

近 20 年来我国农作物病虫害时空变化特征

赵森¹ 赵闯¹ 孙振中^{1,†} 宋宏权²

1. 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871;

2. 河南大学生命科学学院, 开封 475004; † 通信作者, E-mail: sunzhenzhong@pku.edu.cn

摘要 基于农作物播种面积和病虫害发生面积的统计数据, 分析我国近 20 年来农作物病虫害的时间变化趋势和空间分布特征, 同时探讨农作物病虫害发生与气候因素的关系。结果表明: 在时间序列上, 我国农作物病虫害发生面积和病虫害发生面积率分别以 8520.05 千公顷次/年和每年 0.05% 的速度显著增长($p < 0.01$); 在空间分布上, 播种面积最大的山东省和河南省, 病虫害发生面积也最大, 发生面积均达到 3.0×10^5 千公顷次以上; 从病虫害发生面积率来看, 空间分布不均匀, 上海市、浙江省和江苏省的病虫害发生面积率较大, 同时各个省份病虫害发生面积率都呈增加趋势, 其中上海市和浙江省的病虫害发生面积率增加较快, 年增幅分别为 0.17% 和 0.12%, 而内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、甘肃省、青海省、四川省、云南省等地发生面积率增加幅度较小, 这种增加趋势由沿海向内陆递减。与气候因子的相关性分析表明, 89.3% 的省份病虫害发生率距平与平均温度距平呈正相关关系, 其中 46.4% 的省份呈显著正相关关系($p < 0.05$), 与年降水量距平的相关关系不明显。

关键词 农作物; 病虫害; 时空变化特征; 降水; 温度

中图分类号 S181

Spatio-temporal Changes of Crop Diseases and Insect Pests in China over the Last Two Decades

ZHAO Miao¹, ZHAO Chuang¹, SUN Zhenzhong^{1,†}, SONG Hongquan²

1. Key Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. College of Life Sciences, Henan University, Kaifeng 475004;

† Corresponding author, E-mail: sunzhenzhong@pku.edu.cn

Abstract The temporal and spatial changes of crop diseases and insect pests were investigated based on the statistic data of occurrence area as well as planted crop areas data during the last 20 years in China. Meanwhile, the relationship between crop diseases and insect pests' occurrence and climate were examined in this paper. Results showed that the trends of crop diseases and insect pests' occurrence area and rate significantly increased by 8.52×10^6 (hm²·time)/a and 0.05%/a, respectively ($p < 0.01$). Spatially, Shandong and Henan had the largest planted crop area and occurrence area, whose occurrence area both reached more than 3.0×10^8 hm²·time. Twenty-two years averaged, crop diseases and insect pests occurred all over the country, but experienced uneven pattern. The most serious province (autonomous region or municipality) is Shanghai, followed by Zhejiang and Jiangsu. Furthermore, the trends of crop diseases and insect pests' occurrence area rate increased in all of the studied provinces in China. Shanghai (0.17%/a) and Zhejiang (0.12%/a) owned the largest two crop diseases and insect pests' occurrence area rate, while Inner Mongolia, Xinjiang Uygur autonomous region, Gansu, Qinghai, Sichuan and Yunnan had the smaller increasing trends. Therefore the increasing trend of crop diseases and insect pests' occurrence area rate descended from the coast to the inland. Out of the 28 provinces investigated, there were positive correlations between the anomaly of insect pests' occurrence area rate and the anomaly of mean annual temperature in 25

国家自然科学基金(41401096)资助

收稿日期: 2014-08-10; 修回日期: 2014-10-20; 网络出版日期: 2015-08-18

(89.3%) provinces and were significant positive in 13 (46.4%) provinces ($p < 0.05$), but no significant correlations with that of precipitation in most provinces.

Key words crop; diseases and insect pests; temporal and spatial variation characteristics; precipitation; temperature

农业是国民经济的重要基础。我国人口众多,粮食需求大,用仅占世界 7% 的土地养活占世界 22% 的人口^[1-2]。然而,我国又是世界上自然灾害最为严重的国家之一。据统计,我国每年农业因气象灾害受灾面积达 50000~70000 万亩,占农作物总播种面积的 30%~35%,造成的粮食损失占全国粮食总产量的 8%~10%^[3-4],经济损失约占国民生产总值(GDP)的 3%~6%^[5]。农业生产的另一大威胁来自病虫害,世界粮食产量每年因虫害损失 18%,因病害损失 16%,其中大豆、小麦和棉花损失 26%~29%,玉米、水稻和土豆分别损失 31%, 37% 和 40%^[6]。据统计,全国农作物病虫害近 1600 种,其中可造成严重危害的有 100 种以上,重大流行性、迁飞性病虫害有 20 多种^[7]。我国因病虫害造成的农业产值损失约为农业总产值的 20%~25%,危害十分严重^[8]。1990—1991 年全国小麦白粉病大流行,导致 1990 年小麦损失 14.38 亿公斤,局部严重地区减产 30%~50%,有些高感品种甚至绝收^[9]。因此,有必要开展我国农作物病虫害发生特征的研究,为减灾和预防农作物病虫害提供参考。

农作物病虫害的发生、消长与成灾,不仅与农作物品种、耕作栽培制度、施肥与灌溉、大气环流等相关,还与气象条件关系密切^[7,10-13],尤其受温度、降水等基本气象因子影响甚大^[14]。IPCC 第五次报告表明,全球地表持续升温,1880—2012 年的 130 年间,全球地表平均温度上升 0.85℃;1983—2012 年可能是过去 1400 年中最暖的 30 年。预计到 21 世纪末,全球温度将升高 1.5~5.8℃,全球平均降水将增长 5%~15%^[15-17]。中国地区 1981—2007 年比 1961—1980 年温度升高 0.6℃,降水增加 0.4%^[18],但是总体上全国降水量空间分布的区域差异性较强,比较一致的观点是自 20 世纪 90 年代以来,东北地区降水呈减少趋势,东南沿海地区降水呈增加趋势^[19-21]。

