

On the heavy metal contamination and the health risk assessment of Dahekou Reservoir in the Inner Mongolia Autonomous Region

LU Jun-ping^{1,2}, CUI Zhi-mou^{1,2}, LIU Ting-xi^{1,2}, ZHANG Xiao-jing^{1,2}

(1 Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2 Water Resources Protection and Utilization Key Laboratory, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The given paper is inclined to collect the polluted samples and find and determine the pollution degree of the heavy metals and the potential carcinogenic or non-carcinogenic risk levels of Dahekou Reservoir in the upper reaches of Luanhe River. And, its purpose is to provide basic needed information for the domestic water supply safety in Tianjin municipality in the lower reaches of Luanhe River. And, so, taking Dahekou water source reservoir as the research object, we have managed to collect 135 water samples from the 15 monitoring points in the reservoir area in January, July and October, 2017. Of the 7 kinds of heavy metal elements, we have managed to analyze and determine the content rates of Cr, Fe, Ni, Cu, Al, Pb and As. And, in doing our analysis, we have managed to assess the water quality of the reservoir in the different water storage periods by using the health risk assessment model recommended by EPA of China. The results indicate that the average detection concentration rate of the 7 heavy metals in the reservoir water during the different storage periods turns out in a range from 0.005 mg/L to 0.129 mg/L, which is all within the limit extent of China national surface water environmental quality standard. The health risk rate of the adult carcinogens in the reservoir water stands between 10^{-7} - 10^{-5} , whereas the average annual carcinogenic risk rate for children stands 2.7 times as that of the adults. What is more, the non-carcinogenic risk for children stands out 2.5 times as that for adults. Thus, the annual health risk rate of the non-carcinogenic heavy metals, say, Ni, Fe, Cu and Al, in the above mentioned reservoirs, tends to be in a range from 10^{-12} to 10^{-9} , with the contribution rate to the overall personal health risk rate being less than 1%. And, so, the health risk of the reservoir tends to come mainly from the carcinogenic content of heavy metals. To be more exactly speaking, the chief risk substances come from As, just next by Cr, whose average risk rates are $4.85 \times 10^{-6} a^{-1}$ and $3.93 \times 10^{-6} a^{-1}$, that is to say, very close to the maximum tolerance rate recommended by the International Committee on the Radiological Protection (ICRP), which can be taken as the prioritized control goal of the heavy metal pollution risk in the said reservoir water.

Key words: environmental science; heavy metal; Dahekou Reservoir; pollution level; risk assessment

CLC number: X82 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2020)04-0858-09

文章编号: 1009-6094(2021)02-0866-08

基于 SAHDT 方法的湖南省土地生态安全评价*

胡东滨¹ 谭文清¹ 黄 炜²

(1 中南大学商学院,长沙 410083;

2 华南师范大学教育信息技术学院,广州 510631)

摘 要: 为了解决目前土地生态安全评价方法存在的稳定性不高、拓展性不强等问题,通过 DPSIR 框架构建土地生态安全评价指标体系,选取湖南省 7 个具有代表性地形(平原、山地、丘陵、盆地等)以及经济相对发达的地级市作为样本,利用逼近的对抗哈斯图(SAHDT, Squeeze Adversarial Hasse Diagram Technology)评价方法对其 2017 年的土地生态安全状况进行评价。SAHDT 依据偏序集理论对评价方案的正负理想点距离值进行比较,并通过哈斯图将该偏序关系图形化,进而展现评价对象的优劣排序和层级关系。评价结果显示区域经济发展水平、土地类型分布和环境污染治理等因素使湖南省各地级市土地生态安全有较大差异。其中长沙市、株洲市和衡阳市的土地状态较为良好,娄底市、岳阳市、郴州市和怀化市的土地安全形势相对严峻。结合评价结果为湖南省土地生态发展提出了政策建议。

关键词: 环境学;生态安全;土地;哈斯图;DPSIR;湖南省

中图分类号: X826 **文献标志码:** A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0328

0 引 言

土地生态系统是一个涉及植物、动物、土壤、水文、人类活动等多因素且各因素间相互作用的整体^[1]。土地生态安全是指在一定的时间和区域范围内,土地生态系统能够保证其功能结构不被破坏的状态^[2]。因此,土地生态安全是土地可持续利用的核心和基础,对土地生态安全进行科学评价,不仅能够衡量区域可持续发展状况,也能为土地资源规划建设、土地生态环境预测和预警等研究提供重要依据^[3]。

生态安全领域主要的评价方法有层次分析法、TOPSIS 法、模糊综合评价法等。金辉和王思^[4]利用

* 收稿日期: 2020-04-18

作者简介: 胡东滨,教授,博导,从事两型社会、环境大数据、管理决策模型与方法等研究, hdbin@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71991483); 中国工程院咨询研究项目(2019-XY-35)

