

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2014.04.011

一种等分作物花粉扩散圆形源区的方法

胡继超^{1*}, 陆锡青², 胡凝¹, 江晓东¹, 卢宗志³, 姚克敏¹

¹南京信息工程大学应用气象学院, 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044;

²广东省台山市气象局, 广东 台山 529200; ³吉林省农业科学院

植物保护研究所, 吉林 长春 136100

摘要:【背景】转基因作物花粉在大气中扩散会引起基因漂流, 从而可导致不可预知的环境风险, 运用模型预测可评估其花粉扩散状况、定量确定可靠的安全扩散距离。为了应用高斯烟羽模型应用于模拟转基因作物花粉在大气中的扩散浓度, 提出了一种如何将半径为 R 的圆形花粉源区划分成许多等面积小面元的方法。【方法】通过数学推导, 首次提出了各等面积面元中心点坐标的计算公式。【结果】根据在中国东北地区吉林省公主岭玉米花粉扩散和基因漂流的试验观测资料, 将该公式应用到高斯烟羽扩散模型中, 模拟了玉米花粉扩散到源区外不同距离处的浓度, 对比花粉扩散模拟值与实测值, 两者具有较好的一致性, 表明应用该公式模拟花粉扩散能取得令人满意的效果。【结论与意义】分析证明这种推导划分半径为 R 的圆形花粉源区各面元中心点坐标的计算公式是可靠的, 该方法可为应用高斯烟羽模型计算花粉源区内不同位置点单个源强对源区外某一距离处的花粉浓度的贡献提供便利。

关键词: 花粉扩散; 源区划分方法; 高斯烟羽模型

A method to divide the circular source area of crop pollen dispersal into equal parts

Ji-chao HU¹, Xi-qing LU², Ning HU¹, Xiao-dong JIANG¹, Zong-zhi LU³, Ke-min YAO¹

¹Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; ²Taishan Meteorological Bureau, Taishan, Guangdong 529200, China;

³Institute of Plant Protection, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun, Jilin 136100, China

Abstract: 【Background】As a simple and effective tool, Gaussian plume model is commonly used to calculate the pollen dispersal concentration and determinate the gene flow safety distance. In order to simulate the pollen dispersal concentration of genetically modified crops, the accurate estimation of source strength contribution is essential in Gaussian plume model. 【Method】In this paper, using mathematical derivation, we propose for the first time a method how to divide equally circular pollen source area into lots of smaller parts and identify the center point coordinates of each parts. An example of its application example is given. 【Result】Based on observed data from the maize pollen dispersal and gene flow experiment conducted in Gongzhuling (Jilin Province, north-east China), the formula was applied into Gaussian plume diffusion model to calculate the contribution of each small parts' pollen source strengths. The maize pollen dispersal concentration at different distances out of the pollen source area was estimated. The simulated and observed values results from these calculations showing a similar values suggest that good agreements, and it showed that the application of the formula to simulate pollen dispersal could obtain satisfactory results and could be appropriate. 【Conclusion and significance】The formula to determine the center point coordinate of each small pollen source area is reliable. This method is useful to improve the convenient calculation of each small source strength contribution to pollen concentration outside of source area with Gaussian plume model.

Key words: pollen dispersal; division of circular pollen source area; Gaussian plume model

自 1996 年转基因作物商业化种植以来, 其在全球发展迅猛, 但转基因作物种植的环境安全问题一直是关注的热点之一。由于转基因作物花粉在大气中扩散会引起基因漂流, 从而可导致不可预知

收稿日期 (Received): 2014-10-13 接受日期 (Accepted): 2014-11-04

基金项目: 国家转基因生物新品种培育重大专项 (2014ZX08011-001)

