



基于 SPI 指数的黑龙江省近 46 年大豆生长季干旱特征评估

朱海霞,李秀芬,殷世平,赵慧颖,姜丽霞,官丽娟,杜春英,闫 平

(1. 中国气象局 东北地区生态气象创新开放实验室,黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省气象院士工作站,黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省气象科学研究所,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要:为了明确黑龙江省大豆生长季干旱时空特征,基于标准化降水指数(SPI),分析黑龙江省 76 个气象观测站 1971–2016 年大豆生长季,播种、苗期、开花结荚和鼓粒阶段中度以上干旱的时空分布。结果表明:46 年间西部干旱趋势总体增强,但近 10 年大豆播种期和苗期干旱程度明显减弱,东部干旱趋势总体减弱。大豆各生育阶段干旱区域总体缩小,以播种阶段最明显。46 年中,在大豆各个生育阶段约 50% 的年份、总计约 42 年出现了局域性、区域性或全区域中度以上干旱,其中 1975、1976、1977、1979、1982、2000、2001、2003、2004 和 2007 年为区域性或全区域重度以上干旱,1977、1982 和 2003 年为全区域特旱。大豆各生育阶段中度以上干旱有联发性特点,约有 18 年出现了联发 2 个或 2 个以上生育阶段的局域性、区域性干旱,其中 1975 和 1999 年甚至达到了联发 3 个发育阶段的区域性中度以上干旱。黑龙江省中度以上干旱的出现年份也有连发性特点,如大豆播种、出苗和开花结荚阶段,约 2~3 年连发。大豆各生育阶段,尤其是苗期阶段出现范围大、程度重的干旱时段多集中于 1970s 和 2000s,近 6 年中开花结荚阶段的干旱趋势增强。

关键词:干旱; 标准化降水指数; 大豆; 联发

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Evaluation of Drought Characteristics During Soybean Growth Period of 1971 – 2016 in Heilongjiang Province Based on SPI

ZHU Hai-xia, LI Xiu-fen, YIN Shi-ping, ZHAO Hui-ying, JIANG Li-xia, GONG Li-juan, DU Chun-ying, YAN Ping

(1. Innovation and Opening laboratory of Regional Eco-Meteorology in Northeast China, CMA, Harbin 150030, China; 2. Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 3. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China)

Abstract: For studying temporal and spatial features drought during growth period of soybean, based on standard precipitation index (SPI), spatial and temporal variation characteristics is researched for drought of middle or above levels in 76 weather stations of Heilongjiang province with the drought station ratio from 1971 to 2016 during these growing stages of soybean, such as total growing periods, sowing period, seedling period, flowering and podding period and seed filling period. The results showed that, in 46 years, drought was obvious tendency in the western, however, drought degree decreased significantly during sowing and seedling periods of soybean in the last ten years, drought was weak all over in the eastern. Drought area reduced overall during various stages of soybean, and drought area obviously reduced in seedling stage there were almost half of years to drought middle or above levels, and 42 years were dominated by localized drought, regional drought and whole regional drought of grave or above levels. Regional drought and whole drought of grave or above levels occur in these years such as 1975, 1976, 1977, 1979, 1982, 2000, 2001, 2003, 2004 and 2007, furthermore these years were whole drought of extreme level, such as 1977, 1982 and 2003. During various growing periods of soybean, drought has character of joint appearance. In 18 years, two growing periods or above periods to outbreak localized drought or regional drought, above all 1975 and 1999, two growing periods to outbreak regional drought. The continuous occurrence of drought showed in Heilongjiang province from the perspective of time, for example, the continuous occurrence of drought were from 2 to 3 years in these periods such as sowing period, seedling period, flowering and podding period. During various growing periods of soybean, especially seedling period, expensive and serious droughts were apt to occur in 1970s and 2000s, but drought tendency was enhanced during flowering and podding period in the past six years.

Keywords: Drought; Standardized precipitation index; Soybean; Joint appearance

东北亚春播大豆区是中国重要的大豆产区,是世界最大的非转基因高油大豆种植带,播种面积约

为全国大豆总播种面积的 30%^[1],加上近年来相关政策的倾斜,使得东北地区大豆播种面积进一步扩

收稿日期:2019-10-08

基金项目:国家自然科学基金(31671576,31801253);中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室项目(stqx2019zd02)。

第一作者简介:朱海霞(1978-),女,硕士,高级工程师,主要从事农业气象等研究。E-mail:hxzhu0301@126.com。

通讯作者:姜丽霞(1972-),女,硕士,正研级高级工程师,主要从事农业气象、生态气象研究。E-mail:jianglixia0326@aliyun.com。

大。黑龙江省地处东北亚,地域辽阔,是春播大豆区的主要种植区,因受东亚大陆季风气候的控制,春季降水量小^[2],夏季降水时空分布不均,降水的年际变动较大,易导致干旱的发生,加之黑龙江省属典型的旱作雨养农业区,因此干旱现已成为威胁黑龙江省旱作农业安全生产的主要农业气象灾害之一^[3]。

大豆属于喜湿作物,生长季里需水量较多,是豆类作物中对缺水最敏感的作物之一,其生长季里任何阶段的干旱对产量都将产生不同程度的影响。已有大量关于土壤干旱对大豆生育的影响及干旱监测评估的研究^[4-8]。大豆生长季不同阶段出现干旱均会对产量造成影响。大豆播种期干旱易导致种子萌发迟缓;苗期干旱则有利于根系的发育;分枝期、开花期轻度干旱导致多个性状受到显著影响;鼓粒期轻度干旱,仅百粒重显著降低^[9-10]。

