

陈家金, 李丽纯, 林晶, 等. 福建省枇杷气象灾害综合风险评估. 应用气象学报, 2014, 25(2): 232-241.

# 福建省枇杷气象灾害综合风险评估

陈家金<sup>1)\*</sup> 李丽纯<sup>1)</sup> 林晶<sup>1)</sup> 王加义<sup>1)</sup> 郑东旗<sup>2)</sup> 黄川容<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(福建省气象科学研究所, 福州 350001) <sup>2)</sup>(福建省福州市气象局, 福州 350014)

## 摘 要

通过辨识影响福建省枇杷生长发育和产量的主要致灾因子, 分析枇杷对气象灾害的敏感性和暴露性, 考虑种植区的防灾减灾能力, 构建出枇杷气象灾害综合风险评估指标体系, 利用枇杷种植区 1971—2011 年气象资料, 1992—2011 年枇杷种植面积、产量及其他社会经济资料, 采用层次分析法和熵权系数法融合方法计算各风险指标的权重及各评估单元的风险指数, 进而构建枇杷气象灾害的综合风险评估模型, 应用 GIS 技术制作出风险精细区划图, 评估枇杷气象灾害的综合风险。结果表明: 致灾危险性对综合风险的影响最大, 起主要作用; 重度以上的综合风险主要分布在福建省 5 个主要山脉的中高海拔山区以及枇杷种植面积大的莆田市、福清市、云霄县, 轻度综合风险区主要分布在中南部沿海县市的低海拔种植区(除种植大县和东山县外), 其余种植区的综合风险属中度。

**关键词:** 枇杷; 气象灾害; 风险评估

## 引 言

枇杷属亚热带果树, 性喜温暖, 忌严寒, 并以花果越冬, 在福建省常遭受冻害; 同时枇杷既不耐旱, 也不耐涝, 若降水分布不均, 常造成涝害或旱害, 秋旱严重的年份还会引起大量落叶, 树势衰弱, 影响次年产量; 此外枇杷根系浅, 抗大风能力弱, 易被吹倒<sup>[1-2]</sup>。福建省气象灾害种类众多, 冻害、台风、干旱等主要农业气象灾害常给福建省枇杷生长发育带来风险。

农业气象灾害风险评估是农业避灾的重要手段。国内在风险评估方法方面, 霍治国等<sup>[3]</sup>、葛全胜等<sup>[4]</sup>对灾害风险评估指标和方法开展了研究与探讨; 在具体作物或果树的单灾种风险评估方面, 人们开展了区域冬小麦干旱、霜害风险区划研究<sup>[5-8]</sup>, 罗伯良等<sup>[9]</sup>开展了水稻干旱风险区划研究, 蔡哲等<sup>[10]</sup>开展了脐橙冻害风险区划研究, 还有一些学者开展了苹果、香蕉和荔枝等寒冻害风险分析与区划<sup>[11-13]</sup>; 而在多灾种对作物或果树综合影响的风险评估研究则较少, 仅见薛昌颖等<sup>[14]</sup>、陈家金等<sup>[15]</sup>、邓国等<sup>[16]</sup>、

李世奎等<sup>[17]</sup>和孙文堂等<sup>[18]</sup>分别采用历年产量减产率相关指标和抗灾能力指标评估主要农业气象灾害对作物产量影响的综合风险, 陈怀亮等<sup>[19]</sup>运用多因子综合风险指数模型, 分析了 3 种主要农业气象灾害对河南省小麦生产影响的综合风险, 陈家金等<sup>[20-22]</sup>运用多指标综合评估法对福建省龙眼、橄榄、荔枝等果树气象灾害综合风险进行了评估。因此, 本文针对福建省枇杷产业结构调整的需要以及探索多灾种综合风险评估方法的考虑, 从影响福建省枇杷生长发育和产量的致灾因子危险性、枇杷脆弱性以及种植区防灾减灾能力着手, 构建影响枇杷生长发育的多灾种综合风险评估指标体系, 采用融合主、客观赋权法确定各风险指标权重, 评估福建省枇杷主要气象灾害的综合风险, 以期为复杂地形下的福建省枇杷布局调整和防灾减灾提供依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

福建省地处我国东南沿海(23°33'~28°19'N,

2013-04-12 收到, 2014-01-21 收到再改稿。

资助项目: 福建省自然科学基金项目(2012J01160), 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CAMGJ2012M27), 中国气象局小型业务项目(2012209), 福建省气象局基金项目(2011K03), 科技部农业科技成果转化资金项目(2012GB24160607)

\* email: cjj8284@163.com

115°50′~120°43′E),跨中、南亚热带,境内多山,丘陵起伏,素有“八山一水一分田”之称。近年来,福建省不断推进农业结构调整,出台了果业发展规划,其中枇杷发展迅猛,至 2011 年枇杷面积达  $3.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,产量达 21.2 万吨,约占国内的 1/2,是中国枇杷第 1 产区<sup>[2]</sup>。福建省大部县市种植枇杷,但主要种植区集中在中部沿海地区,以中晚熟品种为主,南部云霄县种植面积较大,以早熟品种为主。种植面积从高到低的地区依次为莆田、福州、漳州、宁德、泉州、南平、三明、龙岩,莆田市枇杷种植面积占福建省枇杷总种植面积的 52.3%。枇杷种植面积大于  $0.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的县(市)有莆田市辖区、云霄县、仙游县和福清市。

## 1.2 数据来源

福建省枇杷种植区各县 1971—2011 年气温、降水、风速的资料来源于国家气象信息中心和福建省气象局的气象观测数据;1992—2011 年枇杷种植面积、产量及其他社会经济资料来源于历年《福建经济与社会统计年鉴》<sup>[23]</sup>;地理信息资料来源于“数字福建”提供的 1:25 万基础地理背景资料,包括 DEM (digital elevation model)、行政边界等数据。

## 1.3 评估方法

采用多指标综合风险评估法评估枇杷气象灾害综合风险<sup>[20-22]</sup>。其主要步骤包括:①构建指标体系,②对诸指标进行归一化处理,消除量纲差异,③确定风险评估指标权重,④计算评估单元的风险指数,⑤根据权重构建评估模型,⑥对风险指数进行等级划分,⑦应用 GIS 技术制作风险区划图,⑧评估不同区域的风险大小。其中指标体系构建和指标权重确定是技术关键。

