

辽西北春玉米旱灾灾损风险区划

曹永强, 路洁, 冯兴兴

(辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029)

摘要: 开展干旱风险区划研究, 对实现抗旱减灾及粮食稳产增产至关重要。以辽西北为研究区域, 以作物水分亏缺指数(CWDI)为干旱表征指标, 利用该区 1965—2019 年逐日气象数据及多年玉米种植资料, 通过数理统计和通径分析方法揭示研究区玉米干旱时空演变及对各气象因子的响应特征, 在此基础上构建干旱灾损指数进行旱灾风险区划, 结果表明: (1) 近 54 年春玉米抽穗一成熟期 CWDI 值以 2.2/10 a 的速率上升, 其他生育阶段呈下降趋势, 空间上干旱频率由辽西向辽北递减; (2) 相对湿度和降水量与 CWDI 指数呈明显负相关, 其他气象因子呈正相关, 其中气温和相对湿度对其直接影响最大; (3) 辽西北分四个灾损风险区, 且风险程度由辽北向辽西递增。研究结果可为优化春玉米农田管理和防灾减灾提供一定参考。

关键词: CWDI; 时空变化; 影响因素; 灾损风险区划; 辽西北地区

随着全球气候的持续性变暖, 蒸散发变得越来越剧烈, 致使干旱灾害频繁发生并随之带来水资源短缺、粮食减产等一系列危机^[1]。据统计, 近年来我国农作物的年均受灾面积达 6 亿亩, 成灾率高达 15.1%; 平均每年因干旱造成粮食减产 250 亿~300 亿 kg, 超过其他所有自然灾害造成的粮食减产之和^[2]。玉米作为主要粮食作物, 由于其生长周期长, 需水量大, 生育期内水分配比变化显著, 使得生育期内干旱时有发生, 对玉米产量产生不利影响, 平均减产高达 20%~30%^[3]。因此, 探究玉米生育期干旱时空演变规律和成因机制、制定防灾减灾规划以减轻旱灾损失已成为当前的研究热点。

当前, 国内外对农业干旱领域的研究集中于农业干旱指标的建立、干旱监测、风险评估和区划以及干旱与承灾体之间的关系等多个层面。在干旱指标应用方面, 不同研究部门对于干旱有不同的评价标准。其中农业干旱指标大致可以分为两类^[4]: 一是降水类指标^[5,6], 如标准化降水指数 (SPI), 该指标仅涉及降水量等少量参数, 可进行快速评估, 但由于无法直接反映作物受旱影响程度, 具有一定局限性; 二是基于水分盈亏变化的指标^[7-9], 如水分亏缺指数 (CWDI)、相对湿度指数 (MI) 等, 此类指标从作物生长角度出发, 考虑土壤含水以及降水和蒸散等气象因子对作物的综合影响, 可较好地反映水分胁迫对农作物发育的影响状况。其中, CWDI 指数是我国气象行业标准规定的玉米干旱评价指标之一^[10], 并有学者^[11]验证了该指数在我国玉米干旱研究中的适用性。在干旱监测方面, 主要集中于选择合适的干旱指标, 并进一步揭示农业干旱演变及作物水分亏缺情况, 曹言等^[12]基于 CWDI 指数分析了云南省夏玉米干旱分布特征, 发现其频率在空间上呈中部高四周低的分布特征。在风险评估方面, 研究主要集中于理清干旱和作物间

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2020-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51779114), 辽宁省重点研发计划 (2020JH2/10200043)

作者简介: 曹永强 (1972-), 男, 内蒙古丰镇人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

的定量关系, 构建干旱灾损模型, 反映农作物减产情况, 吴东丽等^[13]基于灾害成因四要素理论对华北的冬小麦种植区进行了综合区划; 魏堃等^[14]从产量灾损角度出发, 通过建立风险评估模型, 确立区划指标, 并对甘肃河东地区干旱灾损进行区划。此外, 陈冬冬等^[15]联合干旱指数与概率分布函数估算了干旱在生育阶段的发生概率, 都取得了较为丰硕的研究成果。

综合已有研究发现, 针对农业干旱监测, 多数采用气象干旱指标来表征农业干旱, 但仅考虑造成农业干旱的气象因素, 容易忽略农业干旱对气象干旱的滞后作用; 此外, 在干旱风险区划方面, 大多从气象和作物等自然条件出发, 忽略人为因素影响。针对以上问题, 本文采用农业干旱指标 *CWDI* 表征农业干旱, 且构建考虑人为因素 (生产水平指标) 的灾损风险指数进行风险区划。辽宁省旱涝灾害发生频繁, 其中旱情以辽西北最为严重, 全区受干旱威胁的耕地日益增多。与此相对应, 辽西北地区缺乏完善的适应性体系应对频繁的旱灾, 制约了粮食稳产与高产, 造成作物大量减产失收^[16]。鉴于此, 本文基于农业干旱指标, 即 *CWDI* 揭示辽西北地区农业干旱时空演变特征, 运用通径分析方法探讨干旱对各气候因子的响应, 并结合辽西北地区播种面积、耕地面积及产量数据构建灾损风险指数, 对其进行风险区划, 以期优化辽西北地区春玉米产业布局, 为春玉米种植及防灾减灾工作等提供一定参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区域为辽西北地区, 主要包括辽宁省西部和北部的朝阳市、葫芦岛市、阜新市、锦州市、铁岭市和沈阳市, 位于我国黄金玉米带之间, 其种植面积达到整个辽宁省的67%。同时, 特殊的地理位置和大气环境因素使该区更容易受到干旱的影响, 其多年亩均水资源量仅为257 m³, 属于缺水严重的区域。尤其位于辽西地区的坡耕地, 该类土壤保水能力相对较差, 加之该区极易出现季节性干旱现象, 为区域粮食作物生产带来极大挑战^[17]。根据当地近15年来的旱灾统计分析, 粮食产量因干旱波动幅度在30%~50%之间。2009年大旱, 辽西地区粮食减产70%, 朝阳县几乎全部绝收。农业干旱一方面对实现“突破辽西北”战略目标造成一定阻碍, 另一方面也给社会经济的可持续发展带来消极影响。

