自然资源学报, 2024, 39(3): 731-748
Journal of Natural Resources
http://www.jnr.ac.cn
DOI: 10.31497/zrzyxb.20240314

造林增汇是实现碳中和的成本有效途径吗？
——以西北地区为例

汪宗顺[1],张海鹏[2],岳 超[3],杨红强[4],张 寒[1]

（1. 西北农林科技大学经济管理学院,杨陵 712100;2. 中国社会科学院农村发展研究所,北京 100732;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所,杨陵 712100;4. 南京林业大学经济管理学院,南京 210037）

摘要：造林增汇是减缓气候变化的重要方式,但其碳中和效果背后的成本有效性不可忽视,这对西北干旱半干旱地区尤为重要。基于西北地区GIS平台数据,构建地理—经济—生态三维整合分析框架,采用环境因子叠加模型和土地利用动态优化模型,从自然可行性和经济可行性两个角度识别了西北地区边际可造林区域,采用Richards生长方程预测了造林碳汇潜力,以此为基础拟合了碳汇供给曲线,并对西北地区造林增汇的成本有效性进行了评价。结果表明:(1)西北地区满足自然和经济双重可行性的造林土地面积为102.71万hm^2,仅占自然可行造林土地面积的20.56%。其中以草地和未利用地为主,主要分布在青海和甘肃两省。(2)西北地区造林的碳汇潜力为9.37 Mt CO_2/年,到2060年能够为该地区碳中和目标提供约9.70%~15.06%的贡献,不可忽视。(3)西北地区造林增汇的平均成本为948.81元/t CO_2,相比于能源碳减排路径,整体上不具有成本有效性。且在迫切应对气候变化情景下,西北地区造林增汇的成本有效性更弱。据此,提出强化造林增汇对碳中和贡献的政策建议。

关键词：碳中和;生态系统服务价值;碳汇供给曲线;碳汇成本;西北地区

气候变化是人类社会可持续发展面临的严峻而紧迫的挑战之一，中国积极参与减缓全球变暖行动并提出碳达峰、碳中和目标。实现“双碳”目标需要统筹减排和增汇两个关键方面。森林作为重要的增汇路径，被多次纳入《联合国气候变化框架公约》缔约方会议谈判[1]。2015年达成的《巴黎协定》允许各缔约国以国家自主贡献（Nationally Determined Contributions，NDC）的方式参与2020年后全球应对气候变化行动，包括中国在内的超过半数的缔约国将造林和再造林作为实现NDC的重要手段[2]。作为增汇潜力最大的“基于自然的气候解决方案”，造林不仅有助于为工业减排赢得关键时间窗口，而且与工业部门的技术碳减排相比更具有成本有效性，因而成为应对气候变化的重要选项[3,4]。

中国是人工造林规模最大的国家，但不同省份造林固碳的成本收益存在较大差异[5]。这意味着对造林增汇的成本有效性进行评价时，需要关注区域异质性问题，其中西北地区尤其值得关注。从空间布局来看，西北地区属干旱半干旱气候，生态环境本底差、敏感性高且承载力低，生态脆弱区分布广、自我修复能力弱，水、土两大资源配置严重失调，是国家生态安全的关键节点与重要屏障[6]。为解决西北地区生态脆弱问题，国家实施

收稿日期：2023-07-24；**修订日期：**2023-10-29
基金项目：中组部“万人计划”青年拔尖人才支持项目（F1010221001）
作者简介：汪宗顺（1995- ），男，河南信阳人，博士研究生，研究方向为气候变化与林业碳中和。
E-mail: wzs126@nwafu.edu.cn
通讯作者：张寒（1985- ），男，江苏徐州人，博士，教授，博士生导师，研究方向为林业经济与政策。
E-mail: hanzhang@nwafu.edu.cn

了退耕还林、“三北”防护林等重大生态修复工程，显著地提升了该区域的森林覆盖率[7]，既改善了其脆弱的生态环境，又有助于提升其生态系统碳汇能力[8]。然而需要指出的是，造林需要大量的人力和资金等经济要素的投入[5]，且与东部水热条件较好的地区相比，在西北地区造林还面临着更加不利的生态环境条件。因此，由造林产生的生态环境机会成本不容忽视，这反映出在西北干旱半干旱地区造林增汇是否具有成本有效性仍有待深入研究。基于此，本文回答以下三个问题：一是西北地区满足自然可行性和经济可行性的造林土地面积与空间分布如何？二是西北地区造林增汇的潜力及其对碳中和的贡献有多大？三是从经济和生态环境双重机会成本视角来看，造林增汇是成本有效的气候变化减缓手段吗？围绕上述科学问题，本文对西北地区可造林区域进行识别，进而对西北地区造林的碳汇潜力进行预测，在此基础上评价西北地区造林增汇的成本有效性，以期科学认知造林增汇的碳中和贡献，为碳中和的实现路径选择提供决策参考。

1 文献综述

核算造林碳汇成本的前提是识别可造林区域，已有研究主要有两种途径。一是基于自然可行性视角，根据土地的生态本底条件或土地利用规划进行获取。例如徐进勇[9]基于2020年的两种土地利用/土地覆盖（Land Use/Land Cover，LUC）数据，结合地形、气候、交通、林线以及生态地理分区等因素，以草地和坡度大于25°的耕地为潜在造林的土地来源，采用Liebig“最小因子定律”估算了中国潜在造林地的面积和质量等级。许恩银等[10]基于全国第八次森林资源清查数据，结合《全国森林经营规划（2016—2050年）》中2050年全国森林覆盖率稳定在26%的目标，推算出2030年中国乔木林新造林面积为1839万hm^2，并将新造林面积按照各林分原面积占全国的比例分配至各区域。二是基于经济可行性视角，考虑土地利用转变的机会成本和收益，以土地收益最大化为目标构建土地利用决策模型并进行求解。例如van Kooten[11]将木材和碳汇的复合收益作为造林收益，将农业生产收益作为机会成本，构建土地利用动态优化模型进行求解，得到土地最大预期收益下的造林面积占自然可行造林面积的比例为50%。

核算造林增汇的潜力是评估其成本有效性的关键，已有研究通常基于识别出的可造林土地结果，构建出林龄与蓄积量或生物量关系的林木生长方程，再通过林龄的变化从而预测造林的碳汇潜力[12]。从测算结果上看，有的学者关注了全球层面的造林碳汇潜力，例如Doelman等[13]发现到2050年，全球通过造林实现减缓气候变化的潜力为15亿t CO_2/年。但更多学者从国家层面开展研究，例如Niu等[14]测算发现美国中西部地区边际农地造林的平均碳汇潜力为0.80亿t CO_2/年，能够抵消该地区当前化石燃料燃烧排放量的6%~8%。部分学者则关注了中国造林碳汇的潜力。例如Cai等[15]利用FCS模型预测得到在2015—2060年间中国造林的碳汇潜力是1.04亿t CO_2/年。而徐晋涛等[16]根据《全国森林经营规划（2016—2050年）》的森林覆盖率增长情况，测算发现到2060年中国造林增汇的潜力为8.14亿t CO_2/年。综上所述，已有研究从多方面对造林碳汇潜力进行了十分丰富的探讨，但因研究对象和测算方法等的选择不同，导致造林碳汇潜力的预测结果存在差异。

