

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.014

赤泥固废土壤化修复研究进展

张雪,王重庆,曹亦俊

(郑州大学 化工学院,郑州 450001)

摘要:赤泥产量大、碱性强、综合利用难度大,赤泥处置问题严重限制了氧化铝行业的可持续发展。为减少环境污染和提高资源利用率,赤泥的综合利用得到广泛研究,但是赤泥的无害化处置仍然是亟待解决的问题。土壤化是实现赤泥大宗消纳的一种可行性方法,在综合赤泥土壤化研究现状的基础上,分析了赤泥土壤化处置过程中堆场演化、碱性调控、土壤化调控、植物修复等研究方向存在的问题,并对赤泥土壤化研究方向提出了建议,为赤泥生态修复和无害化处置提供理论和技术指导。

关键词:赤泥;碱性调控;土壤化;植物修复

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0084-09

Research Progress on Soilification of Red Mud Solid Waste

ZHANG Xue, WANG Chong-qing, CAO Yi-jun

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Due to massive production, high alkalinity and intractable utilization, the sustainable development of alumina industry is significantly limited by disposal of red mud. In order to reduce environmental pollution and improve resource utilization, numerous researches have been carried out on comprehensive utilization of red mud. However, cleaner utilization of red mud is still an urgent issue to be solved. Soilification is a feasible method for massive consumption of red mud. This review surveys current status, and discusses future research directions from the aspects of evolution of red mud dam, alkaline regulation, soil regulation and phytoremediation. Theoretical and technical guidance for cleaner disposal and phytoremediation of red mud are provided.

Key words: red mud; alkaline regulation; soilification; phytoremediation

赤泥是氧化铝生产过程中产生的一种碱性固体废弃物。生产1 t氧化铝大约产生1~2 t赤泥^[1]。2018年全球赤泥堆存量达到4.6亿t,并且每年以大约2亿t的速率增加^[2]。赤泥的堆存占用大量土地资源,同时产生严重的环境问题。为减少环境污染和提高资源利用率,赤泥的综合利用得到广泛研究,主要集中在有价金属回收、开发建筑材料、环境修复等方面,然而全球对赤泥的资源化利用仍不

足10%^[3]。

赤泥在土壤改良方面具有良好的优势,可用于对酸性、含重金属以及微量元素缺乏土壤的改良。通过调控赤泥添加量,可以有效改善酸性沙质土壤的微生物活性和多样性^[4]。OPRCKAL等^[5]发现赤泥和纸灰可与潜在有毒元素形成新的水化产物,进而固定潜在有毒元素,修复后的土壤可以用于制备岩土复合材料。GAUTAM等^[6]发现,添加5%

收稿日期:2020-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1704252);国家重点研发计划项目(2020YFC1908802)

作者简介:张雪(1994-),女,河南驻马店人,硕士研究生;通信作者:曹亦俊(1969-),男,博士,教授,博士生导师

赤泥和10%污泥改良土壤提高了柠檬精油质量和产量。近几年研究者提出了赤泥土壤化的技术思路,主要是通过碱性和土壤特性调控将赤泥转化为土壤基质,进而通过植物生长实现生态修复。需要指出的是,赤泥土壤化的目的并不是将赤泥用作土壤进行作物生长,而是通过植物修复实现赤泥的无害化处置。赤泥土壤化是实现赤泥大宗消纳的有效途径,本文对赤泥土壤化研究进展进行总结,主要从堆场演化、碱性调控、土壤化调控、植物修复方面进行评述。

1 堆场演化

大量赤泥弃置在堆场无法处理,而且其碱性强、盐分高,随着污染物的迁移,造成地下水污染和土壤盐碱化。堆场物理结构不良,养分缺乏,团聚性差,表层不稳定,温差变化大,一般植物难以生长^[7]。赤泥堆场经风化、干燥和再润湿循环作用,容重降低,孔隙度增加,促进颗粒团聚体的形成;干燥会导致赤泥从类泥物质转变为固体物质,黏土、砂粒颗粒大小

会增加同时影响持水量的变化,该过程存在土壤发生现象并逐渐形成一种类土壤基质(图1)^[8]。

自然风化过程可提高颗粒大团聚体含量。随着堆存时间的增加,赤泥颗粒由片状结构转化为团粒结构,增加了有机碳含量。提高可交换钙离子含量有助于促进稳定团聚体的形成。此外,团聚体的形成和稳定以及有机碳储备和稳定都与团聚体内颗粒有机碳含量有关。随着堆存时间的延长,赤泥总有机碳含量增加,同时也增加了赤泥团聚体颗粒有机碳分配比例,通过增加不稳定性有机碳含量提高赤泥团聚体稳定性。自然风化过程赤泥以稳定有机碳库为主,活性有机碳库变化较小,有利于形成稳定的有机碳库^[9]。自然风化过程砂粒含量增加,孔隙度从43.88%增至58.24%,水稳定性团聚体含量从43.32%增至93.20%,赤泥结构稳定性指数从1.33%增至5.46%,表明在自然风化过程中实现了赤泥理化性质的改善,这将有利于赤泥形成类土基质。

