

# 基于LCA的合肥滨湖国家森林公园的环境评估

江晓雨<sup>1</sup>, 刘康桢<sup>2</sup>, 徐帅<sup>2</sup>

(1. 安徽省林业调查规划院, 合肥 230031; 2. 吉林农业大学 植物保护学院, 长春 130118)

**摘要:**采用生命周期评价法(LCA)对合肥滨湖国家森林公园进行研究,分析比较了该人工森林公园在三个建造时期的环境负荷指标。结果表明,在2001年至今的造林和维护周期中,使用柴油造成的环境负荷占总环境负荷的84.6%,是最主要的环境负荷来源。由于柴油的大量使用,在三个阶段中,成林阶段(Stage 2)的温室气体排放量最高,为75.9 kg CO<sub>2</sub> eq,占总温室气体排放量的43.3%。通过敏感性分析可知,减少20%柴油使用可减少13.55%温室气体排放。在育苗阶段(Stage 1)施用绿色化肥可以大大降低水体富营养化和环境生态毒性的危害,在护林阶段(Stage 3)使用电动汽车虽会提高潜在的电离辐射,但能够有效降低温室气体、PM 2.5和淡水消耗等环境负荷。人工杨树林具有很强的固碳能力,二十一年可达到158.6 t CO<sub>2</sub> eq,远远高于建造维护森林公园造成的1.3 t CO<sub>2</sub> eq温室气体排放,因此从碳封存和减缓地区性气候变化的角度来看,长期维护城市人工林将产生巨大的生态效益。

**关键词:**生命周期评价; 碳中和; 人工林; 环境毒理; 污染物控制

中图分类号:S725

文献标识码:A

文章编号:2096-2371(2023)05-0070-07

## Environmental Assessment of Hefei Binhu National Forest Park Based on LCA

JIANG Xiaoyu<sup>1</sup>, LIU Kangzhen<sup>2</sup>, XU Shuai<sup>2</sup>

(1. Anhui Provincial Forestry Survey and Planning Institute, Hefei 230031,

2. College of plant protection, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** In this paper, the life cycle assessment (LCA) method was employed to investigate the environmental impact of Binhu National Forest Park in Hefei, and compare the environmental load indicators associated with the development of park during three distinct construction periods. The results showed that over the course of the 21-year construction and maintenance period, the utilization of diesel fuel contributed to 84.6% of the total environmental load, thereby emerging as the primary source of environmental impact. Due to the extensive use of diesel fuel, forest formation stage (Stage 2) had the highest GHG emissions at 75.9 kg CO<sub>2</sub> eq, which accounted for 43.3% of the total GHG emissions among all stages. The sensitivity analysis demonstrated that a 20% reduction in diesel use could decrease GHG emissions by 13.55%. The use of green fertilizers in the seedling stage of planted forests (Stage 1) can notably reduce the hazards of eutrophication of water bodies and environmental ecotoxicity, whereas employing electric vehicles in the maintenance stage of plantation forests (Stage 3) can decrease environmental loads such as global warming, PM 2.5, and freshwater consumption, although it slightly increases ionizing radiation. Planted poplar forests has a high carbon fixing capacity, reaching 158.6 t CO<sub>2</sub> eq in 21 years, which is much greater than the 1.3 t CO<sub>2</sub> eq greenhouse gas emissions

---

收稿日期:2023-06-06

基金项目:国家留学基金管理委员会联合培养博士奖学金(202208220100)

作者简介:江晓雨(1995—),女,安徽六安人,助理工程师,硕士;E-mail:jxy\_gis@qq.com。

caused by the construction and maintenance of natural forest parks. Consequently, the long-term maintenance of urban plantations is of great ecological interest from the standpoint of carbon sequestration and mitigating regional climate change.

**Key words:**LCA; carbon neutrality; planted forest; environmental ecotoxicity; pollutant control

随着全球气候变化问题的日益严重,减少碳排放并实现碳中和成为全球共同关注的重要议题。中国作为全球温室气体排放国之一,提出2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和的目标。森林作为重要的天然碳汇,能够从大气中吸收和储存CO<sub>2</sub>,被广泛认为是缓解全球变暖的重要手段。根据第九次全国森林资源清查结果,中国森林面积2.2亿ha,森林覆盖率为23%。其中天然林面积1.4亿ha、占64%,人工林面积0.8亿ha、占36%,继续保持世界首位<sup>[1]</sup>,人工林已经成为国家固碳减排战略的重要组成部分。近年来,全国多地因地制宜加快推进以人工林为主体的森林公园建设,以实现森林数量不断增加,森林质量稳步提升,增汇能力显著增强。

