

吉林省春玉米生产潜力及其敏感性分析

陈霞燕^{1,2} 王连喜^{1,2} 任景全³ 郭春明³ 李琪^{1,2} 李莹莹^{1,2}

(¹江苏省农业气象重点实验室, 210044, 江苏南京; ²南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 210044, 江苏南京; ³吉林省气象科学研究所, 130062, 吉林长春)

摘要 基于“作物生长动态统计”模型计算吉林省春玉米光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力, 运用敏感系数法计算并分析了生产潜力对全生育期平均气温和降水的敏感性。结果表明: 春玉米光合生产潜力和光温生产潜力在吉林省由西向东呈递减趋势, 中部的气候生产潜力最大, 为 17 266kg/hm², 西部和东部分别为 10 787、16 983kg/hm²; 西部、中部和东部生产潜力气温影响率分别为 20.1%、19.5% 和 30.9%; 生产潜力降水影响率分别为 50.9%、17.6% 和 3.2%; 西部和中部的敏感系数均值分别为 1.77 和 1.99, 西部最大为 3.63; 西部的降水敏感系数均值最大, 为 1.6, 东部则形成了低值区。

关键词 春玉米; 气候生产潜力; “作物生长动态统计”模型; 气候变化

随着全球平均气温的逐渐升高, 极端天气的出现频率增加, 对粮食生产安全带来了严重影响。周曙东等^[1]认为气候变化将使农业生产的不稳定性增加、产量波动增大、农业生产布局和结构发生改变。同时, 会导致环境条件日益恶化、物种丰富度下降、景观生态的脆弱性增强等^[2]。魏凤英等^[3]研究表明, 过去几十年, 东北地区玉米光温生产潜力呈显著上升趋势, 而气候生产潜力呈下降趋势。袁彬等^[4]研究得出, 气候变化使东北玉米不同品种的种植界限不断北移东扩, 其气候生产潜力的高值区逐渐北移。陈群等^[5]研究表明, 温度与吉林省春玉米产量关系主要表现为与东部地区呈正相关, 而与西部地区呈负相关。

作物生产潜力的研究不仅可以揭示作物生育规律、产量形成与环境条件的关系, 还可以明确作物对气候、土壤等资源的利用程度以及产量形成的限制因素。“作物生长动态统计”模型是计算作物生产潜力最具代表性的工具, 按常用的三级(光合潜力、光温潜力、气候潜力)来计算, 并按作物发育期分别计算生产潜力^[6]。目前, 已有很多应用“作物生长动态统计”模型和其他模型对农业生产潜力预测的研究。王宗明等^[7]对松嫩平原各县市主要作物的农业气候生产潜力进行了计算, 并分析了各地

农业自然资源利用率的分布差异; 郭建平等^[8]分析了我国西部农业气候资源对作物的影响系数和气候生产潜力, 指出限制该区域农业气候资源高效利用的主要因子是频繁的农业气象灾害和不合理的农业结构, 为西部地区的农业发展提供了科学依据; Zhong 等^[9]利用“作物生长动态统计”模型方法, 计算了三峡库区水稻、玉米、冬小麦的气候产量及三峡水库蓄水后气候生产潜力的变化情况。

吉林省是我国重要的商品粮生产基地, 其西部和中部地区为平原区, 是吉林省的主要粮食产区, 绝大部分种植玉米^[10]。在全球气候变暖的背景下, 干旱、洪涝等气象灾害给东北地区农作物带来了严重影响^[11]。为此, 研究气候变化背景下吉林省春玉米生产潜力的时空变化及其影响因子尤为重要。吉林省春玉米种植区地理特征存在空间差异, 降水量、太阳辐射等空间分布不均, 大多数研究将吉林省作为一个整体来计算生产潜力值。本研究将吉林省春玉米种植区划分为西部、中部和东部 3 个地区, 根据“作物生长动态统计”模型结合当地实际情况划分春玉米的生育期, 对太阳辐射系数本地化取值, 细化计算全生育期春玉米光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力, 并通过影响率及敏感系数对该模型及气候影响因子进行分析, 以期对吉林省春玉米的生产提供理论支撑。

1 资料与方法

1.1 研究区域和数据来源

吉林省属于温带大陆性季风气候, 四季分明,

作者简介: 陈霞燕, 硕士, 主要研究方向为农业气象

王连喜为通信作者, 教授, 主要从事农业气象、生态气象、卫星遥感技术应用研究

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001); 吉林省气象局青年基金项目(2014006); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206018)

收稿日期: 2016-07-25; 修回日期: 2016-10-17

雨热同季。年均气温 2~6℃，气温日较差 10~14℃；全年无霜期 100~160d；年平均日照时数 2 259~3 016h；年平均降水量 400~600mm，季节和区域差异较大，80%的降水集中在夏季，以东部降水量最为丰沛。吉林省地形地貌大致是东南部高、西北部低，形成了山地、丘陵、平原三大地貌类型，主要分为西部沙丘覆盖的冲积平原区、中部台地平原区和东部山地丘陵区。西部和中部地势平坦，是玉米的集中产区，素有“黄金玉米带”之称。

本研究气象资料为 1961-2015 年吉林省 50 个

研究站点的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数等，数据来源于吉林省气象局。春玉米生育期数据来源于 1981-2010 年农业气象观测资料记录。根据《中国气象地理区划手册》^[12]和吉林省地区特点、农业气候特征，以县级为划分单元进行划分，春玉米种植分区情况和研究站点分布见表 1。

