

# 基于GIS耦合地理探测器模型的陕北红枣生态适宜性区划与驱动机理分析

何钊全<sup>1,2</sup>, 尚雪<sup>2</sup>, 张铜会<sup>3</sup>, 云建英<sup>3</sup>

(1.陕西省红枣重点实验室 延安大学, 陕西 延安 716000; 2.延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 716000; 3.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730030)

**摘要:**【目的】明晰陕北红枣生态适宜性区划特征及其对环境因子的响应过程。【方法】本文利用GIS技术进行红枣生态适宜性区划分析,并通过地理探测器模型确定环境因子驱动机理。【结果】①红枣生态适宜性区划等级自陕北东南部向西北部由高到低递减。最优适宜区和次适宜区集中分布在富县;一般适宜区主要分布在陕北沿黄河西岸诸区县,种植面积较大。②气候因子和地形因子对红枣生态适宜性影响较大,呈相互增强或非线性增强的交互作用效应,且差异显著。③年降水量、高程和年积温( $\geq 10^\circ\text{C}$ )为主要驱动因子。红枣生态适宜性指数与年降水量和年积温极显著负相关,与高程极显著正相关。④年降水量、高程及年积温能够依次解释红枣生态适宜性指数的22%、15%、11%,综合解释率达78%。【结论】陕北地区的红枣生态适宜性区划等级自东南部向西北部显著降低,主要通过年降水量、高程、年积温及其交互作用的影响,实现区域红枣特色产业发展和林木主导型生态系统格局的调控。

**关键词:** GIS技术; 生态适宜性; 地理探测器; 驱动机理; 陕北红枣

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022083

OSID:



何钊全, 尚雪, 张铜会, 等. 基于GIS耦合地理探测器模型的陕北红枣生态适宜性区划与驱动机理分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 97-106.

HE Zhaoquan, SHANG Xue, ZHANG Tonghui, et al. Ecological Suitability Regionalization and Driving Mechanism of Jujube Based on GIS Coupled Geographical Detector Model in Northern Shaanxi[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 97-106.

## 0 引言

【研究意义】枣树(Jujube)原产于我国,是我国特有经济树种之一,具有防风、固沙和减轻干热风等作用。陕北黄土高原黄河沿岸是我国优良制干红枣中阳木枣的主要栽培区域和适生区之一。陕北半干旱区夏季炎热,日照较强、秋季有短促暴雨、冬季干冷,所产红枣果大、营养丰富、口味甘甜、富含维生素,是一种保健果品<sup>[1]</sup>。近年来,红枣种植面积持续扩大。截至2018年,陕北红枣种植面积 $19 \times 10^4 \text{hm}^2$ 左右,产量 $74.87 \times 10^4 \text{t}$ ,成为当地的支柱产业,经济、社会和生态效益显著<sup>[2]</sup>。进而也出现了佳县、延川和清涧等非常著名的全国红枣重点县。比如,1988年,陕西佳县被命名为“中国红枣名乡”,是我国唯一认证的有机红枣产地,具有“天然极品、百果之王”的美誉<sup>[3]</sup>。因此,探究陕北红枣的生态适宜性区划特征及其驱动机理,对发展区域红枣特色产业具有现实意义。

【研究进展】近年来,该区域气候因子、植被状况等变化显著,加之地貌形态、地形结构复杂多变,会影响光、热、水、气等条件,对红枣的生长发育、产量及其品质产生不同程度的影响,最终严重阻碍红枣产业的可持续发展<sup>[4]</sup>。国内很多学者采用不同的统计分析方法对该地区气候资源变化、气温降水时空变异、植被土壤特征等进行了研究,较全面地揭示了该地区的气候地理变化趋势。比如,一方面,1960—2010年陕北地区年均气温和月均气温呈上升趋势,变化倾向率达 $0.30^\circ\text{C}/10\text{a}$ ,年降水量呈下降趋势,变化倾向率为 $-12.46 \text{mm}/10\text{a}$ <sup>[5]</sup>,导致陕北产生轻度干旱的频率高达68.20%,因此,气候总体上呈暖干化趋势,但是增长速率逐步降低<sup>[6]</sup>。另一方面,自1999年我国启动退耕还林(草)的工程,至2015年,黄土高原造林面积已达 $8954 \text{km}^2$ <sup>[7]</sup>。在此背景下,2005—2019年,陕北地区增强型植被指数(EVI)空间分布差异明显,总体上表现为,东南丘陵沟壑区植被覆盖度较高,西北风沙区及城镇建设用地区域植被覆盖度较低,陕北地区的植被覆盖整体呈显著上升趋势,植被增加的区域面积占区域面积的64.30%,植被不变的区域占31.10%,而植被减少的区域仅占4.60%<sup>[8-9]</sup>。此外,

收稿日期: 2022-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371053, 30972422); 陕西省教育厅重点实验室项目(20JS150); 陕西省科技厅项目(202070117); 延安大学博士科研启动项目(205040305)

作者简介: 何钊全(1990-),男,硕士生导师,博士,主要从事恢复生态学研究。E-mail: hzq@yau.edu.cn

陕北黄土地貌正负地形存在明显差异,地面坡度的个体和空间差异反映了黄土地貌形态的空间分异<sup>[10]</sup>。研究<sup>[6,8,10]</sup>表明,黄土高原不同地貌类型在结构和分布上各有特点,尤其是以塬、梁、峁为典型代表的黄土地貌在地貌形态、地形结构和水系发育程度等方面表现出明显的地区性特征。然而,黄土地貌形态极其复杂,具有不规则性,许多研究指标尺度依赖性大,不同尺度研究结果具有明显差异性,是典型的土壤退化与水土流失区域。目前,通过对该区土地利用/覆被变化的气候驱动因素、土壤侵蚀、生态系统生产力变化及脆弱生态的综合整治,生态脆弱区条件得到显著改善<sup>[11]</sup>。适宜的种植区域是保证结构优化和促进产业可持续发展的基础。加之植被、地形生态类别多样,气候因子变化频繁,红枣的生长状况、品质产量会在不同区域有显著异同。

