

区域农业生态系统健康定量评价

武兰芳, 欧阳竹, 唐登银

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 鉴于农业生态系统健康与人类、社会、经济、环境等具有密切的关系, 从区域尺度出发, 提出区域农业生态系统健康的概念、评价指标体系及其相应度量方法, 并采用专家评判标准赋值法对各指标进行了标准量化。认为农业生态系统存在不健康、亚健康和健康 3 种状态, 在这 3 种状态下各指标的属性判断值分别是 1、5 和 10, 并以山东省禹城市为例进行了实证分析应用。结果表明: 从 1980 年到 2000 年, 禹城市农业生态系统总体上表现为由不健康状态经过亚健康状态, 目前处在向健康状态的过渡阶段, 综合健康指数由 4 上升为 6。其中, 结构特征在由亚健康状态向健康状态过渡中又转变为亚健康状态, 是因为资源可供性和结构多样性向不健康状态转变所致; 生产功能特征表现为由不健康过渡为亚健康进一步向健康状态过渡, 其中生态效率有向不健康转变的趋势; 抗逆特征表现为由亚健康向健康过渡的趋势, 而其中自生产力已表现为不健康状态。评价结果与实际情况基本相符。

关键词: 农业生态系统; 健康; 指标体系; 评价

The quantitative assessment of agro-ecosystem health on a regional dimension

WU Lan-Fang, OUYAN Zhu, TANG Deng-Yin (Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2740~2748.

Abstract: the Agro-ecosystem health at different spatial and temporal scales is closely related with human, society, economy and environment. It is a new emerging field of agro-ecosystem research. Although many researchers did many studies from different aspects, there is no consensus of its definition and no quantitative measure has been available for its assessment at present. By reviewing literatures and special investigation, this paper defines the agro-ecosystem health on a regional dimension of county level, shows the assessing indicator system and the measure of every indicator of them, also the calculation method of aggregate index of agro-ecosystem health is proposed.

The Agro-ecosystem health could be considered as a collective concept. Briefly speaking, a healthy agro-ecosystem means a good condition for sustainable development. Due to the characteristic of the nested hierarchy structure of agro-ecosystem, it should be defined specially at different spatial dimension and temporal dimension. A healthy agro-ecosystem on a regional dimension of county level can be understood as a harmonious unification of resource security, food safety and environmental protection. The healthy agro-ecosystem should performance as following: it should have a rational structure and good function, it should have the capability to resist to both natural disasters and socioeconomic risks, it should perform good service and to meet the rational demands of all stakeholders. From practical point of view, a healthy agro-ecosystem should use agricultural resources efficiently, capture better economic benefits, improve surrounding of both living and working, at the same time no harmful pressure to adjacent ecosystem.

The indicator system for assessing the health of a regional agro-ecosystem of county level needs to integrate ecological factors with socioeconomic aspects, because it is influenced by both the ecological process and the socioeconomic components with human values. A general framework of the indicator system is set up according to some principles in the paper. The

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA508B03); 中国科学院“十五”农业资助项目(NK105-A-01)

收稿日期: 2003-09-18; **修订日期:** 2004-02-16

作者简介: 武兰芳(1963~), 女, 山西省人, 博士, 副研究员, 主要从事农业生态系统分析、区域农业开发、农业可持续发展研究。E-mail: wulf@igsnrr.ac.cn

Foundation item: National “Tenth Five-year Plan” Key Project of Science and Technology (No. 2001 BA 508 B03) & Agricultural Development Program of CAS “Tenth Five-year Plan” (No. NK105-A-01)

Received date: 2003-09-18; **Accepted date:** 2004-02-16

Biography: WU Lan-Fang, Ph. D., mainly engaged in agro-ecosystem analysis, exploitation and development of regional agriculture, and sustainable agriculture. E-mail: wulf@igsnrr.ac.cn

overall objective of the framework is to discover the status of a regional agro-ecosystem health. At first, it is categorized three groups of indicator: the structure, the productive function and the stress-resistance of agro-ecosystem. The first group would be used mainly to examine the condition of resources and components of agro-ecosystem, which includes resource availability, accessibility, diversity and integrity. The second group would be used mainly to reflect how to match the aims of stakeholders, which includes productivity, efficiency, effectiveness and equitability (equity). The third group would be used mainly to investigate the relationship between agro-ecosystem development and environment, which includes self-productivity, stability, resilience and capacity to respond. Then, the three groups are secondly disassembled to several sub-group indicators, which are also analyzed continuously, step by step, till to measurable indicators.

In order to do quantitative assessment of agro-ecosystem health, it also needs to know the health criterion of every indicator clearly. In this paper, the reference criteria of agro-ecosystem health indicators at regional dimension are suggested by the approach of experts' evaluation. The status of a regional agro-ecosystem was differentiated into three cases: unhealthy, sub-healthy and healthy, and their corresponding indexes of indicators are 1, 5, and 10 respectively. Special explanation is that, as for stability indicators, there are only two cases, and it is healthy as long as grain yield and agricultural value per unit land are not decreased, otherwise unhealthy. Whereafter, by using the Analytic Hierarchy Processing (AHP) to get the weight coefficient of every indicator and every group, then calculate the aggregated health indexes of the regional agro-ecosystem by means of weighting sum.

Yucheng county of Shangdong province in the North China Plain was taken as a case study. The result shown that the agro-ecosystem of Yucheng County has been changed from unhealthy via sub-healthy to healthy during 1980~2000 in general, the integrated health index of it raised from 4 to 6. The structural index turned into sub-healthy again when it has been evolved the state of structural health from sub-healthy to healthy because of the transition to unhealthy of resources availability and diversity. The index of productive function showed the transition of unhealthy via sub-healthy to healthy. The index of stress-resistance behaved the transition trend from sub-healthy to healthy. In general, the assessment result of agro-ecosystem health for Yucheng County is match to its actual development, which indicated that the indicators and measure might be used to assess an agro-ecosystem health on regional dimension of county level.

