

程汉亭, 刘国道, 董荣书, 等. 基于果园牧草间作的石漠化综合治理效益评价: 以贵州省兴义市为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 210-219.

DOI: 10.11932/karst20220203

基于果园牧草间作的石漠化综合治理效益评价 ——以贵州省兴义市为例

程汉亭^{1,3,4}, 刘国道², 董荣书², 王晓敏³, 李勤奋^{1,4,5}, 周小慧^{1,4,5}, 张显波³

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南 海口 571101; 2. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南 海口 571101; 3. 贵州省亚热带作物研究所, 贵州 兴义 562400; 4. 海南省热带生态循环农业重点实验室, 海南 海口 571101; 5. 农业部儋州农业环境科学观测实验站, 海南 儋州 571700)

摘要:开展石漠化综合治理效益评价,对于石漠化综合治理模式的优化和改进至关重要。文章以贵州兴义市南盘江镇田房村为研究对象,分析热带果树+覆盖作物措施的石漠化综合治理效益。通过调查兴义市南盘江镇田房村治理前(2014年)和治理后(2017年和2020年)的农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益,利用冗余分析(RDA)和结构方程建模(SEM)评价了田房村石漠化治理的综合效益。结果表明:通过将耕地转变为园地(芒果和澳洲坚果间作牧草或绿肥),综合治理6年后,该示范区农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益均呈现向好趋势;除了农/林草面积比和农产品商品产值两个观测变量,农业产业结构和产业资源发展与经济效益和生态效益之间观测指标均呈显著相关;果园用地比重、务工劳动力比重、务工贡献率、农产商品化产值、农/林草面积比5个变量是引起经济效益和生态效益变化的重要驱动因子;石漠化治理能耦合生态环境与产业资源的协调发展,同时实现生态恢复和经济增收。热带果树+覆盖作物相结合综合治理石漠化是该村生态恢复和经济增收的有效措施。研究结果为喀斯特石漠化综合治理提供了依据。

关键词:石漠化;综合治理;效益评价;结构方程模型

中图分类号: X171.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)02-0210-10 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国喀斯特地貌面积约占陆地国土总面积的1/3,主要分布于以贵州为中心的我国西南部地区,面积约 $5.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。由于巨大的人口压力和高强度的农业活动,使西南喀斯特地区成为我国主要的石漠化生态脆弱区^[1]。以云贵高原为中心的滇桂黔地区,

石漠化面积达 $6.07 \times 10^4 \text{ km}^2$,占我国石漠化土地面积的60.3%。其中,贵州省的石漠化土地面积最大,为 $2.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国石漠化土地总面积的24.5%,是我国石漠化面积最大的省^[2]。在我国,喀斯特分布地区的生态区位十分重要,该区域是珠江的源头,长江水源的重要补给区,也是南水北调水源区和三峡库区^[3]。中国喀斯特地区石漠化的遏制与综合治理是长江和

基金项目:滇桂黔石漠化地区特色作物产业发展关键技术集成示范项目(SMH2019-2021);中国热带农业科学院基本科研业务费专项(1630042017008, 1630032021012);贵州科技厅科技支撑项目(黔科合支撑[2017]2856号);贵州农科院青年科技基金项目(黔农科院青年科技基金[2020]28号)

第一作者简介:程汉亭(1983—),男,硕士,副研究员,从事石漠化综合治理与评价。E-mail: chenghanting@163.com。

通信作者:王晓敏(1982—),女,助理研究员,主要从事石漠化综合治理与利用研究。E-mail: wxmgzu@163.com。

收稿日期:2021-08-02

珠江流域生态安全的需要^[4],也是解决区域性整体贫困和推进生态文明建设的必然要求。如何把石漠化治理与扶贫开发有机结合是该地区开展石漠化综合治理面临的一个重要问题。

自2000年,中国科学院等有关单位向国务院提交了推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议,我国政府在“十五”政府报告中明确提出“加快推进黔桂滇岩溶石漠化的综合治理”以来^[5],国家利用多种资源、联合各方面力量,开展了一系列石漠化综合治理工程^[6-7],如退耕还林还草、天然林保护、人工造林种草、坡改梯、生态移民等;发展并形成了一系列成功的综合治理模式,如贵州花江峡谷的“关岭模式”和“顶坛模式”^[8]、贵州晴隆县的“晴隆模式”^[9]、广西环江县的肯福屯“异地扶贫”模式、广西平果县的“果化模式”等^[10]。同时,针对石漠化综合治理的效益评价研究,研究人员采用层次分析和模糊评价法开展了小流域和县域的生态效益指标体系构建及评价^[11-13]和县域的生态—经济综合效益评价^[14-15]。然而,针对乡镇或者行政村石漠化综合治理的生态、经济效益评价研究却没有系统深入地开展,而且石漠化综合治理后农业产业—资源—经济—生态系统耦合路径有待进一步明确。农业产业—资源—经济—生态系统之间的互动关系涉及到潜变量,而结构方程模型是潜变量研究中比较成熟的方法^[16],赵晓翠^[17]和苏鑫等^[18]等已经采用该方法研究了黄土高原地区退耕还林对农业产业资源和生态经济系统的耦合关系。

2014年以来,针对贵州兴义市南盘江镇喀斯特地区植被覆盖率低、水土流失严重、生态环境恶化,以及当地农业产业模式落后、经济效益低和区域贫困等问题,由中国热带农业科学院与贵州省亚热带作物研究所联合,在低热河谷地带的典型石漠化贫困村开展石漠化综合治理项目。具体做法是采用多年生、高效益、土壤扰动小的特色果树(芒果和澳洲坚果)来替代一年生、低效益、土壤扰动大的一年生粮食作物(甘蔗、玉米等),同时在果树下间作覆盖能力强的牧草/绿肥进行水土保持和土壤培肥,构建热带果树+覆盖作物相结合的石漠化综合治理模式。治理6年来,该村在经济增收方面取得了一定成效,但是在石漠化治理上的生态效益尚不明确。