层次分析法和GIS技术评估了武汉城市圈2011—2015年的生态安全状况。陈勇等^[5]基于PSR(压力-状态-响应)模型和模糊综合评价法对地下铁矿山的土地生态安全进行评价。不同评价方法均有不同的优势和不足,例如:层次分析法虽然有效结合了定量和定性分析,但评价结果仍然包含研究人员的主观意见,当同一层次间元素较多时,容易造成判断的矛盾和混乱;模糊分析法很好解决了判断的模糊性问题,然而隶属度函数的确定较为繁琐;传统的TOPSIS法计算步骤简便,对数据无严格限制,广泛应用于生态安全评价中^[6],该方法需与熵权法等赋权方法结合使用,然而不同的赋权方法会导致评价结果的显著差异,致使研究人员对赋权方法的选择具有较大争议。土地生态系统具有复杂性,其评价指标需涵盖的评价角度繁多,涉及自然(生物和环境)、经济、社会等多个方面^[7],评价维度较大。与此同时,土地生态系统中各要素互相联系,如单位耕地粮食产量与单位耕地面积化肥施用量之间的非线性相关关系^[8]等。因此土地生态安全评价方法需具有较强的客观性、不假设指标数据关系、对样本量没有限制等特点,而目前尚未形成一套标准评价方法。

哈斯图源于离散数学中的序理论,由Garrett于1948年首次提出并命名,是用来表示有限偏序集的一种数学图表。2006年,Brüggemann^[9]提出将哈斯图技术作为多指标评价方法拓展到环境工程领域,这为后续国内外研究奠定了基础。2017年,岳立柱^[10]率先结合HDT(Hasse Diagram Technology)和TOPSIS法,构造基于偏序集的TOPSIS评价模型,进而提升评价方法的稳定性。目前,HDT在多指标系统排序中具有广泛的应用^[11-12]。通常利用哈斯图进行综合评价,最终得到的评价结果仅为各评价方案的层级划分,无法明确同一层级评价方案之间的优劣关系。因此本文针对这一问题对传统HDT进行拓展,利用TOPSIS法中的正负理想点距离和贴近度指标,对评价方案进行偏序比较,最终得出优劣排序。SAHDT实现了待评价系统从可拓变活动系统到完全刚性系统的转化,对传统HDT的适用评价场景进行拓展,进而能够应用于土地生态安全评价。

1 研究区概况

1.1 研究区概况

湖南省位于长江中游南部,土地总面积为21.18万km²,2018年末全省总人口为6899.0万人。地貌类型以山地、丘陵为主,呈现“七山一水两分田”的格

局,除林地外其余地类均广泛分布。

湖南省地形复杂,不同的地形(山地、丘陵、盆地、平原等)会有不同的用地类型,进而影响到城市的土地生态安全状况。湖南省土地利用方式具有较大地域差异,其中耕地集中于湘北洞庭湖平原和湘中丘陵盆地区域;交通和城镇建设用地主要分布在湘南和湘西的丘陵盆地,其中长株潭城市群等经济发达地区占比较高;未利用地主要分布于湘西、湘南等经济欠发达区域。本文选取湖南省具有典型地形特征的城市岳阳市(湘北洞庭湖平原)、怀化市(湘西山区)、衡阳市(湘中盆地)、郴州市(湘南山地丘陵)、娄底市(湘中混合地形)作为评价样本,与此同时考虑到城市的经济状况是土地生态安全与否重要的评价指标,将湘东长株潭城市群中长沙市和株洲市一并纳入评价样本中,进而对比分析以上7个城市的土地生态安全状况。

1.2 数据来源

本文使用的各指标数据均来源于2017年湖南省和各地级市年鉴、各地级市国民经济和社会发展统计公报及《中国城市建设统计年鉴》^[13]。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

土地生态安全评价指标体系建立的框架主要有压力-状态-响应(PSR)模型和经济-环境-社会(EES)模型两种,以及基于这两种模型的改进和修正模型。传统的PSR模型中人类对环境的影响仅有状态(S)指标体现,无法充分反映人类与环境之间的相互作用关系。欧洲环境署修正提出的驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)概念模型增加了驱动力(D)和影响(I),其中驱动力是指区域生态环境变化的潜在原因(如经济因素等)^[14]。由于选取的样本城市经济发展水平有较大差异,为全面深入探究区域土地生态安全与人类活动的因果关系,本文采用DPSIR框架构建评价指标体系。

