

DOI: 10.20103/j.stxb.202210233012

赵东升, 王珂, 崔耀平. 植被变化对气候的反馈机制及调节效应. 生态学报, 2023, 43(19): 7830-7840.

Zhao D S, Wang K, Cui Y P. Feedback mechanisms and regulatory effects of vegetation change on climate. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7830-7840.

植被变化对气候的反馈机制及调节效应

赵东升^{1,*}, 王珂^{1,2}, 崔耀平^{3,4}

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100149

3 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

4 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

摘要: 植被通过光合作用固定大气中的 CO₂ 来减缓温室效应, 同时植被也通过改变地表能量收支影响温室效应。在过去的气候-植被研究中, 大多关注气候变化对植被的影响, 而植被对气候反馈的研究相对较少。植被通过调节地表能量收支、水通量等重要地气过程影响局地、区域乃至全球气候, 在气候变化中的作用十分重要。因此, 需要厘清植被对气候的反馈效应机制及其结果, 并识别其地域差异。从生物地球物理和生物地球化学过程两方面分析植被与气候之间的作用机制, 对全球及关键区域内植被变化对局地、区域乃至全球的气候反馈效应进行了系统总结: (1) 生物地球物理反馈的区域特征明显, 生物地球化学反馈则表现在全球尺度上, 二者相互作用但难以统一; (2) 植被破坏带来的气候影响在气温效应方面与生态系统的类型及地理分布相关: 热带森林破坏带来增温效应, 北方森林破坏带来降温效应, 温带森林破坏则会通过增加森林反照率抵消丢失的固碳降温效应, 气温效应表现不明显; (3) 当前研究对关键过程机制考虑不够完善, 不同研究方法的结果差异较大, 且缺乏高质量观测数据的验证; 同时考虑生物地球物理和生物地球化学的净气候反馈研究尚无法支撑植树造林对气候变化单一减缓作用的常规理解。本文为科学评估植树造林对气候变化作用的方向与强度提供理论依据。

关键词: 植被变化; 气候效应; 反馈机制; 博弈

Feedback mechanisms and regulatory effects of vegetation change on climate

ZHAO Dongsheng^{1,*}, WANG Ke^{1,2}, CUI Yaoping^{3,4}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China

3 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Henan University, Kaifeng 475004, China

4 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Vegetation mitigates the greenhouse effect by fixing atmospheric CO₂ through photosynthesis, while vegetation also affects the greenhouse effect by altering the surface energy balance. In the past climate-vegetation studies, most of them focused on the effects of climate change on vegetation, while relatively few studies on vegetation feedback on climate. Vegetation affects local, regional and even global climate by regulating surface energy balance and water fluxes, and its role in climate change is vital. Therefore, it is extremely important to clarify the mechanisms of vegetation feedback effects on climate and their outcomes and to identify their geographical differences. In this paper, we analyze the mechanisms between vegetation and climate in terms of biogeophysical and biogeochemical processes, and systematically summarize the feedback effects of vegetation restoration/destruction on local, regional, and even global climate in global and key regions. Results

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42271489)

收稿日期: 2022-10-23; 网络出版日期: 2023-05-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaods@igsnr.ac.cn

show that: (1) the regional characteristics of biogeophysical feedback are obvious, while biogeochemical feedback is manifested at the global scale, and the two interact with each other but are difficult to be unified; (2) The climate effects of vegetation destruction is related to the type and geographical distribution of forest ecosystems in terms of temperature effect: tropical forest destruction brings warming effect, temperate forest destruction will offset the lost carbon sequestration and cooling effect by increasing forest albedo, and boreal forest destruction brings cooling effect; (3) The current study does not consider the critical process mechanisms well enough, the results of different research methods vary widely, and the results lack the validation of high-quality observation data from multiple sources, while the net climate feedback studies considering biogeophysical and biogeochemical are not yet able to support the conventional understanding of the single mitigation effect of afforestation on climate change. It has been widely recognized that afforestation mitigates climate warming by increasing the carbon sink function, but the net climate effect of afforestation depends not only on the carbon cycle process, but also on the surface albedo, evapotranspiration, soil water cycle, heat absorption process by water evaporation and aerosol concentration and process, so the study of the climate feedback effect of afforestation still has many problems to be solved. In this paper, we summarized the problems of the current research on the effect of vegetation on climate feedback, and proposed the future direction of related research, providing a theoretical basis for scientific assessment of the direction and intensity of the effect of afforestation on climate change.

Key Words: vegetation change; climate effect; feedback mechanism; game

植被是陆地生态系统的主要组成部分,其动态变化会通过陆面-大气相互作用机制对气候产生一系列反馈效应。研究发现过去 30 年全球三分之一的陆地植被在变绿,全球叶面积每 10 年净增加达到 2.3%,变绿区域主要集中在中国和印度,其中三分之二的植被变绿是人工造林、农业开垦导致的^[1]。过去的研究大多将气候视为影响植被生长变化的外部动力,集中探讨气候对植被的影响,如气候因子(温度、降水等)变化对植被生长过程^[2]、地理分布^[3]的影响。但应注意的是植被通过吸收约四分之一的人为排放的二氧化碳形成天然碳库,在全球碳循环过程中发挥重要作用^[4];同时,植被也在通过调节地表能量收支、蒸散发^[5]以及地表水通量等重要过程影响局地、区域乃至全球气候^[6],对气候变化的影响至关重要。

植被主要通过生物地球物理过程(包括反照率、蒸散发、地表粗糙度等因子)和生物地球化学过程(包括大气中 CO₂、N₂ 含量、气溶胶等因子)来影响地表水热通量以及大气组成,进而影响区域乃至全球气候^[7]。相对于生物地球化学过程,植被通过生物地球物理过程对气候的影响幅度的研究仍存在较大不确定性^[6],在国际上重要的气候协定如《京都议定书》和《巴黎协定》中均未被提及,这为量化植被恢复的气候效益带来了较大不确定性。此外,植被对气候的反馈效也会因时空尺度、地理环境的差异而呈现不同的结果。因此,需要整合多方面的研究成果,厘清植被对气候的反馈效应,识别地域差异。

