

人为干预对石漠化治理过程中生态系统健康的影响

陈圣子^{1,2}, 周忠发^{1,2}, 闫利会^{1,2}

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001)

摘要:人为干预是推动生态系统正向演替的动力,探索人为干预作用于生态系统的影响机制对退化生态系统的改善具有重大意义。以花江石漠化综合治理示范区为例,采用 GIS 空间分析方法,探索了 2000—2010 年石漠化治理过程中生态系统健康演变特征,进一步探讨了人为干预对石漠化治理过程中生态系统健康的影响。结果表明:(1) 石漠化治理过程中生态系统健康整体上呈改善趋势,病态、不健康和亚健康等级相互转换最为激烈;其中亚健康等级转移最为明显,占总转移面积的 38.05%;(2) 生态系统健康变化呈时空分异特征,生态系统健康不变区面积所占总面积比例最大,为 66.75%,遍布花江示范区绝大部分区域,生态系统健康持续好转区主要分布在石漠化综合治理的村组,局部人为干扰强烈地区出现生态系统恶化或反复多变;(3) 不同石漠化综合治理工程对生态系统健康的影响不同,其改善比例依次为:封山育林>坡改梯>经果林>水保林>防护林>人工种草。

关键词:喀斯特石漠化; 人为干预; 生态系统健康; 治理过程; 斑块

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0213-07

Influence of Human Intervention on Ecosystem Health in the Karst Rock Desertification Controlling Process

CHEN Shengzi^{1,2}, ZHOU Zhongfa^{1,2}, YAN Lihui^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. The State Key

Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: Human intervention is the driving force to promote the positive succession of ecological system. To explore the mechanism of human intervention to the ecosystem has the great significance for the improvement of the degraded ecosystem. Taking the demonstration areas of the rock desertification integrated management in Huajiang of Guizhou as an example, using GIS spatial analysis method, we investigated the trend of the ecosystem health evolvement of karst rock desertification controlling process from 2000 to 2010, and deeply explored the main factors influencing the ecosystem health evolvement of karst rock desertification controlling process. The results show that: (1) the ecosystem health presented a trend of improvement in the process of rocky desertification control, Conversion between the morbid, unhealthy and sub-health levels was very intense, among them, the most significance is the level of sub-health, which accounted for 38.05% of the total transfer area; (2) the changes of ecosystem health showed spatial and temporal variation characteristics, the unchanged region of ecosystem health widely distributed in the Huangjiang demonstration area, accounting for 66.75% of the total area, continuous improvement area of ecosystem health mainly distributed in the villages where the rocky desertification control project was carried out, ecosystem health appeared deterioration or repeated variation in the local strong human disturbance region; (3) the influences of different rocky desertification comprehensive treatment projects on ecosystem health are different, the improvement ratio follows the order: closed forest>slope ladder>planting economic fruit trees>forest for soil and water conservation>protection forests>artificial grass.

Keywords: karst rock desertification; human intervention; ecosystem health; controlling process; plaque

收稿日期:2015-09-13

修回日期:2015-10-09

资助项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题“人为干预下喀斯特山地石漠化的演变机制与调控”(2012CB723202);贵州省重大应用基础研究项目“喀斯特石漠化生态修复及生态经济系统优化调控研究”(黔科合 JZ 字[2014]200201);国家自然科学基金青年项目“喀斯特峰丛洼地地貌形态耦合模式及机制研究”(41301504);2012 年贵州省国际国际合作计划“不同生态恢复措施干预下喀斯特石漠化演变及调控研究”[黔科合外 G 字(2012)7022 号]

