文章编号: 1674－7054(2022)06－0634－10

防城港 2 种红树林虫害与气象条件的关系

张　悦[1,2], 陈燕丽[2,3], 黄　滢[4], 许文龙[4], 陶艳成[3], 刘文爱[3]

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193; 2. 广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022;
3. 广西科学院 广西红树林研究中心/广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536000;
4. 防城港市气象局, 广西 防城港 538001)

摘　要: 为了给红树林虫害的预报和防治提供科学依据, 笔者基于 2015—2019 年防城港市红树林 2 种典型虫害(广州小斑螟 *Oligochroa cantonella* 和柚木肖弄蝶夜蛾 *Hyblaea puera*)的发生面积及气候资料, 采用 Pearson 相关分析法, 在月尺度和旬尺度上揭示并对比了影响这两种害虫发生的关键气象因子和影响时段。结果表明: 防城港市 2 种典型虫害的发生均显著受 5 月下旬 (虫害发生期) 的温度和相对湿度的影响, 其中, 广州小斑螟的发生与该时段温度呈负相关, 而柚木肖弄蝶夜蛾的发生与该时段的温度呈正相关。此外, 虫害发生前期的气象要素也影响其发生程度, 广州小斑螟的发生受前期(3 月上旬和下旬)相对湿度及风速影响, 柚木肖弄蝶夜蛾的发生受前期(2 月上旬和下旬)降雨的显著影响。

关键词: 红树林; 广州小斑螟; 柚木肖弄蝶夜蛾; 气候因子; 相关性; 温湿系数

中图分类号: S 763　　**文献标志码:** A

引用格式: 张悦, 陈燕丽, 黄滢, 等. 防城港 2 种红树林虫害与气象条件的关系 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(6): 634−643. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.2022.06.014

红树林具有多方面的生态系统服务功能, 如防风搏浪、固岸护堤、净化海水、保护耕地和防止侵蚀等, 对维护和改善生态环境具有不可替代的作用[1]。红树林所处的海陆生态交错区, 属于生态脆弱带和敏感带, 其高温高湿环境, 促使害虫发生、发展频繁。近十余年来, 广西红树林几乎每年都遭受不同程度的虫害, 被危害的树种主要为白骨壤(*Avicennia marina*), 受害程度多为中度至重度, 造成红树林大面积枯萎死亡。红树林生境面临着严重的威胁。广西当地害虫主要种类为广州小斑螟(*Oligochroa cantonella*)和柚木肖弄蝶夜蛾(*Hyblaea puera*)等。广州小斑螟是红树植物白骨壤最普遍、最主要且具有暴食性的食叶害虫, 主要危害嫩芽和叶片, 部分幼虫蛀入果实内危害, 虫害发生严重时会造成树林成片枯死, 阻碍了白骨壤的正常生长[2]。如 2004 年和 2005 年, 广西山口国家红树林生态自然保护区发生了 40 年来最严重的广州小斑螟虫害, 白骨壤中 95% 以上的叶片及果实均被啃, 树木严重枯萎, 受灾面积达 700 hm^2, 对次年的繁殖造成了严重的影响[3]。柚木肖弄蝶夜蛾又名柚木驼蛾、全须夜蛾、柚木弄蛾, 是广西近年来新出现的食叶类红树林害虫, 2020 年 7 月广西北部湾红树林遭遇柚木肖弄蝶夜蛾虫害, 局部较严重, 发生面积达 194.2 hm^2, 已严重威胁了红树林群落的生态健康[4]。

气候是林业生产重要的自然资源[5], 也显著影响森林害虫的分布及发展。气候因素直接影响害虫的生长发育、生存和繁殖, 从而改变害虫的发生期、发生量和危害程度。也可以通过影响寄主树木和其他生物(如天敌), 间接影响害虫的发生[6]。

收稿日期: 2022－04－20　　**修回日期:** 2022－06－10

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF202030); 广西自然科学基金项目(2022GXNSFBA035586); 广西红树林保护与利用重点实验室开放基金(GKLMC-202004)

第一作者: 张悦(1993−), 女, 博士. 研究方向: 应用气象及作物模型. E-mail: zhangyue93@cau.edu.cn

通信作者: 陈燕丽(1982−), 女, 教授级高级工程师, 博士. 研究方向: 农业、生态遥感应用. E-mail: cyl0505@sina.com

气候条件的适宜与否，会使害虫种群的数量发生重大变化。在适宜的气候条件下，昆虫种群往往呈现数量急增现象，种群呈现为聚集分布。当气候条件不适宜时，昆虫种群数量急剧降低，分布则由聚集转变为随机。近年来在全球气候变化的背景下，虫害危害的地理范围扩大，程度加剧[7]。因而明确虫害与气象因子的关系对于建立相应的气象指标、有效预报及防治虫害、做好气象保障及确保红树林繁殖生长至关重要。刘文爱等[8]通过室内饲养试验和野外观察，发现广州小斑螟的发生与滩位、方位、海水的水温等环境因素相关。范航清等[9]对广西红树林虫害发生的成因进行分析评估，认为红树林自身的生物学原因、异常气候、人为活动、大面积引种外来树种是红树林虫害发生的主要影响因素。梁燕红等[10]利用 Apriori 算法得到广州小斑螟虫害级别与气温、降水量密切相关。在进一步的研究中，将数据挖掘技术引入红树林虫害成因分析中，得到对广州小斑螟发生影响力最大的要素为 1 月降水量[4]。但目前相关的研究选取的气候要素及时间尺度均有限，鲜见关于不同气象因子及研究时段的相关研究。因此，本研究基于北部湾北部的广西防城港市 2015—2019 年广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾虫害灾情数据及历史气候资料，采用 Pearson 相关分析法，以月、旬为尺度揭示影响这 2 种虫害发生的关键气候因子及影响时段，并建立虫害气象预报模型，旨在为红树林广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾虫害防治预警提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况　广西防城港市，位于 20°36′N ~ 22°22′N、107°28′E ~ 108°36′E 之间，属亚热带季风性气候，光热条件较好。1992—2011 年(20 年)的年平均气温为 22.8 ℃，年累积降雨量为 2 427.5 mm，有气候暖干化的趋势(图 1)。防城港市现有红树林面积约 2 059 hm^2，防城港江山半岛西岸边的石角，红树林连片面积超过 1 000 hm^2，是北仑河口国家级自然保护区的重要组成部分，常见树种有木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、秋茄(*Kandelia obovata*)和红海榄(*Rhizophora stylosa*)等。主要灾害性天气气候事件有暴雨洪涝、台风、干旱、高温、低温冷害、大风、冰雹和雷暴等，其中，对红树林造成危害的以高温、少雨、热带气旋、大风为主[11－12]。