然而,在人工造林和森林经营的过程中,为有效控制森林病虫害、促进林木健康生长,需使用农药、化肥和除草剂,氮素、磷酸盐等元素通过挥发和淋滤进入自然环境,引起淡水环境富营养化和土壤矿化,过量的氮肥向空气中释放N<sub>2</sub>O,其温室效应是CO<sub>2</sub>的300倍。另外,营林机械的运转也无可避免地需要化石燃料和润滑剂,在使用营林机械时,CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和氮氧化物等废气会释放到大气中,大大增加全球变暖潜势、酸化潜势和光化学氧化剂形成潜势,可见人工造林对陆地、淡水和海洋生态环境造成了不可忽视的影响。

因此,人工森林公园的生态和环境影响是复杂和多方面的,对其碳平衡和环境负荷进行全面评估对于实现“双碳”目标、推动生态文明建设显得尤为必要。生命周期评价(LCA)是一种用于评估产品从原材料的获取、生产和使用直至产品使用后的报废处置等整个生命周期中造成的环境影响的方法,通常被作为解决人工造林和森林经营过程中污染物控制问题的有效方法。<sup>[2]</sup>合肥滨湖国家森林公园是中国第一个由退耕还林的人工林经生态修复后建成的森林公园,该公园的建设旨在推动森林保护和生态修复,是助力安徽省实现碳中和目标的重要举措。作为一个新兴的森林公园,该公园的碳平衡和环境负荷情况尚未得到深入评估。本研究利用LCA方法评估合肥滨湖国家森林公园的碳平衡和环境负荷。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

合肥滨湖国家森林公园位于安徽省合肥市主城区东南部(E 117.3°, N 31.78°),北依甲子河,南连巢湖北岸,东至南肥河,紧临十五里河入湖口(图1)。公园占地总面积为1 072 hm<sup>2</sup>,其中森林面积为799 hm<sup>2</sup>,水域面积为263 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率达74.6%。公园属亚热带湿润季风气候区,气候温和湿润,四季分明,梅雨显著、夏雨集中。年平均气温15.7 °C,年平均降水量约1 000 mm,年平均日照时数2 100 h以上。地势西北部高,东南部和北部低洼,岗少圩多,圩区中间低四周高,是一个典型的圩湖地区。土壤以粉砂土为主,辅以少部分的铁砂土。该公园动物资源相对匮乏,植物资源多为人工种植,内有植物共计280多种,园区内人工林主要由杨树组成,兼有部分水杉、女贞、香樟、银杏、湿地松等树种。

### 1.2 生命周期评价清单

本文利用SimaPro 9.4.0.1进行生命周期评价。选取的评价模型为ReCiPe 2016 Midpoint(H)。该模型把环境负荷分为18类,分别是温室气体、臭氧层消耗、电离辐射、臭氧人类毒性、PM 2.5、臭氧生态毒性、陆地酸化、淡水富营养化、海洋富营养化、陆地生态毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性、人体致癌毒性、人体非致癌毒性、土地使用、矿产资源消耗、化石资源消耗、淡水消耗。环境负荷的计算方

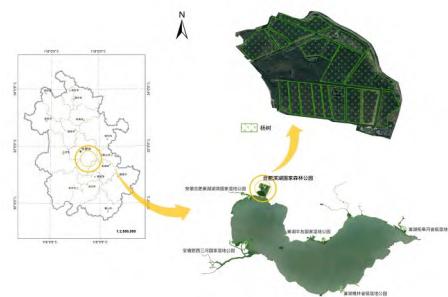


图1 合肥滨湖国家森林公园地理位置概况

式为

$$EP_j = \sum (Q_{ji} \times EF_{ji}) \quad (1)$$

式中: $EP_j$ 为第 $j$ 种环境影响类型的影响潜值; $Q_{ji}$ 为第 $i$ 种环境影响因子的排放或消耗量; $EF_{ji}$ 为第 $i$ 种环境影响因子对第 $j$ 类环境影响的当量系数。

