

DOI: 10.5846/stxb201406301353

洪惠坤, 廖和平, 魏朝富, 李涛, 谢德体. 基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价. 生态学报, 2015, 35(24): - .

Hong H K, Liao H P, Wei C F, Li T, Xie D T. Health assessment of a land use system used in the ecologically sensitive area of the Three Gorges reservoir area, based on the improved TOPSIS Method. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价

洪惠坤^{1,2}, 廖和平³, 魏朝富², 李 涛³, 谢德体^{2,*}

1 西南大学, 重庆 400715

2 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

3 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

摘要: 土地利用系统健康评价研究能够有效引导土地合理利用, 协调城市发展与自然生态保护之间的矛盾。本文构建基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价指标体系, 并采用改进 TOPSIS 方法对三峡库区生态敏感区的典型区域—重庆市进行实证分析。结果表明: 1) 研究区土地利用系统健康综合分值整体呈现 T 型带状分布格局, 可分为四个健康等级, 即健康、临界健康、不健康、病态。2) 渝东北、渝东南和重庆市西南片区部分地区因其土地生态系统脆弱敏感, 土地利用风险性大和生态系统稳定性差, 土地生态系统呈现病态和不健康状态, 属于高风险-高压力区域; 重庆市主城区环线区域因其属于城市核心拓展区和人类活动频繁区域, 人口压力指数和土地利用压力指数较大, 土地利用风险性较小, 健康度较为良好, 是低风险-中度压力区域。3) PSR 模型能够较好地改变现有研究主要关注自然资源环境的状况, 更准确地反映土地利用系统健康的各要素之间的关系和影响土地生态系统健康的关键因素, 为三峡库区生态敏感区土地利用系统健康状态起到一定的预警作用。4) 以改进 TOPSIS 方法计算土地利用系统健康指数, 消除了不同指标量纲的影响, 并能充分利用原始数据的信息, 能充分反映各方案之间的差距, 客观真实的反映实际情况。5) 为保障三峡库区生态敏感区土地利用系统的健康发展, 应加强土地利用规划与调整, 控制人类过度开发, 维持生态系统正常功能。

关键词: 三峡库区; 生态敏感区; 土地利用系统; 健康评价; 改进 TOPSIS 方法

Health assessment of a land use system used in the ecologically sensitive area of the Three Gorges reservoir area, based on the improved TOPSIS Method

HONG Huikun^{1,2}, LIAO Hepin³, WEI Chaofu², LI Tao³, XIE Deti^{2,*}

1 Southwest University, Chongqing 400715, China

2 College of resources and environments in Southwest University, Chongqing 400715, China

3 School of Geographical sciences in Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The Three Gorges reservoir area forms an ecological barrier for the key sensitive areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River. The ecological quality of a land use system is directly related to the overall benefits of the Three Gorges Project and to the ecological security of the middle and lower reaches of the Yangtze River. A health assessment of a land use system can effectively guide the rational land use and coordinate the contradiction between urban development and natural ecological protection. This study proposes a health evaluation index system of a land use system based on a PSR (pressure-state-response) model. Through the improved TOPSIS method, this research conducted an

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题; 三峡库区及上游流域农村面源污染控制技术与工程示范 (2012ZX07104-003)

收稿日期: 2014-06-30; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xdt@swu.edu.cn

empirical study of Chongqing as a typical example of health assessment of a land use system in the ecologically sensitive area of the Three Gorges reservoir area. The results showed that: 1) The score of the Three Gorges reservoir area land use displayed a pattern of the “T” zonal distribution, which can be categorized as healthy, critical, unhealthy, and morbid. Morbid and unhealthy regions mainly cover the northeast, the southeast, and the southwest of Chongqing, which are in the state of stress and have higher health index. The critical and healthy regions are located mainly in the loop of main urban area in Chongqing. 2) The ecosystems in the northeast, southeast, and southwest regions of Chongqing, which are in morbid and unhealthy conditions, belong to high risk-high pressure areas, because of their fragile and unstable ecosystems and high risks of land use. The loop area in the Chongqing urban area, which is at low risk of land utilization and in relatively good condition, is in the low risk-moderate pressure area. To foster healthy development of land use in the ecologically sensitive area in the Three Gorges reservoir area, land use planning and adjustment should be strengthened, excessive human development of land should be restricted, and the ecosystem functioning should be maintained. 3) The PSR model as a means of analysis and unifying the natural resources, the environment, and social economy, not only emphasizes the health condition of ecosystems but also considers the impact of socio-economic activities and their association in carrying out a comprehensive health evaluation of the land use system. PSR shifts the research focus to natural resources and environmental conditions. It fully characterizes the spatial characteristics of the land use system, accurately displays the relationship between various elements of a healthy land use system and the key factors affecting the ecosystem, and sets an early alarm for a land use system for the ecologically sensitive land in the Three Gorges reservoir area. 4) The improved TOPSIS method can make full use of original data, illustrate the reality, achieve a comprehensive diagnosis of the health condition of a land use system, and reveal the level of each indicator as well as the critical factors affecting the system. The method is effective and can be applied to other kinds of assessment with proper adjustments. 5) The evaluation index system based on the PSR model and the improved TOPSIS method can be applied to health assessment of a land use system. Both analysis methods can enhance the health condition of a land use system. This study can be a reference for further improvement of a health assessment of land use as well as for land use planning, management, and ecological protection.

Key Words: Three Gorges reservoir area; ecological sensitive area; land use system; health assessment; the improved TOPSIS method

三峡库区山高坡陡,人多地少,人地关系紧张,库区森林覆盖率低,水土流失严重,是自然生态环境脆弱敏感的地区,同时三峡库区地处我国中西部结合地带,是长江上游与中下游之间的经济联系纽带,也是人类生产活动强烈的区域,随着中国城市化进程的加快,个别地区片面追求经济效益而忽视了生态环境的保护,导致三峡库区土地生态系统遭受到了极大的冲击和损毁,人类生存环境问题日益突出。作为我国重点敏感生态区和长江中下游的生态屏障,三峡库区的土地利用系统生态质量直接关系到三峡工程的综合效益和长江中下游的生态安全,加强三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价研究,已成为当前解决诸多土地生态环境问题的迫切需要^[1]。

