

中国潜在造林地及其气候生产潜力空间分布估算

徐进勇

(中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101)

摘要: 本文基于2020年GLC_FCS30和GlobeLand30两种30 m高空间分辨率土地利用/土地覆盖遥感分类产品,并结合地形与微气候、交通、林线、生态地理分区,以及Miami气候生产潜力变化等时空大数据,以草地和坡度大于25°耕地为潜在土地来源,使用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,形成了30 m分辨率中国潜在造林地空间分布数据,并分析了潜在造林地的空间分布特征。结果表明,中国缺少质量等级相对较高的潜在造林地,随着质量等级的降低,潜在造林地的面积越多。潜在造林地中适于造林的优先造林地面积66.61万 km²,其Miami多年平均气候生产潜力总值为6.30亿 t,假如优先造林地全部被开发用来植树造林,则全国森林覆盖率约增加6.94%,森林气候生产潜力增加25.00%。华北地区潜在优先造林地面积最多,且2/3分布在内蒙古。西南地区潜在优先造林地面积与华北接近,但其气候生产潜力全国占比最高,是华北地区的1.59倍。潜在优先造林地中,新造林地和重新造林地面积占比分别为59.56%和40.44%,但气候生产潜力占比分别为47.94%和52.06%,将来的植树造林建设中,不仅要积极布局新造林地,同时要加强对气候条件较好地区的森林恢复建设。研究得出的30 m分辨率潜在造林地空间分布能够为全国范围碳汇造林规划提供重要参考依据。

关键词: 中国;潜在造林地;Miami模型;最小因子定律

DOI: 10.11821/dlxb202303011

1 引言

“碳达峰”“碳中和”已成为中国发展的重要内容。“碳中和”意味着二氧化碳的产生量与自然界吸收及人为固定的碳总量相当,从目前中国的工业发展水平来看,行业减排的碳汇需求十分巨大^[1-2]。造林(包括造林和再造林)具备改善生态环境和缓解部分气候变暖功能,联合国2030年议程的17项可持续发展目标(SDGs)中有12项与林业有关^[3],其中SDG 15关于生命和土地的主题明确提出,保护和恢复森林生态系统是世界各国面临的一项关键挑战^[4-5]。通过对退化生态系统的修复、保育等措施,提高光合作用并将更多的碳以有机物形式固定在植物(尤其是森林)和土壤之中,是最重要的固碳过程^[1],通过造林的间接CO₂减排措施得到了国际社会的广泛认可和高度期望^[6-10],相关研究支持中国未来能够通过造林为碳汇做出更大贡献^[11],因此,补充森林面积和提高现有森林质量,必然成为增加森林碳汇的必要前提和关键。

目前,对于潜在造林地的研究比较有限且多具有片面性,尚缺乏大尺度(国家或全球尺度)和高空间分辨率的研究。以往研究倾向于使用景观生态学方法和历史数据来确

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2023-02-24

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19090119)[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19090119]

作者简介: 徐进勇(1982-),男,甘肃庆阳人,博士,副研究员,主要从事土地利用变化及其生态环境影响研究。

E-mail: xujy@aircas.ac.cn

定适宜造林地的分布范围^[8, 12-14]。另外,有通过实地调查或遥感方法,基于气候、土壤和地形等森林生长条件的空间特征推断适宜造林的分布范围^[15-16]。由于地形、气候、土地利用构成和生态环境背景的区域差异性,这些方法应用到大范围或者其他国家与地区存在一定的局限性,并且多数研究没有顾及区域造林的土地来源和困难程度。在全国尺度上,Zhang等根据中国各地自然顶极植被的空间分布,预测了当前和未来气候条件下森林的生态位,该研究强调了气候对森林分布的控制作用,方法上具有推荐适宜造林树种的优势^[11]。然而,Zhang等研究中自然顶极植被的空间分布是基于早期1:100万比例尺植被图和8 km×8 km大小的网格气候数据得出的^[11],首先,由于植被图的时间较早且分辨率相对较粗,与区域土地利用/土地覆盖(Land Use/Land Cover, LUC)的实际状况相去甚远,不能客观反映潜在造林地的土地来源;其次,粗糙背景数据无法准确表达与地形有关的微气候特征;此外,基于不同尺寸网格计算的面积有所差异,通常粗网格带来的面积误差较大。因此,非常有必要基于高空间分辨率数据进一步获取全国范围内潜在造林地的详细空间分布。

林地是中国第二大土地利用类型。中国是世界上人工造林规模最大的国家之一,造林面积超过其他国家造林面积总和^[17-18]。基于中国科学院全国1:10万比例尺土地利用变化遥感持续监测数据显示^[19],2000—2008年期间全国林地面积恢复较快,但若想长期保持森林面积稳定依然存在压力^[20]。林地面积变化与城镇化等人类活动关系密切^[21-23],毁林不仅引起森林面积减少,集中连片的森林被分割为较小的独立斑块导致森林景观破碎化,严重降低森林质量和碳汇能力。根据2003—2008年第7次全国森林资源清查数据,中国森林破碎化情况较为普遍,有超过30.27%的森林连续分布面积不足10 hm²,化解森林破碎化、改善森林质量是中国在相当长时间内林业政策着力的重要方向^[24-25]。因此,阻止森林面积消亡,保护和恢复森林面积,改善森林质量,充分发掘森林碳汇潜力,对于实现“碳中和”发展目标和践行新时代生态文明理念具有重要支撑作用。

在全国范围内规划增加森林面积和化解森林破碎化,首先需要明确潜在造林地的空间分布详细情况。因此,本文的主要研究目的是:①通过确定潜在造林地的主要土地来源,综合分析生态—社会—环境等条件因素,估算潜在林地及其质量等级的空间分布,形成30 m分辨率潜在造林地空间分布产品;②通过计算和比较潜在造林地和现有林地的多年平均气候生产潜力,对于潜在造林地的固碳能力有前瞻性地了解。研究成果有望为全国造林规划提供科学数据支持,以期促进国家生态文明建设和实现“碳中和”发展目标。

2 数据与方法

2.1 数据

本文使用的地理空间数据主要包括LUC数据产品、地形数据、气候数据、交通数据、生态地理区划及行政区划数据等。

(1) LUC数据。使用公开发布的2020年全球30 m分辨率地表覆盖遥感分类成果GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com/>)和全球30 m地表覆盖精细分类成果GLC_FCS30 (<http://data.casearth.cn>)两种LUC产品^[26-28]。

(2) DEM数据。使用SRTM 30 m空间分辨率DEM数据。基于ArcGIS软件,计算坡度、坡向,并结合冬季风向数据提取中国西南地区干热河谷的背风坡空间分布信息。

(3) 气候数据。温度和降水数据使用国家青藏高原科学数据中心网站 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>) 提供的 1991—2020 年中国 1 km 分辨率逐月平均温度数据集和逐月降水量数据集^[29]。风向数据基于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 网站 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) 提供的 ERA5 陆地月度平均再分析数据集的 10 m 高度风场资料计算, 空间分辨率 0.1°。

(4) 生态区划数据。使用国家地球系统科学数据中心网站 (<http://www.geodata.cn>) 提供的中国生态地理分区矢量数据。

(5) 交通数据。使用 OpenStreetMap 星球网站 (<https://planet.openstreetmap.org/>) 提供的 2021 年 7 月份全球道路矢量空间分布数据。

2.2 方法

确定潜在造林地空间分布主要包含 3 个步骤 (图 1)。首先, 基于 GlobeLand30 和 GLC_FCS30 两种 LUC 产品, 以及地形坡度和高山林线, 确定潜在造林地的基础土地来源。其次, 运用加法原理, 依据宏观气候格局、地形与微气候, 以及气候变化综合评价区域的气候条件。再次, 运用最小因子定律, 基于地形坡度、交通和气候等地理时空数据, 多要素综合判定潜在造林地的造林困难程度, 以此作为潜在造林地的限制条件及质量等级划分依据。最后, 根据历史气象资料和 Miami 模型, 计算中国多年平均气候生产力, 通过分析潜在造林地质量等级的空间分布及其气候生产潜力, 支持全国范围内的植树造林规划。

