

DOI: 10.5846/stxb201302020219

解文娟, 杨晓光, 杨婕, 刘利民, 叶清, 董朝阳, 刘志娟, 赵锦. 气候变化背景下东北三省大豆干旱时空特征. 生态学报, 2014, 34(21): 6232-6243.
Xie W J, Yang X G, Yang J, Liu L M, Ye Q, Dong C Y, Liu Z J, Zhao J. Spatio-temporal characteristics of drought for soybean under climate change in the three provinces of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6232-6243.

气候变化背景下东北三省大豆干旱时空特征

解文娟^{1,2}, 杨晓光^{2,*}, 杨 婕², 刘利民¹, 叶 清^{2,3}, 董朝阳², 刘志娟², 赵 锦²

(1. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;

3. 江西农业大学园林与艺术学院, 南昌 330045)

摘要: 利用 1961—2010 年东北三省大豆种植区 71 个气象站点地面气象观测资料, 基于农业干旱指标作物水分亏缺指数 (CWDI) 及干旱等级, 分析了气候变化背景下近 50 年来我国东北地区大豆干旱发生频率演变趋势及干旱程度演变特征, 研究结果表明: 东北三省大豆干旱频率空间差异较大, 呈明显的西高东低的经向带状分布特征; 大豆全生育期干旱频率以轻旱最高, 中旱次之, 重旱和特严重干旱频率最低; 轻旱及以上干旱频率以播种到分枝阶段最高, 分枝到开花阶段次之, 开花到成熟阶段最低; 作物水分亏缺指数年际变化趋势各地不同, 总体而言以播种到分枝期干旱为主向开花到成熟期干旱转变的特点; 大豆全生育干旱等级存在明显的年代际变化, 20 世纪 80 年代干旱范围最小、程度最轻, 2000 年以后重旱及中旱范围增加明显, 干旱趋于严重。

关键词: 东北三省; 大豆; 干旱; 作物水分亏缺指数; 时空特征

Spatio-temporal characteristics of drought for soybean under climate change in the three provinces of Northeast China

XIE Wenjuan^{1,2}, YANG Xiaoguang^{2,*}, YANG Jie², LIU Limin¹, YE Qing^{2,3}, DONG Chaoyang², LIU Zhijuan², ZHAO Jin²

1 College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3 College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: Climate data from seventy-one meteorological stations in the soybean planting areas in three provinces of Northeast China (NEC) during 1961 to 2010 were used to calculate the reference crop evapotranspiration using the Penman-Monteith formula. Then combined with the revised crop coefficient, soybean water requirement can be obtained during each growth stage. Finally, we calculated the Crop Water Deficit Index (CWDI) by considering cumulative effects of moisture surplus condition during the soybean growing season. and obtained the degree of drought Based on this index and the degree of drought, the characteristics of spatio-temporal variation for occurrence frequency and degree of soybean drought in NEC during the study period were analyzed. Result shows that there is a significant spatial variation in the occurrence frequency of soybean drought, which was increased from east to west. Light drought is the most frequent drought, followed by the middle drought and heavy drought during the whole soybean growing season. There could be relatively higher frequency of light drought in the western regions of Heilongjiang Province and the western and southern regions of Liaoning Province. In the western regions of Jilin Province, there is relatively less frequency of light drought, but the frequencies of middle drought and heavy drought are higher. We also found the basic vegetative phase (sowing to branching) experienced

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAD20B04); 公益性行业 (农业) 科研专项项目 (200903007)

收稿日期: 2013-02-01; 网络出版日期: 2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangxg@cau.edu.cn

the most severe drought and the frequency of drought exceed 50% (once every 2 years) at the 56% of the selected sites in the study areas, the frequency of drought exceed 80% (four every 5 years) at the 31% of the selected sites in the study areas. The drought during the panical formation phase (branching to flowering) is lighter, drought frequency was lower than 80% in most regions in the study area except Qian'an and Tongyu of Jilin Province, and drought frequency was higher than 50% (once every 2 years) at the 48% of the selected sites in the study area. The drought during the reproductive phase (flowering to maturity) is lightest, but there could be still high drought frequency (50%—80%) in the southwest regions of Heilongjiang Province, northern of Sanjiang Plain, western of Jilin Province, and western and southern of Liaoning Province. Interannual variability in CWDI differs from regions. The CWDI showed a downward trend during the sowing to branching stage in all three representatives sites. We can find a maximum inter-annual fluctuation during the branching to flowering stage, it showed a downward trend in Liaoning Chaoyang and Heilongjiang Suihua during this stage, and an upward trend in Jilin Tonghua. There is least value of CWDI during the flowering to maturity stage, and showed an upward trend in Liaoning Chaoyang and Heilongjiang Suihua during this stage; interannual variability is not significant in Jilin Tonghua. In other words, generally the drought threat is progressively more severe during reproductive phase. There is also obvious decadal variability of drought degrees during whole growing period. In 1980s, either drought degree and range were the smallest, from 2000 years, the range of medium drought and heavy drought increased significantly.

Key Words: the three provinces of Northeast China; soybean; drought; Crop Water Deficit Index (CWDI); spatio-temporal characteristics

IPCC(2007)第四次报告指出,气候变暖已成为不争的事实^[1]。中国气候变暖趋势与全球基本一致^[2],特别是东北地区,最近 50 年增温最为明显,平均每 10a 增温 0.34 °C,约为全国增温率的 3 倍^[3-4]。气候变暖会引起田间蒸散加剧,并伴随着降水格局的变化,导致洪涝和干旱的加剧^[5]。东北地区受东亚大陆季风气候的控制,降水量时空分布不均,年际变动较大,干旱为该地区主要的农业气象灾害之一^[6]。已有研究表明,气候变化背景下东北地区年降水量呈减少趋势,20 世纪 90 年代末以来最为明显^[7],而降水时空分布的不均衡性,导致干旱日趋严重^[8]。频繁发生的干旱对东北地区农业生产造成严重影响,2000 年至 2007 年期间,我国东北地区平均每年因旱受灾面积高达 853.3 万 hm²,成灾面积 506.7 万 hm²,因旱受灾面积占全国同期因旱受灾面积比例从 20 世纪 80 年代的 19.5% 增加到 2000 年以来的 32.9%^[9],农业干旱的加剧已对我国东北地区粮食生产构成严重威胁。

大豆是我国东北地区的主要油料作物,年种植面积和产量占全国的 1/3^[10]。大豆的蒸腾系数较高,需水量大,抗旱能力相对较弱,干旱加剧对其生长发育及产量、品质产生很大影响^[11]。前人在干旱胁迫对大豆生理生化影响方面做了很多研究,如利

用生理指标、形态与发育指标研究了大豆的抗旱性^[12-14],表明不同生育时期的干旱对大豆生理生态、光合生产能力及产量构成因子造成影响,而基于干旱指标的大豆干旱时空分布特征的研究尚未见报道。

