

人工林碳储量及影响因子研究进展

吴思思¹, 邢 玮^{1,2*}, 葛之蕙¹

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学生物与环境学院,
江苏 南京 210037; 2. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153)

摘要: 为了解人工林在整个陆地生态学系统中的固碳作用, 调查研究了大量有关人工林碳储量的文献资料, 对国内外人工林碳储量的研究进行梳理。归纳了人工林碳储量的研究结果以及人工林碳储量影响因子研究进展, 为我国开展人工林碳储量动态及过程的研究提供参考依据。

关键词: 人工林; 固碳; 碳储量; 碳汇能力; 碳循环; 研究进展

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-7380.2017.06.013

大量化石能源的消耗燃烧, 大气中 CO₂ 的含量逐年增加, 由温室气体 CO₂ 等所引起的温室效应也愈发严峻。2007 年 11 月联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 4 次评估报告表明, 气候变暖的客观现状是毋庸置疑的, 所有大陆和多数的海洋观测数据结果表明, 很多的自然系统正在经历着区域的气候变化, 特别是受到温度上升的影响。

森林作为陆地生态系统的主体, 对全球碳循环和气候变化均产生着重要影响^[1]。森林面积仅占全球陆地面积的 27%, 却拥有全球近 85% 的植物碳和 35% 的土壤碳, 是整个陆地生态系统的最主要的碳库, 在全球碳循环中具有至关重要的作用^[2-3]。人工林被认为是用来提高森林覆盖率最主要的措施, 它在评价森林对陆地碳汇的贡献中具有重要的作用^[3]。大量研究结果表明, 营造人工林是成为固定大气中的 CO₂、防止全球气候继续变暖的有效途径之一^[4-5]。所以, 加强对人工林碳储量方面的相关研究, 对预测并维护其系统长期生产力, 减缓大气 CO₂ 浓度上升, 将具有极其重要的指导作用。

1 森林生态系统碳储量研究进展

国内外有关碳循环的研究很多, 国际科联 (ICSU) 组织的地圈生物圈计划 (IGBP)、美国启动的 BigFoot 项目及《美国碳循环研究计划》(CCSP)、

德国、澳大利亚、日本和加拿大等国均开展了碳通量观测和碳循环的研究。从研究的空间尺度来看, 目前主要集中在全球和大的区域尺度上, 如全球大气、海洋和陆地生态系统的碳储量和通量估算, 或某一大洲、国家和地区的碳库和通量研究^[6-8]。从生态系统的类型来看, 主要集中在森林、草地、湿地、内陆水体、边缘海、深海等自然生态系统, 以及农田生态系统方面。如 Dixon 等对全球不同区域森林碳储量进行研究, 得到热带森林、温带森林及北方森林生态系统碳储量分别是 428, 159, 55 Gt^[9]。方精云对北半球中高纬度带在 1987—1992 年间的森林碳密度估算为 43.6 Mg/hm²^[10]。现有的众多研究结果表明: 陆地生态系统是一个重要的汇, 在减少全球碳收支不平衡的现状中, 担当着举足轻重的地位。

我国已在不同类型系统中建立了 CO 通量观测网 (ChinaFlux) 和 CMA—Flux 通量观测系统。这些工作涉及到不同时间和空间尺度的碳循环过程中的主要碳储量和通量的空间格局和时间变化、控制碳循环动态变化的机制和反馈、未来碳循环的变化及人类调控的可能性方法等。王效科基于第 3 次森林清查资料数据, 预估了对中国森林生态系统植被层碳库结构, 强调了中国森林对全球碳循环的重要影响^[11]。方精云等以中国近 50 a 来的森林资源清

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-10-23

基金项目: 江苏省省属公益类科研院所能力提升项目“江苏杨树农田林网更新改造及效益监测评价技术” (BM2015021) 子课题“杨树农田林网更新改造技术与示范” (BM2015021-2)

作者简介: 吴思思 (1994-), 女, 江苏省溧阳人, 硕士研究生。主要研究方向: 森林生态学, 城市生态学。

*** 通信作者:** 邢 玮 (1981-), 女, 河北省高邑人, 副研究员, 博士研究生。主要研究方向: 森林生态学。

查资料为基础,也在更大的空间尺度上对中国森林的植被碳库动态做了进一步分析^[12]。徐新良等在计算全国以及各省区的森林面积、碳储量和平均碳密度的过程中指出,30 a 间(20 世纪 70 年代初期到 2003 年),中国森林面积($1.08 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增加到 $1.43 \times 10^8 \text{ hm}^2$)和碳储量($3.848 8 \text{ Pg C}$ 增加到 $5.506 4 \text{ Pg C}$)保持着稳定的增长^[13]。以上研究内容,主要是以国家尺度对森林生态系统碳储量以及森林对全球碳循环的影响进行估算。在森林碳储量的估算中,不同学者所采用的方法不同。此外,森林生态系统碳储量的空间异质性以及时间变化的复杂性,从而使得森林碳储量的估算仍存在很大的不确定性^[14-15]。

