

# 黄土高原小流域生态系统健康评价指标体系研究

方炫<sup>1,2</sup> 李壁成<sup>1</sup> 赵世伟<sup>1</sup> 刘德林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 小流域是黄土高原地理环境与生态系统的基本单元, 建立健康的小流域生态系统是该区可持续发展的基础。文章在深入理解小流域生态系统健康概念的基础上, 阐述了黄土高原小流域生态系统健康评价体系构建思路与指标选取原则, 并将评价体系分解为活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能和人类健康五个要素, 建立了适于黄土高原小流域生态系统健康评价的指标体系, 以期为黄土高原小流域生态系统健康建设与区域可持续发展提供科学依据。

**关键词:** 生态系统健康; 评价指标体系; 小流域; 黄土高原

## Study on Metrics System for Ecosystem Health Assessment in a Small Watershed Scale on the Loess Plateau in China

FANG Xuan<sup>1,2</sup>, LI Bicheng<sup>1</sup>, ZHAO Shiwei<sup>1</sup>, LIU Delin<sup>1</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling Shaanxi 712100, China;  
2. School of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A small watershed is the basic geographical and ecological unit on the Loess Plateau of China, and healthy ecosystem in a small watershed is the foundation of the sustainable development of this region. In this paper, firstly, the definition of ecosystem health in a small watershed was given, then, the method and principle of the assessment indicator system were discussed, and finally, five factors (including vigor, organization structure, resilience, service functions of ecosystem and human health) were chosen to build an assessment indicator system. This work could provide scientific evidence for building healthy ecosystems and sustainable development of this region.

**Key words:** ecosystem health; assessment indicator; small watershed; Loess Plateau

在全球生态系统健康状况日益恶化的严峻形势下, 生态系统健康评价逐渐成为生态学领域的一个研究热点<sup>[1]</sup>。其中, 健康评价指标体系是近年该领域的重要研究方向, 研究成果几乎涉及地球上所有类型的生态系统<sup>[2]</sup>, 但针对黄土高原区的研究相对较少。目前, 虽有部分学者对黄土高原小流域健康进行了评价, 但多侧重于实例研究<sup>[3]</sup>。适于黄土高原区小流域尺度的生态系统健康评价的指标体系尚未形成统一。

黄土高原是我国乃至全球水土流失最为严重、自然环境最为脆弱的地区之一, 加之长期以来土地利用不合理、植被遭受破坏, 生态系统健康受到严重威胁<sup>[4-5]</sup>。长期的实践和科学研究表明, 小流域是黄土高原水土流失综合治理的基本单元, 健康的小流域生态系统是黄土高原生态环境建设的基础和保证<sup>[6-8]</sup>。因此, 以小流域为单元研究黄土高原生态系统健康, 符合自然和社会经济规律、具有可

操作性, 对黄土高原的生态保护与合理开发具有重要的理论与现实意义。

本文以黄土高原小流域为基本单元, 论述了小流域生态系统健康的概念, 并试图建立较完整的适于小流域尺度的生态系统健康评价指标体系, 以期为黄土高原生态系统健康与可持续发展提供科学依据, 同时为其他具有相似基质的小流域生态系统健康评价提供借鉴。

### 1 小流域生态系统健康

关于生态系统健康, 美国生态学家Rapport认为, 它指一个生态系统所具有的稳定性和可持续性, 即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力, 可以通过活力、组织结构和恢复力三个特征来定义<sup>[9]</sup>。此概念是从生态学角度定义的, 强调生态系统本身自我维持和更新的能力, 适用于一般的生态系统。而作为由自然和人文

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目 (2006BCA01A07)

通讯作者: 李壁成 bcli@ms.iswc.ac.cn

要素共同组成的自然—社会—经济复合系统，小流域生态系统健康的概念，应在此基础上“以符合适宜的目标为标来定义”<sup>[10]</sup>，从人类自身出发强调满足人类社会合理要求的能力。小流域生态系统是介于单一生态系统和流域生态系统之间的特殊尺度。一方面，小流域不是单一的生态系统，它是由不同类型生态系统空间镶嵌而成的地域综合体。另一方面，小流域是流域的子系统，具有相对完整的水文、地貌和生态过程、能够为人类提供丰富的生态系统服务功能等流域生态系统的一些特征；但不能将其看作流域的“缩影”，与流域相比，小流域生态系统自然与社会环境较为均质，生物多样性、种群结构、生物链等生态学特征简单。