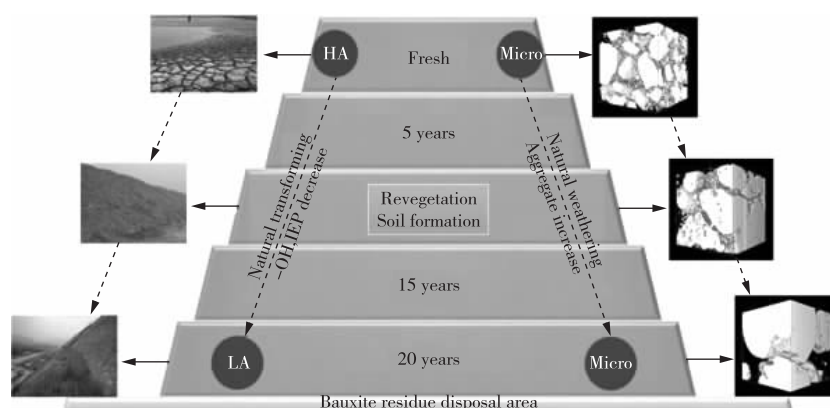


图1 自然风化过程赤泥堆场土壤化演变机理

Fig. 1 Mechanism of soil evolution in red mud dump during natural weathering

随着存放时间的延长,赤泥堆场物理化学特性和微生物群落发生了变化。赤泥堆放20年后,由于 Na^+ 和 OH^- 的减少导致其pH和电导率成比例下降。自然风化过程影响了细颗粒表面沉积物引起二次碳化并形成较大团聚体,进而导致赤泥堆场容重有所降低,这有利于赤泥良好结构的形成。在自然风化作用下,土壤中交换性阳离子的含量也会发生变化,矿物风化和碱度降低也可能促进赤泥堆场交换态 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 的释放。经过多年堆存,赤泥中总有机碳和总氮含量显著增加,这可能来源于死亡植物的分解、植物根系的建立及其上层的分泌物。土壤微生物群落组成和多样性受土壤养分和碱度的调节,而总有机碳是主要因素。此外,创造营养

丰富的环境能够促进细菌群落的发展,如根分泌物、脱落的根细胞和黏液^[10-11]。WU等^[12]认为自然风化过程细菌群落发生了动态变化,*Proteobacteria*、*Chloroflexi*、*Acidobacteria*及*Planctomycetes*菌种种群数量增加,但*Firmicutes*和*Actinobacteria*菌种种群数量减少。随着赤泥存放年限的增加,有机碳含量由5.65 g/kg增加到10.73 g/kg,总氮含量由0.004%增加到0.033%;赤泥土壤质量指数增加,相对土壤质量指数由1.89降至0.15,表明自然风化对改善赤泥的性质和形成新的类土基质有显著作用^[13]。

赤泥碱性强、盐分高、环境风险大、综合利用难度大,难以解决赤泥大量堆存的问题。自然风化过

程中赤泥土壤化进程缓慢,植物难以生长,为了加快堆场的生态重建,消除赤泥堆场环境安全隐患,针对赤泥堆场演化研究中存在的问题,还需要进一步开展以下研究^[14]:赤泥堆场自然风化过程土壤特性的演变机理、赤泥土壤化过程的影响因素、赤泥土壤化过程团聚体的形成与调控机制、赤泥土壤化过程的环境风险和污染控制等。

2 碱性调控

赤泥的强碱性对环境是一个潜在的威胁,可能破坏处置区周围的生态平衡。赤泥复杂的化学组成及其强碱性也限制了其在实际中的应用。因此,对赤泥进行碱性调控,是实现赤泥减量化、无害化、资源化利用的前提,也是氧化铝行业实现可持续发展亟待解决的问题。研究者对赤泥脱碱开展了大量研究,赤泥脱碱的方法主要包括水浸法、酸中和法和钙化浸出法。赤泥碱性调控主要机制如图2所示^[15]。

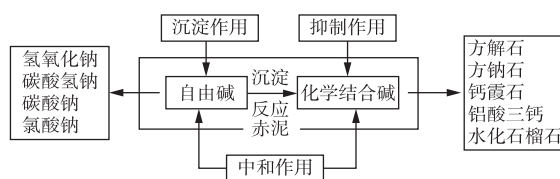


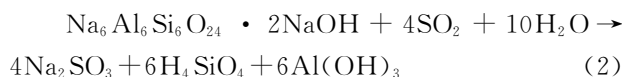
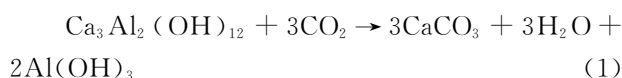
图2 赤泥碱性调控主要机制

