

内蒙古黄土丘陵沟壑区生态系统健康评价

黄和平^{1, 2}, 杨 劼^{1*}, 宋炳煜¹, 包铁军¹

(1. 内蒙古大学省部共建国家重点实验室培育基地 内蒙古草地生态学实验室, 呼和浩特 010021; 2. 南京大学环境学院, 南京 210093)

摘要:采用指标体系评价法,按自然指标体系,从生态系统活力、组织结构、系统服务功能和土壤健康等方面,以内蒙古黄土丘陵沟壑区为研究对象,分别选择原生植被区、人工恢复治理区、退化未治理区等 3 个样区,对其生态系统健康状况进行分析和评价,提出了适合于该区域的生态系统健康评价指标体系和权重体系,建立了适合于该区域的生态系统健康评价指数、评价模型和指标分级标准。最后,从自然生态学角度,结合研究区的实际情况,对该区域的生态系统健康恢复途径、生态系统管理和可持续发展策略提出了一些具有针对性的建议和措施,并对生态系统健康评价的进一步研究进行了展望。

关键词:黄土高原;内蒙古;生态系统;健康评价;指标体系;可持续发展

文章编号:1000-0933(2005)05-1048-09 **中图分类号:**Q14, S154 **文献标识码:**A

Ecosystem health assessment of the hilly and gully area of Loess Plateau in Inner Mongolia

HUANG He-Ping^{1, 2}, YANG Jie^{1*}, SONG Bing-Yu¹, BAO Tie-Jun¹ (1. The Cultivation Base for the State Key Laboratory-Inner Mongolia Grassland Ecology Laboratory, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China, 2. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1048~1056.

Abstract: Maintenance of ecosystem health is the primary focus of a sound ecological restoration. Yet methods involved in quantifying and assessing the health level remain a challenge to the ecological community. In this study, we used the hill and gully area of the Loess Plateau, Inner Mongolia, where soil and water erosions continue to be responsible for much of the environmental problems in eastern China because of its fragility and long disturbance history. In this study, we developed an assessment method of indicator system (AMIS) based on analytical hierarchy process (AHP), fuzzy mathematics, and the theory of net-hierarchy. At ecosystem or catchment scale, three sample areas of: (1) intact vegetation (i. e., Aguiniao Natural Conservation, 110°45'E, 39°28'N), (2) reconstructed vegetation (Wufendigou Soil and Water Conservation Experimental Area, 111°07'E, 39°45'N), and (3) severely degraded vegetation (Yangquangou Catchment, 111°06'E, 39°45'N) in the Loess Plateau in Inner Mongolia of China were selected to examine ecosystem vigor, organizational structure, service function, and soil health. We applied the AMIS for all three landscapes by categorizing each ecosystem into five health levels. We found that the health index for reconstructed vegetation were at levels of IV, II, IV and III, while those of degraded

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018604);国家自然科学基金资助项目(30060018);内蒙古自治区教育厅重点科研资助项目(ZD9903)

收稿日期:2004-10-13; **修订日期:**2005-02-11

作者简介:黄和平(1968~),男,江西人,博士生,主要从事植被生态学、城市生态学和环境规划与管理研究. E-mail: hphuang2004@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: Jyang@mail.imu.edu.cn

致谢:中国科学院沈阳应用生态研究所曾德慧研究员和美国托莱多大学教授陈吉泉博士对本文给予帮助和修改;内蒙古大学赵一之教授、白学良教授、邵玉琴老师提供指导和部分资料,内蒙古大学赵利清博士也给予帮助,中山大学龚建周博士和内蒙古大学张仲平等同学参与野外工作,在此一并致以诚挚的谢意

Foundation item: The Development Plan of the State Key Fundamental Research of China (No. G2000018604), Natural Science Foundation of China (No. 30060018), The Key Scientific and Researching Program of Educational Agency of Inner Mongolia Autonomous Region (No. ZD9903)

Received date: 2004-10-13; **Accepted date:** 2005-02-11

Biography: HUANG He-Ping, Ph. D. candidate, mainly engaged in vegetation ecology, urban ecology and environmental planning and management. E-mail: hphuang2004@163.com

vegetation were ranked at V, IV, V and IV. Overall, the comprehensive ecosystem health index of reconstructed vegetation was lower than that of intact vegetation but higher than that of degraded vegetation. The health index for reconstructed vegetation was at level III, and that of degraded vegetation was still at level IV. The contributing values were: organization structure > soil health > vigor > service function. Based on our results and assessments, we proposed several management recommendations and methods for restoring the regional ecosystems.

Key words: Loess Plateau; Inner Mongolia; ecosystem; health assessment; indicator system; sustainable development

黄土丘陵沟壑区,是指地表切割破碎、沟壑密度较大、植被覆盖率较低、水土流失严重的黄土低山区。其主要分布在我国黄河的中游和黄土高原的北部地区,面积约 22.74 万 km²,是黄土高原水土流失的主要来源区^[1]。因其恶劣的自然环境条件,自然灾害多发、频发,农林牧业生产长期处于低下水平,其生态系统健康状况受到极大威胁,也是我国生态环境最脆弱的地区之一^[1, 2]。

目前对该区域的研究主要集中在水土流失规律、水土流失综合治理的工程措施及土壤侵蚀系统模型和治理模式、土地利用结构与生态过程、流域植被分析及水分生理生态等方面,并且取得了多项重大成果^[1, 3~6],但对该区域生态系统健康的评价研究尚未见报道。

