

麻小婷,南 灵,何岩岩. 基于云模型的土地生态质量评价及障碍因素诊断——以陕西省榆林市为例[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):345-351.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.089

基于云模型的土地生态质量评价及障碍因素诊断 ——以陕西省榆林市为例

麻小婷,南 灵,何岩岩

(西北农林科技大学经济管理学院,陕西杨凌 712100)

摘要:通过构建土地生态质量评价指标体系,对陕西省榆林市土地生态质量的优劣程度进行测度并找到主要障碍因子。基于云理论构建了榆林市土地生态质量评价模型,并且建立了土地生态质量障碍度模型。结果表明:(1)从总体看,2003 年榆林市土地生态质量等级分布呈西部、北部高,中部、南部低;2014 年各县(市、区)土地生态质量等别变化不尽相同,但整体较 2003 年有所上升。(2)从指标层看,土地生态质量主要障碍因子有水土流失治理率、废水处理率、节能环保支出占 GDP 比重、耕地自然质量平均等别等;从准则层看,障碍因子主要集中于土地生态质量状态及响应,土地生态质量响应障碍度变化较大。研究结果对榆林市可持续发展有一定的借鉴意义。

关键词:土地生态质量;云模型;障碍因素;组合赋权法;榆林市

中图分类号: F323.211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)24-0345-07

随着我国社会经济的高速发展,工业化、城市化进程加快,各类资源开采利用的程度日益严重,人们一味地向土地索取经济利益,导致一系列的土地生态问题。土地荒漠化加快、水土流失日益严重、森林资源锐减、地下水位下降、生物多样性降低、环境污染范围扩大等。

土地生态问题频发是制约我国社会经济长远发展的一大难题。要解决土地生态问题,进行生态环境保护就离不开对土地生态质量的评价。综合现有研究来看,我国对生态质量评价的研究多集中于农业生态质量评价、城市生态质量评价、景观生态质量评价及自然保护区生态质量评价^[1-6],对土地生态质量评价的研究极少,须要丰富对土地生态质量评价研究。

本研究借鉴生态质量评价及生态环境评价的相关研究进行土地生态质量评价。综合现有研究来看,使用频率较高的评价方法有综合评价法、生态足迹法、物元模型法、景观生态模型法、数字地面模型法等^[7-10]。通过研究发现,这些传统方法对土地生态质量的评价无法兼顾评价对象的模糊性和随机性。随着云理论的产生,这一缺陷有了有效的解决渠道。近些年来也有学者将云理论引入到生态环境评价之中,如龚艳冰将正态云模型与熵权法相结合,对河西走廊城市化生态风险进行评价,其评价结果较传统模糊综合法更为合理^[11];张扬等学者将正态云模型引入土地生态安全评价,并结合层次分析法对湖北省土地生态安全进行了评价^[12];周启刚等运用正态云模型对三峡库区土地利用生态风险进行了评估,有效解决了由于某些数据获取、量化过程中的不准确性而造成

的评估指标及结果的模糊性和随机性^[13]。在指标权重的确定方面,大多数研究多采用某一单一赋权法,指标权重的合理性有待验证^[14-16]。目前几乎没有学者运用云模型结合基于相对熵的组合赋权法对土地生态质量进行评价,这还要进行不断的探索与实践。

榆林地区在生态环境方面具有较强的区域色彩。榆林市地处黄土高原和毛乌素沙地交界处,风蚀沙化和水土流失严重。截至 2014 年底,榆林市水土流失面积为 3.69 万 km²,约占整个陕西省水土流失面积的 26.8%。再者榆林市矿产资源丰富,而矿产资源所在区域也正是榆林市地下水资源的富集区,资源开采过程中也造成了严重的生态破坏。笔者将云模型引入土地生态质量评价之中,结合相对熵的组合赋权法构建土地生态质量评价模型;以榆林市为研究对象,应用基于正态云模型的土地生态质量评价方法对其土地生态质量进行评价,最终借助障碍度模型对土地生态质量的障碍因子进行诊断,丰富了土地生态质量评价的研究,为其他学者提供理论及实践借鉴;同时还可以为榆林市的可持续发展提供参考,促进人地和谐,对预防榆林市土地生态环境恶化及土地退化有着重要的意义。

1 云理论

1.1 云模型简介

20 世纪 90 年代,我国著名学者李德毅院士在研究不确定性人工智能过程中,为了反映自然语言中的不确定性(尤其是随机性和模糊性)、实现语言值与数值的转化,创新性地传统 Fuzzy 理论及概率统计的基础上提出一个可以实现定性概念与其定量描述间不确定转换的数学模型——云模型^[17-18]。多年来,经过众多学者研究与发展,云模型的分布形态也日益增多,且已成功应用于多个领域。凭借其普遍的实用性,在正态分布及钟形隶属函数基础上演化而来的正态云模型成为目前研究最多且应用最广泛的云模型^[19-20]。

正态云用 3 个数值来表征某一定性概念的整体性定量特

收稿日期:2017-08-20

基金项目:陕西省国土资源厅项目(编号:K14210323);陕西省土地整治战略研究项目(编号:K332021306)。

作者简介:麻小婷(1992—),女,宁夏银川人,硕士研究生,研究方向为土地资源管理。E-mail: maxt92@126.com。

通信作者:南 灵,硕士,副教授,硕士生导师,研究方向为土地资源管理。E-mail: nanling68@126.com。

性,分别为期望(E_x)、熵(E_n)、超熵(H_e),它们被称之为云模型的数字特征。它们共同反映了定性概念论域的中心值、定性概念的模糊度及离散程度,将模糊性和随机性结合起来。