作物水分亏缺指数(CWDI)是常用的农业干旱指标之一,综合考虑了土壤、植物和气象因素的影响,相对于用单一的环境指标表征干旱程度而言,在反映作物水分收支平衡方面有其独到的优势^[15]。前人基于此指标已经得出了大量的研究成果^[16-19],但主要集中在玉米等其他作物,还未有利用作物水分亏缺指数研究大豆干旱的报道。本文基于作物水分亏缺指数(CWDI),分析了近 50 年东北地区大豆干旱时空演变特征,旨在揭示东北大豆各生育阶段干旱发生频率和时空演变特征,以期为我国大豆生产管理及抗灾避灾提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

我国东北三省地处北纬 38°43'—53°24'、东经 115°20'—135°,属温带大陆性季风气候,夏季温凉湿润,冬季漫长寒冷,近 47 年气候资料统计结果,年平均降水量为 350—1200 mm,平均气温为 -4.8—

11.3 °C, 年总辐射量为 4100—5400 MJ/m²[4], 种植制度以一年一熟为主。大豆是东北三省的主要油料作物, 本文参考前人对大豆种植区划研究结果[20], 计算

1961—2010 年东北三省 ≥10 °C 积温, 在 80% 保证率条件下, 积温大于 1900 °C · d 的地区作为东北三省春大豆可种植区, 确定为研究区域, 其范围如图 1 所示。

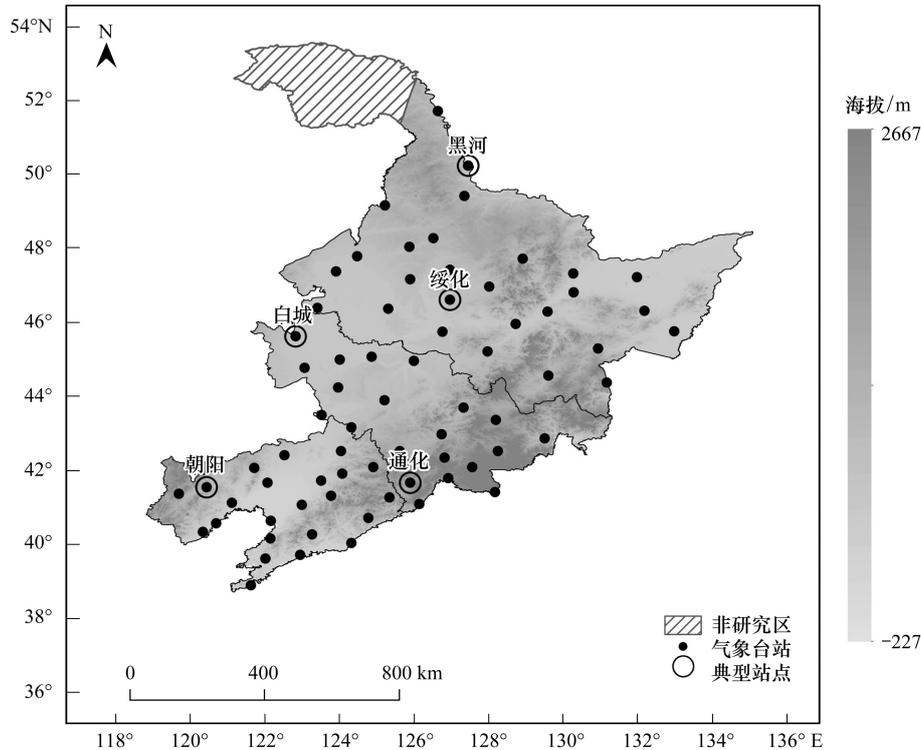


图 1 研究区域及气象站点和其海拔分布图

Fig.1 Coverage of study region and distribution of stations and elevation

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象局气象信息中心, 包括东北三省大豆种植区空间代表性好、资料年限长的 71 个气象站点(图 1)。气候资料为 1961—2010 年逐日气象观测数据, 包括: 平均气温、最高及最低气温、降水量、平均相对湿度、平均气压、日照时数和风速等。

大豆生育期资料来自中国农业气象观测站及全国县级农户调查结果, 为东北各地 2008—2010 年平均生育期, 包括大豆播种、分枝、开花和成熟日期。由于地形、纬度等方面的差异, 东北三省热量条件明显不同, 3 个省大豆生育时期存在明显差异(表 1), 播种期大致在 4 月下旬到 5 月中旬之间, 在 6 月中下旬分枝, 7 月中旬开花, 到 9 月中下旬成熟。

表 1 东北三省大豆生育期

Table 1 The date of soybean Growth Periods in Northeast China

省份 Province	播种日期 Sowing date	分枝日期 Branch date	开花日期 Flowering date	成熟日期 Maturation date
辽宁	04-30—05-05	06-10—06-22	07-08	09-10—09-15
吉林	05-10	06-19—06-30	07-08—07-10	09-19—09-21
黑龙江	05-10—05-20	06-30	07-10—07-20	09-21

1.3 研究方法

1.3.1 参考作物蒸散量(ET_0)

参考作物蒸散量是指表面开阔, 高度一致(8—15 m), 生长旺盛, 水分充足, 完全遮盖地面的绿色草

地的蒸散量, 本文采用 1998 年联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式进行计算[21], 计算公式如下:

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

式中, R_n 为地表净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), u_2 为 2 m 高处风速 (m/s), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa), Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), γ 为干湿表常数 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。 R_n 、 Δ 和 γ 可利用公式计算, G 有时候可忽略。其中 T 、 u_2 、 e_a 等项为气象站观测资料。

$$K_{\text{cmid}} = K_{\text{cmid}(\text{Tab})} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

$$K_{\text{cend}} = \begin{cases} K_{\text{cend}(\text{Tab})} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)] (h/3)^{0.3} & K_{\text{cend}(\text{Tab})} < 0.45 \\ K_{\text{cend}(\text{Tab})} & K_{\text{cend}(\text{Tab})} \geq 0.45 \end{cases} \quad (2)$$

式中, K_{cmid} 为订正后大豆生育中期作物系数; K_{cend} 为订正后大豆生育后期作物系数; U_2 为 2m 高度处的日平均风速; RH_{min} 为日最低相对湿度; h 为该生育阶段内作物的平均高度。

对于播种前处于裸地状态时的作物系数, 参照 FAO 推荐的方法, 用作物生育前期的作物系数值代替, 即东北地区大豆播种前 4 旬的作物系数取值为 0.4。

1.3.3 作物需水量 (ET_c)

作物需水量是指在水分供应充足且没有其他因素限制条件下, 作物为获得最高产量所需要的水分总量。本文采用目前公认的 FAO 推荐的间接方法计算, 即先计算出参考作物蒸散量再乘以作物系数得到, 公式如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中, ET_c 为逐日作物需水量; ET_0 逐日参考作物蒸散量; K_c 为逐日作物系数。

1.3.4 作物水分亏缺指数 (CWDI)

作物水分亏缺指数 (CWDI) 是表征作物水分亏缺程度的指标之一。考虑前期水分盈亏所造成的累积效应, 水分亏缺指数一般计算连续 5 旬的累积作物水分亏缺指数, 公式如下^[22]:

$$\text{CWDI} = a \times \text{CWDI}_i + b \times \text{CWDI}_{i-1} + c \times \text{CWDI}_{i-2} + d \times \text{CWDI}_{i-3} + e \times \text{CWDI}_{i-4} \quad (4)$$

