

DOI: 10.5846/stxb201806091291

曹世雄, 刘伟, 赵麦换, 冯飞. 延安市生态修复双赢模式的实证研究. 生态学报, 2018, 38(22): - .

作者. Test of a win-win path for ecological restoration in Yan'an City, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

## 延安市生态修复双赢模式的实证研究

曹世雄<sup>1,2,\*</sup>, 刘伟<sup>3</sup>, 赵麦换<sup>4</sup>, 冯飞<sup>1</sup>

1 延安大学经济管理学院, 延安 716000

2 中央民族大学经济学院, 北京 100081

3 中山大学大气科学学院, 广东 510275

4 黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003

**摘要:**“越穷越垦、越垦越穷”的贫困陷阱是困扰全球可持续发展的学术难题之一, 探索摆脱贫困陷阱的有效途径, 是生态修复的核心目标。因此, 生态修复不仅要依据当地气候与地理条件开展生态治理, 同时要改变当地居民的生产生活行为, 发展有利于生态修复的绿色产业, 使当地居民的生产生活行为既可以提高收入、改善生活, 又有利于生态修复。从而摆脱“越穷越垦、越垦越穷”的被动局面, 实现生态修复与居民生计改善的双赢目标。为了验证这一模式的可行性, 该研究在退耕还林项目实施的基础上, 通过补短板的方式, 在延安市开展了生态修复双赢模式实证研究。结果表明, 新方案实施前, 延安市 NDVI 增长速度是陕西省平均水平的 41%; 新方案实施后, 是陕西省平均水平的 195%, 新方案的贡献率为 74.0%。双赢模式较好解决了环境保护与社会经济发展彼此分离的这一矛盾, 提高了生态修复的治理效果, 为我国生态脆弱区精准扶贫和生态文明建设提供了理论依据和适度超前的治理样板。

**关键词:** 气候变化, 生态修复, 土地退化, 植被覆盖度, 可持续发展

## Test of a win-win path for ecological restoration in Yan'an City, China

CAO Shixiong<sup>1,2,\*</sup>, LIU Wei<sup>3</sup>, ZHAO Maihuan<sup>4</sup>, FENG Fei<sup>1</sup>

1 College of Economic Management, Yan'an University, Yan'an 716000, China

2 School of Economics, Minzu University of China, Beijing 100081, China

3 College of Climate, Zhongshan University, Guangdong 510275, China

4 Co. Ltd. of the Yellow River Reconnaissance Planning Design, Zhengzhou 450003, China

**Abstract:** Desertification is caused by the interaction between climate change and human activity. Therefore, a win-win strategy that both restores the environment and ensures a sustainable livelihood for those who are affected by the restoration project is the most desirable solution. However, because researchers in the natural sciences and the humanities rarely cooperate, few researchers have simultaneously studied the combination of environmental and socioeconomic factors during ecological restoration. As a result, previous ecological restoration programs have typically benefited one group of factors at the expense of the other group. Because of the complexity of the interactions between humans and ecosystems and a lack of previous research on these interactions, it is difficult to simultaneously improve ecological restoration and socioeconomic development. To achieve such a solution, we suggested and tested a new approach that we call *A Win-win Path for Ecological Restoration*. In this approach, we calculated the contribution of the key ecological and socioeconomic factors for vegetation cover change during historical ecological restoration projects; we also accounted for the effects of climate change and land degradation to design suitable ecological restoration measures. To confirm that this approach works, we tested it in

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501002)

收稿日期: 2018-06-09; 网络出版日期: 2018-10-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shixiongcao@126.com

Yan'an City, a region of China where the national Grain for Green program has been implemented since 1999 to identify weak links and find ways to improve them. We found that vegetation cover increased by only 41% at the level of Shaaxi Province from 1982 to 1999, and 195% from 1999 to 2016. The new approach accounted for a 74.0% increase in vegetation cover since 1999. The Grain for Green Program accounted for the remaining 26% of the increase. Policy developers and ecosystem managers must remember that despite the importance of ecological restoration, residents of project areas have a right to survive and achieve an acceptable standard of living. Our win-win approach permits this by accounting simultaneously for ecological restoration and poverty alleviation. Another advantage of our approach is that it emphasizes methods that encourage natural recovery of a degraded ecosystem instead of replacing it with a new ecosystem that is less appropriate for the project area. Our results suggest that our method will help people who live in ecologically fragile areas to deal with the simultaneous effects of climate change and human activities.

