中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

近60年东北地区春玉米旱涝趋势演变研究

任宗悦，刘晓静，刘家福，陈鹏

引用本文:
任宗悦, 刘晓静, 刘家福, 等. 近60年东北地区春玉米旱涝趋势演变研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 179–190.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190684

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响

Spatial distribution characteristics and impact on spring maize yield of drought in Northeast China

中国生态农业学报. 2015(6): 758–767 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141350

基于游程理论的农业干旱指数在辽宁省春玉米旱灾损失评估中的应用

Application of agricultural drought index based on Run Theory for the assessment of yield loss in spring maize owing to drought in Liaoning Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 191–199 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190675

日尺度标准化前期降水蒸散指数及其在安徽省的适用性分析

Daily standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI) and its adaptability in Anhui Province

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 919–928 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180835

近30年中国主要农业气象灾害典型场时空格局分异特征

Spatio–temporal patterns of typical agro–meteorological disasters in China in the past 30 years

中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1302–1314 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170697

山东省干旱时空分布特征及其与ENSO的相关性

Spatio–temporal distribution characteristics of drought in Shandong Province and it relationship with ENSO

中国生态农业学报. 2018, 26(8): 1236–1248 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171024

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 2 月 第 28 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2020, 28(2): 179−190

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190684

任宗悦, 刘晓静, 刘家福, 陈鹏. 近60年东北地区春玉米旱涝趋势演变研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 179−190
REN Z Y, LIU X J, LIU J F, CHEN P. Evolution of drought and flood trend in the growth period of spring maize in Northeast China in the past 60 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 179−190

近 60 年东北地区春玉米旱涝趋势演变研究*

任宗悦, 刘晓静**, 刘家福, 陈 鹏

(吉林师范大学旅游与地理科学学院 四平 136000)

摘 要: 区域作物旱涝趋势的演变是区域应对气候变化、制定防灾减灾决策的理论依据, 是保证我国粮食安全的基础。本文以东北地区为研究区, 依据春玉米的生长特征将其划分为 14 个分区, 利用研究区 1958—2017 年 78 个站点的逐日气象数据, 计算春玉米生育期内的累积水分盈亏指数(CWSDI′), 并将其划分为 8 个旱涝等级, 结合 M-K 趋势检验和突变检验法及 GIS 空间分析技术, 揭示了东北地区春玉米生长期旱涝趋势的时空演变规律。结果表明: 在春玉米生育期内, 播种—抽穗期的 3 个生育阶段, CWSDI′值大体呈上升趋势, 抽穗—成熟期 CWSDI′值呈下降趋势, 其中乳熟—成熟阶段的下降趋势最重, 但无明显区域性。研究区内春玉米干旱的发生频率远高于洪涝的发生频率, 干旱自 20 世纪 90 年代逐渐加重, 洪涝情况无明显变化趋势; 拔节—抽穗阶段和乳熟—成熟阶段分别是旱涝灾害最轻和最重的阶段, 春玉米各生育阶段各旱涝等级的发生频率大体上是特旱>轻旱>其余旱涝等级; 吉林省西部和辽宁省西部的中旱及重旱频率高于其他地区, 特旱主要集中在研究区西部, 轻涝集中在黑龙江省中、南部, 吉林省东部和辽宁省东部, 研究区内几乎不发生中、重涝。应在春玉米的生育初期和后期注意旱涝灾害的预防, 研究区西部的旱情较重应重点防范, 做到适时有效灌溉。研究结果可为区域预测农业旱涝灾害、优化水资源配置提供决策依据。

关键词: 东北地区; 春玉米; 水分盈亏指数; 旱涝频率; 时空变化; M-K 趋势检验

中图分类号: K90 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Evolution of drought and flood trend in the growth period of spring maize in Northeast China in the past 60 years*

REN Zongyue, LIU Xiaojing**, LIU Jiafu, CHEN Peng

(College of Tourism and Geographic Science, Jilin Normal University, Siping 136000, China)

Abstract: The evolution of regional drought and flood trend provides a theoretical basis for understanding crop response to climate change, decision making on disaster prevention and reduction, and ensuring China's food security. Here, the northeast region of China was used as the research area, which was divided into 14 parts based on the growth characteristics of spring maize. The daily meteorological data from 78 stations in the study area from 1958 to 2017 were used to calculate the crop water surplus deficit index (CWSDI′) of spring maize during the growing period. The CWSDI′ values were divided into eight drought and flood levels. The results revealed the temporal and spatial trend of drought and flood during the growth period of spring maize in the northeast region using Mann-Kendall trend test, mutation test, and geographic information system spatial analysis technology. During the growth period of spring maize, CWSDI′ generally increased in the three growth stages of sowing–heading period and decreased in the

* 国家自然科学基金项目(41501559, 41977411)和吉林师范大学研究生科研创新计划项目(研创新 201945)资助
** 通信作者: 刘晓静, 主要从事自然灾害风险评价与管理方面的工作。E-mail: liuxj@jlnu.edu.cn
任宗悦, 研究方向为自然灾害监测、风险评估与管理。E-mail: Zorinrzy@163.com
收稿日期: 2019-09-20 接受日期: 2019-11-13
* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41501559, 41977411) and the Graduate Innovation Foundation of Jilin Normal University (201945).
** Corresponding author, E-mail: liuxj@jlnu.edu.cn
Received Sep. 20, 2019; accepted Nov. 13, 2019

heading–maturation stage, and the decreasing trend was the most significant in the milk-maturation stage, but without any obvious regional difference. The frequency of drought in the growth period of spring maize in the research area was considerably higher than that of flood. The drought situation had gradually worsened since the 1990s, but the flood situation showed no obvious change. The jointing–heading and milk–maturation stages were the least and most affected stages by drought and flood, respectively. The frequency of drought and flood in each growth stage of spring maize was as follows: extreme drought > light drought > other drought and flood levels. The frequency of moderate drought and heavy drought in the western part of Liaoning was higher than that in other areas. Extreme drought mostly occurred in the western part of the study site, whereas light flood mostly occurred in Heilongjiang. Moderate flood and heavy flood rarely occurred in the study site. In the future, efforts should be made to prevent drought and flood in the early and late growth stages of spring maize. Furthermore, more attention should be paid to the western part of the study site owing to the more severe drought situation in order to achieve timely and effective irrigation. The results will provide a basis for the prediction of agricultural drought and flood disasters and optimization of water resource allocation on a regional scale.

Keywords: Northeast China; Spring maize; Crop water surplus deficit index; Drought and flood frequency; Spatio-temporal Change; M-K trend test

近年来，气象灾害频繁多发，对我国农业经济的发展造成了极大影响。尤其是有“黄金玉米带”之称的东北地区，仅 2017 年，黑龙江、吉林、辽宁省的作物受灾总面积约为 3.48×10^6 hm^2，其中干旱灾害受灾面积达 2.25×10^6 hm^2，洪涝灾害受灾面积约 7.53×10^4 hm^2，共占总受灾面积的 86.2%，可见旱涝灾害严重影响了东北地区春玉米(*Zea mays*)的生产。对区域旱涝趋势的演变进行研究，探究旱涝趋势在时间和空间上的发展变化，有助于因地制宜地制定防灾减灾措施，优化资源配置，从而削弱旱涝灾害对区域农业造成的损失。

