

煤矸石土壤化利用与土壤改良剂研究进展

刘帆俞^{1,2}, 宋慧平^{1,2}, 吴海滨^{1,2}, 冯政君^{1,2}, 柴春镜^{1,2}, 张俊杰^{1,2}, 周建军³

1. 山西大学 资源与环境工程研究所, 山西 太原 030006;
2. 黄河流域资源增效减碳教育部工程研究中心, 山西 太原 030006;
3. 山西焦煤集团有限责任公司, 山西 太原 030024

中图分类号: TD849.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)06-0014-13
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.06.002

摘要 煤矸石大量堆存不仅对周围环境造成污染,也是对资源本身的一种浪费。系统阐述了煤矸石在土壤化利用与土壤改良剂制备方面的研究现状,主要包括煤矸石直接覆土,煤矸石与土壤、有机质、菌类、固废等直接混配改良土壤,改性煤矸石制肥或制备多孔生态土壤,改性煤矸石与外源材料混配制育苗基质、肥料及人造土壤。我国在利用煤矸石进行土壤化利用与土壤改良剂方面已有一些进展,但还应注意对煤矸石重金属的控制,尽可能实现煤矸石的大规模消纳。最后指出了煤矸石在土壤化利用与土壤改良剂方面存在的问题,并提出了相应的建议,以期对相关研究提供参考。

关键词 煤矸石; 土壤改良剂; 土壤化利用; 综合利用

中国是煤炭生产消耗大国,煤矸石是煤炭开采和洗选过程中排放的主要固体废弃物之一。据统计,我国现阶段国有重点煤矿矸石山数量已超过 1 500 座,煤矸石累计堆存已达 70 亿 t,且以 1.5 亿 t/a 的速度增长,占地面积约 70 km²,约为全国耕地保有面积的 6.79%^[1]。煤矸石堆积会自燃,长期裸露被任意堆置的煤矸石在降雨和自然风化的作用下,矸石中析出的重金属随雨水流入河流、地表水和渗入到周围土壤中,对水资源和土壤造成严重的污染,因此对煤矸石的资源化利用已成为研究热点。

煤矸石与煤炭相比,具有含碳量低、热值低、质地坚硬的特点^[2]。目前,煤矸石已广泛用于有用组分回收、废水处理、建筑材料、农业生产、回填复垦和发电等^[3]。例如,根据煤矸石的不同组分特性,可以利用不同的工艺从中提取可利用的化工产品。李培新等人^[4]通过掘进煤矸石二次拣选系统将煤矸石中的煤炭含量由原来的 15% 降到 3% 以下;李瑜^[5]利用硫酸对煤矸石中的 Al₂O₃ 进行浸取,浸出率达 79.6%;刘成龙^[6]利用浓硫酸对煤矸石中的铝、钛元素的浸出率可达到 98.32%、92.28%。根据煤矸石优异的稳定性以及碳、硅、铝、铁、钙、镁等共存的化学特性,对其进行活化和改性,可制备出吸附性能优良的吸附材料。李慧婉

等^[7]以 SnCl₄、ZnCl₄、煤矸石和 NaOH 为原料,制备的煤矸石复合物对有机磷具有良好的催化降解效果,且该催化剂稳定性好,也可重复多次使用。煤矸石是炭质、泥质和砂质的混合物,有研究表明,其矿物组成和化学成分与黏土类似,可以用作混凝土的骨料^[8]。陈杰^[9]在研究中发现采用活化煤矸石代替部分硅酸盐水泥熟料能保证良好的力学性能与工作性能,且煤矸石最佳用量达 30%。尽管煤矸石已开发的利用途径很多,但限于技术和经济的原因,目前我国的煤矸石利用率不高,仅为 40% 左右,大多数煤矸石仍在堆存,需进一步开发更广泛的利用途径。

我国作为煤矸石排放大国,一直在积极寻找更多有效利用煤矸石的途径,提高煤矸石的利用率^[10]。近年来,我国针对煤炭开采过程中造成的土地挖损、塌陷和压占,以及耕地损失和生态环境恶化^[11]等矿区生态问题实施了大量的土地复垦与生态修复工程,最常用的方法就是表土转化法^[12],即将从其他地方开挖的安全、肥沃的土壤转移到矿区的地表上直接重建矿区的土壤结构和理化性质,将受污染的土壤隔绝开。该方法取得了一定成绩,但也有很多失败或效果欠佳的案例^[2],究其原因主要是缺少土壤或所用土壤质量差。土壤是生命之基,是矿山生态修复成败的关键,但是

收稿日期: 2023-08-31

基金项目: 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项目(2023YFE0100700); 山西焦煤集团有限责任公司科研项目(2022-448)

作者简介: 刘帆俞(1998—),女,山西太原人,硕士研究生,主要从事煤矸石生态化利用的研究工作, E-mail: 1141854456@qq.com。

通信作者: 宋慧平(1979—),女,山西文水人,教授,博士生导师,主要从事固废资源化利用, E-mail: songhp@sxu.edu.cn。

土壤的形成受多种因素的影响,因此快速成土成为矿山生态修复的重要任务。煤矸石经历风化后具备特定的基本物理性质,且其有机物含量占有的份额相对较高,是天然的有机矿藏资源。将煤矸石进行土壤化利用可以改良土壤土质,增加土壤肥力,促进植物生长,不仅可以缓解目前的缺土问题,也可以更好地实

现煤矸石的大规模利用,因此对煤矸石进行土壤化利用成为近期学者们的研究热点。如图 1,本文以煤矸石的不同利用方式为依据,从原理、工艺、应用效果以及存在问题等方面对煤矸石的土壤化及土壤改良剂利用进行了归纳,以期对相关研究提供参考。

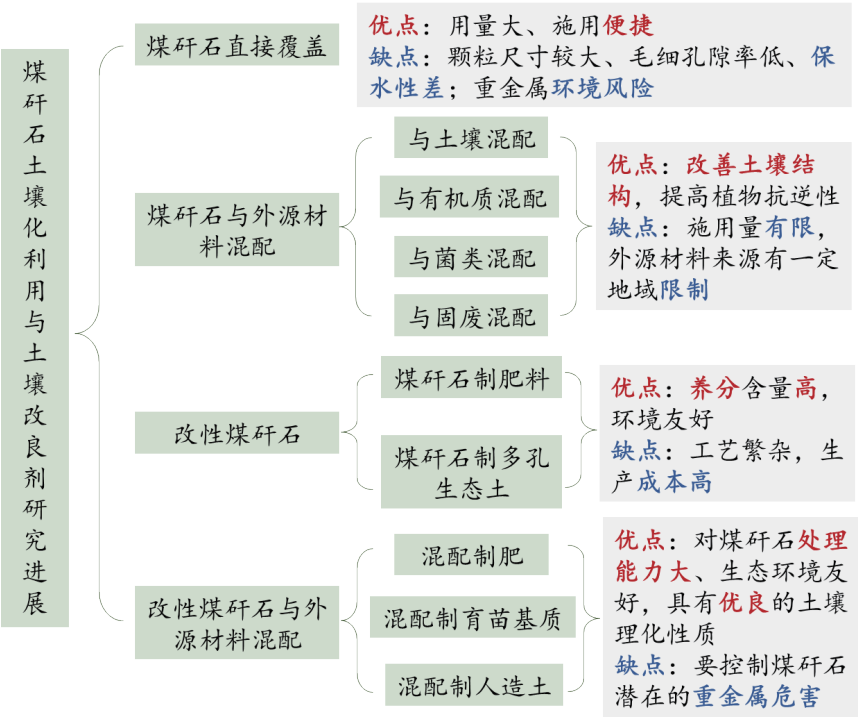


图 1 煤矸石土壤化利用与做土壤改良剂途径
Fig. 1 Pathways of coal gangue utilization for soil remediation and as a soil amendment agent

1 煤矸石直接覆盖改土

如表 1 所示,煤矸石中含有大量的氧化铝(Al_2O_3)、二氧化硅(SiO_2)、氧化铁(Fe_2O_3)等无机灰分^[13],与天然土壤有着相似性,如表 2、表 3 所示。通过表 2 可以看出,煤矸石所含植物生长所需的 N、P、K 元素可以达到甚至高于一般土壤,且含有大量的炭质页岩、粉砂岩和有机质,丰富的有机质也为固氮、解磷、解钾等微生物提供了适宜的生存环境,合理添加煤矸石能增加土壤的蓄水保墒能力,刺激作物生长,改善土壤环境^[14]。

表 1 煤矸石主要成分^[15] /%

Table 1 Main components of coal gangue

类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	其他	烧失量
碳质页岩	46~62	17~23	0.2~20	0.5~7.5	0.6~1.3	0~5	0.5~3.0	20~45
泥质页岩	44~55	44~55	0.2~26	9~25	1~5	0.3~7.0	0.3~1.4	10~28
砂质页岩	45~52	6~15	0.2~21	14~21	2~6	2~4	0.3~1.0	6~20

