



山东夏玉米土壤干旱阈值研究与影响评价

董智强¹, 李曼华¹, 李楠¹, 薛晓萍¹, 陈辰¹, 张继波¹, 赵红¹, 侯英雨², 潘志华³

(¹山东省气候中心, 济南 250031; ²国家气象中心, 北京 100081; ³中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 【目的】确定山东夏玉米土壤水分的适宜阈值范围与干旱胁迫阈值, 定量化评估不同程度干旱对夏玉米生长发育和产量形成的影响, 从而为提高农业水资源利用效率, 缓解干旱胁迫的不利影响等提供依据。【方法】基于水分控制试验结果, 确定夏玉米苗期、穗期与花粒期的土壤水分适宜与不适宜阈值范围; 以土壤相对湿度驱动 WOFOST 作物机理模型, 明确无旱、轻旱、中旱与重旱的阈值指标; 通过设置不同干旱程度与持续天数, 完成定量化的干旱影响评价。【结果】(1) 夏玉米苗期、穗期与花粒期的土壤水分适宜阈值范围分别为 62%—91%、66%—92%与 68%—94%, 不适宜阈值范围分别为 <62%、<66%及 <68%; (2) 苗期无旱、轻旱、中旱与重旱阈值指标分别为 53%、50%、45%与 40%, 穗期各程度干旱阈值指标分别为 58%、48%、43%与 37%, 花粒期各程度干旱阈值指标分别为 57%、52%、49%与 45%; (3) 苗期干旱对夏玉米总叶重、总茎重与最大叶面积指数的影响最大, 穗期与花粒期干旱对总穗重影响最大, 其中穗期重旱将导致不能形成最终产量。【结论】确定了夏玉米不同发育期的土壤水分阈值指标, 夏玉米穗期与花粒期干旱对于产量形成的影响更为显著。

关键词: 夏玉米; 干旱; 阈值; 土壤湿度

The Thresholds of Soil Drought and Its Impacts on Summer Maize in Shandong Province

DONG ZhiQiang¹, LI ManHua¹, LI Nan¹, XUE XiaoPing¹, CHEN Chen¹, ZHANG JiBo¹, ZHAO Hong¹,
HOU YingYu², PAN ZhiHua³

(¹Shandong Provincial Climate Center, Ji'nan 250031; ²National Meteorological Center, Beijing 100081; ³College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: 【Objective】This study was aimed to determine the suitable range and the drought stress thresholds of soil water on summer maize in Shandong Province, and to evaluate the effects of different drought degrees on growth and development and yield formation of summer maize quantitatively. So as to provide a basis for improving the utilization efficiency of agricultural water resources and alleviating the adverse impacts of drought stress. 【Method】Based on the data from field experiments, the suitable and unsuitable ranges of soil moisture were determined for the seedling stage, ear stage and grain stage of summer maize. By the model of WOFOST, the drought stress thresholds were analyzed with the relative water content as the driving factor. And the drought effects were assessed quantitatively through different drought degrees and their duration days. 【Result】(1) The suitable ranges of soil water during seedling stage, ear stage and grain stage of summer maize were 62%-91%, 66%-92% and 68%-94%, respectively. And the unsuitable ranges were less than 62%, 66% and 68%, respectively. (2) The thresholds of no drought, light drought, medium drought and severe drought during seedling stage were 53%, 50%, 45% and 40%, respectively. The thresholds of different drought degrees during ear stage were 58%, 48%, 43% and 37%, respectively. The thresholds of different drought degrees

收稿日期: 2020-05-14; 接受日期: 2020-07-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0301004)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)、山东省自然科学基金(ZR2018BD024)、山东省气象局气象科学技术研究项目重点课题(2017sdqzx02)、“十三五”山东重大气象工程项目(鲁发改农经(2017)97号)

联系方式: 董智强, E-mail: zhiqiangdong@cau.edu.cn. 通信作者薛晓萍, E-mail: xxpdyh@163.com

during grain stage were 57%, 52%, 49% and 45%, respectively. (3) The drought happened during seedling stage had the greatest effects on the total leaf weight, total stem weight and maximum leaf area index. The drought happened during ear stage and grain stage had the greatest effects on the total ear weight. And the severe drought during ear stage would result in the failure of final yield formation. 【Conclusion】The suitable ranges of soil water and the drought thresholds of summer maize were brought to light in Shandong. The drought happened during ear stage and grain stage of summer maize had more significant impacts on yield formation.

Key words: summer maize; drought; thresholds; soil moisture

0 引言

【研究意义】山东省是中国粮食作物和经济作物的重点产区。夏玉米是山东最主要的粮食作物之一,其播种面积与总产分别占全国总播种面积与总产的 7.3%与 7.8%^[1-2]。山东夏玉米的产量变化,对于保障地区乃至全国粮食安全,具有举足轻重的作用。干旱是对我国农业影响面最广、影响程度最严重的自然灾害^[3],资料显示 2003—2013 年干旱造成我国农作物的受灾面积约占总受灾面积的 51.9%^[4]。干旱同样是制约山东夏玉米稳产与高产的主要灾害之一,不仅影响夏玉米的播种与出苗,还对其生长发育与产量形成造成严重的影响^[5]。山东夏玉米生育期间气温高、蒸发量大,且降水分布不均,阶段性干旱频繁发生,加之夏玉米是需水较多且对干旱比较敏感的作物,受土壤水分盈亏的影响较大,干旱已成为这一地区影响范围最大、造成产量损失最重的农业气象灾害之一^[6-9]。

【前人研究进展】夏玉米全生育期对水分均比较敏感,尤其是拔节期、抽雄吐丝期等,水分不足将导致产量及品质显著降低^[10-11]。夏玉米受干旱胁迫的影响与干旱程度、持续时间及生育进程等密切相关,特别是需水关键期受旱程度越重、持续时间越长,不利影响会越大^[12-14],夏玉米产量波动的不确定性也随之增大^[15]。玉米受旱后生长发育受到抑制,光合速率等生理指标显著降低,最终导致产量下降^[16-18]。玉米对土壤水分胁迫具有复杂的调控反馈机制,适度的水分亏缺并不能造成减产^[19]。在特定的条件下,土壤干旱存在一个临界阈值,干旱程度未超过该阈值时,作物对干旱产生适应性的变化,生理过程受影响程度较小,恢复正常供水后不减产^[20-21];但当干旱程度超过该阈值,作物将受到永久性的损害,恢复正常供水后,生理指标也不能恢复正常,产量显著降低^[22-23]。【本研究切入点】已有对于土壤干旱阈值的研究中,大多以田间控水试验为主^[20, 24-25],并结合统计模型进行等级确定^[26],或结合作物机理模型进行干旱胁迫影响模拟^[27]。

