

基于概率统计方法的承德市农业旱灾风险评估

许凯^{1,2}, 徐翔宇^{1,2*}, 李爱花², 杨大文¹

(1. 清华大学水利水电工程系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 根据旱灾风险的统计特征, 提出2种基于概率统计方法的旱灾风险评价方法: 1) 旱灾损失的概率分布曲线, 2) 旱灾损失与干旱概率的关系曲线。以滦河上游承德市辖区的农业旱灾风险为例进行应用研究。根据1990—2007年历年农业旱灾损失数据计算粮食因旱减产率, 拟合其概率分布。利用分布式水文模型模拟得到该区域1956—2005年0~50 cm的月平均土壤含水率, 识别农业干旱事件, 计算农业干旱烈度概率, 选用对数函数拟合因旱粮食减产率和农业干旱烈度概率关系曲线。采用因旱粮食减产率期望值表征区域旱灾风险, 2种方法结果一致性较好, 研究区域农业旱灾风险上游大于下游, 各个县的多年平均因旱粮食减产率为7%~15%。

关键词: 干旱, 概率分布, 风险评估, 农业烈度概率, 减产率, 农业旱灾风险

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.018

中图分类号: S423

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0139-08

许凯, 徐翔宇, 李爱花, 等. 基于概率统计方法的承德市农业旱灾风险评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 139—146.

Xu Kai, Xu Xiangyu, Li Aihua, et al. Assessing agricultural drought disaster risk in Chengde city using stochastic method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 139—146. (in Chinese with English abstract)

0 引言

旱灾是世界上最严重的自然灾害之一, 它在持续时间、影响范围、灾害影响等方面位列自然灾害之首^[1-2], 世界上除了南北极的其他各个气候带均有干旱发生^[3]。全球气候变化背景下, 干旱历时、烈度和影响范围都有增加的趋势^[4]。2002—2010年澳大利亚千禧年大旱^[5]、2010—2012年美国西南特大干旱^[6]、2010—2012年中国西南地区连续三年特大春旱等都预示着未来的干旱威胁将更大^[7-8]。干旱的发生导致旱灾损失, 随着社会经济迅猛发展, 社会经济和生态环境的暴露性和脆弱性增大, 导致干旱成灾率和旱灾损失呈明显增加的趋势。

然而, 传统应急抗旱手段具有滞后性, 难以有效预防和减小旱灾损失。近几年兴起的旱灾风险管理则可以实现从消极被动抗旱到积极主动抗旱的

转变^[9]。风险评估是风险管理的基础和核心, 目前风险评估的方法主要有两大类: 模糊综合评价方法和概率统计方法^[10]。前者主要是从灾害风险的组成成分“致灾因子的危险性、承灾体的暴露性和脆弱性以及抗灾能力”^[11]等方面着手建立评价指标体系, 采用专家打分、层次分析等模糊数学方法计算得到灾害风险度。该方法已经在旱灾风险评估中得到了广泛应用^[12-15], 但它在指标遴选、权重确定等方面易受人为主观因素影响, 且结果仅仅是相对值或者简单的风险等级。后一种方法目前仅在金融、保险领域应用较多, 主要是用来获得损失(或收益)的概率分布^[16-18]。如洪水风险评估中的“洪水频率~水位~淹没范围(淹没损失)”关系、生态环境风险分析中的“暴露(污染物浓度)~反应(不利影响)”关系^[19]等都用到概率统计方法。由于历史旱灾统计数据匮乏, 对干旱致灾过程认识不足以及旱灾的复杂性等因素, 概率统计方法在旱灾风险评估中的应用还比较少。

尝试基于概率统计方法来评估旱灾风险具有重要的现实意义, 此外, 随着对旱灾关注的增多和抗旱投入的增大, 历史旱灾损失统计数据逐渐增多, 为本研究提供了基础资料条件。本文以农业旱灾风险为例进行研究, 研究区域为滦河上游承德市辖区的八个县, 提出两种基于概率统计的农业旱灾风险评估方法: 1) 因旱粮食减产率(以下简称因

收稿日期: 2013-02-01 修订日期: 2013-06-27

基金项目: 中国博士后科学基金第52批面上资助项目(2012M520292); 水利部重大基建前期项目“全国干旱区划及旱灾风险评估研究”

作者简介: 许凯(1989—), 男, 山东莒县人, 博士生, 主要从事水文水资源研究。北京 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 水利水电工程系, 100084。Email: xukai0606@gmail.com

*通信作者: 徐翔宇(1986—), 女, 浙江衢州人, 博士后, 主要从事水文模型及生态水文方面的研究。北京 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 水利水电工程系, 100084。

Email: xuxy12@tsinghua.edu.cn

旱减产率)的概率分布曲线;2)因旱减产率和农业干旱烈度概率的关系曲线。用因旱减产率期望值(多年平均因旱减产率)来表征农业旱灾风险,对两种方法的结果进行了对比分析。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

本文选取研究区域为滦河流域上游承德市辖区的八个县(图1)。该区域位于河北省东北部,处于华北和东北两个地区的连接过渡地带,面积约为3.5万 km^2 ,地势西北高东南低,平均海拔为938 m,土地利用以林地为主,占49.9%,耕地占20.2%,草地占26.8%,水域占1.25%,未利用土地占1.16%,城镇建设用地占0.72%。气候类型为寒温带向暖温带过渡,半干旱向半湿润过渡,大陆性、季风型燕山山地气候,多年平均降水为551 mm^[20]。