1.2 春玉米生产潜力的计算

1.2.1 光合生产潜力 光合生产潜力 (Y_1) 计算公式为：

表 1 研究区域和站点分布
Table 1 The study districts and distribution for the sites

区域 District	站点 Site
西部地区 Western region	扶余, 大安, 洮南, 前郭, 白城, 镇赉, 松原, 乾安, 通榆, 长岭
中部地区 Central region	德惠, 东丰, 九台, 梨树, 辽源, 双阳, 公主岭, 伊通, 长春, 四平, 农安, 榆树, 双辽
东部地区 Eastern region	安图, 白山, 敦化, 东岗, 二道, 和龙, 通化县, 柳河, 临江, 龙井, 舒兰, 磐石, 梅河口, 吉林城郊, 集安, 辉南, 延吉, 长白, 通化, 汪清, 烟筒山, 图们, 永吉, 蛟河, 靖宇, 琿春, 桦甸

$$Y_1=Cf(Q)=k\Omega\varepsilon\phi(1-\alpha)(1-\beta)(1-\rho)(1-\gamma)(1-\omega)sf(L)(1-\eta)^{-1}(1-\delta)^{-1}q^{-1}\sum Q_j \quad (1)$$

式中： Y_1 为光合生产潜力，kg/hm²； C 为单位换算系数； K 为面积系数； Q_j 为作物生育期内的太阳总辐射，MJ/m²； q 为单位干物质含热量，MJ/kg；其他参数的意义及取值见文献 [13]。

$$Q=(a+b\frac{n}{N})R_a \quad (2)$$

式中： R_a 为大气外太阳辐射通量，MJ/(m²·d)； n 为日照时数，h； N 为太阳从日出到日没的时间，即可照时数，h； n/N 为日照百分率，%； $a+b$ 为大气外太阳辐射在晴天状况下 ($n=N$) 到达地球表面的部分^[14]。

1.2.2 光温生产潜力 光温生产潜力计算公式为：

$$Y_2=f(T)\cdot Y_1 \quad (3)$$

式中： Y_2 为光温生产潜力，kg/hm²； $f(T)$ 为作物光合作用的温度订正函数。

本研究以春玉米三基点温度指标为基准，这是因为生育期内平均气温达到作物的最适温度时，作物的潜在产量将主要由生育期内水分的供给和配合的程度决定^[6]。因此，将生育期内平均气温低于和超出春玉米生长发育下限温度和上限温度时的情况视为不适宜的温度条件，以此来反映温度对潜在产量的影响程度。

$$f(T)=\frac{(T-T_1)(T_2-T)^B}{(T_0-T_1)(T_2-T_0)^B} \quad (4)$$

$$B=\frac{(T_2-T_0)}{(T_0-T_1)} \quad (5)$$

两式中： T 是某一时段的平均气温， T_1 、 T_2 和 T_0 分别是该时段内春玉米生长发育的下限温度、上限温度和最适温度； $f(T)$ 是由 T 、 T_1 、 T_2 和 T_0 决定的值为 0~1 的不对称抛物线函数。本研究将春玉米生育期划分为播种 - 出苗、出苗 - 拔节、拔节 - 抽雄、抽雄 - 乳熟和乳熟 - 成熟 5 个阶段，分别计算 $f(T)$ 。根据东北地区春玉米生长的气候条件以及参考《大宗作物气象服务手册》^[15]和《实用农业气象指标》^[16]，吉林春玉米各阶段 T_0 、 T_1 和 T_2 的取值见表 2。

表 2 春玉米各生育期三基点温度
Table 2 Three point temperature of spring maize in every growth period

生育时期 Development period	T_0	T_1	T_2
播种 - 出苗 Sowing-emergence	12	8	35
出苗 - 拔节 Emergence-jointing	20	10	38
拔节 - 抽雄 Jointing-heading	26	18	38
抽雄 - 乳熟 Heading-milk maturity	27	19	30
乳熟 - 成熟 Milk maturity-maturity	22	16	30

1.2.3 气候生产潜力 气候生产潜力计算公式为：

$$Y_3=Y_2\cdot f(p) \quad (6)$$

式中： Y_3 为春玉米的气候生产潜力，kg/hm²； $f(p)$ 为水分订正函数。主要从两个方面考虑 $f(p)$ ：一是降水量小于作物生育期内最大蒸腾蒸发量时，生产潜力不能达到最大潜力值的情况^[14]；二是降水量

大于作物生育期内最大蒸腾蒸发量时, 能够满足作物生育期对水分的需求, 对生产潜力不构成限制的情况。其计算公式为:

$$f(P) = \begin{cases} 1 - K_y \times (1 - P / ET_m) & (P < ET_m) \\ 1 & (P > ET_m) \end{cases} \quad (7)$$

$$ET_m = K_1 \cdot ET_0 \quad (8)$$

式中: P 为降水量; K_y 为作物反应系数, 春玉米取值 1.25; K_1 为作物系数, 采用中国气象局行业标准《北方春玉米干旱等级》^[17] 推荐的吉林春玉米作物系数; ET_0 为参考作物蒸散量, 采用 FAO Penman-Monteith 公式计算; ET_m 为春玉米生育期内实际蒸腾蒸发量。