表 2 煤矸石与土壤化学成分对比^[15] /%

Table 2 Comparison of chemical composition of coal gangue and soil

类别	有机质	总氮	总磷	总钾	总钙	总镁	总硫	总铁
煤矸石	15~25	0.19~0.87	0.23~0.47	0.86~1.71	0.02~0.43	0.004~0.125	0.021~0.039	0.014~0.197
土壤	2	0.1	0.08	1.36	1.37	0.6	0.085	3.8

在煤矸石肥料发展的早期,国外学者考虑到农田长期施用 N、P、K 等农肥会造成硼、硅酸和氧化镁等的缺乏,用煤矸石烧渣制成的基肥正好可以补充这些成分,从而达到农作物增产的目的。英国曾在小块土地上,在播冬小麦前试施了浮选的煤矸石作肥料,增产 7%~10%。美国在西红柿株周围的土壤上面盖一层洗矸(约 25~50 mm),除了提高产量 10%~15% 以外,西红柿的成熟也可提前。另外,前苏联在不同的土地上实验了浮选的煤矸石的肥效,获得较好的效果,使农作物增产 15%~40%^[16]。

国内学者也对直接利用煤矸石改良土壤进行了研究,早在 1993 年^[17],介休市西湛泉村将煤矸石粉碎成颗粒状,直接覆盖于重黏土水地上,发现覆盖了煤

表 3 煤矸石与土壤矿物成分对比

Table 3 Comparison of mineral composition between coal gangue and soil

类别	黏土矿物	其他矿物
煤矸石	高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石等	石英、长石、云母、白云石、方解石、氢氧化铝、二氧化硅胶体、蛋白石等
土壤	高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石、埃洛石、蛭石等	石英、长石、云母、白云石、方解石、黄铁矿、铝土矿等

矸石的农田地玉米生长发育快,植株健壮,比对照农田增产了 13.7%,且覆盖后的土壤疏松,地面板结减少,这说明将煤矸石直接覆盖于农田土地有明显的增温、保墒、减少土壤水分蒸发、改善土壤结构的效果。段永红等人^[18]在对裸露煤矸石上牧草的地下根系的研究中发现,粗粒煤矸石会促使植物根毛增多,以扩大根系的吸收面积,且裸露煤矸石上的植物根系下扎深,能充分利用深层的水分,故减缓了旱情。

单独利用煤矸石作为植生基质的缺点也很明显,煤矸石颗粒尺寸较大且毛细孔隙率极低,水分容易渗透但却不容易蒸发,单独使用会使基质结构不良,影响渗透、贮水性能以及保肥能力等,继而不利于植物生长。因此,利用单一的、结构特殊的煤矸石作为改良原料有一定局限性,只有煤矸石的表土很难作为农用地加以利用,需要混合其他外源物质才能对煤矸石

进行合理利用^[19-21]。

2 煤矸石与其他基质混配改土

2.1 与土壤混配

煤矸石山在治理过程中存在一定的限制因素,主要有:(1)矸石山是由岩石碎屑或矿石堆积形成的,这些碎屑或矿石中的养分含量相对较低,土壤形成过程中,这些养分不能有效地溶解并吸附到土壤颗粒表面,从而导致矸石山土壤中的养分较为贫瘠,同时矸石山的岩石成分可能含有酸性物质,如硫酸盐、硝酸盐等,这些物质会与水反应产生酸性溶液,导致土壤酸化,因此其 pH 值也较为极端。正是由于矸石山的土壤通常由石块、砾石和沙粒组成,这种土壤结构松散,孔隙度大,水分很容易渗透并迅速排出,因此保水性也较差。(2)由于自燃的作用,煤矸石山温度较高,这不仅破坏了土壤中的营养成分,还进一步加剧了土壤的干旱程度。(3)煤矸石山的土壤结构使植物根系缺少发展空间,不利于根系的生长。这就导致植物的生长受到限制,常常出现修复第一年植物生长良好,到第二年植物开始发黄,到第三年植物开始死亡。缺少植物的固土作用,矸石山表层覆土易被冲刷,造成滑坡、坍塌的现象。针对以上问题,目前矿区生态修复中使用客土覆盖的方法来对煤矸石山的土壤环境进行改良,表 4 总结了煤矸石山常见的问题及与黄土混配的改良效果。

表 4 煤矸石山常见问题及与黄土混配的改良效果

Table 4 Common issues of coal gangue dumps and the improvement effects of mixing with loess

问题类型	存在问题	改良效果
土壤酸碱性	裸露矸石山高盐强酸环境; 植被无法生存	黄土的添加可使煤矸石山的酸碱性接近正常黄土水平
土壤水土侵蚀状况	裸露矸石山土壤侵蚀严重; 水土流失是植被建设的关键因素	由于表层矸石风化失水后形成的干层颗粒较粗,与下层的毛细管联系较弱,下层大部分水分须通过扩散作用方可被蒸发,致使这个干层具有一定的保水性能
植物产量	大面积深色矸石易吸热升温灼伤幼苗; 难保证出苗率,降低植被产量	提高了保水保肥性,能够为植被的生长提供充足的水分和养分,利于植被恢复

2.1.1 对煤矿区土壤酸碱性的改良

矸石山可能含有硫化物矿石,当这些矿石暴露在空气中时,会与水和氧气反应产生酸性物质,矸石山周围的酸雨或酸性气体等酸性沉降物也会进一步导致土壤酸化,使 pH 值降低。矸石山通常干燥,水分蒸发速度快,当灌溉或雨水进入土壤后,水分会迅速蒸发,留下盐分在土壤中积累,因此矸石山整体呈现高盐强酸环境。这使得植被根本无法生存,要想进行生态修复,就必须用黄土对煤矸石风化层进行基质改良。黄土的添加,能够很好地改善煤矸石风化物的酸性环境,可使煤矸石山的酸碱性接近正常黄土的水平。关禹^[22]将煤矸石分别与壤土和沙土进行不同比例的混

配,发现植物生长过程中会将煤矸石中的有机质腐解氧化从而释放一定的有机酸、腐殖酸,降低了混合基质的 pH 值,但同时腐殖酸易与各种阳离子结合生成腐殖酸盐,从而形成一个相互转化的缓冲体系,调节和稳定了混合基质的 pH 值,减缓混合基质酸碱度的急剧变化。

2.1.2 对土壤侵蚀状况的改良

无论是裸露的矸石山,还是通过传统覆土治理的煤矸石山,土壤侵蚀都很严重,不能满足煤矸石山复垦的需要^[23]。宋楠选取了 3 块样地,分别为裸露矸石区、纯黄土覆盖矸石区、混合覆盖矸石区,通过侵蚀沟测量法测算每块样地的沟蚀量,并通过测针法计算

一年内所产生的面蚀量。结果表明相对于裸露和纯黄土覆盖的矸石山,采用混合覆盖的矸石山的保土效益显著提高。采用不同措施的煤矸石山的保土效益的总体趋势是:混合覆盖的矸石山保土效益>纯黄土覆盖的矸石山保土效益>裸露矸石山保土效益,并且煤矸石覆盖率在35%~45%时,保土效益达到最优。这是由于黄土与煤矸石混合覆盖可以形成一层保护层,减少了雨水的直接冲刷,防止土壤颗粒的流失,同时增加了土壤的黏结力和抗冲刷能力,减少了土壤的侵蚀^[24-25]。

2.1.3 对土壤水分状况的改良

宋楠^[26]在其研究中采用了黄土层上覆盖一层黄土和煤矸石相间的混合层这样的新型煤矸石山坡面覆盖方式,如图2所示,发现煤矸石层铺设间距较大的样地其土壤含水率明显较低,这是由于这些样地的表层矸石风化形成的干层不完整,有黄土裸露,因此保水性能不太好,所以其土壤含水率不高,该现象与段永红的研究一致,即矸石风化形成的干层颗粒较粗,与下层的毛细管联系较弱,下层的大部分水分须通过扩散作用才可被蒸发,故表层失水后反而对下层水分的保存有利,致使下层尤其在旱季可能含有较多的水分,这个干层具有一定的保水性能^[27]。

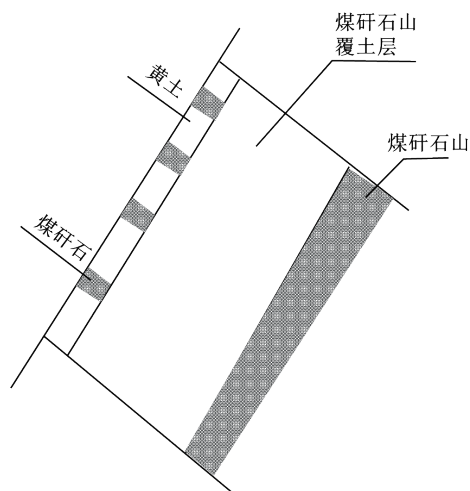


图2 煤矸石山新型坡面覆盖方式^[26]

Fig. 2 New slope covering method of coal waste hill

2.1.4 对植物根系的影响

段永红等人^[17]考虑到黑色煤矸石具有较强的吸热性能,植物苗期其表层温度高达39~42℃,易使幼苗灼伤而迅速枯萎死亡,且其风化颗粒粗,大孔隙多,表层保水性能差,采用直接复垦的方式效果较差。因此在矸石山上进行了覆土和粉煤灰覆盖复垦种植实验,研究表明植物地上部的产草量是覆土>覆灰>裸露矸石。并且提出了不同于传统观念的“薄层覆盖复

