

基于信息分配理论的云南干旱风险评估

彭贵芬¹ 张一平² 赵宁坤¹

(1. 云南省气象台, 昆明 650034; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园)

提 要: 建立以 Thornthwaite 干燥度指数为主、自定义的有效降水指数为辅的干旱综合指数, 用 1959—2005 年云南省 125 个气象站资料, 分 5 个时段基于模糊信息分配理论和超越极限概率原理, 对云南干旱风险进行评估。结果表明: 云南省每年 1—3 月出现干旱灾害的风险最大, 大部分地区干旱概率为 60 % ~ 100 %、重旱概率为 20 % ~ 60 % (部分地区甚至达 90 %); 11—12 月干旱风险次之, 大部分地区干旱概率为 30 % ~ 60 %、重旱概率为 20 % ~ 60 %; 6—8 月云南省基本上没有出现干旱的风险; 9—10 月全省各地干旱概率小于 5 %, 重旱的风险基本没有; 4—6 月上旬约一半的地区干旱概率为 10 % ~ 20 %、有 29 % 的地区为 20 % ~ 40 %、有 21 % 的地区为 40 % ~ 80 %, 重旱的风险小于 5 %。

关键词: 干旱 风险 评估 信息分配理论

Drought Risk Assessment in Yunnan Province on the Basis of Information Distribution Theory

Peng Guifen¹ Zhang Yiping² Zhao Ningkun¹

(1. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034;
2. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: By using the conventional meteorological data of 125 stations and dividing 5 durations from 1959 to 2005, the drought risk assessment in Yunnan Province was conducted with the fuzzy information theory and over-limit probability principle. The establishment of synthetic drought index was mainly based on the Thornthwaite drought index and supplemented by self-defined effective precipitation index. The results showed as follows: the most drought risk period is in January to March every year; the probability of drought in most area is 60 % ~ 100 %; the heavy drought probability is 20 % ~ 60 % with some area of 90 %. The drought risk in November

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(国家 973 项目)(2003CB415101)、中国气象局新技术推广应用项目(CMATG2006M45)和中国气象局气候变化专项(CCSF-09-4)资助

收稿日期: 2008 年 6 月 27 日; 修定稿日期: 2009 年 2 月 16 日

to December is in the second place. The drought probability in most area is 30 % ~ 60 %; the heavy drought probability is 20 % ~ 60 %. There is mostly no drought risk in June to August. The drought probability is less than 5 % in September to October and there is no heavy drought at all. The drought probability is 10 % ~ 20 % in April to the first ten days of June in about half area of Yunnan, 20 % ~ 40 % in the area of 29 %, 40 % ~ 80 % in the area of 21 % and the heavy drought risk is less than 5 %.

Key Words : drought risk assessment information distribution theory

引 言

近年来,国内外防灾减灾的重点已从直接救灾向灾害风险管理方向发展,人们在加强灾害危机管理的同时,更注意通过灾害风险管理降低灾害事件的影响。美国政府提出了“减灾始于风险评估”的理念,中国气象局在近期及今后的防灾减灾工作中将突出灾害风险评估的地位和作用。干旱灾害的风险评估是防灾减灾的基础性工作,是采取减灾行动、调整产业结构、改善运行能力的决策依据。但是国内外在量化干旱风险评估方面的工作目前只处于起步阶段,在诸如适用于低纬高原地区的干旱指数确定、干旱概率分布函数、量化分时段干旱灾害风险评估方面缺少系统化的工作,抗旱处于应急被动状态。云南受季风控制,加之地理位置和地形的作用,大部分地区呈现四季不分明、干湿季明显的气候特征,旱灾是造成经济损失最大的灾种,随着社会经济的发展,干旱带来的经济损失有越来越重的趋势,因此亟待对云南干旱灾害进行有效的风险评估。

自 1900 年以来,中外学者提出了许多干旱指数,简单的是以经验公式如降水或降水距平百分率作为代用指标,用于短期干旱(降水异常偏少)的研究有一定的意义和实用价值。国内气象工作者用降水距平百分率、 z 指数等与降水有关的指数对云南、高原、西北地区、浙江、四川、安徽等地的干旱指数作了

