

南方红壤丘陵区水土保持生态 服务功能提升研究进展

——以江西省兴国县塘背河小流域为例

肖胜生^{1,2}, 王聪³, 郭利平^{1,2}, 宋月君^{1,2}, 汤崇军^{1,2}

(1. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029; 3. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: [目的] 总结和探讨南方红壤丘陵区水土保持生态服务功能的提升途径, 为该区水土保持生态建设、脱贫致富和社会经济可持续发展提供科学借鉴。[方法] 以江西省兴国县塘背河小流域为例, 基于相关科学研究和文献资料, 在综合考虑不同生态服务功能之间的关系基础上, 开展以水土保持服务功能提升为核心的关键技术研究。[结果] 在系统梳理塘背河小流域治理成效的基础上, 指出崩岗侵蚀、林分结构单一和林下流、规模化经果林开发导致的局部水土流失恶化和生态系统脆弱等问题依然存在, 亟需从前期侧重遏制水土流失为主的生态修复转向生态系统服务功能整体提升为主的新阶段, 这是南方红壤丘陵区普遍存在的问题。[结论] 建议以生态系统服务提升为核心目标, 从不同服务之间权衡与协同关系和水土保持服务的空间流动等基础科学问题研究入手, 研发水土保持生态服务功能提升关键技术(包括权衡与协同水土保持与生物多样性、水源涵养和固碳增汇等服务功能之间的关系), 并构建生态和社会经济协调发展的生态服务功能提升综合模式, 打造塘背河小流域“升级版”和“扩展板”, 以促进研究成果的转化, 服务南方红壤丘陵区生态环境保护与可持续高质量发展。

关键词: 塘背河小流域; 南方红壤丘陵区; 水土保持; 生态服务功能; 可持续高质量发展

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0289-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 肖胜生, 王聪, 郭利平, 等. 南方红壤丘陵区水土保持生态服务功能提升研究进展[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 289-294. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 06. 042; Xiao Shengsheng, Wangcong, Guo Liping, et al. Progress of researches on enhancing soil erosion control and ecological services in red soil hilly region of South China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 289-294.

Progress of Researches on Enhancing Soil Erosion Control and Ecological Services in Red Soil Hilly Region of South China

—A Case Study at Tangbei River Watershed of Xingguo County, Jiangxi Province

Xiao Shengsheng^{1,2}, Wangcong³, Guo Liping^{1,2}, Song Yuejun^{1,2}, Tang Chongjun^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, 330029, Nanchang, China;

2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, 330029, Nanchang, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] The approaches to improve the ecological service of soil and water conservation in the red soil hilly region of the South China were reviewed and discussed in order to provide scientific reference for the ecological construction of soil and water conservation, poverty alleviation, and sustainable development of social economy in this area. [Methods] Taking Tangbei River watershed in Xingguo County of Jiangxi Province as a case study, based on the relevant scientific research literatures, and considering the relationship

收稿日期: 2019-08-13

修回日期: 2019-11-05

资助项目: 国家重点研发计划课题“高效开发型水土流失治理技术集成与示范”(2017YFC0505405); 江西水利科技重大项目(201821ZDKT17; KT201716)

第一作者: 肖胜生(1981—), 男(汉族), 湖北省英山县人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持生态恢复方面的研究工作。E-mail: xss19811213@163.com.

通讯作者: 汤崇军(1976—), 男(汉族), 江西省赣州市崇义县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究工作。E-mail: tangchongjun@126.com.

between different ecological service functions, the key technology research focusing on the improvement of soil and water conservation service function was carried out. [Results] Although remarkable achievements has been made in the comprehensive control of soil erosion, Tangbei River watershed is still faced with serious soil erosion problems, such as collapse erosion, serious soil erosion under forest, soil erosion caused by large-scale economic fruit forest development, and fragile ecosystems. It was urgent to shift the focus from the prevention of soil erosion to the improvement of ecosystem services. [Conclusion] The key technologies for the promotion of soil and water conservation ecological services (such as the relationship between the balance and coordination of soil and water conservation and biological diversity, water conservation and carbon sequestration) should be developed based on the basic scientific issue such as the trade-offs and synergies among different ecosystem services and spatial mobility of soil and water conservation services. The comprehensive model for harmonious development of ecology and social economy should be constructed, and a “upgraded version” and “expanded version” of Tangbei River watershed should be built, in order to promote the transformation and application of research results, and serve the protection and construction of local ecological environment, as well as sustainable and high quality development of the red soil hilly region in the South China.