而针对山东土壤干旱阈值的研究相对较少,或是在相邻地区确定指标的基础上,在本地进行干旱等级的验证^[26],或是以本地试验数据结果为基准,多以干旱影响评估为主^[28-29],均缺乏本地化阈值指标的定量研究与确定。【拟解决的关键问题】本研究结合已有大田水分控制试验结果,确定夏玉米苗期(出苗—拔节期)、穗期(拔节—抽雄期)与花粒期(抽雄—成熟期)等 3 个关键生育期的适宜土壤水分阈值范围;并应用 WOFOST 作物机理模型,以土壤相对湿度数据驱动模型,确定夏玉米 3 个关键生育期的无旱、轻旱、中旱及重旱阈值指标;在此基础上,分析不同发育期内不同干旱持续天数,对夏玉米最大叶面积指数、地上部干物重等生长发育指标的影响,为山东夏玉米干旱胁迫的定量化影响评估提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文应用的气象资料包括山东省 2010—2015 年逐日最高气温、最低气温、降水量、日照时数、平均风速、空气相对湿度等基本气象资料;农业资料包括泰安等 10 个夏玉米农业气象观测站 2010—2015 年的发育期及产量结构资料,其中泰安、济阳、聊城、菏泽、莒县、潍坊、高密等观测站以郑单 958 为主要观测品种,淄博、胶州与莱阳主要观测品种分别为登海 605、鲁丹 22 号及敦玉 8 号;各观测站历年播种期与所在地适播期一致,田间管理方式与所在地高产方式一致。

水分控制试验数据包括德州市夏津气象观测站(36°59'N, 116°01'E, 海拔 27.4 m) 2013—2015 年的试验资料。该研究区土壤为黄棕壤土,前茬作物为冬小麦,0—50 cm 土壤田间持水量为 22.3%,土壤容重为 1.58 g·cm⁻³,凋萎系数为 5.4%^[30]。试验品种为主栽品种郑单 958,播种方式为人工播种,播种时间与当地夏玉米适播期一致,其中 2013 年为 6 月 21 日,2014 和 2015 年均均为 6 月 10 日。其他管理方式与当地高产

方式保持一致。

试验共设置 5 个控水梯度 (T1—T5)，其中 T1 处理为 4 个重复，T2—T5 处理均为 3 个重复，共 16 个小区，每个小区面积为 28 m² (4 m×7 m)，小区之间设置隔离带，小区四周铺设防渗膜，防止小区间土壤水分水平交换；通过遮雨棚阻隔自然降水，应用土钻烘干法算出土壤相对湿度，各处理水分控制生育阶段及土壤相对湿度指标如表 1 所示。其中 T1 处理在 2013、2014 与 2015 年，分别在花粒期、苗期与穗期将土壤相对湿度控制在 40% 以下；T2 处理分别在 3 年中 3 个生育时期内，将土壤相对湿度控制在 40%—60% 之间；T3 处理 2013 年在苗期与花粒期将土壤相

对湿度控制在 40%—60% 之间，2014 年在苗期与穗期控制在 40%—60% 之间，而 2015 年在穗期与花粒期控制在 40%—60% 之间；T4 处理 2013 年各生育时期土壤相对湿度均控制在 60% 以上，2014 与 2015 年控制在 60%—80% 之间；T5 处理 2013 年各生育时期保持自然状态，2014 年与 2015 年均控制在 80% 以上 (表 1)。观测项目包括夏玉米出苗期、3 叶期、7 叶期、拔节期、抽雄期、开花期、吐丝期、乳熟期、成熟期等生育时期，以及主要生育时期各器官干物重，果穗长、果穗粗、穗粒重、百粒重、理论产量等产量结构指标^[30]，各观测项目均按照《农业气象观测规范》^[31]的要求进行观测，取样方式为随机取样。

表 1 不同年份试验小区水分控制设计

Table 1 The design of soil moisture control of experiment plot in different years

年份 Year	生育时期 Growth stage	处理 Treatment				
		T1	T2	T3	T4	T5
2013	苗期 Seedling stage	>60%	>60%	40%-60%	>60%	自然状态 Natural state
	穗期 Ear stage	>60%	>60%	>60%	>60%	自然状态 Natural state
	花粒期 Grain stage	≤40%	40%-60%	40%-60%	>60%	自然状态 Natural state
2014	苗期 Seedling stage	≤40%	40%-60%	40%-60%	60%-80%	>80%
	穗期 Ear stage	>60%	>60%	40%-60%	60%-80%	>80%
	花粒期 Grain stage	>60%	>60%	>60%	60%-80%	>80%
2015	苗期 Seedling stage	>60%	>60%	>60%	60%-80%	>80%
	穗期 Ear stage	≤40%	40%-60%	40%-60%	60%-80%	>80%
	花粒期 Grain stage	>60%	>60%	40%-60%	60%-80%	>80%

1.2 土壤水分阈值确定方法

基于之前学者的相关研究成果，本文针对土壤水分适宜阈值范围的确定，以不同发育期夏玉米地上部干物重为主要指标。该指标不仅能衡量有机物积累及营养成分多寡^[7, 32]，还能够充分反映夏玉米的生理特性^[33]，是其生长发育状况的综合表征，且在不同生育时期之间具备较强的可比性。结合水分控制试验数据资料，分别构建历年各生育时期干物重与土壤相对湿度的二次回归拟合模型，结合 80% 保证率原理^[34-35]，分别确定土壤相对湿度适宜阈值范围的上、下限，适宜阈值下限即对应不适宜阈值范围；再将不同年份间得到的共同阈值范围，确定为各生育时期的适宜与不适宜阈值范围。

土壤干旱阈值指标的确定，是基于本地化验证后的 WOFOST 机理模型^[36]，以土壤相对湿度为驱动

因子^[37]；针对苗期、穗期与花粒期 3 个发育阶段，以土壤相对湿度每单位变化引起总穗重变化的幅度（与潜在总穗重相比较，即减产率）为依据；参考已有农业气象评价指标^[38]，分别将无减产、减产 5%、减产 10% 与减产 20% 对应的土壤相对湿度，作为无旱、轻旱、中旱与重旱的阈值指标。

WOFOST 模型是荷兰瓦赫宁根大学和世界粮食研究中心共同开发研制，以作物的同化作用、呼吸作用、蒸腾作用及干物质分配等生理生态过程为模拟基础，用于模拟特定土壤和气候条件下作物生长的动态解释性模型。该模型以日为时间步长，可动态、定量模拟潜在、水分限制和养分限制 3 种水平下的作物生长状态^[39-41]。由于该模型机理性强、源代码开放、调参相对简便，已经在相关研究中发挥了重要的作用^[42-44]。前期研究中，根据 10 个夏玉米观测站的观