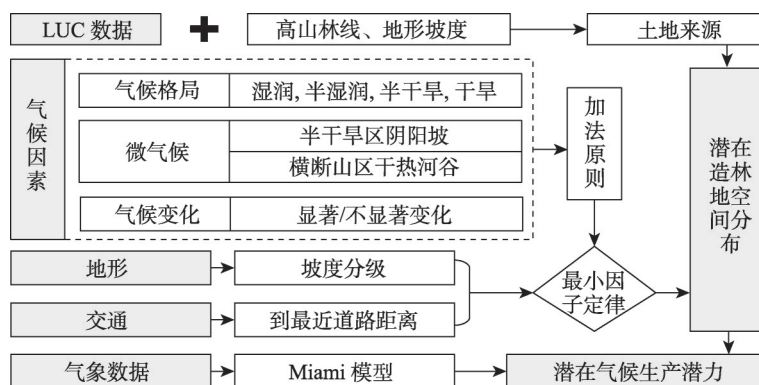
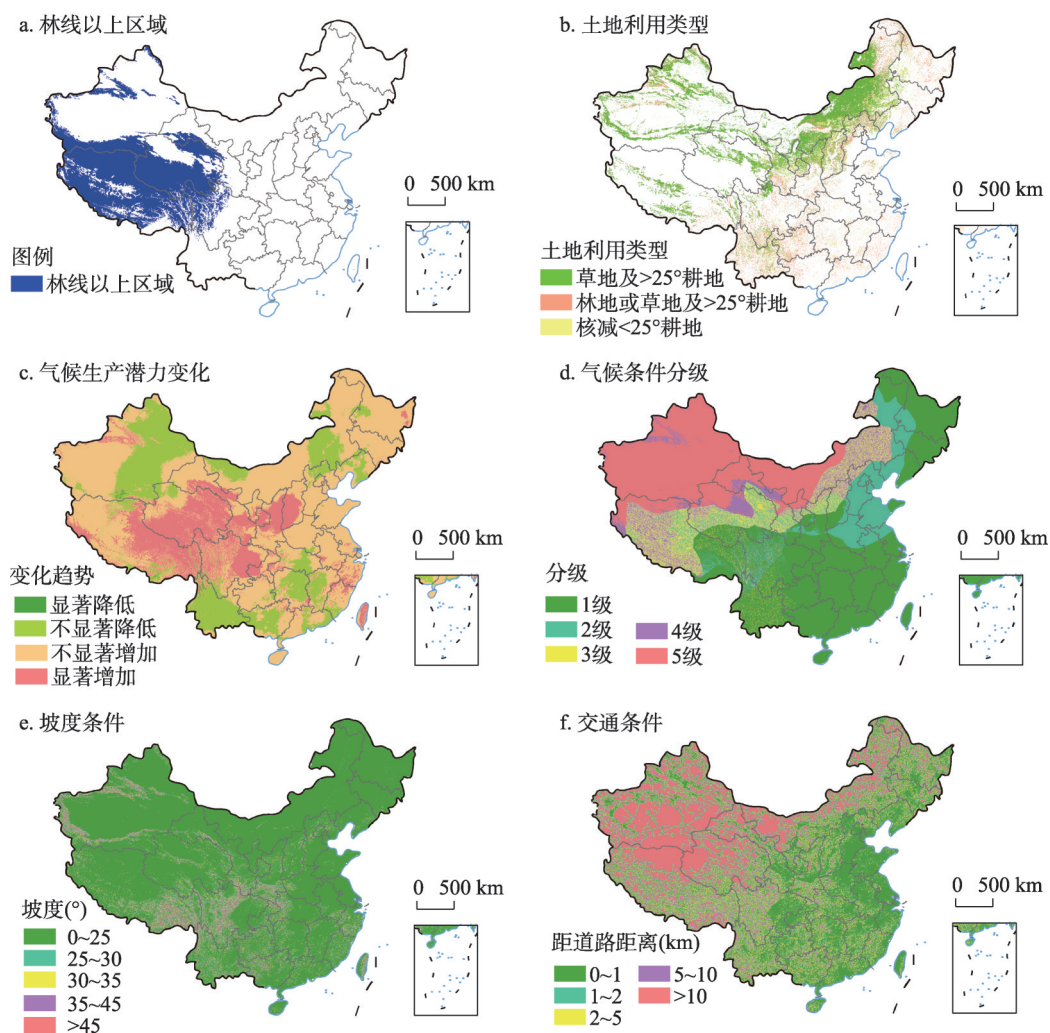


图 1 潜在造林地及其气候生产潜力空间分布估算技术流程

Fig. 1 Flowchart to identify the potential forestation land and its climatic potential productivity in China

2.2.1 潜在造林地的土地来源 一般来说, 林中空地、荒山以及不宜种植农作物的坡耕地比较适于植树造林, 而其他如矿山生态修复土地等数量比较稀少, 且不容易获取其在全国尺度上的空间分布。根据 GlobeLand30 和 GLC_FCS30 的 LUC 类型设置, 本文仅以草地和坡度大于 25° 耕地作为潜在造林地的基础土地来源。林线是山地垂直自然带谱中森林分布的上限海拔高度, 林线以上地区不能植树造林, 是潜在造林地空间分布的禁止条件 (图 2a)。因此, 本文首先结合林线分布数据和坡度数据, 分别从 GlobeLand30 和 GLC_FCS30 两种 LUC 产品中提取出林线以下草地与坡度大于 25° 的耕地。

鉴于两种 LUC 数据中同种地物类型的空间分布存在一定差异, 本文进一步对获取的草地和坡度大于 25° 耕地信息做了细分和处理: 一是如果在一种 LUC 产品中为草地或坡度大于 25° 耕地, 但在另一种 LUC 产品中被划为林地, 则认为这类土地为潜在重新



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1603号标准地图制作,底图边界无修改。

图2 中国潜在造林地土地来源及气候、地形和交通条件

Fig. 2 Land sources, climatic, topographical and traffic conditions for potential forestation land in China

(再)造林地的土地来源；如果在一种LUC产品中为草地，但在另一种LUC中为坡度小于25°耕地，为了同时兼顾粮食安全和最大程度保护耕地，将这类土地从潜在造林地中核减；最终，余下的草地或坡度大于25°耕地被视为潜在新造林地的土地来源（图2b）。

本文采用王襄平的方法，使用30年平均温度计算林线^[30]，生长季温度是限制林线高度的气候因子，年生物温度（Annual bio-temperature, ABT）等于3.5℃^[31]、温暖指数（Warmth Index, WI）等于14.2℃^[32]、生长季（月均温大于5℃的月）平均温度（Mean temperature for growing season, MTGS）等于8.2℃对于林线海拔均具有较好的指示^[30]。

$$ABT = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} t_i \quad (1)$$

$$WI = \sum_{j=1}^{12} (t_j - 5) \quad (2)$$

式中: t_i 为大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的月平均温度, 如果 $t_i > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则 $t_i = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; t_j 为大于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的月平均温度。本文将基于 ABT、WI 和 MTGS 指数计算的林线以上区域合并, 作为植树造林规划的禁止条件 (图 2a)。

2.2.2 潜在造林地的限制条件及质量等级划分 林线以下的潜在造林地被认为是潜在造林地的最大面积, 受区域地形和气候等条件影响, 将来植树造林工程中实际远不能达到该最大面积, 还需要进一步进行质量等级划分, 从而区分出比较适合造林的潜在优先造林地范围。

(1) 气候条件分级。气候条件干燥与湿润影响森林生长与植树造林成活率, 将植树造林的气候条件分为 5 级 (级数越低, 植树造林困难程度越低)。本文从 3 个方面对气候条件进行分级: 宏观气候格局、地形微气候和气候变化。

首先, 提取中国生态地理分区数据的干湿气候分区, 并依次将湿润区、半湿润区、干旱区的植树造林气候条件分别定为 1 级、2 级和 5 级。

其次, 考虑地形条件对水热条件的再分配。半干旱地区的山地阴坡和阳坡土壤水分蒸发存在一定的差异, 阴坡相对利于植被生长, 因此将半干旱区山地阴坡定为 3 级, 阳坡定为 4 级。中国西南横断山区干热河谷的焚风效应能引起局部地表严重干旱, 不利于植被的生长, 但该区域在宏观气候分布图上基本上被划分为湿润区与半湿润区, 显然低估了地形微气候对植树造林的影响。为此, 本文基于坡向数据和冬季风主风向提取了怒江、澜沧江、金沙江、元江、南北盘江和岷江等流域背风坡的空间分布, 然后在原先气候条件分级的基础上, 将干热河谷背风坡植树造林困难程度增加 2 个等级 (当等级大于 5 级时, 仍归为 5 级)。

