

罗兴树, 章数语, 郭园, 等. 极端降水对陕西省农业生产的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 339-347, 398. LUO X S, ZHANG S Y, GUO Y, et al. The impact of extreme precipitation on agricultural production in Shanxi Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 339-347, 398. (in Chinese)

极端降水对陕西省农业生产的影响

罗兴树¹, 章数语², 郭园³, 霍云超³, 高学睿^{1,4}, 赵西宁⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 南方科技大学, 深圳 518055;
3. 中国电建集团西北勘测设计院有限公司, 西安 710065; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探究变化环境下极端降水对陕西农业生产的影响, 依据陕西省 2010—2020 年降水数据, 结合地形、植被覆盖和社会经济等特征, 将 HEV(危险性指数、暴露度指数、脆弱性指数) 风险评价体系应用于极端降水对陕西省农业生产的影响评价当中, 形成风险分布图。研究表明: 咸阳市南部、西安市北部以及汉中市中部地区由于地势较低, 河网众多, 受极端降水的影响较大, 风险指数高于 0.8, 属于高风险地区; 陕北的榆林地区由于农业经济密度较低(小于 400 万元/km²), 农业生产受极端降水影响较小, 而汉中市北部则由于植被覆盖度高、地形坡度大, 受极端降水影响较小, 均属于低风险地区。分析极端降水对陕西省农业生产影响的空间分布特征以及原因, 可为变化环境下陕西省农业生产防洪减灾提供理论依据。

关键词: 气候变化; 陕西; 极端降雨; 农业生产; 风险评估

中图分类号: TV93;X43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0035

近年来, 全球气候变化日益加剧, 台风路径呈现北移趋势^[1], 我国内陆地区遭遇持续性极端降水事件的频率逐渐增加。陕西省是我国西北地区重要的粮食生产基地之一, 也是黄河流域上游的重要水源涵养地^[2]。陕西省在 2010—2020 年遭遇了多次极端降水事件, 这些事件都对陕西省的农业造成不同程度的影响和损失。因此, 了解全省近年来极端降水变化规律, 对防控极端降水灾害、减少农业经济损失十分必要。

国内外已有学者在极端气候对农业生产的影响上进行了许多研究。例如: Ali 等^[3] 在巴基斯坦的 Southern Punjab 使用极端气候指数法对当地棉花和冬小麦受极端气候的影响进行了定量评价, 发现暖日(TX_{90p})和暖夜(TN_{90p})会抑制小麦粒径的增加, 最终导致冬小麦减产; 菅艺伟等^[4] 通过分析极端降水对水稻产量的生理、化学和物理过程的影响机制, 发现极端降水会增加土壤营养流失和加剧水分胁迫, 导致水稻产量下降; 管新建等^[5] 使用农业受灾、成灾面积 2 个指数采用九点二次平滑法等发现中国

极端降水导致的洪涝灾害对农业的影响有上升趋势; 于文颖等^[6] 通过识别复合农业气象灾害历史实况和净初级生产力(NPP)对复合气象灾害对玉米的生产的影响进行评估, 发现单一指标无法直接判别复合灾害造成的叠加影响。陕西省在 2010—2020 年气候变化较为剧烈, 降水量增加明显, 极端降水频率明显增加^[7-9], 对农业生产影响较大, 使用单一指标评估极端降水对农业生产的影响可能导致较大的偏差。

HEV 评价体系被广泛应用于城市洪涝评价当中, 该体系评价内容清晰全面, 同时具有较好的可操作性^[10-12]。近年来有研究^[13] 将 HEV 评价体系应用于极端气候对农业生产的影响评估并取得较好结果。HEV 评价体系由危险性、暴露度、脆弱性 3 部分共同构成, 在极端降水对农业生产的影响中, 危险性可以理解为极端降水和由降水导致的如山洪、泥石流等可能对农业生产造成的负面影响; 暴露度可以理解为承灾体如农村人口、农田作物和基础设施等, 脆弱性可以理解为社会经济体系抵御灾

收稿日期: 2023-08-09 修回日期: 2024-01-21 网络出版时间: 2024-03-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240315.1702.008>

基金项目: 陕西省农业协同创新与推广联盟 2022 年软科学项目(LMR202209)

作者简介: 罗兴树(1999—), 男, 重庆城口人, 主要从事农业水文气象研究。E-mail: luoxingshu@nwafu.edu.cn

通信作者: 赵西宁(1976—), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: zxn@nwsuaf.edu.cn