土地利用系统健康评价的研究始于 Aldo Leopold 提出的土地健康 (Land health) 概念,并使用 “Land sickness” 来描述土地生态系统功能的紊乱 (Dysfunction)^[2]。20 世纪 80 年代,加拿大政府为了评价城市地区的可持续发展情况,开展了全国土壤质量调查,进行 “土壤健康” 项目研究^[3]国内学者也对土地健康概念和评价方法进行了探索,但相关研究不多,未提出具体的研究方法^[4,5]。其后人们借鉴 “土地健康”、“生态系统健康” 和 “土地生态系统健康” 的概念,提出了 “土地利用系统健康”。近年来,随着我国人们对生态环境保护 and 土地可持续利用的日益重视,土地利用系统健康研究也逐步开展起来,蔡为民深入分析了土地利用系统健康的概念和内涵^[2,6,7];郑华伟、张锐等人分别运用物元分析、PSR 模型、模糊综合评判等方法对土地利用系统健康进行评价^[8-12];Moussiopoulos 和 Joachim 等人研究了关于土地利用系统可持续利用健康评价指标体系

的构建^[13-14];陆丽珍、Guangming Yu 等人评价研究土地利用系统健康影响因素以及土地利用系统健康调控^[15-16]。综合来看,尽管国内外学者重点针对土地利用系统健康评价模型与方法开展了大量的理论探讨和个案研究,但是土地利用系统健康评价研究尚属起步阶段,定性分析多,定量研究少;研究大多注重自然资源与土地生态环境状况,却很少关注基于研究区自然生态基底的土地利用风险性对土地利用系统健康的影响,而且以往的研究很少有人关注评估人类活动对生态系统健康状态的影响^[17],而人类活动和生态系统密切相关,人类活动深刻影响着生态系统的健康可持续发展^[18-22]。目前,生态系统健康评价的指标体系多遵从 Costanza 提出的“Vigor-Organization-Resilience 活力-组织结构-恢复力”模型(简称 VOR 模型)^[23],该模型主要强调了生态系统健康状态的自然属性而忽视了人为因素,而 PSR 模型不只强调自然生态系统健康质量同时也考虑了人类活动的影响因素^[24-26]。

因此,本文以生态系统健康理论和土地可持续利用理论为基础,充分考虑到人类活动和土地利用生态风险性对土地系统健康评价的影响,构建基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价指标体系,并采用改进的 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)方法对土地利用系统健康评价进行实证分析,分析土地利用系统健康的障碍因子,引导土地合理利用,以协调城市发展与自然生态保护之间的矛盾,促进土地资源健康可持续利用。重庆地处三峡库区生态敏感区,是中西部地区唯一的直辖市,当前重庆市正处于城市化工业化加速发展时期,城市用地急剧膨胀,而重庆山地丘陵多,生态系统脆弱敏感,加之人类对土地资源不合理的开发利用,土地资源面临巨大的环境、生态和社会压力,这些问题严重影响着社会经济持续、健康发展。因此,以重庆市这样一个生态系统脆弱敏感地区为例来研究土地利用系统健康评价,其结果可以为土地利用的规划、管理和保护提供决策参考。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区概况

重庆直辖市位于中国内陆西南部、长江上游,四川盆地东部边缘,地跨东经 105°11′—110°11′、北纬 28°10′—32°13′之间的青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,东邻湖北、湖南,南靠贵州,西接四川,北连陕西,是西南工商业重镇和水陆交通枢纽,长江上游最大的经济中心,也是发达的东部地区和资源丰富的西部地区的结合部,地理位置十分优越。重庆地处长江上游、三峡库区腹心地带,是一个集大城市、大农村、大库区、大山区的年轻直辖市,辖 38 个区县,幅员面积 8.24 万 km²,气候温和,属亚热带季风性湿润气候,冬暖夏热,无霜期长、雨量充沛、常年降雨量 1000—1450 mm。同时,重庆市地处三峡库区生态敏感区,全市山地丘陵占总面积的 90%以上,是全国水土流失严重地区之一。据土壤侵蚀遥感调查,重庆市水土流失面积 4 万 km²,占幅员面积的 48.5%,生态环境脆弱敏感,已成为影响库区经济社会可持续发展的制约瓶颈。

1.2 数据来源

县域是我国行政相对独立,地域性和综合性较为完整的基本区域单元,每个县域都具有较一致的自然条件和社会经济文化背景,是我国目前统计资料中经常采用的单元。因此,本研究以重庆市县域单元为研究样本,把市辖区当做县域单元来处理,据此统计全市合计为 38 个研究单元。

研究数据主要涉及区域生态环境、土地利用和社会经济发展三个方面。文章所采用的土地利用数据资料以重庆市地形图、土地利用现状图、行政区划图、土地利用矢量图(2012 年)及其他辅助图件为基础,并参考研究区域的气候、土壤、植被等自然地理资料,利用地理信息系统软件 ARCGIS 对土地利用现状进行数据处理。其他基础数据主要来源于《重庆市统计年鉴》(2012 年)、《重庆市环境统计公报》(2012 年)、环保局及农业普查资料等统计资料和实地调查资料,评价所使用的数据根据各项指标的原始数据经过计算得到。

2 研究方法

2.1 土地利用系统健康的内涵

土地利用系统健康是以人类社会的可持续发展为目的,促进经济、社会和生态三者之间和谐统一,由土地

利用系统的结构、功能和效益这几个方面组成的健康体系。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;三是土地利用系统维护和改善环境问题和健康状态的能力^[6,9,12]。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诊断评价;它本质上是一种诊断评价,目的是诊断由人类活动与自然因素引起的系统破坏与退化程度,以便发出预警,为管理者提供决策^[7]。

2.2 评价指标体系构建

本研究结合土地利用系统自身的特点,在参考借鉴相关生态系统评价研究的基础上^[27-30],充分考虑到人类活动对土地利用系统健康评价的影响,并根据研究区域山地城市土地利用系统的特点和土地利用的生态风险性,借鉴 PSR 概念模型构建土地利用系统健康评价指标体系(见表 1)。本研究构建的土地利用系统 PSR 模型评价指标体系中:“压力指标是指来自自然环境及人类活动对土地利用系统产生的压力,具体由经济、社会和自然多方面的压力构成;”状态指标用来反映特定时间阶段的土地利用系统的结构、功能状况与动态特征,包括土地生态系统与自然环境现状和土地利用功能效益等方面的健康状况;“响应指标是能够反映处理土地利用系统环境问题和维护改善土地利用系统健康状态的能力,包括自然和人文两方面因素。其中,土地利用系统的自然环境要素和人类社会经济指标的协调匹配情况比较复杂,某些因子量的增加会使系统更加稳定和健康,本文把这类指标归结为正向指标;某些因子则会影响到土地利用系统的健康性,本文则称为负向指标。

