

文章编号: 2096-1618(2021)04-0443-08

# 气候变暖背景下云南省旱灾风险区划研究

孙丽君<sup>1,2</sup>, 李谢辉<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 为了对气候变暖背景下的云南旱灾风险进行研究, 采用 24 个气象站点 1970–2017 年的气温和降水数据以及社会经济和遥感数据等, 从干旱灾害的致灾因子危险性、承灾体易损性、孕灾环境敏感性、防灾减灾能力出发, 通过选取适合研究区特点的指标, 利用 AHP 法建立旱灾风险评估模型, 应用干旱灾害风险指数法、加权综合评价法以及 GIS 技术对云南省进行旱灾风险区划研究。结果表明: 云南省东部干旱灾害风险最高, 北部以及西部处于中等干旱风险区, 西北以及南部干旱风险较低。将风险区划结果与云南省实际旱灾灾情比较后表明, 采用的旱灾风险模型总体上能表征旱灾风险分布情况, 其结果能为当地政府以及有关部门在气候变暖背景下制定防旱抗旱减灾对策提供参考依据。

**关键词:** 应用气象学; 灾害风险; 干旱灾害; 风险分析; GIS 技术; 层次分析法; 云南省

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 16836/j. cnki. jcuit. 2021. 04. 014

## 0 引言

干旱是众多极端气候事件中影响范围最大, 给人类造成损失最严重, 被认为是世界上最严重的自然灾害之一<sup>[1]</sup>。中国自然灾害频发, 据统计, 在气象灾害所造成的损失中, 干旱灾害造成的损失能达到 50% 以上<sup>[2]</sup>。根据《中国水旱灾害公报》1950–2017 年全国干旱灾情统计, 全国平均受灾面积为  $2.05 \times 10^8$  ha, 平均成灾面积为  $9196.82 \times 10^3$  ha, 平均绝收面积为  $2339.58 \times 10^3$  ha, 平均粮食损失  $162.60 \times 10^8$  kg, 平均直接经济损失达  $882.31 \times 10^8$  元<sup>[3]</sup>。

在全球气候变暖背景下, 干旱变得日益严重。各国纷纷从旱灾的危机管理向风险管理转变, 旱灾风险评价也受到广泛关注。自 20 世纪 90 年代以来, 国内外开展了大量旱灾风险研究<sup>[4]</sup>。Islam 等<sup>[5]</sup>利用 3 种全球气候模型(global climate models, GCMs) 得到 2041–2070 年的模拟气候数据, 评估未来孟加拉西部水稻种植区在气候变化条件下的干旱灾害情况。Kim 等<sup>[6]</sup>利用干旱灾害危险性和承灾体脆弱性对韩国进行了干旱灾害风险评估。Liang 等<sup>[7]</sup>在对 1958–2017 年中国 2264 个城市气候特征分析的基础上, 评估了城市洪水和干旱的风险。Samantaray 等<sup>[8]</sup>以印度奥里萨邦的马哈纳迪河流域中部为研究区域, 绘制了研究区域内不

同位置的干旱热点图和干旱严重程度–持续时间–频率关系曲线。Kim 等<sup>[9]</sup>综合考虑了物理和社会经济因素, 评估了韩国洛东江流域未来气候预测中的干旱风险。韩兰英等<sup>[10]</sup>对中国西南地区进行了农业干旱灾害风险研究, 发现四川盆地和云贵川三省交界处的农业干旱风险最高。何娇楠等<sup>[11]</sup>基于自然灾害风险理论, 选取了相关的 15 个指标, 对云南进行干旱灾害风险评估, 研究结果表明云南省干旱灾害风险呈西低东高的分布。李建安等<sup>[12]</sup>对安康市汉滨区开展了旱灾风险区划分析, 并提出了农业生产建议。李家文等<sup>[13]</sup>构建了柳州市甘蔗干旱风险指数, 并绘制了风险区划图。但目前仍没有形成较为统一的旱灾风险评估体系, 因此需要根据区域特点建立符合当地的风险评估模型。

在全球变暖的背景下, 云南省的气候有着十分明显的变化特征。刘瑜等<sup>[14]</sup>对云南省 1961–2007 年的降水和气温变化趋势进行了研究, 发现近 46 年云南年均温升高, 年均降水趋于减少, 且夏季降水减少的最明显, 在 1971 年前后发生了夏季降水由多到少的突变。王宇等<sup>[15]</sup>分析了云南省 18 个站点 1951–1994 年年平均气温变化特征, 将云南省的气温变化规律划分成 3 个自然区域, 研究发现以昆明站为代表的滇东区域, 年均温呈现高一低一高的变化特征, 最大负距平在 1971 年。以思茅站为代表的滇西南区, 年均温有不断上升的趋势, 在 1971 年也有最大负距平。以丽江站为代表的滇西北区气温较为稳定, 只有较小的波动变化。由