1.2.4 生产潜力影响率计算 分别将光合生产潜力和光温生产潜力作为上限, 分析气温修正和水分修正得出的光温生产潜力和气候生产潜力的修正效果。具体计算公式为: 温度(降水)影响率(%) = (光合/光温生产潜力 - 光温/气候生产潜力) / 光合/光温生产潜力 × 100, 由该公式可知, 影响率值越大说明该气象因子对生产潜力的影响越大, 反之亦然。

1.3 敏感性分析和敏感系数

气候倾向率是表征气象要素多年变化趋势的指标, 一般用气候要素时间序列的回归直线的斜率的 10 倍表示。 X_i 表示样本量为 n 的某气候变量, t_i 表示 x_i 对应的时间, 建立 x_i 与 t_i 之间的回归方程^[18]:

$$DY = 10 \times b \quad (9)$$

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1, n) \quad (10)$$

式中: DY 为作物 10 年的作物生产潜力倾向率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{a})$; a 为回归常数, b 为回归系数, a 和 b 用最小二乘法估计得到; i 表示时间序列的第 i 年; 气候倾向率等于回归系数 b 的 10 倍, $10b$ 或 $\text{mm}/10\text{a}$ 。

采用敏感系数法^[19-20], 用气象要素(温度和降水)相对变化量与单个气象因子相对变化量之比计算, 即:

$$S_{Vi} = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \frac{\Delta Y_i / Y_i}{\Delta V_i / V_i} = \frac{\partial Y_i}{\partial V_i} \cdot \frac{V_i}{Y_i} \quad (11)$$

式中: S_{Vi} 是生产潜力 Y_i 对气象因子 V_i 的敏感系数, 无量纲。公式(11)通过相对变量把相关气象因子无量纲化, 便于不同因子间的比较分析。敏感系数的正(负)表明生产潜力随气象因子的增加而增加(减少); 其绝对值的大小表示生产潜

力的变化对相应气象因子变化的敏感程度, 绝对值越大表示生产潜力对该要素的变化越敏感; 反之则越不敏感。

1.4 数据处理

春玉米生产潜力通过 MatLab 编程计算得出, 利用 ArcGIS 的反距离权重法进行空间插值作图; 春玉米生产潜力的空间趋势分析, 各气候因子随时间变化的趋势分析用 SPSS 完成。

2 结果与分析

2.1 春玉米生产潜力空间分布特征

由表 3 可知, 吉林省春玉米光合生产潜力从西向东呈递减趋势。春玉米种植区光合生产潜力平均值为 $26\ 328\text{kg}/\text{hm}^2$ 。其中, 西部地区光合生产潜力最高, 为 $27\ 842\sim 29\ 053\text{kg}/\text{hm}^2$; 中部地区光合生产潜力次之, 为 $26\ 631\sim 27\ 842\text{kg}/\text{hm}^2$; 东部地区光合生产潜力最低, 为 $22\ 997\sim 26\ 631\text{kg}/\text{hm}^2$ 。春玉米光温生产潜力分布特征与光合生产潜力一致, 从西向东呈递减趋势, 西部、中部和东部地区光温生产潜力均值分别为 $22\ 267$ 、 $21\ 309$ 和 $17\ 533\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

春玉米气候生产潜力空间分布由西向东呈低 - 高 - 低的变化趋势, 全区平均为 $15\ 918\text{kg}/\text{hm}^2$ 。西部气候生产潜力平均为 $10\ 787\text{kg}/\text{hm}^2$, 其中, 洮南最低, 为 $9\ 077\text{kg}/\text{hm}^2$; 中部气候生产潜力平均为 $17\ 266\text{kg}/\text{hm}^2$, 四平站最高, 为 $19\ 880.11\text{kg}/\text{hm}^2$; 东部气候生产潜力为 $7\ 923.75\sim 21\ 294.15\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

2.2 春玉米生产潜力时间变化

1961-2015 年吉林省 80% 的站点春玉米生育期光合生产潜力呈下降趋势, 主要集中在西部地区, 其中光合生产潜力减少达到显著和极显著的站点分别占全省的 8% 和 50% (表 4)。有 32% 的站点春玉米生育期光温生产潜力呈减少趋势, 其中光温生产潜力减少达到显著和极显著的站点分别占全省的 4% 和 30%。有 58% 的站点春玉米生育期气候生产潜力呈减小趋势, 主要集中在西部和东部地区, 其中气候生产潜力减少达到显著和极显著的站点分别占全省的 2% 和 18% (表 4)。