随着森林生物量与碳储量研究的深入,一些学者开始关注森林生态系统碳循环模型研究,在冯宗炜、李文华等最早开始对中国森林植被生物量研究的基础上,随后开展了大区域森林生物量、碳储量的模拟研究,其中最具代表性的是唐守正、青辉等提出的与材积兼容的生物量模型;徐德应研建了适用于中国森林碳储量计算以及土壤利用方式改变后碳排放的计算机模型(CARBON)^[16]。该模型的分区、分林种计算模式,提高了对中国森林碳储量的估算准确度。方精云为克服 Brown 和 Lugo 提出的材积源生物量模型的不足,基于全国森林资源清查资料,提出了生物量转换因子连续函数法^[10]。樊登星等利用全国森林资源清查资料,依据建立的不同森林类型蓄积量和生物量之间的回归方程,估算了北京市不同时段森林生物量和碳储量,并分析其动态变化特点,采用的是经典的材积源生物量法估算森林生物量^[17]。可见,作为陆地生态系统的主体,森林与大气碳交换量占陆地生态系统与大气碳总交换量的 90% 以上^[18],在维护区域生态环境上发挥着重要的作用。

2 人工林生态系统碳储量研究

人工林被认为是用来提高森林覆盖率最主要的措施,它在评价森林对陆地碳汇的贡献中发挥着紧要的作用。目前,随着退耕还林和防护林建设等林业工程的实施,进行了大规模的造林、再造林和森林经营管护工作,我国人工林面积快速增加,森林蓄积量不断增长。邢尚军等对黄河三角洲不同人工林分的碳汇效应研究结果显示:森林生态系统的碳汇作用包括了土壤、乔木和草本 3 方面的碳汇

量,其中土壤和乔木的碳汇量占总碳汇量的大多数;不同林分碳汇作用存在着巨大的差异,其作用顺序依次为白蜡林>刺槐林>榆林>臭椿林>国槐林>草地^[19]。在人工林地上部分碳储量影响因素研究方面,认为森林类型是决定人工林生态系统碳储量水平最为重要的因素之一,乔木林的固碳能力大小依次为用材林>薪炭林>特种用途林>防护林^[20]。刘华等研究了中国各类典型森林乔木层平均碳含量,变幅为 0.42—0.55,以刺槐林最低,杨树类为 0.51,热带山地雨林原始林为最高^[21]。孙世群等对安徽省乔木林固碳能力研究表明,不同优势树种乔木林年均固碳能力依次是杉木林>马尾松林>杨树林^[22]。北京市的碳储量主要集中在阔叶林中,阔叶林碳储量占森林碳储量的 66.20%—75.33%,而在阔叶林碳储量中,栎类和杨树占主导地位^[17]。王磊等利用江苏省第 4 次和第 5 次森林资源清查主要数据,建立了不同森林类型蓄积量和生物量之间的回归方程,并对江苏省的森林植被碳储量和碳密度的动态变化进行了研究分析,结果表明:人工林以杨树占主导地位,5 a 间全省的杨树新造林面积占全省新增林地面积的 90.27%,森林总碳储量的比例也由原来的 39.51% 增加到 66.12%^[23]。

3 人工林碳储量影响因素研究进展

3.1 森林类型

森林类型是决定人工林生态系统碳储量水平最为重要的因素之一^[24]。不同林种乔木林固碳能力大小依次为用材林>薪炭林>特种用途林>防护林。在对安徽省乔木林固碳能力的研究中表明,不同优势树种乔木林年均固碳能力不同,其顺序依次是杉木林>马尾松林>杨树林^[22]。北京市碳储量主要集中在阔叶林中,阔叶林碳储量分别占各次清查森林碳储量的 75.33% 和 66.20%。而在阔叶林碳储量中,栎类和杨树占主导地位。因此,阔叶林碳储量的动态变化将极大地影响整个森林的碳汇功能^[17]。

森林生态系统存在着巨大的空间异质性,不同个体的不同器官都在以不同的速率与外界不停地进行着碳交换,并且随着森林自身的年龄、健康状况等生理特性和环境因子(气象、土壤、季节等)发生着时间和空间上的变化^[25]。因此,森林植被呼吸作用的研究难度大,同时意义也重大,是陆地生态系统碳循环研究的关键。在测定方法上,由于密闭

