江苏省小麦赤霉病多因子综合风险评估与区划

曹 璐， 高 苹， 吴洪颜*

（江苏省气象局，南京 210008）

摘要 根据小麦赤霉病的发生特点和灾害风险分析理论，确定小麦赤霉病综合风险评估指标。本文利用江苏省1961年—2017年67个气象站气象数据和农业统计资料，结合地理信息和土壤数据构建了综合风险评估模型，基于GIS空间分析技术将江苏省划分为小麦赤霉病发生低风险区、中等风险区、高风险区和极高风险区。结果表明：江苏省小麦赤霉病的高风险区位于淮河以南地区，其中里下河和沿江东部赤霉病流行风险最高，需加强预防和治理。

关键词 小麦赤霉病； 气候条件； 风险区划； 应灾能力

中图分类号： S 435.121.45 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2019216

Multi-factor comprehensive risk assessment and zoning map of wheat scab epidemics in Jiangsu province

CAO Lu， GAO Ping， WU Hongyan*

（*Jiangsu Provincial Meteorological Bureau*, *Nanjing* 210008, *China*）

Abstract Based on the characteristics of wheat scab occurrence and the theory of disaster risk analysis, a set of comprehensive risk indexes of wheat scab were derived. In this study, we used meteorological and agricultural statistics datasets of 67 stations in Jiangsu province from 1961 to 2017, combined with geographic information and soil data, to construct a comprehensive risk assessment model. With GIS spatial analysis technology, four zones, i.e., low-risk, medium-risk, high-risk and very-high-risk zones for wheat scab in Jiangsu, were differentiated according to the assessment model. The results showed that the high-risk areas of wheat scab in Jiangsu were located in the south of Huaihe River, and the risk of wheat scab was the highest in Lixia River and the eastern part of the Yangtze River, where the prevention and management of wheat scad need to be strengthened.

Key words wheat scab； meteorological conditions； risk zoning； disaster-bearing capability

江苏是小麦赤霉病的常发区和重发区，流行频率高、感染程度重，近年来，还有向北蔓延的趋势[1]。被赤霉病感染后的小麦不仅大幅减产，还可产生脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)等毒素沉积于籽粒中，严重威胁着江苏的粮食安全生产。小麦对赤霉病的抗性是由多基因控制的，目前国内尚无绝对的抗赤霉病品种。为更好地防治赤霉病，许多学者从赤霉病发生和防治实践出发，不仅分析了栽培管理、菌源量、品种差异、防治措施及气象条件等多种成因[2-5]，还采用多种统计方法，建立赤霉病发生程度和流行趋势的预报方法[6-12]。此外，也有学者对小麦赤霉病进行了多方位的气候分区，并取得了一些研究成果，分区界线也与实况基本吻合。赵圣菊等[13]通过收集我国冬、春麦区气象资料，结合暖雨日日数及出现频率确定了赤霉病的致病界线和敏感指标，并将我国的赤霉病发生区细分为4个气候亚带、10个气候小区；冯成玉等[14]利用小麦赤霉病易感时期湿热天气的出现频率和持续时间构成气候分区指标，将江苏划分为4个气候区；商鸿生等[15]则在气候分区的基础上，又根据地下水位和发病率的关系，对关中地区小麦赤霉病分区，在一定程度上考虑了地理复杂性。然而，小麦赤霉病的流行不仅取决于气候条件、土壤和菌源量，还受地形、种植面积、种植方式和应灾能力等因素影响。本文基于灾害风险分析理论[16]，尝试对小麦赤霉病流行从孕灾环境、致灾因子和承灾体3个方面进行评估，充分考虑多因子影

收稿日期： 2019-04-26 **修订日期**： 2019-06-14
基金项目： 国内外作物产量预报专项
* 通信作者 E-mail：jsqx_zqzb@126.com