统计分析方法常被应用于作物干旱评估,其中,基于降水量数据的标准化降水指标(Standard Precipitation Index, SPI)计算简单^[11-12],利用该方法可实现利用同一个干旱指标反映不同时间尺度和不同方面水资源状况的目的,具有良好的稳定性和连续性^[12-13],多用于干旱的评估。那音太^[14]、余方琳等^[13]利用 SPI 探讨了区域的干旱时空演变与特征;王芝兰等^[15]指出 SPI 指数的多时间尺度特性是该指数的优点之一;基于 SPI 指数统计分析方法能够反映干旱强度和持续时间,具有多时间尺度应用的特性,易于判断研究区域是否经历干旱,因此得到较广泛的应用。鉴于黑龙江省春播大豆所面临干旱风险的常态化,本研究拟采用 SPI 分析和评估大豆生育阶段的干旱时空特征,利用农业种植区 76 个气象站点 1971–2016 年的降水观测资料,研究大豆各生育阶段干旱时空分布及其程度,明确各生育阶段干旱时空特征分布,为制定更具针对性的春播大豆防旱避灾政策、保障大豆稳产增收提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

降水资料为黑龙江省气象局 1971–2016 年 76 个气象观测站 4 月 21 日–9 月 30 日逐日降水量观测数据。

黑龙江省现分为 13 个市级地区,其中齐齐哈尔、绥化、大庆和哈尔滨属松嫩平原;鹤岗、佳木斯、双鸭山、七台河和鸡西属三江平原;大兴安岭、黑河和伊春为大小兴安岭;松嫩平原、三江平原和黑河地区为黑龙江省主要农业种植区;因大兴安岭纬度

最高,农业生产区域很小,为非研究区,其它地区为研究区,76 个气象站均分布于研究区内(图 1)。

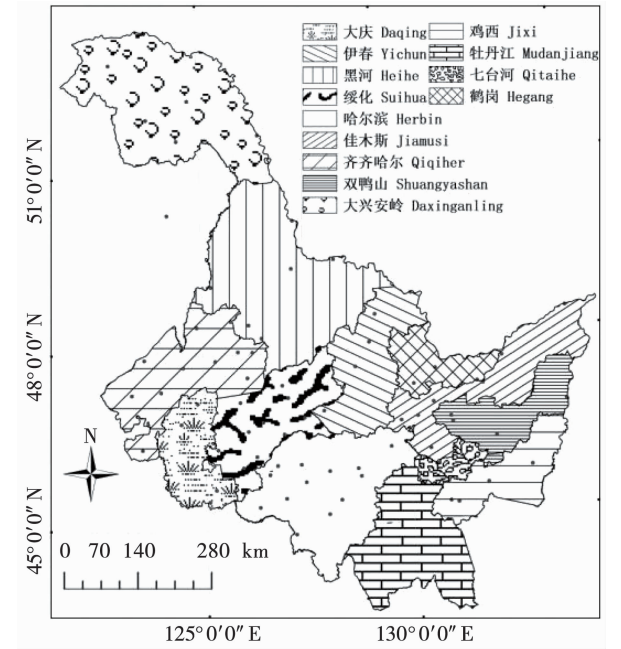


图 1 研究区及气象站点分布
Fig. 1 Distribution of research areas and meteorological stations

1.2 方法

1.2.1 SPI 计算 根据《气象干旱等级 GB/T20481–2017》国家标准中的定义^[16],SPI 为表征某时段降雨量出现概率多少的指标,采用 Γ 分布概率来描述降水量的变化,将偏态概率分布的降水量进行正态标准化处理,最终用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级,适用于月以上尺度气候干旱的检测与评估。本研究中大豆生育阶段分为 5 个研究时段,分别为 4 月 21 日–9 月 30 日(整个生长季, GPR)、4 月 21 日–5 月 20 日(播种期, GPR1)、5 月 21 日–6 月 20 日(苗期, GPR2)、6 月 21 日–8 月 10 日(开花结荚期, GPR3)和 8 月 11 日–9 月 30 日(鼓粒期, GPR4)。SPI 的计算公式为^[12-13]: $SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0}$, 式中, $t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$, $G(x)$ 为与 Γ 函数相关的降水分布概率; x 为降水量样本; S 为概率密度正负系数。当 $G(x) > 0.5$ 时, $S = 1$; 当 $G(x) \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。 $G(x)$ 由 Γ 分布函数概率密度积分公式计算: $G(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x t^{\gamma-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt, x > 0$, 式中, γ, β 分别为 Γ 分布函数的形状和尺度参数; 计算参数: $c_0 = 2.515\ 517, c_1 = 0.802\ 853, c_2 = 0.010\ 328, d_1 = 1.432\ 788, d_2 = 0.189\ 269, d_3 = 0.001\ 308$ 。基于 Visual Basic 6.0 编程语言实现 SPI 的计算过程。

1.2.2 干旱等级划分 参考 Guttman^[17] 提出的标准进行干旱等级划分,标准化降水指数旱涝等级标准如表 1 所示。由于轻度的干旱对作物造成的影响较小,中旱、重旱和极端干旱的发生才会对农作物的生长造成影响^[18],为了准确把握黑龙江省农业种植区近 46 年中干旱程度与覆盖范围,本研究针对中度、中度以上(中旱、重旱和特旱合并计算)和重度以上(重旱和特旱合并计算)的干旱进行时空特征分布分析,文中所述干旱均为中度或中度以上干旱。