Fig. 2 Major mechanism of alkaline regulation of red mud

水浸法脱碱主要是通过水溶解脱除赤泥中游离碱,存在耗水量大、脱碱效率低等问题,研究者对水浸法脱碱进行了改进。ZHANG等^[16]采用曝气洗涤与电渗析相结合的方法改善赤泥脱碱效果;通过曝气洗涤可将大量游离碱和附着碱释放到水中,增加了碱性液体与水的接触面积,促进了洗涤过程中的脱碱化,提高了脱碱效率;自由碱的平均去除率为76.62%,实现了稀释室中NaOH和NaAl(OH)₄的分离。通过引入含有Ca²⁺和Mg²⁺的海水对赤泥进行脱碱,其pH从13.1降至7.5;该方法不仅可以降低pH和电导率,同时降低活性铝,从而抑制不溶性碱铝酸三钙的溶解^[17]。LI等^[3]采用氯化铵溶液处理赤泥,在优化条件下可溶性钠的浸出率为80.86%,同时赤泥的pH从10.49降至8.93,碱性阴离子总浓度从38.89 mmol/L降至25.50 mmol/L。

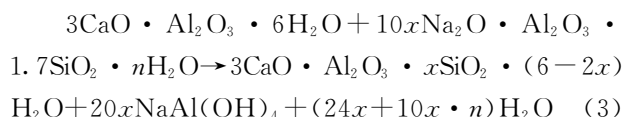
酸中和法脱碱主要包括无机酸和酸性气体中和法,通过酸碱中和作用去除赤泥中游离碱及部分化学结合碱。酸浸过程易产生大量废酸对环境造成二

次污染;溶解部分金属氧化物,不利于有价金属的回收利用。KONG等^[18]认为,无机酸如盐酸、硫酸、硝酸可以中和赤泥中的自由碱以及化学结合碱,赤泥的pH以及可溶性钠含量明显降低。利用含有20% CO₂的石灰窑尾气对赤泥进行脱碱试验,在最佳条件下脱碱率达到31.10%^[19]。采用二氧化硫和模拟烟气在温和条件下脱除赤泥中的碱;赤泥中方钠石结构被破坏,在悬浮液中形成可溶的钠盐易被酸性气体中和,从而导致赤泥中Na₂O减少;在优化条件下,脱碱后赤泥中Na₂O含量低于1%^[20]。主要反应如下:

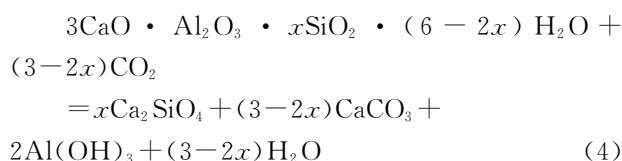


钙化浸出脱碱主要以氧化钙、铝酸三钙、石膏作为钙源,能够为赤泥持续提供钙离子,通过与赤泥中部分碱性阴离子发生沉淀作用以及部分化学结合碱发生钙钠置换进行脱碱。ZHOU等^[21]采用不同摩尔比的CaO/MgO共混物进行水热反应从赤泥中回收碱。在优化条件下Na₂O最高回收率可达到89.3%,该方法可为基于离子交换法从赤泥中回收碱的反应机理研究提供参考。LU等^[22]研究了一种从赤泥中回收碱和氧化铝的方法即钙化-碳化法,拜耳法赤泥中大约74%的氧化铝可实现回收,处理后赤泥的主要成分是CaCO₃和Ca₂SiO₄,其中Na₂O含量降低至0.03%,可用来制备水泥或其他建筑材料。LI等^[23]研究发现,添加1.50%磷石膏处理赤泥91 d后,赤泥体系pH可降至8.70,自由碱去除率为97.94%,可交换钠去除率为75.87%,碱性矿物相由52.81%降至48.58%。其中钙化-碳化法主要反应^[22]如下:

钙化过程



碳化过程



消化过程



利用上述方法对赤泥进行碱性调控已经取得

了一定进展,但是脱碱率低、经济性、二次污染等问题限制了脱碱技术的规模化应用。上述脱碱方法主要以钠的去除率作为脱碱指标,脱碱过程可能造成碱性矿物相的破坏以及引入有害物质,并

不适用于赤泥土壤化碱性调控。赤泥土壤化碱性调控研究主要集中在添加石膏、有机质、微生物筛选等方面。表 1 总结了不同处理方法对赤泥进行碱性调控。

表 1 使用不同处理方法对赤泥进行碱性调控
Table 1 Alkaline regulation of red mud with different treatments

处理	pH	脱碱率/%	作用机理	参考文献
氯化铵	8.93	80.86	铵根离子与钠离子间离子交换作用	[3]
二氧化碳	—	31.10	酸碱中和除去自由碱和铝酸三钙	[19]
磷石膏	8.7	75.87	钙钠离子交换作用;残留酸中和作用	[23]
二氧化硫、模拟烟气	—	$\text{Na}_2\text{O}<1$	酸碱中和除去自由碱和方钠石	[20]
真菌 RM-28	8.2	—	代谢产酸	[24]
耐盐碱菌株 ZH-22	9.3	—	代谢产酸:酒石酸、草酸	[25]

