

DOI: 10.20103/j.stxb.202404180865

徐晓铮, 张会兰, 安妮, 谷方正. 多模型耦合与 GIS 支持下的西南高山峡谷区经果林措施适宜性评价. 生态学报, 2025, 45(9): 4573-4589.

Xu X Z, Zhang H L, An N, Gu F Z. Suitability evaluation of economic fruit forest measures in Yongsheng County, Southwest Alpine Canyon Area based on multi-model coupling and GIS. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4573-4589.

多模型耦合与 GIS 支持下的西南高山峡谷区经果林措施适宜性评价

徐晓铮¹, 张会兰^{1,2,*}, 安 妮¹, 谷方正¹

1 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘要: 针对水土流失综合治理过程中出现的负向效应情况, 评价水土保持措施是选择适宜生态治理策略的重要环节。以西南高山峡谷区永胜县为例, 以 GIS 为支持, 发展一种基于证据权模型、Logistic 回归模型和证据权-Logistic 回归耦合模型的多模型评价模式, 评估现有经果林措施的立地适宜性和社会发展可行性。结果表明: (1) 通过绘制经果林措施点频数分布雷达图, 筛选出 12 个在不同分级区间内呈现显著波动趋势的评价指标。(2) 采用皮尔逊相关性分析、A-C 测试和方差膨胀因子(VIF)、容忍度(TOL)方法, 验证了 12 个评价指标的独立性。通过指标结果拟合, 坡度和土地利用类型指标的权重较大。(3) 采用 Sridevi Jadi 经验概率法、10 折交叉验证法和 ROC 曲线法检验模型精度, 三种模型均能评价经果林措施的适宜性。其中证据权-Logistic 回归耦合模型的结果优于两个单一模型。根据重要性分析, 坡度指标对结果起主导作用($RD=1.39$)。(4) 永胜县经果林措施整体呈现良好态势, 表现出较为明显的高值与低值交错的空间分布格局, 适宜性等级与措施占比呈逐级递增趋势。在不适宜-适宜区间的适宜性等级占比变化中, 证据权-Logistic 回归耦合模型的增幅达到 17.83%, 显示出更为优异的分区效果。本研究为西南高山峡谷区县域尺度的水土保持措施评估提供了参考, 对水土流失治理和生态恢复建设具有指导意义。

关键词: 西南高山峡谷区; 经果林措施; 多模型评价模式; 证据权-Logistic 回归耦合模型; 适宜性评价

Suitability evaluation of economic fruit forest measures in Yongsheng County, Southwest Alpine Canyon Area based on multi-model coupling and GIS

XU Xiaozheng¹, ZHANG Huilan^{1,2,*}, AN Ni¹, GU Fangzheng¹

1 Chongqing Jinyun (Three Gorges Reservoir area) Forest Ecosystem Research Station, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Jianshui Desert Ecosystem Research Station, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Considering the negative effects of current integrated soil erosion control, assessing soil and water conservation strategies is essential for choosing suitable and effective ecological management measures. Using Yongsheng County, located in the Southwest Alpine Canyon Area as a case study, supported by GIS, a multi-model evaluation mode was developed. This model integrated the weight of evidence model, Logistic regression model and evidence-Logistic regression coupling model to identify, evaluate the existing the economic fruit forest measures and in terms of site suitability and feasibility of social development. The findings of the study are as follows: (1) Through the radar chart of frequency distribution of economic fruit forest measures, 12 evaluation indicators exhibiting a significant fluctuating trend across different classification intervals were identified. (2) Pearson's correlation analysis, A-C test, variance inflation factor (VIF) and

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF1302905, 2022YFF1302900)

收稿日期: 2024-04-18; 网络出版日期: 2025-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghl@bjfu.edu.cn

tolerance (TOL), the independence of 12 evaluation indicators has been verified. Through the fitting of indicators coefficient results, the weight values of slope and land use types indicators are larger. (3) The Sridevi Jadi empirical probability method, ten-fold cross-validation and ROC curve approach were applied to assess the model's accuracy, demonstrating that all three models accurately represent the suitability of economic forestry practices. Among them, the result of the evidence-Logistic regression coupling model shows better evaluation ability than the two single models. According to the importance analysis, the slope indicator plays a leading role ($RD=1.39$). (4) The economic fruit forest measures implemented in Yongsheng County shows a good trend as a whole, the spatial distribution pattern is high in the southwest and low in the northeast, and the suitability is characterized by staggered distribution of high value and low value, the proportion of the economic fruit forest measures and the suitability grade are increasing step by step. The variation of the proportion of suitability grade in the unsuitable—suitable range, evidence-Logistic regression coupling model with a dramatic increase of 17.83% which shows superior partitioning performance. This study provides a reference for the evaluation of soil and water conservation measures at the county scale in the Southwest Alpine Canyon Area, and has guiding significance for the control of soil erosion and the construction of ecological restoration.

Key Words: Southwest Alpine Canyon Area; economic fruit forest measures; multi-model evaluation mode; evidence-Logistic regression coupling model; suitability evaluation

近年来,生态环境的不稳定性与社会经济发展的不协调性显著增加,加剧了水土流失,使之成为全球公认的首要生态问题之一。近二十年来,我国通过实施一系列水土保持措施,水土流失面积下降了 26.6%。为了获取更为成熟与适宜的区域水土保持措施,需要对现有措施进行适宜性评价,以分析水土流失治理与自然环境和社会发展之间的耦合机制,实现政策协同性^[1]。水土资源作为水土保持的主体,是自然环境的重要组成部分^[2-3],其受到区域内社会经济发展需求的影响^[4]。

水土保持措施适宜性评价是一个复杂且多维度的决策过程,其核心在于采取的措施既要有效地控制水土流失,又要符合区域的自然条件、社会经济需求以及环境承载力。在这一过程中,评价指标、评价方法和评价尺度发挥着重要作用。首先,已有研究在自然环境指标选取方面取得了丰富进展,蒋光毅等^[5]主要选取年降雨量、土壤侵蚀模数、田块坡度等指标评价南方坡耕地水土保持效应;姚应龙等^[6]选取坡度、土壤可蚀性、土壤类型等指标对长汀县水土保持措施进行适宜性评价。实际上,水土保持受自然和社会因素的综合影响,然而在水土流失较为严重的少数民族聚集地,对社会因素及其评价指标的关注仍显不足。其次,适宜性评价方法主要分为间接法和直接法。间接法主要集中在措施效益^[7-9]、措施采纳程度^[10-11]、措施优化^[12-14]等方面,而直接法则主要采用模型分析法^[15-18]直接研究水土保持措施的适宜性。然而,现有方法大多依赖于主体对不同指标重要性的主观判断,评价结果易受主观因素干扰。此外,单一评价模型难以全面、准确地捕捉措施实施过程中涉及的动态变化、地域差异、技术适应性等要素。最后,流域作为自然界水文循环的自然地理单元,流域尺度的水土保持措施优化模式及管理方法为水土流失综合治理和水资源的可持续利用提供了有效支持。但随着人类活动的日益加剧和区域管理的不断增强,县域水土流失综合治理的重要性日益凸显,基于县域尺度的水土保持措施适宜性评价研究亟需进一步加强。

西南高山峡谷区以山地和高原为主,地形起伏急变,气候空间分异明显,生态环境脆弱。永胜县作为高山峡谷区的典型代表县域,形成了以经果林为主的水土保持措施体系,且近二十年来经果林种植面积增加尤为明显^[19],主要包括沃柑、软籽石榴、花椒、野生铁核桃等。作为重要的水土资源开发性治理措施之一,经果林措施不仅能使林下植被截留部分降雨及保护地表,而且能够产生较大的经济效益,有效缓解当地的人地矛盾问题^[20],推动当地农业经济发展。因此,本研究重点开展西南高山峡谷区永胜县经果林措施的适宜性评价研究,以 GIS 为技术支撑,从自然环境和社会发展两个角度选取评价指标,引入证据权模型、Logistic 回归模型和证据权-Logistic 回归耦合模型确定指标权重,综合评价研究区经果林措施的适宜性,明晰其空间分布特点与

占比情况。通过对区域水土流失进行高效治理,促进社会经济健康发展和生态环境建设^[21]。本研究对深入理解水土流失综合治理机制具有一定的理论指导价值,对县域生态环境保护以及社会经济的可持续发展具有实际意义。

1 研究区概况

西南高山峡谷区指我国西南地区以高山、峡谷地形为主的区域,根据水利部全国水土保持区划^[22],综合考虑气候、地形、地质、生态、水土流失及其防治需求等因素,同时遵循区域完整性和边界连续性等原则,形成了具有明确空间界限的西南高山峡谷区范围^[23](图 1)。该区域覆盖大横断“七脉六江”地区,涉及西藏、四川、云南三省 88 个县^[23],总面积约 61.10 万 km²,海拔范围从 89m 到 6826m,地貌以山地和高原为主^[24],地形高陡且起伏剧烈,平均气温为-2.98—21.89℃,年降雨量为 296.62—2302.90mm,呈南多北少、东多西少的分布格局^[25]。区域内土壤和植被类型丰富,土壤类型主要为淋溶土、铁铝土,植被类型以针叶林、阔叶林、灌丛和草甸为主^[25]。该区聚集了藏族、傈僳族、彝族、白族、普米族等少数民族,以油橄榄、苹果、软籽石榴、沃柑、核桃为主要经济林种。由于该区特殊的气候、地形和土壤特点,水土流失问题严重,生态环境脆弱。因此,研究该区域内经果林措施的适宜性对于区域生态承载力和经济可持续发展具有重要的科学指导意义,对我国“三区四带”发挥生态屏障作用亦具有重要的实际价值。

