

全球气候变暖对中国种植制度可能影响

V. 气候变暖对中国热带作物种植北界和寒害风险的影响分析

李 勇^{1,3}, 杨晓光¹, 王文峰¹, 陈 阜²

(¹中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; ²中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; ³贵州省气象局科技减灾处, 贵阳 550002)

摘要:【目的】以 1981 年为界, 把从 20 世纪 50 年代到 2007 年划分为两个时段, 对比分析 1950s—1980 年和 1981—2007 年热带作物安全种植北界的地理位移以及北界位移后界限变化敏感区域的寒害风险。【方法】利用中国种植制度分区标准和农业气候指标, 对比分析两个时段热带作物种植北界的演变特征, 并采用 ArcGIS 绘制了热带作物种植北界地理位移图; 利用综合寒害指数对气候变暖背景下热带作物安全种植北界位移后的敏感区域进行寒害风险评估。【结果】与 1950s—1980 年相比, 1981—2007 年在 80% 气候保证率下中国热带作物安全种植北界北移了 0.86 个纬度, 且年代际变化显著; 20 世纪 90 年代和时段 2000—2007 年, 北界的北移速率每年分别达 0.03 和 0.06 个纬度; 在 80% 气候保证率下, 热带作物安全种植北界北移后敏感区域的寒害风险比非敏感区域要高出 3.0 倍, 而重度以上寒害风险比非敏感区域要高出 3.5 倍。【结论】在全球气候变暖背景下, 中国热带作物安全种植北界发生了明显北移, 且北移速率呈加快趋势; 在热带作物安全种植北界地理位移后的敏感区域, 寒害风险增加。

关键词: 气候变暖; 热带作物; 种植北界; 寒害风险

The Possible Effects of Global Warming on Cropping Systems in China

V. The Possible Effects of Climate Warming on Geographical Shift in Safe Northern Limit of Tropical Crops and the Risk Analysis of Cold Damage in China

LI Yong^{1,3}, YANG Xiao-guang¹, WANG Wen-feng¹, CHEN Fu²

(¹College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193; ²College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193; ³Technology and Disaster Reduction Division of Guizhou Meteorological Bureau, Guiyang 550002)

Abstract: 【Objective】 The period from 1950s to 2007 was divided into two stages, i.e., 1950s-1980 and 1981-2007, then the geographical shift of northern limit for tropical crops and the possible risk of cold damage in the cold-sensitive areas after the shift were analyzed and compared. 【Method】 Using the standard of China farming system regional planning and some agro-meteorological indicators, the geographical shift of safe northern limit were compared and analyzed and the change map were draw by ArcGIS. Using the synthesized index of cold damage, the risks of cold damage in sensitive area of planting tropical crops were evaluated. 【Result】 Compared with the results during the period from 1950s to 1980, in the 80% climate guarantee rate, the safe northern limit moved northward by 0.86 latitude during the period from 1981 to 2007. Its interdecadal change was obvious, and the respective annual rating of moving northward was 0.03 and 0.06 latitude during the 1990s and the period 2000-2007. In the 80% climate guarantee rate, the risk of cold damage in sensitive area of planting tropical crops reached 3.0 times higher than the non-sensitive area, especially the risk caused by severe or very severe cold damage reached 3.5 times. 【Conclusion】 The safe Northern limit has shown an obvious northward moving under climate warming and the rate of northward moving shows an

收稿日期: 2010-01-26; 接受日期: 2010-04-08

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(200803028)

作者简介: 李 勇, 博士研究生, 高级工程师。E-mail: zynjw@cau.edu.cn. 通信作者杨晓光, 教授, 博士。E-mail: yangxg@cau.edu.cn

accelerated trend. The risk of cold damage is increased in the moving sensitive region of the safe northern limit.

