

基于生育时段的湖南省早稻洪涝等级指标及时空变化特征

汪天颖^{1,2,3} 霍治国^{1,2*} 李旭辉⁴ 杨建莹² 吴立² 张桂香²

(¹南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; ²中国气象科学研究院, 北京 100081; ³湖南省气象局气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118; ⁴南京信息工程大学耶鲁-南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044)

摘要 研究早稻洪涝气象指标对实时开展区域早稻洪涝灾害监测预警与评估具有现实意义。本文以湖南省早稻为研究对象, 利用湖南省 68 个气象站点 1961—2010 年逐日气象资料、早稻灾情史料, 以及早稻生育期资料, 筛选基于水稻生育时段、洪涝等级、过程降水量的洪涝灾害样本 385 个, 得到早稻移栽-拔节期、孕穗-抽穗期、乳熟-成熟期的轻、中、重度灾害样本集合 9 组。采用 K-S 检验法和学生氏 t -分布置信区间方法界定早稻不同生育时段、不同等级洪涝灾害的过程降水量指标阈值, 构建基于生育时段的湖南早稻洪涝等级指标, 进行独立样本验证。依据建立的洪涝等级指标和 ArcGIS 技术, 分析 1961—2010 年湖南早稻各生育时段洪涝的时空分布特征。结果表明: 各生育时段轻度、中度、重度洪涝下限阈值分别为移栽-拔节期, 129、154、241 mm; 孕穗-抽穗期, 135、170、260 mm; 乳熟-成熟期, 145、190、295 mm。指标验证结果与历史记录有较好的一致性; 1961 年以来湖南早稻总洪涝次数总体呈现增加趋势, 重度洪涝主要发生在岳阳北部和郴州南部地区; 移栽-拔节期洪涝主要发生在湘东及湘南地区, 孕穗-抽穗期洪涝主要位于湘东与湘中地区, 乳熟-成熟期洪涝主要位于湘东北和湘中以北地区; 20 世纪 90 年代是湖南近 50 年早稻洪涝灾害最为严重的年代, 全生育期间均有高频次、高强度的洪涝发生; 2000 年后早稻在移栽-拔节期和孕穗-抽穗期洪涝主发区有所变化, 前者增加了湘中部地区, 后者增加了湘中东部至南部地区。

关键词 早稻; 生育时段; 洪涝等级指标; 过程降水量; 时空分布

Level indicators and temporal-spatial distribution features of early rice flood disaster in Hunan Province based on different growth stages. WANG Tian-ying^{1,2,3}, HUO Zhi-guo^{1,2*}, LI Xu-hui⁴, YANG Jian-ying², WU Li², ZHANG Gui-xiang² (¹Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Forecast, Early-Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; ²Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; ³Key Laboratory of Hunan Province for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410118, China; ⁴Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China).

Abstract: Meteorological indicators of early rice flood are recognized to be of realistic importance to the disaster monitoring, pre-warning and assessment of early rice flood. Taking early rice in Hunan Province as research object, 385 flood rainfall amount data samples from 9 early rice flood disaster sample sets based on different rice growth stages (transplanting-jointing, booting-blooming, milk-maturity) and flood levels (light, moderate, severe) were built in this paper, integrating daily precipitation data (1961 to 2010) from 68 meteorology stations, flood disaster historical data and phenophase data in Hunan Province. K-S test and Student's t -distribution were em-

ployed for the goodness-of-fit test and parameters determination, and thus, rainfall thresholds for flood levels were determined based on the confidential intervals of 9 sample sets, and verified by independent samples. Afterwards, temporal-spatial characters of early rice flood disaster in Hunan Province were analyzed based on the constructed flood level indicators and ArcGIS. The thresholds of early rice flood disaster were 129, 154 and 241 mm for light, moderate and severe floods in transplanting-jointing stage, 135, 170 and 260 mm in booting-blooming stage, and 145, 190 and 295 mm in milk-maturity stage, respectively. Rice flood level indicators were detected to be basically consistent with the historical occurrence levels of rice flood disasters, according to the verification results. Total flood disaster frequency of early rice showed an increasing tendency since 1961, and furthermore, severe floods mainly located in northern Yueyang and southern Chenzhou. South and east regions of Hunan were detected with high frequencies of flood in transplanting-jointing. Flood in booting-blooming stage mainly happened in east and central regions of Hunan, while milk-maturity flood occurred mainly in the north region of Hunan. Considering the frequency and intensity of flood, early rice flood disasters were most serious in the 1990s in Hunan. Central Hunan and east to south region of Hunan were the flood-prone area during transplanting-jointing and milk-maturity stage respectively, in recent 10 years.

Key words: early rice; growth stage; flood level indicator; flood rainfall amount; temporal-spatial distribution.

洪涝灾害包括洪水灾害(强降水等引起河湖水位上涨泛滥或山洪暴发造成的灾害)与雨涝灾害(暴雨或降雨集中形成积水径流致使区域淹渍造成的灾害)。全球范围内,每年因自然灾害导致的经济损失约有40亿美元,洪涝灾害的影响约占其中的40%(Kates *et al.*, 1985)。在我国农业生产中,洪涝灾害是仅次于旱灾的主要气象灾害。

长江中下游地区作为中国最重要的水稻主产区,水稻种植面积占全国水稻面积的60%,产量占总产的70%(徐明等, 2009)。该区域属季风气候,降水多而集中,多平原,南北支流汇入多,地势低平,不利于泻洪,是中国多涝区之一。1981—2014年长江中下游地区农业洪涝受灾面积约为1.5亿 hm^2 ,占全国洪涝受灾面积的38%。湖南地处长江中游,全年降水主要集中于春末夏初。水稻是湖南第一大粮食作物,双季稻是其主要种植方式,其中双季早稻(下文简称早稻)生育期处于该省的雨季,其生产水平长期以来受洪涝灾害显著影响和制约。

洪涝灾害与强降水密切相关,表征洪涝灾害的指标主要有日雨量、旬雨量、月、季、年雨量、降水日数、旱涝指数 Z 、 K 指标等(Kite, 1977; 田敏等, 1989; Ahn *et al.*, 2013)。前人从气象、水文等方面的单个或多个指标出发,开展了洪涝灾害发生规律、风险评估等方面的研究(姜爱军等, 2000; 万君等, 2007; 邹朝望等, 2010; 姜会飞等, 2011),但研究对象多以农林业,针对单种农作物的研究相对较少。有关水稻洪涝灾害的研究,国内外从洪涝受灾面积监测与损