研究表明，考虑水分供需关系的旱涝指标更能真正反映农田湿润程度和旱涝状况[1]。曹永强等[2]计算河北省典型作物的有效降雨量及作物需水量，借助水分盈亏指数分析了不同水文年作物的缺水情况。Zhang 等[3]选取 4 个干旱风险指数，用现有模型进行校正，构建吉林省 1981—2014 年玉米干旱动态风险评估模型来分析玉米生育阶段内水分胁迫对玉米的影响。Wang 等[4]利用 SPEIbass v2.4 数据集提取内蒙古标准化降水蒸散指数，利用加性季节与趋势断点分析技术(breaks for additive seasonal and trend, BFAST)研究了干旱的时空变化和干旱聚集特征。Supit 等[5]根据作物生长监测系统的蒸散模型，结合 Penman-Monteith 公式分析了气候变化下欧洲大田作物水分亏缺的时空变化。黄晚华等[6]利用水分亏缺指数探讨了湖南省春玉米干旱情况的季节性和空间区域性。但作物需水量受土壤、气候、作物生长状况和管理方式等诸多因素影响[7]，不同区域作物系数具有一定差异，不能一概而论。且作物旱涝灾害的发生，不仅与同时段的水分条件有关，还与前一时段的水分盈亏量有关。因此本文按照作物生长系数特征将东北地区划为 14 个分区，利用 1958—2017 年 78 个站点的气象数据，计算累积水分盈亏指数，结合 M-K 检验法，分析研究区近 60 年春玉米各生育期内旱涝程度及旱涝频率的时空演变，以期为东北地区玉米种植区的农业灌排和防灾减灾提供理论依据。

1 研究区概况

东北农作区耕地面积约占全国耕地面积的 15%，是我国主要的商品粮种植基地。东北地区也是中国玉米主产区之一，包括黑龙江省、吉林省、辽宁省及内蒙东部的通辽市和赤峰市，该区多年平均降水量在 500~800 mm，雨热同期，在春玉米生育期内较易发生旱涝灾害。故本文以东北地区为研究区，依据春玉米生长特征，对研究区进行分区，如图 1 所示。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 气象数据

本文选取东北玉米产区内 78 个气象台站 1958—2017 年的逐日气象数据，包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、平均风速、日照时数、相对湿度(图 1)。数据资料均来自国家气象信息中心(https://data.cma.cn/)中国地面气候资料日值数据集(V3.0)，并对个别缺测值和突变值进行空间插补、同期均值代替和异常值剔除等处理(异常值占比<0.1%)。

2.1.2 春玉米作物系数

国际粮农组织(FAO)建议玉米生育期划分为初始生长期、发育期、生育中期和生育后期。结合东北地区春玉米的品种和生长特点，根据文献[8-9]和田间数据，确定了东北地区春玉米各生育阶段的起止时间(表 1)。参考 FAO 计算的和前人修订的玉米作物系数[7,10]，根据北方春玉米干旱等级标准[11]中列出的北方春玉米作物系数，以及研究区的地理位置，以月为单位确定研究区各地区的春玉米作物系数值(表 2)，逐日计算春玉米需水量，累加得出各个生育阶段内的阶段需水量。

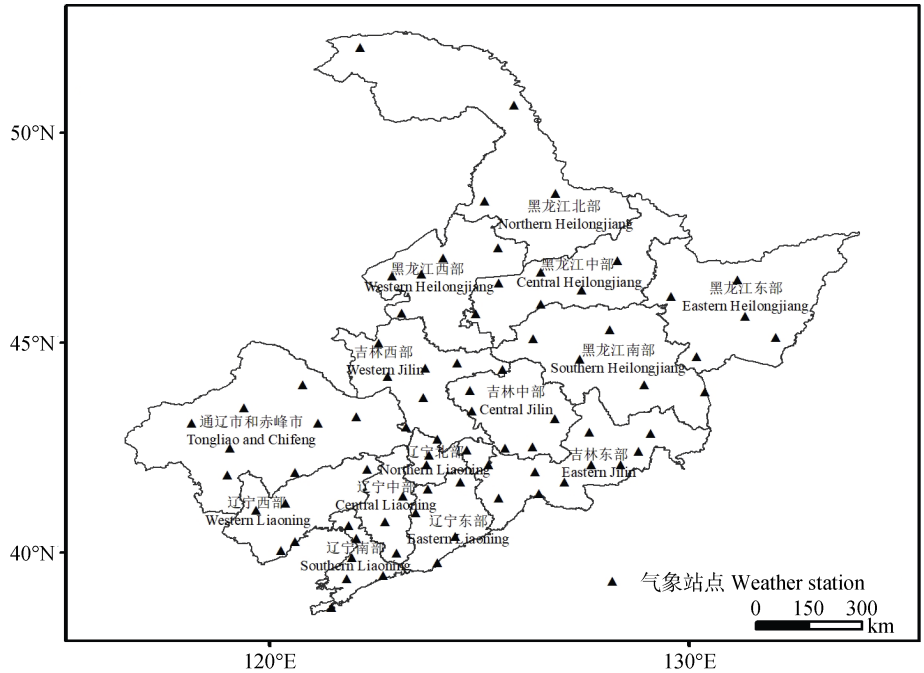


图 1　研究区分区情况及气象站点分布示意图

Fig. 1　Regionalization of the study area and distribution of meteorological stations in the study area

表 1　东北地区春玉米各生育阶段起止时间

Table 1　Starting and ending time of each growth period of spring maize in Northeast China

FAO 建议的生育阶段 Growth period recommended by FAO	生育阶段 Growth period	起止时间 Starting and ending time
初始生长期 Initial growth period	播种—出苗 Sowing–emergence	4 月下旬至 5 月中旬 Late-April to mid-May
发育期 Development period	出苗—拔节 Emergence–jointing	5 月下旬至 6 月中旬 Late-May to mid-June
	拔节—抽穗 Jointing–heading	6 月下旬至 7 月中旬 Late-June to mid-July
生育中期 Mid-growth period	抽穗—乳熟 Heading–milk	7 月下旬至 8 月中旬 Late-July to mid-August
生育后期 Late-growth period	乳熟—成熟 Milk–maturation	8 月下旬至 9 月下旬 Late-August to late-September

表 2　东北地区不同区域春玉米各月作物系数值

Table 2　Monthly crop coefficients of spring maize in different regions of Northeast China

地区 Region	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
黑龙江东部 Eastern Heilongjiang	0.30	0.49	0.75	1.08	1.02	0.74
黑龙江南部 Southern Heilongjiang	0.30	0.48	0.71	1.04	1.11	0.80
黑龙江西部 Western Heilongjiang	0.30	0.37	0.69	1.11	1.01	0.65
黑龙江北部 Northern Heilongjiang	0.30	0.49	0.77	1.03	1.02	0.74
黑龙江中部 Central Heilongjiang	0.30	0.45	0.76	1.10	1.02	0.74
吉林西部 Western Jilin	0.30	0.40	0.80	1.26	1.25	0.73
吉林中部 Central Jilin	0.30	0.45	0.63	1.15	0.96	0.74
吉林东部 Eastern Jilin	0.30	0.40	0.70	1.10	0.95	0.70
辽宁东部 Eastern Liaoning	0.47	0.68	0.92	1.13	1.12	0.84
辽宁南部 Southern Liaoning	0.46	0.70	0.92	1.21	1.11	0.83
辽宁西部 Western Liaoning	0.36	0.51	0.72	1.12	1.04	0.77
辽宁北部 Northern Liaoning	0.39	0.50	0.70	1.17	1.12	0.86
辽宁中部 Central Liaoning	0.40	0.52	0.76	1.21	1.13	0.89
内蒙古通辽市、赤峰市 Tongliao, Chifeng of Inner Mongolia	0.45	0.51	0.71	1.11	1.04	0.77

2.2 研究方法

2.2.1 春玉米生育期内累积水分盈亏指数的计算

水分盈亏指数(crop water surplus deficit index, CWSDI)是以某时段参考作物蒸散量为需水指标，以同一时段有效降雨量为供水指标，该指数能准确地表征作物各生育期及全生育期的水分盈亏程度，公式如下:

$$\mathrm{CWSDI}_i=\frac{P_{ei}-\mathrm{ET}_{ci}}{\mathrm{ET}_{ci}}\times 100\% \quad (1)$$

