

# 相对蒸散在冬小麦干旱宏观评估中的应用

王石立 娄秀荣 庄立伟

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘要

利用最新的 Penman-Monteith 参考蒸散估算方法, 计算了华北各地历年小麦各发育阶段的相对蒸散。根据水分亏缺引起的不同减产程度, 确定冬小麦各发育阶段干旱指标, 并据此分析了小麦干旱程度及发生概率。建立了冬小麦干旱影响综合评估模式。结果表明, 干旱指标农业意义明确, 分析评估符合实际。利用综合考虑冬季严寒和生育期内各阶段水分状况的模式进行农业干旱影响评估的尝试取得了较好的效果。

关键词: 相对蒸散, 冬小麦, 干旱评估。

## 1 引言

农业干旱及其影响的评估一直是研究者关注和探讨的问题。在众多评估方法中, 相对蒸散(农田实际蒸散与水分适宜时的农田最大蒸散之比)通常被视为是表征作物水分亏缺程度的较好的指标<sup>[1,2]</sup>。但是, 目前国内有关相对蒸散与作物产量关系的研究大多是在个别地点、个别年份进行的田间试验结果<sup>[3,4]</sup>。而对于大范围内, 不同气候年型, 以及作物不同发育阶段相对蒸散的数量和分布的分析则很少, 更没有将其用于宏观的农业干旱及其影响评估。

本研究旨在探讨农业干旱及其影响的宏观评估方法。研究中力求指标农业意义明确, 资料易于获得, 模式适合于大范围使用。为此, 从能够反映土壤-作物-大气系统中水分状况的相对蒸散出发, 根据水分不足引起的不同减产程度, 确定出各发育阶段的干旱指标。在此基础上, 分析评估各地冬小麦干旱的程度及发生概率。为了宏观定量评估干旱造成的影响, 还利用温度、相对蒸散和小麦产量资料, 建立起考虑冬季严寒程度和生育期内各发育阶段水分胁迫综合影响的评估模型。

## 2 资料及方法

### 2.1 相对蒸散的计算

利用华北冬麦区32个测站的气象资料、冬小麦发育期资料和土壤水文常数资料, 进行了1956~1990年历年小麦生育期内逐旬土壤水分平衡计算。根据农业气象业务规范和资

料情况, 将冬小麦全生育期划分为冬前、返青、拔节、抽穗、乳熟至成熟等5个发育阶段, 计算了各发育阶段和全生育期的实际蒸散量 ( $ET_a$ )、农田最大蒸散量 ( $ET_m$ ), 以及相对蒸散值 ( $ET_a/ET_m$ )。

不考虑毛管上升水、渗漏和径流, 土壤水分平衡公式为:

$$W = P + I - ET_a + dM_r \quad (1)$$

$W$  为旬初与旬末土壤水分变化,  $P$  为降水量,  $I$  为灌溉量,  $ET_a$  为实际蒸散量,  $dM_r$  为随着根系向下生长吸收而进入土壤-作物系统内的土壤下层的水分(均为 mm)。

蒸散是土壤水分平衡中的基本分量。本研究采用 FAO 1992年最新推荐的 Penman-Monteith 公式参考蒸散业务计算方法<sup>[5]</sup>。农田最大蒸散为作物系数<sup>[6]</sup>与蒸散量的乘积。

实际蒸散量取决于农田最大蒸散和旬初土壤水分:

$$ET_a = ET_m[(W - W_p)/(W_k - W_p)] \quad (2)$$

式中  $ET_m$  为农田最大蒸散量;  $W_p$  为土壤最大吸湿度;  $W_k$  为临界土壤水分, 因发育期而异, 按文献[6]取值;  $W$  为土壤水分含量, 以旬为步长, 按式(1)循环计算, 初始  $W$  取田间持水量的80%。

$$dM_r = W_{nr}[RR/(RD_m - RD)] \quad (3)$$

式中  $W_{nr}$  为小麦潜在长根层内尚未长根土层的含水量, 其初始值取决于土壤特性和底墒状况, 参照有关夏季降水量与底墒关系的研究取值, 其余各旬值根据根系吸水数量递减;  $RR$  为根生长速率;  $RD_m$  为最大根深度;  $RD$  为已长根土层深度。

