



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202111076 中图分类号 X705 文献标识码 A

张宇玲, 成官文, 韦桥权, 等. MgCl₂ 和脱水矿泥对赤泥盐碱性的调控[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 937-945. [ZHANG Yuling, CHENG Guanwen, WEI Qiaoquan, et al. Conditioning of salinity and alkalinity in red mud by MgCl₂ and dehydrated mineral slime[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 937-945.]

MgCl₂ 和脱水矿泥对赤泥盐碱性的调控

张宇玲¹, 成官文^{1,✉}, 韦桥权¹, 徐晓宇¹, 岳远隋¹, 徐敏¹, 冯杰²,
农国武²

1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006; 2. 中国铝业股份有限公司广西分公司, 百色 531499

摘要 针对赤泥盐碱性过高造成资源化利用难的问题, 采用 MgCl₂ 和氧化铝工业固体废物脱水矿泥对赤泥进行盐碱性调控, 并依据赤泥的 pH、电导率、碱性阴离子(OH⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、AlO₂⁻)和可溶性盐分阳离子(K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺)质量分数以及黑麦草种子发芽率结果表征盐碱性调控效果。结果表明, 当赤泥投加 7‰ MgCl₂, 并与脱水矿泥按 1:4 质量比混合处置时, 其 pH 从 11.36 降至 8.43, 电导率从 1.557 mS·cm⁻¹ 降至 1.166 mS·cm⁻¹, 黑麦草种子发芽率达到 99.67%。赤泥 pH、电导率以及 OH⁻、CO₃²⁻、AlO₂⁻、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺ 质量分数随着 MgCl₂ 投加量和脱水矿泥混合比例的增加而降低, 黑麦草种子发芽率因此而随之增加, 显示了良好的盐碱性调控效果。本研究结果可为氧化铝工业固废赤泥盐碱性调控提供参考。

关键词 赤泥; MgCl₂; 脱水矿泥; 盐碱性调控; 种子发芽率

广西壮族自治区、云南省堆积型铝土矿储量巨大、资源丰富, 铝土矿山建设与氧化铝生产规模巨大。据统计, 仅广西壮族自治区百色市年产氧化铝就达到 1.0×10⁷ t, 且每生产 1 t 氧化铝约产生 1.0~1.5 t 赤泥^[1-3]和 3.0~4.5 t 矿泥, 赤泥和矿泥累计堆存量分别在 1.0×10⁹ t 以上和 3.0×10⁹ t 以上。赤泥具有碱性强、盐分高、环境风险高和资源化利用难等特点^[4-8]; 矿泥具有含水率高、粒径小、颗粒表面带负电、高比阻和脱水难等特点^[9]。由于缺乏经济可行的资源化综合利用的技术, 目前赤泥和矿泥主要以堆存为主。这不但占用大量土地资源, 还可能存在堆存库溃坝、土壤及水污染等环境隐患, 严重制约着氧化铝行业的可持续发展^[10]。

赤泥盐碱性调控是能否解决赤泥规模化的关键所在。目前, 国内外对赤泥盐分调控研究较少, 主要研究赤泥碱性调控。赤泥碱性调控方法主要有水洗法、无机酸中和法、石膏法、海水法和卤水法等方法^[5]。其中, 水洗法是水过滤的处置方法, 难以实现赤泥中化学结合碱的有效调控, 且耗水量大, 技术经济性差^[1,5]。无机酸中和法是利用无机酸与赤泥中自由碱和化学结合碱发生中和反应来降低赤泥碱性^[11-12], 但降低赤泥碱性的同时可能存在与赤泥中氢氧化铝、各种铝酸盐发生反应, 加重铝的二次溶出及其环境危害。石膏法、海水法和卤水法是利用 Ca²⁺、Mg²⁺与赤泥中的碱性阴离子发生反应降低赤泥 pH^[5,13-17], 且可提供 Ca²⁺、Mg²⁺, 有助于植物生长, 利于赤泥原位复垦和生态恢复。

收稿日期: 2021-11-16; 录用日期: 2022-02-17

基金项目: 中国铝业股份有限公司科技攻关项目(gxzz201903); 广西重点研发计划(桂科 AB20297039)

第一作者: 张宇玲(1998—), 女, 硕士研究生, E-mail: 485640646@qq.com; ✉通信作者: 成官文(1962—), 男, 博士, 教授, 1423076413@qq.com

铝土矿矿山采空区周边坡地和耕地可交换 Mg^{2+} 质量分数低^[18], 而 Mg^{2+} 是植物形成叶绿素不可缺少的元素, 在光合和呼吸作用中起到不可或缺作用^[19]。外源施加镁肥能够增强植物光合作用^[20]。由崔姗姗等^[21]利用 $CaCl_2$ 废液中 $CaCl_2$ 、 $MgCl_2$ 和酸对赤泥进行脱碱处置的研究可知, $MgCl_2$ 能够降低赤泥碱性。为推进赤泥、矿泥规模化处置和矿区生态恢复工作, 本研究采用 $MgCl_2$ 和脱水矿泥对赤泥进行盐碱性调控, 以期对赤泥盐碱性调控, 并与矿泥一起进行原位矿山采空区回填和地貌景观修复、复垦地块土壤生态恢复提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验原料

