

许莹,王晓东,王猛,等,2025. SAPEI 在皖北夏玉米苗期涝渍监测中的适用性研究[J]. 气象,51(2):229-238. Xu Y, Wang X D, Wang M, et al, 2025. Applicability of SAPEI in waterlogging monitoring during the seedling stage of summer maize in northern Anhui Province[J]. Meteor Mon, 51(2):229-238(in Chinese).

SAPEI 在皖北夏玉米苗期涝渍监测中的适用性研究*

许 莹^{1,2,3} 王晓东^{1,2,3} 王 猛⁴ 张 林⁵ 王世济⁵ 武文明⁵

1 安徽省农业气象中心,合肥 230031

2 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室,合肥 230031

3 寿县国家气候观象台,安徽寿县 232200

4 河北省唐山市气象局,唐山 063000

5 安徽省农业科学院作物研究所,合肥 230001

提 要: 涝渍害是影响安徽省夏玉米稳产、高产的主要限制因素,土壤水分虽然是衡量农业旱涝状况的直接指标,但现有的土壤水分观测站点密度和数据精确度均无法满足旱涝监测、预警及评估的需求。本研究旨在构建一个能够反映夏玉米苗期逐日土壤相对湿度变化的涝渍指标。根据皖北地区 20 个县(区)1981—2020 年的逐日气象资料、地理信息数据以及夏玉米灾情资料,采用逐日标准化前期降水蒸散指数(SAPEI)表征土壤相对湿度,结合行业标准建立了夏玉米苗期涝渍主导指标和辅助指数,验证准确率在 90%以上。计算结果表明:皖北地区夏玉米苗期涝渍在时间上表现为 1991—2000 年最严重、2001—2010 年次之;在近 40 年中,2003 年是涝渍最严重的一年。在空间分布上表现为沿淮地区涝渍发生频率高于淮北地区。加强玉米涝渍害监测和预警技术研究,以及开展区域性玉米涝渍害的定量化评估,对于保障安徽省粮食安全具有重要意义。

关键词: 标准化前期降水蒸散指数(SAPEI),苗期涝渍指标,夏玉米,皖北地区

中图分类号: S166, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.102901

Applicability of SAPEI in Waterlogging Monitoring During the Seedling Stage of Summer Maize in Northern Anhui Province

XU Ying^{1,2,3} WANG Xiaodong^{1,2,3} WANG Meng⁴ ZHANG Lin⁵ WANG Shiji⁵ WU Wenming⁵

1 Anhui Agrometeorological Center, Hefei 230031

2 Anhui Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

3 Shouxian National Climatology Observatory, Anhui, Shouxian 232200

4 Tangshan Meteorological Office of Hebei Province, Tangshan 063000

5 Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001

Abstract: Waterlogging damage is the main limiting factor for stable and high yield of summer maize in Anhui Province. Soil moisture is a direct indicator of agricultural drought and flood conditions. The current density and accuracy of soil moisture observation stations can not satisfy the requirements of drought and flood monitoring, early warning and assessment. To construct a waterlogging index that can reflect the daily changes of soil moisture for summer maize during the seedling stage, based on daily meteorological data, geographic information, and summer maize disaster data of 20 counties (districts) in the northern part of Anhui Province from 1981 to 2020, this paper uses the daily standardized antecedent precipitation

* 安徽省重点研究与开发计划(202204c06020007)资助

2024 年 7 月 1 日收稿; 2024 年 12 月 23 日收修定稿

第一作者:许莹,主要从事农业气象灾害和农业气候资源区划研究. E-mail: xuying6222@sohu.com

通讯作者:王晓东,主要从事农业气象灾害和气候变化影响评价研究. E-mail: wxd040303118@163.com

evapotranspiration index (SAPEI) in characterizing soil relative humidity. In addition, combined with the industry standard grades of waterlogging for summer maize, the dominant indicators and auxiliary indexes of waterlogging for summer maize during the seedling stage are established. The verified accuracy of the indexes exceeds 90%. The temporal manifestation of waterlogging during the seedling stage of summer maize in northern Anhui is as follows. The most severe period is from 1991 to 2000 and the period from 2001 to 2010 comes the second. 2003 is the year most serious waterlogging in the past 40 years. In spatial distribution, the frequency of waterlogging in the area along the Huaihe River is higher than that in the area north to the Huaihe River. Strengthening the research on monitoring and early warning technology for maize waterlogging and conducting quantitative assessments of regional waterlogging for maize is of great significance to ensure food security in Anhui Province.

Key words: standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI), waterlogging index during the seedling stage, summer maize, northern Anhui Province

引 言

2023 年,安徽省粮食总产量已连续七年保持在 4000 万 t 以上,居全国第五位、中部第二位。皖北地区位于黄淮海平原南部,属于半湿润季风气候,光温水热资源丰沛,实行冬小麦与夏玉米一年两熟轮作种植模式,是安徽省最重要的农业生产区(杨太明等,2016)。目前,皖北地区夏玉米种植面积占全省玉米种植总面积的 85% 以上,年产量 560 余万 t, 占全省粮食总产量的 14% 左右,在全省粮食生产中占有重要地位。全球气候变化背景下,极端降水事件的频繁发生导致涝渍灾害日益加剧(江洁等, 2022; 蒋晓武等, 2010; 高超等, 2014; 罗连升等, 2019; 张丽敏等, 2021; 田红等, 2005)。每年 6 月中旬至 7 月上旬,皖北时值雨季,夏玉米处于出苗至拔节的关键阶段,极易遭受涝渍害,导致严重缺苗或苗期生长缓慢、停滞不前(段爱旺等, 2004; 李少昆等, 2011; 余卫东等, 2013)。涝渍已成为影响安徽省夏玉米稳定高产的关键限制因素(陈玉民等, 1995; 张爱民等, 2007; 马晓群等, 2016)。研究玉米苗期涝渍发生规律对合理规划品种布局、实施趋利避害的配套栽培技术,以及持续提升玉米产能具有重要的现实意义。

旱涝指标是农业旱涝灾害监测、预警和评估的基础。土壤湿度作为反映农业旱涝状况的最直接指标(李秀芬等, 2017),存在一定的局限性。目前,土壤水分观测站点的密度和分布、数据时间长度和准确度均不能满足旱涝评估需要,且农田土壤湿度预测方法尚未成熟。相比之下,基于遥感技术的旱涝