在此背景下,关于病虫害发生的时空变化特征以及病虫害发生与气候变化的关系研究尚较少。卢丽萍等^[22]及房世波等^[23]利用统计数据,对我国主要农业气象灾害进行了时间变化趋势和空间特征分

析。李祎君等^[24]分区域探讨了我国西南地区、西北地区、长江流域、华北地区和东北地区的气候变化对农业病虫害的影响。张蕾等^[25]和王丽等^[26]分别利用全国 527 个气象站点数据、全国病害或虫害及农作物种植面积等资料,分析了气象要素变化对病害或虫害发生的影响。上述研究基本上是基于全国或者区域尺度。由于我国不同省份病虫害发生情况不同,同时环境要素的变化对病虫害影响也非常复杂,因此,基于全国范围的研究结果与区域研究结果存在差异,针对某一省份开展气候变化对农业病虫害影响的评估具有重要意义和应用价值。

目前还未见省级尺度的基于统计数据的病虫害发生时空变化特征以及与气象因子关系的相关研究,因此本文从省级尺度上探讨我国病虫害发生的时间变化趋势和空间格局特征,从降水和温度方面揭示并量化气候变化对病虫害的影响,以期达到评价农作物病虫害的发生现状及发展趋势的目的,同时为开展区域尺度上的气候变化对农业病虫害影响的评估提供科学参考。

1 数据与方法

本研究的数据资料来自《中国农业年鉴》^[27]和《新中国农业 60 年统计资料》^[28],包括 1988—2010 年(2001 年数据缺失)全国及 28 个省(自治区、直辖市,未包括西藏自治区、重庆市、海南省、台湾省、香港与澳门特别行政区)逐年农作物种植面积和病虫害发生面积。本文提到的东北地区包括辽宁省、吉林省和黑龙江省,华北地区包括北京市、天津市、河北省、河南省、山西省、山东省和内蒙古自治区,西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区,长江中下游地区包括江苏省、浙江省、上海市、安徽省、湖北省、湖南省和江西省,华南地区包括广东省、广西省、福建省和海南省,西南地区包括四川省、贵州省和云南省^[18]。

全国以及各省(自治区、直辖市)的气候资料来自英国东安格利亚大学(University of East Anglia)气候研究所(Climatic Research Unit, CRU)的 CRU

TS 3.20 数据集, 包括 1988—2010 年逐月的平均温度和降水, 该数据集是由全球陆地上(不包括南极洲)大约 2000 个站点插值生成的, 与 CRUTEM3, CRUTEM4 和 GPCC (全球降水气候学中心)数据集进行比较, 结果显示很好的一致性^[29]。气候数据的空间分辨率均为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 经纬网格。由于农作物种植面积与病虫害发生面积数据以全国或省(自治区、直辖市)为单位进行统计, 因此依据 Frolking 等^[30]和 Qiu 等^[31]通过遥感解译的中国农作物分布图, 将气候数据进行逐像元的加权运算, 得到全国及各省的逐月气候要素。其中各省的物候期参照前人对我国农作物种植制度的研究成果^[32-35], 对冬季不种植作物的东北三省、内蒙古自治区、甘肃省和青海省选取 5—9 月作为生长季, 其他冬季种植作物的省份则以全年为生长季进行计算。

本文中各因子的时间趋势分析采用 t 检验。对气象因子分析时采用因子的距平值, 以便对比。以省份为单位, 因子的距平值计算方法如下:

$$X_i' = X_i - \sum X_i / 22, \quad (1)$$

其中, X_i' 为因子的距平值, X_i 为第 i 年 ($i = 1, 2, \dots, 22$) 的 X 因子。

为消除农作物种植面积的影响, 本文将病虫害发生面积转换为病虫害发生面积率(病虫害发生面积率 = 当年病虫害发生面积 / 当年农作物种植面积 $\times 100\%$)^[25], 求得病虫害发生面积率的距平值。在此基础上, 采用皮尔森相关分析病虫害因子与气象因子的相关关系。

2 结果与分析

2.1 农作物病虫害的时空变化特征

2.1.1 全国范围内农作物病虫害的时序变化

从我国近 20 年来病虫害发生面积、农作物播种面积以及病虫害发生面积率的时间变化趋势(图 1)看出, 1988—2010 年期间我国农业病虫害发生呈显著上升趋势, 病虫害发生面积以 8520.05 千公顷次/年的速度增长($p < 0.01$), 农作物播种面积以 502.40 千公顷/年的速度增长($p < 0.01$), 病虫害发生面积率以每年 0.05% 的速度增长($p < 0.01$)。近 20 年病虫害发生面积平均值为 2.92×10^5 千公顷次, 其中 1988 年为 1.83×10^5 千公顷次, 2008 年为 3.68×10^5 千公顷次, 2008 年是 1988 年的 2.01 倍; 全国病虫害发生面积率, 由 1988 年的 1.27% 上升到 2007 年的 2.38%, 增加 0.87 倍。农作物播种面积由 1981

