文章编号:1000-7601(2022)02-0197-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.02.24

典型脆弱区干旱灾害风险评估关键技术研究
——以陇东黄土塬区为例

陈思名[1],霍艾迪[1,2],张 丹[3],陈四宾[1],赵志欣[1],陈 建[1]

(1.长安大学水利与环境学院,陕西 西安 710054;2.长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,陕西 西安 710054;
3.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘 要:基于对黄土塬区旱灾风险成因的深入分析,选取“灾害胁迫—社会脆弱性—暴露”的自然灾害风险评价体系及相应的遥感数据和社会经济数据作为干旱灾害风险数据源,通过层次分析法构建旱灾风险评估模型,并运用 GIS 技术分别对 3 项指标因子进行空间叠加分析,最后利用自然断点法对庆阳地区旱灾风险进行等级划分与评估。计算结果表明:(1)整体而言,庆阳地区干旱灾害风险有显著的空间差异,呈“北高南低、西高东低”的特点,这主要是由于降雨时空分布不均造成的。(2)庆阳地区高、次高、中、次低、低风险等级面积分别占研究区总面积的 11.30%、24.90%、30.96%、18.54%、14.3%。(3)高风险区主要集中在环县北部以及庆阳市中心地区;次高风险区主要分布在环县中部、华池县北部以及镇原县北部地区;中风险区主要分布在镇原县南部、庆城县南部、华池县南部、正宁县西部以及宁县南部地区;次低风险区主要分布在宁县东部以及合水县南部;低风险区主要集中在庆阳市东部,即华池县东南部、合水县东部、宁县东部以及正宁县大部分地区。

关键词:干旱灾害;致灾因子;风险评估;典型脆弱区

中图分类号:S165 **文献标志码**:A

Key technologies for drought disaster risk assessment in typical vulnerable areas of eastern Gansu Province

CHEN Siming[1], HUO Aidi[1,2], Zhang Dan[3], CHEN Sibin[1], ZHAO Zhixin[1], CHEN Jian[1]

(1. *School of Water and Environmental, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
2. *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in the Arid Region under Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 3. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing* 100101, *China*)

Abstract: Based on causes analysis of the drought risk in East Gansu, this paper used the natural disaster risk assessment system of “Hazard-Vulnerability-Exposure”, the corresponding remote sensing data and social and economic data as the data source for drought disaster risk assessment. Drought risk assessment model was established and analyzed by the Analytic Hierarchy Process (AHP), and the three index factors were analyzed by GIS spatial overlay analysis. Finally, the classification and regionalization of drought disaster risk in East Gansu were carried out by the Natural Breakpoint Method. The results indicated that: (1) On the whole, the spatial difference of the drought risk in Qingyang area was significant, showing the characteristics of high in the north and low in the south, and high in the west and low in the east which was mainly due to the uneven spatial and temporal distribution of rainfall. (2) The area of very high, high, medium, low and very low level of drought disaster risk accounted for 11.30%、24.90%、30.96%、18.54% and 14.3% in East Gansu, respectively. (3) The very high-risk areas were mainly concentrated in northern of Huan County and the central area of Qingyang city. The high-risk areas were

收稿日期:2021-05-19 **修回日期**:2021-10-21

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41790444/D0214);国家自然科学基金面上项目(41877232);中国科学院战略性先导科技专项(A 类)(XDA20030302)

作者简介:陈思名(1993-),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为生态环境变化与灾害研究。E-mail:chen1226m@ 163.com

通信作者:霍艾迪(1971-),男,陕西西安人,博士,教授,主要从事遥感的水文生态应用研究。E-mail:huoaidi@ 126.com

mainly distributed in the middle of Huan County, northern of Huachi County and north of Zhenyuan County. The medium-risk areas were mainly distributed in south of Zhenyuan County, southern of Qingcheng County, southern of Huachi County, west of Zhengning County and south of Ning County. The low-risk areas were mainly located in east of Ning County and south of Heshui County. The very low-risk areas were mainly concentrated in east of Qingyang City, including southeast of Huachi County, east of Heshui County, east of Ning County and most areas of Zhengning County.

Keywords: drought disaster; disaster-causing factors; risk assessment; typical vulnerable areas

干旱灾害是全球发生频率最高、持续时间最长、影响面最广的气象灾害[1]。据联合国发布的《灾害造成的人类损失 2000 — 2019》报告中指出,2000 — 2019 年期间发生了 338 起干旱事件,造成经济损失高达 1280 亿美元。近年来随着全球气候变化的影响,干旱已成为中国最严重的自然灾害之一[2-3]。2017 年中国气象灾害年鉴显示,2012 — 2016 年干旱造成我国经济损失高达 443 亿美元,约占所有气象灾害直接经济损失的 15.6%[4]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)指出,全球平均温度将持续升高,极端干旱事件发生频率不断增大[5],未来干旱形势将更加严峻[6],寻求抗旱减灾良策已是迫在眉睫[7]。

