doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.025

黑龙江省近 50 年大豆需水量与干旱时空分布特征研究

李玖颖[1]　王欣亮[2]　王忠波[2,3]　聂堂哲[4]

(1. 黑龙江省灌溉排水与节约用水技术中心, 哈尔滨 150040; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
3. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江大学水利电力学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 基于黑龙江省 28 个气象站 1966—2015 年逐日气象数据和 20 个农业气象站 1991—2008 年大豆生育期观测资料,计算大豆不同生育阶段的有效降雨量、需水量和水分盈亏指数(Crop water surplus deficit index)及三者的气候倾向率,并根据水分盈亏指数制定干旱等级,计算各生育阶段干旱频率和干旱强度,利用 ArcMap 空间分析功能绘制相应分布图。结果表明,黑龙江省大豆生育期内年均有效降雨量为 253 ~ 370 mm,平均值为 321 mm,除生长前期外,其他各生育阶段均表现为中部高和东西部较低的分布趋势,大豆生育期有效降雨量气候倾向率为 -6.16 ~ 9.09 mm/(10a),平均值为 2.41 mm/(10a),生长前期有效降雨量总体呈上升趋势,生长后期有效降雨量总体呈下降趋势;大豆年均需水量为 336 ~ 465 mm,平均值为 388 mm,各生育阶段需水量均呈中部低、东西部高的空间分布规律,大豆生育期内需水量气候倾向率为 -16.01 ~ 2.42 mm/(10a),平均值为 -5.17 mm/(10a),各生育阶段需水量总体呈下降趋势;大豆生育期内年均水分盈亏指数为 -44.5% ~ 8.9%,均值为 -15%,自西向东呈先增大后减小的趋势,水分盈亏指数的气候倾向率为 -1.89 ~ 4.92%/(10a),水分盈亏指数总体呈上升趋势;大豆各生育阶段干旱频率分布与需水量空间分布大致相同,其中生长前期和快速发育期干旱频率高于生长中期和生长后期,易发生春旱和夏旱。本研究可为黑龙江省大豆的灌溉管理和旱灾预防提供理论依据和参考。

关键词: 大豆; 有效降雨量; 需水量; 水分盈亏指数; 干旱频率

中图分类号: S274; S565.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0223-15　　**OSID**:

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Soybean Crop Water Requirement and Drought in Heilongjiang Province in Recent 50 Years

LI Jiuying[1]　WANG Xinliang[2]　WANG Zhongbo[2,3]　NIE Tangzhe[4]

(1. *Irrigation and Water Saving Technology Center of Heilongjiang Province*, *Harbin* 150040, *China*
2. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
3. *Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
4. *School of Water Conservancy and Electric Power*, *Heilongjiang University*, *Harbin* 150080, *China*)

Abstract: Based on the daily meteorological data of 28 meteorological stations in Heilongjiang Province from 1966 to 2015 and the observation data of 20 agricultural meteorological stations during the growth period from 1991 to 2008, the effective precipitation, water requirement and water surplus deficit index and their climate trend rate in different growth stages of soybean were calculated. The drought rank and the drought frequency and intensity of each growth stage were determined according to the water surplus deficit index. Then the corresponding distribution map was drawn by using ArcMap spatial analysis, which revealed the water supply and demand and drought situation of soybean in each growth stage in Heilongjiang Province. The results showed that the annual average effective precipitation of soybean in Heilongjiang Province was 253 ~ 370 mm, the average value was 321 mm, in addition to the initial all the other growth stages showed the distribution trend of high in the middle part and low in the east and west, the climatic trend rate of effective rainfall during the growth period of soybean was -6.16 ~ 9.09 mm/(10a), and the average value was 2.41 mm/(10a), the effective precipitation in the initial stage was on the whole

收稿日期: 2019-10-28　修回日期: 2019-11-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC00108)

作者简介: 李玖颖(1970—),女,高级工程师,主要从事黑龙江省灌区管理研究,E-mail: 8264545@163.com

通信作者: 聂堂哲(1991—),男,讲师,博士,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: nietangzhe527@163.com

increasing, but in the late season stage was on the whole decreasing. The average annual water demand of soybean was 336 ~ 465 mm, and the average value was 388 mm. In each growth stage, the water demand was low in the middle and high in the east and west areas. The climate trend rate of water requirement during the growth period of soybean was -16.01 ~ 2.42 mm/(10a), the average value was -5.17 mm/(10a), and the trend of water requirement in each growth stage was generally decreasing. It was increased firstly and then decreased from west to east areas when the average annual surplus deficit index was -44.5% ~ 8.9% and the average value was -15% in the growth period of soybean, and an overall upward trend when the climate trend rate of water surplus deficit index was -1.89 ~ 4.92%/(10a). The drought frequency distribution and water requirement spatial distribution of soybean in different growth stages were roughly the same, among which the drought frequency in early growth and rapid growth stage was higher than that in middle growth and late growth stage, and the drought was easy to occur in spring and summer. The research result can provide a theoretical basis and reference for reasonable irrigation and drought prevention of soybean in Heilongjiang Province.

Key words: soybean; effective precipitation; crop water requirement; water surplus deficit index; drought frequency

0 引言

黑龙江省是我国粮食生产大省,大豆在全省范围内广泛种植,截止 2017 年大豆种植面积达 373.5 万 hm^2,占黑龙江省种植面积的 25.3%[1]。黑龙江省是气候变化的敏感地区,气候变化导致作物生长发育和需水量产生相应的变化,各地气候、降雨和作物生长期的分布差异也导致作物水分供需的空间差异[2-4],因此,区域尺度下作物水分供需时空分布特征研究得到了国内外学者的广泛关注[5-8]。已有学者对黑龙江省作物水分供需规律进行了研究[9-13],随着黑龙江省大豆种植面积和大豆出口占比的增加,研究确定大豆水分供需情况对制定农业灌溉方案、合理利用农业水资源和作物生产决策与保障粮食安全具有借鉴和指导意义[14-16]。胡惠杰等[17]对东北大豆需水量进行了分区分析,但分区范围过大,且研究区未包括黑龙江省西北部大豆种植地区,因此难以对黑龙江省的农业生产进行指导。解文娟等[18]对东北三省大豆干旱时空特征进行了分析,但并未对黑龙江省大豆生育期内有效降雨量和需水量的时空分布特征进行分析。

黑龙江省属典型的旱作雨养农业区,春季干旱频繁,春夏连旱高发,干旱已经成为威胁农业生产安全的主要农业灾害[19-20],研究黑龙江省大豆生育期内的干旱情况对预防旱灾和保证粮食安全具有重要意义。在干旱研究和旱情评价中,关键是明确干旱指标[21],目前常用的两类指标为:①反映水分供应状况的降水指标,如降雨距平百分率[22]、Z 指数、标准化降雨指数[23-24]、连续无降水日[25]等。②反映水分供需变化的指标,如气象干旱指数(CI)[26]、Palmer 指标、相对湿润指数[27]、作物水分亏缺指数[28]、作物水分盈亏指数。作物水分盈亏指数能够较好地反映植物、土壤和气象三者的综合影响,已有一些学者利用水分盈亏指数对作物干旱进行评价研究[29-31]。

本文基于黑龙江省 28 个气象站 1966—2015 年的逐日气象资料和 20 个农业气象站 1991—2008 年大豆生育期的观测资料,计算大豆生育期内有效降雨量、需水量和水分盈亏指数及三者的气候倾向率,并绘制相应的分布图;利用水分盈亏指数制定黑龙江省大豆干旱等级,并利用《中国气象灾害大典黑龙江卷》[32]进行验证,计算黑龙江省大豆各生育阶段发生干旱频率;选取省内不同地区的典型站对有效降雨量、需水量、水分盈亏指数、干旱频率和干旱强度进行分析。旨在为黑龙江省合理分配灌溉水资源和预防旱灾提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

选取黑龙江省 28 个气象站 1966—2015 年的逐日气象资料:降雨量、最高气温、最低气温、平均风速、平均相对湿度、日照时数,20 个农业气象站 1991—2008 年大豆的生育期观测资料,以上资料均来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/site/index.html),干旱灾害资料来源于《中国气象灾害大典黑龙江卷》[32]。图 1 为研究区域及气象站和农业气象站的分布情况。

1.2 研究方法

1.2.1 生育期的划分

依据 FAO-56 将大豆生育期划分为 4 个阶段,即生长前期、快速发育期、生长中期和生长后期[33],根据黑龙江省 20 个农业气象站 1991—2008 年的生育期观测资料,假定在研究时段内大豆的品种和作物系数不变,确定各地区大豆播种日期、成熟日期和

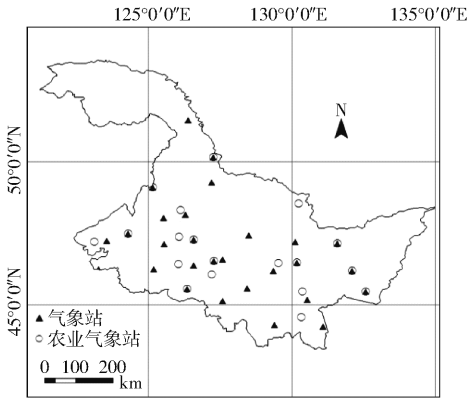


图 1　研究区域及农业气象站和气象站分布

Fig. 1　Distribution of agricultural weather stations and weather stations in study area

各生育阶段平均天数，对于没有生育期观测资料的气象站，选取临近的并与其在同一积温带内的农业气象站观测数据作为计算依据，如表 1 所示。

表 1　气象站点划分

Tab. 1　Division of weather stations

农业气象站	使用该站数据的气象站
龙江	齐齐哈尔、泰来
五大连池	克山、北安
拜泉	明水
青冈	安达、绥化
巴彦	通河、尚志
庆安	庆安、铁力
嘉荫	伊春
汤原	鹤岗、依兰
穆棱	牡丹江、绥芬河
勃利	鸡西
爱辉	黑河、孙吴