基于上述核算思路，国内外学者对造林碳汇的成本有效性进行了广泛检验。国外较早地开展了相关研究，主要成果集中在两个方面。从造林碳汇成本的测算方法来看，已

有文献提出了部门优化法[17]、计量经济方法[18]和“自下而上”法[19]三种方法。以上方法各有特点，但“自下而上”法由于操作简便、易于从经济学视角进行解释等优点，在研究中被广泛应用。“自下而上”法需要核算造林成本，其测算方法主要有三种视角：第一种视角是仅考虑了造林的直接成本，例如van Kooten等[20]在比较加拿大农地造林增汇和减少车辆排放的成本收益的研究中，将种植等造林直接成本作为造林成本，而没有考虑土地的使用成本。第二种视角是考虑了土地转变的经济机会成本。例如Nijnik等[21]和Regan等[19]在研究农地造林的碳汇成本时，分别将土地的市场租赁价格和农地净收益作为土地的机会成本纳入碳汇成本核算模型。第三种视角是考虑了土地转变的非经济机会成本。例如Yang等[22]将土地提供的水净化和气候调节等生态系统服务功能的价值作为土地的机会成本，检验了美国田纳西河谷综合修复项目的成本收益状况。从造林碳汇成本的测算结果来看，学者们最早关注了全球层面[23,24]的测算，但对美国[18]和加拿大[25]等发达国家的研究最为丰富。例如Obembe等[26]研究发现美国东南部的造林碳汇成本为35.98美元/t C。Hope等[27]以加拿大安大略省的造林碳汇为研究对象，得到其碳汇成本不超过30美元/t C。可以发现，两国之间的造林碳汇成本差距不大。而近年来，随着发展中国家对缓解气候变化的贡献提升，关注该区域造林碳汇成本的研究逐渐增多。例如Adetoye等[28]和Aggarwa[29]的研究显示，非洲和印度的造林碳汇成本分别为7.02~17.25美元/t C和17.42美元/t C。比较而言，发展中国家进行造林增汇比美国等发达国家更具有成本优势。

中国是造林大国，其造林增汇的成本有效性也得到了学者们的广泛关注。一方面，一些学者从全国层面核算了造林碳汇成本，例如Xu[30]基于统计数据核算得到中国大规模荒山荒地造林的碳汇成本为1~7美元/t C。而许骞骞等[31]采用Meta分析的方法对已有文献进行梳理，发现中国造林碳汇的平均成本为783.2元/t C。仲伟周等[32]则研究发现西南和华东地区的碳汇成本分别最低和最高。另一方面，不少学者从省域等区域层面开展研究，尤其集中于东南沿海地区。例如黄宰胜等[33]发现浙江省碳汇造林项目的碳汇成本为79.49元/t C。薛蓓蓓等[34]则发现福建省的碳汇成本区间为62.04~69.97元/t C。但周伟等[35]发现广东省的造林碳汇成本高达391.38元/t C。综上所述，由于不同省份间树种、水热条件和研究周期等因素的差异，得到各区域间的碳汇成本差异比较明显，且不同的研究方法和数据来源也导致了结果上的差异。

以上成果为本文的开展提供了有益的借鉴，但仍存在以下不足：首先，已有研究在识别可造林区域时，要么基于自然可行的视角，根据土地的生态本底条件或土地利用规划进行获取，忽略了土地利用的成本与收益对造林决策的影响；要么基于经济可行的视角，将土地机会成本和收益纳入土地利用最优决策模型，但对区域空间、地理和气候信息关注不足。因此，有必要将二者结合起来，讨论自然和经济双重可行视角下的造林面积。其次，已有研究在进行土地机会成本的测算时，通常只考虑经济机会成本，而未将土地利用变化导致的生态环境损失纳入核算体系，导致成本有效性估算可能存在偏误。最后，已有研究多关注水热条件较好、森林资源丰富地区的碳汇造林，对生态环境脆弱地区的关注不足，导致该区域造林增汇的可行性尚不明晰。以上三点不足为本文提供了创新空间。本文的边际贡献在于：一是聚焦中国西北地区，将地理学、经济学和生态学研究方法进行融合，构建地理—经济—生态三维整合分析框架。二是基于环境因子叠加模型和土地利用动态优化模型，从自然可行性与经济可行性双重视角出发对西北地区造

林区域进行识别。三是将经济机会成本与生态环境机会成本纳入成本有效性评价体系，从社会计划者视角对造林增汇的成本有效性进行全面评估。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究框架

为了分析西北地区造林增汇的成本有效性，本文构建基于地理学、经济学和生态学的三维整合分析框架，具体思路如下。首先，从地理学视角出发，基于西北地区不同土地利用类型的分布，依据坡度、海拔、降水量、气温和土壤类型等环境因子的限制，借助地理信息系统的方法构建环境因子叠加模型，从地理空间上识别出西北地区满足自然可行性的造林面积，称为可造林面积。其次，从经济学的视角出发，构建土地利用动态优化模型，将经济机会成本和生态环境机会成本纳入决策模型，求解西北地区满足自然和经济双重可行性的造林面积，称为宜造林面积。最后，从生态学视角出发，借助Richards生长方程，对地上、地下和土壤等碳库进行核算，预测造林产生的碳汇潜力，并以此拟合西北地区造林碳汇供给曲线，对造林增汇的成本有效性进行评价。

2.2 模型构建

2.2.1 环境因子叠加模型

为了识别出西北地区可造林区域的分布，构建可造林潜力综合评估体系（表1），借助ArcGIS软件，采用环境因子叠加模型进行测算。具体而言，参考Zhang等[40]的研究结果，选择对土地利用类型、土壤类型、干燥度、海拔和坡度等5个环境因子进行重分类，将满足表1评估结果的栅格赋值为1，否则赋值为0。再利用栅格计算器对重分类后的各项结果进行图层叠加，在地理空间上识别出同时满足上述5个因子评估结果的区域，据此计算西北地区可造林面积。

表1 西北地区可造林潜力综合评估体系

Table 1 Evaluation system for afforestation potential in Northwest China

因子名称	评估结果	参考来源
土地利用类型	灌木丛、疏林地、其他林地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、坡耕地（>25°）	张丹妮等[36]
土壤类型	淋溶土、半淋溶土、钙层土、干旱土、初育土、水成土、半水成土、人为土	Fan等[37]
干燥度	de Martonne干燥指数大于30	孟猛等[38]
海拔	低于区域内最高的太白山林线3400 m	孙然好等[39]
坡度	坡度小于40°	张丹妮等[36]

注：盐碱土、高山土和西北岩壳的土壤热量不足，故排除；灌木林、疏林地和其他林地的林木多属于低质林，仍有改造空间；基于对基本草原的保护和不破坏畜牧业发展的基本原则，将高覆盖度草地排除；依据《中华人民共和国森林法实施条例》的相关规定，排除25°以下的坡耕地；基于《中华人民共和国湿地保护法》中对湿地的保护要求，将沼泽地和滩涂排除。

2.2.2 土地利用动态优化模型

造林活动伴随着土地利用类型的转移，使得土地出现竞争性利用，由此产生机会成本。对任意一块土地，只有当其被用于造林的收益大于土地利用转变所损失的机会成本时，造林活动才满足经济可行性。因此，满足自然可行性的造林区域不一定满足经济可

行性。土地利用类型转变不仅使得原有土地利用类型产生的经济收益丧失，还可能导致生态环境收益也一并损失，这点对西北地区相对脆弱的生态系统而言尤为重要。因此，在核算西北地区土地利用类型转变的机会成本时，需要将损失的经济和生态环境收益同时考虑在内。为此，采用生态系统服务价值（Ecosystem Service Value，ESV）衡量某一土地利用类型产生的经济与生态环境收益总和。*ESV*包括了供给服务价值、调节服务价值、支持服务价值和文化服务价值四大类共11小类，涵盖了造林产生的经济效益、生态效益和社会效益。由此，当采用*ESV*衡量造林的机会成本时，既包括了经济收益机会成本，也包括了生态环境收益机会成本。参考已有研究[11]，假设存在一个社会计划者，以最大化土地资源未来净收益的贴现值W（单位）为目标，模型设定如下：

$$\max_{A(t)} W = \max \int_0^{\infty} \left[\int_0^{A(t)} B'(s)\mathrm{d}s + \int_0^{A_0 - A(t)} C'(z)\mathrm{d}z - \tau(R)R(t) \right] \times \mathrm{e}^{-rt}\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：西北地区土地产生的净收益等于土地的*ESV*与造林成本之差，由三部分组成，第一部分为$\int_0^{A(t)} B'(s)\mathrm{d}s$，表示未转换用途的土地提供的*ESV*（万元）；第二部分为$\int_0^{A_0 - A(t)} C'(z)\mathrm{d}z$，表示造林产生的净*ESV*（万元）；第三部分为$\tau(R)R(t)$，表示造林的直接成本（万元）；$A_0$是西北地区可造林面积（万$\mathrm{hm}^2$）；$A(t)$是任意时刻未转换用途的土地总面积（万$\mathrm{hm}^2$），为模型（1）中的可调变量；$B'(s)$表示未转换用途的土地提供的边际*ESV*（元/$\mathrm{hm}^2$）；$C'(z)$表示造林产生的边际*ESV*（元/$\mathrm{hm}^2$）。在进行造林决策时，假设边际价值最低的土地最先被进行造林，这是因为边际价值最低意味着损失的边际机会成本最小。$\tau(R)$表示边际造林直接成本函数，且在给定时期进行更大规模造林时，边际造林直接成本会上升；$R(t)$为第t年的造林面积（万hm^2）；r是金融贴现率（%），参考已有研究[41]的设定，此处取5%。