**Key Words:** climate change; ecological restoration; land degradation; vegetation cover; sustainable development.

土壤侵蚀引发的土地退化是全球面临的重大环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。全球土地退化面积 3600 万 km<sup>2</sup>, 占地球陆地面积的四分之一, 直接经济损失每年高达 8500 亿美元<sup>[2]</sup>。我国土地退化面积约 330 万 km<sup>2</sup>, 占国土总面积的三分之一, 影响着 18 个省、400 多个县, 威胁着 4 亿多人口, 直接导致 1200 万人口处于贫困状态, 占全国贫困人口 28.5%<sup>[3]</sup>。土地退化导致可耕地面积逐步减少, 贫困化问题也呈加剧态势<sup>[4]</sup>。由于缺乏选择, 这些地区的居民往往被迫从事不可持续的生产活动, 如森林砍伐、过度放牧、开垦荒地, 从而造成土地退化<sup>[5]</sup>。贫困导致土地退化、土地退化进一步加剧贫困的恶性循环被称为“贫困陷阱”, 严重困扰着这些地区居民的生存与社会经济发展<sup>[6]</sup>。

土地退化是自然和人为等多重因素共同作用的结果<sup>[7-8]</sup>, 气候变化和人类活动对植被变化有重要影响, 地表植被变化也会影响气候变化<sup>[9-10]</sup>和人类活动<sup>[11-12]</sup>。自然学科的一些学者认为, 气候变化影响土壤质量、植被覆盖度、物种组成、水文循环, 因而导致了土地退化<sup>[13-14]</sup>; 人文学科一些学者认为, 不可持续的人类活动(如过度放牧、过度采伐、地下水开采等)对生态系统施加了巨大压力, 进而导致了水土流失, 加剧了土地退化<sup>[15-16]</sup>。但是, 以前的研究要么集中在与气候变化有关的气象因素<sup>[1]</sup>、要么集中在与人类活动有关的人为因素<sup>[4]</sup>, 鲜有基于长期数据监测下对自然与人为等多重因素之间相互作用的定量评估<sup>[13-14]</sup>。这些互不关联的研究结果, 很难为环境管理提供科学依据, 从而制约了生态环境保护的进一步发展。

传统生态系统恢复的工作重点是重新建立生态干扰机制或者非生物条件, 并依靠生态系统演替过程促进生物群落恢复。但是, 生物因素和气候环境之间强烈的相互作用可以改变以生态系统演替为基础的环境工程结果<sup>[17-18]</sup>。因此, 如何正确认识生态修复与社会经济发展的相互关系, 有的放矢地建立有效应对机制, 仍然是我国乃至全球生态修复研究的重要课题<sup>[19-20]</sup>。寻找摆脱“越穷越垦、越垦越穷”的被动局面, 实现生态修复与居民生计改善的双赢目标, 无疑是生态修复的根本出路<sup>[21]</sup>。

由此可见, 土地退化是自然和人为等多重因素共同作用的结果, 因此, 生态修复不仅要依据气候与地理条件开展生态治理, 同时要改变当地居民的生产生活行为, 发展有利于生态修复的绿色产业, 使当地居民的生产生活行为既可以提高收入、改善生活, 又有利于生态修复。从而摆脱“越穷越垦、越垦越穷”的被动局面, 实现生态修复与居民生计改善的双赢目标。为了提高效率, 生态修复应通过关键因素对生态系统演化的影响评估, 明确历史时期不同治理措施对生态系统恢复的贡献度, 结合地方气候条件、土地退化程度、以及当地居民的生产生活方式, 科学配置生态修复治理措施, 使退化生态系统逐步恢复到健康稳定的自然状态。为了验证这一假设的科学性和可行性, 该研究依据生态修复双赢理论, 在陕西省延安开展了为期 16 年的实证研究。

## 1 延安市生态修复双赢模式的探索与实践

### 1.1 研究区概况

延安市位于陕西省北部黄土丘陵沟壑区, 总面积  $3.7 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 年均气温 9.6℃, 极端最低气温 -11℃, 极端

