排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 12 月 Dec. 2017 | 第 35 卷 第 12 期 Vol. 35 No. 12
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0158

农田渍害监测预警系统设计与应用

贾艳辉[1,2]，费良军[1]，黄修桥[2]，范永申[1,2]，李金山[1,2]，马春芽[2]
（1. 西安理工大学水资源研究所，陕西 西安 710048；2. 中国农业科学院农田灌溉研究所，河南 新乡 453002）

贾艳辉

摘要：为了提高农田水分管理降低渍害对农作物的影响，开发了基于田间积水及作物根区水分信息监测的农田渍害智能化预警系统. 该系统由水分信息传感器、数据采集及无线传输模块、数据处理模块、农田渍害预测以及灾情结果发布模块 6 部分组成，可实现农田积水及土壤水分状况的连续监测，并通过无线传输系统将农田实时水分信息传输至数据处理终端，根据该系统预测部分的决策支持系统对农田渍害进行评估和预测. 在田间试验的基础上，确定了该系统预测模块数学模型中的相关参数，提出了适用于农田渍害评估和预报方法. 实地应用结果表明，实时监测结果及预警精度均能达到农田水分管理的需求，而且该系统监测部分小巧轻便，预警终端部分界面友好，操作简单，实用价值较高. 对提高当地排涝管理水平、减小农田渍害对农业生产的影响具有显著效果.

关键词：农田；渍害；预警系统；DRAINMOD 模型
中图分类号：S24　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)12-1075-06

贾艳辉，费良军，黄修桥，等. 农田渍害监测预警系统设计与应用[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(12)：1075-1080.
JIA Yanhui，FEI Liangjun，HUANG Xiuqiao，et al. Design and application of pre-warning system for farmland waterlogging[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2017，35(12)：1075-1080.(in Chinese)

Design and application of pre-warning system for farmland waterlogging

JIA Yanhui[1,2]，*FEI Liangjun*[1]，*HUANG Xiuqiao*[2]，*FAN Yongshen*[1,2]，*LI Jinshan*[1,2]，*MA Chunya*[2]
(1. Water Resource Research Institute，Xi′an University of Technology，Xi′an，Shaanxi 710048，China；2. Farmland Irrigation Research Institute，Chinese Academy of Agricultural Sciences，Xinxiang，Henan 453002，China)

Abstract：In order to improve the water management in the farmland and reduce the influence of waterlogging damage on crops，the intelligent warning system for farmland waterlogging was designed based on the real time monitoring of water information in crop root areas. The system is composed of 6 parts：water information sensor，data acquisition and wireless transmission module，data processing module，farmland damage prediction and disaster release module，which can continuously monitor farmland water accumulation and soil moisture status，and transfer the data through the wireless transmission system，then evaluate and forecast the waterlogging. Based on the field experiments，the parameters in the mathematical model are determined，and a method for evaluating and predicting farmland waterlogging damage is proposed. The results of application indicate that the real time monitoring

收稿日期：2017-07-07；**修回日期**：2017-09-14；**网络出版时间**：2017-12-05
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20171205.1619.024.html
基金项目："十二五"农村领域国家科技支撑计划项目(2014BAD12B05)；国家重点研发计划项目(2017YFC0403204)
作者简介：贾艳辉(1982—)，男，河北承德人，助理研究员(jyh_5151@126.com)，主要从事节水灌溉技术研究.
黄修桥(1961—)，男，湖北汉川人，研究员，博士生导师(通信作者，huangxq626@126.com)，主要从事农业水资源高效利用研究.

results and warning accuracy can meet the demand of farmland water management, moreover the monitoring module of this system is small and portable, and the software module has friendly interfaces and simple operations. Applicating this system has the striking effect on improving the drainage management level and reducing the damage of farmland waterlogging.