基于此,本文以贵州兴义市南盘江镇田房村为研究区,通过动态分析石漠化综合治理前和治理后

农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益提升情况,厘清治理区产业、资源、经济、生态之间的相互关系,解析热带果树+覆盖作物相结合的石漠化治理的综合效益,找出该石漠化治理模式的优缺点,以便进一步优化并指导新形势下喀斯特地区石漠化的综合治理,为石漠化综合治理和生态系统可持续发展提供科学依据。

1 研究区域和石漠化综合治理措施简介

1.1 研究区域概况

研究区位于贵州兴义市南盘江镇田房村,全村共有34户,131人。地理位置为113°12'40"E, 24°52'10"N,坡向NW45°,海拔780~900 m,总耕地面积35 hm²,该地区处于滇桂黔交界处,是我国喀斯特地貌发育最典型的地区之一。该区域属亚热带湿润气候,年均气温20.25℃,全年积温7 298℃,全年日照时间1 636 h,年降水量1 535.5 mm,无霜期约345 d以上。冬春干旱、夏秋多雨,干湿季节明显,雨热同季。研究区域岩石为碳酸盐类的石灰岩,石多土少,土层浅薄,土层深度40~80 cm,土壤质地为黏质土壤。据2014年调查,该村石漠化严重,平均岩石裸露率68.63%。少数地势陡峭的区域以自然植被为主,优势植物包括八角枫(*Alangium chinense*)、毛桐(*Mallotus japonicus*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)和粗糠柴(*Mallotus philippensis*)等,大多数区域种植玉米和甘蔗。村里还有畜禽养殖业,部分剩余劳动力外出务工。因此,采用多年生热带果树(芒果和澳洲坚果)代替一年生农作物(玉米和甘蔗),开展石漠化综合治理后,村里的产业结构转变为林果业、畜牧业和务工业。

1.2 热带果树+覆盖作物相结合的石漠化综合治理措施简介

芒果(*Mangifera indica* F.)和澳洲坚果(*Macadamia ternifolia*)于2014年种植,替换原有的低效益作物(玉米和甘蔗)。芒果树采用嫁接苗移栽,每公顷种植670~820株,每年的2-4月开花,种植后3年挂果。同时在芒果树下种植覆盖作物—紫花苕子(*Vicia Angustifolia*),每公顷播种量为7.5 kg,根据生长速度,每年割草一次或两次。澳洲坚果每公顷种植约400~492株。花期为每年的3-4月,种植4年

后挂果。同时在澳洲坚果树下种植覆盖作物绿叶山蚂蝗 (*Desmodium intortum*), 每公顷播种量为 5.5 kg, 根据生长速度, 每年割草两次或三次。

2 数据与方法

2.1 数据收集

本研究以户为调查单位, 采用野外实地调研和农户问卷调查的方式, 对贵州兴义市南盘江镇田房村全村 34 户进行入户调查, 调查从农业产业结构、产业资源发展、经济效益、生态效益四个方面进行。采集治理前(2014 年)、治理后 3 年(2017 年)和治理后 6 年(2020 年)的数据。收集数据指标借鉴了先前开展生态和经济效益评价研究成果^[12-13]并结合石漠化治理特点, 具体调查信息如表 1。为了获得农户地块的地表径流和土壤侵蚀量数据, 在研究区选择了玉米、芒果、澳洲坚果种植系统, 建立宽度为 6 m, 长度为 25 m 的径流监测小区域, 用来观测不同种植系统的土壤侵蚀和径流损失。结合实地调查每块耕地的种植作物和果园种草情况, 根据植被覆盖率、坡度、岩石裸露率等因素, 估算每块耕地的地表径流量、土壤侵蚀量。

表 1 调研基本信息
Table 1 Basic situation of investigation

类别	研究内容
家庭基本信息	人口数量、耕地数量、劳动力数量
农业产业	一年生农作物种类和种植面积、多年生果树种类和种植面积、果园种草面积、商品化农产品种类
产业资源发展	农产品商品率、务农劳动力数量、外出务工劳动力数量
经济效益	务农收益(一年生作物经济收益、多年生果树经济收益、畜禽养殖收益)、本地务工收益、外地务工收益
生态效益	地表径流量、土壤侵蚀量、林草覆盖率

2.2 数据分析

使用 Shapiro-Wilk 和 Levene 检验来检验数据的正态性和方差同质性, 并通过数据转换(标准化或对数转换)来提高数据正态性。采用单因素方差分析(ANOVA)对不同年份的指标进行显著性检验($P < 0.05$)。通过 Person 相关性分析评价产业结构、

产业资源发展、经济收益和生态效益之间的相关关系; 利用 Canoco 5.0 进行冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)确定经济收益和生态效益变化的主要影响因子。

2.3 农业产业结构—产业资源发展—经济效益—生态效益耦合关系概念模型构建

结构方程模型是表示潜变量之间、潜变量与观测变量之间关系的一种统计方法, 结构模型主要界定潜在自变量和潜在因变量间的线性关系; 测量模型则明确了潜在变量与观察变量间的线性关系^[16]。结合实际调查情况、感性认识和先前研究生态—经济耦合模型^[17], 选取农业产业结构与资源发展、生态效益、经济效益和耦合状态 4 大要素作为潜变量, 以总径流减少量、土壤侵蚀减少量、农/林草面积比、务工劳动力比重、务工贡献率、人均经济收入、人均务工收入、产业资源相关度、资源适宜度为观测变量, 用结构方程模型分析农业产业—资源—经济—生态耦合系统间的关系及作用过程, 提出以下假设: ①生态效益、农业产业与资源发展对系统耦合状态有影响; ②耦合状态对经济效益有影响; ③农业产业与资源发展对经济效益有影响; ④生态效益与农业产业与资源发展相关。在此基础上根据表征潜变量的可测变量(表 2), 建立初始模型(图 1), 图中 e1-e11 为残差变量, 表示无法被系统解释的部分。