失评估两个方面,利用遥感数据对大尺度水稻洪涝灾害进行了研究(Sakamoto *et al.*, 2009; Son *et al.*, 2013)。由于缺乏受灾水稻下垫面特征与水稻受灾程度的定量描述,基于遥感方法的水稻洪涝研究对作物洪涝强度反应不敏感。基于地面气象数据的水稻洪涝灾害指标研究,多选用暴雨日数和暴雨量作为水稻洪涝指标,如李巧媛等(2013)应用暴雨日及大暴雨日产生的年降水量及其雨日数计算湖南水稻受洪涝灾害的影响程度,陈家金等(2010)在研究福建水稻的暴雨灾害时,还引入了暴雨强度的影响因素,这些洪涝指标能较好地反映水稻生长发育受强降水的影响,但只能在生长季结束后才可以评估,缺乏水稻洪涝监测、预警的实效性。

本文以湖南地区早稻洪涝灾害为研究对象,采用长年代早稻洪涝灾情史料和气象资料,基于洪涝灾害的降水过程特征,开展湖南地区早稻洪涝灾害等级评价指标研究,构建基于降水过程的洪涝灾害指标,揭示早稻洪涝灾害的时空变化规律,为区域早稻生产和防洪减灾以及洪涝灾害风险评估等提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源与处理

早稻种植区域依据2012年国家气象中心编著的《农业气象业务服务手册》(非出版物)中的全国农业气候地理区划图;气象资料来源于国家气象信息中心中国国家级地面气象站基本气象要素日值数

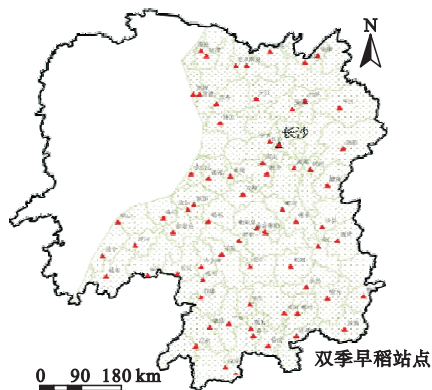


图1 湖南省早稻种植区域68个气象站点分布

Fig.1 Distribution of 68 meteorological stations in early rice area in Hunan

据集,包括湖南早稻种植区内68个气象站点1961—2010年的逐日降水量资料,少数降水量存在数据缺测的站点,缺测值采用历年同期有效平均值代替。早稻生育期资料来自湖南省早稻种植区域17个农业气象站1984—2012年的观测资料;洪涝灾情史料来源于《中国气象灾害大典·湖南卷》和《中国气象灾害年鉴》(董文杰等,2006,2007,2008;肖子牛等,2008)。湖南早稻种植区域及站点分布如图1所示。

1.2 研究方法

1.2.1 洪涝灾害样本构建方法 基于已有研究成果,结合湖南早稻发育期资料,进行洪涝灾害对早稻影响的生育时段划分。依据早稻洪涝灾情史料记载的灾害发生地点和强度结合逐日气象资料,反演不同强度等级的早稻洪涝灾害的过程降水量。基于不同生育时段、灾害等级、过程降水量,构建湖南早稻洪涝灾害样本。

水稻田间淹涝试验已有研究成果表明水稻不同生育期对淹涝的敏感程度不同(李永和等,2004;殷剑敏等,2009;宁金花等,2013),早稻最敏感时期为抽穗期和孕穗期,其次为乳熟期,较不敏感的时期为分蘖期。基于早稻不同生育期对淹涝敏感的差异性,结合《中国气象灾害大典·湖南卷》和《中国气象灾害年鉴》中的湖南早稻主产区历史实际洪涝受灾记录,把早稻洪涝灾害的生育时段划分为播种-三叶期、移栽-拔节期、孕穗-抽穗期、乳熟-成熟期4个阶段。由于目前湖南早稻的种植多采用大棚育秧的方式,后移栽至大田中,洪涝灾害对处于播种-三叶期早稻的影响难以判定,因此本文早稻洪涝灾害的研究主要针对早稻生育的后3个阶段,即早稻的移栽-拔

节期、孕穗-抽穗期、乳熟-成熟期3个发育时段。

基于湖南早稻种植区内17个农业气象观测站1984—2012年早稻的发育期观测资料,对不同生育期的起止时间进行平均处理,以平均日期进行不同生育期起止日期的划分。早稻平均移栽时间为5月3日,6月15日进入孕穗期,7月5日进入乳熟期。

参照农作物洪涝灾害受灾、成灾、绝收面积统计的灾害程度规定,将湖南地区早稻洪涝分为轻度洪涝、中度洪涝和重度洪涝3个等级。查阅《中国气象灾害大典·湖南卷》中1961—2000年,《中国气象灾害年鉴》中2004—2007年,共44年的湖南省早稻生产期间的洪涝灾害发生实况记录,分别得到湖南各县(市)早稻移栽-拔节期、孕穗-抽穗期、乳熟-成熟期间的洪涝灾害导致的水稻“受灾”、“成灾”、“绝收”记录。逐条反演灾情资料记载中受灾时段及其前后连续的过程降水情况,整理得到包含早稻生育时段、洪涝等级、过程降水量的洪涝灾害样本385个,按早稻生育时段(移栽-拔节期、孕穗-抽穗期、乳熟-成熟期),洪涝灾害等级(轻、中、重),分为9组灾害样本集合。

1.2.2 洪涝等级指标构建方法 一定生育时段的过程降水量是决定水稻洪涝灾害等级大小的关键。基于早稻生育时段和洪涝等级的9组灾害样本集合的过程降水量序列,选取正态分布、泊松分布、指数分布等常用于致灾因子拟合的概率密度函数、K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验方法,分别对灾害过程降水量样本序列的理论概率分布型进行拟合(霍治国等,2003)、检验(胡涛平等,2014)。考虑到对于服从正态分布的总体,在样本数量有限时,将样本标准差 s 作为正态分布总体的标准差 μ 会对 μ 产生低估(樊顺厚,1994);而在正态分布总体的标准差 μ 未知的情况下,无论样本数量大或小, t -分布均可对总体的区间概率做出较好的估计(盛骤等,1996)。选取学生氏 t -分布置信区间方法对服从正态分布总体的过程降水量样本序列进行区间概率估计,基于置信水平在95%或以上的降水量区间,确定各等级洪涝灾害的阈值。