1.2 云发生器

云发生器主要分为 3 类,即正向云发生器、逆向云发生器及条件云发生器。本研究主要通过正向云正态云发生器来实现正态云模型。正向云发生器算法(图 1)可以将定性概念转换为定量描述,在已知正态云的数字特征(E_x 、 E_n 、 H_e)的情况下产生一定数量的云滴及其确定度。具体算法如下:(1)给定熵 E_n 及超熵 H_e ,通过正态随机数生成函数 Normrnd,生成正态随机数 $E'_{n1} \sim N(E_n, H_e^2)$;(2)给定期望 E_x ,结合(1)求得的正态随机数 E'_{n1} 通过 Normrnd 函数,生成正态随机数 $x_i \sim N(E_x, E'^2_{n1})$;(3)计算确定度 $\mu_i = \exp[-(x_0 - E_x)^2 / (2(E'_{n1})^2)]$,此时形成一个云滴 Dpro(x_i, μ_i);(4)重复(1)~(3),直至产生所需的 N 个云滴。

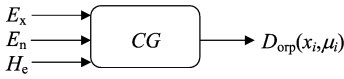


图1 正向正太云发生器

2 模型构建

2.1 土地生态质量评价模型构建

2.1.1 基于相对熵的组合赋权法确定权重 鉴于单一赋权方法在确定指标权重时表现出偏离客观实际、缺少理论支持、与实践经验相悖等缺陷,本研究基于相对熵理论,将层次分析法及改进的熵权法结合起来,形成综合主、客观赋权法优点的组合赋权法,以期得到更加合理的指标权重。

假设有 n 个评价指标,此时记单一赋权法的集合为: $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, p_{ij} 为第 i 种单一赋权法中第 j 个指标的权重($i = 1, 2, \dots, n; n = 2; j = 1, 2, \dots, m$)。 p_{ik} 为第 i 种单一赋权法中第 k 个指标的权重; p_{jk} 为第 j 种单一赋权法中第 k 个指标的权重,任意 2 个权重向 p_i, p_j 间的相对熵为:

$$h[p_i, p_j] = \sum_{k=1}^n p_{ik} \ln(p_{ik} / p_{jk})。$$

当且仅当 $j \in \{1, 2, \dots, m\}$, $\exists p_{ik} = p_{jk}$ 时,有 $h[p_i, p_j] = 0$,此时, $h[p_i, p_j]$ 可以用于度量 2 种赋权法的符合程度。故组合权重 W 的计算步骤如下:(1)应用 AHP 法确定评价指标主观权重 $p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1m})$,应用改进的熵权法确定指标客观权重 $p_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2m})$ 。

(2)基于相对熵的思想,根据优化模型^[21-23]

$$\min h[p_i, q] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_j \ln(q_j / p_{ij}) ; \begin{cases} \sum_{j=1}^m q_j = 1 \\ q_j \geq 0, j \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases}。$$

得最优解:

$$q_j = \prod_{i=1}^n (p_{ij})^{1/n} / \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n (p_{ij})^{1/n}。 \quad (1)$$

解出与各单一赋权法求得的指标权重最接近的指标权重,即集结权重 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ 。

(3)计算各个赋权结果 p_i 与集结权重 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ 的贴近度 $h[p_i, q]$ 。

(4)计算组合系数 $\theta_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 。

$$\theta_k = h[p_i, q] / \sum_{i=1}^n h[p_i, q]。 \quad (2)$$

(5)最后,根据不同赋权法指标权重的组合公式

$$w_j = \sum_{k=1}^n \theta_k p_{kj}, \quad (3)$$

计算出各个指标最终权重 w_j ,得到权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

2.1.2 基于正态云模型的土地生态质量评价模型 将正态云模型与基于相对熵的组合赋权法结合起来,构建土地生态质量评价模型,建立步骤如下:(1)建立土地生态质量评价指标体系 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$,确定评价等级 D 并建立土地生态质量评价指标标准域 $V = (v_1, v_2, \dots, v_d)$ 。

(2)将 AHP 及熵权法与相对熵原理结合起来确定各指标的组权重 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

(3)在土地生态质量评价指标体系 X 与评价指标标准域 V 之间进行单一指标的评估并建立模糊关系矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1d} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{md} \end{bmatrix}。$$

式中: r_{jk} 表示评价指标体系 X 中第 j 个评价指标 X_j 对评价指标标准域 V 中第 ζ 个等级 v_{ζ} 的隶属度。此处借助正态云模型的数字特征 E_x 、 E_n 、 H_e 来描述评价指标的隶属度。假设评价指标 $X_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 对应的等级 $\zeta (\zeta = 1, 2, \dots, d)$ 的上、下边界值分别为 a_{jk}^+ 、 a_{jk}^- ,则有:

$$W_{xjk} = (a_{jk}^+ + a_{jk}^-) / 2。 \quad (4)$$

a_{jk}^+ 、 a_{jk}^- 均为 2 个级别的边界值,是一个级别到另一级别的过渡,所以应同时隶属于相应的 2 个级别,且隶属度相等,则有

$$\exp[-(a_{jk}^+ - a_{jk}^-)^2 / (8(E_{njk})^2)] \approx 0.5$$

可得:

$$E_{njk} = (a_{jk}^+ - a_{jk}^-) / 2.355。 \quad (5)$$

其中:超熵 H_{ejk} 是熵 E_{njk} 的熵,直接反映云滴的离散程度,通常通过经验或试验取值。 H_{ejk} 越小,云越薄,反之亦然。

(4)在确定了各个指标所对应的每一等级的正态云模型数字特征后,基于各个指标的实际值,通过正向正态云发生器,确定出土地生态质量评价各个指标对应每个等级的正态云模型隶属度矩阵 $F = (f_{jk})_{m \times d}$,考虑到由正态云模型得出的隶属度矩阵的随机性特征,为提高评估的可信度,重复运行正向云发生器 N 次,计算各指标在不同隶属度下的平均综合评估值:

$$f_{jk} = \sum_{s=1}^N f_{js}^N / N。$$

(5)基于(2)中求得的评价指标权重集 W ,将其与(4)中求得的隶属度矩阵 F 进行模糊转换,即可得出评价指标标准域 V 上的模糊子集 $G (j = 1, 2, \dots, m)$:

$$G = W \times F = (g_1, g_2, \dots, g_d); g_{\zeta} = \sum_{j=1}^m w_j f_{j\zeta}。$$