Key words: climate warming; tropical crops; northern limits; risk of cold damage

0 引言

【研究意义】气候变暖已是不争的事实^[1]。最近几十年,气候变化问题一直是学术界研究的热点^[2]。根据 IPCC 第 4 次评估报告,在过去的 100 年全球平均温度上升了 0.74℃^[3],中国的平均温度上升了 0.79℃,略高于全球平均增温幅度^[4]。气候条件是限制种植制度最重要的因素之一^[5]。气候变暖改变了各地的热量资源,从而使当前多熟种植的界线向北向西推移^[6],导致种植制度界限、作物种类和品种的布局 and 比例等发生变化^[7]。中国热带地区土地面积约 $4.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[8],农业自然资源十分丰富,适宜种植多种热带作物。在气候变暖背景下,热带地区的农业气候资源发生了明显改变,对热带作物种植北界将带来怎样的影响,是中国农业科研领域和生产管理部门普遍关注的问题。【前人研究进展】关于作物安全种植北界方面的研究,金之庆等利用农业气候指标和气候预测模型,分析了未来气候情景下中国冬小麦安全种植北界可能出现的地理位移^[9-10];依据全国种植制度气候区划指标和作物种植北界指标,杨晓光等分析得出,气候变暖造成全国种植制度界限不同程度北移、冬小麦和双季稻种植北界北移^[11];李克南和赵锦等分别对中国北方地区和南方地区种植制度界限的变化情况及其对产量的可能影响进行了分析^[12-13]。刘志娟等研究探讨了未来气候情景下东北三省春玉米不同熟型品种种植北界的变化趋势^[14]。还有许多研究者对热带作物种植北界方面进行了研究,分析了气候平均状况下热带作物种植北界的位置^[15-16],但很少考虑 80%气候保证率。有研究者基于 IPCC 对未来气候情景的预测分析认为,2020 年左右广东省雷州半岛南部将由北热带渐变为中热带,阳西以东沿海由目前的南亚热带渐变为北热带^[17];至 2100 年,如果中国年平均温度上升达 3℃,南亚热带将全部变为边沿热带,边沿热带一部分变为中热带^[18],但很少有基于已经发生气候变暖的事实,分析热带作物种植北界是如何变化的。全球气候变暖背景下,云南省西双版纳、海南省和广东省等热带地区的年平均气温具有显著增加趋势,特别是近 10 多年来冬季气候变暖,加之热带作物抗寒性减弱,加大了作物遭遇寒害的风险,致使寒害加重^[17,19-20]。寒害是热带作物能否安全越冬的关键因素,气候带的北移势

必会导致热带作物寒害风险的加剧,但对于界限北移后寒害风险会有多大程度地增加却鲜见报道。【本研究切入点】前人研究为本工作的顺利开展奠定了良好基础。本研究采用已有的热带作物种植北界指标分析了气候变暖对热带作物种植北界的可能影响,明确热带作物种植北界地理位移的变化特征,据此进一步分析其种植界限变化敏感区域的寒害风险,为中国热带作物区域布局和结构调整提供科学依据。【拟解决的关键问题】利用中国热带作物主要种植区域海南省、广东省、广西壮族自治区和云南省南部地区的 81 个地面气象台站 1950s—2007 年的气候资料,基于全球气候变化特征、寒害演变特征和现有资料,将 1950s—2007 年划分为 1950s—1980 (时段 I) 和 1981—2007 年 (时段 II) 两个时段^[21-22],结合热带作物种植北界指标,明确后一时段热带作物种植北界的时空演变特征,并利用综合寒害指数和寒害等级标准,对热带作物种植北界地理位移敏感区域寒害风险进行评估。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文所用气候数据来自笔者所在研究组已建的气象资料库,剔除一些在研究时段内搬迁的台站,共选取研究区域 1950s—2007 年 40 多年 81 个地面气象台站 (图 1) 的逐日气象资料,包括平均气温、最低气温。

1.2 指标的确定和计算方法

1.2.1 热带作物安全种植北界指标 刘巽浩先生等

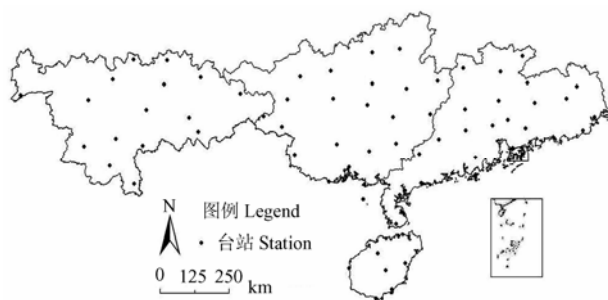


图 1 研究区域及气象站点分布

Fig. 1 The research regions and distribution of the weather stations

以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温大于或等于 $8\ 000\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为海南岛、雷州半岛、西双版纳水田旱作二熟兼热作区的积温指标，因该区以种植橡胶、剑麻、椰子等典型热带作物为主^[23]，本文将其作为研究典型热带作物种植（以下简称热带作物）北界的积温指标，该指标也是竺可桢先生提出的中国亚热带南界指标^[24]，为学术界普遍认可^[16,25]。本研究将上述指标用于广东、广西和海南 3 省（区）安全种植北界分析。考虑到云南省南部积温有效性强，故选择 $\geq 7\ 500\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为该地区热带作物种植北界指标^[26]。

