

南京开花期稻田贴地层微气象特征研究

刘寿东, 李仁忠, 胡凝 (1. 南京信息工程大学, 江苏南京210044; 2. 浙江省气候中心, 浙江杭州310017)

摘要 [目的] 揭示南京水稻开花期稻田贴地层的微气象规律。[方法] 利用南京开花期稻田微气象观测资料, 分析稻田贴地层温、风垂直分布特征, 大气稳定度状况和动力粗糙度特征。[结果] 南京开花期稻田白天温度垂直分布分为日射型、弱辐射型和过渡型3个类型, 强光条件下冠层附近温度垂直变化明显, 冠层温度比冠层上方气温最大可高出5.9℃。稻田较强的蒸腾和蒸发导致贴地层大气温度垂直变化幅度不大, 开花期稻田大气层结比较稳定, 中性或近中性层结占70%。开花期稻田风速垂直分布符合对数规律, 摩擦速度和粗糙度与风速的关系十分密切, 摩擦速度随风速递增, 粗糙度高度则随风速递减, 南京开花期稻田粗糙度平均为0.1 m。[结论] 研究结果可为揭示稻田的湍流运动规律提供科学依据。

关键词 南京; 水稻; 开花期; 贴地层; 微气象特征

中图分类号 S162.4+1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)16-06701-03

Study on the Micrometeorological Characteristics of the Near-surface Layer of Rice Paddy during the Flowering Stage in Nanjing

LIU Shou-dong et al (Nanjing Information Engineering University, Nanjing, Jiangsu 210044)

Abstract [Objective] The research aimed to reveal the micrometeorological law of the near-surface layer of rice paddy during the flowering stage in Nanjing. [Method] The microclimatology observation data of the rice paddy during the flowering stage in Nanjing was used to analyze the near-surface layer temperature of rice paddy, the vertical distribution characteristics of wind, the atmospheric stability status, and the dynamic roughness characteristics. [Result] The vertical distributions of the daytime temperature in rice paddy during the flowering stage in Nanjing were classified into three types such as solar radiation type, weak radiation type, and transitional type. Under the condition of strong light, the temperature near canopy had an obvious vertical variation, and the temperature in canopy could be 5.9℃ higher than that above canopy. The stronger transpiration and evaporation in rice paddy resulted in the vertical change of temperature in the near-surface layer to be little. The atmosphere layer structure of rice paddy was comparatively steady, in which the neutral and near-neutral stratification accounted for more than 70%. The vertical distribution of the wind speed in rice paddy during the flowering stage accorded with logarithm law. There was a close relationship among the friction velocity, the roughness, and the wind speed. The friction velocity increased with the wind speed while the roughness length decreased with the wind speed. The average roughness over rice paddy during the flowering stage in Nanjing was 0.1 m. [Conclusion] The study provided scientific basis for revealing the turbulence rule of rice paddy.

Key words Nanjing; Rice; Flowering stage; Near-surface layer; Micrometeorological characteristics

水稻花粉扩散是水稻的外源转基因由转基因水稻向非转基因水稻转移的主要途径之一, 由此可引发一系列生物安全性问题^[1-2]。以往对水稻花粉扩散的研究主要集中在对花粉扩散浓度与气象条件相互关系的讨论上, 如Song等认为风速是决定花粉扩散的主要气象因子之一, 且风速的大小与最大花粉扩散距离成正比, 当平均风速为2.52 m/s时, 最大花粉扩散距离为38.4 m^[3-4]。

水稻花粉扩散与其他大气微粒类似, 风不是影响水稻花粉扩散的唯一气象因子^[5]。大气边界层的湍流结构, 尤其是贴地层的湍流特征, 与水稻花粉的扩散有密切关系^[6]。由于稻田的动力和热力状态与其他下垫面不同, 其70%的净辐射能量用于潜热支出^[7], 土壤湿度大且热通量在净辐射能量支出上所占的份额很小^[8-9], 使得稻田上方的花粉扩散规律也不相同, 因此有必要对稻田的湍流运动规律进行研究。