在造林的过程中，假设减少的可造林土地全部用于造林，则t年减少的可造林土地面积等于进行造林的面积，因此，上述模型的动态约束条件为：

$$\overset{g}{A}(t) = -R(t) \tag{2}$$

式中：g表示求导。为求解上述土地利用动态优化模型，构建现值汉密尔顿函数，得到未转换用途的土地面积A^*的稳态方程如下①：

$$\frac{C'(A_0 - A^*)}{r} - \tau(0) = \frac{B'(A^*)}{r} \tag{3}$$

式（3）表示在稳态条件下，可造林土地被用于造林或是保持原有土地利用类型所产生的边际*ESV*相同。式（3）构造显示，求解稳态A^*的关键在于确定$\tau(0)$的值以及$B'(A)$和$C'(z)$的函数形式。其中，$\tau(0)$是造林规模为0时的边际造林直接成本（元/hm^2），由造林的初始投入数据计算得到，具体取值见下文。参考van Kooten等[11]的研究，假设函数$B'(A)$和$C'(z)$的形式为：

$$B'(A) = \alpha_0 + \alpha_1 A + \alpha_2 A^2 + \alpha_3 A^3 \tag{4}$$

$$C'(z) = \beta_0 + \beta_1 z + \beta_2 z^2 + \beta_3 z^3 \tag{5}$$

式中：α_0~α_3分别表示　；β_0~β_3分别表示　；z表示.....。

① 限于篇幅，求解过程省略，备索。

2.2.3 *ESV*估算

采用价值当量换算法，计算西北五省（区）各种土地利用类型的单位面积*ESV*。首先借鉴耿甜伟等[42]的做法，用各省（区）粮食单产与同时期全国粮食单产的比值作为修正系数对谢高地等[43]的研究成果进行修正，得到2020年西北各省（区）的1个标准当量因子的*ESV*。然后，确定西北地区各土地利用类型的供给服务、调节服务、支持服务和文化服务的价值当量因子表②。最后计算西北五省（区）不同土地利用类型的单位面积的*ESV*，计算公式如下：

$$ESV_{ij} = SV_i \sum_{n=1}^{11} F_{jn}, i = 1, 2, \cdots, 5; j = 1, 2, \cdots, 10; n = 1, 2, \cdots, 11 \tag{6}$$

式中：ESV_{ij}是省（区）i内第j类土地利用类型的单位面积*ESV* [元/(hm²·a)]；SV_i表示省（区）i的1个标准当量因子的*ESV* [元/(hm²·a)]；F_{jn}表示第j类土地利用类型的第n项生态系统服务的当量因子。

2.2.4 碳核算模型

森林碳库主要由林木生物量碳和土壤有机碳两部分组成，由于枯枝落叶层的碳储量占比很小，在核算时忽略不计。假设以阔叶混交类树种进行造林，且研究期间不存在采伐和大规模的林木死亡，并设定模拟期为40年，以对标2060年碳中和目标的实现。参考付晓等[44]的研究，采用蓄积量法进行碳汇量的核算，模型设定如下：

$$Q^{total} = 44/12 \times \theta \times S \times \left(Q^{biom} + Q^{soil}\right) \tag{7}$$

$$Q^{biom} = \delta \times B_{EF} \times \left(1 + R_{SR}\right) \times \int_0^{T_g} v(t) \mathrm{e}^{-r_c t} \mathrm{d}t \tag{8}$$

$$Q^{soil} = \sum_{i=1}^{5} \left(\int_{\Delta t_i} \omega_i \mathrm{e}^{-r_c t} \mathrm{d}t \right) \tag{9}$$

式中：Q^{total}为西北地区T年内造林增汇总量（Mt）；Q^{biom}和Q^{soil}分别表示单位面积林木生物和土壤各自的CO_2吸收量（t）；S是西北地区宜造林面积（百万hm²）；参数θ是西北地区人工林造林保存率（%），取77%[45]；B_{EF}是蓄积与生物量的转换因子系数（t/m³）；R_{SR}是地下与地上生物量比值；δ是生物量的平均含碳系数。参考张煜星等[46]的研究，取B_{EF}=0.799，R_{SR}=0.302，δ=0.500。r_c是碳实物贴现率（%），用于反映政府应对气候变化的紧迫性，对碳实物进行贴现的逻辑在于，当气候变化是一个迫切需要解决的问题时，当前增汇将比未来增汇更重要，即碳汇被赋予了时间价值[47]。当应对气候变化比较紧迫时，借鉴已有研究[11]，取碳实物贴现率等于金融贴现率5%；当应对气候变化不急迫时，r_c=0。ω_i是造林后第i个时间段Δt_i内的土壤固碳变化率 [t/(hm²·a)]，具体取值参考曹先磊[48]的研究；$v(t)$表示林木生长的单位公顷蓄积量（m³/hm²），采用Richards生长方程描述其与林龄t之间的关系，具体形式参考付晓等[44]的研究，设定如下：

$$v(t) = 120.323\left(1 - \mathrm{e}^{-0.040t}\right)^{1.947} \tag{10}$$

2.3 数据来源

研究区域为中国西北地区，包括新疆、宁夏、青海、甘肃和陕西五省（区）。土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn./），选择最新的2020年数据；温度和降水数据源自国家青藏高原科学数据中心（http://data.tpdc.ac.

② 限于篇幅，*ESV*修正系数、1个标准当量的*ESV*和价值当量因子表省略，备索。

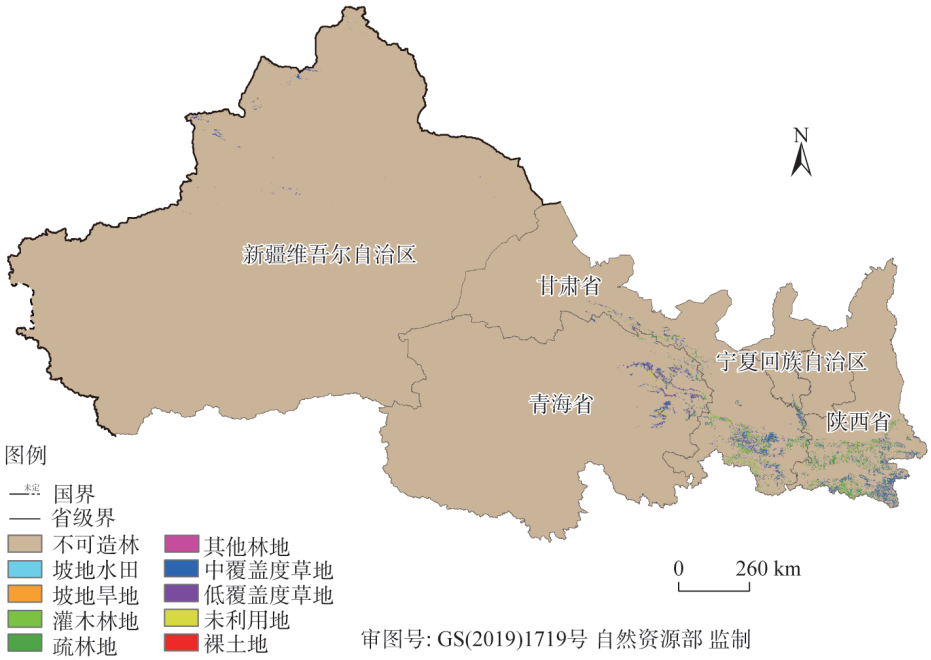
cn）提供的1990—2020年1 km中国逐月降水量和逐月平均气温数据集[49]；海拔和坡度数据源自ALOS DSM V3.2数据集（https://developers.google.cn/earth-engine/datasets）；土壤类型数据从世界土壤数据库下载（http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soildatabase/）；粮食产量和播种面积数据均源自《中国统计年鉴2021》，数据年份为2020年；各类化石燃料的火电消费量、发电量和折煤系数源自《2021中国能源统计年鉴》，碳排放系数取自IPCC指南；火电的电价数据源自国家电网（http://www.sgcc.com.cn），光伏发电和陆上风电的价格取自国家发展改革委员会出台的《关于调整光伏发电陆上风电标杆上网电价的通知》（发改价格〔2016〕2729号）中的上网电价。使用的土地利用类型、气象、地理空间和土壤类型等栅格数据的空间分辨率均为1 km，空间坐标系统为WGS_1984_UTM_zone_43 N。

