

南方红壤丘陵区退耕还林还草工程土壤保持效应评估

胡晓倩¹, 李忠武^{1,2}, 陈佳³, 聂小东²

(1.湖南大学环境科学与工程学院,长沙 410082;2.湖南师范大学资源与环境科学学院,长沙 410081;

3.中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:以南方红壤丘陵区为研究对象,应用修正通用土壤流失方程,根据2000年、2005年、2010年、2015年土地利用数据,识别出了近15年南方红壤丘陵区退耕还林还草的空间范围,并估算了退耕还林还草实际发生区的土壤保持效应。结果表明,2000—2015年,南方红壤丘陵区退耕还林还草面积约2 052.61 km²。期间土壤保持量增加 9.18×10^8 t,单位面积土壤保持量变化量为447 327.54 t/km²,土壤保持效应整体显著提升,但仍有部分区域出现负效益。此外,对提升土壤保持功能而言,将裸地转换为林地是效果最显著的土地利用变化方式。退耕还林还草的实施提高了区域的土壤保持功能。研究结果对南方红壤丘陵区退耕还林还草工程的实施及管理具有指导意义。

关键词:退耕还林还草;土壤保持效应;RUSLE;土地利用/覆被变化;红壤丘陵区

中图分类号:S157 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)06-0095-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.015

Soil Conservation Benefits of the Grain for Green Program in the Hilly Red Soil Region of Southern China

HU Xiaoqian¹, LI Zhongwu^{1,2}, CHEN Jia³, NIE Xiaodong²

(1.College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082;

2.College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The soil erosion in hilly red soil region (HRSR) of southern China has a serious impact on the local ecological environment. The government has implemented a series of ecological projects to control soil erosion. However, there are few studies on the ecological effects of ecological projects such as the Grain for Green Program (GFGP) in the southern region. This paper selected the hilly red soil region of southern China as the research area. Based on the land use data in 2000, 2005, 2010, and 2015, we identified the spatial extent of the Grain for Green Program (GFGP) in HRSR. We also estimated the effect of soil conservation in areas where the GFGP actually occurred by the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). The results showed that from 2000 to 2015, the GFGP area in the HRSR was about 2 052.61 km². During this period, soil conservation quantity increased by 918 million tons, and the change in soil retention per unit area was 447 327.54 t/km². The overall soil conservation effect was significantly improved, but some areas still had negative benefits. In addition, the conversion of bare land into forest land was the most effective way of land use change for improving soil conservation services. The implementation of GFGP improved the regional soil retention function. This study has guiding significance for the implementation and management of the GFGP in hilly red soil region of southern China.

Keywords: the Grain for Green Program (GFGP); soil conservation; RUSLE; land-use/ land-cover change (LUCC); hilly red soil region

收稿日期:2020-06-03

资助项目:国家重点研究和发展计划项目(2017YFC0505401);湖南省水利厅重点水利科技项目([2017]230-40)

第一作者:胡晓倩(1994—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持生态系统服务研究。E-mail:huxiaoqian@hnu.edu.cn

通信作者:李忠武(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与物质循环领域相关研究。E-mail:lizw@hnu.edu.cn

生态系统服务功能是人类生存的基础与保证,土壤保持是其中一项重要的生态系统调节服务,它为土壤形成、植被生长、水源涵养等提供了重要基础,也对区域生态安全提供了保障。土壤侵蚀是导致土地退化的重要因素,其诱发的一系列生态环境问题已影响到人类的生存与发展^[1]。因此,土壤保持研究受到国内外学者的广泛关注。土壤保持量的多少可以作为反映当地生态系统环境优劣的一项关键指标^[2]。