生态系统健康评价的目的是为了生态恢复与管理,并实现全球或区域生态环境的可持续性。对于受到人类强烈干扰的生态系统来说,要恢复到受干扰前的原始状态是不现实的。生态恢复应以特定区域状况下可实现的最大自然性为依据,以近自然状态为其参考状态,以相对生态完整性为目标^[7]。因此,健康的生态系统不一定是原始的生态系统,但它必须是一个相对完整的生态系统,具有复杂生境异质性特征,是稳定和可持续的,即随时间的进程具有相当的活力并且能维持其组织性及自主性,在外界一定的胁迫下容易恢复^[8]。这是生态系统健康评价的基础^[9]。

目前国内外对生态系统健康评价的研究主要有指标体系的研究,如由 U. N. Environmental Program (UNEP) 召集,1992 年在日内瓦建立的海洋生态系统健康指标体系^[10],并作为优化选择指标应用于生态系统服务和管理^[11]。国内目前在此方面的研究也取得了一些进展,如肖风劲、欧阳华等探讨了森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用^[12],崔宝山、杨志峰以三江平原挠力河流域为例建立了湿地生态系统健康评价的理论与方法,并以其二级支流为评价单元对其评价结果进行了分级排序,有一定的理论和实践价值^[13, 14],郝敦元、高霞等从生态恢复的角度对内蒙古锡林河流域典型草原生态系统健康的植物群落组织力进行了测定^[15]。但上述研究从生态系统健康的角度进行度量的方法和评价体系仍不够系统或完善。

评价生态系统健康更为普遍的方法是对生态系统结构(和功能)整合性的综合指标的辨别,而目前对于构成生态系统健康所必需的标准是什么还未取得广泛的一致性意见。这就表明,从处于受干扰状态下的生态系统行为的比较试验研究的角度来看,一个相对较少的生态系统水平的指标组合足以把那些因人类活动而受到严重干扰的生态系统和基本不受干扰的生态系统区分开来。在实践中,这些指标为判断自然区域的健康状态的变化提供了判别标准^[27]。为此本文采用指标体系评价法^[10],按自然指标体系,从生态系统活力、组织结构、系统服务功能和土壤健康等方面对内蒙古黄土丘陵沟壑区,特别是皇甫川流域不同恢复阶段或不同植被状况的生态系统健康评价进行探讨,以处于皇甫川流域西南侧 7km 处的阿贵庙自然保护区作为原生岛状植被进行参照,并建立一个适合于该区域的生态系统健康指数评价模型,对当地的生态环境建设和可持续发展具有重要的理论指导和实践意义。

1 研究区概况及评价单元的确定

内蒙古黄土丘陵沟壑区系指阴山山脉以南、黄土高原向北延伸至内蒙古自治区境内、鄂尔多斯高原东缘的黄土丘陵地区,处于晋、陕、蒙接壤区。面积 20775km²,主要为砒砂岩分布区,抗蚀能力极低,水土流失严重^[1]。阴山山脉的天然屏障在一定程度上减弱了冬季蒙古冷高压的影响,使气候比较温暖,年均温 5~7℃,≥10℃的积温为 2700~3200℃。年降水量 300~450mm,湿润度 0.3~0.45,属暖温性典型草原和半干旱气候。本氏针茅(*Stipa bungeana*)草原是本地区代表性的地带性草原植被类型。但是,由于垦种历史悠久,天然的本氏针茅草原尚存无几,只在梁顶或残丘上有小面积残留。风蚀作用常常抑制本氏针茅的发育,而唇形科的小半灌木百里香(*Thymus serpyllum*)侵入,形成次生的偏途群落^[16]。

在系统或群落尺度上,本文拟按照退化梯度,以小流域为单元,重点选择 3 个不同植被恢复状态的样区(原生植被区、人工恢复治理区、退化未治理区)进行评价。原生植被区选择的是阿贵庙自然保护区(旗县级),该区是一条与皇甫川流域相邻的完整小流域,处于皇甫川流域西南侧约 7km 的准格尔旗羊市塔镇境内,110°45'E, 39°28'N,平均海拔 1150m,面积 1.23km²。在自然地理地带同属于黄土高原北部沟壑丘陵区,土壤为栗钙土,并以黄土、砒砂岩和风沙土镶嵌分布为特征。地带性植被为本氏针茅+芨芨草(*Artemisia giraldii*)草原。该区由于庙宇的存在而受到地方政府的保护,自然植被保存较好,包括天然油松(*Pinus tabulaeformis*)林、杜松(*Juniperus rigida*)林、山桃(*Prunus davidiana*)林、芨芨草原等植被类型,属原生岛状植被。

人工恢复治理区选择的是准格尔旗海子塔镇以南约 5km 处的五分地沟试验区内的一条完整小流域,即五分地沟,面积约 4.18km²。该区是国家黄土高原 11 个造林示范区之一,位于皇甫川流域两大支流之一——长川中游东岸,111°07'E, 39°45'N, 平均海拔 1130m。土壤主要由三大类型组成,以砒砂岩为母质的栗钙土、风沙土及以黄土为母质的黄绵土和黄土。主要植被覆盖类型有人工油松林、人工杨树(*Populus simonii*)林及沙柳(*Salix psammophyla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)等人工灌木林和本氏针茅、百里香草原等天然植被。

退化未治理区选择的是宁格尔塔西北侧的一条完整小流域(即阳泉沟小流域),该区位于长川中游西岸,与五分地沟试验区隔河相对,111°06'E, 39°45'N, 平均海拔 1160m, 面积 1.82km²。成土条件及地形地貌与五分地沟相似。由于人为活动的强烈影响,又未给予人工治理,植被恢复十分缓慢,主要植被覆盖类型只有稀疏的中间锦鸡儿灌木林、百里香群落等植被类型,乔木林极少见。