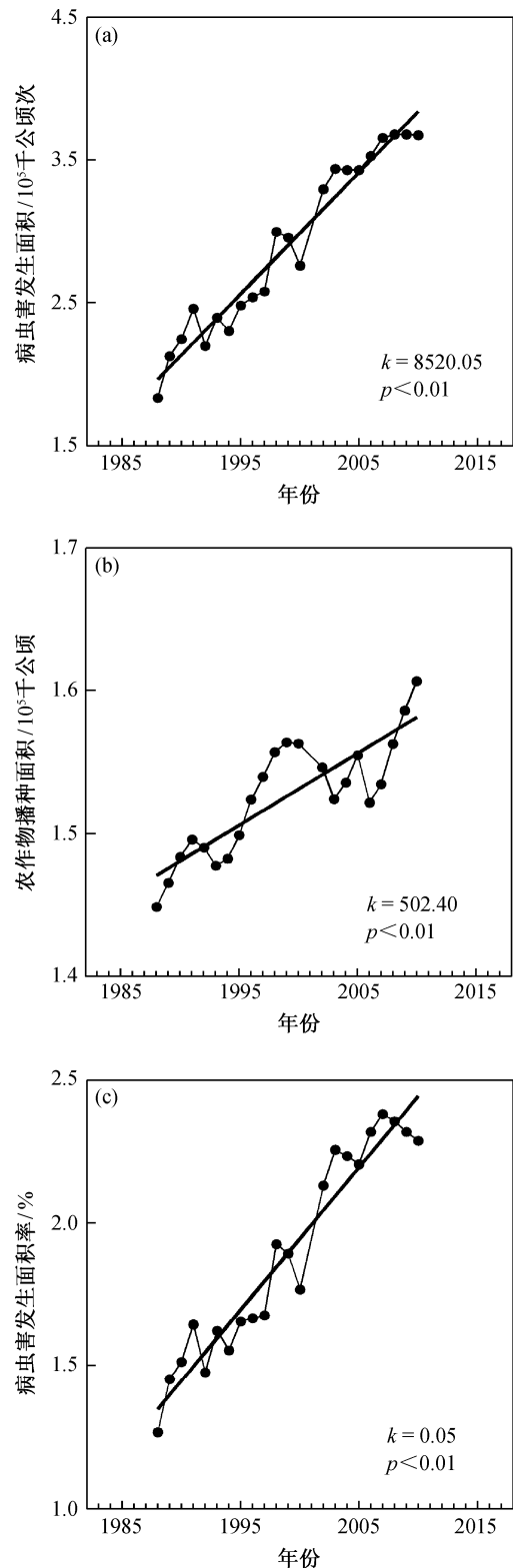


图 1 近 20 年来全国病虫害发生面积(a)、农作物播种面积(b)和病虫害发生面积率(c)的时间序列

Fig. 1 Time series of diseases and insect pests' occurrence area (a), planted crop area (b) and diseases and insect pests occurrence area rate (c) in China over the last 20 years

年的 1.44×10^5 千公顷上升到 2010 年的 1.61×10^5 千公顷。

2.1.2 农作物病虫害空间分布特征

1) 农作物病虫害发生面积与播种面积。

从表 1 看出,黄淮海平原的山东、河南等播种面积较大的省份病虫害发生面积较大,其中 89% 的省份发生面积呈显著上升趋势($p < 0.05$),82% 的省份呈极显著上升趋势($p < 0.01$),只有北京市呈下降趋

势。50% 的省份农作物播种面积呈下降趋势,39% 的省份显著下降($p < 0.01$),包括东部和东南部沿海的省份、西南地区的四川省、西北地区的青海省和陕西省,其中四川省降幅达 189.12 千公顷/年。东北地区、长江中下游大部分省份和西南地区的云南省、贵州省等呈增加趋势。

将农作物播种面积与病虫害发生面积做相关性分析(表 1),可以看出,近 20 年来各个省(自治区、

表 1 全国 28 个省病虫害发生面积、农作物播种面积、变化趋势及病虫害发生面积和农作物播种面积的相关系数
Table 1 Diseases and insect pests' occurrence area, crop sown area, the trends and correlation coefficient between diseases and insect pests' occurrence area and crop sown area in 28 provinces (autonomous regions or municipalities) of China

省份	病虫害发生面积/ 千公顷次	发生面积趋势/ (千公顷次·年 ⁻¹)	播种面积/ 千公顷	播种面积趋势/ (千公顷·年 ⁻¹)	发生面积与播种 面积的相关系数
北京市	976.30	-4.88	458.14	-16.66**	0.45*
天津市	941.59	30.64**	532.96	-6.37**	-0.85**
河北省	26971.42	676.59**	8785.22	-1.55	-0.06
山西省	7393.78	164.93**	3887.64	-14.92**	-0.78**
内蒙古自治区	5729.21	165.81**	5687.69	111.96**	0.75**
辽宁省	7615.18	256.07**	3697.29	13.22**	0.76**
吉林省	5024.25	150.45**	4439.43	60.71**	0.74**
黑龙江省	9658.26	665.50**	9646.29	175.07**	0.87**
上海市	2075.25	30.14*	508.58	-12.90**	-0.29
江苏省	27207.86	554.88**	7888.80	-37.78**	-0.81**
浙江省	11622.57	40.96	3494.68	-99.67**	-0.26
安徽省	14109.93	386.60**	8653.87	52.01**	0.67**
福建省	3366.20	115.34**	2645.95	-26.33**	-0.77**
江西省	10018.22	369.61**	5579.29	-25.32**	-0.74**
山东省	30700.28	697.70**	10887.84	-6.71	-0.30
河南省	34681.89	670.25*	12934.35	130.08**	0.36
湖北省	13274.95	440.26**	7395.47	6.72	0.22
湖南省	20818.66	1058.64**	7862.06	4.26	0.09
广东省	10560.98	412.26**	5105.64	-54.18**	-0.71**
广西壮族自治区	9121.01	358.54**	5824.60	48.99**	0.58**
四川省	10127.44	15.63	10780.88	-189.12**	0.33
贵州省	3638.82	91.22**	4334.39	61.72**	0.34
云南省	3831.48	149.59**	5367.60	96.22**	0.92**
陕西省	7338.01	275.29**	4497.44	-41.10**	-0.88**
甘肃省	4717.83	118.20**	3724.28	11.77**	0.64**
青海省	604.64	15.70**	530.76	-2.28*	-0.17
宁夏回族自治区	1440.52	60.58**	1034.50	18.00**	0.91**
新疆维吾尔自治区	2745.54	218.62**	3481.09	76.09**	0.94**

