

DOI: 10.20103/j.stxb.202405201156

汪宗顺, 岳超, 杨红强, 李强, 张寒. 基于水资源成本约束视角的中国造林增汇研究. 生态学报, 2025, 45(8): 3659-3671.

Wang Z S, Yue C, Yang H Q, Li Q, Zhang H. How can China's forestation carbon sequestration efforts be tailored to local water resources: analysis from the perspective of water resource cost constraints. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3659-3671.

基于水资源成本约束视角的中国造林增汇研究

汪宗顺¹, 岳超², 杨红强³, 李强⁴, 张寒^{1,*}

¹ 西北农林科技大学经济管理学院, 杨陵 712100

² 中国科学院水土保持研究所, 杨陵 712100

³ 南京林业大学经济管理学院, 南京 210037

⁴ 西北农林科技大学林学院, 杨陵 712100

摘要: 造林增汇对中国实现碳中和目标具有重要作用, 目前中国已经将扩大森林面积确定为实现碳中和目标的重要策略之一。但已有研究多从自然条件出发识别可造林区域, 而忽视了经济因素特别是水资源成本对造林的约束。基于 GIS 数据和统计数据, 将水资源成本纳入造林经济决策模型, 评估其对中国自然和经济双重可行的造林面积和碳汇潜力的影响。结果表明: (1) 中国自然和经济双重可行的造林面积和碳汇潜力分别为 1509.31 万 hm^2 和 75.18 $\text{Mt CO}_2/\text{a}$, 水资源成本会导致两者分别减少约 50% 和 30%, 产生了显著的约束作用。(2) 在水资源成本约束下, 当前中国碳市场仅能促使造林增汇的碳中和贡献从 3.16%—4.91% 提升到 3.75%—5.83%, 激励作用比较有限。(3) 水资源成本约束下的中国再造林碳汇潜力为 43.07 $\text{Mt CO}_2/\text{a}$, 高于新造林。并且水资源成本导致再造林碳汇潜力下降幅度为 27.54%, 低于新造林的 38.91%, 对再造林碳汇潜力的约束作用弱于新造林。综上, 应尽快将水资源成本纳入造林决策之中, 并完善碳交易市场体系, 重点发挥再造林的增汇优势。研究对提高中国土地资源利用效率、制定灵活的生态修复政策以及科学认知和发挥造林增汇的碳中和贡献具有重要现实意义。

关键词: 造林; 碳汇潜力; 水资源成本; 碳中和; 造林决策模型

How can China's forestation carbon sequestration efforts be tailored to local water resources: analysis from the perspective of water resource cost constraints

WANG Zongshun¹, YUE Chao², YANG Hongqiang³, LI Qiang⁴, ZHANG Han^{1,*}

¹ School of Economics and Management, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

² Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China

³ College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

⁴ College of forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Afforestation is very pivotal in realizing China's goal of carbon neutrality. Expanding forest area and enhancing the forest carbon sequestration has been identified as an important strategy in the national climate mitigation plans of China. However, current research has predominantly concentrated on assessing afforestation areas based on ecological criteria, overlooking the influence of economic factors, especially those related to water resource costs in afforestation activities. Incorporating the cost of water resources into an afforestation economic decision-making framework, this study utilizes GIS and statistical data to assess the impact on ecological and economic afforestation areas and carbon sequestration potential in China. The findings revealed that: (1) China's ecologically viable forestation area is 1509.31 Mhm^2 . China's economically

基金项目: 国家社科基金重大项目 (24&ZD108, 23&ZD103); 国家重点研发计划青年科学家项目 (2022YFF1302200); 中央高校基本科研业务费 (2023HHZX005)

收稿日期: 2024-05-20; **网络出版日期:** 2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanzhang@nwfu.edu.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国台湾统计数据, 中国香港和澳门统计数据已并入广东省。

forestation carbon sequestration potential amount to 75.18 Mt CO₂ annually. The cost of water will cause China's ecologically viable forestation area to decrease by approximately 50% and China's economically forestation carbon sequestration potential to decrease by around 30%. Thus, the cost of water exerts a significant constraining effect on forestation. (2) With the consideration of water resource costs, the existing carbon market can merely stimulate an enhancement in the carbon sequestration contribution of forestation from 3.16% to 4.91%, expanding to a range of 3.75% to 5.83%. This suggests that the current carbon market has a relatively modest incentive effect on augmenting the carbon sequestration potential of forestation. (3) China's reforestation activities, taking into account the constraints of water resource costs, exhibits a carbon sink potential of 43.07 Mt CO₂ per year. By comparison, this figure surpasses the carbon sink potential of afforestation. Furthermore, the cost of water resources leads to a 27.54% decline in the carbon sink potential of reforestation, which is lower than the 38.91% decline for afforestation. The reduction in carbon sequestration potential resulting from water resource costs is comparatively lower for reforestation when compared to afforestation. Thus, it is advisable to promptly integrate the cost of water resources into afforestation decision-making processes and to refine the carbon trading market mechanism, emphasizing the exploitation of the carbon sequestration potential of reforestation. The research is of great practical significance for improving the utilization efficiency of land resources, formulating flexible ecological restoration policies, and scientifically understanding and fulfilling the carbon neutrality contribution of afforestation in China.

Key Words: forestation; carbon sequestration potential; water resource cost; carbon neutrality; forestation decision model

为应对全球气候变化危机,世界各国纷纷提出了在 21 世纪中叶前后实现碳中和的目标,并把提升森林碳汇作为实现碳中和目标的重要举措^[1]。其中造林作为增汇潜力最大的“基于自然的解决方案”,比技术减排路径更具有成本有效性^[2],已经成为中国应对气候变化的重要策略之一^[3]。但造林活动既对实施区域的降水量等自然条件要求严格,还需要持续投入大量的资金和人力等经济要素^[4]。因此,满足自然可行性的造林区域并不一定具有经济可行性。但已有研究通常仅从自然可行的视角对中国可造林区域进行识别^[5],忽略了经济因素对造林活动的限制,从而可能导致夸大中国可造林面积及造林碳汇潜力。更重要的是,大规模造林会占用大量的水土等自然资源,甚至可能导致区域的水资源短缺^[6],但这种水资源成本却被相关研究和政策制定者们忽视了^[7]。为此,在“双碳”战略布局下,探究水资源成本如何约束中国造林增汇活动成为学者们广泛讨论和亟需解决的重要现实议题。厘清该问题既有助于科学认知中国造林的碳中和贡献,还能为合理利用土地资源以及制定灵活的生态修复政策提供参考依据。

