

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.01.003

城市道路交通碳中和措施系统的概念与架构

卜政滔

(成都农业科技职业学院, 四川 成都 611130)

摘要: 当前形势表明,碳治理的紧迫性从未像现在这样明确而迫切。城市道路交通领域在按时达成预定碳目标方面仍面临重大挑战。为理清各种措施、路径或方法之间的关系,构建一个明晰的治理框架,并把握研究与实践的关键路径,以便于更有效的碳中和行动。通过运用文献研究、统计分析和归纳与演绎等多种方法,研究并提出了城市道路交通系统性解决方案和碳中和措施分系统的基本架构,明确了从系统、分系统、子系统到关键组件的关键线路,对碳中和措施分系统中的两类主要负排放措施进行了深入的分析,并强调了负排放子系统在城市道路交通实现零碳排状态中的决定性作用。其结论可为其他行业或领域的碳中和措施系统构建提供借鉴和参考。

关键词: 碳中和;零排放;碳汇;碳捕集

中图分类号: U412.3;X22

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)01-0013-06

0 引言

据 UNESCO(联合国教科文组织)于 2022 年 11 月发布的《World Heritage Glacier Report》指出“无论采用何种气候情景,到 2050 年,有 1/3 的世界遗产地冰川将消失,而在既有的排放情景中,到 2100 年,大约有 1/2 的遗产地冰川将几乎完全消失。”根据 IPCC 在第六个评估周期内发布的第三工作组报告《Climate Change 2022》指出:“过去十年的温室气体排放量处于人类历史的最高水平。除非所有部门立即大幅减排,否则将全球变暖限制在 1.5℃ 的目标将遥不可及,同时使得将全球变暖限制在 2℃ 以下也变得更加困难。”现实情况已经表明,降碳减排的紧迫感从未像现在这样明晰而深刻,各国政府应对气候问题给予高度关注,如果人类对于气候变化的应对措施仍然不够积极和主动,那么由气候导致的自然危机(干旱、洪灾、酷热以及冰川消融等)将会持续加剧。减少温室气体排放,减缓全球升温速度是应对全球冰川大量消融的最有效途径,各国政府必须信守承诺、落实行动,才有可能实现《巴黎协定》预定的温控目标。2022 年 11 月 6 日《联合国气候变化框架公约》第 27 次缔约方大会(COP27)在埃及沙姆沙伊赫召开,会议中达成了“沙姆沙伊赫行动计划”,旨

在帮助发展中国家应对气候灾难,同时也重申了将全球变暖幅度控制在比工业化前水平高 1.5℃ 的温控目标。从 2015 年通过的《巴黎协定》到 2030 年实现碳达峰目标,预定的时间期限已经过半。根据当前的形势来看,要实现《巴黎协定》所设定的温度控制目标,全球气候治理工作还面临着漫长而艰巨的挑战。根据 IEA(International Energy Agency)公开的数据表明,我国碳排放结构中最主要的三大碳排放来源分别为电力、工业和交通运输,其中交通运输行业 CO₂ 排放量在全国总排放量中的占比超过 9%。因此,交通运输行业已成为我国三大高消耗、高排放的碳源之一,而城市道路交通系统作为交通运输大系统的子系统之一,也是应对全球温室效应、实施降碳行动的重要领域之一。在当前这种紧迫的形势下,与“碳”相关的研究课题持续保持较高的研究热度,与此同时,一系列全新的与“碳”相关的新概念、新路径、新措施、新策略等不断涌现。在这些众多的碳治理举措、路径或方法中,明确各种碳相关概念的内涵与外延,理清各种措施、路径或方法之间的关系,构建一个清晰的研究框架,将有助于更有效的进行碳中和行动,推动碳中和目标按期或提前实现。

1 城市道路交通碳中和措施体系的研究对象与研究现状

1.1 城市道路交通碳中和措施体系的研究对象

由于城市对航空、水运、公路、铁路交通运输不具备管理权限,因此,研究中所指的交通其实是指市域

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 成都市农业科技职业学院(22ZR212): 海绵城市生态步道路面结构优化研究