害的能力。

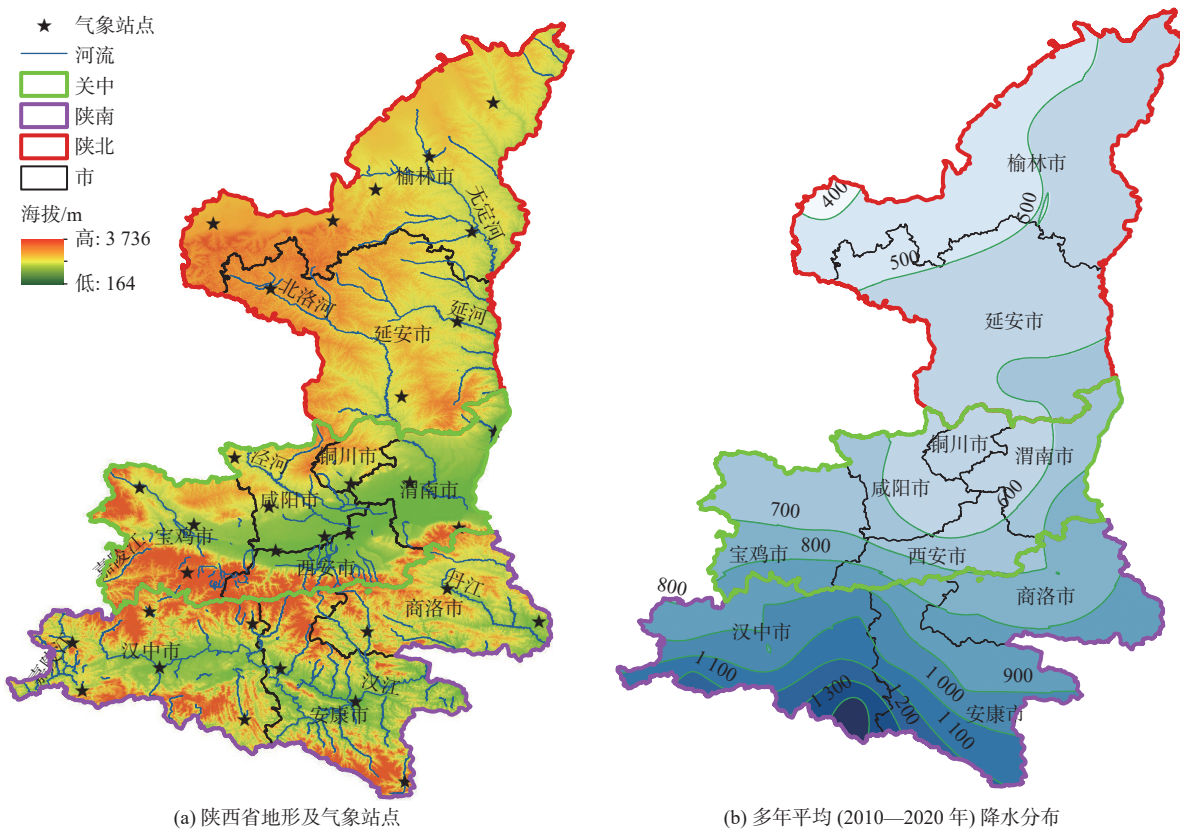
本研究通过构建危险性、暴露度、脆弱性指标,基于 HEV 评价体系,综合考虑陕西省历史极端降水事件、农业经济发展现状、地形和植被覆盖等下垫面条件,针对极端降水对全省农业生产的影响进行了定量评价和归因分析,为全省防控极端降水灾害、减少农业经济损失提供理论支撑。

1 研究区概况

陕西省地处我国中部黄河中游地区,南部兼跨长江支流汉江流域和嘉陵江上游的秦巴山区,介于 $105^{\circ}29'E\sim 111^{\circ}15'E$, $31^{\circ}42'N\sim 39^{\circ}35'N$,总面积 20.6 万 km^2 ,约占我国总国土面积的 2.14% 。截至 2022 年,陕西省共设 10 个省辖市和杨凌农业高新技术产业示范区。根据地形特征(图 1),通常将陕西省分为三大区域:位于北部黄土高原,海拔较高

的榆林市、延安市,统称为陕北地区;位于中部的宝鸡市、铜川市、咸阳市、西安市、渭南市同称为关中地区;位于秦岭以南的汉中市、安康市、商洛市统称为陕南地区。

陕西省纵跨 3 个气候带,南北气候差异大。全省降水空间分布不均,年降水量 $330\sim 1\ 250$ mm,由南至北递减,同时,全省降水年内分配不均,多集中在夏季,多由几次暴雨形成,在气候变化背景下,极端降水频率逐渐增加。同时陕西省耕地较为集中,截至 2019 年,全省共有耕地 3.01 万 km^2 ,关中平原有耕地 1.41 万 km^2 ,占全省耕地面积的 46.83% ,是陕西省粮、棉、油主要生产基地,其中粮食产量约占全省的 50% 以上;陕北北部地区是我国马铃薯优质产区之一,整个地区农业生产容易遭受极端降水的影响。



审图号: 陕 S(2024)009 号

图 1 陕西省地形分布及多年平均降水分布

Fig. 1 Topographic distribution and multi-year average precipitation distribution in Shaanxi Province

2 数据与方法

2.1 数据及数据来源

本研究所使用的数据见表 1。其中,降水数据来自陕西省境内 33 个国家气象站点数据,农业

GDP 数据和农村人口数据采用的是市级平均数据,时间范围为 2010—2020 年。近年来,陕西省地形和河道水系并未发生显著变化,因此 DEM 和河道水系资料采用 2020 年资料。

表 1 水文气象、经济社会数据及来源
Tab. 1 Sources and dataset of hydro-meteorology and social-economy

数据名称	来源	数据精度
2010—2020年日降水	中国气象局信息中心(https://data.cma.cn/)	日
农业GDP、农村人口	陕西省统计局(http://tjj.shaanxi.gov.cn/)	市级
DEM	美国国家航空航天局(www.earthdata.nasa.gov)	1 km×1 km
月归一化植被指数	美国国家航空航天局(https://lpdaac.usgs.gov/)	1 km×1 km
河道水系	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/)	三级支流

2.2 HEV 风险评估法

目前国内外学者多采用相对阈值法来定义极端降水,通常采用序列的指定分位值,使用较多的是90%分位值^[14]、95%分位值^[15]、99%分位值^[16]。根据陕西省的降水情况,本研究基于气象站点2010—2020年降水序列,以各站点2010—2020年日降水序列经验概率累计函数的90%分位值为阈值,将高于阈值的日降水作为极端降水事件。

