

近 57 年松嫩平原春玉米生育期干旱特征分析

焦文慧, 张 勃, 崔艳强, 邢立亭, 黄 浩, 王晓丹

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘 要:春玉米生长发育及其产量受干旱影响很大,明晰不同生育期干旱特征对为保障春玉米安全和防旱减灾具有重要意义。基于松嫩平原及周边 42 个站点 1960—2016 年逐日气象资料和春玉米生育期资料,分别计算各生育期逐日相对湿度,将其作为春玉米生育期干旱等级评价指标,并应用线性倾向估计法、Mann-Kendall 法和相关分析法,分析了近 57 年松嫩平原春玉米全育期及各主要生育期干旱变化特征。结果表明:(1) 松嫩平原春玉米全育期、并进期和生殖生长期呈干旱化趋势,营养生长期呈湿润化趋势。(2) 干旱频率、强度和持续时间在全育期、并进期和生殖生长期呈增加趋势,在营养生长期呈下降趋势。并进期干旱在 1990s 最严重,其他生育期和全育期均在 2000s 最严重。各生育期干旱程度表现为营养生长期>生殖生长期>并进期。(3) 全育期及各生育期多年平均干旱频率、强度和持续时间呈东北向西南递增的变化趋势,从东北向西南干旱加强。(4) 松嫩平原春玉米生育期干旱变化特征对降水量、日照时数和相对湿度的变化最敏感。研究结果可为松嫩平原春玉米干旱预报及生产规划等提供参考。

关键词:相对湿度; 干旱; 春玉米生育期; 松嫩平原

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0324-08

Analysis on Drought Characteristics in Growth Period of Spring Maize in Songnen Plain in Recent 57 Years

JIAO Wenhui, ZHANG Bo, CUI Yanqiang, XING Liting, HUANG Hao, WANG Xiaodan

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Drought has great influence on the growth, development and yield of spring maize. It is of great significance to clarify the drought characteristics at different growth stages to ensure the safety of spring maize, drought prevention and disaster reduction. Based on the daily meteorological data and data in the growth period spring maize from 42 meteorological stations of Songnen Plain from 1960 to 2016, the daily relative moist index(M) of different growth periods was calculated, and the relative moist index as was taken as a drought index in spring maize growth period, the methods of linear regression, Mann-Kendal test, and correlation analysis were used to analyze the drought variation characteristics of spring maize in Songnen Plain in recent 58 years. The results showed that: (1) the trend of drought showed in the complete growth period, vegetative and reproductive transition period and the reproductive growth period of spring maize in Songnen Plain, and the trend of wetting showed in the vegetative growth period; (2) the drought frequency, intensity and duration had the increasing trend in complete growth period, vegetative and reproductive transition stage and the reproductive growth period, and had the decreasing trend in the vegetative growth period; In the vegetative and reproductive stage, the most serious drought occurred in the 1990s, and the most serious drought in the other growth and complete stages occurred after 2000; the drought degree of each growth period decreased in the order: vegetative growth period>reproductive growth period>vegetative and reproductive stage; (3) the average drought frequency, intensity and duration in all growth period increased from northeast to southwest, and the drought increased from northeast to southwest; (4) the drought variation of spring maize in Songnen Plain was most sensitive to the changes of precipitation, sunshine hours and relative humidity. These results can provide reference for drought forecast, planning of spring maize production in Songnen Plain.

Keywords: relative moist index; drought; growth period of spring maize; Songnen Plain

收稿日期:2019-12-03

修回日期:2020-01-05

资助项目:国家自然科学基金“黑河中游灌区尺度土地利用变化及其驱动力研究”(41561024)

第一作者:焦文慧(1995—),女,山东济南人,硕士,主要从事农业气象方面的研究。E-mail:jiaowenhui@163.com

通信作者:张勃(1963—),男,甘肃庆阳人,博士生导师,教授,主要从事区域环境与资源开发等方面的研究。E-mail:zhangbo@nwnu.edu.cn

干旱是一种常见又普遍的自然灾害,特点是发生频率高、持续时间长、影响范围广,能给农业生产造成巨大的损失^[1-2]。近年来随着气候变暖,干旱的频率和强度呈增加的趋势^[3-5],有研究表明未来 40 a,我国气候总体上向暖干化的趋势发展,半干旱地区干旱化趋势以及范围呈增大趋势,同时我国北方主要农业区不同程度的干旱面积也有扩大的趋势^[6-7]。松嫩平原位于东北地区中西部,本是半湿润地区,但也受到干旱的严重影响,已有研究表明松嫩平原春旱频发,成为影响当地粮食产量的主要灾害之一^[8-9]。近年来松嫩平原的气候明显趋向干旱,干旱逐年加重且范围逐渐增大^[10-11]。松嫩平原粮食以春玉米为主,其产量占该区粮食总产量的 72.88%^[12]。纪瑞鹏等^[13]指出干旱对玉米生产的影响不但取决于干旱程度,还取决于干旱发生的时期,众多学者对玉米不同发育期的干旱开展了大量研究,并得出生育期的干旱状况直接影响春玉米的生长发育及其产量^[14-15],研究松嫩平原夏玉米生育期内的干旱情况,对保障松嫩平原农业经济持续稳定发展具有重大意义。