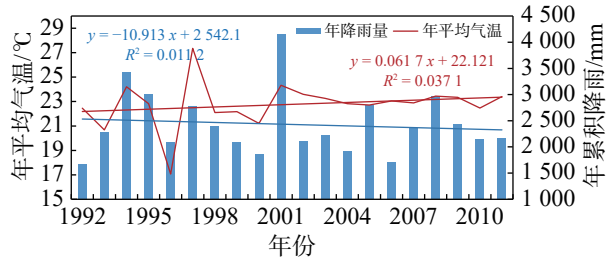

图 1　防城港市 1992—2011 年年平均气温及年累积降雨量

1.2　数据来源　1992—2011 年及 2014—2019 年气象数据来自国家气象中心，要素包括逐日最高气温、最低气温、平均气温、降雨量、空气相对湿度等。2015—2019 年广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾虫害发生面积来自广西红树林研究中心。

1.3　气候环境特征　采用农业气候分析方法，分析红树林病虫害发生发展过程中(当年 5—6 月)及发展前的 7 个月(上年 10 月—当年 4 月)的气温、降水、相对湿度、风速等气象环境因子特征。

1.4　气候指标选取　气温相关指标选取月(旬)平均最高温、平均最低温、平均气温和平均气温>30 ℃日数。湿度相关指标选取月(旬)平均相对湿度、相对湿度<70% 日数、相对湿度>80% 日数和相对湿度>90% 日数。降雨相关指标选取月(旬)累积降雨及平均降雨。风速相关指标选取月(旬)平均风速。

考虑到昆虫对温度和湿度条件的综合要求，采用温湿系数表征温湿综合条件(温湿系数=相对湿度/温度)

1.5　相关性分析　广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾发生程度以年发生面积为依据，因子普查采用 Pearson 相关分析法，分析红树林病虫害发生发展过程中(当年 5—6 月)及发展前的 7 个月(上年 10 月—当年 4 月)不同月、旬尺度上的气温、相对湿度、降水、风速等气象环境因子与受灾面积的相关关系，揭示与广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾发生程度显著相关的关键气象因子及影响时段，相关系数的检验采用双尾 t 检验。

1.6　虫害预警模型构建　在旬尺度上，选取影响虫害发生的关键气象因子为自变量，以虫害面积为因变量建立多元回归模型。模型如下：

$$S = b + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \cdots\cdots + a_kX_k,$$

式中，S 为虫害面积，X_1、X_2、X_3……X_k为影响虫害发生的关键气象因子，b、a_1、a_2、a_3……a_k为求得的回归参数。

2 结果分析

2.1 2015—2019 年研究区域的气象条件 温度方面，2015—2019 年虫害发生期间（每年 5—6 月）及发生的前 7 个月（上年 10 月开始）中，6 月的平均气温最高且大于 30 ℃ 日数最多，为 29.0 ℃ 和 8 d；1 月平均气温最低，为 15.7 ℃。降雨方面，6 月的降雨最高，为 411.2 mm；当年 2 月的降雨最低，为 32.7 mm。风速方面，上年 12 月的日平均风速最高，为 3.1 m·s^{-1}；当年 3 月的日平均风速最低，为 2.5 m·s^{-1}。相对湿度方面，3 月的日平均相对湿度最高，为 85.6%，同时相对湿度>80% 和>90% 的日数也相对较多，分别为 24 d 和 11 d。上年 12 月相对湿度最低，同时相对湿度<70% 日数也最多，为 13 d（表 1）。

表 1 2015—2019 年防城港各气象要素指标

月份	温度				降雨		平均风速/(m·s^{-1})	相对湿度			
	最高温/℃	最低温/℃	平均气温/℃	日平均气温>30 ℃日数/d	平均降雨/mm	累积降雨/mm		平均湿度/%	湿度<70%日数/d	湿度>80%日数/d	湿度>90%日数/d
上年10月	29.3±0.4	23.0±0.3	25.7±0.4	0	3.9±0.7	121.7±22.2	2.8±0.1	72.0±0.8	13.0±1.1	9.2±1.6	1.5±1.0
上年11月	24.6±0.4	19.1±0.3	21.4±0.3	0	3.1±1.2	96.7±37.1	3.0±0.1	76.6±2.2	9.8±2.3	14.3±1.9	4.8±1.5
上年12月	19.6±0.7	14.4±0.5	16.6±0.5	0	1.7±0.5	54.0±15.6	3.1±0.1	70.1±3.2	13.5±2.8	10.7±2.2	4.5±0.8
1月	18.6±0.6	13.4±0.4	15.7±0.5	0	2.2±1.4	69.2±43.1	2.7±0.1	78.3±2.0	8.2±1.8	16.3±1.6	7.0±1.4
2月	19.0±0.8	13.9±0.7	15.9±0.7	0	1.1±0.3	32.7±9.8	2.7±0.1	77.4±2.9	7.8±2.0	27.7±6.5	7.7±1.0
3月	22.0±0.6	17.3±0.4	19.2±0.4	0	1.4±0.2	43.3±6.1	2.5±1.1	85.6±1.8	2.5±1.1	23.5±1.2	11.0±2.9
4月	26.9±0.4	22.0±0.4	24.0±0.4	0	2.6±0.6	81.9±19.7	2.6±0.1	82.9±1.9	3.8±1.4	20.2±1.7	7.0±2.8
5月	30.0±0.3	25.3±0.3	27.3±0.3	2.0±0.9	5.9±0.3	183.5±10.2	2.9±0.1	82.7±0.7	2.5±1.1	21.7±1.5	4.8±2.1
6月	31.6±0.2	26.9±0.2	29.0±0.2	8.3±1.5	13.3±1.7	411.2±54.0	3.0±0.2	84.0±2.0	0.2±0.2	20.5±3.0	5.5±3.0
5-6月平均	30.8±0.2	26.1±0.2	28.2±0.2	5.0±0.7	9.6±1.0	297.4±30.9	3.0±0.4	83.4±1.1	2.0±0.5	22.5±1.9	6.0±2.5