指标体系构建的具体做法:通过分析影响福建省枇杷产量的主要致灾因子,确定致灾危险性评估指标;分析枇杷种植的暴露性和对农业气象灾害影响的敏感性,确定承险体脆弱性指标;分析枇杷种植区农业基础及专项工程的应灾能力大小,确定防灾减灾能力指标,构建福建省枇杷气象灾害综合风险评估指标体系。

本文综合应用层次分析法<sup>[24-25]</sup>、熵权系数法<sup>[26-27]</sup>确定风险评估指标权重。

### 1.3.1 主观权重

采用层次分析法(AHP),由 16 位专家按照 1~9 比例标度法对各层次指标的重要性进行两两比较,并将比较的结果  $b_{jk}$  ( $j, k = 1, 2, \dots, n$ ) 写成  $n \times$

$n$  阶矩阵  $\mathbf{B}$  的形式,构建出各指标的判断矩阵。

$$\mathbf{B} = (b_{jk})_{n \times n} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

然后,采用和积法对判断矩阵进行归一化处理,求出判断矩阵的权值向量和特征根,计算一致性比率判断矩阵是否符合随机一致性指标。

### 1.3.2 客观权重

采用熵权系数法确定风险评估指标的客观权重。

设有  $n$  个评价对象,每个评价对象有  $m$  个评价指标,则评价指标特征值的矩阵  $\mathbf{X}$  如下:

$$\mathbf{X} = (X_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{pmatrix},$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

按照参与评价的各项指标值越大风险越高型(式(3))和指标值越小风险越高型(式(4))对式(2)中的特征值进行归一化处理。

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \min X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}), \quad (3)$$

$$X'_{ij} = (\max X_{ij} - X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}). \quad (4)$$

其中,  $\max X_{ij}$ ,  $\min X_{ij}$  分别为第  $i$  个指标值、第  $j$  个待评价对象的最大值和最小值。

得到归一化矩阵:

$$\mathbf{X}'_{ij} = \begin{pmatrix} X'_{11} & \cdots & X'_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X'_{m1} & \cdots & X'_{mn} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

计算第  $i$  个评价指标、第  $j$  个待评价对象的评价指标特征值比例  $P_{ij}$ ,

$$P_{ij} = X'_{ij} / \sum_{j=1}^n X'_{ij}. \quad (6)$$

计算第  $i$  个评价指标的熵  $e_i$ ,

$$e_i = - \frac{1}{\ln(n)} \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}. \quad (7)$$

计算第  $i$  个评价指标的熵权重  $a_i$ ,

$$a_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^m (1 - e_i). \quad (8)$$

### 1.3.3 综合权重

为了全面反映评价指标的重要性,将决策者对各指标给出的主观权重( $\omega_i$ )与客观权重( $a_i$ )相融合,最终确定各指标的综合权重( $\sigma_i$ )为

$$\sigma_i = a_i \omega_i / \sum_{i=1}^m a_i \omega_i. \quad (9)$$

## 2 结果分析

### 2.1 枇杷气象灾害风险评估指标体系

构建的枇杷气象灾害综合风险评估指标体系如图 1 所示。

#### 2.1.1 致灾因子危险性指标

枇杷营养器官的耐寒性比较强,冬季最低气温即使为 $-18.0^{\circ}\text{C}$ ,尚无冻害,但枇杷的生殖器官耐寒性较弱,研究认为枇杷花器冻害的温度指标为 $-5^{\circ}\text{C}$ ,幼果冻害的温度指标为 $-3^{\circ}\text{C}$ <sup>[1-2,28-30]</sup>,近年来,虽然冬季气温总体偏高,出现暖冬,但阶段性极端降温过程依然多现,极端最低气温低,如 1999 年/2000 年、2004 年/2005 年、2010 年/2011 年的冬季,枇杷均不同程度遭受冻害,导致产量下降<sup>[26]</sup>。同时枇杷根浅不耐旱,秋冬干旱,会抑制枇杷的生长,引起大量落叶、树势衰弱,过度干旱会造成花芽分化过程缩短,花期提前,坐果率下降,果实生长发育慢,果

实小,成熟推迟,品质下降;春旱则影响枇杷果实膨大,容易造成萎蔫和日灼,若在久晴少雨、土壤干旱情况下突降大雨,果肉细胞将迅速膨大,果皮破裂,造成大量裂果,影响产量和质量<sup>[31-34]</sup>。此外,浅根枇杷抗大风能力弱,6 级以上大风可造成机械损伤和落叶落果,8 级以上大风就会折枝倒树,并使枝叶受害,影响产量和品质<sup>[31-32]</sup>。

通过上述对影响枇杷生长发育和产量的致灾因子危险性分析,确定出影响枇杷生长发育的致灾因子危险性量化分级评估指标。以花果越冬期(12 月一次年 2 月)极端最低气温、果实发育期(1—5 月)日最大平均风速、果实膨大期(2—5 月)连旱日数、开花至幼果期(10 月一次年 2 月)连旱日数 4 个致灾因子在不同强度下的历年平均发生频率分别作为花果越冬期冻害、果实发育期风害、果实膨大期旱害和开花至幼果期旱害的危险性评估指标(表 1),以考虑不同强度农业气象灾害对枇杷生长发育影响的风险大小。

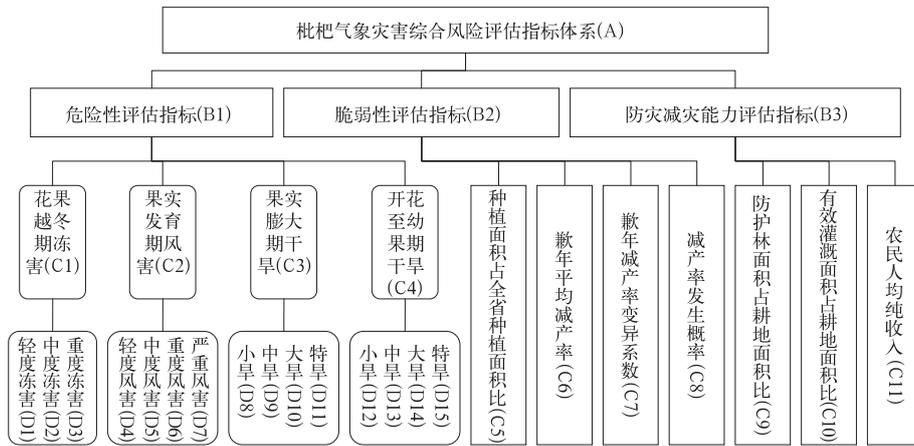


图 1 枇杷气象灾害综合风险评估指标体系

Fig. 1 Index system of the integrated risk evaluation for loquat meteorological disasters