表1 人工杨树林生命周期输入清单

时间	材料输入	单位	合计	数据来源
育苗阶段(Stage 1): 第一年	杀虫剂	kg	1.04	Lopes et al., 2022 <sup>[3]</sup>
	交通运输	tkm	1 924.46	Lopes et al., 2022
	灌溉	L	249 012.45	Lopes et al., 2022
	绿色肥料	kg	3 112.50	本研究
	汽油	L	6 894.89	Djomo et al., 2018
	电力	MJ	2 169.07	本研究
成林阶段(Stage 2): 第二年至第五年	柴油	MJ	78 457.35	Djomo et al., 2018
	钙质泥灰岩	kg	8 964.90	本研究
	氮肥	kg	683.66	本研究
	磷肥	kg	944.63	本研究
	氯化钾	kg	1 378.08	本研究
	无水硼砂	kg	26.89	本研究
	硫酸铜	kg	13.45	本研究
	硫磺	kg	403.42	本研究
	单硫酸锌	kg	13.45	本研究
	草甘膦	kg	44.60	Lopes et al., 2022
	杀虫剂	kg	4.17	Lopes et al., 2022
	交通运输	tkm	7 697.84	Lopes et al., 2022
护林阶段(Stage 3): 第六年至第二十一年	柴油	MJ	940 257.37	Djomo et al., 2018 <sup>[4]</sup>
	电力	MJ	8 676.30	本研究
	杀虫剂	kg	16.67	Lopes et al., 2022
	交通运输	tkm	3 0791.37	Lopes et al., 2022
第六年至第二十一年	柴油	MJ	3 761 029.46	Djomo et al., 2018
	电力	MJ	34 705.20	本研究

建造杨树人造林的生命周期评价清单主要来自于文献查阅(表1),在第一阶段(Stage 1),主要输入的材料包括杀虫剂、交通运输、灌溉、绿色肥料(建园初期使用的动物粪便为树苗提供营养)、杀虫剂、汽油、电力和柴油。在第二阶段(Stage 2),主要输入的材料包括商业化肥、草甘膦、杀虫剂、交通运输、柴油和电力。在第三阶段(Stage 3),主要输入的材料仍包括杀虫剂、交通运输、柴油和电力,但在杨树林成林后去除了商业化肥的施用。

### 1.3 CO<sub>2</sub>储存的计算

根据合肥滨湖国家森林公园不同年份的杨树林胸径计算生物量,生物量计算公式为:

$$\text{树干 } W_1 = 0.22D^{2.08}/(1 + 0.097D^{0.33} + 0.63D^{-0.93} + 0.54D^{-0.13}) \quad (2)$$

$$\text{树枝 } W_2 = 0.22 \times 0.097D^{2.41}/(1 + 0.097D^{0.33} + 0.63D^{-0.93} + 0.54D^{-0.13}) \quad (3)$$

$$\text{树叶 } W_3 = 0.22 \times 0.63D^{-0.93}/(1 + 0.097D^{0.33} + 0.63D^{-0.93} + 0.54D^{-0.13}) \quad (4)$$

$$\text{树根 } W_4 = 0.22 \times 0.54D^{-0.13}/(1 + 0.097D^{0.33} + 0.63D^{-0.93} + 0.54D^{-0.13}) \quad (5)$$

$$S(\text{树木储存碳}) = A \times W_1 + B \times W_2 + C \times W_3 + D \times W_4 \quad (6)$$

其中: $D$ 是不同年份下人工杨树的平均胸径(实地考察); $A(48.22\%)$ 、 $B(48.79\%)$ 、 $C(47.91\%)$ 、 $d(41.99\%)$ 分别为杨树树干、树枝、树叶和树根的含碳率。<sup>[5]</sup>

$$\text{净吸收} = S \times 3.67 - C_{\text{LCA}} - R \times 3.67 \quad (7)$$

式中: $C_{\text{LCA}}$ 是累计建成人工林消耗的CO<sub>2</sub>;R是森林土壤中储存的碳(C)<sup>[6]</sup>;R=206 g C m<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>,3.67是将碳转换程CO<sub>2</sub>的系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 归一化分析

对整个人工杨树林生命周期进行量化评估,根据表2可知,柴油、汽油、杨树木造成的温室气体排放分别占总温室气体排放的67.6%、20.2%、5.8%,化石燃料的使用是温室气体排放的主要来源。柴油导致的环境负荷占总环境负荷的84.6%,其造成的主要环境负荷类型是人体致癌毒性。柴油燃烧产生的烟灰有致癌作用,使得柴油燃烧的人体致癌毒性效应较为突出。不同输入材料的环境负荷大小依次为柴油>汽油>化肥>交通运输>杨树木>电力>灌溉>绿色肥料>杀虫剂。