本文从生物地球物理和生物地球化学两个角度分析了植被对气候变化的反馈机制,总结了全球尺度、中国关键区域植被变化对局地、区域乃至全球气候的可能影响。此外,也对比了区域环境、时空尺度、研究方法差异对反馈效应的影响,总结了当前研究存在的问题,提出植被对气候反馈效应研究的未来方向,为科学评估生态建设对气候变化作用的方向与强度提供理论依据。

1 植被变化对气候的反馈

1.1 生物地球物理反馈

植被对气候的生物地球物理反馈分为直接反馈和间接反馈,其中直接反馈通常表现在局地尺度,间接反馈可通过大气平流层运动过程影响全球气候,因此从生物地球物理角度,研究植被对气候的间接作用尤为关键。具体地说,植被主要通过影响辐射过程和非辐射过程进而影响气温变化^[8-9]。从辐射角度,地表反照率改变带来净短波辐射变化,产生的气温效应大多集中在局地尺度^[10-11];非辐射角度,地表粗糙度改变带来蒸

散发强度变化,进而与大尺度环流系统共同作用,产生的气温效应波及范围可达到洲际尺度甚至全球尺度^[12-13]。

1.1.1 地表反照率变化对气温的影响

地表反照率指地球表面反射的太阳辐射与入射太阳辐射的比率,反映了地球表面对太阳辐射的反射能力^[14]。在气候系统中,地表反照率是重要的辐射强迫因子之一,其变化会直接影响地表能量平衡^[15],已经被广泛用于量化城市热岛效应^[16]、气候干旱^[17]等气候效应的研究中。

地表反照率受下垫面性质(土地覆被类型、土壤类型、积雪和地表粗糙度等)、太阳高度角以及天气条件等因素的影响,具有较大的时空异质性^[18-19]。气温对地表反照率变化极为敏感,地表反照率可以作用至对流层顶部的行星反照率,如全球行星反照率变化 5%,全球温度将改变约 1℃^[20]。Dougty 发现随着反照率每增加 0.01,农田夏季的日最高气温在高纬度下降达 0.25℃,在低纬度下降 0.07℃^[21]。

植被恢复/破坏通过转换土地覆被类型导致地表反照率改变。不同土地覆被类型的反照率基本上是确定的,植被覆盖区域地表反照率较低,非植被覆盖区域地表反照率较高。在主要的植被类型如林地、草地以及农田中,通常林地的反照率最低^[22](图 1);不同森林类型之间也存在明显的差异,通常常绿阔叶林的反照率较大,常绿针叶林的反照率较小^[14](表 1)。植被指数与地表反照率一般呈负相关关系,以植被恢复为例,区域植被恢复会导致地表反照率下降,从而使地表留存更多的热量,最终带来局部乃至全球增温效应。虽然反照率对气候的影响机制已基本明确,但反照率改变对气候的实际贡献仍存在较大不确定性。

表 1 不同植被类型反照率年均值

Table 1 Average values of albedo of different vegetation types

植被类型 Vegetation types	反照率 Albedo	植被类型 Vegetation types	反照率 Albedo
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	0.14	混交林 Mixed forests	0.17
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	0.22	郁闭灌木 Dense shrubs	0.18
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	0.15	稀疏灌木 Sparse shrubs	0.21
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	0.21		

1.1.2 地表粗糙度以及蒸散发变化对气温的影响

地表粗糙度是表征陆地表面特征的重要物理量,是影响陆气之间物质、水分、能量交换的动力因子^[23-24];同时,它反映地表对风速的减弱作用,对区域风场动态过程及变化强度具有重要影响^[25-26]。在森林与草地、农田等土地覆被类型之间的转化,会改变地表粗糙度,带来边界层中的湍流热交换强度变化,从而带来增温/降温效应;蒸散发是植被-气候相互作用的关键过程,包括土壤蒸发和植被散发两个部分,主要涉及水分循环与能量循环过程^[27-28]。植被散发通过云和降水的反馈来冷却气候,与部分作物相比,森林的散发量通常较高,且针叶林的散发量低于落叶阔叶林^[29]。Song 研究指出大约 60%的降水会通过蒸散发作用返回到大气中^[30]。

森林砍伐和过度放牧等植被破坏活动,主要通过两方面影响气候:一方面,植被破坏使地表粗糙度降低,减弱大气与地表的垂直湍流能量传输,影响地表能量收支平衡,从而带来增温效应^[31];Wang 指出地表粗糙度的变化直接导致全球边界层湍流改变,使全球地表升温 0.08℃,且由于森林砍伐带来的地表粗糙度改变对气候的影响在中纬度区域更加明显^[32]。另一方面,植被破坏通过降低土壤蒸散发、持水能力,使得地表潜热通量和地表湍流强度减弱,进而减少降水量^[33]。观测研究表明大规模的森林砍伐可导致当地降雨量减少

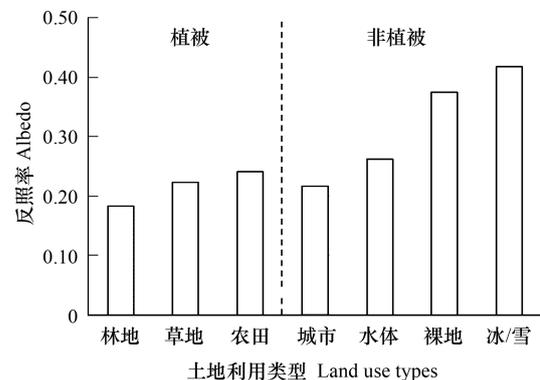


图 1 不同土地利用类型下的反照率差异

Fig. 1 Differences in albedo under different land use types

20%—30%, 并降低散发量、云层覆盖度和土壤湿度, 增加地表反照率和地表温度^[34]。Hesslerová 指出以自然植被覆盖为主的地区在生长季节的温度波动较小, 且植被覆盖会降低平均温度, 增加相对湿度; 而非森林和裸露地面的地区蒸散能力最低, 温度波动较大^[35]。