识别可造林区域是发挥造林增汇作用的重要前提,目前已有研究主要从自然可行^[5]或经济可行两种视角^[8]进行识别。其中前者根据长期的降水和气温等多种自然条件的约束对可造林区域进行筛选,而后者则将造林的成本与收益纳入造林决策之中,从而求解可造林面积。从测算结果上看,当前研究普遍认为中国未来可供造林的土地面积有限^[9],且受到降水量等因素的影响,主要分布在胡焕庸线附近^[10]。在此基础上,学者们多基于样地清查法构建林木生长方程,通过林龄的变化预测了中国未来造林的碳汇潜力^[11]。目前,大多数研究发现中国造林具有一定的增汇潜力,但因碳库选择的差异导致了测算结果的不同^[12-13]。具体而言,已有研究主要以地上和地下林木的生物量碳为主要核算对象^[14],也有学者关注了土壤碳库,其中少部分研究认为造林会导致土壤有机碳减少^[15],而更多研究认为造林会引致土壤产生显著的碳增汇效应^[16]。近些年,林产品的碳储存功能和对高排放材料的替代减排作用也越来越得到重视^[17]。最后,还有少数研究关注了死亡有机质碳库^[18]。值得注意的是,造林虽然具有显著的增汇作用,但大规模植树造林可能会对当地生态系统造成复杂且难以逆转的影响^[19],特别是对区域水资源的负向影响得到了学者们的广泛关注^[20]。相关研究认为造林增汇在很大程度上是一种水和碳的单向交换关系,由此导致的干旱可能会增加树木死亡的风险^[21-22]。不过这种负向影响在造林决策中往往被相关学者和政策制定者忽视,从而导致实施的环境政策效果不理想,难以产生可持续的生态效益^[23]。其原因在于大多数研究并未重视造林过程中的水资源成本约束,即使有少

部分研究测算了造林导致的水资源成本^[24],但并未评估其对造林活动的约束程度。

综上所述,已有研究对中国可造林区域识别和造林碳汇潜力评估已有较为深入的探讨,但仍存在以下不足。首先,对中国自然和经济双重可行的造林面积和碳汇潜力关注不够,特别是忽视了水资源成本的约束作用。其次,造林包括新造林和再造林,两者在学理内涵与实践逻辑上存在差异。但已有研究多笼统探讨造林问题,对造林形式的结构性差异关注不够。最后,较少研究把土壤碳收益作为经济收益纳入造林决策模型,可能导致对经济可行造林区域的识别出现偏差。基于此,本研究基于 GIS 数据和统计数据,将水资源成本纳入造林经济决策模型,评估其对中国自然和经济双重可行的造林面积和碳汇潜力的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源与说明

本研究使用遥感数据、统计数据和文献数据进行分析,其中“中国潜在造林地及其气候生产潜力 30 m 栅格数据集”源自中国科学院空天信息创新研究院(<https://geodoi.ac.cn>)。土地利用/土地覆盖数据产品(Land use/Land cover, LUC)包括 2020 年的 GLC_FCS30(<https://data.casearth.cn>)和 GlobeLand30(<http://www.globallandcover.com>)两种。前者由中国科学院空天信息创新研究院研制,后者由国家基础地理信息中心研制。各省(市、自治区)的优势树种来自《全国第九次森林资源清查报告》,其对应的林木生长方程参数取值参考付晓等^[25]的研究,对应的轮伐期取自中国林业行业标准(LY/T 2908—2017)。值得注意的是,由于本研究采用的两种高分辨率遥感数据的最新年份为 2020 年,因此为匹配该数据,相关统计数据也采用 2020 年的值。其中木材实际销售平均价格源自《中国林业和草原统计年鉴 2021》。当量因子法需要用到的粮食价格、产量和播种面积数据分别源自《全国农产品成本收益资料汇编—2021》和《中国统计年鉴 2021》。计算耕地和草地产出用到的当量因子系数和转化系数均取自谢高地等^[26]。各省(市、自治区)造林初始成本、管护成本和水资源机会成本数据主要源自 Cao 等^[27],其中水资源成本采用水价和耗水量计算获得,前者由资源稀缺模型计算,后者由人工神经网络模型等 7 种蒸散发模型进行计算^[24]。0—20 cm 的土壤碳密度数据源自《2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集》^[28],其由中国科学院地理科学与资源研究所基于 2004—2014 年公开发表的历史文献数据资料以及相关实验监测数据整理而得,包括 4356 条文献数据和 180 条试验监测数据,从国家生态科学数据中心(<http://www.cnern.org.cn>)下载。部分缺失值采用相邻省(市、自治区)的平均值代替。同时,为便于比较和分析,本研究涉及到的各种价格和成本等数据均采用相关价格指数换算为 2020 年的真实值。

1.2 研究方法

1.2.1 可造林土地识别

基于土地类型和造林形式,采用 ArcGIS 软件识别出满足水热等严苛条件的中国自然可行的造林土地(见图 1)。首先,对 GLC_FCS30^[29]和 GlobeLand30^[30]两种 30 m 高空分辨率的 LUC 产品分别进行重分类,各自获得林地、草地和耕地三种土地类型。进一步采用栅格计算器进行处理,获得土地类型的叠加图层,再对获取的结果进行重分类,最终分别得到草地和耕地两种土地类型。其次,基于中国潜在造林地及其气候生产潜力 30 m 栅格数据集^[5],获得中国潜在新造林土地与再造林土地的空间分布,即造林形式图层。最后,将上述步骤获得的土地类型图层和造林形式图层,采用栅格计算器进行处理,并对所得结果进行重分类,最终获得中国自然可行的造林土地,包括新造林草地、新造林坡耕地、再造林草地和再造林坡耕地四种类型。其中新造林是指在之前不是林地的土地上造林,不过受限于数据的可获取性,本研究仅根据 2020 年数据对新造林土地进行识别,与《联合国气候变化框架公约》的定义有一点差别,但徐进勇^[5]认为该差别导致的误差很小。

1.2.2 造林经济决策模型

假设在识别出的自然可行的土地上进行造林,树种为各省(市、自治区)的优势树种。由于造林活动涉及到土地利用的转换和经济要素的投入,所以只有当造林的净现值(Net Present Value, NPV)大于或等于 0 时,造林才是自然和经济双重可行的(后文简称双重可行的),造林碳汇才能被供给^[31]。NPV 表示造林产生的净

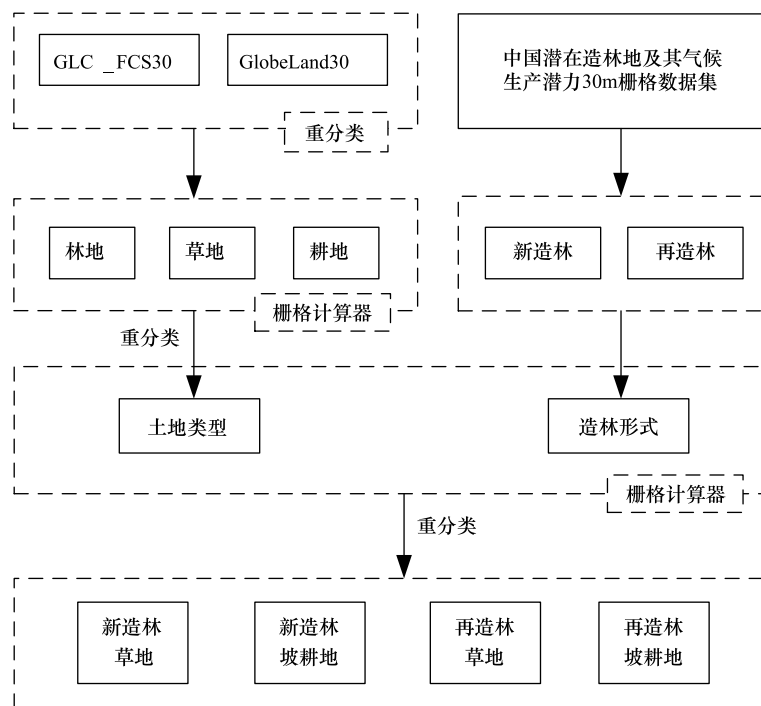


图1 自然可行的可造林土地识别

Fig.1 Identification of ecologically feasible forestation land in China

GLC_FCS30:全球 30m 精细地表覆盖产品;GlobeLand30:30m 全球地表覆盖数据

现值,计算公式如下:

$$NPV = PV - C \quad (1)$$

式中, PV 表示造林产生的收益现值, C 表示造林产生的成本现值。其中造林收益由木材收益现值 PV_F 和碳汇收益现值 PV_C 两部分构成,计算公式如下:

$$PV = PV_F + PV_C$$

$$= \frac{P_F v(T) e^{-r_d T}}{1 - e^{-r_d T}} + P_C \left[\frac{\int_0^T \alpha v'(t) e^{-(r_c + r_d)t} dt - \alpha \beta v(T) e^{-(r_c + r_d)T}}{1 - e^{-r_d T}} + \theta \int_0^{50} c_s e^{-(r_c + r_d)t} dt \right] \quad (2)$$