数据通过标准化转化后, 符合多元正态分布总体, 同时对数据进行共线性分析, 删除共线性指标, 利用 SPSS AMOS (IBM SPSS AMOS Inc., 21.0) 对模型进行初始检验, 使用最大似然值法(拟合优度指数(GFI), 卡方自由度比(χ^2/df), 近似误差均方根(RMSEA))来评估 SEM, 参考拟合指数修正意见, 根据初始模型输出的结果修正模型。

3 结果与分析

3.1 农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益变化

本研究调查了治理前(2014 年)和治理后(2017 年和 2020 年)兴义市南盘江镇田房村的农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益变化情况。结果显示: 总体来看, 与治理前(2014 年)相比较, 2020 年治理区的农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益各项指标变得更优更好(表 3)。

表 2 石漠化综合治理区农业产业—资源—经济—生态系统耦合变量解释

Table 2 Coupling variable interpretation of agricultural industry-industrial resources- economic-ecological system in rocky desertification comprehensive control area

潜变量	观测变量	定义方法
产业结构与资源发展	农/林草面积比	农用地面积: 果园和牧草地面积
	务工劳动力比重	务工劳动力/总劳动力
	务工贡献率	务工经济收入/总经济收入
经济效益	人均经济收入	家庭总收入/家庭人口数
	人均务工收入	家庭务工总收入/家庭人口数
生态效益	径流量减少量	治理后径流量—治理前径流量
	侵蚀减少量	治理后侵蚀量—治理前侵蚀量
	林草覆盖率	林地和草地面积之和/土地确权的耕地面积
耦合状态	产业资源相关度	具体赋值方法参考王继军 ^[19] 的研究成果
	资源适宜度(各项得分相加总值; 0~12)	耕地适宜性(1 不适宜/2 临界适宜/3 适宜, 下同)+ 园地适宜性(1/2/3)+ 林地适宜性(1/2/3)+草地适宜性(1/2/3) (赵晓翠, 2019) ^[16]

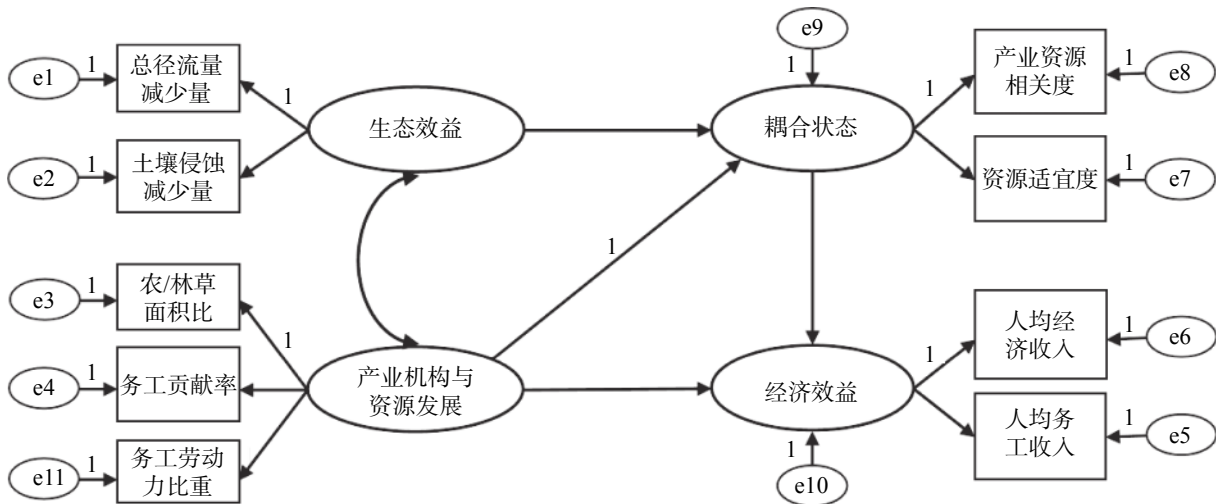


图 1 农业产业结构—产业资源发展—经济效益—生态效益耦合关系初始模型

Fig. 1 Initial model of coupling relationship among agricultural industrial structure-industrial resources development-economic benefit-ecological benefit

农业产业结构方面, 果园用地比重增加 79.64%, 农/林草面积比降低了 23%; 产业资源发展方面, 务工劳动力比重和务工贡献率分别增加了 28.82% 和 19.09%; 同时, 经济效益增加显著, 人均经济收入和人均务工收入分别增加 0.99 万元和 1.07 万元, 增幅分别达 79.92% 和 126.12%; 生态效益方面, 年总径流量和年总侵蚀量分别减少 385.34 m³/hm² 和 7.46 t/hm², 减少比例分别达 44.29% 和 62.78%; 林草覆盖率提高了 84.09%(图 2)。

3.2 农业产业结构和产业资源发展与经济效益和生态效益之间的关系

石漠化综合治理后, 果园用地比重、务工劳动力

比重、务工贡献率与人均经济收入、人均务工收入呈显著正相关, 与总径流量和总侵蚀量呈显著负相关。农/林草面积比与总径流量和总侵蚀量呈显著正相关。农产品商品产值与人均经济收入呈显著正相关。务工劳动力比重、务工贡献率与林草覆盖率呈显著正相关(表 4)。

