基于压力－状态－响应模型与集对分析的土地利用系统健康评价

张 锐[1]，郑华伟[2]，刘友兆[1]

(1. 南京农业大学 公共管理学院，江苏 南京 210095；2. 南京农业大学 农村发展学院，江苏 南京 210095)

摘 要：土地利用系统健康评价是改善土地利用系统健康状况，促进土地可持续利用的重要基础。针对土地利用系统健康的不确定性，构建了基于 PSR 模型的评价指标体系。在了解集对分析原理的基础上，利用原创联系度的可展性对其进行改进，建立了基于集对分析法和改进熵值法的土地利用系统健康评价模型，并对中国土地利用系统健康状况进行诊断。结果表明：(1) 1999—2008 年中国土地利用系统健康水平不断提高，健康等级经历了“不健康—临界状态”的演变历程，但 2008 年“临界状态”水平不高；(2) 固定资产投资年增长率、人均耕地面积、土地垦殖率、水土流失程度、地均 GDP 等是土地利用系统健康等级提升的关键制约因素。研究结果表明，基于 PSR 模型的评价指标体系能更准确地反映土地利用系统健康，各要素之间的关系。集对分析法通过注重信息处理过程中的相对性和模糊性能很好地解决不确定性问题，有效挖掘土地利用系统存在的具体问题，适合用于土地利用系统健康状况的评价。

关键词：土地利用系统；集对分析；PSR 模型；障碍因素

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2014)05-0146-07 **中图分类号**：F301.24

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.034

Health Evaluation of Land Use System Based on Pressure－State－Response Model and Set Pair Analysis

ZHANG Rui[1], ZHENG Hua-wei[2], LIU You-zhao[1]

(1. *College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*; 2. *College of Rural Development, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*)

Abstract: Health evaluation of land use system is a significant foundation for improving the health of land use system and the sustainable land use of land. In view of the health on land use system's uncertainty, the authors constructed an evaluation index system based on the PSR(pressure—state—response) model, and established the health evaluation model on land use system based on the set pair analysis and the improved entropy method, and utilizing set pair analysis theory and the malleability of the original relation degree to extend the comprehensive evaluation ranking from 3 levels to 5 levels, and then conducted an evaluation of the health on land use system of China. The results showed: (1) The health of land use system in China was gradually improved from unhealthy to critical state from 1999 to 2008, but the level of "critical state" was not high in 2008; (2) Crucial constraint factors for improving land use system health include the growth rate of fixed asset investment, per capita arable land, land reclamation rate, extent of soil erosion and per capita GDP. The evaluation index system based on the PSR model can accurately reflect the relationship between various elements of the land use system health, while the set pair analysis can discover specific problems in land use system. Therefore, the evaluation index system and the set pair analysis are suitable to assess the health of land use system.

Keywords: land use system; set pair analysis; PSR model; obstacle factors

收稿日期：2013-10-09 **修回日期**：2013-11-04

资助项目：国家自然科学基金项目“农村土地整治生态风险管控研究”(71403130)；江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目“耕地生态风险管理研究”(CXLX13_301)

作者简介：张锐(1985—)，女(汉族)，江苏省盐城市人，博士研究生，研究方向为土地利用与乡村发展。E-mail:zhangrui_1985@163.com。

通信作者：刘友兆(1959—)，男(汉族)，江苏省淮安市人，博士，教授，博士生导师，研究方向为土地可持续利用与土地资源评价。E-mail:yzliu@njau.edu.cn。

土地利用系统是一个以土地利用为基础的自然、经济、社会复合系统,它既有生态系统的一般特征,又有其本身的特殊性,集中体现了人口增长、经济发展与资源短缺的矛盾[1]。伴随着经济社会的快速发展,工业化和城镇化建设进程快速推进,导致土地生态环境日趋恶化,土地污染负荷加重,土地质量下降等一系列问题,土地利用系统健康问题日渐凸显[2]。因此,开展土地利用系统健康评价研究,提高土地利用系统健康水平,对于加强生态文明建设,保障中国生态安全,促进社会经济可持续发展具有非常重要的理论意义和现实意义。