1.2 数据来源

为保证气象资料完整性和时间连续性, 选用辽西北地区9个气象台站1965—2019年的逐日气象数据, 站点分布见图1。该数据源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>), 包括逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、日照时数和风速等观测资料, 农作物播种数据源于辽

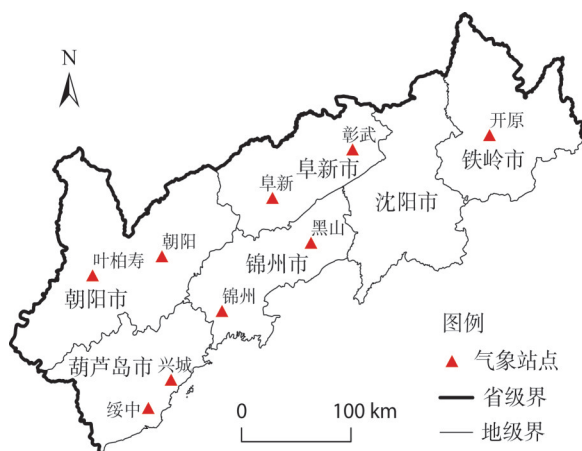


图1 辽西北气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Northwestern Liaoning

宁省统计局 (<http://www.ln.stats.gov.cn/tjsj/sjcx/ndsj/>) 下载的 2000—2018 年辽宁省统计年鉴, 包括各市玉米播种面积、耕地面积、单位面积产量和总产量数据等。

1.3 研究方法

1.3.1 作物水分亏缺指数构建

该指数是国家质检总局和国家标准化委员会联合发布的最新农业干旱指标^[18,19], 能比较真实地反映出作物水分亏缺状态, 计算步骤如下:

第一步计算潜在蒸散量 ET_0 ^[20]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{G_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + G_d u_2)}$$

(1)

式中: R_n 为净辐射 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$); T 为日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$); G 为热通量密度 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$); u_2 为 2 m 高处风速 (m/s); e_s 为饱和空气水汽压 (kPa); e_a 为空气水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压—温度曲线的梯度 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为湿度计常数; G_n 、 G_d 为固定常数, 在估算逐日潜在蒸散发量时取值分别为 900 和 0.34, 各因子具体计算公式详见参考文献 [20]。

第二步计算作物需水量^[21]:

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

(2)

式中: ET_c 为作物需水量 (mm/d); k_c 为作物系数, 本文所采用的作物系数参考曹永强^[23]对辽宁省春玉米作物系数的总结, 具体见表 1。

表 1 辽宁省春玉米作物系数

Table 1 Crop coefficient of spring maize in Liaoning province

时间/(月, 旬)	辽宁西部	辽宁北部	时间/(月, 旬)	辽宁西部	辽宁北部
4月中(播种期)	0.36	0.35	7月上(拔节期)	0.91	0.93
4月下(播种期)	0.46	0.44	7月中(拔节期)	1.17	1.14
5月上(苗期)	0.47	0.45	7月下(抽穗期)	1.21	1.16
5月中(苗期)	0.51	0.46	8月上(抽穗期)	1.02	1.08
5月下(苗期)	0.55	0.48	8月中(成熟期)	0.97	0.98
6月上(苗期)	0.58	0.51	8月下(成熟期)	0.95	0.93
6月中(苗期)	0.68	0.62	9月上(成熟期)	0.91	0.89
6月下(拔节期)	0.80	0.81	9月中(成熟期)	0.78	0.79

第三步计算 $CWDI$: 根据黄晚华等^[22]的研究, 结合辽宁省的具体情况对 $CWDI$ 公式进行系数修正, 得到本文所采用的 $CWDI$ 公式, 具体计算方法如下:

$$CWDI = a \times CWDI_i + b \times CWDI_{i-1} + c \times CWDI_{i-2} + d \times CWDI_{i-3} + e \times CWDI_{i-4}$$

(3)

式中: a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别对应各旬的累积权重系数, 依次取值为 0.30、0.25、0.20、0.15、0.10; $CWDI_i$ 、 $CWDI_{i-1}$ 、 $CWDI_{i-2}$ 、 $CWDI_{i-3}$ 、 $CWDI_{i-4}$ 分别为该旬以及前四旬的水分亏缺指数, 计算方法如下:

$$CWDI_i = \begin{cases} (ET_c - P_i)/ET_c \times 100\%, & ET_c \geq P_i \\ 0, & ET_c < P_i \text{ 且 } P_i \leq 35 \\ K_i \times 100\%, & P_i > 35 \end{cases}$$

(4)

式中: P_i 为第 i 旬的降水量 (mm); K_i 为降水量远大于需水量时的水分盈余系数, 分以下

三种情况:

$$K_i = \begin{cases} (\overline{ET_i} - P_i) / \overline{ET_i}, & 35 < P_i \leq 70 \\ -P_i / (2\overline{ET_i}), & 70 < P_i \leq 105 \\ -1.5, & P_i > 105 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\overline{ET_i}$ 为春玉米每旬作物需水量基数, 根据董秋婷等^[23]的研究, 辽宁省春玉米每旬作物需水量基数为 35 mm。

表2 CWDI干旱等级标准

Table 2 CWDI drought grade standard

等级	类型	CWDI/%
0	无旱	$CWDI \leq 15$
1	轻旱	$15 < CWDI \leq 30$
2	中旱	$30 < CWDI \leq 45$
3	重旱	$45 < CWDI \leq 60$
4	特旱	$CWDI > 60$

CWDI能够较真实地评估作物的干旱程度。本文基于CWDI的计算结果, 参考前人研究成果及辽宁省春玉米的具体情况干旱等级分级, 确定CWDI具体分级, 如表2所示:

1.3.2 干旱灾损指数构建

第一步计算春玉米因旱减产率:

春玉米的实际产量 (Y) 为气象产量 (Y_w)、趋势产量 (Y_t) 与随机误差 (ε) (一般忽略不计) 之和^[24]。采用滑动平均法对产量进行分离, 并计算相对气象产量, 即气象产量与趋势产量之比。而减产率为相对气象产量的绝对值百分比^[25], 公式如下:

$$Y = Y_w + Y_t + \varepsilon \quad (6)$$

$$Y_w = Y - Y_t \quad (7)$$

根据前人研究建立减产率 (Y'_w), 公式如下^[25]:

$$Y'_w = \left| \frac{Y_w}{Y_t} \right| \times 100\% \quad (8)$$

式中: Y'_w 为减产率 (%); Y_w 为气象产量 (万t); Y_t 为趋势产量 (万t); ε 表示随机误差。

第二步计算干旱灾损风险指数^[14]: 基于CWDI计算结果, 以春玉米种植面积和生产水平为评价指标, 从玉米灾损角度出发进行风险评估, 公式如下:

$$E = (S_p / S_c) \times (1 - X / X_m) \times \left(\sum_{i=1}^m Y_i / P_i \right) \quad (9)$$

式中: Y_i 多年平均减产率 (%); P_i 为第 i 种干旱发生频率; S_p 为玉米播种面积 (hm^2); S_c 为耕地面积 (hm^2); X 为玉米平均产量 (万t); X_m 为最大产量 (万t)。以得到的标准化春玉米灾损风险指数为依据, 采用反距离权重插值法进行空间插值分析。结合杨小利等^[26]对春玉米灾损风险的分区标准, 将辽西北地区春玉米干旱灾损分为低风险区 ($E \leq 0.2$)、中风险区 ($0.2 \leq E \leq 0.5$)、较高风险区 ($0.5 \leq E \leq 0.7$)、和高风险区 ($E \geq 0.7$) 四个区域。将上述得到的结果结合辽西北地区行政区域图, 对辽宁省旱灾灾损风险程度进行区域划分。

本文以辽西北地区为研究基点, 以CWDI为干旱量化指标, 为保证数据的科学性和可靠性, 该指数在计算过程中首先采用逐日气象数据计算逐日CWDI值, 然后根据式(3)计算生育期内逐旬的累积水分亏缺指数。随后运用线性倾向、反距离权重插值等方法对农业干旱的时空演变特征进行分析, 采用通径分析法^[27]探讨其演变成因, 在此基础上结合干旱灾损指数进行旱灾风险区划, 并提出春玉米种植及防灾减灾的相关建议。

2 结果分析

2.1 辽西北春玉米生育期干旱时空变化

2.1.1 春玉米生育期干旱的时序变化

利用辽西北地区多年气象数据,得到玉米生育期内各旬多年平均 *CWDI* 值序列,如图 2a 所示。辽西北地区降水量在 4 月中旬到 7 月中旬期间呈增加趋势,之后呈逐旬减少趋势。生育期内需水量呈“两头小、中间大”分布特征,7 月中旬达到最大值,与降水量变化趋势保持一致。7 月上旬至 8 月中旬降水量始终大于需水量,基本降水量可满足春玉米基本生长要求,但 *CWDI* 值大于 15%,处于轻旱,因此应加强土壤干湿状况的监测力度,适当增加灌溉次数以保证春玉米正常生长;除此之外其他各旬需水量均大于降水量,大部分发生了中旱,说明在生育期前后春玉米水分亏缺严重,易发生春旱和秋旱,其中 5 月中旬 *CWDI* 值最大,达到重旱,4 月中旬 *CWDI* 值最小,这是由于气温回升后冰雪融化,土壤中水分下移,弥补了当时降水不足的状况。由于在春玉米生长前期,正处于根系向下伸展阶段,轻旱有利于春玉米进行蹲苗作用,在生长后期,轻旱可促进快速脱水。因此,在干旱时间短程度轻时对玉米生长起促进作用^[28],雨量过多反而容易造成秆高粒小的情况,使玉米发育不健壮。当发生严重干旱时,农业管理过程中应充分利用喷灌技术,保证充足水量供应,满足其生长需求。

计算春玉米生育期各旬不同等级干旱频率并绘制频率变化图,如图 2b 所示。无旱在雨期和春季初期时频率较高,这是由于雨期降水量多,可满足春玉米需水要求,春季初期冰雪消融土壤湿度大。轻旱在 4 月中旬和下旬发生频率较高,达到 60.49% 和 33.13%,其他旬出现频率较低;中旱变化情况与轻旱相类似。重旱和特旱发生频率在所有等级中最高,对春玉米影响最大,旱情在 5 月上旬全年最为严重,达到 52.47%,面临严重干旱风险,此时处于春玉米生长关键期,建议加强水分供应以保证正常生长发育。

为了更直观地反映其干旱情况,本文计算了辽西北 1965—2019 年各生育阶段 *CWDI* 值,并依据干旱等级表(表 1)统计轻旱及以上站点数,得到各生育阶段的干旱站次比,结果如图 3 所示。可以看出,抽穗一成熟期 *CWDI* 值倾向率为 2.2/10 a,呈显著上升趋势,说明这一发育阶段干旱化特征显著,除此之外的三个阶段 *CWDI* 值都呈下降趋势,倾向率分别为 -1.6/10 a、-3.2/10 a 和 -1.6/10 a,说明这三个生育阶段随着时间推进,

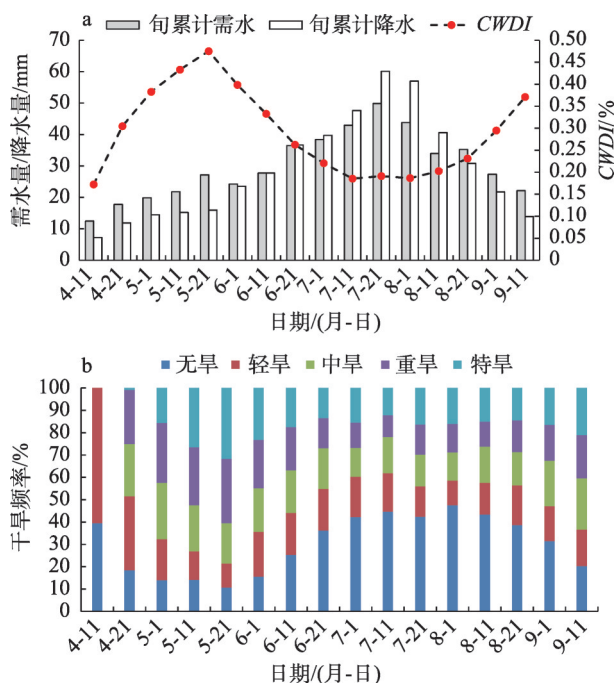


图2 春玉米 *CWDI* 月值变化情况及不同干旱等级发生频率
Fig. 2 Variation of *CWDI* monthly value and occurrence frequency of different drought grades in spring maize