农业气象学家普遍采用 80% 的气候保证率来研究农业气候资料有效性及种植制度安全种植北界。本文采用五日滑动平均法计算各台站 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温，并考虑 80% 的气候保证率，分别计算各台站在 1950s—1980 年和 1981—2007 年 2 个时段内具有 80% 保证率的积温^[27]。

1.2.2 寒害指标 对热带和亚热带植物而言，寒害指标通常是指温度不低于 0°C 的气温引起各种生理障碍，使热带作物遭受损伤^[28]。寒害主要发生在冬季，低温危害的日最低温度为 5.0°C ，即当日最低气温 $\leq 5.0^{\circ}\text{C}$ 时，寒害过程开始，当日最低气温 $> 5.0^{\circ}\text{C}$ 时寒害过程结束^[29]。

表 1 寒害等级标准

Table 1 The grade standard of cold damage

寒害等级	轻度	中度	重度	极重
Grade of cold damage	Light	Middle	Severe	Ponderosity
HI	$-1 \leq HI < 0$	$0 \leq HI < 1$	$1 \leq HI < 2$	$2 \leq HI$

HI 为综合寒害指数 HI is synthesized index of cold damage

本研究采用极端最低气温、最大降温幅度、低温持续日数和有害积寒作为寒害的致灾因子计算综合寒害指数^[29-30]，并用该指数分析研究区域内的寒害风险。该方法可以弥补用寒潮标准分析寒害的不足，较好地表征热带和亚热带地区寒害致灾过程与强度等级。综合寒害指数的计算公式^[30]：

$$HI = -0.5388X_1 + 0.5412X_2 + 0.5215X_3 + 0.3805X_4$$

式中，HI—逐年综合寒害指数，无量纲值； X_1 —逐年冬季极端最低气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）； X_2 —逐年冬季日最低气温 $\leq 5.0^{\circ}\text{C}$ 持续日数（d）； X_3 —逐年冬季日最低气温 $\leq 5.0^{\circ}\text{C}$ 有害温度的累积（ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ）； X_4 —逐年冬季所有寒害过程的最大降温幅度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

寒害等级标准根据表 1 确定^[29]。

1.3 热带作物界限敏感区域和非敏感区域的界定

本文针对气候变暖背景下时段 II 分析热带作物敏感区域的寒害风险。为便于表达，对 80% 气候保证率下的敏感区域、非敏感区域作如下定义：敏感区域为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 $\geq 8\ 000\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的保证率由时段 I 的 $< 80\%$ 保证率演变为时段 II 的 $\geq 80\%$ 保证率的站点所覆盖区域；非敏感区域为时段 I 和时段 II $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 $\geq 8\ 000\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的保证率均 $\geq 80\%$ 的站点所覆盖区域。

1.4 结果表达

根据上述方法计算 81 个站点的各农业气象要素的统计量后，采用 IDW（inverse distance weighted interpolation）插值方法对气象数据进行插值，设定的 Cell size 参数均为 0.002，生成空间栅格数据，然后根据指标要求，使用空间分析方法中的 Contour 工具提取相应等值线，最后生成所需的等值线图，种植界限的地理位移使用软件中的测量工具来度量，取其平均值，最后结果采用 ArcGIS 软件表达。

2 结果

2.1 气候变暖背景下热带作物种植北界演变特征

2.1.1 热带作物种植北界的地理位移 前人分析热带作物种植北界时，大多仅考虑气候平均状况，在此以 80% 气候保证率为基础分析作物安全种植的北界变化^[27]。

图 2 为时段 I 和时段 II 在考虑 80% 气候保证率条件下广西、广东和海南 3 省（区）热带作物安全种植北界的演变情况见图 3。从图 2 可见，2 个时段的北界位置明显不同，时段 I 的北界位置在广东省徐闻县南部一线，而海南省琼中地区因积温 $< 8\ 000\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ，不属于热带地区，像是一块“飞地”嵌入海南省热带地区内。时段 II 的安全种植北界为不连续的 2 段连线，一段在广东省雷州、遂溪、湛江一线，另一段在广东省吴川至电白一线，较时段 I 的安全种植北界大约北移了 0.86 个纬度，广西、广东、海南 3 省（区）在时段 II 的潜在种植面积较时段 I 增加了 $0.81 \times 10^4\ \text{km}^2$ 。时段 I 的热带作物种植区主要包括海南省和广东省徐闻县以南地区，而时段 II 的热带作物种植区域较为分散、东西跨度大，其中电白是插入南亚热带的一块“飞地”。