前人对松嫩平原干旱的研究主要是对年、季节及春玉米生长季干旱的研究^[10-11],而对春玉米各生育期干旱的研究较少,本研究利用相对湿度度作为春玉米干旱指标,分析了松嫩平原春玉米生育期干旱特征,明确春玉米生育期干旱的发生规律,在春玉米不同生育阶段采取适宜的措施对防旱减灾具有重要的现实意义,以为农业干旱预报及农业生产规划、服务决策等提供科学依据。

1 研究区概况

松嫩平原位于东北地区中西部,地理位置为 121°38′—128°33′E,42°49′—49°12′N(图 1),由松花江和嫩江冲积而成,略呈菱形,总面积约为 22.35 万 km²,是东北三大平原(三江平原、松嫩平原、辽河平原)之一;区内大体可分为东部高平原区、中部低平原区、西部山前倾斜平原区及北部岗状平原区^[16];属温带大陆性半湿润、半干旱季风气候,雨热同季,年均降水量 400~600 mm;松嫩平原在东北地区自然资源最为优越^[12],是我国主要的粮食主产区之一。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选用松嫩平原及周边 42 个站点 1960—2016 年逐日气象数据(降水量、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数)和中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。研究区及所选气象站点分布见图 1。

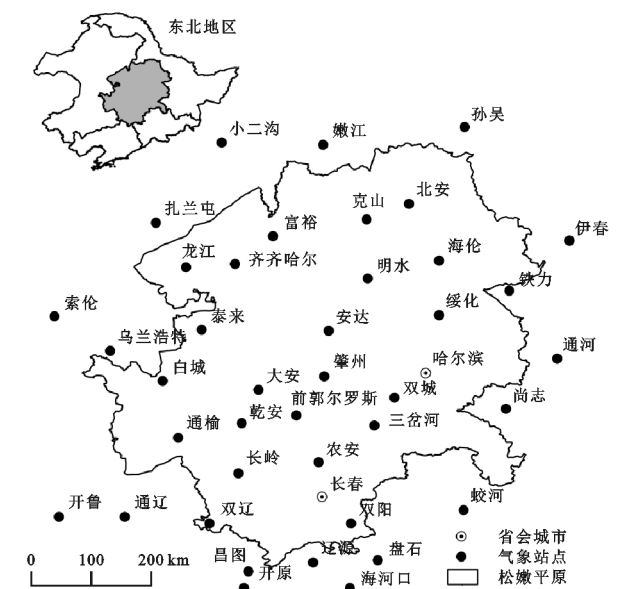


图 1 松嫩平原气象站点分布

2.2 研究方法

2.2.1 春玉米生育期划分 松嫩平原春玉米主要生育时间参照中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集 1991—2013 年松嫩平原各农业气象站春玉米年平均生育时间并结合文献^[17],具体生育时间见表 1。本研究将春玉米的生育期划分为:营养生长期(从播种到拔节)、营养生长与生殖生长并进期(简称并进期,从拔节到抽雄)、生殖生长期(从抽雄到成熟)3 个阶段^[17]。

表 1 1991—2013 年松嫩平原春玉米年平均生育时间

播种	营养生长期			并进期				生殖生长期	
	出苗	三叶	七叶	拔节	抽雄	开花	吐丝	乳熟	成熟
5-04	5-19	5-27	6-11	7-04	7-23	7-27	7-30	8-23	9-21

2.2.2 相对湿润度的计算 干旱指标的计算采用《气象干旱等级》(GB/T20481~2006)标准中提供的相对湿度计算方法^[18],其计算公式为:

$$M = \frac{P - ET_0}{ET_0} \tag{1}$$

式中: M 为日相对湿润度指数; P 为日降水量(mm); ET_0 为某日的参考作物蒸散量(mm),采用联合国粮农组织(FAO)1998 年推荐的 Penman-Monteith 模型计算^[19],其计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中: ET_0 为日潜在蒸散量(mm/d); Δ 为温度随饱和水汽压变化的斜率(kPa/℃); U_2 为离地 2 m 高处风速(m/s); e_s 为空气饱和水汽压(kPa); e_a 为空气实际水汽压(kPa); T 为平均气温(℃); γ 为湿度表常数(kPa/℃); R_n 为到达地面的净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量密度[MJ/(m²·d)]。

2.2.3 干旱过程确定 相对湿润度指数气象干旱等级划分标准^[18]见表 2,当 M 连续 10 d 为轻旱及以上等级,则认为发生一次干旱过程。干旱过程开始日期为第 1 天 M 值达到轻旱等级以上的日期,结束日期为最后一天 M 值为无旱的日期,干旱过程从开始到结束的天数为干旱持续时间,用干旱过程内各日 M 指数绝对值之和表示干旱过程的强度,值越大干旱程度越强。

表 2 相对湿润度气象干旱等级划分标准

等级	类型	相对湿润度
1	无旱	$-0.4 < M$
2	轻旱	$-0.65 < M \leq -0.40$
3	中旱	$-0.80 < M \leq -0.65$
4	重旱	$-0.95 < M \leq -0.80$
5	特旱	$M \leq -0.95$