1.2.2　有效降雨量

对于旱田作物，有效降雨量指总降雨量能够保存在作物根系层中的降雨量，用于满足作物需要水分，不包括地表径流和渗漏至作物根系吸水层以下的部分，本文有效降雨量采用美国农业土壤保持局(USDA)推荐的方法计算，公式为

$$P_e=\begin{cases}P(125-0.6P)/125 & (P\leqslant 83.3\ \text{mm})\\ 125/3+0.1P & (P>83.3\ \text{mm})\end{cases} \quad (1)$$

式中　P——月降雨量，mm

P_e——月有效降雨量，mm

1.2.3　作物需水量

大豆作物需水量采用单作物系数法计算，大豆各生育阶段及生育期内总需水量由生育期内逐日需水量累加得出，根据大豆不同生育期内的作物系数可以计算大豆需水量，公式为

$$ET_c=K_cET_0 \quad (2)$$

式中　ET_0——参照作物需水量，mm

K_c——作物系数

ET_c——作物实际需水量，mm

采用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman－Monteith 公式计算参考作物需水量 ET_0，计算公式为

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\dfrac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \quad (3)$$

式中　R_n——作物表面净辐射量，MJ/(m²·d)

G——土壤通热量密度，MJ/(m²·d)

T——2 m 高度处的日平均气温，℃

e_s——饱和水气压，kPa

e_a——实际水气压，kPa

u_2——生长中期 2 m 高度处平均风速，m/s

Δ——饱和水气压与温度曲线斜率，kPa/K

γ——温度计常数，kPa/K

根据 FAO－56 的推荐，在最小相对湿度为 45%、平均风速为 2 m/s、无水分胁迫、管理水平较高条件下大豆生长前期、生长中期和生长后期的作物系数 K_{cini}、$K_{cmid(Tab)}$ 和 $K_{cend(Tab)}$ 分别为 0.4、1.15 和 0.5。由于黑龙江省春季降雨频率较低、降雨量较少和大气蒸发强度较弱，故对 K_{cini} 未进行修正，K_{cmid} 和 K_{cend} 修正公式为[33]

$$K_{cmid}=K_{cmid(Tab)}+[0.04(u_2-2)-0.004(R_{Hmin}-45)](3/h)^{0.3} \quad (4)$$

$$K_{cend}=\begin{cases}K_{cend(Tab)}+[0.04(u_2-2)-0.004(R_{Hmin}-45)](3/h)^{0.3} & (K_{cend(Tab)}\geqslant 0.45)\\ K_{cend(Tab)} & (K_{cend(Tab)}<0.45)\end{cases} \quad (5)$$

式中　K_{cmid}——修正后大豆生长中期作物系数

K_{cend}——修正后大豆生长后期作物系数

R_{Hmin}——日最低相对湿度，%

h——生育阶段内作物平均高度，m

1.2.4　生育阶段水分盈亏指数

为了更加准确地反映研究区内大豆 4 个生育期的需水特性及水分供应状况，以各生育阶段需水量为需水标准，以有效降雨量为供水标准，基于作物水分亏缺指数及湿润指数构建大豆生育阶段水分盈亏指数(Crop water surplus deficit index，CWSDI)表征水分盈亏程度[29]，计算公式为

$$CWSDI_i=\frac{P_{ei}-ET_{ci}}{ET_{ci}}\times 100\% \quad (i=1,2,3,4) \quad (6)$$

式中　i——生育阶段，1～4 分别为生长前期、快速发育期、生长中期、生长后期

P_{ei}——i 阶段有效降雨量

ET_{ci}——i 阶段作物需水量

1.2.5 生育阶段水分盈亏指数干旱等级标准

参照相对湿润指数及水分亏缺指数干旱等级和已有的研究结果[18,34-37]制定大豆水分盈亏指数干旱强度等级,同时利用代表气象站灾害资料进行验证,确定大豆生育阶段水分盈亏指数的干旱等级标准。

1.2.6 干旱频率和干旱强度

统计大豆各生育阶段不同等级的作物干旱级别和次数,得到各站点相应等级作物发生干旱的频率 F 和干旱强度 T[38],公式为

$$F_i = \frac{H_i}{N} \times 100\% \tag{7}$$

$$T_i = \frac{E_i}{N} \tag{8}$$

式中 H_i——1966—2015 年相应等级干旱次数

N——总年数,为 50

E_i——大豆第 i 个生育阶段的 50 年干旱强度之和

1.2.7 气候倾向率

将气候变化趋势用一次线性方程表示,即

$$y(t) = b_0 + bt \tag{9}$$

式中 $y(t)$——气象要素拟合值

t——对应年份 b、b_0——回归系数

把 $10b$ 称作气候倾向率。

则趋势变化率方程为

$$\frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t} = b \tag{10}$$

1.2.8 趋势检验

Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计方法,对于非正态分布的水文气象数据 Mann-Kendall 秩序相关检验具有更加突出的适用性。Z 为统计变量,正负值表示数据变化趋势,Z 的绝对值高于 2.56、2.32、1.64 和 1.28 时,表示通过置信度 99.9%、99%、95% 和 90% 显著性检验[39]。

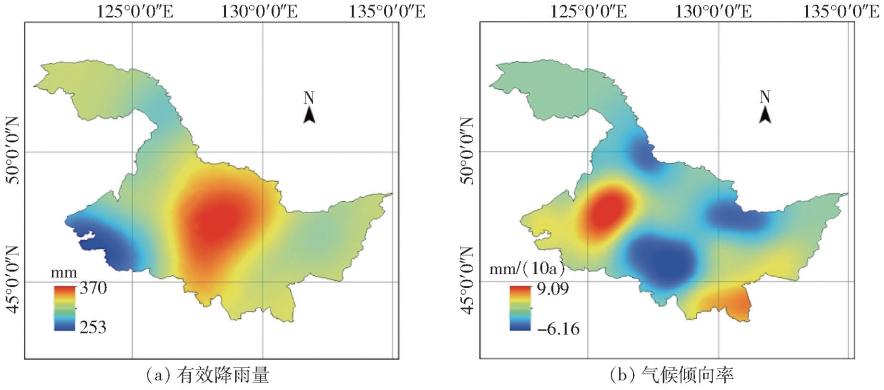
1.3 数据处理

利用 CROPWAT 8.0 软件计算黑龙江省 28 个气象站有效降雨量、需水量进而计算大豆水分盈亏指数,根据制定的干旱指标计算干旱频率,利用 Matlab 2014b 计算气候倾向率,并进行 Mann-Kendall 趋势检验,利用 ArcMap 10.2 工具箱的空间分析功能对有效降雨量、需水量、水分盈亏和干旱频率进行空间插值并作图。

2 结果与分析

2.1 大豆生育期有效降雨量的变化趋势

1966—2015 年黑龙江省大豆生育期内年平均有效降雨量及气候倾向率空间分布如图 2 所示。由图 2a 可知,大豆生育期内年均有效降雨量为 253~370 mm,平均值为 321 mm,自西向东表现为先增加后减小的趋势,高值主要集中在中部地区的伊春、铁力、鹤岗、尚志、通河和庆安一带,均大于 330 mm,低值主要集中在西部地区的泰来、齐齐哈尔和安达,均小于 280 mm,东部的宝清、富锦、鸡西和牡丹江一带接近平均值。由图 2b 可知,大豆生育期有效降雨量的气候倾向率为 -6.16~9.09 mm/(10a),平均值为 2.41 mm/(10a),克山、北安、明水和绥芬河等地升高速率较快,分别为 8.3、8.7、9.5、9.1 mm/(10a),鸡西、呼玛、富裕和依兰变化趋势不明显,分别为 -0.2、0.02、0.01、0.09 mm/(10a),有 16 个站点呈上升趋势,9 个站点呈下降趋势,安达、北安通过了 $\alpha = 0.1$ 显著性检验,克山、明水和绥芬河通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性检验。



(a) 有效降雨量 (b) 气候倾向率

图 2 年平均有效降雨量及其气候倾向率空间分布

Fig. 2 Distributions of effective precipitation and climatic trend rate

1966—2015 年黑龙江省大豆生育期各阶段内有效降雨量如图 3 所示,生长前期年均有效降雨量为 24~51 mm,平均值为 40 mm,由西部到东部呈递增趋势;快速发育期年均有效降雨量为 55~76 mm,

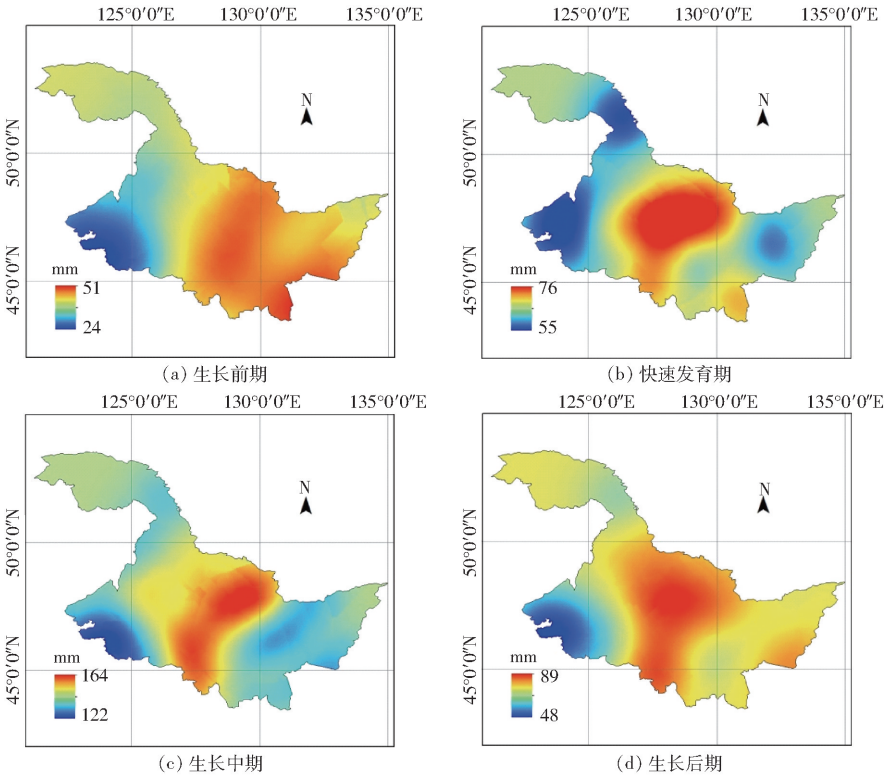


图 3　各生育阶段有效降雨量分布

Fig. 3　Distributions of effective precipitation at each growth stage

平均值为 64 mm；生长中期年均有效降雨量为 122 ~ 164 mm，平均值为 143 mm；生长后期年均有效降雨量为 48 ~ 89 mm，平均值为 72 mm。总体上看，快速发育期、生长中期、生长后期有效降雨量空间分布均呈中部高，西部和东部低的趋势，南北差异不大。从生育前期到生育末期有效降雨量呈先增加后减小的趋势，有效降雨量在生长中期最大，占平均有效降雨量总量的 44.5%。

