

DOI: 10.20103/j.stxb.202307221567

刘亦文, 邓楠, 颜建军, 胡宗义. 中国集中连片特困区退耕还林还草生态效应评估. 生态学报, 2024, 44(11): 4719-4732.

Liu Y W, Deng N, Yan J J, Hu Z Y. Evaluation of the ecological effect of returning farmland to forest and grassland in the former concentrated contiguous impoverished area of China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4719-4732.

中国集中连片特困区退耕还林还草生态效应评估

刘亦文¹, 邓楠², 颜建军^{2,*}, 胡宗义³

¹ 湖南工商大学资源与环境学院, 长沙 410205

² 湖南工商大学经济与贸易学院, 长沙 410205

³ 湖南大学金融与统计学院, 长沙 410082

摘要:集中连片特困地区作为我国生态环境脆弱区是退耕还林还草的主战场,其退耕成效直接反映了退耕还林还草工程的整体实施效果,为新征程中巩固和拓展退耕还林还草成果提供经验镜鉴。以《中国农村扶贫开发纲要(2011—2020年)》文件明确的14个集中连片特困地区作为研究区域,基于2000—2020年生态系统年总初级生产力(AGPP)数据集和归一化植被指数(NDVI)数据集,对比分析集中连片特困区的退耕区和未退耕区AGPP和NDVI的年际变化差异,以此来评估集中连片特困地区实施退耕还林还草工程的生态效应。研究发现:(1)2000—2020年,集中连片特困区退耕还林还草面积为178554km²,占2000年耕地总面积的44.71%;(2)研究期内,退耕区与未退耕区AGPP和NDVI整体表现出增长趋势,其中退耕区AGPP和NDVI呈现极显著和显著上升趋势的面积分别占总面积的69.07%和86.51%,未退耕区的占比分别为65.88%和72.61%,且退耕区AGPP和NDVI的年均值和相对变化率均高于未退耕区;(3)2000—2020年整个区域、退耕区以及未退耕区AGPP和NDVI年际变化趋势大体一致,均表现出线性递增态势,且退耕区AGPP和NDVI的增长始终高于整个集中连片特困区和未退耕区。因此,研究通过探讨原集中连片特困区退耕还林还草对AGPP和NDVI的影响,为进一步调整和优化退耕还林还草政策提供了参考依据。

关键词:集中连片特困区;退耕还林还草;生态效应

Evaluation of the ecological effect of returning farmland to forest and grassland in the former concentrated contiguous impoverished area of China

LIU Yiwen¹, DENG Nan², YAN Jianjun^{2,*}, HU Zongyi³

¹ School of Resource and Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

² School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

³ School of Finance and Statistics, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: As a fragile ecological environment area in China, the former concentrated contiguous impoverished areas is the main battlefield for returning farmland to forests and grasslands. Its effect of returning farmland to forests and grasslands directly reflects the overall effect of the implementation of the project of returning farmland to forests and grasslands, which provides a mirror of the experience of consolidating and expanding the results of returning farmland to forests and grasslands in the new journey. Taking 14 concentrated contiguous impoverished areas specified in the document “China’s Rural Poverty Alleviation and Development Programme (2011—2020)” as the study area, based on the 2000—2020 ecosystem annual gross primary productivity (AGPP) dataset and the normalised vegetation index (NDVI) dataset, we compared and

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目(22YJA790040);全国统计科学研究项目(2023LY046);湖南省教育厅科学研究重点项目(23A0452);湖南省研究生科研创新项目(CX20231131)

收稿日期:2023-07-22; **网络出版日期:**2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yan751225@163.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

analysed the inter-annual changes in the AGPP and NDVI of fallowed and un-fallowed areas in the concentrated contiguous impoverished areas, in order to assess the ecological effect of implementing the project of returning farmland to forests and grasslands in the concentrated contiguous impoverished areas. The study found that: (1) from 2000 to 2020, the area of returning farmland to forests and grasslands in the concentrated contiguous impoverished area was 178554 km², accounting for 44.71% of the total area of arable land in 2000. (2) During the study period, AGPP and NDVI in the fallow and non-fallow areas showed an overall increasing trend, with 69.07% and 86.51% of the total area in the fallow area showing highly significant and significant increasing trends in AGPP and NDVI, respectively, while the proportion in the non-fallow area being 65.88% and 72.61%, respectively. The annual mean and relative rate of change of AGPP and NDVI were higher than those of the non-retained farmland area. (3) From 2000 to 2020, the inter-annual trends of AGPP and NDVI in the whole region, the fallow area and the non-fallowed area were generally consistent, showing a linear increasing trend. The growth of AGPP and NDVI in the fallow area was always higher than that in the whole of the concentrated contiguous impoverished area and the non-fallowed area. Therefore, this study provides a reference basis for further adjusting and optimizing the policy of returning farmland to forest and grassland by exploring the impacts of returning farmland to forest and grassland in the former concentrated contiguous impoverished area on AGPP and NDVI.

Key Words: concentrated contiguous impoverished area; returning farmland to forest and grassland; ecological effects

自 2002 年 4 月国务院发布《关于进一步完善退耕还林政策措施的若干意见》后,我国全面实施了退耕还林工程。据统计,截止到 2022 年,我国先后在 25 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团实施两轮退耕还林还草工程,完成退耕还林还草任务 14.2 万 km²,同时完成配套荒山荒地造林和封山育林 20.7 万 km²,共有 4100 万农户、1.58 亿农牧民参与并受益^[1]。该工程在提升农业绿色全要素生产率、改善农村生态环境、增加农民收入等方面发挥了重要作用,极大地促进了人与自然和谐共生,加快推进了我国生态文明建设进程。2011 年,中共中央、国务院发布《中国农村扶贫开发纲要(2011—2020 年)》,明确将六盘山区等 14 个集中连片特困地区确立为扶贫攻坚主战场,这些地区地势结构复杂,水土流失和土地沙化严重,生态环境极为脆弱,曾是我国扶贫工作和生态保护的重点实施区域。2012—2020 年期间,党和国家相继在这些地区大力推行相关精准扶贫政策,原集中连片特困地区的经济社会发展水平有显著提高^[2—4],生态环境得到明显改善^[5—7]。而退耕还林还草作为其中一项重点生态减贫和生态修复工程,对原集中连片特困地区的脱贫摘帽与经济社会发展产生了重要影响。因此,探究原集中连片特困地区退耕还林还草工程的实施成效,对新发展阶段进一步完善退耕还林还草政策、巩固和拓展退耕还林还草成果极具现实意义。

自退耕还林还草工程实施以来,国内外许多学者聚焦于该生态修复工程的环境效益和经济效益展开了大量研究。有关退耕还林还草的环境效益,多数研究是以某个特定区县或典型地貌为例,对其实施退耕还林还草工程后的土壤蓄水能力^[8]、气候变化^[9]、土地利用结构^[10—12]、植被覆盖^[13—14]以及土壤有机碳^[15—20]等生态系统结构和功能进行探究,并认为该项工程的实施有效消除了土壤侵蚀对生态系统所造成的负面影响^[18,21],提升了植被的覆盖面积和总初级生产力^[22],为保护生态系统服务功能和优化土地资源配置带来了较好的生态效益^[23—26]。而针对退耕还林还草的经济效益,不少研究是通过某个地区展开问卷调查的方式分析退耕农户收入变化来反映该效益^[27—32],并认为退耕还林还草所产生的退耕补贴和劳动力转移是实现农户收入增长的关键动因^[33—37],该项生态建设工程有效提高了农户的总收入水平^[38]。然而,对于退耕还林还草工程的这种经济效益,目前仍存在质疑,有学者认为由于退耕还林还草工程无法从根本上改变农业生产结构,因此难以从真正意义上实现农户增收^[39—43]。