干旱灾害风险是指干旱的发生发展过程对社会、经济及生态环境造成影响和危害的概率与程度[8]。干旱灾害风险评估可以表征区域发生旱灾的形式和程度,是制定综合防灾减灾对策的基础[9]。近年来,中国经济发展的空间格局发生了深刻转变,尤其是黄河流域生态保护和高质量发展已成为亟待解决的关键问题[10-11]。陇东黄土塬区属典型雨养农业区,且地处我国生态环境脆弱带[12-13],是典型的干旱缺水区。由于气温升高及降雨偏少,陇东黄土塬区干旱化趋势不断加剧[14]。近年来,相关学者针对黄土塬区旱灾风险做出了大量研究。王莺[15]结合相关气象数据对甘肃省河东地区气象干旱灾害风险进行评估;肖志强等[16]分析了黄土塬区东南部近 40 a 平均干旱年频率,分析了气候特征对农业生产的影响及对旱灾风险进行了评估;贾建英等[17]对甘肃省冬小麦进行了干旱灾害风险评估及区划;赵冬青等[18]利用陇东黄土塬区冬小麦、春玉米等数据资料对农业综合旱灾风险进行评估。以上研究均能清晰地反映研究区的旱灾风险状况,为抗旱减灾行动提供了行之有效的方案,但对旱灾风险的评估主要偏重于农业方面[19-21],且由于所用遥感数据精度的限制,精细化程度还有待进一步提高。基于此,本文结合黄土塬区气候特征及干旱事件发生规律,利用遥感、经济等数据开展甘肃省庆阳市旱灾风险评价研究,构建切实反映陇东黄土塬区旱灾风险的评价模型,及时评估庆阳市旱灾风险,不仅对陇东黄土塬区抗旱减灾具有重大意义,也是推动黄河流域高质量发展的重要任务之一。本文以百米级尺度(空间分辨率为 0.1°×0.1°)进行庆阳市旱灾风险评价与区划分析,以期有效提高数据空间分辨率,反映更为精细的风险性空间分异特征。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

甘肃省庆阳地区位于甘肃省东部、黄河中游,地跨 106°20′~108°45′E,35°15′~37°31′N,辖西峰区、庆城、华池、宁县、镇原、合水、正宁和环县 1 区 7 县,总面积为 27 119 km^2(图 1,见 201 页)。地势呈现北高南低的趋势,海拔 855~2 089 m,最高处是北部马家大山;中南部属于黄土高塬沟壑区,有数十条塬面,其中最大的董志塬是农作物的主产区。庆阳市地处干旱半干旱大陆性季风气候区,受季风气候的影响,降雨主要集中在 7 — 9 月,年平均降雨量为432.6~665 mm,年际变化大,降雨分布极不均匀,在空间分布上呈东南向西北递减的趋势。由于地形地貌对水资源分布的显著影响,降雨是全市主要的水资源补充[22]。该地区干旱灾害频繁发生,有“三年一旱,十年一大旱”之说。

1.2 数据来源

本研究选取的数据主要有:

(1)基础地理数据:庆阳市县级行政区划数据、数字高程模型(DEM)数据、帕默尔干旱指数(*PDSI*)数据、植被覆盖指数(*NDVI*)数据、地表温度(LST)数据、地表覆盖数据、土壤湿度数据,其中甘肃省 1∶4×10^6 县级行政区划数据集来源于国家地球系统科学数据中心,数字高程模型(DEM)数据来源于美国航空航天局(http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/),全球 *PDSI* 数据以及土壤湿度数据来源于气候学加州大学梅塞德分校实验室(http://www.climatologylab.org/),植被指数数据和地表温度数据

均来源于 NASA 发布的遥感影像数据(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/),地表覆盖数据来源于国家基础地理信息中心(http://www.globallandcover.com/)。

(2)社会经济数据:GDP、人口格网数据来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)

2　研究方法

首先确定干旱灾害风险评估系统的构成要素,再利用层次分析法计算各项指标因子的权重,并通过 GIS 软件对各项要素所包含的单项指标进行归一化处理,最终形成庆阳市干旱灾害风险区划结果,其技术路线如图 2。

2.1　层次分析法

层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)是将一个复杂的多目标决策问题表示为有序的递阶层次结构[23]。其步骤为:首先建立层次结构模型,将旱灾风险的组成要素按照目标层、准则层和指标层进行划分;其次构建权重判断矩阵,根据指标的相对重要程度进行两两比较并参照 SAATY[24]给出的比例标准度构建判断矩阵并计算权重;最后进行一致性检验,由于主观判断可能造成结果发生偏离,因此需对结果进行检验,使其符合满意一致性。以上算法均通过 Matlab 实现。