一个时段的水分盈亏程度，不仅取决于当期水分供需条件，还受到前期水分盈亏量的影响。考虑到前期水分状况对后期影响的大小和持续时间有限，故在公式中加入前 10 日的水分盈亏量作为盈亏累积部分，计算累积水分盈亏指数，公式如下:

$$\mathrm{CWSDI}_i'=\frac{\left(p_{\mathrm{e}10}-\mathrm{ET}_{\mathrm{c}10}\right)+\left(p_{ei}-\mathrm{ET}_{ci}\right)}{\mathrm{ET}_{ci}}\times 100\% \quad (2)$$

式中: CWSDI_i' 为某一时段内累积水分盈亏指数; p_{ei} 为 i 生育阶段内日有效降雨量的总和，mm; ET_{ci} 为 i 生育阶段内作物总需水量，mm; $p_{\mathrm{e}10}$ 为研究时段前 10 日累积降水量，mm; $\mathrm{ET}_{\mathrm{c}10}$ 为研究时段前 10 日累积需水量, mm。其中 P_{e} 采用降雨有效利用系数法[1]进行计算，ET_{c} 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式[12]和作物系数法计算[13]。

2.2.2 旱涝标准的确立

根据王蕊等[14]的研究，基于北方春玉米干旱等级标准[11]中以水分亏缺指数划分干旱等级的基础，根据累积水分盈亏指数值的大小划分旱涝等级标准，并选择较易受干旱影响的辽宁西北部和吉林西部的部分站点作为验证数据，将验证数据的结果与统计年鉴中的灾情数据对比，来验证作物系数值及旱涝标准确定的合理性，最终确定了研究区玉米旱涝等级划分标准(表 3)。

2.2.3 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是由 Mann 和 Kendall 提出并发展起来的一种非参数统计方法，亦称无分布检验，其不要求样本遵从一定的分布，且检验结果基本不受少数异常值的干扰。在进行突变检验时，本文取显著性水平 α=0.05，利用 MATLAB 软件进行编程计算，得到 UF、UB 两列数据，将 UF、UB 两条曲线和 $U_{0.05}$=±1.96 两条直线绘在同一张图上。若 UF 的值大于 0，则表明序列呈上升趋势，如果 UF 和 UB 出现交点，且交点在 $U_{0.05}$=±1.96 之间，那么交点时刻即为突变开始的时间，当 UF 的值超出 $U_{0.05}$=±1.96 的区间时，表明上升或下降趋势显著。在 Mann-Kendall 趋势检验中，当 M-K 统计变量 Z 值大于 0 时，表示时间序列数据随着时间的推移呈增加趋势，小于 0 时表示呈减少趋势，且 Z 的绝对值超过 1.64 或 2.32 时，分别对应趋势检验的显著性水平为 0.05、0.01[15]。M-K 趋势检验已被世界气象组织推荐并已广泛应用于降水、径流、气温和水质等的分析研究[16]。

表 3 基于累积水分盈亏指数的东北地区春玉米旱涝等级标准

Table 3 Drought and flood grade indexes of maize in Northeast China based on crop water surplus deficit index (CWSDI′)

等级 Level	各生育阶段水分盈亏指数 CWSDI′ at each growth period (%)					
	播种—出苗 Sowing–emergence	出苗—拔节 Emergence–jointing	拔节—抽穗 Jointing–heading	抽穗—乳熟 Heading–milk	乳熟—成熟 Milk–maturation	全生育期 Growth period
正常 Normal	(−45, 45]	(−50, 50]	(−35, 35]	(−35, 35]	(−50, 50]	(−40, 40]
轻旱 Light drought	(−60, −45]	(−65, −50]	(−50, −35]	(−45, −35]	(−60, −50]	(−60, −40]
中旱 Moderate drought	(−70, −60]	(−75, −65]	(−60, −50]	(−55, −45]	(−70, −60]	(−80, −60]
重旱 Heavy drought	(−80, −70]	(−85, −75]	(−70, −60]	(−65, −55]	(−80, −70]	(−90, −80]
特旱 Extreme drought	(−∞, −80]	(−∞, −85]	(−∞, −70]	(−∞, −65]	(−∞, −80]	(−∞, −90]
轻涝 Light flood	(45, 60]	(50, 65]	(35, 50]	(35, 45]	(50, 60]	(40, 60]
中涝 Moderate flood	(60, 70]	(65, 75]	(50, 60]	(45, 55]	(60, 70]	(60, 80]
重涝 Heavy flood	(70, 80]	(75, 85]	(60, 70]	(55, 65]	(70, 80]	(80, 90]
特涝 Extreme flood	(80, ∞)	(85, ∞)	(70, ∞)	(65, ∞)	(80, ∞)	(90, ∞)