式中, P_F 表示木材的价格,取近三年木材销售平均价格, T 表示优势树种的林木轮伐期。 r_d 表示金融贴现率,取值 5%^[32]。 $v(t)$ 表示林木生长方程,采用 Chapman-Richards 函数形式。 P_C 表示碳价,根据中国当前碳市场交易价格取值约为 70 元/t CO₂, $v'(t)$ 表示 $v(t)$ 的导数, r_c 表示碳实物的贴现率,用以反映应对气候变化的紧迫性,取值为 2%^[33]。 c_s 表示进行造林后,0—20 cm 土壤层有机碳密度的年均变化速率,由造林前后土地类型的土壤有机碳密度决定。而且根据已有研究^[34],土壤碳库在造林后的 50 年内基本趋于稳定,因此本文对造林后土壤碳动态的模拟期限共 50 年。 θ 是二氧化碳和碳的质量比,取值 11/3。分母 $1 - e^{-r_d T}$ 表示把单个轮伐期的收益扩展到无限个轮伐期。 α 表示将林木的蓄积量转换为二氧化碳量的系数; β 表示林木被采伐后释放碳的比例,两者的计算公式如下:

$$\alpha = BE \times SV \times (1 + RS) \times CF \times \theta \quad (3)$$

$$\beta = \sum_{k=1}^K \frac{\delta_k}{r_c + \delta_k} \gamma_k \quad (4)$$

式中, BE 表示生物量扩展系数, SV 表示木材密度, RS 表示“根冠比”, CF 为含碳率,取值均参考《森林经营项目碳汇计量监测指南》和已有研究^[35]。(4)式中,释放碳的程度与采伐后林木的去向 k 、比例 γ_k 和衰败率 δ_k 相关,取值参考已有研究^[36]。

土地所有者的造林成本现值 C 包括初始成本现值 C_o 、管护成本现值 C_H 、土地资源的机会成本现值 C_U 以及水资源的机会成本 C_w 。其中将土地和水资源的机会成本定义为占用土地和水在其他用途上产生的收益或者产生的价值^[37]。 C 的计算公式如下:

$$C = C_o + C_H + C_U + C_w = \frac{C_o + \int_0^T h e^{-r_d t} dt + \int_0^T u e^{-r_d t} dt + C_w}{1 - e^{-r_d T}} \quad (5)$$

式中, C_o 为造林初始成本, 包括整地、种植和施肥等活动的费用, 发生在造林当年。 h 主要包括防止病虫害等发生的投入费用, 发生在造林后的每一年; 而 u 表示土地资源的机会成本, 采用土地的净经济收益进行衡量^[38]; 坡耕地或草地的净收益由其产出和投入成本进行计算, 其中坡耕地的经济产出采用旱地和水田的平均产出, 包括食物和原材料供给的经济价值^[39], 根据当量因子法计算^[26]。而草地的产出则根据其耕地的产出关系系数进行转化。坡耕地的投入成本借鉴 Ge 等^[4]的做法, 将产出的部分比例作为投入的成本。草地的投入成本则源自 Cao 等^[27]的研究成果。 C_w 表示水资源使用的机会成本, 采用耗水量和当地水资源的价格进行计算^[40]。

最后, 将各区域的经济变量参数代入模型(1), 计算得到其对应的净现值, 当该值大于等于 0 时, 其造林活动才是双重可行的, 据此识别出中国自然和经济双重可行的造林区域。而当 C_w 为 0 时, 模型(1)则描述的是不存在水资源成本约束的情景。以上模型的设定和推导主要参考了 Ge 等^[4]的研究, 并进行了适当的修改。

2 结果与分析

2.1 自然可行视角

2.1.1 自然可行造林面积

图 2 展示了中国自然可行的造林土地分布情况。结果显示, 中国自然可行造林土地的分布会受到降水量的调节, 且对新造林土地的分布影响更加显著。同时, 其集中分布在少数省(市、自治区), 并在造林形式和土地来源上呈现出显著的区域异质性。具体而言, 从空间布局上看, 中国自然可行的造林土地主要分布于 400 mm 等降水量线两侧。其中新造林土地在北方主要分布于 400 mm 等降水量线的西侧, 在南方主要位于该线的两侧; 而再造林土地主要位于 400 mm 等降水量线东侧。从区域上看, 华北、西南和西北地区位于前三, 均以新造林草地为主, 其他区域则以再造林草地为主, 而坡耕地主要分布于西南地区。

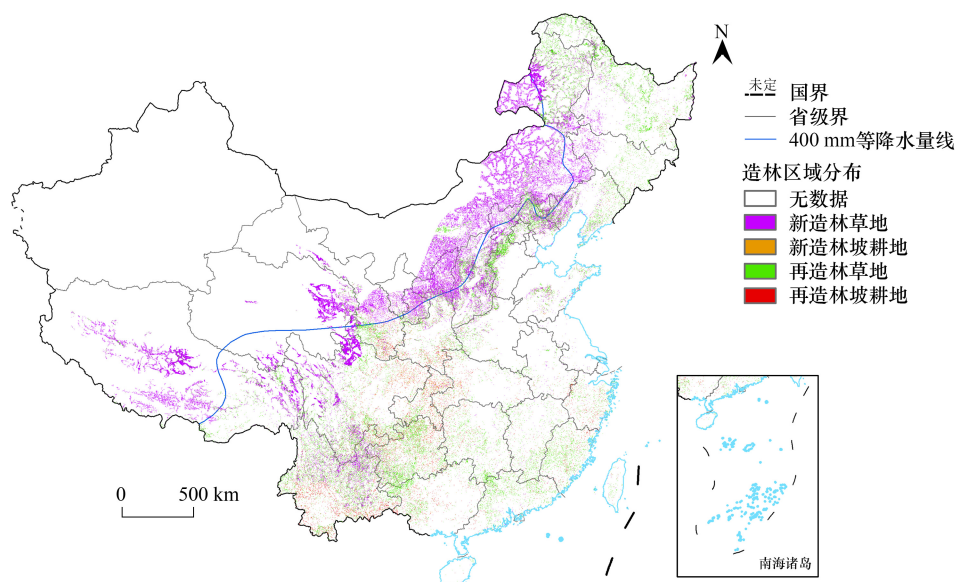


图 2 中国自然可行的造林区域分布

Fig.2 The area distribution of ecologically feasible forestation land in China

从数量上看,中国自然可行的造林土地面积约为 6657.57 万 hm^2 ,仍有一定开发空间。其中内蒙古、西藏、云南、四川和甘肃的可造林土地面积分别排名前五,合计占比约 55.38%。从造林形式上看,新造林土地和再造林土地面积的占比分别为 59.55%和 40.45%,内蒙古和云南分别是新造林和再造林土地面积最高的地区。从土地类型上看,草地面积约为 6077.66 万 hm^2 ,占比为 91.29%,说明草地是主要的自然可行的造林土地类型。其中,草地面积排名前三的是内蒙古、西藏和四川,坡耕地面积排名前三的则是云南、四川和贵州。本研究结果说明,中国仍有一定自然可行的造林土地有待充分利用,特别是以草地为主的新造林土地有待开发。