式中: g_{ζ} 表示评价对象对于评价等级 ζ 的隶属度。根据最大隶属度原则,选择最大隶属度所对应的评价等级作为评价对象的最终评价等级。

2.2 土地生态质量评价障碍因子诊断模型的构建

在土地生态质量评价的基础上对影响土地生态质量的障碍因子进行分析与诊断,以便有针对性地解决土地生态质量问题。本研究引入障碍度模型实现这一目的^[24-25],具体模型如下:

$$O_j = w_j \times B_j / (\sum_{j=1}^m w_j \times B_j)。 \quad (6)$$

式中: B_j 第 j 个评价指标与土地生态质量全目标之间的差距, 即 1 与第 j 个评价指标标准化值之差; $B_j = 1 - b_j$; O_j 为第 j 个评价指标的障碍度。

3 实证分析与结果

3.1 评价指标体系的构建及权重的确定

3.1.1 评价指标体系的构建 构建科学、合理的评价指标体系是进行土地生态质量评价的一大前提。本研究遵循系统性、完备性、可操作性、科学性 & 数据可得性等原则对土地生态质量评价指标进行分析与筛选。

通过对 50 篇生态环境评价相关文献进行分析, 分别统计各个评价指标在相关参考文献中出现频率, 得出生态评价指标在相关参考文献中出现频率统计表, 合并相似指标, 抛弃区域性个性指标, 最终筛选出高频指标 32 个, 其中出现频次排名前 3 的指标为: 单位面积化肥施用量 (39 次)、森林覆盖率 (37 次)、节能环保支出占 GDP 比 (36 次)。在此基础上结合德尔非法, 向 20 位相关专家 (包含教师 7 人、科研人员 6 人、相关从业者 5 人、当地政府人员 2 人) 发放问卷, 经 2 轮筛选最终确定榆林市土地生态质量评价指标 17 个; 基于 2003、2014 年榆林市相关数据 (榆林市统计年鉴、地理空间数据云、国家科技基础条件平台 - 国家地球系统科学数据共享平台 - 黄土高原科学数据中心 <http://loess.geodata.cn>), 从土地生态质量状态、响应、压力 3 个方面进行分析, 建立榆林市土地生态质量评价指标体系 (表 1)。

3.1.2 指标权重确定 基于层次分析法及熵权法, 应用相对熵理论, 确定榆林市土地生态质量评价指标的权重。

$P_{\text{层次分析法}} = (0.074\ 0, 0.116\ 7, 0.064\ 5, 0.059\ 1, 0.044\ 7, 0.026\ 7, 0.020\ 2, 0.034\ 7, 0.063\ 4, 0.030\ 9, 0.036\ 0, 0.014\ 9, 0.015\ 8, 0.072\ 1, 0.154\ 1, 0.089\ 1, 0.083\ 0)$;

$P_{\text{改进熵权法}} = (0.030\ 5, 0.034\ 1, 0.031\ 6, 0.026\ 1, 0.033\ 0, 0.047\ 8, 0.042\ 9, 0.074\ 5, 0.062\ 7, 0.059\ 5, 0.141\ 5, 0.047\ 3, 0.040\ 0, 0.056\ 5, 0.107\ 2, 0.119\ 6, 0.045\ 1)$ 。

根据“2.1”节中式 (1)、式 (2) 可得 AHP 及改进的熵权法的组合权系数, 分别为 0.481 3、0.518 7, 在此基础上根据式 (3) 计算出相对熵的组合权重, 即最终权重 W :

$W = (0.051\ 4, 0.073\ 9, 0.047\ 4, 0.042\ 0, 0.038\ 6, 0.037\ 6, 0.032\ 0, 0.055\ 3, 0.063\ 0, 0.045\ 8, 0.090\ 8, 0.031\ 7, 0.028\ 4, 0.064\ 0, 0.129\ 8, 0.104\ 9, 0.063\ 3)$ 。

3.2 榆林市土地生态质量评价

3.2.1 评价标准的制定 结合土地生态质量相关研究及研究区实际状况, 本研究将土地生态质量划分为 5 个等级, 从高到低依次表示为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级。目前土地生态质量评价尚未确立统一的评价标准, 本研究对评价指标评价标准 (表 2) 的确定主要是在参考《生态县、生态市、生态省建设指标 (试行)》《陕西省生态园林县城标准 (试行)》、国际公认值、全国平均水平、区域背景或本底值、理论最佳值及相关研究的基础上, 从榆林市土地生态环境现状与特征出发, 综合分析、归纳并加以修正而最终确定。