响，建立综合风险评估模型，开展赤霉病流行风险评估和精细化分区，有望为江苏小麦种植结构调整和赤霉病防控提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1961年－2017年江苏省67个气象站逐日气温(℃)、相对湿度(%)，由江苏省气候中心提供；1971年－2017年分区赤霉病的病穗率观测值来自江苏省植保站；江苏省1∶25万基础地理信息数据由国家基础地理信息中心提供；1∶100万土壤属性数据由南京土壤研究所提供；1961年－2017年江苏各县(市)小麦产量和种植面积数据由江苏省统计局提供。以上所需数据经标准化后，利用地理信息系统的空间分析进行处理，通过反距离权重和克里金插值法进行空间插值[17]。

1.2 赤霉病气象达标日

小麦抽穗开花至乳熟期间，阴雨连绵、潮湿多雾、天气闷热，对赤霉病的发生极为有利。根据小麦赤霉病始见病日至病情稳定期病情系统消长动态监测数据统计，将同时满足日平均气温≥15.0℃、日平均相对湿度≥85%的当天作为诱发赤霉病的达标日[18]，又以持续时间长短作为赤霉病流行等级的划分标准(表1)。

表1 江苏省小麦赤霉病气象等级划分标准

Table 1 Definition of epidemic degrees of wheat scab by meteorological parameters in Jiangsu province

流行程度 Epidemic degree	持续天数/d Duration	病穗率/% Diseased panicle rate
轻度 Slight	1	0～10
中度 Medium	2	10～20
较重 Serious	3	20～40
重度 Severe	≥4	≥40

1.3 构建综合风险评估模型

小麦赤霉病发生流行受菌源、气象条件、作物品种和栽培方式等多因素影响。从孕灾环境、致灾因子及承灾体3个方面考虑，构建江苏冬小麦赤霉病综合风险评估模型：

$$D_r = D_s \times D_h \times D_v \quad (1)$$

其中D_r为赤霉病综合风险评估值，D_s为孕灾环境敏感性，D_h为致灾因子综合强度，D_v为承灾体脆弱性。D_r的值越大，赤霉病发生流行风险越大。

1.3.1 孕灾环境敏感性评估

赤霉病的孕灾环境包含了地形地貌、土壤属性及栽培措施等方面，其中地势低洼、排水不畅、土壤黏重、植株密度过大等都会加重赤霉病。因植株密度、管理措施等可人为控制，因此本文仅选择坡度、田间持水量(0～20 cm)作为孕灾环境因子构建环境敏感性模型D_s，其中坡度(S_l)是影响地表径流的重要因素之一，同等降雨条件下，坡度越大越易引起坡面流，水流下渗少，不易积水。田间持水量(F_c)是土壤的一个重要属性，能较好地反映土壤质地的差异，土壤黏滞或地下水位高，田间持水量较大，反之，砂质土壤孔隙大，田间持水量也小[19]。

$$D_s = w_1 F_c + w_2(1 - S_l) \quad (2)$$

式中，D_s为环境敏感性指数，w_1，w_2为影响权重系数，用层次分析法确定[20]。

1.3.2 致灾因子危险性评估

调查表明，稻麦茬种植区尤其是秸秆还田以后，田间菌源广泛存在[21]，那么，抽穗扬花期的气象条件则成为赤霉病流行的主因。因此，可根据气象达标日的出现频率和可能的病穗率构建致灾危险性评估模型D_h：

$$D_h = \sum_{i=1}^{4} P_i \times C_i \quad (3)$$

其中i为等级数，P_i为各等级达标日发生频率，C_i为相应的可能小麦病穗率中间值。

1.3.3 承灾体脆弱性评估

采用相对小麦种植面积作为承灾体物理暴露性指标，即为各县(市)小麦的种植面积与各县(市)耕地面积之比。其计算公式如下：

$$V_\varepsilon = \frac{A_w}{A_a} \quad (4)$$

其中，V_ε为承灾体物理暴露性指数，A_w为各县(市)冬小麦种植面积，A_a为《江苏省统计年鉴》提供的县(市)耕地面积，取近5年平均值。

V_d反映的是区域人类社会为保障承灾体免受、少受某种灾害威胁而采取的基础的及专项的防备措施力度。本文采用某区域单产占整个研究区单产总和的平均值所代表的区域农业水平指数来表示区域应灾能力。

$$V_d = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{Y_i}{S_i} \quad (5)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} Y_{ij} \quad (6)$$

