

魏子力. 黑龙江省气候生产力时空分布及粮食产量预测[J]. 陕西气象, 2021(2): 49-55.

文章编号: 1006-4354(2021)02-0049-07

# 黑龙江省气候生产力时空分布及粮食产量预测

魏子力<sup>1,2</sup>

(1. 信阳师范学院, 河南信阳 464000;

2. 河南省水土环境污染协同防治重点实验室, 河南信阳 464000)

**摘要:**为充分利用气候资源推动农业可持续发展,研究复杂地形条件下气候生产力的分布变化。利用黑龙江省 25 个站点 1961—2017 年逐年气温和降水量资料,基于 Thornthwaite Memorial 模型研究了气候变化对气候生产力的影响;采用线性回归法、克里金空间插值和相关统计方法研究气候生产力时空分布特征;利用灰色系统方法预估了未来 10 a 黑龙江省粮食产量变化特征。结果表明:(1)近 57 a 来黑龙江省年平均气温、年平均降水量和气候生产力均呈上升趋势,变化倾向率分别为  $0.28 \pm 0.11 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 、 $7.06 \pm 10.97 \text{ mm}/10 \text{ a}$  和  $117.05 \pm 52.67 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})$ 。(2)黑龙江省气候生产力存在显著空间差异,空间变化总体上呈由东南向西北和由东北向西南递减的特征,形成通河县、漠河市两个低值中心和以富锦市为中心的高值中心。影响黑龙江气候生产力最重要的因素是降水,其次是光热条件的综合影响。(3)预估未来 10 a 粮食产量将继续呈增长趋势,2030 年粮食理论产量可达  $11\ 162.04 \times 10^4 \text{ t}$ 。

**关键词:**气候生产力;粮食产量;黑龙江省

**中图分类号:** S162.3; F326.11

**文献标识码:** A

联合国政府间气候变化专门委员会发布的第四次和第五次气候变化评估报告指出:1880—2012 年期间,全球平均地表温度升高了  $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1850—1900 年时期和 2003—2012 年两个时期平均温度总升温幅度为  $0.78 \text{ }^\circ\text{C}$ , 预计 2030—2052 年间可能达到  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[1-2]</sup>, 这将使全球粮食产量面临重大挑战。因此加强对气候变化监测和预报对保障全球粮食安全具有重要作用。

气象因素对土地的影响比其它基本要素更为突出<sup>[3]</sup>。国内外已有大量有关气候变化对农作物产量影响的研究。Nelson G C 等<sup>[4]</sup>研究发现气温上升、降雨格局的变化和灌溉水量供应的变化对作物产量有重要影响。发达国家的粮食产量受气候因素的影响小于发展中国家,在没有人因素影响的条件下,东南亚、东亚、南亚、撒哈拉以南非洲和太平洋地区重要作物的产量都将大幅度下降。Piao 等<sup>[5]</sup>研究发现中国区域气候变暖延长了

作物的生长期,使得水稻种植向北扩展;受益于气温升高,中国北方温带气候区的作物产量增加,但害虫和疾病的活动范围可能相应扩大,导致作物减产。崔林丽等<sup>[6]</sup>研究了不同季节陆地净初级生产力对气候变暖的响应,结果发现我国四个季节的陆地净初级生产力都呈显著增加趋势,春季陆地净初级生产力增加速率最快,夏季陆地净初级生产力增加量最大;我国东部的多数地区、内蒙古东部、四川盆地、贵州东部、藏南和新疆西部陆地净初级生产力增长最高,在呼伦贝尔高原、鄂尔多斯高原、黄土高原、青藏高原东部和新疆西北部陆地净初级生产力降低最多。气候要素对我国陕西地区也有重要影响,郑小华<sup>[7]</sup>研究发现气候变暖使陕西农业生产的热量资源增加,但降水量减少,气候生产力降低。张小峰<sup>[8]</sup>研究得出汉中市热量条件较好,但降水量不足是限制气候生产潜力的主要因素,尤其是南部山区气候生产力潜力最大。

