

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.

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*

李秀芬¹ 马树庆² 姜丽霞¹ 纪瑞鹏³
刘 静⁴ 李兴华⁵ 韩俊杰¹ 周永吉⁶

1 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030

2 吉林省气象台, 长春 130062

3 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016

4 宁夏回族自治区气象科学研究所, 银川 750004

5 内蒙古自治区气象服务中心, 呼和浩特 010051

6 黑龙江省气象数据中心, 哈尔滨 150030

提 要: 作物干旱等级农业气象指标是开展作物干旱监测、预警和评估的科学依据, 其适用性关系到农业气象业务质量和防灾减灾效果。应用东北地区 31 个春玉米代表站 1981—2012 年逐日气象资料、土壤湿度资料、玉米生长发育观测资料及产量资料, 对东北地区春玉米不同生育阶段土壤相对湿度和水分亏缺指数干旱等级指标进行应用效果检验, 比较适用性差异, 并利用黑龙江省 2013—2016 年的资料进行干旱实例分析。结果表明, 土壤湿度和水分亏缺指数干旱等级指标均适用于东北区域春玉米不同生长时段干旱识别, 且有较好的一致性, 两套指标判定的春玉米干旱等级完全相同的占 75% 左右, 相同和基本相同的占 95% 左右。两套指标对历史和近年玉米干旱事件的判识效果都较好, 土壤湿度指标和水分亏缺指数的干旱识别正确率分别在 80% 和 75% 以上, 土壤湿度指标判定效果更好。两套指标在玉米生育前、中期适宜性略好于后期, 在东北三省的应用效果要略好于内蒙古东部, 部分干旱年份水分亏缺指数判定的灾情等级偏高, 因此, 当两套指标判定结果存在差异时, 应以土壤相对湿度指标判定结果为准。

关键词: 东北地区, 春玉米, 干旱判识, 土壤湿度指标, 水分亏缺指数, 效果检验

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.011

Applicability Test of Two Common Indexes for Spring Maize Drought Grade in Northeast China

LI Xiufen¹ MA Shuqing² JIANG Lixia¹ JI Ruipeng³
LIU Jing⁴ LI Xinghua⁵ HAN Junjie¹ ZHOU Yongji⁶

1 Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030

2 Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062

3 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016

4 Institute of Meteorological Science of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750004

5 Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Service Center, Hohhot 010051

6 Meteorological Data Center of Heilongjiang Province, Harbin 150030

Abstract: Agrometeorological indicator of crop drought grade is the scientific basis for crop drought

* 中国气象局气候变化专项 (CCSF201606)、中国气象局核心业务发展专项 (CMAHX20160205) 和黑龙江省气象局重点项目 (HQZD2015002) 共同资助

2016 年 11 月 24 日收稿; 2017 年 8 月 7 日收修定稿

第一作者: 李秀芬, 主要从事农业气象业务和研究工作. Email: ge-2003@163.com

monitoring, early warning and assessment, and its applicability is related to the quality of agricultural meteorological service and the effect of disaster prevention and mitigation. By using daily meteorological data, soil relative moisture data, spring maize growth and development observation data and maize yield data in 1981—2012 from 31 spring maize representative stations in Northeast China, the application effect of soil moisture and water deficit index indicators for spring maize drought grade are tested, and their applicability differences are compared. By using the data from 2013 to 2016 in Heilongjiang Province, an example is analyzed. The results show that the soil moisture indicator and the water deficit index indicator are suitable for determining spring maize drought grades in different growth stages in Northeast China and they have good consistency. The same proportion of the two sets of indicators to determine the drought grade of spring maize is about 75%. The same and basically same proportion is about 95%. Identification effect of the two sets of indicators are good on the historic and recent maize drought events, the accuracy of drought identification by soil moisture indicator and water deficit index are above 80% and 75% respectively, and the identification effect of soil moisture indicator is better. The suitability of the two sets of indicators in early and mid stage is slightly better than that in later stage. The application effect in three provinces in Northeast China is better than that in East of Inner Mongolia. In some drought years, the drought grade determined by water deficit index is higher, so when the results determined by the two sets of indicators are different, it should be based on the results of the soil relative moisture indicator.

Key words: Northeast China, spring maize, drought identification, soil relative moisture indicator, crop water deficit index, effect test

引 言

玉米是中国三大粮食作物之一。1981—2012年玉米产量持续增长,其产量和面积的年均增长幅度显著高于小麦和水稻等其他粮食作物。2012年中国玉米总产量达到2.08亿t,种植面积达3494万 hm^2 ,无论是产量还是种植面积都超过水稻和小麦等其他粮食作物,成为产量最大的粮食作物(仇焕广等,2013)。北方春玉米种植区(包括黑龙江省、吉林省、辽宁省、宁夏回族自治区和内蒙古东部区的全部,山西省的大部,河北省、陕西省和甘肃省的一部分)是中国最大的玉米产区,玉米种植面积约占全国玉米种植面积的36%,而产量占全国玉米产量的40%(肖俊夫等,2010),在保障中国粮食安全中的地位非常突出。气候变化背景下,中国北方地区在普遍明显增温(秦大河,2009;董李丽等,2015)的同时,多数地区降水量呈下降趋势(邓振镛等,2010),进而导致气候变干,气象干旱和农业干旱呈常态化。北方春玉米虽然生长在雨季,但因其生育期长,需水量较大,加上降水量地域和年际间变化大,玉米生长季内干旱时有发生,严重干旱可导致减产2成以上,成为影响该地区玉米生产的重要因素(Campos et al,

2004;齐伟等,2010;杨若子和周广胜,2015)。因此,建立春玉米不同生育阶段的干旱指标,对开展精细化的干旱监测、预测及评估,以及采取适宜的措施防旱减灾都具有重要意义。

目前判识农业干旱的指标较多,有降水量指标、土壤含水量指标、作物旱情指标及综合性旱情指标等(王密侠等,1998;袁文平和周广胜,2004;姚玉璧等,2007;李柏楨和周广胜,2014;郭建平,2016)。降水量指标降水距平、标准化降水指数等,主要用于地下水位较深且无灌溉条件的半干旱、半湿润雨养农业区(黄晚华等,2010;谢五三和田红,2011;李树岩等,2012;杨晓晨等,2015),仅适用于平原且不能直接反映农作物遭受干旱的程度。供作物生长发育的水分主要靠根系从土壤中获取,因此基于广泛试验建立的土壤含水量指标(王宝英和张学,1996;张喜英等,2000;白莉萍等,2004;郑盛华和严昌荣,2006;侯玉虹等,2007;李北齐等,2009)地域普适性好,且能较好反映作物旱情状况的常用指标。作物旱情指标是目前国内外普遍认可的直接反映作物水分供应状况的最灵敏的指标(Duff et al,1997;宋凤斌和徐世昌,2004),利用作物生理生态特征的突变和最优分割理论而建立。这类指标可以分为作物形态指标(定性的利用作物长势、长相来进行作物缺水诊断)