RDA 双轴排序图清晰地显示了石漠化综合治理区 2014 年、2017 年和 2020 年农户农业产业结构和产业资源指标(图 3)。冗余分析表明, 农业产业结构与产业资源发展对 3 个调查年份的经济效益和生态效益贡献率为 72.15%, 第一轴贡献率为 53.73%, 第二轴贡献率为 18.42%; 果园用地比重、务工劳动力

表3 石漠化综合治理后农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益变化情况
Table 3 Changes of agricultural industrial structure, industrial resources development, economic benefit and ecological benefit after rocky desertification comprehensive control

年度	农业产业结构		产业资源发展		经济效益		生态效益			
	果园用地比重/%	农/林草面积比	务工劳动力比重/%	农产品商品产值/万元·人 ⁻¹	务工贡献率/%	人均经济收入/万元·人 ⁻¹	人均务工收入/万元·人 ⁻¹	年总径流量/m ³ ·hm ⁻²	年总侵蚀量/t·hm ⁻²	林草覆盖率/%
2014	0.47a	0.58a	45.74a	0.20b	67.44a	1.24a	0.85a	870.1a	11.89a	0.53a
2017	78.43b	0.58b	67.09b	0.00a	86.68b	1.85b	1.66b	557.99b	7.68b	80.27b
2020	80.12b	0.35b	74.56b	0.20b	86.53b	2.23b	1.93b	484.76b	4.42b	84.62b

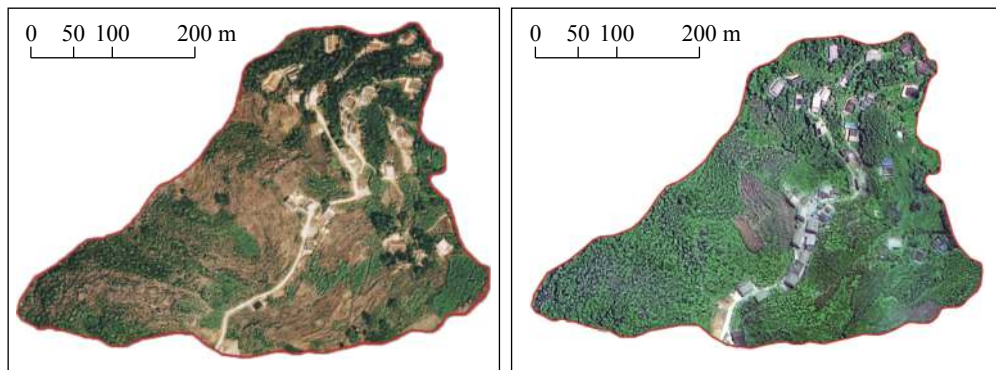


图2 贵州兴义市田房村治理前(2014年)和治理后(2020年)的植被覆盖

Fig. 2 Vegetation cover before(2014) and after(2020) karst rocky desertification control in Tianfang village, Xingyi City, Guizhou Province

表4 石漠化治理后农业产业结构和产业资源发展与经济效益和生态效益的相关性分析
Table 4 Correlation analysis of agricultural industrial structure and industrial resources development with economic benefit and ecological benefit after rocky desertification control

观测项目	观测变量	农业产业结构		产业资源发展		
		果园用地比重	农/林草面积比	务工劳动力比重	农产品商品产值	务工贡献率
经济效益	人均经济收入	0.272**	0.176	0.474**	0.311**	0.273**
	人均务工收入	0.384**	0.111	0.551**	0.032	0.505**
生态效益	总径流量	-0.473**	0.405**	-0.233*	0.202	-0.324**
	总侵蚀量	-0.514**	0.414**	-0.262**	0.152	-0.321**
	林草覆盖率	0.995**	-0.343**	0.457**	-0.115	0.430**

比重、务工贡献率、农产商品化产值、农/林草面积比5个变量是影响治理区经济效益和生态效益发生变化的主要因子。

3.3 农业产业结构—产业资源发展—经济效益—生态效益耦合关系

通过农业产业结构、产业资源发展与经济效益、生态效益耦合关系拟合模型分析(图4)结果表明,笔者提出的所有假设都是成立的。产业结构与资源发展对经济效益直接作用影响系数达0.7,表明石漠化综合治理区优化产业结构与产业资源发展能促进经

济效益提升;产业结构与资源发展和生态效益对耦合状态直接作用影响系数分别为0.44和0.38,说明优化产业结构和提升生态环境质量有助于增强系统的耦合状态,即石漠化治理能促进生态环境与产业资源的协调发展;产业结构与资源发展和生态效益相关系数较小(0.16),是因为选取的产业结构与资源发展3个观测变量中,只有农/林草面积比这个观测变量与生态效益有直接关系;通过石漠化综合治理,减少了务农在产业发展的比重,释放出更多劳动力发展外出务工,从而间接增加了务工劳动力比重和务工贡献率。同时还发现,石漠化综合治理区的