各生育阶段有效降雨量气候倾向率的空间分布如图 4 所示，生长前期有效降雨量的气候倾向率为 0.62 ~ 6.06 mm/(10a)，平均值为 2.92 mm/(10a)，研究区域内所有站点有效降雨量均呈上升趋势，上升速率较高的在绥芬河、牡丹江、泰来和呼玛等地，安达、北安、牡丹江、嫩江、泰来和铁力均通过 $\alpha = 0.1$ 显著性检验，鹤岗、呼玛和绥芬河均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验；快速发育期有效降雨量气候倾向率为 −2.46 ~ 4.11 mm/(10a)，平均值为 0.61 mm/(10a)，西部地区泰来、齐齐哈尔、安达和富裕有效降雨量呈上升趋势，东部 12 个站点有效降雨量呈小幅度下降趋势，占总站点的 42.9%，倾向率零值线在尚志、庆安、伊春和孙吴一带，仅鹤岗在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著上升；生长中期有效降雨量气候倾向率为 −5.19 ~ 5.17 mm/(10a)，平均值为 0.25 mm/(10a)，14 个站点有效降雨量呈下降趋势，西部地区的克山、明水和海伦等地有效降雨量呈上升趋势，南部的通河、尚志一带和东部地区的鹤岗、富锦、佳木斯一带有效降雨量均呈下降趋势，鹤岗地区在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著下降，绥芬河地区在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著上升，牡丹江在 $\alpha = 0.1$ 的水平上显著上升；生长后期有效降雨量气候倾向率为 −5.15 ~ 3.35 mm/(10a)，平均值为 −1.34 mm/(10a)，21 个站点有效降雨量呈下降趋势，占总站点的 75%，西部地区有效降雨量呈下降趋势，东部地区有效降雨量呈上升趋势，有效降雨量气候倾向率零值主要分布在通河、牡丹江和依兰等地，变化趋势不明显，富裕、嫩江、鹤岗和安达等地在 $\alpha \leqslant 0.1$ 的水平上显著下降。生长前期有效降雨量总体呈上升趋势，生长中期有效降雨量总体呈下降趋势，除生长后期外，其他时段西部地区有效降雨量均呈上升趋势，除快速发育期，东南部地区有效降雨量均呈上升趋势。

2.2　大豆生育期内需水量的变化趋势

1966—2015 年黑龙江省大豆需水量及其气候倾向率空间分布如图 5 所示。由图 5a 可知，大豆年均需水量为 336 ~ 465 mm，平均值为 388 mm，西部需水量由南到北呈递减趋势，而东部由南到北呈递增趋势，高值主要集中在西南地区的泰来、齐齐哈尔和安达等地。由图 5b 可知，需水量的气候倾向率为 −16.01 ~ 2.42 mm/(10a)，平均值为 −5.17 mm/(10a)，总体呈下降趋势，西部的安达、明水，北部的鹤岗等地需水量下降趋势明显，西北部的呼玛、黑河和嫩江

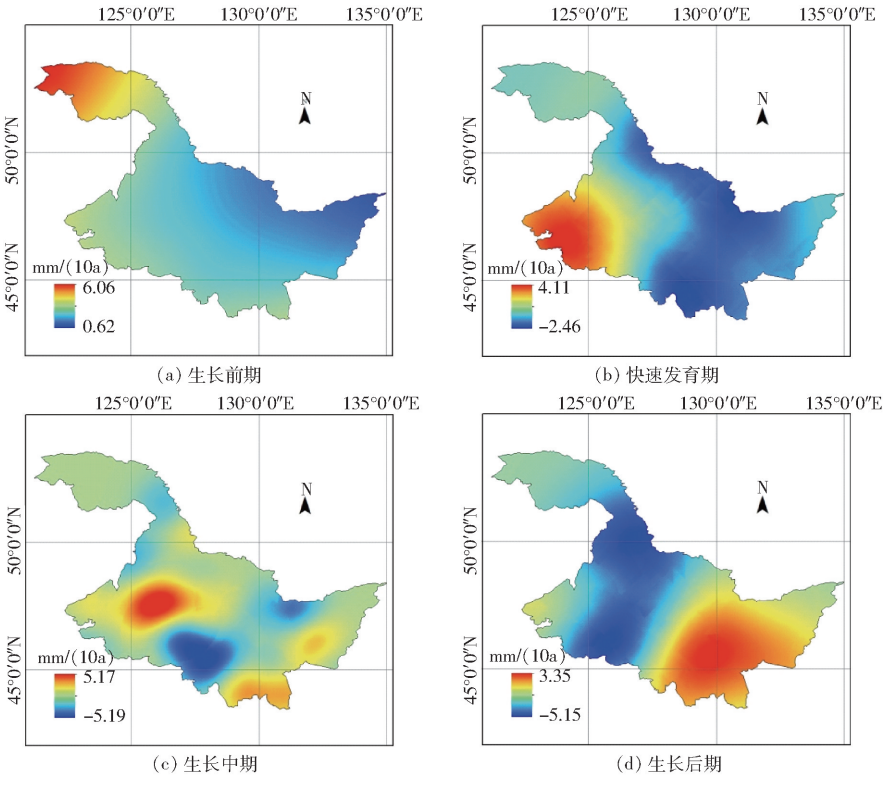


图 4 各生育阶段有效降雨量气候倾向率分布

Fig. 4 Distributions of climatic trend rate of effective precipitation at each growth stage

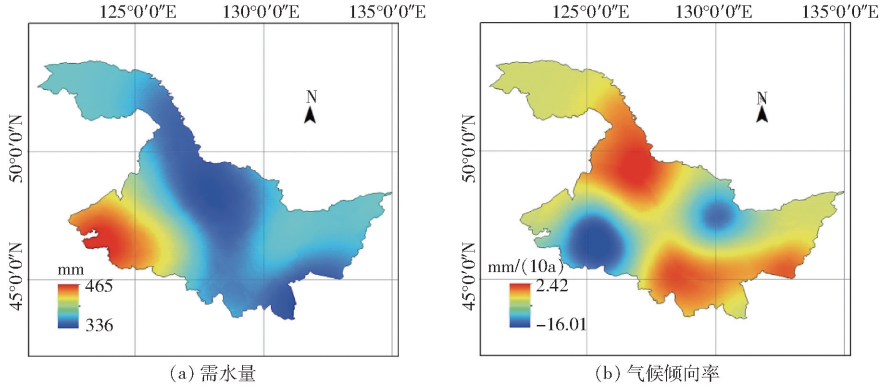


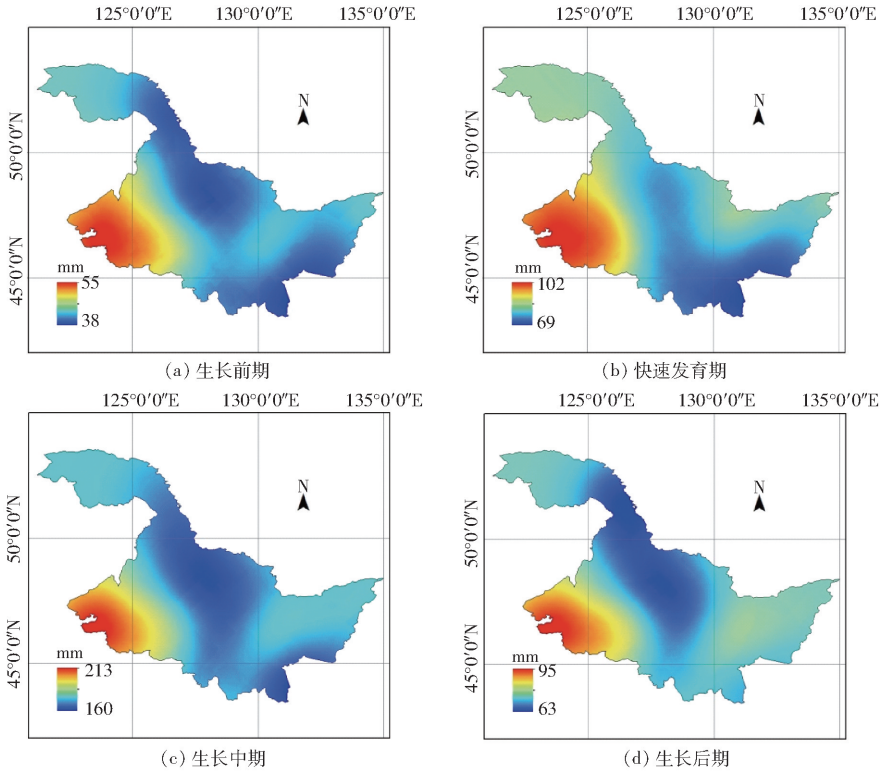
图 5 大豆需水量及其气候倾向率空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of soybean water requirement and climatic trend rate