3.2.2 评价结果 根据建立的土地生态质量评价指标体系及评价指标标准, 利用式 (4)、式 (5) 将各个指标所对应的等级用相应的正态云模型表示 (表 3)。

表 1 榆林市土地生态质量评价指标体系

目标层	准则层	指标层	性质
土地生态 质量评价	土地生态质量压力	单位面积化肥施用量 C_1	-
		单位面积废水排放量 C_2	-
		单位面积二氧化硫排放量 C_3	-
		单位面积农膜使用量 C_4	-
		人均沙地面积 C_5	-
土地生态质量状态	土地生态质量状态	森林覆盖率 C_6	+
		人均土地面积 C_7	+
		人均水资源量 C_8	+
		25°以上耕地面积比 C_9	+
		生物丰富度 C_{10}	+
		耕地自然质量平均等级 C_{11}	-
		地形起伏度 C_{12}	-
		有效灌溉面积比 C_{13}	-
土地生态质量响应	土地生态质量响应	节能环保支出占 GDP 比 C_{14}	+
		水土流失治理率 C_{15}	+
		废水处理率 C_{16}	+
		植树造林种草面积 C_{17}	+

注: 根据指标因子对土地生态质量的影响, 将所选的指标分为正、负趋向性指标分别用“+”、“-”表示。正趋向性指标值越大, 表示土地生态质量状况越好 (或者是越有利于土地生态质量的提升); 反之负趋向性指标值越大, 则表示土地生态质量状况越差 (或者是越不利于土地生态质量的提升)。

基于土地生态质量评价各指标相对应的正态云模型, 假定 $N = 100$, 根据各个方案对应的指标值, 利用正态云发生器, 重复计算 100 次, 建立评价指标的正态云隶属度矩阵。最后, 根据公式 $G = W \times F = (g_1, g_2, \dots, g_d)$ 计算榆林市各县 (市、区) 土地生态质量值, 并根据最大隶属度原则确定质量等级 (表 4)。

由计算结果可知, 2003 年榆林市土地生态质量等级分布情况大体为西、北部高, 中、南部低。其中, 土地生态质量等级为优 (I) 的县 (市、区) 有 5 个, 等级为中 (III) 的区有 1 个, 等级为劣 (V) 的县有 6 个。

2014 年榆林市土地生态质量等级为优 (I) 的县减少为 4 个, 等级为良 (II) 的县 (区) 增加 2 个, 等级为差 (IV) 的县增加 1 个, 等级为中 (III) 的县 (区) 增加至 4 个, 等级为劣 (V) 的县减少至 1 个。整体来看, 榆林市土地生态质量等级相较于 2003 年有所上升。其中, 绥德县、靖边县及定边县土地生态质量等级并无变化, 分别为劣、优、优。榆阳区、神木市、府谷县土地生态质量等级在 2003 年的基础上降了 2 个等级, 而佳县、清涧县、横山区、米脂县及子洲县土地生态质量等级 2014 年均有一定程度的上升, 其中佳县及清涧县均上升了 4 个等级, 上升程度最大。主要因榆阳区为榆林市的核心区域, 而神木市及府谷县矿产资源丰富, 在经济快速发展的同时致使环境污染、生态破坏, 农业生产过程中化肥、农药、农膜投入过多, 导致各县 (区) 土地生态质量压力增大、状态恶化、等级降低。而佳县、清涧县、横山区、米脂县及子洲县等区域经济发展速度相对缓慢, 环境破坏程度较轻, 化肥、农药、农膜投入相对适度, 同时又注重环保治理, 进而土地生态质量等级上升。

在对榆林市各县 (市、区) 土地生态质量评价的基础上,

表 2 土地生态质量评价指标评价标准

评价指标	等级标准				
	优(Ⅰ级)	良(Ⅱ级)	中(Ⅲ级)	差(Ⅳ级)	劣(Ⅴ级)
单位面积化肥施用量 C_1 (kg/hm ²)	≤225	(225,450]	(450,850]	(850,1 200]	>1 200
单位面积废水排放量 C_2 (kg/hm ²)	≤16	(16,20]	(20,30]	(20,40]	>40
单位面积二氧化硫排放量 C_3 (kg/hm ²)	≤35	(35,60]	(60,85]	(85,110]	>110
单位面积农膜使用量 C_4 (kg/hm ²)	≤3	(3,5]	(5,7]	(7,9]	>9
人均沙地面积 C_5 (hm ² /人)	≤0.03	(0.03,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,1]	>1
森林覆盖率 C_6 (%)	>40	(30,40]	(20,30]	(10,20]	≤10
人均土地面积 C_7 (hm ² /人)	>17	(14,17]	(11,14]	(7,11]	≤7
人均水资源量 C_8 (m ³ /人)	>1 800	(1 450,1 800]	(1 350,1 450]	(800,1 350]	≤800
25°以上耕地面积比 C_9 (%)	≤2	(2,7]	(7,12]	(12,24]	>24
生物丰富度 C_{10} (%)	>21	(19,21]	(17,19]	(15,17]	≤15
耕地自然质量平均等别 C_{11}	≤6	(6,9]	(9,11]	(11,14]	>14
地形起伏度 C_{12} (m)	≤50	(50,100]	(100,300]	(300,500]	>500
有效灌溉面积比重 C_{13} (%)	>80	(60,80]	(40,60]	(20,40]	≤20
节能环保支出占 GDP 比 C_{14} (%)	>3.5	(2.5,3.5]	(1.5,2.5]	(0.5,1.5]	≤0.5
水土流失治理率 C_{15} (%)	>70	(50,70]	(30,50]	(10,30]	≤10
废水处理率 C_{16} (%)	>90	(80,90]	(70,80]	(60,70]	≤60
植树造林种草面积 C_{17} (hm ²)	>5 000	(4 000,5 000]	(3 000,4 000]	(1 500,3 000]	≤1 500