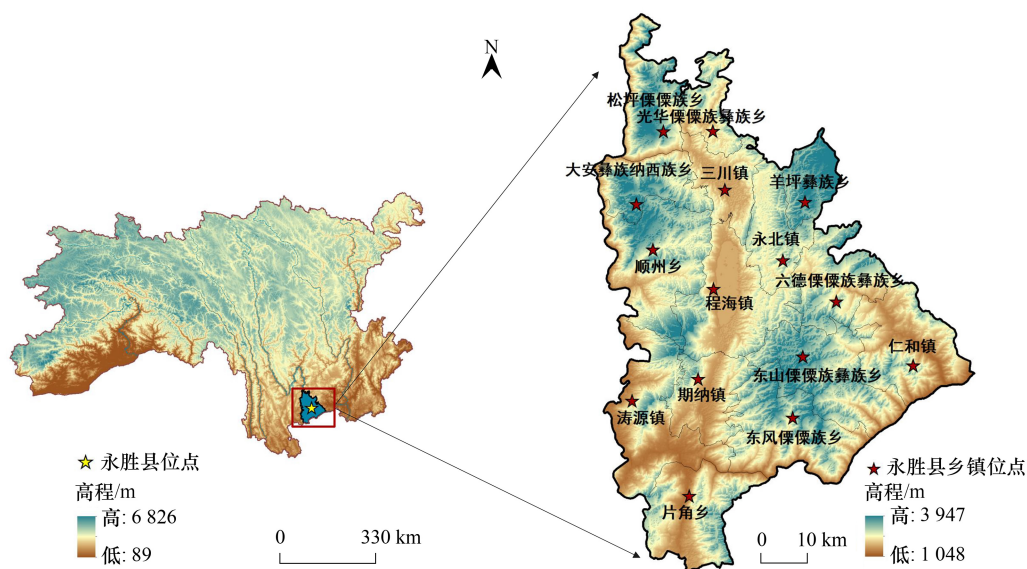


图 1 研究区地理位置

Fig.1 The location of study area

永胜县位于西南高山峡谷区南部(图 1),地处北纬 25°59′—27°04′,东经 100°22′—101°11′之间,县域面积 4950km²,降水时空变化显著,气候类型涵盖高中山寒冷带、斜坡—盆地温暖带与河谷炎热带,土壤以红壤为主,占总面积的 54.68%。该县地形起伏剧烈,生态环境脆弱,水土流失面积占全县面积的 29.95%,是典型的贫困山区^[26]。为有效治理水土流失并促进经济发展,永胜县重点推广经果林措施,种植沃柑、葡萄、软籽石榴等特色经济林,面积达 19253.3hm²。同时,彝族、傈僳族、纳西族、普米族等少数民族在此聚集,占总人口的 33.68%,文化多样性及复杂的社会结构,对于探索可持续发展路径与提升水土保持治理能力具有重要意义。永胜县的自然条件和人文社会经济情况与西南高山峡谷特征高度契合,且立体气候明显,物种资源富集,是西南高山峡谷区内生物多样性最为丰富和独特的地区之一。因此,通过在永胜县这一典型县域深入研究水土保持措施适宜性,为具有类似环境和人文条件的县域提供了实际案例,有助于促进区域生态保护。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

为确保评价指标的科学性与全面性,准确反映经果林措施适宜性的实际状况,协同自然环境因素与社会发展因素,共同构成了经果林措施适宜性评价指标体系的整体框架。因不同区域环境状况差异显著,需遵循“因地制宜”基本原则,其中“地”涵盖了地形、气候、土壤、植被等多种因素。因此,针对永胜县多样化的生态系统及特殊的环境状况,并基于已有研究成果,考虑评价指标的科学性与实用性,综合选取了坡度、坡向、年均气温等 9 个具有代表性和适用性的自然环境指标。社会发展因素方面,根据徐伟铭等^[27]研究成果及永胜县经果林措施的区域分布特征,选取距道路距离、距水源距离和人口密度指标。其中,道路距离影响着经果林措施的管理,距离道路较近的区域,交通便利;水源作为经果林生长的基本条件,其距离远近直接影响到经果林的水分利用率,适宜的水源位置对提升经果林的生长潜力至关重要;人口密度作为衡量人类活动密集程度的重要指标,能够有效评估经果林措施在农业活动下的适应性。

综上,针对永胜县特殊的自然环境条件及多元的社会发展状况,最终选取坡度、年均气温、距水源距离等 12 个评价指标进行适宜性分析。因本研究主要基于三种模型评估经果林措施适宜性的空间分布特点与占比情况,涉及数据类型较多,所以主要采用已公开发布的数据产品及水土保持监测中心提供的数据进行研究。数据来源如下:①坡度、坡向、地表粗糙度指标基于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>) ASTER GDEM 30m 分辨率 DEM 数据集获取,在 GIS 中提取各指标数据。为进一步提高坡度指标精度,现对原有数据进行精细化处理,将其细分为 10 个等级区间,分别为 0—5°、5—10°、10—15°、15—20°、20—25°、25—30°、30—35°、35—40°、40—45°以及>45°。利用直方统计法揭示不同区间等级下,修正前后坡度值在各栅格内的分布情况。修正后的坡度能够提供更精细的地形信息,其精确率得到显著提升,措施点覆盖率较修正前提高了 0.765%,不同区间坡度栅格分布情况更加合理,数据满足研究需求;②降雨侵蚀力、土壤可蚀性、土壤侵蚀模数、土地利用类型指标源自 2023 年水土保持监测中心,数据分辨率为 10m,符合精度要求。根据研究区土地特点,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、居民用地、未利用土地六个类别,数据质量较好;③年均气温数据产品源自资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/>)中国气象要素年度空间插值数据集,数据产品分辨率为 1km。通过去除气象站点异常值和错误数据,以便更好地获取年均气温分布情况;④NDVI 数据产品源自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>) Landsat8 OLI_TIRS 卫星数字产品数据集,选择 2021 年拍摄的遥感影像,空间分辨率为 30m,影像质量完好,利用 ENVI 5.2 软件处理后获取指标;⑤距道路距离、距水源距离指标源自 Open Street Map 地图永胜县实际道路和水系,为了量化不同指标分级区间对经果林措施适宜性的影响程度,采用 GIS 多环缓冲区法,直接构建道路和水系的缓冲区,并统计分析各区间内经果林措施点的分布情况。将经果林措施点与道路和水系的缓冲区进行空间叠加分析,评估各缓冲区的措施点覆盖情况。根据多次迭代分析,生成围绕永胜县实际道路和水系且具有一定宽度范围的缓冲区多边形图层。目前,该方法的可靠性已得到充分验证。依据研究区实际情况,选取 5 个递增的缓冲区宽度值,其中,道路距离的设置考虑了现有道路对周边环境的影响,包括噪音、污染、交通便利性等,选择 1000m 作为平衡距离,将道路距离分为 0—1000m、1000—2000m、2000—3000m、3000—4000m 及>4000m 的多环缓冲区。水系距离设置则主要考虑了水源涵养、水系保护与利用等方面的需求,设置 0—1000m、1000—2000m、2000—3000m、3000—4000m 及>4000m 的多环缓冲区。最终,道路和水系距离在 4000m 范围内,经果林措施点的覆盖率分别达到了 99.78%和 99.53%,基本实现全覆盖,数据质量较好;⑥人口密度指标基于永胜县统计年鉴、全国第七次人口普查分乡(街道)的总人口,对涉及行政区划的乡镇人口进行统计,共计 15 个乡镇级行政单元,求算栅格内人口密度,实现人口空间化。

本研究选取的评价指标,能够严格保持内部逻辑统一性。通过 ArcGIS 10.2 对所有评价指标统一范围裁剪,对空间数据进行统一坐标系处理,确定 250m×250m 的栅格作为研究单元计算各评价指标参数。由于评价

指标为连续性变量,需要对其进行离散化处理,通过划分为不同的区间等级进行适宜性评价,一定程度上避免了异常值对分析结果的影响,数据误差满足研究需求。

2.2 研究方法

2.2.1 单一模型评价指标的独立性检验

为避免评价指标间的空间自相关,考虑指标的波动情况兼顾评价结果的可信度,需分别对不同模型的评价指标进行独立性检验。

(1) 证据权模型

本研究采用两种方法对证据权模型的评价指标进行独立性检验,这不仅降低了模型运行的复杂性,还可以削弱模型精度降低的问题。第一种是利用皮尔逊相关系数法进行验证,通过指标间的相关关系剔除信息严重的冗余变量。其计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

通常情况下,当 R 为负值时,表示两个指标为负相关关系, R 为正值时,两个指标为正相关关系。 $R \leq 0.3$ 呈不相关或弱相关, $0.3 < R \leq 0.5$ 呈低度相关, $0.5 < R \leq 0.8$ 呈中度相关, $R > 0.8$ 呈高度相关。

第二种是利用 Agterberg 提出的通过 A-C 测试^[28]综合计算指标相对于经果林措施点满足独立性的概率。当 A-C 条件独立指数 $< 50\%$ 时,则认为评价指标间相对独立。

(2) Logistic 回归模型

共线性使得指标间影响效果相互融合,难以区分各指标的独立重要程度。若将存在强共线性的评价指标代入 Logistic 回归模型,容易出现模型复杂化和过拟合等问题。因此,本研究采用方差膨胀因子(VIF)、容忍度(TOL)对 Logistic 回归模型进行独立性检验,以消除评价指标间的强共线性对模型产生的不利影响^[29]。最终,将满足独立性要求的指标用于后续模型的构建。方差膨胀因子表达式为:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (2)$$

