

DOI: 10.5846/stxb202002110227

曹永强, 冯兴兴, 李玲慧, 路洁. 气候变化下辽宁省春玉米水热时空特征及干旱风险. 生态学报, 2021, 41(3): 1092-1105.

Cao Y Q, Feng X X, Li L H, Lu J. Temporal and spatial characteristics and drought risk of spring corn in Liaoning Province under climate change. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1092-1105.

气候变化下辽宁省春玉米水热时空特征及干旱风险

曹永强*, 冯兴兴, 李玲慧, 路洁

辽宁师范大学 地理科学学院, 大连 116029

摘要:探究辽宁省春玉米各生育期内的气候资源变化特征及干旱风险, 能够为农政策制定提供理论依据, 从而增强玉米种植气候适应能力。基于辽宁省 19 个气象站点逐日气象数据及玉米生育期数据, 利用度日指标、显著性检验、干燥度指数及地理信息技术分析 1970—2018 年 5 个年代际玉米全生育期生长度日 (GDD)、高温日 (HDD)、降水量的时空变异特征。结果显示: (1) 春玉米 GDD 整体呈上升趋势, 不同年代际间 GDD 在苗期、成熟期及全生育期存在显著差异; 从 2000 年开始, 高值区向朝阳、鞍山等地集中。 (2) 2000—2018 年春玉米全生育期 HDD 增长趋势明显, 尤其在抽穗期; 空间上以朝阳为中心的辽西北地区高值区变化范围明显。 (3) 春玉米降水量在拔节期、抽穗期及成熟期年际变化大, 波动性强; 以中部地区变化最为明显, 且 1990—1999 年降水量分布变化较大。 (4) 辽宁省春玉米全生育期干燥度指数在不同年代际存在差异, 从干燥度指数与 GDD、HDD 及降水量的聚合分析看, HDD 的升高和降水量的减少引发干旱的风险性较高。 (5) 虽辽宁省春玉米全生育期的热量资源增加, 但降水量呈减少趋势, 未来极端高温和农业干旱的风险将有所提升, 因此, 下一步应针对农业气候变化及其对农业影响等开展分区研究。

关键词:气候变化; 水热特征; 干旱风险; 春玉米; 生育期

Temporal and spatial variation of spring corn in Liaoning Province under climate change

CAO Yongqiang*, FENG Xingxing, LI Linghui, LU Jie

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: The exploration of the characteristics of climate resources change and drought risk in each growth period of spring maize in Liaoning Province is beneficial to provide the theoretical basis for the formulation of suitable agriculture policy and enhance the climate adaptation of maize planting. Based on the daily meteorological data of 19 meteorological stations in Liaoning Province and the data of maize growth period, this study analyzes the temporal and spatial variation of total growth period (GDD), high temperature day (HDD) and precipitation for maize of 5 decades from 1970 to 2018 by day index, significance test, aridity index and geographic information technology, so as to explore the drought risk of spring maize in Liaoning Province. The results show that: (1) The overall trend of GDD for spring maize is increasing, but there are significant differences in the period of seedling, maturity and whole breeding period. High values of GDD are mainly distributed in Chaoyang, Anshan and other regions. (2) HDD shows an obvious increasing trend in the whole growth period for spring maize from 2000 to 2018, especially in the heading period. (3) The precipitation varies greatly in the period of jointing, heading and maturity, especially in the central region, and its distribution changes a lot from 1990 to 1999. (4) Aridity index of spring maize in Liaoning Province is different at different periods, the risk of drought caused by the increase of HDD and the decrease of precipitation is higher from the polymerization analysis of drying index and GDD, HDD and

基金项目:国家自然科学基金面上项目 (51779114); 2020 年辽宁省重点研发计划 (2020JH2/10200043)

收稿日期: 2020-02-11; **网络出版日期:** 2020-07-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

precipitation. (5) With the heat resources of spring maize in Liaoning Province increasing and the precipitation decreasing, the risk of extreme high temperature and agricultural drought will be increased in the future. Therefore, the future work should be focused on regional study on agricultural climate change and its impact on agriculture.

Key Words: climate change; hydrothermal characteristics; drought risk; spring corn; child-bearing period

玉米作为世界第一大粮食作物,种植面积广泛、生产潜力巨大,其在粮食安全及国民经济发展中占据重要地位^[1-2]。IPCC 第五次评估报告指出,预计 21 世纪全球平均气温增幅可能超过 1.5—2℃,以全球气候变暖为主要特征的气候要素变化已对世界环境和经济发展造成了巨大威胁^[3-4]。气候变化条件下,农业气候资源也相应发生变化^[5-7]。由于农业生产活动对气候条件的依赖程度很高,任何程度的气候变化都将给农业生产带来显著影响,特别是作物生长季内水热条件的变化^[8]。玉米生产受气候变化的影响十分显著,因此,如何应对气候变化对农作物带来的影响成为当前研究的热点话题。

近年来,国内外学者关于气候变化对粮食生产的影响进行了广泛研究,其方法主要是利用不同作物生长模型以及统计学方法研究不同时空尺度、作物类型生育期的温度、降水、日照、蒸散量等气候变量的时空特征及其与农业生产的相关性评价^[9-12]。如何奇瑾等^[13]利用 ArcGIS 空间分析对我国春玉米潜在种植分布区进行研究,并进行了玉米种植区划;余会康等^[14]研究表明增温效应对东北地区水稻生育过程产生重要影响,水稻冷害发生频率逐年减少;薛亚荣等^[15]认为降水是影响塔城地区棉花灌溉需水量最大的气象因子;Golovko 等^[16]研究了在相对寒冷潮湿的土壤和气候条件下培育早熟玉米杂交种的可能性和前景;Labell 等^[17]认为极端高温对非洲玉米生产影响显著,日最高温度大于 30℃ 的积温每增加 1℃,将导致玉米减产 1.7%;同时,Otkin 和 Wu 等^[18-19]研究认为,干旱对玉米种植产生巨大影响。综合来看,以往研究缺乏对作物各生育期内气温和降水时空特征的协同研究,致使难以明确气候变化背景下的区域水热协同变异过程对作物生育的影响;另外,对年代际间春玉米水热变化趋势及差异水平的研究鲜有发现,而这在指导地区农业可持续与稳定发展、中长期规划与种植结构调整中具有潜在价值。

辽宁省作为国家重点粮食产区之一,在《全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划(2009—2020 年)》中,被定位为粮食生产核心区^[20]。辽宁省玉米种植面积较广阔,在辽宁省 14 个地级市中,12 个以玉米为第一种植作物^[21-22]。近年来,随着全球气候变化的不断发展,东北地区气候总体存在以“气温显著增高,降水、日照时数减少”为主要特点的暖干化趋势,农业生产活动受到影响^[23]。选取辽宁省 1970—2018 年近 49 年春玉米生育期内 19 个气象站点逐日气象数据,划分为 1970—1979、1980—1989、1990—1999、2000—2009、2010—2018 年 5 个研究区间,从年代际尺度上分析气候变化背景下辽宁省玉米生育期内气温和降水气候资源的时空变化特征及差异水平,旨在为优化其农业生产布局,调整作物种植结构提供理论与决策支持。

1 研究区域概况

辽宁省位于我国东北地区的东南部,38°43′—43°26′N,118°53′—125°46′E 之间,南濒黄海、渤海,总面积为 14.8 万 km²(图 1)。辽宁省是我国重要的粮食主产区之一,现代农业是辽宁省发展规划的重要部分,其中玉米种植占据重要地位。辽宁省属温带大陆性季风气候,且受海洋性气候影响显著;年平均气温 7—11℃,年降水量为 600—1100 mm,时空分布不均,东部多西部少,且多集中 7—8 月。辽宁省气候自东南向西北由温带的半湿润向半干旱过渡,具有日照丰富、雨热同季、积温较高、降水较少的特征^[24]。近年来,气候变暖下东北地区因纬度偏高,增暖明显,降水量减少,热量指数和水分亏缺指数随年代呈波动上升趋势,农业生产受到较大影响^[25]。