1.2.3 洪涝等级指标验证方法 构建水稻洪涝等级指标前,预留出部分洪涝灾害样本,对指标进行验证。预留样本采用随机选取方法,选取包括不同年代、生育时段、洪涝等级的预留验证样本33个。验证主要依据《中国气象灾害大典·湖南卷》中的洪涝灾害记录,检验验证样本的发生时间、主要发生地

表 1 湖南早稻洪涝灾害样本记录分布情况
Table 1 Distribution of early rice flood disaster sample records

生育时段	轻涝次数	中涝次数	重涝次数	总次数
移栽-拔节期	116	41	22	179
孕穗-抽穗期	79	26	21	126
乳熟-成熟期	20	9	18	47
全生育期	215	76	61	352

点和灾害发生强度,与构建的湖南早稻洪涝等级指标计算得到的洪涝发生地点和灾害发生强度是否一致。

1.2.4 洪涝发生趋势分析方法 采用线性回归方法(李海燕等,2011)分析 1961—2010 年湖南地区早稻洪涝次数的时间变化趋势。

表 2 不同分布型函数对早稻洪涝过程降水量样本序列拟合的 K-S 检验结果
Table 2 K-S test results of early rice flood rainfall amount samples, using different distribution functions

		移栽-拔节期			孕穗-抽穗期			乳熟-成熟期		
		轻涝	中涝	重涝	轻涝	中涝	重涝	轻涝	中涝	重涝
正态分布	Z 值	0.879	0.545	0.637	0.980	0.626	0.500	0.577	0.449	0.614
	P 值	0.423	0.927	0.811	0.292	0.828	0.964	0.893	0.988	0.846
均匀分布	Z 值	2.462	0.862	0.823	1.631	1.781	0.736	0.652	0.997	1.187
	P 值	0.000	0.447	0.507	0.010	0.004	0.651	0.789	0.273	0.119
泊松分布	Z 值	3.330	1.823	1.676	3.281	1.530	1.547	1.391	1.087	0.893
	P 值	0.000	0.003	0.007	0.000	0.019	0.017	0.042	0.188	0.403
指数分布	Z 值	4.748	2.771	1.961	3.834	2.377	1.795	2.140	1.663	2.027
	P 值	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.008	0.001

表中 P 为概率,Z 为渐近统计量。

样本序列分布型函数拟合的 K-S 检验结果在显著性水平 $P=0.05$ 上差异不显著,即可接受原假设。由表 2 可以看出,4 种分布型函数对 9 组灾害过程降水量序列拟合的 K-S 检验结果表明,样本总体属于正态分布、均匀分布、泊松分布和指数分布的结果分别有 9 组、6 组、2 组和 0 组。全部 9 组序列均接受假设“样本来自的总体属于正态分布”,且相应的 P 值为同序列 4 组 K-S 检验中的最高值,对应 Z 值的检验均在临界 D 值换算的阈值内(游志颖,1999),故选择接受该假设,认为早稻不同生育时段各等级洪涝过程降水量序列的总体均服从正态分布。

应用 SPSS 对 9 组灾害样本集合分别进行学生氏 t -分布运算,以各样本集合的过程降水量序列的 t -分布置信水平在 95%或以上的降水量作为早稻洪涝灾害指标等级划分的阈值,则落在阈值外的过程降水量值仅有 5%或以下的概率属于考察的早稻洪涝等级范围。所得早稻洪涝灾害等级指标结果和阈

2 结果与分析

2.1 早稻洪涝等级指标构建

将构建的 385 个洪涝灾害样本,预留 33 个样本用于指标验证,不参与洪涝等级指标构建。用于洪涝等级指标构建的样本为 352 个,样本在不同生育时段、洪涝灾害等级的数量分布情况见表 1。基于早稻生育时段(移栽-拔节期、孕穗-抽穗期、乳熟-成熟期)、洪涝灾害等级(轻、中、重)的 9 组灾害样本集合的过程降水量序列,应用 SPSS(IBM SPSS Statistics 20)分别对样本序列进行正态分布、均匀分布、泊松分布、指数分布概率密度函数拟合与 K-S 检验(表 2)。

值的置信水平如表 3 所示。

2.2 指标验证

表 4 给出了构建的湖南省早稻洪涝指标的验证情况。5 组验证样本中,湖南早稻洪涝指标计算结果所得到的地理位置和发生程度与早稻历史洪涝灾害记录发生的地点和发生程度相符合的有 3 组,基

表 3 湖南省早稻洪涝灾害等级指标与阈值的置信水平
Table 3 Flood level indicators of early rice in Hunan Province and confidence level of rainfall thresholds

生育时段	洪涝等级	过程降水量(mm)
移栽-拔节期	轻度	$129^* \leq R < 154^{**}$
	中度	$154^{**} \leq R < 241^{**}$
	重度	$R \geq 241^{**}$
孕穗-抽穗期	轻度	$135^* \leq R < 170^{**}$
	中度	$170^{**} \leq R < 260^{**}$
	重度	$R \geq 260^{**}$
乳熟-成熟期	轻度	$145^* \leq R < 190^{**}$
	中度	$190^* \leq R < 295^{**}$
	重度	$R \geq 295^{**}$