式中, R_i 表示当因变量 x_i 、评价指标 x_j 作回归分析时的复相关系数。

容忍度(TOL)是方差膨胀因子(VIF)的倒数,即:

$$TOL = \frac{1}{VIF} \quad (3)$$

当 $VIF > 10$ 或 $TOL < 0.1$ 时,可认为评价指标间存在严重共线性,需剔除。

2.2.2 证据权模型下评价指标的参数计算

证据权模型是一种贝叶斯概率准则下的对数线性模型^[30],它能够将已知的离散事件作为训练样点(即经果林措施点),将与事件有关的各种因素作为证据因子(即评价指标),利用与离散事件形成的有关地学信息进行复合叠加分析,有效开展永胜县经果林措施适宜性评价研究。

(1) 先验概率:将区域划分为 N 个单元,存在经果林措施的单元数为 D , P 为任意一个单元存在经果林措施的概率:

$$P_{\text{先验}} = P(D) = \frac{D}{N} \quad (4)$$

(2) 证据权重:将各指标与经果林措施关联分析,任意一个指标分级对经果林措施适宜性的贡献值(权重)表示为^[31]:

$$W^+ = \ln [P(B/D)/P(B/\bar{D})] \quad (5)$$

$$W^- = \ln [P(\bar{B}/D)/P(\bar{B}/\bar{D})] \quad (6)$$

式中, W^+ 和 W^- 分别为指标分级存在和不存在的权重值, 若原始数据缺失, 则指标权重值为 0。其中, $P(B/D)$ 为指标分级存在时, 经果林措施适宜性发生的概率, $P(B/\bar{D})$ 为指标分级存在时, 经果林措施适宜性不发生的概率, $P(\bar{B}/D)$ 为指标分级不存在时, 经果林措施适宜性发生的概率, $P(\bar{B}/\bar{D})$ 为指标分级不存在时, 经果林措施适宜性不发生的概率。

(3) 对比度: 度量第 j 个指标分级与经果林措施适宜性发生之间的关联程度, 其表达式为:

$$C_j = W_j^+ - W_j^- \quad (7)$$

式中, $C_j > 0$ 表示适宜经果林措施发生, $C_j < 0$ 表示不适宜经果林措施发生。

(4) 后验概率: 对于 n 个指标, 若它们关于事件发生的条件相互独立, 可用后验概率对数表示任意一个栅格单元 k 为适宜经果林措施实施的有利度, 其函数表达式为:

$$\ln O(D | B_1^k \cap B_2^k \cap B_3^k \cdots B_n^k) = \sum_{j=1}^n W_j^k + \ln O(D) \quad (8)$$

最终, 后验概率 P 的表达式为:

$$P = \frac{O}{1+O} \quad (9)$$

2.2.3 Logistic 回归模型下评价指标的系数计算

Logistic 回归模型是一种多元统计模型, 通过建立一种数据关系映射二元因变量(1 代表发生, 0 代表不发生)和一系列指标之间的关系^[32]。其函数表达式为:

$$P = \frac{e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_k x_k}}{1 + e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_k x_k}} \quad (10)$$

式中, P 为评价指标 $x_1, x_2, \cdots, x_k$ 组合作用下经果林措施适宜性发生的概率; b_0 为常数项; $b_1, b_2, \cdots, b_k$ 为各评价指标对应的回归系数。

2.2.4 证据权-Logistic 回归耦合模型

经果林措施的形成机制复杂, 其适宜性难以准确地通过单一模型评价。因此, 将 Logistic 回归模型与证据权模型进行耦合, 构建证据权-Logistic 回归耦合模型。最终, 基于 GIS 实现耦合模型下经果林措施的适宜性结果可视化。证据权-Logistic 回归耦合模型通过整合两个单一模型的优势, 更为全面、准确地评价经果林措施在不同环境状况下的适宜性。本研究具体流程图如图 2 所示。

2.2.5 模型精度检验

(1) Sridevi Jadi 经验概率法

Sridevi Jadi 经验概率法属于受临界约束准确性的统计方法, 主要通过经验概率形式表示模型精度^[33]。其表达式为:

$$P = \frac{K_s}{S} (1 - (K - K_s) / (N - S))^{1/3} \quad (11)$$

式中, P 为模型精度, K_s 为存在措施区域的经果林措施适宜性表现为比较、高度适宜等级的栅格总数, S 为存在经果林措施的栅格总数, K 为经果林措施适宜性为比较适宜和高度适宜等级的栅格总数, N 为评价栅格总数。

(2) 10 折交叉验证法

为了提高模型的泛化能力, 采用交叉验证 (Cross Validation, CV) 亦被称作循环估计^[32]来降低模型过拟合风险, 它是由 S. Geisser^[34]提出的一种将数据样本切割成较小子集的方法。本研究利用 10 折交叉验证法将样本数据平均分为 10 份, 提取其中一份作为测试数据集, 剩余九份作为训练数据集^[32], 计算 CV 三类数据——精确度、召回率和 F1 分数, 以此来判断所选模型精度。

(3) ROC 曲线法

ROC 曲线法是通过累计频率曲线下面积 (AUC 值) 反映模型精度, 其评判标准为: AUC 在 0.5—0.6 为

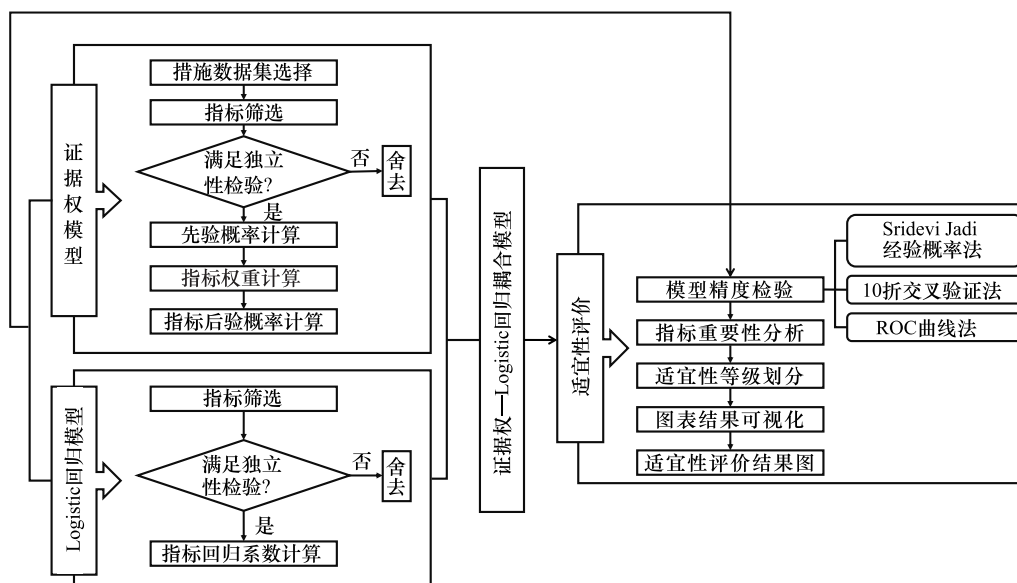


图2 适宜性评价流程图

Fig.2 Flow chart of suitability evaluation

Fail;0.6—0.7 为 Poor;0.7—0.8 为 Fair;0.8—0.9 为 Good;0.9—1.0 为 Excellent^[35]。

2.2.6 评价指标重要性分析

重要性分析旨在通过剔除模型中某项评价指标,进一步分析各指标对经果林措施适宜性的影响程度。当 $RD > 0$ 时,表示该指标对结果产生积极影响。其表达式为:

$$RD_i = \frac{AUC - AUC_i}{AUC} \times 100\% \quad (12)$$

式中, RD_i 为*i*评价指标的重要性系数值; AUC 为所有参与最优模型评价的指标前提下,检验得到的累计频率曲线下面积值; AUC_i 为去除*i*评价指标后,检验得到的最优模型累计频率曲线下面积值。

3 结果与分析

3.1 评价指标在不同分级区间数值或类别下的显著性变化

将经果林措施点的样本比例视作适宜性评价的超参数,利用分离样本法将 75%的措施点作为训练数据集,用于建立模型,25%的措施点作为检验数据集,用于验证模型精度。为了直观地展现各评价指标在不同数值范围或区间类别下的经果林措施点分布情况,绘制频数分布雷达图以客观筛选区间变化幅度显著的指标(图3),从而有效降低主观判断对结果产生的误差。结果分析得知,这 12 个评价指标的经果林措施点频数分布展现出显著的波动趋势,在不同的数值范围或区间类别下,措施点分布情况存在较大差异,符合筛选指标应遵循的显著性原则。因此,这 12 个评价指标均可用于模型构建。