总体而言,当前有关退耕还林还草工程的研究已有较为丰富的成果,尤其是针对该项工程所带来的生态效益。基于此,本研究借鉴前人的研究成果,考察集中连片特困区退耕还林还草的现状,通过系统分析集中连片特困区的退耕区与未退耕区生态系统年总初级生产力(AGPP)和归一化植被指数(NDVI)的变化差异,以

期能够评估出退耕还林还草工程实施对集中连片特困区所带来的生态效应。为进一步完善集中连片特困区的退耕还林还草政策提供经验依据,同时为该项生态修复工程的实施提供科学支撑。

1 研究设计

1.1 研究区概况

作为特定时期党和国家脱贫攻坚重点支持区域,原集中连片特困区曾是我国深度贫困地区,根据 2007—2009 年各县的人均 GDP、农民人均纯收入等指标,划定包括六盘山区、秦巴山区、武陵山区、乌蒙山区、滇黔石漠化山区、滇西边境山区、大兴安岭南麓山区、燕山-太行山区、吕梁山区、大别山区、罗霄山区等 11 个集中连片特困区,再加上已明确实施特殊扶持政策的四省藏区、西藏以及新疆南疆三地州,总共 14 个片区,680 个贫困县,国土面积约为 392 万 km²,涵盖 680 个县及县级单位,其中有 440 个国家扶贫开发工作重点县,252 个革命老区县,448 个地质灾害高发县,661 个县属于地方病病区,覆盖全国经济发展相对落后的县和贫困人口较为集中的地区。到 2009 年,总人口 2.36 亿人,其中乡村人口约为 2.3 亿人,占全国的 17.7%。集中连片特困区主要分布在我国中西部地区,地区分布密度高、覆盖面积广,不同连片特困区相互毗邻,地势结构复杂、气候环境恶劣、地貌类型多种多样,主要包括山地、丘陵、盆地以及草原等,土地、耕地以及水资源普遍短缺,生态环境脆弱;多数贫困县处于山区,远离区域中心城市和城市群,经济辐射带动作用也因基础设施建设落后而受限。由于存在少部分的贫困地区名称未显示在地图上,本研究仅提取到了原集中连片特困区 625 个贫困县(图 1),因此以这 625 个贫困县作为研究对象进行分析。

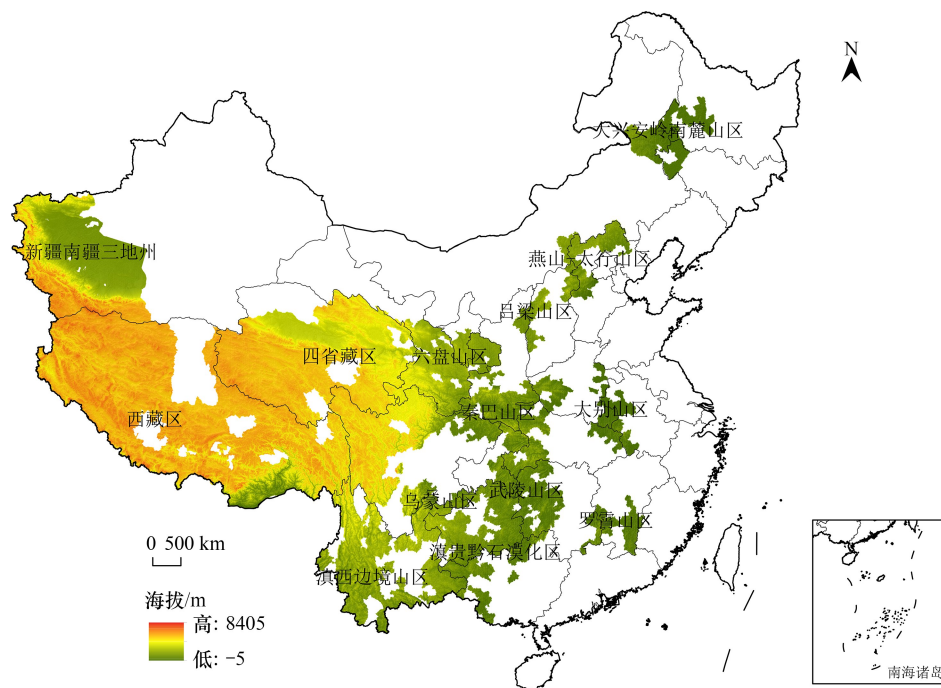


图 1 区位概况图

Fig.1 Location map of study area

1.2 数据来源

研究中的 DEM 高程数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),其分辨率为 1km×1km。矢量数据来自于国家基础地理信息中心 1:400 万数据库(<http://www.ngcc.cn/ngcc>)。2000 年和 2020 年两期土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<https://www.resdc.cn>),其数据分辨率为 1km×1km。土地利用类型采用三级分类系统包括一级分为 6 类,二级分为 25 类。根据研究需要,采用 ArcGIS10.7 对一级

分类中的耕地、林地、草地、湿地、未利用土地以及城乡建设用地等六种用地类型进行分析,以观察原集中连片特困地区土地利用结构在退耕还林还草工程实施前后的变动情况。陆地生态系统年总初级生产力 (AGPP) 是粮食生产和陆地生态系统固碳的基础,集中连片特困区 2000—2020 年 AGPP 数据来源于范雪等^[44] 基于 ChinaFLUX 的长期联网观测数据和公开数据集,利用随机森林回归树计算获得,其分辨率为 30arcsecond。归一化植被指数 (NDVI) 是反映植被覆盖情况的指标,其数据来源于 Landsat5/7/8 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>),分辨率为 1km×1km。考虑当前针对生态系统功能的性状主要聚焦于 AGPP 和 NDVI,因而选取二者来评估集中连片特困区退耕还林还草的生态效应,通过对比分析研究区内退耕区像元与未退耕区像元的 AGPP 和 NDVI 变化差异来反映该项生态修复工程所带来的生态效益。同时,考虑虽然退耕还林还草工程和气候变化均会对 AGPP 和 NDVI 变化产生影响,但退耕区与未退耕区在空间上相互交错,彼此相邻,自然因素对两个区块像元所产生的影响在统计特征上无显著差异,因而可认为两个区块的 AGPP 和 NDVI 的变化差异主要是由退耕还林还草所导致^[21]。

1.3 研究方法

为探究集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 的年际变化趋势,采用 Sen 斜率估计^[45] 对其进行计算,该方法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,对测量误差和离群数据不敏感,可以对长时间序列数据进行趋势分析。同时借助 M-K 统计检验法对 AGPP 和 NDVI 变化趋势的显著性进行检验,该方法不需要测量数据服从正态分布,不受缺失值和异常值的影响,可以对长时间序列数据进行趋势显著性检验。Sen 趋势分析的具体公式如下:

$$\beta = \text{mean} \left\{ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right\} \quad (\forall i > j) \quad (1)$$

式中, β 表示 AGPP 或 NDVI 的变化趋势,当 $\beta > 0$ 时,表示 AGPP 或 NDVI 存在增加趋势,当 $\beta < 0$ 时,表示 AGPP 或 NDVI 存在减少趋势; i 和 j 分别为时间序数; x_i 和 x_j 分别为第 i 、 j 时间的 AGPP 或 NDVI 值。

进一步地,结合 AGPP 和 NDVI 的变化趋势 (线性回归的斜率) 和二者多年的平均值,计算 AGPP 和 NDVI 年际相对变化率,从而得到每个像元 AGPP 和 NDVI 的相对自身平均水平的变化速率,具体公式如下:

$$\delta_{\text{AGPP}} = \frac{\beta_{\text{AGPP}}}{\overline{\text{AGPP}}} \quad (2)$$

$$\delta_{\text{NDVI}} = \frac{\beta_{\text{NDVI}}}{\overline{\text{NDVI}}} \quad (3)$$