对比前人同类研究发现，邱宝剑、唐永奎分析 1950s—1960s 的与钟功甫、何大章、韩渊丰等分析 1980s—1990s 的热带作物种植北界位置各不相同^[15,31-34]，但

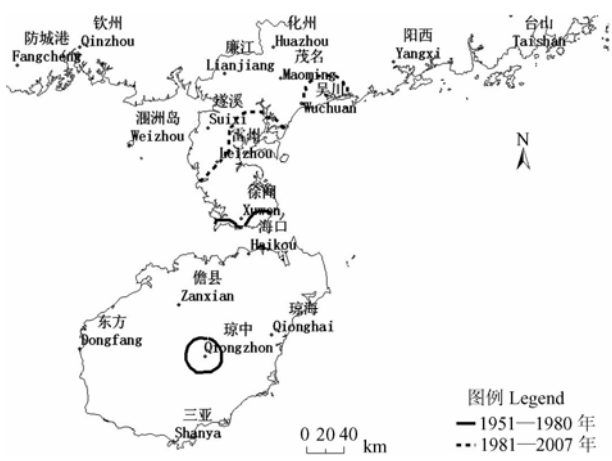


图 2 热带作物种植北界的地理位移

Fig. 2 Geographical shift of northern limit for tropical crops planting in Southern China

均较本文按 80%气候保证率下的热带作物种植北界位置偏北，产生差异的可能原因如下：一是前人分析的热带作物种植北界大多考虑 50%气候保证率下的平均状况；二是受当时研究条件限制，分析所选用的气候资料年限较短且各不相同；三是选用的热带作物种植北界的热量指标不完全相同，主要有 7 500℃·d 和 8 000℃·d 两种。

从图 3 可以看出，在考虑 80%气候保证率条件下，云南省南部在时段 I 和时段 II 均没有成片的热带作物种植区，仅有景洪、元江和勐腊几块热带“飞地”嵌入到亚热带中，但时段 II 的热带作物可种植区域较时段 I 面积有所扩大。

2.1.2 热带作物种植北界的年代际变化特征 图 4 为

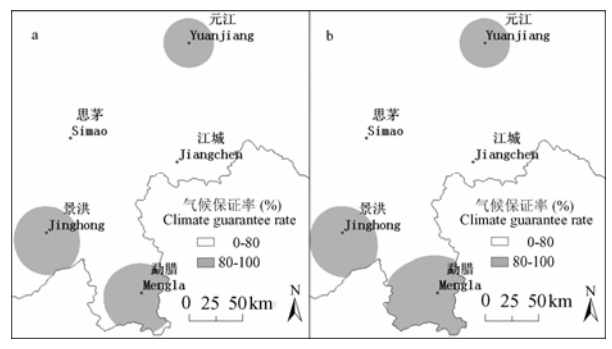


图 3 云南省南部热带作物种植区在时段 I (a) 和时段 II (b) 的变化

Fig. 3 Change of tropical crop planting area in the southern Yunnan province in period I (a) and period II (b)

广东、广西和海南 3 省（区）不同年代热带作物种植北界的地理位移图。从中可以看出，不同年代际间的热带作物种植北界差异较大。北界位于最北的是时段 2000—2007 年，东起广西宁明、钦州一线，中经广西岑溪和广东高要、惠阳，西接广东普宁和潮州一线，而广西的龙州、广东的广州则呈“飞地”插入到该时段的热带中。1950s 北界线西段位于诸年代中的最南端，北界线从广东雷州半岛北部边缘经过湛江和吴川北部，延至电白中部入海；1970s 北界线位于遂溪偏北、吴川中部、茂名偏南和电白偏西南一线；1960s 和 1980s 的北界线基本上重合，大致位于广东遂溪、化州、茂名和电白一线，较 1950s 和 1970s 的北界线略微偏北；1990s 的北界线东起广西的北海，中经广东廉江、高州和阳江一线，广西防城港、广东的台山、深圳和海丰几块热带“飞地”嵌入在该年代的亚热带中；时段 2000—2007 年的北界线分别较 1950s、1960s、1970s、1980s 和 1990s 偏北 1.03、0.91、1.11、0.91 和 0.56 个纬度。热带作物可种植面积最大的为时段 2000—2007 年，约 $33.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；面积最小的是 1950s 和 1970s，均为 $4.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；1960s 和 1980s 的面积基本相同，分别为 $4.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $4.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；1990s 的面积仅次于时段 2000—2007 年，为 $5.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