赤泥和脱水矿泥取自中国铝业股份有限公司广西分公司。赤泥含水率为 36.82%、pH 为 11.33~11.38、电导率为 1.453~1.677 $mS \cdot cm^{-1}$; 脱水矿泥含水率为 58.10%、pH 为 6.55~6.61、电导率为 0.213~0.352 $mS \cdot cm^{-1}$ 。赤泥和脱水矿泥主要化学成分见表 1, 无水氯化镁 ($MgCl_2$) 为分析纯。

表 1 赤泥、脱水矿泥的化学成分
Table 1 Chemical compositions of red mud and dehydrated mineral slime %

供试样品	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	Na_2O	MgO	其他
赤泥	12.4	29.6	37.9	-	6.5	6.7	-	6.9
脱水矿泥	39.9	23.6	9.3	6.8	0.5	0.8	2.3	16.8

注: -表示未检出。

1.2 实验方法

分别称取质量分数为 0、1‰、2‰、3‰、4‰、5‰、6‰、7‰的 $MgCl_2$ 对赤泥进行控碱, 经 3 d 陈化后采集控碱赤泥进行分析, 并将控碱赤泥与脱水矿泥按 3:7、1:3 和 1:4 质量比进行充分混合, 降低赤泥盐碱性, 形成类土, 5 d 后采集类土进行分析。每种处理重复 3 次。

1.3 分析方法

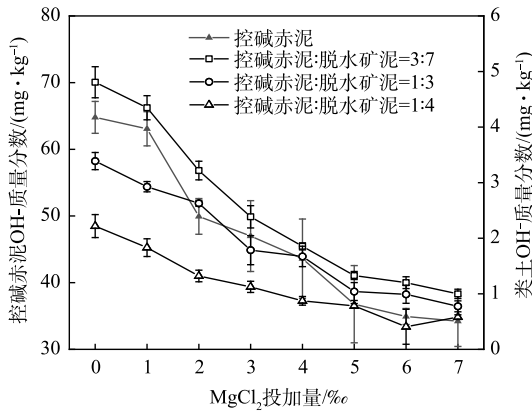
控碱赤泥和类土的 pH 及 OH^- 质量分数采用 pH 计 (pHS-3E, 上海仪电科学仪器股份有限公司) 测定; 电导率采用电导率仪 (DDS-801, 贵阳学通仪器仪表有限公司) 测定; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 质量分数采用双指示剂中和滴定法^[22] 测定; K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 质量分数采用电感耦合光谱法 (Optima 7000DV, PerkinElmer) 测定, 并将 Al^{3+} 质量分数转化为 AlO_2^- 质量分数^[23]; 采用台式 X 射线衍射仪 (X'Pert3 Power, Malvern Panalytical Limited)、场发射扫描电镜 (JSM-7900F, 日本电子株式会社) 进行矿相分析与表征。

2 结果与讨论

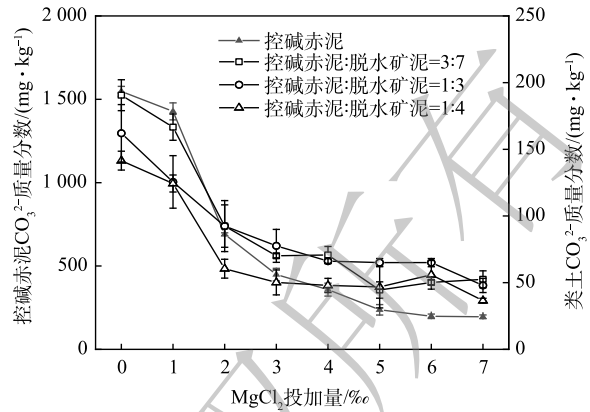
2.1 $MgCl_2$ 和脱水矿泥对赤泥碱性的影响

从图 1 和图 2 可以看出, 赤泥中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 AlO_2^- 质量分数和 pH 随着 $MgCl_2$ 投加量的增加而降低; 赤泥中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 AlO_2^- 质量分数和 pH 随着脱水矿泥混合比例的增加而降低, 但赤泥中 HCO_3^- 质量分数随着脱水矿泥混合比例的增加而升高。

