

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20190904

## · 技术方法 ·

# 湖南油菜春季涝渍灾变等级指标与灾损评估 \*

范雨娴<sup>1, 2</sup>, 霍治国<sup>1, 3\*</sup>, 尚 莹<sup>1</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 益阳市气象局, 湖南益阳 413000;

3. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044)

**摘要** [目的] 以湖南省油菜春季涝渍灾害为例, 创建基于涝渍过程的逐日灾变等级指标、灾害影响量化评价与灾损量化评估模型, 探索区域农作物涝渍灾变动态监测评估的天气学方法。[方法] 基于湖南省油菜春季涝渍灾变过程解析, 以过程灾变判别指标为基础, 采用基于假设的滚动模拟寻优、实际灾情验证与个例分析等方法, 厘定轻度涝渍与重度涝渍灾变的最佳阈值, 构建油菜春季涝渍过程逐日灾变等级指标; 利用多元回归等方法, 构建对应的灾害影响量化评价模型和减产率量化评估模型; 基于个例分析, 验证指标及模型结果与历史灾情记录的吻合情况。[结果] 湖南省轻度与重度涝渍灾变的最佳阈值为 1.44; 不同县涝渍灾变等级阈值存在一定差异, 平均受灾频率越低, 洪涝脆弱性越低, 防灾减灾能力越强, 阈值越高; 基于受灾天数和重灾天数的灾害影响指数都表现为结荚期涝渍对油菜减产率影响更大, 且两者的空间分布形势都与各县年平均减产率的空间分布形势基本一致; 个例中, 基于指标的全省重灾站数百分比的时间演变与实际灾情记录一致, 减产率量化评估模型的结果也与实际灾损相匹配。[结论] 油菜涝渍灾变等级指标、灾害影响指数及减产率量化评估模型, 实现了对涝渍灾变过程等级的动态监测、影响与灾损的量化评估, 为基于天气学方法开展区域油菜涝渍灾变等级的动态监测提供了理论支持和方法支撑, 同时为历史灾情资料的补充和量化及灾情记录的再分析提供了可行的思路。

**关键词** 涝渍灾害 灾变过程 等级指标 灾损评估 油菜**中图分类号:**S422 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9121[2019]09037-11

## 0 引言

油菜是世界上重要的油料作物之一, 随着我国人均耕地面积的不断减少, 油菜单产的提高越来越受到重视<sup>[1]</sup>。油菜涝渍灾害, 通常由持续阴雨或致洪暴雨引起, 指长时间地表积水或土壤水分饱和造成油菜根系长期缺氧, 进而影响其生长发育, 造成减产甚至绝产的农业气象灾害, 是长江中下游地区油菜减产、质量降低的重要原因<sup>[2-3]</sup>, 其中又以春季涝渍灾害对油菜产量的影响最为严重<sup>[4-7]</sup>。因此, 开展油菜涝渍灾害监测及灾损评估具有重要的科学意义和应用价值。

湖南油菜生长期跨秋冬春三季, 春季湖南油菜正处于产量形成的关键时期, 此时恰逢春雨期和汛期<sup>[8]</sup>, 故极易遭受涝渍灾害。特别是蕾薹期和花期湿害, 不但影响油菜生长速度, 使株高、茎粗、单株一次分枝数、单株有效角果数及千粒重减少, 菜籽含油量降低<sup>[9-12]</sup>; 还易引发病害如开花期菌核病的爆发<sup>[13]</sup>, 导致减产和菜籽品质降低。

涝渍指标广泛应用于涝渍灾害强度与灾损的灾后记录、灾中监测及灾前预警等<sup>[14]</sup>, 是国内外涝渍灾害研究领域的热点。涝渍指标的等级即指标与灾害强度或灾损的对应关系, 其中形态学指标着眼于作物器

---

**收稿日期:** 2018-12-14**作者简介:** 范雨娴(1993—), 女, 湖南益阳人, 硕士。研究方向: 农业气象灾害风险预测与评估研究**※通讯作者:** 霍治国(1965—), 男, 河南平舆人, 研究员。研究方向: 气候资源利用和农业气象灾害、病虫害预测与评估研究。Email: huozg@cma.gov.cn**\*资助项目:** 中国气象科学研究院科技发展基金项目“气候变化背景下粮油作物气象灾害指标构建及演变规律研究”(2018KJ012); “十二五”国家科技支撑计划课题“洪涝灾害监测预警与防控与应急关键技术研究与应用”(2012BAD20B02)

官等对涝渍灾害的反应变化<sup>[15-16]</sup>，受涝指标表示由控制试验淹水历时、积水深度等涝渍致灾因子与产量损失或作物敏感性的关系<sup>[17-20]</sup>，天气气候指标则将天气气候尺度的致灾因子与实际受灾情况进行匹配<sup>[21-24]</sup>，农业气象指标在天气气候指标的基础上进一步考虑作物及其不同生育期的易损性关系来得到涝渍等级<sup>[6, 25, 26]</sup>等。油菜涝渍指标以天气气候指标与农业气象指标为主，多针对连阴雨导致的涝渍灾害，用于判断全生育期<sup>[6, 27]</sup>、自然旬和自然月<sup>[28]</sup>或一次过程<sup>[21]</sup>的平均受灾强度，无法用于灾前预警与灾中监测。故范雨娴等<sup>[29]</sup>基于连阴雨及致灾暴雨过程中致灾因子的动态累积，构建了逐日动态的油菜春季涝渍过程灾变判别指标，用于灾害发生与否的实时动态监测，但该指标缺乏对灾害程度的监测。

减产率是受灾程度及灾损最直接的表现形式，目前大部分指标构建时仅将其用于确定致灾因子<sup>[30]</sup>或验证指标<sup>[21]</sup>，故文章从减产率与涝渍灾害程度的关系出发，以湖南油菜春季涝渍灾变判别指标<sup>[29]</sup>为基础，以灾害影响是否可逆为分级标准，采用基于假设的滚动模拟寻优方法，通过引入减产率数据，构建基于过程的逐日灾变等级指标及基于涝渍灾变等级的减产率和灾害影响量化评估模型，为区域涝渍灾变动态监测及灾损量化评估提供理论支持和方法支撑。