2.1.2 自然可行造林碳汇潜力

图 3 显示了中国自然可行的造林碳汇潜力分布,整体上,中国自然可行的造林固碳速率为 204.89 $\text{Mt CO}_2/\text{年}$ 。根据于贵瑞等^[41]的研究,中国要实现碳中和目标,生态系统固碳速率需要由 2020 年到 2060 年实现 9.04—14.04 亿 $\text{t CO}_2/\text{年}$ 的额外增量。据此可以计算得到造林增汇能够为中国实现碳中和的生态增汇目标做出的贡献率为 14.59%—22.66%。因此,即使将中国自然可行的土地全部用于造林也不能实现碳中和生态系统增汇目标的 1/4。这说明中国仍有一定的造林碳汇潜力尚未发挥,但政策制定者也应客观地看待其能够产生的碳中和贡献,避免夸大其作用,导致盲目开展造林活动。图 3 显示,再造林的固碳速率为 100.43 $\text{Mt CO}_2/\text{年}$,且再造林的面积仅是新造林的 67.92%,所以算得再造林的增汇强度约为新造林的 1.42 倍。因此再造林具有更强的增汇优势,是发挥中国造林碳汇潜力的关键造林形式。从区域上看,增汇潜力排名前三的省(市、自治区)分别是内蒙古、西藏和广西,是中国实现造林增汇的主要对象,但前两者以新造林为主,后者以再造林为主,反映了不同区域间造林增汇在形式上的差异。

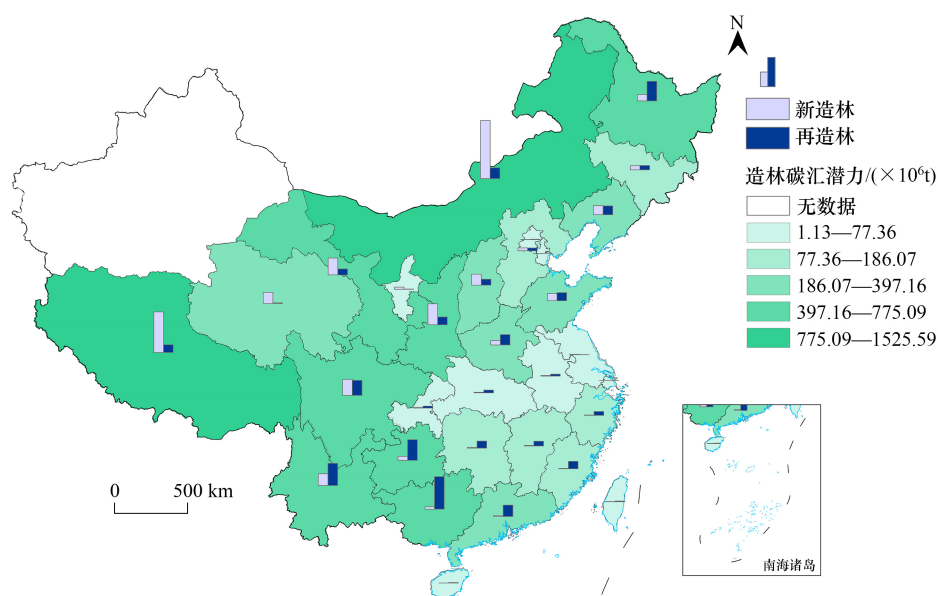


图 3 中国自然可行的造林碳汇潜力分布

Fig.3 The distribution of ecologically feasible forestation carbon sink potential in China

图 4 报告了中国自然可行的造林碳汇潜力在碳库构成上的差异。结果显示,中国造林碳汇潜力主要由林木生物量碳驱动,而土壤碳的贡献较小,并且由采伐导致的碳排放会显著降低造林的增汇效应。具体而言,林木生物量碳的占比最高,而采伐后释放碳约占其 35.38%,反映了采伐活动导致较高的碳成本^[42]。同时,造林会提升土壤有机碳的储量,不过其只占林木生物量碳的 8.79%,原因是其在造林后的 50 年左右就基本稳定。其中在宁夏、陕西、甘肃和山西等水热条件相对较差的地区进行造林,会显著提升其土壤碳库,这与 Hong 等^[16]的研究结果一致。

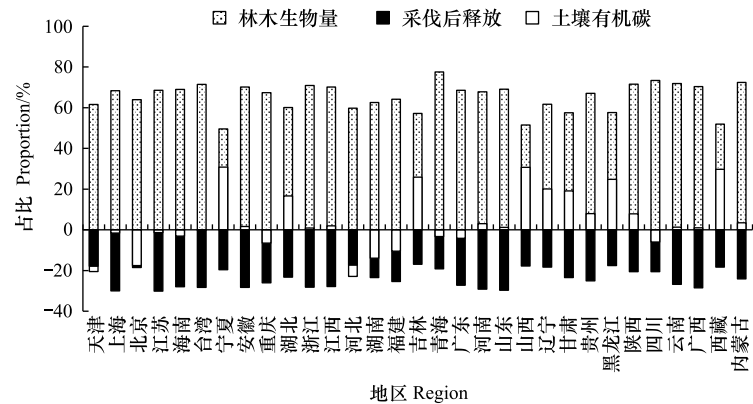


图 4 中国自然可行的造林碳汇潜力碳库

Fig.4 The carbon pools of ecologically feasible forestation carbon sink in China

2.2 自然和经济双重可行视角

2.2.1 双重可行造林面积

表 1 显示了中国双重可行的造林面积情况。可以发现,在无水成本约束情景下,中国双重可行的造林面积共约 1509.31 万 hm^2 ,占自然可行造林面积的比例为 22.67%,不足 1/4。数量上如此大的反差,说明由于造林的经济投资回报率低,大量的中国自然可行的造林土地不具备经济可行性,这也侧面解释了中国开展造林活动积极性低的原因。同时,该结果也说明若造林活动不考虑经济条件的约束,会显著夸大中国可造林的面积。其中,草地占比为 75.43%,是双重可行造林的主要土地类型。再造林面积为 1164.92 万 hm^2 ,占比 77.18%,是双重可行造林的主要形式,这与自然可行的结果相反,说明成本收益对新造林的约束更强。从区域上看,中国双重可行造林的土地主要分布在云南、贵州、广西、湖南和广东等水热条件较好的省(市、自治区),这与已有研究发现相符^[25]。