垦”新方法,即覆盖薄层黄土更利于出苗、保苗和使幼苗免受高温灼伤,还不会因为覆盖层太厚而降低植物根系的抗逆性,能使更多的根系扎入矸石深层,充分利用深层的水分、养分,达到更好复垦效果的同时大大降低了复垦造价。

2.2 与有机物质混配

传统水稻土育苗受育苗土的影响较大,往往存在出苗不均、弱苗、土传病害等问题;同时存在取土难、破坏耕层土壤、土壤药害残留等情况,由此,替代育苗土的基质育苗方式成为水稻育苗生产中的发展方向。现有的育苗基质主要成分为泥炭,泥炭的容重较小,利用煤矸石容重较大并含有一定营养成分的特性,将两者混合配制水稻育苗基质可以为固体废弃物的资源化利用找到可行途径。邵玉飞^[28]在利用煤矸石作为水稻育苗基质的可行性研究中将常规处理的煤矸石与泥炭混合进行水稻育苗,发现处理组的生物量已达到市场基质的标准,且根部生物量较大;在根部机械能力的测试中,实验组基本达到或优于对照组水平;且实验组的容重较小、总孔隙度大、有利于植株的生长。这说明煤矸石作为水稻育苗基质的原料可行,煤矸石基质可以替代市售基质。

泥炭作为一种天然产物,具有不可再生性,过度开采会破坏湿地生态环境、加剧全球的温室效应^[29]。因此,在育苗基质生产中寻找可以替代泥炭的可再生、环保型原料成为了新的研究热点^[30]。目前,农作物秸秆、稻壳、菇渣等固体废弃物是替代泥炭生产育苗基质的主要原料,张秀丽等^[31]将秸秆与田园土混配制作基质,发现秸秆基质能使番茄、茄子、辣椒等具有较好的生长效果。然而秸秆因其容重小、持水性差等性状缺陷,必须与其他物料混配后才能生产出合格的基质^[32]。鉴于煤矸石容重大、蓄热能力强的性质,将煤矸石与秸秆混合制作育苗基质具有较大的实际生产意义^[33]。李娜等人^[34]以堆腐后玉米秸秆与煤矸石为原料混配后开展水稻育苗生长实验,结果表明当 $m(\text{玉米秸秆}):m(\text{煤矸石}):m(\text{珍珠岩})=54\%:36\%:10\%$ 时,水稻秧苗的地上干重、地下干重和壮苗指数最高,叶片叶绿素含量最大,且混合后的基质均满足水稻秧苗的生长发育条件,水稻秧苗的出苗时间及出苗成活率较高,水稻生长状况良好。

2.3 与菌类混配

丛枝菌根真菌(AMF)是自然界中普遍存在的一种土壤微生物,图3为丛枝菌根真菌作用示意图。丛枝菌根真菌能够促进植物吸收利用矿质养分和水分,提高作物抗逆性和抗病性,改良土壤结构,增强土壤肥力,提高苗木移栽成活率,促进植被恢复。丛枝菌根真菌的这些生理生态特性使得菌根技术具有克服

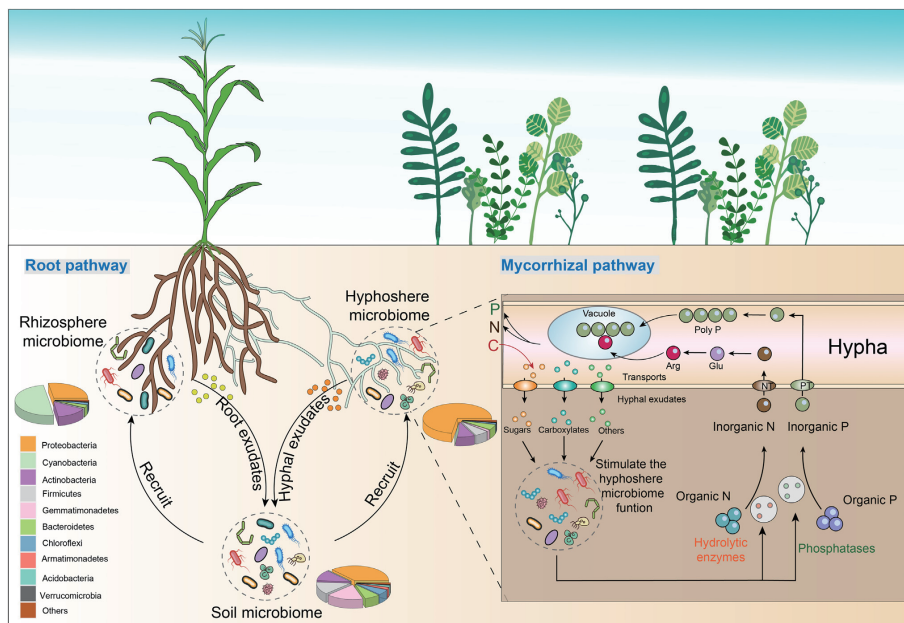
图3 丛枝菌根真菌作用示意图^[39]

Fig. 3 Action diagram of arbuscular mycorrhizal fungi

矿区煤矸石山生态重建中 N、P、K 及有机质含量极低、土壤结构不良、持水保肥能力差、极端 pH 值、干旱或盐分过高引起的生理干旱等的潜力^[35-36]。毕丽银^[29]在自然状况下接种丛枝菌根真菌,研究其对煤矸石山土地复垦的生态效果中发现,菌根真菌在煤矸石山土地复垦中具有较好的生态效果,接种菌根真菌后植被成活率提高了 15 百分点,促进植株生长和发育,扩大了根系的范围,同时增加了生物物种的丰度。赵仁鑫等^[37]采用温室盆栽实验的方法研究了接种丛枝菌根真菌对新排、风化和自燃这 3 种类型煤矸石上玉米生长的影响,结果表明 3 种煤矸石上丛枝菌根真菌均与玉米成功建立了互惠共生关系,接种丛枝菌根真菌不同程度促进了玉米对 N、P 和 K 的吸收,且增加了玉米植株的干重。孔涛等人^[38]在研究哈茨木霉菌 (TH)、胶质芽孢杆菌 (BM) 与丛枝菌根真菌 (AMF) 三种菌剂对各粒径矸石性质及苜蓿生长的影响中发现,接种丛枝菌根真菌对煤矸石基质综合改良的效果最佳,总体上能显著提升紫花苜蓿的生长指标和不同粒径基质养分含量。且各处理对小粒径煤矸石基质的综合改良效果均优于大、中粒径基质,原因在于基质粒径越小,比表面积越大,越有利于菌根微生物附着生长。

2.4 与其他固废协同利用

根据资源储存情况,我国当下的能源利用中煤炭占有很大份额。在煤炭开采及煤炭燃烧过程中会有煤矸石及粉煤灰等煤基固废的产生^[40],煤基固废的综合利用有限,主要以堆存为主,不仅会造成严重的环境污染问题,而且对煤基固废中特含资源也是一种浪费。很多研究学者发现,利用煤基固废特殊的物化性质以及富含多种有用组分的特点将其添加进土壤中

可以提高土壤的养分含量,降低土壤有害元素含量,改善土壤理化性质,提高土壤保水保肥能力。

国外研究表明,粉煤灰^[41]、风化的褐色砂岩^[42]、在煤矸石中掺入粉煤灰系列燃烧产物和污泥^[43]堆肥、板岩粉末等均可经过一定处理作为人造土壤替代天然土壤,并且栽培的植物生长效果良好。胡振琪等^[44]以 $m(\text{风化煤}) : m(\text{煤矸石}) : m(\text{粉煤灰}) = 50\% : 10\% : 40\%$ 为比例,并加入一定量的化学肥料进行盆栽实验,结果表明苜蓿生物量比对照组提高约一倍,粗蛋白含量亦显著提高。周昊等人^[45]以煤矿区生活污水、煤矸石、粉煤灰为原料,将固废原料设置 7 种混配比例添加至土壤中,进行白三叶盆栽实验,最终选择 $m(\text{污泥}) : m(\text{粉煤灰}) : m(\text{煤矸石}) : m(\text{土壤}) = 5\% : 20\% : 15\% : 60\%$ 为种植白三叶的最佳方案。该方案与对照组相比,白三叶株高基本持平,根长增加了 0.04 cm,白三叶生长状况显著提升。

3 改性煤矸石

3.1 煤矸石制肥料

3.1.1 煤矸石中提取腐殖酸

煤矸石中通常含有腐殖酸,而腐殖酸是一种很好的土壤改良剂和植物肥料,腐殖酸的应用能够引起植物一系列明显的生理效应,例如可以引起植物叶片气孔关闭,降低蒸腾,叶片中叶绿素含量明显增加,从而增加光合产物的累积;同时使根系活力提高,增强根系对水分及矿质的吸收能力,起到一个“开源”的作用,这对增强作物的抗旱能力是十分有利的。钟仁华等人^[46]发明公开了一种煤矸石提取腐殖酸的方法,通