人工杨树林的主要环境负荷类型为人体致癌毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性,分别占人工杨树林总环境负荷的56.1%、11.1%、8.5%,其中最主要的环境负荷类型是人体致癌毒性。这是由传统机械使用过程中的柴油消耗造成的,而其他类型的环境负荷较小首先是由于输入的量较小。不同环境影响类型的环境负荷大小依次为人体致癌毒性>淡水生态毒性>海洋生态毒性>淡水富营养化>臭氧生态毒性>臭氧人类毒性>化石资源消耗>陆地生态毒性>陆地酸化>温室气体>海洋富营养化>PM 2.5>人体非致癌毒性>电离辐射>臭氧层消耗>淡水消耗>土地使用>矿产资源消耗。

表2 人工杨树林的归一化分析

环境影响类别	杀虫剂	交通运输	柴油	电力	化肥	灌溉	绿色肥料	汽油	杨树木	总计
温室气体	8.28E-06	7.71E-04	1.48E-02	3.09E-06	5.83E-04	4.30E-06	1.77E-05	4.43E-03	1.27E-03	2.19E-02
臭氧层消耗	3.78E-06	3.54E-05	9.98E-04	3.11E-07	4.96E-04	1.58E-07	1.29E-05	1.59E-04	4.96E-03	6.67E-03
电离辐射	6.77E-06	2.82E-04	5.23E-03	5.48E-03	5.64E-04	1.26E-06	4.79E-06	0.00E+00	0.00E+00	1.16E-02
臭氧人类毒性	8.71E-06	1.79E-03	4.76E-02	6.18E-06	6.18E-04	5.22E-06	1.30E-05	2.42E-02	2.76E-04	7.45E-02
PM 2.5	7.44E-06	3.57E-04	1.22E-02	3.90E-06	4.11E-04	2.20E-06	7.78E-06	2.91E-03	1.79E-04	1.61E-02
臭氧生态毒性	1.03E-05	2.10E-03	5.60E-02	7.30E-06	8.26E-04	6.10E-06	1.54E-05	2.82E-02	3.19E-04	8.75E-02
陆地酸化	1.23E-05	5.43E-04	1.40E-02	3.18E-06	8.01E-04	3.10E-06	2.23E-05	6.02E-03	8.40E-04	2.22E-02
淡水富营养化	6.83E-05	2.15E-03	8.01E-02	2.72E-05	4.11E-03	1.42E-05	5.70E-05	7.75E-04	1.99E-03	8.93E-02
海洋富营养化	4.53E-06	1.22E-05	4.22E-04	1.02E-05	2.81E-04	9.55E-08	2.86E-05	4.28E-05	1.66E-02	1.74E-02
陆地生态毒性	2.27E-05	4.55E-03	2.78E-02	5.72E-05	3.67E-03	1.02E-05	3.50E-05	4.42E-05	2.31E-08	3.62E-02
淡水生态毒性	1.71E-04	7.08E-03	1.69E-01	1.54E-04	2.08E-02	2.10E-04	1.18E-04	8.29E-03	3.26E-03	2.09E-01
海洋生态毒性	1.06E-04	6.35E-03	1.31E-01	1.25E-04	1.57E-02	1.50E-04	8.93E-05	6.48E-03	7.20E-04	1.61E-01
人体致癌毒性	3.48E-04	3.82E-02	9.79E-01	1.04E-03	3.10E-02	2.62E-04	4.53E-04	4.30E-03	7.58E-04	1.06E+00
人体非致癌毒性	2.56E-06	1.81E-04	1.48E-02	1.03E-05	3.18E-04	1.06E-06	1.11E-05	3.66E-04	2.51E-05	1.57E-02
土地使用	2.39E-07	3.82E-05	1.84E-03	1.78E-07	1.90E-04	7.89E-08	9.94E-05	0.00E+00	0.00E+00	2.17E-03
矿产资源消耗	1.62E-08	1.51E-07	5.84E-06	2.14E-08	7.32E-07	1.04E-09	2.53E-09	0.00E+00	0.00E+00	6.76E-06
化石资源消耗	2.15E-05	2.08E-03	3.51E-02	7.00E-06	1.13E-03	7.58E-06	1.57E-05	1.27E-02	0.00E+00	5.11E-02
淡水消耗	5.58E-07	4.92E-05	1.26E-03	4.15E-05	5.03E-04	1.86E-03	1.16E-05	0.00E+00	0.00E+00	3.73E-03
总计	8.03E-04	6.66E-02	1.59E+00	6.98E-03	8.20E-02	2.54E-03	1.01E-03	9.89E-02	3.12E-02	1.88E+00

### 2.2 环境特征分析

人工杨树林的环境特征分析见表3所示。三个阶段的温室气体总排放量为175.24 kg CO<sub>2</sub> eq,其中Stage 2排放量最高,为75.86 kg CO<sub>2</sub> eq,比Stage 1和Stage 3分别高出49.4%和19.6%。Stage 2的PM 2.5排放量最高,为0.17 kg PM 2.5 eq,占总计排放量的41.46%,比Stage 1和Stage 3分别高出52.94%和5.88%。大气中的CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O通常被认为是温室气体的主要组成,在人工杨树林建成过程中,温室气体的贡献主要来自于CO<sub>2</sub>,而CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放可能来自于森林土壤中的微生物,关于土壤微生物的温室气体排放将在之后的章节讨论。Stage 2的土地使用量最高,为6.90 m<sup>2</sup>a crop eq,比Stage 1和Stage 3分别高出6.13 m<sup>2</sup>a crop eq和1.18 m<sup>2</sup>a crop eq,总计为13.39 m<sup>2</sup>a crop eq。

表3 人工杨树林的环境特征分析

		Stage 1	Stage 2	Stage 3	总计
温室气体	kg CO <sub>2</sub> eq	38.36	75.86	61.02	175.24
臭氧层消耗	kg CFC11 eq	0	0	0	0
电离辐射	kBq Co-60 eq	0.89	2.40	2.13	5.42
臭氧人类毒性	kg NO <sub>x</sub> eq	0.52	0.52	0.50	1.53
PM 2.5	kg PM 2.5 eq	0.08	0.17	0.16	0.41
臭氧生态毒性	kg NO <sub>x</sub> eq	0.52	0.53	0.51	1.55
陆地酸化	kg SO <sub>2</sub> eq	0.26	0.36	0.29	0.91
淡水富营养化	kg P eq	0	0.03	0.03	0.06
海洋富营养化	kg N eq	0	0.08	0	0.08
陆地生态毒性	kg 1,4-DCB	25.66	289.14	233.33	548.12
淡水生态毒性	kg 1,4-DCB	0.31	2.78	2.18	5.27
海洋生态毒性	kg 1,4-DCB	0.42	3.64	2.92	6.98
人体致癌毒性	kg 1,4-DCB	0.25	5.46	5.14	10.85
人体非致癌毒性	kg 1,4-DCB	17.09	242.24	231.52	490.86
土地使用	m <sup>2</sup> a crop eq	0.77	6.90	5.72	13.39
矿产资源消耗	kg Cu eq	0.01	0.44	0.36	0.81
化石资源消耗	kg oil eq	13.38	18.86	17.76	49.99
淡水消耗	m <sup>3</sup>	0.51	0.31	0.18	1.99
					1.99

人工杨树林建成过程中的生态毒性和人体毒性的指标较高,其中 Stage 2 和 Stage 3 陆地生态毒性的值最高,分别为 289.14 kg 1,4-DCB 和 233.33 kg 1,4-DCB。Stage 1 的淡水消耗量最高,为 0.51 m<sup>3</sup>,比 Stage 2 和 Stage 3 分别高出 0.20 m<sup>3</sup> 和 0.33 m<sup>3</sup>。由于肥料的使用仅在 Stage 2,因此只有该阶段表现出了对水体富营养化的危害。合肥滨湖国家森林公园紧靠巢湖,防止土壤中的 N 对周边水域产生污染及其重要,因此在第一年使用绿色肥料来为杨树林提供营养的方法应在以后的人工造林中被推广。<sup>[7]</sup>

### 2.3 显著环境负荷的特征分析

交通运输、柴油、汽油在 Stage 1 和 Stage 2 对温室气体排放的贡献分别为 4.8%、2.3%、92.3% 和 3.1%、89.7%、0%。Stage 1 中的杀虫剂、交通运输、柴油的贡献较为均衡(图2)。Stage 3 中柴油的贡献激增,成为最主要的温室气体排放因素(>90%),肥料在温室气体的贡献为 Stage 2 的 7.1%,高于 3 个时期杀虫剂和灌溉的总和。在土地使用方面,杀虫剂使用量较少,在三个阶段中的贡献占比仅为 0.06%、0.01%、0.01%。与温室气体特征化结果不同的是,在 Stage 1 中的绿色肥料贡献值占比达到了 79.7%,比柴油的贡献值高 6.23 倍。在 Stage 2 和 Stage 3 中,交通运输和柴油的累计值超过了 80%,其中柴油在 Stage 3 中的占比达到了 98.6%。在淡水消耗的影响中,Stage 1 的灌溉是最主要的淡水消耗因素,在 Stage 1 的占比为 97.4%,在累计三个阶段中的占比仍然达到了 49.9%。在之后的阶段中,由于灌溉的停止导致了柴油的贡献占比急剧上升,达到了 54% 和 95.4%。肥料的贡献值占总计的 13.5%,而交通运输和电力的累计值占比仅为 2.4%。