其中,V_d 为区域应灾能力,Y_i 为县级第 i 年的实际单产,S_i 为第 i 年全省各县(市)实际单产总和,Y_{ij} 为第 i 年 j 县(市)的实际单产,n 为年代长度,m 为县(市)个数。

利用承灾体的物理暴露性和区域应灾能力 2 个指标构建承灾体脆弱性综合评估模型 D_v:

$$D_v = w_3 V_\varepsilon + w_4(1 - V_d) \quad (7)$$

式中,V_ε 为承灾体物理暴露性,V_d 为区域应灾能力;w_3,w_4 分别为承灾体物理暴露性和区域应灾能力的权重,用层次分析法确定。

2　结果与分析

2.1　赤霉病流行气象条件空间分布特征

统计 1961 年以来小麦抽穗-乳熟期(4 月－5 月)逐日平均气温和相对湿度发现,江淮之间南部和苏南大部分地区年平均诱发达标日超过 10 d,其中,苏南南部和南通地区超过 12 d、局部达到 14～15 d;江淮之间北部有 8～10 d;淮北地区年平均 4～8 d(图 1)。进一步分析流行程度发现(表 2),全省平均年发生轻-中度诱发赤霉病气象条件 1～3 次;较重以上程度的气象条件淮北地区每年出现 0.3 次左右,江淮之间 0.6～0.7 次,苏南地区则在 0.73 次以上。江淮之间和苏南地区出现诱发赤霉病的气象条件几率远高于淮北地区。

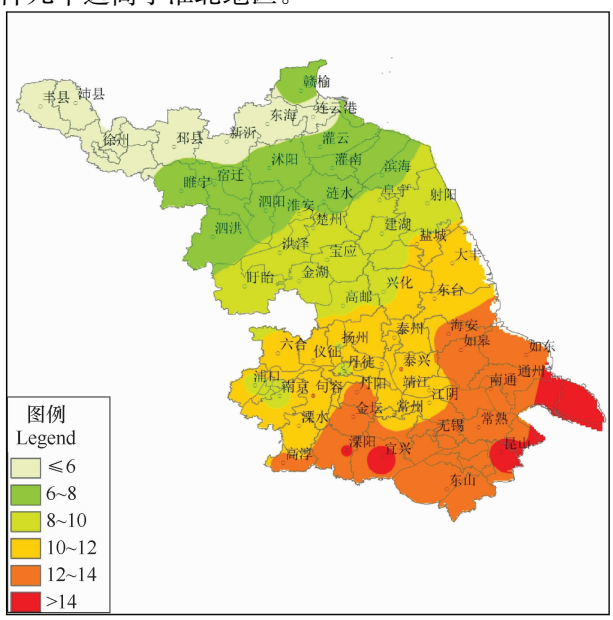

图 1　1961 年－2017 年江苏省诱发赤霉病气象条件平均日数

Fig. 1　Distribution of average days when meteorological conditions are in favor of wheat scab in Jiangsu from 1961 to 2017

表 2　1961 年－2017 年江苏省气象指标反演赤霉病流行平均次数

Table 2　Average times of wheat scab epidemic derived by meteorological parameters in Jiangsu from 1961 to 2017

区域 Region	轻度 Slight	中度 Moderate	较重 Serious	重度 Severe
淮北地区 Northern Jiangsu	2.30	0.84	0.35	0.28
江淮之间 Between the Yangtze River and the Huaihe River	2.91	1.42	0.62	0.68
苏南地区 Southern Jiangsu	3.27	1.47	0.73	0.77