基于钙钠离子交换作用实现碱性调控,同时石膏的添加量会影响碱性调控效果。COURTNEY 等^[26]发现,石膏能有效降低赤泥的碱性和可交换钠含量,有利于植物生长。石膏用量为 5%时,通过置换赤泥中可交换钠使其 pH 降低至 8.9 左右,这将有助于赤泥土壤化的形成^[27]。添加磷石膏后赤泥的 pH 有所降低,在赤泥处置区表面深度为 0~20 cm和 40~60 cm,赤泥 pH 分别为 8.3~8.5 和 8.4~9.5^[28]。

在有机质如泥炭土、木质纤维素废渣、腐殖酸和有机酸等作用下可降低赤泥碱性,采用有机酸中和赤泥碱性机理如图 3 所示^[29]。廖建雄等^[30]采用添加木质纤维素废渣和微生物对赤泥进行碱性调控,结果表明,二者质量比为 7:3 时可实现赤泥 pH 由 11.08 降至 8.35。房超等^[31]研究表明,泥炭土可显著降低赤泥的碱性,家禽粪肥可以改善赤泥团聚体结构和孔隙分布,有利于碱性物质的迁移,从而降低赤泥碱性^[28]。LI 等^[32]研究表明,柠檬酸可降低赤泥碱性,同时提供有机碳改善赤泥理化性质,但该方法成本较高。

微生物驱动的碱性调控是利用微生物代谢产酸降低赤泥碱性从而改善环境的策略^[33]。该方法成本低,在赤泥堆场碱性调控方面应用前景较好。从赤泥中分离出一种真菌 RM-28,该真菌可将赤泥 pH 从 11.8 显著降至 8.2^[24]。宋建等^[25]从赤泥堆场筛选出一株耐盐碱菌株可降低赤泥 pH 至 9.3 并保持较长时间。

碱性调控是改善赤泥理化性质、促进赤泥土壤化的关键环节。添加石膏、有机质改良剂、微生物筛选及代谢产酸能够改良赤泥理化性质,降低赤泥碱

性。其中,微生物代谢产酸调控赤泥碱性在赤泥堆场碱性调控及赤泥土壤化应用方面具有良好的应用前景。但基于赤泥独特的理化性质,筛选出合适的产酸菌较为困难,未来仍需深入研究解决菌种的筛选、接种环境的配置等问题^[15]。

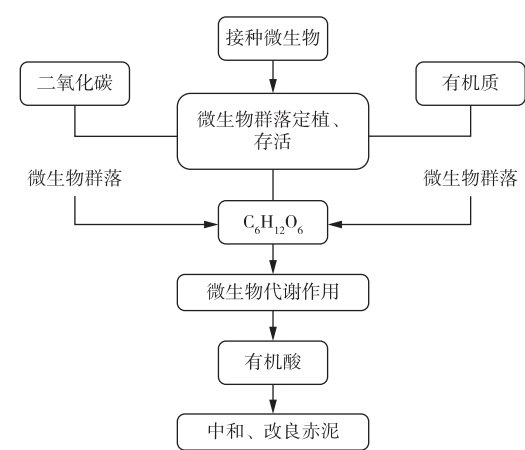


图 3 有机酸中和赤泥碱性机理

Fig. 3 Alkaline regulation of red mud with organic acids

3 土壤化调控

赤泥成分复杂但严重缺乏有机质和营养成分,且透气性差、易板结,颗粒物不能形成合理的团聚体,持水保肥能力差。因此,仅对赤泥进行碱性调控并不具备植物生长的基本条件,还需要进行土壤化调控。土壤化调控主要集中在石膏、有机质改良剂和微生物筛选等方面,可在一定程度改善赤泥的土壤特性。表 2 总结了使用不同改良剂对赤泥基质土壤化调控研究。

表2 使用不同改良剂对赤泥基质进行土壤化调控

Table 2 Soilification regulating of red mud with various ameliorant

改良剂	基质基本性能				改良剂作用	参考文献
	电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	可交换钠 比例	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率/%		
硫酸、含钙复盐	3.14	降低	1.13	增加	促进颗粒团聚体的形成	[34]
泥炭土、蛭石、珍珠岩	—	—	0.472	82.19	促进颗粒间团聚、提高持水性	[31]
石膏、有机肥料	2.1	降低	降低	—	降低可交换钠含量、容重	[26]
石膏、堆肥	0.365	5.42%	1.1	64.3	降低容重、促进颗粒团聚体的形成	[35]
石膏、有机质	降低	降低	0.81	略有增加	促进颗粒团聚体形成, 增加微生物活性、提供养分	[27]

