城市生物废弃物和开挖土壤在建筑领域的应用：综述

丹妮拉·夏尔皮，朱莉娅·佩罗蒂
隶属机构：比利时图尔奈研究中心

摘　要：数千年来，土壤一直被用作建筑材料，工业革命后逐渐减少。如今，由于其低环境影响、性能和可用性，人们对实施非烧制土壤建筑解决方案越来越感兴趣。传统的土壤建设技术经常包括植物纤维以提高土壤性能，最近的研究强调了农业和非农业废弃物的主要用途是未烧制的土壤建设。本文回顾了建筑行业使用挖掘土壤和生物废物的最新技术，包括对城市废物和利用这两种二次建筑材料流整合的建筑技术的新关注。我们的文献回顾强调了缺乏关于联合使用这些二级资源的参考资料。最后，提出了未来的研究方向，以促进其在建筑领域的实施，从而改善城市垃圾管理。

关键词：废旧物资；生物废物；循环经济；挖出的土壤；城市新陈代谢；城市采矿

Application of urban biowaste and excavated soil in the construction sector: A review

Daniela Scialpi, Giulia Perrotti
Affiliation: Tournai Research Centre, Belgium

Abstract: Soil has been used as building material for thousands of years with a decrease in popularity after the industrial revolution. Nowadays, there is a growing interest in the implementation of unfired soil-based building solutions for their low environmental impact, performances and availability. Traditional soil construction techniques have recurrently included vegetal fibres to enhance soil performance and recent studies highlight a predominant use of agro- and non-agro-waste for unfired soil construction. The article reviews the state-of-the-art of the use of excavated soil and biowaste in the construction industry including a novel focus on urban-only waste and on building technologies using the integration of these two secondary construction material flows. Our literature review highlights a lack of references about the joint use of these secondary resources. Finally, future research orientations are suggested to promote their implementation in the building sector, which could improve urban waste management.

Keywords: Waste materials; biowaste; circular economy; excavated soil; urban metabolism; urban mining

引言：

到 2050 年，世界人口预计将增加 68%，到 2100 年将有 85% 的人口居住在城市。在“一切照旧”的情况下，这将导致需要更多的建筑和基础设施，从而导致消费增加不可再生材料和废物的产生。因此，在过去的几十年里，城市废物管理已成为全球环境优先事项，全球每天产生约 350 万吨城市固体废物（MSW）。欧洲的回收率正在提高（欧洲环境署，将残渣作为原材料和二次材料来源的价值已在全球范围内成为政策和实践中的一项引人注目的挑战。这反映在研究人员中循环经济战略的日益普及，政策制定者和建筑业，以实现更好的废物预防和优化资源管理。在欧洲层面，欧盟委员会（EC）的循环经济一揽子计划确定了五个优先部门（塑料、食物垃圾、关键原材料、建筑和拆除、生物质和生物基材料），以促进循环经济转型和产品生命周期的“闭环”。到 2030 年，欧盟的目标要求回收 65% 的 MSW、70% 的所有建筑和拆除废物（CDW）、75% 用于包装垃圾，垃圾填埋限制在 MSW 的 10% 以内。在城市层面，循环经济战略适用于 valo 鉴于人口增长以及资源需求和废物产生的相关增加，地方废物流的增加对于改善城市系统的性能至关重要。在过去几年中，有关该主题的作品数量呈指数增长，表明该研究领域正在不断发展。由于供需

接近，城市在循环经济中具有独特的地位，可以通过更有效的材料收集循环和逆向物流来获得环境效益。陈等人。分析了几个回收项目，以确定不同类型废物的“回收边界”。市场价值高、运输成本相对较低和特定用途的废物，如废油、金属或废纸，可以在区域层面进行循环，而市场价值低、长途运输成本高的废物，如生物废物和CDW，适用于城市层面的回收和回收。本文重点关注城市产生的两种废物：生物废物和未受污染的开挖土壤。它提供了对两种废物流的首次联合分析，以此为开发可回收建筑材料以供联合使用的机会提供了一种手段。正如下一节所讨论的，先前对土壤基复合材料的研究表明，通过添加生物废物（在大多数情况下是农业副产品）可以提高其物理、机械和热性能。从环境的角度来看，与传统解决方案相比，它们在建筑领域的组合使用可以替代焚烧或垃圾填埋等污染处理系统，并减少能源和资源消耗以及温室气体排放。基于循环经济战略以实现欧盟回收目标，本次审查有两个主要目标：（a）强调将开挖的土壤和生物废物转化为直接来自城市的替代建筑材料的潜力；（b）在联合使用两种废物的基础上寻找开发技术的机会，从长远来看，这可以利用新的综合政策框架。

