DOI: 10.5846/stxb202207172042

李海萍,李定恒,李豪.贵州省退耕还林还草潜在碳汇效益评估.生态学报,2022,42(23):9499-9510.

Li H P, Li D H, Li H.Evaluation of potential carbon sink benefits of Grain for Green Project in Guizhou Province.Acta Ecologica Sinica,2022,42(23):9499-9510.

贵州省退耕还林还草潜在碳汇效益评估

李海萍*,李定恒,李 豪

中国人民大学环境学院, 北京 100872

摘要:作为我国的一项重要生态工程,退耕还林不仅有利于生态保护,对提升森林碳汇功能、实现碳中和目标也具有重要意义。以退耕还林的碳汇效益为目标,对贵州省退耕还林的潜在碳汇效益进行评估,在对耕地条件及退耕还林还草目标进行分析的基础上,根据坡度、石漠化程度和土壤重金属污染等退耕要求确定出需要退耕的区域;采用随机森林分类算法对地形、气候、土壤等影响植被生长的关键因子进行分类,进而对退耕地的宜林宜草宜灌适宜性进行评价,根据评价结果对贵州省的主要植被类型碳汇因子进行修正,得到不同植被的固碳率并据此对退耕还林工程的碳汇潜力进行评估。结果显示:(1)贵州省现有 25°以上陡坡耕地 82.5 万 hm^2,重要水源地 15—25°坡耕地 7.9 万 hm^2,严重石漠化耕地 25.1 万 hm^2,受重金属镉、铅、锌严重污染的耕地分别为 9.3 万 hm^2、21.7 万 hm^2和 6.9 万 hm^2;(2)降雨量、海拔和≥10 ℃积温是影响植被生长的 3 个重要自然因子,131.9 万 hm^2待退耕地中,宜林、宜草和宜灌地的面积分别为 63.5 万 hm^2、38.7 万 hm^2和 29.7 万 hm^2;(3)贵州省新一轮退耕还林还草工程的碳汇潜力巨大并以林地碳汇最大,林地、灌木、草地碳汇增量分别为 1779 万 t、293 万 t 和 45 万 t,碳汇总收益可达 2117 万 t,对实现碳中和目标具有积极作用。

关键词:贵州省;退耕还林;碳汇潜力评估;随机森林

Evaluation of potential carbon sink benefits of Grain for Green Project in Guizhou Province

LI Haiping*, LI Dingheng, LI Hao

School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, *China*

Abstract: As an important ecological project in China, returning farmland to forest is not only conducive to ecological protection, but also of great significance to enhance the function of forest carbon sink and achieve the goal of carbon neutrality. Evidences revealed that the conversion of cropland to forest has changed the carbon cycle process of the ecosystem by adjusting the way of land use, which could be quite helpful to strengthen the land's carbon sink capacity. Aiming at the carbon sequestration benefit of Grain for Green Project, this paper evaluates the potential carbon sink benefit of returning farmland to forests in Guizhou Province. On the basis of analyzing the cultivated land conditions and taking the objectives of Grain for Green Project into account, the areas that need to be converted are determined in accordance with the requirements of returning farmland, such as slope, rocky desertification degree and soil heavy metal pollution; The random forest classification algorithm is used with 9 environmental variables such as terrain, climate, soil and so on to discover the driving mechanism of vegetation growth, then the suitability of the cultivated land suitable for forest, grass and shrub is evaluated. According to the evaluation results, the carbon sink factors of the main vegetation types in Guizhou Province are modified to obtain the carbon sequestration rates of different vegetations, based on which the carbon sink potential of the

基金项目:中国人民大学习近平新时代中国特色社会主义思想研究工程成果(22XNQ004)

收稿日期:2022-07-17; **采用日期**:2022-09-12

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lhping@ruc.edu.cn

Grain for Green Project is evaluated. The results show that: (1) there are 825250 hm^2 of steep slope cultivated land above 25° in Guizhou Province, 78813 hm^2 of 15—25° slope cultivated land in important water sources, 251400 hm^2 of severely rocky desertification cultivated land, and 93300 hm^2, 216600 hm^2 and 69200 hm^2 of the cultivated land seriously polluted by heavy metals Cd, Pb, Zn, respectively; (2) Within the 9 factors that has been considered when evaluating land suitability, rainfall, altitude and accumulated temperature more than 10 ℃ are three most important natural factors which have a great influence on the process of vegetation growth. Among 1319700 hm^2 of the cultivated land to be converted, the areas suitable for forest, grass and shrub are 635000 hm^2, 387100 hm^2 and 297600 hm^2, respectively; (3) The carbon sink potential of the new round of Grain for Green Project in Guizhou Province is considerably huge, after comparing with grassland and shrub, the contribution of forest land to carbon sink has always been the largest. The carbon sink increment of forest, shrub and grassland is 17790000 tons, 2930000 tons and 450000 tons, respectively, and the total increment of carbon sequestration can reach 21170000 tons, which will play a positive role in achieving the goal of carbon neutralization.

Key Words: Guizhou Province; Grain for Green Project; carbon sink potential assessment; random forest

工业革命以来的世界经济飞速发展,人类生产生活对自然资源需求的同时也引发了森林退化、水土流失、气候变暖等一系列生态环境问题[1]。为应对日趋加剧的生态危机,世界各国先后启动了一系列大规模的生态治理工程,如美国罗斯福工程、苏联斯大林改造大自然计划、北非绿色坝防护林工程等[2—4]。我国自 20 世纪 80 年代以来也相继开展了包括退耕还林在内的多项生态工程,20 年来我国退耕还林还草面积累计高达 3440 万 hm^2,工程区内森林覆盖率平均提高 4 个多百分点,成林面积占全球同时期增绿面积的 4%以上[5]。基于卫星遥感数据的全球绿化趋势研究也强调了人为土地管理对改善地球环境的重要性,并呼吁世界其他国家学习中国经验[6]。

我国退耕还林还草的实践可分为两个阶段,即 1999 年在甘肃、陕西、四川率先试点的第一轮和 2014 年起的新一轮退耕还林还草。已有研究从多个维度评估了该工程对地区生态系统的积极影响[7—9]。由于不同生态系统的服务功能间存在权衡关系[10],如林地增加可促进地表植被蒸散,水文调节功能增强的同时会使水源涵养量减少,因此需要对工程的实施强度加以控制[11]。此外,退耕还林通过调整土地利用方式改变了生态系统的碳循环过程,Lugo 等基于波多黎各不同历史时期的土壤调查发现,毁林造田后的土壤碳贮量仅为初始量的 35%,而休耕还林后可回升至 75%左右[12]。刘苑秋等通过监测江西瑞昌市退耕还林后的植被状况及土壤性质,发现土壤有机碳、微生物生物量碳以及可矿化碳的含量均有显著提升[13]。赵宁等综合已发表的数据,估算出过去几十年我国陆地的平均碳汇为(0.21±0.03) Pg C /a(1 Pg=10^{15} g)[14]。作为实施面积最广的一项造林工程,2001 至 2008 年因生态退耕产生的碳汇就高达 5.87 Mt[15]。