## 1 研究区与数据

该文选择湖南冬油菜种植区为研究区（图1），对湖南油菜春季涝渍灾变判别指标<sup>[29]</sup>进行扩展分级；根据相关研究<sup>[6, 7, 29]</sup>，涝渍灾害对湖南油菜的主要影响时段为开花期（3月上旬至下旬）、结荚期（4月上旬至下旬）及成熟期（5月上旬至中旬），考虑到油菜的收晒及实际灾情的出现时间，研究过程中将成熟期影响时段后延一旬（5月上旬至下旬）；与文献[29]一致。

油菜产量数据来源于中国种植业信息网的产量数据库，包含1957—2012年湖南省省级油菜籽单产及澧县、南县等20县市（图1）的县级单产数据。气象数据来源于国家气象信息中心中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集，包含种植区内97个气象站（图1）1961—2012年的逐日降水及日照时数资料。缺测值使用Cressman空间插值<sup>[31]</sup>进行补充。

## 2 研究方法

### 2.1 油菜涝渍灾变过程及分级

油菜涝渍灾变过程：从致灾降水过程开始，致灾因子累积灾变，到降水结束，恢复无灾水平的全过程（图2）。

轻度涝渍灾害：简称轻灾，对应灾害影响可逆或部分可逆的涝渍灾害。在一次灾变过程中，将致灾降水过程开始到致灾因子累积达到受灾水平的过程称为轻度灾变。轻度灾变后受灾程度为轻灾，涝渍灾害虽会对油菜生长发育造成一定影响，但可以通过承灾体的自我调节或人为后期补救等减轻或避免，对最终减产率的影响相对较小。



图1 湖南省97个气象站、油菜种植区及有产量数据的县分布

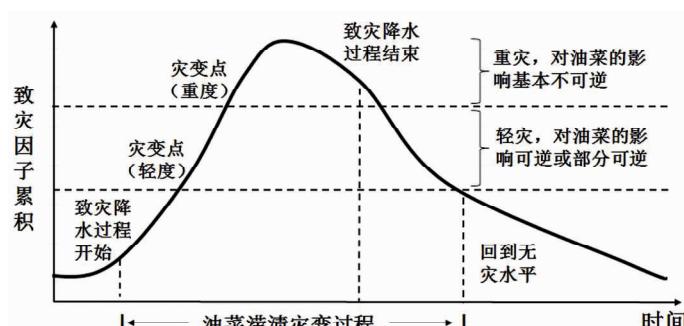


图2 湖南省油菜涝渍灾变过程及分级

重度涝渍灾害:简称重灾,对应灾害影响基本不可逆的涝渍灾害。轻度灾变后,若致灾因子继续累积,直至超出作物自我调节和人为补救的承受范围,则将这一过程称为重度灾变。重度灾变后受灾程度为重灾,灾害影响将很难通过后续补救恢复,直接影响油菜最终减产率。

从定义及统计学角度出发,重灾与最终减产率的相关性好,轻灾与最终减产率的相关性相对重灾低,且两者差异比较明显。

## 2.2 减产率的计算

相对气象产量是气象产量与趋势产量的比值,计算公式为:

$$y_r = \frac{y - y_t}{y_t} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中,  $y_r$  表示相对气象产量,  $y_t$  表示趋势产量,  $y$  为实际产量。其中,  $y_t$  通过九点二次滑动平均法求得。

将减产率  $y_d$  定义为气象条件对产量的负面影响,若相对气象产量为负值,减产率为  $y_r$  的绝对值,若  $y_r$  为正,则认为减产率为 0,即:

$$y_d = \begin{cases} -y_r, & y_r < 0 \\ 0, & y_r \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

该文产量数据的范围为 1957—2012 年,由于九点二次滑动平均会使前后各 4 年的趋势产量数据损失,故减产率的范围为 1961—2008 年。

## 2.3 油菜春季涝渍过程灾变判别指标

湖南省油菜春季涝渍过程灾变判别指标 ( $I$ ) 是以有效累积降水量与连阴雨日数为致灾因子的逐日动态指标,其计算公式<sup>[29]</sup>为:

$$I = \begin{cases} 0.42 (D/D_i) + 0.37 (T_E/T_{Ei}), & i=1 \\ 0.17 (D/D_i) + 0.60 (T_E/T_{Ei}), & i=2 \\ 0.04 (D/D_i) + 0.70 (T_E/T_{Ei}), & i=3 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $i=1, 2, 3$  分别对应开花期、结荚期及成熟期;  $T_E$  (mm) 表示有效累积降水量,采用逐日降水资料滚动计算:

$$T_E(j) = t(j) + 0.899 T_E(j-1) \quad (4)$$

$T_E(j)$  表示第  $j$  日的  $T_E$ ,  $t(j)$  为当天降水量。  $D$  表示连阴雨日数,计算公式为:

$$D(j) = \begin{cases} D(j-1) + 1, & s(j) \leq 2H \\ 0, & s(j) > 2H \end{cases} \quad (5)$$

$D(j)$  表示第  $j$  日的连阴雨日数,  $s(j)$  表示第  $j$  日的日照时数。 $T_{Ei}$ 、 $D_i$  为对应生育期有效累积降水量与连阴雨日数的气候平均值。

当  $I \geq 1$  时, 当天油菜为受灾状态,  $I < 1$  时, 为无灾状态。

## 2.4 涝渍灾变等级阈值的计算

基于涝渍灾变判别指标的值,将涝渍灾变划分为轻度涝渍灾变与重度涝渍灾变,采用基于假设的滚动模拟寻优法,以 0.02 为步长,依次统计两者轻灾与重灾阈值为 1.02, 1.04, …, 2.20 时,湖南 97 个站点 1961—2008 年开花期、结荚期、成熟期轻度与重度涝渍灾害的年站均受灾天数。如假设阈值为 1.04 时,则计算的轻灾范围为  $I = [1, 1.04]$ ,重灾范围为  $I = [1.04, \infty)$ ,以此类推。

构建不同假设阈值时 1961—2008 年湖南油菜减产率与开花期、结荚期、成熟期轻灾或重灾天数的回归关系式,使用决定系数  $R^2$  检验轻灾或重灾与减产率的回归方程的显著性,其计算公式为:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) (\hat{y}_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