等地下降趋势不明显,下降速率接近于零,有 18 个站点通过显著性检验,占总站点的 64.3%,其中安达、哈尔滨、克山、明水、绥化和庆安在 $\alpha=0.001$ 上显著下降。

1966—2015 年黑龙江省大豆各生育阶段需水量空间分布如图 6 所示,生长前期大豆年均需水量为 38 ~ 55 mm,平均值为 46 mm,自西向东呈递减的变化趋势;快速发育期大豆年均需水量为 69 ~ 102 mm,平均值为 87 mm,西部地区自南向北呈递减的趋势,而东部自南向北呈递增趋势;生长中期年均需水量为 160 ~ 213 mm,平均值为 180 mm;生长后期年均需水量为 63 ~ 95 mm,平均值为 76 mm。总体上看,各时期大豆需水量高值主要集中在西南地区的泰来、齐齐哈尔、富裕和安达一带,低值主要集中在中部的伊春和北部的孙吴、黑河一带,各生育阶段东部地区富锦、鹤岗和依兰等地均高于东部其他地区,生长中期、生长后期自西向东均呈现先减小再增加的趋势。

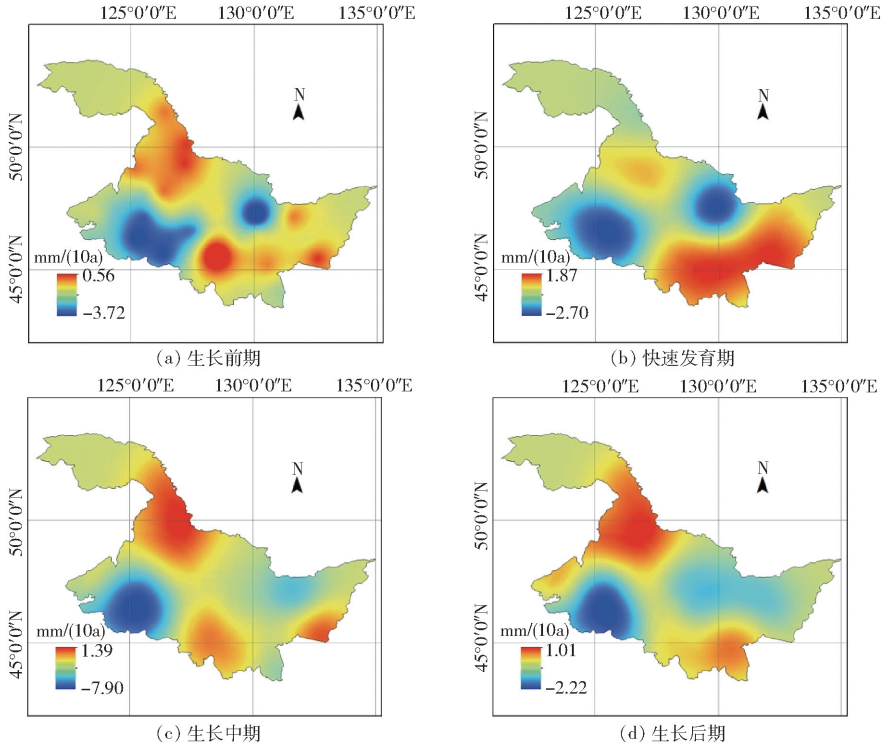
各生育阶段大豆需水量气候倾向率空间分布如图 7 所示,生长前期大豆需水量气候倾向率为 -3.72 ~ 0.56 mm/(10a),平均值为 -1.53 mm/(10a),除通河外其他站点需水量均呈下降趋势,北安、孙吴、黑河和虎林等地变化速率趋近于零,安达、哈尔滨、明水和绥化地区下降速率相对较大,研究区内 71.4% 的站点均通过 $\alpha \leqslant 0.1$ 显著性检验;快速发育期大豆需水量气候倾向率为 -2.7 ~ 1.87 mm/(10a),平均值为 -0.65 mm/(10a),15 个站点的倾向率为负值,其余站点倾向率为正值且较小,总体呈下降趋势,变化速率零值线主要在海伦、铁力和依兰一带,



(a) 生长前期　(b) 快速发育期　(c) 生长中期　(d) 生长后期

图 6　各生育阶段大豆需水量空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of soybean water requirement at each growth stage



(a) 生长前期　(b) 快速发育期　(c) 生长中期　(d) 生长后期

图 7　各生育阶段大豆需水量气候倾向率分布

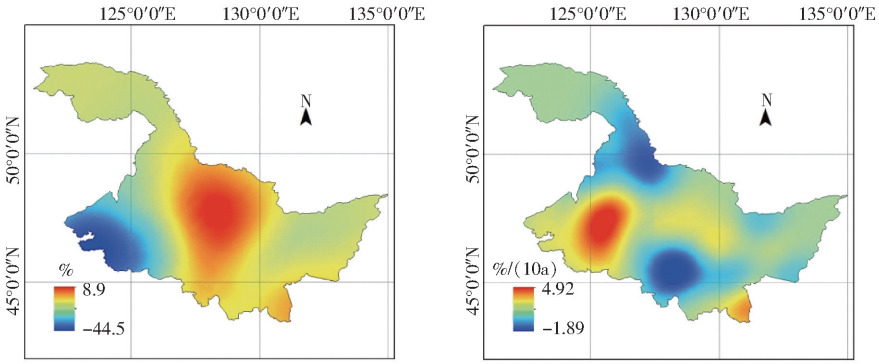
Fig. 7　Distributions of soybean water requirement climatic trend rate at each growth stage

安达和牡丹江通过 $\alpha=0.1$ 显著性检验，虎林和明水通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验。生长中期大豆需水量气候倾向率为 -7.9 ~ 1.39 mm/(10a)，平均值为 -2.76 mm/(10a)，24 个站点倾向率小于零，总体呈下降趋势，通河、呼玛、孙吴和黑河等地倾向率趋近于零，60.7% 的站点通过 $\alpha\leqslant0.1$ 显著性检验；生长后期大豆需水量气候倾向率为 -2.22 ~ 1.01 mm/(10a)，平均值为 -0.39 mm/(10a)，研究区内 18 个站点气候倾向率小于 0，其中零值线在虎林、通河和铁力一带，安达、明水和哈尔滨等地需水量下降明显，哈尔滨、

鸡西、明水、泰来和伊春需水量在 $\alpha=0.1$ 水平上显著下降,孙吴需水量在 $\alpha=0.05$ 水平上显著上升。各生育阶段需水量均呈下降的趋势,其中生长前期、生长中期需水量气候倾向率通过显著性检验站点较多,下降趋势变化明显。

2.3 大豆生育期内水分盈亏指数的变化趋势

1966—2015 年黑龙江省大豆生育期内水分盈亏指数及其气候倾向率空间分布如图 8 所示,大豆年均水分盈亏指数为 -44.5% ~8.9%,均值为 -15%,自西向东呈先增大后减小的趋势,其中低值主要集中在西部的泰来、齐齐哈尔、安达和东部的富锦、宝清、佳木斯等地,水分盈亏指数均小于 -17%,高值主要集中在铁力、伊春等地,水分盈亏指数均大于零。大豆水分盈亏指数的气候倾向率为 -1.89 ~4.92%/(10a),平均值为 1.64%/(10a),22 个站点水分盈亏指数有上升趋势,占总站点的 78.6%,8 个站点通过显著性检验,总体呈上升的趋势,高值主要在安达、克山、明水和绥芬河等地,其中安达在 $\alpha=0.01$ 水平上、克山和明水在 $\alpha=0.05$ 水平上、绥芬河在 $\alpha=0.1$ 水平上均显著上升。

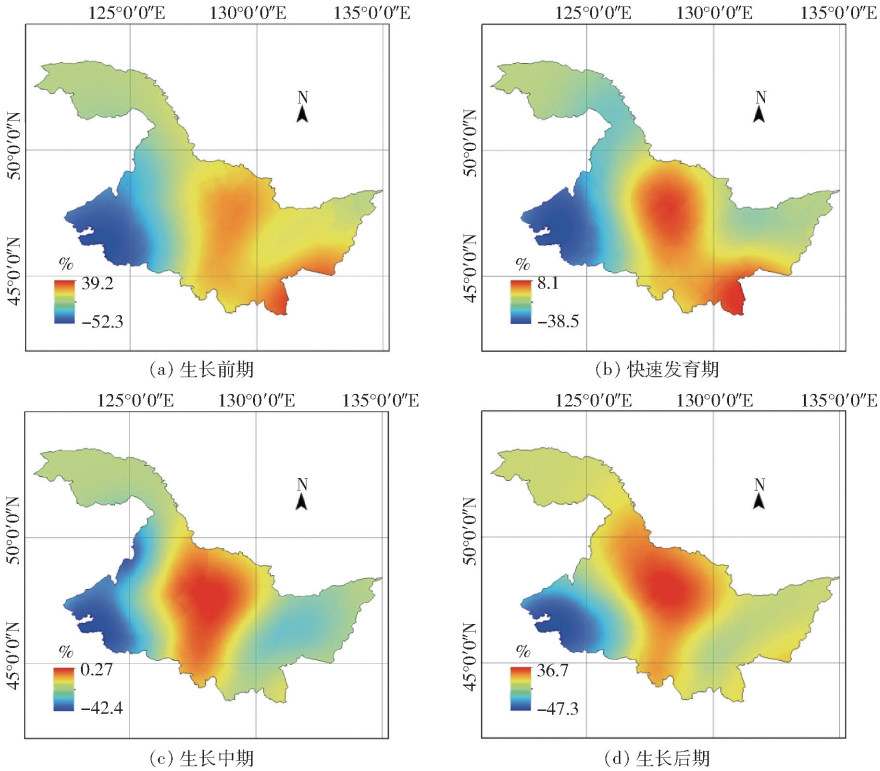


(a) 水分盈亏指数 (b) 气候倾向率

图 8 大豆水分盈亏指数及其气候倾向率空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of soybean CDSDI and climatic trend rate