柴油在三个时期的环境毒性的贡献值达到了 85.3%,在三个阶段的占比分别为 15.5%、82.9%、94.6%。汽油在运输中的使用对环境毒性的贡献值在 Stage 1 占比最高,且累计占比相似(6.9% 和 6.4%)。根据不同阶段内生产方式对温室气体、土地使用、淡水消耗和环境毒性的结果表明,人工杨树林建成过程中的因素贡献大小排序为:柴油>汽油>化肥>运输>灌溉>绿色化肥>杀虫剂。尽管使用了绿色循环方式,但是传统机械的使用仍然是造成环境毒性的主要因素<sup>[8]</sup>。

### 2.4 敏感性分析

为对合肥滨湖国家森林公园的后期维护管理和其他地区人工林的建设提供科学指导性意见,对该 LCA 模型进行了敏感性分析(图3)。减少柴油使用和交通运输消耗对减少温室气体排放均有较大的影响,减少 20% 的柴油使用(S1H)比减

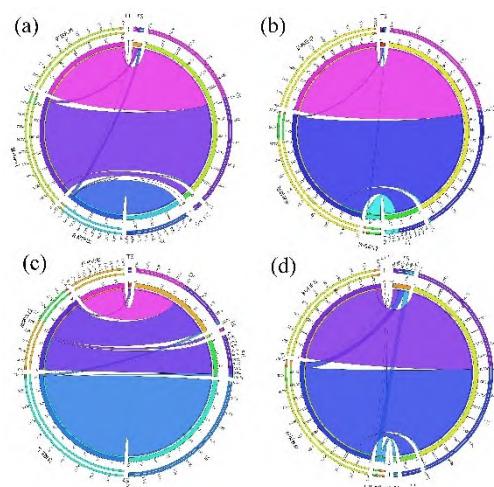


图2 温室气体、土地使用、淡水消耗和环境毒性的具体化特征分析:(a)温室气体;(b)土地使用;(c)淡水消耗;(d)环境毒性。其中 PE: 杀虫剂, TR: 交通运输, DI: 柴油, EL: 电力, FE: 肥料, GA: 汽油, IR: 灌溉

少10%的柴油使用(S1)高6.7%,且减少20%的柴油使用可以减少13.6%的温室气体排放。减少10%和20%柴油的使用都可以大幅度降低生态毒性、土地使用、矿产资源消耗、化石资源消耗和淡水消耗的值,其中S1H比S1的所有环境特征的平均下降值高1倍。减少柴油消耗的主要方法是使用电动或混动设备对杨树林进行修枝、粉碎和落叶清理,降低柴油机械车的使用频率。<sup>[9]</sup>此外,在造林过程中使用合适的营林机械,减少设备不必要的空转以及优化负载尺寸等也可以降低柴油消耗。

减少10%和20%交通运输的消耗会提高2.5%和2.2%的电离辐射值,但是会降低平均环境特征影响的0.05%和0.35%,其中对陆地生态毒性的降低最为明显,达到了0.84%和2.14%。合肥作为汽车新能源产业发展的重要城市,城市运输完全可以被电车替代,使用电动汽车尽管会提高潜在的电离辐射,但是会大幅度降低主要的环境特征值。园区内大量电动载客汽车、观光汽车和维护机械车在近些年被广泛使用,在杨树林成林后,交通运输造成的环境影响在未来可能会进一步降低。在合肥滨湖国家森林公园的案例分析中电力的分配是核电优先,然而核电改为生物乙醇能源发电或石油能源发电的改善效果都较小。对于电离辐射、臭氧层消耗、淡水生态毒性等环境特征来说,核电改为煤炭能源发电是最优秀的策略。园区内生产的大量杨树和其余木质纤维素生物质可以作为生物乙醇的生产原料来降低LCA中的环境影响特征<sup>[10,11]</sup>,然而由于模型内产生的自我修正对于结果的分析是复杂且未知的,因此没有计算在内。