3.2 不同模型下评价指标独立性检验及参数计算

3.2.1 证据权模型

根据皮尔逊相关性分析(图4)可知,12 个评价指标间的相关系数满足 $|R|_{\max} = 0.2921 < 0.3$,认为其弱相关。

A-C 条件独立指数为 $0.41 < 50\%$ (表1),符合检验要求。因此,这 12 个指标均可纳入证据权模型参数计算。

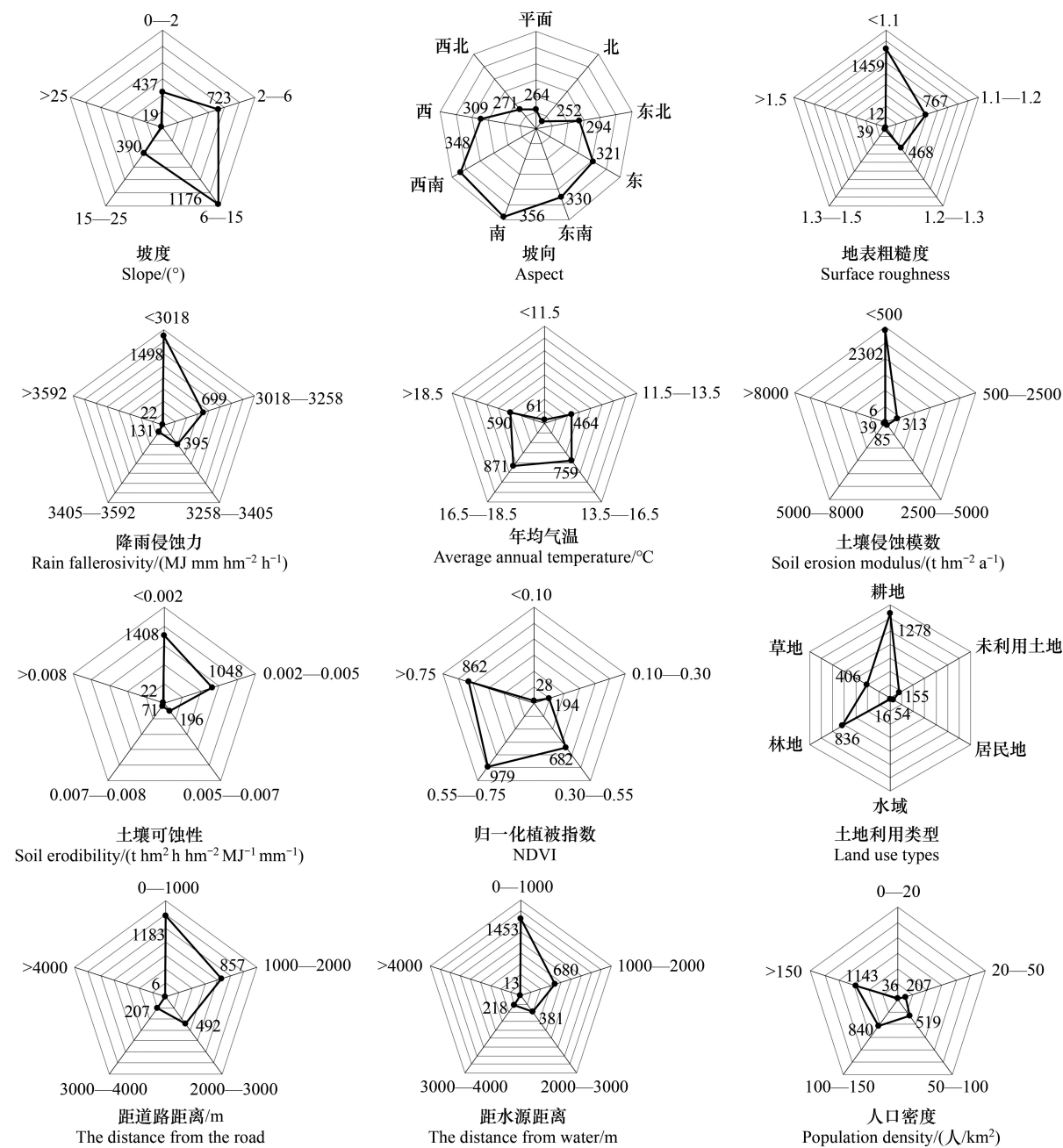


图 3 经果林措施点频数分布雷达图

Fig.3 Radar chart of frequency distribution of measures points passing through the economic forest

图中折线值代表各评价指标在不同分级区间内的经果林措施点频数

表 1 Agterberg-Cheng 条件独立检验

Table 1 Independent test of Agterberg-Cheng condition

数据名称 Data names	结果值 Result values
训练样本点 Taining sample points	2745
A-C 条件独立指数 Conditional independence index of A-C	0.41

A-C 条件独立指数是指利用 Agterberg-Cheng 条件独立检验法计算得到的指标独立性结果值

证据权模型的先验概率为 0.034,为突出各指标在适宜性评价中的不同重要程度,反映其作用差异性,计

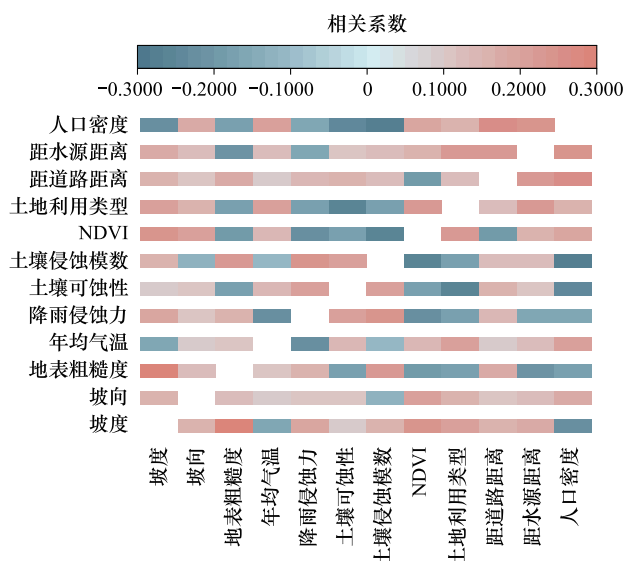


图4 皮尔逊相关性分析

Fig.4 Pearson correlation analysis

算各指标的正负权重等各类参数(图5)。结果可知,坡度在6—15°范围内 W^+ 最大,其值为1.518,这主要是因为适宜的坡度能够有效防止因过于陡峭而导致的土壤侵蚀以及经济林种根系生长受限的问题,形成稳固的支撑结构,减少由于根系生长不均导致而引起的经果林倾斜或倒伏现象。此外,充足的水分能够携带养分沿着坡面缓慢流动,为经果林根系提供稳定且适宜的生长环境。因此,在此区间内的坡度,其良好的水土保持能力与优越的环境条件共同构成了适宜经果林生长的关键要素。

后验概率代表各独立单元适宜经果林措施的概率大小,其值在0—1之间,数值越大,表明适宜经果林措施实施的概率越大,由此进一步反映经果林措施适宜性的空间分布概率情况。由图6可知,坡度、土地利用类型指标对经果林措施适宜性的发生具有较大影响,其后验概率分别为0.1173、0.1084。这主要是因为坡度作为地形因素中的一个重要指标,对农业生产活动产生直接影响。在坡度较大的地区,地表径流流速加快,导致较为严重的水土流失问题,土壤养分和有机质易随径流被冲刷,从而影响经济林种的正常生长发育,因此在实施经果林措施时要充分考虑坡度对土壤稳定性和质量的影响。不同的土地利用类型影响土壤持水能力不同,在实施经果林措施时,应科学合理地选择土壤结构良好、适宜经果林措施实施的土地利用类型,促进经果林正常生长,有效减少水土流失,维护生态系统的平衡,以实现经济效益与环境保护的双赢。

3.2.2 Logistic 回归模型

通过方差膨胀因子(VIF)、容忍度(TOL)对 Logistic 回归模型进行独立性检验(图7)可知,12个评价指标均满足 $VIF < 10$ 、 $TOL > 0.1$,表明指标间不存在显著的多重共线性,模型指标间相互干扰较小,能够有效地避免共线性带来的估计偏差与不稳定问题,符合独立性检验要求。

最终,求得12个评价指标的系数值(表2)。结果可知,12个指标均具有统计意义。其中,坡度指标的回归系数 b 值最大,其值为0.923,而年均气温和降雨侵蚀力指标的 b 值差距较小,这主要是因为经果林生长需要适宜的气候条件,气温和降雨都是其重要组成部分,它们共同影响经果林措施的适宜性。在气候条件相对稳定的同一区域,气温和降雨的变化幅度较小,对土壤侵蚀的影响也相对平衡,因而 b 值差异较小。通过调控土壤水分的动态平衡,确保土壤水分的持续稳定供给。稳定的土壤水分条件不仅有利于经济林种根系的生长,还有助于促进养分的吸收与利用,从而提高经济林种的抗逆性,为经果林提供适宜的生长环境。