结合湖南省土地实际情况,在DPSIR的框架下构建土地生态安全评价指标体系,见表1。为探究经济因素对湖南省土地生态安全的影响,驱动力子系统涵盖了区域和经济发展方面的指标^[15]。考虑到湖南省作为农业大省,农业面源污染(化肥、生活污染等)较为严重,因此压力层侧重选取农业面源污染相关指标,并通过耕地面积比重和水土协调度指标来体现因地形导致的土地类型和产出质量的差异。

2.2 SAHDT 评价方法

SAHDT 在传统哈斯图技术的基础上融入对抗思想^[16]和 TOPSIS 计算框架,共构建了 3 组不同维度的对抗矩阵,每组对抗矩阵均利用偏序集排序准

则来实现方案比较,通过对比较维度的逼近来得到最后的直链型哈斯图(即每个评价方案单独属于某一优劣层级)。

SAHDT 方法的主要流程见图 1

表 1 湖南省土地生态安全评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of land ecological security in Hunan

目标层	准则层	因素层	指标层	单位	指标性质
湖南省各市土地生态安全评价	驱动力	经济发展驱动力	恩格尔系数(d_1)		-
			人均 GDP(d_2)	元	+
		区域发展驱动力	城镇化水平(d_3)	%	+
	压力	人文社会压力	农村用电量(p_1)	万度	+
			单位耕地面积化肥使用量(p_2)	kg/hm ²	-
		环境污染压力	单位土地废水负荷(p_3)	t/m ²	-
	状态	土地资源状态	耕地面积比重(s_1)	%	-
			人均建设用地面积(s_2)	人/m ²	-
		土地产出状态	水土协调度(s_3)	hm ² /(10 ⁴ m ³)	+
	影响	土地产能影响	单位耕地粮食产量(i_1)	kg/hm ²	+
		农民收入影响	农民人均纯收入(i_2)	元	+
		产业结构影响	第三产业比重(i_3)	%	+
	响应	土地质量响应	工业固体废物综合利用率(r_1)	%	+
			污水处理率(r_2)	%	+
		土地结构响应	城市人均公园绿地面积(r_3)	人/m ²	+

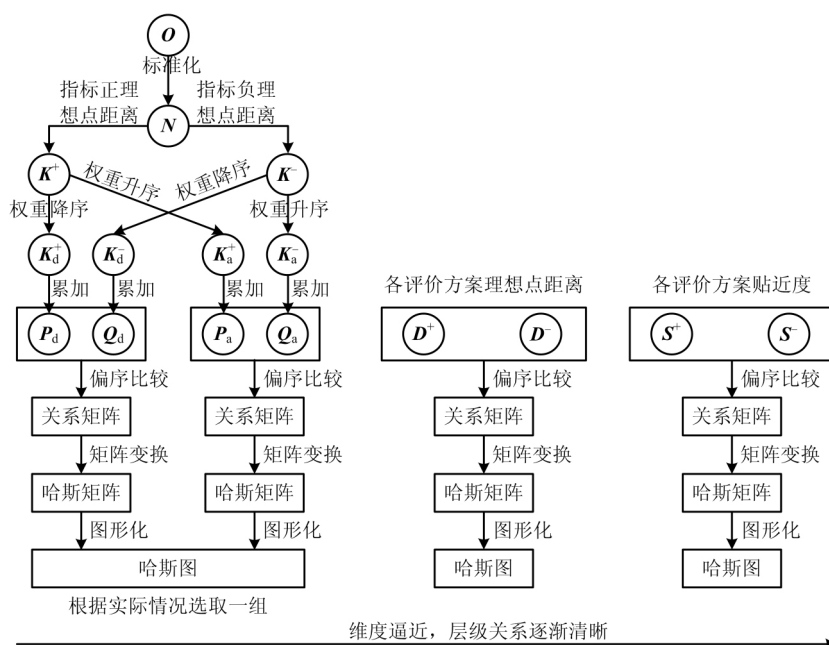


图 1 SAHDT 计算流程

Fig. 1 Calculation process of SAHDT

2.2.1 数据预处理

依据指标体系获得原始数据矩阵 $O = (o_{ij})_{n \times m}$ 后, 需要对不同量纲的数据进行标准化, SAHDT 根据不同类型指标的处理方式如下, 得到标准矩阵 $N = (n_{ij})_{n \times m}$ 。

对于负向指标的处理公式为

$$n_{ij} = \frac{o_{ij} - \min(o_j)}{\max(o_j) - \min(o_j)} \quad (1)$$

对于正向指标的处理公式为

$$n_{ij} = \frac{\max(o_j) - o_{ij}}{\max(o_j) - \min(o_j)} \quad (2)$$

2.2.2 指标权重获取

SAHDT 评价方法可结合多种赋权方法, 如变异系数法(COV)、CRITIC 法、熵权法(EWM)、主成分分析法(PCA)等, 计算得出权重数值。其中熵权法为客观赋权方法, 操作简便, 在土地生态安全评价中应用较多, 故本文采用熵权法赋权。

