

# 黄淮麦区小麦拔节后霜害的风险评估<sup>\* 1</sup>

钟秀丽 王道龙 李玉中 赵鹏 闫旭宇 孙忠富

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

## 摘 要

小麦拔节后抗寒力迅速减弱,遇强冷空气侵入会发生霜害。该文首先分析了黄淮麦区小麦拔节期的变化规律和霜害温度出现的规律。结果表明:逐日进入拔节期的概率随日序的变化可以用正态分布函数来表示;霜害温度出现的累积概率随日序的变化可以用指数方程表示。根据拔节期和霜害温度出现的规律,建立了霜害的风险评估模式。给出了霜害风险度的地区分布,并指出利用模式中的参数值可以判断几种防御措施的有效性。

关键词: 冬小麦; 拔节期; 霜害; 风险评估

## 引 言

小麦拔节后抗寒力迅速减弱,进入霜冻敏感期。此时北方冷空气势力仍然较强,常爆发南下而引起显著降温,低温强度超过小麦能够忍耐的限度,就会发生霜害,使部分叶片或小穗甚至植株地上部死亡。这种灾害曾在许多地方发生并造成严重减产<sup>[1-3]</sup>。河南省农业科学院的研究指出,霜害发生概率的地区差异显著,豫中、豫东最高,豫南其次,豫西较低,豫北最低<sup>[4]</sup>。冯玉香等对小麦整个生育期的霜冻发生概率曾做过统计,黄淮地区有一条霜冻多发带,向南和向北发生概率迅速减小<sup>[5]</sup>,但是对小麦拔节后的霜害风险还未进行专门的统计,而且对这种分布特点都未做出解释。本项研究从拔节期和零下低温的一般变化规律入手,建立风险的定量评估模式,分析风险度的地区分布特点,试图解释地区间差异很大的原因,并用参数值判断几种主要减灾措施在不同条件下的有效性<sup>[5-6]</sup>,为霜害防御提供依据。

## 1 材料和方法

本研究地区主要是黄淮麦区。为进行比较,向周边地区延伸,北到冀东北、晋中和陕北,西到 109°E,南到豫南、鄂北、皖中、苏中,东到海滨。从中

国气象局国家气候中心收集黄淮麦区及其周边地区 37 个农业气象观测站的逐年拔节期和逐年逐日最低气温资料,其中商丘站资料 1980—2003 年共 24 年,其他站均为 1981—2000 年共 20 年,部分站有较系统的霜害调查。用农业气象学和统计学的方法从分析拔节期和低温这两个因素的变化规律入手,找出它们的概率分布,进而建立霜害的风险评估模式。

## 2 结果分析

### 2.1 拔节期的变化规律

利用 1981—2000 年资料统计各站平均拔节期,结果如图 1 所示。可见平均拔节期随纬度增大和海拔高度升高而推迟,离海洋近的地区平均拔节期较迟,秦岭北比秦岭南要迟。

统计各站在平均拔节期前后逐日进入拔节期的概率,可以看出,平均拔节期附近的概率最大;比平均拔节期早或晚的概率较小,而且早(晚)越多,概率越小。图 2 为 1980—2003 年商丘逐日进入拔节期的概率,具有连续型随机变量的概率分布特点。用正态分布方程拟合这些数据:

$$P_{拔} = \frac{\exp[-(N-m)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, $P_{拔}$ 表示由拟合方程计算出的小麦在第  $N$  日进入拔节期的概率, $m$ 是平均拔节期, $N$ 和 $m$ 以