表 1 基于 SPI 的干旱等级划分

等级 Grade	类型 Type	SPI
1	极端干旱(特旱)	≤ -2.0
2	严重干旱(重旱)	$-1.99 \sim -1.50$
3	中等干旱(中旱)	$-1.49 \sim -1.0$
4	轻微干旱(轻旱)	$-0.99 \sim 0.0$
5	湿润	≥ 0.0

1.2.3 干旱站次比 干旱站次比指研究区内发生干旱的站点数占该区域全部站点数的比重,用来评价干旱影响范围的大小^[13,19],具体计算公式为: $Y(\%) = n/N \times 100$,式中, N 表示研究区内的总气象站数, n 表示某一年发生干旱的气象站数。 Y 表征某一年干旱发生范围的大小,可间接反映出干旱影响范围的严重程度,将干旱站次比分类为 4 个等级,即无明显干旱($Y < 10\%$)、局域性干旱($10\% \leq Y < 33\%$)、区域性干旱($33\% \leq Y < 50\%$)和全域性干旱($Y \geq 50\%$)^[19]。

1.2.4 趋势分析法 趋势分析法(Mann-Kendall)^[20] 是一种非参数统计检验方法,用于检测序列的变化

趋势。本研究采用该方法对 SPI 和干旱站次比进行 46 年的趋势变化分析。若 $UF_{sk} > 0$,表明呈上升趋势, $UF_{sk} < 0$ 则表明呈下降趋势,当 $|UF_{sk}| > UF_{0.05}$ 时(查表得 $UF_{0.05} = 1.96$),表明上升或下降趋势显著,并达到 95% 的可信度。

2 结果与分析

2.1 1971 - 2016 年黑龙江省大豆各生育阶段干旱情况时间变化分析

2.1.1 黑龙江省代表地点 SPI 时间变化特征 1971 - 2016 年 SPI 震荡波动情况(附图 1)表明海伦与佳木斯市两地大豆生长季表现干旱的年份较多,黑龙江省多为局地性、区域性或全区域干旱,因此分别以海伦和佳木斯市为黑龙江省西部和东部的代表地点。对两地大豆不同生长阶段 SPI 的统计量检验结果表明:西部的海伦在 1970s (1970 - 1979 年),GPR、GPR3 和 GPR4 时段大豆 SPI 统计量明显下降,干旱趋势增强,在 1980s 明显上升,并于 1995 年前后逐渐下降,其中 GPR4 的大豆 SPI 下降明显,干旱趋势增强;GPR1 和 GPR2 阶段大豆 SPI 统计量自 1971 年波动性下降,尤其在 1990s 和 2000s 初期的 SPI 下降达显著水平,为大豆干旱的高发阶段,2007 - 2016 年 SPI 回升,干旱形式逐渐缓解(图 2a)。东部的佳木斯市大豆在生育的各阶段 SPI 统计量总体呈上升趋势,干旱趋势总体减弱,其中 GPR、GPR3 和 GPR4 大豆 SPI 在 1980s 和 1990s 上升趋势明显,为干旱趋势逐渐减弱阶段,近 20 年中,各阶段大豆 SPI 趋势均未出现明显的波动(图 2b)。

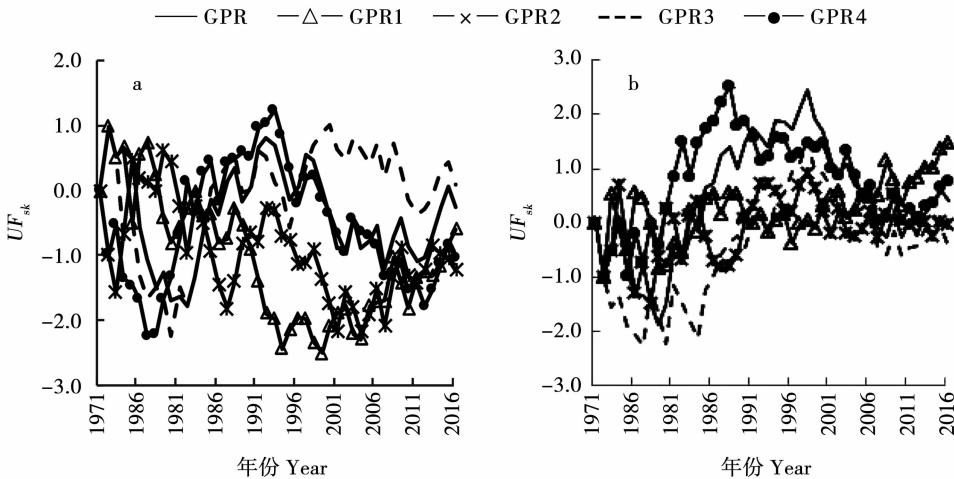


图 2 1971 - 2016 年海伦(a)和佳木斯(b)不同大豆生长阶段 SPI Mann-Kendall 统计量曲线
Fig. 2 Mann-Kendall statistics curve on SPI of different soybean growing stages in Hailun(a)
and Jiamusi(b) from 1971 to 2016

2.1.2 干旱站次比时间变化特征 由图 3 可知,黑龙江省大豆生育的各阶段干旱站次比统计量总体呈“M”型波动下降,表明大豆生育各阶段干旱区域总体减弱,但 1970s 初期、1990s 后期及 2000s 初期大豆干旱区域呈总体扩大趋势,其它时段呈缩减趋势,近 10 年干旱区域呈缩减趋势,尤其是 GPR1 阶段自 2012 年始干旱站次比统计量明显降低,表明近几年黑龙江省春旱范围已明显缩减。

