

黑龙江省冷害对水稻产量的影响

刘晓菲¹, 张 朝¹, 帅嘉冰¹, 王 品¹, 史文娇², 陈 一¹, 陶福禄²

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室/减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:以黑龙江省为例, 比较了在大尺度范围内、利用传统的站点平均法以及基于格点水稻密度分布的泰森多边形面积权重法所得的两种省级水稻气象数据差异, 并分析了1960-2009年内, 不同时间尺度上温度和降水的变化趋势特点。针对当地水稻低温冷害频发及其危害严重的实际情况, 对比研究了气象行业标准(QX/T 101-2009)和国家标准中有关低温冷害的指标定义, 以及国际上较通用的有效负积温算法(GDD_n)这三种指标在反映黑龙江省水稻冷害事件上的能力, 结果表明: 气象行业标准可以较好地反映延期型冷害对水稻的影响, 而GDD指标在反映障碍型冷害上均优于气象行业及国家标准。利用时间序列模型对包含延迟型和障碍型两种冷害影响的黑龙江省水稻产量进行拟合, 回归方程的解释能力可达92% ($p < 0.05$)。本研究定量得出了人为因素和气象因素对黑龙江省水稻生产的影响分别占87.2%和12.8%的结论, 并检测出近年来水稻抽穗开花期障碍型冷害的波动增加趋势, 为明确今后低温冷害的防御重点提供科学参考。

关键词: 水稻生产; 黑龙江省; 低温冷害

水稻是中国最重要的粮食作物之一, 我国有超过半数的人以其为主食。根据国家统计局数据库收集整理的2010年分地区主要农产品产量数据可见, 截止到2010年, 全国水稻种植面积和产量分别占粮食作物的27.2%和35.8%^[1]。实现水稻产量稳定增长, 对于我国保证粮食安全具有十分重要的意义。黑龙江省自然条件优越, 是我国最大的商品稻谷生产基地, 净调出量占全国商品粳稻的50%以上^[2]。然而冷害、洪涝和干旱等农业气象灾害事件频发, 一直困扰着当地的水稻安全生产。其中, 低温冷害是黑龙江省最为典型的气象灾害, 其强度和频率都高于南方地区及北方其他省份, 严重冷害年的水稻灾害减产率可达20%以上, 给当地粮食生产带来巨大损失^[3-4]。

在当今全球变暖的背景下, 黑龙江省水稻产区的气象条件也有所改变, 这在一定程度上缓解了冷害的发生。建国以来的数据研究表明: 黑龙江省的低温冷害事件在20世纪70年代最为严重, 80年代以来呈下降趋势^[5-6], 但也有研究表明, 进入21世纪以来, 低温冷害事件的发生又有抬头之势^[7-8]。然而整体上看, 该省的延迟型、障碍型以及混合型冷害频繁发生, 对水稻的苗期、孕穗期以及抽穗开花期等关键生长阶段均有影响, 最终导致产量的下降。

收稿日期: 2012-06-06; 修订日期: 2012-07-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金; 国家重大科学研究计划“全球变化与环境风险关系及其适应性范式研究”课题(2012CB955404); IRG-国际合作项目“典型脆弱区综合风险防范技术与范式对比合作研究”(2012DFG20710); 地表过程与资源生态国家重点实验室项目(2010-ZY-10; 2011-KF-06) [Foundation: Fundamental Research Funds for the Central Universities; The National Basic Research Program of China (2012CB955404); International Cooperation Project funded by the Ministry of Science and Technology of China, No.2012DFG20710; Project of State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, No.2010-ZY-10; No.2011-KF-06]

作者简介: 刘晓菲, 硕士生, 主要从事农业气象灾害风险研究。E-mail: liuxiaofei@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 张朝, 副教授, 主要从事灾害风险分析及水文模拟研究。E-mail: zhangzhao@bnu.edu.cn

目前,关于作物产量受气象条件影响的研究很多,国内外学者利用试验方法^[9]、统计方法^[10-14]和模型方法^[15-20]在不同空间尺度上检验了温度、降水、辐射等气象要素对作物产量的影响。我国对于北方地区低温冷害的研究一直非常重视,在较小尺度上开发出了不同类型的低温冷害指标,成功运用于当地水稻气象产量模拟^[21-24],并于2009年综合形成了《水稻、玉米冷害等级(QX/T 101-2009)》^[25]的气象行业标准和《水稻盛夏低温冷害等级(征求意见稿)》¹⁾的国家标准。然而在气候变化的背景下,黑龙江水稻产区的气象条件发生了何种改变,各个低温指标和标准能否良好地反映黑龙江省省级尺度的水稻低温及减产情况,冷害事件是否有减缓或者增加的趋势,气象条件的变动对水稻产量有多大的影响,以及如何快速评估低温冷害在大尺度上带来的产量损失等问题尚没有得到良好解答。在此情况下,本文利用黑龙江省历史水稻产量数据及对应的气象数据,对气象条件进行了趋势检验,并通过对产量的拟合,对以上问题进行了详细分析。

1 数据与方法

1.1 资料及来源

本文筛选了黑龙江省1960-2009年的逐日平均温度(Tave),最低温度(Tmin),最高温度(Tmax),和降水(Prec)记录齐全的25个气象站数据(图1),水稻种植物候信息来自于《中国农作物生长发育状况资料数据集》中记录的黑龙江省农作物生长发育状况报告,以上资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>);水稻种植分布数据来源于于地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/Portal/>);1960-2009年省级水稻产量数据来源于中国种植业信息网(<http://zzys.agri.gov.cn/>)。

