

# 农业干旱评估指标体系

徐向阳<sup>1</sup>, 刘 俊<sup>1</sup>, 陈晓静<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京市水利规划设计院, 江苏 南京 210008)

**摘要** 利用帕尔默旱度模式的基本原理, 提出了徐州市自然旱度评估方程. 与此同时, 建立了模拟农业干旱的数学模型, 模型依据农作物的缺水率来分级判定旱情程度, 模拟农业旱情产生和发展的全过程. 在模拟的基础上, 根据徐州市的具体情况定量估算旱灾范围、灾情损失及灌溉效益, 客观地评估农业旱情和抗旱措施的作用.

**关键词** 帕尔默旱度模式; 自然旱度; 农业干旱; 评估

**中图分类号** S16      **文献标识码** A      **文章编号** 1000-1980(2001)04-0056-05

徐州市是江苏省的易旱地区, 年平均蒸发量 1 200 mm, 年平均降水量 886 mm, 枯水年雨量不足 400 mm. 降水的特点一是年际变化大, 丰枯年份点雨量相差 4~5 倍; 二是年内分配不均, 6~9 月降水量占全年总雨量的 70% 以上. 降水不均的自然现象造成徐州市旱灾的易发性. 尤其是 80 年代以来, 随着上游地区和本地用水量的逐年增长, 区域缺水现象日益明显, 旱灾已在众多的自然灾害中占据主要位置.

为了了解徐州市旱情发生的机制, 提前预测旱情并及时制定有效的防灾减灾方案, 合理地进行抗旱工程的规划建设, 需要对自然条件和工程条件下的干旱程度进行模拟和分析, 估算可能造成的旱灾损失, 并对灌溉效益进行评估, 建立适合于徐州市的旱情模拟和评估系统.

## 1 自然干旱评估和分析

### 1.1 自然旱度评估指标

描述自然旱度的指标很多. 考虑到徐州市具有的半干旱半湿润地区特征, 选择经改进的帕尔默旱度模式<sup>[1]</sup>作为描述自然条件下的区域性干旱指标. 帕尔默旱度模式是目前国际上最广泛应用的区域性旱度指标之一, 它与传统的气象指标的主要差别在于不仅考虑降水和蒸发, 而且综合考虑到径流和土壤含水量, 进行土壤层水量平衡计算, 比较适合代表与半干旱度区域自然干旱的程度.

帕尔默旱度模式认为某一时段满足地区经济机制正常运行降水量可称为适宜降水量  $P_0$ , 该时段实际降水量  $P$  与  $P_0$  的差额

$$d_j = P_j - P_{0j} \tag{1}$$

该差额反映了地区自然条件下的缺(余)水程度.

对于适宜降水量  $P_0$ , 帕尔默旱度模式通过对适宜的降水量、蒸发量、土壤水补给量、径流量、土壤水损失量分析推求得出. 但在实际计算时操作很困难, 资料条件也往往不能满足要求. 因此, 本项研究针对徐州市的气象特征, 采用区域多年平均雨量表示  $P_0$  值.

为了得出在时间和空间上相对独立的干旱指标, 帕尔默旱度模式中采用的旱度值为

$$Z_j = K_j \frac{d_j}{D} \tag{2}$$

式中:  $D$ ——年内各时段  $P$  与  $P_0$  绝对离差平均值;  $K_j$ ——反映地区水资源供需关系的特征因子, 由下式定义:

$$K = \frac{k_j}{\sum_i k_i} \tag{3}$$

$$k = \frac{E + RG + RV}{P + I}$$

(4)

式中 : $E$ ——时段蒸散发量 ; $RG$ ——时段土壤水补给量 ; $RV$ ——时段径流补给量 ; $P$ ——时段降水量 ; $I$ ——时段土壤水损失量.

为了反映前期干旱的影响和消除计算误差的累积 ,帕尔默旱度指标计算采用经验递推公式

$$PDSI_j = aZ_j + bPDSI_{j-1}$$

(5)

式中 : $PDSI_j$ ——第  $j$  时段帕尔默旱度指标值.当  $-1 \leq PDSI < -2$  时为轻度干旱 , $-2 \leq PDSI < -3$  时为中等干旱 , $-3 \leq PDSI < -4$  时为严重干旱 , $PDSI \geq -4$  为极度干旱.