Keywords: Tangbei River watershed; red soil hilly region of South China; soil and water conservation; ecosystem services; sustainable and high quality development

南方红壤丘陵是中国“两屏三带”生态安全屏障的重要组成部分。由于自然和人为因素的双重影响,导致其生态屏障作用得不到有效发挥,区域生态安全难以维持。①自然因素。区域降雨量是全国年均水平的 2~3 倍,且季节分布不均衡,降雨集中在 4—6 月,容易诱发严重的水土流失;区域内低山丘陵交错,地形破碎(如崩岗地貌发育,且分布广泛),为土壤侵蚀提供了较为便利的地形条件。②人为因素。主要是区域人口稠密,人地矛盾突出。例如,不规范地规模化经果林开发等强度大的活动进一步加剧了水土流失。南方红壤丘陵实施了系列生态工程治理后(如飞播造林、退耕还林和水土流失重点治理工程等),对区域内生态系统服务功能的提升具有一定的促进作用^[1-2],水土流失面积也得到了有效遏制,但区域内广泛分布的残次林存在生物多样性低,固碳增汇效率差,水土保持与水源涵养功能低下等生态服务功能问题依然存在,治理技术及模式的生态功能仍有待提升。总体来说目前区域的水土保持工作处于一种瓶颈状态,亟需开展相关基础理论研究,研发集成相关技术,建立示范样板,将水土流失治理的生态服务功能与民生改善有机结合,从侧重遏制水土流失面积的扩张转向注重生态系统功能的整体提升。

江西省兴国县塘背河小流域为中国 1980 年首批开展小流域综合治理试点的小流域之一,是南方花岗岩侵蚀区具有典型性和代表性的水土保持综合治理试点的样板。经过几十年的水土保持综合治理,兴国县 2012 年被评为“国家水土保持生态文明县”,但由于地处赣南革命老区腹地,脱贫攻坚任务依然严峻。因此,如何由“绿起来”向“富起来”转变、新时期水土

保持工作如何转型升级、如何保持“塘背”这张靓丽名片不褪色是我们需要考虑的问题。为此,本文以塘背河小流域为研究对象,在考虑粮食/果品生产、水土保持、生物多样性、水源涵养和固碳增汇等不同生态服务功能之间权衡和协同关系的基础上,开展以水土保持服务功能提升为核心的关键技术研究,构建兼顾生态和社会经济发展的生态服务功能提升优化模式,打造塘背河小流域“升级版”和“扩展板”,旨在为小流域水土保持重点建设工程效益评价提供参考,进而为南方红壤丘陵山区的水土保持与生态建设,脱贫致富,和经济社会可持续高质量发展提供借鉴。

1 塘背河小流域水土流失治理成效及存在问题

1.1 水土流失治理成效研究进展

塘背河小流域位于江西省兴国县境内(图 1),跨龙口、永丰两个乡,属长江流域鄱阳湖水系,为赣江上游贡水的二级支流,流域面积 16.38 km²^[3]。气候属亚热带季风气候,年平均温度 19.5℃,无霜期 289 d,年平均降雨量为 1 593 mm。地貌类型以山地丘陵为主,其中 40% 为低山,主要分布在上游,50% 为丘陵;流域海拔高度 131~469 m^[3],土壤类型为花岗岩发育成的红壤,地带性植被为亚热带常绿阔叶林。由于过去不合理地采伐利用,该区原生植物遭到毁灭性破坏,引发了严重的水土流失,使得塘背河小流域成为南方红壤区重度侵蚀区。20 世纪 80 年代初,小流域境内山地面积 1 155 hm²,而剧烈和强度流失面积合计 951 hm²,占山地面积的 82.4%,山地植被覆盖率