表 1 土地利用系统生态健康评价指标体系

Table 1 Health assessment index system of a land use system

准则层	因素	指标	指标性质	权重值
Rule Layer	Factor	Index	Index Character	Weight
压力(P)	土地利用风险性(P ₁)	灾害发生指数(X ₁)	负向	0.0959
Pressure(P)		土地退化(X ₂)	负向	0.1246
		石漠化(X ₃)	负向	0.1028
		土层流失指数(X ₄)	负向	0.1365
	土地利用压力(P ₂)	耕地比例(X ₅)	正向	0.1512
		林地比例(X ₆)	正向	0.1454
	人口压力(P ₃)	城乡建设用地人口密度(X ₇)	负向	0.1302
		单位人口增长消耗新增城乡建设用地(X ₈)	负向	0.1134
状态(S)	土地资源活力(S ₁)	年均降水量(X ₉)	区间值	0.0781
State(S)		人均粮食产量(X ₁₀)	正向	0.1025
		单位土地生产力(X ₁₁)	正向	0.0911
		水网密度指数(X ₁₂)	正向	0.0925
	土地利用效率(S ₂)	单位地区生产总值耗地下降率(X ₁₃)	正向	0.1082
		单位地区生产总值增长消耗新增建设用地量(X ₁₄)	负向	0.0993
		建设用地地均地区生产总值(X ₁₅)	正向	0.1008
		人口与城乡建设用地增长弹性系数(X ₁₆)	负向	0.0734
		第三产业比例(X ₁₇)	正向	0.0913
	景观状态(S ₃)	景观多样性指数(X ₁₈)	正向	0.1023
		生物丰度(X ₁₉)	正向	0.0605
响应(R)	自然系统(R ₁)	植被覆盖率(X ₂₀)	正向	0.2218
Response(R)		环境质量综合指数(X ₂₁)	正向	0.2626
	人文系统(R ₂)	人均 GDP(X ₂₂)	正向	0.2814
		水土保持投资比例(X ₂₃)	正向	0.2342

2.2.1 压力

对于土地利用系统而言,压力通常是由自然和人类共同影响的。研究区由于特殊的山地地形、有限的土地资源以及脆弱的生态决定了该地区威胁其平衡态的胁迫力很大一方面来自于自然;而由于城镇化和工业化的发展,该地区土地类型变化迅速,人类活动对土地资源的过度攫取使城市土地发生不可逆的功能转变,威胁到了当地的生态环境。因此,本研究将压力指标归纳为土地利用风险性、土地利用压力和人口压力三方面因素。

土地利用风险性主要是考虑到研究区生态环境的脆弱性和山地地形的特殊性,风险源主要来自自然或者人为因素的作用下形成的,对人类生命财产、环境造成破坏和损失的地质灾害,包括滑坡、泥石流、水土流失和土地石漠化等灾害,自然灾害是土地健康恶化的最直接的表现。重庆市 2012 年水土保持公报统计显示,重庆市 2011 年水土流失面积达 4 万 km^2 ,其中中度以上水土流失面积达 2.83 万 km^2 。在三峡重庆库区,重庆 26 个库区区县水土流失面积达 2.79 万 km^2 ,占重庆库区土地面积的 48.64%。水土流失将大量泥沙带入长江,并影响着库区水质。水土流失严重地段还极易发生山地灾害、石漠化等生态问题,严重危害了当地的生态环境。因此本文把灾害发生指数(本文灾害发生指数主要是指滑坡泥石流灾害发生频数)、土地退化指数、石漠化指数、土层流失指数视为负向指标。

土地利用压力主要考虑到研究区土地资源的有限性和生态环境的敏感性。研究区山地地形多,耕地少,目前缓解耕地压力的主要措施是开垦坡耕地,而坡耕地农业生产稳定性较差,保肥保水性能差,土地利用风险大,耕地相对较多的区域所面临的风险相对较小。一些山区城镇迫切追求经济快速发展,在非农业建设用地需求不断增长及后备资源不足的情况下,盲目进行农业结构调整,不遵循因地制宜的原则,在不适宜水果种植的区域的大量发展果园,导致许多优质耕地被挤占,耕地比例偏低。非农业建设用地大量增加,也导致了植被覆盖率偏低,破坏了区域景观多样性,土地资源组织结构极其不合理,严重阻碍了土地资源的可持续健康发展。因而本文把耕地比例和林地比例作为正向指标来评价土地利用系统的生态稳定性。

人口压力是威胁土地健康的最主要社会因素,人口密度过大,土地资源压力越大,越不利于自然生态恢复,而人口压力又与人口数量、素质密切相关,故选择了城乡建设用地人口密度和单位人口增长消耗新增城乡建设用地两项负向指标。因此,灾害发生指数、土地退化指数、石漠化指数、土层流失指数、耕地比例、林地比例、城乡用地人口密度、人口自然增长率、是本研究的压力指标。

2.2.2 状态

土地是人类赖以生存和生产的最重要的自然资源,是一类社会-经济-自然复合生态系统,具有物理属性、生态属性、社会属性和经济属性^[31]。人类不断开发土地资源,通过社会经济活动作用于土地利用系统,改变了土地利用系统结构与功能状态。健康可持续发展的土地其自然生态、社会经济和景观环境都应该处于健康可持续状态。因此,本研究从土地资源活力、土地利用效率和景观状态三方面来评价土地利用系统的健康状态。

土地资源活力是测量土地生态系统活动、初级生产力的一项重要指标。研究区气候温暖湿润,无霜期长、雨量充沛,其水热状况总体较丰富,有利于农业发展。因此,本文在评价指标的选择时必需考虑影响土地资源活力的宏观指标,如年均降水量、人均粮食产量、单位土地生产力和水网密度指数,均属于正向指标,以客观表达研究区土地资源活力、土地生产力的本底条件和潜在能力。

土地利用效率主要是测量土地资源配置及土地资源节约、集约利用的情况。人类通过社会经济活动开发利用土地资源时,经济社会发展水平在一定的程度上能够提高人们的素质、增强生态环境保护意识,促进人地协调健康发展。因此,可通过建设用地地均地区生产总值、第三产业比例、单位地区生产总值增长消耗新增建设用地量、单位地区生产总值耗地下降率和人口与城乡建设用地增长弹性系数等指标来量化土地利用效率。单位地区生产总值耗地下降率、建设用地地均地区生产总值和第三产业比例值越大,表明维护和改善土地利用系统生态安全的能力越强,属于正向指标。而单位地区生产总值增长消耗新增建设用地量和人口与城乡建