灾害监测方法,以其广泛的覆盖范围、较高的监测频次和空间分辨率等优势,在较大区域内实现了旱涝灾害的快速识别与监测(丁太胜等, 2003; 杨涛等, 2010; 葛道阔等, 2017; 沙沙等, 2023)。然而,遥感数据受天气条件、地表覆盖类型等多种因素制约,其精确度与可靠性尚需进一步提升。随着对农业旱涝灾害研究的不断深入,学者们以作物需水特性为前提,构建了一系列农业旱涝指标,如水分亏缺指数(姜丽霞等, 2021; 穆佳等, 2024)、累积湿润度指数(马晓群等, 2008)、标准化降水蒸发指数(SPEI)(韦潇宇等, 2018; 纪昌明等, 2021)、标准化前期降水蒸散指数(SAPEI)(陈金华等, 2019)等。这类指标综合考虑了农田水分平衡且能在多时间尺度上合理评估旱涝,利用这些指标不仅可以进行旱涝灾害监测、评估,还可以根据降水预报数据,对未来的农田旱涝情况进行预测;但它们大部分都以旬、月、季为时间尺度,忽视了前期降水发生时间对当前旱涝的影响,不能完全反映旱涝逐日动态变化。逐日 SAPEI 基于 SPEI,在充分考虑农田土壤水分基础上,优化了农田水分收支项中有效降水量和作物需水量计算,采用三参数 log-logistic 概率分布拟合日尺度前期累积降水蒸散差,通过正态标准化得到日尺度 SAPEI 值,其适用于干湿季节分明的地区,能较准确地反映该地区实际农田旱涝特征(王晓东等, 2021)。

2020 年颁布的行业标准《夏玉米涝渍等级》(中国气象局, 2020)以 0~50 cm 土壤相对湿度平均值大于或等于 90% 的持续天数确定夏玉米不同发育阶段的涝渍过程等级。由于在本研究区域内,长期且完整的土壤湿度人工观测资料相对匮乏,自动土壤水分观测数据在时序长度和准确性方面亦难以满

足旱涝灾害评估的精细需求。为解决这一问题,本文以逐日 SAPEI 来反映土壤相对湿度,结合夏玉米涝渍等级行业标准,得到夏玉米苗期涝渍等级指标;进而研究夏玉米苗期涝渍风险区划,以期对皖北地区夏玉米产量均衡提升和防灾减灾工作提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料

所用气象数据来自安徽省气象信息中心,包括皖北地区玉米种植区域(图1)内20个国家级地面气象观测站近40年(1981—2020年)逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、水汽压、平均风速、相对湿度等。基础地理信息资料为国家气象信息中心下发的安徽省1:50 000地理信息数据。灾害指标验证灾情资料来自安徽省气象灾害普查数据库、《中国气象灾害大典(安徽卷)》(温克刚,2007),以及安徽省玉米发育期农业气象报表中的玉米苗期涝渍灾情记录。

1.2 皖北夏玉米种植分区

按气候特征结合行政区域,把皖北地区夏玉米种植区分为两个区域:淮北区(砀山县、萧县、淮北市市辖区、濉溪县、宿州市、蒙城县、利辛县、太和县、涡阳县、亳州市、界首市、临泉县)和沿淮区(阜阳市、阜南县、颍上县、怀远县、固镇县、灵璧县、泗县、五河县)(图1)。

1.3 SAPEI 旱涝等级

逐日 SAPEI 计算过程如下。

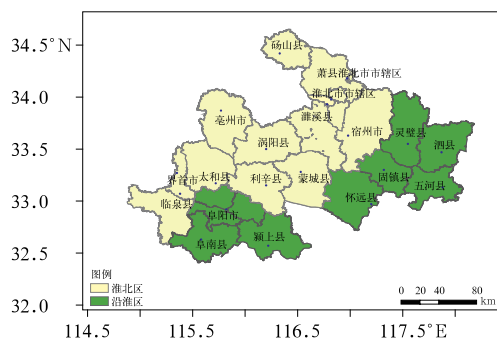


图1 皖北地区夏玉米种植分区

Fig.1 Summer maize planting zone in northern Anhui Province

1.3.1 前期累积降水与蒸散差值指数

从实际农田旱涝出发,综合考虑农田旱涝前期的累积效应,构建前期累积降水与蒸散差值指数(APEI)(陈金华等,2019),并根据淮河流域农田旱涝特征,对第*i*日农田水分收支量(ΔW_i)和衰减系数(*K*)进行本地化订正,优化 APEI 计算:

$$APEI = \sum_{i=0}^m \left[\frac{K^i}{\sum_{i=0}^m K^i} \times \Delta W_i \right] \quad (1)$$

式中:*m*为前期农田旱涝累积影响的天数,取值为99 d;*i*为前推日序数(当日记为0),统计时段共计100 d整;皖北地区*K*为0.915(王晓东等,2021)。

ΔW_i 可表示为:

$$\Delta W_i = P_e - ET_c \quad (2)$$

式中: P_e 为区域有效降水量,单位:mm; ET_c 为作物需水量,单位:mm。

P_e 的计算公式为:

$$P_e = \begin{cases} 0 & P < 5 \text{ mm} \\ P \times a e^{b \times P} & 5 \text{ mm} \leq P \leq P_0 \\ P_{e, \max} & P > P_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:*P*为日总降水量,单位:mm; P_0 为有效降水量达到极大值时所对应的日降水量; $P_{e, \max}$ 为有效降水量极大值;*a*和*b*为计算有效降水系数的参数,皖北地区*a*=0.957、*b*=0.82、 $P_{e, \max}$ =50.3 mm(王晓东等,2021)。

ET_c 由作物系数(K_c)和参考作物蒸散量(ET_0)计算得到:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (4)$$

式中 K_c 基于联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的作物生育期 K_c 变化模型确定(李崇瑞等,2019)。 ET_0 计算采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型,其中净辐射的经验系数由淮河流域辐射站的实测资料计算得到,各站点采用最短距离和气候相似性原理确定(王晓东等,2013),其余参数均采用联合国粮食及农业组织推荐值。

