

# 天然橡胶：负碳足迹的可再生工业原料

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

**摘要：**本文讨论了天然橡胶(NR)作为可再生工业原料的环境可持续性，特别是在印度橡胶工业中的应用及其碳足迹。文章指出，尽管合成橡胶(SR)的生产导致较高的碳排放，但天然橡胶种植园具有显著的固碳能力。通过生命周期分析，研究发现喀拉拉邦的天然橡胶种植园具有负碳足迹，即从大气中清除的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)多于释放的CO<sub>2</sub>。文章还探讨了不同橡胶加工形式(如RSS、TSR和cenex)的碳足迹，并与合成橡胶的碳足迹进行了对比。

**关键词：**天然橡胶；合成橡胶；碳足迹；碳排放

**中图分类号：**TQ332

**文献标识码：**B

**文章编号：**1009-797X(2025)05-0076-06

**DOI:**10.13520/j.cnki.rpte.2025.05.016

促进经济增长的产品和工艺的碳足迹是衡量其环境可持续性的一个重要指标。当全世界都在严重关注二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放量的增加和全球变暖问题时，这一点显得尤为重要。

橡胶工业主要消耗天然橡胶(NR)和合成橡胶(SR)，也是产业经济增长的主要驱动力。在全球范围内，该行业消费的橡胶总量中约65%为SR，其余为NR。在印度，SR的份额约为30%，NR为70%。国内NR生产需求的增加和赤字的增加可能会导致印度橡胶行业在未来几年对SR的消费增加。由于SR是由石油为原料生产的，其消耗量的增加必然会增加橡胶行业的碳排放强度，这与印度所宣称的降低经济碳排放强度、到2070年实现净零排放的意图相悖。

众所周知，石油衍生的合成橡胶的碳足迹明显较大，但尽管已有大量数据表明天然橡胶种植园具有较高的固碳能力，人们仍然认为有必要对天然橡胶的碳足迹进行评估。在本研究中，我们对喀拉拉邦1 ha NR种植园的碳排放进行了生命周期分析，喀拉拉邦是印度典型的传统橡胶种植区，估计生产率为1.5 t/ha/年，经济生命周期为27年，包括7年的未成熟期。我们估算了从苗圃准备到种植周期结束时砍伐老树以及将乳胶加工成不同市场形式的NR等每项农艺活动的潜在排放量。利用早先公布的橡胶种植园CO<sub>2</sub>整合数据，我们发现NR的碳足迹为-15，这是一项具有深远环境影响和社会意义的重大发现。