2 资料与方法

2.1 数据来源

数据来源于中国气象数据网,主要包括辽宁省近49年(1970—2018年)春玉米全育期内19个标准气象站点的逐日气象数据(图2),主要包括日最高气温,日平均气温以及日降水量和各个站点的经纬度等地理特征数据。数据分析基于Excel 2010和SPSS软件进行数据的统计分析,采用ANOVA进行方差分析,显著性水平 $P=0.05$ 。空间分析采用ArcGIS 10.0软件的克里金插值方法(Kriging)对气象数据进行插值,生成空间栅格数据,按掩膜提取后得到相应的空间分布图。

2.2 研究方法

2.2.1 辽宁省春玉米生育期划分及作物系数 K_c

根据实际生产实践经验并结合辽宁省水利电力厅编制的《辽宁省抗旱资料汇编》及相关资料^[26-28],玉米生产经历播种、出苗、拔节、抽穗、灌浆、乳熟、成熟等主要发育时期,将辽宁省春玉米全育期划分为5个阶段(表1),具体划分时间为播种期、苗期、拔节期、抽穗期、成熟期,共历时163 d。根据李晶等^[29]对已有对辽宁玉米作物系数的研究,结合靳春香^[30]对辽宁省春玉米作物系数的总结,故本文选取 K_c (表2)。

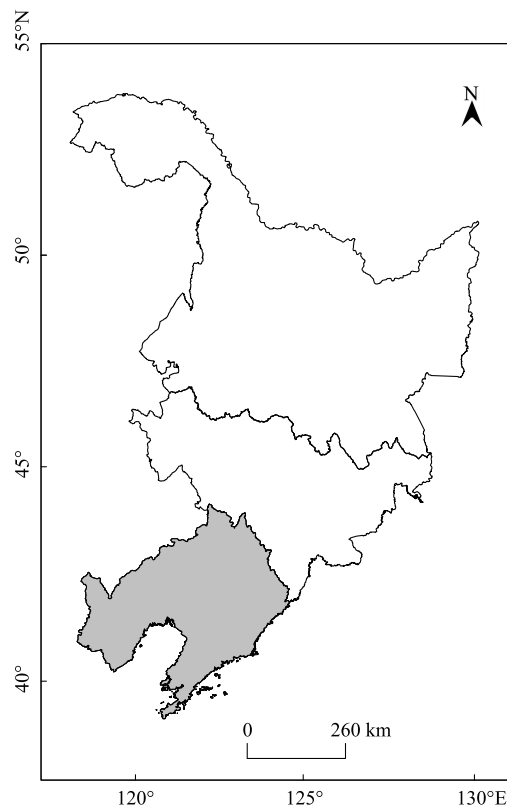


图1 辽宁省地理位置示意图

Fig.1 Location map of Liaoning Province

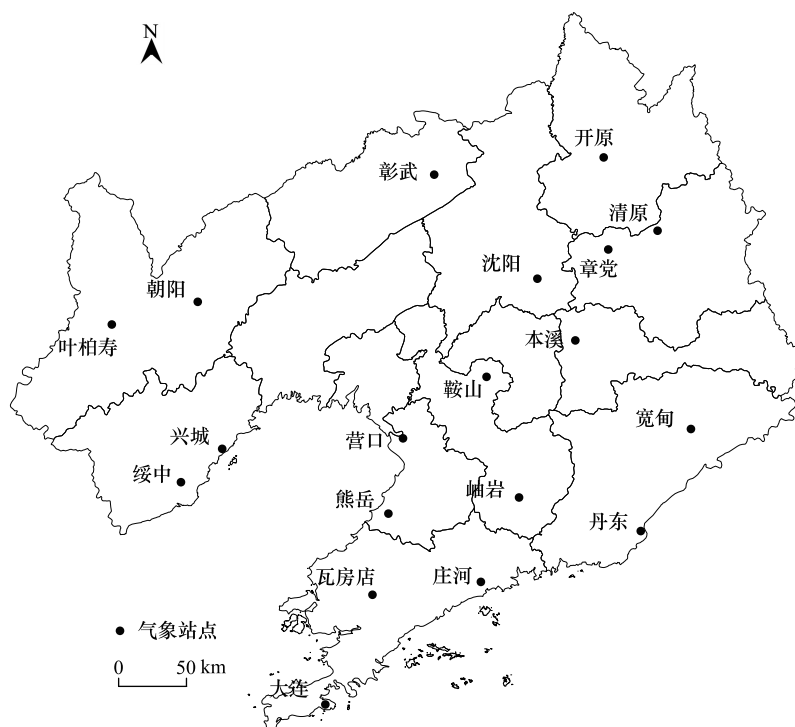


图2 辽宁省气象站点分布图

Fig.2 Distribution map of meteorological stations in Liaoning Province

表 1 辽宁省春玉米全育期划分

Table 1 Division of growth period of spring maize in Liaoning Province

阶段 Period	播种期 Sowing period	苗期 Seedling period	拔节期 Jointing period	抽穗期 Heading period	成熟期 Maturation period	全育期 Whole breeding period
起止日期(月-日) Starting and ending date(Month-day)	4-11—4-30	5-1—6-20	6-21—7-20	7-21—8-10	8-11—9-20	4-11—9-20
育期天数 Number of days/d	20	51	30	21	41	163

表 2 辽宁省春玉米作物系数统计表

Table 2 Ascertainment of crop coefficients of maize in Liaoning Province

时间 Time	辽宁西部 The western of Liaoning Province	辽宁北部 The northern of Liaoning Province	辽宁东部 The eastern of Liaoning Province	辽宁南部 The southern of Liaoning Province	辽宁中部 The ccentral of Liaoning Province
4 月中 Mid-April	0.36	0.35	0.53	0.50	0.37
4 月下 Last-April	0.46	0.44	0.55	0.57	0.42
5 月上 Early-May	0.47	0.45	0.63	0.64	0.47
5 月中 Mid-May	0.51	0.46	0.65	0.74	0.53
5 月下 Last-May	0.55	0.48	0.71	0.82	0.50
6 月上 Early-June	0.58	0.51	0.87	0.88	0.69
6 月中 Mid-June	0.68	0.62	0.94	0.97	0.81
6 月下 Last-June	0.80	0.81	1.02	1.06	0.94
7 月上 Early-July	0.91	0.93	1.12	1.12	1.17
7 月中 Mid-July	1.17	1.14	1.15	1.21	1.27
7 月下 Last-July	1.21	1.16	1.27	1.26	1.29
8 月上 Early-August	1.02	1.08	1.21	1.20	1.20
8 月中 Mid-August	0.97	0.98	1.16	1.09	0.96
8 月下 Last-August	0.95	0.93	1.01	0.88	0.91
9 月上 Early-September	0.91	0.89	0.94	0.78	0.85
9 月中 Mid-September	0.78	0.79	0.76	0.76	0.85

2.2.2 热量指标

气温是影响玉米生长的重要条件之一,不仅影响作物的发育速度,同时也影响作物的产量。玉米为喜温作物,气温的变化会直接影响玉米的整个生长过程,玉米生长的最低温度为 10—12℃,适宜温度为 25—31℃^[31-33]。积温学说或者有效积温学说($\geq 10^{\circ}\text{C}$)是评价作物生长期内热量的有效依据,目前学者多使用平均气温作为判断热量的主要指标。然而在作物实际生长过程中,过高或过低的温度都会对作物生长产生不利影响^[34]。为更好地分析玉米生育期内的热量条件,本文将采用度日指标^[35-37]。

生长度日(Growing degree days, GDD)是分析作物生长期内的热量指标,文中是指日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温。高温度日(Heat degree days, HDD)是分析作物极端高温的热量指标,文中是指日平均气温 $\geq 31^{\circ}\text{C}$ 的积累温度。本文利用度日指标衡量春玉米全育期及各生育期的温度累积程度,分析辽宁省春玉米不同生育期受温度累积的可能程度及变化趋势。

$$\text{GDD} = \sum_{t=1}^n \text{GDD}_t \rightarrow \text{GDD}_t = \begin{cases} 0 & (T_{\text{ave}} \leq T_{\text{base}}) \\ (T_{\text{ave}} - T_{\text{base}}) & (T_{\text{ave}} > T_{\text{base}}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{HDD} = \sum_{t=1}^n \text{HDD}_t \rightarrow \text{HDD}_t = \begin{cases} 0 & (T_{\text{max}} \leq T_{\text{max}}) \\ (T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}) & (T_{\text{max}} > T_{\text{opt}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_{ave} 代表日平均气温, T_{base} 代表玉米全育期下限温度,文中取值为 10°C ; T_{max} 代表日最高气温, T_{opt} 代表玉