为治理水土流失,我国政府实施了天然林保护、长江中上游水土流失综合治理、退耕还林还草等工程。其中,退耕还林还草是我国乃至世界上最大的一项生态恢复工程,是治理水土流失的有效途径。退耕还林还草工程与土地利用变化密切相关^[3],土地利用变化与土壤保持能力之间存在着强烈的耦合关系^[4]。随着工程实施的深入,对生态系统服务功能产生了显著影响,众多学者对退耕还林还草实施带来的土壤保持生态效益展开了研究。如王森等^[2]对延安市退耕还林前后 2000 年和 2015 年土壤保持量评估发现,15 年间各土壤侵蚀强度类型均有向低级程度转化的趋势。对不同土地利用类型土壤保持量分析发现,林地和草地的效果最显著。梁占岐等^[5]分析了黄土丘陵退耕还林典型县安塞县退耕还林前后土壤侵蚀变化表明,土壤侵蚀强度总体上明显减小,但部分区域由于退耕后裸露斑块的出现加剧了土壤侵蚀。退耕还林还草在不同区域对土壤侵蚀的影响具有一定的差异。另外,不同的土地利用转化方式对土壤保持能力变化的影响也不同^[6]。科学评估退耕还林还草工程生态系统服务功能的时空变化,探讨土地利用变化与土壤保持服务的时空变化,对区域退耕还林还草的实施及生态系统可持续发展具有重要意义。

南方红壤丘陵区是中国“两屏三带”生态屏障的重要部分^[7]。由于其自然环境的独特性以及生态恢复的复杂性,加之人口密度大,耕地面积少(人均耕地面积仅相当于全国人均耕地面积的 1/3),农业开发力度高,进而导致土壤侵蚀严重,生态功能降低。该区现有水土流失约 16 万 km²,占总面积的 12.9%,且已成为该区生态安全维持、生产发展、人民生活质量提高等的障碍^[8]。南方红壤丘陵区实施了多项生态工程(如退耕还林、飞播造林等),水土流失面积得到了有效遏制^[9-10]。众多学者对南方红壤丘陵区区域土壤保持动态^[11]、果园^[12]或径流小区^[13-14]水土保持措施效益等进行了评估。但对于退耕还林还草工程对南方红壤丘陵区土壤保持服务功能的影响研究比较缺乏。

目前,常用的土壤保持服务功能评估方法为改进的通用土壤流失方程(RUSLE),即以潜在土壤侵蚀量(RKLS)与实际土壤侵蚀量(RUSLE)之差代表土

壤保持量^[15]。故本文基于 RUSLE 模型,结合南方红壤丘陵区 2000—2015 年土地利用状况,分析退耕还林还草实际发生区的土壤保持功能变化,以及不同土地利用变化方式对土壤保持功能的影响,以期为南方红壤丘陵区下阶段退耕还林还草的实施提供科学依据。

1 研究区概况

根据《全国水土保持区划》方案^[16],本文选择南方红壤丘陵区中山地丘陵区,即 V-4(江南山地丘陵区)、V-5(浙闽山地丘陵区)和 V-6(南岭山地丘陵区)3 个二级区作为研究区域。这 3 个亚区具有典型代表性,是南方红壤区中人为活动最强烈、垦殖指数最高、水土流失最严重的区域。研究区位于 107°49′—123°25′E, 21°22′—31°19′N,涉及 8 个省(区)的 483 个县(江西省、福建省、安徽省皖南地区、浙江省大部分地区、湖北省东南部、湖南省中部和南部、广西壮族自治区东部、广东省中部和北部)。土地总面积 79.6 万 km²,海拔范围 -210~2 191 m(图 1)。地形以低山丘陵为主,破碎程度高且起伏多变。该区属于亚热带温暖湿润季风气候区,年均气温 11~23℃,年均降水量 800~2 500 mm,约 70%的降水量集中在 4—9 月。南方红壤丘陵区是我国重要的粮食作物基地,总耕地面积达 28 万 km²,其中坡耕地面积约有 18 万 km²^[17]。坡耕地是其水土流失的重要来源。长江流域及南方地区是退耕还林还草工程的主战场之一^[18]。随着第一轮退耕还林还草的结束,该区植被覆盖度发生显著变化,水土流失得到了有效遏制,生态环境明显改善。

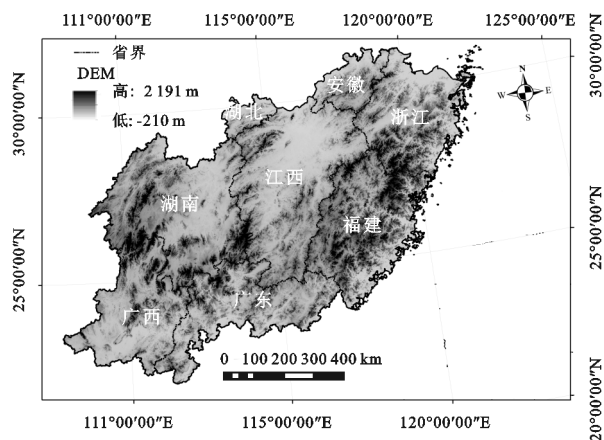


图 1 研究区地理位置

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本文研究数据主要包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年气象数据、土壤属性和土壤类型数据、数字高程模型(DEM)、土地利用类型数据、归一化植被指数(NDVI)数据等。降雨数据来源于国家气象局(<http://data.cma.cn/en>)。土壤信息数据从第二次

全国土壤普查数据和相应各省土壤图中提取 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>)。DEM 数据采用高分辨率 ASTER GDEM 数据产品,空间分辨率为 30 m,下载于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。土地利用数据基于 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 30 m 分辨率的 Landsat TM/ETM 影像获取。在对遥感影像进行波段提取、假彩色合成、图像纠正等预处理的基础上,根据中国科学院土地资源分类系统,结合遥感影像解译标志(附录 A),在 ArcMap 软件环境下进行人机交互土地利用/覆被类型的判读解译。土地利用类型分为耕地、草地、林地、水域、建设用地和裸地 6 大类。2000—2015 年植被覆盖度植被指数 (NDVI) 来源于美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 推出的 250 m MODIS 13Q1 NDVI 产品数据,下载于地理空间数据云。

2.2 退耕还林还草区的识别

退耕还林还草工程与土地利用变化密切相关。退耕还林还草工程涉及的土地利用变化方式包括耕地向林地转换、耕地向草地转换、草地向林地转换、裸地向林地转换和裸地向草地转换 5 种类型^[19]。因此,基于土地利用变化分析可以提取退耕还林还草工程发生区。

叠加 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年南方红壤丘陵区 30 m 分辨率土地利用数据,提取涉及上述 5 种土地利用变化方式的像元,从而获得退耕还林还草分布范围。

2.3 土壤保持量估算模型

基于修正后的土壤侵蚀模型 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 来估算南方红壤丘陵区退耕还林还草区的土壤保持量。计算公式为:

$$A=R \times K \times LS \times (1-C \times P) \tag{1}$$

式中: A 为单位面积土壤保持量,即潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值,也称为单位面积减少的土壤侵蚀量 ($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为降雨侵蚀力因子 ($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子 ($t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm)$); LS 为坡度坡长因子 (无量纲); C 为植被覆盖与管理因子 (无量纲); P 为水土保持措施因子 (无量纲)。

(1) 降雨侵蚀力 (R)。降雨侵蚀力是土壤侵蚀的自然驱动因子。本文利用全国 298 个气象站点监测数据计算^[20],计算公式为:

$$R=\sum_{i=1}^{12} 0.179 P_i^{1.5527} \tag{2}$$

式中: R 为年降雨侵蚀力 ($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$); P_i 为月降雨量 (mm)。

(2) 土壤可蚀性 (K)。土壤可蚀性是表征土壤抗侵蚀能力的指标。本文采用 Williams^[21] 提出的土壤

有机质和土壤质地函数获取,计算公式为:

$$K=0.1317\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256SAN\left(1-\frac{SIL}{100}\right)\right]\right\}\times\left(\frac{SIL}{CLA-SIL}\right)^{0.3}\times\left(1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-0.95C)}\right)\times\left(1-\frac{0.7SNI}{SNI+\exp(-5.51+22.9SNI)}\right) \tag{3}$$