2 研究方法

2.1 遥感影像解译及植被格局调查

由记录在高密度磁带 HDTs(High-Density Tapes)上的卫星图像信息数据在遥感图像处理系统中处理输出的 2002 年 ikonos 影像图(4、3、2 波段合成并与 8 波段融合处理,分辨率 1m)进行目视解译,结合地面调查核对。在 GIS 软件支持下,输出各样区植被格局现状图,提取属性数据进行分析。

2.2 群落调查及植物区系调查

于 2002 年和 2003 年两个生长季分别在上述 3 个样区,采取典型抽样的办法选择有代表性的群落类型进行 12 条样线、45 个样地和 187 个样方的调查。具体方法如下:

乔木林 设置 20×20m² 样地,分种量测样地内每株树的胸径、树高、株数、林分郁闭度等,按路线法分别记载林下植被(灌木、草本)各植物种的盖度、高度、多度等特征。其生物量主要根据吴刚等的经验公式(相对生长式)推算而得^[17]。

灌木和小乔木林 选择具有代表性的地段,设置 20×20m² 或 10×10m² 的样地,分种量测样地内每株树的树高、株数、冠幅、枝条数、覆盖度、频度等,按平均冠幅和平均树高得出平均木,剪取有代表性的枝条用以推算枝、叶生物量。

小半灌木及草本层片 按“×”形设置 1×1m² 的样方,分种记录样方内植物的种类组成、覆盖度、高度、株(丛)数等特征。然后全部刈割,用以推算生物量。

对于苔藓(结皮)层的取样,采用样线和样方结合调查的办法,选取有代表性的坡面,从沟底至坡顶顺坡拉一样线,每隔 10m 或 5m 设置 1×1m² 的样方,统计样方内所有苔藓植物种的名称、藓结皮的覆盖度等。然后选取 10×10cm² 覆盖度最高、生长良好的苔藓结皮带土小心铲取,以量测其生物量。

植物标本的鉴定参照《内蒙古植物志》,另外还参照《中国植被》和《内蒙古植被》等文献对这 3 个样区植被的科属种组成、生活型谱和水分生态类型进行划分整理和对比分析。

2.3 土壤侵蚀调查

定性与定量方法相结合,在群落调查的同时估测其土壤侵蚀级,在 GIS 支持下提取面积、坡度、坡长等因子,按美国通用土壤流失预报方程推算年均土壤侵蚀量或土壤侵蚀模数^[3]。

2.4 土壤调查

结合群落调查的同时选择有代表性的地段,与等高线平行按 1×0.5×1m³ 挖取土壤剖面,确定土壤类型,然后按 20cm 一层,分 3 层用环刀取样以测定土壤容重、含水量等,其测定方法分别是环刀法和烘干称重法^[18],另外再每层随机挑取约 250g 土壤样品装入布袋带回,以测定其有机质、全 N、全 P 含量、微生物类群总数量等,其测定方法分别是重铬酸钾比色法、半微量-开氏法、高氯酸-硫酸消解-钼锑抗比色法和平板稀释分离技术法^[19, 20]。

3 生态系统健康判别模型的建立及评价指标标准分级

3.1 生态系统健康评价指标及权重体系的确立

根据生态系统健康评价指标体系确立的有关原则和方法,结合研究区实际情况,运用层次分析法,分为 4 个层次,第 1 层以生态系统健康作为目标层,其下一层为准则层,分为活力、组织结构、服务功能、土壤健康 4 个功能指标,准则层下为指标层,即每一功能指标又可分为若干个指标,再细分下去为分指标层,使得每一指标都可直接测定^[21]。而每一层指标与其下属层次的指标属于完全的包含与被包含的关系,符合巢式等级理论,这样也便于下一级层次指标向上一级层次的整合^[22]。然后运用专家咨询调查的方法^[23],设计评价指标体系结构专家咨询表,通过 Email 或面送等方式于 2003 年下半年向各地的在该领域有所研究和造诣的专家发出 93 份调查表,收回有效问卷 27 份,通过统计分析,得出评价指标及其权重体系(表 1)。

3.2 生态系统健康判别模型的确立

为便于不同属性元素之间和不同系统之间的比较,本文对每一元素或指标作了必要的无量纲化处理,即对每一元素或指

标,都以一定的理想值或参照值进行相对化处理,得出指标相对值向量(D)。然后把指标相对值向量和归一化权重值向量分别相乘,两向量的积整合到上一层所隶属的指标或元素,这样逐层加权整合,直至目标层,最终得出一个能说明整体健康状况的综合指数。公式拟定如下:

$$C = D \times W^T$$

(1)

式中: C 为上一层评价元素或指标 D 的健康评价值; D 为下一层指标相对值向量, $D=[D_1, D_2, \dots, D_n]$; W^T 为下一层指标的归一化权重值向量, $W^T=[W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 。

