

文章编号:2095-6134(2019)04-0530-07

# 石膏/蚯蚓粪肥对赤泥团聚体结构稳定性的影响<sup>\*</sup>

王琼丽<sup>1</sup>, 叶羽真<sup>1</sup>, 薛生国<sup>1,2†</sup>, 江 钧<sup>1</sup>, 朱 锋<sup>1</sup>, 田 桃<sup>1</sup>

(1 中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083; 2 中南大学 国家重金属污染防治工程技术研究中心, 长沙 410083)

(2018 年 4 月 28 日收稿; 2018 年 6 月 17 日收修改稿)

Wang Q L, Ye Y Z, Xue S G, et al. Effects of ameliorants on aggregate stability of bauxite residue[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(4): 530-536.

**摘 要** 赤泥是氧化铝工业生产过程中排放的高碱性固体废弃物,迄今尚无经济有效的处置方法。以华中地区某堆场赤泥为研究对象,通过土培实验研究改良剂(石膏、蚯蚓粪肥、石膏+蚯蚓粪肥)对赤泥团聚体稳定性的影响。结果表明:石膏的添加能显著降低赤泥 pH,而蚯蚓粪肥能显著增加赤泥有机碳含量。土培 60 d 时,石膏添加后赤泥 pH 由 10.54 降到 8.75,蚯蚓粪肥添加后赤泥有机碳含量由 3.54 g·kg<sup>-1</sup> 增加至 14.31 g·kg<sup>-1</sup>。土培 180 d 时,石膏、蚯蚓粪肥、石膏+蚯蚓粪肥添加后赤泥水稳性团聚体含量由 12.04% 分别增加到 23.49%、29.24%、33.94%;团聚体平均重量直径由 0.15 mm 分别增加到 0.26、0.30、0.34 mm;可蚀性因子由 0.36 分别降低到 0.31、0.30、0.29。石膏和蚯蚓粪肥的添加促进水稳性团聚体形成,提高赤泥团聚体稳定性。基质改良对赤泥团聚体稳定性的影响效果依次为:石膏+蚯蚓粪肥>蚯蚓粪肥>石膏。研究结果对赤泥土壤化处置和规模化消纳研究有科学参考意义。

**关键词** 赤泥;基质改良;团聚体稳定性;水稳性团聚体;赤泥土壤化

中图分类号:X753 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2019.04.012

## Effects of ameliorants on aggregate stability of bauxite residue

WANG Qiongli<sup>1</sup>, YE Yuzhen<sup>1</sup>, XUE Shengguo<sup>1,2</sup>, JIANG Jun<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>1</sup>, TIAN Tao<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

2 Chinese National Engineering Research Center for Control and Treatment of Heavy Metal Pollution, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** Bauxite residue is a highly alkaline waste produced during the production of alumina and there is no economical and effective disposal strategy at the present. In this study, gypsum and vermicompost were selected as the ameliorants to investigate their effects on aggregate stability of bauxite residue in the laboratory incubation experiments with different incubation periods. After 60 d incubation, 2% (w/w) gypsum addition reduced the pH from 10.54 to 8.75, whilst 8% (w/w) vermicompost addition increased organic carbon content (TOC) from 3.54 g/kg to 14.31 g/kg. After 180 d incubation, additions of gypsum, vermicompost, and the combination increased the contents of water-stable aggregates from 12.04% to 23.49%, 29.24%, and 33.94%, increased the

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(41701587,41371475)和国家公益性(环保)行业科研专项(201509048)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: sgxue@csu.edu.cn; sgxue70@hotmail.com

mean weight diameters (MWD) from 0.15 mm to 0.26, 0.30, and 0.34 mm, and decreased the erodibility factors (K) from 0.36 to 0.31, 0.30, and 0.29, respectively. This study demonstrated that gypsum and vermicompost amendments stimulate water-stable aggregate formation and improve aggregate stability of bauxite residue. Effectiveness of the ameliorants on aggregate stability of bauxite residue decreased in the order: the combination > vermicompost > gypsum. The results provide scientific information for soil formation and large-scale disposal of bauxite residue.