1.2 省级气象数据生成

由于黑龙江省水稻种植分布非常不均匀,而气候及其变化特点又往往存在较强的空间差异,水稻种植与气象站点分布的不匹配可能会导致直接采取传统的气象站点平均法来获取省级气象数据不能真实反映水稻主产区的气候特征。因此,本文采用泰森多边形法^[26-27]来计算省级气象数据,并基于水稻种植密度分布对其进行了改进。具体步骤如下:利用ArcGIS软件生成各个气象站点对应的泰森多边形,依据每个多边形中水稻种植面积值的大小赋予各个气象站权重,从而加权得到省级尺度逐日气象数据,即:

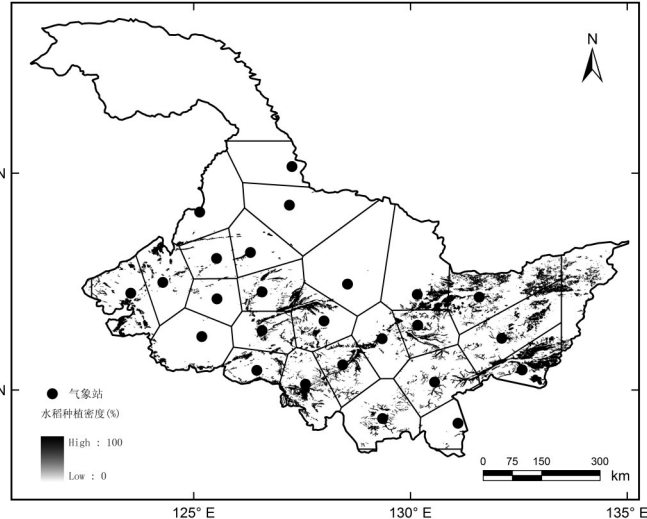


图1 黑龙江省气象站点及水稻种植密度分布图
(包括气象站点生成的泰森多边形)

Fig. 1 Weather stations and rice planting density in Heilongjiang
(including Thiessen polygon generated by weather stations)

$$P(X) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{D} X_i \right) \tag{1}$$

式中, $P(X)$ 为省级气象要素(X)的数值, D_i 为第 i 个气象站点对应泰森多边形内的水稻种植面积, D 为黑龙江省水稻种植总面积, X_i 为第 i 个气象站点气象要素(X)数值。为进

1) 由国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会于2009年发布

行对比,我们又利用传统的站点平均法,计算了全省范围上各个站点的逐日平均值。

1.3 指标选取

1.3.1 气象行业指标 2009年6月,中国气象局发布了《水稻、玉米冷害等级的气象行业标准(QX/T 101-2009)》(以下简称气象行业标准),对水稻冷害进行了延迟性和障碍型的区分^[25],气象行业指标规定:对于东北水稻延迟型冷害,参考不同地区历年5-9月平均温度之和(T , $^{\circ}\text{C}$),选取当年5-9月逐月平均气温之和的距平值(ΔT , $^{\circ}\text{C}$)作为致灾因子,将其分为一般及严重冷害,并给出相应减产参考值;对于东北水稻障碍型冷害,则是选取5-10月中水稻生育敏感时期的日最低气温(T_{\min} , $^{\circ}\text{C}$)及其持续天数作为致灾因子进行等级划分(表1)。

1.3.2 国家标准指标 我国《水稻盛夏低温冷害等级的国家标准(征求意见稿)》(以下简称国家标准)则强调了障碍型低温冷害,该标准规定:在水稻生长发育期处于“幼穗分化”和“抽穗开花”期间,出现持续3天或以上日平均气温低于表2中温度值时,即为“轻度冷害”或“重度冷害”(表2)。

1.3.3 国际通用生长期有效负积温 GDD_n (Growing Degree Days) 指标 参照Lobell等人2011年对非洲玉米热害研究中采用的计算极端温度事件的方法^[27],引入国际上比较通用的一种积温表达方法 GDD (Growing Degree Days),生长期有效积温,也可写为Growing Degree Units (GDUs),计算关键时期小于阈值温度的有效负积温 GDD_n ,计算公式如下:

$$GDD_{base-} = \sum_{t=1}^N DD_t$$
$$DD = T_{base} - \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \begin{cases} T_{max} = T_{max}, T_{min} = T_{min} & \text{if } T_{max} \leq T_{base}, T_{min} \leq T_{base} \\ T_{max} = T_{base}, T_{min} = T_{base} & \text{if } T_{max} > T_{base}, T_{min} > T_{base} \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_{base} 为生育低温敏感时期的温度阈值,同一个敏感期为一个固定值,即 GDD_n 中的 n 值, DD 为日负积温标识, N 为该生育期天数。

1.3.4 指标计算 对于延迟型冷害,气象行业标准利用水稻生长季(5-9月)平均温度的距平值来表征,而对于障碍型冷害,气象行业标准及国家标准都以抽穗期为界分为两个敏感时期。幼穗分化到孕穗期结束(记为敏感I期,位于7月份)一般以 17°C 为受害临界阈值;抽穗开花期(记为敏感II期,位于8月份)为 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

综上,本文计算了1960-2009年黑龙江省5-9月平均温度距平值作为水稻延迟型冷害指标,障碍型冷害则分别统计了气象行业和国家标准中的两个敏感时期的各程度冷害频次,对比可能减产幅度,分别赋予0.5、1、2的比重,累计加权得到当年两个障碍型冷害敏感时期的影响指标 I_z :

$$I_z = 0.5f_{Mi} + f_{Mo} + 2f_{Se}$$

(3)

