

DOI: 10.5846/stxb201905291116

赵东升, 郭彩赞, 郭义强, 刘磊, 高璇, 张家诚, 朱瑜, 张雪梅. 气候变化对“山水林田湖草”重大生态工程的影响. 生态学报, 2019, 39(23): 8780-8788.

Zhao D S, Guo C Y, Guo Y Q, Liu L, Gao X, Zhang J C, Zhu Y, Zhang X M. Effects of climate change on major ecological projects of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8780-8788.

气候变化对“山水林田湖草”重大生态工程的影响

赵东升^{1,*}, 郭彩赞^{1,2}, 郭义强³, 刘磊^{1,2}, 高璇^{1,2}, 张家诚^{1,2}, 朱瑜^{1,2}, 张雪梅^{1,2}

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 自然资源部国土整治重点实验室, 北京 100035

摘要:“山水林田湖草”重大生态保护与修复工程是中国对复杂生态环境治理的重要探索。鉴于目前大多数重大生态工程未系统地考虑气候变化对重大生态工程的影响问题, 针对气候变化对高寒草地、北方林区以及风沙源区生态的影响, 以实施了多年的三江源生态保护工程、三北防护林工程和京津风沙源治理工程为重点, 分析了重大生态工程对全球气候变化的响应, 解构了重大生态工程与气候的反馈关系和影响程度, 指出了中国“山水林田湖草”重大生态工程实施过程中可能存在的问题, 并给出了应对建议。结果表明: (1) 气候变化对重大生态工程影响研究不足, 尤其是涉及区域生态系统结构、功能、生物多样性与脆弱性等方面以及气候变化在工程实施效果贡献率的研究。(2) 缺乏有效区分气候变化和工程实施效果的评估方法。目前能够定量识别气候变化对生态系统恢复的试验和方法比较少见, 且缺乏对气候变化未来风险预估, 导致制订的措施不能有效适应气候变化从而达到生态效益的最大化。所以在今后设计和实施“山水林田湖草”重大生态保护与修复工程时, 要充分考虑自然规律、地理地带性差异和气候因素对生态系统的影响, 并且加强建设生态综合监测和工程评价体系, 根据未来不同的气候变化情景制订不同的措施, 并依据气候动态预估来适当调整措施, 使得生态工程能发挥出最大效益, 以保证修复工程的系统性、区域性和整体性。

关键词: 气候变化; 山水林田湖草; 生态建设工程; 影响评估

Effects of climate change on major ecological projects of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands

ZHAO Dongsheng^{1,*}, GUO Caiyun^{1,2}, GUO Yiqiang³, LIU Lei^{1,2}, GAO Xuan^{1,2}, ZHANG Jiacheng^{1,2}, ZHU Yu^{1,2}, ZHANG Xuemei^{1,2}

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 Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

Abstract: The major ecological protection and restoration project mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands is an essential exploration of the complex ecological environment governance in China. Considering that the impact of climate change on major ecological projects has not been systematically considered in most major ecological projects, this paper summarizes the responses of major ecological projects in alpine grassland, boreal forest areas, and wind sand source areas in north China to climate change, taking the “Three-River Sources Ecological Project”, the “Three North Shelterbelt

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YHA0604803, 2017YFC1503003); 国家自然科学基金项目(41571193)

收稿日期: 2019-05-29; **修订日期:** 2019-09-09

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

Development Program”, and “Beijing and Tianjin Sandstorm Source Control Project” in China as examples. Moreover, the feedback relationships and degrees of influence were analyzed between major ecological engineering and climate change, and problems and suggestions during the project implementation were noted. The results show that: (1) Research on the impact of climate change on major ecological engineering is insufficient and lacks concept, especially that related to the structure, function, biodiversity, and vulnerability of regional ecosystems as well as the contribution of climate change to engineering implementation. (2) Lack of effective assessment methods for distinguishing between climate change and project implementation effects on ecosystem, and present quantitative calculations of climate change on ecosystem restoration control tests and calculation methods are relatively rare. Furthermore, the lack of future risk assessments on climate change mean that measures are unable to maximize ecological benefits. Therefore, in the future design and implementation of the major ecological protection and restoration project mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands, we must consider the influence of natural laws, geographical zone differences, and climate factors on the ecosystem, and strengthen the construction of climate change-based scientific ecological comprehensive monitoring and engineering evaluation systems. Thus, scientists can develop different measures according to different future climate change scenarios, which can be adjusted according to real-time climate monitoring, so that ecological engineering can maximize the benefits of the ecosystem and ensure systematic, regional, and integral restoration projects.