Key words: agro-ecosystem; health; indicator system; assessment

文章编号:1000-0933(2004)12-2740-09 中图分类号:Q14,S181 文献标识码:A

世界人口在 1999 年突破了 60 亿大关,目前每年的增长数约为 9300 万人,预计到 2050 年,将达到约 100 亿人。人口激增将对地球环境产生更加巨大的压力。农业生产是一种需要高度集约利用资源的大规模的产业,其最基本的功能就是依靠日渐减少的资源供养越来越多的人口,所以,农业集约化生产仍然是社会各界研究和发展的主要目标^[1]。农业生产面临的主要矛盾就是如何在进一步提高食物产量的同时注重产品的质量,并极大限度地保护资源环境。20 世纪许多生态环境恶性事件的发生,告诉人们人类活动会胁迫生态系统健康,导致生态系统结构和服务功能发生变化。人类如果不能维持(农业)生态系统的健康,人类社会自身的健康发展就会受到严重胁迫。农业生态系统覆盖了地球上约 30% 的陆地面积,农业生态系统的健康问题也就显得越来越重要,农业生态系统健康的研究与管理将逐步成为未来农业生产的新范式^[2]。正如加拿大 Guelph 大学健康问题研究小组所言:一个农业生态系统包括了农业区域内所有生物和非生物环境、以及其社会和经济组成,如果人们要研究个人健康、家庭健康、群体健康、甚至农场健康和社区健康,人们必须把这些健康问题综合在一起进行农业生态系统健康的研究。本文从区域尺度出发,研究我国县级水平农业生态系统健康评价的指标体系与评价方法,使农业生态系统健康评价从概念框架走向实证应用。

1 农业生态系统健康的内涵及其评价研究进展

农业生态系统健康研究可以追溯到 20 世纪 40 年代,1942 年在新西兰出版的《Soil and Health》杂志,首次提出以“健康的土壤-健康的食品-健康的人”为研究主题,但当时并没有引起人们足够的重视,直到 20 世纪 80 年代后期到 90 年代初,在可持续发展思想影响下,伴随着退化生态学的研究,生态系统健康逐渐成为生态学研究的一个新的热门领域^[3]。1994 年国际生态系统健康学会(ISEH)成立,1995 年《Ecosystem Health》正式创刊;与此同时,1993~1996 年加拿大启动了农业生态系统健康研究项目,在 1998 年出版其研究报告《Agroecosystem Health: Analysis and Assessment》,随之建立了“全球农业生态系统健康网络”,加入的国家主要有加拿大、秘鲁、洪都拉斯、肯尼亚、尼泊尔和埃塞俄比亚 6 个国家,这个网络的建立为全球农业生态系统健康研究提供了交流信息的平台,促进了农业生态系统健康理论与实践工作的深入发展,从此,开创了农业生态系统健康研究的新局面。鉴于农业生态系统健康与社会、经济、人类、生态环境等密切相关,目前,农业生态系统健康研究在国际上已日益成为(农业)生态学研究的前沿领域,研究的内容主要包括:农业生态系统健康评价^[4~7],农业生态系统健康与人类健康的关

系^[2,8],农业生态系统健康的影响因素及管理^[9~13]。

农业生态系统是指生产农产品并提供农村服务的有机整体,它包括诸如土地、劳力、资本、管理及各种投入等一系列与农业有关的因素,这些因素既相互联系又相互作用,共同影响和决定着农业生态系统的结构与功能,使得农业生态系统成为自然-社会-经济复合生态系统,其运行与调控既要遵循自然生态系统的原理,又要满足社会经济发展的需求。由于农业生态系统的特殊性和复杂性,至今,关于农业生态系统健康的概念还没有形成统一的定义,不同研究者从不同研究领域和研究兴趣出发得出了不同的认识与理解。Soule 等^[14]根据系统的结构和功能特征描述了农业生态系统的健康状态,认为一个健康的农业生态系统,其功能上应该具有“稳定的生物量动态和营养流”,并表现出“高水平的系统完整性和持续性”。Okey^[15]认为,农业生态系统的健康状态是由系统的稳定性和弹性之间的平衡组成的,具有平衡生态效益和经济效益的特征,健康的农业生态系统要能够在环境条件发生波动时维持稳定的生产水平,如果遇到重大干扰,也能够很快转变原有生产方式为一种新的生产方式,既使生产者获得满意的经济收入,也为社会提供充足的食物。Haworth 等^[16]认为,农业生态系统健康的概念可以从系统功能和系统目标两方面理解,系统功能包括完整性、弹性、效率及日渐增长的生命的必要物质,系统目标包括社会、自然、经济及其相互之间的制约。王小艺等^[17]指出,健康的农业生态系统主要是指那种能够满足人类需要而又不破坏甚至能够改善自然资源的农业生态系统,其目标是高产出、低投入、合理的耕作方式,有效的作物组合,农业与社会的相互适应、良好的环境保护与丰富的物种多样性等。Xu 等^[7]认为:因为结构和功能表现了农业生态系统的基本特征,所以区域农业生态系统健康是指在一段时期内系统实现一定功能和维持一定结构的能力,其功能主要是满足社会需求,其结构既是实现其自身功能所需,也是为社会提供系统服务功能所需。总之,农业生态系统健康是一个总体概念,是指农业生态系统表现为能够持续发展的良好状态,因为农业生态系统的层次性,在不同时间尺度和不同空间尺度上,应该具有相应特定的具体内涵。根据系统结构的层次理论,农业生态系统的空间尺度,既可以小到一块农田,也可以大到整个地球,从上至下形成镶嵌式层次结构,通常下一级层次又是上一级层次的亚系统;在不同层次与尺度上,农业生态系统的构成因素有所不同,而且这些构成因素之间的相互作用及所表现出来的属性也存在差异,而且在特定环境条件下随着时间推移而发展变化。所以,在区域水平上的农业生态系统健康(即区域农业生态系统健康)应该表现为:根据区域资源状况特点,形成合理的农业生产结构,保持良好的系统运转功能,具有抵抗各种自然灾害和社会经济风险的能力,提供有效的系统服务功能,满足所有受益者的合理目标要求,同时对邻近生态系统不产生负面压力。