3　结果分析

3.1　西北地区可造林面积

从空间上看，西北地区可造林面积主要分布在该区域东南和西北（图1）。这种空间分布格局与区域内的自然条件基本吻合，东部主要受到干燥度的限制，中部受到海拔和土壤类型的限制，西部主要受到气温、降水量、海拔、土壤类型以及土地利用类型的多重限制。

从数量上看，西北地区可造林面积共499.58万hm^2（表2）。各省（区）之间存在明显差异，陕西省和甘肃省的可造林面积之和占比超过3/4，可造林的主要土地利用类型是



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改。

图1　西北地区可造林面积的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of the afforestation area in Northwest China

表2 西北地区可造林面积

Table 2 The afforestation area in Northwest China (万 hm^2)

面积	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆	总计
裸土地	0.04	0.44	0.18	0	0	0.66
未利用地	0.03	0.25	9.80	0	0.02	10.10
坡地水田	0.01	0	0	0	0	0.01
坡地旱地	0.13	0.52	0	0	0	0.65
低覆盖度草地	3.92	10.12	29.07	0.19	2.35	45.65
中覆盖度草地	89.77	75.94	39.70	1.01	9.59	216.01
其他林地	0.65	1.02	0	0	0	1.67
疏林地	65.91	19.49	4.20	1.51	2.00	93.11
灌木林地	49.14	68.37	13.41	0.63	0.17	131.72
总计	209.60	176.15	96.36	3.34	14.13	499.58

中覆盖度草地。宁夏的可造林面积最少，仅3.34万 hm^2。青海省的可造林区域主要集中在祁连山山脚下，共约为96万 hm^2，主要类型是中覆盖度草地，占青海省可造林面积的比例约为41.20%。新疆的可造林地主要受到干燥度的限制，可造林面积仅14.13万 hm^2，其中中覆盖度草地的面积占比最高，约为67.87%。从土地利用类型来看，西北地区可造林土地以中覆盖度草地、灌木林地和疏林地为主，三者面积占可造林总面积的88.24%。其中可造林的中覆盖度草地面积最大，合计216.01万 hm^2，占比约为43.24%。西北地区存在10.10万 hm^2 适宜造林的未利用地（沙地、戈壁和盐碱地），约97%分布在青海省，有待充分利用。

3.2 西北地区宜造林面积

表3显示，单位面积 *ESV* 最高的土地利用类型是阔叶林地，单位面积 *ESV* 最低的是裸土地，按照边际价值最低的土地被优先造林的假设，裸土地是造林的优先选项。

通过表2和表3中的数据对函数 $B'(A)$ 和 $C'(z)$ 进行拟合，得到式（4）和式（5）中

表3 西北五省（区）土地利用类型的边际 *ESV*

Table 3 Annual *ESV* of land use types in the five provincial-level regions in Northwest China [元/(hm^2· a)]

土地利用类型	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆
裸土地	504.77	541.47	440.11	665.70	843.66
未利用地	2776.26	2978.09	2420.60	3661.33	4640.12
坡地水田	9817.85	10531.62	8560.12	12947.79	16409.15
坡地旱地	10120.72	10856.50	8824.18	13347.21	16915.35
低覆盖度草地	12796.02	13726.30	11156.76	16875.40	21386.74
中覆盖度草地	28847.82	30349.10	25152.22	38044.54	48215.07
其他林地	29226.41	31351.20	25482.30	38543.82	48847.81
疏林地	33920.80	36386.88	29575.31	44734.79	56693.84
灌木林地	38413.29	41205.98	33492.28	50659.49	64202.39
阔叶林地	57922.80	62133.85	50502.48	76388.65	96809.79

各参数的估计值，其中α_0=55203，α_1=−268.01，α_2=1.12，α_3=−0.0016，函数的拟合优度为0.96；β_0=83519，β_1=−808.19，β_2=2.92，β_3=−0.0034，函数的拟合优度为0.94。较高的拟合优度说明对函数$B'(A)$和$C'(z)$的拟合效果较好。表4报告了西北地区造林的直接成本，第一年包括整地和种植等投入，为造林初始成本，即造林面积为0时的成本，由此可得$\tau(0)=42265$。在造林后三年存在补植和抚育成本，而且研究期内每年都有管护成本发生，表4中其他年份的数据用于下文的造林碳汇成本的计算。

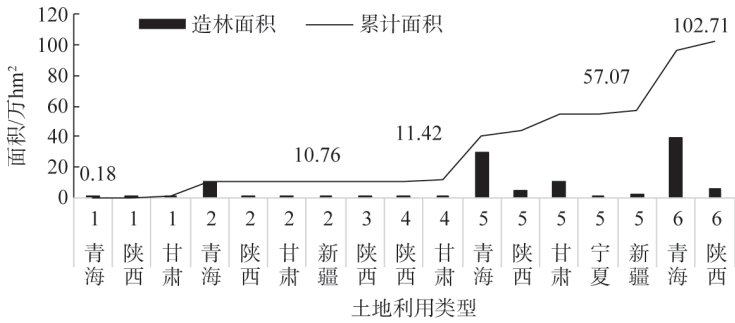
表4　西北地区造林直接成本

Table 4　Direct cost of afforestation in Northwest China　　(元/hm²)

第一年	第二年	第三年	第四年	每年
整地、种植、灌溉和施肥等	补植和抚育	补植和抚育	抚育	管护成本
42265	1326	1326	750	181

注：数据来源于曹先磊[48]、Cao等[50]；参考已有研究[51]的做法，假设造林后每年发生的管护成本为定值。

将上述参数代入式（3），求解得到西北地区宜造林面积共计102.71万hm²，占西北地区可造林面积的20.56%（图2）。可见，当考虑土地利用变化产生的机会成本后，西北地区宜造林面积远小于可造林面积，后者中有约79.44%的土地不具备造林的经济可行性。从土地利用类型上看，西北地区宜造林面积中，未利用土地10.48万hm²，坡耕地0.94万hm²，低覆盖度草地45.65万hm²，中覆盖度草地45.64万hm²。其中，低覆盖度和中覆盖度草地面积之和占宜造林面积的比例高达88.88%，是西北地区造林的主要土地利用类型。从区域上看，西北地区宜造林面积中，青海省的占比最高，为76.67%。甘肃省的宜造林面积占比次高，为11.03%，陕西省的宜造林面积占比约为9.80%，新疆和宁夏两区的宜造林面积之和占比仅约2.50%。研究结果会受到多种因素的影响，因此有必要进行相关的敏感性分析。一方面，不同土地利用类型的造林直接成本存在异质性，但受限于数据，本文未能充分考虑其差异性。因此，将西北地区造林直接成本的最低和最高数值分别代入土地利用动态优化模型，求解得到西北地区宜造林面积占可造林面积的比例分别为21.02%和19.63%。该结果与基准结果相比，分别变动+0.46%和−0.93%。因此，本文认为由忽略造林成本在土地类型上的异质性而导致的误差很小，也反映出本结果的