收稿日期: 2021-09-08

基金项目: 科技部第二次青藏高原综合科学考察研究资助子项目(2019QZKK0105); 风云三号(02 批)气象卫星地面应用系统工程资助项目(ZQC-J19193)

此能够看出,在1971年后滇东、滇西南年均温均有上升趋势,滇西北气温稳定。王宇、刘瑜等的研究,对研究时间段的选取有参考意义。因此,在长时间的全球变暖过程中,以1970年为时间截点,选取1970–2017年的数据,对云南省进行气候变暖背景下的干旱灾害风险研究。

干旱灾害是云南省最主要的自然灾害之一,这与云南省所处的地理位置和气候特征等密不可分<sup>[16]</sup>。云南省位于北纬 $20^{\circ}08'32'' \sim 29^{\circ}15'08''$ 和东经 $97^{\circ}31'39'' \sim 106^{\circ}11'47''$ ,总面积为39.4万 $\text{km}^2$ 。受季风和青藏高原的影响,具有干湿季分明的气候特点<sup>[17-18]</sup>。云南为山地高原地形,山地高原面积占全省的94%左右,还有各种类型的岩溶地貌,再加上省内河流众多,但水资源利用率低,省内干旱频发。根据云南省1450–1949年干旱灾害资料,500年中,旱灾共发生了294年,所占比例为58.8%<sup>[17]</sup>。在1950–2009年60年中,一共有56个旱年,其中大旱有21年,小旱有35年,几乎年年都有旱灾发生<sup>[16]</sup>。在2009年的秋季到2010年的春季,云南省遭受了一次百年一遇的特大旱灾,继此之后,云南地区又连续遭遇了2011年的雨季干旱、2012年的季节性干旱以及2013年的冬春连旱<sup>[19]</sup>。云南省旱灾日益严重,旱灾的发生频次、受旱面积、旱灾损失等均呈上升趋势,给当地造成严重的经济损失<sup>[16]</sup>。目前对云南省进行干旱风险的研究不多,因此,对云南省进行旱灾风险研究很有必要。鉴于此,从形成干旱的因素出发,通过构建云南省旱灾风险体系,利用GIS技术进行干旱灾害风险研究,以期当地政府有关部门制定防旱抗旱对策提供参考。

## 1 数据资料和研究方法

### 1.1 数据资料

文中的温度和降水数据(1970–2017年)来自中国地面气候资料日值数据集V3.0,共挑选了24个站点,站点分布如图1所示。从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载了云南省的DEM数据,分辨率为90 m $\times$ 90 m。从中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)下载了基于DEM提取的中国流域和河网数据集<sup>[20]</sup>及2018年中国土地利用遥感监测数据。从土地调查成果共享应用服务平台([http://tdc.mnr.gov.cn/to\\_Login](http://tdc.mnr.gov.cn/to_Login))得到云南省各州市的土地利用情况,并下载了2011–2016年的耕地面积数据。从云南省统计局(<http://stats.yn.gov.cn/>)下载

了2009–2018年云南统计年鉴,得到相关的地均GDP、人口密度、有效灌溉面积、人均GDP、水库库容量和财政收入等社会经济数据。从国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)下载了基于微波数据同化的中国土壤水分数据集(2002–2011)。

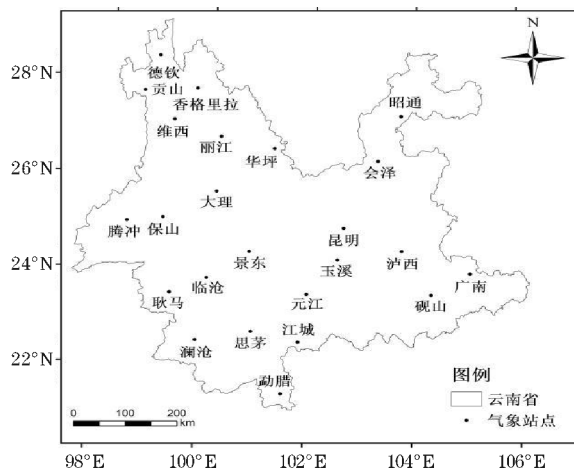


图1 气象站点分布图

### 1.2 研究方法

#### (1) 干旱灾害风险指数法

干旱灾害风险是致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性以及防灾减灾能力相互作用的结果。所以选取能综合体现灾害4因子的风险指数作为区划指标<sup>[21-22]</sup>,计算公式为

$$ADRI = (H^{WH})(E^{WE})(V^{WV})(1-R)^{WR}$$

其中,ADRI为干旱灾害风险指数,H、E、V、R分别代表致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性、防灾减灾能力指数,WH、WE、WV、WR分别为利用层次分析法得到的各评价因子权重。