表 3 土地生态质量正态云隶属度

评价指标	Ⅰ级			Ⅱ级			Ⅲ级			Ⅴ级			Ⅲ级		
	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e
C_1	112.500	95.000 0	6.000 0	337.500	95.000 0	6.000 0	600.000	127.300 0	6.000 0	925.00	148.620 0	6.000 0	1 275.000 0	148.620 0	6.000 0
C_2	8.000	6.794 0	0.500 0	18.000	1.699 0	0.500 0	25.000	4.2460 0	0.500 0	35.00	4.246 0	0.500 0	45.000 0	4.246 0	0.500 0
C_3	17.500	14.862 0	15.000 0	47.500	10.616 0	15.000 0	72.500	10.616 0	15.000 0	97.50	10.616 0	15.000 0	127.500 0	14.862 0	15.000 0
C_4	1.500	1.274 0	0.200 0	4.000	0.849 0	0.200 0	6.000	0.849 0	0.200 0	8.00	0.849 0	0.200 0	11.500 0	2.123 0	0.200 0
C_5	0.015	0.013 0	0.008 0	0.115	0.072 0	0.008 0	0.300	0.085 0	0.008	0.70	0.255 0	0.008 0	1.300 0	0.085 0	0.008 0
C_6	45.000	4.250 0	0.500 0	35.000	4.250 0	0.500 0	25.000	4.250 0	0.500 0	15.00	4.250 0	0.500 0	5.000 0	4.250 0	0.500 0
C_7	19.500	2.123 0	0.300 0	15.500	1.274 0	0.300 0	12.500	1.274 0	0.300 0	9.00	1.699 0	0.300 0	3.500 0	2.972 0	0.300 0
C_8	1 975.000	148.620 0	10.000 0	1 625.000	148.620 0	10.000 0	1 400.000	42.460 0	10.000 0	1 075.00	233.550 0	10.000 0	400.000 0	339.700 0	10.000 0
C_9	0.010	0.008 5	0.002 0	0.045	0.021 2	0.002 0	0.095	0.021 2	0.002 0	0.18	0.051 0	0.002 0	0.360 0	0.102 0	0.002 0
C_{10}	0.230	0.017 0	0.400 0	0.200	0.008 5	0.400 0	0.180	0.008 5	0.400 0	0.16	0.008 5	0.400 0	0.075 0	0.063 7	0.400 0
C_{11}	3.000	2.570 0	0.250 0	7.500	1.285 0	0.250 0	10.000	0.857 0	0.250 0	12.50	2.570 0	0.250 0	15.500 0	2.570 0	0.250 0
C_{12}	25.00	21.230 0	2.500 0	75.000	21.230 0	2.500 0	200.000	84.930 0	2.500 0	400.00	84.930 0	2.500 0	600.000 0	84.930 0	2.500 0
C_{13}	0.900	0.085 0	0.000 9	0.700	0.085 0	0.000 9	0.500	0.085 0	0.000 9	0.30	0.085 0	0.000 9	0.100 0	0.085 0	0.000 9
C_{14}	0.040	0.004 2	0.050 0	0.030	0.004 2	0.050 0	0.020	0.004 2	0.050 0	0.01	0.004 2	0.050 0	0.002 5	0.002 1	0.050 0
C_{15}	0.850	0.127 0	0.000 9	0.600	0.127 0	0.000 9	0.400	0.085 0	0.009 0	0.20	0.085 0	0.009 0	0.050 0	0.042 0	0.009 0
C_{16}	0.950	0.043 0	0.001 0	0.850	0.043 0	0.001 0	0.750	0.043 0	0.001 0	0.65	0.043 0	0.001 0	0.300 0	0.255 0	0.001 0
C_{17}	11.250	3.185 0	0.200 0	6.750	3.185 0	0.200 0	5.250	0.637 0	0.200 0	3.75	0.637 0	0.200 0	1.500 0	1.274 0	0.200 0

为了进一步了解影响其土地生态质量的关键因素、实现土地的可持续发展,下文借助障碍度模型对影响榆林市各县(市、区)土地生态质量的障碍因子进行诊断。

3.3 障碍因子诊断

在上述土地生态质量评价的基础上,根据式(6)对 2003 年及 2014 年榆林市土地生态质量障碍度进行计算,并对结果进行排序(表 5、表 6)。

3.3.1 准则层障碍因子 由表 5 可知,准则层 3 个指标对榆林市各县(市、区)土地生态质量的障碍度存在一定差异。

2003 年准则层障碍度大体排序为土地生态质量响应(56.36)、土地生态质量状态(33.16)、土地生态质量压力(4.46)。土地生态质量响应障碍度最小的区域为绥德县(42.73),最大的为靖边县(73.24);土地生态质量状态障碍

度最小的区域为靖边县(18.74),最大的为吴堡县(43.31);土地生态质量压力障碍度最小的区域为子洲县(0.98),最大的为榆阳区(11.88)。

2014 年准则层障碍度大体排序为土地生态质量响应(39.30)、土地生态质量状态(38.86)、土地生态质量压力(11.81)。土地生态质量响应障碍度最小的区域为米脂县(27.60),最大的为清涧县(55.51);土地生态质量状态障碍度最小的区域为靖边县(26.01),最大的为吴堡县(52.64);土地生态质量压力障碍度最小的区域为横山区(4.41),最大为榆阳区(24.36)。

总体而言,研究期内影响榆林市土地生态质量的障碍因子主要集中于土地生态质量状态、土地生态质量响应 2 个准则层,土地生态质量响应障碍度有较大变化。与 2003 年相