式中, CWDI 为作物生长季内按旬时段计算的累积水分亏缺指数; CWDI_i 、 CWDI_{i-1} 、 CWDI_{i-2} 、 CWDI_{i-3} 、 CWDI_{i-4} 分别为该旬及其前 4 旬的水分亏缺指数。

1.3.2 作物系数 (K_c)

作物系数是指作物某生长发育阶段的需水量 ET_c 与对应阶段参考作物蒸散量 ET_0 的比值, 随作物品种、生长状况、气候、土壤及管理方式而异。本研究采用 1998 年 FAO 推荐的分段单值平均法计算^[21], 得到大豆发育初期、中期、后期的 3 个标准作物系数分别为: $K_{\text{cini}(\text{Tab})} = 0.4$, $K_{\text{cmid}(\text{Tab})} = 1.15$, $K_{\text{cend}(\text{Tab})} = 0.5$, 并根据各站点的气候条件, 对大豆生育中期和后期逐日作物系数进行订正, 公式如下:

a 、 b 、 c 、 d 、 e 为对应旬的累计权重系数, 一般 a 取值为 0.3, b 取值为 0.25, c 取值为 0.2, d 取值为 0.15, e 取值为 0.1。

式(4)中, CWDI_i 的计算公式如下:

$$\text{CWDI}_i = \begin{cases} (ET_{ci} - P_i)/ET_{ci} \times 100\% & ET_{ci} \geq P_i \\ 0 & ET_{ci} < P_i \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_i 为第 i 旬的累积降水量 (mm), ET_{ci} 为第 i 旬的累积作物需水量 (mm), 分别由第 i 旬内逐日降水量 (P) 和需水量 (ET_c) 累计得到。

本文在计算大豆各生育阶段的作物水分亏缺指数时, 对于旬的划分是从不同生育阶段开始的第 1 天起, 每 10 d 作为 1 旬, 至生育阶段停止, 最后不足 5 d 则合并为上一旬, 超过 5 d 则单独作为新的一旬, 再分别按照公式(4)和公式(5)计算得到各生育阶段内各旬累计作物水分亏缺指数, 最后, 大豆各生育阶段的作物水分亏缺指数为该生育阶段内各旬累计作物水分亏缺的平均值。

1.3.5 干旱频率 (F_i)

根据文中确定的作物水分亏缺指标, 计算作物不同生育阶段干旱发生频率 F_i , 即某站发生某等级干旱的年次数与统计资料的总年数之比, 计算公式如下:

$$F_i = n/N \times 100\% \quad (6)$$

式中, F_i 为某等级干旱发生的频率; n 为该生育阶段发生某等级干旱的年数; N 为研究资料总年数。

1.3.6 气候倾向率(TR)

某气候要素的变化趋势可用一次线性方程表示。用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候要素变量,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 的一元线性回归方程:

$$x_i = at_i + b$$

式中, a 为回归系数, b 为回归常数,可用最小二乘法进行估计^[23]。以 a 的 10 倍作为气候倾向率(TR),表示气候要素每 10a 的变化规律,正值表示气候要素呈增加趋势,负值表示呈减少趋势。

1.3.7 变异系数(CV)

变异系数是标准差与平均数的比值,可用以比较不同观测数列离差程度的大小,计算公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

式中, σ 为观测要素的标准差, μ 为观测要素的均值。变异系数越大,说明要素变化越剧烈、越不稳定;变异系数越小,说明要素变化程度越小、越稳定^[24]。

2 结果与分析

2.1 干旱指标等级订正

本文结合东北三省大豆生产实际资料,参照气

象行业标准《农业干旱等级》及已有的研究结果^[22,16-19],对东北大豆干旱等级标准进行订正,订正后的结果如表 2。

表 2 东北三省大豆作物水分亏缺指数(CWDI)的干旱分级

Table 2 Classification of drought of soybean in Northeast China based on CWDI

等级 Grade	类型 Type	作物水分亏缺指数 Crop Water Deficit Index/%
0	无旱	CWDI ≤ 35
1	轻旱	35 < CWDI ≤ 45
2	中旱	45 < CWDI ≤ 55
3	重旱	55 < CWDI ≤ 65
4	特旱	CWDI > 65

为了检验本文为对大豆干旱等级的订正是否合理,在此利用《中国气象灾害大典》的黑龙江卷、吉林卷和辽宁卷,选取典型站点的灾情资料进行验证。本文选取了黑龙江省的黑河、吉林省的白城、辽宁省的朝阳为代表站点,依据公式 4 计算了 1961—2010 年大豆全生育期作物水分亏缺指数,采用表 2 的指标划定干旱等级,3 个典型站点大豆作物水分亏缺指数时间演变特征如图 2。

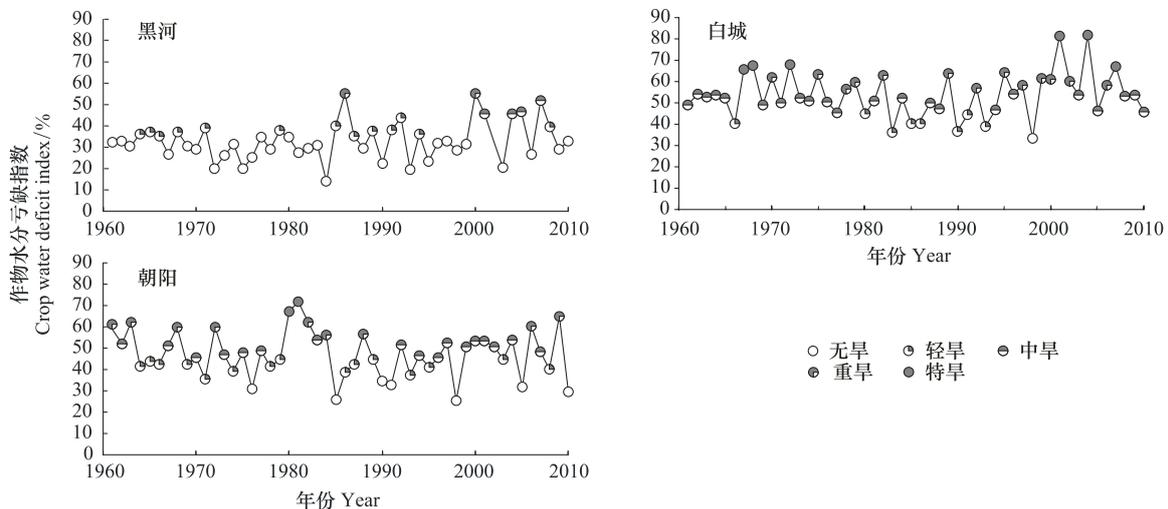


图 2 1961—2010 年黑河、白城、朝阳大豆全生育期作物水分亏缺指数(CWDI)变化

Fig.2 Variations of CWDI during the growing season of soybean in Heihe, Baicheng, and Chaoyang stations during 1961—2010

图 2 为 3 个典型站点依据 CWDI 计算的干旱发生年份和干旱等级,从图中可以看出近 50 年来,黑河发生干旱 19a,1986 年和 2000 年重旱;白城发生干旱 49a,1967、1968、1972、2001 和 2004 年特旱;朝阳发生干旱 43a,1980 年和 1981 年特旱。《中国气象