注：最高温、最低温为该月平均每日最高、最低气温。表中数据为2015—2019年的5年数据的平均值。如上年10月指2014—2018年10月数据5年的平均值；1月指2015—2019年1月数据5年的平均值。以此类推。下同

2.2 年份间气象要素对比 防城港市灾情较为严重（受灾面积>66.67 hm^2）的年份为 2015 年和 2016 年，较轻（受灾面积<6.67 hm^2）年份为 2018 年，分析对比了 2 种受灾类型年份及历史 20 年（1992—2011 年）降雨、风速、温度和相对湿度各项指标的差异。温度方面，受灾年份 5 月（虫害发生月）的日最高气温、最低气温及平均气温均高于历史 40 年均值。且受灾较重年份 5 月和 6 月（均为虫害发生月）日平均气温>30 ℃ 日数显著高于受灾较轻年份及历史水平，即受灾较重年份虫害发生月的总体温度较高（图 2）。

从图 3 可知，相对湿度方面，灾情重的年份 4 月和 6 月相对湿度显著高于灾情较轻年份，分别高 6.5% 和 7.7%。从上年 10 月—当年 6 月灾情较轻年份的相对湿度>90% 日数显著低于灾情较重年份，平均低 98%。

从图 4 可知，降雨方面，虫害发生月（5 月和 6 月），灾情重和轻的年份降雨量分别比历史年份低 28.9% 和 41.6%。风速方面，受灾年份各月平均风速均低于历史年份。

2.3 月尺度相关性分析 在温度方面，2015—2019 年防城港市广州小斑螟的发生与 5 月最低气温和平均气温呈显著负相关且相关性最高，相关系数分别为−0.94 和−0.95。与 4 月平均气温呈正相关，相关系数为 0.63。湿度方面，虫害的发生显著受 3 月的湿度影响，与 3 月相对湿度<70% 日数呈显著负相关，与相对湿度>80% 日数呈显著正相关，相关系数分别为−0.98 和 0.98。与 5 月温湿系

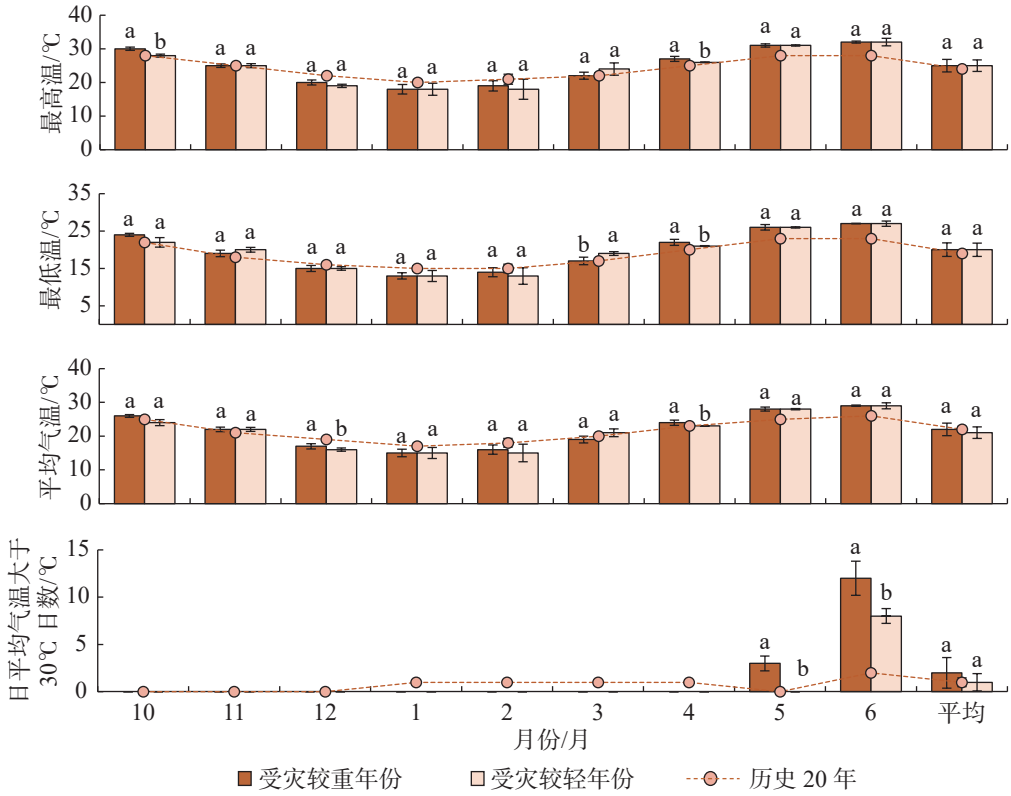

图 2　受灾较重年份、较轻年份及历史 20 年虫害发生前 7 个月至虫害发生月每月平均最高温、最低温、平均气温及日平均气温大于 30 ℃ 日数。相同字母表示无显著性差异, 不同字母之间表示显著性差异, 下同。