米生育期的上限温度,文中取值为 31℃。

2.2.3 气候倾向率

气候倾向率是指气候要素多年变化, 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 的一元回归方程。

$$x_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, a 指回归常数, b 指回归系数, 通常以 b 的 10 倍作为各气候要素的气候倾斜率。利用气候倾向率分析 1970—2018 年 5 个不同年代际间辽宁省春玉米全育期及各个生育期的 GDD、HDD 和降水量的变化趋势。

2.2.4 干燥度指数

干燥度指数 (Aridity index) 是评价一个地区干湿程度的重要指标, 通常以某地区水分收支与热量平衡来计算^[2]。计算公式如下:

$$\text{Aridity} = 1 - P/ET_0 \quad (4)$$

式中, Aridity 代表玉米在生育期内的干燥度, P 代表玉米在生育期内的相应累积降水量; ET_0 代表玉米在生育期内的相应作物蒸散量之和。如果 Aridity 小于 0, 表明该时段里降水量大于蒸散量, 干旱不会发生, 因此可以用 0 代替所有负值; 如果 Aridity 大于 0, 表明该时段里干旱可能发生, 并且 Aridity 越大, 干旱越严重。

农作物蒸散量通常指农作物在生长期期间蒸发蒸腾所消耗的水资源量, 通常采用 FAO (联合国粮食及农业组织) 推荐的 Penman-Monteith 模型。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{G_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + G_d u_2)} \quad (5)$$

式中, R_n 为净辐射 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; G 为热通量密度 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; T (°C) 为日平均温度; u_2 为 2m 高处风速 (m/s); e_s 为饱和空气水汽压 (kPa); e_a 为空气水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压-温度曲线的梯度 ($\text{kPa/}^\circ\text{C}$); γ 为湿度计常数; G_n 、 G_d 为固定常数, 在估算逐日潜在蒸散发量时取值分别为 900 和 0.34。

由于不同地区地貌地形条件的不同, 根据不同地区作物系数 K_c 对蒸散量 ET_0 进行修订, 得到作物需水量 ET_c 。因此, 采用修订后的干燥度指数公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (6)$$

$$\text{Aridity} = 1 - P/ET_c \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 不同年代辽宁省春玉米全育期生长度日 GDD 时空特征分析

辽宁省不同年代际间春玉米各个生育阶段 GDD 平均值及气候倾向率见表 3。总体来看, 1970—2018 年辽宁省春玉米全育期 GDD 以 $44.23^\circ\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 的速率上升, 不同年代际春玉米生长度日 (GDD) 在苗期、成熟期以及全育期存在显著差异, 且显著性水平通过 0.05 检验; 表明不同年代际温度在苗期、成熟期以及全育期变化幅度存在明显差异。此外, 各个生育阶段内春玉米 GDD 呈现递增趋势, 在播种期增长速率最高, 气候倾向率均呈正向变化。其中, 2010—2018 年间春玉米 GDD 在各个生育阶段增长趋势明显大于其他阶段, 将意味着春玉米播种期的提前, 生长期的延长^[38]。同时, 近年来 GDD 增幅明显, 2000—2018 年苗期春玉米 GDD 明显大于 1970—1979 年 ($P < 0.05$), 1970—1979 年成熟期春玉米 GDD 明显低于 1990—2018 年, 2000—2009 年 GDD 值显著高于其他年际 ($P < 0.05$), 2000—2018 年全育期内春玉米 GDD 明显大于 1970—1989 年 ($P < 0.05$), 表明春玉米全育期生长热量总体在持续增加。

辽宁省春玉米 1970—2018 年不同年代际全育期 GDD 空间分布如图 3 所示。近 49 年, 辽宁省春玉米全育期 GDD 范围在 1317.23 — $1980.53^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 之间; GDD 空间分布上由西北向东南沿海递增, 局部地区显著增长。GDD 高值区范围主要分布在辽宁省西部和中部地区, 低值范围主要分布在辽宁省东部地区, 与王培娟^[39]对

东北地区春玉米生育期热量研究的结果一致,同时与整个东北春玉米冷害危险性指数呈自西南向东北方向递增的空间分布格局相呼应^[40]。由图 3 可以看出,1970—1979 年 GDD 差值不大,1980—1999 年西北部地区 GDD 增加明显,2000—2018 年辽宁省 GDD 整体增加,高值区主要向朝阳、鞍山及营口等地区集中,其主要原因是朝阳、鞍山及营口等地区温度增大于其他地区,为 0.5—1℃,其他地区平均增幅多为 0—0.5℃^[41];低值区主要出现在清原、宽甸及周围地区,温度的区域分布特点可能受地形及海洋影响^[42]。总体上,GDD 呈现上升趋势,空间分布上由西北向东南扩增,同时地区间差异逐渐减小,辽宁省春玉米全育期的热量增加有利于春玉米发育及产量增加。

表 3 1970—2018 年各个年代际辽宁省春玉米不同生育期 GDD 平均值及气候倾向率

Table 3 Average value of GDD and climate tendency rate in different growth stages of spring corn in Liaoning Province from 1970 to 2018

年份 Year	指标 Index	播种期 Sowing period	苗期 Seedling period	拔节期 Elongation period	抽穗期 Heading period	成熟期 Maturation period	全育期 Whole breeding period
1970—1979	GDD/(℃·d)	39.88	387.79 *	385.24	295.37	422.07 *	1530.36 *
	气候倾向率/(℃·d/10a)	-25.79	-5.75	-1.09	16.64	-35.37	-51.37
1980—1989	GDD/(℃·d)	40.14	409.87	383.92	302.66	433.87 *	1570.45 *
	气候倾向率/(℃·d/10a)	4.22	-16.18	0.25	14.54	3.17	6.01
1990—1999	GDD/(℃·d)	49.25	408.86	392.86	309.74	457.03 *	1617.74
	气候倾向率/(℃·d/10a)	37.15	50.23	52.23	34.61	-10.12	164.10
2000—2009	GDD/(℃·d)	47.08	453.13 *	407.88	305.74	469.77 *	1683.60 *
	气候倾向率/(℃·d/10a)	-1.84	-79.2	-46.41	1.11	-84.19	-134.76
2010—2018	GDD/(℃·d)	51.90	443.92 *	414.82	319.52	462.54 *	1692.69 *
	气候倾向率/(℃·d/10a)	81.72	49.05	48.92	61.79	15.25	256.74
1970—2018	GDD/(℃·d)	45.52	420.24	396.58	306.34	448.78	1617.46
	气候倾向率/(℃·d/10a)	36.17	15.14	5.85	5.85	11.25	44.23

* 表示不同年代际在 $P=0.05$ 时存在显著差异;GDD: 生长度日 Growing degree days

3.2 不同年代辽宁省春玉米全育期高温日 HDD 时空特征分析

辽宁省不同年代际间春玉米各个生育阶段 HDD 平均值及气候倾向率见表 4。总体来看,1970—2018 年辽宁省春玉米全育期 HDD 以 4.77℃·d/10a 的速率上升,在 2010—2018 年变化速率最为明显,且不同年代际间春玉米高温日(HDD)在相同生育阶段内未达到显著差异水平,表明 HDD 在不同年代际不同生育期虽有差异,但差异显著性水平未达到 0.05。整体上春玉米 HDD 在拔节期的均值明显大于其他生育阶段,在 2000—2009 年表现尤为显著,其次为成熟期。同时,从各个生育阶段来,近 49 年春玉米 HDD 增长期主要在抽穗期和拔节期,在抽穗期 HDD 的增长最为明显。据历史资料显示,2000—2009 年,辽宁省干旱发生频繁,2000、2001 年、2007 年、2009 年均出现了较大旱情,可能与气温升高、降水减少有关。