设用地增长弹性系数越高,消耗的土地资源越多,越不利于土地利用系统的健康发展,属于负向指标。

土地利用系统的景观环境状态可以从景观多样性指数和生物丰度两方面来考虑。景观多样性指数和生物丰度在其调节气候、维持生物多样性、降解环境污染物等方面起着积极作用,因此,景观多样性指数和生物丰度值越大,表明土地资源生态安全状况越好,土地利用系统越健康,本文将其归结为正向指标。

2.2.3 响应

健康的土地利用系统在外界对土地产生不良冲击下,如对抗自然灾害或人类过度活动干扰时,具有维持其结构、自我调节和对环境危害的恢复能力;同时,人类通过政策调整、环境保护等方面改善土地利用系统状态,保持良好的结构和功能,进而实现土地利用系统的稳定性和可持续性。

本研究分别从自然和人文系统选取了植被覆盖率、环境质量综合指数、人均 GDP 和水土保持投资比例来衡量土地利用系统的响应能力。森林能够调节气候、涵养水源、保持水土,植被覆盖率、环境质量综合指数越高,说明其土地利用系统自我调节能力和区域生态环境质量越好,属于正向指标。人均 GDP 和水土保持投资比例值越高,说明生态环境保护投入的可能性越大,越有利于改善土地利用系统的生态环境质量,防止土地利用系统退化,通过对响应指标的考察,可以判断土地利用系统的健康状况。

2.3 数据处理

TOPSIS 的全称是“逼近于理想值的排序方法”(Technique for Order Preference By Similarity to Ideal Solution),是 Hwang 和 Yoon 于 1981 年提出的一种适用于根据多项指标、对多个方案进行比较选择的分析方法,该方法能够客观全面地反映土地利用状况的动态变化,通过在目标空间中定义一个测度,以此测量目标靠近正理想解和远离负理想解的程度来评估土地利用的绩效水平^[32]。与传统的 TOPSIS 法相比,改进的 TOPSIS 法主要针对评价对象与正理想解和负理想解的评价公式进行了改进^[33-35],然后求出各个方案与理想值、负理想值之间的加权欧氏距离,由此得出各方案与最优方案的接近程度,作为评价方案优劣的标准。具体步骤如下:

设有 m 个目标(有限个目标), n 个属性,专家对其中第 i 个目标的第 j 个属性的评估值为 x_{ij} ,则初始判断矩阵 V 为

$$V = \begin{Bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{Bmatrix}$$

第一步,数据标准化:

所选评价指标因评价单位不同不具有可比性,由于各个指标的量纲可能不同,为使各指标具有可比性及可计算性,需要决策矩阵进行归一化处理,即标准化,利用相对隶属度公式对上面的矩阵进行标准化处理,得到相对隶属度矩阵

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad Y = \begin{Bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{Bmatrix}$$

第二步,确定指标权重,构建加权的决策矩阵。采用熵权确定指标权重(表 1),由于该方较为成熟,本文就不再赘述。确立各个指标的权重 $W = (W_1, W_2, \cdots, W_j)$,建立加权判断矩阵:

$$Z = YB = \begin{Bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{nn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{Bmatrix}$$

第三步,根据加权判断矩阵获取评估目标的正负理想解:

$$\text{正理想解: } L_j^* = \begin{cases} \max(z_{ij}), j \in J^* \\ \min(z_{ij}), j \in J \end{cases} \quad \text{负理想解: } L_j = \begin{cases} \max(z_{ij}), j \in J \\ \min(z_{ij}), j \in J^* \end{cases}$$

其中 J^* 为效益型指标, J 为成本型指标.

第四步,计算各目标值与理想值之间的欧式距离:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij} - L_j^*)^2}, j = 1, 2, \dots, n$$

$$S_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij} - L_j)^2}, j = 1, 2, \dots, n$$

在确定正、负理想值时,考虑到人类利用土地的趋向,确定已利用土地为效益型指标,未利用土地为成本型指标。

第五步,土地利用系统生态健康值 C 表达式如下,依照相对贴近度的大小(分数的大小)对目标进行排序,形成决策依据, C 越大,说明土地利用系统健康水平越高,计算各个目标的相对贴近度:

$$C_i^* = \frac{S_i}{S_i^* + S_i}, i = 1, 2, \dots, m$$

第六步 依照相对贴近度的大小(分数的大小)对目标进行排序,形成决策依据。

3 结果与分析

3.1 土地利用系统健康障碍因子分析

为了有效提高土地利用系统健康水平,有必要分析单项指标和分类指标对土地利用系统健康影响的程度,找出影响土地利用系统健康的主要障碍因子,从而形成决策依据。本文根据土地利用系统压力、状态和响应指标计算结果,采用 ARCGIS 自然断点法绘制了重庆市土地利用系统压力、状态和响应指数图。

3.1.1 压力

从图 1 可见,压力得分值低的区域集中分布在渝东南片区,包括黔江、武隆县、石柱县、秀山县、酉阳县、彭水县,压力指数值在 0.3082—0.3991 之间。从表 2 可知,该区域石漠化和土层流失指数的得分值,在研究区中分值较低,排在研究区前 10 位;可见,土地利用风险性是影响土地利用系统压力健康指数的主要障碍因子。耕地比例和单位人口增长消耗新增城乡建设用地指数的得分值在压力指数指标值中偏低,因而,土地利用压力是影响土地利用系统压力健康指数的次要障碍因子。究其原因是因为该区域地貌以丘陵、山地为主、土地资源稀缺加之脆弱的生态决定了该地区既是生态敏感区又是生态脆弱区。“敏感”主要体现在该地区是国家重点生态功能区与重要生物多样性保护区,而“脆弱”则是该区域石漠化、生态灾害、水土流失和农业面源污

表 2 重庆市渝东南片区土地利用系统压力指数得分值及排序情况

Table 2 The pressure scores of land use system of Southeast of Chongqing and sort situation in Study area