灾害大典》^[25-27]记载的干旱实际发生情况为黑河市 1986 年出现严重春旱,0.27 万 hm^2 大豆种子未出苗,农作物成灾面积 4.53 万 hm^2 ,占播种面积的 94%。白城市 1968 年春夏少雨,大豆开花不结荚,农作物普遍减产 80%,旱情十分严重。1972 年白城地区春

季少雨,干旱面积 40.67 万 hm^2 ,占耕地面积的 1/3,农作物减产 5 成左右。朝阳地区 1980 年春夏降水极少,干旱面积 46.67 万 hm^2 ,绝收面积 8.67 万 hm^2 ,旱情严重。1981 年朝阳地区春夏秋三季连旱,全区严重干旱 18 万 hm^2 ,绝收面积 16.67 万 hm^2 ,从上面比较分析可以看出,利用 CWDI 计算得到的等级和实际干旱灾情记载基本相符,表明本文 CWDI 的计算和干旱等级是合理的。

2.2 东北三省大豆干旱频率特征

2.2.1 大豆全生育期干旱频率特征

图 3a 为东北三省大豆全生育期轻旱发生频率空间分布图,从图中可以看出,大豆全生育期轻旱发

生频率总体较高,全区 56% 的站点轻旱频率高于 25% (4 年一遇),主要集中在黑龙江省的西部、三江平原北部、吉林省中部以及辽宁省西部和南部地区;其中,以哈尔滨附近轻旱发生频率最高,为 58%,相当于 2 年一遇,黑龙江省中部的伊春、尚志一带以及辽宁省东北部的本溪、丹东一带轻旱频率相对较低,在 10%—25% 之间,相当于 5 年或 4 年一遇,只有吉林省东南部的敦化、通化一带地区轻旱频率在 10% (10 年一遇) 以下,不易发生轻旱。

图 3b 为东北三省大豆全生育期中旱发生频率空间分布图。从图中可以看出,中旱发生频率呈明显的西高东低的空间分布特征,黑龙江省西南部、吉

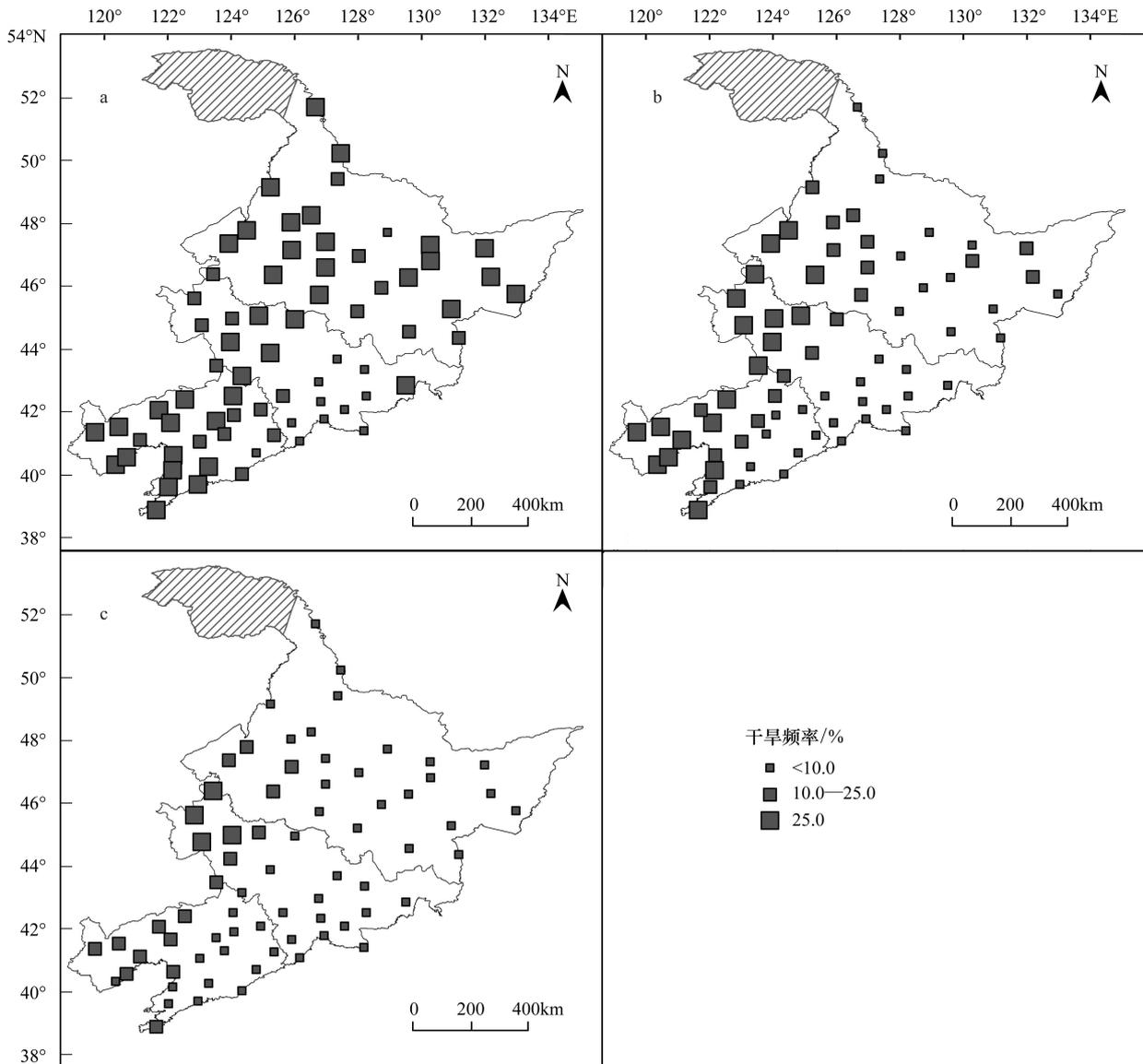


图 3 东北三省大豆全生育期轻旱(a)、中旱(b)、重级以上干旱(c)频率的空间分布

Fig.3 Frequency of light (a), middle (b), and heavy or above (c) drought during the growing season of soybean in Northeast China

林省西部以及辽宁省西部和南部地区,中旱频率较高,可达 25%(4 年一遇)以上,黑龙江省西北部、三江平原北部、吉林省中部以及辽宁省中部的大豆中旱频率则有所降低,在 10%—25%之间,而黑龙江省中部及东南部、吉林省东部和辽宁省东部地区,中旱频率在 10%(10 年一遇)以下,不易发生中旱。

图 3c 为东北三省大豆全生育期重旱以上发生频率空间分布图。从图中可以看出,重旱以上干旱发生频率总体较低,除黑龙江省的泰来、吉林省的白城、通榆和乾安以外,其它地区均小于 25%(4 年一遇),其中,黑龙江省西南部、辽宁省西部以及吉林西部地区重旱频率在 10%—25%之间,约有 71% 的站点重旱以上干旱频率低于 10%(10 年一遇),44% 的站点从未发生过重旱。

总体来看,分析东北三省大豆全生育期干旱频率呈明显的西高东低的空间分布特征,与降水的空间分布特征基本一致。干旱发生频率以轻旱最高,中旱次之,重旱以上干旱频率最低;黑龙江省西部、辽宁省西部及南部地区发生轻旱和中旱的频率相对较高,而吉林西部地区虽然不易发生轻旱,但却存在较高的中旱及重旱以上干旱风险。