数呈正相关, 但与上年 10—11 月的温湿系数呈负相关, 说明害虫发生的不同阶段所需的环境温度和湿度配合是不同的。降雨方面, 广州小斑螟虫害的发生与 3 月降雨相关性最高且呈显著正相关, 相关系数为 0.98。风速方面, 显著受 5 月日平均风速的影响, 且呈负相关关系, 相关系数为 −0.74(表 2)。

柚木肖弄蝶夜蛾的发生与 5 月、6 月(虫害发生月)的平均气温>30 ℃ 日数呈显著正相关, 相关系数分别为 0.84 和 0.85。与 5 月相对湿度>80% 日数呈显著正相关, 相关系数为 0.87。降雨方面与广州小斑螟相同, 同样与 3 月降雨相关性最高, 相关系数为−0.81。风速方面显著受 6 月平均风速影响, 相关系数为 0.80(表 3)。

综上, 基于月尺度的分析得到, 防城港市 2 种虫害的发生受虫害发生月(5—6 月)及当年 3 月各气象因子影响较大。

2.4　旬尺度相关性分析　基于月尺度的分析结果, 在旬尺度上分析了虫害面积与虫害当年 2、3、5 和 6 月各旬气象要素的相关性。在温度方面, 2015—2019 年广州小斑螟的发生与 5 月下旬和 6 月上旬最高温呈显著负相关, 相关系数分别为 −0.97 和−0.94。湿度方面, 该虫害发生显著受 2 月上旬和 3 月下旬平均相对湿度的影响, 且综合其他月份相对湿度<70% 日数及相对湿度>80% 日数的相关性分析, 可知广州小斑螟的发生面积随相对湿度的增高而增加。其发生还显著受 3 月上旬和 5 月下旬温湿系数影响, 相关系数分别为 0.90 和 0.97。降雨方面显著受 5 月上旬降雨影响, 且两者呈负相关, 相关系数为−0.94。风速方面显著受 3 月下旬风速影响, 相关系数为 0.94(表 4)。

柚木肖弄蝶夜蛾的发生在温度上显著受 3 月上旬和 5 月下旬影响, 相关系数分别为−0.77 和 0.99。湿度方面受 5 月中下旬相对湿度、和 2 月上旬的温湿系数的影响, 且随湿度的增高受虫害程度增大。该虫害发生还与 2 月下旬降雨呈正相关(表 5)。

2.5　虫害发生与气象因子的关系　基于旬尺度相关性分析结果, 采用多元回归方程, 选取显著影响虫害发生的气象因子和影响时段, 构建了广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾发生面积(S)与气象因子的关系(表 6)。

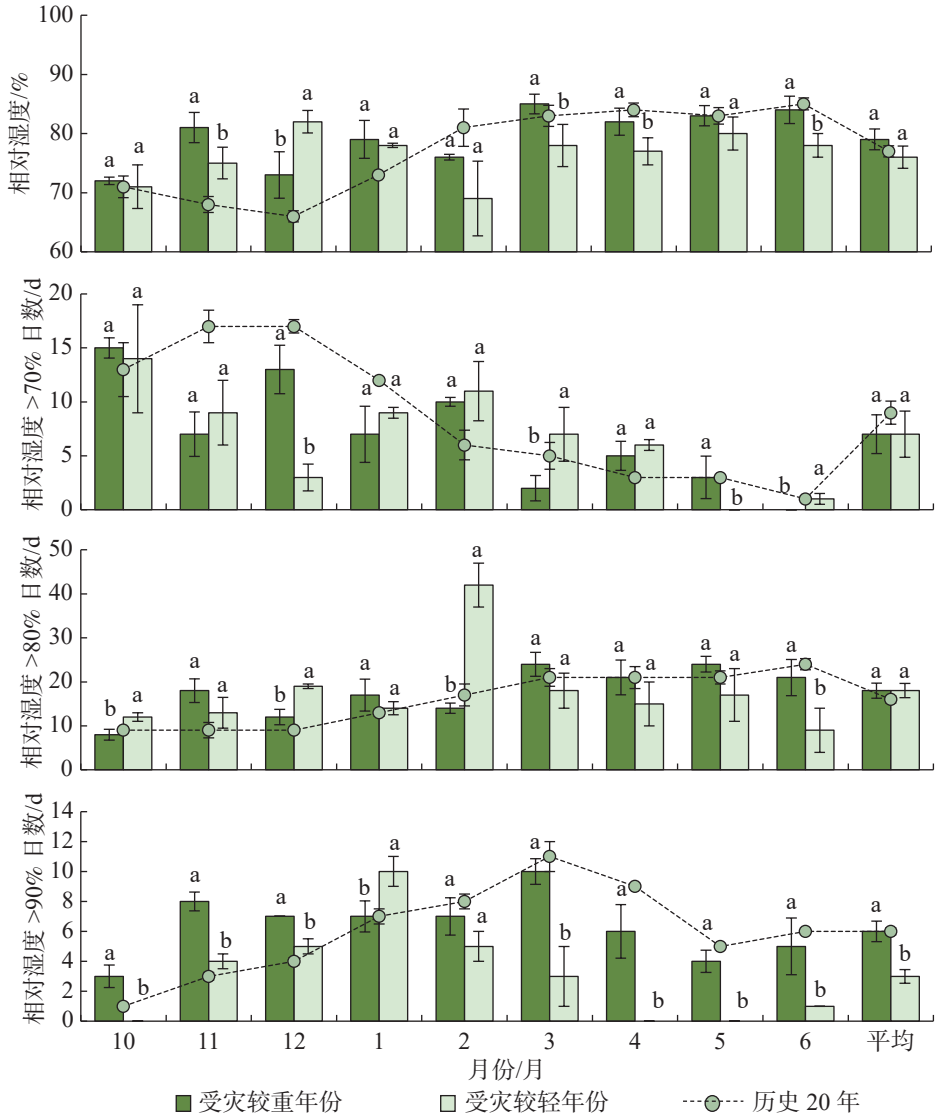

图 3 受灾较重年份、较轻年份及历史 20 年虫害发生前 7 个月至虫害发生月每月平均相对湿度、相对湿度<70% 日数、相对湿度>80% 日数 % 及相对湿度>90% 日数