式中, δ_{AGPP} 、 δ_{NDVI} 分别表示 AGPP 和 NDVI 的年际相对变化率, $\overline{\text{AGPP}}$ 和 $\overline{\text{NDVI}}$ 分别表示 AGPP 和 NDVI 在 2000—2020 年的多年均值。

2 结果分析

2.1 2000—2020 年集中连片特困区土地利用变化

林地主要集中于西南部连片特困区,如滇桂黔石漠化区、滇西边境山区、乌蒙山区、武陵山区、罗霄山区以及秦巴山区等连片特困区被大面积林地覆盖,西藏区和四省藏区主要以草地为主,新疆南疆三地州则以未利用土地为主 (图 2)。同时,还发现研究期内西藏区存在大面积土地由草地向未利用地转化。相比 2000 年,集中连片特困区耕地、湿地以及建设用地面积分别减少了 2.80%、5.61%、72.99%,林地、草地以及未利用土地面积分别增加了 30.54%、16.88%、27.27%,退耕还林还草总面积约为 178554km² (表 1)。退耕还林还草主要集中在滇西边境山区、滇桂黔石漠化区、乌蒙山区、秦巴山区、武陵山区、六盘山区以及燕山-太行山区,大别山区、罗霄山区、新疆南疆三地州、四省藏区以及大兴安岭南麓山区均有少部分耕地向林地和草地转化,且相对分散 (图 3)。此外,大兴安岭南麓山区、大别山区、六盘山区、秦巴山区的未退耕土地也相对集中,尤其是大兴安岭南麓山区和大别山区最为突出,其余地区的未退耕土地相对分散且分布范围较广 (图 3)。总体来看,

集中连片特困区发生耕地转林地和草地的像元总数为 178554,占 2000 年整个区域耕地总面积的 44.71%,耕地未发生变化的像元总数为 192679,所占比例为 48.24%,这意味着退耕还林还草工程可能在集中连片特困区并未实现全覆盖,还存在部分区县受地形、气候等自然因素的制约导致生态修复工程实施较为困难。

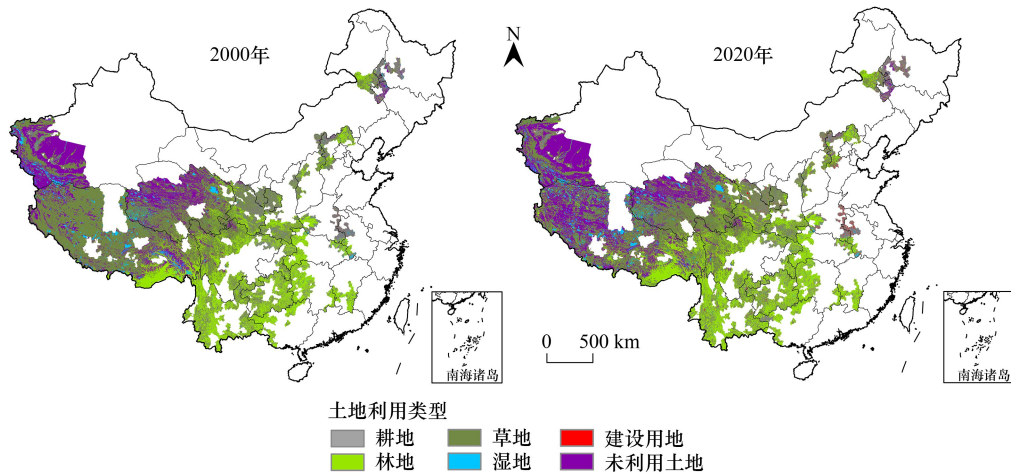


图 2 2000—2020 年集中连片特困区土地利用变化

Fig.2 Changes in land use in concentrated and contiguous special hardship areas, 2000—2020

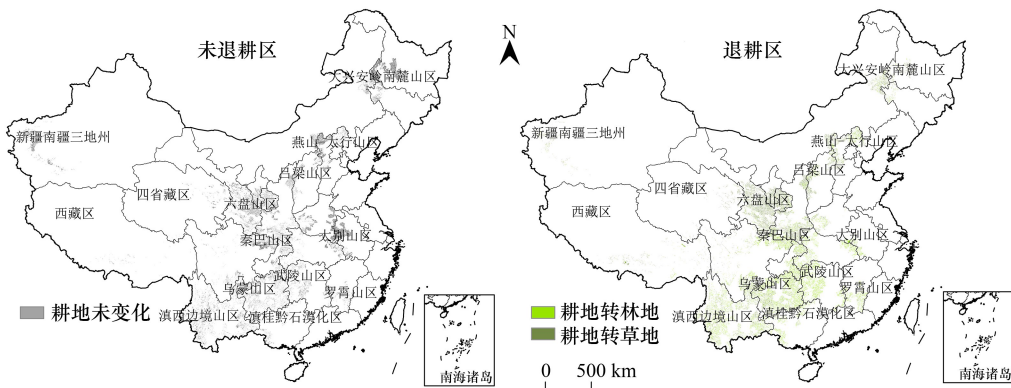


图 3 2000—2020 年集中连片特困区的退耕区与未退耕区空间分布

Fig.3 Spatial distribution of fallow and non-fallow areas in concentrated contiguous special hardship areas, 2000—2020

表 1 2000—2020 年集中连片特困区土地利用转移矩阵/ km^2

Table 1 Land-use transfer matrix for concentrated contiguous special hardship areas, 2000—2020

2000 年	2020 年						
	耕地	林地	草地	湿地	建设用地	未利用土地	总和
耕地 Croplands	192679	97679	80875	5734	14601	4966	396534
林地 Woodlands	100064	515815	156688	5711	3438	8561	790277
草地 Grasslands	85837	183741	921891	38431	4621	342921	1577442
湿地 Wetlands	5494	4712	21517	50987	580	24743	108033
建设用地 Building sites	9902	1602	2261	500	2268	261	16794
未利用土地 Unutilized lands	7262	22548	183877	23229	700	415820	653436
总和 Aggregate	401238	826097	1367109	124592	26208	797272	3542516

2.2 2000—2020 年集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 年均值变化及趋势变化分析

2000—2020 年集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 的多年平均值分别为 376.87g/m²、0.4948,且二者的空间分布格局呈现出“西南高、西北低”的特征(图 4)。AGPP 和 NDVI 年均值的低值区间集中于新疆南疆三地州、西藏区以及四省藏区,三者毗邻海拔高、地形复杂多样,日温差较大,以草地为主,植被覆盖率不高,因而 AGPP 和 NDVI 的数值相对较小。中高值区域则集中分布于西南部连片特困区,包括滇西边境山区、滇桂黔石漠化区、武陵山区、乌蒙山区、秦巴山区以及六盘山区等,这些地区降水充足、多气候带、动植物资源丰富,因而具有较高的初级生产力。大兴安岭南麓山区、燕山-太行山区以及吕梁山区等东部偏北地区的 AGPP 多年的年均值处于中低值区域,AGPP 相对较低的可能原因是受气温、日照等条件的影响,由于偏北部地区,气温相对较低,日照时间相对较短,导致植被的光合作用不强,NDVI 年均值则处于中高值区域。