农业生态系统健康的概念和内容处在不断的研究发展之中,对农业生态系统的健康状态进行准确评价是重要基础与关键。生态系统健康评价主要有两种方法^[18]:一是指示物种法,比较适用于一些自然生态系统的健康评价;二是结构功能指标法,适用于任何类型的生态系统。对于农业生态系统健康评价,在指标体系研究上呈现出两个明显的特点:一是已逐步从单一考虑系统自身特点的指标体系转到综合人类活动的指标体系,二是由单纯考虑生物环境指标体系逐步转到涉及社会经济领域。Swanton 等^[13]认为生物多样性是农业生态系统健康指标特征之一,并指出通过化学除草剂大面积管理杂草不利于生物多样性的保持和农业生态系统的健康,应该采取对杂草的综合管理。Dumanski^[19]则提出应该用土壤质量指标作为农业生态系统健康的标准,因为土地是农业生产的最基本要素。而 Berka^[20]则认为任何生物学现象和人类活动都依赖于水,土地的使用类型也直接影响到水的质量,所以应该用水(质)作为生态系统健康的一个综合环境指标。Yiridoe 等^[5]分析了经济指标应用于农业生态系统健康评价的重要性,并提出了生物环境指标与经济指标结合的概念框架,为评价农业生态系统健康提供了较为系统的认识。Xu^[7]从农业生态系统的结构、功能、组织和动态四个方面对评价农业生态系统健康的指标进行了解释和说明,其中也包含了社会经济与生物环境指标,并尝试应用于实证研究,但只是作了定性评价。

至于评价方法,Conway^[21]曾提出应该采用综合指数分析法对农业生态系统进行分析,就是把农业生态系统不同层次的 4 种特性进行有机结合,即生产力、稳定性、持续性和公平性。Costanza^[22]提出利用系统的活力、组织和恢复力计算生态系统健康综合指数,以评价系统的稳定性与完整性。Mukhebi^[23]也提出通过权重法将农业生态系统健康的各项指标转变成一个综合指数,这些指标的权重系数应根据每个指标重要性的真实程度而确定。但是,这些方法均没有明确具体操作方法。

总之,前人研究虽然提出了农业生态系统健康评价的概念框架,但定性描述居多,定量研究很少。从评价指标的选取、度量标准、评价方法及其适合的尺度范围,尚需要进一步深入研究。

2 区域农业生态系统健康评价的指标体系与评价方法

农业生态系统的运行既受自然生物生态过程作用,更受人类社会经济利益驱动,前者是系统的基础,后者是系统的目标。很明显,对于这种复杂系统要选择单个恰当的指标是不可能的,所以,只有把生物环境指标和社会经济指标进行有机结合建立一套指标体系,才能全面反映农业生态系统的健康状态。生态指标通常用于评价资源环境状况,社会经济指标通常用于评价受益者决策与管理目标的实现程度。指标体系建立的目的实质上就是为了要全面、准确、科学地对农业生态发展的阶段、状态、程度与水平进行综合评估和判断,以揭示系统本身的变化趋势及人类该如何对农业生产发展进行规划调控。在一套指标体系中,因为不同的指标具有不同功能,有些可以评价资源环境状态及其一段时间的变化趋势,有的可以对环境变化进行早期预警,而有

些可用来判断引起环境变化的原因,所以,研究目的不同常常会影响到对指标的取舍权重,需要对不能同时兼顾的各种因素进行权衡决定。

2.1 区域农业生态系统健康评价指标体系建立的原则

区域农业生态系统健康指标体系的建立,并不是某些单个指标之间的简单组合,而是遵循一定原则所建立的各项指标内在有机联系的整体。

首先要科学性与实用性相结合。科学性是指指标体系必须建立在科学的基础上,以便客观和真实地反映农业生态系统发展的状态,各个子系统之间的相互联系与相互作用关系,能较好地衡量农业生产目标的实现程度。在科学性的基础上,指标体系还必须具有实用可操作性的特征,一方面要注重时间、空间与适应范围的可对比性,以便于进行各种纵向和横向的比较与推广运用,另一方面,评价指标必须尽可能简单明了、容易理解,易于量化,相关数据容易获得,可操作性强。

其次要系统性与层次性相统一。因为农业生态系统本身可以分若干个子系统,子系统又包含若干次级子系统,具有层次性,每一子层次又可以用众多的指标进行标度,最终合成一个指标来描述系统的总体状况,所以指标体系也应分层设置,以便于对系统各组成要素、各个方面与过程等进行全面准确的评估。

再次要静态性与动态性相结合。农业生产由原始农业、传统农业到现代农业,随人类社会而不断发展,因而农业生态系统在时间尺度上是不断演变发展的,而且不同阶段拥有不同的社会目标和不同的人类调控能力,导致其结构与功能发生较大变化。因此,指标体系不仅要能反映当前农业生态系统健康状态,而且要能反映一段时期内农业生产发展及变化趋势。

2.2 农业生态系统健康评价指标体系及其度量

根据评价指标体系建立原则,区域农业生态系统健康评价指标体系主要由系统结构、生产功能和抗逆功能 3 个方面组成。系统结构指标主要反映农业生态系统的资源状况和生产结构组成;生产功能指标主要是根据系统产出功能来评价农业生态系统对受益者目标要求的满足程度,即系统提供产品的能力和效率;抗逆功能指标是指农业生态系统运行状态与外部压力或胁迫的关系,及农业生态系统对自然灾害和社会经济风险的应对能力(图 1)。