表 1 内蒙古黄土丘陵沟壑区生态系统健康指标体系结构及权重值

Table 1 The construction of ecosystem health indicator and weight statistic result in hilly and gully area of Loess Plateau in Inner Mongolia									
A 层 (目标层) Layer A (objective layer)		B 层(准则层) Layer B(rule layer)		C 层(指标层) Layer C(indicator layer)			D 层(分指标层) Layer D(vice indicator layer)		
	功能 Function	权重值 Weight	归一化 权重值 Unitary weight	指标 Indicator	权重值 Weight	归一化 权重值 Unitary weight	指标 Weight	权重值 Weight	归一化 权重值 Unitary weight
生态系统健康 Ecosystem health	活力 Vigor	3.8800±1.0132	0.2779	初级生产力 Primary production	1.8800±0.3377	1.0000	乔木林 Arbor woods	2.0400±0.7895	0.2350
							灌木林 Shrub woods	2.4000±0.6455	0.2765
							草地 Grassland	2.3200±0.7483	0.2673
							苔藓(结皮) Moss	1.9200±0.7993	0.2212
	组织结构 Organization structure	3.7200±0.9798	0.2665	群落特征 Community property	2.2538±0.6796	0.3604	植被覆盖度 Vegetation cover	1.8400±0.3742	0.2599
							苔藓植物覆盖度 Moss cover	1.2400±0.5642	0.1751
							物种多样性 Species diversity	2.7600±0.6633	0.3899
							苔藓植物多样性 Moss diversity	1.2400±0.5642	0.1751
				水平结构 Horizontal structure	1.9200±0.8622	0.3070	群落分布格局 Community pattern	1.8000±0.8165	0.4891
							水分生态类群组成 Water ecotype structure	1.8800±1.0536	0.5109
							分层生物量 Layer biomass	1.0200±0.5050	0.2649
							分层覆盖度 Layer cover	1.3100±0.6123	0.3403
	服务功能 Service function	3.1200±1.1299	0.2235	垂直结构 Vertical structure	1.5200±0.5099	1.0000	生活型谱组成 Life form structure	1.5200±0.5099	0.3948
							土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	2.2800±0.8426	1.0000
							腐殖质层厚度 Humus layer depth	3.0800±0.9092	0.3889
							土壤含水量 Soil water content	2.9600±0.8888	0.3737
							有机质含量 Organism content	1.8800±0.6000	0.2374
							全 N 含量 Full N content	1.7200±0.4583	0.5000
土壤健康 Soil health	3.2400±1.3000	0.2321	化学性质 Chemical property	1.9600±0.6758	0.2970	全 P 含量 Full P content	1.7200±0.4583	0.5000	微生物类群数量 Microbe community quantity

根据生态系统健康判别原则和方法,结合研究区实际情况及各样区的具体情况,按照从下往上逐层整合的办法,得出各样区生态系统健康关于活力、组织结构、服务功能、土壤健康等四大功能指标子体系的健康指数,再综合得出各样区的生态系统健康综合指数。其生态系统健康的判别模型或公式如下:

$$HI_i = V_i \times P_v + O_i \times P_o + S_i \times P_s + L_i \times P_l$$

(2)

式中, HI_i 为表示 i 样区生态系统健康指数值,其值在 0~1 之间; V_i 、 O_i 、 S_i 、 L_i 为分别 i 为样区生态系统活力、组织结构、服务功

能、土壤健康的评价指标或健康指数值,其值在 0~1 之间; P_v 、 P_o 、 P_s 、 P_l 为分别为生态系统活力、组织结构、服务功能、土壤健康的归一化权重值; $P_v+P_o+P_s+P_l=1$ 。

3.3 评价指标标准的分级

目前在各类有关生态学方面的评价,特别是在生态系统健康评价中,并没有一个统一的关于评价指标标准分级的方法^[24]。为此,本文在参考了国内外相关研究的有关标准以及本研究区的特殊地理与生态条件,提出一个适合于本研究区的指标标准和追求目标。引用崔保山、杨志峰对湿地生态系统健康评价指标等级确定的方法^[14],本次评价指标标准分为很健康、健康、亚健康、一般病态、疾病 5 级(表 2)。