式中, f_{Mi} , f_{Mo} 和 f_{Se} 分别为当月轻、中、重度障碍型冷害事件发生次数。

GDD_n 的计算则参考气象行业标准,7,8月份分别取 17°C 和 19°C 作为阈值温度,各月累加得到历年两个敏感时期的有效负积温(GDD_{17} 和 GDD_{19})。与此同时,我们统计了黑龙江省历年7、8月份低于阈值温度的天数(对于气象行业标准,统计了7月 $T_{\min} < 17^{\circ}\text{C}$ 和8月 $T_{\min} < 19^{\circ}\text{C}$ 的天数;对于国家标准,则统计7月 $T_{ave} < 17^{\circ}\text{C}$ 和8月 $T_{ave} < 20^{\circ}\text{C}$ 的天数)以进行进一步分析。

表1 东北地区水稻障碍型冷害等级气象行业指标
Tab. 1 Chilling indexes for rice sterile injury in Northeast China defined by China Meteorological Administration

冷害 级别	致灾指标	
	孕穗期 $T_{\min} \leq 17^{\circ}\text{C}$ 的持续天数	抽穗开花期 $T_{\min} \leq 19^{\circ}\text{C}$ 的持续天数
轻度	< 2	< 2
中度	$3\sim 4$	$3\sim 4$
重度	≥ 5	≥ 5

表2 东北地区粳稻盛夏低温冷害等级国家标准
Tab. 2 Grades for rice chilling injury in midsummer of Northeast China defined by the government

冷害级别	幼穗分化期 ($^{\circ}\text{C}$)	抽穗开花期 ($^{\circ}\text{C}$)
轻度	≤ 17	≤ 20
重度	≤ 15	≤ 18

1.4 趋势系数计算及天气—水稻产量方程模拟

本文利用最小二乘法拟合了趋势系数来分析不同时间尺度的气象要素变化,采用相关分析及显著性检验、多元线性回归分析的方法用来确定冷害指标对水稻产量的影响。所有统计工作均利用SPSS PASW Statistics v18.0软件进行。

为消除品种改良、经济发展等非气象因素对水稻亩产的影响,回归分析采用了时间序列模型,包含了年份序列为一个自变量(S),即:

$$Y_t = \beta_0 S_t + \beta_1 \Delta T_t + \beta_2 I_{It} + \beta_3 I_{II} + \varepsilon_t \tag{4}$$

式中, S 为 1960-2009 年的时间序列 (即 $S_t = 1, 2, 3, \dots, 50$), ΔT 为综合延迟性冷害指标, I_I 和 I_{II} 分别为敏感 I 期和敏感 II 期的障碍型冷害指标, β 为待拟合系数, ε 为误差项。

2 结果与分析

2.1 黑龙江省水稻主产区气候变化

2.1.1 平均法及权重法所得数据比较 对比利用权重法和平均值法得到的黑龙江省气象要素数据可见:两种方法所得的数据变动存在非常好的一致性 ($r > 0.972, p < 0.05$),其中降水的年均序列基本吻合。然而权重法得到的温度数据要比平均法有较明显的偏高,其中最低温度 (Tmin) 最为显著 (图 2)。所有站点 1960-2009 年的 Tmin 年平均值为 $-0.34\text{ }^{\circ}\text{C}$,而利用权重法得到的该地区的 Tmin 年平均值为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均偏高达到了 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。权重法所得的 Tmax 年平均值偏高 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$, Tave 年平均值也偏高 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这主要是由于在大尺度的范围内,水稻种植与气象站点的分布存在不一致所造成 (图 1),权重法可以有效排除对省级水稻产量影响不大的气象站点,并突出地处水稻种植密度较高地区的气象站点数据。

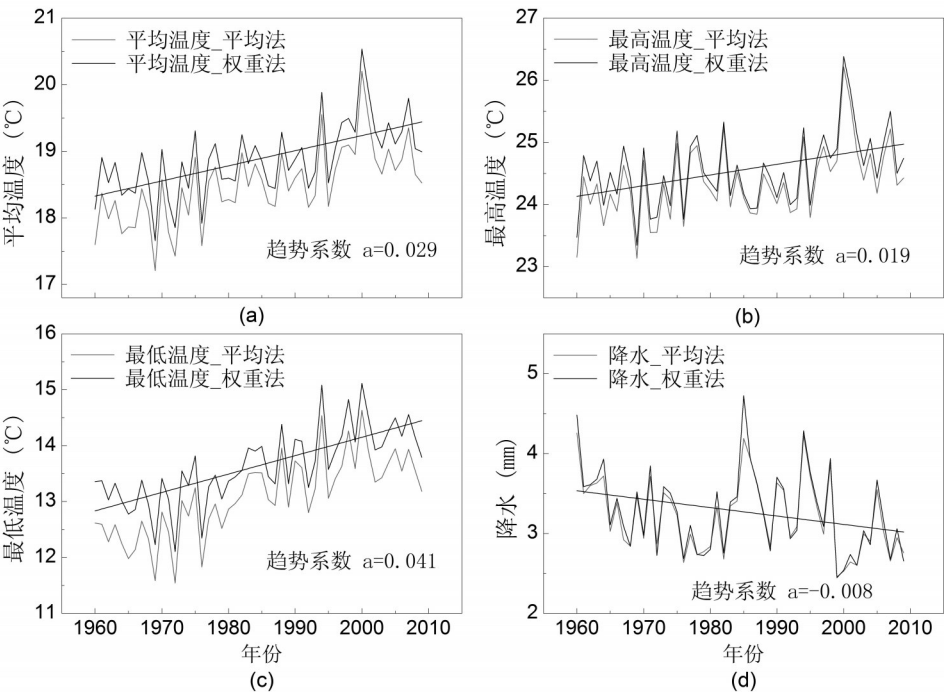


图2 1960-2009年黑龙江省水稻生长季(5-9月)平均温度(a),最高温度(b),最低温度(c),和降水(d)变化趋势(灰色直线为平均法所得结果,黑色直线为权重法所得结果)