从地形要素类别准确性、地形零碎性和运算效率等方面综合衡量, 研究认为 DEM 分辨率在 330 m 左右时地形要素提取效果较好, 并定义坡向与冬季主风向夹角大于 90° 的坡面为背风坡^[33]。本文使用 ArcGIS 软件的 Aggregation 功能将 SRTM 30 m 空间分辨率 DEM 数据按平均值聚合成 300 m 空间分辨率的 DEM 数据, 然后计算山谷线、山脊线和山坡等地形要素。基于 ERA5 月度风场资料分别计算 1991—2020 年冬季 1 月份的 U、V 风速矢量平均值, 采用反正切函数计算冬季风的多年平均风向^[34], 然后转换投影并重采样成 300 m 尺寸的栅格风向数据, 再通过叠加栅格坡向数据和山坡数据提取背风坡的空间分布。ECMWF 发布的第五代全球气候再分析资料数据集 ERA5 在国际上应用较广, 虽然 ERA5 0.1° 风场资料的空间分辨率相对 300 m 分辨率地形数据较粗, 但已是目前可获取的分辨率最高的风场资料, 能反映区域背景风场信息, 提取的背风坡空间分布比较有规律性, 不易出现零碎空间分布。

再次, 考虑气候变化对植被生长的影响。气候生产潜力是一种描述理想气象条件下植被最大生产力的指标^[35], 能综合反映气候变化对植被生长的影响。本文基于 Miami 模型计算植被的气候生产潜力, 并采用 Mann-Kendall 非参数统计法计算 1991—2020 年中国植被气候生产潜力的变化趋势 (图 2c)。在宏观气候条件分级和地形微气候条件分级加和的基础上, 进一步对于植被生产潜力显著增加的地区, 植树造林的困难程度降低 1 个等级, 反之对于植被生产潜力显著降低的地区, 植树造林的困难程度增加 1 个等级 (当等级小于 1 级时, 仍归为 1 级; 当等级大于 5 级时, 仍归为 5 级) (图 2d)。Miami 模型考虑了与陆地生物生长及其分布关系密切的因子——温度和有效水分, 由于这两种参数易于获得, 因此该模型实用性强, 应用较为普遍^[35-36]。Miami 气候生产潜力 Y_{\min} 是光温生产潜力 Y_t 和降水生产潜力 Y_p 的最小值, 其中 Y_t 、 Y_p 分别是年平均气温和年降水量的函数。

$$Y_t = 3000/[1 + \exp(1.315 - 0.119T)] \quad (3)$$

$$Y_p = 3000[1 - \exp(-0.000664P)] \quad (4)$$

$$Y_{\min} = \min(Y_t, Y_p) \quad (5)$$

式中: Y_{\min} 、 Y_t 、 Y_p 的单位是 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; T 为年均温 ($^{\circ}\text{C}$); P 为年降水量 (mm)。

Mann-Kendall 非参数统计法^[37-38], 用于研究时间序列样本的趋势变化, 其优点是不受异常值干扰, 也不需要遵从一定的分布, 计算比较方便^[39-40]。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad (8)$$

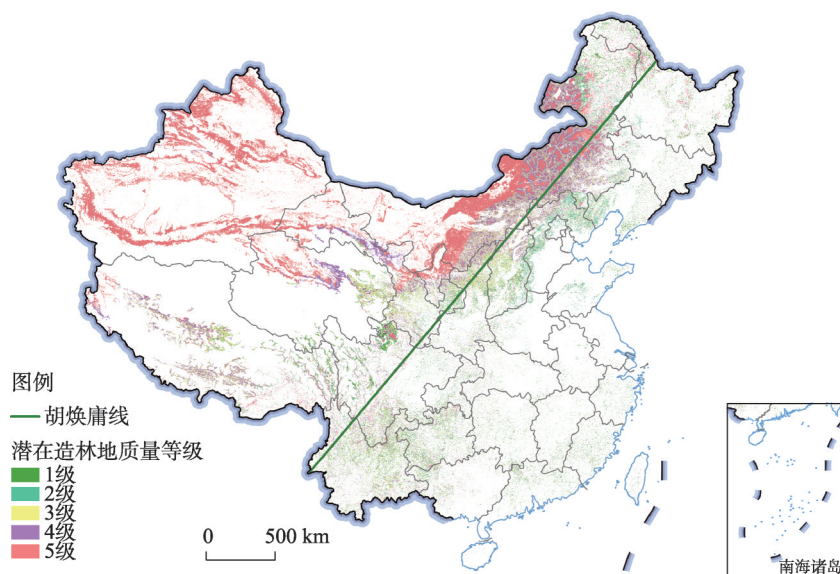
$$Z_s = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: n 为时间序列变量 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 的总数; $\text{Var}(S)$ 是累积量 S 的方差; Z_s 是统计量序列, Z_s 服从标准正态分布, 当 Z_s 为正值表示上升趋势, 为负值表示减少趋势, 当 $|Z_s| > 1.96$ 时, 表示通过了置信度为 95% 的显著性检验^[41]; t_i 是第 i 组相等数据点的数目。

(2) 地形坡度条件分级。经统计, 全国约 90% 的林地坡度位于 35° 及以下。整地是植树前的一项重要环节, 由于 25° 及以下为国家允许的耕地垦种坡度范围, 其地形条件必然适于植树造林, 而 45° 以上为险坡, 难以利用。因此, 本文依次将 $0 \sim 25^{\circ}$ 定为 1 级, $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 定为 2 级, $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 定为 3 级, $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 定为 4 级, 大于 45° 定为 5 级 (图 2e)。

(3) 交通条件分级。路径距离影响植树造林及后期养护成本。基于 DEM 数据和 OpenStreetMap 道路矢量数据, 使用 ArcGIS 的空间分析功能计算得到了全国范围内到最近道路的路径距离空间分布格网数据, 并使用分位数法将其分类为 5 个级别 (级数越低, 植树造林困难程度越低)。最新 OpenStreetMap 道路矢量数据已非常详细, 基本能够反映人迹到达情况。本文采用与分位数法获取的分类间隔最接近的整数作为分级依据, 依次将路径距离 $0 \sim 1 \text{ km}$ 定为 1 级, $1 \sim 2 \text{ km}$ 定为 2 级, $2 \sim 5 \text{ km}$ 定为 3 级, $5 \sim 10 \text{ km}$ 定为 4 级, 大于 10 km 定为 5 级 (图 2f)。

(4) 综合判定潜在造林地的质量等级。19 世纪德国农业化学家 Liebig 提出的“最小因子定律”与管理学中的“短板理论”具有一致性, 均强调关键限制因素对特定发展目标的限制性作用, 因此本文依据“最小因子定律”综合判定潜在造林地的质量等级。将气候条件分级、地形坡度条件分级和交通条件分级结果的空间分辨率统一到 30 m , 通过计算条件分级的最大值, 最终将全国潜在造林地的质量等级划分为 5 级, 级数越低, 说明植树造林困难程度越低, 潜在造林地的质量等级越高。将潜在造林地的质量等级反映为植树造林的适宜程度, 则 1 级为比较适宜, 2 级为适宜, 3 级为一般适宜, 4 级为不适宜, 5 级为极不适宜 (图 3)。1 级为气候、地形和交通条件均最好, 比较适宜植树造林, 2 级及以上等级受某种或多种条件不同程度限制, 本文将 1~3 级确定为优先造林地, 4~5 级确定为其他造林地。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1823号标准地图制作，底图边界无修改，后图同。

图3 2020年中国潜在造林地空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of potential forestation land in China

3 结果分析

3.1 中国潜在造林地的空间分布特征

中国质量等级相对较高的潜在造林地偏少，随着质量等级的降低，潜在造林地的面积越多（图3），质量1~5级的潜在造林地面积依次分别为9.75万km²、18.99万km²、37.86万km²、40.24万km²和62.56万km²，面积合计169.40万km²。质量等级为1~3级的优先造林地面积合计66.61万km²，质量等级为4~5级的其他造林地面积合计102.79万km²，分别占潜在造林地面积的39.32%和60.68%（表1）。经统计，在2020年的GlobeLand30和GLC_FCS30上同时为林地的林地面积184.06万km²，假使潜在优先造林地被全部开发用来造林，则森林面积在此基础上增加36.19%，全国森林覆盖率将增加6.94%。