石膏对于改良赤泥加速土壤化过程具有重要作用。它可以有效降低可交换钠比例,可交换钠的变化对赤泥团聚体粒径分布以及团聚体稳定性有显著影响。石膏能增加赤泥中钙和镁的含量,促进植物生长^[26]。磷石膏可以提供过量钙离子,有机物和黏土颗粒之间通过阳离子结合可以改善宏观团聚体的形成。LI等^[27]在采用海水对赤泥进行处理后,进一步通过添加石膏和有机质改良,添加5%石膏,可交换钠比例从64%降低至38%。磷石膏和家禽粪肥的添加显著增加了赤泥团聚体中2~1 mm的比例,提高了赤泥0~20 cm和20~40 cm层的平均重量直径,但在40~60 cm层效果不明显^[28]。采用硫酸和含钙复盐对赤泥进行土壤化调控,赤泥中可溶性盐含量明显降低,同时赤泥粒径从1.25 μm 增加到17.5 μm ,促进颗粒团聚体的形成,提高其孔隙率^[34]。

有机质如木质纤维素废渣、泥炭土、腐殖酸、堆肥、污泥等通过改善有效水容量、有机养分、容重进而实现赤泥基质的改良。LI等^[27]发现,添加6%的

污泥或6%的家禽粪肥增加了泥浆中可交换阳离子含量,有助于可交换钠比例降低至5%~11%;相比于家禽粪肥,污泥能够提供更多的有机碳含量,在可溶性有机碳含量、土壤微生物群落的大小和活性方面则相反。木质纤维素废渣和复合微生物菌剂联合使用增加了有机质及有效水容量,分别从6.13 g/kg增至24.92 g/kg,8.80%增至19.17%^[30]。房超等^[31]认为,蛭石和珍珠岩在降低赤泥容重、促进颗粒间团聚、提高持水性方面有较好效果。

从赤泥堆场中筛选耐盐碱微生物通过新陈代谢作用,能够较好改善赤泥理化性质。宋建等^[25]在赤泥中发现了一种耐盐碱细菌ZH-22,提高大颗粒含量、促进颗粒间团聚及其稳定性;该菌株在赤泥中存活良好并促进了微生物群落数量及多样性。RM-28是一种从赤泥中分离出的真菌,该真菌可显著降低赤泥的毒性及电导率,有效促进磷酸三钙的溶解,提高了磷的生物利用度^[24]。微生物改良赤泥主要原理如图4所示^[2]。

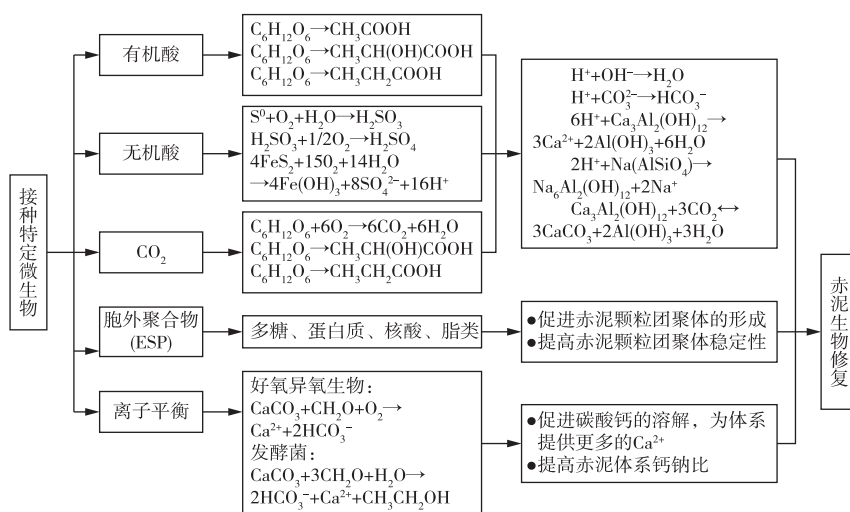


图4 微生物改良赤泥主要原理

Fig. 4 Mechanism of amelioration of red mud with microorganisms

石膏改良剂能够降低赤泥高盐度、促进颗粒团聚、提高渗透系数。有机质可以为植物提供营养物质,与金属阳离子形成稳定的络合物,稳定土壤结构,为微生物提供能量来源。耐盐碱微生物在土壤化调控中显示出巨大的潜力,可以在一定程度实现赤泥基质的改良。经过人为干预,赤泥的土壤特性得到改善,但是赤泥的土壤化演变过程尚缺乏系统研究。对赤泥土壤化调控过程土壤特性变化、有机质累积和分解土壤微生物群落之间相互作用的进一步研究将有助于我们对赤泥土壤化调控的理解。

尽管在赤泥土壤化调控方面已经开展了大量相关研究,但仅集中于赤泥基质有机养分、孔隙度、团聚体、容重、可交换钠等特性的调控,未能从土壤自身特性入手开展赤泥土壤化调控研究。土壤特性包括容重、孔隙度、渗透性、饱和含水量、腐殖质、坚实度、粘着力、塑性等。土壤结构能够综合反映植物生长的水、气、热条件;土壤水分是土壤内生物活动、养分转化、植物生长的必须条件;土壤渗透性与土壤孔隙、机械组成、结构、坚实度、盐分含量、含水量以及土壤湿度有关,测定土壤渗透性能可以了解土壤水分动态规律,为土壤改良,防止水土流失提供重要依据;腐殖质是植物养分来源,可增强土壤的吸水、保肥能力,提高粘重土壤的疏松度和通气性,促进土壤微生物的活动。土壤特性决定其理化性质进而影响植物生长,未来研究需综合考虑土壤本身特性与赤泥理化性质相结合,进行更有效的土壤化调控实现赤泥基质的改良,加快赤泥土壤化进程。