区县 District and county	X_1	排序 Sort	X_2	排序 Sort	X_3	排序 Sort	X_4	排序 Sort	X_5	排序 Sort	X_6	排序 Sort	X_7	排序 Sort	X_8	排序 Sort
丰都县	0.048977	15	0.613523	17	0.662858	10	0.518148	7	0.474711	19	0.648975	27	0.963999	19	0.055627	1
黔江区	0.008977	38	0.106547	1	0.638181	9	0.318148	5	0.401287	12	0.750466	30	0.996372	35	0.489908	36
武隆县	0.148988	33	0.592545	13	0.608934	7	0.308148	4	0.391267	11	0.837884	36	0.976172	27	0.159021	4
石柱县	0.048989	23	0.626916	18	0.999115	37	0.559449	21	0.311048	8	0.78876	33	0.981584	30	0.189602	6
秀山县	0.048988	24	0.605777	16	0.50954	6	0.305148	3	0.429728	16	0.726465	29	0.980079	28	0.424465	30
酉阳县	0.888979	6	0.477328	8	0.19639	2	0.301148	1	0.353428	10	0.798988	35	0.973319	24	0.320183	12
彭水县	0.689989	36	0.437308	7	0.343082	5	0.311148	2	0.455809	18	0.760034	31	0.940599	11	0.186544	5

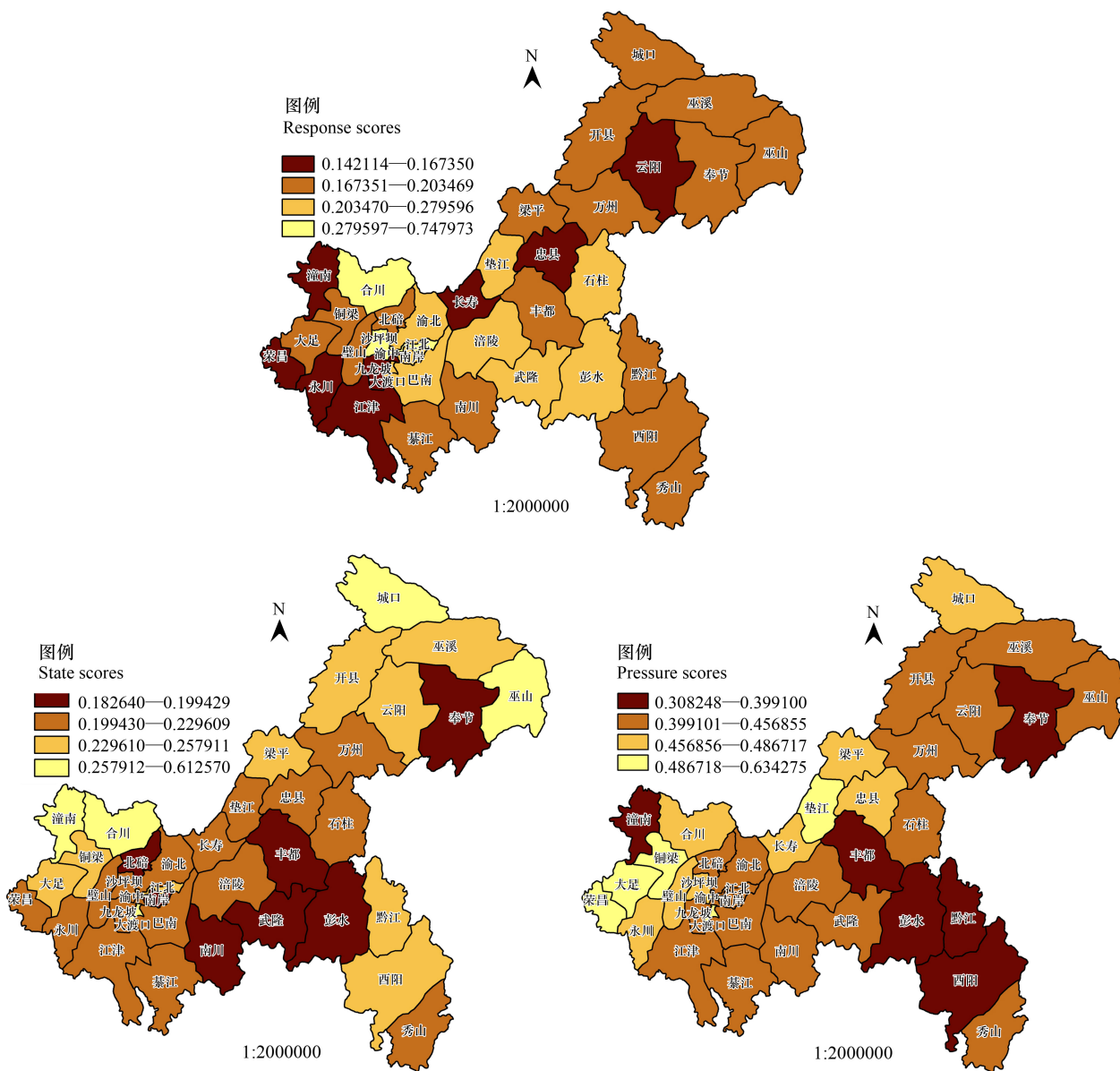


图 1 重庆市土地利用系统压力、状态和响应指数图

Fig. 1 Pressure, State and Response scores of the land use system in Chongqing

染严重,如该区域石漠化面积达 3725 km²,占该地区国土面积的近 20%,占全市石漠化面积的 41.6%,从而造成了该区域土地利用风险指数高,资源环境压力大,土地利用压力大,人地矛盾突出。

压力值偏低的区域分布在渝东北和渝西部分地区。渝东北区域既是秦巴山连片特困地区,又是三峡库区,集大农村、大山区、大库区于一体,生态环境脆弱,水土流失较为严重,资源环境压力较大。因而,该区域土地利用风险大,发展压力大,人地关系不协调。而渝西部分地区压力指数较低的原因是该区域处于重庆市 1 小时经济圈,是全市人口与高端产业的集聚发展区,人口压力和土地利用压力较大而导致土地利用出现不健康状态。

3.1.2 状态

状态健康得分值主要以重庆市主城区为核心,往四周扩散呈递增趋势(见图 1)。重庆市主城区是指重庆市中心城区,主要包括渝中区、江北区、南岸区、九龙坡区、沙坪坝区、大渡口区、渝北区、巴南区、北碚区 9 个市辖区,该片区状态健康得分值大多在 0.182640—0.199429 之间。从表 3 可知,该区域生物分丰度指数和建