目前关于土地利用系统健康的研究主要集中在土地利用系统健康内涵、土地利用系统健康评价、土地利用系统健康影响因素以及土地利用系统健康调控等几个方面[3-8]。Vieira[4]从土地条件变化指标出发构建了土地健康评价指标体系,主要包括定性和定量两种土地条件变化指标。蔡为民等[5]在分析土地利用系统的基础上,探讨了土地利用系统健康的内涵,构建了土地利用系统健康评价框架体系。陈美球等[6]从环境因素、社会因素、经济因素三个方面构建了土地健康评价指标体系,综合运用特尔菲法、层次分析法、聚类分析法等建立了土地健康评价模型,并诊断了鄱阳湖区 11 个县的土地健康状况。郑华伟等[8]在界定土地利用系统健康内涵的基础上,构建了土地利用系统健康评价指标体系,采用物元分析法测算了四川省土地利用系统健康水平。

总体来看,土地利用系统健康评价研究尚属起步阶段,定性分析相对较多、定量研究较少;土地利用系统健康综合评价是对土地利用系统的全面诊断,包括资源的开发、经济社会发展、生态环境质量、政策管理水平等方面的内容,但现有的评价指标多集中于资源与环境状况,很少综合考虑人类活动、社会经济等对土地利用系统健康评价的作用。与此同时,土地利用系统健康评价多采用综合评价法、物元分析法等,专家学者针对这些方法的不足作了相应的改进,取得了一定的研究成果;但是由于土地利用系统健康评价影响因素的不确定性,评价指标与健康等级之间存在复杂的非线性关系,所以至今尚没有一个统一的评价模型来诊断土地利用系统健康水平[9]。集对分析法[10-11]是一种综合的不确定性分析方法,能从整体和局部上剖析研究系统内在的关系,把对不确定性的辩证认识转换成具体的数学问题,但尚未被应用到土地利用系统健康评价研究中;“压力—状态—响应”(pressure state response,PSR)模型综合考虑社会、经济、资源与环境,突出了人地关系。

鉴于此,本研究拟在界定土地利用系统健康内涵的基础上,构建基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价指标体系,并引入集对分析法和改进的熵值法对中国土地利用系统健康进行实证研究,诊断土地利用系统健康的障碍因子,以期为土地利用系统实施可持续性管理和合理利用提供依据。

1　研究方法

1.1　评价指标体系构建

土地利用系统是在一定的土地利用方式和特定土地单元下,与社会经济因素相互作用而形成的系统,包括自然生态系统、社会系统和经济系统,土地自然生态系统是土地利用系统的形成基础;土地利用系统健康是以人类社会可持续发展为目的,促进经济、社会和生态三者之间和谐统一,其内涵可以概括为:一是土地利用系统自身是否健康,即其自身结构是否合理,功能是否得到正常发挥;二是土地利用系统对人类是否健康,即土地利用系统所产生的综合效益是否满足人类的需要;三是土地利用系统是否协调发展,即经济发展、社会进步、土地资源合理利用、人口控制等,它们之间是否相互协调[5,7,12]。土地利用系统健康评价是以整个土地利用系统为评价对象,对特定时刻、特定区域的自然生态要素和社会经济要素进行的综合评价,诊断由人类活动与自然因素引起的系统破坏与退化程度,以便为管理者提供决策[5,8]。

PSR 概念模型是由联合国 OECD 和 UNEP 提出的[13-14],该模型以因果关系为基础,主要目的是评价生态系统的持续性,分析生态系统内在的因果关系,寻找人类活动与生态环境影响之间的因果链,得到较为普遍的认可与应用[12,15-16]。因此,本研究借鉴 PSR 概念模型作为土地利用系统健康评价指标体系的基本框架:人口增长、社会经济发展给土地利用系统带来巨大的压力;人类不断开发资源,通过社会经济活动向土地利用系统排放污染,改变了土地利用系统结构与功能状态;压力之下,土地利用系统在原有状态基础上做出反应,同时反馈于社会经济的发展过程;人类对土地利用系统的反馈进一步做出响应。例如进行政策调整、环境保护等,改善土地利用系统状态,使之保持良好的结构与功能,进而实现可持续发展[16-18]。

从土地利用系统健康内涵、PSR 概念模型出发,遵循指标选取的系统性、科学性、可获取性和可比性等原则,在参考相关文献的基础上[5-8,12],构建了土地

利用系统健康评价指标体系(表 1)。基于 PSR 模型的评价指标体系可以从总体上反映土地利用系统、社会经济发展目标与管理决策之间的相互依存、相互制约的关系,改变现有土地利用系统健康评价研究中指标体系主要关注资源环境的状况,能更准确地反映土地利用系统健康的各要素之间的关系。