2.2.3 基于指标正负理想点距离的对抗矩阵计算

对于标准矩阵 $N = (n_{ij})_{n \times m}$ 根据式(3)和(4)得到各评价指标的正负理想点, 再利用式(5)和(6)计算出基于各指标正负理想点距离的对抗矩阵 K^+ 、 K^- 。

$$Z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+) = (\max\{z_{11}, \dots, z_{n1}\}, \dots, \max\{z_{1m}, \dots, z_{nm}\}) \quad (3)$$

$$Z^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-) = (\min\{z_{11}, \dots, z_{n1}\}, \dots, \min\{z_{1m}, \dots, z_{nm}\}) \quad (4)$$

$$K^+ = (k_{ij}^+)_{n \times m} = (n_{ij} - z_j^+)^2 \quad (5)$$

$$K^- = (k_{ij}^-)_{n \times m} = (n_{ij} - z_j^-)^2 \quad (6)$$

2.2.4 对抗矩阵指标权重排序

SAHDT 采用基于偏序集理论的排序准则, 其无需具体的权重数值, 只利用权重大小顺序即可实现评价方案排序^[17]。指标数为 m 的矩阵共有 $m!$ 种指标排列方式, 而按权重升序和降序排列则为两种极值对抗情形, 通过这种方法将指标权重信息蕴含在变换后的矩阵中。因此, 将正负对抗矩阵 K^+ 、 K^- 分别按照权重大小降序(desc)和升序(asc)排序, 可得到两组互相对抗的新矩阵 K_d^+ 、 K_d^- 、 K_a^+ 、 K_a^- 。

2.2.5 累加矩阵获取

在进行方案比较前, 需要对待评价矩阵进行矩阵累加变换, 对于 n 个评价对象 m 个指标的待评价矩阵 $K = (k_{ij})_{n \times m}$, 可以使用如下变换方法^[18]。

$$K = (k_{ij})_{n \times m} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{11} + k_{12} & \dots & \sum_{j=1}^m k_{1j} \\ k_{21} & k_{21} + k_{22} & \dots & \sum_{j=1}^m k_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n1} + k_{n2} & \dots & \sum_{j=1}^m k_{nj} \end{pmatrix} \quad (7)$$

矩阵 K_d^+ 、 K_d^- 、 K_a^+ 、 K_a^- 通过公式(7)累加可获得累加矩阵 P_d 、 Q_d 和 P_a 、 Q_a 。

2.2.6 关系矩阵获取

基于偏序集理论的排序方法为: 对于 P 、 Q 矩阵中任意的两行 x 、 y , 若 P 矩阵有

$$p_{x1} \geq p_{y1}, p_{x2} \geq p_{y2}, \dots, p_{xm} \geq p_{ym}$$

同时矩阵 Q 有

$$q_{x1} \leq q_{y1}, q_{x2} \leq q_{y2}, \dots, q_{xm} \leq q_{ym}$$

其中 $PS_{(x)}$ 与 $PS_{(y)}$ 分别为两个矩阵中 x 和 y 的偏序关系, 那么 $PS_{(x)} \geq PS_{(y)}$ 。关系矩阵为布尔矩阵, 各元素的取值方法为

$$a_{xy} = \begin{cases} 1 & PS_{(x)} \geq PS_{(y)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

累加矩阵可按照上述判定方法得出关系矩阵。

2.2.7 哈斯矩阵获取和哈斯图绘制

为展现有限偏序集中各评价方案优劣关系, 需要依据哈斯矩阵绘制哈斯图, 范懿^[19]提出关系矩阵到哈斯矩阵的转换公式

$$B = A + I \quad (8)$$

$$B^{(k-1)} \neq B^k = B^{(k+1)} = R \quad (9)$$

$$HS = R - (R - I)^2 - I \quad (10)$$

其中 I 为单位矩阵, A 为关系矩阵, B 为相乘矩阵, R 为可达矩阵, HS 为无回路的哈斯矩阵。

绘制拓扑层级图的过程中, 需要根据一定的抽取规则进行层级抽取^[20], 其中结果优先(即帕累托最优开始)和原因优先(即帕累托最劣开始)这两种划分方式各有利弊, 但均是通过可达集合、先行集合和共同集合进行抽取。

