

北京某大学校园碳中和测算与评估

张颖^{1*}, 孟阳¹, 张瑞轩², 尚佳乐¹

¹北京林业大学经济管理学院 北京

²北京林业大学工学院 北京

【摘要】根据北京林业大学关键能耗统计数据和对学校的实地调查资料, 文章在 IPCC 等资料基础上, 设计了一套用于测算全校校园 CO₂ 排放量和吸收量的估计指标和方法, 并对校园碳中和进行了测算。计算结果表明, 北京林业大学校园每天有 83.62 万 Kg 的 CO₂ 排放量, 在考虑学校实验林场的情况下, 校园能够产生 56.14 万 kg/天的 CO₂ “碳盈余”, 有利于学校整体实现碳中和, 也有利于绿色校园建设目标的实现。研究对碳达峰碳中和等“双碳”目标实现有一定参考意义。

【关键词】碳中和; 二氧化碳排放; 二氧化碳吸收; 绿色校园; 能耗

【基金项目】中国环境科学研究院“森林类自然保护区生态系统服务价值评估项目”(STFW0106)

【收稿日期】2022 年 9 月 26 日 **【出刊日期】**2023 年 3 月 16 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20230001

Measurement and evaluation of carbon neutrality in a university campus in Beijing

Ying Zhang^{1*}, Yang Meng¹, Ruixuan Zhang², Jiale Shang¹

¹Beijing Forestry University School of Economics and Management

²Beijing Forestry University School of Technology, Beijing, China

【Abstract】Based on the statistical data of key energy consumption of Beijing Forestry University and the field survey data of its campus, this paper designed a set of estimation indicators and methods for measuring the daily CO₂ emission and absorption of the whole university on the basis of IPCC and other data, and calculated the carbon neutrality of Beijing Forestry University. The calculation results show that the campus of Beijing Forestry University has 836,200 Kg of CO₂ emissions per day. When the experimental forest farm is taken into account, the campus can generate 561,400 kg of CO₂ "carbon surplus" per day, which is conducive to the realization of carbon neutrality of the university as a whole and the realization of the goal of green campus construction. The research has certain reference significance for the realization of "two-carbon" goals such as carbon emission peaking and carbon neutralization.

【Keywords】carbon neutralization; carbon dioxide emission; carbon dioxide absorption; green campus; energy consumption

1 引言

2020 年 9 月, 中国国家主席在七十五届联合国大会一般性辩论会议上宣布, “中国将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和, 这需要付出艰苦努力, 但我们会全力以赴”^[1]。充分表达了中国对于实现碳中和的决心和重视。何为碳中和? 碳中

和所表达的是一种碳平衡, 即温室气体在进入大气的排放和吸收的碳之间达到的平衡^[2]。

高校作为社会变革的先行者、倡导者, 应在碳中和变革中发挥关键作用。需要推动对于碳中和科技创新人才的培养, 开展碳中和相关教育, 同时也应首先在校园内开展碳减排, 实现碳中和。2019 年

作者简介: 张颖, 博士, 北京林业大学经济管理学院教授, 博士生导师; 孟阳 (2000-) 男, 研究方向: 统计学; 张瑞轩 (2001-) 男, 北京, 研究方向: 环境统计; 尚佳乐 (2001-) 女, 山东临沂, 研究方向: 环境统计。

3月, 中国住房和城乡建设部印发《绿色校园评价标准》, 这是中国新时代提倡绿色低碳, 推进碳达峰、碳中和的重要举措。这其中的标准为: 为师生提供安全、健康、适用和高效的学习及使用空间, 最大限度地节约资源、保护环境、减少污染, 并提供对学生具有教育意义的和谐校园。校园作为具有社会属性的小城市^[3], 应该肩负着推进绿色、可持续发展的重任。教育部也下发了《高等学校碳中和科技创新计划》^[4], 引导高校开展科技创新, 培养人才, 并持续为“碳达峰”“碳中和”提供科技支撑和人才保障。北京林业大学作为全国绿色高等学府, 具有“把精彩论文写在祖国的大地上”的光荣传统, 对于碳中和校园建设十分的重视。

