

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.026

1959—2015年黑龙江省玉米需水量时空分布特征

聂堂哲^{1,2} 张忠学^{1,2} 林彦宇^{2,3} 陈鹏^{1,2} 孙仲益⁴

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 4. 北海道大学大学院农学院, 札幌 060-8589)

摘要: 基于黑龙江省26个气象站1959—2015年的逐日气象数据和14个农业气象观测站的1991—2008年玉米生育期观测资料, 利用单作物系数法和Arcmap的空间分析功能计算并绘制了玉米生育期内各月有效降雨量(Effective precipitation)、需水量(Crop water requirement)和灌溉需水量(Irrigation requirement)及三者气候倾向率的分布图, 揭示了黑龙江省玉米水分供需的时空分布规律。结果表明: 黑龙江省玉米生育期有效降雨量平均值为302 mm, 高值区位于中部地区, 5—6月呈增长趋势, 7—9月呈下降趋势; 需水量平均值为383 mm, 自西向东总体呈先减小后增大的分布趋势, 除9月外, 全生育期及各月需水量均呈减小趋势; 灌溉需水量平均值为153 mm, 其分布与需水量分布相似, 西部地区灌溉需水量较大, 5、7月呈减小趋势, 而8、9月呈大幅增加趋势, 应在7、8月适时补充灌溉, 保障玉米产量。本研究可为黑龙江省玉米种植区灌溉水资源分配和灌溉制度制定提供科学依据。

关键词: 玉米; 黑龙江省; 有效降雨量; 需水量; 灌溉需水量; 单作物系数法

中图分类号: S274; TV212.5⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)07-0217-11

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Maize Water Requirement in Heilongjiang Province during 1959—2015

NIE Tangzhe^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} LIN Yanyu^{2,3} CHEN Peng^{1,2} SUN Zhongyi⁴

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Agricultural Water Resource Use, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China

3. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

4. Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan)

Abstract: Distribution maps of effective precipitation (P_e), crop water requirement (ET_c), irrigation requirement (I_r) and their climatic tendencies during maize growth period were calculated and drawn by single crop coefficient method Arcmap spatial analysis based on daily meteorological data in 1959—2015 of 26 meteorological stations and maize growth observation data in 1991—2008 of 14 agrometeorological stations in Heilongjiang Province. The spatial and temporal distribution of maize water supply and demand in Heilongjiang Province was revealed. The result showed that the average value of P_e in Heilongjiang Province during maize growth period was 302 mm, and the high value area was located in the central area, it showed an increasing trend in May and June, a decreasing trend from July to October. The average ET_c was 383 mm, and it was decreased first, and then increased from west to east, ET_c during the whole growth period and each month showed a increasing trend except September. The average I_r was 153 mm, and its spatial distribution was similar to that of ET_c , I_r in the western area was larger, it decreased in May and July, and increased greatly in August and September. Irrigation should be supplemented in time in July and August to ensure maize yield. The research result provided a scientific basis for the allocation of irrigation water resource and the formulation of irrigation practice in maize planting area of Heilongjiang Province.

Key words: maize; Heilongjiang Province; effective precipitation; crop water requirement; irrigation requirement; single crop coefficient method

收稿日期: 2018-01-18 修回日期: 2018-03-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01)

作者简介: 聂堂哲(1991—), 男, 博士生, 主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: nietangzhe527@163.com

通信作者: 张忠学(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: zhangzhongxue@163.com

0 引言

黑龙江省是我国重要的粮食主产区之一。玉米作为主要的粮食作物,在全省范围内得到广泛种植,且种植面积在逐年增加。截止2015年,其种植面积为 $7.723 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全省农作物种植面积52.2%,产量 $3.544 \times 10^7 \text{ t}$,占全省粮食产量的56%^[1]。但是由于气候变化及各地降雨的空间分布差异,导致玉米水分供需情况时空差异较大^[2-4]。准确掌握玉米生育期内有效降雨量、需水量及灌溉需水量时空分布特征,对于合理利用农业水资源、优化田间水分管理和保障粮食安全意义重大^[5-6]。

目前,已有很多学者利用Penman-Monteith公式和单作物系数法对区域尺度下不同作物的需水量时空变化开展了大量研究,利用有效降雨量与需水量差值计算作物灌溉需水量来指导农业水分管理在众多研究区内得到了很好的实践^[7-12]。但涉及到黑龙江玉米需水量的研究并不多,刘钰等^[13]研究表明,东北地区1970—2000年春玉米需水量为200~500 mm,灌溉需水量为10~220 mm,其需水量及灌溉需水量范围太大,难以指导农业生产。高晓容等^[2]研究了1961—2010年东北地区玉米生育阶段需水量及早涝时空变化,其研究区域并未包含黑龙江东部及北部玉米种植区,且仅给出了东北地区玉米生育期内有效降雨量和需水量总体时间变化趋势及黑龙江省玉米各生育期需水量分布,并未涉及有效降雨量、需水量和灌溉需水量空间变化趋势。目前,黑龙江省省区尺度的玉米需水量时空分布特征的研究还不能满足玉米种植面积逐年增长条件下指导农业水资源合理分配及节水高产的要求。

以往研究中,大多将玉米生育期划分为4个阶段进行玉米需水规律的研究^[2,6,14],然而黑龙江省受春季低温影响,各地种植日期差异较大,且适宜各积温带的玉米品种不一,各地气候及种植品种差异较大造成玉米各生长阶段持续时间不一^[15-16]。若按生育阶段进行分析,不利于水资源分配工作进行,故在本研究中按月进行分析,明确生育期各月有效降雨量、需水量、灌溉需水量及其变化趋势,使结果更具实用性和指导意义。

在黑龙江省气候变化和玉米种植面积不断增加的背景下,本文根据黑龙江省26个气象站1959—2015年的逐日气象资料及14个农业气象观测站1991—2008年的玉米生育期观测资料计算玉米生育期内各月有效降雨量、需水量、灌溉需水量及三者气候倾向率并绘制相应的分布图,选取各积温区典型站进行分析,旨在为黑龙江省合理分配灌溉水资

源和制定区域灌溉制度提供依据。

1 材料和方法

1.1 数据来源

由于黑龙江省内各气象站建站年代不同,本着数据时间序列尽可能长、入选站点尽可能多的原则,选取黑龙江省26个站点1959—2015年的逐日气象资料,包括:最高气温、最低气温、平均相对湿度、风速、日照、降雨量以及各站的经纬度、海拔高度等信息以及14个农业气象观测站1991—2008年的玉米生育期观测资料。以上资料均来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。图1为研究区域及站点分布情况,根据黑龙江省农业委员会发布的《黑龙江省农作物品种积温区划图》^[17]和《黑龙江省2015年主要粮食作物优质高产品种区域布局规划》^[18],第6积温带不适合玉米种植,故第6积温带非本文研究区域。