深入的研究^[1-7];并研究了华北东部、我国北方地区、黄淮海平原、江西、山西干旱的气候分布或变化特征^[8-12]。但以降水与可能蒸散的对比关系作为水分平衡干燥度指数和有效降水指数综合来研究低纬高原云南的干旱气候风险评估的研究还未见到,采用水分平衡干旱指数来进行干湿气候区划和气候变化的研究是国内外的发展趋势^[13],因此本文以 Thornthwaite 水分平衡干燥度指数为主,自定义的反映短期降水有效性特征和异常的有效降水指数为辅作为云南干旱气候风险评估的综合指数。该指数计算出的结果既能进行地域间又能进行季节间比较,既能反映季节性干旱又能反映短期干旱。在灾害风险评估方面,牛叔超等^[14]用马尔科夫模型和统计决策理论对致洪大暴雨进行了风险评估和最优决策,冯利华用正态扩散模型作了基于信息扩散理论的气象要素风险分析^[15],是灾害风险量化评估方面十分有意义的工作,但由于事先假定了评估模型,可能使评估风险与实际风险偏差较大。陈瑾文^[16]考虑到数据的漂移性和过渡性,基于信息分配理论对气象数据进行了模糊化处理和信息分配,得到了基本上符合客观实际的分析结果,扈海波等^[17]开展了北京奥运期间冰雹灾害风险评估,马清云等^[18]基于模糊综合评价法作了登陆台风灾害影响评估模型的研究。本文采用事先不假定评估模型、用模糊信息分配方法根据实际干旱指数数据系列寻找分布函数进行风险评估的方法开展云南干旱风险评估,

使评估结果能客观、真实地反映云南省内各区域、各时段的干旱风险。

1 资 料

用云南省现有的 125 个气象站代表对应的地区,进行低纬高原云南的干旱风险评估。考虑到各气象站建站时间不同,因此本研究所用的实际资料是从 1959—2005 年(已有 112 站资料,占研究站数的 90%)各站的观测资料,要素为地面逐日降水量和平均气温。

2 干旱综合评估指数

2.1 Thornthwaite 干燥度指数

Thornthwaite 干燥度指数 dr_T ^[14,19] 以最大蒸散量作为需水量,求降水量与需水量之差与需水量的比例来确定干旱程度,是一个基于水分平衡的干燥指数,在考虑降水量的同时,还考虑了气温。其所用资料就是气象观测的常规资料,除可用于干旱气候风险评估外,还可方便地用于日常干旱监测评估气象业务。如果评估时段不是标准月(指的是 30 天 1 个月的小月),则需对统计值求日平均后乘以 30 来标准化。该指数的干旱等级划分标准见表 1。

表 1 Thornthwaite 干旱指数等级划分标准表

干旱等级说明	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
指数(dr_T)	< -0.75	-0.75 ~ -0.50	-0.5 ~ -0.25	-0.25 ~ 0	> 0
等级(G_T)	4	3	2	1	0

2.2 有效降水指数

干旱有效降水指数 dr_p 是本文提出用以描述降水对干旱缓和有效性的一个指数。定义如下:

$$dr_p = \frac{EP_d}{\max(EP_d) - \min(EP_d)} \quad (1)$$

式中 dr_p 为有效降水指数, EP_d 为某时段内大于等于 5mm 以上的降水天数, $\max(EP_d)$ 为同时段内数据系列的最大数, $\min(EP_d)$ 为最小数。其干旱等级划分标准见表 2。

表 2 有效降水干旱指数等级划分标准表

干旱等级说明	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
指数(dr_p)	< 0.125	0.25 ~ 0.25	0.25 ~ 0.375	0.375 ~ 0.5	> 0.5
等级(G_p)	4	3	2	1	0