**Keywords** bauxite residue; substrate amendment; aggregate stability; water stable aggregate; soil formation in bauxite residue

赤泥是氧化铝工业生产过程中产生的高碱性固体废弃物,盐分含量高,资源化利用难度大<sup>[1]</sup>。每生产1 t氧化铝,约产生1.0~2.0 t赤泥<sup>[2]</sup>。大量的外排赤泥以堆存为主,2017年全球赤泥堆存量超过40亿t,并以1.2亿t/a的速度增长<sup>[3]</sup>。赤泥的资源化利用主要包括建筑材料制备<sup>[4]</sup>、有价金属回收<sup>[5]</sup>、环境功能材料<sup>[6]</sup>。然而,赤泥的高盐碱性及其潜在的环境风险导致全球赤泥资源化利用率不足10%<sup>[6]</sup>。赤泥土壤化是赤泥大规模生态化处置最具应用前景的方法<sup>[7]</sup>,通过调控其化学性质以及改善其物理结构,将赤泥转变为一种适宜于植物生长的类土基质,进而促进堆场植被重建<sup>[8-9]</sup>。

良好的土壤结构能够稳水、稳气、稳肥、稳温等,对于植物和土壤动物的生命活动具有重要促进作用<sup>[10-11]</sup>。团聚体的形成过程,一般认为是由原生颗粒与有机质胶结形成微团聚体,进而经过黏粒包裹、菌丝缠绕以及一系列物理化学作用形成稳定的大团聚体<sup>[12]</sup>。而赤泥粒径较细,团聚体稳定性较差,物理结构与土壤差异大,这些因素都严重限制植物在赤泥堆场上的生长<sup>[13]</sup>。朱锋等<sup>[14]</sup>发现自然风化过程可以提高赤泥稳定性团聚体含量,改善赤泥物理性状,实现植被自然定植。Santini和Fey<sup>[15]</sup>发现在圭亚那某堆场的赤泥堆存20 a后,粒径分布特征和物理性质发生明显改变。自然风化过程中,赤泥大团聚体含量明显增多,微团聚体以及物理结构更加稳定,但所需时间较长<sup>[16-17]</sup>。通过人为干预,定向改善赤泥物理性状,加速土壤化进程,可有效降低堆场环境风险。

石膏和有机堆肥被认为是有效的赤泥基质改良剂<sup>[18]</sup>。石膏能够有效降低赤泥碱性,Ca<sup>2+</sup>的添加能够与赤泥中可交换Na<sup>+</sup>发生置换,促进细颗粒的絮凝和稳定团聚体的形成<sup>[19]</sup>。Courtney等<sup>[20]</sup>分析3个不同赤泥堆场的植被演替状况,发现施用石膏可以明显改善基质营养状况,促进植

物生长。有机堆肥能够增加赤泥有机碳含量,提高肥力,降低赤泥容重,改善孔隙结构<sup>[21-22]</sup>。蚯蚓粪肥中含有大量具有生物活性的微生物,能提供聚胶结剂,且微生物的新陈代谢产物也能有效促进赤泥颗粒团聚<sup>[23]</sup>。前期研究发现,石膏和蚯蚓粪肥添加能够促进赤泥团聚体形成,但长期改良过程中赤泥团聚体的动态变化需进一步研究<sup>[24]</sup>。本研究以石膏和蚯蚓粪肥作为赤泥基质改良剂,在前期研究基础上,进一步探讨基质改良对基于时间序列的赤泥理化性质和团聚体稳定性的影响,为人为加速赤泥土壤化进程、实现堆场植被重建提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

赤泥采自华中地区某氧化铝企业赤泥堆场,在实验室自然风干后,过2 mm样筛备用。蚯蚓粪肥选自江苏某农场,疏松多孔、密度较小,pH约为6.5,含有机质30.7%、氮1.8%、磷1.5%、钾0.2%。石膏选用湖北某石膏生产厂家,呈粉末状,硫酸钙含量为98%,pH约为2.8。

### 1.2 基质改良

根据前期研究结果,确定基质改良的最优添加比例:石膏的最优添加质量比为2%,蚯蚓粪肥的最优添加质量比为8%<sup>[24]</sup>。实验设计包括4个不同处理:1)赤泥(CK);2)赤泥+石膏(BG);3)赤泥+蚯蚓粪肥(BF);4)赤泥+石膏+蚯蚓粪肥(BGF)。每个处理设置3个平行。基质改良通过土培实验开展,土盆直径12 cm,高为9 cm。每个土盆中装入赤泥0.5 kg,各改良剂按比例添加,并混合均匀。土培过程中,保持70%田间持水率(每3 d浇水20 mL),在温室(25℃)中分别培育60、90、120、150和180 d。