作者简介: 卜政滔(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事城市交通与道桥工程的教学、科研与工程设计。

道路交通,而不包括上述交通类型。凡行驶在我国道路上的汽车可以分为乘用车和商用车两大类,其中商用汽车包括客车、载货汽车和专用汽车^[1]。因此,城市道路交通的主要构成见图1。据生态环境部公开数据可知,交通运输行业中,汽车的四项污染物(CO、HC、NO_x、PM)的排放量所占比例占机动车总排放量的90%以上,见图2。很明显,在机动车的四项污染物排放总量中,汽车是污染物排放的主要来源。因此,城市道路交通碳中和措施系统的研究重点在于针对运行中的汽车所产生的直接能耗和排放,以及围绕汽车产业为核心的全产业链所产生的间接能耗和排放进行研究。

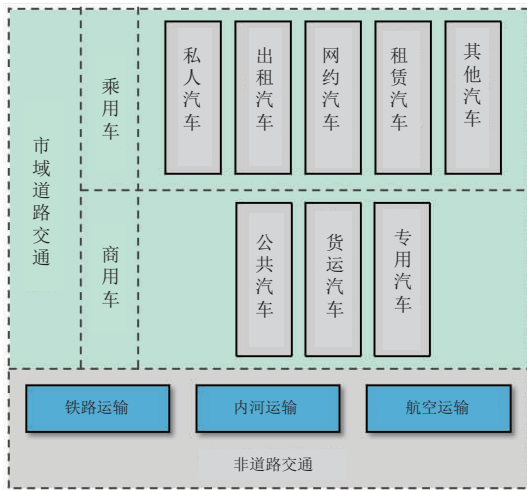
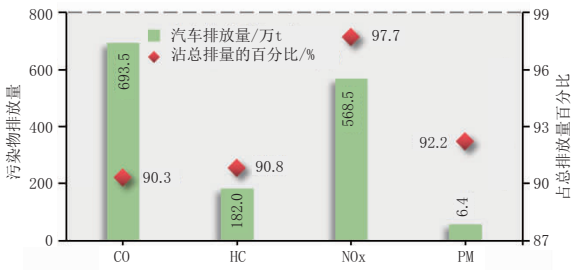


图1 城市交通碳排放研究对象图



注:根据中国生态环境部数据绘制

图2 汽车四大污染物排放量(2021)图

1.2 城市道路交通碳中和技术体系的研究现状

通过使用包括CNKI和WOS等具有代表性的国内外学术期刊数据库进行检索,并从中筛选出与主题高度相关的文献以供进一步研究。经过文献分析发现,在碳中和背景下,近十年来,国内外学者在城市交通低碳领域进行了广泛而深入的研究。其研究内容主要可以概括为以下四个方面,一是城市交通碳排放预测与建模^[2],这是碳中和研究的重要基础,通过对城市交通碳排放的准确预测,有助于制定有效的碳减排策略或措施;二是城市低碳交通体系的构建研究^[3],该方向主要针对双碳目标,研究城市交

通运输的减排治理策略,包括政策、技术、经济等方面的措施,是实现双碳目标的重要研究方向之一;三是国际大城市交通碳排放的经验与启示^[4],通过研究发达国家的大城市的交通减碳策略,为国内城市交通减碳治理提供借鉴;四是城市客运交通各情景碳减排研究,以预测各情节下城市客运交通的减碳效果,关于CCUS技术的研究文献,在研究中针对的捕集源主要集中在能源和材料生成等上游行业,而直接以城市道路交通为捕集源的研究文献相对很少,这种现象可能归因于多种因素,例如随车捕集的难度较大、研究成本相对较高或者碳源处于移动且分散状态难以集中处理等,这些因素在一定程度上限制了以城市道路交通为捕集源的CCUS技术的发展。近些年,关于生态碳汇的研究热度一直较高,研究的方向主要集中在森林或林业碳汇、海洋碳汇、草地或湿地碳汇、农业碳汇以及广义的金融碳汇等方面,而关于城市绿地碳汇方面的研究文献相对较少,且研究内容与方法比较分散。经过对检索到的相关文献进行分析后发现,关于城市绿地碳汇方面的文献,其研究内容主要集中在以下几个方面,首先是绿地碳汇的计算方法研究^[5],这一领域的研究在碳汇固碳能力的量化与评价中起着关键作用;其次是绿地碳储量的影响因素研究^[6],这些因素涵盖了气候、土壤、植被等多个方面,它们的相互作用对绿地碳储量的形成和变化有着重要影响;再者是对不同类型绿地的碳汇量估算研究^[7];最后是评价指标体系研究,该体系在评价和提升城市绿地碳汇功能方面具有重要的指导意义。