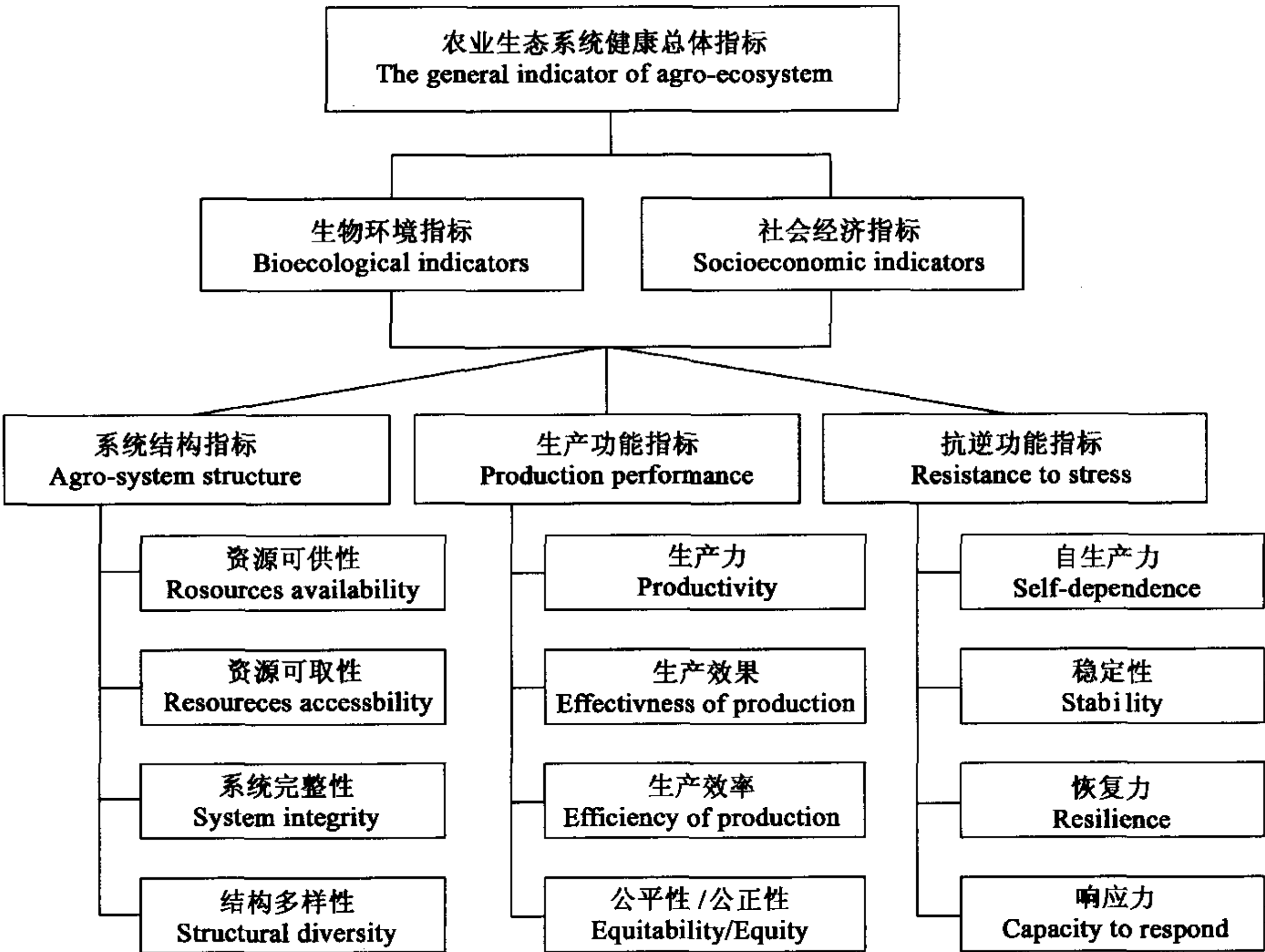


图 1 评价农业生态系统健康的指标体系框架

Fig. 1 The framework of indicators system for agro-ecosystem health assessment

2.2.1 系统结构指标

(1)资源可供性 资源可供性是指一个系统能够获得维持正常功能所必需资源的最大数量。农业生态系统功能的实现依赖于许多资源,具备一定数量的各种资源对于农业生态系统功能的体现是必需的,而且资源的数量不仅决定了其产出农产品的生产潜力,同时也反应其对外界环境变化的应对能力。因此,资源可供性是描述农业生态系统结构特征好坏的一个重要标准,在其它条件相同的情况下,资源可供性高的农业生态系统应该比资源可供性低的农业生态系统更健康。在我国,劳力资源丰富,耕地

资源紧缺,因而资源可供性可用人均耕地占有量和劳均耕地占有量表示。

(2)资源可取性 资源可取性通常是指对系统内资源进行获取和利用的难易程度,也可以说是指资源供给与需求之间的分配关系。当一个农业生态系统处在胁迫条件下,其正常功能就会出现波动,此时就需要用替代资源来支持,因而不难理解资源可取性经常就成为系统如何应对胁迫条件、以维持其正常功能的主要决定因子之一。一个农业生态系统如果其各种资源都比较容易获取,则这个系统就会表现出较高的健康水平,如在耕地资源供给中表现有高、中、低产田,高产田主要是因为水肥条件较好,明显高产田比例高的农业生态系统要比低产田比例高的农业生态系统健康。用有效灌溉面积占耕地面积的比例和标准化生产环境达标率表示耕地资源的可取性。

(3)结构完整性 结构完整性是指系统具有合理的组织结构。通过合理的结构系统能够自身维持其良好的功能,最终达到一个良好的状态。当一个系统维持着自然、人类、社会和经济的正常运转时,这个系统就具有结构完整性,实际上就是系统在结构和功能上具有全面性,系统在运行过程中,对资源利用消耗遵循“整体、协调、循环、再生”的原则,如我国许多生态农业模式通过种植业与养殖业的有机搭配与组合,使各个生产环节的废弃物达到循环升级利用同时,还减少了外部物质的投入。这样,系统完整性就与系统健康相一致。