2.3 春玉米生产潜力影响率分析

气温和降水量对吉林春玉米生产潜力影响率结果见图 1。西部、中部和东部春玉米光温生产潜力受气温影响率分别为 20.1%、19.5% 和 30.9%,

表3 春玉米生产潜力空间变化
Table 3 Spatial change of spring maize production potential

站点 Site	Y ₁	Y ₂	Y ₃	站点 Site	Y ₁	Y ₂	Y ₃
舒兰 Shulan	26 850.52	19 948.68	19 178.90	白山 Baishan	24 239.16	16 574.18	16 564.09
通化 Tonghua	25 210.39	19 518.59	19 518.59	临江 Linjiang	24 432.12	18 995.27	18 995.27
永吉 Yongji	26 415.39	20 821.71	20 143.78	集安 Ji'an	24 763.37	21 478.55	21 294.15
双阳 Shuangyang	26 448.45	20 743.81	18 679.46	长白 Changbai	25 268.92	8 156.78	7 923.75
蛟河 Jiaohu	25 775.30	18 207.57	17 714.73	白城 Baicheng	28 018.55	21 646.82	9 529.32
敦化 Dunhua	25 067.98	12 904.21	12 513.37	洮南 Taonan	28 890.79	23 414.84	9 077.88
安图 Antu	24 285.80	14 519.03	13 976.35	镇赉 Zhenlai	28 446.12	22 367.24	9 945.62
汪清 Wangqing	24 467.99	16 093.11	14 783.78	大安 Da'an	29 054.21	23 179.18	11 070.41
辽源 Liaoyuan	26 233.89	21 279.99	19 656.92	松原 Songyuan	27 520.31	22 327.15	11 875.21
东丰 Dongfeng	27 566.14	21 102.77	17 266.36	乾安 Qian'an	27 623.70	22 427.60	10 765.50
磐石 Panshi	26 107.96	19 856.23	19 309.50	前郭 Qianguo	27 725.69	22 580.93	12 050.67
图们 Tumen	22 995.50	16 898.60	15 993.45	通榆 Tongyu	27 977.29	22 984.32	9 334.00
柳河 Liuhe	26 268.61	20 353.32	19 891.71	长岭 Changling	27 310.05	22 141.09	11 480.67
桦甸 Huadian	25 537.65	19 598.15	19 498.04	扶余 Fuyu	26 435.26	19 609.74	12 746.97
辉南 Huinan	26 374.00	20 277.44	19 717.49	农安 Nong'an	27 491.22	21 877.96	15 645.30
靖宇 Jingyu	25 634.29	14 487.66	14 422.83	德惠 Dehui	26 965.09	13 467.72	13 422.03
东岗 Donggang	26 116.89	12 889.15	12 889.15	九台 Jiutai	26 891.11	21 661.31	18 048.12
二道 Erdao	25 804.78	11 459.87	11 431.66	榆树 Yushu	27 566.14	21 102.77	17 266.36
和龙 Helong	24 634.39	15 715.69	14 728.27	双辽 Shuangliao	28 701.25	24 052.79	15 515.88
龙井 Longjing	24 975.39	18 955.80	17 501.82	梨树 Lishu	27 534.60	23 160.29	18 772.67
珲春 Hunchun	23 430.21	17 178.12	16 307.89	伊通 Yitong	26 970.93	20 595.48	18 669.78
延吉 Yanji	24 711.55	18 692.70	16 832.66	四平 Siping	27 125.30	22 875.11	19 880.11
长春 Changchun	27 382.36	22 189.90	18 213.50	梅河口 Meihekou	26 490.31	20 753.93	19 799.12
通化县 Tonghuaxian	25 146.90	18 180.69	18 194.58	公主岭 Gongzhuling	27 675.85	22 915.47	18 461.87
烟筒山 Yantongshan	26 177.22	20 366.88	19 915.91	吉林城郊 Jilinchengjiao	25 691.01	20 518.14	19 526.52

表4 春玉米生产潜力倾向率
Table 4 Changing trends of spring maize production potential

站点 Site	DY ₁	DY ₂	DY ₃	站点 Site	DY ₁	DY ₂	DY ₃
舒兰 Shulan	-218.40**	445.54**	418.48	白山 Baishan	6.45 ^ˆ	469.93	469.93
通化 Tonghua	-194.47**	166.03	166.03	临江 Linjiang	-314.49	-174.86	-174.86
永吉 Yongji	43.35**	414.38**	874.16	集安 Ji'an	-208.80	-38.69	-123.58
双阳 Shuangyang	-174.26	217.07	-175.85	长白 Changbai	29.871	1 071.30	982.44
蛟河 Jiaohu	-355.80**	69.62**	75.52	白城 Baicheng	-510.77	60.36	-285.42
敦化 Dunhua	-356.57**	1 081.10**	1 087.70	洮南 Taonan	-95.54	466.00	-202.86
安图 Antu	-216.88**	419.10**	569.03	镇赉 Zhenlai	36.98	486.10	192.22
汪清 Wangqing	-78.57**	351.92**	332.78	大安 Da'an	-383.45	54.46	290.97
辽源 Liaoyuan	-278.56**	-52.32**	-230.81	松原 Songyuan	-125.47	478.84	430.00
东丰 Dongfeng	-102.35**	274.57**	-245.94	乾安 Qian'an	-641.22	-99.29	81.56
磐石 Panshi	-323.60**	16.38**	-94.31	前郭 Qianguo	-320.88	136.84	91.01
图们 Tumen	563.81**	1 051.30	1 227.60	通榆 Tongyu	-568.25	130.40	-447.63
柳河 Liuhe	-675.66**	-182.14**	-232.92	长岭 Changling	-721.58	-136.92	-721.27
桦甸 Huadian	-400.57**	-86.77**	-114.38	扶余 Fuyu	-988.59	-255.80	233.90
辉南 Huinan	-368.70**	-8.82**	-113.55	农安 Nong'an	-34.78	65.33	-549.32
靖宇 Jingyu	-254.10**	632.76 ^ˆ	641.00	德惠 Dehui	-391.42	988.38	991.39
东岗 Donggang	-319.04**	204.51 ^ˆ	204.51	九台 Jiutai	-369.60	115.40	-138.25
二道 Erdao	74.82**	1 039.40	1 041.60	榆树 Yushu	-102.35	274.57	-245.94
和龙 Helong	-270.90**	21.23	-3.34	双辽 Shuangliao	-471.80	-297.88	75.63
龙井 Longjing	-416.55**	-51.76	158.23	梨树 Lishu	-184.13	261.00	-160.73
珲春 Hunchun	42.21**	744.30	884.82	伊通 Yitong	386.95	805.99	328.04
延吉 Yanji	40.79**	282.24	118.25	四平 Siping	-955.59	-510.10	-808.48
长春 Changchun	-139.40	425.82	134.33	梅河口 Meihekou	-437.32	40.16	-167.83
通化县 Tonghuaxian	-733.92**	-62.30	-62.30	公主岭 Gongzhuling	114.21	517.18	-75.46
烟筒山 Yantongshan	-433.47**	-203.29**	-151.75	吉林城郊 Jilinchengjiao	-693.62	-184.01	-191.16