2 城市道路交通碳中和措施系统的概念与架构

为了如期实现习近平总书记在2020年9月的联合国大会上提出的双碳自主贡献目标,即“力争在2030年前实现碳达峰,并努力争取在2060年前实现碳中和”,这不仅需要汽车上游的能源供应端和汽车工业相关生产企业实现近零排放,还需要依赖于负排放技术措施和负排放生态措施来抵消短期内难以完全削减的温室气体。这一目标的实现不仅需要能源供应端作出变革,也需要汽车工业及相关生产企业的积极响应。若城市道路交通领域要能不逾期实现碳中和目标,就必须构建一个有效的、可行的系统性解决方案,这一方案至少应由两个相互关联的分系统组成:首先是碳中和措施分系统,该系统主要由负排放措施子系统(包括CCUS组件和生态碳汇

组件)和降碳排措施子系统(包括降碳措施组件和减排措施组件)构成;其次是保障辅助措施分系统,该系统的主要功能是为碳中和措施分系统的高效运行提供保障和服务,内容涉及法律、政策、管理、标准、碳交易及碳税等众多维度。这两个分系统相互作用、相互支持,为实现碳中和目标提供系统性保障。因此,可以将城市道路交通碳中和系统性解决方案理解为通过构建两个相互关联的分系统,包括由负排放措施子系统和降碳排措施子系统构成的碳中和措施分系统,以及为碳中和措施分系统的高效运行提供保障及服务的保障辅助措施分系统构成。该系统性解决方案与各分系统之间的关系见图3,采用这种架构方式利于更好地理解 and 实施碳中和措施。因此,在研究与实践中应把握其主要方向,在各种措施、路径和策略中,围绕以“负排放和降碳排”为主轴,以碳中和措施分系统为基石的碳治理理念进行不断优化与改进,从而推动城市道路交通达成碳中和目标。

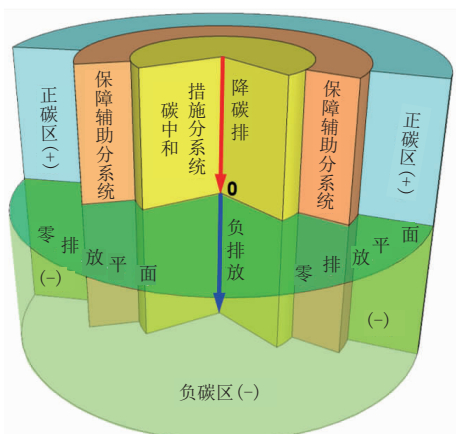


图3 城市交通碳中和系统性解决方案框架图

由于目前国内碳相关学科体系尚未健全和完善,因此许多与碳相关的概念,仍存在不同的理解和分歧。中国环境科学学会发布的《二氧化碳捕集利用与封存术语》(T/CSE 41—2021)标准中将碳中和定义为“国家、企业、团体在一定时间内,通过植树造林等增加碳汇的方式或CCUS等碳移除技术的使用,抵消自身直接或间接产生的CO₂排放量,达到边界范围内CO₂零排放的状态”^[8]。基于《二氧化碳捕集利用与封存术语》(T/CSE 41—2021)中碳中和的概念,研究中将碳中和措施分系统定义为一种通过技术措施(如CCUS、DACCS、BECCS)和生态措施(如绿碳和蓝碳等),以达到固碳或除碳目的的负排放措施子系统与以降碳减排为目的的降碳排措施子系统所构成的分系统,该系统的合理使用可以帮助国家、企