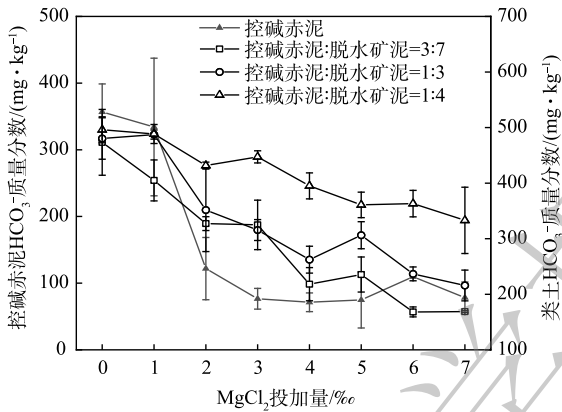
赤泥的碱性物质主要由 $NaOH$ 、 Na_2CO_3 、 $NaHCO_3$ 、 $NaAl(OH)_4$ 等自由碱和方钠石 ($[Na_6Al_6Si_6O_{24}] \cdot [2NaX \text{ 或 } Na_2X]$)、钙霞石 ($[Na_6Al_6Si_6O_{24}] \cdot 2[CaCO_3]$)、方解石 ($CaCO_3$) 等化学结合碱组成。赤泥的自由碱和化学结合碱溶解会产生大量游离碱性阴离子 (OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 AlO_2^-), 是导致赤泥 pH 较高的原因^[5,24] (式 (1)~式 (3))。Mg 为碱土元素, 极易与游离碱性阴离子 (OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 AlO_2^-) 发生反应, 生成新化合物或化学结合碱, 但生成顺序取决于投加的 Mg^{2+} 、游离碱性阴离子的质量分数及 $Al(OH)_3$ 、 $Mg(OH)_2$ 和 $MgCO_3$ 等化合物的溶度积常数。随着 $MgCl_2$ 的投加, 赤泥中自由碱和化学结合碱溶解产生大量游离碱性阴离子, 打破了这一体系的碱度平衡, 游离碱性阴离子不断与 Mg^{2+} 发生沉淀反应, 生成三水铝石 ($Al(OH)_3$)、水镁石 ($Mg(OH)_2$) 和菱镁矿 ($MgCO_3$) 等难溶固体物质 (式 (4)~式 (7))^[5,21,25], 从而使赤泥 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 AlO_2^- 质量分数和 pH 降低。



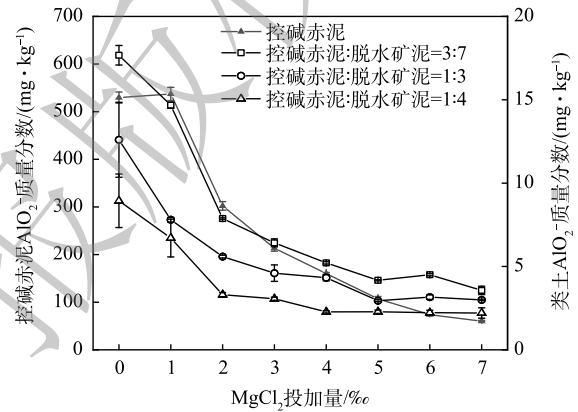
(a) $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥OH⁻的影响



(b) $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥CO₃²⁻的影响



(c) $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥HCO₃⁻的影响



(d) $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥AlO₂⁻的影响

图 1 $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥碱性阴离子的影响

Fig. 1 Influence of $MgCl_2$ addition and dehydrated mineral slime mixture ratio on alkaline anions in red mud

脱水矿泥的物质组分源于岩溶风化性堆积矿,除了有大量硅酸盐、铝酸盐组分外,还有碳酸岩残余碎屑及其钙、镁、铁、锰等物质。当控碱赤泥与脱水矿泥混合处置时, pH 为 6.55~6.61 的脱水矿泥会不断稀释、中和控碱赤泥中的碱性阴离子,并与控碱赤泥中的这些碱性阴离子进行与投加 $MgCl_2$ 类似的反应(式(4)~式(7))^[5,21,25],使控碱赤泥中的 OH^- 、 CO_3^{2-} 和 AlO_2^- 质量分数和 pH 进一步降低; pH 的降低打破了式(8)所示的 CO_3^{2-} 水解平衡,反应向右进行^[7],使 HCO_3^- 质量分数随着脱水矿泥混合比例的增加而升高。

可见, Mg^{2+} 和脱水矿泥能够打破赤泥中原有的碱度平衡,不断促进赤泥中的碱性阴离子溶出,并发生沉淀反应,生成三水铝石、水镁石、菱镁矿等难溶固体物质(式(4)~式(7))。碱度平衡的动态变化及其次生的氢氧化物、碳酸盐矿物的生成可能是赤泥碱性降低的主要原因。因此,

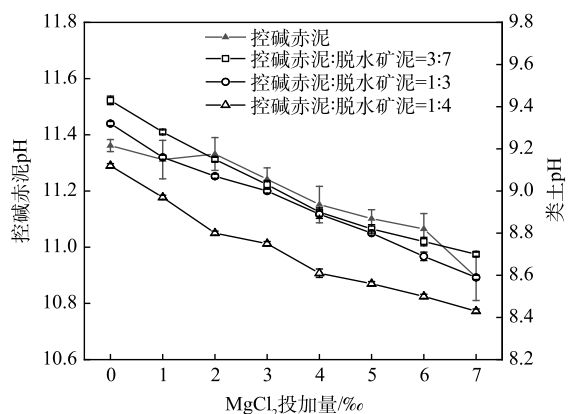
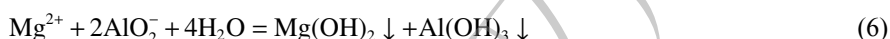
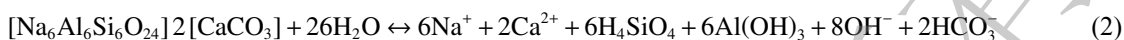


图 2 $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥 pH 的影响

Fig. 2 Influence of $MgCl_2$ addition and dehydrated mineral slime mixture ratio on pH in red mud