采用线性倾向估计分析松嫩平原春玉米各生育期相对湿润度及各干旱指标的年际变化趋势^[20],显著性检验为 Mann-Kendall(M-K)趋势检验^[21-22]。采用反距离加权(IDW)插值法对各生育期相对湿润度和各干旱指标进行空间化处理,采用 SPASS 软件对生育期相对湿润度和各气候要素进行相关分析。

3 结果与分析

3.1 干旱事件时间变化特征

3.1.1 相对湿润度时间变化特征 由表 3 可知,1960—2016 年松嫩平原春玉米全育期内相对湿润度呈下降趋势,倾向率为 $-0.01/10\text{ a}$,并进期和生殖生长期相对湿润度也呈下降趋势,即干旱化趋势,倾向率分别为 $-0.10/10\text{ a}$ 和 $-0.04/10\text{ a}$;营养生长期相对湿润度呈显著的上升趋势($p < 0.05$),即湿润化趋势,倾向率为 $0.05/10\text{ a}$ 。

表 3 1960—2016 年松嫩平原春玉米生育期
相对湿润度年际变化趋势

生育期	全育期	营养生长期	并进期	生殖生长期
倾向率/(10 a) ⁻¹	-0.01	0.05 [*]	-0.10	-0.04

注: * 表示通过 0.05 水平的置信度检验。

3.1.2 干旱指标的时间变化特征 为进一步研究干旱变化特征,本研究对松嫩平原春玉米生育期干旱频率、强度和持续时间进行了分析(图 2)。全育期干旱频率、强度和持续时间均呈增加趋势,年际倾向率分别为 $0.07/10\text{ a}$, $1.0/10\text{ a}$, $0.95\text{ d}/10\text{ a}$,表明春玉米全育期干旱呈加重趋势。全育期在 2007 年干旱较严重,干旱频率、强度和持续时间分别为 4 次,64,66 d。

营养生长期干旱频率、强度和持续时间均呈下降趋势,年际倾向率分别为 $-0.04/10\text{ a}$, $-0.65/10\text{ a}$, $-0.69\text{ d}/10\text{ a}$ 。1982 年干旱发生较频繁,干旱频率、强度

和持续时间分别为 2.1 次,40,41 d。并进期干旱频率、强度和持续时间均呈上升趋势,年际倾向率分别为 $0.03/10\text{ a}$, $0.32/10\text{ a}$, $0.32\text{ d}/10\text{ a}$,在 2000 年干旱较严重,干旱频率、强度和持续时间分别为 0.7 次,9,9 d。生殖生长期干旱频率、强度和持续时间均呈上升趋势,年际倾向率分别为 $0.06/10\text{ a}$, $1.03/10\text{ a}$, $1.01\text{ d}/10\text{ a}$,干旱程度在 1977 年较严重,干旱频率、强度和持续时间分别为 2.0 次,30,30 d。

综上松嫩平原全育期、并进期和生殖生长期干旱程度呈加重趋势,生殖生长期加重较明显;营养生长期干旱程度虽呈减轻趋势,但干旱较严重,各生育期干旱严重程度为:营养生长期>生殖生长期>并进期。

3.1.3 干旱事件的年代际演变 表 4 列出了近 57 a 松嫩平原春玉米生育期各年代出现干旱事件的次数、强度和持续天数。从整个生育期看,松嫩平原春玉米全育期在 1990s 干旱程度较严重,1960s 和 1970s 次之,2000s 为近 57 a 最严重的时段。从各生育期看,营养生长期在 1960s 干旱程度较严重,干旱程度在 1960s—1990s 呈下降—上升—下降的波动趋势,在 2000s 干旱程度又加重;并进期在 1990s 干旱程度较严重,1960s—1990s 干旱程度呈上升—下降—上升的波动趋势,2000s 转为下降;生殖生长期在 1970s 干旱程度较严重,之后为下降—上升,2000s 进一步上升。综上,1990s 为并进期干旱最严重的时段,而其他生育期和全育期均在 2000s 干旱最严重。

3.2 干旱事件空间变化特征

3.2.1 相对湿润度空间变化特征 图 3 是 1960—2016 年松嫩平原春玉米生育期相对湿润度变化趋势的空间分布,在全育期,除中部地区和双辽站附近相对湿润度呈上升趋势,其他地区为下降趋势,故近 57 a 松嫩平原春玉米全育期中部和双辽站附近有微弱的湿润化趋势,而其他地区为干旱化趋势。在营养生长期,相对湿润度为上升趋势,表现为湿润化趋势,其中内部有 11 个站点通过了显著性检验,大部分区域相对湿润度的升幅为 $0.05\sim0.10/10\text{ a}$,安达站升幅最大($0.11/10\text{ a}$);在并进期,相对湿润度除明水站表现为微弱上升趋势,其他区域为下降趋势,降幅由东北向西南增大,其中有 10 个站点通过了显著性检验,大部分区域相对湿润度的降幅为 $-0.15\sim-0.10/10\text{ a}$,龙江站降幅最大($-0.32/10\text{ a}$);在生殖生长期,相对湿润度除克山、明水和双辽站为微弱上升趋势,其他区域均为下降趋势,大部分区域相对湿润度的变幅为 $-0.05\sim0/10\text{ a}$ 。综合春玉米生育期相对湿润度的空间变化,西南部相对湿润度降幅较大,干旱较严重。