表 1 中国双重可行的造林面积/万 hm^2

Table 1 The dual feasible forestation areas in China

区域 Region	新造林坡耕地 Sloping cropland for afforestation	新造林草地 Grassland for afforestation	再造林坡耕地 Sloping cropland for reforestation	再造林草地 Grassland for reforestation	合计 Total
上海	0.02	0.36	0.00	0.01	0.38
海南	0.04	0.38	0.26	1.55	2.23
江苏	0.56	2.05	0.28	0.83	3.73
台湾	0.11	0.93	0.85	4.20	6.09
安徽	0.87	3.64	4.07	9.04	17.62
湖北	5.70 *		17.54 *		23.24
重庆	12.72 *		27.69 *		40.41
浙江	1.39	2.83 *	13.17	23.24 *	40.62
河南	1.99	12.52	4.35	29.56	48.42
山东	2.92	21.61	2.35	25.18	52.06
江西	1.34	4.04	6.68	40.24	52.30
福建	1.53	2.30	14.39	61.05	79.26
广东	1.59	5.91 *	9.27	74.61 *	91.38
湖南	3.30	5.42	16.42	70.24	95.38
广西	3.92	3.17	27.02	70.38	104.50
贵州	15.25	31.67	53.33	184.05	284.30
云南	23.51 *	170.84 *	96.42 *	276.64 *	567.40
合计 Total	76.74	267.65	294.09	870.83	1509.31

上标“*”表示这些土地在水资源成本约束后进行造林不再具有经济可行性

表 1 也显示,在有水成本约束情景下,中国双重可行的造林面积约为 771.67 万 hm^2 ,占自然可行造林面积的比例为 11.59%,仅是无水成本约束情景的 51.13%。因此,水成本会导致双重可行造林面积减少一半左右,这说明了水资源成本的存在对中国双重可行造林面积具有显著的约束作用。其中草地占比 75.73%,仍是中国双重可行造林的主要土地类型。再造林面积为 648.78 万 hm^2 ,占比 84.07%,高于新造林,主要分布在贵州、广西和福建三省(市、自治区)。而且水资源成本约束导致中国双重可行的再造林面积下降了 44.31%,低于新造林 64.32% 的下降幅度。说明从面积上看,再造林具有更强的增汇优势,而且受水资源成本的约束更小,是中国未来造林增汇的主要方式。从区域上看,贵州、广西、湖南、福建和江西是提升中国双重可行造林碳汇潜力的主要区域。比较而言,400mm 等降水量线西侧的大多数省份只满足造林的自然可行性,而不具有经济可行性,对于这些地区,即使不考虑水成本的约束,未来也不应成为中国造林的主要区域。而水资源成本对该线东部的部分地区存在一定的约束作用,具体而言,水成本约束导致广东和浙江的草地、云南的草地和坡耕地、湖北以及重庆的坡耕地不再具有造林的经济可行性,其中云南省和广东省的面积占比最多,是水成本约束的主要地区。上述结果也在一定程度上反映了降水量和水成本两种条件对造林活动约束作用的差异。

2.2.2 双重可行造林碳汇潜力

图 5 显示了中国由坡耕地新造林、草地新造林、坡耕地再造林和草地再造林产生的双重可行的造林碳汇潜力情况。可以发现,在无水成本约束情景下,中国双重可行的造林碳汇潜力为 75.18Mt $\text{CO}_2/\text{年}$,占自然可行的造林碳汇潜力的比例为 36.69%,即有超过 3/5 的自然可行造林碳汇潜力不具有经济可行性,并且其对中国碳中和生态增汇目标的贡献率下降到 5.35%—8.32%。说明若不考虑经济条件对造林的约束,会显著夸大中国造林的增汇潜力及其碳中和贡献。从造林形式上看,再造林是发挥中国双重可行造林碳汇潜力的主要方式,其占比约为 79.07%,远高于新造林。从区域上看,广西、云南、贵州、河南和山东排名前五,其占比之和约为 72.90%,说明西南地区是中国进行双重可行造林增汇活动的主要区域。

在有水成本约束情景下,中国双重可行的造林碳汇潜力为 52.68 Mt $\text{CO}_2/\text{年}$,占自然可行的造林碳汇潜力

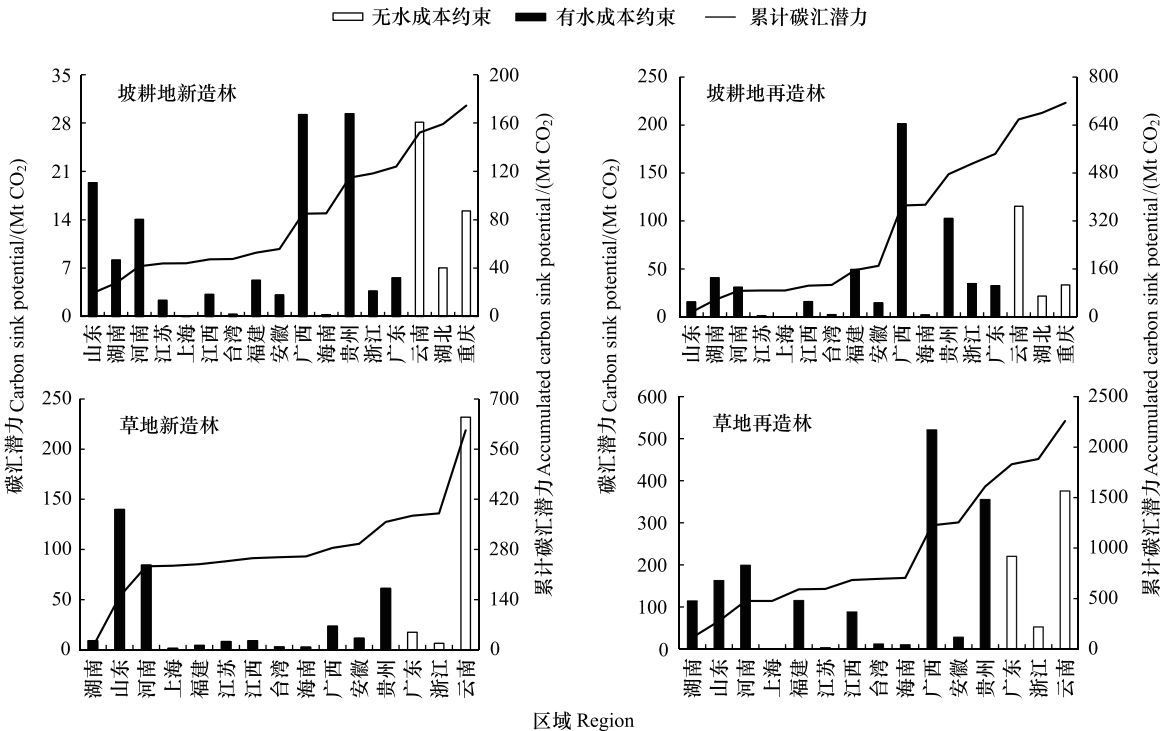


图 5 中国双重可行的造林碳汇潜力
Fig.5 The dual feasible forestation carbon sink potential in China
Mt:100 万 t