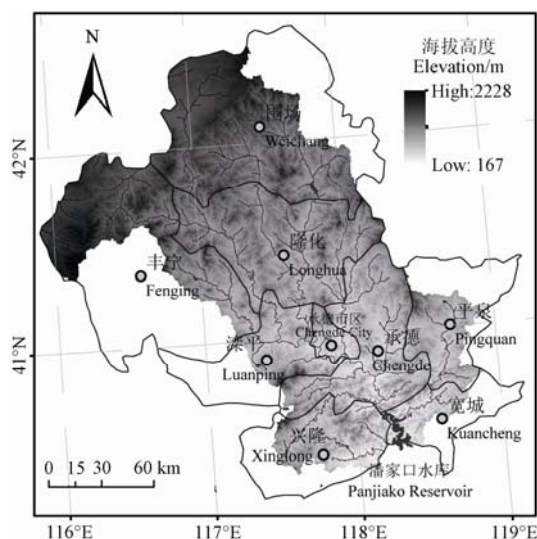


图1 研究区域
Fig.1 Research region

承德市下辖八县三区(图2),围场县、丰宁县、隆化县、滦平县、平泉县、承德县、宽城县、兴隆县,双桥区、双滦区、鹰手营子矿区。双桥区、双滦区和鹰手营子区农业所占社会经济比例较少,在研究中不予考虑。受到全球气候变化和人类活动的影响,近年来承德市年平均气温显著升高,降水有减少趋势,潘家口水库的入库流量急剧减少^[21]。气温升高将导致蒸发散增多土壤变干^[22],影响作物生长,因此,对承德市进行农业旱灾风险评价很有意义。

1.2 数据来源

农业旱灾损失数据来自于中国水利部水利水电规划设计总院在制定《全国抗旱规划》时收集的各县1990—2007年的旱情、旱灾数据,包括受旱面积、成灾面积、绝收面积、因旱减产量等^[23]。

收集滦河潘家口水库上游的日气象数据(包括降水、气温、相对湿度、日照时数、风速等),土地利用类型、土壤类型、植被覆盖、数字高程模型(DEM)等,建立基于流域地形地貌的分布式水文模型(geography-based hydrological model, GBHM),模型的详细原理和结构参见文献[24]。模型采用1960—1969年实测径流对分布式水文模型进行率定,采用1970—1979年的实测径流对分布式水文模型进行验证,采用纳什效率系数(NSE)对模拟的月径流结果进行评判,每个站点的NSE值均在0.8以上,说明GBHM模型在模拟月尺度水量平衡上的模拟效果良好^[25-26],模拟得到的月平均土壤水含水率能够较好的反映实际情况。

土壤水与作物的生长息息相关,研究区域内的主要农作物是玉米,其次是马铃薯和水稻^[20],玉米的大根深是1.0~1.7 m^[27],其中80%以上的根系集中在0~40 cm的土层中^[28],马铃薯的最大根深约为1.0 m,大部分的根系集中在0~30 cm^[29],水稻最大根深是0.5~1.0 m^[27],70%~90%的根系集中在0~20 cm^[30]。因此,本文采用0~50 cm土层的平均土壤水状况来反映与作物生长相关的平均土壤水分状况,同时利用该土层的土壤含水率亏缺来描述农业干旱。0~50 cm土层的平均土壤体积含水率是基于GBHM模拟得到的,是1956—2005年逐月的空间网格分布(空间分辨率2 km)数据^[25-26],模拟的土壤水数据与中国农业气象站(承德站,站号:54430)的土壤水分数据(来源于中国气象科学数据共享网,1991—2005年的旬数据)进行对比,相对模拟误差为1.8%,模拟效果良好。基于2000年土地利用分布图(图2)及各县的行政区划,利用ArcGIS提取并计算每个县耕地面积上的平均土壤含水率。

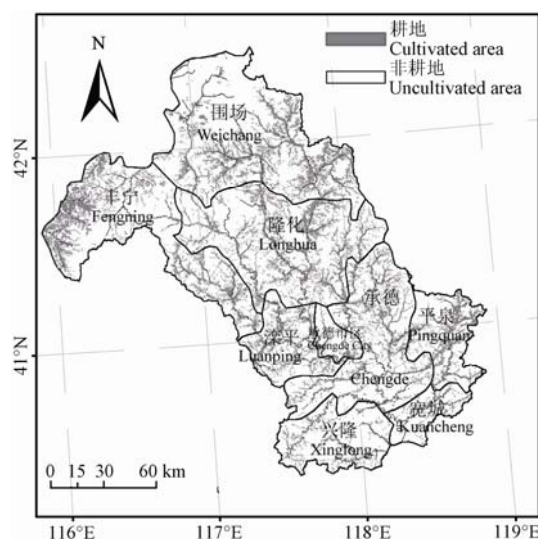


图2 耕地分布
Fig.2 Distribution of cultivated land

2 研究方法

2.1 农业干旱识别与频率分析

干旱是某一时段内气象或水文要素值小于多年平均值的一种自然现象。目前在气象和水文干旱研究领域,通常选取一定水平的阈值来识别干旱,得到干旱历时和干旱烈度^[31-32],然后采用 *Copula* 方法计算干旱历时和烈度的联合概率分布^[33]。若采用以上方法进行农业干旱事件的识别,会出现识别出的干旱事件与作物生长期不相匹配的问题,有些发生在非生长期的干旱事件对作物生长影响很小或者根本没有影响。因此,本文仅识别承德市主要农作物的生长期 3-9 月期间的干旱,不考虑农业干旱历时,仅对农业干旱烈度进行频率分析,对干旱事件识别方法进行了简化。主要过程如下:

计算生长期内每个月的土壤含水率相对距平值

$$d_{i,j} = \frac{\theta_{i,j} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \quad (1)$$

其中, $d_{i,j}$ 为第 i 年、第 j 月土壤含水率相对距平值, $\theta_{i,j}$ 为第 i 年、第 j 月平均土壤含水率, $\bar{\theta}_j$ 为第 j 月的多年平均土壤含水率,本文中 $i=1956, \dots, 2005$, $j=3, \dots, 9$ 。若 $d_{i,j} < 0$, 则认为该月发生农业干旱,取生长期内发生农业干旱的各月份的相对距平值之和作为农业干旱烈度

$$s_i = -\sum d_{i,j}, \quad d_{i,j} < 0 \quad (2)$$

对公式(2)计算出的干旱烈度序列进行频率分析。选取指数分布 (*exp*)、伽马分布 (*gam*)、对数正态分布 (*logn*)、广义极值分布 (*gev*) 四种常用的分布类型,采用极大似然法分别初估这四种分布的参数,采用 *Kolmogorov-Smirnov* 检验^[34] (*KS* 检验) 进行假设检验,根据 *KS* 检验统计量值检验拟合优度,确定最优分布类型。在此基础上,采用传统水文频率分析中的适线法,基于均方根误差 (*RMSE*) 尽量小的原则调整参数,并尽量照顾到分布的尾部,使其通过样本中最严重干旱所对应的经验频率点距。

2.2 基于概率统计方法的农业旱灾风险评价

风险是损失的规模及其发生的可能性,农业旱灾风险可用因旱减产率的概率分布(以下简称“方法一”)来定量化表示。旱灾风险是在特定环境中干旱事件发生的可能性及其可能造成的社会经济后果,可拟合因旱减产率和农业干旱烈度概率关系曲线(以下简称“方法二”)来描述农业旱灾风险。

因旱减产率计算公式如下

$$r = \frac{\Delta y}{y + \Delta y} \quad (3)$$

其中, r 为因旱减产率; y 为实际产量; Δy 为因旱

减产产量。假设每个县的因旱减产率在空间上均匀分布,因此总面积上的因旱减产率可代表部分面积上的因旱减产率。

方法一: 因旱减产率的概率分布曲线

假设因旱减产率序列是随机序列,则可以采用 2.1 中的方法进行频率分析。首先通过极大似然估计和 *KS* 检验得到最优概率分布类型,然后通过适线法确定最终参数,采用因旱减产率的期望值表征区域农业旱灾风险。

方法二: 因旱减产率与农业干旱概率的关系曲线

假设干旱事件和旱灾损失存在一一对应的关系,即某一特定的地区,一定规模的干旱事件(农业干旱烈度)对应唯一的旱灾损失(农业因旱减产率),因此干旱事件的概率分布与旱灾损失的概率分布是相同的。

若有农业干旱烈度样本 $s_i (i=1, 2, \dots, n)$, 对应的农业因旱减产率为 $r_i (i=1, 2, \dots, n)$, 两者发生概率相等 $p'(s_i) = p'(r_i)$, 则农业因旱减产率的期望值 $E(r)$ 为

$$E(r) = \sum_{i=1}^n r_i p'(s_i) \quad (4)$$

若采用超越概率 $p(S \geq s)$ 的形式, 则上式变为

$$E(r) = \sum_{i=1}^n r_i [p(s_i - \Delta s) - p(s_i)] = \sum_{i=1}^n r_i dp_i \quad (5)$$

其中, $E(r)$ 为农业因旱减产率的期望值, 指的是多年平均农业因旱减产率。

采用 2.1 中的农业干旱识别和频率分析方法确定农业干旱烈度的概率分布。拟合干旱烈度和因旱减产率超越概率 $p(S \geq s)$ 的关系曲线, 假设其满足对数函数关系

$$r = a \ln(p) + b \quad (6)$$

其中, r 为因旱减产率, p 为农业干旱烈度超越概率 $p(S \geq s)$, a 、 b 为拟合参数。将式(5)的离散形式变为连续形式, 得到多年平均农业因旱减产率 $E(r)$ 的理论值为

$$E(r) = \int_0^1 (a \ln(p) + b) dp = -a + b \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 因旱减产率的概率分布曲线

假设四种分布条件下因旱减产率 *KS* 检验结果见表 1。表中“—”表示该分布未通过 *KS* 检验, 粗体字标出的是 *KS* 统计量的最小值, 代表着最优的分布类型。各县最优的分布中, 广义极值分布出现五次, 对数正态分布出现三次。为了在消除分布类型差异对后续分析的影响, 选用广义极值分布拟合因旱减产率的概率分布, 结果见表 2。首先通过极大似然法初估形状参数 κ 、尺度参数 σ 、位置参数 μ , 采用适线法调整参数, 在保证整体拟合效果的前提下, 提高分布尾部的拟合效果。适线后各县拟合均方根误差 (*RMSE*) 均在 8% 以内。表中最后一列为因旱减产率的期望值 $E(r)$,