因此，我们将小流域生态系统健康的概念理解为：一定时间内，在没有外部物质和能量输入的条件下，小流域内空间镶嵌的各类生态系统及其整体，能够保存关键生态组分与结构且远离疾病，对进化过程中遇到的长期或突发的自然与人为干扰（如洪水、干旱、火灾等）保持弹性和稳定性；同时能够稳定提供人类生存和发展需要的水、土地、森林等自然资源，维持涵养水源、保持水土、净化环境等服务功能，保证社会经济的稳定持续发展和人类群体的健康。简言之，就是在干扰情况下能够保证自然与人类社会经济系统协调、持续、稳定发展的状态。

## 2 黄土高原小流域生态系统健康评价指标体系构建

### 2.1 评价体系构建思路

根据小流域生态系统健康的概念，确定黄土高原小流域生态系统健康评价的尺度特征、内容和指标范畴以把握评价体系的整体框架。该评价是强调土地覆盖/利用格局的小流域景观尺度的评价；评价内容应包括生态系统的结构和功能、生态系统服务功能的提供及人类健康等方面；对应指标应包括物理化学、生态学、社会经济和人类健康等范畴。

黄土高原地处黄河中游及海河上游地区（100° 54' E~114° 33' E、33° 43' N~41° 16' N），属于干旱半干旱季风气候区。该区小流域自然地理特征总体上表现为，热量充足、水热资源与植被生长同步，但降水量少且集中在夏季、植被稀少、水土流失严重；社会经济特征表现为，以农村聚落为主、产业结构简单、社会经济与科技文化发展落后。因此，水分与土壤条件是影响黄土高原小流域生态系统健康的关键自然因子，而农业生产活动和围绕农村经济的土地利用方式则是关键的社会因子。

### 2.2 指标选取原则

#### 2.2.1 系统性原则

黄土高原小流域生态系统是由自然、社会、经济三个子系统相互影响和制约形成的复合系统，选取的指标应全面、综合、有层次地反映系统健康的各类因子。

#### 2.2.2 定性与定量相结合原则

对于无法测量但能够反映生态系统健康特征的要素也应充分考虑，采取定性与定量相结合的方法，实现定性概念的定量化，以确保评价的全面性。

#### 2.2.3 规范化与可比性原则

评价指标的内容与方法必须做到统一和规范，便于不同时期或不同地区生态系统之间进行比较。

#### 2.2.4 可操作性原则

在科学性基础上，指标应简单明确、易于理解、可测可得，数据要便于统计和计算。

### 2.3 构建方法和指标框架

根据评价体系构建思路与指标选取原则，将黄土高原小流域生态系统健康评价指标体系分解为活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能、人类健康等五个要素。其中，前面三个要素用来反映黄土高原小流域生态系统结构和功能的完整性和稳定性。具体而言，活力表征自然、经济、人口再生产能力以及物质循环与能量流动的效率；组织结构代表生态系统的复杂性和多样性；恢复力则表示系统在自然灾害、资源紧张、环境污染等

问题发生后如何将危害减少到最低程度，也就是系统抵抗自然灾害和处理生态环境问题的能力。生态系统服务功能是用来反映黄土高原小流域生态系统满足人类需求的程度，主要体现在提供资源、保持水土、净化环境等方面。人类健康是从人类本身出发对生态系统健康状况的最直接反映，包括人群身体健康和文化素质。根据各个要素的含义选择相应的指标，最终形成黄土高原小流域生态系统健康评

表1 黄土高原小流域生态系统健康评价指标体系

目标层	要素层	指标层	
小流域生态系统健康综合指标	活力	自然生态活力	初级生产力、粮食亩产量
		社会经济活力	人均纯收入、农业产投比、人口自然增长率
	组织结构	自然生态结构	Simpson多样性指数、高功能景观斑块分维数和优势度
		社会经济结构	工副业产值比重、基尼系数
	恢复力	自然生态恢复力	生态弹性度指数、旱涝保收面积比例
		社会经济恢复力	雨水资源利用率、环保资金与人力投入比重
	生态系统服务功能	提供资源	人均水资源占有量、人均耕地面积、人均牧草地面积
		净化环境	农药化肥施用量
	人类健康	保持水土	土壤厚度、土壤有机质含量、土壤侵蚀综合指数
		人群健康	人均期望寿命、传染病发病率
	文化素质	义务教育普及率	