和作物生理指标(叶水势、气孔导度、产量和冠层温度等)两大类。综合性旱情指标涉及与大气、作物和土壤有关的因子,全面反映了农业干旱的发生及其影响。其中,作物水分亏缺指数是目前应用较为广泛的指标之一,其综合考虑了土壤、植物和气象三方面因素的影响,能较好地反映各地作物生长季水分亏缺与旱情,更适用于农业干旱监测(张艳红等,2008)。董秋婷等(2011)、张淑杰等(2011)、高晓蓉等(2012)以作物水分亏缺指数为指标,分析了东北地区春玉米干旱时间变化及空间特征;董朝阳等(2013;2015)分析了中国北方地区春玉米各生育阶段干旱的年代际演变及空间分布规律,基于农业生产系统模型揭示了各生育阶段不同等级干旱对春玉米产量的影响;黄晚华等(2009)利用作物水分亏缺指数建立干旱等级指标,分析了湖南省春玉米季节性干旱时空特征;薛昌颖等(2014;2016)利用作物水分亏缺指数进行了黄淮海地区夏玉米不同生育阶段干旱等级划分,并验证了该指数用于黄淮海地区夏玉米生育期干旱监测的可行性和有效性。北方春玉米干旱指标研究较多,目前已初步形成了基于土壤湿度和水分亏缺指数的涵盖春玉米全生长季节的干旱等级指标体系(中国气象局,2015),但对于指标的比较和适用性检验少见报道。本文选取东北地区31个春玉米观测站,通过统计分析,对土壤湿度和水分亏缺指数两套春玉米干旱等级指标的一致性和适用性进行了检验,并探讨了两套指标的使用原则及提升干旱判定正确率的途径,以期为东北地区开展春玉米干旱灾害的监测、预测及定量评估提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文所指东北地区包括中国东北部的黑、吉、辽三省和内蒙古东部(呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市和兴安盟)(图1)。该地区位于东亚季风的最北端,南北纵跨纬度近 15° ,东西横跨经度近 20° ,属于温带大陆性季风气候,冬季低温干燥,夏季温暖多雨,无霜期130~170 d,全年降水量400~800 mm,其中60%集中在7—9月。该地区气候和土壤适宜种植玉米,是中国春玉米主产区和重要的商品粮基地(陈长青等,2011)。

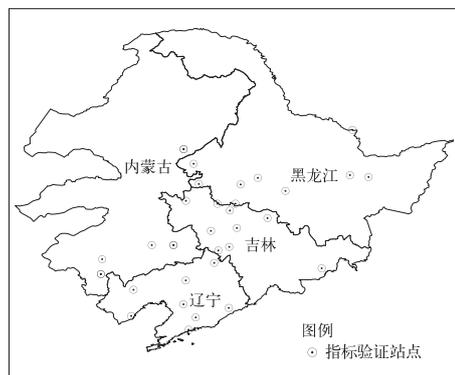


图1 研究区代表站点分布

Fig. 1 Locations of representative stations in the study area

1.2 数据来源

本着玉米种植面积比例大、且玉米发育期和气象资料序列较长的原则,选取31个站点代表春玉米主产区(图1),其中黑龙江省9个站、吉林省9个站、辽宁省8个站、内蒙古东部5个站,所选站点多位于东北黄金玉米带上。所用资料包括逐日气象资料(最高气温、最低气温、平均气温、降水量、日照时数、平均风速和水汽压)、历史干旱灾害资料(来源于中国气象数据网、中国气象灾害大典和气象灾害普查数据库)、春玉米地面观测资料(玉米发育期和生长状况资料)和产量资料、土壤湿度资料(0~50 cm,每10 cm为一层的土壤相对湿度;干土层厚度)及灌溉量资料。资料年限多为1981—2016年,其中1981—2012年资料用于计算分析,2013—2016年资料用于验证。

1.3 干旱等级指标

土壤湿度和水分亏缺指数春玉米干旱等级指标是在考虑了指标的普适性、实用性和资料获取的难易程度的基础上,在已有干旱指标的基础上,通过修订或改进而形成的。根据春玉米干旱发生及影响程度,将北方春玉米干旱分为无旱、轻旱、中旱、重旱和特旱5个等级,干旱时段按玉米生育阶段分为播种—出苗、出苗—拔节、拔节—抽雄、抽雄—乳熟和乳熟—成熟5个时段,其中前2个时段属于春旱,中间2个时段为夏旱,后1个时段为秋旱,需分别确定各时段的干旱等级指标。

1.3.1 土壤湿度指标

土壤湿度是土壤水分状况的直接反映,其干旱

指标普适性好。综合已有的研究成果可以看出,尽管各研究在生育阶段和等级划分上略有差异,但各生育阶段适宜土壤相对湿度指标的下限范围趋于一致。由于玉米种子发芽(播种—出苗)对水分要求较高,适宜的土壤相对湿度也略高,其适宜下限范围为 65%~75%;苗期(出苗—拔节)具有较强的抗旱能力,适宜土壤相对湿度范围低于其他生育阶段,为 55%~60%;拔节—抽雄期需水量剧增,抽雄前 10 d 和后 20 d 是玉米需水关键期,也是需水高峰期,因此拔节—抽雄和抽雄—乳熟期适宜的土壤相对湿度范围较高,而抽雄—乳熟期对于水分的要求及敏感

度高于拔节—抽雄期(白向历等,2009;侯琼等,2015;王俊强等,2016),拔节—抽雄期为 70%左右,抽雄—乳熟期为 75%~80%;乳熟后需水量逐渐减少,适宜指标范围降低,乳熟—成熟期在 70%左右。由于不同土壤质地间持水能力的差异、春玉米各发育阶段因根系发育程度以及春玉米不同生育阶段对水分的敏感程度差异,达到各级干旱程度的土壤湿度范围也不尽相同。表 1(中国气象局,2015)给出了不同土壤质地、不同生育阶段各干旱等级的土壤湿度指标。

表 1 基于土壤相对湿度(R)的春玉米干旱等级指标(单位:%)

Table 1 Drought indexes of spring maize based on soil relative moisture (unit:%)