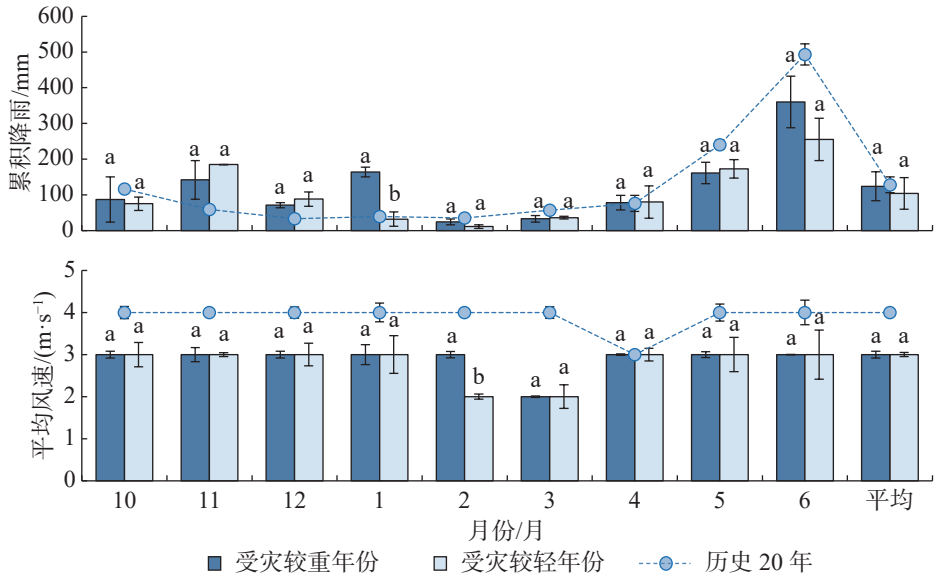

图 4 受灾较重年份、较轻年份及历史 20 年虫害发生前 7 个月至虫害发生月每月累积降雨及平均风速

表 2　2015—2019 年各月份温度、相对湿度、温湿、降雨及风速相关指标与广州小斑螟受灾面积的相关系数

月份	温度				相对湿度				温湿系数	降雨		平均风速/(m·s^{-1})
	最高温/℃	最低温/℃	平均气温/℃	日平均气温>30 ℃日数/d	平均湿度/%	湿度<70%日数/d	湿度>80%日数/d	湿度>90%日数/d		平均降雨/mm	累积降雨/mm	
上年10月	0.22	0.03	0.17	−	−0.86	0.60	−0.56	−0.43	−0.65	−0.49	−0.49	−0.64
上年11月	0.68	0.46	0.60	−	−0.10	0.13	−0.10	−0.35	−0.51	0.37	0.37	−0.59
上年12月	0.26	0.40	0.29	−	0.75	−0.65	0.66	0.62	0.40	0.50	0.50	−0.14
1月	0.03	0.16	0.07	−	0.75	−0.65	0.82	−0.52	0.20	0.01	0.01	0.28
2月	0.71	0.55	0.61	−	0.77	−0.54	−0.20	0.70	0.33	0.70	0.70	0.59
3月	−0.71	−0.61	−0.69	−	0.80	−0.98*	0.98*	0.48	0.78	0.98*	0.98*	0.64
4月	0.54	0.63	0.63	−	0.74	−0.50	0.60	0.49	0.18	−0.25	−0.25	0.27
5月	−0.89	−0.94*	−0.95*	0.64	0.64	0.84	0.65	0.64	0.92*	0.49	0.49	−0.74
6月	−0.32	0.14	−0.15	−0.38	0.61	−0.94*	0.81	0.34	0.56	0.62	0.62	−0.62

注: * 和 **分别表示达到0.05和0.01显著性水平, −表示无数据, 下同。

表 3　2015—2019 年各月份温度、相对湿度、温湿、降雨及风速相关指标与柚木肖弄蝶夜蛾受灾面积的相关系数

月份	温度				相对湿度				温湿系数	降雨		平均风速/(m·s^{-1})
	最高温/℃	最低温/℃	平均气温/℃	日平均气温>30℃日数/d	平均湿度/%	湿度<70%日数/d	湿度>80%日数/d	湿度>90%日数/d		平均降雨/mm	累积降雨/mm	
上年10月	0.22	0.41	0.50	−	−0.56	0.31	−0.60	−0.57	−0.66	0.31	0.31	−0.71
上年11月	0.08	0.23	0.34	−	0.02	−0.23	−0.23	−0.74	−0.26	−0.26	−0.26	−0.25
上年12月	−0.50	−0.70	−0.55		−0.33	0.25	−0.26	−0.58	0.02	0.17	0.17	0.23
1月	0.10	−0.14	−0.08		−0.58	0.49	−0.44	−0.53	−0.20	0.20	0.20	−0.09
2月	−0.02	0.10	0.06	−	0.21	−0.06	−0.60	0.06	0.39	−0.04	−0.04	−0.31
3月	−0.17	−0.06	−0.13		0.04	−0.55	0.20	−0.20	0.07	−0.81*	−0.81*	0.34
4月	0.01	−0.09	−0.06		−0.42	0.36	−0.14	−0.32	−0.46	−0.31	−0.31	0.71
5月	0.56	0.58	0.55	0.84*	0.44	−0.45	0.87*	−0.40	−0.24	−0.47	−0.47	0.59
6月	0.53	0.77*	0.66	0.85*	−0.20	−0.36	−0.17	−0.30	−0.29	−0.33	−0.33	0.80*