计算中灌溉按两种方案进行。一种假定足墒播种, 冬前灌一水, 其余时间不灌溉, 称不灌溉方案。另一种为有限灌溉, 除冬灌外, 当春季某旬估算的土壤水分下降到田间持水量的45% 时进行灌溉, 灌溉量为土壤水分与田间持水量的80% 之间的差值。这样多数地区春季灌溉2至3次, 与生产实际比较接近。

## 2.2 冬小麦干旱指标确定

一个具有农业意义的干旱指标, 应当不仅反映水分亏缺程度, 而且能够体现水分亏缺对作物生长的影响。从这一点出发, 根据水分不足引起的产量下降程度确定干旱指标。利用 FAO 产量与水分关系模式<sup>[2]</sup>, 估算了不同阶段水分不足可能导致的减产率:

$$1 - Y_a/Y_m = k_y(1 - ET_a/ET_m) \quad (4)$$

式中  $1 - Y_a/Y_m$  表示偏离最高产量的数量,  $k_y$  为产量反应系数, 体现作物不同发育阶段对水分亏缺的敏感程度。按照文献[2], 冬小麦营养生长期  $k_y$  取 0.2, 抽穗、开花期为 0.6, 其后取 0.5。  $1 - ET_a/ET_m$  为相对蒸散差额。将减产率小于10%、10%~20% 和大于20% 分别定为轻度、中度和严重减产。然后根据这3种减产程度的相对蒸散值, 确定各发育阶段轻、中、重度干旱的指标(表1)。

表1 冬小麦各发育阶段干旱指标(相对蒸散)

阶段	拔节	抽穗		乳熟	
强度	中	中	重	中	重
指标	< 0.5	0.67~0.83	< 0.67	0.6~0.8	< 0.6

用表1指标衡量了各地历年小麦干旱情况,发现历史上的严重干旱年如1959~1960年黄淮麦区持续干旱、1972年华北春夏连旱、1979年秋~1980年春持续干旱、1981~1982年北方春旱等其相对蒸散值都符合上述指标。同时,根据指标分析的1950年代末至1960年代初和1970年代小麦干旱频繁而严重,1980年代以来程度减轻等特点也与事实吻合。另外,一些未发生冻害年份的拔节期相对蒸散比抽穗至乳熟期大,但最终仍因干旱而严重减产,显然是由于抽穗至乳熟期对水分更加敏感所致。

### 3 冬小麦干旱评估

#### 3.1 冬小麦不同发育阶段干旱程度评估

表2为两种灌溉方案下各地冬小麦不同发育阶段相对蒸散的多年平均值。表中 I 区为北京、天津、河北、河南北部和山东西北部等地; II 区为河南中部、山东大部; III 区为山东半岛东南部沿海地区; IV 区为河南南部。对照表1干旱指标,可以看出不同地区冬小麦各发育阶段的干旱程度。

表2 华北地区冬小麦不同发育阶段的相对蒸散多年平均值

灌溉方案 地 区	不灌溉				有限灌溉			
	冬 前	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
返 青	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
拔 节	< 0.3	0.3~0.5	0.6~0.7	0.8~0.9	0.6~0.7	0.6~0.7	0.8~0.9	0.9
抽 穗	0.3~0.4	0.4~0.6	0.7~0.8	0.9	0.7~0.75	0.75~0.8	0.8~0.9	0.9
乳熟-成熟	0.3~0.4	0.4~0.5	0.6~0.7	0.8~0.9	0.7~0.75	0.75~0.8	0.8~0.9	0.9