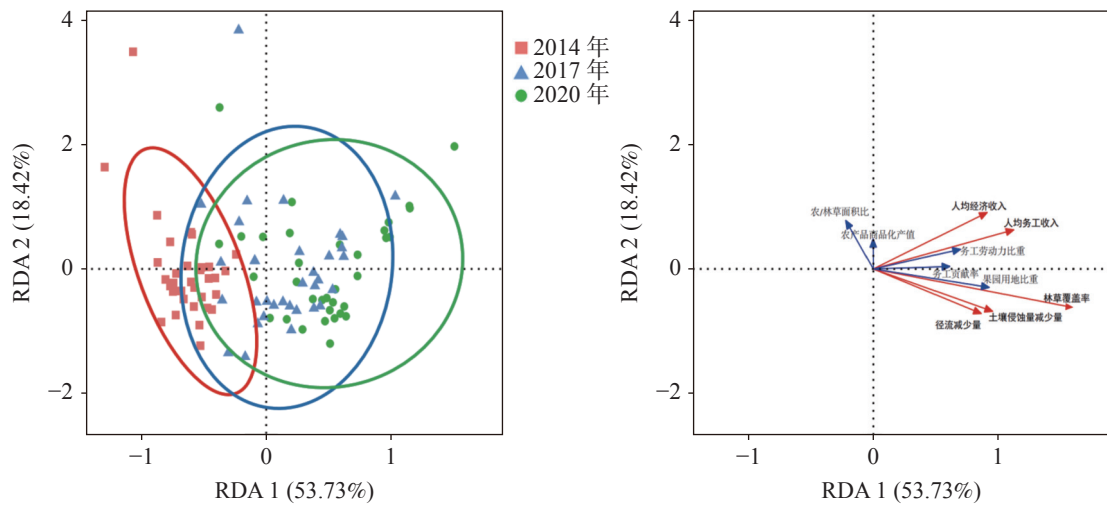


图 3 石漠化综合治理区农业产业结构和产业资源发展与经济效益和生态效益的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of agricultural industrial structure and industrial resources development and economic benefit and ecological benefit in rocky desertification comprehensive control area

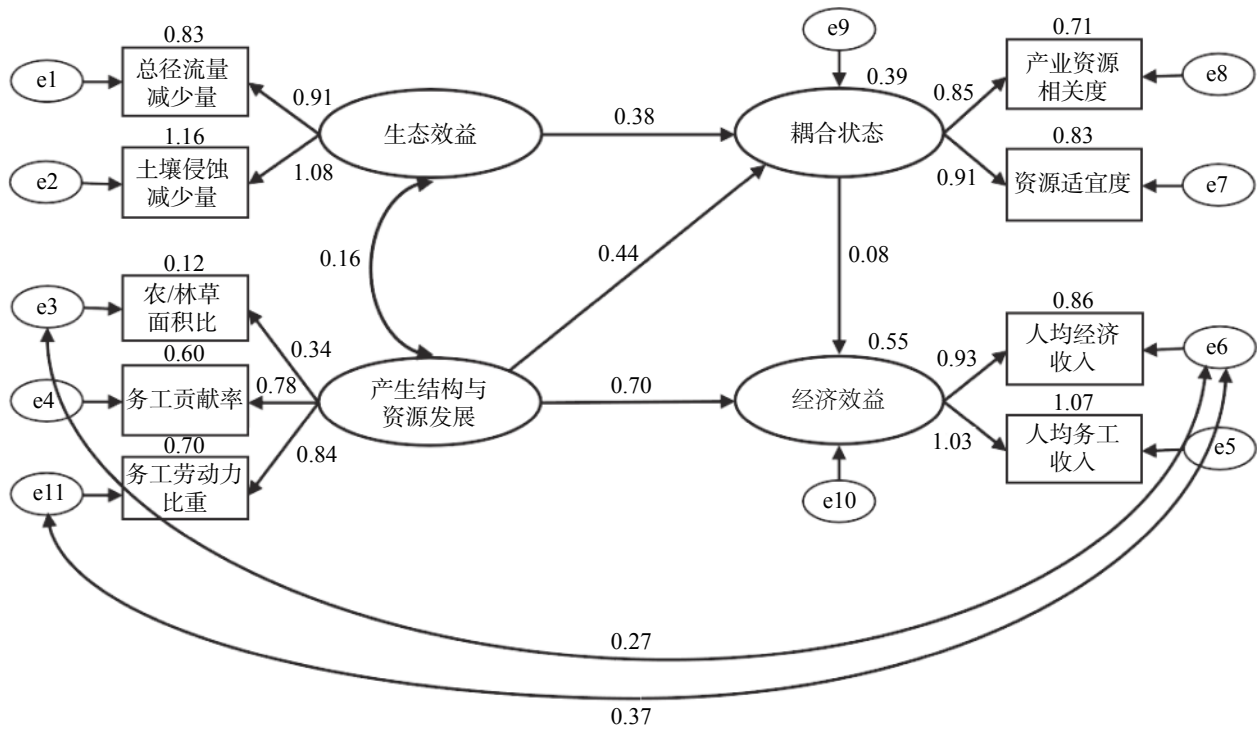


图 4 农业产业结构—产业资源发展—经济效益—生态效益耦合关系拟合模型

模型拟合结果： $\chi^2=55.426, df=23, P=0.657, AIC=108.00$

Fig. 4 Fitting model of coupling relationship between agricultural industrial structure-industrial resources development-economic benefit-ecological benefit

农业资源潜力未充分发挥, 导致系统耦合状态对经济效益直接作用较低, 影响系数仅为 0.08。

4 讨论

通过对贵州兴义市南盘江镇田房村石漠化综合

治理前(2014 年)和治理后(2017 年和 2020 年)的调查分析, 表明该治理区农业产业结构、产业资源发展、经济效益和生态效益均呈现向好趋势。石漠化综合治理的核心是调整人地矛盾^[1], 针对该石漠化区域石多土少、山地面积占比大、土地资源匮乏、人地关系紧张的问题, 因地制宜地引进多年生、土壤扰动小、