该值越大农业旱灾风险越大。图 3 为理论分布曲线和经验频率 ($p=m/(n+1)$, n 为样本容量, m 为降序排名) 的拟合情况。从图和表均可以看出, 拟合效果良好。

表 1 不同分布类型因旱减产率 KS 统计量

Table1 KS test statistic of different hypothetical distributions for drought caused yield loss rate

| 县名 | 指数 | 伽马 | 对数正态 | 广义极值 |
|----|-------|-------|--------------|--------------|
| 围场 | 0.309 | 0.164 | 0.150 | 0.138 |
| 丰宁 | 0.275 | 0.167 | 0.155 | 0.140 |
| 隆化 | 0.272 | 0.176 | 0.138 | 0.113 |
| 承德 | --- | 0.094 | 0.075 | 0.075 |
| 滦平 | --- | 0.214 | 0.181 | 0.154 |
| 平泉 | --- | 0.132 | 0.132 | 0.142 |
| 宽城 | --- | 0.132 | 0.129 | 0.133 |
| 兴隆 | --- | 0.209 | 0.186 | 0.130 |

注: 表中“---”表示该分布未通过 KS 检验, 粗体字标出的是 KS 统计量的最小值, 代表着最优的分布类型。下同
Note: “---” represents the distribution was not approved by KS significance test. The bold numbers represent the minimum value of KS test statistic, which means the best distribution type. The same as blow.

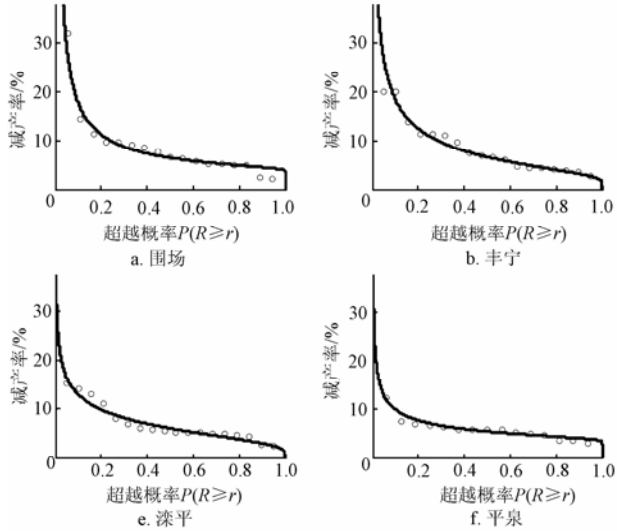


图 3 因旱减产率概率分布

Fig.3 Cumulative probability distribution of drought caused yield loss rate

3.2 农业干旱概率与因旱减产率关系曲线

假设四种分布条件下农业干旱烈度 KS 检验的结果如表 3 所示。表中“---”表示该分布未通过 KS 检验, 粗体字标出的是 KS 统计量的最小值, 代表着最优的分布类型。各县最优的分布中, 广义极值分布出现四次, 伽马分布出现四次, 然而围场县和丰宁县的 KS 统计量伽马分布远大于广义极值分布, 其余六个县两种分布表现接近, 因此总体上广义极值分布表现好于伽马分布, 故选用广义极值分布拟合各县农业干旱烈度概率分布, 结果如表 4 所示。同样采用极大似然法初估形状参数 κ 、尺度参数 σ 、位置参数 μ , 采用适线法调整参数, 在保证整体拟合效果的前提下, 提高分布尾部的拟合效果。适线后各县拟合均方根误差 ($RMSE$) 均在 4% 以内, 表中最后一列农业干旱烈度期望值代表农业干旱严

表 2 因旱减产率的频率分析结果

Table 2 Frequency analysis results of drought caused yield loss rate

| 县名 | 形状参数 κ | 尺度参数 σ | 位置参数 μ | $^1RMSE/\%$ | $^2E(r)/\%$ |
|----|---------------|---------------|------------|-------------|-------------|
| 围场 | 0.81 | 1.89 | 5.61 | 4.9 | 14.6 |
| 丰宁 | 0.49 | 3.20 | 5.30 | 4.1 | 10.1 |
| 隆化 | 0.52 | 3.51 | 6.30 | 5.7 | 12.0 |
| 承德 | 0.17 | 2.46 | 5.16 | 2.6 | 7.1 |
| 滦平 | 0.23 | 2.70 | 5.00 | 7.3 | 7.3 |
| 平泉 | 0.45 | 1.28 | 4.90 | 7.9 | 6.7 |
| 宽城 | 0.31 | 2.02 | 5.50 | 4.8 | 7.5 |
| 兴隆 | 0.40 | 3.80 | 6.70 | 5.5 | 11.3 |

注: 1. $RMSE$ 为均方根误差; 2. $E(r)$ 为农业因旱减产率的期望值, 指的是多年平均农业因旱减产率, 由公式 (7) 计算。

Note: 1. $RMSE$ is the root-mean-square error; 2. $E(r)$ is the expectancy value of drought caused yield loss rate, referring to mean annual drought caused yield loss rate, which is calculated by equation (7).