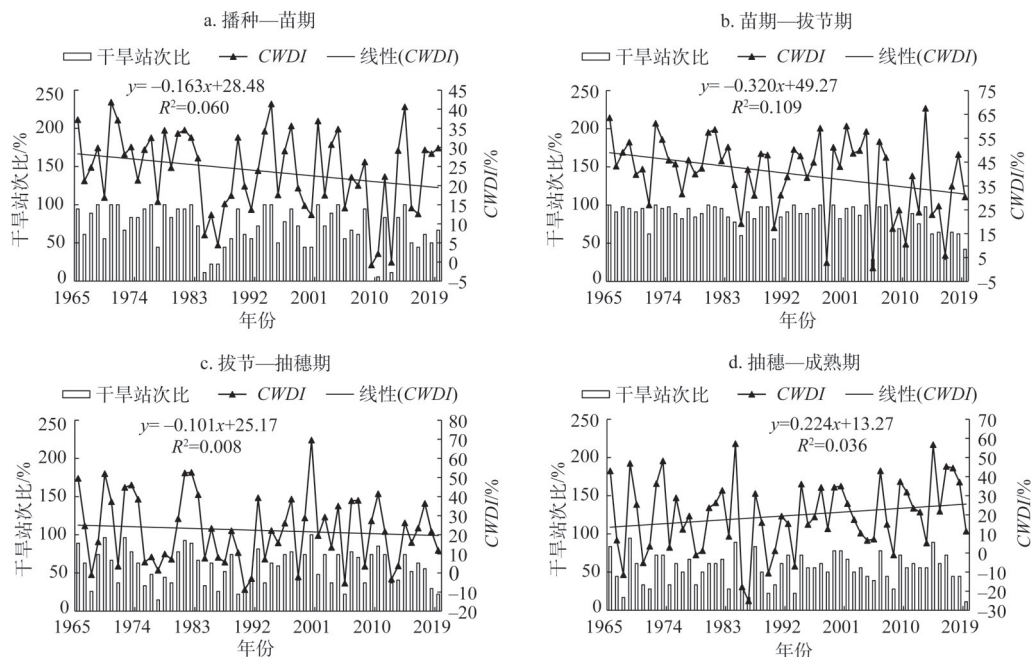


图3 辽宁省春玉米生育期干旱站次比和CWDI值年际变化

Fig. 3 Interannual variation of drought station ratio and CWDI value during spring maize growth period in Liaoning province

干旱发生程度有所减轻。

播种—出苗时段, CWDI最高值为41.83%, 属于中旱程度, 发生于1970年; 最低值为-0.78, 出现于2009年。在54年内有43年发生干旱, 占比79.63%。对干旱站次比而言, 多年平均值达到66.70%, 54年中有41年干旱站次比达到50%以上, 发生全域性干旱。出苗—拔节时段, 年均CWDI为全年最高, 旱灾状况最重, 除1998年、2005年和2016年, 其余年份年均CWDI值均保持较高水平, 其中, CWDI最高值出现于2013年, 达到67.54%, 属于特旱程度。干旱站次比多年平均值为82.51%, 干旱程度比上一时段严重。拔节—抽穗时段, 正处于春玉米生长的关键时节, 干旱过重会对春玉米生长不利, 该阶段CWDI变化波动较大, 介于-8.68%~69.57%之间, 2000年最为干旱, 达到特旱程度, 54年中有34年发生干旱, 其中33年发生全域性干旱, 干旱相对前两个时段较轻, 是由于该时段降水量多, 自然降水可满足春玉米生长需求。抽穗—成熟时段CWDI波动范围为-25.09%~57.25%, 1984年干旱程度最为严重, 达到“特旱”, 干旱站次比多年平均值为54.04%, 54年中31年发生全域性干旱, 为四个时段干旱程度最低。

2.1.2 春玉米生育期干旱频率空间变化

基于CWDI干旱等级划分, 统计四个生育期各等级干旱发生频率, 如图4所示。各生育阶段干旱发生频率在空间分布上趋于一致, 基本都表现为由辽西向辽北递减的空间展布态势。播种—出苗干旱频率较高, 以轻旱为主, 全区轻旱频率达到40%以上, 特旱发生最少, 全区55.56%的站点都没有特旱的发生; 出苗—拔节阶段干旱发生频率最高, 干旱等级主要为重旱和特旱, 旱区主要集中于朝阳市、阜新市和锦州市部分区域, 发生频率达到在25%以上, 虽然前两个阶段玉米对水分亏缺的敏感度较低, 但由于旱情最重, 仅靠自然降水并不能满足生长需求, 还需注重水分的持续供给; 拔节—抽穗阶段大