2.3 干旱综合评估指数

云南省为半年干旱、半年湿润地区,整个干季(11 月至次年 4 月)降水量仅占全年总降水的 15% 左右,存在季节性干旱,因此无论降水偏多偏少,仅用 Thornthwaite 指数评估会得到缺水十分严重、干旱等级很高的结果,不能反映干季降水特多(与多年同期相比)时干旱较轻或无干旱的实况;而雨季(6—8 月)3 个月的降水量占全年总降水量的 55%,降水十分集中,无论降水偏多偏少,仅用 Thornthwaite 指数评估均会得到湿润度很高、无干旱的结果,不能反映降水特少有干旱发生的实况;另外,由于 Thornthwaite 干燥指数是以一个时段的降水、气温为因子来计算的,如果一个时段内仅在某一天出现大暴雨,其他时段内均无降水,虽然降雨时段内降水量很大,但较短时间内降水将很快流走,降水的有效性较差,对干旱的缓和效果不是很大,而其他较长时间段内无降水,仍会出现干旱现象,Thornthwaite 干燥度指数对此种旱情也不能真实地予以反映。因此,本文以 Thornthwaite 干燥度指数为主、自定义的有效降水指数为辅的原则,设计了以下干旱综合评估指数,使之既能反映季节性干旱又能反映短期干旱,还能反映无效降水性干旱。其计算公式如下:

$$M = \begin{cases} dr_T & \text{当 } G_T = G_p \\ dr_T + 0.125\Delta d & \text{当 } G_T \neq G_p \end{cases} \quad (2)$$

式中 M 为干旱综合评估指数, dr_T 为 Thornthwaite 干旱指数, $\Delta d = G_T - G_p$, G_T 为 Thornthwaite 干旱指数划分的干旱等级, G_p 为有效降水指数划分的干旱等级。其干旱等级划分标准见表 3。

表 3 单站综合干旱指数等级划分标准

干旱等级说明	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
指数(M)	< -0.75	$-0.75 \sim -0.50$	$-0.5 \sim -0.25$	$-0.25 \sim 0$	> 0
等级(G)	4	3	2	1	0

3 应用模糊信息分配和超越极限概率方法评估云南的干旱风险

将云南省 125 个站、47 年的资料分为 5 个时段(1—3 月、4—6 月上旬、6—8 月、9—10 月、11—12 月)来计算其综合干旱指数:其中,1—3 月、11—12 月两个时段为干季前段和后段,是云南省降水稀少时段,干季前段是雨季结束不久、土壤墒情较好、干旱还不太突出时段;干季后段是雨季结束了较长时间、土壤墒情已很差、当年的雨季还未开始、干旱十分突出阶段;6—8 月为雨季,是云南的降水充沛时段;4 月至 6 月上旬是云南干季向雨季的转换时段;9—10 月是云南雨季向干季的转换时段;分这 5 个时段进行云南干旱灾害风险评估,能与云南的工农业生产、人民群众的生活用水、护林防火等经济、社会活动紧密联系。本文通过计算各站、各年、各时段综合干旱指数,进而采用模糊信息分配理论方法确定干旱指数的概率分布函数,用超越

极限概率方法分站分时段进行云南干旱风险评估。

3.1 干旱指数的概率分布函数

用式(1)、(2)计算全省 125 个站的 1959—2005 年不同时段干旱综合指数,各站每年可得到 5 个综合指数。各站的某个评估时段,47 年的干旱指数系列可构成一组评估数据样本 X ,采用模糊信息分配方法^[20],按式(3)计算干旱指数在各个强度等级内的模糊概率。

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - u_j|}{\Delta}, & |x_i - u_j| \leq \Delta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中的 q_{ij} 是第 i 个指数值在第 j 个等级的模糊概率, x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 是样本组中的第 i 个指数值, u_j 是某个等级区间的中点值, $\Delta = u_j - u_{j-1}$ ($j = 2, 3, \dots, m$) 是信息分配期间长度, m 为等级个数。通过式(3)的信息分配计算,一个指数值根据其距相邻等级中心点的距离而被模糊地分配到不同的等级中。这样就能得到事先不假定分布函数,只是根据实际数列按期间进行模糊信息分配,从而得到新的 X 的总体概率分布估计的折线图或软直方图。以昆明站为例,取 $m = 13$, $\Delta = 0.25$, $U = \{-0.875, -0.625, -0.375, -0.125, 0.125, 0.375, 0.625, 0.875, 1.125, 1.375, 1.625, 1.875, 2.125\}$, 各时段的干旱概率分布估计折线图如图 1 所示。从图 1 中可见,各个时段的概率分布函