#### (2) 加权综合评价法

加权综合评价法适用于对决策、方案进行综合的分析评价,会综合考虑每个具有不同影响程度的指标。各指标的作用大小用权重来表征,权重越大影响度越大,最后将各指标的标准化值与对应的权重相乘再求和即得到目标的评价情况,计算公式如下

$$V = \sum_{i=1}^n w_i y_i$$

式中,V为干旱灾害四因子评估结果, $w_i$ 是干旱灾害因子中第*i*个评估指标对应的权重, $y_i$ 是干旱灾害因子中第*i*个评估指标标准化值, $n$ 为各干旱灾害因子的指标数。

#### (3) 层次分析法

在多目标决策中,会遇到一些变量繁多、结构复杂

的系统,在这些复杂系统的决策过程中需对各指标进行相对重要性的评价,而权重就反映了各指标的重要程度。层次分析法就是一种较好的确定权重的方法,能把复杂问题中相互影响的因素层次化,再利用定量分析与定性分析相结合的方法确定权重<sup>[23-24]</sup>。

(4) 指标量化

由于选取的各指标的量纲不同,无法比较,所以对指标进行标准化。根据指标与风险的关系,分为正向和负向指标。如干旱频率为正向指标,频率越大,干旱风险越大;河网密度为负向指标,指标值越大,干旱风险越小。

正向指标:

新值 = (原值 - 极小值) / (极大值 - 极小值)

负向指标:

新值 = (极大值 - 原值) / (极大值 - 极小值)

对土地利用类型等无法量化的指标,则进行重分类,再按照专家打分法对每一类进行影响度打分,影响度范围为[0,1]。

2 结果与分析

2.1 区域干旱灾害风险指标体系构建

基于干旱灾害风险理论,从致灾因子危险性、承灾体脆弱性、孕灾环境敏感性、防灾减灾能力出发,选取表 1 中的 15 个指标,构建了云南省旱灾风险指标体系。

表 1 云南省干旱灾害风险评估指标

因子	权重	指标	权重
致灾因子危险性	0.434	轻旱频率	0.095
		中旱频率	0.16
		重旱频率	0.278
		特旱频率	0.467
孕灾环境敏感性	0.286	土壤水分	0.169
		河网密度	0.214
		土地利用类型	0.266
		地形	0.351
承灾体易损性	0.182	耕地率	0.232
		地均 GDP	0.322
		人口密度	0.446
防灾减灾能力	0.098	有效灌溉面积	0.172
		人均 GDP	0.230
		水库库容量	0.269
		财政收入	0.329

各指标的权重利用层次分析法得到。

2.2 云南旱灾风险综合区划

将各指标处理成格式统一的栅格数据后,对指标进行标准化或者量化,在图层叠加后利用自然断点法分级,获得干旱灾害 4 因子分布图以及旱灾风险区划图。

2.2.1 致灾因子危险性区划

致灾因子危险性指的是造成干旱的自然变异因素和程度<sup>[11]</sup>,它常由降水减少、温度升高等气象要素异常造成,与气象干旱的发生频率、强度以及持续时间有关<sup>[10]</sup>。由于标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)同时考虑了潜在蒸发量和降水,所以是一种较为理想的干旱评价指标。并且 SPEI 指数的大小还能表征出干旱的强度,能进一步统计出各等级干旱的发生频率,因此基于 SPEI 指数所得到的各等级干旱频率能较好地表征致灾因子危险性。若气象干旱的发生频率越高、强度越强,其对应的致灾因子危险性越大,相对应发生干旱灾害的风险就越大。SPEI 指数的计算步骤主要包括:(1)利用月平均温度和纬度计算出月潜在蒸发量;(2)计算月平均降水量和月潜在蒸发量差值;(3)计算各时间尺度下的水分盈余/亏损累积序列;(4)对该序列进行正态化后得到的数值就是 SPEI 指数<sup>[25]</sup>。先利用云南省 24 个站点 1970-2017 年的降水、气温和纬度数据计算 SPEI 干旱指数,然后按照国标干旱等级分类标准(表 2)统计出各站点轻旱、中旱、重旱、特旱的频率,并将数据导入 GIS 中,利用反距离权重插值,得到云南省各等级干旱频率分布图 2,最后利用栅格叠加与自然断点法分级,得到云南省致灾因子危险性区划图 3。

表 2 云南省标准化降水蒸散指数(SPEI)干旱等级划分

等级	类型	SPEI
1	无旱	-0.5 < SPEI
2	轻旱	-1.0 < SPEI ≤ -0.5
3	中旱	-1.5 < SPEI ≤ -1.0
4	重旱	-2.0 < SPEI ≤ -1.5
5	特旱	SPEI ≤ -2.0