准确估算退耕还林的碳汇潜力对实现碳中和目标具有重要意义,许多学者已对此进行了研究,邓元杰等人[16]使用 FLUS 模型对子长县退耕还林工程进行了四种情景模拟,并结合 InVEST 模型测算了陆地碳储量潜力及碳汇的经济价值,但其对土地利用的模拟更侧重于耕地与其他地类间的竞争关系,未考虑耕地条件是否满足退耕要求。大多数研究以坡度为依据确定退耕地的面积和范围,如陆文涛等以 15°和 25°划分坡度区间,运用 Dyna-CLUE 模型模拟了滇池流域退耕还林后的土地利用情况[17]。蒙吉军等在陡坡耕地的基础上,将张掖市沙化耕地和盐碱地纳入了退耕范围[18]。杨存建等将坡度与土壤侵蚀和 NDVI 数据叠加对云南省的退耕空间进行了识别,并进一步利用降雨和气温数据区分退耕还林还草的适宜性[19]。目前对水土流失及土壤污染区域的退耕研究还不多见。由于不同地区的自然条件存在较大差异,退耕后的林草恢复适宜性也不尽相同,致使碳汇估算时的碳汇系数难以统一,因而界定不同区域不同植被的固碳率不仅是准确估算碳汇潜力的首要问题,也是进行中小空间尺度碳汇效益评估的科学基础。

贵州省于 2000 年正式启动退耕还林工程,目前已累计退耕还林 247 万 hm^2,超过全省森林总面积 1/5。尽管如此,2014 年新一轮退耕还林还草工程中贵州省的计划任务仍居全国首位。国务院 2014 年《关于印发

新一轮退耕还林还草总体方案的通知》和 2015 年《关于扩大新一轮退耕还林还草规模的通知》中明确将陡坡耕地、重要水源地 15—25°坡耕地、严重沙(石)漠化及严重污染耕地列入退耕范围。鉴于此,本文以耕地问题较突出的贵州省为研究区,基于新的退耕范围,通过识别退耕区域并评价退耕地的立地条件,对不同自然条件下林灌草的固碳率进行确定,遵循因地制宜的原则对贵州省退耕还林还草还灌后的碳汇效益进行评估,既扩大了退耕的碳汇效益评估范围,又可提升碳汇潜力的估算精度。

1　研究区概况和数据来源

1.1　研究区概况

贵州省地处云贵高原东部 103°36′—109°35′E、24°37′—29°13′N 之间,地势西高东低,为典型的喀斯特地貌区,总面积 1760 万 hm^2,见图 1。

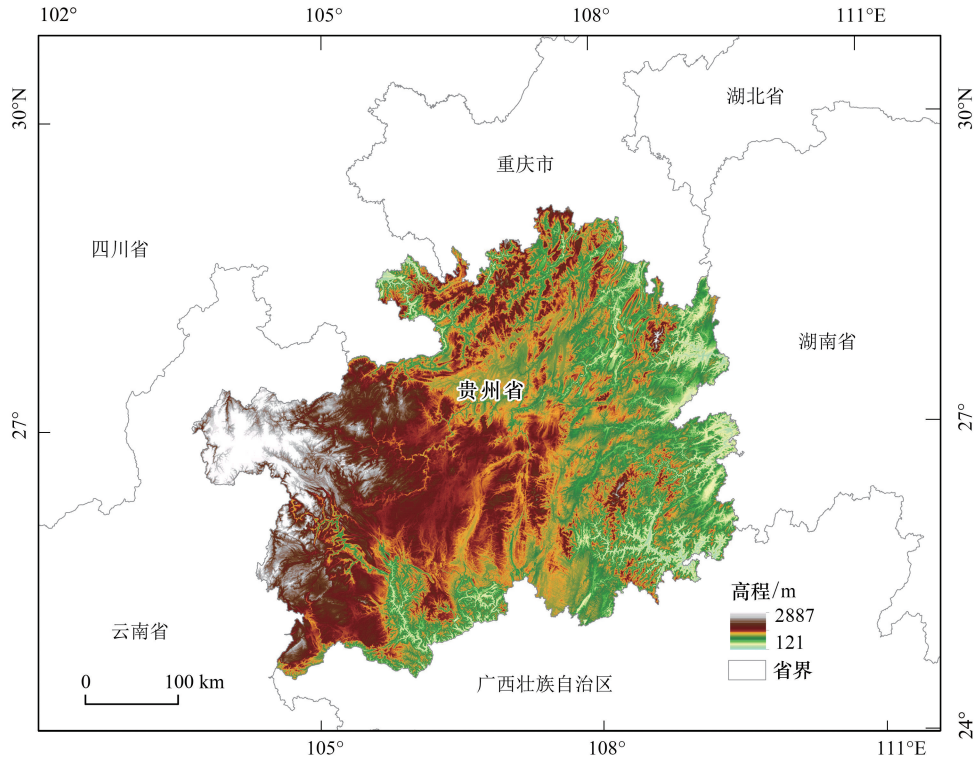

图 1　研究区位置

Fig.1　Location of the study area

贵州省为亚热带湿润季风气候区,年均温 14—16 ℃,年降水量 1100—1400 mm。因地处横断山和喀斯特地貌区,不仅土地资源稀缺,坡耕地占比也很高,15°以上陡坡耕地超 40%。尽管已退耕 134 万 hm^2,新一轮退耕任务仍有 113 万 hm^2。

1.2　数据来源及预处理

2020 年贵州省发改委部署的近期退耕任务约 20 万 hm^2,因此选用 2000 和 2020 年两期土地利用数据探究自退耕工程开始以来贵州省植被的生长趋势并预测工程未来的碳汇潜力,该数据来源于国家基础地理信息中心(http://www.globallandcover.com/)的全球地表覆盖数据 Globeland 30,分类总体精度分别为 83.5%和 85.7%[20],根据退耕还林工程目标,将原始 7 种地类中的湿地和水体合并为水域,与耕地、林地、草地、灌木地和建设用地一起进行评估。

DEM 数据从地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)平台下载,并派生出坡度和坡向图。气温和降雨

量栅格数据源自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。水系分布矢量数据来源于1∶400万全国基础地理数据库(https://www.webmap.cn/)。

从 Google Earth Engine 云平台调用经辐射定标、大气校正、几何纠正等预处理后的贵州省 2020 全年度 Landsat 8 卫星影像,通过编写代码计算出基岩裸露率,作为石漠化范围和程度的确定依据。

土壤重金属含量点数据整理自公开发表的文献[21],将包含经纬度的样本点数据导入 ArcGIS 10.4,提取出位于贵州省内的 277 个点位,其中镉 249、铅 239、锌 68、砷 168、铜 132 和铬 192 个。土壤质地、酸碱度和有机质含量等其他属性数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)和世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集。