测资料与田间试验数据,应用决定系数 (R^2)、归一化均方根误差 ($nRMSE$) 与相对误差 (RE) 等指标,已经实现了该模型对山东夏玉米生育时期与产量形成的较准确模拟,其中对出苗期、开花期和成熟期的模拟误差绝大多数站点均小于 5 d, R^2 分别在 0.43—0.99、0.77—0.99 与 0.51—0.99, $nRMSE$ 分别在 0.3%—1.9%、0.4%—2.3%与 0.7%—3.2%; 绝大多数观测站点产量模拟 R^2 在 0.68—0.99, RE 与 $nRMSE$ 均小于 10%^[36]。

1.3 干旱影响评价方法

针对轻旱、中旱与重旱,分别在苗期、穗期与花粒期设置连续干旱 3、5、10、15 与 20 d 共 5 个干旱处理,依据模拟得到的地上部总干物重 (TAGP)、总穗重 (TWSO)、总叶重 (TWLV)、总茎重 (TWST)

与最大叶面积指数 (MAXLAI) 等指标,分别与无旱状况下进行对比,从而明确不同程度干旱及其持续天数的影响。

2 结果

2.1 适宜阈值确定

依据试验数据,分别构建各年夏玉米苗期、穗期及花粒期受旱条件下的干物重与土壤相对湿度的二次回归拟合模型 (图 1—3)。结果表明,2013 与 2014 年夏玉米苗期适宜阈值范围分别为 62%—93% 和 61%—91%, 不适宜阈值范围分别为 <62% 和 <61%; 确定夏玉米苗期的适宜阈值范围为 62%—91%, 不适宜阈值范围为 <62%。2014 与 2015 年夏玉米穗期适宜阈值范围分别为 66%—95% 和 64%—92%,

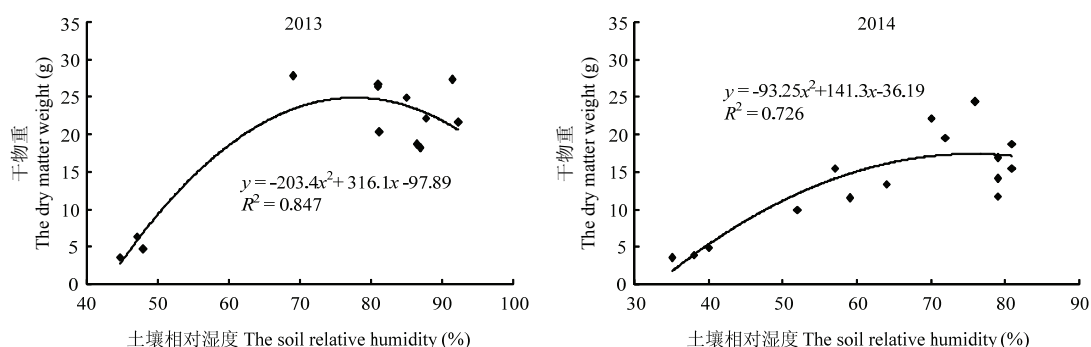


图 1 2013 与 2014 年夏玉米苗期干物重与土壤相对湿度关系 ($P < 0.05$)

Fig. 1 The relationship between dry matter weight and soil relative humidity at seedling stage of summer maize in 2013 and 2014 respectively ($P < 0.05$)

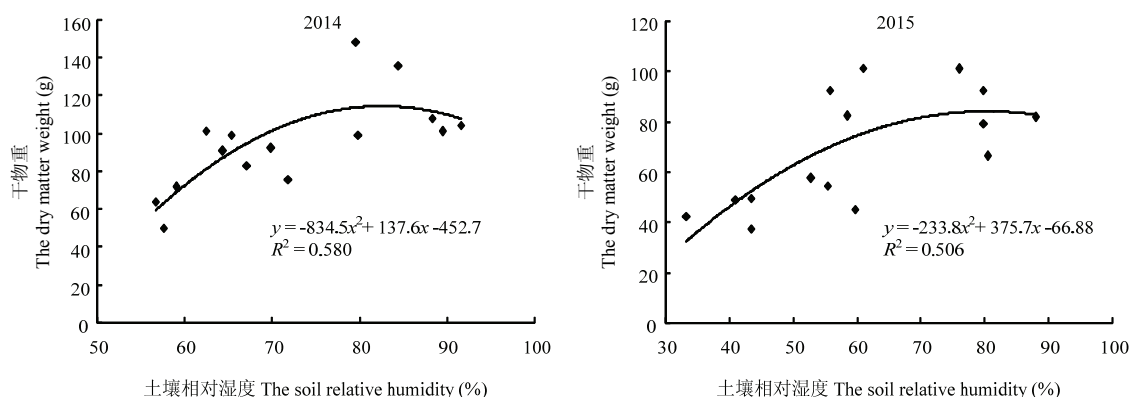


图 2 2014 与 2015 年夏玉米穗期干物重与土壤相对湿度关系 ($P < 0.05$)

Fig. 2 The relationship between dry matter weight and soil relative humidity at ear stage of summer maize in 2014 and 2015 respectively ($P < 0.05$)

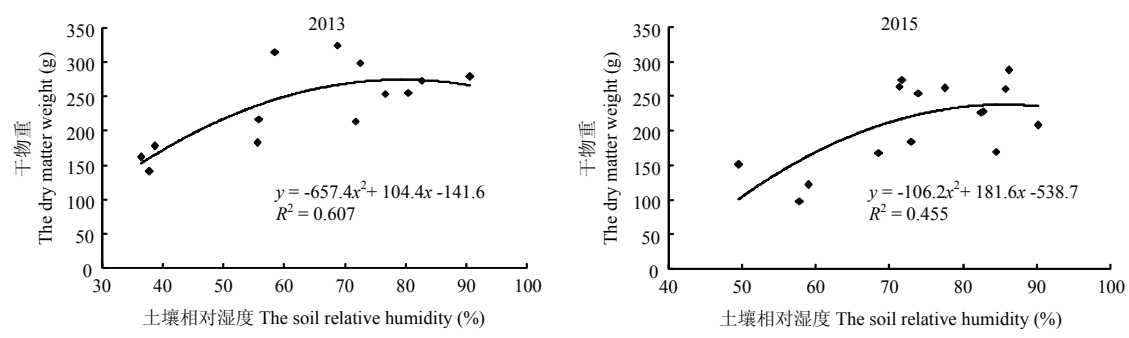


图 3 2013 与 2015 年夏玉米花粒期干物重与土壤相对湿度关系 ($P<0.05$)

Fig. 3 The relationship between dry matter weight and soil relative humidity at grain stage of summer maize in 2013 and 2015 respectively ($P<0.05$)

不适宜阈值范围分别为 <66%和<64%；确定夏玉米穗期的适宜阈值范围为 66%—92%，不适宜阈值范围为 <66%。2013 与 2015 年夏玉米花粒期适宜阈值范围分别为 64%—95%和 68%—94%，不适宜阈值范围分别为 <64%和<68%；确定夏玉米花粒期的适宜阈值范围为 68%—94%，不适宜阈值范围为 <68%（表 2）。