检验量  $F$  的计算公式为:

$$F = \frac{R^2}{(1-R^2)} \frac{(n-d-1)}{d} \quad (7)$$

式(7)中,  $d$  为自由度即因子量,  $n$  为数据量,  $P$  为  $F$  分布中大于检验值  $F$  的概率, 即因子与预报量不存在线性关系的概率。若  $P < 0.05$  则回归方程显著,  $P$  越小,  $R^2$  越大, 回归方程越显著, 因子与预报量的相关性越好。根据灾害学中部分可逆灾害与不可逆灾害的思想, 挑选减产率与重灾的回归方程最显著、轻灾和重灾与减产率的相关性差异大的计算阈值作为重度涝渍与轻度涝渍的临界值。

## 2.5 涝渍灾害影响评价模型构建

基于涝渍灾变过程的相关定义, 涝渍受灾天数对油菜减产率有正影响, 而重度涝渍对最终减产率的影响较大。以油菜涝渍灾变等级指标为基础, 分别计算油菜减产率与受灾天数或重灾天数的回归方程。以回归系数的归一化值作为不同生育期涝渍灾害的影响权重。构建基于受灾天数的油菜春季涝渍灾害影响评价模型  $M_1$ :

$$M_1 = \sum_{i=1}^3 a_i p_i \quad (8)$$

式(8)中,  $i=1, 2$  和  $3$ , 对应油菜开花期、结荚期及成熟期,  $a_i$  为该生育期涝渍灾害对油菜减产率的影响权重,  $p_i$  为该生育期内涝渍受灾天数, 用 1961—2008 年油菜春季涝渍灾变等级指标判别受灾的年站均受灾天数来表示。同理构建基于重灾天数的油菜春季涝渍灾害影响评价模型  $M_2$ :

$$M_2 = \sum_{i=1}^3 a_{i2} p_{i2} \quad (9)$$

式(9)中,  $i=1, 2$  和  $3$ , 对应油菜开花期、结荚期及成熟期, 下标 2, 代表重度涝渍灾害,  $a_{i2}$  为该生育期内重度涝渍灾变对油菜减产率的影响权重,  $p_{i2}$  为该生育期内涝渍重灾天数, 同样采用 1961—2008 年油菜春季涝渍灾变等级指标判别的年站均重灾天数来表示。

## 3 结果与分析

### 3.1 油菜春季涝渍过程灾变等级指标构建

依次计算春季涝渍过程灾变等级指标  $I$  的轻灾与重灾假设阈值  $m = 1.02, 1.04, \dots, 2.20$  时, 1961—2008 年开花期、结荚期、成熟期轻灾 ( $I = [1.0, m]$ ) 与重灾 ( $I = [m, \infty)$ ) 的年站均受灾天数。将 1961—2008 年湖南油菜减产率与不同假设阈值时开花期、结荚期、成熟期轻灾或重灾受灾天数进行多元回归分析, 并分别检验轻灾或重灾与减产率的回归方程的显著性。得到不同阈值时回归方程的决定系数  $R^2$  及线性关系不显著的概率  $P$ , 如图 3。

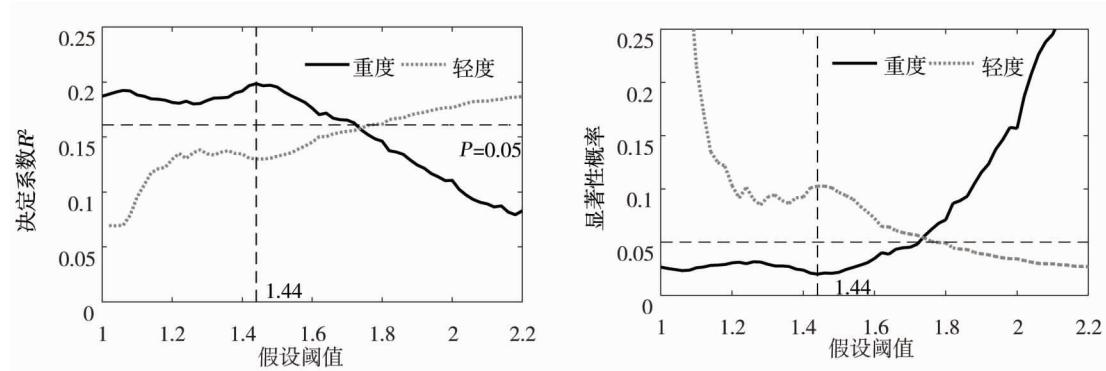


图 3 不同假设阈值时轻度及重度涝渍受灾天数与减产率相关关系的显著性检验

结果表明, 重灾范围为  $I = [1.44, \infty)$  时, 重灾天数与减产率相关性最好, 通过 0.05 水平的显著

性检验,且轻灾天数、重灾天数与减产率相关性差异最大。在轻灾与重灾假设阈值  $m$  在  $[1, 1.20]$  范围内时,重灾天数与油菜减产率的相关性变化不大,而轻灾天数与油菜减产率的相关性随假设阈值的增大而变强,这是因为数据量的增加使计算结果趋向于实际;从重灾天数与减产率的相关性看,假设阈值  $m$  小于 1.44 时,重灾天数 ( $I = [m, \infty)$ ) 与减产率的相关性较重灾范围为  $I = [1.44, \infty)$  时低,这说明  $I = (m, 1.44)$  范围内的灾害与减产率的相关性相对  $I = [1.44, \infty)$  时低;假设阈值  $m$  大于 1.44 时,随着  $m$  的增大重灾天数 ( $I = [m, \infty)$ ) 与减产率回归方程的决定系数基本呈均匀减小,这说明  $I = [1.44, \infty)$  范围内的灾害对减产率的影响基本相同,都有较大影响。故认为  $I = 1.44$  是涝渍灾害对减产率有较大影响的下限,表现出了湖南省对油菜春季涝渍灾害的易损性及防灾减灾能力。

综上所述,以油菜涝渍灾变判别指标为基础,以 1.44 为阈值,可以将湖南省油菜涝渍灾害划分为轻度与重度两级,扩展得到油菜春季涝渍过程灾变等级指标如表 1。

### 3.2 县级油菜涝渍灾变等级阈值计算

由于无实际湖南省的油菜春季涝渍灾变等级资料,故无法对灾变等级指标进行直接验证,同时湖南省的油菜春季涝渍易损性及防灾减灾能力目前并没有太多具有可比性的指标或资料,大多洪涝脆弱性评估都将洪涝受灾频率作为重要影响因子,无法分离出易损性指标与防灾减灾能力指标,很难直接对等级阈值进行间接验证。故使用县级减产率计算县级涝渍灾变等级阈值,进行相互比较。