1966—2015 年黑龙江省大豆各生育阶段水分盈亏指数空间分布如图 9 所示,大豆生长前期的水分盈亏指数为 -52.3% ~39.2%,平均值为 -3.8%,自西向东呈逐渐升高的趋势,中部地区南北差异不大,西部地区自南向北呈递增趋势,而东北地区自南向北呈递减趋势,水分盈亏指数零值主要在黑河、孙吴、海伦和绥化一带;大豆快速发育期水分盈亏指数为 -38.5% ~8.1%,平均值为 -19.7%;



(a) 生长前期 (b) 快速发育期

(c) 生长中期 (d) 生长后期

图 9 各生育阶段大豆水分盈亏指数的空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of soybean CDSDI at each growth stage

生长中期大豆水分盈亏指数为 -42.4% ~0.27%，平均值为 -18.9%；生长后期大豆水分盈亏指数为 -47.3% ~36.7%，平均值为 -0.1%，自西向东呈先增加后减小的趋势，西部水分盈亏指数零值主要在嫩江、克山和绥化等一带，东部水分盈亏指数零值主要在富锦、佳木斯、依兰和牡丹江一带。大豆快速发育期、生长中期两个时段，低值主要集中在西部的齐齐哈尔、富裕、安达和东部的富锦、宝清一带，分别有 26、27 个站点水分盈亏指数小于零，此两个时段黑龙江省大部分地区有效降雨量难以满足大豆的需水要求。

1966—2015 年黑龙江省大豆各生育阶段水分盈亏指数气候倾向率如图 10 所示，大豆生长前期水分盈亏指数气候倾向率为 5.55 ~16.43%/(10a)，研究区内 10 个站点通过 $\alpha \leqslant 0.1$ 显著性检验，占总站点的 35.73%，绥芬河增加趋势最大；快速发育期水分盈亏指数气候倾向率为 -4.32 ~6.78%/(10a)，平均值为 1.4%/(10a)，西南部地区增加趋势较大，东部地区减小趋势较大，宝清、鹤岗和佳木斯等地气候倾向率趋近于零，只有安达地区通过 $\alpha = 0.1$ 显著性检验；生长中期大豆水分盈亏指数气候倾向率为 -2.93 ~5.61%/(10a)，平均值为 1.4%/(10a)，研究区内 21 个站点大豆水分盈亏指数呈增加趋势，8 个站点通过 $\alpha \leqslant 0.1$ 显著性检验，占总站点的 28.6%，庆安、铁力和绥化等地气候倾向率趋近于零；生长后期大豆水分盈亏指数气候倾向率为 -8.49 ~5.52%/(10a)，研究区内 22 个站点大豆水分盈亏指数均呈下降的趋势，气候倾向率零值线在伊春和通河一带，哈尔滨、海伦、黑河、呼玛、嫩江、尚志和孙吴等地均在 $\alpha = 0.1$ 水平上显著下降。

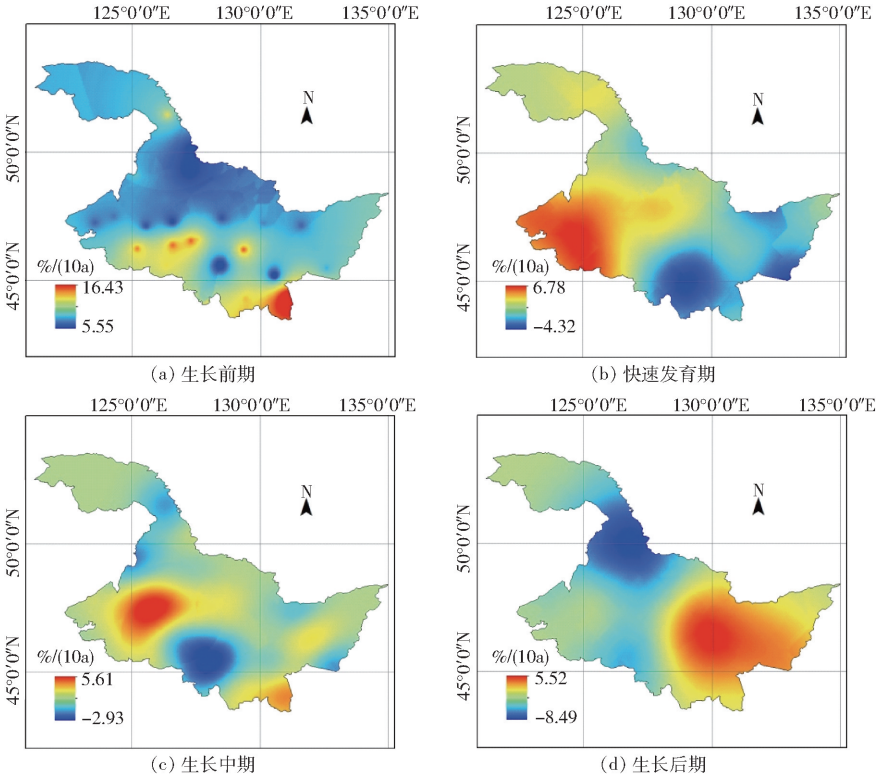


图 10　各生育阶段大豆水分盈亏指数气候倾向率的空间分布

Fig. 10　Spatial distributions of climatic trend rate of soybean CWSDI at each growth stage

2.4　大豆生育期内干旱情况分析

2.4.1　大豆生育期内水分盈亏指数及干旱等级标准

本文依据黑龙江省大豆实际生产资料，参考相对湿润指数和水分盈亏指数干旱等级指标制定干旱等级标准，得到适宜黑龙江地区大豆作物的干旱等级标准，如表 2 所示。

表 2　基于水分盈亏指数的干旱等级标准

Tab. 2　Drought classification criteria based on CWSDI

等级	类型	作物水分盈亏指数/%
0	无旱	≥ -30
1	轻旱	[-40, -30)
2	中旱	[-50, -40)
3	重旱	[-60, -50)
4	特旱	< -60

利用《中国气象灾害大典黑龙江卷》[32] 提供的干旱资料对干旱等级标准进行验证，选取齐齐哈尔、黑河、牡丹江、富锦和铁力 5 个典型站点，分别位于西部、北部、南部、东部和中部，5 个典型站点的水分盈亏指数 1966—2015 年演变特征如图 11 所示。

以生长前期为例，根据《中国气象灾害大典黑龙江卷》[32] 干旱资料，齐齐哈尔分别在 1968、1978、

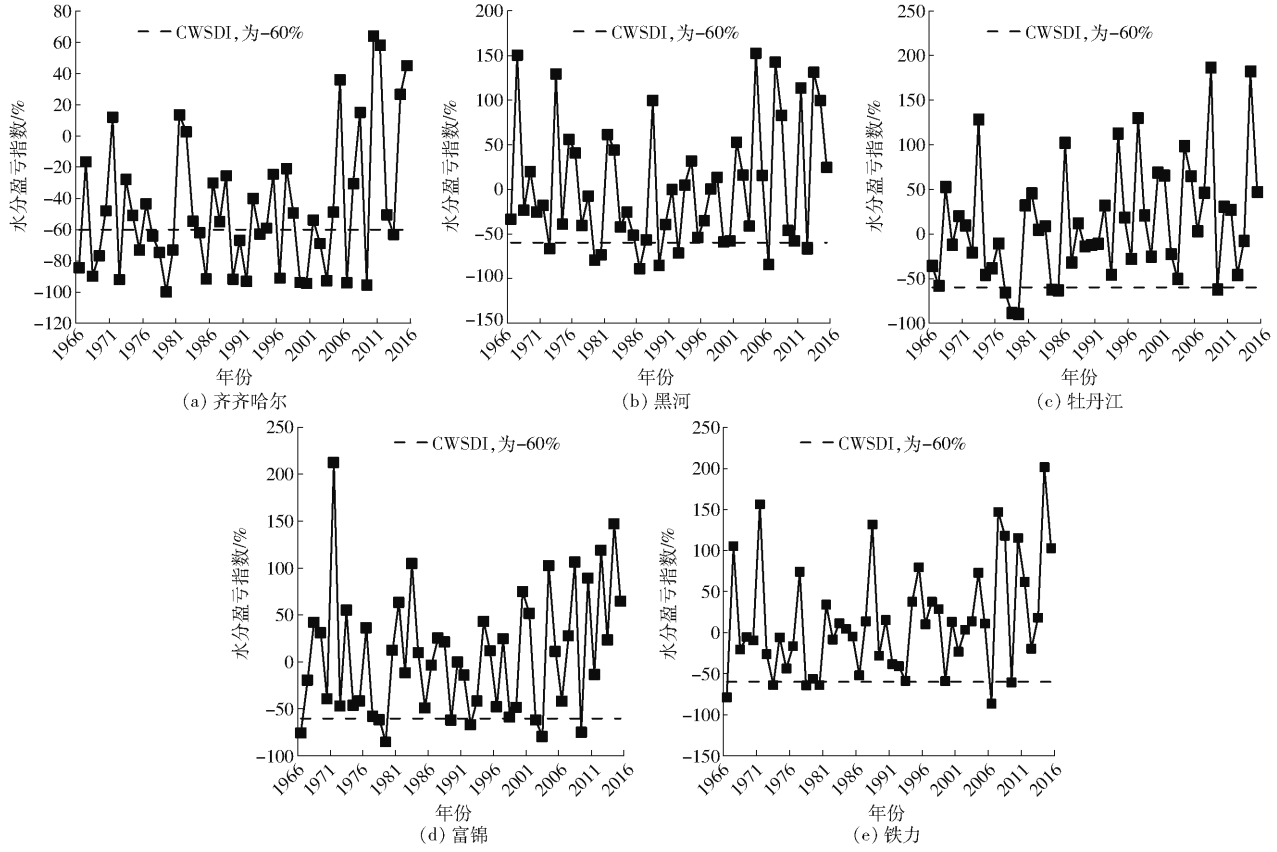


图 11 1966—2015 年 5 个典型站点的水分盈亏指数演变特征

Fig. 11 Evolution characteristics of CWSDI of five typical stations from 1966 to 2015

