

王 勇.基于拉格朗日随机游走模型的水稻花粉扩散模拟[J].气象研究与应用,2024,45(3):111-116.

WANG Yong.Pollen diffusion simulation of rice based on Lagrange random walk model[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2024,45(3):111-116.

基于拉格朗日随机游走模型的水稻花粉扩散模拟

王 勇

(贺州市气象局, 广西 贺州 542899)

摘要:根据5m×5m(T1)、10m×10m(T2)和15×15m(T3)的花粉源尺寸,利用基于拉格朗日随机游走的水稻花粉扩散模型研究水稻花粉在花粉源区的沉降量和面源花粉浓度累加值。结果表明:(1)花粉沉降量的实测值与模拟值之间的相关性较好,对于优化后的拉格朗日随机游走水稻花粉扩散模型切实可行。(2)水稻花粉沉降量一开始先急剧上升,之后保持平稳缓慢增加,在源区外呈负指数形式规律递减。随着花粉源尺寸增大,风对水稻花粉扩散的影响更显著,即风对大尺寸花粉源相比于小尺寸的花粉源影响更大。(3)随着花粉源尺寸的增大,花粉面源的浓度累加值是增大的,这种变化的趋势是先急剧增加然后逐渐趋于平缓。

关键词:花粉浓度;水稻花粉扩散;花粉源尺寸;花粉沉降

中图分类号:P49

文献标识码:A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.3.17

水稻作为一种重要的农业经济作物,是风媒传粉的自花授粉植物,其基因飘流一直以来备受关注^[1-2]。基因飘流是指作物的目标基因向附近的近缘种的自发转移,导致近缘种发生内在的基因变化,具有目标基因的一些特征。风媒介导的花粉扩散^[3]是水稻基因飘流的主要渠道之一。在自然界中,栽培种和野生近缘种之间经常出现这种基因飘流,它是一个普遍存在的自然现象,也是物种进化的动力^[4-5]。非目标花粉向不育系的基因飘流会直接影响种子的质量,造成经济损失^[6-8]。因此,掌握水稻基因飘流规律、设置合理的隔离距离、控制水稻的基因飘流,对保障国家粮食安全具有重大意义。

我国水稻种植面积广,南起海南三亚(18°N)北至黑龙江黑河(52°N),只要有水源的地方都有水稻种植。各地气候迥异,使得一地的田间试验结果因试验材料、环境条件的不同常常变异范围较大,在异地应用这些田间试验数据具有很大的局限性^[9-10]。此外,目前尚有一些问题仅有定性的答案而缺乏定量的数据。比如,扩散到花粉源区以外的

花粉量会持续增加吗?有没有临界点?基于现有的试验条件,这些问题很难用田间试验数据来回答,模型是解决这些问题的有效方法。国内外已经进行了大量水稻基因飘流方面的研究,其中国内有一个从事水稻基因飘流的研究团队建立了模型:由胡凝等^[11-16]以高斯烟羽模型为基础建立的。

基于以上背景,本文综合考虑水稻本身的开花习性以及气象条件对花粉释放量的影响,开发水稻花粉源强子模型,与拉格朗日随机游走模型进行耦合,建立水稻花粉扩散模型。通过优化水稻花粉沉降速度的参数化方案,改善水稻花粉扩散过程的模拟精度。该研究可以有效提高水稻花粉扩散模型的可靠性和准确性,为水稻基因飘流的风险评估和安全监管提供基础数据和科学依据。

1 资料与方法

1.1 建立模型

1.1.1 花粉扩散的模拟

采用拉格朗日随机游走模型来模拟水稻花粉

收稿日期:2024-01-19

基金项目:贺州市科学研究与技术开发计划项目(贺科技202210)