Key words: farmland; waterlogging; pre-warning system; DRAINMOD model

渍害是指由于灌溉、降水或地下水位抬升等单因素或多因素联合作用,使农田土壤水分特别是根区土壤水分长时间处于饱和状态,甚至引起农田地表积水,从而使作物根区环境恶化(主要表现在水分过多,根区土壤孔隙率降低、地温明显下降、养分流失等),进而抵制了作物根系及地上部的正常生长,最终影响作物光合产物分配、转化以及经济产量构成甚至危及作物存活的一种灾害现象[1]. 中国盐渍化土地面积达 $3.630\ 53\times10^7$ hm^2,其中盐渍化耕地面积 $9.209\ 4\times10^6$ hm^2,占全国耕地总面积的6.62%[2]. 对于盐渍化农田,渍害严重制约农作物优质高产以及区域经济可持续发展[3].

对于大多数农作物而言,渍害对作物生长以及经济产量形成的负面影响程度主要受作物经历渍害历时呈正相关关系[4]. 因此,建立农田渍害的灾前防御与预警、灾中实时监测的灾害预警系统,通过农田水分管理最大程度缩短农作物受渍时间,对于减轻渍害对农业生产的负面影响,保证中国粮食安全具有十分重要的现实意义.

近年来,众多学者就农业气象灾害理论与技术开展了大量研究,也取得了丰硕成果. 如杨威[4]和张德林等[5]在试验研究基础上,系统分析了渍害以及气象灾害对作物生长、产量的影响,探索了不同渍害程度与作物产量的关系,初步提出了相应的调控模式及灾害预警指标. 刘定辉等[6]分析了重大气象灾害对农业生产的影响,并提出了应对西南地区自然灾害的监测和防控技术;王春乙等[7]系统阐述了有关农业气象灾害风险评估研究成果,在分析相关研究成果及存在不足的基础上提出了相关研究领域的发展方向,但是对于具体农田渍害却涉及较少. 也有不少学者针对气象灾害及农业灾害等多灾害地区的不同特点,分析了气象等农业灾害对区域农业生产的影响特征,并提出了应对防御对策[8-11]. 田璐等[12]和白玉洁等[13]论述了中国主要气象灾害对农作物优质高产的制约问题,并提出了防范不同气象灾害的有力措施. 但已有研究大多集中于不同区域不同气象灾害与农业生产的关系以及不同区域灾害风险评估、减灾、防灾有效措施的研究,而涉及农田渍害实时监测、预警的相关研究还鲜有报道. 文中开发适宜于田间尺度的农田渍害实时监测预警及预防调控系统,并通过田间试验对系统中涉及的相关模型参数进行率定,使农田水分实时监测、渍害预警以及预防调控有机结合.

1 农田涝渍灾害预警的理论基础

目前通常使用的作物单次排渍指标为天数 N 内地下水位控制在 H 深度,其中 N 与 H 依作物的耐渍性能而变化.

根据农田排水理论,如图1所示,农田计划层土壤贮水量变化符合水量平衡方程[14]

$$\Delta Va = P - S - RO - ET - D - DS, \tag{1}$$

式中:ΔVa 为农田计划湿润层土壤贮水量变化,mm;P 为农田灌溉量和降水量,mm;RO 为地表径流量,mm;S 为农田地表积水量,mm;D 为侧向排水,mm;ET 为农田棵间蒸发与植株蒸腾总量,mm;DS 为深层渗漏损失,mm.

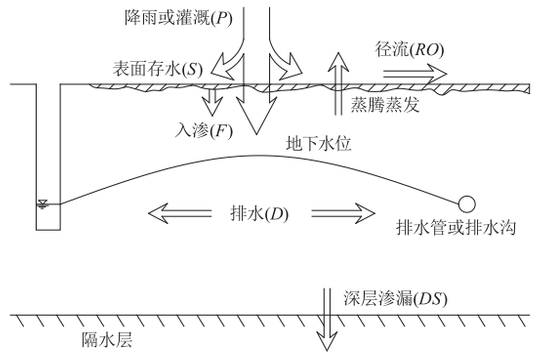


图1 水量平衡示意图

Fig. 1 Water balance diagram

图1中的排水量 D 及地下水位计算公式[14]为

$$\mu_d \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(Kh\frac{\partial h}{\partial x}\right) + W, \tag{2}$$

式中:h 为地下水位高度;μ_d 为给水度;K 为渗透系数;W 为源汇项;x 为空间坐标;t 为时间.