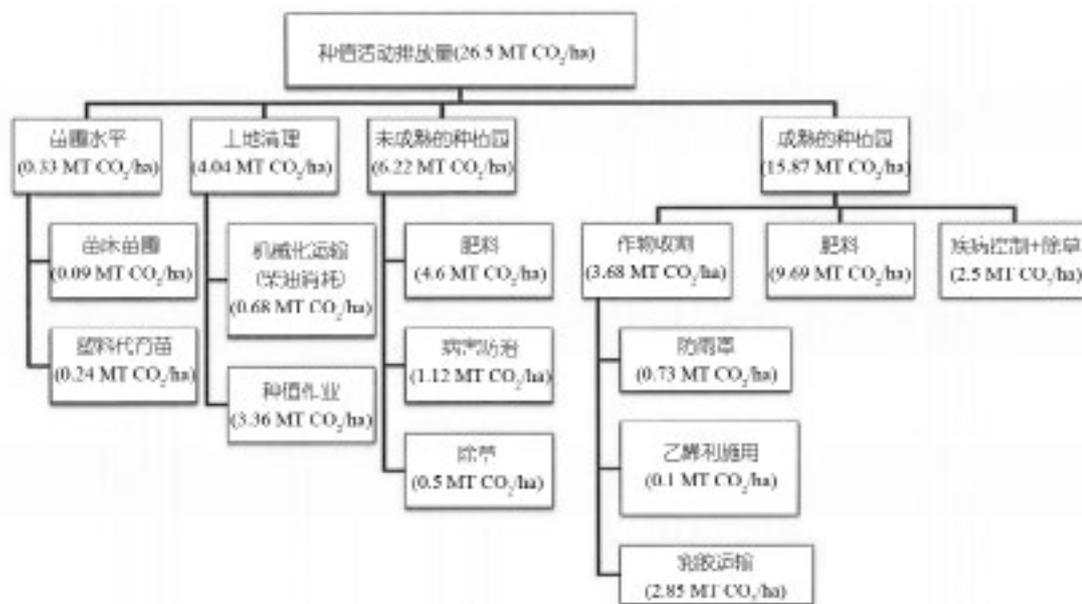
## 1 材料与方法

与生产胶乳和将其加工成可销售的NR形式(即肋状烟熏片状橡胶(RSS)、技术指定橡胶(TSR)和胶乳浓缩物或离心胶乳(cenex))相关的排放源可分为直接排放和间接排放。这些都是使用IPCC的默认排放因子和各种温室气体(GHG<sub>s</sub>)的全球升温潜值计算得出的。直接排放是指在1 ha种植园的物理边界内，由于与乳胶生产相关的农艺活动以及在加工厂将乳胶加工成可销售的NR形式而产生的排放(图1)。这些排放可在种植园和加工厂直接测量和监测。间接排放是指与各种投入生产相关的排放，如种植园使用的化肥、化肥的运输、农用机械和加工厂运行所需的燃料和电力等。

种植园的农艺操作包括准备苗床、在苗圃的塑料容器中培育幼苗和浇水、准备主田(包括除草、修梯田、打坑、种植、施肥、植物保护措施)、收获和收集乳胶以及将乳胶加工成RSS、TSR或cenex。在评估生命周期排放时，假定采用科学种植NR的所有标准农艺措施，在1 ha土地上种植这种作物，并在其27年的整个经济生命周期(包括前7年的未成熟期)内对收获的乳胶进行加工。

**作者简介：**章羽(1991-)，男，本科，主要从事橡塑技术装备方面的研究，已发表论文多篇。

**原文：**CURRENT SCIENCE No.3/2024, by K. Annamalai<sup>nath</sup> an\*and James Jacob.



注：括号中的数值表示个别农场活动可能产生的排放

图 1 橡胶种植园各种农场活动排放源示意图

在喀拉拉邦种植的 NR 种植园中，对净固碳率进行了多年的连续监测。本分析采用 25 t CO<sub>2</sub>/ha/年的平均整合率（从第七年开始）来计算 1 ha NR 种植园在生命周期内的总 CO<sub>2</sub> 整合量。从乳胶加工厂收集了将乳胶加工成可销售的 NR（如 RSS、TSR 和 cenex）所用燃料的类型和数量的数据，并使用其各自的排放因子和全球升温潜能值计算加工过程中的相应排放量。

## 2 结果与讨论

假设在 1 ha 土地上种植 NR 时采用了所有标准推荐方法，估算了每项农场活动以及将乳胶加工成 RSS、TSR 或 cenex 时的潜在生命周期排放量，并计算了 NR 的碳足迹。

### 2.1 苗圃和地田准备过程中的排放

对于地田每公顷 500 株秧苗的标准种植要求，苗床育苗可能从 1 000 粒种子开始，最终只有最好的 500 株秧苗被种植到地田。苗床育苗过程中使用的堆肥、木炭粉、化肥、农药等都是潜在的排放源。苗床育苗的总排放量估计约为 87 kg CO<sub>2</sub>（表 1）。下一步，幼苗在育苗室的低密度聚乙烯聚乙烯袋或塑料育苗杯中生长，待植株充分生长后移植到大田。培育 1 000 株育苗需要约 20 kg 的聚乙烯材料。这些聚乙烯袋不可重复使用，而且碳排放量高。育苗时使用的塑料育苗杯也会产生碳足迹。育苗杯可重复使用 5~6 次。育苗室的总排放量估计为 241 kg CO<sub>2</sub>（表 2）。