\* 国家科技支撑计划课题(2006BAD04B08)资助。

2005-08-03 收到,2006-07-03 收到再改稿。

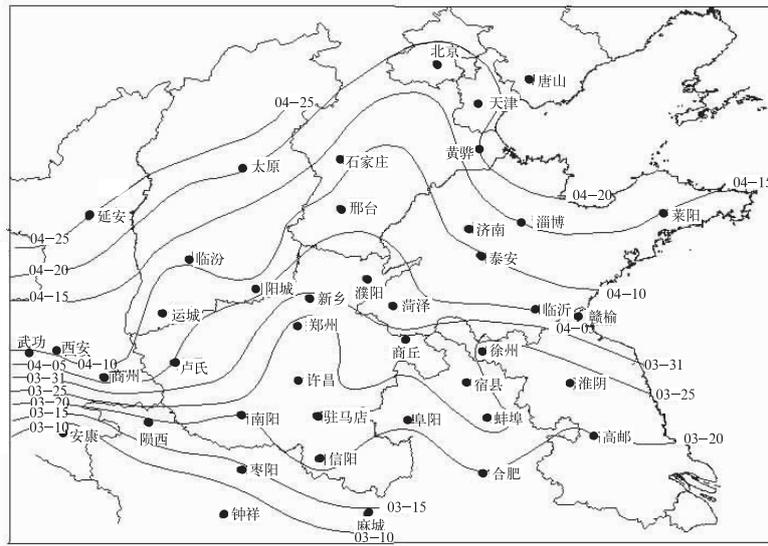


图 1 1981—2000 年黄淮麦区小麦平均拔节期分布

Fig. 1 Average jointing date of winter wheat of different counties in Huang-Huai wheat production area during the period from 1981 through 2000

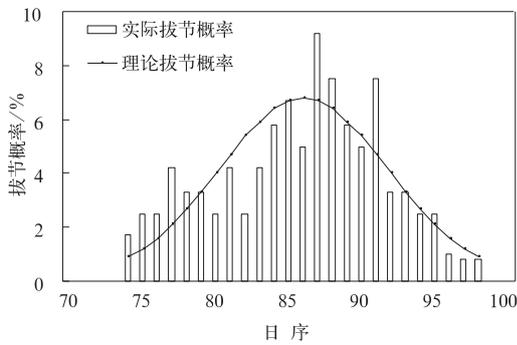


图 2 1980—2003 年商丘逐日进入拔节期的概率  
Fig. 2 The probability of winter wheat developing into jointing stage per day in Shangqiu county, Henan Province, during the period from 1980 through 2003

日序表示,  $\sigma$  是拔节期的标准差。以商丘为例,  $m = 86, \sigma = 5.9$ , 拟合方程为:

$$P_{拔} = \frac{\exp[-(N - 86)^2 / 69.62]}{14.789} \times 100\%$$

算出的理论概率( $P_{拔}$ )与实际概率相关系数为 0.815(样本数为 24), 达极显著水平。根据各站的数据, 分别建立各自的拟合方程, 相关系数都达到极显著水平。因此认为在资料年代足够长的条件下, 每日进入拔节期的概率随日序的变化可以用正态分布函数来表示。

### 2.2 霜害温度出现的规律

小麦霜害的程度取决于低温强度和抗霜力。研究表明: 最低叶温与最低气温之间存在统计学关系,

最低叶温低于最低气温<sup>[7]</sup>。各站的数据表明, 小麦拔节后发生霜冻对应的最低温度, 绝大多数在 0℃ 以下, 且有温度越低受害越重的趋势, 个别在 0℃ 以上, 但接近 0℃。将拔节期前后低于 0℃ 的最低气温(简称霜害温度)以 1℃ 为区间分段进行统计, 分析不同强度的霜害温度出现的规律。

首先计算逐日遇到霜害温度的概率( $Q$ ), 以百分数表示。

拔节期( $N$ )到霜害温度终日( $\mu$ )之间任何一天遇到霜害温度, 植株都可能受害。用累积概率( $G$ )表示第  $N$  日拔节小麦遇到霜害温度的概率, 即

$$G_N = Q_N + Q_{N+1} + Q_{N+2} + \dots + Q_{\mu}$$

如 1986 年 3 月 30 日小麦拔节, 虽然当天遇到最低气温  $-0.1 \sim -1.0$ ℃ 的概率只有 1.7%, 但是以后各日还可能遇到这种低温, 3 月 30 日及其后各日遇到这种低温的累积概率为 10%。这一累积概率才能表示 3 月 30 日拔节的小麦遇到  $-0.1 \sim -1.0$ ℃ 低温的可能性。