表 1 致灾因子危险性等级

Table 1 Hazard level of disaster-causing factors

| 致灾因子  | 危害等级                     |                          |                          |                  |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
|   | 轻度                       | 中度                       | 重度                       | 严重               |
| 花果越冬期极端最低气温 $t_d/^{\circ}\text{C}$              | $-3.0 \leq t_d < -2.0$   | $-5.0 \leq t_d < -3.0$   | $t_d < -5.0$             |                  |
| 果实发育期日最大平均风速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $10.8 < v \leq 17.2$     | $17.2 < v \leq 24.5$     | $24.5 < v \leq 32.6$     | $v > 32.6$       |
| 果实膨大期连旱日数 $d_{sd}/\text{d}$                     | $16 \leq d_{sd} \leq 30$ | $31 \leq d_{sd} \leq 45$ | $46 \leq d_{sd} \leq 60$ | $d_{sd} > 61$    |
| 开花至幼果期连旱日数 $d_{ad}/\text{d}$                    | $31 \leq d_{ad} \leq 50$ | $51 \leq d_{ad} \leq 70$ | $71 \leq d_{ad} \leq 90$ | $d_{ad} \geq 91$ |

注:连旱日数是指日降水量不大于 2 mm 的连续日数;当果实膨大期、开花至幼果期日降水量不大于 2 mm 的连续日数分别达到 16 d 和 31 d 时开始出现干旱,并统计旱日;其后出现连续 6 d 降水量不小于 30 mm(果实膨大期)或不小于 15 mm(开花至幼果期)则解除旱情,终止旱日统计,若未达解除标准,持续统计连旱日数。

### 2.1.2 枇杷脆弱性指标

采用各县枇杷种植面积占全省总种植面积的比例反映枇杷的暴露性,种植面积比例越大,其所承受的危害风险越大;采用歉年枇杷单产量的平均减产率、歉年减产率变异系数和减产率不大于-10%的发生概率 3 个指标来综合反映枇杷对主要农业气象灾害综合敏感性。

### 2.1.3 防灾减灾能力指标

在基础防灾减灾能力方面,主要考虑防御气象灾害的资金投入;在工程专项抗灾方面,主要考虑防

风害而建立的防护林工程以及防干旱而建立的水利灌溉工程。因此,本文选用防护林面积占耕地面积比、有效灌溉面积占耕地面积比、农民人均纯收入 3 个指标作为枇杷种植区防灾减灾能力评估指标。

## 2.2 风险指标综合权重

根据上述权重计算方法,按照枇杷风险评估指标体系逐级由下而上构建风险评估指标的特征矩阵,再对特征矩阵数据进行计算,最后得出各风险指标的综合权重(表 2)。

表 2 枇杷气象灾害风险指标综合权重值

Table 2 Comprehensive weight of the risk evaluation index for loquat meteorological disasters

| 二级指标 | 二级指标权重 | 三级指标 | 三级指标权重 | 四级指标 | 四级指标权重 |
|------|--------|------|--------|------|--------|
| B1   | 0.6292 | C1   | 0.5473 | D1   | 0.0563 |
|      |        |      |        | D2   | 0.1733 |
|      |        |      |        | D3   | 0.7704 |
|      |        | C2   | 0.3456 | D4   | 0.0314 |
|      |        |      |        | D5   | 0.1075 |
|      |        |      |        | D6   | 0.3560 |
|      |        |      |        | D7   | 0.5051 |
|      |        | C3   | 0.0897 | D8   | 0.0136 |
|      |        |      |        | D9   | 0.0546 |
|      |        |      |        | D10  | 0.1644 |
|      |        |      |        | D11  | 0.7644 |
|      |        | C4   | 0.0174 | D12  | 0.0705 |
|      |        |      |        | D13  | 0.2016 |
|      |        |      |        | D14  | 0.1584 |
|      |        |      |        | D15  | 0.5695 |
| B2   | 0.3573 | C5   | 0.9159 |      |        |
|      |        | C6   | 0.0250 |      |        |
|      |        | C7   | 0.0165 |      |        |
|      |        | C8   | 0.0426 |      |        |
| B3   | 0.0135 | C9   | 0.7157 |      |        |
|      |        | C10  | 0.1493 |      |        |
|      |        | C11  | 0.1350 |      |        |

## 2.3 风险指数的计算

在确定各风险指标的权重后,根据式(10)逐级计算各评价对象的风险评估指数  $\lambda_j$  (表 3),

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^m \sigma_i P_{ij} \quad (10)$$

## 2.4 风险模型的构建

### 2.4.1 致灾因子风险评估指数地理推算模型

致灾因子危险性评估指数是基于评估单元(县)气象测站单点观测值计算而来,属点状数据,未能精

细反映评估单元(县)内其他点的风险情况。因此,本文应用多元回归方法<sup>[35]</sup>建立各致灾因子(冻害、旱害)风险评估指数与地理因子(经度  $x$  和纬度  $y$ ; 海拔  $h$ , 单位:m; 离海距  $l$ , 单位:m)关系的地理推算模型(表 4),结合 GIS 技术进行地理插值推算,将点状数据转化为面状网格数据,实现致灾因子风险评估指数的空间连续分布。表 4 中,  $I_{fi}$ ,  $I_{sdi}$ ,  $I_{adi}$  分别代表花果越冬期冻害、果实膨大期干旱和开花至幼果期干旱致灾因子的风险评估指数。