在有产量数据的 20 个县市中,筛选出产量数据质量较高,稳定性较好的长沙、湘潭等 8 个县,使用滚动模拟寻优法,分别计算各站轻度涝渍灾变与重度涝渍灾变的最佳阈值,结果如表 2。

结果表明,不同县涝渍灾变等级阈值存在一定差异,且能表现出当地对油菜春季涝渍灾害的易损性及防灾减灾能力。如长沙、湘潭地区防灾抗灾能力强,故阈值高;桃源与祁阳位于江流中游,泄洪压力较小,而且受灾频率不高<sup>[29]</sup>,故阈值也很高;湘阴与醴陵灾变等级阈值略低,这可能是因为其地形地势等对洪涝灾害的脆弱性过高而受灾频率大,如醴陵境内的主要河流渌江拐过九道十八湾,使沿岸很容易受洪涝侵害;溆浦、道县境内多为山地,地形脆弱性高,防灾减灾能力弱,而且是受灾频率较高的地区<sup>[29]</sup>,故洪涝脆弱性高,灾变等级阈值最低。

综上所述,涝渍灾变等级阈值大小与受灾频率、地形对洪涝脆弱性的影响、防灾减灾能力等有一定的关系,平均受灾频率越低,洪涝脆弱性越低,防灾减灾能力越强,阈值越高,故认为此方法计算涝渍灾变阈值具有可行性,由全省油菜减产率与全省站均受灾天数计算得到的阈值 1.44,正是湖南省涝渍受灾频率、地形对洪涝脆弱性的影响、防灾减灾能力等的平均体现。

### 3.3 油菜春季涝渍灾变等级频率空间分布

使用涝渍灾变等级指标分生育期统计 1961—2008 年湖南省 97 个气象站点轻度与重度涝渍年均受灾频率,得到不同等级涝渍受灾频率空间分布如图 4。

可见,随着生育期的推进,同等级涝渍灾变受灾频率的空间分布形势由一个位于湖南东部及南部的高值区分裂为湘中以北及湘南两个高值区,对减产率有显著影响的重灾的高发区逐渐缩小,同时,同一生育期轻灾与重灾的高发区基本一致,这是因为实际情况中灾害程度具有连续性。

开花期轻灾频率较重灾频率小,这是因为在开花期,多阴雨是长江中下游的重要气候特点之一,主要致灾因子为连阴雨日数,连续阴雨时,受灾程度一直维持在较高水平,一旦放晴,能较快恢复到无灾水平。从空间分布来看,开花期涝渍主要表现为南多北少,东多西少。

结荚期受灾频率的空间差异较大,这主要是由于各地进入汛期的时间存在差异。高发区较开花期扩

表 1 湖南省油菜春季涝渍过程灾变等级指标分级标准

等级	无灾	受灾	
		轻度	重度
范围	(0, 1.00)	[1.00, 1.44)	[1.44, $\infty$ )

表 2 各县轻度与重度涝渍灾变等级阈值

站号	县名	等级阈值	站号	县名	等级阈值
57661	桃源	1.58	57773	湘潭	1.56
57673	湘阴	1.24	57781	醴陵	1.26
57687	长沙	1.56	57868	祁阳	1.52
57752	溆浦	1.18	57965	道县	1.14