第一作者:陈圣子(1991—)女,湖南祁阳人,硕士研究生,主要从事 GIS 与生态环境。E-mail:shengzi25925@163.com

通信作者:周忠发(1969—)男,贵州遵义人,教授,博士生导师,主要从事喀斯特生态环境研究。E-mail:fa6897@163.com

石漠化已成为我国西南喀斯特山区实现可持续发展的主要障碍,人类不合理的经济活动使较为敏感的喀斯特生态系统更加脆弱。近年来,西南地区喀斯特石漠化在党中央、国务院的高度重视下,石漠化地区实施重大生态修复工程,增强生态产品生产能力,推进石漠化、水土流失综合治理,石漠化综合治理所产生的生态效益也日益显著。越来越多生态环境领域的专家和学者日益关注人类活动对生态系统的影响机制和作用规律,维护区域社会经济与生态环境的可持续发展。20 世纪 80 年代以来,由于全球气候变化和人和地矛盾日益突出,生态系统健康研究备受人们关注,国内外研究主要集中于相关概念、研究尺度和评估研究等方面的探讨,生态系统健康评估逐渐应用于森林^[1]、湿地^[2-3]、流域^[4-5]、消落带^[6]、农业^[7]、矿区^[8]、城市^[9]等自然生态系统中。Schaeffe 等^[10]首次从测度的角度探讨了生态系统健康。David 等^[11]从活力(Vigor)、组织(Organization)和恢复力(Resilience)三个方面研究生态系统健康。“水生生态系统健康与管理协会”,从整体性、系统性和综合性角度探讨保护、规划和管理全球的水生资源健康等问题。“国际生态系统健康学会”(International Society for Ecosystem Health,简称 ISEH)在全球展开了生态系统健康的基本理论与方法的研究,集中探讨“人与生态系统关系、生态健康评估、生态系统健康政策等”。“千年生态系统评估”(Millennium Ecosystem Assessment,简称 MA)从生态系统与人类福祉的联系来认识和研究生态系统健康和可持续发展战略。

生态系统具有动态演变的特征,而目前多数研究为某一时间的静态研究,静态研究很难发现生态系统健康的变化趋势及规律。建立一个完整的监测网络并对其进行诊断及预测,是生态系统健康诊断的一个重要方面。喀斯特石漠化生态系统在众陆地生态系统中较为敏感^[12],研究主要集中在干扰生态系统^[13-15]与退化生态系统的恢复重建^[16-17],在喀斯特石漠化生态系统研究中,人类活动是影响生态系统变化的重要因素。本文运用 3S 技术,通过获取 2000—2005—2010 年的遥感影像数据、社会经济调查数据和基础地理数据,以花江示范区为例,对石漠化治理过程中的生态系统进行长期的定量研究,进一步发现石漠治理过程中生态系统健康的变化趋势及规律,并运用 GIS 空间分析方法分析人为干预对石漠化治理过程中生态系统健康的影响,探索出喀斯特石漠化治理过程中生态系统健康的时空动态变化规律及人为干预对生态系统健康变化的影响,从而更好地改善喀斯特石漠化地区的生态系统,对西南喀斯特地区社会经济可持续发展具有重要的意义。

1 研究区概况

关岭—贞丰花江石漠化综合治理示范区是喀斯特干热河谷生态环境的典型代表,位于贵州西南部,关岭县与贞丰县之间的北盘江花江峡谷两岸,105°36′30″—105°46′30″E,25°39′13″—25°41′00″N。辖北盘江镇的擦尔岩、云洞湾、水淹坝村和板贵乡的木工、三家寨、孔落箐、坝山村共 7 个行政村以及花江镇五里村的法郎、干耳盘 2 个村民组。示范区总面积 5 161.65 hm²,结合实地调查统计得出,2013 年,示范区人口达 9 030 人,主要分布在擦尔岩、云洞湾、三家寨、木工等地;地势起伏大,相对高差 1 000 m,年均温 18.4℃,年均降水量 1 100 mm;土壤以石灰土为主,表现出连续性极差的特点;喀斯特地貌极为发育,地表破碎,以中—强度石漠化为主,石漠化面积 1 351.99 hm²,占示范区喀斯特总面积的 29.79%^[18]。在九五、十五、十一五期间,构建了喀斯特高原峡谷中—强度石漠化环境生态建设循环经济综合治理模式与技术集成,通过开展坡耕地综合治理模式、特色经济林果产业发展模式和庭园生态经济发展模式等,极大改善了示范区内社会经济和生态环境。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