土壤质地	干旱等级	播种—出苗	出苗—拔节	拔节—抽雄	抽雄—乳熟	乳熟—成熟
黏土	无旱	$R > 70$	$R > 65$	$R > 75$	$R > 80$	$R > 70$
	轻旱	$60 < R \leq 70$	$55 < R \leq 65$	$65 < R \leq 75$	$70 < R \leq 80$	$60 < R \leq 70$
	中旱	$50 < R \leq 60$	$45 < R \leq 55$	$55 < R \leq 65$	$60 < R \leq 70$	$50 < R \leq 60$
	重旱	$40 < R \leq 50$	$35 < R \leq 45$	$45 < R \leq 55$	$50 < R \leq 60$	$40 < R \leq 50$
	特旱	$R \leq 40$	$R \leq 35$	$R \leq 45$	$R \leq 50$	$R \leq 40$
壤土	无旱	$R > 65$	$R > 60$	$R > 70$	$R > 75$	$R > 65$
	轻旱	$55 < R \leq 65$	$50 < R \leq 60$	$60 < R \leq 70$	$65 < R \leq 75$	$55 < R \leq 65$
	中旱	$45 < R \leq 55$	$40 < R \leq 50$	$50 < R \leq 60$	$55 < R \leq 65$	$45 < R \leq 55$
	重旱	$35 < R \leq 45$	$30 < R \leq 40$	$40 < R \leq 50$	$45 < R \leq 55$	$35 < R \leq 45$
	特旱	$R \leq 35$	$R \leq 30$	$R \leq 40$	$R \leq 45$	$R \leq 35$
砂土	无旱	$R > 60$	$R > 55$	$R > 65$	$R > 70$	$R > 60$
	轻旱	$50 < R \leq 60$	$45 < R \leq 55$	$55 < R \leq 65$	$60 < R \leq 70$	$50 < R \leq 60$
	中旱	$40 < R \leq 50$	$35 < R \leq 45$	$45 < R \leq 55$	$50 < R \leq 60$	$40 < R \leq 50$
	重旱	$30 < R \leq 40$	$25 < R \leq 35$	$35 < R \leq 45$	$40 < R \leq 50$	$30 < R \leq 40$
	特旱	$R \leq 30$	$R \leq 25$	$R \leq 35$	$R \leq 40$	$R \leq 30$

1.3.2 水分亏缺指数指标

作物水分亏缺率是一定时段内外界供水量与作物需水量的差占作物需水量的比例(单位:%),水分亏缺指数(或缺水指数)是水分亏缺率在末段时期的累积。作为研究农业干旱的综合性指标之一,水分亏缺指数综合考虑了土壤、植物、气象三方面因素的影响,能较好地反映各站点主要生长季作物水分亏缺与农业干旱情况,对监测不同区域的农业干旱具有较好的适用性(张艳红等,2008)。基于水分亏缺指数的

春玉米干旱等级指标见表 2(中国气象局,2015)。

水分亏缺指数反映一段时间内的作物水分亏缺状况,本文以 10 d 为一个时间单位,根据 GB/T 32136—2015(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,2015)、QX/T 259—2015(中国气象局,2015)及黄晚华等(2009)提出的计算方法和参数,分步计算春玉米不同生育阶段逐日累计水分亏缺指数,再将各生育阶段内每日累计水分亏缺指数进行平均,得到生育阶段平均

表 2 同表 1,基于水分亏缺指数(K_{CWDI})

Table 2 Same as Table 1, but based on water deficit index

干旱等级	播种—出苗	出苗—拔节	拔节—抽雄	抽雄—乳熟	乳熟—成熟
无旱	$K_{CWDI} \leq 45$	$K_{CWDI} \leq 50$	$K_{CWDI} \leq 35$	$K_{CWDI} \leq 35$	$K_{CWDI} \leq 50$
轻旱	$45 < K_{CWDI} \leq 60$	$50 < K_{CWDI} \leq 65$	$35 < K_{CWDI} \leq 50$	$35 < K_{CWDI} \leq 45$	$50 < K_{CWDI} \leq 60$
中旱	$60 < K_{CWDI} \leq 70$	$65 < K_{CWDI} \leq 75$	$50 < K_{CWDI} \leq 60$	$45 < K_{CWDI} \leq 55$	$60 < K_{CWDI} \leq 70$
重旱	$70 < K_{CWDI} \leq 80$	$75 < K_{CWDI} \leq 85$	$60 < K_{CWDI} \leq 70$	$55 < K_{CWDI} \leq 65$	$70 < K_{CWDI} \leq 80$
特旱	$K_{CWDI} > 80$	$K_{CWDI} > 85$	$K_{CWDI} > 70$	$K_{CWDI} > 65$	$K_{CWDI} > 80$

水分亏缺指数 K_{CWDI} 。

1.4 检验方法

计算代表站春玉米各生育阶段平均土壤相对湿度和水分亏缺指数,进行相关分析,并根据给定的指标进行春玉米干旱等级判定,统计两套指标各生育阶段干旱等级判定结果的差别,以验证土壤相对湿度指数与水分亏缺指数干旱等级指标的一致性。以指标判定的干旱等级与历史干旱发生情况对比,统计各指标判定干旱发生与否的正确率(f), $f=(\text{正确年数}/\text{总年数})\times 100$ 。有干旱等级记录的年份以记录为准,无明确干旱等级记录的年份,则利用春玉米干旱农田及作物形态表征界定各年各阶段发生干

旱等级情况(中国气象局,2015;中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2015)。 f 值越大,表明干旱等级指标比较客观和科学。

2 结果与分析

2.1 两套指标判定玉米干旱事件的正确率

2.1.1 土壤湿度指标春玉米干旱等级判定的正确率

各代表县(市)平均正确率为 87%,多数为 85%以上(表 3),其中播种—出苗阶段为 87.6%,出苗—

表 3 代表县(市)不同阶段土壤湿度(R)和水分亏缺指数(K_{CWDI})指标判定春玉米干旱等级的正确率(单位:%)

Table 3 Accuracy of defining spring maize drought grade with soil moisture and crop water deficit index indicators in different growth stages in the representative counties/cities (unit:%)