表 1 土地利用系统健康评价指标体系及权重

目标层	准则层	因素层	指标层	评价函数	指标权重
土地利用系统健康	系统压力	人口活动水平	人口密度 x_1/(人·km^{-2})	总人口除以土地总面积	0.047 3
			人口自然增长率 x_2/‰	—	0.039 3
		社会经济发展压力	城市化水平 x_3/%	非农业人口除以总人口	0.046 6
			GDP 年增长率 x_4/%	当年 GDP 除以前一年 GDP 减 1	0.052 7
			固定资产投资增长率 x_5/%	当年固定资产投资除以前一年固定资产投资减 1	0.052 7
		土地利用强度	土地垦殖率 x_6/%	耕地面积除以土地总面积	0.037 7
			土地利用率 x_7/%	农用地和建设用地之和除以土地总面积	0.048 6
			建设用地比例 x_8/%	建设用地规模除以土地总面积	0.044 5
	系统状态	社会经济发展水平	人均 GDP x_9(元/人)	GDP 除以总人口	0.040 3
			城镇居民人均可支配收入 x_{10}(元/人)	—	0.041 3
			农民人均纯收入 x_{11}(元/人)	—	0.039 8
		土地集约利用状况	地均 GDP x_{12}/(万元·hm^{-2})	GDP 除以土地总面积	0.040 3
			人均耕地面积 x_{13}(hm^2/人)	耕地面积除以总人口	0.038 9
			人均建设用地 x_{14}(m^2/人)	建设用地面积除以总人口	0.041 3
		生态环境质量	森林覆盖率 x_{15}/%	—	0.052 8
			水土流失程度 x_{16}/%	水土流失面积除以土地总面积	0.047 6
	系统响应	政策管理水平	土地市场配置程度 x_{17}/%	土地一级市场配置程度与土地二级市场配置程度加权求和	0.052 3
		环境保护力度	水土流失治理率 x_{18}/%	水土流失治理面积除以水土流失面积	0.048 3
			工业废水排放达标率 x_{19}/%	达标工业废水排放量除以工业废水总排放量	0.052 6
			城市污水日处理能力 x_{20}/10^4 m^3	—	0.046 2
			工业固体废物综合利用率 x_{21}/%	工业固体废物综合利用量除以工业固体废物产生量	0.046 4
			环境污染治理投资占 GDP 比例 x_{22}/%	环境污染治理投资除以 GDP	0.042 5

1.2 集对评价模型

1.2.1 *集对分析法的原理* 集对分析是指对不确定性系统中的两个有关联的集合构造集对,对集对的某特性做同一性、差异性、对立性分析,建立联系度描述集对的同、异、反关系的分析方法[19]。集对分析的基础是集对,关键是联系度[11]。对于两个有关联的集合 A 和 B 组成的集对 $H(A,B)$,A,B 分别有 N 项表征其特性,在具体问题 Z 的背景下,分析集对 $H(A,B)$ 的特性,其中有 S 特性为 A 和 B 共同拥有的,P 特性为 A 和 B 对立的,其余的 F 特性既不为 A 和 B 共同拥有也不相互对立,[10-11,20] 则有:

$$\mu=\frac{S}{N}+\frac{F}{N}i+\frac{P}{N}j \tag{1}$$

令 $a=S/N$,$b=F/N$,$c=P/N$,则式(1)可改写为:

$$\mu=a+bi+cj \tag{2}$$

式中:μ——联系度,$\mu\in[-1,1]$;a,b,c——联系度分量,$a,b,c\in[0,1]$,分别称为集对 $H(A,B)$ 的同一度、差异度和对立度,且满足 $a+b+c=1$;i——差异度系数,$i\in[-1,1]$;j——对立度系数,其恒取值为 -1[20]。

式(1),(2)是常用的三元联系度,将其看成 1 个数,可以称为三元联系数,将式中的 b_i 进一步展开可以得到 K 元联系数:

$$\mu=a+b_1i_1+b_2i_2+\cdots+b_{K-2}i_{K-2}+cj \tag{3}$$

式中:μ——联系度,$\mu\in[-1,1]$;$a,b_1,b_2,\cdots,b_{K-2}$,c——联系度分量,$a,b_1,b_2,\cdots,b_{K-2},c\in[0,1]$;$i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}$——差异度系数,$i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}\in[-1,1]$;$j$——对立度系数,其恒取值为 -1[20]。

1.2.2 *指标联系度的确定* 假设评价对象为集合 $A_l(x_1,x_2,\cdots,x_l)$($l=1,2,\cdots,L$,L 为评价指标数),x_l 为评价指标,评价指标等级标准为 s_k($k=1,2,\cdots,K$,K 为等级标准数),B_k 为评价指标 k 级等级标准,$H(A_l,B_k)$ 为 A_l,B_k 构成的集对。根据集对分析法的原理,确定 $H(A_l,B_k)$ 的联系度[11,21]。