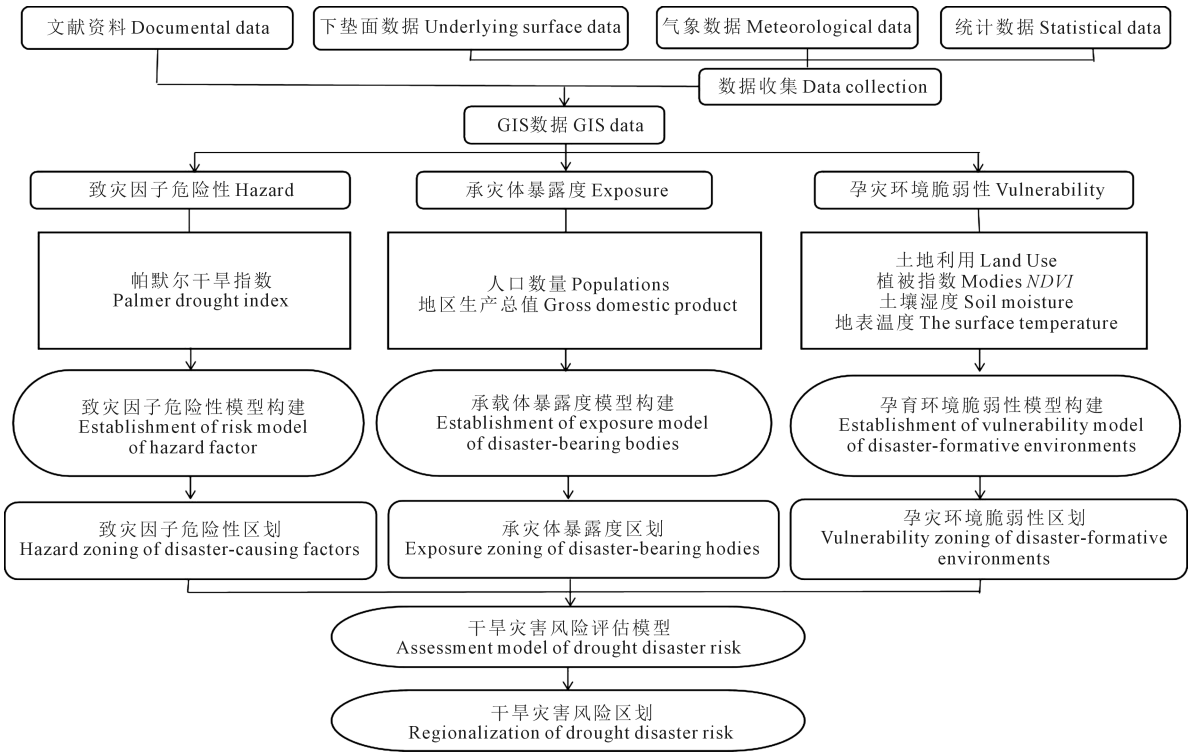


图 2　庆阳市干旱灾害风险区划研究技术框架

Fig.2　Technology framework of drought risk zoning research in Qingyang City

2.2　指标因子归一化

干旱灾害风险评估是由多因子共同决定,各因子量纲单位不同。为了消除各指标下因子的量纲影响,需对各因子进行[0,1]归一化处理。按照指标性质的不同,可分为正向指标和负向指标[25]。

正向指标是所反映的风险要素指标 x_i 对应的值越大,风险性越高,计算公式为:

$$y_i = (x_i - x_{\min})/(x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

负向指标是所反映的风险要素指标 x_i 对应的值越大,风险性越低,计算公式为:

$$y_i = (x_{\max} - x_i)/(x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

式(1)(2)中,x_i 为各分项指标的像元值,$x_{\max}$、$x_{\min}$ 分别为指标 x_i 的最大值和最小值。

2.3　基于图层叠置法的风险评估模型

基于 IPCC AR5 提出的"灾害胁迫—社会脆弱性—暴露"的自然灾害风险评价体系[5],综合考虑干旱灾害风险的特征及影响因素,构建基于"致灾因子危险性(Hazard, H)-承灾体暴露度(Exposure, E)-孕灾环境脆弱性(Vulnerability, V)"的庆阳市干旱灾害风险评估框架。

旱灾风险指数是评估风险结果的依据,其分项指标公式为:

$$X = \sum_{i=1}^{n} W_i \times y_i \quad (3)$$

式中,X 为分项指标数值,即旱灾风险指标要素值,W_i 为各分项指标因子的权重。

根据图层叠置法以及公式(3),得到旱灾风险评估综合指数 R 的表达式为:

$$R = f(H,E,V) = f_1(H) + f_2(E) + f_3(V) \quad (4)$$

式中,H 为致灾因子危险性,E 为承灾体暴露度,V 为孕灾环境脆弱性。

2.3.1 *致灾因子危险性模型构建* 对于干旱风险的致灾因子危险性评估首先要确定干旱指数。*PDSI* 结合水文和气候等多方面因素,主要包含降水、蒸散量、径流量等数据,相比于其他干旱指数有更好的适用性和时序性。韩宇平等[26]通过对典型旱灾各种干旱指标的适用性分析,发现 *PDSI* 更能反映海河流域的历史干旱分布及趋势;唐红玉等[27]通过对 *PDSI* 和 *Z* 指数两种指标在西北干旱地区监测应用中的差异性分析,表明 *PDSI* 更能客观反映当地实际干旱情势;张振伟等[28]通过多年平均 *PDSI* 值对甘肃省的干旱频次和空间分布做了系统研究,总结出甘肃省干旱时空变化特征;张洪波等[29]通过对泾河流域的干旱评估分析,表明 *PDSI* 能有效表征研究区的干旱情况。因此,本研究选用 *PDSI* 作为衡量庆阳市干旱致灾因子的指标。干旱致灾因子危险性模型为:

$$I(H) = h \quad (5)$$

式中,$I(H)$ 为致灾因子危险性指数,h 为 *PDSI* 数据归一化后的像元值。

通过 ArcGIS 10.3 对 *PDSI* 数据进行插值分析和归一化处理得到研究区致灾因子危险性分布区划图(图3)。分析表明,庆阳市危险性呈现从南部向东部递增的趋势,其中危险性最高的区域为环县,固原县、庆城县以及华池县危险性较高,西峰区、合水县危险性属中等偏低,宁县危险性较低,危险性最低的区域为正宁县。