遥感影像为 2000 年、2005 年和 2010 年的 ETM, TM, ALOS 遥感影像。首先将多光谱数据和全色数据进行正射校正,然后进行单波段影像合成假彩色影像,进一步进行数据融合和影像镶嵌,最后通过花江示范区边界矢量层裁剪得到各年份的遥感影像;气象数据来源于贵州省气象信息中心和安置在花江示范区的便携式自动气象站,利用 ArcGIS 的空间插值工具,得到气象栅格数据;社会经济与人文数据来源于典型农户的追踪调查;地貌与岩性数据(1:5 万)来源于关岭—贞丰地区区域水文地质图(图幅编号为:G-48-XX II);坡度(1:1 万)来自区域地形图。石漠化综合治理工程数据来源于《点石成金——贵州石漠化治理技术与模式》和实地调查补充数据。

2.2 诊断与分析方法

诊断指标。喀斯特石漠化生态系统健康是一个区域复合生态系统,结构复杂、层次多变、子系统之间既有相互作用,又有相互间的输入和输出^[19-20]。为满足指标体系的完备性、针对性原则和数据的可获得性,从生态环境支撑系统、资源环境支撑系统和社会经济支撑系统三方面选择 15 项诊断指标,运用层次

分析法并结合专家咨询确定权重,根据影响石漠化地区生态系统健康的程度差异,结合专家意见,分级量化不同的诊断因子,并赋予一定等级指数(表 1),使整个诊断指标体系的量化值无量纲化。

表 1 石漠化地区生态系统健康诊断指标体系、权重和分级标准

指标层	权重	诊断函数分值,评判标准,标准分级				
		9,Ⅰ级,很健康	7,Ⅱ级,健康	5,Ⅲ级,亚健康	3,Ⅳ级,不健康	1,Ⅴ级,病态
海拔/m	0.0218	500~650	650~850	850~1050	1050~1250	1250~1400
坡度/(°)	0.0315	<8	8~15	15~25	25~35	>35
年降水量/mm	0.0392	1300~1400	1200~1300 >1400	1100~1200	1000~1100	<1000
年平均气温/℃	0.0297	<16	16~17	17~18	18~19	>19
土地利用	0.0978	有林地、 河流水面	灌木林地、 草地、水田	旱地、园地	住宅用地、 交通运输用地	采矿用地、 裸岩石砾地
林草覆盖指数	0.0899	>75	60~75	45~60	30~45	<30
景观多样性指数	0.0699	>2.5	2.5~2	<2	—	—
水土流失强度	0.0848	无侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀
石漠化程度	0.0943	非喀斯特、 无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	强度、极强度 石漠化
垦殖系数	0.0512	<10	10~20	20~35	35~50	>50
石漠化治理工程	0.1398	—	封山育林水保林	经果林防护林	坡改梯人工种草	无工程区
人均 GDP/元	0.0345	>4500	3500~4500	2500~3500	1500~2500	<1500
人口密度/(人·km ⁻²)	0.0641	<100	100~150	150~200	200~250	>250
高中及高中以上人口数/人	0.0321	>25	20~25	15~20	10~15	<10
人为干扰度	0.1194	无干扰区<0.1	轻度干扰 0.1~0.39	中度干扰 0.4~0.59	强度干扰 0.6~0.79	极强度干扰 0.8~1

注:表格整理自参考文献^[21]。

生态系统健康诊断。立足于喀斯特石漠化生态系统健康要素以及各要素间的相互关系^[22],为定量诊断石漠化地区生态系统健康状况,运用多级加权求和的方法并通过石漠化生态系统的健康指数(FEHI)来表达,其诊断模型为:

$$FEHI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} K_{ij}$$

式中:FEHI——石漠化地区生态系统健康诊断综合指数;*m*——诊断组指标数;*n*——每诊断指标组下指标种指标数;*W_{ij}*——指标权重;*K_{ij}*——第*j*指标第*i*样本原始数据标准化后的值。

本文将 GIS 空间分析方法运用于人为干预与石漠化治理过程中生态系统健康状况定量研究,探讨人为干预对生态系统健康的影响。以生态系统健康的 15 个诊断指标和总生态系统健康结果共 16 个测评指标为数据层,根据区域特征和数据的可获取性,选取石漠化综合治理工程为人为干预数据层,进行 GIS 空间分析。

