

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 6 - 672 - 13

青藏高原农牧区干旱灾害风险分析

赵志龙¹, 张镜铨², 刘峰贵^{1, 2*}, 张海峰¹, 周强¹, 刘佩¹, 邹新华¹

(1. 青海师范大学生命与地理科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 随着全球气候变化, 青藏高原的干旱化趋势愈加显现。根据 1951—2010 年气象灾害统计数据, 利用 GIS 技术与自然灾害风险分析模型, 基于 2010 年承险体脆弱性断面数据, 分析了青藏高原农牧区 210 个县的干旱灾害风险要素空间分布特点, 并对青藏高原农牧区进行了干旱灾害风险程度分区。研究表明: 1. 青藏高原农牧区旱灾中等以上(0.24~1.00)风险等级的区域面积总计为 $103.26 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占农牧区总面积的 63%。2. 旱灾风险高值中心(0.44~1.00)总面积 $9.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 西藏自治区占 20%, 青海省占 77%, 甘肃省占 3%。3. 旱灾风险低值区(0.00~0.15)总面积 $54.49 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 西藏自治区占 52%, 青海省占 6%, 云南省占 1%, 四川省占 35%, 甘肃省占 1%, 新疆自治区占 5%。因此, 青藏高原农牧区旱灾防御形势严峻。

关键词: 青藏高原; 历史数据; 干旱; 灾害; 风险

中图分类号: P46 X4

文献标志码: A

干旱是全球危害最严重的自然灾害之一, 长期以来, 国外学者在干旱灾害的概念^[1]、干旱灾害的时空尺度^[2-3]、干旱灾害风险建模^[4]、干旱灾害表征要素规律性分析^[2-6]和干旱灾害风险区划与案例分析^[2-6]等方面已进行了广泛而深入的探讨。由于我国季风气候明显、年际间季风的不稳定性和境内地形差异等因素造成的水热分布不均^[7], 使我国成为世界上旱灾高发的地区之一, 旱灾对我国农、牧业的影响十分显著, 对中国区域旱灾的时空格局^[8]、致灾危险性分异及其转移规律^[9]、旱灾脆弱性的成因^[10]和评价指标体系^[11]及旱灾典型区域风险区划^[12-13]等已经有了较多的研究。从 1949—2000 年间中国旱灾的时空格局来看, 总体呈东西分异, 重旱灾区域在北方, 旱灾的范围有向西部扩展的趋势^[8]; 而 1951—2000 年间农业旱灾分析得出, 20 世纪 90 年代以来, 西北地区农业旱灾呈明显增加, 其中, 青海和新疆农业旱灾递增率为 $8.35 \times 10^4 \text{ hm}^2 /$

(10 a) 以下, 青藏高原的畜牧业区干旱灾害呈多发态势^[14]。

青藏高原土地总面积约 $257.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15], 其中农牧区面积总计 $163.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由于旱灾影响面积大, 对畜牧、耕作业危害严重, 所以, 青藏高原旱灾对地区经济和社会保障有着举足轻重的影响。本文通过青藏高原范围内青海、西藏、甘肃、四川、云南、新疆等县域尺度 1950—2010 年旱灾历史数据和 2010 年社会经济断面数据, 分析青藏高原农牧区旱灾风险分布状况, 为区域旱灾风险防范提供相应的参考依据。

1 数据来源

1.1 文献数据

灾害数据: 源于《中国气象灾害大典》(青海卷、西藏卷、新疆卷、甘肃卷、四川卷、云南卷)^[16-21]

收稿日期(Received date): 2013-01-30; 改回日期(Accepted): 2013-04-12。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(2010CB951704), 国家自然科学基金项目(40761003)和中国科学院战略性先导科技专项(XDB03030501)。[Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB951704), the National Natural Science Foundation of China(No. 40761003), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(No. XDB03030501).]

作者简介(Biography): 赵志龙(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事自然地理综合研究。[Zhao Zhilong(1988-), male, postgraduate, major in integrated physical geography.] E-mail: geozhao@163.com

* 通信作者: 刘峰贵(1966-), 教授, 从事全球变化与自然灾害研究。[Liu Fenggui(1966-), Professor of global change and natural disaster.] E-mail: Liufenggui@igsnr.ac.cn

1950—2000年的灾情记录,以及《青海省气候公报》(2000—2010年)和《西藏自治区气候公报》(2000—2010年)等相关各省区的气候公报^[22-27]等。

社会经济数据:源于《中国县(市)社会经济统计年鉴》(2011)和《青海统计年鉴》(2011)暨《西藏统计年鉴》(2011)等相关省区2011年的统计年鉴^[28-34]。

1.2 气象数据

本文所用青藏高原(1951—2010年)降水气候平均值、气温气候平均值源于中国气象科学数据共享服务网中国地面气候资料年值数据集;平均径流深源于《中国自然灾害系统地图集》^[35]。

1.3 地图数据

高原矢量范围源自文献^[15];各县行政界线等其他基础地理数据源于1:400万中国基础地理数据库(2003年)。

1.4 土地利用与土地覆被数据

青藏高原250 m×250 m土地利用与土地覆被矢量数据源于中国西部环境与生态科学数据中心的全国土地利用/覆被数据集(2000年)。

2 分析方法与评价模型

2.1 分析方法

现有的灾害风险模型主要包括基于指标体系的相对风险等级评估模型、基于致灾曲线和脆弱性等级的风险等级评估模型、基于脆弱性曲线的灾害风险评估模型、基于历史灾情的模糊推断灾害风险模型等4个方面^[7,36]。干旱模型系统组成可理解为干旱时空分析、气候变化对干旱的影响、陆面数据同化系统、干旱管理、干旱预测、干旱概率特征等6个方面^[4,37],一般干旱灾害的致险性主要通过相关模型进行规律性探讨^[5],而旱灾脆弱性则通过农户调查的方式以及相关脆弱性模型对不同时空尺度和典型区域进行旱灾脆弱性评价^[2-3,6]。同时由于对旱灾本身和风险概念理解的差异性,还有学者通过信息扩散理论^[38]、模糊网络分析^[39]、风险评估模型^[13,40]、灰色关联分析^[41-42]等对典型区域农、牧业旱灾风险进行了综合评价,从多角度探讨中国区域旱灾的危险性时空分异规律^[9]。

干旱灾害风险是指干旱的活动(发生、发展)及其对经济、社会和自然环境系统造成的影响和危害

的可能性,而不是干旱灾害本身。当这种由于干旱导致的影响和危害的可能性变为现实,即为干旱灾害^[7]。从此定义出发,本文认为干旱灾害的承险体是干旱区域的经济、社会和自然环境系统。在上述模型中,基于指标体系的相对风险等级评估模型可以通过完善的指标体系反映旱灾对干旱区域的经济、社会和自然环境系统所造成的影响和危害的可能性。故本文选取基于指标体系的相对风险等级评估模型,以青藏高原210个县1950—2010年旱灾历史数据和2010年社会经济断面数据为基础,建立致险性和脆弱性指标体系,可以较为客观准确地反映青藏高原旱灾风险的全貌。同时,建立指标体系可以将复杂问题分解为若干层次和若干因素,并通过各因素间内在关系的比较分析,条理化、数量化地解决复杂地理问题。本文将致灾危险性理解为历史灾害致险性和潜在灾害致险性,脆弱性指标理解为物理暴露、物理暴露的敏感性和应灾能力3个方面,并筛选出与旱灾有关联的26项评价指标,利用GIS技术对研究区干旱灾害风险等级进行分析。

2.2 研究区范围假定

在青藏高原范围^[15]的基础上,利用ArcGIS数据处理模块对中国(250 m×250 m)土地利用与土地覆被矢量图进行裁切,生成青藏高原(250 m×250 m)土地利用与土地覆被图。同时,基于中国科学院资源环境分类系统将非农业、非牧业的土地利用与土地覆被类型(包括有林地、灌木林、疏林地、其他林地、河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、城镇用地、其他建设用地、沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石砾地、其他未利用土地)面状要素导出,并运用ArcGIS叠加分析工具将其去除,生成青藏高原(各类)高寒草地和农地分布区图,本文假设该分布区为青藏高原农牧区范围(图1)。同时,将该分布区图与青藏高原各县行政范围进行裁切,生成青藏高原各县农牧区范围矢量数据集。

