

DOI: 10.5846/stxb202003290731

黄麟.造林气候调节效应及其影响机理研究进展.生态学报, 2021, 41(2):469-478.

Huang L. A review on the climatic regulation effects of afforestation and its impact mechanisms. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2):469-478.

造林气候调节效应及其影响机理研究进展

黄 麟

中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

摘要:造林及人工林生长吸收并固定二氧化碳(CO₂), 其“幼龄效应”使得全球中、高纬度新造林的 CO₂ 吸收超过天然林, 被认为是减缓全球变暖、控制升温 2℃ 目标的一个关键战略, 亦是生态保护修复和林业可持续发展并举的一个重要措施。我国人工林保有面积居全球首位, 占林地面积的 36%, 近几十年造林为全球变绿的贡献超过 10%。造林改变地表生物地球化学和生物物理过程从而影响温度、降水、成云、风等, 在不同气候带、不同区域呈现差异性气候调节效应, 取决于温室气体、辐射能量、水汽收支之间的平衡结果。分析了国际、国内在应对气候变化活动中对于造林的迫切需求, 综述了造林气候调节效应的研究进展, 以及产生这种效应的生物地球化学和生物物理机理, 总结了当前研究中亟待深入探索的内容, 并展望了未来造林仍需深入开展系统地生物地球化学和生物物理机理研究, 推动可持续地人工林管理、恢复具有完整结构的森林、促进多重生态系统服务的协同。
关键词:造林; 气候调节; 生物地球化学过程; 生物物理过程

A review on the climatic regulation effects of afforestation and its impact mechanisms

HUANG Lin

Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Afforestation and the growth of planted forest are considered as a key strategy to mitigate global warming and to keep global warming below 2 °C, as well as an important measurement for ecological restoration and forestry sustainable development, by increasing vegetation coverage and biomass, absorbing and sequestering carbon dioxide. The “young stand-age effect” of CO₂ absorption by plantation has contributed to global CO₂ absorption by afforestation in the middle and high latitudes exceed that of natural forest. The preservation area of plantation in China ranks the first in the world, accounting for 36% of the national forest land area. In recent decades, China's afforestation has contributed more than 10% to global greening. Afforestation impacts the temperature, precipitation, cloud formation, and wind force, etc. by changing the land surface biogeochemical and biophysical processes. And the impacts were observed variations across different climate zones and different regions, which depends on the balance between the greenhouse gas budget, radiation energy budget and water vapor budget. In this paper, the urgent needs of afforestation activities at home and abroad under the background of climate change, the research progress of climate regulation effect of afforestation and its biogeochemical and biophysical mechanisms are reviewed. Afforestation affects the microclimate in the forest such as light, temperature, humidity and precipitation. It then affects ecological processes such as photosynthetic respiration, vegetation growth, water transpiration and radiation energy balance, thus influences the regional climate system. In addition to affecting the exchange of CO₂, water and energy balance, afforestation also releases Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs), which affects the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977417, 41371019); 国家重点研发计划课题(2017YFC0506503)

收稿日期: 2020-03-29; 网络出版日期: 2020-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanglin@igsrr.ac.cn

short-term climate forcing factors such as aerosols, O_3 and CH_4 . Because the physiological, phenological and structural changes of vegetation affect the biophysical processes such as energy, water vapor and momentum exchange between the land surface and the atmosphere, which may enhance, weaken or even offset its carbon sink benefits, plus the additional effects generated by atmospheric chemistry and aerosols, afforestation may also intensify climate change taking into account carbon regulation and biophysical effects. Although the increasing area, the volume per unit area of plantation in China is only 36% of that of natural forest, with poor quality, unreasonable structure, low productivity and weak ecological function. The contents that need to be further explored in the current research were summarized. The future needs of afforestation research should focus on systematic and in-depth study of biogeochemical and biophysical mechanisms, promote sustainable forest management, restore forests with intact structure, and change to the tradeoff of multiple ecological regulation services.

Key Words: afforestation; climate regulation; biogeochemical process; biophysical process

近 40 年,全球 60%的土地覆盖变化直接源于人类活动,农业开垦、城镇化导致森林破坏,而造林再造林使得森林面积净增加约 7%^[1]。这些人类活动改变土地覆盖状况,改变二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、一氧化二氮(N_2O)、含氟化合物等长生命周期温室气体,硫酸盐、硝酸盐、聚甲醛(POM)、黑炭、臭氧(O_3)等短生命周期大气组分及其他空气污染物的浓度,改变生物地球化学循环和生物物理过程,从而影响全球气候变化^[2]。树木从生长到死亡,持续与大气、土壤交换碳、氮、水分、光以及可以与气候产生相互作用的各种化学物质^[3]。树木通过光合作用吸收 CO_2 ,通过呼吸和分解作用释放碳,吸收多则为汇、释放多则为源。近几十年来,造林成为地球变绿的主要因素之一,全球近 20 年新增绿化面积中,约 25%源自中国的植被增加量,其中造林贡献占植被增加量的 42%^[4]。截至 2018 年,中国人工林保有面积达 0.69 亿 hm^2 ,居全球首位,占全国林地面积的 36%,人工林成为净碳汇^[5]。

1 造林应对气候变化的迫切需求

温室气体“减源增汇”是缓解气候变化最直接的手段^[6],气候变暖使得树木生长速度加快,通过增强碳汇功能,减轻温室效应,具有深远的政治、生态和经济影响^[7]。全球森林是一个巨大的碳汇^[8],可减少三分之一 CO_2 排放量,即 2℃甚至更高目标所需的减排力度^[9]。全球中、高纬度新造林吸收的 CO_2 超过了天然林,除了 CO_2 增加引起的“肥料效应”外,“幼龄效应”贡献了约 25%^[10-11]。因此,保留、恢复、新增和管理森林被认为是减缓全球变暖、控制升温目标最有效、最安全、最具成本效益的一个解决方法^[9,12-16],是联合国生态系统恢复十年计划(2021—2030 年)中应对气候危机、供水和粮食安全以及生物多样性保护的有效措施^[17]。