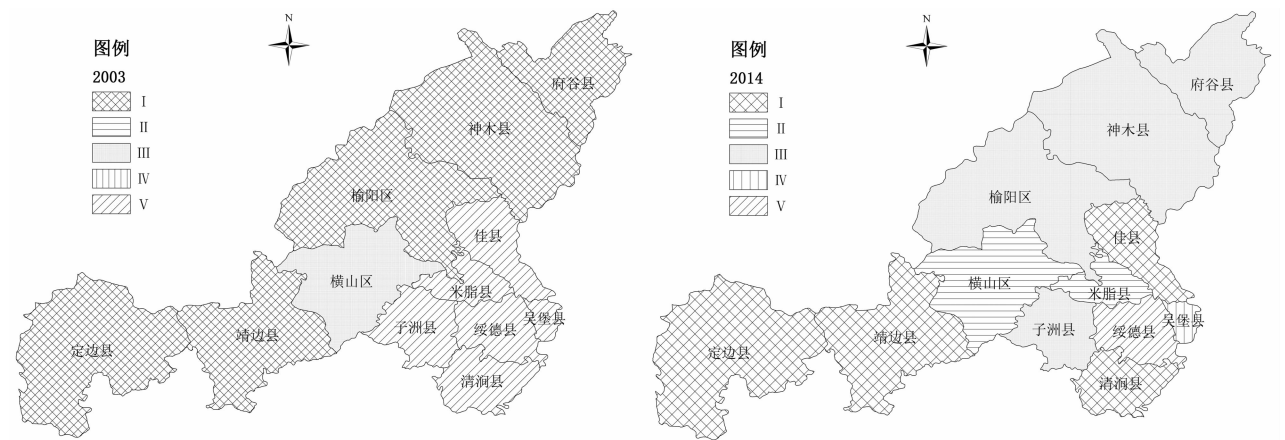


图2 榆林市土地生态质量空间分布

表 4 榆林市各县(市、区)土地生态质量评价结果

区域	2003 正态云隶属度					2003 年质量等级	2014 年质量等级
	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V 级		
榆阳区	0.295 42	0.242 61	0.163 76	0.242 18	0.294 66	I	Ⅲ
神木市	0.467 41	0.140 90	0.224 51	0.216 22	0.253 70	I	Ⅲ
府谷县	0.348 75	0.250 24	0.189 40	0.196 92	0.323 82	I	Ⅲ
横山区	0.237 62	0.144 99	0.264 51	0.233 96	0.237 96	Ⅲ	Ⅱ
靖边县	0.442 62	0.150 73	0.159 63	0.242 94	0.195 62	I	I
定边县	0.380 01	0.149 98	0.222 76	0.205 20	0.323 83	I	I
绥德县	0.267 44	0.142 04	0.173 69	0.218 16	0.340 41	V	V
米脂县	0.267 78	0.150 51	0.207 31	0.177 20	0.384 13	V	Ⅱ
佳县	0.285 61	0.189 29	0.178 45	0.142 68	0.346 15	V	I
吴堡县	0.272 02	0.095 11	0.175 67	0.252 29	0.342 66	V	Ⅳ
清涧县	0.312 88	0.176 18	0.166 08	0.176 96	0.343 64	V	I
子洲县	0.267 45	0.161 49	0.159 85	0.179 94	0.315 68	V	Ⅲ
榆林市	0.268 67	0.200 05	0.243 67	0.187 76	0.362 45	V	Ⅲ

表 5 榆林市土地生态质量准则层障碍度

区域	2003 年障碍度(%)			2014 年障碍度(%)		
	土地生态质量压力	土地生态质量状态	土地生态质量响应	土地生态质量压力	土地生态质量状态	土地生态质量响应
榆阳区	11.88	33.01	55.11	24.36	33.42	42.51
神木市	9.78	28.88	56.07	20.67	32.61	32.57
府谷县	5.04	32.73	44.83	14.01	32.76	38.35
横山区	4.49	35.45	44.89	4.41	41.04	38.42
靖边县	8.02	18.74	73.24	17.13	26.01	37.17
定边县	3.02	36.71	42.76	8.80	38.18	39.08
绥德县	2.87	37.55	42.73	7.19	44.97	29.94
米脂县	1.87	41.51	56.62	8.85	52.29	27.60
佳县	1.37	26.49	72.14	5.34	36.14	39.33
吴堡县	2.54	43.31	54.15	12.31	52.64	36.63
清涧县	1.68	27.75	70.56	9.23	39.36	55.51
子洲县	0.98	35.77	63.25	9.41	36.87	54.48
均值	4.46	33.16	56.36	11.81	38.86	39.30

比,2014 年榆林市各县(市、区)土地生态质量响应平均障碍度下降值大约为 17,这与榆林市近些年来大力实行生态文明建设等治理措施有很大关系。然而,由于社会经济发展过程所带来的一系列环境问题,榆林市土地生态质量状态平均障碍度提升值大约 5.7,土地生态质量压力平均障碍度提升值约为 7。因此,必须立足长远,尽快缓解土地生态质量压力。

3.3.2 指标层障碍因子 榆林市各县(区)障碍度排名前 5 位的指标层障碍因子见表 6。根据各障碍因子出现在表 6 的频次及均值得知,2003 年障碍度排名前 5 的指标为废水处理率、水土流失治理率、节能环保支出占 GDP 比重、耕地自然质量平均等别、有效灌溉面积比;2014 年障碍度排名前 5 的指标为废水处理率、植树造林种草面积、耕地自然质量平均等别、节