全国优先造林地中，质量等级1~3级的面积占比分别为14.64%、28.51%和56.85%。质量等级为1级的潜在造林地主要分布于气候湿润区，在云南、四川和黑龙江等省份分布较多，面积均大于1万km²（表1），其次分布在贵州省、内蒙古自治区东部和西藏自治区东南部，面积均大于4500 km²。质量等级为2级的潜在造林地主要分布在半湿润气候区，在东北和华北地区主要包括内蒙古自治区东部、河北省和山西省的南部等地，以及辽宁省，在西南地区主要包括四川、云南、贵州等省，以及西藏自治区东南部等地，在西北地区主要包括甘肃、陕西、青海等省的南部，其中在内蒙古自治区和河北的面积大于2万km²，在四川、云南、山西、西藏和甘肃等省份的分布面积均大于1万km²。质量等级为3级的潜在造林地面积比质量等级1级和2级的面积明显增多，主要分布于中国的半干旱地区及一些地形条件相对复杂的地区，在北方主要集中于“胡焕庸线”的两侧，包括内蒙古自治区中部，以及河北、山西和陕西等省的北部，在南方主要分布于四川盆地周边及云贵高原，向西主要分布于甘肃省中部、青海省东部及西藏自治区南部，其中

表1 中国各省(市、自治区)不同等级潜在造林地面积(km²)

Tab. 1 The area of potential forestation land in different provincial-level regions of China (km²)

省份	1级	2级	3级	4级	5级	优先	其他
北京	0.23	2081.68	291.69	181.06	41.99	2373.59	223.05
天津	—	258.79	18.82	7.06	0.72	277.61	7.79
河北	46.63	21538.72	14419.90	10242.97	328.73	36005.24	10571.70
山西	4203.92	13644.12	22109.80	10526.59	201.04	39957.84	10727.63
内蒙古	6383.31	24676.13	120868.96	195065.19	199932.95	151928.40	394998.15
辽宁	3476.69	8892.72	4698.80	654.65	17.67	17068.21	672.32
吉林	2092.35	2686.79	2331.27	1286.76	177.21	7110.41	1463.97
黑龙江	10696.89	6315.08	10803.20	8674.19	3986.05	27815.16	12660.25
上海	39.41	0.27	0.06	0.08	0.00	39.74	0.09
江苏	223.34	124.59	24.96	6.18	0.58	372.90	6.76
浙江	1599.77	1487.91	1003.10	427.39	46.80	4090.78	474.19
安徽	750.97	527.58	484.93	138.84	11.38	1763.48	150.22
福建	3361.48	2345.19	2246.52	713.25	39.45	7953.19	752.70
江西	2595.94	1308.24	1333.73	318.83	18.74	5237.91	337.56
山东	653.24	3567.67	1004.31	212.95	15.55	5225.22	228.50
河南	492.98	2931.87	1417.18	588.45	73.16	4842.03	661.61
湖北	1175.95	1829.64	2246.61	1223.86	147.87	5252.20	1371.74
湖南	3646.29	2777.29	3136.00	1114.86	89.67	9559.58	1204.53
广东	4456.31	2431.32	2268.83	694.62	68.58	9156.46	763.20
广西	2491.86	3349.71	4605.21	2934.20	604.42	10446.77	3538.62
海南	154.12	46.11	32.10	5.32	0.65	232.33	5.96
重庆	1174.93	3207.95	2792.36	1485.71	287.44	7175.24	1773.15
四川	12104.53	18114.31	24190.63	20002.26	5502.91	54409.47	25505.17
贵州	8688.43	8716.74	11017.11	5732.88	1195.65	28422.28	6928.54
云南	13215.96	15133.43	28449.40	16037.41	3007.01	56798.79	19044.41
西藏	4703.87	11930.17	48330.93	51899.35	14915.92	64964.98	66815.27
陕西	2928.42	8967.15	22919.75	13118.49	594.96	34815.32	13713.45
甘肃	4009.45	11822.58	24927.90	30725.87	33822.87	40759.92	64548.74
青海	1712.53	8426.19	18126.10	22556.16	33054.76	28264.82	55610.92
宁夏	76.09	646.79	2416.61	2869.16	14871.24	3139.49	17740.40
新疆	—	—	—	2796.50	312454.77	—	315251.27
台湾	353.01	144.37	119.12	127.06	60.79	616.49	187.86
合计	97508.88	189931.09	378635.89	402368.16	625571.55	666075.86	1027939.70

注：广东包含香港和澳门数据。

内蒙古自治区质量等级为3级的潜在造林地面积比较突出，面积大于12万 km²，其次为西藏自治区，面积大于4.5万 km²，在云南、甘肃、四川、陕西和山西等省份面积均大于2万 km²，在青海、河北、贵州和黑龙江等省份均大于1万 km²。质量等级为4级和5级的其他造林地主要分布于西北气候干旱区以及西南的地形复杂地区，其中在内蒙古和新疆两个省份的分布面积占潜在其他造林地总面积的69.09%，受干旱气候环境影响，不建议开发利用^[42]。

总体上,潜在优先造林地在“胡焕庸线”附近分布比较集中。内蒙古自治区潜在优先造林地分布面积最多,占全国潜在优先造林地总面积的22.81%,西藏自治区、云南省和四川省潜在优先造林地面积也比较突出,分别占全国潜在优先造林地总面积的9.75%、8.53%和8.17%,这4个省份的潜在优先造林地面积占比合计49.26%。此外,甘肃、山西、河北、陕西、贵州、青海和黑龙江等省份的潜在优先造林地面积也相对较多,合计占全国潜在优先造林地面积的38.00%。统计和比较各区域潜在优先造林地面积的全国占比,发现华北地区(包括北京、天津、河北、山西和内蒙古)潜在优先造林地面积全国占比最高,比例为34.61%;其次为西南地区(包括重庆、四川、贵州、云南和西藏),比例为31.79%;再次为西北地区(包括陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆),比例为16.06%;东北(包括辽宁、吉林和黑龙江)、华东(包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东和台湾)、华南(包括广东、广西、海南、香港和澳门)、华中(包括河南、湖北和湖南)地区潜在优先造林地面积全国占比分别为7.81%、3.80%、2.98%和2.95%。华北地区潜在优先造林地面积全国最多,其中约2/3分布在内蒙古自治区。

在北方和西南地区的省份,虽然潜在优先造林地面积较多,但质量等级为3级的潜在造林地面积占比相对较高。位于华中、华南和华东地区的省份,虽然优先造林地面积相对较少,但质量等级为1级和2级的潜在造林地面积占比相对较高,且潜在优先造林地面积总和接近6.5万 km²,约占全国潜在优先造林地面积的1/10,因此,这部分适宜植树造林的土地资源尽管分省面积少,但总量不容忽视。

3.2 潜在新造林地和重新造林地的空间分布特征

潜在优先造林地是将来植树造林工程实施的主体,因此本文只分析潜在优先造林地中新造林地和重新造林地的空间分布特征。全国潜在新造林地面积39.67万 km²,潜在重新造林地面积26.94万 km²,分别占潜在优先造林地的59.56%和40.44%。潜在新造林地中,质量等级为1~3级的潜在造林地面积占比分别为8.74%、25.60%和65.66%,潜在重新造林地中质量等级为1~3级的潜在造林地面积占比分别为23.33%、32.80%和43.87%,因此,潜在重新造林地的平均质量等级相对较高。