### 1.3 赤泥重要特性分析

制备赤泥浸出液(固液比为1:5),赤泥pH

采用 pH 计(雷磁 PHS-3C)测定,赤泥电导率(EC)采用电导率仪(雷磁 DDS-307)测定<sup>[25]</sup>。赤泥有机碳含量的测定采用重铬酸钾氧化-分光光度法<sup>[26]</sup>。

1.4 团聚体组成分析

赤泥团聚体组成采用干筛法测定<sup>[27]</sup>。赤泥水稳性团聚体组成采用湿筛法测定<sup>[14]</sup>。分别得到 4 个不同粒径(2~1 mm、1~0.25 mm、0.25~0.05 mm、<0.05 mm)的赤泥团聚体。

1.5 团聚体稳定性分析

赤泥团聚体稳定性选择团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和可蚀性因子(K)3 个指标参数进行评价,各指标计算公式<sup>[28]</sup>如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \overline{X_i} \times W_i, \tag{1}$$

$$GMD = \exp\left(\sum_i W_i \ln X_i / \sum_i W_i\right), \tag{2}$$

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \times \exp\left[-0.5 \times \left(\frac{\lg GMD + 1.675}{0.6986}\right)^2\right] \right\}. \tag{3}$$

式中:  $\overline{X_i}$  为每个级别团聚体直径的中值(mm);  $W_i$  为该样筛中赤泥样品重量占总重的百分比。

1.6 数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2010, SPSS version 19.0 和 Origin 8.0 处理。赤泥样品数据均采用单因素方差分析(ANOVA)和方差齐性检验。所有图表均通过 Origin 8.0 绘制。

2 结果与讨论

2.1 基质改良对赤泥重要特性的影响

通过测定各样品在不同处理时间下的 pH、EC、TOC,分析石膏和蚯蚓粪肥对赤泥理化性质改良的动态变化(表 1)。土培 60 d 后,与对照组(CK)相比:BG 组 pH 由 10.54 降低至 8.75,EC 由 0.98 mS·cm<sup>-1</sup>增加至 2.39 mS·cm<sup>-1</sup>;BF 组 TOC 含量由 3.54 g·kg<sup>-1</sup>增加至 14.31 g·kg<sup>-1</sup>;BGF 组 pH 由 10.54 降低至 8.79,EC 由 0.98 mS·cm<sup>-1</sup>增加至 1.58 mS·cm<sup>-1</sup>,TOC 含量由 3.54 g·kg<sup>-1</sup>增加至 15.16 g·kg<sup>-1</sup>。CK、BG、BF 和 BGF 组各处理之间的 pH、EC、TOC 均存在显著性差异( $P<0.05$ )。随着处理时间的延长,BF 和 BGF 组的 TOC 含量呈现微下降的趋势,而在处理时间达 150 d 后,TOC 含量基本保持稳定。土培 180 d 时,相较于 CK,BF 和 BGF 组的 TOC 含量分别增长 116% 和 123%。

表 1 不同处理方式下赤泥 pH、EC、TOC 变化  
Table 1 Changes in the pH, EC, and TOC of bauxite residue in different treatments

		处理时间/d				
		60	90	120	150	180
pH	CK	10.54±0.20a	10.72±0.10a	10.23±0.03a	10.42±0.07a	10.72±0.06a
	BG	8.75±0.26b	8.88±0.07b	8.55±0.06b	8.61±0.02b	8.68±0.08b
	BF	10.51±0.12a	10.35±0.13a	10.07±0.04a	10.37±0.05a	10.67±0.02a
	BGF	8.79±0.16b	8.94±0.08b	8.52±0.08b	8.78±0.09b	9.03±0.07b
EC/(mS·cm <sup>-1</sup> )	CK	0.98±0.02c	1.22±0.09c	1.33±0.02b	1.21±0.03b	1.01±0.01b
	BG	2.39±0.11a	2.55±0.03b	3.13±0.09a	2.76±0.01a	2.51±0.06a
	BF	0.98±0.01c	1.46±0.02c	1.35±0.05b	1.33±0.02b	1.40±0.03b
	BGF	1.58±0.01b	3.04±0.03a	3.35±0.11a	2.59±0.04a	2.46±0.05a
TOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	CK	3.54±0.23b	4.39±0.19b	5.08±0.11b	3.54±0.16b	4.75±0.11b
	BG	3.47±0.41b	4.24±0.23b	3.90±0.32b	3.89±0.11b	5.69±0.23b
	BF	14.31±0.51a	11.25±0.34a	12.36±0.27a	10.54±0.33a	10.25±0.34a
	BGF	15.16±0.28a	10.33±0.22a	12.14±0.46a	10.97±0.27a	10.57±0.22a

注:同列不同字母表示添加不同改良剂的显著差异性( $P<0.05$ )。

BG、BGF 组 pH 降低,电导率升高,这是因为所添加的石膏呈酸性,使得赤泥 pH 降低,又因为其主要成分为硫酸钙,大量的 Ca<sup>2+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2+</sup> 离子在溶解过程中进入到赤泥基质中,使得赤泥浸出液中盐浓度升高。这与 Courtney 等<sup>[20,29]</sup> 发现向赤

泥中添加石膏可以明显降低赤泥碱性,增加其中可溶性钙离子含量,有效提高电导率(0.37~2.43 mS·cm<sup>-1</sup>) 的研究结果一致。而 BF 和 BGF 组 TOC 含量显著增加,这是因为蚯蚓粪肥中含有丰富的有机质,能够提高赤泥肥力水平。Verdenelli

等<sup>[30]</sup>的研究也表明蚯蚓粪肥由于其细颗粒及丰富的有机质能够提高土壤的肥力,改善土壤的结构。随着处理时间的延长,BF 和 BGF 组 TOC 含量仍远高于对照组(CK),并且含量基本保持不变,这表明赤泥能将部分有机碳进行固定。通过对各组的 pH、EC 和 TOC 含量变化分析可得,对赤泥主要理化性质的改良效果为:石膏+蚯蚓粪肥>蚯蚓粪肥>石膏,赤泥碱性降低以及有机碳含量增加改善了赤泥的基本理化性质。

2.2 基质改良对赤泥团聚体组成的影响

团聚体的形成和稳定是土壤物理性质的重要指标之一,促进土壤中有机碳的稳定、水分的渗透、营养元素的运输,增强其抗侵蚀能力<sup>[31-32]</sup>。赤泥碱性强、有机碳含量低、物理结构差、抗侵蚀能力弱等是导致难以在赤泥堆场进行植被修复的重要因素<sup>[24]</sup>。改善其物理结构,增加大团聚体含量是赤泥基质改良的重要环节。通过干筛和湿筛对各样品团聚体进行分级,研究不同改良剂对赤泥团聚体形成及稳定的影响。

由图 1 可知,对照组(CK)团聚体组成主要集中在 1.0~0.05 mm。处理 60 d 后,BG、BF 和 BGF 3 组中大团聚体(2~0.25 mm)比例由 CK 组的 60.24% 分别增加至 65.20%、67.16%、75.34%。

这表明石膏+蚯蚓粪肥复合改良剂更有利于促进赤泥团聚体的形成。处理 90 d 后,改良剂对大团聚体形成的促进效果最为明显,BG、BF 和 BGF 3 组大团聚体比例由 CK 组的 53.79% 分别增加至 73.02%、79.34%、84.75%。随着处理时间的延长,BG、BF 和 BGF 3 组中大团聚体含量较土培 90 d 时有所降低,但当土培 120、150 和 180 d 时,各处理组大团聚体比例基本保持稳定。大团聚体比例增加最大的 BGF 组在处理 120、150、180 d 后分别为 62.88%、66.87% 和 65.39%。这是因为赤泥中含有大量可交换性 Na<sup>+</sup>,会降低土壤中有有机质和土壤矿物之间的共价作用,导致胶体中团聚体的崩解和黏粒的分散<sup>[33]</sup>。而添加石膏后,可交换 Ca<sup>2+</sup>的增加能够减少其中分散性黏粒的数量,促进团聚体的絮凝和稳定<sup>[34]</sup>。大团聚体主要由微团聚体和粉黏粒通过植物根系、生物菌丝和有机大分子胶结形成<sup>[35]</sup>。Jones 等<sup>[26]</sup>也发现生物物质能够促进赤泥颗粒团聚。故向赤泥添加蚯蚓粪肥后,其中含有大量的具有生物活性的微生物,微生物的新陈代谢产物能够有效促进赤泥颗粒团聚,使得大团聚体含量大幅增加。石膏、蚯蚓粪肥均能促进赤泥颗粒团聚,其促进效果为:石膏+蚯蚓粪肥>蚯蚓粪肥>石膏。