大气湍流运动的规律主要取决于层结稳定度, 尤其对贴地层而言, 稳定度特点是最基本的特点^[10]。表征稳定度的定量特征值可以是里查逊数(Ri)、温度梯度()和风速梯度(u)。为此, 笔者在2006年8月水稻开花期间进行了稻田微气象观测试验, 获取了稻田温度、湿度、风速梯度观测资料, 并通过对温风的垂直分布、里查逊数、摩擦速度和粗糙度分析, 讨论了南京开花期稻田贴地层的微气象特征。

1 材料与方法

1.1 资料来源 研究所用资料来源于南京2006年8月水稻开花期稻田微气象观测资料。观测地段设在江苏省农业科学院两优培九试验田内。稻田长200 m, 宽200 m, 水稻平

均株高1.2 m, 种植密度26 cm×13 cm。观测地段开阔平坦。

观测所用仪器为锦州322研究所生产的TRMZSI型气象生态环境监测系统, 观测项目为温度和风速。温度采用PTWD2A型温度传感器, 观测高度为7.2、4.2、3.2、1.6、1.0和0.5 m。风速采用EC9S型数字风速传感器, 在7.2 m处设风向仪, 观测高度为7.2、4.2、2.8、2.1和1.6 m。另外, 用热球微风仪测量水稻群体内风速, 高度分别为1/3 H、2/3 H和H处(H为水稻平均株高)。

1.2 研究方法 在中性层结条件下, 稻田上方垂直风廓线和旱地近地层一样符合对数线性规律。因此, 可用下式来表示稻田上方风的垂直分布^[11]:

$$u = u_1 + (u_2 - u_1) \frac{\ln(z-d) - \ln(z_1-d)}{\ln(z_2-d) - \ln(z_1-d)} \quad (1)$$

式中, d 为零平面位移, 文中取 $2/3 H$ 。

在中性层结条件下, 摩擦速度可用下式计算:

$$u_* = k \cdot z \cdot \frac{\overline{u}}{z} \quad (2)$$

式中, k 为卡门常数, 其值在0.38~0.43, 文中取0.4; \overline{u} 为10 min的平均风速; z 为相对于地面的高度。

如果有2个高度以上的观测资料, 那么对(2)式从 z_1 到 z_2 进行积分, 可得:

$$u_* = \frac{k(\overline{u_2} - \overline{u_1})}{\ln \frac{z_2}{z_1}} \quad (3)$$

如果以粗糙度高度 z_0 取代 z_1 , u_0 则为0, \overline{u} 取代 $\overline{u_2}$, $z-d$ 取代于 z_2 于是可得到:

$$\overline{u} = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (4)$$

如果把 u_* 和 z_0 看作常数, 由(3)式可知, 试验中5个高度的

观测数据 \overline{u} 与 $\ln(z-d)$ 应该在一条直线上, 这条直线的斜率为 $\frac{u^*}{k}$, 可用最小二乘法求得(3) 式中的 u^* 和 z_0 ^[12]。

里查逊数是判定大气稳定度状况及衡量湍流消长的指标。温度梯度和风速相互作用的效应与梯度里查逊数 R_i 有关。在微气象工作中, 里查逊数使用广泛, 但 $\frac{1}{z} \cdot \frac{u}{z}$ 难以精确测定, 所以常用正比于里查逊数的另一特征量 R_i 来表示^[10]:

$$R_i = \frac{z_2 - z_1}{u^2} \quad (5)$$

式中, $z_2 - z_1$ 为 2 个高度的温差, 文中取 7.2 m 和 1.6 m; u 为 1.6 m 高度的平均风速。 R_i 为正, 表示大气层结稳定; 为零, 表示中性; 为负, 表示大气层结不稳定。因为 R_i 比里查逊数少 2 个参数, 容易计算, 所以用来判定大气稳定度更加方便。

2 结果与分析

2.1 稻田温度垂直分布与大气层结特征

2.1.1 稻田白天温度垂直分布类型。 开花期水稻生长旺盛, 叶面积指数达到最大, 透光率小, 对稻田温度垂直分布影响较大。分析温度梯度观测资料发现, 即使是在白天, 由于天气状况的不同, 稻田的温度垂直分布有日射型、弱辐射型、过渡型 3 个类型(图 1、2)。