2.3.2 *承灾体暴露度模型构建* 承灾体暴露度是指一个地区在经济、社会、基础设施上所能承受的不利影响[30]。人口作为干旱灾害的承灾体,其空间分布差异信息对旱灾暴露度评价具有重要作用,是受其影响最直接、最显著的指标[31],而 GDP 是社会经济发展的关键指标[32]。因此,选用人口格网和 GDP 数据作为衡量研究区暴露度的因子。人口数量越多,国民生产总值越高,可能承受灾害的范围越大,因干旱导致的经济损失越大,承灾体暴露度越高。利用层次分析法计算各分项因子权重,依据(3)式建立承灾体暴露度模型:

$$I(E) = 0.25e_1 + 0.75e_2 \quad (6)$$

式中,$I(E)$ 为承灾体暴露度指数,e_1、e_2 为人口、GDP 归一化后的像元值。

通过 ArcGIS 10.3 空间叠加工具,对研究区暴露度指标进行图层叠加,得到庆阳市干旱承灾体暴露度及其空间分布(图4)。从图中可以看出,庆阳市整体暴露度程度不大,但由于西峰区为庆阳市人口密集区,因此暴露度最高。

2.3.3 *孕灾环境脆弱性模型构建* 孕灾环境脆弱性是反映某地区由于自然环境和人为因素导致灾害发生的概率[33]。张学玲[34]提出评价孕灾环境脆弱性指标的潜在因子和胁迫因子包括地形地貌、水文气候、植被覆盖、土地利用等。王连喜等[35]认为土地利用类型是脆弱性评价的一个必要指标。大量前期研究表明,植被指数、土壤湿度、地表温度可以及时准确地反映旱情发生的范围和程度。根据研究区的脆弱性表征,选用土地利用、植被指数、土壤湿度以及地表温度4个因子综合评估庆阳市孕灾环境脆弱性特征。土地利用类型复杂,通过脆弱性赋值对其进行归一化处理[35];植被指数、土壤湿度与孕育环境脆弱性呈负相关;地表温度与脆弱性呈正相关。利用层次分析法对各因子进行量化加权,依据(3)式建立孕灾环境脆弱性模型:

$$I(V) = 0.286v_1 + 0.394v_2 + 0.223v_3 + 0.097v_4 \quad (7)$$

式中,$I(V)$ 为孕灾环境脆弱性指数,v_1、v_2、v_3、v_4 分别表示土地覆盖、植被指数、土壤湿度、地表温度归一化处理后的像元值。

通过 ArcGIS 10.3 空间叠加工具,将研究区脆弱性各分项指标作为叠加图层,得到庆阳市干旱灾害孕灾环境脆弱性及其空间分布(图5)。从整体分布上来看,庆阳市北部地区脆弱性最高,东部地区脆弱性最低。脆弱性较高的区域主要集中在环县北部、西峰区中部地区。

2.3.4 *干旱风险性模型构建* 根据以上构建的致灾因子危险性、承灾体暴露度和孕灾环境脆弱性模型,并针对各项指标对干旱灾害的贡献大小,利用层次分析法分别赋予权重,依据(3)(4)式构建庆阳市干旱灾害风险综合评估模型:

$$R = 0.405I(H) + 0.114I(E) + 0.481I(V) \quad (8)$$

式中,R 为干旱灾害风险评估综合指数,$I(H)$ 为致灾因子危险性指数,$I(E)$ 为承灾体暴露度指数,$I(V)$ 为孕灾环境脆弱性指数。

通过 ArcGIS 10.3 空间叠加工具,将研究区风险性评估各分项指标进行图层叠加,得到庆阳市干旱灾害综合风险指数的空间分布(图6)。从图中可以

看出,庆阳市高风险地区主要集中在环县北部和西峰区;次高风险地区位于环县中部、华池县北部以及镇原县北部;中风险地区位于镇原县南部、庆城县南部、华池县南部、正宁县西部以及宁县南部;次低风险地区位于宁县东部以及合水县南部;低风险地区位于华池县东南部、合水县东部、宁县东部以及正宁县大部分地区。