表 6 榆林市土地生态质量指标层障碍度排序

年份	区域	障碍度排序									
		1		2		3		4		5	
		障碍因子	障碍度(%)	障碍因子	障碍度(%)	障碍因子	障碍度(%)	障碍因子	障碍度(%)	障碍因子	障碍度(%)
2003 年	榆阳区	C ₁₆	24.15	C ₁₇	19.41	C ₁₁	16.71	C ₁₅	11.54	C ₈	10.46
	神木市	C ₁₆	20.74	C ₁₄	14.73	C ₁₇	11.85	C ₁₃	10.12	C ₁₅	9.53
	府谷县	C ₁₆	21.15	C ₁₄	15.34	C ₁₅	9.81	C ₁₁	9.33	C ₁₃	6.42
	横山区	C ₁₆	20.77	C ₁₄	14.45	C ₁₅	9.93	C ₁₁	9.44	C ₁₃	5.12
	靖边县	C ₁₆	27.85	C ₁₄	22.81	C ₁₅	12.73	C ₁₁	9.10	C ₁₃	5.53
	定边县	C ₁₆	22.15	C ₁₄	16.24	C ₁₅	11.05	C ₁₁	8.19	C ₁₃	7.22
	绥德县	C ₁₄	20.89	C ₁₅	9.98	C ₁₆	9.91	C ₁₃	8.52	C ₁₀	4.90
	米脂县	C ₁₆	19.89	C ₁₇	16.28	C ₁₅	14.01	C ₁₄	9.27	C ₁₃	8.76
	佳县	C ₁₆	22.86	C ₁₄	18.78	C ₁₅	10.96	C ₁₇	10.19	C ₁₃	9.35
	吴堡县	C ₁₆	18.03	C ₁₇	14.83	C ₁₁	12.76	C ₁₅	8.41	C ₁₄	8.07
	清涧县	C ₁₆	23.30	C ₁₄	18.76	C ₁₅	11.01	C ₁₇	10.84	C ₁₃	8.83
	子洲县	C ₁₆	20.38	C ₁₄	16.64	C ₁₇	9.78	C ₁₄	9.72	C ₁₃	8.41
2014 年	榆阳区	C ₁₁	17.73	C ₄	15.26	C ₁₄	10.18	C ₁	9.56	C ₁₇	8.41
	神木市	C ₂	15.70	C ₁₁	12.67	C ₁₅	8.91	C ₁₇	8.73	C ₁₄	8.68
	府谷县	C ₁₆	14.93	C ₁₃	10.18	C ₁₇	9.47	C ₃	9.13	C ₁₅	7.54
	横山区	C ₁₆	17.77	C ₁₇	12.34	C ₁₁	10.59	C ₁₃	9.74	C ₁₄	9.69
	靖边县	C ₁₆	13.41	C ₄	9.49	C ₁₁	9.22	C ₁₅	7.96	C ₁₄	7.82
	定边县	C ₅	15.15	C ₁₄	12.54	C ₁₇	8.54	C ₁₃	7.65	C ₈	7.27
	绥德县	C ₁₃	19.92	C ₁₆	9.54	C ₁₄	9.16	C ₁₀	7.90	C ₁₁	6.67
	米脂县	C ₁₃	14.76	C ₈	8.90	C ₁₁	8.12	C ₁₀	8.09	C ₁₇	6.58
	佳县	C ₄	13.91	C ₁₃	12.98	C ₁₅	9.84	C ₁₆	9.54	C ₁₇	8.10
	吴堡县	C ₁₆	16.03	C ₁₃	13.80	C ₈	9.17	C ₂	8.39	C ₁₁	8.37
	清涧县	C ₁₆	22.95	C ₁₃	13.01	C ₁₇	11.36	C ₁₀	8.93	C ₁₄	8.92
	子洲县	C ₁₆	18.74	C ₁₄	9.70	C ₁₃	9.50	C ₁₁	8.84	C ₁₇	8.65

能环保支出占 GDP 比重及有效灌溉面积比。从各县区单指标障碍度变化来看,由于城市化及工业化的推进,2014 年神木县单位面积废水排放量障碍度上升较大(15.70);单位面积农膜使用量障碍度上升较大的区域为佳县(13.91);随着人们对生态环境保护重视程度的日益增加,节能环保支出占 GDP 比重障碍度有所下降,下降幅度较大的区域为靖边县(7.82);植树造林种草面积障碍度上升较大的区域为横山区(12.34)、米脂县(6.58);水土流失治理率障碍度下降较大的区域为靖边县(7.96);从单指标平均障碍度变化来看,2014 年上升幅度较大的指标为单位面积废水排放量、单位面积二氧化硫排放量、单位面积农膜使用量及单位面积化肥施用量;另外水土流失治理率、废水处理率、节能环保支出占 GDP 比重、人均沙地面积及 25°以上耕地面积比平均障碍度有所下降。

研究发现,经过榆林市多年的努力,土地沙化面积有所降低,大部分地区节能环保支出占 GDP 比重有所上升,但仍然呈现出节能环保支出与日益增长的 GDP 不相符的状态;虽然榆林市一直致力于水土保持、水土流失的综合治理,但水土流失面积多年来基本没有变化,并且治理率还大幅下降,因此治理力度还要在现有程度上进一步加大。除此之外,榆林市社会经济的飞速发展还伴随着废水排放量、二氧化硫排放量、农膜使用量及化肥施用量的增加,典型区域为榆阳区及神木市。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究将云模型引入土地生态质量评价之中,结合基于

相对熵理论的组合赋权法构建了土地生态质量评价模型。从土地生态质量压力、土地生态质量状态和土地生态质量响应 3 个方面构建土地生态质量评价指标体系,运用基于正态云模型的土地生态质量评价模型对榆林市各县(市、区)的土地生态质量进行系统科学的评价,并借助障碍度模型对影响榆林市土地生态质量的障碍因素进行分析、诊断。结果表明:(1)2003 年榆林市土地生态质量等级分布情况大体为西部、北部高,中部、南部低;2014 年榆林市各县(市、区)土地生态质量等别变化不尽相同,但整体上相较于 2003 年有所上升。(2)从准则层障碍度看,研究期内影响榆林市土地生态质量的障碍因子主要集中于土地生态质量状态、土地生态质量响应 2 个准则层。相较于 2003 年准则层各指标障碍度,2014 年土地生态质量状态、质量响应障碍度增长值均大于 5.5。而土地生态质量响应障碍度下降程度较大,降幅最小的横山区下降数值为 6.47,降幅最大的靖边县下降数值高达 36.07。(3)从指标层障碍度看,各县(市、区)的主要障碍因子障碍度排序不尽相同,主要障碍因子大体包括水土流失治理率、废水处理率、节能环保支出占 GDP 比重、有效灌溉面积比、耕地自然质量平均等别、植树造林种草面积。2014 年障碍度上升的主要障碍因子包括单位面积废水排放量、单位面积二氧化硫排放量、单位面积农膜使用量及单位面积化肥施用量。