本研究采用HEV风险评估法,从危险性、暴露度和脆弱性3个方面对风险进行描述和定量评估^[10]。在极端降水对农业生产的影响评价上,HEV风险评估法具有以下优点:评价全面,能够从危险性、暴露度、脆弱性3方面来评价极端降水对农业生产的影响,能够有效避免在气候变化环境下单一指标在极端降水对农业生产的影响的评价中所产生的不确定性;在国内外有所应用并取得较好结果,较为准确地评估了极端气候对该地区农业生产的影响^[13,17];具有较好的操作性,能够将多个因素(降水、地形、社会经济、植被覆盖等)同时考虑,且计算相对简单。危险性、暴露度和脆弱性3个属性可以分别通过危险性指数(H)、暴露度指数(E)、脆弱性指数(V)来描述,三者的计算关系为

$$R = H \times E \times V \quad (1)$$

为了统一不同指数量纲,使其在同一维度具有可比性,在计算风险值 R 时,需要将 H 、 E 、 V 归一化;计算脆弱性指数 V 时需将地形指数(T)、河网指数(R_n)、植被覆盖度(C)进行归一化^[16]:

$$Y_i = 0.5 + 0.5 \frac{X_i - X_{\min,i}}{X_{\max,i} - X_{\min,i}} \quad (2)$$

式中: Y_i 表示第 i 个指标的归一化值; X_i 代表第 i 个指标的初始值; $X_{\max,i}$ 代表第 i 个指标的最大值; $X_{\min,i}$ 代表第 i 个指标的最小值。

2.2.1 危险性指数

极端降水主要由极端降水强度与极端降水持续时间决定,极端降水强度越大、持续时间越长,对农

业生产的影响就越大。根据叶殿秀等^[18]所提出的暴雨过程强度评估指标对危险性指数 H 进行估算:

$$H = I \times \sqrt{D} \quad (3)$$

式中: I 代表极端降水强度,mm/d,用平均日降水量表示; D 代表极端降水历时,d,用极端降水持续天数表示。

2.2.2 暴露度指数

本研究主要考虑极端降水对农业生产和农村人口的影响,因此计算了全省农村人口密度(单位耕地面积的农村人口数量)和农业经济密度(单位耕地面积的农业经济生产总值)以归一化农村人口密度(agricultural population density, A_{POP})和归一化农业经济密度(agricultural gross domestic product, A_{GDP}),等权平均作为暴露度指数 E (exposure index)^[19],计算公式为

$$E = 0.5 \times A_{POP} + 0.5 \times A_{GDP} \quad (4)$$

式中: E 代表暴露度指数; A_{POP} 代表归一化农村人口密度, A_{GDP} 代表归一化农业经济密度。

2.2.3 脆弱性指数

脆弱性主要考虑地理因素对遭遇极端降水的影响,其中地形、河网密度和植被覆盖是最主要的3个因素^[20]。地形、河网密度是洪涝灾害形成的积极因素,地势越低越平坦、河网越密集的区域,在发生极端降水后,越容易形成洪涝灾害。植被有保水截流作用,能降低洪涝形成的概率,是洪涝灾害形成的消极因素。参考以往研究,将 T 、 R_n 、 C 的权重分别赋值0.4、0.3、-0.3^[21,22],进行加权平均可得脆弱性指数 V ^[23-24]:

$$V = 0.4 \times T + 0.3 \times R_n - 0.3 \times C \quad (5)$$

式中: V 代表脆弱性指数; T 代表地形指数; R_n 代表河网指数; C 代表植被覆盖度;三者均为归一化结果。各地理因素指数内涵与计算方法如下:

地形指数(T)。极端降水容易在海拔较低、地形平缓的区域形成积水和洪涝,对农业生产造成影

响。本研究使用绝对高程和坡度来表示地形特征,其中坡度使用绝对高程差来表征^[25]。海拔越低、绝对高程差越小受极端降水影响概率越大, T 值越大。根据《极端降水过程危险性等级评估技术规范》(DB 33/T 2025—2017)^[26], 结合陕西省地形特征, 对绝对高程和绝对高程差进行分类组合, 使用自然间断点分级法对地形进行赋值见表 2。

表 2 地形因素赋值
Tab. 2 Terrain factor assignment

海拔/m	高程标准差/m					
	<30	[30, 70)	[70, 110)	[110, 150)	[150, 190)	≥190
<650	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75
[650, 950)	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
[950, 1250)	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
[1250, 1550)	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
[1550, 1850)	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55
≥1850	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50

河网指数(R_n)。河网密度高, 靠近湖泊、大型水库等水体的区域受极端降水引发洪涝的概率更大。因此, 参考《极端降水过程危险性等级评估技术规范》(DB 33/T 2025—2017), 将河网密度和水体的距离作为河网指数的 2 个主要因素^[27]。将河网密度定义为单位面积(km^2)上河流的长度(km)。网格到水体的距离可通过计算水体缓冲区得到。缓冲距离设为 4、8、12 km 这 3 个宽度, 分别赋权 0.9、0.8、0.7, 非缓冲区为 0.5。对河网密度和缓冲区影响值归一化后, 通过等权平均得到河网指数值。

植被覆盖度(C)。植被具有保水固土的作用, 可以降低极端降水引发洪涝的可能性及后续灾害^[28]。在其他条件相同的情况下, 植被覆盖度越高的地方, 发生洪涝灾害的可能性越低。参考《陆地植被气象与生态质量检测与评价等级》^[29](QX/T 494—2019), 根据 MODIS 的 1 km 归一化植被指数产品计算得到植被覆盖度:

$$C = (I_{\text{NDV}} - 0.05) / 0.9 \quad (6)$$

式中: C 为植被覆盖度; I_{NDV} 为 2010—2020 年陕西省 7—9 月归一化植被指数平均值。

在计算陕西农业生产遭遇极端降水的危险性指数、暴露度指数、脆弱性指数后, 根据式(1)计算全省风险值, 各指数关系见图 2。风险值取值范围在 0.5~1.0, 使用自然间断点分级法将风险等级分为 4 级: 低风险(一级)、中风险(二级)、中高风险(三