仅为10%，被称为“江南红色沙漠”^[4]。塘背河小流域于1983年成为全国首批开展小流域综合治理试点的小流域之一。经过约30 a的综合治理，取得了显著的生态、经济和社会效益，昔日“江南红色沙漠”腹地变成了美丽的绿色山川。2000年，塘背河小流域被国家水利部、财政部命名为“全国水土保持生态环境建设示范小流域”，其所在的兴国县于2012年被评为“国家水土保持生态文明县”，且其所在的赣州市于2014年被水利部列为全国首个水土保持改革试验区。塘背河小流域治理的成功经验为赣南乃至南方红壤丘陵区的水土保持治理工作奠定了基础。之后以小流域为单元的水土流失综合治理在南方红壤丘陵区全面铺开，并在减少江河湖库泥沙淤积，改善农业生产条件，调整产业结构以及促进经济社会协调发展等方面成效显著。塘背河小流域的成功经验也越来越受到相关学者的重视。如宋月君和张金生^[5]采用中国土壤流失方程(CSLE)对1975—2008年塘背河小流域土壤侵蚀时空变化特征进行了分析，结果表明，土壤侵蚀面积已由1975年的12.20 km²减少为2008年的3.40 km²，治理度达72.13%，尤其是强烈和剧烈流失面积下降了98.5%，并且以流域中游的来溪村和下游的都田村变化最为显著，在空间格局上已由治理前的集中连片式转变为2008年的零星分散式。小流域植被覆盖度也由1975年的22.91%提升到2014年的86.87%。40 a间塘背河小流域新增植被面积高达7.25 km²，超过整个流域总面积的50%^[3]。另外，苏春丽等^[6]建立了“小流域治理度”的概念，并认为塘背河小流域经过多年治理恢复，其治理度由治理前的0.252提高到0.683，生态经济系统进入了初步的良性循环。孙昕等^[7]也认为，塘背河小流域基本上已进入良性发展状态，不需再进行大规模的治理活动，因此其今后水保工作的重点是强化维护工作以持续发挥水土保持措施的生态、社会和经济效益。

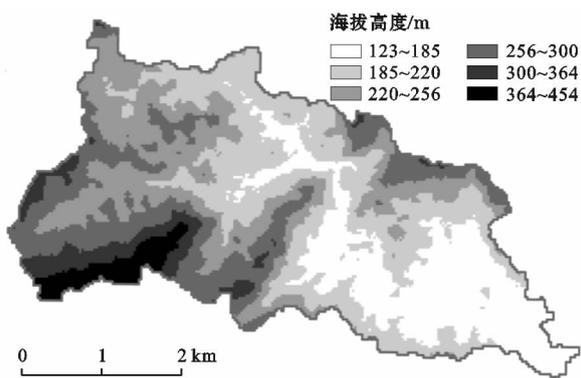


图1 兴国县塘背河小流域地形图(DEM)

1.2 水土保持工作存在问题

尽管塘背河小流域水土保持工作取得了阶段性成效，但依然存在明显不足。如小流域内以马尾松小老头林为代表的低效林广泛分布，导致了严重的林下水土流失问题。“远看青山在，近看水土流”是对该区域的真实写照；以针叶林为主的林分结构不合理，导致森林生态功能低下；崩岗侵蚀在小流域内还有零星分布，主要集中在小流域中游腹地，个别区域水土流失严重。例如，永丰乡凌源村一处崩岗侵蚀群，侵蚀面积达到 $3.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ ^[3]。特别是规模山地林果开发(主要是脐橙和油茶)等人为活动剧烈导致新增水土流失等问题。如与2001年相比，由于流域下游文院村果园开发导致小流域植被覆盖减少了0.86 km²，并且新开发果园2~3 a内地表植被尚未完全覆盖，从而造成一定程度的水土流失^[3]。宋月君和张金生^[5]指出，塘背河小流域仍然存在着少量的水土流失强烈侵蚀区，主要与新果园开发初期有关，特别是山顶以及个别区域存在林下水土流失和崩岗侵蚀。这些问题导致流域生物多样性维持、碳汇功能、水土保持与水源涵养等生态服务功能严重退化，生态屏障作用不断被削弱，对区域生态安全造成一定的威胁。另外，塘背河小流域内经济发展水平相对滞后，如下游所在的都田村共计465户2217人，至2018年底仍有贫困户40户和贫困人口204人，脱贫攻坚任务较重。总体而言，将来一段时期内塘背河小流域水土保持工作需要结合民生改善，将水土流失治理与生态服务功能提升有机结合，在进一步有效消减现有水土流失面积和遏制新增人为水土流失的基础上，逐步提升生态服务功能，培育生态产业^[8]，以有效推动当地的社会经济发展。