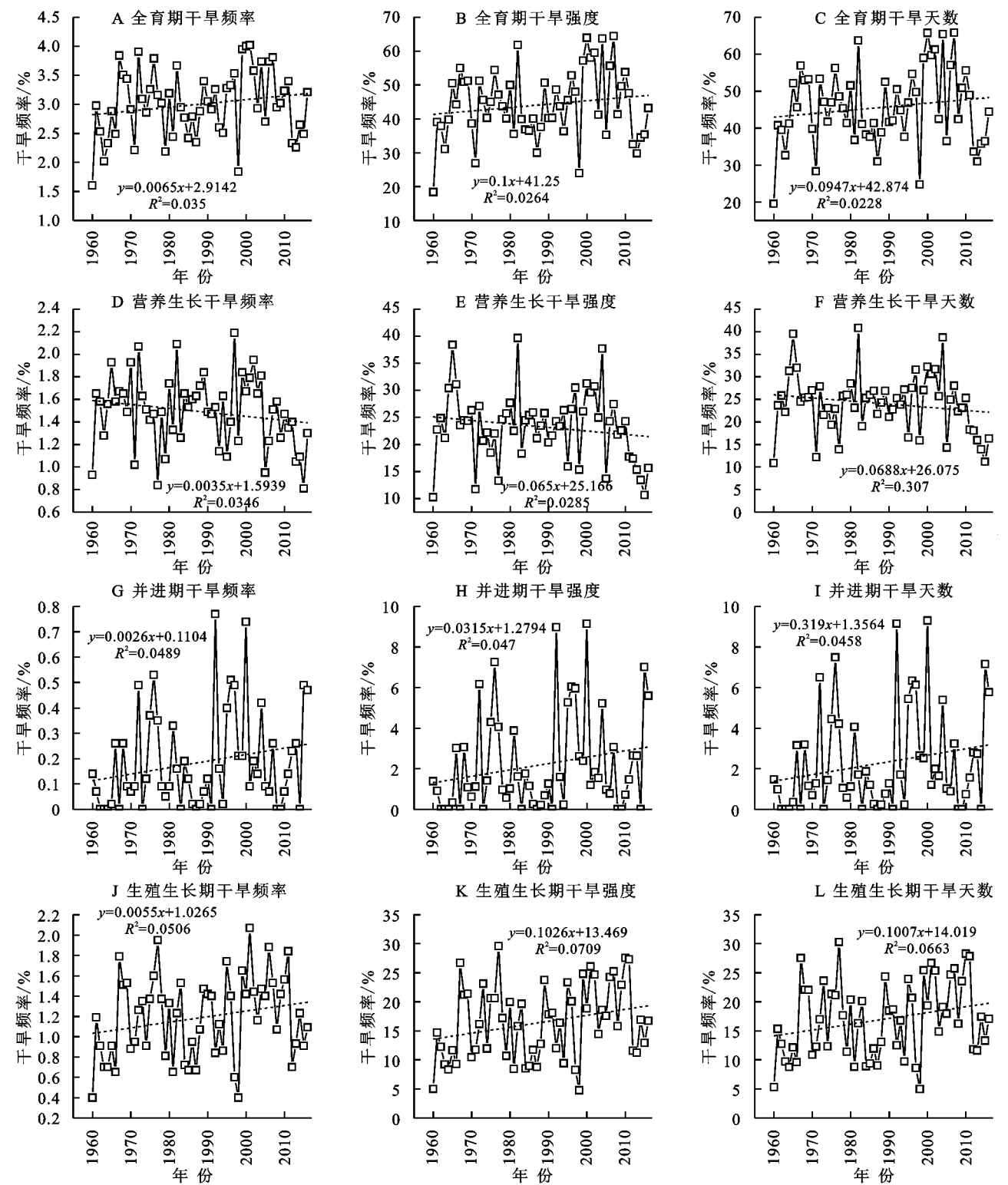


图 2 松嫩平原春玉米生育期内干旱事件频率、强度和持续时间的年际变化

表 4 松嫩平原春玉米生育期干旱特征年代际变化

年代	全育期			营养生长期			并进期			生殖生长期		
	频次/次	强度	天数/d	频次/次	强度	天数/d	频次/次	强度	天数/d	频次/次	强度	天数/d
1960s	30.5	456.9	474.3	17.3	277.7	287.7	0.9	10.4	11.0	11.2	150.1	156.1
1970s	30.7	444.5	460.3	14.3	213.6	221.2	2.2	26.9	28.1	12.9	181.6	187.3
1980s	28.7	409.1	422.7	16.1	247.1	255.2	1.0	10.8	11.4	10.4	136.0	140.2
1990s	31.2	460.5	475.9	15.2	241.3	249.9	3.5	42.2	43.5	11.5	155.9	160.6
2000s	50.1	745.5	767.2	22.2	347.4	358.5	2.9	34.7	36.1	21.7	313.7	321.4