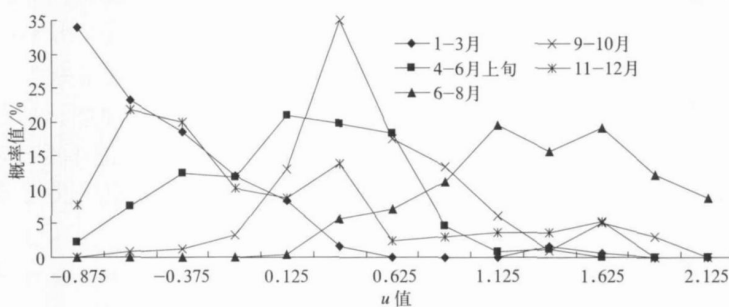


图 1 昆明不同时段干旱的概率分布图

数与各种典型分布函数(线性、正态、指数、对数分布等)相差均较大。因此,用模糊线性信息分配方法寻找干旱概率分布估计函数比使用各种典型分布函数用于风险评估要优越。

3.2 云南干旱灾害的超越极限概率法风险评估

按照表3的综合干旱指数相对应的干旱等级标准,干旱指数 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。通常 x_i 取为论域 U 中的某一个元素 u_i , 比如,特旱取为 $u = -0.875$ 的概率,重旱取为 $u = -0.625$ 的概率,中旱取为 $u = -0.375$ 的概率,轻旱取为 $u = -0.125$ 的概率。则超越 u_i 的概率值^[14]则为

$$P(u \leq u_i) = \sum_{k=m}^i p(u_k) \quad (4)$$

以昆明为例(表4)说明各等级气候干旱的超越极限概率。从表4第一行可见,昆明1—3月出现干旱的气候概率为 $u = (-0.875) + (-0.625) + (-0.375) + (-0.125) = 87.5\%$;出现中度以上强度干旱的气候概率为 $u = (-0.875) + (-0.625) + (-0.375) = 75.7\%$;出现重度以上强度干旱的气候概率为 $u = (-0.875) + (-0.625) = 57.1\%$;出现特别干旱的气候概率为 $u = (-0.875) = 34.0\%$ 。其余各行分别代表4—6月上旬、6—8月、9—10月、11—12月其他4个时段各等级干旱的风险。可见,昆明每年中1—3月气候干旱风险最大,其次是11—12月。

表4 昆明气候干旱超越极限概率风险列表

时段	干旱风险 (%)	中旱以上 风险 (%)	重旱以上 风险 (%)	特旱风险 (%)
1—3月	87.8	75.7	57.1	34.0
4—6月上旬	34.3	22.4	9.9	2.3
6—8月	0.0	0.0	0.0	0.0
9—10月	5.4	2.1	0.8	0.0
11—12月	59.6	49.5	29.5	7.8

4 结果与分析

用式(1)、(2)、(3)、(4)分别计算全省125站5个时段干旱、中旱、重旱、特旱的超越极限概率,得到全省各站各个时段超越极限概率值,结果填在云南省的底图上,可以得到全省不同等级强度干旱的风险图(区划图),可以从图上直观地看出云南各个时段出现干旱的风险。

4.1 云南降水稀少时段(1—3月、11—12月)干旱风险评估结果

4.1.1 云南1—3月干旱风险评估结果

云南1—3月出现干旱的风险很大。除滇西北和滇东北的边缘地区外,省内绝大部分地区(101站,占全省总站数的81%)这个时段出现干旱的风险均在60%以上,其中滇中大部、滇西南大部、滇西局部地区高达80%以上,其中元谋、宾川、华坪、永仁、丽江、孟连出现干旱的风险高达95%以上,几乎年年干旱(图2a);云南1—3月出现中度以上干旱的风险较大,有84站(占全省总站数的68%)在40%~80%之间,有20个站的气候概率高达80%~98%,元谋、宾川、华坪的出现概率高达95%以上,说明这几个县几乎年年出现中度以上干旱;云南1—3月有78个站(占全省总站数的62%)出现重旱的风险为20%~60%,其中仍有5个站的风险高达80%~92%;1—3月除滇西北、滇东北、滇西、滇南的边缘地区特旱的风险较小外,云南省内大部分地区1—3月都存在出现特旱的风险。省内有79个站(占全省总站数的63%)这个时段内出现特旱的气候概率在20%~60%,其中有11站为60%~90%。