据最新估计,全球造林潜力巨大,可以支持 9 亿 hm^2 新造林并固定 200 亿 t 碳,有望将大气 CO_2 浓度减少约 25%^[15]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)建议到 2030 年需要每年新增森林面积 2400 万 hm^2 以应对全球变暖,特别是热带和亚热带地区^[18]。由于碳排放控制的有限进展,中国、美国、英国、欧盟、非洲、拉丁美洲等 50 多个国家和地区承诺并制定了森林恢复^[3,16]或保护现有森林^[1]等各种计划应对气候变化。但是,“2030 年全球恢复林地 3.5 亿 hm^2 ”的“波恩挑战”,43%国家仅承诺恢复半数可恢复的林地^[15],并且以恢复单一树种的经济林为主^[18]。

然而,造林对于气候变化的影响非常复杂且存在极大地不确定性^[3],森林相关减缓措施的碳响应尚不明确,从而引起了对于该策略有效性的质疑和争论^[12]。因此,为了更加准确、全面地认识造林的气候效应,当务之急需要搞清楚并充分理解造林对气候的影响是什么?影响程度如何?不同区域造林对气候影响的差异性?产生这种差异的机理是什么?不确定性及其产生原因是什么?通过调控造林活动能否有效减缓气候变化?如何正确评估这种调控行为?回答好这些问题,对于科学规划我国乃至全球未来造林活动具有重要且紧迫的科学与现实意义。

2 造林的气候效应研究进展

2.1 造林对林内小气候的影响研究

由于地形地势、气候背景、土壤理化、林分特征、保护及经营措施等差异,森林的水分、气体、热量交换存在显著地时空差异,从而影响林内的光照、温度、湿度、降水等小气候因子。森林小气候研究源于欧洲,在我国始于建国初^[19],利用平行对比或垂直梯度开展林内、外的太阳辐射、空气/土壤温湿度、风速、蒸发量、降水、CO₂浓度等观测^[20-22]。近几十年,人工林小气候特征、水热交换、辐射能量平衡、降温增湿、防风固沙等成为以造林为主的生态保护修复工程生态效应评估的研究热点^[23-26]。一般而言,人工林可降低林内气温和土壤温度,但这种降温存在区域、季节、昼夜差异^[24]。因此,不同区域、林分类型、生长时期、演替阶段的人工林,林内水热环境对气候变化的响应和反馈作用不同,混交林优于纯林,复层林优于单层林,常绿林优于落叶林,高郁闭度优于低郁闭度,成熟期优于建群期^[24,27]。

热带、亚热带、温带湿润区的人工林,林冠强烈吸收和反射太阳辐射,降低地面长波辐射和林内光照强度^[20,25,28],枝叶阻截、磨擦平流、乱流涡旋体削弱空气热量交换强度,使得林内气温和土壤温度降低、日较差缩小、温度变幅减弱^[20,28],由于林内风速及乱流交换减弱,蒸腾蒸发气体可停滞在近地面层空气中,使林内空气湿度和雨季土壤湿度增加^[20,25,28]。与天然常绿阔叶林对比,人工林的降温增湿效应较弱,干季降温明显、湿季增湿明显^[24],不同树种人工林的降温保湿效应亦有差异^[23]。相反地,干旱半干旱区人工林的降温、增湿、阻风效应受水分条件限制,荒漠草原地区营造片状防护林使得白天净辐射增大,地温和气温升高,空气相对湿度降低^[29]。比如,塔里木盆地人工林引起地表反射率降低、净辐射增加、潜热通量占比增加、湍流交换减弱,具有白天升温、夜间降温作用,降温效应与树种和覆盖度关系密切^[30-31]。黑河流域中游干旱区的农田防护林,夏季林内气温比林外低,冬季林内气温比林外高^[32]。黄土高原混交、灌木、草地等不同退耕还林还草模式,夏季高温天气均可显著削弱光照、降低风速和局地范围温度、提高空气相对湿度^[33]。

2.2 造林对区域气候的调节效应研究

造林影响局地小气候,进而影响光合呼吸、植被生长、水分蒸腾、辐射能量平衡等生态过程,从而对区域气候系统产生影响,特别是夏季最高气温及其日/年际变化^[22,34]。一般认为,造林使白天的地表温度降低、夜间升高^[5]。也有模拟试验认为,造林的降温作用被夸大,几十年时间尺度可能降温,但是更长时间来看则会使地球升温^[35]。造林在不同气候带、纬度、区域具有增温或致冷效应^[36-37]。热带森林极具致冷作用,其降温效应可能是目前估计的两倍^[35,38]。寒带、高纬度地带造林具有增温作用^[39],特别是积雪覆盖时^[40],或因水汽增加而增强温室效应^[41]。北中纬度地区大规模造林也使地表温度提高^[37]。温带造林可能引起降温,也可能增温,亦有研究认为对温度影响不大^[36,38,42-43]。干旱区造林会导致净增温,因为白天的降温被夜间的增温所抵消^[5,36]。

森林水平降水的生态意义更大,有研究表明林内气温达 20℃ 以上、相对湿度 90% 以上可能出现水平降水,以雾露水和叶尖吐水现象为主^[28]。植被恢复导致晚春土壤水分亏缺、加剧夏季干旱^[44],春季土壤水分损失越快,大气湿度水平越高,有利于云的形成并增加降水^[45]。热带造林增加降水的概率较高^[46],撒哈拉和澳大利亚北部干旱区造林也会使降水增强^[47]。模拟试验得出大规模造林改变了全球环流和降水模式,大气环流对地表水分的重新分配有助于增加下风向区域的降水量^[45],比如北中纬度地区大规模造林改变了亚马逊等远离造林区域的降水量^[37]。也有研究认为,土壤水分不足导致水分蒸发减少,较低潜热可能抑制云和降水^[45]。此外,由于林层对气流的阻挡和磨擦作用增强,迫使气流分散、消耗动能,降低水平风速并削弱近地面空气湍流交换,可使风速减弱 40%—90%^[25,29]。过去 30 年造林及其生长导致植被生物量增加、地表粗糙度增加从而引起风力减弱,对欧亚大陆风力减弱的贡献率 25% 到 60%^[48],特别是中国^[49]。

