

姜丽霞, 官丽娟, 刘泽恩, 等. 高寒区温度三因子的时间变化及其与水稻产量的关系研究[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 5-11. [JIANG Lixia, GONG Lijuan, LIU Zeen, et al. The Temporal Change of Three Air Temperature Factors and Relationship Between Air Temperature and Rice Yield in Very Cold Region [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 5-11. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.002.]

高寒区温度三因子的时间变化及其与水稻产量的关系研究^{*}

姜丽霞¹, 官丽娟¹, 刘泽恩², 于瑛楠¹, 王 铭¹, 赵慧颖¹

(1. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨市通河县气象局, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 利用高寒区——黑龙江省44个气象观测站1980-2014年气象资料和水稻单产资料, 以旬为时间单元将生长季(5-9月)划分为15个研究时段, 引入日平均气温、最低气温、最高气温3个温度因子, 采用数理统计方法, 研究温度三因子的时间变化趋势和突变特征, 并构建温度因子与水稻产量的相关关系。结果表明: ①1980-2014年间, 研究区作物生长季内各研究时段温度三因子随时间总体以升高为主, 其中最低气温升温显著。5-6月是温度升高较快时期, 升温形势表征为最低气温与最高气温升温显著不对称。②1980-2014年间, 5月中旬至下旬、6月下旬至7月中旬、9月中旬至9月下旬有气温因子发生突变, 突变主要发生在1980年代末至21世纪初, 突变后升温剧烈, 升幅为1.2~2.2℃。③研究期间, 研究区水稻生长季内大部研究时段的温度因子与水稻单产相关显著($P < 0.01$, $P < 0.05$), 5-7月是温度三因子与水稻单产相关最显著的时间段, 其中最低气温与水稻单产相关最显著。④1980-2014年间, 在不同研究时段内, 温度单因子均与水稻单产呈正相关, 表明在一定温度范围内, 温度对产量的影响为正效应。温度各因子每升高1℃, 水稻单产升高幅度为307~722 kg/hm²。

关键词: 高寒区; 温度三因子; 时间变化; 水稻产量

中图分类号: X43; S511; S64; P46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)01-0005-07
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.002

黑龙江省是中国最重要的粮食生产基地之一, 其在国家粮食安全中占有重要地位。水稻是黑龙江省主要的粮食作物, 但水稻是喜温作物, 对热量条件要求较高, 而黑龙江省所处纬度较高, 热量资源有限, 易出现低温天气, 在无形中造成热量条件与作物需求之间的矛盾, 使水稻生产受到影响和威胁, 因此深入研究黑龙江省作物生长季温度时间变化及其与水稻产量的关系, 甄别影响产量的主要温度因子及影响时期, 对水稻安全生产具有宝贵的参考价值, 在推动现代农业可持续发展、保障国家粮食安全中具有重要的现实意义。

在全球气候变化背景下, 气候变暖及其对农业环境影响受到世界各国科学家的高度关注^[1-7], 气候——农业——作物间关系得到了广泛而深入的研究, 并取得显著进展^[8-10]。研究表明, 气候变化中温度因子对作物产量表现出深刻影响^[11], 气候变化影响的农业温度也即成为焦点问题^[12], 围绕这一问题, 许多专家学者从不同层面、不同角度、不同需求、不同方向上开展了卓有成效的

研究, 在灾害、作物发育期、作物产量等方面比较集中, 通过试验、田间观测、统计学、模型等多种方法探讨各种气象条件对作物生长发育的影响, Tauseef等^[13]基于2012-2013年田间试验, 采用热量累积(GDD)、光热转换系数(HTU)、热量利用率等与温度有关的农业气象指标, 分析发现水稻品种SR-2在克什米尔山谷种植能够获取最高产量, 上述农业气象指标在印度还被用于水稻生理成熟期的预测^[14]; Jansen等^[15]在1990年代初即关注了温度变化对水稻产量造成的影响, 研究指出若温度升高幅度超过0.8℃/10年, 水稻产量将下降; 郭建平等^[16]经过多年的深入研究建立了水稻低温指标体系; 姜丽霞等^[17]通过低温控制试验, 获得了寒地水稻敏感性品种和耐冷性品种的障碍型冷害临界温度指标分别为17℃、16℃; 宋迎波等^[18]阐述总结了不同作物生长发育气象指标; 李秀芬等^[19]研究表明, 推迟播期造成水稻产量降低, 其真正原因在于灌浆期温度低导致生境潜热不足而使籽粒充实度下降; 张鑫等^[20]采用夜间增

* 收稿日期: 2017-05-09 修回日期: 2017-07-01

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF201606); 中国气象局核心业务发展专项(CMAHX20160205)