收稿日期:2020-06-23

作者简介:魏子力(1998—),男,甘肃兰州人,学士,主要从事气候变化研究。

黑龙江省是农业大省,也是我国商品粮生产的重要基地。黑龙江省的松嫩平原、三江平原和穆稜河—兴凯湖平原是我国东北大平原的一部分,平原面积辽阔,地势低平,广布肥沃的黑钙土,因此黑龙江省粮食产量位居我国首位且粮食品质优良。高永刚等<sup>[9]</sup>采用 WOFOST 作物生长模型分析了马铃薯气候生产力的空间分布特征,发现马铃薯不同气候栽培区的产量和稳定性迥异。李秀芬等<sup>[10]</sup>从玉米气候生产力的变化趋势及其空间差异入手,发现黑龙江省玉米产量在空间分布上均表现为由西南向东北逐渐减少,玉米实际单产与气候生产力比率仍有很大上升潜力。目前,研究黑龙江省气候变化对某一种农产品产量影响的研究较多,但从气候生产力的角度研究较少,且缺少 1960 年代资料的相关分析。本文利用 Thomthwaite Memorial 气候生产力模型和克里

金插值法对该省气候生产力的时空分布进行深入分析,对影响气候生产力的气象因素开展相关性分析,并利用 GM(2,1)模型对黑龙江省未来 10 a 的粮食总产量进行预测,以期分析该区域近 56 a 来农业气候资源和气候生产力的时空变化特征,揭示气候变化对气候生产力影响的时空规律,为正确调整农业生产布局,帮助农业领域应对气候变化提供理论依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

选用黑龙江省 1961—2017 年 25 个站点的逐月平均气温、平均降水量和年平均粮食产量资料。资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)和黑龙江省 1961—2017 年统计年鉴(<http://www.stats.gov.cn/>)。所用资料经过质量控制,具有良好的完整性和连续性。

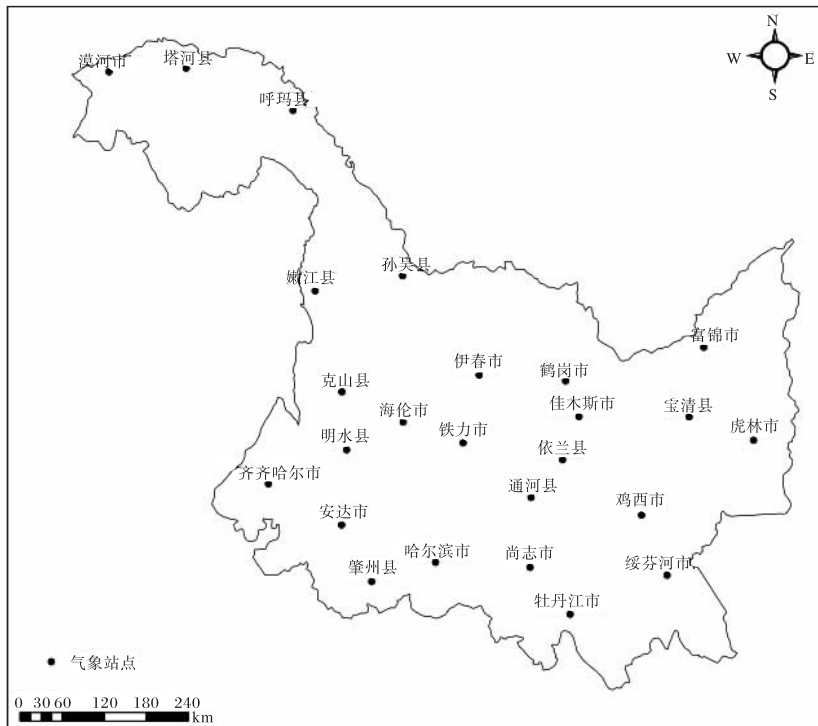


图 1 研究区气象站空间分布

### 1.2 研究方法

利用黑龙江省 25 个站点年平均气温和年平均降水量数据,在 Thornthwaite Memorial 模型的基础上分析了黑龙江各地的气候生产力;在线性回归和克里金插值法的支撑下分析了气候生产力的时