大，受灾频率发展为湘中及湘南两个高值区，高值中心为长沙东部、湘潭、永州与郴州南部，轻灾频率在 0.18 以上，重灾频率超过 0.09。

成熟期由于湖南绝大部分地区都已进入汛期，故在空间分布上，受灾频率的空间差异相对小。由于成熟期油菜的抗灾能力强，故虽受灾频率大但重灾频率较低。

从 3 生育期总频率来看，湘潭与永州南部轻灾变频率最多，超过 0.18；永州南部重灾频率最多，超过 0.12。

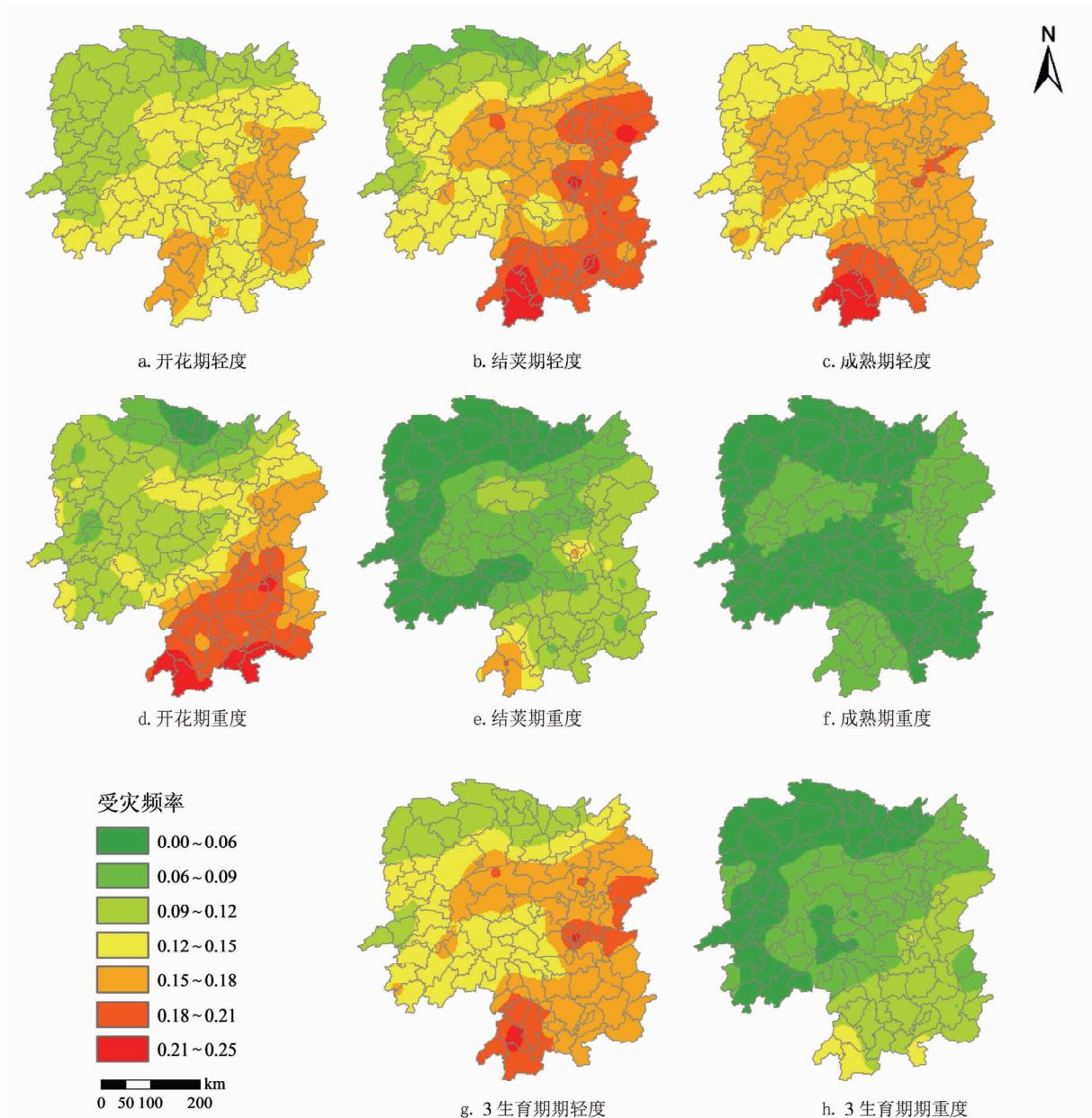


图 4 1961—2008 年湖南省油菜春季涝渍受灾频率空间分布

### 3.4 灾害影响评价模型

基于油菜涝渍灾变等级指标，统计 1961—2008 年每年各生育期站均涝渍总受灾天数 ( $I = (1.00, \infty)$ ) 与重灾天数 ( $I = (1.44, \infty)$ )，分别与减产率进行多元线性回归，得到回归方程为：

$$y_d = -3.65 + 0.17p_1 + 0.65p_2 + 0.16p_3 \quad (10)$$

$$y_d = -0.87 + 0.19p_{12} + 1.33p_{22} + 0.24p_{32} \quad (11)$$

式(10)中,  $y_d$  为减产率,  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  对应开花期、结荚期、成熟期涝渍受灾天数;  $p_{12}$ 、 $p_{22}$ 、 $p_{32}$  对应开花期、结荚期、成熟期重度涝渍受灾天数; 式(10)的决定系数  $R^2 = 0.1812$ ,  $P = 0.03$ ; 式(11)的决定系数  $R^2 = 0.1985$ ,  $P = 0.02$ , 两者都通过 5% 显著性检验。可以看出, 式(11)  $R^2$  较大,  $P$  值较小, 即重度涝渍与减产率的相关关系更好。

将式(10)~(11)回归系数进行归一化, 得到各生育期涝渍灾害对油菜减产率的影响权重:  $a_1 = 0.18$ ,  $a_2 = 0.66$ ,  $a_3 = 0.16$ ;  $a_{12} = 0.11$ ,  $a_{22} = 0.75$ ,  $a_{32} = 0.14$ 。分别建立油菜春季涝渍灾害影响评价指数  $M_1$ 、 $M_2$ :

$$M_1 = 0.18p_1 + 0.66p_2 + 0.16p_3 \quad (12)$$

$$M_2 = 0.11p_{12} + 0.75p_{22} + 0.14p_{32} \quad (13)$$

### 3.5 两组模型的对比与减产率量化评估

计算各站点油菜春季涝渍灾害影响评价指数  $M_1$ 、 $M_2$ , 空间分布如图 5 所示。

可知,  $M_1$  与  $M_2$  的空间分布形势十分相似, 高值区也能相互匹配。油菜春季涝渍灾害对油菜的影响, 呈东南向西北逐渐减小的趋势, 有湘中及湘南两个高值区。长沙东部、株洲中部及北部、湘潭、衡阳、永州东部及郴州  $M_1$  在 8.1 以上,  $M_2$  在 5.4 以上, 是油菜春季涝渍灾害最严重的地区, 也是 1961—2008 年涝渍灾害对油菜产量影响最大的区域。

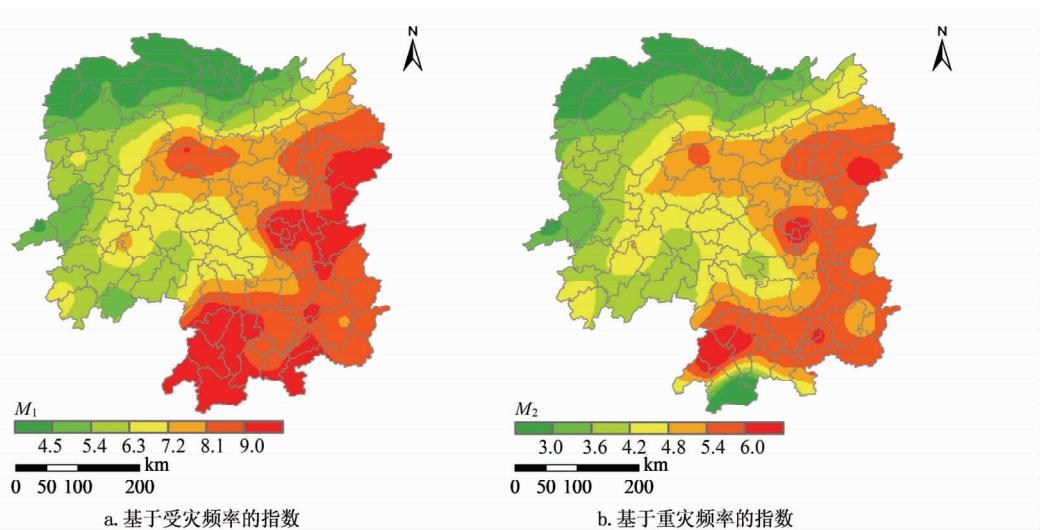


图 5 1961—2008 年湖南省油菜春季涝渍灾害影响评价指数  $M_1$ 、 $M_2$  空间分布

从  $M_1$ 、 $M_2$  的表达式(12)、(13)来看, 两者都表现为结荚期涝渍或重度涝渍对油菜减产率的影响最大。联系涝渍灾害的时空分布规律、气候特点及油菜生长规律, 成熟期已经度过营养物质的积累期, 油菜对涝渍灾害的敏感性较小, 故涝渍灾害对产量的影响小, 而开花期虽涝渍频率大, 油菜对涝渍灾害敏感性高, 但由于 3 月湖南以持续阴雨为主, 且每年都有发生, 加之避灾难度较暴雨洪涝小, 故常提前进行防灾减灾工作, 在一定程度上减轻了涝渍灾害对油菜产量的影响。