在足墒播种和冬前灌水的假定下,小麦播种至停止生长期间大部分地区土壤水分适宜,相对蒸散为0.9左右,基本无干旱发生。

不灌溉方案下,返青阶段冬前储存的水分逐渐被消耗,相对蒸散变小。I 区最小,为0.5~0.7。但此时小麦对水分亏缺的敏感程度较低,所引起的减产数量为6%~10%。II 区水分状况略好于 I 区,减产率不到6%。因此就多年平均而言,华北地区 I 区和 II 区存在轻度干旱。拔节期内土壤水分大量消耗,大部分地区相对蒸散降至0.5以下,III 区甚至小于0.3,IV 区也仅为0.6~0.7。但是从影响产量的角度评价,I、II 区的水分亏缺导致产量下降10%~20%,尚属中度干旱,III 区为轻度干旱区,IV 区基本无干旱。抽穗期 I、II 区的相对蒸散为0.3~0.6。由于处于水分临界期,小麦生长对水分非常敏感,可引起减产20%~30%,甚至更多。因此 I、II 区所在的华北大部分地区常有严重干旱。III 区相对蒸散0.7~0.8,产量降低12%~18%,为中度干旱区。IV 区也有轻度干旱。乳熟至成熟期各地相对蒸散与抽穗期接近,但产量反应系数稍小,故干旱程度与抽穗期相似或略偏轻。可以认为,在自然降水情况下,小麦生育期内水分供需矛盾以拔节期最大,而抽穗至乳熟期的水分亏缺对产量影响最重。另外,京、津、河北中南部、河南北部和山东西北部各发育阶段的相对蒸散均最小,水分亏缺明显,干旱程度重。

在有限灌溉方案下,水分供需状况有明显的改观。I 区冬季、初春降水稀少,多数年份

小麦返青阶段即进行灌溉,因此大部分地区相对蒸散在0.9左右。拔节期内, 区相对蒸散为0.6~0.7,引起减产6%~8%,属轻度干旱。但其中京、津、德州等地相对蒸散不到0.6,为中度干旱。抽穗至乳熟期, 区相对蒸散为0.7~0.8,水分亏缺导致10%~20%的中度减产,形成中度干旱。、区只有轻度干旱。因此,从相对蒸散的角度看,华北地区多年平均情况下春季灌2~3次水可保证小麦最大需水量的60%~80%,但大部分地区在小麦抽穗至乳熟期内仍存在水分不足,常导致减产10%~20%,形成中度干旱。

### 3.2 冬小麦干旱发生概率分析

季风气候导致华北地区气候要素年际变化很大。因此,计算了冬小麦各发育阶段相对蒸散的概率分布,借以分析冬小麦干旱的发生概率。

不灌溉方案下,返青阶段 区虽多年平均为轻度干旱区,但有25%~45%的年份出现中度干旱; 区也有10%~15%的中旱可能性。拔节期, 区中度干旱概率为60%~70%,其中京、津、河北大部高达80%~90%; 区和 区各有10%~15%和10%的中度干旱年。抽穗至成熟期 区重度干旱频繁,为70%~90%,中度约10%~20%; 区重旱和中度干旱分别为50%~70%和30%~40%; 区重度干旱概率为10%~20%,中度为20%~40%; 区也有10%~20%的年份发生中度干旱,但基本无重旱。