省	站名	播种—出苗		出苗—拔节		拔节—抽雄		抽雄—乳熟		乳熟—成熟	
		R	K_{CWDI}								
黑龙江	嘉荫	94.4	88.9	88.9	80.6	83.3	83.3	86.1	75.0	94.4	94.4
	龙江	90.6	82.8	87.5	92.2	87.5	84.4	84.4	82.8	84.4	81.3
	泰来	84.4	81.3	89.1	90.6	90.6	87.5	87.5	85.9	92.2	87.5
	青冈	91.4	86.2	86.2	89.7	91.4	81.0	82.8	84.5	93.1	82.8
	安达	89.5	86.8	94.7	89.5	97.4	86.8	81.6	76.3	89.5	84.2
	巴彦	86.7	86.7	93.3	86.7	90.0	86.7	90.0	83.3	95.0	90.0
	佳木斯	93.8	91.7	91.7	95.8	87.5	75.0	95.8	87.5	95.8	91.7
	集贤	93.3	95.0	86.7	86.7	86.7	80.0	88.3	85.0	96.7	90.0
	肇源	91.3	89.1	80.4	89.1	91.3	84.8	84.8	89.1	87.0	82.6
吉林	白城	88.4	82.0	92.0	88.0	84.0	68.0	84.0	66.0	82.0	66.0
	大安	73.9	76.1	87.0	82.6	84.8	76.1	82.6	80.4	87.0	78.3
	松原	90.7	88.9	96.3	92.6	94.4	85.2	90.7	85.2	88.9	83.3
	长岭	85.9	84.4	79.7	76.6	85.9	78.1	81.3	78.1	75.0	70.3
	农安	82.8	86.2	89.7	87.9	77.6	74.1	86.2	82.8	89.7	75.9
	榆树	89.3	87.5	85.7	85.7	83.9	67.9	87.5	76.8	92.9	91.1
	梨树	89.3	82.1	85.7	85.7	89.3	73.2	87.5	78.6	96.4	83.9
	公主岭	95.0	85.0	90.0	90.0	90.0	82.5	82.5	85.0	90.0	92.5
	和龙	95.0	90.0	95.0	85.0	80.0	85.0	85.0	87.5	95.0	90.0
辽宁	昌图	86.1	80.6	88.9	88.9	88.9	86.1	88.9	80.6	94.4	88.9
	朝阳	76.0	80.0	80.0	84.0	84.0	78.0	86.0	72.0	84.0	86.0
	新民	90.4	92.3	88.5	88.5	86.5	78.8	86.5	82.7	84.6	82.7
	绥中	84.4	81.3	90.6	87.5	78.1	71.9	82.8	81.3	89.1	87.5
	庄河	91.3	89.1	82.6	82.6	87.0	84.8	80.4	84.8	87.0	91.3
	宽甸	93.3	93.3	93.3	80.0	93.3	96.7	96.7	93.3	93.3	93.3
	海城	92.9	92.9	85.7	89.3	85.7	71.4	78.6	82.1	96.4	92.9
	岫岩	80.0	80.0	86.7	86.7	83.3	86.7	93.3	86.7	93.3	90.0
内蒙古东部	扎兰屯	87.5	73.4	87.5	71.9	81.3	70.3	86.6	87.5	92.2	81.3
	通辽	81.8	71.2	81.8	78.8	84.4	71.9	79.7	84.4	89.1	81.3
	开鲁	89.1	81.3	71.9	75.0	75.0	59.4	86.4	68.8	87.5	91.3
	翁牛特旗	80.0	78.3	90.0	80.0	78.3	80.0	88.3	83.3	83.3	80.0
	赤峰	78.3	73.3	79.0	71.0	83.9	74.2	80.6	72.6	84.1	74.2
平均	87.6	84.4	87.3	85.1	86.0	79.0	85.9	86.1	89.8	85.0	

拔节阶段为 87.3%,拔节—抽雄阶段为 86.0%,抽雄—乳熟阶段为 85.9%,乳熟—成熟阶段为 89.8%。总体正确率虽较高,但存在一定的区域差异和阶段差异。综合准确率由高到低依次是黑龙江省、辽宁省、吉林省和内蒙古东部。播种—出苗阶段最大正确率为 95.0%(公主岭、和龙),最小正确率为 73.9%(大安);出苗—拔节阶段最大为 96.3%(松原),最小为 71.9%(开鲁);拔节—抽雄阶段最大正确率为 97.4%(安达),最小为 75.0%(开鲁);抽雄—乳熟阶段最大正确率为 96.7%(宽甸),最小为 78.6%(海城);乳熟—成熟阶段最大正确率为 96.7%(集贤),最小为 75.0%(长岭)。内蒙古东部开鲁出苗—拔节、拔节—抽雄阶段正确率均较低。

2.1.2 水分亏缺指数指标春玉米干旱等级判定的正确率

各代表县(市)平均正确率为 83.1%,多数为 80%以上(表 3),其中播种—出苗阶段为 84.4%,出苗—拔节阶段为 85.1%,拔节—抽雄阶段为 79.0%,抽雄—乳熟阶段为 86.1%,乳熟—成熟阶段为 85.0%。播种—出苗阶段最大正确率为 95.0%(集贤),最小正确率为 71.2%(通辽);出苗—拔节阶段最大为 95.8%(佳木斯),最小为 71.0%(赤峰);拔节—抽雄阶段最大正确率为 96.7%(宽甸),最小为 59.4%(开鲁);抽雄—乳熟阶段最大正确率为 93.3%(宽甸),最小为 66.0%(白城);乳熟—成熟阶段最大正确率为 94.4%(嘉荫),最小为 66.0%(白城),拔节—抽雄、播种—出苗阶段的正确率总体低于其他阶段。各阶段正确率存在一定的区域差异。播种—出苗、拔节—抽雄、抽雄—乳熟三个阶段的平均准确率从大到小依次为黑龙江省、辽宁省、吉林省和内蒙古东部,出苗—拔节阶段的平均准确率从大到小依次为黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古东部,乳熟—成熟阶段的平均准确率从大到小依次为辽宁省、黑龙江省、吉林省、内蒙古东部。内蒙古东部赤峰各阶段正确率均较低。

总的来看,两套指标判别干旱的正确率都较高,且在不同生育期间差异不大。东北三省的正确率略高于内蒙古东部,土壤湿度指标的正确率略高于水分亏缺指标,表明土壤湿度指标更适用,也可能是灌溉等因素对水分亏缺指标的适用性有一定影响。

2.2 两种干旱指标的一致性验证

基于 31 个站点的土壤相对湿度资料 and 水分亏

缺指数,计算播种—出苗阶段 0~20 cm 土层、其他生育阶段 0~50 cm 土层平均湿度和各阶段水分亏缺指数,分析两者之间的关系。结果表明,春玉米各生育阶段对应土层相对湿度与水分亏缺指数均呈显著的线性关系,31 个站点中除个别站点的个别生育阶段平均土壤相对湿度与水分亏缺指数的相关性通过 0.05 显著性水平检验外,其他各站各阶段均通过了 0.01 显著性水平检验(表 4)。两套指标存在显著的负相关关系,土壤相对湿度越小,对应的水分亏缺指数越大,缺水情况越严重,干旱等级越高。图 2 给出了部分代表站点 5 个阶段的土壤相对湿度与水分亏缺指数之间的对应关系。