将所有栅格图层重采样为 30 m,以便与土地利用数据的空间分辨率保持一致,投影坐标系采用 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

2 研究方法

2.1 确定退耕区域

(1)坡耕地

《中华人民共和国水土保持法》禁止在 25°以上陡坡地开垦种植农作物。此外,为降低水源地保护区的环境污染风险,新一轮退耕还林还草将三峡库区、丹江口库区及上游区域的 15—25°坡耕地也纳入了工程范围,涉及贵州省赤水市、习水县和仁怀县,将坡度按 15°和 25°分级后与土地利用数据叠加,提取出相应的坡耕地。

(2)严重石漠化耕地

水利部《岩溶地区水土流失综合治理技术标准》(SL 461—2009)中,石漠化程度以基岩裸露率进行划分,30%—50%为轻度,50%—70%为中度,大于 70%则为重度石漠化。基岩裸露率以归一化岩石指数 NDRI 为基础,采用像元二分模型计算[22],公式为:

$$\mathrm{NDRI}=\frac{\mathrm{SWIR}-\mathrm{NIR}}{\mathrm{SWIR}+\mathrm{NIR}} \tag{1}$$

$$F_r=\frac{\mathrm{NDRI}-\mathrm{NDRI}_o}{\mathrm{NDRI}_r-\mathrm{NDRI}_o} \tag{2}$$

式中,F_r为基岩裸露率;SWIR 和 NIR 分别对应 Landsat 8 的短波红外波段和近红外波段;NDRI_o为完全非岩石覆盖像元的 NDRI 值;NDRI_r为完全岩石覆盖区的 NDRI 值。参考牛群等[23]的研究将 NDRI_o和 NDRI_r确定为累计百分比 1%和 99%所对应的像元值。

(3)严重污染耕地

克里金法是以半变异函数理论为基础估计无数据区域变量值的一种最优内插方法,广泛应用于模拟重金属空间分布的研究中[24—25]。对重金属点位数据进行克里金插值后,采用德国学者 Muller 于上世纪 60 年代提出的地累积指数(I_{geo})对重金属污染耕地进行评价,该方法因综合了人为污染因素和自然背景的影响而沿用至今[26],公式为:

$$I_{geo}=\log_2(C_i/kS_i) \tag{3}$$

式中,I_{geo}为土壤重金属 i 的地累积指数;C_i为重金属 i 的实际含量(mg/kg);S_i为重金属 i 在土壤中的参考标准值(mg/kg);k 为消除岩石差异引起的背景值变动所设定的修正系数,通常取值 1.5。若 I_{geo}值≥3 则表明土壤已受到严重的重金属污染。贵州省土壤重金属背景值参考现有文献[25]。

2.2 退耕土地的适宜性评价

2.2.1 评价因子

新一轮退耕方案强调尊重规律、因地制宜,根据不同立地条件宜林则林、宜灌则灌、宜草则草。西南地区林木在降雨量低于 400 mm 或≥0 ℃积温不足 1500 ℃的环境下难以存活,但却适宜种草[19],灌木适宜生长在

半阴、湿润的环境中,最佳生长温度为 15 ℃左右。为进一步确定退耕地的林草配置,选取地形(海拔、坡度和坡向)、土壤性质(酸碱度、土壤质地和有机质含量)、气候类型(年均降雨量、≥10 ℃积温)以及区位条件(距水系距离)4 类指标 9 个因子对退耕土地的适宜性进行评价,各因子的空间分布见图 2。