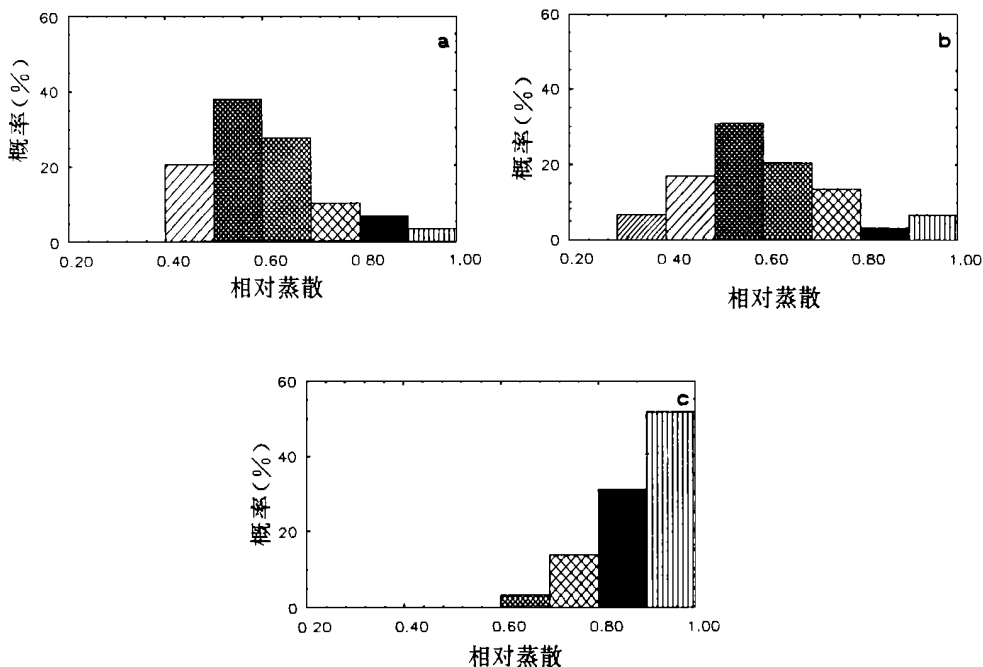


图1 小麦拔节期相对蒸散直方图

(a. 北京; b. 济南; c. 南阳)

重点分析了有限灌溉方案下各发育阶段相对蒸散值的概率分布。可以看出,小麦拔节期 区相对蒸散直方图的峰值向左偏至0.5~0.7范围内,0.4~0.5的概率为10%~20% (图1a), < 0.5的累积概率为10%~25%,中度干旱次数比其它地区均多。 区直方图接近正态分布,相对蒸散0.6~0.9区间的概率集中于20%~30%,0.4~0.5的概率为5%~

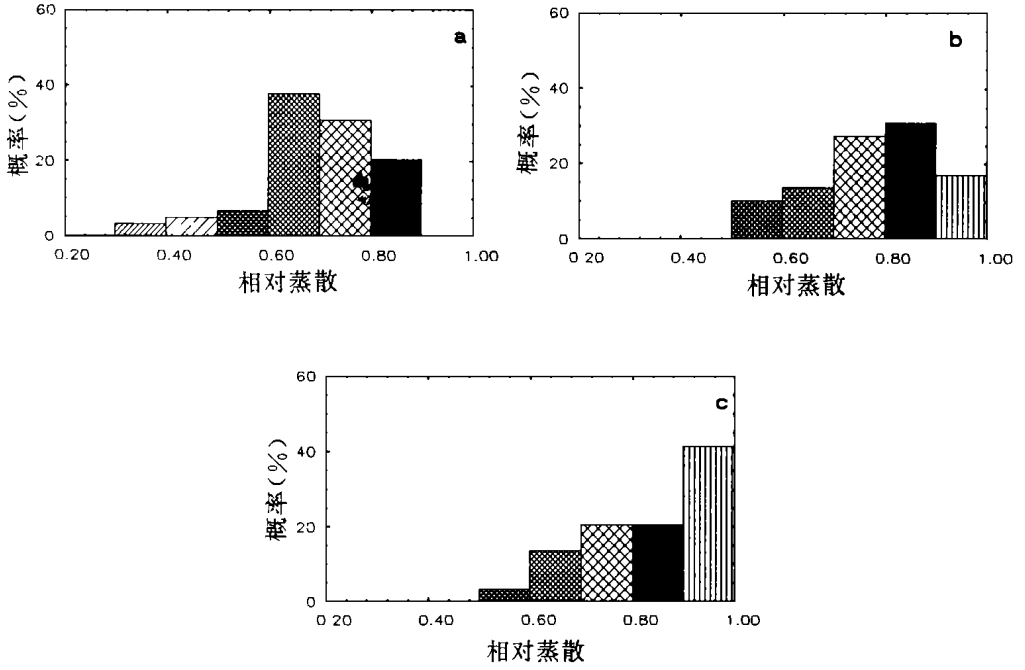


图2 小麦抽穗期内相对蒸散直方图  
(a. 北京; b. 济南; c. 南阳)