由云南省致灾因子危险性区划结果可知,整体上东部高于西部。其中,低、次低风险区分布在怒江、大理、保山西部、德宏、普洱南部、西双版纳;中等危险区主要位于临沧、普洱北部、保山东部、楚雄西北部、丽江大部分地区;次高、高风险区分布在昭通、楚雄东部、昆明、曲靖、玉溪、红河、文山。



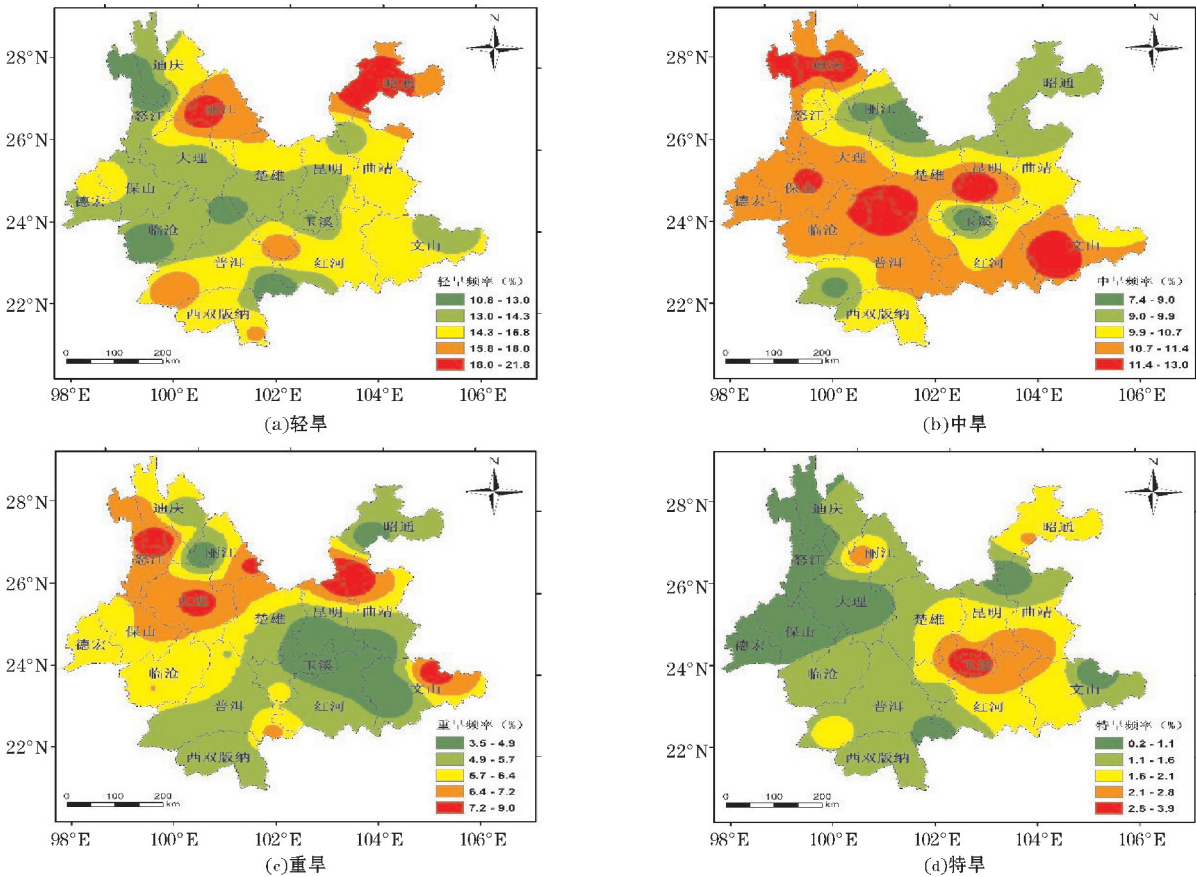


图2 云南省1970–2017年各等级干旱频率分布图

2.2.2 孕灾环境敏感性区划

孕灾环境敏感性是指受到气象灾害威胁地区的外部环境对灾害的敏感程度,敏感程度越高,受灾害风险越高。云南省以山地高原为主,河流众多,但利用率低,土壤的水分体积含量对干旱的敏感程度也有影响。所以,选取土壤水分、河网密度、土地利用类型、地形为孕灾环境敏感性的评估指标。通过综合考虑各项指标,绘制出云南省孕灾环境敏感性分布图(图4)。结果表明,由于云南省大小河流众多,河网分布较为均匀,林草地面积大,以山地为主,土壤水分较低,因此整个云南省的孕灾环境敏感性偏高,东部高于西部。其中楚雄、昆明、曲靖、玉溪、红河北部、文山北部敏感性不仅高,还成片分布,几乎都能达到次高、高敏感的标准。除了怒江、迪庆以及丽江北部地区的孕灾环境敏感性为低、次低敏感性外,其余州市均有敏感性较高的区域,且分布较为分散均匀。