一、背景：生物废物和挖掘的土壤

在欧洲，生物垃圾占 MSW 的 34% 以上。它被定义为来自家庭、小型企业和机构的非液体废物，包括食品和厨房废物（例如来自家庭、餐馆、酒店、学校、医院）、市场废物、花园和公园废物以及食品加工行业的残留物。生物垃圾可分为绿色垃圾（例如草、植物）和食物垃圾（含有蔬菜或动物蛋白），2017 年欧盟 28 国的垃圾总量为 8600 万吨。这包括单独收集的生物废物和与混合（残留）废物一起收集的生物废物，但不包括家庭堆肥的生物废物。食物垃圾是最重要的组成部分，占城市生物垃圾流的 60%，而绿色垃圾占 35%，剩下的 5% 被归类为“其他”。这种庞大的废物流构成了重大的环境和经济威胁。在欧洲，由于 57% 的生物垃圾仍被未分类的 MSW 填埋，因此成为垃圾填埋场温室气体排放的主要来源，约占欧盟温室气体排放总量的 3%。解决城市生物废物对于实现 2018 年欧洲废物框架修订指令中定义的新目标也至关重要。该指令引入了关于回收和再利用准备的新目标：按重量计算，到 2025 年，至少 55% 的生物废物必须被回收，到 2030 年为 60%，到 2035 年为 65%。与之前关于生物基价值链转化的研究一致与循环处理和减少废物产生相一致，新的循环生物价值链的发展将需要在以前不相干的部门（例如废物管理和建筑）之间进行合作，以处理废物类型的具体特征并实现更高的可持续性标准和经济竞争力与基于化石的过程相比。分类收集是循环利用生物垃圾作为资源的先决条件。到 2023 年，生物废物必须要么在源头回收，要么单独收集并在专用设施中回收，而不是与其他类型的废物混合。

目前，两种最广泛应用的分离收集生物废物的处理技术是堆肥（需要氧气的处理）和厌氧消化（不需要氧气的处理）。这两种处理方法都是养分回收技术，对环境的影响低于垃圾填埋场，是需要考虑的相关应用。然而，必须提高生物质的有效利用，以实施级联战略，以最大限度地提高环境和社会经济效益。这可以通过纳入其他生物基价值链来实现。这些价值链应优先考虑尚未使用或不太适合其他增值过程的生物质流。这可以避免回收的生物质的替代用途之间的潜在冲突。一个例子是在建筑材料中使用生物废物，这也可以减少产生的废物量，防止原材料枯竭，并提供化石产品和工艺的替代品。有关当前和未来废物流的详细定性和定量信息是研究循环模型的实施或制定创新的废物管理战略的关键。然而，城市–区域层面的数据可用性通常具有挑战性，因为数据大多仅在全国范围内报告。更具体地说，地方和区域尺度的废物统计数据的可用性在数据覆盖范围（家庭和经济活动）方面具有挑战性，关于废物成分的详细信息，以及空间和时间分辨率（地理参考数据的可用性和完整时间序列）。除了环境收益之外，从业者社区对了解加工成建筑材料的潜在更高经济价值的兴趣也越来越大。这是由于与用于能源回收的堆肥或焚烧有关的一公斤建筑材料的商业价格较高。存放在建筑物中的废物在经过几个循环后会产生成倍的价值，然后在其工程服务寿命结束时返回到生物循环。欧洲废物框架指令将挖掘的土壤视为 CDW 的一部分。CDW 是欧盟产生的最重和最大的废物流之一。它约占所有废物类型重量的 25–30%，由多种材料组成，包括挖掘出来的土壤。每年 CDW 约为 8.2 亿吨，其中至少 5.2 亿吨为开挖土壤。挖掘出的土壤和石头（废物清单的类别 17 05 04）不包括在欧盟的 CDW 回收目标中，这要求将 CDW 的重量减少到至少 70%。土壤通常用于生产烧制的粘土材料（例如砖和瓦），并且它在未烧制的粘土材料中的应用已经在乡土建筑中普遍使用了几个世纪。未经烧制的土壤建设，在文献中也被定义为“土方建设”，已经实施了数千年。二战后被混凝土取代的土方建筑由于与混凝土相比环境性能低，最近开始引起建筑商和建筑师的兴趣。通过添加主要从农业副产品中回收的生物团聚体来加固和减轻土壤是当今的