对于负向指标,当 $K>2$ 时,集对 $H(A_l,B_k)$ 的联系度为:

$$\mu(A_l,B_k)=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+\cdots+0i_{K-2}+0j & (x_l\leqslant s_1)\\ \dfrac{s_1+s_2-2x_l}{s_2-s_1}+\dfrac{2x_l-2s_1}{s_2-s_1}i_1+0i_2+\cdots+0i_{K-2}+0j & (s_1<x_l\leqslant\dfrac{s_1+s_2}{2})\\ 0+\dfrac{s_2+s_3-2x_l}{s_3-s_1}i_1+\dfrac{2x_l-s_1-s_2}{s_3-s_1}i_2+\cdots+0i_{K-2}+0j & (\dfrac{s_1+s_2}{2}<x_l\leqslant\dfrac{s_2+s_3}{2})\\ \vdots & \vdots\\ 0+0i_1+\cdots+\dfrac{2s_{K-1}-2x_l}{s_{K-1}-s_{K-2}}i_{K-2}+\dfrac{2x_l-s_{K-1}-s_{K-2}}{s_{K-1}-s_{K-2}}j & (\dfrac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2}<x_l\leqslant s_{K-1})\\ 0+0i_1+0i_2+\cdots+0i_{K-2}+1j & (x_l>s_{K-1})\end{cases}\tag{4}$$

对于正向指标,当 $K>2$ **时,集对** $H(A_l,B_k)$**的联系度为:**

$$\mu(A_l,B_k)=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+\cdots+0i_{K-2}+0j & (x_l\geqslant s_1)\\ \dfrac{2x_l-s_1-s_2}{s_1-s_2}+\dfrac{2s_1-2x_l}{s_1-s_2}i_1+0i_2+\cdots+0i_{K-2}+0j & (\dfrac{s_1+s_2}{2}\leqslant x_l<s_1)\\ 0+\dfrac{2x_l-s_2-s_3}{s_1-s_3}i_1+\dfrac{s_1+s_2-2x_l}{s_1-s_3}i_2+\cdots+0i_{K-2}+0j & (\dfrac{s_2+s_3}{2}\leqslant x_l<\dfrac{s_1+s_2}{2})\\ \vdots & \vdots\\ 0+0i_1+\cdots+\dfrac{2x_l-2s_{K-1}}{s_{K-2}-s_{K-1}}i_{K-2}+\dfrac{s_{K-1}+s_{K-2}-2x_l}{s_{K-2}-s_{K-1}}j & (s_{K-1}\leqslant x_l<\dfrac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2})\\ 0+0i_1+0i_2+\cdots+0i_{K-2}+1j & (x_l<s_{K-1})\end{cases}\tag{5}$$

式中:$\mu(A_l,B_k)$**——集对** $H(A_l,B_k)$**的联系度;** $i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}$**——差异度系数,**$i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}\in[-1,1]$**;** j**——对立度系数,其恒取值为**-1。

1.2.3　评价指标权重确定　**对于土地利用系统健康,不同评价指标的影响程度存在一定的差异,为了反映这种差异性,需要对评价指标赋以一定的权重,本研究采用改进的熵值法来确定评价指标权重,主要步骤如下**[22]**:**

(1) **评价指标标准化处理。由于不同的指标具有不同的量纲和单位,为了消除量纲和量纲单位的不同所带来的不可公度性,需要对指标数据用标准化法进行变换:**

$$X''_{il}=(X_{il}-\overline{X}_l)/s_l\quad(i=1,2,\cdots,m;\quad l=1,2,\cdots,L)\tag{6}$$

式中:X''_{il}**——标准化后的指标值;** $\overline{X}_l$**——第** l **项指标的均值;** s_l**——第** l **项指标的标准差。**

(2) **为了清除负数,进行坐标平移。**

$$X'''_{il}=H+X''_{il}\tag{7}$$

式中:X'''_{il}**——平移后的指标值;** X''_{il}**——标准化后的指标值;** H**——指标平移的幅度。**

(3) **计算第** l **项指标下的** i **个样本值的比重**(P_{il})

$$P_{il}=X'''_{il}/\sum_{i=1}^{m}X'''_{il}\tag{8}$$

(4) **计算第** l **项指标的熵值。**$e_l=-k\sum_{i}^{m}P_{il}\ln(P_{il})$**,其中** $k>0$**,**ln **为自然对数,**$e_l>0$**。如果** X'''_{il} **对于给定的** l **全部相等,那么** $P_{il}=X'''_{il}/\sum_{i=1}^{m}X'''_{il}=1/m$**,此时** e_l**取极大值,即** $e_l=-k\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{m}\ln\frac{1}{m}=k\ln m$**。若设** $k=1/\ln m$**,**$e_l=1$**,所以** $0\leqslant e_l\leqslant 1$。