* 代表置信水平在 95%以上, ** 代表置信水平在 99%以上。

表 4 湖南省早稻洪涝指标的验证情况
Table 4 Verification of early rice flood level indicators

时间段	历史记录 灾害发生地点	历史记录 灾害发生程度	指标计算得出灾害发生地点 与发生程度	符合程度
1967 年 6 月 30 日—7 月 1 日	资兴	成灾	资兴县中度洪涝	符合
1974 年 4 月 30 日—5 月 9 日	湘中以北 5 县和长沙 等地	受灾	临澧、华容、平江、桃江 4 县轻度洪涝;湘阴、浏阳 2 县中度洪涝	基本符合
1988 年 6 月 16 日	邵阳县	成灾	邵阳县中度洪涝	符合
1996 年 5 月 31 日—6 月 3 日	岳阳地区及桃源、安乡 等 11 县	成灾,部分绝收	南县、岳阳、桃源、平江 4 县轻度洪涝;澧县、临 澧、安乡、汉寿、汨罗 5 县中度洪涝;华容、临湘 2 县重度洪涝	符合
1997 年 7 月 20 日—7 月 23 日	汉寿、桃源、临澧	受灾,部分成灾	桃源、桃江 2 县轻度洪涝;汉寿县中度洪涝	基本符合

本符合的有 2 组。基本符合的 2 组验证中,指标计算得出的 9 组结果 7 个受涝地理位置与验证样本符合,2 个与验证样本地理位置相邻,2 个计算等级记录等级相差 1 个等级。考虑到人为灾情评述存在一定误差,验证结果未出现跨级差异,且在可估计范围内。表明构建的基于生育时段的早稻洪涝等级指标能较好地反映早稻洪涝灾害的实际发生情况,具有代表性。

2.3 早稻洪涝的时间分布

基于早稻洪涝等级指标、线性趋势分析方法,统计湖南早稻主产区 1961—2010 年 68 个站点各生育时段各等级洪涝的发生次数、分析 50 年间早稻洪涝次数的时间变化趋势。由图 2 可见,1961—2010 年早稻全生育期总洪涝次数和重度洪涝次数总体呈增加趋势,平均每站增加速率分别为 $0.055 \text{ 次} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) 和 $0.005 \text{ 次} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。总洪涝次数、重度洪涝次数年代际变化:20 世纪 60—80 年代均逐年代减少,90 年代总洪涝次数显著增加并达最大,与 90 年代相比,21 世纪前 10 年总洪涝次数有所减少,但重度洪涝次数达近 50 年的新高。5 个年代间平均

每年每站次总洪涝次数在 0.30 次以上。
据《中国气象灾害大典·湖南卷》记载,20 世纪 60 年代至 20 世纪末,湖南共有 5 个全省性大涝年,分别为 1988、1993、1996、1998 和 1999 年,其中 1988 和 1993 年洪涝时间段主要集中于秋季和盛夏时期,不在湖南早稻的生育期内。比对图 2 中,1996、1998 和 1999 年湖南早稻区平均每站总洪涝次数都在 0.80 次及以上,重涝次数都在 0.13 次左右。1970 与 1995 年的平均每站总洪涝次数同在 0.80 次及以上,1964 年平均每站重涝次数约为 0.13 次,1971 和 1978 年平均每站重涝的次数也在 0.10 次以上。经查历史灾情记载,1970 和 1995 年全省洪涝发生严重,1964 年全省大部分地区发生洪涝,1971 和 1978 年主要发生了局部暴雨洪涝(曾庆华等,2006)。反演的早稻洪涝的时间分布与历史灾情记载相吻合。20 世纪 60 年代以来,湖南早稻站点平均总洪涝次数在 0.50 次以上的年份主要集中在 60 年代、90 年代和 21 世纪前 10 年,而在 1991—2010 年有 15 年,说明 20 世纪 90 年代以来湖南早稻受洪涝灾害与前期相比较严重。

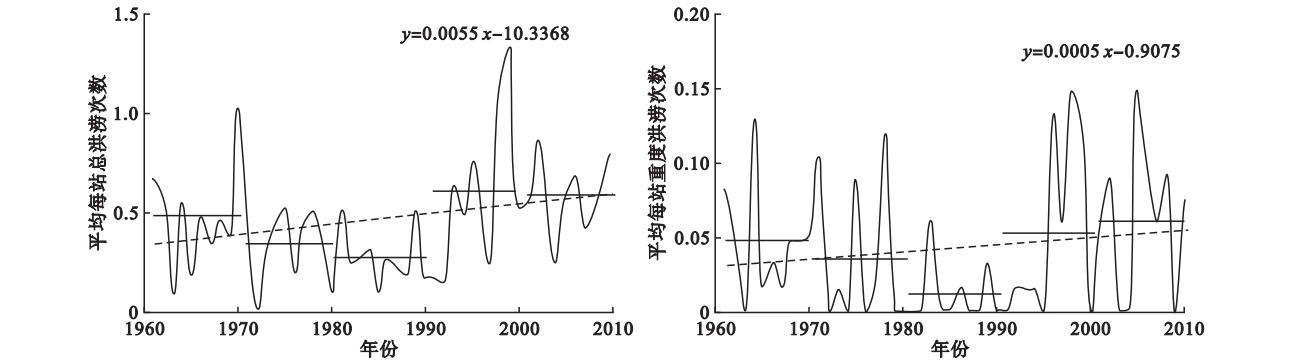


图 2 湖南早稻全生育期总洪涝次数和重度洪涝次数的年际变化
Fig.2 Interannual change of early rice total flood and severe flood frequency

1961—2010 年湖南地区早稻移栽-拔节期、孕穗-抽穗期和乳熟-成熟期 68 个气象站点平均每站总洪涝次数和重度洪涝次数的年际变化如图 3 所示。平均每站总洪涝与重度洪涝次数在移栽-拔节期的增加速率分别为 0.022 和 0.003 次 $\cdot 10a^{-1}$, 在孕穗-抽穗期的速率变化分别为增加 0.002 和减少 0.001 次 $\cdot 10a^{-1}$, 在乳熟-成熟期的增加速率分别为 0.031 次 $\cdot 10a^{-1}$ ($P<0.05$) 和 0.004 次 $\cdot 10a^{-1}$ ($P<0.05$)。移栽-拔节期早稻洪涝次数 20 世纪 60—70 年代增加, 80 年代减少至最低, 往后继续呈增加趋势, 70 和 90 年代后 20 年平均每站总洪涝频次达到了 0.25 次 $\cdot a^{-1}$ 以上。孕穗-抽穗期和乳熟-成熟期洪涝次数变化较一致, 在 20 世纪 60—70 年代减少, 往后逐年代增加, 于 90 年代达到另一高值, 之后 10 年有所下降。孕穗-抽穗期洪涝频次的高值在 20 世纪 60 和 90 年代, 站点平均总洪涝频次均超过 0.21

