

基于云模型与熵权法的安徽省土地生态安全评价研究^①

黄木易, 何翔

(安徽建筑大学环境与能源工程学院, 合肥 230601)

摘要: 土地生态环境条件是区域社会经济可持续发展的基础。本研究以安徽省为例, 根据“自然-社会-经济”复合系统理论构建土地生态安全评价指标体系, 应用云理论, 将正态云模型与熵权法引入安徽省土地生态安全评价研究中, 揭示近 10 年来安徽省土地生态安全状况、演变规律及障碍因子。研究结果表明: 2005 年、2010 年和 2013 年, 安徽省土地生态安全水平分别处于一般、良好和健康水平, 土地生态安全状况趋于良性发展; 基于综合指数评价方法, 2005 年、2010 年和 2013 年的土地生态安全水平评价结果分别为 0.184 8、0.342 4 和 0.473 0, 表明安徽省土地生态安全处于稳步上升趋势, 与云模型评价结论一致; 指标隶属度分析显示, 2005 年、2010 年和 2013 年, 安徽省土地生态安全处于良好及以上水平的指标分别为 7 个、13 个和 17 个, 处于上升趋势; 而一般及以下水平的指标分别为 16 个、10 个和 6 个, 处于下降趋势。因此, 近 10 年来, 安徽省土地生态系统整体状况趋于良性发展, 在一定程度上体现了生态文明建设对土地生态系统的优化效应。

关键词: 正态云模型; 熵权法; 土地生态安全; 安徽省

中图分类号: F301; X826

土地是人类生产和生活的重要资源和资产, 是整个资源、环境的根基, 居核心地位。土地生态系统也是整个生态系统的组成部分, 土地利用或配置是否合理, 对整个资源节约与环境保护有重大影响^[1]。土地生态系统的安全对于生态环境系统影响很大^[2], 人类面临的许多生态环境问题其深层次的原因都与土地的利用有关。可以说土地生态系统安全状况是社会经济可持续发展的基础。土地生态评价研究一直是 LUCC 研究领域的热点^[3-9]。相关研究广泛采用的评价方法主要有神经网络、模糊综合评价和主成分分析等^[10-11], 这类传统的评价方法在一定程度上忽视了评价中存在的 uncertainty 问题^[12]。1993 年, 李德毅院士首次提到云的概念, 并以此为基础建立了定性定量之间转换的不确定性转换模型^[13-14]。云模型在概念的不确定性分析上具有独特优势, 以及该模型能较好地体现评价中模糊性和随机性问题, 因此, 引入云模型能有效解决土地生态安全评价过程中的不确定性转换及随机性和模糊性问题。云模型理论最初较多的应用在复杂系统过程评估、系统性能测试、电子产品可靠性等方面^[15-16], 近年来, 该方法广泛应

用于水质评价^[17]、环境评价^[12]、生态安全评估^[18-19]等研究中。

安徽省位于华东腹地, 区域优势明显。近年来, 随着中部崛起战略的提出、皖江城市带产业转移示范区的设立, 安徽省的社会经济高速发展, 2005 年全省生产总值(GDP)为 5 350.17 亿元, 2013 年达 19 229.34 亿元, 增长约 2.6 倍。另外, 2014 年 12 月 29 日, 国家发展改革委等 11 个部委联合印发了《国家新型城镇化综合试点方案》, 并将安徽列为国家新型城镇化综合试点省, 未来安徽省必将迎来新一轮的工业化和城镇化浪潮, 区域经济高速增长将会对土地资源与生态环境产生巨大的冲击。因此, 作为全国生态省建设试点之一, 安徽省在加强生态强省建设进程中, 面临着区域社会经济快速发展的机遇, 而如何协调好经济发展与生态建设的关系是能否取得社会经济可持续发展的关键。本文基于“自然-社会-经济”复合系统理论, 构建土地生态安全评价指标体系, 引入云理论对近 10 年来的安徽省土地生态安全系统进行分析评估, 揭示土地生态安全状况、演变规律及障碍因子, 研究结果在一定程度上可为安徽省未来生态