1979、1980 年,黑河分别在 1986、1992 年,牡丹江分别在 1979、1984 年,宝清分别在 1978、1979 年,铁力分别在 1978、1979 年,出现严重春旱,1978 年 5 月宝清县降雨不足 30 mm,大豆减产 11%,1979 年全省干旱面积达 453 万 hm^2,1984 年春牡丹江大旱,河沟干涸,1986 年黑河发生严重旱灾,全市 0.27 万 hm^2 大豆因种子播在干旱土层内而没有出土,1992 年黑河 4—7 月连续发生旱情,全市受灾面积达 1.5 万 hm^2。通过本文方法计算 5 个典型站点发生干旱的时间均与干旱灾害资料相符。

2.4.2 大豆生育期内干旱频率

1966—2015 年黑龙江省大豆各生育阶段中旱及以上的频率如图 12 所示,大豆生长前期中旱及以上的频率为 16% ~78%,平均值为 36.3%,干旱频率自西向东呈下降趋势,高值主要集中在泰来、安达、明水、齐齐哈尔和富裕一带,均大于 50%,低值主要集中在中部的伊春、通河、尚志和东部的虎林等地,均小于 20%;大豆快速发育期中旱及以上的频率为 14% ~54%,平均值为 36.9%,这个时段各地区干旱差异较大,自西向东呈先减小后增加的趋势,低值主要集中在伊春、铁力和绥芬河一带,均小于 25%,高值主要集中在泰来、富裕、齐齐哈尔和三江平原地区的富锦、宝清一带,均大于 40%;生长中期中旱及以上的频率为 6% ~62%,平均值为 25%,西部地区自北向南呈递减的趋势,而东部地区自北向南呈递增的趋势,高值主要集中在西部地区,低值主要集中在中部地区,与快速发育期相比西部高值区有收缩的趋势,中部低值区有扩大的趋势;生长后期中旱及以上的频率为 6% ~62%,平均值为 23.7%,自西向东呈递减的趋势,高值主要集中在西部地区的安达、富裕、齐齐哈尔和泰来等地,均大于 35%,西部地区自北向南呈递减的趋势,中部和东部地区南北差异不大。总体上看,各生育阶段松嫩平原西部地区干旱频发,其次是三江平原地区的富锦、鹤岗和佳木斯等地,同一地区不同阶段发生干旱的频率也不相同,生长前期和快速发育期干旱频率大于生长中期和生长后期。

2.4.3 大豆生育期内干旱强度分布

1966—2015 年黑龙江省大豆各生育阶段干旱强度如图 13 所示,生长前期干旱强度为 0.5 ~2.7 级,平均值为 1.3 级,干旱强度自西向东呈减小的趋势;快速发育期干旱强度为 0.6 ~1.8 级,平均值为 1.3 级,低值主要集中在中部地区,高值主要集中在西部地区和东南部的富锦和宝清一带;生长中期干旱强度为 0.2 ~2.2 级,平均值为 0.8;生长后期干旱强度为 0.3 ~2.2 级,平均值为 0.8 级。后 3 个阶

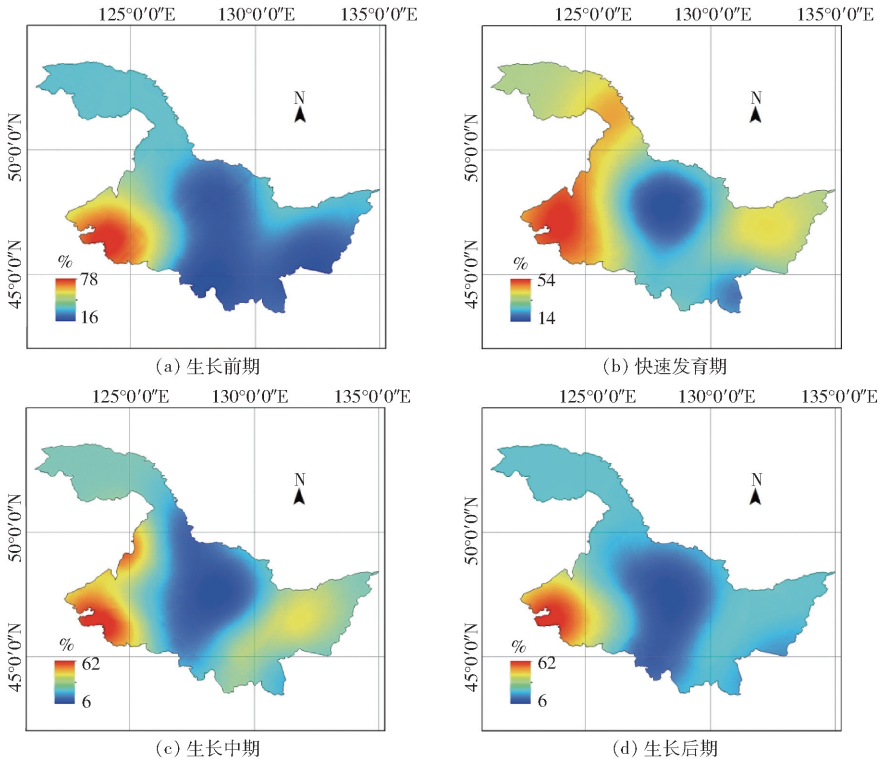


图 12　1966—2015 年黑龙江省大豆各生育阶段中旱及以上的频率空间分布

Fig. 12　Spatial frequency distributions of middle-drought grade and above in each growth stage of soybean in Heilongjiang Province from 1966 to 2015

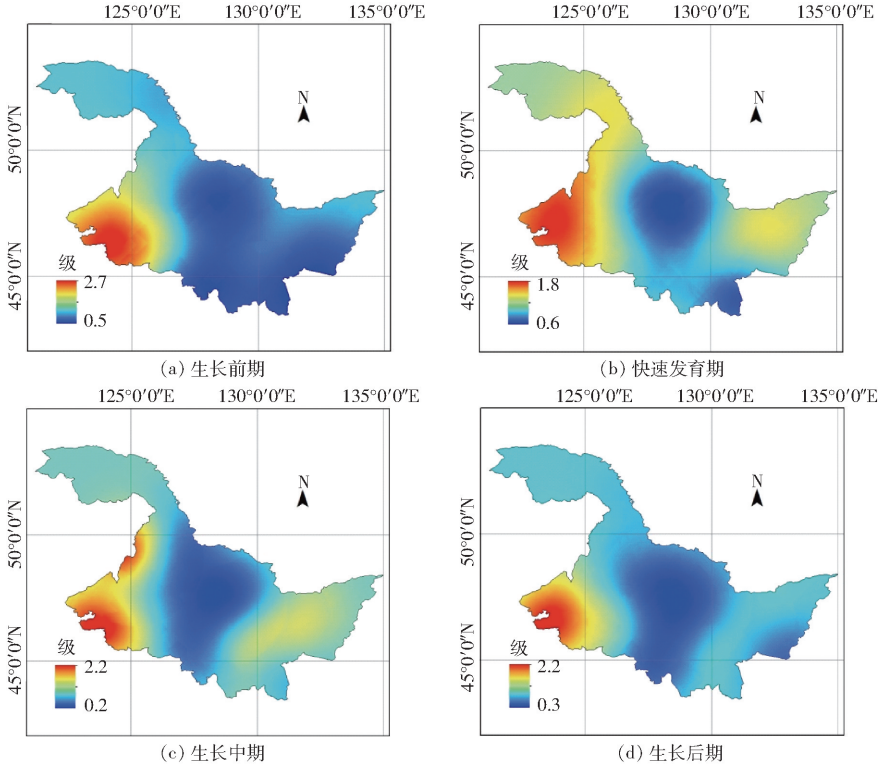


图 13　1966—2015 年黑龙江省大豆各生育阶段干旱强度空间分布

Fig. 13　Spatial distributions of drought intensity in different growth stages of soybean in Heilongjiang Province from 1966 to 2015

段干旱强度自西向东均表现为先减小后增加的趋势，高值主要集中在西部的泰来、齐齐哈尔、富裕和安达一带，东部的富锦、宝清和佳木斯均高于中部地区。总体上看，生长前期和快速发育期两个阶段发生的干旱强度大于生长中期和生长后期两个阶段，表明黑龙江省大豆春季和夏初发生干旱的强度较大。

2.5　典型气象站大豆需水规律及干旱情况

典型站点各生育阶段有效降雨量、需水量、水分

盈亏指数、干旱频率和干旱强度如表 3 所示。由表 3 可知,全生育期内有效降雨量由小到大依次为齐齐哈尔、宝清、牡丹江、黑河、铁力,需水量由小到大依次为铁力、黑河、牡丹江、宝清、齐齐哈尔,与有效降雨量相反。生长中期的需水量和有效降雨量均最多,随着生育期的推移有效降雨量和需水量均呈先升高后减小的趋势,生长前期齐齐哈尔有效降雨量最小,为 25 mm,需水量最大,为 52 mm,其他站点相差不大;除生长中期外,其他阶段各站点水分盈亏指数均小于零,快速发育期水分盈亏指数均小于生长后期,快速发育期缺水较为严重;牡丹江和宝清生长前期干旱频率较小,其他站点随着生育期的推移,干旱频率均呈下降的趋势,各生育阶段齐齐哈尔发生干旱频率均最高,铁力干旱频率最低;各站点干旱强度变化趋势与干旱频率相同。总体看,西部地区齐齐哈尔常年有效降雨量小、需水量大导致干旱频率和强度均大于其他地区,而中部地区的铁力由于常年有效降雨量大、需水量小,干旱发生的频率和强度均较小。