的比例为 25.71%,是无水成本约束情景下的 70%,其对碳中和的贡献率下降到 3.75%—5.83%。因此,水成本会导致中国双重可行造林碳汇潜力减少 30%左右,低于造林面积的减少幅度。这说明水资源成本会显著约束中国双重可行的造林碳汇潜力,忽略水成本的约束则会夸大造林增汇对碳中和的贡献。从区域上看,广西、贵州、山东、河南和福建的占比之和高达 82.14%。从造林形式上看,再造林的造林碳汇潜力为 43.07 Mt CO₂/年,占比为 81.75%,其中广西、贵州和河南排名前三。并且水资源成本约束导致中国双重可行的新造林碳汇潜力下降 38.91%,高于再造林 27.54%的下降幅度。说明从造林碳汇潜力上看,再造林更具有比较优势,而且水资源成本对其约束更小,是未来中国造林增汇的主要方式。并且 Ge 等^[4]认为云南省是中国最适合进行造林增汇的地区,但本研究发现,在考虑水成本后,在该地区造林并不具有经济可行性,侧面反映了水资源成本对造林增汇活动的约束。综上所述,在考虑水资源成本后,中国双重可行的造林碳汇潜力会显著降低,但其被约束程度弱于造林面积。其中再造林受到的约束作用更小,是中国未来造林增汇的主要驱动力,并且中国未来造林活动的重点工作应集中在广西、贵州、山东、河南和福建等地区。

2.3 碳市场激励

图 6 显示了林业碳汇交易价格对中国双重可行造林面积和碳汇潜力占比的影响。可以发现,当碳价为 0 时,无、有水成本约束的中国双重可行造林面积占比分别仍有 15.34%和 8.35%,中国双重可行造林碳汇潜力占比分别为 30.29%和 21.65%,其对碳中和生态增汇目标的贡献分别为 4.42%—6.87%和 3.16%—4.91%。说明即使不存在碳市场的激励,中国仍然有一定的自然可行的造林面积和碳汇潜力满足经济可行性,有超过 1/5 的造林碳汇潜力不需要由碳市场激励即可进行投资。在当前约 70 元/t CO₂的碳价激励下,无、有水成本约束下的中国双重可行造林面积占比分别上升了 7.33%和 3.24%,中国双重可行造林碳汇潜力占比则分别上升了 6.40%和 4.06%。说明当前碳市场对中国造林增汇具有一定的激励作用,但忽略水成本则会夸大此作用。

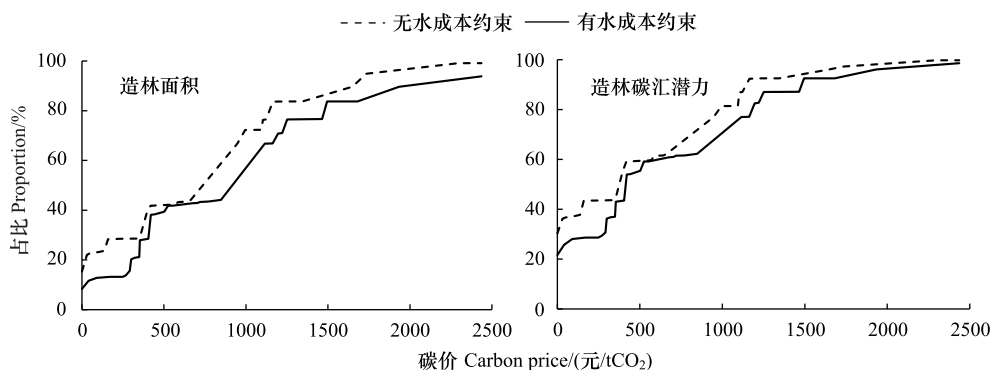


图 6 碳市场对中国双重可行造林面积及碳汇潜力的影响

Fig.6 The impact of carbon prices on dual feasible forestation areas and carbon sink potential in China

假设碳市场激励下中国双重可行造林碳汇潜力的碳中和贡献达到 10%,水成本约束情景下的碳价要达到 420.65 元/t CO₂,仍然是当前碳价的数倍。说明当前较低的碳价限制了碳市场对造林增汇的激励和市场调节作用,而主要原因在于木材收益仍是造林的主要经济驱动力,碳汇收益的平均占比仅约为 20%。Lin 等^[43]认为将碳价逐步提升到 137.95 元/t CO₂(由原文 20 美元/t CO₂按照当年 6.8976 的汇率换算得到),将会促使碳市场发挥最优效应。但本研究认为该种观点可能过于乐观。因为即使碳价提升到该水平,在有水成本约束情景下的中国双重可行造林碳汇潜力的占比也仅提升了 2.23%,幅度较小,反映了碳市场对造林增汇的激励作用有限。

2.4 敏感性分析

将模型(1)中木材价格、轮伐期、造林初始成本、金融贴现率相较于基准值分别上升和下降 20%,以探究中国双重可行造林面积和碳汇潜力对各参数变化的敏感性。

图 7 报告了中国双重可行造林面积和碳汇潜力占比对四种参数变动的敏感性结果。结果显示,相较于基准值,在有水成本约束情景下,木材价格变动导致中国双重可行造林面积的占比分别变动 1.60%和-5.79%;而轮伐期、造林初始成本、金融贴现率变动导致相应值分别变动-3.24%和 1.90%、-3.24%和 1.60%、-5.79%和 1.60%。同时,在有水成本约束情景下,木材价格变动导致中国双重可行造林面积的占比分别变动 2.90%和-7.65%;而轮伐期、造林初始成本、金融贴现率变动导致相应值分别变动-5.11%和 3.67%、-4.07%和 2.90%、-7.65%和 2.90%。