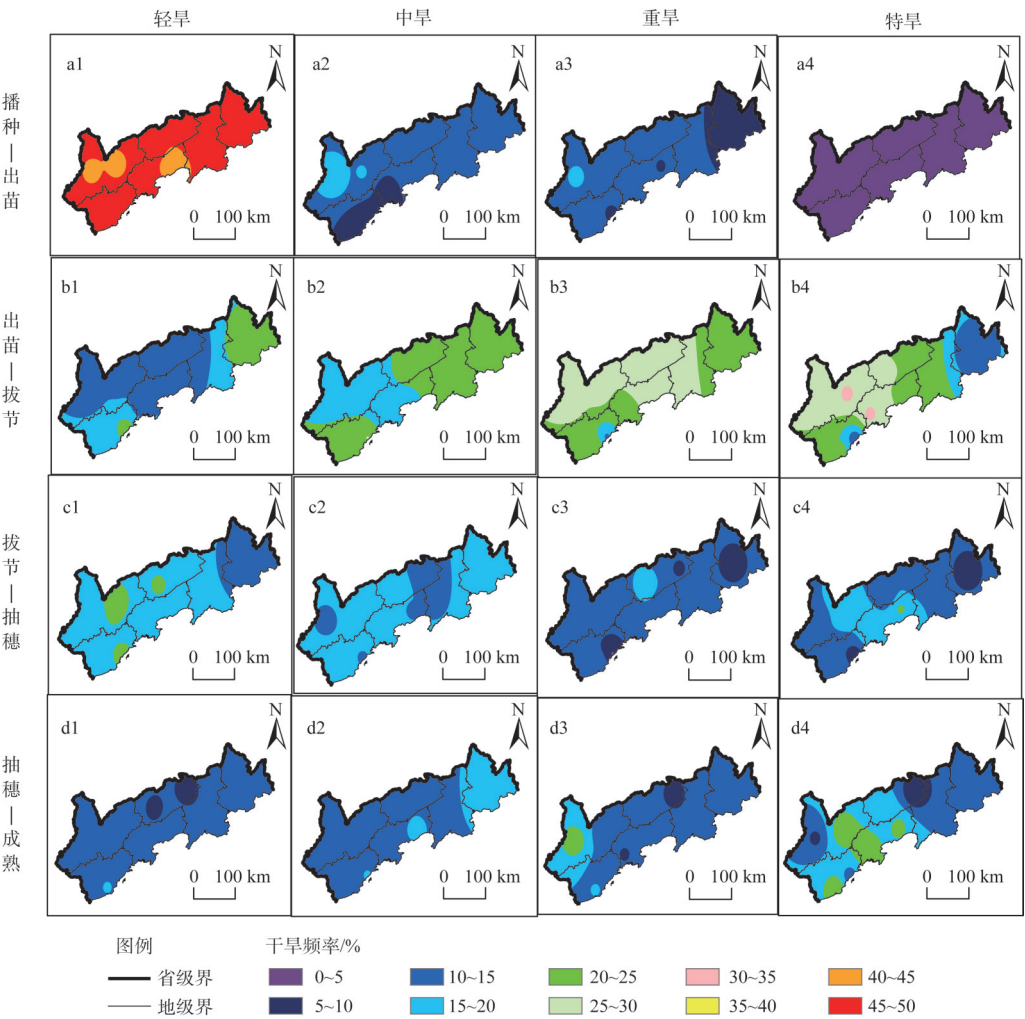


图4 1965—2019年辽西北地区春玉米生育期不同等级干旱发生频率
Fig. 4 Drought frequency of spring maize in Liaoning province from 1965 to 2019

部分地区以轻旱和中旱为主，轻旱达到20%的站点集中于兴城、朝阳和阜新，该阶段处于玉米生长关键期，玉米的开花授粉受缺水影响可能会造成花丝退化、畸形和败育，使穗粒数减少，因此应采取喷灌滴灌方式以减轻轻旱对春玉米的影响；抽穗—成熟期除朝阳、锦州、黑山等少数站点特旱频率发生在20%以上外，其余站点任何等级干旱发生频率均介于10%~20%之间，该阶段玉米生长对水分亏缺较为敏感，应加强灌溉以保证籽粒充分灌浆。

综上分析可知，辽宁省春玉米干旱频率基本呈辽西高辽北低的空间分布特征，在生长前期频次最高，干旱程度较重的地区主要发生于朝阳市和阜新市，这是由于这一时期处于干季向雨季过渡时期，降水较雨期少，且辽西地区靠近大陆，海洋水汽受地形阻挡很难深入，会加重干旱发生的风险程度。

2.2 辽西北春玉米干旱影响因素分析

由于CWDI变化受各种气象因子的综合影响，且各气象因子间又相互联系，为进一

步量化各气象因子对 *CWDI* 变化的作用大小，辨析各气象因子对 *CWDI* 的影响强度，本文采用通径分析方法，定量分析影响 *CWDI* 的因素。结果表明（表3），*CWDI* 与相对湿度相关系数最大，为-0.68（ $P<0.05$ ），水分作为农业干旱发生的重要指标，对农业干旱的发生及变化影响深刻，相对湿度作为空气中水分含量的重要指标，是水循环过程的重要环节，在地气领域相互作用中影响深远。其次为降水量，相关系数达到-0.60（ $P<0.05$ ），与相对湿度保持一致，两个因子与 *CWDI* 相关系数均通过显著性检验，呈明显负相关，所以降水量和相对湿度是影响农业干旱程度的重要指标。其他因子的相关关系都表现为正相关，其中最高气温、平均气温和平均风速通过0.05显著性检验，这也说明，在气候不断变暖大趋势下，未来辽西北地区春玉米农业干旱风险将会有增强趋势，对春玉米的生长发育造成的不利影响将会不断增大。在未来的农业区划及春玉米种植中，需要进一步提高防灾减灾意识，充分考虑全球变暖对春玉米生长的影响，分析光热、水资源与春玉米的配比，优化春玉米种植格局，培育抗旱品种；研究各气象因子演变规律，开展农业干旱灾害监测预警，为科学决策提供支持。

表3 辽西北地区1965—2019年*CWDI*与各影响因子的相关和通径系数
Table 3 Correlation and path coefficient between *CWDI* and influencing factors in
Northwestern Liaoning province from 1965 to 2019

影响因子	与 <i>CWDI</i> 的 相关系数	与 <i>CWDI</i> 的 直接通径	与 <i>CWDI</i> 的间接通径						
			降水量	平均气温	最低气温	最高气温	平均风速	日照时数	相对湿度
降水量	-0.60**	-0.29	—	-0.16	-0.08	-0.04	-0.07	-0.08	0.44
平均气温	0.31*	-0.33	-0.16	—	0.46	0.15	-0.26	-0.14	-0.32
最低气温	0.02	0.45	-0.20	1.08	—	-0.93	-0.35	-0.18	-0.57
最高气温	0.34*	0.64	-0.07	0.26	-0.71	—	-0.08	0.02	-0.06
平均风速	0.28*	0.26	-0.04	-0.12	-0.07	-0.02	—	0.19	-0.06
日照时数	0.15	-0.16	-0.33	-0.53	-0.28	0.04	1.54	—	-0.46
相对湿度	-0.68**	-0.44	2.06	-1.49	-1.11	-0.15	-0.63	-0.58	—