分别计算各区间及各界限温度以下霜害温度的逐日累积概率, 图 3 为 1980—2003 年商丘各霜害温度的累积概率随日序的变化。

可见, 在拔节期很早的情况下,  $G_N$  可能超过 100%, 各霜害温度区间和各界限温度以下的累积概率都是随日序增大而呈指数减小的, 但各地减小的速率不同, 用指数方程  $G = d \times e^{b(\mu - N)}$  拟合统计数据。  $G$  表示由拟合方程算出的第  $N$  日拔节遇到该霜害温度的累积概率,  $d$  和  $b$  是回归系数, 其中  $b$  为

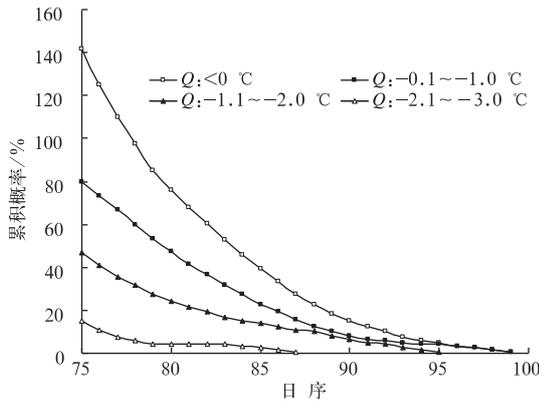


图3 1980—2003年商丘各霜害温度的累积概率随日序的变化

Fig. 3 The variation in accumulative probability of frost temperature occurring with Gregorian day in Shangqiu county, Henan Province, during the period from 1980 through 2003

霜害温度累积概率随日序变化速率,  $\mu$  是霜害温度的终日。商丘站的拟合结果:

$$G_{-0.1 \sim -1.0 \text{ } ^\circ\text{C}} = 2.4 e^{0.1615(98-N)} \quad R^2 = 0.989 \quad (2)$$

$$G_{-1.1 \sim -2.0 \text{ } ^\circ\text{C}} = 3.5 e^{0.1390(94-N)} \quad R^2 = 0.965 \quad (3)$$

$$G_{-2.1 \sim -3.0 \text{ } ^\circ\text{C}} = 2.2 e^{0.1462(86-N)} \quad R^2 = 0.848 \quad (4)$$

$$G_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}} = 3.2 e^{0.177(98-N)} \quad R^2 = 0.976 \quad (5)$$

$$G_{<-1.0 \text{ } ^\circ\text{C}} = 3.5 e^{0.154(94-N)} \quad R^2 = 0.970 \quad (6)$$

$$G_{<-2.0 \text{ } ^\circ\text{C}} = G_{-2.1 \sim -3.0 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

同样拟合其他站点的统计数据, 相关系数都达到极显著水平, 因此可以认为: 指数方程能够很好地表示累积概率随时间的变化规律。

### 3 霜害风险评估

#### 3.1 霜害风险评估模式

将  $P_{拔}$  和  $G_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$  随  $N$  的变化曲线结合起来分析, 看到: ①有些站低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  的终日 ( $\mu$ ) 比最早拔节期 ( $K$ ) 要早, 即最早拔节的年份也不会遇到低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  的低温。这些站小麦拔节后没有遇到低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  温度的风险; ②多数站  $\mu$  比  $K$  要晚, 即在  $K$  到  $\mu$  这段时间里, 拔节后小麦有遇到低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  温度的可能。

某一天 ( $N$ ) 拔节后小麦遇到低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  霜害的概率 ( $f_N$ ) 等于当天进入拔节期的概率 ( $P_{拔}$ ) 与当天低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  的累积概率 ( $G_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ) 的乘积:

$$f_N = P_{拔} \times G_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

显然, 最早拔节期 ( $K$ ) 之前, 因为  $P_{拔} = 0$ , 所以  $f_N = 0$ ; 在最低气温低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  的终日 ( $\mu$ ) 之后, 因为