将式(10)~(11)变换为减产率与灾害影响指数的关系, 得到减产率量化评估模型:

$$\begin{cases} y_{d1} = 0.98M_1 - 3.65 \\ y_{d2} = 1.76M_2 - 0.87 \end{cases} \quad (14)$$

在式(14)中, 灾害影响指数  $M_1$  与  $M_2$  的系数都为正值, 证明涝渍灾害对油菜减产率具有正影响;

从系数大小来看，同样受灾天数时，重度涝渍灾害对油菜产量的影响高于平均强度涝渍灾害的影响，这都与涝渍灾害对油菜生产的影响特点一致。从常数项来看，由于在计算过程中将相对气象产量为正值部分的减产率令为0，故常数项的理想值为0，在式（14）中  $M_2$  与减产率的关系式常数项更接近0。

为更准确地讨论灾害影响指数与减产率的关系，计算1961—2008年长沙、湘潭等20县市的平均减产率，得到空间分布图如图6。图6中减产率较大的县市基本与图5中湘中及湘南的灾害影响指数的高值区匹配，减产率较小县市也与灾害影响指数的低值区匹配。

综上所述， $M_1$  与  $M_2$  都可以用于灾害影响评价及减产率量化评估，两者分析结果较一致，但相比而言，涝渍灾害影响指数  $M_2$  的准确度相对更高。

### 3.6 个例分析

以1992年为例，在《中国气象灾害大典》（湖南卷）<sup>[32]</sup>的记载中，当年3—5月的灾情主要为：“3月12—26日全省持续阴雨天气”、“4月20—23日湘北部分地区出现暴雨”、“5月1—6日，芷江、会同、古丈、保靖等地强降雨”。对油菜的主要影响为：“油菜授粉受抑，减产1~2成”。

涝渍灾变等级指标及减产率量化评估模型的评估结果与实际描述对比如表3，当年3—5月受灾站数占全省总站数（97站）的百分率随时间的变化如图7。从受灾天数看，由指标判断得到的受灾天数与实际灾情描述基本一致，开花期站均重灾天数最多。从受灾站数占总站数的百分率来看，当年最严重的涝渍灾害出现在3月中下旬，油菜处于开花期，3月中旬起湖南涝渍受灾与重灾站数快速上升，在3月下旬受灾近100%，重灾也在80%以上，此次涝渍灾害影响一直延续到4月上旬，与灾情记录中的全省持续阴雨天气，油菜授粉受抑对应，4月下旬及5月上旬的局地强降水也有体现，但5月中旬的局地受灾并没有记录对应，考虑可能因为此时油菜处于收获阶段，局地涝渍灾害对单产的影响小，故未做记录。从减产率来看，根据趋势产量计算的减产率为3.71%，减产率量化评估模型的计算结果与之接近，其中，基于受灾天数的量化减产率稍大，为4.26%，基于重灾天数的量化减产率稍小为3.20%，这是因为基于受灾天数时，没有排除轻灾造成的可逆影响，而基于重灾天数时，则忽略了轻灾影响没有恢复的部分。从灾损看，记录为减产1~2成，由于农业灾情评估通常以最近的正常年为参考，与该文减产率并不一致，为对比减

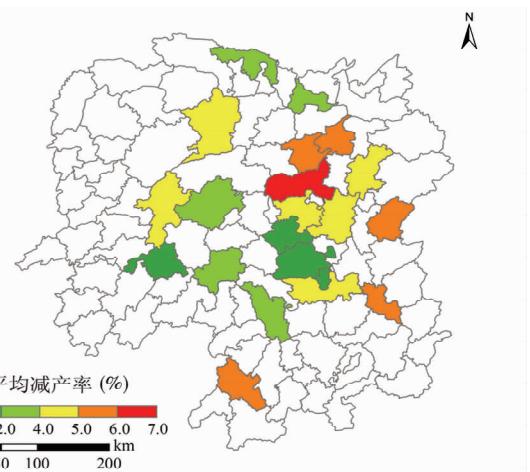


图6 1961—2008年湖南省20县市油菜年平均减产率的空间分布

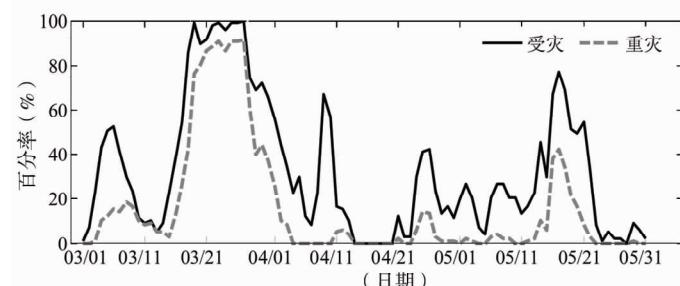


图7 1992年3—5月湖南省油菜涝渍受灾站数占总站数的百分率随时间的变化

表3 基于涝渍灾变等级指标的1992年春季湖南省站均受灾天数及减产率与实际灾情记录的对比

	开花期天数 (d)	结荚期天数 (d)	成熟期天数 (d)	减产率 (%)	农业灾情评估灾损 (%)
指标指示受灾	16.73	5.93	7.60	4.26	16.97
指标指示重灾	11.77	1.02	1.99	3.20	16.05
灾情记录	3月12—26日	4月20—23日	5月1—6日	—	1~2成

产率与记录的灾损，将计算 1992 年减产率涉及的 1988—1996 年单产进行 M-K 突变检验（图 8），结果表明，1991 年湖南油菜单产发生了突变，同时根据文献 [32] 的记载，1992 年、1993 年油菜生长期受灾严重，1994 年对油菜为基本无灾年，故农业灾情评估时 1992 年灾损的参照标准应是 1994 年。将 1994 年单产作为参照产量，1992 年实际灾损为 16.49%，根据两组模型计算的减产率逆推的灾损分别为 16.97%、16.05%，与灾情记录一致。

综上所述，涝渍灾变等级指标对油菜受灾时间及涝渍灾害对油菜产量的主要影响时段有较好的指示作用；在与农业灾情评估方法统一后，实际灾损及由减产率量化评估模型逆推出的灾损结果与文献记录基本相同；故灾变等级指标的演变与减产率量化评估与实际灾情记录有很高的致一致性。