当赤泥的 MgCl_2 投加量为 7‰，并与脱水矿泥按 1:4 质量比混合处置时，其 pH 从 11.36 降至 8.43，低于 8.5。该 pH 值满足矿山回填的要求^[26]。因此，采用 MgCl_2 和脱水矿泥对赤泥控碱是可行的，可为氧化铝工业产生的赤泥规模化处置提供依据。



2.2 MgCl_2 和脱水矿泥对赤泥盐分的影响

从图3和图4可以看出，赤泥的可溶性盐分阳离子 (K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+}) 质量分数和电导率随着 MgCl_2 投加量的增加而升高，随着脱水矿泥混合比例的增加而降低。其中，与未投加 MgCl_2 的赤泥相比， MgCl_2 投加量为 7‰ 的控碱赤泥可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 质量分数分别增加 107.45、659.54、

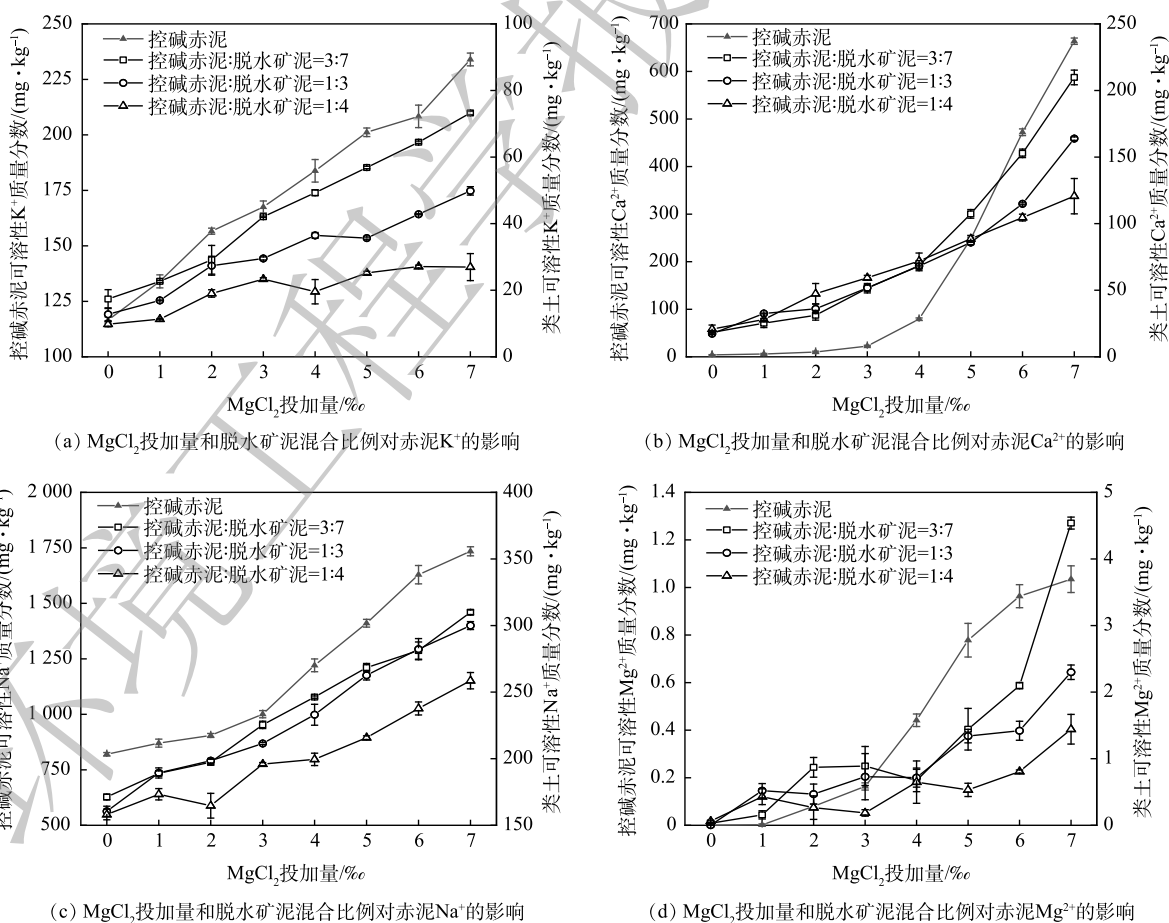


图3 MgCl_2 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥可溶性盐分阳离子的影响

Fig. 3 Influence of MgCl_2 addition and dehydrated mineral slime mixture ratio on the soluble salt cations in red mud

914.58 $mg \cdot kg^{-1}$, 电导率从 $1.557 mS \cdot cm^{-1}$ 增加至 $3.076 mS \cdot cm^{-1}$, 均大于 $1.00 mS \cdot cm^{-1}$ 。该条件下, 仅限极耐作物能生长^[27](表 2)。与 $MgCl_2$ 投加量为 7‰ 的控碱赤泥相比, $MgCl_2$ 投加量为 7‰ 的控碱赤泥与脱水矿泥按 1:4 质量比混合处置后, 控碱赤泥的可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 质量分数分别减少了 207.03、542.95、1 476.00 $mg \cdot kg^{-1}$, 电导率从 $3.076 mS \cdot cm^{-1}$ 降至 $1.166 mS \cdot cm^{-1}$ 。