目前, 国内外在校园碳排放测算方面, 仍无统一标准指标和方法, 且大多集中在一般测算计量上^[5], 指标、方法也不够具体。高校具有人数多、规模大的特点, 建立科学、合理的碳排放测算指标和方法对高校碳中和工作将起到很好的推动作用。本文设计了一种基于高校校园的碳中和测算指标与评估方法, 并通过北京林业大学校园碳排放、碳吸收的测算, 评估校园是否实现了碳中和, 以期更好的在高校范围内落实国家“双碳”目标的战略承诺。

2 校园现状及碳吸收和碳排放的主要途径

2.1 北京林业大学校园现状

北京林业大学位于北京市海淀区西北部, 校本部有校园面积 46.4hm² (696 亩), 学校实验林场面积 832hm² (12480 亩)。校本部绿地面积 19.0 hm², 绿化率 44.7%。2002 年, 北京林业大学获评“首都绿化美化花园式单位”荣誉称号^[6]。2014 年, 北京林业大学生物学院编写了《北京林业大学木本植物名录》^[7], 根据该名录, 校园内共有植物 72 科 147 属 247 种, 其中被子植物 227 种, 裸子植物 19 种, 针叶树种 18 种, 阔叶树种 93 种。

目前, 学校共有 17 个学院, 在校生 25276 人, 教职工 2044 人, 建筑面积约 42 万 m², 主要建筑 33 栋, 其中教学楼 4 栋、宿舍楼 12 栋。校园建筑物类型基本为砖混结构。校园中用能系统主要包括变配电系统、供暖空调系统、照明系统、综合服务系统等, 校园中能源消耗主要有电力、水、天然气、外购热力等。

2.2 校园碳吸收和碳排放主要途径

自然条件下, 碳吸收的主要方式是光合作用。在植物当中, 树木对 CO₂ 的吸收作用尤为显著, 而其它小型植物的作用较小, 树木承担了几乎全部校园的碳吸收任务。北京林业大学作为花园式校园, 校园中树木的密度相比于其它学校更高, CO₂ 吸收也主要通过校园树木来完成。

资料显示, 碳排放的主要方式有化石燃料燃烧、汽车尾气、工业生产、动物和人的生活等^[8], 上述均为直接的碳排放源。实际上, 化石燃料的燃烧可以转化成电能, 在电的使用过程中, 也相当于间接的碳排放。因此, 在测算一个地区碳排放量的时候, 除了计算直接的碳排放量, 还需要考虑所有间接的碳排放量。大学校园人口密度大, 功能复杂。不仅校园日常活动产生碳排放, 而且碳排放源也相对多样化。

因此, 为了实现对高校校园碳排放的准确评价和监测, 建立高校校园碳排放清单, 有效指导绿色低碳校园建设, 并建立科学、系统的评价指标体系, 以利于校园碳中和的发展。

通过对北京林业大学校园的调查分析发现: 高校校园中的碳排放活动类型主要为人员、建筑、道路设施、交通、水资源利用和废弃物处理等^[8-9]。参考 IPCC 国家温室气体清单指南和中国国家温室气体清单, 本文构建了校园碳排放清单如表 1 所示。

3 碳吸收量与碳排放量测算

3.1 碳吸收量测算

收集北京林业大学校园内植物分布的数据资料, 并按植物类别统计所有树木数量。截止 2020 年, 北京林业大学校园本部的树木数量为 776 棵, 主要包括法国梧桐、银杏等近百种树种, 不同树种碳吸收量具体的测算公式为:

$$T_c = \sum_{i=1}^m n_i \times (x_i - p_i) \quad (1)$$

式中, T_c 为一天所有树木平均 CO₂ 净吸收量; n_i 为第 i 种树种的数量; x_i 为第 i 种树种通过光合作用一天 CO₂ 的吸收量; p_i 为来自呼吸作用的 CO₂ 排放量。