2.2 干旱阈值确定

根据田间试验结果得到不适宜的土壤相对湿度，是较粗略的范围，为进一步确定不同发育阶段的干旱阈值指标，根据减产率的变化，确定了无旱、轻旱、中旱与重旱的阈值指标。图 4 是夏玉米苗期、穗期与

表 2 各年不同发育阶段适宜与不适宜土壤相对湿度阈值范围

Table 2 The threshold range of soil relative humidity of suitable and unsuitable degree at different development stages of summer maize in 2013, 2014 and 2015 respectively (%)

生育时期	年份	适宜	不适宜
Growth stage	Year	Suitable threshold	Unsuitable threshold
苗期	2013	62-93	<62
Seedling stage	2014	61-91	<61
穗期	2014	66-95	<66
Ear stage	2015	64-92	<64
花粒期	2013	64-95	<64
Grain stage	2015	68-94	<68

花粒期土壤相对湿度单位变化引起的减产率变化，通过对各方程解析，确定夏玉米苗期无旱、轻旱、中旱与重旱阈值指标分别为 53%、50%、45%与 40%，穗期各程度干旱阈值指标分别为 58%、48%、43%与 37%，花粒期各程度干旱阈值指标分别为 57%、52%、49%与 45%（表 3）。

表 3 夏玉米不同发育期干旱阈值指标确定

Table 3 The drought threshold indexes at different development stages of summer maize (%)

生育时期	干旱程度	阈值指标
Growth stage	Degree of drought	Threshold indexes
苗期	无旱 No drought	53
	轻旱 Light drought	50
	中旱 Medium drought	45
	重旱 Severe drought	40
穗期	无旱 No drought	58
	轻旱 Light drought	48
	中旱 Medium drought	43
	重旱 Severe drought	37
花粒期	无旱 No drought	57
	轻旱 Light drought	52
	中旱 Medium drought	49
	重旱 Severe drought	45

2.3 干旱影响定量评价

在确定各发育阶段干旱阈值的基础上，对不同程度干旱及其不同持续天数的影响进行定量评价。以全省 10 个农业气象观测站的平均播种期与成熟期

为依据，确定夏玉米的发育期日序在 177—262。由此依据各生育期间的积温状况，确定苗期、穗期与花粒期的日序如表 4 所示，其中苗期在 177—196，穗期在 214—233，花粒期在 243—262。

表 4 夏玉米苗期、穗期与花粒期划定（日序）
Table 4 The determination of seedling stage, ear stage and grain stage of summer maize (Day of year)

生育时期	日序区间
Growth period	Interval of day of year
苗期 Seedling stage	177-196
穗期 Ear stage	214-233
花粒期 Grain stage	243-262

在此基础上，针对轻旱、中旱与重旱，分别在苗期、穗期与花粒期设置连续干旱 3、5、10、15 与 20 d 共 5 个干旱处理，依据模拟得到的地上部总干物重

（TAGP）、总穗重（TWSO）、总叶重（TWLV）、总茎重（TWST）与最大叶面积指数（MAXLAI）等指标，分别与无旱状况下进行对比。结果表明，随着轻旱持续天数的增加，各指标均表现为减少趋势，其中 TAGP 减少幅度在 3.2%—8.5%；TWLV 与 TWST 减幅分别在 3.9%—20.7%与 3.7%—18.4%；MAXLAI 减幅在 3.0%—17.6%；TWSO 减少幅度最小，且各持续天数间变化幅度不大，基本维持在 2.9%左右。同样，随着中旱持续天数的增加，TAGP 减幅在 1.7%—17.0%；TWLV 与 TWST 减幅分别为 5.7%—40.8%与 4.8%—36.6%；MAXLAI 减幅在 3.9%—37.1%；TWSO 减幅最小，随持续天数增加，最大减产幅度达 6.1%。随着重旱持续天数的增加，TAGP 减幅在 2.4%—31.8%；TWLV 与 TWST 减幅分别在 7.8%—60.1%与 6.7%—55.3%；MAXLAI 减幅在 5.5%—56.8%；TWSO 减幅在 0.2%—18.8%（表 5）。

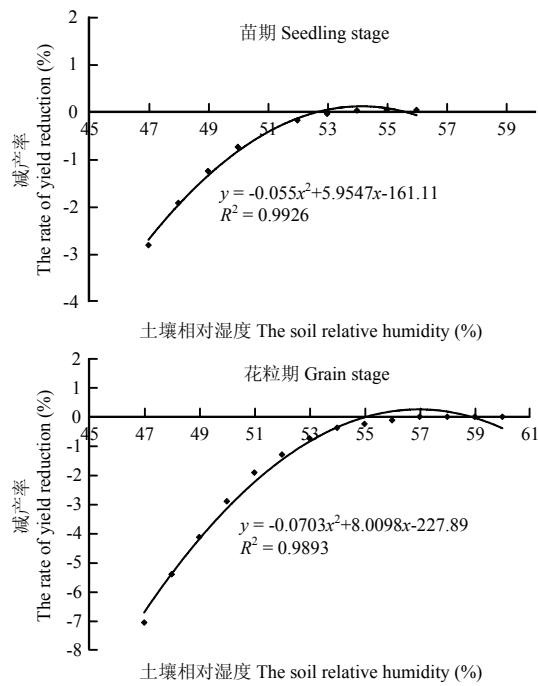


图 4 夏玉米减产率与苗期、穗期及花粒期土壤相对湿度单位变化的关系
Fig. 4 The relationship between yield reduction and unit change of soil relative humidity at seedling stage, ear stage and grain stage of summer maize

表 6 是穗期轻旱与中旱不同持续天数下，夏玉米各生长发育指标的变化程度。从中可以看出，随着轻旱持续天数的增加，各指标均表现为减少趋势，其中 TAGP 减幅在 1.1%—6.7%；TWLV 与 TWST 减幅分别在 3.0%—8.2%与 2.8%—7.8%；MAXLAI 减幅在 2.7%—9.9%；TWSO 减幅在 0.1%—6.0%。随着中旱持续天数的增加，TAGP 减幅在 2.4%—17.1%；TWLV 与 TWST 减幅分别在 6.7%—20.7%与 6.2%—19.9%；

MAXLAI 减幅在 6.1%—29.6%；TWSO 减幅在 0.4%—15.5%。

穗期是夏玉米营养生长到生殖生长过渡的关键时期，此时发生重旱，将导致夏玉米抽不出穗，形成不了最终产量。本研究结果表明，夏玉米重旱条件下，从持续 3 d 开始，到持续 20 d，各指标均无变化，即说明夏玉米穗期重旱发生，导致不能形成最终产量。

表 5 苗期轻旱、中旱与重旱不同持续天数的各指标变化程度

Table 5 The variation degree of each index of light drought, medium drought and severe drought with different duration days at seedling stage of summer maize (%)