吸收法操作方便,设备简单,已成为应用广泛的一种林木器官呼吸速率的测定方法^[3]。同化器官呼吸量只与其质量和表面积有关;但在计算非同化器官(树、干、根)的呼吸速率时,不仅要考虑其重量参数,还要考虑到与直径之间的关系,有研究表明非同化器官呼吸速率与其直径之间存在着幂函数关系^[12]。因此对于不同物质的非同化器官呼吸速率测定时,一定要对不同径级植物进行区分,以排除直径不同对于呼吸速率的干扰。

森林类型对于群落呼吸和器官间物质分配情况影响显著。油松、白桦林分年呼吸消耗的干物质分别是辽东栎林分的3.08倍和1.63倍,差异显著,但是不同器官呼吸速率的分配比例不同森林类型之间差异不大,都是叶>枝>干>根^[3]。这些差异由森林群落的地理环境、种类组成、群落生物量、林分年龄等因素各不相同所致。因此在研究森林群落呼吸量的时候,一定要区分不同森林类型间的差异,特别是在大尺度推算时,只有在森林类型相同时才能进行估算^[26]。

3.2 林分年龄

林龄与森林生态系统碳储量之间的相关联系还依然存在着一定的争议。Kim等的研究结果显示,森林生态系统NPP和NEP在中龄林时达到了最大值,随着树龄的增长,森林生态系统NPP和NEP其后会缓慢减小,但是生态系统各部分的碳储量会一直随着林分年龄的增加而增大^[27]。依据Song等的估计,在200 a内,森林都可以维持其碳汇的功能;200 a之后,森林既可能是汇,也可能是源^[28]。必须说明的是,Kim和Song等的研究对象都是天然林。在对人工林的研究中,魏文俊等对大岗山林区杉木人工林碳密度特征及分配规律的研究结果,认为杉木林乔木层碳密度随着树龄的增大而增加,随着林分密度的增大而减小;林分郁闭度和坡向对杉木乔木层碳密度有着显著影响,然而坡位的影响并不显著^[29]。马伟等探讨了不同发育阶段长白落叶松人工林碳储量的时空变化规律,认为随着林龄的增加,长白落叶松人工林林木和各器官的生物量均有所增加,树干所占比例也有所增加,生物量转换因子和根茎比等其他参数显示分布正常^[30]。肖春波等研究的崇明岛不同年龄水杉人工林生态系统碳储量的特点及估测结果表明,水杉人工林生态系统碳储量随着生长年限的增加而增加^[31]。

3.3 林分密度

林分密度与林分生物量之间的相互影响尤为复杂,温度、水分、光照等环境因子都在其中起到了一定的作用。由学术界的不确定可以看出,主导机理过程往往取决于森林初始结构、自身立地条件、植物个体对水分和养分的竞争能力,但研究结果不尽相同。研究表明,25年生杉木的碳密度会在个体密度显著增加的情况下(1 667株/hm²增加到10 000株/hm²)显著降低^[29];同时,方晰等对广西16年生的湿地松林开展研究时发现,密度(2 220株/hm²增加到3 750株/hm²)升高会使林分碳密度升高^[32]。

3.4 林下植被及枯落物

灌木、草本等林下植被以及枯落物,不仅自身可以储存少量的碳,而且是土壤-植被系统碳循环的重要联结库。因为灌木和草本可以覆盖于地面,所以可以有效地减少或防止土壤的碳流失^[33]。另外,灌木、草本和枯落物对土壤活性和土壤理化性质也具有重要的调节作用^[32],并有利于土壤有机碳的形成^[34]。土壤层的碳密度在0—20 cm层最高,往下逐渐降低,这主要是因为土壤有机碳的主要来源是动植物残体、土壤微生物和树林凋落物等,而这些来源均在土壤表层的分布更为密集^[35]。

3.5 土地利用变化

各种土地利用变化和覆被变化将不同程度地影响森林生态系统碳储量^[36]。Guo等的研究表明,农田在转变成人工林后,土壤碳储量增加了18%^[37]。而Turner等研究表明,森林采伐后,土壤中的碳储量不会有明显变化,但如在采伐后紧接着实行农业垦殖或畜牧经营,土壤碳储量会出现不同程度的变化^[38]。土地利用方式的改变,一方面导致进入土壤种植物残体的数量和性质发生了改变,另一方面会引起土壤水管理、耕作方式等管理措施的变化,影响和改变易氧化有机碳的含量、土壤微生物量碳和水溶性有机碳^[39]。周程爱等在四川省亚高山米亚罗林区,以原始冷杉林(M-Y)和由原始林转化成的45龄云杉人工林(M-60)、25龄云杉人工林(M-80)和菜地(M-C)等4种土地利用类型为研究对象,进行了易氧化有机碳、土壤的微生物量碳和水溶性有机碳的含量和季节变化研究。结果显示:土地利用变化对土壤活性有机碳组分的含量有显著影响,表现为易氧化有机碳的变化趋势为M-60>M-Y,微生物量碳和水溶性有机碳的变化

