

# 承重草捆住宅楼：其生命周期影响评估

迈克尔·斯蒂夫科，罗扎莉亚·维科，约瑟夫·瓦诺萨

隶属机构：木材科学与技术学院，96001，斯洛伐克

**摘要：**作为一种可再生原材料，秸秆捆代表了一种可持续的建筑方式，对环境的影响最小。本文重点研究了承重草捆住宅建筑的生命周期影响评估。评估中考虑了从原材料提取到制造建筑材料的产品阶段，包括七种草捆。根据 IMPACT 2002+ 方法评估建筑材料。包括中点和终点影响类别。结果显示了稻草包来源的重要性。粗放型牧场秸秆对生态系统质量的影响是集约化生产的 20 倍，因此对建设总分有显著影响。结果显示稻草作为建筑材料的优势，特别是在当地使用时。此外，还确定了其他建筑材料的重要贡献。

**关键词：**建筑材料；损害评估；生命周期影响评估；单分；稻草捆

## Load-Bearing Straw Bale Residential Building: Its Life Cycle Impact Assessment

Michael Stefko, Rozalia Vicko, Jozef Vanoza

Affiliation: Faculty of Wood Science and Technology, 960 01 Zvolen, Slovakia

**Abstract:** As a renewable raw material, straw bale represents a sustainable way of construction with minimal environmental impact. This paper focused on life cycle impact assessment of load-bearing straw bale residential building. Product stage from raw materials extraction to manufacture of construction materials was considered in the assessment including seven variations of straw bale. Construction materials were evaluated due to IMPACT 2002+ method. Both midpoint and endpoint impact categories were included. The results showed the importance of straw bale origin. Ecosystem quality impact of straw from extensively cultivated pastures was twenty times higher than that of intensive crop production, thus making a significant difference to an overall score of the construction. Results showed advantage of straw as a construction material particularly when used locally. In addition, significant contributions of other construction materials were identified.

**Keywords:** Construction materials; damage assessment; life cycle impact assessment; single score; straw bale

### 引言：

从 1990 年到 2014 年工业化导致直接排放增加，包括能源和非能源过程排放增加了 65%，从而形成了我们今天面临的困难局面。世界经济论坛声称，飓风、干旱和野火等与气候有关的自然灾害正变得越来越激烈和频繁。再加上极地冰层融化速度加快，沿海人口受到威胁，我们被迫采取行动避免环境发生不可逆转的变化。气候观察项目的联合创始人安德鲁博伊德表示，我们只有 7 年多的时间来帮助我们的星球恢复。如何在这些变化中幸存下来的一种方法是使用可持续的原材料和能源，并创造尽可能多地防止废物产生的技术。因此，国际标准化组织在 2006 年发布了生命周期评估框架——LCA 方法，提供了对整个生命周期的产品和服务影响评

估的原则和指南。这种方法已在世界范围内的研究人员中普遍使用，并为当前技术和社会需求造成的环境污染带来了进步的看法。LCA 方法帮助我们了解产品和服务在其各自的生命周期阶段。根据 EN 15804，建筑和建筑材料有四个主要阶段——产品、建造、使用和报废阶段；一个额外的阶段表示可能的好处和超出系统边界的负载。每个阶段可能会产生不同的影响。为了选择对环境影响最小的产品或服务，识别和了解其在整个生命周期中的影响至关重要。LCA 根据特定的计算方法，通过中点和/或端点影响类别评估所研究系统内的输入和输出材料和能量流。表征阶段作为生命周期影响评估（LCIA）的关键步骤，可以通过损害评估、加权或单分分析来补充。这些步骤用于比较所选影响类别或产品的