表 2 生态系统健康指标标准分级表
Table 2 The grade of ecosystem health index standards

指标 Indicators		分级标准 Level standard				
		I	II	III	IV	V
		很健康 Excellent health 0.80~1.00	健康 Health 0.60~0.80	亚健康 Sub-health 0.40~0.60	一般病态 Mobidity 0.20~0.40	疾病 Illness 0.00~0.20
健康指数 Health index						
乔木林生物量	Arbor woods biomass(t/hm ²)	54.53~68.17	40.90~54.53	27.27~40.90	13.63~27.27	0.00~13.63
灌木林生物量	Shrub woods biomass(t/hm ²)	0.52~0.87	0.52~0.69	0.35~0.52	0.17~0.35	0.00~0.17
草地生物量	Grassland biomass(t/hm ²)	0.56~0.70	0.42~0.56	0.28~0.42	0.14~0.28	0.00~0.14
苔藓(结皮)生物量	Moss biomass(t/hm ²)	0.25~0.31	0.19~0.25	0.12~0.19	0.06~0.12	0.00~0.06
植被覆盖度	Vegetation cover(%)	30.33~37.91	22.75~30.33	15.17~22.75	7.58~15.17	0.00~7.58
苔藓植物覆盖度	Moss cover(%)	4.37~5.46	3.28~4.37	2.18~3.28	1.09~2.18	0.00~1.09
物种多样性(种数)	Species diversity	168~210	126~168	84~126	42~84	0~42
苔藓植物多样性(种数)	Moss diversity	58~72	43~58	29~43	14~29	0~14
群落分布格局	Community pattern	0.80~1.00	0.60~0.80	0.40~0.60	0.20~0.40	0.00~0.20
水分生态类群组成	Water ecotype structure	0.80~1.00	0.60~0.80	0.40~0.60	0.20~0.40	0.00~0.20
分层生物量 (t/hm ²) Layer biomass	乔木层 Arbor layer	58.07~72.59	43.55~58.07	29.04~43.55	14.52~29.04	0.00~14.52
	灌木层 Shrub layer	1.24~1.55	0.93~1.24	0.62~0.93	0.31~0.62	0.00~0.31
	草本层 Herbage layer	0.90~1.12	0.67~0.90	0.45~0.67	0.22~0.45	0.00~0.22
	苔藓(结皮)层 Moss layer	0.25~0.31	0.19~0.25	0.12~0.19	0.06~0.12	0.00~0.06
分层覆盖度(%) Layer cover	乔木层 Arbor layer	15.86~19.83	11.90~15.86	7.93~11.90	3.97~7.93	0.00~3.97
	灌木层 Shrub layer	30.82~38.52	23.11~30.82	15.41~23.11	7.70~15.41	0.00~7.70
	草本层 Herbage layer	27.86~34.82	20.89~27.86	13.93~20.89	6.96~13.93	0.00~6.96
	苔藓(结皮)层 Moss layer	4.37~5.46	3.28~4.37	2.18~3.28	1.09~2.18	0.00~1.09
生活型谱组成	Life form spectrum construction	0.80~1.00	0.60~0.80	0.40~0.60	0.20~0.40	0.00~0.20
水土保持效益	Soil and water conservation benefit(%)	100.00~80.00	60.00~80.00	40.00~60.00	20.00~40.00	0.00~20.00
腐殖质层厚度	Humus layer depth(cm)	2.91~3.63	2.18~2.91	1.45~2.18	0.73~1.45	0.00~0.73
土壤含水量	Soil water content(%)	6.27~7.84	4.71~6.27	3.14~4.71	1.57~3.14	0.00~1.57
有机质含量	Organism content(%)	0.551~0.689	0.413~0.551	0.276~0.413	0.141~0.276	0.000~0.138
全 N 含量	Full N content(%)	0.029~0.036	0.022~0.029	0.014~0.022	0.007~0.014	0.000~0.007
全 P 含量	Full P content(%)	0.027~0.034	0.020~0.027	0.013~0.020	0.007~0.013	0.000~0.007
微生物数量	Microbe quantity(×10 ⁴ /g)	1039~11298	779~1039	519~779	260~519	0~260

* 表中群落分布格局、水分生态类群组成、生活型谱组成等指标均是以其综合指数来表示 The pattern of community contribution, water ecotype construction and life form spectrum composition in the table are all expressed by their comprehensive index

4 结果与分析

以生态系统健康指标体系中的 B 层(准则层)为重点,按生态系统活力、组织结构、服务功能、土壤健康等 4 大功能指标子体系的推算结果分别加以分析,然后再综合上述 4 大指标得出各样区的生态系统健康综合指数,集中进行阐述。

4.1 活力

按照公式(2)将表 1 和表 2 中关于活力指标的相关下属指标及其归一化权重值逐层推算,得出各样区关于活力的健康指数(表 3)。

从上表结果中可以看出,以原生植被区关于活力方面的健康指数为 1 对比,人工治理区和退化未治理区关于活力方面的健康指数都非常低,分别为 0.3612 和 0.1969,也就是说按照表 2 的分级标准,它们分别处于一般病态(Ⅳ级)和疾病(Ⅴ级)的水平。这主要是由于人工治理区和退化未治理区的乔木林、灌木林、草地的现存生物量都远低于原生植被区的缘故,特别是乔木林

在退化未治理区极少见,其贡献值几乎为 0,灌木林也占很小的份量。

表 3 各样区生态系统活力的健康指数
Table 3 Health index of ecosystem vigor in three sample areas

样区 Sample area	B 层 Layer B	C 层 Layer C	D 层 Layer D			
	健康指数 Health index	初级生产力 Primary production	乔木林 Arbor woods	灌木林 Shrub woods	草地 Grass land	苔藓(结皮) Moss (soil crust)
原生植被区 Intact vegetation	1.0000	1.0000	0.2350	0.2765	0.2673	0.2212
人工治理区 Reconstructed vegetation	0.3612	0.3612	0.0396	0.1062	0.0554	0.1601
退化未治理区 Degraded vegetation	0.1969	0.1969	0.0006	0.0460	0.0866	0.0638

4.2 组织结构

按前述方法和有关公式,得出各样区生态系统关于组织结构方面的健康值(表 4)。

可以看出,人工治理区关于组织结构方面的健康指数远高于退化未治理区而低于原生植被区,分别处于Ⅱ级(健康水平)和Ⅳ级(一般病态水平)。在人工治理区,其主要贡献来自水平结构,其次是群落特征和垂直结构;退化未治理区的情况也基本相似,但需重点提出的是群落特征的贡献值相对明显偏低,只及人工治理区的一半,原生植被区的四分之一强一点。说明人工治理区经过 20 余年的恢复与治理,群落的空间配置虽仍不尽合理,群落特征也有待优化,但其组织结构方面的综合健康指数仍有较大的提高,处于Ⅱ级的下限边缘,显示出该区植被恢复与建设的成效。

4.3 生态系统服务功能

各样区关于系统服务功能的健康指数见表 5。

在生态系统服务功能的健康指数方面,人工治理区和退化未治理区都远低于原生植被区,分别处于Ⅳ级(一般病态水平)和Ⅴ级(疾病水平)。在人工治理区,虽然经过 20 余年的恢复与治理,水土保持取得了一定的成效,但与原生植被区相比仍有非常大的差距;而退化未治理区域原生植被区的差距就更远。这就充分说明一方面植被恢复和水土保持措施(包括生物措施和工程措施)对于水土保持、缓解侵蚀等功能具有一定的促进作用;另一方面由于频繁的人类扰动,如不合理的农林牧业生产活动以及土地利用方式的改变,加上该流域特有的基质特性,生态系统为人类提供持续而稳定的服务功能就很难得到保证。