(4)结构多样性 在农业生态系统中,结构多样性是指系统组分数量及这些组分在空间的变化范围与程度,更多的是指农业生产结构多样性。生产结构的多样性带来系统功能的增强,主要表现为:可以由于避免市场价格波动而引起的经济损失与风险,可以满足社会对农产品种类消费需求上的不断变化,还可以产生环境景观多样性的美学价值等等。结构多样性合理的农业生态系统比不合理的健康。结构多样性可以通过计算结构多样性指数进行度量,通常也可用养殖业产值占农业总产值的比重和经济作物占作物总播种面积的比重表示。

2.2.2 生产功能指标

(1)生产力 生产力一般是指单位资源投入量所能生产的产品量,它描述了一个系统生产产品的能力。在生态学上,生产力通常是指在单位时间内单位面积上一个生态系统所固定的化学能的总量,被定义为“总初级生产力”。在农业经济分析中,生产力通常是指单位资源量(如土地和劳力)所生产的产品数量或经济收入。农业生态系统的生产力受到各种因素影响,是农业生态系统功能表现的一个重要特征,作为农业生态系统健康的一个指标,在其它条件相同的前提下,生产力高的农业生态系统要比生产力低的农业生态系统表现的更健康。本文用耕地生产力,即单位面积耕地粮食产量和农业产值来评价区域农业生态系统的生产力。

(2)生产效率 效率通常是指系统功能产出与投入的比率。在生态学上,生产效率主要是通过分析光合作用和能量转化的生态学过程,例如光合效率被定义为植物所固定的化学能与吸收的总太阳能的比率,生态效率是指单位面积上单位时间内系统所产出能量与投入能量之比,用工业辅助能利用率和光能利用率表示。在经济学上,生产效率实际上就是指经济效益,其实质就是尽可能有效地利用资源以满足人们的需求,以尽量少的成本获取尽量多的经济产品或经济回报。用生产效率作为评价农业生态系统健康的功能指标,显而易见,效率高的农业生态系统明显要比生产效率低的农业生态系统更健康。

(3)生产效果 生产效果作为评价农业生态系统健康的一个指标,既指系统通过其结构和功能来满足社会需求的能力,也指系统满足生产投资者合理目标的一种实际能力。社会对农产品的需求首先表现为数量充足,在数量满足的前提下又追求质量上乘和种类多样;生产者在力求满足社会市场需求的过程中获取合理的收入回报。我国是一个人口大国,粮食问题主要依靠自己解决,只有在粮食供给达到基本要求后,其它生产活动才能如愿进行。因此,生产效果可用人均粮食占有量和农民人均纯收入衡量。

(4)公平性与公正性 公平性与公正性通常是指农业生态系统的资源与产品如何在人类中如何被均衡地分配,这种均衡分配既包括代际之间,也包括国家与地区之间,也就是指人类具有维护资源合理分配与利用的权利与机会。这一概念在可持续农业的研究与发展中曾经得到广泛使用,在农业生态系统健康分析与评价中,具有相同的含义,但实践中要真正界定进行量化,却存在困难。

2.2.3 抗逆功能指标

(1)自生产力 自生产力是指系统依靠自身作用维持系统运转的能力,它反映的是农业生态系统在多大程度上要依靠外部投入才能维持其结构和完成其功能,所以,它强调一个具有自生产力的系统应该主要依赖于其自身拥有的资源和努力。一般来讲,一个自生产力较高的系统,其功能和结构就基本上不受外界的影响;一个健康的农业生态系统,其农业生产的发展不应该过度依赖于人类创造的外部投入,也不应使其邻近的生态系统受到损毁。现代农业生产中投入大量的化肥、农药、农机等工业辅助能,自生产力的大小用单位面积耕地上工业辅助能投入的多少度量。

(2)稳定性 农业生态系统的稳定性是农业生态系统管理的一个重要目标,人们期望通过管理使农业生态系统在周围自然和社会环境发生波动的干扰下,其生产力能保持稳定或增长。农业生态系统的稳定性描述了农业生态系统健康的动态性质,可

以定义为相对于对各种胁迫状况下的生产稳定性,反应了农业生态系统对自然灾害和社会经济压力的抵抗和防御能力。从时间尺度上来看,农业生态系统的稳定性是农业生态系统健康的一个必要组成部分,可用耕地生产力的稳定性表示,耕地生产力的稳定性用单位面积耕地粮食产量和农业产值的年增长变化率来衡量。

(3)恢复力 恢复力是指系统在受干扰后通过某种方式恢复其原来结构与功能的能力。在农业生态系统中,恢复力是指农业生态系统应对各种自然灾害和社会经济胁迫的能力。恢复力与稳定性有相似之处,但稳定性更注重农业生态系统结构与功能的恒久不变的状态,而恢复力是指系统的维护能力,更确切地说是指系统应付胁迫的机制与策略,是在各种灾害发生后如何把危害减少到最小程度。所以,恢复力与系统如何利用其资源减轻外部干扰以维护其能力密切相关,因此,可以认为恢复力就是系统的抗灾能力,这样恢复力就可用旱涝保收面积或盐碱地面积占总耕地面积的比例进行衡量。

(4)响应力 响应力是指系统应对各种胁迫的潜力和能力范围。农业生态系统更重要是指对 自然环境和经济社会环境变化的应变,包括结构调整,功能改变等,以保证生态系统功能不下降。Gallopín^[24]指出,响应力是系统对新环境做出反应的一种能力,这一能力包括从应变趋向平衡。因此可以看出,农业生态系统的响应力,是指系统对自然灾害和社会压力应变的时间过程,就是指在多长时间由受害状态转变为原来的正常状态。目前,这一指标的应用仍然停留在理论探讨阶段。