3.2.2 干旱指标的空间变化特征 松嫩平原近 57 a 春玉米生育期年平均干旱频率、强度和持续时间的空间分布见图 4,松嫩平原春玉米全育期及各生育期各地多年平均干旱频率、强度和持续时间分布差异明显且呈带状分布,并呈东北向西南递增的趋势,说明从东北向西南干旱加强。近 57 a 来,松嫩平原春玉米全育期平均干旱频率、干旱强度和持续时间分别为 3 次,44,46 d,位于西南部的泰来、白城、通榆和齐齐哈尔地区干旱较严重,干旱频率、强度和持续时间平均为 3.9 次,62,64 d;营养生长期多年平均干旱频率、强度和持续时间分别为 1.5 次,23,24 d,西南部的泰来、白城、通

榆、乾安和龙江、齐齐哈尔地区干旱较严重,干旱频率、强度和持续时间平均为 1.8 次,31,32 d;并进期多年平均干旱频率、强度和持续时间分别为 0.2 次,2.2,2.3 d,西南部的泰来、大安、前郭尔罗斯、通榆、双辽和齐齐哈尔地区干旱较严重,干旱频率、强度和持续时间平均为 0.3 次,3.4,3.6 d;生殖生长期多年平均干旱频率、强度和持续时间分别为 1.2 次,16,17 d,西南部的泰来、白城、乾安、通榆和双辽地区干旱较严重,干旱频率、强度和持续时间平均为 1.6 次,24,25 d。综上,全育期及各生育期多年平均干旱频率、强度和持续时间在西南部较高,即松嫩平原春玉米生育期内西南部干旱较严重。