2.2　赤霉病流行年际特征

以泰兴为例,统计 1961 年以来历年赤霉病气象诱发达标日发现,分别在 1963、1964、1966、1977、1983、1985、1994、1998、2002 及 2016 等年份出现峰值,均超过 15 d,有逐年波动减弱趋势,这与当地小麦赤霉病的流行情况基本吻合(图 2)。年代际分布看,气象诱发平均日数亦有下降趋势,2001 年－2010 年间达到最少,2011 年－2017 年平均日数又有回升,这说明气象条件在逐渐好转的过程中,出现波动回升。尤其是 2016 年,气象诱发达标日出现了 22 d,有 2 次天气过程达到重度、3 次达到中度的温湿指标,满足了赤霉病大流行诱发条件。而来自农业部门的调查也证实了这一情况,2016 年全省赤霉病发病面较广,沿江和苏南小麦病穗率超过 50%,江淮之间部分地区达到 40%左右,淮北地区病穗率也普遍超过 10%,造成全省小麦品质下降,严重影响了夏粮收购。

2.3　冬小麦脆弱性评估

冬小麦脆弱性评估主要从物理暴露性和应灾能力两方面考虑,江苏冬小麦的物理暴露性指数(图略)在淮北、江淮之间中西部及沿江和苏南的中部地区较高,该地超过 50%的耕地种植小麦,其中宿迁、淮安甚至超过 60%,物理暴露性最高;东部沿海、苏南南部及宁镇丘陵地区小麦种植面积较小,南京地区仅有 10%～20%,物理暴露性较低。应灾能力(图 3a)空间分布以江淮之间为最强,超过 0.014,包括宿迁、盐城、淮安、泰州及扬州和南通部分地区,这些地区小麦单产高且稳定;淮北和沿江大部分地区略低一些,在 0.013～0.014 之间;苏南南部和宁镇丘陵地带产量稳定性最差,种植面积小,单产波动大,应灾能力也相对最弱。

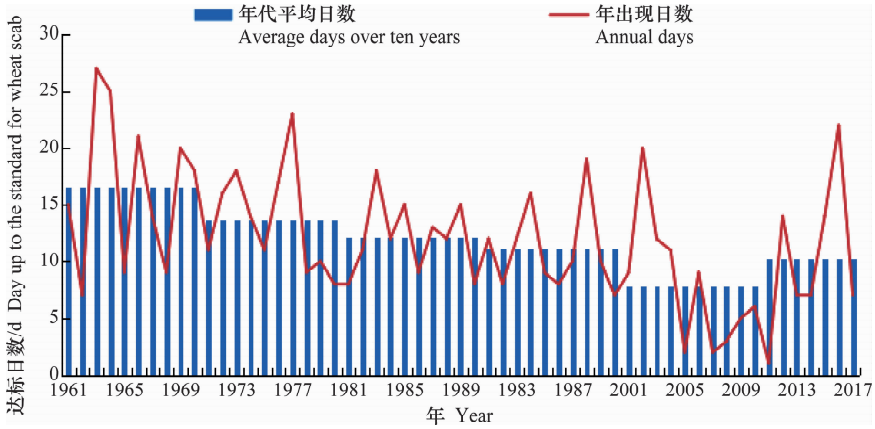

图 2 江苏省泰兴市赤霉病气象达标日年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of days up to the standard for wheat scab in Taixing, Jiangsu province

