

侵蚀环境小流域生态经济系统健康定量评价

戴全厚^{1,2,3}, 刘国彬¹, 田均良¹, 薛 菱¹, 翟 胜⁴ 王国梁¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 贵州大学林学院, 贵阳 550025;

3. 吉林省水土保持研究院, 长春 130033; 4. 聊城大学环境与规划学院, 山东聊城 252059)

摘要:生态经济系统健康是黄土丘陵区侵蚀环境下水土保持与生态建设的目标。在分析侵蚀环境下生态系统健康特征和诊断指标筛选原则的基础上, 从资源环境支持、社会经济人文影响和生态综合功能 3 个方面, 选择 17 个因素作为参评因子, 建立了一套适合于侵蚀环境小流域生态经济系统健康诊断的指标体系。以均方差决策法确定各指标的权重, 运用递阶多层次综合法、线性加权函数法分别建立二级层次和综合指标健康诊断模型——健康指数。分析研究侵蚀环境小流域生态经济系统健康动态, 结果表明, 该环境系统健康状况相对稳定, 健康指数呈逐年波动式上升趋势(由 1985 年的 0.370 增大到 2003 年的 0.573), 具有较强的可持续发展能力。同时, 以现实生态经济最佳水平为目标, 引入障碍度、优势度等概念, 运用通经分析对该环境小流域系统健康进行障碍和优势诊断, 并据此提出了建设对策和建议, 为该环境小流域生态环境建设提供科学依据。

关键词:生态系统健康; 定量评价; 小流域; 侵蚀环境

文章编号: 1000-0933(2006)07-2219-10 中图分类号: Q178 文献标识码: A

Health diagnoses of eco-economy system in Zhifanggou small watershed on typical erosion environment

DAI Quan-Hou^{1,2,3}, LIU Guo-Bin¹, TIAN Jun-Liang¹, XUE Sha¹, ZHAI Sheng⁴, WANG Guo-Liang¹ (1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. Department of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. The Soil and Water Conservation Institute of Jilin Province, Changchun 130033, China; 4. College of Environment and Programming, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2219 ~ 2228.

Abstract: To reach the ecosystem health from both ecological and economic points is the objective of water conservation and ecological building in the loess hilly area under erosion environment. On the principle of ecosystem healthy quantitative assessment and diagnosis index selecting, 17 factors were selected and evaluation index system was established to make ecosystem health assessment from the following three aspects: resource and environmental capacity, social and economic impact, and ecological services in a small watershed under erosion environment. The mean-square deviation decision method was employed to determine the weight of each factor and then the step-up multilayer synthesis with liner weighting function method was used to build two-level hierarchy and collecting index health consultation model-health index. The health dynamics of eco-economy system in the small watershed under erosion environment was analyzed. It was shown that the watershed ecosystem is relatively stable and the health index has an increasing trend from annual fluctuation (0.370 in 1985 to 0.573 in 2003). This indicates that it has a quite strong ability on sustainable development. At the same time, the obstacle and advantage to the watershed ecosystem health were studied by introducing the concepts of obstacle degree and advantage, and path analysis method, with considering the real eco-economic optimal level as the uppermost goal. Finally, suggestions on ecological building were provided which give a scientific basis to the

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(90502007); 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-06)

收稿日期:2006-02-09; **修订日期:**2006-05-23

作者简介:戴全厚(1969~), 男, 陕西长武人, 博士, 主要从事水土保持和生态恢复重建研究. E-mail: qhdai@sohu.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90502007); Knowledge Innovation Projection of CAS (No. KZCX1-06)

Received date: 2006-02-09; **Accepted date:** 2006-05-23

Biography: DAI Quan-Hou, Ph. D., mainly engaged in soil and water conservation and ecological restoration and rehabilitation. E-mail: qhdai@sohu.com

ecosystem rehabilitation in the small watershed.

Key words: ecosystem health; quantitative assessment; small watershed; erosion environment

生态系统健康是 20 世纪 80 年代后期发展起来的生态学研究热点, 主要集中于生态系统功能幅值、紊乱的辨识, 组织结构的负载能力, 生态系统的恢复能力、扩散能力, 诊断方案, 有效指标设计和健康评价体系, 经济生态系统的协调性与耦合性研究^[1,2], 自 Schaffer 等探讨了有关生态系统健康度量问题^[3], Rapport 论述了生态系统健康的内涵^[4]以来, 各国学者对此进行了大量的探索, 极大地推动了生态系统健康研究的发展。目前已成为最具活力的研究领域^[5-8], 但国内的研究还较少, 特别是侵蚀环境生态系统方面。

侵蚀环境指在水土流失区因侵蚀而造成的特有的侵蚀景观和生态系统^[9], 是一个包含自然侵蚀环境与人文侵蚀环境的复合型环境系统。小流域是侵蚀环境生态系统的基本单元, 建立健康的小流域生态经济系统是黄土丘陵区生态与环境建设的基础和保证。典型侵蚀环境——陕北黄土丘陵区纸坊沟小流域生态系统经过近 20a 的综合治理, 已取得了很大成效, 目前已经历了起始恢复阶段、稳定发展阶段和良性循环阶段, 由退化状态逐步走上健康发展方向^[10,11]。但随着水土保持环境建设的深入和社会经济的发展, 国内外对于流域综合治理与生态建设有了更高的要求 and 目标^[11-14]。因而, 分析侵蚀环境生态经济系统演变规律, 开展其健康评价研究, 对于促进侵蚀环境生态经济系统建设和持续稳定发展具有极其重要的理论和实践意义。

本文在刘国彬等建立的健康评价层次模型基础上^[11], 新引入了反映侵蚀环境生态环境建设人文特征改善和发展的指标。在系统分析评价中, 根据其生态环境恢复的状态值统计计算获取各指标权重, 改进了计算方法, 消除了人为主观随意性。对典型侵蚀环境——纸坊沟小流域水土保持型生态农业健康进行定量评价, 为该流域生态经济系统进一步建设决策服务。

1 研究区概况

研究区设在典型侵蚀环境——陕西省安塞县纸坊沟小流域(36°51'N, 109°19'E), 该流域居黄土高原腹地, 属典型的丘陵沟壑区, 流域面积 8.27 km²。处于暖温带半干旱气候区, 多年平均降雨量为 524.5mm, 年平均温度为 8.8℃。流域内地形破碎, 梁峁起伏, 地带性土壤为黑垆土, 但大部分已流失殆尽, 绝大部分土壤是在黄土母质上发育的幼年土壤黄绵土。流域地处森林草原过渡带, 由于人类活动的影响, 地带性植被已经破坏殆尽。据调查, 1338 年, 纸坊沟小流域人口密度为 11.4 人/km², 乔灌木林覆被率 51.2%, 粮食单产 1449kg/hm²。1938~1958 年的 20a 间, 人口密度增至 26.7 人/km², 开垦指数达 51.5%, 乔灌木植被破坏殆尽, 仅为土地面积的 0.4%, 土壤侵蚀模数达 15000t/km²; 粮食单产下降到 415.5kg/hm², 生态系统严重退化。自 1973 年以来安塞水土保持实验站开始对这个小流域进行治理, 经过多年逐步退耕还林还草使流域林草植被覆被率达 60% 以上, 粮食单产显著提高, 2002 年达到 4438.5kg/hm²。在人口持续增加的情况下, 人均粮食、经济收入仍得到提高, 生态环境显著改善, 初步恢复重建了退化的生态系统。