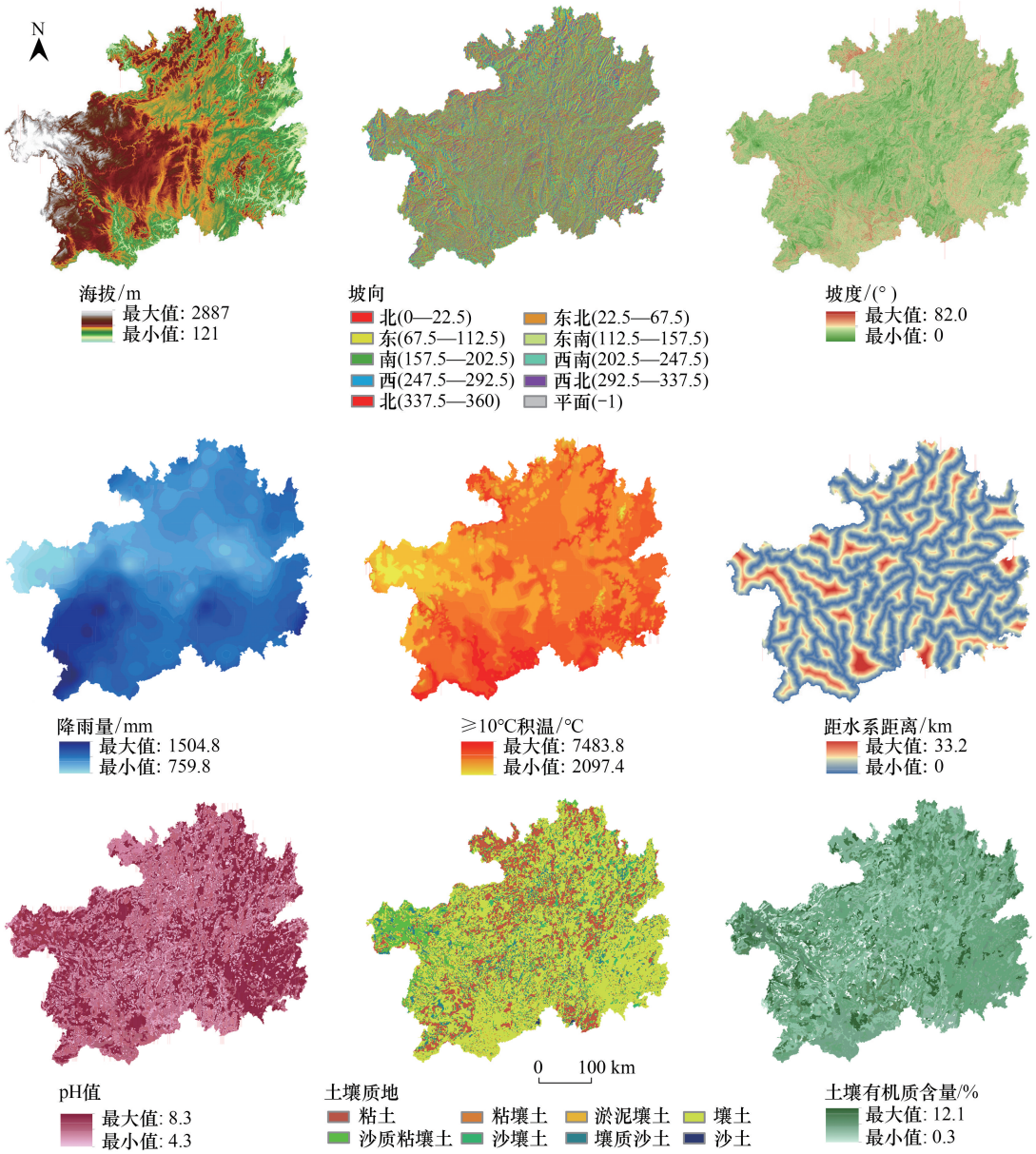

图 2　立地条件适宜性评价因子

Fig.2　Site condition suitability evaluation factors

2.2.2　PLUS(Patch-generating Land Use Simulation)评价模型

PLUS 模型可进行斑块尺度的土地利用变化模拟,由中国地质大学关庆锋团队 2021 年开发,其中的用地扩张分析策略 LEAS(Land Expansion Analysis Strategy)模块可用来探索多因素对用地扩张的驱动机制,并在此基础上预测每种地类未来的发展潜力。使用时先从两期土地利用数据中提取林、草和灌木地的增加部分,通过随机采样提取 30%的数据作为训练集,之后采用随机森林分类(Random Forest Classification)算法对各地类扩张和输入的驱动因子图层逐一进行挖掘,获得自然因子对用地扩张的贡献度及各地类的发展概率,该方法可有效解决驱动因子间的多重共线性[27],公式为:

$$P_{i,k}^{d}(x)=\frac{\sum_{n=1}^{M} I(h_n(x)=d)}{M} \tag{4}$$

式中,参数 d 取值 0 或 1;1 表明有地类向 k 类型转化, 0 表明向除 k 以外的其他地类转化;x 是由若干驱动因子组成的向量;I 是决策树集的指示函数;$h_n(x)$ 是向量 x 第 n 个决策树的预测类型;M 为决策树的总数。

2.3 碳汇潜力计算

2.3.1 林地碳汇

林地碳汇的计算以林木总生物量为基础,使用 IPCC 生物量扩展因子法计算出生物量后乘以含碳率即可获得林地碳储量的变化值[28—29],公式为:

$$\Delta C_{林}=A_{林}\cdot V\cdot \overline{BEF}\cdot \overline{SVD}\cdot C_{林} \tag{5}$$

式中, $A_{林}$ 为造林面积(hm^2);V 为本区域林分蓄积量(m^3/hm^2);$\overline{BEF}$为平均木材密度(Mg/m^3);$\overline{SVD}$为平均生物量转换系数; $C_{林}$ 为林木含碳率。贵州省林业厅森林资源数据显示,2020 年该省每公顷蓄积量 V 为 56.39 m^3/hm^2,新一轮退耕工程选用的各类林木参数根据《中国初始国家信息通报》中的土地利用变化和林业温室气体清单及有关学者对云贵地区退耕造林工程各树种的研究[30—31]确定,见表 1。

表 1 贵州省退耕还林工程各树种木材密度、生物量转换系数和含碳率

Table 1 Wood density, biomass conversion coefficient and carbon content of different tree species under grain for green project in Guizhou Province

树种 Tree species	木材密度/(Mg/m^3) Wood density	生物量转换系数 Biomass conversion coefficient	含碳率 Carbon content
针叶树 Conifer	0.381	2.04	0.52
硬阔树 Hard broad leaf tree	0.578	2.11	0.50
软阔树 Soft broad leaf tree	0.443	2.35	0.49
阔叶混 Mixed broad leaf	0.482	1.95	0.50
平均值 Average	0.471	2.11	0.50

2.3.2 灌木碳汇

根据灌木林增加面积和平均生物量法计算其碳贮量变化[29],公式为:

$$\Delta C_{灌}=A_{灌}\cdot B\cdot C_{灌} \tag{6}$$

式中, $A_{灌}$ 为灌木增加面积(hm^2); B 为灌木林平均生物量(t/hm^2); $C_{灌}$ 为灌木含碳系数。参数 B 按照我国秦岭淮河以南的灌木单位面积平均生物量 19.67 t/hm^2进行计算[32],贵州省灌木含碳系数取值 0.5[29]。

2.3.3 草地碳汇

草地的碳汇效益估算基于退耕还草面积和草地单位面积的固碳量,公式为:

$$\Delta C_{草}=A_{草}\cdot \alpha \tag{7}$$

式中, $A_{草}$ 为草地面积(hm^2);α 为单位面积草地固碳量(t/hm^2)。IPCC 报告中每公顷天然草地每年固碳量约为 1.3 t[33],孙思思等[34]对云贵高原草地生态系统的研究显示,该地区草地每年 CO_2吸收率达 4.25 t/hm^2,本研究据此换算出 α 的取值为 1.16 t/hm^2。