#### 4 结论与讨论

(1) 该文利用减产率与受灾程度及灾害强度与灾害影响可逆性的相关关系，将湖南省涝渍灾变判别指标的受灾等级分为轻度与重度，并据此构建了灾害影响评价模型与减产率量化评估模型，据此进行了个例分析，主要结论如下：轻度涝渍与重度涝渍的阈值大小体现了湖南省油菜涝渍受灾频率、地形、防灾减灾能力等对涝渍脆弱性的影响，各县市的阈值与湖南省的平均阈值有一定差异，表现为平均受灾频率越低，洪涝脆弱性越低，防灾减灾能力越强，阈值越高；基于受灾天数和基于重灾天数计算的灾害影响评价模型和减产率量化评估模型都可以很好的表现涝渍灾害的影响并运用于减产率量化评估，但基于重灾的模型准确度更高；通过个例分析发现，涝渍灾变等级指标的大小与等级能指示出一段连续时间内油菜涝渍灾害的起止时间和影响油菜产量的主要时段，减产率量化评估模型能表现出实际灾损程度，在统一参照标准后，与实际灾损记录匹配。

(2) 该文通过耦合产量数据与灾情数据，构建分级指标，使指标能一定程度上体现防灾减灾能力、地形脆弱度等因素的影响，指标的针对性进一步提高。与一般意义上的分级指标如涝渍判别系数  $Q_w^{[28]}$ 、油菜生长期连阴雨指标<sup>[6]</sup>不同，该文并不是针对一个时段或一次过程灾害总强度的分级，而是针对单日灾害程度的分级，可以更细致的表示出一次灾变过程中受灾程度的变化和影响范围的变化，将离散的对过程、对时段的判断转变为连续的逐站逐日判别，为实时监测灾害强度、影响范围、分析油菜涝渍灾害的时空演变情况等提供了理论支撑。同时，与常用的根据气象灾害强度<sup>[21]</sup>或根据灾情资料的描述<sup>[33]</sup>进行分级不同，该文的分级依据是与最终减产率的关系，通过分离出对于油菜减产率影响显著的重度涝渍灾害，准确的定位涝渍灾害对油菜产量产生不可逆影响的起止时间，对于区域抗灾措施的决策等具有重要科学意义。通过灾害影响评价模型和减产率量化评估模型的研究，证明了研究方法及模型的可行性和适用性，为灾害影响评价及灾害影响的量化评估提供了方法支持。通过个例分析，反映出指标及模型与历史灾情资料的匹配程度，为灾情记录的补充及量化，历史灾情资料的再分析提供了新思路。

(3) 不足的是，与目前大部分已有涝渍指标将涝渍灾害分为轻度、中度及重度 3 级不同，该文构建分级指标时，只划分出了轻度与重度两个等级，有待对指标等级进行更加精细的划分。由于资料的限制，指标构建时虽考虑了产量及气象因子等的影响，但未具体量化品种、地形、防灾减灾能力等的影响，也未将气象因子与直接影响油菜生长的淹水深度与淹水、渍水历时相联系<sup>[16,18,34]</sup>，利用相关模型如 FloodArea 模型<sup>[35]</sup>等将气象因子与淹水渍水过程相联系也是优化指数与模型的方向。