干旱程度	干旱持续时间	TAGP	TWSO	TWLV	TWST	MAXLAI
Drought degree	Duration days of drought					
轻旱 Light drought	3 d	-3.2	-2.9	-3.9	-3.7	-3.0
	5 d	-3.7	-2.9	-5.7	-5.1	-4.4
	10 d	-4.5	-2.7	-8.6	-7.7	-6.9
	15 d	-6.1	-2.7	-13.8	-12.2	-11.3
	20 d	-8.5	-3.0	-20.7	-18.4	-17.6
中旱 Medium drought	3 d	-1.7	0.1	-5.7	-4.8	-3.9
	5 d	-3.0	0.0	-9.6	-8.2	-7.2
	10 d	-5.9	-0.5	-17.7	-15.3	-14.5
	15 d	-10.4	-2.2	-28.5	-25.1	-24.7
	20 d	-17.0	-6.1	-40.8	-36.6	-37.1
重旱 Severe drought	3 d	-2.4	0.0	-7.8	-6.7	-5.5
	5 d	-4.5	-0.2	-14.1	-12.1	-11.1
	10 d	-10.0	-1.9	-27.6	-24.3	-23.9
	15 d	-18.7	-7.2	-43.6	-39.2	-39.7
	20 d	-31.8	-18.8	-60.1	-55.3	-56.8

表中 TAGP、TWSO、TWLV、TWST、MAXLAI 分别代表地上部总干物重、总穗重、总叶重、总茎重与最大叶面积指数。下同
The abbreviation of TAGP, TWSO, TWLV, TWST and MAXLAI represent the total above ground production, total dry weight of storage organs, total dry weight of leaves, total dry weight of stems and maximum leaf area index, respectively. The same as below

表 6 穗期轻旱与中旱不同持续天数的各指标变化程度

Table 6 The variation degree of each index of light drought and medium drought with different duration days at ear stage of summer maize (%)

干旱程度	干旱持续时间	TAGP	TWSO	TWLV	TWST	MAXLAI
Drought degree	Duration days of drought					
轻旱 Light drought	3 d	-1.1	-0.1	-3.0	-2.8	-2.7
	5 d	-2.1	-0.3	-5.7	-5.4	-5.2
	10 d	-4.1	-2.5	-7.6	-7.0	-7.6
	15 d	-5.9	-4.9	-8.1	-7.6	-9.2
	20 d	-6.7	-6.0	-8.2	-7.8	-9.9
中旱 Medium drought	3 d	-2.4	-0.4	-6.7	-6.2	-6.1
	5 d	-5.1	-1.3	-13.1	-12.3	-13.4
	10 d	-10.6	-6.6	-19.2	-18.1	-23.0
	15 d	-14.8	-12.3	-20.3	-19.3	-27.6
	20 d	-17.1	-15.5	-20.7	-19.9	-29.6

表 7 是花粒期轻旱、中旱与重旱不同持续天数下，夏玉米各生长发育指标的变化程度。结果表明，随着轻旱持续天数的增加，各指标均表现为减少趋势，其中 TAGP 减幅在 0.7%—0.9%；TWLV 与 MAXLAI 均无变化；TWST 减幅为 0.2%—0.3%；TWSO 减幅在 1.1%—1.3%。同样，随着中旱持续天数的增加，各指标均表

现为减少趋势，其中 TAGP 减幅在 1.6%—2.9%；TWLV 与 MAXLAI 无变化；TWST 减幅为 0.5%—0.7%；TWSO 减幅在 2.3%—4.1%。随着重旱持续天数的增加，各指标均表现为减少趋势，其中 TAGP 减幅在 2.8%—7.8%；TWLV 减幅均为 0.1%；TWST 减幅为 0.8%—1.6%；MAXLAI 无变化；TWSO 减幅在 4.0%—11.3%。

表 7 花粒期轻旱、中旱与重旱不同持续天数的各指标变化程度

Table 7 The variation degree of each index of light drought, medium drought and severe drought with different duration days at grain stage of summer maize (%)

干旱程度	干旱持续时间	TAGP	TWSO	TWLV	TWST	MAXLAI
Drought degree	Duration days of drought					
轻旱 Light drought	3 d	-0.7	-1.1	0.0	-0.2	0.0
	5 d	-0.9	-1.3	0.0	-0.3	0.0
	10 d	-0.9	-1.3	0.0	-0.3	0.0
	15 d	-0.9	-1.3	0.0	-0.3	0.0
	20 d	-0.9	-1.3	0.0	-0.3	0.0
中旱 Medium drought	3 d	-1.6	-2.3	0.0	-0.5	0.0
	5 d	-2.1	-3.0	0.0	-0.6	0.0
	10 d	-2.4	-3.5	0.0	-0.7	0.0
	15 d	-2.8	-4.0	0.0	-0.7	0.0
	20 d	-2.9	-4.1	0.0	-0.7	0.0
重旱 Severe drought	3 d	-2.8	-4.0	-0.1	-0.8	0.0
	5 d	-4.0	-5.8	-0.1	-1.2	0.0
	10 d	-5.4	-7.8	-0.1	-1.4	0.0
	15 d	-6.8	-9.8	-0.1	-1.6	0.0
	20 d	-7.8	-11.3	-0.1	-1.6	0.0

综上，苗期干旱对夏玉米总叶重、总茎重与最大叶面积指数影响最大，穗期与花粒期干旱对总穗重影响最大，且穗期重旱将导致不能形成最终产量。

3 讨论

土壤相对湿度作为表征农业干旱的重要指标之一，可以综合反映土壤水分状况和地表水文过程的大部分信息^[45]，在准确预报农业干旱状况、农业抗旱减灾实践中得到了广泛应用^[46]，也是农业气象业务服务中最常用、最有效的指标之一，能够用于大田作物全生育期的土壤水分监测^[47]。相较于标准化降水指数（SPI）^[48]、作物水分亏缺指数（CWDI）^[49]等常用于干旱指标，土壤相对湿度更为直观，对于确定灌溉时间与灌溉量等具有较大的参考价值。

相关研究在设置控水试验时，以土壤相对湿度（55±5）%作为夏玉米轻度水分胁迫指标，（35±5）%作为重度水分胁迫指标，并以此为依据明确了夏玉米生长的光谱特征与植被指数等指标，在水分胁迫下的差异显著^[50]。该研究的控水设置与本文通过减产率确定的轻旱与重旱阈值指标基本一致，这在一定程度上反映了本文干旱阈值指标的有效性。同样，已有研究表明，土壤湿度在 70%—90%时，夏玉米苗期的光合速率和蒸腾速率受土壤水分影响很小，而当土壤湿度