业、团体在一定时间内抵消自身直接或间接产生的CO₂排放量,从而达到边界范围内CO₂零排放的状态。需要注意的是,诸如城市交通能源结构优化、交通运输结构调整、城市出行结构优化、客运装备共享化与智能化等举措虽然在降碳减排方面也具有显著的正向作用,但是这些措施的核心功能在于降碳排,而非固碳或除碳。因此,与此性质相同或相似的一系列措施、策略或途径均可划归于降碳排措施子系统的范畴。根据图3可知,负排放子系统和降碳排子系统构成了整个系统性解决方案的内核,即碳中和措施分系统,该分系统与各子系统的关系可以用图4进行描述。对于城市道路交通领域而言,除非位于行业上游的能源行业和汽车工业相关生产企业能够实现深度脱碳,否则要实现零碳排状态,就必须依赖具有负排放功能的子系统的支持,因此,城市道路交通领域将难以达成碳中和目标。基于这一事实,在构成碳中和措施分系统的两个子系统中,负排放子系统对实现零排放起着决定性作用,而减排子系统则起着辅助性作用。其中,负排放子系统主要由基于技术的CCUS组件和基于生态的碳汇组件构成。综上所述,由图3和图4共同构成了城市道路交通碳中和系统性解决方案的基本架构,在该架构中碳中和措施分系统是内核,负排放措施子系统(图4中的蓝轴)和降碳排措施子系统(图4中的红轴)是主轴,在碳中和措施分系统中起决定作用的是蓝轴,即基于技术的CCUS负排放组件和基于生态的碳汇组件的负排放子系统。



图4 城市交通碳中和措施系统架构图

2.1 基于技术的负排放措施——CCUS组件

随着电动汽车保有量的持续增长,道路交通的部分碳排放将逐步转移到上游的电能供应端。因此,在中后期实现双碳目标的过程中,汽车电能供应端可能会成为城市交通的主要碳源之一。电能供应端的碳排放量占总排放量的比例将取决于能源的清洁

程度。因此,在双碳时限的中后期,积极构建零碳能源供应系统将成一种必然选择。在推动能源行业实现化石能源低碳利用方面,CCUS (Carbon dioxide capture, utilization and storage) 技术具有不可替代的优势,并且 CCUS 技术还包含了负排放技术 DACCS (Direct air carbon capture and storage) 和 BECCS (Bio-energy with carbon capture and storage)。CCUS 技术是指“将 CO₂ 从大气、工业或能源相关的排放源中分离或直接加以利用或封存,以实现 CO₂ 减排或消除的工业过程”^[8]。CCUS 概念是在 CCS 基础上增加了“Utilization”部分,因此在概念内涵上 CCUS 已包含了 CCS。DACCS 是指直接从大气中进行 CO₂ 捕获、利用和储存的技术,从 CCUS 的定义来看,广义的 CCUS 概念也包含了 DACCS 的内容。BECCS 是指将 CCUS 应用于生物质燃烧或转化过程的技术,故 BECCS 技术仍可以划归于广义的 CCUS 技术的范畴。因此,广义的 CCUS 组件包括 DACCS、BECCS 和传统 CCS 技术。IEA 研究报告指出,若要实现 2℃ 和 1.75℃ 的温升目标,CCUS 的累计减排贡献分别可达到 14% 和 32%^[9]。IPCC 与 IRENA 等研究机构也发布了关于 CCUS 贡献度的研究数据,虽然各机构对不同情景中 CCUS 的贡献度预测存在一定差异,但其研究结论总体趋势具有一致性,即在 2050 年实现净零排放的情景下,CCUS 将是一不可或缺的技术途径。据现有技术预测,中国若在 2060 年实现碳中和目标,需 CCUS 组件贡献减排量 10~18 亿 t^[10]。其中,CCUS 组件中各技术措施的 CO₂ 减排量及平均占比如图 5 所示。