注：横坐标上的编号1代表裸土地，2代表未利用地，3代表坡地水田，4代表坡地旱地，5代表低覆盖度草地，6代表中覆盖度草地。

图2　西北地区宜造林面积

Fig. 2　The desirable afforestation area in Northwest China

稳健性。另一方面，将金融贴现率从基准值5%分别向下和向上变动2个单位，得到西北地区宜造林面积占比分别为20.75%和20.19%。这也反映出宜造林面积对贴现率敏感程度较低，其数量结果具有较强的稳健性。

3.3 成本有效性分析

3.3.1 造林碳汇潜力测算

图3报告了西北地区造林碳汇潜力的测算结果，其中图3a和图3b分别对应碳实物贴现率为0（气候变化被认为不紧迫）和5%（气候变化被认为较紧迫）的情形。图3a显示，西北地区造林的固碳速率为9.37 Mt CO_2/年，到2060年将累计增汇374.88 Mt CO_2。其中土壤有机碳占比70.35%，是造林增汇的主要来源，地上和地下生物碳占比分别为22.77%和6.88%。基于以上数据，对西北地区造林增汇的碳中和贡献进行评价。于贵瑞等[52]发现，如果2060年要实现碳中和，全国生态系统固碳速率应达到20亿~25亿t CO_2/年。以蓄积量占比将全国生态系统固碳速率目标分配至西北地区，得到西北地区的生态系统固碳速率目标为62.20~96.60 Mt CO_2/年。因此，西北地区造林活动对该区域碳中和目标实现的贡献率为9.70%~15.06%。

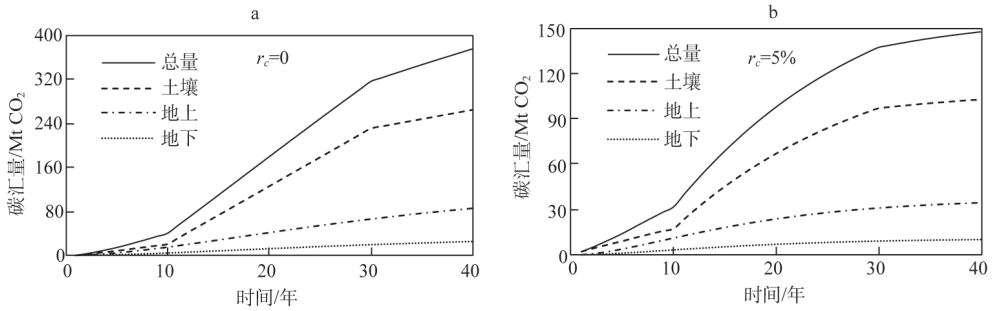


图3 西北地区造林碳汇潜力

Fig. 3 Carbon sequestration potential of afforestation in Northwest China

图3b显示，在5%碳贴现率情景下，西北地区造林平均每年吸收二氧化碳3.69 Mt，到2060年累计吸收二氧化碳147.60 Mt，较0贴现率的累计吸收量下降60.63%。在此情境下，西北地区造林活动对该区域碳中和目标实现的贡献率为3.82%~5.93%，较0贴现率时的贡献率下降约60.62%。可见，当应对气候变化被认为较紧迫时，西北地区造林增汇的碳中和效应并不乐观，其碳中和效应对碳实物贴现率反应较为敏感。

3.3.2 碳汇供给曲线拟合

碳汇供给曲线描述了边际碳汇成本与碳汇供给量之间的关系，即给定某一碳汇价格，有多少碳汇量能够被市场供给。对造林活动而言，边际价值最低的土地被优先造林，如图2所示。因此，伴随造林面积的扩大，边际造林成本逐步提高，由此构造出造林面积和边际造林成本之间的关系，如图4a所示。给定任意一造林面积，借助式（7）可以测算出该造林面积所能吸收的CO_2量，由此可以将图4a的横轴转变为碳汇供给量，纵轴转变为边际碳汇成本，进而构造出边际碳汇成本与碳汇供给量的关系，即碳汇供给曲线，如图4b所示。

整体来看，西北地区碳汇供给曲线呈现阶梯式跳跃特征，这是受到不同土地利用类型转变的影响。从数值看，在0碳贴现率情景下，西北地区碳汇供给的边际成本为

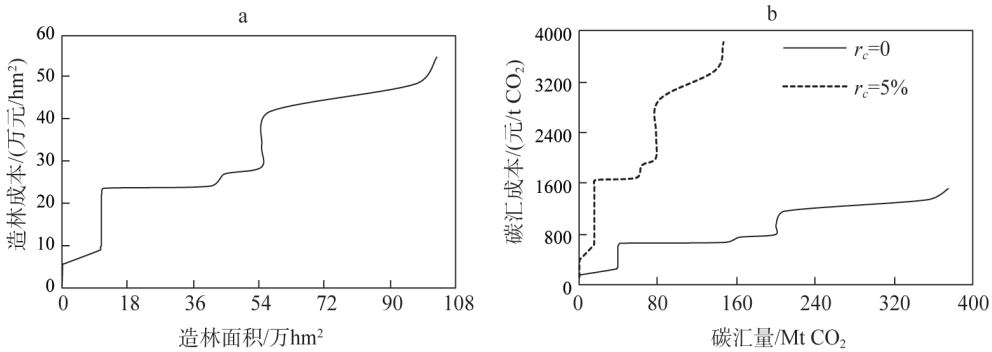


图4　西北地区造林碳汇供给曲线

Fig. 4　Supply curve of carbon sequestration through afforestation in Northwest China

153.72~1499.67元/t CO_2，且基本位于600~1500元/t CO_2的变化范围内。在5%的碳贴现率情景下，碳汇供给的边际成本区间上涨为390.43~3808.93元/t CO_2，且主要位于1600~3800元/t CO_2的变化范围内。

碳交易市场是实现碳中和目标的重要工具，2021年全国碳市场在发电行业率先启动线上交易，其交易产品则是发电企业持有的碳配额。《碳排放权交易管理办法（试行）》第二十九条规定，重点排放单位每年可以使用国家核证自愿减排量（Chinese Certified Emission Reduction，CCER）抵销碳排放配额的清缴，而林业碳汇交易是CCER的重要组成部分，未来有机会在全国碳交易市场中有所作为。但可以发现，在当前全国50元/t左右的二氧化碳交易价格下，西北地区能够由市场提供的造林碳汇量基本为0。因此，西北地区造林碳汇难以由市场进行供给，需要加强政府对碳汇造林项目的财政投入。

3.3.3 成本有效性测算与比较

电力行业是中国重要的减排主体，且西北地区以化石能源、光伏和风力资源发电为主。基于此，本文分别以通过减少火力发电实现碳减排和增加光伏发电、风力发电实现碳减排作为比较对象，结合碳汇供给曲线，进一步分析西北地区造林增汇的成本有效性。本文认为当碳汇供给成本低于二氧化碳减排成本时，造林增汇被认为是具有成本有效性的，即相比于碳减排路径，造林增汇是成本更低的减缓气候变化的手段。

根据相关数据计算西北地区三种减排路径的二氧化碳减排成本（表5）。当通过减少火力发电实现碳减排时，首先采用火电的各类燃料消费量、折煤系数和碳排放系数计算火电的总碳排放量；然后通过火电的总碳排放量和总发电量计算其碳排放强度为0.84 t CO_2/(MW·h)；最后根据碳排放强度和发电成本，计算得到西北地区减少使用煤等化石燃料进行发电的碳减排成本为708.43元/t CO_2。其中火电发电成本的计算借鉴Liu等[53]的研究，选择以减少发电导致的经济损失即电价作为发电成本。而当通过采用可再生能源替代化石能源进行发电实现碳减排时，每增加1 MW·h的发电量，就相当于避免了使用化石能源发1 MW·h的电，从而减少了0.84 t CO_2的排放。结合西北地区光伏发电和陆上风电的发电成本，计算得到西北地区使用光伏发电和风电替代火电的减排成本分别为795.32元/t CO_2和588.78元/t CO_2。可以发现，相比之下，西北地区通过风电实现碳减排最便宜，通过光伏发电实现减排最昂贵，而通过减少火电实现碳减排介于两者之间。