## 2.5 碳中和下的碳(C)固定量分析

合肥滨湖国家森林公园人工杨树林建成第1年的净吸收C为-136.23 kg CO<sub>2</sub> eq,从第2年开始储存C,在21年后达到了158 634.42 kg CO<sub>2</sub> eq,结果表明人工杨树林具有很强的固碳能力(图4)。由于杨树属于速生树种,因此在最初的10年内储存C的效率最高,在第11年达到了累计总量的52.9%。与传统的杨树林不同,该森林公园的人工杨树林以景观为主要建成目标,仅需要修枝不需要进行轮伐,因此总体生物量在21年后将达到较稳定的水平。尽管根据Liu & Guo的研究表明不同林地间的土壤微生物存在较大差异<sup>[12]</sup>,但是整体的呼吸强度差异较小,尤其是当杨树林成林后森林土壤表面覆盖的落叶与枯枝充当了真菌和其余微生物的环境稳定剂。因此,每年土壤呼吸排出的CO<sub>2</sub>值与年份成正比。与杨树林固定的C值相比,维护杨树林所投入的C是微量的,这表明了在城市建造人工林的环境效益是巨大的。

虽然迫切需要更多的数据来支持关于积极管理的人工林的碳汇强度的结论,但该研究为评估城市人工林的气候减缓潜力提供了重要基线,同时还可作为评估重大森林管理战略碳封存潜力的有效参考,例如持续提升城市绿化面积、封山育林、湿地保护等生态可持续性发展方向。<sup>[13]</sup>进一步表明,人工林生物量的积累是碳封存的重要途径,这意味着提高树木生物量生产的林业集约化经营可能会优于树木生长速度较低的森林经营方式。从碳封存和减缓地区性气候变化的角度来看,长期维护人工林将产生巨大的生态效益。<sup>[14]</sup>总的来说,本研究强调了人工林在提升城市树木碳封存和减缓城市污染方面的关键作用。

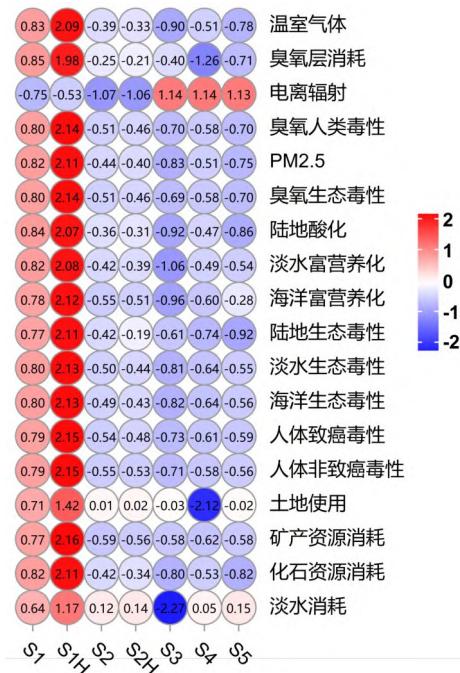


图3 敏感性分析:S1—减少10%的柴油使用;S1H—减少20%的柴油使用;S2—减少10%交通运输的消耗;S2H—减少20%交通运输的消耗;S3—将核电改为煤炭能源发电;S4—将核电改为生物乙醇能源发电;S5—将核电改为石油能源发电