最高气温 28.2℃, 年均降水 513 mm, 且 81.4% 集中在 5—10 月主汛期。2015 年全市人口  $2.2 \times 10^6$ , 其中农村人口  $1.9 \times 10^6$ , 年人均纯收入 6180 元。1999 年延安市在全国率先开展退耕还林试点工作。

### 1.3 生态修复双赢模式

为了全面认识气候变化和人类活动对生态系统演化的影响, 该研究通过卫星或遥感数据, 以归一化差分植被指数值 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 一般应用于检测植被生长状态、植被覆盖度) 代替植被变化, 获取研究区各个年度植被变化的平均值。并从统计年鉴或者社会调查方法获得可能影响植被变化的所有气候和人类活动指标的年度数据。

统计指标包括: (1) 农村社会发展指标: 农村人口、农业劳动力、公路绿化里程、铁路绿化里程、矿区绿化面积; (2) 农村经济发展指标: 农业 GDP, 农业收入、农村人均收入、耕地面积、播种面积、复种指数、基本农田面积、粮食产量、粮食单产、各种家畜存栏量; (3) 环境政策指标: 封山禁牧面积、封山育林面积、人工造林面积、人工种草面积、退耕面积、生态项目投资; (4) 气候环境指标: 年均温度、年均降水量、极端温度、 $>0^\circ\text{C}$  和  $>10^\circ\text{C}$  积温、太阳辐射、地下水位、地表水量等统计监测指标。

为了去除统计单位不同造成的影响, 相关研究使用每个指标的年度变化率面板数据去识别关键因素, 并且比较他们对 NDVI 的贡献。为了避免重叠因素对结果的影响, 该研究应用 2011 版本的 STATA 软件的回归分析模型 (<http://www.stata.com>) 计算所有双驱动因素之间关系的回归系数, 最后确定关键指标。面板数据模型如下:

$$y_{it} = a + bx_{it} + u_{it} \quad (1)$$

式中,  $y_{it}$  是指在 t 年 i 地区的 NDVI 值,  $x_{it}$  是相应的影响因素,  $u_{it}$  是误差, a 和 b 是回归系数。

为了解释在回归分析中变量因素自相关的可能性, 可以使用 Breusch-Godfrey LM 测试, 最终得到辅助回归系数 R。依据  $(n-1)R$  近似服从自由度为 1 的卡方分布来确定有没有出现显著自相关。然后将原始数据  $x_{it}$  减去  $x_{it}$  的均数后, 再除以  $x_{it}$  的标准差, 从而得到标准化的 a 和 b。最后计算项目区中不同变量对 NDVI 变化的贡献率, 并依据贡献率、结合地方气候条件、土地退化程度配置生态修复治理措施。计算的模型如下:

$$\text{Con}_i = \frac{|\text{SCV}_i|}{\sum_1^i |\text{SCV}_i|} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $\text{Con}_i$  是变量 i 对 NDVI 的贡献,  $|\text{SCV}_i|$  是变量 i 标准化系数值的绝对值、通过系数 b 来计算。

2000 年, 科研人员测算了延安市历史时期关键指标对植被变化的贡献率。结果表明, 农村人口减少、农民收入增加、耕地面积减少、封山育林、矿区和道路绿化对本年度植被的贡献率分别为 18.8、11.4、11.1、6.1、11.8%, 并存在时滞效应(对第二年和第三年的影响分为 8.5、20.4、25.5、0、0% 和 0、9.9、11.5、15.9、0%); 气候变化(气温和降水)对本年度的影响为 18.1、19.0%(表 1)。

表 1 各因素对 1982 至 1999 年间延安市 NDVI 变化的相对贡献

Table 1 The relative contribution of each factor to the changes in NDVI from 1982 to 1999 in Yanan City, China