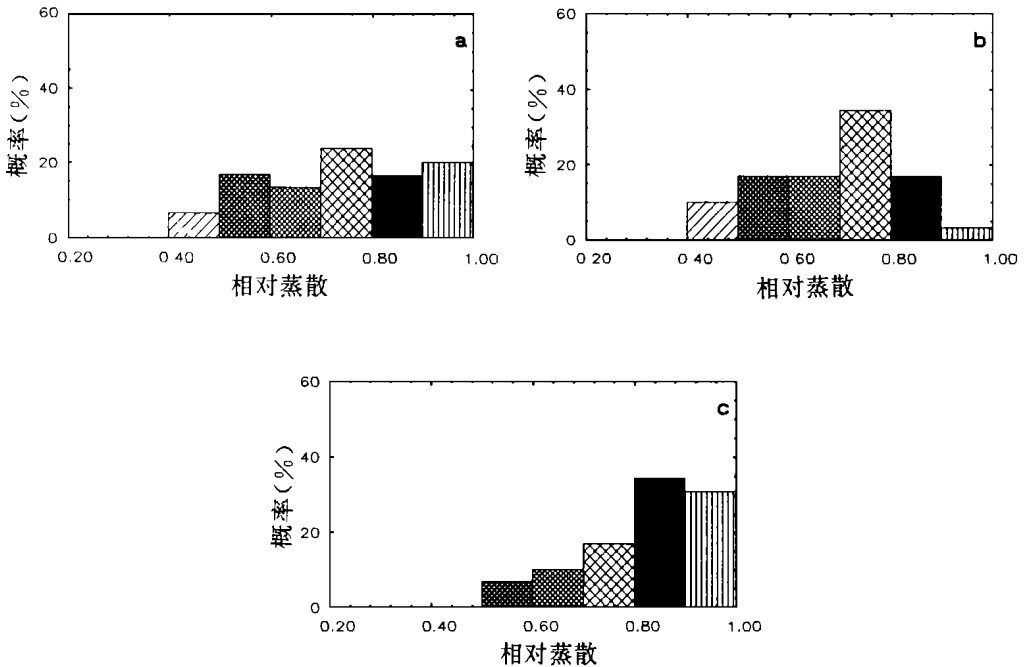


图3 小麦乳熟至成熟期内相对蒸散直方图  
(a. 北京; b. 济南; c. 南阳)

10% (图1b), 中旱概率为10% ~ 20%。区水分状况较好, 直方图峰值明显向右偏移至0.8 ~ 1.0 (图1c)。抽穗期内区直方图左偏略有缓和, 相对蒸散集中于0.6 ~ 0.9。区直方图略右偏。区右偏仍较明显(图2)。区、区中等干旱概率为40% ~ 60%, 重旱为15% ~ 30%。区中度干旱概率大大减少, 约10% ~ 30%, 重旱为10% ~ 15%。区有10%左右的年份出现中度干旱, 重度干旱不到5%。乳熟至成熟期相对蒸散直方图呈低而宽的特征, 各等级概率相差不大(图3)。区、区中等干旱发生概率为35% ~ 55%, 重度干旱为15% ~ 25%; 区、区的中度、重度干旱概率分别为10% ~ 20%和10%。

#### 4 冬小麦干旱影响评估

作物生长发育和产量形成是生育期内各个阶段和多种因素连续、综合、相互影响的结果。FAO模式考虑了各个发育阶段水分亏缺对产量的影响, 但没有将各阶段的影响相互联系起来。Meyer等人<sup>[7]</sup>提出的CSDI指数(Crop-specific drought index)采用各个发育阶段缺水影响的阶乘形式, 较好地弥补了上述不足:

$$CSDI = Y_a/Y_{pot} = \prod_{i=1}^n (ET_a/ET_m)^i \quad (5)$$

式中 $Y_a$ 和 $Y_{pot}$ 分别为实际产量和最大潜在产量;  $n$ 为发育阶段个数,  $i$ 为第 $i$ 个发育阶段作物对水分胁迫的相对敏感性。根据 $i$ 和 $Y_{pot}$ 可以评估水分对产量的影响。