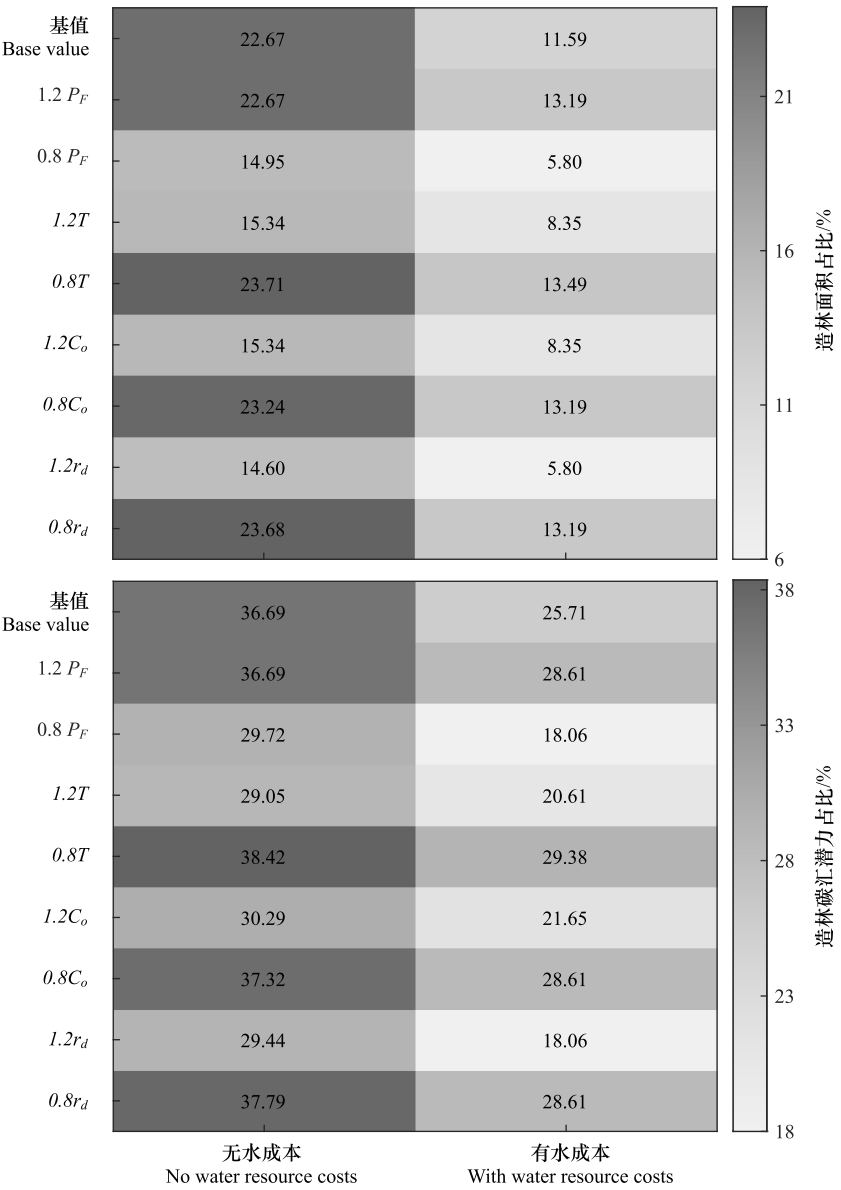


图 7 敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis

P_F : 木材价格; T : 轮伐期; C_o : 造林初始成本; r_d : 金融贴现率

敏感性分析结果显示,一方面,在两种约束情景下,中国双重可行造林面积和碳汇潜力对木材价格的下降、轮伐期的延长、造林初始成本的上升和金融贴现率的上升比较敏感。说明不同经济因素对造林经济可行性的影响方式存在差异,其中木材价格和金融贴现率成为促使造林具有经济可行性的关键因素。另一方面,不同参数下,无水成本约束下的中国双重可行造林面积和碳汇潜力的占比分别未超过 25%和 40%,而有水成

本约束下的相应值分别未超过 15% 和 30%, 且占比均更低。反映了忽略水资源成本会导致显著夸大中国双重可行造林面积和碳汇潜力结论的稳健性。

3 讨论与结论

3.1 讨论

提升造林碳汇潜力是中国实现碳中和目标的重要路径。但不同土地来源、碳库选择和测算方法下的中国造林碳汇潜力结果不尽相同。本研究的结果显示中国自然可行的造林碳汇潜力为 2.10 亿 t CO₂/a, 略高于 Cai 等^[12] 估算的 1.04 亿 t CO₂/a, 原因在于其忽略了采伐后林产品的碳储功能。而本研究的结果又低于 Weng 等^[13] 测算的 6.17 亿 t CO₂/a, 因为其在识别中国可造林区域时, 对水热条件的约束较弱, 得到的可造林面积高于本研究。同时本研究的结果显示, 在考虑经济条件, 特别是在水资源成本约束情景下, 中国可投资的造林碳汇潜力仅约为自然可行的 1/4, 说明在忽略了成本收益的经济条件约束后, 中国造林碳汇潜力会被显著夸大, 这与 Huang 等^[44] 的观点一致。除此之外, 虽然碳市场交易往往被认为是市场经济框架下碳减排的最有效措施之一, 但本研究的结果显示当前中国碳市场交易价格过低, 对造林增汇的激励作用较小, 这与张颖等^[45] 的发现相同。本研究仍存在一定的局限性, 在研究尺度上, 受限于数据, 从省级层面进行分析而忽略了中国各省(市、自治区)内部之间的差异; 在研究方法上, 本研究基于林龄与蓄积量关系的生长方程预测造林碳汇潜力, 而忽略了实际林龄的变化, 特别是气候变化对林木生长的影响, 这可能导致造林碳汇潜力被低估^[46]。因此, 如何考虑未来气候变化对林龄实际的影响, 并从更精细的尺度上评估中国自然和经济双重可行的造林碳汇潜力, 都是未来需要进一步探究的问题。

3.2 结论

(1) 中国自然可行的造林面积约为 6657.57 万 hm², 造林碳汇潜力为 204.89 Mt CO₂/年, 无水资源成本约束时, 中国双重可行的造林面积和碳汇潜力分别为 1509.31 万 hm² 和 75.18 Mt CO₂/年, 分别占自然可行的 22.67% 和 36.69%。但在水资源成本约束下, 两者占比分别下降到 11.59% 和 25.71%, 下降幅度约为 50% 和 30%。水资源成本约束的对象主要是云南的草地和坡耕地、广东和浙江的草地、湖北以及重庆的坡耕地。

(2) 中国自然可行的造林碳汇潜力对碳中和生态增汇目标的贡献为 14.59%—22.66%, 而在水资源成本约束下, 当前碳市场仅能促使中国双重可行的造林碳汇潜力占比上升 4.06%, 进而激励中国造林增汇的碳中和贡献从 3.16%—4.91% 提升到 3.75%—5.83%。而若要使得中国双重可行造林碳汇的碳中和贡献超过 10%, 碳价则必须达到 420.65 元/t CO₂, 远高于当前市场水平。说明当前中国碳市场对增强造林碳汇的激励作用有限。

(3) 在水成本的约束下, 中国双重可行的再造林土地面积为 648.78 万 hm², 占比 84.07%, 相比于无水成本约束情景下降了 44.31%, 且低于新造林 64.32% 的下降幅度。而中国双重可行的再造林碳汇潜力为 43.07 Mt CO₂/年, 占比为 81.75%, 下降幅度为 27.54%, 也低于新造林的 38.91%, 说明中国可投资的新造林土地受水资源成本的约束作用更强。其中新造林碳汇潜力主要由山东、河南和贵州贡献, 再造林碳汇潜力主要由广西、贵州和河南贡献。

3.3 政策启示

一是不可忽视但应避免高估中国造林的碳汇潜力, 重视水资源成本对造林增汇的约束作用。政策制定者在进行造林区域的规划时, 应统筹考虑生态本底和成本收益对造林活动的约束, 避免在 400 mm 等降水量线附近开展造林, 特别是在该线的西侧, 虽然大部分地区满足自然可行性, 但在成本收益约束后, 变得不再经济可行。并且针对该线东侧的湖北和云南等地区, 应谨慎开展大规模造林活动, 尽快通过完善农业水权交易机制, 以提高用水代价和成本, 倒逼营造林主体提高用水效率。

二是健全碳交易市场体系, 充分发挥市场机制的激励作用。首先, 应尽快建立林业碳汇交易的评估、登记、监测、交易和监管机制, 并培育相关的中介和咨询机构, 为林业碳汇的核算与定价提供保障。其次, 借助

CCER 机制重启的契机,优先将林业碳汇纳入全国统一碳交易市场,并积极探索林业碳汇的期权等金融衍生品,以提高碳汇市场的流动性。最后,构建并完善多层次的碳汇市场体系,支持如广西和贵州等地方政府建立区域碳汇市场试点,充分发挥各区域的林业碳汇市场活力。

三是中国造林增汇应在合理利用新造林土地的同时,重点发挥再造林土地的优势。一方面,应继续借助退耕还林等国家重大生态修复工程,对山东和河南等地区的宜造林土地进行科学规划,并尽可能选择耐旱速生的本地树种进行造林,在最大程度上实现新造林的增汇潜力。另一方面,重点关注广西、贵州等地区的森林恢复和管理活动,加大对营造林行为的补贴范围和强度,同时提高对林地用途转变甚至荒废行为的惩罚力度。

参考文献 (References):