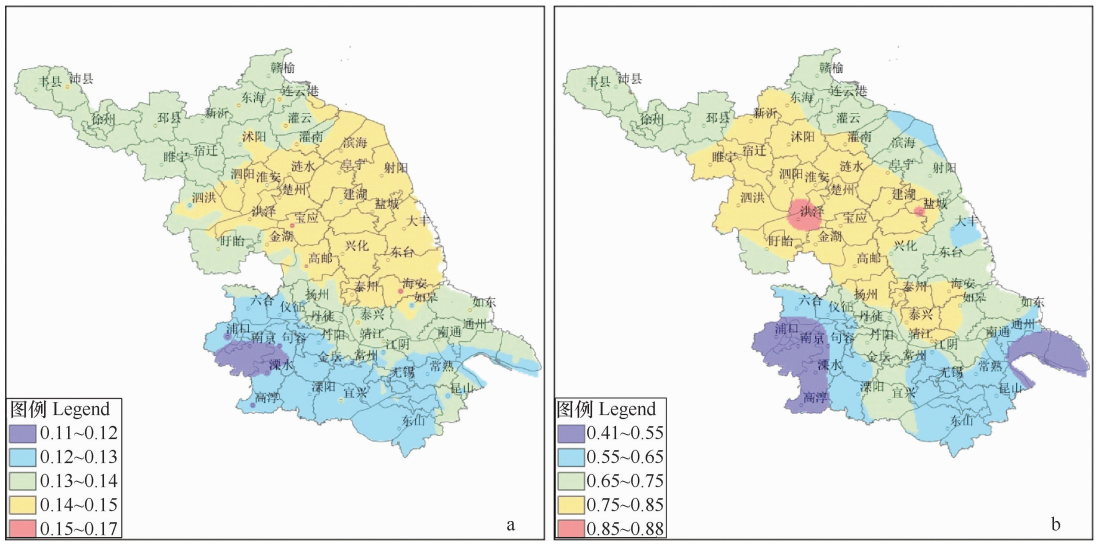

图 3 江苏省小麦生产应灾能力(a)和脆弱性(b)评估

Fig. 3 Evaluations of disaster-bearing capability(a) and vulnerability (b) of wheat production in Jiangsu province

综合分析(图 3b),江苏冬小麦脆弱性较高的地区主要在长江以北,其中徐州南部、宿迁、淮安、扬州及泰州和盐城的部分地区最高,脆弱性相对较低的地区为宁镇丘陵、苏南东部和南通南部地区,北部沿海和苏南南部地区呈中等脆弱性。

2.4 孕灾环境敏感性评估

坡度分析显示,江苏大部分地区坡度≤2°,地势平缓,低洼地较多,仅在苏南西部和连云港地区有部分丘陵岗地。全省 0～20 cm 的田间持水量在 0～0.52 之间,高值区分布在沿江、江淮之间,范围较广,这些地区的土壤保水性好,偏黏滞。分析孕灾环境敏感性指数发现,江淮之间中西部、沿江和苏南的部分地区数值较高,大于 0.65;沿江东部、沿海和江淮部分地区敏感指数在 0.55～0.65 之间,土壤砂性较强;敏感指数小于 0.55 的区域多为水体(图 4)。

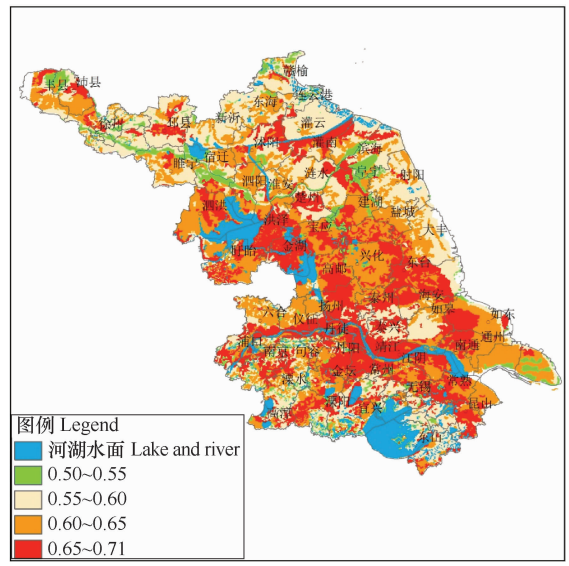

图 4 江苏省小麦赤霉病孕灾环境敏感性

Fig. 4 The sensitivity of wheat scab to epidemics-inducing environment in Jiangsu province