Key Words: climate change; mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands; ecological protection and restoration project; effect assessment

自 2016 年 10 月《关于推进山水林田湖草生态保护修复工作的通知》印发以来,“山水林田湖草”生态保护修复试点工程被广泛关注,目前已经开展了诸如河北环京津、陕西黄土高原、甘肃青海祁连山、吉林长白山、湖南湘江和洞庭湖等一批“山水林田湖草”生态保护修复试点工程,这些工程涵盖了东北森林地区、西北祁连山地、京津水源涵养区、黄土高原地区、南方丘陵山地等重要的生态功能区。这些区域多为生态脆弱地区,生态系统受损严重,环境问题较为突出,开展“山水林田湖草”生态保护修复工程既是建设社会主义生态文明的必然要求,也是破解生态环境难题的重要举措,对于构建国家生态安全格局和维系民族永续发展具有重要意义。

IPCC 第五次气候评估报告指出,近百年(1909—2011 年)来,中国陆地区域增温速率高于全球平均值,达 $0.9—1.5^{\circ}\text{C}$,最近 50—60 年全国年平均气温上升速率约为 $0.21—0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{[1]}$ 。随着气温的上升,降水分布不均现象更加明显,极端事件频率显著增加。由于正在实施的重大生态工程多位于我国生态脆弱区,水土资源配置失稳、人地矛盾突出,大多数重大生态工程在最初设计时可能未考虑气候变化的影响,或对气候变化的影响估计不足,在重大生态工程实施过程中不能完全遵循自然规律,如不能基于人与自然系统的全局和长远利益角度进行科学决策,将无法保证生态工程修复的系统性和完整性,也无法就气候变化的应对决策提出科学的指导。因此,开展关于气候变化对重大生态工程和生态系统恢复的影响研究显得十分紧迫。

本文针对气候变化对高寒草地、北方林区以及风沙源区生态的影响,以实施多年的三江源生态保护工程、三北防护林工程和京津风沙源治理工程为例,分析全球气候变化对重大生态工程的影响与反馈,并指出了工程实施过程中存在的问题,希望能为正在和即将实施的“山水林田湖草”生态保护修复工程提供参考价值,为达到生态系统整体保护、系统修复、综合治理的目标提供理论依据,为当前和今后一段时期内的生态文明建设提供科学支撑。

1 重大生态工程区气候变化过程

中国的重大生态工程区气候变化特征如表 1 所示。近 50 年来,各生态工程区气候变化均以增温为主要特征,且气温倾向率均高于同期全国平均气温($0.22—0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),大兴安岭天然林保护工程区气温增幅最

大,达 0.88℃/10a,其余工程区增幅接近,在 0.31—0.36℃/10a 之间。各区降水变化差异较大,三江源生态保护工程区和大兴安岭天然林保护工程区近年来年降水量不断增加,气候呈暖湿化趋势;而“三北”防护林工程区和京津风沙源治理工程区则呈现暖干化趋势,但二者的年平均风速明显降低,对于减弱沙尘暴灾害具有积极作用。

表 1 重大生态工程区气候变化特征

Table 1 The characteristics of climate change in major ecological engineering areas

重大生态工程区 Major ecological engineering area	气候变化特征 The characteristics of climate change	参考文献 References
三江源生态保护工程区 Three-River sources ecological project	三江源地区近 50 年来增温显著,地区平均气温倾向率为 0.36℃/10a,澜沧江源区、长江源区和黄河源区年平均气温倾向率分别为 0.37、0.34、0.37℃/10a,三个源区均为冬季增温幅度最大,其次为秋季和夏季,春季最小;年降水量变化存在周期性规律,1975—2004 年降水量呈较少趋势,倾斜率为 -9.3 mm/10a,2004—2012 年间,降水量逐渐增多,由前 30 年的 470.6 mm 增加至 518.66 mm,倾斜率为 68.44 mm/10a,中西部长江源区降水量增加最为显著,东部黄河源区降水量增加较少。气候变化由 2004 年以前的暖干趋势转变为之后的暖湿趋势	[2-5]
“三北”防护林工程区 Three north shelterbelt development program	区域平均气温呈显著上升趋势,年均温由 1960 年的 6.29℃ 上升到 2011 年的 7.19℃,增温速率为 0.346℃/10a。区域内内蒙古高原、黑龙江松嫩平原、吉林西部平原、柴达木盆地均为显著增暖区,华北北部、山西西部、陕北、陇东、塔里木盆地均为增温低值区;年降水量呈下降趋势,由 1960 年的 317.6mm 下降到 2011 年的 280.8 mm,下降速率为 3.554 mm/10a。区域内西部地区降雨量以增加为主,而东部地区则以减少为主。1970 年以来区域年平均风速逐渐减弱,1970—1990 年站点平均风速 2.68 m/s,至 2010—2015 年时,减弱到 2.37 m/s	[6-8]
京津风沙源治理工程区 Beijing and Tianjin sandstorm source control project	近 50 年京津风沙源治理工程区年平均气温不断升高,增幅为 0.34℃/10a;年降水量呈下降趋势,气候倾向率为 -11.93 mm/10a;气候呈暖干化发展趋势。工程区沙尘暴集中分布在春季,春季气温增幅显著,降水量在林西-多伦-张家口-蔚县以西呈下降趋势,在以东地区呈上升趋势。1957—2007 年,春季风速整体呈波动下降趋势,1980—2007 年较 1957—1979 年下降了 17.3%	[9-10]