2.2.3 承灾体易损性区划

承灾体易损性代表的是可能受到灾害影响的人口财物的伤害和损失程度。人口财物越集中,就越可能受到损害,受灾害风险越高。选取人口密度、地均GDP、耕地率为指标,绘制出云南省承灾体易损性分布

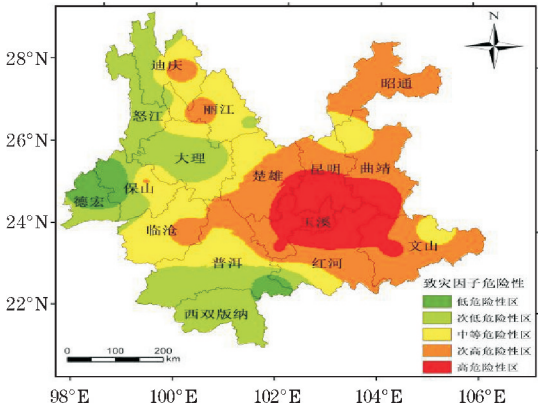


图3 致灾因子危险性区划图

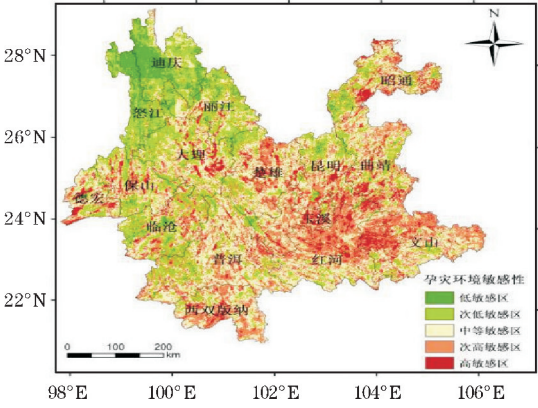


图4 孕灾环境敏感性区划图

图(图 5)。由图 5 可知,高易损区在昭通、昆明、曲靖;次高易损区在玉溪、红河;中等易损区分布在云南西部的德宏、保山、大理、临沧以及云南东部的文山;次低易损区分布在楚雄;位于云南西北部的迪庆、怒江、丽江,南部的普洱、西双版纳为低易损区。

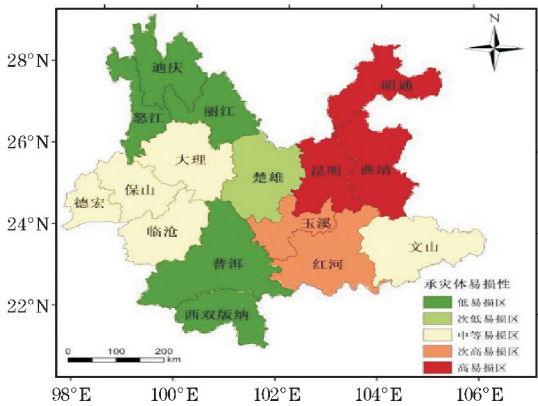


图 5 承灾体易损性区划图

2.2.4 防灾减灾能力区划

防灾减灾能力是指受灾地区对灾害的抵御以及恢复能力,包括采用一些工程和非工程措施来达到防灾减灾的目的。选取有效灌溉面积、人均 GDP、水库库容量、财政收入为防灾减灾能力的指标,绘制出云南省防灾减灾能力分布图(图 6)。由图 6 可知,云南省防灾减灾能力最高的地区为昆明和曲靖;楚雄、玉溪、红河的防灾减灾能力处于次高水平;保山、大理、普洱、昭通、文山为中等防灾减灾能力区;迪庆、丽江、德宏、临沧、西双版纳为次低防灾减灾能力区;怒江为低防灾减灾能力区。