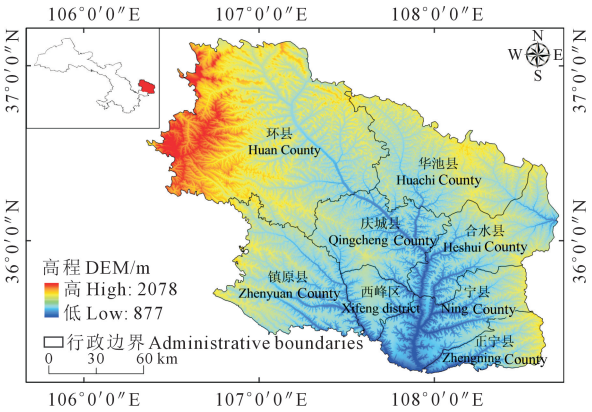


图 1　庆阳市行政区划及高程图

Fig.1　Administration and digital elevation of Qingyang City

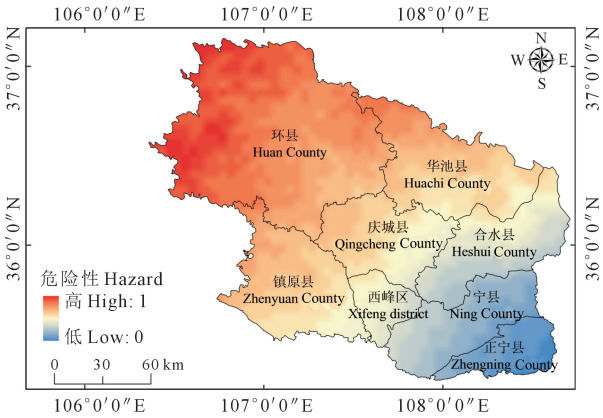


图 3　庆阳市致灾因子危险性空间分布图

Fig.3　Spatial distribution of disaster-causing hazard factor in Qingyang City

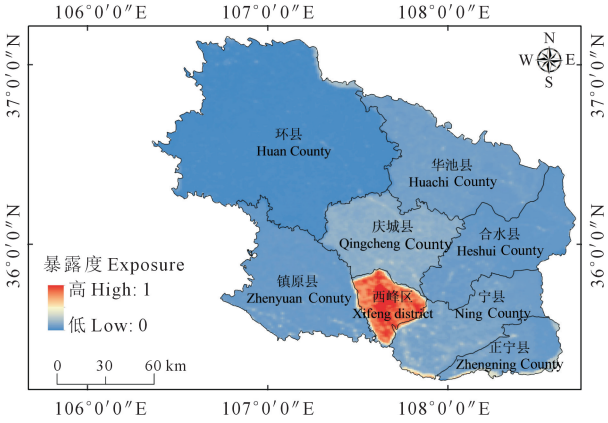


图 4　庆阳市承灾体暴露度空间分布图

Fig.4　Spatial distribution of exposure of disaster-bearing bodies in Qingyang City

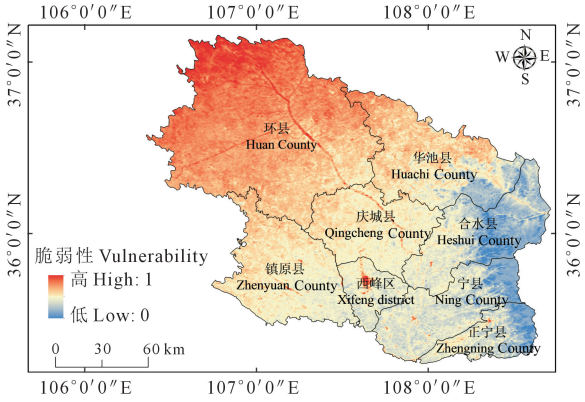


图 5　庆阳市孕灾环境脆弱性空间分布图

Fig.5　Spatial distribution of vulnerability of disaster-formative environments in Qingyang City

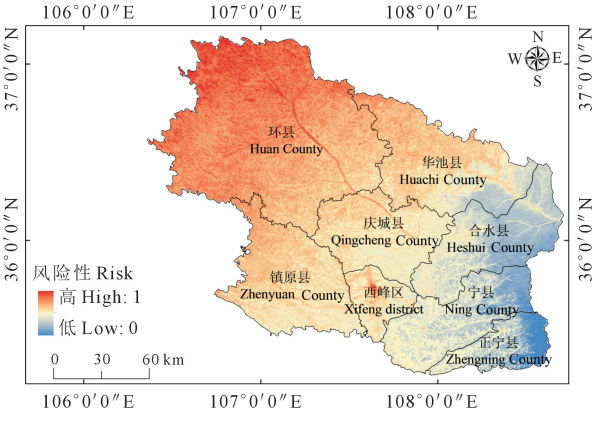


图 6　庆阳市干旱灾害风险分布图

Fig.6　Spatial distribution of risk of drought disaster in Qingyang City

3　结果与分析

基于 GIS 的空间分析功能,利用自然断点法将庆阳地区干旱灾害综合风险划分为 5 个等级,其标准为:干旱综合风险指数为 0.075～0.257、0.257～0.323、0.343～0.402、0.402～0.459、0.549～0.798,分别为低风险区、次低风险区、中风险区、次高风险区以及高风险区(表 1、图 7)。

(1)高风险区:高风险区占庆阳市总面积的 11.30%,主要集中在环县北部以及庆阳市中心地区。由于环县北部海拔高,地形地貌以黄土丘陵沟壑区为主,年均蒸发量大约为降雨量的 6 倍,致灾因子危险性高。西峰区是庆阳市的政治经济文化中心,人口集中,建筑物覆盖度极高,承灾体暴露度高。

表 1 庆阳市干旱综合风险区划结果统计

Table 1 The statistical results of comprehensive drought risk regionalization in Qingyang City

类型 Type	像元数 Pixel numbers	面积/km² Area	比例/% Percentage
低风险区 Very low	383854	3878	14.30
次低风险区 Low	498008	5028	18.54
中风险区 Moderate	831559	8396	30.96
次高风险区 High	668843	6753	24.90
高风险区 Very high	303353	3064	11.30
合计 Total	2685617	27119	100.00