在到整个南方红壤丘陵区，由于其特殊的自然地理条件和生态恢复的复杂性，截至2013年第一次全国水利普查时区域内仍有水土流失面积 $1.60 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，特别是崩岗侵蚀达到23.9万个^[9]。史志华等^[8]认为，南方红壤区治理模式缺乏区域针对性；广泛分布的低效林林分结构亟需调整；崩岗与林下水土流失治理、生态与生产协调发展是难点。针对上述问题，建议研发以下关键技术：①多用途抗逆乡土植物筛选及规模化建植技术；②有机物资源利用与侵蚀退化土壤肥力提升技术；③水土保持措施空间布局与系统功能提升技术；④区域水土流失治理与特色生态产业协同发展技术^[8]。

2 生态系统服务研究进展

新时期，水土保持工作面临着从初步治理到质量

提升的转型阶段。在这种转型过程中,需要从单一治理措施到综合技术集成,从增加植被覆盖率为目的转向结构改善和功能提升,从蓄水减沙为主到小流域综合治理,再到区域尺度上的生态经济协同、持续和高质量发展与优化布局,并注重资源—经济—社会的空间分异及其功能分区^[8,10-11]。因此,区域尺度生态经济协同发展与优化布局就需要从整体和系统性的角度出发,以提升生态服务功能为切入点是关键,利用生态系统服务的研究方法,综合权衡和协同不同生态服务功能之间的关系。

2.1 生态系统服务及其权衡和协同研究

自 Costanza^[12]对全球生态系统服务经济价值进行评估以来,国际上生态系统服务研究逐渐兴起。生态系统服务概念的一般性共识是生态系统为人类提供的各种惠益,包括供给服务(如提供食物和淡水)、调节服务(如水土保持)、文化服务(如精神、娱乐和文化收益)以及支持服务(如维持地球生命生存环境的养分循环),是人类与环境可持续协调发展不可或缺的基础。国内外开展了一系列针对不同地区、生态系统类型下的生态系统服务价值评估,得到了一系列不同尺度下生态系统服务价值的空间格局结果^[13-16]。并且认为,自中国改革开放 30 a 余以来,尽管经济社会资产快速增长,但生态系统服务负债呈现出累积性高速增长态势^[17]。

不同生态系统服务类型之间权衡/协同的相互作用关系成为近年来国内外研究的热点^[18-19]。不同类型生态系统服务之间主要包括权衡关系(trade-off)和协同关系(synergy),生态系统服务管理主要是对这两种关系进行平衡协调。所谓权衡,即生态系统在增加某种服务供给时,相应地削弱其他生态系统服务提供能力的现象。协同就是生态系统在增加某种服务供给时也会同时增加对其他服务的供给。生态系统服务权衡产生于人们对生态系统服务的需求偏好。当人们消费某一种或某几种生态系统服务时,就会有意或无意地对其他生态系统服务的提供产生影响,随即产生生态系统服务的权衡与协同问题^[20]。生态系统服务之间的关系中,许多服务之间是矛盾的(特别是供给服务和调节服务)。大部分的生态脆弱地区同时也是贫困相对集中地区,由于对某项服务需求的增加(如粮食或果品生产等),人们常常通过改造生态系统来增加其提供能力。例如,山地开垦和经济果木林开发等来转换生态系统类型,减少自然生态系统面积或向生态系统投入更多的人为辅助能量等,其结果往往是牺牲一些服务来使另外一些服务的供给能力得以提高^[21]。例如,在山地开垦坡地种植农作物,粮食