潜在新造林地在中国北方主要分布于“胡焕庸线”的两侧,在中国南方主要分布于“胡焕庸线”的西侧,而潜在重新造林地主要分布于“胡焕庸线”的东侧(图4)。内蒙古自治区潜在新造林面积最多,为12.82万 km²,其次为西藏自治区,为5.46万 km²,再次为甘肃省,为3.03万 km²,四川、青海、山西、陕西、云南、河北等省份潜在新造林面积介于1.84万~2.90万 km²之间,其余各省份的分布面积均不足1万 km²。潜在重新造林地在云南省分布面积最多,为3.73万 km²,其次在四川省,为2.54万 km²,再次在贵州省、内蒙古自治区和黑龙江省,面积均大于2万 km²,河北、山西、甘肃、西藏等省份潜在重新造林地面积均大于1万 km²,其余各省份的分布面积均少于1万 km²。总体来看,华南、华中和华东地区潜在重新造林地面积占各自区域优先造林地面积的比例相对较高,分别为92.23%、82.96%和81.33%;其次为东北三省,潜在重新造林地面积占优先造林地面积的比例为63.34%;再次为西南地区,除西藏潜在重新造林地面积占比较低,为15.92%外,其他4个省份包括四川、重庆、云南和贵州的潜在重新造林地面积占比均非常高,是该区域潜在优先造林地面积的62.63%。华北地区和西北地区潜在重新造林地面积比重相对较低,其中华北地区除内蒙古外的潜在重新造林地面积占比为42.29%(内蒙古为15.60%);西北地区潜在重新造林地面积占优先造林地面积的比例最低,仅为20.60%。

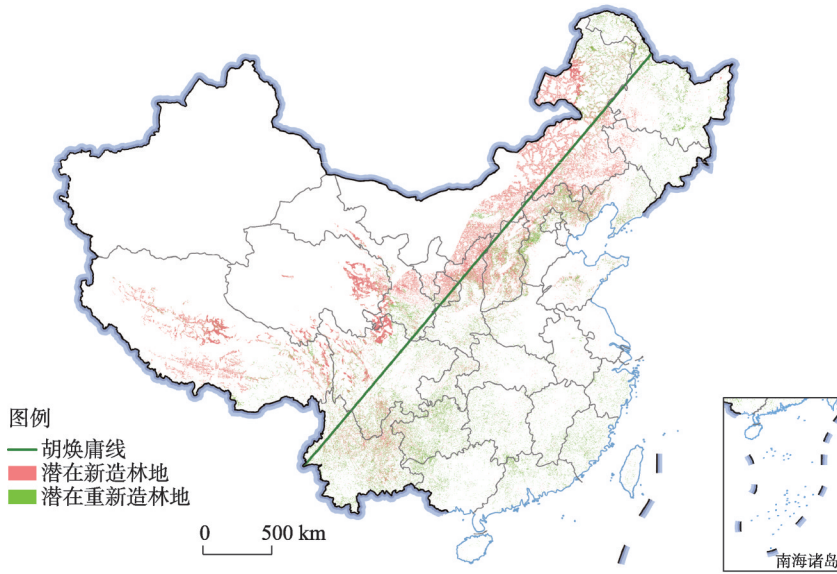


图4 中国潜在优先造林地中新造林地与重新造林地空间分布

Fig. 4 The suitable potential forestation land for afforestation and reforestation in China

3.3 潜在造林地的气候生产潜力

中国潜在造林地 Miami 多年平均气候生产潜力总和为 11.17 亿 t, 其中优先造林地为 6.30 亿 t, 其他造林地 4.87 亿 t。其他造林地面积约是优先造林地面积的 1.54 倍, 但气候生产潜力仅是优先造林地的 77.30%, 性价比较低 (图 5)。假使潜在优先造林地被完全用来造林, 则中国森林 (在 GlobeLand30 和 GLC_FCS30 上共同为林地的林地面积) Miami 多年平均气候生产潜力总值 25.20 亿 t 的基础上再增加 25.00%。潜在优先造林地中, 潜在新造林地的 Miami 多年平均气候生产潜力总值为 3.02 亿 t, 潜在重新造林地为 3.28 亿 t, 分别占潜在优先造林地气候生产潜力的 47.94% 和 52.06%。尽管潜在重新造林地面积少于潜在新造林地面积, 但其气候生产潜力总值却高于潜在新造林地。因此, 在将来的植树造林建设中, 不仅要规划布局新造林地, 同时要加强东部等气候条件较好地区的森林恢复建设。

内蒙古自治区潜在优先造林地的气候生产潜力总值最高, 占全国潜在优先造林地气候生产潜力的 13.86%; 其次为云南省, 占比为 12.86%; 再次为四川省, 比例为 9.38%。贵州省和西藏自治区优先造林地的气候生产潜力总值也相对较高, 占全国优先造林地气候生产潜力总值的比例分别为 7.16% 和 6.98%。以上 5 个省份优先造林地气候生产潜力占全国总量的一半以上, 且其中 4 个省份处于西南地区。此外, 山西、甘肃、陕西和河北等北方省份优先造林地气候生产潜力总值的占比也较高, 分别为 5.31%、5.08%、4.83% 和 4.52%, 合计 19.74%。

经统计, 南方地区水热条件相对较好地区的潜在优先造林地, 单位面积气候生产潜力相对较高, 并且其气候生产潜力总值与潜在优先造林地面积基本上成正比, 而水热资源相对较差的西部和北方地区, 虽然气候生产潜力总值较大, 但单位面积的气候生产潜力相对较低。华南、华东、华中潜在优先造林地面积虽少, 但平均每平方千米的气候生产潜力分别高达 1895.91 t、1713.74 t 和 1567.39 t; 其次为西南地区, 为 1341.77 t (除西藏外); 再次为华北、东北和西北地区, 分别为 815.65 t (除内蒙古外)、796.69 t 和

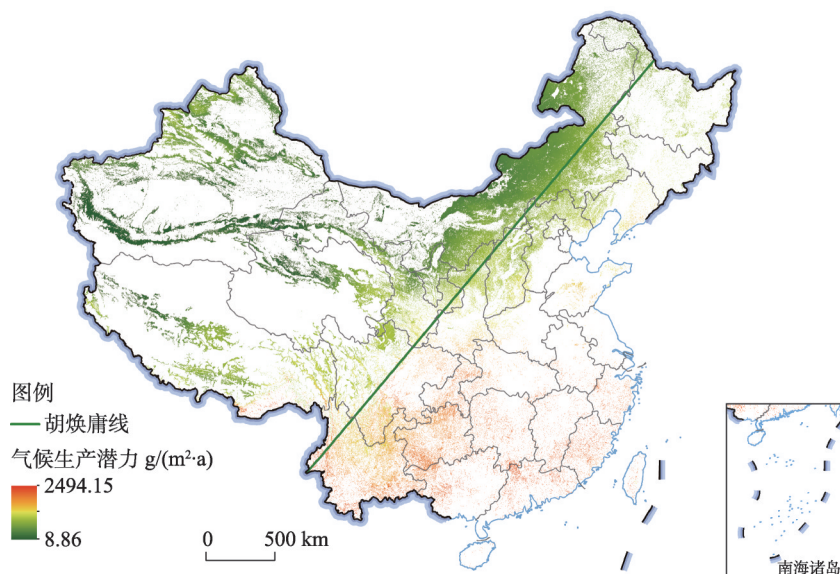


图5 中国潜在造林地 Miami 多年平均气候生产潜力空间分布

Fig. 5 Multiyear average Miami climatic potential productivity of the potential forestation land in China

785.98 t；西藏和内蒙古分别为676.78 t和574.21 t。从总量来看，西南地区潜在优先造林地的气候生产潜力全国占比最高，为38.27%；其次为华北地区，为24.04%，再次为西北地区，为13.36%；华东、东北、华南和华中地区潜在优先造林地的气候生产潜力全国占比依次分别为6.89%、6.58%、5.97%和4.89%。华北地区潜在优先造林地面积全国最多，虽然西南地区潜在优先造林地面积与华北接近，但其气候生产潜力是华北地区的1.59倍。如不计西藏，西南地区总计以22.04%的优先造林地面积提供31.29%的气候生产潜力增量，在全国碳汇造林中具有举足轻重的作用。