价指标体系(表1)。

#### 2.4 部分指标涵义和获取

在上述黄土高原小流域生态系统健康评价指标体系中,有些常用指标涵义不言而喻,且可通过实地调查或实验获得,这里仅对部分指标涵义和获取方法进行说明。

##### 2.4.1 景观格局指数

景观格局指数是符合小流域尺度特征的生态结构指标。Simpson多样性是反映黄土高原小流域土地覆盖/利用类型的复杂性和多样性的指标。高功能景观斑块是景观中对发挥生态系统功能贡献较大的土地覆盖/利用类型,因而常被用于景观结构指标计算<sup>[11-12]</sup>。高功能景观斑块分维数和优势度分别从形状上、面积与斑块数量比例上反映了黄土高原小流域高功能景观斑块的复杂性和异质性。各景观指数计算公式参见文献<sup>[13]</sup>。

##### 2.4.2 基尼指数

基尼指数是指全部居民收入中用于不平均分配的百分比<sup>[14]</sup>。它能够反映黄土高原小流域收入(贫富)差距的程度,从而反映该生态系统社会经济结构的合理性。其值越大,表示收入差距越大,社会经济结构越不合理。

##### 2.4.3 生态弹性度

生态弹性度是用来反映黄土高原小流域景观水平生态恢复力的一项综合指标。根据不同土地利用类型对生态恢复的贡献和作用,分别赋以不同级别的生态恢复力值,然后得出反映生态恢复力的综合指数(值越大表示恢复力越强):

$$E = \sum_{i=1}^m A_i V_i$$

式中, $E$ 为生态弹性度指数, $V_i$ 为第 $i$ 类土地覆盖/利用类型的生态恢复力值, $A_i$ 为第 $i$ 类土地覆盖/利用类型的面积比重。

##### 2.4.4 旱涝保收面积比例

旱涝保收面积比例反映了农业生态系统对自然灾害的免疫力和抵抗力,对于自然灾害频繁、以农业生产为主的黄土高原小流域而言,是一项重要的生态恢复力指标。

##### 2.4.5 雨水资源利用率

有研究表明,雨水是黄土高原小流域尺度上水资源的唯一来源。因此,雨水资源利用率能够反映水资源紧缺的黄土高原小流域处理该生态问题的能力,是评价其社会经济恢复力的一项不可或缺的指标。它可以用评价区域内人为拦蓄的雨量占降雨量的比例(%)来表示。

##### 2.4.6 土壤侵蚀综合指数

水土流失是黄土高原小流域的重要生态问题。土壤侵蚀综合指数是反映黄土高原小流域土壤侵蚀强度的综合指

标,也是反映该生态系统保持水土能力的一项重要指标,计算方法如下:

$$I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} D_{ij}$$

式中, $I$ 代表土壤侵蚀综合指数; $W_{ij}$ 代表第 $i$ 类第 $j$ 级的土壤侵蚀强度的分级值,分级值越高表示对土壤侵蚀的综合指数的贡献越大; $D_{ij}$ 代表第 $i$ 类第 $j$ 级的土壤侵蚀强度的面积比重<sup>[15]</sup>。

### 3 结语

小流域是黄土高原生态系统的基本单元,是生态系统健康研究较为合适的单元。随着人类对黄土高原生态系统干扰的深入,在区域可持续发展目标的驱使下,黄土高原小流域生态系统健康作为环境管理的方法和目标将越来越被接受。

本文提出了小流域生态系统健康的概念,并根据黄土高原的区域特征,建立了较为完整的评价指标体系,为黄土高原小流域生态系统健康评价提供一般参考。但该评价指标体系的研究涉及领域广泛且还处于摸索阶段,还需要进一步的研究,主要体现在以下几个方面:

- (1) 小流域生态系统健康的概念与内涵还有待于统一认识。科学的定义直接影响着健康标准的确定,进而影响评价结果,最终影响小流域管理和开发的科学决策。
- (2) 本文提出的指标体系具有一般性,而黄土高原不同地区不同时期生态系统健康因子不同,指标体系在实际应用中还应当因地、因时进行调整。
- (3) 作为区域/景观尺度单元,黄土高原小流域的生态系统健康与景观生态学的结合有待于深入研究。
- (4) 小流域是流域的天然子系统,其生态系统健康评价研究应加强与流域尺度的结合。
- (5) 作为宏观尺度的生态系统健康研究,黄土高原小流域生态系统健康评价应注意遥感和地理信息系统等新技术和新方法的应用,快速、适时、有效地提供指标信息。

#### 参考文献:

[1] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13: 397-402.