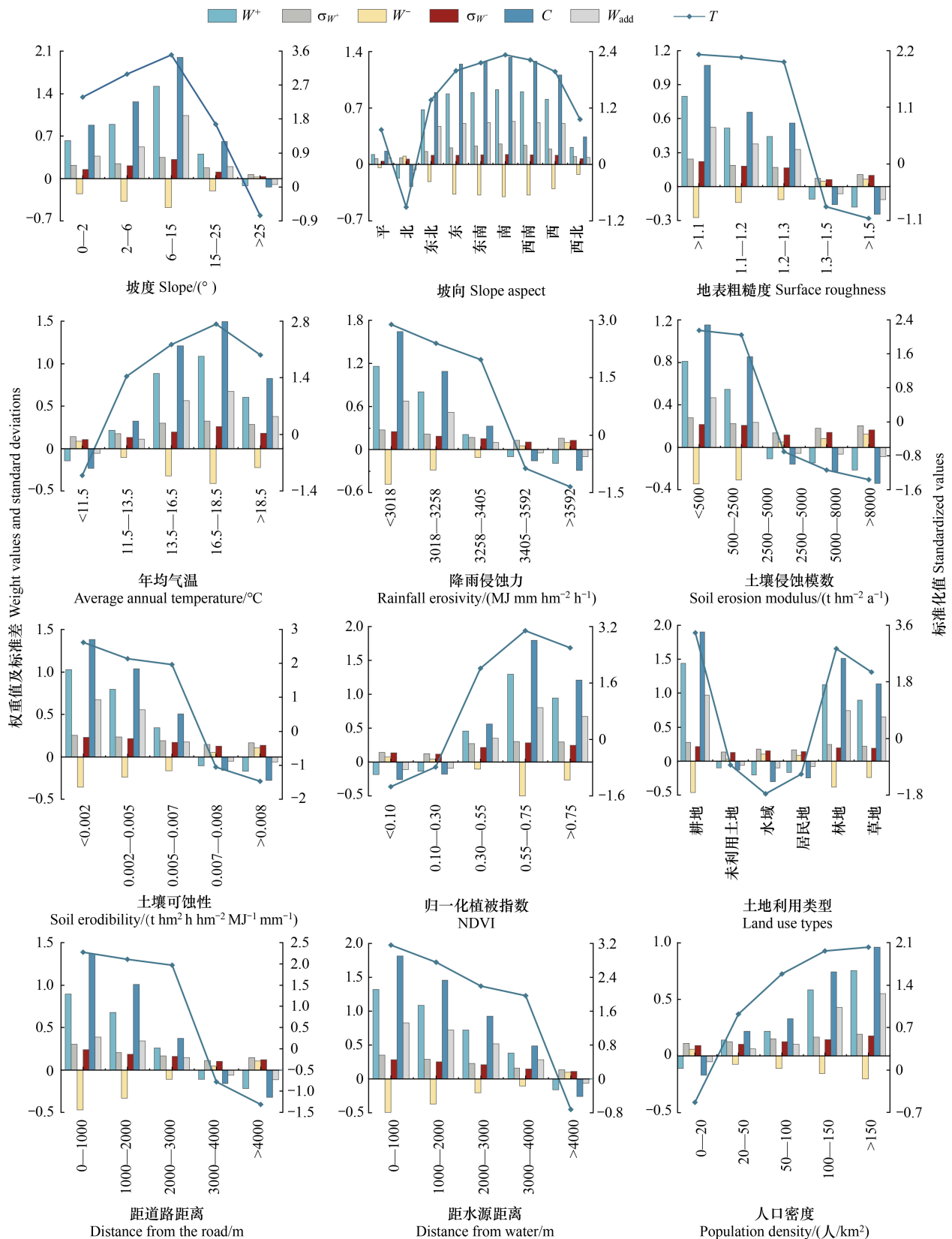


图5 各评价指标证据权重值

Fig.5 Weight values of evidence for each evaluation indicator

W^+ 代表指标的正权重, σ_{W^+} 代表正权重的标准差, W^- 代表指标的负权重, σ_{W^-} 代表负权重的标准差, C 代表指标的对比度, W_{add} 代表指标的加权权重, T 代表指标的标准化值, 通常用来表示不同指标区间对结果林措施适宜性的影响是否显著。

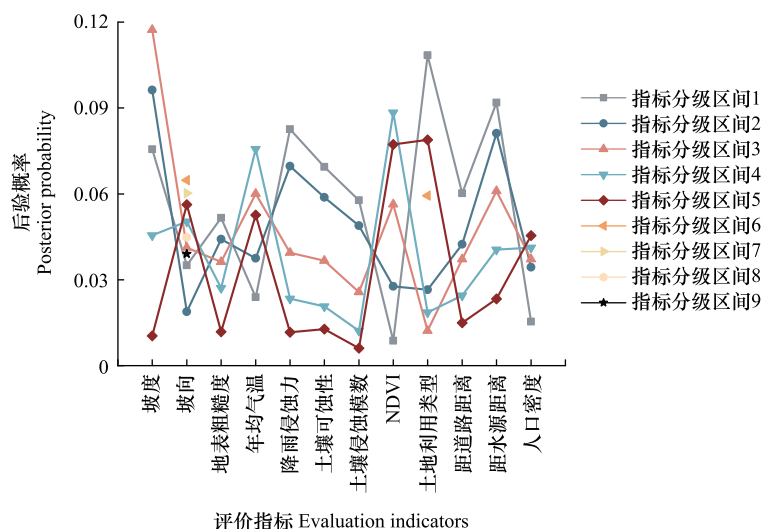


图 6 评价指标后验概率

Fig.6 Posterior probability of evaluation indicators

3.3 模型精度检验与评价指标重要性分析

3.3.1 模型精度检验

由 Sridevi Jadi 经验概率法可知(表 3),三种模型精度 P 值由大到小依次为证据权-Logistic 回归耦合模型 (0.849) > Logistic 回归模型 (0.821) > 证据权模型 (0.809)。该耦合模型通过融合证据权模型和 Logistic 回归模型的优势,有效减少了两个单一模型存在的不确定性和局限性,综合考量了各指标的相互作用与协同效应,在适宜性评价中具有较高的准确性和可靠性。

根据 ROC 曲线法可知(表 3),三种模型的 AUC 值明显大于参考线的 AUC 值(0.500),评价结果均显示“Good”,表明所选模型拟合程度相对较好,结果可信。其中,耦合模型的精度 (AUC = 0.863) 分别比证据权模型和 Logistic 回归模型的精度高 3.3% 和 2.1%,表明证据权-Logistic 回归耦合模型的评价结果与实际情况吻合度更高,将该耦合模型引入经果林措施适宜性评价领域具有一定的理论可行性。

由 10 折交叉验证法可知(图 8), CV 三类数据——精确度、召回率和 $F1$ 分数对应的 $CV_{\max}$ 与 $CV_{\min}$ 之差分别为 0.0641、0.0636 和 0.0638,表明本研究所选用的三种模型性能稳定。

具体来看,尽管证据权模型在评价精度上没有达到其他两种模型的较好效果,但仍然在可接受范围内。综上所述,三种模型均满足经果林措施适宜性评价需求。对比分析可知,证据权-Logistic 回归耦合模型不仅在评价精度上有所提升,而且其泛化能力也显示出明显的优势,综合评价能力显著优于两个单一模型。

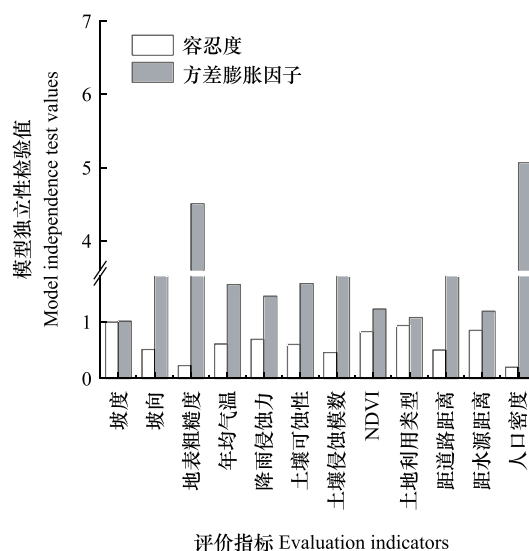


图 7 共线性诊断结果数值图

Fig.7 Numerical diagram of collinearity diagnosis results

表 2 Logistic 回归系数值

Table 2 Logistic regression coefficient values

指标 Indicators	回归系数 <i>b</i>	标准误差 <i>SE</i>	卡方值 Wald	显著性 Sig	优势比 Exp(<i>b</i>)
坡度 Slope	0.923	0.042	482.953	<0.001	2.517
坡向 Slope aspect	0.512	0.047	118.671	<0.001	1.669
地表粗糙度 Surface roughness	0.347	0.071	23.886	0.005	1.415
年均气温 Average annual temperature	0.598	0.043	193.404	<0.001	1.818
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity	0.604	0.039	239.853	<0.001	1.829
土壤可蚀性 Soil erodibility	0.582	0.051	130.228	<0.001	1.790
土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	0.392	0.061	41.296	<0.001	1.480
归一化植被指数 NDVI	0.696	0.041	288.171	<0.001	2.006
土地利用类型 Land use types	0.833	0.044	358.414	<0.001	2.300
距道路距离 Distance from the road	0.468	0.048	95.063	<0.001	1.597
距水源距离 Distance from water	0.769	0.040	369.601	<0.001	2.158
人口密度 Population density	0.284	0.077	13.604	0.012	1.328

表 3 三种模型精度

Table 3 Accuracy of three models

模型类型 Model types	精度 <i>P</i> 值 Accuracy <i>P</i> values	曲线下面积值 AUC values
证据权模型 Weight of evidence model	0.809	0.830
Logistic 回归模型 Logistic regression model	0.821	0.842
证据权-Logistic 回归耦合模型 Evidence-Logistic regression coupling model	0.849	0.863

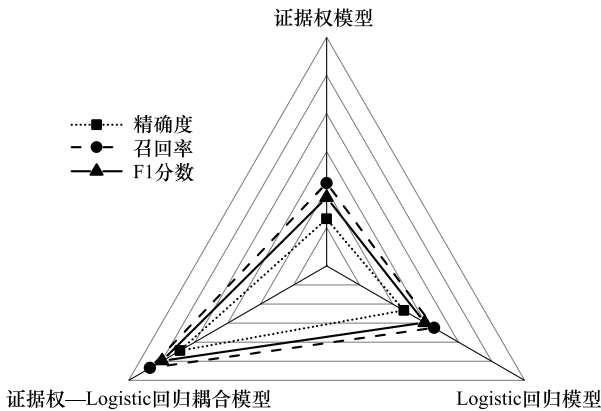


图 8 10 折交叉验证

Fig.8 Ten-fold cross validation

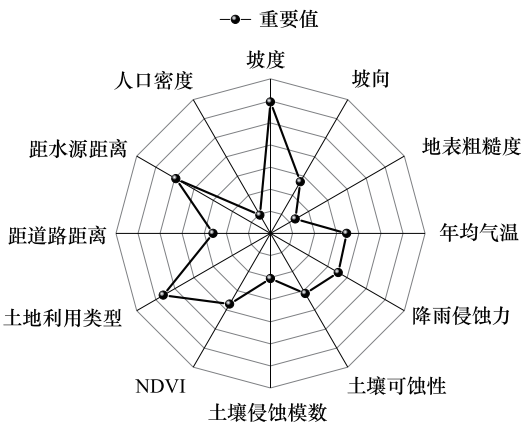


图 9 评价指标 RD 值

Fig.9 RD values of evaluation indicators

3.3.2 评价指标重要性分析

根据重要性分析得到 12 个评价指标对经果林措施适宜性的潜在影响(图 9)。在一定的研究区域内,不同指标对经果林措施的影响程度不同,本研究所选指标在最大程度上解释了经果林措施适宜性的空间分布情况。 RD 均大于 0,表明 12 个评价指标对评价结果均产生积极作用。其中, $RD_{\max, \text{坡度}} = 1.39$,坡度指标对经果林措施适宜性起主导作用,这主要是因为较缓的坡面能够保持土壤稳定性,减少土壤侵蚀风险,有助于水分在土壤内均匀分布,并且缓坡上的经果林通常能获得更充足的光照,有利于进行光合作用。而坡度越大,土壤侵蚀的风险越高,径流在陡坡上的流速越快,容易带走表层土壤,破坏了土壤结构,使得土壤肥力下降。此外,径流