过对煤矸石磨碎、与酸碱溶液混合、静置沉淀等步骤有效地提取了煤矸石中的腐殖酸, 还实现了腐殖酸的快速连续提取。吴伟辰^[47]以粉状煤矸石作为制备腐殖酸肥的原料, 利用菌液生物两次发酵工艺制得肥效更好的腐殖酸。许旭旦^[48]研究表明叶面喷施煤矸石提取的黄腐酸有着广泛的适用性, 且呈现出作物产量水平越低, 增产百分比越高; 产量水平越高, 亩增产斤数越多的规律。

3.1.2 化学活化法制煤矸石肥

煤矸石本身的吸附性、黏结性和离子交换性等性质, 有利于改良土壤结构, 提高土壤肥力, 减少重金属危害。然而, 煤矸石的利用, 更多的还是作为生物肥料载体和复混肥料配料, 很少单独作为有机肥进行使用。因为煤矸石虽然含有营养组分, 但个别养分含量仍然偏低。即便是煤矸石作为载体或配料, 也必须将其含有的营养物质转化为作物能够吸收的有效态。利用化学活化处理方法制备煤矸石有机矿物复合肥料可以提高煤矸石中各种营养元素被作物吸收的有效性, 从而提高作物产量。

刘信平等^[49]利用弱碱性物质 Na_2CO_3 活化恩施富硒煤矸石, 将制备的煤矸石硒有机肥进行田间实验, 结果表明 Na_2CO_3 活化富硒煤矸石的最佳工艺条件为活化剂的质量分数 22%、活化时间 3.9 h、料液比 1 : 9 g/mL、活化温度 85 °C。在该条件下, 活化后煤矸石的硒含量为 170.82 mg/kg, 煤矸石中硒的活化率可高达 81.24%, 且煤矸石硒肥的热稳定性更好, 制备的煤矸石硒有机肥可以提高土壤中的硒含量, 进而有效增加大蒜中总硒和有机硒含量。施用煤矸石硒有机肥土壤的大蒜鳞茎中有机硒比例均在 99% 以上, 高于未施硒肥对照组的 60%。

3.1.3 微生物法制煤矸石肥

煤矸石中含有大量的 N、P、K 元素, 但植物并不能直接吸收。煤矸石中大量丰富的有机质为固氮、解

磷、解钾等微生物提供适宜的生存环境, 利用微生物的降解能力可将 N、P、K 元素解离为可被植物吸收的碱解氮、有效磷、速效钾。因此, 煤矸石可用于制备微生物有机肥料。

微生物法制肥的原理是菌体利用煤矸石中的养料代谢, 分泌多糖等产物, 多糖一方面黏附在煤矸石表面并逐渐形成生物膜, 另一方面使矿物分解转化, 形成的矿物质离子不断向外释放, 其中, 作物需要的矿物质离子成为肥料组分, 菌种与煤矸石之间的相互作用机制如图 4 所示。

目前煤矸石制备微生物肥料的方法主要是利用硅酸盐细菌和巨大芽孢杆菌两种, 硅酸盐细菌具有解钾和一定的固氮功能, 巨大芽孢杆菌具有解磷功能^[50]。钟艳等研究人员^[51]利用芽孢杆菌处理低硫煤矸石, 产品中有效 N、P、K 的含量较原料分别提高了 1.27 倍、33.96 倍和 6.83 倍。袁向芬等^[52]研究利用巨大芽孢杆菌制得的高硫煤矸石肥料中的碱解氮、有效磷和速效钾的含量分别比原样提高了 26.84 倍、65.71 倍和 10.55 倍; 有效硫、有效钙和有效硅的含量分别比原煤矸石中提高 2.70 倍、1.27 倍和 1.07 倍。贾倩倩等^[53]利用硅酸盐细菌作用于煤矸石制得的煤矸石肥料中的速效钾、有效磷含量分别比原煤矸石增加了 2.75 倍和 3.95 倍。程蓉等人^[54]利用硅酸盐细菌制备煤矸石矿物肥料, 其中有效磷含量和速效钾含量较高, 是原煤矸石样品中含量的 5.12 倍和 2.01 倍。

3.2 煤矸石制多孔土壤

多孔材料由于自身优良的特性, 一开始就受到了化学和材料科学界的高度重视, 并迅速发展成为各学科的研究热点之一^[55]。近年来, 使用多孔矿物作为添加剂或辅助材料对土壤进行改良的研究受到国内外普遍重视^[56-57]。由于多孔矿物具有独特的结构化学特性, 在土壤中适当应用可以对土壤结构和性能、土壤的渗透性、土壤的酸碱度、土壤保水能力、土壤肥力

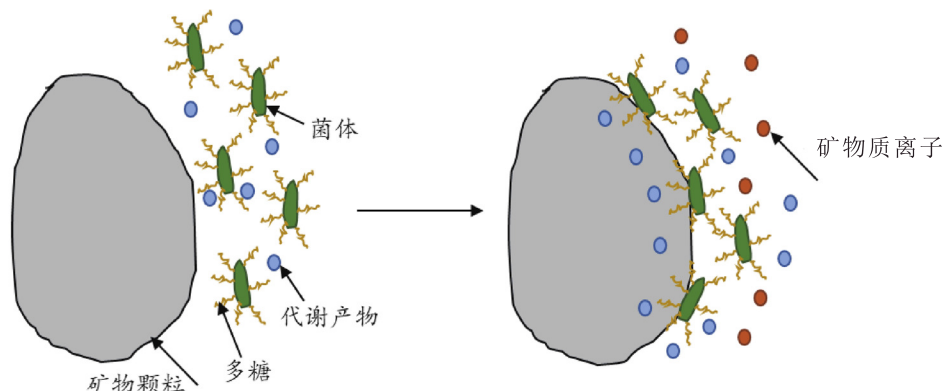


图 4 菌种与煤矸石之间的相互作用机制

Fig. 4 Interaction mechanism between bacteria and coal gangue

等多个方面进行提高和改良^[57]。目前,有研究者通过使用煤矸石粉和不同的黏结剂,利用铝粉发泡控制孔隙的技术来制备一种具有土壤自然功能且具有保水性、抗流失性、保温性、保肥性等多种优良特性的煤矸石基多孔人造土壤,为使用煤矸石进行矿区生态修复提供了一种新的方法。表 5 列举了以煤矸石为主体通过不同黏结剂制备出的煤矸石基多孔材料的最优配比及性能。

3.2.1 以水泥为黏结剂

与天然土壤相比,矸石基人造土壤在结构上具有更多且更细小的孔隙,并且稳定性良好,而天然土壤则整体上呈现出相对松散而内部致密的颗粒堆积结构^[58]。苏迪^[59]通过将质量比 85%~95% 的煤矸石粉与

5%~15% 的水泥胶凝材料充分混合,经过发泡、养护、筛分工艺制备出了煤矸石基多孔土壤,测定得出其保水量为 86%,较天然土壤增长约 51 百分点;流失率为 0.93%,较天然土壤降低约 87 百分点,保温性能良好。多孔矿物微溶解释放矿物中的营养元素,如部分沸石结构中含有 K、Na、Ca、Mg 等有益元素,其微溶解可以有效和长效地释放有益元素,对土壤有一定的调节作用,如图 5 为多孔矿物对土壤养分元素吸附与保持的过程。实验也证明了该水泥-煤矸石基人造土壤具有良好的缓释性,初期养分释放率和 28 d 累积释放率分别为 17.09% 和 65.13%。由此可以看出,利用水泥为黏结剂制备出的矸石基人造土壤具有更好的保水性、抗流失性、保温性等性能,可以用作生态修复材料。

表 5 煤矸石基多孔土壤基质的类型

Table 5 Types of porous soil matrix based on coal gangue

原料	最优配比	性能
煤矸石为主体,水泥为黏结剂	水泥掺入量 5%、煤矸石粉掺入量 95% 时各项性能最优	保水量为 86%,流失率为 0.93%,保温性能良好,并具有良好的肥效缓释性
煤矸石为主体,多组分自胶凝粉体为黏结剂	多组分自胶凝粉体掺入量 12%、煤矸石粉按掺入量 88% 时各项性能最优	保水量为 80%,流失率为 1.53%,保温性能良好
煤矸石为主体,工业淀粉为黏结剂	淀粉掺入量 8%、煤矸石粉掺入量 81.5% 时各项性能最优	吸水率在 40% 左右,流失率小于 1%,孔隙率 40%~50%,重金属含量低于国家标准