3 结果与分析

3.1 东北地区春玉米不同生育阶段旱涝时空分布特征

3.1.1 基于累积水分盈亏指数的春玉米生育期内旱涝分布时间变化

为分析 CWSDI′的变化特征，基于 M-K 突变检验法，绘图分析了近 60 年春玉米各生育期内 CWSDI′的变化趋势(图 2)。

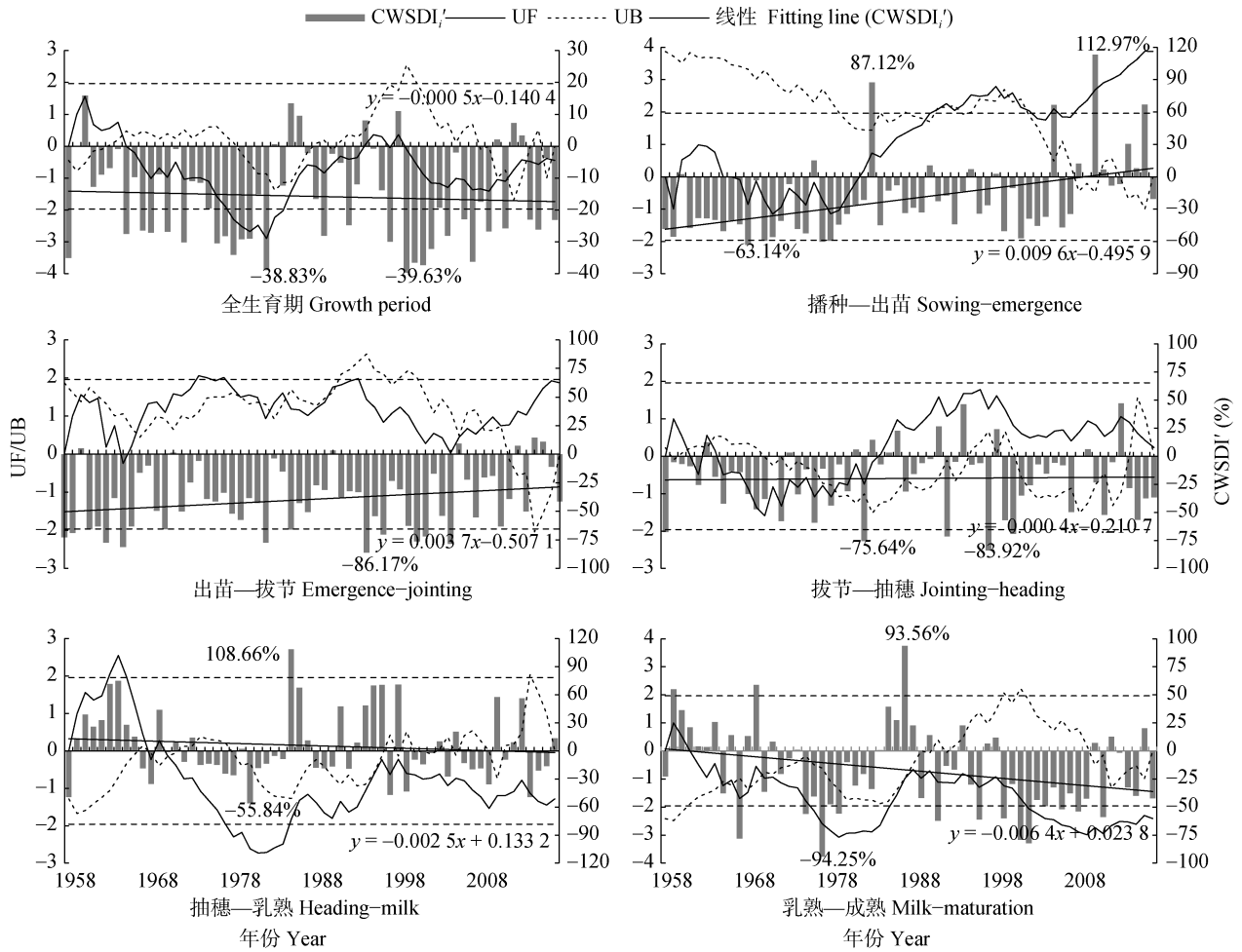


图 2　1958—2017 年东北地区春玉米各生育阶段内累积水分盈亏指数(CWSDI′)变化趋势

Fig. 2　Trends of crop water surplus deficit index (CWSDI′) in different growth periods of spring maize in Northeast China from1958 to 2017

春玉米全生育期内, 60 年间 CWSDI′普遍小于 0, 最低值是 1999 年的−39.63%, UF 和 UB 曲线的交点出现在 1965 年、2011 年和 2014 年, 但未超过 $U_{0.05}$=±1.96, 没有发生重大突变。自 1965 年起, CWSDI′整体呈下降趋势。播种—出苗阶段, 突变发生在 1999—2001 年间, 大多数年份水分亏缺, 1983 年和 2010 年 CWSDI′较高, 水分盈余情况严重, 整体呈不显著上升趋势; 出苗—拔节阶段的水分亏缺最严重, 其中 1994 年 CWSDI′仅为−86.17%, 无明显突变; 拔节—抽穗阶段 CWSDI′值在 1964—1983 年间呈下降趋势, 最低值出现在 1997 年; 抽穗—乳熟阶段在 1967 年以前, UF 值大于 0, CWSDI′值呈上升趋势, 1970 年之后 CWSDI′值年际间波动较大, 最大值是 1985 年的 108.66%, 1995 年左右出现水分盈余情况; 乳熟—成熟阶段, 研究区内 65%的年份出现水分亏缺, 突变点发生在 1965—1970 年和 1987 年, 最大值和最小值分别是 1987 年和 1977 年。即在春玉米整个生育期内的前 3 个生育阶段 CWSDI′值大体呈上升趋势, 后两个生育阶段呈下降趋势。

为进一步分析研究区内近 60 年旱涝情况的变化特征, 基于表 3 的玉米旱涝等级划分标准, 从 78 个站点中分别筛选出 CWSDI′值达到干旱标准和洪涝标准的站点, 分别计算出各年每个生育阶段 CWSDI′值达到旱、涝标准的站点的均值, 并基于 M-K 检验法分别对旱、涝均值序列进行趋势检验, 绘图分析各生育期内旱涝情况的变化趋势(图 3)。

由图 3 可知, 全生育期内, 自 20 世纪 90 年代末期, 干旱略有加重, 洪涝最大值出现在 2014 年(124.84%),中涝及以上的发生频率占 50%。播种—出苗阶段, 洪涝 CWSDI′呈周期性上升趋势, 表明洪涝加重, 干旱情况自 1991 年有所缓解; 出苗—拔节阶段, 干旱年际间波动较大; 拔节—抽穗阶段, 干旱和洪涝 CWSDI′的 60 年均值分别为−66.53%和 76.10%, 旱涝程度是 5 个生育阶段中最轻的; 抽穗—乳熟阶段的干旱情况自 1965 年起呈加重趋势; 乳熟—成熟阶段干旱 CWSDI′的 60 年均值低至

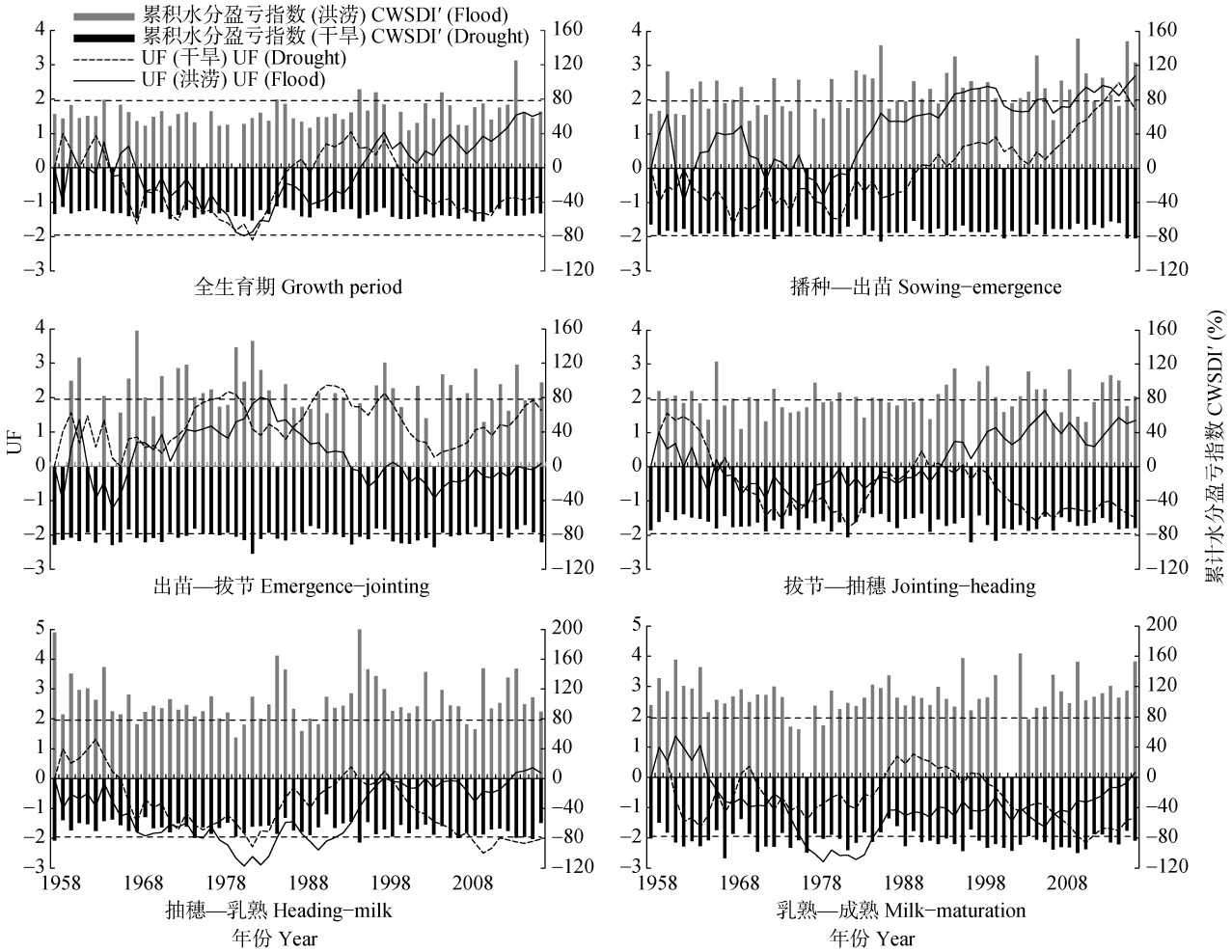


图 3 1958—2017 年东北地区春玉米各生育阶段内累积水分盈亏指数(达到干旱及洪涝标准地区)变化趋势

Fig. 3 Trends of crop water surplus deficit index (CWSDI′) in areas reaching drought and flood standard in different growth periods of spring maize in Northeast China from 1958 to 2017