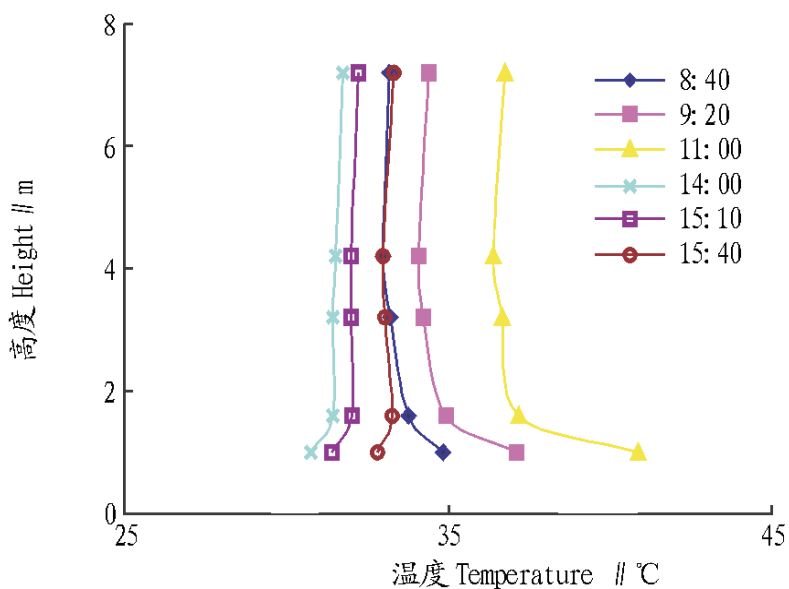


图1 日射型和弱辐射型

Fig.1 Solar radiation type and weak radiation type

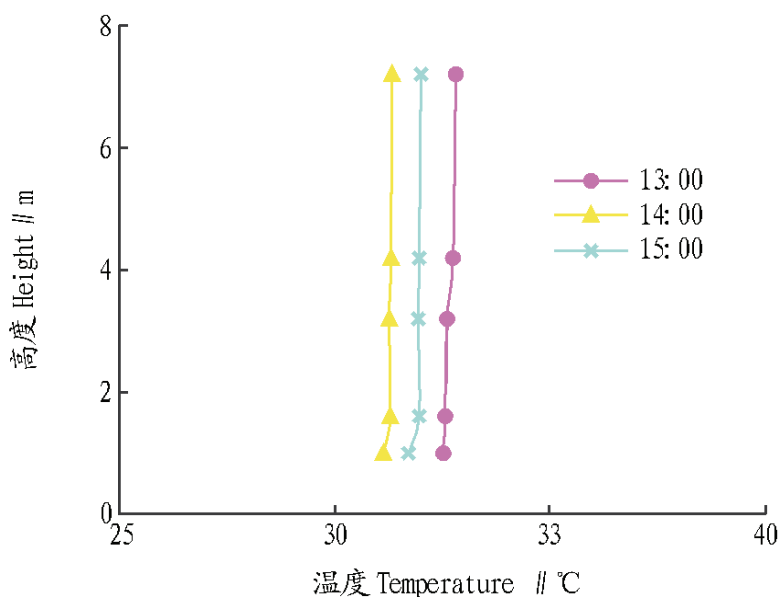


图2 过渡型

Fig.2 Transitional type

图1 中上午的温度垂直分布属于日射型, 这是由于日出后水稻冠层吸收太阳辐射, 水稻叶片温度迅速升高, 而冠层上方空气吸收太阳辐射慢, 温度缓慢升高, 形成上低下高的