根据上面理论,给出土壤水运动参数、农田初始积水情况及农田排水方式等信息,就可以通过上面方程计算出排水过程及地下水位动态. 因此,可

以在农田水分状态监测的基础上,对各种农田排水方案进行模拟预测,从而找出较好的排水方案来降低农田渍害损失.

2　农田渍害预警系统设计

农田渍害预警系统,是一个集农田渍害实时监测、农作物受渍能力及渍害控制的实时预警综合系统,其结构如图 2 所示. 监测(硬件)部分使用水位传感器和土壤水分传感器测量农田积水深度及作物根区(分层,20 cm 为 1 个层次,监测农田地表以下 0 ~ 100 cm 土层的土壤水分信息,)土壤墒情;预警(软件)系统部分为数值模拟(利用实测资料对农田土壤水分状况进行模拟估算)、渍害程度预测(在实测资料基础上估算农田土壤水分并根据作物耐渍指标预测渍害程度)、渍害等级及调控指标发布等.

图 2　农田渍害预警系统结构图

Fig. 2　Structure of farmland waterlogging damage pre-warning system

2.1　监测(硬件)部分

如图 3 所示,根据设计要求,监测系统分为主站(数据接收端)和子站(数据测量端)两级,2 级系统使用无线数传技术进行数据通信. 子站负责数据测量及发送,主站负责数据接收及存储.

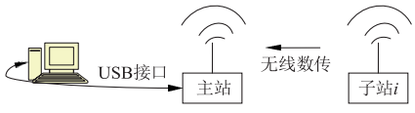


图 3　监测部分系统结构图

Fig. 3　System structure diagram of monitoring module

2.1.1　子站

系统子站用于数据采集、模数转换及数据上传. 每个子站使用多个水位电极组合进行农田积水水位的测量,这使得测量范围及测量精度可以自由调整,子站中的水位电极为等间距(20 mm)安装,可以测量 20 ~ 120 mm 的农田积水. 使用时域反射(TDR)探头进行土壤水分信息的实时监测,每个子站连接 5 个 TDR 探头,分别监测农田地表下[0,20),[20,40)[40,60)[60,80)和[80,100]cm 土层的土壤水分信息,数据采集周期为 10 min.

2.1.2　主站

系统主站主要用于接收各子站采集的实时数据并上传至上位机(服务器). 主站与子站之间使用数传电台进行通信,主站与上位机(服务器)间使用 USB 接口进行通信.

2.2　预警(软件)部分

预警部分是在收集田间水分、作物及环境等实时监测信息的基础上,通过模型计算及相关决策系统,对农田渍害信息进行预测,并传输给系统终端将农田灾情信息对外实时发布. 系统结构如图 4 所示.

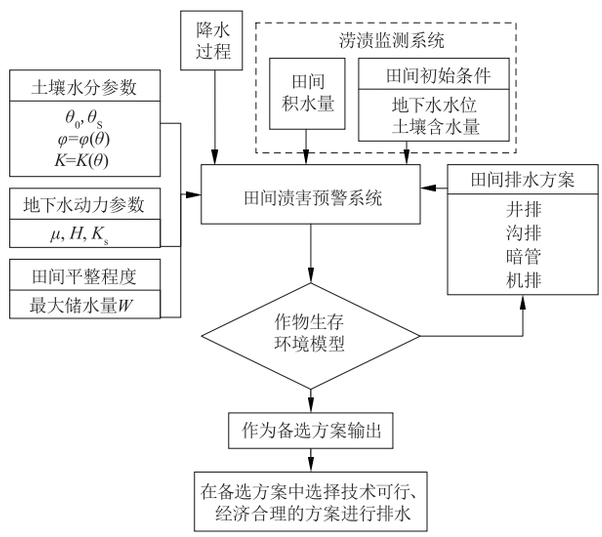


图 4　预警部分系统结构图

Fig. 4　Structure diagram of pre-warning system

预警软件主要是对实时监测数据进行存储、资料管理、预警模型前处理、模拟结果和决策系统决策结果进行可视化处理. 相关模拟、决策和帮助等模块使用 Visual Basic 语言编写,窗体列表及运行主界面如图 5 所示.