2 典型侵蚀环境小流域健康诊断

侵蚀环境生态经济系统是生态系统和经济系统的复合系统, 是一个开放系统, 也是一个相对异质性的系统, 其各子系统之间不断地进行着能量、物质和信息流动, 其中一个子系统健康受损将会对环境内其它系统乃至整个环境的健康产生影响。同时, 系统内人类活动如土地利用格局的改变、农田灌溉及施肥、各种水利工程措施等都会对生态经济系统的健康状况产生重要影响。系统各子系统相互关系及人类活动的影响是侵蚀环境小流域生态系统健康研究必须考虑的重要特征。因此, 侵蚀环境生态经济系统健康的内涵是, 管理者能够实施合理的经营策略, 在侵蚀干旱胁迫下能够保持生态安全、生产能力及可持续发展的状态。侵蚀环境健康的生态经济系统应具有以下特征^[10-12]: ①年土壤侵蚀量控制在允许范围之内(<1 000 t/(km²·a)), 对遇到的正常干扰(如洪水、干旱、火灾等)具有恢复力; ②远离区域生态经济系统危机综合症; ③能自我维持, 即在没有外部输入时能存在; ④管理和实践生态经济系统过程时不损害邻近生态系统; ⑤经济上可行, 能够提供合乎自然和人类需求的生态服务; ⑥维持健康的人类群体。

2.1 指标选择与诊断体系框架构建

生态系统健康评价方法主要有指示物种诊断法和指标体系诊断法。指示物种诊断法是陆地生态系统和水生生态系统健康评价的常用方法。该方法简单易行,但存在严重不足,主要是未考虑系统内社会经济和人类健康问题方面的参数。指标体系评价法是建立包括社会经济和人类健康参数在内的指标体系,综合大量复杂信息进行诊断系统健康状况。根据研究区纸坊沟侵蚀环境演变过程,采用指标体系诊断法,其评价的理论基础是生态系统健康和侵蚀环境小流域生态系统的物质循环与能量流动。其指标涉及多学科、多领域,种类繁多、项目多样。指标筛选必须达到如下目标,即指标体系能完整准确地反映侵蚀环境生态经济系统健康状况,能够提供现状的代表性图案;又能对各类生态系统的生物物理状况和人类胁迫进行监测,寻求自然、人为压力与生态系统健康变化之间的联系,并探求生态系统健康衰退的原因。同时,还能定期地为政府决策、科研及公众要求等提供生态经济系统健康现状、变化及趋势的统计总结和解释报告。为此,其筛选指标遵循以下原则:①整体性原则;②空间尺度原则;③指标范畴或类型原则;④简明性和可操作性原则;⑤规范化原则。

基于上述原则和该区小流域综合治理的目标与要求,从侵蚀环境生态系统健康的内涵出发,坚持指标体系的灵敏性、独立性和协调性准则,构造能够反映典型侵蚀环境——黄土丘陵沟壑区生态经济系统社会、经济、资源、环境和人类健康协调现状及发展趋势的指标,形成以资源环境支持(T_1)、社会经济人文影响(T_2)和生态综合功能(T_3)3个二级层次指标,资源指数(C_1)、环境指数(C_2)、社会经济指数(C_3)、人文发展指数(C_4)、综合指数(C_5)和土壤功能指数(C_6)共6个三级层次指标,16个具体指标 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{17}$ 作为三级层次的侵蚀环境小流域生态经济系统健康评价指标体系(Eco-economy system Health Indicator, EHI)(图1)。图1中 $C_1 \sim C_6$ 层次下设的 x 层指标具体含义:

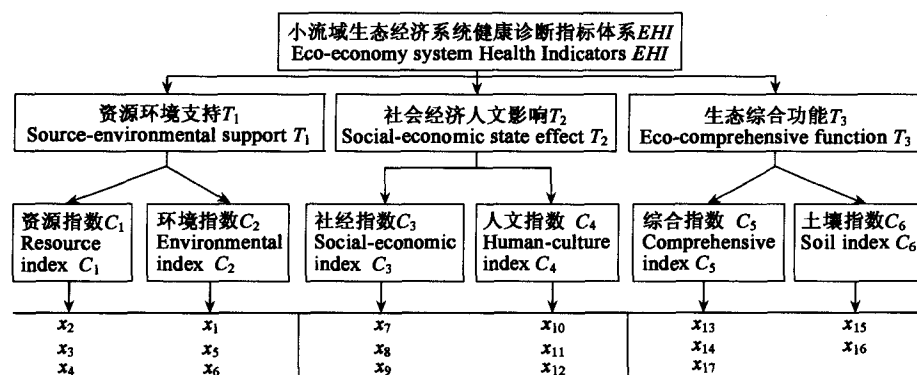


图1 侵蚀环境小流域生态系统健康诊断层次结构图

Fig.1 The hierarchical structure of health diagnoses of eco-economy system in small watershed on erosion environment

C_1 : 人均基本农田 x_2 (hm^2)、人均牧草地 x_3 (hm^2)、牲畜人均存栏量 x_4 (羊单位);

C_2 : 林草覆盖率 x_1 (%)、有机质含量 x_5 (g/kg)、治理度 x_6 (%);

C_3 : 农业产投比 x_7 、人均纯收入 x_8 (元)、工副业贡献率 x_9 (%);

C_4 : 人口密度 x_{10} (人/ km^2)、义务教育普及率 x_{11} (%)、恩格尔系数 x_{12} ;

C_5 : 粮食单产潜势实现率^[10] x_{13} (%)、综合治理减沙效率^[10] x_{14} (%)、系统抗逆力^[10] x_{17} ;

C_6 : 土壤抗冲性 x_{15} (L·min/g)、土壤渗透性 x_{16} 。

2.2 诊断方法与模型构建

系统多指标综合分析诊断的方法较多,其关键是指标权重的确定。一般地,根据原始数据的不同来源,确定指标权重的方法大体上分为主观赋权法和客观赋权法两类。主观赋权法主要是由专家根据经验主观判断而获得,如古林法、Delphi法、AHP法等,这种方法较为成熟,但客观性较差。客观赋权法是根据原始数据运用统计方法计算获得,不依赖于人的主观判断,其客观性较强,如离差法、均方差法、主成分分析法等。本研究采