−83.36%，该阶段洪涝程度相比其他阶段也较重。总体来看，研究区内干旱情况自 20 世纪 90 年代逐渐加重，较重的阶段是出苗—拔节和乳熟—成熟阶段；而洪涝情况除播种—出苗阶段发生洪涝的趋势明显上升外，其余 4 个阶段均呈波动变化无明显趋势。

3.1.2 东北地区近 60 年累积水分盈亏指数变化趋势空间分布特征

对各站点 1958—2017 年东北春玉米各生育期的 CWSDI′值进行 M-K 趋势检验，并根据 M-K 统计量 Z 值进行空间插值，得到研究区 CWSDI′时间变化趋势的空间分布图(图 4)。

全生育期内，研究区内 88.6%的区域 CWSDI′都呈下降趋势，仅黑龙江省内的部分地区呈上升趋势。吉林中部部分地区的 M-K 统计量 Z 值超过了显著性 α=0.01 时的临界值−2.32，表明 CWSDI′呈极显著下降趋势。播种—出苗阶段，仅黑龙江北部春玉米 CWSDI′呈下降趋势，其他地区呈上升趋势，研究区内大部分地区水分盈亏指数的变化趋势都较显著，研究区内自西向东，CWSDI′上升趋势逐渐加重；出苗—拔节阶段，研究区内 92.2%的区域 CWSDI′都呈上升趋势，黑龙江中部、西部和北部的变化趋势较为显著；拔节—抽穗阶段，大部分地区 CWSDI′都没有明显变化趋势；抽穗—乳熟阶段，研究区的中部、西南部和黑龙江东部 CWSDI′有显著下降趋势；乳熟—成熟阶段，CWSDI′整体呈下降趋势，其中下降趋势超过 95%置信水平的面积达 52%，这是由于近年来气候变化，极端天气增加，春玉米生长季温度增高加快[17]，导致了干旱。越到生育后期，下降趋势越为明显，研究区内仅播种—出苗阶段存在 CWSDI′大面积显著上升趋势的情况。

3.2 东北地区春玉米各生育期不同旱涝等级发生频率时空变化特征

3.2.1 近 60 年不同旱涝等级发生频率的时间变化特征

根据近 60 年东北地区各站点的水分盈亏指数

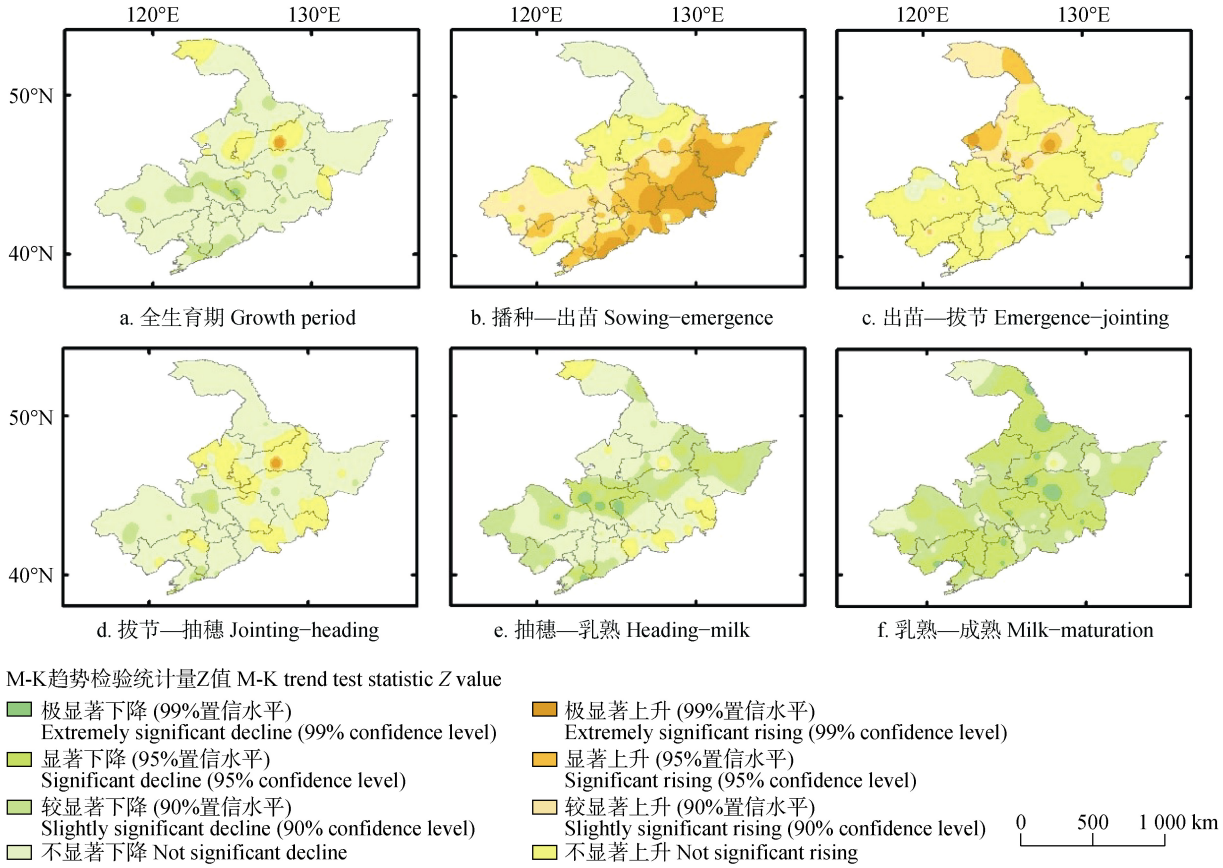


图 4　1958—2017 年东北地区春玉米各生育阶段内累积水分盈亏指数变化趋势空间分布图

Fig. 4　Spatial distribution of the change trend of crop water surplus deficit index (CWSDI′) in different growth periods of spring maize in Northeast China from 1958 to 2017

确定玉米的旱涝等级(表 3)，统计各站点各生育阶段及全生育期发生不同等级旱涝的次数，与总年数之比即为旱涝发生频率。计算各生育期内 20 世纪 60 年代、70 年代、80 年代、90 年代和 21 世纪 00 年代、10 年代(以下简称 60 年代、70 年代、80 年代、90 年代、00 年代、10 年代)各旱涝等级的发生频率，年代间变化趋势见图 5。

全生育期内发生轻旱的频率最高，约为 16.5%~25.5%(约 4~6 年一遇)，其次是中旱和轻涝，70 年代和 00 年代发生旱涝灾害的频率整体较高。播种—出苗阶段，各等级干旱的发生频率均呈下降趋势，洪涝频率上升，上升最明显的是特涝。出苗—拔节阶段，特旱的发生频率波动较大。抽穗—乳熟阶段，除特旱、特涝的发生频率较高外，其余旱涝等级的频率均在 0~10%内波动。乳熟—成熟阶段的特旱发生频率最高，在 00 年代达到 38.2%。整体看，播种—出苗、乳熟—成熟阶段的干旱发生频率高于其他 3 个生育期，故应在玉米刚刚种植的生育初期和后期及时结合各分区情况进行及时灌溉。发生轻旱和特旱的频率高于其他旱级，00 年代干旱情况最严重。各等级的洪涝发生频率中，特涝频率明显高于其他洪涝等级，其次是轻涝，即洪涝的发生较为极端，且年代间波动较大。