作者简介: 胡继超, 男, 副教授, 博士。研究方向: 农业气象模型

* 通讯作者 (Author for correspondence), E-mail: jchu2005@126.com

的环境风险(贾士荣,2004),因此运用模型预测评估其花粉扩散状况,定量确定可靠的安全扩散距离是一种重要方法。目前,应用较多的模型是高斯烟羽模型(胡凝,2010; Skelsey,2008),它具有机理性且计算简便点。在运用高斯烟羽模型模拟作物花粉在大气扩散时,需要把花粉面源源区划分为许多点源进行积分运算,通常以中心点为坐标轴心将区域划分为许多等面积的小方块进行累积计算,得到花粉扩散的源强(Yao,2008)。当花粉源区呈不规则形或方形时,由于大气湍流的存在,风向不停变化,源区外不同水平方位上到区域中心点距离相等的观测点到源区边缘的距离不相等,会给源区外花粉扩散浓度的计算带来不便,因此科学试验设计中倾向将花粉贡献源区设计成圆形(Messeguer,2004; Yuan,2007),但对如何划分源区和确定坐标点等问题还未见报道。本文将对该问题进行探讨,并通过数学方法推导出所划分面元中心坐标点的计算公式。

1 面元中心点坐标计算公式推导

1.1 坐标系的建立

以试验田花粉源区圆心 O 为坐标原点、主风方向为 x 轴、主风的垂直方向为 y 轴建立直角坐标系。设花粉源区最大半径为 R_{max} , 将其 N 等分, 等分间距为 ΔL , 即 $N = R_{max} / \Delta L$ 。这样将圆形源区分成 N 个半径递增的同心圆, $N-1$ 个圆环厚度(即外内半径之差)等于 ΔL 的圆环, 然后将每个圆环划分成总数目 m 不等但面积相等的小面元(图 1)。

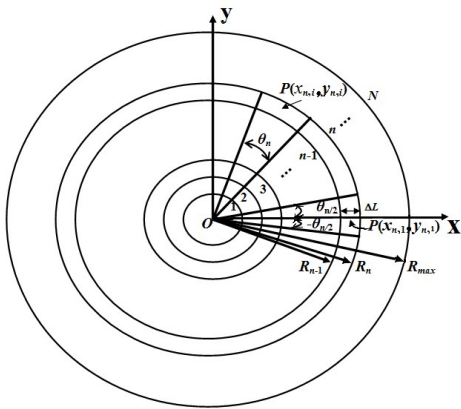


图 1 花粉源区划分示意图

Fig.1 A diagram of pollen source area division

1.2 面元中心点坐标计算公式推导

设第 n 层的圆环, 其外半径为 R_n , 第 n 层每个小面元对应的圆心角为 θ_n , 第 n 层第 i 个小面元 (n, i) 的中心点坐标记为 $P(x_{n,i}, y_{n,i})$, 其对应的极坐标记为 $P(R_{n,i}, \theta_{n,i})$, $1 \leq n \leq N$, n 为正整数, N 为最大层数, $1 \leq i \leq 2\pi/\theta_n$, i 为正整数。

由扇形面积公式知 $S = 0.5\theta R^2$, 第 n 层的每个小面元的面积为:

$$\Delta S_n = 0.5\theta_n R_n^2 - 0.5\theta_n R_{n-1}^2 \quad n \geq 2$$

$$\text{故有 } \theta_n = 2\Delta S_n / (R_n^2 - R_{n-1}^2).$$

在直角坐标系中, 小面元中心点 $P(x_{n,i}, y_{n,i})$ 如图所示, 其极坐标 $P(R_{n,i}, \theta_{n,i})$ 为

$$R_{n,i} = \bar{x} = \frac{\int x d\sigma}{\int d\sigma} \quad (1)$$

$$\theta_{n,i} = \bar{y} = 0 \quad (2)$$

对(1)式进行极坐标代换, 即 $x = \rho \cos\theta$, $d\sigma = \rho d\rho d\theta$, 则有

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\int \rho^2 \cos\theta d\theta}{\int \rho d\rho d\theta} = \frac{\int_{R_{n-1}}^{R_n} \rho^2 d\rho \int_{-\theta_n/2}^{\theta_n/2} \cos\theta d\theta}{\int_{R_{n-1}}^{R_n} \rho d\rho \int_{-\theta_n/2}^{\theta_n/2} d\theta} \\ &= \frac{\frac{1}{3}(R_n^3 - R_{n-1}^3)(\sin(\theta_n/2) - \sin(-\theta_n/2))}{\frac{1}{2}(R_n^2 - R_{n-1}^2)(\theta_n/2 - (-\theta_n/2))} \end{aligned}$$

$$= \frac{4 \sin(\theta_n/2)}{3 \theta_n} \frac{(R_n^3 - R_{n-1}^3)}{(R_n^2 - R_{n-1}^2)}$$