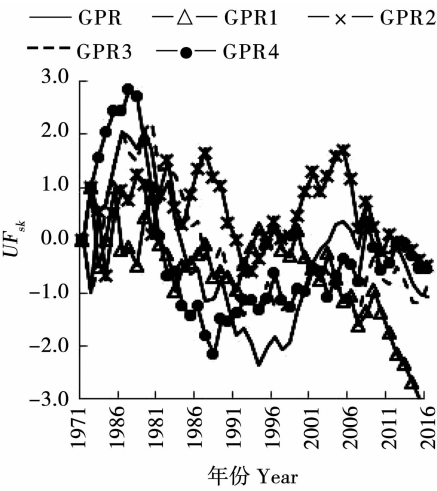


图 3 1971 – 2016 年黑龙江省干旱站次比 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 3 Mann-Kendall statistics curve of drought station ratio of Heilongjiang from 1971 to 2016

2.2 不同大豆生育阶段中度以上干旱评估

2.2.1 中度以上干旱区域分布分析 根据大豆生长季干旱站次比判定干旱影响范围的评估结果如

表 2 所示,在 GPR 时段,全区域干旱为 5 年,区域性干旱为 4 年,局地性干旱的年份约 11 年;46 年中未出现全区域重度以上干旱,区域性重度以上干旱的年份为 1976、2001 和 2004 年,局地性重度以上干旱的年份为 10 年。GPR1 和 GPR2 时段全区域中旱或以上干旱均为 3 年,GPR3 和 GPR4 时段分别为 1 和 2 年;GPR1、GPR2 和 GPR4 时段均有 1 年为全区域重旱或以上干旱,分别为 2003、1982 和 1977 年。除 GPR 和 GPR1 时段的区域性中旱或以上干旱外,其它时段出现区域性干旱的年份较全区域干旱的年份多;GPR2 时段出现区域性中旱或以上干旱的年份最多,为 7 年。5 个时段出现局地性中旱或以上干旱的年份为 9 ~ 19 年,GPR2 时段出现 9 年,GPR3 时段出现年份最多,为 19 年;5 个时段出现局地性重旱或以上干旱年份为 6 ~ 11 年,GPR1 时段出现 6 年,GPR3 时段出现年份最多,为 11 年。综合来看,大豆生育各阶段均以局地性干旱为主,在苗期阶段(GPR2)区域性干旱比例较高,局地性干旱比例较低。

在 GPR 阶段,1970s、2000s 干旱频次较高,而 2011 – 2016 年中仅有 2011 年为局地性干旱;GPR1 阶段,1970s、1980s、1990s 干旱频次高,其它时段干旱频次较低;GPR2 阶段,除 2011 – 2016 年无干旱外,其它时段干旱频次均为 4 ~ 5 年;GPR3 阶段,1970s、2000s 干旱频次为 6 ~ 7 年,其它时段 4 ~ 5 年;GPR4 阶段,1970s、2000s 干旱频次为 6 年,1980s 干旱频次较低,仅为 3 年。

表 2 1971 – 2016 年黑龙江省大豆不同生长阶段干旱区域分布

	中旱或以上 Drought above moderate					重旱或以上 Drought above grave				
	GPR	GPR1	GPR2	GPR3	GPR4	GPR	GPR1	GPR2	GPR3	GPR4
全区域 Whole regional	1976	1979	1982	1979	1975		2003	1982		1977
	1979	1999	2000		1977					
	1999	2003	2004							
	2001									
	2007									
区域性 Region	1975	1975	1985	1976	1989	1976	1979	2000	1979	1975
	1982	2009	1986	1980	1996	2001		2004		
	2000		1996	1995	2001	2007				
	2004		1999	2007	2007					
			2001	2009	2008					
			2000	2015	2011					
			2010							

续表 2

	中旱或以上 Drought above moderate					重旱或以上 Drought above grave				
	GPR	GPR1	GPR2	GPR3	GPR4	GPR	GPR1	GPR2	GPR3	GPR4
局地性 Part	1977	1971	1972	1974	1973	1975	1974	1985	1975	1974
	1978	1972	1975	1975	1974	1977	1975	1986	1976	1978
	1980	1974	1976	1977	1976	1979	1984	1996	1980	1989
	1986	1977	1978	1978	1978	1989	1994	1999	1982	1996
	1989	1980	1981	1982	1983	1995	1999	2001	1995	2001
	1995	1984	1987	1983	1986	1999	2009	2003	1999	2007
	2002	1985	1994	1986	1991	2000		2010	2002	2008
	2003	1986	1995	1988	1992	2002			2007	2011
	2005	1987	2005	1989	1995	2004			2009	
	2008	1989		1993	1999	2008			2011	
	2011	1990		1998	2004				2015	
		1992		1999	2005					
		1993		2001	2010					
		1994		2002	2012					
		1996		2005	2015					
		1998		2008						
		2006		2011						
		2007		2014						
				2016						

由表 3 所示,大豆生长季(GPR)及各生育阶段均以无明显的干旱为主,在 GPR1 和 GPR3 阶段区域性干旱比例为 40% 左右,占比较高;在 GPR 和 GPR1 时段区域性干旱比重不足 10%,而 GPR2、GPR3 和 GPR4 阶段区域性干旱年份的比例分别为 15.2%、13.0% 和 13.0%;GPR 时段全域性干旱的比例最高,10.9% 年份在大豆生长季出现了大范围干旱。