级)、高风险(四级), 风险指数范围分别为 [0.50, 0.63]、[0.63, 0.70]、[0.70, 0.77]、[0.77, 1.00]。

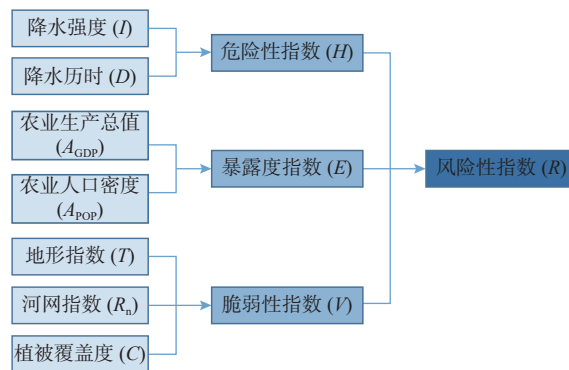


图 2 HEV 评估系统各指数关系

Fig. 2 Relationship between indices of HEV evaluation system

3 结果分析

3.1 极端降水危险性分布

经统计, 陕西省境内 33 个气象站点记录 2010—2020 年累计共 1 716 场极端降水, 其中, 持续 1 d 和 2 d 的降雨过程分别占 37.2% 和 25.8%, 持续时间大于 2 d 的占 36.9%。逐年极端降水频率(由全省气象站点所观测数据累计)见图 3(a)。全省最多极端降水次数发生在 2011 年(204 次), 其次是 2012 年(181 次)。陕北、关中、陕南分别在 2012 年(50 次)、2012 年(65 次)、2011 年(99 次)发生了最多次极端降水。从逐年变化看, 2010—2015 年极端降水频率存在下降的趋势, 但在 2015—2020 年极端降水频率是有所上升的。从极端降水强度看, 2010—2020 年极端降水强度存在下降趋势, 2012 年极端降水强度为研究期间最大值 [图 3(b)]。

从极端降水频率的空间分布来看 [图 4(a)], 陕南地区极端降水频率较高, 平均次数都在 5 次以上, 陕北地区极端降水频率则相对较低, 均小于 4.5 次。极端降水的强度在空间上呈现南高北低的分布 [图 4(b)], 陕南地区大部分站点所记录的极端降水平均降雨强度均在 25 mm/d, 关中地区极端降水过程平均强度大多在 20~25 mm/d, 陕北地区除延安西北部和榆林西南部 2 个极端降水过程平均强度低于 20 mm/d, 其他地区均在 20 mm/d 以上, 榆林市中部以及延安东北部极端降水平均强度在 25 mm/d 以上。造成这些现象的原因可能是因为陕北陕南气候区域不同, 陕南地区属于亚热带气候, 陕北地区属于温带气候, 同时, 陕南属于秦岭淮河线以南, 水汽相对充足。

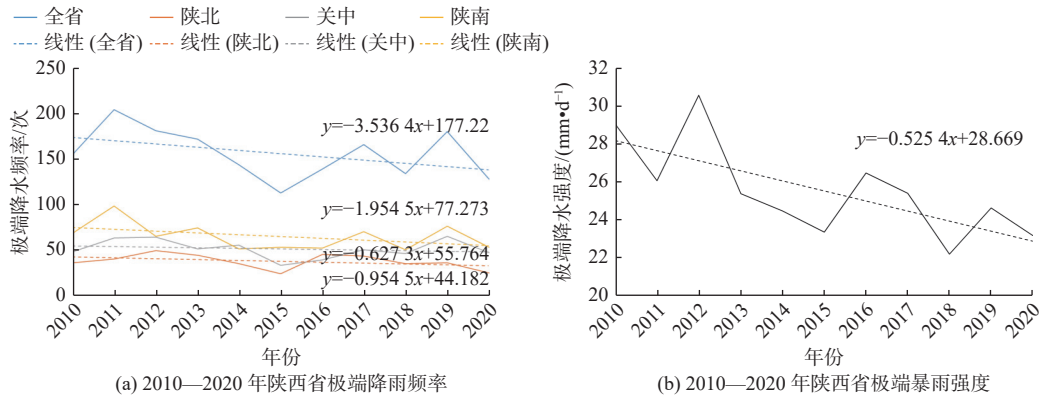
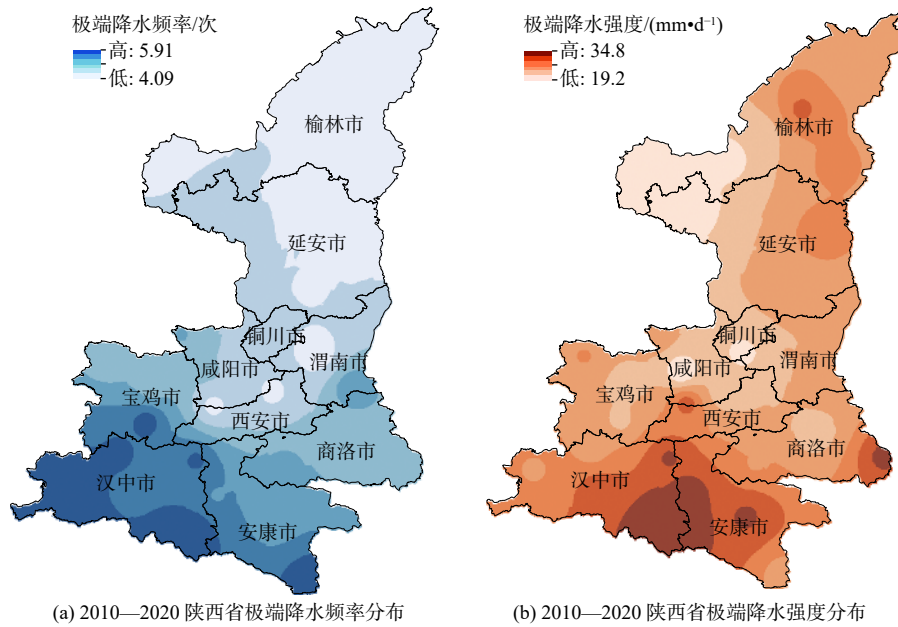