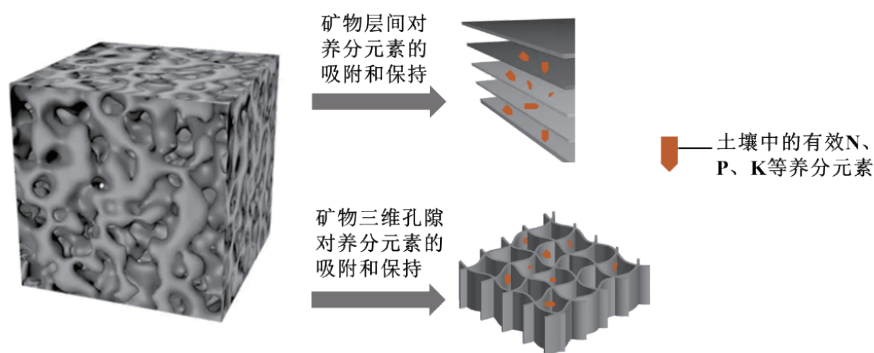


图 5 多孔矿物材料对养分元素吸附与保持

Fig. 5 Adsorption and retention of nutrient elements by porous mineral materials

3.2.2 以多组分自胶凝粉体为黏结剂

苏迪^[46]还探讨了以煤矸石粉为主体,多组分自胶凝粉体 [$m(\text{粉煤灰}):m(\text{电石渣}):m(\text{脱硫石膏})=75\%:20\%:5\%$ 充分混合复配得到的一种胶凝材料] 为黏结剂制备多组分自胶凝粉体-煤矸石基多孔土壤。其中煤矸石粉用量达到 88%,制备的多孔土壤保水量为 80%,较天然土壤增长约 40 百分点,流失率为 1.53%,较天然土壤降低约 78 百分点,保温性能及肥效缓释性能良好。利用多孔矿物的离子交换能力可以有效提高土壤中盐基阳离子的交换量^[60-61]、土壤颗粒团聚量和土壤中养分元素的保存量,进而实现对土壤改良

的特性对其进行盆栽实验,发现植物中重金属元素含量小于单独使用天然土壤栽培植物中的重金属元素含量。利用该多组分自胶凝粉体-煤矸石基多孔土壤修复矿区生态可以做到以废治废,原位资源合理利用。

3.2.3 以工业淀粉为黏结剂

吴圣杰^[62]按比例称取煤矸石、淀粉黏结剂、石英砂、硫酸铵发泡剂,经过一系列工艺(图 6)制得多孔土壤基质,该多孔土壤基质孔隙率在 40%~50%,吸水率在 30%~40%,破碎率在 5% 以下,强度在 2~4 MPa,流失率小于 1%。该基质的制备及应用解决了煤矸石

大量堆积和矿区矸石山堆存的问题,在制备中利用到了烟气余热,并且能够净化烟气,避免了空气污染。企业生产多孔基质可获利 141.75 元/t,具有可观的经济效益。通过分析研究该多孔基质的重金属全量和浸出结果,发现制备出的多孔基质的重金属含量低于国家标准,且在实际应用中,浸出毒性也远低于标准基值。因此该多孔土壤基质能够安全地应用于生态修复中,不存在二次污染的可能。

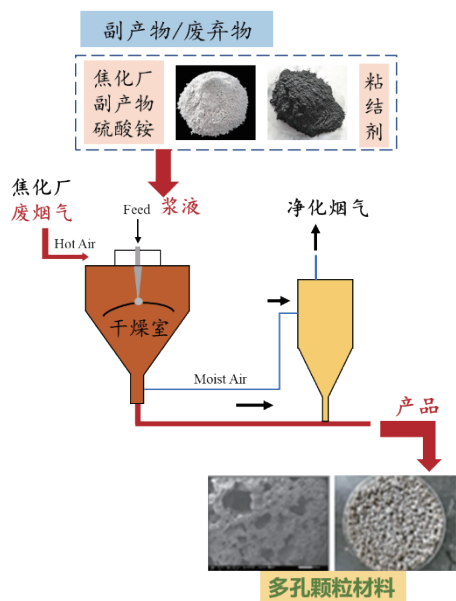


图 6 煤矸石多孔土壤基质的制备

Fig. 6 Preparation of porous soil matrix with coal gangue

综上所述,煤矸石制备的多孔土壤基质应用于矿区生态修复前景良好,就地取材,利用多孔材料的保水保肥性和煤基固废的矿物特性,能够很好地解决矸石山的保水保肥性不足和植物抗逆性差等问题。通过该方法既可以省去开挖、运输客土产生的问题,同时又由于煤矸石对环境的适宜性高、影响小,产生的修复效果良好,同时解决了煤矸石堆存可能产生的一系列问题,做到了以废治废,原位资源合理利用,一举多得,为实现可持续发展又迈进了坚实的一步。

4 改性煤矸石与其他物质混配

4.1 改性煤矸石与其他物质混配制肥

煤矸石虽然含有营养组分,但仅仅由单一的煤矸石制肥而不添加其他营养物时,产品的养分组成不理想,所以研究者们通常将两种或两种以上含有有机质或无机养分的原料混合制成煤矸石复合肥,以实现各类原料的优势互补。根据不同的煤矸石性质,在制备煤矸石复合肥时可以灵活选择不同的生产方式。

煤矸石中如果有有机质含量比较高,但 N、P、K 等无机养分含量较低时,可以通过适当添加富含 N、P、

K 的化肥,来提高煤矸石复合肥的整体养分含量并提高其缓释长效的作用。例如煤科院西安分院^[63]研制的掺入适量 N、P、K 和微量元素的全养分矸石肥料经田间实验后发现苹果和西瓜的产量增加了大约 15%~20%。张伟才等^[64]以煤矸石为主要原料,配以适量的农家肥、化肥、微肥和添加剂制得煤矸石肥料,实验结果表明,施用煤矸石肥料的西瓜和苹果比施用市售专用肥分别增产 28.11% 和 29.4%。

若煤矸石的有机质含量较低,则可以通过与腐熟的污泥复合来增加煤矸石中的营养含量,同时为了防止重金属的量超标,要控制污泥的添加量。吕珊兰等人^[65]在煤矸石风化物上种植红豆草的模拟盆栽实验表明,施用污泥之后红豆草的成活率与生物量均有提高。

4.2 改性煤矸石与其他物质混配制育苗基质

煤矸石作为育苗基质的原料,不能直接或清洗后利用,需要做适当的预处理,刘莹等人^[66]利用煅烧后的煤矸石和蚯蚓粪替代河沙作为棉花的育苗基质,发现复配基质的棉苗素质显著优于商品化基质。何俊瑜等^[67]利用预处理和未经处理的煤矸石作为育苗基质,结果表明:预处理后的煤矸石作为育苗基质培育油菜,油菜的出苗率均在 80% 以上,且油菜质量优于利用土壤培育的幼苗,而未处理的煤矸石不适合作为育苗基质。邵玉飞^[22]利用煤矸石容重大、蓄热能力强的特点,经活化后可与性状互补的泥炭混合作水稻育苗基质。

4.3 改性煤矸石与其他物质混配制人造土壤

为实现大量消耗煤矸石存量的目的,研究者们开发出煤矸石制生态土的关键技术,提出具有处理能力大、生态环境友好、成本低、可持续性强、安全性高的煤矸石处理及利用模式,形成科学合理的煤矸石利用技术体系。制备出的煤矸石生态土^[68-70]具有优良的土壤理化性质,在保水性、透气性上都有较好的表现,其中含有大量的有机质和丰富的微量元素,以及植物生长所需的 C、N、P、K 等必要元素,对于园林植物的生长和性状表现上都有较好的促进作用,可以替代天然土壤。柯凯恩等人^[71]将煤矸石粉碎,添加微生物菌剂,与植物来源的有机物堆肥,混合均匀,经一段时间熟化,使煤矸石中利用植物生长的养分得以释放。制得的人工生态土具有一定的粒径组成和团聚体结构,不仅在理化性状、肥力水平、微生物含量方面具有优良特性,而且在促进植物生长方面也有极佳的表现。乔浩亮等人^[72]将煤矸石粉碎,污泥进行堆肥化处理,再添加粉煤灰和耐受重金属的微生物菌剂,混合放置 2 周后得到熟化的近似土壤的生态土,将该生态土和沙土按质量比 1:5 的比例添加并混合均匀后种植高羊茅,与纯沙土相比,处理组的种子发芽率和株高均有

明显提高,能达到与市售基质基本一致的效果。内蒙古嗨泥环保科技有限公司^[73]将含水率 $\leq 80\%$ 的生活污泥、嗨泥处理剂与煤矸石粉混合后经过污泥脱水处理系统并配合其嗨泥智能处理系统进行快速破壁、快速除臭、快速杀虫除卵操作,得到富含有机质、腐殖酸、N、P、K 等多种营养成分以及具有保水、保肥、透气性良好、肥效缓释性好的营养土。肖作义等人^[74]将活化后的煤基固废与 AM 真菌作为固废基生物土壤改良剂,按不同比例分别添加到矿区土壤中,进行盆栽实验,通过分析植物生物量、全氮、全碳、全磷、全钾、土壤有机质和溶解性有机碳、微生物多样性,与碳氮代谢相关的微生物物种丰度差异等性能,来探究煤基固废耦合微生物固碳修复技术对土壤的改良效果和植物的促生作用,结果表明,煤基固废养分释放率低、微生物亲和性差与 AM 真菌需要养分来源的特点相结合可以很大程度促进植物的生长。

将煤矸石基多孔材料与天然黄土混合栽培植物,可以获得较单独使用天然土壤栽培植物更高的出苗率和平均株高,当水泥-煤矸石基人造土壤占 20% 时,出苗率最高为 78%,平均株高最高为 16.21 cm^[51];苏迪等人^[58]还发现将多组分自胶凝粉体-煤矸石基人造土壤与天然黄土混合使用,也可以达到更好的效果,当多组分自胶凝粉体-煤矸石基人造土壤占 60% 时,出苗率最高为 85%,平均株高最高为 15.06 cm。也有研究者通过盆栽实验模拟了多孔土壤基质在实际矿山修复中的效果,探究出不同多孔基质和土壤的比例对植物生长状况的影响,发现在 $m(\text{多孔土壤基质}):m(\text{土壤})=10\%:90\%$ 时,植物生长状态最好,相较纯土环境,株高高出 5%,鲜重增加 54%,干重增加 85%。