次 $\cdot a^{-1}$, 重度洪涝频次大于 0.02 次 $\cdot a^{-1}$, 即平均每年至少有 1 个站点发生 1 次重度洪涝; 乳熟-成熟期的洪涝频次高值则出现在 90 年代和 21 世纪前 10 年, 每个年代平均每站总洪涝次数和重度洪涝次数分别在 1.48 和 0.14 次以上。湖南早稻孕穗-成熟期的洪涝年际变化计算结果与张录军等 (2004) 对长江中游汛期洪涝的降水量与集中度研究成果吻合度高。相较其他年代, 湖南早稻在 20 世纪 90 年代全生育期间均有高频次高强度的洪涝发生, 而 80 年代早稻的总洪涝频次和重度洪涝频次相对较低。近 20 年早稻洪涝频次增长主要发生在移栽-拔节期和乳熟-成熟期。

2.4 早稻洪涝的空间分布

从图 4 可以看出, 洪涝的高发地区主要位于湘东, 湘中娄底地区和湘南永州地区, 总洪涝频次在 0.50 次 $\cdot a^{-1}$ 及以上, 对应《中国气象灾害大典·湖

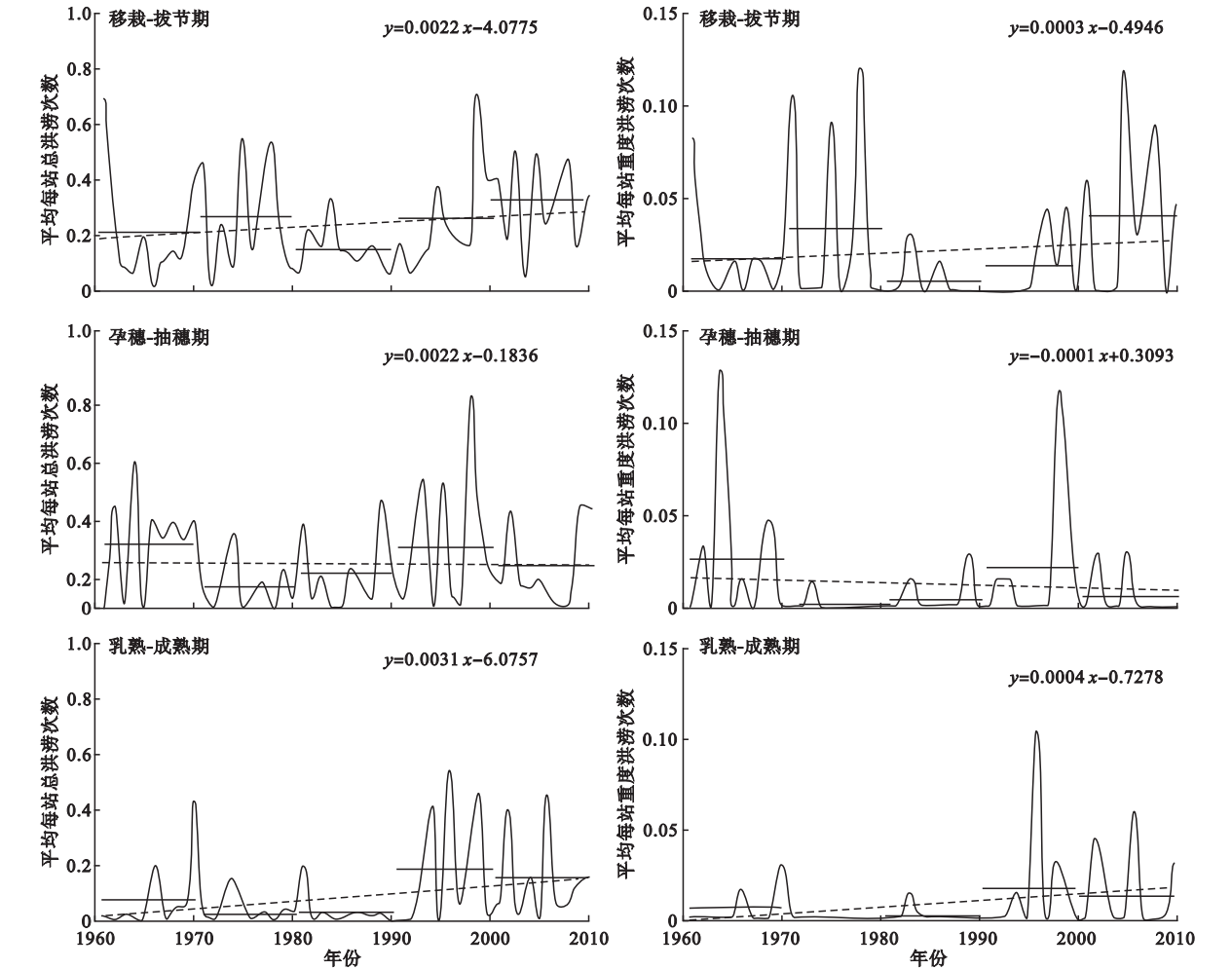


图 3 湖南早稻各生育时段总洪涝次数与重度洪涝次数的年际变化
Fig.3 Interannual change of early rice total flood and severe flood frequency in different growth stages

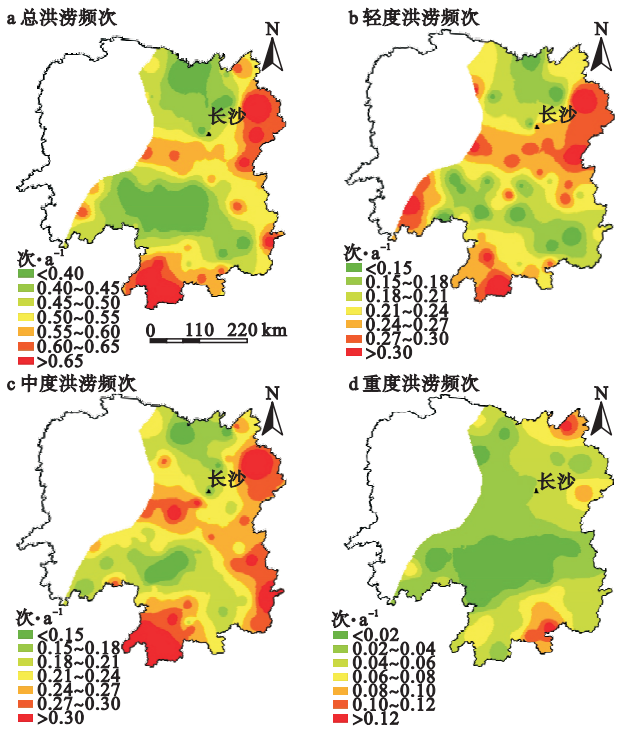


图4 1961—2010年湖南早稻全生育期总洪涝频次与各等级洪涝频次分布

Fig.4 Distribution of early rice total flood frequency in Hunan Province from 1961 to 2010