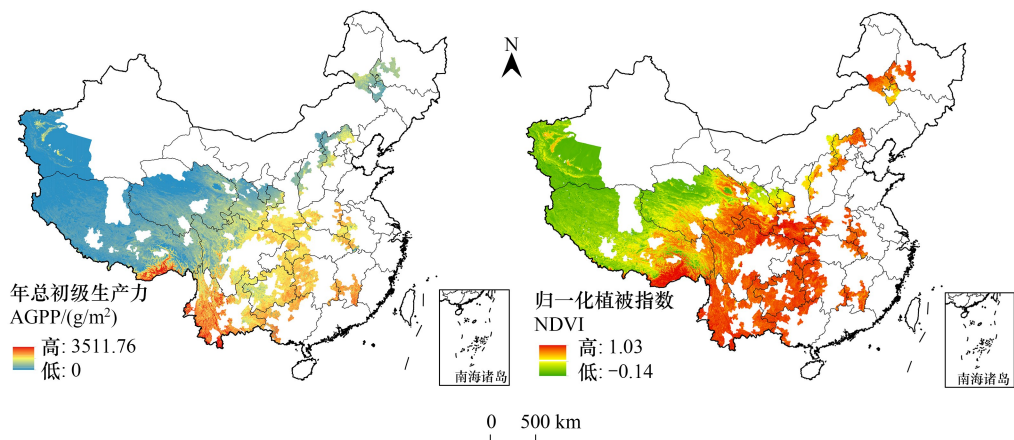


图 4 2000—2020 年集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 年均值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of annual average values of AGPP and NDVI in concentrated contiguous special hardship areas, 2000—2020

在研究期内,集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 的变化整体呈现出增加趋势,其中 AGPP 和 NDVI 表现为极显著和显著增加趋势的像元个数总和占比分别为 41.91%、48.03%(表 2),且这些像元集中分布在滇西边境山区、滇桂黔石漠化区、武陵山区、乌蒙山区、吕梁山区、六盘山区、燕山-太行山区以及大兴安岭南麓山区(图 5)。AGPP 和 NDVI 表现为微显著增加和不显著增加的像元个数总和占比分别为 25.53%、36.47%,这些像元主要分布在西藏区、四省藏区以及新疆南疆三地州,AGPP 无变化的区域占比较大为 22.06%,集中于新疆南疆三地州和四省藏区,而 NDVI 无变化的区域占比较小仅为 2.26%。集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 具

表 2 集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 像元变化类型个数及百分比

Table 2 Number and percentage of AGPP and NDVI pixel change types in the centralized contiguous special hardship area

变化类型 Type of change	年总初级生产力 AGPP		归一化植被指数 NDVI	
	像元个数	百分比/%	像元个数	百分比/%
	Pixel count	Pixel count	Pixel count	Pixel count
极显著增加 Highly significant increase	1539054	30.94	1209455	33.94
显著增加 Significant increase	545812	10.97	502116	14.09
微显著增加 Marginal increase	241931	4.86	230524	6.47
不显著增加 No significant increase	1027930	20.67	1068995	30.00
无变化 No change	1097382	22.06	80705	2.26
不显著减少 No significant decrease	418664	8.42	413004	11.59
微显著减少 Marginal decrease	31673	0.64	21010	0.59
显著减少 Significant decrease	43547	0.88	24145	0.68
极显著减少 Highly significant decrease	28116	0.57	13539	0.38

退耕区与未退耕区 AGPP 整体表现出显著增长趋势,其中退耕区 AGPP 具有极显著和显著增加趋势的像元个数总和占比为 65.30%,未退耕区则为 60.04%(表 3),主要位于偏北部的连片特困区,包括六盘山区、吕梁山区、燕山-太行山区以及大兴安岭南麓山区(图 7);退耕区与未退耕区 AGPP 增加趋势不明显的像元个数总和占比分别为 19.11%、26.24%,主要位于西南部的连片特困区,分散在秦巴山区、武陵山区、乌蒙山区、滇桂黔石漠化区以及滇西边境山区。退耕区与未退耕区无变化的像元个数极少,占比分别为 0.70%、0.74%。相比增加趋势,退耕区与未退耕区所表现出的减少趋势较不明显,其中退耕区与未退耕区 AGPP 减少趋势不显著和微显著的像元个数总和占比分别为 7.40%、10.67%,显著减少和极显著减少的像元个数总和占比分别为 1.24%、2.30%。

表 3 AGPP 变化类型像元个数及百分比

Table.3 Number and percentage of image elements of AGPP change type

变化类型 Type of change	未退耕区 Unplowed area		退耕区 Fallow area	
	像元个数 Pixel count	百分比/% Pixel count	像元个数 Pixel count	百分比/% Pixel count
极显著增加 Highly significant increase	131891	47.48	137111	55.72
显著增加 significant increase	34884	12.56	23572	9.58
微显著增加 Marginal increase	16230	5.84	9311	3.78
不显著增加 No significant increase	56677	20.40	37717	15.33
无变化 No change	2067	0.74	1727	0.70
不显著减少 No significant decrease	27042	9.73	16783	6.82
微显著减少 Marginal decrease	2613	0.94	1419	0.58
显著减少 Significant decrease	3040	1.09	1949	0.79
极显著减少 Highly significant decrease	3351	1.21	1111	0.45

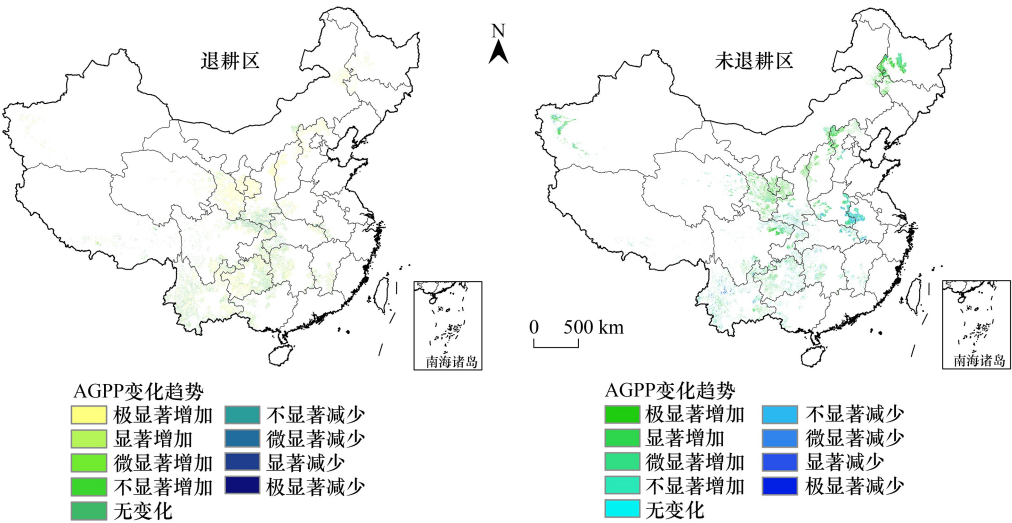


图 7 集中连片特困区的退耕区与未退耕区 AGPP 变化趋势的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of AGPP trends between fallowed and non-fallowed areas in concentrated and contiguous special hardship areas

对比研究期内退耕区与未退耕区 AGPP 的相对变化率,可以发现,退耕区和未退耕区像元 AGPP 的相对变化率均值分别为 0.40%和 0.39%,两个分区大部分像元 AGPP 的相对变化率处于低值区域(图 8),且主要位于西南部地区,而处于中值区域的像元则集中在六盘山区、吕梁山区、燕山-太行山区以及大兴安岭南麓山区,高值区域不明显。综合分析可知,相比未退耕区,退耕区 AGPP 的总体水平更高,增长趋势更为明显,相对变化率更快。这表明实施退耕还林还草工程为集中连片特困区的生态环境带来了较好的生态效益。