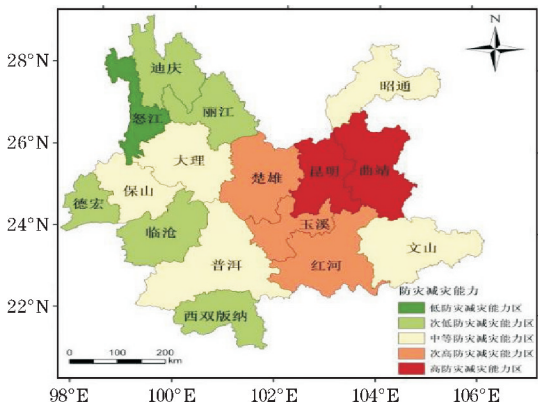


图 6 防灾减灾能力区划图

2.2.5 干旱灾害风险综合区划

综合考虑各指标因子,将云南省干旱灾害风险分为低风险区、次低风险区、中等风险区、次高风险区、高风险区,结果如图 7 所示。

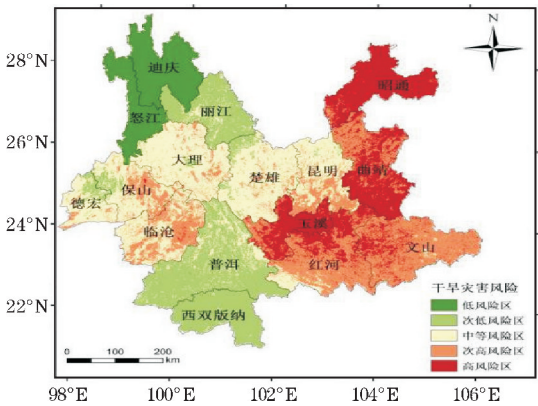


图 7 云南干旱灾害风险综合区划图

整体来看,云南省东部干旱灾害风险最高,北部以及西部处于中等干旱风险区,云南省西北以及南部干旱风险较低。其中,玉溪、昭通、曲靖及红河和文山的北部发生干旱灾害的风险最高,为干旱灾害高风险区。此区降水少,蒸发强,致灾因子危险性高,且多为起伏较和缓的丘陵和山地,人口密度大,耕地率较高,经济发达,在同等强度干旱灾害影响下,较其他地区损失更为严重,承灾体易损性高。同时,该区人民进行的生产活动较多,河网虽然分布较均匀,但流量大,水流较湍急,利用率不高,在玉溪、红河以及文山北部地区的土壤水分很低,较易受到旱灾的影响,孕灾环境敏感性高。然而,由于该区的经济水平较好,灌溉能力强,水库库容大,防灾减灾能力处在中等及其以上水平。综合考虑以上 4 个因子后得出该区为干旱灾害高风险区。

保山和临沧东部、昆明南部、红河和文山南部位于干旱灾害风险次高风险区。该区旱灾发生的频率较高,致灾因子危险性较大,且该区的耕地率能达到次高及其以上的水平,经济状况良好,人口分布较为稠密,承灾体易损性能达到中等及其以上的水平。保山、临沧、文山的耕地利用较多,且昆明南部的居民用地较多,孕灾环境敏感性较高。该区由于经济水平较高,灌溉能力也较强,除了临沧的水库库容偏低外,其余地区的水库库容能达到中等及以上水平,因此,除了临沧地区的防灾减灾能力偏低,其他地区的防灾减灾能力都在中等及以上水平。综合考虑各因素得出该区为干旱灾害次高风险区。

德宏、保山和临沧西部、大理、楚雄、昆明北部为中等干旱灾害风险区。此区除了楚雄东部为致灾因子次高风险区,其余地区的致灾因子危险性均处于中等及以下水平。该地区的耕地率较高,经济条件一般,人口密度较东部地区要稀疏一些,承灾体易损性总体处于



中等水平。由于该地区的林草地分布较多,且耕地分布也较广,大理、楚雄、昆明部分地区的土壤水分偏低,孕灾环境敏感性处于中等偏上的水平。另外,本地区的经济水平一般,除了临沧的灌溉能力以及水库库容偏低外,其余地区的抗旱能力较强,因此该地区除临沧外,其余地区防灾减灾能力可以达到中上水平。因此,综合考虑得出该区的干旱灾害风险为中等水平。

丽江、普洱、西双版纳为次低风险区。此地区的干旱发生频率偏低,致灾危险性整体处于次低的水平;耕地率也较低,均为 7% ~ 13%;经济发展水平较低,人口稀疏,为低承灾体易损性区域。同时,该区域林地分布广泛,土壤水分处于中等偏下的水平,除了丽江的孕灾环境敏感性为中等偏下的水平,其余地区的孕灾环境敏感性为中等偏上的水平。此地区,除了普洱的灌溉能力较强外,其余地区的灌溉能力较弱,经济水平较低,水库库容也较小,防灾减灾能力偏弱。由于该区域的致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性均较小,虽然防灾减灾能力不强,整个区域的干旱灾害风险处于次低水平。

迪庆、怒江为干旱灾害低风险区。除了迪庆东部的致灾因子危险性高于中等水平,其他地区均为次低危险性区域。迪庆、怒江的耕地率很低,均小于 7%,经济发展水平较低,人口也较稀少,属于承灾体低易损区。同时,该地区的植被覆盖率高,林草地分布广,地势高,地形起伏度大,不利于人们进行生产活动,且迪庆的土壤水分含量较高,因此,此地区孕灾环境敏感性低。另外,该地区的防灾减灾能力并不高,但致灾因子危险性、承灾体易损性、孕灾环境敏感性均处于低水平,所以综合来看,该地区的干旱灾害风险最低。