除树木以外, 其它小型植物也可通过光合作用吸收 CO₂, 而与树木相比, 这些植物碳吸收 CO₂ 的量可以忽略不计。因此, T_c 为全校一天 CO₂ 吸收量的保守估计值。

表 1 校园 CO₂ 排放清单及指标

排放	评估内容	主要指标及参数
人员	校园人员呼吸产生的碳排放	人口数; 人均 CO ₂ 排放量
建筑	校园建筑中的各类设备能耗的碳排放	建筑面积; 单位面积能耗
道路设施	校园道路中指示灯, 路灯等设备耗能的碳排放	道路长度和等级; 设备布置密度; 设备功率
交通	校园交通出行中消耗能源的碳排放	道路长度; 通勤距离; 单位出行距离能耗
水资源利用	校园生活生产用水及其污水处理产生的碳排放	人口数; 人均生活用水量
废弃物处理	校园生活废弃物在处理过程中产生的碳排放	人口数; 人均生活垃圾产生量

资料来源: 江海华等, 2019。

测算中, 树木一天的净碳吸收量 ($x_i - p_i$) 在一年的不同季节是不同的, 在夏季水分适宜、气温较高时, 树木光合作用强度较高, 净碳吸收量较高; 冬天光合作用较弱, 净碳吸收量较小。在计算过程中, 由于缺乏相关实验参数数据, 我们不考虑树木 CO₂ 吸收的季节性差异, 先测算树木每天 CO₂ 净吸收量, 再按照每年 365 天测算全年树木 CO₂ 的年均碳吸收总量。按上述方法测算, 北京林业大学校园本部一天碳吸收量 T_c 的计算结果为 3897.85kg。

北京林业大学拥有 832hm² 的实验林场, 1 公顷林地一天可以净吸收 1005kg 的 CO₂^[5], 因此, 北京林业大学林场一天可吸收 CO₂ 的量约为 836160kg, 与主校区合计, CO₂ 总吸收量为 840057.85kg, 即 84.01 万 kg。

在不考虑季节性差异的情况下, 如果按 365 天计算, 北京林业大学每年 CO₂ 总吸收量为 30.66 万 t。

3.2 碳排放量的测算

北京林业大学校园碳排放源相对多样化, 根据校园 CO₂ 排放清单, 主要的 CO₂ 排放为:

(1) 人员

人员所产生 CO₂ 主要为呼吸作用。目前, 学校在校人数为 25276 人, 男女比例约为 3:7, 教职工工人数为 2044 人, 男女比例约为 1:1。按照一般成人一天正常生理需求的氧气量换算, 一个成年男性一天平均呼出 0.8928kgCO₂, 一个成年女性一天平均呼出 0.7488kg CO₂。因此, 在正常情况下在不考虑其他因素影响的条件下, 全校 27320 个人一天呼吸产生的 CO₂ 量约为 21696.31kg。

(2) 建筑

建筑所对应的评估内容包括了天然气、电的使

用等所产生的 CO₂。首先计算全校建筑一天平均总用电量, 其次将总用电量折合为碳排放量, 再根据用电在建筑总能耗中的占比估算出全校建筑物一天总的碳排放量。

根据相关调查统计, 北京林业大学年建筑平均单位耗电量为 52.04kW·h/m², 总建筑面积为 420000m²。因此, 全校建筑年平均耗电量为 21856800kW·h, 即 2185.68 万 kW·h, 全校建筑日平均耗电量为 59881.64kW·h, 折算成 CO₂ 的排放量为 59881.64kg。另外, 根据校内各类能源消耗量统计数据, 折合成标准煤的占比为: 天然气 56.7%, 电力 25.1%, 外购热力 13.6%, 汽油 1.1%, 柴油 0.5%^[10], 其他 3%。因此, 全校建筑物日平均 CO₂ 排放量为 238572.27kg, 即 23.86 万 kg。