第一作者简介: 姜丽霞(1972-), 女, 吉林德惠人, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用气象、气候资源研究. E-mail: hljlx@163.com

通讯作者: 赵慧颖(1964-), 男, 黑龙江省讷河人, 硕士, 研究员, 主要从事应用气象、气候变化研究. E-mail: zhaohyy2008@aliyun.com

温试验, 观测发现增温使水稻单位面积总颖花数下降了 12.6%, 进而导致产量下降。一直以来, 作物积温在生态与农业气象领域中占有重要地位, 其能够准确表征作物不同发育时期热量需求与供给的关系^[21], 在气候与农业关系的研究中被广泛采用, 并被采纳制定中华人民共和国气象行业标准, 目前已颁布实施^[22-23]。

纵观生态与农业气象领域的大量研究, 其中关于寒地水稻与温度关系的讨论, 由于研究目标和角度不同, 研究结果不尽相同。迄今为止, 深入探讨温度三因子对寒地水稻生长和产量影响的研究报道仍较少见。值得一提的是, 前期的大量研究所采用的温度数据多为日均值, 往往忽略了日最低气温和日最高气温。事实上, 逐日最低气温、最高气温均为实际观测值, 在高纬度寒地水稻生长期, 最低气温、最高气温变化幅度大, 其与水稻产量形成的关系较为密切。基于此, 利用 1980-2014 年气象数据, 针对中国最北部的黑龙江地区, 研究分析水稻生长期温度条件与产量的关系, 深层次甄别影响寒地水稻产量的主要温度因子及发育时期, 进而为揭示水稻生长的温度影响机制提供技术支撑, 以期为水稻生产趋利避害以及种植结构调整提供气象参考, 保证国家粮食安全。

1 材料与方法

1.1 研究站点及资料来源

黑龙江省稻作区主要分布在 50°N 以南地区, 为了最接近黑龙江省水稻生产实际情况, 本文在主要稻作区选取了北安、海伦、庆安、铁力、泰来、肇源、巴彦、五常、宁安、勃利、萝北、宝清、富锦、汤原、虎林等 44 个气象站作为研究站点, 除大兴安岭地区外, 其余 12 个行政区均有站点被选入, 其中包含庆安、尚志、宝清、肇源、宁安、五常、方正、汤原、虎林等 9 个水稻观测站(表 1)。上述站点均匀分布在稻作区, 水稻种植面积位列黑龙江省前 44 位, 基本在 1.2 万 hm^2 以上, 具有较强代表性, 能够很好反映出稻作区的气候特征和生产特点。

气象资料包括 44 个气象站 1980-2014 年 5-9 月逐日平均气温、最低气温、最高气温、降水、日照时数, 9 个水稻观测站有记录以来至 2014 年的水稻农业气象观测数据, 均来自黑龙江省气象局档案馆。1980-2014 年水稻单产资料, 来自黑龙江省统计局。水稻发育期等观测资料按照中国气象局《农业气象观测规范》的要求进行。

表 1 研究区站点概况

所属行政区	站名	纬度 /(°)	经度 /(°)	备注	所属行政区	站名	纬度 /(°)	经度 /(°)	备注	
黑河地区	嫩江	49.17	125.23		哈尔滨地区	巴彦	46.08	127.35		
	逊克	49.58	128.47			依兰	46.3	129.58		
	北安	48.28	126.52			五常	44.9	127.15	水稻观测站	
齐齐哈尔地区	讷河	48.48	124.85			双城	45.38	126.3		
	龙江	47.33	123.18			木兰	45.95	128.03		
	甘南	47.93	123.5			通河	45.97	128.73		
	富裕	47.8	124.48			方正	45.83	128.8	水稻观测站	
	依安	47.9	125.3			延寿	45.45	128.3		
	泰来	46.4	123.42			尚志	45.22	127.97	水稻观测站	
绥化地区	海伦	47.43	126.97			佳木斯地区	同江	47.65	132.5	
	绥棱	47.23	127.1		抚远		48.37	134.28		
	肇东	46.07	125.97		富锦		47.23	131.98		
	望奎	46.87	126.48		汤原		46.73	129.88	水稻观测站	
	绥化	46.62	126.97		桦川		47.02	130.72		
	庆安	46.88	127.48	水稻观测站	桦南		46.2	130.52		
大庆地区	林甸	47.18	124.83		双鸭山地区		集贤	46.72	131.13	
	杜尔伯特	46.87	124.43				宝清	46.32	132.18	水稻观测站
	肇源	45.5	125.08	水稻观测站		饶河	46.8	134		
七台河地区	勃利	45.75	130.58		鸡西地区	虎林	45.77	132.97	水稻观测站	
牡丹江地区	宁安	44.33	129.47	水稻观测站		密山	45.55	131.87		
鹤岗地区	萝北	47.57	130.83			鸡东	45.25	131.13		
	绥滨	47.28	131.85		伊春地区	铁力	46.98	128.02		