指标 Factors	第一年 First year		第二年 Second year		第三年 Third year	
	$R^2$	贡献率 Contribution/%	$R^2$	贡献率 Contribution/%	$R^2$	贡献率 Contribution/%
农村人口 Rural Population	-0.801 **	18.76	-0.21	8.48	-0.247	0
农民纯收入 Rural net income	0.138 *	11.43	0.529 **	20.39	0.499 **	9.93
耕地面积 Farm land area	-0.290 *	11.11	-0.609 **	25.47	-0.519 **	11.46
封山育林面积 Forestry area forbid	0.309 *	6.07	0.268	0	0.330 *	15.88
人工造林 Reforestation area	-0.015	3.79	-0.133	17.55	-0.17	0
道路和矿区绿化 Road and mines' greened	0.125	11.78	0.125	0	-0.096	0
气温 Temperature	0.672 **	18.05	0.577 **	20.09	0.578 **	29.33
降水 Precipitation	0.725 **	19.01	0.094	0	0.055	0

显著性水平 Significance levels: \*\* 1%, \* 5%

依据补短板原理,延安市政府在国家退耕还林植树造林基础上,增加了以下治理策略:(1)通过人均 0.17  $\text{hm}^2$  基本农田建设促进坡地退耕还林;(2)多种经营大力发展经济林增加农民的收入;(3)大力开展封山育林和封山禁牧,依靠自然力量恢复植被;(4)通过城市化和生态移民减少环境压力;(5)加大矿区和道路边坡水土保持工作力度,保护生态环境。

## 2 实施效果

结果显示,1999 至 2016 年延安市人工造林、果树种植、封山育林、道路绿化、基本农田、农民纯收入分别增长了 111.7%、98.1%、74.2%、35.3%、17.0%、203.1%(图 1);NDVI 增长了 49.8%(图 2)。

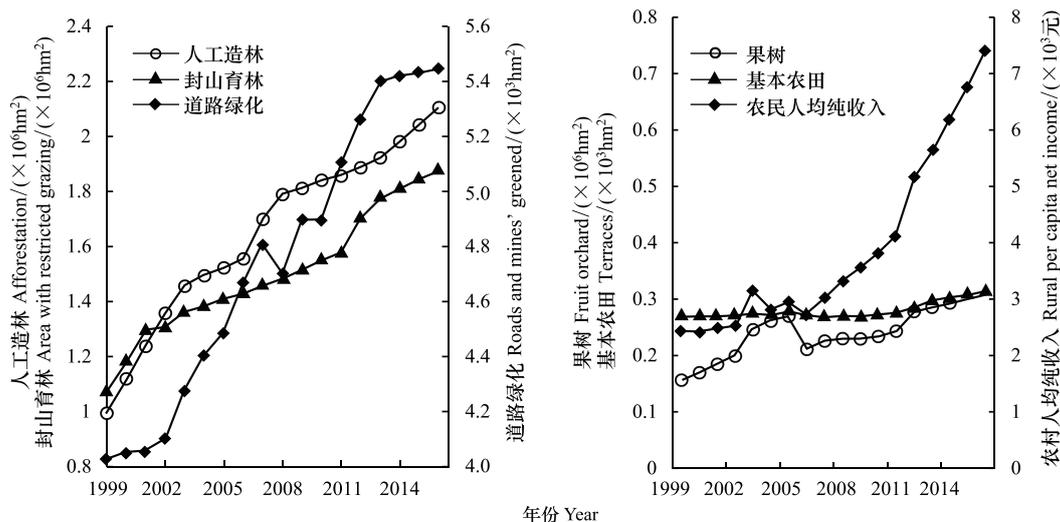


图 1 1999—2016 年延安市主要生态经济指标增长情况

Fig.1 The primary ecological economics change in Yanan City from 1999 to 2016

卫星图片显示,精准治理前的 1982—1999 年,延安市 NDVI 增长速度是陕西省平均水平的 41.2%,精准治理后是陕西省平均水平的 194.8%(图 2,3)。精准治理对本年度、第二年度、及第三年度的贡献分别为 74.0%、72.1%、67.7%(表 2)。

