中国生态农业学报 2018 年 3 月 第 26 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2018, 26(3): 442−452

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170593

王世东, 吴超. 基于改进指数和法的地形因素对土地利用变化影响程度评价[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 442−452
WANG S D, WU C. Evaluation of influencing of terrain factors on land use change based on improved Index Sum Method[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 442−452

基于改进指数和法的地形因素对土地利用变化影响程度评价*

王世东, 吴 超

(河南理工大学测绘与国土信息工程学院 焦作 454000)

摘 要: 土地利用变化影响因素研究是当前土地利用变化领域的热点。本研究拟探究地形因子对区域土地利用变化的影响程度, 解释人地系统相互作用的内在机制, 以期为区域土地开发与空间利用的结构、方向、模式等提供科学依据。根据研究区自然条件、土地利用特点和地形因素特征, 从宏观地形因子和微观地形因子两个方面选取评价指标, 建立地形因素对土地利用变化影响程度评价指标体系; 在此基础上, 采用熵权法和环比评分法相结合确定评价指标权重的方法, 建立基于改进指数和法的地形因素对土地利用变化影响程度综合评价模型, 基于河南省栾川县 2005—2015 年 3 期 Landsat 遥感影像和 DEM 数据, 利用 GIS 和 RS 技术定量评价了研究区地形因素对土地利用变化的影响程度。评价结果显示, 2005—2015 年间地形因子中的高程、坡度、坡向、坡长、坡向变率和地表切割度对研究区土地利用变化的影响程度评价值增加, 而坡度变率、平面曲率、剖面曲率、高程变异系数、地形起伏度和地形粗糙度的影响程度评价值减小。2005—2010 年研究区地形因子对土地利用变化的影响程度评价变化值为 0.000 978, 变化率为 7.06%; 2010—2015 年地形因子对土地利用变化的影响程度评价变化值为−0.001 705, 变化率为−11.50%; 2005—2015 年地形因子对土地利用变化的影响程度评价变化值为−0.000 727, 变化率为−5.25%。 这些数据结果显示, 2005—2015 年地形因子对土地利用变化的影响程度呈现先增加后减少的趋势。研究结果表明, 随着社会经济发展, 在人类技术水平的提高、政治经济结构的合理化以及保护生态环境意识和政策等人文驱动因素条件下, 地形因子作为影响土地利用变化的自然驱动因素之一, 对土地利用变化的影响程度总体呈现减小趋势。该研究可为区域土地利用规划、城市建设和生态环境保护提供重要的数据参考与技术支撑。

关键词: 地形因子; 改进指数和法; 土地利用变化; 栾川县

中图分类号: P 901 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)03-0442-11

Evaluation of influencing of terrain factors on land use change based on improved Index Sum Method*

WANG Shidong, WU Chao

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

* 国家自然科学基金项目(41301617)、中国博士后科学基金(2016M590679)、河南省高等学校重点科研项目(17A420001)、河南省高校基本科研业务费专项资金(NSFRF1630)、河南理工大学创新性科研团队项目(B2017-16)和河南省高校科技创新团队支持计划(18IRTSTHN008)资助

王世东, 主要研究方向为土地利用变化与土地复垦。E-mail: wsd0908@163.com

收稿日期: 2017-06-29 接受日期: 2017-09-26

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41301617), the Postdoctoral Science Foundation of China (2016M590679), the Key Scientific Research Project of Henan Higher Education (17A420001), the Fundamental Scientific Research Funds for Colleges and Universities in Henan Province (NSFRF1630), the Innovative Research Team Fund of Henan Polytechnic University (B2017-16) and the Henan Province University Science and Technology Innovation Team Support Program (18IRTSTHN008).
Corresponding author, WANG Shidong, E-mail: wsd0908@163.com
Received Jun. 29, 2017; accepted Sep. 26, 2017

Abstract: Land use change is the interaction result of human activities and natural environment under social and economic impact. Discovering factors affecting land use change is the hot spot and has very important significance for researches on resources, environment and socioeconomic issues. Terrain directly influences land use change. Therefore, it is crucial to explore the extents of terrain affecting the regional land use changes. In order to explain the interaction of human-land system and provide the basis for sustainable land use, environmental protection and ecological reconstruction, we conducted a research on the performance of terrain factors with regard to land use change. The study aimed to explore the influence extents of terrain factors on regional land use change, so as to provide scientific basis for regional land development and land use spatial structure, direction and mode. In view of the existing problems in the research field, based on the natural conditions, land use characteristics and terrain factors of the study area, we chose 12 evaluation indexes from the macro-terrain factors and micro-terrain factors to establish the evaluation index system. Then, a comprehensive evaluation model of terrain factors influencing on land use change was established based on the improved Index Sum method. Indexes weights were determined by combining Entropy method and Decision Alternative Ratio Evaluation System to overcome the objectivity of the Entropy method and improve the rationality of weight determination of the improved Index Sum method. The influencing extent of terrain factors on land use change in Luanchuan County of Henan Province was evaluated using the established method. The results showed that the influencing extents of terrain factors of evaluation, slope, slope direction, slope length, slope direction variability and surface cutting extent increased from 2005 to 2015, while those of slope variability, plane curvature, profile curvature, elevation variation coefficient, terrain relief and terrain roughness decreased. The change in comprehensive influencing extent of terrain factors on land use change was 0.000 978 and the change rate was 7.06% from 2005 to 2010, which were −0.001 705 and −11.50% from 2010 to 2015, and −0.000 727 and −5.25% from 2005 to 2015. These results showed a tendency of increase-decrease of terrain factors influencing extent on land use change from 2005 to 2015. The evaluation results showed that the terrain factors, as the natural driving factors of land use change, had a decreasing trend of influence extent with the social and economic development, improvement of human technology, rationalization of political and economic structure and environment protection. The results provided the important data reference and scientific basis for regional land use planning, urban construction and ecological environment protection.

Keywords: Terrain factor; Improved Index Sum Method; Land use change; Luanchuan County

土地利用作为社会经济影响下的人类活动和自然环境相互作用的结果，其驱动力的作用机制对研究资源环境和社会经济问题有着极其重要的意义[1]。地形因子作为对土地利用变化影响程度最大的自然因素，直接影响着土地利用变化的方式和趋势[2]。因此探究地形因子对区域土地利用变化影响程度具有重要的现实意义，研究成果不仅可以进一步解释人地系统相互作用的内在机制，还可以为区域实现土地可持续利用、环境保护和生态重建等工作提供基础依据。

近年来，国内外学者对地形因子与土地利用变化方面开展了一系列研究，取得了一定的研究成果。例如，Wood[3]将地形因子分为一般地形因子和水文特征因子两大类。Shary 等[4]提出了根据不同领域、不同比例尺的地形因子分类方法。侯明行等[5]对盐城滨海湿地的景观分布、演变以及对地形因子的响应进行了分析。宫继萍等[6]分析了地形因子与农村居民点分布格局的关系。邓欧平等[7]研究了地形因子与土壤养分空间分异的相关关系。郭月峰等[8]研究了流域尺度土壤有机碳与地形因子关系，利用地统计学和 GIS 技术相结合的方法，研究了土壤有机碳的空间分布特征与地形因子的关系。哈凯等[9]研究了各土地利用类型在不同地形上的分布特征。郑亚运等[10]在 DEM 基础上，综合运用 RS 和 GIS 技术，研究了济南市南部山区土地利用结构及其变化、土地利用类型转移率及转移方式与高程、坡度和坡向间的关系。罗娅等[11]基于干湿条件、地貌类型与坡度坡向，由宏观到微观，分析了土地利用变化的主要类型、变化程度以及植被变化程度。郭洪峰等[12]为探讨在不同高程、坡度和坡向分级条件下的土地利用变化规律，以北京市平谷区为例，借助 DEM 提取地形信息，对平谷区土地利用变化在各地形因子分级的分布特征进行了分析，结果表明，研究区土地利用变化剧烈且与高程、坡度和坡向具有高度相关性，随着高程、坡度增大，土地利用变化逐渐减弱。综上所述，近年来在地形因子对土地利用变化影响方面取得了一定的研究成果，例如，上述的国外学者主要对地形因子分类方法进行研究，国内学者主要集中在地形因子与土地利

用空间分布格局的关系以及特定地形因子对土地利用变化的影响方面进行研究。但这些研究大多针对单个或少数地形因子，未能系统研究地形因子对区域土地开发与空间利用的结构、方向、模式等方面的影响，尤其是从宏观地形因子和微观地形因子层面建立评价指标体系和评价模型来分析地形因素影响区域土地利用变化的研究较少；此外由于不同地区的地形地貌特征的差异性，对于评价指标体系的建立没有统一标准且权重确定方法主观性较强，且缺乏科学合理的地形因子对土地利用变化影响程度评价模型。

本文针对目前研究中存在的问题，以河南省栾川县为例，建立基于宏观地形因子和微观地形因子的土地利用变化影响程度评价指标体系；改进传统熵权赋权法，将其应用于指数和法，建立基于改进指数和法的地形因子对土地利用变化的影响程度评价模型，并运用该评价模型对研究区土地利用变化基于地形因子的影响程度进行评价。研究结果可为土地利用变化驱动因素影响程度评价方法研究提供一定的借鉴，同时对研究区土地资源的合理利用，优化土地利用方式，科学进行土地利用规划和环境保护提供理论支持。

1 研究区概况

栾川县位于河南省洛阳市西南部的伏牛山区(111°11′~112°01′E，33°39′~34°11′N)。东与嵩县毗邻，西与卢氏接壤，南与西峡抵足，北与洛宁摩肩。总面积 2 177 km^2，东西长 78.4 km，南北宽 57.2 km。县城距省会郑州市 280 km，距洛阳市 162 km。县城境内有黄河水系的伊河、小河、明白河，长江水系的淯河等 4 条河流，伏牛山、熊耳山、遏遇岭将全县分为南川和北川。整个地形由东向西南逐渐升高，海拔自 450 m 到 2 000 m 以上，全县有中山、低山、河川 3 种地貌类型。同时，栾川县矿藏十分丰富，工矿业比较发达，地形地貌较为复杂，全县山多地少，人均耕地面积偏低，素有“九山半水半分田”之称[13]。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源

本研究采用的原始数据主要有 2005 年、2010 年 Landsat 5 TM 影像、2015 年 Landsat 8 OLI 影像数据和原始DEM数据，其空间分辨率均为30 m×30 m，成像时间分别为 2005 年 8 月 9 日、2010 年 8 月 15 日、2015 年 8 月 26 日。所用数据均来自中国科学院计算机网络信息中心。

2.2 数据处理方法

本研究利用 ENVI 5. 3 软件对 Landsat 遥感数据进行几何校正、影像拼接和影像裁剪等处理，采用不同波段组合成假彩色合成影像图[14]，运用监督分类和人工目视解译的方法进行分类，将研究区划分为耕地、林地、水体、建设用地和裸地共 5 种土地利用类型。考虑研究区草地面积较小，而且零星分布在山体范围内，在遥感影像上很难与林地区分开，因此，将草地归并在林地中。

2.3 研究区土地利用数据处理结果

采用以上处理方法，最终得到研究区 3 期土地利用分类图。通过实地抽样调查对分类结果进行精度验证。经检验 3 期影像分类结果的精度分别为 88.23%、89.75%和 88.63%，Kappa 系数分别为 0.83、0.85 和 0.80，均大于判别精度 0.7 的要求，满足研究需要[15]。其中 3 期土地利用变化数据见表 1。图 1a、1b、1c 分别为栾川县 3 期土地利用分类图，图 1d 为栾川县 DEM 图。

表 1 研究区 2005 年、2010 年和 2015 年土地利用分类结果

Table 1 Land use classification results in 2005, 2010 and 2015 of the study area

土地类型 Land type	2005 年 Year 2005		2010 年 Year 2010		2015 年 Year 2015	
	面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)	面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)	面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)
建设用地 Construction land	5 362.94	2.17	9 137.50	3.69	14 307.30	5.78
耕地 Arable land	24 554.40	9.91	21 941.00	8.86	20 342.00	8.21
林地 Woodland	213 802.50	86.32	212 707.40	85.87	209 183.26	84.45
水体 Waters	2 579.80	1.04	2 495.70	1.01	2 328.60	0.94
裸地 Bare land	1 398.76	0.56	1 416.80	0.57	1 537.24	0.62

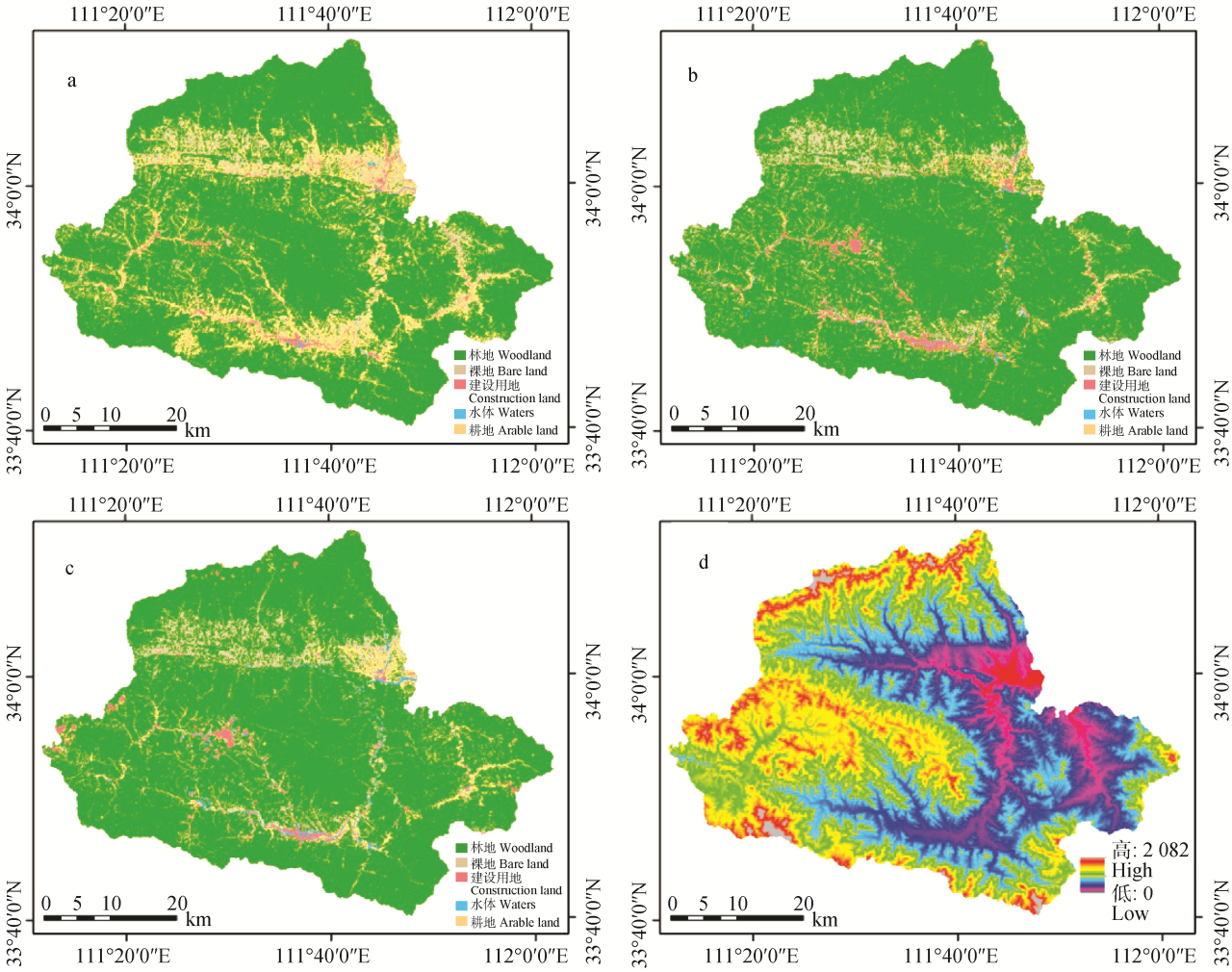

图 1　研究区 2005 年(a)、2010 年(b)和 2015 年(c)土地利用分类结果及 DEM 图(d)

Fig. 1　Land classification results in 2005 (a), 2010 (b), 2015 (c) and DEM (d) of the study area

在研究区土地利用分类结果和 DEM 数据基础上，利用 ArcGIS 软件对研究区的微观地形因子和宏观地形因子进行提取[16]。按照地形因子所描述的空间区域范围，将其划分为微观地形因子与宏观地形因子两种类型。其中研究涉及的微观地形因子有：坡度、坡向、坡长、坡度变率、坡向变率、平面曲率和剖面曲率；宏观地形因子有：地形粗糙度、地形起伏度、高程变异系数和地表切割深度。基于栾川县土地利用分类图、中国 1∶1 000 000 地貌图制图规范以及所提取到的研究区各地形因子的实际数值范围和数据特征，对所提取的地形因子进行了分级[17]，具体见表 2 所示。最后，利用 ArcGIS 软件，将研究区地形因子提取图与研究区 2005 年、2010 年和 2015 年土地利用分类图进行叠加分析，得到研究区地形因子各等级下的 3 期土地利用数据。

3　研究方法

3.1　评价方法

地形因素对土地利用变化影响程度评价拟采用改进指数和法，根据研究区自然条件、实际地形特征和土地利用变化特点，从宏观地形因子和微观地形因子两个方面构建评价指标体系；采用熵权法和环比评分法相结合确定指标权重，在此基础上构建基于改进指数和法的综合评价模型。

改进指数和法是通过计算各评价指标的综合分值，对一定区域内的地形因素对土地利用变化影响程度进行评价。指数和法计算公式为：

$$S=\sum W_k E_k \tag{1}$$

式中：S 为第 k 个评价指标的综合分值，W_k 为第 k 个评价指标的权重，E_k 为第 k 个评价指标的数据标准值。

表 2 研究区地形因子分级标准

Table 2 Grading standards of terrain factors in the study area

类型 Type	地形因子 Terrain factor	级别数 Grade number	分级标准 Grading criteria
微观地形因子 Micro terrain factors	高程 Elevation (m)	4	0~839, 839~1 103, 1 103~1 371, 1 371~2 182
	坡度 Slope (°)	6	0~5, 5~15, 15~2, 25~35, 35~45, 45~88
	坡向 Slope direction	4	阴坡、半阴坡、阳坡、半阳坡 Shady slope, half shady slope, sunny slope, half sunny slope
	坡长 Slope length (m)	5	30~17 541, 17 541~32 722, 32 722~46 132, 46 132~58 907, 58 907~65 535
	坡度变率 Slope variability (°)	5	1~12, 12~23, 23~35, 35~46, 46~58
	坡向变率 Slope direction variability (°)	4	0~90, 90~180, 180~270, 270~360
	平面曲率 Plane curvature	5	−386~−144, −144~−81, −81~0, 0~124, 124~396
	剖面曲率 Profile curvature	4	−277~−138, −138~0, 0~138, 138~276
宏观地形因子 Macro terrain factors	高程变异系数 Elevation variation coefficient	5	2~3, 3~5, 5~7, 7~10, 10~12
	地形起伏度 Terrain relief (m)	5	0~23, 23~61, 61~92, 92~128, 128~281
	地形粗糙度 Terrain roughness	5	1~2, 2~6, 6~11, 11~18, 18~28
	地表切割度 Surface cutting degree	5	0~31, 31~55, 55~137, 137~284, 284~439

3.2 评价指标体系的构建

为了使评价指标体系更加科学化、规范化，本研究从 7 个层次构建地形因素对土地利用变化的影响程度评价指标体系[18]。其中，指标体系中目标层(V)为地形因子对土地利用变化的影响程度；1 级指标(A)为微观地形因子(A_1)和宏观地形因子(A_2)；2 级指标(B)为研究所涉及的地形因子，其中微观地形因子包括高程(B_1)、坡度(B_2)、坡向(B_3)、坡长(B_4)、坡度变率(B_5)、坡向变率(B_6)、平面曲率(B_7)、剖面曲率(B_8)共 8 个地形因子，宏观地形因子包括高程变异系数(B_9)、地形起伏度(B_{10})、地形粗糙度(B_{11})和地表切割度(B_{12})共 4 个地形因子；3 级指标层(C)对应 2 级指标地形因子的地形等级；4 级指标层(D)是各种土地利用类型的分布指数，包括耕地分布指数(D_1)、建设用地分布指数(D_2)、林地分布指数(D_3)、裸地分布指数(D_4)和水体分布指数(D_5)。其中，分布指数通过计算各种土地利用类型的出现频率，可以反映各个用地类型在地形因子各个等级上的分布特征[19-20]。分布指数计算公式如下：

$$P=\left(S_{ie}/S_i\right)\times\left(\frac{S}{S_e}\right) \tag{2}$$

式中：P 为分布指数，S_{ie} 为在 e 地形因子特定等级下的 i 地类面积，S_i 为 i 地类的面积，S_e 为整个区域 e 地形因子特定等级下的土地总面积，S 为整个区域的面积。

最后，可以分别计算出不同地形因子在各等级下的土地利用类型的分布指数。根据上述内容可构建研究区地形因素对土地利用变化的影响程度评价指标体系(表 3)。

3.3 指标权重确定

采用熵权法确定指标权重，评价结果过于客观，缺乏指标之间的横向比较，并且各个指标的权重过于依赖于样本，得到的权重可能不符合指标实际的影响程度[21]。如果在实际应用过程中，单一使用熵权法确定评价指标权重，在综合评价中将会导致评价结果偏向客观，从而与实际情况不符。针对熵权法存在的这一问题，本文利用环比评分法(decision alternative ratio evaluation system，简称 DARE)对熵权法进行改进，该方法可以根据不同评价对象等级得到较为合理的评价指标排序，增加各个指标之间的横向比较，更能根据样本的变化对权重进行相应的修正，一定程度上减少熵权法对样本的依赖性[22]。

3.3.1 环比评分法

环比评分法(DARE)，是一种通过确定各因素的重要性系数来评价和选择创新方案的方法[23]。该方法思路是指从上至下依次比较相邻两个指标的重要程度，给出不同指标功能重要度值，然后令最后一个被比较的指标的重要度值为 1，依次

表 3　地形因子对土地利用变化的影响程度评价指标体系

Table 3　Evaluation indexes system of influence grade of terrain factors on land use change

目标层 Target (V)	1 级指标 First grade index (A)	2 级指标 Second grade index (B)	3 级指标 Third grade index (C)	4 级指标 Fourth grade index (D)[1)]
地形因子对土地利用变化的影响程度评价 Evaluation of influence extent of terrain factors on land use change	微观地形因子 Micro terrain factors (A_1)	高程 Elevation (B_1)	地形因子对应的因子等级 Grades of terrain factors (C_i)	耕地分布指数 Arable land distribution index (D_1)
		坡度 Slope (B_2)		建设用地分布指数 Construction land distribution index (D_2)
		坡向 Slope direction (B_3)		林地分布指数 Woodland distribution index (D_3)
		坡长 Slope length (B_4)		裸地分布指数 Bare land distribution index (D_4)
		坡度变率 Slope variability (B_5)		水体分布指数 Waters distribution index (D_5)
		坡向变率 Slope direction variability (B_6)		
		平面曲率 Plane curvature (B_7)		
		剖面曲率 Profile curvature (B_8)		
	宏观地形因子 Macro terrain factors (A_2)	高程变异系数 Elevation variation coefficient (B_9)		
		地形起伏度 Terrain relief (B_{10})		
		地形粗糙度 Terrain roughness (B_{11})		
		地表切割度 Surface cutting extent (B_{12})		

1) 4 级指标 D_i 即某种土地类型分布指数，指的是土地利用类型在 3 级指标 C_i 即某种地形因子对应等级下的分布特征。1) The fourth grade indexes (D_i) are distribution indexes of land use types, showing the distribution characteristics of land use types under the third grade index (C_i), i. e. grades of the terrain factors.

修正重要性比值，以排列在下面的指标的修正重要度比值乘以与其相邻的上一个指标的重要度比值，得出上一指标修正重要度比值。用各指标修正重要度比值除以功能修正值总和，即得各指标权重。DARE 法的方法与步骤如下:

DARE 法首先确定功能名称(评分对象即评价指标)的顺序，然后通过对比评分确定暂定系数，通过对暂定系数进行修正得到修正系数，最终得到功能评价系数，即评价指标权重值(表 4)。

表 4　用于确定评价指标权重的环比评分法 (DARE)模型的建立

Table 4　Establishment of the DARE model to determine the weights of the evaluation indexes

评分对象 Core object (P_j)	暂定系数 Tentative coefficient (t_j)	修正系数 Correction coefficient (Z_j)	功能评价系数 Functional evaluation coefficient (W_j)
P_1	t_1	$t_{n-1}\times\ldots\times t_3\times t_2\times t_1$	Z_1/Z
P_2	t_2	$t_{n-1}\times\ldots\times t_3\times t_2$	Z_2/Z
P_3	t_3	$t_{n-1}\times\ldots\times t_3$	Z_3/Z
...	...	...	...
P_{n-1}	t_{n-1}	t_{n-1}	Z_{n-1}/Z
P_n	1	1	$1/Z$
合计 Total		Z	1

具体步骤如下:

1)确定评价指标的顺序，具体依据为: 从上至下依次比较相邻两个指标的重要程度，给出不同指标功能重要度值，以此确定评价指标的顺序。

2)确定评价指标的暂定系数 t_j，具体依据为: 根据上述第一步得到的评价指标顺序，通过对比评价指标的评分确定暂定系数(P_n 的暂定系数定为 1)。

3)确定评价指标的修正系数 Z_j。具体依据为: 以排列在下面的指标的修正系数乘以与其相邻的上一个指标的暂定系数得到评分对象的修正系数，其中 P_n 的修正系数定为 1。最后计算评价指标修正值总和 Z。

4)确定评分对象的功能评价系数即评价指标的权重 W_i。

通过各个评价对象的修正系数 Z_j 与修正系数总和 Z 的比值，计算出各个评价指标的功能评价系数 W_j，即评价指标的主观权重。

3.3.2　熵权法的改进

本研究确定权重的思路如下: 首先采用熵权法根据评价指标原始数据，计算评价指标的客观权重 W_i。然后运用 DARE 法依据评价对象和等级，确定其相应指标的主观权重 W_j。利用主观权重 W_j 对客观权重 W_i 进行修正，最终得到评价指标综合权重值。

采用熵权法计算评价指标的客观权重具体步骤如下:

1)指标数据标准化

假设给定 k 个指标 $X_1, X_2, X_3, \cdots, X_k$，其中 X_i

(i=1, 2, 3, …, k)为第 i 个评价指标的实际值。对各指标数据进行标准化处理，Y_i 为各评价指标的标准值:

$$Y_i=(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \quad (3)$$

式中: $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为第 i 个评价指标的最大值和最小值。

2)计算熵值

通过公式(4)和(5)，分别计算出评价指标体系中 2005 年、2010 年和 2015 年评价指标的信息熵值。结果见表 5。

先计算出指标值的比重 p_i:

$$p_i = Y_i / \sum_{i=1}^{n} Y_i \quad (4)$$

其次，计算各指标的熵值 E_i:

$$E_i = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i \quad (5)$$

式中: Y_i 为第 i 个评价指标的标准值, n 为指标个数。

3)根据评价指标的信息熵值和指标权重公式计算各个指标的客观权重。公式如下:

$$W_i = (1-E_i)/(n-\sum E_i) \quad (6)$$

式中: W_i 为第 i 个评价指标客观权重, E_i 为各评价指标的信息熵, n 为评价指标个数。

4)通过公式(4)-(6)，计算出 2005 年、2010 年和 2015 年 4 级评价指标的客观权重 W_i 和熵值 E_{ij}，结果见表 5。

5)确定评价指标主观权重

运用改进指数和法对评价指标的客观权重进行修正。首先确定 4 级指标的评价对象，根据 4 级指标的评价对象的性质，运用 DARE 法构建 4 级评价指标 D-DARE 模型。通过 4 级评价指标 D-DARE 模型，确定 4 级指标 D 的主观权重 W_j; 然后根据刘纪远[24]提出的土地利用程度的综合分析方法，并与研究区实际情况相结合，将土地利用分为 5 级，在此基础上建立 4 级指标 D-DARE 模型。最后基于研究区土地利用程度分级赋值表建立 4 级指标 D-DARE 模型(表 6)。

从表 6 可以看出, 4 级评价指标的评价对象是研究区土地利用类型，最终得到 4 级评价指标的主观权重值。

3.3.3 综合权重的确定

在上述利用环比评分法计算评价指标的主观权重和利用改进熵权法计算评价指标的客观权重的基础上，根据公式 $W_k=W_i\times W_j$ 实现评价指标权重的修正，最终计算得到 4 级评价指标的综合权重值，见表 7。

表 5 地形因子对土地利用变化的影响程度评价指标体系 4 级评价指标信息熵值和客观权重

Table 5 Information entropy values and objective weights of the fourth grade evaluation indexes of the evaluation indexes system of influence extent of terrain factors on land use change

年份 Year	建设用地分布指数 Construction land distribution index (D_1)		耕地分布指数 Arable land distribution index (D_2)		林地分布指数 Woodland distribution index (D_3)		水体分布指数 Waters distribution index (D_4)		裸地分布指数 Bare land distribution index (D_5)	
	信息熵值 Entropy value	客观权重 Objective weight	信息熵值 Entropy value	客观权重 Objective weight	信息熵值 Entropy value	客观权重 Objective weight	信息熵值 Entropy value	客观权重 Objective weight	信息熵值 Entropy value	客观权重 Objective weight
2005	1.550	0.184	1.558	0.186	1.692	0.231	0.898	0.218	1.545	0.182
2010	1.527	0.176	1.588	0.197	1.574	0.192	0.899	0.215	1.661	0.221
2015	1.536	0.183	1.576	0.196	1.575	0.196	0.901	0.212	1.625	0.213

表 6 研究区地形因子对土地利用变化的影响程度评价指标体系 4 级评价指标 D-DARE 模型

Table 6 D-DARE model of the fourth grade evaluation indexes of the evaluation indexes system of influence extent of terrain factors on land use change

评价指标对象 Score object (P_j)	暂定系数 Tentative coefficient (t_j)	修正系数 Correction coefficient (Z_j)	主观权重 Subjective weight (W_j)
建设用地分布指数 Construction land distribution index (D_1)	5	120	0.784
耕地分布指数 Arable land distribution index (D_2)	4	24	0.157
林地分布指数 Woodland distribution index (D_3)	3	6	0.039
水体分布指数 Waters distribution index (D_4)	2	2	0.013
裸地分布指数 Bare land distribution index (D_5)	1	1	0.007
合计 Total	—	153	1.000

表 7　地形因子对土地利用变化的影响程度评价指标体系 4 级评价指标综合权重值

Table 7　Comprehensive weight values of the fourth grade evaluation indexes of the evaluation indexes system of influence extent of terrain factors on land use change

年份 Year	建设用地分布指数 Construction land distribution index (D_1)	耕地分布指数 Arable land distribution index (D_2)	林地分布指数 Woodland distribution index (D_3)	水体分布指数 Waters distribution index (D_4)	裸地分布指数 Bare land distribution index (D_5)
2005	0.028 888	0.145 824	0.009 009	0.001 526	0.002 366
2010	0.027 632	0.154 448	0.007 488	0.001 505	0.002 873
2015	0.028 731	0.153 664	0.007 644	0.001 484	0.002 769

4　结果与分析

4.1　单一地形因子评价结果与分析

根据上述方法建立的土地利用变化地形因素影响程度评级体系和改进指数和综合评价模型, 计算得到各评价指标的综合权重值, 最终确定各个地形因子对研究区土地利用变化的影响程度评价结果, 如表 8 所示。

从表 8 可以看出, 2005 年, 地形因子对土地利用变化影响程度评价值由大到小的排序为: 坡度变率>地形粗糙度>地表切割度>剖面曲率>高程>坡向>高程变异系数>坡向变率>地形起伏度>坡度>平面曲率>坡长; 2010 年, 地形因子对对土地利用变化影响程度评价值由大到小的排序为: 地形粗糙度>坡度变率>地表切割度>剖面曲率>高程>坡向>高程变异系数>坡向变率>坡度>地形起伏度>坡长>平面曲率; 2015 年, 地形因子对土地利用变化影响程度评价值由大到小的排序为: 地形粗糙度>坡度变率>地表切割度>剖面曲率>高程>坡向>坡向变率>高程变异系数>坡度>地形起伏度>坡长。

表 8　2005—2015 年研究区地形因子对土地利用变化的影响程度评价结果

Table 8　Influencing extents of terrain factors on land use changes in the study area from 2005 to 2015

地形因子 Terrain factor	综合分值 Comprehensive score			综合分值变化 Change of comprehensive score					
				2005—2010		2010—2015		2005—2015	
	2005	2010	2015	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)
高程 Elevation (B_1)	0.017 7	0.018 6	0.018 9	0.000 899	5.07	0.000 233	1.25	0.001 132	6.38
坡度 Slope (B_2)	0.005 9	0.006 5	0.006 6	0.000 604	10.26	0.000 115	1.77	0.000 719	12.22
坡向 Slope direction (B_3)	0.012 4	0.014 2	0.014 8	0.001 796	14.46	0.000 628	4.42	0.002 424	19.51
坡长 Slope length (B_4)	0.003 6	0.003 9	0.004 3	0.000 367	10.27	0.000 311	7.89	0.000 678	18.98
坡度变率 Slope variability (B_5)	0.110 8	0.102 0	0.100 7	−0.008 793	−7.94	−0.001 282	−1.26	−0.010 075	−9.09
坡向变率 Slope direction variability (B_6)	0.010 3	0.010 1	0.010 7	−0.000 251	−2.43	0.000 626	6.21	0.000 375	3.63
平面曲率 Plane curvature (B_7)	0.003 8	0.003 4	0.002 6	−0.000 381	−10.11	−0.000 742	−21.89	−0.001 123	−29.79
剖面曲率 Profile curvature (B_8)	0.040 0	0.048 6	0.033 2	0.008 565	21.40	−0.015 390	−31.67	−0.006 825	−17.05
高程变异系数 Elevation variation coefficient (B_9)	0.011 6	0.012 0	0.008 6	0.000 419	3.63	−0.003 327	−27.79	−0.002 908	−25.17
地形起伏度 Terrain relief (B_{10})	0.006 0	0.006 4	0.005 7	0.000 427	7.12	−0.000 721	−11.23	−0.000 294	−4.90
地形粗糙度 Terrain roughness (B_{11})	0.108 8	0.116 0	0.103 3	0.007 189	6.61	−0.012 696	−10.95	−0.005 507	−5.06
地表切割度 Surface cutting extent (B_{12})	0.044 1	0.051 0	0.044 3	0.006 914	15.69	−0.006 665	−13.07	0.000 249	0.56

根据前面计算方法, 可以得到各地形因子在 2005—2010 年、2010—2015 年和 2005—2015 年期间对土地利用变化影响程度评价值的变化情况。2005—2015 年间地形因子高程、坡度、坡向、坡长、坡向变率和地表切割度对研究区土地利用变化的影响程度评价值增加。在该地形因子等级区域内, 社会经济发展和土地开发利用技术水平较低, 加之没有合理的制度和政策的引导, 导致在社会经济、城市化和人口密度迅速增长的同时, 大量耕地转化为建设用地, 部分植被遭到破坏, 裸地面积增加, 水资源短缺, 生态环境日趋脆弱。此外, 地形因子坡度变率、平面曲率、剖面曲率、

高程变异系数、地形起伏度和地形粗糙度对研究区土地利用变化影响程度评价值在减小。在该地形因子等级区域内，社会经济水平较为发达，土地开发利用技术水平较高，政治经济结构和政策较为合理，在社会经济发展的同时重视保护生态环境，导致作为土地利用自然驱动因素的地形因子对土地利用变化的影响程度不断降低，土地利用人文驱动因素对土地利用变化的影响程度却不断增加。

4.2 地形因子类型评价结果与分析

根据单一地形因子对土地利用变化影响程度评价结果，可以看出在 2005—2010 年、2010—2015 年和 2005—2015 年间，不同地形因子类型对土地利用变化影响程度评价值由大到小的排序均为：宏观地形因子>微观地形因子。在此基础上，可以计算得到研究区微观地形因子和宏观地形因子在 2005—2010 年、2010—2015 年和 2002—2015 年间的评价值变化情况(表 9)。

表 9 2005—2015 年研究区地形因子类型对土地利用变化的影响程度评价结果

Table 9 Changes in influencing extents of different types to terrain factors on land use changes in the study area from 2005 to 2015

地形因子类型 Terrain factors type	2005—2010		2010—2015		2005—2015	
	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)
微观地形因子 Micro terrain factors	0.000 351	1.37	−0.001 938	−7.48	−0.001 587	−6.21
宏观地形因子 Macro terrain factors	0.003 737	8.77	−0.005 852	−12.63	−0.002 115	−4.96

从表 9 评价值的变化可以看出，微观地形因子对研究区土地利用变化的影响程度评价值在 2005—2010 年间增加，在 2010—2015 年间减小；宏观地形因子对研究区土地利用变化的影响程度评价值在 2005—2010 年间增加，在 2010—2015 年间减小。总的来说，微观地形因子和宏观地形因子对研究区土地利用变化的影响程度评价值在 2005—2015 年间均呈现先增加后减小趋势。从土地利用变化的驱动机制来看，地形因子作为影响土地利用变化的自然因素，对土地利用变化影响程度呈降低趋势，而随着社会经济发展和开发利用土地的技术水平不断提高，人文因素对土地利用变化的影响程度将呈现不断增加的趋势。

4.3 综合地形因子评价结果与分析

根据表 9 中计算出的各地形因子对土地利用变化影响程度的评价结果进行整理，由于微观地形因子和和宏观地形因子的评价指标数量不同，因此为了提高评价结果的准确性，采用加权平均法对地形因子进行综合评价，计算得到研究区地形因子在 2005 年、2010 年和 2015 年对土地利用变化的影响程度综合评价值及 2005—2010 年、2010—2015 年和 2005—2015 年间的评价值变化情况(表 10)。

表 10 2005—2015 年地形因子对土地利用变化影响程度的综合评价结果及变化情况

Table 10 Comprehensive evaluation results and changes of influencing extents of terrain factors on land use changes in the study area from 2005 to 2015

评价结果 Evaluation result			综合分值变化 Change of evaluation result					
			2005—2010		2010—2015		2005—2015	
2005	2010	2015	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)	变化值 Change value	变化率 Change rate (%)
0.013 846	0.014 824	0.013 119	0.000 978	7.06	−0.001 705	−11.50	−0.000 727	−5.25

从表 10 可以看出，地形因子对土地利用变化的影响程度在 2005—2015 年间呈现先增加后减少的趋势，并且影响程度总体呈现减小趋势。主要表现在栾川县社会经济发展水平较低的地区，该区域内在 2005—2010 年间经济快速发展，城市化加速，尤其是栾川县矿业和旅游行业的飞速发展，人口密度和经济水平快速提高，导致研究区耕地和林地等生态用地大量减少，生态环境脆弱，局部区域出现植被退化、土壤侵蚀、水土流失等生态环境问题；2010—2015 年间地形因子对土地利用变化的影响程度评价值呈现减小趋势，说明随着城市化加快和经济水平提高，在技术水平、政策因素和政治经济结构因素等人文驱动因素的影响下，人们开始有意识地通过制定一系列措施

和政策来保护生态环境, 地形因子对土地利用变化的影响程度减小。总的来说, 2005—2015 年间地形因子对土地利用变化的影响程度总体呈减小趋势。随着社会经济不断发展和人类技术水平的不断提高, 政治经济结构的合理化以及保护生态环境意识等人文驱动因素影响下, 地形因子对土地利用变化的影响程度将会继续呈现减小趋势。

5　结论

本文将 DEAR 法运用到熵权法中, 通过 DARE 法与熵权法相结合确定权重的方法, 建立了基于改进指数和法综合评价模型, 与传统的指数和法评价模型相比, 本文提出的改进指数和法综合评价模型在一定程度上减小了在指标对象和数量发生变化时导致权重分配的不合理性, 减少熵权法对样本的依赖性, 克服了熵权法中指标权重客观性较强的缺点, 提高了指数和综合评价模型中权重确定的合理性以及评价方法的适应性, 使得评价结果更加客观合理。该模型可广泛应用于我国大多数城市的土地利用开发规划和城市规划工作中, 在区域土地利用规划、城市建设和生态环境保护等方面有较好的应用价值。最后将该模型应用于河南省洛阳市栾川县地形因子对土地利用变化的影响程度评价中。结果表明, 研究区地形因子对土地利用变化的影响程度评价值总体呈逐渐较小趋势, 随着社会经济因素的发展, 在人类技术水平的提高, 政治经济结构的合理化以及保护生态环境意识和政策等人文驱动因素条件下, 地形因子作为影响土地利用变化的自然驱动因素之一, 对土地利用变化的影响程度总体呈现减小趋势。针对这一情况, 在地形因子单一评价结果的基础上, 栾川县的土地利用规划和城市建设区域的重点应放在地形因子对土地利用变化影响程度较低的区域内, 来缓解经济发达区域内的生态环境问题。

参考文献 References

[1] 封建民, 郭玲霞. 陕西省神木县土地利用格局和生态服务价值变化[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 293–298
FENG J M, GUO L X. Land use patterns and ecosystem service values change in Shenmu County of Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 293–298

[2] 李丹, 刘丹丹, 赵金祥. 基于 DEM 的山区土地利用变化分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 66–70
LI D, LIU D D, ZHAO J X. Analysis of land use change in mountain area based on DEM[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 66–70

[3] WOOD J. The geomorphological characterisation of digital elevation models[D]. Leicester: University of Leicester, 1996

[4] SHARY P A, SHARAYA L S, MITUSOV A V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis[J]. Geoderma, 2002, 107(1/2): 1–32

[5] 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等. 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3765–3773
HOU M H, LIU H Y, ZHANG H B, et al. Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3765–3773

[6] 宫继萍, 石培基, 杨雪梅, 等. 干旱区内陆河流域景观格局及其与环境因子的关系研究——以石羊河流域为例[J]. 土壤, 2013, 45(1): 143–151
GONG J P, SHI P J, YANG X M, et al. Spatial gradient pattern of landscapes and their relations with environmental factors in the inland river basin of arid regions: A case of Shiyang River Basin[J]. Soils, 2013, 45(1): 143–151

[7] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2434–2443
DENG O P, ZHOU X, HUANG P P, et al. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan[J]. Resources Science, 2013, 35(12): 2434–2443

[8] 郭月峰, 姚云峰, 秦富仓, 等. 地形因子对老哈河流域土壤有机碳的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 156–161
GUO Y F, YAO Y F, QIN F C, et al. Impact of terrain factors on soil organic carbon in Laoha River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(2): 156–161

[9] 哈凯, 丁庆龙, 门明新, 等. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系——以河北省怀来县为例[J]. 地理研究, 2015, 34(5): 909–921
HA K, DING Q L, MEN M X, et al. Spatial distribution of land use and its relationship with terrain factors in hilly area[J]. Geographical Research, 2015, 34(5): 909–921

[10] 郑亚运, 赵清, 黄巧华, 等. 济南市南部山区土地利用变化与地形因子关系研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 149–153
ZHENG Y Y, ZHAO Q, HUANG Q H, et al. Research on the relationship between land use change and terrain factors in the south mountain area of Ji'nan, Shandong Province, China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 149–153

[11] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 黄河河口镇—潼关区间1998—2010年土地利用变化特征[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 42–53
LUO Y, YANG S T, LIU X Y, et al. Land use change in the reach from Hekouzhen to Tongguan of the Yellow River dur-

ing 1998–2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 42–53

[12] 郭洪峰, 许月卿, 吴艳芳. 基于地形因子的大都市边缘区土地利用变化分析——以北京市平谷区为例[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(1): 178–187
GUO H F, XU Y Q, WU Y F. Land use change in metropolitan fringe based on topography factors: A case study of Pinggu District, Beijing[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(1): 178–187

[13] 周亮, 文仕知, 李铁华, 等. 河南省栾川县林业发展的现状及对策[J]. 河南林业科技, 2012, 32(1): 22–25
ZHOU L, WEN S Z, LI T H, et al. Forestry development's present situation and counter measure of Luanchuan County, Henan Province [J]. Journal of Henan Forestry Science and Technology, 2012, 32(1): 22–25

[14] 白洪伟, 辛博爵. 基于 ENVI 的宿州市土地利用动态变化分析[J]. 阴山学刊: 自然科学版, 2016, 30(4): 68–70
BAI H W, XIN B J. Analysis of land use dynamic change in Suzhou city based on ENVI[J]. Yinshan Academic Journal: Natural Science Edition, 2016, 30(4): 68–70

[15] 白洪伟, 徐洋洋. 基于 ENVI 和 ArcGIS 的合肥市土地利用/覆被变化分析[J]. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2016, 28(5): 365–372
BAI H W, XU Y Y. Analysis of land use/cover change in Hefei City based on ENVI and ArcGIS[J]. Journal of Shenyang University: Natural Science, 2016, 28(5): 365–372

[16] 钟德燕, 常庆瑞, 宋丰骥. 黄土丘陵沟壑区土地利用空间分布与地形因子关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 102–108
ZHONG D Y, CHANG Q R, SONG F J. Relationship between terrain factors and spatial distribution of land use in loess hilly and gully area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 102–108

[17] 李欣, 叶长盛, 吕雪. 基于地形因子的鄱阳湖地区土地利用格局变化分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 210–218
LI X, YE C S, LYU X. Analysis of land use pattern change in Poyang Lake region based on the topographic factor[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 210–218

[18] 张万红, 陈振斌. 基于层次分析法的和谐矿区评价体系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 848–852
ZHANG W H, CHEN Z B. Assessment system of harmonious mining area based on analytic hierarchy process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(6): 848–852

[19] 骆延青, 赵俊三. 基于层次分析法的华坪县地质环境承载力评价[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(21): 64–66
LUO Y Q, ZHAO J S. Assessment of geological environment carrying capacity of Huaping County based on AHP[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(21): 64–66

[20] 陈延辉, 吴怀静. 基于熵权 DPSIR 模型的宁县土地利用规划环境影响评价研究[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(1): 130–134
CHEN Y H, WU H J. The land use planning environmental impact assessment based on entropy weight DPSIR in Ningxian County[J]. Journal of Northwest Normal University: Natural Science, 2016, 52(1): 130–134

[21] 梁叶萍, 毕如田. 基于指数和法和极限条件法的矿区土地适宜性评价——以孟家窑煤矿为例[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2014, 34(5): 436–441
LIANG Y P, BI R T. The evaluation of land suitability in mining area based on the indexes and limit conditions — Mengjiayao Coal Mine[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2014, 34(5): 436–441

[22] 杨志超, 张成龙, 葛乐, 等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 90–94
YANG Z C, ZHANG C L, GE L, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flashover pollution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90–94

[23] 陈志刚, 周丹. 基于环比倍乘评分法的上海市创新型城市阶段评价[J]. 消费导刊, 2008, (16): 175
Chen Z G, Zhou D. Evaluation of Shanghai's innovative city stage based on ring multiplication scoring method[J]. Consume Guide, 2008, (16): 175

[24] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996
LIU J Y. Macro-Scale Survey and Dynamic Study of Natural Resources and Environment of China by Remote Sensing[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996