$G_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0$ , 所以  $f_N = 0$ 。从  $K$  到  $\mu$  之间每一天的  $f_N$  都不等于零, 将它们累加起来, 称为低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  霜害的风险度 ( $F_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ):

$$F_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}} = \sum_{i=K}^{\mu} (P_{拔,i} \times G_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}) \quad (7)$$

式(7)中,  $i$  为日序。

将式(1)和(5)代入式(7), 得出:

$$F_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}} = \sum_{N=K}^{\mu} \frac{d \times \exp[b(\mu - N) - (N - m)^2 / 2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \quad (8)$$

霜害风险度  $F$  是可能遭霜期间逐日霜害概率的总和。不同的霜冻温度, 其  $G$  和  $\mu$  也不同, 算出的  $F$  就不同。以商丘为例  $F_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ,  $F_{<-1.0 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ,  $F_{<-2.0 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ,  $F_{<-3.0 \text{ } ^\circ\text{C}}$ , 分别为 40%, 16%, 2% 和 0%, 与商丘市的资料相比较, 与  $F_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$  比较接近。

用同样的方法分析其他几个有系统霜害调查资料的站点, 也是  $F_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$  最接近实际。因此, 本文以下主要对  $F_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$  进行分析, 并用它代表一个地方的霜害风险度 ( $F$ )。

#### 3.2 参数分析

各站  $P_{拔}$  与  $G_{<0 \text{ } ^\circ\text{C}}$  的关系不同, 决定  $F$  的大小。这些差异都以模式中参数的不同表示出来。

##### ① 平均拔节期及标准差

平均拔节期  $m$  是由自然因素和人为因素共同决定的。冬季气候严寒的唐山只能种植强冬性品种, 拔节期较晚; 洪泽湖畔的兴化, 冬季不冷, 适宜种植春性品种, 拔节期较早。冬春偏暖年拔节早, 反之则晚。这些都反映自然因素对拔节期的影响。有的地点既可种植半冬性品种, 又可种植春性品种, 人为选种前者, 拔节就较晚, 选种后者, 拔节就较早。人为早播则拔节期相应提早, 晚播则推迟。可见人为因素也能够影响拔节期。图1绘出了  $m$  的地区分布。

$\sigma$  是拔节期的标准差。它能够从总体上反映拔节期的年际变化,  $\sigma$  值大则表示拔节期年际变化大。各地的  $\sigma$  值差异较大, 豫南、皖中、苏西北  $\sigma$  值高达 10 以上, 向北减小, 到河北只有 4 以下。影响  $\sigma$  值的因子很多, 其中种植的品种和历年种植品种的冬春性变化可能是最重要的。如武功年年种植冬性品种  $\sigma = 5.0$ ; 有些年份种冬性品种, 有些年份种半冬性品种的濮阳  $\sigma = 6.6$ ; 年年种半冬性品种的菏泽  $\sigma = 7.7$ ; 年年种春性品种的安全  $\sigma = 9.9$ ; 有些年份种强春性, 有些年份种弱春性, 有些年份种半冬性品种的风阳  $\sigma = 12.9$ 。其次, 播种期和温度年际变化

大的地方,  $\sigma$  也较大。  $\sigma$  不同则  $P_{拔}$  的正态分布曲线特征也不同,  $\sigma$  大的曲线比较缓, 平均拔节期的  $P_{拔}$  比较小;  $\sigma$  小的则相反, 曲线比较陡, 平均拔节期的  $P_{拔}$  较大。

### ② 参数 $b$

$b$  反映霜冻温度的累积概率随日序增大而减小的快慢。  $b$  由当地的气候条件决定,  $b$  的地区差异明显, 总的趋势是北部较大, 南部较小。 秦岭以北、太行山以东  $b$  值超过 0.20, 淮河以南则只有 0.1 左右。