作者简介:王勇(1994-),助理工程师,从事气象预报预警与农业气象服务。E-mail:3035348241@qq.com

的运动轨迹。根据观测到的风矢量来确定水平坐标轴的方向, x 轴方向与水平风矢量一致, y 轴为侧风方向, z 轴垂直于地面。花粉在一定时间步长 (Δt) 内在 i 方向上的位移 (ΔX_i) 为:

$$\Delta X_i = U_i \Delta t \quad (1)$$

式中, $i=1, 2, 3$, 分别代表 x, y, z 方向; U_i 是三维风矢量, U_1, U_2, U_3 分别代表 x, y, z 方向上的风速 u, v, w 。在垂直方向上, 由于受重力作用, 花粉的位移为

$$dz = (w - v_s) dt \quad (2)$$

式中, v_s 是花粉在静止空气中的自由沉降速度。

利用雷诺分解法则, 每一个风速分量的瞬时量都被分解成平均量和脉动量两个部分, 即:

$$U_i = \bar{U}_i + U'_i \quad (3)$$

这里, 假设 y 和 z 方向上的平均风速都为 0。每一个时刻的风速脉动量都是由前一个时刻的风速脉动量计算得到的:

$$U'_i(t+\Delta t) = R_{il}(\Delta t) U'_i(t) + \sigma_i (1 - R_{il}^2(\Delta t))^{0.5} d\zeta_i \quad (4)$$

式中, $d\zeta_i$ 是一组相互独立的随机数, 符合标准正态分布, 它的平均值为 0, 标准差为 1; R_{il} 为拉格朗日自相关函数,

$$R_{il} = \exp(1 - \frac{\Delta t}{T_{il}}) \quad (5)$$

其中, T_{il} 是拉格朗日时间尺度。

假设花粉进入冠层后全部被吸附, 那么在冠层顶部 (i, j) 位置上的花粉沉降量为:

$$D(ij) = \frac{Q(m, n)}{N_p S} \sum_{n=i}^{N_p} Dn(ij) \quad (6)$$

这里, Q 是 (m, n) 网格单元的实际源强。由于花药中的花粉并不会全部释放出来, 有大量花粉残留在花药中或直接沉降到原地, 只有一小部分能逃逸到水稻冠层上方, 这些花粉称为实际源强, 这里取潜在源强一半^[12]。此外, N_p 代表释放的标记粒子总数, D_n 是落在 (i, j) 网格单元的可能性, S 是网格单元的面积。最后, 将所有网格单元的花粉源强沉降到 (i, j) 网格单元的花粉量累积, 与实测的花粉沉降量进行比较。

注: 潜在源强指能够释放到大气中的最大花粉量, 从花药中释放出来的所有花粉分成两部分, 一部分落在花粉源区内, 不会产生基因漂流, 为无效源强; 另一部分会扩散至花粉源区外, 为有效源强, 即实际源强, 根据有效源强比公式 $r=Q/(Q_1+Q)$, 其中 r 为有效源强比, Q 为花粉源区外累积花粉量, Q_1 为花粉源区内累积花粉量, 根据实测数据拟合, 近

似取实际源强为潜在源强的一半。

1.1.2 气象参数的确定

模型的输入量是水平平均风速 \bar{U} 和速度方差 $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ 以及拉格朗日时间尺度 TL 。假设这些统计量在水平方向上是均匀的; 而在垂直方向上, 根据以往的研究发现, 这些统计量的廓线与摩擦速度 u_* 、莫宁-奥布霍夫长度 L 有关。

在冠层上方, 水平平均风速的廓线呈现对数分布:

$$U = \frac{u_*}{\kappa} [\ln(\frac{z-d}{z_0}) + \varphi] \quad (7)$$

这里, z 为花粉的位移高度, d 为零平面位移, z_0 为粗糙度, φ 为稳定度修正项,

$$\varphi = \begin{cases} 4.7 \frac{z-d}{L} & L > 0 \\ -2 \ln(\frac{1+\alpha}{2}) - \ln(\frac{1+\alpha^2}{2}) + \tan^{-1}(\alpha) - \frac{\pi}{2} & L < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, L 是莫宁-奥布霍夫长度, $\alpha = [1 - 15(z-d)/L]^{0.25}$ 。

在稳定和中性条件下, 速度方差 $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ 是不随着高度变化的,

$$\sigma_u = \sigma_v = 2.4u_* \text{ 和 } \sigma_w = 1.25u_* \quad (9)$$

这里, u_* 是摩擦速度, $u_*^2 = -\overline{u'w'}$ 。在不稳定条件下:

$$\sigma_u = \sigma_v = u_* \left[4 + 0.6 \left(\frac{z_{PBL}}{-L} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\sigma_w = 1.25u_* \left(1 - 3 \frac{z-d}{L} \right)^{1/3}$$