大小。结果为决策者提供了与产品或服务相关的环境效益和负担的信息。

废物处理的潜在减少和秸秆捆的普遍可用性使秸秆成为一种非凡的建筑材料。世界上以稻草为基础的建筑物确切数量是未知的。但是，有一些数据库可以注册这些建筑物，例如欧洲的欧洲稻草建筑协会（ESBA）。根据 Cornaro 等人的说法。稻草建筑主要分布在美国、西欧和亚洲。Gonzalez 专注于稻草包的整个生命周期，报告称，稻草包的隐含能量比烧砖低 5.8%，而水泥块则低 19.8%。此外，他证明了普通砖石建筑材料的运输距离大大增加了整体环境破坏，强调了可再生农产品在降低建筑材料影响方面的相关作用，以及可持续生产的选择。Abd-Elhafeez 等人的一项研究。比较秸秆捆和砌筑砖施工表明，与砌筑砖相比，秸秆捆施工的不适度小时数降低了 40%，能耗降低了 82%，CO<sub>2</sub> 排放降低了 80%。Cornaro 等人的研究结果。与砖石墙相比，秸秆墙的生产 and 施工所产生的能源和二氧化碳排放量减少了 50%。此外，秸秆墙的使用阶段约占总能量的 91% 和总二氧化碳排放量的 93%，而砖墙分别占总能量和二氧化碳排放量的 85% 和 88%。诺兹德罗维奇等人。研究了秸秆打包技术的技术效果，发现较小的田地面积需要频繁的机器转动，这增加了机器的工作时间，从而导致更高的二氧化碳排放量。国际能源署报告称，2019 年，建筑和建筑业占最终能源消耗总量的 36%，占能源相关二氧化碳排放总量的 38%。国际能源署。2019 年全球建筑和施工状况报告。IEA，巴黎。本文在考虑几种类型的秸秆捆的情况下确定了秸秆捆建筑的产品阶段环境影响。中点（致癌物；非致癌物；呼吸性有机物和无机物；电离辐射；臭氧层消耗；水生和陆地生态毒性；陆地酸化和硝化；土地占用；水生酸化和富营养化；全球变暖；不可再生能源；矿产开采）和引入了端点影响类别（人类健康、生态系统质量、气候变化、资源），以彻底探索使用过的建筑材料的影响。

### 一、秸秆作为建筑材料

数千年来，稻草一直被用作建筑材料。其化学成分可与木材生物质相媲美，并且可以通过多种方式实施到建筑中。常见类型的稻草基建筑呈现承重或柱梁结构。如今，基于秸秆的生物复合材料是人们感兴趣的领域。基于稻草的建筑代表了传统建筑材料的绿色变体。穆阿祖等人。肯定传统建筑利用当地原材料来源，并提供简单的加工和最低的运输要求。巴塔拉伊等人。在他们的研究中强调了稻草捆的环境问题。Ashour 和 Wu 宣称几

乎可以使用稻草捆建造任何结构，包括隔热和隔音以及防火墙。正确设计的秸秆结构可以满足热技术标准和环境要求。

### 二、秸秆的精选特性

**耐火性：**将稻草压缩成致密块会显着降低氧气着火的能力。Dzidic 的一项研究表明，由稻草捆制成的承重墙，两侧抹灰，负载为 12 kN/m，耐标准火力 2 小时 26 分钟，达到 REI 120 耐火性。作为比较，墙板用木钉框起来，用稻草包绝缘，负载为 20 kN/m，达到了 REI 60 的耐火性。

**隔热：**Petkova-Slipets 和 Zlateva 证明了秸秆作为隔热材料的优势，他们采用 TCi Mathis 热导率分析仪对热物理特性进行无损测量。他们得出的结论是，即使复合材料中稻草的重量低于 0.5%，也会导致比热容增加 50% 以上，热导率降低高达 56%。科斯特斯等人。在 Guarded Hot Plate 仪器中测量秸秆捆的热导率。他们比较了 36 到 46 厘米壁宽和 20 到 70 公斤/平方米稻草质量的性能变化。所考虑的草捆墙的热导率在 0.056 和 0.097 W/mK 之间。Sabapathy 和 Gedupudi 强调了秸秆纤维的取向会影响热传输特性。平行定向的秸秆样品的热导率（0.069–0.194 W/mK）高于随机和垂直定向的秸秆样品（0.040–0.084 W/mK）。