注：*代表通过0.05显著性水平检验，**代表通过0.01显著性水平检验。

由通径系数可知，最高气温和*CWDI*的直接通径系数最大，达到0.64，说明农业干旱对最高气温的响应最强。其次是最低气温和相对湿度，直接通径系数分别为0.45和-0.44，表明辽西北地区春玉米生长发育对气温和相对湿度较敏感。当气温较高，相对湿度较小时应该加强对农作物的干旱检测，综合春玉米生育期内降水量、土壤湿度等条件及时补水灌溉，增加土壤湿度，满足春玉米的正常生长需求，及时降低春玉米的受旱影响程度。从间接通径系数来看，生育期内各因子之间相互作用，对区域农业干旱程度具有共同影响作用。日照时数对*CWDI*的直接通径系数较小，但受平均风速和平均气温影响的间接通径系数较大，说明日照时数是通过影响平均风速和平均气温进而作用于*CWDI*的。研究表明当前尽管平均气温在不断升高，但日照时数却在不断降低^[29]，同时平均气温的上升在一定程度上会使风速减弱。因此，当风速和日照时数减少时，蒸散发会随之减弱，同时温度的上升对蒸散发的增加作用相对较弱，所以日照时数的减少有助于干旱的缓解，但如果不足以填补降水量和相对湿度的减少，也可能会出现干旱加重的情况。

综上分析各气象因子与*CWDI*相关系数发现，相对湿度和降水量与*CWDI*呈明显负

相关,其他气象因子与 $CWDI$ 呈正相关。其中气温和相对湿度对 $CWDI$ 的直接影响最大,而降水量与干旱的相关性虽然很大,但分析可知,降水量主要通过相对湿度间接影响 $CWDI$ 。因此,各因子之间也存在相互影响的情况,并共同作用于区域农业干旱。今后在未来农业建设及发展中,更应在明晰干旱与气象因子关系基础上科学预测农业干旱的发生发展规律,以实现辽西北地区的抗旱减灾及粮食稳产增产的最终目的。

2.3 辽西北春玉米干旱灾损区划

辽西北地区干旱频发,是影响农作物产量的主要气象灾害,本文综合考虑灾损风险程度和抗灾能力,选取灾损率、种植面积比例和生产水平指标,根据式(11)客观评估该区春玉米的干旱灾损指数并进行分区,结果如图5所示。辽西北春玉米分为四个灾损风险区,且在空间分布上具有一定连续性。I区灾损风险指数 $E \leq 0.2$,为低风险区,主要包括铁岭市和沈阳市的一部分,因旱减产率为24.63%。该区应加强水利基础设施和渠系配套设施的建设,保证对春玉米的持续供水,还要提高土壤蓄水保水能力,以期降低干旱对粮食产量的影响。II区灾损风险指数 $0.2 \leq E \leq 0.5$,为中风险区,主要包括沈阳市中部地区,因旱减产率为24.65%。该区城市化水平高,城市用地规模大,植被稀疏,土壤墒情差,因此应加强田间管理,提高旱作农业抗旱技术,扩大玉米产量。III区灾损风险指数 $0.5 \leq E \leq 0.7$,为较高风险区,主要包括阜新市大部、沈阳市西南部和锦州市东北部,该区因旱减产率为24.67%。因地势平坦,应注重水利工程建设,将自然降水集中保存,提高调蓄能力,解决降水时空分布不均匀的问题,改进耕作方式,应用滴灌喷灌技术,加强对农作物的及时补水。IV区干旱灾损指数 $E > 0.7$,为高风险区,包括朝阳市、葫芦岛市和锦州市的大部,因旱减产率为25.21%。该区玉米种植面积大,农业发达,但由于多年耕作活动的影响,土层变薄,水土流失严重,且该区属于山区,耕地类型多属坡耕旱地,土壤保水能力差,因此农作物易遭受旱灾影响。针对这个问题,在今后一方面应建立健全水利设施,扩大水源,提高农作物的有效灌溉面积;另一方面应加强对植被的监测力度,植树造林以提高土壤的蓄水保水能力,并使水资源得到有效的开发利用;同时,政府要提高抗旱补贴,鼓励农民进行土地改良,在保护优质耕地的同时防止土地退化。整体来看,辽西北地区春玉米生育期干旱灾损风险由辽北向辽西递增,这与江和文等^[25]对辽宁省玉米产量灾损风险评估的区划结果保持一致。

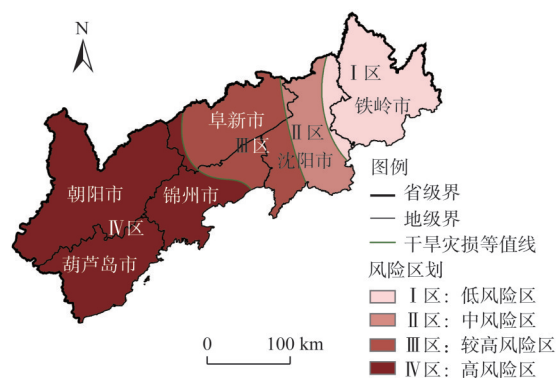


图5 辽西北地区春玉米干旱灾损风险区划
Fig. 5 Drought damage risk zoning of spring maize in Northwestern Liaoning province

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于 $CWDI$ 在揭示辽西北地区农业干旱时空演变特征基础上,运用通径分析方法探讨干旱对各气候因子的响应,并结合辽西北地区播种面积、耕地面积及产量数据,

构建了符合辽宁省发展实际的灾损风险指数,对辽西北地区进行农业干旱风险区划。其中灾损风险指数的构建综合考虑了灾损风险程度和抗灾能力两方面,且弥补了过去多数采用气象干旱指标来表征农业干旱的缺点。研究结论如下:

(1) 就农业干旱的时间变化特征上看,辽西北地区春玉米易发生春旱和秋旱;抽穗一成熟期 *CWDI* 值倾向率为 $2.2/10\text{ a}$,呈显著上升趋势,向干旱化发展,除此之外的三个阶段 *CWDI* 值都呈下降趋势,倾向率分别为 $-1.6/10\text{ a}$ 、 $-3.2/10\text{ a}$ 和 $-1.6/10\text{ a}$ 。