2.2.4 评价标准 农业生态系统健康评价指标确定后,类似于医学诊断,还需要明确各项指标的健康标准,才能对生态系统健康状况进行诊断评价。可是,目前还没有统一认可的农业生态系统健康标准,需要经过实践探索。鉴于农业生态系统的服务功能是实现经济效益、社会效益和生态效益的协调发展,根据我国农业生产的实际水平与条件,参照我国农村小康社会标准和生态县建设标准,采用专家评判标准赋值法,提出我国区域农业生态系统健康评价的参考标准,并将健康标准分为不健康、亚健康和健康 3 种状态,在这 3 种状态下各指标的属性判断值分别是 1、5 和 10。特别说明的是,对于稳定性指标,暂且认为健康和亚健康两种状态,只要粮食单产和耕地产值不减产或不降低就视为健康,否则为不健康(表 1)。

2.2.5 评价模型 建立了农业生态系统健康评价指标体系和确定了各指标判断标准后,农业生态系统各层次及其总体健康综合指数的计算方法是从基层到高层,直到最后复合成一个具体的数值,其数学表达式为:

$$H = \sum W_i \cdot \sum W_{ij} G_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

式中, H 代表农业生态系统健康综合指数,可以用来表征不同区域农业生态系统健康的状态,也可用来分析同一区域不同同时段的农业生态系统健康状态的变化趋势; W_i 和 W_{ij} 代表不同层次评价指标权重系数; G 代表不同层次评价指标的得分数值。

在该评价模型中,各指标权重的确定是关键。本研究权重系数的获得利用层次分析法^[25]。该方法是一种定性分析与定量分析相结合的决策方法,按照“分解-判断-综合”的思维特点,把多层次、多准则的复杂问题分解为各个组成因素,并将这些因素按支配关系分组,形成递阶层次结构,通过两两比较的方式确定各层次中诸因素的相对重要性,然后综合判断,确定决定因素的主次相对排序。主要步骤如下:

第一步 通过对每一层指标进行两两成对比较,按照 1~9 级标度的方法(表 2)构造下一层对上一层判断矩阵。

第二步 计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及其正交化特征向量 $P = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$, 得到各元素的权重。

第三步 误差检验。如果决策者或专家判断估计时,有小的误差,必然导致特征值也有偏差。为使根据经验构造的判断矩阵与理论矩阵具有令人满意的一致性,需用相容性指标 $C.I.$ 进行检验,即 $C.I. = \frac{I_{\max} - n}{n - 1} < 0.10$ 就可以认为该判断矩阵所得到的权重向量是可以接受的。

3 区域农业生态系统健康评价的实证分析

山东省禹城市位于东经 $116^{\circ}23' \sim 116^{\circ}45'$, 北纬 $36^{\circ}40' \sim 37^{\circ}12'$, 南北最长处 64.4km, 东西最宽处 28.8km, 总面积 990km²。在地理上属黄河泛滥冲积平原,地势平缓。在气候上属于暖温带季风气候区,四季分明,气候温和,光照充足,年平均降雨量 593 mm,降雨多集中在 6、7、8 月份,呈现春旱、夏涝、晚秋旱的规律。禹城农业生产的资源条件、发展水平及其生态系统特性在我国黄淮海平原具有典型性和代表性;历史上长期受到干旱、洪涝、盐碱和风沙等多种自然灾害的危害,农业生产环境恶劣,建国以来,特别是改革开放后,经过区域农业开发和治理,农业生态系统发生了显著的变化,一方面表现出生产条件明显改善,农业生态系统结构和功能发生了显著变化,生产能力稳定提高;另一方面农业生态环境仍十分脆弱,盐碱、旱涝、风沙等灾害还时有发生,存在潜在威胁,仍然需要加强预防;同时面临农产品需求和产出持续增加与维护资源环境的矛盾,农用化学物品用量不断增加,可能导致潜在生态环境与农畜产品受到污染,人口增加导致水土资源日趋短缺等,都会直接影响到农村社区和农业生态系统的健康状态。在此,以禹城市为研究案例,对上述指标体系中的各个指标进行量化标准赋值。

按照标准值划定指标健康状态的范围及其评判标准,根据禹城市历年农村经济统计资料,将相关数据经过计算整理,禹城市农业生态系统健康评价各指标的得分情况列于表 3。如前所述,由于结构完成性、公平性与公正性、及响应力目前还没有找到比较准确的度量方法,所以在本实例研究中也未得到有效应用。

表 1 区域农业生态系统健康评价指标体系及其评判标准
Table 1 The indicators and their criterion for assessing a regional agro-ecosystem health

基准层 Group	指标层 Indicator	度量层 Measurement	不健康 Un-health	亚健康 Sub-health	健康 Health
			1	5	10
结构特征 Agro-ecosystem structure	资源可供性 Resources availability	人均耕地(hm ²) Farmland per capita	≤0.08	0.08~0.15	≥0.15
		劳均耕地(hm ²) Farmland per labor	≤0.10	0.01~0.30	≥0.30
	资源可取性 Resources accessibility	有效灌溉面积比例(%) Percent of irrigable farmland	≤70	70~90	≥90
		标准化生产环境达标率(%) Percent of condition up to par	≤70	70~90	≥90
	结构多样性 Structural diversity	养殖业占农业比重(%) Percent of livestock value	≤30	30~50	≥50
		经济作物占种植业比重(%) Percent of cash crop area	≤20	20~30	≥30
功能特征 Production performance	耕地生产力 Farmland productivity	耕地粮食产量(kg/hm ²) Grain yield of farmland	≤4500	4500~7500	≥7500
		耕地农业产值(RMB/hm ²) Agricultural value of farmland	≤5000	5000~10000	10000
	生产效果 Effectiveness of production	人均占有粮食(kg) Grain per capita	≤200	200~500	≥500
		农民人均纯收入(RMB) Net income per villager	≤1000	1000~2500	≥2500
		无公害产品比例(%) Products of no social effects of pollution	≤70	70~90	≥90
	生态效率 Ecology efficiency	工业辅助能利用效率(O/I) Fossil auxiliary energy use efficiency	≤2.5	2.5~3.5	≥3.5
		光能利用率(%) Solar energy use efficiency	≤0.3	0.3~0.4	≥0.40
抗逆特征 Resistance to stress	自生产力 Self-dependence	工业辅助能投入(×106J/hm ²) Input of fossil auxiliary energy	≥55000	55000~25000	≤25000
	稳定性 Stability	粮食单产增长率(%) Increase percent of grain yield	≤0	—	>0
		耕地产值增长率(%) Increase percent of agricultural value	≤0	—	>0
	抗灾力 Anti-disaster	旱涝保收面积比例(%) Area of ensure stable yields despite drought and excessive rain	≤50	50~70	≥70
		盐碱地面积比例(%) Proportion of saline and alkaline area	≥25	25~5	≤5