注: *显著($p < 0.05$); **极显著($p < 0.01$)。

直辖市)播种面积对病虫害发生面积的影响不一致。华北地区的天津市和山西省、华南地区的福建省和广东省播种面积与病虫害发生面积显著负相关($p<0.01$),东北地区 and 内蒙古自治区播种面积与病虫害发生面积显著正相关($p<0.01$)。因此,为消除年际间农作物种植面积变化对农作物病虫害发生面积的影响,需要进一步分析病虫害发生面积率的空间分布格局,以便更好地掌握病虫害的发生特征。

2) 农作物病虫害发生面积率。

从图 2 可以看出,病虫害在全国各地都有发生,但分布不均匀,总体上呈现由沿海向内陆递减的趋势。由图 2(a)可知,东部沿海城市的农作物受病虫害影响较大,其中上海市、浙江省、江苏省的病虫害发生面积率较大;云南省、贵州省、四川省、新疆维吾尔自治区等内陆地区病虫害发生面积率较小,最小的是云南省,为 0.70%。

从图 2(b)可以看出,全部省份病虫害发生面积率都呈增加趋势,其中只有内蒙古自治区、河南省和贵州省增加趋势不显著,其余 25 个省份都呈显著上升的趋势($p<0.05$)。长江中下游地区大部分省份农作物病虫害发生面积率增加较快,西北地区和东北地区增加较慢。其中,上海市、湖南省和浙江省的病虫害发生面积率增加最快,年增幅分别为 0.17%, 0.13% 和 0.12%;内陆地区的内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、甘肃省、青海省、四川省、云南省等发生面积率增加趋势较小,与图 2(a)结果较一致。

2.2 农作物病虫害对气候变化的响应

2.2.1 降水对病虫害的影响

降水量变化趋势不明显,但各地区不同(图 3(a))。总体上,东北地区降水呈减少趋势,东南沿海地区大部分省份降水呈增加趋势,与前人研究结果^[19-21]一致。

从图 4(a)可以看出,对于黄淮海平原大部分省份、东北的吉林省、西北的新疆维吾尔自治区和青海省以及南部的云南省和广西省,病虫害发生率距平与年降水量距平呈正相关关系,其中山东省呈显著的正相关关系($p<0.05$)。其余的 16 个省份降水与病虫害发生面积率呈负相关关系。

2.2.2 温度对病虫害的影响

近 20 年来 78% 的省份温度呈上升趋势,其中西北地区的新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区和陕西省,西南地区的云南省和四川省,华南地区的

广东省和福建省,长江中下游地区的湖南省、湖北省、江西省、安徽省和江苏省,华北地区的河南省、山西省和河北省等省份的温度呈显著上升趋势($p<0.05$);青海省、贵州省、广西壮族自治区、山东省、黑龙江省和辽宁省 6 个省份呈下降趋势(图 3(b))。

由图 4(b)可知,89% 的省份病虫害发生率距平与平均温度距平呈正相关关系,其中 13 个省份呈显著正相关关系($p<0.05$),只有山东省、贵州省和广西壮族自治区呈负相关关系。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究表明,近 20 年来病虫害发生面积率在时间变化上呈显著上升趋势,与张蕾^[36]的近 50 年(1961—2010 年)全国农作物病虫害发生面积率呈显著上升趋势的研究结果一致。张蕾^[36]的研究表明,近 50 年全国农作物病虫害发生面积率平均增加速率为 0.43%/10 年,略小于本文得出的近 20 年的增加速率(0.50%/10 年)。

在空间分布上,上海市、江苏省和浙江省地区农作物发生面积率较大,原因可能是该地区种植作物有水稻、油菜、麦类、饲料绿肥、蚕豆、棉、桑等,种植制度为双季稻三熟制(肥-稻-稻、麦-稻-稻、油-稻-稻),或麦-单季稻两作^[37],这种种植制度在一定程度上增加病虫害发生的次数。同时,该区域也为冬小麦赤霉病重病气候区^[38]。张蕾^[36]指出,近 30 年(1981—2010 年),对于小麦白粉病,上海市和江苏省的发生面积率较大;对于水稻稻飞虱,上海市的发生面积率最大,江苏省和浙江省的发生面积和发生面积率均位居前列。此外,人类的各种生产活动(如耕作制度、施肥情况、防治技术等)都可能影响病虫害的发生^[24]。

病虫害发生面积率的波动对气候要素波动的响应具有时空异质性,不同气候要素对病虫害的影响不同。总的来看,气象因子的变化在不同程度上向着有利于病虫害发生的方向发展^[24-26,39-40]。研究表明,大多数的有害昆虫和病原菌喜欢湿热的环境,温度和湿度的增加可以提高真菌和细菌孢子的萌发和扩散能力,导致病害的扩散^[41]。温度升高可以使害虫变得更活跃,扩大其活动范围,加速害虫的发生和繁殖,从而直接影响害虫侵染力^[16,41-43]。已有研究指出,温度升高 10℃,昆虫代谢速率增加一

