



黑龙江省大豆渍害过程雨量指标构建

余 兰, 闫 平, 吕佳佳, 姜丽霞

(黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要:为定量评估黑龙江省大豆渍害灾损程度, 本文以黑龙江省为研究区域, 大豆为研究对象, 基于研究区 75 个气象站 1961—2022 年长时间序列大豆渍害历史资料、降水量资料及 27 个农业气象站 1980—2022 年大豆生育期资料, 利用柯尔莫哥罗夫-斯米尔诺夫检验及置信区间阈值法, 构建黑龙江省大豆关键生育期渍害过程雨量等级指标, 通过预留的渍害样本进行指标验证, 同时分析研究区大豆渍害时空分布特征。结果表明: 降水过程在 1~5 d 范围内大豆轻、中、重度渍害雨量下限值, 出苗~三真叶期分别为 53, 86 和 111 mm, 开花~结荚期分别为 62, 95 和 113 mm; 降水过程 6~7 d 大豆轻、中、重度渍害雨量下限值, 出苗~三真叶期分别为 90, 113 和 147 mm, 开花~结荚期分别为 97, 119 和 140 mm。黑龙江省大豆渍害平均发生次数高值区主要位于中部、东北部、南部和西部局部地区, 1981、1984、1985、1991、1994、1998、2012、2013、2017 和 2019 年发生较多。指标验证结果及大豆渍害时空分布特征与历史灾情记录较吻合。研究结果对黑龙江省大豆安全生产具有重要意义。

关键词:大豆; 生育期; 渍害; 过程雨量; 等级指标

Establishment of Process Rainfall Indices of Soybean Waterlogging in Heilongjiang Province

YU Lan, YAN Ping, LÜ Jiajia, JIANG Lixia

(Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to quantitatively assess damage degree of soybean waterlogging in Heilongjiang province, this paper took Heilongjiang province as the research area and soybean as the research object. Based on historical data of soybean waterlogging in long time series, precipitation data of 75 meteorological stations in the study area during 1961 to 2022, and data of soybean growth period of 27 agricultural meteorological stations from 1980 to 2022, Kolmogorov-Smirnov test and confidence interval threshold method were used to establish grade indices of process rainfall of waterlogging at the key growth period of soybean in Heilongjiang province, and the indices were verified by using reserved waterlogging samples. Meanwhile, spatial-temporal distribution characteristics of soybean waterlogging in the study area were analyzed. The results showed that when rainy days were within 1-5, the lower rainfall limits of mild, moderate and severe waterlogging were 53, 86 and 111 mm at the stages of seedling emergence and three true leaves; and 62, 95 and 113 mm at the stages of flowering and podding, respectively. When rainy days were within 6-7, the lower rainfall limits of mild, moderate and severe waterlogging were 90, 113 and 147 mm at the stages of seedling emergence and three true leaves; and 97, 119 and 140 mm at the stages of flowering and podding, respectively. The areas with high average frequency of soybean waterlogging in Heilongjiang province were mainly located in central, northeastern, southern and part of western regions, and more occurrences were in 1981, 1984, 1985, 1991, 1994, 1998, 2012, 2013, 2017 and 2019. The results of index verification and spatial-temporal distribution characteristics of soybean waterlogging were in good agreement with historical disaster records. The results were of great significance to safety production of soybean in Heilongjiang province.

Keywords: soybean; growth period; waterlogging; process rainfall; grade indices

黑龙江省是我国大豆主产区之一, 1965 年至 2022 年大豆种植面积和产量连续 58 年位居我国首位^[1], 对保障我国粮食安全有举足轻重的作用。黑龙江省三江平原和松嫩平原地形地势多样, 耕地土质粘重, 降水量地域间、季节间分布不均, 易形成渍害^[2-3], 渍害对大豆产量和品质影响很大^[4]。黑龙江省大豆轻、中、重度渍害的减产率在出苗~三真叶期分别为 5.6%~10.3%、10.3%~14.7%、>14.7%; 在开花~结荚期分别为 6.2%~9.3%、9.3%~

14.2%、>14.2%^[5]。2020—2022 年黑龙江省大豆轻、中、重度渍害的直接经济损失平均约为 26,782 和 6 743 万元(数据依据气象灾害管理系统网站资料整理获得)。因此, 探讨黑龙江省大豆渍害指标, 对保障我国粮食安全生产具有重要意义。

多年来, 国内外许多专家学者在渍害方面开展了详尽研究。国外方面, Calvin 等^[6]和 Yamane 等^[7]研究表明渍害是大豆生长和产量的制约因素。Shimono 等^[8]研究渍害和大气 CO₂ 浓度升高对大豆

收稿日期: 2024-06-29

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2022D025); 中国气象局沈阳气象环境研究所联合开放基金(2022SYIAEKFZD04-02)。

第一作者: 余兰(1980—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事农业气象研究。E-mail: 1353471766@qq.com。

通讯作者: 闫平(1979—), 女, 硕士, 正研级高级工程师, 主要从事应用气象研究。E-mail: di-chun@163.com。

营养生长的交互影响。Board^[9]研究渍害对大豆植株养分浓度的影响。在国内,渍害评价指标通常可分为3种^[10]:第一种是基于土壤相对湿度及其持续日数的渍害指标,如现行农业气象涝渍监测业务中的农田渍害标准^[11];第二种是基于作物需水量与降水等的综合指标,如长江中下游油菜湿渍害指数^[12]和长江中下游小麦涝渍害指数^[13];第三种是基于降水日数、降水量等的渍害指标,如江淮小麦渍害指标^[14]、湖南省油菜湿渍害指标^[15]。纵观国内外已有渍害方面研究成果,国外主要研究渍害对大豆生长、产量、植株养分浓度等的影响,国内渍害指标多以南方地区为研究区域,针对黑龙江省大豆不同生育期渍害等级指标的研究较少,且大豆关键生育期内不同降水日数及不同过程雨量的渍害对大豆的伤害程度尚无划分标准。因此,为定量评估黑龙江省大豆渍害灾损程度,本文利用黑龙江省大豆渍害