设用地地均地区生产总值得分值,在研究区中分值较低,均排在研究区前 16 位;年均降水量、人均粮食产量和单位地区生产总值增长消耗新增建设用地量得分值在状态指数指标值中偏低,均排在研究区 50%之前。可见土地资源活力和景观状态是影响土地利用系统状态健康指数的主要障碍动因子,土地利用效率是次要因子。重庆市主城区和 1 小时经济圈状态值偏低,主要源于这片区域属于重庆市城市发展核心区和拓展区,由于城镇化和工业化的迅速发展,该地区土地类型变化迅速,人类活动对土地资源的过度攫取使城市土地发生不可逆的功能转变,改变了土地利用系统结构与功能状态,造成了土地资源压力过大,土地供需矛盾突出,威胁到了当地的生态环境,因此土地社会经济属于亚健康可持续状态。

表 3 重庆市主城区土地利用系统状态指数得分值及排序情况

Table 3 The state scores of land use system of Chongqing's Core District in Study area

区县 District and County	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉
渝中区	0.770416	0.27141	0.00192	0.000842	0.714593	0.538226	0.546524	0.253004	0.743018	0.099189	0.013117
大渡口区	0.770416	0.17141	0.00857	0.010842	0.398941	0.738226	0.236462	0.186572	0.082169	0.087611	0.224177
江北区	0.770416	0.09717	0.00792	0.139133	0.712608	0.308257	0.346524	0.209894	0.556808	0.094189	0.231261
沙坪坝区	0.770416	0.055192	0.009641	0.143005	0.795169	0.375841	0.1646	0.19364	0.333847	0.078565	0.220293
九龙坡区	0.770416	0.049288	0.010527	0.739649	0.598941	0.336086	0.144089	0.166078	0.31769	0.072373	0.204525
南岸区	0.770416	0.078708	0.008915	0.231285	0.620781	0.192661	0.277018	0.186572	0.488145	0.084482	0.196984
北碚区	0.770416	0.026352	0.024878	0.229995	0.711946	0.085627	0.156139	0.260071	0.161071	0.031511	0.474406
渝北区	0.770416	0.011514	0.029808	0.19205	0.796492	0.334862	0.105389	0.007951	0.246767	0.026306	0.414305
巴南区	0.770416	0.008368	0.043859	0.177594	0.746195	0.38685	0.118302	0.213428	0.393745	0.017774	0.434186

表 4 重庆市主城区土地利用系统状态指数得分值排序情况

Table 4 The sort state scores of land use system of Chongqing's Core District in Study area

区县 District and County	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉
渝中区	25%—45%	1	38	38	28	2	1	19	6	38	1
大渡口区	25%—45%	2	36	37	38	1	4	32	36	29	3
江北区	25%—45%	3	37	31	29	29	2	26	17	27	2
沙坪坝区	25%—45%	5	34	30	10	18	5	28	30	30	5
九龙坡区	25%—45%	6	33	1	37	24	7	34	31	32	6
南岸区	25%—45%	4	35	15	36	32	3	31	19	33	4
北碚区	25%—45%	8	29	16	30	37	6	16	34	19	10
渝北区	25%—45%	13	26	19	9	25	10	38	32	23	13
巴南区	25%—45%	18	23	26	24	17	9	224	27	22	16

而渝东南和渝东北区域以及重庆市西北区域远离城市核心发展区,受人类活动干扰较少,土地资源活力相对较好,景观多样性指数、生物丰度和植被覆盖度较高,生物多样性较丰富,因而状态分值相对较低。渝东南和渝东北个别区域由于土地利用较为粗放,土地利用效率较低,因而状态得分值相对较低,土地利用系统健康性较差。

3.1.3 响应

由图 1 可见,响应分值整体呈现四周高中间低、渝东北、渝东南和渝西高于渝中地区的空间分布特征。究其原因主要是因为渝东北、渝东南和渝西地区远离城市发展中心,受人类干扰活动影响较小,但是该区域属于生态脆弱地区,生态稳定性差,对外界干扰敏感性强,科技、人力资源不足,资金投入严重滞后,遭遇破坏后其生态环境恢复力差。而渝中地区虽然人类活动较为频繁,但是该区域土地生态保护意识较好,人类通过政策调整、环境保护等方面改善土地利用系统状态,保持良好的结构和功能,进而实现土地生态系统的稳定性和可持续性。

3.2 土地利用系统健康综合评价指数结果分析

在借鉴国内外生态系统健康等级划分的基础上,综合土地利用系统健康指数计算的结果,本文将土地利用系统健康级别划分为四个等级:健康、临界健康、不健康、病态; $0.30 \leq C_i \leq 0.50$ 为健康区, $0.28 \leq C_i \leq 0.30$ 为临界健康区, $0.25 \leq C_i \leq 0.28$ 为不健康区, $0 \leq C_i \leq 0.25$ 为病态区,计算结果和分类情况见表 4。土地利用系统生态健康值大小代表变量载荷信息的大小, C_i 越大,说明土地利用系统健康水平越高。

表 5 研究区各区域土地利用系统健康指数及级别

Table 5 Health condition of land use system					
研究单元 Research Unit	健康指数 Health Scores	健康级别 Health Level	研究单元 Research Unit	健康指数 Health Scores	健康级别 Health Level
渝中区	0.456681	健康	涪陵区	0.289604	临界健康
大渡口区	0.32663	健康	长寿区	0.270437	不健康
江北区	0.326756	健康	万州区	0.267938	不健康
沙坪坝区	0.346338	健康	梁平县	0.282722	临界健康
九龙坡区	0.255434	不健康	城口县	0.290841	临界健康
南岸区	0.270019	不健康	丰都县	0.240004	病态
北碚区	0.251271	不健康	垫江县	0.299231	临界健康
渝北区	0.29162	临界健康	忠县	0.26496	不健康
巴南区	0.278183	不健康	开县	0.271683	不健康
江津区	0.247583	病态	云阳县	0.275478	不健康
合川区	0.523947	健康	奉节县	0.235403	病态
永川区	0.262649	不健康	巫山县	0.278632	不健康
南川区	0.258118	不健康	巫溪县	0.26662	不健康
綦江区	0.258383	不健康	黔江区	0.249743	病态
潼南县	0.27457	不健康	武隆县	0.250263	不健康
铜梁县	0.282113	临界健康	石柱县	0.298894	临界健康
大足区	0.29294	临界健康	秀山县	0.275722	不健康
荣昌县	0.271656	不健康	酉阳县	0.267037	不健康
璧山县	0.271253	不健康	彭水县	0.242528	病态