3 结果与分析

3.1 生态系统健康类型转移分析

2000 年、2005 年、2010 年的花江示范区生态系统

健康诊断结果如图 1 所示。总体上看,花江示范区生态系统健康在 2000—2010 年期间呈现出好转趋势。很健康的区域不存在;健康的区域持续上升了 4.48%;亚健康的区域持续上升了 10.62%。另一方面,不健康的区域所占面积比例呈明显下降趋势,所占比例由 2000 年的 40.42%下降到 2 010 的 34.79%,病态的区域则由 2000 年的 22.56%下降到 2010 年 13.09%。这表明 2000—2010 年间花江示范区生态系统健康状况有缓慢改善的趋势,但整体上仍不容乐观。

为了解不同生态系统健康各等级相互转化的具体情况,运用 ArcGIS 10.1 软件对 2000 年、2005 年和 2010 年花江示范区生态系统健康数据(附图 3)进行空间统计分析,经处理得到生态系统健康转移矩阵(表 2)。

2000—2005 年花江示范区生态系统健康等级发生转换的面积共有 1 656.9 hm²,占示范区总面积的 32.35%。其中以病态、不健康和亚健康的相互转换最为激烈;5 a 内,不健康和亚健康相互转换面积最大,为 855.1 hm²,占总转化面积的 52.6%,其余各生态系统健康等级的转换程度比较微弱。主要是由于近些年封山育林、防护林、坡耕地等石漠化综合治理

措施的治理效果,改善了花江示范区的生态环境,缓解了人地矛盾,其余各生态系统健康等级的转换比较微弱,但是病态等级也有 2.3 hm² 转化成健康等级,生态系统健康演变速度不会如此迅速,究其原因这是由于居民用地、工矿用地、交通用地和部分坡改梯工程实施造成的,改变原本的土地利用类型,使生态系统等级转为健康等级。

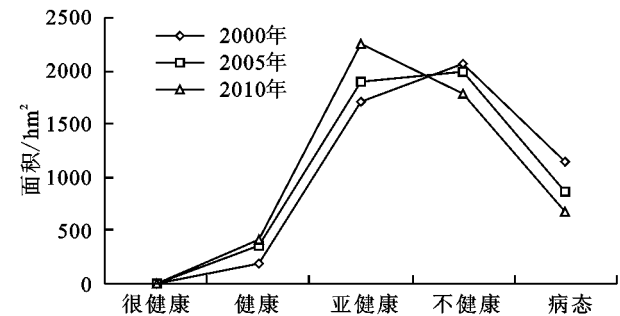


图 1 花江示范区生态系统健康诊断结果

2005—2010 年花江示范区生态系统健康等级发生转换的面积有 1 941.4 hm²,占示范区总面积的 37.9%,与 2000—2005 年相比,转化强度增强了 5.6%。其中,不健康等级向亚健康等级转化为主导,转化 715.9 hm²,占这一阶段发生转化总面积的 36.9%。病态等级转向其他健康等级面积相对于 2000—2005 年增加了 89.1 hm²,是因为随着石漠化综合治理程度日渐深入,花江示范区生态环境逐年改善,原本属于病态等级逐渐向亚健康、健康等级转移。

10 a 间,花江示范区亚健康等级面积变化最大,增加了 544.48 hm²,其中 2005—2010 年增加 349.73 hm²,占总转移面积的 64.23%;其次为病态等级共减少了 484.79 hm²,前阶段减少 58.5%,后阶段增加 41.5%。其他生态系统健康等级的面积没有发生太大变化,不健康、健康等级面积分别改变 288.75,229.71 hm²,占总转化面积的 18.6%,14.8%。

3.2 生态系统健康时空分异

生态系统健康变化是自然和人文共同作用的结果,其演替方式复杂多样,基于斑块的生态系统健康动态变化角度分析,生态系统健康发展/逆转的变化面积为监测期末的生态系统健康面积与监测初期的生态系统健康面积差值,当值大于 0 时,生态系统为正向演变,当值小于 0 时,生态系统为逆向演变;按照生态环境演替规律,将生态系统健康的时空演变概括为不变型、持续好转型、反复变化性、持续恶化型 4 种方式。(1) 不变型。即生态系统健康等级没有发生变化。(2) 持续好转型。指生态系统健康等级的正向演替过程,在这种生态系统健康的演替过程中,生