5 煤矸石土壤化利用及作土壤改良剂存在的问题

(1)煤矸石直接覆盖改土的方式虽然便捷,但单一的煤矸石在利用过程中存在颗粒尺寸较大、毛细孔隙率低、保水性差等问题,且直接覆盖的方式没有对煤矸石的重金属进行任何固化,存在严重的重金属环境污染风险。将煤矸石与外源材料混配的方法在一定程度上改善了土壤结构,有利于提高植物抗逆性,但是存在施用量有限,外源材料来源有一定地域限制的问题。将煤矸石改性后利用可以进一步提高煤矸石中养分的利用率,且对煤矸石进行了一定的化学或生物处理,在一定程度上降低了其重金属危害性,但是不可避免地会有工艺繁杂、成本较高的问题。因此,在实际利用过程中可以根据矿区实际情况以及想达到的目的针对性选取合适的煤矸石土壤化利用方法,同时也应积极寻找环境友好及经济可行共存的煤矸石土壤化利用方式。

(2)煤矸石中除了含有 SiO_2 、 Al_2O_3 以及 Fe、Mn

等常量元素外,还含有 Pb、Cd、Hg、As、Cr 等有害的微量重金属元素。这些重金属元素具有高毒性,若渗入土壤可能会进一步破坏土壤结构,影响植物的生长和农作物质量。有毒重金属元素也可通过雨水淋溶进入地表水域从而导致水体污染,危害水生生物和人类饮水安全。由于煤矸石中的重金属元素在生物体内具有生物蓄积性,通过食物链传递,可能积累到高浓度,对生态系统和食品安全造成威胁。张肖萌等人^[75]研究表明,排矸场中 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 含量超过该地区的土壤背景值,对当地的土壤环境造成了一定的污染。沈智杰^[76]在土壤重金属空间分布和垂直分布的研究中表明,随着与煤矸石堆积区距离增加,土壤重金属含量总体呈现降低趋势,表层土壤重金属含量总体高于底层。因此,为避免土壤的二次污染,有必要降低并控制煤矸石重金属的潜在危害。可以采取适当的煤矸石处理方法,如物理分离、化学处理或生物处理,以减少重金属的释放和迁移,也可以使用适当的固化剂将重金属固化在煤矸石中,以减少其释放。有关部门也应制定和执行相关的法规和政策,以限制和控制煤矸石中重金属的排放和处理。

6 结论及建议

目前,我国在利用煤矸石进行矿区土壤修复的理论与技术研究方面已经有一定的进展,在直接利用煤矸石进行修复方面有直接覆盖以及与适量外源材料混配的方法,其工艺简单、成本较低且对煤矸石的消耗量大,但是存在修复地土壤结构较差且存在重金属污染等环境风险。此外,通过对煤矸石进行一定的改性再进行矿区土壤修复的方法可以较为有效地提高土壤的养分含量,且更好地改善土壤结构,同时伴随的问题就是工艺较为复杂、成本较高。利用煤矸石进行矿区土壤修复还有一些关键问题亟待解决。

(1)煤矸石中含有 Zn、Pb、Cu 等重金属,这些重金属会随着水分的流动进入地下水或附近土体,造成周围土壤以及水体的污染。因此,对煤矸石重金属的降低和控制十分重要。同时,要探索新的煤矸石基肥料生产工艺,达到供肥、降低有害元素及改良土壤的多重效果。

(2)煤矸石中丰富的有机质导致其具有斥水性,即水分不易浸润土壤颗粒表面,这就使得煤矸石基质体内容易出现“干域”,进而影响植物根系对水分的吸收。因此,在实际应用过程中,可能需要通过一定的方法消除煤矸石的斥水性,这样才有利于植物从基质中吸收足够的水分和养分。

(3)煤矸石的矿区生态化利用不仅要做到切实改善矿区土壤,也要尽可能实现煤矸石的大规模消纳,在最大限度地利用煤矸石的基础上,降低运输成本和

能耗,缓解土地资源的紧张,真正达到“以废治废”的目的。

参考文献:

- [1] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165-178.
LI Z, XUE J, ZHU Z L, et al. Research progress of comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 165-178.
- [2] 叶吉文, 沈国栋, 路露. 煤矸石的危害与综合利用[J]. 中国资源综合利用, 2010, 28(5): 32-34.
YE J W, SHEN G D, LU L. Hazards and comprehensive utilization of coal gangue[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2010, 28(5): 32-34.
- [3] 张华林, 滕泽栋, 江晓亮, 等. 废弃煤矸石资源化利用研究进展[J]. 环境化学, 2023, 43(6): 1-14.
ZHANG H L, TENG Z D, JIANG X L, et al. Research progress on resource utilization of waste coal gangue[J]. Environmental Chemistry, 2023, 43(6): 1-14.
- [4] 李培新, 许家勤, 高树东. 掘进煤矸石中煤炭资源回收方法[J]. 煤矿开采, 2006(5): 99-100.
LI P X, XU J Q, GAO S D. Recovery method of coal resources in coal gangue[J]. Coal Mining Technology, 2006(5): 99-100.
- [5] 李瑜, 舒新前, 张蕾, 等. 酸浸法提取煤矸石中 Al_2O_3 的研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(7): 70-73.
LI Y, SHU X Q, ZHANG L, et al. Study on the acid leaching of Al_2O_3 from coal gangue[J]. Environmental Pollution and Prevention, 2013, 35(7): 70-73.
- [6] 刘成龙, 谢宇充, 夏举佩, 等. 煤矸石中和渣酸化提取铝、钛实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 966-972.
LIU C L, XIE Y C, XIA J P, et al. Study on extracting aluminum and titanium from neutral residues of coal gangue by acid leaching[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(4): 966-972.
- [7] 谢娟, 夏润南, 杜红霞, 等. $\alpha-Fe_2O_3-ZnO$ /煤矸石复合光催化剂的制备及其降解五氯酚性能的研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(12): 165-168+172.
XIE J, XIA R N, DU H X, et al. Preparation of $\alpha-Fe_2O_3-ZnO$ /coal gangue composite photocatalyst and their application in PCP degradation[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(12): 165-168+172.
- [8] 王爱国, 朱愿愿, 徐海燕, 等. 混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2076-2086.
WANG A G, ZHU Y Y, XU H Y, et al. Research progress on coal gangue aggregate for concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2076-2086.
- [9] 陈杰, 水中和, 孙涛, 等. 活化煤矸石在水泥基材料中的早期水化动力学研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 1983-1990.
CHEN J, SHUI Z H, SUN T, et al. Early hydration kinetics research of calcined coal gangue in cement-based materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 1983-1990.
- [10] LIU X. Low-carbon utilization of coal gangue under the carbon neutralization strategy: a short review[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2023, 25(4): 1978-1987.
- [11] 胡振琪, 张子璇, 孙煌. 试论矿山生态修复的地质成土[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 21-29.
HU Z Q, ZHANG Z X, SUN H. Geological soil formation for ecological restoration of mining areas and its case study[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 21-29.
- [12] 任荣彬. 土壤污染控制与土地的可持续利用[J]. 企业技术开发, 2016, 35(3): 56-57.
REN R B. Soil pollution control and sustainable land use[J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(3): 56-57.
- [13] 郭彦霞, 张圆圆, 程芳琴. 煤矸石综合利用的产业化及其展望[J]. 化工学报, 2014, 65(7): 2443-2453.
GUO Y X, ZHANG Y Y, CHENG F Q. Industrial development and prospect about comprehensive utilization of coal gangue[J]. CIESC Journal, 2014, 65(7): 2443-2453.
- [14] 唐升引, 蒋永吉, 陈静, 等. 煤矸石主要物理特性及在栽培基质中应用的可行性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 209-213.
TANG S Y, JIANG Y J, CHEN J, et al. Major physical characteristics of gangue and feasible analysis for the application in cultivation matrix[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 209-213.
- [15] 韩彦明, 郭玉玮, 范利国, 等. 生活污水一分钟制营养土的方法: CN2022115386 19.9[P]. 2023-07-24.
HAN Y M, GUO Y W, FAN L G, et al. The method of making nutritive soil from domestic sludge in one minute: CN2022115386 19.9[P]. 2023-07-24.
- [16] 张庆玲. 利用煤矸石研制有机矿物肥料的尝试[J]. 煤矿环境保护, 1996, 10(1): 24-26.
ZHANG Q L. An attempt to develop organic mineral fertilizer from coal gangue[J]. Coal Mine Environmental Protection, 1996, 10(1): 24-26.
- [17] 邢成江, 邢丽萍. 煤矸石覆盖农田好处多[J]. 农业科技信息, 1994(9): 30.
XING C J, XING L P. Covering farmland with coal gangue has many advantages[J]. Agricultural Science and Technology Information, 1994(9): 30.
- [18] 段永红, 赵景遼. 煤矸石山覆盖种植对植物根系的影响[J]. 煤矿环境保护, 1999(1): 41-43.
DUAN Y H, ZHAO J K. Effect of mulch planting of coal gangue mountain on plant root system[J]. Coal Mine Environmental Protection, 1999(1): 41-43.
- [19] 杜韬, 王冬梅, 张泽洲, 等. 煤矸石植生基质保水性能对黑麦草生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 75-84.
DU T, WANG D M, ZHANG Z Z, et al. Effect of the water-retaining property of coal gangue planting substrate on the growth of lolium perenne[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 75-84.
- [20] 马柳. 以煤矸石为基质的生菜种植土壤改良配比研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
MA L. Study on soil improvement ratio of lettuce growing with coal gangue as the substrate[D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.
- [21] 李依临, 尚海丽, 温欣, 等. 多源废弃物配施对矿区土壤的改良效应[J]. 北方农业学报, 2022, 50(4): 74-82.
LI Y L, SHANG H L, WEN X, et al. Effect of multi-source waste combined application on soil improvement in mining area[J]. Journal of Northern Agriculture, 2022, 50(4): 74-82.
- [22] 关禹. 煤矸石的肥效及重金属活性钝化的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
GUAN Y. Study on fertilizer efficiency and passivation of heavy metal activity of coal gangue[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [23] BU N J, LIU X M, SONG S L, et al. Synthesis of NaY zeolite from coal gangue and its characterization for lead removal from aqueous solution[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31: 2699-2710.