用精度较高的均方差法确定指标权重,并结合其它统计方法建立评价模型,对黄土丘陵区典型侵蚀环境小流域生态经济系统健康进行全面评价诊断。

2.2.1 单项指标涵义及获取 上述筛选设置的侵蚀环境小流域生态经济系统健康评价具体指标中大部分指标涵义清楚,概念明确,其代表性不言而喻,可通过实地调查、测试和多年观测积累获得,只有极少部分指标的涵义需要说明,且要借助相关计算求得,这些指标的涵义和计算公式分别如下。

(1)恩格尔系数(x_{12}) 恩格尔系数是反映贫困与富裕程度的重要指标^[15]。侵蚀环境人民生活的贫困与富裕程度在很大程度上决定着其治理成效和生态恢复健康水平,因而选取该指标进行生态系统健康定量评价具有较强的代表性,其计算公式为:

$$\text{恩格尔系数}(\%) = (\text{食品支出额} / \text{消费支出额}) \times 100\%$$

一般地讲,恩格尔系数越低,生活越富裕,反之,恩格尔系数越高,生活越贫困。联合国粮农组织提出了一个划分贫困与富裕的标准,即恩格尔系数在 59% 以上者为绝对贫困,50% ~ 59% 为勉强度日,40% ~ 50% 为小康水平,30% ~ 40% 为富裕,30% 以下为最富裕。

(2)粮食单产潜势实现率(x_{13}) 粮食单产潜势实现率是指侵蚀环境小流域单位面积土地单产(kg/hm^2)与当地气候条件下作物最大生产潜力($5745\text{kg}/\text{hm}^2$)^[16]的比值。粮食生产潜势实现率反映该区土地生产力比较符合目前产业结构现状,黄土高原的粮食问题也是中国粮食安全问题^[16]的重要组成部分。粮食单产潜势实现率与侵蚀环境水分、土壤养分等关系极为密切,是一综合性较强的生产力指标,体现了该环境的水分、养分等状况,因而具有较好的代表性。

(3)系统抗逆力(x_{17}) 系统抗逆力^[16]是指流域系统抵抗灾害的能力,流域某时期内发生灾害年份的农业产值占此期间的平均农业产值的比例,该指标反映了流域系统对自然灾害的免疫力,在其生态系统健康评价中起关键性作用,代表性极强。

(4)土壤抗冲性(x_{15}) 土壤抗冲性是指土壤抵抗径流和风等外营力机械破坏的能力,它与土壤理化性状及生物因素关系密切,是侵蚀环境小流域生态系统健康评价中不可或缺的重要指标,该研究采用原状土冲刷法^[16,17]测定,计算公式为:

$$S_0 = \frac{Q \cdot t}{M} \quad (1)$$

式中, S_0 为土壤抗冲性($\text{L}/(\text{min} \cdot \text{g})$); Q 为冲刷总流量(ml); t 为冲刷时间(min); M 为冲刷走的干土重(g)。

(5)土壤渗透性(x_{16}) 土壤渗透性是指水分进入土壤形成土壤水的过程,它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化过程中的一个重要的环节^[16]。采用大型渗透筒法^[15]测定,计算公式为:

$$K_{10} = \frac{10 Q_i \cdot L}{S(0.7 + 0.03 t)(H + L) t_i} \quad (2)$$

式中, K_{10} 为土壤渗透系数; Q_i 为时段 t_i 中土壤渗出水量(ml); S 为渗透筒横截面面积(cm^2); L 为土层厚度(cm); H 为水层厚度(cm); t_i 为渗透时间。

2.2.2 指标权重确定 首先运用模糊集合理论引入隶属函数进行指标量化(无量纲标准化处理)。

对于效益型指标,有: $y_{ij} = (x_{ij}/x_{j\max})^C \times 10\%$ (3)

对于成本型指标,有: $y_{ij} = (x_{j\min}/x_{ij})^C \times 100\%$ (4)

式中, $x_{j\max}$, $x_{j\min}$ 分别为 I_j 指标的最大值和最小值,即系统运行最佳值; C 为刻划模糊度的常数,一般 $C > 1$,这里取 1.1(小流域生态经济系统模糊度较低)。

评价指标量化,即无量纲标准化后的决策矩阵为 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$,显然, y_{ij} 愈大愈好。

然后运用均方差法^[18]计算单项指标(x_j)、二级层次指标(T_i)和三级层次指标(C_k)权系数 w_j 、 w_k 和 w_i ,计算方法详见参考文献^[19,20]。

2.2.3 健康评价模型 运用均方差决策法等数理统计方法确定各指标权重,既能反映流域系统特定时期的

健康水平,又能初步判断该流域系统的持续协调发展局势。为进一步研究评价典型侵蚀环境——小流域系统的健康状况,本研究构建了系统健康指数模型。系统健康指数是侵蚀环境小流域综合治理和生态环境建设及系统经济发展等总体水平的集中体现。

(1)二级层次指标健康指数 依据流域系统指标体系特征,二级层次指标中的各指数不能相互替代,它们是资源环境支持、社会经济人文影响和生态综合功能健康的必要条件,不可缺废其中任何一个,故该文采用多目标线性加权函数法(加权连乘法)^[21]对二级层次指标健康指数(I_i)进行求解,即:

$$I_i = \prod [\sum (y_{ij}w_j)]^{w_k} \quad (5)$$

式中, I_i 为二级层次指标(T_i)健康指数; y_{ij} 为各指标量化值; w_j 为单项指标权重; w_k 为三级层次指标权重。

(2)系统健康指数 二级层次中每一指标均是从不同侧面来反映侵蚀环境的健康水平,总体水平必须进行综合评判,故采用多目标线性加权函数法对系统健康指数(I_h)进行求解,即:

$$I_h = \sum_{i=1}^3 (I_i w_i) = \sum_{i=1}^3 \{ \prod [\sum (y_{ij}w_j)]^{w_k} \} w_i \quad (6)$$

式中, I_h 为黄土丘陵区生态经济系统健康指数; w_i 为二级层次指标权重;其它指标含义同式(5)。

I_i 和 I_h 的具体分级意义根据刘国彬等的研究^[10],安塞纸坊沟小流域生态经济系统健康可以分为恶性循环、脆弱、相对稳定、良好和良性循环5个等级,根据侵蚀环境生态环境的实际变化和发展过程看,是科学可信的,故该研究引用其健康分级标准(表1)。

2.4 障碍与优势诊断

生态经济系统健康评价的目的既在于对侵蚀环境小流域健康状况进行评判,更重要的是在于探求其健康发展的障碍和优势因素,以便有针对性的对其进行环境整治和政策上的调整,首先根据文献^[20]计算障碍度(L_j)和优势度(A_j),然后运用途径分析确定系统健康障碍和优势因素。