3 造林调节气候的生物地球化学机理

造林直接或间接地影响气候,主要取决于地表与大气之间生物地球化学效应和生物物理效应的相对强

度^[36,50-51]。在高纬度地带受辐射因素影响,在热带受水汽循环控制^[38]。除了影响陆气之间 CO₂、水分和能量交换,造林还会释放生物挥发性有机化合物(BVOCs),影响气溶胶、O₃和 CH₄等气候强迫因子^[51-53]。

3.1 造林对 CO₂变化的影响

造林增加植被覆盖^[1]、植被碳固定^[54-55]以及表层土壤碳储量^[56],是减缓气候变化的有效措施^[43,54,57]。虽然木材和土壤有机质中碳固定对气候的影响是百年尺度的^[58],但是森林植被的 CO₂通量很大、随时间变化剧烈,树木在多个时间尺度上与大气交换 CO₂、CH₄和 N₂O 等温室气体,呈现明显的瞬时、日、季节变化规律。虽然树干是 CO₂和 CH₄的净源^[59],然而,树木吸收 CO₂所产生的冷却效应显著超过树木通过释放 CH₄所产生的增温效应^[3]。因此,恢复或增加森林有助于吸收人为活动排放的 CO₂。极受争议的干旱半干旱区,造林使得 30cm 深度表层土壤有机碳和全氮储量分别显著提升了 131%和 88%,造林前土地利用类型、造林树种是最主要影响因素,其中,荒地造林后土壤碳、氮储量的增幅要显著大于农田和草地造林,营造落叶阔叶树种的增幅显著优于常绿阔叶和针叶树种^[60]。因此,干旱半干旱区造林容易,但要维持其生长较为困难,大气 CO₂浓度增加刺激植物生长加速,但土壤养分供应限制却降低其碳汇潜力,这种限制影响在热带地区较小、在寒冷区域较强^[58]。此外,随着气候变暖,更高的树干生产力、更快的树木更新率和更短的碳截留时间,将降低森林碳蓄积能力,从而影响利用造林应对全球气候变化的效果^[18]。

3.2 造林对 CH₄变化的影响

百年尺度,CH₄引起的辐射强迫是 CO₂的 32—45 倍^[61]。但是,当前对于森林是 CH₄源和汇的关注较少。了解森林 CH₄通量动态、森林与大气之间 CH₄交换,开展森林 CH₄计量,对于减缓全球气候变化速度具有重要意义,应纳入全球 CH₄预算^[62]。森林 CH₄动态受土壤水分与养分、自然干扰、森林管理措施等因素影响^[63]。森林土壤作为大气 CH₄的重要陆地汇,其 CH₄吸收量可能会随着降水量的增加而下降^[64],随着土壤状况变化,可能变成更大的汇,也可能变成源^[65]。基于排放量或卫星估算的热带森林 CH₄源差异,亦引发了对于森林 CH₄源的重视^[66]。树干是森林 CH₄收支的重要源,树木通过根-干-皮连续体将土壤中、树干心材中、内部微生物及非生物光化学过程产生的 CH₄输送或横向扩散到大气中^[67-68]。山地^[69]、湿地^[70-71]、漫滩^[72]森林的树干皆排放 CH₄。但是,树干 CH₄排放量不确定且存在争论^[66-67,72]。从热带到寒带森林的树木 CH₄排放具有区域差异,亚马逊雨林树木 CH₄排放量是温带湿地森林和热带泥炭沼泽林的 200 倍^[71],温带山地森林树干 CH₄排放抵消了生长季土壤 CH₄汇,可能短暂地将森林变成 CH₄源^[70]。树木 CH₄排放增强了湿地森林 CH₄源、降低了山地森林 CH₄汇^[67],可能会削弱森林对气候的正面效应^[68]。虽然缺乏数据估计森林 CH₄排放对全球 CH₄收支的贡献,考虑到全球庞大的树木数量及造林面积^[73],即使单株树木的排放量低,在全球尺度也可能是巨大的排放量。

3.3 造林对其它化学物质变化的影响

森林亦会向大气释放异戊二烯、O₃等 BVOCs^[53,74],在氧化作用下产生二次有机气溶胶(SOA),这些化学物质既影响空气质量,也影响气候变化,通过充当云凝聚核(CCN)影响云的形成、辐射平衡和气候,其净效应可能会使地球变暖,也可能致冷^[52,75]。异戊二烯能够与空气中的氮氧化物发生反应形成具有强大致暖作用的 O₃,可以延长大气 CH₄的寿命,又可以促使生成气溶胶粒子、阻挡入射光而产生冷却效应^[52]。大气异戊二烯的 90%以上源于陆地植物,且不同植物的异戊二烯排放速率存在数量级上的差异^[75]。热带和温带的树木会释放大量的异戊二烯,亚马逊雨林是大气倍半萜类异戊二烯的最大来源,除了光合作用驱动这种次生代谢产物并从雨林冠层释放,土壤微生物也是一个来源^[76]。高纬度北方森林主要释放萜烯,萜烯可以形成气溶胶,阻挡阳光,促进形成云粒,达到冷却气候的效果^[3]。受病虫害危害的森林也会释放萜类等植物挥发物作为一种防御手段^[77]。O₃破坏光合作用,阻碍植物生长和生物量的积累,降低植被吸收大气中 CO₂的能力,进而加剧全球变暖^[78]。