表 2 给出了云南省南部热带作物可种植区不同年代际 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温变化。由此可以看出，在 1990s 和时段 2000—2007 年，该种植区域包括瑞丽、景洪、元江和勐腊在内，但在 1950s、1960s、1970s 和 1980s，瑞丽的 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温没有达到热带作物种植的热量指标。

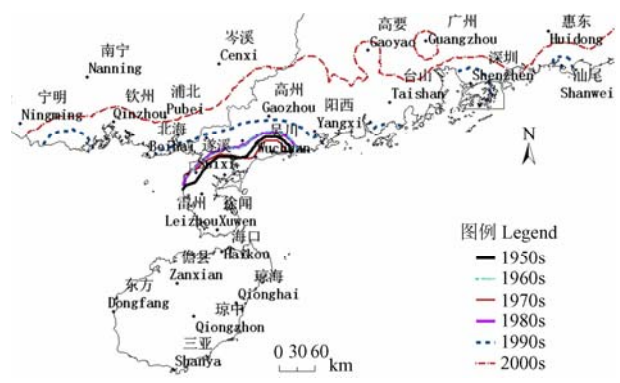


图 4 不同年代热带作物种植北界的地理位移

Fig. 4 Change in the northern limit of tropical crops in different decades in China

表 2 云南省南部热带作物种植区不同年代际的积温变化
Table 2 Change in accumulated temperature in different decades in the southern Yunnan province where tropical crops can be planted

台站 Station	≥10℃ 积温 ≥10℃ accumulated temperature (℃·d)					
	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000-2007
瑞丽 Ruili	7188	7292	7276	7345	7573	7752
景洪 Jinghong	7838	7963	7967	8216	8284	8271
元江 Yuanjiang	8791	8716	8601	8728	8684	8741
勐腊 Mengla	7522	7658	7662	7860	7966	8033

由以上分析可知，在气候变暖背景下，中国热带作物种植北界的北移现象明显且速率呈加快趋势，1990s 较 1980s 的平均北移速率为 0.03 个纬度/年，时段 2000—2007 年较 1990s 的平均北移速率达到了 0.06 个纬度/年。

据研究^[4]，在 A2（强调经济发展）和 B2（强调可持续发展）排放情形下^[14]，华南地区在 2011—2040 年将分别增温 0.9℃ 和 1.0℃，这说明中国热带作物种植北界在未来可能会进一步北移，因此该地区适宜热带作物种植的区域可望进一步增加，对农业产业结构调整 and 农民增收带来新的机遇。但需要注意的是，随着气候的增暖，极端天气事件发生的强度和频率也随之发生变化^[35]，因此，如何根据热带作物种植北界北移的特点、未来气候变化趋势和极端天气事件的发生情况做好相应的热带作物种植区划，应引起农业管理部门重视。

2.2 热带作物种植北界北移后敏感区域寒害风险分析

以上对热带作物可种植北界变化的分析是基于全年热量条件得出的，由于越冬条件是限制热带作物种植的主要因素，因此，必须从农业生产的实际出发，充分考虑寒害风险，为热带作物的优化布局 and 风险评估等提供科学决策依据。

根据本文 1.3 的界定，80% 气候保证率下的敏感区域为广东省的湛江、徐闻、电白，海南省的琼中；非敏感区域为海南省的三亚、陵水、东方、琼海、海口和云南省的元江、傣县、景洪、勐腊。表 3 为 80% 气候保证率下敏感区域和非敏感区域寒害指数和寒害频率。从表 3 可以看出，该敏感区域时段 II 综合寒害指数为 -2.8，比非敏感区域高 1.9。从寒害发生频率（表 3 中的频率 1）来看，非敏感区域的寒害发生频率比敏感区域低 11.1%，敏感区域寒害出现的频率相当于 7

年一遇，而非敏感区域寒害出现的频率相当于 27 年一遇。对于重度以上寒害发生频率（表 3 中的频率 2），敏感区域的重度以上寒害发生频率为 7.4%，约 14 年一遇，非敏感区域为 1.6%，大致为 61 年一遇。敏感区域 14 年一遇的重度以上寒害发生频率对橡胶等热带作物的可能危害不容忽视，如 1955 年 1 月的特大寒潮，使雷州半岛和海南岛北部出现过 0℃ 左右的低温，云南省河口也出现数十年未见的 2.1℃ 极端低温，曾使热带作物遭受不同程度的危害^[15]。