4.4 土壤健康

各样区关于土壤健康方面的健康指数见表 6。

从表中结果可以看出,人工治理区土壤健康指数高于退化未治理区而远低于原生植被区,分别处于Ⅲ级(亚健康水平)和Ⅳ级(一般病态水平)。在人工治理区,其贡献值主要来自化学性质和生物学性质,物理性质的贡献值最小;退化未治理区更是如此。这说明人工治理区经过 20 余年的恢复与治理,土壤健康状况有了一定程度的改善,特别是植被恢复对生境条件的改善,使得其物理性质和生物学性质相比退化未治理区有了较大程度的提高;而退化未治理区由于植被尚未得到恢复,生境条件也未得到改善,使得其土壤健康方面的综合健康指数,尤其是物理性质和生物学性质的健康指数一直处于较低水平。

4.5 生态系统健康综合指数分析

表 4 各样区关于组织的健康指数推算表

Table 4 Health index of organizational structure in three sample areas

样区 Sample area	B 层 Layer B	C 层 Layer C		
	健康指数 Health index	群落特征 Community characteristics	水平结构 Horizontal structure	垂直结构 Vertical structure
原生植被区 Intact vegetation	1.0000	0.3604	0.3326	0.3070
人工治理区 Reconstructed vegetation	0.6100	0.2082	0.2317	0.1702
退化未治理区 Degraded vegetation	0.3938	0.1078	0.1732	0.1127

表 5 各样区关于生态系统服务功能的健康指数推算表

Table 5 Health index of ecosystem service function in three sample areas

样区 Sample area	B 层 Layer B	C 层 Layer C	D 层 Layer D
	健康指数 Health index	缓解侵蚀 Diminish erosion	土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus
原生植被区 Intact vegetation	1.0000	1.0000	1.0000
人工治理区 Reconstructed vegetation	0.2142	0.2142	0.2142
退化未治理区 Degraded vegetation	0.0622	0.0622	0.0622

表 6 各样区关于土壤健康指数推算表

Table 6 Health index of soil in three sample areas

样区 Sample area	B 层 Layer B	C 层 Layer C		
	健康指数 Health index	物理性质 Physical	化学性质 Chemical	生物学性质 Biological
原生植被区 Intact vegetation	1.0000	0.3576	0.2970	0.3454
人工治理区 Reconstructed vegetation	0.5133	0.1428	0.1752	0.1953
退化未治理区 Degraded vegetation	0.3885	0.0815	0.1708	0.1362

综合上述 4 大功能指标,再进一步整合,仍按前述方法和有关公式,得到各样区关于生态系统的综合健康指数值(表 7)。

从表中结果可以看出,人工治理区生态系统健康综合指数高于退化未治理区而远低于原生植被区,分别处于Ⅲ级(亚健康水平)和Ⅳ级(一般病态水平)。在人工治理区,其贡献主要来自组织结构,其次是土壤健康和活力,来自服务功能的贡献值最小,退化未治理区与其基本一致。说明一方面经过 20 余年的恢复与治理,由于植被的逐渐恢复以及相应的对生境条件的改善,使得人工治理区的生态系统综合健康指数有了一定程度的提高,显示出该区多年治理的成效,特别是在活力与组织结构方面,与退化未治理区有了显著的提高;另一方面,由于强烈的人类扰动,如频繁的农林牧业生产活动及土地利用方式的改变,植被覆盖面积所占的比重仍然偏小,群落类型的配置结构仍不尽合理,生态系统健康的各方面功能指标,特别是活力、服务功能和土壤健康等方面与原生植被区相比仍有较大的差距,这一点在退化未治理区表现得尤为明显。

表 7 各样区生态系统健康综合指数推算表

Table 7 Ecosystem health comprehensive index in three sample areas

样区 Sample area	A 层 Layer A		B 层 Layer B						
	健康指数 Health index HI	健康指 数 HI	活力 Vigor	组织结构 Organization structure		服务功能 Service function		土壤健康 Soil health	
			加权值 Added weight value	健康指 数 HI	加权值 Added weight value	健康指 数 HI	加权值 Added weight value	健康指 数 HI	加权值 Added weight value
			健康指 数 HI	健康指 数 HI	健康指 数 HI	健康指 数 HI	健康指 数 HI	健康指 数 HI	健康指 数 HI
归一化权重值 Unitary weight			0.2779		0.2665		0.2235		0.2321
原生植被区 Intact vegetation	1.0000	1.0000	0.2779	1.0000	0.2665	1.0000	0.2235	1.0000	0.2321
人工治理区 Reconstructed vegetation	0.4299	0.3612	0.1004	0.6100	0.1626	0.2142	0.0479	0.5133	0.1191
退化未治理区 Degraded vegetation	0.2637	0.1969	0.0547	0.3938	0.1049	0.0622	0.0139	0.3885	0.0902

5 结论与讨论

5.1 结论

通过对原生植被区、人工治理区和退化未治理区的一系列功能指标的分析研究,可以得到以下结论:

(1)从理论和方法上,结合内蒙古黄土丘陵沟壑区特别是所选定的 3 个样区的实际情况,本文在评价指标体系、权重体系和评价模型的建立及指标分级标准的划分上作了个初步的尝试,为今后该领域的深入研究提供了一个可供参照的雏形。