经济效益高、劳动力投入少的热带果树(芒果和澳洲坚果)代替原来的一年生、土壤扰动大、经济效益低、劳动力投入多的农作物(玉米和甘蔗)。综合评价结果发现,通过农业产业调整,释放出更多的劳动力外出务工(表3),原因是林地替换农田缓解了石漠化治理区的土地耕作压力,减轻了农户对土地的依赖^[20]。由于种植的多年生果树(芒果和澳洲坚果)需3~4年后才挂果,6~8年才进入高产期,因此,2017年的农产品商品产值为0,2020年农产品商品产值才恢复到治理前的水平。随着治理年限的增长,果树逐渐进入高产期,农产品商品产值仍有巨大增长的潜力,人均经济收入会进一步增加。

石漠化综合治理是一项系统性工程,治理措施通常是发展特色产业,调整和优化产业结构,实现当地产业的提质和增效,达到增加经济效益和提升生态环境质量的目的。先前的石漠化综合治理研究只开展了生态效益和经济效益评价^[15],而忽视了产业结构和产业资源发展与经济效益和生态效益的内在关系。本研究发现,综合治理区果园用地比重与经济收入呈正相关,与总径流量和总侵蚀量呈负相关(表4),这是因为石漠化地区增加植被覆盖,特别是果园—牧草覆盖措施能减少岩石裸露率(图1和图2),同时果树和牧草冠层能减少雨水侵蚀^[21],植物根系能改善土壤结构,增加土壤稳定性和渗透性^[22],其共同作用减少了岩溶区土壤侵蚀和地表径流。这些进一步增加了治理区经济反馈投入^[23],先前的研究也发现植被覆盖与后三角洲地区的经济发展呈正相关^[24]。冗余分析表明(图3),果园用地比重和务工劳动力比重对经济效益(人均经济收入和人均务工收入)和生态效益(林草覆盖率、土壤侵蚀减少量和径流减少量)的影响最大。这可能是果园用地比重增加,减少了农业劳动力投入,降低了土壤扰动频率,减少了耕作侵蚀与水蚀作用^[25]。同时,释放出更多劳动力进城务工,增强了经济增长的主要驱动力^[26]。因此,治理区的产业、资源、经济、生态之间是紧密相关的,果园间作牧草代替一年生作物的石漠化综合治理能优化产业结构,提升治理区的经济效益和生态效益。这些研究结果,为今后提升石漠化治理综合效益提供了重要的可量化技术指标。

本勘察借鉴先前研究资料,建立了适宜的指标体系,运用耦合度模型,对石漠化综合治理区农业产业结构—资源发展—经济效益—生态效益的协同关

系及演变过程进行了分析。研究结果表明石漠化综合治理实施后,该村的农业产业结构和资源的优化改善了生态环境,促进了系统良性耦合(图4)。退耕还林能够提升林地覆盖率,提升地下水涵养和土壤固碳能力,改善区域生态环境,进而提升治理区生态系统服务功能^[27-28]。本研究中,农业产业结构与生态效益指标呈显著相关(表4),进一步验证了本项研究拟合模型的结果。石漠化治理区实现了从“变绿”^[29]到喀斯特生态系统服务能力的提升和石漠化治理的提质与增效^[19]。由此可见,石漠化治理能耦合生态环境与产业资源的协调发展,促进经济和生态的综合效益的提升。

5 结 论

通过对贵州兴义市南盘江镇田房村石漠化综合治理的效益评价,得到了以下结论:

(1)热带果树+覆盖作物相结合的整村石漠化综合治理能够释放更多劳动力发展务工产业,促进务工收入增加126.12%,经济效益增加79.92%;

(2)治理措施提升石漠化地区林草覆盖率达84.09%、土壤侵蚀和地表径流分别减少62.78%和44.29%,显著改善了治理区生态环境质量;

(3)石漠化综合治理的结果既促进了当地经济增长,又耦合了生态环境与产业资源的协调发展。因此,热带果树+覆盖作物石漠化综合治理能满足新时代背景下生态文明建设与经济发展的需求,为我国西南喀斯特地区石漠化综合治理提供技术支撑和可推广模式。

参考文献

- [1] 王克林,岳跃民,陈洪松,曾馥平.科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径[J].中国科学院院刊,2020,35(10):1264-1272.
WANG Kelin, YUE Yuemin, CHEN Hongsong, ZENG Fuping. Mechanisms and realization pathways for integration of scientific poverty alleviation and ecosystem services enhancement[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(10): 1264-1272.
- [2] 国家林业和草原局.中国·岩溶地区石漠化状况公报[N].2018.
National forestry and grassland administration. bulletin on the status of rocky desertification in karst areas of China [N]. 2018.
- [3] 朱斌,刘丹一.岩溶地区石漠化综合治理经验、问题及策略[J].林业经济,2015,37(5):76-81.