态系统有所改善,结构与功能有所完善,人地关系逐步和谐;(3) 反复变化型。指生态系统健康等级反复发生变化,在石漠化治理过程中,生态系统时好时坏,喀斯特石漠化生态系统不稳定;(4) 持续恶化型。指生态系统健康等级的逆向演替,在演替过程中,生态系统不断恶化,结构与功能退化,石漠化生态系统的保护与治理力度需要加大。

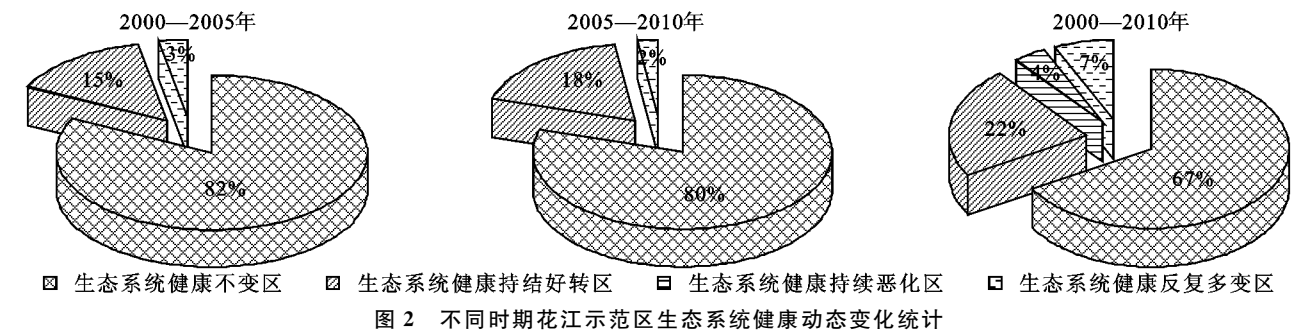
表 2 花江示范区生态系统健康转移矩阵 hm²

时间	健康等级	病态	不健康	亚健康	健康
2000—2005 年	病态	687.5	169.8	155.3	2.3
	不健康	150.2	1509.8	557.7	51.7
	亚健康	32.1	297.4	1092.1	121.8
2005—2010 年	健康	1.4	23.1	92.7	174.7
	病态	454.8	380.8	35.1	0.6
	不健康	167.8	1108.2	715.9	8.3
	亚健康	46.8	276.7	1389.3	185.3
	健康	0.7	15.1	107.4	227.3

花江示范区生态系统健康变化呈现出显著的空间分异特征(附图 3)。在 2000—2005 年、2005—2010 年和 2000—2010 年 3 个阶段中,生态系统健康不变区面积分别是 4 244.14 hm²,4 118.81 hm²,3 445.20 hm²,生态系统健康持续好转区面积分别是 760.71 hm²,927.73 hm²,1 156.53 hm²,生态系统健康持续恶化区面积分别是 156.80 hm²,115.11 hm²,198.75 hm²(图 2)。生态系统健康不变区面积所占比例最大,示范区绝大部分地区都属于此种区域,但所占面积比例呈下降趋势,由于脆弱的喀斯特石漠化环境是生态系统的自然背景,生态系统的恢复重建仍是一个漫长而艰辛的过程。生态系统健康持续好转区逐年增加,主要分布在水热条件较好的非喀斯特地区、峰丛洼地、峰丛谷地以及石漠化综合治理工程布置的地区,系统结构和功能逐步得到完善,生态环境逐步恢复,人地关系基本和谐,生态系统可持续发展。生态系统健康持续恶化区所占比例虽然较小,但仍然不容忽视。其主要分布在人口密集的居民点、交通用地以及擦尔岩村的部分村民组,由于大量开采石场出现了生态系统健康持续恶化的现象。2000—2010 年的生态系统健康改善区面积并不等于 2000—2005 年和 2005—2010 年的生态系统健康改善区面积之和,而是出现反复多变区,反复多变区高达 361.17 hm²,反复多变区呈零星状分布,与生态系统健康不变区与生态系统健康持续好转区镶嵌在一起,这进一步印证了在喀斯特脆弱的生态环境下,喀斯特生境极易受到人类活动的干扰和破坏,而且一旦破坏极难恢复。石漠化治理是一个漫长的过程,不是一蹴而就的,中间还会出现一些反复。