1.3.2 旱涝等级分类

采用三参数 log-Logistic 概率密度函数对所建立的逐日 APEI 数据序列进行拟合,经过正态标准化求得标准化变量 SAPEI 值。概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (5)$$

式中: α 、 β 、 γ 参数可通过线性矩(L-moment)估计方法得到。给定时间尺度的累积概率 $F(x)$ 及 SAPEI

计算如下:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\text{SAPEI} = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (7)$$

式中:当 $F(x) \leq 0.5$ 时, $w = \sqrt{-2\ln[1-F(x)]}$; 当 $F(x) \geq 0.5$ 时, $w = \sqrt{-2\ln F(x)}$ 。常数项 $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

1.4 研究方法

首先,确定皖北夏玉米苗期起止时间,生产上把玉米从出苗到拔节这一阶段称为苗期(李少昆等, 2011)。皖北地区夏玉米苗期一般为 6 月中旬至 7 月上旬(于波, 2013)。

其次,以逐日 SAPEI 来反映土壤相对湿度,结合夏玉米涝渍等级行业标准判断涝渍过程等级。由于夏玉米苗期可能出现多次涝渍过程,可将多次涝渍过程进行组合判断,最终得到夏玉米苗期涝渍等级判别方法。

最后,借鉴李祎君和王春乙(2007)提出的灾害主导指标和辅助指标原则,将苗期涝渍等级指标作

为主导指标,将苗期涝渍指数作为辅助指标,主导指标用于判断区域灾害等级和不同等级的占比,辅助指标用于小范围站点间的灾害强度精细化比较。

2 夏玉米苗期涝渍指标

2.1 主导指标

根据《夏玉米涝渍等级》(中国气象局, 2020),土壤相对湿度大于或等于 90% 的持续天数确定玉米苗期涝渍过程等级。根据 SAPEI 等级(王晓东等, 2021),当 $\text{SAPEI} > 1.0$ 时,对应的土壤相对湿度 $> 90\%$ 。因此,只需统计夏玉米苗期逐日 $\text{SAPEI} > 1.0$ 的持续日数,再根据表 1,即可判断各站点涝渍过程的等级;当苗期出现 2 个以上涝渍过程时,用涝渍过程等级组合确定夏玉米苗期涝渍等级,等级划分方法见表 2。

表 1 涝渍过程等级(单位:d)

Table 1 Grades of waterlogging process grade (unit: d)

等级	I 级	II 级	III 级
持续日数(D)	$4 \leq D < 9$	$9 \leq D < 15$	$D \geq 15$

表 2 夏玉米苗期涝渍等级

Table 2 Waterlogging grades during the seedling stage of summer maize

等级	指标
轻	I 级涝渍过程发生 1~2 次
中	II 级涝渍过程 1 次,或 1 次 II 级涝渍过程和 1 次 I 级涝渍过程,或 I 级涝渍过程发生 3~4 次
重	III 级涝渍过程发生 1 次及以上,或 II 级涝渍过程发生 2 次及以上,或 1 次 II 级涝渍过程且 I 级涝渍过程大于或等于 2 次,或 I 级涝渍过程发生 5 次及以上

2.2 辅助指标

由于不同等级苗期涝渍存在持续日数范围,用等级来划分无法区分这个范围内的差别,为此引入苗期涝渍指数(M),将其作为夏玉米苗期涝渍的辅助指标:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n (0.1M_{i1} + 0.3M_{i2} + 0.6M_{i3}) \quad (8)$$

据统计,皖北地区夏玉米苗期一般会出现 1~3 个涝渍过程, M_i 为第 i 个涝渍过程的过程涝渍指数; n 为苗期内发生涝渍过程的总个数; M_{i1} 为第 i 个涝渍过程中 $1.0 < \text{逐日 SAPEI} \leq 1.5$ 的值之和,

M_{i2} 为第 i 个涝渍过程中 $1.5 < \text{逐日 SAPEI} \leq 2.0$ 的值之和, M_{i3} 为第 i 个涝渍过程中逐日 $\text{SAPEI} > 2.0$ 的值之和; 0.1、0.3 和 0.6 分别为 M_{i1} 、 M_{i2} 和 M_{i3} 的权重。

2.3 指标验证

利用皖北地区宿州玉米观测站点 1981—2020 年农业气象观测资料、《中国气象灾害大典(安徽卷)》(温克刚, 2007)和安徽省气象灾害普查数据库中有关玉米苗期涝渍的观测记载实例,对玉米苗期涝渍指标进行验证(表 3)。其中,重度涝渍正确率 100%,中度涝渍正确率 91%,轻度涝渍正确率 92%,检验效果较好,可进行业务应用。

表 3 涝渍指标验证

Table 3 Verification of waterlogging index

项目	实况			指标判断			
	轻度	中度	重度	无	轻度	中度	重度
样本数/个	26	22	4	4	24	20	4

3 皖北地区夏玉米苗期涝渍时空分布特征

3.1 时间分布

为阐明皖北地区 20 个站点 1981—2020 年逐年玉米苗期涝渍发生情况,首先根据夏玉米苗期涝渍主导指标,统计逐年发生涝渍的站点数占总站点数百分率,以及其中的轻、中、重度涝渍的站点数占总站点数百分率,涝渍站点百分率越大,说明涝渍范围广,判断是否发生区域性的大范围涝渍害;其中重度站点百分率越大,则说明该年份涝渍越严重(范围广、强度大)。由图 2 可见,1981 年、1990 年、1996 年、2000 年、2003 年、2006 年、2007 年、2015 年和 2020 年都是 100% 站点发生涝渍,其中 2003 年、2000 年、2020 年、1996 年和 2015 年重度站点百分率在 65%~90%,为夏玉米苗期涝渍比较严重的年份。

再根据夏玉米苗期涝渍辅助指标,利用式(8)计算逐年区域站点平均苗期涝渍指数(图 3)。通过比较指数大小,可以更直观地看出不同年份区域整体玉米苗期涝渍灾害的强弱。1991 年、1996 年、2000