(3) 道路设施

道路设施主要为道路的用电设备产生的 CO₂ 排放。首先计算全校道路设施一天平均总用电量, 再将用电量折合为碳排放量, 并根据相关公式计算道路设施的日用电量和碳排放量。具体计算公式为:

$$D = \sum_{i=1}^4 l_i \times \rho_i \times P_i \times t_i \quad (2)$$

式中, D 为道路设施的日用电量; l_i 为第 i 种路段的道路长度; ρ_i 为第 i 种路段的用电设备(路灯)布置密度; P_i 为第 i 种路段的单个用电设备(路灯)的功率; t_i 为第 i 种路段的用电设备(路灯)一天的使用时间; i 为道路的种类数。根据相关统计资料, 学校拥有路灯的道路分为四类, 即大路(例如图书馆南侧), 小路(例如工科楼北侧), 室外运动场以及部分景观。因此, i=4。相关道路的长度、密度的统计数据主要由学校的有关科室提供, 最终计算的全校道路设施日平均耗电量为 829.92kW·h, 全校

道路设施日平均 CO₂ 排放量为 829.92kg。

(4) 交通

交通主要为交通设备的使用, 尤其是汽油、柴油等使用排放的 CO₂。汽车尾气中含有大量 CO₂^[11], 而尾气不易监测, 主要根据相关实验数据获得有关参数, 并测算校园内交通设备的排放量(图 1)。由于校内已全面禁止摩托车与电动自行车, 交通的能耗基本全部来源于各类机动车的使用^[9]。本研究主要通过相关评价模型估算交通设备 CO₂ 的排放。

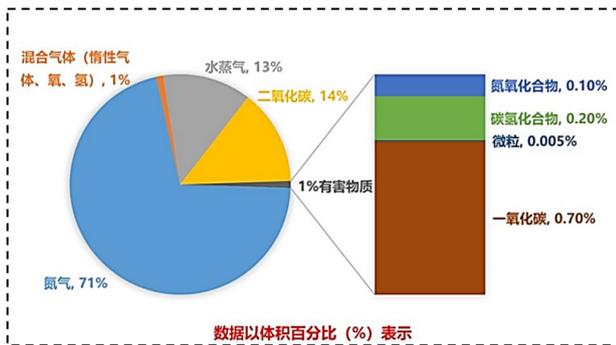


图 1 汽油发动机的尾气构成

以汽油消耗量的估算为例, 先计算平均通勤距离, 建立如下模型。北京林业大学主校区校园共有 5 个允许机动车出入的校门, 假设学校共有 q 个停车区域, 第 i 个停车区域一日平均停放并使用燃油汽车的数量为 y_i, 一台车一日上下班通勤两次, 每次只能从学校的 5 个门出入, 第 i 个停车区域距离第 j 个门的最短道路距离为 d_{ij}, 则从第 i 个停车区域离开学校或从校外进入第 i 个停车区域的平均通勤距离:

$$d_i = \frac{\sum_{j=1}^5 d_{ij}}{5}$$

全校所有停车区域一天总的燃油汽车的通勤距离 d 为:

$$d = \sum_{i=1}^q 2 \times y_i \times d_i = \sum_{i=1}^q 2 \times y_i \times \frac{\sum_{j=1}^5 d_{ij}}{5} \quad (3)$$

式中只有 y_i 和 d_{ij} 两组未知变量, 前者主要通过观测平均停放并使用燃油汽车的数量获得, 后者则通过相关职能科室的规划设计获得。因此, 按照汽车在校内平均行驶速度 20km/h、油耗 9L/100km 的油耗水平计算, 再按照 1L 汽油燃烧排放 2.254kgCO₂ 估算, 即可测算出燃油汽车的 CO₂ 排放量。

对于电动汽车的排放量计算方法同上, 先计算

全校一天交通设备的总耗电量, 再转化为 CO₂ 的排放量。因此, 最终测算的全校所有燃油汽车的 CO₂ 排放量为 182.58kg, 所有电动车的 CO₂ 排放量为 11.86kg, 全校一日的交通设施的 CO₂ 排放总量为 194.44kg。