整体上看,从 GPR1 到 GPR2 阶段,局地性干旱明显下降,但区域性干旱明显增加;从 GPR2 到 GPR3 阶段,局地性干旱站次比变动幅度较大,呈 2 倍增长趋势,全域性干旱则下降为 GPR2 的 1/3;从 GPR3 到 GPR4 阶段,整体变化幅度不大。

表 3 1971 – 2016 年黑龙江省大豆生长阶段
不同等级干旱站次比比例

Table 3 Proportion of drought station ratio for different drought levels during soybean growth stage from 1971 to 2016 (%)				
时段 Period	无明显 Not obvious	局地性 Part	区域性 Region	全域性 Whole regional
GPR	56.5	23.9	8.7	10.9
GPR1	50.0	39.1	4.3	6.5
GPR2	58.7	19.6	15.2	6.5
GPR3	43.5	41.3	13.0	2.2
GPR4	50.0	32.6	13.0	4.3

2.2.2 重度以上干旱特征分布 前述分析表明,1971 – 2016 年大豆生育各阶段约 11 年出现了区域性或全区域重度以上干旱(表 2),为比较干旱程度和干旱区域的差异特征,对上述年份 SPI 空间分布的分析表明:大豆的 GPR1 阶段,1979 年出现了区域性干旱,2003 年出现全区域重度以上干旱。1979 年大部分的农业种植区为中度干旱(图 4a),而三江平原大部为重度以上干旱,其中三江平原西部达特旱程度;2003 年农业种植区基本呈全区域的特旱(图 4b),基本覆盖大豆主产区,为 46 年之最,为典型的全区域特旱年。

GPR2 阶段,1982 年出现全区域干旱,2000 和 2004 年出现区域性重度以上干旱。1982 松嫩平原大部、黑河南部和三江平原西部为特旱程度(图 4c),为 46 年之最,覆盖主要的大豆产区,为典型的全区域特旱年;2000 年松嫩平原大部、黑河地区为重度以上干旱(图 4d),覆盖了中西部大豆产区,其中哈尔滨北部、绥化南部、齐齐哈尔北部和黑河北部为特旱;2004 年西部农业种植区为重度以上干旱(图 4e),其中松嫩平原西部和黑河西部为特旱。在大豆的苗期阶段,农业种植区西部易多发重度以上的全区域或区域性干旱。

GPR3 阶段,只有 1979 年出现区域性或全区域重度以上干旱,基本位于东部的农业种植区(图 4f),结合表 2 可知,在大豆开花结荚阶段多以局地

性的中度干旱为主。

GPR4 阶段,1975 年出现区域性干旱,1977 年出现全区域重度以上干旱。1975 年齐齐哈尔南部、大庆北部、哈尔滨中部、三江平原西部为重度干旱(图 4g);1977 年大部分农业种植区为重度以上干旱(图 4h),其中农业种植区的东部大部呈特旱,46 年之最,为全区域特旱年。

在 46 年间有 3 年在 GPR 阶段出现区域性重度以上干旱,分别为 1976、2001 和 2007 年。1976 年松嫩平原东部大部为重度以上干旱(图 4i);2001 年仍以松嫩平原大部为重度以上干旱的主要分布落区(图 4j);2007 年松嫩平原大部及黑河大部为重度以上干旱的主要分布区(图 4k),并且 2007 年干旱程度较重、范围较广。

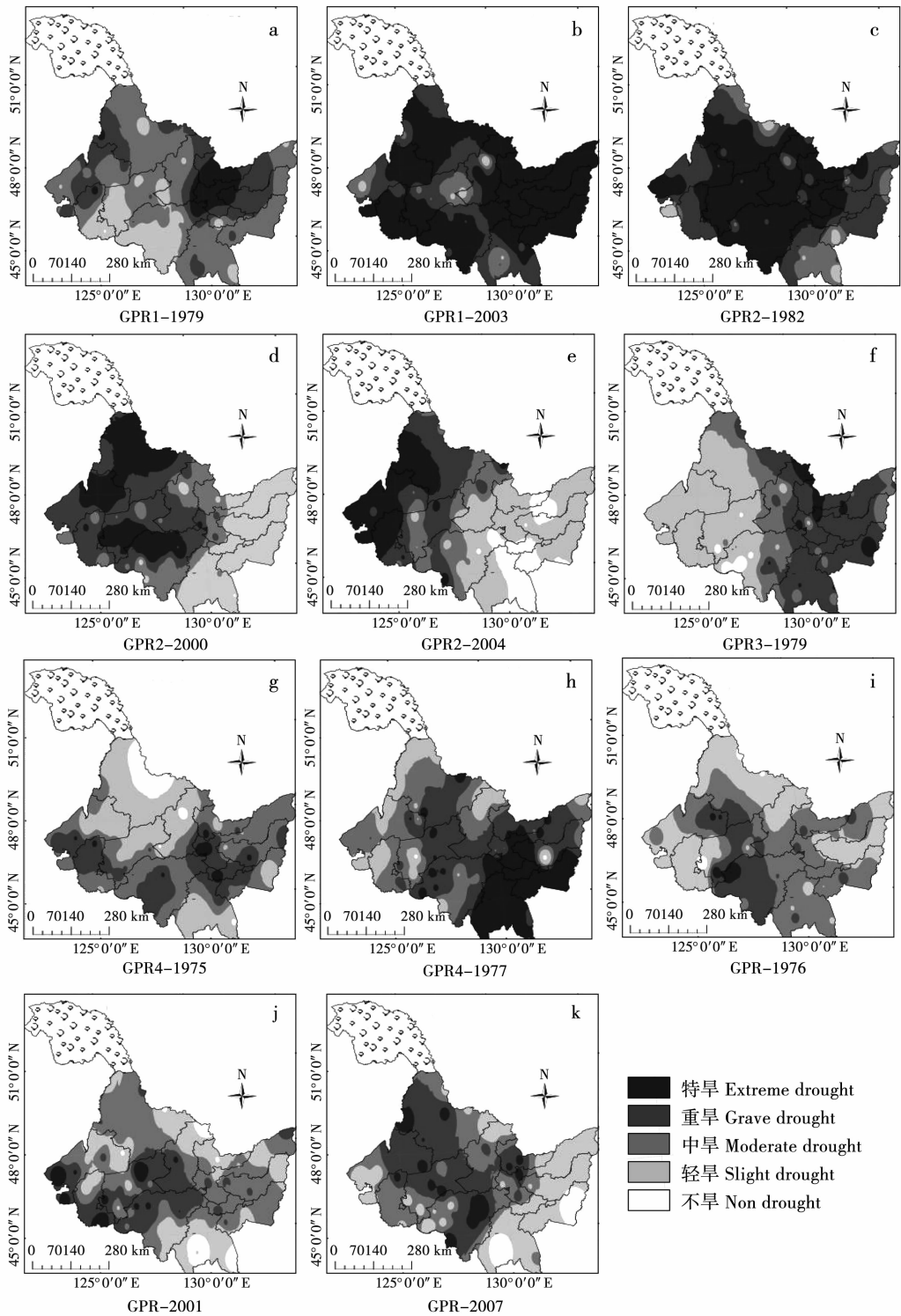


图 4 1971 - 2016 年黑龙江省大豆不同生长阶段重度以上干旱空间分布

Fig. 4 Distribution of drought above grave for each soybean growth stage in Heilongjiang from 1971 to 2016

2.3 中度以上干旱联发性特征分析

如表2所示,1971-2016年大豆播种、出苗、开花结荚和鼓粒阶段中2个生育阶段均出现干旱的年份为17年,3个生育阶段均出现干旱的年份为10年,4个生育阶段均出现干旱的年份为3年,有13年在单一阶段出现了干旱。但此种不同生育期干旱联发是否位于同一地点有待进一步分析。综合来看,1975年中东部分地区为播种期、开花结荚期、鼓粒期联旱;1979年为播种期、开花结荚期联旱;1982年为中部地区开花结荚期、鼓粒期联旱;2003年则以播种期、苗期联旱;而1999年表现较复杂,个别地区为播种期、苗期联旱,或为播种期、鼓粒期干旱,或为播种期、开花结荚期联旱。在大豆生育的不同阶段联发干旱说明干旱的时间较长。

表4 1971-2016年黑龙江省大豆不同生长阶段联发干旱的站次比

Table 4 Station ratio of drought joint emergence for various soybean growth stages in Heilongjiang from 1971 to 2016 (%)							
年份 Year	2个发育期 Two growing stages	3个发育期 Three growing stages	2个或以上发育期 Growing stages above two	年份 Year	2个发育期 Two growing stages	3个发育期 Three growing stages	2个或以上发育期 Growing stages above two
1972	6.6		6.6	1994	6.6		6.6
1974	13.2		13.2	1995	14.5		14.5
1975	27.6	21.1	48.7	1996	22.4		22.4
1976	26.3		26.3	1998	7.9		7.9
1977	26.3		26.3	1999	30.3	13.2	43.4
1979	40.8	6.6	47.4	2001	21.1	5.3	26.3
1980	15.8		15.8	2003	35.5		35.5
1982	36.8		36.8	2004	3.9		3.9
1983	6.6		6.6	2005	10.5		10.5
1985	5.3		5.3	2007	22.4	3.9	26.3
1986	19.7	5.3	25.0	2008	9.2		9.2
1987	2.6		2.6	2009	10.5		10.5
1989	14.5	6.6	21.1	2010	6.6		6.6
1992	3.9		3.9	2011	15.8		15.8
1993	7.9		7.9	2015	3.9		3.9

3 讨 论

本研究中黑龙江省以松嫩平原为主的西部地区和以三江平原为主的东部地区在大豆生育期间表现出不同的干旱特征。1971-2016年中西部主要表现为干旱趋势增强,近些年呈减弱状态;东部干旱趋势总体减弱。解文娟等^[21]研究东三省时指出气候变化背景下东北三省大豆干旱总体呈明显

黑龙江省中度以上干旱也有多年连发性特点。大豆播种、苗期和开花结荚阶段,存在2~3年连旱,但近6年中大豆播种出苗阶段无中度以上干旱出现,而1970s中后期于大豆开花结荚阶段连发7年中度以上干旱;1970s和2000s,大豆苗期阶段出现了大范围、程度重的干旱。

如表4所示,约有18年干旱站次比高于10%,构成了多个(2个或2个以上)发育阶段联发的局域性干旱,其中1979、1982和2003年为2个发育阶段联发区域性干旱(33%≤Y<50%);约有7年联发3个发育阶段干旱,其站次比为3.9%~21.1%,而1975和1999年构成了3个发育阶段联发的区域性干旱。

的西高东低的带状空间分布特征,与本研究基本一致,同时也指出干旱西高东低的分布符合该地区降水的空间分布特征。本研究中,约有半数年份在大豆生育各阶段出现了中度以上干旱,总体表现为以轻度干旱频次最高,中旱次之,重旱以上干旱频率最低的特点,而2000-2010年以范围大、程度重,频次高为干旱的显著特征。孙滨峰等^[22]利用SPEI研究东北地区干旱时,得出相似结论,即2000-2010

年是东北地区干旱发生频率和影响范围最大的时期,尤其是东北地区的中、西部。进一步研究表明 2003 年的大豆播种阶段、1982 年的苗期阶段、1979 年的开花结荚阶段、1977 年的鼓粒阶段、2007 年的大豆生长季在干旱程度和干旱范围上均为 46 年之最,与朱海霞等^[23]利用连续无有效降水日数评价出 1979、1982 和 2007 等年份干旱范围大、程度较重的结论一致。

基于时间角度,黑龙江省中度以上干旱也有连发性特点,多以 2~3 年连旱,其中 1970s 中后期于大豆开花结荚阶段连发 7 年中度以上干旱,且范围大、程度重的干旱时段多集中于 1970s 和 2000s,与赵茹欣等^[24],刘玉莲等^[25]研究指出 2000 年之后黑龙江省干旱频次增强的结论较一致。基于大豆生育角度,在其生育各阶段中度以上干旱有联发性特点,其中 1975 年中东部分地区为播种、开花结荚期、鼓粒期联发干旱,2003 年表现为播种期、苗期联旱的大豆生育前期干旱,1982 年为开花结荚期、鼓粒期联旱的大豆生育中后期干旱,均对大豆安全生产构成威胁。

SPI 是基于长时间序列中比较某时间序列历史同期平均水平的基础上获得的,具有一定的合理性,具有优越的多时间尺度应用特性,能有效地反映旱涝状况。本研究利用 SPI,基于大豆生育各阶段、干旱范围及干旱程度三方面对黑龙江省 1971–2016 年大豆不同生育阶段中度以上干旱特征进行了深入研究,明确了黑龙江省大豆生育各阶段干旱特征。但本研究仍有不足之处,首先,本研究主要以有降雨量观测的气象站点为研究对象,采用 SPI 分析其干旱强度,而对于黑龙江省而言,如何更客观的界定与对比局部地区的重度干旱和全区域轻度干旱有待进一步研究。其次,由于 SPI 的计算特性无法标识干旱频发地区^[12],例如黑龙江省大豆播种阶段是松嫩平原西部少雨时段^[26],三江平原降水量多于松嫩平原西部,虽 SPI 接近,但并不能说明两地干旱程度相同,在利用 SPI 进行旱涝分析时须结合具体情况加以甄别。在今后研究中,还需与其它指标相融合,考虑气温变化、蒸发、连续无降水日数及大豆生物学特性等因素进一步明晰干旱特征,明确大豆各生育阶段干旱分布的内在差异性。

4 结 论

以海伦为代表的黑龙江省西部地区在 1971–2016 年干旱趋势增强,近些年呈减弱状态,以佳木

斯市为代表的东部干旱趋势总体减弱。46 年中,黑龙江省大豆生育各阶段干旱区域总体缩小,尤其春季干旱形式已明显减弱。

1971–2016 年,在大豆播种、苗期、开花结荚、鼓粒阶段及整个生长季约 50% 的年份均出现了中度以上干旱,1975、1976、1977、1979、1982、2000、2001、2003、2004 和 2007 年为区域性、全区域重度以上干旱,其中 1977、1982 和 2003 年为全区域特旱年份。总体以无旱或轻度干旱频次最高、中旱次之、重旱以上干旱频率最低为特点。

大豆生育各阶段中度以上干旱有联发性特点,约有 18 年出现了联发 2 个或 2 个以上发育阶段的局域性、区域性干旱,而 1975、1979、1982、1999 和 2003 年中度以上干旱区域较广,其中 1975 和 1999 年甚至达到了联发 3 个发育阶段的区域性中度以上干旱。大豆播种、苗期和开花结荚阶段,存在 2~3 年连旱,但近 6 年中于大豆播种出苗阶段无中度以上干旱出现。

参考文献

[1] Liu X B, Jin J, Wang G T, et al. Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2008, 105 (3): 157-171.

[2] 沙莎,王勇,沈新勇,等. 基于 SPEI 指数的东北春旱频率变化及突变成因分析[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26 (4): 180-190. (Sha S, Wang Y, Shen X Y, et al. Analysis of frequency variation and causes of mutation change about spring drought over northeast region of China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26 (4): 180-190.)

[3] 孙风华,吴志坚,杨素英. 东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征[J]. *生态学杂志*, 2006, 25 (7): 779-784. (Sun F H, Wu Z J, Yang S Y. Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in Northeast China in last 50 years [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (7): 779-784.)

[4] 孟凡钢,李羽,张伟,等. 不同生育时期干旱胁迫对大豆根系分布和农艺性状的影响[J]. *大豆科学*, 2016, 35 (6): 943-946. (Meng F G, Li Y, Zhang W, et al. Effect of drought-stress on soybean root distribution and agronomic traits at different growth stages [J]. *Soybean Science*, 2016, 35 (6): 943-946.)

[5] Richard R, Heim J R. A review of twentieth century drought index used in the United States [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2002, 83: 1149-1165.