**隔音：**Tesl í k 等人的测量。对不同类型的稻草墙的空气隔音性能进行了研究，结果表明表面处理在空气隔音价值中所占的份额最大。此外，每面被调查的墙都符合欧盟隔墙结构加权降噪指数的要求（ $R_w = 48-57$  dB）。卡斯科内等人。在他们的研究中，比较了带有稻草捆绝缘的木框架墙与含有膨胀聚苯乙烯的类似墙的声学性能。结果表明，稻草捆是一种更好的隔音材料，其加权表观降噪指数（ $R'_{w}$ ）值为 49 dB，外墙的加权标准化电平差（ $D_{2m, nt, w}$ ）等于 43 dB。

**耐久性、水分和生物抗性：**将水分作为建筑耐久性的因素之一，Koh 和 Kraniotis 指出外部气候是秸秆捆建筑湿热特性的最重要因素。稻草墙的外侧最容易发霉。尽管如此，他们建议应用带有通风气隙的外部覆层可以防止水分渗透。Marques 等人证实了秸秆中真菌和霉菌发展的风险。同时，他们声称正确设计和建造稻草捆建筑对于确保耐用性和防止生物发育至关重要。

**毒性：**Allam 等人。提醒燃烧秸秆释放大量空气污染物，可能导致严重的环境问题。秸秆捆以建筑材料的形式保持完好。因此，将秸秆升级为建筑材料可以防止排放物燃烧。

### 三、材料和方法

根据 LCA 方法和 IMPACT 2002+ 计算方法,对选定的承重草捆建筑的环境影响进行了评估。阶段 A1 至 A3 包括在评估中。功能单元的特点是整个草捆建筑,内部总面积为 76.05 平方米。该建筑是作者提出的典型的小型家庭住宅的建筑对象方式。组件数据取自建筑面积声明。根据斯洛伐克技术标准 STN 73 0540-3 计算热特性(比热需求和传热系数)。供暖的比热需求设定为 31 kWh/m<sup>2</sup>a。未考虑一次能源需求。

### 四、结果

首先,建议的结构是通过表征阶段进行评估的。所有的物质和能量流都被分配到各自的中点影响类别。表征结果表明,泡沫玻璃在七个影响类别中对环境的影响最严重——致癌物(74.23 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq)、呼吸性无机物(8.42 kg PM<sub>2.5</sub> eq)、电离辐射(59.14 × 10<sup>3</sup> Bq C-14 eq)、陆地酸化/硝化(98.11 kg SO<sub>2</sub> eq)、水生酸化(25.78 kg SO<sub>2</sub> eq)、全球变暖(58.93 × 10<sup>2</sup> kg CO<sub>2</sub> eq)和不可再生能源(90.45 × 10<sup>3</sup> kg 石油当量)。OSB 影响最严重的呼吸有机物(1.72 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq)。金属板屋顶被认为是矿物提取中最差的材料,导致 555.82 千克铁当量资源枯竭,仅占建筑重量的 0.25%。尽管重量贡献相对较低(0.9%),但由于仍使用 HFC-134a 和 HFC-152a 的挤压工艺,XPS 在臭氧层消耗类别中的负面影响最大(1.15 × 10<sup>-3</sup> kg CFC-11 eq)作为除二氧化碳之外的发泡剂。单独的秸秆在土地占用(每年 61.34 × 10<sup>3</sup> m<sup>2</sup> eq 有机耕地)和水生富营养化(3.08 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq)影响类别中取得了最高的负面影响。尽管如此,它在非致癌物(-14.29 × 10<sup>2</sup> kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq)、水生生态毒性(-27.30 × 10<sup>5</sup> kg TEG eq)和陆地生态毒性(-35.61 × 10<sup>5</sup> kg TEG eq)影响类别中达到负值,证明对环境与污染物并入其结构有关。然而,负面影响可能发生在生命周期结束时,污染物可能会重新回到环境中。在土地占用类别中,影响是由单独的秸秆生产过程造成的,尤其是来自“占用、牧场、人工、集约化”的自然投入。相同的过程对磷酸盐浸出引起的水体富营养化产生负面影响。另一方面,锌和铜由于它们沉积到秸秆结构中而产生了积极影响。在表征结果后,进行了损伤评估。损伤评估构成四个端点影响类别(人类健康、生态系统质量、气候变化和资源),通过将中点表征潜力与基于 Jolliet 等人的参考物质的损害表征因子相乘而形成。人类健康被引入为残疾调整生命年(DALY)。对生物多样性的破坏反映了与自然或未受干扰的区域相比,已消失的物种比例,因为在特定时间段内特定区域内可