图3 2010—2020年陕西省极端降雨频率及强度

Fig. 3 Average frequency and precipitation of extreme rainfall in Shaanxi Province from 2010 to 2020



审图号: 陕S(2024)009号

图4 2010—2020年陕西省极端降水频率及强度分布

Fig. 4 Distribution of extreme precipitation frequency and intensity in Shaanxi Province from 2010 to 2020

计算站点的危险性指数(H)并通过反距离权重差值得到全省的危险性指数分布,见图5。从图(5)中发现,关中地区东部和陕南的东部极端降水的危险性较高,西安市与渭南市交界处、商洛市西部、安康市西部存在高值区,陕北榆林市西部也存在危险值较大区域,陕北地区南部和关中地区西部危险值相对较小。

3.2 农业生产生活暴露度分析

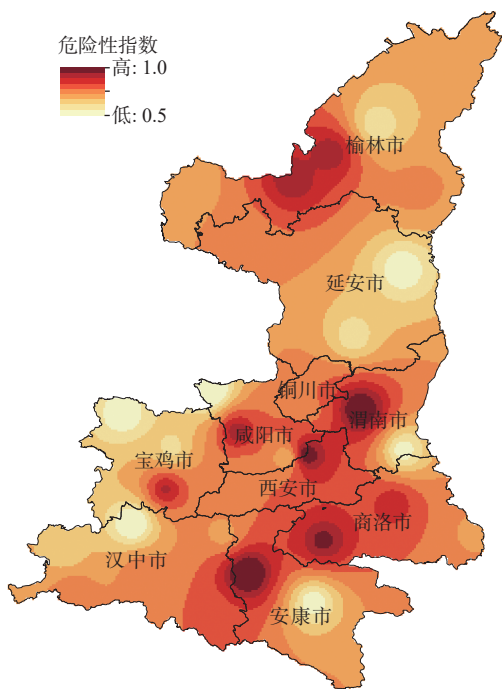
农村人口密度方面,西安市、汉中市、商洛市农村人口密度较大,均达到 $800 \text{ 人}/\text{km}^2$ 。陕北地区延安市、榆林市、关中地区铜川市,农村人口密度较低,低于 $500 \text{ 人}/\text{km}^2$ [图6(a)]。从农业经济密度[图6(b)]来看,咸阳市、西安市、汉中市农业经济密度较高,均超过 $800 \text{ 万元}/\text{km}^2$,相对而言,榆林市的农业经济密度较低,低于 $400 \text{ 万元}/\text{km}^2$ 。综合考虑农村人口和农业GDP计算发现:西安市的农村人

口密度与农业经济密度均较高,因此陕西省极端降水暴露度指数最高;榆林的农村人口密度与农业经济密度均较低,因此暴露度指数最低。

3.3 地形、河网、植被覆盖度以及敏感性分析

从地形指数[图7(a)]来看:关中平原和汉中平原海拔较低,坡度较小,极端降水形成积洼和洪涝概率较高,因此地形指数较大;汉中市北部、宝鸡市南部、西安市南部的秦岭山区,坡度较大,形成积洼和洪涝的概率较低,因此地形指数较小;陕北地区虽然整体海拔高,但坡度小,地形指数因此相对偏高。

从河网指数[图7(b)]来看:关中地区河网较密,一旦发生极端降水,形成洪涝的可能性较高,因此河网指数较大;延安市的东、西部,宝鸡市南部和汉中市北部地区,河道较少,由暴雨导致河流泛滥形成洪涝的可能性较低,因此河网指数较小。



审图号: 陕 S(2024)009 号

图 5 2010—2020 年陕西省危险性指数

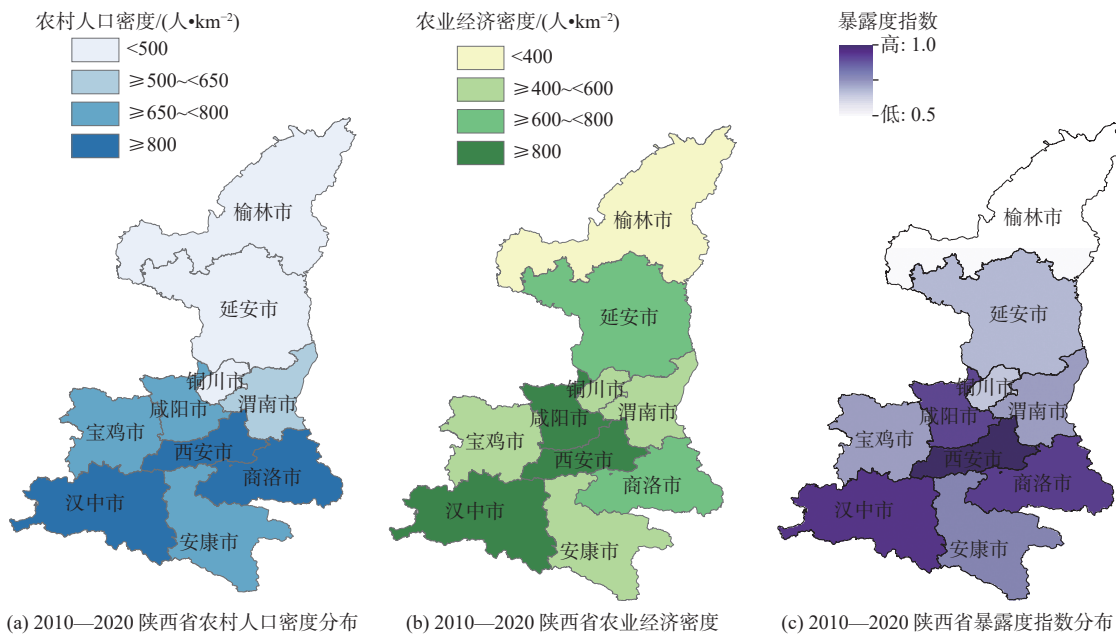
Fig. 5 The hazard index in Shaanxi Province from 2010 to 2020