2 气候变化对重大生态工程的影响

气候变化与重大生态工程之间存在着互馈式影响。温度升高导致的蒸发量增加、降水季节分配变化,能引发干旱、洪涝频发、径流量季节变化规律异常等问题,给生态工程的水资源调配、环境改善、灾害防治的综合发挥带来严峻考验^[11-15]。此外,气候变化和极端事件可能对重大生态工程区的生态系统结构、功能和分布产生影响,从而导致关键物种的丧失,破坏生态系统的稳定性和可逆性,进一步加剧生态系统的脆弱性,从而影响区域的经济发展与社会稳定,对国家安全和社会的发展构成新的挑战。本研究选择了实施范围较广、区域影响较大且对气候变化较为敏感的 4 个重大生态工程,总结了气候变化对其的影响。

2.1 高寒草地重大生态工程

三江源位于青藏高原腹地,有“中华水塔”之称,是长江、黄河和澜沧江的源头,分布着广阔的高寒草地,是高原生物多样性最集中的地区和青藏高原生态安全屏障的重要组成。近年来,由于气候变化和人类活动的双重影响,该地区生态系统功能持续下降,影响了源区中下游的可持续发展。为了改变这种不利情况,我国规划实施了三江源区生态保护和建设工程。

1980 年以来,三江源地区的气候总体上向暖湿转变。1982—2013 年期间,三江源植被 NPP 呈现上升趋势,草地生产力也表现为线性增加趋势。暖湿的气候对三江源地区的生态景观变化具有正面效应,贡献率约为 87%,人类活动(工程)的贡献率为 13%^[16];其中在 1998—2012 年间,由于生长季温度的上升,三江源地区的植被覆盖度有所提高^[17];气温升高使得冰川退缩和冰川融水增多,湿地和水域面积的径流量增加,导致雪线以下草地 NPP 的增加,以及地下水库径流调节作用的增强^[18]。未来三江源地区的气温和降水将会持续上升,冰川大面积消融,草地面积增加,从而挤占其他景观类型分布区域^[19];2005—2013 年自工程实施以来,三

江源区域草地平均产草量比工程实施前 17 年的平均产草量提高了 20.31%,从 2003 年减蓄措施实施后 10 年内,平均载畜压力比 15 年前下降了 36.1%,气候变化和生态保护建设工程是草地产量提高和载畜压力减轻的主要原因^[20]。截止到 2015 年,三江源气候变化贡献了长江源地区年尺度植被 NDVI 增加的 41.5%,比生态保护工程对其的影响小 17.0%^[21]。总体而言,自三江源生态保护工程开始以来,该地区的生态系统总体表现为“初步遏制,局部好转”的态势^[22],并且气候变化对生态保护工程起着积极正面的促进作用。

也有研究指出,1982—2013 年之间,人类活动在 2010 年之前积极效应显著,2010 年之后效应减退,所以认为生态保护工程缺乏长期效应^[23]。正在实施的三江源生态保护工程对生态环境恶化趋势尚未得到根本性遏制,环境治理的速度跟不上生态恶化的速度,仍存在着诸多问题。首先,尽管植被覆盖度和草地生产力有所提高,但土壤保持功能没有实质性的提高,区域冰川融水和降水增多,增加了土壤侵蚀的敏感性,导致水体流失现象严峻^[24];草地退化的好转仅是植被长势的好转,草地面积退化趋势未能得到有效遏制,该区域草地仍在以每年近 8 万亩的速度退化和沙化^[25]。其次,三江源生态保护工程生态移民安置问题突出,该区经济基础薄弱,产业结构单一,工程实施围栏禁牧,退牧还草等措施后,移民的长远生计面临很大问题,生态移民回流现象严重^[26]。最后,三江源生态体系的法规建设还不健全,生态保护的专业化队伍建设不能满足需求,并且科技力量支撑不够^[27]。

总体而言,三江源地区整体生态状况趋于好转,一系列生态工程的实施对于恢复植被覆盖度、草地生产力、水源涵养能力以及提升生态系统生物多样性起到了积极作用。许多研究表明,当今三江源地区气候主要向暖湿转变,其中气温对草地生产力和高寒草地植被覆盖起重要作用,而降水对生产力的增加起关键作用。因此,暖湿化的气候变化趋势对工程区实施效果和生态景观变化具有正面效应。但是区域生态系统的健康状况远未达到理想状态,在未来必须扩大工程的实施范围,加大生态环境保护和建设力度,尊重客观自然规律,坚持生态自然修复为主,人工手段为辅的原则,充分利用气候变化的优势条件,方能实现“整体恢复,全面好转,生态健康,功能稳定”的最终目标^[25,27]。