土地的准备工作包括清理旧植被、砍伐后轻度焚

表 1 1 公顷种植面积苗床育苗的潜在排放量

投入	数量	面积 / 种植规模	CO <sub>2</sub> /kg 成分	二氧化碳当量 (eq)kg/1 000 种子
麻袋	-	-	0	0(微不足道)
木炭粉	2 kg	1 000 粒种子	2.56	5.12
堆肥	50 kg	200 m <sup>2</sup>	0.415	20.75
除草剂 (敌草隆)	500 g	200 m <sup>2</sup>	5.4	2.7
PO <sub>4</sub>	7.0 kg	200 m <sup>2</sup>	0.56	3.92
肥料				
尿素	5.5 kg	200 m <sup>2</sup>	5.15	28.3
岩石 PO <sub>4</sub>	15.6 kg	200 m <sup>2</sup>	0.56	8.74
钾	1.7 kg	200 m <sup>2</sup>	0.43	0.73
MgSO <sub>4</sub>	4.7 kg	200 m <sup>2</sup>	0.3	1.4
耕作和灌溉				15.2
共计				86.9 kgCO/ha

各种投入和活动的排放潜能值是根据 IPCC 指南计算的

**表 2 橡胶育苗活动的潜在排放量**

活动	成分	数量 /1 000 株	CO <sub>2</sub> kg/1 000 株
聚乙烯袋	塑料	20 kg@2.7/kg	54.00
培根剂	可重复使用 (排放潜能值损耗的 15%)	12.75 kg×2.7 kgCO <sub>2</sub>	34.43*
白粉病喷雾剂	硫	0.2% 的硫 (喷洒六次) 432 g/1 000 株	0.38
波尔多混合物	CuSO <sub>4</sub>	2.16 kg	1.80
	石灰	2.16 kg	0.246
肥料	(N : P : K 和 MgSO <sub>4</sub> )	30 kg	92.00
燃料 / 运输和喷雾	汽油 / 汽油		69.30
耕作和灌溉			23.00
			240.7 kg

**表 3 种植作业期间土地清理活动的潜在排放量**

活动	成分 / (kg·ha <sup>-1</sup> )	排放 CO <sub>2</sub> eq/kg 组分	CO <sub>2</sub> eq/(kg·ha <sup>-1</sup> )
机械化 (包括清理古树)	土地清理 (柴油等), 露台和坑洼, 以及运输 电锯作业 (汽油)	2.79 kgCO <sub>2</sub> ×200 L	558.0
		3.19 kg×2	122.0
		1.65 kg×175	289.0
焚烧废弃物 种植	175 kg 干重 农家肥 岩石 PO <sub>4</sub>	12 kg/ 坑 (0.416×12 kg×500)	2 500.00
		200 g/ 坑 (0.56×200 g×500)	56.00
			510.00
保护性耕作等。 二氧化碳总量	种植和未成熟阶段		4.035 MTCO <sub>2</sub>

各种投入和活动的排放潜能值是根据 IPCC 指南计算的。

烧碎石、修筑梯田、衬砌、坑道等 (表 3)。如今, 这些活动大多由重型机械完成。运输原木、挖坑、运输种植材料和肥料等都需要消耗柴油或汽油等化石燃料。在估算大陆准备工作的排放量时, 考虑了一般农场做法的典型值, 总排放量约为 4 t CO<sub>2</sub> (表 3)。

## 2.2 未成熟期和成熟期的排放量

在种植园的未成熟期和成熟期, 施肥、病虫害防治措施和除草是主要的农艺措施。在未成熟期 (前 7 年,

树木没有采挖乳汁), CO<sub>2</sub> 总排放量约为 6.2 t, 其中 67% 的排放量来自肥料 (表 4)。在成熟期 (在本分析中为 8~27 年), 近 61% 的总排放量来自肥料, 约为 9.7 t CO<sub>2</sub> 当量。7 t CO<sub>2</sub> (表 5)。成熟期乳胶采收活动的估计排放量约为 3.7 t CO<sub>2</sub> (表 6)。