从植被覆盖度 [图 7(c)] 来看: 陕北榆林市、关中地区、陕南地区北部植被覆盖度较低, 对洪涝形成的削弱能力较差; 陕南地区大部 and 延安地区南部整体植被覆盖度较高, 对洪涝形成的削弱性较强。

基于地形和下垫面情况分析, 绘制全省脆弱性指数空间分布图 [图 7(d)] 可以发现: 榆林市北部地区, 关中平原、汉中市中部和安康市中部受极端降水影响的脆弱性较高, 且主导因素不同: 榆林市北部主要由较低的植被覆盖度导致; 关中平原地区、汉中市中部、安康市中部则是由平坦地区和密集河网共同导致; 宝鸡市南部、西安市南部、汉中市北部地区地形较为陡峭, 植被覆盖度高, 当极端降水发生时, 下渗量大、产流小且可有效削峰, 同时河流较少, 因此脆弱性指数较小。

3.4 风险性分析

综合危险性指数、暴露度指数、脆弱性指数, 得出陕西省农业受极端降水影响风险值分布图(图 8)。整体而言, 关中地区中部和陕南地区中部风险值较高, 陕北地区则风险值较低。但分析各地三方面特征, 发现主导因素差异较大。



(a) 2010—2020 陕西省农村人口密度分布

(b) 2010—2020 陕西省农业经济密度

(c) 2010—2020 陕西省暴露度指数分布

审图号: 陕 S(2024)009 号

图 6 2010—2020 年陕西农村人口密度、农业经济密度、暴露度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of rural population density, agricultural economic density, and exposure in Shaanxi Province from 2010 to 2020

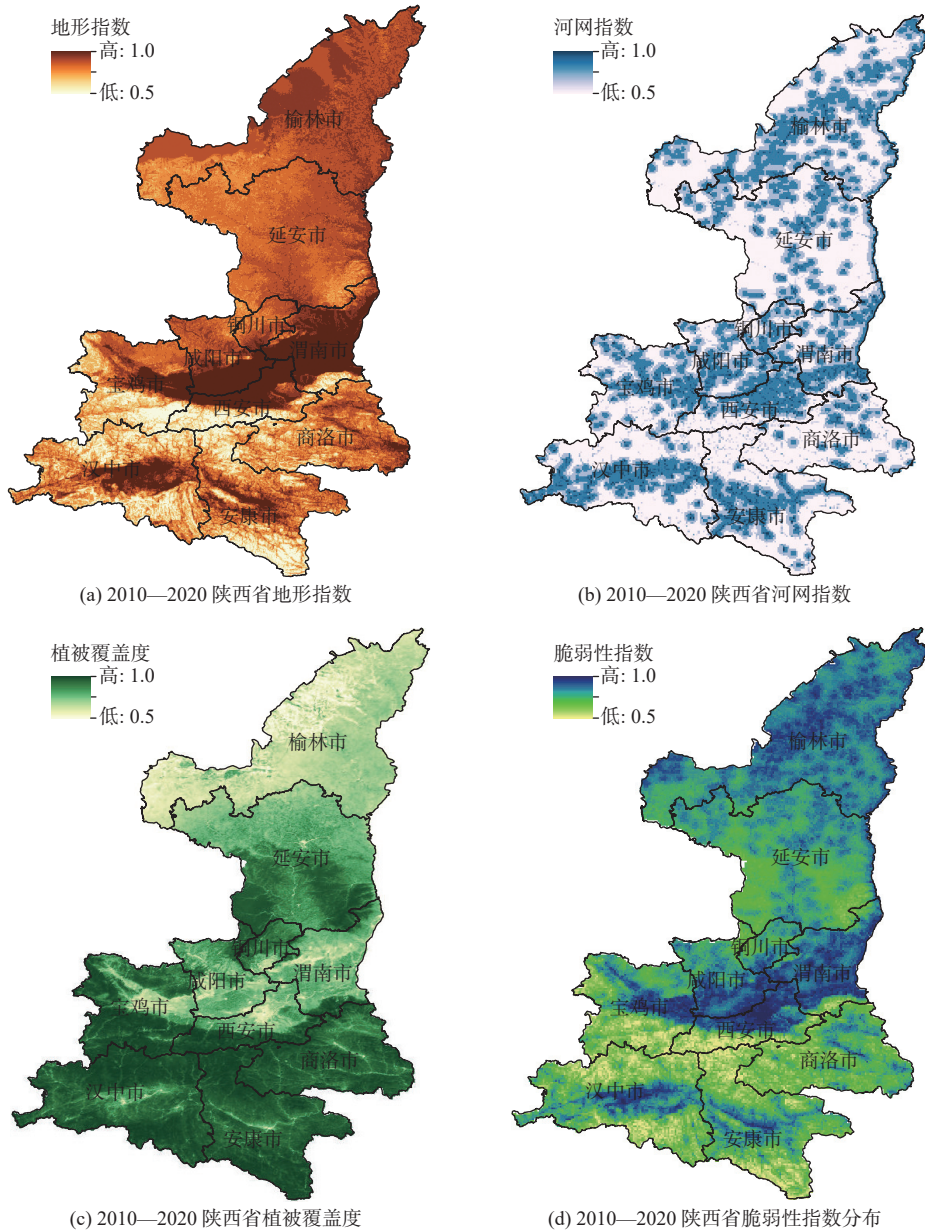
关中地区中部由于降雨量较大, 植被覆盖度低、耕地集中, 极端降水易形成积水和洪涝灾害, 同时农业经济密度高, 因此属于高风险地区; 从数值上看, 汉中中部地区同属于高风险地区, 但主要受地形影响。