2.2 北方林区重大生态工程

为改善我国北方林区的生态环境,减少自然灾害、维护生存空间,我国政府于 1979 年规划了三北防护林体系工程。对三北防护林工程区内的气候变化分析发现,过去几十年该区气候呈暖干化的趋势,且未来也将延续这种趋势^[28]。三北防护林工程的生态系统功能集中于治理沙化土地、抵御风沙侵蚀、保护农田和恢复牧场等^[8],间接功能则包括固碳释氧^[29]、涵养水源^[30]、防风固沙^[31]等。在气候暖干化背景下,三北防护林工程区将面临干旱面积扩大、荒漠化程度加剧、区域植被逆向演替以及现存防护林在气候变化的干扰下衰退的风险。叶佳琦等研究发现,三北防护林工程区域的草地、湿地、森林生境对气候变化存在显著的响应差异,气候暖干化对森林和湿地的植被覆盖状况有明显促进作用,草原比湿地和森林对暖干化气候的响应更为强烈^[32]。

通过比较 2000 年和 2012 年的植被覆盖度数据,Tian 发现三北防护林有效改善了内蒙古的植被恢复,在 15.38% 的植被显著增加区域中,气候变化和生态工程建设两种因素发挥的作用各占一半,而在 1.64% 的植被显著退化区域中,极少部分由气候变化引起,多数由人口增长、城市扩张等因素引起^[33];通过对近 40 年来中国林业生态工程对森林生态系统功能影响的分析表明,相对于其它工程,三北防护林工程实施历史长,工程区内森林生态系统结构和功能相对完整,对于净化大气环境、固碳释氧、缓冲气候变化影响等方面发挥了积极的作用^[34]。气候变化将导致工程区脉动式降水的频率和强度发生变化,使得群落中各功能群达到生物量峰值的时间发生改变。气候暖干化增加了河流、湖泊的水体蒸发量,降低了水源涵养量和河流径流量,减少了水资源的有效性,进而导致部分工程区极端气候频发,树木大面积死亡,对工程区植物群落和生态功能产生不利影响^[35]。

受气候变化导致的年均降水量降低,干旱影响可能增强^[36],三北防护林部分区域出现广分布、大面积、多树种的明显衰退迹象^[37],地方大量开采地下水造成水位下降也加剧了林分退化速度^[38],甚至出现大面积枯死现象,还有些区域树种长成“小老头树”^[39]。出现“小老头树”是因为西北大部分地区适合草灌类植被生

长,而三北防护林都是以乔木为主(例如杨树和云杉),乔木的生长需要大量的水分,造林会减少土壤含水量,地下水位降低,使局部地区荒漠化更加严重^[40]。有些地区造林并未考虑地理地带性差异,致使造林成本较高、成活率低和维护困难,许多地方造林不见林^[41],这在一定程度上违背了生态适宜的原则;同时三北地区防护林建设存在树种单一、造林密度偏大、多样性较低的问题,致使防护林受到病虫害感染的风险极高^[42]。在气候暖干化的背景下,这些不利影响可能会进一步被放大,影响三北防护林生态效益的充分发挥。

总体上,三北防护林对生态环境的保护具有积极的效果,该区气候变化被认为有暖干化与暖湿化两种趋势,暖湿化对于三北工程部分地区植被覆盖增加与固碳释氧、防风固沙、净化大气等生态功能具有正面效应。气候的暖干化则不利于三北防护林工程,水分的减少会造成林分退化、植被死亡,进而影响植被群落、生态功能和生态系统服务,而城市扩张、地下水开采和工程管理不善等人类因素又加剧了这一状况。

2.3 风沙治理重大生态工程

我国北方是重要的生态安全屏障,具有十分重要的战略地位,但由于人为活动导致的土壤风蚀加剧,土地生产力下降,沙尘暴频发,严重威胁了当地及周边居民的生产和生活。为减少中国北方风沙天气,改善和优化周边地区的生态环境状况,有效固土防沙,我国政府于 2000 年启动了京津风沙源治理工程,这是中国抗击风沙的重要生态工程。

自工程实施以来,京津风沙源区的中部和西部县、市(旗)的植被覆盖度有不同程度的降低^[43],该区东部、中部和南部地区植被盖度变高、降水有所增加、风场强度相对变小^[44]。沙化土地动态分析显示,在 2000—2010 年,京津风沙源治理工程区沙化面积总体上先减少后增加,相比 2000 年,2015 年京津风沙源区有 51% 的区域植被覆盖度增加,49% 区域植被覆盖度未变或降低。覆盖度未变或降低区域主要集中在京津风沙源区的中部和西部县、市(旗),其中降水变化是决定京津风沙源区植被生长状况重要因子^[45]。浑善达克沙地在 1994—2001 年,沙地退化主要驱动力为气候变化和放牧强度,湿地萎缩主要受降雨变化的影响,2001—2014 年,沙地植被逐渐恢复,这一阶段湿地的退化主要受风速增加、温度升高等自然因素和人为放牧等因素共同影响^[46]。近 50 年来,京津风沙源治理工程区沙尘暴发生频次呈显著下降的趋势,风速和相对湿度的变化是影响沙尘暴减少的最重要气象因子。近 30 年来,沙尘暴变化主要受到植被覆盖与相对湿度的影响,贡献率分别为 32.7% 和 44.5%^[10]。