对所有的要素(评价方案)而言, $R(e_i)$ 为可达集合, 可达集合是要素 e_i 所在行值为 1 对应的全部元素, 代表要素 e_i 到达的要素; $Q(e_i)$ 为先行集合, 先行集合是要素 e_i 所在列值为 1 对应的全部元素, 代表到达要素 e_i 的要素。两者的交集为 $T(e_i)$, 即 $T(e_i) = R(e_i) \cap Q(e_i)$ 。

结果优先的划分准则为 $T(e_i) = R(e_i)$, 其原理是将满足条件的结果要素抽取出来放置在顶层, 重复该过程直到所有要素抽取完毕。但结果优先得到的元素层级划分存在缺陷, 即不是所有根本原因的

要素都在最下层。

原因优先的划分准则与结果优先相反,为 $T(e_i) = Q(e_i)$ 其原理是将满足条件的原因要素抽取出来放置在底层,原因优先所得到的层级虽然保证所有根本原因要素都处于最下层,但是最终结果要素不一定都在最顶层。

刘映春^[21]提出轮换规则抽取方法,即原因优先与结果优先交替使用的方法。后续的算例中将会展现不同层级抽取方式的结果差异。

2.2.8 层级逼近与最终评价结果

为得到评价方案的优劣排序,需从比较维度上逼近最终的排序结果。SAHDT 共有 3 组拓扑层级图,第一组为评价方案间各指标数值的比较,其正负理想点均在指标维度;第二组为评价方案到正负理想点距离的优劣比较,有别于第一组的对抗矩阵 K^+ 、 K^- 其求法为

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^2 (n_{ij} - z_j^+)^2} \quad (11)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^2 (n_{ij} - z_j^-)^2} \quad (12)$$

式中 ω_j 为指标 j 的权重。

获得各评价方案的正负理想点距离矩阵 $D^+ = (d_i^+)_{n \times 1}$ 和 $D^- = (d_i^-)_{n \times 1}$ 后,可通过偏序集排序规则计算出对应的关系矩阵,进而得到第二组拓扑层级图。

第三组为评价方案间贴近度的优劣比较,其计算公式为

$$s_i^- = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}; s_i^+ = \frac{d_i^+}{d_i^- + d_i^+} \quad (13)$$

贴近度是客观可比的数值,由矩阵 $S^+ = (s_i^+)_{n \times 1}$

和 $S^- = (s_i^-)_{n \times 1}$ 得出第三组拓扑层级图为直链型,即每个评价方案单独占一层级,为最终的评价结果。

3 结果与分析

利用 SAHDT 方法在 DPSIR 框架下对数据进行处理和分析,通过三组拓扑层级图展现各评价方案的土地生态安全排序,见图 2。按权重升序排列所得累加矩阵对应的拓扑层级图中, A_3 和 A_5 样本为孤立点,即无法确定其所处的层级。因此本文只保留按权重降序对应的拓扑层级图。

图 2 和 3 的层级分布总体一致,但第二层级 A_1 和 A_3 样本所在层级不同。这是由于抽取方式不同导致的层级跃迁现象。在哈斯图理论中,最下层中的要素是根本原因(只有输出,没有输入),最上层中的要素是最终结果(只有输入,没有输出)。其中输入是指箭头指向其他元素,输出是指被其他元素指向, A_1 和 A_3 即根本原因要素。原因优先的抽取方式保证所有的根本原因要素都处在最底层。

3.1 土地生态安全影响因子分析

各评价指标权重的大小能够反映指标的相对重要程度,权重值越大,说明该指标对排序结果的影响力越大。根据熵权法计算得出湖南省土地生态安全评价各指标权重值和秩次,见表 2。

赋权结果可以得出,湖南省地级市土地生态安全影响因子最大的为:农村用电量(p_1)、恩格尔系数(d_1)、人均 GDP(d_2)、城镇化水平(d_3)、工业固体废物综合利用率(r_1)、耕地面积比重(s_1),权重值均大于 0.07。其中权重前四位均为经济指标, r_1 和 s_1