灾情史料、生育期资料和降水量资料,采用K-S检验(Kolmogorov-Smirnov test 柯尔莫哥罗夫-斯米尔诺夫检验),运用置信区间下限值确定阈值法,构建黑龙江省大豆关键生育期、不同降水日数、不同过程雨量的渍害等级定量指标,以期为黑龙江省大豆防灾减灾及安全生产提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 资料来源

气象资料为黑龙江省大豆种植区75个气象站(图1)1961—2022年的逐日降水量数据,大豆生育期资料为研究区27个农业气象站1980—2022年的资料,来源于黑龙江省气象数据中心。1961—2022年的渍害灾情史料来自《中国气象灾害大典》(黑龙江卷)^[16]、黑龙江省气候中心和气象灾害管理系统网站(<http://10.1.64.146/disaster/index>)。

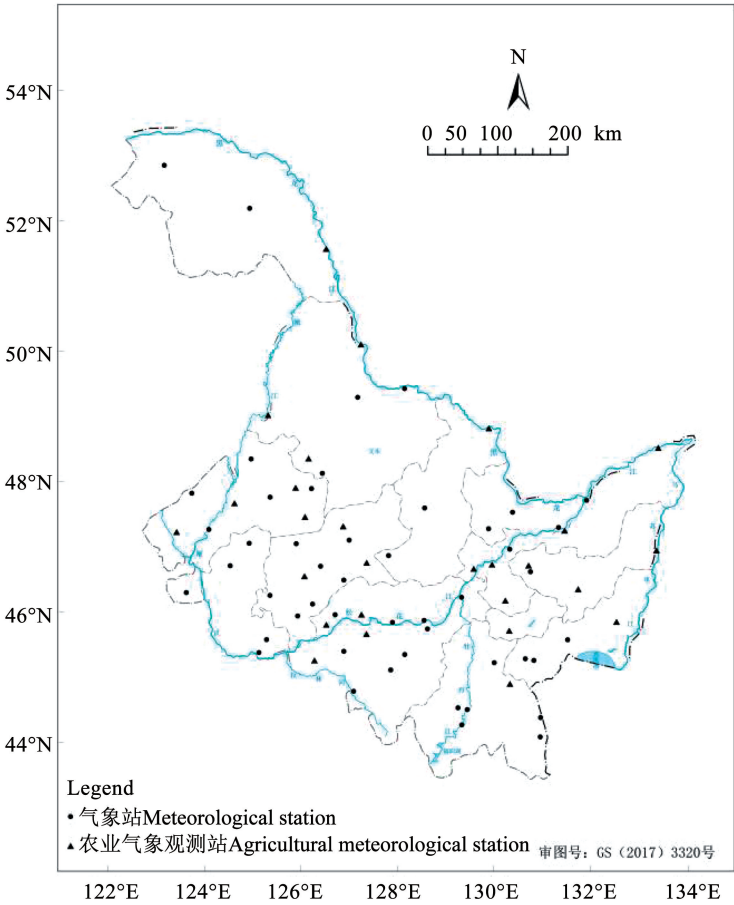


图1 75个气象站分布

Fig. 1 Distribution of 75 meteorological stations

1.2 研究方法

大豆生长发育关键期(5月下旬—8月中旬)恰逢黑龙江省降水高峰时段,大豆在此时遭受渍害,对产量形成有较大影响。因此,本文将过程雨量作

为大豆渍害指标。

大豆渍害分级。研究大豆渍害的灾损评价标准,就要明确过程雨量对大豆产量的影响程度。渍害灾情史料中大豆受渍害程度的描述概括了渍害

对农业生产的破坏程度及其异常程度,包含对大豆产量的影响程度。因此,可以用灾情史料来评判受渍害程度^[17]。本研究根据灾情史料记载将大豆受渍害程度分成3个等级,即轻、中、重度,不同等级对应的灾情史料描述详见表1^[18]。

表 1 大豆渍害程度分级标准

| Table 1 Classification standard of soybean waterlogging grade | |
|---|--|
| 渍害等级 Waterlogging grade | 灾情史料中的描述 Description of historical disaster |
| 轻度 Mild | 受淹、受灾、部分成灾 Flooded, disaster-affected, partial disaster |
| 中度 Moderate | 淹没、成灾、部分绝收 Inundation, disaster, partial crop failure |
| 重度 Severe | 绝收、无收 Total crop failure |

黑龙江省大豆渍害发生关键生育期的确定。不同生育期大豆对同一渍害胁迫的敏感程度不同,程伦国等^[19]研究发现大豆不同生育阶段对涝渍胁迫的敏感性依次为苗期<结荚鼓粒期<初花期<开花期;朱建强等^[20]认为,大豆结荚期是涝渍发生关键生育期。基于前人研究结果并结合专家经验,本文将黑龙江省大豆渍害发生关键生育期分为:出苗~三真叶期(5月下旬—7月上旬)和开花~结荚期(7月中旬—8月中旬)。

建立黑龙江省大豆不同生育期渍害的过程雨量样本。例如,一个样本,“1994 年 7 月 9—10 日,宾县降水时间持续 12 h,全县平均降水量 102 mm,42 090 hm²农田受灾,重灾 25 078 hm²,绝产 17 733 hm²,其中,玉米 4 584 hm²、大豆 9 347 hm²、水稻