注: * 和 **分别表示达到0.05和0.01显著性水平。

表 4 2015—2019 年 2、3、5、6 月各旬温度、相对湿度、温湿、降雨及风速相关指标与广州小斑螟受灾面积的相关系数

时段	温度				相对湿度				温湿系数	降雨		平均风速/(m·s^{-1})
	最高温/℃	最低温/℃	平均气温/℃	日平均气温>30 ℃日数/d	平均湿度/%	湿度<70%日数/d	湿度>80%日数/d	湿度>90%日数/d		平均降雨/mm	累积降雨/mm	
2月上旬	0.83	0.80	0.82	−	0.95*	−0.86	0.78	0.80	0.54	0.29	0.29	−0.63
2月中旬	0.55	−0.21	0.22	−	0.26	−0.41	0.03	0.30	0.13	0.59	0.59	0.87
2月下旬	−0.87	−0.85	−0.83	−	−0.36	0.34	−0.45	−0.30	0.16	−0.73	−0.73	0.69
3月上旬	−0.98*	−0.79	−0.89	−	0.87	−0.98*	0.55	0.51	0.90*	0.58	0.58	0.37
3月中旬	−0.45	−0.53	−0.54	−	0.32	−0.16	0.00	0.34	0.54	−0.76	−0.76	0.61
3月下旬	−0.27	−0.25	−0.41	−	0.93*	−0.84	0.99*	0.55	0.86	0.87	0.87	0.94*
5月上旬	−0.51	−0.58	−0.57	−	0.35	0.60	−0.36	0.72	0.81	−0.94*	−0.94*	−0.37
5月中旬	−0.19	−0.21	−0.25	0.60	0.29	0.24	−0.60	0.33	0.33	0.24	0.24	−0.42
5月下旬	−0.97*	−0.86	−0.94*	0.04	0.54	0.76	0.92*	0.53	0.97*	0.38	0.38	−0.52
6月上旬	−0.94*	0.23	−0.77	0.02	0.75	−0.94*	0.91*	0.24	0.81	0.53	0.53	0.50
6月中旬	−0.14	−0.23	−0.36	0.64	0.57	−	0.79	0.45	0.54	0.62	0.62	−0.27
6月下旬	0.78	0.46	0.59	0	0.15	−	0.15	0.22	−0.06	−0.40	−0.40	−0.57

表 5 2015—2019 年 2、3、5、6 月各旬温度、相对湿度、温湿、降雨及风速相关指标与柚木肖弄蝶夜蛾受灾面积的相关系数

时段	温度				相对湿度				温湿系数	降雨		平均风速/(m·s^{-1})
	最高温/℃	最低温/℃	平均气温/℃	日平均气温>30 ℃日数/d	平均湿度/%	湿度<70%日数/d	湿度>80%日数/d	湿度>90%日数/d		平均降雨/mm	累积降雨/mm	
2月上旬	−0.47	−0.44	−0.45	−	−0.05	0.11	−0.35	−0.57	0.82*	−0.31	−0.31	0.45
2月中旬	−0.14	0.33	0.06	−	0.30	−0.12	0.32	0.75	0.31	−0.17	−0.17	−0.02
2月下旬	0.58	0.66	0.63	−	0.35	−0.17	0.28	0.61	−0.21	0.88*	0.88*	−0.40
3月上旬	−0.63	−0.77*	−0.75	−	0.25	−0.47	0.22	−0.22	0.72	−0.43	−0.43	0.58
3月中旬	0.22	0.34	0.34	−	−0.06	−0.23	0.22	0.06	−0.27	−0.49	−0.49	−0.12
3月下旬	0.22	0.38	0.34	−	0.01	−0.56	0.04	−0.43	−0.16	−0.35	−0.35	0.26
5月上旬	0.49	0.57	0.52	−	−0.20	−0.35	0.08	−0.55	−0.61	−0.54	−0.54	0.68
5月中旬	−0.12	−0.15	−0.16	−0.35	0.31	−0.09	0.90*	0.05	0.24	0.36	0.36	−0.10
5月下旬	0.53	0.61	0.59	0.99*	0.80*	−0.49	0.77*	−0.33	0.05	−0.31	−0.31	0.65
6月上旬	−0.20	−0.01	0.00	0.81	0.19	−0.36	0.31	0.06	0.17	0.54	0.54	0.14
6月中旬	0.55	0.67	0.59	0.33	−0.28	−	−0.29	−0.39	−0.37	−0.62	−0.62	0.74
6月下旬	0.59	0.79*	0.75	0.49	−0.48	−	−0.64	−0.39	−0.61	−0.34	−0.34	0.67

表 6　旬尺度虫害受灾面积与气象因子的关系

广州小斑螟		柚木肖弄蝶夜蛾	
时段	回归关系	时段	回归关系
3月上旬	S=3 853.9−135.9 T_{max}−180.4 $RH_{<70\%}$−5.3 TH		
3月下旬	S=28 914.9−202.8 RH+1 371.1 $RH_{>80\%}$−95 280.6 W		
5月下旬	S=11 577.9−350.8 T_{max}−17.5 T_{min} +72.9 $RH_{>80\%}$	5月下旬	S=−16 032+1 280 $T_{max>30}$+210.3 RH-93.9 $RH_{>80\%}$
6月上旬	S=−5 892.1+405.1 T_{max}−7 377.1 $RH_{<70\%}$−608.4 $RH_{>80\%}$		

注: 方程中S为虫害受灾面积; T_{max}为最高温, $T_{max>30℃}$为最高温大于30 ℃的日数; RH 为平均相对湿度, $RH_{<70\%}$、$RH_{>80\%}$分别为相对湿度<70%、>80%日数; W为平均风速; TH为温湿系数。表中回归关系均为2015—2019年5年平均值建立的方程。

3　讨　论

本研究结果表明, 广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾两种虫害均显著受温度和湿度的影响。虫害与气温、湿度变化关系密切。在自然情况下, 大气的温度和湿度这两个因素是相互关联的, 而且总是共同综合对虫害起作用, 因而本研究引用温湿系数来描述昆虫对温湿条件的综合要求。温度可使害虫内分泌激素代谢等方面受到影响, 进而影响害虫生长发育的快慢、迁入迁出的时期和繁殖的世代数[13]。且害虫一般多为变温生物, 温度对其发生及分布有着较大影响[7]。在适宜的温度范围内, 随着温度的升高, 害虫的生长发育速度加快, 生育期缩短, 种群数量、害虫发生的世代数、危害时长和范围随之增加[14], 如稻飞虱的发生显著受冬季最低温度的影响, 冬季最低温度上升有利于提高虫卵越冬存活率[15]。当温度超出适宜范围时, 则会抑制害虫的繁殖, 尤其极端低温会破坏虫体的生理结构, 使虫体细胞和组织产生不可逆的变化, 从而抑制虫害发生[16], 如 2001 年我国北方地区 5 月中下旬出现了大范围晴热高温天气, 抑制了麦蚜的种群增长[17]; 再如南美洲斑潜蝇种群的净增殖率遇高温会急剧下降[18] 等。本研究区域内广州小斑螟的发生与 5 月下旬—6 月上旬温度呈负相关, 可能由于当温度较高时, 害虫取食较多而发育加快, 寿命相对缩短。而柚木肖弄蝶夜蛾则与温度呈正相关, 其原因可能是温度升高加速了害虫体内酶的活性和生长发育, 延长了危害期并扩大了危害范围和程度。此外, 本研究中 2 种害虫对温度的要求有所差异, 可能是柚木肖弄蝶夜蛾生长的适宜温度高于广州小斑螟。近几十年来全球气候变化明显, 主要体现为气温逐渐升高、极端天气事件增多, 这样的气候变化趋势间接提高了虫害率, 并增大了虫害发生频率、扩散面积和程度。统计资料显示, 近年来我国林业虫害逐年递增, 受中等虫害的地区高达 50%[19], 因而在全球变暖的大背景下, 更加有必要做好林业虫害防治工作, 减缓气候变化带来的负面影响。

湿度和降雨量可影响害虫的迁徙能力和水分平衡, 引起其质量变化, 通过降水强度和持续时间共同对种群数量及幼虫成活率造成影响[7]。同时, 湿度还可以引发微生物的流行, 通过影响寄主植物含水量从而影响害虫的进食[20]。广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾的发生均受当年春季降雨及相对湿度的影响, 这可能由于早春湿度对越冬结束后处于复苏状态下的低龄幼虫、卵、茧蛹体内水分调节影响较大, 即适宜湿度会复苏害虫体内湿度并加速害虫的繁殖[7]。且由于雨水的适度冲刷作用, 大量下沉降落的害虫也加大了初始虫源基数[21－22], 类似的影响事实还有稻纵卷叶螟、褐飞虱、白背飞虱、黏虫等[23], 如耒阳市 2006 年 6 月中旬的暴雨引起稻纵卷叶螟蛾数量突增[24], 但过强和长时间的降雨则会对害虫产生较大的机械伤害, 从而使虫害减少[7]。气候变化背景下, 极端天气的增多导致雨季增加, 也会导致害虫发生频率和面积增大。

风会影响昆虫的传播, 适宜的风速可以帮助昆虫飞翔和迁移, 但风速过大则会阻碍一些昆虫的活动, 如飞蝗的“小风迎风飞翔, 风力稍大顺风飞翔, 风力过大则停止飞翔”, 因此飞蝗的分布范围常取决于风速和风向[25]。本研究中柚木肖弄蝶夜蛾的发生受 6 月风速的显著影响, 这可能由于 6 月风速与害虫取食等活动的关系十分密切, 且幼虫多集中于树枝末梢, 受风的干扰和吹动即吐丝

下垂，飘落到其他树枝处，影响其迁飞和扩散[26]。类型的现象还如稻水象甲[27]及粘虫[28]在微风条件下出现大量扩散和迁飞等。

虫害发生前的气候条件有时会影响到下一年的森林虫害的发生，即存在“滞后效应”[29]。本研究中，广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾的发生均受当年春季(2—3 月)气象因子的影响，这说明环境要素(尤其温度和湿度)的长期作用影响着红树林虫害的发生。因此，未来的研究工作可进一步扩大研究时段，逐步探究积温、干燥度等因素对虫害发生的长期效应及影响。

本研究由于数据量有限，仅考虑了一部分地面气象条件对广州小斑螟和柚木肖弄蝶夜蛾发生和发展的影响，而其他与人类活动相关的要素如林木种类、区域经济社会活动、虫害防治措施等也会对虫害的发生产生一定影响[30]，因此，今后的研究工作可结合植被参数等遥感监测数据，综合探究各要素对虫害发展的影响，建立监测预报模型，并用于评估危害程度。同时要加强虫害防治技术，综合气候因素的影响，灵活采用生物防治、化学药剂防治、物理防治等手段，进而及时防控、高效保护有限的红树林资源。

4 结 论

(1)防城港市红树林受虫灾程度较重年份的当年 5—6 月(虫害发生月)气温和相对湿度高于虫灾程度较轻年份。

(2)月尺度上，防城港市广州小斑螟的发生受 3 月降雨和 5 月温度影响较大，柚木肖弄蝶夜蛾的发生较大程度受 5 月温度及相对湿度的影响。

(3)旬尺度上，在虫害发生期，防城港市广州小斑螟的发生与 5 月下旬的温度呈负相关，而柚木肖弄蝶夜蛾的发生与该时段的温度呈正相关。在虫害发生前期，广州小斑螟的发生受当年 3 月上旬和下旬的相对湿度及风速影响，柚木肖弄蝶夜蛾的发生受当年 2 月上旬和下旬降雨的显著影响。

参考文献:

[1] 生农, 辛琨, 廖宝文. 红树林湿地生态功能及其价值研究文献学分析[J]. 湿地科学与管理, 2021, 17(1): 47 − 50.
[2] 韦江玲, 刘文爱, 黄琦, 等. 广西山口红树林保护区近 15 年主要虫害调查[J]. 福建林业科技, 2019, 46(4): 66 − 69.
[3] 刘文爱, 李丽凤. 广州小斑螟生物学特性及其防治的研究[J]. 中国森林病虫, 2018, 37(2): 18 − 21.
[4] 梁燕红. C4.5 算法在广州小斑螟发生与气候因素分析中的应用——以广西山口国家红树林生态自然保护区为例[J]. 中国森林病虫, 2019, 38(1): 34 − 37.
[5] 陈燕丽, 张悦, 钱拴, 等. 红树林生长气象条件适宜度评估方法研究——以广西北海沙生红树林为例[J]. 广西林业科学, 2022, 51(1): 53 − 61.
[6] 宋丹, 姜燕敏, 兰建军, 等. 松阳茶园主要虫害与气象因子的关系[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(6): 137 − 140.
[7] 邹全程, 闫平, 徐健楠, 等. 塞罕坝地区森林虫害暴发历史及其与气候因子的关系[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(7): 114 − 119.
[8] 刘文爱, 范航清. 广州小斑螟发生与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7320 − 7324.
[9] 范航清, 刘文爱, 曹庆先. 广西红树林害虫生物生态学特性与综合防治技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
[10] 梁燕红. 数据挖掘技术在广西红树林病虫害气候因素分析中的应用—以广州小斑螟为例[J]. 玉林师范学院学报, 2017, 38(5): 131 − 135.
[11] 颜秀花, 蔡榕硕, 郭海峡, 等. 气候变化背景下海南东寨港红树林生态系统的脆弱性评估[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(3): 338 − 349.
[12] 黄雪松, 陈燕丽, 莫伟华, 等. 近 60 年广西北部湾红树林生态区气候变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5026 − 5033.
[13] 窦亚楠, 孙小诺, 安静杰, 等. 四氯虫酰胺对棉铃虫生物活性的温度效应及其解毒酶相关机制[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8): 1447 − 1453.
[14] 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 3 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2001.
[15] 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[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 243 − 246.
[16] 于跃, 方磊, 方国飞, 等. 气象因子对落叶松毛虫种群数量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2839 − 2847.
[17] 霍治国, 钱拴, 王素艳, 等. 2001 年农作物病虫害发生流行的气候影响评价[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(3): 3 − 7.
[18] 周亦红, 姜卫华, 赵志模, 等. 温度对美洲斑潜蝇及南美斑潜蝇种群增长的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(8): 1276 − 1284.
[19] 秦兰香. 探析在气候变化下的林业虫害防治技术[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(9): 177 − 178.
[20] 冯玉元. 白僵菌防治思茅松毛虫研究[J]. 林业科技, 2018, 43(4): 26 − 29.
[21] 朱明华, 陈光玉, 田茂仁, 等. 白背飞虱种群动态研究[J]. 昆虫知识, 1995, 32(5): 257 − 260.
[22] 侯婷婷, 霍治国, 李世奎, 等. 影响稻飞虱迁飞规律的气象环境成因[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 142 − 148.

[23] 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[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1499－1507.
[24] 王秋芽, 刘思乡, 谢炜, 等. 耒阳市稻纵卷叶螟重发原因分析及防治对策[J]. 湖南农业科学, 2008(6): 88－89.
[25] 查绪栋, 于冰洁, 汪姝玥, 等. 中哈边境迁飞蝗虫降落的天气过程分析——以 1999 年塔城地区为例[J]. 植物保护学报,2021, 48(1): 221−227.
[26] 郑大玮, 李茂松, 霍治国. 农业灾害与减灾对策[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
[27] 翟保平, 郑雪浩, 商晗武, 等. 风对稻水象甲起飞的影响[J]. 中国农业气象, 1999, 20(3): 24－27.
[28] 赖凤香, 陈伟, 姚青, 等. 风洞内粘虫飞翔行为与气流的关系[J]. 昆虫知识, 2000, 37(4): 193－194.
[29] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 1964—2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 917－931.
[30] LIN W, ZHOU G F, CHENG X Y, et al. Fast economic development accelerates biological invasions in China [J]. PLoS ONE, 2007(2): e1208.

Relationship between the occurrence of two typical insect pests in mangroves and the climate factors in Fangchenggang, Guangxi

ZHANG Yue[1,2], CHEN Yanli[2,3], HUANG Ying[4], XU Wenlong[4], TAO Yancheng[3], LIU Wenai[3]
(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193;
2. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning, Guangxi 530022;
3. Guangxi Mangrove Research Center/ Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi 536000;
4. Guangxi Fangchenggang Meteorological Bureau, Fangchenggang, Guaangxi 538001, China)

Abstract: The data on mangrove area under infestation by two typical insect pests, *Oligochroa cantonella* and *Hyblaea puera*, in mangroves and the climate data in Fangchenggang in the years from 2015 to 2019 were collected and analyzed by using the Pearson correlation method to reveal and compare the key meteorological factors and the time durations associated with occurrence of these two insect pests on monthly and ten-day scales. The results showed that the occurrence of the two insect pests in the study area was significantly affected by the rainfall and relative humidity in late May (pest occurrence period). *O. cantonella* occurrence was negatively correlated with the temperature in late May, whereas *H. puera* occurrence was positively correlated with the temperature in late May. Moreover, the occurrence of *O. cantonella* was also affected by relative humidity and wind speed in the pre-occurrence periods (early and late March), and the occurrence of *H. puera* was affected by rainfall in the pre-occurrence periods (early and late February). The relationship between the occurrence of the two pest insects and the meteorological factors in Fangchenggang was then established, which is helpful for forecasting and early warning of occurrence and infestation of pest insects.

Keywords: mangrove; *Oligochroa cantonella*; *Hyblaea puera*; climatic factors; correlation; temperature-humidity coefficient

(责任编委:吴少英　责任编辑:潘学峰)