生态适宜性概念最早由美国景观规划师宗黎黎<sup>[4]</sup>提出,并随着遥感和地理信息系统(GIS)技术的持续应用和数据统计方法深入探究,使生态适宜性指标类别日趋系统和全面<sup>[12]</sup>。GIS技术在农业、林业、药业等多领域广泛应用,评价对象愈发细化,且提高了区划和评估结果的精度。整体上看,近年来,学者们针对各类作物生态适宜性评价展开了大量研究,研究方向主要集中在方法、模型及应用性研究方面。比如,王珊等<sup>[13]</sup>利用耕地地力评价结果,对高县玉米种植区土地进行了生态适宜性评价,明确了不同生态适宜性等级的区域分布面积,确定了生育期间 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和降水量为影响该区域玉米种植适宜性的主要指标,为该县今后的玉米种植生态区划提供科学依据。贺征兵等<sup>[14]</sup>基于陕西省黄龙县气象资料,数字高程模型(DEM)以及土壤数据,利用GIS逆距离权重法的综合插值方法对核桃种植生态气候适宜性进行评价,确定了种植适宜区,以期在核桃栽培过程中充分发挥生态气候资源合理利用的优势。莫建国等<sup>[15]</sup>基于GIS技术,利用气候因素(平均气温、降水量及日照时间),确立了猕猴桃种植的气候适宜性区划,为河源地区进一步扩大种植面积和提高品质提供理论支撑。孙园园等<sup>[16]</sup>以四川省稻作区为分析样区,利用GIS空间差值法,研究了优质稻生产的气候生态条件适宜性及其空间分布格局,为科学规划优化优质稻生产布局和结构奠定案例基础。王迅等<sup>[17]</sup>通过分析四川晚熟柑橘适宜性区划,结合对代表性产区的实地调研,分析出四川发展晚熟柑橘的气候优势点,并得到了晚熟柑橘气候适宜性精细区划图。上述分析结论更加充分验证了作物生态适宜性评价的必要性和现实意义。但是,评价因子侧重点的差异性会影响评价方法的不同,最终导致评价方向和适用性范畴的不同。

【切入点】鉴于气候、植被和立地条件是影响红枣生长的关键因素,而人们对陕北红枣生长在不同区域上的气候、地理等限制性因子认识有限,对具体的立地环境缺少研究,势必影响了红枣产业的持续发展。同时,气候、地形、土壤等与红枣生长的关系极力促进红枣生态适宜性精细区划和评价。【拟解决的关键问题】因此,本文采用GIS技术和层次分析法,探讨陕北地区红枣分布与生态环境之间的关系,对红枣生态适宜区进行等级划分,确定红枣生态适宜性区划图;且通过地理探测器模型和生态学统计方法筛选影响红枣生态适宜性的主要生态因子及其影响机理。研究结果可为陕北红枣合理引种栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕北地区位于黄土高原中部,地处 $35^\circ 02' - 39^\circ 35' \text{N}$ ,  $107^\circ 15' - 110^\circ 15' \text{E}$ ,总面积 $92\,521.40\text{ km}^2$ (图1)。年均降水量约 $350\sim 600\text{ mm}$ ,年平均气温 $8\sim 12^\circ\text{C}$ ,为典型的半干旱地区。土壤以栗钙土、黄绵土为主。该区域平均海拔高,气候干燥,且光照充足、昼夜温差大,是我国优质红枣的重要产区。

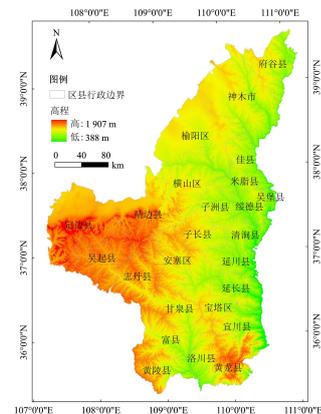


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

### 1.2 数据来源

本文采用的数据主要有数字高程数据(DEM)、研究区县级行政矢量边界、年平均气温、年降水量、年积温( $\geq 10^\circ\text{C}$ )、土地利用数据。其中,DEM收集于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);研究区县级行政矢量边界来源于地球大数据科学工程数据共享服务系统;年平均气温、年降水量、年积温( $\geq 10^\circ\text{C}$ )及土壤类型等栅格数据收集于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。上述矢量和栅格数据均解译完成。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 适宜性环境因子选取

本研究根据差异性、定量性原则,通过分析研究

区地理和气候资料,参考其他学者研究方法,选取地形、气候、土壤和植被 4 个尺度的生态环境因子作为陕北红枣生态适宜性评价指标。首先,730~1 100 m 被确定为适宜陕北红枣生长的海拔高程,东南、南、西南方向被选定为阳坡,0~25°被选定为适宜坡度<sup>[18]</sup>。其次,9.6~11.10 °C、3 000~3 200 °C、430~580 mm 依次被选定为适宜陕北红枣生长的年平均气温、年积温(≥10 °C)、年降水量<sup>[18]</sup>。此外,黄绵土、黑垆土和灰钙土被选定为适宜土壤类型<sup>[19]</sup>,温带落叶阔叶林被选定为适合陕北红枣生长的地理类别<sup>[20]</sup>。其中,选择温带落叶阔叶林作为植被因子,主要是因为,相比灌木和草本植物,它们具有树木种类一致性;保护灌木和草本植物所表征的生态景观格局多样性的同时,并能够减弱不同树种间的生长竞争性<sup>[20]</sup>。

### 1.3.2 环境因子提取

利用 ArcGIS10.6 软件将获取的环境数据统一重采样为 30 m 分辨率,并获得陕北 DEM、气象、土壤及土地利用栅格图。通过该软件的空间分析工具(Spatial Analyst)按照适宜红枣生长的环境因子的阈值范围,对红枣的 10 个适宜性环境因子进行空间化处理。在所有适宜性环境因子提取并栅格可视化后,依次通过“创建随机点”和“多值提取至点”2 个步骤实现它们的点数据的获取,以便后期统计分析使用。

选取极差法分别对数据进行标准化处理,将各个环境因子值域确定为[0-1],具体计算式为:

正相关指标:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

负相关指标:

$$a_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $a_{ij}$ 代表经过标准化处理后第  $i$  个单元的第  $j$  个指标的原始值; $x_{ij}$ 代表第  $i$  个单元的第  $j$  个指标的原始值; $x_{\max}$ 代表第  $i$  个单元的第  $j$  个指标的最大值; $x_{\min}$ 代表第  $i$  个单元的第  $j$  个指标的最小值。

### 1.3.3 适宜性环境因子权重确定

采用层次分析法将适宜性环境因子按顺序分解为不同层次结构,采用 1—9 标度评分标准赋值建立判断矩阵,确定各个指标的权重(表 1)。通过对其结果进行一致性检验(一致性比率≤0.1),证实判断矩阵一致性好,指标权重结果合理。

### 1.3.4 空间叠加分析

基于各环境因子的权重大小,利用 ArcGIS10.6 软件对上述提取的 10 个环境因子进行空间综合分析,最终得出红枣生态适宜性指数( $S$ )并进行等级划分,即优适宜区( $S \geq 90\%$ )、次适宜区( $90\% >$

$S \geq 80\%$ )、一般适宜区( $80\% > S \geq 70\%$ )及非适宜区( $S < 70\%$ )。红枣生态适宜性指数的栅格图可视化后,同样通过“创建随机点”和“多值提取至点”2 个步骤实现数值的获取,用于地理探测和数据分析。

表 1 陕北红枣生态适宜性的影响因子权重

Table 1 Weight of influencing factors of ecological suitability of jujube in Northern Shaanxi