- [1] 徐浩,岳超,朴世龙. 科学规划植树造林把握森林碳汇对“碳中和”战略的服务窗口期. 中国科学: 地球科学,2023,53(12): 3010-3014.
- [2] 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,2022,43(9): 11-23.
- [3] 刘晓曼,王超,高吉喜,袁静芳,黄艳,王斌,彭阳. 服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径. 生态学报,2023,43(14): 5662-5673.
- [4] Ge J M, Zhang Z P, Lin B Q. Towards carbon neutrality: How much do forest carbon sinks cost in China? Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106949.
- [5] 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.
- [6] Wang Y Q, Hu W, Sun H, Zhao Y L, Zhang P P, Li Z M, Zhou Z X, Tong Y P, Liu S Z, Zhou J X, Huang M B, Jia X X, Clothier B, Shao M A, Zhou W J, An Z S. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: more a result of land-use conversion than climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(15): e2322127121.
- [7] Zhang J Z, Zhao T Y, Jiang C C, Cao S X. Opportunity cost of water allocation to afforestation rather than conservation of natural vegetation in China. Land Use Policy, 2016, 50: 67-73.
- [8] 汪宗顺,张海鹏,岳超,杨红强,张寒. 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. 自然资源学报,2024,39(3): 731-748.
- [9] Zhang L, Sun P S, Huettmann F, Liu S R. Where should China practice forestry in a warming world? Global Change Biology, 2022, 28(7): 2461-2475.
- [10] Xu H, Yue C, Zhang Y, Liu D, Piao S L. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(41): e2304988120.
- [11] Xu L, He N P, Li M X, Cai W X, Yu G R. Spatiotemporal dynamics of carbon sinks in China's terrestrial ecosystems from 2010 to 2060. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 203: 107457.
- [12] Cai W X, He N P, Li M X, Xu L, Wang L Z, Zhu J H, Zeng N, Yan P, Si G X, Zhang X Q, Cen X Y, Yu G R, Sun O J. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. Science Bulletin, 2022, 67(8): 836-843.
- [13] Weng Y W, Cai W J, Wang C. Evaluating the use of BECCS and afforestation under China's carbon-neutral target for 2060. Applied Energy, 2021, 299: 117263.
- [14] Pan Y D, Birdsey R A, Phillips O L, Houghton R A, Fang J Y, Kauppi P E, Keith H, Kurz W A, Ito A, Lewis S L, Nabuurs G J, Shvidenko A, Hashimoto S, Lerink B, Schepaschenko D, Castanho A, Murdiyarslo D. The enduring world forest carbon sink. Nature, 2024, 631(8021): 563-569.
- [15] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, Augusto L, Cécillon L, Ferreira G W D, James J, Jandl R, Katzensteiner K, Laclau J P, Laganière J, Nouvellon Y, Paré D, Stanturf J A, Vanguelova E I, Vesterdal L. Tamm review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. Forest Ecology and Management, 2020, 466: 118127.
- [16] Hong S B, Ding J Z, Kan F, Xu H, Chen S Y, Yao Y T, Piao S L. Asymmetry of carbon sequestrations by plant and soil after forestation regulated by soil nitrogen. Nature Communications, 2023, 14(1): 3196.
- [17] 朱建华,田宇,李奇,刘华妍,郭学媛,田惠玲,刘常富,肖文发. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力. 生态学报,2023,43(9): 3442-3457.
- [18] 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.
- [19] Buechel M, Slater L, Dadson S. Hydrological impact of widespread afforestation in Great Britain using a large ensemble of modelled scenarios. Communications Earth & Environment, 2022, 3: 6.
- [20] Hoek van Dijke A J, Herold M, Mallick K, Benedict I, Machwitz M, Schlerf M, Pranindita A, Theeuwens J J E, Bastin J F, Teuling A J. Shifts in regional water availability due to global tree restoration. Nature Geoscience, 2022, 15: 363-368.
- [21] Gherardi L A, Sala O E. Global patterns and climatic controls of belowground net carbon fixation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(33): 20038-20043.

- [22] Li H J, Li H, Wu Q F, Si B C, Jobbágy E G, McDonnell J J. Afforestation triggers water mining and a single pulse of water for carbon trade-off in deep soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 356: 108655.
- [23] Cao S X, Zhang J Z, Chen L, Zhao T Y. Ecosystem water imbalances created during ecological restoration by afforestation in China, and lessons for other developing countries. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 843-849.
- [24] 鲁晨曦, 张军泽, 赵廷阳, 曹世雄. 我国人工林生态系统的水成本核算. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 743-754.
- [25] 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.
- [26] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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.
- [27] Cao S X, Xia C Q, Suo X H, Wei Z R. A framework for calculating the net benefits of ecological restoration programs in China. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101325.
- [28] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2019, 4(1): 90-96.
- [29] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Gao Y, Xie S, Mi J. GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [30] Jun C, Ban Y F, Li S N. China: Open access to Earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434.
- [31] Ryan M, O'Donoghue C, Hynes S, Jin Y. Understanding planting preferences-A case-study of the afforestation choices of farmers in Ireland. *Land Use Policy*, 2022, 115: 105982.
- [32] 祁慧博, 杜萌萌, 龙飞, 高晓玮. 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.
- [33] 汪宗顺, 杨红强, 张寒. 中国造林增汇潜力及成本有效性——基于经济可行与社会最优视角的再审视. *农业经济问题*, 2025, (2): 111-125.
- [34] 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.
- [35] 薛龙飞, 罗小锋, 李兆亮, 吴贤荣. 中国森林碳汇的空间溢出效应与影响因素——基于大陆 31 个省(市、区)森林资源清查数据的空间计量分析. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1744-1754.
- [36] van Kooten G C. Determining optimal forest rotation ages and carbon offset credits: accounting for post-harvest carbon storehouses. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 2023, 71(2): 255-272.
- [37] 曹世雄, 刘玉洁, 苏蔚, 郑鑫怡, 余中淇. 中国陆地生态系统服务净价值评估. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(3): 331-339.
- [38] Rämö J, Tupek B, Lehtonen H, Mäkipää R. Towards climate targets with cropland afforestation-effect of subsidies on profitability. *Land Use Policy*, 2023, 124: 106433.
- [39] 尹朝静, 杨坤, 田云. 中国农业生态全要素生产率增长: 经验事实、区域差异与动态演进. *中国农村经济*, 2024(2): 20-43.
- [40] Cao S X, Xia C Q, Xian J L, Guo H, Zheng H R. Payoff of the grain for green policy. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(6): 1180-1188.
- [41] 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.
- [42] Peng L Q, Searchinger T D, Zions J, Waite R. The carbon costs of global wood harvests. *Nature*, 2023, 620(7972): 110-115.
- [43] Lin B Q, Jia Z J. Impacts of carbon price level in carbon emission trading market. *Applied Energy*, 2019, 239: 157-170.
- [44] Huang L, Liu J Y, Shao Q Q, Xu X L. Carbon sequestration by forestation across China: past, present, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(2): 1291-1299.
- [45] 张颖, 张莉莉, 金笙. 基于分类分析的中国碳交易价格变化分析——兼对林业碳汇造林的讨论. *北京林业大学学报*, 2019, 41(2): 116-124.
- [46] Tian H L, Zhu J H, Lei X D, Jian Z J, Chen X Y, Zeng L X, Huang G S, Liu C F, Xiao W F. Models considering the theoretical stand age will underestimate the future forest carbon sequestration potential. *Forest Ecology and Management*, 2024, 562: 121982.