表 3 典型站点各生育阶段水分供需和干旱情况

Tab. 3 Water supply and demand and drought conditions of each typical station at each stage

站点	参数	生长前期	快速发育期	生长中期	生长后期	全生育期
齐齐哈尔	有效降雨量/mm	25	57	132	56	270
	需水量/mm	52	192	204	88	443
	水分盈亏指数/%	-38.3	-34.0	-33.3	-38.1	-46.7
	干旱频率/%	66	48	46	40	
	干旱强度/级	2.4	1.8	1.4	1.6	
铁力	有效降雨量/mm	45	76	160	84	366
	需水量/mm	43	81	173	70	367
	水分盈亏指数/%	-1.5	-5.9	22.2	0.5	13.9
	干旱频率/%	24	22	14	12	
	干旱强度/级	0.8	0.7	0.4	0.4	
黑河	有效降雨量/mm	41	63	146	76	326
	需水量/mm	43	85	173	69	369
	水分盈亏指数/%	-20.2	-13.9	15.2	-10.9	2.5
	干旱频率/%	36	36	12	20	
	干旱强度/级	1.2	1.2	0.5	0.7	
牡丹江	有效降雨量/mm	46	65	139	71	321
	需水量/mm	43	81	181	74	379
	水分盈亏指数/%	-15.2	-21.8	-1.8	-14.5	12.1
	干旱频率/%	22	34	30	22	
	干旱强度/级	0.8	1.1	0.9	0.8	
宝清	有效降雨量/mm	45	59	137	70	311
	需水量/mm	45	86	186	80	397
	水分盈亏指数/%	6.4	-26.2	-24.9	-9.3	-20.7
	干旱频率/%	20	48	36	28	
	干旱强度/级	0.8	1.6	1.1	0.9	

3 讨论

本研究结果表明,1966—2015 年大豆年均需水量为 336 ~ 465 mm,平均值为 388 mm,高值主要集中在西南地区的泰来、齐齐哈尔和安达等地,需水量气候倾向率为 -16.01 ~ 2.42 mm/(10a),平均值为 -5.17 mm/(10a),总体呈下降的趋势。胡惠杰等[17]研究表明,1961—2010 年东北大豆全生育期平均需水量在 327.02 ~ 464.14 mm,平均值为 398.29 mm,高值主要集中在松嫩平原西南部,东北地区需水量气候倾向率在 -10.77 ~ 8.02 mm/(10a)之间,全区平均值 -0.83 mm/(10a),呈下降趋势,黑龙江地区年需水量与东北地区大豆年均需水量相似,高值分布地区相同,需水量气候倾向率绝对值高于东北地区。本文与黑龙江省大豆 2004 年甘南地区蒸渗仪实验、2008 年甘南盆栽实验、2001—2004 肇州小区实验和 2009 年杜蒙小区实验对比,差异分别为 7.5%、3.7%、5.3% 和 1.6%,差异较小,与实际值较为接近[40-43]。《中国主要农作物需水量等值线图研究》[44]指出,黑龙江省 17 个县 1961—1980 年大豆需水量平均值为 450.8 mm,本研究 1966—1980 年大豆需水量的平均值为 402 mm,相差 48.8 mm,文献[40]所取大豆生育期为 4 月 25 日—9 月 20 日,作物系数取 0.78,而本文所取生育期为 5 月 5

日—9 月 24 日，作物系数为 FAO 推荐，且进行了修正，生育期的长短和作物系数的取值导致了二者需水量的不同。近年来大豆非传统耕作方式如秸秆还田、秸秆覆盖、免耕、深松、覆膜和一些新兴的灌溉方式如喷灌、滴灌、水肥一体化等会影响耕地土壤环境进而影响大豆的作物系数，减小大豆的需水量，本文假定研究时段内作物系数不变会导致研究时段后期需水量偏高，大豆需水量气候倾向率可能高于实际情况。各地生育期长短也是需水量空间分布不同的原因之一，根据文献[45]：南部第一积温带为晚熟品种，北部第四积温带为中熟品种，第二、三积温带种植品种为中熟品种，第五、六积温带为早熟和超早熟品种，1991—2008 年 20 个农业气象站大豆的生育期观测资料显示，西南地区大豆播种期最早，成熟期最晚，生育期较长，也导致了西南部地区的需水量高于其他地区。

解文娟等[18]研究表明，东北地区干旱频率呈明显的西高东低的空间分布，各生育阶段干旱频率空间分布相似，呈由东北向西南增加的趋势，黑龙江西南部、三江平原北部干旱发生频率较高，为干旱的主发区，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，与本文黑龙江研究区结果相似，文献[18]还指出大豆开花到成熟期黑龙江省西南部干旱频率较大，为 50% ~80%，而本文研究结果表明在生长后期黑龙江省西南部干旱频率为 36% ~62%，主要因为文献[18]计算了轻旱及以上的干旱频率，而本文计算了中旱及以上的干旱频率。朱海霞等[25]研究表明，1971—2016 年间，黑龙江省大豆春旱、伏旱和秋旱频率较高，而本文研究表明秋旱频率较低，文献[25]在制定干旱强度等级时采用连续无有效降雨天数作为干旱等级指标，而本文在制定干旱强度等级时除考虑降雨因素外还考虑大豆本身的需水要求。

本文研究表明，黑龙江省大豆生育期内有效降雨量中部地区最大，其次为东部地区，西南部地区最小，需水量和水分盈亏指数的空间分布呈相反趋势，有效降雨量和需水量空间分布的差异导致各地区干旱强度和干旱频率的差异。在生长前期，各地有效降雨量均呈升高趋势，需水量呈降低趋势，导致水分盈亏指数有上升的趋势，随着时间的推移大豆生长前期干旱强度有一定的降低，但由于全省春季常年有效降雨量较小，生长前期的干旱强度和频率仍然较大，此阶段为预防春旱的重要时段；在快速发育期，虽然此阶段有效降雨量增多，仍不能弥补缺水状况，有效降雨量西部有升高的趋势东部有减小趋势，而需水量东部和西部均有减小趋势，西部水分盈亏指数有上升趋势，但缺水的状况仍非常严重，水分盈亏指数较其他地区仍然较小；生长中期，水分盈亏指数与前两个阶段相比较大，但仍小于零，此时段由于需水量较大，对应灌水量增多，生长中期又包含开花与结荚两个重要的需水时期，虽然降雨较多，仍需要注意补充灌溉；生长后期，大豆需水量较小，但研究区内西部和东部仍有 12 个站点水分盈亏指数小于零，鼓粒期干旱仍能造成大豆产量下降。总体上看，在生长前期和快速发育期应加强灌溉预防干旱，在生长中期应注意及时补充灌溉，同时在水资源缺乏的地区推广近些年来的非充分灌溉、喷灌、滴灌和水肥结合等适宜的节水灌溉技术，有利于保障粮食安全。

4　结论

（1）1966—2015 年，黑龙江省大豆生育期内年平均有效降雨量为 253 ~370 mm 之间，平均值为 321 mm，生长前期有效降雨量自西向东表现为升高趋势，其他各生育阶段均表现为中部高和东、西部较低的分布趋势。大豆生育期有效降雨量气候倾向率为 -6.16 ~9.09 mm/(10a)，平均值为 2.41 mm/(10a)，生长前期和快速发育期有效降雨量均呈上升趋势，生长中期西部克山、明水和海伦等地有效降雨量呈上升趋势，南部的通河、尚志一带和鹤岗、富锦、佳木斯一带有效降雨量均呈下降趋势，生长后期有效降雨量呈下降的趋势。

（2）1966—2015 年，黑龙江省大豆年均需水量为 336 ~465 mm，平均值为 388 mm，各生育阶段需水量均呈中部低、东西部高的空间分布规律，与有效降雨量的空间分布规律相反。大豆生育期内需水量气候倾向率为 -16.01 ~2.42 mm/(10a)，平均值为 -5.17 mm/(10a)，各生育阶段需水量总体呈下降的趋势，快速发育期下降速率较大。

（3）1966—2015 年，大豆各生育阶段干旱频率分布均为西部地区最高，其次为东部地区，中部地区最低，其中东部三江平原地区在快速发育期和生长中期干旱频率较高，易发生夏旱；生长前期和快速发育期干旱频率高于生长中期和生长后期，易发生春旱。研究区内各生育阶段干旱强度表现为西部地区最大，除西部外，快速发育期和生长中期东部的三江平原地区干旱强度较大。

（4）总体上看，各生育阶段黑龙江省西部地区降雨量少、需水量较大、发生干旱的频率和强度较高，其次为东部的富锦、宝清和佳木斯等地区，中部降雨量多、需水量少，发生干旱的频率和强度均较小。因此，黑龙江省西部地区和东部的三江平原地区是加强灌溉、预防灾害的主要地区。

参 考 文 献

[1] 黑龙江统计局. 黑龙江统计年鉴(2018)[M]. 北京:中国统计年鉴出版社,2018.

[2] 戚颖,白雪峰,李铁男. 气候变化对黑龙江省生育期内玉米产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):254 - 263.
QI Ying, BAI Xuefeng, LI Tienan. Effect of climate change on maize yield in maize growth period in Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 254 - 263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190930&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.030. (in Chinese)

[3] 朱红蕊,刘赫男,张洪玲,等. 1971—2010 年黑龙江省蒸发量气候变化特征[J]. 气象与环境学报,2013,29(3):63 - 68.
ZHU Hongrui, LIU He'nan, ZHANG Hongling, et al. Climatic characters of evaporation from 1971 to 2010 in Heilongjiang Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(3): 63 - 68. (in Chinese)

[4] 靳春香,王秀茹,王希,等. 黑龙江省近 50 年降水变化趋势及空间分布特征[J]. 中国水土保持科学,2015,13(1):76 - 83.
JIN Chunxiang, WANG Xiuru, WANG Xi, et al. Variation trend and spatial distribution characteristics of precipitation in recent 50 years in Heilongjiang Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(1): 76 - 83. (in Chinese)

[5] 符娜,李闯,刘艳伟,等. 基于灌溉需求指数的滇中地区烤烟需水量时空变化分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):155 - 161.
FU Na, LI Chuang, LIU Yanwei, et al. Temporal and spatial variation analysis of water requirement of tobacco in middle of Yunnan Province based on irrigation requirement index[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 155 - 161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160421&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.021. (in Chinese)

[6] 慕臣英,梁红,纪瑞鹏,等. 沈阳春玉米不同生育阶段需水量及缺水量变化特征[J]. 干旱气象,2019,37(1):127 - 133,158.
MU Chenying, LIANG Hong, JI Ruipeng, et al. Variation characteristics of spring maize water requirement and water deficit in different growth stages in Shenyang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(1): 127 - 133, 158. (in Chinese)

[7] BOUREGAA T. Impact of climate change on yield and water requirement of rainfed crops in the Setif region[J]. Management of Environmental Quality, 2019, 30(4): 851 - 863.