(2) 就农业干旱的空间分布格局上看,辽宁省春玉米干旱频率基本呈辽西高辽北低的空间分布特征,在生长前期干旱发生频次最高,干旱程度较重的地区主要位于朝阳市和阜新市。

(3) 从影响因素看,相对湿度和降水量与 *CWDI* 呈明显负相关,其他气象因子与 *CWDI* 呈正相关,在所有气象因子中气温和相对湿度对 *CWDI* 的直接影响最大,同时各因子之间也相互影响,共同作用于区域农业干旱变化。

(4) 从辽宁省综合干旱灾损区划上看,辽西北春玉米分为四个灾损风险区,且在空间分布上具有一定连续性,其干旱灾损风险程度呈现由辽北向辽西递增的趋势。

3.2 讨论

本文采用 *CWDI* 对辽西北地区春玉米干旱特征进行分析,研究表明在生育前期春玉米干旱频率最高,这是由于回春时气温升高明显,土壤所含水分被较快蒸发,若没有充分的降水补给,春玉米则容易遭受春旱的影响,但该时期雨量过多会造成秆高粒小、植株生长不健壮的问题,因此适当的轻旱有利于蹲苗作用的发生,对玉米生长产生有利的影响,生育期内干旱时空演变与严俊^[30]的研究结果保持一致,说明该指数可以较好地表征土壤、作物和气象三者的变化情况,对辽西北地区春玉米的干旱监测具有一定的科学性和适用性。在灾损风险区划方面,研究结果表明风险程度呈现由辽北向辽西递增的趋势,这是区域农业气候资源与水分供应共同作用的结果。辽宁省降水最少的地区属辽西地区,且已有研究发现辽西地区是辽宁省蒸发潜力最大的地区,因此辽西地区水分亏缺严重,容易发生农业干旱灾害,使辽西地区干旱风险增加,进一步对玉米产量产生影响,今后应做好辽西地区的防旱抗旱工作。但需要注意的是农业干旱机理非常复杂,农业干旱的水平及变化过程受自然—人为二元驱动力的共同影响。本文采用的 *CWDI* 考虑了作物、土壤和气象因素,对引起农业干旱的气象因子进行初步探究,没有考虑全球气候变化、人类活动和耕作制度等方面的影响,如何将气候因素与人为因素二者结合起来,人为因素对其影响的具体表征及多指标的计算与合成还需进一步探讨。此外,在灾损模型方面,产量损失除受干旱影响外,还受其他气象灾害的影响,未来如何分离各种气象灾害对农作物的影响也将成为下一步研究的重点。

参考文献(References):

- [1] 陈洁,刘玉洁,潘韬,等. 1961—2010年中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2440-2453. [CHEN J, LIU Y J, PAN T, et al. Characteristics of temporal and spatial changes of precipitation in China from 1961 to 2010 and its impact on the surface dry and wet conditions. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2440-2453.]
- [2] 江丽,安萍莉. 我国自然灾害时空分布及其粮食风险评估. 灾害学, 2011, 26(1): 48-53, 59. [JIANG L, AN P L. Temporal and spatial distribution of natural disasters and food risk assessment in my country. Disaster Science, 2011, 26(1): 48-

- 53, 59.]
- [3] 黄岩, 李晶, 王莹, 等. 不同生育期干旱对玉米生长及产量的影响模拟. 农业灾害研究, 2019, 9(6): 47-49, 92. [HUANG Y, LI J, WANG Y, et al. Simulation of the effect of drought on the growth and yield of maize in different growth stages. *Agricultural Disaster Research*, 2019, 9(6): 47-49, 92.]
- [4] 罗纲, 阮甜, 陈财, 等. 农业干旱与气象干旱关联性: 以淮河蚌埠闸以上地区为例. 自然资源学报, 2020, 35(4): 977-991. [LUO G, RUAN T, CHEN C, et al. The correlation between agricultural drought and meteorological drought: Taking the area above the Bengbu Gate of the Huaihe River as an example. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(4): 977-991.]
- [5] 吴英杰, 李玮, 王文君, 等. 基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征. 干旱区研究, 2019, 36(4): 943-952. [WU Y J, LI W, WANG W J, et al. Drought characteristics in Inner Mongolia based on the percentage of precipitation anomaly. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 943-952.]
- [6] 李明, 王贵文, 柴旭荣, 等. 基于空间聚类的中国东北气候分区及其气象干旱时间变化特征. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1682-1693. [LI M, WANG G W, CHAI X R, et al. Climatic division of Northeast China based on spatial clustering and its meteorological drought temporal change characteristics. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1682-1693.]
- [7] YANG X J, LIU Y, BAI W, et al. Spatiotemporal assessment of drought related to soybean production and sensitivity analysis in Northeast China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(4): 937-952.
- [8] 丁怡博, 徐家屯, 李亮, 等. 基于 *SPEI* 和 *MI* 分析陕西省干旱特征及趋势变化. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4296-4308. [DING Y B, XU J T, LI L, et al. Analysis of drought characteristics and trend changes in Shaanxi province based on *SPEI* and *MI*. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 52(23): 4296-4308.]
- [9] 张强, 邹旭恺, 肖风劲. 气象干旱等级 GB/T 20481-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006: 17. [ZHANG Q, ZOU X K, XIAO F J. *Meteorological Drought Level GB/T 20481-2006*. Beijing: China Standard Press, 2006: 17.]
- [10] 刘荣花, 薛昌颖, 方文松, 等. QX/T260-2015 北方玉米干旱等级. 北京: 气象出版社, 2015. [LIU R H, XUE C Y, FANG W S, et al. *QX/T260-2015 Drought Rating of Northern Maize*. Beijing: Meteorological Press, 2015.]
- [11] 张艳红, 吕厚荃, 李森, 等. 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. [ZHANG Y H, LYU H Q, LI S, et al. Applicability of crop water deficit index in agricultural drought monitoring. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(5): 596-600.]
- [12] 曹言, 王杰, 李允亮, 等. 基于作物水分亏缺指数的云南省夏玉米不同生育期干旱时空特征分析. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 97-106. [CAO Y, WANG J, LI Y L, et al. Analysis of the spatial and temporal characteristics of drought in different growth stages of summer maize in Yunnan province based on crop water deficit index. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 97-106.]
- [13] 吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 等. 华北地区冬小麦干旱风险区划. 生态学报, 2011, 31(3): 760-769. [WU D L, WANG C Y, XUE H X, et al. Drought risk zoning of winter wheat in North China. *Journal of Ecology*, 2011, 31(3): 760-769.]
- [14] 魏塍, 张勃, 马尚谦, 等. 甘肃省河东地区春玉米干旱演变特征及灾损风险区划. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 238-247. [WEI K, ZHANG B, MA S Q, et al. Spring maize drought evolution characteristics and disaster risk zoning in Hedong Area of Gansu province. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2019, 37(6): 238-247.]
- [15] 陈东东, 紫檀, 张玉芳. 基于水分盈亏指数的四川省小麦生育期干旱风险评估. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 155-163. [CHEN D D, ZI T, ZHANG Y F. Drought risk assessment of wheat growth period in Sichuan province based on water profit and loss index. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(4): 155-163.]
- [16] 何鑫, 吴吉东, 李颖, 等. 基于 *SPEI* 的辽西地区气象干旱时空分布特征. 干旱区地理, 2017, 40(2): 340-347. [HE X, WU J D, LI Y, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of meteorological drought in Western Liaoning based on *SPEI*. *Geography of Arid Areas*, 2017, 40(2): 340-347.]
- [17] 刘晓静, 张继权, 马东来. 基于 MODIS 数据的辽西北地区玉米干旱脆弱性评价研究. 中国农业资源与区划, 2016, 37(11): 44-49. [LIU X J, ZHANG J Q, MA D L. Research on drought vulnerability assessment of maize in Northwestern Liaoning based on MODIS data. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(11): 44-49.]
- [18] 徐建文, 居辉, 刘勤. 黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响. 生态学报, 2014, 34(10): 2765-2774. [XU J W, JU H, LIU Q. Drought characteristics of winter wheat at typical sites in the Huanghuaihai Plain