1.2 研究方法

黑龙江省水稻为一年一熟制, 根据水稻发育期观测资料, 同时结合黑龙江省水稻生产实际来看, 一般情况下, 大部稻区水稻在 5 月处于苗期并普遍移栽, 在 9 月成熟, 因此将 5-9 月定义为水稻生长季。为了充分揭示研究区气候对水稻的影响机制, 本文主要针对水稻生长季, 细化时间尺度, 以旬为时间单元开展研究, 即 5-9 月内各旬共计 15 个研究时段。气象因子选取平均气温、最低气温、最高气温, 分别以 \bar{T} 、 T_{\min} 、 T_{\max} 表示。

采用线性气候倾向率分析各温度因子的变化趋势, 即:

$$\hat{y}(t) = a_0 + a_1 t. \quad (1)$$

式中: $a_1 \times 10$ 为气候倾向率, 表示气候要素的变化率, 其符号正负表示升降。系数 a_0 、 a_1 通过最小二乘法来确定。

采用 Mann-Kendall 检测法^[24] 研究各因子的突变特征。利用回归方法分析气象因子与水稻产量的相关关系。利用气候统计方法对所有研究站点 1980-2014 年逐年逐日气象数据进行相应的统计处理, 统计得到研究时期内各时间单元的气象要素值, 并根据研究需求进行平均处理。采用 SPSS statistics 17.0 处理软件进行数据分析和计算。

2 结果与分析

2.1 温度的时间变化

1980-2014 年间, 研究区水稻生长季各研究时段气温三因子变化趋势总体以升高为主, 以 5 月上

旬最低气温、7 月下旬平均气温、5 月上旬最高气温、8 月上旬平均气温为例绘图, 由图 1 可见, 平均气温、最低气温、最高气温随时间呈波动式变化, 其中以最低气温振荡最剧烈。具体由表 2 可见, 平均气温 7 月下旬表征为极微弱的下降趋势(图 1b, $P > 0.05$), 其余时段均为上升趋势, 但 8 月上旬升高幅度极小(图 1d, $P > 0.05$), 接近于零, 其它时段升高速率在 $0.1 \sim 0.8^\circ\text{C}/10$ 年, 5 月下旬、6 月下旬、9 月中旬、9 月下旬通过 0.05 或 0.01 显著性检验; 最低气温 8 月下旬呈下降趋势($P > 0.05$), 其余时段均呈上升趋势, 升高速率在 $0.1 \sim 0.9^\circ\text{C}/10$ 年, 通过 0.05 或 0.01 信度检验的研究时段明显增多, 共计 9 个时段, 其中 5 月中旬至 7 月上旬升温极显著, 升温速率在 $0.7 \sim 0.9^\circ\text{C}/10$ 年; 最高气温 7 月下旬、8 月上旬表现为下降趋势($P > 0.05$), 其余时段最高气温为升温走势, 6 月下旬、9 月中旬、9 月下旬 3 个时段通过 0.05 或 0.01 信度检验。从不同时间段的升温速度来看, 温度三因子在 5-6 月、9 月中至下旬升温较快, 其它时间相对较慢。进一步比较三因子温度升高速率可见, 以 8 月上旬为分水岭, 其前期基本表征为最低气温升温速度分别快于平均气温、最高气温, 同时平均气温的升温速度又快于最高气温, 后期则恰好相反, 表现为最高气温升温速度最快。总体来说, 在研究区 1980-2014 年间, 5-6 月是温度升高较快时期, 升温形势表现为最低气温升温显著、最高气温升温不明显, 即表征为最低气温与最高气温升温显著不对称, 这与姜丽霞等^[25] 的研究结论一致。