电导率的大小能反映土样的水溶性盐分的质量分数, 与植物生长状况密切相关^[27-28]。投加的 $MgCl_2$ 可与赤泥中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 AlO_2^- 发生反应, 打破了赤泥中原有的碱度平衡, 能促进方钠石、钙霞石、方解石等化学结合碱的溶解(式(1)~式(3))^[5,24], 使赤泥的可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量分数随着 $MgCl_2$ 投加量的增加而升高, 进而导致赤泥的电导率上升。电导率为 $0.213 \sim 0.352 mS \cdot cm^{-1}$ 的脱水矿泥会不断稀释赤泥中的盐分离子, 使赤泥中可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量分数随着脱水矿泥混合比例的增加而降低, 从而导致赤泥电导率下降。 $MgCl_2$ 能与赤泥中自由碱发生沉淀反应, 从而打破赤泥原有的碱度平衡, 促进化学结合碱的溶解, 这可能是导致可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量分数和电导率增加的主要原因; 同时, 大量脱水矿泥的稀释作用可能是导致可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量分数和电导率降低的主要原因。

2.3 $MgCl_2$ 和脱水矿泥对类土种植黑麦草种子发芽率的影响

从图 5 可以看出, 当 $MgCl_2$ 投加量为 7‰ 的控碱赤泥与脱水矿泥按 1:4 质量比混合处置的类土种植黑麦草种子发芽率达到 99.67%, 且类土种植的黑麦草种子发芽率随着 $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例的增加而升高。

赤泥具有碱性强、盐分高等特点, 其盐碱性胁迫严重影响黑麦草种子萌芽。陈雅琦等^[29] 和 WANG 等^[30] 发现, 盐、碱对植物的危害从大到小依次为盐碱性胁迫、碱性胁迫和盐性胁迫。 $MgCl_2$ 与赤泥中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 AlO_2^- 等碱性阴离子发生沉淀反应, 可将赤泥盐碱性

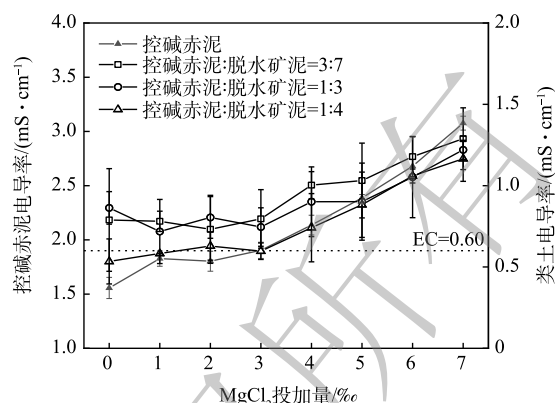


图 4 $MgCl_2$ 投加量和脱水矿泥混合比例对赤泥电导率的影响

Fig. 4 Influence of $MgCl_2$ addition and dehydrated mineral slime mixture ratio on conductivity in red mud

表 2 菜田土壤盐分分级参考标准(土水比 1 g:5 mL 测定电导率)^[27]

Table 2 Reference standard for soil salinity classification in vegetable fields (soil-water ratio 1g:5mL to determine conductivity)

电导率/($mS \cdot cm^{-1}$)	盐分等级	对作物的影响
<0.25	极低盐度	一般作物生长正常
0.25 ~ 0.60	低盐度	对敏感作物有障碍
0.60 ~ 0.80	中盐度	多数作物生长受阻
0.80 ~ 1.00	高盐度	仅耐盐作物能生长
≥ 1.00	超高盐度	仅极耐盐作物能生长

注: 蔬菜正常生长的电导率临界值为 $0.60 mS \cdot cm^{-1}$ 。

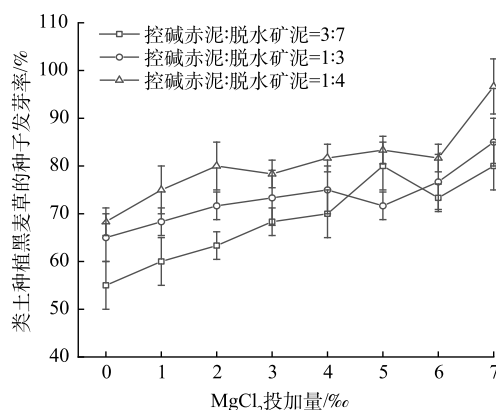


图 5 $MgCl_2$ 添加量和脱水矿泥混合比例对黑麦草种子发芽率的影响

Fig. 5 Influence of $MgCl_2$ addition and dehydrated mineral slime mixture ratio on germination rate of ryegrass seeds

胁迫转为碱性更弱的盐碱性胁迫或盐性胁迫，从而减轻了赤泥的盐碱性对黑麦草种子萌发的抑制作用，提高了种子发芽率。无盐碱性胁迫的脱水矿泥为赤泥中的盐碱性提供了稀释与中和作用，进一步减轻了赤泥盐碱性对黑麦草种子的危害，提高种子发芽率。 $MgCl_2$ 和脱水矿泥通过沉淀、稀释和中和等作用降低赤泥的盐碱性，从而降低溶液渗透势，使黑麦草种子相对容易吸水，促进种子萌发^[31]，为赤泥规模化处置和矿区生态恢复奠定基础。