重程度, 隆化县最大, 宽城县最小。采用对数函数 (公式 6) 拟合因旱减产率和农业干旱烈度概率之间的关系曲线, 拟合结果见表 5。平泉县和宽城县减产率和农业干旱烈度概率之间的相关关系较差, 无法用指数函数进行拟合, 这是由于该地区水资源丰富, 水利设施完备, 灌溉保证率较高造成的。平泉县境内有老哈河、瀑河等多条河流, 水资源十分丰富^[20], 宽城县境内有潘家口水库, 而且是承德市的降水中心。另外, 统计数据显示平泉县单位耕地面积农业机械总动力、农村用电总量和有效灌溉面积等在承德市位居前列^[35]。本文所采用的模型没有考虑灌溉对土壤含水率的影响, 因此即使识别出天然状况下发生土壤水干旱, 在有灌溉保证的条件下, 作物也不会出现减产的现象。从表 5 中可以看出, 其他六个县的 a 、 b 值均在 T 检验 95% 置信区间内,

除了承德县之外,其他各县 R^2 均在 0.4 以上,围场县和兴隆县的 R^2 超过了 0.6,说明农业干旱烈度和因旱减产率之间存在着指数函数关系这一假设是合理的。表 5 中第七列多年平均农业因旱减产率越大,则农业旱灾风险越大。

3.3 结果比较

将因旱减产率期望值分为五个等级,绘制分别基于方法一和方法二计算的因旱减产率期望的空间分布,如图 4 和图 5 所示。可以看出,两种方法所得结果基本一致,整体上,从上游到下游农业旱灾风险逐渐减小,这与文献[36]的结论是一致的。旱灾风险是致灾因子危险性,承载体的暴露性和脆弱性,以及抗旱能力共同决定的。上游的围场县农业干旱烈度(危险性)仅位于第四位(表 4),但是它的耕地面积大(暴露性大),农业灌溉设施较少^[37](抗旱能力弱),导致其农业旱灾风险最为严重^[38];隆化县农业旱灾风险较大的原因是它的干旱情势比较严重(危险性高)^[38]。

表 3 不同分布类型农业干旱烈度 KS 统计量

Table3 KS test statistic of different hypothetical distributions for agricultural drought severity

| 县名 | 指数 | 伽马 | 对数正态 | 广义极值 |
|----|-------|--------------|-------|--------------|
| 围场 | 0.181 | 0.140 | 0.201 | 0.068 |
| 丰宁 | --- | 0.139 | 0.195 | 0.059 |
| 隆化 | 0.201 | 0.095 | 0.150 | 0.109 |
| 承德 | 0.117 | 0.097 | 0.130 | 0.117 |
| 滦平 | 0.130 | 0.107 | 0.180 | 0.071 |
| 平泉 | 0.120 | 0.117 | 0.135 | 0.127 |
| 宽城 | --- | 0.104 | 0.130 | 0.103 |
| 兴隆 | 0.122 | 0.066 | 0.128 | 0.070 |

表 4 农业干旱烈度频率分析结果

Table 4 Frequency analysis results of agricultural drought severity

| 县名 | 形状参数 κ | 尺度参数 σ | 位置参数 μ | $RMSE/\%$ | 干旱烈度 |
|----|---------------|---------------|------------|-----------|------|
| 围场 | -0.13 | 0.19 | 0.21 | 2.8 | 0.30 |
| 丰宁 | -0.07 | 0.14 | 0.17 | 2.2 | 0.24 |
| 隆化 | 0.18 | 0.17 | 0.21 | 3.0 | 0.34 |
| 承德 | 0.20 | 0.18 | 0.17 | 3.5 | 0.32 |
| 滦平 | 0.27 | 0.17 | 0.17 | 2.4 | 0.33 |
| 平泉 | 0.16 | 0.18 | 0.16 | 3.2 | 0.30 |
| 宽城 | -0.17 | 0.12 | 0.15 | 3.0 | 0.20 |
| 兴隆 | 0.21 | 0.14 | 0.15 | 1.9 | 0.27 |

表 5 因旱减产率与农业干旱烈度概率关系曲线的拟合结果

Table5 Fitting results of drought caused yield loss rate versus agricultural drought severity probability

| 县名 | a | a 的 95%置信区间 | b | b 的 95%置信区间 | R^2 | 多年平均农业因旱减产率 $E(r)/\%$ |
|----|--------|-----------------|------|----------------|-------|-----------------------|
| 围场 | -10.74 | [-15.80, -5.67] | 3.63 | [-0.21, 7.47] | 0.664 | 14.4 |
| 丰宁 | -4.49 | [-7.14, -1.84] | 5.63 | [2.71, 8.55] | 0.485 | 10.1 |
| 隆化 | -7.05 | [-12.97, -1.13] | 5.28 | [-0.77, 11.33] | 0.414 | 12.3 |
| 承德 | -2.48 | [-4.94, -0.01] | 4.62 | [1.60, 7.64] | 0.285 | 7.1 |
| 滦平 | -3.12 | [-5.28, -0.95] | 4.26 | [1.42, 7.10] | 0.427 | 7.4 |
| 平泉 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 宽城 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 兴隆 | -5.68 | [-8.44, -2.90] | 4.55 | [0.76, 8.34] | 0.601 | 10.2 |

注:表中 a 、 b 是公式(6)中的参数,通过因旱减产率和农业干旱烈度概率之间的关系曲线拟合得到。

Note: a and b represent the parameters in equation (6), which are fitted from the relationship between drought caused yield loss rate and agricultural drought severity probability.