陕北地区榆林市的危险性指数(图 5)和脆弱性

指数 [图 7(d)] 均较高, 但由于农业经济密度较低, 暴露度指数 [图 6(c)] 较低, 因此其风险数值偏低, 属于低风险地区。西安市南部、汉中市北部, 虽然暴露度指数 [图 6(c)] 较高, 但脆弱性指数 [图 7(d)] 较低, 危险性指数(图 5)较低, 极端降水对农业生产的影

响较低,因此属于中风险地区;同样,宝鸡市南部地区虽然危险性指数(图5)较高,但暴露度指数

[图6(c)]较低、脆弱性指数[图7(d)]较低,属于低风险地区。



审图号:陕S(2024)009号

图7 2010—2020年陕西省地形指数、河网指数、植被覆盖度、脆弱性指数分布

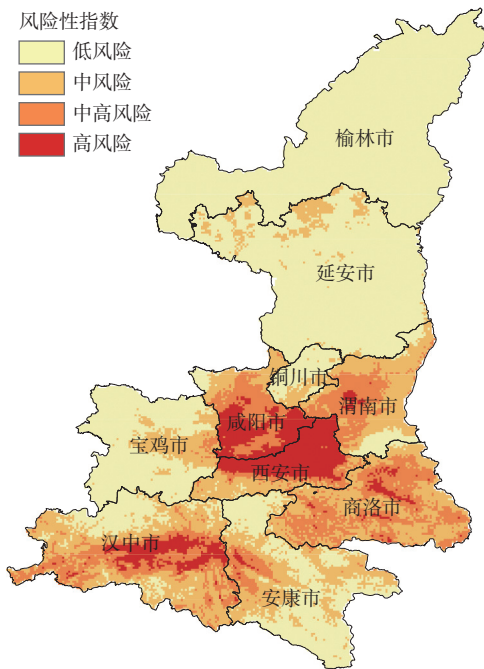
Fig. 7 Distribution of topographic index, river network index, vegetation coverage, and vulnerability index in Shaanxi Province from 2010 to 2020

但在气候变化背景下,风险值也会随之发生改变。舒章康等^[30]使用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的未来预估数据,发现中国未来极端降水在不同人类社会发展模式下均呈现增加趋势。在这样的情况下,高风险地区(咸阳市南部、西安市北部、汉中市中部)的风险值可能进一步加大,一些中风险地区(渭南市中部、商洛市)可能会从中高风险地区转化为高风险地区。

4 结论与建议

基于陕西省33个气象站点2010—2020的气象数据、农村社会经济数据、植被和河网数据,综合考虑陕西省农业经济、降水、下垫面特征,使用HEV评价体系,对极端降水对农业生产的影响从危险性、暴露度、脆弱性3个方面进行量化评估,并绘制全省风险指数空间分布图。通过相对阈值法提取极端降水事件并进行频率和强度分析,发现虽然2010—

2020 年极端降水强度整体有所下降,但在 2015—2020 年极端降水频率呈上升趋势。综合危险性、暴露度、脆弱性,分析极端降水对全省农业生产影响的风险值,可以发现:咸阳市南部、西安市北部以及汉中市中部受极端降水的影响较大,为高风险地区;西安市南部和汉中市北部地区由于暴露度较高,但危险性指数和脆弱指数较低,属于中风险地区;陕北地区以及宝鸡市南部农业社会经济水平相对较低,为低风险地区。



审图号: 陕 S(2024)009 号

图 8 陕西省风险性指数分布

Fig. 8 Distribution map of risk index in Shaanxi Province from 2010 to 2020

基于以上研究结果,有关部门在应对极端降水对农业生产带来影响时应有所侧重。例如:在由极端降水强度和频率主导的地区,如咸阳市南部,应该提高预警预报精度和准确度,完善响应机制;在由地形主导的高风险区域,如汉中市中部地区,应合理增加植被覆盖度,完善农业基础设施;在由农村经济高密度所导致的高风险区域,如西安市北部地区,应从作物优化和管理方面提高农业生产活动的抗灾能力。通过对风险的多维度特征进行分析,研究为农业和水资源管理部门应对变化环境下越来越频繁、强度越来越大的极端降水灾害提供理论支撑。

参考文献:

[1] CHEN T, CHEN S, ZHOU M, et al. Northward shift

in landfall locations of tropical cyclones over the Western North Pacific during the last four decades[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(2): 304-319. DOI: 10.1007/s00376-021-1077-z.