2.3 评估结果验证

为验证云南省旱灾风险区划结果能否表征云南省的旱灾风险水平,将旱灾风险区划结果与云南省实际灾情进行比较,分别利用徐新创等<sup>[26]</sup>根据云南省《减灾年鉴》(1996–2007)和《救灾年鉴》(1994–2007)计算出的云南省各州市的农业干旱风险损失量,在 GIS 中绘制云南省农业干旱风险损失量分布图(图 8),以及利用 1989–1993 年云南省各州市干旱的受灾面积数据绘制云南省干旱灾害平均受灾面积分布图(图 9)。

将图 7 与图 8 进行比较后可以看出:在昭通、曲靖、文山、红河、玉溪、昆明、楚雄、大理、保山、德宏、临沧区域呈现中等及其以上的干旱风险,对应的损失量

风险也呈现中等及其以上的级别;迪庆、怒江、丽江、普洱、西双版纳区域的干旱灾害风险呈低、次低风险水平,相应的该 5 市的损失风险也在低与次低的水平。因此,总体而言,云南省的干旱灾害风险评估结果总体上能反映出其旱灾风险水平。由图 7 与图 9 相比较可以看出:除楚雄、昆明、玉溪、临沧 4 州市的平均受灾情况与干旱风险略有差异外,其余地区的灾情与风险匹配度较好。所以构建得出的云南省干旱灾害风险区划结果整体能体现云南省的干旱灾害风险分布。

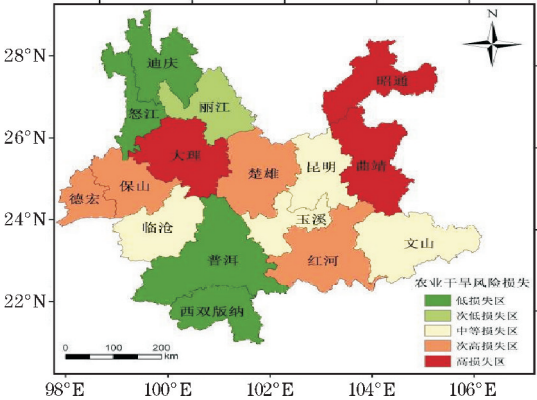


图 8 云南省农业干旱风险损失量分布图

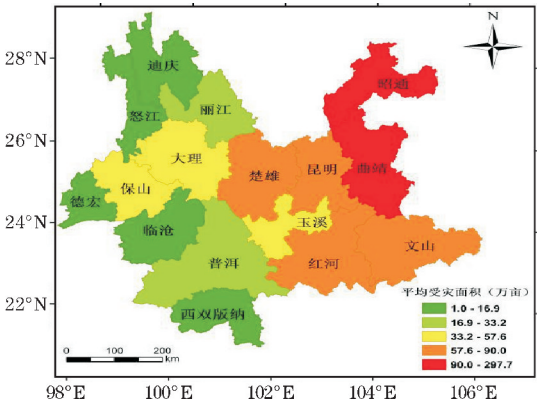


图 9 云南省平均受灾面积分布图

3 结论与讨论

从干旱灾害风险评估 4 因子出发,选取相关的 15 个指标,利用层次分析法、加权综合评价法、干旱灾害风险指数法及 GIS 的空间分析功能,绘制了云南省旱灾风险区划图。与云南省实际灾情比较验证表明,旱灾风险区划图大体能表征云南省的旱灾风险分布。即云南省的旱灾风险整体呈现东高西低的分布情况。其中,玉溪、昭通、曲靖及红河和文山的北部发生干旱灾害的风险最高,为干旱灾害高风险区;保山和临沧东部、昆明南部、红河和文山南部位于干旱灾害风险次高

危险区;德宏、保山和临沧西部、大理、楚雄、昆明北部为中等干旱灾害风险区;丽江、普洱、西双版纳为次低风险区;迪庆、怒江为干旱灾害低风险区。

由于文中的一些指标因子是以州市行政范围统计的,在一定程度降低了结果的精确度,如果能对社会经济数据进行网格化表达,则结果会更准确。另外,在灾情统计方面,由于数据资料查找的困难,仅选取了5年的数据代表云南省的平均受灾情况,为更好地体现云南省旱灾灾情情况的平均水平,统计的时间尺度有待加长。同时,为了使旱灾风险评估的结果更加准确可靠,构建更加健全的旱灾风险评估体系至关重要,在对各指标的权重分配上,采用的层次分析法相对主观性较大,若能引入更加客观的一些方法,或主客观方法结合使用,则能使各指标的权重分配会更合理,这些都有待后续研究的进一步深入和完善。