辽宁省春玉米 1970—2018 年不同年代际全育期高温日 HDD 空间分布如图 4 所示。近 49 年来,HDD 在不同年代际的范围变化幅度明显,在空间上整体表现出不断增大的趋势,辽西北地区增长显著;在空间变化上由西北地区向东南沿海增大,其主要原因可能是西部、中部地区高温日数普遍于沿海和东部山区^[43]。1970—1999 年间 HDD 增长趋势较 2000 年后的增长趋势低;2000—2018 年 HDD 增长趋势明显上升,其中 2010—2018 年间 HDD 显著高于其他阶段;高值区主要在朝阳和叶柏寿地区集中,可能与其降水少、蒸发大、植被少等因素有关^[24],其次在辽宁中部地区,主要是鞍山一带,与其地区气温增加幅度显著有关;整体来看,以朝阳为中心的辽西北地区高值区变化范围明显,80 年代末开始突变的气候变暖持续影响至今,朝阳地区气温整体呈现波动上升趋势且最高和最低增温的强弱在时间上表现出不一致性^[44]。HDD 的增长不仅表明春玉米全育期内热量的增加,也意味着蒸发加剧,作物生育期水分亏缺指数增加,高温干旱的风险将大大增强^[2]。总体上,近 49 年来 HDD 呈现增长趋势,在空间上与生长度日 GDD 分布趋势大体一致。

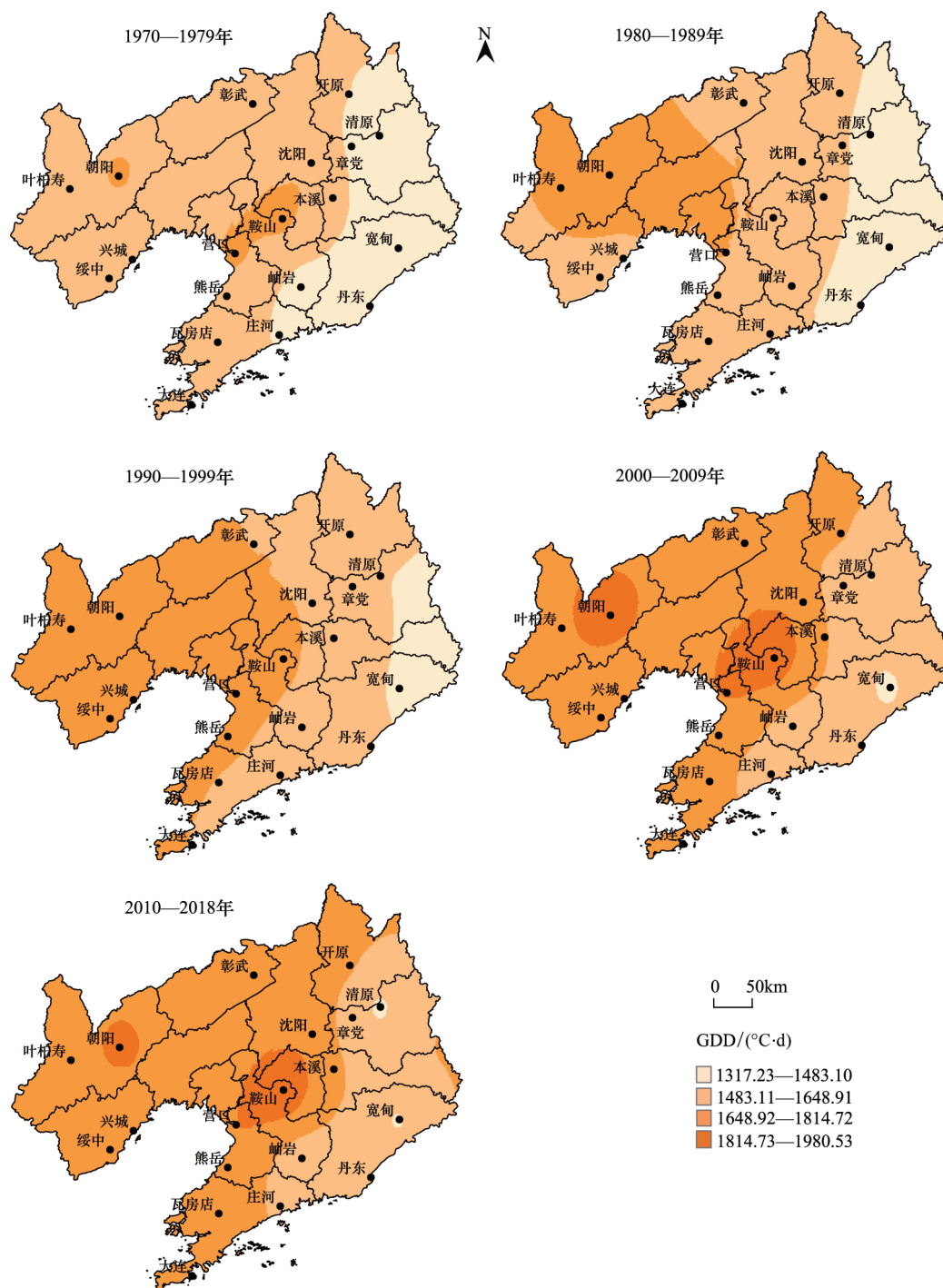


图3 1970—2018 不同年代春玉米全育期生长度日 (GDD) 空间分布

Fig.3 Growing degree days (GDD) spatial distribution of growing day of spring maize in 1970—2018 from different eras

3.3 不同年代辽宁省春玉米全育期降水量时空特征分析

辽宁省不同年代间春玉米各个生育阶段降水量平均值及气候倾向率见表5。1970—2018年辽宁省春玉米全育期降水量以4.93 mm/10 a的速率下降,年际变化大,波动性强;且均值间差异没有达到显著水平,表明降水量在不同年代际不同生育期差异显著性水平未达到0.05。其中,2000—2009年降水量明显低于其他年代,减少时期主要在抽穗期和成熟期,春玉米全育期内降水量在2010—2018年变化速率最为明显;从不同玉米生育期阶段来,近49年春玉米生育期降水量增长主要表现在播种期和苗期,而春玉米在拔节期、抽穗期

以及成熟期的降水量存在不同程度的降低,随着降水减少、气温升高将对作物生物量积累和产量形成都有不利影响。

表 4 1970—2018 年各个年代际辽宁省春玉米不同生育期(HDD)平均值及气候倾向率

Table 4 Average value of heat degree days (HDD) and climate tendency rate in different growth stages of spring corn in Liaoning Province from 1970 to 2018

年份 Year	指标 Index	播种期 Sowing period	苗期 Seedling period	拔节期 Jointing period	抽穗期 Heading period	成熟期 Maturation period	全育期 Whole breeding period
1970—1979	HDD/(℃·d)	0.03	3.71	5.71	3.05	2.14	14.67
	气候倾向率/(℃·d/10a)	-0.10	-0.85	-2.30	1.19	-3.29	-5.08
1980—1989	HDD/(℃·d)	0.05	3.79	4.88	6.70	2.34	17.77
	气候倾向率/(℃·d/10a)	-0.12	-0.6	-3.97	5.96	-0.77	-4.86
1990—1999	HDD/(℃·d)	0.02	4.17	7.18	7.50	3.28	22.14
	气候倾向率/(℃·d/10a)	-0.04	1.7	20.91	1.77	1.99	38.31
2000—2009	HDD/(℃·d)	0.04	9.00	10.02	6.41	3.81	29.29
	气候倾向率/(℃·d/10a)	0.06	-21.49	-21.82	0.34	7.77	-35.14
2010—2018	HDD/(℃·d)	0.19	5.76	9.69	11.76	4.08	31.49
	气候倾向率/(℃·d/10a)	0.58	1	17.06	38.72	3.97	70.33
1970—2018	HDD/(℃·d)	0.06	5.28	7.45	6.99	3.11	22.89
	气候倾向率/(℃·d/10a)	0.03	0.76	1.33	2.05	0.60	4.77

表 5 1970—2018 年各个年代际辽宁省春玉米不同生育期降水量平均值及气候倾向率

Table 5 Average value of precipitation and climate tendency rate in different growth stages of spring corn in Liaoning Province from 1970 to 2018