产量的提高常常会以土壤侵蚀的加剧为代价。同理,侵蚀劣地的治理和生态恢复在总体上能够提升生态系统服务能力,特别是调节服务和文化服务的水平,但可能降低产品供给服务的能力。如黄土高原的研究表明,土地利用变化(植被覆盖的增加)与水土保持、碳固定具有正效应,与产水量间存在负效应^[22]。但若想同时提升供给服务的水平,需要同时增加投入,为营造供给服务提供更多外在条件^[22]。因此,必须通过权衡不同服务功能项,科学地集成服务项以实现生态系统服务的优化,以期为生态系统服务相关的管理决策提供科学依据^[23]。

2.2 南方红壤丘陵区生态系统服务功能提升途径研究

国际上关于退化地生态系统服务功能提升的研究主要集中于热带森林,尝试通过恢复和适应性管理的途径加速退化森林的自然恢复,提高其生物多样性和生态服务功能^[24],并特别强调农村生计可持续发展和社区参与在实现恢复目标方面的重要性^[25-26]。南方红壤丘陵区作为中国水土流失最为严重的地区之一,对其生态系统服务价值与功能的正确认知,是开展多种生态系统服务可持续管理决策的基础^[27]。基于此,国内部分学者也开展了相关研究。如陈美球等^[1]认为得益于退耕还林,1990—2005 年贡江源头的石城县及章江源头的上犹县和崇义县的生态系统服务价值增量最多。刘海等^[2]也得出类似结果。他认为由于水土保持和退耕还林等工作的相继开展,与 1990 年相比,2008 年鄱阳湖流域单位面积生态系统服务价值均有所提升,特别是鄱阳湖流域南部的红壤山地丘陵区(同时也是水土流失主要分布区),并建议以林地为主的子流域中应加大对生态环境的维护,发展林业经济。另外,基于江西省广丰县 2009 年森林资源二类清查数据,王兵和王丹^[28]研究得到混交林的单位面积生态效益价值最大,硬阔类、竹林和灌木林也较大,而马尾松和软阔类则具备较低的单位面积生态服务功能价值。贾芳芳^[29]的研究进一步指出,赣江流域各森林类型的不同生态服务功能能力存在差异。例如,土壤保持能力表现为:杉木林>灌木林>阔叶林>松林>经济林>竹林;水源供给能力表现为:竹林>杉木林>经济林>阔叶林>松林>灌木林;总碳密度大小顺序为:阔叶林>竹林>经济林>杉木林>灌木林>松林。上述结论可为南方红壤丘陵区广泛分布的马尾松林低效林改造提供借鉴。例如,马尾松林针改阔时建议采取硬阔类树种,而非软阔类树种;杉木林可作为改造的目标树种之一,它不仅具备最高的保持土壤能力,也具备较强的水源涵养能力,同时还属于速生用材树种,经济效益巨大。

总体而言,前期相关研究多集中于生态系统服务功能理论和方法,对生态屏障带生态系统或侵蚀劣地生态系统服务功能提升的深入研究较为缺乏,尤其是对于南方红壤丘陵侵蚀劣地生态服务功能提升的理论、技术集成与示范方面关注较少。例如,关于不同生态服务功能之间的权衡关系及理论依据、生态服务功能提升的途径及关键技术、生态服务功能提升综合优化模式的构建与示范以及大面积推广的社会和经济驱动因素与关键限制性因素等方面的理论和技术方法的研究薄弱。

3 研究展望

经过30 a的水土流失综合治理,塘背河小流域和整个南方红壤丘陵区水土保持工作成效显著。学术界基于此实践成果,在理论认识和技术模式等方面都取得了丰富的研究成果。但同时也清醒地认识到,南方红壤丘陵区水土保持工作还存在不少薄弱环节。新时期该区的生态系统亟需转型和升级。参考生态系统服务的研究体系,建议从基础研究、关键技术研发和综合模式构建与示范等三个方面开展进一步研究工作。