表3 枇杷气象灾害综合风险归一化评估指数

Table 3 Normalized difference index of the synthetic risk evaluation for loquat meteorological disasters

| 评估单元 | 危险性    | 脆弱性    | 防灾减灾能力 | 综合风险   | 评估单元 | 危险性    | 脆弱性    | 防灾减灾能力 | 综合风险   |
|------|--------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|
| 光泽   | 0.7505 | 0.0660 | 0.1885 | 0.7653 | 长汀   | 0.1845 | 0.0591 | 0.0780 | 0.2108 |
| 邵武   | 0.3661 | 0.0587 | 0.2068 | 0.3852 | 连城   | 0.0716 | 0.0490 | 0.1384 | 0.0933 |
| 武夷山  | 0.2851 | 0.0590 | 0.1212 | 0.3081 | 武平   | 0.0771 | 0.0478 | 0.1353 | 0.0981 |
| 浦城   | 0.4148 | 0.0610 | 0.1889 | 0.4344 | 上杭   | 0.0348 | 0.0546 | 0.1186 | 0.0610 |
| 建阳   | 0.2980 | 0.0591 | 0.1680 | 0.3197 | 永安   | 0.0783 | 0.0558 | 0.1976 | 0.1025 |
| 松溪   | 0.2734 | 0.0537 | 0.1672 | 0.2926 | 大田   | 0.1022 | 0.0724 | 0.1174 | 0.1371 |
| 政和   | 0.1167 | 0.0662 | 0.0537 | 0.1491 | 漳平   | 0.0557 | 0.0387 | 0.1866 | 0.0708 |
| 建瓯   | 0.1752 | 0.0687 | 0.2070 | 0.2044 | 龙岩   | 0.0275 | 0.0536 | 0.2737 | 0.0500 |
| 寿宁   | 1.0000 | 0.0467 | 0.0978 | 1.0000 | 华安   | 0.0558 | 0.0536 | 0.9458 | 0.0632 |
| 周宁   | 0.5299 | 0.0359 | 0.0245 | 0.5360 | 安溪   | 0.0286 | 0.0462 | 0.6393 | 0.0390 |
| 福安   | 0.0418 | 0.0818 | 0.4236 | 0.0769 | 永泰   | 0.0317 | 0.0915 | 0.8950 | 0.0626 |
| 福鼎   | 0.0560 | 0.0520 | 0.5160 | 0.0717 | 永春   | 0.0510 | 0.1261 | 0.5445 | 0.1088 |
| 宁化   | 0.5109 | 0.0561 | 0.1002 | 0.5274 | 德化   | 0.1149 | 0.0492 | 1.0000 | 0.1173 |
| 清流   | 0.3602 | 0.0543 | 0.1785 | 0.3774 | 仙游   | 0.0693 | 0.3427 | 0.4565 | 0.2529 |
| 泰宁   | 0.6805 | 0.0539 | 0.1608 | 0.6906 | 长乐   | 0.0276 | 0.0480 | 0.4112 | 0.0439 |
| 将乐   | 0.1188 | 0.0507 | 0.1799 | 0.1396 | 福清   | 0.0586 | 0.2805 | 0.4701 | 0.2065 |
| 顺昌   | 0.1349 | 0.0554 | 0.1892 | 0.1578 | 莆田   | 0.0533 | 1.0000 | 0.3927 | 0.6160 |
| 明溪   | 0.3976 | 0.0398 | 0.1154 | 0.4070 | 永定   | 0.0591 | 0.0465 | 0.1845 | 0.0787 |
| 沙县   | 0.0890 | 0.0619 | 0.2366 | 0.1156 | 长泰   | 0.0662 | 0.0549 | 0.4760 | 0.0842 |
| 三明   | 0.0454 | 0.0576 | 0.1920 | 0.0716 | 南靖   | 0.6492 | 0.0609 | 0.5266 | 0.6563 |
| 南平辖区 | 0.0334 | 0.0673 | 0.1798 | 0.0656 | 平和   | 0.0885 | 0.0599 | 0.5299 | 0.1077 |
| 古田   | 0.0982 | 0.0423 | 0.3728 | 0.1105 | 漳州辖区 | 0.0998 | 0.0495 | 0.2706 | 0.1183 |
| 尤溪   | 0.1619 | 0.0690 | 0.1788 | 0.1921 | 漳浦   | 0.1246 | 0.0597 | 0.4788 | 0.1440 |
| 闽清   | 0.0338 | 0.0467 | 0.4411 | 0.0486 | 南安   | 0.0647 | 0.0659 | 0.4706 | 0.0892 |
| 霞浦   | 0.0415 | 0.0914 | 0.5554 | 0.0794 | 惠安   | 0.1251 | 0.0591 | 0.3829 | 0.1462 |
| 闽侯   | 0.0263 | 0.0733 | 0.6468 | 0.0522 | 厦门   | 0.1291 | 0.0556 | 0.4252 | 0.1472 |
| 罗源   | 0.0336 | 0.0667 | 0.5259 | 0.0581 | 晋江   | 0.0888 | 0.0639 | 0.4705 | 0.1116 |
| 宁德辖区 | 0.0026 | 0.0697 | 0.6289 | 0.0273 | 诏安   | 0.1366 | 0.0785 | 0.4081 | 0.1680 |
| 福州辖区 | 0.0348 | 0.0624 | 0.9967 | 0.0467 | 东山   | 0.3097 | 0.0553 | 0.3681 | 0.3247 |
| 连江   | 0.0170 | 0.0810 | 0.5382 | 0.0498 | 云霄   | 0.1239 | 0.3628 | 0.5544 | 0.3156 |

表4 致灾因子风险评估指数的地理推算模型

Table 4 Geographical calculation models of the risk evaluation for disaster-causing factors

| 评价指标 | 地理推算模型  | 复相关系数 | 检验值    |
|------|---|-------|--------|
| C1   | $I_{fi} = -0.352 + 2.21 \times 10^{-7}x + 5.46 \times 10^{-8}y + 4.94 \times 10^{-4}h + 5.96 \times 10^{-7}l$ | 0.85  | 36.78* |
| C3   | $I_{sdi} = 1.382 - 1.34 \times 10^{-6}x - 5.74 \times 10^{-8}y - 1.06 \times 10^{-4}h - 2.46 \times 10^{-6}l$ | 0.80  | 28.00* |
| C4   | $I_{adi} = 5.395 + 1.29 \times 10^{-6}x - 2.04 \times 10^{-6}y - 1.84 \times 10^{-4}h + 1.53 \times 10^{-6}l$ | 0.85  | 36.78* |

注：\*表示达到0.01显著性水平。

对其他与地理因子无关的风险评估指数(风害  $I_{wi}$ 、脆弱性  $I_v$ 、防灾减灾能力指数  $I_c$ )，采用基本单元值计算，以面上数据代表评估单元内的任一点数据。