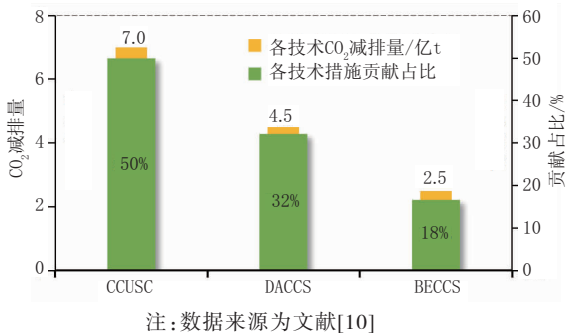


图5 中国2060年碳中和CCUS系各措施贡献度预测

近十年来,国内在CCUS技术领域取得了长足的进步,但技术代差问题也比较突出。目前,燃烧前物理吸附技术相对比较成熟,已处于商业运用阶段;燃烧后化学吸附技术目前处于中试阶段,相对于国际水平稍显滞后;燃烧类技术整体发展相对迟缓^[11]。根据工程实践,CCUS技术的各个环节(收集、运输、利

用和封存)的成本投入相对较高,其中收集环节的成本投入最大。尽管随着技术水平的不断提高,CCUS技术的成本会逐渐降低,但目前来说,其成本仍然偏高。CCUS技术的规模化、商业化受到了高成本问题的严重制约,这已经成为了一个主要瓶颈。为了解决这一问题,针对CCUS技术提出了明确的发展目标,如图6所示,充分体现了我国对CCUS技术的重视程度。CCUS技术不仅是上游电能供应端和汽车工业相关生产企业实现深度降碳的关键技术手段,对于运行中的传统燃油汽车来说,进行随车集成的CCUS技术同样至关重要。尽管当前随车尾气捕集技术尚未成熟,且远未达到商业化应用阶段,但是随车CCUS技术对于实现交通领域的净零排放仍具有重要意义,并具有显著的市场前景。因此,加速研发与燃油汽车尾气成分(CO、HC、NO_x、PM)相适配的新型吸附剂、新型过滤膜以及尾气复合捕集等随车捕集材料与技术,对整个汽车工业产业链形成全面碳捕集具有重要的影响。