Fig. 2 Trends of Tave (a), Tmax (b), Tmin (c) and Prec (d) during rice growing season (i.e. May to September) in Heilongjiang, 1960-2009 (gray lines for the averaged method, and black lines for the weighted method)

在这种情况下，本文利用了面积权重法生成的气象数据进行进一步分析。

2.1.2 水稻气象条件变化及趋势分析 根据当地的水稻种植实际情况及物候规律，选取了水稻生长季 (5-9 月份) 的温度 (Tave、Tmax 和 Tmin) 和降水 (Prec) 数据来分析黑龙江省的 1960-2009 年水稻种植气象条件的变化。

整体来看，黑龙江省水稻产区的温度有较明显的升高趋势，尤其自 20 世纪 80 年代以来，温度低值的出现相对 70 年代明显减少；而降水则仍以强烈的年际波动为主 (图 2)。趋势系数结果显示：近 50 年来，黑龙江省水稻生长季内有比较明显的增温，Tave、Tmax 和 Tmin 的升高可达每十年 0.29 °C，0.19 °C 和 0.41 °C，其中 Tmin 增加最为明显，而降水量则有 0.08 mm/10a 的下降趋势 (图 2)。相比于同期全省气象要素的年平均值变化 (Tave、Tmax、Tmin 和 Prec) 的趋势系数 (分别达到每十年 0.41 °C，0.26 °C，0.56 °C 和 -0.02 mm)，可见：水稻生长季内温度增幅较全年增幅要小 26.8%~9.3%，并且降水下降趋势比年平均数据更为明显，即黑龙江省降水的减少主要发生于水稻生长季内，而温度升高更强烈地发生于非生长季。

气象要素的月平均值变化趋势系数则显示：黑龙江省的气温在 2 月份升高最为显著，Tave、Tmin、和 Tmax 的增幅速率分别达到 0.85 °C、0.68 °C 和 1.02 °C /10a，冬半年增温比夏半年强烈、水稻非生长季增温比生长季内显著。而降水则在 7-9 月有最为显著的减少趋势，其余月份则表示出不明显或少量的增加趋势 (图 3)。

2.2 气象要素—水稻产量关系分析

水稻亩产数据与温度及降水数据的相关分析结果可见：黑龙江省的水稻产量明显受温度影响，降水与产量则无法检验出显著的相关关系。全球变化在东北地区主要表现为温度的变化，而降水的变化对该地区的水稻产量没有显著的影响。该结果与黑龙江省灌溉条件较好、低温冷害频发的自然条件一致。针对这种情况，我们对计算出的气象行业、国家标准以及 GDD 指标进行比较，并将各个指标与产量数据进行相关性分析，得出如下结果：

- (1) 5-9 月平均温度距平值 (ΔT) 与产量有显著的正相关关系 ($r = 0.721, p < 0.05$)，可见气象行业延迟型冷害指标可以良好地反映该地区由于平均热量不足给水稻生产带来的影响。
- (2) 水稻障碍型冷害标准中，7 月份指标与历年 7 月份低温天数 ($T_{min} < 17\text{ }^{\circ}\text{C}$) 呈显著正相关 ($r = 0.808, p < 0.05$)，可以较好地反映 7 月份低温情况，也能一定程度上指示敏感 I 期低温给产量带来的损失 ($r = -0.300, p < 0.1$)。然而 8 月份的指标则与 8 月份低温 ($T_{min} < 19\text{ }^{\circ}\text{C}$) 天数指标并不一致，说明其不能正确表征敏感 II 期的低温情况。
- (3) 与气象行业指标相反，根据国家冷害标准，7 月份只能检验出 1964 年 15-17 日的一次的轻度冷害，这与实际情况不符，说明该指标不能指示敏感 I 期的冷害情况。然而其 8 月份指标与历年 8 月低温 ($T_{ave} < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 天数呈显著正相关 ($r = 0.761, p < 0.05$)，可以较

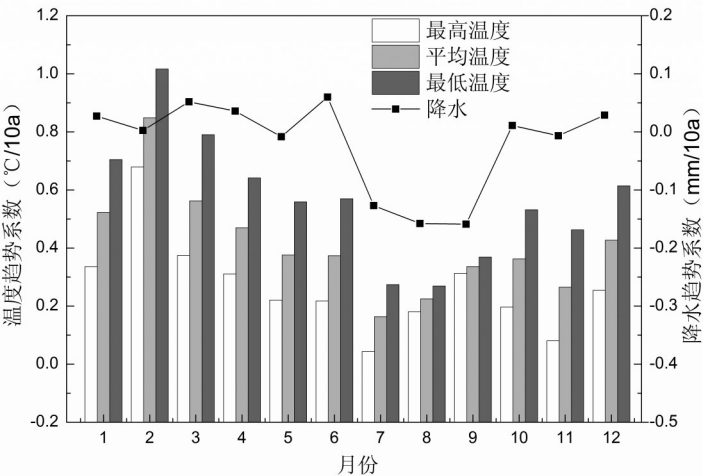


图3 1960-2009年黑龙江省各月平均温度、最高温度、最低温度和降水趋势系数

Fig. 3 Trend of Tave, Tmax, Tmin and Prec for each month in Heilongjiang, 1960-2009

好地反映 8 月份低温情况，并指示敏感Ⅱ期低温给水稻产量带来的影响 ($r = -0.326$, $p < 0.1$)。

(4) 负积温指标 (GDD_{n-}) 与水稻产量的相关性分析结果可见：7 月份 GDD_{17-} 和 8 月份 GDD_{19-} 均与当月各个低温天数指标呈显著相关 ($r = 0.447\sim 0.817$, $p < 0.05$)，表示该指标能很好地反映历年水稻障碍型冷害的两个敏感时期低温，并能对水稻产量情况进行指示 ($r_I = -0.535$, $r_{II} = -0.420$, $p < 0.05$)。

综上，在黑龙江省省级尺度上，各种标准及指标能否反映水稻冷害事件总结(表3)如下：

2.3 气象要素—水稻
产量模拟

根据以上研究结果，利用 5-9 月平均温度距平 ΔT ，7 月份 GDD_{17-} 和 8 月份 GDD_{19-} 来分别表征黑龙江省水稻延迟型冷害、敏感Ⅰ期以及敏感Ⅱ期的障碍型冷害指数，对水稻亩产数据的时间序列拟合模型如下 (各变量与公式 (4) 一致)：

$$Y_i = 127.074 + 6.549S_i + 27.05 \Delta T_i - 0.234I_{Ii} - 0.33I_{IIi}$$

(5)

拟合方程的判定系数 $R^2 = 0.92$ ($p < 0.05$)，各变量随时间的变化趋势见图 4，模型及指标趋势分析可得：

(1) 1960-2009 年的 50 年时间中，水稻产量随时间存在明显的增加趋势，直接线性拟合结果显示增长幅度平均达到 7.51 kg/a (图 4a)，由回归分析结果可见其时间增长趋势为 6.55 kg/a (式 5)，这表明了科技进步、管理水平提高等人为因素对水稻生产的积极作用，同时，回归模型时间系数低于产量的直接线性拟合值，也表明水稻产量的增加也不完全是

表 3 各种指标对黑龙江省不同等级水稻冷害反映能力总结

Tab. 3 Summary in evaluating different indicators for rice chilling injury in Heilongjiang			
冷害类型	气象行业标准	国家标准 (试用)	有效负积温 (GDD_{n-})
延迟型冷害	是	无	无
障碍型冷害 (敏感Ⅰ期)	是	否	是
障碍型冷害 (敏感Ⅱ期)	否	是	是

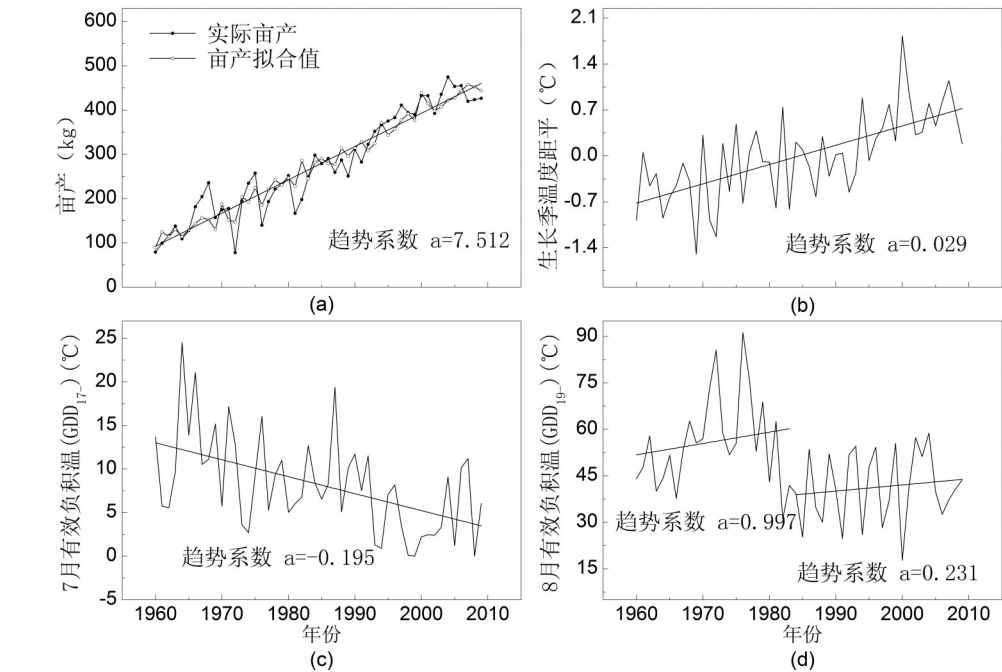


图 4 1960-2009 年黑龙江省水稻亩产 (a) 及影响水稻生产的各个气象指标 (b-d) 的变化趋势
Fig. 4 Trends of rice yield (a) and indexes of rice chilling injury by weather variables (b-d), 1960-2009

由于人为因素, 约有12.8%的增加趋势是由于温度等气象条件改善带来的。

(2) 5-9月低温造成的延迟型冷害对水稻产量有较大影响, 生长季内 ΔT 与亩产序列有较强的正相关关系, 线性回归方程显示 ΔT 每降低1℃, 水稻亩产将下降27.05 kg。50年来, 黑龙江省5-9月平均温度呈现非常明显的上升趋势, 平均达到0.294℃/10a, 则近50年来由于生长季平均温度上升给水稻带来的产量增加平均可达0.8 kg/a (图4 b)。