4.1.2 云南11—12月干旱风险评估结果

云南11—12月大部分地区的干旱气候概率值为30%~60%(94站,占全省总站数的

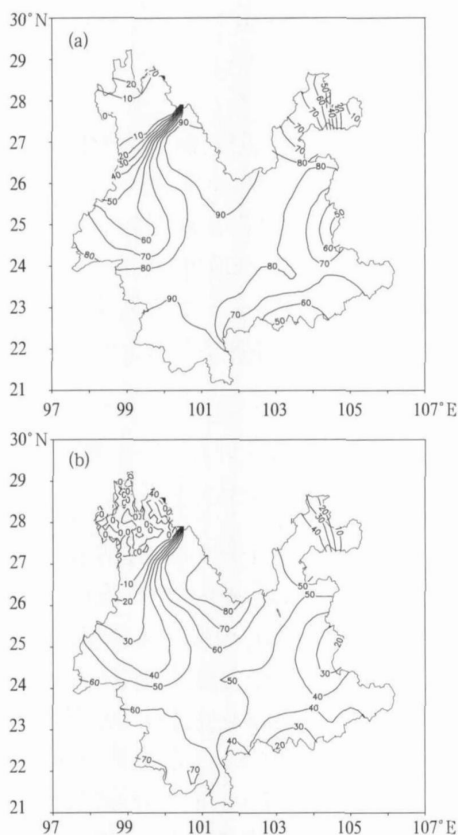


图2 云南1—3月干旱风险概率分布图(单位: %)
(a) 干旱概率; (b) 重旱概率

76%), 气候概率值为 60%~80% 的有 10 个站, 占全省总站数的 15%, 概率值小于 20% 的仅有 5 站(干旱风险较小), 概率值为 80%~92% 的有 7 个站, 这些站出现干旱的风险很大, 因此, 11—12 月是云南省仅次于 1—3 月易出现干旱的时段(评估图略); 云南 11—12 月大部分地区出现中等以上干旱的气候概率为 30%~60% (81 站, 占全省总站数的 65%), 分布在省内除滇东北、滇西北、滇南的省内大部分地区, 这个时段内虽然干旱的气候概率小于 1—3 月, 但中等以上强度干旱的气候概率与 1—3 月相当; 这个时段云南省内大部分地区出现重旱的气候概率为 20%~60% (79 站, 占全省总站数的 64%), 主要分布在省内中部及以北地区, 有 41 站(33%) 的气候概率在 20% 以下, 主要分布在滇中以

南、滇东北滇西北的局部地区, 说明这些地区出现重旱的风险较小, 另有 5 站的概率值为 60%~73%, 分布在昭通、大理、丽江, 说明这几个站出现重旱的风险较大; 云南 11—12 月大部分地区出现特旱的气候概率为 10%~30% (82 站, 占全省总站数的 66%), 主要分布在省内中部及以南地区, 概率小于 10% 的站和概率为 30%~40% 的站共有 15 个, 分别占全省总站数的 12%, 另有 13 站概率为 40%~65%, 主要分布在丽江、大理、楚雄、昭通和金沙江河谷地区, 这些地区出现特旱的风险较大。

4.2 云南干、雨季转换时段(4—6 月上旬、9—10 月)的干旱风险评估结果

4.2.1 云南 4—6 月上旬干旱风险评估结果

4—6 月上旬是云南省干季向雨季转换的时段, 是云南大春种植需水的关键期, 这个时段的干旱风险评估可反映春夏连旱的强度, 对农业、林业及饮水具有十分重要的意义, 是云南省干旱监测评估的最关键时段。