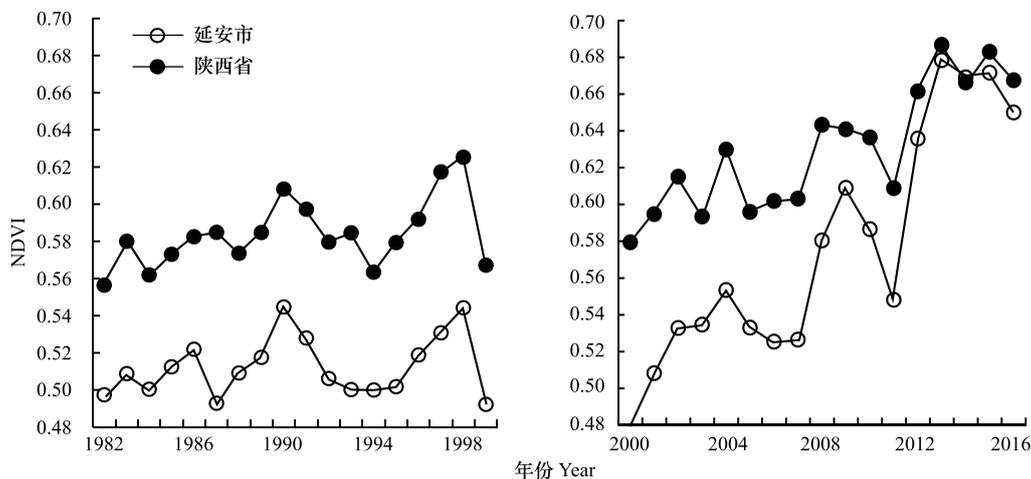


图 2 延安市和陕西省精准治理项目前后 NDVI 变化图

Fig.2 NDVI change in Yanan City and Shaanxi Province before and after the Targeted path

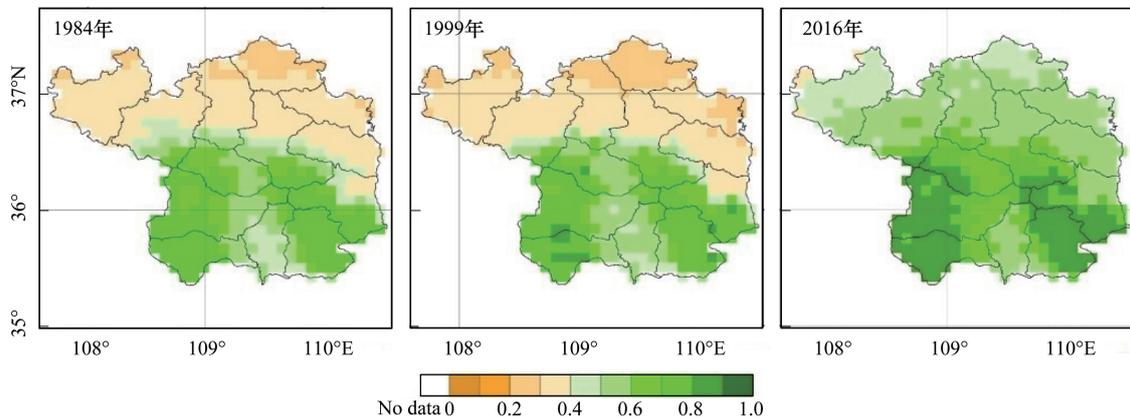


图3 延安市1984、1999、2016NDVI图

Fig.3 NDVI in Yanan City from 1984 to 1999 and 2016

表2 1999年以后各种因素对延安市NDVI变化的贡献率

Table 2 The contribution of each factor to the changes of NDVI since 1999 in Yanan City

指标 Factors		第一年 First year		第二年 Second year		第三年 Third year	
		$R^2$	贡献率 Contribution/%	$R^2$	贡献率 Contribution/%	$R^2$	贡献率 Contribution/%
精准治理 Targeted measures	农村人口	-0.743 **	5.77	-0.743 **	2.10	-0.743 **	5.07
	农民纯收入	0.331 *	23.63	0.331 *	40.60	0.331 *	37.56
	基本农田	0.647 **	14.62	0.647 **	5.39	0.744 **	3.10
	封山禁牧面积	0.628 **	16.68	-0.705 **	11.46	0.628 **	7.89
	道路矿区绿化面积	0.691 **	13.31	0.691 **	12.55	0.691 **	14.03
退耕还林	人工造林面积	0.513 **	12.11	0.513 **	5.42	0.513 **	15.30
Grain for Green	经济林面积	0.612 **	5.62	0.612 **	17.73	0.612 **	5.66
气候变化 Climate change	气温	0.678 **	2.89	0.678 **	2.12	0.678 **	3.41
	降水	0.043 ns	5.36	0.043	2.81	0.043	7.99