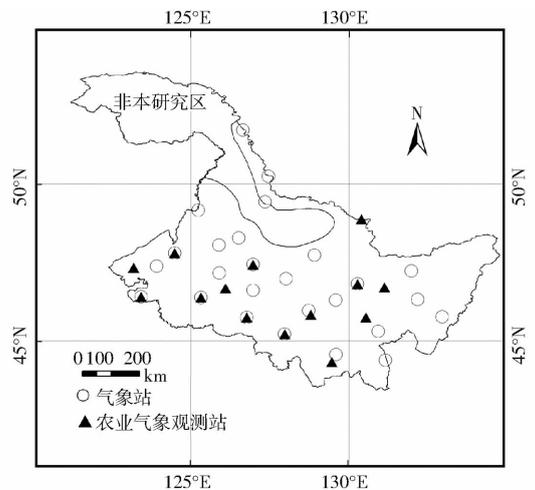


图1 研究区域及站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of stations

1.2 玉米生育期划分

FAO-56将作物生育期划分为:生长初期(L_{ini})即从播种到作物地面覆盖率大约10%,快速发育期(L_{dev})即从地面覆盖率10%到充分覆盖,生长中期(L_{mid})即从充分覆盖到成熟期开始,生长后期(L_{late})即从叶片开始变黄到成熟或收获^[19]。本文将玉米整个生育期划分为4个阶段:播种—七叶期(L_{ini})、七叶期—抽雄期(L_{dev})、抽雄期—乳熟期(L_{mid})、乳熟期—成熟期(L_{late})。根据黑龙江省14个农业气象观测站1991—2008年玉米生育期观测资料,假定研究时段内玉米品种不发生变化,确定了玉米播种日期和各生育阶段平均天数,对于没有生育期观测资料的气象站,选取其临近的并与其在同一积温区内的农业气象观测站数据作为计算依据,如表1所示。

表1 1991—2008年玉米生育期资料
Tab.1 Maize growth period data in 1991—2008

农业气象 观测站	生长初期 L_{ini}/d	快速发育期 L_{dev}/d	生长中期 L_{mid}/d	生长后期 L_{late}/d	总生育期 /d	使用该站数据的气象站
安达	45	37	34	24	140	安达站
勃利	42	39	29	31	141	虎林站、鸡西站
方正	37	43	31	24	135	通河站
富裕	40	40	37	23	140	富裕站
哈尔滨	40	43	27	33	143	哈尔滨站
海伦	38	39	30	34	141	北安站、克山站、明水站、嫩江站、铁力站
集贤	36	43	36	25	140	宝清站、富锦站
佳木斯	39	30	33	33	135	佳木斯站、依兰站
嘉荫	35	27	27	31	120	黑河站、呼玛站、孙吴站、伊春站
龙江	45	36	28	36	145	齐齐哈尔站
宁安	47	33	38	20	138	牡丹江站、绥芬河站
青冈	47	38	37	26	148	绥化站
尚志	38	39	31	26	134	尚志站
泰来	46	38	30	35	149	泰来站
平均值	41.07	37.50	32.00	28.64	139.21	

1.3 测定指标与方法

1.3.1 有效降雨量

有效降雨量采用美国农业部土壤保持局推荐的方法计算^[20],公式为

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17 & (P \leq 8.3 \text{ mm}) \\ 4.17 + 0.1P & (P > 8.3 \text{ mm}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 P_e ——有效降雨量,mm P ——降雨量,mm

1.3.2 玉米需水量

玉米需水量采用FAO推荐的单作物系数法进行逐日计算^[19],玉米生育期内总需水量及各月需水量由生育期内逐日需水量累加得出,根据玉米不同生长阶段的作物系数可以计算得到玉米需水量,公式为

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中 ET_c ——逐日作物需水量,mm

K_c ——作物系数

ET_0 ——逐日参考作物蒸散量,mm

根据FAO-56的推荐,在最小相对湿度为45%、平均风速为2 m/s、无水分胁迫、管理水平较高条件下玉米的作物系数 K_{cini} 、 K_{cmid} 和 K_{cend} 分别取值为0.30、1.20和0.35。本文对 K_{cmid} 进行修正,由于黑龙江省春季降雨频率较低、降雨量较少、大气蒸发频率较弱,故对 K_{cini} 未进行修正。根据FAO-56当 $K_{cend} < 0.45$ 时,对 K_{cend} 值不做修正。对 K_{cmid} 进行修正公式为

$$K_{cmid} = K_{cmid(tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3)$$

式中 $K_{cmid(tab)}$ ——FAO-56中推荐的作物系数值
 u_2 ——生长中期2 m高度处日平均风速,m/s
 RH_{min} ——生长中期日最小相对湿度的平均值,%

h ——生长中期作物的平均高度,m

利用FAO推荐的Penman-Monteith方法计算参考作物蒸散量(ET_0),其计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

式中 R_n ——作物表面净辐射量,MJ/(m²·d)

G ——土壤热通量密度,MJ/(m²·d)

T ——2 m高处的日平均空气温度,℃

e_s ——饱和水汽压,kPa

e_a ——实际水汽压,kPa

Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线斜率,kPa/K

γ ——湿度计常数,kPa/K

1.3.3 灌溉需水量

对于旱田作物,各月灌溉需水量等于该月 ET_c 与 P_e 的差值,若该月内 P_e 大于 ET_c ,则不需要灌溉。生育期内总灌溉需水量等于各月灌溉需水量之和,公式为

$$I_{rm} = \max\left(\sum_{i=1}^n ET_c - \sum_{i=1}^n P_e, 0\right) \quad (5)$$

$$I_{ra} = \sum_{i=1}^m I_{rm} \quad (6)$$

式中 n ——生育期内各月天数,d

I_{m} ——生育期内第 m 个月灌溉需水量, mm

I_{ra} ——生育期内总灌溉需水量, mm

1.3.4 气候倾向率

采用最小二乘法, 将气象要素变化趋势用一次线性方程表示, 即

$$\hat{Y}_i = at + b \quad (7)$$

式中 \hat{Y}_i ——气象要素的拟合值

t ——对应年份

a 、 b ——回归系数

10a 称为气候倾向率, 表示气象要素每 10 a 的变化速率。其正值表示对应气象要素呈增加趋势, 负值表示呈减少趋势。

1.3.5 ET_c 与 P_e 的耦合度

ET_c 与 P_e 的耦合度指作物生长期内, P_e 满足 ET_c 的程度。计算式为

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & (P_i \geq ET_{ci}) \\ P_i/ET_{ci} & (P_i < ET_{ci}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 λ_i ——第 i 时段的耦合度

P_i ——第 i 时段内的有效降雨量, mm

ET_{ci} ——第 i 时段内作物需水量, mm

1.3.6 趋势检验和突变检验

Mann-Kendall 趋势检验作为一种非参数统计检验方法, 能够很好地揭示时间序列的变化趋势, 对于非正态分布的气象数据, 具有更加突出的适应性。其统计变量 Z 的正负表示数据变化趋势, Z 的绝对值在大于等于 1.64、2.32 和 2.56 时, 分别表示通过可信度为 95%、99% 和 99.9% 的显著性检验, 本文利用此方法对玉米生育期内 P_e 、 ET_c 及 I_r 变化趋势进行检验。Mann-Kendall 突变检验通过计算 UF_k 和 UB_k 两个统计量并绘制其曲线图, 可分析得到数据序列的变化趋势和突变点。利用滑动 t 检验法^[21]、Yamamoto 法^[22] 和 Mann-Kendall 突变检验^[23] 分别对多年玉米生育期内 P_e 、 ET_c 及 I_r 进行突变检验。

1.4 数据处理

利用 CROPWAT 8.0 软件进行黑龙江省 26 个气象站 P_e 、 ET_c 及 I_r 的计算, 利用 Matlab 2004b 计算气候倾向率, 并进行 Mann-Kendall 趋势检验和突变检验, 利用 Arcmap 10.2 工具箱的空间分析功能对 P_e 、 ET_c 及 I_r 进行空间插值并作图。

2 结果与分析

2.1 玉米生育期有效降雨量变化趋势

1959—2015 年研究区内玉米生育期内年均 P_e 及其气候倾向率空间分布情况如图 2 和图 3 所示。

由图 2a 可知, 玉米生育期年均 P_e 为 254 ~ 356 mm, 平均值为 302 mm。 P_e 自西向东总体表现为先增大后减小的趋势, 高值区主要分布在伊春、海伦、铁力、绥化和尚志一带, 其平均 P_e 均大于 320 mm, 铁力站的平均 P_e 最大。低值区在泰来、齐齐哈尔、富裕和呼玛一带, 平均 P_e 小于 270 mm。由图 3a 可知, 玉米生育期 P_e 气候倾向率为 $-12.15 \sim 3.65$ mm/(10 a), 平均值为 -3.20 mm/(10 a), 总体表现为下降趋势。除西部的齐齐哈尔、克山、富裕、明水和南部的绥芬河外, 其他 21 个气象站的 P_e 均表现为下降趋势。其中, 通河、尚志和宝清 P_e 下降趋势分别通过了 $\alpha = 0.001$ 、 $\alpha = 0.01$ 和 $\alpha = 0.05$ 显著性检验。

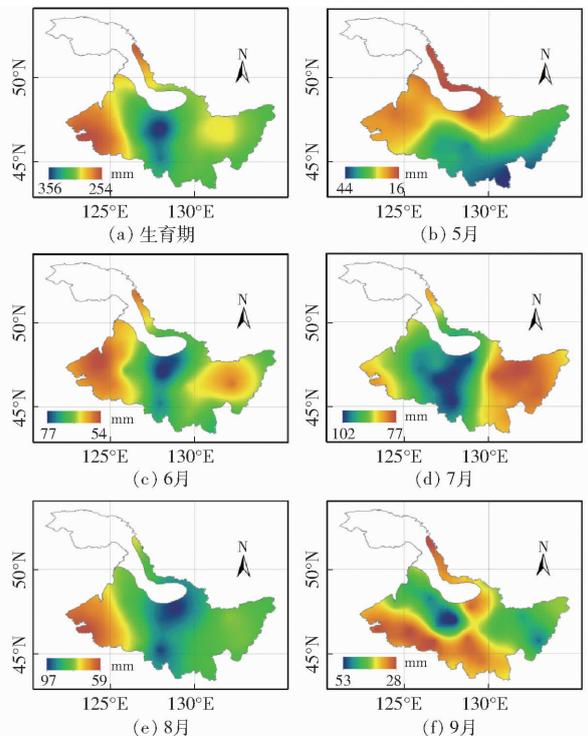


图 2 1959—2015 年有效降雨量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of P_e in 1959—2015

1959—2015 年研究区内玉米生育期内各月 P_e 的空间分布如图 2b~2f 所示, 5 月年均 P_e 为 16 ~ 44 mm, 平均值为 28 mm, 自北向南呈递减趋势分布; 6 月年均 P_e 为 54 ~ 77 mm, 平均值为 64 mm; 7 月年均 P_e 为 77 ~ 102 mm, 平均值为 91 mm; 8 月年均 P_e 为 59 ~ 97 mm, 平均值为 80 mm, 6、7、8 月年均 P_e 均自西向东呈先增大后减小分布趋势; 9 月 P_e 为 28 ~ 53 mm, 平均值为 39 mm, 总体呈现中部较大、北部和南部较小的分布趋势。通过比较 5—9 月年均 P_e , 各月 P_e 由大到小依次为: 7 月、8 月、6 月、9 月、5 月。从时间上看, 生育期内有效降雨量呈先增大后减小的趋势, 有效降雨主要集中在 7、8 月, 两月之和为 171 mm, 占玉米生育期平均 P_e 总量的 56.62%。各月高低值在空间上存在较大差异, 6、7、8 月 P_e 均呈

现为中部大于东部和西部,5、9月的 P_e 南北差异较大。 P_e 高值区主要集中在研究区中部,不同月份的低值区分布位置不同。

各月 P_e 气候倾向率的空间分布情况如图3b~3f所示。研究区域内5月 P_e 气候倾向率为 $-1.18 \sim 3.99 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,平均值为 $1.45 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,研究区内21个气象站 P_e 呈上升趋势,7.69%的站点通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验;6月 P_e 气候倾向率为 $-3.20 \sim 4.34 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,平均值为 $0.46 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, P_e 气候倾向率零值线位于嫩江、北安、海伦、绥化和哈尔滨一线,此线以西的17个气象站呈上升趋势,占研究区总站数的65.38%,安达和通河分别在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著上升和下降;7月 P_e 气候倾向率为 $-3.42 \sim 3.03 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,平均值 $-0.26 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,中部和西南部地区气候倾向率小于零,绥芬河地区 P_e 在0.05水平上显著上升,绥化和尚志两地 P_e 在0.05水平上显著下降;8月 P_e 气候倾向率为 $-5.05 \sim -0.22 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,平均值 $-2.49 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,东部

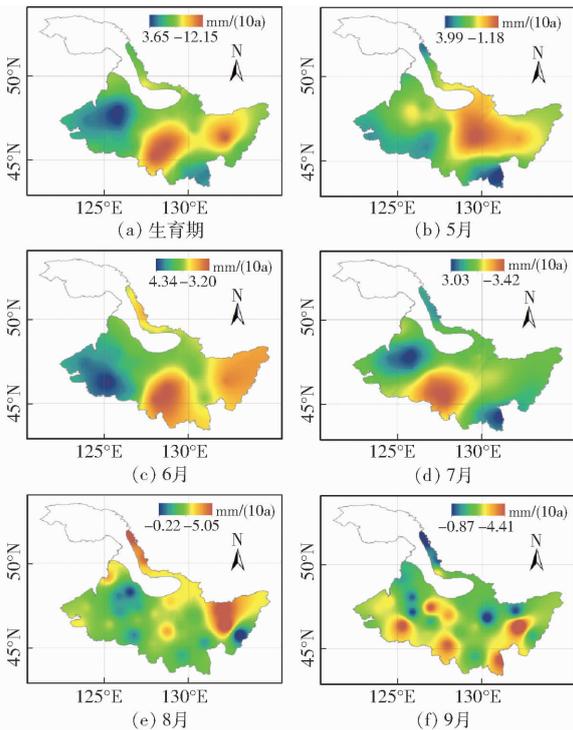


图3 1959—2015年有效降雨量气候倾向率空间分布
Fig. 3 Spatial distributions of P_e climatic tendency in 1959—2015