2.2.2 大豆不同生育阶段干旱频率特征

前面分析大豆全生育阶段干旱频率分布特征,而大豆各生育阶段需水量和降水分布不同,各生育阶段的干旱特征也不同,具体结果,大豆播种到分枝、分枝到开花、开花到成熟阶段干旱(指轻旱以上,下同)频率空间分布如图 4 所示,各生育阶段干旱频率空间分布情况基本相似,呈由东北向西南逐渐增加的趋势,三江平原北部、黑龙江省西南部、吉林省西部、辽宁省西部及南部地区干旱发生频率较高,为干旱的主发区。从研究区域来看,干旱发生频率为播种到分枝最高,分枝到开花次之,开花到成熟最低。

(1) 东北三省大豆播种到分枝阶段干旱频率特征

东北三省大豆播种到分枝阶段干旱频率较高(图 4a),研究区域内,吉林白城地区干旱频率最高,为 100%,即年年都有干旱发生;干旱频率最低的地区位于吉林省东岗地区,为 10%,每 10 年一遇。56% 的站点干旱频率超过 50%(为 2 年一遇),这些

区域包括黑龙江省的三江平原北部和呼玛→吉林省的长春→辽宁的沈阳→大连一线以西地区;31% 的站点干旱频率超过 80%(为 5 年四遇),这些区域包括黑龙江省的齐齐哈尔、大庆地区,吉林省的乾安、通榆、双辽、长岭一带和辽宁省的朝阳、阜新、锦州、大连一带;播种到分枝阶段干旱频率较低(4 年一遇)的站点主要分布在吉林省东南部地区。

(2) 东北三省大豆分枝到开花阶段干旱频率特征

大豆从分枝到开花阶段干旱频率明显低于播种到分枝阶段干旱频率(图 4b),除吉林省的乾安、通榆两地干旱频率为 80%之外,其他地区均为 80%以下;全区约有 48% 的站点超过 50%(2 年一遇),包括黑龙江省西南部及三江平原北部、吉林省西部和中部、辽宁省西部、南部及中部的部分地区。吉林省临江和靖宇两地干旱频率最低,小于 10%(10 年一遇)。

(3) 东北三省大豆开花到成熟阶段干旱频率特征

大豆开花到成熟阶段干旱频率又进一步下降(图 4c),但在黑龙江省西南部及三江平原北部、吉林省西部、辽宁省西部及南部地区干旱频率仍然较高,为 50%—80%,约为 2—3 年一遇,尤以吉林省通榆地区干旱频率最高(80%),而吉林省东南部和辽宁省东北部部分地区干旱频率较低,小于 10%。

2.3 东北三省大豆干旱程度演变特征

2.3.1 大豆作物水分亏缺指数年际变化特征

根据前面的研究结果,在大豆干旱发生频率不同地区,分别选择辽宁省的朝阳(研究区域西部)、黑龙江省的绥化(研究区域中部)、吉林省的通化(研究区域东部)3 个代表站作为典型站点,分析气候变化背景下大豆不同生育阶段作物水分亏缺指数(CWDI)的年际变化特征,分析结果见图 5。

1961—2010 年 3 个站点大豆从播种到分枝阶段的 CWDI 均呈波动下降趋势,其中辽宁的朝阳干旱最为严重,作物水分亏缺指数平均为 56%,且年际间波动较小;黑龙江省的绥化作物水分亏缺指数居中,年际间波动较大;吉林省的通化作物水分亏缺指数最小,下降趋势也最不明显,但年际间的波动最大。

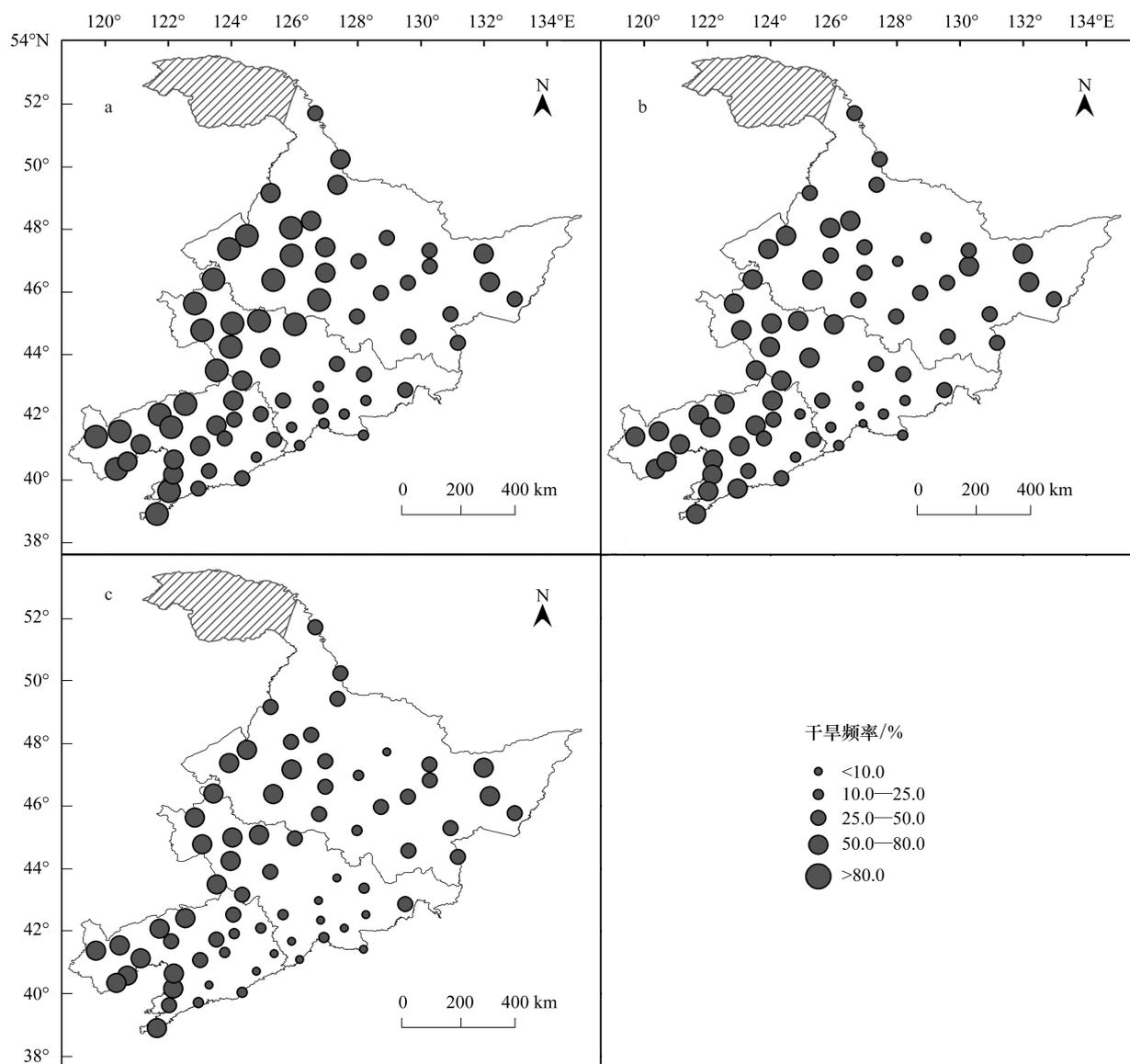


图4 东北三省大豆播种到分枝(a)、分枝到开花(b)、开花到成熟(c)干旱频率的空间分布

Fig.4 Frequency of drought during the stage of sowing to branch (a), branch to flowering (b), and flowering to maturation (c) of soybean in Northeast China