利用土壤湿度和水分亏缺指数指标判定春玉米干旱等级,两套指标判定结果完全一致的比率(级别差 $D=0$),等级判别趋势正确但相差 1 级的比率($D=1$)见表 5。可以看出,研究区域内多数县(市)两套指标判定结果完全一致的比率在 74%左右,部分在 90%以上,趋势正确但相差 1 个级别的在 20%左右,即两套指标判别干旱等级一致和基本一致的占 95%左右,表明两套指标一致性较好。相对而言,东北三省两套指标的完全一致性要好于内蒙古东部,可能是后者灌溉条件相对较好所致。玉米播种—出苗、出苗—拔节、乳熟—成熟 3 个阶段两套指标判别干旱等级的完全一致性要好于拔节—抽雄和抽雄—乳熟 2 个阶段,可能与拔节—抽雄、抽雄—乳熟 2 个阶段的时间间隔较长,且干旱等级判识指标采用的是平均值有关。个别县(市)、个别季节两套指标判别干旱等级一致性较差,如内蒙古东部赤峰部分生长时期完全吻合度不足 50%,相同和基本吻合度不足 80%,主要是部分干旱年份水分亏缺指数判定的灾情等级偏高,这可能与灌溉情况掌握不完全有关,也不排除历史干旱记录和产量测定的随机误差。

2.3 两套干旱等级指标适用效果验证

以黑龙江省为例,计算 9 个站 2013—2016 年春玉米各生育阶段土壤相对湿度和水分亏缺指数,并依据干旱等级指标判定干旱等级。参照马树庆等(2015)方法,干旱等级与实际干旱等级相同的为正确,记为 1;两者相差一个级别的为半对,记为 0.5;相差 2 个级别或相反的为错误,记为 0。土壤湿度指标判定 2013—2016 年黑龙江省各代表县(市)春玉米各生育阶段干旱等级的正确率较高(表 6),多数县(市)的判定结果与实际相符,播种—出苗阶段

表 4 代表县(市)土壤相对湿度(R)与水分亏缺指数(K_{CWDI})的相关性
Table 4 Correlation between soil relative moisture and crop water deficit index
in the representative counties/cities

省	站名	样本数	土壤质地	播种—出苗	出苗—拔节	拔节—抽雄	抽雄—乳熟	乳熟—成熟
黑龙江	嘉荫	18	壤土	-0.7696**	-0.5620*	-0.7426**	-0.8479**	-0.9098**
	龙江	32	壤土	-0.6185**	-0.7192**	-0.8526**	-0.8566**	-0.7744**
	泰来	32	壤砂土	-0.8866**	-0.6318**	-0.9263**	-0.9526**	-0.9069**
	青冈	31	黏土	-0.5771**	-0.6656**	-0.6971**	-0.8349**	-0.8240**
	安达	18	黏土	-0.8056**	-0.8573**	-0.8607**	-0.7169**	-0.6921**
	巴彦	32	壤土	-0.7749**	-0.6316**	-0.7426**	-0.7192**	-0.6552**
	佳木斯	24	黏土	-0.7610**	-0.4599*	-0.6636**	-0.8119**	-0.6523**
	集贤	30	壤土	-0.6050**	-0.6329**	-0.7994**	-0.7984**	-0.8508**
	肇源	31	壤土	-0.8726**	-0.7606**	-0.9187**	-0.8676**	-0.8456**
吉林	白城	31	黏土	-0.8740**	-0.6046**	-0.7649**	-0.7707**	-0.8689**
	大安	23	壤土	-0.7463**	-0.6964**	-0.8019**	-0.7994**	-0.6885**
	松原	27	壤土	-0.8713**	-0.7167**	-0.9407**	-0.8052**	-0.8006**
	长岭	32	黏土	-0.7113**	-0.6602**	-0.8068**	-0.8522**	-0.8019**
	农安	29	壤土	-0.8898**	-0.7820**	-0.7071**	-0.8432**	-0.7014**
	榆树	28	黏土	-0.8749**	-0.6242**	-0.6921**	-0.7994**	-0.8142**
	梨树	29	黏土	-0.8509**	-0.6841**	-0.8491**	-0.8689**	-0.6364**
	公主岭	21	壤土	-0.7450**	-0.5675**	-0.7912**	-0.6603**	-0.8006**
	和龙	21	黏土	-0.5466*	-0.4394*	-0.5797**	-0.6148**	-0.6488**
辽宁	昌图	18	黏土	-0.8196**	-0.6731**	-0.7723**	-0.725**	-0.6261**
	朝阳	25	壤土	-0.6580**	-0.6516**	-0.7720**	-0.8707**	-0.7725**
	新民	32	壤土	-0.7078**	-0.6436**	-0.6294**	-0.6602**	-0.7790**
	绥中	32	壤土	-0.8212**	-0.6704**	-0.6349**	-0.6427**	-0.6641**
	庄河	23	壤土	-0.6738**	-0.5532**	-0.8758**	-0.7470**	-0.7470**
	宽甸	15	壤土	-0.6496**	-0.6678**	-0.8701**	-0.7836**	-0.7849**
	海城	14	壤土	-0.7629**	-0.6309*	-0.6826**	-0.8198**	-0.6907**
	岫岩	15	壤土	-0.8031**	-0.5514*	-0.8337**	-0.8390**	-0.5311*
内蒙古东部	扎兰屯	32	壤土	-0.5638**	-0.5572**	-0.7579**	-0.8430**	-0.8417**
	通辽	32	壤砂土	-0.6510**	-0.5567**	-0.6589**	-0.8753**	-0.8055**
	开鲁	32	壤土	-0.5953**	-0.5546**	-0.6449**	-0.8531**	-0.7168**
	翁牛特旗	30	壤砂土	-0.3922*	-0.4947**	-0.7560**	-0.8503**	-0.7881**
	赤峰	32	壤土	-0.6358**	-0.5442**	-0.7302**	-0.8175**	-0.7063**

注: * 和 ** 分别表示通过 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 显著性水平检验。

Note: * and ** denote those having passed the significance test at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

平均为 91.7%，出苗—拔节阶段平均为 87.5%，拔节—抽雄阶段平均为 84.7%，抽雄—乳熟阶段平均为 84.7%，乳熟—成熟阶段平均为 93.1%。水分亏缺指数指标判定的 2013—2016 年黑龙江省各代表县(市)春玉米各生育阶段干旱等级的正确率(表 7)，播种—出苗阶段平均为 73.6%，出苗—拔节阶段平均为 86.1%，拔节—抽雄阶段平均为 81.9%，抽雄—乳熟阶段平均为 73.6%，乳熟—成熟阶段平均为 88.9%。各阶段干旱等级判定平均准确率均小于土壤湿度指标的判定结果，且以播种—出苗阶段的偏差最大，部分县(市)干旱等级判定正确率不足 70%。

3 结论与讨论

(1) 春玉米各生育阶段土壤相对湿度与水分亏缺指数均呈显著的负相关。利用土壤相对湿度和水分亏缺指数两套指标判别干旱等级一致和基本一致的比例可达 95%。相对而言，比较土壤相对湿度和水分亏缺指数两套指标判别干旱等级的一致性，东北三省好于内蒙古东部。但个别县(市)、个别季节两套指标判别干旱等级一致性较差，内蒙古东部部分干旱年份水分亏缺指数判定的灾情等级偏高。