2.4 赤泥、控碱赤泥、脱水矿泥和类土的矿相组分和形态特征分析

赤泥、 $MgCl_2$ 投加量为7‰的控碱赤泥、脱水矿泥和 $MgCl_2$ 投加量为7‰的赤泥与脱水矿泥按1:4混合处置的类土XRD谱图见图6，矿相组成见表3，SEM-EDS图见图7。从图6可知，赤泥的化学结合碱有方钠石、钙霞石、方解石。从表3可知，赤泥经过 $MgCl_2$ 和脱水矿泥处置后，赤泥中的三水铝石、水镁石和菱镁矿等难溶固体的质量分数增加，方钠石、钙霞石和方解石等化学结合碱的质量分数减少。从图7可以看出，赤泥的微观结构相对松散，含有较多细小颗粒物，而经过 $MgCl_2$ 和脱水矿泥处置的赤泥粒径明显增加，形成大团聚体，且Na、Mg、Al等元素质量分数发生明显改变。其中，与未处置赤泥相比，控碱赤泥Na质量分数减少6.25%，Mg、Al质量分数依次增加0.59%和3.27%；类土Na质量分数减少12.71%，Mg、Al质量分数依次增加0.58%和11.62%。

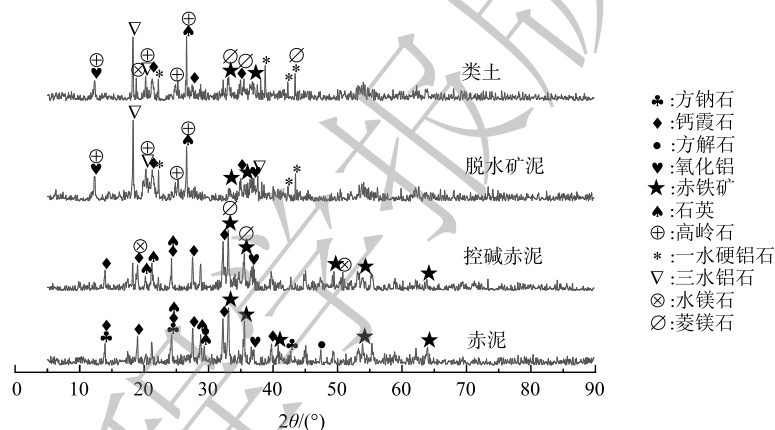


图6 赤泥、控碱赤泥、脱水矿泥和类土XRD谱图

Fig. 6 XRD spectra of red mud, alkali-controlled red mud, dehydrated mineral slime and soil-like

$MgCl_2$ 和脱水矿泥能够与赤泥中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 AlO_2^- 发生沉淀反应，生成三水铝石、水镁石和菱镁矿等难溶固体物质(式(4)~式(7))附着于赤泥表面，促进赤泥中细颗粒向粗颗粒和块矿结构转变，粒径变大，进而形成大团聚体^[14]，且赤泥中Mg、Al质量分数增加；同时， OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 AlO_2^- 等碱性阴离子的消耗，打破了赤泥中原有的碱度平衡，促进方钠石、钙霞石和方解石等化学结合碱溶解，使赤泥中Na质量分数减少。赤泥的粒径增大和碱性组分Na质量分数的减少可加快赤泥土壤化^[32]，可为赤泥原位回填和矿区生态恢复提供科学依据。

表3 赤泥、控碱赤泥、脱水矿泥和类土矿相组成
Table 3 Mineral phase contents of red mud, alkali-controlled red mud, dehydrated mineral

矿相	slime and soil-like				/%
	赤泥	控碱赤泥	脱水矿泥	类土	
方钠石	9.5	0	0	0	
钙霞石	24.1	23.1	4.4	6.5	
方解石	7.1	0	0	0	
高岭石	0	3.6	24.9	22.5	
一水硬铝石	0	0	14.3	11.0	
三水铝石	3.6	9.0	25.5	24.5	
水镁石	0	0.3	2.7	4.1	
菱镁矿	0	33.9	0.9	8.8	
石英	17.8	11.8	10.5	9.5	