- ZHU Bin, LIU Danyi. Comprehensive taming of karst rock desertification in karst region: experience, problems and strategy[J]. *Forestry Economics*, 2015, 37(5): 76-81.
- [4] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- SONG Tongqing, PENG Wanxia, DU Hu, WANG Kelin, ZENG Fuping. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [5] 黄秋昊, 蔡运龙, 王秀春. 我国西南部喀斯特地区石漠化研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(2): 106-111.
- HUANG Qiuhaohao, CAI Yunlong, WANG Xiuchun. Progress of research on rocky desertification in karst areas of southwestern China[J]. *Journal of Natural Disasters*. 2007, 16(2): 106-111.
- [6] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 程洋, 杨奇勇, 吴泽燕, 梁建宏. 21世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 461-468.
- JIANG Zhongchen, LUO Weiqun, TONG Liqian, CHENG Yan, YANG Qiyong, WU Zeyan, LIANG Jianhong. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of southwest China in the 21st century[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 461-468.
- [7] 吴协保. 继续推进岩溶地区石漠化综合治理二期工程的现实意义[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 469-475.
- WU Xiebao. Realistic significance of carrying forward the project phase II for comprehensive treatment of rocky desertification in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 469-475.
- [8] 李阳兵, 王世杰, 熊康宁. 花江峡谷石漠化土地生态重建及其启示[J]. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15(1): 138-142.
- LI Yangbing, WANG Shijie, XIONG Kangning. Ecological reconstruction of karst rocky desertification and its significance in Huajian Gorge[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15(1): 138-142.
- [9] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 37-42.
- CHENG Honglin, YUE Yüemin, WANG Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of southwestern China: achievements, problems, and countermeasures[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 37-42.
- [10] 蒋忠诚, 李先琨, 覃小群, 吕仕洪, 罗为群, 蓝芙宁, 曹建华. 论岩溶峰丛洼地石漠化的综合治理技术: 以广西平果果化示范区为例[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(1): 50-55.
- JIANG Zhongcheng, LI Xiankun, QIN Xiaoqun, LU Shihong, LUO Weiqun, LAN Funing, CAO Jianhua. Comprehensive improving technique to rocky desertification in karst peak-cluster depression: A case study at Guohua Ecological Experimental Area, Pingguo, Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(1): 50-55.
- [11] 吴鹏, 朱军, 崔迎春, 赵文君, 侯娜, 张喜. 喀斯特地区石漠化综合治理生态效益指标体系构建及评价: 以杠寨小流域为例[J]. *中南林业科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(10): 95-101.
- WU Peng, ZHU Jun, CUI Yingchun, ZHAO Wenjun, HOU Na, ZHANG Xi. Construction of eco-efficiency index system for preventing and controlling rocky desertification in Gangzhai karst small watershed, Kaiyang, Guizhou and system evaluation[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology (Natural Science)*, 2014, 34(10): 95-101.
- [12] 尹育知. 岩溶地区石漠化综合治理及其生态效益评价研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2013.
- YIN Yunzhi. Study on the comprehensive treatment and eco-benefit evaluation on karst rocky desertification area—a case study on Xihua county[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [13] 杜雪莲, 王世杰, 熊强辉, 彭韬, 程安云, 张林, 蔡先立. 基于模糊综合评价法的小流域喀斯特石漠化治理综合效益评价: 以贵州省普定县陈家寨小流域为例[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 586-593.
- DU Xuelian, WANG Shijie, XIONG Qianghui, PENG Tao, CHEN Anyun, ZHANG Lin, CAI Xianli. Evaluation on effect of small catchment comprehensive control in karst rocky desertification areas based on fuzzy comprehensive evaluation method: A case study of Chenjiazhai catchment in Puding county, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 586-593.
- [14] 顾剑红. 广西石漠化地区小流域水土保持综合效益评价[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- GU Jianhong. Assessment on comprehensive benefits of soil and water conservation at small watersheds in the rocky desertification region, Guangxi[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [15] 李昂, 王云琦, 张会兰, 王彬, 黎宏祥. 广西石漠化地区水土保持效应评价指标体系研究[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(11): 67-78.
- LI Ang, WANG Yunqi, ZHANG Huilan, WANG Bin, LI Hongxiang. Research on evaluation index system of soil and water conservation effect of rocky desertification region in Guangxi of southern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(11): 67-78.
- [16] 荣泰生. AMOS与研究方法[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2009.
- RONG Tai-sheng. AMOS and research method[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009.
- [17] 赵晓翠, 王继军, 乔梅, 韩晓佳, 李玥. 水土保持技术对农业产业—资源系统的耦合路径分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5820-5828.
- ZHAO Xiaocui, WANG Jijun, QIAO Mei, HAN Xiaojia, LI Yue. Coupling path analysis of soil and water conservation technology to the agricultural industry-resource system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5820-5828.
- [18] 苏鑫, 王继军, 郭满才, 姜志德, 李慧, 牛艳利. 基于结构方程模型的吴起县农业生态经济系统耦合关系[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 937-944.
- SU Xin, WANG Jijun, GUO Mancai, JIANG Zhide, LI Hui, NIU