4 植物修复

对赤泥进行植物修复是促进土壤发育和赤泥无害化处置的有效途径^[26]。在碱性调控和土壤化调控的基础上,进一步通过植物生长可实现赤泥堆场生态修复。植物修复可以减少风和水的侵蚀,减少环境污染,促进有机物的累积;植物修复能够促进微生物群落的多样性和数量,进而改善赤泥土壤基质。

采用硫酸和含钙复盐对赤泥改良后,可实现黑麦草 92% 的发芽率,相比于土壤种植,其平均株高增加 68.97%,平均湿重提高 86.04%,平均干重降低 96.24%^[34]。房超等^[31]对赤泥改良后能够满足黑麦草的正常生长,显著提高其发芽率。COURTNEY 等^[26]发现改良后的赤泥基质草地物种可以生长,农业草生长一年后赤泥基质养分含量降低,农业草将

被能够适应贫瘠条件生长的物种取代;在五年时间里灌木物种能够在植物残体上定植,同时实现营养循环。

由于赤泥性质与盐碱土类似,一般植物物种在高碱、高盐环境中较难存活,赤泥贫瘠的理化性质也会限制植物的生长^[14]。因此,针对赤泥特殊的性质,筛选耐性植物进行植物修复是实现堆场生态修复的可行性方法。盐生植物对盐碱度有较好的耐性,能够去除钠离子,降低可交换钠含量;释放有机酸刺激微生物代谢生长^[36]。*Terminalia arjuna*、*Pongamia pinnata*、*Pennisetum pedicellatum*、*Chloris virgata* 等盐生植物具有较强的耐盐碱能力,*Chloris virgata* 可从根际土壤中吸收 17% 的 Na^+ 并累积至茎叶组织,有利于植物生长^[14]。ALSHAAL 等^[37]发现芦苇能降低土壤盐分和 pH,提高土壤微生物数量和酶活性。此外,在盐碱土壤中适应性较强的野生抗盐植物如盐蒿等,抗盐碱牧草如大米草、高冰草、小花碱茅草等,抗盐灌木、花卉如珠美海棠、沙枣、胡杨等,可考虑种植在改良后的赤泥基质中^[38]。基于适当改良的赤泥基质,通过种植耐盐碱植物进行植物修复也是赤泥堆场生态修复研究的重点方向。

对改良后的赤泥进行植物修复已经开展了探索试验,但仍缺乏系统研究。建立可持续的植物群落是实现生态修复最有希望的发展方向。针对赤泥基质修复过程中的一些科学问题还亟待解决,如耐盐碱植物的筛选、植物生长过程对赤泥基质成份演化的影响、植物生长过程赤泥中有害元素迁移以及对植物生长的影响、植物生长过程中微生物群落丰富度和数量的变化等。

5 工程实践

赤泥土壤化的试验研究成果推动了工程实践应用。为了降低工程化实施的成本,主要通过添加酸性石膏、生物质、有机肥等廉价废弃物改良赤泥。中铝郑州有色金属研究院开发了赤泥堆场无土原位修复技术,以工业、农业废弃物为赤泥改良剂,结合耐性微生物进行赤泥盐碱调控、团聚体构建、养分调理,快速实现赤泥的土壤化(图 5)。通过微生物的生长繁衍和先锋作物生长在赤泥堆场构建完整的生态群落,利用微生物驱动和植被修复协同机制提高赤泥堆场生态系统的可持续性和稳定性。工程实践表明,在修复赤泥堆场上牧草、冬小麦等作物生长状况良好,第一年植被绿化覆盖率大于 95%,第二年实现耐性植物的自然繁衍和生长,并且赤泥的盐碱

性和土壤结构得到显著改善。工程实践证实了赤泥土壤化技术的可行性,对于赤泥土壤化技术的推广

应用还需在降低改良剂成本、工程化实施、环境风险评估等方面进一步研究。

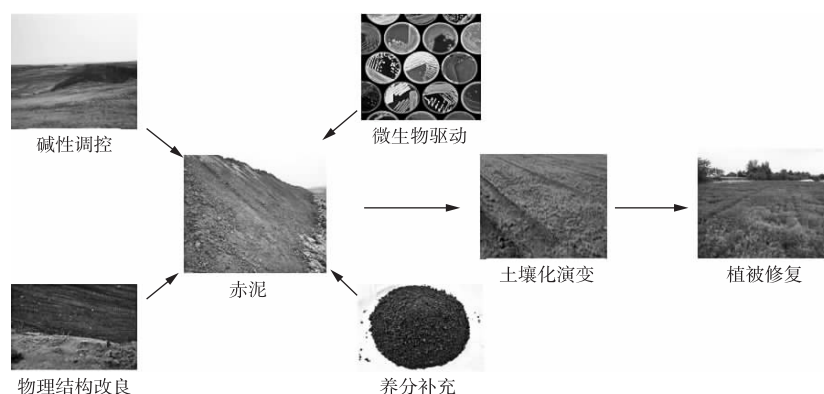


图5 赤泥土壤化调控与植物修复示意图

Fig. 5 Schematic of soilification regulation and phytoremediation of red mud

6 结论与展望

1) 赤泥大量堆存存在极大的环境安全隐患,赤泥的安全处置依然是一个世界性的难题,对赤泥改良进行土壤化植物修复是规模化处置赤泥的有效方法。赤泥土壤化修复方面的研究工作主要包括堆场演化、碱性调控、土壤化调控、植物修复。自然风化过程赤泥可转化为类土基质,该过程演化周期较长,种植植物比较困难;耐性微生物对推动赤泥土壤化具有良好作用,但由于赤泥极端碱性环境下微生物难以生长,需要筛选合适的菌种;通过植物修复可改善赤泥物理结构、为微生物提供良好的代谢环境进而实现赤泥堆场的生态修复,但植物修复方面仍缺乏长期的成功经验。

2) 基于赤泥特殊的物理化学特性,探讨赤泥土壤化调控机制,定向调控赤泥理化性质,发展经济有效的调控技术,将有助于实现赤泥规模化、生态化处置。

3) 未来赤泥土壤化研究建议关注以下方向:基于赤泥堆场演化,提出赤泥堆场土壤化过程的物理化学特性调控方法;针对赤泥碱性调控问题,研究赤泥碱性调控机理,开发适用于赤泥土壤化的碱性调控技术;基于赤泥堆场耐性植物和微生物的基质改良特性,筛选典型耐性植物和微生物,开展赤泥土壤化和生态重建研究。

参考文献

[1] XUE S G, KONG X F, ZHU F, et al. Proposal for management and alkalinity transformation of bauxite

residue in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(13): 12822-12834.

[2] ZHU X B, WANG L, GUAN X M. An active dealkalization of red mud with roasting and water leaching [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 286: 85-91.

[3] LI Y W, JIANG J, XUE S G, et al. Effect of ammonium chloride on leaching behavior of alkaline anion and sodium ion in bauxite residue [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(10): 2125-2134.

[4] FEIGL V, UJACKZI E, VASZITA E, et al. Influence of red mud on soil microbial communities; Application and comprehensive evaluation of the Biolog EcoPlate approach as a tool in soil microbiological studies[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 903-911.

[5] OPRKAL P, MLADENOVIC A, ZUPANI N, et al. Remediation of contaminated soil by red mud and paper ash[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 1-10.

[6] GAUTAM M, AGRAWAL M. Influence of metals on essential oil content and composition of lemongrass (*Cymbopogon citratus* (D. C.) Stapf.) grown under different levels of red mud in sewage sludge amended soil[J]. Chemosphere, 2017, 175: 315-322.

[7] 薛生国, 吴雪娥, 黄玲, 等. 赤泥土壤化处置技术研究进展[J]. 矿山工程, 2015, 3(2): 13-18.

XUE S G, WU X E, HUANG L, et al. Research advances on soil formation of bauxite residues[J]. Mine Engineering, 2015, 3(2): 13-18.

[8] ZUBER S M, BEHNKE G D, NAFZIGER E D, et al. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois[J]. Soil and Tillage

- Research, 2017, 174: 147-155.
- [9] 朱锋, 李萌, 薛生国, 等. 自然风化过程对赤泥团聚体有机碳组分的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1174-1183.
- ZHU F, LI M, XUE S G, et al. Effects of natural weathering processes on the distribution characteristics of organic carbon and its composition in bauxite residue aggregates[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1174-1183.
- [10] KONG X F, GUO Y, XUE S G, et al. Natural evolution of alkaline characteristics in bauxite residue[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 224-230.
- [11] ZHU F, LIAO J X, XUE S G, et al. Evaluation of aggregate microstructures following natural regeneration in bauxite residue as characterized by synchrotron-based X-ray micro-computed tomography[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 155-163.
- [12] WU H, XUE S G, ZHU F, et al. The dynamic development of bacterial community following long-term weathering of bauxite residue[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 90: 321-330.
- [13] GUO Y, ZHU F, WU C, et al. Dynamic change and diagnosis of physical, chemical and biological properties in bauxite residue disposal areas[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(2): 410-421.
- [14] XUE S G, ZHU F, KONG X F, et al. A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (red mud)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 1120-1132.
- [15] 薛生国, 李晓飞, 孔祥峰, 等. 赤泥碱性调控研究进展[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 2815-2828.
- XUE S G, LI X F, KONG X F, et al. Alkaline regulation of bauxite residue: A comprehensive review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 2815-2828.
- [16] ZHANG Y X, SHI Q, LUO M X, et al. Improved bauxite residue dealkalization by combination of aerated washing and electrodialysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 364: 682-690.
- [17] CLARK M W, JOHNSTON M, REICHELTER-BRUSHETT A J. Comparison of several different neutralisations to a bauxite refinery residue: Potential effectiveness environmental ameliorants[J]. Applied Geochemistry, 2015, 56: 1-10.
- [18] KONG X F, LI M, XUE S G, et al. Acid transformation of bauxite residue: Conversion of its alkaline characteristics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324: 382-390.
- [19] 唐小辉, 徐刚, 刘润藻, 等. 赤泥使用石灰窑尾气脱碱的模拟实验[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(5): 142-150.
- TANG X H, XU G, LIU R Z, et al. Simulation experiments for dealkalization of red mud by limekiln gas[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(5): 142-150.
- [20] WANG X K, ZHANG Y H, LV F Z, et al. Removal of alkali in the red mud by SO₂ and simulated flue gas under mild conditions[J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2015, 34(1): 81-87.
- [21] ZHOU B X, CAO S T, CHEN F F, et al. Recovery of alkali from Bayer red mud using CaO and/or MgO[J]. Minerals, 2019, 9(5): 269-284.
- [22] LU G Z, ZHANG T A, MA L N, et al. Utilization of Bayer red mud by a calcification-carbonation method using calcium aluminate hydrate as a calcium source[J]. Hydrometallurgy, 2019, 188: 248-255.
- [23] LI Y W, LUO X H, LI C X, et al. Variation of alkaline characteristics in bauxite residue under phosphogypsum amendment[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(2): 361-372.
- [24] ANAM G B, REDDY M S, AHN Y H. Characterization of *Trichoderma asperellum* RM-28 for its sodic/saline-alkali tolerance and plant growth promoting activities to alleviate toxicity of red mud[J]. Science of the Total Environment, 2019, 662: 462-469.
- [25] 宋建, 王帝伟, 张晓晶, 等. 一株耐盐碱细菌的筛选及其在赤泥改良中的应用[J]. 河南大学学报, 2019, 49(1): 29-38.
- SONG J, WANG D W, ZHANG X J, et al. Isolation of an alkali-tolerant bacteria and its improvement of bauxite residue[J]. Journal of Henan University, 2019, 49(1): 29-38.
- [26] COURTNEY R, XUE S G. Rehabilitation of bauxite residue to support soil development and grassland establishment[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(2): 353-360.
- [27] LI Y Y, HAYNES R J, CHANDRAWANA I, et al. Properties of seawater neutralized bauxite residues and changes in chemical, physical and microbial properties induced by additions of gypsum and organic matter[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 223: 489-494.
- [28] XUE S G, ZHU F, KE W S, et al. Effect of phosphogypsum and poultry manure on aggregate-associated alkaline characteristics in bauxite residue[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 256: 1-10.
- [29] SANTINI T C, KERR J L, WARREN L A. Microbially-driven strategies for bioremediation of

- bauxite residue[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 293:131-157.
- [30] 廖建雄, 汤茜, 周龙武, 等. 木质纤维素废渣对赤泥的脱碱及改良研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(1): 31-36.
- LIAO J X, TANG Q, ZHOU L W, et al. Studies of lignocellulose waste residue on dealkalization and amendment of red mud[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(1):31-36.
- [31] 房超, 李金鑫, 余鹏, 等. 基于泥炭土、蛭石和珍珠岩的混配对赤泥土壤化改良的试验研究[J]. *山东化工*, 2017, 46(6):146-148.
- FANG C, LI J X, YU P, et al. Experimental study on soil treatment of red mud with peat, vermiculite and perlite mixture[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2017, 46(6):146-148.
- [32] LI W, ZHU X B, TANG S. Selective separation of sodium from red mud with citric acid leaching[J]. *Separation Science and Technology*, 2017, 52(11): 1876-1884.
- [33] WU H, LIAO J X, ZHU F, et al. Isolation of an acid producing bacillus sp. EEEL02; potential for bauxite residue neutralization[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(2):343-352.
- [34] 曾华, 吕斐, 胡广艳, 等. 拜耳法赤泥脱碱新工艺及其土壤化研究[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(3):1-7.
- ZENG H, LYU F, HU G Y, et al. Study on new process of removing alkali from red mud by Bayer process and its soil formation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(3):1-7.
- [35] COURTNEY R, HARRINGTON T, BYRNE K A. Indicators of soil formation in restored bauxite residues[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58:63-68.
- [36] GRAEFE M, KLAUBER C. Bauxite residue issues: IV. old obstacles and new pathways for in situ residue bioremediation[J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 108(1/2): 46-59.
- [37] ALSHAAL T, DOMOKOS-SZABOLCSY E, MARTON L, et al. Phytoremediation of bauxite-derived red mud by giant reed[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, 11(3):295-302.
- [38] 王苗, 齐树亭, 葛美丽. 盐生植物对滨海盐渍土生物改良的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(7): 2898-2899.
- WANG M, QI S T, GE M L. Research progress on the biological improvement of the coastal saline soil by halophytes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(7):2898-2899.