为了更能直观的体现土地利用系统健康分布情况,根据土地利用系统健康综合评价指数计算结果,采用 ARCGIS 绘制了重庆市土地利用系统健康综合评价指数分布图,从图 2 可见,研究区土地利用系统健康综合分值具有显著的空间分异特征,具有明显的空间集聚性,整体呈现 T 型带状分布格局。

病态和不健康区域主要位于压力和状态健康指数较低的渝东北、渝东南和重庆市西南片区部分地区。这一区域主要环绕库区沿线分布,景观多样性指数和植被覆盖度较高,生物多样性较丰富,土地资源活力较好;但是该区域以丘陵、山地地貌为主,水土流失、石漠化、生态灾害严重,土地利用系统受到较大的负面影响,生态系统非常脆弱敏感,土地利用风险性大;该区域曾走大招商、大工业、大发展的道路,经济虽有所增长,但是该生态系统稳定性差,对外界干扰敏感性高,遭遇破坏后其生态环境恢复力差,是高风险-高压力区域。

临界健康和健康区域主要位于重庆市中部,即重庆市主城区环线,该区域内地势较为平坦,土壤相对肥沃,区位条件优越,属于重庆市城市核心拓展区和人类活动频繁区域,人口压力和土地利用压力较大,而该区域科技资金、人力资源响应程度高,土地生态保护意识较好,有较强的抗外界干扰能力,生态系统破坏后,自然恢复能力较强,是低风险-中度压力区域。

4 结论

随着中国城市化进程的加快,为了满足经济建设的需求,人类对土地资源不合理的开发利用,使土地利用系统遭受到了极大的冲击和损毁,尤其是三峡库区生态敏感区的人类生存环境问题日益突出,通过土地利用

系统健康评价研究来引导土地合理利用,对协调城市发展与自然生态保护之间的矛盾至关重要。鉴于此,本文充分考虑到人类活动对土地利用系统健康评价的影响,根据三峡库区生态敏感区典型区域——重庆市山地城市土地生态系统的特点和土地利用的生态风险性,借鉴 PSR 概念模型构建土地利用系统健康评价指标体系,并采用改进 TOPSIS 方法对重庆市进行了评价,结论及建议如下:

(1)研究表明,“以压力-状态-响应”(PSR)模型为分析手段,从自然资源环境与社会经济有机统一的观点出发,不只强调自然生态系统健康质量同时也考虑了人类社会经济活动的影响因素及其它它们之间的关联性来开展土地利用系统健康综合评价研究,能够较好地改变现有研究主要关注自然资源环境的状况,可以充分表征土地利用系统健康的空间特性,更准确地反映土地利用

系统健康的各要素之间的关系和影响土地生态系统健康的关键因素,为三峡库区生态敏感区土地利用系统健康状态起到一定的预警作用。另外,本研究选取的指标是基于三峡库区生态敏感区的自然生态基底与人类发展需求而选取的评价指标,能较好的考虑到研究区典型的个性化指标,以识别各评价单位对各类指标的响应程度,表达各评价单元健康性的区分度。

(2)TOPSIS 法是有限方案多目标决策的综合评价方法之一,以改进 TOPSIS 方法计算土地利用系统生态健康指数,对原始数据进行同趋势和归一化的处理后,消除了不同指标量纲的影响,并能充分利用原始数据的信息,客观真实的反映实际情况,获取土地利用系统健康水平的综合诊断结果,揭示各指标的水平状态,揭示系统健康问题的关键影响因素。是一种有效地技术方法,该方法可以用于其他评价,评价指标体系可根据研究区域的实际进行调整。

(3)实证结果表明,三峡库区生态敏感区的典型区域——重庆市土地利用系统健康综合分值呈 T 型带状分布格局。渝东北、渝东南和重庆市西南片区部分地区土地生态系统呈现病态和不健康状态,属于高风险-高压区域。土地利用风险性、人口压力和土地利用压力较大以及土地利用系统的响应能力低是制约土地利用系统健康状况改善的关键因素。因此,这些区域库区沿线要强化土地环境和水环境治理,保持水土、涵养水源,避让地质灾害,改善生态环境,降低生态脆弱度,建立好土地利用风险防范体系,大幅减轻库区沿线生态环境承载力负担。土地开发成本相对较高的渝东北区域要以生态环境保护优先,点状发展适当集聚,保护脆弱生境,优化土地利用结构,控制产业和人口规模不能超过土地环境容量,减少对自然环境的人为侵害。渝东南区域要加强植被重建,保持水土防止石漠化,结合高山生态扶贫搬迁等工作,给人们留出生产生活生态空间,减少人地矛盾。同时,加强科技资金投入,加大水土保持、生态建设重要性的宣传力度,增强人们的环保意识,促进人地和谐发展。

临界健康和健康区域主要位于主城区环线,是低风险-中度压力区域。人口压力指数和土地利用压力指数是制约土地利用系统健康状况改善的关键因素。因此,应加强土地利用规划与调整,转变经济发展方式,优化产业结构,控制人类过度开发,进一步降低经济增长对土地资源的过度消耗,维持土地生态系统正常功能。

(4)构建基于 PSR 模型的评价指标体系和采用改进 TOPSIS 方法的研究适用于土地利用系统健康诊断,有利于促进土地利用系统健康状况改善。本研究对进一步完善土地利用系统健康评价体系具有一定的参考价值,对于当前城市化进程中日益关注的区域生态安全问题的认知与解决具有重要意义,同时也为土地利用的规划、管理和生态保护提供决策参考。但是,土地利用系统的健康评价是一项复杂的系统工程,本研究设置

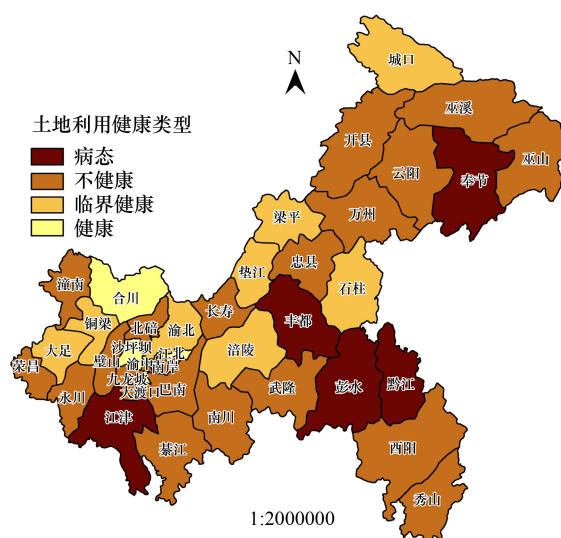


图2 土地利用系统健康综合评价指数分布图

Fig. 2 The distribution of health condition of land use system

的评价指标和评价等级标准等问题还有待进一步深入探讨研究和验证,由于数据收集的局限性,本文仅为基于现状数据的研究,在后续研究中,可收集多个时间段的数据,对土地利用系统健康评价进行一个动态研究,并设计模型对土地利用系统健康做预测分析。