普遍做法。

二、挖出的土壤

马格努森等人。审查通过使用城市挖掘的土壤和岩石作为建筑材料来提高资源效率的管理策略。这篇综述强调了对城市地区开挖土壤和岩石的数量和整体管理知之甚少。该研究概述了科学文献中一个突出的废物观点，根据该观点，填埋是主流管理策略，高质量目的的回收率仍然很低。更好地协调建筑项目可以促进其他应用，例如在建筑工地或其他项目中再利用、运输到回收设施或为以后使用做准备。在后来的研究中，Magnusson 等人。提出了一个模型来分析城市土壤和岩石流的材料质量及其大小，以评估其回收潜力。卡塔吉里等人。介绍了一个表征流程图来评估巴西圣保罗市挖掘土壤的再利用。与 Magnusson 等人的研究一样，该研究指出需要提高城市地区建筑工程开挖土壤的循环性。挖掘出的土壤，如果分类得当，可以在现场重复使用或重定向到其他项目。该研究提到的主要应用是垃圾填埋场覆盖、沟渠工程、土坝、铺路层、加固土墙等挡土结构和植被更换。张等人。调查了中国开挖土壤和岩石的产生、组成、流动和潜在影响。除了回填和景观美化外，近 87% 的挖掘土壤和岩石总产生量流向了倾倒场或不受管制的垃圾填埋场。中国的情况尤其重要，因为它建设了世界上最长的地铁系统，大量的土壤和岩石被从建筑工地挖掘和清除。该研究提出了一种方法来了解挖掘的土壤和岩石的生成、组成、流动和再循环潜力，并通过生命周期分析评估它们对环境的潜在影响。

Säynäjoki 等人。评估了开挖土壤在减少温室气体排放中的作用。由于大量的岩石和土壤材料流通常被驱赶进出建筑工地，挖掘导致了大量的温室气体排放。他们研究的目的是调查在多大程度上减少挖掘工程对环境的影响，可以在城市层面促进更可持续的城市规划和减缓气候变化。该研究还提供了通过在城市规划中更受控制的挖掘活动获得的潜在减排数据。Cabello Eras 等人。提出通过生命周期分析和清洁生产策略研究土方工程的环境绩效。该研究侧重于古巴的一个案例研究，并建议对原始项目进行修改以减少挖掘土壤的数量。梯田填土只使用高阻土，低阻和中阻土外送。沃尔什等人。调查在纽约市提取的剩余土壤，以防止洪水泛滥、维护基础设施并减少城市土壤中污染物的暴露。该研究回顾了 113 个建筑施工项目，结果显示，在半径约 72 公里的范围内，超过 95% 的提取土壤用于出口。即使 74% 的土壤被回收利用，运输也会对环境和经济造成重大影响。公共政策并没有促进在当地（在它们被提取的地方）再利用土壤，部分原因是缺乏对城市土壤资源可用性的认识以及缺乏对其产生率和最终目的地的研究。最后提出了一些当地利用剩余土壤的政策建议。卡帕索等人。概述了使用不同类型的挖掘土壤生产地聚合物粘合剂，特别关注来自海洋港口和天然和人工水库的采矿废物和疏浚沉积物。地质聚合有助于制造用于建筑的新产品，改善土壤管理及其可持续性。Priyadharshini 等人研究了中高塑性土壤的替代用途。他们的研究通过一系列热试验研究了挖掘土壤作为水泥砂浆细骨料的用途。结果表明，根据其中的粘土矿物学，热处理允许将粘土用作细骨料。布格勒等人。和 Alshibani 提供了土方工程生产力评估方法的示例，Sobotka 和 Blajer 讨论了高密度城市条件下土方工程物流的案例研究。尽管它们的兴趣和关注点新颖，但这些文章并未包含在结果中，因为它们的关注点不在于在施工中使用开挖的土壤。

三、城市生物垃圾

里卡迪等人。回顾从椰子、咖啡、玉米、棉花和大米中选择的生物废料，以及它们在生产污染物去除以及根据其纤维成分的隔热和隔音板中的可能应用。其次，Sharma 等人。研究稻壳、麦秸、甘蔗渣、玉米壳、花生壳和蛋壳的先进应用，这些材料目前用作污染物去除、肥料、燃料和热解。还提到了在建筑部门使用农业废料灰作为二次副产品来增强水泥的性能。这些研究并未直接涉及生物废物的城市来源，但在城市环境中也可以找到一些农业工业残留物，例如咖啡或蛋壳。2019 年，Esposito Corcione 等人。概述了欧洲生物垃圾的数量（欧洲 MSW 的 46wt% 或每年 8.9×10^7 吨）、其组成（来自家庭、餐馆和市场的食物垃圾）和当前的处理方法（动物饲养、堆肥、厌氧消化、焚烧和填埋处置）。该研究提出了一种稳定和增值 MSW 有机部分的新方法，并将其掺入热固性聚合物树脂中以生产完全惰性的面板或砖块。Lozano-Miralles 等人。通过生命周期评估调查了含有啤酒厂废料（大麦甘蔗渣）的烤粘土砖对环境的影响。甘蔗渣由位于哈恩大都市区的喜力啤酒厂（西班牙哈恩）提供。该研究涵盖了从“摇篮到大门”的材料，涉及提取、运输、粉碎、建模、干燥和烹饪。结果表明，从环境的角度来看，在砖块中加入生物废物是有利的，因为它导致所研究的所有影响类别减少了 15-20%。该方法可以作为评估其他复合废物基产品的基础。洛里等人。研究了城市固体生物废物的不同处理技术以制造产品。处理技术分为四大类：（a）直接使用；（b）生物处理；（c）