3 结果与分析

3.1 退耕区域空间分布

根据前述条件,分别得到符合陡坡耕地、重要水源地 15—25°坡耕地、严重石漠化及严重污染耕地等需要退耕的区域,见图 3。

由图 3 可知,赤水河中下游的赤水市、习水县和仁怀县水源保护区内 15—25°坡耕地分布较为密集,作为

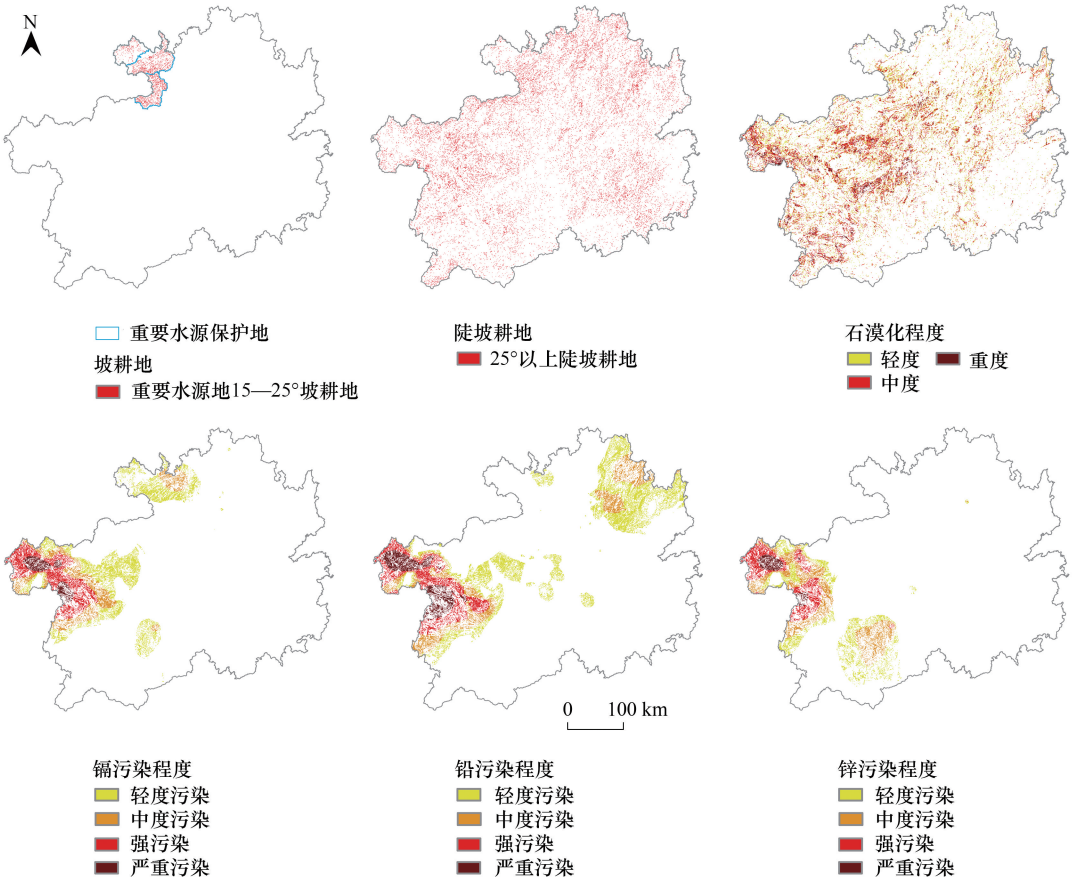

图 3　满足不同退耕条件的耕地空间分布

Fig.3　Spatial distribution of farmland satisfying different returning conditions

全国唯一没有平原的省份,贵州省 25°以上陡坡耕地分布较多且范围较大,基岩裸露率>70%的严重石漠化耕地主要分布在中西部的毕节、贵阳、六盘水、安顺和黔西南州等地。

对克里金插值后的重金属分布进行空间统计,结果显示,砷、铜和铬的地累积指数 I_{geo} 值均小于 3,未达到严重污染水平。铅污染情况最为严重,最高铅含量 1579.1 mg/kg,I_{geo} 最大值 4.9,在西部的毕节市和六盘水市出现了连片的高值区,严重铅污染耕地达 21.7 万 hm^2。镉含量最高值达 22.8 mg/kg,最大地累积指数为 4.5,严重污染区也位于毕节和六盘水市,面积为 9.3 万 hm^2。锌污染的空间分布与铅和镉污染区基本重叠,土壤最高锌含量 3662.9 mg/kg, I_{geo} 最大值为 4.6,需退耕的锌污染面积为 6.9 万 hm^2。

按照新的退耕工程要求,统计各地市州满足不同退耕条件的耕地面积及其占比,结果见表 2。

表 2 显示,贵州省需退耕地共 131.9 万 hm^2,其中 25°以上陡坡耕地、水源地 15—25°坡耕地、严重石漠化及严重污染耕地分别为 82.5 万 hm^2、7.9 万 hm^2、25.1 万 hm^2 和 22.2 万 hm^2,各占退耕总面积的 62.5%、5.9%、19.0%和 16.8%。六盘水市耕地 33.4 万 hm^2,但多项土壤重金属含量超标,待退耕地占耕地总面积 42.3%。毕节市共有耕地 121 万 hm^2,因石漠化程度较重,加之共有 13.9 万 hm^2 的耕地受到严重的重金属污染,超 30%的土地需要退耕。遵义市包含水源地保护区,辖区内 15°以上坡耕地的退耕任务较重。其余各市州由于陡坡耕地及石漠化耕地占比较多,也是退耕的重点区域。

3.2　林灌草生长适宜性

为进一步确定所退耕地的还林、还草或还灌适宜性,在提取出 2000—2020 年林、草和灌木扩张区域的基础上,采用随机森林分类算法对增长区和 9 类自然影响因子逐一进行分析,得到各因子的用地转换贡献度及

其排名(图 4),并生成林、草和灌木地的生长概率分布图(图 5),作为退耕后的地类转换基础。

表 2 贵州省各地区满足不同条件的退耕地面积及其占比

Table 2 The area and proportion of farmland satisfying different returning conditions in various regions of Guizhou Province

地区 Region	>25°陡坡耕地 Slope>25° farmland/hm²	水源地 15—25°耕地 15—25° slope farmland in water source/hm²	严重石漠化耕地 Rocky desertification farmland/hm²	严重污染耕地 Seriously polluted farmland/hm²	退耕地总面积 Returning farmland total area/hm²	退耕地占耕地面积比例 Proportion/%
安顺市	35425	0	29345	0	64024	20.55
毕节市	177053	0	79729	139167	368738	30.48
贵阳市	22458	0	24664	0	46699	13.71
六盘水市	58214	0	24782	82760	141198	42.31
黔东南州	118295	0	11532	0	129447	17.19
黔南州	64218	0	16296	0	80088	11.24
黔西南州	53751	0	30711	0	83334	23.52
铜仁市	103965	0	11537	0	115113	16.61
遵义市	191431	78813	22700	0	291051	23.63
总计 Total/hm²	824810	78813	251296	221927	1319692	

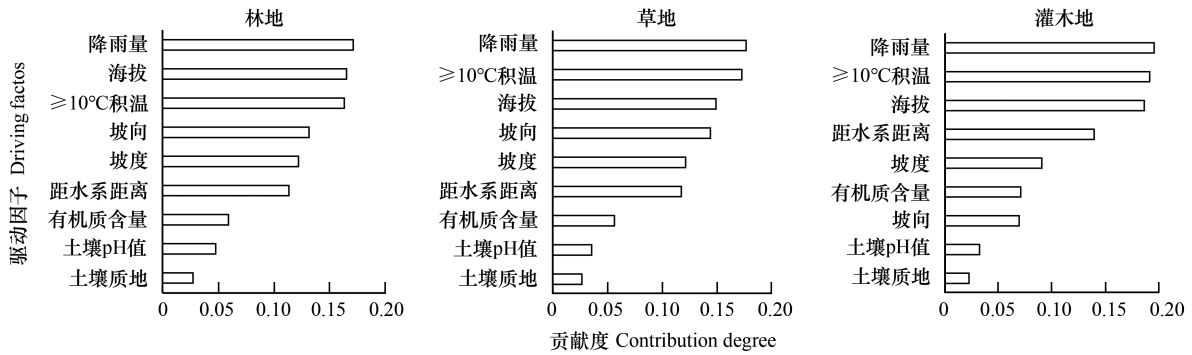

图 4 林地、草地、灌木地的转换影响因子及其贡献度排名

Fig.4 Influence factors and contribution ranking of forest, grassland and shrub conversion