(5) 水资源利用

水资源利用所产生的 CO₂ 排放主要自来水生产与污水处理两者 CO₂ 的排放^[12], 相关机理如图 2 所示。

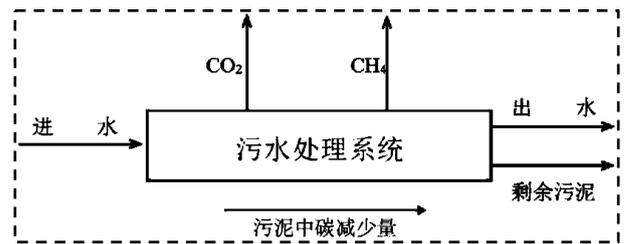


图 2 污水处理的碳排放过程

相关研究表明, 对于工业建筑以及居住区之类的区域, 废水产生量与建筑面积有明显的正相关关系^[12], 而学校校园的建筑类型较为复杂, 用此类方法估算误差较大。因此, 本研究主要根据人口基数, 在不考虑工业生产的情况下, 一个人一天需要生活用水 200L, 约产生待处理的污水量为 200L, 全校人口数为 27320 人, 一天总消耗自来水为 5464000L, 即 5464t, 产生的污水也约为 5464t, 生产 1 吨自来水会产生 0.91kg 的 CO₂ 排放量。因此, 全校每天自来水消耗约产生 4972.24kg CO₂。

污水处理产生的碳排放不易计算, 不同的污水种类, 不同的处理方法(例如百乐克工艺, CAST 工艺, UCT 工艺等)产生的 CO₂ 量是不同的, 许多文献给出了基于化学机理与实验的碳排放核算方法, 但这些方法的共同点是均考虑了药剂与耗电两者引起的碳排放, 在此取平均值, 按照普通居民区生活污水排放 1 吨污水的处理排放量 0.47kg CO₂ 计算^[12], 计算的全校一天水资源利用方面总 CO₂ 排放量为 7540.32kg。

(6) 废弃物处理

废弃物处理主要为校内人员产生的垃圾在处理过程中产生的 CO₂。垃圾由人产生, 因此碳排放估计方法与水资源利用类似。相关研究显示, 正常生

活中, 一人一天平均产生 1.2kg 的垃圾, 处理一吨生活垃圾约产生 0.3t CO₂^[13]。据统计, 全校共有师生员工 27320 人, 因此, 一天在废弃物处理方面的 CO₂ 总排放量为 9835.2kg。同样, 如果按 365 天计算, 北京林业大学每年 CO₂ 总排放量为 10.17 万 t。

4 结果分析

4.1 不同类型排放源 CO₂ 排放量比较

根据上述测算结果, 将不同类型排放源一天 CO₂ 排放量汇总如表 2、图 3 所示。由表 2、图 3 的结果可以看出, 各排放源 CO₂ 排放量占比从高到低依次为建筑、人员、废弃物处理、水资源利用、道路设施、交通。

首先, 建筑的碳排放量占总排放量的 85% 多。这其中天然气与电力使用占据主导地位, 主要由于校园食堂天然气的使用以及宿舍楼、教学楼等场地设备电力的使用等。目前学校食堂天然气的使用呈上升趋势^[8], 其他建筑电力设备的电力消耗也呈上升趋势。

其次, 人员 CO₂ 的排在总排放量中占据第二, 水资源利用与废弃物处理分别排第三、第四, 二者对校园碳排放也有重要的影响。近年来, 随着垃圾

分类政策的出台, 学校师生员工认真遵循垃圾分类的规定, 尽量减少碳排放。另外, 学校通过举办不同的活动, 鼓励学生用餐时“光盘行动”, 树立节水节电的低碳环保理念, 厨余垃圾与污水的产生量大幅减少^[6]。

第三, 在道路设施方面, CO₂ 排放量占比较低, 仅占总排放量的 0.30% 左右。主要是学校在道路两旁设计了适当的路灯间隔, 在大路上安装高度较高、功率较大的路灯, 小路上安装高度较低, 功率较小的路灯, 并根据校园区域的不同, 严格控制路灯开放时间, 并进行差异化管理, 对各类道路用电设备及时进行高效维修等, 确保达到低碳校园的标准要求^[8], 促进了 CO₂ 排放量的减小。