南卷》中的降水量分布图,基本符合记载中湖南以安化、平江、浏阳、桂东为中心的雨区。岳阳、洞口、江华等地大暴雨出现几率较多,上述地区早稻总洪涝频次均超过 $0.60\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$ 。洪涝相对较少发生地区主要位于湘北的常德、益阳地区和湘南衡阳、邵阳地区,对应记载中少雨中心位于衡邵盆地、洞庭湖平原和河谷地区,结果吻合。湖南早稻轻度洪涝主要发生在永州南部、湘东偏北部、安化桃源和绥宁洞口,上述地区轻度洪涝频次在 $0.27\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上;中

度洪涝集中区位于湖南中部、湘东地区和永州地区,发生频次几乎都超过 $0.24\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$;重度洪涝主要发生在岳阳北部和郴州南部地区,平均每年发生 0.10 次以上,即每 10 年至少发生一次,符合对全省 40 个站点 $1951—2000$ 年雨季内任意 10 日的降水量抽样统计中(曾庆华,2006),岳阳和临武出现总降水量大于 500mm 的频次最高的结果。

由图5可知,湖南早稻移栽-拔节期主要洪涝地区位于湘南,总洪涝频次在 $0.30\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上,次要洪涝地区在湘东,总洪涝频次约为 $0.25\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$;进入孕穗期后洪涝带有所北移,主要在湘东与湘中部地区,总洪涝频次超过 $0.17\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$;乳熟-成熟期早稻洪涝主要地区在湘东北和湘中以北,总洪涝频次在 $0.11\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上。

图6显示,早稻移栽-拔节期洪涝地区年代际变化相较明显,20世纪60年代洪涝发生区主要位于湘东和湘南,70年代主要位于湘东北和湘中以南,80年代主要位于湘南,90年代主要在湘东北和湘西南,进入21世纪后主要位于湘中及以南除衡邵盆地的地区。早稻移栽-拔节期湘南地区在5个年代间总洪涝频次均超过 $0.31\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$,为洪涝的主发区;20世纪60、70和90年代的湘东北和60年代、1990年后20年湘中局部地区总洪涝频次也达 $0.31\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$,为洪涝的第二主发区。湖南早稻孕穗-抽穗期高频次洪涝发生在20世纪60和90年代,主要洪涝地区在湘中北部,地区内大部分地区总洪涝频次超过 $0.30\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$;同时段,20世纪60年代和21世纪前10年均湖南中东部至南部形成了洪涝带,地区总洪涝频次超过 $0.20\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$,部分地区达到 $0.35\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$ 。20世纪60—80年代湖南地区早稻乳熟-成熟期总洪涝频次均在 $0.20\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下,大部

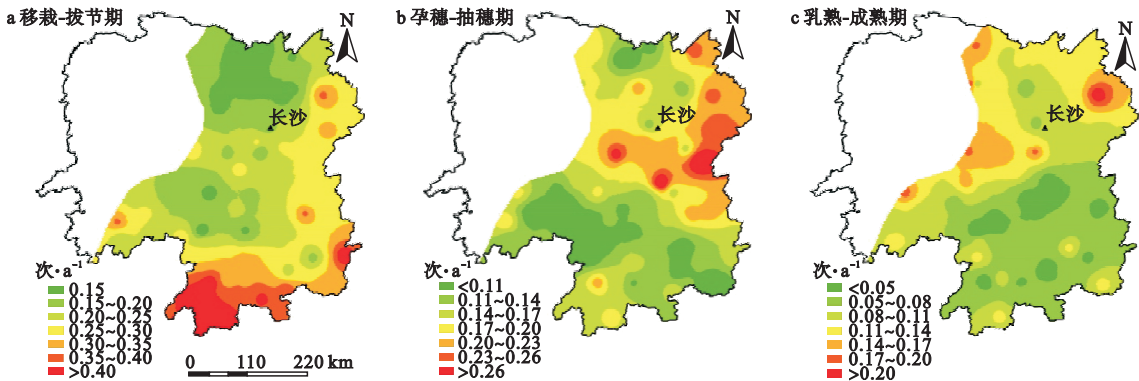


图5 1961—2010年湖南早稻各生育时段总洪涝频次分布

Fig.5 Distribution of early rice total flood frequency in different growth stages from 1961 to 2010