从苗床准备到种植园经济生命周期结束 (共 27

**表 4 未成熟种植园的潜在排放量 (考虑七年未成熟期)**

活动	所用化学品名称 / (kg·ha <sup>-1</sup> )	化学品使用总量 / [(kg 或 L·ha <sup>-1</sup> )]	排放 CO <sub>2</sub> eq/kg 成分	7 年内的二氧化碳排放量 / (kg·ha <sup>-1</sup> )
肥料	尿素	609	5.15	3 136.4
	岩石 PO <sub>4</sub>	1525	0.56	854.0
	钾肥	307.9	0.43	132.4
	MgSO <sub>4</sub>	150	0.3	45.0
运输	柴油	140 L	2.79	391.0
病害防治喷洒	硫磺	25.2 kg	0.88	22.2
	波尔多混合物	25.2 kg	1.04	28.1
白粉病	波尔多混合物	27 kg	1.04	12.5
芽腐病	波尔多混合物	12 kg 波尔多 480 g thiride+60 kg	1.04	255.4
粉病			3.9	
棒孢霉	代森锰锌	39 kg	4.02	151.3
	巴维辛 / 吡啶酚	27 kg	3.9	105.3
炭疽菌	百草枯 / 草甘膦	24 kg	3.9	151.2
除草剂	喷雾器 (汽油)	250	6.32.31	577.5
总喷洒活动	运输 (柴油)	120	2.79	335.0
			CO <sub>2</sub> 总排放量	6.2MTCO <sub>2</sub>

年), 整个生命周期的总排放量为 26.5 t CO<sub>2</sub> 当量 / 公顷, 约合 1 t CO<sub>2</sub> 当量 / 公顷 / 年。5 t CO<sub>2</sub>/ha, 即大约 1 t CO<sub>2</sub>/ha/ 年。种植园长达 20 年的成熟期几乎占生命周期排放量的 46%, 其次是 7 年的未成熟期 (23%)、主田种植活动 (15%) 和乳胶收获 (14%)。

按年计算, 未成熟期的排放量 (0.89 t CO<sub>2</sub>/ha/ 年) 高于成熟期的排放量 (0.61 t CO<sub>2</sub>/ha/ 年), 这是因为在植物生长旺盛的未成熟期采用了更为密集的农艺措施。

在种植园未成熟和成熟阶段的各种排放成分中, 化肥的生命周期排放量最大 (12.9 t CO<sub>2</sub>, 占 49%),

表 5 成熟橡胶种植园活动的潜在排放 (20 年), 出胶过程除外

活动	成分 /[(kg 或 L·ha <sup>-1</sup> )]	排放 CO <sub>2</sub> eq./[(kg·ha <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> eq./[(kg·ha <sup>-1</sup> )
肥料			
尿素	1 209.6	5.15	6 229.4
岩石 PO <sub>4</sub>	3 024.0	0.56	1 881.6
钾肥	972.0	0.43	464.4
运输: 柴油	400 L	2.79	1 116.0
病害防治			
白粉病	硫磺 648 kg	0.88	570.0
ALF/ 根腐病	COC121 kg	3.9	470.0
棒孢霉	COC121 kg	3.9	470.0
喷雾活动, 运输等。	汽油 300 L	2.31	693.0
	柴油 100 L	2.79	279.0
除草	百草枯和 2, 4D/3 kg	6.3	19.0
		二氧化碳总量	12.2MTCO <sub>2</sub>

各种投入和活动的排放潜能是根据 IPCC 将工业生产和实地应用组件产生的所有温室气体的 CO<sub>2</sub> 当量计算出来的。

表 6 20 年收获期作物收获活动的潜在排放量

活动	成分 /t(kg·ha <sup>-1</sup> )	排放 CO <sub>2</sub> eq./[(kg·kg <sup>-1</sup> ) 成分	CO <sub>2</sub> eq./[(kg·ha <sup>-1</sup> )
碘依可酯 10% 库存	12 L	1.24	14.9
棕榈油	30 kg	2.93	88.0
防雨罩 (聚乙烯帘)	16 kg×20 年=320 kg	2.06	659.0
	聚乙烯带 -0.3 kg	2.06	62.0
	沥青混合料 -40 kg	0.22	8.8
收集和运输乳胶	柴油 -1020 L	2.79	2 846.0
		共计	3.68MTCO <sub>2</sub>