3.2.2　近 60 年不同旱涝程度发生频率空间分布特征

分别计算春玉米各生育阶段发生轻、中、重、特旱，轻、中、重、特涝的频率并进行插值，结果见图 6。全生育期内，内蒙东部、黑龙江西部、吉林西部、辽西北地区的轻旱频率和内蒙地区的中旱频率在 30%以上，研究区内约 1/2 地区小概率发生重旱，仅吉林西部和黑龙江西部的部分地区有 1.66%的频率发生特旱，研究区内干旱发生的严重性及频率均自西向东递减。辽宁东部、吉林东部、黑龙江南部和中部轻涝的发生频率较高，大部分地区不易发生洪涝。

轻旱在春玉米抽穗—乳熟和乳熟—成熟阶段的发生频率均较低；中旱和重旱在各生育阶段内的频率分布差异不大；播种—出苗阶段，特旱频率超过 20%的区域主要集中在研究区的西部，出苗—抽穗阶段，该等级开始由西向东扩展，至抽穗—乳熟阶段，研究区内特旱频率大于 20%的区域达到研究区总面积的 45.6%，乳熟—成熟阶段，研究区东部

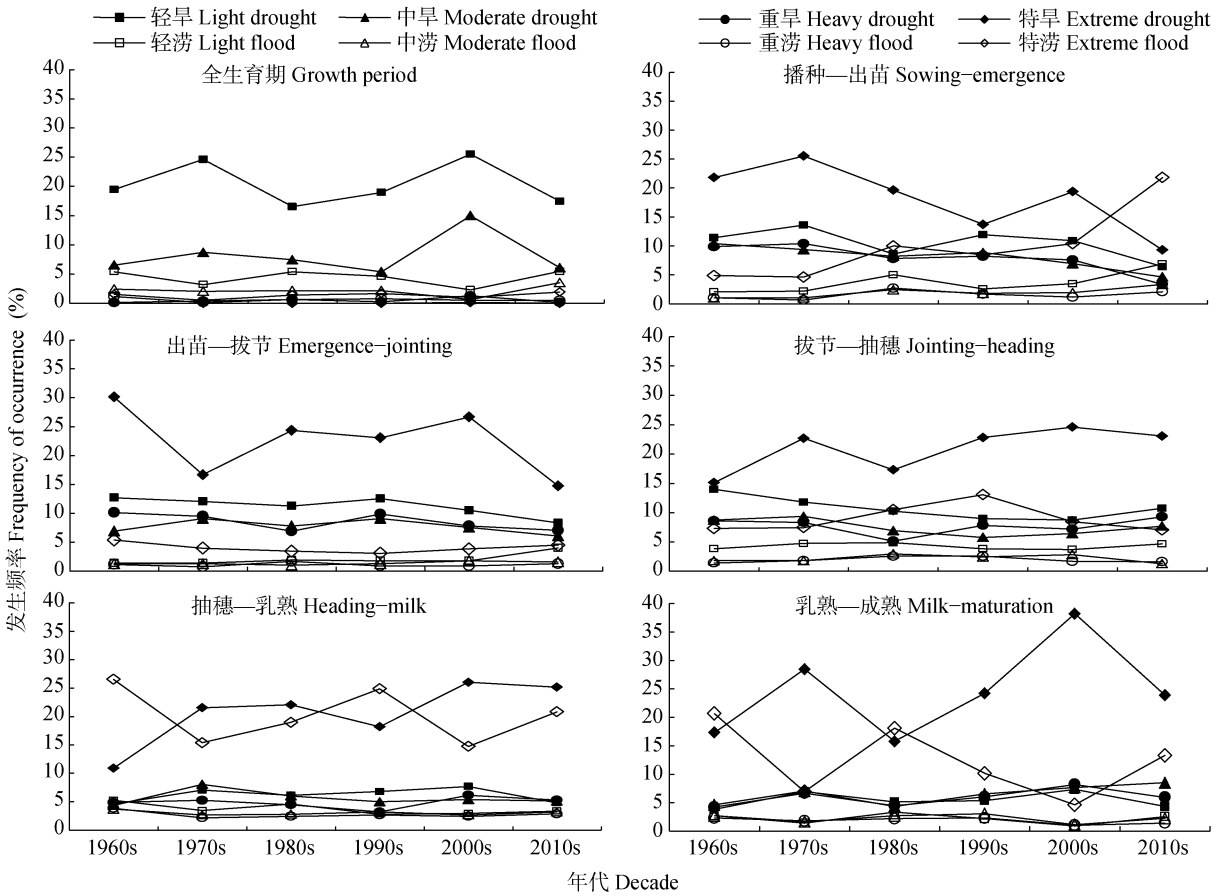


图 5 1958—2017 年东北地区各年代春玉米不同生育阶段各旱涝程度的发生频率

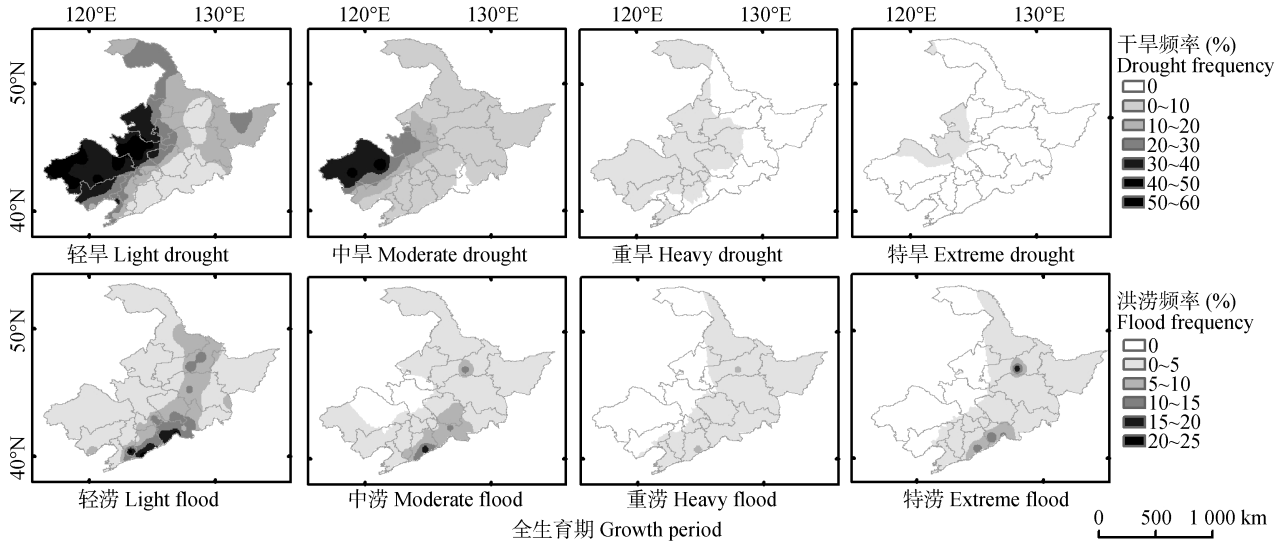
Fig. 5 Frequency of different grades of drought and flood in different growth periods of spring maize in Northeast China in different decades from 1958 to 2017

的特旱情况有所缓解，西部持续加重，是旱情最重的阶段。播种—出苗及拔节—抽穗阶段，吉林东部和黑龙江中部的轻涝频率相比较大，其余地区各生育阶段的轻、中、重涝发生频率基本都小于 5%，吉林东部、辽宁东部和黑龙江中、北部的特涝发生频率较高，整个研究区的东北和东南部较易发生洪涝灾害。总的来说，研究区内春玉米前 3 个生育阶段较易发生轻旱，在各生育阶段中，吉林西部和辽宁西部玉米的中旱及重旱发生频率均比其他地区高，研究区西部特旱发生频率最高，特旱的发生频率分布呈现最明显的区域性，轻涝集中在黑龙江中、南部、吉林东部和辽宁东部，中、重涝几乎不发生，特涝发生频率的空间分布与特旱的空间分布相反。