1 618 hm²、甜菜 781 hm²、其它 1 441 hm²。”^[16]7 月 9—10 日黑龙江省宾县大豆生长正在出苗~三真叶期,所以建立此次渍害过程雨量样本为:大豆处于出苗~三真叶期,降水过程日数在 1~5 d 之间,渍害等级为重度,雨量为 102 mm。另一个样本,“2000 年 7 月 21—24 日,五常市冲河、小山子、安家 and 志广等地遭水灾,有 2 900 hm²作物(水稻、玉米和大豆)受灾,其中 400 hm²绝产。”^[16]根据历史灾情描述,确定此次渍害等级为“中度”,7 月 21—24 日五常市大豆生长处于开花结荚期,此样本缺少过程雨量数据,在五常市气象站历年逐日降水量资料中查找 2000 年 7 月 21—24 日的逐日降水量,得到过程雨量为 88.2 mm,所以该样本为:大豆处在开花~结荚期,降水日数为 1~5 d,中度渍害,雨量为 88.2 mm。

1.3 渍害等级指标构建方法

分别对大豆渍害样本过程雨量序列进行正态分布、泊松分布、均匀分布和指数分布拟合检验,利用置信区间估计法,确定通过检验的样本序列不同生育期不同等级渍害过程雨量阈值,进而建立黑龙江省不同降水日数大豆渍害过程雨量指标^[21-22]。降水过程日数分别按照 1~5 d 和 6~7 d 统计渍害样本。从渍害灾情史料中随机选择 349 个样本,其中 329 个样本用来建立渍害过程雨量指标,包括 118 个出苗~三真叶期样本和 211 个开花结荚期样本(表 2)。预留 20 个不参与指标构建且渍害发生的时间、地点、程度、降水量记载较为详细的样本,验证指标。运用 K-S 检验,分别对大豆两个关键生育期(出苗~三真叶期和开花~结荚期)、不同降水过程日数(1~5 d 和 6~7 d)、不同渍害等级(轻度、中度和重度)的 12 组样本雨量序列,进行正态、泊松、均匀和指数分布检验^[21]。

表 2 大豆渍害样本数量分布情况

| Table 2 Distribution of number of soybean waterlogging samples | | | | |
|--|---|-------|---|-------|
| 渍害等级 Waterlogging grade | 出苗~三真叶期样本数 Number of samples at the stages of seedling emergence to three true leaves | | 开花~结荚期样本数 Number of samples at the stages of flowering to podding | |
| | 1~5 d | 6~7 d | 1~5 d | 6~7 d |
| | | | | |
| 轻度 Mild | 14 | 10 | 22 | 18 |
| 中度 Moderate | 29 | 34 | 90 | 39 |
| 重度 Severe | 14 | 17 | 20 | 22 |
| 合计 Total | 57 | 61 | 132 | 79 |

K-S 检验是通过比较样本的经验分布函数和给定分布函数,判断此样本是否来源于给定分布函数总体^[18],计算公式^[23]为:

$$D_n = \max_x (| F_n(x) - G(x) |)$$

式中, D_n 表示一个随机变量,其分布依赖于 n ; $F_n(x)$ 表示容量 n 的样本经验分布函数,其通过样本中小于 x 的数据占比得到; $G(x)$ 表示给定分布函数^[23]。该计算公式的含义为两个分布函数之差的最大值,对于零假设,总体上服从给定分布 $G(x)$ 和给定 α ,统计量关于是否接受零假设的数量界限依据 D_n 的极限分布($n \rightarrow \infty$ 时的分布)确定^[23]。

对于通过拟合分布检验的样本,运用置信区间估计法,依据样本均值 95% 置信区间确定样本的过程雨量区间,以 95% 置信区间的下限值作为此渍害等级过程雨量临界阈值^[22, 24]。

1.4 渍害等级指标验证方法

构建大豆关键生育期渍害过程雨量指标后,验证预留的 20 个样本渍害发生的时间、等级、降水日

数和过程雨量,是否与指标计算得出的渍害事件一致。

1.5 数据分析

利用 Excel 2019 处理数据及制作时间分布图,使用 IBM SPSS Statistics 19 软件进行数据分析,使用 ArcGIS 10.2 软件制作空间分布图。

2 结果与分析

2.1 大豆渍害过程雨量指标构建

分别统计分析 12 组样本过程雨量的特征(表 3)。降水日数方面,最大雨量、平均雨量、最小雨量都符合 6 ~ 7 d > 1 ~ 5 d 的规律;等级方面,最大雨量、平均雨量、最小雨量都符合重度 > 中度 > 轻度的规律;出苗 ~ 三真叶期和开花 ~ 结荚期雨量特征无明显变化规律。12 组样本序列中,标准差 < 40 mm 的样本有 10 组,标准差 ≥ 40 mm 的样本有 2 组。可见,各组样本序列内降水量与平均值较为接近,离散程度较小。

表 3 大豆渍害样本过程雨量特征
Table 3 Characteristics of process rainfall of soybean waterlogging samples

| 生育期 Growth period | 渍害等级 Waterlogging grade | 降水日数 Precipitation days/d | 最小雨量 Minimum rainfall/mm | 最大雨量 Maximum rainfall/mm | 平均雨量 Average rainfall/mm | 标准差 Standard deviation/mm |
|---|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 出苗 ~ 三真叶期 Stages of seedling | 轻度 Mild | 1 ~ 5 | 29 | 114 | 68 | 25 |
| | 中度 Moderate | 6 ~ 7 | 53 | 145 | 99 | 31 |
| | | 1 ~ 5 | 46 | 175 | 91 | 30 |
| emergence to three true leaves | 重度 Severe | 6 ~ 7 | 55 | 270 | 135 | 40 |
| | 重度 Severe | 1 ~ 5 | 90 | 253 | 151 | 42 |
| | | 6 ~ 7 | 95 | 278 | 172 | 34 |
| 开花 ~ 结荚期 Stages of flowering and podding | 轻度 Mild | 1 ~ 5 | 24 | 130 | 77 | 33 |
| | 中度 Moderate | 6 ~ 7 | 41 | 203 | 100 | 35 |
| | | 1 ~ 5 | 52 | 242 | 103 | 31 |
| | 重度 Severe | 6 ~ 7 | 80 | 252 | 133 | 33 |
| | | 1 ~ 5 | 72 | 254 | 136 | 39 |
| | Severe | 6 ~ 7 | 97 | 301 | 166 | 35 |