空变化,并用皮尔逊相关性分析法分析了影响气候生产力的因素;基于已知气候生产力数据,采用灰色系统方法预测未来 10 a 的粮食产量。

1.2.1 Thornthwaite Memorial 模型 气候生产力是指充分、合理地利用当地气候资源,而其它条

件处于最适宜状况时单位面积土地上可能获得的最高生物学产量<sup>[11]</sup>。计算气候生产力的方法有很多,诸如植被净初级生产力(NPP)模型、Miami模型、Memorial模型、Chicago模型、筑后数学模型等<sup>[9]</sup>。本文选择德国学者 Lieth 的方法,该学者依据植物生物产量与年平均气温、年降水量之间的关系,提出著名的 Thornthwaite Memorial 模型<sup>[12-14]</sup>:

$$P_V = 3000[1 - e^{-0.000956(V-20)}], \quad (1)$$

$$V = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1.05R/L)^2}}, \quad (2)$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3. \quad (3)$$

式中, $P_V$ 为气候生产力( $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ), $V$ 为年平均蒸散量( $\text{mm}$ ), $L$ 为年平均蒸发量( $\text{mm}$ ), $t$ 为年平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ), $R$ 为年降水量( $\text{mm}$ )。

该方法不受个别气象数据异常值的干扰,又能有效说明气候变化的影响,具有包含的环境因子较全面的优点,计算的结果优于其它模型<sup>[12-13]</sup>。

1.2.2 克里金插值法,又称空间局部估计或空间局部插值法,它是建立在变异函数理论及结构分析基础上,是在有限区域内对区域变化的取值进行无偏最优估计的一种方法。其实质是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未采样点的区域化变化的取值进行线性无偏、最优估计<sup>[15]</sup>。

1.2.3 皮尔逊相关性分析法 皮尔逊相关性分析是描述两个随机气候要素线性相关的统计量,主要是通过相关系数的计算与检验完成的。相关系数  $r_{xy}$ , 是表示两要素之间的相关程度的统计指标,其值介于  $[-1, 1]$  区间。 $r_{xy} > 0$ , 表示正相关,即两要素同向相关; $r_{xy} < 0$ , 表示负相关,即两要素异向相关。 $r_{xy}$  的绝对值越接近于 1, 表示两要素的关系越密切;越接近于 0, 表示两要素的关系越不密切<sup>[15]</sup>。

1.2.4 灰色系统方法 灰色系统是由我国学者邓聚龙教授于 20 世纪 80 年代首创的一种系统建模理论。该理论认为,客观世界,既是物质的世界,又是信息的世界。它既包含大量的已知信息,也包含大量的未知信息与非确定信息。未知的或非确定的信息称为黑色信息,已知信息称为白色

信息。既含有已知信息,又含有未知信息和非确定信息的系统,称为灰色系统。模型具备有不需大量样本且样本不需要有规律性分布就能准确预测未知信息的便捷性<sup>[15]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 气温和降水量时间序列变化特征

2.1.1 气温变化特征 图 2 展示了 1961—2017 年黑龙江省年平均气温时间序列变化特征。由图可知:黑龙江省年平均气温最大值和最小值分别出现在 2007 年和 1969 年,正距平最大值为  $1.64^{\circ}\text{C}$ , 负距平最小值为  $-2.09^{\circ}\text{C}$ 。一元线性回归拟合表明,黑龙江省年平均气温呈显著增加趋势,变化倾向率为  $0.28 \pm 0.11^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ (通过 0.05 显著性检验,下同)。计算相邻年份年平均气温的绝对值(差值正负仅表示年平均气温变化方向)可得黑龙江省年平均气温的变化幅度。黑龙江省年平均气温多年平均值为  $2.46 \pm 0.80^{\circ}\text{C}$ , 其中最大变幅出现在 1975 和 1976 年,变化幅度为  $1.87^{\circ}\text{C}$ , 最小变幅出现在 1967 和 1968 年,相邻两年年平均气温波动变化幅度极小。