对于林地,降雨量、海拔和≥10 ℃积温是主要的影响因子,且海拔和积温的贡献度均为 0.16,黔东的低海拔喀斯特丘陵地带及毕节市东部的微起伏山地,土质以壤土为主且有机质含量高,≥10 ℃的积温也适宜林地生长,应以还林为主。草地倾向于分布在高湿低温的环境中,水分和温度是影响其生长的决定性因素,贡献度均大于 0.17,黔西乌蒙山脉和黔北大娄山脉的高海拔山区不仅降水丰沛且积温值普遍较低,是适宜还草的主要区域。灌木具有耐寒、耐旱特性,适宜在凉爽干燥的环境生长,不少种类只在酸性土壤中存活,影响灌木扩张的主要因子是降雨、≥10 ℃积温和海拔,贡献度依次为 0.196、0.192 和 0.186。毕节市东南部、贵阳市西南部、安顺市西北部以及南盘江流域的兴义市、安龙县和册亨县,在还林还草条件不充分时,种植灌木是较适宜的选择。

3.3 退耕地的林灌草配置

将各像元林、草和灌木的生长概率使用条件函数进行比较,基于退耕地的立地适宜性,划分出宜林、宜灌和宜草地,见图 6。

该图层的空间统计结果显示,131.9 万 hm² 待退耕地中,宜林、宜灌和宜草地的面积分别为 63.5 万 hm²、29.7 万 hm² 和 38.7 万 hm²,分别占退耕地总面积的 48.1%、22.6% 和 29.3%,将其与现有土地利用类型进行空

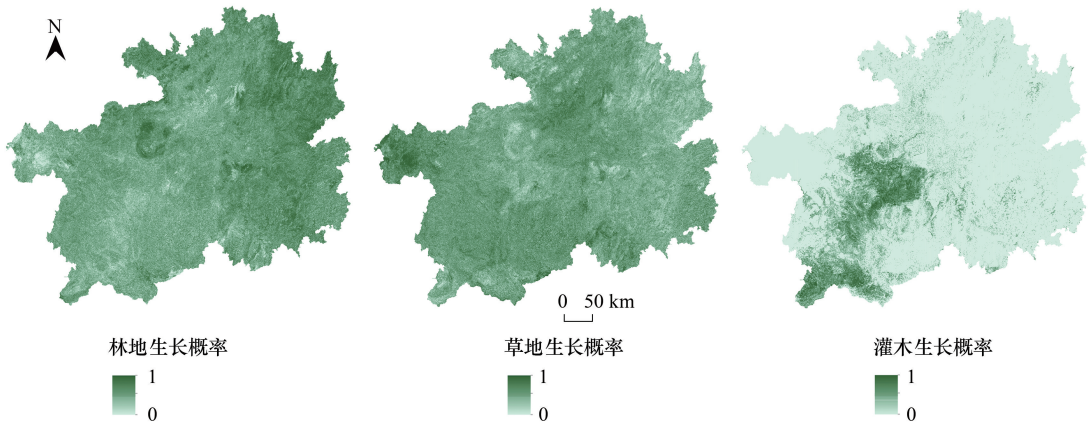

图 5　林地、草地、灌木生长概率

Fig.5　Growth probability of woodland, grassland and shrub

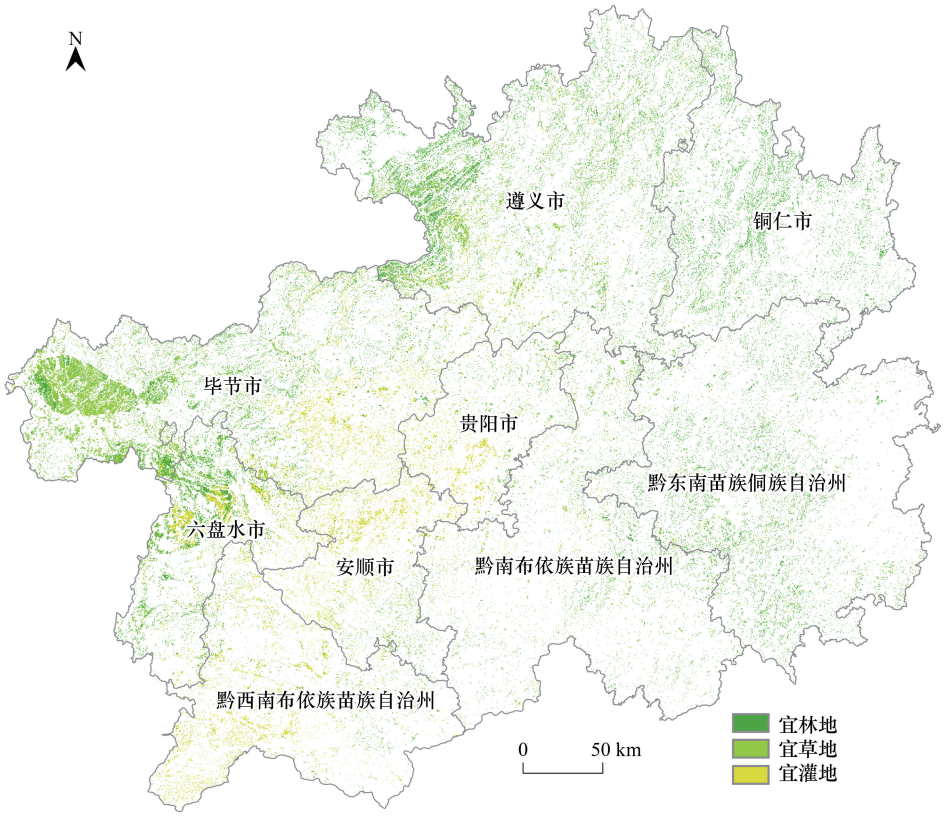

图 6　宜林、宜灌、宜草地的空间分布

Fig.6　Spatial distribution of land suitable for forest, shrub and grass

间叠加,得到贵州省 3 个时期的土地利用变化,见图 7。

由图 7 可知,退耕工程可有效改善贵州省的用地结构,计算出退耕后的植被覆盖率增量达 7.5%,毕节和六盘水市的退耕效益最显著,工程完成后两市的林草覆盖率分别由 2020 年的 52.1%和 63.3%提升至 65.8%和 77.5%。