(3) 水稻7,8月份生育敏感时期低温事件发生越频繁, 带来的减产幅度越大。其中敏感I期 (主要是幼穗分化-孕穗期) 和敏感II期 (主要是抽穗开花期) 的有效负积温 GDD_{17} 和 GDD_{19} 。每增加1℃, 将分别给水稻带来0.234 kg和0.33 kg减产的影响。1960-2009年, 7月份温度条件有所改善, GDD_{17} 呈下降趋势 (slope = -0.195℃/a, $p < 0.05$), 50年时间内降低9.75℃, 由此也使黑龙江省水稻敏感I期的障碍型冷害得到一定缓解, 但是由于其本身量纲较小, 对水稻产量的影响并不十分明显 (图4c)。对于敏感II期, 其发生障碍型冷害的温度条件则比较复杂, GDD_{19} 在20世纪80年代初存在一次明显的突变, 前期均值明显大于后期, 表明80年代之前水稻敏感II期障碍型冷害的发生比较严重, 而之后则有所减缓。然而值得注意的是8月份 GDD_{19} 指标量纲较大并且近30年来有波动上升趋势, 说明该阶段冷害具有易发性和损失严重性的特征, 并且将会继续影响当地水稻生产 (图4d)。

(4) 根据拟合方程式 (4) 模拟出的历年水稻受温度影响而减产情况 (图5) 可见: 1960-2009年黑龙江省每年都会遭受由冷害发生带来的水稻减产, 亩产损失为1.4~35.8 kg不等, 其中10~25 kg之间的年份有38个, 占全部年份的76%。水稻减产量受敏感II期 GDD_{19} 影响最显著, 两者在20世纪80年代初表现出一致的均值突变, 之前黑龙江省水稻受温度影响减产平均为每亩21.9 kg, 之后则有所缓解, 减产降低至平均每亩14.2 kg。与敏感II期 GDD_{19} 指标有波动上升趋势不同, 由于受温度条件改变的共同作用, 水稻产量在波动中有所上升。这表明全球变暖确实优化了黑龙江省水稻生产的温度条件, 在一定程度上提高了水稻产量。

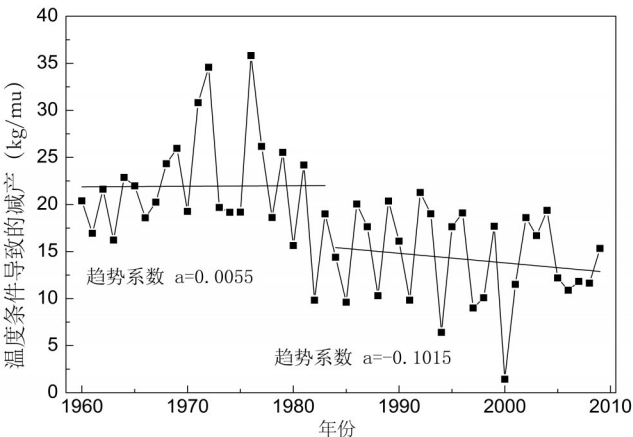


图5 1960-2009年黑龙江省温度胁迫造成的水稻亩产降低值
Fig. 5 Loss of rice yield (a) affected by temperature stress, 1960-2009

3 结论与讨论

3.1 主要结论

(1) 关于大尺度的气象因子—作物产量分析, 以往研究多是采用将所有气象站记录取平均值作为全省气象数据^[3, 5, 8, 23, 29-30], 或者将省级尺度分为较小的区域尺度, 仍采用平均方法来计算水稻主产区气象数据^[31]。然而在大尺度条件下, 气候变化具有很强的空间差异, 以致在水稻种植分布极为不均匀的黑龙江省 (东南多, 北部极少), 这种平均法无法真实反映水稻产区的气象条件。本文分析结果显示: 利用面积权重法所得的温度数据明显高于利用平均法所得的结果, 这主要是由于实际种植栽培中考虑了气候状况及水稻生长条件, 导致水稻种植分布与气象站点的分布并不完全匹配 (图1), 在这种条件下, 利用面积权重法, 排除对水稻生产没有影响的站点, 并适当多考虑水稻密集地区的气象条件, 得到专注于水稻生长的省级气象数据, 与利用所有站点的平均值的方法相比, 其更能真实反映东北

地区水稻生产的气象状况。

(2) 1960-2009年生长季及全年各月的温度和降水变化趋势系数显示,在全球变暖的背景下,区域气候变化在不同时间尺度上也存在不一致的现象。具体到黑龙江省水稻产区,则表现为全年最低温度上升最为明显,以及非生长季内的强烈增暖,并且突出表现为水稻关键生长期(7-9月份)的增温最小,降水却明显减少,在黑龙江省水稻生产存在热量和水分资源不足的情况下,这种变化势必给黑龙江省水稻生产带来不利影响。所以,对于气候变化给不同作物带来的影响、以及各种农业气象灾害的防范及应对研究,这种显著存在的时间分布不均匀是一个亟须注意的要点。

(3) 对于极端温度事件及其对作物生长影响的研究,我国通常选取平均温度或者最高、最低温度中的一项为基础数据进行极端值的选取及指标确定。例如水稻冷害的气象行业和国家标准,以及我国农业气象研究中通常采取的积温概念,均以一天中的某一温度要素值来代表当日温度状况。这种方法简便易行,然而完全忽略了温度的日变化。本文中引入了国际上比较通用的GDD (Growing degree days) 的概念,选取水稻生长发育关键时期的冷害影响阈值温度,计算有效负积温(GDD_n),使低温事件得到量化表达,并且综合应用最高、最低温度,在一定程度上解决了忽略温度日变化的问题。

(4) 作为热力严重不足的典型省份,人们普遍认为全球变暖将优化黑龙江省水稻生产条件、减少当地水稻低温冷害的发生,并对其寄予保障我国粮食安全的希望。然而,本研究表明:近年来的温度升高确实减缓了黑龙江省水稻延迟型冷害的发生,也对水稻幼穗分化和安全抽穗提供了良好条件,但是对于水稻抽穗开花期的障碍型冷害,除19世纪80年代存在一次明显的均值降低之外,近30年来则表现为波动增加趋势,这表明敏感II期障碍型冷害的发生将会继续影响当地水稻生产,也是未来一段时间内防范东北水稻冷害的关键所在。该研究对于黑龙江省有针对性地提出适应气候变化对策、保证当地水稻稳定增产均有一定的现实意义,也可为我国应对气候变化带来的粮食安全问题提供参考。