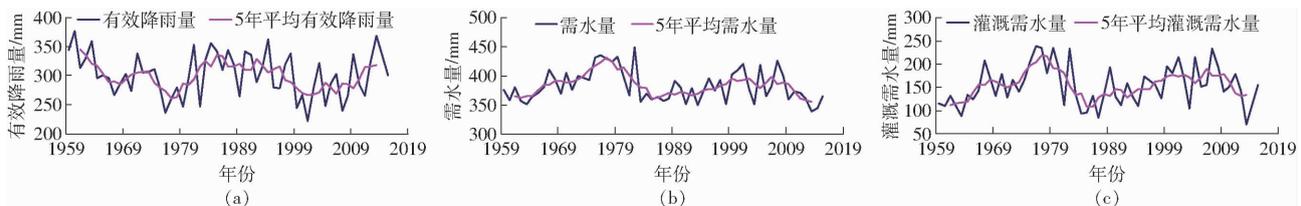


图4 1959—2015年玉米生育期内研究区年均有效降雨量、需水量和灌溉需水量变化趋势

Fig. 4 Changing trends of P_e , ET_e and I_e average value in each year during maize growth period in study area during 1959—2015

地区 P_e 下降幅度较大,有15.38%的站点在0.05水平上显著下降;9月 P_e 气候倾向率为 $-4.41 \sim -0.87 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,平均值为 $-2.37 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,南部地区 P_e 下降幅度较大,34.62%的站点在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著下降。总体来看,5月和6月平均 P_e 呈增长趋势,7月呈小幅减小趋势,9月和8月减小幅度较大。

利用3种突变检验方法分析得到,玉米生育期内 P_e 突变发生点在1964年和1975年,由图4a可知,两点突变后均呈增加趋势,Mann-Kendall突变检验显示,1967—1972年和1976—1983年时间段内 P_e 在0.05水平上显著下降,这是由于这个时间段内平均 P_e 较小,总体表现为下降趋势(图略)。

2.2 玉米生育期需水量变化趋势

1959—2015年研究区内玉米 ET_e 及其气候倾向率空间分布情况如图5、6所示。由图5a、6a可知,年均 ET_e 在302~487 mm范围内,平均值383 mm,自西向东总体表现为先减小后增大的分布趋势,玉米 ET_e 高值中心主要分布在研究区西部。除北部呼玛、黑河和孙吴地区外, ET_e 的这种分布趋势与 P_e 的分布相反,即 P_e 较少的地方,玉米 ET_e 反而较多。 ET_e 气候倾向率在 $-12.94 \sim 4.04 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 范围内,其平均值为 $-2.43 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, ET_e 总体表现为下降趋势。研究区内有18个气象站的 ET_e 气候倾向率小于零,占总气象站数的69.23%。其中安达和哈尔滨的 ET_e 减小趋势通过了 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验,明水的 ET_e 减小趋势通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,虎林和嫩江 ET_e 增加趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,克山、绥芬河、绥化、泰来和伊春 ET_e 减小趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。

1959—2015年研究区内玉米生育期内玉米各月 ET_e 的空间分布如图5b~5f,5月年均 ET_e 为14~51 mm,平均值为31 mm,自北向南呈逐渐增加。这种分布主要是由于各地玉米播种时间的差异造成的,研究区内西南部地区播种时间在5月7日前,而北部地区播种时间则在5月20日后;6月玉米年均 ET_e 在40~75 mm范围内,平均值为52 mm;7月玉米年均 ET_e 为112~146 mm,平均值为124 mm,6、7月 ET_e 自西向东呈逐渐减小的趋势;8月 ET_e 范围

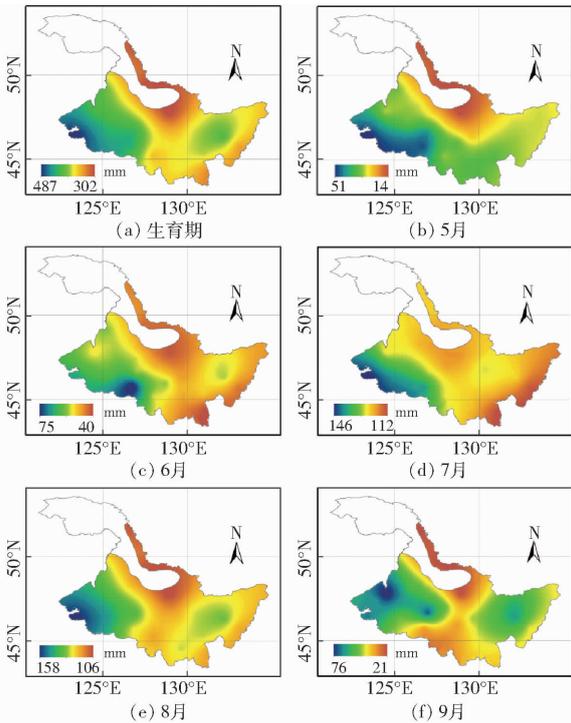


图5 1959—2015年需水量空间分布

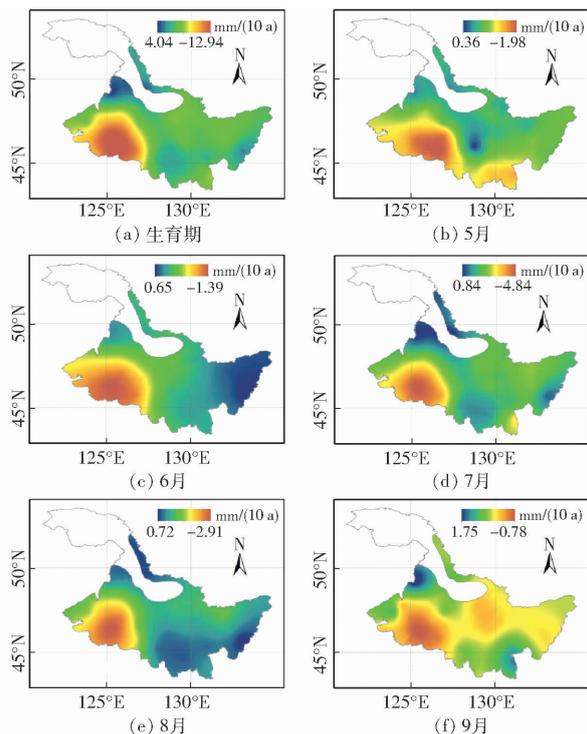
Fig.5 Spatial distributions of ET_c during 1959—2015

图6 1959—2015年需水量气候倾向率空间分布

Fig.6 Spatial distributions of ET_c climatic tendency during 1959—2015

为106~158 mm,平均值为128 mm;9月 ET_c 为21~76 mm,平均值为46 mm,8、9月 ET_c 自西向东呈先减小再增大的分布趋势。各月 ET_c 平均值由大到小依次为:8月、7月、6月、9月、5月,从时间上看,玉米生育期内 ET_c 呈先增大后减小趋势,需水高峰期主要为7月和8月,两月之和为252 mm,占玉米生