研究时段内大豆分枝至开花阶段3个站点作物水分亏缺指数年际间波动最大,其中辽宁的朝阳、黑龙江的绥化两个站点干旱作物水分亏缺指数在波动中呈下降趋势,吉林省的通化作物水分亏缺指数上升,表明该生育阶段内干旱呈加重趋势。

研究时段内大豆开花至成熟阶段3个站点作物水分亏缺指数是3个生育阶段中最小的,年际间的波动较大;其中,辽宁省的朝阳、黑龙江省的绥化均呈上升趋势,通化站点的年际变化不明显。

大豆全生育期3个站点作物水分亏缺指数年际间波动最小,通化年平均CWDI最小,为21%,其次

是绥化,为37%;朝阳和通化呈微弱的下降趋势,绥化则呈微弱的上升趋势。

2.3.2 大豆干旱等级演变特征

图6反映了1961—2010年5个年代80%保证率下干旱等级的空间演变特征。从图中可以看出,干旱等级由东向西逐渐加重。重旱区主要位于松嫩平原西部地区,覆盖面积在1961—2010年的5个年代中表现为先减小后增加的趋势,以80年代面积最小,近10年区域最广(达 $1.04 \times 10^5 \text{ km}^2$),已延伸至富裕→乾安→双辽一线;中旱区主要位于除重旱区外的辽宁西部、吉林西部和黑龙江西南部地区,不同

年代间面积增加趋势明显,近 10 年覆盖面积从 20 世纪 60 年代的 $1.84 \times 10^5 \text{ km}^2$ 增加到 $3.55 \times 10^5 \text{ km}^2$,较 90 年代增加了 $1.23 \times 10^5 \text{ km}^2$,已延伸至海伦→长春→沈阳→大连一线;轻旱区主要分布于辽宁中部、吉林中部和黑龙江中部及东部地区,其覆盖面积演变趋势与中旱相反,呈减少趋势,60 年代区域最广,

最近 10 年面积最小;无旱区主要分布在吉林省东部地区,其覆盖面积呈先增加后减少的趋势,与重旱相反,80 年代面积最大,近 10 年面积最小。综上分析,近 10 年东北大豆种植区重旱及中旱范围增加明显,干旱趋于严重。

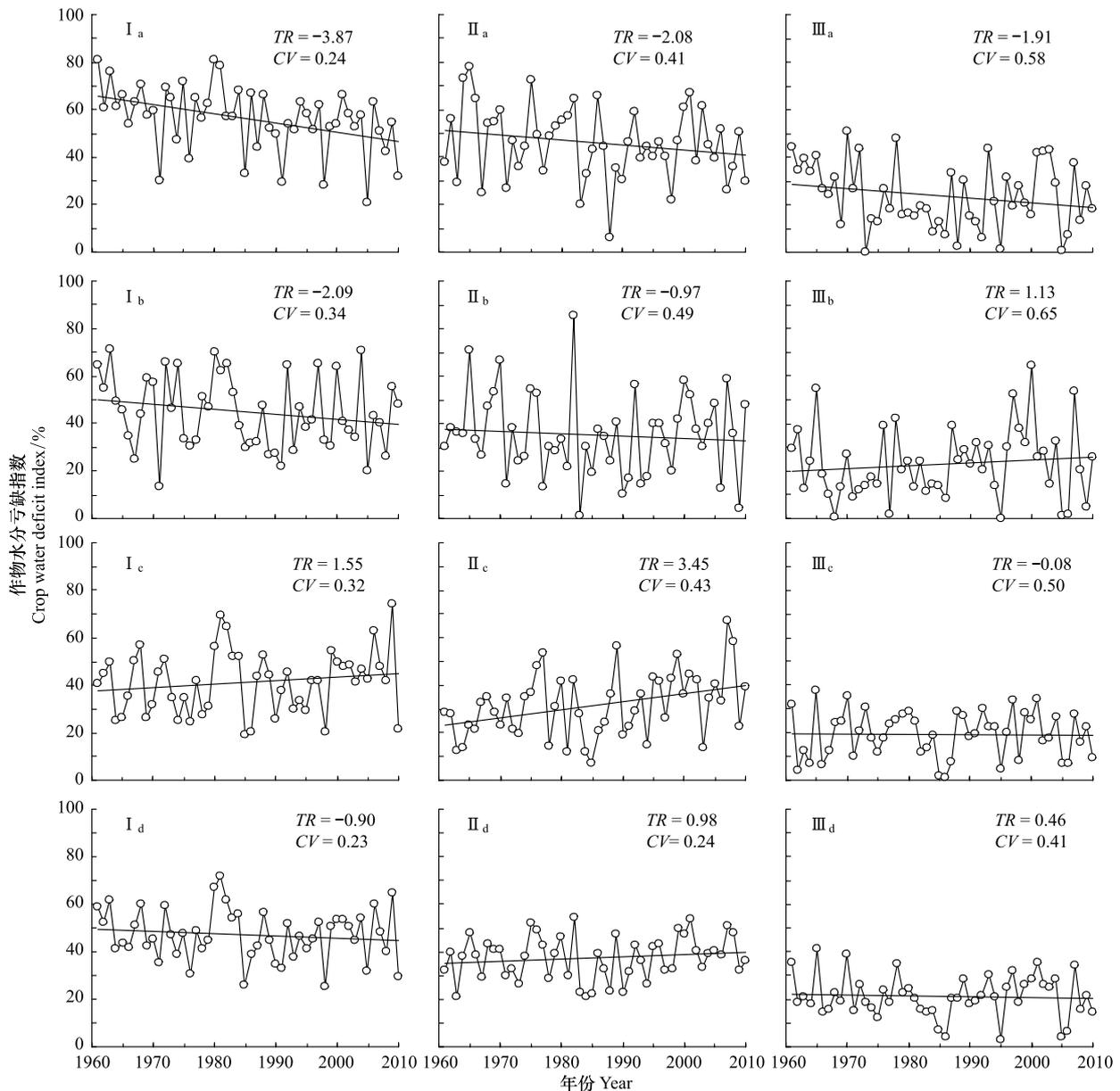


图 5 1961—2010 年朝阳 (I)、绥化 (II)、通化 (III) 大豆不同生育阶段作物水分亏缺指数年际变化

Fig.5 The time series of CWDI during the different growing stages of soybean in Chaoyang (I), Suihua (II), and Tonghua (III) stations during 1961—2010