- Yanli. Coupling relationship of agricultural eco-economic systems in Wuqi county based on structural model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 21(4): 937-944.
- [19] 王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济安全评价[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 06(4): 109-113.
- WANG Jijun. Safety evaluation of the Zhifanggou watershed in the agricultural eco-economics of Hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 06(4): 109-113.
- [20] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7432-7440.
- WANG Kelin, YUE Yuemin, CHEN Hongsong, WU Xiebao, XIAO Jun, QI Xiangkun, ZHANG Wei, DU Hu. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [21] LI Changjia, PAN Chengzhong. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 90-103.
- [22] 程汉亭, 李勤奋, 王晓敏, 卢天禹, 张显波. 不同植被恢复策略对贵州喀斯特生态系统土壤渗透特性的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 110-116.
- CHENG Hanting, LI Qinfen, WANG Xiaomin, LU Tianyu, ZHANG Xianbo. Effects of different vegetation restoration strategies on soil penetrability of karst ecosystem in Guizhou Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 110-116.
- [23] ZHAN Chesheng, ZHAO RUXIN, HU Shi. Emergy-based sustainability assessment of forest ecosystem with the aid of mountain eco-hydrological model in Huanjiang county, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119638.
- [24] HU Mengmeng, XIA Beicheng. Significant increase in the normalized difference vegetation index during the rapid economic development in the Pearl River Delta of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30: 359e370.
- [25] 侯宁, 王勇, 赵虎, 张校棱, 梁心蓝. 耕作侵蚀对不同坡度下紫色土侵蚀产沙的影响[J]. *山地学报*, 2021, 39(4): 495-505.
- HOU Ning, WANG Yong, ZHAO Hu, ZHANG Xiaoling, LIANG Xinlan. Effects of tillage erosion on sediment yield of purple soil under different slopes[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(4): 495-505.
- [26] 张黎明, 王红瑞, 潘成忠, 何继宏. 资源型地区产业结构调整对水资源利用效率影响的实证分析: 来自中国10个资源型省份的经验证据[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(3): 353-362.
- ZHANG Liming, WANG Hongrui, PAN Chengzhong, HE Jihong. Empirical analysis on the influence of industrial structure adjustment on water resource utilization efficiency in resource-based regions: empirical evidence from 10 resource-based provinces in China[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(3): 353-362.
- [27] 叶鑫, 顾羊羊, 张琨, 邹长新, 徐梦佳, 黄贤. 西南喀斯特地区石漠化治理现状分析与对策研究: 以贵州省黔西南州为例[J]. *环境保护*, 2020, 48(22): 30-34.
- YE Xin, GU Yangyang, ZHANG Kun, ZOU Changxin, XUN Mengjia, HUANG Xian. Current situation analysis and countermeasures of rocky desertification control in southwest karst region: A case study of Qianxinan Prefecture in Guizhou Province[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(22): 30-34.
- [28] 李海燕, 丁剑宏, 柏勇, 吴昊, 张凤. 岩溶区水土保持综合治理技术效益分析: 以官脉地小流域、高枳槽小流域为例[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(3): 68-78.
- LI Haiyan, DING Jianhong, BAI Yong, WU Hao, ZHANG Feng. Promotion effects of comprehensive control technologies of soil and water conservation in Karst region: A case study of the Guanmaidi Watershed and the Gaojiancao Watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(3): 68-78.
- [29] TONG Xiaowei, BRANDT Martin, YUE Yuemin, HORIZON Stephanie, WANG Kelin, KEERSMEACHER Wanda, TIAN Feng, SCHURGERS Guy, XIAO Xiaoming, LUO Yiqi, CHEN Chi, MYNENI Ranga, SHI Zheng, CHEN Hongsong, FENSHOLT Rasmus. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.

Evaluation of rocky desertification comprehensive control based on orchard intercropped by herbage: A case study of the Xingyi City, Guizhou Province

CHENG Hanting^{1,3,4}, LIU Guodao², DONG Rongshu², WANG Xiaomin³,
LI Qinfen^{1,4,5}, ZHOU Xiaohui^{1,4,5}, ZHANG Xianbo³

(1. *Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China*; 2. *Tropical Crops Germplasm Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China*; 3. *Guizhou Provincial Institute of Subtropics Crops, Xingyi, Guizhou 562400, China*; 4. *Hainan Key Laboratory of Tropical Ecological Circular Agriculture, Haikou, Hainan 571101, China*; 5. *Danzhou Agricultural Environmental Science Observation and Experiment Station Ministry Agriculture, Danzhou, Hainan 571700, China*)

Abstract An evaluation of rocky desertification comprehensive control is very important to optimize and improve

strategy for rocky desertification control modes. This paper aims to (I) analyze the relationship among agricultural structure, industrial resources situation, economy benefit and ecology benefit; (II) evaluate the comprehensive benefit of karst rocky desertification control by orchard-herbage intercropping, and further find its own advantages and disadvantages; (III) provide ecological economic and sustainable development reference for rocky desertification control in the southwest karst area of China.

A comprehensive prevention and control of rocky desertification area has been implemented in combination with tropical fruit tree intercropped by legume herb in Tianfang village, Nanpanjiang town, Xingyi City of Guizhou Province, where the rocky desertification is serious. To evaluate the comprehensive benefit of the demonstration area, we investigated the agricultural structure, industrial resources situation, and the benefits of economy and ecology before (2014) and after (2017 and 2020) karst rocky desertification control, and then adopted correlation analysis, Redundancy Analysis (RDA) and Structure Equation Modeling (SEM).

By converting cultivated land to orchard (mango and Macadamia intercropped with herbage or green manure) the agricultural industrial structure ,industrial resources development, economic benefit and ecological benefit of the demonstration area showed a good trend after 6 years of rocky desertification comprehensive control. Correlation analysis showed that the agricultural industrial structure and industrial resources development situation were significantly correlated with economic benefit and ecological benefit, except for farming/forest-grass area ratio and commodity output value of agricultural products. RDA analysis showed that there are five variables which are the important contributing factors to the changes of economic benefit and ecological benefit such as, proportion of orchard land, migrant worker population, economic contribution rate of migrant workers, commodity output value of agricultural products farming/forest-grass area ratio SEM further showed that the rocky desertification control are able to couple the coordinated development of ecological environment and industrial resources, and at the same time achieve ecological restoration and economic benefit.

Conclusions are drawn as follows, (I) The rocky desertification control in orchards intercropped by fruit tree has increased the number of labor force and migrant workers, and improved the economic benefits by increasing commodity output value of agricultural products and migrant workers income. (II) The ecological environment has been improved by increasing forest and grass coverage, soil erosion and water loss and surface runoff loss in the comprehensive control area of rocky desertification has been reduced. (III) The rocky desertification control by orchard covered with fruit tree and intercropped by crops controlling rocky desertification will improve both economic benefit and ecological benefit. Overall, rocky desertification control by fruit tree intercropping orchard is an effective way to achieve sustainable development in the southwest karst area of China The study results provide a basis for the comprehensive control of karst rocky desertification.

Key words rocky desertification, comprehensive control, benefit evaluation, Structural Equation Model

(编辑 杨杨 张玲)