利用 K-S 检验,分别得到 12 组样本的过程雨量序列符合正态、泊松、均匀和指数分布的组数。K-S 检验结果中, P 值表示显著性水平,若其大于 0.05,则原假设成立,即此组样本序列服从此分布型,当 P 在 0.05 和 1 之间时, P 越接近 1,显著性水平越高。表 4 显示,12 组样本均通过正态分布显著性检验,从而判定大豆关键生育期不同等级渍害雨量序列总体上服从正态分布。12 组样本通过均匀分布、泊松分布和指数分布显著性检验的组数分别为 5 组、3 组和 1 组。所以,判定过程雨量序列最优分布型为正态分布。

依据 12 组过程雨量样本符合正态分布函数,对其作区间估计,以样本均值 95% 置信区间降雨量(表 5),确定大豆渍害过程雨量等级。为避免遗漏任何一个轻度渍害事件,用 95% 置信区间降雨量的下限值划分黑龙江省大豆渍害过程雨量等级阈值(表 6)。以大豆出苗 ~ 三真叶期 1 ~ 5 d 轻度和中度渍害降水过程为例,大豆出苗 ~ 三真叶期 1 ~ 5 d 轻度和中度渍害样本均值 95% 置信区间过程雨量分别为 53 ~ 82 mm 和 86 ~ 111 mm,用 95% 置信区间过程雨量的下限值划分渍害等级阈值,则大豆出苗 ~ 三真叶期 1 ~ 5 d 轻度渍害过程雨量阈值为 53 ~ 86 mm。

表 4 大豆渍害过程雨量 K-S 检验结果

Table 4 Results of K-S test of process rainfall of soybean waterlogging

| 生育期 Growth period | 降水日数 Precipitation days/d | 渍害等级 Waterlogging grade | 正态分布 | | 均匀分布 | | 泊松分布 | | 指数分布 | |
|--|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|--------------------------|---------|
| | | | Normal distribution | | Uniform distribution | | Poisson distribution | | Exponential distribution | |
| | | | Z 值 | P 值 | Z 值 | P 值 | Z 值 | P 值 | Z 值 | P 值 |
| | | | Z value | P value | Z value | P value | Z value | P value | Z value | P value |
| 出苗 ~ 三 真叶期 Stages of seedling emergence to three true leaves | 1 ~ 5 | 轻度 Mild | 0.848 | 0.468 | 1.000 | 0.270 | 1.196 | 0.114 | 1.604 | 0.012 |
| | | 中度 Moderate | 0.786 | 0.567 | 1.717 | 0.005 | 1.802 | 0.003 | 1.957 | 0.001 |
| | | 重度 Severe | 1.153 | 0.140 | 2.320 | 0.000 | 1.853 | 0.002 | 1.809 | 0.003 |
| | 6 ~ 7 | 轻度 Mild | 0.486 | 0.972 | 0.632 | 0.819 | 1.201 | 0.112 | 1.313 | 0.063 |
| | | 中度 Moderate | 0.709 | 0.696 | 1.394 | 0.041 | 2.284 | 0.000 | 1.636 | 0.009 |
| | | 重度 Severe | 0.687 | 0.732 | 1.006 | 0.263 | 2.267 | 0.000 | 2.203 | 0.000 |
| 开花 ~ 结荚期 Stages of flowering and podding | 1 ~ 5 | 轻度 Mild | 0.678 | 0.747 | 0.551 | 0.922 | 1.884 | 0.002 | 1.649 | 0.009 |
| | | 中度 Moderate | 0.849 | 0.466 | 2.951 | 0.000 | 3.453 | 0.000 | 3.129 | 0.000 |
| | | 重度 Severe | 0.625 | 0.829 | 1.415 | 0.036 | 1.922 | 0.001 | 1.844 | 0.002 |
| | 6 ~ 7 | 轻度 Mild | 0.761 | 0.608 | 1.833 | 0.002 | 1.883 | 0.002 | 1.548 | 0.017 |
| | | 中度 Moderate | 0.450 | 0.987 | 0.747 | 0.631 | 1.220 | 0.102 | 1.433 | 0.033 |
| | | 重度 Severe | 0.815 | 0.519 | 1.589 | 0.013 | 1.773 | 0.004 | 2.077 | 0.000 |

表 5 大豆渍害样本均值 95% 置信区间降雨量

Table 5 95% confidence interval of average rainfall of soybean waterlogging samples

单位: mm

| 渍害等级 Waterlogging grade | 出苗 ~ 三真叶期降雨量区间 Rainfall interval at the stages of seedling emergence and three true leaves | | 开花 ~ 结荚期降雨量区间 Rainfall interval at the stages of flowering and podding | |
|----------------------------|--|-----------|--|-----------|
| | 1 ~ 5 d | 6 ~ 7 d | 1 ~ 5 d | 6 ~ 7 d |
| | | | | |
| 轻度 Mild | 53 ~ 82 | 90 ~ 122 | 62 ~ 92 | 97 ~ 113 |
| 中度 Moderate | 86 ~ 111 | 113 ~ 160 | 95 ~ 112 | 119 ~ 163 |
| 重度 Severe | 111 ~ 192 | 147 ~ 197 | 113 ~ 158 | 140 ~ 192 |