运用ArcGIS统计分析工具,得出青藏高原农牧区面积总计 $163.05 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,高寒草地面积 $157.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,沼泽地面积 $2.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,滩地面积 $1.28 \times 10^4 \text{ km}^2$,农村居民点面积 $0.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,旱地面积 $1.78 \times 10^4 \text{ km}^2$,水田面积 $0.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本文即以该青藏高原农牧区为研究区,进行干旱灾害风险分析。

2.3 指标体系建立与权重确定

构建指标体系是青藏高原旱灾风险分析中的关

键一步。根据指标体系的构建原则和国内外相关研究方法^[36-48],本文从致灾危险性和脆弱性 2 个方面进行青藏高原农牧区干旱灾害风险分析指标的选取,共选取 26 项指标分别进行农、牧区风险分析(表 1)。

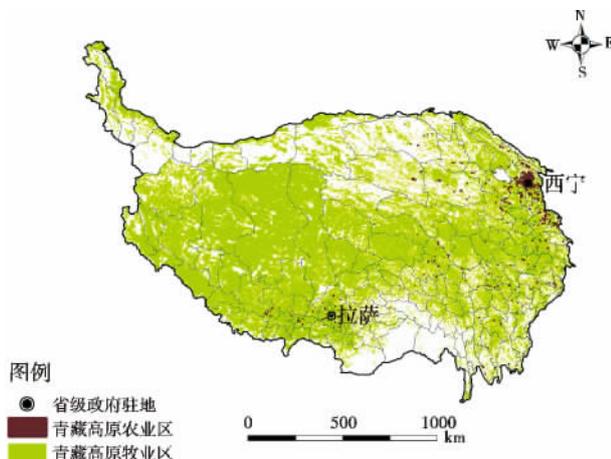


图 1 青藏高原农牧区范围

Fig. 1 Agricultural and pastoral areas of Tibetan Plateau

从干旱灾害风险的定义^[7]出发,本文认为干旱灾害的承险体是干旱区域的经济、社会和自然环境系统。而干旱灾害致灾危险性是指造成干旱灾害的自然变异因素和程度,主要是指极端气候条件和自然地理环境^[7]。本文从自然环境、气候条件和历史

状况将导致旱灾的危险性因子分为潜在致灾危险性和历史致灾危险性。由于历史上旱灾发生的频次和强度直观记录了区域旱灾发生的时间和次数,间接代表了区域旱灾受灾危险程度,所以选取 1951—2010 年青藏高原旱灾的频次和强度这两项指标来反映历史致灾危险性。年均降水量、年均径流深这两项自然因素指标对旱灾发生起到至关重要的作用,当年均降水量越多、年均径流深越大时,表明区域水量充足,旱灾越不易发生;反之,旱灾极易发生。但是,年均气温越高,地表蒸发就越旺盛,旱灾也就越易发生。因而选取年均降水量、年均径流深、年均气温来反映潜在致灾危险性。由于干旱灾害的承险体是干旱区域的经济、社会和自然环境系统,那么农牧区的旱灾暴露性具体包括农业、牧业、人类和生态环境等。故本文从人口、牲畜、农田、农牧业经济效益等方面出发,同时,考虑到青藏高原旱灾的影响区既包括农业区又包括牧业区,因而分别选择人口密度、耕地面积、单位面积牲畜数、农业产值比重、牧业产值比重来代表不同承险体的物理暴露性。敏感性是指由承险体本身的物理特性决定的接受一定强度的打击后受到损失的容易程度^[45],它反映了区域内不同承险体由于自身的物理特性表现出的易损程度差异。本文研究区为青藏高原农牧区,即选取旱地面积比例、草地面积比例;粮食单产量、大牲畜比例

表 1 青藏高原农牧区干旱灾害指标及权重

Table 1 Drought disaster analysis index system and weight of agricultural and pastoral areas of Tibetan Plateau

| 因子层 Factor layer | 副因子层与权重 Vice factor layer and weights | 指标层与权重 Index layer and weights | |
|---------------------|--|-----------------------------------|---------------|
| 致险性(H) | 历史致灾危险性(X) 0.400 | 频次 0.500 | |
| | | 强度 0.500 | |
| | 潜在致灾危险性(W) 0.600 | 降水气候平均值 0.530 | |
| | | 气温气候平均值 0.173 | |
| 物理暴露性(E) 0.286 | 基础应灾能力 0.600 | 平均径流深 0.297 | |
| | | 人口密度 0.297 | |
| | | 耕地面积 0.173 | 单位面积牲畜数 0.173 |
| | | 农业产值比重 0.530 | 牧业产值比重 0.530 |
| 敏感性(S) 0.286 | 基础应灾能力 0.600 | 旱地比例 0.667 | 草地比例 0.667 |
| | | 粮食单产量 0.333 | 大牲畜比例 0.333 |
| | | 农民人均纯收入 0.317 | 牧民人均纯收入 0.317 |
| | | 人均耕地面积 0.091 | 人均草地面积 0.091 |
| 脆弱性(V) | 专项应灾能力 0.400 | 人均粮食产量 0.091 | 人均牲畜头数 0.091 |
| | | 农民人口素质 0.200 | 牧民人口素质 0.200 |
| | | 地表植被覆盖类型 0.091 | |
| | | 政府应急管理能力和气象站点密度 0.210 | |
| 应灾能力(R) 0.428 | 专项应灾能力 0.400 | 工程防灾减灾能力(水资源工程、粮食储备库等) 0.833 | |

等4项指标分别反映不同承险体中对于旱灾的敏感群体,其值越高,承险体的敏感性就越强。应灾能力表现的是各种用于防御和减轻干旱灾害的各种管理措施和对策^[7]。本文从干旱灾害的承险体——干旱区域的经济、社会和自然环境系统出发,选取农牧民人均纯收入、人均耕地面积、人均草地面积、人均粮食产量、人均牲畜头数、农牧民人口素质、地表植被覆盖类型、政府应急管理能力、气象站点密度(本文涉及的气象站点总数为144个)、工程防灾减灾能力等指标分别反映区域基础应灾能力和专项应灾能力,其值越高,承险体受灾损失越小。但是,由于个别指标数据的不易获取性,本文选取了相关的指标予以替代,如用“各县(市)普通学校在校人数”指标替代“农牧民人口素质”指标。

整个指标体系分为因子层、副因子层和指标层。首先,通过最大最小值归一化的方法消除各指标的量纲,使指标之间具有可比性,所有指标的归一化值介于0~1,再运用AHP决策分析法确定整个体系各项指标的权重^[36,48],主要包括6个基本步骤,即明确问题、建立层次结构模型、构造判断矩阵、层次单排序、层次总排序、一致性检验等。其中,构造判断矩阵是用于评定各层次中所有要素两两之间的相对重要性状况,其各项标度值是根据数据资料、专家意见和本文作者的相关认识,加以平衡后给出的。整个指标体系权重的确定是在判断矩阵的基础上完成的,根据专家给出的各指标之间的相对重要性标度值,计算判断矩阵每一行元素的乘积,而后根据矩阵的阶数求每一行元素所对应的指标的方根,再用每项指标的方根与各项指标的方根之和相除,即得出各项指标的权重,再根据各项权重和排序结果,求出各判断矩阵的最大特征根,并且通过CR一致性检验(本文运用AHP决策分析法构造判断矩阵9个,在所有CR值中,最小为0,最大为0.0025,均<0.1)。

2.4 数据获取

根据本文构建的指标体系,各项指标的具体数值获取途径如下:

旱灾频次和强度通过《中国气象灾害大典》和各省、自治区气候公报的灾情记录直接统计获得。

降水气候平均值和气温气候平均值的获取:首先从中国地面气候资料年值数据集中提取出青藏高原(1951—2010年)年平均气温和降水量两个要素,而后经过Excel预处理的青藏高原气象站点的气象