注：* 和 ** 分别为显著性水平 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ ，下同
Notes: * and ** represent significance level of $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively, the same below

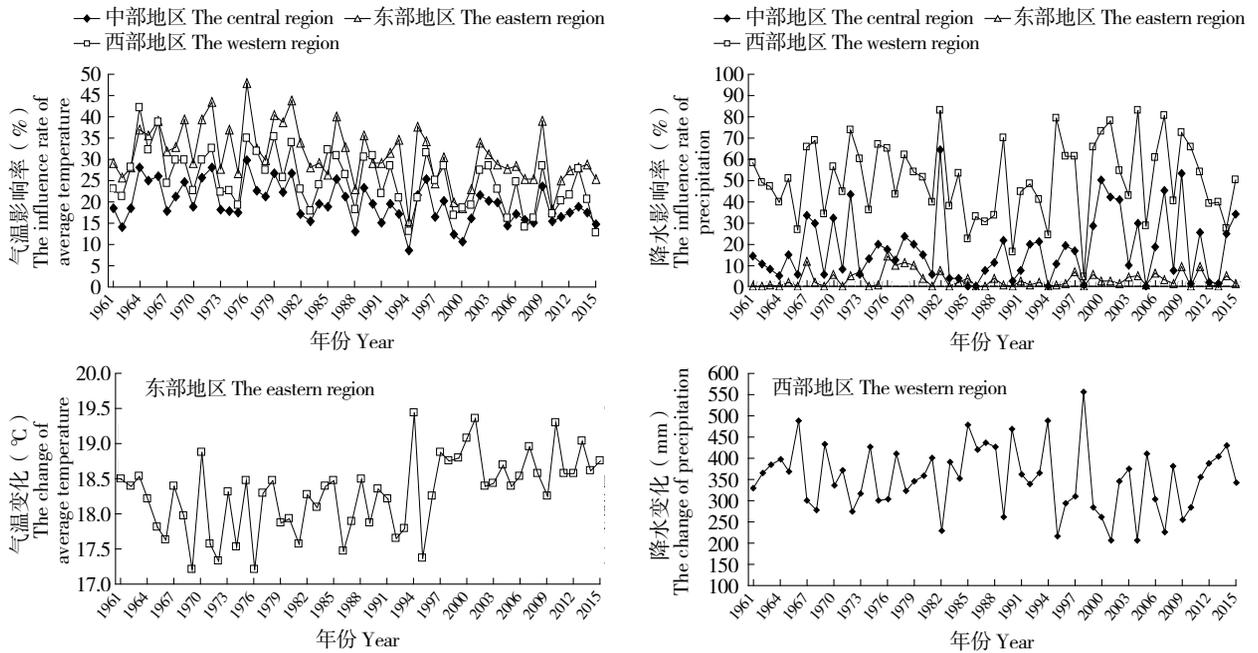


图 1 春玉米气温和降水影响率的时空分布

Fig.1 Temporal and spatial distribution of the influence rate of temperature and precipitation on spring maize

表明气温对东部光温生产潜力的影响较大。1961-2015 年东部地区气温变化, 东部春玉米生育期平均气温在 1976 年达到最低, 为 17.2 , 相应的气温影响率达到最高值, 为 48.0% ;1994 年平均气温最高, 为 19.4 , 气温影响率达到最低值, 为 15.4%。由此说明, 气温修正效果明显, 且与实际情况基本一致。

吉林省西部、中部和东部春玉米光温生产潜力订正为气候生产潜力时的降水影响率分别为 50.9%、17.6% 和 3.2% (图 1), 说明降水对西部气候生产潜力影响较大。由图 1 可知, 西部地区生育期平均降水量在 1982 年达到最小值, 为 228mm, 降水影响率为 83.0% ;1998 年的生育期平均降水量最大, 为 559mm, 此时降水影响率达到最小值为 5.8%。这表明水分修正的效果明显, 且逐级订正所得到的气候生产潜力与实际情况基本一致。

2.4 春玉米生育期气候因子敏感性分析

2.4.1 主要气象要素的变化 表 5 显示, 1961-2015 年吉林春玉米种植区全部站点生育期的平均气温呈升高趋势, 其中差异达到显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 的站点分别占全区的 2% 和 88%, 西部和中部地区增温明显。82% 的站点春玉米生育期降水量呈减少趋势, 其中差异达到显著的站点占全区的 4%, 西部和中部地区均以减少为主。