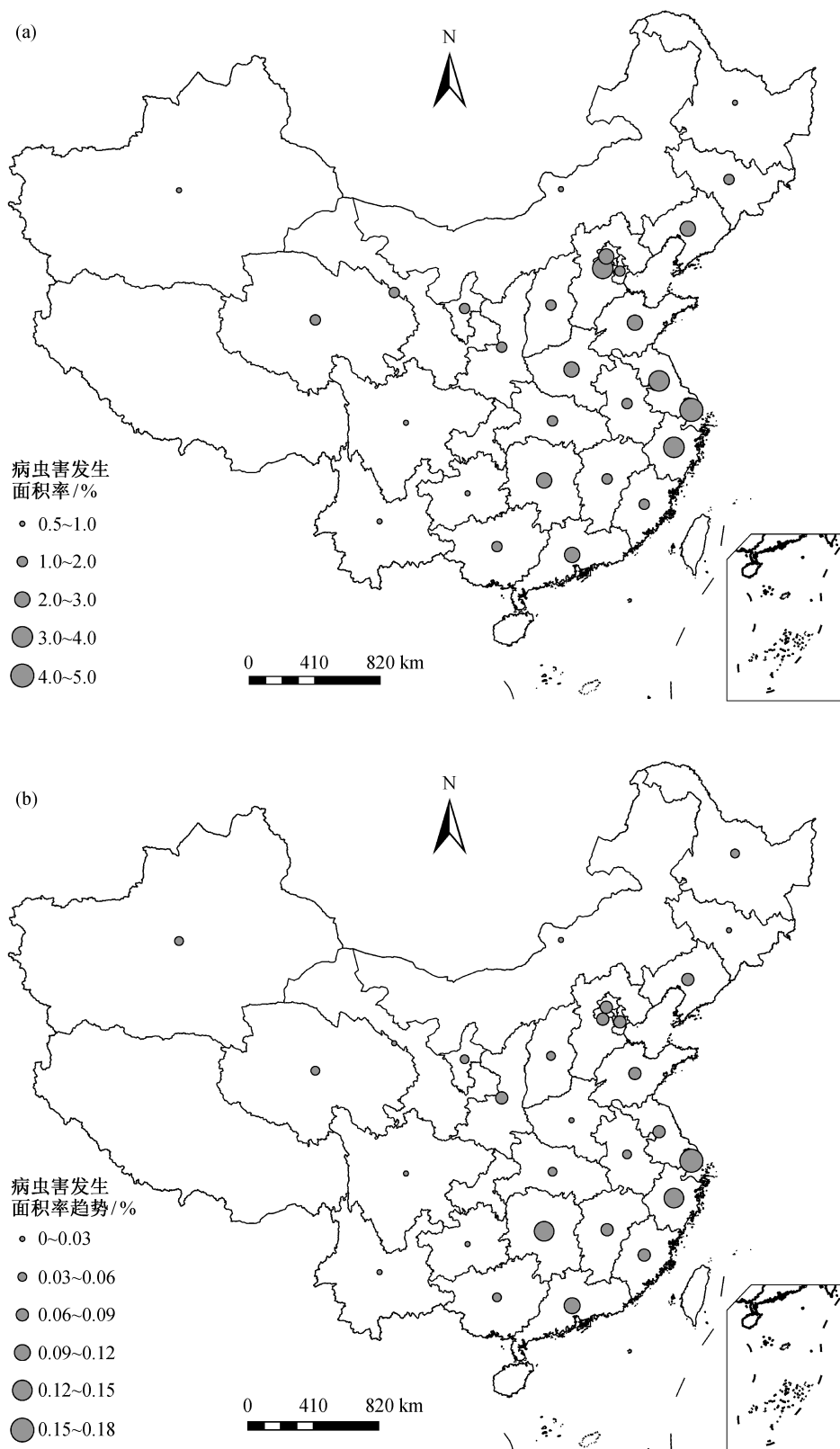


图 2 近 20 年来 28 个省(自治区或者直辖市)的病虫害发生面积率均值(a)和病虫害发生面积率趋势(b)的空间分布(每个点的值代表相应省份的值)

Fig. 2 Spatial distribution of mean values (a) and trends of diseases and insect pests' occurrence area rate (b) in 28 provinces (autonomous regions or municipalities) of China during the last 20 years (the value of each dot stands for that of the corresponding province)