显著性水平 Significance levels: \*\* 1%, \* 5%, ns not significant

### 3 讨论

生态修复工程作为一项公共政策,其根本目标是实现人类社会经济的可持续发展<sup>[6,22]</sup>。研究表明,通过发展农村经济实现环境保护是可持续发展的长期策略<sup>[23]</sup>。因此,在处理生态建设与社会经济发展的关系上,不应一味寻找资源替代品,而应做好生态建设与社会经济发展的平衡<sup>[24]</sup>。由此可见,社会经济发展在环境保护工作中起着至关重要的作用,其不仅影响项目区内人群之间利益分配的公平性,也影响项目区外受项目影响人群之间利益分配的公平性<sup>[25-27]</sup>。

生态恢复对未来生态系统和社会经济系统的结构和组成有着复杂而难以估量的影响<sup>[8,28]</sup>。即使生态恢复的意图良好,恢复策略适合环境条件,也有必要考虑该项目的社会经济后果<sup>[23]</sup>。特别是像我国这样经济发展迅速、人口密集、地理环境差异显著的国家更是如此<sup>[29]</sup>。通过改善居民生计、增加农村居民收入,可以有效提高他们对生态恢复活动的积极性。也只有这样,生态脆弱地区的居民才有可能摆脱贫困陷阱<sup>[21]</sup>。实践表明,双赢策略对延安生态修复做出了重大贡献(表2)。

生存权高于所有其他权利<sup>[30]</sup>。因此,生态修复与精准扶贫的有效对接才是区域可持续发展的根本出路。对于生态脆弱区的居民,生态退化和贫困化相互作用,极易形成贫困陷阱。采取有效措施消除贫困,为当地居民提供更好和可持续的发展策略,可显著提高生态修复效果<sup>[21]</sup>。国家或地方政府实施生态修复工程时,必须充分考虑相关地区的社会和经济需要,通过技术培训、就业帮扶、绿色产业发展等方法,使当地居民在项目结

束后也有稳定的就业和收入来源<sup>[23]</sup>。如果一个项目不能为当地居民提供良好生计,任何保护环境的话语都是空话<sup>[31]</sup>。

生态系统复杂多变,如降水对于干旱少雨的干旱地区无疑是植被修复的甘露,但对积温不足的高寒地区,降水增加会减少光照,影响植物的光和作用<sup>[7]</sup>。干旱地区植树造林通常需要灌溉才能存活<sup>[32]</sup>,但树木蒸散发进一步增加了土壤水分消耗,使本来就有限的水资源更加紧张<sup>[3]</sup>。相对于自然因素(如降水、光照)直接作用于植物的生长发育,人工措施对生态系统的影响是渐渐的,需要较长时间的响应过程,这很好地说明了人类活动的时滞效应<sup>[33]</sup>。生态退化与经济发展之间的关系、以及环境保护与消除贫困之间的联系都是动态的,也存在区域差异<sup>[34-35]</sup>。自然生态系统具有复杂性特征<sup>[36]</sup>,在受到人为干扰或者环境变化(如气候变化)时,生态系统自我恢复会更加困难<sup>[37]</sup>。在气候变化、环境退化、生态系统日益脆弱化的大背景下,环境管理更加需要负有弹性的解决方案<sup>[38]</sup>。这进一步说明生态修复需要全面了解气候变化和人类活动之间的交互作用,从而针对这些因素的相关性制定出切实可行的应对措施。

退化的生态系统处于极不稳定状态,景观连续性和结构变化、物种丧失、优势物种变化、不同营养层次相互作用,都会引起土壤和其他生物群落的变化<sup>[39]</sup>。当外部扰动引起主要物种、土壤、或者生态群落内部其他资源发生变化时,生态群落结构极有可能表现出突然变化<sup>[40-42]</sup>。而不适当的生态修复方式会导致退化生态系统朝逆向方向发展<sup>[17,43]</sup>。不同地区气候不同、社会经济发展水平不同,生态修复的路径也不尽相同<sup>[36]</sup>。因此,尊重地方差异,在不同地区采取因地制宜的差异性策略是未来环境管理学研究的重要方向。