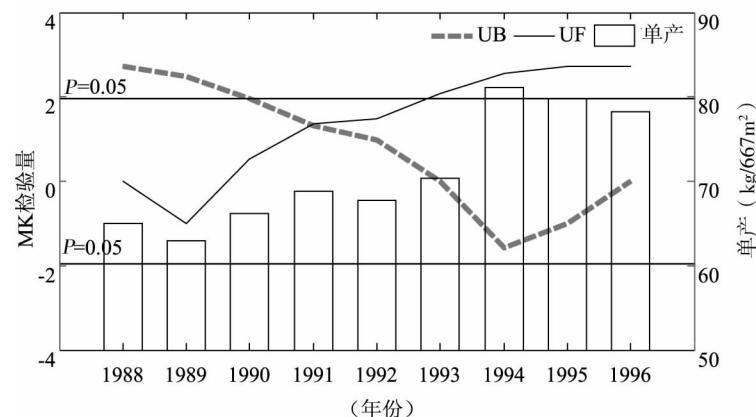


图 8 1988—1996 年湖南省油菜单产及 M-K 突变检验

## 参考文献

- [1] 蔡承智, 王芳, 莫洪兰, 等. 基于 ARIMA 模型的我国油菜单产预测分析. 中国农业资源与区划, 2018, 39 (1): 71–76.
- [2] 霍治国, 王石立. 农业和生物气象灾害 (气象灾害丛书). 北京: 气象出版社, 2009.
- [3] Grassini P, Indaco G V, Pereira M L, et al. Responses to short-term waterlogging during grain filling in sunflower. Field Crops Research, 2007, 101 (3): 352–363.
- [4] 许孟会, 赵辉, 王晋, 等. 春季低温连阴雨对农业生产的影响及防御. 湖南农业科学, 2008 (6): 63–65.
- [5] 朱建强, 张文英, 潘传柏, 等. 几种作物对涝渍胁迫的敏感性试验研究. 灌溉排水学报, 2000, 19 (3): 42–46.
- [6] 韩沁哲, 罗伯良, 周伟, 等. 湖南省油菜生长期连阴雨气象灾害发生强度的时空特征. 湖南农业科学, 2012 (19): 93–96.
- [7] 陆魁东, 彭莉莉, 黄晚华, 等. 气候变化背景下湖南油菜气象灾害风险评估. 中国农业气象, 2013, 34 (2): 191–196.
- [8] 湖南省气象局资料室. 湖南农业气候. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1981.
- [9] 谭筱玉, 程勇, 郑普英, 等. 油菜湿害及耐湿性机理研究进展. 中国油料作物学报, 2011, 33 (3): 306–310.
- [10] Boem F H G, Lavado R S, Porcelli C A. Note on the effects of winter and spring waterlogging on growth, chemical composition and yield of rapeseed. Field Crops Research, 1996, 47 (2–3): 175–179.
- [11] 胡立勇, 丁艳锋. 作物栽培学. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [12] 张文英, 朱建强, 郭显平, 等. 花果期持续受渍对油菜生长、产量与含油量的影响. 长江流域资源与环境, 2003, 12 (2): 194–197.
- [13] 胡官庆, 吴应元, 宋周元, 等. 油菜湿害表现及生理机制与预防. 安徽农业科学, 2000, 28 (2): 171.
- [14] 霍治国, 范雨娴, 杨建莹, 等. 中国农业洪涝灾害研究进展. 应用气象学报, 2017 (6): 641–653.
- [15] 李翔, 赵金萍. 连续淹水对毛桃幼苗形态及部分生理指标的影响. 现代农业科技, 2010 (15): 129–130, 133.
- [16] 宋丰萍. 渍水对油菜生物学性状及产量品质的影响. 华中农业大学, 2008.
- [17] Hiler E A. Quantitative evaluation of crop-drainage Requirements. Amer Soc Agr Eng Trans Asae, 1969, 12 (4): 0499–0505.
- [18] 王矿, 王友贞, 汤广民. 油菜花芽期涝渍胁迫对产量要素的影响. 中国农村水利水电, 2010 (8): 83–84, 90.
- [19] Evans R O, Skaggs R W, Sneed R E. Normalized crop susceptibility factors for corn and soybean to excess water stress. Transactions of the ASAE, 1990, 33 (4): 1153–1161.
- [20] Kar G, Sahoo N, Kumar A. Deep-water rice production as influenced by time and depth of flooding on the east coast of India. Archives of Agronomy & Soil Science, 2012, 58 (6): 573–592.
- [21] 刘瑞娜, 杨太明, 陈金华, 等. 安徽省春季连阴雨分布特征及其对油菜产量影响评估. 中国农学通报, 2012, 28 (34): 252–256.
- [22] Weggel J R. Are Floods on the Delaware River Getting Worse? Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16 (3): 263–265.
- [23] Subash N, Singh S S, Priya N. Extreme rainfall indices and its impact on rice productivity—A case study over sub-humid climatic environment. Agricultural Water Management, 2011, 98 (9): 1373–1387.
- [24] Wu H, Hayes M J, Weiss A, et al. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China - Z Index and the statistical Z - Score. International Journal of Climatology, 2001, 21 (6): 745–758.
- [25] Yang J, Huo Z, Wu L, et al. Indicator-based evaluation of spatiotemporal characteristics of rice flood in Southwest China. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 230: 221–230.
- [26] 霍治国, 盛绍学, 贺楠, 等. QX/T 107—2009, 冬小麦、油菜涝渍等级. 北京: 气象出版社, 2009. 5–6.
- [27] 鞠英芹, 杨霏云, 马德栗, 等. 江淮地区油菜渍害的时空分析. 自然灾害学报, 2017 (6): 136–146.
- [28] 盛绍学, 石磊, 李彪. 安徽省油菜涝渍灾害孕灾环境特征及其指标研究. 安徽农业科学, 2008, 36 (30): 13099–130101, 13189.
- [29] 范雨娴, 霍治国, 杨宏毅, 等. 湖南省油菜春季涝渍过程灾变判别指标. 应用气象学报, 2018, 29 (2): 141–153.
- [30] 霍治国, 李世奎, 王素艳, 等. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究. 自然资源学报, 2003, 18 (6): 692–703.
- [31] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较. 气候与环境研究, 2004, 9 (2): 261–277.
- [32] 温克刚, 曾庆华. 中国气象灾害大典, 湖南卷. 北京: 气象出版社, 2006.
- [33] 杨宏毅, 霍治国, 杨建莹, 等. 江汉和江南西部春玉米涝渍指标及风险评估. 应用气象学报, 2017, 28 (2): 237–246.
- [34] 杨太明, 蒋跃林, 刘瑞娜, 等. 开花期涝渍对油菜生物量和产量的影响研究//创新驱动发展提高气象灾害防御能力——s7 应对气候变化与农业气象防灾减灾. 2013.
- [35] 张杰, 吴明业. 基于 GIS 的皖南地区暴雨洪涝灾害风险区划. 中国农业资源与区划, 2017, 38 (6): 121–129.

## CATASTROPHE CLASSIFICATION INDICATOR AND YIELD LOSS ANALYSIS OF OILSEED RAPE VERNAL WATERLOGGING IN HUNAN PROVINCE<sup>\*</sup>

Fan Yuxian<sup>1,2</sup>, Huo Zhiguo<sup>1,3\*</sup>, Shang Ying<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Meteorological Bureau of Yiyang City, Yiyang, Hunan 413000, China;

3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract** Taking spring waterlogging disaster of oilseed rape in Hunan province as an example, this research constructs a waterlogging damage valuation model and a quantitative assessment model for the rape yield loss through the process-based classification indicator for dynamic waterlogging damage monitor, in order to explore a meteorological method for regional crop waterlogging process monitoring and evaluation. Based on the existing disaster identification index of rape spring waterlogging process in Hunan province, the methods of rolling simulation optimization, actual verification and case analysis were adopted to determine the optimal threshold for light and severe waterlogging, establish the original index to a process-based rapeseed spring waterlogging catastrophic grades index. At the same time, the relationship between the yield loss and different grades waterlogging frequency was explored by multiple regression analysis, and the yield loss quantification estimation model and waterlogging damage valuation model were constructed. Afterwards, the match degree of index and models with historical disaster records had been tested through a case study. The results showed as follows. 1. 44 was the optimal threshold to distinguish the light and severe rape vernal waterlogging in Hunan. This threshold varied with counties, and higher threshold value was detected in areas with less average waterlogging frequency, lower flood vulnerability and better disaster prevention and mitigation capabilities. Waterlogging in rape pod stage had the greatest influence on the rape yield according to the disaster impact indexes, including index based on duration of damage and index based on duration of severe damage. Similar spatial distribution of rape yield reduction rate had been detected base on the two indexes at the county scale. The temporal characteristic of calculated severe damage percentage based on grades index was consistent with the actual records in cases, and the result of quantification estimation model of yield reduction rate was also matched with the actual losses. Generally, the process-based classification indicator for dynamic waterlogging monitor, the waterlogging damage valuation model and the quantitative assessment model for the rape yield loss performed well in the implementation of regional dynamic monitoring and quantitative assessment of rape waterlogging damage. The results can provide theoretical support for regional monitoring and assessment of oilseed rape vernal waterlogging dynamically. Additionally, it also provides a feasible approach for the supplement and reanalysis of historical disaster records.

**Keywords** agricultural waterlogging; catastrophe process; classification indicator; damage assessment; oilseed rape