按帕尔默旱度模式原先公式的定义 , $a = 1/3$  , $b = 0.897$ .对我国一些地区试验表明 ,取  $a$  和  $b$  为常数与实况吻合不好 .经改进后是利用由历史旱灾资料来确定的.

1.2 自然旱度模式的建立

自然干旱模拟分析采用的基本参变量包括研究区域的雨量、蒸发量和有效土壤含水量 ,以月为计算时段.雨量选用丰县、沛城、敬安、徐州、贾汪、双沟、睢宁、邳县、新沂等 9 站 1964 ~ 1990 年共 27 年逐月资料 ;蒸发量选用邳县、沛县 1964 ~ 1990 年共 27 年逐月资料.有效土壤含水量分上下两层计算 ,取上层为 40 mm ;下层为 330 mm.适宜降水量采用多年平均雨量代表.

以上述资料建立起徐州市分县自然旱度模式见表 1.

表 1 徐州市分县自然旱度模式

Table 1 Natural dryness mode for Xuzhou region

| 县 名 | 自然旱度模拟方程                               | 县 名 | 自然旱度模拟方程                               |
|-----|----------------------------------------|-----|----------------------------------------|
| 丰 县 | $PDSI_i = 0.0298Z_i + 0.837PDSI_{i-1}$ | 睢 宁 | $PDSI_i = 0.0212Z_i + 0.965PDSI_{i-1}$ |
| 沛 县 | $PDSI_i = 0.0132Z_i + 0.960PDSI_{i-1}$ | 邳 县 | $PDSI_i = 0.0190Z_i + 0.952PDSI_{i-1}$ |
| 铜 山 | $PDSI_i = 0.0175Z_i + 0.945PDSI_{i-1}$ | 新 沂 | $PDSI_i = 0.0206Z_i + 0.955PDSI_{i-1}$ |

1.3 模拟结果和检验

采用徐州市各县自然旱度模式计算逐年各月自然干旱指标值 ,年内各季的旱度由各季内最大月旱度确定 ,四季中最早季节的旱度即评估为该年的年旱度.据此得出徐州市历年各县干旱年出现的频次、性质和年份 ,并与历史干旱灾情记载成果对比分析(表 2 和表 3).

表 2 徐州市干旱年历史记载与模拟结果

Table 2 Recorded and simulated values of drought for Xuzhou region

| 数据来源 | 统计年限        | 干 旱 |      | 严重干旱 |      | 干旱年组                                  |
|------|-------------|-----|------|------|------|---------------------------------------|
|      |             | 年数  | 频次/% | 年数   | 频次/% |                                       |
| 历史记载 | 1964 ~ 1990 | 24  | 88.8 | 6    | 22.2 | 1966 ~ 1969 ,1978 ~ 1983 ,1987 ~ 1989 |
| 模拟计算 | 1964 ~ 1990 | 25  | 92.6 | 5    | 18.5 | 1966 ~ 1969 ,1978 ~ 1982 ,1988 ~ 1989 |

表 3 徐州市严重特大干旱年历史记载与模拟结果

Table 3 Recorded and simulated values of severe drought for Xuzhou region

| 受灾年份 | 历史记载 |      | 模拟结果           |       |
|------|------|------|----------------|-------|
|      | 受灾范围 | 灾害特征 | 受灾范围           | 灾害特征  |
| 1967 | 全地区  | 春夏旱  | 全地区            | 春夏秋旱  |
| 1968 | 全地区  | 冬春旱  | 全地区            | 冬春夏秋旱 |
| 1978 | 全地区  | 夏秋旱  | 全地区            | 春夏秋旱  |
| 1981 | 全地区  | 春夏旱  | 丰县 ,铜山 ,邳县 ,新沂 | 春夏旱   |
| 1988 | 全地区  | 夏 旱  | 全地区            | 夏秋旱   |