(2) 土壤湿度指标判定的各代表县(市)干旱等

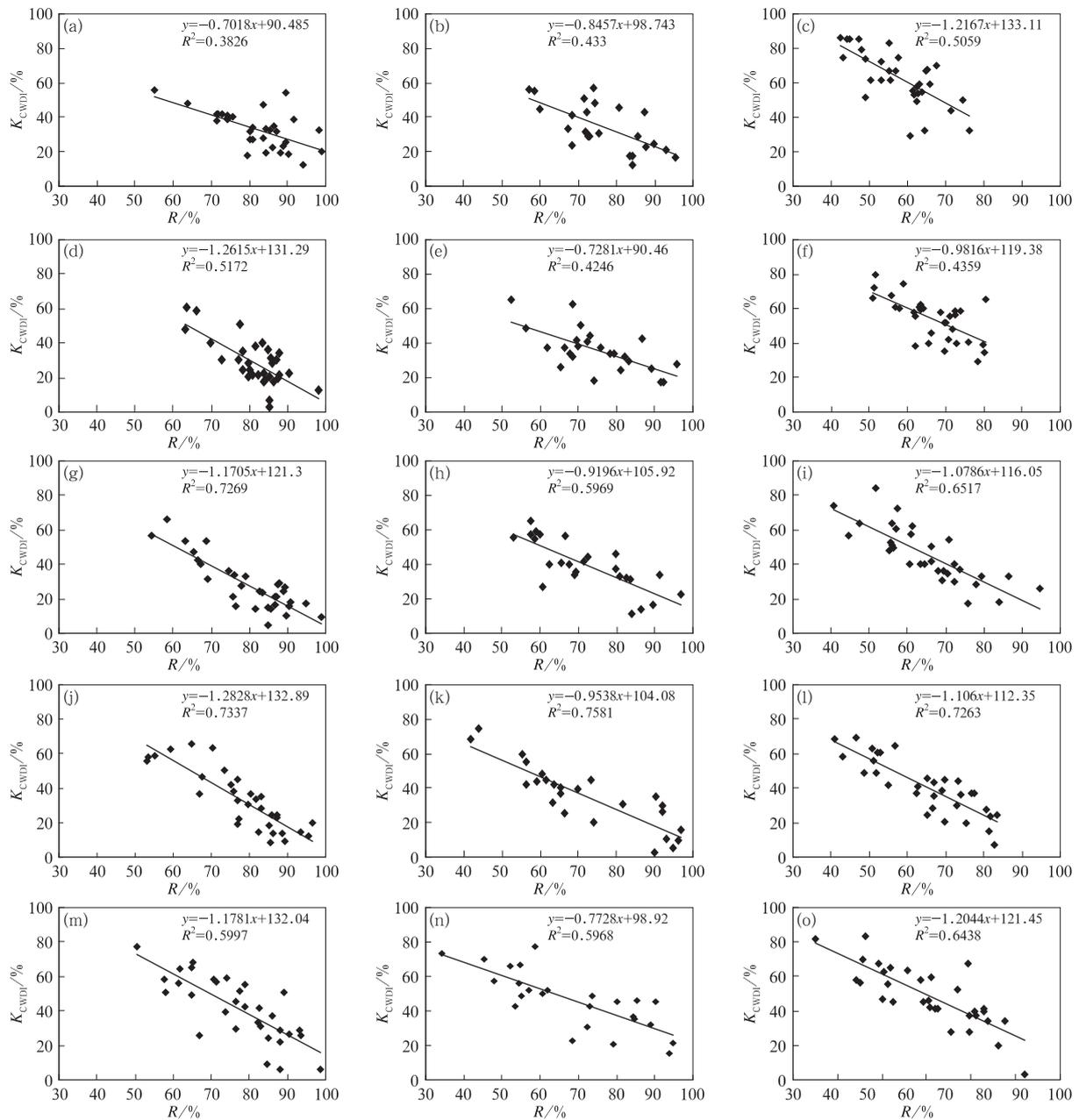


图 2 黑龙江龙江(a, d, g, j, m)、辽宁朝阳(b, e, h, k, n)和吉林长岭(c, f, i, l, o)春玉米不同生育阶段平均土壤相对湿度(R)与作物水分亏缺指数(K_{CWDI})的关系图 (a~c)播种—出苗, (d~f)出苗—拔节, (g~i)拔节—抽雄, (j~l)抽雄—乳熟, (m~o)乳熟—成熟

Fig. 2 Relationship of average soil relative humidity and crop water deficit index in different growth stages of spring maize in Longjiang of Heilongjiang Province (a, d, g, j, m), Chaoyang of Liaoning Province (b, e, h, k, n) and Changling of Jilin Province (c, f, i, l, o) (a, b, c) sowing—emergence, (d, e, f) emergence—jointing, (g, h, i) jointing—tasseling, (j, k, l) tasseling—milking, (m, n, o) milking—maturity

级判定的平均正确率为 87%，多数为 85% 以上；水分亏缺指数指标春玉米干旱等级判定的平均正确率为 83.1%，多数为 80% 以上。总的来看，两套指标判别干旱的正确率都较高，且在不同生育期间差异

不大，东北三省的正确率略高于内蒙古东部，土壤湿度指标的正确率略高于水分亏缺指标。

(3) 利用土壤湿度和水分亏缺指数指标判定 2013—2016 年黑龙江省各代表县(市)春玉米各生

表 5 代表县(市)土壤湿度(R)和水分亏缺指数(K_{CWDI})指标判定春玉米干旱等级结果比较(单位:%)

Table 5 Comparison of determination results of spring maize drought grade by soil moisture and crop water deficit index indicators in the representative counties/cities (unit:%)