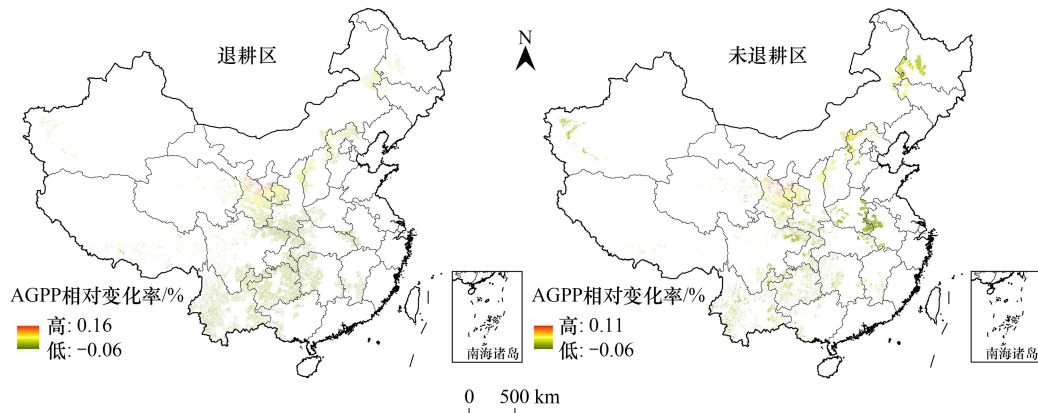


图8 集中连片特困区的退耕区与未退耕区 AGPP 相对变化率的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of relative rate of change of AGPP between fallowed and non-fallowed areas in concentrated and contiguous special hardship area

2.4 集中连片特困区退耕还林还草对 NDVI 的年际变化影响

对比分析所有退耕像元和未退耕像元 NDVI 的年均值、变化趋势以及相对变化率,发现两个分区的空间分布情况也大致相同,也即再次验证了自然因素对退耕区和未退耕区植被变化影响无显著区别。进一步具体分析,整个研究区像元 NDVI 多年的平均值(8.8116)要远大于未退耕区(0.6913)和退耕区(0.7111),同时退耕区 NDVI 年均值要高于未退耕区。两个分区 NDVI 年均值处于高值区域的像元主要集中于西南部和东北部连片特困区(图9),包括滇西边境山区、黔桂石漠化区、武陵山区、乌蒙山区、秦巴山区、大别山区以及大兴安岭南麓山区,中值区域则分布在六盘山区、吕梁山区以及燕山-太行山区,低值区域不明显。

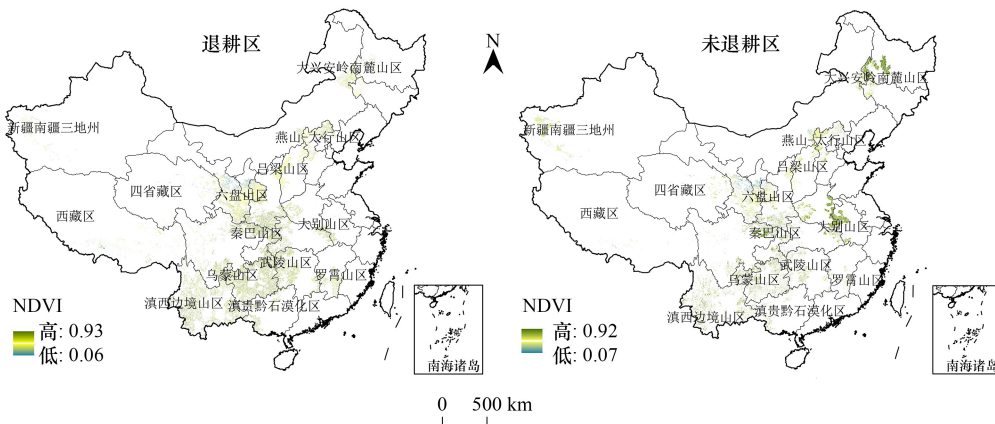


图9 集中连片特困区的退耕区与未退耕区 NDVI 年均值的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of annual average NDVI between retired and non-retired areas in concentrated and contiguous special hardship areas

研究期内退耕区和未退耕区的 NDVI 整体具有增长的态势,其中退耕区与未退耕区 NDVI 增呈现出显著和极显著加趋势的像元个数总和占比分别为 82.17%、67.93%(表4),且连片特困区中的大部分退耕区和未退耕区均表现出极显著增加趋势(图10)。而增加趋势表现出微显著和不显著的像元个数总和占比分别为 17.27%、22.81%,其像元分布相对分散。无变化的像元个数占比极少,均为 0.01%。两个区块 NDVI 的总体减少趋势不明显,其中退耕区与未退耕区 NDVI 表现出显著和极显著减少趋势的像元个数总和占比分别为 0.69%、2.03%,表现出微显著和不显著减少趋势的像元个数总和占比分别为 4.20%、8.23%。可以看出退耕区

和未退耕区的 NDVI 增长趋势明显,特别是退耕区大部分像元表现出极显著的增长趋势,而两个分区呈现显著减少趋势的像元均较少。

表 4 NDVI 变化类型像元个数及百分比

Table 4 Number and percentage of image elements of NDVI change type

变化类型 Type of change	未退耕区 Unplowed area		退耕区 Fallow area	
	像元个数 Pixel count	百分比/% Pixel count	像元个数 Pixel count	百分比/% Pixel count
极显著增加 Highly significant increase	105741	54.88	123112	68.95
显著增加 Significant increase	25143	13.05	23597	13.22
微显著增加 Marginal increase	9028	4.69	7753	4.34
不显著增加 No significant increase	32993	17.12	23087	12.93
无变化 No change	13	0.01	18	0.01
不显著减少 No significant decrease	14558	7.56	6990	3.91
微显著减少 Marginal decrease	1299	0.67	516	0.29
显著减少 Significant decrease	1905	0.99	696	0.39
极显著减少 Highly significant decrease	1999	1.04	538	0.30

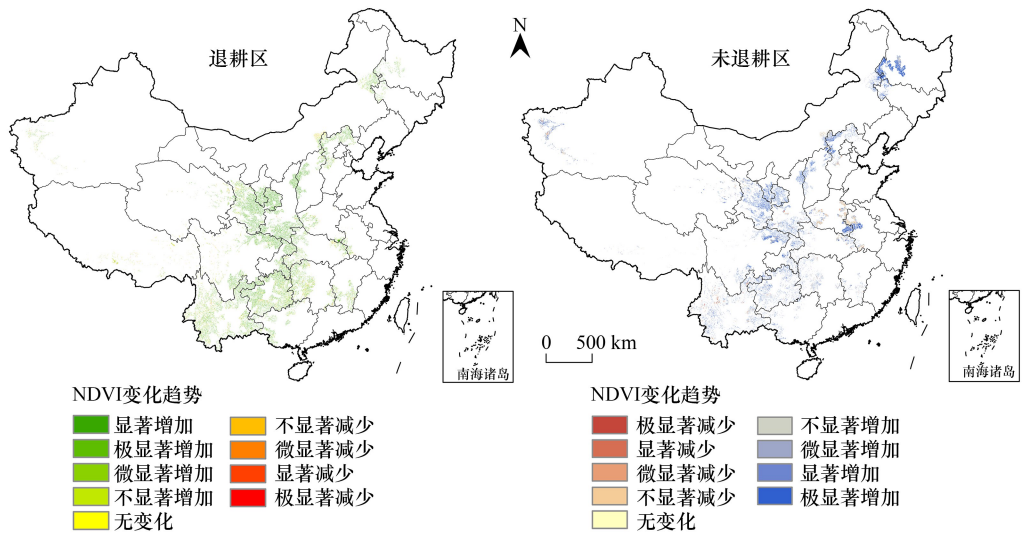


图 10 集中连片特困区的退耕区与未退耕区 NDVI 变化趋势的空间分布

Fig.10 Spatial distribution of NDVI trends between fallowed and non-fallowed areas in concentrated and contiguous special hardship areas