在京津风沙源区,人工草地种植能最大程度的增加群落的地上生物量,快速恢复草地生产功能,但群落地下生物量大幅下降,降低了群落总生物量,造成草地生物质碳库流失,并显著降低了植物群落的物种多样性。长期围封禁牧措施对草地物种多样性的抑制作用相对较小,但长期的工程干预很有可能对工程区的植物群落物种多样性造成负面影响^[47],在气候变化条件下,这种不利影响可能会被进一步放大。自 2000 年以来,京津风沙源区内 NDVI 呈增加趋势,NDVI 下降区域主要集中在沙源区西南至东北条带上,干旱是 NDVI 下降的主要原因。其中 2007 年和 2009 年的夏季干旱造成 NDVI 分别减少了约 13.06% 和 23.55%,抵消了生态恢复措施的积极效应。京津风沙源治理工程一期(2001—2010 年)净固碳量为 63.75—64.38 Tg C,年均净固碳量为 6.38—6.44 Tg C^[48]。

总体来说,京津风沙源治理工程区整体生态状况趋于好转,一系列生态工程的实施对于恢复自然植被和提升生态系统防风固沙服务起到了积极作用^[44]。但也有研究表明,温度的升高和降水的减少对工程区植被生长有不同程度的负面影响,其中降水量起主导作用,气温为次要因素^[9,45]。气候的暖干化会导致地表水减少,人们开采地下水又加剧地表水的萎缩^[46],气候变化与人类活动共同对京津风沙源治理工程的效果产生不利影响。未来需进一步保护植被多样性,避免种植需水量较多的高大乔木,以低矮植被为主,保护现有的林草植被,顺应当地气候进行生态改良。

3 主要问题与未来发展方向

了解气候变化对重大生态工程实施的影响及存在问题,有助于科学优化“山水林田湖草”生态保护修复

工程的实施方案、保障工程实施效果,确保后续生态工程部署更具科学性和针对性,这不仅是国家重大迫切的需求,也将促进恢复生态学的科学实践和理论创新。通过气候变化对三江源生态保护、三北防护林、京津风沙源治理等工程影响研究的梳理,发现目前各项重大生态工程存在以下几方面的问题。

3.1 主要问题

(1) 气候变化对重大生态工程的影响研究不足

综观已有气候变化与重大生态工程影响的研究发现,大部分研究聚焦于重大生态工程地区的气候因子变化趋势^[49]、工程的生态效益^[50]、工程的气候效应等方向,小部分关注气候变化对生态工程影响的研究集中于对区域植被覆盖度^[17]、植被生产力^[23]、土壤侵蚀^[24]、水体与径流变化^[51]方面,少有涉及对区域生态系统结构、功能、生物多样性与脆弱性等方面的影响研究。此外,已有文献中关于气候变化对多个重大生态工程影响的研究有所偏倚,对三江源生态保护工程的研究数量相对较多,而对其他生态工程的研究则在数量与综合性上有所欠缺。综合来看,现有研究难以系统全面阐述气候变化对重大生态工程的影响,无法满足多系统、多工程、多时段的关注需求。

另外,由于缺乏针对重大生态工程理论的研究方法,已有研究中多使用常规生态研究方法对工程实施地区进行分析,而忽略了重大生态工程中人类参与的因素,和部分植被具有人工属性的特点。相对于自然生态系统,重大生态工程对于气候变化的响应更为敏感,因此已有研究得出的结论有可能存在偏差,面向气候变化下重大生态工程影响研究的科学理论与技术方法亟待完善。

(2) 重大工程缺乏适应气候变化的理念

气候暖干化对于生态工程区植被产生了负面影响,而暖湿化则对植被产生了正面影响。气候变化下热量资源增加、光能资源充分、山区降水资源充沛的特点对生态工程具正面影响,而干旱加剧、暴雨冰雹增多、霜冻危害加重、大风增多则具负面影响^[45]。研究认为三北防护林工程中草场退化与树木缓慢生长甚至死亡是由于忽视了植被的气候适应性^[52],所有重大生态工程都需开展适应气候变化的科学研究,但我国在生态保护工程的气候可行性论证、气候变化和人为干预作用下区域生态响应与应对技术方面开展的研究工作尚不多,这可能是由于生态工程实施时间早、时间跨度大所导致。以三北防护林工程为例,1978 年以来三北防护林工程地区总体呈现暖干化趋势,其中防护林建设前(1960—1977)为偏冷干期,1978—1995 年区域气温与降水逐步升高,1996 年后表现为显著暖干趋势^[8]。工程实施早期,气候变化对生态工程影响不显著,因此建设中忽视了适应气候变化的理念,导致了建设工程后期生态系统功能的退化。