数据在ArcGIS中转为站点的图层,再利用反向距离加权平均的方法内插出青藏高原(1951—2010年)年平均气温、年平均降水量栅格图。

平均径流深通过《中国自然灾害系统地图集》(2011)中提供的全国平均径流深矢量化数据提取出青藏高原平均径流深矢量数据,并经过矢量-栅格间转换获得。

人口密度由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得。

耕地面积、牲畜数量、草地面积由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得;单位面积牲畜数是通过各县牲畜总头数与各县草地面积相除获得。

农业、牧业产值与各县生产总值由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得;农牧业产值比重通过各县农牧业产值与各县生产总值相除获得。

各县旱地面积、草地面积、土地总面积由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得;旱地比例、草地比例通过各县旱地面积、草地面积与各县土地总面积相除获得。

各县粮食总产量由《中国县(市)社会经济统计年鉴》直接获得,耕地面积、牲畜数量、大牲畜数量由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得,粮食单产量通过各县粮食总产量与耕地面积相除获得,大牲畜比例通过大牲畜数量与牲畜数量相除获得。

农、牧民人均纯收入由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得。

人口数量由《中国县(市)社会经济统计年鉴》直接获得,耕地面积、草地面积由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得,人均耕地面积通过耕地面积与人口数量相除获得,人均草地面积通过草地面积与人口数量相除获得。

人口数量、粮食总产量由《中国县(市)社会经济统计年鉴》直接获得,牲畜总头数由各省统计年鉴中的县域情况统计直接获得,人均粮食产量通过粮食总产量与人口数量相除获得,人均牲畜头数通过牲畜总头数与人口数量相除获得。

农、牧民人口素质由“各县(市)普通学校在校人数”替代,并由《中国县(市)社会经济统计年鉴》直接获得。

地表植被覆盖类型由1:400万中国基础地理数据库矢量数据进行栅格转换获得。

政府应急管理能力按照省会城市、州府所在地县(市)、县级市、一般县等4个等级赋予权重。

气象站点密度由中国气象科学数据共享服务网提供的青藏高原气象台站数据在 ArcGIS 中进行密度分析获得。

工程防灾减灾能力通过各省统计年鉴中的县域情况统计中列出的水利水资源工程、粮食储备库等工程措施数据统计获得。

2.5 评价模型与制图

2.5.1 基本评价模型与制图

根据联合国提出的通用自然灾害风险评估模型以及相关学者研究^[7, 36-48], 本文依据致灾危险性、脆弱性, 将其危险性表示为历史致灾危险性和潜在致灾危险性之和, 脆弱性表示为物理暴露与敏感性之和再加上 1 与应灾能力之差, 其表达式为^[7, 36-48]

$$ADRI = H \times V = (0.4D + 0.6P) \times [0.286E + 0.286S + 0.428(1 - R)] \quad (1)$$

式中 $ADRI$ 是干旱灾害风险评价指数, 用于表示区域干旱灾害风险程度, 其值越大, 旱灾风险的程度也越大; H 表示致灾危险性因子指数; V 表示脆弱性因子指数; D 表示历史致灾危险性因子指数; P 表示潜在致灾危险性因子指数; E 表示物理暴露性因子指数; S 表示敏感性因子指数; R 表示应灾能力因子指数。

依据该分析模型将致险性因子和脆弱性因子的分析结果加以综合, 并根据自然裂点分级方法^[48], 将青藏高原农牧区干旱灾害风险状况分为 5 个等级, 最终得到青藏高原农牧区干旱灾害综合风险分析图。

2.5.2 致险性分析模型与制图

本文对青藏高原农牧区干旱灾害致险性的评价, 是从历史旱灾致险性和潜在旱灾致险性两个方面分别选取指标进行分析。历史旱灾致险性分析选择了旱灾频率和强度 2 项指标, 一般而言, 旱灾强度越大, 发生频率越高, 则旱灾的致险性指数也越高; 潜在旱灾致险性分析选择了多年平均降水量、多年平均气温和多年平均径流深等 3 项指标, 进而根据青藏高原农牧区旱灾发生时的气候条件(主要指无雨或少雨、空气干燥和干热、蒸发量大等)来确定这 3 项指标的权重, 并得出青藏高原农牧区干旱灾害致险性指数计算公式^[7, 36-48]

$$H = 0.4 \sum_{i=1}^2 X_{hi} W_{hi} + 0.6 \sum_{j=1}^3 X_{hj} W_{hj} \quad (2)$$

式中 H 表示青藏高原农牧区干旱灾害致险性指数; X_{hi} 为历史旱灾致险性各评价指标的归一化值, X_{hj} 为潜在旱灾致险性各评价指标的归一化值; W_{hi} 为

历史旱灾致险性各评价指标的权重系数, W_{hj} 为潜在旱灾致险性各评价指标的权重系数, 其表示各指标对形成旱灾风险的各因子的相对重要性, 其中 0.4、0.6 分别表示历史灾害致险性和潜在灾害致险性的权重系数。旱灾潜在致灾危险性因其具有诱发旱灾的一定的随机性和不确定性, 所以它的重要程度稍高于历史致灾危险性。

依据该分析模型, 在收集、整理和分析并标准化数据之后, 分别计算出历史旱灾致险性和潜在旱灾致险性再加以综合, 最终得到青藏高原农牧区旱灾致险性分析结果(图 2a)。

2.5.3 脆弱性分析模型与制图

根据自然灾害风险评估的基本原理^[7, 36-48] 以及青藏高原环境的特殊性, 对青藏高原农牧区干旱灾害脆弱性的评价是从承险体物理暴露性、承险体敏感性和应灾能力三个方面分别选取指标进行分析, 承险体物理暴露性分析选择了人口密度、单位面积牲畜数、耕地面积、农业产值比重和牧业产值比重等 5 项指标; 承险体敏感性分析选择了旱地面积比例、草地面积比例、粮食单产量、大牲畜比例等 4 项指标, 应灾能力分析则选择了农牧民人均纯收入等 12 项指标。

根据表 1 确立的指标体系和各指标权重系数以及青藏高原农牧区旱灾风险评价模型, 得出青藏高原农牧区旱灾脆弱性指数计算公式^[7, 36-48]

$$V = 0.286E + 0.286S + 0.428(1 - R) \quad (3)$$

式中 V 表示青藏高原农牧区干旱灾害脆弱性指数; E 表示物理暴露性因子指数; S 表示敏感性因子指数; R 表示应灾能力因子指数。其中, 0.286、0.286、0.428 分别表示物理暴露性因子、敏感性因子和应灾能力因子的权重系数。旱灾应灾能力因子代表着各县域减轻灾害损失, 降低承险体脆弱性的综合能力, 所以它的重要程度稍高于物理暴露性因子与敏感性因子。而物理暴露性因子与敏感性因子均代表着承险体的脆弱程度, 两者的重要程度相等。

同时, 依据该节中的(4)、(5)、(6)模型, 分别收集、整理和分析各评价指标数据, 进行无量纲化计算, 再将物理暴露性因子、敏感性因子和应灾能力因子的分析结果加以综合, 最终得到青藏高原农牧区旱灾脆弱性分析结果(图 2b)。

1. 物理暴露性分析模型与制图

承险体的物理暴露性是暴露在旱灾影响范围内的承险体(如人口、牲畜、农田等)的数目或价值量,

是旱灾风险存在的必要条件^[36]。

根据表1确立的指标体系和各指标权重系数,得出青藏高原农牧区旱灾承险体物理暴露性指数计算公式^[7,36-48]

$$E = \sum_{i=1}^5 X_{ei} W_{ei} \quad (4)$$

式中 E 表示青藏高原农牧区干旱灾害承险体物理暴露性指数; X_{ei} 为承险体物理暴露性各评价指标的归一化值; W_{ei} 为承险体物理暴露性各评价指标的权重系数。