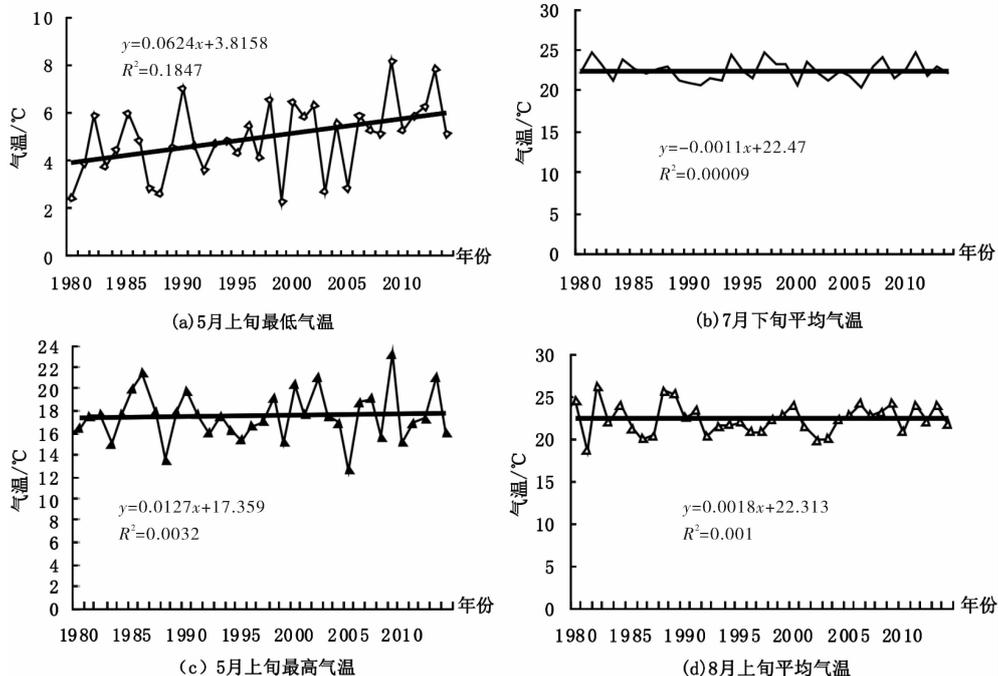


图 1 研究区 1980-2014 年 5 月上旬最低气温、7 月下旬平均气温、5 月上旬最高气温、8 月上旬平均气温变化趋势

表2 研究区 1980-2014 年各研究时段温度因子的时间变化趋势

时段	\bar{T} 的 R^2	\bar{T} 倾向率 $a_1/$ ($^{\circ}\text{C}/10$ 年)	T_{\min} 的 R^2	T_{\min} 倾向率/ ($^{\circ}\text{C}/10$ 年)	T_{\max} 的 R^2	T_{\max} 倾向率 $a_3/$ ($^{\circ}\text{C}/10$ 年)	$a_2 - a_1$	$a_2 - a_3$	$a_1 - a_3$
5月上旬	0.047	0.4	0.185*	0.6	0.003	0.1	0.2	0.5	0.3
5月中旬	0.081	0.6	0.252**	0.9	0.014	0.3	0.3	0.6	0.3
5月下旬	0.126*	0.6	0.362**	0.9	0.038	0.4	0.3	0.5	0.2
6月上旬	0.060	0.5	0.242**	0.8	0.014	0.3	0.3	0.5	0.2
6月中旬	0.074	0.6	0.245**	0.7	0.030	0.5	0.1	0.2	0.1
6月下旬	0.169*	0.8	0.243**	0.8	0.143*	0.9	0	-0.1	-0.1
7月上旬	0.046	0.3	0.289**	0.7	0.004	0.1	0.4	0.6	0.2
7月中旬	0.074	0.4	0.124*	0.4	0.042	0.4	0	0	0
7月下旬	0	0	0.054	0.3	0.004	-0.1	0.3	0.4	0.1
8月上旬	0	0	0.007	0.1	0.001	-0.1	0.1	0.2	0.1
8月中旬	0.035	0.2	0.007	0.1	0.076	0.4	-0.1	-0.3	-0.2
8月下旬	0.005	0.1	0.006	-0.1	0.043	0.3	-0.2	-0.4	-0.2
9月上旬	0.024	0.2	0.003	0.1	0.067	0.4	-0.1	-0.3	-0.2
9月中旬	0.121*	0.6	0.026	0.3	0.191**	0.8	-0.3	-0.5	-0.2
9月下旬	0.219**	0.8	0.142*	0.6	0.220**	1	-0.2	-0.4	-0.2

注: * 和 ** 分别为通过 0.05 和 0.01 显著性检验, “-” 表示未通过 0.05 检验

采用 Mann-Kendall 检验法对各研究时段气温三因子进行突变检验, 分析发现 5 月上旬、6 月上旬至中旬、7 月下旬至 9 月上旬气温三因子均未出现突变, 7 月中旬、9 月中旬三因子均发生突变, 其余时段 1~2 个因子发生突变; 5 个研究时段的最低气温、平均气温发生突变, 而最高气温有 4 个时段。突变时间主要集中于 1988-1993 年、1997 年、2001-2004 年, 可见温度突变主要发生在 1980 年代末至 21 世纪初。突变后与突变前的温度变化显示, 突变后温度升高幅度较大, 在 1.2~2.2 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 其中最高温度升高达 2.2 $^{\circ}\text{C}$ (表 3)。