(3) 缺乏有效区分气候变化和工程实施效果的评估方法

生态工程下生态系统的退化与恢复的动态过程是气候变化与人为活动共同作用的结果,目前能够定量划分生态工程地区各类植被生产力动态驱动因子的研究仍然比较少见。气候变化与生态工程实施同时对区域生态系统产生作用,主要表现为相互促进、相互抵消或加速恶化。黄麟等^[8]通过分析三北防护林工程区生态系统防风固沙服务量变化评价工程防风固沙效应,认为以风场减弱为主的气候变化对生态系统防风固沙服务变化起到了主要作用,气候变化背景下生态工程的正面作用也十分明显。张宝庆等^[53]通过监测黄土高原植被建设成效,认为大规模植被建设措施的实施促进了该地区植被恢复,但也使研究区植被覆盖对气候等自然因子的变化敏感度降低。刘凤和曾永年^[54]利用 CASA 改进模型估算青海高原植被 NPP,并探讨了不同区域生态保护工程建设的成效,结果表明,气候与不同生态保护工程的实施对区域 NPP 时空格局及变化趋势存在不同程度的影响。已有研究多利用遥感图像提取植被覆盖度数据,评估的生态系统要素主要是植被面积与覆盖度,利用生态模型或统计学方法分离气候与人类活动的影响,这些方法缺乏基础的理论指导,实践效果也可能存在较大的偏差,这是由于气候变化的复杂性与生态系统功能的多样性所共同决定的。而科学区分气候变化和生态工程的影响,对于准确评估生态工程的作用至关重要,因此亟待发展气候变化和工程实施效果的评估理论与方法,以支持“山水林田湖草”生态保护修复工程等重大生态工程建设实施。

(4) 缺乏气候变化未来风险预估,无法进行规划适应

三北防护林工程、京津风沙源治理工程覆盖的北方地区,大部分属于我国干旱半干旱区,受气候因子尤其是水分因子的影响大,生态环境脆弱,为气候变化高风险区域。针对各重大生态工程,已有一些研究对工程地区的未来气候变化趋势进行了模拟和分析,但是对未来气候变化下生态系统脆弱性与风险的研究依然比较少。而各类以适应气候变化为目的的管理行动,被认为可以有效减少气候变化对陆地生态系统造成的不利影响,降低气候变化风险,提高生态系统及其物种适应气候变化的能力^[55]。由于缺乏对气候变化未来风险的分析,难以评价未来重大生态工程中生态系统面临的风险与管理措施对生态系统恢复的绩效,无法为决策者提供进行规划适应的理论依据。

3.2 未来发展方向

中国自然条件复杂多样,生态脆弱区(如农牧交错带、江河源区、石漠化山区等)面积较大,生态与环境的恶化成为一些地区可持续发展的障碍,正在实施的“山水林田湖草”生态保护修复工程主要位于我国的重要生态功能区和生态脆弱区,而这些地区多是气候变化的敏感区,气候变化和极端事件可能会进一步加剧生态环境的脆弱性,降低重大工程的实施效果。在这些地区实施重大生态建设工程,我国仍缺乏成熟的经验可供遵循,气候变化将使这一问题更为复杂。针对“山水林田湖草”生态保护修复工程实施过程中可能面临的一些问题,本文主要提出了以下几点建议。

(1) 充分考虑地理地带性差异

有些地区的生态工程可能未考虑地理地带性差异,将造成局部地区生态环境更为恶化。只有尊重地带性差异,才能有效提高生态系统功能。在适合森林生长区种植同时具有生态效益和经济效益的混交林,加强已有的森林管护,对密度过大的林分进行抚育复壮,合理布局生态保护工程。在干旱半干旱区适宜灌木生长地区种植灌木,采用斑块状的种植方式,有利于集结降水和提高降水捕获率,并且优势灌木对深层土壤水或地下水有向上提升的作用,从而可以有效恢复土壤生境,实现其生态恢复^[56]。另外,引水工程计划需要十分谨慎,不适宜的调水将破坏天然植被,加重土壤次生盐碱化。“山水林田湖草”生态保护修复工程实施要符合自然植被的空间分布规律,充分尊重自然规律、尊重地理地带性、尊重“山水林田湖草”生命共同体理念,坚持宜林则林、宜灌则灌、宜草则草的近自然恢复原则,提高生态系统功能,实现生态效益和经济效益相统一。

(2) 将气候变化因素纳入工程设计和实施过程中

在“山水林田湖草”生态保护修复工程实施过程中要充分考虑气候变化风险,特别是气候变化对生态系统结构和功能,以及适宜分布区的影响,提前采取有效应对措施。如,在三江源地区,气候变化以暖湿为主,降水量的增加在促进植被生长的同时,也造成了降雨侵蚀力的明显提高,而土壤侵蚀敏感性的提高,使得土壤水蚀量有所增加,所以在实施工程时应该有科学的规划部署^[2];在全球变暖背景下,气温升高从短期来看会显著促进部分地区有机碳的固定,而从长期来看,气温的增加会增强土壤有机质的分解,完全抵消掉植物生长的固碳量。降水量的增加降低了土壤透气性、减缓了土壤有机质的分解,促进了有机碳的截获,但是过多的降水可能会引起土壤水蚀量的增加,从而减少有机碳的积累^[57]。所以将气候变化因素纳入生态工程的规划和设计中,制定与气候变化变化相适宜的实施办法,在实现生态效益最大化的同时,也可以增加生态工程的固碳能力。