省	站名	播种一出苗		出苗一拔节		拔节一抽雄		抽雄一乳熟		乳熟一成熟	
		D=0	D=1								
黑龙江	嘉荫	88.9	11.1	88.9	11.1	66.7	16.7	72.2	16.7	100	0
	龙江	90.6	9.4	90.6	9.4	87.5	12.5	78.1	18.8	65.6	34.4
	泰来	81.3	15.6	87.5	12.5	93.8	6.2	68.8	31.2	81.2	15.6
	青冈	77.4	22.6	96.8	3.2	67.7	29.0	61.3	38.7	71.0	22.6
	安达	72.2	27.8	88.9	11.1	77.8	22.2	27.8	50.0	61.1	27.8
	巴彦	93.8	6.2	93.8	6.2	84.4	12.5	65.6	31.3	84.4	15.6
	佳木斯	79.2	20.8	95.8	4.2	54.2	20.8	66.7	29.2	95.8	4.2
	集贤	96.7	3.3	100	0	70.0	26.7	76.7	16.7	93.3	6.7
	肇源	78.9	5.3	73.7	10.5	57.9	36.8	63.2	36.8	84.2	10.5
吉林	白城	77.4	19.4	90.3	9.7	48.4	35.5	48.4	41.9	58.1	32.3
	大安	60.9	34.8	91.3	8.7	39.1	56.5	39.1	52.2	65.2	26.1
	松原	85.2	14.8	96.3	3.7	74.1	22.2	63.0	29.6	66.7	33.3
	长岭	52.6	31.6	73.7	21.1	57.9	42.1	47.4	42.1	36.8	36.8
	农安	96.6	3.4	96.6	3.4	44.8	37.9	58.6	34.5	72.4	20.7
	榆树	92.9	7.1	100	0	67.9	28.6	67.9	25.0	89.3	7.1
	梨树	89.7	10.3	100	0	62.1	31.0	62.1	31.0	82.8	13.8
	公主岭	90.0	10.0	100	0	65.0	30.0	60.0	35.0	85.0	5.0
辽宁	和龙	95.2	4.8	90.5	9.5	71.4	23.8	76.2	14.3	85.7	14.3
	昌图	77.8	16.7	100	0	77.8	16.7	77.8	16.7	94.4	5.6
	朝阳	57.9	21.1	78.9	10.5	63.2	31.6	57.9	36.8	78.9	5.3
	新民	84.4	12.5	87.5	12.5	65.6	21.9	62.5	18.8	71.9	18.8
	绥中	68.8	21.9	87.5	12.5	37.5	53.1	68.8	18.8	81.3	15.6
	庄河	82.6	13.0	100	0	87.0	13.0	78.3	21.7	82.6	17.4
	宽甸	100	0	86.7	13.3	86.7	13.3	93.3	6.7	100	0
	海城	100	0	78.6	21.4	64.3	28.6	57.1	43.9	85.7	14.3
内蒙古东部	岫岩	100	0	100	0	80.0	20.0	86.7	13.3	86.7	13.3
	扎兰屯	50.0	40.6	65.6	28.1	56.3	43.8	65.6	31.3	71.9	28.1
	通辽	68.8	21.9	81.3	25.0	37.5	46.9	46.9	46.9	53.1	28.1
	开鲁	81.3	15.6	62.5	34.4	26.7	56.3	34.4	28.1	71.9	12.5
	翁牛特旗	76.7	20.0	76.7	16.7	40.0	43.3	73.3	13.3	46.7	33.3
赤峰	59.4	28.1	59.4	31.3	31.3	53.1	34.4	40.6	37.5	37.5	
平均		80.9	15.2	87.7	10.6	62.7	30.6	62.6	29.4	75.5	18.0

表 6 土壤湿度(R)春玉米干旱等级指标检验结果

Table 6 Test results of defining spring maize drought grade with soil moisture indicators

站名	播种一出苗					出苗一拔节					拔节一抽雄					抽雄一乳熟					乳熟一成熟				
	2013	2014	2015	2016	正确率	2013	2014	2015	2016	正确率	2013	2014	2015	2016	正确率	2013	2014	2015	2016	正确率	2013	2014	2015	2016	正确率
嘉荫	√	√	√	√	100	√	√	√	√	100	√	√	√	※	87.5	√	√	×	√	75	√	√	√	√	100
龙江	√	√	√	※	87.5	√	√	※	√	87.5	√	√	※	√	87.5	√	√	√	※	87.5	√	√	√	√	100
泰来	※	√	※	√	75	√	√	※	√	87.5	√	√	※	√	87.5	√	√	※	√	87.5	√	√	√	√	100
青冈	√	√	√	√	100	√	√	√	√	100	√	√	√	※	87.5	√	√	√	※	87.5	※	√	√	√	87.5
安达	√	√	√	※	87.5	√	√	√	※	87.5	√	※	×	√	62.5	√	※	※	√	75	×	√	√	√	75
巴彦	√	√	√	※	87.5	√	√	√	※	87.5	√	※	√	√	87.5	√	√	※	√	87.5	√	√	√	√	100
佳木斯	√	√	√	√	100	√	√	×	√	75	√	√	×	√	75	√	√	√	√	100	√	√	√	√	100
集贤	√	√	√	√	100	√	√	※	√	87.5	√	√	√	√	100	√	√	×	√	75	√	√	√	※	87.5
肇源	√	√	※	√	87.5	√	√	√	×	75	√	√	※	√	87.5	√	√	√	※	87.5	√	√	√	※	87.5

注: √:对, ※:半对, ×:错。

Note: √: correction, ※: half of correction, ×: wrong.

表 7 同表 6, 但为水分亏缺指数 (K_{cwdi})
Table 7 Same as Table 6, but for water deficit index

站名	播种一出苗					出苗一拔节					拔节一抽雄					抽雄一乳熟					乳熟一成熟				
	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	正确率 /%	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	正确率 /%	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	正确率 /%	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	正确率 /%	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	正确率 /%
嘉荫	√	√	√	※	87.5	√	√	√	√	100	√	√	√	×	75	√	※	√	×	62.5	√	√	√	√	100
龙江	※	√	※	√	75	※	√	√	√	87.5	√	√	√	√	100	√	√	※	※	75	√	√	√	√	100
泰来	√	※	√	※	75	√	√	※	√	87.5	√	√	√	×	75	√	※	※	※	62.5	√	√	√	※	87.5
青冈	×	√	※	√	62.5	√	√	√	√	100	√	√	√	※	87.5	√	×	√	√	75	×	√	√	√	75
安达	√	√	×	※	62.5	√	√	√	※	87.5	√	※	√	※	75	※	※	√	√	75	√	√	√	√	100
巴彦	√	√	×	√	75	√	√	√	※	87.5	√	√	√	※	87.5	√	×	√	※	62.5	√	√	√	※	87.5
佳木斯	√	×	√	√	75	×	√	√	√	75	√	√	√	√	100	√	√	※	√	87.5	√	√	√	√	100
集贤	√	√	√	※	87.5	√	√	√	×	75	√	√	×	√	75	√	√	×	√	75	√	√	√	×	75
肇源	×	√	√	※	62.5	√	※	√	※	75	√	√	×	※	62.5	√	√	※	√	87.5	√	√	※	※	75

育阶段干旱等级, 两套指标判定的多数县(市)各阶段干旱等级结果与实际相符, 各阶段土壤湿度指标的干旱等级判定结果好于水分亏缺指数指标, 且以播种一出苗阶段的偏差最大。少数县(市)水分亏缺指数干旱等级判定正确率不足 65%。