退耕区 NDVI 的相对变化率均值(4.76%)要高于未退耕区 NDVI 的相对变化率均值(4.20%),但二者均小于整个集中连片特困区 NDVI 相对变化率均值(8.81%)。退耕区和未退耕区 NDVI 相对变化率集中处于中高值区域,低值区域像元所占比例极小且分散(图 11)。这表明两个分区的整体 NDVI 变化具有较高增速,尤其是退耕区的 NDVI 增长速度更快。总体来看,相比未退耕区,退耕区植被覆盖度和相对变化率更高,NDVI 具有更明显的增长趋势,这也进一步验证了退耕还林还草工程为集中连片特困区的生态环境改善作出了重要贡献。

2.5 集中连片特困区退耕还林还草对 AGPP 和 NDVI 年际变化的影响

对比 2000—2020 年所有退耕像元、未退耕像元以及整个研究区所有像元的 AGPP 和 NDVI 年际变化趋势,可以发现退耕区多年 AGPP 年均值和 NDVI 年均值的中位数(分别为 1164.41g/m²和 0.7078)均要高于整个集中连片特困区(中位数分别为 813.83g/m²和 0.4935)和未退耕区(中位数分别为 1017.01g/m²和 0.6988)。

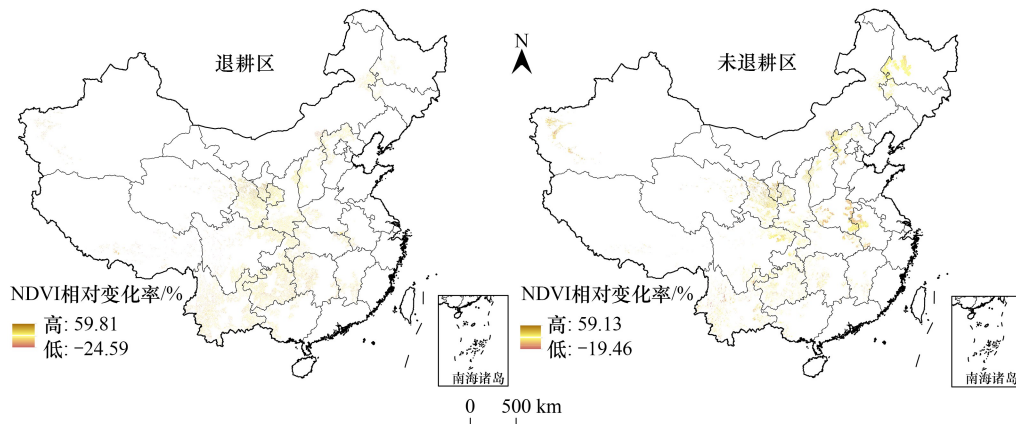


图 11 集中连片特困区的退耕区与未退耕区 NDVI 相对变化率的空间分布

Fig.11 Spatial distribution of relative rate of change of NDVI between fallowed and non-fallowed areas in concentrated and contiguous special hardship areas

研究期内退耕区 AGPP 和 NDVI 的年均值均集中分布在较大值区域;未退耕区 AGPP 的年均值集中在较大值区域,而 NDVI 均值则集中在较小值区域;整个集中连片特困区的 AGPP 和 NDVI 年均值的分布比较均匀(图 12)。

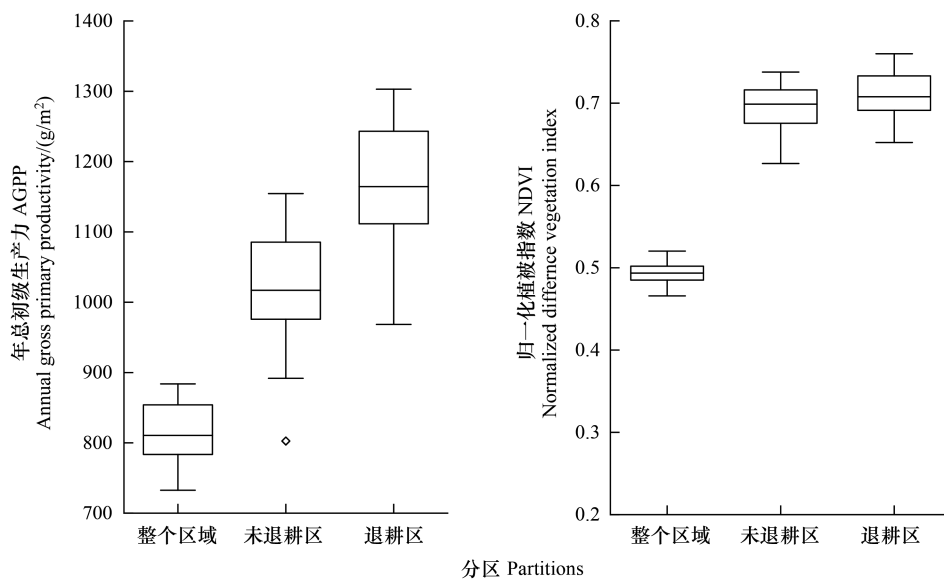


图 12 2000—2020 年 AGPP 和 NDVI 在整个区域、未退耕区和退耕区变化差异

Fig.12 Differences in AGPP and NDVI changes across the region, unplowed areas and fallow areas, 2000—2020

进一步地,从整个研究区、未退耕区以及退耕区 AGPP 和 NDVI 在 2000—2020 年的年均值变化趋势可以发现(图 13),从整体来看,无论是 AGPP 还是 NDVI,在区域尺度和像元尺度二者的时间序列变化趋势大体一致,均表现出递增态势,且退耕区的增长趋势始终保持在最上方,整个研究区的 AGPP 和 NDVI 的年均值变化趋势相对小于退耕区和未退耕区,这可能是由于部分连片特困区尤其是西藏区、新疆南疆三地州以及四省藏区,占地面积广阔且以未利用土地为主,因地理位置、气候以及土壤等因素条件的制约,导致植被稀少,植被覆盖面积小,从而影响了整个研究区域 AGPP 和 NDVI 的数值大小。综合以上分析,再次验证了退耕还林还草工程在集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 的增长过程中发挥了重要作用。

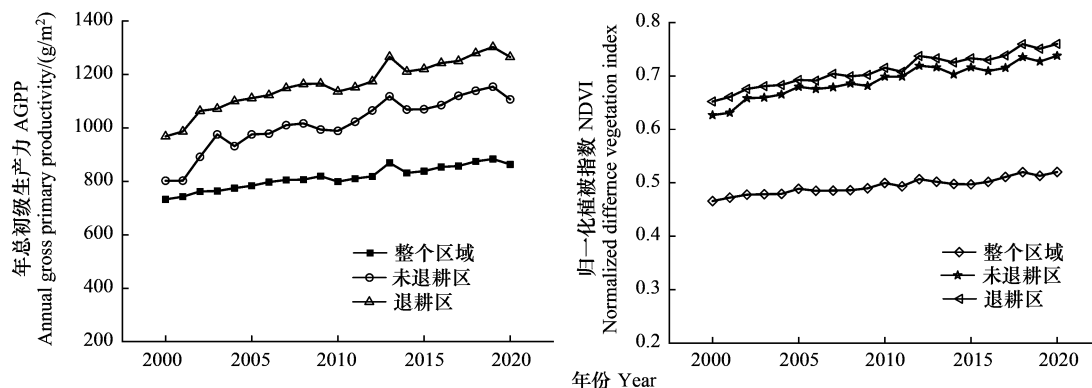


图 13 2000—2020 年 AGPP 和 NDVI 在整个区域、未退耕区和退耕区的变化趋势

Fig.13 Trends in AGPP and NDVI for the region as a whole, unplowed areas and fallow areas, 2000—2020