物理化学处理；（d）热化学处理。在审查中列出的产品及其最终用途中，未提及建筑行业，表明生物废物对建筑产出的影响仍可被视为利基市场。Madurwar 等人、Hebel 等人、Attias 等人。和 Cecchini 回顾了农业废弃物在建筑领域的主要应用，随后是 Arup 于 2017 年发表的一项研究。在这些基础上，可以确定城市生物废弃物的 11 个主要应用领域：（a）刨花板（例如由香蕉制成）束，棉秆，椰子髓）；（b）砌筑复合材料/砖（例如蘑菇菌丝体、稻壳与粘土或砂水泥砖混合）；（c）粘合剂材料（例如甘蔗渣灰、草、锯末、稻壳灰）；（d）骨料（例如油棕壳）；（e）纤维增强材料（例如稻草、小麦秸秆、大麦秸秆和刨花）；（f）加固物（例如竹子）；（g）家具（例如，来自废弃咖啡渣的瓷砖、灯或杯子）；（h）隔音（例如咖啡废料、大豆残渣中的生物泡沫）；（i）隔热（例如用玉米芯或马铃薯皮制成的面板）；（j）地毯和绒球（例如来自香蕉或菠萝的残留物）；（k）外壳系统（例如由果皮、蛋壳和虾壳制成的生物聚合物）。

四、含有生物废物的土基复合材料

詹纳特等人。回顾关于农业和非农业废弃物对未烧制土壤块生产的影响的最新研究。该报告强调了农业副产品的普遍使用，其中一些可以在城市环境中找到，例如：木骨料/纤维、木屑和锯末；草；蛋壳；番茄渣和甜菜根。该研究侧重于复合材料的物理力学和热性能，没有直接参考生物垃圾和开挖土壤的城市来源。Al-Fakih 等人。提供了关于在制造烧制和不烧制砖中使用废料的最新评论。在烧砖部分，作者指的是在不分离有机部分的情况下使用降解的 MSW，并与两种不同的土壤类型以不同的比例混合然后烧制。在未烧砖部分，审查的生物废物类型是木纤维、锯末、棕榈油和贝壳，通常与石灰和水泥材料而不是土壤混合。因此，这些文章中没有提到使用未烧制的土壤与城市生物垃圾混合。Laborel-Préneron 等人。报道了植物聚集体和纤维在制造未烧制土壤建筑材料（如砌块、灰泥和整体墙）中的影响。评论的一部分讨论了植物聚集体和纤维的起源和特征，将它们分为八类：谷物秸秆、木材聚集体、韧皮纤维、棕榈树纤维、废料和残渣、叶纤维、水生植物纤维和碎片以及羊毛.这些生物聚集体的来源可以是植物或动物，但在大多数情况下使用植物产品。蔬菜中以农副产品使用最多，仅对木材骨料、烟草、茶叶、棉渣等工业废弃物进行了介绍。

Mohajerani 等人。概述用于各种建筑材料（包括开挖的土壤和土方材料）的不同纤维的类型、特性和应用。纤维分为天然纤维和合成纤维，其中一部分来自地毯、轮胎、天然头发等的废纤维。没有提供来自城市生物废物的纤维的参考资料，天然纤维通常是农业废物。然而，该研究建议在建筑项目中使用纤维来改善质量差的挖掘土壤，而不是丢弃它。这种加筋土可用于铺装层、挡土墙、斜坡和地基。在土材料中使用的纤维中，唯一的废料纤维是烟头中含有的纤维素，以及从木材和树叶中研磨出来的纤维素，用于加固石灰土砖。值得一提的是 Muñoz 等人的研究。关于在未烧制的土基砖中使用废纸和纸浆。尽管纸张和纸浆不被视为生物废物，但这项研究是少数指出工业废物不同于农业工业废物的研究之一。由于季节性原因，农业工业废物可能难以储存，并且通常已经在其他市场进行了处理。从生命周期评估的角度来看，砖的环境足迹可以进一步减少，因为工业废物通常比农业废物具有更大的足迹。此外，与烧制砖相比，未烧制砖的能量强度较低。最后，用于生成样本的制造过程可以促进更大行业水平的升级。在关于土基复合材料的文献中，最广泛测试的特性是密度、抗压强度和吸水性以及导热性、隔音性和耐火性。测试结果因废料类型、纤维长度和土壤成分而异。密度和吸水率是相互关联的两个物理特性；密度与机械和热性能直接相关。通常，由于废物相对于土颗粒的比密度较低，添加废物会降低复合密度。由于毛细管效应，低密度样品中更多的孔隙导致更高的吸水系数。在大多数情况下，样品的抗压强度是通过添加废料来提高的。总体而言，复合材料的热效率随着废料的引入而提高，因为它们具有更大的孔隙率。

五、结论

越来越多的证据表明，城市化进程的加快和城市增长将导致对自然资源的需求增加。建筑业目前动用了全球基础资源总量的 30-40%，并产生了三分之一的温室气体排放量。使用当地采购的材料是减少废物产生量和减少原材料消耗的主要策略之一。在本文中，我们回顾了城市开挖土壤和生物废弃物在建筑领域的利用研究现状。土壤是最古老的建筑材料之一，在过去 20 年中越来越多的出版物表明，土壤作为一种可持续的、低环境影响的材料在世界范围内重新出现。如果越来越多的研究集中在城市开挖土壤的管理策略上，那么没有研究将其用作未烧制的土壤建设。相反，一些研究表明，挖掘出的土壤大多被填埋或丢弃在非法区域。其他常见的应用是垃圾填埋场覆盖、沟渠工程、土坝、铺路层、挡土结构和植被更换。尽管数千年来植物纤维已被纳入土壤以提高

其性能，但最近才开始科学研究，没有发现关于城市生物废物和开挖土壤联合使用的研究；这凸显了废物管理研究方面的重大知识差距和未来研究的新途径。

由于城市生物废物和挖掘土壤代表了欧洲范围内的主要流动，它们的联合使用可以为加强回收战略和技术以及利用未来更全面的废物管理政策的精简提供机会。从技术角度来看，生物废物中富含纤维的有机部分可以改善土壤产品的热、声学和机械性能。从环境的角度来看，生物废物和挖掘土壤的联合使用可以替代焚烧或填埋等污染处理系统。此外，利用生物废物开发新材料可以减少能源和资源消耗以及温室气体排放。城市将永远是废物产生的地方，但我们研究中提到的对两种废物流的联合使用的研究可以促进废物管理战略的进步，并有利于开发先进的回收、再利用或堆肥解决方案。

参考文献：

[1]Attias N, Danai O, Abitbol T, et al. (2020) Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. Journal of Cleaner Production 246: 119037.

[2]Ayodele AL, Oketope OM and Olatunde OS (2019) Effect of sawdust ash and eggshell ash on selected engineering properties of lateralized bricks for low cost housing. Nigerian Journal of Technology 38: 278 - 282.

[3]Demir I (2008) Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. Waste Management 28: 622 - 627.

[4]Eliche-Quesada D, P é rez-Villarejo L, Iglesias-Godino FJ, et al. (2011) Incorporation of coffee grounds into clay brick production. Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional & Bioceramics 110: 225 - 232.

[5]Elsacker E, Vandelook S, Van Wylick A, et al. (2020) A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. Science of The Total Environment 725: 138431.

[6]Goel G and Kalamdhad AS (2017) Degraded municipal solid waste as partial substitute for manufacturing fired bricks. Construction and Building Materials 155: 259 - 266.

[7]Haberl H and Geissler S (2000) Cascade utilisation of biomass: Strategies for a more efficient use of a scarce resource. Ecological Engineering 16: S111 - S121.

[8]Nistic ò R, Lavagna L, Versaci D, et al. (2020) Chitosan and its char as fillers in cement-base composites: A case study. Boletin de la Sociedad Española de Cer á mica y Vidrio 59: 186 - 192.

[9]Oskouei AV, Afzali M and Madadipour M (2017) Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests. Construction and Building Materials 142: 137 - 147.

[10]Ouargui A, Belouaggadia N, Elbouari A, et al. (2018) Development of a cellulose-based insulating composite material for green buildings: Case of treated organic waste (paper, cardboard, hash). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 353: 012018.

[11]Pacheco-Torgal F and Jalali S (2012) Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. Construction and Building Materials 29: 512 - 519.