3.2 不足与展望

本文利用考虑了黑龙江省水稻种植分布的泰森多边形权重法来计算省级气象数据,得到了比较合理的结果,但是由于资料获取局限问题的存在,文中没有包括水稻种植范围的扩张以及种植分布的调整,这给历年省级气象数据的准确性带来了一定影响。在今后的研究中,引入多次土地利用结果,动态获取历年省级数据,将会使分析结果更有说服力。

另外,温度、降水和辐射是影响农作物生长发育及产量形成的三个最主要的天气因子。然而由于黑龙江省日照条件充足,一般不会影响到作物生长,故本文只选择了温度和降水两个因子进行了产量影响检验。结果显示黑龙江省水稻产量与温度相关最为密切,与该省实际情况较为符合。

本文对于病虫害等因素的发生没有进行区分考虑,将其与品种改良等人为因素合并作为了影响水稻产量的非气象因素。然而近年来,人们也有认为作物病虫害现象的加剧与气候变化及其带来的极端事件等有密切关系。在未来的研究中,也可以将其进行区分检验,以达到对作物产量变动更广泛、更深刻的理解。

参考文献 (References)

- [1] China Statistical Database. Output of major farm products by region. Accessed March 2012. <http://219.235.129.58/welcome.do>. [国家统计局数据库. 2010年分地区主要农产品产量. 2012年3月进入. <http://219.235.129.58/welcome.do>.]
- [2] Leng Zhijie. Study on the principles to co-operation integrating the rice supply chain in Heilongjiang land-reclamation area and the policies by government. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2011, 27(2): 186-191. [冷志杰. 黑龙江垦区粳稻供应链协作集成原则及支持政策研究. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(2): 186-191.]
- [3] Wang Yu, Yang Xiu. An assessment of rice loss caused by meteorological disasters in Heilongjiang Province. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4): 457-459. [王雨, 杨修. 黑龙江省水稻气象灾害损失评估. 中国农业气象,

- 2007, 28(4): 457-459.]
- [4] Jiang Lixia, Yan Ping, Wang Ping et al. Influence of climatic factors on safety of rice production in Heilongjiang Province. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(3): 46-51. [姜丽霞, 阎平, 王萍 等. 黑龙江省影响水稻安全生产的气象要素. *自然灾害学报*, 2006, 15(3): 46-51.]
- [5] Li Wenliang, Zhang Ddongyou, Zhang Lijuan. Study on occurrence and forecast of low temperature and cold damage in Heilongjiang Province. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(4): 31-35. [李文亮, 张冬有, 张丽娟. 黑龙江省低温冷害发生规律及预测研究. *灾害学*, 2008, 23(4): 31-35.]
- [6] Sun W, Huang Y. Global warming over the period 1961-2008 did not increase high-temperature stress but did reduce low-temperature stress in irrigated rice across China. *Agric. Forest Meteorol.*, 2011, doi: 10.1016/j.agrformet.2011.04.009.
- [7] Wang Lianmin, Zeng Xianguo, Wang Lizhi et al. Rice cooling injury in Heilongjiang Province: I. Time regularity of cooling injury. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2009, (1): 12-14. [王连敏, 曾宪国, 王立志 等. 黑龙江省水稻冷害: I. 冷害发生的时间规律. *黑龙江农业科学*, 2009, (1): 12-14.]
- [8] Wang Shaowu, Ma Shuqing, Chen Li et al. *Chilling Damage*. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 23-29, 31, 44. [王绍武, 马树庆, 陈莉 等. 低温冷害. 北京: 气象出版社, 2009: 23-29, 31, 44.]
- [9] Xu Xianbin, Bian Jingyang, Tan He et al. Study on cold injury yield testing model of rice in Heilongjiang. *North Rice*, 2009, 39(1): 21-23. [许显滨, 卞景阳, 谭贺 等. 黑龙江省水稻冷害产量试验模型研究. *北方水稻*, 2009, 39(1): 21-23.]
- [10] Jiang Lixia, Li Shuai, Yan Ping et al. Sterile type cool injury of rice during booting stage and its impacts on rice yield in Heilongjiang Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(3): 463-468. [姜丽霞, 李帅, 闫平 等. 黑龙江水稻孕穗期障碍型冷害及其对产量的影响. *中国农业气象*, 2009, 30(3): 463-468.]
- [11] Tao F, Yokozawa M, Liu J et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. *Climate Research*, 2008, 38: 83-94.
- [12] Almaraz J J, Mabood F, Zhou X. Climate change, weather variability and crop yield at a higher latitude locale: Southwestern Quebec. *Climatic Change*, 2008, 88: 187-197.
- [13] Zhang T, Zhu J, Wassmann R. Responses of rice yields to recent climate change in China: An empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981-2005). *Agric. Forest Meteorol.*, 2010, 150: 1128-1137.
- [14] Peng S, Huang J, Sheehy J E et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2004, 101(27): 9971-9975.
- [15] Bai Mingqi, Gao Yonggang, Wang Fang. Effect of temperature change on rice yield in Heilongjiang Province. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(31): 13571-13573, 13580. [白鸣祺, 高永刚, 王芳. 黑龙江省气温变化对水稻产量的影响. *安徽农业科学*, 2008, 36(31): 13571-13573, 13580.]
- [16] Xiong Wei. Simulation of the yields changes of China's main crops yield under climate change scenario [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. [熊伟. 未来气候变化情景下中国主要粮食作物生产模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.]
- [17] Zhang Jianping, Zhao Yanxia, Wang Chunyi et al. Simulation of the yields change of China's main crops under climate change scenario. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(5): 208-213. [张建平, 赵艳霞, 王春乙 等. 未来气候变化情景下我国主要粮食作物产量变化模拟. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 208-213.]
- [18] Xiong W, Holman I, Lin E et al. Climate change, water availability and future cereal production in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135: 58-69.
- [19] Jin Z Q, Zhu D W. Impacts of changes in climate and its variability on food production in Northeast China. *Acta Agron. Sin.*, 2008, 34(9): 1588-1597.
- [20] Liu Yujie, Tao Fulu. Probabilistic assessment and uncertainties analysis of climate change impacts on wheat biomass. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 337-345. [刘玉洁, 陶福禄. 气候变化对小麦生物量影响的概率预测和不确定性分析. *地理学报*, 2012, 67(3): 337-345.]
- [21] Gao Yingjuan, Wang Songhua, Tong Xue. Establishment of decreased yield amplitude model of rice caused by low temperature and cold damage. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(17): 8050-8051, 8053. [高迎娟, 王松华, 佟雪. 水稻低温冷害减产幅度模型的建立. *安徽农业科学*, 2009, 37(17): 8050-8051, 8053.]
- [22] Ding Shicheng. Analysis of low temperature in summer and its impact on agricultural in Northeast China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1980, 38(3): 234-242. [丁士晟. 东北地区夏季低温的气候分析及其对农业生产的影响. *气象学报*, 1980, 38(3): 234-242.]
- [23] Sun Yuting, Wang Shuyu, Yang Yongqi. Studies on cool summer and crop yield in Northeast China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1983, 41(3): 313-321. [孙玉亭, 王书裕, 杨永岐. 东北地区作物冷害的研究. *气象学报*, 1983, 41(3): 313-321.]