基于单站田间试验资料得到的结果用于大范围评估有一定的局限性, 而确定区域CSDI模式所需的多点、多年田间试验资料又很难获得。因此本文利用实际产量资料, 对CSDI模式进行了改进。首先, 以各地社会产量序列经处理得到的气象产量作为 $Y_a$ , 气象产量历史最大值与气象产量均方差的2倍之和为最大潜在产量。其次, 综合考虑影响冬小麦产量的主要环境气象因子, 华北地区除了干旱之外, 冬季低温可造成小麦冻害, 引起减产, 如1957, 1964, 1968, 1969, 1977年, 有的年份甚至冻旱交加, 造成大幅度减产。导致冬小麦冻害的因素很多, 本研究以小麦越冬期间负积温作为主要影响因子。进而采用小麦各发育阶段水分和冬季负积温共同影响产量的方案, 即

$$CSDI = Y_a/Y_{pot} = \prod_{i=1}^n ET_R^i \cdot NAT^b \quad (6)$$

式中 $ET_R$ 为各发育阶段的相对蒸散值;  $NAT$ 为负积温,  $b$ 表示产量对 $NAT$ 的响应;  $i$ 为发育阶段。对(6)式两边取自然对数, 得到

$$\ln Y_a/Y_{pot} = b \ln NAT + \sum_{i=1}^n i \cdot \ln ET_{R_i} \quad (7)$$

用岭回归方法得到 $b$ 值和 $i$ 。 $i$ 是指数系数, 相对较大的值表示产量对其更加敏感, 较小或负数表示不敏感。 $NAT$ 与产量成负相关,  $b$ 值分析绝对值大小。

表3为有限灌溉条件下4个地区通过统计显著性检验的站点 $b$ 和 $i$ 的平均值。I区 $b$ 值绝对值最大, 且越往北越大, 说明这一地区冬季冻害是影响小麦产量的重要因素; 抽穗期和乳熟至成熟期水分敏感系数也较大。区冬季冻害影响变小, 拔节期水分敏感系数上升为第一位。河南南部(区)产量基本不受负积温影响, 水分敏感系数负值很小, 乳熟至成熟期更为明显。这在一定意义上反映了对水分过多较敏感。事实上, 这一地区往往因

成熟收获阶段的连阴雨而使产量受到较大损失。

表3 有限灌溉方案下模式敏感系数

地区	$b$	拔节	抽穗	乳熟至成熟
	0.2301	- 0.1976	0.1018	0.1471
	0.0250	0.1543	- 0.2911	0.0716
	0.0884	0.2068	- 0.1869	- 0.1600
	0.0093	- 0.2705	- 0.1978	- 0.3544

与有限灌溉方案相似,不灌溉方案模式中负积温的影响也是 区最大。水分敏感时段各区略有不同。

改进 CSDI 模式拟合的相对产量基本上满意。以北京为例,用 1956~1985 年资料建立的灌溉方案模式复相关系数 0.618,方差 3.703,均通过 0.01 信度的显著性检验。相对产量拟合平均误差 15.5%。若以评估气象产量增减 1 成以内为标准,其准确率为 80%。从典型年份看,相对气象产量大于 0.55 的 9<sub>a</sub> 中均未出现冻害,水分亦较适宜,其中 8<sub>a</sub> 只有 1 个或 2 个发育阶段相对蒸散为 0.5~0.6,其余阶段均在 0.75~0.8 以上。模式拟合全部正确。相对产量小于 0.4 的 8 个减产年中 4<sub>a</sub> 负积温偏多,发生明显冻害; 6<sub>a</sub> 水分条件差,相对蒸散连续 3 个发育阶段小于 0.67; 2<sub>a</sub> 冻旱交加或相继发生。拟合结果 4<sub>a</sub> 完全正确, 4<sub>a</sub> 趋势正确。以 1986~1990 年独立样本进行了验证。1986, 1987 年春季降水量明显偏少,持续干旱,旱地小麦受影响较大。而灌溉方案下相对蒸散阶段性偏低,估算产量属中等水平。1988~1990 年降水量偏多或虽偏少但降雨适时,相对蒸散多在 0.6 以上,产量偏丰。5<sub>a</sub> 评估的产量趋势与实况完全相符,平均相对误差 10.2%。