表 6 黑龙江省大豆渍害过程雨量等级指标

Table 6 Grade indices of process rainfall of soybean waterlogging in Heilongjiang province

单位: mm

| 渍害等级 Waterlogging grade | 出苗 ~ 三真叶期等级指标 Grade indices at the stages of seedling emergence and three true leaves | | 开花 ~ 结荚期等级指标 Grade indices at the stages of flowering and podding | |
|----------------------------|---|-----------|---|-----------|
| | 1 ~ 5 d | 6 ~ 7 d | 1 ~ 5 d | 6 ~ 7 d |
| | | | | |
| 轻度 Mild | 53 ~ 86 | 90 ~ 113 | 62 ~ 95 | 97 ~ 119 |
| 中度 Moderate | 86 ~ 111 | 113 ~ 147 | 95 ~ 113 | 119 ~ 140 |
| 重度 Severe | > 111 | > 147 | > 113 | > 140 |

2.2 渍害过程雨量指标验证

通过对指标进行历史渍害事件记载的一致性检验,验证本文建立的黑龙江省大豆渍害过程雨量等级指标的可信度。20 个用来验证指标的样本为渍害灾情史料中记载的不同生育期、不同降水日数、不同渍害等级的样本。检验结果表明,20 个样本的渍害事件全部判断出来,其中有 17 个样本历史记载渍害发生的地点、程度与指标计算得到的完全一致,有 3 个样本指标计算渍害发生程度与历史记载相差 1 个等级,即基本一致(表 7)。指标验证完

全一致的比例达 85%。以 2003 年 7 月 28 日北安市发生渍害为例,指标计算结果为北安市中度渍害,渍害灾情史料中记载为“2003 年 7 月 28 日,北安市市区、东胜乡、二井镇 20 时开始强降水持续到 7 时,局地降水量达 100 mm。大豆受灾面积 3 325 hm²,其中绝收面积 463 hm²”,依据灾情确定此次渍害等级为“中度”,与指标计算结果渍害发生地点、程度相同,证明指标评价可信。综上所述,黑龙江省大豆渍害过程雨量等级指标基本可以表明大豆渍害发生情况。

表 7 黑龙江省大豆渍害等级指标验证

Table 7 Verification of grade indices of soybean waterlogging in Heilongjiang province

| 渍害时段 Waterlogging period | 历史记载渍害发生的地点 Location of historical waterlogging | 历史记载渍害发生的程度 Degree of historical waterlogging | 指标计算出渍害发生的程度 Calculated degree of waterlogging | 一致性 Consistency |
|--------------------------------|---|---|--|--------------------|
| 1981-07-03 ~08 | 嫩江县 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 1984-07-20 ~25 | 拜泉县 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 1985-08-01 ~07 | 北安市 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 1987-07-16 | 绥芬河市 | 部分绝收(中度) | 中度渍害 | 一致 |
| 1987-07-16 ~19 | 穆棱市 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 1988-07-19 ~20 | 嫩江县 | 受灾(轻度) | 轻度渍害 | 一致 |
| 1988-07-19 ~25 | 杜蒙县 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 1989-07-17 ~23 | 嫩江县 | 绝收(重度) | 中度渍害 | 基本一致 |
| 1994-07-28 ~29 | 孙吴县 | 部分绝收(中度) | 中度渍害 | 一致 |
| 1998-06-18 ~24 | 嫩江县 | 绝收(重度) | 中度渍害 | 基本一致 |
| 1998-07-01 ~02 | 穆棱市 | 部分绝收(中度) | 中度渍害 | 一致 |
| 1999-07-26 ~27 | 嘉荫县 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 1999-07-26 ~27 | 孙吴县 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 2002-07-02 | 嘉荫县 | 受灾(轻度) | 轻度渍害 | 一致 |
| 2002-07-28 | 桦南县 | 绝收(重度) | 重度渍害 | 一致 |
| 2003-06-28 | 克山县 | 绝收(重度) | 中度渍害 | 基本一致 |
| 2003-07-28 | 北安市 | 部分绝收(中度) | 中度渍害 | 一致 |
| 2003-08-18 ~19 | 孙吴县 | 部分绝收(中度) | 中度渍害 | 一致 |
| 2005-06-21 | 穆棱市 | 受灾(轻度) | 轻度渍害 | 一致 |
| 2022-06-23 | 嫩江县 | 部分绝收(中度) | 中度渍害 | 一致 |

2.3 渍害时空分布特征

利用黑龙江省大豆渍害过程雨量指标,统计各站点 1961—2022 年历年渍害发生次数,绘制黑龙江省平均每站大豆渍害次数时间趋势图及 1961—2022 年平均大豆渍害发生次数空间分布图,分析黑龙江省大豆种植区渍害的时空分布特征,验证建立的大豆渍害等级指标的适用性和准确性。

如图 2 所示,1961—2022 年黑龙江省大豆渍害发生次数年代际呈先增加后减少再增加的趋势。1961—1970 年、1971—1980 年渍害发生次数相对较少,平均每站渍害总次数分别为 1.33 和 1.38 次;1981—1990 年、1991—2000 年渍害发生次数明显增加,平均每站渍害总次数分别为 1.84 和 1.88 次;2001—2010 年渍害发生次数明显减少,平均每站渍害总次数为 1.59 次;2011—2022 年渍害发生次数又明显增加且达到最大值,平均每站渍害总次数达 2.20 次。1961—2022 年黑龙江省渍害发生次数年际呈明显的波动式增减。根据渍害灾情史料的记载,在 1961—2022 年中,1961、1963、1969、1981、1983、1984、1985、1991、1994、1998、2008、2012、