准则层		决策层		
环境因子	权重	影响因子	权重	总权重
地形因子	0.291 3	海拔	0.648 0	0.188 8
		坡度	0.122 2	0.035 6
		坡向	0.229 9	0.067 0
气候因子	0.573 9	年平均气温	0.122 2	0.070 1
		年积温	0.229 9	0.131 9
		年降水量	0.648 0	0.371 9
土壤因子	0.044 5	黄绵土	0.537 1	0.023 9
		黑垆土	0.304 3	0.013 5
		灰钙土	0.158 6	0.007 1
植被因子	0.090 3	温带落叶阔叶林带	1.000 0	0.090 3

### 1.3.5 地理探测分析

地理探测器(GeoDetector)是一种能够探测空间分异性的新型统计学方法<sup>[21]</sup>,主要从以下几方面进行空间探测。

因子探测方法是探测各因子的解释力大小,模型如式(2):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: $q$ 值代表各环境因子对研究区增强型植被指数(EVI)的解释力,值域为[0-1],该值越大,说明该环境因子对EVI的解释力越强; $h=1, 2, \dots, L$ 为影响因子的分层数; $N_h$ 和  $N$ 分别代表各环境因子的层  $h$  和整个研究区的样本数; $\sigma_h$ 和  $\sigma$ 分别代表层  $h$  和整个研究区的EVI值的方差。

生态探测方法是探究任意 2 个环境因子  $x_1$  和  $x_2$  对红枣生态适宜性指数的影响是否有显著差异。2 种因子之间,如果行因子和列因子有显著性差异,则为  $Y$ , 没有为  $N$ 。用  $F$  统计量进行衡量:

$$F = \frac{N_{x_1} (N_{x_2} - 1) \times SSW_{x_1}}{N_{x_2} (N_{x_1} - 1) \times SSW_{x_2}} \quad (3)$$

$$SSW_{x_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2, SSW_{x_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2$$

式中: $N_{x_1}$ 和  $N_{x_2}$ 分别代表环境因子  $x_1$  和  $x_2$  的样本数量; $SSW_{x_1}$ 和  $SSW_{x_2}$ 分别代表由 2 个环境因子形成分层的层内方差之和; $L_1$ 和  $L_2$ 分别代表变量  $x_1$  和  $x_2$  分层数目。

交互作用探测方法用于识别各因子共同作用(增强或减弱)或相互独立作用对红枣生态适宜性的解释力大小。在计算 2 个环境因子交互的  $q$  值后比较  $q(x_1)$ 、

$q(x_2)$  和  $q(x_1 \cap x_2)$  大小。

### 1.3.6 数据处理

采用 ArcGIS 10.6 绘制红枣适宜性区划等级图, 采用地理探测器模型 (Geographical detector model) 和典型相关分析 (CCA) 探析环境因子对红枣生态适宜性指数的影响特征。利用 Origin 2022 绘制主要环境因子和红枣生态适宜性指数之间的相关性, 利用韦恩图 (Venn diagram) 确定主要环境因子对红枣生态适宜性指数的解释率大小。

## 2 结果与分析

### 2.1 陕北红枣生态适宜性区划等级空间格局

图 2 为陕北红枣生态适宜性区划等级的空间格局。由图 2 可知, 红枣最优适宜区和次适宜区面积小, 均分布在陕北南部的富县及邻近区域; 一般适宜区集中分布在陕北中南部沿黄河西岸区域, 以绥德县、清涧县、延川县及延长县为代表。最优适宜区、次适宜区、一般适宜区的面积分别达到 8 548.02、50 732.19、887 126.76  $\text{hm}^2$ 。可以看出, 一般适宜区面积依次是最优适宜区和次适宜区面积的 103.80 倍和 17.50 倍。充分说明, 陕北红枣生长主要表现为一般适宜区, 而有利于红枣生长的最优生态适宜区较少。

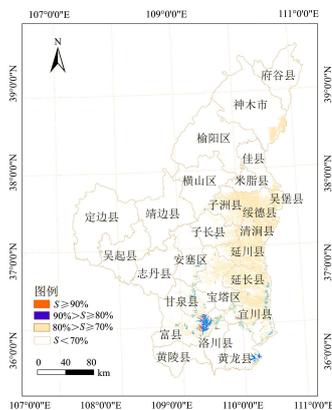


图 2 陕北红枣生态适宜性区划等级的空间格局  
Fig.2 Spatial pattern of zoning levels of ecological suitability of Jujube in Northern Shaanxi

### 2.2 陕北红枣生态适宜性影响因子的地理探测

#### 2.2.1 因子探测分析

通过计算各环境因子的  $q$  值, 提取各环境因子对红枣生态适宜性现状的影响力, 探测结果如表 2 所示。各环境因子对红枣生态适宜性的影响程度排序为: 年积温 > 年平均气温 > 年降水量 > 高程 > 坡度 > 坡向 > 其他 (土壤因子和植被因子)。由此可见, 年积温、年平均气温、年降水量及高程的  $q$  值均大于 0.50, 解释力均大于 45%, 是影响红枣生态适宜性的主要环境因子; 坡度和坡向的  $q$  值在 0.20~0.40 区间, 是红枣生态适宜性的次要影响因子; 土壤类型和植被因子的  $q$  值

均小于 0.10, 对红枣生态适宜性的影响较小。

表 2 各影响因子探测  $q$  值

Table 2  $q$  values of factor detection

因子	ET	SS	SR	MT	AT	PT	FL	HS	MS	GS
$q$ 值	0.51	0.40	0.29	0.91	0.95	0.79	0.03	0.01	0.00	0.00
$p$ 值	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01

注 ET 为高程; SS 为坡度; SR 为坡向; MT 为年平均气温; AT 为年积温 ( $\geq 10^\circ\text{C}$ ); PT 为年降水量; FL 为温带落叶阔叶林带; HS 为黑垆土; MS 为黄绵土; GS 为灰钙土, 下同。

#### 2.2.2 生态探测分析

通过生态探测分析 (表 3) 得出, 气候因子 (年降水量、年积温、年平均气温) 与地形因子 (高程、坡度、坡向) 对红枣生态适宜性变化的影响存在显著性差异, 与土壤类别 (黄绵土、黑垆土、灰钙土)、植被类型 (温带落叶阔叶林带) 对红枣适宜性的影响无显著性差异。这充分证实了因子探测结果的正确性, 即可以表明, 在影响陕北红枣的主要生态环境因子方面, 气候因子 (年降水量、年积温、年平均气温) 对陕北红枣生态适宜性的影响最为突出, 且其影响程度明显高于地形因子中的坡度和坡向。此外, 土壤类别 (黄绵土、黑垆土、灰钙土) 与植被类型 (温带落叶阔叶林带) 对红枣生态适宜性的影响也无显著性差异。结合因子分析结果表明, 土壤类别和植被类型对红枣生态适宜性影响小且影响程度相近, 因此, 在后期的红枣区域规模培育过程中不作为重点关注因素, 而着重科学规划气候因子和地形因子中的高程。