能消失的物种比例。资源的特点是每单位矿物所需的额外一次能源和能源载体的不可再生一次能源总量。气候变化与中点影响类别的单位相同。

从损害评估的角度来看,秸秆重金属从土壤中吸收的积极作用导致了人类健康的消极价值。泡沫玻璃确认了气候变化、资源和人类健康影响类别中的最差值。由于草场的密集占用,草捆对生态系统质量的影响最大。混凝土、纤维板和粘土灰泥在几乎所有类别中都显示出相似的值,除了以混凝土为主的气候变化。胶泥沥青和屋顶隔热箔对环境的影响可以忽略不计,因为它们在施工中的重量贡献较低(分别为 0.05% 和 0.01%)。最终,确定了单分终点影响。单分评估评估每个端点影响类别对整个材料的贡献。1 分(Pt)作为单一得分单位,代表一个普通欧洲居民每年环境负荷的千分之一。单分结果清楚地表明稻草捆是环境的最大负担,主要是因为如上所述的密集牧草占用。此外,应说明稻草仅占整个建筑重量的 15.09%。第二差的材料仍然是泡沫玻璃,其次是金属板屋顶。此外,金属板屋顶的重量比泡沫玻璃轻 16 倍以上,占泡沫玻璃整体端点影响的近 55%。为了调查秸秆来源对整体环境影响的贡献,评估了另外六个秸秆数据库。尽管对人类健康有积极影响,但稻草 G 被认为是最有害的稻草替代品。另一方面,与小麦集约化生产相对应的秸秆 C 似乎是对生态系统质量影响最小的最环保的选择(占相应类别中秸秆 G 总体影响的 4.98%)。

### 五、讨论

用于评估的数据库是全球数据集的一部分,涉及来自世界各地的平均技术和运输距离。该研究证明了秸秆来源对建筑最终影响的重要性,并支持了 Haas 等人的研究结果。他们声称与集约化草原耕作相比,粗放和有机耕作减少了对环境的负面影响。我们研究中考虑的每种秸秆替代品都具有特定的相对百分比端点类别影响,该影响与根据种植类型的特定技术操作密切相关。这证明了在执行 LCA 时数据库选择的相关性以及本地可用资源的重要性以及个体栽培类型的贡献。作为建筑秸秆捆的最佳选择,秸秆 C 被选为代表瑞士集约小麦生产的产品。泡沫玻璃、金属板屋顶、木地板和 XPS 被确定为对环境造成的大部分建筑影响。防水绝缘对环境的影响可忽略不计。在秸秆 C 替代品的情况下,SBRB 的全球变暖中点影响类别为 304.93 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> 和 294.35 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>。Petrovic 等人评估的木质单户住宅。在整个产品阶段产生了 169.80 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>。Mitterpach 等人对木质建筑的其他评估。显示出 389.62 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> 的影响。然而,每个

建筑在材料成分、重量分布、楼层数、建筑面积、用于评估的库存、计算方法、地理区域和许多其他因素方面都是独一无二的。大多数研究都包含特定于研究的数据，因此无法与其他记录进行比较。因此，这些限制带来了不同的价值观，并没有反映现实。此外，经常估算建筑中的建筑材料数量，导致进一步的不准确。Moschetti 等人的研究结果。指出需要更加战略性地强调隐含能源和材料排放，以实现从零能源到零排放的建筑目标的成功过渡。尽管对生态系统质量的影响相对较大，但秸秆仍然是一种对环境有益的建筑材料。以及高野等人。比较不同的数据库，我们对环境的具体影响的结果总是个别的，根据所选择的计算方法以及个别影响类别的不同而不同。此外，正如 Finnveden 等人所证明的那样，归因方法和结果方法可能会产生不同的结果。此外，考虑秸秆作为农业废弃物及其对总分的影响，可以进一步研究秸秆建筑的环境特征。该研究没有考虑经济因素、环境条件和结构的耐久性。