2.5　赤霉病综合风险区划

利用地理信息系统的栅格计算功能,根据公式(1)求得江苏冬小麦赤霉病风险值。经风险综合分析,确定如下 4 个等级:低风险区($D_r \leqslant 0.2$)、中等风险区($0.2 < D_r \leqslant 0.3$)、较高风险区($0.3 < D_r \leqslant 0.4$)、极高风险区($D_r > 0.4$)。江苏小麦赤霉病综合风险地区差异明显(图 5),其中,极高风险区主要位于泰兴、江都、丹阳、溧阳、姜堰、海安、如皋、如东、靖江、宜兴、常熟、昆山、张家港等地,这些地区春季满足日平均气温≥15℃且相对湿度≥85%的日数年平均超过12 d,地势低洼、水网密布,土壤黏滞、多为水稻土和潮土,冬小麦单产并不稳定。高风险区主要位于淮河以南的洪泽、金湖、盱眙、宝应、高邮、建湖、兴化、大丰、仪征、句容、金坛、启东和海门等地,这部分地区气象致灾日较多,年平均 10～12 d,春季降水略少,地势低平、水稻土为主,北部地区小麦的种植比例较高,产量稳定。

中等风险区包括南京、沿淮及淮北南部地区,这些地区气象致灾的达标日平均少于 10 d,旱涝时有发生,土壤多为潮土,肥力性能较好,适宜于小麦生长,但需加强改良和合理利用。

低风险区主要在淮北北部,壤性土质,肥力得当,非常适宜强筋小麦的生长。虽然小麦种植面积超过 50%,但由于春季降水常年偏少,并不利于赤霉病的发生。

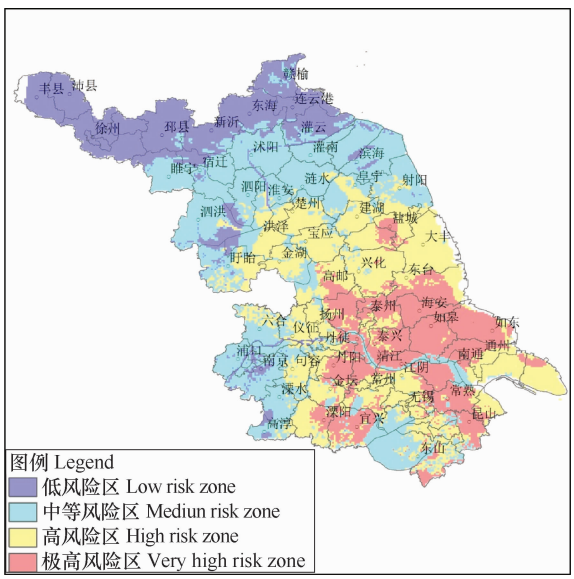

图 5　江苏省小麦赤霉病综合风险区划图

Fig. 5　The map of integrated risk zones of wheat scab epidemics in Jiangsu province

3　结论与讨论

利用对小麦赤霉病成灾影响最直接的因子,构建赤霉病综合风险评估模型,是开展小麦赤霉病综合风险评估的一个有益探索,模型评估结果与灾情实况也基本吻合。

江苏冬小麦赤霉病综合风险指数呈东南-西北向分布,空间差异较大,与气象致病日的空间分布基本一致。其中,极高风险区主要位于里下河南部和沿江东部地区,包括扬州、泰州、南通、苏州、镇江及常州地区的 20 县(区);高风险区包括极高风险区外围的一定区域,分布在淮河以南的平原和沿海地区,宁镇丘陵除外;中等风险区主要分布在沿淮、淮北南部和宁镇丘陵,包括南京大部、淮安北部、盐城北部及睢宁、沭阳、泗阳、灌南等地;低风险区主要分布在淮北北部地区,由于春季降水偏少,干旱为小麦生长主要影响因素。