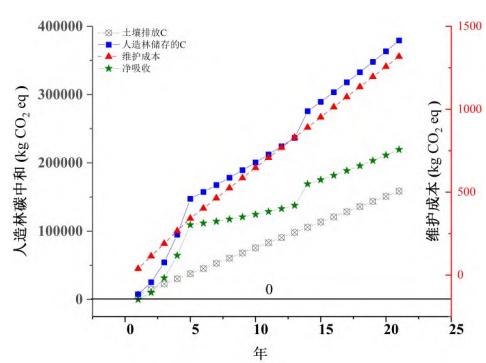


图4 人工杨树林的碳中和分析

**参考文献:**

- [1] 张煜星,王雪军,蒲莹,等.1949-2018年中国森林资源碳储量变化研究[J].北京林业大学学报,2021,43(5):14.
- [2] 杨建新,徐成,王如松,等.产品生命周期评价方法及应用[M].北京:气象出版社,2002,1-38.
- [3] LOPES J D S, KIPERSTOK A, CLEA B D F M, et al. Assessing the Economic and Environmental Performance of Cleaner Production Practices in Eucalyptus Planted Forests using Life Cycle Assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380: 134757.
- [4] DJOMO S N, GROOTE T D, GOBIN A, et al. Combining a Land Surface Model With Life Cycle Assessment for Identifying the Optimal Management of Short Rotation Coppice in Belgium[J]. Biomass Bioenerg, 2019, 121: 78-88.
- [5] 孙虎,李凤日,孙美欧,等.松嫩平原杨树人工林生态系统碳储量研究[J].北京林业大学学报,2016,38(5):33-41.
- [6] PEICHL M, MARTÍNEZ-GARCÍA E, FRANSSON J E S, et al. Landscape-variability of the Carbon Balance across Managed Boreal Forests[J]. Glob Change Biol, 2023, 29: 1119-1123.
- [7] 阮怀静.合肥滨湖国家森林公园植被景观质量提升探究[J].合肥学院学报(综合版),2018,35(3):10-15.
- [8] 吴京京,吴克,陈俊,等.合肥滨湖国家森林公园植物配置研究[J].生物学杂志,2016,22(2):26-29.
- [9] 吴亚婷.合肥滨湖国家森林公园社会效益评价及其发展对策研究[D].合肥:安徽农业大学,2022,1-55.
- [10] 章功玉.合肥滨湖国家森林公园生境质量变化及其影响因素研究[D].合肥:安徽农业大学,2022,1-56.
- [11] CHEN F, XIONG S, SUNDELIN J, et al. Potential for Combined Production of Food and Biofuel: Cultivation Of Pleurotus Pulmonarius on Soft-and Hardwood Sawdusts[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 266: 122011.
- [12] LIU Y, GUO M. Environmental Load Analysis of Forestation and Management Process Of Larix Olgensis Plantation By Life Cycle Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 2463-2470.
- [13] 司冬晶,张鑫鑫,韩冬荟,等.不同地点杨树无性系树高和胸径变异分析及生长模型构建[J].植物研究,2016,36(4):588-595.
- [14] 刘畅,曹帅,李明晗,等.不同厚度针、阔叶材吸湿特性研究[J].安徽农业大学学报,2023,50(1):36-43.

[责任编辑:谢进]

(上接第61页)

**参考文献:**

- [1] SKAJIMALI A S, AHMAD A. Forecasting MSW Generation using Artificial Neural Network Time Series Model: A Study from Metropolitan City[J]. SN Applied Sciences, 2019,1(11):1-16.
- [2] YEE V F, JIANG P, TAN R R, et al. Forecasting Plastic Waste Generation and Interventions for Environmental Hazard Mitigation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,424: 127330.
- [3] 周素霞,王明智,夏训峰,等.最优组合预测模型在城市生活垃圾清运量中的应用[J].环境科学与技术,2010,33(9):197-200.
- [4] 徐礼来,崔胜辉,闫祯,等.城市生活垃圾产生预测的核心问题探讨[J].环境科学与技术,2013,36(2):184-190.
- [5] 唐睿,王晨,陈雅萌,等.厦门市城市生活垃圾的系统动力学预测管控体系[J].环境科学学报,2019,39(6):2071-2078.
- [6] 张万里,郑永浩,邢万丽,等.基于ARIMA模型的环渤海典型城市生活垃圾产量预测研究[J].环境工程技术学报,2022,3:861-868.
- [7] 王琛,李晴,李历欣.城市生活垃圾产生的影响因素及未来趋势预测:基于省际分区研究[J].北京理工大学学报(社会科学版),2020,22(1):49-56.
- [8] ZHANG Z Y, ZHANG Y X, WU D Z, et al. Hybrid Model for the Prediction of Municipal Solid Waste Generation in Hangzhou, China[J]. Waste Management & Research, 2019,37(8):781-792.
- [9] 孙李红,张瑜.城市生活垃圾产量的变权重组合预测[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2016,32(3):366-368.
- [10] 陈华友,刘春林,盛昭瀚. IOWHA 算子及其在组合预测中的应用[J]. 中国管理科学, 2004,12(5):35-40.
- [11] 汪平生,陈俊,陈召明,等.合肥市生活垃圾产量多模型预测与分析[J].环境监测管理与技术,2022,34(4):64-67.
- [12] 高凤杰,刘洋,姜晗,等.东北地区村镇环境满意度影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(8):81-87.
- [13] 丁小松,杨桂元.基于GIOWHA算子的汇率组合预测模型[J].统计与决策,2018,34(12):9-13.
- [14] 赵亚红,王金星,张丽华,等.基于IOWHA算子的路基沉降加权组合预测方法研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(10):2529-2534.

[责任编辑:谢进]