## 六、结论

本文揭示了草捆住宅建筑 (SBRB) 在中点和终点影响类别中的环境影响，并证明了选择合适的建筑材料的重要性。该研究还确定了环境不适宜和繁重的材料。为了表达不同来源的秸秆可能对施工环境影响的影响，我们考虑了七种秸秆。结果表明，个别产品之间存在巨大差异，尤其是取决于生产技术、耕作方式、地理范围和运输距离。正确选择秸秆捆可将总隐含排放量减少 89%。在所有情况下，由于土地占用，秸秆对生态系统质量的影响最大。小麦秸秆集约化生产需要更多的肥料，从而支持富营养化。另一方面，大量生产单独的秸秆造成的巨大土地占用极大地破坏了生物多样性，但由于在生物质生长过程中吸收了重金属，在非致癌物、水生和陆地生态毒性影响类别中仍然保持积极。了解建筑材料对环境的影响是建筑设计的一个关键点。然而，要建造对环境最有利的建筑，有必要详细研究每个生命周期阶段并作为一个整体进行评估。在这些方面，考虑到最繁重的建筑材料和能源的几种变化，应进行进一步分析以评估这种结构的整体生命周期环境影响。

## 参考文献:

[1]Haas, G.; Wetterich, F.; Köpke, U. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2001, 83, 43 - 53.

[2]Petrovic, B.; Myhren, J.A.; Zhang, X.; Wallhagen, M.; Eriksson, O. Life cycle assessment of a wooden single-family house in Sweden. *Appl. Energy* 2019, 251, 113253.

[3]Mitterpach, J.; Ilceckova, R.; Stefko, J. Life cycle impact assessment of construction materials of a wood-based building in an environmental context. *Acta Fac. Xylogiae* 2018, 60, 147 - 157.

[4]Moschetti, R.; Brattebø, H.; Sparrevik, M. Exploring the pathway from zero-energy to zero-emission building solutions: A case study of a Norwegian office building. *Energy Build.* 2019, 188 - 189, 84 - 97.

[5]Takano, A.; Winter, S.; Hughes, M.; Linkosalmi, L. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Build. Environ.* 2014, 79, 20 - 30.

[6]Finnveden, G.; Hauschild, M.Z.; Ekvall, T.; Guin é e, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J. Environ. Manag.* 2009, 91, 1 - 21.

[7]Koh, C.H.; Kraniotis, D. Hygrothermal performance, energy use and embodied emissions in straw bale buildings. *Energy Build.* 2021, 245, 111091. Koh, C.H.; Kraniotis, D. Hygrothermal performance, energy use and embodied emissions in straw bale buildings. *Energy Build.* 2021, 245, 111091.

[8]Petkova-Slipets, R.; Zlateva, P. Thermal Insulating Properties of Straw-Filled Environmentally Friendly Building Materials. *Civ. Environ. Eng.* 2017, 13, 52 - 57.

[9]Costes, J.-P.; Evrard, A.; Biot, B.; Keutgen, G.; Daras, A.; Dubois, S.; Lebeau, F.; Courard, L. Thermal Conductivity of Straw Bales: Full Size Measurements Considering the Direction of the Heat Flow. *Buildings* 2017, 7, 11.

[10]Sabapathy, K.A.; Gedupudi, S. Straw bale based constructions: Measurement of effective thermal transport properties. *Constr. Build. Mater.* 2019, 198, 182 - 194.

[11]Tesl í k, J.; Fabian, R.; Hrub á, B. Determination of the Airborne Sound Insulation of a Straw Bale Partition Wall. *Civ. Environ. Eng.* 2017, 13, 20 - 29.

[12]Cascone, S.; Evola, G.; Gagliano, A.; Sciuto, G.; Parisi, C.B. Laboratory and In-Situ Measurements for Thermal and Acoustic Performance of Straw Bales. *Sustainability* 2019, 11, 5592.