- [24] Ma Shuqing, Wang Qi, Shen Xiangwen et al. Model study on the evaluation and forecast of loss for sterile-type cool injury in rice plants. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(4): 507-512. [马树庆, 王琪, 沈享文 等. 水稻障碍型冷害损失评估及预测动态模型研究. *气象学报*, 2003, 61(4): 507-512.]
- [25] China Meteorological Administration. Grade of Chilling Damage for Rice and Maize. Meteorological Industry Standard of People's Republic of China (QX/T 101-2009). Beijing: China Meteorological Press. Delivered June 7, 2009, Implemented November 1, 2009. [中国气象局. 水稻、玉米冷害等级. 中华人民共和国气象行业标准(QX/T 101-2009). 北京: 气象出版社, 2009-06-07发布, 2009-11-01实施.]
- [26] Bi Baogui, Xu Jing, Lin Jian. Method of area rainfall calculation and its application to Haihe Valley. *Meteorological Monthly*, 2003, (8): 39-421. [毕宝贵, 徐晶, 林建. 面雨量计算方法及其在海河流域的应用. *气象*, 2003, (8): 39-421.]
- [27] Li Ning, Liu Zhen, Gu Wei. Statistic analysis of average annual precipitation in the areas in and around Bohai Sea. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1022-1030. [李宁, 刘珍, 顾卫. 渤海与环渤海地区年降水量的统计分析. *地理研究*, 2006, 25(6): 1022-1030.]
- [28] Lobell D B, Banziger M, Magorokosho C et al. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield. *Nature Climate Change*, 2011, 1(1): 42-45.
- [29] Chen C, Lei C, Deng A et al. Will higher minimum temperatures increase corn production in Northeast China? An analysis of historical data over 1965-2008. *Agric. Forest Meteorol.*, 2011, doi: 10.1016/j.agrformet.2011.06.013.
- [30] Fang Xiuqi, Wang Yuan, Xu Tan et al. Contribution of climate warming to rice yield in Heilongjiang Province. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 820-828. [方修琦, 王媛, 徐钺 等. 近20年气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献. *地理学报*, 2004, 59(6): 820-828.]
- [31] Jiang Lixia, Li Shuai, Shen Shuanghe et al. Sterile-type cool injury on rice and its relationship with climate productivity in Heilongjiang Province from 1961 to 2006. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(3): 315-320. [姜丽霞, 李帅, 申双和 等. 近46a黑龙江水稻障碍型冷害及其与气候生产力的关系. *大气科学学报*, 2010, 33(3): 315-320.]

Effect of Chilling Injury on Rice Yield in Heilongjiang Province

LIU Xiaofei¹, ZHANG Zhao¹, SHUAI Jiabing¹, WANG Pin¹,
SHI Wenjiao², CHEN Yi¹, TAO Fulv²

(1. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management/State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: This study is focused on indexes for the rice chilling injury in Heilongjiang Province during 1960-2009. Firstly, we compared a new derived climate data weighted by rice planting density with the traditional method, and found that the new one is more reasonable to assess the impact of climate change on crop yields. Considering the frequency and intensity of rice chilling in the province, secondly, chilling indexes defined by meteorological, national and international levels were assessed. The result showed that the meteorological standards were suitable for the delayed injury, while the international one, so-called sum of Growing Degree Day below threshold (GDD_n), characterized best the chilling sterile injury for rice. The explanation ability of the rice yield time series model including both injury types as two independent variables reached approximately 92% ($p < 0.05$). Finally, we concluded that the contribution rates of human and weather factors to rice yields are about 87.2% and 12.8% respectively, and a slight increasing trend for sterile chilling injury was found during heading to flowing period in recent years, indicating a high chilling risk for rice planting in Heilongjiang Province in the future global warming.

Key words: rice production; Heilongjiang Province; chilling injury