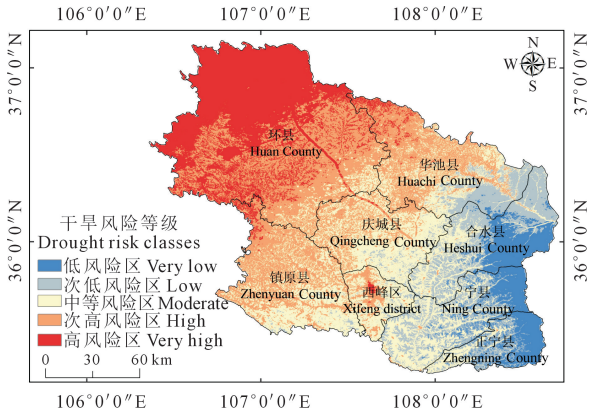


图 7 庆阳市干旱灾害风险等级图

Fig.7 Drought risk grade distribution in Qingyang City

(2)次高风险区:次高风险区占庆阳市总面积的 24.90%,主要分布在环县中部、华池县北部以及镇原县北部地区。以上地区海拔较高,土地利用以耕地为主,孕育环境脆弱性较高,因而风险性较高。(3)中风险区:中风险区占庆阳市总面积的 30.96%,主要分布在镇原县南部、庆城县南部、华池县南部、正宁县西部以及宁县南部地区。以上地区建筑覆盖度较高,土地利用以耕地为主,部分为草地,致灾因子风险性指数以及孕育环境脆弱性指数分布均在 0.5 左右。(4)次低风险区:次低风险区占庆阳市总面积的 18.54%,主要分布在宁县东部以及合水县南部。以上地区海拔低,土地利用以草地为主,少部分为耕地,致灾因子危险性低。(5)低风险区:低风险区占庆阳市总面积的 14.3%。从整体来看,主要集中在庆阳市东部,即华池县东南部、合水县东部、宁县东部以及正宁县大部分地区。以上地区森林覆盖度大,人口密度也比较低,孕灾环境脆弱性以及承灾体暴露度低,因而风险性低。

对庆阳市各区县风险等级做分区统计得到其风险等级占比(图 8)。经分析可得,高风险区和次高风险区主要集中在西峰区、环县,面积占比分别为 76.92%、63.02%;中风险区主要为镇原县、庆城县,面积占比分别为 54.61%、50.64%;次低风险区和低风险区主要分布在正宁县、合水县、宁县,面积占比分别为 86.12%、85.99%、71.29%。该结果可以更直观地反映各区县的风险严重程度,西峰区、环县两个地区中、高风险等级占比大,应加强抗旱减灾预警行动。

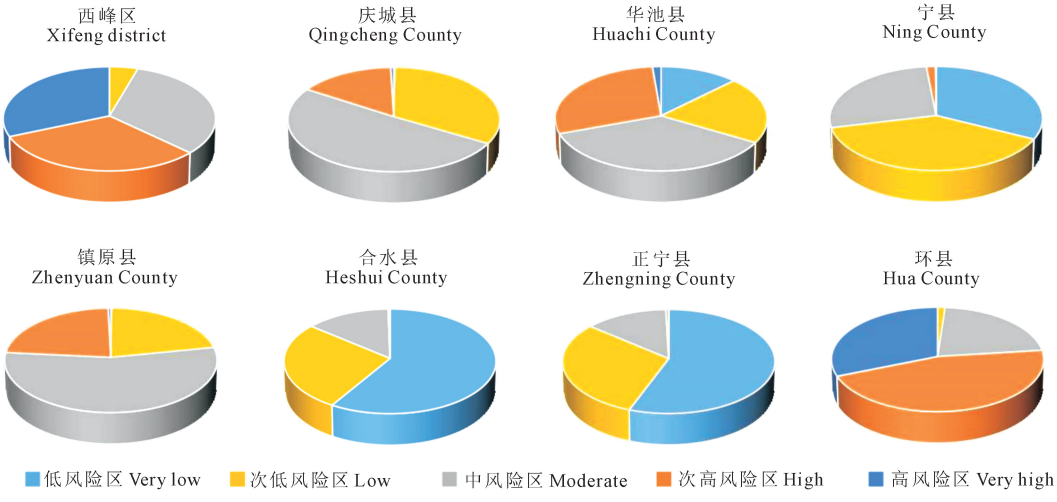


图 8 庆阳市各区县风险等级分区统计

Fig.8 Regional statistics of risk grade of each district and county in Qingyang City

4　讨　论

本文根据黄土塬区的气候特征及旱灾成因选取了 7 个指标来评估庆阳地区的干旱灾害风险。从结果来看,庆阳地区干旱的形成受气候、地形、人为因素共同作用的影响。通过对比赵玉娟、沈鸿飞等[12,36]对庆阳市区域生态以及干旱的特征分析,由于选取旱灾成因指标略有不同,赵玉娟从农业方面分析了气象干旱对于庆阳市农作物成灾面积的年际变化特征,沈鸿飞从生态环境状况角度出发,未考虑人口密度与 GDP 因素,因此在分析庆阳市西峰区的结果上略有偏低,其余各县结果有较好的一致性。西峰区作为庆阳市的经济政治文化中心,其人口密度、GDP 相对较大,导致承灾体暴露度大,其旱灾风险性较大。通过对比与前人研究,由于人口密度、GPD 与庆阳地区的旱灾风险息息相关,本文在评估旱灾风险的指标中增加了这两个因子,进一步完善了评价结果,使其更符合实际。