温度垂直分布类型。在强光照条件下, 1.6 m 以上气温随高度升高缓慢递减, 而 1.6 m 以下到水稻冠层上部, 温度随高度降低急剧升高, 冠层温度可比冠层上方高出几度, 最大温差达 5.9。但在有厚云遮蔽或阴天条件下, 冠层和冠层上方的温差不大, 温差为零甚至可能为负值。弱辐射型出现在有厚云遮蔽条件下, 如图 1 中的下午, 由于当时天气由晴转阴, 云量为 10, 温度垂直分布类型就由上午的日射型转为弱辐射型, 弱辐射型的形成主要是开花期稻田蒸散较高所致。图 2 是阴有小雨天气条件下的温度垂直分布曲线, 近似为一直线。这种情况持续时间虽短, 但出现次数不少, 在 8 月有记录的 22 d 中, 有 15 d 出现这样的情况, 上午、中午和下午都有, 以中午、下午居多, 占 92%; 上午 8:00 之后 1 h 内也有极少数这样的情况出现, 这可能是受到雾、霾和能见度低的影响。晴天、多云和阴天条件下, 开花期稻田 1.6 和 7.2 m 高度温度的时间变化趋势基本一致, 且在各类天气条件下的温差较小; 而 1 m 高度(冠层) 温度随天气的变化较大。对 8 月份(有效数据 22 d) 水稻冠层 8:00 ~ 16:00 的温度数据统计发现, 平均温度高于 35 的有 3 d, 分别为 8 月 12 日 38.5、8 月 15 日 35.5 和 8 月 28 日 36.7, 其中 8 月 12 日最高温度达到 41.1。出现这样的高温天气, 虽然有利于加快水稻开花进程, 但会杀死水稻的雄性花粉, 降低结实率。

2.1.2 稳定度因子与稻田大气层结。 开花期稻田贴地层晴天和阴天 R_i 值的时间变化趋势见图 3、4。由于稻田是有水的下垫面, 与裸地单一的辐射散热不同, 蒸腾和蒸发耗热强烈, 因此即使是在晴天, 大气层结也有很大一部分是中性或近中性。而阴天到达稻田下垫面的太阳辐射少, 所以大气层

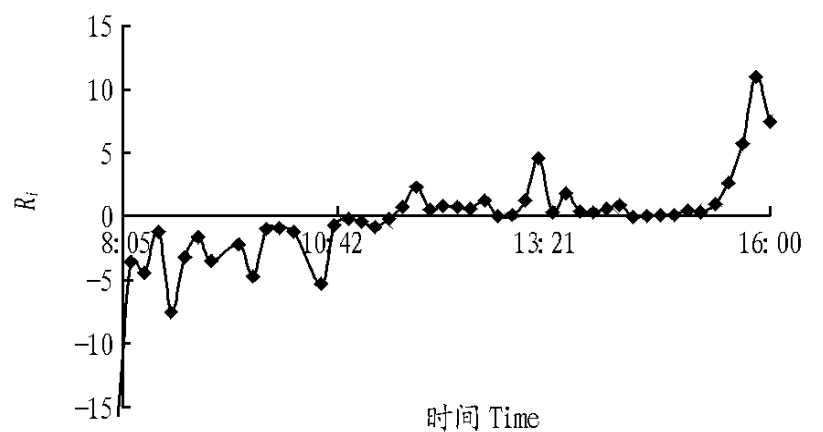


图3 晴天 R_i 的变化趋势

Fig.3 Change trend of R_i in rainy days

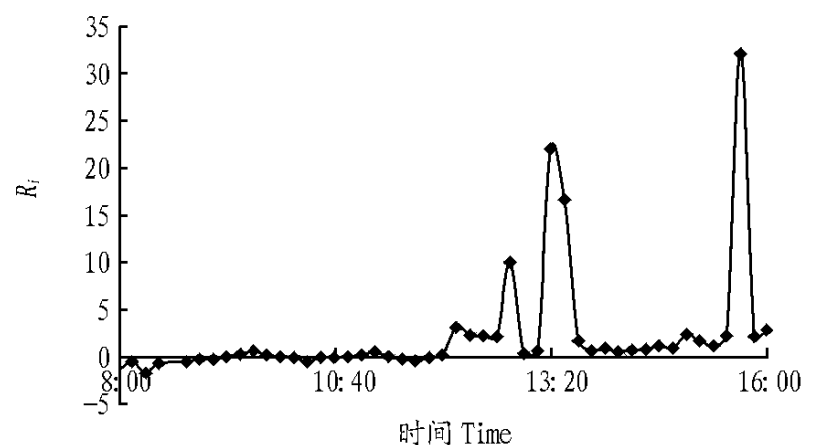


图4 阴天 R_i 的变化趋势

Fig.4 Change trend of R_i in cloudy days

结能持续保持中性或近中性状态, R_i 值大部分都集中于 0 附近。因此, 在稻田这样特殊的下垫面上, 除了 13:00 和 16:00 以外, 大气层结可看成是近中性或中性层结。