(3) 建立稳定的生态综合监测评估机制

“山水林田湖草”重大生态保护与修复工程应大力加强生态工程监测机制的建设,特别是加强气候变化影响的监测。因为目前的生态工程监测尚未达到天、空、地一体化综合实施,也没能够建立稳定的运行机制,针对气候变化的影响未被囊括在监测项目中,导致生态工程的评价缺乏针对性和系统性,难以全面实现工程规划之初设定的目标,难以从格局、质量、服务等方面反映生态系统变化,难以区分气候变化和生态建设工程对生态系统的影响,使得工程效果无法被合理评估。在“山水林田湖草”生态保护修复工程的实施过程中,应构建全面、长期、动态的生态系统监测体系,科学评估工程的效果和气候变化的贡献,这对于工程规划、调整和实施具有非常重要的意义。

(4) 构建基于气候变化的科学工程评价体系

要积极探索“山水林田湖草”重大生态工程实施效果的综合科学评价体系,把气候因素纳入到工程评价体系当中,明确气候变化对生态系统工程的促进或阻碍作用,从而更好地判断工程和气候变化在生态系统恢复中的贡献率。发展具有特色和针对性的生态保护和建设的评价方法,科学合理部署生态建设工程,客观地评估工程实施所产生的生态成效,以及气候变化对生态保护工程效果的作用,为“山水林田湖草”生态保护修复工程的有效实施提供保障。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Summary for policymakers//Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, van der Linden P J, Hanson C E, eds. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 彭景涛. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化. 地理学报, 2011, 66(11): 1451-1465.
- [3] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. 地理学报, 2016, 71(1): 3-20.
- [4] 张士锋, 华东, 孟秀敬, 张永勇. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析. 地理学报, 2011, 66(1): 13-24.
- [5] 白晓兰, 魏加华, 解宏伟. 三江源区干湿变化特征及其影响. 生态学报, 2017, 37(24): 8397-8410.
- [6] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 刘宪锋, 廖光明. 三北防护林工程区气候变化分析. 水土保持通报, 2014, 34(1): 273-278.
- [7] 陈赛赛, 孙艳玲, 杨艳丽, 王中良. 三北防护林工程区植被景观格局变化分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 85-90.
- [8] 黄麟, 祝萍, 肖桐, 曹巍, 巩国丽. 近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应. 地理科学, 2018, 38(4): 600-609.
- [9] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 夏朝宗. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [10] 覃云斌, 信忠保, 易扬, 杨梦婵. 京津风沙源治理工程区沙尘暴时空变化及其与植被恢复关系. 农业工程学报, 2012, 28(24): 196-204.
- [11] 李志, 赵西宁. 1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析. 自然资源学报, 2013, 28(2): 287-299.
- [12] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 孙文义, 赵广举. 1961—2014 年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 136-143.
- [13] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [14] 程洁, 欧阳杨, 张佳琦, 由珈齐, 张银, 赵颖慧, 程鹏. 我国东北地区冬季气温时空变化特征分布的研究. 林业科技情报, 2017, 49(3): 106-112.
- [15] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 姜会飞, 潘志华, 乔宇, 邵长秀, 丁梦琳, 尹紫薇, 胡莉婷. 1961—2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析. 农业工程学报, 2017, 33(6): 124-132.
- [16] 李惠梅, 张安录. 三江源草地气候生产力对气候变化的响应. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2014, 33(1): 124-130.
- [17] 刘正佳, 邵全琴. 三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系. 水土保持研究, 2014, 21(6): 334-339.
- [18] 蒋冲, 王德旺, 罗上华, 李岱青, 张林波, 高艳妮. 三江源区生态系统状况变化及其成因. 环境科学研究, 2017, 30(1): 10-19.
- [19] 吴晓全. 气候变化对三江源地区生态景观格局的影响及其模拟[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018: 1-63.
- [20] 唐见, 曹慧群, 陈进. 生态保护工程和气候变化对长江源区植被变化的影响量化. 地理学报, 2019, 74(1): 76-86.
- [21] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 刘璐璐. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 35-44.
- [22] 李作伟, 吴荣军, 马玉平. 气候变化和人类活动对三江源地区植被生产力的影响. 冰川冻土, 2016, 38(3): 804-810.
- [23] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 樊江文, 徐新良, 王军邦. 2005—2009 年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. 地理研究, 2013, 32(9): 1645-1656.
- [24] 单菁菁. 三江源生态保护成效、问题与对策. 开发研究, 2015, (5): 21-24.
- [25] 韩墨武. 推进三江源生态保护与建设的思考——以果洛实施三江源生态保护与建设工程为例. 青海国土经略, 2013, (4): 34-36.
- [26] 李晓南. 三江源生态保护建设工作的回顾与展望. 青海环境, 2014, 24(4): 149-151.
- [27] 姜凤岐, 于占源, 曾德慧, 朱教君. 气候变化对三北防护林的影响与应对策略. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1702-1705.
- [28] 鲁天平, 郭靖, 刘永萍, 玉苏普江·艾麦提. 新疆森林碳储量与造林项目. 防护林科技, 2015, (12): 73-74.
- [29] 王晓慧, 陈永富, 陈尔学, 张元应, 锥艳兰. 基于遥感和 GIS 的三北防护林工程生态效益评价研究——以山西省中阳县为例. 水土保持