途径分析是美国遗传学家 Sewall Wright 于 1921 年提出的一种进一步剖析相关系数多元分析方法^[22,23]。它不仅能测定两变数间的相互关系,而且还能给出原因对结果的重要性,并可将相关系数分解为直接作用和间接作用,提示各个因素对结果的相对重要性。

对于一个相互关联的系统,有一个因变量 y 与 n 个自变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 间存在的线性关系,回归方程为:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (7)$$

将实际观测值代入(7)式,并用最小二乘法原理解方程组,即可以求得通径系数 P_{yxi} 。通径系数是变量标准化的偏回归系数,表示各原因对结果的相对重要性。

式(7)通过数学变换,可建立正规矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1 x_2} & \dots & r_{x_1 x_n} \\ r_{x_1 x_1} & 1 & \dots & r_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_n x_1} & r_{x_n x_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{yx_1} \\ P_{yx_2} \\ \vdots \\ P_{yx_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1 y} \\ r_{x_2 y} \\ \vdots \\ r_{x_n y} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $r_{x_i x_j}$ 为 x_i 和 x_j 的简单相关关系, $r_{x_i y}$ 为 x_i 和 y 的简单相关系数。对方程(8)进行求解即可求得通径系数 P_{yxi} ,即:

$$P_{yxi} = b_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中, b_i 即为 y 对 x_i 的偏回归系数, σ_{x_i} 、 σ_y 分别为 x_i 、 y 的标准差。 P_{yx_i} 表示 x_i 对 y 的直接通经系数, 用 $r_{x_i x_j} P_{yx_i}$ 表示 x_i 通过 x_j 对 y 的间接通经系数。而剩余项的通经系数 P_{ye} 表示为:

$$P_{ye} = \sqrt{1 - (r_{x_1 y} P_{yx_1} + r_{x_2 y} P_{yx_2} + \cdots + r_{x_n y} P_{yx_n})}$$

若 P_{ye} 数值较大, 则表明误差较大或者还有另外更重要的因素未考虑在内。

表 2 纸坊沟流域生态经济系统健康诊断指标量化值

Table 2 Indicators value for health diagnosis of eco-economy system in Zhifanggou watershed

年份 Year	指标 Index																
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
1985	0.4787	0.4155	0.8695	0.7966	0.7587	0.3082	0.7702	0.0652	0.1482	1	0.4613	0.6309	0.1554	0.0702	0.1379	0.7044	0.7500
1986	0.5673	0.4329	0.8328	0.7687	0.7583	0.3740	1	0.0881	0.1627	0.9678	0.5029	0.6402	0.1914	0.2119	0.1648	0.7146	0.6677
1987	0.5887	0.4818	0.8210	0.8561	0.7770	0.3926	0.7707	0.1059	0.4996	0.9375	0.5238	0.6595	0.1893	0.2427	0.2299	0.7139	0.8289
1988	0.6222	0.5916	0.8320	0.8382	0.8024	0.4760	0.8184	0.1380	0.4476	0.9146	0.5448	0.6907	0.2308	0.4379	0.2317	0.7231	0.7715
1989	0.6378	0.6059	0.8171	1	0.8086	0.4950	0.5860	0.1807	0.4872	0.8927	0.5659	0.7017	0.2662	0.6135	0.5122	0.7323	0.7098
1990	0.6582	0.6600	0.7662	0.6612	0.8162	0.5470	0.4677	0.2233	0.5860	0.8829	0.6082	0.6907	0.4486	0.6149	0.5690	0.7318	0.9027
1991	0.6630	0.7102	0.6635	0.5752	0.8709	0.5497	0.3262	0.1554	0.4551	0.8101	0.6722	0.7247	0.3358	0.5813	0.6142	0.7477	0.7004
1992	0.7272	0.7362	0.7560	0.6137	0.9035	0.6439	0.2301	0.2396	0.4398	0.7697	0.7261	0.7493	0.1949	0.6233	0.6249	0.7512	0.4776
1993	0.7503	0.7837	0.7256	0.6025	0.8931	0.6886	0.4186	0.3058	0.4362	0.7479	0.7802	0.7755	0.4238	0.6430	0.6298	0.7543	0.3592
1994	0.7163	0.7911	0.7077	0.5406	0.9032	0.7097	0.3842	0.5779	0.426	0.7345	0.8237	0.8035	0.5283	0.6854	0.6370	0.7595	0.6788
1995	0.7369	0.8426	0.7319	0.6305	0.9037	0.7407	0.6123	0.5949	0.2839	0.7393	0.8128	0.8183	0.4206	0.6741	0.6426	0.7694	0.7135
1996	0.7845	0.8525	0.7142	0.7765	0.8970	0.7421	0.5529	0.5184	0.3512	0.7434	0.8565	0.8035	0.6134	0.7252	0.6415	0.7737	0.9686
1997	0.7797	0.8864	0.7279	0.9364	0.9401	0.7747	0.4274	0.4993	0.6908	0.7434	0.8784	0.8335	0.3591	0.9853	0.6687	0.7839	0.9875
1998	0.7894	0.9099	0.7162	0.7148	0.9425	0.9179	0.3849	0.7023	0.5931	0.7404	0.9005	0.8828	1	0.7780	0.9389	0.9456	0.9003
1999	0.7931	0.9099	0.7351	0.7398	1	0.9508	0.3049	0.7866	0.7799	0.7404	0.9225	0.9379	0.7198	0.7852	0.9623	0.9657	0.9596
2000	0.8620	1	1	0.3809	0.9778	0.9838	0.4297	0.5902	1	0.8431	0.9778	0.9785	0.7891	0.8383	0.9696	0.9859	0.9623
2001	0.9004	0.9842	0.7734	0.2795	0.9800	0.9839	0.3800	0.7498	0.9125	0.8298	0.9778	0.9578	0.8084	0.8544	0.9793	0.9974	0.9669
2002	0.9600	0.9820	0.6316	0.5402	0.9870	0.9898	0.4038	0.8142	0.9308	0.8279	0.9889	1	0.8447	0.9707	0.9869	0.9881	0.9765
2003	1	0.9540	0.6800	0.4484	0.9891	1	0.4678	1	0.9888	0.8043	1	1	0.8432	1	1	1	1

3 结果与分析

3.1 诊断指标量化与权重确定

在前文设置的指标体系的基础上, 结合指标涵义, 根据多年试验、观测及调查资料进行分析计算取得了典型侵蚀环境——黄土丘陵区纸坊沟流域生态经济系统各单项指标状态值, 并运用上述方法对原始数据进行标准化处理, 获得了各指标的量化值(表 2), 然后计算获得了各指标权重系数(表 3)。

从表 2 可以看出该流域系统各指标均随时间呈波动式上升趋势, 即该流域的生态环境在逐步好转, 呈良性循环态势。据表 3 知该区小流域生态经济系统各指标间的协调性较好, 其健康状况较为稳定。主要体现在各指标的权重差异不是太大, 如二级层次指标资源环境支持、社会经济人文影响和生态综合功能的权重分别为 0.2843、0.3605 和 0.3552。