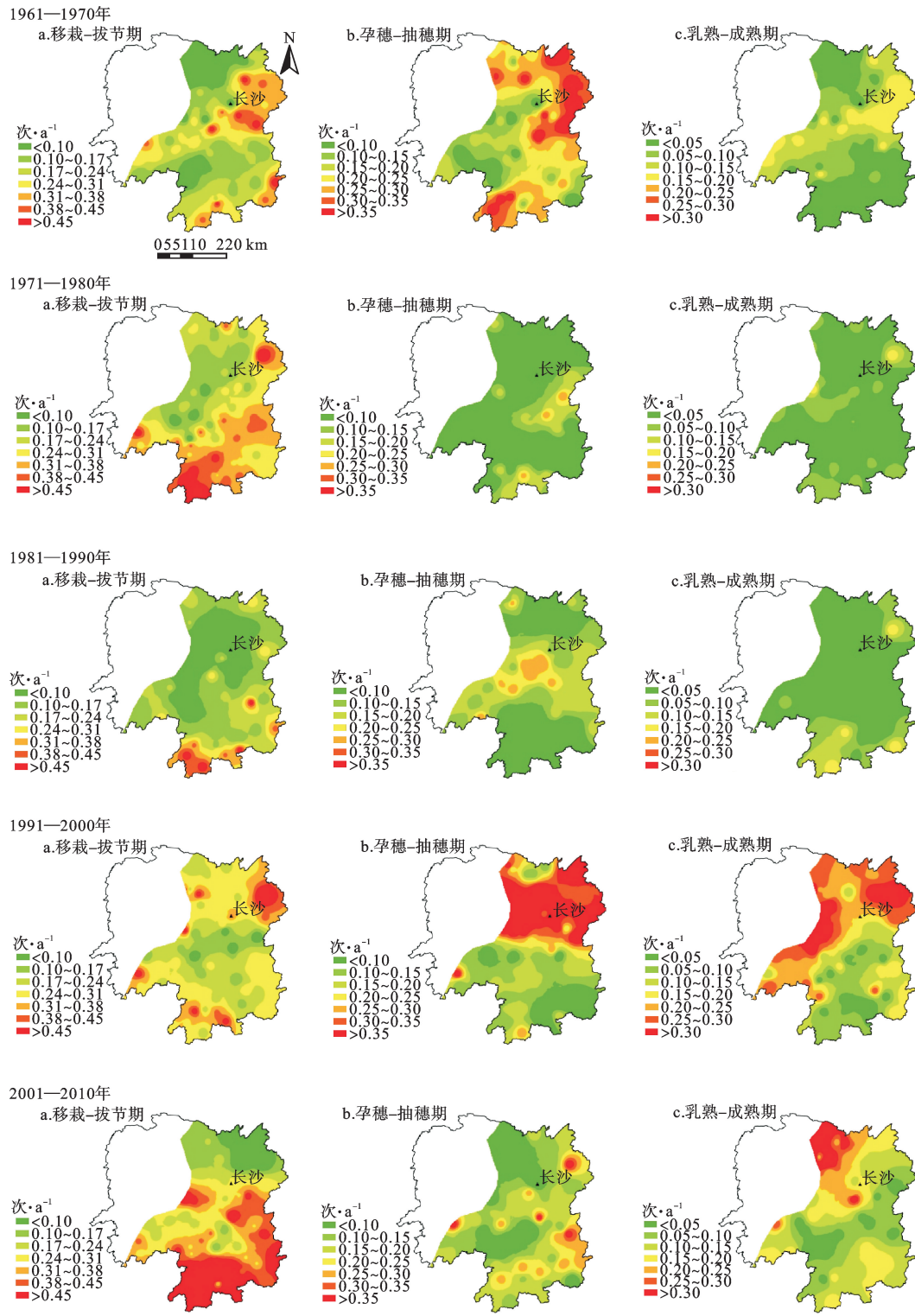


图 6 湖南地区早稻各生育时段总洪涝频次分布年代际变化
Fig.6 Interdecadal change of early rice total flood frequency distribution in different growth stages

分地区总洪涝频次不到 0.10 次 · a⁻¹。该时段总洪涝频次进入 20 世纪 90 年代后有显著增长,主要集中在湘中及以北地区,20 世纪 90 年代的岳阳地区、湘中局部地区和 21 世纪前 10 年的湘乡、常德地区

总洪涝频次均超过 0.30 次 · a⁻¹。湖南早稻各生育时段洪涝主发区在 1961—2010 年几乎每个年代都属于洪涝中心(图 5)。观察 5 个年代的早稻全生育期,随着时间的推移,总洪涝次数集中地区均大致呈现

由南至北的走向。

3 讨论

3.1 早稻不同生育时段洪涝灾害等级指标

本研究基于 50 年湖南地区早稻洪涝灾情史料的重演分析,重建了早稻洪涝灾害过程降水量样本序列;基于不同分布型函数对样本序列拟合的 K-S 检验结果,优选出样本序列拟合的正态分布型函数;在此基础上,采用学生氏 t -分布方法,构建了早稻移栽-拔节期、孕穗-抽穗期、乳熟-成熟期轻、中、重等级的早稻洪涝等级指标。其中早稻孕穗-抽穗期洪涝等级指标阈值高于移栽-拔节期、但低于乳熟-成熟期指标阈值,与已有的水稻洪涝田间控制试验研究成果,即早稻洪涝指标随早稻的株高增加有所增加(李永和等,2004;殷剑敏等,2009)和早稻孕穗抽穗阶段对淹水环境的敏感程度高于乳熟成熟阶段(李永和等,2004)相吻合。前人对早稻洪涝的研究以田间淹涝试验为主,尚无基于生育时段灾害过程降水量的早稻洪涝等级指标报道,相关成果多以不同淹涝高度、日数作为指标表征早稻生理特性和产量性状受淹涝的影响程度(李阳生等,2000;殷剑敏等,2009;宁金花等,2013),由于未考虑实际降水的动态过程以及淹涝环境的浑浊程度等因素的影响,指标难以进行大范围监测应用。本研究以灾情史料为基础构建的早稻洪涝等级指标,经过验证表明能较好地反映早稻洪涝灾害的实际发生情况,且应用所需资料易于获取,对实时开展区域早稻洪涝灾害监测预警与评估有实用价值。

3.2 早稻洪涝的时间和空间分布

本研究给出的湖南早稻总洪涝次数年代际变化,20 世纪 60—80 年代逐年减少,90 年代显著增加并达最大,2001—2010 年继续维持在较高水平。与王春乙等(2007)对 1950—2003 年全国农业洪涝受灾面积变化研究结果,即 20 世纪 60 年代至 80 年代初期洪涝面积减少,此后呈现增加趋势基本一致。本研究发现,20 世纪 90 年代之后湖南地区早稻洪涝发生频繁的地域主要在湘北与湘中东部至南部,湘中南部衡邵盆地早稻遭受洪涝灾害的频次最低,这与罗伯良等(2009)应用信息扩散理论和 1987—2006 年湖南水稻播种面积、水灾成灾面积资料计算得到的湖南地区水稻洪涝灾害风险概率分布图有较好的吻合性。李巧媛等(2013)研究湖南地区水稻生产受降水量影响时,认为 2000 年后湖南地区水稻