各种投入和活动的排放潜力是根据 IPCC 计算得出的。

耕作仅占 2% (0.55 t CO<sub>2</sub>)。这是因为在主田种植植物后, 在 NR 种植园几乎不需要耕作。值得注意的是, 与许多其他作物相比, 氮磷钾种植对化肥的需求量较小, 而且土壤耕作要求也较低。与橡胶相比, 大田作物需要更多的耕作, 据估计, 耕作作业每年排放约 18~26 kg CO<sub>2</sub>/公顷 (或 27 年排放 0.49~0.70 t CO<sub>2</sub>)。这可能因种植模式、土壤类型、土壤有机质含量、当地气候等因素而有很大不同。

### 2.3 乳胶初级加工过程中的排放

在本分析中, 我们考虑了 20 年内 1.5 t/公顷/年的平均 NR 产量或 30 t 的生命周期产量, 以及其加工成 RSS、TSR 或 cenx 过程中的估计排放量。

带肋烟熏片橡胶: 利用 NR 加工厂的燃料和能源消耗数据, 我们估算了 RSS、TSR 和 cenx 加工过程中的 CO<sub>2</sub> 排放量。

对几家主要生产 RSS 的小种植户的调查显示, 根据周围的天气条件和熏制房干燥 1 tRSS 的效率, 大约需要 1~1.5 t 木柴 (表 7)。假设木柴的含水量为 50%, 则大约需要 0.917~1.375 t CO<sub>2</sub>。假设木柴含水量为 50%, 则在熏制房烘干 1 t RSS 时会排放约 0.917~1.375 t 的 CO<sub>2</sub>。此外, 在大型 RSS 加工中心, 板材电池的运行需要电力, 每生产 1 t RSS 大约需要 10~15 千瓦时。以 0.85 kg CO<sub>2</sub>/kWh 电量计算, 这相当于额外排放 8.5~12.75 kg CO<sub>2</sub>/kWh。每加工一 tRSS 排放 75 kg CO<sub>2</sub>。因此, 在完全加工 1 t RSS 时, 最大排放量在 0.926~1.388 t CO<sub>2</sub> 之间。388 t CO<sub>2</sub>。换句话说, 对于 30tRSS 的生命周期产量, 总排放量为 27.78~41.74 t CO<sub>2</sub>。根据 Jawjit 等人的研究, 在泰国, 每生产一 tRSS 排放约 0.64 t CO<sub>2</sub>, 泰国的 RSS 生产规模高于印度。

表 7 加工 1 kg 橡胶的能耗

加工橡胶的形式	薪材 /t	柴油 /L	电力 /(kWh)	每公斤加工橡胶 /cenex 排放的二氧化碳 /kg
片状橡胶	1~1.5	-	10~15	0.926~1.388
TSR	0.26~0.32	0~29	240~309	0.442~0.764
Cenex	-	-	150~218	0.089~0.131

技术规定橡胶: TSR 生产更加系统化和规模化, 比 RSS 生产更节能, 排放更少。在 TSR 加工过程中, 每 tTSR 的 CO<sub>2</sub> 排放量在 0.442~0.764 t 之间

(表 7), 大大低于板材制造过程中的 CO<sub>2</sub> 排放量。这样算来, 30 tNR 在整个生命周期中的 CO<sub>2</sub> 排放量为 13.26~22.92 t。由于加工效率的不同, 每 tTSR 排放

的 CO<sub>2</sub> 量存在很大差异,这主要取决于 TSR 工厂的年限/条件、加工规模和干燥系统的效率。

离心胶乳 (cenex): 最清洁的胶乳加工方式是生产鳞片胶乳,与其他形式的加工 NR 相比, cenex 的 CO<sub>2</sub> 排放量最小 (每 kg 鳞片胶乳排放 0.089~0.131 kgCO<sub>2</sub>) (表 7)。这是因为乳胶仍处于液态,干燥时不需要燃料或能源。加工 30 t 液态胶的生命周期排放量为 2.67~3.93 t CO<sub>2</sub>。