育期平均 ET_c 总量的65.80%。从 ET_c 空间分布情况看,各月 ET_c 低值区主要分布在北部地区,而随着玉米的生长, ET_c 高值区由西南部逐渐向西北移动。

各月 ET_c 的气候倾向率空间分布如图6b~6f。5月玉米 ET_c 气候倾向率在 $-1.98 \sim 0.36$ mm/(10 a)范围内,平均值为 -0.6 mm/(10 a),有23个气象站气候倾向率小于零,研究区50%的站点通过了0.05显著性检验;6月玉米 ET_c 气候倾向率为 $-1.39 \sim 0.65$ mm/(10 a),平均值为 -0.17 mm/(10 a),气候倾向率自西向东由负值逐渐转变成正值,气候倾向率零值线在伊春、铁力和尚志一线上,11.54%的站点在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著减小;7月 ET_c 气候倾向率为 $-4.84 \sim 0.84$ mm/(10 a),平均值为 -1.43 mm/(10 a),呈减小趋势的气象站占研究区总站数的84.61%,其中23.08%的站点通过了0.05的显著性检验;8月 ET_c 气候倾向率范围在 $-2.91 \sim 0.72$ mm/(10 a),平均值为 -0.42 mm/(10 a),研究区中部和西部地区气候倾向率为负值,其他地区为正值,只有安达站在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著减小。9月 ET_c 气候倾向率为 $-0.78 \sim 1.75$ mm/(10 a),平均值为0.28 mm/(10 a),中部和西南部地区为负值,其他地区为正值,19.23%的站点在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著增加。各月 ET_c 气候倾向率平均值由大到小依次为:9月、6月、8月、5月、7月,除9月外,各月 ET_c 总体呈减小趋势,7月减小幅度较大。从空间上看,各月 ET_c 气候倾向率低值区主要分布在西南部地区,各月高值区分布位置不同。

利用滑动 t 检验法、Yamamoto法对玉米生育期内 ET_c 进行突变检验,发现突变点在1975年和1983年,而Mann-Kendall突变检验未检验出明显的突变点(图略)。由图4b可知,1975年以后5年平均 ET_c 由增加转为减小趋势,这与同年 P_c 突变变化趋势正好相反,1983年后玉米 ET_c 表现为增加趋势。Mann-Kendall突变检验则显示1972—1980年玉米需水量呈显著增加趋势。

2.3 玉米生育期灌溉需水量变化趋势

1959—2015年研究区内玉米生育期 I_r 及其气候倾向率空间分布情况如图7、8所示。由图7a可知,黑龙江省玉米生育期内年均 I_r 在79~274 mm范围内,平均值为153 mm,其分布与 ET_c 分布相似,均为自西向东呈先减小后增大的分布趋势, $I_r > 200$ mm的高值区主要分布在西部,低值区(小于120 mm)主要分布在呼玛、孙吴、铁力和尚志一线上。由图8a可知,玉米生育期 I_r 气候倾向率在 $-5.65 \sim 10.52$ mm/(10 a)范围内,平均值为2.09 mm/(10 a),总体表现为增加趋势。研究区内

18个气象站气候倾向率为正值, 占总气象站数的69.23%, 其中通河 I_r 在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著增加, 鸡西、嫩江、尚志、孙吴在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著性增加。

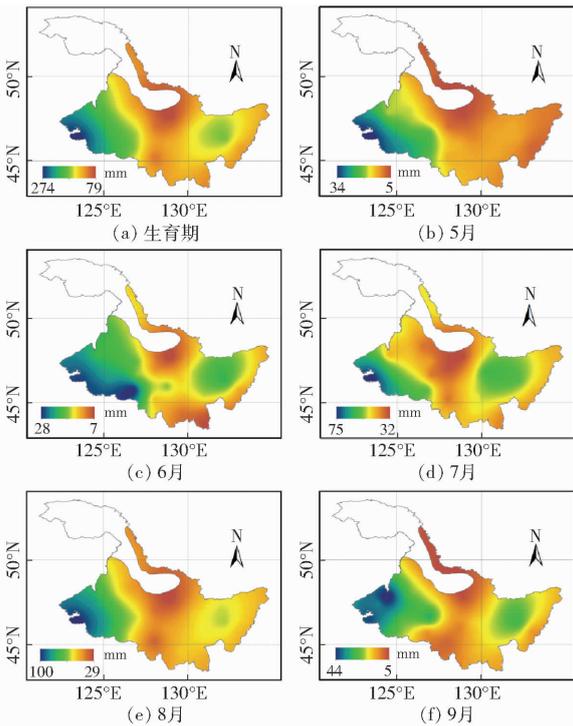


图7 1959—2015年灌溉需水量空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of I_r during 1959—2015

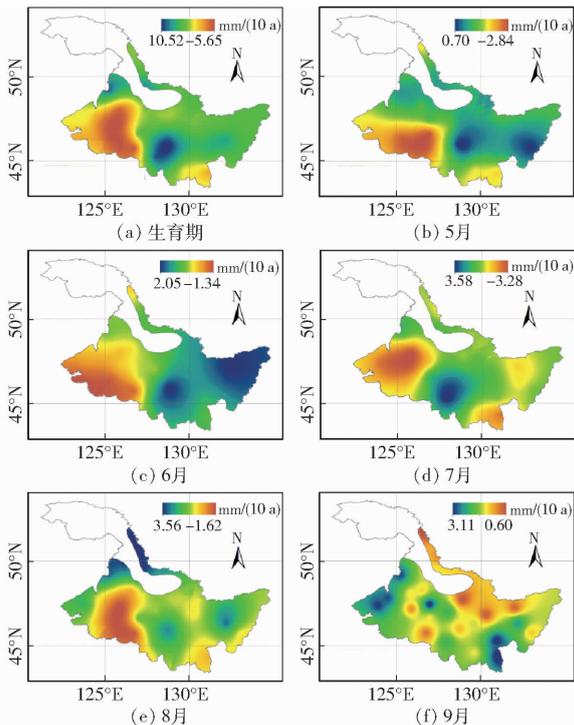


图8 1959—2015年灌溉需水量气候倾向率空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of I_r climatic tendency during 1959—2015

1959—2015年研究区内玉米生育期内玉米各月 I_r 的空间分布如图7b~7f。5月玉米年均 I_r 在

5~34 mm 范围内, 平均值为 14 mm, 自西南向东北呈逐渐减小的趋势分布; 6月玉米年均 I_r 在 7~28 mm 范围内, 平均值为 17 mm; 7月玉米年均 I_r 在 32~75 mm 范围内, 平均值为 47 mm; 8月玉米年均 I_r 在 29~100 mm 范围内, 平均值为 56 mm; 9月玉米 I_r 在 5~44 mm 范围内, 平均值为 20 mm。6、7、8、9月年均 I_r 分布趋势与生育期内 ET_c 相同, 呈自西向东先减小后增大趋势。各月 I_r 平均值由小到大依次为: 8月、7月、9月、6月、5月。从时间上看, 研究区内玉米 I_r 从5月到8月呈逐渐增加趋势, 9月有所降低。 I_r 高峰主要集中在7月和8月, 其值为 103 mm, 占平均灌溉总量的 66.88%。从空间上看, 各月的 I_r 低值区主要分布在研究区的北部、中部和南部地区, 高值区分布在西部地区, 这与生育期内各月 ET_c 分布相同。