表 3 各环境因子影响红枣生态适宜性的显著性差异

Table 3 Significant differences of environmental factors influencing ecological suitability of Jujube

因子	ET	SS	SR	MT	AT	PT	FL	HS	MS	GS
ET										
SS	N									
SR	N	N								
MT	Y	Y	Y							
AT	Y	Y	Y	Y						
PT	Y	Y	Y	N	N					
FL	N	N	N	N	N	N				
HS	N	N	N	N	N	N	N			
MS	N	N	N	N	N	N	N	N		
GS	N	N	N	N	N	N	N	N	N	

#### 2.2.3 交互探测分析

本文利用交互作用探测器对各环境因子进行探测, 获取各因子之间的相互关系 (表 4)。可以发现, 各环境因子对红枣生态适宜性的影响存在交互作用, 不存在相互独立起作用的因子 (表 5)。

由表 4 可发现, 影响红枣生态适宜性的主要和次要环境因子, 即年降水量、高程、年平均气温、年积温、坡度及坡向之间表现出极显著的交互作用, 而与其他环境因子间交互作用不显著。由表 5 可知, 绝大部分的环境因子交互  $q$  值大于其单因子的  $q$  值, 因子互动效应呈相互增强和非线性增强关系。其中, 年降

水量、年平均气温、高程、坡度、坡向与土壤类型的交互作用，均大于其因子间的简单加和作用，呈现出对红枣生态适宜性的非线性增强的影响效应。而与其他环境因子的交互作用均小于因子加和作用，表现出相互增强的交互效应。此外，年积温、土壤类型、植被类型与其他环境因子的交互作用均小于其因子

加和作用，说明它们对陕北红枣生态适宜性的影响形式表现为相互增强的交互效应。总之，各环境因子对红枣生态适宜性的影响具有交互效应，并非独立存在的，也不是简单的叠加，而是呈相互增强或非线性增强效应。

表 4 红枣生态适宜性影响因子的交互作用

Table 4 Interaction of factors influencing ecological suitability of Jujube

因子	ET	SS	SR	MT	AT	PT	FL	HS	MS	GS
ET	0.51									
SS	0.73	0.40								
SR	0.92	0.87	0.29							
MT	1.00	1.00	0.96	0.91						
AT	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95					
PT	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.79				
FL	0.52	0.42	0.33	0.91	0.95	0.80	0.03			
HS	0.65	0.47	0.42	0.93	0.95	0.91	0.03	0.01		
MS	0.51	0.40	0.30	0.91	0.95	0.81	0.03	0.02	0.00	
GS	0.53	0.42	0.30	0.92	0.95	0.80	0.03	0.02	0.01	0.00

表 5 影响红枣生态适宜性的环境因子的交互效应

Table 5 Interaction effect of environmental factors influencing ecological suitability of Jujube

结果	解释	结果	解释	结果	解释
$ET \cap SS < ET + SS$	相互增强	$SS \cap MS < SS + MS$	相互增强	$AT \cap PT < AT + PT$	相互增强
$ET \cap SR > ET + SR$	非线性增强	$SS \cap GS > SS + GS$	非线性增强	$AT \cap FL < AT + FL$	相互增强
$ET \cap MT < ET + MT$	相互增强	$SR \cap MT < SR + MT$	相互增强	$AT \cap HS < AT + HS$	相互增强
$ET \cap AT < ET + AT$	相互增强	$SR \cap AT < SR + AT$	相互增强	$AT \cap MS < AT + MS$	相互增强
$ET \cap PT < ET + PT$	相互增强	$SR \cap PT < SR + PT$	相互增强	$AT \cap GS < AT + GS$	相互增强
$ET \cap FL < ET + FL$	相互增强	$SR \cap FL > SR + FL$	非线性增强	$PT \cap FL < PT + FL$	相互增强
$ET \cap HS > ET + HS$	非线性增强	$SR \cap HS > SR + HS$	非线性增强	$PT \cap HS > PT + HS$	非线性增强
$ET \cap MS < ET + MS$	相互增强	$SR \cap MS > SR + MS$	非线性增强	$PT \cap MS > PT + MS$	非线性增强
$ET \cap GS > ET + GS$	非线性增强	$SR \cap GS > SR + GS$	非线性增强	$PT \cap GS > PT + GS$	非线性增强
$SS \cap SR > SS + SR$	非线性增强	$MT \cap AT < MT + AT$	相互增强	$FL \cap HS < FL + HS$	相互增强
$SS \cap MT < SS + MT$	相互增强	$MT \cap PT < MT + PT$	相互增强	$FL \cap MS < FL + MS$	相互增强
$SS \cap AT < SS + AT$	相互增强	$MT \cap FL < MT + FL$	相互增强	$FL \cap GS < FL + GS$	相互增强
$SS \cap PT < SS + PT$	相互增强	$MT \cap HS > MT + HS$	非线性增强	$HS \cap MS < HS + MS$	相互增强
$SS \cap FL < SS + FL$	相互增强	$MT \cap MS > MT + MS$	非线性增强	$HS \cap GS < HS + GS$	相互增强
$SS \cap HS > SS + HS$	非线性增强	$MT \cap GS > MT + GS$	非线性增强	$MS \cap GS < MS + GS$	相互增强

### 2.3 影响陕北红枣生态适宜性的因子关系

本文在确定陕北地区红枣生态适宜性区划特征的基础上，采用因子探测明晰了各环境因子对红枣生态适宜性指数的影响差异特征。其中，年积温、年平均气温、年降水量及高程的影响解释率均大于 45%，是调控红枣生态适宜性的主要环境因子。基于典型相关分析得出，年降水量、高程和年积温极显著影响红枣生态适宜性指数，而其他环境因子的影响程度较小（图 3）。这充分证实了因子探测结果的正确性，确定了降水量和温度对红枣种植的重要性。

通过相关性分析得出，年降水量、高程、年积温及红枣生态适宜性指数存在极显著的相关性。其中，年降水量和年积温与红枣生态适宜性指数呈极显著的非线性负相关关系，而高程和生态适宜性指标呈现极显著的非线性正相关关系（图 4）。说明主要环境因子在不同数值范围内与红枣的生态适宜性指数表现出不同的协同/权衡的动态变化关系。其中，在

0~340 mm 和大于 475 mm 的年降水量阈值内，生态适宜性指数会随年降水量的增加而增大，表现出正向协同关系，在 340~475 mm 阈值内，生态适宜性分布指数会随年降水量的增加而减小，权衡关系显著；年积温在 0~2 600 °C 和大于 3 750 °C 阈值内，生态适宜性指数随着年积温的增加而增大，呈正向协同关系，2 600~3 750 °C 阈值内，生态适宜性指数随着年积温的增加而减小，权衡关系亦显著；高程在 0~900 m 和大于 1 300 m 阈值内，适宜性分布指数随着高程的增加而减小，二者为权衡关系，900~1 300 m 阈值内，生态适宜性指数随着高程的增加而增大，因此表现为明显的正向协同关系。整体上看，红枣生态适宜性与年降水量和年积温均表现为显著的权衡关系，而与高程呈显著的正向协同关系。此外，可以看出，利于红枣生态适宜性分布和利于红枣生长的主要环境因子（年降水量、高程及年积温）的适宜阈值范围不同。这主要是由于生态适宜性指数是由文中选定的 10 个