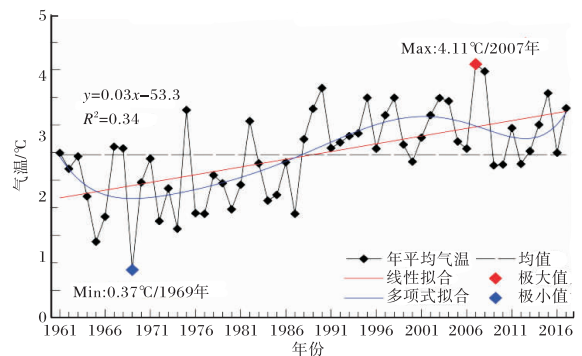


图 2 1961—2017 年黑龙江省年平均气温变化

就年代际变化而言,黑龙江省 20 世纪 70 年代气温较低,10 a 中有 9 a 气温为负距平,年代距平为  $-0.65^{\circ}\text{C}$ ;60 年代年平均气温以负距平为主,但其寒冷程度未超过 70 年代,年代均值仅比多年均值低  $0.04^{\circ}\text{C}$ ;80 年代年平均气温围绕均值剧烈波动,由于负距平强度较大,年代平均值为  $-0.05^{\circ}\text{C}$ ;90 年代开始黑龙江省年平均气温开始急剧上升,年平均气温除 2000 年之外绝大多数为正距平;21 世纪 00 年代年平均气温较多年平均值高  $0.61^{\circ}\text{C}$ ;2010 年后气温持续上升,2011—

2017年年平均气温较多年平均值高 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,介于前两个年代之间,高于20世纪90年代 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低于21世纪00年代 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.2 降水量变化特征 图3为1961—2017年黑龙江省年平均降水量时间序列变化特征。由图可知:黑龙江省年平均降水量最大值和最小值分别出现在2013年和2001年,正距平最大值为 $674.62\text{ mm}$ ,负距平最小值为 $-152.42\text{ mm}$ 。一元线性回归拟合表明,黑龙江省年平均降水量呈现微弱增加趋势,变化倾向率为 $7.06\pm 10.97\text{ mm}/10\text{ a}$ (通过 $0.05$ 显著性检验,下同)。计算相邻年份年平均降水量差值的绝对值(差值正负仅表示年平均降水量变化方向)可得黑龙江省年平均降水量的变化幅度。分析可知,黑龙江省年平均降水量多年平均值为 $514.47\pm 68.40\text{ mm}$ ,其中最大变幅出现在2001和2002年,变化幅度为 $179.31\text{ mm}$ ,最小变幅出现在2014和2015年,相邻两年平均降水量几乎没有发生变化。

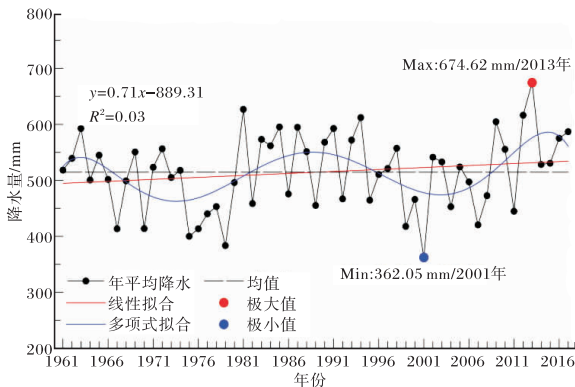


图3 1961—2017年黑龙江省年平均降水量

就年代际变化而言,黑龙江省20世纪70年代平均降水量较少,10 a中有7 a降水量为负距平,年代距平为 $-45.58\text{ mm}$ 。80年代降水量较多,10 a中有3 a降水量为负距平,年代距平 $31.60\text{ mm}$ 。20世纪60、90年代,21世纪00年代黑龙江省年平均降水量围绕均值剧烈波动,尽管正距平年份和负距平年份相当。但60年代、00年代负距平强度稍大,降水量距平平均值分别为 $-7.03\text{ mm}$ 和 $-3.20\text{ mm}$ ;90年代正距平强度稍大,该年代平均值为 $3.59\text{ mm}$ 。2010年后年平均降水量持续上升,2011—2017年平均降水量平均