年、2003 年和 2006 年是苗期涝渍比较严重的年份,其中以 2003 年玉米苗期涝渍最严重,其区域平均涝渍指数为 17.74;其次为 1996 年,其区域平均涝渍指数为 16.35;排在第三位的是 2000 年,其区域平均涝渍指数为 15.16。从不同年代看,夏玉米苗期涝渍指数呈先增大再减小的趋势。1981—1990 年夏玉米苗期涝渍发生程度最轻,平均涝渍指数为 2.58;1991—2000 年最严重,平均涝渍指数为 6.35;2001—2010 年次之,平均涝渍指数为 5.51;2011—2020 年又有所降低,平均涝渍指数为 4.36。

《中国气象灾害大典·安徽卷》(温克刚,2007)和安徽省气象灾害普查数据库中记载 1991 年 6—7 月安徽省出现连续暴雨到特大暴雨过程。从阜阳西部、沿淮到沿江东部是特重灾区,不少地方反复受涝,全省夏秋作物受涝成灾面积达 155.5 万 hm^2 ,洪水成灾面积达 67.7 万 hm^2 ,绝收面积达 80 万 hm^2 。1996 年 6 月 2 日入梅至 7 月 21 日出梅,梅雨期长达 50 d,强降雨带在安徽南北反复摆动,暴雨范围广,区域性暴雨和大暴雨日数多,因洪涝灾害农作物受灾面积达 134.3 万 hm^2 ,绝收面积达 39.7 万 hm^2 ,农业损失达 73.6 亿元。2000 年 6 月,沿淮淮北连降暴雨到特大暴雨,洪涝灾情严重,6 月 24—28 日,

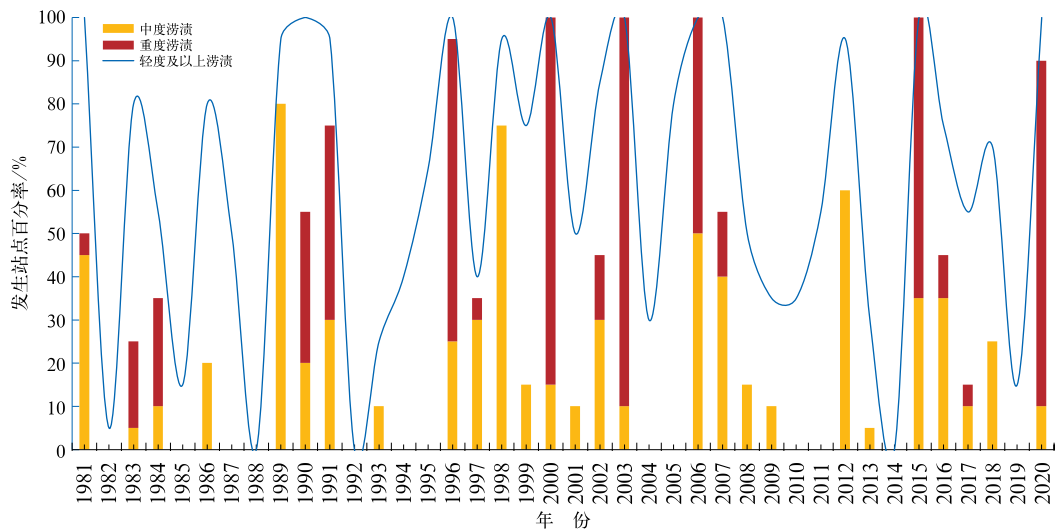


图 2 1981—2020 年皖北地区夏玉米苗期不同等级涝渍发生站点百分率

Fig. 2 Annual variation of the percentage of waterlogging occurrence stations at different grades during the seedling stage of summer maize in northern Anhui Province from 1981 to 2020

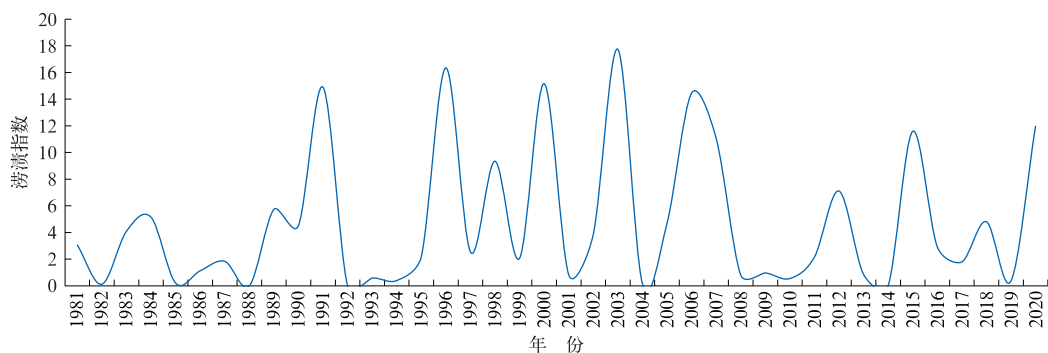


图 3 1981—2020 年皖北地区夏玉米苗期平均涝渍指数

Fig. 3 Annual variation of average waterlogging index during the seedling stage of summer maize in northern Anhui Province from 1981 to 2020

沿淮淮北又出现连续性暴雨和大暴雨,农作物受淹面积为 6.66 万亩($1 \text{ 亩} \approx 666.7 \text{ m}^2$),成灾面积为 3.075 万亩,农业经济损失约为 1950 万元。2003 年淮河出现自 1991 年以来最大洪涝,阜阳、亳州、滁州等市灾情严重,淮河流域农作物受灾面积为 3063.86 万亩,其中成灾面积为 2172.23 万亩,绝收面积为 918.22 万亩,农业经济损失达 109.85 亿元。2006 年 6 月 27 日至 7 月 5 日沿淮淮北和皖东地区发生强降水过程,降水集中、强度大、汇流快,造成部分地