1.4 自然干旱的时空分布特征

对徐州市历史实际干旱灾情资料统计和采用自然旱度指标模拟结果表明 ,徐州是极易受旱成灾的地区.在 1964 ~ 1996 年的 33 年内 ,有 25 年发生了不同程度的干旱 ,频次达 80%.干旱的时空分布具有以下主要特征 :

a. 年内季节性干旱中以夏旱发生频次最高 ,其次是春旱和秋旱 ,它们的频次分别为 69% ,45% 和 44% .

b. 造成较大灾情的特大干旱年 10 年左右发生 1 次,一般为连季干旱,并涉及全市各地.在发生极端干旱年前后,大多具有 2~4 年的干旱连续年组出现,如 1968,1978,1988 年特大干旱年前后,就出现了 1967~1969 年、1978~1981 年、1988~1989 年的连续干旱年组.

c. 徐州地区的西部(丰县、沛县)和东部(邳县、新沂)都是本地区干旱易发地,发生干旱的频次均大于 80%.干旱现象一般是从徐州地区东、西两侧开始,而后向中、南部展延.在全地区性的严重旱年份,这种地区空间动态分布更明显.

## 2 农业干旱模拟和实时旱情评估

### 2.1 基本模式

在徐州市灌区,引起农业干旱的因素众多,包括降水量、土壤含水量、作物需水量、前期旱情,以及当地的灌溉能力和农业抗旱措施.显然,前期越干旱,降水量越少,灌溉能力越差,则作物缺水越多,作物受旱成灾的程度也就越严重.作物的缺水程度和减产率关系可作为评估作物受旱成灾程度的依据.因此,采用水量平衡原理建立各类作物在不同生长期的供需水平衡方程,可以推求出相应的缺水量,并与同期需水量的比值来分级判定旱情程度.

对于指定地区,某一作物在某一生长期的缺余水量方程为

$$D = X - P - G \tag{6}$$

式中: $X$ ——作物需水量; $P$ ——降水量; $G$ ——灌溉水量; $D$ ——作物缺水量.

考虑到灌溉沿程损失和前期旱情的影响,方程(1)可写为

$$D = X - P - \eta k G \tag{7}$$

式中: $k$ ——前期旱情系数; $\eta$ ——灌溉沿程损失系数.

计算得作物生长期缺水率为

$$\nu = D/X \tag{8}$$

将 $\nu$ 与实际旱灾程度建立关系,便作为模拟旱情的依据.

### 2.2 资料选择和参变量确定

旱情模拟以旬作为计算时段.徐州市 183 个乡镇共 24 个灌溉区,有省、市、县级翻水站 29 个,具有 1993~1996 年共 4 年逐旬翻水量记录可资利用.采用丰县、沛县、铜山、睢宁、邳县、新沂站实测旬雨量.6~9 月份同旬水稻和秋旱作的灌溉水量分配比按经验定为 8:2,即 80%灌溉水田,20%灌溉秋旱田.4~5 月份全部灌溉麦田.作物各生育期的需水量由当地农业实验站资料分析得出,具体数据见表 4.

| 表 4 主要农作物生长期需水量                                         |   |       |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------------------------|---|-------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Table 4 Water consumption of crops during growth period |   |       |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | mm |
| 作物                                                      | 旬 | 各月需水量 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                                                         |   | 1     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 水 稻                                                     | 上 |       |   |    |    |    | 30 | 84 | 87 | 65 |    |    |    |
|                                                         | 中 |       |   |    |    |    | 80 | 87 | 87 | 70 |    |    |    |
|                                                         | 下 |       |   |    |    |    | 84 | 87 | 90 | 50 |    |    |    |
| 秋旱作物                                                    | 上 |       |   |    | 3  | 0  | 35 | 14 | 58 | 42 | 30 |    |    |
|                                                         | 中 |       |   |    | 3  | 0  | 35 | 14 | 58 | 42 | 30 |    |    |
|                                                         | 下 |       |   |    | 3  | 0  | 35 | 14 | 58 | 42 | 30 |    |    |
| 三 麦                                                     | 上 | 6     | 5 | 10 | 55 | 60 |    |    |    |    |    | 13 | 7  |
|                                                         | 中 | 6     | 6 | 20 | 55 | 60 |    |    |    |    |    | 13 | 6  |
|                                                         | 下 | 7     | 6 | 52 | 55 | 57 |    |    |    |    | 16 | 13 | 6  |

各类农作物旬缺水率按公式(8)计算.其中,秋粮作物考虑水稻、棉花和玉米,以主要生长期 6~8 月内连续两旬的最大缺水率作为秋粮缺水率;夏粮主要是三麦,考虑到三麦有一定的耐旱能力,以 4~5 月生长期的总缺水率作为夏粮缺水率.各类农作物缺水率与旱度的关系以历年的实际受旱成灾资料作为参考依据率定得出,具体见表 5.