本文可为降低区域干旱灾害风险提供有效参考,但干旱灾害风险系统的组成包含诸多影响因子,本文从研究区的实际情况以及数据的易获得性出发,仅选取代表性强的影响因子(人口密度和 GDP)来评估干旱风险。实际上,在考虑承灾体的时候,产业结构、布局、可获得水资源的距离等都有一定的影响。因此,在今后的研究中,要更加注重干旱灾害风险评价指标的多元化以及采用高精度遥感数据。

5　结　论

庆阳地区致灾因子危险性具有明显的地带性分布规律,呈现从东南向西北递增的空间格局,高危险性主要分布于环县地区;孕灾环境脆弱性指数呈现“东高西低”的空间分布特征,高脆弱性主要分布于环县北部、西峰区中心地带;承灾体暴露度较大的区域主要为经济发展较好的西峰区。

旱灾风险性区划具有明显的空间差异,北部风险高于南部,西部风险高于东部。高风险区占庆阳市总面积的 11.30%,主要分布于环县北部以及西峰区;次高风险区及中风险区占总面积的 55.86%,主要集中在环县中部、镇原县、庆城县以及华池县;次低风险区占总面积的 18.54%,主要分布在宁县东部以及合水县南部;低风险区占总面积的 14.3%,主要分布在华池县东南部、合水县东部、宁县东部以及正宁县大部分地区。

参 考 文 献:

[1] 韩兰英,张强,程英,等.农业干旱灾害风险研究进展及前景分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(6):97-102.
HAN L Y, ZHANG Q, CHENG Y, et al. Research progress of agriculture drought disaster risk and prospect[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(6): 97-102.

[2] 张强,姚玉璧,王莺,等.中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策[J].生态学报,2017,37(21):7206-7218.
ZHANG Q, YAO Y B, WANG Y, et al. Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in Southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7206-7218.

[3] 姚玉璧,李耀辉,石界,等.基于 GIS 的石羊河流域干旱灾害风险评估与区划[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):21-28.
YAO Y B, LI Y H, SHI J, et al. Assessment and division of drought hazard risk in Shiyang River basin based on GIS[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 21-28.

[4] 中国气象局.中国气象灾害年鉴-2017[M].北京:气象出版社,2018:56-63.
China Meteorological Administration. China meteorological disaster yearbook-2017[M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2018: 56-63.

[5] IPCC. Climate change 2014: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R].Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[6] 姚玉璧,张强,王劲松,等.中国西南干旱对气候变暖的响应特征[J].生态环境学报,2014,23(9):1409-1417.
YAO Y B, ZHANG Q, WANG J S, et al. The response of drought to climate warming in southwest in China[J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23(9): 1409-1417.

[7] 张存厚,张立,吴英杰,等.内蒙古草原干旱灾害综合风险评估[J].干旱区资源与环境,2019,33(7):115-121.
ZHANG C H, ZHANG L, WU Y J, et al. Assessment on the integrated drought disaster risk in Inner Mongolia grassland[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(7): 115-121.

[8] 姚玉璧,张强,李耀辉,等.干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J].资源科学,2013,35(9):1884-1897.
YAO Y B, ZHANG Q, LI Y H, et al. Drought risk assessment technological progresses and problems[J]. Resources Science, 2013, 35(9): 1884-1897.

[9] 史培军,袁艺.重特大自然灾害综合评估[J].地理科学进展,2014,33(9):1145-1151.
SHI P J, YUAN Y. Integrated assessment of large-scale natural disasters in China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(9): 1145-1151.

[10] HUO A D, YANG L, LUO P P, et al. Influence of landfill and land use scenario on runoff, evapotranspiration, and sediment yield over the Chinese Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107208.

[11] HUO A D, CHEN S M, PENG J B, et al. UAV-based gully retrogressive erosion status dynamic variability investigations in Chinese Loess Plateau[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(4): 263.

[12] 赵玉娟,张谋草,张洪芬,等.陇东黄土高原气象干旱特征分析及其对农业的影响[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(4):138-143.
ZHAO Y J, ZHANG M C, ZHANG H F, et al. Characteristics of meteorological drought and its impact on agriculture in eastern Gansu Loess Plateau[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(4): 138-143.

[13] HUO A D, PENG J B, CHENG Y X, et al. Hydrological analysis of loess plateau highland control schemes in Dongzhi plateau[J]. Frontiers in Earth Science, 2020.

[14] 马柱国,符淙斌.1951~2004年中国北方干旱化的基本事实[J].科学通报,2006,(20):2429-2439.
MA Z G, FU C B. Basic facts of aridity in northern China from 1951 to 2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2006,(20): 2429-2439.

[15] 王莺,王劲松,姚玉璧.甘肃省河东地区气象干旱灾害风险评估与区划[J].中国沙漠,2014,34(4):1115-1124.
WANG Y, WANG J S, YAO Y B. Assessment and regionalization on meteorological drought disaster risk in the Hedong area of Gansu province, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(4): 1115-1124.

[16] 肖志强,赵彦锋,吴巧娟.陇南山区干旱气候特征及其对农业生产的影响与灾害风险区划[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):240-245.
XIAO Z Q, ZHAO Y F, WU Q J. The drought climatic characteristics in Longnan mountainous areas and its impact on agricultural production and zonation for disaster risk[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 240-245.