区农田积水,形成内涝,导致部分农田受淹,滁州、宿州、蚌埠、淮北、亳州、阜阳受灾严重,受涝面积为 663 万亩。灾情实况与本文统计的重度涝渍出现年份一致性较好。

3.2 空间分布

根据夏玉米苗期涝渍主导指标,统计皖北各站点 40 年夏玉米苗期总涝渍年平均发生频次(图 4a)。可以看出,总涝渍(轻、中、重度涝渍之和)频次呈明

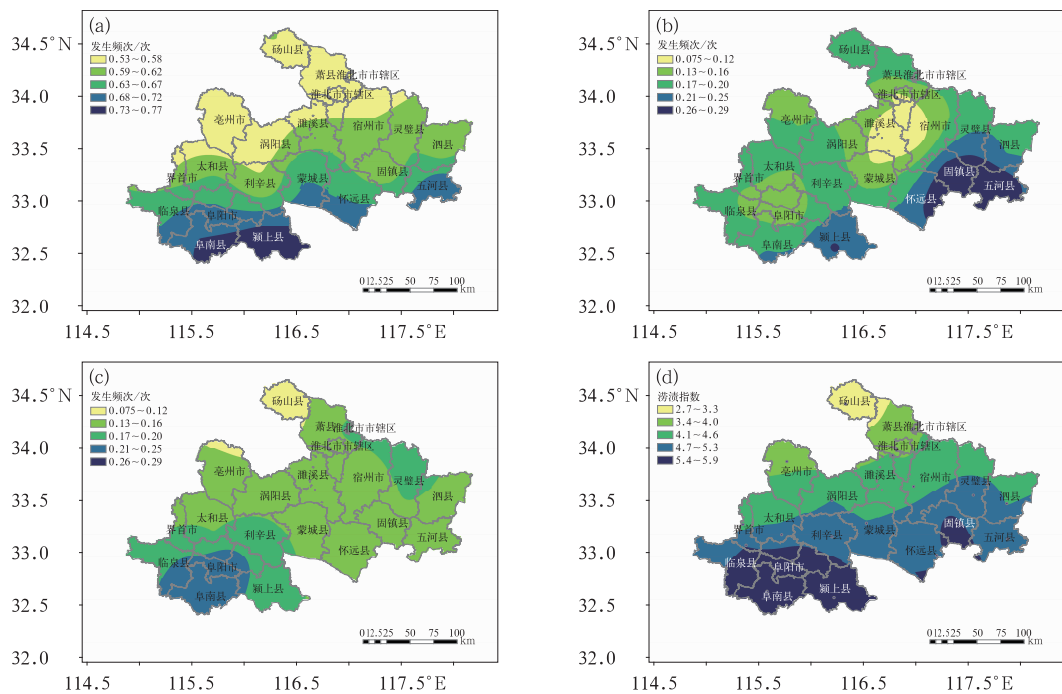


图 4 1981—2020 年皖北地区夏玉米苗期(a)总涝渍、(b)中度涝渍、(c)重度涝渍年平均发生频次和(d)40 年涝渍指数平均值的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of (a—c) the annual frequency of (a) total, (b) moderate waterlogging events, and (c) severe waterlogging events, and (d) the mean waterlogging index of 40 years during the seedling stage of summer maize in northern Anhui Province from 1981 to 2020

显纬向分布,南部高、北部低。沿淮地区年总涝渍发生频次每年为 0.600~0.775 次,其中颍上涝渍总发生频次最高;而淮北地区涝渍总发生频率相对较低,每年为 0.525~0.650 次,其中亳州总涝渍发生频次最低。统计中度和重度涝渍发生频次(图 4b,4c)表明,中度涝渍频次沿淮地区(每年 0.170~0.290 次)亦高于淮北地区(每年 0.075~0.200 次),中度涝渍高值区在固镇、怀远和五河一带;重度涝渍频次则为沿淮西部明显高于其他地区,最大值位于阜南(每年 0.225 次),最小值为砀山(每年 0.084 次)。

根据夏玉米苗期涝渍辅助指标,计算各站苗期涝渍指数 40 年平均值(图 4d),由图可见沿淮地区涝渍指数为 4.7~5.9,而淮北地区为 2.7~4.6。综合来看,沿淮地区是夏玉米苗期涝渍发生频次和发生强度均较高的区域。

从近 40 年皖北地区各站点夏玉米苗期涝渍指数极大值可以看出(表 4),沿淮西部地区的颍上、阜南、阜阳苗期涝渍指数极值较高,发生过非常严重的夏玉米苗期涝渍;淮西北部地区的砀山夏玉米苗期涝渍指数极值较低,苗期涝渍相对较轻。

表 4 1981—2020 年皖北地区各站点夏玉米苗期涝渍指数最大值
Table 4 Maximum values of waterlogging index during the seedling stage of summer maize at various sites in northern Anhui Province from 1981 to 2020

站名	苗期涝渍指数	发生年份	发生时段	站名	苗期涝渍指数	发生年份	发生时段
亳州	18.70	1996	6 月 17 日至 7 月 10 日	砀山	17.89	2000	6 月 25 日至 7 月 10 日
临泉	32.36	1991	6 月 11 日至 7 月 10 日	萧县	23.22	2020	6 月 12 日至 7 月 6 日
界首	23.52	2003	6 月 20 日至 7 月 10 日	濉溪	24.16	1996	6 月 16 日至 7 月 10 日
太和	21.64	2003	6 月 22 日至 7 月 10 日	蒙城	18.87	2003	6 月 22 日至 7 月 10 日
涡阳	22.08	2003	6 月 22 日至 7 月 10 日	怀远	26.30	1991	6 月 12 日至 7 月 10 日
宿州	31.09	1996	6 月 17 日至 7 月 10 日	固镇	18.14	2018	6 月 27 日至 7 月 10 日
淮北	23.70	1996	6 月 16 日至 7 月 10 日	五河	18.43	1991	6 月 12 日至 6 月 23 日 6 月 30 日至 7 月 10 日
灵璧	22.11	1996	6 月 17 日至 7 月 10 日	阜南	34.96	1991	6 月 12 日至 7 月 10 日
颍上	36.00	1991	6 月 11 日至 7 月 10 日	阜阳	35.46	1991	6 月 12 日至 7 月 10 日
泗县	18.55	1996	6 月 16 日至 7 月 10 日				
利辛	20.22	1991	6 月 12 日至 7 月 10 日				

从《中国气象灾害大典·安徽卷》(温克刚, 2007)和安徽省气象灾害普查数据库中记载的灾情来看,沿淮地区因为靠近淮河,一旦遇强降水容易引发洪涝灾害,尤其阜阳、颍上和阜南是受灾较重的地区,与玉米苗期涝渍指标拟合的空间分布趋势相符。