4 讨论

4.1 潜在造林地的土地来源与政策影响

LUC遥感分类精度直接影响潜在造林地的空间分布。由于遥感分类时所使用的卫星影像的季相不同，分类样本和分类方法有差异，因此不同LUC分类产品中部分同一位置的地物不可避免存在类型不一致的情况，然而这种数据不一致也可以被充分利用，数据交叉使用能进一步保证潜在造林地土地来源的可靠性。首先，国家实行永久基本农田保护制度，永久基本农田经依法划定后，除国务院批准外任何单位和个人不得擅自占用或者改变其用途，因此，虽然GLC_FCS30和GlobeLand30是目前分类精度相对较高并且已经公开使用的两种30 m分辨率LUC遥感自动分类产品，本文仍进一步从土地来源中排除了为坡度小于25°耕地的可能性。其次，林、草是遥感分类时比较容易混淆的两种LUC类型，对于在一种LUC产品中被划分为草地或坡度大于25°耕地，但在另一种LUC产品中被划分为林地的土地单元，实际中可能往往表现为森林生境受到干扰导致林木长势较差，且主要分布于林地的边缘地带，因此，本文将这类土地单元归为潜在重新造林地。从得出的潜在重新造林地分布范围来看，潜在重新造林地主要分布于“胡焕庸线”以东地区，由于东部地区人口稠密，城市化水平较高，林地受人类活动影响也较大，因

此潜在重新造林地空间分布具有很高的可信度。Zhang 等指出^[11], 中国潜在造林地主要沿“胡焕庸线”分布, 面积约 33 万 km², 与本文估算的潜在新造林地面积基本在同等数量级, 空间规律相似, 但 Zhang 等的研究没有考虑退耕还林, 也不能顾及当前已经是草地等土地类型但植被图上仍然是林地的土地面积。依本文估算结果, 中国潜在重新造林地面积占潜在优先造林面积的 4 成, 且其气候生产潜力更可观。因此, 综合来看, 顾及土地来源的潜在造林地估算方法更贴近实际情况。

自然资源部联合多部委发布的《关于进一步完善政策措施巩固退耕还林还草成果的通知》(自然资发〔2022〕191 号)指出, 1999 年以来, 中国先后实施两轮退耕还林还草工程, 综合效益显著, 同时也面临可退耕空间不足、成果巩固难度较大等问题, 根据当前形势, 为统筹耕地保护和生态安全, 暂缓安排新增退耕还林还草任务, 将工作重心转到巩固已有建设成果上来。依据本文方法估算的潜在优先造林地面积中, GlobeLand30 和 GLC_FCS30 共同为坡度大于 25°耕地的面积 1.08 万 km², GlobeLand30 或 GLC_FCS30 为坡度大于 25°耕地的面积 6.75 万 km², 即坡度大于 25°耕地占潜在优先造林地面积的 1.62%~10.14%。如进一步控制坡度大于 25°耕地的退耕, 则潜在优先造林地面积将调整为 59.86 万~66.61 万 km², 其中潜在新造林地面积 36.94 万~39.67 万 km², 潜在重新造林地面积 22.92 万~26.94 万 km²。经统计, GlobeLand30 和 GLC_FCS30 的 2020 年耕地面积均高于《第三次全国国土调查主要数据公报》的耕地面积, 因此, 依本文方法核算的潜在造林地分布对耕地保有量影响非常有限。同时也说明, 在空间布局与规划分析中, LUC 数据交叉使用得到的结果相比基于单一来源 LUC 数据更加可靠。

4.2 造林定义的局限性

《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)将 Afforestation 定义为“通过人工植树、播种或人工促进天然下种方式, 使至少在过去 50 年不曾有森林的土地转化为有林地的直接人为活动”^[43-44]。但过去 50 年或更长时期的详细森林空间分布通常不可获取, 本文仅根据 2020 年数据分析潜在造林地的土地来源, 得出的潜在新造林地不可避免包含历史上存在过林地但后来转化为草地或耕地的土地面积, 与 UNFCCC 的造林定义有一定差别, 但 20 世纪 80 年代末至 2015 年全国森林覆盖率基本稳定^[20], 并且中国已经实施了长期和大规模的植树造林工程, 因此, 这部分原本应为潜在重新造林地的土地面积必然极少, 而且不影响潜在造林地的面积总量。

4.3 潜在造林地的限制因素

不当的植被恢复导致水资源减少^[42], 并且存在树木生长滞缓及存活率低等造林失败案例^[45]。本文从多个层次考虑气候对于造林的影响, 首先高山林线代表了热量条件对森林分布的制约, 气候格局、半干旱地区的阳坡和横断山区的干热河谷等与地形微气候的叠加分析则重点考虑了区域水资源的制约。总体而言, 对于不建议在干旱地区造林和在半干旱地区条件允许情况下的造林, 本文给出的解决方案与周国逸的观点基本保持一致^[42]。

地形坡度过陡显然不利于植树造林工作的实施。关于地形坡度的影响, 当前还没有推荐的关于造林的地形坡度划分标准。本文调查了全国森林随坡度分布情况, 发现约 70.60% 的森林分布在坡度 26°以下, 80.09% 在坡度 30°以下, 89.06% 坡度在 35°以下 (图 6), 因此, 将适合造林的地形坡度最大值设为 35°。坡度等于或低于 25°的地形是国家允许耕作的坡度, 既然适于耕种, 当然多数情况下也适于造林, 因此本文将坡度 0°~25°设为比较适宜级别。

飞播造林技术适宜于偏远地区撒播树种或者草种, 一定程度上能克服交通条件制约, 但仍然需要人工辅助措施保证造林的成效。飞播前开展有效的简易整地工作, 能够

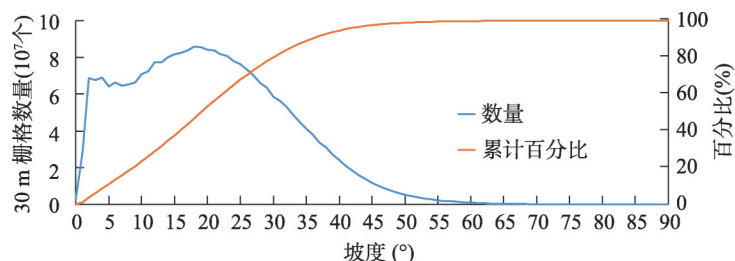


图6 2020年中国森林随坡度分布

Fig. 6 Histogram of forest slope distribution in China

有效提高土壤的保水能力，增加种子与土壤接触的机会，对提高飞播造林的出苗率以及成活率有重要作用^[46]；飞播后需要经营和管理，偏远地区飞播造林的后期管理与维护缺失是飞播造林成苗难、保存难和成林难的重要原因^[47]。因此，距离和人力条件仍是制约植树造林实施和管理的限制条件，本文依据到最近道路的路径距离远近对交通条件设置了相应质量等级。

本文未考虑土壤因素对造林的影响。一方面，主要是因为气候控制着森林的分布^[11]；另一方面，本研究中潜在造林地的土地来源为草地和坡度大于25°的耕地，植被覆盖的存在可以部分保证一定的土壤深度，而且土壤质地和化学性质可以通过树种和生物技术适应。因此，未将土壤列为成潜在造林地空间分布估算的影响因素具有可行性。

4.4 气候变化对潜在造林地空间分布的影响

气候变化既可能构成植被生长的有利条件，也可能构成不利条件。Miami气候生产潜力涵盖了气温和降水两个气候因素，其变化能综合说明气候变化对植被生长的影响。1991—2020年Miami气候生产潜力变化显示气候变化对全国植被生长构成整体利好，Miami气候生产潜力显著增加区域占陆地国土面积的20.33%，不显著增加区域占比为56.76%，不显著减弱区域占比为22.73%，而显著减弱区域占比仅0.18%。Miami气候生产潜力显著增加的地区除青藏高原及周边等受林线控制的区域外，山西省中部及南部大部、陕西省陕北地区大部、甘肃省东部及南部、青海省中部、四川省东部及西藏南部等区域的气候生产潜力显著增加，在空间上连片集中分布，且在“胡焕庸线”以东地区面积也相当可观，Miami多年平均气候生产潜力相对较高（图2c、2d）。因此，上述区域是气候变化对于植被生长的重点利好区域。进一步对比潜在造林地估算方法中考虑气候变化与不考虑气候变化的两个方案，统计得出气候生产潜力显著增加能多出4.96万km²的潜在优先造林地面积，为区域植树造林和生态恢复建设带来了重要机遇。