参考文献 (References):

- [1] 陈美球, 刘桃菊, 黄靓. 土地生态系统健康研究的主要内容及面临的问题. 生态环境, 2004, 13(4): 698-701.
- [2] Rapport D J, Böhm G, Buckingham D, Cairns J Jr, Costanza R, Karr J R, De Kruijf H A M, Levins R, McMichae A J, Nielsen N O, Whitford W G. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and important tasks ahead. Ecosystem Health, 1999, 5(2): 82-90.
- [3] Leopold A. For the Health of Land. Washington, DC: Island Press, 1999.
- [4] 陈美球, 刘桃菊. 土地健康与土地资源可持续利用. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(4): 64-67.
- [5] 陈美球, 黄靓, 蔡海生, 刘序, 刘桃菊. 鄱阳湖区土地健康评价. 自然资源学报, 2004, 19(2): 170-175.
- [6] 蔡为民, 唐华俊. 土地利用系统健康评价. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [7] 蔡为民, 唐华俊, 陈佑启, 张凤荣. 土地利用系统健康评价的框架与指标选择. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(1): 31-35.
- [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. 中国土地科学, 2012, 26(11): 33-39.
- [9] 郑华伟, 张锐, 杨兴典, 刘友兆. 基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断. 长江流域资源与环境, 2012, 21(9): 1009-1105.
- [10] 张悦, 宋戈. 城市土地利用系统健康评价——以哈尔滨市为例. 城市问题, 2013, (12): 26-31.
- [11] 张锐, 刘友兆, 丑建立. 中国土地利用系统健康动态评价. 水土保持通报, 2014, 34(2): 197-203.
- [12] Guo J, Wu B. Health assessment on land use system. China Land Science, 2011, 25(4): 71-77, 96-96.
- [13] Moussiopoulos N, Achillas C, Vlachokostas C, Spyridi D, Nikolaou K. Environmental, social and economic information management for the evaluation of sustainability in urban areas: a system of indicators for Thessaloniki, Greece. Cities, 2010, 27(5): 377-384.
- [14] Spangenberg J H. Environmental space and the prism of sustainability: frameworks for indicators measuring sustainable development. Ecological Indicators, 2002, 2(3): 295-309.
- [15] 陆丽珍, 詹远增, 叶艳妹, 陈建裕, 牟永铭. 基于土地利用空间格局的区域生态系统健康评价——以舟山岛为例. 生态学报, 2010, 30(1): 245-252.
- [16] Yu G M, Yu Q W, Hu L M, Zhang S, Fu T T, Zhou X, He X L, Liu Y A, Wang S, Jia H H. Ecosystem health assessment based on analysis of a land use database. Applied Geography, 2013, 44: 154-164.
- [17] Yu G M, Hu X L, Zhang M, Lu D, Wei Y L, Tao W X. On the ecological risks assessment of the land-use rectification and reconstruction. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(6): 83-89.
- [18] 郁亚娟, 郭怀成, 刘永, 姜玉梅, 李艳秋, 黄凯. 城市病诊断与城市生态系统健康评价. 生态学报, 2008, 28(4): 1736-1747.
- [19] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 张玉清. 区域生态系统健康评价——研究方法与发展. 生态学报, 2007, 27(11): 4877-4885.
- [20] 赵帅, 柴立和, 李鹏飞, 程宏鑫. 城市生态系统健康评价新模型及应用——以天津市为例. 环境科学学报, 2013, 33(4): 1173-1179.
- [21] Calderon-Aguilera L E, Rivera-Monroy V H, Porter-Bolland L, Martínez-Yrizar A, Ladah L B, Martínez-Ramos M, Alcocer J, Santiago-Pérez A L, Hernandez-Arana H A, Reyes-Gómez V M, Pérez-Salicrup D R, Díaz-Núñez V, Sosa-Ramírez J, Herrera-Silveira J, Búrquez A. An assessment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: current trends and research gaps. Biodiversity and Conservation, 2012, 21(3): 589-617.
- [22] Schirmer J, Berry H L, O'Brien L V. Healthier land, healthier farmers: Considering the potential of natural resource management as a place-focused farmer health intervention. Health & Place, 2013, 24: 97-109.
- [23] Rapport D J. Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1995, 4(2): 97-105.
- [24] 张晓琴, 石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 77-82.
- [25] 杨予静, 李昌晓, 丽娜·热玛赞. 基于 PSR 框架模型的三峡库区忠县汝溪河流域生态系统健康评价. 长江流域资源与环境, 2013, 22(S1): 65-74.
- [26] Jagger P, Shively G. Land use change, fuel use and respiratory health in Uganda. Energy Policy, 2013, 67: 713-726.
- [27] Li Q, Yan J M. Assessing the health of agricultural land with emergy analysis and fuzzy logic in the major grain-producing region. CATENA, 2012, 99: 9-17.
- [28] Styers D M, Chappelka A H, Marzen L J, Somers G L. Developing a land-cover classification to select indicators of forest ecosystem health in a rapidly urbanizing landscape. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4): 158-165.
- [29] Connell D J. Sustainable livelihoods and ecosystem health: exploring methodological relations as a source of synergy. Ecohealth, 2010, 7(3): 351-360.
- [30] Guan B H, An S Q, Gu B H. Assessment of ecosystem health during the past 40 years for Lake Taihu in the Yangtze River Delta, China. Limnology, 2011, 12(1): 47-53.
- [31] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.
- [32] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进. 数学的实践与认识, 2002, 32(4): 572-575.
- [33] 鲁春阳, 文枫, 杨庆媛, 陈琳琳, 宗会明. 基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断——以重庆市为例. 资源科学, 2011, 33(3): 535-541.
- [34] 王颖君. 基于改进 Topsis 法的土地集约利用评价研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [35] 文洁, 刘学录. 基于改进 TOPSIS 方法的甘肃省土地利用结构合理性评价. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 234-239.