各月 I_r 气候倾向率空间分布如图8b~8f所示。5月 I_r 气候倾向率在 $-2.84 \sim 0.70$ mm/(10 a) 范围内, 平均值为 -0.89 mm/(10 a), I_r 总体呈减小趋势, 研究区内 84.62% 的气象站 I_r 气候倾向率均小于零, 26.92% 的气象站通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验; 6月 I_r 气候倾向率在 $-1.34 \sim 2.05$ mm/(10 a) 范围内, 平均值为 0.47 mm/(10 a), 气候倾向率自西向东呈增加趋势, 11.54% 的气象站在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著增大; 7月玉米 I_r 气候倾向率在 $-3.28 \sim 3.58$ mm/(10 a) 范围内, 平均值为 -0.27 mm/(10 a), 西部地区 I_r 下降趋势较大, 中部地区上升的趋势较大, 尚志和克山的 I_r 分别在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著增加和减小。8月玉米 I_r 气候倾向率在 $-1.62 \sim 3.56$ mm/(10 a) 范围内, 平均值为 1.08 mm/(10 a), I_r 总体表现为增加趋势。80.77% 气象站的 I_r 气候倾向率大于零, 其中黑河站的 I_r 在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著增加。9月玉米 I_r 气候倾向率在 $0.60 \sim 3.11$ mm/(10 a) 范围内, 平均值为 1.70 mm/(10 a), 研究区内各站 I_r 均呈增大趋势, 其中 30.77% 的气象站在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著增加。各月 I_r 气候倾向率平均值由大到小依次为: 9月、8月、6月、7月、5月, 5、7月 I_r 小幅减小, 8、9月 I_r 增加的幅度较大。从空间上看, 研究区各月 I_r 高值区主要分布在中部, 低值区主要分布在西部。

通过滑动 t 检验法和 Yamamoto 法对玉米生育期内 I_r 进行突变检验 (图略), 其突变点在 1967 年、1975 年和 1983 年, 1967 年和 1975 年以后 I_r 均表现为减小趋势, 而在 1983 年由减小转变为增大趋势, 1975 和 1983 年与 ET_c 出现突变的年份相同, 由图 4c 可知, 各年 I_r 与 ET_c 的变化趋势相同。

2.4 玉米生育期有效降雨量、需水量和灌溉需水量之间的关系

由图2、5、7可知,生育期内 P_e 由大到小总体呈中部、东部、西部的分布趋势,而 ET_c 和 I_r 与 P_e 则相反,由大到小均呈西部、东部、中部的分布趋势,这与 P_e 和 I_r 的互补关系有关, P_e 和 ET_c 空间上不均匀的分布致使各气象站多年平均 I_r 的极差较大,为195 mm。6月、7月和8月 P_e 、 ET_c 和 I_r 的分布情况与其生育期分布大致相同。5月 P_e 主要集中在东南部,而由于玉米种植日期的不同, ET_c 主要集中在西北部,致使 I_r 西部大于东部。9月由于西部成熟期较晚,导致西部 I_r 较大,南部和北部 P_e 和 ET_c 均较小,故 I_r 较小。

由图3、6、8可知,玉米生育期内 P_e 西部小幅增加,中部和东部大幅减小,这使得西部 P_e 的不足得到缓解,减小了全省 P_e 的极差,但 ET_c 中部和东部地区减小较小,北部地区小幅增加,导致除西部地区外的其他地区 I_r 的增加,特别是通河、尚志、嫩江、孙吴地区 I_r 增加显著。5—9月研究区内 ET_c 气候倾向率大致表现为自西向东由负值逐渐变为正值,5—7月 P_e 东部呈增加趋势,而中部和西部呈减小趋势,故 I_r 东部呈减小趋势,中部和西部呈增加趋势。而8月和9月 P_e 的整体下降导致整个研究区内 I_r 呈整体上升趋势。

图9为研究区内玉米生育期内各月 P_e 、 ET_c 和 I_r 平均值变化趋势, P_e 、 ET_c 和 I_r 变化趋势大致相同,均呈先增大后减小趋势,7月和8月达到高峰。玉米 ET_c 在8月达到最大值,而 P_e 最大值出现在7月,这导致了8月 I_r 大于7月。5月和9月的 P_e 、 ET_c 和 I_r 较低。除6月外,各月 P_e 、 ET_c 和 I_r 由大到小均表现为 ET_c 、 P_e 、 I_r 。6月 P_e 大于 ET_c ,降雨供应充足,故 I_r 值较小。5、6月的 P_e 气候倾向率为正值, ET_c 气候倾向率为负值,使 I_r 呈减小趋势。7月 P_e 减小的幅度小于 ET_c 的减小幅度,故 I_r 呈小幅减小趋势,8月和9月 P_e 大幅减小,而玉米 ET_c 增减幅度较小,导致8月和9月 I_r 增加。这说明,研究区近57年玉米抽雄期前的水分亏缺有所缓解,而抽雄期以后的缺水呈增加趋势。

2.5 典型气象站玉米需水变化特征

为了更好地比较研究区玉米生育期内 P_e 、 ET_c 及两者的耦合度情况,在研究区内各积温区选取具有代表性的典型气象站进行分析比较,其中泰来、宝清和呼玛分别分布在研究区的西部、东部和北部,铁力和通河分布在中部。

由表2可知,玉米生育期内 ET_c 和 I_r 由大到小分别为:泰来、宝清、通河、铁力、呼玛, ET_c 和 I_r 都随着

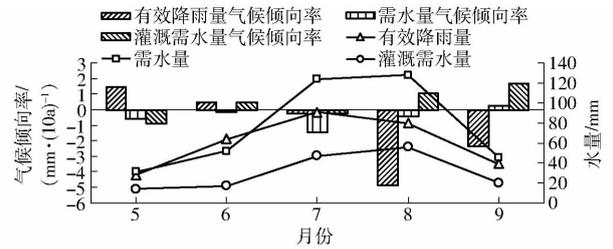


图9 研究区玉米生育期内有效降雨量、需水量和灌溉需水量各月平均值变化趋势

Fig. 9 Changing trends of P_e , ET_c and I_r average value in each month during maize growth period in study area

积温增加而增加。除呼玛外,各积温区的 P_e 由大到小分别为:铁力、通河、宝清、泰来,与 ET_c 的大小顺序相反,导致除第5积温区外玉米 ET_c 和 P_e 的耦合度随着积温的增加而越来越小,第1到第4积温区的 ET_c 和 P_e 的耦合度分别为0.52、0.72、0.87、0.97,而呼玛耦合度为0.83,各积温区均存在水分亏缺,第1积温区(西部地区)水分亏缺较为严重,第4积温区(中部地区)水分亏缺最轻。