表5 西北地区的二氧化碳减排成本

Table 5 Cost of CO_2 reduction in Northwest China

发电类型	减排						增汇
	化石能源发电				可再生能源发电		造林
燃料类型	原煤	柴油	燃料油	天然气	太阳能	陆上风	
燃料消费量	33137.58	1.37	0.12	8.83			
折煤系数	0.71	1.46	1.43	1.33			
碳排放系数/(t CO_2/t)	2.77	2.17	2.27	1.64			
碳排放量/10^4 t CO_2	65605.78	4.38	0.39	193.04			
火电总排放量/10^4 t CO_2	65803.54						
火电总发电量/10^8 KW・h	7811.22						
碳排放强度/[t CO_2/(MW・h)]	0.84						
发电成本/[元/(MW・h)]	596.80				670.00	496.00	
平均成本/(元/t CO_2)	708.43				795.32	588.78	948.81

注：原煤、柴油、燃料油消费量的单位是10^4 t，天然气消费量的单位是10^8 m^3；碳排放量=能源消费量×折煤系数×碳排放系数。

从平均成本视角看，根据图4b的碳汇供给曲线可以计算出西北地区碳汇供给的平均成本为948.81元/t CO_2，高于通过减少火电实现碳减排的成本和通过增加光伏发电以及风电实现碳减排的成本。因此，相比于通过减少使用化石能源和增加使用可再生能源的碳减排路径，西北地区造林增汇整体上并不具有成本优势。但需要说明的是，该结果并非否定造林增汇的作用。原因在于，从边际成本视角看，西北地区碳汇供给的边际成本为153.72~1499.67元/t CO_2，而通过图4可以得到碳汇供给成本在153.72~708.45元/t CO_2区间范围对应的宜造林面积约为40.49万hm^2，造林碳汇潜力为147.79 Mt CO_2，占宜造林面积和碳汇总潜力的39.42%。说明相比于化石能源减排，仍有39.42%的造林碳汇潜力是具有成本有效性的。从区域分布上看，这些面积主要分布在青海省的低覆盖度草地、陕西省和甘肃省的坡耕地以及全部的未利用土地，这些地区应优先选择造林的方式实现碳中和。上述发现与“当前阶段森林碳汇的成本优势十分有限，应主要依靠产业减排”[54]的观点类似，也与“根据有效性原则制定区域低碳政策”[32]的含义相同。相较于光伏发电和风电实现碳减排，西北地区造林增汇在整体上也不具有成本有效性。在5%的碳贴现率情景下，碳汇供给的平均成本上升为2567.27元/t CO_2。相较于0碳贴现率，此情景下西北地区造林增汇的成本有效性更弱。

最后，为便于比较，将上述碳汇成本的核算结果换算为“美元/t CO_2”，结果如表6所示。从国际比较看，西北地区碳汇平均成本为137.52美元/t CO_2，低于欧洲的碳汇成本158.18~185.45美元/t CO_2，但高于美国和加拿大等大多数国家，也高于全球平均碳汇成本。从国内比较看，西北地区的碳汇平均成本不仅高于全国平均水平，而且高于浙江等碳汇成本较高的省份。产生上述差异的主要原因有两点：一是受水热条件限制，西北地区林木生长速率较低导致其碳汇能力较弱；二是测算造林成本时，将生态系统服务价值作为土地利用类型转变的机会成本，在数值上高于已有研究中常采用的经济机会成本。

表6　本文测算结果与已有研究的对比

Table 6　Comparison of the carbon sequestration cost of this research with the others

作者	区域	年份	林分	碳汇成本	成本类型
Nordhaus[23]	全球	1991	NA	11.45~31.09	AC
Grafton等[24]	全球	2021	NA	0.03~51.27	AC
Benítez等[55]	拉丁美洲	2006	NA	0~139.91	AC
van Kooten等[56]	欧洲	2007	NA	158.18~185.45	AC
Adetoye等[28]	非洲	2018	NA	1.91~4.71	MC
Griscom等[57]	热带地区	2020	NA	0~100.00	AC
Alig等[58]	美国	1997	NA	5.73~38.45	AC
Stavins[18]	美国	1999	松树	0~37.09	MC
Kovacs等[17]	美国阿肯色州	2021	松树	3.55~9.84	AC
Obembe等[26]	美国东南部	2022	NA	9.81	MC
van Kooten等[25]	加拿大西部	2000	杂交杨树	0~15.76	AC
Hope等[27]	加拿大安大略省	2021	红松	0~30.00	AC
Nijnik等[21]	英国	2013	云杉	6.56~32.27	AC
Regan等[19]	澳大利亚	2020	桉树	37.91~42.00	AC
Brancalion等[59]	巴西	2021	NA	18.00	AC
Aggarwa[29]	印度	2022	NA	4.75	AC
Xu[30]	中国	1995	NA	0.27~1.91	MC
仲伟周等[32]	中国	2012	NA	49.81	AC
Ge等[5]	中国	2023	NA	23.56	AC
黄宰胜等[33]	浙江省	2016	湿地松	3.31~101.61	AC
薛蓓蓓等[34]	福建省	2022	杉木	2.45~2.77	AC
周伟等[35]	广东省	2019	阔叶混交林	16.18	AC
Liu等[53]	台湾省	2022	NA	5.26~9.83	AC
本文	西北地区	—	阔叶混交林	22.28~217.36	MC
				137.52	AC

注：林分一列中的“NA”表示研究中并未指出具体的林分类型；不同货币单位均按照研究对应时间的汇率兑换为美元，碳汇成本的单位为美元/t CO_2；成本类型中AC表示平均成本，MC表示边际成本。

4　结论与建议

造林是增汇潜力最大的“基于自然的气候解决方案”，成为应对气候变化的重要选项。本文以中国西北地区为例，构建了地理—经济—生态三维整合分析框架，基于环境因子叠加模型和土地利用动态优化模型，从自然可行性和经济可行性两个角度识别了西北地区的可造林区域；基于Richards林木生长方程，预测了西北地区造林碳汇的潜力，以此为基础拟合了碳汇供给曲线，并对成本有效性进行了评价。研究结果显示：

（1）西北地区满足自然可行性的造林面积有499.58万hm^2，但其中仅有102.71万hm^2满足自然和经济双重可行性，后者占比约为20.56%。其中草地是主要的宜造林土地利用类型，占比约为88.88%，未利用地面积的占比约为10.48%。青海省的宜造林面积占比最高，为76.67%；甘肃省的宜造林面积次高，占比为11.03%。

（2）西北地区造林增汇的潜力为9.37 Mt CO_2/年，到2060年西北地区造林将增汇

374.88 Mt CO_2，能够为西北地区的碳中和目标提供约9.70%~15.06%的贡献。在碳实物贴现率为5%的情景下，到2060年西北地区造林将增汇147.60 Mt CO_2，对该区域碳中和目标实现的贡献率为3.82%~5.93%，较0碳贴现率时的增汇量和贡献率分别下降60.63%和60.62%。

（3）西北地区造林碳汇供给的边际成本区间为153.72~1499.67元/t CO_2，平均成本为948.81元/t CO_2。而该地区通过减少使用化石能源的碳减排成本为708.43元/t CO_2，因此，相比于化石能源减排路径，西北地区造林增汇整体上并不具有成本有效性。具体而言，与减少使用化石能源相比，成本有效的宜造林面积仅40.49万hm^2，如果按照成本有效性开展造林增汇，西北地区将有超过一半的碳汇潜能无法发挥。且当碳实物贴现率为5%时，碳汇供给的边际成本区间上涨为390.43~3808.93元/t CO_2，造林增汇的成本有效性将会变得更弱。

根据以上结论得到以下政策建议：

（1）西北地区造林增汇应精准扩库增容，做到自然可行与经济可行相统一。一方面，对于造林增绿的区域选择，应结合生态本底进行综合规划，充分考虑水热条件的客观约束。另一方面，造林活动既要满足自然可行性，又要实现经济可行性，从社会计划者的角度进行决策，应以追求土地长期综合净收益最大化为目标，尤其要统筹考虑土地利用变化引致的经济与生态环境双重损益，而非追求森林覆盖率等单一指标或短期收益最大化。

（2）西北地区应充分重视造林增汇的贡献，同时应多管齐下实现碳中和。一方面，应充分认识到造林增汇的重要性，继续结合国家生态保护修复重大工程，充分发挥造林增汇的作用。另一方面，不宜过分夸大造林增汇的贡献，应通过加强森林集约经营和增强零碳能源使用等多种方式实现碳中和。

（3）建议重视CCER项目，完善西北地区碳市场交易机制，并提升碳交易价格，为碳汇造林项目提供更强的市场动力。同时，应重视应对气候变化的紧迫性及碳移除的时间价值对碳汇成本有效性的影响，将其纳入决策变量，尽可能地消除各减排主体延迟气候行动的动机。

参考文献(References):

[1] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(7): 1419-1426. [PIAO S L, YUE C, DING J Z, et al. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the 'carbon neutrality' strategy. Science China Earth Sciences, 2022, 52(7): 1419-1426.]