1.2 生物地球化学反馈

在生物地球化学机制作用下, 植被主要通过两种途径产生气候反馈: 一是植被变化会扰动碳、氮等元素的生物地球化学循环, 主要影响二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体净排放或吸收, 从而改变温室气体浓度, 影响全球气候^[36]; 二是植被能排放挥发性有机物等气溶胶前体物, 同时对大气气溶胶浓度产生影响, 进而影响区域气候; 以植被增加为例, 挥发性有机物增加使气溶胶增多, 会通过阳伞效应带来区域尺度的降温效应^[37], 并通过云凝结核的作用促进降水形成^[38]。

温室气体浓度的增加, 特别是二氧化碳浓度的增加, 将导致全球明显的温升。陆地是地球上最重要的碳汇, 其中土壤和植被的作用最为突出^[39]。植被破坏可使储存在植被和土壤中的大部分碳释放, 使大气中温室气体浓度增加, 导致全球气候增暖。IPCC 第六次评估报告指出通过在全球范围内最大限度的造林/再造林, 每年能额外储存约 0.5—10.1Gt 的 CO₂^[40], 进而缓解气候变暖。House 针对植被砍伐对气候的影响进行了极端假设, 模拟结果表明: 到 21 世纪末全球森林完全砍伐将会使大气 CO₂ 浓度增加约 0.13‰—0.29‰, 而 50 年内最大限度的植被恢复会使大气 CO₂ 浓度减少约 0.015‰—0.030‰^[41]。同样地, Cramer 模拟了 21 世纪以来由于热带雨林砍伐导致的碳汇能力损失(额外碳排放量), 估计范围在 101 到 367Gt C 之间, 导致 CO₂ 浓度高于背景值 0.029‰—0.129‰, 这将会带来明显的温升效应^[42]。Zhao 指出 CO₂ 浓度的增加除了导致温升, 还将引起区域降雨强度增大、极端降雨事件增多^[43]。

气溶胶对气候的影响可分为直接影响和间接影响。一方面, 气溶胶将太阳辐射反射回太空, 减少地表吸收的热量, 从而降低地表温度; 另一方面, 一些气溶胶(如煤烟颗粒)吸收太阳辐射, 从而使大气升温, 同时使到达地面的辐射减少, 使地表降温。同时, 这种大气变暖过程将会抑制空气对流, 影响云量和降水。气溶胶对地表的遮蔽也会减少蒸发, 从而导致降雨减少^[44]。植被尤其是森林能有效地减少粉尘等气溶胶, Liu 研究发现中国地面气温对气溶胶辐射效应的响应大小为 -0.1—1.1K, 且气溶胶与云的相互作用也会影响大气辐射过程和降水; 通常在气溶胶浓度增大的条件下, 大雨频率增加, 而小雨频率减少^[45]。此外, Andreae 指出温室气体和大气黑碳将会带来增温效应, 一些气溶胶将会带来降温效应, 甚至在 20 世纪气溶胶抵消了温室气体的部分增温效应; 二者存在博弈过程, 这可能导致我们的研究低估了气候系统受温室气体影响的敏感性^[46]。

2 植被变化的气候效应

2.1 植被动态变化的气候效应及区域特征

植被对气候的响应、反馈及其敏感性存在较大的区域差异。中高纬度植被的变化主要受温度控制, 植被对温度有很强的正反馈, 北方林地区域最为明显; 在热带和亚热带地区, 植被变化主要由降水主导, 但植被对降水反馈微弱^[47—48]。非洲萨赫勒地区的植被退化通过减少土壤水分含量和潜热通量, 会带来增温效应^[49]; 而北方森林及干旱地区的植被退化会通过增加地表反照率, 减少地表吸收的短波辐射量, 最终带来降温效应^[7]; 西非地区人类活动造成的沙漠化和植被砍伐加剧了当地的气候干旱状况^[50]。Lawrence 等^[51]发现热带森林砍伐导致当地气候变暖、干燥; 但由于气候过程相对复杂, 植被对气候的影响会因环境条件(地理位置、植被破坏程度)和研究方法的不同而产生较大的差异。

Snyder 等利用 CCM3-IBIS 大气-生物圈耦合模型分析 6 类植物群落(北方森林、温带森林、稀树草原、草地、灌木和苔原)对气候的影响, 发现北方森林的减少对全球温度影响最大, 热带森林的减少对全球降水影响最大^[52]。众多的模拟结果表明不同气候背景下生物群落破坏带来的气候影响有显著差异(表 2): 热带区域的植被破坏在区域乃至全球尺度带来增温效应, 同时减少潜热通量与降水量; 北方森林以及温带森林破坏在区域乃至全球尺度则会带来降温效应, 同时减少降水量; 较为干旱的区域如稀树草原、草地、灌木群落区域, 以

及高寒苔原植被破坏主要在区域尺度带来增温效应,并减少降水量^[53-58]。在不同气候情景下,全球尺度的植被变化对降水的影响方向已基本确定,即植被覆盖度与降水量变化方向相同;而全球植被对温度的影响仍存在争议,受生物地球物理与生物地球化学机制共同影响。

表 2 不同类型的植物群落破坏带来的气候影响^[53-58]

Table 2 Climatic impacts of different types of plant community destruction^[53-58]

植物群落类型 Plant community type	温度影响 Temperature effects	降水量影响 Precipitation effects	反照率机制 反馈强度 Feedback intensity of albedo mechanism	蒸散机制反馈强度 Feedback intensity of evaporation mechanism	影响范围/强度 Impact range/ intensity
热带森林 Tropical forest	+	-	中	强	区域乃至全球/强
北方森林 Boreal forest	-	-	强	弱	区域乃至全球/强
温带森林 Temperate forest	-	-	中	中	区域>全球/中
稀树草原 Savanna	+	-	中	强	区域/弱
草地 Grassland	+	-	中	中	区域/弱
灌木 Shrubs	+	-	中	中	区域/弱
苔原 Tundra	+	-	中	弱	区域/强