环境因子（地形、气候、土壤及植被因子）综合叠加得到的表征红枣生态适宜性分布环境状况和面积的指数，更具全面性和复杂性；同时，生态适宜性指数与红枣生长是表征陕北红枣种植培育状况的 2 类不同的影响途径。因此，二者对主要环境因子的响应节律表现出一定的关联性和差异性。

进一步利用韦恩图发现，年降水量、高程及年积温对红枣生态适宜性指数具有明显的单一和交互解释率。三者单一的解释率分别达 22%、15%、11%，且年降水量与高程，年降水量与年积温，及高程与年积温对红枣生态适宜性指数的交互解释率依次为 11%、9%、7%。三者总共能够解释红枣生态适宜性

指数的 78%（图 5），更加验证了它们作为主要环境因子对红枣生态适宜性的作用。

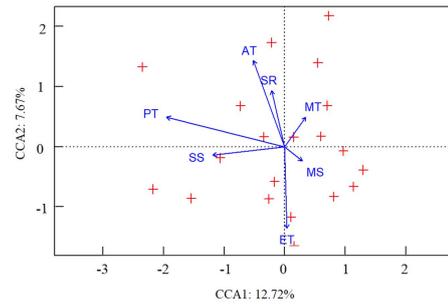


图 3 环境因子对红枣生态适宜性的影响

Fig.3 Influence of environmental factors on ecological suitability of Jujube

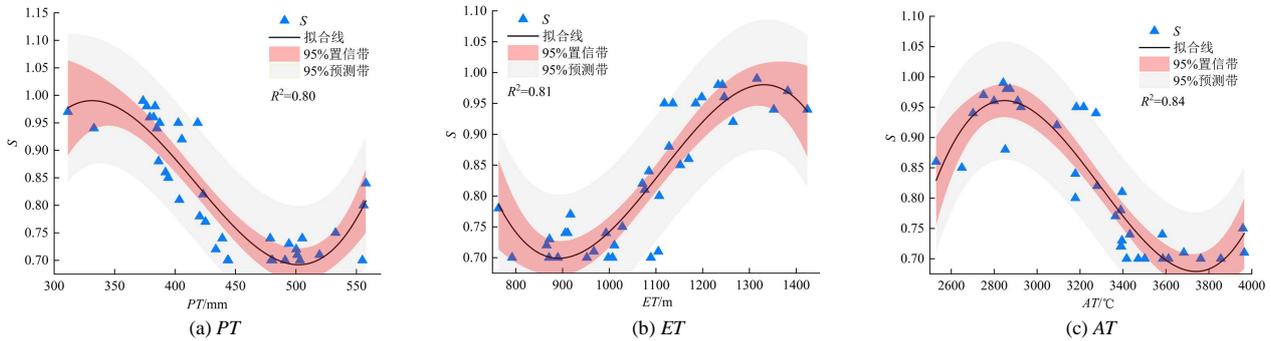


图 4 年降水量、年积温及高程与红枣生态适宜性指数的关系

Fig.4 Relationships between annual precipitation, annual accumulated temperature, elevation, and ecological suitability index of Jujube

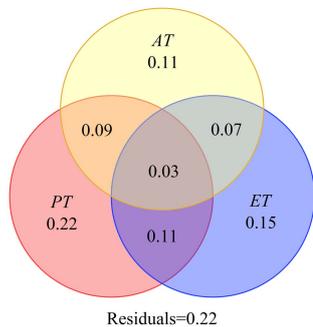


图 5 年降水量、年积温和高程对红枣生态适宜性指数的解释率

Fig.5 Interpretation rate of annual precipitation, annual accumulated temperature and elevation to ecological suitability index of Jujube

### 3 讨论

#### 3.1 陕北红枣生态适宜性区划特征

研究区红枣生态适宜性区划等级在空间上从东南部到西北部由高到低递减。本研究表明，陕北红枣最优适宜区和次适宜区为陕北南部区域，主要以富县为代表；富县邻边区域分布较少，或只有小植株零星分布。二者分布面积分别为 8 548.02、50 732.19  $\text{hm}^2$ 。一般适宜区集中分布在陕北中南部沿黄河西岸区域，主要以绥德县、清涧县、延川县及延长县为代表，并向四周逐渐减少。一般适宜区面积显著大于最优适宜

区和次适宜区，高达 887 126.76  $\text{hm}^2$ ，是陕北地区红枣适宜性区划的代表性特征。而陕北地区的北部（横山区、榆阳区、神木市、府谷县）和西部区县（定边县、吴起县、志丹县、靖边县）是红枣非适宜区。

以往红枣种植区划指标的选择大多仅考虑了气象因素，导致区划结果粗略<sup>[22-23]</sup>。在分析红枣与气象要素关系的基础上，综合地形和土壤环境要素，以及植被的影响，实现了陕北地区红枣种植生态适宜性的精细化区划，有利于区域红枣合理区划和集约化管理。通过实地调查验证，确定该研究的评价结果基本符合该地区红枣种植的实际情况。优适宜区和次适宜区，枣林分布分散，种植面积小，需要发挥地理优势，大力培育，增加规模；一般适宜区枣林种植面积大，但是红枣品质仍需要着重提升。

#### 3.2 陕北红枣生态适宜性的驱动机理

2000 年以来，陕北地区生态系统格局变化显著。主要表现为林木、草地的面积占比分别增加 19%、7%。生态系统格局已由退耕还林（还草）生态工程实施前的耕地主导型转化为林木主导型<sup>[11]</sup>。陕北枣树作为该区域优势特色经济林木树种之一，在区域生态系统调控方面发挥着重要的现实意义。本文通过因子探测分析和典型相关分析明晰了年积温、年平均气温、年降水量及高程的影响解释率均大于 45%，对陕北红枣生态适宜性指数具有极显著的影响，是调控红枣生态适