据图 2 知, 纸坊沟小流域生态经济系统二级层次指标资源环境支持、社会经济人文影响和生态综合功能的健康指数均随时间呈波动式上升趋势, 三者具有极为相似的一致性, 且随时间推移, 系统的资源环境支持平稳上升, 社会经济人文影响和生态综合功能发挥作用明显, 特别是生态综合功能的健康指数增长较快, 从 1985 年的 0.351 增长到了 2003 年的 0.611。总之, 侵蚀环境纸坊沟小流域生态经济系统资源环境、社会经济人文和生态综合功能健康状况逐年好转, 且向良性循环发展。

3.2 系统健康动态诊断

根据表 2、表 3 所获得的属性值和指标权重, 利用式(5)计算得到纸坊沟小流域生态经济系统二级层次指标健康指数动态变化(图 2)。并利用式(6)进一步计算获得流域生态经济系统的健康指数, 并绘制了其动态

曲线(图 3)。

表 3 纸坊沟小流域生态经济系统健康诊断指标权重

层次结构 The hierarchical structure		指标 Indicators		权重 Weighing
诊断指标 CHI Health indicator CHI	资源环境支持 T_1	资源指数 C_1	x_2	0.0592
	Source-environment T_1	Resource index C_1	x_3	0.0266
	0.2843	0.1443	x_4	0.0585
		环境指数 C_2	x_1	0.0421
		Environment index C_2	x_5	0.0257
	社经人文影响 T_2	0.1400	x_6	0.0721
		社经指数 C_3	x_7	0.0631
		Social Economy T_2	x_8	0.0917
	0.3605	0.2366	x_9	0.0818
		人文指数 C_4	x_{10}	0.0270
		Human-culture index C_4	x_{11}	0.0578
	生态综合功能 T_3	0.1238	x_{12}	0.0392
		综合指数 C_5	x_{13}	0.0899
		Ecology function T_3	x_{14}	0.0812
	0.3552	0.2282	x_{17}	0.0570
		土壤指数 C_6	x_{15}	0.0907
		Soil index C_6	x_{16}	0.0363
	0.1271			

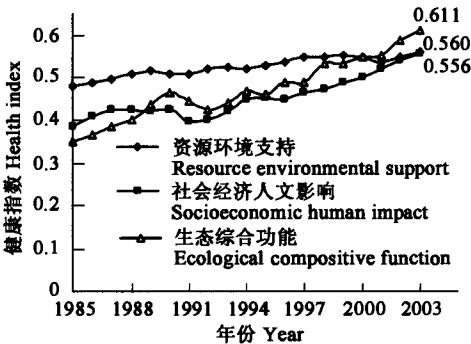


图 2 资环支持、社经人文影响和生态功能健康指数动态

Fig.2 Variance of resource environmental support, socioeconomic human impact and ecological composite function healthy index

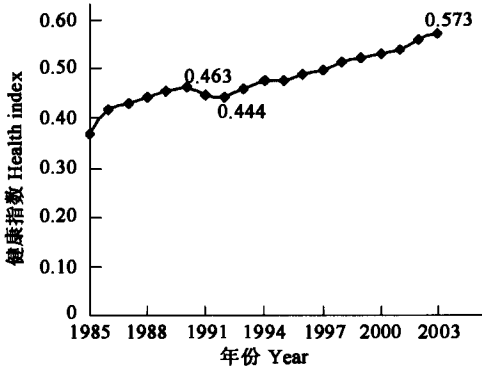


图 3 纸坊沟流域生态经济系统健康指数动态

Fig.3 Temporal variance of integrated health index in Zhifangou watershed

据图 3 知,纸坊沟小流域生态经济系统健康指数随时间呈波动式上升趋势,经历了健康的相对稳定阶段,健康指数从 1985 年 0.370 提高到 2001 年的 0.536,到 2002 年开始进入健康的良好阶段,2003 年达到了 0.573,正在向健康的高级阶段——良性循环阶段发展。该流域自 1973 年安塞水土保持实验站开始治理,到“六五”陕西省科技攻关、“七五”国家科技攻关项目,多年来主要通过开展以强化降水就地拦蓄入渗、防止水土流失为中心,以土地合理利用为前提,以恢复植被和建设基本农田,发展经济林和养殖业为四大主导措施的水土保持型生态农业建设,恢复重建了侵蚀环境生态系统。显然,其方法和措施是科学和得当的,可以在侵蚀环境——黄土丘陵区大力推广。

3.3 障碍与优势诊断

3.3.1 障碍诊断 为了进一步改善典型侵蚀环境的健康状况,必须进行健康障碍诊断。根据上述方法采用式(9)对各单项指标因素进行障碍度计算,并利用 SAS 统计软件对其计算结果——障碍度(L_j)与流域系统健康指数(I_h)进行通径分析,其结果见表 4。对角线上带有 * 号的为直接通径系数,其余均为间接通径系数。系统健康指数 I_h 剩余项的通径系数为 0.0562。

从表 4 可知,林草覆盖率(x_1)、人均纯收入(x_8)、工副业贡献率(x_9)、粮食单产潜势实现率(x_{13})和系统抗

逆力(x_{17})的障碍度 L_1 、 L_8 、 L_9 、 L_{13} 和 L_{17} 与系统健康指数(I_h)的相关性相对较好,其通径系数的总和分别为 0.0977、0.1074、0.0606、0.4104 和 0.0643,其中对健康指数(I_h)的直接作用(通径系数)分别为 0.3368、0.6635、0.0330、0.4682 和 1.0153。林草覆盖率(x_1)障碍度 L_1 并通过人均纯收入 x_8 (0.3542)、义务教育普及率 x_{11} (0.2373)、综合治理减沙效益 x_{14} (0.2836)和土壤渗透性 x_{16} (0.3341)间接作用于健康指数(I_h),阻碍系统健康;人均纯收入(x_8)也同时通过林草覆盖率 x_1 (0.1798)、牲畜人均存栏量 x_5 (0.1060)、农业产投比 x_7 (0.1806)、义务教育普及率 x_{11} (0.1938)和土壤渗透性 x_{16} (0.2976)间接作用阻碍系统健康;工副业工效率(x_9)的直接通径系数比较小,仅为 0.330,但其通过林草覆盖率 x_1 (0.1687)、牲畜人均存栏量 x_5 (0.1176)、农业产投比 x_7 (0.2170)、义务教育普及率 x_{11} (0.2084)、恩格尔系数 x_{12} (0.1235)、综合治理减沙效益 x_{14} (0.1663)和土壤渗透性 x_{16} (0.2976)的间接作用使其总和增大,故其为系统健康的障碍因素;粮食单产潜势实现率(x_{13})通过土壤渗透性 x_{16} (0.3708)间接作用阻碍系统健康;系统抗逆力(x_{17})通过农业产投比 x_7 (0.1670)、义务教育普及率 x_{11} (0.1357)和土壤渗透性 x_{16} (0.3708)间接作用阻碍系统健康。显然,林草覆盖率、人均纯收入、工副业贡献率、粮食单产潜势实现率和系统抗逆力是该侵蚀环境小流域生态经济系统健康的障碍因素。