生态系统健康变化的时空分异特征与生态系统健康本身的时空分异特征并不相同。2000—2005 年,擦耳岩村西部和云洞湾村南部的峰丛洼地、峰丛谷地和三家寨村、孔落箐村石漠化综合治理工程地区以及非喀斯特地区生态系统健康逐渐好转,擦尔岩村北部、交

通用地,采石场生态系统健康逐渐恶化。2005—2010 年相比 2000—2005 年花江示范区生态系统健康好转区增加了 167.02 hm²,而生态系统健康恶化区面积则减少了 41.69 hm²。这与农村落后的生产方式得到调整,石漠化综合治理工程效果逐渐显现相关。



3.3 人为干预对喀斯特石漠治理过程中生态系统健康的影响

3.3.1 喀斯特石漠化综合治理过程中人为干预方式 人为干预对喀斯特生态系统的影响类型主要体现在喀斯特石漠化综合治理工程。国家“九五”、“十五”、“十一五”和“十二五”科技攻关项目均把花江石漠化综合治理区作为主要研究示范区,先后有大批科技人员前往此区进行科学研究和指导,因地制宜地采用坡耕地综合整治及特色经济林种植等模式与技术体系,进行了封

山育林、特色经济林、农田水利建设等试验示范,依次建立强度、中度、轻度、潜在石漠化治理示范小区,以及参与式农村发展社区、水资源开发利用与节水农业示范小区,并在小流域尺度研究工程空间上优化组合配套和综合治理。石漠化综合治理工程的兴建从空间形态上可分为点状、线状和斑块状的防治工程。如小水池、沉沙池、拦沙坝等点状工程;排涝渠、机耕道、田间生产道路等线状工程;相邻点状工程扩展连接、镶嵌形成大的集群或斑块,如防护林、水土保持林、特色经果林等(表 3)。

表 3 花江示范区石漠化综合防治工程建设内容

防治工程种类	防治工程亚类	防治工程子类	工程量
林草植被保护和建设	人工造林	防护林	8.25 hm ²
		水土保持林	365.872 hm ²
		特色经果林	524.06 hm ²
		封山育林	309.57 hm ²
草地建设与草食畜牧业发展	草地建设	人工种草	112.386 hm ²
		饲草机械	1 台/套
		坡改梯	74.8 hm ²
		田间生产道路(作业便道)	8.53 km
基本农田建设与水资源开发利用	小型水利水保	引水渠	9.67 km
		排涝渠	0.86 km
		机耕道	1.42 km
		拦沙坝	1 个
农村能源建设	水资源开发利用	小水池	55 个
		沉沙池	29 个
		沼气池	1 个
		节柴灶	4 个
监测体系建设	监测体系建设	石漠化治理综合监测站	1 个

3.3.2 人为干预对生态系统健康的影响 由于石漠化综合治理点、线工程绝大部分都是和面状工程相配套的工程,而且多数分布在面状工程内部。因此,在

研究人为干预中用石漠化综合治理面状工程代替了整个系统治理工程。将花江示范区石漠化综合治理工程布置图与 2000—2010 年花江示范区喀斯特生态

系统健康动态变化图进行空间叠加分析,统计分析两者耦合数据得出:对比有无石漠化综合治理工程措施下花江示范区生态系统健康的改善状况,实施工程区明显高于无工程区,高 40.57%,说明石漠化综合治理工程对改善生态环境产生了一定的成效。为进一步探究不同石漠化治理工程措施下花江示范区生态

系统健康的改善状况(表 4,图 3),生态系统健康改善比例依次为:封山育林>坡改梯>经果林>水保林>防护林>人工种草。这直接证明了在恢复石漠化生态系统过程中,石漠化综合治理工程产生了明显的生态效应,这是喀斯特人文社会响应的重要表现,也是石漠化综合治理效果的重要反映。