(5) **计算第** l **项指标的差异性系数** g_l**:**

$$g_l=1-e_l$$

(6) **定义第** l **项指标的权重** w_l**:**

$$w_l=g_l/\sum_{i=1}^{m}g_l\quad(l=1,2,\cdots,L)$$

1.2.4　样本联系度的确定　**假设集合** A **为评价样本,**B **为评价指标等级标准的集合,则** $H(A,B)$**的联系度为:**

$$\mu(A,B)=\sum_{l=1}^{L}w_l\mu(A_l,B_k)=\sum_{l=1}^{L}w_la_l+\sum_{l=1}^{L}w_lb_{l,1}i_1+\sum_{l=1}^{L}w_lb_{l,2}i_2+\cdots+\sum_{l=1}^{L}w_lb_{l,K-2}i_{K-2}+\sum_{l=1}^{L}w_lc_lj\tag{9}$$

式中:$\mu(A,B)$**——集对** $H(A,B)$**的联系度;** $\mu(A_l,B_K)$**——集对** $H(A_l,B_K)$**的联系度;** w_l**——第** l **项指标的权重;** $i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}$**——差异度系数,**$i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}\in[-1,1]$**;** j**——对立度系数,其恒取值为**-1。

若令 $f_1=\sum_{l=1}^{L}w_la_l,f_2=\sum_{l=1}^{L}w_lb_{l,1},\cdots,f_{K-1}=\sum_{l=1}^{L}w_lb_{l,K-2},f_K=\sum_{l=1}^{L}w_lc_l$**,则公式**(8)**可变为:**

$$\mu(A,B)=f_1+f_2i_1+f_3i_2+\cdots+f_{K-1}i_{K-2}+f_{Kj}\tag{10}$$

式中:$\mu(A,B)$**——集对** $H(A,B)$**的联系度;** $i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}$**——差异度系数,**$i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}\in[-1,1]$**;** j**——对立度系数,其恒取值为**-1。

在此基础上,按照直接途径求取不确定(分量)系

数，得到联系数 $\mu(A,B)$ 的值[19]。根据均匀取值法，$i_0=1$，$j=-1$，差异不确定（分量）系数 $i_1,i_2,\cdots,i_{K-2}$ 将 i_0 和 j 之间（1～－1）进行 $K-1$ 等分，等分点的值为 $i_1,i_2\cdots,i_{K-2}$ 的值，即

$$i_k=1-\frac{2k}{K-1}\quad k=1,2\cdots,K-2 \tag{11}$$

式中：i_k——差异度系数，$i_k\in[-1,1]$。

1.2.5 评价等级的确定 根据“均分原则”，将$[-1,1]$区间 K 等分，则从右至左每个区间依次分别对应土地利用系统健康评价等级 $B_1,B_2,\cdots,B_K$，将 $\mu(A,B)$ 与各个评价等级对应的区间范围进行比较，得到土地利用系统健康评价等级[10,19]。

1.3 数据来源

本研究数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《中国农业年鉴》、《中国国土资源年鉴》和中国国土资源公报等。由于数据的可获得性限制，本研究只选择对 1999，2004 和 2008 年这 3 a 中国土地利用系统健康水平进行分析。

2 结果分析

评价标准的制定是土地利用系统健康评价的关键环节，现阶段土地利用系统健康评价在中国尚处于探索阶段，还没有统一的评价标准；土地利用系统健康的评价标准不仅复杂，而且需要因地制宜。评价标准的确定是集对评价模型的基础，本研究依据土地利用系统健康的特征，将其划分为 5 个等级：健康、亚健康、临界状态、不健康和病态。评价标准的确定主要参考国家、行业及国际相关标准，科学研究的判定标准，研究区域背景值或本底值等[6,8,12]，具体标准见表 2。值得说明的是，由于数据的可获得性限制，本研究主要分析全国尺度的土地利用系统健康状况，土地利用系统健康评价标准的确定主要着眼于全国整体；水土流失程度、水土流失治理率等指标的评价标准在不同地理区域存在一定的差异，在分析不同地理区域土地利用系统健康水平时，需要结合区域的实际情况进一步讨论确定评价标准。