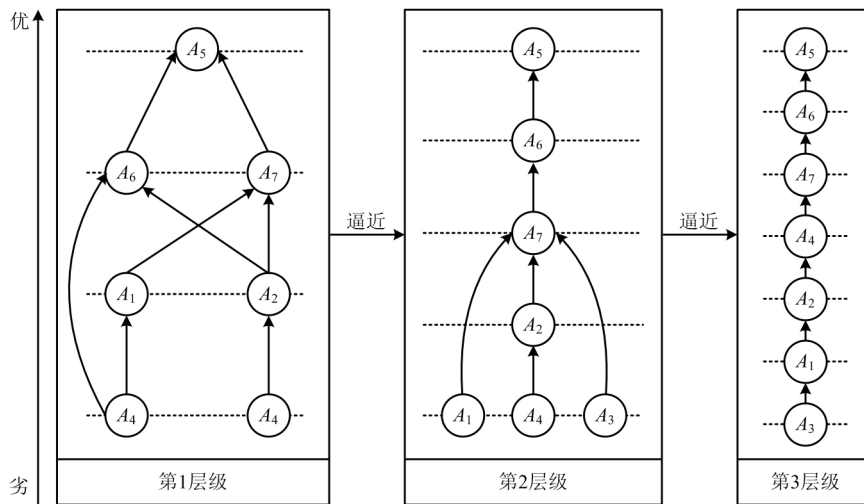


图 2 原因优先拓扑层级图

Fig. 2 Cause-first topological hierarchy diagram

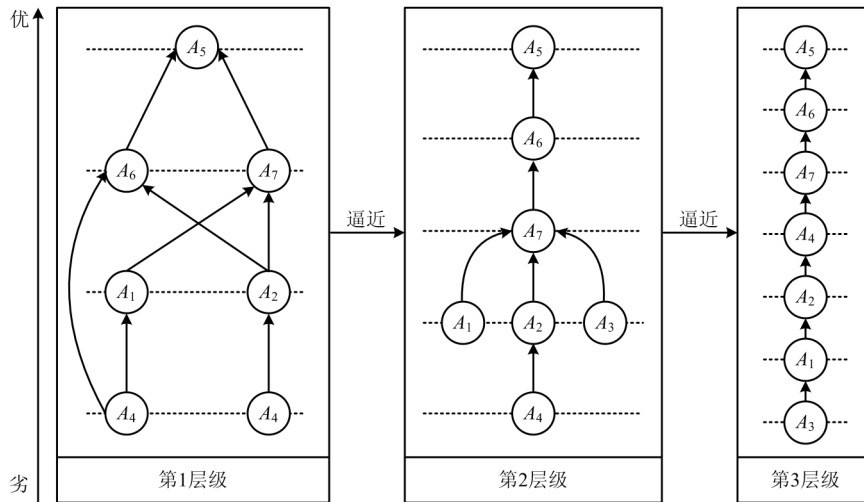


图 3 结果优先拓扑层级图

Fig. 3 Results-first topological hierarchy diagram

表 2 评价指标权重及排序

Table 2 Evaluation index weight and ranking

	d_1	d_2	d_3	p_1	p_2	p_3	s_1	s_2	s_3	i_1	i_2	i_3	r_1	r_2	r_3
权重	0.105 6	0.097 1	0.089 5	0.113 8	0.029 8	0.038 2	0.072 6	0.041 9	0.055 6	0.040 7	0.068 9	0.047 2	0.077 5	0.048 7	0.078 2
秩次	2	3	4	1	15	14	7	12	9	13	8	11	5	10	6

为环境类指标。因此对样本城市而言,提升区域经济实力是改善土地状况的首要举措。耕地面积比重权重较高也反映出湖南省土地类型的分布不均,一定程度上造成了各地级市的土地生态安全差异。

3.2 土地生态安全区域差异分析

哈斯图是对各评价方案偏序关系的图形表示,其层级信息能够反映出评价方案的相对优劣程度,即越上层的评价方案土地生态越安全。如图 2 中显示,处于最高层(即最安全)的城市为省会长沙市,其次是株洲市和衡阳市,再次为岳阳市和郴州市,位于最低层级(即最不安全)的地级市为娄底市和怀化市。结合权重大小和层级可以看出,城市的经济实力是维护土地生态安全的重要驱动力量。长沙市 2017 年人均 GDP 为 131 207 元,远高于其他地级市,株洲市的人均 GDP 为 62 953 元,同样位于省内前列。

经济相对发达的城市对城市绿化建设、污染物排放管控及环保事业等更加重视,有利于土地利用率和生产效率的提升。例如长沙市对加强土壤污染环境监管、农业面源污染防治均出台相关政策方案。指标数据显示长沙市 2017 年污水处理率达 98%,政策响应度较高。

经济欠发达地区(如娄底市和怀化市)虽然拥

有大量的未破坏原生态土地,但由于土地利用程度低,大部分土地为未开发或是难开发区域,且水土流失严重导致土地质量不高。怀化市的耕地面积比重为 12%,而单位耕地粮食产量仅为 5 230.19 kg/hm²。该类城市的土地生态仍呈现不安全状态。

3.3 湖南省土地相关政策建议

综合评价结果及分析,未来湖南省土地生态安全应重视以下几个方面:

1) 转变区域经济发展方式,提高区域经济发展效率,在不危害环境的前提之下以繁荣的区域经济带土地生态安全水平提升。

2) 加大环境治理投资和环境污染整治力度,减轻环境污染对土地资源所造成的破坏。对废水、废气和固体废物的排放进行严格控制,严惩各类破坏耕地行为。与此同时针对耕地重金属污染和水土流失等土地退化现象展开治理。

3) 推进经济欠发达区域土地的开发工作和农业科技推广工作,提升土地利用率和生产效率;对农村旱地和耕地进行复种,恢复其土地等级。

4 结 论

本文在 DPSIR 框架下从驱动力、压力、状态、影响、响应五个方面选取指标并构建土地生态安全评

价指标体系,对湖南省代表性地级市 2017 年的土地生态安全进行了评价。验证 SAHDT 评价方法具有良好的适用性和有效性。鉴于 SAHDT 能够结合多种赋权方法、距离公式和贴近度计算方法,为之后其结合不同方法对评价结果影响的对比分析研究奠定了基础。

权重秩次和层级分布中可以看出,农村用电量、恩格尔系数、人均 GDP、城镇化水平等经济类指标以及工业固体废物综合利用率等环境类指标对湖南省土地生态安全的影响较大,因此该类指标应引起充分重视。与此同时由于湖南省土地类型分布不均,导致不同地形区域城市土地生态状况相差悬殊。

评价结果显示娄底市、岳阳市、郴州市、怀化市土地生态形势较为严峻,湖南省应该充分重视这些地级市的区域经济发展、环境污染和土地治理,从而逐步改善土地生态状况;土地生态相对安全的长沙市、株洲市和衡阳市湖南省应继续维持,并吸取经验。

受数据可获得性等不确定性因素的影响,本文构建的评价体系所涵盖的指标不全面,未来还应对指标选取的科学性方面深入研究。同时,本文还未涉及土地生态安全的预测及预警研究,可将其作为下一步的探讨方向。

References(参考文献):

- [1] WANG Wanmao(王万茂), GAO Bo(高波), XIA Taishou(夏太寿). *Land ecological economics(土地生态经济学)* [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1992.
- [2] HUANG Huiling(黄辉玲), LUO Wenbin(罗文斌), WU Cifang(吴次芳), et al. Evaluation of land eco-security based on matter element analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2010, 26(3): 316-322.
- [3] TANG Jie(汤洁), ZHU Yunfeng(朱云峰), LI Shaoyang(李昭阳), et al. Evaluation on ecological security of land resources in ecotone between farming and animal raising in northeastern China: a case study of Zhenlai county[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment(干旱区资源与环境)*, 2006(1): 119-124.
- [4] JIN Hui(金辉), WANG Si(王思). Ecological security assessment and situational analysis of Wuhan metropolitan area via PSR model[J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2020, 20(1): 352-363.
- [5] CHEN Yong(陈勇), HONG Qiang(洪强), LIU Yanzhong(刘艳中), et al. Assessment project for the land ecological security of the underground iron mine and the corresponding empirical test [J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2016, 16(3): 366-371.
- [6] LÜ Guangbin(吕广斌), LIAO Tiejun(廖铁军), YAO Qiusheng(姚秋昇), et al. Spatiotemporal variation and land ecological security and its evaluation in Chongqing City based on DPSIR-EES-TOPSIS model [J]. *Research of Soil and Water Conservation(水土保持研究)*, 2019, 26(6): 249-258, 266.
- [7] ZHANG Hongbo(张虹波), LIU Liming(刘黎明). Main progress and prospects of land resource ecological security research [J]. *Progress in Geography(地理科学进展)*, 2006, (5): 77-85.
- [8] ZHANG Liyang(张利庠), PENG Hui(彭辉), JIN Xingchu(靳兴初). Analysis of the effect of different stages of chemical fertilizer application on grain yield in China-based on panel data from 30 provinces from 1952 to 2006 [J]. *Journal of Agrotechnical Economics(农业技术经济)*, 2008(4): 85-94.
- [9] BRÜGGEMANN R, CARLSEN L. *Partial order in environmental sciences and chemistry* [M]. Berlin: Springer, 2006.
- [10] YUE Lizhu(岳立柱), LI Liangqiong(李良琼). Using poset to express TOPSIS model when weights is difficult to obtain [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics(模糊系统与数学)*, 2017, 31(4): 167-174.
- [11] LI Wei(李伟), YAO Xiaoyan(姚笑颜), LIANG Zhiwei(梁志伟), et al. Assessment of surface water quality using self-organizing map and Hasse diagram technique [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报)*, 2013, 33(3): 893-903.
- [12] YU Xuan(余璇), WU Jin(吴劲), SONG Liuting(宋柳霆), et al. Priority control pollutants screening based on health risk assessment in soil [J]. *Environmental Pollution & Control(环境污染与防治)*, 2018, 40(4): 473-478, 483.
- [13] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China(中华人民共和国住房和城乡建设部). *China city statistical yearbook(中国城市统计年鉴)* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [14] LI Jintao(李进涛), TAN Shukui(谭术魁), WANG Wenxiong(汪文雄). Empirical study of spatial-temporal differences of urban land use intensity based on DPSIR model: a case of Hubei province [J]. *China Land Science(中国土地科学)*, 2009, 23(3): 49-54, 65.
- [15] ZHANG Fengtai(张凤太), WANG Lachun(王腊春), SU Weici(苏维词). Evaluation of land ecological security in Chongqing based on the matter-element analysis-