流速快的陡坡,容易造成上层土壤干旱,并且下层土壤因水分聚集,会出现过湿现象,进而影响经果林的生长和发育。 $RD_{\min}$,人口密度=0.39,人口密度指标对评价结果影响较小。这主要是因为人口密度较高的区域,种植经果林有利于推动农业从传统粮食作物向经济作物的转型,优化农业产业结构。而适宜的地形有助于保持土壤肥力和结构,优越的土壤状况可以为经果林提供足够的养分,良好的气候条件则在一定程度上确保经果林的正常生长周期。因此,相较于自然环境因素带来的较大直接影响,人口密度指标的重要性相对较小。

3.4 经果林措施适宜性评价结果

将图 5、表 2 结果进行可视化,并利用自然断点法 (Natural Breaks) 对永胜县经果林措施适宜性进行综合分区,得到适宜性空间分布图(图 10)。通过增加不同级间的差异性进行有效自然聚类,避免了以往方法中存在的简单机械性。最终,将经果林措施适宜性程度划分为 5 个等级:高度适宜、比较适宜、一般适宜、适宜及不适宜。受县域自然环境特征以及社会发展的共同影响,经果林措施适宜性整体呈现高值与低值交错分布的空间格局。

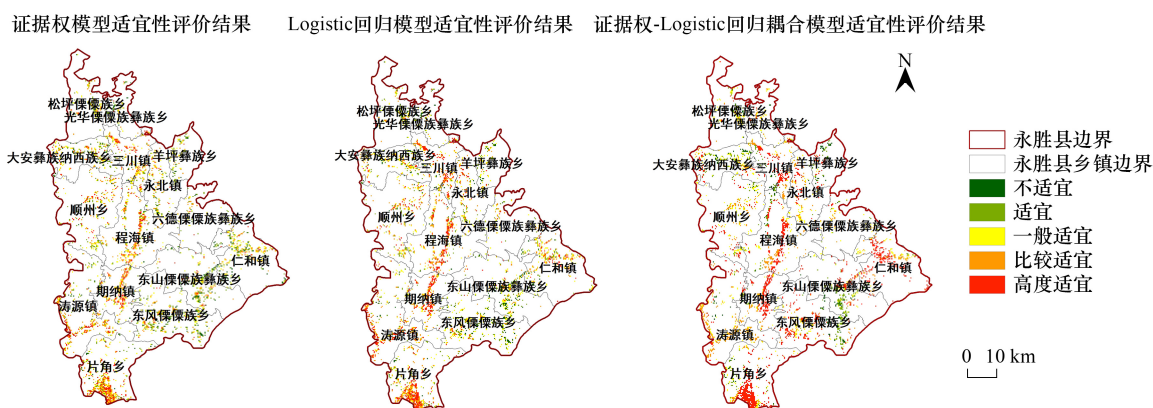


图 10 不同模型经果林措施适宜性评价结果图

Fig.10 Results of suitability evaluation of different models for economic forest measures

三种模型适宜性评价结果具有一定的相似性。从适宜性布局来看,不适宜区主要集中在羊坪彝族乡北部以及东山傈僳族彝族乡南部。究其原因,如羊坪彝族乡自 2003 年实施退耕还林约 400hm²,当地发展一种主要以青刺果和花椒为主的经果林措施模式,但因其北部地区坡度较大,坡面径流流速较快,土壤侵蚀加剧,土壤的保水和保肥能力减弱,易发生水土流失,从而影响经果林对水分、养分的吸收及其根系的生长,故该区域经果林措施较不适宜。针对表现为不适宜等级的小部分经果林措施,需要进行措施调整,以促进区域生态恢复^[36]。适宜区主要集中在东风傈僳族乡南部;一般适宜区主要集中在顺州乡东北部以及仁和镇东部;比较适宜区主要集中在涛源镇南部和程海镇南部;高度适宜区主要集中在三川镇西北部、程海镇中部、期纳镇中北部以及片角乡南部。这些地区的共同特点是水源充足,交通便利,坡度平缓,多为轻度水土流失区。对于处于适宜性等级以上的经果林措施需要进行措施优化以提升其效果,做到有针对性地合理安排治理工作的时序及工程等^[37]。

4 讨论

4.1 基于自然环境和社会发展双重角度选取的适宜性评价指标分析

适宜性是自然环境和社会经济的有机统一体,能够反映人与自然的相互作用过程中为人类提供的生态本底^[38]和人类生产生活所需领域的保障与供给。张瑜^[18]等从经济、生态和管护角度,选取土层厚度、减沙率等 6 个指标,对吉林省山地丘陵区典型坡面水土保持措施进行适宜性评价,得出柳河县荣家小流域为较不适宜措施区,其余地区流域的措施均处于适宜级别以上;陈巧云^[39]利用坡度、地貌类型、土壤侵蚀状况等 6 个指

标,对江西省吉安县小流域进行了水土保持措施适宜性分析,得出适宜性整体呈现良好态势;陈小林等^[40]以福建省长汀县的封禁措施为研究对象,选取了坡度、土壤可蚀性 K 值、植被覆盖度等 7 个指标进行适宜性评价,得出 82% 的封禁区域处于中度适宜级别以上。水土保持措施适宜性评价研究是一个涉及多因素、多层次的复杂过程,受自然环境和社会发展的共同驱动^[41],地形地貌、气候条件、土壤类型和植被状况等自然环境因素是实施水土保持措施的基础,人口分布、区位条件、资源状况等社会因素同样对水土保持措施的实施产生重要影响。因此,本研究充分考虑措施的动态适应性、综合协同性以及合理可行性,基于自然与社会的双重视角选取更为全面和多元的关键性指标,将交通、水源、人口指标定量化纳入适宜性评价体系,以丰富现有县域适宜性指标评价体系。通过持续评价并动态调整区域水土保持措施,以确保治理方案的有效性。

经果林地土质疏松,能吸收大量水分,较好的蓄水保土效应对减缓永胜县水土流失状况具有显著作用^[42]。通过图 9 分析可知,各评价指标对适宜性的影响程度有所不同。同一区域内,地形通过直接影响土壤质地及水文过程,促使坡度成为影响经果林生长的重要指标之一^[43]。坡度通过改变击溅土壤角度以及坡面所承接的雨量^[44]影响坡面土壤的保土和保水能力,一定程度上决定了经果林的生长环境及其适宜性。研究认为,当坡度超过适宜范围时,经果林措施的适宜性随坡度的增加而降低。这主要是因为坡度增加导致高强度水土流失发生概率增大^[45],陡峭的坡面加剧雨水的径流速度,增强其对土壤的冲刷和搬运能力。随着水土流失加剧,土壤结构发生改变,土壤养分亦随之流失。这不仅极大地降低了土壤肥力,还会导致土壤干旱化和盐碱化,进而抑制经果林的生长和发育。因此,在较高坡度下应实施其他类型的水土保持措施,以减少对地表土壤扰动,保持土壤结构。

4.2 基于多模型评价模式的指标权重确定方法分析

确定指标权重的方法主要包括专家打分法、层次分析法、Logistic 回归模型等。李情等^[46]采用层次分析法得到坡度、降水量等 22 个指标的权重值,分析影响生态防护型和高效开发型水土流失综合治理模式适宜性的关键因素;乔梅等^[1]以纸坊沟流域水土保持技术为研究对象,采取问卷调查的方式对评价指标的重要程度进行打分,并通过层次分析法计算各指标权重,得出技术适宜性在评价指标体系中占有重要地位;姚应龙等^[6]利用层次分析法计算指标权重,进一步评价长汀县水土保持措施适宜性,得出水土流失强度指标的权重值最大为 0.209;赵晓翠等^[47]运用层次分析模型和 Logistic 回归模型对影响安塞县南沟流域内水土保持技术适宜性的三级指标分别进行赋权,得出水土保持技术整体处于“适宜”状态,满足区域水土流失治理需求。