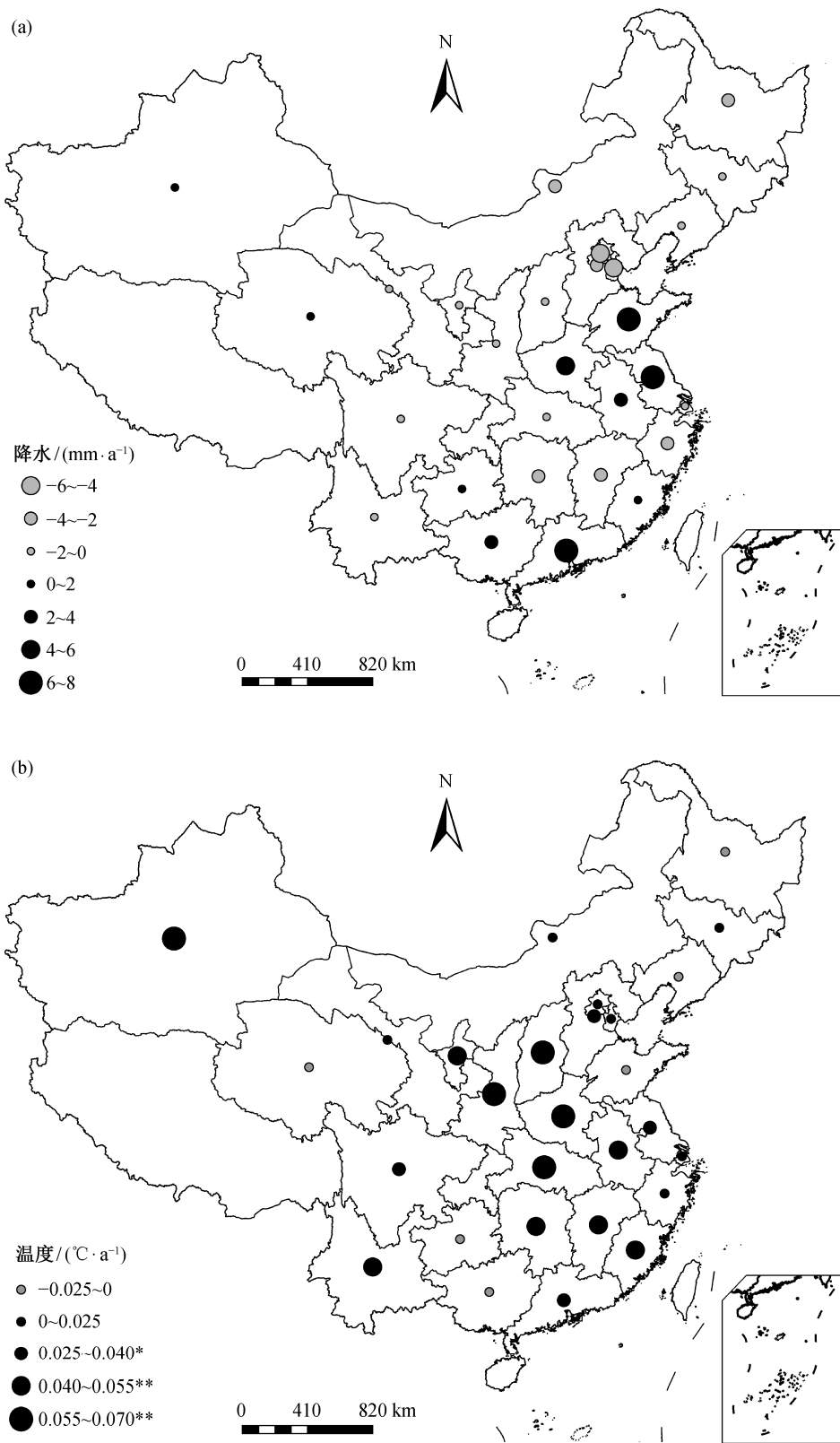


图 3 近 20 年来 28 个省(自治区或者直辖市)的降水(a)和温度(b)趋势空间分布(* $p<0.05$, ** $p<0.01$)
Fig. 3 Spatial distribution of trends of precipitation (a) and temperature (b) in 28 provinces (autonomous regions or municipalities) of China over the last 20 years (* $p<0.05$, ** $p<0.01$)