中国作为全球受季风影响最强的地区之一,不同气候区下典型植被动态变化有不同的气候影响(表 3)^[59-62]。丁一汇等利用 RegCM_NCC 区域气候模式研究表明西北地区植被恢复对地面气温和降水都有影响,西北地区植被恢复将带来夏季显著降温、冬季偏暖、黄河流域降水增加、长江流域及南方地区降水减少等一系列气候效应^[59]。Wei 等指出中国华北地区植被恢复增强了地表蒸散量,使局部区域地表温度降低,降水也随地表蒸散量的增加而增加,但是对降水的影响较微弱^[60]。Ma 等利用 NCAR CCSM3.5 模型的研究发现植被恢复使当地地表气温在夏季显著下降,在冬季显著升高。主要原因是由于植被覆盖度增加导致蒸散量增强夏季降温,而冬季增温是由于植被恢复导致邻近沿海海洋地表粗糙度增加且风速减弱,进一步降低地表潜热通量,海面温度增加带来的热量被输送到中国地区。此外,大气中水蒸气和云覆盖量的增加产生了温室效应,提高冬季地表空气温度^[61]。青藏高原作为世界海拔最高的高原,其植被动态变化不仅影响高原区域内的气候变化,对周边地区气候的产生显著影响^[63]。Shen 等指出青藏高原植被恢复会增强区域整体的蒸发冷却能力,缓解局地的增温效应,并会带来更多降水^[64]。Zhou 等发现高原植被大面积破坏会影响大气环流系统,使西风急流向偏西偏北方向移动,导致北方冷气团难以抵达长江流域和黄河流域,减少区域降水;同时导致孟加拉湾地区的经向风减弱,这一变化使从海上带来的水汽减少,我国大多区域降水量会显著减少^[65]。张少波等利用气候模式 RegCM4 研究青藏高原植被退化对中国东部夏季降水的影响,发现青藏高原植被退化会使中国东北部分地区、南部地区降水增加,而北部地区降水减少^[66]。

表 3 中国不同气候型区域植被动态变化带来的气候影响^[59-62]

Table 3 Climate impacts of regional vegetation dynamics in different climate types in China^[59-62]

主要气候型 Major climate type	植被动态变化 Changes in vegetation dynamics	温度 Temperature	降水 precipitation	参考文献 References
温带大陆性 Temperate continental	植被恢复	夏季- 冬季+	黄河流域 + 长江流域及南方-	(丁一汇等,2005) ^[59]
温带季风 Temperate monsoon	植被恢复	-	* 微弱	(Wei 等,2017) ^[60]
亚热带季风 Subtropical monsoon	植被恢复	夏季- 冬季+	+	(Ma 等,2013) ^[61]
高山高原 Alpine plateau	植被退化	+	-	(刘振元等,2018) ^[62]

2.2 两种机制下共同作用下植被变化的气候效应

植树造林通过增加碳汇功能缓解气候变暖的说法已被广泛认可,但植树造林的净气候效应不仅取决于碳循环过程,还与地表反照率、蒸散发、土壤水分循环以及水汽蒸发吸收热量过程有关(图2),因此植树造林的气候反馈效应研究仍有诸多问题亟待解决。例如,前面提到的由于植被能有效吸收大气中的二氧化碳,通过造林可以提高陆地生态系统的固碳能力,减少空气中温室气体的含量;然而,植树造林也会带来地表反照率降低,使留存地表的热量变多,带来增温效应,在一定程度上抵消碳固存的降温效应。因此,要通过植树造林减缓气候变暖,就需要量化植被恢复在两种机制下的气候效应强度大小。

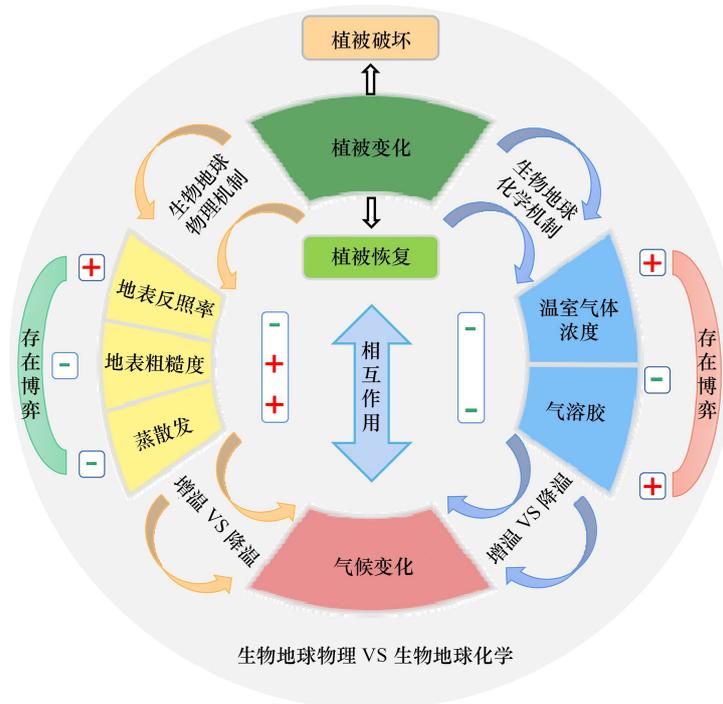


图2 植被恢复/破坏影响气候变化的两种机制示意图

Fig.2 Schematic diagram of two mechanisms of impact of vegetation restoration/destruction on climate change