4.2 建议

榆林市各县(市、区)土地生态质量评价结果差异较大,为改善榆林市土地生态质量状况,应该对不同区域采取不同的措施。

(1) 针对人均水资源量、有效灌溉面积比及植树造林种草面积障碍度上升,人均沙地面积较大、水土流失严重的地区,继续实行退耕还林还草,增加植树造林种草面积,对禁牧效果进行实时监督,对社会公布滥伐林木、违规放牧举报电话;引入先进技术,加强农业水利等基础设施的建设,实现水资源的高效利用;加大水土保持、水土流失综合治理力度及人为破坏的执法力度,引进相关人才并建立水土保持科研队伍,对水土流失情况进行实时监测;严格控制矿产资源开发,继续推进矿区土地复垦,开展污损土地整治。

(2) 针对单位面积废水排放量、单位面积二氧化硫排放量、单位面积农膜使用量及单位面积化肥施用量障碍度加大的地区,引进国内外先进的污染物处理技术及处理人才,加大污染物处理投入,按不同行业及企业的实际情况设定其废水循环使用量;提升并严格约束废水、废气、固废排放标准,提高污染严重产业的进入门槛,加大执法力度,对排污企业进行突击检查,凡 2 次以上检查不合格的企业需接受罚金加倍处理,对生产技术落后、污染物排放严重不达标企业按具体情况进行无限期停产整改甚至淘汰;推行环保耕作方式(如秸秆还田);宣传、普及农业科学技术(如测土配方施肥),提升农药、化肥使用效率,制定奖惩措施鼓励增加有机肥的使用及农膜的回收;邀请有关专家入村进行宣传教育、答疑解惑,提高广大群众环境保护意识。

(3) 针对节能环保支出占 GDP 比重普遍较低的状况,推进社会经济生态同步、可持续发展,以政策、法规的形式对节能环保支出的增长幅度或对节能环保支出占 GDP 的比重进行明确;提高排污费收取标准扩大收费范围,抑制个别企业“宁缴费不治理”的现象;增强对环境保护的重视程度,加大资金投入,引进并推广污染物处理新技术、新设备;严格控制专款专用,加强节能环保支出监测,适当降低节能环保支出在城市环境基础设施建设的使用,将其更多地投入到污染物治理及污染物处理新技术、新设备的引进方面。

参考文献:

- [1] 高奇,师学义,张琛,等. 县域农业生态环境质量动态评价及预测[J]. 农业工程学报,2014,30(5):228-237.
- [2] 黄河东. 基于 PSR 模型和改进 TOPSIS 法的中国城市群生态质量比较研究[J]. 生态经济,2016,32(6):164-167.
- [3] 任国平,刘黎明,卓东. 都市郊区景观生态质量空间差异及影响因素分析[J]. 农业工程学报,32(21):252-263.
- [4] 左舒翟,任引. 快速城市化地区森林景观生态质量的时空演变研究[J]. 环境科学与技术,2015,38(9):191-198.
- [5] 张峥,朱琳,张建文,等. 我国湿地生态质量评价方法的研究[J]. 中国环境科学,2000,20(1):55-58.
- [6] 杨光华,包安明,陈曦,等. 新疆博斯腾湖湿地生态质量的定量评价[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(2):119-124.
- [7] 付伟,赵俊权,杜国祯. 基于生态足迹与环境库兹涅茨曲线的中国西北部地区生态安全分析[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(增刊1):107-110.
- [8] 张宇,游和远. 基于 PSR 的土地资源生态环境安全评价—以湖北省为例[J]. 生态经济,2015,31(8):125-128.
- [9] 徐嘉兴,李钢,陈国良,等. 土地复垦矿区景观生态质量变化[J]. 农业工程学报,2013,29(1):232-240.
- [10] 余健,房莉,仓定帮,等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报,2012,28(5):260-266.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 周启刚,张晓媛,王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J]. 农业工程学报,2014,30(23):289-297.
- [14] 郑华伟,张锐,孟展,等. 基于 PSR 模型与集对分析的耕地生态安全诊断[J]. 中国土地科学,2015,29(12):42-50.
- [15] 任艳敏,唐秀美,刘玉等. 考虑耕地生态质量的基本农田划定方法[J]. 农业工程学报,2014,30(24):297-309.
- [16] 吴金华,李纪伟,朱鸿儒. 基于 ArcGIS 区统计的延安市土地生态敏感性评价[J]. 自然资源学报,2011,26(7):1180-1188.
- [17] 李德毅,杜鹞. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [18] 李德毅,史雪梅,孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):16-21.
- [19] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28-34.
- [20] 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.
- [21] 杨茂盛,何文华. 基于组合权物元模型的经济适用房投资评价[J]. 会计之友,2013,(16):38-42.
- [22] 周宇峰,魏法杰. 组合赋权法在企业绩效评价中的应用[J]. 工业工程与管理,2007,(4):51-54,74.
- [23] 李春燕. 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.
- [24] 雷勋平,Robin Q,刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报,2016,32(13):243-253.
- [25] 张锐,刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(7):945-951.