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 2000—2020 年集中连片特困区耕地、湿地、建设用地面积分别减少了 2.80%、5.61%、72.99%，林地、草地以及未利用土地面积分别增加了 30.54%、16.88%、27.27%，其中耕地转化为林地和草地的总面积为 178554 km²，约占 2000 年耕地总面积的 44.71%，耕地面积未发生变化的比例为 48.24%。

(2) 2000—2020 年集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 多年平均值分别为 376.87 g/m²、0.4948，二者的中高值区域集中于西南部和东北部的连片特困区，而新疆南疆三地州、西藏区以及四省藏区的 AGPP 和 NDVI 年均值则主要处于低值区域。集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 整体变化具有增长态势，且二者表现出增加趋势的像元总和占比分别为 68.44%、84.50%。

(3) 2000—2020 年退耕区和未退耕区像元多年 AGPP 的平均值分别为 1136.67 g/m²、988.26 g/m²，且两个区域 AGPP 呈现增加趋势的像元总和占比分别为 65.30%、60.04%，而呈现减少趋势的像元占比分别为 8.98%、8.64%。此外，退耕区与未退耕区像元的 AGPP 平均相对变化率分别为 0.40% 和 0.39%。总体来看，相比未退耕区，退耕区 AGPP 的增长更为明显。

(4) 2000—2020 年退耕区与未退耕区像元多年 NDVI 的平均值分别为 0.7111、0.6913，退耕区与未退耕区 NDVI 表现出增加趋势的像元总和占比分别为 82.17%、67.93%，而呈现减少趋势的像元占比分别为 4.89%、10.26%。此外，退耕区与未退耕区像元的 NDVI 平均相对变化率分别为 4.76%、4.20%。总体而言，相较于未退耕区，退耕区的植被覆盖度有更为显著的提升。

(5) 相比于未退耕区，退耕区的 AGPP 和 NDVI 年均值更集中于较大值区域。同时，在研究期内整个集中连片特困区、未退耕区以及退耕区 AGPP 和 NDVI 的年际变化趋势大体一致，均表现出递增态势，且退耕区的 AGPP 和 NDVI 增长变化始终保持在最上方。

3.2 讨论

通过研究发现，退耕还林还草工程对原集中连片特困区 AGPP 和 NDVI 产生了显著影响，耕地转林地和草地后 AGPP 和 NDVI 均有明显提高，这与以往对退耕还林还草工程的生态效益研究结果一致。如姚楠等^[46]和衣鹏慧等^[47]对黄土高原退耕还林还草工程的固碳效益进行评估后，发现退耕后黄土高原的土壤有机碳储量有显著提升，尤南山等则发现黄土高原的退耕区总初级生产力的增长趋势明显高于未退耕区^[22]。相比于以往以黄土高原作为研究对象，本研究选择从原集中连片特困区这一生态环境极为脆弱区域入手，考察退耕还林还草工程实施后相关连片特困区 AGPP 和 NDVI 的变化，以评估退耕还林还草所带来的生态效应。可以发现，不同连片特困区退耕后的 AGPP 和 NDVI 呈现出不同程度的增长态势，其中 AGPP 和 NDVI 呈现极

显著增长趋势的面积占退耕区总面积比例分别为 55.72% 和 68.95%, 与以往发现黄土高原退耕区总初级生产力(GPP)和 NDVI 上升区域面积占全区域面积的 67.3% 和 53.34% 一致^[13,22]。同时,还可以发现以中部和偏北部的连片特困区退耕后的生态效益最为良好,如六盘山区、吕梁山区、燕山-太行山区以及大兴安岭南麓山区等地区,退耕后的 AGPP 和 NDVI 均表现出极显著的增长趋势,存在极少部分相对分散的退耕区 AGPP 和 NDVI 增长趋势较不明显,表明中部和偏北部的连片特困区对退耕还林还草工程的响应较为敏感,这也说明针对不同连片特困区的生态环境状况,需因地制宜,遵循“宜草则草、宜林则林”的原则,以便最大限度地发挥出退耕还林还草工程的生态效应,从而进一步降低集中连片特困区的生态脆弱程度。

本研究基于 2000 和 2020 年两期土地利用数据将原集中连片特困区中的退耕像元和未退耕像元分离出来,并计算出 2000—2020 年所有退耕像元、未退耕像元以及整个研究区像元的 AGPP 和 NDVI 年均值、变化趋势以及相对变化率,试图从 AGPP 和 NDVI 两个视角考察原集中连片特困区实施退耕还林还草工程对生态环境所带来的生态效益,但自然生态系统不仅受降水、气温等自然因素的影响,同时还因退耕还林还草、植树造林、自然植被恢复等生态修复工程的实施而发生明显变化。因而植被的生长会因气候条件、人类活动等因素的影响,导致 AGPP 和 NDVI 的提取值与真实值之间存在偏差,但从已有研究来看,由于退耕区和未退耕区相互毗邻,气候变化对两个区域植被的影响无明显区别^[22],因此在差异分析中并未讨论气候对 AGPP 和 NDVI 变化的干扰。在后续研究中,应当综合考虑自然因素和退耕还林还草等生态建设工程的共同作用,更加精准分离这些因素对生态系统服务功能的影响,以更科学准确地评估出研究区退耕还林还草的生态效应。此外,鉴于本研究仅分析了 AGPP 和 NDVI 的变化差异,这无法全面反映退耕还林还草工程实施所带来的生态效应,因此在之后的研究中也需进一步考虑 SOC、NPP、NEP 等生态指标的变化,才能更加精准评价原集中连片特困区退耕还林还草的环境效益。

参考文献 (References):

- [1] 国家林业和草原局,国家公园管理局. 三大生态工程建设不断取得成效, (2023-02-04). <https://www.forestry.gov.cn/c/www/trlgcjz/61258.jhtml>
- [2] 罗蓉,何黄琪,陈爽. 原连片特困地区共同富裕能力评价及其演变跃迁. 经济地理, 2022, 42(8): 154-164.
- [3] 殷江滨,李尚谦,姜磊,程哲,黄晓燕,路改改. 中国连片特困地区非农就业增长的时空特征与驱动因素. 地理学报, 2021, 76(6): 1471-1488.
- [4] 徐孝勇,曾恒源. 中国 14 个集中连片特困地区县域自我发展能力测度与乡村振兴战略瞄准研究. 农林经济管理学报, 2019, 18(5): 684-692.
- [5] 李绍平,李帆,董永庆. 集中连片特困地区减贫政策效应评估: 基于 PSM-DID 方法的检验. 改革, 2018(12): 142-155.
- [6] 张大维. 生计资本视角下连片特困区的现状与治理——以集中连片特困地区武陵山区为对象. 华中师范大学学报: 人文社会科学版, 2011, 50(4): 16-23.
- [7] 康江江,宁越敏,魏也华,武荣伟. 中国集中连片特困地区农民收入的时空演变及影响因素. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 86-94.
- [8] Zuo D P, Chen G, Wang G Q, Xu Z X, Han Y N, Peng D Z, Pang B, Abbaspour K C, Yang H. Assessment of changes in water conservation capacity under land degradation neutrality effects in a typical watershed of Yellow River Basin, China. Ecological Indicators, 2023, 148: 110145.
- [9] 黄麟,翟俊,宁佳. 不同气候带退耕还林对区域气温的影响差异分析. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1832-1843.
- [10] 李艳忠,刘昌明,刘小莽,梁康,白鹏,冯异星. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2005-2020.
- [11] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in mainland China since the late 1980s. Science of the Total Environment, 2018, 639: 237-247.
- [12] 田晓宇,徐霞,江红蕾,龚容,关梦茜. 退耕还林(草)政策下土地利用结构优化研究——以内蒙古太仆寺旗为例. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S2): 25-30.
- [13] 赵安周,张安兵,刘海新,刘焱序,王贺封,王冬利. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460.
- [14] Li W Q, Wang W L, Chen J H, Zhang Z M. Assessing effects of the Returning Farmland to Forest Program on vegetation cover changes at multiple spatial scales: the case of northwest Yunnan, China. Journal of Environmental Management, 2022, 304: 114303.
- [15] 刘淑娟,张伟,王克林,苏以荣. 桂西北典型喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的固碳效益评价. 生态学报, 2016, 36(17): 5528-5536.
- [16] Song Y, Yao Y F, Qin X, Wei X R, Jia X X, Shao M G. Response of carbon and nitrogen to afforestation from 0 to 5? m depth on two semiarid cropland soils with contrasting inorganic carbon concentrations. Geoderma, 2020, 357: 113940.