4—6 月上旬, 滇东北、滇东、滇东南、滇南、滇西、滇西北边缘地区共 63 个站出现干旱的气候概率小于 20%, 占全省总站数的 51%, 其中有 40 个站小于 10%, 说明这些地区出现干旱的风险较小, 出现干旱的气候概率在 20%~40% 之间的有 36 个站, 占全省总站数的 29%, 主要是昆明、玉溪、楚雄东部和昭通、思茅、临沧的部分地区, 另有 26 个站出现干旱的气候概率在 40%~88% 之间, 主要分布在楚雄中东部、大理、丽江、临沧和金沙江河谷地区, 这些地区是省内最早的区域, 出现春夏连旱的风险较大(如图 3a 所示); 云南 4—6 月上旬大部分地区出现中等强度干旱的气候概率小于 20% (84 站, 占全省总站数的 68%), 说明大部分地区出现中等以上强度干旱的风险较小, 特别是整个云南的边缘地带基本没有出现中等以上强度干旱的风险(概率值小于

10 %),但有 11 个站出现中等以上强度干旱的气候概率值在 40 %~88 %之间,主要分布在楚雄、大理和金沙江河谷地区(包括东川、巧家),这些地区出现中等以上强度的风险较大;云南 4—6 月上旬大部分地区出现重度以上干旱的气候概率小于 5 % (82 站,占全省总站数的 66 %),说明大部分地区没有出现重度以上干旱的风险,概率值在 5 %~20 %的有 29 站,占全省总站数的 23 %,主要分布在昆明、玉溪、楚雄东部,但有 3 个站(宾川、华坪、元谋)的概率值在 40 %~59 %之间(如图 3b 所示);云南 4—6 月上旬大部分地区出现特别干旱的气候概率小于 5 % (92 站,占全省总站数的 74 %),其中小于 2 %的站有 62 站,概率值为 2 %~5 %的站有 30 站,另外,宾川、华坪、元谋 3 站的概率值在 30 %~45 %之间。

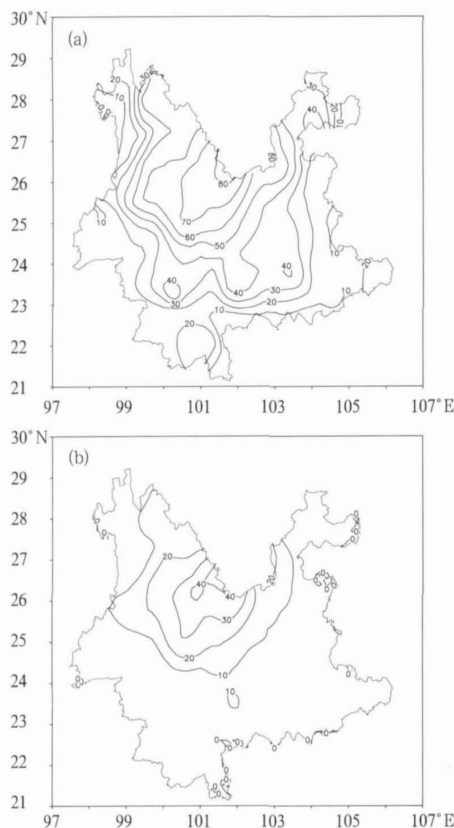


图 3 云南 4—6 月上旬干旱风险概率分布图(单位: %)
(a) 干旱概率; (b) 重旱概率

4.2.2 云南省 9—10 月干旱风险评估结果

9—10 月云南省内大部分地区干旱的气候概率值小于 5 % (87 站,占全省总站数的 70 %),出现干旱的风险较小,气候概率值为 5 %~10 %的有 20 个站,占全省总站数的 16 %,概率值为 10 %~40 %的站有 17 个,占总站数的 14 %,只有元谋站在 40 %以上。由于处于雨季后期,该时段内省内基本没有中等以上强度干旱的风险出现。

4.3 云南主汛期(6—8 月)干旱风险评估结果

云南 6—8 月绝大部分地区出现干旱的气候概率值为 0 % (99 站,占全省总站数的 80 %),基本上没有出现干旱的风险;有 24 个站的概率值为 2 %~10 %;只有福贡、元江两站的概率值为 23 %、26 %。云南 6—8 月是主汛期,3 个月的降水量占全年总降水量的 55 %,降水集中,基本上不会出现干旱灾害。这个评估结果与实际相符,说明本文所用的评估指数和评估方法较适用于云南。