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471422)、安徽省高校省级优秀青年人才基金重点项目(2013SQRL047ZD)和安徽省财政、住建厅徽派建筑保护省级专项(HPZX2013-01)资助。

作者简介: 黄木易(1978—), 男, 安徽芜湖人, 博士, 副教授, 主要从事土地管理与 3S 技术应用研究。E-mail: huangyang78@163.com

保护、规划和建设提供相应的理论依据。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 土地生态安全评价指标体系构建及数据标准化

本文在前人相关研究基础上^[3-9,20-22], 结合安徽省实际情况, 根据“自然-社会-经济”复合系统理论,

构建土地生态安全评价指标体系。研究所采用的数据来源主要为 2006 年、2011 年和 2014 年《安徽省统计年鉴》、环境状况公报等统计数据资料。依据评价指标体系, 建立土地生态安全因素集, $A=\{A_1, A_2, \dots, A_{23}\}$, 将 2005 年、2010 年、2013 年的各指标数据进行标准化处理, 结果见表 1。

表 1 土地生态安全评价指标体系及权重
Table 1 Index system and weights of land ecological security evaluation

因素	指标		年份			权重
	代号	名称	2005 年	2010 年	2013 年	
土地自然生态安全系统(A)	A1	人均耕地面积(人/hm ²)	0.317 3	0.324 0	0.358 7	0.002 5
	A2	森林覆盖率(%)	0.320 9	0.339 7	0.339 4	0.000 6
	A3	土地受自然灾害比重(%)	0.152 3	0.324 5	0.523 2	0.187 6
	A4	人均粮食产量(kg/人)	0.282 5	0.336 7	0.380 8	0.012 8
	A5	有效灌溉面积(khm ²)	0.298 6	0.315 5	0.385 9	0.011 0
	A6	建成区绿化覆盖率(%)	0.272 2	0.333 3	0.394 5	0.019 6
	A7	人均水资源(m ³ /人)	0.310 2	0.423 6	0.266 2	0.033 7
	A8	单位面积耕地化肥负荷(t/hm ²)	0.307 3	0.336 7	0.356 0	0.003 2
土地经济生态安全系统(B)	B1	人均 GDP(元)	0.141 0	0.341 3	0.517 7	0.199 5
	B2	第三产业比重(%)	0.346 7	0.289 5	0.363 8	0.008 1
	B3	单位面积林地产值(万元/hm ²)	0.171 8	0.296 3	0.531 9	0.173 6
	B4	农民人均纯收入(元)	0.164 8	0.329 8	0.505 4	0.157 8
	B5	单位播种面积谷物产量(t/hm ²)	0.328 7	0.334 3	0.337 0	0.000 1
	B6	单位面积农用地薄膜使用量(t/hm ²)	0.306 6	0.341 0	0.352 4	0.003 0
	B7	全社会固定资产占 GDP 比重(%)	0.197 2	0.401 5	0.401 3	0.079 5
土地社会生态安全系统(C)	C1	人口密度(人/km ²)	0.321 1	0.337 0	0.341 9	0.000 6
	C2	人均建设用地面积(m ² /人)	0.318 4	0.356 8	0.324 8	0.002 2
	C3	人均工业废水排放量(t/人)	0.305 5	0.373 3	0.321 2	0.006 5
	C4	每千人拥有卫生人员数	0.254 1	0.335 9	0.409 9	0.032 1
	C5	年内新增耕地面积占总耕地面积(%)	0.252 0	0.459 1	0.288 9	0.061 2
	C6	就业率(%)	0.339 0	0.330 3	0.330 7	0.000 1
	C7	人口自然增长率(‰)	0.313 6	0.341 4	0.345 0	0.001 5
	C8	恩格尔系数(%)	0.361 5	0.323 4	0.315 1	0.003 2

1.2 正态云模型与熵权法

正态云模型是定性定量转换的不确定性转换模型^[13]。正态云的数字特征用 3 个数值来表征, 分别为: 期望(Expected value, Ex), 其代表性概念论域的中心值; 熵(Entropy, En), 其度量了定性概念在论域中可被接受的数值范围; 超熵(Hyper entropy, He)是关于熵的不确定性度量。它们反映了定性概念和定量特性。云的生成可以通过云发生器(Cloud generator, CG)进行模拟产生, 它是云生产的算法, 其中正向云发生器是最基本的算法, 它可以实现定性信息向定量范围和分布规律的转换。图 1 是