## 参考文献:

- [1] 尹晗,李耀辉.我国西南干旱研究最新进展综述[J].气象干旱,2013,31(1):182-193.
- [2] 王劲松,李耀辉,王润元,等.我国气象干旱研究进展评述[J].气象干旱,2012,30(4):497-508.
- [3] 国家防汛抗旱总指挥部,中华人民共和国水利部.中国水旱灾害公报:2017[M].北京:中国地图出版社,2018.
- [4] 贾慧聪,王静爱.国内外不同尺度的旱灾风险评估研究进展[J].自然灾害学报,2011,20(2):138-145.
- [5] Islam A R M T, Shen S H, Hu Z H, et al. Drought Hazard Evaluation in Boro Paddy Cultivated Areas of Western Bangladesh at Current and Future Climate Change Conditions[EB/OL]. <https://www.researchgate.net/publication/312028161>.
- [6] Kim H, Park J, Yoo J, et al. Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2015, 9(1): 28-35.
- [7] Liang C, Li D, Yuan Z, et al. Assessing urban flood and drought risks under climate change, China[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(9): 1349-1361.
- [8] Samantaray A K, Singh G, Ramadas M, et al. Drought hotspot analysis and risk assessment using probabilistic drought monitoring and severity-duration-frequency analysis[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(3): 432-449.
- [9] Kim J S, Park S Y, Hong H P, et al. Drought Risk Assessment for Future Climate Projections in the Nakdong River Basin, Korea[EB/OL]. <https://www.researchgate.net/publication/338549598>.
- [10] 韩兰英,张强,马鹏里,等.中国西南地区农业干旱灾害风险空间特征[J].中国沙漠,2015,35(4):1015-1023.
- [11] 何娇楠,李运刚,李雪,等.云南省干旱灾害风险评估[J].自然灾害学报,2016,25(5):37-45.
- [12] 李建安,张亮,李晶晶,等.安康市汉滨区干旱灾害风险区划分析[J].现代农业科技,2019(6):172-173.
- [13] 李家文,黄维,吴炫柯,等.柳州市甘蔗干旱风险区划——基于作物水分亏缺指数[J].中国农学通报,2019,35(22):96-105.
- [14] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等.云南近46年降水与气温变化趋势的特征分析[J].灾害学,2010,25(1):39-44.
- [15] 王宇,缪启龙,肖伟.云南省40年来气温场变化的基本特征[J].大气科学学报,1996,19(4):478-481.
- [16] 罗丽艳,李芸,马平森,等.云南省干旱及演变趋势分析[J].人民珠江,2011,32(2):13-15.
- [17] 余航,王龙,文俊,等.云南省500年干旱灾害时空分布研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(12):38-44.
- [18] 祁俊青,于文金,谢涛,等.云南省干旱灾害时空变化特征[J].江苏农业学报,2019,35(3):631-638.
- [19] 陈为铎,余培刚.“三个维度”看云南旱灾[J].地理教学,2013(19):4-5.
- [20] 徐新良,庄大方,贾绍凤,等. GIS 环境下基于DEM的中国流域自动提取方法[J].长渡流域资源与环境,2004,13(4):343-348.
- [21] 赵静,张继权,严登华,等.基于网格GIS的豫北地区干旱灾害风险区划[J].灾害学,2012,27(1):55-58.
- [22] 刘玉英,石大明,胡轶鑫,等.吉林省农业气象干旱灾害的风险分析及区划[J].生态学杂志,2013,32(6):1518-1524.
- [23] 常建娥,蒋太立.层次分析法确定权重的研究

- [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007, 29(1): 153-156.
- [24] 王以彭, 李结松, 刘立元. 层次分析法在确定评价指标权重系数中的应用[J]. 第一军医大学学报, 1999, 19(4): 377-379.
- [25] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431.
- [26] 徐新创, 葛全胜, 郑景云, 等. 区域农业干旱风险评估研究——以中国西南地区为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 883-890.

## Study on Drought Disaster Risk Zoning in Yunnan Province under the Background of Climate Warming

SUN Lijun<sup>1, 2</sup>, LI Xiehui<sup>1</sup>

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Environmental Changes and Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In order to study the drought risk in Yunnan Province under the background of climate warming, using the temperature and precipitation data of 24 meteorological stations from 1970 to 2017, the socio-economic and remote sensing data, based on the drought disaster risk factors on hazard of disaster-causing factors, sensitivity of disaster-formative environments, vulnerability of disaster-bearing body, and disaster prevention and mitigation capability, the drought disaster risk assessment model established by selecting the indicators suitable for the characteristics of study area, AHP method, drought risk index method, weighted comprehensive evaluation method and GIS technique were applied to study the drought risk zoning in Yunnan Province. The results showed that the risk of drought disaster in eastern Yunnan Province was the high, the north and west of Yunnan Province were in the moderate drought risk area, and the drought risk in the northwest and south was low. Comparing the results of risk zoning with the actual drought disaster situation in Yunnan Province, it showed that the drought risk model used in this paper can generally represent the distribution of drought risk, and the results can provide valuable reference for local government and relevant departments to formulate drought prevention and drought mitigation countermeasures under the background of climate warming.

**Keywords:** applied meteorology; disaster risk; drought disaster; risk analysis; GIS technique; AHP method; Yunnan Province