年份 Year	指标 Index	播种期 Sowing period	苗期 Seedling period	拔节期 Jointing period	抽穗期 Heading period	成熟期 Maturation period	全育期 Whole breeding period
1970—1979	降水量/mm	18.18	106.60	146.83	158.97	134.57	565.15
	气候倾向率/(mm/10a)	15.94	-11.19	23.22	-13.02	-52.86	-37.90
1980—1989	降水量/mm	27.91	104.93	149.59	131.65	165.71	579.79
	气候倾向率/(mm/10a)	14.82	7.89	38.31	-50.63	63.36	73.75
1990—1999	降水量/mm	23.20	115.08	157.76	157.85	140.11	594.00
	气候倾向率/(mm/10a)	-10.06	-41.86	-42.01	48.3	0.12	-45.52
2000—2009	降水量/mm	32.38	110.22	131.59	128.51	106.84	509.54
	气候倾向率/(mm/10a)	42.32	60.81	59.71	-79.68	48.75	131.91
2010—2018	降水量/mm	28.30	123.57	120.20	163.15	147.17	582.39
	气候倾向率/(mm/10a)	-39.1	2.01	-99.98	-132.64	-39.75	-309.46
1970—2018	降水量/mm	25.95	111.85	141.62	147.72	138.71	565.84
	气候倾向率/(mm/10a)	2.75	3.85	-6.68	-1.46	-3.39	-4.93

辽宁省春玉米 1970—2018 年不同年代际全育期降水量空间分布如图 5 所示。近 49 年,辽宁省春玉米全育期降水量在不同年代际间变率大,空间上呈东南—西北递减趋势,其中中部地区年降水量变化较大,而西部和东部变化较小^[45],主要是 487.56—628.35 mm 降水量的空间分布变化较大。辽宁省春玉米降水量在 346.75—909.94 mm,高值区主要分布在宽甸和丹东等东南地区,低值区主要分布叶柏寿和朝阳等西北地区,主要与辽宁省地形有关,西北地区受海洋性气候影响较小,气温高,蒸发旺盛^[40,46]。不同年代际间辽宁省春玉米生育期年均降水量空间分布明显变化,地区间存在明显差异,与韩丛利对辽宁省洪涝灾害时间变化特征分析中提到的降水在时空上分布差异的研究结果一致^[47];1990—1999 年辽宁省春玉米全育期内整体降水量

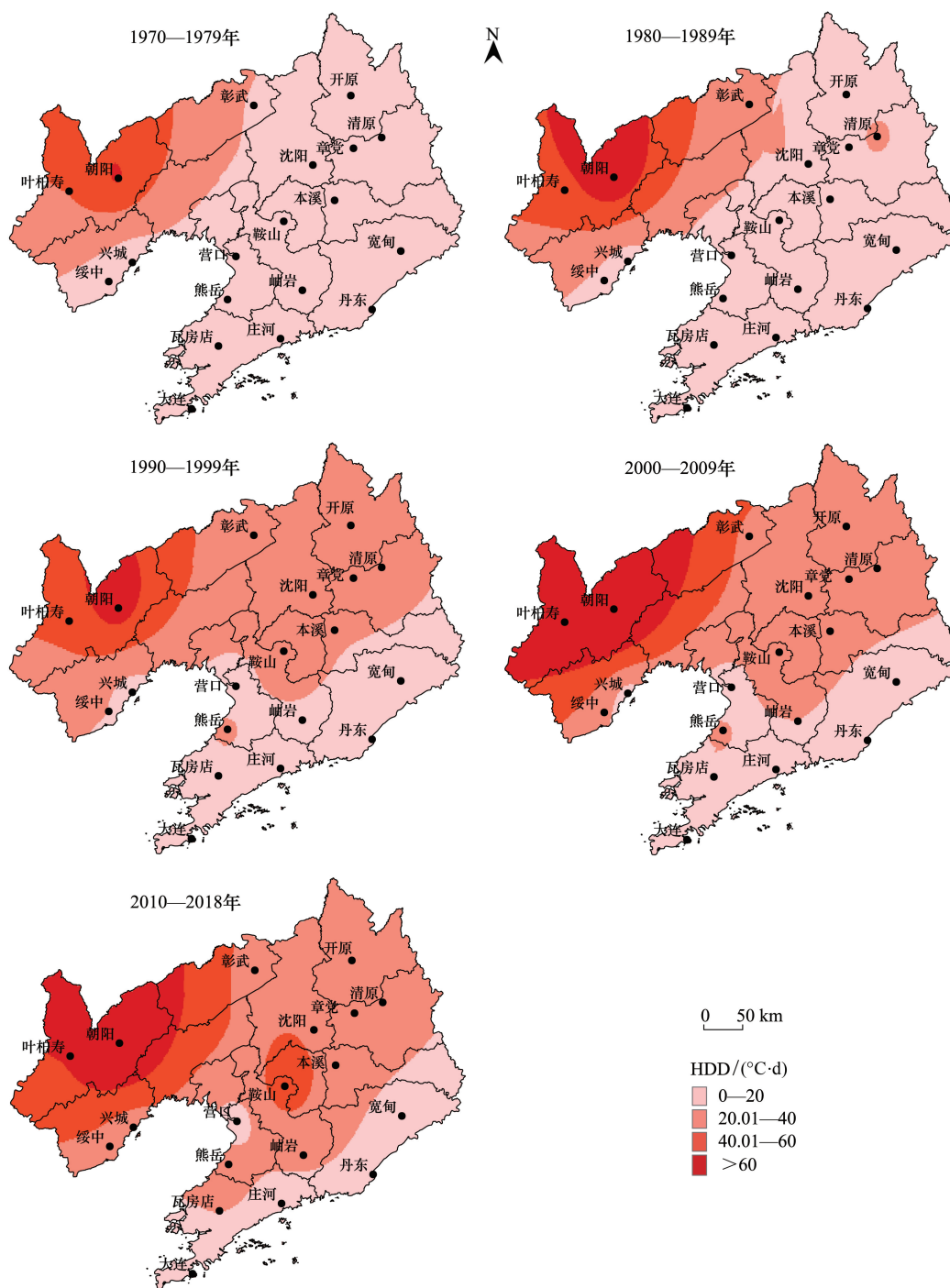


图4 1970—2018 不同年代春玉米全育期生长期日(HDD)空间分布

Fig.4 Heat degree days (HDD) spatial distribution of growing day of spring maize in 1970—2018 from different eras

高于其他年代际;而 2000—2009 年降水量显著减少。总体而言,近 49 年辽宁省春玉米生育期降水量空间分布差异不明显,但与辽宁省春玉米生育期生长期日 GDD、高温日 HDD 的空间分布呈相反趋势。

4 讨论

以温度升高和降水减少为主要标志的辽宁省气候暖干化现象对当地农业产生了重要影响,高温和干旱是限制农作物生产的重要因子,其危害的严重度很大程度上取决于温度^[48-49]。由于气温变化是导致作物生育