表 2 土地利用系统健康评价等级标准

评价指标	评价等级标准				
	1 级（健康）	2 级（亚健康）	3 级（临界状态）	4 级（不健康）	5 级（病态）
x_1	＜80	80～120	120～250	250～500	＞500
x_2	＜5	5～10	10～15	15～20	＞20
x_3	＞70	40～70	20～40	10～20	＜10
x_4	＜3	3～10	10～18	18～28	＞28
x_5	＜2	2～10	10～20	20～30	＞30
x_6	＞33	21～33	13～21	9～13	＜9
x_7	＞95	85～95	75～85	65～75	＜65
x_8	＜3	3～7	7～12	12～18	＞18
x_9	＞32 000	23 000～32 000	15 000～23 000	7 500～15 000	＜7 500
x_{10}	＞22 000	16 000～22 000	10 000～16 000	6 000～10 000	＜6 000
x_{11}	＞6 000	4 000～6 000	3 000～4 000	2 200～3 000	＜2 200
x_{12}	＞8	3～8	1.500～3	0.500～1.500	＜0.500
x_{13}	＞0.150	0.115～0.150	0.095～0.115	0.053～0.095	＜0.053
x_{14}	＜150	150～180	180～230	230～300	＞300
x_{15}	＞30	20～30	15～20	5～15	＜5
x_{16}	＜15	15～25	25～35	35～50	＞50
x_{17}	＞65	50～65	30～50	15～30	＜15
x_{18}	＞60	30～60	20～30	10～20	＜10
x_{19}	＞95	85～95	70～85	55～70	＜55
x_{20}	＞20 000	12 000～20 000	6 400～12 000	2 700～6 400	＜2 700
x_{21}	＞85	70～85	55～70	46～55	＜46
x_{22}	＞3.000	1.500～3.000	1.000～1.500	0.100～1.000	＜0.100

收集中国有关土地利用系统健康评价指标数据，经分析整理后，按照改进的熵值法确定各评价指标的权重（表 1）。根据 1999，2004，2008 年各评价指标的具体数值，建立中国土地利用系统健康的集对 $H_{1999}(A_{22},B_5)$，$H_{2004}(A_{22},B_5)$，$H_{2008}(A_{22},B_5)$，将 3 个集对的数据分别输入集对评价模型，得到土地利用系统健康评价指标联系度、样本联系度（表 3—4）。根据均匀取值法，$i_0=1$，$j=-1$，差异不确定（分量）系数

i_1,i_2,i_3将 i_0和 j 之间进行 4 等分,$i_1=0.5$,$i_2=0$,$i_3=-0.5$,根据公式(8)计算 3 个集对的联系度,依次为:$\mu_{2008}(A,B)=0.111\ 3$,$\mu_{2004}(A,B)=-0.046\ 6$,$\mu_{1999}(A,B)=-0.200\ 5$。根据"均分原则",将[-1,1]区间 5 等分(0.6～1.0),(0.2～0.6),(-0.2～0.2),(-0.6～-0.2),(-1.0～-0.6),分别对应土地利用系统健康评价等级"健康"、"亚健康"、"临界状态"、"不健康"和"病态"。由此可知,2008 年中国土地利用系统健康水平等级为"临界状态",2004,1999 年分别为"临界状态"、"不健康";但 $\mu_{2008}(A,B)>\mu_{2004}(A,B)$。从土地利用系统健康的变化来看,1999—2008 年中国土地利用系统健康状况有所改善,土地利用系统健康等级在提升,土地利用系统健康水平有变好的趋势。