为 $50.78\text{ mm}$ ,较80年代增多 $19.18\text{ mm}$ 。

## 2.2 气候生产力变化特征

2.2.1 时间序列变化特征 图4为黑龙江省近57 a气候生产力的时空变化特征。由图可知:近57 a来黑龙江省气候生产力总体呈波动上升趋势,变化倾向率为 $117.05\pm 52.67\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot 10\text{ a})$ ,气候生产力上升趋势通过了 $0.05$ 的显著性检验。气候生产力最高值为 $7492.88\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{a})$ ,出现在1990年;最低值为 $6036.23\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{a})$ ,出现在2001年;最高值和最低值的差值达 $1456.65\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{a})$ 。分析可知,黑龙江省年均气候生产力多年平均值为 $6846.77\pm 377.35\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{a})$ (通过 $0.05$ 显著性检验),其中最大变幅出现在2001和2002年,变化幅度为 $1213.89\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{a})$ ,最小变幅出现在1961和1962年,相邻两年气候生产力几乎没有发生变化。

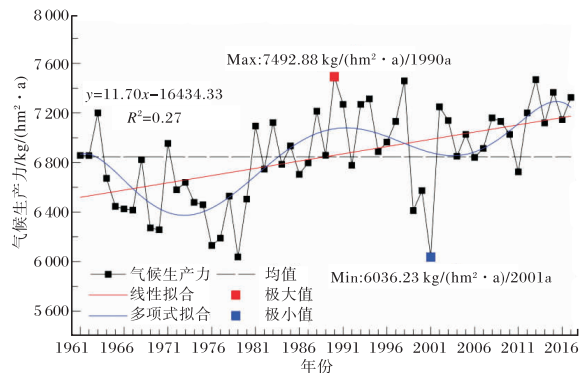


图4 1961—2017年黑龙江省气候生产力变化

就年代变化而言,黑龙江省20世纪70年代气候生产力较低,10 a中有9 a气候生产力为负距平,年代距平为 $-224.25\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot 10\text{ a})$ ,尽管60年代黑龙江省年气候生产力也以负距平为主,但远不及70年代气候生产力水平;80年代黑龙江省气候生产力迅速上升,于21世纪10年代达到最大值,10年代比前三个年代气候生产力分别增高 $217.85$ 、 $187.09$ 、 $255.09\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot 10\text{ a})$ 。

2.2.2 空间变化特征分析 如图5所示,黑龙江省气候生产力在空间分布上均存在明显的不均衡性。黑龙江省东北部的富锦市、鹤岗、虎林等地区的农业气候生产力较大,均在 $7500.00\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{a})$ 以上,气候生产力最大值在富锦市( $11413.30\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{a})$ );在黑龙江省中部和东北地区形成了两

个低值中心,均在  $3\,500\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  以下,最小值在通河县( $3\,101.10\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ),其次漠河市农业气候生产力也较低( $4\,162.53\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )。黑龙江省农业气候生产力的空间变化总体上呈由东南向西北和由东北向西南递减的特征,中部形成气候生产力低值中心,各站点的农业气候生产

力存在较大的差异。这说明黑龙江省热量资源空间分配的明显差异决定了黑龙江省气候生产力分布的不均,位于小兴安岭南麓山区的通河县和位于三江平原腹地的富锦市的气候生产力的差异说明地形地势的空间差异也是影响黑龙江省的气候生产力的因素之一。