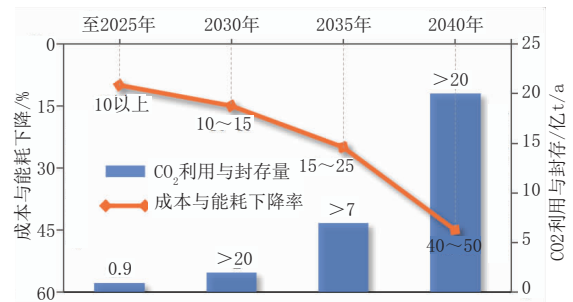


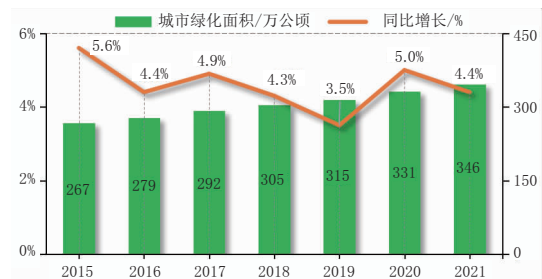
图6 中国政府设定的CCUS技术发展目标

2.2 基于生态的负排放措施——碳汇组件

生态碳汇通常涉及森林碳汇、农田碳汇、湿地碳汇、城市绿地碳汇以及海洋碳汇等多种形式。从空间分布的角度来看,这些生态碳汇可以被概括为绿碳(陆地碳汇)和蓝碳(海洋碳汇)。基于研究主题,研究中仅关注城市绿地。城市绿地不仅具备美化城市环境、提供休闲游憩场所和防灾避险等多种功能,而且还拥有良好的碳汇能力。根据《城市绿地分类标准》(CJJ/T 85—2017)可知,城市用地范围内的城市绿地包括公园绿地、防护绿地、广场绿地和附属绿地四类,其中城市道路与交通绿地、市政公用设施绿地均属于附属绿地的范畴。在城市绿地空间中,地被、土壤和微生物群落都具有从大气环境中吸收并完成碳固定的能力,当绿地系统的固碳量大于其排碳量时,该系统则呈现碳汇特征。碳汇这个概念源自于《联合国气候变化框架公约》的缔约国签订的《京都议定

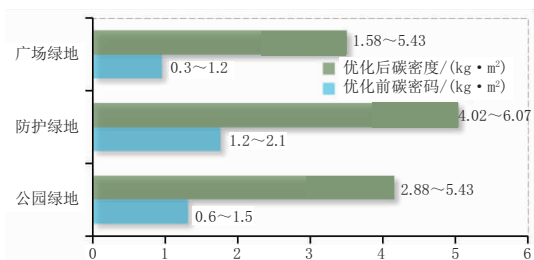
书》,它被定义为一种过程、活动或机制,即从大气中清除二氧化碳的过程、活动或机制。值得注意的是,在研究中所指的碳汇是一种生态措施,并不包含广义碳汇概念中与碳交易相关的内容。从碳中和目标的中后期阶段来看,城市道路交通行业在碳达峰之后,若要实现碳中和目标将面临更大的挑战。此时,除了主要依赖技术组件 CCUS 的贡献,也需要借助生态组件(如绿地碳汇)来完成对剩余碳的抵消。作为自然资源的城市绿地,就固碳成本而言,是一种相对经济且可行的方案。据国家统计局公开数据可知,从 2015 至 2021 年中国城市绿地面积同比增长率保持在 4.5%左右,截止 2021 年全国城市绿地面积达到了 345.8 万 hm^2 ,如图 7 所示。根据文献[12]研究结论,可假设城市绿地的平均碳足迹为 $0.15 \text{ kgC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ 。据此,可粗略估算出 2021 年全国城市绿地新增的碳汇量约为 520 万 t。如果城市绿地的面积保持年增长率为 4.5%,那么每年城市绿地的碳汇量递增约 24 万 t。虽然该碳汇量相当可观,但这仅是基于传统城市绿地的碳汇估算。由于传统城市绿地在规划、设计、建造及后期管养过程中并未充分考虑碳汇方法学的相关内容,因此城市绿地的碳汇能力仍有巨大的提升空间。文献[13]研究表明,通过对既有绿地乔、灌、草覆盖率的优化调整,使得绿地的碳密度得以大幅提升(如图 8 所示),从而实现了在有限用地面积内获得更大碳汇量的可能。因此,在后续城市绿地的新建和改造过程中,应适度弱化城市绿地景观要求,增强城市绿地的碳汇意识,着重考虑如何在有限的绿地空间内获得更好的碳汇能力。对城市绿地的新建和改造项目,如何提升绿地碳汇能力给出以下几点建议:其一,持续提高城市绿地率或人均绿地面积,这是扩大城市绿地碳汇能力的基本手段。并根据不同的绿地类型采用不同的绿地率并适度提高乔木占比,例如道路防护林地,由于不考虑景观及休闲游憩功能,因而可以采用较高的绿地率;相反,对于广场绿地则应该采用相对更低的绿地率,这是由其功能所决定的。其二,由于乔木的固碳能力大于灌木而地被及草本植物的固碳能力最小^[14],因此城市绿地设计阶段应在保障生长需要的前提下应尽量提高乔木的种植密度,并优先选择碳汇量较高的乔木(如黄连木、香樟等)。其三,在绿地地形设计中,应尽量减少土石方工程量,同时应优先选择本土植物,不仅易于种植,还可减少运输过程中的碳排放。其四,城市绿地规划与设计阶段,应注重绿地土壤固碳能力