生态修复是对受损生态系统的修补、而不是重建。正如该研究结果显示,生态修复双赢模式的理念与方法,可以有效减少生态修复的盲目性、降低生态工程成本,达到事半功倍的效果。科学合理的生态修复是基于长期土地净收益最大化的综合结果,而不是追求某个单一指标(比如森林覆盖度)的最大化和短期利益最大化。通过分析生态系统演化的驱动力,因地制宜生态治理,是生态修复的根本出路。虽然该研究的理论方法还很粗糙,但是研究结果反映出的问题值得重视。生态修复双赢模式的研究结果可以帮助相关部门获得更加有效的规划方案,为环境保护和社会经济发展提供理论基础,该方法的成熟与应用将对我国社会经济可持续发展产生深远影响。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Sivakumar M V K. Interactions between climate and desertification. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2/4): 143-155.
- [ 2 ] D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, Ravi S, Runyan C W. Global desertification: drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 326-344.
- [ 3 ] Wang X M, Chen F H, Hasi E, Li J C. Desertification in China: an assessment. *Earth-Science Reviews*, 2008, 88(3/4): 188-206.
- [ 4 ] Olukoye G A, Kinyamario J I. Community participation in the rehabilitation of a sand dune environment in Kenya. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(4): 397-409.
- [ 5 ] Sietz D, Lüdeke M K B, Walther C. Categorisation of typical vulnerability patterns in global drylands. *Global Environmental Change*, 2011, 21(2): 431-440.
- [ 6 ] Tallis H, Kareiva P, Marvier M, Chang A. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9457-9464.
- [ 7 ] Cao S X, Ma H, Yuan W P, Wang X. Interaction of ecological and social factors affects vegetation recovery in China. *Biological Conservation*, 2014, 180: 270-277.
- [ 8 ] Feng Q, Ma H, Jiang X M, Wang X, Cao S X. What has caused desertification in China? *Scientific Reports*, 2015, 5: 15998.
- [ 9 ] 石正国, 延晓冬, 尹崇华, 王召民. 人类土地利用的历史变化对气候的影响. *科学通报*, 2007, 52(12): 1436-1444.
- [ 10 ] 马迪, 刘征宇, 吕世华, Notaro M, 容新尧, 陈广善, 王富瑶. 东亚季风区植被变化对局地气候的短期影响. *科学通报*, 2013, 58(17): 1661-1669.
- [ 11 ] 孙晓鹏, 王天明, 寇小军, 葛剑平. 黄土高原泾河流域长时间序列的归一化植被指数动态变化及其驱动因素分析. *植物生态学报*, 2012, 36(6): 511-521.
- [ 12 ] 马华, 王云琦, 王力, 王益坤. 近20a广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系. *山地学报*, 2014, 32(1): 38-45.
- [ 13 ] Marland G, Pielke Sr R A, Apps M, Avissar R, Betts R A, Davis K J, Frumhoff P C, Jackson S T, Joyce L A, Kauppi P, Katzenberger J, MacDicken K G, Neilson R P, Niles J O, Niyogi D S, Norby R J, Pena N, Sampson N, Xue Y K. The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy. *Climate Policy*, 2003, 3(2): 149-157.
- [ 14 ] Zhou H J, Van Rompaey A, Wang J A. Detecting the impact of the "Grain for Green" program on the mean annual vegetation cover in the Shaanxi