[8] GAO Chao, LI Xuewen, SUN Yanwei, et al. Water requirement of summer maize at different growth stages and the spatiotemporal characteristics of agricultural drought in the Huaihe River Basin, China[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2019, 136(3 - 4): 1289 - 1302.

[9] 聂堂哲,张忠学,齐智娟,等. 1960—2015 年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):279 - 290.
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rice water requirement in Heilongjiang Province during 1960—2015[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 279 - 290. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190532&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.032. (in Chinese)

[10] 聂堂哲,张忠学,林彦宇,等. 1959—2015 年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(7):217 - 227.
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, LIN Yanyu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water requirement in Heilongjiang Province during 1959—2015[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 217 - 227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180726&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.026. (in Chinese)

[11] 黄志刚,肖烨,张国,等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. 生态学报,2017,37(7):2368 - 2381.
HUANG Zhigang, XIAO Ye, ZHANG Guo, et al. Estimation and prediction of maize irrigation water requirement based on climate change in Songnen Plain, NE China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2368 - 2381. (in Chinese)

[12] 黄志刚,王小立,肖烨,等. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(1):260 - 268.
HUANG Zhigang, WANG Xiaoli, XIAO Ye, et al. Effect of climate change on rice irrigation water requirement in Songnen Plain, Northeast China[J]. Chinese Journal Applied Ecology, 2015, 26(1): 260 - 268. (in Chinese)

[13] 马文津,刘诗梦,卫琦,等. 气候变化下黑龙江省水稻灌溉需水量变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):236 - 242.
MA Wenjin, LIU Shimeng, WEI Qi, et al. Variation characteristics of rice irrigation water requirements in Heilongjiang Province under climate change[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4): 236 - 242. (in Chinese)

[14] 张华,王浩. 1967—2017 年甘肃省小麦需水量和缺水量时空特征[J]. 干旱区地理,2019,42(5):1094 - 1104.
ZHANG Hua, WANG Hao. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of wheat in Gansu Province from 1967 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1094 - 1104. (in Chinese)

[15] 胡志桥,田霄鸿,张久东,等. 石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):1 - 6.
HU Zhiqiao, TIAN Xiaohong, ZHANG Jiudong, et al. Research on amount and low of water requirement in Shiyang River Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(3): 1 - 6. (in Chinese)

[16] 曹永强,李维佳,赵博雅. 气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J]. 资源科学,2018,40(1):150 - 160.
CAO Yongqiang, LI Weijia, ZHAO Boya. Water requirements of spring maize in Northwest Liaoning Province under climate change[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 150 - 160. (in Chinese)

[17] 胡惠杰,王猛,尹小刚,等. 气候变化下东北农作区大豆需水量时空变化特征分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(2):21 - 31.
HU Huijie, WANG Meng, YIN Xiaogang, et al. Spatial and temporal changes of soybean water requirement under climate changes in the Northeast Farming Region of China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(2): 21 - 31. (in Chinese)

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

[19] 王萍,李廷全,闫平,等. 近年黑龙江省春旱频繁发生的研究分析[J]. 自然灾害学报,2005,14(3):95 - 98.
WANG Ping, LI Tingquan, YAN Ping, et al. Study on frequent occurrence of spring drought in Heilongjiang Province in recent years[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(3): 95 - 98. (in Chinese)

[20] 孙凤华,吴志坚,杨素英. 东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征[J]. 生态学杂志,2006(7):779 - 784.
SUN Fenghua, WU Zhijian, YANG Suying. Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in Northeast China in last 50 years[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006(7): 779 - 784. (in Chinese)

[21] 王劲松,郭江勇,周跃武,等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理,2007,30(1):60 - 65.
WANG Jingsong, GUO Jiangyong, ZHOU Yuewu, et al. Progress and prospect or drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007,30(1):60 - 65. (in Chinese)
[22] 李树岩,刘荣花,马志红. 基于降水距平的黄淮平原夏玉米干旱评估指标研究[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(3):252 - 256.
LI Shuyan, LIU Ronghua, MA Zhihong. Research on drought assessment index of summer maize base on precipitation anomaly[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012,30(3):252 - 256. (in Chinese)
[23] 余方琳,翟石艳,王铮,等. 基于 SPI 的 1960—2012 年西南地区水稻生长季干旱时空特征分析[J]. 地理科学,2018,38(5):808 - 817.
YU Fanglin, ZHAI Shiyan, WANG Zheng, et al. Spatial and temporal variation characteristics of drought during rice growth based on SPI in Southwest China from 1960 to 2012[J]. Scientia Geographica Sinica,2018,38(5):808 - 817. (in Chinese)
[24] XIE H, RINGLER C, ZHU T, et al. Droughts in Pakistan: a spatiotemporal variability analysis using the standardized precipitation index[J]. Water International, 2013, 38(5):620 - 631.
[25] 朱海霞,李秀芬,赵慧颖,等. 黑龙江省大豆生长季干旱时空格局[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(2):229 - 237,259.
ZHU Haixia, LI Xiufen, ZHAO Huiying, et al. Spatial-temporal characteristics of drought during growing periods of soybean in Heilongjiang Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019,37(2):229 - 237,259. (in Chinese)
[26] 李树岩,马志红,师丽魁. 基于 CI 指数的 2008 年河南省麦播后气象干旱演变分析[J]. 气象与环境科学,2009,32(1):59 - 62.
LI Shuyan, MA Zhihong, SHI Likui. Analysis of meteorological drought development since 2008 winter wheat sowing base on the CI index in Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009,32(1):59 - 62. (in Chinese)
[27] 王明田,王翔,黄晚华,等. 基于相对湿润度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. 农业工程学报,2012,28(19):85 - 92,295.
WANG Mingtian, WANG Xiang, HUANG Wanhua, et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in Southwest of China based on relative moisture index[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(19):85 - 92,295. (in Chinese)
[28] 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 Wanhua, YANG Xiaoguang, QU Huihui, 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. (in Chinese)
[29] 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 Yufang, WANG Mingtian, LIU Juan, 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. (in Chinese)
[30] 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 Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan, 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. (in Chinese)
[31] 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 Rui, ZHANG Jiquan, GUO Enliang, 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. (in Chinese)
[32] 温克刚,孙永罡. 中国气象灾害大典黑龙江卷[M]. 北京: 气象出版社,2007: 167 - 203.
[33] FAO. Crop evapotranspiration for computing crop water requirement[R]. FAO Irrigation & Drainage Paper,1998:56.
[34] GB/T 20481—2017　气象干旱等级[S]. 2017.
[35] GB/T 32136—2015　农业干旱等级[S]. 2015.
[36] 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[J]. 自然灾害学报,2011,20(4):52 - 59.
DONG Qiuting, LI Maosong, LIU Jiang, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought of spring maize in Northeast China in recent 50 years[J]. Journal of Natural Disasters,2011,20(4):52 - 59. (in Chinese)
[37] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,等. 东北地区玉米干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(1):231 - 236.
ZHANG Shujie, ZHANG Yushu, JI Ruipeng, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of drought for maize in Northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2011,29(1):231 - 236. (in Chinese)
[38] 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[J]. 自然灾害学报,2017,26(4):155 - 163.
CHEN Dongdong, ZI Tan, ZHANG Yufang. Drought risk assessment based on crop water deficit index during wheat fertility periods in Sichuan Province[J]. Journal of Natural Disasters,2017,26(4):155 - 163. (in Chinese)
[39] 邢贞相,刘美鑫,付强,等. 三江平原建三江垦区降水时空特征分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(5):892 - 904.
XING Zhenxiang, LIU Meixin, FU Qiang, et al. Analysis on the spatial-temporal feature of precipitation in Jiansanjiang Reclamation Area of Sanjiang Plain[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017,25(5):892 - 904. (in Chinese)
[40] 陶延怀,司振江,孙艳玲,等. 大豆生态需水的变化规律研究[J]. 黑龙江水专学报,2005,32(3):1 - 4.
TAO Yanhuai, SI Zhenjiang, SUN Yanling, et al. Exploration of change law of soy's life-require water[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College,2005,32(3):1 - 4. (in Chinese)
[41] 陶延怀,郑文生. Minitab 软件在大豆水分生产函数模型建立与评价中的应用[J]. 水利科学与寒区工程,2018,1(9):1 - 4.
TAO Yanhuai, ZHENG Wensheng. Application of Minitab software on building and evaluation of water production function models of soybean[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering,2018,1(9):1 - 4. (in Chinese)
[42] 郎景波,李铁男,尹刚吉,等. 旱田主要作物耗水规律试验研究[J]. 节水灌溉,2014(6):9 - 12.
LANG Jingbo, LI Tienan, YIN Gangji, et al. Experimental study on water consumption rules of main dry land crops[J]. Water Saving Irrigation,2014(6):9 - 12. (in Chinese)
[43] 冯淑梅. 黑龙江省西部半干旱区大豆滴灌水肥耦合效应试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2011.
[44] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京:中国农业科技出版社,1993.
[45] 刘丽君. 中国东北优质大豆[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,2007.