也即:

$$\bar{x} = \frac{4 \sin(\theta_n/2)}{3 \theta_n} \frac{(R_n^3 - R_{n-1}^3)}{(R_n^2 - R_{n-1}^2)} \quad (3)$$

花粉源区最大半径为 R_{max} 以间距 ΔL 等分, 得 N 份, $N = R_{max} / \Delta L$ 。可知 $R_1 = \Delta L$, $R_n = n\Delta L$, 代入(3)得到,

$$\bar{x} = \frac{4 \sin(\theta_n/2)}{3 \theta_n} \frac{(3n^2 - 3n + 1)}{(2n - 1)} \times \Delta L \quad (4)$$

第一层半径为 $R_1 = \Delta L$, 设 $\theta_1 = \pi/2$, 则 $\Delta S_1 = 0.5 \theta_1 R_1^2 = \pi \Delta L^2 / 4$, 这是每个面元划分成的固定面积, 它们都等于 $\pi \Delta L^2 / 4$, 即 $\Delta S_n = \pi \Delta L^2 / 4$ 。所以,

$$\begin{aligned} \theta_n &= \frac{2\Delta S_n}{(R_n^2 - R_{n-1}^2)} = \frac{2 \times \pi \Delta L^2 / 4}{(n\Delta L)^2 - ((n-1)\Delta L)^2} \\ &= \frac{\pi}{2(2n-1)} \end{aligned} \quad (5)$$

将(5)代入(4)式, 得到

$$\bar{x} = \frac{8}{3\pi} \sin(\pi / (4(2n-1))) \times (3n^2 - 3n + 1) \times \Delta L \quad (6)$$

由于,当 $n=1$ 时,

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{R_1} \rho^2 d\rho \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \cos\theta d\theta}{\int_0^{R_1} \rho d\rho \int_{-\pi/4}^{\pi/4} d\theta} = \frac{8}{3\pi} \sin(\pi/4) \times \Delta L$$

也满足(6)式,所以对所有层序数 $n(1 \leq n \leq N)$ 都成立,从而得到,

$$R_{n,i} = \frac{8}{3\pi} \sin(\pi/(4(2n-1))) \times (3n^2 - 3n + 1) \times \Delta L \quad (7)$$

由于划分时,已规定每层第一个面元中心点在 X 方向的坐标轴上,即 $\theta_{n,1} = 0$ 。由划分方法知, $\theta_{n,i} = \theta_{n,1} + \theta_n \times (i-1)$, $2 \leq i \leq 2\pi/\theta_n$, i 为整数。故, $\theta_{n,i} = \theta_n \times (i-1)$ 对所有划分的面元都成立,得到,

$$\theta_{n,i} = \frac{(i-1)\pi}{2(2n-1)}, 1 \leq i \leq 2\pi/\theta_n, 1 \leq n \leq N \quad (8)$$

将每个面元中心点的极坐标 $P(R_{n,i}, \theta_{n,i})$ 转换为对应的直角坐标 $P(x_{n,i}, y_{n,i})$ 得到

$$\begin{aligned} x_{n,i} &= R_{n,i} \cos(\theta_{n,i}) \\ &= \frac{8}{3\pi} \sin(\pi/(4(2n-1))) \times (3n^2 - 3n + 1) \times \Delta L \times \cos(\pi(i-1)/(2(2n-1))) \end{aligned} \quad (9)$$

$$n=1, 2, 3, \dots, N; i=1, 2, 3, \dots, m; m=4(2n-1)$$

$$\begin{aligned} y_{n,i} &= R_{n,i} \sin(\theta_{n,i}) \\ &= \frac{8}{3\pi} \sin(\pi/(4(2n-1))) \times (3n^2 - 3n + 1) \times \Delta L \times \sin(\pi(i-1)/(2(2n-1))) \end{aligned} \quad (10)$$