[2] 郑芊卉, 周春国, 韦海航, 等. 各国应对气候变化自主贡献目标及林业对策. 世界林业研究, 2019, 32(2): 1-6. [ZHENG Q H, ZHOU C G, WEI H H, et al. National determined contribution in response to climate change and its forestry countermeasures. World Forestry Research, 2019, 32(2): 1-6.]

[3] GRISCOM B W, ADAMS J, ELLIS P W, et al. Natural climate solutions. PNAS, 2017, 114(44): 11645-11650.

[4] RICHARDS K R, STOKES C. A review of forest carbon sequestration cost studies: A dozen years of research. Climatic Change, 2004, 63(1-2): 1-48.

[5] GE J, ZHANG Z, LIN B. Towards carbon neutrality: How much do forest carbon sinks cost in China?. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106949, Doi: 10.1016/j.eiar.2022.106949.

[6] 冯起, 白光祖, 李宗省, 等. 加快构建西北地区生态保护新格局. 中国科学院院刊, 2022, 37(10): 1457-1470. [FENG Q, BAI G Z, LI Z X, et al. Accelerate construction of new pattern of ecological protection in Northwest China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(10): 1457-1470.]

[7] 李晓英, 禹熙, 王方, 等. 西北干旱荒漠地区退耕还林还草工程综合效益评价. 水土保持研究, 2023, 30(1): 216-223, 232. [LI X Y, YU X, WANG F, et al. Comprehensive benefit evaluation on the project of converting farmland to forestland and grassland in arid desert area of Northwest China. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 216-223, 232.]

[8] CHEN X, YU L, DU Z R, et al. Distribution of ecological restoration projects associated with land use and land cover change in China and their ecological impacts. Science of the Total Environment, 2022, 825: 153938, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153938.

[9] 徐进勇. 中国潜在造林地及其气候生产潜力空间分布估算. 地理学报, 2023, 78(3): 677-693. [XU J Y. Estimation of the spatial distribution of potential forestation land and its climatic potential productivity in China. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(3): 677-693.]

[10] 许恩银, 王维枫, 聂影, 等. 中国林业碳贡献区域分布及潜力预测. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 36-45. [XU E Y, WANG W F, NIE Y, et al. Regional distribution and potential forecast of China's forestry carbon contributions. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(5): 36-45.]

[11] VAN KOOTEN G C. Economic dynamics of tree planting for carbon uptake on marginal agricultural lands. Canadian Journal of Agricultural Economics, 2000, 48(1): 51-65.

[12] XU H, YUE C, ZHANG Y, et al. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China. PNAS, 2023, 120(41): e2304988120, Doi: 10.1073/pnas.2304988120.

[13] DOELMAN J C, STEHFEST E, VAN VUUREN D P, et al. Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and trade-offs. Global Change Biology, 2020, 26(3): 1576-1591.

[14] NIU X Z, DUIKER S W. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern US. Forest Ecology and Management, 2006, 223(1-3): 415-427.

[15] CAI W X, HE N P, LI M X, et al. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: Spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. Science Bulletin, 2022, 67(8): 836-843.

[16] 徐晋涛, 易媛媛. “双碳”目标与基于自然的解决方案: 森林碳汇的潜力和政策需求. 农业经济问题, 2022, (9): 11-23. [XU J T, YI Y Y. Nature-based solutions in meeting China's dual-carbon goal: The potential of forest and policy needs. Issues in Agricultural Economy, 2022, (9): 11-23.]

[17] KOVACS K F, HAIGHT R G, MOORE K, et al. Afforestation for carbon sequestration in the Lower Mississippi River Basin of Arkansas, USA: Does modeling of land use at fine spatial resolution reveal lower carbon cost?. Forest Policy and Economics, 2021, 130: 102526, Doi: 10.1016/j.forpol.2021.102526.

[18] STAVINS R N. The costs of carbon sequestration: A revealed-preference approach. American Economic Review, 1999, 89(4): 994-1009.

[19] REGAN C M, CONNOR J D, SUMMERS D M, et al. The influence of crediting and permanence periods on Australian forest-based carbon offset supply. Land Use Policy, 2020, 97: 104800, Doi: .....

[20] VAN KOOTEN G C, ARTHUR L M, WILSON W R. Potential to sequester carbon in Canadian forests: Some economic considerations. Canadian Public Policy, 1992, 18(2): 127-138.

[21] NIJNIK M, PAJOT G, MOFFAT A J, et al. An economic analysis of the establishment of forest plantations in the United Kingdom to mitigate climatic change. Forest Policy and Economics, 2013, 26: 34-42.

[22] YANG L, ZHAO Y Q. ESV measurement-the opportunity cost of land development. In: 2019 International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2019, 136: 02001.

[23] NORDHAUS W D. The cost of slowing climate change: A survey. The Energy Journal, 1991, 12(1): 37-65.

[24] GRAFTON R Q, CHU H L, NELSON H, et al. A Global Analysis of the Cost-efficiency of Forest Carbon Sequestration. Paris: OECD Publishing, 2021: 14-15.

[25] VAN KOOTEN G C, STENNES B, KRCMAR-NOZIC E, et al. Economics of afforestation for carbon sequestration in Western Canada. The Forestry Chronicle, 2000, 76(1): 165-172.

[26] OBEMBE O S, HENDRICKS N P. Marginal cost of carbon sequestration through forest afforestation of agricultural land in the Southeastern United States. Agricultural Economics, 2022, 53(s1): 59-73.

[27] HOPE E S, FILEWOD B, MCKENNEY D W, et al. A financial analysis of four carbon offset accounting protocols for a representative afforestation project (Southern Ontario, Canada). Canadian Journal of Forest Research, 2021, 51(7): 1015-1028.

[28] ADETOYE A M, OKOJIE L O, AKERELE D. Forest carbon sequestration supply function for African countries: An econometric modelling approach. Forest Policy and Economics, 2018, 90: 59-66.

[29] AGGARWAL A. 'Carbon' in forest carbon projects: Evidence from India. Climate and Development, 2022, 14(7): 625-634.

[30] XU D Y. The potential for reducing atmospheric carbon by large-scale afforestation in China and related cost/benefit analysis. Biomass and Bioenergy, 1995, 8(5): 337-344.

[31] 许骞骞, 曹先磊, 孙婷, 等. 中国森林碳汇潜力与增汇成本评估: 基于Meta分析方法. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3217-3233. [XU Q Q, CAO X L, SUN T, et al. Assessment of forest carbon sequestration potential and the cost of increasing carbon sequestration in China: Based on meta-analysis method. Journal of Natural Resources, 2022, 37(12): 3217-3233.]

[32] 仲伟周, 邢治斌. 中国各省造林再造林工程的固碳成本收益分析. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(9): 33-41. [ZHONG W Z, XING Z B. Analysis on cost and benefit of carbon sequestration in each province of China: Based on afforestation and reforestation project. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(9): 33-41.]