然而,以上定权方法各有优势与不足。因西南高山峡谷区永胜县水土流失具有复杂性的特点,层次分析等模型难以做到准确评价。证据权模型作为目前最常用的信息综合方法之一,因其利用 GIS 挖掘指标数据中重要及隐含的空间信息,能够有效地将地面信息获取、数值计算和空间数据处理有机地结合起来^[48]。目前,该模型已被广泛应用在矿产资源预测评价^[49—52]、地质灾害易发性评价^[53—54]、土地适宜性评价^[55]和生态环境^[56]等方面,且取得了较为理想的成果,但在水土保持措施适宜性评价领域的研究相对较少。因此,本研究引入证据权模型进行经果林措施适宜性评价,是对该领域现行评价方法的科学机理解析和定量化改进,在一定程度上降低了主观因素对评价结果的影响^[57]。通过在永胜县的实证应用检验,模型评价结果精度“Good”(AUC=0.830),取得了较有说服力的效果。但证据权模型各评价指标的独立性检验是模型应用中的难题,长期以来不得不通过调整或减少指标以在最大程度上实现独立性。而某些被剔除的指标在一定程度上与水土保持措施关系密切,导致有用信息浪费,制约了证据权模型对水土资源的有效评估。因此,如何削弱非独立性对证据权模型评价结果的影响,使其在保留自身优点的同时能更适用于普遍的评价情况,已成为当前关注的重点科学问题。Journel^[58]从如何解决数据冗余角度提出了一种新的定权修正统计学模型——tau 模型,该模型在列出不需任何假设的后验概率表达式的同时度量了因不满足条件独立性而产生的无效重复性指标;Deng^[59]提出了校正证据权模型,该模型通过校正相关系数矩阵,进一步弱化指标间的重叠信息;Agterberg^[60]提出了一种基于 Logistic 回归的加权证据权模型,该模型将回归系数作为证据权模型的加权因子,该因子起到消除证据权模型下评价指标间的非独立性影响。以上研究为改进证据权模型在独立性检验方面的限制提供

了新的思路。

为弥补单一模型评价的局限性,更准确地反映经果林措施在区域特定环境条件下的动态响应,本研究一方面通过系统整合多源信息,引入多定量分析模型,识别不同评价指标的影响程度,明晰适宜性空间分布特点与占比情况。另一方面,将 Logistic 回归模型与证据权模型进行耦合,构建证据权-Logistic 回归耦合模型。结合证据权模型综合多源信息、提高分析客观性的独特能力与 Logistic 回归模型在处理二分类问题方面的高效优势,有效发挥两个单一模型的优势,增强适宜性分析的可信度和准确度^[61-62]。最终得出模型精度由大到小依次为证据权-Logistic 回归耦合模型($AUC = 0.863$)>Logistic 回归模型($AUC = 0.842$)>证据权模型($AUC = 0.830$),表明证据权-Logistic 回归耦合模型的评价结果与实际情况吻合度更高。相较于传统的单一模型评价方法,本研究构建的多模型耦合方法能够有效地提高适应性评价的准确性。

4.3 基于不同模型的经果林措施适宜性占比变化分析

研究发现,经果林措施因其能同时发挥优秀的水土保持生态效益和经济效益,成为解决生态和社会发展冲突问题的调和剂^[40]。通过经果林措施适宜性等级占比图可以看出(图 11),不适宜-适宜区间占比的变化趋势较为明显,区域措施适宜性整体较好,满足水土流失治理需求。

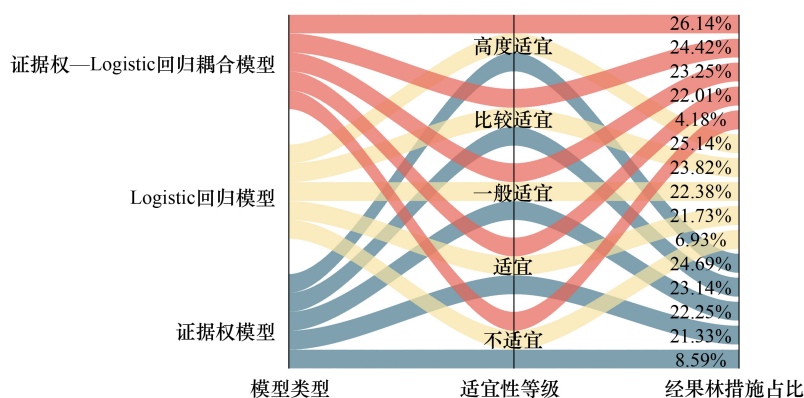


图 11 不同模型下各适宜性等级经果林措施占比

Fig.11 Proportion of economic forest measures in different suitability grades under different models

分析不同模型下各适宜性等级经果林措施占比(图 11)可以看出,三种模型评价结论基本一致,均表现为随着适宜性等级的升高,三种模型的经果林措施占比与适宜性等级呈正相关关系,理论上满足合理性检验,即经果林措施点落在高度适宜区的百分比最大,适宜性评价结果与实际情况基本一致。但在以下三方面仍存在差异:从措施分级占比来看,证据权模型处于不适宜-高度适宜区间经果林措施占比依次为 8.59%、21.33%、22.25%、23.14%和 24.69%;Logistic 回归模型处于不适宜-高度适宜区间经果林措施占比依次为 6.93%、21.73%、22.38%、23.82%和 25.14%;证据权-Logistic 回归耦合模型处于不适宜-高度适宜区间经果林措施占比依次为 4.18%、22.01%、23.25%、24.42%和 26.14%。高度适宜区最大程度地发挥了经果林措施的适宜潜力,而不适宜区存在严重影响经果林措施正常实施的限制指标,因而不利于经果林生长。从评价模型不同的角度来看,证据权模型处于不适宜-高度适宜区间的经果林措施占比虽表现为随着适宜性等级的升高呈增大趋势,但其增长幅度(0.1610)相较于耦合模型(0.2196)和 Logistic 回归模型(0.1821)的变幅较小。从适宜性等级区间变幅的角度来看,三种模型处于不适宜-适宜区间增幅大小依次为证据权-Logistic 回归耦合模型(17.83%)>Logistic 回归模型(14.80%)>证据权模型(12.74%),跨区间的增幅显示出了优秀的分区效果。

5 结论

(1) 利用经果林措施点频数分布雷达图初步筛选具有显著变化的指标,12 个指标区间展现出显著的波动趋势,满足显著性原则,指标均可纳入后续模型独立性检验与结果计算。

(2) 采用皮尔逊相关性分析、A-C 测试法和方差膨胀因子 (VIF)、容忍度 (TOL) 分别对证据权模型和 Logistic 回归模型的各指标进行独立性检验, 12 个指标均满足独立性要求。通过模型参数计算, 坡度在 6—15° 范围内 W^+ 最大为 1.518, 回归系数 $b_{\max, \text{坡度}} = 0.923$, 表明坡度对经果林措施适宜性影响较大。

(3) 选用 Sridevi Jadi 经验概率法、10 折交叉验证法和 ROC 曲线法对模型精度进行检验, 三种模型均能满足研究需求。模型精度大小均依次表现为证据权-Logistic 回归耦合模型 > Logistic 回归模型 > 证据权模型, 耦合模型评价结果优于两个单一模型。利用最优模型即耦合模型进行重要性分析, 坡度是影响经果林措施适宜性的主导环境指标 ($RD = 1.39$)。

(4) 永胜县经果林措施适宜性在各乡镇内呈高值与低值交错的空间分布特点, 处于适宜性等级以上的经果林措施占比大小依次为证据权-Logistic 回归耦合模型 (95.82%) > Logistic 回归模型 (93.07%) > 证据权模型 (91.41%), 经果林措施整体适宜性较好, 本研究提出的评价方法可行且适用。随着适宜性等级的升高, 三种模型下经果林措施占比与适宜性等级均呈正相关关系, 这在理论上满足经果林措施的合理性准则。经果林措施处于不适宜-适宜区间内, 变幅最为显著的是证据权-Logistic 回归耦合模型, 其增幅为 17.83%, 显示出了优秀的分区效果。

参考文献 (References):

- [1] 乔梅, 王继军, 赵晓翠, 李玥, 韩晓佳. 基于评价指标为潜变量背景下的纸坊沟流域水土保持技术评估. 生态学报, 2019, 39(16): 5787-5797.
- [2] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 杨勤科, 赵敏娟, 党小虎, 郭明航, 王国梁, 王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
- [3] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, Jia X X. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: a review. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-8.
- [4] Wynants M, Kelly C, Mtei K, Munishi L, Patrick A, Rabinovich A, Nasser M, Gilvear D, Roberts N, Boeckx P, Wilson G, Blake W H, Ndakidemi P. Drivers of increased soil erosion in East Africa's agro-pastoral systems: changing interactions between the social, economic and natural domains. Regional Environmental Change, 2019, 19(7): 1909-1921.
- [5] 蒋光毅, 曾小英, 史东梅, 张健乐. 南方坡耕地水土保持措施分类及效应评价最小数据集. 中国水土保持, 2021(10): 56-59, 5.
- [6] 姚应龙, 徐伟铭, 涂平. 面向水土保持措施适宜性评价的本地知识库构建. 福州大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2): 188-195.
- [7] 许炯心, 孙季. 无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义. 水科学进展, 2006, 17(5): 610-615.
- [8] 李宗杰, 宋玲玲, 田青, 张富. 陇南土石山区水土保持综合治理效益分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 132-137.
- [9] 张杰, 陈晓安, 汤崇军, 王凌云, 李龙飞. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响. 农业工程学报, 2017, 33(24): 165-173.
- [10] Bewket W. Soil and water conservation intervention with conventional technologies in northwestern Highlands of Ethiopia: acceptance and adoption by farmers. Land Use Policy, 2007, 24(2): 404-416.
- [11] 廖炜, 高超, 刘汉生, 吴宜进. 基于 Logistic 回归分析的农户参与水土流失治理状况研究——以鄂西地区为例. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 892-898.
- [12] 高会然, 秦承志, 朱良君, 朱阿兴, 刘军志, 吴辉. 以坡位为空间配置单元的流域管理措施情景优化方法. 地球信息科学学报, 2018, 20(6): 781-790.
- [13] 耿润哲, 梁璇静, 殷培红, 王萌, 周丽丽. 面源污染最佳管理措施多目标协同优化配置研究进展. 生态学报, 2019, 39(8): 2667-2675.
- [14] 高海东, 马玲玲, 易琦. 基于目标输沙量的黄河中游区域水土保持措施配置研究. 泥沙研究, 2023, 48(6): 24-29.
- [15] 邹丽丽, 陈晓翔, 何莹, 黎夏, 何执兼. 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价. 生态学报, 2012, 32(12): 3722-3728.
- [16] 孙嘉, 齐实, 澎湃, 黄媛, 刘孝盈, 杨爱民. 十三种农村水资源保护措施适宜性评价. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3242-3248.
- [17] Xiao R, Su S L, Mai G C, Zhang Z H, Yang C X. Quantifying determinants of cash crop expansion and their relative effects using logistic regression modeling and variance partitioning. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 34: 258-263.
- [18] 张瑜, 徐子棋, 杨献坤, 崔斌. 吉林省山地丘陵区典型坡面水土保持措施适宜性研究. 森林工程, 2021, 37(6): 25-33, 38.
- [19] 刘春艳, 张继飞. 基于生态位模型的岷江上游典型县乡村聚落地适宜性评价. 农业工程学报, 2021, 37(14): 266-273.
- [20] 杨坪坪, 李勇, 宋涛, 覃莉, 刘忠仙, 李瑞. 典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应. 生态环境学报, 2021, 30(1): 53-62.
- [21] 蒲朝勇. 贯彻落实十九大精神 做好新时代水土保持工作. 中国水土保持, 2017(12): 1-6.
- [22] 全国水土保持规划编制工作领导小组办公室, 水利部水利水电规划设计总院. 中国水土保持区划. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [23] 丁琳, 黄婷婷, 秦伟, 周金星. 西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征. 泥沙研究, 2023, 48(6): 51-58, 66.
- [24] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 崔冉冉, 李鹏, 唐颖. 2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应. 农业工程学报, 2023, 39(14): 155-163.
- [25] 廖瑞恩, 齐实, 赖金林, 唐颖, 李鹏. 西南高山峡谷区水力侵蚀时空变化及其驱动力. 水土保持研究, 2024, 31(5): 139-147.