宜性的主要环境因子。陕北地区的降水量和温度在生态系统格局变化过程中波动显著，相互制约，主导着区域气象节律。1960—2017年，陕北地区年际地温、气温显著上升 ( $P < 0.01$ )，同时气温通过地-气的热量交换调控地温变化<sup>[24]</sup>。这很大程度上因为退耕还林（还草）生态工程的实施。该地区造林引起微弱的增温 ( $0.03 \pm 0.22$ ) °C 和地表温度季节性变化。春季及夏季的降温程度较大，冬季降温作用微弱。春季白天地表降温最强，其次是夏季，秋冬季节降温较弱<sup>[25]</sup>。地表温度变化与降水梯度密切相关。年降水量、年平均气温增加趋势的气候倾向率分别达到 14.73 mm/(10 a)、0.25 °C/(10 a) ( $P > 0.05$ )<sup>[2]</sup>。季节上，陕北地区夏季和秋季气象干旱频率高，春季和冬季气象干旱频率相对较低<sup>[26]</sup>。夏季极端降水约占夏季总降水量的 54%，且极端降水占比在将近 70% 的站点表现出增长趋势<sup>[27]</sup>。由此可见，陕北地区虽然具有植被和季节性降水量增加所导致的湿润化气候特征的发展趋势，且有利于地表林木生长和恢复。但是由于气温仍然处于年际持续升高趋势，所以该区域的气候节律整体上仍然处于暖干化状态<sup>[5]</sup>。因此，在陕北半干旱地区，主要以旱生植被和树种为主。红枣耐旱性较强，在热量充足的条件下，降水对其生长的影响显得更为重要。降水可以缓解水分胁迫，使得生长季末期延迟<sup>[28]</sup>，且降水和温度对枣树生长的影响占主导地位，这与刘静等<sup>[29]</sup>和吉珍霞等<sup>[30]</sup>的观点一致。故气象的年际和季节性变化更替，对枣林的生长产生定期、不定量的影响。

温度和降水的变化能够显著解释林木覆盖的变化。其中，温度与陕北地区林木覆盖度之间呈极显著正相关的区域占 84%，极显著负相关区域占 14%；降水与林木覆盖度之间呈极显著正相关的区域占 54%，极显著负相关区域占 37%<sup>[31]</sup>。这一点与本研究结果相似，即年降水量和年积温与生态适宜性指数极显著负相关（权衡关系），而高程和生态适宜性指数极显著正相关（正向协同关系）。此外，陕北地区林木对气候变化的响应存在明显的空间差异性，不同气候因子对不同林木覆盖类型的影响程度不同<sup>[32-33]</sup>。这主要是因为陕北地区气候特征本身具有显著的区域差异性。陕北北部和中部黄河沿岸的府谷县、神木县、吴堡县及绥德县等区域，近年来降水量增多，尤其在红枣成熟采摘期的集中降水现象的增加；加之黄河流水域的区域微气候特征的影响，使得红枣出现裂果和枣果含水量增加的现象，直接减弱了红枣的甜度和芳香风味<sup>[20]</sup>。因此，红枣的生态适宜性指数呈从陕北南部和东部区县向西部和北部区县递减的空间布局差异性。结合各环境因子，进行地理探测中的生态探测

分析，进一步得出，年降水量、年积温、年平均气温与高程、坡度、坡向对红枣生态适宜性的影响存在显著性差异，与土壤类别（黄绵土、黑垆土、灰钙土）、植被类型对红枣生态适宜性的影响无显著性差异。这与梁轶等<sup>[20]</sup>的研究结果一致，即基于陕北红枣的喜光和耐旱的气候特性，坡向和坡度也会显著影响红枣的产量和品质，所以需要坡向类型（阳坡、阴坡）进行优化，对坡度适宜性进行人工修定。由此可知，在栽培种植过程中，需要稳定造林面积，同时根据环境因子对红枣的影响差异性和相关性，协同稳定调控区域气象变化幅度，以期实现枣林的平稳生长。

进一步交互探测分析发现，年降水量、年平均气温、高程、坡度、坡向与土壤类型呈对红枣适宜性的非线性增强的影响效应。而与其他环境因子呈相互增强的交互效应。这主要是因为地形、植被、气候及土壤因子之间的关系本身具有时空复杂性和关联性<sup>[5-6,8,10]</sup>。地形通过影响植被和气候分布格局，来影响土壤类型，进而综合性调控红枣生态适宜性生长和分布区域及态势。此外，年降水量、高程和年积温对红枣适宜性具有明显的单一和交互解释率。三者能够整体性解释红枣生态适宜性指数的 78%，足以证实它们对红枣生态适宜性的显著作用。因此，各环境因子交互作用对红生态枣适宜性的影响是相互增强或非线性增强效应，并非独立存在和简单叠加。基于环境因子和林木、植被的交互关系，生态环境的持续规模化绿化，也会促进环境因子的良性循环。比如，2000年以来，植被恢复对陕北地区局地降水量的增加显现了积极效应。观测数据显示，2000—2015年该区域降水量以 7.84 mm/a<sup>2</sup> 的速率显著增加，大规模植被恢复对研究区降水量增加速率的贡献高达 37.40%<sup>[34]</sup>。

陕北地区退耕还林还草工程实施效果显著，工程实施后共有 297 066.15 hm<sup>2</sup> 耕地转化为林地和草地，林草覆盖率由 57.30% 增长至 60.50%<sup>[35]</sup>。该区域生态系统格局已从耕地型转化为林木和草地型<sup>[11,36]</sup>。充分说明，2000年以来，人为对植被、林地覆盖的影响也向正作用方向发展。张翀等<sup>[37]</sup>利用地理探测器分析得出，土地利用变化就是影响林地、植被覆盖变化的重要人为主导因子。据统计，1997—2018年，陕北地区未利用地面积占比减少 5%<sup>[11]</sup>。在后续的土地利用规划中，可以进一步调整区域土地利用模式和结构，在适宜区开发未利用地，增加红枣的规模栽培，促进土地利用结构的生态转变进程。这对于区域生态环境的持续改善具有现实意义。

综上所述认为，对于陕北优适宜区和次适宜区，由于实地考察证实，该 2 类区域红枣种植密度和面积

小, 需要提升生产培育面积和规模, 引领优质红枣发展形成优势突出和特色鲜明的红枣产业带; 一般适宜区域, 应以培肥地力为重点, 通过提升耕地肥力和质量促进红枣生长。非适宜区, 应及时调整农业产业结构, 改种其他作物或退耕还林; 亦或根据影响因子作用大小, 针对性地进行温室红枣种植培育。通过主要影响因子的人工合理调控, 并配合水肥等农艺措施, 达到陕北红枣生长和品质的改善。

## 4 结论

1) 陕北红枣生态适宜性区划等级从东南部到西北部由高到低递减。最优适宜区和次适宜区集中分布在富县, 分布面积达 8 548.02 hm<sup>2</sup>; 一般适宜区分布在绥德县、清涧县及延川县等陕北沿黄河西岸区域, 面积显著高于最优适宜区和次适宜区。

2) 气候因子(年降水量、年积温、年平均气温)和地形因子(高程、坡度、坡向)对红枣生态适宜性影响较大, 且存在显著性差异。其中, 年降水量、高程和年积温( $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )为主要驱动因子, 三者对红枣生态适宜性指数的解释率分别达到 22%、15%、11%, 且总和解释率高达 78%。

3) 各环境因子对红枣生态适宜性的影响并非独立存在的, 也不是简单的叠加, 而是呈相互增强或非线性增强的交互作用效应。其中, 年降水量和年积温与红枣生态适宜性指数极显著负相关(权衡关系), 高程与生态适宜性指数极显著正相关(正向协同关系)。

### 参考文献:

[1] 韩丹. 陕西红枣生产分析与对策研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.  
HAN Dan. Development of jujube production in Shaanxi province: analysis and strategies[D]. Yangling: Northwest A & F university, 2018.