本研究基于 Matlab7.0 编程模拟的评价指标正态云模型。

指标因子权重的确定对评价结果至关重要。目前常用的方法主要有专家评分法、模糊综合评判法、层次分析法、主成分分析法等。熵权法是一种客观赋权方法, 通过指标信息熵值的大小进行权重分配, 从而克服了专家经验、视角等主观性原因造成的权重不确定性。目前, 相关研究中常采用熵权法进行评价指标权重的计算, 主要计算步骤可参考相关文献[19]。本文采用熵权法对标准化后的评价指标进行权重系数计算, 结果见表 1。

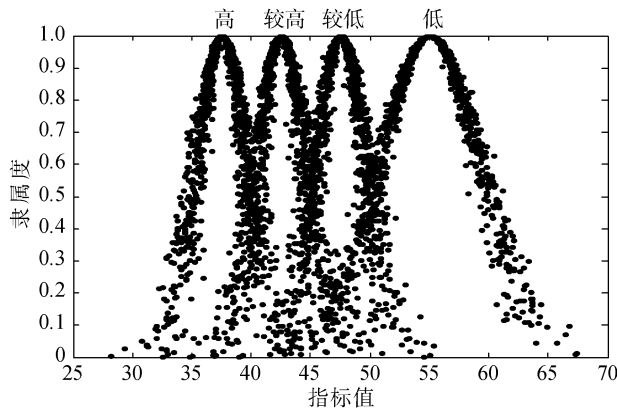


图 1 恩格尔系数正态云模型

Fig. 1 Normal cloud model of Engel's coefficient

2 结果与分析

2.1 云模型参数确定及评价因子正态云模型生成

评价中的每个指标所对应的等级用正态云的隶属度来判断,即每个评价指标将会生成一个正态云模型。在已经确定了评价因子及其标准的基础上,某评价指标可以通过其上、下边界 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ 来确定云的 3 个数字特征,公式如下^[17]:

$$\begin{cases} Ex = (B_{min} + B_{max}) / 2 \\ En = (B_{max} - B_{min}) / 6 \\ He = k \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_{min} 、 B_{max} 分别表示评价指标的最小与最大边, k 为常数,可根据变量的模糊阈值进行调整,文中取经验值 0.1。本文确定的云模型参数计算方法见表 2。

表 2 云模型的数字特征的确定方法
Table 2 Determination of cloud model digital characteristics

Cloud	Ex	En	He
危险, 对应低级	$Ex1=(a_1 + a_2)/2$	$En1=(Ex2 - Ex1)/3$	0.1
一般, 对应较低	$Ex2=(a_2 + a_3)/2$	$En2=(Ex2 - Ex1)/3$	0.1
良好, 对应较高	$Ex3=(a_3 + a_4)/2$	$En3=(Ex3 - Ex2)/3$	0.1
健康, 对应高级	$Ex4=(a_4 + a_5)/2$	$En4=(Ex4 - Ex3)/3$	0.1

各个等级上、下限值分别用 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 表示,即评价语集可表示为 $C=\{(a_1+a_2)/2, (a_2+a_3)/2, (a_3+a_4)/2, (a_4+a_5)/2\}$ 。根据指标的各等级上、下限值,依据上述公式,计算每个等级对应的正态云模型特征值,用得到的正态云模型来决定 23 个指标的各个等级。以恩格尔系数(C8)指标为例,该评价指标分成 4 个等级,即评价语集 $C=\{低, 较低, 较高, 高\}$,分别表示该指标代表的恩格尔系数 4 个级别,其各级别 {低, 较低, 较高, 高} 的上、下边界值为 $\{(60, 50), (50, 45), (45, 40), (40, 35)\}$ (限于篇幅,其余指标上、下边界数值略)。按照云数字特征计算公式得到各指标的正态云模型参数。本文基于 Matlab7.0 模

拟该评价指标的正态云,其隶属度标准正态云模型分布见图 1 所示。恩格尔系数正态云模型分布图表示该指标 {危险, 一般, 良好, 健康} 等级分别对应了 {低, 较低, 较高, 高} 级别的隶属度。

2.2 评价因子正态云模型隶属度矩阵分析

通过对 2005 年、2010 年、2013 年安徽省土地生态安全评价指标数据进行标准化处理,将标准化后的数据利用熵值法计算各个指标的权重,结果见表 1。利用评价权重集 $=\{0.0025, 0.0006, 0.1876, 0.0128, 0.0110, 0.0196, 0.0337, 0.0032, 0.1995, 0.0081, 0.1736, 0.1578, 0.0001, 0.0030, 0.0795, 0.0006, 0.0022, 0.0065, 0.0321, 0.0612, 0.0001, 0.0015, 0.0032\}$ 建立指标的评价语集,将每个指标分成 4 个等级,即评价语集 $C=\{危险, 一般, 良好, 健康\}$,分别表示该指标代表的安徽省土地生态安全 4 个级别 {低, 较低, 较高, 高}。利用逆向发生器可计算得出这一指标每个等级的正态云模型标准值。然后,计算各个年份对应每个等级的隶属度。本文基于 Matlab7.0 编程模拟各评价指标的正态云,令 $N=1000$,重复运行正向正态云发生器 1000 次,得到不同的隶属度,然后计算均值作为土地生态安全评价指标在某一等级下的隶属度。23 个指标的模糊隶属度矩阵见表 3。

指标隶属度分析表明,2005 年、2010 年和 2013 年,安徽省土地生态安全处于良好及以上水平的指标分别为 7 个、13 个和 17 个;而处于一般及以下水平的指标分别为 16 个、10 个和 6 个。近 10 年,安徽省良好及以上指标处于上升趋势,一般及以下水平指标处于下降趋势,土地生态安全系统整体表现较好。从 2013 年近期评价结果来看,处于健康水平的指标共 9 个,其中 5 个位于土地经济生态安全子系统中,3 个位于土地自然生态安全系统中,1 个位于土地社会生态安全子系统中。而危险指标在各子系统中均有 1 个,分别为土地受自然灾害比重(A3)、单位面积农用地薄膜使用量(B6)和人口自然增长率(C7),值得注意的是,这 3 个指标从 2005 年到 2013 年,在近 10 年间呈现不断恶化趋势。保障土地生态安全,促进土地资源可持续发展,必须加强土地灾害治理投入,减少农用薄膜塑料制品或使用可降解农用薄膜避免土地污染,改善农业生态环境,适度控制人口增长、提高人口素质,缓解区域人地矛盾。分析表明,目前安徽省土地生态系统中的经济生态安全子系统较优,在保持经济生态安全前提下,应进一步加强自然和社会生态安全子系统的指标建设,从而保障安徽省土地生态安全系统的全面提升与优化。

2.3 土地生态安全综合评价结果

将土地生态安全隶属度矩阵与指标权重集进行模糊转换^[23],得到土地生态安全的综合评价结果。根据最大隶属度原则,将评价结果隶属度中最大值对应的等级作为安徽省土地生态安全的水平,如表 3 所示。以 2005 年评价结果为例,{危险,一般,良好,健康}4 个等级的隶属度值分别为{0.400 4, 0.517 1, 0.275 3, 0.208 2},依据最大隶属度原则,2005 年安徽省土地生态安全级别为一般。依此类推,分别求得 2010 年、2013 年安徽省土地生态安全水平,分别为良好和健康。

正态云模型评价结果表明,过去近 10 年,安徽省土地生态安全水平从一般上升为良好和健康,土地生态系统状况得到改善。为了对比,本文也利用综合指数法对各年份土地生态安全进行了分析,采用公

式: $LES_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} \cdot X'_{ij}$ 进行土地生态安全综合计算,