式中, z_{PBL} 是边界层厚度, 在不稳定、中性和稳定条件下, z_{PBL} 分别取 1500 m、700 m 和 300 m。

拉格朗日时间尺度为:

$$TL = \begin{cases} \frac{0.5z}{\sigma_w} \left(\frac{1}{1 + 5z/L} \right) L > 0 \\ \frac{0.5z}{\sigma_w} \left(1 - \frac{6z}{L} \right)^{0.25} L < 0 \end{cases} \quad (11)$$

1.1.3 重粒子的订正

花粉在湍流场中的运动受控于湍流场、颗粒的惯性和自由沉降速度。单个颗粒在流体中的沉降过程分为两个阶段: 加速段和等速段。对于小颗粒, 加速段极短, 通常可以忽略; 然而对于花粉这样的大颗粒, 初始的加速段对于沉降速度影响非常显著。据此需要考虑“交叉轨迹效应”, 用以表示重粒子因惯性、重力的影响而不能完全跟随着湍流运动, 实际运动轨迹和湍流运动轨迹之间形成交叉的现象。这里利用时间尺度订正参数来修正重粒子的交叉轨迹效应。大粒子轨迹的拉格朗日时间尺度 TP 要小于 TL , 两者的关系为:

$$T_{3p} = \frac{T_{3L}}{\sqrt{1 + (\beta v_s / \sigma_w)^2}} \quad (12)$$

式中, β 是一个经验系数, v_s 是花粉的沉降速度。在显微镜下, 新鲜花粉的形状近似球形, 平均直径为 42 μm 。根据 Stokes 公式:

$$v_s = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_a) g}{18\nu} \quad (13)$$

式中, d_p 是花粉直径(单位: m); $\rho_p = 1.23 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $\rho_a = 1.27 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别代表水稻花粉和空气的比重; ν 是空气的动力粘滞系数: $1.8 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; g 为重力加速度: $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。由此, 水稻花粉的自由沉降速度近似为 $0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.1.4 引入花粉含水量

随着花粉在空气中的暴露时间延长, 花粉逐渐脱水造成重量减轻、体积变小, 进而改变花粉沉降速度。花粉的脱水过程主要取决于空气中的饱和水汽压差, 因此

$$\omega_p = \omega_{p0} \exp(-0.0006 \cdot VPF \cdot \tau) \quad (14)$$

式中, τ 是花粉的离体时间(单位: min); ω_p 和 ω_{p0} 分别指离体 τ min 后的花粉含水量和新鲜花粉的初始含水量(单位: %), $\omega_{p0} = 60.0\%$; VPF 是空气的饱和水汽压差(单位: hPa)。

花粉含水量与花粉体积之间的关系可以表示为:

$$V = \frac{\pi d_0^3}{6} - \frac{m_{\text{dry}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{1}{1 - \omega_{p0}/100} - \frac{1}{1 - \omega_p/100} \right) \quad (15)$$

式中, m_{dry} 是花粉完全失水后的重量(单位: g); V 是失水后的花粉体积(单位: cm^3); d_0 是新鲜花粉的初始直径(单位: m); $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 是水的密度(单位: $1.0 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$); ω_p 和 ω_{p0} 同上。

1.2 田间验证实验

1.2.1 实验设计

试验于 2017 年 4—11 月在江苏省镇江市京口区新民洲共青团农场($104^\circ 5' \text{N}$, $36^\circ 3' \text{E}$)进行。试验以“陵两优”作为花粉源, 进行 2 次花粉扩散试验。其中, “陵两优”的播种期为 2017 年 4 月 20 日, 6 月 4 日移栽, 移栽密度为 $17 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 开花期为 7 月 4—14 日, 平均株高 80 cm。“特粘占”的播种期为 2017 年 5 月 6 日, 6 月 4 日移栽, 移栽密度为 $17 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 开花期为 8 月 19—26 日, 平均株高 120 cm。

“陵两优”试验采用正方形设计, 设置 3 个处理, 分别为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ (T1)、 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ (T2) 和 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ (T3)。T3、T1、T2 从东到西依次排列, 不同处理之间

间隔距离超过 40 m 以减少处理间的相互干扰。特粘占试验(T4)采用长方形设计, 花粉源长 310 m、宽 130 m, 面积约为 3.67 hm^2 。为了形成均匀的下垫面, 所有花粉源与周围水稻相邻种植, 调整播种期使花粉源比周围水稻提前 1~2 个月开花。