表 4 花江示范区生态系统健康面积变化 hm²

分 区	防护林	水保林	经果林	封山育林	人工种草	坡改梯	实施工程区	无工程区	示范区
生态系统健康恶化区	0.32	19.07	23.17	22.86	6.33	1.49	73.24	125.51	198.75
生态系统健康不变区	2.85	135.69	216.63	128.91	53.66	18.76	556.5	2888.7	3445.2
生态系统健康好转区	2.71	147.48	261.71	285.02	28.71	30.95	756.58	399.95	1156.53
生态系统健康反复多变区	2.37	23.63	42.55	19.45	7.69	3.6	99.29	261.88	361.17

注:改善比例即生态系统健康改善区占相应分类的总面积的比。

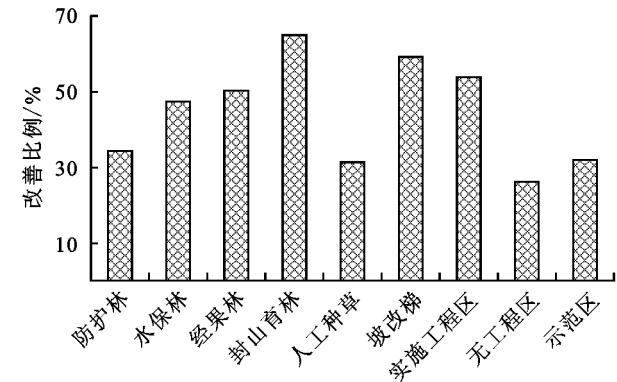


图 3 不同石漠化治理措施下花江示范区生态系统健康改善比例统计

4 结论与讨论

人为干预是人类活动对生态系统的积极响应,研究采用 GIS 空间叠加分析得到 2000—2010 年不同生态系统健康等级的转移流向矩阵,揭示了不健康等级向亚健康等级转移流向最大,主要原因是石漠化综合治理的实施改善了当地的生态系统健康状况;同时有部分病态等级转化成健康等级,是由于人类活动改变原本的土地利用类型,使生态系统转为健康状态,这与实地调查结果相符;花江示范区石漠化综合治理工程分布地区生态系统出现了持续好转,但局部地区如人口分布集中、居民点和交通线路以及采石场附近的区域由于长期受人类活动的干扰,生态系统有持续恶化的趋势,而生态系统健康反复多变区零星分布在持续好转区与持续不变区,印证了喀斯特石漠化生态系统的脆弱性、不稳定性和敏感性;不同石漠化综合治理工程对喀斯特生态系统健康改善由好到差依次是封山育林、坡改梯、经果林、水保林、防护林、人工种草,其中封山育林的改善效果最为明显,改善比例已

经超过 60%。研究表明,喀斯特地区封山育林和坡改梯等石漠化控制措施效果明显,有利于生态系统健康的恢复与可持续发展。

文章利用 RS 和 GIS 技术,以斑块为单位进行人为干预对石漠化治理过程中生态系统健康的影响具有一定的方法先进性,但仍然存在一些问题。生态系统健康诊断指标体系不够完善,在遥感数据与气象数据的获取和处理过程中,存在不可避免的误差。另外,人为干预的方式众多,但由于获取相关数据困难,只针对石漠化综合防治工程对生态系统健康的影响,石漠化生态系统健康演变机理以及生态系统健康预警研究需要进一步完善。

参考文献:

[1] 吴霜,延晓冬,张丽娟. 中国森林生态系统能值与服务功能价值的关系[J]. 地理学报,2014,69(3):334-342.

[2] 彭益书,付培,杨瑞东. 草海湿地生态系统健康评价[J]. 地球与环境,2014,42(1):68-81.

[3] 王一涵,周德民,孙永华. RS 和 GIS 支持的洪河地区湿地生态健康评价[J]. 生态学报,2011,31(13):3590-3602.

[4] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报,2012,67(3):338-397.

[5] 朱卫红,曹光兰,李莹,等. 图们江流域河流生态系统健康评价[J]. 生态学报,2014,34(14):3969-3977.