表 3 敏感区域和非敏感区域寒害指数和寒害频率的对比
Table 3 The comparison of the index and frequency of cold damage in sensitive and non sensitive regions

区域 Region	时段 II Period II		
	HI	频率 1(%) Frequency 1	频率 2(%) Frequency 2
敏感区域 Sensitive region	-2.8	14.8	7.4
非敏感区域 Non sensitive region	-4.7	3.7	1.6

以上分析可以看出，在 80% 气候保证率下，时段 II 敏感区域的寒害明显重于非敏感区域；其发生寒害和发生重度以上寒害的风险分别比非敏感区域高 3.0 倍和 3.5 倍。

3 讨论

本文以 8 000℃·d 积温指标对热带作物种植北界进行分析，过去学者一般认为积温在 7 500℃·d^[36]，即可视为满足热带作物种植或热带气候北界的热量指标^[34]。为提高热带农业气候区划研究的精细化和针对性，还需要根据不同热带作物对积温的要求，具体分析其种植北界的变化特征，以提出更加科学合理的布局建议。另外，本文采用的 8 000℃·d 积温指标能够满足三季稻种植的要求^[16,37]，因此分析结论亦可作为三季稻区划布局的参考依据。

以往研究大多定性地分析气候变暖背景下热带作物种植北界的可能变化和寒害的可能风险，定量分析则鲜见报道。本文依据历史气候资料明确了气候变暖背景下中国热带作物安全种植北界具体的地理位移，为农业管理部门科学管理提供决策依据；同时，由于 80% 气候保证率下热带作物种植敏感区域的寒害风险远远大于非敏感区域，因此农业部门在敏感区域布局热带作物时要选取抗寒性强的热带作物品种。由于一个地区的种植制度和种植方式不仅取决于气候条件，还要考虑当地的农业生产技术水平、农业投入、土壤

及作物品种特性等,因此在敏感区域扩大热带作物种植面积,要依据当地的实际情况,科学合理布局。

进行寒害风险评估时,由于研究区域内采用的是统一权重系数,并用于公式计算,所以分析结果仅适用于本研究区域。寒害是一种复杂的过程,在不同地区、不同作物、不同发育期、不同长势受害程度都有所不同,故在热带作物种植布局时,应根据当地的实际情况,结合不同热带作物特性及区域内气候特点进行更加精细地寒害风险分析,才能有效规避热带作物寒害的风险。

本文根据气候变暖已有的事实(1950s—2007年),明确了中国热带作物安全种植北界的地理位移,为定量分析未来气候情景下热带作物种植北界的可能地理位移提供了基础,为该区域内热带作物布局提供科学依据。

4 结论

在气候变暖背景下,中国热带作物种植北界发生了明显的变化。当考虑 80%气候保证率时,1981—2007年间的种植北界位置,与 1950s—1980 年相比,大约北移了 0.86 个纬度,适于种植热带作物区域的面积增加了 $0.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

从年代际比较结果来看,热带作物种植北界北移现象明显且速率呈加快趋势,1990s 较 1980s 的平均北移速率为 0.03 个纬度/年,时段 2000—2007 年较 1990s 的平均北移速率达到了 0.06 个纬度/年。云南省瑞丽在 1990s 和时段 2000—2007 年已演变为新的热带作物种植区域。

本文比较了 80%气候保证率下的热带作物种植敏感区域和非敏感区域寒害风险。在 80%气候保证率下,敏感区域的寒害明显重于非敏感区域,其发生寒害和发生重度以上寒害的风险分别比非敏感区域高 3.0 倍和 3.5 倍。

References

- [1] 秦大河, 罗 勇, 陈振林, 任贾文, 沈永平. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311-314.
Qin D H, Luo Y, Chen Z L, Ren J W, Shen Y P. Latest advances in climate change sciences: interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(6): 311-314. (in Chinese)
- [2] Alexandrov V A, Hoogenboom G. The impact of climate variability

and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104: 315-327.