## 5 结语及讨论

(1) 考虑作物不同发育阶段的特点,根据引起不同减产程度的相对蒸散值确定农业干旱指标,农业意义明确,分析比较客观。京、津、河北中南部、河南北部和山东西北部相对蒸散小,水分供需矛盾大,干旱程度重。冬小麦拔节期水分状况最差,而抽穗至乳熟期对产量影响最大。

(2) 相对蒸散的年际变化较大,不同地区小麦各发育阶段干旱的发生概率不同,冬麦区北部明显大于其它地区。春季自然降水情况下,北部拔节期中等干旱概率为 70%~90%,抽穗至成熟期有 70%~90% 的年份出现严重干旱。如果春季灌溉 2~3 次,可以满足最大需水的 60%~80%,但北部和中部地区拔节期内仍有 10%~25% 的年份出现中度干旱;抽穗至成熟期中度、严重干旱概率分别为 35%~60% 和 15%~30%。因此,对于水资源短缺的华北地区来说,除适时灌溉外,采取生物、物理、化学等保墒抑蒸防御措施,提高水分利用率是使农业获得可持续发展的重要途径。

(3) 利用小麦实际产量资料,综合冬季严寒程度和水分亏缺状况,建立了干旱影响评估综合模式。得到的敏感系数与冬小麦产量形成过程中冬季温度及各阶段水分因子的作用相符,回代、检验效果基本满意,可以概括产量的 80%~90%。这是利用大范围资料,根

据相对蒸散进行农业干旱影响宏观评估的初步尝试。具体应用时,可从返青开始,逐旬将实况负积温和相对蒸散值,以及后期相对蒸散平均值代入模式,得到相对产量,进行干旱影响动态评估。或用前期实况值和后期历史值计算的相对产量进行未来变化的概率分析。

(4) 土壤-作物-大气系统内的水分运动十分复杂。为便于宏观评估,本文未考虑土壤各层间的水分交换。限于资料,小麦发育阶段的划分较粗。干旱程度指标仍是静态的。综合评估模式是统计意义上的关系,产量资料的处理、其它因子的作用都会影响拟合效果。因此,宏观分析与机理性较强的作物生长模式相结合,进行区域农业干旱影响实时评估,将是今后的研究方向。

## 参考文献

- 1 Jensen M E. Water consumption by agricultural plants. In: Kozlowski T T. Water Deficits and Plant Growth. New York: Academic Press, 1968. 2: 1 ~ 22
- 2 Doorenbos J and Kassam A H. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper, Rome: FAO, 1977. No. 33, 193pp
- 3 王宏. 作物水分亏缺诊断的研究、冠层温度和农田蒸散, 作物与水分关系研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 217 ~ 285
- 4 石培华, 梅旭荣, 冷石林, 赵聚宝. 相对蒸散用于冬小麦水分亏缺诊断及灌溉决策初步探讨. 中国农业气象, 1995, 16(3): 14 ~ 22
- 5 Martin Smith. CROPWAT a computer program for irrigation planning and managment. FAO Irrigation and Drainage Paper, Rome: FAO, 1992. No. 46, 126pp.
- 6 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989. 210pp
- 7 Steven J M, Kenneth G H and Donald A W. A crop-specific drought index for corn; I. model development and validation. Agronomy Journal, 1993, 85: 388 ~ 399

# APPLICATION OF RELATIVE EVAPOTRANSPIRATION IN MACROSCALE ASSESSMENTS OF WINTER WHEAT DROUGHT

Wang Shili Lou Xiurong Zhuang Liwei

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)

## Abstract

Based on the updated operational estimates of reference evapotranspiration by Penman-Monteith the relative evapotranspiration in various development stages of winter wheat in North China were calculated. The results show that the proposed drought indexes have agricultural meaning, the analysis and assessments well fit to facts. The agricultural drought impact assessment using integrated model in consideration of winter cold status and water condition in various stages of winter wheat got good results.

**Key words:** Relative evapotranspiration, Winter wheat, Drought assessments.