#### 2.4.2 风险指数评估模型

按照加权综合评价法，对风险评估指标框架体系中各指标下设因子权重进行加权，分别得出致灾因子危险性、枇杷脆弱性、种植区防灾减灾能力和综合风险的风险评估模型(表5)。 $I_{pr}$ 、 $I_{rr}$ 、 $I_{vi}$ 、 $I_{cp}$ 分别代表枇杷种植面积占全省总种植面积比、歉年平均减产率、歉年减产率变异系数和减产率(不大于

—10%)发生概率； $I_{sr}$ 、 $I_{ir}$ 、 $I_{fe}$ 分别代表防护林面积占耕地面积比、有效灌溉面积占耕地面积比、农民人均纯收入； $I_h$ 、 $I_v$ 、 $I_c$ 、 $I$ 分别代表致灾因子危险性、枇杷脆弱性、防灾减灾能力和综合风险的评估指数。

由表5可见，枇杷致灾危险性对综合风险的影响最大，起主要作用，且危险性主要来自花果越冬期冻害和果实发育期风害，旱害危险性较小；枇杷脆弱性主要表现在种植面积的暴露面大小，对综合风险的影响属其次；而种植区防灾减灾能力对综合风险的影响权重小，对减轻枇杷气象灾害风险的作用有限。

表 5 枇杷气象灾害综合风险评估模型

Table 5 Integrated risk evaluation models of loquat meteorological disasters

| 评价指标 | 评估模型  |
|------|---|
| B1   | $I_h = 0.5473I_{fi} + 0.3456I_{wi} + 0.0897I_{sdi} + 0.0174I_{adi}$ |
| B2   | $I_v = 0.9159I_{pr} + 0.025I_{rr} + 0.0165I_{vi} + 0.0426I_{cp}$    |
| B3   | $I_c = 0.7157I_{sr} + 0.1493I_{ir} + 0.1350I_{fe}$                  |
| A    | $I = 0.6292I_h + 0.3573I_v - 0.0135I_c$                             |

2.5 风险等级划分与区划制图

采用自然断点法对风险评估指标进行分级,即

表 6 风险等级划分标准

Table 6 Grading standard of the risk

| 指标 | 风险等级                |                        |                           |                           |
|----|---------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
|    | 轻度                  | 中度                     | 重度                        | 严重                        |
| B1 | $0 \leq I_h < 0.10$ | $0.10 \leq I_h < 0.30$ | $0.30 \leq I_h < 0.50$    | $0.50 \leq I_h \leq 1.00$ |
| B2 | $0 \leq I_v < 0.10$ | $0.10 \leq I_v < 0.30$ | $0.30 \leq I_v < 0.50$    | $0.50 \leq I_v \leq 1.00$ |
| B3 | $0 \leq I_c < 0.35$ | $0.35 \leq I_c < 0.70$ | $0.70 \leq I_c \leq 1.00$ |                           |
| A  | $0 \leq I < 0.10$   | $0.10 \leq I < 0.30$   | $0.30 \leq I < 0.50$      | $0.50 \leq I \leq 1.00$   |

2.6 单项风险评估

2.6.1 致灾因子危险性

由图 2a 可以看出,重度以上的综合致灾危险性主要分布在 5 个山脉即武夷山脉、闽中大山带(鹭峰山脉、戴云山脉、博平岭)、玳瑁山脉的海拔较高山区,其中高海拔地区有严重风险,致灾因子综合危险性高的原因主要在于这些地区海拔高,有重度以上冻害;沿海县市的低海拔种植区的综合危险性属轻度,主要是由于无冻害或冻害轻,虽然开花至果实膨大期间的干旱危险度较高,但由于旱害对枇杷产量影响的权重小,故综合致灾危险性小;其余种植区综合致灾危险性属中度,其中内陆种植区主要是由于冻害因素所致,沿海种植区则主要是由于风害及早害所致,比较典型的代表是东山县,虽无冻害,但由于风害和旱害较为严重,对枇杷产量的致灾风险仍属中度。

2.6.2 枇杷脆弱性

由图 2b 可以看出,莆田市辖区的枇杷脆弱性属重度,脆弱性大主要缘于莆田市辖区种植面积大,暴露性大,同时歉年变异系数大、发生概率较高;云霄、仙游和福清的枇杷脆弱性属中度,主要是由于这 3 县种植面积较大,同时仙游和福清的歉年平均减产率、变异系数及发生概率均相对较大;其余枇杷种植区脆弱性较轻,主要是由于这些种植区枇杷种植面积小,暴露性小,农业气象灾害对枇杷总产量带来的影响有限。

通过某一指标范围内所有数据值与平均值之差的原则来寻找特征点,并结合对实地风险大小调查情况,按各风险指标归一化指数划分出风险等级,限于篇幅,表 6 中仅列出一级和二级风险指标等级划分标准;然后根据枇杷气象灾害各风险指数评估模型(表 5),按照枇杷气象灾害综合风险评估体系,应用 GIS 技术,制作各风险指数区划图,并将各图层逐级叠加,得到影响枇杷产量的单灾种及多灾种综合风险分布图。

2.6.3 防灾减灾能力

由图 2c 可以看出,沿海种植区的防灾减灾能力高于内陆种植区,防灾减灾能力较高,其中防灾减灾能力高值区出现在福州市辖区、华安、永泰和德化,主要是因为这些地区防护林面积比例、有效灌溉面积比例、农民收入相对较高所致,防旱和防风能力以及投入防灾救灾的资金能力相对较强;内陆种植区的防灾减灾能力相对较低,主要是由于农民收入较低、无防护林所致。

2.7 综合风险评估

从枇杷综合风险归一化评估指数分布来看(表 3),指数介于 0.03~1.00 之间,以宁德市辖区为最小,寿宁为最大;其中指数大于 0.50 的站点有光泽、寿宁、周宁、泰宁、莆田和南靖;指数介于 0.30~0.50 之间的站点有邵武、武夷山、浦城、建阳、清流、明溪、东山和云霄;指数介于 0.10~0.30 之间的有松溪、政和、建瓯、将乐、顺昌、沙县、古田、尤溪、长汀、永安、大田、永春、德化、仙游、福清、平和、漳州辖区、漳浦、惠安、厦门、晋江和诏安;其余种植区指数低于 0.10。