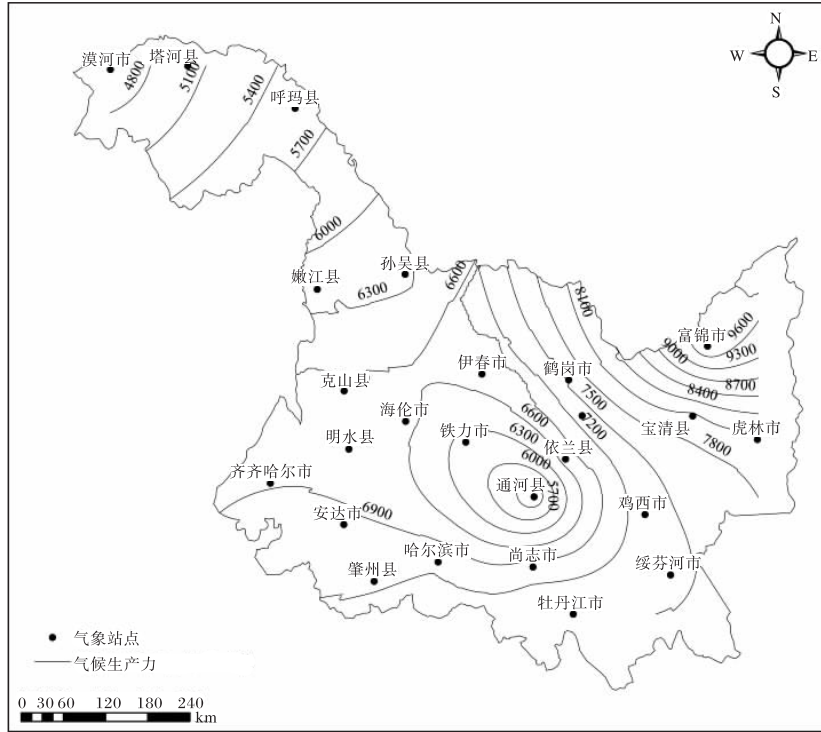


图5 黑龙江省气候生产力(单位: $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )空间分布

### 2.3 气候要素对气候生产力的影响

关于影响气候生产力的要素,皮尔逊相关分析表明:1961—2017年黑龙江省各气候要素与气候生产力之间呈强正相关。其中,与气候生产力相关性最高的为年平均降水量,二者的相关系数为0.72;其次为年平均气温,二者的相关系数为0.57。一元线性回归拟合表明:年平均气温对气候生产力最为敏感,年平均气温每升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ ,相当于该地气候生产潜力升高 $266.22 \pm 105.65\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (通过0.05显著性检验,下同);年平均降水量次之,年平均降水量每升高 $1\text{ mm}$ ,相当于该地气候生产力升高 $3.99 \pm 1.03\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。以上研究表明:年平均气温对气候生产力最敏感,年平均降水量的敏感性较低。F检验显示,回归方程的F统计量均大于0.05显著性水平的临界值,表明方

程均通过了0.05的显著性检验(表1)。

表1 影响黑龙江省气候生产力的气候要素检验

气候要素	$r$	$R^2$	$k/(\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a}))$	$F$
年平均气温	0.57**	0.32	$266.22 \pm 105.65$	25.50
年平均降水量	0.72**	0.53	$3.99 \pm 1.03$	30.73

注:\*\*表示通过 $p=0.01$ 的显著性检验; $r$ 为相关系数; $k$ 为回归系数; $R^2$ 为方差解释量; $F$ 为显著性检验统计量。

### 2.4 作物产量和潜在生产力的对比及预测

从2000年以来黑龙江省粮食产量、气候生产力及现实生产力分析结果(表2)可知,2000年以来,现实生产力所占的比例逐渐升高,在2010和2011年增长最快,两年增幅达到12.24%,在2014年达到饱和,这与我国农业技术提升和农业用地比例大幅度增长有密切的关系。

表 2 21 世纪 00 年代以来黑龙江省粮食产量、气候生产力及现实生产力所占比例

年份	粮食产量 /(10 <sup>4</sup> t)	气候生产力 /(kg/(hm <sup>2</sup> ·a))	现实生产力 所占比/%	年份	粮食产量 /(10 <sup>4</sup> t)	气候生产力 /(kg/(hm <sup>2</sup> ·a))	现实生产力 所占比/%
2000	2 545.50	6 573.78	38.72	2009	4 788.87	7 131.88	67.15
2001	2 651.70	6 036.23	43.93	2010	5 632.86	7 027.57	80.15
2002	2 941.20	7 250.11	40.57	2011	6 212.57	6 723.98	92.39
2003	2 512.30	7 139.69	35.19	2012	6 598.60	7 200.25	91.64
2004	3 001.00	6 849.88	43.81	2013	7 055.11	7 468.91	94.46
2005	3 092.00	7 027.39	44.00	2014	7 403.80	7 120.19	103.98
2006	3 843.5	6 840.79	56.19	2015	7 615.78	7 367.08	103.38
2007	3 880.98	6 914.66	56.13	2016	7 416.13	7 145.08	103.79
2008	4 627.26	7 159.46	64.63	2017	7 410.34	7 324.48	101.17