依据该分析模型,分别收集、整理和分析各评价指标数据,进行无量纲化计算,而后得出青藏高原农牧区旱灾承险体物理暴露性分析结果(图2c)。

2. 敏感性分析模型与制图

承险体的灾损敏感性是指由承险体本身的物理特性决定的接受一定强度的打击后受到损失的容易程度,它反映了承险体本身抵御干旱灾害打击的能力强弱^[45]。

根据表1确立的指标体系和各指标权重系数,得出青藏高原农牧区旱灾承险体敏感性指数计算公式^[7,36-48]

$$S = \sum_{i=1}^4 X_{si} W_{si} \quad (5)$$

式中 S 表示青藏高原农牧区干旱灾害承险体敏感性指数; X_{si} 为承险体敏感性各评价指标的归一化值; W_{si} 为承险体敏感性各评价指标的权重系数。

依据该分析模型,分别收集、整理和分析各评价指标数据,进行无量纲化计算,而后得出青藏高原农牧区旱灾承险体敏感性分析结果(图2d)。

3. 应灾能力分析模型与制图

区域应灾能力是区域人类社会为保障承险体免受或少受干旱灾害威胁所拥有的基础条件和专项防御旱灾的能力^[45-47]。一般来说,应灾能力越强,承险体承受或抵御干旱灾害的能力也就越强。基础应灾能力分析选择了农牧民人均纯收入等10项指标对农、牧区分别进行分析;专项应灾能力分析选择了气象站点密度(本文涉及的气象站点总数为144个)、工程防灾减灾能力等2项指标。

根据表1确立的指标体系和各指标权重系数,得出青藏高原农牧区旱灾承险体敏感性指数计算公式^[7,36-48]

$$R = 0.6 \sum_{i=1}^{10} X_{ri} W_{ri} + 0.4 \sum_{j=1}^2 X_{rj} W_{rj} \quad (6)$$

式中 R 表示青藏高原农牧区干旱灾害应灾能力指数; X_{ri} 为基础应灾能力各评价指标的归一化值, X_{rj}

为专项应灾能力各评价指标的归一化值; W_{ri} 为基础应灾能力各评价指标的权重系数, W_{rj} 为专项应灾能力各评价指标的权重系数,其表示各指标对形成应灾能力的各因子的相对重要性,其中0.6、0.4分别表示基础应灾能力和专项应灾能力的权重系数。基础应灾能力代表着各县域减轻灾害损失,降低承险体脆弱性的常备措施,是各县域应对灾害能力的核心体现。所以它的重要程度稍高于专项应灾能力。

依据该分析模型,分别收集、整理和分析各评价指标数据,进行无量纲化计算,而后得出青藏高原农牧区旱灾应灾能力分析结果(图2e)。

3 结果分析

3.1 旱灾致险性

从综合分析结果(见图2a)来看,青藏高原农牧区的大部分地区旱灾致险性处于较低水平,这与史培军等^[49]研究结论较为一致,但危险性等级划分存在一定差异,原因可能是:1. 研究的空间尺度不同。史培军等研究的是全国尺度,其危险性等级划分是基于全国,而本文研究的是青藏高原,危险性相对等级划分是基于青藏高原尺度,研究区范围更小,所采取的等级划分更加符合青藏高原实际情况。2. 研究的时间尺度不同。史培军等研究时段是1949—2005年,而本文研究时段是1951—2010年,在高原内部60a气象灾害统计数据的基础上进行相对等级的危险性划分。从具体特征上看,旱灾致险性指数高值中心(0.76~1.00)集中分布于河湟谷地、柴达木盆地、共和盆地、河西走廊、阿尔金山麓,总面积 $9.77 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,青海省 $7.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括互助、乐都、格尔木等11县),占81%;甘肃省 $0.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括天祝、肃南、肃北等6县部分地区),占10%;新疆自治区 $0.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括若羌县的部分地区),占9%。本文结果与唐洪波等^[50]研究结论(青海省各地干旱以黄河、湟水谷地最为严重)相符合,但其研究结论同时指出在降水极少的柴达木地区很少发生旱灾,这与本文中指出的青海省格尔木等县市位于危险性高值中心相悖,其原因可能是本文统计其降水、径流深等条件在高原范围内属于低水平,并且旱灾发生频率和强度均处于高水平。旱灾危险性高值中心的成因与这些地区的历史旱灾状况和潜在条件是分不开的,在本文60a的统计尺度内,这些地区干旱灾害发生的频率和强度均高于

其他区域 这是其成为旱灾危险性高值中心的主要原因之一;同时,降水气候平均值较低,平均径流深处于较低水平,气温气候平均值较高,并且近 30 a 升温显著^[51]等,体现了这些地区潜在旱灾致险性等 级高,也是其成为旱灾危险性高值中心的原因。旱灾致险性指数低值区(0.00~0.40)位于藏南谷地、川西高原、松潘高原、横断山脉,总面积 $52.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中西藏自治区 $28.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括林芝、生达、察隅等 25 县),占 54%;青海省 $3.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括班玛、久治、达日等 3 县),占 7%;云南省 $0.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括丽江、香格里拉、兰坪等 8 县),占 1.5%;四川省 $19.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括九寨沟、康定、马尔康等 46 县),占 37%;甘肃省 $0.10 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括碌曲县的部分地区),占 0.5%。这与史培军等^[49]、唐洪波等^[50]研究结果相符合。导致这些地区成为低值区的成因,是其在本文 60 a 的统计尺度内旱灾发生的强度和频率均处于低水平。同时,降水、气温、径流深等指标反映的潜在旱灾致险性等 级处于低水平。

3.2 旱灾承险体脆弱性

3.2.1 物理暴露

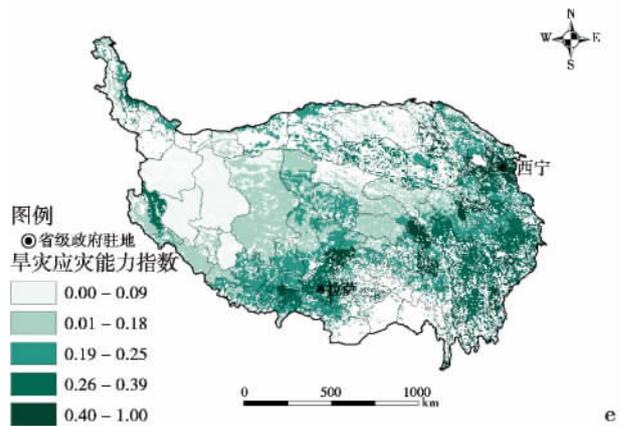
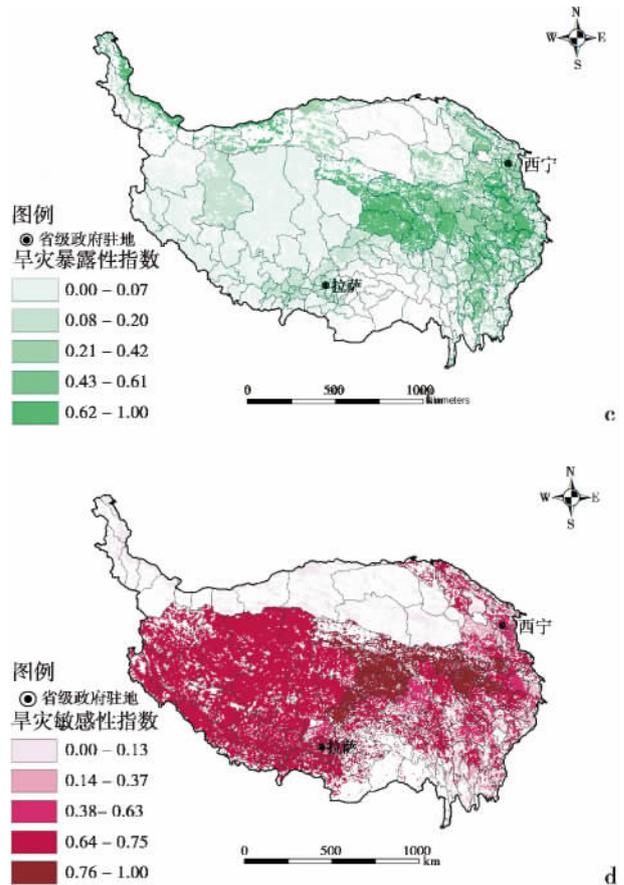
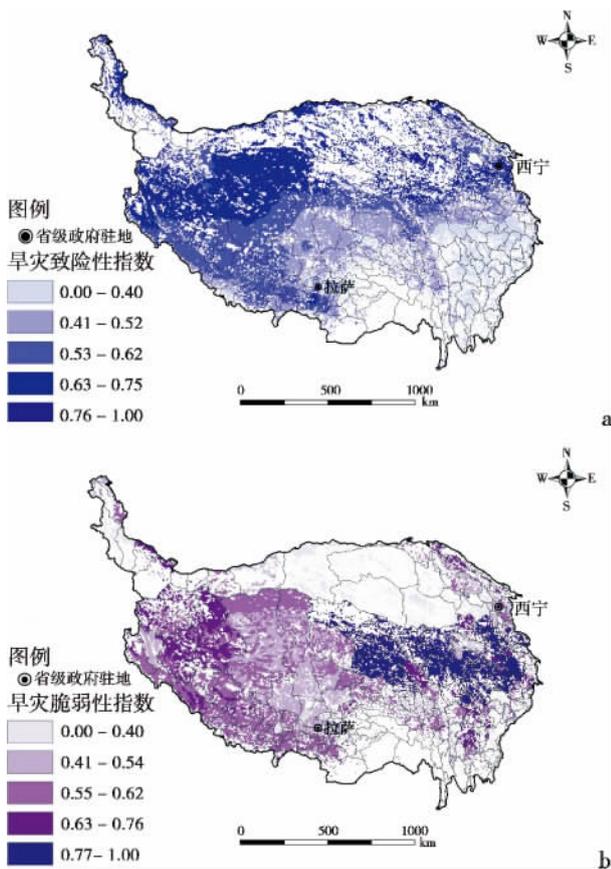


图 2 青藏高原农牧区主要干旱风险因子

Fig. 2 Main risk factors of drought disaster in agricultural and pastoral areas of Tibetan Plateau

(a. 致险性分析 risk assessment; b. 物理暴露性分析 Physical exposure assessment; c. 敏感性分析 Sensibility assessment; d. 灾灾能力分析 Response disaster capability assessment; e. 脆弱性分析 Vulnerability assessment)

从分析结果(见图 2c)来看,青藏高原农牧区的大部分地区旱灾物理暴露性处于较低水平。从具体特征上看,旱灾物理暴露性指数高值中心(0.62~1.00)分布于青南高原、川西高原、昆仑山麓,总面

积 $50.44 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 青海省 $26.94 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括西宁、杂多、玉树等6县市), 占53%; 四川省 $9.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括阿坝、石渠、甘孜等7县), 占20%; 新疆自治区 $13.78 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括阿克陶、皮山、且末等8县的部分地区), 占27%。造成这些地区成为高值中心的原因主要是农牧区单位面积牲畜数比重高, 农牧业产值比重较高。其中, 西宁市成为高值中心的原因还有人口密度高, 耕地面积比重高。这些地区暴露于干旱灾害危险因素中的社会、经济、自然环境系统的价值密度高, 所以物理暴露性也就越高。旱灾承险体物理暴露性指数低值区 ($0.00 \sim 0.07$) 位于柴达木盆地、藏北高原、藏南谷地、祁连山麓, 总面积 $84.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中西藏自治区 $77.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括林芝、波密、米林等45县), 占91%; 青海省 $6.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括格尔木、德令哈、大柴旦等5县), 占7%; 甘肃省 $0.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括玉门、肃北、阿克塞等3县的部分地区), 占2%。导致这些地区成为低值区的成因是其人口密度处于低水平, 农牧业产值比重处于低水平, 这是其成为旱灾物理暴露性低值区的主要原因, 同时, 这些地区耕地面积比重均处于极低水平, 单位面积牲畜数处于较低水平也是原因之一。这些地区暴露于干旱灾害危险因素中的社会、经济、自然环境系统的价值密度低, 所以物理暴露性也就越低。

3.2.2 敏感性

从分析结果(见图2d)来看, 青藏高原农牧区的大部分地区旱灾敏感性处于中等以上水平。从具体特征上看, 旱灾敏感性指数高值中心 ($0.76 \sim 1.00$) 分布于青南高原、唐古拉山麓、拉萨河谷, 总面积 $38.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 西藏自治区 $8.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括拉萨、那曲、聂荣等3县市), 占21%; 青海省 $30.84 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括玛多、玛沁、达日等9县), 占78%。造成这些地区成为高值中心的原因主要是这些地区多为牧业县, 草原面积比例和大牲畜比例均处于高水平, 而草原和大牲畜在旱灾发生时, 更容易产生经济损失(如牧草枯萎引起牲畜饲料紧张, 同时, 旱灾引起的饮水困难会引起大牲畜因需水量无法满足而出现死亡), 其中, 拉萨市成为高值中心的原因还有旱地比例与粮食单产量处于高水平。而当旱灾发生时, 由于灌溉用水大幅减少, 旱地比例高导致极易出现粮食产量大幅下降甚至绝收。这些因素进而表明该地区的承险体由于自身的物理特性对于旱灾更加敏感, 在旱灾发生后受到损失的容易程度

更高。旱灾敏感性指数低值区 ($0.00 \sim 0.13$) 位于柴达木盆地、昆仑山麓、“三江并流”河谷, 总面积 $29.82 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 青海省 $9.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括格尔木、德令哈、乌兰等8县), 占33%; 云南省 $0.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括贡山、维西、福贡等5县), 占1%; 新疆自治区 $19.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括乌恰、阿克陶、皮山等14县), 占66%。导致这些地区成为低值区的成因主要是其草原面积比例和大牲畜比例均处于低水平, 同时, 云南省5县成为低值区的原因还有水田占一定的比例。而水田因其良好地储水性能, 在旱灾发生时, 其敏感性低于旱地。这些因素进而表明该地区的承险体由于自身的物理特性对于旱灾不敏感, 而在旱灾发生时受到损失的容易程度更低。

3.2.3 应灾能力

从综合分析结果(见图2e)来看, 青藏高原农牧区的大部分地区旱灾应灾能力处于中等以下水平。从具体特征上看, 旱灾应灾能力指数高值中心 ($0.40 \sim 1.00$) 分布于省会或州府所在地以及其毗邻县域, 总面积 $21.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 西藏自治区 $9.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括拉萨、那曲、林芝等6县市), 占45%; 青海省 $12.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括西宁、平安、湟中等14县市), 占55%。造成这些地区成为高值中心的原因主要是作为省会或州府所在地以及其毗邻县域, 其基础应灾能力和专项应灾能力均处于高水平, 尤其是政府应急管理能力、农牧民人均纯收入、工程防灾减灾能力、气象站点密度要高于一般县。这些应灾措施和对策在抗旱减灾中起到关键作用, 能够最大限度地降低旱灾带来的经济损失, 所以这些地区的应灾能力处于高水平。旱灾应灾能力指数低值区 ($0.00 \sim 0.09$) 位于藏北高原, 总面积 $30.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括日土、改则、革吉等5县)。导致这些地区成为低值区的成因主要是其基础应灾能力和专项应灾能力均处于低水平, 尤其是政府应急管理能力、工程防灾减灾能力、气象站点密度等由于受到自然条件限制要低于一般县, 进而导致这些地区的应灾能力处于低水平。

3.2.4 脆弱性综合结果

从综合分析结果(见图2b)来看, 青藏高原农牧区的大部分地区旱灾承险体脆弱性处于中等以上水平, 这与倪深海等^[52]研究结论较为一致, 但脆弱性等级划分存在一定差异, 原因可能是: 1. 研究的空间尺度不同。倪深海等研究的是全国尺度, 其脆弱性等级划分是基于全国, 而本文研究的是青藏高原,

脆弱性相对等级划分是基于青藏高原尺度,研究区范围更小,所采取的等级划分更加符合青藏高原实际情况。2. 研究的角度不同。倪深海等研究视角是基于农业旱灾,而本文研究是基于农业旱灾和牧业旱灾,在两者同时考虑的基础上进行相对等级的脆弱性划分,从而更加全面。从具体特征上看,旱灾脆弱性指数高值中心(0.77~1.00)分布于青南高原、川西高原西北部、甘肃南部,总面积 $45.81 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,青海省 $32.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括曲麻莱、治多、杂多等12县),占70%;四川省 $9.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括石渠、色达、若尔盖等7县),占21%;甘肃省 $3.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括夏河、碌曲、玛曲等4县部分地区),占9%。本文结果与倪深海等^[52]研究结论(甘肃南部属旱灾极严重脆弱区)相符合。这些地区旱灾承险体物理暴露性较高,敏感性较高,同时,旱灾的应灾能力较低,导致整体成为旱灾脆弱性的高值中心。旱灾承险体脆弱性指数低值区(0.00~0.40)位于藏南谷地、柴达木盆地、青海湖盆地、昆仑山麓、川西高原西南部、横断山脉,总面积 $24.77 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,西藏自治区 $2.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括拉萨、林芝、日喀则等3县市),占9%;青海省 $10.75 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括西宁、德令哈、格尔木等11县市),占43%;云南省 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括香格里拉、德钦、维西等6县),占4%;四川省 $4.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括马尔康、康定、丹巴等3县),占16%;新疆自治区 $6.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括若羌、叶城、塔什库尔干等4县),占28%。这与倪深海等^[52]研究结果相符合。这些地区旱灾承险体物理暴露性较低,敏感性较低,同时,旱灾的应灾能力较高,导致整体成为旱灾脆弱性的低值区。

3.3 干旱灾害风险分析

从干旱灾害综合风险分析结果(图3)来看,青藏高原农牧区旱灾中等以上(0.24~1.00)风险等级的区域面积总计为 $103.26 \times 10^4 \text{ km}^2$,占农牧区总面积的63%。从具体特征上看,旱灾风险高值中心(0.44~1.00)分布于青南高原、柴达木盆地、河湟谷地、河西走廊、甘南高原、藏南谷地局部地区,总面积 $9.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,西藏自治区 $1.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括贡嘎、浪卡子等2县部分地区),占20%;青海省 $7.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括湟中、乐都、都兰等18县),占77%;甘肃省 $0.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括天祝、和政、积石山等5县),占3%。本文结果与唐洪波等^[50]研究结论(青海省各地干旱以黄河、湟水谷地最为严

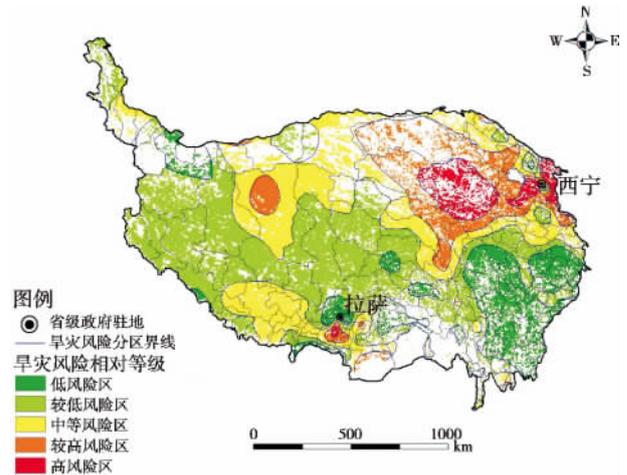


图3 青藏高原农牧区干旱灾害综合风险分析图

Fig. 3 Comprehensive risk analysis map of drought disaster in agricultural and pastoral areas of Tibetan Plateau

重)以及隋欣等^[53]相关结论相符合。但其研究结论同时指出在柴达木地区和青南地区很少发生旱灾,这与本文中指出的青海省都兰县等县市位于旱灾风险高值中心相悖,其原因可能是:1. 本文统计其旱灾发生频率和强度均处于高水平;2. 唐洪波等研究中只单一考虑了降水因素,而本文是基于指标体系的综合分析;3. 都兰县境内既存在牧业经济体系又存在农业经济体系,旱灾同时对两种经济体系产生影响,导致其风险处于高水平。造成这些地区成为高值中心的原因主要是这些地区致险性处于高水平,尤其是旱灾发生的强度和频率均较高,同时,脆弱性也处于较高水平。旱灾风险低值区(0.00~0.15)位于省级城市、祁连山麓、昆仑山麓、藏北高原、藏南谷地、甘青交界地区,总面积 $54.49 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,西藏自治区 $28.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括拉萨、林芝、当雄等36县市),占52%;青海省 $3.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括西宁、平安、祁连等9县市),占6%;云南省 $0.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括香格里拉、德钦、维西等4县),占1%;四川省 $19.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括九寨沟、马尔康、康定等46县),占35%;甘肃省 $0.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括玛曲县部分地区),占1%;新疆自治区 $2.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括和田、于田、策勒等4县部分地区),占5%。这些地区致险性处于低水平,尤其是旱灾发生的强度和频率均较低,同时,脆弱性也处于较低水平,特别是一些省级城市和州府所在地城市应灾能力较强。综上所述,本文认为青藏高原农牧区的干旱灾害风险较高,尤其是东部农业区和青南牧业区的干旱灾害防治工作应该作为今后青藏高原

农牧区干旱灾害防治的重点区域。

4 讨论与结论

本文从灾害发生的历史情况、诱发灾害的潜在条件、农牧业基本情况、自然条件、人口状况、社会文化状况、政府管理能力、预报减灾能力等角度构建的青藏高原农牧区干旱灾害风险分析指标体系,具有空间多尺度适宜性特点。通过本文的研究,认为该指标体系适用于青藏高原农牧区等大区域尺度。其建立同时,运用标准化方法对相关指标进行归一化处理,并运用层次分析法确定各因子、指标的权重。再者,根据研究区存在农业区和牧业区的实际情况,指标体系细分为农业旱灾风险评价指标和牧业旱灾风险评价指标,并在承险体脆弱性分析评价中得以运用。

现阶段的灾害风险模型主要包括基于指标体系的相对风险等级评估模型、基于致灾曲线和脆弱性等级的风险等级评估模型、基于脆弱性曲线的灾害风险评估模型、基于历史灾情的模糊推断灾害风险模型等4个方面。本文在借鉴相关研究^[1-7,13,36-44]的基础上,基于多指标体系风险评估模型和GIS技术对青藏高原农牧区旱灾风险进行了实证分析,具有一定的可行性和应用价值,但在指标选取中存在一定的主观性,因此,为使评价结果更加合理,从而更好地被政府部门作为防灾减灾政策制定的参考,青藏高原农牧区干旱灾害风险分析的指标体系和评价模型仍需要不断改进。同时,更加精准尺度和更加客观地对青藏高原农牧区灾害风险进行分析是本文今后考虑的方向。

基于本文综合研究,1951—2010年间,青藏高原农牧区干旱灾害风险特征如下:

1. 青藏高原农牧区的干旱灾害风险较高,整个农牧区旱灾中等以上(0.24~1.00)风险等级的区域面积总计为 $103.26 \times 10^4 \text{ km}^2$,占农牧区总面积的63%,占青藏高原总面积的40%。

2. 旱灾风险高值中心(0.44~1.00)总面积 $9.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,西藏自治区 $1.95 \times 10^4 \text{ km}^2$,占20%;青海省 $7.45 \times 10^4 \text{ km}^2$,占77%;甘肃省 $0.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,占3%。值得注意的是,高原东部农业区和青南牧业区的干旱灾害防治工作应该作为今后青藏高原农牧区干旱灾害防治的重点区域。

3. 旱灾风险低值区(0.00~0.15)总面积54.49

$\times 10^4 \text{ km}^2$,其中,西藏自治区 $28.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,占52%;青海省 $3.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,占6%;云南省 $0.31 \times 10^4 \text{ km}^2$,占1%;四川省 $19.40 \times 10^4 \text{ km}^2$,占35%;甘肃省 $0.46 \times 10^4 \text{ km}^2$,占1%;新疆自治区 $2.02 \times 10^4 \text{ km}^2$,占5%。这些地区应该作为今后青藏高原农牧区干旱灾害防治工作的重点保护区。

4. 旱灾致险性高值中心(0.76~1.00)集中分布于河湟谷地、柴达木盆地、共和盆地、河西走廊、阿尔金山麓,总面积 $9.77 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,青海省占81%;甘肃省占10%;新疆自治区占9%。旱灾致险性低值区(0.00~0.40)位于藏南谷地、川西高原、松潘高原、横断山脉,总面积 $52.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中西藏自治区占54%;青海省占7%;云南省占1.5%;四川省占37%;甘肃省占0.5%。

5. 旱灾承险体脆弱性高值中心(0.77~1.00)分布于青南高原、川西高原西北部、甘肃南部,总面积 $45.81 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,青海省占70%;四川省占21%;甘肃省占9%。旱灾承险体脆弱性低值区(0.00~0.40)位于藏南谷地、柴达木盆地、青海湖盆地、昆仑山麓、川西高原西南部、横断山脉,总面积 $24.77 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,西藏自治区占9%;青海省占43%;云南省占4%;四川省占16%;新疆自治区占28%。

参考文献(References)

- [1] Ashok K Mishra, Vijay P Singh. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology 2010, 391: 202-216
- [2] K E Logan, N A Brunsell, A R Jones, et al. Assessing spatiotemporal variability of drought in the U. S. central plains [J]. Journal of Arid Environments 2010, 74: 247-255
- [3] Ayhan E. Analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index [J]. Natural Hazards 2005, 35: 243-264
- [4] Ashok K Mishra, Vijay P Singh. Drought modeling—a review [J]. Journal of Hydrology 2011, 403: 157-175
- [5] J H Nunez, K Verbist, J R Wallis, et al. Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile [J]. Journal of Hydrology 2011, 405: 352-366
- [6] Kiumars Zarafshani, Lida Sharafi, Hossein Azadi, et al. Drought vulnerability assessment: the case of wheat farmers in Western Iran [J]. Global and Planetary Change 2012, 98-99: 122-130
- [7] Zhang Jiquan, Li Ning. Quantitative methods and applications of risk assessment and management on main meteorological disasters [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2007: 216-261 [张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007: 216-261]
- [8] Wang Jingai, Sun Heng, Xu wei, et al. Spatio-temporal change of

- drought disaster in China in recent fifty years [J]. *Journal of Natural Disaster* 2002 ,11(2) : 1 - 6 [王静爱,孙恒,徐伟,等.近 50 年中国旱灾的时空变化[J].*自然灾害学报* 2002 ,11(2) : 1 - 6]
- [9] Wang Jingai ,Mao Jia ,Jia Huicong. On spatiotemporal patterns of flood and drought hazards in China [J]. *Journal of Natural Disasters* , 2008 ,17(1) : 115 - 121 [王静爱,毛佳,贾慧聪.中国水旱灾害危险性的时空格局研究[J].*自然灾害学报* ,2008 ,17(1) : 115 - 121]
- [10] Shang Yanrui. The analysis of drought agricultural drought disaster and the farmhouses' vulnerability: taking the typical farmhouses of Xingtai County as an example [J]. *Journal of Natural Disasters* , 2000 ,9(2) : 55 - 61 [商彦蕊.干旱、农业旱灾与农户旱灾脆弱性分析—以邢台县典型农户为例[J].*自然灾害学报* ,2000 ,9(2) : 55 - 61]
- [11] Wang Jingai ,Shang Yanrui ,Su Jun ,et al. A vulnerability diagnosis of agricultural drought disasters and regional sustainable development in China [J]. *Journal of Beijing Normal University: Social Sciences* 2005 (3) : 130 - 137 [王静爱,商彦蕊,苏筠,等.中国农业旱灾承灾体脆弱性诊断与区域可持续发展[J].*北京师范大学学报:社会科学版* 2005 (3) : 130 - 137]
- [12] Zhao Jing ,Zhang Jiquan ,Yan Denghua ,et al. Drought disaster risk zoning in the northern Henan Province based on gridding GIS [J]. *Journal of Catastrophology* 2012 27(1) : 55 - 58 [赵静,张继权,严登华,等.基于格网 GIS 的豫北地区干旱灾害风险区划[J].*灾害学* 2012 27(1) : 55 - 58]
- [13] Hao Lu ,Wang Jingai ,Zhang Hua. Drought risk assessment model to animal husbandry systems in Inner Mongolia Pastures [J]. *Journal of Basic Science and Engineering* 2008 ,16(3) : 414 - 424 [郝璐,王静爱,张化.内蒙古草地畜牧业系统旱灾风险评估模型[J].*应用基础与工程科学学报* 2008 ,16(3) : 414 - 424]
- [14] Liu Yingge ,Miu Qilong. Prediction on agricultural drought disaster in northwest China [J]. *Arid Land Geography* 2004 27(4) : 564 - 569 [刘引鸽,缪启龙.西北地区农业旱灾与预测研究[J].*干旱区地理* 2004 27(4) : 564 - 569]
- [15] Zhang Yili ,Li Bingyuan ,Zheng Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. *Geographical Research* 2002 21(1) : 1 - 8 [张镫锂,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积[J].*地理研究* 2002 21(1) : 1 - 8]
- [16] Wang Xin ,Wen Kegang. China meteorological disasters books (Qinghai volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press , 2007. [王莘,温克刚.中国气象灾害大典(青海卷)[M].北京:气象出版社 2007.]
- [17] Liu Guangxian ,Wen Kegang. China meteorological disasters books (Xizang volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press , 2008. [刘光轩,温克刚.中国气象灾害大典(西藏卷)[M].北京:气象出版社 2008.]
- [18] Shi Yuguang ,Wen Kegang. China meteorological disasters books (Xinjiang volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press , 2006. [史玉光,温克刚.中国气象灾害大典(新疆卷)[M].北京:气象出版社 2006.]
- [19] Dong Anxiang ,Wen Kegang. China meteorological disasters books (Gansu volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press 2005. [董安祥,温克刚.中国气象灾害大典(甘肃卷)[M].北京:气象出版社 2005.]
- [20] Zhan Zhaoyu ,Wen Kegang. China meteorological disasters books (Sichuan volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press , 2006. [詹兆渝,温克刚.中国气象灾害大典(四川卷)[M].北京:气象出版社 2006.]
- [21] Liu Jianhua ,Wen Kegang. China meteorological disasters books (Yunnan volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press , 2006. [刘建华,温克刚.中国气象灾害大典(云南卷)[M].北京:气象出版社 2006.]
- [22] Qinghai Province Climate Information Centre. Qinghai Province climate communiqué [R]. Xining: Qinghai Province Climate Information Centre 2010 [青海省气候资料中心.青海省气候公报[R].西宁:青海省气候资料中心 2010.]
- [23] Tibet Autonomous Region Climate Centre. Tibet Autonomous Region climate communiqué [R]. Lasa: Tibet Autonomous Region Climate Centre 2010. [西藏自治区气候中心.西藏自治区气候公报[R].拉萨:西藏自治区气候中心 2010.]
- [24] Xinjiang Autonomous Region Climate Centre. Xinjiang climate communiqué and assessment [J]. *Desert and Oasis Meteorology* , 2011 ,11(4) : 9 - 11 [新疆自治区气候中心.新疆气候公报及影响评价[J].*沙漠与绿洲气象* 2011 ,11(4) : 9 - 11]
- [25] Lanzhou Centre Meteorological Observatory. Gansu Province climate communiqué [R]. Lanzhou: Lanzhou Centre Meteorological Observatory 2010. [兰州中心气象台.甘肃省气候公报[R].兰州:兰州中心气象台 2010.]
- [26] Sichuan Meteorological Observatory. Sichuan Province climate communiqué [R]. Chengdu: Sichuan Meteorological Observatory , 2010. [四川省气象台.四川省气候公报[R].成都:四川省气象台 2010.]
- [27] Yunnan Province Climate Centre. Yunnan Province climate communiqué [R]. Kunming: Yunnan Province Climate Centre , 2010. [云南省气候中心.云南省气候公报[R].昆明:云南省气候中心 2010.]
- [28] The editorial board of 2011 China county (municipal) statistical yearbook on socio-economic. 2011 China county(municipal) statistical yearbook on socio-economic [M]. Beijing: China Statistics Press , 2011. [《中国县(市)社会经济统计年鉴 - 2011》编辑委员会.《中国县(市)社会经济统计年鉴 - 2011》[M].北京:中国统计出版社 2011.]
- [29] The editorial board of 2011 Qinghai statistical yearbook. 2011 Qinghai statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press 2011. [《青海统计年鉴 - 2011》编辑委员会.《青海统计年鉴 - 2011》[M].北京:中国统计出版社 2011.]
- [30] The editorial board of 2011 Xizang statistical yearbook. 2011 Xizang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press , 2011. [《西藏统计年鉴 - 2011》编辑委员会.《西藏统计年鉴 - 2011》[M].北京:中国统计出版社 2011.]
- [31] The editorial board of 2011 Xinjiang statistical yearbook. 2011 Xinjiang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press 2011. [《新疆统计年鉴 - 2011》编辑委员会.《新疆统计年鉴 - 2011》[M].北京:中国统计出版社 2011.]