表3 研究区 1980-2014 年各研究时段温度因子的突变时间及突变前后温度比较

时段	突变时间			突变后与突变前温度距平/ $^{\circ}\text{C}$		
	\bar{T}	T_{\min}	T_{\max}	\bar{T}	T_{\min}	T_{\max}
5月上旬	—	—	—	—	—	—
5月中旬	1990	1992	—	1.9	1.8	—
5月下旬	—	2002	—	—	1.8	—
6月上旬	—	—	—	—	—	—
6月中旬	—	—	—	—	—	—
6月下旬	1997	—	1997	1.8	—	2.2
7月上旬	—	1997	—	—	1.4	—
7月中旬	1988	1993	1988	1.5	1.2	1.6
7月下旬	—	—	—	—	—	—
8月上旬	—	—	—	—	—	—
8月中旬	—	—	—	—	—	—
8月下旬	—	—	—	—	—	—
9月上旬	—	—	—	—	—	—
9月中旬	2001	2004	2001	1.7	1.4	2.2
9月下旬	1989	—	1991	1.9	—	2.2

2.2 水稻产量与温度三因子的关系

2.2.1 不同温度因子与水稻单产关系的差异

为甄别三个温度因子对水稻产量的影响, 采用逐步回归方法分析三因子与水稻单产的关系, 由表 4、表 5 可见, 1980-2014 年, 研究区水稻生长季内大部时段的气温因子与水稻单产具有极显著或显著的相关关系 ($P < 0.01$, $P < 0.05$), 个别研究时段存在多温度因子与水稻产量相关极显著的现象。整体来看, 在 15 个研究时段中, 总计有 8 个时段的最低气温与水稻单产相关显著, 平均气温、最高气温分别为 4 个时段, 这在一定程度上可以说明在水稻产量形成中, 最低气温在 3 个温度因子中占主要地位。表 4 给出了单温度因子与水稻单产的相关关系, 由表可见, 5 月上旬至 7 月上旬各旬、7 月下旬等研究时段均表征为最低气温与水稻单产相关显著, 其累积时间占生长季全部时间的 53%, 可见最低气温在水稻产量形成中的重要作用。单温度因子与水稻单产的相关关系均为正相关, 表明在一定温度范围内, 水稻单产随着温度的升高而增加, 温度对水稻产量形成为正效应作用。除了单因子与水稻产量显著相关外, 还表征出多温度因子与水稻单产存在极显著相关关系, 均通过 0.01 的信度检验 (表 5), 说明在上述研究时段内, 多温度因子协同作用对水稻产量影响更加显著。

2.2.2 不同时段温度因子与水稻单产关系的差异

由表 4、表 5 可见, 研究区不同研究时段的气温因子与水稻单产相关关系不同, 相关的显著性也不相同。从研究时段看, 8 月所包含的 3 个研究时段的气温因子与水稻单产不存在相关关系, 而

其余时段均有温度因子与产量相关显著。比较单因子相关显著性, 通过 0.01 显著性检验为 6 个时段, 分别为 5 月中旬、5 月下旬、6 月中旬、6 月下旬、7 月上旬、7 月中旬, 其 R^2 在 0.22 以上, 值得关注的是, 上述时段集中分布在水稻营养生长及生殖生长初期; 通过 0.05 显著性检验为 6 个时段, 分别为 9 月下旬、5 月上旬、6 月上旬、7 月下旬、9 月上旬、9 月中旬, 其 R^2 在 0.113 以上, 此 6 个时段则较为零散地分布在水稻整个生长季(表 4)。分析多温度因子相关显著性可见(表 5), 在 5 月上旬、5 月下旬、7 月上旬等 3 个时段, 出现多因子与产量相关显著的现象, 且均达到极显著程度, R^2 在 0.306 以上, 3 个时段也均集中分布在水稻营养生长及生殖生长初期, 其中 5 月上旬存在 3 种不同的相关关系, 涉及 3 个温度因子的相关关系的 R^2 最高, 为 0.460。总体来看, 5-7 月是温度因子与水稻单产相关最显著的时间段。