2.4.2 春玉米生产潜力对生育期气象因子的敏感性分析 1961-2015 年吉林春玉米光温 (气候) 生产潜力对生育期气温 (降水) 的敏感系数空间分布见表 6。由表 6 可知, 春玉米对平均气温的变化呈正效应。其中, 西部地区和中部地区的气温敏感系数范围分别为 0.08~3.44 和 0.02~3.93, 平均值分别为 1.77 和 1.99 ;东部地区的气温敏感系数范围为 0.50~8.90, 平均为 3.63。说明东部地区春玉米光温生产潜力对气温最为敏感, 中部次之, 西部最小。高值区主要分布在山地丘陵区, 包括敦化、二道和长白等气象站点。长白山附近常年积雪, 热量资源较差, 全生育期平均气温往往达不到春玉米的生长要求, 对气温的敏感性也最强, 这与实际情况相符。

吉林省春玉米气候生产潜力对生育期降水量的敏感系数具有明显的空间分布特征, 由西向东依次呈递减的趋势, 西部和中部降水敏感系数分别为 1.60 和 1.23, 说明西部春玉米气候生产潜力对降水量最为敏感。与降水在吉林省的空间分布状况基本保持一致: 西部地区属于干旱半干旱地区, 当地春玉米产量往往因为降水不足而减产, 因此西部地区春玉米对降水敏感性较强; 中部地区属于湿润半湿润地区, 降水相对充足, 春玉米生产潜力相对最大; 而东部地区水资源丰富, 有 13 座大型水库, 吉林省 98% 水资源都分布在东部地区, 因此该地区春玉米对降水敏感性较差甚至呈负敏感。

表5 春玉米生育期气候因子气候倾向率
Table5 Change trends of climate factors of spring maize in every growth period

站点 Site	平均气温 (/10a) Average temperature	降水 (mm/10a) Precipitation	站点 Site	平均气温 (/10a) Average temperature	降水 (mm/10a) Precipitation
舒兰 Shulan	0.25**	-5.25	白山 Baishan	0.22	-8.82
通化 Tonghua	0.17**	-1.39	临江 Linjiang	0.08	-6.93
永吉 Yongji	0.21**	8.89	集安 Ji'an	0.13**	-15.41
双阳 Shuangyang	0.22**	1.58	长白 Changbai	0.30**	-17.15
蛟河 Jiaohu	0.15**	-5.02	白城 Baicheng	0.26**	-12.95
敦化 Dunhua	0.32**	-9.13	洮南 Taonan	0.29**	-10.4
安图 Antu	0.14**	-1.03	镇赉 Zhenlai	0.24**	-2.46
汪清 Wangqing	0.13**	-6.31	大安 Da'an	0.21**	1.28
辽源 Liaoyuan	0.16**	-10.01	松原 Songyuan	0.33**	0.25
东丰 Dongfeng	0.17**	-6.24	乾安 Qian'an	0.26**	-3.07
磐石 Panshi	0.18**	-0.50	前郭 Qianguo	0.27**	-3.42
图们 Tumen	0.23**	-7.60	通榆 Tongyu	0.24**	-11.87
柳河 Liuhe	0.19**	-5.82	长岭 Changling	0.28**	-17.20
桦甸 Huadian	0.16**	7.38	扶余 Fuyu	0.23**	-2.03
辉南 Huinan	0.19**	-0.80	农安 Nong'an	0.18**	-15.79
靖宇 Jingyu	0.25**	7.91	德惠 Dehui	0.23**	-5.95
东岗 Donggang	0.12**	-1.14	九台 Jiutai	0.28**	-11.62
二道 Erdao	0.25**	-0.17	榆树 Yushu	0.21**	-14.05
和龙 Helong	0.07	-2.18	双辽 Shuangliao	0.16**	-1.53
龙井 Longjing	0.09	1.24	梨树 Lishu	0.30**	-12.00
珲春 Hunchun	0.26**	-15.32	伊通 Yitong	0.25**	-8.15
延吉 Yanji	0.10	-2.83	四平 Siping	0.25**	-15.27
长春 Changchun	0.29**	6.94	梅河口 Meiheikou	0.22**	-2.34
通化县 Tonghuaxian	0.16**	11.68	公主岭 Gongzhuling	0.23**	-5.24
烟筒山 Yantongshan	0.15**	-1.73	吉林城郊 Jilinchengjiao	0.16**	-1.85

表6 春玉米生育期气温和降水敏感系数
Table6 Sensitivity coefficients of temperature and precipitation of spring maize in every growth period