式中: K 为土壤可蚀性,单位为美制 ($t \cdot acre \cdot h/100 \cdot acre \cdot ft \cdot tanf \cdot in$),由于国际制单位为 ($(t \cdot km^2 \cdot h)/(km^2 \cdot MJ \cdot mm)$),因此需乘转换系数 0.131 7; SAN 、 SIL 、 CLA 和 C 分别为砂粒 (0.050~2.000 mm)、粉粒 (0.002~0.050 mm)、黏粒 (<0.002 mm) 和有机质含量 (%), $SNI=1-SN/100$, K 值的计算结果采用国际制单位。

(3) 坡度坡长因子 (LS)。 LS 因子反映地形对土壤侵蚀的影响。本文使用 Renard 等^[22] 提出的方程从数字高程模型 (DEM) 获得,计算公式为:

$$LS=\left(\frac{L}{72.6}\right)^m \times (65.41 \sin \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \tag{4}$$

式中: LS 为地形因子值; L 为坡长 (m); θ 为坡度 ($^\circ$); m 为坡长指数,随坡度而变。

$$m=\begin{cases} 0.2 & \theta<0.57^\circ \\ 0.3 & 0.57^\circ\leq\theta<1.72^\circ \\ 0.4 & 1.72^\circ\leq\theta<2.86^\circ \\ 0.5 & 2.86^\circ\leq\theta \end{cases} \tag{5}$$

其累计坡长的截断条件设置为:①遇到河网水系停止累积坡长计算;②坡度 $<2.75^\circ$ 变化率达到 0.7 或坡度 $>2.75^\circ$ 变化率达到 0.5 视为沉积区,累积坡长为 0;③坡度为 0 的区域,累积坡长为 0;④累积坡长 >900 m 的区域视为沟道区域,累积坡长为 0;得到南方红壤区坡度坡长因子。

(4) 植被覆盖与管理因子 (C)。植被覆盖与管理因子表示植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的影响,与植被覆盖度的关系密切,取值范围为 $[0,1]$ 。NDVI 指数可以反映植被覆盖度的大小,裸地因无植被或植被稀少,其 NDVI 值一般低于 0.1^[23],退耕还林还草的实施有利于 NDVI 的增加^[24]。故本文采用蔡崇法等^[25] 提出的 C 值计算方法。计算公式为:

$$f=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \tag{6}$$

$$C=\begin{cases} 1 & f=0 \\ 0.6508-0.3436\ln f & 0<f\leq 78.3\% \\ 0 & f>78.3\% \end{cases} \tag{7}$$

式中: C 为植被因子; f 为植被覆盖度;NDVI 为归一化

植被指数;NDVI_{max}和NDVI_{min}分别为研究区NDVI的最大值和最小值。

(5)水土保持措施因子(*P*)。*P*因子指实施水土保持措施后的土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量的比例,取值范围为0~1。*P*值为0表示该区不发生土壤侵蚀,*P*值为1表示未采取任何土壤保护措施。因本文主要研究退耕还林还草对土壤侵蚀的影响,且淤地坝、梯田等措施在该遥感数据尺度下难以反映,故本文中*P*值定位1^[26]。

3 结果与分析

3.1 退耕还林还草区时空变化特征

本文基于2000年、2005年、2010年和2015年4期南方红壤丘陵区土地利用现状数据,分析了该研究区的土地利用变化规律。基于土地利用变化数据,获取南方红壤丘陵区退耕还林还草区的时空分布特征。结果表明,2000—2015年南方红壤丘陵区退耕还林还草总面积为2 052.61 km²,且新增退耕还林还草实施面积呈下降趋势(图2)。在所涉及的土地利用变化类型中,草地向林地转换类型面积最大,约占总退耕还林还草总面积的69%。从空间分布上来看,退耕还林还草区主要分布于湖南、福建、江西省东部、浙江省南部和广东省东部地区,其中福建省、广东省东部区域最先实施退耕还林还草的区域,2010—2015年实施退耕还林还草主要区域为湖南省和浙江省南部,整体呈现由东向西趋势(图3)。