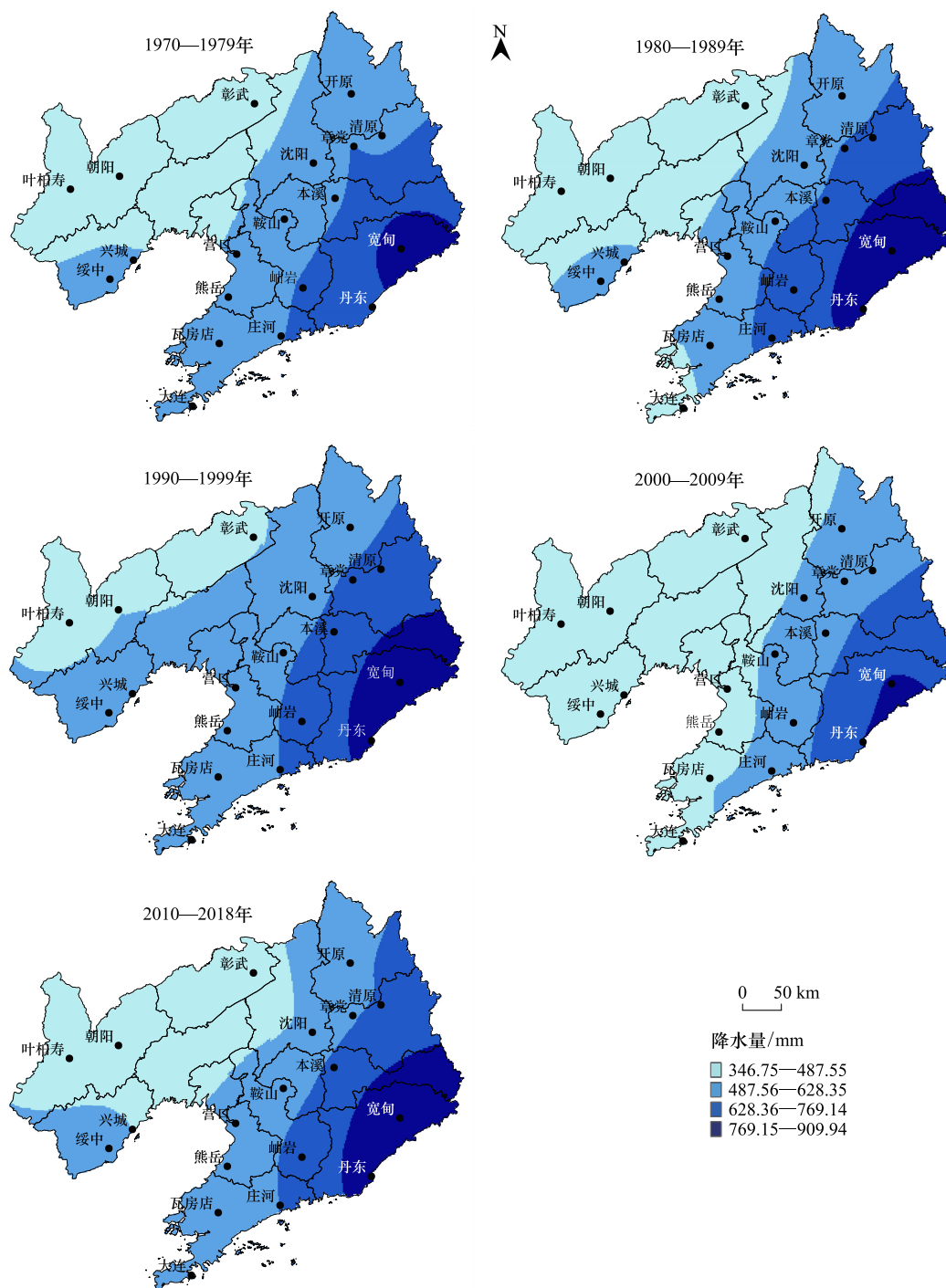


图 5 1970—2018 不同年代春玉米全生育期降水量空间分布

Fig.5 Spatial Distribution of precipitation in each growth period of spring maize in 1970—2018 from different eras

期内活动积温变化的直接原因,因此本文的热量条件重点考虑了温度,并未考虑日照辐射的影响。本文通过对辽宁省春玉米全育期 GDD、HDD 以及降水量在年代际上的时空变化特征及差异水平研究发现,辽宁省春玉米全育期 GDD、HDD 呈不断上升的趋势,虽然未来春玉米生产能够获得良好的热量资源,但叶柏寿、朝阳及鞍山等地极端高温、干旱的风险极有可能大大增加,气温升高会加剧土壤蒸发,引起土壤干旱,从而严重影响玉米产量^[50]。此外,辽宁省春玉米全育期内降水量呈现降低趋势,且西北部降水量较少,未来春玉米干旱风险加大。

4.1 不同年代际辽宁省春玉米干燥度指数时空特征分析

农业作为受干旱影响最显著的部门之一,由于气温升高或者降水减少,作物不能从土壤或者空气中获得生长发育足够的水分,造成农作物生长发育不良,导致作物减产或者品质下降的一种灾害现象^[51]。前人对辽宁省玉米干旱研究颇多,但多集中在以 Penman-Monteith、Z 指数、标准化降水指数(SPI)、帕默尔干旱指数(PDSI)、综合气象干旱指数(CI)等方法为基础上的干旱风险研究^[27,52],通过重点研究气温和降水组合条件下辽宁省春玉米生产的气候条件,虽然春玉米全育期的热量资源增加,但降水量在减少,表明辽宁省春玉米全育期水热时空变化给玉米生产带来了极端高温、干旱等风险变化。在此背景下引入干燥度指数(Aridity index),对气候变化下辽宁省春玉米在 1970—2018 年全育期发生干旱的风险性进行研究。

利用修订后干燥度指数公式分析 1970—2018 年 5 个年代际辽宁省春玉米全育期干旱发生的时空变化特征,干燥度指数时空变化分布如图 6 所示。近 49 年来,辽宁省春玉米全育期在不同年代际干燥度指数空间分布不同,总体上由东南地区向西北地区增大,其中,东部地区整体变化不明显,西部及中部地区在不同年代际分布不同;此外,辽西北地区干燥度指数最为显著,高值中心出现在朝阳、叶柏寿等地及周边地区。其中,1970—1979 年、2000—2009 年干燥度指数空间分布特征基本一致;1980—1989 年、2010—2018 年干燥度指数空间分布特征基本一致;1990—1999 年干燥度指数整体较低。据史料记载,1994、1997、2001 以及 2014 年辽宁中部地区发生不同程度干旱事件,2000 年辽宁省出现大面积干旱事件,2007 年遭受了严重夏旱,2009 年辽西北发生特大干旱事件^[53-54]。结合 GDD、HDD 以及降水量的时空变化特征,1970—1989 年间辽宁省春玉米全育期干燥度指数变化不大,高值区主要集中在西北地区。其中,1980—1989 年瓦房店以南地区变化明显,大连及周边地区变化显著。在此阶段,西北地区 GDD、HDD 增高,降水量整体上变化不显著。1990—1999 年整体干燥度指数为近 49 年最低。在此阶段,西北地区 GDD 增大,HDD 由西北地区向东北增加,降水量整体由东南向西北增加,为近 49 年最多,因此干燥度指数较低。2000—2018 年间干燥度指数较 1990—1999 年明显增加,仍以辽西北地区最为显著。在此阶段,GDD 以及 HDD 总体由西北向东南方向继续增加,2000—2009 年降水量明显减少,2010—2018 年降水量较上个阶段有所增加,干燥度指数明显增加。

综上所述,辽宁省春玉米全育期干燥度指数在不同年代际存在差异,但 GDD、HDD 的持续增加并未使得干旱风险范围发生明显变化;同时,降水量大范围的减少,干燥度指数会产生一定变化,结果表明 GDD、HDD 的升高以及降水量的减少可能带来干旱风险;总体而言,辽宁省西北部地春玉米发生干旱风险性最高。

4.2 干燥度指数与 GDD、HDD 以及降水量的聚合分析

散点图可以清晰展示数据的分布和聚合情况。1970—2018 年辽宁省春玉米全育期干燥度指数和 GDD、HDD 以及降水量的散点分布图如图 7 所示。由图 7 可知,干燥度指数和 GDD 没有明显聚合分布,GDD 的升高不能引起干燥度指数的明显变化,结果表明辽宁省春玉米全育期 GDD 的增长引发干旱风险的可能性较低。干燥度指数和 HDD 呈现一定聚合分布,随着 HDD 的增大,干燥度指数随之增大,结果表明辽宁省春玉米全育期 HDD 的增高会造成一定程度的干旱事件。干燥度指数和降水量的聚合分布程度较高,降水量的减少会引起干燥度指数的明显变化,结果表明辽宁省春玉米全育期降水量的减少引发干旱的风险较大。

综上所述,辽宁省春玉米全育期 GDD 的增加引发干旱的风险性较低,而 HDD 的增长以及降水量的减少对于干旱发生的影响较大。因此,辽宁省应通过优化作物布局,调整种植结构,培育栽种技术以及改进管理模式等措施应对干旱风险,例如,调整播种期,培育新品种,改进灌溉技术等。而未来辽宁省春玉米如何应对气候变化,降低干旱风险的对策与措施还需要进一步深入研究。

5 结论

(1) 近 49 年春玉米全育期 GDD 以 $44.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 的速率上升,范围在 $1317.29\text{--}1980.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 之间波动,同时苗期、成熟期及全育期 GDD 在不同年代际间存在显著差异;在空间分布上,1979—1999 年间地区差异不大;从 2000 年开始,地区间差异逐渐缩小,高值区向朝阳、鞍山等地集中,低值区以清原、宽甸地区为中心。良