4 夏玉米苗期涝渍指标应用

4.1 相似年比较

进行夏玉米苗期涝渍相似年比较。首先,比较涝渍发生范围,即选取涝渍发生总站点百分率相同的年份,再比较这些年份的区域平均涝渍指数;选取涝渍发生范围一致且平均涝渍指数接近的年份为涝渍相似年。分析相似年的不同等级涝渍发生站点百分率,可以看出相似年之间的差别。从表 5 可以看出,近 40 年中整个皖北地区夏玉米都发生苗期涝渍的年份有 1981 年、1990 年、1996 年、2000 年、2003 年、2006 年、2007 年、2015 年和 2020 年,按照平均涝渍指数相近的原则,可以分为四组苗期涝渍相似

年(表 5)。以第一组为例进行比较,2003 年发生重度涝渍的站点百分率明显多于 1996 年,且 2003 年 100%的站点都发生了中度或重度涝渍;而 1996 年发生中度涝渍的站点百分率多于 2003 年,且有 5%的站点发生轻度涝渍。从区域平均涝渍指数也可以看出,1996 年涝渍指数要小于 2003 年;即根据夏玉米苗期涝渍主导指标和辅助指标相结合的判定原则,2003 年苗期涝渍程度强于 1996 年。与实际灾情记录对比,1996 年因洪涝灾害农作物受灾面积为 134.3 万 hm²,绝收面积为 39.7 万 hm²;2003 年农作物受灾面积为 3063.86 万亩,其中成灾面积为 2172.23 万亩,绝收面积为 918.22 万亩;说明 2003 年涝渍灾害强于 1996 年,与指标判定结果相符。

从苗期涝渍发生空间分布可以看出(图 5),2003 年涝渍较重的区域位于淮北西部的临泉、界首和涡阳,苗期涝渍指数为 22.08~24.99;1996 年涝渍较重的区域则位于淮北东部的宿州、淮北和濉溪,苗期涝渍指数为 23.70~31.09;说明 1996 年皖北区域整体平均涝渍指数虽然低于 2003 年,即区域整体涝渍强度 2003 年高于 1996 年,但局部涝渍强度

表 5 1981—2020 年皖北地区夏玉米苗期涝渍相似年比较

Table 5 Comparison of similar waterlogging years during the seedling stage of summer maize in northern Anhui Province from 1981 to 2020

组序号	年份	总涝渍发生站点百分率/%	轻度涝渍发生站点百分率/%	中度涝渍发生站点百分率/%	重度涝渍发生站点百分率/%	平均涝渍指数
第一组	2003	100	0	10	90	17.74
	1996	100	5	25	70	16.35
第二组	2000	100	0	15	85	15.16
	2006	100	0	50	50	14.45
第三组	2020	100	10	10	80	11.97
	2015	100	0	35	65	11.58
	2007	100	45	40	15	11.07
第四组	1990	100	45	20	35	4.52
	1981	100	50	45	5	3.06

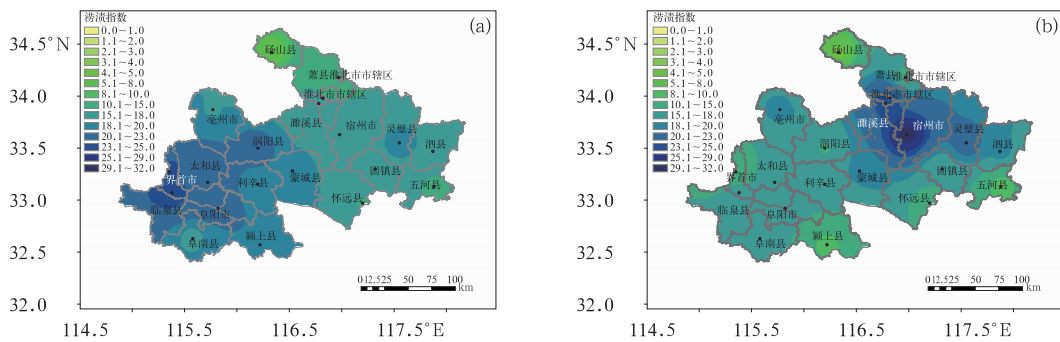


图 5 (a)2003 年和(b)1996 年皖北地区夏玉米苗期涝渍指数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of waterlogging index during the seedling stage of summer maize in northern Anhui Province in (a) 2003 and (b) 1996

1996 年要高于 2003 年。

4.2 灾害年个例分析

以 2020 年为例,皖北地区发生夏玉米苗期涝渍,灾害持续时间长、范围广。皖北地区大部涝渍持续时间超过 10 d,太和最长达 30 d;萧县、濉溪、界首、太和、涡阳和五河 6 个县(市)为历史同期最长,涝渍持续时间为 21~30 d;6 月 17 日至 7 月 6 日涝渍覆盖整个皖北地区。

根据夏玉米苗期涝渍主导指标和辅助指标,2020 年皖北地区 20 个县(市)中有 16 个县(市)出现重度苗期涝渍,2 个县(市)出现中度苗期涝渍,2 个县(市)出现轻度苗期涝渍。区域平均苗期涝渍指数为 11.97,强度位居 1981 年以来第六位,在皖北地区各县(市)中(图 6),濉溪涝渍指数最高(24.12),怀远涝渍指数最低(2.49)。

与 2020 年夏玉米苗期涝渍相似的年份有 2015 年和 2007 年(表 5),这三年皖北地区所有县(市)都发生了苗期涝渍,但 2007 年以轻度和中度涝渍为

主,2020 年和 2015 年则以中度和重度为主;2020 年发生重度涝渍的站点比 2015 年多,而 2015 年发生中度涝渍的站点比 2020 年多。再比较区域平均涝渍指数,也说明 2015 年与 2020 年苗期涝渍程度更为接近。但 2020 年与 2015 年发生严重涝渍的区域

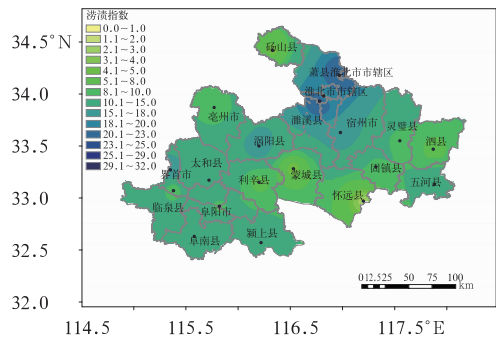


图 6 2020 年皖北地区夏玉米苗期涝渍指数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of waterlogging index during seedling stage of summer maize in northern Anhui Province in 2020