4.5 潜在造林地的固碳能力

相关研究指出，在森林成长初期，森林的固碳能力随着林龄的增加而快速增强，到一定阶段之后便会减弱^[48]，通过大量样本对比研究表明，植树造林对土壤有机碳的影响取决于本底土壤的含碳量，如果土壤本底有机碳丰富，特别是土壤厚度比较深的区域，造林会降低土壤有机碳储量，而在土壤本底有机碳较为贫瘠的区域，造林会促进土壤有机碳的积累^[49]。鉴于潜在造林地在未来付诸造林措施的时间上必然有先后，造成林龄不统一，区域林木种类也存在空间差异，想要获取全国尺度上潜在造林地的固碳能力，实际上可能只有在将来全国范围详细的造林时间和空间规划基础上才能实现^[50-51]。本文基于Miami模型计算的多年平均气候生产潜力，与实际森林碳汇有较大差距，但对于全国范围内潜在造林地的固碳能力及其空间分布具有重要的前瞻性。

碳中和可理解为发电端、能源消费端和固碳端的“三端共同发力”体系,因其他碳固存技术需要额外消耗能源及充足技术储备,因此,固碳端的工作首先聚焦于生态建设^[1],而森林是陆地生态系统碳汇的最主要贡献者^[52-53]。在高空间分辨率潜在造林地分布数据的基础上,进一步发挥多学科交叉和空间大数据优势,因地制宜规划碳汇造林的林木种类,模拟潜在造林地的生物量变化,设计适宜的造林技术和选择合适的时机,分析碳汇造林的投入产出等,形成国家尺度的植树造林详细空间规划,将对国家的“碳中和”战略具有重大促进作用。

5 结论

本文基于2020年GLC_FCS30和GlobeLand30两种30 m高空间分辨率LUC遥感分类数据,并结合地形与微气候、交通、林线、生态地理分区,以及Miami气候生产潜力变化等时空数据,以草地和坡度大于25°耕地为主要土地来源,使用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,形成了30m高空间分辨率中国潜在造林地空间分布数据,并分析了中国潜在造林地的空间分布特征,厘清了潜在优先造林地中新造林地和重新造林地的空间分布范围及其气候生产潜力贡献。主要结论如下:

(1) 中国潜在造林地面积为169.40万km²,其中潜在优先造林地面积为66.61万km²,潜在优先造林地是将来植树造林工程实施的主体。1991—2020年Miami气候生产潜力变化显示气候变化对全国植被生长构成整体利好,尤其是山西、陕西、甘肃、四川、青海、西藏等省份大部分地区的Miami气候生产潜力显著增加,为区域潜在优先造林地的植树造林和生态恢复建设带来了重要机遇。

(2) 全国潜在优先造林地中,潜在新造林地面积39.67万km²,潜在重新造林地面积26.94万km²,分别占潜在优先造林地的59.56%和40.44%,其中潜在新造林地在中国北方主要分布于“胡焕庸线”的两侧,在中国南方主要分布于“胡焕庸线”的西侧,而潜在重新造林地主要分布于“胡焕庸线”的东侧。

(3) 中国潜在优先造林地的Miami多年平均气候生产潜力总值为6.30亿t,潜在新造林地和潜在重新造林地的气候生产潜力分别是潜在优先造林地的47.94%和52.06%。鉴于潜在优先造林地中重新造林地面积虽然少于新造林地面积,但气候生产潜力总值却高于新造林地,因此,在将来的植树造林建设中,不仅要规划布局新造林地,同时要加强对东部等气候条件较好地区的森林恢复建设。

(4) 假使潜在优先造林地被全部开发用来造林,则中国森林面积在2020年数据(在GlobeLand30和GLC_FCS30上同时为林地的林地面积)的基础上增加36.19%,全国森林覆盖率将增加6.94%,全国森林气候生产潜力增加25.00%。华北地区潜在优先造林地面积全国最多,且将近2/3分布在内蒙古自治区,西南地区潜在优先造林地面积与华北接近,但其气候生产潜力全国占比最高,并且是华北地区的1.59倍。

关联数据信息: 本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版,获取地址:<https://doi.org/10.3974/geodb.2023.03.02.V1>。

参考文献 (References)

- [1] Ding Zhongli, Zhang Tao. Carbon Neutrality. Beijing: Science Press, 2022. [丁仲礼, 张涛. 碳中和: 逻辑体系与技术需求. 北京: 科学出版社, 2022.]
- [2] Zhu Meiyu, Long Fei, Qi Huibo, et al. Spatial measurement and classification of forest carbon sink demand based on industry emission reduction. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(2): 377-386. [朱梅钰, 龙飞, 祁慧博, 等. 基

- 于行业减排的森林碳汇需求空间测度与分类. 浙江农林大学学报, 2021, 38(2): 377-386.]
- [3] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559 (7713): 193-204.
- [4] Baumgartner R J. Sustainable development goals and the forest sector: A complex relationship. *Forests*, 2019, 10(2): 152. DOI: 10.3390/f10020152.
- [5] Zhang J, Fu B, Stafford-Smith M, et al. Improve forest restoration initiatives to meet Sustainable Development Goal 15. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(1): 10-13.
- [6] Nave L E, Domke G M, Hofmeister K L, et al. Reforestation can sequester two petagrams of carbon in US topsoils in a century. *PNAS*, 2018, 115(11): 2776-2781.
- [7] Domke G M, Oswalt S N, Walters B F, et al. Tree planting has the potential to increase carbon sequestration capacity of forests in the United States. *PNAS*, 2020, 117(40): 24649-24651.
- [8] Tong Sichun, Li Weizheng, Yan Taotao, et al. Identification of the land suitable for afforestation in karst area based on the evaluation of ecosystem service importance. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 159-165. [佟思纯, 李卫正, 严陶韬, 等. 基于生态系统服务功能重要性评价的喀斯特宜林地识别. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 159-165.]
- [9] Wang Songwei, Guo Zhongsheng. Research progress of carbon sink forests in the context of global change. *Forest Science and Technology*, 2020(9): 8-11. [王松伟, 郭忠升. 全球变化背景下碳汇林研究进展. 林业科技通讯, 2020(9): 8-11.]
- [10] Tian Huiling, Zhu Jianhua, Li Chenyu, et al. Nature-based solution: Potential and economic benefits of carbon removal or carbon emission reduction through forestry approaches. *Climate Change Research*, 2021, 17(2): 195-203. [田惠玲, 朱建华, 李宸宇, 等. 基于自然的解决方案: 林业增汇减排路径、潜力与经济性评价. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 195-203.]
- [11] Zhang L, Sun P, Huettmann F, et al. Where should China practice forestry in a warming world? *Global Change Biology*, 2022, 28(7): 2461-2475.
- [12] Ferraz S F B, Vettorazzi C A. Identification of suitable areas for forest recovery based on principles of landscape ecology. *Revista Árvore*, 2003, 27(4): 575-583.
- [13] Schulz J J, Schröder B. Identifying suitable multifunctional restoration areas for forest landscape restoration in Central Chile. *Ecosphere*, 2017, 8(1): e01644. DOI: 10.1002/ecs2.1644.
- [14] Hu T Y, Li X C, Gong P, et al. Evaluating the effect of plain afforestation project and future spatial suitability in Beijing. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(10): 1587-1598.
- [15] Chang Cun. Distribution characteristics of soil conservation forest in northern Shaanxi loess area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. [常存. 陕北黄土区水土保持林宜林地空间分布特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.]
- [16] Gao Haidong, Pang Guowei, Li Zhanbin, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5): 863-874. [高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874.]
- [17] Ahrends A, Hollingsworth P M, Beckschäfer P, et al. China's fight to halt tree cover loss. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, 284(1854): 20162559. DOI: 10.1098/rspb.2016.2559.
- [18] Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [19] Zhang Z X, Wang X, Zhao X L, et al. A 2010 update of National Land Use/Cover Database of China at 1:100000 scale using medium spatial resolution satellite images. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 142-154.
- [20] Gu Xingfa, Li Minrong, Xu Donghua, et al. Green Book of Remote Sensing Monitoring: Report on Remote Sensing Monitoring of China Sustainability Development (2019). Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2020. [顾行发, 李闽榕, 徐东华, 等. 遥感监测绿皮书: 中国可持续发展遥感监测报告(2019). 北京: 社会科学文献出版社, 2020.]
- [21] Hall B, Motzkin G, Foster D R, et al. Three hundred years of forest and land-use change in Massachusetts, USA. *Journal of Biogeography*, 2002, 29(10/11): 1319-1335.
- [22] Nepstad D C, Stickler C M, Filho B S, et al. Interactions among Amazon land use, forests and climate: Prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363 (1498): 1737-1746.
- [23] Li Lingchao, Deng Dandan, Zhang Dingwen, et al. Analysis on socio-economic determinants of forest fragmentation in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Forestry Economics*, 2021, 43(4): 5-16. [李凌超, 邓丹丹, 张鼎文, 等. 京津冀森林破碎化的社会经济影响因素分析. 林业经济, 2021, 43(4): 5-16.]
- [24] Li Yao, Xiao Xiangming, Li Xiangping, et al. Multi-scale assessments of forest fragmentation in China. *Biodiversity*