第四, 在交通碳排放方面, CO₂ 排放量仅占总排放量的 0.07%。主要由于校园全面禁止摩托车、电动自行车的使用, 提倡低碳出行, 基本实现了零碳排放。

4.2 校园碳中和比较

在不考虑滞后性的情况下, 北京林业大学校园 CO₂ 排放量与吸收量 (碳中和) 比较如表 3、图 4 所示。

表 2 不同类型排放源 CO₂ 排放量及占比

项目	人员	建筑	道路设施	交通	水资源利用	废弃物处理	合计
CO ₂ 排放量 (kg/天)	21696.31	238572.3	829.92	194.44	7540.32	9835.2	278668.5
占比 (%)	7.79	85.61	0.30	0.07	2.71	3.53	100.00

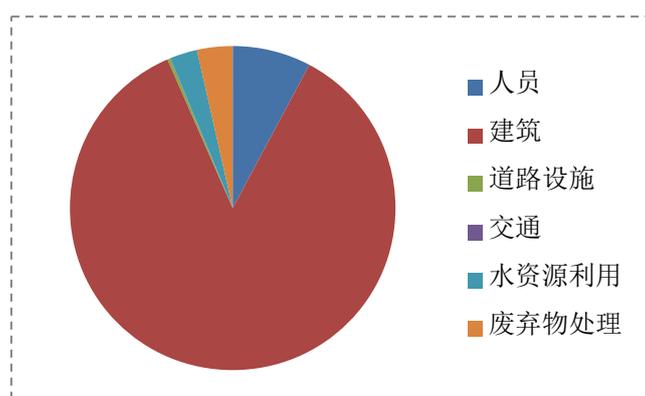


图 3 不同排放源 CO₂ 排放量占比图

表 3 CO₂ 排放量与吸收量

指标	CO ₂ 排放量	主校区 CO ₂ 吸收量	林场 CO ₂ 吸收量
排放量/吸收量(kg/天)	278668.5	3897.85	836160

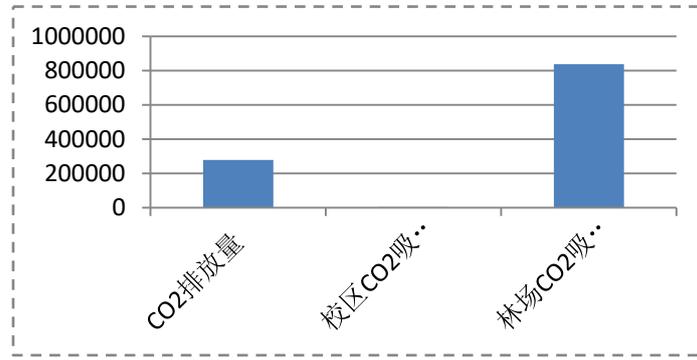


图 4 CO₂ 排放量与吸收量图 (单位: kg/天)

根据上述测算,校本部 776 棵树木,在不考虑季节性差异的情况下,每天吸收 CO₂ 量约为 3897.85kg,仅占总排放量的 1.4%左右。但校园内植物可以有效地吸收 CO₂ 的排放量,尤其在夏天气温较高的时候,光合作用的速率显著较高(图 5),其光合速率是平时的 3-4 倍^[9]。因此,加强校园绿化,做好校园植树造林是减少校园碳排放的重要途径。

在对学校实验林场每天 CO₂ 的吸收量测算中,每天吸收 83.62 万 kg 的 CO₂,能够全部中和掉全校 27.87 万 kg 的 CO₂ 排放总量,每天还产生 56.14 万 kg 的 CO₂ 吸收量的“碳盈余”。在不考虑季节性差异的情况下,如果按年计算,整个北京林业大学每年可实现 20.49 万 t “碳盈余”。因此,加强植树造林,做好国土绿化工作,不仅能够从整体上实现碳平衡,也能够局部范围内实现碳平衡。