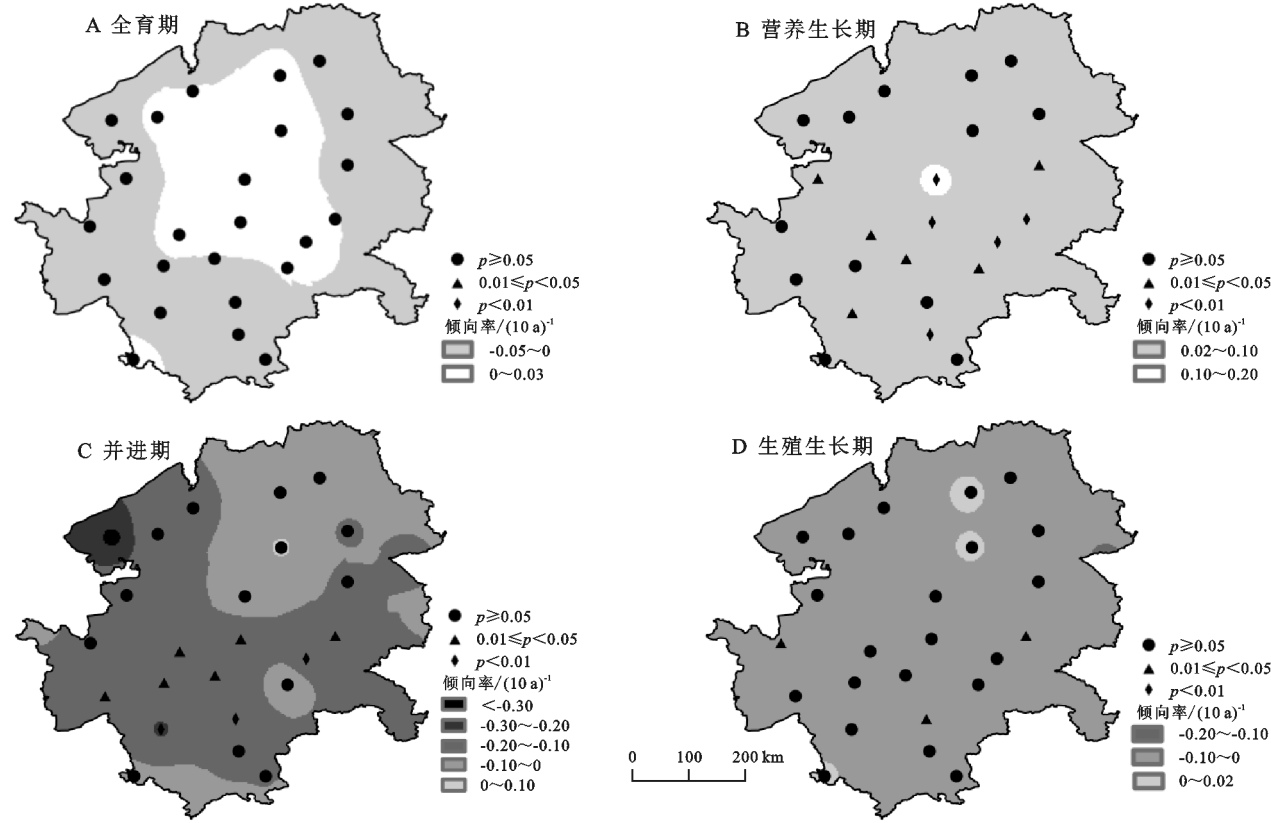


图 3 松嫩平原春玉米生育期相对湿度变化趋势空间分布

3.3 干旱特征对气候变化的响应

由表 5 可知,近 57 a 春玉米全育期及各生育期内平均气温呈显著上升趋势($p < 0.01$),其中营养生长期升温最快($0.31^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),全育期及各生育期内的平均日照时数和风速呈下降趋势,风速下降趋势较显著($p < 0.01$),日照时数在全育期和营养生长期下降显著($p < 0.01$),日照时数和风速在营养生长期降幅最大,分别为 $-0.22\text{ h}/10\text{ a}$ 和 $-0.26(\text{m/s})/10\text{ a}$,平均相对湿度和降水量在全育期、并进期和生殖生长期为下降趋势,在营养生长期为上升趋势,其中降水量在并进期呈显著下降趋势($p < 0.05$),在营养生长期呈显著上升趋势($p < 0.01$),生殖生长期平均相对湿度降幅最大最显著($p < 0.01$),为 $-0.71\%/10\text{ a}$,生殖生长期降水量降幅最大,为 $-6.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

春玉米全育期及各生育期内相对湿度与相同时段各气候因子之间的相关性分析得出:全育期及各生育期相对湿度与降水量的相关性均较高且较显著($p < 0.01$),在全育期及各生育期,相对湿度与平均气温、日照时数呈负相关,与降水量和相对湿度呈显著正相关($p < 0.01$),全育期、营养生长期和并进期的相对湿度与平均风速呈负相关,生殖生长期的相对湿度与平均风速呈正相关。营养生长期相对湿度与平均日照时数和风速相关性最高,分别为 -0.80 和 -0.35 ($p < 0.01$);并进期相对湿度与平均气温和降水量的相关性最高,分别为 $-0.46, 0.98$ ($p < 0.01$);生殖生长期相对湿度与降水量和平均相对湿度的相关性最高,分别为 $0.98, 0.81$ ($p < 0.01$)。同时发现,全育期及各生育期内相对湿度与的相关性最大最显著($p < 0.01$),即松