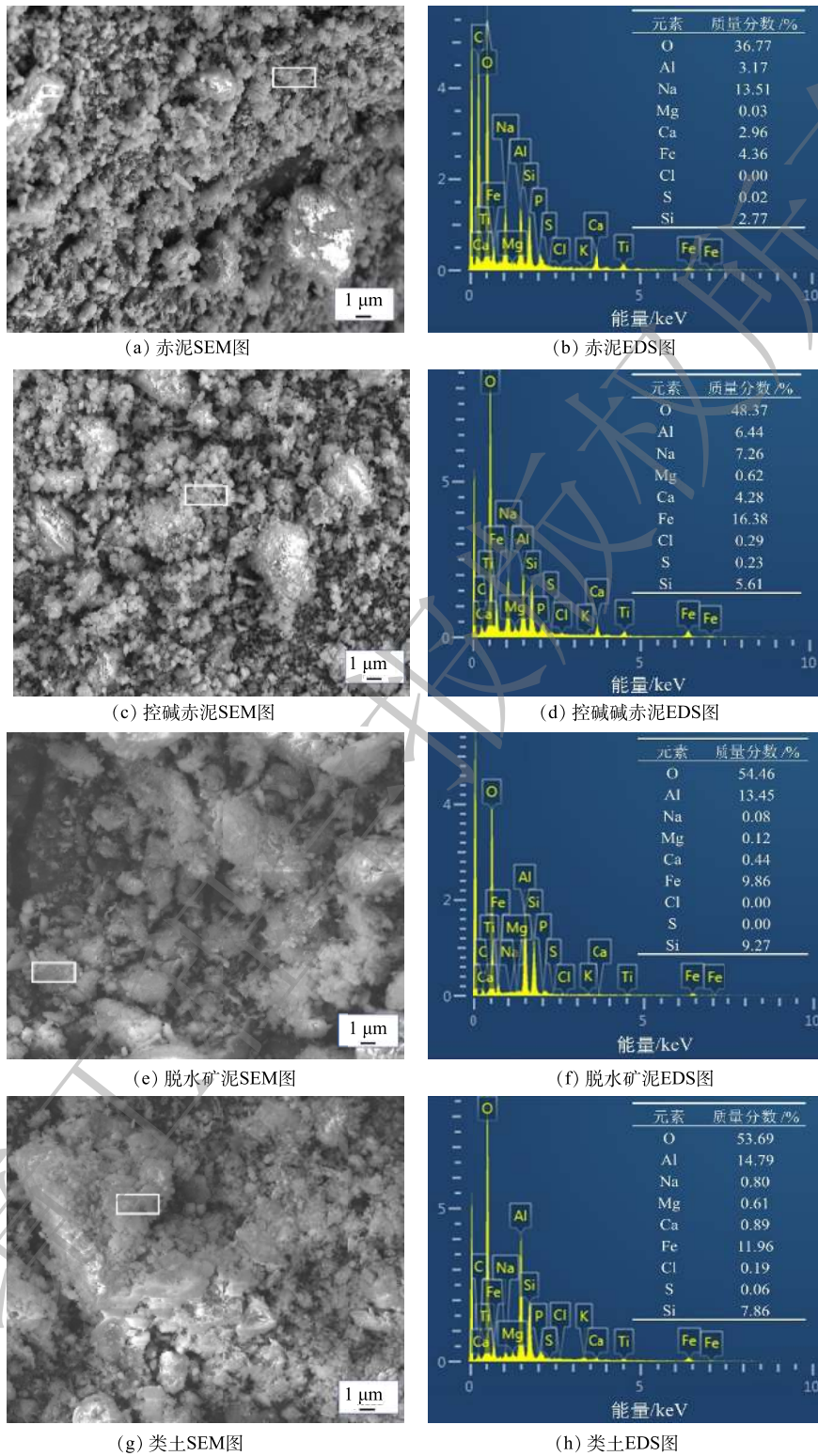


图 7 赤泥、控碱赤泥、脱水矿泥和类土 SEM-EDS 图

Fig. 7 SEM-EDS images of red mud, alkali-controlled red mud, dehydrated mineral slime and soil-like

3 结论

1) MgCl_2 和脱水矿泥能够有效降低赤泥中 OH^- 、 CO_3^{2-} 及 AlO_2^- 等碱性阴离子质量分数, 促进赤泥中方钠石、钙霞石、方解石等化学结合碱的溶解, 使赤泥 pH 降低。

2) 脱水矿泥的稀释作用能够有效降低赤泥可溶性盐分离子 (K^+ 、 Ca^{2+} 和 Na^+) 质量分数, 达到赤泥盐分调控效果。

3) MgCl_2 和脱水矿泥能够有效降低赤泥盐碱性胁迫, 提高黑麦草种子发芽率。

4) 当 MgCl_2 投加量为 7‰ 的赤泥, 并与脱水矿泥按 1:4 质量比混合处置时, 电导率降至 $1.166 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, pH 降至 8.43, 黑麦草种子发芽率达到 99.67%, 赤泥的盐碱性得到有效调控。