站点 Site	平均气温 Average temperature	降水 Precipitation	站点 Site	平均气温 Average temperature	降水 Precipitation
舒兰 Shulan	1.10	0.41	白山 Baishan	5.59	0.29
通化 Tonghua	2.27	-0.18	临江 Linjiang	2.79	-0.33
永吉 Yongji	0.50	-0.52	集安 Ji'an	0.82	-0.11
双阳 Shuangyang	2.70	0.09	长白 Changbai	5.88	-0.65
蛟河 Jiaohu	3.72	-0.21	白城 Baicheng	1.47	2.15
敦化 Dunhua	6.45	0.33	洮南 Taonan	2.22	1.97
安图 Antu	4.42	-0.04	镇赉 Zhenlai	1.43	2.01
汪清 Wangqing	2.42	0.86	大安 Da'an	0.96	1.45
辽源 Liaoyuan	2.60	-0.58	松原 Songyuan	1.75	0.74
东丰 Dongfeng	0.53	1.18	乾安 Qian'an	0.08	1.96
磐石 Panshi	3.33	0.28	前郭 Qianguo	1.47	0.80
图们 Tumen	4.75	0.72	通榆 Tongyu	2.07	2.02
柳河 Liuhe	4.33	0.41	长岭 Changling	0.27	1.33
桦甸 Huadian	2.68	0.05	扶余 Fuyu	3.44	1.64
辉南 Huinan	2.54	0.58	农安 Nong'an	0.03	1.04
靖宇 Jingyu	6.82	-0.46	德惠 Dehui	3.93	2.29
东岗 Donggang	6.41	-0.14	九台 Jiutai	2.13	1.07
二道 Erdao	8.89	0.37	榆树 Yushu	0.03	0.30
和龙 Helong	4.85	0.29	双辽 Shuangliao	3.02	1.87
龙井 Longjing	2.26	0.81	梨树 Lishu	1.05	1.08
珲春 Hunchun	4.01	-0.37	伊通 Yitong	2.21	0.48
延吉 Yanji	2.85	0.69	四平 Siping	1.92	2.27
长春 Changchun	2.09	1.17	梅河口 Meiheikou	2.12	0.33
通化县 Tonghuaxian	4.11	-0.50	公主岭 Gongzhuling	1.27	1.41
烟筒山 Yantongshan	3.73	-0.49	吉林城郊 Jilinchengjiao	1.31	-0.20

3 结论

1961-2015 年吉林省春玉米光合生产潜力和光温生产潜力由西向东呈逐渐递减的趋势, 气候生产潜力表现为中部地区高, 西部和东部地区相对低的空间分布特征, 西部、中部和东部平均值分别为 10 787、17 266、16 983kg/hm²。光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力均呈减小趋势变化, 其中呈减少趋势的站点分别占西部、中部和东部地区的 58%、34% 和 20%。西部地区的降水影响率最高, 为 50.9%, 东部的气温影响率最高, 为 30.9%, 降水量的修正效果十分明显, 表明降水量是影响西部生产潜力的主要因子。气温是影响东部生产潜力的主要因子, 这与实际情况相符。春玉米种植区平均气温呈升高趋势, 升高显著的站点占全部站点的 10%。降水量呈降低趋势, 降低显著的站点占全部站点的 78%。

1961-2015 年吉林省春玉米种植区的光合生产潜力修正为光温生产潜力仍在较高的区间变化, 但是光温生产潜力转化为气候生产潜力时其值降低较多, 西部气候生产潜力的降水敏感系数最大, 为 1.6, 东部光温生产潜力的气温敏感系数最大, 为 3.63。说明西部地区春玉米生产潜力对降水量最敏感; 东部地区生产潜力对气温最敏感。

4 讨论

吉林省境内地形复杂, 气象要素的分布很不均匀, 因此春玉米生产潜力的空间差异明显。在光合生产潜力基础上进行气温因子修正的光温生产潜力, 其减少的站点较光合生产潜力少。由于西部和中部地区降水量呈减少趋势, 从而导致了通过进一步水分修正的气候生产潜力以减少趋势变化为主。气温升高使春玉米生长发育快, 生物量增加, 但同时也会缩短生育期, 在一定程度上影响产量, 因此温度对生产潜力的影响应综合分析, 也需要进一步的深入研究。气温的升高更可能的是伴随降水的减少或在降水持平情况下导致气候干燥度的增加。5-9 月降水频率最高的区域在吉林省东部地区, 因此东部生产潜力更大, 而十年九旱的西部受水分的限制, 即使温度条件满足其生产潜力, 生产潜力仍然是减小的^[2]。

吉林省春玉米种植区气候生产潜力呈现“低 -

高 - 低”的变化趋势。这与王冬妮等^[21]、袁彬^[6]、石淑芹^[22]的研究结果一致。中部地区是吉林春玉米气候生产潜力最大, 这与实际情况相符。吉林中部是吉林春玉米种植最集中的地区, 土壤肥沃, 气候条件适宜, 是世界三大“黄金玉米带”之一。西部和中部春玉米气候生产潜力对降水敏感性较强, 西部尤为明显, 东部主要受气温的影响。这主要是因为西部属于半干旱区, 生长季内气温高、降水少、蒸发量大导致水分亏缺严重, 因此降水成为主要限制因素。东部地区多山林地带, 降水较多, 但气温偏低, 热量资源较差^[23]。

本研究从气候资源的角度分析了春玉米生产潜力的时空分布以及气候因子对春玉米生产潜力的影响, 与以往研究有所不同的是, 本研究依照当地实际情况对春玉米的生育期进行划分、并对太阳辐射系数和作物系数等进行了分区域取值计算与分区域细化分析, 使结果更加符合实际情况。此外, 对温水修正结果作了进一步分析, 探讨了吉林省春玉米生产潜力的时空变化。实际生产中, 春玉米还受土壤质地、种植措施、品种以及社会生产力等众多因素的影响^[24], 因此本研究结果与实际情况仍有一定差异。同时, 在研究气候因子对生产潜力的影响过程中, 一种气候要素的变化常会引起相关要素的变化, 因此气候因子对生产潜力的影响研究结果还存在不确定性, 还需在今后进行更全面的研究。