表 4 研究区温度单因子与水稻产量的相关关系

时段	R^2	相关因子	时段	R^2	相关因子
5 月上旬	0.147*	T_{\min}	7 月下旬	0.135*	T_{\min}
5 月中旬	0.282**	T_{\min}	8 月上旬	—	—
5 月下旬	0.235**	T_{\min}	8 月中旬	—	—
6 月上旬	0.141*	T_{\min}	8 月下旬	—	—
6 月中旬	0.33**	T_{\min}	9 月上旬	0.122*	
6 月下旬	0.22**	T_{\min}	9 月中旬	0.113*	
7 月上旬	0.266**	T_{\min}	9 月下旬	0.182*	
7 月中旬	0.231**	T			

注: * 和 ** 分别为通过 0.05 和 0.01 显著性检验, “—”表示未通过 0.05 检验

表 5 研究区气象多因子与水稻产量的相关关系

时段	R^2	相关因子
	0.306**	最低气温、最高气温
5 月上旬	0.460**	平均气温、最低气温、最高气温
	0.416**	平均气温、最高气温
5 月下旬	0.402**	平均气温、最低气温
7 月上旬	0.449**	最低气温、最高气温

注: * 和 ** 分别为通过 0.05 和 0.01 显著性检验, “—”表示未通过 0.05 检验

3 讨论

气象观测数据显示, 一天中温度呈波动式变化, 因此, 本文在构建温度与水稻产量关系时, 引入 3 个温度因子——日平均气温、日最低气温、日最高气温, 这在一定程度上使温度对产量的影响研究更为全面、清晰, 同时, 考虑不同时期温度条件对水稻产量的影响不同, 本文对研究时段进行细致划分, 采用旬尺度作为研究的时间单元,

使研究结果更加接近实际情况。

在黑龙江省, 水稻在 5-7 月先后进入移栽期、分蘖期、孕穗抽穗期, 大量研究表明该时期恰是形成产量三因素即穗数、每穗粒数(每穗颖花数)、成粒率的关键时期, 其中水稻分蘖期是决定穗数并为穗粒发育奠定基础的重要时期, 孕穗抽穗期是形成每穗颖花数、成粒率的重要时期。从本文研究结果来看, 恰恰 5-7 月是温度因子与水稻单产相关最显著的时间段, 这一方面说明了该时段温度因子与产量直接相关, 另一方面也反映了该时期温度因子对产量形成具有至关重要的作用, 研究表明, 分蘖期间气温适宜可促进分蘖速度, 提高分蘖成穗率^[26]; 移栽 20 d 后增温 2℃可使每穴约增加 1 个分蘖茎^[27]; 穗粒数与孕穗到抽穗期最低气温成正相关^[28], 可见本文研究结果与上述研究结论相吻合。另外, 本文通过细致分析发现, 存在多温度因子与产量相关显著的现象, 且最低气温与水稻产量相关最显著, 说明 5-7 月温度因子的优劣及匹配与水稻产量的高低密切相关, 且最低气温具有重要作用。

温度单因子与水稻产量的相关关系显示, 在不同研究时段内, 温度单因子均与水稻单产呈正相关, 在一定温度范围内, 随着各温度因子的升高, 水稻单产呈现不同程度的升高趋势, 其中最低气温每升高 1℃, 单产升高幅度在 410~722 kg/hm², 平均气温每升高 1℃, 单产升高幅度在 431~554 kg/hm², 最高气温每升高 1℃, 单产升高幅度在 307~365 kg/hm², 可见, 温度对产量的影响为正效应, 且最低气温引起产量升高的幅度较大。研究表明^[16], 1992 年为低温年之一, 黑龙江省部分地区作物生长季温度条件差, 五常市即是 1992 年初夏温度不高的地区之一, 该年五常市水稻单产为 6700 kg/hm², 比 1991 年、1993 年分别下降 2%、7%, 比较分析 1991、1992、1993 年 5-7 月温度状况, 1992 年该时段平均气温、最低气温均比 1991、1993 年偏低, 且以最低气温偏低显著, 负距平达 -0.8℃; 最高气温与 1991 年持平, 比 1993 年偏低 0.1℃; 1992 年 5-7 月 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温比 1991、1993 年同期分别偏低 49℃·d、60℃·d, 可见 1992 年温度条件差于相邻 2 年, 其产量也相应偏低, 这一定程度上印证了温度对产量的正效应作用。进一步比较分析 3 年的最低气温可见, 5-7 月最低气温的变化形式相似, 均呈波动式变化, 但 1992 年 6 月 4-16 日出现了一个明显的低温时段(图 2), 期间的平均最低气温比 1991 年、1993 年分别偏低 5.2℃、4.8℃, 偏低之多可见一斑, 其后在 7 月 3-10 日、7 月 19-21 日也分别出现偏低时段。据记载, 五常市 1992 年该时段未发生