- Science, 2017, 25(4): 372-381. [李瑶, 肖向明, 李香萍, 等. 中国森林破碎化多尺度评价. 生物多样性, 2017, 25(4): 372-381.]
- [25] Long Hexing, Shi Weiping, Liu Jinlong. Research review and outlook of forest fragmentation and its solutions in China. *World Forestry Research*, 2018, 31(1): 69-74. [龙贺兴, 时卫平, 刘金龙. 中国森林破碎化及其化解研究综述及展望. 世界林业研究, 2018, 31(1): 69-74.]
- [26] Chen J, Ban Y F, Li S. China: Open access to earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434.
- [27] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, et al. 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.
- [28] Zhang X, Liu L, Wu C, et al. Development of a global 30 m impervious surface map using multisource and multitemporal remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1625-1648.
- [29] 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(4): 1931-1946.
- [30] Wang Xiangping, Zhang Ling, Fang Jingyun. Geographical differences in alpine timberline and its climatic interpretation in China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 871-879. [王襄平, 张玲, 方精云. 中国高山林线的分布高度与气候的关系. 地理学报, 2004, 59(6): 871-879.]
- [31] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 1947, 105: 367-368.
- [32] Kira T. A New Classification of Climate in Eastern Asia as the Basis for Agricultural Geography. Kyoto: Horticultural Institute of Kyoto University, 1945.
- [33] Guo Xinchun, Wu Guoqiang. A GIS-based method for identifying and extracting micro-topography factors. *Electric Power Survey & Design*, 2019(Suppl.1): 207-209, 217. [郭新春, 吴国强. 基于GIS的微地形因子识别与提取. 电力勘测设计, 2019(Suppl.1): 207-209, 217.]
- [34] Qiu Chuantao, Li Dinghua. The calculation algorithms for average wind direction and their comparison. *Plateau Meteorology*, 1997, 16(1): 94-98. [邱传涛, 李丁华. 平均风向的计算方法及其比较. 高原气象, 1997, 16(1): 94-98.]
- [35] Li Zhenjie, Duan Changchun, Jin Lili, et al. Spatial and temporal variability of climatic potential productivity in Yunnan province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2181-2190. [李振杰, 段长春, 金莉莉, 等. 云南省气候生产潜力的时空变化. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2181-2190.]
- [36] Zhou Guangsheng, Zheng Yuanrun, Chen Siqing, et al. NPP model of natural vegetation and its application in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(5): 4-13. [周广胜, 郑元润, 陈四清, 等. 自然植被净第一性生产力模型及其应用. 林业科学, 1998, 34(5): 4-13.]
- [37] Mann H B. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [38] Kendall M G. Rank Correlation Methods. 4th ed. London: Charles Griffin, 1975.
- [39] Esterby S R. Review of methods for the detection and estimation of trends with emphasis on water quality applications. *Hydrological Processes*, 1996, 10: 127-149.
- [40] Guo Xiaoqin, Liu Mingchun, Qian Li, et al. Evolution regularity of precipitation in the Shiyang River Basin on Mann-Kendall features. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 593-599. [郭小芹, 刘明春, 钱莉, 等. 从Mann-Kendall特征看石羊河流域降水量的演变规律. 干旱区地理, 2010, 33(4): 593-599.]
- [41] Shadmani M, Marofi S, Roknian M. Trend analysis in reference evapotranspiration using Mann-Kendall and spearman's rho tests in arid regions of Iran. *Water Resources Management*, 2012, 26(1): 211-224.
- [42] Zhou Guoyi, Xia Jun, Zhou Ping, et al. Improper vegetation restoration leads to reduction of water resources. *Scientia Sinica: Terrae*, 2021, 51(2): 175-182. [周国逸, 夏军, 周平, 等. 不恰当的植被恢复导致水资源减少. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(2): 175-182.]
- [43] UNFCCC. The Marrakesh Accords and the Marrakesh Declaration. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change Secretariat, 2001.
- [44] Zhang Xiaoquan, Hou Zhenhong. Definitions of afforestation, reforestation, and deforestation in relations to carbon accounting. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(2): 145-152. [张小全, 侯振宏. 森林、造林、再造林和毁林的定义与碳计量问题. 林业科学, 2003, 39(2): 145-152.]
- [45] Wang F, Pan X B, Gerlein - Safdi C, et al. Vegetation restoration in northern China: A contrasted picture. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 669-676.
- [46] Liu Shaoqian, Zhang Cuijuan, Suo Xiaorong. The effect of ground treatment on the effectiveness of fly-seeded afforestation. *Rural Economy and Science-Technology*, 2020, 31(2): 39-40. [刘少倩, 张翠娟, 索小荣. 浅谈地面处理对飞播造林成效的影响. 农村经济与科技, 2020, 31(2): 39-40.]
- [47] Tian Jianhua, Shi Rui, Wang Rui. Influence factors of afforestation by aerial seeding and improving measures in Shaanxi

- province. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(19): 171-172. [田建华, 师蕊, 王锐. 陕西省飞播造林影响因素及提高措施. *现代农业科技*, 2015(19): 171-172.]
- [48] Zhou T, Shi P J, Jia G S, et al. Age-dependent forest carbon sink: Estimation via inverse modeling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(12): 2473-2492.
- [49] Hong S B, Yin G D, Piao S L, et al. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 694-700.
- [50] Ma Xuewei, Xiong Kangning, Zhang Yu, et al. Research progresses and prospects of carbon storage in forest ecosystems. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(5): 62-72. [马学威, 熊康宁, 张俞, 等. 森林生态系统碳储量研究进展与展望. *西北林学院学报*, 2019, 34(5): 62-72.]
- [51] Feng Yuan, Xiao Wenfa, Zhu Jianhua, et al. Impacts of afforestation on the carbon stocks and carbon sequestration rates of regional forest ecosystems. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(3): 281-290. [冯源, 肖文发, 朱建华, 等. 造林对区域森林生态系统碳储量和固碳速率的影响. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(3): 281-290.]
- [52] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [53] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *PNAS*, 2018, 115(16): 4015-4020.

Estimation of the spatial distribution of potential forestation land and its climatic potential productivity in China

XU Jinyong

(Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on 30 m resolution remote-sensing classified land use/land cover data from GLC_FCS30 and GlobeLand30 in 2020, and combined with spatiotemporal data, such as topography and microclimate, transportation, alpine timberline, ecogeographical zoning, as well as changes in Miami climatic potential productivity, this study has obtained the spatial distribution and quality of China's potential forestation land with a resolution of 30 m by selecting the grassland and cultivated land with a slope greater than 25° as the potential land source and applying Liebig's "Law of the Minimum". The results show that China lacks potential forestation land of high quality; as the quality level decreases, its area increases. Among potential forestation land, the area of prioritized potential forestation land is 0.66 million km², of which the total multiyear average Miami climatic potential productivity is 630 million tons. If all the prioritized potential forestation land is developed for forest plantations, the national forest coverage rate would increase by 6.94%, and the corresponding climatic potential productivity would increase by 25.00%. The area of prioritized potential forestation land in North China is the highest and two-thirds of this area is observed in Inner Mongolia, while the climatic potential productivity in Southwest China is the highest, 1.59 times that in North China. Among the prioritized potential forestation land, the areas for afforestation and reforestation accounted for 59.56% and 40.44%, respectively, but the climatic potential productivity accounted for 47.94% and 52.06%, respectively. Therefore, in future forestry, we must not only actively deploy afforestation land but also strengthen forest restoration in areas with better climatic conditions. The spatial distribution of potential forestation land with a resolution of 30 m obtained in this study can provide an important reference for the nationwide forest planting plan for carbon sequestration.

Keywords: China; potential forestation land; Miami model; Law of the Minimum