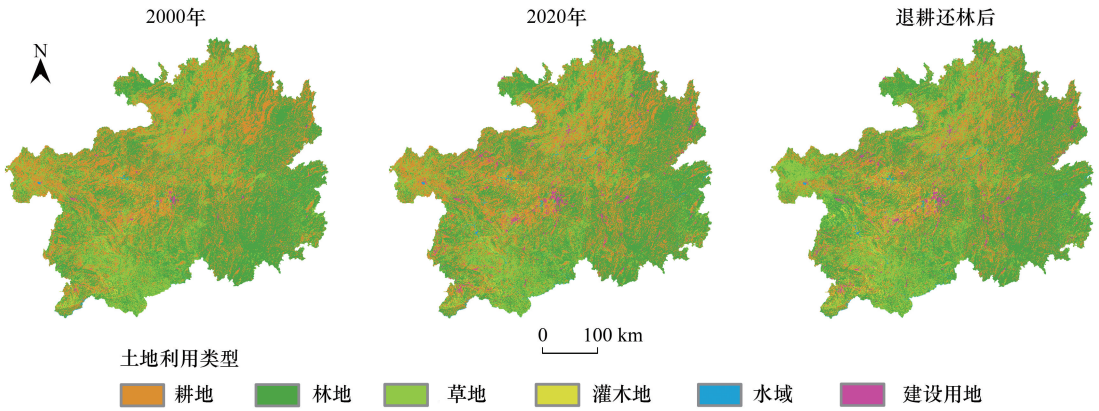

图 7 贵州省土地利用变化

Fig.7 Land use change in Guizhou Province

3.4 退耕工程的碳汇潜力评估

退耕工程既促进了生态的正向演变,也可增加区域的碳汇效益,基于前述的碳汇计算公式和各地类变化情况,计算贵州省各地市州所还林、灌、草的碳汇增益,见图 8。

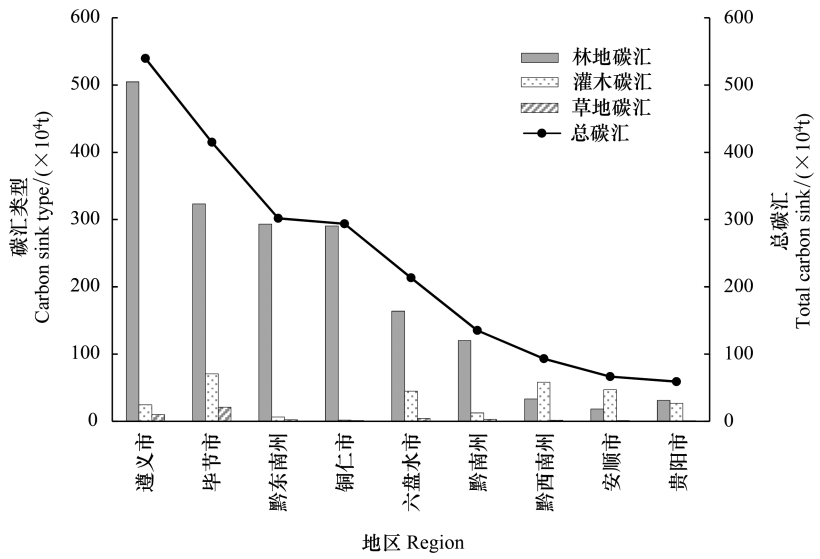

图 8 贵州省各地区退耕后的碳汇增量

Fig.8 Carbon sink increment in various regions of Guizhou Province

结果显示,实施退耕工程后贵州省的碳汇量可提升 2116.83 万 t。遵义市的碳汇增效最显著,工程结束后碳汇量可增加 539.55 万 t,毕节市、黔东南州和铜仁市的碳汇增量均超过 290 万 t。结合新一轮退耕工程向贫困地区倾斜的政策导向,将碳汇增长率相对较高的贫困地区作为退耕工程的优先区,可实现生态和社会效益的双重最大化。退耕面积最少的贵阳市(4.7 万 hm^2)的碳汇量也可增加 59.03 万 t,转换成 CO_2 当量后大约可吸收 216.44 万 t CO_2。

从碳汇类型来看,由于林地单位面积的固碳量最高且宜林地的面积也最大,因此,林地对碳汇潜力的提升贡献最大,累计增量可达 1779 万 t,占总碳汇潜力的 84.1%。退耕后的宜灌地面积最小(29.7 万 hm^2),然而灌木的固碳能力约为林地的 1/3 左右,故其碳汇潜力约占 13.8%,可增加 293 万 t 碳汇,毕节市、黔西南州和安顺市的灌木碳汇潜力最大。尽管退耕还草的面积达 38.7 万 hm^2,但草地的固碳率不及灌木地的 1/8,其碳汇潜

力仅占 2.1%,碳增量为 45 万 t,除毕节市和遵义市外,其余各市州的草地碳汇均低于 5 万 t。

4　讨论

4.1　待退耕地面积估算的影响因素

本研究依据现行政策法规,采用卫星影像数据识别出贵州省的重度石漠化面积 58.5 万 hm^2,与土地利用数据叠加后提取出严重石漠化耕地 25.1 万 hm^2,与其他学者的结果大致相等[35]。此外,本研究又提取出陡坡耕地、水源保护区内坡耕地和重金属污染耕地共 131.9 万 hm^2,可作为退耕工程未来空间布局及实施步骤的决策依据。由于新一轮退耕工程遵循“自上而下,上下结合” 的原则,即由农民自愿申报退耕任务,再由中央汇总核定后将任务下发到各省并划拨专项生态补偿资金,农户退耕的主观意愿[36]、资金补偿标准的差异以及时间的滞后性[37]都是影响退耕面积大小的可变因素,从而造成实际可退耕地与理论可退耕地面积的差异,进而影响碳汇潜力评估结果的准确性。

4.2　林灌草配置的科学性

基于土地利用变化的随机森林分类结果显示,降雨、海拔和积温是影响植被生长的 3 个首要因素,且草地倾向于生长在西部的高海拔低温高湿山区,这与聂祥琴等[38]使用线性回归分析得出的贵州省草地生长决定因素和空间分布趋势相契合。但本研究囿于数据获取的局限性,未能将地下水埋深等[39]其他影响植被生长的重要因子纳入分析。同时,本研究识别出需退耕的重金属污染区的适宜性是假定污染治理后自然条件下的林灌草适宜性,也会使退耕后林灌草的空间配置与现实情况不完全一致,从而使基于适宜性评价的碳汇潜力估算出现偏差。

4.3　碳汇估算的精度分析

姚平等[40]根据西南五省的适生树种建立了相应的生长曲线模型,认为贵州省的退耕工程林对森林碳汇功能的影响最显著。本研究对潜在碳汇量进行估算前,已根据贵州省的清查资料和相关文献对不同植被的碳汇因子进行了修正,修正后林地和草地的固碳率分别为 28.02 t/hm^2和 1.16 t/hm^2,与方精云等[41]得出的草地单位面积碳汇能力约为森林的 1/30 的结论一致,也可证明本研究结果的可信度。但本研究采用的生物量扩展因子法将转换因子作为常数,忽略了林木生长期、林分条件等微观条件的差异[42],同时退耕林的碳汇效益也受耕地石漠化和土壤重金属含量等理化性质的影响,通过监测退耕地植被碳储量的动态变化可修正并提升碳汇估算的精度。

5　结论

退耕还林还草不仅能有效改善土地利用方式,对增加区域碳汇也极具潜力,科学准确地识别退耕区域并估算其碳汇潜力是实现双碳目标的一项基础性工作。

贵州省现有满足退耕条件的耕地共 131.9 万 hm^2,其中 25°以上陡坡耕地占 62.5%,重要水源地 15—25°坡耕地占 5.9%,严重石漠化耕地占 19.0%,另有 7.1%耕地重金属镉严重污染,16.4%耕地重金属铅含量超标,5.2%耕地重金属锌污染严重,六盘水市和毕节市耕地条件最不理想。

降雨、海拔、积温是影响贵州省植被生长最主要的三个因素,各地市州累计可退耕还林 63.5 万 hm^2,退耕还灌 29.7 万 hm^2,退耕还草 38.7 万 hm^2,工程结束后贵州省的植被覆盖率将提升 7.6%。

退耕还林还草工程将使贵州省的碳汇增加 2117 万 t。林地是碳汇的主要贡献者,其碳吸收贮存量占比可达 84.1%,灌木和草地的碳汇效益虽然不显著,分别占总碳汇的 13.8%和 2.1%,但草地的其他生态服务价值相较其碳汇价值更高,在退耕地转换时应予以优先考虑。

参考文献(References):

[1] Mahmoud S H, Gan T Y. Impact of anthropogenic climate change and human activities on environment and ecosystem services in arid regions. Science of The Total Environment, 2018, 633:1329-1344.