众多学者针对植被恢复/造林的生物地球物理和生物地球化学的单独过程机制及综合影响已开展研究。Hansen 等指出辐射强迫是衡量外部强迫因子对气候的影响大小的重要指标,它通常被定义为对流层顶净辐射通量的变化,正的辐射强迫代表变暖,负的辐射强迫代表变冷。辐射强迫可以提供一种比较不同扰动机制对气候的影响的方法^[67]。唐荣云等基于辐射强迫方法计算得出北京市有植被参与的土地覆被变化区域产生 $2.95\text{W}/\text{m}^2$ 的正辐射强迫,即带来增温效应^[68]。翟俊等发现京津唐区域农田转为建设用地,使地表反照率降低 0.005,产生 $0.863\text{W}/\text{m}^2$ 的正辐射强迫,带来增温效应^[69];刘纪远等指出从生物地球物理过程角度,大尺度土地利用覆被变化影响气候变化的过程机制清晰,气候效应明显,应作为全球尺度气候变化科学研究的重点研究方向^[70]。植被变化带来的地表反照率变化通过改变短波辐射的吸收而影响辐射平衡^[71];这种短波辐射强迫可以与温室气体、气溶胶变化的辐射强迫进行比较,从而对比地表反照率变化与这些强迫因子带来气候影响的重要性。Brovkin 等指出过去 150 多年来,全球尺度上的降温是由于生物地球物理影响,而变暖是由于生物地球化学影响;且全球平均生物地球化学机制带来变暖 0.18°C 的效应,而生物地球物理机制的冷却效应为 0.26°C ,最终净冷却效应为 0.08°C ^[72]。Matthews 指出由于土地覆盖变化在两种机制下带来全球净变暖 0.15°C ^[73]。此外,两种机制共同作用的结果受到时空尺度的影响。Betts 对温带和北方森林地区造林导致的地表反照率变化带来的辐射强迫进行了模拟,并将其转化为等效的碳储量变化,再将这一等效量与前人估算

的碳固存潜力进行比较。结果显示在许多北方森林地区,反照率减少所引起的正辐射强迫可以抵消碳封存所预期产生的负辐射强迫^[7]。这一研究表明高纬度植被增加可能会加剧气候变暖,而不如预期那样有减轻气候变暖的效果。Bonan 从反照率、蒸散量、碳循环等角度出发,评估热带、温带以及北方森林带来的气候效应,发现热带森林较高的碳积累速率带来负的气候强迫,并增强区域蒸发冷却能力;即热带森林的生物地球化学效应和生物地球物理效应总体带来全球气候的降温效应。而温带森林与北方森林的总体气候效应尚未确定^[29]。Akbari 等在中高纬度的所有陆地区域模拟每增加 0.01 的反照率带来的温度变化,发现单位面积上温度降低 $3 \times 10^{-15} \text{K}$,相当于减少约 7kg 的等效二氧化碳排放^[74]。

在不同时间尺度、不同区域内,生物地球物理和生物地球化学过程的影响及强度各不相同。在生物地球化学机制中温室气体在大气中快速混合,其对于气候的影响是全球性的。生物地球物理反馈则具有显著区域特征,它对气候的影响比碳循环更直接。同一机制内的主导因子也随地理环境变化而产生差异。Zeng 研究发现热带森林破坏导致了反照率、地表粗糙度和蒸散发的变化,其中粗糙度对地表通量影响显著,而对辐合的动力作用较小;且其带来的反照率和蒸散发变化对区域气候的影响较显著^[75]。此外,辐射强迫估计的不确定性也会影响共同作用的结果,地表反照率变化引起的辐射强迫的全球平均值还会掩盖区域的异质性。因为在区域或局地尺度上,尤其是积雪覆盖面积大、时间较长的地区,反照率变化引起的辐射强迫可能与二氧化碳的作用幅度相当甚至更大^[76-77]。

3 问题及展望

3.1 当前存在的主要问题

3.1.1 植被对气候反馈效应的研究虽增多,但对关键过程考虑仍不够完善。

当前研究不仅关注气候对植被的影响,针对植被对气候反馈效应的研究也有所增加,但是考虑的过程仍不够完善。当前的大气-生物圈耦合模型大多将难以量化的过程进行简化,例如未能将植被变化对云量的影响、氮对碳吸收能力的影响^[78]、高臭氧浓度对植物初级生产力的影响^[79]以及植被变化的外部干扰(如火灾、病虫害)^[80]等因素纳入模型;这些因素可能会引发不可预见的强烈反馈,甚至直接影响植被-大气相互作用研究的准确性。极端事件导致的森林死亡也可能会增加其对生物地球物理过程的影响,给区域气候与生态系统相互作用的量化带来不确定性,也影响全球碳循环过程^[81];此外,当前研究多聚焦于生物地球化学机制过程,对生物地球物理机制过程的研究较少,甚至一些国际气候公约的制定也忽略了生物地球物理机制的影响,这将使我们错误估计植树造林对缓解气候变暖的作用^[82-83],这些因素都会增加植被对气候反馈效应评估的不确定性。

3.1.2 不同研究方法的结果差异较大,缺乏高质量观测数据的验证支持

虽然利用定位和遥感观测数据可以在不同空间尺度分析植被对气候的反馈效应,但定位观测研究只能从相关关系入手研究植被对气候的反馈效应,而遥感数据通常在较大的时空尺度展开分析,所以得出的结果难以解释植被对气候反馈作用。准确的数值模拟仍是最有效的研究手段,依靠数值模拟能定量解释植被变化对气候变化的贡献程度。虽然数值模拟方法的优势大,但对植被动态变化、陆面参数化过程的理解和描述不同,这也增加了模型模拟结果的不确定性。目前,仍然缺乏能用于验证、改进土地覆被变化的生物物理模型的高分辨率观测数据,难以为评估植被变化对气候的反馈提供更可靠的证据和模型参数。

3.1.3 研究尺度集中在局地 and 区域,植被变化的全球净气候反馈研究较少

当前有关植被变化的全球及区域净气候反馈研究较少,可归纳为两方面原因:一方面,植被变化的气候反馈在植被绿度梯度和不同气候条件下是不同的,如随着纬度的增加,植树造林带来的降温效应会减弱,且具有明显的季节差异,评估方法难以统一;另一方面,在同时考虑生物地球化学和生物地球物理过程的植被变化对气候调节的评估中,面临时间尺度差异的挑战,需要考虑辐射强迫和气候反馈的大规模变化,也涉及背景状态的变化(如二氧化碳浓度值)。尽管将辐射强迫量转化为对应的 CO_2 当量的思路能为尺度融合提供合理框

架,但其转化结果不能简单与植被变化带来的碳效应等同,这些问题使相关研究的空间尺度局限于局地 and 区域。

3.2 展望

本文针对植被变化对气候的反馈机制与效应展开综合分析,表明植被变化在气候变化中发挥着重要的作用,植被变化的气候反馈指标应被纳入气候评估的一部分。综合分析当前针对植被对气候反馈效应研究的主要问题,未来研究应主要集中在以下方面:

3.2.1 重点关注地理环境差异,综合考虑大气-植被相互作用的关键过程

植被影响气候变化的强度有较大地理差异性,这一特征甚至表现在相似气候、邻近区域条件下,所以应开展精细的本底调查,查明该区域是否存在人类活动、极端天气等因素带来的局地扰动,量化相似气候区的植被对气候反馈效应的差异。在评估植被对气候的反馈效应时需要考虑植被动态变化的准确性、植被对外部干扰响应的尺度,同时提高模拟过程的完备性。此外,气候变化也同步影响着植被,所以在考察植被对气候影响的过程中,应在模型中耦合二者的同步影响。干旱导致森林死亡的可能性提醒我们在研究植被变化对气候系统的生物地球物理反馈时,必须将植被动态与区域乃至全球气候模型耦合起来。近年来城市人工植被覆盖度大幅增加,城市化进程中人工植被的变化对气候的反馈效应也需高度重视^[84],重点增加有关城市人工植被与气候的中尺度和天气尺度相互作用过程。

3.2.2 提高验证数据精度,逐步优化模型以增强评估结果的准确性与全面性

数值模拟仍是当前最有效的定量研究手段,提高模拟结果的准确性是一项重要任务,所以未来研究需要整合来自不同生态系统和发展阶段的北方、温带和热带地区的通量观测数据,将其与遥感数据相结合,不断改进并验证模型。如针对中国陆地生态系统通量观测研究网络 ChinaFLUX,需要持续增加通量站点数量及监测对象类型,以增强特定地点的过程模型的准确性,优化模型并提高结果精度。此外,通过获取高分辨率的土地利用数据准确地描述城市物理属性,结合城市经济社会发展情景将其在模型中表达,形成物理机制更完善的多层城市冠层模型,耦合中尺度数值模式,实现城市非天然植被对中小尺度天气的反馈效应模拟。

3.2.3 综合考虑生物地球物理与化学机制,科学量化植被变化的全球净气候反馈

植树造林对缓解全球变暖的贡献程度研究至今仍存在很大的不确定性,受到环境差异影响,且生物地球物理机制与生物地球化学机制存在相互促进或抵削的博弈过程;因此,仅通过衡量 CO₂ 增加来解释未来极端温度和气候变暖是不够全面的,需关注外部强迫与内部变异性的相互作用,从生物地球物理机制考虑植被变化对气候的影响,将其与生物地球化学机制带来影响进行耦合分析。如利用全球增温潜势的计算方法将地表反照率改变带来的辐射强迫转化为对应的二氧化碳当量,将两种机制联结比较,以实现从不同的空间、时间尺度全面考察植被对气候变化影响的长期性和可持续性。

总之,对植被影响的综合评估需要考虑反照率、蒸散和碳循环等因素,这些因素影响各不相同,导致气候强迫也存在较大的尺度差异。当前的研究多聚焦于碳循环对气候的影响,实际生物地球物理过程对气候的影响比碳循环更直接,因此要将植被-气候相互作用的影响综合考虑。未来可以通过规划造林 (Smart forestation) 将反照率等参量变化通过生物地球物理机制带来的增温效应控制到最小,将植树造林对于缓解气候变暖的潜力发挥到最大。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Ding Y X, Li Z, Peng S Z. Global analysis of time-lag and-accumulation effects of climate on vegetation growth. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102179.
- [3] Xu W X, Pang Y, Ye M. Vegetation distribution and regional carbon sequestration in China: based on spatial panel data analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(18): 1906.