[6] 于敏,程明虎. 基于 NDVI-Ts 特征空间的黑龙江省干旱监测 [J]. *应用气象学报*, 2010, 21 (2): 221-228. (Yu M, Cheng M H. Drought monitoring in Heilongjiang province based on NDVI-Ts space [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2010, 21 (2): 221-228.)

[7] 姜丽霞,王萍,李帅,等. 黑龙江省土壤湿度的气候响应及其与大豆产量的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1):34-40. (Jiang L X, Wang P, Li S, et al. Responses of soil moisture to climate change and relationship between soil moisture and soybean yield in Heilongjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1):34-40.)

[8] 朱海霞,宫丽娟,曲辉辉,等. 1981-2010 年黑龙江省夏季土壤湿度演变特征[J]. 气象与环境学报, 2012,28(5):34-39. (Zhu H X, Gong L J, Qu H H, et al. The evolution of summer soil moisture from 1981 to 2010 in Heilongjiang province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012,28(5):34-39.)

[9] 莫金钢,马建,张丽辉,等. 干旱胁迫对大豆种子萌发的影响[J]. 大豆科学, 2014,33(5): 701-704. (Mo J G, Ma J, Zhang L H, et al. Effect of drought stress on germination of soybean[J]. Soybean Science, 2014,33(5): 701-704.)

[10] 刘丽君,林浩,唐晓飞,等. 干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响[J]. 大豆科学, 2011,30(3): 405-412. (Liu L J, Lin H, Tang X F, et al. Drought stress influence soybean yield morphogenesis in different growth stages [J]. Soybean Science, 2011,30(3):405-412.)

[11] Seiler B, Hayes M, Bressan L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring [J]. International Journal of Climatology, 2002,22:1365-1376.

[12] 袁文平,周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004,28(4):523-529. (Yuan W P, Zhou G S. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004,28(4):523-529.)

[13] 余方琳,翟石艳,王铮,等. 基于 SPI 的 1960-2012 年西南地区水稻生长季干旱时空特征分析[J]. 地理科学, 2018, 38(5): 808-817. (Yu F L, Zhai S Y, Wang Z, et al. Spatial and temporal variation characteristics of drought during rice growth based on SPI in southwest China from 1960 to 2012[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(5):808-817.)

[14] 那音太. 基于 SPI 指数的近 50a 内蒙古地区干旱特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(5):161-166. (Na Y T. Drought characteristics in Inne Mongolia based on the SPI index in the last 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(5):161-166.)

[15] 王芝兰,王劲松,李耀辉,等. 标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析[J]. 高原气象, 2013,32(3):839-847. (Wang Z L, Wang J S, Li Y H, et al. Comparison of application between generalized extreme value index and standardized precipitation index in northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2013,32(3):839-847.)

[16] 中华人民共和国国家标准 GB/T 20481-2017. 气象干旱等级 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2017. (National Standard of People's Republic of China GB/T 20481-2017. 2017. Meteorological drought grade [M]. Beijing: China Standard Press.)

[17] Guttman N B. The use of l-moments in the determination of regional precipitation climates [J]. Journal of Climate, 1993, 6(12):2309-2325.

[18] Li Y, Ye W, Wang M,et al. Climate change and drought: A risk assessment of crop-yield impacts [J]. Climate Research, 2009,39(1): 31-46.

[19] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59. (Huang W H, Yang X G, Li M S. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(7):50-59.)

[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, 2007: 37-56, 61-64. (Wei F Y. The statistical diagnosis and prediction methods of climate [M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 37-56, 61-64.)

[21] 解文娟,杨晓光,杨婕,等. 气候变化背景下东北三省大豆干旱时空特征[J]. 生态学报,2014, 34(21):6232-6243. (Xie W J, Yang X G, Yang J, et al. Spatio-temporal characteristics of drought for soybean under climate change in the three provinces of northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21):6232-6243.)

[22] 孙滨峰,赵红,王效科. 基于标准化降水蒸发指数 (SPEI) 的东北干旱时空特征 [J]. 生态环境学报,2015,24(1): 22-28. (Sun B F, Zhao H, Wang X K. Spatiotemporal characteristics of drought in northeast China based on SPEI [J]. Ecology and Environment, 2015, 24(1):22-28.)

[23] 朱海霞,李秀芬,赵慧颖,等. 黑龙江省大豆生长季干旱时空格局[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(2):229-237,259. (Zhu H X, Li X F, Zhao H Y, et al. Spatial-temporal characteristics of drought during growing periods of soybean in Heilongjiang province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2019,37(2):229-237,259.)

[24] 赵茹欣,王会肖,杨会彩,等. 基于标准降水指数的黑龙江省气象干旱特征分析[J]. 节水灌溉,2017(12):56-62,67. (Zhao R X, Wang H X, Yang H C, et al. Meteorological drought characteristics in Heilongjiang province based on standardized precipitation index [J]. Water Saving Irrigation,2017(12):56-62,67.)

[25] 刘玉莲,于宏敏. 基于 CI 指数的黑龙江省作物生长关键期干旱变化[J]. 气象与环境学报,2012, 28(1):48-54. (Liu Y L, Yu H M. Drought changes of critical period of crop growth in Heilongjiang province based on CI index [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(1):48-54.)

[26] 王敏,姚维传,张从宇,等. 抗旱剂对大豆出苗及幼苗生长的效应[J]. 中国油料作物学报, 2003,25(2):44-48. (Wang M, Yao W C, Zhang C Y, et al. Effect of drought-resistant drug on seed germination and seedling growth in soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2003,25(2):44-48.)