- and the influence of climate trends. *Journal of Ecology*, 2014, 34(10): 2765-2774.]
- [19] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 99-110. [GAO J Q, YANG X G, DONG C Y. Analysis of the changing characteristics of precipitation resources in dry and wet areas of Northern China under the background of climate change. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 99-110.]
- [20] HUA D, HAO X M, ZHANG Y, et al. Uncertainty assessment of potential evapotranspiration in arid areas, as estimated by the Penman-Monteith method. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 166-180.
- [21] 曹永强, 李隼佳, 赵博雅. 气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究. *资源科学*, 2018, 40(1): 150-160. [CAO Y Q, LI W J, ZHAO B Y. Research on water requirement of spring maize in Northwestern Liaoning under climate change. *Resources Science*, 2018, 40(1): 150-160.]
- [22] 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. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 28-34. [HUANG W H, YANG X G, QU H H, et al. Analysis of the temporal and spatial characteristics of spring maize seasonal drought based on crop water deficit index. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 28-34.]
- [23] 董秋婷, 李茂松, 刘江, 等. 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. [DONG Q T, LI M S, LIU J, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of spring maize drought in Northeast China in the past 50 years. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 52-59.]
- [24] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨. *自然灾害学报*, 2011, 20(6): 13-18. [FANG S B. Discussion on the method of separating trend yield and climatic yield. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(6): 13-18.]
- [25] 江和文, 张录军, 曹士民, 等. 辽宁省主要粮食作物产量灾损风险评估. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 238-244. [JIANG H W, ZHANG L J, CAO S M, et al. Risk assessment of major food crop yield damage in Liaoning province. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2011, 29(4): 238-244.]
- [26] 杨小利, 吴颖娟, 王丽娜, 等. 陇东地区主要农作物干旱灾损风险分析及区划. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(2): 83-90. [YANG X L, WU Y J, WANG L N, et al. Risk analysis and zoning of drought damage of main crops in Longdong area. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(2): 83-90.]
- [27] 何风华, 李明辉. Excel在通径分析中的应用. *中国卫生统计*, 2005, 22(5): 331-332. [HE F H, LI M H. Application of excel in path analysis. *China Health Statistics*, 2005, 22(5): 331-332.]
- [28] 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. *自然灾害学报*, 2018, 27(1): 186-197. [WANG R, ZHANG J Q, GUO E L, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of drought and waterlogging during maize growing season in mid-west of Jilin in recent 55 years. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(1): 186-197.]
- [29] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 我国近59年日照时数变化特征及其与温度、风速、降水的关系. *气候与环境研究*, 2011, 16(3): 389-398. [YU H Y, LIU S H, ZHAO N, et al. Changes in sunshine duration in my country in the past 59 years and its relationship with temperature, wind speed and precipitation. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(3): 389-398.]
- [30] 严俊. 基于作物水分亏缺指数的辽宁省玉米干旱时空变化特征分析. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. [YAN J. Analysis of drought spatio-temporal variation characteristics of maize based on crop water deficit index. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.]

Risk assessment and divisions of loss caused by drought for spring maize in Northwestern Liaoning

CAO Yong-qiang, LU Jie, FENG Xing-xing

(School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: The research on divisions of drought risk is vital to reducing drought disasters and increasing grain yield. In this paper, crop water deficit index (CWDI) was used as a drought index in the northwestern Liaoning province. Based on the daily meteorological data from 1965-2019 and the data of maize planting over years, the spatial and temporal evolution of maize drought and the response characteristics of meteorological factors were revealed by mathematical statistics and path analysis. And the drought risk regionalization was carried out by constructing the drought disaster loss model. The results showed that: (1) In the past 54 years, the *CWDI* of spring maize during the heading-maturation period increased at a rate of 2.2/10 a, and the other growth stages showed a downward trend. And the spatial distribution of drought frequency of spring maize in the study area gradually increased from north to west. (2) Relative humidity and precipitation are negatively correlated with *CWDI*, while other meteorological factors are positively correlated; among which temperature and relative humidity have direct influence on it. (3) Northwestern Liaoning is divided into four disaster risk areas, and the degree of drought disaster risk shows an increasing trend from north to west. The research results can provide some reference for spring maize field management and disaster prevention and mitigation.

Keywords: CWDI; spatio-temporal evolution; influencing factor; risk zoning of drought disaster loss; Northwestern Liaoning province