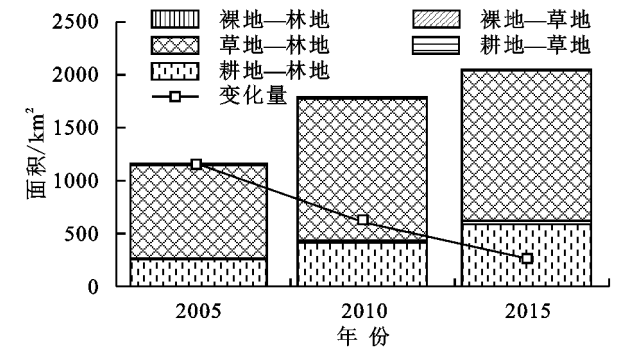


图2 各土地利用/覆被面积变化趋势

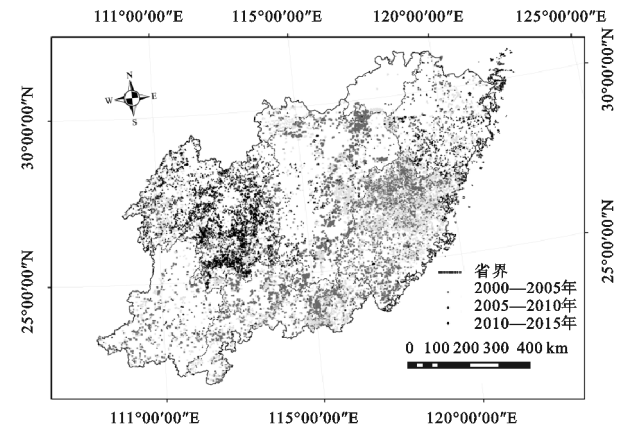


图3 退耕还林还草实施面积时空分布

3.2 土壤保持效应评估

3.2.1 退耕还林还草区土壤保持效应时空变化特征
2000年(未实施退耕还林还草工程前)退耕还林还草区的土壤保持量为 47.64×10^8 t,到2015年该地区土壤保持量为 56.82×10^8 t。历经15年时间,退耕还林还草工程的实施使得该地区土壤保持量增加 9.18×10^8 t。从单位面积土壤保持量来看,2000年该退耕还林还草区单位面积土壤保持量为 $2\,320\,946.66$ t/km²,到2015年增长为 $2\,768\,274.20$ t/km²,变化量仅为 $447\,327.54$ t/km²。由此可见,该地区单位面积土壤保持量呈增长状态。通过各年份单位面积土壤保持量空间分布图(图4)可以看出,实施退耕还林还草前后,虽该地区单位面积土壤保持量均主要处于 $0\sim0.03\times10^8$ t/km²区间,但土壤保持量处于 $0.3\times10^8\sim0.8\times10^8$ t/km²区间的面积在不断扩张。从单位面积土壤保持量变化量空间分布图(图5)可以看出,大部分地区单位面积土壤保持量呈增长状态,但也有部分地区呈减少状态,如广东省东部、湖南省东北部等地区。综上,在南方红壤丘陵区实施退耕还林还草工程,对土壤侵蚀具有一定的正效益,但部分地区出现负效益,这可能与该地区降水条件、主要退耕还林还草类型、经果林等工程措施增加人类干扰等因素有关。