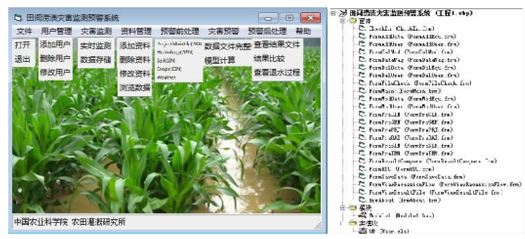


图 5　预警系统软件主界面及窗体列表

Fig. 5　Main interface and form list of pre-warning system software

模拟计算模块使用 DRAINMOD 模型进行计算,模型所需数据由“预警模型前处理”模块给出,模拟结果由“模拟结果进行可视化”模块进行结果显示及对比分析.

DRAINMOD 模型是 1978 年由美国北卡罗来纳州立大学农业工程系 SKAGGS R. W. 博士开发的

1个农田规模水文模型. DRAINMOD模型采用较为简单的函数关系来描绘农田水文变化过程,它根据输入的日降雨以及最高最低气温资料,计算2个排水沟/管中点每日的水平衡项,包括入渗、蒸散发、地表排水(即径流)量、地下排水量以及深层渗漏等水文项. 模型的基本功能是模拟不同排水系统布置及地下水位管理措施下农田排水的水文过程,可以较为准确地预测出田间地下水位、地表、地下排水量以及作物产量等指标. 目前,模型功能还拓展到盐分运移、积雪与冻融现象对田间水文的影响以及施肥条件下氮素的流失等. 因其具有使用简便且预测精度高等优点已经在世界范围内得到了广泛的应用,近年来中国很多学者也对其进行了应用与验证[15-16].

3 实例验证

文中选用淮河流域某地进行的实测排渍过程对预警系统中的DRAINMOD模型进行验证,并使用验证后的模型进行排水方案优选.

试验于2014年进行,试验区面积0.8 hm^2,土地平整、无明显坡度. 区内设置两组试验,试验区布置如图6所示,试验区排水管间距分别为15和30 m,共布置7条60 m长的排水波纹暗管,1-4号暗管埋深0.9 m,5-7号暗管埋深1.2 m. 小区B和E是观测小区,每隔3 m设一观测孔.