a: 播种到分枝;b:分枝到开花;c:开花到成熟;d:全生育期;TR:气候倾向率;CV:变异系数

3 讨论

本研究通过对东北地区大豆各生育阶段干旱发

生频率的分析结果可以看出,播种到分枝阶段大豆干旱发生频率最高,即春早在大多数年份制约着东北大豆的生产,笔者利用《中国气象灾害大典——辽

宁卷》记载的东北三省历史上大豆灾害资料,统计结果显示东北作物生产多受春旱制约,更有成灾严重的季节性连旱发生,如辽宁省朝阳地区 1980 年春夏降水极少,干旱面积 46.67 万 hm^2 ,绝收面积 8.67 万 hm^2 ,旱情严重。关于大豆不同生育时期受水分胁迫影响机制的研究已屡见报道,如韩晓增^[28]等研究认为营养生长期干旱使大豆产量下降 19.42%—21.11%,花期干旱导致减产 17.70%—25.92%,荚期干旱导致减产 23.77%—33.89%,鼓粒期干旱减产 12.25%—40.61%。而开花到成熟阶段干旱仍不能忽视,在东北西部地区此阶段干旱一直保持高发趋势,作为大豆水分关键期,适时的灌溉措施对保障大豆生产至关重要。陈莉等^[29]对我国东北近 50 年作物干旱发生情况的统计分析得出,1997—2007 年干旱成灾面积与绝收面积分别是之前的 20a 干旱成灾

面积和绝收面积的 1.99 和 5.58 倍,魏凤英等^[8]利用气象资料分析同样得出了近期的 1996—2007 年是 57 年来干旱发生频次最多的时期。本文针对大豆干旱空间分布的年代际分析得到最近 10 a 来,东北大豆生产面临的干旱威胁加重。

本研究得出了东北三省各等级干旱频率的空间分布有从东到西逐渐加重的趋势,这与研究区域降水特征相一致,东北地区从东向西依次为湿润地区、亚湿润地区、亚干旱地区。而前人关于东北三省作物干旱空间分布的研究中,所得结果基本符合从东向西干旱逐渐加重的空间格局^[17-18]。本文通过分析得到东北三省各站点大豆干旱发生变率与程度,为当地大豆生产因地制宜、因时制宜的优化管理提供科学依据。

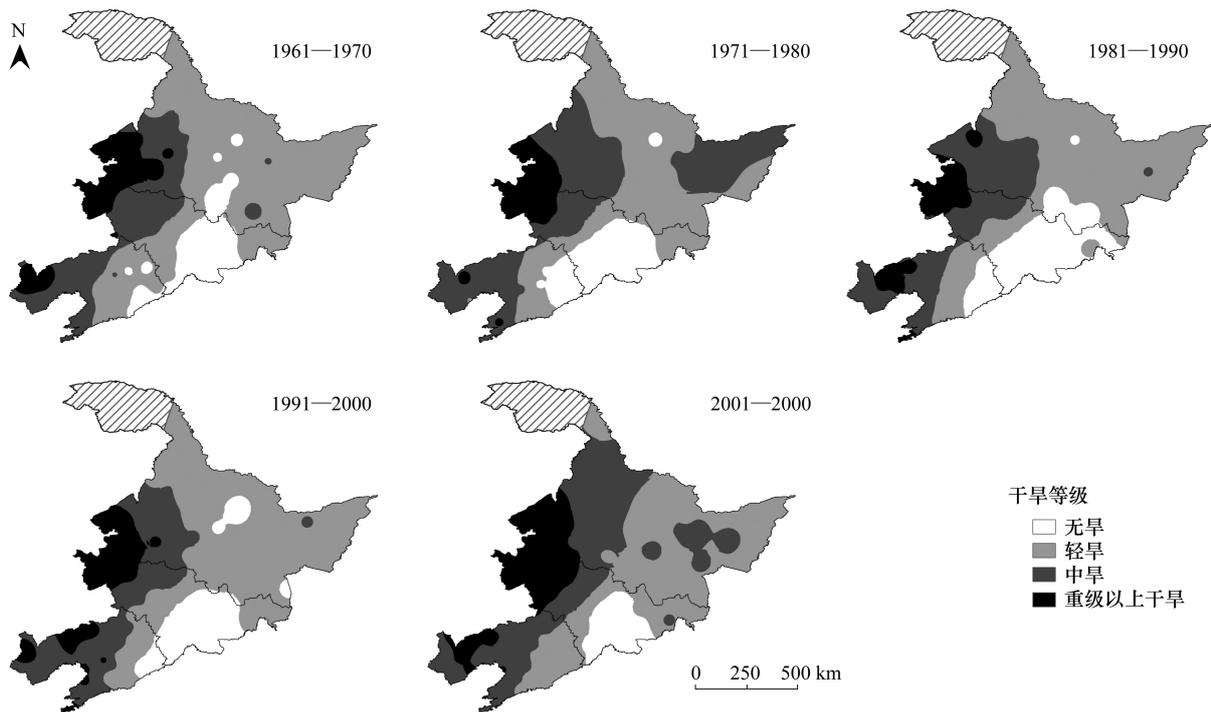


图 6 东北三省 1961—2010 年干旱等级分布演变趋势

Fig.6 Evolution tendency of drought degree in Northeast China during 1961—2010

本文综合分析了气候变化背景下我国东北三省近 50 年大豆干旱发生频率、覆盖范围以及干旱等级的演变趋势,对研究区域大豆生产中防旱避灾具有一定的指导意义。由于作物水分亏缺指数综合考虑了前期水分影响,在反应干旱对作物的持续影响上更具实际意义,但前期干旱对后期影响有待进一步的细化和精确;东北地区大豆生产基本依靠雨养,本

研究仅考虑降水作为大豆生产中水分供给的唯一来源,未考虑灌溉和土壤底墒的影响,这在今后研究中还有待进一步分析。

4 结论

东北三省大豆全生育期干旱频率以轻旱最高,中旱次之,重旱以上干旱频率最低,不同等级干旱频

率总体上均呈明显的西高东低的带状空间分布特征,与该地区降水的空间分布特征基本一致;大豆各生长发育阶段干旱特征来看,3个生育阶段干旱频率分布都呈从东北向西南逐渐增加的趋势,其中播种到分枝阶段的干旱频率最高,其次为分枝到开花阶段,开花到成熟阶段的干旱频率最低,此时为大豆的需水关键期,若遇干旱则会对大豆产量造成很大影响,适时适量的灌溉是保证大豆高产的重要措施。从研究区域黑龙江绥化、吉林的通化、辽宁的朝阳3个站点作物水分亏缺指数年际变化来看,播种到分枝阶段干旱程度较高但波动幅度较小,总体呈下降趋势,分枝到开花和开花到成熟两阶段干旱程度较低但其年际间波动较大,总体呈从播种到分枝期干旱为主向开花到成熟期为主转变的特点;东北三省大豆全生育干旱等级存在明显的年代际变化,20世纪80年代干旱范围最小、程度最轻,最近10年重旱及中旱范围增加明显,干旱趋于严重。

References:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] The Compiling Committee of the Second China's National Assessment Report on Climate Change. The Second China's National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] Sun F H, Yuan J, Lu S. The change and test of climate in northeast China over the last 100 years. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(1): 101-108.
- [4] Liu Z J, Yang X G, Wang W F, Li K N, Zhang X Y. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [5] Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, 2008, 31(1): 79-105.
- [6] Sun F H, Qu Z J, Yang S Y. Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in Northeast China in last 50 years. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 779-784.
- [7] Xie A, Sun Y G, Bai R H. Arid climate trend over northeastern China and its response to global warming. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(S1): 75-82.
- [8] Wei F Y, Zhang T. Frequency distribution of drought intensity in northeast China and relevant circulation background. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(3): 1-7.
- [9] Zhang J T, Qu Y P. Drought discipline and strategy of drought relief in recent 30 years in China. *China Flood and Drought Management*, 2008, 18(5): 47-52.
- [10] Zheng X L, Zhang B S, Kou H. Main problems and developing countermeasures of soybean in northeast China. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2012, (2): 146-149.
- [11] Hao X Y, Han X, Ju H, Lin E D. Impact of climatic change on soybean production: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2697-2706.
- [12] Dong X Y, Lin H, Liu X J, Tang X F, Wei L. Influence of drought stress on soybean physiological indexes. *Soybean Science*, 2011, 30(1): 83-88.
- [13] Xie F T, Dong Z, Sun Y H, Wang X G. Influence of drought on growth and yield of soybeans at different growth stages. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1994, 25(1): 13-16.
- [14] Liu L J, Lin H, Tang X F, Pu G F. Drought stress influence soybean yield morphogenesis in different growth stages. *Soybean Science*, 2011, 30(3): 405-411.
- [15] Zhang Y H, Lu H Q, Li Sen. Applicability of crop water deficit index in agricultural drought monitoring. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(5): 596-600.
- [16] Huang W H, Yang X G, Qu H H, Feng L P, Hang B X, Wang J, Shi S J, Wu Y F, Zhang X Y, Xiao X P, Yang G L, Li M S. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(8): 28-34.
- [17] Zhang S J, Zhang Y S, Ji R P, Cai F, Wu J W. Analysis of spatio-temporal characteristics of drought for maize in Northeast China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 231-236.
- [18] Dong Q T, Li M S, Liu J, Wang C Y. Spatio-temporal evolution characteristics of drought of spring maize in northeast China in recent 50 years. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 52-59.
- [19] Sui Y, Huang W H, Yang X G, Li M S. Characteristics and adaptation of seasonal drought in southern China under the background of global climate change II. Spatiotemporal characteristics of drought for wintering grain and oil crops based on crop water deficit index. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2467-2476.
- [20] Pan T F, Zhang D R, Zhang W G. The climatic regionization of soybean in northeast China. *Soybean Science*, 1983, 2(1): 1-13.
- [21] Allen R G, Luis S P, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998: 15-86.
- [22] Lu H Q, Zhang Y S, Wang J L, Zhang S J, Lou X R, Zhang Y

- H. GB/T- 2009, Classification of agricultural drought category (Examination vision).
- [23] Wei F Y. Modern diagnosis and prediction of climate statistics. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 37-41.
- [24] Ma K Y, Ding Y G, Tu Q P, Yao Z S. Climate statistics principles and method. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 43-45.
- [25] Wen K G, Li B, Meng Q N. China's Meteorological Disasters Ceremony. Liaoning Province. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 103-135.
- [26] Wen K G, Qin Y M. China's Meteorological Disasters Ceremony. Jilin Province. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 174-201.
- [27] Wen K G, Sun Y G. China's Meteorological Disasters Ceremony. Heilongjiang Province. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 167-203.
- [28] Han X Z, Qiao Y F, Zhan Q Y, Wang S Y, Song C Y. Effects of various soil moisture on the yield of soybean. Soybean Science, 2003, 22(4): 269-272.
- [29] Chen L, Fang L J, Li S. Study on drought trend of crop growing season in northeast China in recent 50 years. Journal of Catastrophology, 2010, 25(4): 6-10.
- [11] 郝兴宇, 韩雪, 居辉, 林而达. 气候变化对大豆影响的研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2697-2706.
- [12] 董兴月, 林浩, 刘丽君, 唐晓飞, 魏岷. 干旱胁迫对大豆生理指标的影响. 大豆科学, 2011, 30(1): 83-88.
- [13] 谢甫绵, 董钻, 孙艳环, 王晓光. 不同生育时期干旱对大豆生长和产量的影响. 沈阳农业大学学报, 1994, 25(1): 13-16.
- [14] 刘丽君, 林浩, 唐晓飞, 蒲国峰. 干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响. 大豆科学, 2011, 30(3): 405-412.
- [15] 张艳红, 吕厚荃, 李森. 作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性. 气象科技, 2008, 36(5): 596-600.
- [16] 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 冯利平, 黄彬香, 王靖, 施生锦, 武永峰, 张晓煜, 肖小平, 杨光立, 李茂松. 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. 农业工程学报, 2009, 25(8): 28-34.
- [17] 张淑杰, 张玉书, 纪瑞鹏, 蔡福, 武晋雯. 东北地区玉米干旱时空特征分析. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 231-236.
- [18] 董秋婷, 李茂松, 刘江, 王春艳. 近 50 年东北地区春玉米干旱的时空演变特征. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 52-59.
- [19] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应 II. 基于作物水分亏缺指数的越冬粮油作物干旱时空特征. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2467-2476.
- [20] 潘铁夫, 张德荣, 张文广. 东北地区大豆气候区划的研究. 大豆科学, 1983, 2(1): 1-13.
- [22] 吕厚荃, 张玉书, 王建林, 张淑杰, 姜秀荣, 张艳红. GB/T-2009, 农业干旱等级(审定稿).
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 37-41.
- [24] 马开玉, 丁裕国, 屠其璞, 么枕生. 气候统计原理与方法. 北京: 气象出版社, 1993: 43-45.
- [25] 温克刚, 李波, 孟庆楠. 中国气象灾害大典 辽宁卷. 北京: 气象出版社, 2005: 103-135.
- [26] 温克刚, 秦元明. 中国气象灾害大典 吉林卷. 北京: 气象出版社, 2008: 174-201.
- [27] 温克刚, 孙永罡. 中国气象灾害大典 黑龙江卷. 北京: 气象出版社, 2007: 167-203.
- [28] 韩晓增, 乔云发, 张秋英, 王守宇, 宋春雨. 不同土壤水分条件对大豆产量的影响. 大豆科学, 2003, 22(4): 269-272.
- [29] 陈丽, 方丽娟, 李帅. 东北地区近 50 年农作物生长季干旱趋势研究. 灾害学, 2010, 25(4): 6-10.

参考文献:

- [2] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 孙风华, 袁健, 路爽. 东北地区近百年气候变化及突变检测. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 101-108.
- [4] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 李克南, 张晓煜. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [6] 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. 生态学杂志, 2006, 25(7): 779-784.
- [7] 谢安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应. 地理学报, 2003, 58(增刊): 75-82.
- [8] 魏凤英, 张婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 1-7.
- [9] 张家团, 屈艳萍. 近 30 年来中国干旱灾害演变规律及抗旱减灾对策探讨. 中国防汛抗旱, 2008, 18(5): 47-52.
- [10] 郑新利, 张丙双, 寇贺. 东北地区大豆生产主要问题及发展对策. 黑龙江农业科学, 2012, (2): 146-149.