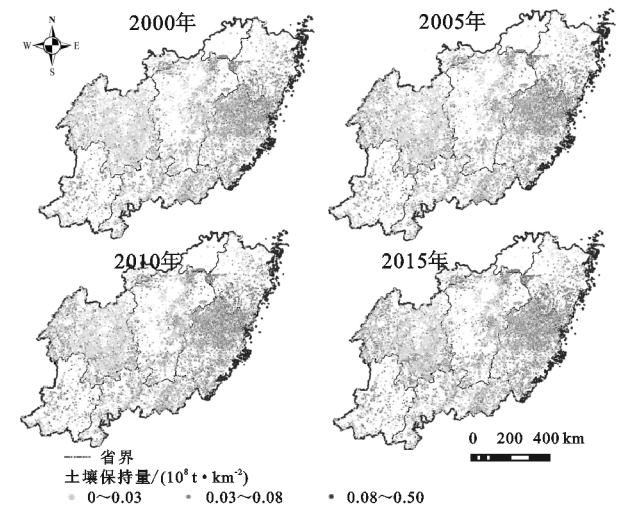


图4 退耕还林还草发生区土壤保持量时空分布

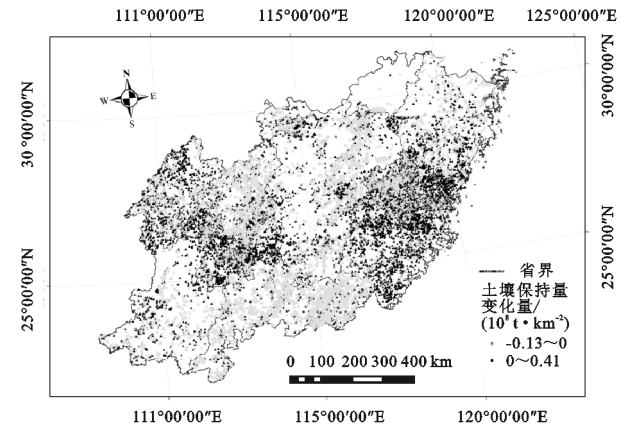


图5 退耕还林还草发生区土壤保持量变化量时空分布

3.2.2 土地变化类型的土壤保持效应 土地利用变化方式不同,对土壤保持效益变化的影响不同,分析各土地利用变化类型的土壤保持效益,对南方红壤丘陵区退耕还林还草工程的实施布设具有指导意义。

由表 1 可知,耕地向林地转换类型引起土壤保持量变化最显著,变化量为 5.61×10^8 t,约占总变化量的 61.05%,这与其实施面积大具有一定的关系。各单位面积退耕还林还草类型引起土壤保持量增加的

顺序依次为:裸地—林地($3\ 989\ 647.43\ \text{t}/\text{km}^2$)>裸地—草地($2\ 330\ 577.35\ \text{t}/\text{km}^2$)>耕地—草地($1\ 130\ 226.38\ \text{t}/\text{km}^2$)>耕地—林地($956\ 356.74\ \text{t}/\text{km}^2$)>草地—林地($195\ 103.21\ \text{t}/\text{km}^2$)。

从单位面积土壤保持量变化量来看,裸地向林地的转换最有利于土壤保持生态系统服务功能的增加,也就是说,该土地利用变化方式对土壤侵蚀作用最显著。

表 1 2000—2015 年各土地利用变化类型土壤保持量

年份	土壤保持量	耕地—林地	耕地—草地	草地—林地	裸地—林地	裸地—草地	总量
2000	土壤保持量/ $10^8\ \text{t}$	4.32	0.32	43.00	0	0	47.64
	单位面积土壤保持量/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	736985.03	943165.59	3059360.86	266.76	5462.99	2320946.66
2005	土壤保持量/ $10^8\ \text{t}$	7.70	0.57	44.70	0.27	0.15	53.38
	单位面积土壤保持量/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	1313063.13	1695245.95	3148911.99	3841090.24	2235822.51	2600452.78
2010	土壤保持量/ $10^8\ \text{t}$	8.75	0.60	45.64	0.27	0.15	55.40
	单位面积土壤保持量/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	1492382.77	1784804.94	3215302.65	3857121.29	2259127.29	2699160.73
2015	土壤保持量/ $10^8\ \text{t}$	9.93	0.69	45.77	0.28	0.15	56.82
	单位面积土壤保持量/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	1693341.78	2073391.97	3224464.08	3989914.20	2336040.34	2768274.20
变化量	土壤保持变化量/ $10^8\ \text{t}$	5.61	0.38	2.77	0.28	0.15	9.18
	土壤保持变化百分比/%	61.05	4.11	30.16	3.02	1.65	—
	单位面积土壤变化量/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	956356.74	1130226.38	195103.21	3989647.43	2330577.35	447327.54