由于降雨在时间上分布不均,第2积温区到第5积温区5、6月 P_e 大于 ET_c , ET_c 和 P_e 的耦合度为1。而第1积温区5月 ET_c 和 P_e 的耦合度为0.46,水分亏缺严重。各气象站7、8月 P_e 均小于 ET_c , ET_c 和 P_e 的耦合度小于1,除第5积温区外,均表现为7月的耦合度大于8月,且积温越大耦合度越小,与全生育期规律相同。9月,第4和第5积温区 ET_c 和 P_e 的耦合度为1,其他地区积温越大耦合度越小。

3 讨论

《中国主要农作物需水量等值线图研究》^[24]指出,黑龙江省17个县1961—1980年玉米 ET_c 平均值为427 mm,缺水量平均值为103 mm,而在本研究的计算中1961—1980全省玉米 ET_c 平均值为394 mm,低于前者7.73%,缺水量平均值为101 mm,低于前者1.94%,这主要是因为前者在计算时全生育期内各站作物系数 K_c 取值均为0.8,而本研究则根据玉米不同生长阶段对 K_c 进行划分并校正,增加了计算的准确性。在估算 P_e 时本文采用美国农业部土壤保持局推荐方法,而前者采用经验系数法,两种方法的计算结果在黑龙江省表现得差异较小。高晓容等^[2]的研究表明,1961—2010年东北地区玉米 ET_c 气候倾向率为1.2 mm/(10 a), L_{ini} 、 L_{dev} 、 L_{mid} 和 L_{late} 分别为1.0、-1.3、-1.0、0.1 mm/(10 a), P_e 全生育期、 L_{ini} 、 L_{dev} 、 L_{mid} 和 L_{late} 为-4.6、1.3、-0.6、-1.2、-4.1 mm/(10 a),本研究1959—2015年黑龙江玉米 ET_c 全生育期和5—9月气候倾向率分别为-2.43、-0.6、-0.17、-1.43、-0.42、0.28 mm/(10 a),

表2 研究区典型气象站 I_r 、 ET_c 、 P_e 及两者耦合度Tab.2 I_r , ET_c , P_e and their coupling coefficients of typical stations in study area

积温区	站点	项目	5月	6月	7月	8月	9月	全生育期
第1积温区	泰来	有效降雨量 P_e /mm	23	59	83	59	29	253
		需水量 ET_c /mm	50	65	150	158	65	487
		灌溉需水量 I_r /mm	34	26	75	101	40	275
		耦合度	0.46	0.91	0.55	0.38	0.45	0.52
第2积温区	宝清	有效降雨量 P_e /mm	33	57	81	79	44	295
		需水量 ET_c /mm	31	55	128	134	61	409
		灌溉需水量 I_r /mm	12	21	55	61	29	178
		耦合度	1	1	0.64	0.59	0.73	0.72
第3积温区	通河	有效降雨量 P_e /mm	39	67	95	87	31	319
		需水量 ET_c /mm	35	56	123	122	33	369
		灌溉需水量 I_r /mm	13	17	43	46	11	130
		耦合度	1	1	0.77	0.71	0.96	0.87
第4积温区	铁力	有效降雨量 P_e /mm	32	77	102	93	53	356
		需水量 ET_c /mm	28	49	118	121	50	366
		灌溉需水量 I_r /mm	9	11	33	39	16	108
		耦合度	1	1	0.86	0.77	1	0.97
第5积温区	呼玛	有效降雨量 P_e /mm	17	57	84	75	27	260
		需水量 ET_c /mm	16	45	122	109	21	313
		灌溉需水量 I_r /mm	7	14	47	43	6	117
		耦合度	1	1	0.68	0.69	1	0.83

P_e 全生育期和5—9月气候倾向率分别为-3.2、1.45、0.46、-0.26、-2.49、-2.37 mm/(10 a), 两研究结果相似, 说明黑龙江省玉米生育期内 P_e 和 ET_c 与东北地区变化趋势相似, 但生育期 ET_c 下降总体比东北地区快, 且黑龙江省玉米生长前期 ET_c 呈降低趋势, 与东北地区总体趋势相反。 P_e 下降趋势总体较东北地区慢, 玉米生长中期下降幅度比东北地区总体趋势下降幅度大。

研究表明, 近50年的气温上升使黑龙江省玉米播种日期提前, 作物生长季的总积温增加, 生长期延长, 种植边界呈北移东扩趋势。为了实现热量资源的有效利用和产量的提升, 新品种大量涌现, 耕作措施发生了改变, 早熟品种逐步被中晚熟品种代替, 紧凑型玉米品种也被广泛种植^[25-26]。玉米熟期类型的改变增加了研究区玉米生育期长度和叶片数^[27], 导致玉米 ET_c 增加。玉米密植会提高群体叶面积, 增加植株与环境的水汽交换, 增加玉米 ET_c ^[28]。本研究通过控制研究区各地玉米播种时期和各生长阶段持续天数, 在一定程度上减小了不同地区由于品种不同导致的玉米植株性状的差异, 从而有效减小由各地品种差异对需水量分布状况的影响。但用1991—2008年玉米生育期观测资料均值计算1959—2015年时段 ET_c 可能会高估了研究区前30年的玉米 ET_c , 因此研究时段内研究区实际玉米 ET_c 的下降趋势可能缓于本文的结果, I_r 的增加趋势也

会更明显。

本文研究指出, 黑龙江省玉米生育期内 P_e 和 ET_c 总体呈下降趋势, 但 P_e 的下降幅度大于 ET_c 。下降幅度, 使得玉米灌溉需水形势愈发严峻。黑龙江省西部地区是玉米 ET_c 的高值区也是 P_e 的低值区, 但该地区 P_e 和 ET_c 的增加和减小趋势最为明显, 在一定程度上缓解了玉米的灌溉需水形势。中部和东部地区 P_e 呈减小趋势, ET_c 呈增加趋势, 导致中部和东部地区灌溉需求加大。但总体来看, 西部 I_r 仍大于其他地区。黑龙江地区春旱较为严重, 但本研究表明5月 P_e 呈增加趋势, ET_c 呈减小趋势, 春旱在一定程度上得到缓解。7、8月灌溉需水量较大, 8、9月 P_e 大幅下降, 而 ET_c 波动不大, I_r 增加趋势加大, 因此全省应注重玉米7月和8月(特别是8月)的适时补充灌溉, 在水资源短缺的地区实行非充分灌溉或喷灌、膜下滴灌等农业节水措施, 有利于提高水分利用效率, 保障高产、稳产。

4 结论

(1) 1959—2015年黑龙江省玉米生育期年均 P_e 为254~356 mm, 平均值为302 mm。各月及全生育期自西向东总体表现为先增大后减小的趋势, 中部地区 P_e 较大。气候倾向率为-12.15~3.65 mm/(10 a), 平均值为-3.20 mm/(10 a), 总体表现为下降趋势, 但西部地区呈增加趋势。 P_e 主要集中在7、8月, 5、6