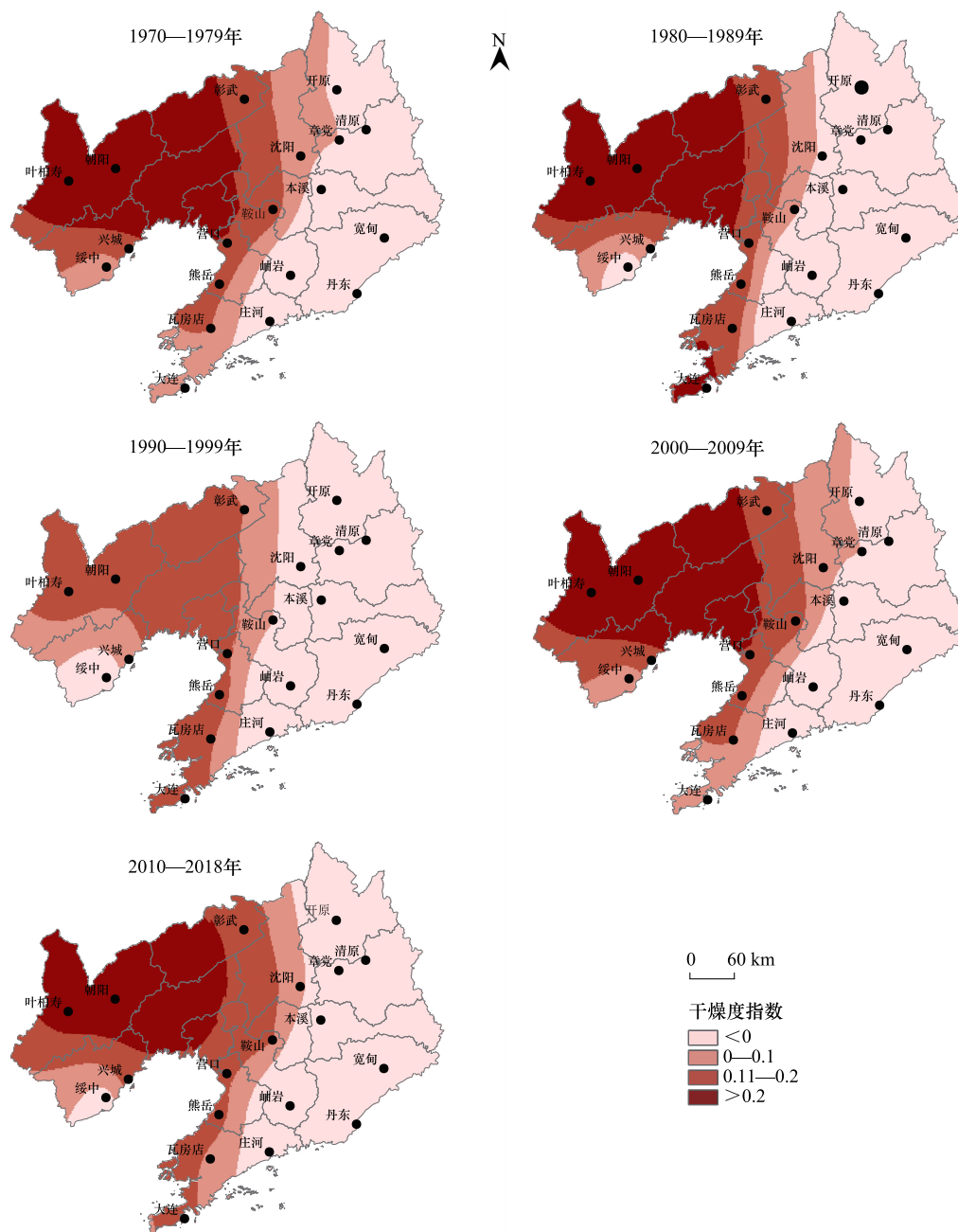


图 6 1970—2018 年不同年代春玉米全育期干燥度指数空间分布

Fig.6 Spatial Distribution of aridity index in growing day of spring maize in 1970—2018 from different eras

好的热量条件的增加有利于玉米产量和品质的提升。

(2) 近 49 年春玉米全育期 HDD 以 $4.77\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 的速率上升,2000—2018 年增长趋势明显,增长期主要集中在抽穗期;在空间分布上,高值区主要集中在叶柏寿、朝阳、鞍山等地,整体上以朝阳为中心的辽西北地区高值区变化范围明显。HDD 的增加将不利于春玉米生长,辽西北地区干旱风险发生可能性增加。

(3) 近 49 年辽宁省春玉米全育期降水量整体以 $4.93\text{ mm}/10\text{a}$ 的减少趋势,各个年代际间变化明显,拔节期、抽穗期及成熟期降水年际变化大,波动性强;空间上,降水量由东南沿海向西北方向递减,其中中部地区年降水量变化较大,不同年代际间地区差异明显,1990—1999 年降水量分布变化较大。

(4) 辽宁省春玉米全育期干燥度指数在不同年代际存在差异。从空间分布上,GDD、HDD 的对于干旱风险

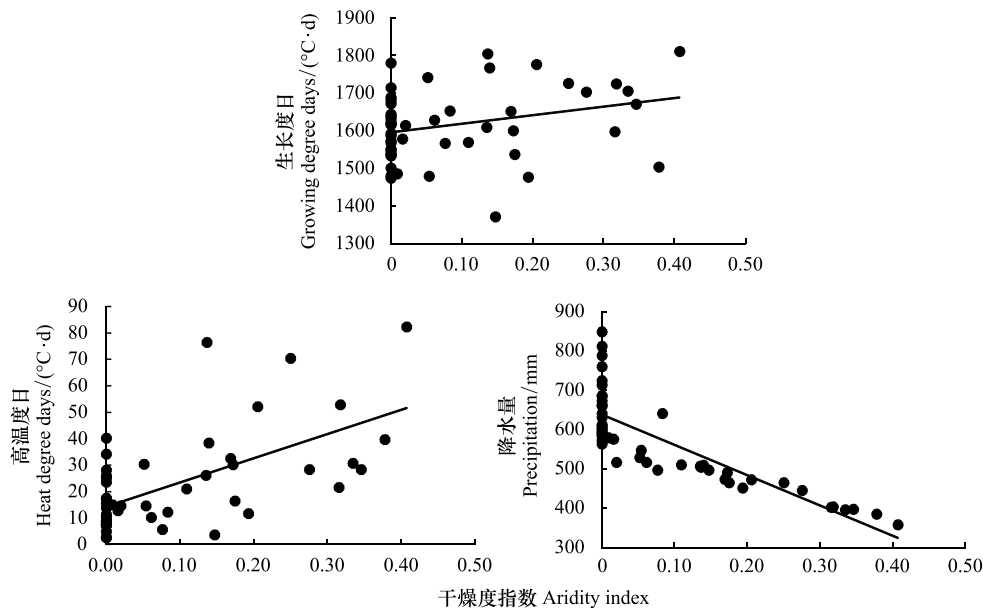


图7 干燥度指数和 GDD、HDD 及降水量散点分布图

Fig.7 Scatter plot of aridity index and GDD, HDD and precipitation

范围变化不明显,但降水量大范围的减少,干燥度指数会产生一定变化;从干燥度指数与 GDD、HDD 以及降水量的聚合分析看,辽宁省春玉米生育期 GDD 的升高对干旱风险影响较小,而 HDD 的升高和降水量的减少引发干旱的风险性较高。

(5)虽辽宁省春玉米全育期 GDD、HDD 近 49 年来呈现不断上升的趋势,高值区多集中在朝阳、叶柏寿等西部地区;但降水量呈现降低趋势,且西北部降水量较少,未来西部地区春玉米干旱风险加大。下一步有必要针对农业气候变化及其对农业影响等开展分区研究,在相对干旱地区,可以通过扩大旱田水浇地面积防御干旱威胁,减轻干旱影响;未来应重点加强对辽宁省春玉米生产气象条件的监测,同时提高玉米生产用水利用率和利用效率,降低干旱带来的危害。

参考文献 (References):