4 讨论

土壤侵蚀与植被、土地利用方式密切相关。退耕还林还草工程的实施使得土地利用/覆被发生变化。本文对退耕还林还草发生区进行了提取,其结果展现了退耕还林还草实际发生区域的土壤保持量的变化趋势。结果表明,退耕还林还草工程发生区的土壤保持能力总体上增强,单位面积土壤保持量增加 $447\ 327.54\ \text{t}/\text{km}^2$ 。退耕还林还草工程的实施,使得林草面积扩张,林草植被对雨水的截留和再分配、枯枝落叶层和草灌木增加地表覆盖度、地下根系稳定土壤结构等的综合作用使得地表土层的抗水蚀能力增强,从而增强土壤保持服务功能^[27-28]。但本研究的评估结果显示部分地区单位面积土壤保持量略有下降。可能是因为:(1)这些区域人工林植被结构单一,栽植密度高,且以马尾松和桉树为主,林下水土现象严重^[25];(2)土壤肥力存在空间差异,主要分布于广西、广东、湖南、福建省东南部等地的砖红壤或赤红壤,肥力较差;(3)一些退耕农户缺乏对经济林树种的管理知识,经济林木经济效益低下,农户失去造林积极性,林木的管理得不到重视,从而发生经济林下土壤侵蚀^[29];(4)部分贫困地区由于人力、经费有限,“重退轻管”现象突出等均会导致退耕还林还草效果不佳,甚至加剧土壤侵蚀^[30]。

退耕还林还草工程的实施会引起 5 种土地利用变化。人类活动改变了土地利用格局,土地利用/覆

被变化会引起生态过程的变化,对生态环境及其小气候产生影响,从而作用于土壤侵蚀。对各土地利用变化类型下土壤保持量的变化量分析发现,在南方红壤丘陵区裸地植树种草最利于土壤保持功能的提升。这是因为裸地植被覆盖度低,土壤侵蚀率(土壤侵蚀面积占该土地利用面积的比例)高于林地、草地和耕地,当其转变为林地和草地后,植被覆盖度增加,有利于降低土壤侵蚀强度^[31]。因此,在南方红壤丘陵区实施退耕还林还草时应优先考虑裸地植树种草。

5 结论

(1)2000—2015 年,南方红壤丘陵区退耕还林还草发生区面积不断扩张,但增长速度减缓。南方红壤丘陵区退耕还林还草面积约 $2\ 052.61\ \text{km}^2$,主要由草地向林地转换而成,约占退耕还林还草总面积的 69%。

(2)南方红壤丘陵区退耕还林还草发生区 2000—2015 年土壤保持量增加 9.18×10^8 t。同时单位面积土壤保持量也增大,由 $2\ 320\ 946.66\ \text{t}/\text{km}^2$ 增长到 $2\ 768\ 274.20\ \text{t}/\text{km}^2$,土壤保持效益显著提升。

(3)不同土地利用变化方式对土壤保持功能变化影响不同。在各土地利用变化方式中,裸地转林地类型具有较高的土壤保持效应($3\ 989\ 647.43\ \text{t}/\text{km}^2$),而草地向林地的转化类型土壤保持效应相对较差。

参考文献:

[1] Van Oost K, Verstraeten G, Doetterl S, et al. Legacy

- of human-induced C erosion and burial on soil-atmosphere C exchange[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2012, 109(47): 19492-19497.
- [2] 王森,王海燕,谢永生,等.延安市退耕还林前后土壤保持生态服务功能评价[J].*水土保持研究*, 2019, 26(1): 280-286.
 - [3] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
 - [4] 吴秀芹,蔡运龙.土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J].*地理科学进展*, 2003, 22(6): 576-584.
 - [5] 梁占岐,李锦荣,郭建英,等.退耕还林工程建设对土壤侵蚀的影响:以安塞县为例[J].*水土保持研究*, 2016, 23(3): 77-81.
 - [6] 李婷,刘康,马力阳,等.秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价[J].*自然资源学报*, 2016, 31(4): 583-595.
 - [7] 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:以江西省兴国县塘背河小流域为例[J].*水土保持通报*, 2019, 39(6): 289-294.
 - [8] 梁音,杨轩,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J].*中国水土保持*, 2008(12): 50-53.
 - [9] Chen J, Xiao H, Li Z, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 132: 109-114.
 - [10] Li Z W, Ning K, Chen J, et al. Soil and water conservation effects driven by the implementation of ecological restoration projects: Evidence from the red soil hilly region of China in the last three decades[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 121109.
 - [11] 许联芳,张海波,张明阳,等.南方丘陵山地带土壤保持功能及其经济价值时空变化特征[J].*长江流域资源与环境*, 2015, 24(9): 1599-1605.
 - [12] 朱丽琴,黄荣珍,李凤,等.南方红壤丘陵区经果林开发对水土流失的影响:以江西省为例[J].*中国水土保持*, 2019(5): 38-41, 69.
 - [13] 李桂静,崔明,周金星,等.南方红壤区林下土壤侵蚀控制措施水土保持效益研究[J].*水土保持学报*, 2014, 28(5): 1-5.
 - [14] 宋江平.南方红壤低山丘陵区水土流失对降雨和坡度的响应特征及其典型治理模式研究[D].长沙:湖南大学, 2018.
 - [15] 殷小菡,孙希华,徐新良,等.我国北方农牧交错带西段退耕对土壤保持功能影响研究[J].*地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1721-1732.
 - [16] 赵岩,王治国,孙保平,等.中国水土保持区划方案初步研究[J].*地理学报*, 2013, 68(3): 307-317.
 - [17] 聂坤照.南方红壤丘陵区 NDVI 时空变化及其影响因素研究[D].武汉:华中农业大学, 2018.
 - [18] 林轩.退耕还林赢来江河安澜:长江流域及南方地区退耕还林综述[J].*中国林业*, 2007(18): 12-13.
 - [19] 李慧颖.基于遥感和 InVEST 模型的辽宁省退耕还林工程生态效应评估[D].长春:吉林大学, 2019.
 - [20] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/4): 287-306.
 - [21] Williams J R. EPIC: The erosion-productivity impact calculator[J]. 1990, 4(4): 206-207.
 - [22] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[J]. *Agricultural Handbook 703*, US Department of Agriculture, Washington D C, 1997.
 - [23] 王婷,郑帅霖,李深泉,等.晋北地区土壤保持量时空变化特征研究[J].*干旱区资源与环境*, 2018, 32(7): 188-195.
 - [24] 黄麟,曹巍,祝萍.退耕还林还草工程生态效应的地域分异特征[J].*生态学报*, 2020, 40(12): 1-12.
 - [25] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].*水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
 - [26] 薛亚永,王晓峰.黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估[J].*干旱地区农业研究*, 2017, 35(5): 122-128.
 - [27] 王晶,赵文武,刘月,等.植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J].*生态学报*, 2019, 39(9): 3355-3364.
 - [28] 胡彩虹,冉广,荐圣淇.佳芦河流域林草覆被变化对产流机制的影响[J].*水土保持学报*, 2020, 34(2): 36-42.
 - [29] 赫金川.巩固退耕还林成果的保障措施探究[J].*农业与技术*, 2019, 39(15): 93-94.
 - [30] 薛林林.退耕还林中出现的问题及对策[J].*农业技术与装备*, 2019(12): 67-68.
 - [31] 陈雅如,康慕谊,宋富强.延安市退耕还林前后土壤保持功能价值评估[J].*北京林业大学学报*, 2013, 35(6): 67-73.