- [3] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007.
China's National Assessment Report on Climate Change Compile Committee. *China's National Assessment Report on Climate Change*. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [5] Moonen A C, Ercoli L, Mariotti M, Masoni A. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 13-27.
- [6] 张厚琯. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 I. 气候变化对中国种植制度的影响. 中国农业气象, 2000, 21(1): 9-13.
Zhang H X. The problems concerning the response of China's cropping systems to global climatic changes I. The effect of climatic changes on cropping systems in China. *China Journal of Agrometeorology*, 2000, 21(1): 9-13. (in Chinese)
- [7] 崔读昌. 气候变暖对中国农业生产的影响与对策. 中国农业气象, 1992, 13(2): 16-20.
Cui D C. The possible influence of climate getting warmer on agricultural production in China. *China Journal of Agrometeorology*, 1992, 13(2): 16-20. (in Chinese)
- [8] 农牧渔业部热带作物区划办公室. 中国热带作物种植业区划. 广州: 广东科技出版社, 1989.
Office of Regional Planning of Tropical Crops of Pastoral Fishery Ministry. *Regional Planning of Tropical Crops in China*. Guangzhou: Sinence Press of Guangdong Province, 1989. (in Chinese)
- [9] 金之庆, 葛道阔, 石春林, 高亮之. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究. 作物学报, 2002, 28(1): 24-31.
Jin Z Q, Ge D K, Shi C L, Gao L Z. Several strategies of food crop production in the Northeast China plain for adaptation to global climate change—a modeling study. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 24-31. (in Chinese)
- [10] 金之庆, 方 娟, 葛道阔, 郑喜莲, 陈 华. 全球气候变化影响中国冬小麦生产之前瞻. 作物学报, 1994, 20(2): 186-197.
Jin Z Q, Fang J, Ge D K, Zheng X L, Chen H. Prospect to the impacts of climate change on winter wheat production in China. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(2): 186-197. (in Chinese)
- [11] 杨晓光, 刘志娟, 陈 阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329-336.

- Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China(I). The possible effects of climatic warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 329-336. (in Chinese)
- [12] 李克南, 杨晓光, 刘志娟, 王文峰, 陈 阜. 全球气候变化对中国种植制度可能影响分析III. 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限可能影响. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2088-2097.
- Li K N, Yang X G, Liu Z J, Wang W F, Chen F. The analysis of the potential influence on global climate change to cropping systems in China III. The change characteristics of climatic resources in northern China and its potential influence on cropping systems. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10): 2088-2097. (in Chinese)
- [13] 赵 锦, 杨晓光, 刘志娟, 成迪芳, 王文峰, 陈 阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响II. 南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1860-1867.
- Zhao J, Yang X G, Liu Z J, Chen D F, Wang W F, Cheng F. The possible effect of global climatic changes on cropping systems boundary in China(II). The characteristics of climatic variables and the possible effect on Northern limits of cropping systems in South China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010 43(9): 1860-1867. (in Chinese)
- [14] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 赵俊芳, 张海林, 陈 阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响IV. 未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能影响. 中国农业科学, 2010, 43(11): 2280-2291.
- Liu Z J, Yang X G, Wang W F, Zhao J F, Zhang H L, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China IV. The possible impact of future climatic warming on the northern limits of spring maize in three provinces of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(11): 2280-2291. (in Chinese)
- [15] 钟功甫, 黄远略, 梁国昭. 中国热带特征及其区域分异. 地理学报, 1990, 45(2): 245-252.
- Zhong G P, Huang Y L, Liang G Z. Characteristics and regional diversity of tropical China. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(2): 245-252. (in Chinese)
- [16] 江爱良. 论中国热带亚热带气候带的划分. 地理学报, 1960, 26(2): 104-109.
- Jiang A L. Discussing the regionalization of tropical and subtropics. *Journal of Mountain Science*, 1960, 26(2): 104-109. (in Chinese)
- [17] 广东省气候变化评估报告编制课题组. 广东气候变化评估报告(节选). 广东气象, 2007, 29(3): 1-14.
- Composing Team for Assessment Report on Climate Change of Guangdong. Assessment report on climate change of Guangdong (Selection). *Guangdong Meteorology*, 2007, 29(3): 1-14. (in Chinese)
- [18] 于沪宁. 气候变化与中国农业的持续发展. 生态农业研究, 1995, 3(4): 38-43.
- Yu H N. Climate change and sustainable agricultural development in China. *Eco-Agriculture Research*, 1995, 3(4): 38-43. (in Chinese)
- [19] 喻 彦, 蒙桂云, 张利才. 西双版纳近 45 年来气候变化及对热带作物的影响. 热带农业科技, 2007, 30(3): 48-52.
- Yu Y, Meng G Y, Zhang L C. The effect of weather change on tropical crops in 45 years in Xishuangbanna. *Tropical Agricultural Science&Technology*, 2007, 30(3): 48-52. (in Chinese)
- [20] 陈小丽, 吴 慧. 海南岛近 42 年气候变化特征. 气象, 2004, 30(8): 27-31.
- Chen X L, Wu H. Characteristics of climatic variation of Hainan Island for last 42 years. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(8): 27-31. (in Chinese)
- [21] 宋 燕, 季劲钧, 朱临洪, 张世英. 20 世纪 80 年代中期全球变暖前后亚非夏季风特征分析. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 24-33.
- Song Y, Ji J J, Zhu L H, Zhang S Y. Characteristics of Asian-African summer monsoon pre-and post-global warming in mid-1980. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2): 24-33. (in Chinese)
- [22] 王春林, 刘锦奎, 曾 侠, 万日金. 近 50 年来广东冬季寒害的特征. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 121-127.
- Wang C L, Liu J L, Zeng X, Wan R J. Characteristics of recent 50 year's cold damage in winter in Guangdong. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(4): 121-127. (in Chinese)
- [23] 刘巽浩, 陈 阜. 中国农作制. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- Liu X H, Chen F. *China System of Farming*. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)
- [24] 竺可桢. 中国的亚热带. 科学通报, 1958, 17: 524-527.
- Zhu K Z. Subtropics of China. *Chinese Science Bulletin*, 1958, 17: 524-527. (in Chinese)
- [25] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案. 地理学报, 1958, 24(4): 348-363.
- Huang B W. The preliminary draft of comprehensive natural regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 1958, 24(4): 348-363. (in Chinese)
- [26] 丘宝剑. 关于中国热带的北界. 地理科学, 1993, 13(4): 297-306.
- Qiu B J. The northern border of tropical zone in China. *Scientia Geographica Sinica*, 1993, 13(4): 297-306. (in Chinese)
- [27] 曲曼丽. 农业气候实习指导. 北京: 北京农业大学出版社, 1990.
- Qu M L. *Agro-climatic Internship Guide*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1990. (in Chinese)
- [28] 崔读昌. 关于冻害、寒害、冷害和霜冻. 中国农业气象, 1999, 20(1):