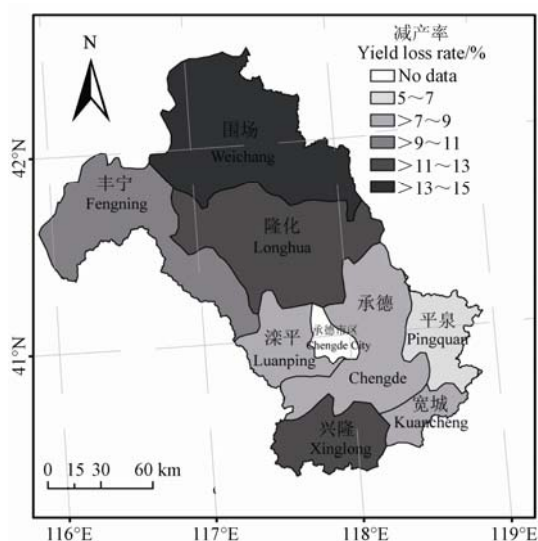


图 4 方法一因旱减产率期望值的空间分布

Fig.4 Distribution of drought caused yield loss rate expectation (Method 1)

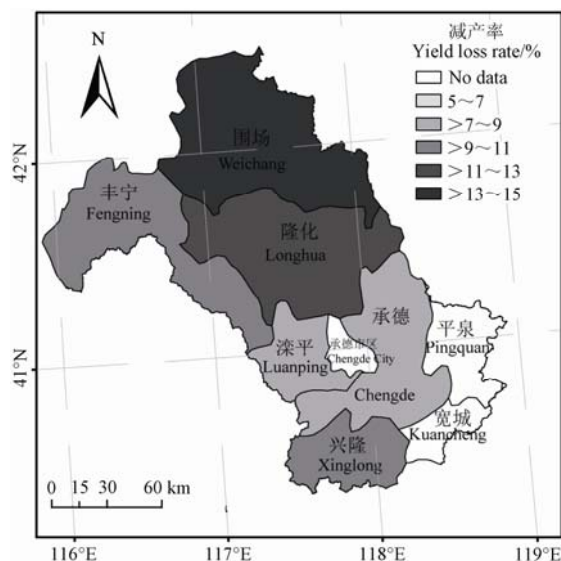


图 5 方法二因旱减产率期望值的空间分布

Fig.5 Distribution of drought caused yield loss rate expectation (Method 2)

对比两种方法计算得到的因旱减产率期望值(表2和表5中最后一列), 兴隆县差别比较大, 其它各个县基本一致。研究区各个县的因旱减产率期望值在7%~15%之间。两种方法的结果在整体上具有较好的一致性, 相互对比验证了彼此的合理可靠性。方法一仅仅基于旱灾损失数据, 简单易于操作, 但是该方法的假设前提是基于“旱灾损失序列是随机序列”这一假设, 而旱灾损失与人类社会经济密切相关, 并不一定是随机序列。方法二的假设前提是基于干旱事件和旱灾损失之间存在一一对应的确定性关系, 即在环境比较稳定条件下, 一定概率和规模的干旱事件所产生的旱灾损失是确定的, 这更具机理性, 而且可以通过干旱预测对未来旱灾风险做出预估, 更利于进行旱灾风险管理。本文采用的是模拟得到的天然土壤含水率, 没有考虑灌溉对农田土壤含水率的影响, 因此本文识别出来的天然状态下的农业干旱并不能代表实际的农业干旱情况, 这限制了方法二在平泉县和宽城县的应用。

文献[38]通过模糊综合评判的方法同样分析了该区域的农业旱灾风险, 其旱灾风险的空间分布于本文相近, 都是上游旱灾风险大于下游, 这也说明本文分析结果的合理性。与本文不同的是, 文献[38]中兴隆县的农业旱灾风险较小, 而在本文中却较大, 这可能是由于研究区域并不完全一致造成的, 本文仅仅对兴隆县位于滦河潘家口水库上游的部分进行研究, 而文献[38]则是以整个兴隆县为研究对象。相比模糊评价方法, 本文分析方法的优势在于: 1) 能够给出旱灾风险的绝对数值(农业旱灾风险的多年平均减产率), 前者只能给出简单的相对值或者风险等级; 2) 客观可靠性强, 而模糊综合评价中指标的选取及其权重确定等方面等受到人为主观因素影响较大。文献[38]中模糊综合评判方法的优势在于能够给出旱灾风险各个组成部分的相对值, 便于识别区域旱灾风险的主要影响因素。基于概率统计方法和基于模糊综合评判方法的旱灾风险评价各有利弊, 将两种方法结合起来, 共同服务于旱灾风险管理, 会提高抗旱决策的合理性。

4 结论与讨论

本文利用历史旱灾统计资料和模型模拟0~50 cm的土壤含水率, 基于概率统计方法, 提出了两种旱灾风险分析方法, 并以滦河流域上游承德市辖区内的各县农业旱灾风险为例开展研究, 得到以下主要结论:

1) 研究区域农业因旱粮食减产率和农业干旱烈度符合广义极值分布。

2) 承德市旱灾风险从上游到下游递减, 上游

的围场县风险最为严重, 各县因旱减产率期望值处于7%~15%范围内。

3) 两种方法的结果一致性较好, 说明“旱灾损失概率分布曲线”和“旱灾损失—干旱概率的关系曲线”是两种有效的旱灾风险分析方法。后者在假设条件和理论基础方面更具优势, 因此是本文所推荐的旱灾风险分析方法。

4) 与文献[38]模糊综合评判方法的分析结果相对比, 本文方法更具客观可靠性, 且能够给出旱灾风险绝对值。

受到资料条件限制和对复杂干旱现象认识的不足, 基于概率统计的旱灾风险评估方法还需要进一步的研究和完善。如何通过模型模拟的手段及历史调查的方法模拟或者挖掘更多的干旱、旱情、旱灾资料, 对于旱灾风险评估十分重要。将人类的抗旱能力因素考虑进来, 将会大大提高方法的适用性和结果的可靠性。建议在区域旱灾风险分析中结合概率统计方法和模糊综合评价方法。

[参 考 文 献]

- [1] Edward Bryant. Natural Hazards[M]. Second edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [2] Sam Lake P. Drought and Aquatic Ecosystems: Effects and Responses[M]. Oxford, UK: John Wiley and Sons Ltd, 2011.
- [3] Ashok K Mishra, Vijay P Singh. A review of drought concepts. Journal of Hydrology[J]. 2010, 391: 202—216.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Fourth Assessment Report (FAR)[R]. IPCC, 2007.
- [5] Peter H Gleick, Matthew Heberger. Devastating Drought Seems Inevitable in American West[EB/OL]. <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=the-coming-mega-drought>, 2013-01-17.
- [6] De De Jones, Dr Steve Amosson, Gid Mayfield. State drought losses have significant impacts on overall economy[EB/OL]. http://agecoect.tamu.edu/fileadmin/user_upload/Documentd/Resources/Publications/RecentDrought.pdf, 2013-01-17.
- [7] 冯海霞, 秦其明, 蒋洪波, 等. 基于HJ-1A/1B CCD数据的干旱监测研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 358—365.
Feng Haixia, Qin Qiming, Jiang Hongbo, et al. Drought monitoring based on HJ-1A/1B CCD data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp.1): 358—365. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴迪, 裴源生, 赵勇, 等. 湄公河流域农业干旱主要影响因素分析和预估[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 1—10.
Wu Di, Pei Yuansheng, Zhao Yong, et al. Influencing factors analysis and prediction of agricultural drought in Mekong River Basin[J]. Transactions of the Chinese

- Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 1—10. (in Chinese with English abstract)
- [9] Donald A Wilhite, Michael J Hayes. Planning for drought: Moving from crisis to risk management[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000.
- [10] 黄崇福. 自然灾害风险分析与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3).
Shi Peijun. Theory and practice of disaster research III[J]. Journal of natural disasters, 2012, 11(3). (in Chinese with English abstract)
- [12] 单琨, 刘布春, 刘园, 等. 基于自然灾害系统理论的辽宁省玉米干旱风险分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 186—194.
Shan Kun, Liu Buchun, Liu Yuan, et al. Analysis on drought risk of maize based on natural disaster system theory in Liaoning province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 186—194. (in Chinese with English abstract)
- [13] Zhang Dan, Wang Guoli, Zhou Huicheng. Assessment on agricultural drought risk based on variable fuzzy sets model[J]. China Geographic Science, 2011, 21(2): 167—175.
- [14] Shamsuddin Shahid, Houshang Behrawan. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh[J]. Natural Hazards, 2008, 46: 391—413.
- [15] Umma Habiba, Rajib Shaw, Yukiko Takeuchi. Drought risk reduction through a socio-economic, institutional and physical approach in the northwestern region of Bangladesh[J]. Environmental Hazards, 2011, 10(2): 121—138.
- [16] 朱淑珍. 金融风险管理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [17] 陈公越, 于盟, 许威. 金融风险测量和全面风险管理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.
- [18] 龚日朝. 保险风险理论模型[M]. 北京: 中国经济出版社, 2011.
- [19] Glenn W Suter II 著, 尹大强, 林志芬, 等译. 生态风险评价[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [20] 李春和. 承德地理[M]. 沈阳: 辽宁民族出版社, 2007.
- [21] 王刚, 严登华, 黄占峰, 等. 近 52 年滦河流域气候变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 134—139.
Wang Gang, Yan Denghua, Huang Zhanfeng, et al. Trend analysis of climate change in the Luan river basin during the past 52 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(7): 134—139. (in Chinese with English abstract)
- [22] Aiguo Dai. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008[J]. Journal of Geophysical Research, 2011.
- [23] 水利部水利水电规划设计总院. 中国抗旱战略研究[M]. 北京: 水利水电出版社, 2008.
- [24] Yang Dawen. Distributed hydrologic model using hillslope discretization based on catchment area function: Development and Applications[D]. Tokyo, Japan: University of Tokyo, 1998.
- [25] 徐翔宇. 气候变化下典型流域的水文响应研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
Xu Xiangyu. Hydrological Response to Climate Change in Typical Chatchments[D]. Ph.D dissertation, Tsinghua University, Beijing, China, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [26] Xu Xiangyu, Yang Dawen. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in the upstream watershed of the Panjiako Reservoir[C]// International Symposium of IAHS-PUB and the 2nd International Symposium of China-PUB. Chengdu, China: [s.n.], 2008.
- [27] Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, Chapter 8 - ET_c under soil water stress conditions[R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998.
- [28] 刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 517—521.
Liu Jingmiao, An Shunqing, Liao Rongwei, et al. Temporal vairaion and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 20092009, 17(3): 517 — 521. (in Chinese with English abstract)
- [29] Iwama K. Physiology of the Potato: New insights into root system and repercussions for crop management. Potato Research, 2008, 51: 333—353.
- [30] 吴伟明, 宋祥甫, 孙宗修, 等. 不同类型水稻的根系分布特征比较. 中国水稻科学, 15(4): 276—280.
Wu Weiming, Song Xiangfu, Sun Zongxiu, et al. Comparison of Root Distribution between Different Type Rice. Chinese journal of rice science, 15(4): 276—280. (in Chinese with English abstract)
- [31] Yevjevich V. An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Drought[R]. Hydrology Paper No. 23. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1967.
- [32] Tallaksen L M, Madsen H, Clausen B. On the definition and modeling of streamflow drought duration and deficit volume[J]. Hydrological Science Journal, 1997, 42(1): 15—33.
- [33] Chen Lu, Vijay P Singh, Guo Shenglian. Drought analysis based on copulas[C]// Symposium on Data-Driven Approaches to Droughts, Paper 45. West Lafayette, USA: Purdue University, 2011.
- [34] Massey F J. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit[J]. Journal of the American Statistical Association, 1951, 46(253): 68—78.
- [35] 河北省统计局. 2003-2011 年河北省经济年鉴[Z]. <http://www.hetj.gov.cn>, 2013-01-15.