- [24] 王丽艳, 张成梁, 韩有志, 等. 煤矸石山不同植被恢复模式对土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 93-99+105.
WANG L Y, ZHANG C L, HAN Y Z, et al. Effects of different vegetation restoration modes on soil erosion and nutrient loss in coal gangue mountains[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(2): 93-99+105.
- [25] 房颖信. 煤矸石区域坡面土壤侵蚀与水土保持措施[J]. 山东水利, 2022(7): 93-94.
FANG Y X. Slope erosion and soil-water conservation measures in coal gangue area[J]. Shandong Water Conservancy, 2022(7): 93-94.
- [26] 宋楠. 煤矸石山坡面覆盖对土壤改良和植被恢复的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
SONG N. Research of coal gangue slope surface cover of soil improvement and vegetation restoration[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [27] 马保国, 王健, 刘婧然, 等. 煤矸石基质土壤的水分入渗试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2501-2506.
MA B G, WANG J, LIU J R, et al. Experimental study on water infiltration of soil weathering coal gangue[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2501-2506.
- [28] 邵玉飞, 马建, 陈欣. 利用煤矸石制作水稻育苗基质的研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 555-561.
SHAO Y F, MA J, CHEN X. Rice seedling substrate produced by coal gangue[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(6): 555-561.
- [29] GE M, CHEN G, HONG J, et al. Screening for formulas of complex substrates for seedling cultivation of tomato and marrow squash[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012(16): 606-615.
- [30] ABAD M, NOGUERA P, BURÉS S. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain[J]. Bioresource Technology, 2001(77): 197-200.
- [31] 张秀丽, 张晓明, 杜东明. 秸秆型基质在番茄育苗上的应用[J]. 辽宁农业职业技术学院学报, 2005(7): 4-5.
ZHANG X L, ZHANG X M, DU D M. Application of straw matrix in tomato seedling cultivation[J]. Journal of Liaoning Agricultural College, 2005(7): 4-5.
- [32] RAVIV M, OKA Y, KATAN J, et al. High-nitrogen compost as a medium for organic container-grown crops[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(4): 419-427.
- [33] LI J, WANG J. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239.
- [34] 李娜, 牛明芬, 马建, 等. 秸秆与煤矸石混配基质对水稻生长特性的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(11): 154-161.
LI N, NIU M F, MA J, et al. Effects of mixed substrate by pretreatment corn straw and coal gangue on growth characteristics of rice seedlings[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(11): 154-161.
- [35] 毕银丽, 吴王燕, 刘银平. 丛枝菌根在煤矸石山土地复垦中的应用[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3738-3743.
BI Y L, WU W Y, LIU Y P. Application of arbuscular mycorrhiza in land reclamation of coal gangue mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3738-3743.
- [36] 甄莉娜, 刘丽珍, 牛艳, 等. 煤矸石山不同植物根际土壤AM真菌群落多样性分析[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2009-2018.
ZHEN L N, LIU L Z, NIU Y, et al. Analysis of AM fungi community diversity in rhizosphere soil of different vegetation in coal gangue mountain[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 2009-2018.
- [37] 赵仁鑫, 郭伟, 付瑞英, 等. 丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4447-4454.
ZHAO R X, GUO W, FU R Y, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the vegetation restoration of different types of coal mine spoil banks[J]. Environmental Science, 2013, 34(11): 4447-4454.
- [38] 孔涛, 张开, 黄丽华, 等. 菌剂混施对各粒径矸石性质及苜蓿生长的影响[J]. 煤炭学报, 2022: 1-12.
KONG T, ZHANG K, HUANG L H, et al. Effects of mixed application of microbial agents on growth and substrate properties of alfalfa in coal gangue matrix with different particle sizes[J]. Journal of China Coal Society, 2022: 1-12.
- [39] ZHANG L, ZHOU J, GEORGE T, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi conducting the hyphosphere bacterial orchestra[J]. Trends in Plant Science, 2021, 27(4): 402-411.
- [40] LIU L, LIU Q, LI Y, et al. Occurrence of iron in the minerals of carboniferous coal gangue of the Pingshuo open-pit mine, North China[J]. Clays and Clay Minerals, 2022, 70(5): 695-711.
- [41] INOUE N, HAMANAKA A, SHIMADA H, et al. Fundamental study on application of fly ash as topsoil substitute for the reclamation of mined land in Indonesian open cut coal mine[C] The Beijing International Symposium Land Reclamation And Ecological Restoration 2024.
- [42] SENA K, BARTON C, HALL S, et al. Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia, United States[J]. Restoration Ecology, 2015, 23(2): 1-8.
- [43] CARABASSA V, SERRA E, ORTIZ O, et al. Sewage sludge application protocol for quarry restoration(Catalonia)[J]. Ecological Restoration, 2010, 28(4): 420-422.
- [44] 胡振琪, 康惊涛, 魏秀菊, 等. 煤基混合物对复垦土壤的改良及苜蓿增产效果[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 120-124.
HU Z Q, KANG J T, WEI X J, et al. Effect of coal-based mixture on soil improvement and alfalfa yield increase[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 120-124.
- [45] 周昊, 郭娇娇, 何绪文, 等. 煤矿区固废改良土壤对植物生长的影响[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 23-25.
ZHOU H, GUO J J, HE X W, et al. Research on impact of coal solid waste improved soil on plant growth[J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 23-25.
- [46] 钟仁华, 蔡红春, 李威, 等. 一种煤矸石提取腐植酸的方法: CN111662463A[P]. 2020-09-15.
ZHONG R H, CAI H C, LI W, et al. A method for extracting humic acid from coal gangue: CN111662463A[P]. 2020-09-15.
- [47] 吴伟辰. 一种利用煤矸石制备腐殖酸肥的方法: CN115353422A[P]. 2022-11-18.
WU W C. The invention relates to a method for preparing humic acid fertilizer by using coal gangue: CN115353422A[P]. 2022-11-18.
- [48] 许旭旦. 黄腐酸(FA)研究的意义与成就[J]. 腐植酸, 1996(1): 32-34.
XU X D. Significance and achievements of fulvic acid (FA) research[J]. Humic Acid, 1996(1): 32-34.
- [49] 刘信平, 吴少尉, 张驰. 富硒煤矸石活化技术及煤矸石硒肥高效利用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1526-1535.
LIU X P, WU S W, ZHANG C. Activation of Se-enriched coal gangue and the efficient use of coal gangue Se fertilizer[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2020, 26(8): 1526-1535.
- [50] BLAGODATSKAYAL E, KUZUYAKOV Y. Active microorganisms in soil: critical review of estimation criteria and approaches[J]. Soil