2013、2014、2017 和 2019 年为黑龙江省渍害大范围出现年,对应到图 2 中,发现 1981、1984、1985、1991、1994、1998、2012、2013、2017 和 2019 年黑龙江省平均每站渍害总次数都在 2.02 次以上,指标统计的渍害与实际情况基本吻合。

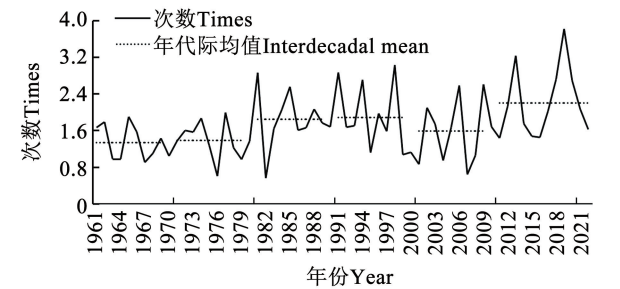


图 2 黑龙江省大豆渍害次数时间分布
Fig. 2 Temporal distribution of soybean waterlogging frequency in Heilongjiang province

由图 3 可见,1961—2022 年黑龙江省大豆渍害平均发生次数高值区主要位于中部、东北部、南部和西部局部地区,平均在 2.23 次以上,这与渍害灾情史料中黑龙江省暴雨频数高值区的分布较吻合。

黑龙江省大豆渍害平均发生次数中值区主要位于西部大部地区、北部和中部局部地区,平均在 1.60 ~2.23 次之间;黑龙江省大豆渍害平均发生次数低

值区主要位于西北部、东部和南部地区,平均在 1.60 次以下;这些与渍害灾情史料中黑龙江省暴雨频数中低值区的分布较吻合。

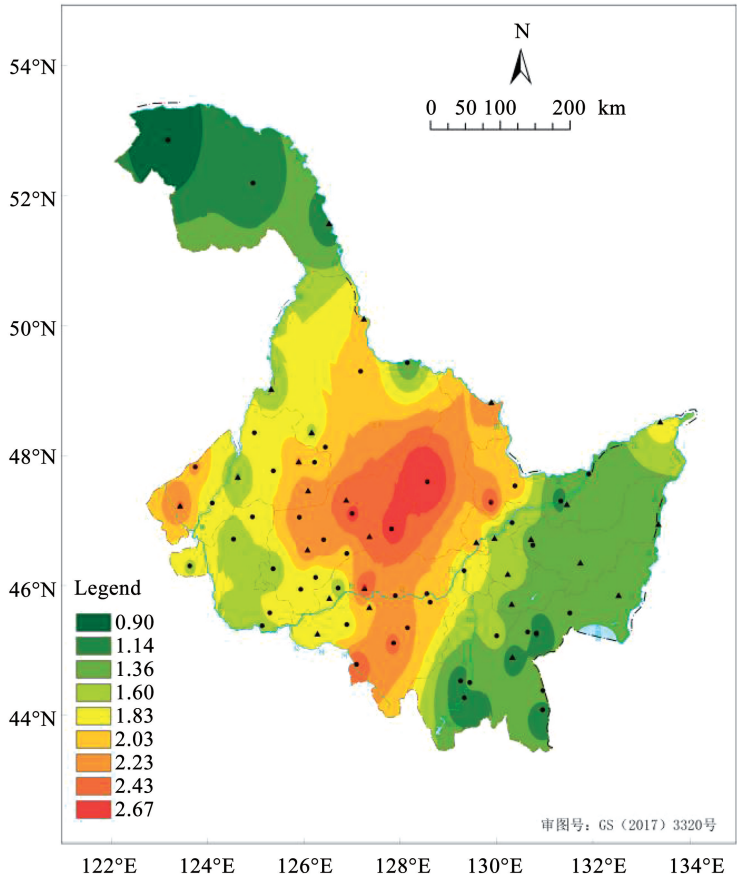


图 3 1961—2022 年黑龙江省大豆渍害平均次数

Fig.3 Average frequency of soybean waterlogging in Heilongjiang province during 1961 – 2022

3 讨论

对于研究区大豆渍害过程雨量指标的研究鲜有报道,本研究在指标构建过程中,不仅考虑了渍害对大豆关键期生育期生长的影响,而且兼顾水淹过程对大豆的累积影响,针对大豆关键生育期出苗 ~ 三真叶期和开花 ~ 结荚期,依据降水日数、过程雨量构建的大豆渍害指标,不仅具有很好的气象学和天气学特征,而且又很好地表达了农学和生物学意义,避免指标的纯气象意义指示作用,从指标验证效果看,在很大程度上接近实际情况,所得指标对研究区大豆渍害评估具有一定的指导意义。

研究表明,大豆淹水产量受损评估的临界时长为 5 d,且多数模拟试验设定为 1 ~ 7 d^[25-26]。而本研究根据淹水时长对大豆累积影响程度,将模拟淹水时长 1 ~ 7 d 分为 1 ~ 5 d 和 6 ~ 7 d 两个时段,使指标更合理。本研究选取大豆出苗 ~ 三真叶期和开花 ~ 结荚期表征大豆生长季受渍害的影响程度,

是因为许多学者在研究涝渍胁迫对大豆生长和产量的影响时,选取这些关键生育期^[19, 27],并且在黑龙江省,这些生育期都处于夏季,受季风气候影响,该时期易出现强降水并引发渍害。本研究利用 20 个大豆渍害样本验证,与历史记录渍害发生地点及发生程度完全一致的吻合率为 85%。可见,选取出苗 ~ 三真叶期和开花 ~ 结荚期研究黑龙江省大豆渍害的农业意义很明确,基于过程雨量建立的大豆渍害等级阈值,对大豆安全生产有重要参考意义。