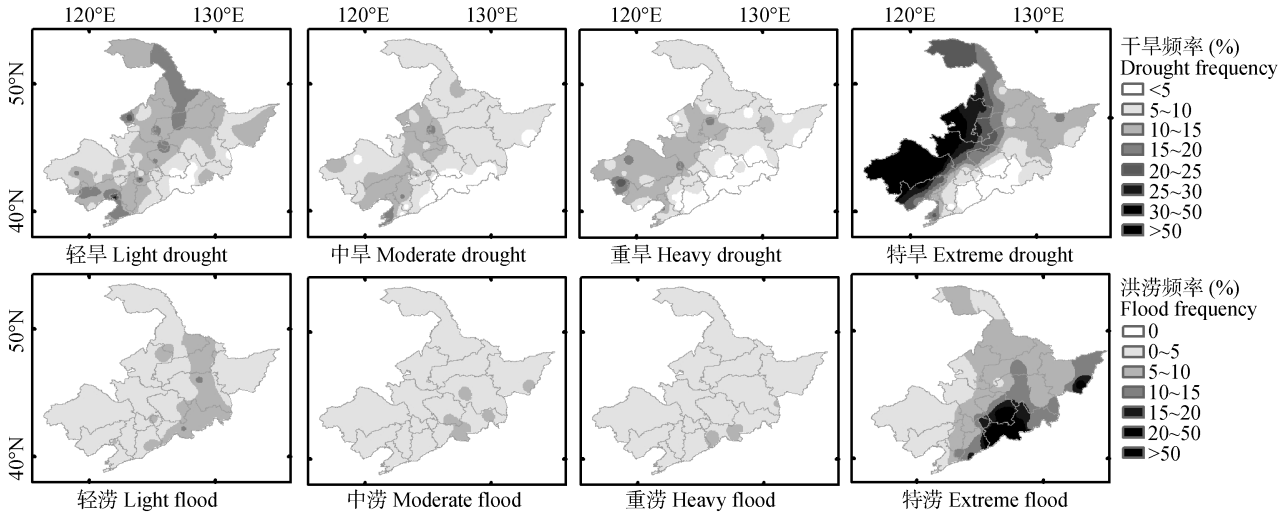
4 结论

在全球气候变暖的大背景下，农区旱涝灾害对我国粮食作物的影响和给农业经济带来的损失不断加剧,因此，如何有效地掌握农业旱涝灾害发展趋势引起越来越多学者们的关注[18-20]。本文以东北地区春玉米为研究对象，基于综合考虑水分供需平衡的累积水分盈亏指数划分旱涝等级，以分析近 60 年春玉米各生育阶段旱涝发生情况的时空演变，结果如下:

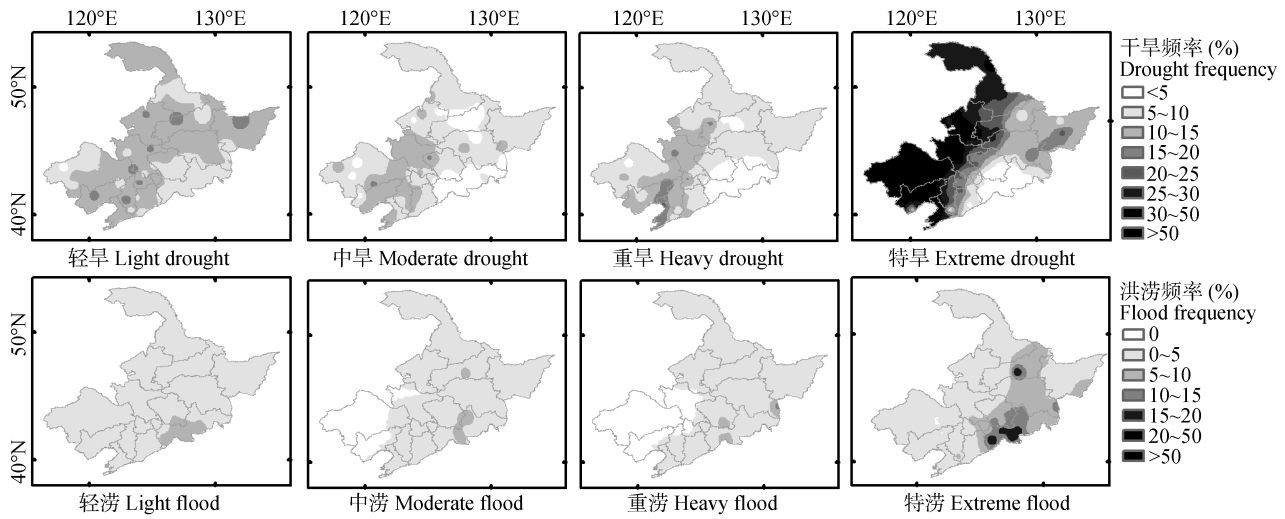
1958—2017 年，研究区内春玉米初始生长期和发育期的 3 个生育阶段 CWSDI′值大体呈上升趋势，生育中后期的两个生育阶段呈下降趋势。仅播种—出苗阶段，研究区东南部存在 CWSDI′大面积显著上升的情况，整体来看，越到生育后期，下降趋势越明显，与前人研究结果大体一致[21]，乳熟—成熟阶段的下降趋势最重，但无明显区域性。研究区内干旱情况自 20 世纪 90 年代逐渐加重，拔节—成熟干旱程度年际间波动较大，出苗—拔节和乳熟—成熟阶段干旱较为严重。这是由于气候变化导致降水量无法补偿由增温引起的蒸散量增加，造成近年来春玉米缺水加剧[22]。而研究区玉米洪涝情况在播种—出苗阶段呈上升趋势，其余阶段均呈波动变化无明显趋势。拔节—抽穗阶段和乳熟—成熟阶段分别是旱涝最轻和最重的阶段。