(2)从活力、组织结构、服务功能、土壤健康等四大功能指标的分析结果来看,人工治理区和退化未治理区的健康指数均有所波动,其中人工治理区分别处于Ⅳ级、Ⅱ级、Ⅳ级和Ⅲ级,而退化未治理区均低于人工治理区,分别处于Ⅴ级、Ⅳ级、Ⅴ级和Ⅳ级。

(3)从总体上来看,人工治理区的生态系统健康综合指数仍低于原生植被区而高于退化未治理区,处于Ⅲ级,即亚健康水平,而退化未治理区仍处于Ⅳ级,即一般病态水平。而且它们的贡献值大小顺序均是:组织结构>土壤健康>活力>服务功能。

5.2 讨论

基于以上分析和结论,本文提出以下几点看法以供讨论:

(1)人工治理区经过 20 余年的恢复与治理,由于植被得到恢复和重建,其生态环境的保护和建设取得了一定的成效,但由于农、林、牧产业结构调整上的重重阻力以及后续管理上的滞后,使得该样区的土地利用/覆盖方式及配置比例上仍存在较大的缺陷。因此,如何调整各种群落类型的配置比例,增加适应当地的乔、灌、草植物种特别是灌木树种的数量和质量,提高植被覆盖的面积,加强后续管理,进而提高生态系统的活力或生产力,仍是一个十分紧迫的任务。

(2)植被恢复和水土保持措施(包括生物措施和工程措施)对于水土保持、缓解侵蚀等服务功能具有显著的促进作用,但在人工治理区和退化未治理区其贡献值却最小。对此,本文认为一方面应在植被格局上以原生植被区的基本稳定的植被格局为参照,在群落类型的搭配,特别是在分层生物量和分层覆盖度上进一步优化其配置比例,以发挥其最大效益的水土保持功能;另一方面,应尽量减轻人类干扰和破坏,进一步退耕还林还草,以从源头上减缓侵蚀动力,增加土壤固着性,促进土壤(苔藓)结皮的形成和植物群落的进展演替,从而最大限度地减小水土流失,增强生态系统服务功能。

(3)土壤的退化相对于植被的退化具有滞后效应,这对于植被的恢复和重建腾出了一定缓冲时间。但同时由于人类对生态环境的强烈扰动,在农牧业生产活动中施用化肥、农药等,使得土壤中的营养成分如 N、P 等保持较高的水平,而土壤有机质的转化明显加快,腐殖质层也难以形成,明显阻碍了土壤健康的恢复,这一点在退化未治理区表现得尤为明显;另一方面,由于植被破坏导致的水土流失必然伴随着土壤养分和有机质的流失,因而当超出其缓冲时间后,势必会对当地的生态系统造成毁灭性的灾难。

(4)生态系统健康一般可通过对活力、组织结构和恢复力的测定来进行评价^[21]。从自然系统、社会经济和人类健康等方面的应用出发,生态系统健康的评价指标又包括活力、组织结构、恢复力、系统服务的维持、管理的选择、减少投入、对相邻系统的危害和人类健康影响等八个方面^[26]。对于有些指标如活力、组织结构等,最直观、也最容易测定,但对于其它指标,如恢复力,由于时间尺度及相关信息难以把握,如多长时间才能较好地度量生态系统的恢复力?又如水热条件的变化在多大程度上影响生物群落的演替和恢复?这些均是今后需要深入研究的课题。

(5)生态系统健康评价及其指标体系的确定是个非常复杂的问题。生态类型的不同会导致选取关键指标和标准的差异。本文所确定的指标体系及其一系列指标只对内蒙古黄土丘陵沟壑区,特别是皇甫川流域的植被恢复和重建及其生态系统管理具有指导作用,而对该流域所处的典型暖温带草原区的其它流域仅具有参考价值。因此,继续在该区域和其它典型流域或地区对其生态系统健康指标进行观察、采样、分析、丰富和完善,是该领域今后需要深入研究的重要课题。

References:

- [1] Dixon Fu B J, Chen L D, Qiu Y, et al. *The Framework of Land Utilization and Ecologic Process in the Hilly and Gully of Loess Plateau*. Beijing: Commerce Press, 2002. 16~29.
- [2] Wu Q X, Yang W Z. *Vegetation Construction and Sustainable Development of the Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1998. 1~15.
- [3] Jin Z P, Shi P J, Hou F C, et al. *The Soil Erosion Systematic Model and Harness Mode in Huangfuchuan Watershed of the Yellow River*. Beijing: Ocean Press, 1992. 1~114.
- [4] Yang J, Gao Q Z, Li G Q, et al. Study on Dynamics of Vegetation in Huangfuchuan Watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(3): 41~43.
- [5] Yang J, Gao Q Z, Li G Q, et al. A study on the water ecology of dominant artificial shrubs in Huangfuchuan watershed. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(1): 87~94.
- [6] Huang H P, Yang J. Contrasting Study on Improvement Region and Intact Vegetation Region in Huangfuchuan Watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(6): 125~128.
- [7] Bundi U, Peter A, Frutiger A, et al. Scientific base and modular concept for comprehensive assessment of streams in Switzerland. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 477~487.
- [8] Costanza R. Toward an operational definition of health, In: Costanza R, Norton B, Haskell B eds. *Ecosystem Health-New Goals for Environmental Management*. Washington, D. C: Island Press, 1992. 6~23.
- [9] Luo Y C, Zhou Z X, Sun Y, et al. Assessment methods of watershed ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8): 1606~1614.
- [10] Kong H M, Zhao J Z, Yao L Z, et al. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2002, **13**(4): 486~490.
- [11] Rapport D J. Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1995, **4**(2): 97~105.
- [12] Xiao F J, Ou Y H, Fu B J, et al. Forest Ecosystem Health Assessment Indicators and Application in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(6): 803~809.
- [13] Cui B S, Yang Z F. Establishing an Indicator System for Ecosystem Health Evaluation on Wetlands I. A Theoretical Framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(7): 1005~1011.
- [14] Cui B S, Yang Z F. Establishing an Indicator System for Ecosystem Health Evaluation on Wetlands II. An Application. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(8): 1231~1239.
- [15] Hao D Y, Gao X, Liu Z L, et al. Determination of plant community organization on steppe ecosystem health evaluation in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(8): 1672~1678.
- [16] Editorial Committee of Inner Mongolia Plant Annals. *Inner Mongolia Plant Annals (Second Version) (The first volume)*, Hohhot: People Press of Inner Mongolia, 1998. 155~177.
- [17] Wu G, Feng Z W. Study on the social characteristics and biomass of the Pinus tabulaeformis forest systems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8): 1606~1614.
- [18] WANG S Y. Analysis on Change of Physical Characteristics of Degraded Wetland Soils in Sanjiang Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, **18**(3): 170~174.
- [19] Zhang J B, Song C C. Effects of Different Land-use on Soil Physical-chemical Properties in the Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, **35**(3): 371~373.

- [20] Li W, Yu L J, Zhou P P, *et al.* Preliminary Study on Soil Microbial Ecological Effect in Karst Areas of Southwest China——A case of the Yajikarst experimental Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, **18**(3): 129~132.
- [21] Wang J H, Guo H C, Richard D, *et al.* Assessment of Tourism Resources in the Ruto Area of Tibet; Based on an Analytic Hierarchy Process. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*. 2004, **40**(2): 287~295.
- [22] Wu J G. *Landscape Ecology——Pattern, Process, Scale and Hierarchy*, Beijing: Higher Education Press, 2000. 73~94.
- [23] Gao J X. *Exploring of Sustainable Development Theory——Theory, Method and Application of Ecological Carrying Capability*, Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2001. 60~63.
- [24] Ma X H, Liu X T. Analysis on Status and Assessment Method of Eco-environmental Quality in Chinese Wetland. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, **17**(supp): 401~408.
- [25] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Tree*, 1998, **13**(10): 397~402.
- [26] Rapport D J, Costanza R, Epstein P, *et al.* *Ecosystem Health*. Blackwell Science, Oxford, U K, 1998. 1~5.
- [27] Rapport D J. What Constitutes Ecosystem health? *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, **33**(1): 120~132.

参考文献:

- [1] 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. 北京:商务印书馆,2002. 16~29.
- [2] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京:科学出版社,1998. 1~15.
- [3] 金争平,史培军,候福昌,等. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式. 北京:海洋出版社,1992. 1~114.
- [4] 杨劼,高清竹,李国强,等. 内蒙古皇甫川流域植被空间动态变化分析. 水土保持学报,2001, **15**(3): 41~43.
- [5] 杨劼,高清竹,李国强,等. 皇甫川流域主要人工灌木水分生态的研究. 自然资源学报,2002, **17**(1): 87~94.
- [6] 黄和平,杨劼. 皇甫川流域治理区与原生植被区植物多样性比较研究. 水土保持学报,2003, **17**(6): 125~128.
- [9] 罗跃初,周忠轩,孙轶,等. 流域生态系统健康评价方法. 生态学报,2003, **23**(8): 1606~1614.
- [10] 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.
- [12] 肖风劲,欧阳华,傅伯杰,等. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用. 地理学报,2003, **58**(6): 803~809.
- [13] 崔宝山,杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I. 理论. 生态学报,2002, **22**(7): 1005~1011.
- [14] 崔宝山,杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例. 生态学报,2002, **22**(8): 1231~1239.
- [15] 郝敦元,高霞,刘钟龄,等. 内蒙古草原生态系统健康评价的植物群落组织力测定. 生态学报,2004, **24**(8): 1672~1678.
- [16] 内蒙古植物志编辑委员会. 内蒙古植物志(第二版)(第一卷). 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1998. 155~177.
- [17] 吴刚,冯宗炜. 中国油松林群落特征及生物量的研究. 生态学报,1994, **14**(4): 415~422.
- [18] 王世岩. 三江平原退化湿地土壤物理特征变化分析. 水土保持学报,2004, **18**(3): 170~174.
- [19] 张金波,宋长春. 三江平原不同土地利用方式对土壤理化性质的影响. 土壤通报,2004, **35**(3): 371~373.
- [20] 李为,余龙江,周蓬蓬,等. 西南岩溶区土壤微生物生态作用的初步研究——以桂林丫吉村岩溶试验场为例. 水土保持学报,2004, **18**(3): 129~132.
- [21] 王吉华,郭怀成, Richard Dawson, 等. 层次分析法在西藏日土地区旅游资源评价中的应用(英文). 北京大学学报(自然科学版),2004, **40**(2): 287~295.
- [22] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京:高等教育出版社,2000. 73~94.
- [23] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用. 北京:中国环境科学出版社,2001. 60~63.
- [24] 马学慧,刘兴土. 中国湿地的生态环境质量的现状和评价方法的分析研究. 地理科学,1997, **17**(supp): 401~408.