本文将渍害程度与气象因子相结合,选择气象因子降水日数和降水量表征黑龙江省大豆渍害特征,建立黑龙江省大豆不同生育期渍害过程雨量等级指标,利用置信区间阈值法划分指标阈值,为定量评估黑龙江省大豆渍害灾损程度提供技术支撑,此方法已应用于大豆低温冷害^[28]、玉米冷害^[29]、玉米涝渍^[30-31]、水稻洪涝^[32-33]、小麦干热风^[34]、小麦干旱^[35]等指标建立,划分结果较合理,所建指标适用性较强。

渍害形成过程较复杂,既受当前气象因子和前

效因子累积影响,也受作物品种、土壤类型、地形地势等因素影响。本文在建立指标时因数据资料限制,只考虑了关键生育期的降水因素,对其他因素欠缺考虑。综合考虑大豆品种、地形地势、土壤类型等因素的大豆渍害过程雨量指标,需在今后的工作中进一步深入研究。

4 结论

大豆出苗~三真叶期和开花结荚期过程雨量序列总体服从正态分布。降水过程在1~5 d范围内,大豆轻、中、重度渍害过程雨量指标,出苗~三真叶期分别为53~86 mm、86~111 mm和>111 mm,开花~结荚期分别为62~95 mm、95~113 mm和>113 mm;降水过程6~7 d,大豆轻、中、重度渍害过程雨量指标,出苗~三真叶期分别为90~113 mm、113~147 mm和>147 mm,开花~结荚期分别为97~119 mm、119~140 mm和>140 mm。利用20个大豆渍害样本对指标进行验证,与历史记录渍害发生的地点和程度完全一致的吻合率达85%。利用已确定的黑龙江省大豆渍害过程雨量指标,对黑龙江省1961—2022年平均大豆渍害发生次数进行时空分析,结果均与历史灾情记录较为吻合。综上所述认为,本研究所建指标能较好反映黑龙江省大豆渍害受灾程度。

参考文献

[1] 国家统计局. 中国第三产业统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023. (National Bureau of Statistics. China statistical yearbook of the tertiary industry [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.)

[2] 王立权, 姚章村. 论三江平原地区涝渍灾害与地上地下排水[J]. 农机化研究, 2006, 28(10): 43-44, 48. (WANG L Q, YAO Z C. Discussion on water-logging disaster above and under ground drainage in area of Sanjiang Plain [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(10): 43-44, 48.)

[3] 高中超, 孙磊, 王丽华, 等. 黑龙江省涝渍的成因和危害及治理措施[J]. 黑龙江农业科学, 2019(11): 142-148. (GAO Z C, SUN L, WANG L H, et al. Causes, harms and control measures of waterlogging in Heilongjiang province [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(11): 142-148.)

[4] 朱建强, 张文英, 欧光华, 等. 夏大豆花荚期受渍胁迫对农艺性状、产量与品质的影响[J]. 大豆科学, 2001, 20(1): 71-74. (ZHU J Q, ZHANG W Y, OU G H, et al. Influence upon agronomic properties, yields and qualities of summer soybean in period of soybean with flowers and pods under subsurface waterlogging of soybean field[J]. Soybean Science, 2001, 20(1): 71-74.)

[5] 余兰, 闫平, 曲辉辉, 等. 黑龙江省大豆渍害影响定量评价指

标构建[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(11): 15-21. (YU L, YAN P, QU H H, et al. Construction of quantitative evaluation index of impact of soybean waterlogging in Heilongjiang province [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(11): 15-21.)

[6] CALVIN, DAMANIK R I, SIREGAR L A M. Growth and production of soybean (*Glycine max* L. Merrill) varieties in response to waterlogging at vegetative (V_5) growth phase by application of gibberellic acid and salicylic acid[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 260(1): 012143.

[7] YAMANE K, IJIMA M. Nodulation control of crack fertilization technique reduced the growth inhibition of soybean caused by short-term waterlogging at early vegetative stage [J]. Plant Production Science, 2016, 19(3): 438-448.

[8] SHIMONO H, KONNO T, SAKAI H, et al. Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ and waterlogging on vegetative growth of soybean [*Glycine max* (L.) merr.] [J]. Plant Production Science, 2012, 15(3): 238-245.

[9] BOARD J E. Waterlogging effects on plant nutrient concentrations in soybean [J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(5): 828-838.

[10] 王营, 徐明洁, 辛明月, 等. 东北地区玉米春季渍害指标构建及时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 101-110. (WANG Y, XU M J, XIN M Y, et al. Indicator construction and spatial distribution characteristics of maize spring waterlogging in northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21): 101-110.)

[11] 王建林. 现代农业气象业务[M]. 北京: 气象出版社, 2010. (WANG J L. Modern agrometeorological service [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010.)

[12] 张佩, 吴洪颜, 江海东, 等. 长江中下游油菜春季湿渍害灾损风险评估研究[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(1): 11-17. (ZHANG P, WU H Y, JIANG H D, et al. Risk assessment study on rapeseed suffering from spring wet damages in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(1): 11-17.)

[13] 吴洪颜, 张佩, 徐敏, 等. 长江中下游地区冬小麦春季涝渍害灾损风险时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1152-1158. (WU H Y, ZHANG P, XU M, et al. Spatial-temporal variations of the risk of winter wheat loss suffered from spring waterlogging disaster in the middle and Lower Yangtze River reaches [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1152-1158.)

[14] 盛绍学, 石磊, 张玉龙. 江淮地区冬小麦渍害指标与风险评估模型研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(19): 263-268. (SHENG S X, SHI L, ZHANG Y L. Study on waterlogging disaster index and risk assessment model of winter wheat in Jianghuai region [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(19): 263-268.)