1.2.2 气象观测

开花期间, 田间太阳总辐射、空气温度和相对湿度、风速和风向、三维风速脉动分别由短波辐射传感器(LI200X, 美国产)、温湿度传感器(HMP155 A, 芬兰产)、风速/风向传感器(010C 和 020C, 美国产)测得, 这些传感器安装于试验田内距离地面 2.0 m 高度上, 由数据采集器(CR3000, 美国产)采集和存储, 采样频率为 1 Hz, 每 30 min 存储一次平均值。天气现象由人工记录。根据观测采集的气象数据, 开花期间平均风速为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 主风向为南风, 占 7 月 4—14 日所有风向资料的 51%。

1.2.3 潜在源强

水稻颖壳张开后, 花丝迅速伸长, 之后花药裂开, 花粉从花药中释放出来。在这个过程中, 能够释放到大气中的最大花粉量, 即为潜在源强。它取决于花粉源的面积以及单位面积上的潜在源强。这里由开放的颖花数和颖花内的花粉量所决定的, 这里将单位面积的有效穗数(穗 $\cdot \text{m}^{-2}$)、每穗的开花颖花数(颖花 $\cdot \text{穗}^{-1}$)和单个颖花的花粉量(粒 $\cdot \text{颖花}^{-1}$)三者相乘^[12], 计算得到单位面积的潜在源强(粒 $\cdot \text{m}^{-2}$)。

单位面积有效穗数的测量: 抽穗后, 每个处理随机选取 30 穴, 分别统计每穴的有效分蘖数, 乘以移栽密度, 即可得到单位面积的有效穗数。

每穗开花颖花数的测量: 在开花前, 每个处理随机选取 18 个有效分蘖进行标记。从开花始期到末期(7 月 4—14 日)于 07:00—16:00 的每个整点用剪刀轻轻剪去已开放的颖花, 记录剪去颖花的数量, 可得到开花颖花数的日变化。每个分蘖的开花颖花数之和, 即每穗开花颖花数。

单个颖花花粉量的测量: 在开花盛期, 分处理采集即将散粉颖花带回实验室, 剥除颖壳后取 120 枚花药, 放入干净的 15 mL 离心管中, 在 65°C 的烘箱中干燥, 待花药完全开裂花粉散出后, 加入 20% 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液, 定容至 6 mL, 振荡摇匀成悬浮液, 然后吸取花粉悬浮液滴在血球计数板上, 在显微镜下统计单位体积溶液中的花粉量。上述试验重复 50 次, 换算得到单个颖花的花粉量。

1.2.4 花粉沉降量

采用涂有凡士林的载玻片捕捉水稻花粉,安装高度均为穗顶高度(T1-T3: 80 cm 和 T4: 120 cm)。在开花期,每日 07:00 将载玻片水平放置在田间的观测支架上,16:00 收回载玻片,遇雨则提前收回载玻片。每片收回的载玻片用显微镜各读取 50 个视野的花粉数量,得到该日的花粉沉降量(粒·cm⁻²)。

如图 1 所示,花粉沉降量的观测点,位于花粉源的中轴线上,沿着风向方向由南向北依次分布。“O”是花粉源区和下风区的分界点。除“O”以外,T1-T3 试验在花粉源区有 5 个观测点,在下风区有 5 个观测点;T4 试验在花粉源区有 30 个观测点,在下风区有 5 个观测点。相邻观测点之间的距离分别为 1 m (T1)、2 m (T2)、3 m (T3) 和 10 m (T4)。观测点的位置用 D 表示, x 表示 D 与 O 的距离, x 为负值表示观测点位于花粉源区, x 为正值表示观测点位于花粉源的下风区。

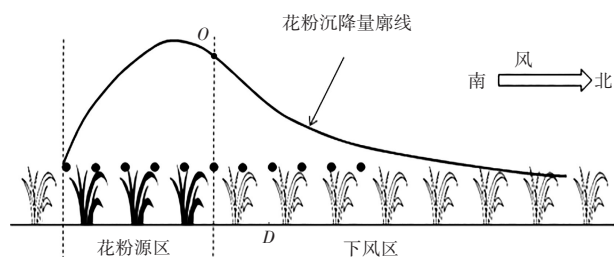


图 1 花粉沉降量观测点的剖面图

注:花粉源有两种设计,一种为正方形,有 3 个处理,花粉源面积分别为 5 m×5 m (T1)、10 m×10 m (T2) 和 15 m×15 m (T3);另一种为长方形,只有 1 个处理,花粉源长和宽度分别为 310 m 和 130 m (T4)。黑色圆点为花粉沉降量的观测点,它们沿着主风向从北向南依次分布在花粉源的中轴线上。 d 为相邻观测点的间距,在 4 个处理中分别为: $d=1$ m (T1)、 $d=2$ m (T2)、 $d=3$ m (T3) 和 $d=10$ m (T4)。 x 表示各个观测点与“O”的距离。