表 2 标度及其描述
Table 2 Pairwise comparison values

标度 Intensity of relative importance	描述 Definition
1	两个元素对于某个性质相同重要 Objectives <i>i</i> and <i>j</i> are of equal importance
3	一个元素比另一个元素稍微重要,即两个元素中稍微偏重于一个 Objective <i>i</i> is weakly more important than <i>j</i>
5	一个元素比另一个元素较强重要,两个元素中较强偏重于一个元素 Objective <i>i</i> is strongly more important than <i>j</i>
7	一个元素比另一个元素强烈重要,即其中一个显示出其主导地位 Objective <i>i</i> is very strongly more important than <i>j</i>
9	一个元素比另一个元素绝对重要,即一个占有绝对主导地位 Objective <i>i</i> is absolutely more important than <i>j</i>
2,4,6,8	两相邻判断的中值,需要有两个相邻判断的折衷 Intermediate values between
倒数 Reciprocal	元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较得判断值,则与 <i>j</i> 比较得判断值 Comparing objective <i>i</i> and objective <i>j</i> give a value <i>a_{ij}</i> , comparing objective <i>j</i> and objective <i>i</i> give a value 1/ <i>a_{ij}</i>

表 3 禹城市农业生态系统健康评价指标权重及得分

Table 3 Weight and score of indicators for assessing agro-ecosystem health of Yucheng County

评价指标 Assessing indicators			1980	1985	1990	1995	2000	
结构特征(0.649) Agro-ecosystem structure	资源可供性(0.637) Resources availability	人均耕地(0.833) Farmland per capita	5	5	5	5	5	
		劳均耕地(0.167) Farmland per labor	10	10	1	1	1	
	资源可取性(0.258) Resources accessibility	有效灌面积比例(0.750) Percent of irrigable farmland	5	5	5	5	10	
		标准化生产环境达标(0.250) Percent of condition up to par	10	10	10	10	10	
	结构多样性(0.105) Structural diversity	养殖业占农业比重(0.833) Percent of livestock value	1	1	5	5	1	
		经济作物占种植业比重(0.167) Percent of cash crop area	1	10	10	5	10	
	功能特征(0.279) Production performance	耕地生产力(0.731) Farmland productivity	耕地粮食产量(0.833) Grain yield of farmland	1	1	5	5	5
			耕地农业产值(0.167) Agricultural value of farmland	1	5	10	10	10
生产效果(0.188) Effectiveness of production		人均占有粮食(0.500) Grain per capita	1	5	5	5	5	
		农民人均纯收入(0.500) Net income per villager	1	1	1	5	10	
生态效率(0.081) Ecology efficiency		工业辅助能利用效率(0.833) Fossil auxiliary energy use efficiency	10	1	5	5	1	
		光能利用率(0.167) Solar energy use efficiency	1	1	1	5	5	
抗逆特征(0.072) Resistance to stress	自生产力(0.105) Self-dependence	工业辅助能投入(1.000) Input of fossil auxiliary energy	10	5	5	1	1	
	稳定性(0.637) Stability	粮食单产增长率(0.167) Increase percent of grain yield	10	10	10	10	10	
		耕地产值增长率(0.833) Increase percent of agricultural value	10	10	10	10	10	
	抗灾力(0.258) Anti-disaster	旱涝保收面积比例(0.500) Area of ensure stable yields despite drought and excessive rain	1	5	5	5	10	
		盐碱地面积比例(0.500) Proportion of saline and alkaline area	1	5	5	5	10	

* 括号内的数为指标权重系数 The numbers within brackets are the weight coefficient of indicators

禹城市农业生态系统健康指数见表 4,从综合健康综合指数来看,从 1980 年至 2000 年,该区域农业生态系统状态由不健康状态经过亚健康状态,目前处在向健康状态的过渡阶段,综合健康指数由 4 上升为 6。其结构特征在由亚健康状态向健康状态过渡中又转变为亚健康状态,是因为资源可供性和结构多样性向不健康状态转变所致;功能特征表现为由不健康过渡为亚健康进一步向健康状态过渡,其中生态效率有向不健康转变的趋势;抗逆特征表现为由亚健康向健康过渡的趋势,而其中自生产力已表现为不健康状态。

4 讨论

指标体系的建立是农业生态系统健康评价的核心,而各个指标的度量方法和标准量化是使评价从定性走向量的关键。本文提出的指标体系、度量方法与标准量化,主要是从农业生态系统的结构和功能演替过程,提供优良生产环境和农产品服务功能,强调人类社会目标导向与区域资源环境演变

表 4 禹城市农业生态系统健康指数

Table 4 Index of agro-ecosystem health of Yucheng County

指标 Indicators	1980	1985	1990	1995	2000
结构健康指数 Index of structure health	5	6	6	6	5
资源可供性 Resources availability	6	6	6	4	4
资源可取性 Resources accessibility	6	6	6	6	10
结构多样性 Structure diversity	1	3	6	5	3
功能健康指数 Index of function health	2	2	5	6	6
耕地生产力 Farmland productivity	1	2	6	6	6
生产效果 Effectiveness of production	1	3	3	5	8
生态效率 Ecology efficiency	8	1	4	5	2
抗逆健康指数 Index of resistance to stress	8	8	8	8	9
自生产力 Self-dependence	10	5	5	1	1
稳定性 Stability	10	10	10	10	10
抗灾力 Anti-disaster	1	5	5	5	10
综合健康指数 Aggregate health index	4	5	6	6	6