[2] Gardner R. Trees as technology: planting shelterbelts on the Great Plains. History and Technology, 2009, 25(4): 325-341.
[3] Dzybov D S. Steppe field shelterbelts: A new factor in ecological stabilization and sustainable development of agrolandscapes. Russian Agricultural Sciences, 2007, 33(2): 133-135.
[4] 朱教君. 防护林学研究现状与展望. 植物生态学报, 2013, 37(9): 872-888.
[5] 国家林业和草原局.《中国退耕还林还草二十年》白皮书发布. [2020-06-30]. https://www.forestry.gov.cn/stzx/4/20220208/212603458957812.html.
[6] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
[7] 王红霞, 王雪松, 王兵, 李保玉, 牛香, 王晓燕, 师贺雄, 汪金松. 河北省退耕还林工程生态效益评估. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 68-75.
[8] 徐省超, 赵雪雁, 宋晓谕. 退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3893-3904.
[9] 鲁绍伟, 李少宁, 刘逸菲, 徐晓天, 赵娜. 北京市退耕还林生态效益评估. 生态学报, 2021, 41(15): 6170-6181.
[10] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 23-31.
[11] Peng J, Hu X X, Wang X Y, Meersmans J, Liu Y X, Qiu S J. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in Northwestern Yunnan, China. Ecosystem Services, 2019, 39: 100998.
[12] Lugo A E, Sanchez M J, Brown S. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. Plant and Soil, 1986, 96(2): 185-196.
[13] 刘苑秋, 王芳, 柯国庆, 王迎迎, 郭圣茂, 范承芳. 江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响. 应用生态学报, 2011, 22(4): 885-890.
[14] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键浠, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658.
[15] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
[16] 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.
[17] 陆文涛, 代超, 郭怀成. 基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟. 地理研究, 2015, 34(9): 1619-1629.
[18] 蒙吉军, 王雅, 江颂. 基于生态系统服务的黑河中游退耕还林生态补偿研究. 生态学报, 2019, 39(15): 5404-5413.
[19] 杨存建, 刘纪远, 张增祥, 党承林. 遥感和 GIS 支持下的云南省退耕还林还草决策分析. 地理学报, 2001, 56(2): 181-188.
[20] 伊木然江·阿卜来提, 张永福, 孜比布拉·司马义. 基于 GlobeLand 30 的哈密市 2000—2020 年土地利用格局变化研究. 水土保持通报, 2021, 41(1): 182-189, 196-196.
[21] Duan Q N, Lee J, Liu Y S, Chen H, Hu H Y. Distribution of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Samples in China: A Graphical Review. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 97(3): 303-309.
[22] 徐红枫, 王妍, 苏倩, 黎舟, 贾玉洁. 基于 Google Earth Engine 的云南省典型岩溶地区 30 年石漠化演变与驱动因子分析. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 94-101.
[23] 牛潜, 周旭, 张继, 杨江州, 黄雪勇. 喀斯特山地城市生态系统弹性变化分析——以贵阳市区为例. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 722-730.
[24] 王菲, 吴泉源, 吕建树, 董玉龙, 曹文涛, 康日斐, 曹见飞. 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估. 环境科学, 2016, 37(8): 3144-3150.
[25] 陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价. 环境科学, 2020, 41(6): 2822-2833.
[26] Nowrouzi M, Pourkhabbaz A. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran. Chemical Speciation & Bioavailability, 2014, 26(2): 99-105.
[27] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
[28] 李海奎, 赵鹏祥, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较. 林业科学, 2012, 48(5): 44-52.
[29] 李明军, 杜明凤, 喻理飞. 贵州省森林植被碳储量、碳密度及其分布. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 48-54, 64-64.
[30] 陈先刚,张一平,詹卉. 云南退耕还林工程林木生物质碳汇潜力. 林业科学, 2008, 44(5): 24-30.
[31] 蔡丽莎, 陈先刚, 郭颖, 殷瑶. 贵州省退耕还林工程碳汇潜力预测. 浙江林学院学报, 2009, 26(5): 722-728.
[32] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
[33] 王穗子, 刘帅, 樊江文, 张雅娴. 碳交易市场现状及草地碳汇潜力研究. 草业学报, 2018, 27(6): 177-187.
[34] 孙思思, 吴战平, 肖启涛, 于飞, 古书鸿, 方荻, 李浪, 赵兴炳. 云贵高原草地生态系统 CO_2 通量变化特征. 草业学报, 2020, 29(4): 184-191.
[35] 马云, 代稳, 唐彬. 贵州省石漠化现状及治理研究. 科技资讯, 2021, 19(7): 253-256.
[36] 张朝辉. 非农就业对农户退耕还林成果保持意愿的影响——基于 1132 个退耕农户的调查. 中国土地科学, 2020, 34(11): 67-75.
[37] 刘婷, 郑宇梅. 中国退耕还林生态补偿研究. 林业经济问题, 2020, 40(1): 21-28.
[38] 聂祥琴, 杨胜会, 杨琴, 张淑炜, 陈可可, 陈关飞, 程华, 赵学春, 董瑞, 李舟, 魏建洲, 金宝成. 基于地理信息系统的贵州省草地空间分布分析. 山地农业生物学报, 2021, 40(3): 29-35.
[39] 牛赟, 李秉新, 苗毓鑫, 王艺林, 边彪. 黑河中游盐碱地植物生长与水分变化关系分析. 生态环境学报, 2015, 24(12): 1969-1975.
[40] 姚平,陈先刚,周永锋,赵文军,陆梅,涂璟. 西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力. 生态学报, 2014, 34(11): 3025-3037.
[41] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
[42] 续珊珊. 森林碳储量估算方法综述. 林业调查规划, 2014, 39(6): 28-33.
[43] 李海萍, 杜佳琪, 唐浩竣. 基于随机森林的县域土壤有机碳密度及储量估算. 中国土壤与肥料, 2021, (3): 1-8.