- [1] 赵锦, 杨晓光. 气候变化背景下我国玉米产量潜力及提升空间研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [2] 尹小刚, 陈阜, Jorgen E, Olesen. 气候变化背景下东北玉米生产的干旱风险与适应对策[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [3] 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. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 5-9.
- [4] 周梦子, 周广胜, 吕晓敏, 周莉, 汲玉河. 1.5 和 2 °C 升温阈值下中国温度和降水变化的预估. 气象学报, 2019, 77(4): 728-74.
- [5] 刘江, 潘宇弘, 王平华, 李一鸣, 金磊, 温永菁, 高淑新. 1966-2015 年辽宁省玉米气候生产潜力的时空特征. 生态学报, 2018, 37(11): 3396-3406.
- [6] 王磊, 崔金虎. 气候变化对我国玉米种植区域划分的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [7] 陈璐, 王连喜, 刘静. 气候变化对宁夏中部干旱带玉米生产影响的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [8] 韩荣青, 郑度, 戴尔阜, 吴绍洪, 赵明华. 中国粮食主产区生产潜力对气候波动响应研究. 资源科学, 2014, 36(12): 2611-2623.
- [9] Xiao D, Moiwu J P, Tao F, Yang Y H, Shen Y J, Xu Q H, Lu J F, Zhang H, Liu F S. Spatio-temporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(7): 1911-1202.
- [10] 刘芳园, 肖嗣荣, 刘寒, 穆虫义. 河北地区气候变化对农业的影响. 地理与地理信息科学, 2014, 30(4): 122-126.
- [11] 庞艳梅, 陈超, 潘学标. 未来气候情景下四川盆地冬小麦生育期气候资源及生产潜力的变化. 中国农业气象, 2014, 35(1): 1-9.
- [12] ZHANG T, WANG J, TENG Y. Adaptive effectiveness of irri-gated area expansion in mitigating the impacts of climate change on crop yields in northern China. Sustainability, 2017, 9(5): 851.
- [13] 何奇瑾, 周广胜. 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性. 生态学报, 2012, 32(12): 3931-3939.
- [14] 余会康, 郭建平. 气候变化下东北水稻冷害时空分布变化. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 594-601.
- [15] 薛亚荣, 巴特儿·巴克, 罗那那, 康丽娟, 王孟辉. 塔城地区棉花生育期需水量变化的气候响应. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1192-1198.

- [16] Golovko T K, Dalke I V, Shmorgunov G T, Triandafilov A F, Tulinov A G. Growth of Plants and Productivity of Corn in a Cold Climate. *Russian Agricultural Sciences*, 2019, 45(3): 251-255.
- [17] Labell D B, Torney A, Field C B. Climate extremes in California agriculture. *Climatic Change*, 2011, 109(1): 355-363.
- [18] Otkin J A, Anderson M C, Hain C, Svoboda M, Johnson D, Mueller R, Tadesse T W, Brown J. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, (218-219): 230-242.
- [19] Wu D, Qu J J, Hao X J. Agricultural drought monitoring using MODIS-based drought indices over the USA Corn Belt. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(21): 5403-5425.
- [20] 闫立萍, 王志丹, 赖晓璐. 辽宁省粮食生产能力分析. *江苏农业科学*, 2014, 42(1): 415-416.
- [21] 杨双. 辽宁省玉米省产情况及产业结构调整趋势. *产业开发与装备*, 2018, (5): 6-7.
- [22] 李胜贤, 曹敏建. 辽宁省粮食综合生产能力及安全预警模型研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- [23] 袁东敏, 郭建平. 气候变化对东北玉米生长发育的影响评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2010.
- [24] 张艺萌, 张雪松, 郭婷婷, 罗新兰. 辽西北地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响. *中国农业气象*, 2015, 36(2): 203-211.
- [25] 杨若子, 周广胜. 东北三省主要农业气象灾害综合危险性评价. *气象学报*, 2015, 73(6): 1114-1153.
- [26] 辽宁省水利电力厅. 辽宁省抗旱资料汇编[R]. 辽宁省水利厅, 1992.
- [27] 曹永强, 李维佳, 赵博雅. 气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究. *资源科学*, 2018, 40(1): 150-160.
- [28] 王翠玲, 宁方贵, 张继权, 刘兴朋, 佟志军. 辽西北玉米不同生长阶段干旱灾害风险阈值的确定. 北京: 气象灾害影响及风险评估理论与实践, 2012.
- [29] 李晶, 张运福, 班显秀. 辽宁玉米作物系数研究. *辽宁气象*, 2000, (1): 18-20.
- [30] 靳春香. 近 50 年辽宁省玉米全生育期有效降水与需水量变化特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [31] 徐玉秀, 蒋姗姗, 周福然, 温舟, 白雪, 史虹婷, 胡明, 张翠艳. 1981-2010 年锦州地区玉米生育期气象因子变化及其与气象产量的关系. *气象与环境学报*, 2017, 33(5): 82-90.
- [32] 甄文超, 王秀英. 气象学与农业气象学基础. 北京: 气象出版社, 2006.
- [33] 刘文海, 赵彦平, 王慧. 浅析温度对玉米生长发育及产量的影响. *农业科技通讯*, 2015, (10): 56-60.
- [34] 叶青, 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 肖金香. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅷ. 江西省双季稻各生育期热量条件变化特征. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2021-2030.
- [35] 王占彪, 王猛, 尹小刚, 张海林, 褚庆全, 文新亚, 陈阜. 气候变化背景下华北平原夏玉米各生育期水热时空特征. *中国生态农业学报*, 2015, 23(4): 473-481.
- [36] Hawkins E, Fricker T E, Challinor A J, Ferro C A, Ho C K, Osborne T M. Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 937-947.
- [37] Liu B, Liu L L, Tian L Y, Cao W X, Zhu Y, Asseng S. Post-heading heat stress and yield impact in winter wheat of China. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 372-381.
- [38] 贾建英, 郭建平. 气候变化对东北玉米生产的影响[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
- [39] 王培娟, 霍治国, 陈鹏狮. 东北地区春玉米不同发育阶段热量指数特征. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1450-1458.
- [40] 高晓容, 王春乙, 张继权. 东北玉米低温冷害时空分布与多时间尺度变化规律分析. *灾害学*, 2012, 27(4): 65-70.
- [41] 王涛, 王乙舒, 崔妍, 敖雪, 侯依玲, 沈玉敏, 王小桃. 1961—1987 年与 1988—2014 年辽宁省气候区划界线变化及可能气候成因. *地理研究*, 2019, 38(4): 794-806.
- [42] 纪然, 张威. 1960—2016 年辽宁省地表温度时空变化特征及影响因素分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2018.
- [43] 侯亚红, 息涛, 徐方姝, 张蕊, 赵森, 关健华. 辽宁避暑旅游气候条件分析和气象指数研究. *气象与环境科学*, 2018, 41(4): 34-40.
- [44] 张黎, 冯淑霞, 冯雪菲, 戴海燕, 张富荣, 王晓霞, 李书军, 隋景月, 梁丰. 辽宁省朝阳市气候变化分析. *畜牧与饲料科学*, 2015, 36(10): 65-66.
- [45] 王春春, 卞新民. 东北农业气候资源演变特征及春玉米栽培应对策略研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [46] 王斯文. 辽宁省区域气候差异及影响因素分析. *经济研究导刊*, 2015, (6): 72-72+189.
- [47] 韩丛利. 辽宁省洪涝灾害时间变化特征分析. *中国防汛抗旱*, 2017, 27(3): 70-73.
- [48] 赵鸿, 王润元, 尚艳, 王鹤龄, 张凯, 赵福年, 齐月, 陈斐. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望. *干旱气象*, 2016, 34(1): 1-12.
- [49] Olufayo A, Baldy C, Ruelle P, Konate J. Diurnal course of canopy temperature and leaf water potential of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) under a Mediterranean climate. *Agric For Meteorol*, 1993, 64: 223-236.
- [50] Lobell D B, Hammer G L, McLean G, Messina C, Roberts M J, Schlenker W. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change*, 2013, 3(5): 497-501.
- [51] 张叶, 罗怀良. 农业气象干旱指标研究综述. *资源开发与市场*, 2006, 22(1): 50-52.
- [52] 曹永强, 张亮亮, 朱明明. 辽西北地区干旱时空变化特征分析. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 49-54.
- [53] 吴琼, 赵春雨, 王大钧, 李倩, 伍俊艺, 林蓉. 1951—2014 年辽宁省气象干旱的时空特征分析. *干旱区资源与环境*, 2016(30): 151-157.
- [54] 王亚许, 吕娟, 孙洪泉, 屈艳萍, 苏志诚. 基于 APSIM 模型的辽宁省玉米旱灾风险评估. *灾害学*, 2017, 32(3): 230-234.