2 结果与分析

2.1 模型的验证

拉格朗日随机游走数值模拟模型已初步建成,下面需要对模型模拟结果的正确性进行验证。通过相关性分析得到实测值与模拟值之间的相关系数为 0.971,达到极显著水平,说明实测值与模拟值之间的相关性很好,可以用该水稻花粉扩散模型来

模拟水稻花粉的沉降量。

通过图 2 的分析表明,花粉沉降量的实测值与模拟值之间的相关性较好,对于优化后的拉格朗日随机游走水稻花粉扩散模型切实可行,因此可用该水稻花粉扩散模型模拟花粉在时间和空间上的总体分布情况。

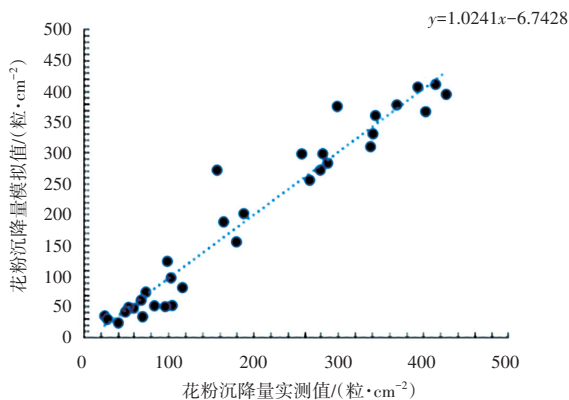


图 2 花粉沉降量实测值与模拟值的相关性

2.2 花粉源尺寸对水稻花粉扩散的影响

2.2.1 花粉源尺寸对花粉沉降的影响

根据图 3 分析源区内和源区外的花粉沉降空间分布情况,在花粉源区内,随着距花粉源距离的增大,水稻花粉的沉降量先急剧增加然后缓慢增加,且花粉源区越大,在每个观测点上的花粉沉降量也越多,不过这种随着花粉源尺寸增大花粉沉降量越多的趋势并不是越来越明显,也就是说这种增多的趋势随着花粉源尺寸的增大逐渐趋于平缓。在花粉源区外,情形则恰好相反,水稻花粉沉降量先迅速减少然后减少量逐渐趋于平缓,且随着花粉源尺寸增大,在各个观测点上对应的相应花粉沉降量就减少。水稻花粉沉降量主要集中在中间部分区域,也就是花粉沉降量主要分布在所选观测点的中间部分。根据图 4 结果分析,水稻花粉沉降量一开始先急剧上升,之后保持平稳缓慢增加,到源区外又迅速急剧减少,三个处理在空间上的分布情况基本一致,在源区外呈负指数形式规律递减。

从表 2 可以知道,随着花粉源尺寸的增大,花粉扩散距离也在增加,当花粉源区外花粉沉降量为 50% 时,在 T1、T2、T3 三个处理上花粉距离“O”点的距离分别为 0~1.1 m、0~2.2 m、0~3.1 m, T2 和 T3 相对于 T1 处理分别增加 2 和 2.82 倍,由此可见,虽然花粉源尺寸增大,花粉扩散距离增加,但是并不

是同比例增加。风是影响水稻花粉扩散最重要的气象因子,再分析源区外当花粉沉降50%~90%时,相应观测点距“O”点距离变化分别为0~1.1到0~3.6、0~2.2到0~7.3、0~3.1到0~11.2,三个处理之间变化分别为2.5、5.1、9.1,可以由此得知随着花粉源尺寸增大,风对水稻花粉扩散的影响更显著,即风对大尺寸花粉源相比于小尺寸的花粉源影响更大。