- [17] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 张童越, 鲁亚楠, 龚直文, 王怡菲. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. 自然资源学报, 2020, 35(4): 826-844.
- [18] Wang J J, Liu Z P, Gao J L, Emanuele L, Ren Y Q, Shao M G, Wei X R. The Grain for Green Project eliminated the effect of soil erosion on organic carbon on China's Loess Plateau between 1980 and 2008. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 322: 107636.
- [19] Zhang Y, Ge N N, Liao X L, Wang Z, Wei X R, Jia X X. Long-term afforestation accelerated soil organic carbon accumulation but decreased its mineralization loss and temperature sensitivity in the bulk soils and aggregates. *CATENA*, 2021, 204: 105405.
- [20] Rong G H, Zhang X J, Wu H Y, Ge N N, Yao Y F, Wei X R. Changes in soil organic carbon and nitrogen mineralization and their temperature sensitivity in response to afforestation across China's Loess Plateau. *CATENA*, 2021, 202: 105226.
- [21] Yang K, Zhao Y G, Gao L Q. Biocrust succession improves soil aggregate stability of subsurface after "Grain for Green" Project in the Hilly Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 2022, 217: 105290.
- [22] 尤南山, 董金玮, 肖桐, 刘纪远, Xiao Xiangming. 退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响. 地理科学, 2020, 40(2): 315-323.
- [23] 胡生君, 孙保平, 王同顺. 干热河谷区退耕还林生态效益价值评估——以云南巧家县为例. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 79-83.
- [24] 李敏, 姚顺波. 退耕还林工程综合效益评价. 西北农林科技大学学报: 社会科学版, 2016, 16(3): 118-124.
- [25] 王静, 姚顺波, 刘天军. 基于 RUE 的宝鸡地区生长季退耕还林(草)工程生态效果评价. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2016-2027.
- [26] Fan M, Xiao Y T. Impacts of the grain for Green Program on the spatial pattern of land uses and ecosystem services in mountainous settlements in southwest China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00806.
- [27] Uchida E, Xu J, Rozelle S. Grain for green: cost-effectiveness and sustainability of China's conservation set-aside program. *Land Economics*, 2005, 81(2): 247-264.
- [28] 李卫忠, 吴付英, 吴宗凯, 雷明军, 刘广亮. 退耕还林对农户经济影响的分析——以陕西省吴起县为例. 中国农村经济, 2007(S1): 108-111, 116.
- [29] Cao S X, Xu C G, Chen L, Wang X Q. Attitudes of farmers in China's northern Shaanxi Province towards the land-use changes required under the Grain for Green Project, and implications for the project's success. *Land Use Policy*, 2009, 26(4): 1182-1194.
- [30] 王庶, 岳希明. 退耕还林、非农就业与农民增收——基于 21 省面板数据的双重差分分析. 经济研究, 2017, 52(4): 106-119.
- [31] Wang J J. The Economic and Ecological Foundations for Converting Farmland and Grass Coverage. *Agricultural Economics*, 2019, 101(5): 1432-14.
- [32] 刘浩, 刘璨, 刘俊昌. 退耕还林工程对农户生产要素投入与收入的影响——基于长期连续跟踪大样本农户数据. 改革, 2021(1): 109-124.
- [33] Peng H, Cheng G, Xu Z, Yin Y, Xu W. Social, economic, and ecological impacts of the "Grain for Green" project in China: a preliminary case in Zhange, Northwest China. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 774-784.
- [34] Liu Z, Lan J. The sloping land conversion program in China: effect on the livelihood diversification of rural households. *World Development*, 2015, 70: 147-161.
- [35] 卢悦, 田相辉. 退耕还林对农户收入的影响分析——基于 PSM-DID 方法. 林业经济, 2019, 41(4): 87-93.
- [36] 陈琛, 石颜露, 邱珊珊, 王立群. 首轮退耕补贴到期对农户非农就业的影响. 干旱区资源与环境, 2022, 36(12): 15-21.
- [37] 高清, 朱凯宁, 靳乐山. 新一轮退耕还林规模的收入效应研究——基于还经济林、生态林农户调查的实证分析. 农业技术经济, 2023(4): 121-135.
- [38] 高清, 靳乐山. 新一轮退耕还林对农户收入影响的机理研究——基于赣南、鄂北农户调查的实证分析. 中国土地科学, 2021, 35(5): 57-66.
- [39] 徐晋涛, 陶然, 徐志刚. 退耕还林: 成本有效性、结构调整效应与经济可持续性——基于西部三省农户调查的实证分析. 经济学: 季刊, 2004, 3(4): 139-162.
- [40] 易福金, 陈志颖. 退耕还林对非农就业的影响分析. 中国软科学, 2006(8): 31-40.
- [41] Liu C, Lu J Z, Yin R S. An estimation of the effects of China's Priority Forestry Programs on farmers' income. *Environmental Management*, 2010, 45(3): 526-540.
- [42] Zhou D C, Zhao S Q, Zhu C. The Grain for Green Project induced land cover change in the Loess Plateau: a case study with Ansai County, Shanxi Province, China. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 88-94.
- [43] 韩秀华. 退耕还林工程对农户收入影响实证分析——以陕西安康为例. 林业经济, 2015, 37(6): 40-43.
- [44] 范仁雪, 朱先进, 陈智, 于贵瑞, 张维康, 韩朗, 王秋凤, 陈世革, 刘绍, 王辉民, 闫俊华, 谭俊磊, 张法伟, 赵风华, 李英年, 张一平, 石培礼, 朱教君, 吴家兵, 赵仲辉, 郝彦宾, 沙丽清, 张玉翠, 姜世成, 顾峰雪, 吴志祥, 张扬建, 周莉, 唐亚坤, 贾丙瑞, 李玉强, 宋清海, 董刚, 高艳红, 蒋正德, 孙聃, 王建林, 何其华, 李新虎, 王飞, 魏文学, 邓正苗, 郝翔翔, 李彦, 刘晓利, 章熙锋, 朱治林. 42000-2020 年中国陆地生态系统年总初级生产力数据集. *Science Data Bank*, 2023[2023-02-02]. <https://cstr.cn/15732.11.sciencedb.00077>. CSTR:15732.11.sciencedb.00077.
- [45] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [46] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 贾磊, 林颖, 邓元杰, 侯孟阳. 基于坡度视角的黄土高原退耕还林(草)工程碳汇效应分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2023, 47(1): 180-188.
- [47] 衣鹏慧, 吴会峰, 胡保安, 温馨, 韩海荣, 程小琴. 黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素. 生态学报, 2023, 43(24): 10054-10064.