[6] 左奎孟,马福恒,王长生,等. 燕山水库消落带生态系统健康测度和恢复措施[J]. 水电能源科学,2013,31(10):136-138.

[7] 张良,陈克龙,曹生奎,等. 青海东部主要农业区县域农业生态系统健康评价[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):204-210.

[8] 王汉斌,杨鑫. 矿区生态系统健康的可拓评价[J]. 煤田

- 地质与勘探,2011,39(2):38-41.
- [9] 陈兴鹏,张伟伟,薛冰,等. 基于集对分析的城市生态系统健康评价:以兰州为例[J]. 生态科学,2011,30(2):135-141.
- [10] Shugart H H. Terrestrial Ecosystems in changing environments[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press,1998.
- [11] David J. Rappor T. Symptoms of pathology in the Gulf of Bothnia(Baltic Sea): ecosystem response to stress from human activity [J]. Biological Journal of the Linnean Society,1989,37(2):33-49.
- [12] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988.
- [13] 张笑楠,王克林,张明阳,等. 人类活动影响下喀斯特区域景观格局梯度分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(12):1187-1192.
- [14] 袁菲,张星耀,梁军. 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价[J]. 生态学报,2013,33(12):3722-3731.
- [15] 席海燕,王圣瑞,郑丙辉,等. 流域人类活动对鄱阳湖生态安全演变的驱动[J]. 环境科学研究,2014,27(4):398-405.
- [16] 曹欢,苏维词. 基于模糊数学综合评价法的喀斯特生态系统健康评价[J]. 水土保持研究,2009,16(3):148-154.
- [17] 任海. 喀斯特山地生态系统石漠化过程及其恢复研究综述[J]. 热带地理,2005,25(3):195-200.
- [18] 熊康宁,陈永毕,陈浒,等. 点石成金:贵州石漠化治理技术与模式[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2011.
- [19] 朱智洺,冯步云,刘磊. 沿海湿地生态系统健康预警指标体系的设计[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(5):436-441.
- [20] 周洪建,王静爱,岳耀杰,等. 人类活动对指标退化/恢复影响的空间格局:以陕西省为例[J]. 生态学报,2009,29(9):4847-4856.
- [21] 陈圣子,周忠发,闫利会. 基于网格 GIS 的喀斯特石漠化治理过程中生态系统健康变化诊断[J]. 中国岩溶,2015,34(3):1-8.
- [22] 张凤太,苏维词,赵卫权,等. 基于生态足迹模型的喀斯特高原山地生态系统健康评价研究[J]. 水土保持通报,2011,31(1):256-261.

~~~~~

(上接第 212 页)

- [17] 马巾英,尹锴,吝涛. 城市复合生态系统碳氧平衡分析:以沿海城市厦门为例[J]. 环境科学学报,2011,31(8):1808-1816.
- [18] 张颖,王群,李边疆,等. 应用碳氧平衡法测算生态用地需求量实证研究[J]. 中国土地科学,2008,21(6):23-28.
- [19] Zhao M, Kong Z, Escobedo F J, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(4):807-813.
- [20] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. 地理学报,2010,65(9):1048-1057.
- [21] 赵荣钦,黄贤金,高珊,等. 江苏省碳排放清单测算及减排潜力分析[J]. 地域研究与开发,2013,32(2):109-115.
- [22] 孙建卫,陈志刚,赵荣钦,等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(5):28-34.
- [23] 谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报,2008,28(4):1729-1735.
- [24] 赖力,黄贤金,刘伟良,等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析:以 2002 年江苏为例[J]. 生态学报,2006,26(4):1285-1292.
- [25] 赵荣钦,刘英,郝仕龙,等. 低碳土地利用模式研究[J]. 水土保持研究,2010,17(5):190-194.
- [26] 刘英,赵荣钦,焦士兴. 河南省土地利用碳源/汇及其变化分析[J]. 水土保持研究,2010,17(5):154-157.
- [27] 赵荣钦. 城市系统碳循环及土地调控研究[M]. 南京:南京大学出版社,2012.
- [28] 庄贵阳. 低碳经济:气候变化背景下中国的发展之路[M]. 北京:气象出版社,2007.