稻田贴地层中风速较小,10 m 高度风速一般在 10 m/s 以下,稻田大气层结特征也可以粗略的用 $t = z^{-1}$ 的值和符号来统计。 t 为正,是稳定层结;为负,是不稳定层结;为0,则是中性。考虑到仪器精度引起的误差,以 $|t|$ 0.2 为中性层结,0.2 < $|t|$ 0.4 为近中性层结,在此范围以外的则为稳定和不稳定层结。统计结果发现南京水稻开花期稻田大气层结 71% 为中性和近中性层结,这与用 R_1 分析的结果相一致。

2.2 稻田风垂直分布特征 风速是影响花粉扩散的主要气象因子,也是影响水稻授精结实率的主要因素。稻田中的风速分布在水稻各个生育期都不一样,这主要是水稻的形态随生育期变化所引起的。开花期水稻平均高度为 1.2 m,叶面积指数可达 7 或 8,对风的削弱作用较大。分析开花期稻田风速梯度观测资料发现,开花期稻田各梯度 10 min 平均风速时间变化趋势基本一致,风速随高度的增加而增大,风速随高度变化符合对数规律。2006 年 8 月份有效 10 min 平均风速资料共 716 组,风速和对数高度的关系都符合对数规律,其复相关系数平均为 0.984,最小为 0.932。这说明,在水稻

贴地层中,风速廓线分布和近地层中性层结一样,符合对数分布规律,不受大气层结的影响。

2.3 稻田摩擦速度与粗糙度

2.3.1 摩擦速度。摩擦速度是表示湍流边界层的一种特征速度,是微气象学中动量湍流输送的重要参数,随着风速和大气层结而变化。晴天、少云和阴天条件下稻田摩擦速度与冠层上方 1.6 m 高度风速的对应关系见图 5。不同天气条件下稻田摩擦速度和冠层上方 1.6 m 高度风速对应关系虽有所不同,但摩擦速度随风速变化呈线性递增关系。其中晴天摩擦速度随风速递增的斜率较大为 0.107 4,摩擦速度在 0.30 ~ 0.52 m/s,平均值 0.43 m/s,这主要是由于晴天风速切变大,湍流强,风经过水稻冠层,叶片弯曲和波动幅度增大,大气边界层上层动量向下层输送增多,从而使得摩擦速度随风速变化明显。少云天,摩擦速度随风速变化平缓,斜率仅为 0.046 4,平均值为 0.29 m/s。阴天,摩擦速度随风速变化斜率为 0.085 6,处于晴天和少云之间,可能是阴天大气层结比较稳定,虽然风速不大,但随风速变化明显,平均摩擦速度只有 0.19 m/s,说明阴天稻田的湍流比较弱。