表 5  作物生长期缺水率与旱度的关系

| Table 5  Relations between water deficiency ratio and dryness during crop growth period |           |           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 干旱程度                                                                                    | 水稻缺水率     | 秋旱作物缺水率   | 三麦缺水率     |
| 极  端                                                                                    | ≥0.85     | ≥0.90     | ≥0.95     |
| 严  重                                                                                    | 0.70~0.85 | 0.80~0.90 | 0.85~0.95 |
| 轻  微                                                                                    | 0.40~0.70 | 0.40~0.80 | 0.50~0.85 |
| 正  常                                                                                    | ≤0.40     | ≤0.40     | ≤0.50     |

公式(8)中前期旱情系数取值为:正常  $k=1.0$  ,轻旱  $k=0.9$  ,重旱  $k=0.8$  ,极旱  $k=0.7$  .灌溉沿程损失系数  $\eta=0.6$  .

2.3  模拟结果和检验

根据徐州市农业干旱模型和所定参数,模拟得到 1993~1996 年 4 年中徐州市各灌区不同作物的受旱灾度.1994 年是 90 年代徐州市最早年份,报灾资料比较充分,故以该年为例将模拟农作物受灾面积与实际统计报灾面积对比分析,结果见表 6.

表 6  1994 年农作物模拟受旱面积与实际报灾面积比较

| Table 6  Comparison of simulated area and recorded area of drought for 1994 |     |       |      |      |      | 10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|-------|------|------|------|---------------------------------|
| 农作物                                                                         | 统计源 | 秋旱作面积 | 受旱面积 | 轻旱面积 | 重旱面积 | 极旱面积                            |
| 水  稻                                                                        | 模拟  | 18.1  | 3.95 | 2.89 | 0.81 | 0.25                            |
|                                                                             | 报灾  | 18.1  | 4.80 | 3.23 | 1.20 | 0.37                            |
| 秋旱作物                                                                        | 模拟  | 48.1  | 30.6 | 18.2 | 10.1 | 2.26                            |
|                                                                             | 报灾  | 48.1  | 27.2 | 13.9 | 10.1 | 3.21                            |

3  农业干旱损失和灌溉效益评估

3.1  农业干旱损失计算

农业干旱损失的估算采用模拟计算途径.按国家统计局规定的区域农业产量或产值减少 10% 以下不算灾,减产 10%~30% 为轻旱灾,减产 30%~50% 为重旱灾,减产 50%~80% 为特大旱灾为基础分析模拟旱灾灾情.

农作物减产量计算公式为

$$G=(\beta_1A_1+\beta_2A_2+\beta_3A_3)V$$
 (9)

式中: $G$ ——某类农作物旱灾减产量,kg; $A_1,A_2,A_3$ ——某类农作物轻旱、重旱、极旱面积,hm<sup>2</sup>; $\beta_1,\beta_2,\beta_3$ ——轻旱、重旱、极旱面积某类农作物减产率,可分别按 20%、40%、60% 计; $V$ ——某农作物正常产量,kg/hm<sup>2</sup>.

农作物旱灾经济损失

$$S=\sum_{i=1}^mb_iG_i$$
 (10)

式中: $S$ ——农作物旱灾减产损失,元; $b_i$ ——第  $i$  类农作物单价,元/kg.

根据徐州市历年农作物统计资料分析,正常年份水稻平均产量为 8 250 kg/hm<sup>2</sup>,秋旱作物 3 750 kg/hm<sup>2</sup>,三麦 4 500 kg/hm<sup>2</sup>;农作物市场价格水稻 1.20 元/kg,秋旱作物 1.00 元/kg,三麦 0.90 元/kg.