- [26] 黄柔, 吴秀芹, 石婕妤, 李旭, 倪朦朦, 刘亚楠. 西南高山峡谷区水土保持技术与生态产业协调发展定量研究——以云南省永胜县为例. 生态学报, 2024, 44(21): 9924-9934.
- [27] 徐伟铭, 陆在宝, 肖桂荣. 基于遗传算法的水土保持措施空间优化配置. 中国水土保持科学, 2016, 14(6): 114-124.
- [28] Agterberg F P, Cheng Q M. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling. *Natural Resources Research*, 2002, 11(4): 249-255.
- [29] Dormann C F, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz J R G, Gruber B, Lafourcade B, Leitão P J, Münkemüller T, McClean C, Osborne P E, Reineking B, Schröder B, Skidmore A K, Zurell D, Lautenbach S. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 2013, 36(1): 27-46.
- [30] Gayen A, Saha S. Application of weights-of-evidence (WoE) and evidential belief function (EBF) models for the delineation of soil erosion vulnerable zones: a study on pathro river basin, Jharkhand, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2017, 3(3): 1123-1139.
- [31] 刘江涛, 吴发富, 李福林, 胡鹏, 王建雄, 向文帅, 张紫程. 基于证据权模型的厄立特里亚金矿资源潜力评价. 地质学报, 2021, 95(4): 1292-1305.
- [32] 罗路广, 裴向军, 崔圣华, 黄润秋, 朱凌, 何智浩. 九寨沟地震滑坡易发性评价因子组合选取研究. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2306-2319.
- [33] 杨强, 王高峰, 丁伟翠, 李荣建, 高幼龙, 邓兵. 多种组合模型的区域滑坡易发性及精度评价. 自然灾害学报, 2021, 30(2): 36-51.
- [34] Geisser S. The predictive sample reuse method with applications. *Journal of the American Statistical Association*, 1975, 70(350): 320-328.
- [35] 王鑫, 任亦钊, 黄琴, 邓小兵, 陈才文, 邓洪平. 基于 GIS 和 Maxent 模型的赤水河地区濒危植物桫欏生境适宜性评价. 生态学报, 2021, 41(15): 6123-6133.
- [36] Liu L, Di B F, Zhang M Y. The tradeoff between ecological protection and economic growth in China's County development: evidence from the soil and water conservation projects during 2011-2015. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 156: 104745.
- [37] 董秀茹, 王迪, 刘强. 非耕农用地耕种功能恢复适宜性评价模型构建. 农业工程学报, 2023, 39(12): 226-235.
- [38] 殷悦, 周侃, 湛东升, 陈好凡. 基于自然与人文耦合视域的高寒生态功能区宜居性评价及阻滞因子诊断——以青海省为例. 生态学报, 2024, 44(3): 992-1008.
- [39] 陈巧云. 基于 InVEST 的赣南地区小流域水土保持措施优化分析. 水利技术监督, 2019, 27(6): 92-94.
- [40] 陈小林, 徐伟铭, 肖桂荣. 基于模糊证据权模型的长汀县水土保持措施适宜性评价. 长江科学院院报, 2017, 34(11): 33-38.
- [41] 袁和第, 信忠保, 侯健, 李宗善, 杨磊. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式. 生态学报, 2021, 41(16): 6398-6416.
- [42] 郭玲梅. 不同土地利用类型土壤物理性质及水土保持效益. 绿色科技, 2014(5): 4-7.
- [43] 高靖, 袁竟富, 成星霖, 潘佑静, 韩文君, 杜波. 望漠河流域植被类型的地形分异分析. 安徽农业科学, 2015, 43(10): 246-248, 286.
- [44] 张佳崎, 马悦, 张瑞芳, 张爱军, 周大迈, 王红. 不同种植模式和坡度对片麻岩山坡地氮素流失的影响. 水土保持学报, 2019, 33(3): 8-13.
- [45] 王丰, 刘金铜, 付同刚, 高会, 齐菲. 基于 RUSLE 模型的太行山区土壤侵蚀时空分异特征及影响因子研究. 中国生态农业学报: 中英文, 2022, 30(7): 1064-1076.
- [46] 李倩, 聂小飞, 谢颂华, 胡启武, 莫明浩. 基于生态与生产功能权衡的赣南水土流失综合治理模式适宜性评价. 水土保持研究, 2022, 29(4): 54-61, 74, 2.
- [47] 赵晓翠, 王继军, 乔梅, 韩晓佳, 李玥. 县南沟流域水土保持技术适宜性评估. 水土保持研究, 2020, 27(2): 350-356.
- [48] 申世广, 范晨璟, 王浩, 徐新洲. 基于土地适宜性评价的黑虎山风景区保护与利用. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 202-206.
- [49] 林楠, 陈永良, 路来君, 姜琦刚, 吴梦红. 基于证据加权模型的青海拉陵灶火地区矿产靶区预测及效果评价研究. 地球学报, 2016, 37(6): 756-762.
- [50] 高乐, 卢宇彤, 虞鹏鹏, 肖凡. 成矿区三维可视化与立体定量预测——以钦-杭成矿带庞西垌地区下垌垌铅锌矿区为例. 岩石学报, 2017, 33(3): 767-778.
- [51] 霍雨佳, 王立志, 吴清华, 王子衿, 王小虎, 刘得辉, 李钟山. 基于模糊证据权的云南省金矿储备矿产地分析方法. 地球物理学进展, 2022, 37(6): 2552-2561.
- [52] 王佳营, 曾威, 张祺, 陈军强, 滕菲, 李威, 刘行. 模糊证据权方法在纳米比亚白岗岩型铀矿预测中的应用. 地质通报, 2023, 42(8): 1318-1333.
- [53] 郭子正, 殷坤龙, 付圣, 黄发明, 桂蕾, 夏辉. 基于 GIS 与 WOE-BP 模型的滑坡易发性评价. 地球科学, 2019, 44(12): 4299-4312.
- [54] 李文彬, 范宣梅, 黄发明, 武雪玲, 殷坤龙, 常志璐. 不同环境因子联接和预测模型的滑坡易发性建模不确定性. 地球科学, 2021, 46(10): 3777-3795.
- [55] 金贵, 王占岐, 胡学东, 胡守庚, 张道军. 基于模糊证据权模型的青藏高原区土地适宜性评价. 农业工程学报, 2013, 29(18): 241-250.
- [56] Gorney R M, Ferris D R, Ward A D, Williams L R. Assessing channel-forming characteristics of an impacted headwater stream in Ohio, USA. *Ecological Engineering*, 2011, 37(3): 418-430.
- [57] 尹海伟, 孔繁花. 城市与区域规划空间分析实验教程. 2 版. 南京: 东南大学出版社, 2016: 179-188.
- [58] Journel A G. Combining knowledge from diverse sources: an alternative to traditional data independence hypotheses. *Mathematical Geology*, 2002, 34(5): 573-596.
- [59] Deng M F. A conditional dependence adjusted weights of evidence model. *Natural Resources Research*, 2009, 18(4): 249-258.
- [60] Agterberg F. A modified weights-of-evidence method for regional mineral resource estimation. *Natural Resources Research*, 2011, 20(2): 95-101.
- [61] 刘璐瑶, 高惠瑛. 基于证据权与 Logistic 回归模型耦合的滑坡易发性评价. 工程地质学报, 2023, 31(1): 165-175.
- [62] 胡杨, 张紫昭, 林世河. 基于证据权与逻辑回归耦合的新疆伊犁河谷地区滑坡易发性评价. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1350-1363.