式中: LES_i 为土地生态安全综合指数值; X'_{ij} 为评价指标层各指标的标准化值; W_{ij} 为评价指标的权重。计算结果表明,安徽省 2005 年、2010 年和 2013 年土地生态安全综合指数值分别为 0.184 8、0.342 4 和 0.473 0,表明近 10 年来,安徽省土地生态安全水平呈稳步上升态势,结果与云模型评价结论一致。生态系统具有重要的服务价值,是社会经济可持续发展评估研究的关键内容^[24]。因此,健康的土地生态系统可为区域社会经济的可持续发展奠定良好的基础。统计表明,2005 年全省国内生产总值 5 380.67 亿元,2013 年增长至 19 052.35 亿元,约为 2005 年的 3.6 倍,近 10 年来,安徽省 GDP 呈快速增长趋势,但人均 GDP 绿色指标如万元 GDP 能耗等却呈下降趋势^[25],安徽省生态环境质量提高与该省生态文明建设成果息息相关。本文中土地生态安全评价研究的结果在一定程度上符合安徽省生态建设成果的实际状况。

表 3 云模型隶属度矩阵(2005—2013 年)
Table 3 The membership matrix of cloud model(2005-2013)

系统层	指标	指标权重	隶属度(2005 年)				隶属度(2010 年)				隶属度(2013 年)			
			危险	一般	良好	健康	危险	一般	良好	健康	危险	一般	良好	健康
土地自然生态安全系统(A)	A1	0.002 5	0.643 9	0.569 0	0.108 3	0.120 8	0.520 6	0.809 8	0.168 1	0.164 2	0.180 7	0.249 1	0.948 9	0.484 2
	A2	0.000 6	0.350 3	0.899 1	0.302 7	0.116 6	0.146 3	0.165 2	0.588 4	0.658 7	0.156 2	0.215 7	0.669 3	0.627 5
	A3	0.187 6	0.021 3	0.037 2	0.318 9	0.844 2	0.297 4	0.865 6	0.406 8	0.022 4	0.671 3	0.060 0	0.013 8	0.000 0
	A4	0.012 8	0.108 1	0.849 9	0.475 3	0.173 4	0.004 8	0.190 3	0.843 6	0.470 2	0.000 2	0.028 3	0.301 9	0.912 3
	A5	0.011 0	0.131 9	0.705 9	0.525 8	0.054 4	0.038 7	0.471 1	0.755 9	0.090 6	0.000 4	0.014 1	0.392 6	0.956 4
	A6	0.019 6	0.855 8	0.377 2	0.020 1	0.000 1	0.389 6	0.993 8	0.238 7	0.002 8	0.101 3	0.362 1	0.967 0	0.221 4
	A7	0.033 7	0.071 9	0.432 8	0.903 1	0.352 4	0.003 5	0.033 5	0.109 9	0.985 9	0.139 5	0.863 1	0.390 4	0.237 8
	A8	0.003 2	0.861 9	0.312 9	0.022 8	0.008 1	0.229 5	0.681 8	0.523 4	0.136 7	0.073 4	0.199 1	0.640 0	0.636 4
土地经济生态安全系统(B)	B1	0.199 5	0.089 5	0.916 1	0.265 7	0.025 9	0.000 0	0.250 4	0.964 4	0.362 6	0.000 0	0.031 1	0.236 4	0.905 6
	B2	0.008 1	0.044 6	0.155 2	0.687 0	0.579 5	0.215 3	0.731 0	0.449 9	0.028 8	0.033 9	0.127 9	0.376 0	0.946 3
	B3	0.173 6	0.401 8	0.827 3	0.362 5	0.071 1	0.035 8	0.273 2	0.862 2	0.182 7	0.000 1	0.001 6	0.268 2	0.989 7
	B4	0.157 9	0.963 9	0.356 7	0.053 1	0.004 9	0.148 5	0.691 3	0.557 5	0.108 5	0.009 8	0.067 7	0.450 5	0.856 4
	B5	0.000 1	0.367 3	0.965 9	0.057 7	0.085 3	0.176 8	0.554 4	0.817 5	0.360 8	0.107 8	0.382 9	0.602 8	0.564 4
	B6	0.003 0	0.122 3	0.356 3	0.770 2	0.472 6	0.479 2	0.848 1	0.070 1	0.039 6	0.737 2	0.519 9	0.015 9	0.014 3
	B7	0.0795	0.988 5	0.178 9	0.000 0	0.000 0	0.116 7	0.433 0	0.508 6	0.887 8	0.148 4	0.464 7	0.548 5	0.818 6
土地社会生态安全系统(C)	C1	0.000 6	0.082 2	0.610 5	0.912 7	0.378 2	0.112 5	0.607 8	0.657 7	0.180 2	0.110 5	0.664 1	0.547 3	0.117 9
	C2	0.002 2	0.259 5	0.652 2	0.567 7	0.166 7	0.101 2	0.176 9	0.873 7	0.479 0	0.238 2	0.549 5	0.734 8	0.186 3
	C3	0.006 5	0.199 9	0.530 7	0.831 3	0.173 2	0.430 0	0.913 9	0.029 0	0.004 1	0.266 6	0.715 1	0.383 3	0.074 8
	C4	0.032 1	0.913 8	0.029 0	0.043 8	0.074 7	0.648 6	0.578 0	0.307 9	0.169 3	0.286 4	0.398 1	0.803 4	0.363 6
	C5	0.061 2	0.289 6	0.941 8	0.478 6	0.093 4	0.000 4	0.001 7	0.302 7	0.997 2	0.099 4	0.457 9	0.686 1	0.125 5
	C6	0.000 1	0.123 5	0.385 7	0.029 8	0.906 3	0.156 0	0.499 4	0.713 8	0.554 7	0.198 4	0.530 5	0.643 5	0.642 6
	C7	0.001 6	0.466 7	0.709 4	0.219 8	0.004 5	0.754 7	0.512 1	0.088 6	0.003 2	0.811 4	0.457 8	0.091 6	0.001 8
	C8	0.003 2	0.293 3	0.722 1	0.592 4	0.111 2	0.174 4	0.134 5	0.745 5	0.506 1	0.113 2	0.094 4	0.564 8	0.662 2
土地生态安全评价结果			0.400 4	0.517 1	0.275 3	0.208 2	0.134 0	0.471 0	0.614 2	0.307 1	0.168 5	0.154 1	0.333 5	0.621 1