$$n=1, 2, 3, \dots, N; i=1, 2, 3, \dots, m; m=4(2n-1)$$

2 公式应用实例

于 2010 年在吉林省公主岭(43.52°N, 124.8°E)进行玉米花粉扩散与基因漂流试验,试验区域平坦开阔。试验花粉源区半径 80 m。当地玉米开花期间主风方向为西南风,因此在花粉源区外主风向为下风区 N、NNE、NE、ENE、E 夹角为 22.5° 的 5 个方位的不同距离观测点竖立测杆用载玻片捕捉玉米花粉,观测点分别距离大圆外缘边界 1、3、6、10、15、20、30、40、50、75、100、135 m 等 12 个距离点,每天分别在 6:00 和 18:00 取放玻片,在室内用显微镜读数,确定玉米花粉扩散浓度。同时在玉米花粉源区中心附近位置,树立 10 m 微气象梯度塔,自动监测温度、湿度、风速、风向等气象要素,观测高度为 3、4、5.5、7.5、10 m,自动气象站数据以 1 Hz 的频率

自动采集,每 10 min 记录 1 次保存。

如果取 $\Delta L = 0.5$ m, $R_{\max} = 80$ m, 则 $N = R_{\max}/\Delta L = 160$, (9) 和 (10) 式变为

$$\begin{aligned} x_{n,i} &= 0.5 \times \frac{8}{3\pi} \times \sin(\pi/(4(2n-1))) \times (3n^2 - 3n + 1) \\ &\times \cos(\pi(i-1)/(2(2n-1))) \end{aligned} \quad (11)$$

$$n=1, 2, 3, \dots, 160; i=1, 2, 3, \dots, m; m=4(2n-1)$$

$$\begin{aligned} y_{n,i} &= 0.5 \times \frac{8}{3\pi} \times \sin(\pi/(4(2n-1))) \times (3n^2 - 3n + 1) \\ &\times \sin(\pi(i-1)/(2(2n-1))) \end{aligned} \quad (12)$$

$$n=1, 2, 3, \dots, 160; i=1, 2, 3, \dots, m; m=4(2n-1)$$

即将整个源区划分为 102400 个等面积(面积 0.19635 m²) 的区域;第 1 圈等分为 4 个半径为 0.5 m、圆心角为 $\pi/2$ 的扇形小面元;第 2 圈等分为 12 个圆环厚度为 0.5 m、圆心角为 $\pi/6$ 的扇环小面元;最外 1 圈等分为 1276 个的扇环小面元,越到外圈,面元越趋近长方形(长 0.5 m、宽 0.3927 m)。

基于高斯烟羽扩散的玉米花粉模型,根据大气扩散理论(蒋维楣等,2004),位于 (i, j, H) 的花粉源对下风向 (x, y, H) 处花粉浓度 $q(x-i, y-j, H)$ (Grain · m⁻³), 可由(13)式计算:

$$\begin{aligned} q(x-i, y-j, H) &= \frac{Q(i, j, H)}{2\pi \bar{u}_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(y-j)^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left\{-\frac{[z-H+(x-i)V_d/\bar{u}_H]^2}{2\sigma_z^2}\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式中, H 为平均玉米株高(m), (i, j, H) 表示花粉源区面元中心的坐标, $Q(i, j, H)$ 为玉米花粉的有效源强(Grain · s⁻¹)。

以玉米源区各面元中心为花粉源坐标,分别计算各点源在源区外下风区不同距离处扩散的花粉浓度,分别对每一距离点 (x, y) 浓度值求和,可得到源区外不同距离点上的玉米花粉浓度,即:

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{8i-4} q(x-i, y-j, H) \quad (14) \\ i &= 1, 2, \dots, M, \dots, N; j = 1, 2, \dots, 4 \cdot (2i-1); N = R_{\max}/\Delta L \end{aligned}$$

式中, N 为同心环个数; R_{\max} 花粉源区最大外径,为 80 m(公主岭试验); ΔL 为同心环划分步长; (i, j) 为花粉点源坐标。应用上述模型模拟得到源区外不同方位的玉米花粉浓度随距离变化如图 2A,模拟值与实测值分布在 1:1 线附近(图 2B),表明两者有很好的一致性,模拟效果较好。