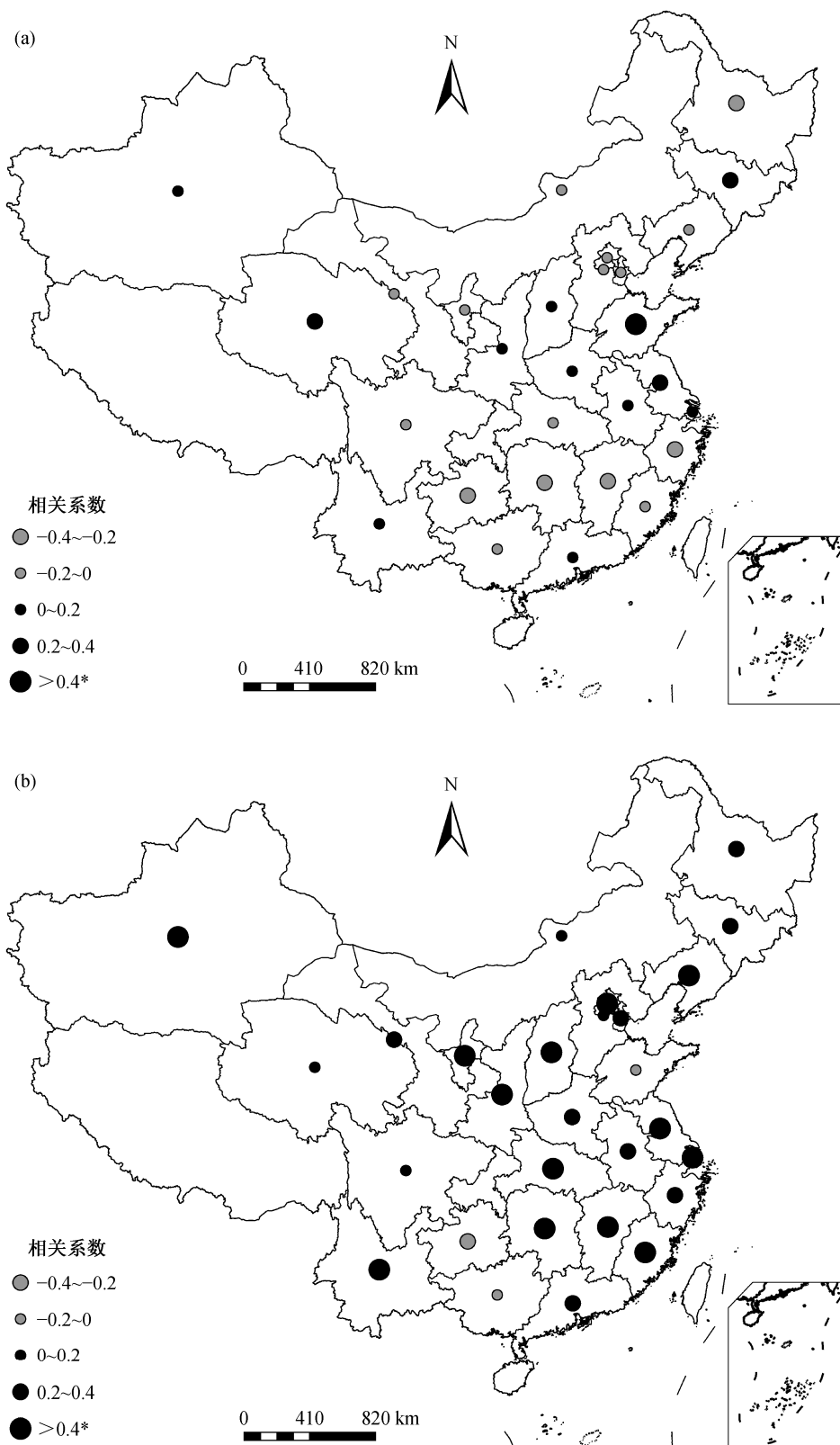


图 4 近 20 年来 28 个省(自治区或者直辖市)病虫害发生面积率距平值与降水距平值(a)和平均温度因子距平值(b)的相关系数 (* $p < 0.05$)

Fig. 4 Correlation coefficient of crop diseases and insect pests' occurrence area rate anomaly with precipitation anomaly (a) and temperature anomaly (b) in 28 provinces (autonomous regions or municipalities) of China over the last 20 years (* $p < 0.05$)

倍^[44-46]。有研究表明,在 10, 14, 18, 22 和 26℃的 5 组实验中,麦长管蚜若蚜的历期、存活率及平均寿命都逐渐减少;产仔高峰期随温度的升高而逐渐提前,在 26℃时,产仔高峰期为第 9 天,而在 14℃时为第 24 天^[47]。就农作物病害而言,病害的潜育期一般在发病温度范围内随温度升高而缩短,危害程度也随之加重^[26,48]。如小麦全蚀病在 10~25℃随着温度升高,症状出现越早,发病也越重^[49]。玉米小斑病可以在 10~35℃发病,且其发病最适温度为 28~30℃^[11]。降雨或适温高湿的气候有利于大多数病菌的繁殖和扩散,雨水又是细菌侵染和传播的主要条件之一^[48],降水的时间和持续天数同样可以影响农药的持久性和药效^[41]。温度在 22~27℃,相对湿度在 92%~98%时有利于稻曲病孢子萌发,从而加速稻曲病的流行^[50]。因此,在气候变暖的大背景下,我国农作物病虫害的变化可能受到气候变化的影响^[7,9]。

对于气候变化影响我国农作物病虫害发生的结论,需要谨慎对待。各种病害和虫害的发生、发展和流行对气象条件的要求不尽相同。如温暖干燥的气象环境反而有利于青椒白粉虱和薹马等虫害的发生^[51]。Easwaramoorthi 等^[52]发现,温度与咖啡害虫口量有显著的正相关,而与真菌的感染率呈显著负相关。Mattson 等^[53]提出干旱可影响植食性昆虫的生理和行为,高温干旱可加快昆虫发育和繁殖。陈若簪等^[54]发现,在排除天敌干扰下,温度对褐飞虱种群的影响随水稻生育期而有差别,取食秧苗或灌浆成熟期水稻的种群,在较低的温度条件下(23~25℃)有利于种群增长;取食分蘖、拔节或孕穗期水稻的种群,在较高的温度条件(27℃左右)有利于种群的增长。因此,气候变化对病虫害发生的影响具有不确定性。

3.2 结论

在时间序列上,近 20 年来我国农作物病虫害不论是发生面积还是发生面积率都呈增加趋势。在空间分布上,89%的省份发生面积呈显著上升趋势,东部沿海城市的农作物病虫害发生面积率较大,内陆地区病虫害发生面积率较小。在病虫害发生与气象因子的关系方面,本文首次尝试从省级尺度上探讨了气候变化对病虫害发生影响。

本文虽然分析了病虫害发生的时空变化格局以及气象因子的关系,但这种关系存在很大的不确定性,影响病虫害发生的因素还有种植制度、耕作

方式、品种抗病性、农药施用情况等。这些因素对病虫害发生的综合影响有待今后进一步研究。

参考文献

- [1] Wang F T, Zhao Z C, Wang S L, et al. Impact of the climate change to the agriculture ecology in China. Beijing: Meteorological Press, 2003: 45-110
- [2] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467: 43-51
- [3] 覃志豪,徐斌,李茂松,等.我国主要农业气象灾害机理与监测研究进展. *自然灾害学报*, 2005, 14 (2): 61-69
- [4] 张朝,王品,陈一,等.1990 年以来中国小麦农业气象灾害时空变化特征. *地理学报*, 2013, 68(11): 1453-1460
- [5] 杨尚英,张梅梅,杨玉玲.近 10 年来我国农业气象灾害分析. *江西农业学报*, 2007, 19(7): 106-108
- [6] Oerke E C. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 2006, 144(1): 31-43
- [7] 霍治国,李茂松,王丽,等.降水变化对中国农作物病虫害的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(10): 1935-1945
- [8] 王长燕,赵景波,李小燕.华北地区气候暖干化的农业适应性对策研究. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 646-652
- [9] 霍治国,李茂松,王丽,等.气候变暖对中国农作物病虫害的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(10): 1926-1934
- [10] 曾娟,姜玉英,霍治国.小麦重大病虫害发生流行的气候影响评价. *科技导报*, 2011, 29 (20): 68-72
- [11] 霍治国,王石立.农业与生物气象灾害.北京:气象出版社,2009
- [12] 钱拴,霍治国.大气环流对中国稻飞虱危害的影响及其预测. *气象学报*, 2007, 65(6): 994-1002
- [13] 姜瑞中,曾昭慧,刘万才,等.中国农作物主要生物灾害实录(1949—2000).北京:中国农业出版社,2005
- [14] Bell J N B, McNeill S, Houlden G, et al. Atmospheric change: effect on plant pests and diseases. *Parasitology*, 1993, 106: S11-S24