表1 花粉源尺寸与扩散距离关系

处理	花粉扩散距离/m			
	50%	70%	85%	90%
5m×5m(A)	0~1.1	0~2.2	0~3.1	0~3.6
10m×10m(B)	0~2.2	0~4.1	0~6.2	0~7.3
15m×15m(C)	0~3.1	0~6.2	0~9.1	0~11.2

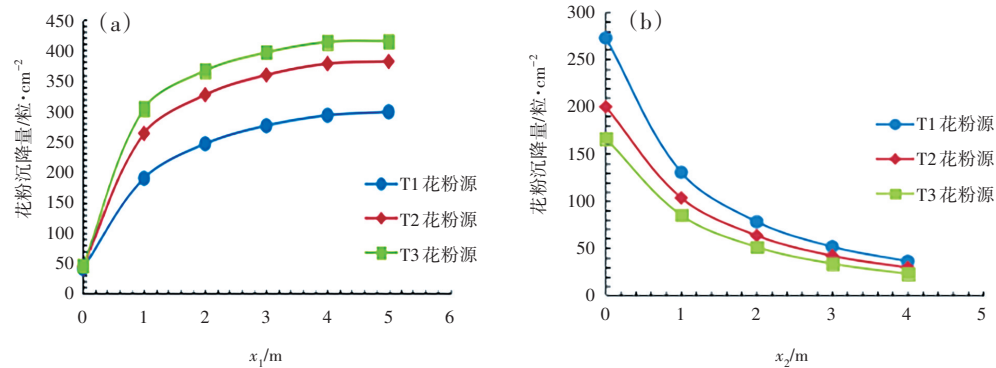


图3 三种尺寸花粉源的花粉沉降通量空间分布

(a)源区内;(b)源区外

注: x_1 代表源区内各观测点距源区起点距离, x_2 代表源区外各观测点距“O”之间的距离。

2.2.2 花粉源尺寸对花粉浓度的影响

花粉从花粉源向四周扩散的过程中花粉浓度也随之改变,我们通过实验可以测得5 m×5 m、10 m×10 m、15 m×15 m的源尺寸花粉面源浓度值,但当花粉源尺寸持续增大时就很难用实验来完成,利用花粉扩散模型获得当花粉源尺寸增大时花粉源浓度值累加值及其变化特征。

根据表2和图4的结果显示,随着花粉源尺寸的增大,花粉面源的浓度累加值是增大的,这种变化的趋势是先急剧增加然后逐渐趋于平缓,在花粉源尺寸内花粉浓度累加值靠近花粉源处的波动变化较大,在距离花粉源较远的地方波动变化较小,由此可推测当花粉源尺寸增大到一定值时花粉浓度累加值趋于一个恒定值。

表2 花粉源尺寸增大花粉浓度累加值

花粉源尺寸/m ²	花粉浓度/(粒·cm ⁻²)
5×5	2 645.4
10×10	3 315.5
15×15	3 676.9
20×20	3 853.2
50×50	4 446.4
100×100	4 794.9

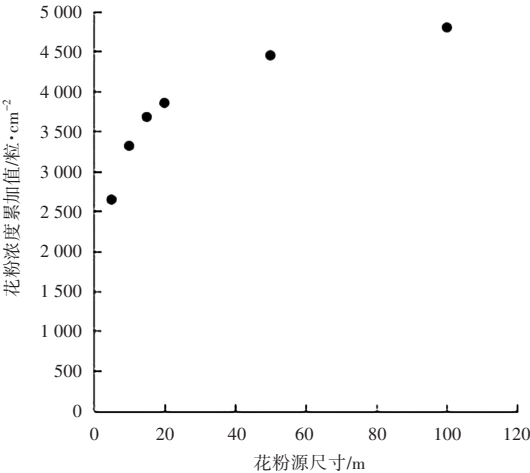


图4 花粉源增大花粉浓度累加值变化

3 结论与讨论

(1)花粉沉降量的实测值与模拟值之间的相关性较好,对于优化后的拉格朗日随机游走水稻花粉扩散模型切实可行,因此可用该水稻花粉扩散模型模拟花粉在时间和空间上的总体分布情况。

(2)水稻花粉沉降量一开始先急剧上升,之后保持平稳缓慢增加,到源区外又迅速急剧减少,三个处理在空间上的分布情况基本一致,在源区外呈

负指数形式规律递减。随着花粉源尺寸的增大,花粉扩散距离也在增加,但是并不是同比例增加。风是影响水稻花粉扩散最重要的气象因子,随着花粉源尺寸增大,风对水稻花粉扩散的影响更显著,即风对大尺寸花粉源相比于小尺寸的花粉源影响更大。