全生育期 Growth period



播种—出苗 Sowing-emergence



出苗—拔节 Emergence-jointing

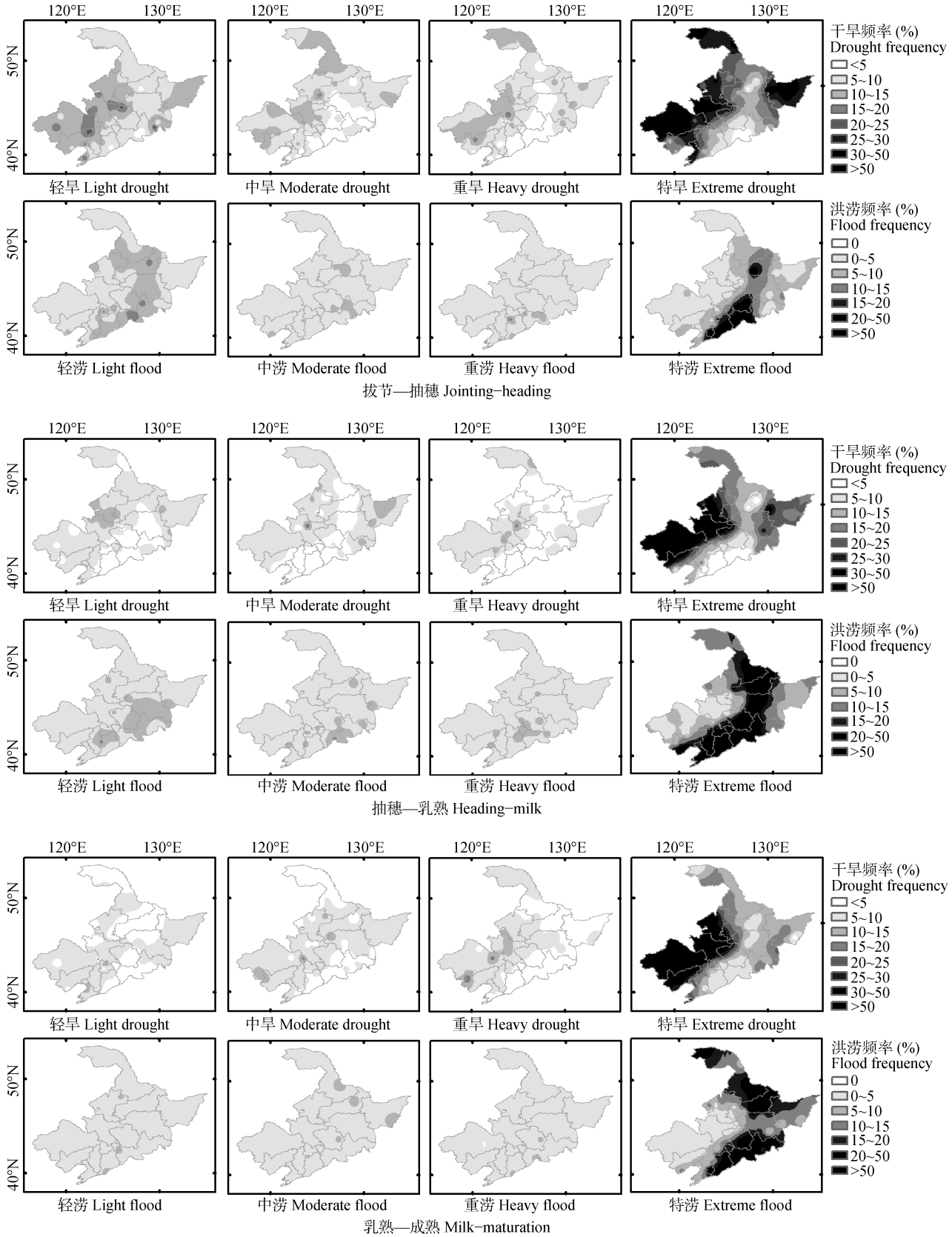


图 6 1958—2017 年东北地区春玉米各生育阶段各旱涝程度发生频率的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the frequency of drought and flood in different growth periods of spring maize from 1958 to 2017 in Northeast China

从旱涝灾害的发生频率来看，研究区内干旱频率远高于洪涝频率。轻旱较易发生在前 3 个生育阶段，各生育阶段轻涝的频率在 0~8%内波动，春玉米各生育阶段发生中、重旱，中、重涝的频率整体较低。特旱、特涝频率最高的分别为乳熟—成熟阶段和抽穗—乳熟阶段，时间序列上，20 世纪 70 年代和 21 世纪 00 年代干旱整体较重。空间上，研究区中西部(内蒙东部、辽宁西北部、吉林西部)发生严重干旱的频率较高且整体较易受旱灾影响。轻涝集中在黑龙江中、南部，吉林东部和辽宁东部，中、重涝几乎不发生，特涝发生频率的空间分布与特旱的空间分布大体相反。

农业是对气候变化反映最为敏感的产业，近年来东北地区气候的显著变化，进一步扩大了该区农业水资源供应不足的缺口。为抓住制定防灾措施的重难点，今后应更加关注主要粮食作物在面对旱涝灾害时的内在响应。本研究仅从春玉米水分供需的角度上宏观地考虑区域内春玉米旱涝情况，并未考虑其内在生长机理对气候变化的响应，今后还需结合作物生长模型，模拟春玉米生长过程以动态分析其与环境因子的相互作用。

参考文献 References

[1] 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旱涝时空变化[J]. 农业工程学报，2012，28(12): 101–109
GAO X R, WANG C Y, ZHANG J Q, 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

[2] 曹永强，朱明明，李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 560–570
CAO Y Q, ZHU M M, LI W J. Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei Province over 60 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 560–570

[3] ZHANG F, CHEN Y N, ZHANG J Q, et al. Dynamic drought risk assessment for maize based on crop simulation model and multi-source drought indices[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 100–114

[4] WANG Y F, LIU G X, GUO E L. Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901–2014 using standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 850–862

[5] SUPIT I, VAN DIEPEN C A, BOOGAARD H L, et al. Trend analysis of the water requirements, consumption and deficit of field crops in Europe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 77–88

[6] 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 W H, YANG X G, QU H H, 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

[7] 张淑杰，周广胜，李荣平. 基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 695–704
ZHANG S J, ZHOU G S, LI R P. Daily crop coefficient of spring maize using eddy covariance observation and its actual evapotranspiration simulation[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(6): 695–704

[8] 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
MU J, ZHAO J F, GUO J P. Response of spring maize growth stage to climate change in Northeast China over the past 30 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(6): 680–689

[9] 刘晓静，马东来，张继权，等. 辽西北地区玉米干旱的识别方法[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 722–727
LIU X J, MA D L, ZHANG J Q, et al. Identification method of maize drought in Northwest Liaoning Province[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 722–727

[10] 陈素华，王志春，李丹. 内蒙古通辽市、赤峰市春玉米水分亏缺评价及区域差异[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2016, 37(4): 20–25
CHEN S H, WANG Z C, LI D. The water deficit evaluation and regional difference of spring maize in Tongliao and Chifeng in Inner Mongolia[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2016, 37(4): 20–25

[11] 中国气象局. 北方春玉米干旱等级[M]. 北京: 中国气象出版社, 2015
China Meteorological Administration. The Drought Grades for Maize in North[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015

[12] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO, 1998

[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 Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6–12

[14] 王蕊，张继权，郭恩亮，等. 近 55 a 吉林中西部玉米生长季旱涝时空特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 186–197
WANG R, ZHANG J Q, GUO E L, et al. Spatiotemporal characteristics of drought and waterlogging during maize growing season in Midwestern Jilin Province for recent 55 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1): 186–197

[15] 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
WEI F Y. Modern Diagnosis of Climate Statistics and Its Prediction[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007

[16] KISI O, AY M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 362–375

[17] 陈长青, 类成霞, 王春春, 等. 气候变暖下东北地区春玉米生产潜力变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1272–1279
CHEN C Q, LEI C X, WANG C C, et al. Changes of spring maize potential productivity under the background of global warming in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(10): 1272–1279

[18] 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
KANG L, ZHANG H Q. Comprehensive research on the state of agricultural drought in five main grain producing areas in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 928–937

[19] 刘晓静, 张继权, 王春乙, 等. 基于遥感数据的辽西北地区玉米干旱风险时空动态格局[J]. 科技导报, 2012, 30(19): 34–39
LIU X J, ZHANG J Q, WANG C Y, et al. Temporal and spatial dynamic distribution of drought risk over the northwest of Liaoning Province based on remote sensing data[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(19): 34–39

[20] 张玉芳, 王明田, 刘娟, 等. 基于水分盈亏指数的四川省玉米生育期干旱时空变化特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 236–242
ZHANG Y F, WANG M T, LIU J, et al. Spatio-temporal characteristics of drought at different maize growth stages in Sichuan Province as determined by water budget index[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2): 236–242

[21] 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
YANG X C, MING B, TAO H B, et al. Spatial distribution characteristics and impact on spring maize yield of drought in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 758–767

[22] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅳ. 未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(11): 2280–2291
LIU Z J, YANG X G, WANG W F, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅳ. The possible impact of future climatic warming on the northern limits of spring maize in three provinces of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(11): 2280–2291