[2] 张维敏, 王景红, 刘璐, 等. 陕北黄土高原红枣种植区水热资源变化及未来趋势预测[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 73-79.  
ZHANG Weimin, WANG Jinghong, LIU Lu, et al. Change and trend prediction of water and heat resource of jujube planting zones in the hilly area of the Loess Plateau in the Northern Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 73-79.

[3] 暴迎春, 李爱琳. 佳县红枣产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技, 2017(12): 94-95.  
BAO Yingchun, LI Ailin. Status and countermeasures of jujube industry development in Jia County[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(12): 94-95.

[4] 宗黎黎. 陕北地区红枣产业发展现状、问题及对策研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.  
ZONG Lili. Development status, problems and countermeasures of jujube industry in Northern Shaanxi province[D]. Yangling: Northwest A & F university, 2017.

[5] 王德丽, 殷淑燕, 王海燕, 等. 近 50 年陕北地区的气候变化[J]. 干旱区研究, 2011(2): 77-82.  
WANG Deli, YIN Shuyan, WANG Haiyan, et al. Analysis on climate change in north Shaanxi province[J]. Arid Zone Research, 2011(2): 77-82.

[6] 温国涛, 白建军, 孙嵩松. 基于时间序列遥感数据的陕西省 2004—2014 年干旱变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 221-229.  
WEN Guotao, BAI Jianjun, SUN Songsong. Variation of drought in Shaanxi from 2004 to 2014 based on remotely sensed data[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 221-229.

[7] WANG Huanhuan, YUE Chao, MAO Qinqin, et al. Vegetation and species impacts on soil organic carbon sequestration following ecological restoration over the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2020, 371: 114-389.

[8] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 882-888.  
BAI Jianjun, BAI Jiangtao, WANG Lei. Spatio-temporal change of vegetation NDVI and its relations with regional climate in Northern Shaanxi province in 2000—2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(7): 882-888.

[9] 尚雪, 何钊全, 张铜会. 增强型植被指数时空变化特征及其驱动机理[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 478-485.  
SHANG Xue, HE Zhaoquan, ZHANG Tonghui. Spatial and temporal variations and the driving mechanism of the enhanced vegetation index[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(5): 478-485.

[10] 高毅平, 汤国安, 周毅, 等. 陕北黄土地貌正负地形坡度组合研究[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 135-140.  
GAO Yiping, TANG Guoan, ZHOU Yi, et al. Slope spectrum of positive and negative terrains of Loess Plateau in Northern Shaanxi province[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2009, 32(2): 135-140.

[11] 卓静, 朱延年, 何慧娟, 等. 生态恢复工程对陕北地区生态系统格局的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 6 627-8 637.  
ZHUO Jing, ZHU Yannian, HE Huijuan, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 6 627-8 637.

[12] 何辉, 王锦, 王楠, 等. 和顺湿地生态适宜性评价[J]. 林业调查规划, 2015, 40(2): 54-58.  
HE Hui, WANG Jin, WANG Nan, et al. Ecological suitability assessment of Heshun wetland[J]. Forest Inventory and Planning, 2015, 40(2): 54-58.

[13] 王珊, 廖桂堂, 邓勇刚, 等. GIS 支持下的玉米种植区土地生态适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(11): 174-182.  
WANG Shan, LIAO Guitang, DENG Yonggang, et al. Evaluation of land ecological suitability in maize planting areas supported by GIS[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(11): 174-182.

[14] 贺征兵, 徐瑶, 李雁杰. 基于 GIS 的黄龙核桃生态气候适宜性评价研究[J]. 北方园艺, 2020(15): 89-95.  
HE Zhengbing, XU Yao, LI Yanjie. Huanglong walnut suitability evaluation based on GIS[J]. Northern Horticulture, 2020(15): 89-95.

[15] 莫建国, 池再香, 汤蕊, 等. 贵州山区红心猕猴桃种植气候区划[J]. 中国农业气象, 2016, 37(1): 36-42.  
MO Jianguo, CHI Zaixiang, TANG Bi, et al. Climate suitability for red cartridge kiwifruit planting in Guizhou mountainous area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(1): 36-42.

[16] 孙园园, 徐富贤, 孙永健, 等. 四川稻作区优质稻生产气候生态条件适宜性评价及空间分布[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 506-513.  
SUN Yuanyuan, XU Fuxian, SUN Yongjian, et al. Suitability evaluation of eco-climatic conditions for high quality rice production in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 506-513.

[17] 王迅, 熊博, 李启权, 等. 四川省晚熟柑橘生态气候适宜性区划研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(13): 94-101.  
WANG Xun, XIONG Bo, LI Qiquan, et al. Analyzing and zoning of eco-climate suitability of late-maturing citrus in Sichuan[J]. Chinese

- Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(13): 94-101.
- [18] 李新岗. 陕北枣区的地位研究[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(1): 80-83.  
LI Xingang. Research on Status of Jujube Region in North Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(1): 80-83.
- [19] 曲永驭. 节水灌溉对陕北半干旱山地红枣产量及品质的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.  
QU Yongyu. Effects of water-saving irrigation on yield and quality of red jujube in semi-arid mountainous areas of Northern Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [20] 梁轶, 王景红, 屈振江, 等. 黄土高原丘陵区中阳木枣精细化气候适宜性区划[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 132-138.  
LIANG Yi, WANG Jinghong, QU Zhenjiang, et al. Climate suitability regionalization for zhongyang jujube in the hilly area of Loess Plateau[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(10): 132-138.
- [21] WANG Jinfeng, ZHANG Tonglin, FU Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
- [22] 郭兆夏, 郭新, 屈振江, 等. GIS 支持下的陕北制干红枣气候区划[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 400-404.  
GUO Zhaoxia, GUO Xin, QU Zhenjiang, et al. GIS Supported climate division of dried red jujube in Northern Shaanxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6): 400-404.
- [23] 段晓凤, 戴小笠, 张玉兰, 等. 中宁县影响红枣产量的主要农业气象灾害分析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 136-141.  
DUAN Xiaofeng, DAI Xiaoli, ZHANG Yulan, et al. The analysis of main agro-meteorological disasters affecting on the productivity of red jujube at Zhongning County[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 136-141.
- [24] 安彬, 肖薇薇, 张淑兰, 等. 1960—2017 年黄土高原地表温度时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 778-785.  
AN Bin, XIAO Weiwei, ZHANG Shulan, et al. Spatial and temporal characteristics of surface temperature in the Loess Plateau during 1961—2017[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 778-785.
- [25] 王欢欢, 赵杰, 岳超, 等. 黄土高原植被恢复对地表的冷却作用及变化规律[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 214-220.  
WANG Huanhuan, ZHAO Jie, YUE Chao, et al. Cooling effect induced by afforestation on the Loess Plateau and its change law[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 214-220.
- [26] 李明, 葛晨昊, 邓宇莹, 等. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2 105-2 114.  
LI Ming, GE Chenhao, DENG Yuying, et al. Meteorological and agricultural drought characteristics and their relationship across the Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2 105-2 114.
- [27] 卢珊, 胡泽勇, 付春伟, 等. 黄土高原夏季极端降水及其成因分析[J]. 高原气象, 2021(5): 1-14.  
LU Shan, HU Zeyong, FU Chunwei, et al. Characteristics and possible causes for extreme precipitation in summer over the Loess Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2021(5): 1-14.
- [28] ZHANG Wei, WANG Lunche, XIANG Feifei, et al. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River basin, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105 892.
- [29] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 678-691.  
LIU Jing, WEN Zhongming, GANG Chengcheng. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 678-691.
- [30] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6 600-6 612.  
JI Zhenxia, PEI Tingting, CHEN Ying, et al. Vegetation phenology change and its response to seasonal climate changes on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6 600-6 612.
- [31] 孙倩倩. 黄土高原植被生长对气候响应的延迟规律与时间多尺度特征分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.  
SUN Qianqian. Analysis on the delay law of vegetation growth response to climate and time multi-scale characteristics in the Loess Plateau[D]. Huainan: Anhui university of science and technology, 2020.
- [32] 刘璐, 王景红, 张维敏, 等. 1971—2010 年陕北红枣种植区气候变化特征及其对物候期的影响[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 841-846.  
LIU Lu, WANG Jinghong, ZHANG Weimin, et al. Climatic change characteristics and its impact on phenophase of jujube in Northern Shaanxi during 1971—2010[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(5): 841-846.
- [33] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3 408-3 419.  
DUAN Yifang, REN Zhiyuan, SUN Yijie. Time-lay effects of climate on water use efficiency in the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3 408-3 419.
- [34] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J]. 中国科学(地球科学), 2021, 51(7): 1 080-1 091.  
ZHANG Baoqing, TIAN Lei, ZHAO Xining, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the loess plateau in China[J]. Science China (Earth Sciences), 2021, 51(7): 1 080-1 091.
- [35] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6 597-6 612.  
DENG Yuanjie, HOU Mengyang, XIE Yifan, et al. Impact of the Grain for Green Project on the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6 597-6 612.
- [36] 孙倩倩, 刘超, 郑蓓蓓. 基于 ICEEMDAN 方法的黄土高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2 129-2 137.  
SUN Qianqian, LIU Chao, ZHENG Beijun. Vegetation cover change and its response to climate change on the Loess Plateau, Northwest China based on ICEEMDAN method[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6): 2 129-2 137.
- [37] 张翀, 白子怡, 李学梅, 等. 2001—2018 年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 188-196.  
ZHANG Chong, BAI Ziyi, LI Xuemei, et al. Spatio-temporal evolution and attribution analysis of human effects of vegetation cover on the Loess Plateau from 2001 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 188-196.

## Suitability Regionalization of Jujube Production in Northern Shaanxi Province Calculated Using GIS Coupled with Geographical Detector

HE Zhaoquan<sup>1,2</sup>, SHANG Xue<sup>2</sup>, ZHANG Tonghui<sup>3</sup>, YUN Jianying<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Chinese Jujube, Yan'an University, Yan'an 716000, China; 2. School of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an 716000, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** 【Objective】 Jujube is one of the cash crops in northern Shaanxi. Understanding the suitable areas and

conditions for its growth is important to its sustainable production but is currently lacking. This paper is to fill this knowledge gap. **【Method】** The analysis is based on GIS; the suitability for jujube growth in different areas is analyzed using the geographical detector model. **【Result】** ①The suitability for jujube growth decreases progressively from the east and south to the northwest of the region, with the optimal area and sub-optimal area concentrated in Fu county. Suitable areas with large jujube planting are mainly in the districts and counties along the western region of the Yellow River. ②Climatic and topographic factors combine to greatly influence the suitability of jujube, and their effects are nonlinearly confounded. ③Annual precipitation, elevation and annual accumulative temperature ( $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) are the main factors controlling suitability for jujube growth, and the suitability index is negatively correlated with annual precipitation and annual accumulated temperature, and positively with elevation. ④Annual precipitation, elevation and annual accumulated temperature explain 22%, 15% and 11% of the suitability index, respectively, and the comprehensive interpretation rate reaches 78%. **【Conclusion】** The suitability for jujube growth in northern Shaanxi province decreases from the southeast to the northwest; developing jujube industry or forest ecosystem in this region should consider the jointed effects of annual precipitation, elevation and annual accumulated temperature.

**Key words:** GIS; ecological suitability; geographical detector model; driving mechanism; Jujube of Northern Shaanxi

责任编辑: 白芳芳

(上接第 96 页)

## Spatiotemporal Variation in Soil Health in Slope Farmlands in Hunan Province: Taking Fenghuang County as an Example

DONG Manhui, XIA Weisheng<sup>\*</sup>, LI Li, ZHOU Hao

(College of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha 410000, China)

**Abstract:** **【Objective】** Soil health is a term increasingly used to quantify soil productivity and sustainability. It is affected by many abiotic and biotic factors and varies spatiotemporally. The purpose of this paper is to investigate the health of soils in slope farmlands in Hunan Province. **【Method】** The study is based on second and third national land survey data in Fenghuang county, conducted in 2010 and 2020 respectively. Spatiotemporal variation in soil health and its determinants are calculated using the analytic hierarchy process (AHP), membership function model, comprehensive index model and local autocorrelation model. **【Result】** ①Soil health in Fenghuang county had improved from 2010 to 2020, with the quality of most soils in medium range. ②Temporal variation in soil health across the county was mainly induced by change in farmland management and nutrient application, while spatial change was mainly caused by construction of high-standard farmlands and sloped farmlands. ③The spatial autocorrelation of soil health, enhanced inter-regional mobility of production factors, and reduced inter-regional difference were responsible for the change in the High-High and Low-Low distribution patterns of soil health. ④Considering crop production security, sustainable economy and ecology, soil health in the county can be divided into four management zones: priority protection zone, suitable improvement zone, potential zone and comprehensive regulation zone. **【Conclusion】** The health of farmland soils in Fenghuang county had increased by 0.08 grade from 2010 to 2020. Implementing the slope cultivated-land management and other engineering measures had a positive impact on improving soil health. Soil quality maintenance and sloping land improvement should consider the special conditions in each of the four management zones.

**Key words:** slope farmland area; cultivated land quality; spatio-temporal variance; Fenghuang County

责任编辑: 白芳芳