- [4] Le Quéré C, Peters G P, Andres R J, Andrew R M, Boden T A, Ciais P, Friedlingstein P, Houghton R A, Marland G, Moriarty R, Sitch S, Tans P, Arneeth A, Arvanitis A, Bakker D C E, Bopp L, Canadell J G, Chini L P, Doney S C, Harper A, Harris I, House J I, Jain A K, Jones D, Kato E, Keeling R F, Klein Goldewijk K, Körtzinger A, Koven C, Lefèvre N, Maignan F, Omar A, Ono T, Park G H, Pfeil B, Poulter B, Raupach M R, Regnier P, Rödenbeck C, Saito S, Schwinger J, Segsneider J, Stocker B D, Takahashi T, Tilbrook B, van Heuven S, Viovy N, Wanninkhof R, Wiltshire A, Zaehle S. Global carbon budget 2013. *Earth System Science Data*, 2014, 6(1): 235-263.
- [5] Zhao, Kaiguang, Robert B. Jackson. Biophysical forcings of land-use changes from potential forestry activities in North America. *Ecological Monographs*, 2014, 84(2): 329-353.
- [6] Alkama R, Cescatti A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*, 2016, 351(6273): 600-604.
- [7] Betts R A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, 2000, 408(6809): 187-190.
- [8] 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: 6603.
- [9] Chen L, Dimmeyer P A. Differing responses of the diurnal cycle of land surface and air temperatures to deforestation. *Journal of Climate*, 2019, 32(20): 7067-7079.
- [10] Zhou S H, Wang K, Yang S Q, Li W L, Zhang Y X, Zhang B, Fu Y M, Liu X Y, Run Y D, Chubwa O, Zhao G S, Dong J W, Cui Y P. Warming effort and energy budget difference of various human land use intensity: case study of Beijing, China. *Land*, 2020, 9(9): 280.
- [11] Tang X Y, Cui Y P, Li N, Fu Y M, Liu X Y, Run Y D, Li M D, Zhao G S, Dong J W. Human activities enhance radiation forcing through surface albedo associated with vegetation in Beijing. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 837.
- [12] Davin E L, de Noblet-Ducoudré N. Climatic impact of global-scale deforestation: radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate*, 2010, 23(1): 97-112.
- [13] Winckler J, Lejeune Q, Reick C H, Pongratz J. Nonlocal effects dominate the global mean surface temperature response to the biogeophysical effects of deforestation. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(2): 745-755.
- [14] Stephens G L, O'Brien D, Webster P J, Pilewski P, Kato S, Li J L. The albedo of earth. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(1): 141-163.
- [15] 王介民, 高峰. 关于地表反照率遥感反演的几个问题. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 295-300.
- [16] Feinberg A. Urban heat island amplification estimates on global warming using an albedo model. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(12): 2178.
- [17] Evans J P, Meng X H, McCabe M F. Land surface albedo and vegetation feedbacks enhanced the millennium drought in south-east Australia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(1): 409-422.
- [18] Meng C L. Surface albedo assimilation and its impact on surface radiation budget in Beijing. *Advances in Meteorology*, 2020, 2020: 1-14.
- [19] 肖登攀, 陶福祿, Moiwu Juana P. 全球变化下地表反照率研究进展. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1217-1224.
- [20] North G R, Cahalan R F, Coakley J A Jr. Energy balance climate models. *Reviews of Geophysics*, 1981, 19(1): 91.
- [21] Doughty C E, Field C B, McMillan A M S. Can crop albedo be increased through the modification of leaf trichomes, and could this cool regional climate? *Climatic Change*, 2011, 104(2): 379-387.
- [22] Otto J, Berveiller D, Bréon F M, Delpierre N, Geppert G, Granier A, Jans W, Knohl A, Kuusk A, Longdoz B, Moors E, Mund M, Pinty B, Schelhaas M J, Luyssaert S. Forest summer albedo is sensitive to species and thinning: how should we account for this in Earth system models? *Biogeosciences*, 2014, 11(8): 2411-2427.
- [23] 刘静, 卓慕宁, 胡耀国. 初论地表粗糙度. *生态环境*, 2007, 16(6): 1829-1836.
- [24] 杨丽薇, 高晓清, 惠小英, 高娜, 周亚, 侯旭宏. 青藏高原中部聂荣亚寒带半干旱草地近地层湍流特征研究. *高原气象*, 2017, 36(4): 875-885.
- [25] 刘震卿, 张冲, 吴晓波, 李秋明. 考虑粗糙地表的近地层风场仿真模拟研究及误差分析. *空气动力学学报*, 2020, 38(4): 715-722.
- [26] 李昂, 高天鹏, 张鸣, 陈映全, 蔺海明, 王升元. 西北风蚀区植被覆盖对土壤风蚀动态的影响. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 120-123.
- [27] Li X M, Lu L, Yang W F, Cheng G D. Estimation of evapotranspiration in an arid region by remote sensing—a case study in the middle reaches of the Heihe River Basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 85-93.
- [28] Cui Y P, Liu J Y, Hu Y F, Wang J B, Kuang W H. Modeling the radiation balance of different urban underlying surfaces. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(9): 1046-1054.
- [29] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [30] Gu S, Tang Y H, Cui X Y, Du M Y, Zhao L, Li Y N, Xu S X, Zhou H K, Kato T, Qi P T, Zhao X Q. Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D8): D08118.
- [31] Davin E L, de Noblet-Ducoudré N, Friedlingstein P. Impact of land cover change on surface climate: relevance of the radiative forcing concept. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13): L13702.
- [32] Wang Y, Wang Z M. Contribution of surface roughness to simulations of historical deforestation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 87/88: 119-125.
- [33] 王平, 沈润平. 基于 CLM 模型的植被覆盖变化对黄土高原气温和降水的影响研究. *科学技术与工程*, 2013, 13(20): 5754-5760.
- [34] Laurance W F. Forest-climate interactions in fragmented tropical landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 2004, 359(1443): 345-352.
- [35] Hesslerová P. Landscape functioning assessment based on radiation temperature distribution. *Auc Geographica*, 2021, 43(1): 63-75.
- [36] Li N, Cui Y P, Fu Y M, Liu X Y, Run Y D, Li M D, Chen L Y, Xia H M, Lu H L. Contribution of anthropogenic CO₂ in China to global radiative forcing and its offset by the ecosystem during 2000-2015. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2021, 1488(1): 56-66.