### ③ 霜害温度终日

$\mu$  代表某一临界温度的终日, 由当地气候条件

决定。 由北到南气温逐渐增高, 低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的  $\mu$  值逐渐减小, 如黄骅为 104, 商丘 98, 信阳 91, 宿县 87, 合肥 81。 随海拔升高气候变冷,  $\mu$  值变大, 如海拔不足 100 m 的濮阳为 95, 而纬度差不多但是海拔超过 400 m 的临汾为 107。

### 3.3 霜害风险度的空间分布

由式(8)计算各站的霜害风险度(图 4)。 自秦岭以南的汉水上游地区, 经黄淮平原西部, 到淮河中下游平原是高风险度地带, 向南和向北总的趋势是逐渐减小, 其中向北减小较快, 向南减小较慢。

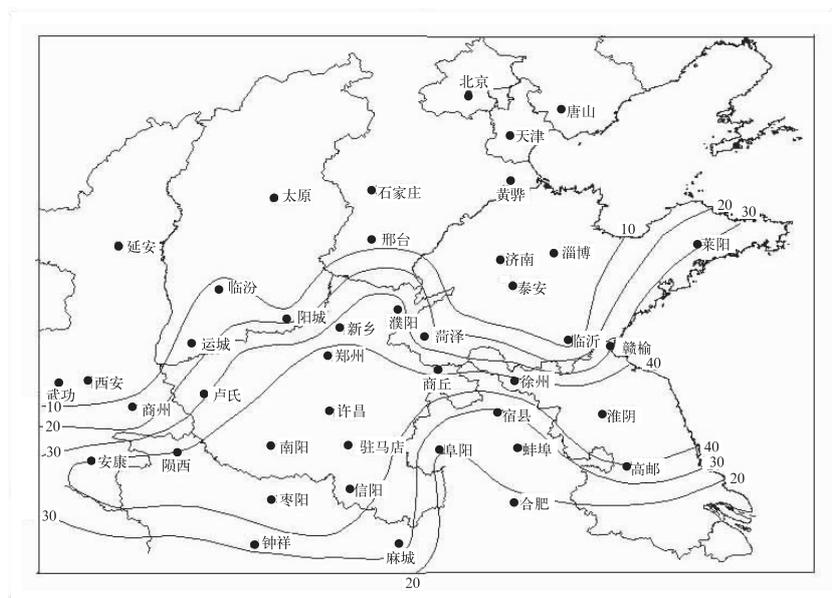


图 4 小麦拔节后霜害风险度的空间分布(单位: %)

Fig. 4 Spacial distribution of risk degree that winter wheat suffers frost injury after developing into jointing stage in Huang-Huai wheat production area (unit: %)

对于上述分布可以作如下初步解释。高风险度地点, 多数是由于最早拔节期( $K$ )出现在日平均气温  $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  终日( $\mu$ )之前 20 d 左右, 即  $(\mu - K)$  较长, 期间  $P_{拔}$  和  $G_{<0\text{ }^{\circ}\text{C}}$  均属中等; 少数是  $(\mu - K)$  很长(超过 30 d), 期间  $P_{拔}$  和  $G_{<0\text{ }^{\circ}\text{C}}$  偏小。其中  $P_{拔}$  和  $G_{<0\text{ }^{\circ}\text{C}}$  与  $\sigma$  和  $b$  密切相关, 因此高风险度地带的存在可以用  $\mu, K, \sigma, b$  等参数的组合来解释。

由高风险度带向北, 有两个因素影响拔节期, 其一是温度逐渐降低对拔节期起推迟作用, 另一是种植的品种由半冬性和春性逐渐改变为冬性, 也对拔节期起推迟作用, 结果是拔节期向北推迟较快。  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  终日只由气候规律决定, 相对推迟较慢。以致可能遭霜期间  $(\mu - K)$  向北明显缩短,  $F$  向北大大减

小。比如徐州向北到黄骅  $K$  推迟了 39 d,  $\mu$  只推迟 6 d, 使  $(\mu - K)$  由 33 d 缩短为 0,  $F$  由 47% 减到 0。