本文考虑气象、地理和农业统计等多因素构建小麦赤霉病综合风险评估模型,利用该模型的输出结果能够较为真实地反映 1961 年以来江苏赤霉病的风险分布及地域差异。但由于模型中并未考虑赤霉病菌源和植株密度的差异,所得评估结果势必存在一定偏差。同样,种植面积和小麦品种的逐年调整,也会给赤霉病风险指数带来年际变化。这些问题都有待于进一步改进。

参考文献

[1]　姚克兵,庄义庆,尹升,等. 江苏小麦赤霉病综合防控关键技术研究[J]. 植物保护,2018,44(1):205-209.

[2]　徐雍皋. 小麦赤霉病防治理论研究与实践[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1993.

[3]　肖晶晶,霍治国,李娜,等. 小麦赤霉病气象环境成因研究进展[J]. 自然灾害学报,2011,20(2):146-152.

[4]　殷平,包志军,卜锋,等. 谈谈小麦赤霉病的发生及防治[J]. 上海农业科技,2011(4):115.

[5]　陈云,王建强,杨荣明,等. 小麦赤霉病发生危害形势及防控对策[J]. 植物保护,2017,43(5):11-17.

[6]　南都国,吴溪涌,周霞. 小麦赤霉病灰色灾变长期预测模型[J]. 中国农业科学,1987,20(6):64-69.

[7]　冯成玉,张光旺,刘建邦,等. 湿段天气在小麦赤霉病定量预报中的应用[J]. 植物保护学报,1998,25(3):231-234.

[8]　高苹,居为民. 冬小麦赤霉病流行程度长期预报模型[J]. 气象,1998,24(6):55-58.

(下转 125 页)

[J]. 河南农业科学，2016，45(11)：1－7.
[15] 张振宇，圣平，黄胜威，等. 昆虫肠道微生物的多样性、功能及应用[J]. 生物资源，2017，39(4)：231－239.
[16] 邴孝利，陆益佳. 水果害虫斑翅果蝇体内微生物菌群研究进展[J]. 微生物学报，2019，59(10)：1880－1888.
[17] ALMEIDA L G，MORAES L A，TRIGO J R，et al. The gut microbiota of insecticide-resistant insects houses insecticide-degrading bacteria：A potential source for biotechnological exploitation [J/OL]. PLoS ONE，2017，12(3)：e0174754. DOI：10.1371/journal.pone.0174754.
[18] ACEVEDO F E，PEIFFER M，TAN C W，et al. Fall armyworm-associated gut bacteria modulate plant defense responses [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions，2017，30(2)：127－137.
[19] 唐运林，吴燕燕，顾偌铖，等. 重庆地区草地贪夜蛾肠道细菌的分离鉴定[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2019，41(7)：8－14.
[20] 顾偌铖，唐运林，吴燕燕，等. 重庆地区取食高粱的草地贪夜蛾与玉米黏虫肠道细菌比较[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2019，41(8)：6－13.
[21] 韦俊宏，唐运林，顾偌铖，等. 重庆地区玉米叶内生细菌的分离及其与草地贪夜蛾肠道菌的比较[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2019，41(9)：17－23.
[22] 李青晏，唐运林，蒋睿轩，等. 云南地区草地贪夜蛾肠道细菌的分离及鉴定[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2020，42(1)：1－8.
[23] GOODRICH J K，DI RIENZI S. C，POOLE A. C，et al. Conducting a microbiome study [J]. Cell，2014，158(2)：250－262.
[24] McDONALD D，PRICE M N，GOODRICH J，et al. An improved greengenes taxonomy with explicit ranks for ecological and evolutionary analyses of bacteria and archaea [J]. The ISME Journal，2012，6(3)：610－618.
[25] KUCZYNSKI J，STOMBAUGH J，WALTERS W A，et al. Using QIIME to analyse 16S rRNA gene sequences from microbial communities [J/OL]. Current Protocols in Bioinformatics Unit，2011，36(1)：10. 7. 1－10. 7. 20. DOI：10.1002/0471250953. bi1007s36.
[26] 蓝波妙. 斜纹夜蛾肠道细菌多样性及其功能研究[D]. 福州：福建农林大学，2016.
[27] FLORES R，SHI Jianxin，YU Guoqin，et al. Collection media and delayed freezing effects on microbial composition of human stool [J]. Microbiome，2015，3(1)：1－11.
[28] 魏丹峰，王秀吉，杨锦，等. 取食不同食料的美国白蛾幼虫肠道细菌多样性及差异性研究[J]. 环境昆虫学报，2017，39(3)：515－524.
[29] MAGO Č T，SALZBERG S L. FLASH：fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies [J]. Bioinformatics，2011，27(21)：2957－2963.
[30] BOLGER A M，LOHSE M，USADEL B. Trimmomatic：a flexible trimmer for Illumina sequence data [J]. Bioinformatics，2014，30(15)：2114－2120.
[31] EDGAR R C，HAAS B J，CLEMENTE J C，et al. UCHIME improves sensitivity and speed of chimera detection [J]. Bioinformatics，2011，27(16)：2194－2200.
[32] 刘小改，杨亚军，廖秋菊，等. 稻纵卷叶螟肠道细菌群落结构与多样性分析[J]. 昆虫学报，2016，59(9)：965－976.
[33] 孙博通，蓝波妙，王倩，等. 斜纹夜蛾幼虫肠道细菌分离鉴定及其功能初步分析[J]. 生物资源，2017，39(4)：264－271.
[34] SU Qi，ZHOU Xiaomao，ZHANG Youjun. Symbiont-mediated functions in insect hosts [J]. Communicative & Integra Biology，2013，6(3)：e23804. DOI：10.4161/cib.23804.