- [36] 王孟民, 吕铁峰, 张东来. 承德市水资源合理开发与优化配置[J]. 河北水利, 2005(8): 17—18, 28.
Wang Mengmin, Lü Tiefeng, Zhang Donglai. Water resources rational exploitation and optimal allocation in Chengde City[J]. Hebei Water Conservancy, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [37] 河北省承德市水文水资源勘测局. 承德市水资源评价[R]. 承德: 承德市水文水资源勘测局, 2005(8): 17—18, 28.
- [38] 秦越, 徐翔宇, 许凯, 等. 农业干旱灾害风险模糊评价体系及其在承德市的应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 83—91.
Qin Yue, Xu Xiangyu, Xu Kai, et al. Fuzzy evaluation system of agriculture drought disaster risk and its application in Chengde[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(10): 83—91. (in Chinese with English abstract)

Assessing agricultural drought disaster risk in Chengde city using stochastic method

Xu Kai^{1,2}, Xu Xiangyu^{1,2*}, Li Aihua², Yang Dawen¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

Abstract: Drought is one of the widespread natural disasters affecting agricultural production, and causes the uncertainty and vulnerability to food security in the world. While rising temperature and less precipitation have contributed to increasing drought, increases in the intensity, duration and area of each drought event have been observed. Therefore, it is of guiding significance to evaluate agricultural drought risk. There are two common methods used for drought disaster risk assessment. One is the fuzzy evaluation method, which is commonly used even though it is weak of objectivity and facticity. Another is the statistical analysis method, which is seldom used in drought disaster risk evaluation due to the data limit. In order to give a quantitative assessment of agriculture drought, this study proposed two statistical analysis methods for drought disaster risk assessment. The first one is the probability distribution curve of drought loss. This method is based on the assumption that drought loss is a random variable and has the same probability distribution as the drought event. The second one is the regression curve between the drought loss and the drought probability, which implies that a regression relationship exists between the scale of the drought event and drought loss. The two methods were applied to the agricultural drought disaster risk assessment in the upper Luan River basin within the administrative boundary of the Chengde city, Hebei Province. Firstly, the annual crop yield loss rate caused by drought was estimated from the historical drought disaster data from 1990 to 2007. The probability distribution curve of the crop yield loss rate was gained by the frequency analysis. Secondly, the agricultural droughts were detected from the long-term soil moisture data, represented by the soil moisture of the top 50 cm soil layers over the agricultural land, which was simulated by the GBHM (Geomorphology-Based Hydrological Model). The probability of each agricultural drought event was calculated using the time series of monthly soil moisture storage anomaly. The logarithmic function was used to fit the regression curve of crop yield loss rate and the exceedance probability of drought. Finally, the regional agricultural drought disaster risk map was represented by the expected yield loss rate calculated by the two methods. In the risk map, the agricultural drought disaster risk was classified into 5 levels. It was found that the results of the two methods showed good consistency. The agricultural drought disaster risk increasing from the downstream to the upstream, and the drought caused crop yield loss rate ranged from 7% to 15% in the study region. The rationality and the reliability of the two methods were also discussed in this paper. From this study it can be seen that drought disaster risk analysis based on the historical data is practically useful. It is necessary to take human's resilience to drought disaster into account for the drought disaster risk assessment.

Key words: drought, probability distribution, risk assessment, agricultural drought severity frequency, yield loss rate

(责任编辑: 曾懿婷)