由图 2d 枇杷多灾种综合风险区划图上可以看出,重度以上的综合风险主要分布在 5 个山脉即武夷山脉、闽中大山带(鹭峰山脉、戴云山脉、博平岭)、玳瑁山脉的海拔较高山区,其中高海拔地区有严重风险,这部分地区因海拔高,有重度以上的冻害危险性,加上防灾减灾能力较弱,致使综合风险高;种植

面积大的莆田市、福清市、云霄县,这部分地区致灾因子危险性低,但脆弱性大,主要原因是种植面积大,暴露性大,一旦遇到农业气象灾害,其所造成的损失就会很大。轻度综合风险区主要分布在中南部沿海县市的低海拔种植区(除种植大县和东山县外),主要是由于这些种植区的农业气象灾害对枇杷产量影响的危险性较小,脆弱性也小,防灾减灾能力

较高。其余种植区综合风险属中度,其中内陆种植区主要还是由于冻害因素可能导致有中度致灾危险,同时防灾减灾能力相对较弱,沿海种植区则主要是由于风害及早害导致有中度致灾危险,比较典型的代表是东山县,虽无冻害,但由于风害和旱害较为严重,影响枇杷产量的综合风险仍属中度。

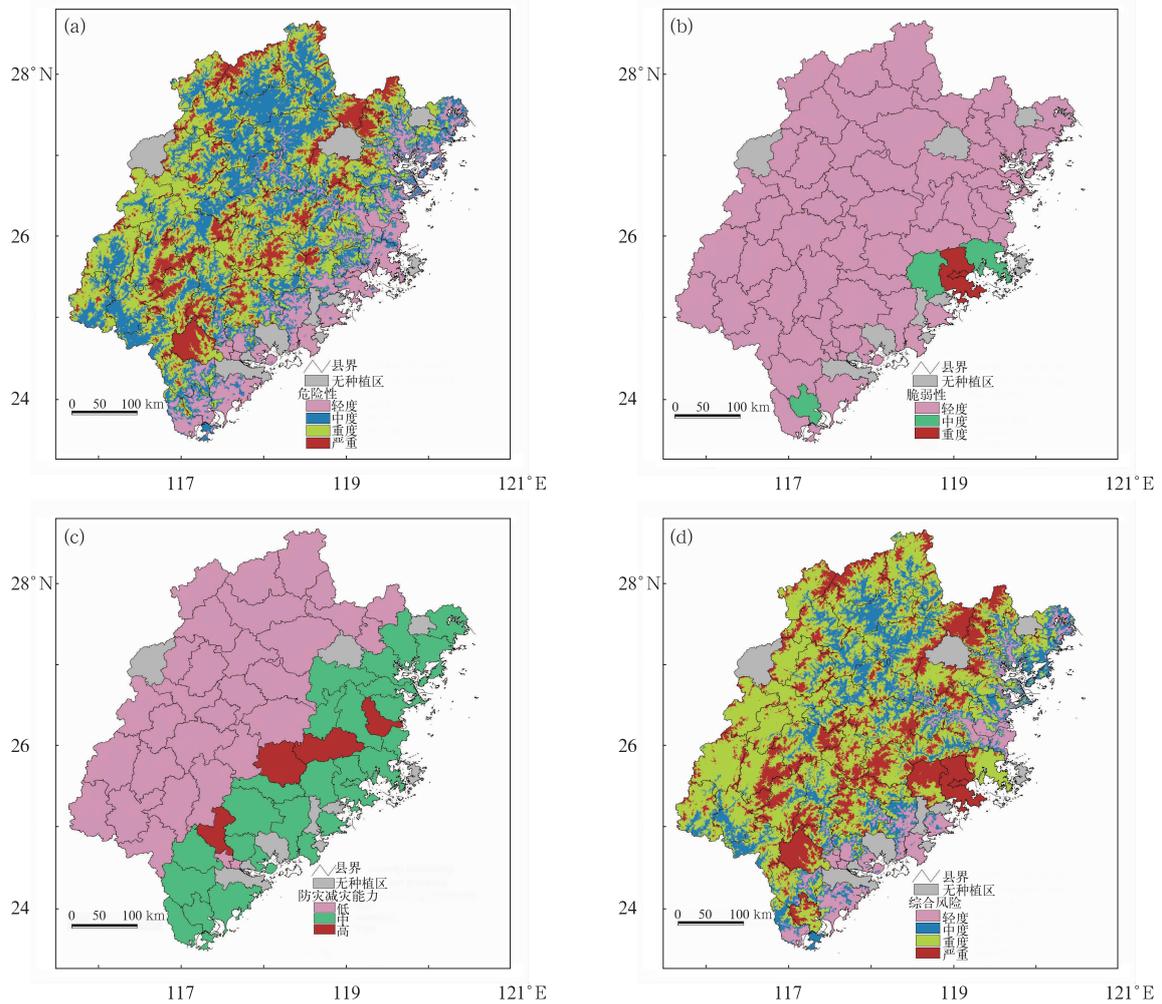


图 2 枇杷气象灾害危险性(a)、脆弱性(b)、防灾减灾能力(c)及综合风险(d)区划图

Fig. 2 Division of the potential hazard(a), vulnerability(b), disaster coping capability(c) and synthetic risk(d) of loquat

结合枇杷历史灾害个例来看,2004 年 12 月 29 日—2005 年 1 月 2 日莆田市涵江区的大洋、庄边、新县等山区乡镇遭受较大程度的冻害,严重影响了果实产量,甚至绝收;涵江区枇杷受冻面积达 6000 hm<sup>2</sup>,占栽培面积的 75%,产量损失近 2.5 万吨,直接经济损失 1.2 亿元<sup>[36]</sup>。2005 年 1 月,笔者曾对莆田市涵江区北部山区乡镇(庄边、新县、大

洋)的枇杷受冻情况进行过实地调查,这些乡镇的枇杷均出现不同程度冻害,且低洼地带和北坡的冻害表现得更为明显,但由于这些乡镇没有自动气象监测站点,缺乏极端低温观测数据,因此,根据莆田涵江区 3 个乡镇枇杷种植地与莆田市气象观测点的相对高差,按照随海拔升高气温递减率 -0.7℃/100 m 反演种植园地的极端最低气温,再根据观测