参考文献

- [1]周曙东, 周文魁, 朱红根, 等. 气候变化对农业的影响及应对措施. 南京农业大学学报, 2010, 10(1): 34-39.
- [2]Schönhart M, Schauppenlehner T, Kuttner M. Climate change impacts on farm production, landscape appearance and the environment: Policy scenario results from an integrated field-farm-landscape model in Austria. *Agricultural Systems*, 2016, 145: 39-50.
- [3]魏凤英, 育鸿兴, 王丽萍. 20世纪80-90年代我国气候增暖进程的统计事实. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 79-86.
- [4]袁彬, 郭建平, 冶明珠, 等. 气候变化下东北春玉米品种熟型分布格局及其气候生产潜力. *科学通报*, 2012, 57(14): 1252-1262.
- [5]陈群, 耿婷, 候雯嘉, 等. 近20年东北气候变暖对春玉米生长发育及产量的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(10): 1904-1916.
- [6]袁彬. 气候变化下东北春玉米气候生产潜力及农业气候资源利用率. 北京: 中国气象科学研究院, 2012: 37-44.
- [7]王宗明, 张柏, 张树清, 等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究. *中国农业气象*, 2005, 26(1): 1-6.
- [8]郭建平, 高素华, 刘玲. 我国西部地区农业开发与农业气候资源高效利用. *资源科学*, 2002, 24(2): 22-25.
- [9]Zhong H L, Gao R, Yang X. Climate characteristics in three gorges reservoir area after water storage and its impact on the production potential. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, 1(2): 53-

- 56.
- [10]李奇峰,陈阜,李玉义,等.东北地区粮食生产能力研究.作物杂志 2005(4) 3-6.
- [11]李忠辉,刘实,郭春明,等.未来气候变化对东北三省水稻产量影响的评估.中国农业大学学报 2015 20(2) 223-228.
- [12]中国气象局预测减灾司,中国气象局国家气象中心.中国气象地理区划手册.北京:气象出版社,2006:18-19.
- [13]郭建平,高素华,潘亚茹.东北地区农业气候生产潜力及其开发利用对策.气象,1994 21(2) 3-9.
- [14]杨勤.宁夏区域太阳日辐射通量计算方法的研究.干旱气象,2007(3) 23-27.
- [15]毛留喜,魏丽.大宗作物气象服务手册.北京:气象出版社,2015:42-58.
- [16]杨霏云,郑秋红,罗蒋梅,等.实用农业气象指标.北京:气象出版社,2015:11-15.
- [17]中国气象局.中华人民共和国气象局行业标准——北方春玉米干旱等级.北京:气象出版社,2015 6-7.
- [18]吕硕,杨晓光,赵锦,等.气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响.农业工程学报,2013 29(18):179-190.
- [19]McCuen R H.A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation.Water Resources Bulletin,1974 3:486-497.
- [20]Beven K.A sensitivity analysis of the penman-monteith actual evapotranspiration estimates.Journal of Hydrology,1979 44:169-190.
- [21]王冬妮,郭春明,晏晓英,等.吉林省春玉米生产潜力估算及其时空变化特征分析.干旱地区农业研究,2011 29(3) 249-253.
- [22]石淑芹.基于多源数据的吉林省玉米生产力区划研究.北京:中国农业科学院,2009:78-88.
- [23]吕硕,杨晓光,赵锦,等.气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响.农业工程学报,2013(18):179-188.
- [24]王静,杨晓光,吕硕,等.黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征.中国农业科学,2012 45(10):1914-1925.

Analysis on Potential Productivity and Climatic Influence Factors of Spring Maize in Jilin

Chen Xiayan^{1,2}, Wang Lianxi^{1,2}, Ren Jingquan³,
Guo Chunming³, Li Qi^{1,2}, Li Yingying^{1,2}

(¹Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; ²Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; ³Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062, Jilin, China)

Abstract To study the spatial and temporal distribution characteristics and potential productivity of spring maize in Jilin and its response to climate change, meteorological data of spring maize in Jilin growing area from 1961 to 2015 were used in order to calculate the spring maize photosynthesis potential productivity, photosynthesis-temperature potential productivity and climatic potential productivity based on dynamic statistic model. Sensitivity of potential productivity to average temperature and precipitation in every growth period was analyzed by using the sensitivity coefficients. The results revealed that spring maize photosynthesis potential productivity and photosynthesis-temperature potential productivity showed a decreasing trend from west to east and the spatial distribution of spring maize climatic potential productivity showed an “increasing-decreasing-increasing” trend from west to east. The largest climatic potential productivity was 17 266kg/hm² in the central region. The climatic potential productivity in the western region was 10 787kg/hm² and the productivity in the eastern region is 16 983kg/hm². The influence rates of average temperature to potential productivity in the western region, central region and eastern region respectively were 20.1%, 19.5% and 30.9%, respectively; The influence rates of precipitation to potential productivity were 50.9%, 17.6% and 3.2%, respectively; The average sensitivity coefficients of average temperature in western region and central region respectively were 1.77 and 1.99, the maximum value was 3.63 in eastern region. The average sensitivity coefficients of precipitation in western region reached 1.6 of the highest value, while the low value area of sensitivity coefficients to precipitation was in eastern region. Precipitation was the most sensitive variable to spring maize climatic potential productivity in western region; Temperature was the most sensitive variable to spring maize climatic potential productivity in eastern region.

Key words Spring maize; Climatic potential productivity; Dynamic statistic model; Climate change