重大气象灾害^[29]，同时降水适中、日照正常，可见温度条件是影响水稻产量的主要因素之一，分析其原因，主要是6月4-16日最低气温偏低，此时间水稻开始分蘖，温度低影响分蘖速度，会降低分蘖成穗率，而7月3-10日、7月19-21日水稻即将进入孕穗期并孕穗，温度低对孕穗不利，且易形成空瘪粒。

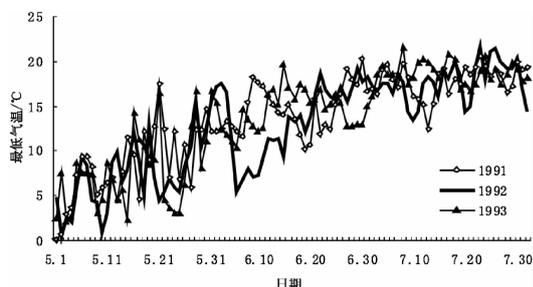


图2 五常市1991-1993年5-7月最低气温变化

2017年中共中央1号文件指出，要在确保国家粮食安全的基础上推进农业供给侧结构性改革，并将“进一步优化农业区域布局”列为一项重要工作内容。目前在气候变化影响下，虽热量资源增加，但同时灾害频发，程度呈加重趋势。现阶段黑龙江省粮食生产仍处于“靠天定年成”阶段，忽略化肥、农药等条件，结合本文研究结果，可以看出在高寒区域——黑龙江省，温度条件仍是影响水稻产量形成的主要因素。因此，调整优化水稻种植结构、发展现代农业应根据水稻生育特性及其对热量条件的需求，充分考虑区域气候资源以及区域性灾害问题，对水稻种植格局进行长远的规划布署和调整，做到趋利避害、合理高效利用气候资源。

4 结论

(1)本文以旬为时间单元细划研究时段，引入温度三因子——日平均气温、日最低气温、日最高气温分析构建温度与水稻产量关系，全面揭示了一日中温度的均值、高值、低值对水稻产量的影响，使温度对产量的影响研究更为深入、细致，研究结果更好地反映了实际情况。

(2)1980-2014年间，研究区作物生长季内各研究时段气温三因子随时间的变化趋势总体以升高为主，其中以最低气温升温显著。5-6月是温度升高较快时期，升温形势表现为最低气温升温显著、最高气温升温不明显，即表征为最低气温与最高气温升温显著不对称，这与姜丽霞等^[25]的研究结论一致。

(3)研究期间，研究区部分研究时段温度发生

突变，平均气温、最低气温发生突变的研究时段多于最高气温。温度突变主要发生在1980年代末至21世纪初，多在1988-1993年、1997年、2001-2004年。突变后与突变前温度变化剧烈，距平在1.2~2.2°C之间。

(4)1980-2014年间，研究区水稻生长季内大部研究时段的温度因子与水稻单产具有极显著或显著的相关关系($P < 0.01$, $P < 0.05$)，5-7月是温度各因子与水稻单产相关最显著的时间段，且最低气温与水稻单产相关最显著，表明其在水稻产量形成中具有重要作用。

(5)1980-2014年间，在不同研究时段内，温度各因子与水稻单产呈正相关，表明在一定温度范围内，温度对产量的影响为正效应。温度各因子每升高1°C，单产升高幅度在307~722 kg/hm²。

(6)目前而言，热量资源仍是制约高寒地区水稻生产的主要因素，在气候变化影响下，如何优化水稻种植结构，进而合理高效利用气候资源，并能够最大限度趋利避害以获得好品质、高产量，这将是未来的工作重点，此部分工作应在今后进行深入研究。

参考文献:

- [1] 赵俊芳, 杨晓光, 刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6544-6551.
- [2] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [3] 黄荣辉, 杜振彩. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势[J]. 自然杂志, 2010, 32(4): 187-195.
- [4] 王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 近10年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 659-671.
- [5] 赵慧颖. 呼伦贝尔沙地45年来气候变化及其对生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1817-1821.
- [6] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1283-1291.
- [7] Thanh Van Hoang, Tien Yin Chou, Bruno Basso, et al. Climate change impact on agricultural productivity and environment influence based on simulation model[J]. International Journal of Advanced Remote Sensing & Gis, 2014, 3(1): 642-659.
- [8] 林而达, 王京华. 全球变化对农业的影响及适应对策[J]. 地球科学进展, 1995, 10(6): 597-604.
- [9] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [10] Craig J. Pearson, Delia Bucknell, Gregory P. Laughlin. Modelling crop productivity and variability for policy and impacts of climate change in eastern Canada[J]. Environmental Modeling & Software, 2008, 23(12): 1345-1355.
- [11] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698-1706.
- [12] 熊伟, 居辉, 许吟隆, 等. 气候变化对中国农业温度阈