地形影响农业气候条件, 使不同地区  $F$  向北减小的速率各不相同。比如秦岭使安康和武功分属两个气候带——北亚热带和南温带, 前者主要种植春性品种, 后者种植冬性品种,  $K$  推迟了 43 d, 而  $\mu$  只推迟 14 d,  $(\mu - K)$  由 36 d 缩短为 7 d, 平均每向北 1 个纬度  $F$  减小 25%。又如太行山东侧的下沉气流使温度升高, 这种影响在肥乡很显著, 而在新乡不明显, 以致由新乡向北到肥乡拔节期的推迟较慢,  $(\mu - K)$  由 19 d 缩短到 6 d, 而且期间的  $P_{拔}$  减小很快, 平均每向北 1 个纬度  $F$  约减小 22%。

由高风险度带向南, 种植的品种变化较小, 但气

温升高,气候湿润、多阴雨,可能遭霜期间有所缩短,且出现低于 $0^{\circ}\text{C}$ 的概率和进入拔节期的概率都减小,使霜害风险度减小,但减小的速度较慢,如徐州向南到合肥平均每个纬度约减小12%。

#### 4 风险评估模式在霜害防御中的应用

因为霜害严重程度的地区差异很大,所以有必要进行空间上的分类,以便针对各类特点,制定有效的防御对策。应用霜害风险度评估模式,可以做出霜害风险度的农业气候区划,为霜害空间分类提供依据。

人们总结出的某些防御措施,其有效性可以用方程中的参数值来判断。① 推迟拔节期的措施。通过调整品种,适当推迟播期,可以推迟拔节期。这种措施不仅推迟了平均拔节期( $m$ ),而且 $K$ 随之推迟,使 $(\mu-K)$ 的期间缩短,期内 $P_{拔}$ 和 $G_{<0^{\circ}\text{C}}$ 都减小,所以会使 $F$ 变小,可见在减轻霜害风险方面是有效的。在 $b$ 值较大的地方 $G_{<0^{\circ}\text{C}}$ 减小较快, $\sigma$ 值较小的地方 $P_{拔}$ 减小较快,推迟拔节期的有效性较高; $b$ 值较小和 $\sigma$ 值较大的地方,有效性较低。需要注意的是拔节期推迟会使成熟期后延,在干热风害和烂场雨比较严重以及生长季比较短的地区,这种措施的可行性比较小。② 避免异常早拔节。不采用易于早拔节的品种和不早播可以避免异常早拔节。这种措施对平均拔节期推迟很少,主要是明显推迟 $K$ ,使 $(\mu-K)$ 期间缩短, $F$ 变小,因此是有效的。在异常早拔节比平均拔节期早很多而且出现次数较多的地方(往往是 $\sigma$ 较大,如合肥、凤阳比平均拔节期早20d以上的均达到3次, $\sigma$ 分别为10.5和12.9),这种措施不但比较容易实施,而且效果较好。在异常早拔节比平均拔节期早很少,且出现次数较少的地方(往往是 $\sigma$ 较小,如莱阳和运城最早拔节期只比平均拔节期早5d和8d, $\sigma$ 分别为4.2和6.3)效果很小。③ 种植抗霜性较强的品种是减轻霜害的有效措施。由各种参数组合算出的霜害风险度较高的地方,采用这种措施能取得较好的效果;风险度低的地方则意义不大。前两种措施有效性小的地方,选用这种措施则更有必要。

霜害严重程度与许多因素有关,上述风险度评

估模式只考虑部分因素,所以评估的风险度可能与实际霜害有明显差异。比如甲乙两地风险度相近,但甲地的实际霜害明显小于乙地,通过对比分析两地的品种、播期、栽培管理、水肥运作等,找出造成差异的原因,总结出减灾的经验。

#### 5 结 论

1) 冬小麦拔节期规律和霜害温度的出现规律是影响冬小麦拔节后霜冻害风险度的主要因素,其中拔节期主要受气候和栽培品种的冬春性的影响,而霜害温度出现的规律则主要受气候条件的影响。