到的 1.5 m 高度露天极端最低温度(简称露天极端最低温度)比同地点百叶箱内极端最低气温普遍低 1.5~3℃的情况,估算出种植园地的露天极端最低温度(表 7),可见这 3 个乡镇的露天极端最低温度均低于-2℃,达到枇杷冻害标准,这与调查的枇杷果实遭受不同程度冻害情况相吻合;此外,根据对 3

个乡镇枇杷种植园地的花果越冬期冻害风险指数模型计算结果,大洋乡的冻害危险性指数达到 0.3 以上,有重度危险性,庄边镇和新县镇的冻害危险性指数分别为 0.27 和 0.24,在中度危险区,对照此次冻害过程的实际表征症状,评估结果与实际情况也较为吻合。

表 7 涵江区部分乡镇枇杷园极端最低气温反演及冻害风险指数

Table 7 Minimum temperature retrieval and freezing injury risk indexes of loquat in parts of Hanjiang Region

| 时间         | 地点  | 海拔/m | 枇杷冻害调查总体评价 | 园地百叶箱极端最低气温反演/℃ | 露天极端最低温度反演/℃ | 冻害危险性指数 |
|------------|-----|------|------------|-----------------|--------------|---------|
| 2005-01-01 | 大洋乡 | 350  | 重度冻害       | -0.8            | -3.1         | 0.32    |
| 2005-01-01 | 庄边镇 | 320  | 中度至重度冻害    | -0.6            | -2.9         | 0.27    |
| 2005-01-01 | 新县镇 | 250  | 中度冻害       | -0.1            | -2.4         | 0.24    |

### 3 结论与讨论

通过对影响福建省枇杷生长发育和产量的灾害风险辨识,依据自然灾害风险分析原理,构建了枇杷气象灾害综合风险评估指标体系,以层次分析法和熵权法融合计算风险指标权重,采用加权综合评价法计算灾害风险指数,并借助 GIS 技术对福建省枇杷气象灾害进行了风险评估和区划,得到如下结论:

1) 由枇杷致灾因子危险性、承灾体脆弱性、种植区防灾减灾能力 3 类 4 级指标组成的枇杷气象灾害综合风险评估指标体系,较充分地表达了主要农业气象灾害对福建省枇杷生长发育影响的风险因素。

2) 风险指标权重计算结果表明:在枇杷气象灾害综合风险构成要素当中,致灾危险性对综合风险的影响最大,起主要作用,且危险性主要来自花果越冬期冻害和果实发育期风害,旱害危险性较小;枇杷脆弱性对综合风险的影响属其次,主要体现在种植面积的暴露面大小;而种植区防灾减灾能力只是起着略微减轻枇杷气象灾害风险的作用。

3) 风险区划结果显示:福建省 5 条主要山脉的中高海拔山区以及枇杷种植面积大的莆田市、福清市、云霄县有重度以上的气象灾害综合风险,中南部沿海县市的低海拔种植区(除种植大县和东山县外)的综合风险属轻度,其余种植区的综合风险属中度。

4) 从枇杷致灾危险性评估结果来看,轻度与中度危险性区域是福建省枇杷的主产区,实际生产布局与致灾危险性评估结果基本一致;同时枇杷气象灾害风险个例评估结果与实际情况也较为吻合,证明风险评估方法的客观性和评估结果的可靠性。

尽管风险评估结果比较理想,可为福建省有关部门进行枇杷气象灾害风险管理和减灾决策提供参考,但由于枇杷气象灾害系统的复杂性,评估结果不可能与实际情况完全吻合,评估方法中仍有需要完善的地方。在风险评估指标构建中,一些指标由于缺乏资料来源基础,未能进入指标体系中,可随着资料的完善,不断充实或改进枇杷致灾因子危险性、脆弱性、防灾减灾能力的表征指标。在风险评估指标权重计算方法中,运用层次分析法和熵权系数法融合计算指标权重,更加客观地反映各指标对综合风险构成的贡献大小问题,克服了以往一些研究使用单一方法赋权带来的评判局限性,使确定的权重更趋科学、合理,但是否最合理,仍需通过比较使用各种赋权方法的评估结果来验证,并通过验证结果择优选用。在风险区划当中,考虑到福建省复杂地形的影响,构建了致灾因子危险性评估指数与经纬度、海拔高度、离海距离的地理推算模型,解决了评估单元(县)内任一点致灾危险性的评判问题,但模型中未考虑到坡向、坡度因素的影响;同时对与地理因子无关的风险评估指数,只能以观测点数据或面上数据代表评估单元(县)内的任一点数据,这样也会出现一定误差,可继续完善评估模型,并随着观测数据的不断增加,考虑以乡镇、村作为评估单元开展精细化风险评估,进一步提高评估精度。此外,对风险评估结果的验证只是结合历史灾害个例进行分析,还可通过分析综合风险指数与实际灾情或产量减产率之间的关系加以验证。

### 参考文献

- [1] 吴汉珠,周永年. 枇杷无公害栽培技术. 北京:中国农业出版社, 2003:5-9.