以 2000—2017 年黑龙江省统计年鉴中的粮食总产量为原始数据,建立 GM(2,1)预测模型,根据模型计算得到 2021—2030 年黑龙江省粮食产量预测值见表 3。根据 2010—2017 年黑龙江省粮食总产量已知数据,在灰色系统方法的支撑下,预估 2021—2030 年黑龙江省粮食产量依旧保持高速增长的趋势,在 2030 年达到历史最高峰,产量达到  $11\ 162.04 \times 10^4 \text{ t}$ 。

表 3 黑龙江省粮食产量预测值

年份	粮食潜力/10 <sup>4</sup> t	年份	粮食潜力/10 <sup>4</sup> t
2021	8 644.00	2026	9 962.98
2022	8 892.89	2027	10 250.15
2023	9 148.83	2028	10 545.38
2024	9 412.82	2029	10 849.67
2025	9 683.87	2030	11 162.04

### 3 结论与讨论

利用黑龙江省 25 个气象站 1961—2017 年平均气温、年平均降水量数据,分析了近 57 a 来该地区平均气温、平均降水量气候因子的时空变化特征,采用 Thornthwaite Memorial 模型计算气候生产力,并探讨了气候变化对该地区气候生产力的影响,主要结论如下。

(1)黑龙江省 1961—2017 年年平均气温、年平均降水量和气候生产力都呈现显著的上升趋势,率化倾向率分别为  $0.28 \pm 0.11 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 、 $7.06$

$\pm 10.97 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 、 $117.05 \pm 52.67 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})$ ,多年平均值分别为  $2.46 \pm 0.80 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $514.47 \pm 68.40 \text{ mm}$  和  $6\ 846.77 \pm 377.35 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。其中,年均温和气候生产力的上升幅度最快。

(2)黑龙江省农业气候生产力具有显著的空间差异,气候生产力的空间变化总体上呈由东南向西北和由东北向西南递减的特征,形成通河县、漠河县为中心的两个低值中心和一个以富锦市为中心的高值中心。黑龙江省气候生产力和年平均降水量紧密相关,也对年平均气温最敏感。

(3)2000 年以来,黑龙江省作物现实生产力所占的比例逐渐升高,2014 年黑龙江省粮食现实生产力已达饱和。由灰色预测模型可知,黑龙江省未来 10 a 粮食潜力很大,粮食产量呈增长趋势,到 2030 年粮食总产量可达  $11\ 162.04 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(4)本研究的不足之处在于仅分析了逐年尺度黑龙江省历史气候变化特征、气候生产潜力变化及未来粮食产量变化趋势,在时间尺度划分上较为粗略。同时,仅使用一种气候生产力模型略显单薄,后期应详细划分研究尺度,利用多模式对比,从而为黑龙江省应对气候变化提供更精细的科学依据。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel

- on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-12.
- [2] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PÖRTNER H-O, et al. Global warming of 1.5 °C [R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018.
- [3] 郝任侠, 黄峰丽. 气候生产潜力是耕地质量评定因素之一[J]. 陕西气象, 1996(4): 27-27.
- [4] NELSON G C, ROSEGRANT M W, KOO J, et al. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation [M]. International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2009.
- [5] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [6] 崔林丽, 史军, 唐娉, 等. 中国陆地净初级生产力的季节变化研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 8-16.
- [7] 郑小华. 气候变暖对陕西农业生产的影响[J]. 陕西气象, 2005(6): 15-18.
- [8] 张小峰, 史平, 王欣. 汉中气候生产潜力的估算及其分布[J]. 陕西气象, 2010(4): 8-10.
- [9] 高永刚, 那济海, 顾红, 等. 黑龙江省马铃薯气候生产力特征及区划[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(3): 275-280.
- [10] 李秀芬, 赵慧颖, 朱海霞, 等. 黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2016(8): 2561-2570.
- [11] 韩玮, 韩永红, 杨沈斌. 1961—2011年山东气候资源及气候生产力时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(3): 425-434.
- [12] 李建新. 普宁市植被净初级生产力对气候变化的响应[J]. 广东气象, 2011(1): 49-51.
- [13] 李颜颜, 康国华, 张鹏岩, 等. 基于 Thornthwaite Memorial 模型的近 54 年河南省农业气候生产力时空变化特征分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 287-293.
- [14] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 等. 青海三江源区果洛藏族自治州草地退化成因分析 [J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6577-6586.
- [15] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 115-119.