低于 70%时，光合速率和蒸腾速率会迅速下降^[51]，这与本文确定的夏玉米苗期适宜土壤相对湿度范围也较为一致。

WOFOST 模型对发育期模拟的依据是“积温学说”，即作物完成某一发育进程，其所需的积温是一定的^[41]。在模拟过程中，当积温达到时，该发育期即开始，不受水分胁迫等影响。本文在评价干旱对其生长发育的影响过程中，也未考虑干旱对于发育期的影响，在之后的研究中，如要提高评估结果的准确性，还需要进一步考虑发育进程的可能变化范围。本文中夏玉米土壤湿度相关阈值的确定与前期 WOFOST 模型的本地化验证等，均是以田间土壤水分控制试验的结果为主要依据，受处理设置与样本容量等限制，对于更细致的阈值指标优化研究，可以结合更多的试验数据结果，并在业务工作中进行验证。

WOFOST 模型缺少对作物补偿效应的反映，即夏玉米受干旱胁迫影响后，各生长发育指标会降低，而复水后各指标又会升至正常水平^[44]。为此，针对模型补偿效应模块的建立或算法的调整等，将在下一步的工作中进行深入研究。

已有研究结果表明，在气候变暖的背景下，气温升高会导致田间蒸散量增加，土壤相对湿度随之明显下降^[52]，干旱出现频次及影响程度加大，最终影响作

物的生长发育进程与产量形成^[53-55]；在未来气候情景下，夏玉米生产仍将面临较大的干旱风险^[56]。在此背景下，希望本文的相关阈值指标与评估结果，能够为降低夏玉米干旱风险、提高资源利用效率等提供依据。但同时，土壤水分对夏玉米生长发育的影响，还受到气象因子、土壤肥力、土壤理化性质、种植管理方式等多因素的限制，再将本文确定的相关阈值应用到不同地区时，还需结合当地实际种植情况，对相关阈值指标进一步优化验证。

4 结论

本文以土壤相对湿度为指标，依据田间试验结果，确定了山东省夏玉米苗期适宜和不适宜的土壤相对湿度范围，分别为 62%—91%和<62%；穗期适宜和不适宜土壤相对湿度范围，分别为 66%—92%和<66%；花粒期适宜和不适宜土壤相对湿度范围，分别为 68%—94%和<68%。应用 WOFOST 作物机理模型，确定了夏玉米苗期无旱、轻旱、中旱与重旱阈值指标分别为 53%、50%、45%与 40%，穗期各程度干旱阈值指标分别为 58%、48%、43%与 37%，花粒期各程度干旱阈值指标分别为 57%、52%、49%与 45%。通过设置不同干旱程度及其持续时间，明确苗期干旱对夏玉米总叶重、总茎重与最大叶面积指数的影响最大；穗期与花粒期干旱对总穗重影响最大，对于产量形成的影响更为显著。

References

- [1] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.
Shandong Provincial Bureau of Statistics, Shandong Survey Team of National Bureau of Statistics. *Shandong Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.
National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)
- [3] GRAYSON M. Agriculture and drought. *Nature*, 2013, 501(7468): S1.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2013.
National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 王丽君. 黄淮海平原夏玉米季干旱、高温的发生特征及对产量的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
WANG L J. Spatiotemporal characteristics of drought, heat and its effect on yield for summer maize in Huang-Huai-Hai Plain, China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [6] 薛昌颖, 马志红, 胡程达. 近 40a 黄淮海地区夏玉米生长季干旱时空特征分析. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 1-14.
XUE C Y, MA Z H, HU C D. Spatiotemporal characteristics of drought during summer maize growing season in Huang-Huai-Hai area for recent 40 years. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(2): 1-14. (in Chinese)
- [7] 邱玉芳, 张丽娟, 郝甜甜, 张琳霞. 不同程度的干旱对华北夏玉米生物量的影响. 自然灾害学报, 2017, 26(1): 176-183.
QIU Y F, ZHANG L J, HAO T T, ZHANG L X. Effects of different degrees of drought on biomass of summer maize in north China. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(1): 176-183. (in Chinese)
- [8] 庄严, 梅旭荣, 龚道枝, 郝卫平, 栗雨勤, 柳斌辉, 武雪萍. 华北平原不同基因型夏玉米水分—产量响应关系. 中国农业气象, 2010, 31(1): 65-68.
ZHUANG Y, MEI X R, GONG D Z, HAO W P, LI Y Q, LIU B H, WU X P. Yield response of different genotypic maize to water in North China Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(1): 65-68. (in Chinese)
- [9] 万能涵, 杨晓光, 刘志娟, 何斌, 孙爽. 气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征(III): 华北地区夏玉米干旱. 中国农业气象, 2018, 39(4): 209-219.
WAN N H, YANG X G, LIU Z J, HE B, SUN S. Temporal and spatial variations of agro-meteorological disasters of main crops in China in a changing climate (III): Drought of summer maize in North China Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(4): 209-219. (in Chinese)
- [10] 孙景生, 肖俊夫, 段爱旺, 张淑敏, 张寄阳. 夏玉米耗水规律及水分胁迫对其生长发育和产量的影响. 玉米科学, 1999(2):46-49, 52.
SUN J S, XIAO J F, DUAN A W, ZHANG S M, ZHANG J Y. The effect of water consuming law and water stress on growth, development and yield of summer maize. *Journal of Maize Sciences*, 1999(2):46-49, 52. (in Chinese)
- [11] 肖俊夫, 刘战东, 陈玉民. 中国玉米需水量与需水规律研究. 玉米科学, 2008, 16(4): 21-25.
XIAO J F, LIU Z D, CHEN Y M. Study on the water requirement and water requirement regulation of maize in China. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 21-25. (in Chinese)
- [12] 白莉萍, 隋方功, 孙朝晖, 葛体达, 吕银燕, 周广胜. 土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响. 生态学报, 2004, 24(7): 1556-1560.
BAI L P, SUI F G, SUN C H, GE T D, LV Y Y, ZHOU G S. Effects of soil water stress on morphological development and yield of maize.

- Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1556-1560. (in Chinese)
- [13] 纪瑞鹏, 车宇胜, 朱永宁, 梁涛, 冯锐, 于文颖, 张玉书. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3021-3026.
- JI R P, CHE Y S, ZHU Y N, LIANG T, FENG R, YU W Y, ZHANG Y S. Impacts of drought stress on the growth and development and grain yield of spring maize in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3021-3026. (in Chinese)
- [14] 马旭凤, 于涛, 汪李宏, 石喜, 郑灵祥, 王密侠, 姚雅琴, 蔡焕杰. 苗期水分亏缺对玉米根系发育及解剖结构的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1731-1736.
- MA X F, YU T, WANG L H, SHI X, ZHENG L X, WANG M X, YAO Y Q, CAI H J. Effects of water deficit at seedling stage on maize root development and anatomical structure. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1731-1736. (in Chinese)
- [15] 陆伟婷, 于欢, 曹胜男, 陈长青. 近 20 年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(16): 3132-3145.
- LU W T, YU H, CAO S N, CHEN C Q. Effects of climate warming on growth process and yield of summer maize in Huang-Huai-Hai Plain in last 20 years. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16): 3132-3145. (in Chinese)
- [16] 齐伟, 张吉旺, 王空军, 刘鹏, 董树亭. 干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 48-52.
- QI W, ZHANG J W, WANG K J, LIU P, DONG S T. Effects of drought stress on the grain yield and root physiological traits of maize varieties with different drought tolerance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 48-52. (in Chinese)
- [17] 何海军, 寇思荣, 王晓娟. 干旱胁迫对不同株型玉米光合特性及产量性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(3): 63-66.
- HE H J, KOU S R, WANG X J. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and yield components of different plant types of corn. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(3): 63-66. (in Chinese)
- [18] 李清芳, 马成仓, 尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 531-536.
- LI Q F, MA C C, SHANG Q L. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 531-536. (in Chinese)
- [19] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 持续干旱及复水对玉米幼苗生理生化指标的影响研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3): 59-61.
- ZHAO L Y, DENG X P, SHAN L. Effects of progressive drying and rewatering on physiological and biochemical indicators in maize seedlings. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 59-61. (in Chinese)
- [20] 陈家宙, 王石, 张丽丽, 吕国安. 玉米对持续干旱的反应及红壤干旱阈值. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 532-539.
- CHEN J Z, WANG S, ZHANG L L, LV G A. Response of maize to progressive drought and red soil's drought threshold. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(3): 532-539. (in Chinese)
- [21] SADRAS V O, MILROY S P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Research*, 1996, 47: 253-266.
- [22] 孟兆江, 卞新民, 刘安能, 庞鸿宾, 王和洲. 调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 182-186.
- MENG Z J, BIAN X M, LIU A N, PANG H B, WANG H Z. Effect of regulated deficit irrigation on physiological and photosynthetic characteristics of summer maize and its optimized combination of agronomic techniques. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 182-186. (in Chinese)
- [23] 杨平, 张丽娟, 赵艳霞, 姜蓝齐, 乔赛男, 张晓慧. 黄淮海地区夏玉米干旱风险评估与区划. *中国生态农业学报*, 2015, 23(1): 110-118.
- YANG P, ZHANG L J, ZHAO Y X, JIANG L Q, QIAO S N, ZHANG X H. Risk assessment and zoning of drought for summer maize in the Huang-Huai-Hai region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1): 110-118. (in Chinese)
- [24] 肖俊夫, 刘战东, 刘祖贵, 南纪琴. 不同时期干旱和干旱程度对夏玉米生长发育及耗水特性的影响. *玉米科学*, 2011, 19(4): 54-58, 64.
- XIAO J F, LIU Z D, LIU Z G, NAN J Q. Effects of drought at different growth stages and different water availabilities on growth and water consumption characteristics of summer maize. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(4): 54-58, 64. (in Chinese)
- [25] 麻雪艳, 周广胜. 夏玉米苗期主要生长指标的土壤水分临界点确定方法. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1761-1768.
- MA X Y, ZHOU G S. A method to determine the critical soil moisture of growth indicators of summer maize in seedling stage. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(6): 1761-1768. (in Chinese)
- [26] 薛昌颖, 刘荣花, 马志红. 黄淮海地区夏玉米干旱等级划分. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 147-156.
- XUE C Y, LIU R H, MA Z H. Drought grade classification of summer maize in Huang-Huai-Hai area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16): 147-156. (in Chinese)
- [27] 米娜, 张玉书, 蔡福, 高莉莉, 纪瑞鹏, 于文颖, 郭宁. 土壤干旱胁迫

- 迫对作物影响的模拟研究进展. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2519-2526.
- MI N, ZHANG Y S, CAI F, GAO L L, JI R P, YU W Y, GUO N. Progress in the simulation of drought stress effect on crop production. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 2519-2526. (in Chinese)
- [28] 吴泽新, 王永久, 李曼华, 薛晓萍. 干旱胁迫对鲁西北夏玉米生长发育及产量的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 817-821.
- WU Z X, WANG Y J, LI M H, XUE X P. The effect of drought stress on the development and yield of summer maize in Northwest Shandong province. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2015, 46(6): 817-821. (in Chinese)
- [29] 刘建栋, 于强, 闵庆文, 李世奎, 毕建杰. 水分胁迫对黄淮海夏玉米农业气候资源利用的影响——II. 水分胁迫对区域生产力影响. 资源科学, 2002(3): 92-95.
- LIU J D, YU Q, MIN Q W, LI S K, BI J J. Impacts of water stress on agroclimatic resources of summer maize in Huanghe Huai Hai plain of China: Impact on regional productivity. *Resources Science*, 2002(3): 92-95. (in Chinese)
- [30] 徐英, 李曼华, 李辉, 姜鹏. 不同发育期的干旱对华北地区夏玉米生长发育及产量的影响. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 108-112.
- XU Y, LI M H, LI H, JIANG P. Effects of drought on the growth and yield of maize at different stages over the North China plain. *Journal of Meteorology and Environment*, 2017, 33(1): 108-112. (in Chinese)
- [31] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷). 北京: 气象出版社, 1993.
- State Meteorological Administration. *Specifications for Agrometeorological Observation (volume 1)*. Beijing: Meteorological Press, 1993. (in Chinese)
- [32] 马玉平, 孙琳丽, 俄有浩. 黄淮海夏玉米不同发育阶段对旱涝灾害的敏感性. 自然灾害学报, 2015, 24(6): 90-96.
- MA Y P, SUN L L, E Y H. Sensitivity of summer maize in different developmental stages in Huang-Huai-Hai plain to drought and waterlogging. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(6): 90-96. (in Chinese)
- [33] 黄振喜, 王永军, 王空军, 李登海, 赵明, 柳京国, 董树亭, 王洪军, 王军海, 杨京胜. 产量 15000 kg·ha⁻¹ 以上夏玉米关键期间的光合特性. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1898-1906.
- HUANG Z X, WANG Y J, WANG K J, LI D H, ZHAO M, LIU J G, DONG S T, WANG H J, WANG J H, YANG J S. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg·ha⁻¹. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1898-1906. (in Chinese)
- [34] DONG Z Q, PAN Z H, AN P L, ZHANG J T, ZHANG J, PAN Y Y, HUANG L, ZHAO H, HAN G L, WU D, WANG J L, FAN D L, GAO L, PAN X B. A quantitative method for risk assessment of agriculture due to climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 131: 653-659.
- [35] 曲曼丽. 农业气候实习指导. 北京: 北京农业大学出版社, 1991.
- QU M L. *The Practice Guidance of Agricultural Climate*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1991. (in Chinese)
- [36] 董智强, 王萌萌, 李鸿怡, 薛晓萍, 潘志华, 侯英雨, 陈辰, 李楠, 李曼华. WOFOST 模型对山东省夏玉米发育期与产量模拟的适用性评价. 作物杂志, 2019(5): 159-165.
- DONG Z Q, WANG M M, LI H Y, XUE X P, PAN Z H, HOU Y Y, CHEN C, LI N, LI M H. Applicability assessment of WOFOST model of growth and yield of summer maize in Shandong province. *Crops*, 2019(5): 159-165. (in Chinese)
- [37] 王锐, 李亚飞, 张丽娟, 王建林, 王志伟. 土壤湿度驱动 WOFOST 模型及其适应性. 中国农业气象, 2015, 36(3): 263-271.
- WANG R, LI Y F, ZHANG L J, WANG J L, WANG Z W. WOFOST model based on soil moisture driven and its adaptability. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(3): 263-271. (in Chinese)
- [38] 马玉平, 王石立, 王馥堂. 作物模拟模型在农业气象业务应用中的研究初探. 应用气象学报, 2005, 16(3): 293-303.
- MA Y P, WANG S L, WANG F T. A preliminary study on the application of crop simulation models in agrometeorological services. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(3): 293-303. (in Chinese)
- [39] PENNING D V F W T, JANSEN D M, TEN B H F M, BAKEMA A. *Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crop*. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1989.
- [40] BOOGAARD H L, DIEPEN C A, ROETTER R P, CABRERA J M C A, LAAR H H V. *User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5*. DLO Wageningen: Winand Staring Centre, 1998: 1-40.
- [41] 杨妍辰, 王建林, 宋迎波. WOFOST 作物模型机理及使用介绍. 气象科技进展, 2013, 3(5): 29-35.
- YANG Y C, WANG J L, SONG Y B. Introduction of WOFOST crop growth simulation model mechanism and its use. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(5): 29-35. (in Chinese)
- [42] 陈思宁, 赵艳霞, 申双和, 黎贞发. 基于 PyWOFOST 作物模型的东北玉米估产及精度评估. 中国农业科学, 2013, 46(14): 2880-2893.
- CHEN S N, ZHAO Y X, SHEN S H, LI Z F. Study on maize yield