[33] 黄宰胜, 陈钦. 基于造林成本法的林业碳汇成本收益影响因素分析. 资源科学, 2016, 38(3): 485-492. [HUANG Z S, CHEN Q. Influencing factors analysis of forestry carbon sequestration cost-benefit based on afforestation cost methods. Resources Science, 2016, 38(3): 485-492.]

[34] 薛蓓蓓, 田国双. 不同碳补贴机制下杉木人工林最优轮伐期和碳汇成本分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2022, 46(2): 27-34. [XUE B B, TIAN G S. An analysis of optimal rotation periods and carbon sequestration cost of Chinese fir plantations under different carbon payment mechanisms. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2022, 46(2): 27-34.]

[35] 周伟, 高岚, 郑彬. 两种不同类型人工林固碳的成本效益分析. 林业经济, 2019, 41(3): 93-97, 118. [ZHOU W, GAO L, ZHENG B. Cost-benefit analysis on carbon sequestration in two different types of plantation. Forestry Economics, 2019, 41(3): 93-97, 118.]

[36] 张丹妮, 陈西雅, 臧传富. 三北防护林体系建设工程区宜林潜力. 林业科学, 2021, 57(5): 184-194. [ZHANG D N, CHEN X Y, ZANG C F. Potential for afforestation in the Three-North Region where implements shelter-belt forest program. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(5): 184-194.]

[37] FAN M M, LAL R, ZHANG H, et al. Variability and determinants of soil organic matter under different land uses and soil types in Eastern China. Soil and Tillage Research, 2020, 198: 104544, Doi: 10.1016/j.still.2019.104544.

[38] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861. [MENG M, NI J, ZHANG Z G. Aridity index and its applications in geo-ecological study. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28 (6): 853-861.]

[39] 孙然好, 张百平. 地形和气候对中国山地森林带界线的影响. 地理科学, 2013, 33(2): 167-173. [SUN R H, ZHANG B P. Effect of regional topographic and climatic factors on limits of altitudinal forest belts. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(2): 167-173.]

[40] ZHANG D N, ZUO X X, ZANG C F. Assessment of future potential carbon sequestration and water consumption in the construction area of the Three-North Shelterbelt Programme in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 303: 108377, Doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108377.

[41] 祁慧博, 杜萌萌, 龙飞, 等. 不同生态调控情景下人工林可持续经营收益研究. 生态学报, 2023, 43(9): 3607-3624. [QI H B, DU M M, LONG F, et al. Research on sustainable management benefits of plantation under different ecological regulation scenarios. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3607-3624.]

[42] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1714-1727. [GENG T W, CHEN H, ZHANG H, et al. Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi province based on GWR. Journal of Natural Resources, 2020, 35(7): 1714-1727.]

[43] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]

[44] 付晓, 张煜星, 王雪军. 2060年前我国森林生物量碳库及碳汇潜力预测. 林业科学, 2022, 58(2): 32-41. [FU X, ZHANG Y X, WANG X J. Prediction of forest biomass carbon pool and carbon sink potential in China before 2060. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(2): 32-41.]

[45] 马振华, 李才文. 西北干旱地区人工造林保存和成林状况影响因素分析. 林业资源管理, 2019, (4): 18-23. [MA Z H, LI C W. An analysis on factors affecting the preservation and establishment of plantation in arid areas of Northwest China. Forest Resources Management, 2019, (4): 18-23.]

[46] 张煜星, 王雪军, 蒲莹, 等. 1949—2018年中国森林资源碳储量变化研究. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1-14. [ZHANG Y X, WANG X J, PU Y, et al. Changes in forest resource carbon storage in China between 1949 and 2018. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 1-14.]

[47] VAN KOOTEN G C, WITHEY P, JOHNSTON C M T. Climate urgency and the timing of carbon fluxes. Biomass and Bioenergy, 2021, 151: 106162, Doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106162.

[48] 曹先磊. 碳交易视角下人工造林固碳效应价值评价研究. 北京: 北京林业大学, 2018. [CAO X L. Study on the effects of artificial afforestation and its value evaluation under the carbon trading perspective: A case study in Diebu county. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.]

[49] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. Earth System Science Data, 2019, 11: 1931-1946.

[50] CAO S X, XIA C Q, XIAN J L, et al. Payoff of the grain for green policy. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(6): 1180-1188.

[51] 余智涵, 宁卓, 杨红强. 随机价格下杉木人工林的碳汇收益及最优轮伐期确定. 自然资源学报, 2022, 37(3): 753-768. [YU Z H, NING Z, YANG H Q. Carbon sequestration benefit and optimal rotation period determination of Cunninghamia lanceolata plantation under stochastic price. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 753-768.]

[52] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434. [YU G R, HAO T X, ZHU J X. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 423-434.]

[53] LIU W Y, CHIANG Y H, LIN C C. Adopting renewable energies to meet the carbon reduction target: Is forest carbon sequestration cheaper?. Energy, 2022, 246: 123328, Doi: 10.1016/j.energy.2022.123328.

[54] 张祥华, 秦会艳, 黄颖利, 等. 碳中和目标下中国森林固碳量跨期分配及成本. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2413-2421. [ZHANG X H, QIN H Y, HUANG Y L, et al. Intertemporal allocation and cost of forest carbon sequestration in China under the carbon neutrality target. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2413-2421.]

[55] BENITEZ P C, OBERSTEINER M. Site identification for carbon sequestration in Latin America: A grid-based economic approach. Forest Policy and Economics, 2006, 8(6): 636-651.

[56] VAN KOOTEN G C, SOHNGEN B. Economics of forest ecosystem carbon sinks: A review. International Review of Environmental and Resource Economics, 2007, 1(3): 237-269.

[57] GRISCOM B W, BUSCH J, COOK-PATTON S C, et al. National mitigation potential from natural climate solutions in the tropics. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2020, 375(1794): 20190126, Doi: 10.1098/rstb.2019.0126.

[58] ALIG R, ADAMS D, MCCARL B, et al. Assessing effects of mitigation strategies for global climate change with an intertemporal model of the US forest and agriculture sectors. Environmental and Resource Economics, 1997, 9(3): 259-274.

[59] BRANCALION P H S, GUILLEMOT J, CESAR R G, et al. The cost of restoring carbon stocks in Brazil's Atlantic Forest. Land Degradation & Development, 2021, 32(2): 830-841.

Is afforestation for carbon sinks a cost-effective way to achieve carbon neutrality?

Take Northwest China as an example

WANG Zong-shun[1], ZHANG Hai-peng[2], YUE Chao[3], YANG Hong-qiang[4], ZHANG Han[1]

(1. School of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Rural Development Institute, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

4. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Afforestation is an important way to mitigate climate change, but its cost effectiveness cannot be ignored, which is especially important for the arid and semi-arid regions in Northwest China. To evaluate the cost effectiveness of afforestation for carbon sink in Northwest China, this paper constructed a three-dimensional integrated geography-economy-ecology analysis framework. The marginal afforestation areas in Northwest China was identified based on the superposition model of environmental factors and the dynamic optimization model of land use. The carbon sink potential by afforestation was predicted using the Richards growth equation, based on which the carbon sink supply curve was fitted. The cost effectiveness of afforestation for carbon sink in Northwest China was also analyzed. The results showed that: (1) The afforestation area that satisfies both natural and economic feasibility is 1027100 hm^2 in Northwest China, accounting for about 20.56% of natural afforestation. Among them, grassland and unused land were dominant, and suitable afforestation areas were mainly distributed in Qinghai and Gansu provinces. (2) The carbon sink potential of afforestation in Northwest China is 9.37 million tons CO_2 per year, and by 2060, afforestation will contribute approximately 9.70%-15.06% to the carbon neutrality target of this region, which cannot be ignored. (3) The average cost of afforestation for carbon sink in Northwest China was 948.81 yuan/t CO_2, which was not cost-effective overall compared with the carbon emission reduction cost of thermal power. And in scenarios where climate change needs to be addressed urgently, the afforestation for carbon sinks in Northwest China will become even less cost effective. Accordingly, policy recommendations were proposed to improve the contribution of afforestation for achieving carbon neutrality.

Keywords: carbon neutrality; ecosystem service value; carbon sink supply curve; carbon sink cost; Northwest China