- province, China using SPOT-VGT NDVI data. *Land Use Policy*, 2009, 26(4): 954-960.
- [15] Zhao H L, Zhao X Y, Zhou R L, Zhang T H, Drake S. Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(2): 309-319.
- [16] Zheng Y R, Xie Z X, Robert C, Jiang L H, Shimizu H. Did climate drive ecosystem change and induce desertification in Otindag sandy land, China over the past 40 years? *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(3): 523-541.
- [17] Suding K N, Gross K L, Houseman G R. Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(1): 46-53.
- [18] 吕一河, 高光耀, 罗毅, 焦菊英, 邵明安. 黄土高原区域生态综合研究: 机理深化与方法拓展. *生态学报*, 2016, 36(22): 7069-7073.
- [19] Newmark W D, Jenkins C N, Pimm S L, McNeally P B, Halley J M. Targeted habitat restoration can reduce extinction rates in fragmented forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(36): 9635-9640.
- [20] Meli P, Herrera F F, Melo F, Pinto S, Aguirre N, Musólem K, Minaverri C, Ramírez W, Brancalion P H S. Four approaches to guide ecological restoration in Latin America. *Restoration Ecology*, 2017, 25(2): 156-163.
- [21] Cao S X, Zhong B L, Yue H, Zeng H S, Zeng J H. Development and testing of a sustainable environmental restoration policy on eradicating the poverty trap in China's Changting County. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(26): 10712-10716.
- [22] Cao S X, Chen L, Zhu Q K. Remembering the ultimate goal of environmental protection: including protection of impoverished citizens in China's environmental policy. *Ambio*, 2010, 39(5/6): 439-442.
- [23] Gong C, Xu C G, Chen L, Cao S X. Cost-effective compensation payments: a model based on Buying Green Cover to sustain ecological restoration. *Forest Policy and Economics*, 2012, 14(1): 143-147.
- [24] Cao S X, Shang D, Yue H, Ma H. A win-win strategy for ecological restoration and biodiversity conservation in Southern China. *Environmental Research Letters*, 2017, 12: 044004.
- [25] Pagiola S, Arcenas A, Platais G. Can payments for environmental services help reduce poverty? An exploration of the issues and the evidence to date from Latin America. *World Development*, 2005, 33(2): 237-253.
- [26] Pywell R F, Warman E A, Hulmes L, Hulmes S, Nuttall P, Sparks H T, Critchley C N R, Sherwood A. Effectiveness of new agri-environment schemes in providing foraging resources for bumblebees in intensively farmed landscapes. *Biological Conservation*, 2006, 129(2): 192-206.
- [27] Wang G Y, Innes J L, Lei J F, Dai S Y, Wu S W. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318(5856): 1556-1557.
- [28] Ma H, Lv Y, Li H X. Complexity of ecological restoration in China. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 75-78.
- [29] Cao S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in Arid and Semiarid Areas of China: achievements, problems, synthesis, and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317-335.
- [30] Biagini B, Miller A. Engaging the private sector in adaptation to climate change in developing countries: importance, status, and challenges. *Climate and Development*, 2013, 5(3): 242-252.
- [31] Enfors E. Social-ecological traps and transformations in dryland agro-ecosystems: Using water system innovations to change the trajectory of development. *Global Environmental Change*, 2013, 23(1): 51-60.
- [32] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, Pockman W T, Wall D H. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, 418(6898): 623-626.
- [33] 曹世雄, 刘冠楚, 马华. 我国三北地区植被变化的动因分析. *生态学报*, 2017, 37(15): 5023-5030.
- [34] Adams W M, Aveling R, Brockington D, Dickson B, Elliott J, Hutton J, Roe D, Vira B, Wolmer W. Biodiversity conservation and the eradication of poverty. *Science*, 2004, 306(5699): 1146-1149.
- [35] 王福兴, 姜丽秋. 生物多样性保护的生态补偿机制. *经济地理*, 2008, 28(4): 667-670, 687-687.
- [36] Byers J E, Cuddington K, Jones C G, Talley T S, Hastings A, Lambrinos J G, Crooks J A, Wilson W G. Using ecosystem engineers to restore ecological systems. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(9): 493-500.
- [37] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [38] Harris S E. Cyprus as a degraded landscape or resilient environment in the wake of colonial intrusion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(10): 3670-3675.
- [39] Sasaki T, Okayasu T, Jamsran U, Takeuchi K. Threshold changes in vegetation along a grazing gradient in Mongolian rangelands. *Journal of Ecology*, 2008, 96(1): 145-154.
- [40] Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 2005, 310(5754): 1628-1632.
- [41] Srinivasan U T, Carey S P, Hallstein E, Higgins P A T, Kerr A C, Koteen L E, Smith A B, Watson R, Harte J, Norgaard R B. The debt of nations and the distribution of ecological impacts from human activities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(5): 1768-1773.
- [42] 马华, 钟炳林, 岳辉, 曹世雄. 典型红壤区自然生态修复的适用性. *生态学报*, 2015, 35(18): 6148-6156.
- [43] Klötzli F, Grootjans A P. Restoration of natural and semi-natural wetland systems in Central Europe: progress and predictability of developments. *Restoration Ecology*, 2001, 9(2): 209-219.