(3)随着花粉源尺寸的增大,花粉面源的浓度累加值是增大的,这种变化的趋势是先急剧增加然后逐渐趋于平缓,在花粉源尺寸内花粉浓度累加值靠近花粉源处的波动变化较大,在距离花粉源较远的地方波动变化较小,由此可推测当花粉源尺寸增大到一定值时花粉浓度累加值趋于一个恒定值。

参考文献:

- [1] 王志兴,王旭静.水稻的基因漂流研究[J].种子科技,2013(9):37.
- [2] 贾士荣,袁潜华,王丰,等.转基因水稻基因漂流研究十年回顾[J].中国农业科学,2014(1):7-16.
- [3] 单琨,刘布春,李茂松,等.基于花粉量的作物产量预测模型研究进展[J].中国农业气象,2010,31(2):282-287.
- [4] 王志兴,王旭静,贾士荣.主要农作物转基因漂流频率和距离的数据调研与分析 I.背景、调研目的及所考虑的问题[J].中国农业科技导报,2011(3):32-35.
- [5] 王志兴,王旭静,贾士荣.主要农作物转基因漂流频率和距离的数据调研与分析 II.水稻[J].中国农业科技导报,2011(3):36-40.
- [6] 姜媛媛,王宇楠,李滢景,等.转基因作物的基因漂流及风险研究进展.贵州农业科学,2018,46(12).
- [7] 胡继超,胡凝,江晓东,等.基于GIS的转基因水稻基因漂流风险评估系统[J].湖北农业科学,2011,50(18):3849-3852.
- [8] 汤日圣.转基因水稻外源基因向近缘种群漂流和渐渗的研究进展[J].生物安全学报,2012,21(2):93-99.
- [9] 蒯建敏,莫惠栋,惠大丰.水稻花时与气象因子的关系[J].中国水稻科学,1994,8(2):79-84.
- [10] 石春林,朱大威,郑建初,等.水稻逐日开花量与结实率的估算方法[J].江苏农业学报,2009,25(1):24-27.
- [11] 胡凝,姚克敏,袁潜华,等.海南南繁区水稻基因漂流的最大限度距离及其时空分布特征[J].中国农业科学,2014(23):4551-4562.
- [12] 张洁,王勇群,胡凝,等.花粉源尺寸对水稻花粉扩散的影响[J].中国农业气象,2018,39(12):796-804.
- [13] 胡凝,陈万隆,刘寿东,等.水稻花粉扩散的模拟研究[J].生态学报,2010,30(14):3665-3671.
- [14] 胡凝,曹明会,江晓东,等.不同品种水稻开花量估算模型[J].中国农业气象,2013,34(4):440-446.
- [15] 王转娥,吴永涛.花粉源面积对水稻花粉扩散的影响.智慧农业导刊,2021,1(9):34-38.
- [16] 李仁忠.水稻花粉扩散模型及基因漂流最大隔离距离的研究[D].南京:南京信息工程大学,2007.

Pollen diffusion simulation of rice based on Lagrange random walk model

WANG Yong

(Hezhou Meteorological Bureau, Guangxi Hezhou 542899, China)

Abstract: Based on the pollen source sizes of 5m×5m (T1), 10m×10m (T2) and 15×15m (T3), the sedimentation of rice pollen in the pollen source area and the cumulative values of non-point pollen concentration were studied by using the Lagrange random walk-based rice pollen diffusion (LRWRPD) model. The results were as follows: (1) the correlation between the measured and simulated values of pollen deposition was good, which was feasible for the optimized LRWRPD model. (2) Pollen sedimentation of rice increased sharply at first, then increased steadily and slowly, and decreased in negative exponential form outside the source area. With the increase of the size of pollen source, the effect of wind on rice pollen diffusion was more significant, that is, the effect of wind on large-size pollen sources was greater than that of small pollen sources. (3) With the increase of the size of pollen source, the cumulative value of the concentration of pollen non-point source increased, and the trend of this change was to increase sharply and then gradually smooth out.

Key words: pollen concentration; rice pollen diffusion; pollen source size; pollen settlement