嫩平原春玉米生育期内的干旱变化特征对降水量、日照 时数和相对湿度的变化最敏感。

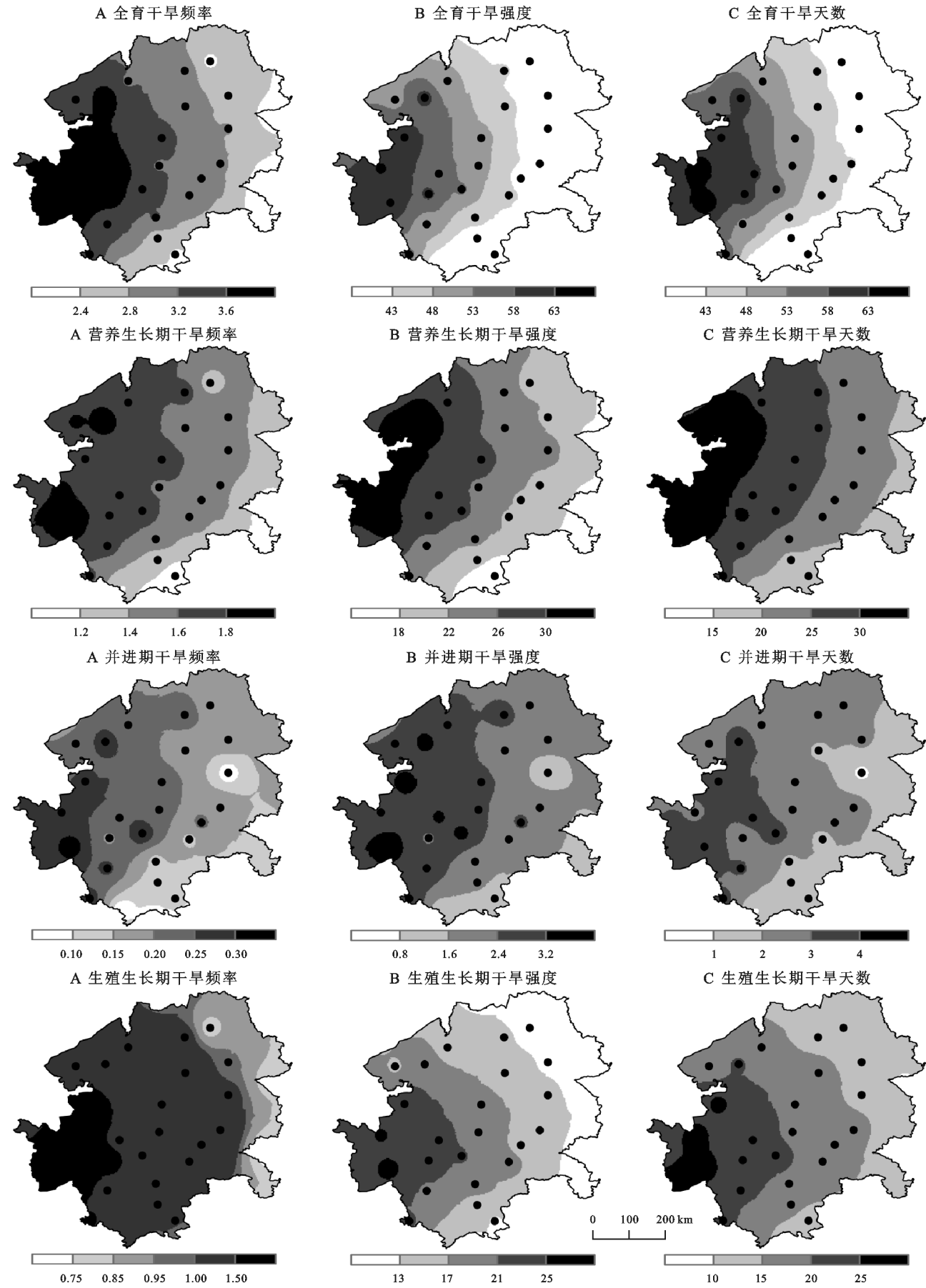


图 4 松嫩平原春玉米生育期多年平均干旱频率、强度和持续时间空间分布

表 5 松嫩平原春玉米生育期干旱对气候变化的响应

统计量	生育期	气温/℃	降水量/mm	日照时数/h	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)
年际变化趋势/10 a	全育期	0.28**	-4.36	-0.14**	-0.34	-0.20**
	营养生长期	0.31**	7.67**	-0.22**	0.08	-0.26**
	并进期	0.25**	-5.53*	-0.12	-0.50	-0.19**
	生殖生长期	0.25**	-6.50	-0.06	-0.71**	-0.14**
M 与气象要素 相关系数	全育期	-0.14	0.97**	-0.67**	0.77**	-0.01
	营养生长期	-0.08	0.96**	-0.80**	0.74**	-0.35**
	并进期	-0.46**	0.98**	-0.70**	0.76**	-0.07
	生殖生长期	-0.12	0.98**	-0.74**	0.81**	0.12

注：*，** 分别表示通过 0.05,0.01 水平的置信度检验。

4 讨论与结论

4.1 讨论

基于相对湿润度分析了 1960—2016 年松嫩平原春玉米生育期的干旱特征,研究结果对保障松嫩平原农业经济持续稳定发展具有重大意义。近 57 a 松嫩平原在气温显著上升,降水减少的背景下干旱化趋势显著,这与我国北方气候变化的大背景是相似的^[23],但是在 2000s 以后该区域干旱指标的变化均表明,该区域干旱化趋势更加显著。松嫩平原春玉米营养生长期虽呈湿润化趋势但干旱最严重,其他生育期呈干旱化趋势,干旱由前期向后期转移,这与前人的研究相符^[9,11,13],因此,不仅应预防前期春旱,还应重视后期日渐严重的夏旱对玉米产量造成的损失。松嫩平原西南部干旱较严重这在一定程度上佐证了前人的研究^[10-11,24]。

采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 法计算 ET₀,该方法考虑因素多、计算复杂且要求资料有较高的完整度,在物理意义上更加严谨可靠,并在农业方面具有较大的现实意义,能够更加客观真实地反映农作物生育期实际气候的干湿状况,但在一定区域内,该方法还存在参数的误差^[25],因此可能会造成湿润度指数与实际干湿情况的地区性偏差,如本研究未考虑当地土壤、灌溉、耕作、社会经济等因素,因此为进一步识别春玉米生育期的干旱变化特征,应从农业干旱角度入手,在计算相对湿润度时将潜在蒸散量订正为作物实际蒸散量^[26]。由本研究以及前人的研究^[10,27-28]可得出干旱变化受气候因子的影响,因此在今后的研究中,要建立气候变化与干旱的早期预警系统,完善农业干旱预报及农业生产规划、服务决策等支撑体系,也应选择抗旱能力强的玉米品种,并调整耕种方法和管理措施,对保障松嫩平原农业经济持续稳定发展具有重大意义。

4.2 结论

- (1) 近 57 a 松嫩平原春玉米全育期、并进期和生殖生长期呈干旱化趋势,营养生长期呈湿润化趋势。
- (2) 春玉米各生育期干旱严重程度为:营养生长期>生殖生长期>并进期。全育期、并进期和生殖生

长期干旱频率、强度和持续时间呈增加趋势,营养生长期干旱频率、强度和持续时间呈下降趋势;年代际尺度上,1990s 为并进期干旱最严重的时段,而其他生育期和全育期均在 2000s 干旱最严重。

(3) 空间上,全育期及各生育期多年平均干旱频率、强度和持续时间分布差异明显且呈带状分布,从东北向西南干旱逐渐加强。

(4) 近 57 a 松嫩平原春玉米营养生长期呈暖湿化趋势,全育期及其他生育期呈暖干化趋势;松嫩平原春玉米生育期内相对湿润度指数的变化与降水量、日照时数和相对湿度表现出较强的相关性,因此松嫩平原春玉米生育期内干旱变化特征对降水量、日照时数和湿度的变化最敏感。

参考文献:

[1] 郑远长.全球自然灾害概述[J].中国减灾,2000,10(1):14-19.

[2] 邓振镛,张强,尹宪志,等.干旱灾害对干旱气候变化的响应[J].冰川冻土,2007,29(1):114-118.

[3] Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations [J]. Climate Dynamics, 2008,13(1):79-105.

[4] Dai A. Drought under global warming:a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews:Climate Change, 2010,2(1):45-65.