[15] 袁小康. 湖南省油菜开花结荚期湿渍害指标研究[J]. 广东农业科学, 2021, 48(6): 1-6. (YUAN X K. Study on wet damage index of rape in flowering and pod-bearing period in Hunan province [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2021, 48(6): 1-6.)

[16] 温克刚主编, 孙永罡卷主编. 中国气象灾害大典-黑龙江卷

[M]. 北京:气象出版社,2007. (WEN K G, SUN Y G. China meteorological disaster encyclopedia - Heilongjiang Volume[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.)

[17] 卜风贤. 中国农业灾害史料灾度等级量化方法研究[J]. 中国农史, 1996, 15(4): 38-46. (BU F X. Study on quantitative methods of disaster degree of historical data of agricultural disasters in China[J]. Agricultural history of China, 1996, 15(4): 38-46.)

[18] 吕佳佳,王晾晾,石磊,等. 寒地水稻关键生育期涝害的过程雨量指标构建[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1402-1409. (LÜ J J, WANG L L, SHI L, et al. Establishment of process rainfall indices for waterlogging damage in key growth stage of rice in cold region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(5): 1402-1409.)

[19] 程伦国,朱建强,刘德福,等. 涝渍胁迫对大豆产量性状的影响[J]. 长江大学学报 B(自然科学版), 2006, 3(2): 109-112. (CHENG L G, ZHU J Q, LIU D F, et al. Effects of waterlogging stress on yield and characteristics of soybean[J]. Journal of Yangtze University B(Nature Science Edition), 2006, 3(2): 109-112.)

[20] 朱建强,欧光华,张文英,等. 涝渍对大豆、棉花产量的影响研究[J]. 湖北农业科学, 2000, 39(4): 25-27. (ZHU J Q, OU G H, ZHANG W Y, et al. Study on effect of waterlogging to the yield of soybean and cotton[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2000, 39(4): 25-27.)

[21] 霍治国,李世奎,王素艳,等. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 692-703. (HUO Z G, LI S K, WANG S Y, et al. Study on the risk evaluation technologies of main agrometeorological disasters and their application[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(6): 692-703.)

[22] 杨建莹,霍治国,吴立,等. 西南地区水稻洪涝等级评价指标构建及风险分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 135-144. (YANG J Y, HUO Z G, WU L, et al. Evaluation level construction and analysis of risk on rice flood in Southwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 135-144.)

[23] 屠其璞,王俊德,丁裕国,等. 气象应用概率统计学[M]. 北京:气象出版社,1984. (TU Q P. Meteorological application probability statistics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1984.)

[24] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2001. (Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y. Probability Theory and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.)

[24] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2001. (SHENG Z. XIE S Q, PAN C Y. Probability and mathematical statistics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2001.)

[25] 刘晓波. 河南发布指导意见:大豆要及时排水,超过5天会大面积减产[EB/OL]. (2022-12-17) [2023-12-27]. <https://news.dahe.cn/2021/07-25/873490.html>. (LIU X B. Henan issued guidance: soybeans should be drained in time, more than 5 days will be large-scale yield reduction[EB/OL]. (2022-12-17) [2023-12-27]. <https://news.dahe.cn/2021/07-25/873490.html>.)

[26] 袁宏伟,袁先江,汤广民,等. 花荚期涝渍胁迫对大豆生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 27-30. (YUAN H W, YUAN X J, TANG G M, et al. Impact of waterlogging at the flower-pod stage on growth and yield of soybean[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(6): 27-30.)

[27] 韩亮亮. 淹水胁迫对大豆生长和生理特性的影响[D]. 南京:南京农业大学,2011. (HAN L L. Effects of waterlogging stress on growth and physiological characteristics of soybean[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.)

[28] 吕佳佳,朱海霞,曲辉辉,等. 高寒区大豆关键生育期低温冷害指标构建[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1581-1588. (LÜ J J, ZHU H X, QU H H, et al. Establishment of indices for soybean low temperature damages in key growth stage in high cold region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1581-1588.)

[29] 王培娟,霍治国,杨建莹,等. 基于热量指数的东北春玉米冷害指标[J]. 应用气象学报, 2019, 30(1): 13-24. (WANG P J, HUO Z G, YANG J Y, et al. Indicators of chilling damage for spring maize based on heat index in northeast China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(1): 13-24.)

[30] 吴玉洁,霍治国,姜会飞,等. 江淮地区玉米涝渍指标构建及时空特征分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 86-94. (WU Y J, HUO Z G, JIANG H F, et al. The construction method and its spatio-temporal characteristics of maize water logging ranks index in Jianghuai region[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(11): 86-94.)

[31] 张桂香,霍治国,杨建莹,等. 江淮地区夏玉米涝渍灾害时空分布特征和风险分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 747-756. (ZHANG G X, HUO Z G, YANG J Y, et al. Spatiotemporal characteristics and risk analysis of summer corn waterlogging disaster in Jianghuai region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3): 747-756.)

[32] YANG J, HUO Z, WU L, et al. Indicator-based evaluation of spatiotemporal characteristics of rice flood in Southwest China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 230: 221-230.

[33] 汪天颖,霍治国,李旭辉,等. 基于生育时段的湖南省早稻洪涝等级指标及时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 709-718. (WANG T Y, HUO Z G, LI X H, et al. Level indicators and temporal-spatial distribution features of early rice flood disaster in Hunan Province based on different growth stages[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3): 709-718.)

[34] 尚莹. 小麦干热风灾害等级指标构建[D]. 北京:中国气象科学研究院,2019. (SHANG Y. Construction of dry and hot wind disaster Grade Index for wheat[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019.)

[35] WU X, WANG P, HUO Z, et al. Crop Drought Identification Index for winter wheat based on evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 263: 18-30.