不同,2020年淮北中北部的萧县、濉溪、宿州、淮北、涡阳和界首涝渍比较严重,涝渍指数为17.34~24.12;2015年则是沿淮地区的怀远、颍上和固镇涝渍指数较高,为16.94~18.16;无论从区域整体还是从局部涝渍强度来看,2020年均高于2015年。

5 结论与讨论

以逐日SAPEI指数,结合夏玉米涝渍等级行业标准,构建了皖北地区夏玉米苗期涝渍主导指标和辅助指标,可用于统计区域内不同等级苗期涝渍的发生比例,并比较年际和站点间苗期涝渍强度。该指标不仅可应用于夏玉米苗期涝渍灾害的监测、评估业务服务,还能够根据格点化的降水量预报,提前预测可能发生的夏玉米苗期涝渍程度,及时开展农业气象灾害预警服务。该指标没有与作物减产率相关联,主要是因为影响作物产量的因素比较多,无法分离出某一发育期内单灾种的影响。

根据夏玉米苗期涝渍指标,1981—2020年皖北地区夏玉米苗期涝渍频发,其中2003年、2000年、2020年、1996年和2015年苗期涝渍严重(范围广、强度大)。各年代中以1991—2000年苗期涝渍最严重。皖北地区夏玉米苗期涝渍发生频率在空间上呈南高北低趋势分布,沿淮地区是夏玉米苗期涝渍频发且强度较大的区域。从皖北地区整体来看,2000年以来夏玉米苗期涝渍指数有所降低,但在气候变暖背景下年际间苗期涝渍指数波动大,易出现较严重的苗期涝渍。建议在沿淮夏玉米苗期涝渍高发区采取一定工程、农艺措施,如建设高标准农田,沟渠配套等,提高夏玉米苗期涝渍防灾能力,减轻灾害损失。

参考文献

- 陈金华,余卫国,刘瑞娜,等,2019.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[J].中国生态农业学报(中英文),27(6):919-928. Chen J H, Yu W G, Liu R N, et al, 2019. Daily standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI) and its adaptability in Anhui Province[J]. Chinese J Eco-Agric, 27(6):919-928(in Chinese).
- 陈玉民,郭国双,王广兴,等,1995.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社. Chen Y M, Guo G S, Wang G X, et al, 1995. Main Crop Water Requirement and Irrigation of China [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press(in Chinese).
- 丁太胜,胡雯,马晓群,等,2003.江淮流域旱涝灾害气象卫星遥感监

- 测和预报方法研究[J].高原气象,22(2):147-154. Ding T S, Hu W, Ma X Q, et al, 2003. Research on satellite monitoring and prediction of drought and flood disasters in Jiang-Huai Valley [J]. Plateau Meteor, 22(2):147-154(in Chinese).
- 段爱旺,孙景生,刘钰,等,2004.北方地区主要农作物灌溉用水定额[M].北京:中国农业科学技术出版社. Duan A W, Sun J S, Liu Y, et al, 2004. Irrigation Water Quota of Main Crops in Northern China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press(in Chinese).
- 高超,陈实,翟建青,等,2014.淮河流域旱涝灾害致灾气候阈值[J].水科学进展,25(1):36-44. Gao C, Chen S, Zhai J Q, et al, 2014. On threshold of drought and flood disasters in Huaihe River Basin[J]. Adv Water Sci, 25(1):36-44(in Chinese).
- 葛道阔,曹宏鑫,杨余旺,等,2017.基于WCSODS的小麦旱涝灾损区域化监测与精细化评估[J].江苏农业学报,33(5):1062-1068. Ge D K, Cao H X, Yang Y W, et al, 2017. Regional monitoring and refined assessment for damage from wheat drought and waterlogging based on WCSODS[J]. Jiangsu J Agric Sci, 33(5): 1062-1068(in Chinese).
- 纪昌明,马皓宇,彭杨,等,2021.考虑多种气候指数的淮河流域气象干旱预测[J].中国农村水利水电,(4):16-21. Ji C M, Ma H Y, Peng Y, et al, 2021. Prediction of meteorological drought in Huai River Basin considering multiple climatic indices[J]. China Rural Water Hydrop, (4):16-21(in Chinese).
- 江洁,周天军,张文霞,2022.近60年来中国主要流域极端降水演变特征[J].大气科学,46(3):707-724. Jiang J, Zhou T J, Zhang W X, 2022. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years[J]. Chin J Atmo Sci, 46(3):707-724(in Chinese).
- 姜丽霞,赵慧颖,曲辉辉,等,2021.黑龙江省玉米干旱与低温冷害复合逆境对产量的影响[J].气象,47(1):94-105. Jiang L X, Zhao H Y, Qu H H, et al, 2021. Effect of drought and cold damage cross-stress on maize yield in Heilongjiang Province[J]. Meteor Mon, 47(1):94-105(in Chinese).
- 蒋晓武,孙卫国,张庆奎,等,2010.全球变暖背景下江淮地区气候变化趋势预估[J].安徽农业科学,38(23):12608-12610. Jiang X W, Sun W G, Zhang Q K, et al, 2010. Multi-model reliability ensemble projection of climate change over the Yangtze-Huaihe Region under global warming[J]. J Anhui Agric Sci, 38(23): 12608-12610(in Chinese).
- 李崇瑞,游松财,武永峰,等,2019.改进作物水分亏缺指数用于东北地区春玉米干旱灾变监测[J].农业工程学报,35(21):175-185. Li C R, You S C, Wu Y F, et al, 2019. Improved crop water deficit index for monitoring drought disaster change process of spring maize in the Northeast China[J]. Trans Chinese Soc Agric Engin, 35(21):175-185(in Chinese).
- 李少昆,石洁,崔彦宏,等,2011.黄淮海夏玉米田间种植手册[M].北京:中国农业出版社. Li S K, Shi J, Cui Y H, et al, 2011. Field Planting Manual for Summer Corn in Huang-Huai-Hai Region [M]. Beijing: China Agriculture Press(in Chinese).
- 李秀芬,马树庆,姜丽霞,等,2017.两种常用的春玉米干旱等级指标