趋势为 $M-Y > M-60 > M-80 > M-C$, 但土地利用变化并没有改变活性有机碳各组分的垂直分布^[40]。

3.6 人工林经营管理

人工林的管理和经营可以通过对林木生产力、土壤碳循环等的影响而对土壤有机碳固定、储存和排放产生不同程度的影响,进而影响人工林植被和土壤在减缓全球变化中的效应^[4]。已有的研究结果表明,把湿地和森林作为自然保护区进行有效管理,可以储存大量的碳^[5]。汪思龙等也提出人工林经营(混交、轮栽)均会加速浅层土壤(0—20 cm)有机碳的累积过程,提高土壤有机质含量^[41]。张剑等以我国亚热带杉木人工林为研究对象,以常绿阔叶林为对照,分析比较了不同经营措施对碳库管理指数、微生物和土壤碳矿化特征的影响,结果显示,对比连栽杉木纯林,杉木、火力楠混交模式和轮栽模式均显著增加了土壤微生物量碳含量、碳库管理指数、土壤微生物熵和易氧化有机碳,提高了土壤微生物对底物的利用效率^[42]。

4 展望

充分发挥人工林固碳增汇的作用,进一步了解我国人工林生态系统碳储量及碳库动态,不仅可以增加对本地区碳在生物地球化学循环过程特征的了解,同时还能明确我国森林生态系统碳源汇能力,以及我国人工林营建与管理在人类应对全球气候变化中的作用和地位。这一系列研究成果,还将对林业建设产生深远的影响,对于全球陆地生态系统碳循环的研究意义重大。

一直以来,人工林碳储量研究受到人们的广泛关注,但是对碳库动态及影响因子的研究尚未有突破性的进展。森林群落演替过程中,物种组成的变化必然带来固碳效率的改变。其中,生态位的稳定与分化、对生态因子的负反馈、物种功能多样性等方面的变化,对森林碳储量影响规律的总结,对改进人工林经营措施,提高人工林碳汇能力,都具有重要的意义。

参考文献:

- [1] WOODWELL G M, WHITAKER R H, REINERS W A, et al. Biota and world carbon budget [J]. Science, 1978, 199 (4325): 141-146.
- [2] HOUGHTON R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990 [J]. Tellus Serie B-Chemical & Physical Meteorology, 1999, 51(2): 298-313.
- [3] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义 [J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [4] 冯瑞芳, 杨万勤, 张 健. 人工林经营与全球变化减缓 [J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3870-3877.
- [5] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 709-714.
- [6] BIRDSEY R A. Carbon storage and accumulation in United States forest ecosystems [R]. USDA Forest Service, 1992.
- [7] HOUGHTON R A, HAEKELER J L. The use carbon budget; contributions from land-use change [J]. Science, 1999, 285 (5427): 574-578.
- [8] KAUPPI P E, SEDJO R. Technological and economic potential of options to enhance, maintain, and manage biological carbon reservoirs and geo-engineering [J]. Journal of Economic Histroy, 2001, 5(7): 1462.
- [9] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pool and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263 (14): 185-190.
- [10] 方精云. 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 635-638.
- [11] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量与碳密度研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [12] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 292(5525): 2320-2322.
- [13] 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(6): 1-10.
- [14] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [15] 王绍强, 陈育峰. 陆地表层碳循环模型研究及其趋势 [J]. 地理科学进展, 1998, 17(24): 58-64.
- [16] 徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响 [J]. 世界林业研究, 1994(5): 26-32.
- [17] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京市森林碳储量及其动态变化 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 117-120.
- [18] 王效科, 冯宗炜. 森林生态系统生物量和碳储量研究历史 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [19] 邢尚军, 杜立民, 翟建平, 等. 黄河三角洲人工林碳汇效应研究 [J]. 山东林业科技, 2009(3): 5-8.
- [20] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环与碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [21] 刘 华, 雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(4): 835-843.
- [22] 孙世群, 王书航, 陈月庆, 等. 安徽省乔木林固碳能力研究 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33(7): 144-147.
- [23] 王 磊, 丁晶晶, 季永华, 等. 江苏省森林碳储量动态变化及其经济价值评价 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 1-5.
- [24] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环与碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [25] 康惠宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林 C 汇功能基本估计 [J]. 应