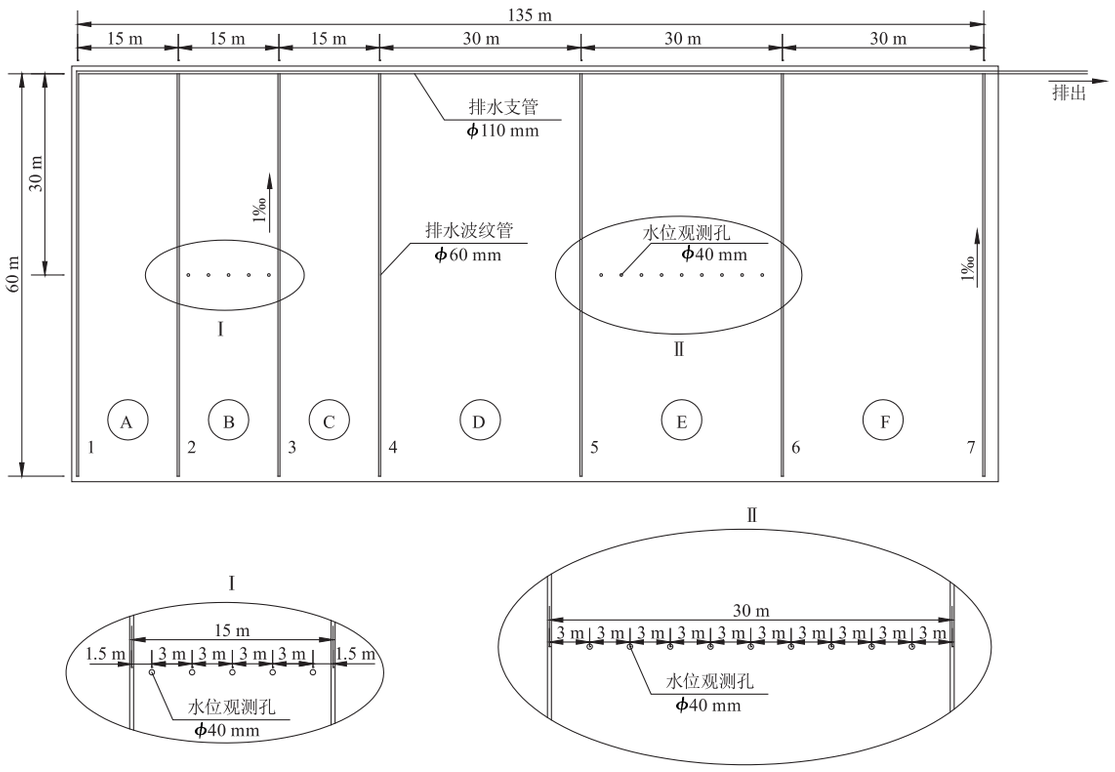


图6 试验小区布置图

Fig. 6 Arrangement in experimental sections

3.1 相关参数

模型需要输入气象、土壤、排水系统等参数,气象参数包括日最高和最低气温、小时(或日)降雨量及潜在腾发量. 模型采用Green-Ampt公式计算入渗量;地下排水量采用Hooghout公式计算,地表积水时则改用Kirkham公式计算. 模型还通过设置地面平整度与田埂高度来计算每日地表径流量和地表排水量. 模型对于潜在腾发量的计算设置了不同选择,文中使用模型默认的基于温度法的Thornthwaite公式. 模型在腾发量计算时如潜在腾发量小于土壤含水量,则腾发量为潜在腾发量,如大于土壤含水量,则腾发量设置为小于潜在腾发量的一个数值.

文中使用2014年当地实测的一次112 mm降雨过程. 土壤及排水系统参数见表1,表中D为土层深度,K为侧向导水率,WTD为地下水埋深,QD为排水量,E为蒸发量,A,B为Green-Ampt入渗模型相应参数,ϕ土壤负压,θ土壤含水量,q为排水模数,b为隔水底板深度.

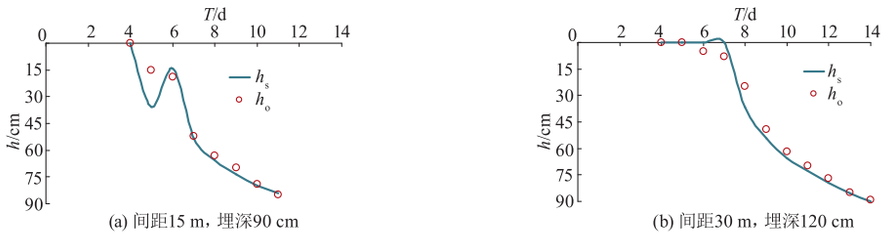
表 1　DRAINMOD 模型排水系统参数
Tab. 1　Drainage system parameters in DRAINMOD model

参数类型	参数	取值								
侧向导水参数	D/cm	0 ~ 450								
	K/(cm · h^{-1})	0. 294								
土壤排水蒸发参数	WTD/cm	0	10	20	30	45	60	90	120	
	QD/cm	0	0. 275	0. 717	1. 306	2. 423	3. 76	6. 829	9. 981	
	E/cm	0. 350	0. 350	0. 228	0. 102	0. 044	0. 016	0. 005	0	
Green-Ampt 入渗参数	WTD/cm	0	10	20	40	60	80	100	150	200
	A/(cm · h^{-1})	0	0. 491	0. 981	2. 031	2. 845	3. 808	5. 094	7. 361	7. 361
	B/(cm · h^{-1})	1. 2	1. 2	1. 2	2. 7	2. 7	2. 7	2. 7	2. 7	2. 7
土壤水分特征曲线	ϕ/cm	0	−10	−30	−100	−300	−700	−3 000	−10 000	
	θ	0. 385	0. 356	0. 343	0. 317	0. 255	0. 179	0. 128	0. 098	
排水特性	q/(cm · d^{-1})	2. 05								
	b/cm	450								

3. 2　模型检验

通过 DRAINMOD 模型模拟试验区地下水埋深的动态变化过程,将地下水位的模拟值与实测值进行对比,检验模型的合理性. 将检验后的模型参数作为预警系统的输入参数,用于农田涝渍灾害预警.