- DPSIR model [J]. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2016, 36(10): 3126-3134.
- [16] GOODFELLOW I, POUGETABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, 3: 2672-2680.
- [17] YUE Lizhu(岳立柱), ZHANG Zhijie(张志杰), YAN Yan(闫艳). Multi criteria decision making method of poset with weight [J]. *Operations Research and Management Science* (运筹与管理), 2018, 27(2): 26-31.
- [18] BRÜGGEMANN R, CARLSEN L, WITTMANN J. *Multi-indicator systems and modelling in partial order* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [19] FAN Yi(范懿). An analytic method about hasse chart [J]. *Journal of Shanghai Second Polytechnic University* (上海第二工业大学学报), 2003, 20(1): 17-22.
- [20] WARFIELD J N. Participative methodology for public system planning [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 1973, 1(2): 187-210.
- [21] LIU Yingchun(刘映春). *Research on the development countermeasure of secondary vocational education in Guangdong province based on system theory and game interpretation structure model* (基于系统理论及博弈解释结构模型的广东省中职教育发展对策研究) [D]. Guangzhou: Guangdong Polytechnic Normal University, 2019.

Land eco-security evaluation analysis of Hunan by SAHDT method

HU Dong-bin¹, TAN Wen-qing¹, HUANG Wei²

(1 School of Business, Central South University, Changsha, 410083, China; 2 School of Information Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: The purpose of this paper is to evaluate the land ecological security quality of the prefecture-level cities of Hunan in 2017, which has been done comprehensively via the exploration of the influential factors of the regional differences in terms of land ecological security. And, for the said purpose of the paper, we have chosen 7 cities through the representative terrains (i. e. the plains, the mountainous ranges, hillsides, as well as the basins) in the economic development in Hunan. Based on the actual situation of the said province, we have managed to organize a comprehensive evaluation index system with the land ecological security as a chief goal under the DPSIR framework included. And, furthermore, to improve the scientificity and applicability of the comprehensive assessment method, we have managed to ameliorate the traditional HDT (Hasse Diagram Technology) approach by suggesting the SAHDT (Squeeze Adversarial Hasse Diagram Technology) assessment method. Moreover, since the

SAHDT assessment method can rank the pros-&-cons of each evaluation scheme by HDT through the concepts of positive and negative idealistic points and closeness extent in the TOPSIS evaluation model, it has enabled us to construct a set of antagonistic matrices of SAHDT primarily based on the distance between the positive and negative idealistic points of the assessment index. Thus, consequently, we have reordered the columns of the antagonistic matrixes according to the weighting ranks, so as to gain the accumulative matrix through the cumulative transformation. And, last of all, on the basis of the accumulative matrix, the assessment scheme has been properly set up in correspondence with the theory of partial ordered sets. And, thus, finally, the hierarchical relationship and the hierarchical approximation process of the assessment goals prove the ranking and hierarchical approximation process of the assessment scheme by the topological hierarchy diagrams in the 3-Ds through multiple topological hierarchy diagrams. Hence, the SAHDT assessment method can categorically show that there exist lots of differences in the land ecological security testing among the cities in Hunan. Say, Changsha, Zhuzhou and Hengyang, the urban areas of theirs are endowed with rather fertile conditions, whereas other regions, like Loudi, Yueyang, Chenzhou and Huaihua, are rather less favorable land security situations. At the same time, the assessment ranks also indicate that such factors, as the regional economic development level, the land type distribution, and the environmental pollution control situation, may all have more or less impact on the land ecological status of the different typical urban areas in the province. Therefore, it can be concluded that the distribution of the land types does affect the ecological security of the land use in those cities, though not the decisive factors. And, therefore, the cooperative development of the interregional and intercity can properly promote the environmental protection and pollution control. Thus, finally, we have brought about a series of policy suggestions for the land ecological development in the province based on the above assessment results.

Key words: environmentalology; ecological security; land; Hasse diagram; DPSIR; Hunan Province

CLC number: X826 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2021)02-0866-08