3 结论与讨论

针对土地生态安全评价中指标存在模糊性等特点,云模型作为定性定量不确定性转换模型,评价指标中定性概念表达的不确定性可以得到反映,熵权方法可有效解决生态安全评估中指标客观赋权问题。另外,由最大隶属度决定土地生态安全水平等级,解决了评价过程中存在的不确定性问题。因此,基于云模型与熵权法可以更加科学、客观地进行土地生态安全评价。研究表明,近10年来,安徽省土地生态安全水平由一般上升为良好、健康等级,呈上升发展趋势,土地生态系统整体上处于良性状态,基于正态云模型方法的研究结果与安徽省生态建设的实际成果比较吻合。2003年,安徽省确定了“建设生态安徽”战略目标,并成为全国生态省建设试点省份之一。近年来,安徽省生态文明建设力度在不断加强,生态环境质量稳步上升。随着2012年《安徽省生态强省建设实施纲要》正式发布实施,进一步促进了生态环境条件的改善。因此,安徽省土地生态系统呈现良性发展趋势在一定程度上体现了生态文明和生态强省建设对区域生态系统的优化效应。

指标隶属度分析表明,2005年、2010年和2013年,安徽省土地生态安全处于良好及以上水平的指标数量在逐步增加,而处于一般及以下水平的指标数量在逐渐下降。相对而言,目前安徽省土地生态系统中的土地经济生态安全子系统较优,在保持经济生态子系统良好的情况下,应当进一步优化自然和社会生态安全子系统,促进安徽省土地生态安全系统全面提升。值得注意的是,近10年来,安徽省土地生态安全评价指标系统中的土地受自然灾害比重、单位面积农用地薄膜使用量和人口自然增长率指标呈现恶化趋势。因此,针对云模型的安徽省土地生态安全评价结果,加强土地生态治理力度和财政投入、减少污染性农用薄膜,提高农业科技投入,推广使用生物可降解塑料用品、适度控制人口增长,提高人口素质,缓解区域人地矛盾等是保障安徽省土地生态系统安全,促进社会经济可持续发展的必要措施。