表 3　2008 年土地利用系统健康评价指标联系度

评价指标	a	b_1	b_2	b_3	c
x_1	0.000 0	0.549 0	0.451 0	0.000 0	0.000 0
x_2	0.968 0	0.032 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
x_3	0.000 0	0.679 6	0.320 4	0.000 0	0.000 0
x_4	0.000 0	0.000 0	0.539 3	0.460 7	0.000 0
x_5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.829 1	0.170 9
x_6	0.000 0	0.000 0	0.300 5	0.699 5	0.000 0
x_7	0.000 0	0.000 0	0.257 3	0.742 7	0.000 0
x_8	0.761 4	0.238 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0
x_9	0.000 0	0.553 8	0.446 2	0.000 0	0.000 0
x_{10}	0.000 0	0.463 5	0.536 5	0.000 0	0.000 0
x_{11}	0.000 0	0.840 4	0.159 6	0.000 0	0.000 0
x_{12}	0.000 0	0.314 2	0.685 8	0.000 0	0.000 0
x_{13}	0.000 0	0.000 0	0.569 4	0.430 6	0.000 0
x_{14}	0.000 0	0.000 0	0.267 9	0.732 1	0.000 0
x_{15}	0.000 0	0.094 7	0.905 3	0.000 0	0.000 0
x_{16}	0.000 0	0.000 0	0.419 4	0.580 6	0.000 0
x_{17}	0.000 0	0.468 0	0.532 0	0.000 0	0.000 0
x_{18}	0.000 0	0.170 1	0.829 9	0.000 0	0.000 0
x_{19}	0.489 4	0.510 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0
x_{20}	0.000 0	0.290 1	0.709 9	0.000 0	0.000 0
x_{21}	0.000 0	0.163 1	0.836 9	0.000 0	0.000 0
x_{22}	0.000 0	0.179 8	0.820 2	0.000 0	0.000 0

注:a,b_1,b_2,b_3,c 为指标联系度分量,且 $a+b_1+b_2+b_3+c=1$。

表 4　土地利用系统健康评价样本联系度

年份	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1999	0.056 5	0.166 4	0.315 0	0.243 9	0.218 2
2004	0.070 4	0.142 0	0.431 0	0.337 3	0.019 3
2008	0.097 7	0.250 2	0.438 0	0.205 1	0.009 0

注:f_1,f_2,f_3,f_4,f_5 为样本联系度分量。

从单个评价指标来看,中国土地利用系统健康评价指标联系度 1999—2008 年大部分指标发生等级跳跃。人均 GDP、城镇居民人均可支配收入、农民人均纯收入、工业废水排放达标率、工业固体废物综合利用率、土地市场配置程度、森林覆盖率、农民人均纯收入、环境污染治理投资占 GDP 比例、水土流失治理率等指标出现不同等级的上升趋势,说明以上指标对中国土地利用系统健康水平的提升有着重要的贡献。1999 年以来中国经济持续发展,人民收入水平不断提高,土地生态保护意识不断强化;中国积极开展农村土地整治,持续加大科技投入,加强技术推广普及,积极开展科技培训;中国加大生态环境保护建设的力度,有效加强水土流失治理,环境污染治理投资比例不断提高,水土流失治理率持续增加,促进了土地利用系统健康状况改善。

$\mu_{2008}(A,B)=0.111\ 3$,说明虽然 2008 年中国土地利用系统健康等级为"临界状态",但仍需进一步改善土地利用系统健康状况。根据单个指标提供的分异信息,1999—2008 年人均耕地面积、土地垦殖率、人均建设用地等指标呈现等级下降趋势,水土流失程度改善幅度较小,这些指标成为制约中国土地利用系统健康状况改善的因素。从单个指标评价结果来看,2008 年中国土地利用系统健康评价指标中,固定资产投资年增长率、人均耕地面积、土地垦殖率、水土流失程度、人均建设用地等属于"不健康"等级。虽然中国一直致力于水土流失的综合治理,但由于易水土流失区域较大,且存在反复的现象,目前水土流失程度仍较大,还需加大治理力度,有效保护土地资源。随着经济社会的发展,中国固定资产投资增长速度明显提升、国内生产总值持续增长,但这种高速增长是以资源高消耗为代价的,建设用地规模不断扩大,耕地面积持续减少,土地集约利用水平较低、地均 GDP 不高。

3　结 论

(1) 研究结果表明,1999—2008 年中国土地利用系统健康水平不断提高,健康等级经历了"不健康—临界状态"的演变历程,但 2008 年"临界状态"水平不高;固定资产投资年增长率、人均耕地面积、土地垦殖率、水土流失程度、地均 GDP 等是制约土地利用系统健康状况改善的关键因素。为了加强土地利用系统可持续性管理,根据土地利用系统健康的评价结果,进一步转变经济发展方式,推动经济结构战略性调整,优化产业升级布局,加强土地利用监督管理,提高土地资源市场化配置程度,形成节约集约用地的"倒

逼机制”，有效增加土地利用集约度，降低经济增长对土地资源的过度消耗；积极开展农村土地整治，加强高标准基本农田建设，增加有效耕地资源面积；持续增加环境保护投入，加大环境治理力度，有效控制水土流失程度，进而持续改善土地利用系统健康状况。