表 8 各种加工橡胶的碳足迹

加工橡胶的形式	天然橡胶的碳足迹 (每公斤干橡胶或 cenex 产生的二氧化碳/kg)
片状橡胶	-14.4~14.9
TSR	-15.0~15.4
Cenex	-15.4~15.6

天然橡胶的碳足迹: 本分析表明,对于 30 t 干橡胶的生命周期产量 (20 年的生产率为 1.5 t/ha/年),在生产 RSS、TSR 和 cenex 的过程中,种植操作和乳胶初加工的总排放量分别为 27.8~41.7、13.3~22.9 和 2.67~3.93 t CO<sub>2</sub> 当量。早先使用协方差分析法进行的研究表明,喀拉拉邦的橡胶种植园平均每年每公顷固定约 25 t CO<sub>2</sub> 当量,在种植园 20 年的成熟期 (抽梢期) 相当于 500 t CO<sub>2</sub> 当量。由于生产 NR 时从大气中清除的 CO<sub>2</sub> 远远多于释放到大气中的 CO<sub>2</sub>,因此 NR 的碳足迹是高度负值。虽然加工 RSS、TSR 或 cenex 的生命周期排放量明显不同 (表 7),但种植园在整个生命周期中整合的 CO<sub>2</sub> 总量远远高于这些排放量,因此,不同形式加工橡胶的碳足迹差异很小 (表 8)。因此,根据生命周期的排放量和碳整合量估算,可以看出 RSS、TSR 和 cenex 的碳足迹相似: 分别为 -14.4~14.9、-15.0~-15.4 和 -15.4~15.6 (表 8)。总之,无论加工橡胶的形式如何, NR 的碳足迹约为 15 t (表 8)。换句话说,每生产一 t RSS、TSR 或 cenex,就会整合约 15 t 的 CO<sub>2</sub> 净排放量。值得注意的是,这一评估是基于这样的假设,即在种植 NR 种

植园时完全采用所有农艺措施,但一般情况并非如此,因为出于经济原因,大多数种植者往往不使用化肥和植物保护措施等。虽然这将减少农场运营产生的排放,并有可能减少 NR 的碳足迹,但由于种植园对 CO<sub>2</sub> 的吸收量与排放量相比极高,因此这种减少将是微不足道的。

NR 的负碳足迹与 SR 的高碳足迹 (每 t SR 大约排放 10~15 t CO<sub>2</sub>) 形成鲜明对比。这使得 NR 成为比 SR 更受青睐的独特原材料,由于印度 NR 产量不足,印度橡胶制品制造业正越来越多地使用 SR。

根据橡胶树的生长速度、种植园的生产力和所遵循的农业管理方法,不同国家和农业气候地区的 NR 种植园的 CO<sub>2</sub> 总排放量和整合量很可能存在一些差异。然而,种植园整合的 CO<sub>2</sub> 总量始终很高。各国的研究表明,在考虑了枯落物分解和土壤呼吸的排放量 (27 t CO<sub>2</sub>/ha/年) 后,氮还原植物的净 CO<sub>2</sub> 整合率介于 20~43 t CO<sub>2</sub>/ha/年之间。

### 3 结论

与通常与大型炼油厂相关联的工厂生产的 SR 不同, NR 是由一些人口最多、最贫穷的发展中国家的数百万小型和边缘种植者生产的。仅在印度就有近 120 万小农户和边缘化的 NR 种植者,其中包括东北部一些在社会和经济上最边缘化的土著人,而 SR 则由该国的几家大型工业企业生产。天然橡胶在环境和社会方面都优于合成橡胶,这使得天然橡胶成为全球橡胶业更青睐的原材料。NR 和 SR 碳足迹的巨大反差为对 SR 征收庇古碳税提供了令人信服的论据。对 SR 征收这种税的收益可以支持小型 NR 种植者,并通过促进更多的 NR 消费来帮助橡胶制品制造业抵消其排放,从而创造一个碳强度降低的循环橡胶经济。

## Natural rubber: a renewable industrial raw material with negative carbon footprint

Zhang Yu, Compiler

(National Machinery Information Center of Rubber & Plastics, Beijing 100143, China)

**Abstract:** This article discusses the environmental sustainability of natural rubber (NR) as a renewable