的关系角度出发,综合了区域尺度范围内十几项便于操作的指标用于分析评价农业生态系统健康态势,并以山东省禹城市农业生态系统演化与发展为案例,对农业生态系统健康评价指标体系进行了量化实证分析,评价分析结果与实际情况基本相符,说明该指标体系可以用于评价同类型农业生态系统的健康状态。但是,农业生态系统健康评价指标的确定是一个非常复杂的问题。在实践中可能还有其它指标,特别是不同类型和不同层次的农业生态系统,会在选取指标、度量方法与度量标准上存在一定的差异,可根据具体情况进行适当调整;而且各个指标权重系数的确定,也会直接影响评价效果。因此,对于如何探讨适合于不同类型农业生态系统健康评价的指标体系和评价方法,还有必要进一步深入研究。如何从不同时间尺度和空间尺度正确评价农业生态系统的健康状态,仍然是农业生态系统健康今后研究的主要内容和重要方向。

References:

- [1] Matson P A, Parton W J, Power A G, *et al.* Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 1997, **277**(25): 504~509.
- [2] Nielsen N Ole. Management for agroecosystem health: the new paradigm for agriculture. *Proceedings of the Annual Meeting of the Canadian Society of Animal Science*. Vancouver, British Columbia, Canada, 1998. July: 5~8.
- [3] Zhang J E, Xu Q. Prospective of hot problems in contemporary ecology. *Progress in Geography*, 1997, **16**(3): 29~37.
- [4] Rapport D J, Gaudet C, Karr J R, *et al.* Evaluating landscape health: integrating societal goals and biophysical process. *Journal Environmental Management*, 1998, **53**: 1~53.
- [5] Yiridoe E K, Weersink A. A review and evaluation of agroecosystem health analysis: the role of economics. *Agricultural system*, 1997, **55**(4): 601~626.
- [6] John E Ikerd. Assessing the health of agroecosystems: a socioeconomic perspective. 2002, [Http://www.ssu.missouri.edu/faculty/jikerd/paper/otta-ssp.htm](http://www.ssu.missouri.edu/faculty/jikerd/paper/otta-ssp.htm).
- [7] Xu W, Mage J A. A review of concepts and criteria for assessing agroecosystem health including a preliminary case study of southern Ontario. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2001, **83**: 215~233.
- [8] Peden D G. Agroecosystem management for improved human health: Applying principles of integrated pest management to people. *Proceedings of the Annual Meeting of the Canadian Society of Animal Science*. Vancouver, British Columbia, Canada, 1998. July: 5~8.
- [9] Altieri M A. The ecological impacts of transgenic crops on agroecosystem health. *Ecosystem Health*, 2000, **6**: 13~23.
- [10] Bradshaw B, Smit B. Subsidy removal and agroecosystem health. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1997, **64**: 245~260.
- [11] Parkes M, Panelli R. Integrating catchment ecosystems and community health: the value of participatory action research. *Ecosystem Health*, 2001, **7**(2): 85~106.
- [12] Giampietro M. Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, **65**: 201~229.
- [13] Swanton C J, Murphy S D. Weed science beyond the weeds: the role of integrated weed management (IWM) in agroecosystem health. *Weed-Science*. 1996, **44**(2): 437~445.
- [14] Soule J D and Piper J K. *Farming in nature's image: An ecological approach to agriculture*. Island Press, Washington, 1992.
- [15] Okey B W. System approaches an properties, and agroecosystem health. *Journal of Environmental Management*, 1996, **48**: 187~199.
- [16] Howorth L, Brunk C, Jennex D, *et al.* A dual-perspective model of agroecosystem health: system function and system goals. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 1997, **10**(2): 127~152.
- [17] Wang X Y, Shen Z R. Progress of assess method of agroecosystem health. *Journal of China Agricultural University*, 2001, **6**(1): 84~90.
- [18] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z, *et al.* Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(4): 486~490.
- [19] Dumanski J. Criteria and indicators for land quality and sustainable. *ITC*, 1997, (3/4): 216~223.
- [20] Berka C, McCallum D, Wernick B. Land use impacts on water quality: case studies in three watersheds. [Http://www.ire.ubc.ca/ecoresearch/publica3.html](http://www.ire.ubc.ca/ecoresearch/publica3.html) 2001.
- [21] Conway G R. The properties of agroecosystem. *Agricultural Systems*, 1987, **24**: 95~117.
- [22] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. *Ecosystem health new goals for environmental management*. Edited by Robert Constanza, Bryan G. Norton, and Benjamin D. Haskell, Island press, Washington, D. C., Covelo, California, 1992. 239~256.
- [23] Mukhebi A W. Views on agroecosystem health. In: *Agroecosystem health*, ed. N. O. Nielson. Proceedings of an international workshop. University of Guelph, Guelph, Canada, 1994.
- [24] Gallopin G C. The potential of agroecosystem health as a guiding concept for agricultural research. *Ecosystem Health*, 1995, **1**(3): 129~140.
- [25] Alphonse C B. Application of the Analytic Hierarchy Process in Agriculture in Developing Countries. *Agricultural Systems*, 1997, **53**: 97~112.

参考文献:

- [3] 章家恩,徐琪. 现代生态研究的几大热点问题透视. *地理科学进展*, 1997, **16**(3): 29~37.
- [17] 王小艺,沈佐锐. 农业生态系统健康评估方法研究概况. *中国农业大学学报*, 2001, **6**(1): 84~90.
- [18] 孔红梅,赵景柱,姬兰柱,等. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报*, 2002, **13**(4): 486~490.