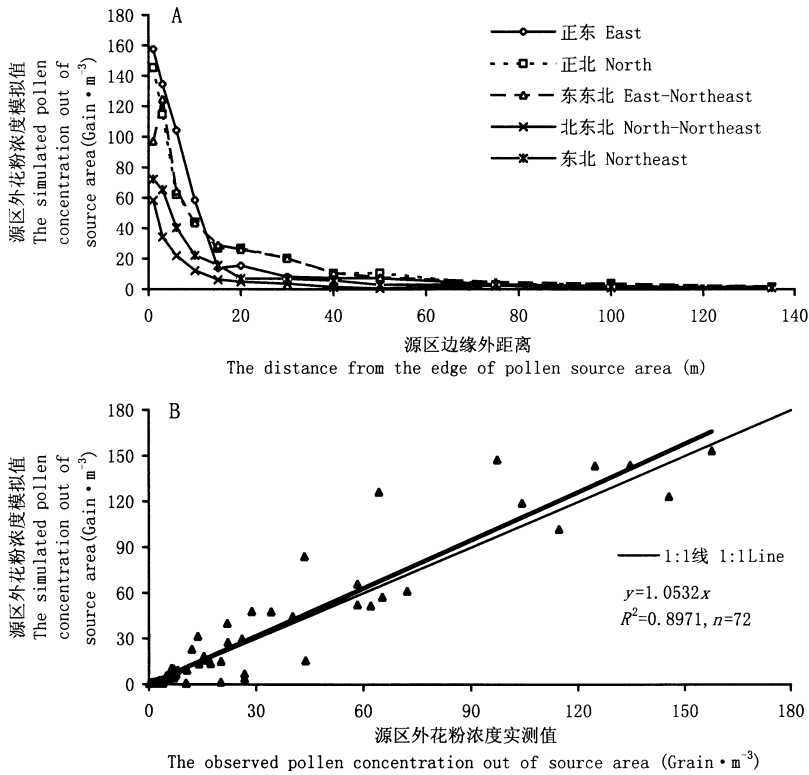


图 2 源区外不同方位的玉米花粉浓度模拟结果比较

Fig.2 Comparison of the observed and simulated values of maize pollen concentrations from the pollen source area

3 结论

本文提出了将作物圆形花粉源区划分成许多等面积小面元的方法,通过数学推导,首次得到了各面元中心点坐标的计算公式,并给出一个实例,将其应用到高斯烟羽模型中,计算各个玉米花粉小点源对源区外不同距离处玉米花粉扩散的浓度的贡献。将模型得到的玉米花粉扩散浓度的模拟值与观测值进行对比,两者有很好的一致性,模拟效果较好,表明面元中心点坐标的计算公式有效,保证了高斯模型模拟结果的可靠性。本研究解决了将高斯模型应用到作物花粉扩散模拟时,如何划分源区及如何估计源强对源区外花粉扩散浓度贡献的问题,是计算方法上的突破,为花粉扩散计算提供了便利。

尽管本研究只提供了一个应用实例,但推导出微面元中心点坐标的计算公式是没有任何假设条件的,因此也能用于其他类似的植物花粉扩散实例中。

参考文献

胡凝, 陈万隆, 刘寿东, 罗卫红, 赵莉莉, 高蓓. 2010. 水稻花粉扩散的模拟研究. *生态学报*, 30(14): 3665-3671.

贾士荣. 2004. 转基因作物的环境风险分析研究进展. *中国农业科学*, 37(2): 175-187.
 蒋维楣, 孙鉴宁, 曹文俊, 蒋瑞宾. 2004. 空气污染气象学教程. 气象出版社.
 Messeguer J, Marfà V, Català M M, Guiderdoni E and Melé E. 2004. A field study of pollen-mediated gene flow from Mediterranean GM rice to conventional rice and the red rice weed. *Molecular Breeding*, 13: 103-112.
 Skelsey P, Holtslag A A M and van der Werf W. 2008. Development and validation of a quasi-Gaussian plume model for the transport of botanical spores. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 1383-1394.
 Yao K M, Hu N, Chen W L, Li R Z, Yuan Q H, Wang F, Qian Q and Jia S R. 2008. Establishment of a rice transgene flow model for predicting maximum distances of gene flow in southern China. *New Phytologist*, 180: 217-228.
 Yuan Q H, Shi L, Wang F, Cao B, Qian Q, Lei X M, Liao Y L, Liu W G, Cheng L and Jia S R. 2007. Investigation of rice transgene flow in compass sectors by using male sterile line as a pollen detector. *Theoretical and Applied Genetics*, 115: 549-560.

(责任编辑:郭莹)