3.1 生态系统服务的权衡与区域集成基础研究

生态系统服务的权衡与区域集成是生态学的研究前沿^[23]。收集小流域气候因子、影像资料、土地利用等数据,以水土保持服务为核心,综合评估小流域水源涵养、生物多样性维持和碳固持等关键生态系统服务功能,分析水土保持生态系统服务功能的时空分异规律,揭示水土保持在自然因素和人为因素作用下与其他关键生态系统服务功能的协同关系,明确该尺度下主要是以哪种服务为主,哪种服务为辅,从而为明确土地利用格局和国土空间规划提供关键科学支撑。在此基础上,通过GIS热点分析工具对水土保持服务进行分等定级,划定小流域水土保持服务的供给区与受益区,以水土保持生态服务功能为指标,借助水文、物理模型分析水土保持服务功能流动的空间范围,探究其空间流动特征。

3.2 关键技术研发

在对小流域及其典型区进行调查的基础上,明确区域目前水土保持服务功能存在的问题,有针对性地研究水土保持服务功能提升的关键技术,并进行适应性评价(包括技术的提升效应、适宜性和推广性);从关键技术出发,融合其他措施手段,对区域典型生态系统进行改造,并对其生物多样性、碳汇和水源涵养等功能进行分析。对塘背河小流域而言,主要是需要针对马尾松林下流、崩岗侵蚀和规模经济果木林开发

人为水土流失等类型,研发集成相关水土保持技术手段并提升生态服务功能。

3.2.1 马尾松低效林林下水土流失 传统的低效林改造技术(如间伐、抚育等)更多注重生产力和生物量等单方面的效益,而忽略了水土保持、水源涵养、生物多样性和碳汇等生态服务功能的其他方面及其之间的权衡关系。本文所研发的技术需要具备基本的土壤保持功能,同时在水源涵养、生物多样性和碳吸存等方面也需具备较强的水平;所研究的技术除了具备基本的水土保持效益之外,还能创造较大的社会效益或经济效益。如通过小老头松精准施肥、竹节水平沟加密放浅、灌草植被带营造和林下多种经营技术(林—药复合)等加速群落正向演替,实现结构与功能的恢复,实现生态系统服务功能的协同提升。

3.2.2 崩岗侵蚀 针对崩岗侵蚀区劣地土壤缺乏草灌植被覆盖,径流侵蚀十分严重,固碳能力下降,生物多样性显著减少的问题,研发多种优势草灌植物种类复合配置的种植、抚育和管理技术;将单个崩岗(将沟头集水区、崩壁、沟道、冲积扇整体施策)或崩岗侵蚀群作为一个系统对待,根据其风险等级,结合崩岗的发育程度、规模、位置、开发条件等,分别按照大封禁+小治理生态恢复模式、治坡降坡和稳坡“三位一体”生态恢复模式、先期有效拦挡+后续开发利用模式、反坡台地规模开发+经果林种植模式和建设用地规模整理模式等实施,加强技术模式的针对性,同时加强新技术、新方法的引入,将工程措施、植物措施以及耕作措施进行有效集成,空间对位,实现基于“人为干预+自然修复”为一体的生态修复服务功能提升体系。

3.2.3 规模经果林开发 广泛存在的向侵蚀劣地“要地”、经济果木林规模开发活动是塘背河小流域及整个南方红壤丘陵区提高土地资源利用率,增加生态系统供给服务的主要手段。但开发过程中特别是开发初期需要控制水土流失和土壤肥力损失,后续需要维持土壤结构和地力,实现幼龄林果地退化土壤肥力快速恢复,实现林果地红壤生态服务功能和经济效益的显著提高。需要研发以耕代抚的保土蓄水技术和有机资源就地利用改善土壤结构(如果园生草刈割覆盖、芒萁刈割覆盖+微生物促腐技术);研发林下绿肥和开发初期作物套种技术,在保水保土的同时增加生物多样性;研发经果林下多功能水土保持植物筛选与种植技术(如蜜源植物等),提升经果林生态服务功能。