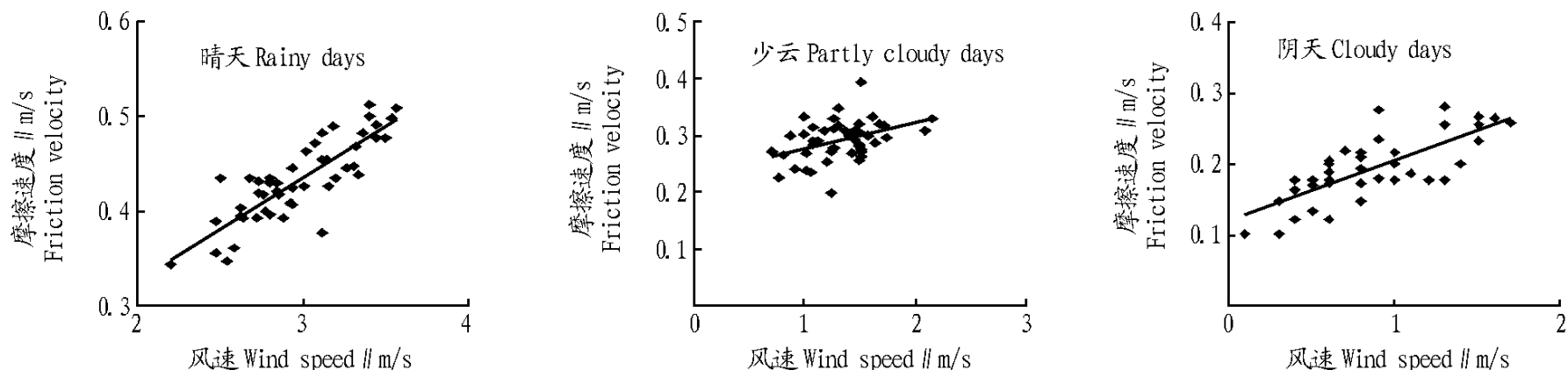


图5 不同天气条件下 1.6 m 高度风速与摩擦速度的关系

Fig.5 Corrdation between wind speed and friction velocity under different weather conditions at the height of 1.6 m

2.3.2 粗糙度。稻田粗糙度是一个随稳定度和风速而变的虚拟高度,是重要的动力学参数,粗糙度高度一般是用经验方法确定,即在风廓线图上曲线外延,及至与坐标轴相交(此时平均风速为 0),这个高度就是粗糙度。但在大气层结不稳定时风廓线规律很复杂,很难用经验方法来确定。而开花期

稻田即使在大气层结不稳定的条件下,贴地层风廓线也符合对数规律,这就为求取粗糙度提供了方便。用最小二乘法计算的不同天气条件下开花期稻田粗糙度随风速变化情况见图 6。由图 6 可见,不同天气条件下的粗糙度高度随风速增大而线性递减,这是因为风使水稻叶片弯伏波动,如果时

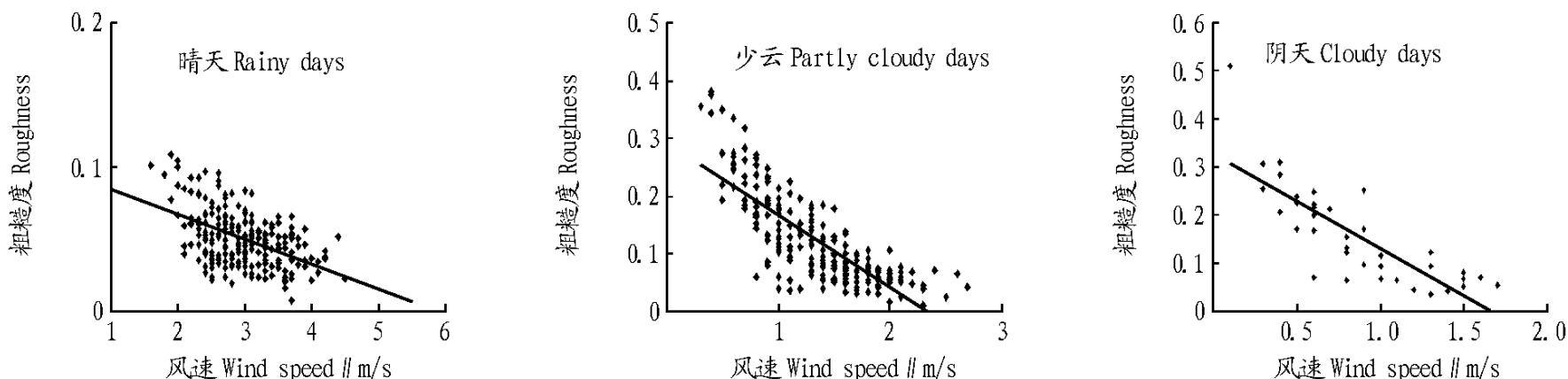


图6 不同天气条件下粗糙度随 1.6 m 风速的变化

Fig.6 Changes of roughness with wind speed under different weather conditions at the height of 1.6 m