4 造林调节气候的生物物理机理

近几十年,造林在恢复植被、增强碳汇、缓解气候变化的同时,由于植被的生理、物候和结构变化影响陆表与大气之间的能量、水汽和动量交换等生物物理过程^[34,38],加上通过大气化学和气溶胶产生的额外作用^[6],可能增强或减弱甚至抵消其碳汇效益。因此,同时考虑碳调节和生物物理效应,造林也可能加剧气候变化^[35,39,53,79]。然而,气候政策多考虑 CO₂等温室气体方面,而忽略了生物物理过程对气候的影响。造林改变反照率、粗糙度,引起蒸散量增加,这些生物物理反馈使得近地层温度、湿度等发生变化,为减缓全球陆表变暖的贡献率为 12%^[39]。植被生物物理反馈主要受叶面积控制,叶面积通过改变反照率和冠层阻力影响蒸散量,从而调节吸收的太阳辐射量^[79-80]。叶面积增加导致寒区地表反照率降低而产生增温,导致干旱区蒸散量增加而产生致冷^[79],进一步反馈到云量、大气循环和水循环变化^[37,39]。这种生物物理反馈在极端干热或寒冷潮湿年份可能放大 5 倍^[79]。同时考虑碳调节和地表能量收支,中国亚热带湿润区造林的致冷效应是仅考虑碳调节致冷效应的 1.3—1.5 倍,而中温带干旱区造林的致冷效应则为仅考虑碳调节效应的近一半^[26]。因此,仅考虑碳效应会导致热带造林气候调节效应的低估和寒带、温带的高估^[35-36,43]。

造林影响辐射和湍流能量通量进而改变地表温度的气候调节效应区域差异显著^[5]。热带造林增加蒸发蒸腾和湍流从而致冷,有助于减缓气候变暖,而北方造林减少地表反照率从而加剧变暖^[6,39]。高纬度地带造林对地表温度的影响是蒸散发增加、大气环流变化、短波透射率减少引起的致冷效应,与长波比辐射率增加、反照率下降引起增温效应之间的平衡结果^[39]。在北高纬度地区,由于反照率较低从而增强太阳辐射吸收,造林具有增温作用,特别是积雪覆盖时^[37,41]。中纬度地区辐射平衡和潜热变化共同控制着局部地表温度响应,气候模式试验表明,北中纬度地区大规模造林导致气温和能量梯度的变化,增加了对太阳辐射的吸收,提高了地表温度,温暖了北半球,改变了全球环流和降水模式,进而改变了亚马逊等远离造林区域的降水量和生产力^[37]。欧洲造林由原始的阔叶林转变为更具经济效益的针叶林,针叶林吸收更多的阳光并释放较少的水分,改变了地表与大气之间能量、水汽交换状态,改变了云量,大致抵消碳汇作用从而引起区域增温^[81-82]。

水资源匮乏的干旱半干旱区造林,由于缺水导致能量必须通过显热和长波上升来消除,因此,可利用土壤水分决定了造林对气候的影响^[37]。有研究认为可能需要 50 至 80 年的碳蓄积,才能抵消其生物物理效应导致地表变暗的增温效应,有研究则认为受到人工林生长速率及其导致地表反照率变化量的影响^[50]。撒哈拉和澳大利亚北部干旱区造林,地表粗糙度增加、反照率下降,蒸散发增强、地表致冷、改变纬向温度梯度,区域低空急流的减弱和转移,水分渗透和降水增强^[47]。美国西南部造林引起反射率变化也对气候产生负面影响^[83]。仅考虑地表能量平衡,中国中温带干旱与半干旱区造林引起的净辐射增加程度大于潜热通量的增加程度,因此地表对大气供热表现为增温效应^[36]。同时,造林导致黄土高原土壤水分和径流减少^[84],且在一定程度上引发了西南地区的干旱^[45,85]。

5 当前亟待深入研究的内容

综上所述,需要进一步明晰造林气候调节效应差异及其影响因素,更加积极有效地应对全球气候变化。当前亟待深入研究的几个方面:

(1) 造林对局地、区域乃至全球气候影响的认识不够全面系统,受到太阳辐射、混合空气、蒸发蒸腾和土壤性质的影响^[86],造林的隔热调节作用产生的日较差幅度差异极大^[87],即环境温度很高时的冷却效应、环境温度很低时的致热效应,当前研究多在一个或多个站点或局地尺度开展对比观测,但在区域、国别甚至全球尺度缺少全面系统的认知,难以在应对气候变化的造林活动中提出有针对性的策略。此外,造林对空气或土壤温度的调节效应研究已取得较为广泛的认识,但是对降水、成云、风等气候因素的影响仍存在极大的认知差异与不确定性。

(2) 森林生物地球化学环境比已知的复杂得多,还不足以对其温室气体平衡和辐射气候强迫形成确切地

认识^[67]。树木在多个时间尺度上与大气交换 CH_4 和 N_2O 等温室气体,但这些气体通量的大小、模式和驱动因素仍不清楚^[59]。比如,目前对于森林 CH_4 通量不清楚、源汇之间复杂重叠以及个体间的极端差异^[67],排放的来源、时间和空间模式以及数量仍不明确,产生、氧化和运输导致树干 CH_4 排放的生物地球化学途径知之甚少^[7-2],底层微生物生产和氧化过程的复杂性、森林 CH_4 通量与环境控制的关系不明确^[63]。

(3) 当前研究很少涉及造林对 BVOCs 排放和 SOA 形成的影响,这限制了对造林如何与气候相互作用的理解^[5-2]。同时,由于缺乏相关的森林排放数据,目前所掌握的信息仍然不够充分,难以说明森林源 BVOCs 究竟具有什么效应。目前还不清楚,哪些森林植物能够排放大量的异戊二烯等 BVOCs? 排放量是多少? 时空变化差异如何? 需要进一步测量不同区域、不同森林类型的叶和冠层尺度 BVOCs 排放量,以确定其地理差异的成因^[75]。

(4) 过去乃至当前对于森林与气候变化相互反馈研究聚焦以 CO_2 为核心的温室气体通量方面,长期的碳水热通量观测在辐射能量平衡、生物物理过程方面的研究较为薄弱,造林的生物物理效应以模型模式模拟和卫星遥感反演为主要手段,尚未形成天空地融合的系统研究,有待揭示更多现象,且当前获得的相关理论知识有待更为深入的验证。

6 研究展望

尽管面积不断增加,我国人工林单位面积蓄积量仅为天然林的 36%,质量较差、结构不尽合理、生产力偏低、生态功能弱^[88]。面对未来气候变化与适宜发展空间的制约以及人类对生态服务需求的日益旺盛,我国规划 21 世纪中叶森林覆盖率达到世界平均水平(30.6%),如何可持续地发展人工林? 需要营造什么样的森林? 何种规模和成本的造林是有效的^[85]? 造林是否能够达到预期生态效应? 需要重点关注几个方面:

6.1 系统地生物地球化学机理研究

需要对不同立地条件、林分特征、干扰和管理等人工林影响温度、降水、成云、风等开展系统深入研究,通过长期、快速、高频率的大规模测量,在时空维度拓展温室气体通量、BVOCs 的大小、模式和驱动因素观测,解析其产生、传输的生物地球化学途径及非生物光化学过程,辨别传输过程在不同个体、物种和生态系统之间的差异,加强对森林释放化学物质及其与大气相互作用的监测,对造林引起温室气体平衡和辐射气候强迫形成系统地认知。

6.2 深入开展生物物理机理研究

造林对气候影响的生物物理效应主要通过站点对比观测、耦合模式模拟或空间替代时间方法来评估。然而,站点分析难以扩展到区域及更大空间范围,基于陆气耦合模式通常假设全面造林或毁林情景,高估了其对气候的生物物理调节效应^[37,45],预测结果在现象、数量、空间分布等方面存在极大不确定性。因此,造林生物物理效应的大小仍然是科学界争论的焦点,跨学科发展涵盖生物地球化学和生物物理过程的生态模型、陆面模式、气候模式,亟需对造林的生物物理气候效应进行深入观测和研究^[34,79]。

6.3 推动可持续地有效人工林管理

有限国土空间使得未来造林空间受限,需要加强人工林管理以增强造林减缓气候变化功能的可持续发展。大面积幼龄林是持续地碳汇,管理能增加更多碳吸收。当然,管理同时引起地表反照率与粗糙度、BVOCs 排放、蒸腾和显热通量等变化,从而导致其获得的碳汇效益被增强、减弱甚至抵消^[81]。IPCC 全球模型模拟结果与 UNFCCC 国家温室气体清单中关于林业土地利用变化 CO_2 净排放量的差异,约 80% 源于森林管理产生的误差^[8]。森林管理能否减少大气 CO_2 与大气顶部辐射不平衡,既不增加近地面气温也不减少降水量,目前难以确定^[55]。因此,通过森林管理实现缓解气候目标需要权衡利弊^[89]。

6.4 恢复具有完整结构地人工林

我国人工纯林占比近 60%,安徽、湖南等省甚至超过 70%,林分结构简单,大面积集中成片,抗逆性差、稳定性低,生态系统功能脆弱。完整的森林景观对于稳定陆地碳储量、保护生物多样性、调节水文状况和提供其

他生态系统服务至关重要。维持并尽可能地恢复具有完整生态功能和景观结构的森林,以遏制生物多样性危机、减缓气候变化、实现可持续目标,应当是全球和各个国家生态环境战略的一个核心组成部分和急迫事项,也是旨在促进重新造林策略的一个重要部分^[90-91]。因此,未来造林目标应是低质低效人工林的提质增效,以及尽可能恢复具有相对完整结构、景观和功能的人工林。

6.5 多重生态系统服务权衡与协同

气候变化背景下,造林的气候调节效应是否可持续^[18]? 水土保持、碳固定效应显著^[54-55],但干旱半干旱区造林加剧地下水枯竭、威胁原生物种、导致生物多样性减少^[9-2],增加水分蒸散、减少径流量、影响水沙关系^[84],甚至对粮食安全存在不利影响^[85,93]。此外,我国木材供应缺口长期保持 1—1.5 亿 m³,木材产品供给和生态调节服务之间存在显著权衡关系。因此,造林重点需从注重面积扩展转向人工林质量及其综合生态系统功能提升,从木材产品供给、碳汇、水土保持、防风固沙等单项生态功能向多重生态服务转变。

参考文献 (References):

- [1] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V, Tyukavina A, Vermote E F, Townshend J R. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 560(7720): 639-643.
- [2] Li B G, Gasser T, Ciais P, Piao S L, Tao S, Balkanski Y, Hauglustaine D, Boissier J P, Chen Z, Huang M T, Li L Z, Li Y, Liu H Y, Liu J F, Peng S S, Shen Z H, Sun Z Z, Wang R, Wang T, Yin G D, Yin Y, Zeng H, Zeng Z Z, Zhou F. The contribution of China's emissions to global climate forcing. *Nature*, 2016, 531(7594): 357-361.
- [3] Popkin G. How much can forests fight climate change? *Nature*, 2019, 565(7739): 280-282.
- [4] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [5] Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, Ciais P, Zhou L M, Li L Z X, Myneni R B, Yin Y, Zeng H. Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2915-2919.
- [6] Bonan G B, Doney S C. Climate, ecosystems, and planetary futures: the challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 2018, 359(6375): eaam8328.
- [7] Büntgen U, Krusic P J, Piermattei A, Coomes D A, Esper J, Myglan V S, Kirdyanov A V, Camarero J J, Crivellaro A, Körner C. Limited capacity of tree growth to mitigate the global greenhouse effect under predicted warming. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2171.
- [8] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [9] Griscom B W, Adams J, Ellis P W, Houghton R A, Lomax G, Miteva D A, Schlesinger W H, Shoch D, Siikamäki J V, Smith P, Woodbury P, Zganjar C, Blackman A, Campari J, Conant R T, Delgado C, Elias P, Gopalakrishna T, Hamsik M R, Herrero M, Kiesecker J, Landis E, Laestadius L, Leavitt S M, Minnemeyer S, Polasky S, Potapov P, Putz F E, Sanderman J, Silvius M, Wollenberg E, Fargione J. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(44): 11645-11650.
- [10] Pugh T A M, Lindeskog M, Smith B, Poulter B, Arneeth A, Haverd V, Calle L. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(10): 4382-4387.
- [11] Zhu K, Song Y L, Qin C. Forest age improves understanding of the global carbon sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(10): 3962-3964.
- [12] Harper A B, Powell T, Cox P M, House J, Huntingford C, Lenton T M, Sitch S, Burke E, Chadburn S E, Collins W J, Comyn-Platt E, Daioglou V, Doelman J C, Hayman G, Robertson E, van Vuuren D, Wiltshire A, Webber C P, Bastos A, Boysen L, Ciais P, Devaraju N, Jain A K, Krause A, Poulter B, Shu S J. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2938.
- [13] Grassi G, House J, Kurz W A, Cescatti A, Houghton R A, Peters G P, Sanz M J, Viñas R A, Alkama R, Arneeth A, Bondeau A, Dentener F, Fader M, Federici S, Friedlingstein P, Jain A K, Kato E, Koven C D, Lee D, Nabel J E M S, Nassikas A A, Perugini L, Rossi S, Sitch S, Viovy N, Wiltshire A, Zaehle S. Reconciling global-model estimates and country reporting of anthropogenic forest CO₂ sinks. *Nature Climate Change*, 2018, 8(10): 914-920.
- [14] Watson J E M, Evans T, Venter O, Williams B, Tulloch A, Stewart C, Thompson I, Ray J C, Murray K, Salazar A, McAlpine C, Potapov P, Walston J, Robinson J G, Painter M, Wilkie D, Filardi C, Laurance W F, Houghton R A, Maxwell S, Grantham H, Samper C, Wang S, Laestadius L, Runtz R K, Silva-Chávez G A, Ervin J, Lindenmayer D. The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(4): 599-610.

- [15] Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, Mollicone D, Rezende M, Routh D, Zohner C M, Crowther T W. The global tree restoration potential. *Science*, 2019, 365(6448): 76-79.
- [16] Hawes M. Planting carbon storage. *Nature Climate Change*, 2018, 8(7): 556-558.
- [17] White J C, Wulder M A, Hermosilla T, Coops N C. Satellite time series can guide forest restoration. *Nature*, 2019, 569(7758): 630.
- [18] Lewis S L, Wheeler C E, Mitchard E T A, Koch A. Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 2019, 568(7750): 25-28.
- [19] 贺庆棠. 中国森林气象学. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [20] 常杰, 潘晓东, 葛滢, 陈增鸿, 刘珂, 陈启常. 青冈常绿阔叶林内的小气候特征. *生态学报*, 1999, 19(1): 68-75.
- [21] 彭少麟, 申卫军, 戴智明, 林永标, 任海. 马占相思人工林温湿效应的时空动态. *热带亚热带植物学报*, 2001, 9(4): 277-283.
- [22] 谭正洪, 于贵瑞, 周国逸, 韩士杰, 夏禹九, 前田高尚, 小杉绿子, 山野井克己, 李胜功, 太田岳史, 平田竜一, 安田幸生, 中野隆志, 小南裕志, 北村兼三, 溝口康子, 廖志勇, 赵俊福, 杨廉雁. 亚洲东部森林的小气候特征: 1. 辐射和能量的平衡. *植物生态学报*, 2015, 39(6): 541-553.
- [23] 林永标, 申卫军, 彭少麟, 任海, 李明辉. 南亚热带鹤山三种人工林小气候效应对比. *生态学报*, 2003, 23(8): 1657-1666.
- [24] 刘效东, 周国逸, 陈修治, 张德强, 张倩媚. 南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应. *生态学报*, 2014, 34(10): 2755-2764.
- [25] 王霞, 李永涛, 魏海霞, 周健, 王振猛, 杨庆山, 李长贵, 刘德玺. 黄河三角洲白蜡人工林小气候特征的时空动态变化. *东北林业大学学报*, 2017, 45(4): 60-64, 80-80.
- [26] 黄麟, 翟俊, 宁佳. 不同气候带退耕还林对区域气温的影响差异分析. *自然资源学报*, 2017, 32(11): 1832-1843.
- [27] 蒋丹丹, 万福绪, 黄文庆. 石灰岩山地两种模式人工林小气候比较. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 110-114.
- [28] 刘文杰, 段文平. 热带人工雨林小气候效应分析. *云南热作科技*, 1997, 20(3): 7-11.
- [29] 傅泽强, 白殿奎, 郭绍存. 荒漠草原造林气候生态效应研究. *内蒙古气象*, 1993, (3): 22-28.
- [30] 严坤, 李生字, 雷加强, 王海峰, 刘小璐, 杨文. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地生长季的小气候特征. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 198-202.
- [31] 毛东雷, 蔡富艳, 赵枫, 雷加强, 来风兵, 薛杰. 新疆和田吉亚乡新开垦地防护林小气候空间差异. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 821-829.
- [32] 孔东升, 金博文, 金铭, 鲁艳芳, 盛吉兴. 黑河流域中游农田防护林小气候效应. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(1): 32-36.
- [33] 徐丽萍, 杨改河, 姜艳, 王得祥. 黄土高原人工植被小气候生态效应研究. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 163-167, 173-173.
- [34] Alkama R, Cescatti A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*, 2016, 351(6273): 600-604.
- [35] Betts R A. Afforestation cools more or less. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 504-505.
- [36] Huang L, Zhai J, Liu J Y, Sun C Y. The moderating or amplifying biophysical effects of afforestation on CO₂-induced cooling depend on the local background climate regimes in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260-261: 193-203.
- [37] Swann A L S, Fung I Y, Chiang J C H. Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(3): 712-716.
- [38] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [39] Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, Zhou L M, Ciais P, Wang T, Li Y, Lian X, Wood E F, Friedlingstein P, Mao J F, Estes L D, Myneni R B, Peng S S, Shi X Y, Seneviratne S I, Wang Y P. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 432-436.
- [40] Bonan G B, Pollard D, Thompson S L. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature*, 1992, 359(6397): 716-718.
- [41] Swann A L, Fung I Y, Levis S, Bonan G B, Doney S C. Changes in arctic vegetation amplify high-latitude warming through the greenhouse effect. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(4): 1295-1300.
- [42] Montenegro A, Eby M, Mu Q Z, Mulligan M, Weaver A J, Wiebe E C, Zhao M S. The net carbon drawdown of small scale afforestation from satellite observations. *Global and Planetary Change*, 2009, 69(4): 195-204.
- [43] Arora V K, Montenegro A. Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 514-518.
- [44] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, Zhou P, Liu X D, Xiao Y, Sun G, Scott D F, Zhou S Y D, Han L S, Su Y X. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5918.
- [45] Li Y, Piao S L, Li L Z X, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Huang L, Lian X, Peng S S, Zeng Z Z, Wang K, Zhou L M. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [46] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viomy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [47] Yosef G, Walko R, Avisar R, Tatarinov F, Rotenberg E, Yakir D. Large-scale semi-arid afforestation can enhance precipitation and carbon sequestration potential. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 996.
- [48] Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, Thépaut J N, Ciais P. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature Geoscience*, 2010, 3(11): 756-761.

- [49] Kauppi P E, Ausubel J H, Fang J Y, Mather A S, Sedjo R A, Waggoner P E. Returning forests analyzed with the forest identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(46): 17574-17579.
- [50] Rotenberg E, Yakir D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 2010, 327(5964): 451-454.
- [51] Scott C E, Monks S A, Spracklen D V, Arnold S R, Forster P M, Rap A, Äijälä M, Artaxo P, Carslaw K S, Chipperfield M P, Ehn M, Gilardoni S, Heikkinen L, Kulmala M, Petäjä T, Reddington C L S, Rizzo L V, Swietlicki E, Vignati E, Wilson C. Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 157.
- [52] Unger N. Human land-use-driven reduction of forest volatiles cools global climate. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10): 907-910.
- [53] Bright R M, Zhao K G, Jackson R B, Cherubini F. Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3246-3266.
- [54] 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.
- [55] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [56] Deng L, Shangguan Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 151-165.
- [57] Anderson R G, Canadell J G, Randerson J T, Jackson R B, Hungate B A, Baldocchi D D, Ban-Weiss G A, Bonan G B, Caldeira K, Cao L, Diffenbaugh N S, Gurney K R, Kueppers L M, Law B E, Luyssaert S, O'Halloran T L. Biophysical considerations in forestry for climate protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(3): 174-182.
- [58] Pongratz J. Plant a tree, but tend it well. *Nature*, 2013, 498(7452): 47-48.
- [59] Barba J, Poyatos R, Vargas R. Automated measurements of greenhouse gases fluxes from tree stems and soils: magnitudes, patterns and drivers. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4005.
- [60] Liu X, Yang T, Wang Q, Huang F R, Li L H. Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1658-1664.
- [61] Neubauer S C, Megonigal J P. Moving beyond global warming potentials to quantify the climatic role of ecosystems. *Ecosystems*, 2015, 18(6): 1000-1013.
- [62] UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change, Paris Agreement-Status of Ratification, 2017. [WWW document\] URL <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>.
- [63] Feng H L, Guo J H, Han M H, Wang W F, Peng C H, Jin J X, Song X Z, Yu S Q. A review of the mechanisms and controlling factors of methane dynamics in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2020, 455:117702.
- [64] Ni X Y, Groffman P M. Declines in methane uptake in forest soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(34): 8587-8590.
- [65] O'Connell C S, Ruan L L, Silver W L. Drought drives rapid shifts in tropical rainforest soil biogeochemistry and greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1348.
- [66] Frankenberg C, Meirink J F, van Weele M, Platt U, Wagner T. Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*, 2005, 308(5724): 1010-1014.
- [67] Covey K R, Megonigal J P. Methane production and emissions in trees and forests. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 35-51.
- [68] Covey K R, Wood S A, Warren II R J, Lee X, Bradford M A. Elevated methane concentrations in trees of an upland forest. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(15): L15705.
- [69] Welch B, Gauci V, Sayer E J. Tree stem bases are sources of CH₄ and N₂O in a tropical forest on upland soil during the dry to wet season transition. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 361-372.
- [70] Pitz S, Megonigal J P. Temperate forest methane sink diminished by tree emissions. *New Phytologist*, 2017, 214(4): 1432-1439.
- [71] Pangala S R, Enrich-Prast A, Basso L S, Peixoto R B, Bastviken D, Hornibrook E R C, Gatti L V, Marotta H, Calazans L S B, Sakuragui C M, Bastos W R, Malm O, Gloor E, Miller J B, Gauci V. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature*, 2017, 552(7684): 230-234.
- [72] Barba J, Bradford M A, Brewer P E, Bruhn D, Covey K, van Haren J, Megonigal J P, Mikkelsen T N, Pangala S R, Pihlatie M, Poulter B, Rivas-Ubach A, Schadt C W, Terazawa K, Warner D L, Zhang Z, Vargas R. Methane emissions from tree stems: a new frontier in the global carbon cycle. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 18-28.
- [73] Crowther T W, Glick H B, Covey K R, Bettigole C, Maynard D S, Thomas S M, Smith J R, Hintler G, Duguid M C, Amatulli G, Tuanmu M N, Jetz W, Salas C, Stam C, Piotto D, Tavani R, Green S, Bruce G, Williams S J, Wiser S K, Huber M O, Hengeveld G M, Nabuurs G J, Tikhonova E, Borchardt P, Li C F, Powrie L W, Fischer M, Hemp A, Homeier J, Cho P, Vibrans A C, Umunay P M, Piao S L, Rowe C W, Ashton M S, Crane P R, Bradford M A. Mapping tree density at a global scale. *Nature*, 2015, 525(7568): 201-205.
- [74] Lelieveld J, Butler T M, Crowley J N, Dillon T J, Fischer H, Ganzeveld L, Harder H, Lawrence M G, Martinez M, Taraborrelli D, Williams J.

- Atmospheric oxidation capacity sustained by a tropical forest. *Nature*, 2008, 452(7188): 737-740.
- [75] Gu D S, Guenther A B, Shilling J E, Yu H F, Huang M Y, Zhao C, Yang Q, Martin S T, Artaxo P, Kim S, Seco R, Stavrou T, Longo K M, Tóta J, de Souza R A F, Vega O, Liu Y, Shrivastava M, Alves E G, Santos F C, Leng G Y, Hu Z Y. Airborne observations reveal elevational gradient in tropical forest isoprene emissions. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15541.
- [76] Boursoukidis E, Behrendt T, Yañez-Serrano A M, Hellén H, Diamantopoulos E, Catão E, Ashworth K, Pozzer A, Quesada C A, Martins D L, Sá M, Araujo A, Brito J, Artaxo P, Kesselmeier J, Lelieveld J, Williams J. Strong sesquiterpene emissions from Amazonian soils. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2226.
- [77] McCormick A C, Irmisch S, Boeckler G A, Gershenson J, Köllner T G, Unsicker S B. Herbivore-induced volatile emission from old-growth black poplar trees under field conditions. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 7714.
- [78] Unger N, Zheng Y Q, Yue X, Harper K L. Mitigation of ozone damage to the world's land ecosystems by source sector. *Nature Climate Change*, 2020, 10(2): 134-137.
- [79] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth. *Science*, 2017, 356(6343): 1180-1184.
- [80] Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, Mu Q Z, Kalnay E, Li S C. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6603.
- [81] Naudts K, Chen Y Y, McGrath M J, Ryder J, Valade A, Otto J, Luyssaert S. Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science*, 2016, 351(6273): 597-600.
- [82] Luyssaert S, Marie G, Valade A, Chen Y Y, Njakou Djomo S, Ryder J, Otto J, Naudts K, Lansø A S, Ghattas J, McGrath M J. Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature*, 2018, 562(7726): 259-262.
- [83] Fargione J E, Bassett S, Boucher T, Bridgman S D, Conant R T, Cook-Patton S C, Ellis P W, Falcucci A, Fourqurean J W, Gopalakrishna T, Gu H, Henderson B, Hurteau M D, Kroeger K D, Kroeger T, Lark T J, Leavitt S M, Lomax G, McDonald R I, Megonigal J P, Miteva D A, Richardson C J, Sanderman J, Shoch D, Spawn S A, Veldman J W, Williams C A, Woodbury P B, Zganjar C, Baranski M, Elias P, Houghton R A, Landis E, McGlynn E, Schlesinger W H, Siikamäki J V, Sutton-Grier A E, Griscom B W. Natural climate solutions for the United States. *Science Advances*, 2018, 4(11): eaat1869.
- [84] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [85] Doelman J C, Stehfest E, van Vuuren D P, Tabau A, Hof A F, Braakhekke M C, Gernaat D E H J, van den Berg M, van Zeist W J, Daioglou V, van Meijl H, Lucas P L. Afforestation for climate change mitigation: potentials, risks and trade-offs. *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1576-1591.
- [86] Frey S J K, Hadley A S, Johnson S L, Schulze M, Jones J A, Betts M G. Spatial models reveal the microclimatic buffering capacity of old-growth forests. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501392.
- [87] De Frenne P, Zellweger F, Rodríguez-Sánchez F, Scheffers B R, Hylander K, Luoto M, Vellend M, Verheyen K, Lenoir J. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(5): 744-749.
- [88] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. *生态学报*, 2018, 38(1): 1-10.
- [89] Bellassen V, Luyssaert S. Carbon sequestration: managing forests in uncertain times. *Nature*, 2014, 506(7487): 153-155.
- [90] Maxwell S L, Evans T, Watson J E M, Morel A, Grantham H, Duncan A, Harris N, Potapov P, Runtz R K, Venter O, Wang S, Malhi Y. Degradation and forgone removals increase the carbon impact of intact forest loss by 626%. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax2546.
- [91] Watson J E M, Evans T D, Venter O, Maxwell S L. Manage forests as protection against warming. *Nature*, 2019, 567(7748): 311.
- [92] Hua F Y, Wang X Y, Zheng X L, Fisher B, Wang L, Zhu J G, Tang Y, Yu D W, Wilcove D S. Opportunities for biodiversity gains under the world's largest reforestation programme. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12717.
- [93] Kreidenweis U, Humpenöder F, Stevanović M, Bodirsky B L, Kriegler E, Lotze-Campen H, Popp A. Afforestation to mitigate climate change: Impacts on food prices under consideration of albedo effects. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(8): 085001.