- [32] The editorial board of 2011 Gansu statistical yearbook. 2011 Gansu statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press 2011 [《甘肃发展年鉴 - 2011》编纂委员会.《甘肃发展年鉴 - 2011》[M]. 北京:中国统计出版社 2011.]
- [33] The editorial board of 2011 Sichuan statistical yearbook. 2011 Sichuan statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011. [《四川统计年鉴 - 2011》编委会.《四川统计年鉴 - 2011》[M]. 北京:中国统计出版社 2011.]
- [34] The editorial board of 2011 Yunnan statistical yearbook. 2011 Yunnan statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press 2011. [《云南统计年鉴 - 2011》编辑部.《云南统计年鉴 - 2011》[M]. 北京:中国统计出版社 2011.]
- [35] Shi Peijun. Atlas of natural disaster system of China [M]. Beijing: Science Press 2011: 110 [史培军. 中国自然灾害系统地图集 [M]. 北京:科学出版社 2011: 110]
- [36] Ge Quansheng, Zou Ming, Zheng Jingyun. Integrated assessment of natural disaster risks in China [M]. Beijing: Science Press 2008: 156 - 173 [葛全胜, 邹铭, 郑景云. 中国自然灾害风险综合评估初步研究 [M]. 北京:科学出版社 2008: 156 - 173]
- [37] T L Saaty. The analytic network process [M]. New York: McGraw - Hill, 1996: 223 - 236
- [38] Zhong Laiyuan, Liu Liming, Liu Yabing. Natural disaster risk assessment of grain production in Dongting Lake Area, China [J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia 2010, 1: 24 - 32
- [39] Chen Junfei, Yang Yang. A fuzzy ANP-based approach to evaluate region agricultural drought risk [J]. Procedia Engineering, 2011, 23: 822 - 827
- [40] Zhang Jiquan. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment 2004, 102: 133 - 153
- [41] Jiang Guiqin, Yu Fuliang, Zhao Yong. An analysis of vulnerability to agricultural drought in China using the expand grey relation analysis method [J]. Procedia Engineering 2012, 28: 670 - 676
- [42] Du X Y. Comprehensive assessment and zoning of vulnerability to agricultural drought in Tianjin [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19 (5): 138 - 145
- [43] Liu Yingge. Analysis on the influencing factors of drought disaster in northwest China [J]. Journal of Catastrophology 2003, 18 (2): 18 - 22 [刘引鸽. 西北干旱灾害影响因子分析 [J]. 灾害学, 2003, 18 (2): 18 - 22]
- [44] Liu Yingge, Li Tuansheng, Miu Qilong. Study on trend and influence of drought in northwest China [J]. Geography and Geo-Information Science 2004, 20(4): 88 - 92 [刘引鸽, 李团胜, 缪启龙. 西北干旱灾害影响趋势分析 [J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(4): 88 - 92]
- [45] Shi Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 18(6): 1 - 7 [史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 2005, 18(6): 1 - 7]
- [46] Liu Jiafu, Li Jing, Liang Yuhua, et al. Storm flood risk assessment in the typical regions of Asia [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(10): 1266 - 1271 [刘家福, 李京, 梁雨华, 等. 亚洲典型区域暴雨洪灾风险评价研究 [J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1266 - 1271]
- [47] Wang Jingjing, Liu Min, Quan Ruisong, et al. Natural disaster risk assessment of coastal ports in China [J]. Scientia Geographica Sinica 2012, 32(4): 516 - 520 [王静静, 刘敏, 权瑞松, 等. 沿海港口自然灾害风险评价 [J]. 地理科学, 2012, 32(4): 516 - 520]
- [48] Xu Jianhua. Mathematical methods in contemporary geography [M]. Higher Education Press 2002: 224 - 249 [徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 高等教育出版社 2002: 224 - 249]
- [49] Shi Peijun. Atlas of natural disaster risk of China [M]. Science Press 2011: 191 [史培军. 中国自然灾害风险地图集 [M]. 科学出版社 2011: 191]
- [50] Tang Hongbo, Chen Qiang. Cause analysis for the drought in Qinghai Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering 2007, 18(2): 89 - 91 [唐洪波, 陈强. 青海省干旱成因分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(2): 89 - 91]
- [51] Wang Pengling, Tang Guoli, Cao Lijuan, et al. Surface air temperature variability and its relationship with altitude and latitude over the Tibetan Plateau in 1981 - 2010 [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis 2012, 8(5): 313 - 319 [王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 1981 - 2010 年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系 [J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 313 - 319]
- [52] Ni Shenhai, Gu Ying, Wang Huirong. Study on frangibility zoning of agricultural drought in China [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 705 - 708 [倪深海, 顾颖, 王会容. 中国农业干旱脆弱性分区研究 [J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 705 - 708]
- [53] Sui Xin, Yang Zhifeng. Characteristics of natural disaster in 12 counties along the Yellow River in Qinghai Province and vulnerability evaluation of hazard bearing body [J]. Journal of Catastrophology, 2004, 19(3): 7 - 12 [隋欣, 杨志峰. 青海省沿黄 12 县自然灾害活动特征及承险体脆弱性评价 [J]. 灾害学, 2004, 19(3): 7 - 12]

Drought Disaster Risk Analysis of Tibetan Plateau

ZHAO Zhilong¹, ZHANG Yili², LIU Fenggui^{1,2}, ZHOU Qiang¹, LIU Pei¹, ZOU Xinhua¹

(1. College of Biologic and Geographic Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: With the global climate change, the aridification of Tibetan Plateau is becoming more and more obvious. Based on the 1951—2010 meteorological disaster statistical data and the vulnerability data of bearing body in 2010, and with the GIS technology and the natural disaster risk analysis model, this study comprehensively analyzed the spatial distribution of drought disaster risk factors for agricultural and pastoral areas within the Tibetan Plateau, and then used natural crack method to make drought disaster risk zoning. The results showed: 1. The area with drought disaster risk of above medium level (0.24 ~ 1.00) is $103.26 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 63% of the total agricultural and pastoral areas; 2. The area of highest value (0.44 ~ 1.00) center of drought disaster risk is $9.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, and the area of Tibetan Autonomous Region, Qinghai Province and Gansu Province account for 20%, 77% and 3% of the total highest value center area each respectively; 3. The area of lowest value (0.00 ~ 0.15) center of drought disaster risk is $54.49 \times 10^4 \text{ km}^2$, and the area of Tibetan Autonomous Region, Qinghai Province, Yunnan Province, Sichuan Province, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region account for 52%, 6%, 1%, 35%, 1% and 5% respectively of the total lowest value center area each. So the situation of drought disaster for agricultural and pastoral areas within the Tibetan Plateau is severe.

Key words: Tibetan Plateau; historical data; drought; disaster; risk