- [2] 郑少泉,许秀淡,蒋际谋,等. 枇杷品种与优质高效栽培技术原色图说. 北京:中国农业出版社,2005:14-16.
- [3] 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.
- [4] 葛全胜,邹铭,郑景云,等. 中国自然灾害风险综合评估初步研究. 北京:科学出版社,2008.
- [5] 刘荣花,朱自玺,方文松,等. 华北平原冬小麦干旱灾损风险区划. 生态学杂志,2006,25(9):1068-1072.
- [6] 任义方,赵艳霞,王春乙. 河南省冬小麦干旱保险风险评估与区划. 应用气象学报,2011,22(5):537-548.
- [7] 钟秀丽,王道龙,李玉中,等. 黄淮麦区小麦拔节后霜害的风险评估. 应用气象学报,2007,18(1):102-107.
- [8] 朱琳,叶殿秀,陈建文,等. 陕西省冬小麦干旱风险分析及区划. 应用气象学报,2002,13(2):201-205.
- [9] 罗伯良,黄晚华,帅细强,等. 湖南省水稻生产干旱灾害风险区划. 中国农业气象,2011,32(3):461-465.
- [10] 蔡哲,刘芳,李迎春,等. 赣州地区脐橙冻害精细化气候风险区划研究. 江西农业学报,2011,23(3):123-125.
- [11] 刘璐,郭兆夏,柴芊,等. 陕西省苹果花期冻害风险评估. 干旱地区农业研究,2009,27(5):251-255.
- [12] 杜鹏,李世奎,温福光,等. 珠江三角洲主要热带果树农业气象灾害风险分析. 应用气象学报,1995,6(增刊):26-32.
- [13] 李娜,霍治国,贺楠,等. 华南地区香蕉、荔枝寒害的气候风险区划. 应用生态学报,2010,21(5):1244-1251.
- [14] 薛昌颖,霍治国,李世奎,等. 北方冬小麦产量灾损风险类型的地理分布. 应用生态学报,2005,16(4):620-625.
- [15] 陈家金,张春桂,王加义,等. 福建省粮食产量气象灾害风险评估. 中国农学通报,2009,25(10):277-281.
- [16] 邓国,王昂生,李世奎,等. 风险分析理论及方法在粮食生产中的应用初探. 自然资源学报,2001,16(3):221-226.
- [17] 李世奎,霍治国,王素艳,等. 农业气象灾害风险评估体系及模型研究. 自然灾害学报,2004,13(1):78-87.
- [18] 孙文堂,苗春生,沈建国,等. 基于GIS的马铃薯种植气候区划及风险区划的研究. 南京气象学院学报,2004,27(5):650-659.
- [19] 陈怀亮,邓伟,张雪芬,等. 河南小麦生产农业气象灾害风险分析及区划. 自然灾害学报,2006,15(1):135-143.
- [20] 陈家金,王加义,李丽纯,等. 影响福建省龙眼产量的多灾种综合风险评估. 应用生态学报,2012,23(3):819-826.
- [21] 陈家金,王加义,李丽纯,等. 极端气候对福建省橄榄产量影响的风险评估. 中国农业气象,2011,32(4):632-637.
- [22] 陈家金,李丽纯,王加义,等. 极端气候对福建荔枝产量影响的风险评估. 果树学报,2011,28(6):1093-1098.
- [23] 福建省统计局. 福建经济与社会统计年鉴. 福州:福建人民出版社,1992-2011.
- [24] 危向峰,段建南,胡振琪,等. 层次分析法在耕地地力评价因子权重确定中的应用. 湖南农业科学,2006(2):39-42.
- [25] 李恺. 层次分析法在生态环境综合评价中的应用. 环境科学与技术,2009,32(2):183-185.
- [26] 汤瑞凉,王龚. 农作物品种综合评判的熵权系数法研究. 资源开发与市场,2002,18(5):3-4.
- [27] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京:高等教育出版社,2004.
- [28] 黄寿波,沈朝栋,李国景. 我国枇杷冻害的农业气象指标及其防御技术. 湖北气象,2000(4):17-19.
- [29] 谢钟琛,李健. 早钟6号枇杷幼果冻害温度界定及其栽培适宜区区划. 福建果树,2006(1):7-11.
- [30] 林燕金,魏秀清,章希娟,等. 福建省枇杷种植区划与品种结构布局. 福建果树,2011(1):49-52.
- [31] 王飞凤. 始兴县枇杷栽培的气象条件分析. 广东气象,2003(1):45-46.
- [32] 梁平,韦波. 黔东南枇杷生产的气象条件与灾害分析. 贵州农业科学,2004,32(5):27-29.
- [33] 赵志晖,黄秋琴. 早钟六号枇杷果实日烧病的防治. 广西园艺,2005,16(5):41.
- [34] 周政华,胡小三. 秋冬干旱对大五星枇杷生长结果的影响. 特产研究,2006(1):34-38.
- [35] 王加义,陈惠,夏丽花,等. 基于离海距和GIS技术的福建低温精细监测. 应用气象学报,2012,23(1):96-103.
- [36] 张辉,蔡秋英. 枇杷防冻栽培技术. 福建果树,2005(4):45-46.

## Integrated Risk Evaluation on Meteorological Disasters of Loquat in Fujian Province

Chen Jiajin<sup>1)</sup> Li Lichun<sup>1)</sup> Lin Jing<sup>1)</sup> Wang Jiayi<sup>1)</sup> Zheng Dongqi<sup>2)</sup> Huang Chuanrong<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (*Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001*)

<sup>2)</sup> (*Fuzhou Meteorological Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350014*)

### Abstract

In order to identify the risk of loquat growing on complicated terrain in Fujian Province, to avoid planting in high risk areas, integrated risk evaluation on meteorological disasters of loquat in Fujian Province is conducted using disaster risk analysis theory. A risk evaluation index system for meteorological disasters of loquat in Fujian Province is constructed, based on the identification of the major disaster-causing factors affecting loquat growth and yield, and from the analysis of the sensitivity and exposed property of loquat to meteorology disasters, and the disaster prevention and mitigation capability of loquat growing regions in the Province. In addition, the risk index of each evaluation unit is calculated based on the annual meteorological data, loquat planting areas and yield, and other socio-economic data in loquat growing region in Fujian Province, and by using the weight of risk indices determined by analytic hierarchy process method and entropy weight coefficient method. Therefore, an integrated risk evaluation model of meteorological disasters is established and a fine risk division map is drawn with GIS technique. The growing region is divided into four-risk-grade areas, including mild risk area, moderate risk area, severe risk area and severity risk area. The result shows that, from the aspect of risk factors composition for the meteorological disasters of loquat, potential hazard of the disaster-causing factors is the determinant factor influencing the synthetic risk, the vulnerability of the planting area takes the second place, and the damage prevention and mitigation capacity only plays an alleviative role. In the Province, loquat growth regions with severe and more severe integrated risk of meteorological disasters for planting loquat are mainly distributed in the mountain areas with mid-high elevation of the five major mountain ranges, and counties with large growing areas including Putian City, Fuqing City and Yunxiao County; the regions with light integrated risk are mainly in the coastal counties with low elevation in the middle south of the Province (except large planting counties and Dongshan County); and the regions with moderate integrated risk are distributed in the other areas of the Province. Based on the risk evaluation results combined with loquat damage examples in history, it could be verified that the risk evaluation and division results is consistent with the actual situation. The results could offer scientific basis for the adjustment and optimization of loquat planting distribution, and for reducing the integrated risk of loquat planting in Fujian Province.

**Key words:** loquat; meteorological disasters; risk evaluation