- 在东北区域的适用性检验[J]. 气象, 43(11):1420-1430. Li X F, Ma S Q, Jiang L X, et al, 2017. Applicability test of two common indexes for spring maize drought grade in Northeast China[J]. Meteor Mon, 43(11):1420-1430(in Chinese).
- 李祎君, 王春乙, 2007. 东北地区玉米低温冷害综合指标研究[J]. 自然灾害学报, 16(6):15-20. Li Y J, Wang C Y, 2007. Research on comprehensive index of chilling damage to corn in Northeast China[J]. J Nat Dis, 16(6):15-20(in Chinese).
- 罗连升, 徐敏, 何冬燕, 2019. 2000 年以来淮河流域夏季降水年代际特征及大气环流异常[J]. 干旱气象, 37(4):540-549. Luo L S, Xu M, He D Y, 2019. Interdecadal characteristics of summer precipitation over Huaihe River Basin and the associated atmospheric circulation anomalies since 2000[J]. J Arid Meteor, 37(4):540-549(in Chinese).
- 马晓群, 马玉平, 葛道阔, 等, 2016. 淮河流域农作物旱涝灾害与精细化损失评估[M]. 北京: 气象出版社. Ma X Q, Ma Y P, Ge D K, et al, 2016. Drought and Flood Disasters and Fine Loss Assessment of Crops in Huaihe River Basin[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 马晓群, 吴文玉, 张辉, 2008. 利用累积湿润指数分析江淮地区农业旱涝时空变化[J]. 资源科学, 30(3):371-377. Ma X Q, Wu W Y, Zhang H, 2008. Analyzing spatial and temporal variations of agricultural drought and waterlog in Jianghuai Area through accumulated humidity index[J]. Resour Sci, 30(3):371-377(in Chinese).
- 穆佳, 吴迪, 刘洋, 等, 2024. 吉林省玉米干旱风险对产量的影响分析[J]. 干旱气象, 42(4):498-506. Mu J, Wu D, Liu Y, et al, 2024. Analysis of influence of drought risk on maize yield in Jilin Province[J]. J Arid Meteor, 42(4):498-506(in Chinese).
- 沙莎, 胡蝶, 王丽娟, 等, 2023. 河南省土壤水分遥感监测方法研究[J]. 气象与环境科学, 46(1):91-99. Sha S, Hu D, Wang L J, et al, 2023. Study on remote sensing monitoring method of soil moisture in Henan Province[J]. Meteor Environ Sci, 46(1):91-99(in Chinese).
- 田红, 李春, 张士洋, 2005. 近 50 年我国江淮流域气候变化[J]. 中国海洋大学学报, 35(4):539-544. Tian H, Li C, Zhang S Y, 2005. The climate change in the Yangtze-Huaihe River Valley over the past 50 years[J]. Period Ocean Univ China, 35(4):539-544(in Chinese).
- 王晓东, 陈金华, 陈曦, 等, 2021. 淮河流域农田旱涝逐日监测指标优化及适用性分析[J]. 农业工程学报, 37(23):117-126. Wang X D, Chen J H, Chen X, et al, 2021. Optimization and applicability analysis of daily farmland drought and flood monitoring index in Huaihe River Basin[J]. Trans Chinese Soc Agric Engin, 37(23):117-126(in Chinese).
- 王晓东, 马晓群, 许莹, 等, 2013. 淮河流域参考作物蒸散量变化特征及主要气象因子的贡献分析[J]. 中国农业气象, 34(6):661-667. Wang X D, Ma X Q, Xu Y, et al, 2013. Variation of reference crop evapotranspiration and contribution of main factors in the Huaihe Basin[J]. Chin J Agrometeor, 34(6):661-667(in Chinese).
- 韦潇宇, 胡琦, 马雪晴, 等, 2018. 基于 SPEI 的华北平原夏玉米生长季干旱时空变化特征[J]. 干旱气象, 36(4):554-560, 577. Wei X Y, Hu Q, Ma X Q, et al, 2018. Temporal-spatial variation characteristics of drought in summer maize growing season in North China Plain based on SPEI[J]. J Arid Meteor, 36(4):554-560, 577(in Chinese).
- 温克刚, 2007. 中国气象灾害大典(安徽卷)[M]. 北京: 气象出版社. Wen K G, 2007. Almanac of Meteorological Disasters in China (Anhui Volume)[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 杨太明, 许莹, 孙喜波, 等, 2016. 安徽省夏玉米干旱天气指数保险产品的设计及应用[J]. 气象, 42(4):450-455. Yang T M, Xu Y, Sun X B, et al, 2016. Design and application of the drought weather index insurance of summer corn in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 42(4):450-455(in Chinese).
- 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 等, 2010. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 30(22):6264-6277. Yang T, Gong H L, Li X J, et al, 2010. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing[J]. Acta Ecol Sin, 30(22):6264-6277(in Chinese).
- 于波, 2013. 安徽农业气象业务服务手册[M]. 北京: 气象出版社. Yu B, 2013. Manual of Agricultural Meteorological Services in Anhui[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 余卫东, 冯利平, 刘荣花, 2013. 玉米涝渍灾害研究进展与展望[J]. 玉米科学, 21(4):143-147. Yu W D, Feng L P, Liu R H, 2013. Research progress and prospective of waterlogging on maize[J]. J Maize Sci, 21(4):143-147(in Chinese).
- 张爱民, 马晓群, 杨太明, 等, 2007. 安徽省旱涝灾害及其对农作物产量影响[J]. 应用气象学报, 18(5):619-626. Zhang A M, Ma X Q, Yang T M, et al, 2007. The influence of drought and waterlogging disasters on crop yields in Anhui Province[J]. J Appl Meteor Sci, 18(5):619-626(in Chinese).
- 张丽敏, 郭建平, 庄立伟, 等, 2021. 中国主产区玉米冠层对降水的截留研究[J]. 气象, 47(5):619-626. Zhang L M, Guo J P, Zhuang L W, et al, 2021. Study on canopy interception in main maize producing areas in China[J]. Meteor Mon, 47(5):619-626(in Chinese).
- 中国气象局, 2020. 夏玉米涝渍等级: QX/T 583—2020[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2020. Grade of waterlogging for summer maize: QX/T 583—2020[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

(本文责编: 何晓欢)