月 P_e 呈增长趋势,7月以后呈减小趋势,且下降幅度越来越大。

(2) 1959—2015年黑龙江省玉米生育期年平均 ET_c 为 302~487 mm,平均值为 383 mm。其分布趋势与 P_e 相反,各月及全生育期自西向东总体表现为先减小后增大的分布趋势,东部地区 ET_c 较大,中部 ET_c 较小。气候倾向率为 $-12.94 \sim 4.04 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,平均值为 $-2.43 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,总体表现为下降趋势,西南地区 ET_c 严重下降。玉米需水高峰主要集中在7、8月,但7月 ET_c 下降幅度较大。

(3) 1959—2015年黑龙江省玉米生育期内平

均 I_r 为 79~274 mm,平均值为 153 mm,其分布与 ET_c 分布相似,高值区分布在西部地区。气候倾向率在 $-5.65 \sim 10.52 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 范围内,平均值为 $2.09 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,总体表现为增加趋势。 I_r 高峰主要集中在7、8月,8、9月 I_r 增加的幅度较大。

(4) 各积温区典型气象站的 ET_c 和 I_r 都随着积温增加而增加,而 P_e 变化与其相反。7、8月 ET_c 和 P_e 的耦合度较小,7、8月和全生育期的 ET_c 和 P_e 的耦合度大致表现为积温越大耦合度越小。全省应当在7、8月进行灌溉来保障玉米的需水需求,特别是在灌溉需水严重的西部地区。

参 考 文 献

- 1 黑龙江统计局. 黑龙江统计年鉴(2016)[J]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- 2 高晓容, 王春乙, 张继权, 等. 近50年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 101-109.
GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan, et al. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 101-109. (in Chinese)
- 3 孙凤华, 杨素英, 陈鹏狮. 东北地区近44年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 751-755.
SUN Fenghua, YANG Suying, CHEN Pengshi. Climatic warming-drying trend in Northeastern China during the last 44 years and its effects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 751-755. (in Chinese)
- 4 赵春雨, 任国玉, 张运福, 等. 近50年东北地区的气候变化事实检测分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 25-30.
ZHAO Chunyu, REN Guoyu, ZHANG Yunfu, et al. Climate change of the Northeast China over the past 50 years[J]. Journal of Arid Land Resource and Environment, 2009, 23(7): 25-30. (in Chinese)
- 5 刘小刚, 符娜, 李闯, 等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188-197.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150927&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.027.
LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188-197. (in Chinese)
- 6 雷宏军, 乔姗姗, 潘红卫, 等. 贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需求指数时空分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 115-121.
LEI Hongjun, QIAO Shanshan, PAN Hongwei, et al. Temporal and spatial distribution of agricultural irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 115-121. (in Chinese)
- 7 张建平, 王春乙, 杨晓光, 等. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 50-55.
ZHANG Jianping, WANG Chunyi, YANG Xiaoguang, et al. Impact forecast of future climate change on maize water requirement in three provinces of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 50-55. (in Chinese)
- 8 魏新光, 王铁良, 刘春成, 等. 基于组合模型的辽宁省玉米水分盈亏量时空分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 193-202.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170625&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.025.
WEI Xinguang, WANG Tieliang, LIU Chuncheng, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water budget based on combined model in Liaoning Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 193-202. (in Chinese)
- 9 张智韬, 粟晓玲, 党永仁, 等. 泾惠渠灌区作物种植结构变化对灌溉需水量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 122-130.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161017&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.017.
ZHANG Zhitao, LI Xiaoling, DANG Yongren, et al. Influence of crop planting structure change on irrigation water requirement in Jinghuiqu irrigation area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 122-130. (in Chinese)
- 10 CHI D, WANG H, LI X, et al. Estimation of the ecological water requirement for natural vegetation in the Ergune River basin in Northeastern China from 2001 to 2014[J/OL]. Ecological Indicators, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.014>.
- 11 YOO S H, CHOI J Y, JANG M W. Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea[J/OL]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 845-853.
- 12 YE Q, YANG X, DAI S, et al. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water

- requirements in southern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159:35–44.
- 13 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12):6–12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12):6–12. (in Chinese)
- 14 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8):28–34.
HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, QU Huihui, et al. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8):28–34. (in Chinese)
- 15 刘丹, 李昕, 郑红, 等. 黑龙江省第二积温带播种期地温变化及玉米适宜播期分析[J]. *玉米科学*, 2016, 24(6):103–106.
LIU Dan, LI Xin, ZHENG Hong, et al. Analysis on changes of earth temperature and spring maize sowing time in second accumulated temperature of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6):103–106. (in Chinese)
- 16 祖洪月, 周璇, 李昕, 等. 黑龙江省第3积温带地温变化及玉米播期的确定[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(4):23–26.
ZU Hongyue, ZHOU Xuan, LI Xin, et al. Changes of earth temperature in third accumulated zone and determination of maize sowing time in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(4):23–26. (in Chinese)
- 17 黑龙江省农业委员会. 黑龙江省农作物品种积温区划分[EB/OL]. [2018-01-11]. <http://www.hljagri.gov.cn/nygk/nzwpzjqwh/>
- 18 黑龙江省农业委员会. 关于印发《黑龙江省2015年主要粮食作物优质高产品种区域布局规划》的通知[EB/OL]. (2015-01-29) [2018-01-11]. <http://dszz.hljagri.gov.cn/tjxxw/jrtj/tzgg/201501/>.
- 19 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- 20 FAO. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: FAO, 1992.
- 21 李珍, 姜逢清. 1961—2004年新疆气候突变分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(3):351–359.
LI Zhen, JIANG Fengqing. A study of abrupt climate change in Xinjiang region during 1961—2004[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3):351–359. (in Chinese)
- 22 YAMAMOTO R, IWASHIMA T, SANGA N K. An analysis of climatic jump[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 64(2):273–281.
- 23 JIANG J M, YOU X T. Where and when did an abrupt climatic change occur in China during the last 43 years? [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 1996, 55(1–4):33–39.
- 24 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.
- 25 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[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18):179–190.
LÜ Shuo, YANG Xiaoguang, ZHAO Jin, et al. Effects of climate change and variety alternative on potential yield of spring maize in Northeast China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(18):179–190. (in Chinese)
- 26 YUAN B, GUO J P, YE M Z, et al. Variety distribution pattern and climatic potential productivity of spring maize in Northeast China under climate change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(26):3497–3508.
- 27 罗新兰, 安娟, 刘新安, 等. 东北三省玉米生育热量指标与品种熟型分布研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2000, 31(4):318–323.
LUO Xinlan, AN Juan, LIU Xin'an, et al. Heat index of maize growth and development, and distribution of variety types[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(4):318–323. (in Chinese)
- 28 刘战东, 肖俊夫, 南纪琴, 等. 种植密度对夏玉米形态指标、耗水量及产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2010(9):8–10.
LIU Zhandong, XIAO Junfu, NAN Jiqin, et al. Effect of different planting density on morphological index, water consumption and yield of summer maize[J]. *Water Saving Irrigation*, 2010(9):8–10. (in Chinese)