（责任编辑：田　喆）

(上接 109 页)

[9] 高苹，居为民，陈宁，等. 人工神经网络方法在赤霉病预报中的应用研究[J]. 中国农业气象，2001，22(2)：21－24.
[10] 贾金明. 黄河中下游小麦赤霉病气象指数的建立与应用[J]. 气象，2002，28(3)：50－53.
[11] 李军，蒋耀培，蒋建忠，等. 小麦赤霉病发生程度的气象动态预测模型[J]. 西南农业大学学报(自然科学版)，2004，26(6)：776－780.
[12] 徐云，高苹，缪燕，等. 江苏省小麦赤霉病气象条件适宜度判别指标[J]. 江苏农业科学，2016，44(8)：188－192.
[13] 赵圣菊，姚彩文，霍治国. 我国小麦赤霉病地域分布的气候分区[J]. 中国农业科学，1991，24(1)：60－66.
[14] 冯成玉，张光旺，陈正岸. 江苏省小麦赤霉病地域分布的气候分区[J]. 植物病理学报，1995，25(2)：111－115.
[15] 商鸿生，井金学，张文军. 关中麦区小麦赤霉病流行的分区研究[J]. 植物保护学报，1999，26(1)：40－44.
[16] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报，2009，18(5)：1－9.
[17] 李军龙，张剑，张丛. 气象要素空间插值方法的比较分析[J]. 草业科学，2006，23(8)：6－11.
[18] 张旭晖，高苹，居为民，等. 小麦赤霉病气象等级预报模式研究[J]. 安徽农业科学，2008，36(23)：10030－10032.
[19] 许广波，吕龙石，廉浩燮，等. 影响田间持水量主要因子的通径分析[J]. 延边大学农学学报，1997，19(4)：242－245.
[20] 张旭晖，吴洪颜，许祥，等. 江苏省雷暴灾害脆弱性分析[J]. 气象科学，2007，27(5)：536－542.
[21] 邬荣世，吴翠翠. 江淮麦区小麦赤霉病大发生的原因与防治对策[J]. 农技服务，2012，29(10)：1141－1142.

（责任编辑：田　喆）