- 56-57.
- Cui D C. About frozen injury, cold damage, chilling injury and frost. *China Journal of Agrometeorology*, 1999, 20(1): 56-57. (in Chinese)
- [29] 中国气象局. 香蕉、荔枝寒害等级. 北京: 气象出版社, 2007.
- China Meteorological Administration. *Grade of Cold Damage for Banana and Litchi*. Beijing: Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [30] 杜尧东, 李春梅. 广东省香蕉与荔枝寒害致灾因子和综合气候指标研究. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 225-230.
- Du Y D, Li C M. Disaster-inducing factors and integrated climatic index for banana and litchi chilling injuries in Guangdong. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 225-230. (in Chinese)
- [31] 丘宝剑, 卢其堯. 中国热带-南亚热带的农业气候区划. *地理学报*, 1961, 27(2): 28-37.
- Qiu B J, Lu Q Y. The agroclimate regionalization of tropical and south subtropics. *Acta Geographica Sinica*, 1961, 27(2): 28-37. (in Chinese)
- [32] 唐永奎. 中国热带界线的探讨. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1964, 2(1): 135-137.
- Tang Y L. Discussion about the northern border of tropical zone in China. *Journal of Plant Ecology*, 1964, 2(1): 135-137. (in Chinese)
- [33] 韩渊丰. 对云南热带-南亚热带区域的再认识. *华南师院学报: 自然科学版*, 1979(2): 48-58.
- Han Y F. Understanding again to tropical and south subtropics region of Yunnan province. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 1979(2): 48-58. (in Chinese)
- [34] 何大章, 何 东. 中国热带气候的北界问题. *地理学报*, 1988, 43(2): 176-183.
- He D Z, He D. On the northern boundary of tropical climate in China. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43(2): 176-183. (in Chinese)
- [35] Zhai P M, Zhang X B, Wang H. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, 18: 1096-1107.
- [36] 唐永奎. 从对全国综合自然区划中所定划分热带指标的意见谈到桂西南热带界线的划分. *地理学报*, 1959, 25(6): 460-462.
- Tang Y L. Comment from the opinion on dividing tropical index in comprehensive natural regionalization of China to division of boundary of tropical of southwest of Guangxi province. *Acta Geographica Sinica*, 1959, 25(6): 460-462. (in Chinese)
- [37] 廖正城, 周继舜, 邵乃凡. 广西南部热带划分问题的商榷. *广西农业科学*, 1982(10): 41-44.
- Liao Z C, Zhou J S, Shao N F. Discussion of the question boundary of tropical of south of Guangxi province divide. *Guangxi Agricultural Sciences*, 1982(10): 41-44. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)