- [15] IPCC (WGI). Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [16] Rosenzweig C, Hillel D. Climate change and the global harvest: potential impacts of the greenhouse effect on agriculture. New York: Oxford University Press, 1998: 324
- [17] Sutherst R W. Impact of climate change on pests and diseases in Australasia. *Search*, 1990, 21(7): 230–232
- [18] 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3177–3188
- [19] 范泽孟, 岳天祥, 陈传法, 等. 中国气温与降水的时空变化趋势分析. *地球信息科学学报*, 2011, 13(4): 526–533
- [20] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征. *应用气象学报*, 2000, 11(3): 322–330
- [21] 冯新灵, 罗隆诚, 冯自立. 中国近 50 年降水变化趋势及突变的 Hurst 指数试验. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 859–866
- [22] 卢丽萍, 程丛兰, 刘伟东, 等. 30 年来我国农业气象灾害对农业生产的影响及其空间分布特征. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1573–1578
- [23] 房世波, 阳晶晶, 周广胜. 30 年来我国农业气象灾害变化趋势和分布特征. *自然灾害学报*, 2011, 20(5): 69–73
- [24] 李祎君, 王春乙, 赵蓓, 等. 气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊 1): 263–271
- [25] 张蕾, 霍治国, 王丽, 等. 气候变化对中国农作物虫害发生的影响. *生态学杂志*, 2012, 31(6): 1499–1507
- [26] 王丽, 霍治国, 张蕾, 等. 气候变化对中国农作物病害发生的影响. *生态学杂志*, 2012, 31(7): 1673–1684
- [27] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 1988—2000, 2002—2010
- [28] 中华人民共和国农业部. 新中国农业 60 年统计资料. 北京: 中国农业出版社, 2009
- [29] Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS 3.10 dataset. *International Journal of Climatology*, 2013, 34(3): 623–642
- [30] Frohling S, Qiu J, Boles S, et al. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. *Global Biogeochem Cycles*, 2002, 16(4): 38–1–38–10
- [31] Qiu J, Tang H, Frohling S, et al. Mapping single-, double-, and triple-crop agriculture in China at 0.5°×0.5° by combining county-scale census data with a remote sensing-derived land cover map. *Geocarto International*, 2003, 18(2): 3–13
- [32] 崔读昌, 刘洪顺, 闵谨如, 等. 中国主要农作物气候资源图集. 北京: 气候出版社, 1984
- [33] 宋艳玲. 气候变化对中国农业影响研究. 北京: 气象出版社, 2012
- [34] 张福春, 王德辉, 丘宝剑. 中国农业物候图集. 北京: 科学出版社, 1987
- [35] Zhang T Y, Huang Y. Estimating the impacts of warming trends on wheat and maize in China from 1980 to 2008 based on county level data. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(3): 699–708
- [36] 张蕾. 气候变化背景下农作物病虫害的变化及区域动态预警研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2013
- [37] 韩湘玲, 刘巽浩, 高亮之, 等. 中国农作物种植制度气候区划. *耕作与栽培*, 1986(增刊 1): 2–19
- [38] 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. *中国农业科学*, 1991, 24(1): 60–66
- [39] Cannon R J C. The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology*, 1998, 4(7): 785–796
- [40] 刘文栋, 葛意活, 何燕. 气候变化对水稻病虫害发生发展趋势的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(24): 243–246
- [41] Rosenzweig C, Lglesias A, Yang X B, et al. Climate change and extreme weather events implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change Human Health*, 2001, 2(2): 90–104

- [42] Wermelinger B, Seifert M. Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips ypograp-hus*, and analysis of the potential population growth. *Ecological Entomology*, 1999, 24(1): 103–110
- [43] Bale J S, Masters G J, Hodkinson I D, et al. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob Change Biol*, 2002, 8(1): 1–16
- [44] Gillooly J F, Brown J H, West G B, et al. Effects of size and temperature on metabolic rate. *Science*, 2001, 293: 2248–2251
- [45] Clarke A, Fraser K P P. Why does metabolism scale with temperature?. *Functional Ecology*, 2004, 18(2): 243–251
- [46] Dukes J S, Pontius J, Orwig D, et al. Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: what can we predict?. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(2): 231–248
- [47] 李定旭, 刘绍友. 温度对麦长管蚜种群增长的影响. *昆虫知识*, 1992, 29(4): 196–198
- [48] 叶彩玲, 霍治国, 丁胜利, 等. 农作物病虫害气象环境成因研究进展. *自然灾害学报*, 2005, 14(1): 90–97
- [49] 袁红旭, 商鸿生, 张锋, 等. 温度与小麦全蚀病发病关系的研究. *西北农业学报*, 2000, 9(1): 43–45
- [50] 王长金. 稻曲病发生发展的气候条件及其防治措施. *中国农业气象*, 1996, 17(3): 41–44
- [51] 孙虹雨, 孙立德, 马成芝, 等. 冬季气候变暖对日光温室大棚病虫害发生的影响及其防御对策. *安徽农业科学*, 2009, 37(18): 8558–8559, 8662
- [52] Easwaramoorthi S, Jayaraj S. Ecology of coffee green bug, *Coccus viridis* (Green) and its entomopathogenic fungus, *Cephalosporium lecanii* Zimm. *Madras Agricultural Journal*, 1976, 63: 545–549
- [53] Mattson W J, Haack R A. Role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *Bioscience*, 1987, 37(2): 110–118
- [54] 陈若簏, 綦立正, 程遐年, 等. 褐飞虱种群动态的研究 I. 温度、食料条件对种群增长的影响. *南京农业大学学报*, 1986(3): 23–33