3.3.2 优势评判 为了更好的发挥典型侵蚀环境——纸坊沟小流域的主观能动性,充分体现主导产业作用,利用式(10)对各单项指标因素进行优势度计算,并利用 SAS 统计软件对其计算结果进行通径分析(表 5),结果表明,人均基本农田(x_2)和义务教育普及率(x_{11})优势度 A_2 和 A_{11} 与系统健康指数(I_h)的相关性较好,其通径系数总和分别为 0.9040 和 0.4327,其中对健康指数(I_h)的直接(通径系数)作用分别 -0.1756 和 0.0292,二者的直接作用都不强,甚至有点弱。人均基本农田竟表现为负作用,但通过治理度 x_6 (0.0762)、人口密度 x_{10} (0.1315)、综合治理减沙效率 x_{14} (0.2454)和粮食单产潜势实现率 x_{15} (0.0924)间接作用使其通径系数总和较大,从而促进了系统健康。义务教育普及率的直接作用也很弱,而其通过治理度 x_6 (0.0596)、恩格尔系数 x_{12} (0.0234)和综合治理减沙效率 x_{14} (0.0717)的间接作用,促进了系统稳定健康。通过分析和结果显示,治理度 x_6 的直接通径系数较大(0.1238),直接作用较为明显,对其它因素的间接影响也较为显著。因而,人均基本农田、义务教育普及率和治理度是该侵蚀环境小流域生态经济系统健康的优势条件,应继续保持,持续发展。

3.4 典型侵蚀环境系统健康的对策和建议

典型侵蚀环境——黄土丘陵区的地形地貌和干旱少雨等特点决定了该区小流域生态环境较为敏感脆弱,极易受到干扰和破坏。据此,结合系统健康(资源环境支持平稳好转,社会经济人文影响明显,生态综合功能不断增强)、障碍和优势诊断(优势明显,障碍突出)结果,该区在建设中应扬长避短,消除障碍,发挥优势,为此提出以下对策和建议:(1)进一步加大退耕还林(草)力度,扩大林草面积,加速生态重建恢复,改善生态环境状况,增强系统抗逆力;(2)稳定人均基本农田数量,增加投入(主要是科技),提高粮食单产潜势实现率,确保粮食安全;(3)开展养殖、加工业,加大初级产品转化,发展工副业,改善人民生活水平;(4)侵蚀环境的生态整治是加速该区健康的重要措施,应进一步开展生态环境整治,从而实现该区的健康稳定发展。

4 结论

侵蚀环境生态系统健康是侵蚀环境研究中一个新的领域,目前对其研究还较少。本文以生态系统健康理论为基础,以资源环境支持、社会经济人文影响和生态综合功能为主线,根据侵蚀环境生态经济系统特点,构造和建立了侵蚀环境小流域生态经济系统健康评价指标体系和评价模型(健康指数),对该区小流域生态经济系统健康进行了动态变异研究,结果表明,其健康指数呈逐年波动式上升趋势,由 1985 年的 0.370 增大的 2003 年的 0.573,具有较强的可持续发展能力。

同时,以侵蚀环境小流域生态经济系统所达到的最佳现实状态值为目标,引入障碍度和优势度等概念,运用通径分析理论进行健康障碍、优势诊断,结果表明,林草覆盖率、人均纯收入、工副业贡献率、粮食单产潜势实现率和系统抗逆力是该侵蚀环境小流域生态经济系统健康的障碍因素,虽然这些因素都在逐步提高,但其发展速度相对较缓,还在阻碍着系统的健康与可持续发展。而人均基本农田、义务教育普及率和治理度是该

表 4 纸坊沟流域各诊断指标障碍度对系统健康指数的通径系数
Table 4 Path coefficients between the limiting degree of diagnosis and health index of system in Zhifangou watershed

自变量 Independent variable	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	L_{16}	L_{17}	总和 Summation
L_1	0.3368*	0.0508	-0.6779	-0.6552	0.0821	-0.6059	0.1810	0.3542	0.0165	-0.2844	0.2373	0.1078	-0.1222	0.2836	-0.0365	0.3341	0.0068	0.0977
L_2	0.0770	0.2221*	-0.4464	-0.7184	0.2360	-1.3889	0.3003	0.0251	0.0114	-0.4956	0.4335	0.1314	0.0870	0.2323	-0.0933	0.5573	0.0178	0.0000
L_3	-0.2242	-0.0974	1.0185*	0.7408	-0.1740	1.1295	-0.3289	-0.4833	-0.0105	0.5847	-0.3355	-0.1310	-0.0657	-0.3055	0.0805	-0.5975	-0.0357	0.0001
L_4	-0.2113	-0.1528	0.7224	1.0443*	-0.1994	1.4242	-0.3491	-0.2870	-0.0227	0.5332	-0.4107	-0.1668	-0.0911	-0.2195	0.0980	-0.8722	-0.0357	0.0000
L_5	0.0947	0.1797	-0.6074	-0.7138	0.2917*	-1.4345	0.3335	0.2411	0.0133	-0.5597	0.4236	0.1492	-0.0007	0.2246	-0.0991	0.6805	0.0173	0.0001
L_6	0.1266	0.1914	-0.7136	-0.9226	0.2596	-1.6120*	0.3760	0.2496	0.0160	-0.6217	0.4558	0.1658	0.1311	0.2203	-0.1109	0.8558	0.0293	0.0000
L_7	-0.1538	-0.1682	0.8450	0.9198	-0.2454	1.5290	-0.3964*	-0.3023	-0.0181	0.6489	-0.4308	-0.1615	-0.1058	-0.2771	0.1110	-0.8278	-0.0398	0.0000
L_8	0.1798	0.0084	-0.7419	-0.4517	0.1060	-0.6065	0.1806	0.6635*	-0.0010	-0.4180	0.1938	0.0730	-0.0032	0.1661	-0.0389	0.2976	0.0113	0.1074
L_9	0.1687	0.0769	-0.3232	0.7191	0.1176	-0.7797	0.2170	-0.0204	0.0330*	-0.2089	0.2084	0.1235	-0.1219	0.1663	-0.0547	0.6433	0.0350	0.0606
L_{10}	-0.1385	-0.1591	0.8608	0.8049	-0.2360	1.4488	-0.3718	-0.4009	-0.0100	0.6918*	-0.4265	-0.1414	-0.1053	-0.2912	0.1012	-0.6656	-0.0352	0.0000
L_{11}	0.1654	0.1992	-0.7071	-0.8875	0.2557	-1.5203	0.3534	0.2661	0.0142	-0.6105	0.4833*	0.1602	0.0608	0.2768	-0.0992	0.6879	0.0265	0.0000
L_{12}	0.1982	0.1593	-0.7282	-0.9507	0.2376	-1.4591	0.3494	0.2644	0.0222	-0.5341	0.4226	0.1832*	0.0258	0.2250	-0.0965	0.8669	0.0313	0.0001
L_{13}	-0.0879	0.0413	-0.1428	-0.2032	-0.0004	-0.4516	0.0896	-0.0045	-0.0086	-0.1556	0.0628	0.0101	0.4682*	-0.1432	-0.0429	0.3708	-0.0026	0.4104
L_{14}	0.2191	0.1184	-0.7137	-0.5258	0.1503	-0.8145	0.2520	0.2527	0.0126	-0.4622	0.3068	0.0946	-0.1538	0.4359*	-0.0562	0.1732	0.0213	0.0011
L_{15}	0.1044	0.1761	-0.6966	-0.8696	0.2456	-1.5183	0.3739	0.2191	0.0153	0.5948	0.4074	0.1501	0.1706	0.2080	-0.1177*	0.8401	0.0219	0.0000
L_{16}	0.1108	0.1219	-0.5994	-0.8972	0.1955	-1.3588	0.3232	0.1945	0.0209	-0.4535	0.3274	0.1564	0.1710	0.0744	-0.0974	1.0153*	0.0351	0.0021
L_{17}	0.0242	0.0419	-0.3852	-0.3948	0.0535	-0.5005	0.1670	0.0797	0.0123	-0.2578	0.1357	0.0608	-0.0128	0.0984	-0.0273	0.3779	0.0944*	0.0643