- estimation and accuracy assessment based on PyWOFOST crop model in Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(14): 2880-2893. (in Chinese)
- [43] 栾庆祖, 叶彩华, 莫志鸿, 李超. 基于 WOFOST 模型的玉米干旱损失评估: 以北京为例. *中国农业气象*, 2014, 35(3): 311-316.
- LUAN Q Z, YE C H, MO Z H, LI C. Maize yield loss assessment for drought based on WOFOST model: A case study in Beijing. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(3): 311-316. (in Chinese)
- [44] 武荣盛, 吴瑞芬, 孙小龙, 田磊, 侯琼, 张超, 孙琳丽. 不同程度干旱对春玉米生物量和产量影响的模拟. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2482-2488.
- WU R S, WU R F, SUN X L, TIAN L, HOU Q, ZHANG C, SUN L L. Simulating the impact of drought on spring maize biomass and yield. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(9): 2482-2488. (in Chinese)
- [45] KUNSTMANN H, JUNG G, WAGNER S, CLOTTEY H. Integration of atmospheric sciences and hydrology for the development of decision support systems in sustainable water management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 33(1): 165-174.
- [46] 王富强, 王雷, 陈希. 郑州市土壤相对湿度变化特征及影响因素分析. *节水灌溉*, 2015(2): 8-11.
- WANG F Q, WANG L, CHEN X. Analysis of relative soil moisture variation characteristics and influencing factors in Zhengzhou City. *Water Saving Irrigation*, 2015(2): 8-11. (in Chinese)
- [47] ZHU G F, SHI P J, PU T, HE Y Q, ZHANG T, WANG P Z, PAN M H. Changes of surface soil relative moisture content in Hengduan Mountains, China, during 1992-2010. *Quaternary International*, 2013, 298(7): 161-170.
- [48] 吴霞, 王培娟, 公衍铎, 杨建莹. 1961—2015 年黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 189-199.
- WU X, WANG P J, GONG Y D, YANG J Y. Analysis of drought identification and spatio-temporal characteristics for summer corn in Huang-Huai-Hai Plain in year of 1961-2015. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(18): 189-199. (in Chinese)
- [49] 曹言, 王杰, 李尤亮, 王树鹏, 戚娜. 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, WANG S P, QI N. The spatial and temporal characteristics of drought during summer maize at different growth stages in Yunnan province based on crop water deficit index. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 97-106. (in Chinese)
- [50] 刘二华, 周广胜, 周莉. 不同干旱条件下夏玉米全生育期冠层吸收光合有效辐射比的高光谱遥感反演. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2021-2029.
- LIU E H, ZHOU G S, ZHOU L. Fraction of absorbed photosynthetically active radiation over summer maize canopy estimated by hyperspectral remote sensing under different drought conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 2021-2029. (in Chinese)
- [51] 张文丽, 张彤, 吴冬秀, 张岁岐, 山仑. 土壤逐渐干旱下玉米幼苗光合速率与蒸腾速率变化的研究. *中国生态农业学报*, 2006, 14(2): 72-75.
- ZHANG W L, ZHANG T, WU D X, ZHANG S Q, SHAN L. The changes of photosynthetic rate and transpiration rate of maize seedling under soil progressive drought. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(2): 72-75. (in Chinese)
- [52] 潘汉雄, 朱国锋, 张昱, 郭慧文, 雍磊磊, 万巧卓, 马惠莹, 李森. 中国耕地土壤相对湿度时空分异. *地理学报*, 2019, 74(1): 117-130.
- PAN H X, ZHU G F, ZHANG Y, GUO H W, YONG L L, WAN Q Z, MA H Y, LI S. Spatial and temporal variations of relative soil moisture in China's farmland. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 117-130. (in Chinese)
- [53] 姚永明, 陈玉琪, 张啟祥, 陈若礼. 淮北夏玉米生育期气候资源特点和增产栽培技术. *中国农业气象*, 2009, 30(S2): 205-209.
- YAO Y M, CHEN Y Q, ZHANG Q X, CHEN R L. Climate resources characteristics and the cultivated practice of increase yield of summer corn in the growth period in Huaibei. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(S2): 205-209. (in Chinese)
- [54] WHITE J W, HOOGENBOOM G, KIMBALL B A, WALL G W. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 357-368.
- [55] WANDAKA L M, MARIARA J K, KIMUYU P. Economic impact of climate change on maize production in Kenya. *American Journal of Agriculture*, 2017, 1(1): 37-50.
- [56] 潘聪聪. 黄淮海地区夏玉米干旱灾害风险评估及预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- FAN C C. Drought risk assessment and prediction of summer maize in the Huang-Huai-Hai Region[D]. Nanjing: Nanjing University of Information & Technology, 2018. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)