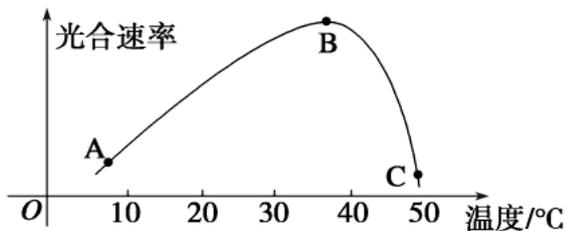


图 5 光合速率受温度影响示意图

5 结论

本研究参考 IPCC 碳计量的方法,在相关研究资料的基础上,以北京林业大学为例,对北京林业大学校区一天总 CO₂ 排放量和吸收量进行了碳中和测算研究。研究结果表明:

(1) 校园碳排放源主要为人员、建筑、道路设

施、交通、水资源利用和废弃物处理。其中在这些排放源中,建筑物的碳排放量占据第一,为 85%多,人员 CO₂ 的排放量占据第二,约为 7.79%,交通的排放量最小,仅占总排放量的 0.07%左右。

(2) 校园碳汇主要为校园绿色植被,即主要为树木。在不考虑季节性差异的情况下,主校区和实验林场每天的 CO₂ 吸收量分别为 3897.85kg 和 836160.00kg。

(3) 在“双碳”目标背景下,北京林业大学主校区很难实现碳中和,实现碳平衡;北京林业大学实验林场每天能够产生 56.14 万 kg “碳盈余”,能够中和掉校园的排放量。如果按年计算,整个北京林业大学每年能够产生 20.49 万 t 的“碳盈余”。因此,碳达峰碳中和是一项整体性的工作,应大力加强植树造林工作,做好国土绿化,实现中国的“双碳”目标承诺。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [N]. 人民日报,2020-09-23(003).
- [2] 邓旭,谢俊,滕飞.何谓“碳中和”? [J]. 气候变化研究进展,2021,17(01):107-113.
- [3] Suresh Jain, et al. Assessment of carbon neutrality and sustainability in educational campuses (CaNSEC): A general framework[J]. Ecological Indicators, 2017, 76 : 131-143.
- [4] 教育部. 教育部关于印发《高等学校碳中和科技创新行动计划》的通知(教科信函〔2021〕30号) [EB/OL].[2021-07-29]. <https://www.eqxun.com/news/15766.html>.

- [5] 娄伟.城市碳排放量测算方法研究——以北京市为例[J].华中科技大学学报(社会科学版),2011,25(03):104-110.
- [6] 徐华清, 杨水平, 陈玉碧, 程冠全.城市绿地生态服务功能价值评估——以北京林业大学为例[J]. 宁夏农林科技,2014,55(02):48-51.
- [7] 肖爱华, 马履一, 王子成, 等. 2018. 大学校园绿化效果综合评价指标体系研究——以北京林业大学为例[J]. 西北林学院学报, 33(04): 246-253.
- [8] 崔建国,满达.高校节能工作现状及对策研究——以北京林业大学为例[J].高校后勤研究,2014(01):87-88.
- [9] 江海华,徐燊,李志信.高校校园碳排放评估方法及应用研究——以华中科技大学主校区为例[J].建设科技,2019(14):37-40.
- [10] 张思思,宋波,朱晓姣,冯超,侯俊鹏,高璐,高贺轩.绿色校园节能改造实测效果分析——以北京林业大学为例[J].暖通空调,2018,48(10):8-12.
- [11] 陈锐朗,乔永平.从汽车尾气排放中看二氧化碳气体[J].科技资讯,2012(26):99+101.
- [12] 张岳,葛铜岗,孙永利,刘静,高晨晨,张维.基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J].中国给水排水,2021,37(09):65-74.
- [13] 元勇.生活垃圾处理的碳排放和减排策略[J].资源节约与环保,2021(02):3-4.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS