

固体废弃物制备人造土壤研究进展与展望

陈君¹, 彭思伟², 张伟军^{1,3,*}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074; 2. 大唐环境产业集团股份有限公司, 北京 100097;
3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 固体废弃物是经济社会发展过程中产生的副产物, 具有污染与资源的双重属性, 对其进行合理的处理与处置是实现社会绿色发展的重要步骤。对固体废弃物进行资源化利用, 可以节约大量的资源, 促进社会建设, 发展循环经济, 并实现“双碳”目标, 具有协同增效作用。以我国固体废弃物资源化的技术需求为出发点, 综述了我国一般工业固体废弃物的产生、处理和处置现状, 并总结了其中典型的固体废弃物特性与资源化路径。同时, 对通过人造土壤技术实现固体废弃物的资源化利用研究现状进行了梳理。总结了人造土壤的制备技术与应用场景, 综述了利用固体废弃物制备的人造土壤的生态环境效应, 并展望了固体废弃物制备人造土壤未来的技术突破方向。

关键词: 固体废弃物; 资源化利用; 人造土壤; 生态效应; 制备技术

中图分类号: X705

文献标识码: A

Progress and prospect of the preparation of manufactured soil from solid waste

CHEN Jun¹, PENG Siwei², ZHANG Weijun^{1,3,*}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Datang Environment Industry Group Co., Ltd., Beijing 100097, China; 3. Research Center for
Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Solid waste is a byproduct generated during the process of economic and social development, possessing both polluting and resource properties. Proper handling and disposal of solid waste are crucial steps toward achieving green development in society. Utilizing solid waste as a resource can save substantial resources and has synergistic effects on promoting social construction, developing a circular economy, and achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals. This article starts with the technical requirements for the resource utilization of solid waste in China, reviews the current situation of the generation, treatment, and disposal of general industrial solid waste in China, and summarizes the typical characteristics and resource utilization pathways of such waste. It also examines the current state of research on the resource utilization of solid waste through manufactured soil technology. The article summarizes the preparation techniques and application scenarios of manufactured soils and reviews the ecological and environmental effects of manufactured soils prepared from solid waste. Finally, it looks forward to future technological breakthroughs in preparing manufactured soils from solid waste.

Keywords: Solid waste; Resource utilization; Manufactured soils; Ecological effects; Preparation techniques

收稿日期: 2024-05-15

修回日期: 2024-06-18

DOI: 10.20078/j.eep.20240613

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52270141, 52122010)

作者简介: 陈君(1996—), 女, 四川绵竹人, 博士研究生, 主要研究方向为污泥资源化。E-mail: 384181397@qq.com

通讯作者: 张伟军(1986—), 男, 甘肃定西人, 研究员, 主要研究方向为污泥资源化。E-mail: zhangweijun@cug.edu.cn

经济社会生产活动消耗了大量的资源,同时产生了大量的废弃物。中国统计年鉴数据显示^[1],2022年中国一般工业固体废弃物产生量高达41亿t,综合利用率仅57%。一般工业固废产生量大,但具有污染与资源的双重属性。《“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》明确指出,大宗固废量大面广、环境影响突出、利用前景广阔,是资源综合利用的核心领域。因此,推进大宗固废综合利用对提高资源利用效率、提高环境质量、促进经济社会发展全面绿色转型具有重要意义。近年来,由于气候变化与资源日渐短缺,无废城市建设与循环经济系列政策逐渐开展,从而对固体废弃物资源化提出了更加明确的要求。目前,我国一般工业固废处理处置以“减量化”“无害化”“资源化”为原则,传统处理处置技术资源化效率较低,工业固废利用方式主要从减量化的角度出发。基于工业固废庞大的产生量与贮存量,有必要开发新的高价值利用途径。

许多工业固体废弃物中含有丰富的植物生长营养物质,如硅、钙等,部分还含有磷和其他高价值成分。因此,将工业固体废弃物进行农业资源化已受到广泛认可,其中,人造土壤技术目前正受到广泛关注^[2-3]。人造土壤又叫技术新成土,是一种经人工“合成”的具有土壤特性的“材料”。技术新成土是第18届世界土壤科学大会正式宣布的一类参考土壤组,其被定义为土壤中人工材料含量大于20%且位于地表100cm范围内的土壤^[4]。常用的人工材料主要由有机和无机工业固

体废弃物组成,如污泥、煤矸石、粉煤灰等。人造土壤应用十分广泛,不仅可用于城市道路建设,还可用于园林绿化、退化土壤修复等土壤建设场景。将合适的固体废弃物制备成人造土壤,不仅可以实现固体废弃物的资源化利用,还可以解决当前城市建设和生态修复过程中优质表土需求的缺口。

本文围绕我国一般工业固体废弃物资源化的技术需求,综述我国一般工业固体废弃物产生与处理处置现状,总结其中典型固体废弃物特性与资源化路径,同时对人造土壤的制备技术与应用场景进行总结,综述了通过固体废弃物制备人造土壤的研究进展与难点,展望了固体废弃物制备人造土壤未来的技术突破方向,以期为我国无废城市建设和实现“双碳”目标提供科学指导。

1 我国固体废弃物产生与资源化利用现状

1.1 我国固体废弃物产生现状

一般工业固体废弃物是我国固体废弃物的重要组成部分^[5],占固体废弃物总量的80%。工业固体废弃物是指人类生产过程中产生的固体废弃物,尤其涉及工业生产活动。根据中国统计年鉴与生态环境状况公报,总结了近10年来中国一般工业固废的产生与利用情况,统计结果见表1。数据显示,从2013年到2022年,我国一般工业固废产生量增加了25.3%,这说明目前我国工业固废总产生量呈高速增长趋势。然而,2022年我国工业固废的综合利用百分比相比2013年却降低了5.2%,这表明现有的工业固废综合利用方式效率低,与固废高速增长的产量之间存在矛盾。除此之外,对比欧美发达国家的工业固废高效利用水

表1 我国一般工业固废总体情况统计表

Table 1 Information of general industrial solid waste in China

年份	产生量/亿 t	综合利用量/亿 t	处置量/亿 t	贮存量/亿 t	综合利用率/%
2022	41.1	23.7	8.88	9.40	57.6
2021	39.7	22.7	8.89	8.94	57.1
2020	36.8	20.4	7.17	8.08	55.4
2019	44.1	23.2	11.0	N.A	52.6
2018	40.8	21.7	10.0	N.A	53.2
2017	38.8	20.6	9.43	9.31	53.3
2016	30.9	18.4	6.55	6.26	59.5
2015	32.7	19.9	7.30	5.84	60.8
2014	32.6	20.4	8.04	4.50	62.8
2013	32.8	20.6	8.30	4.26	62.8

注:N.A为数据不可得

平,我国工业固废资源化利用率长期处于 60% 水平以下,具有较大的提升空间^[6]。在一般工业固体废弃物的细分种类中,煤矸石、粉煤灰、尾矿、工业副产石膏、冶炼渣、建筑垃圾和农作物秸秆的年产量已超过 1 亿 t,污泥年产量预计在 2025 年突破 9 000 万 t^[7],有望在未来三年内成为新的一类大宗固废。其中,煤矸石、粉煤灰、尾矿、工业副产

石膏、冶炼渣、建筑垃圾属于无机固废,秸秆与污泥属于有机固废。

1.2 我国固体废弃物处理处置现状

由于不同固废之间存在内生性质差异,因此对于不同的固废采用不同的处理处置方法。本文对 7 类大宗固废与污泥进行了性质与传统处理处置途径进行了总结(表 2)。

表 2 核心工业固废的主要成分与传统利用途径

Table 2 Main components and traditional utilization ways of core industrial solid waste

种类	主要成分	传统利用途径
煤矸石	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃	(1)发电 (2)制备建筑材料 (3)直接充填开采 (4)制作肥料 (5)提取其他高品质物质
粉煤灰	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃	(1)制备建筑材料 (2)直接充填开采 (3)制作肥料 (4)提取其他高品质物质 (5)用于环境治理(吸附剂)
尾矿	以金属尾矿为主,主要包括铁尾矿、铜尾矿、黄金尾矿	(1)高价值金属组分回收 (2)制备建筑材料 (3)作为矿山地下采空区的填充材料
工业副产石膏	CaSO ₄	(1)制备水泥缓(调)凝剂 (2)制墙体材料(石膏板) (3)制备新型材料(胶凝材料、隔热材料等)
冶炼渣	主要由钢铁冶金渣、金属冶炼渣组成,成分多以金属氧化物为主	(1)制备路基材料 (2)制水泥 (3)生产建筑材料
建筑垃圾	主要由废旧砖瓦、废旧混凝土等建筑废弃物组成	(1)骨料生产 (2)制作建筑材料 (3)制备路基材料
农作物秸秆	作物茎秆	(1)肥料 (2)饲料 (3)基料 (4)燃料 (5)原料
污泥	有机残片、无机颗粒物、胶体、细菌菌体	(1)土地利用 (2)制作建材 (3)焚烧

煤矸石与粉煤灰,是我国煤炭能源领域产生的 2 种典型煤基无机固废,主要成分均为 SiO₂ 和 Al₂O₃,煤矸石相较于粉煤灰而言具有更稳定的结晶相结构^[8]。然而二者的资源化利用途径略有差异,其中煤矸石与粉煤灰均可用于制备建筑材料、肥料或是提取其他高品质物质^[9-10]。比如,LI 等^[11]利用粉煤灰稳定海底疏浚底泥,将其用作建

筑材料,同时实现了疏浚底泥与粉煤灰的资源化利用。除此之外,煤矸石由于其高热值特性还可用于发电或充填开采,而粉煤灰由于含有较高比例的活性硅酸盐矿物,因此具有较高的比表面积和良好的反应活性,可被用作吸附剂参与环境治理^[12-14]。

尾矿是矿业领域产生的典型固废,其组成由原生矿床决定,主要分为金属尾矿与非金属尾矿。

2021年统计数据显示,我国铁尾矿产生量约6.11亿t,占尾矿总量的43.06%;铜尾矿产生量约3.92亿t,占比27.63%,黄金尾矿产生量约1.61亿t,占比11.35%;其他金属尾矿产生量约1.35亿t,占比9.50%,非金属尾矿产生量约1.20亿t,占比8.46%(图1)^[15]。统计数据表明,我国尾矿主要由金属尾矿构成,其中铁尾矿、铜尾矿为主要尾矿类型。目前对于尾矿的综合利用方式为回收金属类有价组分,或是制备建筑材料,也可作为矿山地下采空区的填充材料^[16-17]。其中回收金属类有价组分受到了广泛的关注,大量学者针对这一问题开展了研究,比如SUN等^[18]发现采用氯化焙烧浮选工艺可以从每吨氰化渣尾矿中回收1.71g金;YU等^[19]采用盐酸浸出沉淀法实现了磷尾矿中磷的高效回收。

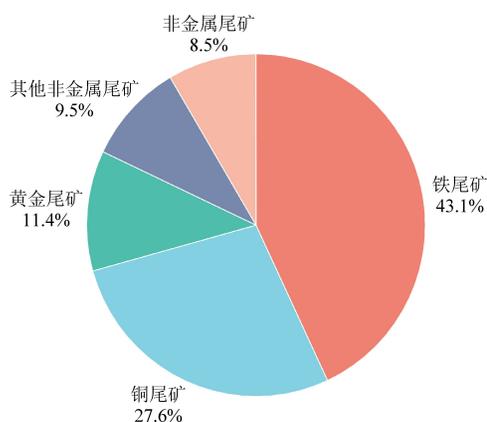


图1 2021年我国不同类型尾矿产生量

Fig. 1 Production of different types of tailings in China in 2021

工业副产石膏是指工业生产中由化学反应生成的以硫酸钙(含零到两个结晶水)为主要成分的副产品或废渣,因此也称化学石膏^[20],其中脱硫石膏、磷石膏与氟石膏是主要的工业副产石膏。工业副产石膏的传统利用主要途径为制水泥,作为水泥缓(调)凝剂,其次可以制成墙体材料,如石膏板等,除此之外,工业副产石膏还可以用于制备新型材料,如胶凝材料、隔热材料等^[21]。

冶炼渣是冶金工业生产过程中产生的典型无机固废,主要包括钢铁冶金渣(高炉渣、钢渣、铁合金渣、钢铁尘泥等)、有色冶炼渣(铜渣、铅渣、锌渣、镁渣等)、电解锰渣和赤泥^[22-23]。冶炼渣组成复杂,由具体的冶炼工艺与冶炼矿物决定具体成分。比如,高炉渣是高炉炼铁过程中产生的多孔、无定形硅酸盐熔融副产物,主要成分为CaO、MgO、SiO₂及Al₂O₃;铜渣是铜冶炼过程中产生的

含铁铅锌固体废物,属于典型有色冶炼渣,主要成分除Ca、Mg、Si、Al的氧化物外,同时含有20%~40%的铁及一定量的铅锌^[23]。目前对于冶炼渣的传统利用途径为制备路基材料、水泥,或者是用于生产建筑材料^[21]。XU等^[24]总结发现,在混凝土生产中,采用冶炼渣作为砂石和骨料的替代材料,不仅减少了自然资源的开采,而且提高了混凝土的综合性能。

建筑垃圾是城市建设发展过程中产生的大宗无机固废,主要由各类建筑物/构筑物、管网建设,以及装饰装修等过程中产生的施工废弃物组成^[25]。建筑垃圾的组成十分丰富,对其进行资源化利用主要遵循回收再利用原则,其传统的利用途径集中于建筑领域,如进行建筑骨料的回收生产或用于制作建筑材料,如新型墙体等,此外,将建筑垃圾(如废弃混凝土、砖石)与其他材料混合还可以制备路基材料^[25]。

农作物秸秆是我国典型的大宗有机固废,是粮食生产过程中的副产品。目前我国秸秆产生量占世界总量的20%~30%^[26]。相较于无机固废,高有机质特性使农作物秸秆的资源化利用途径有所不同。目前秸秆的资源化利用程度比无机固废高,为80.11%。秸秆的资源化原则可归纳为“五料化”,分别为秸秆肥料化、饲料化、基料化、燃料化、原料化,以此开展的资源化技术途径高达几十种^[27]。其中,将秸秆用作肥料与饲料(农业化用途)是主要的资源化途径,其次用作燃料。近年来,以秸秆作为原料进行产品开发越来越受到关注,比如DAI等^[28]利用秸秆制备生物炭,吸附水中的四环素类污染物,该生物炭吸附效果好且成本低,是一类潜在污染治理产品。

除秸秆外,污泥作为污水处理过程中的副产品,是一类产量快速增长的有机固废。污泥富集了大量有机物、污染物质与营养物质,具有污染和资源的双重属性^[29]。污泥是由有机残片、无机颗粒物、胶体、细菌菌体等组成的一种成分极其复杂的非均质体,含有大量的病原体、有机污染物、重金属元素,丰富的N、P、K等营养元素^[30]。与秸秆不同的是,污泥由于其高含水率与污染特性,通常在处置前需要进行脱水与无害化处理。目前对市政污泥的资源利用主要途径为生物稳定化处理后进行土地利用,或是制作建材、参与焚烧^[31-32]。比如,MEKBEL等^[33]发现,添加脱水污泥烧制的黏土砖具有更高的抗压强度。此外,TANG等^[34]

表明从生物稳定化后的污泥中提取的液态肥料可显著促进植物生长。

综上所述,目前我国无机固废的常规资源化途径集中于制备建筑材料,少部分无机固废由于相对低污染特性(如粉煤灰、煤矸石等)可用于土壤改良;而有机固废的传统资源化利用方式则主要集中于土地利用和焚烧发电。针对无机/有机固废进行新型资源化利用途径的开发对提升固废资源化效率至关重要。

2 人造土壤技术研究现状

2.1 人造土壤制备技术

随着经济社会的快速发展,除了伴随大量固废的生成外,因城市建设与环境污染场地修复产生的对优质土壤的需求也在不断扩增^[2]。然而,土壤却是典型的不可再生资源。因此,为寻求土壤资源保护与经济社会发展之间的平衡,人造土壤应运而生。人造土壤也可以称作表土替代材料、人工土壤或者是技术新成土,是受到国际粮农

组织承认的一种新型土壤资源。人造土壤的定义为由人类创造的原始条件决定其发展的土壤^[35]。值得注意的是,与人造土壤概念相近的人为土壤是指长期经历人类生产生活而被深刻改变的土壤,其变化是从地表向下而没有对底层结构产生剧烈变化。人为土壤最好的例子就是农业土壤。农业土壤会经常性被添加常规的有机物质和其他肥料,并进行长期规律性地灌溉^[36]。目前,人造土壤已被广泛使用,2017 年全球市场价值已达到 49 亿美元,2023 年已增长至 69 亿美元^[3]。人造土壤的制备技术主要分为 2 种,一种是堆肥成土,另一种是机械混合成土(图 2)^[37]。堆肥成土技术主要应用于以澳大利亚为代表的发达国家,该成土技术自 2000 年左右开始发展,主要将园林废弃物通过堆肥的方式制备成类土基质,将该类土基质用于城市绿化建设^[3,38-39]。机械混合技术是选择合适的配土基质(通常由固体废弃物组成),按照一定比例直接混合制备。该技术在国内外均有一定的研究,相较于堆肥成土更具代表性。

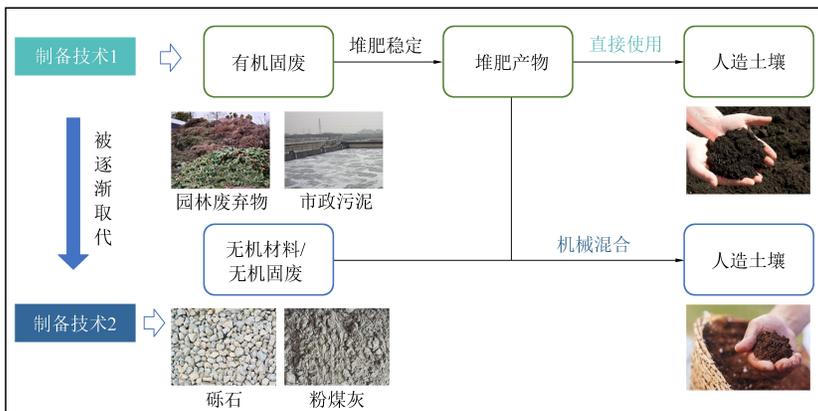


图 2 人造土壤制备技术路线图^[3]

Fig. 2 Manufactured soil preparation technology roadmap^[3]

2.2 人造土壤的应用场景与性质要求

人造土壤作为一种典型“目的产物”,其性质主要由具体的使用场景决定。根据人造土壤的定义范围,目前共有 5 类主要应用场景受到了人们

的广泛关注(表 3),这 5 类应用场景分别为用于园林绿化^[40-41]、构建运动场地、建设道路的结构土壤^[42]、退化土壤修复^[37]和温室或其他无土栽培的植物生长介质。其中用于园林绿化与参与退

表 3 人造土壤的主要应用场景、土壤性质要求与典型成分

Table 3 Main application scenarios, soil property requirements and typical components of manufactured soil

应用场景	性质要求	典型构成成分
园林绿化	量大、性质稳定、含有丰富的植物营养元素	堆肥产物(园林废弃物、污泥等)、无机固废
运动场地	抗压实、良好的排水特性	砂、砾石、保水剂
结构土壤	承重,为大型植被提供生长空间	大粒径碎石、黏土
退化土壤修复	量大、性质稳定、含有丰富的植物营养元素	堆肥产物(园林废弃物、污泥等)、无机固废
植物栽培	孔隙度大,提供适宜的生根空间,合适的排水能力	泥炭、园林废弃物堆肥产物、添加剂(如沙子、珍珠岩、蛭石、木材)

化土壤修复是人造土壤发挥经济价值、生态价值的主要应用场景。

在园林绿化建设过程中,通常需要人造土壤具有量大、性质稳定和含有丰富的植物营养元素的特性。一般用于园林绿化(如草地、花朵、灌木和树木的生长)的大多数人造土壤都是以有机堆肥产物为基础,其中添加一些无机成分(如底土、沙子、岩石碎屑、粉煤灰),有机堆肥产物成分占最终人造土壤产品体积 70%~90%^[3]。目前,园林废弃物是发达国家用于堆肥的主要有机物质,但是随着时间的推移,以园林废弃物堆肥产物为主体的人造土壤可能体积逐渐减小,因为园林废弃物中大部分的固体材料是由分解缓慢的木材和树皮构成。为解决这一问题,研究人员逐渐在堆肥过程中或者是堆肥后加入由无机固废组成的无机材料。无机固废的加入在一定程度上改善人造土壤的性能,其添加量一般为 10%~20%,因此以园林废弃物堆肥产物为核心制备的人造土壤仍不可避免地面临着土壤体积随时间减小的问题^[3]。

在退化土壤的修复过程中,客土修复是一类安全高效的修复方式。使用人造土壤替代自然表土进行土壤修复,不仅可以实现土壤的快速修复,还能保护珍贵的土壤资源^[4]。用于退化土壤修复的人造土壤与用于园林景观用途的人造土壤性质要求类似。人造土壤用于修复时,一般有 2 种制备方式:就地制造和非原位制造。其中就地制造通常适用于修复区域含有部分原生表土层,这时可采用添加改良剂的方式进行原位制造,改良剂在土壤中的占比应超过 20%。由于含有部分原生表土,额外的造土材料一般施用量约为每公顷 50~100 t 干固体^[3]。对于非原位制造,一般是将配土材料混合后再进行施用,施用量约每公顷 100~500 t。用于退化土壤修复的常见造土材料分为两类,一类是有机材料,主要由各种有机堆肥产物构成,如园林废弃物的堆肥产物,污泥堆肥产物等;另一类是无机材料,主要由无机固废组成,如煤矸石、粉煤灰等。

3 固体废弃物制备人造土壤研究进展

3.1 单一固废制备人造土壤

目前已有部分研究人员以人造土壤技术作为固废的一种资源化利用途径^[43-44]。其中,用于制备人造土壤的固废种类较多,按照固废性质可分为有机固废和无机固废。用于制备人造土壤的固

废需要满足安全无毒、易处理和适宜性的标准,并且有一定的肥力或者支撑能力^[4]。有机固废是人造土壤制备过程中受到广泛关注的重要部分,这是因为人造土壤通常需要含有一定量的有机质和植物生长营养元素,而有机固废正是营养物质的主要来源。考虑人造土壤性质的稳定,无机固废通常也会在制备的过程中加入,且无机固废用作土壤改良剂的历史悠久,是一类十分适合用作制备人造土壤的造土材料^[45]。在人造土壤研究初期,主要使用单一有机固废进行制备,其中园林废弃物、污泥等富含有机质和植物营养元素的物质为重要研究对象,通常采用堆肥的方式进行制备。然而,单一固废制备出的人造土壤在使用过程中,缺乏无机组分易发生土壤体积的减少。因此,该方法正在逐渐被多源固废协同制备方法的所取代。

3.2 多源固废协同制备人造土壤

目前,研究人员对有机与无机固废协同制备人造土壤已达成共识。例如,BRODIE 等^[46]于 1994 年以畜禽粪便、锯末、松树皮为有机组分,搭配粉煤灰混合堆肥,成功制备出人造土壤。此外,BELYAEVA 等^[47]发现,单独畜禽粪便堆肥制备的人造土壤和绿色垃圾单独堆肥制备的人造土壤的可提取磷含量、可溶性盐含量高,植物种子发芽指数低于 100%,而添加粉煤灰后,种子发芽指数大于 100%。与国外研究不同的是,国内制备人造土壤时,较少使用园林废弃物,主要以污泥、畜禽粪便与秸秆等物质作为配土的核心有机组分。这主要因为我国农业经济发达,历史悠久,与农业相关的固废产量大。例如,郁山^[48]以生活污水、蚯蚓粪、鸡粪作为有机组分、粉煤灰作为无机组分原料,系统探索了不同比例混合制备的人工土壤的性能。由此可以看出,利用不同种类的有机/无机固废制备人工土壤已经开始逐渐成为一种新兴的固体废弃物资源化利用途径。

3.3 固废制备人造土壤的生态环境效应

利用固废制备人造土壤,在完成对固废的资源化利用的同时,人造土壤在使用后还具有一定的生态环境价值^[49]。首先,在植物生长方面,人造土壤可通过合适的物理空间与营养物质供给植物生长。例如,YILMAZ 等^[42]通过组合建筑垃圾、污泥与园林废弃物的共堆肥产物制备了 4 种由植物生长区和结构支撑区组成的人造土壤,这 4 种人造土壤具有不同的土壤导水率、孔隙度、有机质含量、水分有效性,均能很好地促进植物(挪威枫

和黑麦草)生长。然而,一项长期研究发现,不同人造土壤配方对植物生长的影响不同,其中以20%的底土与10%的堆肥产物和70%的废弃混凝土混合制备的人造土壤种植树木时,树木的成活率与生长情况最好,土壤中大型动物定值速度最快^[41]。尽管已有部分研究探究不同人造土壤组成对植物生长的影响,但考虑到健康生态系统对植物多样性的需求,进行多源固废协同制备人造土壤仍具有十分广阔的应用场景。比如在城市建设中,可根据植物种类定制化制备出最适宜生长的人造土壤,同时实现多源固废的协同化处置。

其次,利用固废制备人造土壤,可以减少对优质资源的消耗。作为天然土壤的替代产品,人造土壤可填补因城市建设、土壤修复等因素产生的土壤资源缺口,可以保护珍贵的土壤资源。在利用固废生产人造土壤之前,泥炭土由于其具有优良的物理、化学和生物特性,一直被用作盆栽种植的培养基,导致泥炭土资源的大量消耗。除此之外,REES等^[50]发现人造土壤在使用后,可以储存大量碳,以一种与天然土壤互补的方式为全球气候调节作出贡献。通过将人造土壤场地的有机碳

储量的演变与同一地区天然草地土壤进行比较发现,当人造土壤层厚度超过30 cm时,人造土壤的初始有机碳储量比天然土壤高50%,当土层厚度超过100 cm时,人造土壤的初始有机碳储量比天然土壤高达5倍^[25]。此外,有研究发现,以煤矸石、粉煤灰、钢渣为代表的无机固废均富含硅酸盐,用其制作的人造土壤在使用时可通过风化作用捕获大气CO₂,具有一定的固碳潜力,每公顷人造土壤施用点每年仅因风化作用固定的无机碳就可能达到15 t^[4,37,50]。

4 总结与展望

通过将固体废弃物循环利用,制备具有经济与生态价值的人造土壤,不仅缓解了固废处置压力大,同时也保护了土壤、泥炭土等珍贵的自然资源。利用固废制备人造土壤应该重视固废原生性质对人造土壤性质的影响。此外,利用不同固废制备人造土壤时,应该重视人造土壤性能,尤其是在植被生长调节、增加碳汇等生态功能方面。结合国内外研究进展,总结以下几点内容供未来研究与探索(图3),从而推动人造土壤的大规模应用和生态功能的发挥。

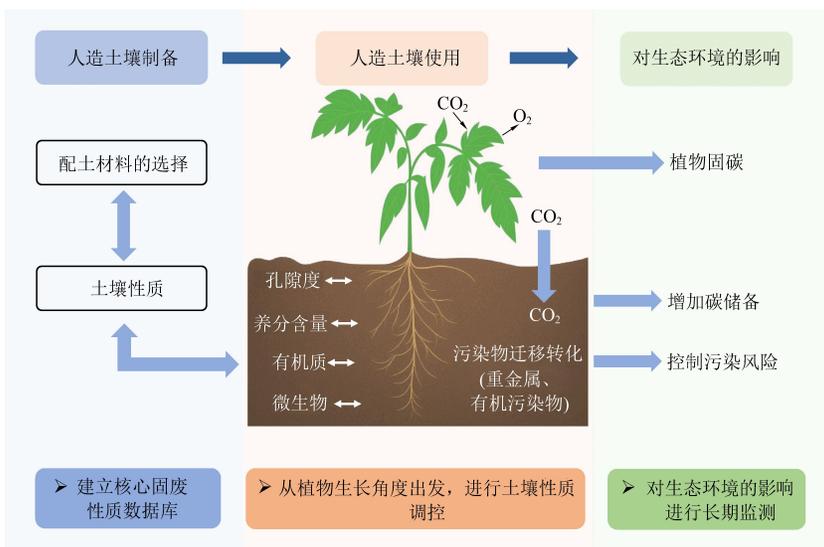


图3 人造土壤研究未来展望

Fig. 3 Future prospect of manufactured soil research

(1)建立核心固废性质数据库。从固废的内生属性出发,定制化制备人造土壤。目前常用于制备人造土壤的固废种类集中在几类大宗固废中,对其他固废的探索不足,多源固废协同制备人造土壤可同时完成对多种固废资源化利用,还可能实现人造土壤性质的突破。

(2)注重对人造土壤结构与性质的调控。目

前的研究重点主要集中于固废的消纳,以人造土壤结构与性质为出发点的研究较为缺乏。人造土壤性质决定了其使用效果,也将深刻影响生态系统。因此从人造土壤性质出发,针对性制备,有利于人造土壤产品发挥更大的作用。

(3)重点关注固废基人造土壤中污染物质的迁移与转化,建立相关政策规范,指导固废基人造

土壤的安全施用。对于有机固废,需重点关注重金属、抗生素、微塑料等污染物浓度与迁移转化行为,对于无机固废,需重点关注重金属的浓度与活性组分含量。

(4)系统关注固废基人造土壤在实际施用过程中对生态环境的影响。目前已有研究发现人造土壤使用后对生态系统产生影响,比如增加土壤固碳能力等。人造土壤对生态系统的影响需要多角度考虑,不仅要关注其有利的一面,也要对其潜在的污染属性进行长期监测。

参考文献 (References) :

[1] 中国统计出版社. 2021年中国统计年鉴[EB/OL]. (2021) [2024-05-15]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexch.htm>.

[2] FABBRI D, PIZZOL R, CALZA P, et al. Constructed technosols: A strategy toward a circular economy[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3432.

[3] HAYNES R J, ZHOU Y F, WENG X. Formulation and use of manufactured soils: A major use for organic and inorganic wastes[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(22): 4113-4133.

[4] 郑瑞伦, 朱永官, 孙国新. 人工技术土壤研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 1-16.
ZHENG Ruilun, ZHU Yongguan, SUN Guoxin. Progress and prospect of research on constructed technosols[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 1-16.

[5] SONG Qingbin, LI Jinhui, ZENG Xianlai. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 199-210.

[6] DING Yin, ZHAO Jun, LIU Jiawei, et al. A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126144.

[7] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. *科学*, 2020, 72(6): 30-34.

[8] 常瑞祺, 张建波, 李会泉, 等. 煤基固废制备胶凝材料研究进展及应用[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(2): 316-330.
CHANG Ruiqi, ZHANG Jianbo, LI Huiquan, et al. Research progress and application of cementing materials prepared from coal based solid waste[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(2): 316-330.

[9] 李启辉. 煤矸石的性质及综合利用研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(5): 1576-1581.
LI Qihui. Research progress on properties and comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(5): 1576-1581.

[10] LI Jiayan, WANG Jinman. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 117946.

[11] LI W, LIU A S, KWOK C Y, et al. Mechanical behaviour of Hong Kong marine deposits stabilized with high content of coal fly ash [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 392: 131837.

[12] 李琴, 杨岳斌, 刘君, 等. 我国粉煤灰利用现状及展望[J]. *能源研究与管理*, 2022(1): 29-34.
LI Qin, YANG Yuebin, LIU Jun, et al. Present status and prospect of fly ash utilization in China[J]. *Energy Research and Management*, 2022(1): 29-34.

[13] YAO Z T, XIA M S, SARKER P K, et al. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China[J]. *Fuel*, 2014, 120: 74-85.

[14] YAO Z T, JI X S, SARKER P K, et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 141: 105-121.

[15] 施灿海, 刘明生, 程立家, 等. 尾矿综合利用研究进展及工程实践[J]. *中国矿业*, 2024, 33(2): 107-114.
SHI Canhai, LIU Mingsheng, CHENG Lijia, et al. Research progress and engineering practice on comprehensive utilization of tailings [J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(2): 107-114.

[16] EDRAKI M, BAUMGARTL T, MANLAPIG E, et al. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 411-420.

[17] QAIDI S M A, TAYEH B A, ZEYAD A M, et al. Recycling of mine tailings for the geopolymers production: A systematic review[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e00933.

[18] SUN Liugen, JIANG Kaixi, XIE Feng, et al. The recovery of gold in low-grade cyanide tailings by chlorination roasting[J]. *Minerals*, 2023, 13(8): 1042.

[19] YU Yaohui, DU Chuanming. Leaching of phosphorus from phosphate tailings and extraction of calcium phosphates: Toward comprehensive utilization of tailing resources [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119159.

[20] 高章韵. 工业副产石膏资源化处理及用于干粉涂料制备的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010: 58-59.
GAO Zhangyun. Utilization of industrial by-product gypsum and its application in architecture powder coating [D]. Changsha: Hunan University, 2010: 58-59.

[21] RUAN Shishan, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. Application of desulfurization gypsum as activator for modified magnesium slag-fly ash cemented paste backfill material[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 869: 161631.

[22] PIATAK N M, PARSONS M B, SEAL R R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 57: 236-266.

[23] TIAN Hongyu, GUO Zhengqi, PAN Jian, et al. Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of copper slag [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105366.

[24] XU Zelin, YAO Jiabin, FU Rongbing. Characteristic, resource

- approaches and safety utilization assessment of non-ferrous metal smelting slags: A literature review [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(4): 1178–1196.
- [25] LÓPEZ RUIZ L A, ROCA RAMON X, GASSO DOMINGO S. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119238.
- [26] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(9): 32–37.
- SHI Zuliang, JIA Tao, WANG Yajing, et al. Comprehensive utilization status of crop straw and estimation of carbon from burning in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(9): 32–37.
- [27] AWASTHI M K, SINDHU R, SIROHI R, et al. Agricultural waste biorefinery development towards circular bioeconomy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 158: 112122.
- [28] DAI Jiawei, MENG Xiangfu, ZHANG Yuhu, et al. Effects of modification and magnetization of rice straw derived biochar on adsorption of tetracycline from water[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 311: 123455.
- [29] CAO Bingdi, ZHANG Tao, ZHANG Weijun, et al. Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: A critical review[J]. *Water Research*, 2021, 189: 116650.
- [30] DING An, ZHANG Rourou, NGO H H, et al. Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144451.
- [31] TYAGI V K, LO S L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25: 708–728.
- [32] RAHEEM A, SIKARWAR V S, HE Jun, et al. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 337: 616–641.
- [33] MEKBEL S, DEBIECHE M, NECHNECH A. The potential of sludge from wastewater treatment plants to improve the mechanical properties of bricks[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2023, 25(6): 3286–3302.
- [34] TANG Yanfei, XIE Hao, SUN Jing, et al. Alkaline thermal hydrolysis of sewage sludge to produce high-quality liquid fertilizer rich in nitrogen-containing plant-growth-promoting nutrients and biostimulants [J]. *Water Research*, 2022, 211: 118036.
- [35] International Union of Soil Sciences. World reference base for soil resources [M]. Netherlands: International Union of Soil Sciences, 2007.
- [36] NELSON M, LAJTHA K. What makes an "urban soil"? [M]//Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Amsterdam: Elsevier, 2017
- [37] FOURVEL G J, VIDAL BEAUDET L, LE BOCQ A, et al. Fertility of technosols constructed with dam sediments for urban greening and land reclamation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(8): 3178–3192.
- [38] BELYAEVA O N, HAYNES R J. Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 5203–5209.
- [39] BELYAEVA O N, HAYNES R J, STURM E C. Chemical, physical and microbial properties and microbial diversity in manufactured soils produced from co-composting green waste and biosolids[J]. *Waste Management*, 2012, 32(12): 2248–2257.
- [40] PRADO B, MORA L, ABBRUZZINI T, et al. Feasibility of urban waste for constructing technosols for plant growth[J]. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2020, 37(3): 237–249.
- [41] PRUVOST C, MATHIEU J, NUNAN N, et al. Tree growth and macrofauna colonization in technosols constructed from recycled urban wastes [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 153: 105886.
- [42] YILMAZ D, CANNAVO P, S? R? G, et al. Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(2): 442–455.
- [43] ROKIA S, SÉRÉ G, SCHWARTZ C, et al. Modelling agronomic properties of technosols constructed with urban wastes [J]. *Waste Management*, 2014, 34(11): 2155–2162.
- [44] ABBRUZZINI T F, MORA L, PRADO B. Evaluation of Technosols constructed with construction and excavation debris for greenhouse production of ornamental plants [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(3): 745–756.
- [45] RAM L C, MASTO R E. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 128: 52–74.
- [46] BRODIE H L, CARR L E, CHRISTIANA G A, et al. Manufacture of artificial soil by composting coal fly ash and bottom ash with poultry litter[M]//The Science of Composting. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996: 603–611.
- [47] BELYAEVA O N, HAYNES R J. A comparison of the properties of manufactured soils produced from composting municipal green waste alone or with poultry manure or grease trap/septage waste [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(3): 271–281.
- [48] 郁山. 基于固体废弃物的人工土壤对黑麦草生长的研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2022: 47–48.
- YU Shan. Study on growth of ryegrass in artificial soil based on solid waste [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022: 47–48.
- [49] IVASHCHENKO K, LEPORE E, VASENEV V, et al. Assessing soil-like materials for ecosystem services provided by constructed technosols[J]. *Land*, 2021, 10(11): 1185.
- [50] REES F, DAGOIS R, DERRIEN D, et al. Storage of carbon in constructed technosols: in situ monitoring over a decade[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 641–648.