2014 年 7 月 4—5 日,试验区降雨 112 mm. 降雨后在图中所示位置采集了地下水位数据,处理后与模拟值进行了对比,结果如图 7,8 所示. 图 7 中 h 为地下水位埋深,T 为时间. 图 8 中 h_s 为模拟值,h_o 为观测值.



(a) 间距15 m，埋深90 cm　　(b) 间距30 m，埋深120 cm

图 7　地下水位变化过程
Fig. 7　Groundwater table levels

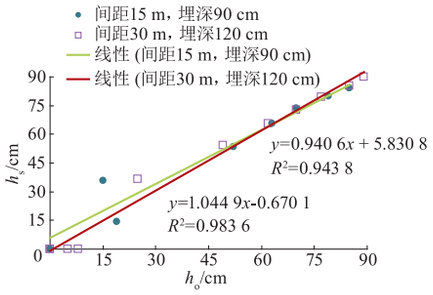


图 8　地下水位模拟值与观测值对比图
Fig. 8　Comparison between simulated and observed groundwater table level

从图 7 可以看到,地下水位深度过程线的后半段吻合要好于前半段. 这是由于水位过程线的前半段变化剧烈,而采样的时间与模拟输出的时间不同引起的.

从总体上,2 种间距及埋深的地下水位观测值和地下水位模拟值变化趋势一致,R^2 分别为 0. 932 和 0. 983,相关性较高. 由此说明,应用此系统对农田渍害进行模拟预测,可以很好地预测地下水位过程,起到预警渍害的作用.

4　结　论

1）由于地下水位深度是渍害的主要影响因素,基于排涝模型(DRAINMOD 模型)的农田渍害预警系统在有无排水系统的农田都适用,也可用于农田排水管理.

2）开发的渍害预警系统,预警部分使用高级语言(Visual Basic 6. 0)编写,界面友好操作简单,并结合 DRAINMOD 模型进行模拟计算,结果符合实际,具有很好的理论基础.

3）开发的预警装置监测部分采用锂电池供电、无线方式传输监测数据,小巧轻便,实用性和可操作性强,对提高易涝地区农田水分管理水平,减少农田渍害损失具有显著效果.

参考文献(References)

[1]　喻光明,王朝南,陈平. 江汉平原农田渍害机理研究[J]. 地理研究,1993,12(3):37 −44.

YU Guangming, WANG Chaonan, CHEN Ping. Mechanism of waterlogging damage in Jianghan Plain [J]. Geographical research, 1993, 12(3): 37 – 44. (in Chinese)

[2] 樊自立,马英杰,马映军. 中国西部地区的盐渍土及其改良利用[J]. 干旱区研究,2001,18(3):1 – 6.
FAN Zili, MA Yingjie, MA Yingjun. Salinized soils and their improvement and utilization in west China[J]. Arid zone research, 2001, 18(3): 1 – 6. (in Chinese)

[3] 李元征,杜耘,吴胜军,等. 农田渍害遥感监测方法研究应用进展[J]. 世界科技研究与发展,2011,33(4):600 – 603,616.
LI Yuanzheng, DU Yun, WU Shengjun, et al. Progress in research and application of farmland waterlogging monitoring method by remote sensing[J]. World Sci – tech R&D, 2011, 33(4): 600 – 603, 616. (in Chinese)

[4] 杨威. 高温与涝渍交互效应对棉花生长的影响及排水调控研究[D]. 荆州:长江大学,2014.