* 直接通径系数 Path coefficients

表 5 纸坊沟流域各诊断指标优势度对系统健康指数的通径系数
Table 5 Path coefficients between the advantage degree of diagnosis and health index of system in Zhifangou watershed

自变量 Independent variable	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}	A_{17}	总和 Summation
A_1	0.2264*	-0.0390	-0.1022	0.0555	-1.0337	-0.0468	0.1477	-0.1981	-0.1981	-0.0841	-0.2906	0.0124	0.6726	-0.1473	-0.1519	-0.0930	0.2941	0.0376
A_2	0.0503	-0.1756*	0.0350	-0.0270	-0.0580	0.0762	-0.1242	0.0376	-0.0255	0.1315	0.0230	0.0230	-0.0154	-0.0039	0.2454	0.0924	-0.1077	-0.1837
A_3	0.1562	0.0415	-0.1482*	0.0820	-1.1288	-0.0962	0.2290	-0.2467	-0.0985	-0.4003	-0.4003	-0.0001	0.7562	-0.1500	-0.3440	-0.1560	0.3915	0.1900
A_4	0.1311	0.0495	-0.1268	0.0959*	-1.0102	-0.1032	0.2141	-0.2308	-0.1030	-0.3564	-0.3564	-0.0039	0.6251	-0.1543	-0.2655	-0.1531	0.3214	0.1967
A_5	0.1899	-0.0083	-0.1357	0.0786	-1.2323*	-0.0776	0.1939	-0.2373	-0.1189	-0.3761	0.3761	0.0083	0.7987	-0.1591	-0.2795	-0.1299	0.3813	0.1363
A_6	-0.0856	-0.1081	0.1152	-0.0799	0.7726	0.1238*	-0.2176	0.2156	0.0523	0.3493	0.3493	0.0141	-0.4919	0.1160	0.3070	0.1574	-0.2963	0.2591
A_7	0.1288	0.0840	-0.1307	0.0790	-0.9202	-0.1037	0.2597*	-0.2036	-0.1115	-0.3719	-0.3719	-0.0054	0.6408	-0.1243	-0.3604	-0.1777	0.3469	0.2139
A_8	-0.1611	-0.0237	0.1312	-0.0795	1.0500	0.0959	0.0959	0.2785*	0.0502	0.3677	0.3677	0.0027	0.6498	0.1495	0.2418	0.1288	-0.3446	0.1718
A_9	-0.0917	0.0216	0.0703	-0.0476	0.7052	0.0312	-0.1394	0.0673	0.2077*	0.1916	-0.0121	-0.0022	0.7533	-0.1477	-0.3541	0.1604	-0.2001	-0.0655
A_{10}	0.1600	0.0562	-0.1443	0.0831	-1.1276	-0.1052	0.2350	-0.2491	-0.0968	-0.4111*	-0.4111*	-0.0022	0.7533	-0.1477	-0.3541	0.1604	0.3990	0.2068
A_{11}	0.0960	-0.1382	0.0006	-0.0126	-0.3483	0.0596	-0.0476	0.0253	-0.0860	0.0306	0.0292*	0.2339	-0.0248	0.0171	0.0402	0.0185	-0.1393	0.4327
A_{12}	0.1856	0.0033	-0.1366	0.0730	-1.1997	-0.0742	0.2029	-0.2206	-0.1182	-0.3774	0.3774	0.0083	0.8204*	-0.1512	-0.3174	-0.1347	0.3942	0.1328
A_{13}	-0.1735	0.0035	0.1156	-0.0770	1.0199	0.0747	0.1680	0.2166	0.0578	0.3158	-0.0038	-0.0038	0.6453	0.1922*	0.1613	0.1215	-0.2895	-0.1311
A_{14}	-0.0788	-0.0987	0.1168	-0.0583	0.7891	0.0871	-0.2144	0.1543	0.0903	0.3335	0.3335	0.0048	-0.5965	0.0711	0.4365*	0.1477	-0.3516	-0.2133
A_{15}	-0.1142	-0.0880	0.1254	-0.0796	0.8682	0.1057	-0.2504	0.1945	0.0922	0.3578	0.3578	0.0064	-0.5995	0.1267	0.3497	0.1843*	-0.3233	-0.2348
A_{16}	0.1606	0.0456	-0.1399	0.0743	-1.1332	-0.0885	0.2173	-0.2314	-0.1002	-0.3956	0.3956	0.0013	0.7799	-0.1342	-0.3701	-0.1437	0.4146*	0.1738
A_{17}	0.0286	0.1085	-0.0947	0.0634	-0.5630	-0.1079	0.1868	-0.1609	-0.0457	-0.2860	-0.2860	-0.0137	0.3665	-0.0848	-0.3131	-0.1456	0.2424	0.2973*

* 直接通径系数; 系统健康指数 I_h 剩余项的通径系数为 0.0372

侵蚀环境小流域生态经济系统健康的优势条件,这些因素的发展有力的促进了生态经济系统的健康发展。多年的运行实践证明,该方法诊断的结果与建设实际相一致,且操作性强,是一种合理可行的有效方法。

