中有 30 个生育期有效降水为 0 mm;5 月份平均有效降水为 19.7 mm,仅有约 20% 的年份有效降水可以达到 30 mm。有效降水年际间不稳定和月际间分配不均。此时段正值温度高、蒸散发快、小麦需水旺盛的时段(耗水量占生育期总耗水量约 57%^[15],约 270 mm 左右),耗水量远超过有效降水量。小量级的降水对缓解作物干旱起不到有效的作用,灌溉是产量的重要保证。

2.3 基于 CI 指数的干旱频率分析

图 3 为 1955—2011 年 56 个冬小麦生育期 CI 时间序列变化曲线,根据 CI 等级(表 1)划分,多数生育期及生育期不同阶段均呈现不同程度的气象干旱。按 CI 等级指标分别统计生育期各月干旱发生的频率(表 3),结果显示,生育期干旱平均发生概率为 58.5%,各月发生干旱的频率均在 50% 以上,但各月不同等级的干旱发生频率存在差异。多年平均,12 月发生轻旱的频率最大,2、3 月常发生中等

程度的干旱,4 月易发重旱。干旱持续时间的累积造成干旱等级的变化,对冬小麦生产极为不利。各生育期(苗期、越冬期、返青期、拔节~成熟期)干旱平均发生频率分别为 53.6%、63.1%、57.1%、57.1%。越冬期干旱发生频率最大,冬后大于冬前。56 个生育期中,每个生育期至少会出现一次干旱。极端干旱的生育期(1988—1989 年)8 个月中呈现 4 次轻旱及 4 次中旱。冬小麦生育期出现干旱的频率高,这种趋势一直持续至今。

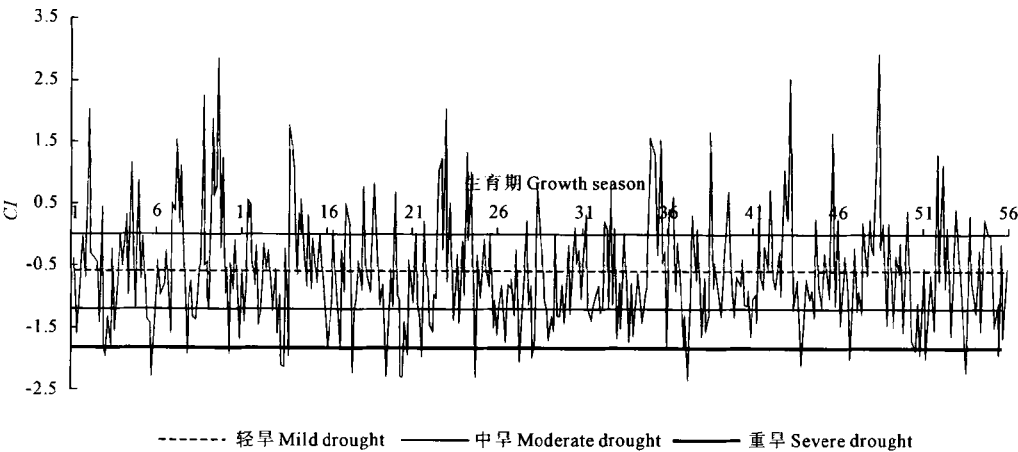


图 3 56 个冬小麦生育期 CI 曲线

Fig.3 CI curve of winter wheat through 56 growth seasons

表 3 逐月 CI 旱涝级别和频率分布

Table 3 Grade and frequency of monthly CI/%

等级 Class	苗期 Seedling		越冬期 Wintering period			返青 Recovery	拔节 ~ 成熟 Elongating to mature		生育期 Growth season
	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	
轻旱 Mild drought	28.6	30.4	46.4	39.3	19.6	26.8	32.1	26.8	31.3
中旱 Moderate drought	14.3	23.2	19.6	19.6	25.0	25.0	14.3	21.4	20.3
重旱 Severe drought	7.1	1.8	1.8	7.1	8.9	5.4	10.7	8.9	6.5
合计 Total	51.8	55.4	69.6	66.1	53.6	57.1	57.1	57.1	58.5

3 结 论

1) 多年间冬小麦生育期及各生育阶段的有效降水均表现出非稳定性,年际、月际间差异显著。生育期平均有效降水为 55.43 mm,分别占年均有效降水和生育期降水量的 13.6%、52.5%。5、10 月有效降水量是生育期有效降水的主要贡献月,平均有效降水量分别占生育期有效降水量的 35.7%、27.1%。整体上,56 个生育期中有近 61% 的年份有效降水低于平均水平,有效降水的次数和总量较少,逐月平均有效降水量均不同程度小于需水量。与作物需水量相比,生育期平均缺水 350 mm 以上,灌溉是产量的

重要保证。

2) 冬小麦生育期出现干旱的频率高。56 个生育期干旱平均发生概率为 58.5%,逐月发生气象干旱的频率均在 50% 以上。各月不同等级的干旱频率相差较大:12 月易发生轻旱,2、3 月易发生中旱,4 月易发生重旱。越冬期干旱发生频率最大,冬后大于冬前。CI 指数考虑了降水和潜在蒸散,物理意义明确、参数计算简便,适于对生育期干旱进行精细分析。通过研究保定冬小麦生育期及各生育阶段的有效降水和气象干旱的发生频率,希望能揭示山前平原冬小麦生育期的干旱发生规律。

(下转第 233 页)

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.
- [13] 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.

(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 Xiyang, 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