- 通报, 2011, 31(5): 171-175+267.
- [30] 黄麟, 曹巍, 巩国丽, 赵国松. 2000—2010 年中国三北地区生态系统时空变化特征. 生态学报, 2016, 36(1): 107-117.
- [31] 叶佳琦, 李政海, 乌云其其格, 张靖, 鲍雅静, 胡志超, 刘翀, 徐媛, 陈佳. 呼伦贝尔草原、湿地和森林植被对气候变化的响应. 中国草地学报, 2018, 40(6): 26-32.
- [32] Tian H J, Cao C X, Chen W, Bao S N, Yang B, Myneni R B. Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 276-289.
- [33] 宋庆丰. 中国近 40 年森林资源变迁动态对生态功能的影响研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [34] 颜廷武. 暖干性气候变化对森林生态水文功能的影响. 辽宁林业科技, 2018, (4): 61-63.
- [35] 马文元. 三北防护林林分退化及更新改造调研报告(一). 林业科技通讯, 2016, (3): 10-15.
- [36] 刘源森. 辽宁省三北防护林体系人工林营造现状及对策. 辽宁农业科学, 2019, (1): 64-66.
- [37] 侯波, 徐乐. 浅谈加强三北防护林退化林分的修复. 防护林科技, 2017, (10): 91-93.
- [38] 宋亚卓. 甘肃省三北工程林分退化原因及修复措施. 防护林科技, 2015, (7): 58-59.
- [39] 李建东. 关于“三北防护林体系建设工程”的思考. 草业科学, 2014, 31(12): 2195-2197.
- [40] 叶磊, 吴来胜. 三北防护林体系建设存在的问题及对策. 林业科技情报, 2008, 40(4): 19-20.
- [41] 赵军. 简析三北防护林工程建设中若干问题及应对建议. 防护林科技, 2018, (7): 58-58, 68-68.
- [42] 李庆旭, 张彪, 王爽, 谢高地. 京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖状况的区域差异研究. 地学前缘, 2018, 25(5): 298-304.
- [43] 吴丹, 巩国丽, 邵全琴, 曹巍. 京津风沙源治理工程生态效应评估. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 117-123.
- [44] 晁雪林. 京津风沙源治理区近 10 年沙化土地动态变化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [45] 高晓霞. 浑善达克沙地景观格局动态变化及其驱动力分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [46] 李愈哲, 樊江文, 于海玲. 京津风沙源治理工程不同恢复措施对草地恢复过程的差异性影响. 草业学报, 2018, 27(5): 1-14.
- [47] 刘博杰. 中国典型重大生态工程温室气体收支与净固碳效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [48] Zhao G J, Tian P, Mu X M, Jiao J Y, Wang F, Gao P. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 387-398.
- [49] Li G, Sun S B, Han J C, Yan J W, Liu W B, Wei Y, Lu N, Sun Y Y. Impacts of Chinese Grain for Green program and climate change on vegetation in the Loess Plateau during 1982-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 177-187.
- [50] 张泽秀, 刘利民, 贾燕, 李秀芬. 三北地区防护林气候生态适应性分析. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1696-1701.
- [51] 史凯航. 辽宁三北防护林退化林分的现状、成因及修复措施. 防护林科技, 2015(2): 50-51.
- [52] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. 农业工程学报, 2011, 27(4): 287-293.
- [53] 刘凤, 曾永年. 近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响. 生态学报, 2019, 39(5): 1528-1540.
- [54] Settele J, Scholes R, Betts R A, Bunn S, Leadley P, Nepstad D, Overpeck J, Taboada M A, Fischlin A, Moreno J M, Root T, Musche M, Winter M. Terrestrial and inland water systems//IPCC, ed. *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015: 271-360.
- [55] 李新荣, 周海燕, 王新平, 刘立超, 张景光, 陈国雄, 张志山, 刘玉冰, 谭会娟, 高艳红. 中国干旱沙区的生态重建与恢复: 沙坡头站 60 年重要研究进展综述. 中国沙漠, 2016, 36(2): 247-264.
- [56] 戴尔阜, 黄宇, 赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展. 生态学报, 2015, 35(12): 3908-3918.