间尺度足够大,风越大水稻向下弯伏就越大,水稻覆盖层变得较平整光滑,因此粗糙度就越小。计算结果表明,晴天、少云和阴天的斜率分别为 -0.017 4、-0.124 4 和 -0.196 4,其原因可能是晴天风速较大,湍流强,粗糙度高度就小,少云和阴天则相反,风速小,粗糙度高度大。利用 2006 年 8 月 701 组有效风速观测数据,计算得到南京开花期稻田 8 月平均粗糙度高度为 0.1 m,这与他人的研究结果相一致^[13]。

3 结论

(1) 南京开花期稻田白天温度垂直分布有日射型、弱辐射型和过渡型 3 个类型。稻田上方 1.6 m 以上气温垂直变化不明显,但在强光照条件下,水稻冠层附近温度的垂直变化明显,冠层温度比冠层上方气温最大可高出 5.9 。

(2) 开花期稻田的大气层结比较稳定,中性或近中性层

(下转第 6707 页)

表6 不同稻种资源发芽率与贮藏年限关系

Table 6 Relationship between seed germination rate and storage duration for different rice varieties

稻种资源 Rice germplasm resources	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	贮藏年限 年 Storage duration Year
早籼稻“1”字头编号	$Y = -1.9397X + 192.06$	0.9863**	47
早籼稻“3”字头编号	$Y = -0.6594X + 61.899$	0.9780**	12
晚稻早籼“(5)”字头编号	$Y = -1.8863X + 189.90$	0.8158*	48
晚稻早粳“(7)”字头编号	$Y = -0.3021X + 33.334$	0.9646**	11
晚稻晚籼“5”字头编号	$Y = -6.3571X + 605.43$	0.7836*	129
晚造大糯(粳糯)“7”字头编号	$Y = -1.2036X + 115.31$	0.9328**	25

注:基准发芽率为75%。

Nte: The reference of seed germination rate is 75%.

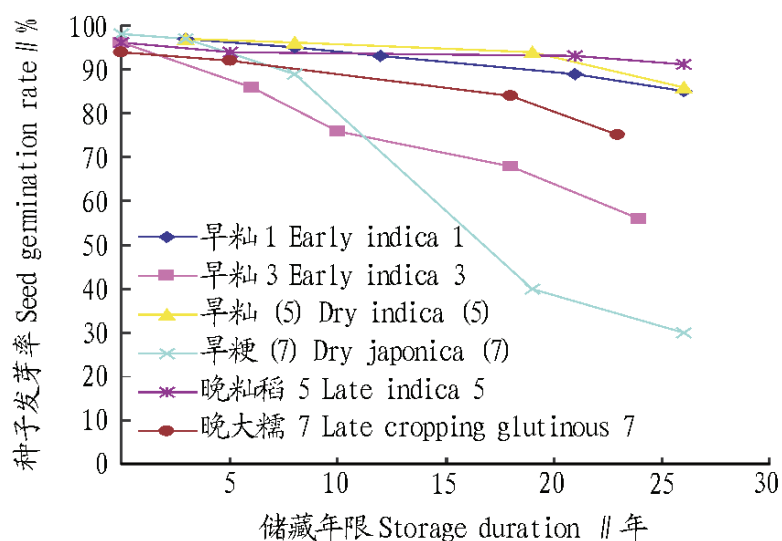


图1 不同类型稻种资源不同贮存年份的发芽率变化情况

Fig.1 Changes of germination rate in different types of rice germplasm sources stored for different years

条件进行长期贮藏,是基本安全、可行的。

(2) 卢新雄等研究发现,水稻种子生活力出现快速下降的拐点发芽率水平约为75%,并认为有必要在种子生活力出现快速下降之前予以更新^[7]。该研究按照这一基准,对跟踪监测的结果建立回归方程进行预测分析,结果表明,以“(7)”字头编号的晚稻早粳种子,在1992年就应及时更新;以“(3)”字头编号的早籼稻种子贮存12年后平均发芽率就下降到75%水平,1995年就应及时进行更新;以“(1)”字头编号的早籼稻种子可安全贮存47年,尚有21年的安全贮存期(即至2029年);以“(5)”字头编号的晚稻早籼种子可安全贮存48年,尚有22

(上接第6703页)