- [2] 刘冬,余侃华,师小燕,等. 陕西省种植业结构变化及时空演变分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(9): 251-261. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20210927.
- [3] ALI M A, HASSAN M, MEHMOOD M, et al. The potential impact of climate extremes on cotton and wheat crops in southern Punjab, Pakistan[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1609. DOI: 10.3390/su14031609.
- [4] 菅艺伟,付瑾,周丰. 极端降水对水稻产量的影响研究综述[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(10): 1746-1760. DOI: 10.18306/dlxxjz.2021.10.011.
- [5] 管新建,刘源,孟钰,等. 中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 21-25. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.004.
- [6] 于文颖,纪瑞鹏,王鹏,等. 辽宁玉米典型复合农业气象灾害影响损失评估[J]. *灾害学*, 2022, 37(3): 84-92. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.03.014.
- [7] 谢楠. 陕西省植被覆盖度变化对气候变化与人类活动的双重响应[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [8] 李慧慧,栾承梅,夏栩,等. 基于 CMIP6 气候模式的中国大陆未来极端降水情景预估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 19-29. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.08.002.
- [9] 薛斯文,周旗. 1960—2020年陕北极端气候指数变化规律的研究[J]. *江西农业学报*, 2023, 35(08): 147-156. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2023.08.023.
- [10] CARDONA O, VAN AALST M K, BIRKMANN J, et al. *Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability* [M]. Cambridge University Press, 2012, 65-108.
- [11] 王豫燕,王艳君,姜彤. 江苏省暴雨洪涝灾害的暴露度和脆弱性时空演变特征[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(4): 27-32,45. DOI: 10.11988/ckyyb.20150291.
- [12] 吴泽宁,申言霞,王慧亮. 基于能值理论的洪涝灾害脆弱性评估[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 9-14.
- [13] JAYADAS A, AMBUJAM N K. A quantitative assessment of vulnerability of farming communities to extreme precipitation events in Lower Vellar River sub-basin, India[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023(25): 13541-13563. DOI: 10.1007/s10668-022-02645-4.
- [14] 陈圣劼,张柳,康志明,等. 强降水事件的判定指标及评估研究[J]. *气象科学*, 2023, 43(4): 505-514. DOI: 10.12306/2022jms.0067.
- [15] 马伟东,刘峰贵,周强,等. 1961—2017年青藏高原极端降水特征分析[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 3039-3050.
- [16] 四川省市场监督管理局. 暴雨洪涝灾害风险评估技术规范: DB51/T 2829—2021[S].
- [17] ZHANG Y, HAO Z, ZHANG Y. Agricultural risk assessment of compound dry and hot events in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2023,

- 277: 108128. DOI: [10.1016/j.agwat.2022.108128](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108128).
- [18] 叶殿秀,王遵娅,高荣,等. 1961—2016年我国区域性暴雨过程的客观识别及其气候特征[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(6): 575-583. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2018.172](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2018.172).
- [19] SUN S, ZHAI J, LI Y, et al. Urban waterlogging risk assessment in well-developed region of Eastern China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, 115: 102824. DOI: [10.1016/j.pce.2019.102824](https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.102824).
- [20] WANG Y, ZHAI J, GAO G, et al. Risk assessment of rainstorm disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China during 1990—2018[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 267-288. DOI: [10.1080/19475705.2021.2023224](https://doi.org/10.1080/19475705.2021.2023224).
- [21] ISLAM M R, RAJA D R. Waterlogging risk assessment: An undervalued disaster risk in coastal urban community of Chattogram, Bangladesh[J]. *Earth*, 2021, 2(1): 151-173. DOI: [10.3390/earth2010010](https://doi.org/10.3390/earth2010010).
- [22] WANG Y, ZHAI J, SONG L. Waterlogging risk assessment of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in the past 60 years[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(34): 1039-1051. DOI: [10.1007/s00704-021-03670-5](https://doi.org/10.1007/s00704-021-03670-5).
- [23] LI Z, SONG K, PENG L. Flood risk assessment under land use and climate change in Wuhan city of the Yangtze River basin, China[J]. *Land*, 2021, 10(8): 878. DOI: [10.3390/land10080878](https://doi.org/10.3390/land10080878).
- [24] DEKONGMEN B W, KABO-BAH A T, DOMFEH M Ket al. Flood vulnerability assessment in the Accra Metropolis, southeastern Ghana[J]. *Applied Water Science*, 2021, 11(7): 1-10. DOI: [10.1007/s13201-021-01463-9](https://doi.org/10.1007/s13201-021-01463-9).
- [25] SINGH O, KUMAR D. Evaluating the influence of watershed characteristics on flood vulnerability of Markanda River basin in north-west India[J]. *Natural Hazards*, 2019, 96(1): 247-268. DOI: [10.1007/s11069-018-3540-4](https://doi.org/10.1007/s11069-018-3540-4).
- [26] DB33/T 2025-2017, 极端降水过程危险性等级评估技术规范[S].
- [27] LIU S, LIN M, LI C. Analysis of the effects of the river network structure and urbanization on waterlogging in High-Density Urban Areas: A case study of the Pudong New Area in Shanghai[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(18): 3306. DOI: [10.3390/ijerph16183306](https://doi.org/10.3390/ijerph16183306).
- [28] LIU F, LIU X, XU T, et al. Driving factors and risk assessment of rainstorm waterlogging in urban agglomeration areas: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. *Water*, 2021, 13(6): 770. DOI: [10.3390/w13060770](https://doi.org/10.3390/w13060770).
- [29] QX/T494-2019, 陆地植被气象与生态质量检测与评价等级[S].
- [30] 舒章康,李文鑫,张建,等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 116-125. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2022.05.014](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2022.05.014).

The impact of extreme precipitation on agricultural production in Shanxi Province

LUO Xingshu¹, ZHANG Shuyu², GUO Yuan³, HUO Yunchao³, GAO Xuerui^{1,4}, ZHAO Xining⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. South University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 3. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In recent years, global climate change has intensified, leading to a northward shift of typhoon paths. Consequently, China's inland regions are increasingly experiencing persistent extreme precipitation events, which are significantly impacting agricultural production. As a crucial grain production base in the northwest region of China, Shaanxi has suffered a lot of extreme precipitation in recent years. During the period from 2010 to 2020, the climate in Shaanxi Province underwent pronounced fluctuations, marked by a notable increase in precipitation levels and a significant rise in the frequency of extreme precipitation events, resulting in substantial impacts on agricultural production. Therefore, to comprehend the recent patterns of extreme precipitation in the province, as well as to effectively prevent and control extreme precipitation disasters while mitigating potential economic losses, an assessment was conducted based on the precipitation data in Shaanxi Province from 2010 to 2020.

This assessment took geographic terrain, vegetation cover, socio-economic attributes into consideration, and employed an evaluation framework including the hazard index, exposure index, and vulnerability index (HEV). This comprehensive approach enabled a detailed risk analysis regarding the impact of extreme precipitation on agricultural production in Shaanxi Province, creating a risk distribution map.

(下转第 399 页)