3.3 综合模式构建与示范

将生态服务功能提升与民生改善有机结合,按照

“点面调查与评估—技术模式集成—生态服务功能提升—系统性解决方案构建”的思路,以单位面积生态服务功能提升为主线,集成适应性水—土—植被—产业技术体系,建立典型小流域生态系统服务提升的综合模式集成方案,建立提升技术转移转化平台,形成可持续的生态产业—服务功能提升价值链及适应性管理机制,为该区生态系统服务功能提升提供系统性解决方案。在此过程中,坚持治山治水治穷致富结合,工程生物耕作措施相协调;坚持治理开发保护相结合,生态经济社会效益相协调。建议以塘背河小流域为尺度建设示范点,依托兴国县水土保持重点建设工程和兴国县水土保持科技示范园建设,集成已有提升技术,有针对性地开展生态系统服务提升的示范点建设,为南方红壤丘陵区生态环境保护与可持续高质量发展提供借鉴。

[参 考 文 献]

- [1] 陈美球,赵宝苹,罗志军,等. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化[J]. 生态学报,2013,33(9):2761-2767.
- [2] 刘海,殷杰,林苗,等. 基于 GIS 的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化研究[J]. 生态学报,2017,37(8):2575-2587.
- [3] 宋月君,廖凯涛,杨洁,等. 塘背河小流域植被覆盖时空动态变化及水保驱动分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):24-31.
- [4] 江西省水土保持委员会办公室. 江西省水土保持小流域技术资料汇编[R]. 江西 南昌:江西省水土保持委员会办公室,1995.
- [5] 宋月君,张金生. 1975—2008 年塘背河小流域土壤侵蚀时空变化特征分析[J]. 中国农村水利水电,2017(12):121-127.
- [6] 苏春丽,梁音,李德成,等. 红壤区小流域治理度的概念与评价方法[J]. 土壤,2011,43(3):466-475.
- [7] 孙昕,李德成,梁音. 南方红壤区小流域水土保持综合效益定量评价方法探讨:以江西兴国县为例[J]. 土壤学报,2009,46(3):373-380.
- [8] 史志华,杨洁,李忠武,等. 南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理[J]. 水土保持学报,2018,32(1):6-9.
- [9] 水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[R]. 北京:水利部,2013.
- [10] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等. 中国水土保持措施分类[J]. 水土保持学报,2013,27(2):80-84.
- [11] 史志华,宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. 水土保持学报,2016,30(5):1-10.
- [12] Costanza R, d'Arge R, d'Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [13] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(3):189-196.
- [14] Sandhu H S, Wratten S D, Cullen R. The role of supporting ecosystem services in conventional and organic arable farmland [J]. Ecological Complexity, 2010, 7(3):302-310.
- [15] Ehrlich P R, Kareiva P M, Daily G C. Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization [J]. Nature, 2012,486(7401):68-73.
- [16] Fu Bojie, Wang Shuai, Su Changhong, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(1):4-10.
- [17] 谢高地. 生态资产评估:存量、质量与价值[J]. 环境保护,2017,18(11):18-22.
- [18] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, et al. National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows [J]. Ecosystem Services, 2013,4(4):104-116.
- [19] 傅伯杰,张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J]. 地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [20] Rodriguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services [J]. Ecology and Society, 2006,11(1):28-28.
- [21] 李双成,张才玉,刘金龙,等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究,2013,32(8):1379-1390.
- [22] 傅伯杰,于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学,2016,38(1):1-9.
- [23] Rieb J T, Chaplin-Kramer R, Daily G C, et al. When, where, and how nature matters for ecosystem services: Challenges for the next generation of ecosystem service models [J]. Bioscience, 2017,67(9):820-833.
- [24] Rey Benayas J M, Newton A C, Diaz A, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis [J]. Science, 2009,325(5944):1121-1124.
- [25] Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. Restoration of degraded tropical forest landscapes[J]. Science, 2005, 310(5754):1628-1632.
- [26] Chazdon R L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands[J]. Science, 2008,320(5882):1458-1460.
- [27] 尹礼唱,王晓峰,张琨,等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. 地理研究,2019,38(9):2162-2172.
- [28] 王兵,王丹. 江西广丰森林生态服务功能及其价值研究[J]. 江西科学,2010,28(5):630-637,687-687.
- [29] 贾芳芳. 基于 InVEST 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D]. 北京:中国地质大学,2014.