结占70%强,这与稻田蒸腾和蒸发作用强烈的特殊下垫面有关。

(3) 开花期稻田风速随高度的变化符合对数分布规律,复相关系数在0.95以上,且受大气层结的影响很小。

(4) 南京开花期稻田的摩擦速度随风速递增,大气层结越不稳定,风速越大,递增越快。粗糙度则随风速递减,晴天、少云和阴天的粗糙度高度分别为0.05、0.12和0.16 m,平均为0.10 m。

参考文献

- [1] 贾士荣. 转基因作物的环境风险分析研究进展[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 175-187.
- [2] 戎俊. 花粉介导的水稻 (*Oryza sativa* L.) 基因漂流模型及其模型的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2006.
- [3] SONG Z P, LU B R, ZHU Y G, et al. Gene flow from cultivated rice to the wild species (*Oryza rufipogon*) under experimental field conditions[J]. *New Phytologist*, 2003, 157: 657-665.

年的安全贮存期(即至2030年);以“(5)”字头编号的晚稻晚籼种子可安全贮存50年以上,即至2031年;以“(7)”字头编号的晚稻大糯(粳糯)种子可保存24年,即在2008年时就要及时进行更新。

(3) 笔者在跟踪监测过程中,针对监测结果及时进行繁殖更新。繁殖更新的时间,与上述测算结果基本吻合,为保证稻种资源贮藏整体安全提供了保障。

(4) 该研究跟踪监测的稻种资源,由于编号是1981年建库时设定的,有些品种类型份数偏低,可能监测结果的代表性不够强。因此,对这些类型的品种资源监测的结果,宜作参考对待,有必要在发芽率达75%之前就进行及时繁殖更新,以确保种质资源贮藏的安全性。

参考文献

- [1] 卢新雄, 崔聪淑, 陈晓玲, 等. 国家种质库部分作物种子生活力鉴定结果与分析[J]. 植物遗传资源科学, 2001, 2(2): 1-5.
- [2] 卢新雄, 陈晓玲, 陈淑平. 低温种质安全保存理论的研究进展[J]. 植物遗传资源科学, 2000, 1(2): 54-58.
- [3] ROBERTS E H. Loss of viability: Chromosomal and genetical aspects[J]. *Seed Science and Technology*, 1973, 1: 515-527.
- [4] SPECHT C E, KELLER E R J, FREYTAG U, et al. Survey of seed germinability after long-term storage in the Gatersleben genebank[J]. *Hort Genetic Resources Newsletter*, 1997, 111: 64-68.
- [5] 卢新雄, 陈晓玲. 水稻种子贮藏过程中生活力丧失特性及预警指标的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(8): 975-979.
- [6] ISTA. International rules for seed testing[J]. *Seed Sci & Technol*, 1985, 15: 299-355.
- [7] 卢新雄. 三种禾本科种子老化过程中生活力丧失特性及其生理生化遗传变异的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 1999.
- [4] SONG Z P, LU B R, CHEN J K. Pollen flow of cultivated rice measured under experimental conditions[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13: 579-590.
- [5] DI GIOVANNI F, BECKETT P M. On the mathematical modeling of pollen dispersal and deposition[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(12): 1352-1357.
- [6] 蒋维楣, 曹文俊, 蒋瑞斌, 等. 空气污染气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [7] 汪瑛. 稻田和旱地湍流通量的观测试验与模拟[M]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003.
- [8] 胡凝, 吕川根, 姚克敏, 等. 两系法杂交稻安全制种的水热传输模型及其应用[J]. 气象科学, 2007, 27(2): 196-201.
- [9] 储长树, 卢显富, 姚克敏, 等. 低温敏不育系水稻“冷灌繁种”技术微气象效应的数值试验[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(1): 95-103.
- [10] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 等. 小气候与农田小气候[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [11] 翁笃鸣, 沈觉成, 钱林清, 等. 农田风况及其模式[J]. 气象学报, 1982, 40(3): 335-343.
- [12] 陈万隆. 高原和开阔山地风资源的估算[J]. 地理研究, 1992, 11(3): 8-11.
- [13] GOUDAAN J. 作物微气象学: 模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 1985.