2) 由建立的霜害风险评估模式计算出黄淮海地区各地的霜害的风险度。该地区的高风险度地带位于其中部,即自秦岭以南的汉水上游地区,经黄淮平原西部,到淮河中下游平原的霜害风险度较高。向南和向北总的趋势是逐渐减小,其中向北减小较快,向南减小较慢。

3) 该霜害风险评估模式对于霜害防御对策的提出有指导意义。如根据模式中参数的特征,可以判断不同地区应该采用何种防霜措施更为有效。

#### 参 考 文 献

- [1] 卜慕华. 1953及1954年山西省小麦春霜冻害的调查报告. 北京: 财政经济出版社, 1957: 1-18.
- [2] 皇甫自起, 常守乾, 李秀花. 豫东地区小麦冻害调查分析. 河南农业科学, 1996, (4): 3-6.
- [3] 罗东亮, 于连城. 小麦冻害研究初报. 河南农业科学, 1997, (2): 8-9.
- [4] 河南省农业科学院. 河南小麦栽培学. 郑州: 河南科学技术出版社, 1988: 9-28.
- [5] 冯玉香, 何维勋, 孙忠富. 我国冬小麦霜冻害的气候分析. 作物学报, 1999, 25(3): 335-340.
- [6] 冯玉香, 何维勋. 霜冻的研究. 北京: 气象出版社, 1996: 158-178.
- [7] 胡新. 小麦霜冻调控技术. 北京: 中国农业科技出版社, 2001: 81-119.
- [8] 何维勋, 冯玉香. 中国农业小气候研究进展. 北京: 气象出版社, 1993: 321-325.
- [9] 王怡, 高翔. 小麦品种春性化趋势成因分析. 国外农学——麦类作物, 1995, (3): 40-41.

## Risk Assessment of Frost Damage in Wheat

Zhong Xiuli Wang Daolong Li Yuzhong Zhao Peng Yan Xuyu Sun Zhongfu

(*Institute of Agro-environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081*)

### Abstract

The resistance of the winter wheat drops rapidly when the plants begin to joint in early spring, in which season air temperatures fluctuate frequently. Winter wheat plants are prone to spring frost injury once strong cold air invades. The variation in wheat jointing date and the occurrence of low temperatures for frost injury (LTFI) in Huang-Huai wheat production areas are analyzed. The jointing date is affected mainly by cultivars growth. The occurrence of LTFI is mainly determined by the local climate. The variation in probability of wheat developing into jointing stage with Gregorian day could be expressed well by normal distribution function, and the accumulative probability of the occurrence of LTFI by exponential function. Based on these analyses, the mathematical model for assessing the degree of frost injury risk (DFIR) is then established. DFIR is mainly determined by such parameters as the termination date for some frost temperature ( $\mu$ ), the earliest jointing date ( $K$ ), the standard deviation of the jointing date ( $\sigma$ ), and the rate of variation in the accumulative probability of frost temperature with Gregorian day proceeding ( $b$ ) etc. Parameters in the assessment model differ among the counties located in Huang-Huai and around area, leading to the different DFIR. According to the DFIR function, the zone with high DFIR is from the upriver region of Hanshui River that lies to the south of the Qinling Mountain, via the western Huang-Huai plain, to the plain lying in the mid-lower region of Huaihe River. The DFIR tends to drop gradually northwards and southwards, more rapidly for the former than the latter. Some effective measures could be chosen according to the properties of the parameters in the given area. In the area with high  $b$  value and low  $\sigma$  value, postponing the jointing stage may reduce the DFIR effectively; while in the area with high  $\sigma$  value, avoiding wheat jointing particularly early, appropriate cultivars and sowing date seem to be a good strategy to reduce DFIR; for the area of high DFIR calculated from the function with combined parameters, growing the frost resistant varieties becomes the most effective measure to avoid frost injury.

**Key words:** winter wheat; jointing stage; frost injury; risk assessment