[17] 贾建英,韩兰英,万信,等.甘肃省冬小麦干旱灾害风险评估及其区划[J].干旱区研究,2019,36(6):1478-1486.
JIA J Y, HAN L Y, WAN X, et al. Risk and regionalization of drought for winter wheat in Gansu province[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1478-1486.

[18] 赵冬青,李政璇,余瀚,等.基于GIS的陇东黄土高原地区干旱灾害风险综合评估[J].农业科技与信息,2020,(21):60-64.
ZHAO D Q, LI Z X, YU H, et al. Risk assessment of drought disaster in Longdong Loess Plateau based on GIS[J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2020,(21): 60-64.

[19] 王有恒,张存杰,段居琦,等.中国北方春玉米干旱灾害风险评估[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):257-264,272.
WANG Y H, ZHANG C J, DUAN J Q, et al. Risk assessment of spring maize drought disaster in northern China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 257-264, 272.

[20] 孙洪泉,苏志诚,屈艳萍.基于作物生长模型的农业干旱灾害风险动态评估[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):231-236.
SUN H Q, SU Z C, QU Y P. Dynamic assessment of agricultural drought disasters risk based on crop growth model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 231-236.

[21] 陈超,庞艳梅,徐富贤,等.四川水稻不同生育阶段的干旱风险评估[J].干旱地区农业研究,2018,36(6):184-193.
CHEN C, PANG Y M, XU F X, et al. Risk assessment of drought on rice at different growth stages in Sichuan province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 184-193.

[22] 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护[J].地理科学进展,2001,20(3):227-233.
TANG Q C, ZHANG J B. Water resources and eco-environment protection in the arid regions in northwest of China[J]. Progress in Geography, 2001, 20(3): 227-233.

[23] 何斌,王全九,吴迪,等.基于主成分分析和层次分析法相结合的陕西省农业干旱风险评估[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):219-227.
HE B, WANG Q J, WU D, et al. Agricultural drought risk assessment in Shaanxi province using principal component analysis and AHP[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 219-227.

[24] SAATY T L. Decision making the analytic hierarchy and network process CAHP/ATP[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004,13(1):1-35.

[25] 秦越,徐翔宇,许凯,等.农业干旱灾害风险模糊评价体系及其应用[J].农业工程学报,2013,29(10):83-91.
QIN Y, XU X Y, XU K, et al. Fuzzy evaluation system of agriculture drought disaster risk and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 83-91.

[26] 韩宇平,马海娇,严登华.典型干旱指标在海河流域的适用性评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(1):6-14.
HAN Y P, MA H J, YAN D H. Applicability evaluation of typical drought indexes in the Haihe river basin[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2016, 37(1): 6-14.

[27] 唐红玉,王志伟,史津梅,等.PDSI和Z指数在西北干旱监测应用中差异性分析[J].干旱地区农业研究,2009,27(5):6-11,64.
TANG H Y, WANG Z W, SHI J M, et al. Analysis of different dryness/wetness index in Northwest China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(5): 6-11, 64.

[28] 张振伟,韩曦.基于PDSI的甘肃省干旱时空变化特征分析[J].人民黄河,2014,36(3):49-51.
ZHANG Z W, HAN X. Temporal and spatial variation feature analysis of drought in Gansu province based on PDSI method[J]. Yellow River, 2014, 36(3): 49-51.

[29] 张洪波,顾磊,辛琛,等.泾河流域干旱特征时空变化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(3):1-10.
ZHANG H B, GU L, XIN C, et al. Investigation on the spatial-temporal variation of drought characteristics in Jinghe river basin[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2016, 37(3): 1-10.

[30] MURRAY V, EBI K L. IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)[J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2012, 66(9): 759-760.

[31] 黄晓军,王博,刘萌萌,等.中国城市高温特征及社会脆弱性评价[J].地理研究,2020,39(7):1534-1547.
HUANG X J, WANG B, LIU M M, et al. Characteristics of urban extreme heat and assessment of social vulnerability in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(7): 1534-1547.

[32] CARRÃO H, NAUMANN G, BARBOSA P. Mapping global patterns of drought risk: an empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2016, 39: 108-124.

[33] 刘晓冉,康俊,王颖,等.基于GIS的重庆地区不同季节干旱灾害风险评估与区划[J].自然灾害学报,2019,28(2):92-100.
LIU X R, KANG J, WANG Y, et al. Assessment and regionalization on drought disaster risk of different season in Chongqing area based on GIS[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(2): 92-100.

[34] 张学玲,余文波,蔡海生,等.区域生态环境脆弱性评价方法研究综述[J].生态学报,2018,38(16):5970-5981.
ZHANG X L, YU W B, CAI H S, et al. Review of the evaluation methods of regional eco-environmental vulnerability[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): 5970-5981.

[35] 王连喜,孟丹,耿秀华,等.基于GIS的宁夏农业干旱风险评价与区划[J].自然灾害学报,2013,22(5):213-220.
WANG L X, MENG D, GENG X H, et al. GIS based drought risk assessment and zoning in Ningxia[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 213-220.

[36] 沈鸿飞,张军,邱慧珍,等.区域生态环境状况综合评价——以甘肃省庆阳市为例[J].干旱区资源与环境,2011,25(6):13-17.
SHEN H F, ZHANG J, QIU H Z, et al. Integrated evaluation of eco-environmental status in Qingyang city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(6): 13-17.