- Biology&Biochemistry, 2013, 67: 192–211.
- [51] 钟艳, 杨艳梅, 谢承卫. 利用巨大芽孢杆菌处理高硫和低硫煤矸石制备肥料的研究[J]. 贵州师范学院学报, 2015, 31(12): 18–25.
ZHONG Y, YANG Y M, XIE C W. Study on the preparation of high-sulfur and low-sulfur coal gangue fertilizers by bacillus megaterium[J]. Journal of Guizhou Education University, 2015, 31(12): 18–25.
- [52] 袁向芬, 谢承卫. 利用巨大芽孢杆菌制备高硫煤矸石肥料[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 946–950.
YUAN X F, XIE C W. Preparation of high-sulfur coal gangue fertilizer by bacillus megaterium[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2): 946–950.
- [53] 贾倩倩, 程帆, 谢承卫. 利用硅酸盐细菌(GY03)制备煤矸石肥料的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2012(2): 28–31.
JIA Q Q, CHENG F, XIE C W. Study on the preparation of coal gangue fertilizer by silicate bacteria(GY03)[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2012(2): 28–31.
- [54] 程蓉, 廖祥文, 舒荣波, 等. 利用硅酸盐细菌制备煤矸石矿物肥料[J]. 矿产综合利用, 2017(6): 115–118.
CHENG R, LIAO X W, SHU R B, et al. Preparation of mineral fertilizer for coal gangue by silicate bacteria[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(6): 115–118.
- [55] 杨辉. 基于硅溶胶的多孔保温材料制备及性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
YANG H. Preparation and properties of porous thermal insulation materials based on silica sol[D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [56] 臧晔, 王晓丽, 王思阳. 乌海地区煤矸石制备LSX型沸石[J]. 中国粉体技术, 2019, 25(2): 37–41.
ZANG Y, WANG X L, WANG S Y. Preparation of LSX zeolite from coal gangue in Wuhai area[J]. China Powder Science and Technology, 2019, 25(2): 37–41.
- [57] ANANYEVA K, WANG W, SMUCKERA J M, et al. Can intra-aggregate pore structures affect the aggregate's effectiveness in protecting carbon[J]. Soil Biology&Biochemistry, 2013, 57: 868–875.
- [58] 陈敏. 矸石基磁性多孔材料的制备及其修复镉污染土壤机理[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
CHEN M. Preparation of magnetic porous materials based on gangue and mechanism of remediation of cadmium-arsenic contaminated soil[D]. Huainan: Anhui University of Science& Technology, 2022.
- [59] 苏迪. 煤矸石基人造土壤制备工艺及性能研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
SU D. Study on preparation technology and properties of artificial soil based on coal gangue[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [60] 温军, 王晓丽, 王彦龙. 长江源区3种地形高寒草地土壤阳离子交换量和交换性盐基离子的分布特征及其机理探讨[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 488–497.
WEN J, WANG X L, WANG Y L. Distribution characteristics and mechanism discussion of soil cation exchange capacity and exchangeable based cations of alpine grassland in the source region of Yangtze River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(3): 488–497.
- [61] 于耀泓, 刘悦, 王艺颖, 等. 鹅凰嶂山地雨林土壤阳离子交换量和交换性盐基离子分布特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1341–1349.
YU Y H, LIU Y, WANG Y Y, et al. Distribution of soil cation exchange capacity and exchangeable based cations in the E'huangzhang montane rain forest[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1341–1349.
- [62] 吴圣杰. 基于工业副产物的多孔土壤基质制备及性能研究[D]. 太原: 山西大学, 2022.
WU S J. Preparation and properties of porous soil matrix based on industrial by-products[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2022.
- [63] 崔树军, 阎云明. 煤矸石的地球化学特征及农业利用前景[J]. 中州煤炭, 1999(1): 30–30.
CUI S J, YAN Y M. Geochemical characteristics and agricultural utilization prospects of coal gangue[J]. Zhongzhou Coal, 1999(1): 30–30.
- [64] 张伟才, 杨桂荣. 用煤矸石制西瓜、苹果专用肥料的试验研究[J]. 煤矿环境保护, 1997(3): 24–26.
ZHANG W C, YANG G R. Experimental study on special fertilizer for watermelon and apple made from coal gangue[J]. Coal Mine Environmental Protection, 1997(3): 24–26.
- [65] 吕珊兰, 武冬梅, 冯两蕊, 等. 覆盖煤矸石风化物上施肥种植红花草效果的研究[J]. 煤矿环境保护, 1996(2): 32–35.
LV S L, WU D M, FENG L R, et al. Study on the effect of planting red bean grass with fertilizer on coal gangue weathering[J]. Coal Mine Environmental Protection, 1996(2): 32–35.
- [66] 刘莹, 李亚兵. 利用煤矸石和蚯蚓粪进行棉花工厂化育苗的研究[J]. 中国棉花, 2014, 41(8): 23–25.
LIU Y, LI Y B. The Study on cotton seeding in the substrate used by gangue and vermicompost[J]. Chinese Cotton, 2014, 41(8): 23–25.
- [67] 何俊瑜, 任艳芳, 温祥珍, 等. 煤矸石为基质的育苗试验[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2004, 24(1): 56–59.
HE J Y, REN Y F, WEN X Z, et al. Study on the gangue as a seedling substrate[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2004, 24(1): 56–59.
- [68] 柯凯恩, 董晓芸, 周金星, 等. 煤矸石生态基质的制备配方及其肥力特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 308–317.
KE K E, DONG X Y, ZHOU J X, et al. Study on preparation formula and fertility characteristics of coal gangue ecological matrix[J]. Chinese Soil and Fertilizer, 2021(4): 308–317.
- [69] 袁伟嘉, 易文, 张建. 不同风化程度的煤矸石生态边坡工程技术[J]. 科技与创新, 2022(23): 153–155.
YUAN W J, YI W, ZHANG J. Ecological slope engineering technology of coal gangue with different weathering degree[J]. Technology and Innovation, 2022(23): 153–155.
- [70] 赵振雷. 山西省煤矸石生态处置模式研究[J]. 低碳世界, 2017(10): 89–90.
ZHAO Z L. Study on ecological disposal model of coal gangue in Shanxi Province[J]. Low-carbon World, 2017(10): 89–90.
- [71] 周金星, 柯凯恩, 乔浩亮, 等. 一种基于煤矸石的人工生态基质及其制备方法: CN1 10999753B[P]. 2021–07–27.
ZHOU J X, KE K E, QIAO H L, et al. The invention relates to an artificial ecological substrate based on coal gangue and a preparation method thereof: CN1 10999753B[P]. 2021–07–27.
- [72] 周金星, 秦琪焜, 乔浩亮, 等. 一种基于煤矸石和污泥的生态改良基质制备方法: CN 11101159B[P]. 2021–11–05.
ZHOU J X, QIN Q K, QIAO H L, et al. The invention relates to an ecologically improved substrate preparation method based on coal gangue and sludge: CN 11101159B[P]. 2021–11–05.
- [73] 韩彦明, 郭玉玮, 范利国, 等. 生活污水一分钟制营养土的方法: CN202211 538619.9[P]. 2023–07–24.
GUO Y M, GUO Y W, FAN L G, et al. The method of making nutritive soil from domestic sludge in one minute: CN202211538619.9[P]. 2023–07–24.
- [74] 肖作义, 白昕冉, 郑春丽, 等. 微生物矿物源土壤修复剂配施效果

- 的研究[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(1): 120–126.
- XIAO Z Y, BAI X R, ZHENG C L, et al. Application affect of microbial mineral source soil remediation agent[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(1): 120–126.
- [75] 张肖萌, 郭巧玲, 杨云松, 等. 煤炭矿区排矸场表层土壤重金属污染研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2023, 10(2): 149–157.
- ZHANG X M, GUO Q L, YANG Y S, et al. Study on heavy metal pollution in topsoil of gangue field in coal mining area[J]. *Non-ferrous Metal*, 2023, 10(2): 149–157.
- [76] 沈智杰. 某煤矸石堆积区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- SHEN Z J. Evaluation and source apportionment of heavy metal pollution in cultivated soil around a coal gangue accumulation area[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.

Research Progress on the Utilization of Coal Gangue for Soil Remediation and as Soil Amendment Agents

LIU Fanyu^{1,2}, SONG Huiping^{1,2}, WU Haibin^{1,2}, FENG Zhengjun^{1,2}, CHAI Chunjing^{1,2}, ZHANG Junjie^{1,2}, ZHOU Jianjun³

1. Institute of Resources and Environmental Engineering, Taiyuan 030006, China;

2. Engineering Research Center of Resource Efficiency Enhancing and Carbon Emission Reduction in Yellow River Basin, Ministry of Education, Taiyuan 030006, China;

3. Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China

Abstract: The massive accumulation of coal gangue not only pollutes the surrounding environment but also constitutes a waste of the resource itself. The pathways and current research status of coal gangue in soil utilization and as soil amendment agents are systematically reviewed, including direct land application of coal gangue, improvement of soil with mixtures of coal gangue, soil, organic matter, fungi, and solid waste, as well as the production of fertilizers or the preparation of porous ecological soil from modified coal gangue. Additionally, the use of modified coal gangue mixed with exogenous materials to cultivate seedling substrates, fertilizers, and artificial soils is discussed. There has been some progress in utilizing coal gangue for soil utilization and as soil amendment agents in China, but the control of heavy metals in coal gangue should also be paid attention to enable its large-scale consumption as much as possible. Finally, the paper identifies existing issues in the use of coal gangue for soil utilization and soil amendment agents, and provides corresponding suggestions to serve as a reference for related research.

Keywords: coal gangue; soil conditioner; soil utilization; comprehensive utilization

引用格式: 刘帆俞, 宋慧平, 吴海滨, 冯政君, 柴春镜, 张俊杰, 周建军. 煤矸石土壤化利用与土壤改良剂研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(6): 14–26.

LIU Fanyu, SONG Huiping, WU Haibin, FENG Zhengjun, CHAI Chunjing, ZHANG Junjie, ZHOU Jianjun. Research progress on the utilization of coal gangue for soil remediation and as soil amendment agents[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(6): 14–26.