该区生态经济系统健康状况相对稳定,潜力较大,其健康水平呈逐年波动式上升趋势,且健康障碍明显,优势突出。其发展的重点应是生态环境建设和当地人民生活条件的改善与水平的提高,为此据诊断结果提出了针对性对策,包括进一步加大退耕还林(草)力度,扩大林草地面积,,增强系统抗逆力;稳定人均基本农田数量,增加科技投入,确保粮食安全;加大初级产品转化,发展工副业,改善人民生活水平,以促进提高该区小流域生态经济系统的健康水平,实现可持续发展。

References:

- [1] Coluelli R. Global climate and infectious disease: the cholera paradigm. *Science*, 1996, 274: 2025 ~ 2031.
- [2] Kong H M, Zhao J Z, Wu G, *et al.* Ecosystem Health and Environmental Management. *Environment Science*, 2002, 23(1): 1 ~ 5.
- [3] Schaeffer D J, Henricks E E, Kerster H W. Ecosystem health 1. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*. 1998, 2: 397 ~ 402.
- [4] Rapport D J. What constitute ecosystem health? *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33: 120 ~ 132.
- [5] Shen Z R. Ecosystem health and vegetable medicine. *Ecology Institute Communicate of China*, 1997, (3): 14 ~ 15.
- [6] Zeng D H, Jiang F Q, Fan Z P, *et al.* Ecosystem health and sustainable development for human. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6): 751 ~ 756.
- [7] Wu G, Han Q H, Lan S F. Assessing eco-system health. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(1): 78 ~ 80.
- [8] Ren H, Peng S L, Wu J G. Evaluation and monitoring of ecosystem health. *Tropical Geography*, 2000, 20(4): 310 ~ 316.
- [9] Tang K L, He X B. Ecological environment construction and erosion environment controlling in loess plateau. *Ecological environment reconstruction and economy coordinating develop science proseminar transactions*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1999. 28 ~ 32.
- [10] Lu Z F, Liang Y M, Liu G B. Studies on Ecological agriculture with Soil and Water Conservation in Loess Hilly Gully Region. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. 205 ~ 206.
- [11] Liu G B, Hu W Y, Xu M X. An analysis on eco-economy system health in Zhifanggou Small Watershed of Ansai on Loess Hilly-Gullied Region, *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 44 ~ 49.
- [12] Walker J. Reuter D J. Indicators of Catchments Health: A Technical Perspective. CSIRO publishing, Collingwood, Australia, 1996.
- [13] Liu G B, Hu C S, Joe W K, Tim McVicar, Li L T, Zhang L, Doug Reuter, Li R, Liu C M. A Guide to Environmental Indicators. CSIRO Land and Water. Canberra, Australia, 1999.
- [14] Noble L R, Dirzo R. Forests as human-dominated ecosystems. *Science*, 1997, 277: 522 ~ 525.
- [15] Wang C S. Changes of Engel's coefficients and scales of inhabitants consuming levels. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2003, 33(2): 208 ~ 212.
- [16] Wu F Q. Soil and water Conservation Planning. Xi'an: Xi'an Map Press, 2002.
- [17] Hu W Y, Liu G B, Xu M X. Dynamic of Soil Anti-scurability on Slope Cropland in Loess Hilly Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(3): 26 ~ 28.
- [18] Wang M T. A Method of Distribution and Variance in Determination of Index Weights for Multi-indicator Composite Evaluation. *China's Soft Science*, 1999, 8(8): 100 ~ 107.
- [19] Dai Q H, Liu G B, Liu P L, *et al.* Approach to Health Diagnoses of Eco-economy System in Mesoscale in Loess Hilly Area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 990 ~ 998.
- [20] Dai Q H, Liu G B, Liu M Y, *et al.* An evaluation on sustainable development of eco-economic system in Small Watershed in hilly Area of Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 209 ~ 218.
- [21] Wang H. Study on the comprehensive benefit of regional economic development and its coordinated degree. *Economic Geography*, 1997, 17(4): 30 ~ 36.
- [22] Ming D X. Path Analysis. Ya'an: Sichuan Agricultural University Press, 1990.
- [23] Bhatt G M. Significance of path coefficient analysis in association. *Euphytica*, 1973, 22(2): 388 ~ 343.

参考文献:

- [2] 孔红梅,赵景柱,吴刚,等. 生态系统健康与环境管理. *环境科学*, 2002, 23(1): 1 ~ 5.
- [5] 沈佑锐. 生态系统健康和植物医学. *中国生态学学会通讯*, 1997, (3): 14 ~ 15.
- [6] 曾德慧,姜凤歧,范志平,等. 生态系统健康与人类可持续发展. *应用生态学报*, 1999, 10(6): 751 ~ 756.
- [7] 吴刚,韩青海,蓝胜芳. 生态系统健康学与生态系统健康评价. *土壤与环境*, 1999, 8(1): 78 ~ 80.
- [8] 任海,彭少麟,邹建国. 生态系统健康的评估. *热带地理*, 2000, 20(4): 310 ~ 316.
- [9] 唐克丽,贺秀斌. 黄土高原生态环境建设与侵蚀环境调控. *中国西部生态重建与经济协调发展学术研讨会论文集*. 成都: 四川科学技术出版社, 1999. 28 ~ 32.
- [10] 卢宗凡,梁一民,刘国彬. 中国黄土高原生态农业. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. 205 ~ 206.
- [11] 刘国彬,胡维银,许明祥. 黄土丘陵区小流域生态经济系统健康评价. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 44 ~ 49.
- [13] 刘国彬,胡春胜,Joe Walker 等. 生态环境健康诊断指南. CSIRO Land and Water. Canberra, Australia: 1999.
- [15] 王传仕. 恩格尔系数变化与居民消费水平的衡量. *山东大学学报(工学版)*, 2003, 33(2): 208 ~ 212.
- [16] 吴发启主编. 水土保持规划. 西安: 西安地图出版社, 2002.
- [17] 胡维银,刘国彬,许明祥. 黄土丘陵沟壑区小流域坡耕地土壤抗冲性试验研究. *水土保持通报*, 2000, 20(3): 26 ~ 28.
- [18] 王明涛. 多指标综合评价中权重确定的离差、均方差决策方法. *中国软科学*, 1999, 8(8): 100 ~ 107.
- [19] 戴全厚,刘国彬,刘普灵,等. 黄土丘陵区中尺度生态经济系统健康诊断方法探索. *中国农业科学*, 2005, 38(5): 990 ~ 998.
- [20] 戴全厚,刘国彬,刘明义,等. 小流域生态经济系统可持续发展评价. *地理学报*, 2005, 60(2): 209 ~ 218.
- [21] 王慧. 区域经济发展综合效益及其协调程度研究. *经济地理*, 1997, 17(4): 30 ~ 36.
- [22] 明道绪. 通径分析. 雅安: 四川农业大学出版社, 1990.