[5] Barros V, Stocker T F. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2012,18(6):586-599.

[6] 赵俊芳,郭建平,徐精文,等.基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势[J].农业工程学报,2010,26(8):18-24,386-387.

[7] 王志伟,翟盘茂.中国北方近 50 年干旱变化特征[J].地理学报,2003,58(S):61-68.

[8] 李廷全,那济海,王萍,等.松嫩平原近年春旱特点浅析[J].中国农业气象,2006,27(1):53-55.

[9] 杨晓晨,明博,陶洪斌,等.中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响[J].中国生态农业学报,

- 2015,23(6):758-767.
- [10] 郑盛华,覃志豪,张文博.松嫩平原干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].中国农业气象,2015,36(5):640-649.
- [11] 曾丽红,宋开山,张柏,等.1960 年以来松嫩平原生长季干旱特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(9):114-122.
- [12] 康蕾,张红旗.我国五大粮食主产区农业干旱态势综合研究[J].中国生态农业学报,2014,22(8):928-937.
- [13] 纪瑞鹏,车宇胜,朱永宁,等.干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3021-3026.
- [14] 张淑杰,张玉书,孙龙戩,等.东北地区玉米生育期干旱分布特征及其成因分析[J].中国农业气象,2013,34(3):350-357.
- [15] 张祖光,郝卫平,李昊儒,等.山西省春玉米生育期干旱特征分析[J].中国农业气象,2015,36(6):754-761.
- [16] 曾丽红,宋开山,张柏,等.2000—2008 年松嫩平原生长季蒸散量时空格局及影响因素分析[J].资源科学,2010,32(12):2305-2315.
- [17] 穆佳,赵俊芳,郭建平.近 30 年东北春玉米发育期对气候变化的响应[J].应用气象学报,2014,25(6):680-689.
- [18] 国家气候中心,GB/T20481-2006 气象干旱等级[J].北京:国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2006.
- [19] Allen R G, Perreira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Fao Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [20] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [21] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [22] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [23] 马柱国,符淙斌.1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J].科学通报,2006,51(20):2429-2439.
- [24] 杨璐,张兵兵,王琪,等.吉林省蒸发量的时空分布特征[J].水土保持研究,2019,26(1):197-202.
- [25] 申双和,张方敏,盛琼,等.1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J].农业工程学报,2009,25(1):11-15.
- [26] 冯建设,王建源,王新堂,等.相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用[J].应用气象学报,2011,22(6):766-772.
- [27] 徐建文,居辉,刘勤,等.黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].生态学报,2014,34(2):460-470.
- [28] 周丹,罗静,郑玲,等.基于格点数据的华北地区气象干旱特征及成因分析[J].水土保持研究,2019,26(4):195-202.

~~~~~

(上接第 323 页)

- [6] Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- [7] 杨萍,侯威,封国林.中国极端气候事件的群发性规律研究[J].气候与环境研究,2010,15(4):365-370.
- [8] Donat M G, Alexander L V, Yang H. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(7):997-1006.
- [9] 任国玉,封国林,严中伟.中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J].气候与环境研究,2010,15(4):337-353.
- [10] 黄小燕,王小平,王劲松,等.1960—2013 年中国沿海极端气温事件变化特征[J].地理科学,2016,36(4):612-620.
- [11] 朱大运,熊康宁,肖华.贵州省极端气温时空变化特征分析[J].资源科学,2018,40(8):1672-1683.
- [12] 赵国永,韩艳,刘明华,等.1951—2014 年内蒙古自治区极端气温事件时空变化特征[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):110-116.
- [13] 刘青娥,吴孝情,陈晓宏,等.珠江流域 1960—2012 年极端气温的时空变化特征[J].自然资源学报,2015,30(8):1356-1366.
- [14] 徐兆红.晋陕蒙地区历史时期寒冻灾害研究[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [15] 李良序,范建忠,鲁渊平,等.陕西灾害性天气气候图集[M].西安:陕西科学技术出版社,2009.
- [16] 张宁.近 50 年来陕西省气温和降水极端事件分析[D].兰州:西北师范大学,2012.
- [17] 陈建宇,邵天杰,赵景波.陕西榆林地区 1954—2013 年极端气温变化特征[J].中国沙漠,2016,36(5):1426-1434.
- [18] 赵景波,杨晓玉,许永红,等.陕西安康近 50 年来极端气温指数变化研究[J].灾害学,2016,31(2):89-94.
- [19] 高文兰,李双双,段克勤,等.基于均一化资料的西安极端气温变化特征研究[J].地理科学,2018,38(3):464-473.
- [20] 王钰,冯起.陕北地区 1960—2013 年极端气温指数[J].中国沙漠,2016,36(4):1097-1105.
- [21] Zhang X B, Yang F. RCLimDex(1.0), User Manual[Z]. Ontario, Canada: Climate Research Branch, Environment Canada Downsview, 2004.
- [22] 尹红,孙颖.基于 ETCCDI 指数 2017 年中国极端温度和降水特征分析[J].气候变化研究进展,2019,15(4):363-373.
- [23] 董思,任志远,张翀,等.陕西省气候变化及其气候生产潜力的时空变化[J].中国农业大学学报,2016,21(8):142-149.