[2] 官冬杰, 苏维词. 城市生态系统健康及其评价指标体系研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13 (5): 70-73.

[3] 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[J]. 自然资源学报, 2003, 18 (1): 44-49.

[4] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展[M]. 北

(下转39页)



新思维图片

结果不同。这一方面与试验当年冬前充沛的降水量有关，印证了“麦收隔年墒”的说法，另一方面可能与有机肥肥效迟而长的特点有关。

#### 4 结论

旱地条件下合理施肥可以扩大作物根系延伸范围，增强根系综合活力<sup>[10]</sup>。旱地合理施肥对作物的促根效应是“以肥调水，以水促肥”的机理所在<sup>[11]</sup>。本研究中不同施肥处理冬小麦生长指标、光合速率与产量均为：CK和N均最低，其次为NP，有机肥（M、NM、NPM）处理均最高，说明不同施肥处理冬小麦的生长指标（株高、叶面积和生物量）和生理生态指标（光合速率）与其籽粒产量高低有很高的相关性。这是由于合理施肥促进了冬小麦根系生长，使根量增加，扩大作物对土壤深层水分的利用，减少了土壤水分亏缺度，有利于作物地上部的正常生长和发

育，增高了小麦株高和叶面积等指标，改善群体通风透光条件，提高光合作用，为作物后期获得较高的产量打下良好的物质基础。■

#### 参考文献：

- [1] 张少民, 郝明德, 陈磊. 黄土高原长期施肥对小麦产量及土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24 (6) : 85~89.
  - [2] 李科江, 张素芳, 贾文竹, 等. 半干旱区长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学, 1999, 5 (1) : 21~25.
  - [3] 李玉山. 旱作农业作物生产力若干规律性及提高途径[J]. 土壤通报, 1990 (5) : 194~197.
  - [4] 郝明德, 来璐, 王改玲, 等. 黄土高原塬区旱地长期施肥对小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1893~1896.
  - [5] 宇万太, 赵鑫, 张璐, 等. 长期施肥对作物产量的贡献[J]. 生态学杂志, 2007, 26 (12) : 2040~2044.
  - [6] 赵云英, 谢永生, 郝明德. 黄土旱塬小麦长期施肥的产量效应及土壤肥力变化[J]. 西北农业学报, 2007, 16 (5) : 75~79, 88.
  - [7] 曹靖, 胡恒觉. 不同肥料组合对冬小麦水分供需状况的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11 (5) : 713~717.
  - [8] 岳维云, 宋建荣, 张耀辉, 等. 天水旱作农业区膜侧小麦不同施肥水平增产效应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24 (4) : 15~18.
  - [9] 刘一. 施肥对黄土高原旱地冬小麦产量及土壤肥力的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10 (1) : 40~42.
  - [10] 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 111~115.
  - [11] 信乃谏, 侯向阳, 张燕卿. 我国北方旱地农业研究开发进展及对策[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9 (4) : 58~60.
- (上接34页)
- 京: 科学出版社, 1998: 1~15.
- [5] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京: 商务印书馆出版社, 2002: 16~29.
  - [6] 王震洪, 段昌群, 张世彪. 从生态经济观论小流域及小流域综合治理[J]. 生态经济, 1997 (6) : 23~26.
  - [7] 刘国彬, 杨勤科, 郑粉莉. 黄土高原小流域治理与生态建设[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2 (1) : 11~15.
  - [8] 党小虎, 刘国彬, 全斌, 等. 黄土高原生态经济建设若干问题[J]. 生态经济, 2007 (1) : 24~27.
  - [9] Rapport D J. What constitute ecosystem health? [J]. Perspectives Biology and Medicine, 1989, 33: 120~132.
  - [10] Rapport D J, R Costanza, McMichael A J. Assessing ecosystem health [J]. Trends in Ecology and Evolution, 1998, 13: 397~402.
  - [11] 田静毅, 王立新, 王继彬. 小流域生态安全景观指标的提取方法研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14 (5) : 40~42.
  - [12] 刘明华, 董贵华. RS和GIS支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价[J]. 地理研究, 2006, 25 (5) : 930~938.
  - [13] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 56.
  - [14] 袁晓玲, 姚慧丽, 张婷. 基尼系数在东、西部差距分析中的应用[J]. 经济师, 2005 (10) : 128~129.
  - [15] 杨存建, 张增祥, 王思远. 不同环境条件下的土壤侵蚀分析——以重庆市为例[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16 (2) : 71~76.