的设计。研究认为,城市绿地碳总储量由植被固碳量和土壤固碳量两部分组成,且土壤的有机碳密度高于植被碳密度^[15]。因此,在进行城市地面铺装设计时,应尽可能确保地表的透气性,这意味着更加注重将地面铺装设计与海绵城市理念、土壤碳汇理念进行融合。



(数据来源:根据国家统计局数据整理)

图7 全国城市绿地面积及同比增长态势图



(数据来源:根据文献[13]数据整理)

图8 城市绿地结构及覆盖率优化前后碳密度对比

3 结论

为了理清碳治理活动中各种措施、路径或方法之间的关系,构建一个明晰的治理框架,并把握研究与实践的关键路径,以便于更有效的碳中和行动。研究中搭建了城市道路交通系统性解决方案和碳中和措施分系统的基本架构,明确了从系统、分系统、子系统到关键组件的关键线路,强调了碳中和措施分系统以及负排放措施子系统在整个碳治理路线中的核心作用。并分别对具有负排放能效的技术措施和生态措施进行了深入分析。研究主要侧重于碳中和措施分系统的构建以及负排放措施子系统的研究,而未对保障辅助措施分系统和碳减排措施子系统开展同步研究,这可能使得城市道路交通碳中和措施分系统在实践中被过于乐观地估计。因此,后续应持续开展针对保障辅助措施分系统和碳减排措施子系统的相关研究。综上所述,要实现城市交通领域的零碳排放状态,需要强化碳中和措施分系统的基石作用,坚持以负排放和降碳排为碳治理主轴,并持续优化与改进碳中和措施分系统,从而推动城市道路交通达成预定碳中和目标。

参考文献:

- [1] GB/T 3730.1—2022, 汽车、挂车及汽车列车的术语和定义 第1部分[S].
- [2] 高妍南,郝晴.低碳经济下城市交通系统动力学模型及政策仿真[J].公路交通科技,2021,38(3):96-104.
- [3] 胡晓伟,包家烁,安实,等.碳达峰下城市交通运输减排治理策略研究[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(6):244-256.
- [4] 金昱.国际大城市交通碳排放特征及减碳策略比较研究[J].国际城市规划,2022,37(2):25-33.
- [5] 石铁矛,王迪,汤煜,等.城市生态系统碳汇固碳能力计算方法与影响因素研究进展[J].应用生态学报,2023,34(2):555-565.
- [6] 邓亮,崔耀平,唐晔,等.城市绿地碳储量分布特征及其影响因素[J].森林与环境学报,2023,43(3):319-328.
- [7] 于洋,王昕歌.面向生态系统服务功能的城市绿地碳汇量估算研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(1):95-102.
- [8] T/CSES41—2021,二氧化碳捕集利用与封存术语[S].
- [9] 中国21世纪议程管理中心.中国碳捕集、利用与封存技术发展路线图[M].北京:科学出版社,2019:16-18.
- [10] 蔡博峰,李琦,张贤,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021):中国CCUS路径研究[R].北京:生态环境部环境规划院,中国科学院武汉岩土力学研究所,中国21世纪议程管理中心,2021.
- [11] 张守攻.碳汇与碳市场导论[M].北京:中国科学技术出版社,2023:69.
- [12] 黄柳菁,张颖,等.城市绿地的碳足迹核算和评估——以广州市为例[J].林业资源管理,2017(2):65-73.
- [13] 和晓彤.面向总体规划阶段的的城市绿地碳汇量估算方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- [14] 史红文,秦泉,廖建雄,等.武汉市10种优势园林植物固碳释氧能力研究[J].中南林业科技大学学报,2011,31(9):87-90.
- [15] 顾韩,施芋宇,刁洁,等.哈尔滨丁香公园4种典型人工绿地群落碳密度研究[J].环境科学研究,2021,34(6):1417-1424.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com