[5] 张德林,李军,蒋其根,等. 大棚草莓农业气象灾害预警指标研究[J]. 上海农业学报,2015,31(5):56 – 60.
ZHANG Delin, LI Jun, JIANG Qigen, et al. The agrometeorological disaster early warning indicators of strawberry vinyl-house culture[J]. Acta agriculturae Shanghai, 2015, 31(5): 56 – 60. (in Chinese)

[6] 刘定辉,刘永红,熊洪,等. 西南地区农业重大气象灾害危害及监测防控研究[J]. 中国农业气象,2011,32(S1):208 – 212.
LIU Dinghui, LIU Yonghong, XIONG Hong, et al. Research on the harmfulness, prevention and control of main agricultural weather disaster in south – west China [J]. Chinese journal of agrometeorology, 2011, 32(S1): 208 – 212. (in Chinese)

[7] 王春乙,张继权,霍治国,等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报,2015,73(1):1 – 19.
WANG Chunyi, ZHANG Jiquan, HUO Zhiguo, et al. Prospects and progresses in the research of risk assessment of agro – meteorological disasters[J]. Acta meteorologica sinica, 2015, 73(1): 1 – 19. (in Chinese)

[8] 何鹏,李晓,林正雨. 四川省主要农业气象灾害及防灾减灾科技需求[J]. 四川农业科技,2015(12):5 – 7.
HE Peng, LI Xiao, LIN Zhengyu. The major agricultural meteorological disasters and disaster prevention and reduction in Sichuan province[J]. Science and technology of Sichuan agriculture, 2015(12): 5 – 7. (in Chinese)

[9] 崔鹏,苏凤环,邹强,等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策[J]. 科学通报,2015,60(32):3067 – 3077.
CUI Peng, SU Fenghuan, ZOU Qiang, et al. Risk assessment and disaster reduction strategies for mountainous and meteorological hazards in Tibetan Plateau[J]. Chin Sci Bull, 2015, 60(32): 3067 – 3077. (in Chinese)

[10] 甘一忠,李耀先. 2003年广西主要农业气象灾害及防御对策[J]. 广西气象,2004,25(2):21 – 23.
GAN Yizhong, LI Yaoxian. Guangxi′s main agricultural weather disaster and prevention countermeasures in 2003 [J]. Journal of Guangxi meteorology, 2004, 25(4): 21 – 23. (in Chinese)

[11] 骆宗强,石春林,江敏. 水稻高温热害预警监测与定量评估研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):12 – 15.
LUO Zongqiang, SHI Chunlin, JIANG Min. Research progress on early warning monitoring and quantitative assessment of high temperature heat damage in rice[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2016, 44(4): 12 – 15.

[12] 田璐,高清源,韩颖,等. 气象灾害对农业生产的影响及防范措施分析[J]. 南方农业,2015,9(30):218 – 219.
TIAN Lu, GAO Qingyuan, HAN Ying, et al. Analysis on the impact of meteorological disasters on agricultural production and the preventive measures[J]. South China agriculture, 2015, 9(30): 218 – 219. (in Chinese)

[13] 白玉洁,段海花,侯学源. 我国主要气象灾害对农业生产的影响及应对策略[J]. 安徽农业科学,2011,39(16):9931 – 9935.
BAI Yujie, DUAN Haihua, HOU Xueyuan. Effects of meteorological disasters on agricultural production and countermeasures in China[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2011, 39(16): 9931 – 9935. (in Chinese)

[14] 王仰仁,段喜明,刘佩茹,等. 灌溉排水工程学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

[15] 贾忠华,罗纨,莫放,等. 用DRAINMOD模型预测不同气候条件下排水及来水量对湿地水文的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(5):54 – 58.
JIA Zhonghua, LUO Wan, MO Fang, et al. Predicting effect of drainage and inflow on wetland hydrology under different climatic conditions with DRAINMOD [J]. Journal of soil and water conservation, 2003, 17(5): 54 – 58. (in Chinese)

[16] NEGM L M, YOUSSEF M A, CHESCHEIR G M, et al. DRAINMOD-based tools for quantifying reductions in annual drainage flow and nitrate losses resulting from drainage water management on croplands in eastern North Carolina [J]. Agricultural water management, 2016, 166: 86 – 100.

(责任编辑 徐云峰)