- 用生态学报,1996,7(3):230-234.
- [26] 王绍强,刘纪远,于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. 应用生态学报,2003,14(5):797-802.
- [27] KIM C, SON Y, WOOKYUN L, et al. Influences of forest tending works on carbon distribution and cycling in a *Pinus densiflora* S. et Z. stand in Korea [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(5):1420-1426.
- [28] SONG C H, WOODCOCK C E. A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and land use history [J]. Ecological Modelling, 2003, 164:33-47.
- [29] 魏文俊,王 兵,白秀兰. 杉木人工林碳密度特征与分配规律研究[J]. 江西农业大学学报,2008,3(1):73-80.
- [30] 马 炜,孙玉军,郭孝玉,等. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量[J]. 生态学报,2010,30(17):4659-4667.
- [31] 肖春波,王 海,范凯峰,等. 崇明岛不同年龄水杉人工林生态系统碳储量的特点及估测[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2010,28(1):30-34.
- [32] 方 晰,田大伦,项文化. 杉木人工林凋落物量及其分解过程中碳的释放率[J]. 中南林业学院学报,2005,25(6):12-16.
- [33] 黄 宇,冯宗炜,汪思龙. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统C、N贮量[J]. 生态学报,2005,25(12):3146-3154.
- [34] 杨玉盛,郭剑芬,林 鹏. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库[J]. 生态学报,2004,24(2):359-367.
- [35] 杨晓菲,鲁绍伟,饶良懿,等. 河南省西平县杨树人工林碳贮量及其分配特征研究[J]. 林业资源管理,2010(2):38-42.
- [36] 周剑芬,管东生. 森林土地利用变化及其对碳循环的影响[J]. 生态环境,2004,13(4):674-676.
- [37] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis [J]. Global Change Biology, 2002, 8(4):345-360.
- [38] TURNER J, LAMBERT M J. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 133(3):231-247.
- [39] SHARMA P, RAI S C, SHARMA R, et al. Effect of land use changes on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed [J]. Pedobiologia, 2004, 48(1):83-92.
- [40] 周程爱,张于光,肖 烨,等. 土地利用变化对川西米亚罗林土壤活性碳库的影响[J]. 生态学报,2009,29(8):4542-4547.
- [41] 汪思龙,廖利平,于小军. 杉木人工林退化土壤恢复过程中有机碳积累与土壤结构的改善[J]. 应用生态学报,2000,11(s):191-196.
- [42] 张 剑,汪思龙,隋艳晖,等. 不同经营措施对杉木人工林土壤碳库的影响[J]. 资源与环境,2010,26(9):826-830.

(上接第46页)

- [32] SCHROEDER H W, ANDERSON L M. Perception of personal safety in urban recreation sites [J]. Journal of Leisure Research, 1984, 16(2):178-194.
- [33] RIBE R G. Aesthetic perceptions of green-tree retention harvests in vista views: The interaction of cut level, retention pattern and harvest shape [J]. Landscape and Urban Planning, 2005, 73(4):277-293.
- [34] AXELSSON-LINDGREN C. Forest aesthetics [M] // HYTONEN M. Multiple-use forestry in the Nordic countries. Metla: The Finnish Forest Research Institute, 1995:279-294.
- [35] KELLOMAKI S. Forest stand preferences of recreationists [J]. Acta Forestalia Fennica, 1975, 146:1-36.
- [36] STAFFELBACH E. A new foundation for forest aesthetics [J]. All gemeineForstzeitschrift, 1984, 39:1179-1181.
- [37] RIBE R G. A general model for understanding the perception of scenic beauty in Northern Hardwood forests [J]. Landscape Journal, 1990, 9(2):86-101.
- [38] HOLLENHORST S J, BROCK S M, FREIMUND W A, et al. Predicting the effects of gypsy moth on near-view aesthetic preferences and recreation appeal [J]. Forest Science, 1993, 39(1):28-40.
- [39] TYRVAINE L, SILVENNOINEN H, NOUSIAINEN I, et al. Rural tourism in Finland: tourists expectation of landscape and environment [J]. Scandinavian Journal of Hospitality & Tourism, 2001, 1(2):133-149.
- [40] KARJALAINEN E, TYRVAINE L. Visualization in forest landscape preference research: a Finnish perspective [J]. Landscape & Urban Planning, 2002, 59(1):13-28.