5) MgCl_2 和脱水矿泥调控赤泥盐碱性过程中生成三水铝石、水镁石和菱镁矿等难溶固体物质, 使颗粒粒径增大, 形成大团聚体, 有效改善赤泥的土理结构。

参考文献

- [1] ZHU X B, LI W, GUAN X M. An active dealkalization of red mud with roasting and water leaching[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286: 85-91.
- [2] SAMOUHOS M, TAXIARCHOU M, TSAKIRIDIS P E, et al. Greek "red mud" residue: a study of microwave reductive roasting followed by magnetic separation for a metallic iron recovery process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 254-255: 193-205.
- [3] LIU W C, YANG J K, XIAO B. Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(1): 474-478.
- [4] 吴川, 黄柳, 薛生国, 等. 赤泥对砷污染的调控研究进展[J]. *环境化学*, 2016, 35(1): 141-149.
- [5] 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.
- [6] 薛生国, 李玉冰, 郭颖. 氧化铝工业赤泥环境影响研究进展[J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(4): 401-412.
- [7] 黄玲, 李义伟, 薛生国, 等. 氧化铝赤泥堆场盐分组成变化[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(11): 2433-2439.
- [8] RONAN C, 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.
- [9] 韦桥权. 铝土矿洗矿泥混凝沉降及其泥水分离过程的重金属转移研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [10] HUANG N, TANG L, ZHU F, et al. Salt ions accumulation and distribution characteristics of pioneer plant species at a bauxite residue disposal area, China[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(2): 323-330.
- [11] KONG X., 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.
- [12] YANG Y, WANG X W, WANG M Y, et al. Iron recovery from the leached solution of red mud through the application of oxalic acid[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 157: 145-151.
- [13] TIAN T, ZHANG C L, ZHU F, et al. Effect of phosphogypsum on saline-alkalinity and aggregate stability of bauxite residue[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(5): 1484-1495.
- [14] LI X F, GUO Y, ZHU F, et al. Alkalinity stabilization behavior of bauxite residue: Ca-driving regulation characteristics of gypsum[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(2): 383-392.
- [15] KANNAN P, BANAT F, HASAN S W, et al. Neutralization of bayer bauxite residue (red mud) by various brines: a review of chemistry and engineering processes[J]. *Hydrometallurgy*, 2021: 206.
- [16] JOHNSTON M, CLARK M W, MCMAHON P, et al. Alkalinity conversion of bauxite refinery residues by neutralization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182(1/2/3): 710-715.
- [17] DESPLAND L M, CLARK M W, ARAGNO M, et al. Minimising alkalinity and pH spikes from portland cement-bound bauxsol (seawater-neutralized red mud) pellets for pH circum-neutral waters[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(6): 2119-2125.
- [18] 段绍彦, 成官文, 解庆林, 等. 平果铝土矿矿区周边坡地、耕地土壤基础理化性质空间差异[J]. *桂林理工大学学报*, 2021, 41(1): 201-209.
- [19] 王佳珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [20] 张亚晨. 简述镁元素对植物的作用[J]. *农业开发与装备*, 2018(11): 166-192.
- [21] 崔姗姗, 王宁, 顾汉念. CaCl_2 废液在赤泥脱碱中的应用[J]. *化工环保*, 2016, 36(5): 553-556.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 中国农业出版社, 2000: 193-195.
- [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] 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.

- [25] 陈珊, 陈允建, 谢鑫, 等. 赤泥脱碱方法及其机理研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3414-3426.
- [26] 环境保护部. 矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行): HJ 651-2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [27] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.
- [28] 王遵亲. 中国渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 325.
- [29] 陈雅琦, 苏楷淇, 陈泰祥, 等. 混合盐碱胁迫对醉马草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(3): 137-157.
- [30] WANG X P, JIANG P, MA Y, et al. Physiological strategies of sunflower exposed to salt or alkali stresses: restriction of ion transport in the cotyledon node zone and solute accumulation[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6): 2181-2192.
- [31] 朱建峰, 杨秀艳, 武海雯, 等. 植物种子萌发期耐盐碱性提高技术研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(2): 158-168.
- [32] ZHU F, HOU J T, XUE S G, et al. Vermicompost and gypsum amendments improve aggregate formation in bauxite residue[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(7): 2109-2120.

(责任编辑: 金曙光)

Conditioning of salinity and alkalinity in red mud by MgCl₂ and dehydrated mineral slime

ZHANG Yuling¹, CHENG Guanwen^{1,*}, WEI Qiaoquan¹, XU Xiaoyu¹, YUE Yuansui¹, XU Min¹, FENG Jie², NONG Guowu²

1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Guangxi Branch of Aluminum Corporation of China Limited, Baise 531499, China

*Corresponding author, E-mail: 1423076413@qq.com

Abstract In order to solve the problem of difficulty in resource utilization caused by excessive salinity and alkalinity of red mud, MgCl₂ and dehydrated mineral slime of alumina industrial solid waste were used to control salinity and alkalinity of red mud. The effect of salinity and alkalinity regulation of red mud was characterized by pH, conductivity, mass fraction of alkaline anions (OH⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, AlO₂⁻), mass fraction of soluble salt cations (K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺) and germination rate of ryegrass seeds. The results showed that when red mud added with 7‰ MgCl₂ and mixed with dehydrated mineral slime at a mass ratio of 1:4, pH decreased from 11.36 to 8.43, conductivity decreased from 1.557 mS·cm⁻¹ to 1.166 mS·cm⁻¹, and germination rate of ryegrass seeds reached 99.67%. The pH, conductivity and mass fractions of OH⁻, CO₃²⁻, AlO₂⁻, K⁺, Ca²⁺, Na⁺ and Mg²⁺ of red mud decreased with increase of MgCl₂ addition and mixture ratio of dehydrated mineral slime, thus germination rate of ryegrass seeds increased, which showed a good effect on salinity and alkalinity regulation. The results of this study can provide the basis for control salinity and alkalinity of solid waste red mud in alumina industrial.

Keywords red mud; MgCl₂; dehydrated mineral slime; salinity and alkalinity regulation; germination rate of seeds