1994 年报灾资料比较可靠和充分,灾情特点是夏旱连秋旱,主要影响水稻和秋作物的产量,故以该年为例模拟计算,结果见表 7.模拟损失与实际报灾损失对比分析,结果还是较为接近的.

表 7  1994 年旱灾损失及模拟结果

| Table 7  Drought loss record and simulated values for 1994 |     |        |        |        | 10 <sup>4</sup> kg |
|------------------------------------------------------------|-----|--------|--------|--------|--------------------|
| 农作物                                                        | 统计源 | 轻旱农田损失 | 重旱农田损失 | 极旱农田损失 | 合  计               |
| 水  稻                                                       | 模拟  | 4 763  | 2 684  | 1 221  | 8 668              |
|                                                            | 报灾  | 5 324  | 3 960  | 1 798  | 11 132             |
| 秋旱作物                                                       | 模拟  | 13 650 | 15 170 | 5 085  | 33 905             |
|                                                            | 报灾  | 10 435 | 15 180 | 7 230  | 32 845             |

3.2 农业灌溉效益估算

一般说来,对于某一作物,当其他条件相同时,在无灌溉与有灌溉情况下受旱损失的差值即可认为是灌溉效益.在实际条件下往往由于对比资料缺乏,难以确切地进行分析.利用干旱模型的模拟功能可以为合理地估算灌溉效益提供一种有效的手段.

应用徐州市农业干旱损失计算模型,按不灌溉和正常灌溉两种条件,分灌区计算农业受旱损失及其差值,推求得 1994 干旱年全市分县不同作物的灌溉效益,汇总结果见表 8. 根据计算结果,1994 年全区农业灌溉效益等价于减少粮食损失 2.67 亿 kg,按公式(10)估算,计人民币 3.04 亿元.

表 8 1994 年灌溉效益模拟计算结果  
Table 8 Simulated irrigation benefit for 1994

| 农作物  | 丰县  | 沛县   | 铜山    | 睢宁   | 邳县   | 新沂   | 全市    |
|------|-----|------|-------|------|------|------|-------|
| 水 稻  | 102 | 2370 | 8562  | 2274 | 2430 | 2554 | 18292 |
| 秋旱作物 | 0   | 708  | 2262  | 621  | 1477 | 3344 | 8412  |
| 合 计  | 102 | 3078 | 10824 | 2895 | 3907 | 5898 | 26704 |

4 结 语

为了客观地评价徐州市的旱灾情况,建立了徐州市干旱评估系统.其中,地区自然旱度评估采用了经改进的帕尔默旱度模式,以自然条件下地区实际降水与适宜降水之间的差值为基础分析评估自然旱度.农业干旱评估采用以水量平衡为基础的干旱数学模型,充分考虑各类作物在不同生长期的供需水平衡,灌溉抗旱措施的作用,以同期缺水率来分级判定旱情程度,干旱模型能够连续模拟农业旱情产生和发展的全过程,结合当时的社会经济情况,可以定量估算旱灾范围、灾情损失及抗旱效益.由徐州市干旱评估系统计算模拟的灾情与历史上旱灾记载并与典型灾害年实际报灾结果进行的比较表明,模拟结果基本上是合理的.由于系统依据的方法和原理是普遍适用的,只要进行适当的参数调整,可以推广到类似的半干旱地区.

参考文献：

[1] Alley W M. The Palmer drought severity index limitations and assumptions[J]. Climate Appl Meteorology, 1984, 23(7):1100~1109.

Index System for Agricultural Drought Estimation

XU Xiang-yang<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>, CHEN Xiao-jing<sup>2</sup>

( 1. College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;  
2. Nanjing Water Conservancy Design and Planning Institute, Nanjing 210008, China )

**Abstract** Natural drought evaluating equations are suggested for Xuzhou region by use of the Palmer drought mode. An agricultural drought mathematical model is established, by which the agricultural drought degree is determined and an agricultural drought process is simulated based on water deficiency ratio of crops. Drought regions, disaster losses and irrigation benefits are estimated, and the agricultural drought degree and the function of anti-drought measures are evaluated based on the information of Xuzhou region.

**Key words** : Palmer drought mode ; natural dryness ; agricultural drought ; evaluation