- [37] 廖礼, 漏嗣佳, 符瑜, 常文渊, 廖宏. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响. *大气科学*, 2015, 39(1): 68-82.
- [38] 李义宇, 郭学良, 金莲姬, 李培仁, 孙鸿娉, 赵德龙, 马新成. 华北中部夏季气溶胶垂直分布及其与云凝结核和云滴转化关系的飞机观测研究. *大气科学*, 2022, 46(4): 845-858.
- [39] 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.
- [40] Roe S, Streck C, Obersteiner M, Frank S, Griscom B, Drouet L, Fricko O, Gusti M, Harris N, Hasegawa T, Hausfather Z, Havlik P, House J, Nabuurs G J, Popp A, Sánchez M J S, Sanderman J, Smith P, Stehfest E, Lawrence D. Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. *Nature Climate Change*, 2019, 9(11): 817-828.
- [41] House J I, Colin Prentice I, Le quéré C. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 2002, 8(11): 1047-1052.
- [42] Cramer W, Bondeau A, Schaphoff S, Lucht W, Smith B, Sitch S. Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2004, 359(1443): 331-343.
- [43] Zhao M, Pitman A J. The relative impact of regional scale land cover change and increasing CO₂ over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(1): 58-68.
- [44] Charlson R J, Heintzenberg J. *Aerosol Forcing of Climate*. environmental sciences research report, 1995, 416.
- [45] Liu S, Xing J, Zhao B, Wang J D, Wang S X, Zhang X Y, Ding A J. Understanding of aerosol-climate interactions in China: aerosol impacts on solar radiation, temperature, cloud, and precipitation and its changes under future climate and emission scenarios. *Current Pollution Reports*, 2019, 5(2): 36-51.
- [46] Andreae M O. Atmospheric aerosols versus greenhouse gases in the twenty-first century. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2007, 365(1856): 1915-1923.
- [47] Liu Z Y, Notaro M, Kutzbach J, Liu N Z. Assessing global vegetation-climate feedbacks from observations. *Journal of Climate*, 2006, 19(5): 787-814.
- [48] Notaro M, Liu Z, Williams J W. Observed vegetation-climate feedbacks in the United States. *Journal of Climate*, 2006, 19(5): 763-786.
- [49] Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. Desertification, drought, and surface vegetation; an example from the west African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(5): 815-829.
- [50] Wang G, Eltahir E A B. Biosphere-atmosphere interactions over West Africa. II: Multiple climate equilibria. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 126(565): 1261-1280.
- [51] Lawrence D, VandeCar K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, 2015, 5(1): 27-36.
- [52] Snyder P K, Delire C, Foley J A. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Climate Dynamics*, 2004, 23(3): 279-302.
- [53] Haghtalab N, Moore N, Nejadhashemi P. Would forest regrowth compensate for climate change in the Amazon Basin? *Applied Sciences*, 2022, 12(14): 7052.
- [54] Cerasoli S, Yin J, Porporato A. Cloud cooling effects of afforestation and reforestation at midlatitudes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(33): e2026241118.
- [55] Stuenzi S M, Schaepman-Strub G. Vegetation trajectories and shortwave radiative forcing following boreal forest disturbance in eastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(6): e2019JG005395.
- [56] Yan M, Liu J, Wang Z Y, Ning L. Biogeophysical impacts of land use/land cover change on 20th century anthropogenic climate compared to the impacts of greenhouse gas change. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(15): 6560-6573.
- [57] 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.
- [58] Perugini L, Caporaso L, Marconi S, Cescatti A, Quesada B, de Noblet-Ducoudré N, House J I, Arneeth A. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(5): 053002.
- [59] 丁一汇, 李巧萍, 董文杰. 植被变化对中国区域气候影响的数值模拟研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 613-621.
- [60] Wei J F, Jin Q J, Yang Z L, Zhou L M. Land-atmosphere-aerosol coupling in North China during 2000-2013. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 1297-1306.
- [61] Ma D, Notaro M, Liu Z Y, Chen G S, Liu Y Q. Simulated impacts of afforestation in East China monsoon region as modulated by ocean variability. *Climate Dynamics*, 2013, 41(9): 2439-2450.
- [62] 刘振元, 张杰, 陈立. 青藏高原植被退化对高原及周边地区大气环流的影响. *生态学报*, 2018, 38(1): 132-142.
- [63] Wu G X, Liu Y M, Zhang Q, Duan A M, Wang T M, Wan R J, Liu X, Li W P, Wang Z Z, Liang X Y. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(4): 770-789.
- [64] M Shen, S Piao, S J Jeong, L Zhou, Z Zeng, P Ciais, D Chen, M Huang, C S Jin, L Z X Li. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(30): 9299-9304.
- [65] 周锁铨, 陈万隆, 徐海明, 边巴次仁. 青藏高原及其周围植被对夏季气候影响的套网格数值试验比较. *南京气象学院学报*, 1998(01): 85-94.
- [66] 张少波, 陈玉春, 吕世华, 李锁锁, 王少影. 青藏高原植被变化对中国东部夏季降水影响的模拟研究. *高原气象*, 2013, 32(5):

- 1236-1245.
- [67] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102 (D6): 6831-6864.
- [68] 唐荣云, 赵祥, 唐碧剑, 魏红, 陈嘉, 彭义峰. 北京地区城市化对辐射强迫的影响估算. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(4): 443-450, 376.
- [69] 翟俊, 刘荣高, 刘纪远, 赵国松. 1990—2010年中国土地覆被变化引起反照率改变的辐射强迫. *地理学报*, 2013, 68(7): 875-885.
- [70] 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 樊江文, 战金艳, 邓祥征, 匡文慧, 黄麟. 土地利用变化影响气候变化的生物地球物理机制. *自然杂志*, 2014, 36(5): 356-363.
- [71] 孙云, 于德永, 曹茜, 郝蕊芳, 刘阳, 常鸣. 土地利用/土地覆盖变化对区域气候影响的生物地球物理途径研究进展. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 51(2): 189-196.
- [72] Brovkin V, Sitch S, Von Bloh W, Claussen M, Bauer E, Cramer W. Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years. *Global Change Biology*, 2004, 10(8): 1253-1266.
- [73] Matthews H D, Weaver A J, Meissner K J, Gillett N P, Eby M. Natural and anthropogenic climate change: incorporating historical land cover change, vegetation dynamics and the global carbon cycle. *Climate Dynamics*, 2004, 22(5): 461-479.
- [74] Akbari H, Damon Matthews H, Seto D. The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(2): 024004.
- [75] Zeng N, Dickinson R E, Zeng X B. Climatic impact of Amazon deforestation—a mechanistic model study. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 859-883.
- [76] Betts R A. Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature change and radiative forcing. *Atmospheric Science Letters*, 2001, 2(1/2/3/4): 39-51.
- [77] Avila F B, Pitman A J, Donat M G, Alexander L V, Abramowitz G. Climate model simulated changes in temperature extremes due to land cover change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D4): D04108.
- [78] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis P G, Kolari P, Kowalski A S, Lankreijer H, Law B E, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff J B, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 2007, 447(7146): 849-851.
- [79] Sitch S, Cox P M, Collins W J, Huntingford C. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, 2007, 448(7155): 791-794.
- [80] Kurz W A, Stinson G, Rampley G J, Dymond C C, Neilson E T. Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(5): 1551-1555.
- [81] McAlpine C A, Syktus J, Ryan J G, Deo R C, McKeon G M, McGowan H A, Phinn S R. A continent under stress: interactions, feedbacks and risks associated with impact of modified land cover on Australia's climate. *Global Change Biology*, 2009, 15(9): 2206-2223.
- [82] Persson M, Moberg J, Ostwald M, Xu J T. The Chinese Grain for Green Programme: assessing the carbon sequestered via land reform. *Journal of Environmental Management*, 2013, 126: 142-146.
- [83] Boyd E. Review: Land use, land use change, and forestry: special report of the intergovernmental panel on climate change. Panel on Climate Change, 2001.
- [84] Cui Y P, Xiao X M, Dong J W, Zhang Y, Qin Y W, Doughty R B, Wu X C, Liu X Y, Joiner J, Moore B. Continued increases of gross primary production in urban areas during 2000-2016. *Journal of Remote Sensing*, 2022, 2022: 1-14.