(4) 干旱等级指标是判定春玉米干旱情况的标尺。土壤湿度能直接反映作物水分供给情况, 地域普适性好, 农业和物理意义明晰, 能较好反映作物旱情状况。作物水分亏缺指数综合考虑了土壤、植物、气象三方面因素, 能较好地反映各地作物生长季水分亏缺与旱情, 且计算水分亏缺指数的资料较易获得, 适用于农业干旱监测。土壤湿度和水分亏缺指数在春玉米干旱等级划分上与农业、气象行业通用的等级划分方法一致, 两者之间具有良好的一致性。总体来看, 土壤湿度指标的干旱判定正确率约比作物水分亏缺指数的高 5%。本研究证明, 最原始的、简便的农业气象指标往往是最实用的指标。因此, 在划分玉米干旱等级等实际工作中, 应优先使用土壤相对湿度指标; 在缺乏土壤相对湿度资料时, 可以使用水分亏缺指数指标; 当两套指标判定结果存在差异时, 应以土壤相对湿度指标判定结果为准。

尽管土壤湿度干旱等级指标简单实用, 但目前常规人工土壤测墒时间间隔较长(10 d), 会影响干旱等级的判识精度, 因此, 应尽可能加密观测土壤湿度; 在无连续土壤湿度观测的情况下要用作物水分亏缺指数进行春玉米干旱等级监测。此外, 在使用土壤湿度指标时, 应尽可能考虑测墒前一日及测墒当日的降水对土壤湿度观测的影响, 否则也会产生误差。在计算水分亏缺指数时, 还应尽可能考虑各站点实际灌溉量和初始的土壤水分状况, 以免出现夸大作物受旱的情况。因此, 因地制宜地选择使用

这两套指标, 并尽可能考虑其他干扰因素, 可提高玉米干旱监测和评估的精度。

参考文献

白莉萍, 隋方功, 孙朝晖, 等, 2004. 土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J]. 生态学报, 24(7): 1556-1560.
 白向历, 孙世贤, 杨国航, 等, 2009. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J]. 玉米科学, 17(2): 60-63.
 陈长青, 类成夏, 王春春, 等, 2011. 气候变暖下东北地区春玉米生产潜力变化分析[J]. 地理科学, 31(10): 1272-1279.
 邓振镛, 王强, 张强, 等, 2010. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 30(22): 6278-6288.
 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光, 2015. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. 农业工程学报, 31(11): 157-164.
 董朝阳, 杨晓光, 杨婕, 等, 2013. 中国北方地区春玉米干旱的时间演变特征和空间分布规律[J]. 中国农业科学, 46(20): 4234-4245.
 董李丽, 李清泉, 丁一汇, 2015. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征[J]. 气象, 41(10): 1177-1189.
 董秋婷, 李茂松, 刘江, 等, 2011. 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, 20(4): 52-59.
 高晓容, 王春乙, 张继权, 等, 2012. 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, 28(12): 101-109.
 郭建平, 2016. 农业气象灾害监测预测技术研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 620-630.
 侯琼, 李建军, 王海梅, 等, 2015. 春玉米适宜土壤水分下限动态指标的确定[J]. 灌溉排水学报, 34(6): 1-5, 34.
 侯玉虹, 尹光华, 刘作新, 等, 2007. 土壤含水量对玉米出苗率及苗期生长的影响[J]. 安徽农学通报, 13(1): 70-73.
 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等, 2010. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J]. 农业工程学报, 26(7): 50-59.
 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 等, 2009. 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, 25(8): 28-34.
 李北齐, 吴坚, 王贵强, 等, 2009. 土壤含水量对玉米产量因素的影响研究[J]. 中国农学通报, 25(18): 249-252.
 李柏桢, 周广胜, 2014. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 34(5): 1043-1052.

- 李树岩,刘荣花,马志红,2012.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,30(3):252-256.
- 马树庆,袁祝香,马力文,等,2015.北方水稻低温冷害指标持续适用性检验与比较[J].气象,41(6):778-785.
- 齐伟,张吉旺,王空军,等,2010.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[J].应用生态学报,21(1):48-52.
- 秦大河,2009.气候变化与干旱[J].科技导报,27(11):3.
- 仇焕广,张世煌,杨军,等,2013.中国玉米产业的发展趋势、面临的挑战与政策建议[J].中国农业科技导报,15(1):20-24.
- 宋凤斌,徐世昌,2004.玉米抗旱性鉴定指标的研究[J].中国生态农业学报,12(1):127-129.
- 王宝英,张学,1996.农作物高产的适宜土壤水分指标研究[J].排水灌溉,15(3):35-39.
- 王俊强,韩业辉,于运凯,等,2016.拔节期和抽雄吐丝期干旱胁迫对黑龙江省玉米产量及农艺性状的影响[J].黑龙江农业科学,(1):37-42.
- 王密侠,马成军,蔡焕杰,1998.农业干旱指标研究与进展[J].干旱地区农业研究,16(3):119-124.
- 肖俊夫,刘战东,刘小飞,等,2010.中国春玉米主产区灌溉问题分析与研究[J].节水灌溉,(4):1-3,7.
- 谢五三,田红,2011.五种干旱指标在安徽省应用研究[J].气象,37(4):503-507.
- 薛昌颖,刘荣花,马志红,2014.黄淮海地区夏玉米干旱等级划分[J].农业工程学报,30(16):147-156.
- 薛昌颖,马志红,胡程达,2016.近 40a 黄淮海地区夏玉米生长季干旱时空特征分析[J].自然灾害学报,25(2):1-14.
- 杨若子,周广胜,2015.东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J].气象学报,73(6):1141-1153.
- 杨晓晨,明博,陶洪斌,等,2015.中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响[J].中国生态农业学报,23(6):758-767.
- 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等,2007.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,25(1):185-189,211.
- 袁文平,周广胜,2004.干旱指标的理论分析与研究展望[J].地球科学进展,19(6):982-991.
- 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,等,2011.东北地区玉米干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,29(1):231-236.
- 张喜英,裴冬,由懋正,2000.几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应[J].植物生态学报,24(3):280-283.
- 张艳红,吕厚荃,李森,2008.作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性[J].气象科技,36(5):596-600.
- 郑盛华,严昌荣,2006.水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响[J].生态学报,26(4):1138-1143.
- 中国气象局,2015.QX/T 259—2015:北方春玉米干旱等级[S].北京:气象出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2015.GB/T 32136—2015:农业干旱等级[S].北京:中国标准出版社.
- Campos H, Cooper M, Habben J E, et al, 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry[J]. Field Crops Res, 90(1):19-34.
- Duff G A, Myers B A, Williams R J, et al, 1997. Seasonal patterns in soil moisture, vapour pressure deficit, tree canopy cover and pre-dawn water potential in a northern Australian savanna[J]. Aust J Bot, 45(2):211-224.