- 值影响研究及其不确定性分析[J]. 地球科学进展, 2006, 21(1): 70-76.
- [13] Tauseef A Bhat, Latief Ahamd, R. Kotru. Relation between agrometeorological indices, crop phenology and yield of rice genotypes as influenced by real time N management[J]. Journal of Agrometeorology, 2015, 17(1): 90-97.
- [14] Sreenivas G, Reddy MD, Reddy DR. Agrometeorological indices in relation to phenology of aerobic rice[J]. Journal of Agrometeorology, 2010, 12(2): 241.
- [15] Jansen D. M. Potential rice yields in future weather conditions in different parts of Asia[J]. Netherlands J. Agric. Sci., 1990, 38, 661-680.
- [16] 郭建平, 马树庆编著. 农作物低温冷害监测预测理论和实践[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 1-62.
- [17] 姜丽霞, 季生太, 李帅, 等. 黑龙江省水稻空壳率与孕穗期低温的关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1725-1730.
- [18] 宋迎波, 王建林, 杨霏云, 等编著. 粮食安全气象服务[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 1-51.
- [19] 李秀芬, 贾燕, 黄元才, 等. 播栽期对水稻产量和产量构成因素及生育期的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 98-100.
- [20] 张鑫, 陈金, 江瑜, 等. 夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1349-1356.
- [21] 姜丽霞, 王铭, 朱海霞, 等. $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平对玉米不同发育期冷害的判定及其与产量的关系[J]. 中国农学通报, 2016, 32(36): 152-162.
- [22] 马树庆, 陈正洪, 王琪, 等. 水稻冷害评估技术规范[M]. 北京: 气象出版社, 2013: 1-5.
- [23] 杨霏云, 郭建平, 马树庆, 等. 北方春玉米冷害评估技术规范[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 1-5.
- [24] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [25] 姜丽霞, 王晾晾, 杜春英, 等. 1971-2014年黑龙江省春季气温演变特征及对作物播种期的影响[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 849-857.
- [26] 程彩霞. 水稻分蘖消长动态与产量的研究[J]. 中国稻米, 2007(1): 37-39.
- [27] 蔡威威, 万运帆, 艾天成, 等. 空气温度和CO₂浓度升高对晚稻生长及产量的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(6): 717-723.
- [28] 张玉芳, 刘琰琰, 赵艺, 等. 四川水稻产量及其构成要素对不同生育期气候因子的响应分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1459-1464.
- [29] 温克刚. 中国气象灾害大典黑龙江卷[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 7-259.

The Temporal Change of Three Air Temperature Factors and Relationship Between Air Temperature and Rice Yield in Very Cold Region

JIANG Lixia¹, GONG Lijuan¹, LIU Zeen², YU Yingnan¹, WANG Ming¹ and ZHAO Huiying¹

(1. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China;

2. Harbin Tonghe County Meteorological Bureau, Harbin 150030, China)

Abstract: Based on the meteorological observation data and rice yield data from 44 meteorological stations in a very cold region—Heilongjiang province, the growth season (from May to September) was divided into 15 research periods and each research period included ten days. By introducing the daily average air temperature, minimum air temperature and maximum air temperature and using mathematical statistics method, temporal distribution characteristics and mutation characteristics of three temperature factors was investigated, and the correlation between temperature and rice yield was analyzed. Results showed that the air temperature rose in each research period of the growth period in the study area from 1980 to 2014, and the minimum air temperature increased significantly. The air temperature raised quickly in the period between May and June, and minimum air temperature and maximum air temperature increased non-symmetrically. The air temperature factors mutated in mid-May, late-May, late-June, early-July, mid-July, mid-September and late-September during 1980 to 2014, mutation occurred mainly from the late 1980s to the early 21st century, the air temperature changed dramatically, it increased 1.2 ~ 2.2 °C after the mutation. During the study period, correlation between the air temperature factors and rice yield was significant in many research periods of the growth season in the study area ($P < 0.01$, $P < 0.05$), and the correlation was the most from May to July, the minimum air temperature was very significantly correlated to the rice yield. The correlation between the air temperature of single factor and rice yield was positively significant in the different research period during 1980 to 2014, which showed that the air temperature was favorable to rice yield and led to rice yield increasing. The each air temperature increased 1 °C, rice yield increased 307 ~ 7 222 kg/hm⁻².

Key words: very cold region; three factors of air temperature; the temporal change; rice yield