参考文献：

[1] 吴次芳,徐根保. 土地生态学[M]. 北京: 中国大地出版社, 2003: 27-61

[2] 吴绍华,虞燕娜,朱江,等. 土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 970-978

[3] 黄辉玲,罗文斌,吴次芳,等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 316-322

[4] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6 305-6 310

[5] 张强,薛惠锋,张明军,等. 基于可拓分析的区域生态安全预警模型及应用——以陕西省为例[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4 277-4 286

[6] 张军以,苏维词,张凤太. 基于PSR模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1 039-1 044

[7] 徐昌瑜,陈健,孟爱农,等. 基于FRAGSTATS的区域土地生态质量综合评价研究[J]. 土壤, 2013, 45(2): 355-360

[8] 王亮,卞正富. 基于灾变理论的盐城市土地生态安全评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 231-236

[9] 李春燕,南灵. 陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]. 中国土地科学, 2015, 29(4): 72-81

[10] 李明月,赖笑娟. 基于BP神经网络方法的城市土地生态安全评价——以广州市为例[J]. 经济地理, 2011, 31(2): 289-292

[11] 王鹏,况福民,邓育武,等. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 168-172

[12] 贺三维,潘鹏,王海军,等. 基于PSR和云理论的农用地生态环境评价——以广东省新兴县为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1 346-1 352

[13] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20

[14] 陈贵林. 一种定性定量信息转换的不确定性模型——云模型[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2 006-2 010

[15] 宋远骏,李德毅,杨孝宗,等. 电子产品可靠性的云模型评价方法[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 74-77

[16] 张勇,李长征,赵东宁,等. 军事电子信息系统性能测试评估的研究与实现[J]. 军事运筹与系统工程, 2003(3): 40-44

[17] 丁昊,王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 251-257

[18] 张杨,严金明,江平,等. 基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 252-258

[19] 龚艳冰. 基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 169-174

[20] 汪朝辉,田定湘,刘艳华. 中外生态安全评价对比研究[J]. 生态经济, 2008(7): 44-49

[21] 余敦,高群,欧阳龙华. 鄱阳湖生态经济区土地生态安全警情研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 678-683

[22] 宫继萍,石培基,魏伟. 基于BP人工神经网络的区域生态安全预警——以甘肃省为例[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 211-216

[23] 龚艳冰,张继国. 基于正态云模型和熵权的人口发展现代化程度综合评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 138-143

[24] 宫继萍,石培基,杨雪梅. 黑河中游土地生态价值及生态风险动态研究——以甘肃省民乐县为例[J]. 土壤, 2012, 44(5): 846-852

[25] 季培君. 安徽省生态文明建设现状评价及对策研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(4): 125-130

Evaluation of Ecological Security of Land in Anhui Province Based on Normal Cloud Model and Entropy Weight

HUANG MUYI, HE XIANG

(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: A set of evaluation indexes was established with the help of the ecological system of ‘nature-society-economy’ to solve fuzziness and randomness problems in the land ecological evaluation of Anhui Province. The normal cloud model and entropy weight theory are introduced to the present study. The entropy weight method was used to calculate the evaluation weight of factors, and the normal cloud model was used to describe the grade of land ecological security in Anhui Province under 23 indexes. The results showed that: 1) from 2005 to 2010 and 2013, the grade of land ecological security in Anhui Province increased from general to good and excellent status. 2) The values of land ecological security obtained with the comprehensive evaluation method were 0.184 8, 0.342 4 and 0.473 0 in 2005, 2010 and 2013, respectively. These results suggested that the land ecological security in Anhui Province was improved continuously during last ten years, which was consistent with the results obtained by the normal cloud model. 3) The analyses of evaluation indexes indicated that there were 7, 13 and 17 indexes at good and excellent levels, and 16, 10 and 6 indexes at a general level in 2005, 2010 and 2013, respectively. Overall, the status of land ecological security in Anhui Province tends to be good performance in recent ten years, which was attributed to the conservation culture promotion in the province.

Key words: Normal cloud model; Entropy weight; Land ecological security; Anhui Province