5 结 论

(1) 以 Thornthwaite 湿润度指数为主,有效降水指数为辅建立的干旱综合监测评估指数能有效地评估云南各个时段出现的干旱风险。

(2) 用模糊信息分配方法和超越极限概率方法进行云南省各时段的干旱风险评估,能较真实地反映云南各个时段的气候干旱风险。

(3) 1—3 月是云南省干旱最严重的时段,大部分地区干旱风险值为 60 %~100 %,重旱风险值为 20 %~60 %,有的地区甚至有 80 %~90 %的重旱风险值。11—12 月份是云南省干旱次重时段,大部分地区干旱的风险值为 30 %~60 %,重旱风险值为 20 %~

60%。6—8 月云南省绝大部分地区的干旱风险值为 0%，基本没有出现干旱的风险；9—10 月云南省大部分地区干旱的风险值小于 5%，出现干旱的风险较小，出现重旱的风险基本没有。4—6 月上旬云南省约一半的站干旱风险值为 10%~20%，出现干旱的风险较小；有 29% 的站为 20%~40%；有 21% 的站为 40%~80%；大部分地区出现重旱的风险值小于 5%，风险较小。

参考文献

- [1] 段旭,尤卫红,郑建萌. 云南旱涝特征[J]. 高原气象, 2000,19(1):84-90.
- [2] 邓振镛,李栋梁,郝志毅,等. 我国高原干旱气候区作物种植区划综合指标体系研究[J]. 高原气象, 2004,23(6):847-850.
- [3] 杨小利. 西北地区气象干旱监测指数的研究和应用[J]. 气象,2007,33(8):92-98.
- [4] 樊高峰,苗长明,毛裕定. 干旱指标及其在浙江省干旱监测分析中的应用[J]. 气象,2006,32(2):71-75.
- [5] 田宏,徐崇浩,彭骏,等. 四川盆地干旱动态评估指标的研究[J]. 气象,1998,24(4):12-16.
- [6] 宫德吉. 干旱监测预警指数研究[J]. 气象,1998,24(8):15-17.
- [7] 马晓群,刘惠敏,吴文玉. 安徽省农业干旱综合监测技术及其业务试用[J]. 气象,2008,34(5):77-83.
- [8] 夏洪星. 华北东部地区干旱分布特征[J]. 气象, 1996,22(11):38-41.
- [9] 王志伟,刘文平,王红霞. 我国北方干旱逐月变化特征分析[J]. 气象,2005,31(1):38-41.
- [10] 王谦. 黄淮海平原极限干旱历时概率特征研究[J]. 气象,1995,21(6):9-12.
- [11] 陆叔鸣. 江西省伏、秋旱时空分布特征及其预测[J]. 气象,1992,18(5):28-33.
- [12] 姚彩霞,魏凤英,韩雪,等. 山西干旱的气候变化特征及多尺度组合预测模型[J]. 气象,2007,33(5):102-106.
- [13] 孟猛,倪健,张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报,2004,28(6):853-861.
- [14] 牛叔超,朱桂林,刘月辉. 致洪大暴雨的风险评估及气象效益[J]. 气象科技, 2000,28(01):32-35.
- [15] 冯利华. 基于信息扩散理论的气象要素风险分析[J]. 气象科技, 2001,28(01):27-30.
- [16] 陈瑾文. 基于信息分配的气象数据分析法[J]. 气象,1999,25(1):34-38.
- [17] 扈海波,董鹏捷,熊亚军,等. 北京奥运期间冰雹灾害风险评估[J]. 气象,2008,34(12):84-89.
- [18] 马清云,李佳英,王秀荣,等. 基于模糊综合评价法的登陆台风灾害影响评估模型[J]. 气象,2008,34(5):20-25.
- [19] 马柱国,黄刚,甘文强,等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学,2005,29(5):671-681.
- [20] 黄崇富. 自然灾害风险评价—理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2006.