（2）通过对 1999—2008 年中国土地利用系统健康评价的实证研究表明，PSR 模型以因果关系为基础，综合考虑人类活动、社会经济、资源环境之间的相互关系，改变现有研究主要关注资源环境的状况，能更准确地反映土地利用系统、社会经济发展目标与管理决策之间的相互依存、相互制约的关系，进而有效剖析土地利用系统健康的各要素之间的关系；基于 PSR 模型的评价指标体系能够实现对土地利用系统健康的综合评价。

（3）传统评价方法中，较少考虑土地利用系统健康评价影响因素的不确定性、评价指标与健康等级之间的非线性关系，而集对分析法通过注重信息处理过程中的相对性和模糊性能很好地解决不确定性问题[23]，利用原创联系度的可展性建立土地利用系统健康的集对评价模型，能从整体和局部上剖析土地利用系统健康内在的关系，把对不确定性的辩证认识转换成具体的数学问题，有效挖掘土地利用系统健康存在的具体问题；改进的熵值法根据土地利用系统健康评价指标之间离散程度，运用信息熵确定评价指标的权重，能够解决一些主观赋值法所带来的结果不稳定的问题，在一定程度上改善和提高了评价的质量；集对分析法和改进的熵值法适用于土地利用系统健康评价，有利于诊断土地利用系统健康障碍因素、优化土地利用系统健康改善路径、强化土地利用系统可持续性管理，进而促进土地资源可持续利用。

（4）本文作为一种研究方法的探讨，在构建土地利用系统健康评价指标体系的基础上，尝试性将集对分析法运用到土地利用系统健康评价中，基本达到预期的研究目的。由于此类研究尚不多，土地利用系统健康评价的指标选择、评价标准的确定，集对分析法中联系度的普适性等问题有待进一步深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 蔡为民，唐华俊. 土地利用系统健康评价[M]. 北京：中国农业出版社，2007.

[2] 孙丕苓，杨海娟，刘庆果. 南水北调重要水源地的土地生态安全动态研究[J]. 自然资源学报，2012，27(9)：1520-1530.

[3] Leopold A. Wilderness as a land laboratory[J]. Living Wilderness，1941，6(7)：2-3.

[4] Benites J R. Land and Water Development Division[M]. Rome：FAO，1996.

[5] 蔡为民，唐华俊，陈佑启，等. 土地利用系统健康评价的框架与指标选择[J]. 中国人口·资源与环境，2004，14(1)：31-35.

[6] 陈美球，黄靓，蔡海生，等. 鄱阳湖区土地健康评价[J]. 自然资源学报，2004，19(2)：170-175.

[7] 贺翔. 上海市土地利用系统健康评价研究[D]. 武汉：华中农业大学，2007.

[8] 郑华伟，张锐，刘友兆. 基于物元分析的土地利用系统健康诊断[J]. 中国土地科学，2012，26(11)：33-39.

[9] 施开放，刁承泰，孙秀锋，等. 基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价[J]. 生态学报，2013，33(4)：1317-1325.

[10] 胡晓雪，杨晓华，郦建强，等. 河流健康系统评价的集对分析模型[J]. 系统工程理论与实践，2008，28(5)：64-170.

[11] 王文圣，金菊良，丁晶，等. 水资源系统评价新方法：集对评价法[J]. 中国科学(E 辑)：技术科学，2009，39(9)：1529-1534.

[12] 郭杰，吴斌. 土地利用系统健康评价[J]. 中国土地科学，2011，25(4)：71-77.

[13] FAO Proceedings. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development[R]. Proceedings of the Workshop Organized by the Land and Water Development Division FAO Agriculture Department，1997.

[14] Walz R. Development of environmental indicator systems：experiences from germany[J]. Environmental Management，2000，25(6)：613-623.

[15] 颜利，王金坑，黄浩. 基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J]. 资源科学，2008，30(1)：107-113.

[16] 仇蕾. 基于免疫机理的流域生态系统健康诊断预警研究[D]. 南京：河海大学，2006.

[17] 高珊，黄贤金. 基于 PSR 框架的 1953—2008 年中国生态建设成效评价[J]. 自然资源学报，2010，25(2)：341-350.

[18] 郑华伟，张锐，杨兴典，等. 基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境，2012，21(9)：1099-1105.

[19] 王文圣，李跃清，金菊良，等. 水文水资源集对分析[M]. 北京：科学出版社，2010.

[20] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州：浙江科学技术出版社，2000.

[21] 王宏伟，张鑫，邱俊楠. 模糊集对分析法在水资源安全评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2011，39(10)：209-214.

[22] 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.

[23] 南彩艳，粟晓玲. 基于改进 SPA 的关中地区水土资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报，2012，27(1)：104-114.