遭受洪涝灾害有加重的趋势,本研究中同时段早稻重度洪涝频次为 5 个年代的最高值,结论相同。本文研究揭示的基于生育时段的湖南地区早稻洪涝灾害时空分布特征,与历史资料和已有研究成果符合程度较高,也从另一方面表明构建的指标具有较好的准确性。

长江流域暴雨具有局地持续强降水特征(鲍名,2007),站点降水数据对区域的降水情况反映能力有一定局限。本文应用湖南早稻种植区 68 个气象站点的降水量数据研究降水过程对早稻洪涝的致灾影响,难以完全反映区域局地降水对早稻洪涝发生的影响程度。洪涝灾害的成因复杂,包括致灾的降水因素、孕灾的环境因素(地形、雨水汇聚等)、承灾的作物易损或脆弱因素等。本研究基于灾情史料记录、气象资料构建的早稻洪涝灾害等级指标以及时空分布特征分析,耦合了早稻洪涝灾害的致灾因子、孕灾环境和承灾体易损性或脆弱性等的相关信息,具有较好的综合表征能力。但对于如早稻扬花期遭遇大雨洗花易引起水稻空壳,直接影响当年产量等灾害过程降水量指标,本文研究结果反映程度有限。未来需结合田间控制试验,开展短时强降水对早稻关键生育期影响的细化研究。

参考文献

- 鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景. 大气科学, **31**(5): 779–792.
- 陈家金, 林晶, 李丽纯, 等. 2010. 暴雨灾害对福建水稻产量影响的灾损评估方法. 中国农业气象, **2010**: 132–136.
- 董文杰, 高歌, 王有民, 等. 2007. 中国气象灾害年鉴(2006). 北京: 气象出版社.
- 董文杰, 何勇, 陈峪, 等. 2008. 中国气象灾害年鉴(2007). 北京: 气象出版社.
- 董文杰, 张强, 郭进修, 等. 2006. 中国气象灾害年鉴(2005). 北京: 气象出版社.
- 樊顺厚. 1994. 正态分布的子样标准差过低估计了总体标准差. 纺织高校基础科学学报, (3): 242–244.
- 胡涛平, 高传山. 2014. 汉江中下游近 44 年降水特征分析. 甘肃水利水电技术, **50**(10): 7–10.
- 霍治国, 李世奎, 王素艳, 等. 2003. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究. 自然资源学报, **18**(6): 692–703.
- 姜爱军, 周学东, 周桂香, 等. 2000. 长江下游异常雨涝及其对农业影响的评估. 地理学报, **55**(z1): 39–45.
- 姜会飞, 廖树华, 潘学标, 等. 2011. 区域暴雨指标与作物洪涝受灾率的关系. 安徽农业科学, **39**(17): 10432–10435.
- 李海燕, 陈国平, 陈光涛, 等. 2011. 近 48a 鄂东汛期暴雨日

- 数的时空变化特征. 暴雨灾害, **30**(1): 77-82.
- 李巧媛, 丁贤法, 许 霖, 等. 2013. 降水量对湖南省水稻生产的影响分析. 湖北农业科学, **52**(2): 265-268.
- 李阳生, 李绍清. 2000. 淹涝胁迫对水稻生育后期的生理特性和产量性状的影响. 植物科学学报, **18**(2): 117-122.
- 李永和, 石亚月, 陈耀岳, 等. 2004. 试论洪涝对水稻的影响. 自然灾害学报, **13**(6): 83-87.
- 罗伯良, 张 超, 黄晚华, 等. 2009. 基于信息扩散法的湖南水稻生产水灾风险评估. 中国农业气象, **30**(3): 458-462.
- 宁金花, 霍治国, 陆魁东, 等. 2013. 不同生育期淹涝胁迫对杂交稻形态特征和产量的影响. 中国农业气象, **34**(6): 678-684.
- 盛 骤, 谢世千, 潘承毅. 1996. 概率论和数理统计. 北京: 高等教育出版社.
- 田 敏, 柴钰翔, 陈余萍, 等. 2010. 农业洪涝灾害风险评估区划指标研究. 安徽农业科学, **38**(12): 6382-6384, 6505.
- 王春乙, 娄秀荣, 王建林. 2007. 中国农业气象灾害对作物产量的影响. 自然灾害学报, **16**(5): 37-43.
- 肖子牛, 叶殿秀, 王 凌, 等. 2008. 中国气象灾害年鉴(2008). 北京: 气象出版社.
- 徐 明, 马超德. 2009. 长江流域气候变化脆弱性与适应性研究. 北京: 中国水利水电出版社.
- 殷剑敏, 孔 萍, 李迎春, 等. 2009. 我国南方早稻洪涝灾害指标试验研究. 自然灾害学报, **18**(4): 1-5.
- 游志颖. 1999. SPSS 软件包中非参数检验方法的正确使用. 中国卫生统计, **16**(2): 122-124.
- 曾庆华, 黎祖贤, 向德龙, 等. 2006. 中国气象灾害大典·湖南卷. 北京: 气象出版社.
- 张录军, 钱永甫. 2004. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究. 地球物理学报, **47**(4): 622-630.
- 邹朝望, 孙媛媛, 谢伯承, 等. 2010. 湖南省洪涝灾害风险评估研究. 人民长江, **41**(11): 63-65.
- Ahn JH, Choi HI. 2013. A new flood index for use in evaluation of local flood severity: A case study of small ungauged catchments in Korea. *Journal of the American Water Resources Association*, **49**: 1-14.
- Kates RW, Ausubel JH, Berberian M. 1985. Climate Impact Assessment. SCOPE.
- Kite GW. 1977. Frequency and Risk Analysis in Hydrology. Fort Collins, Colorado: Water Resources Publications.
- Sakamoto T, Cao PV, Nguyen NV, et al. 2009. Agro-ecological interpretation of rice cropping systems in flood-prone areas using MODIS Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **75**: 413-424.
- Son NT, Chen CF, Chen CR, et al. 2013. Satellite-based investigation of flood-affected rice cultivation areas in Chao Phraya River Delta, Thailand. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **86**: 77-88.
-
- 作者简介** 汪天颖, 女, 1990年生, 硕士研究生, 主要从事农业气象研究. E-mail: fino1990@gmail.com
- 责任编辑** 李凤芹
-