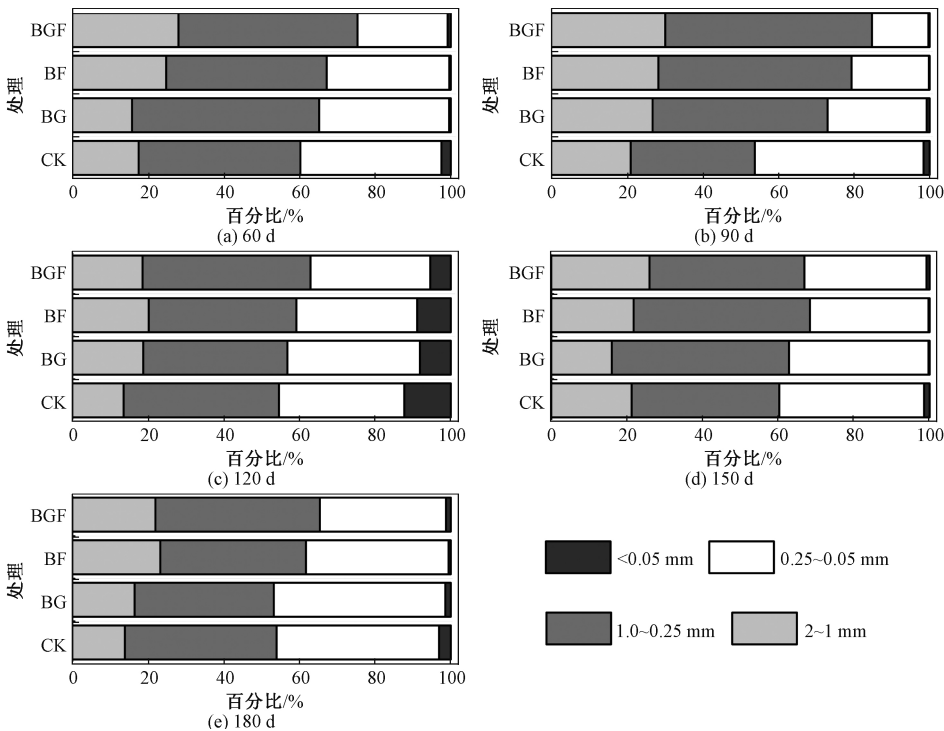


图 1 干筛条件下赤泥团聚体组成  
Fig.1 Dry sieve fractions of residue samples

从图 2 可知,处理 60 d 后,水稳性大团聚体含量由 CK 组的 9.23% 分别增加到 BG、BF 和 BGF 组的 10.44%、12.36% 和 20.01%。湿筛条件下得到的水稳性大团聚体比例明显低于干筛条件下的大团聚体,这是因为赤泥团聚体水稳性较差,大团聚体容易被水力冲刷破坏变成微团聚体。但 BG、BF 和 BGF 3 组的水稳性大团聚体比例均高于对照组(CK),且随着处理时间的延长,水稳性大团聚体比例均有所增加。在处理 180 d 时,CK、BG、BF 和 BGF 组的水稳性大团聚体含量分别为 12.04%、23.49%、29.24% 和 33.94%,这表明改良剂对大团聚体的稳定具有良好效果,石膏和蚯蚓粪肥能增加大团聚体的水稳性,使形成的大团聚体不易被水力侵蚀。石膏能降低可交换性  $\text{Na}^+$ ,提供可交换性  $\text{Ca}^{2+}$ ,进而促进稳定团聚结构

的形成。蚯蚓粪肥中含有大量具有生物活性的微生物,而微生物的新陈代谢产物、分泌的多糖、菌丝能有效促进赤泥颗粒团聚,提高土壤团聚体稳定性<sup>[23]</sup>。BF 和 BGF 水稳性大团聚体比例显著增加,这与石宗琳等<sup>[36]</sup>研究发现土壤水稳性团聚体含量降低与有机质含量下降有关,增加有机质能促进团聚体稳定性的结果一致。BGF 组对水稳性大团聚体的稳定效果最好,这是由石膏和蚯蚓粪肥联合作用的结果,这也说明联合添加对水稳性团聚体稳定效果要优于单独添加。水稳性团聚体含量对于保持土壤稳定状态具有重要价值<sup>[12]</sup>,本研究中添加石膏和蚯蚓粪肥均有利于水稳性团聚体的形成,这对于保持赤泥团聚体的稳定具有重要意义。

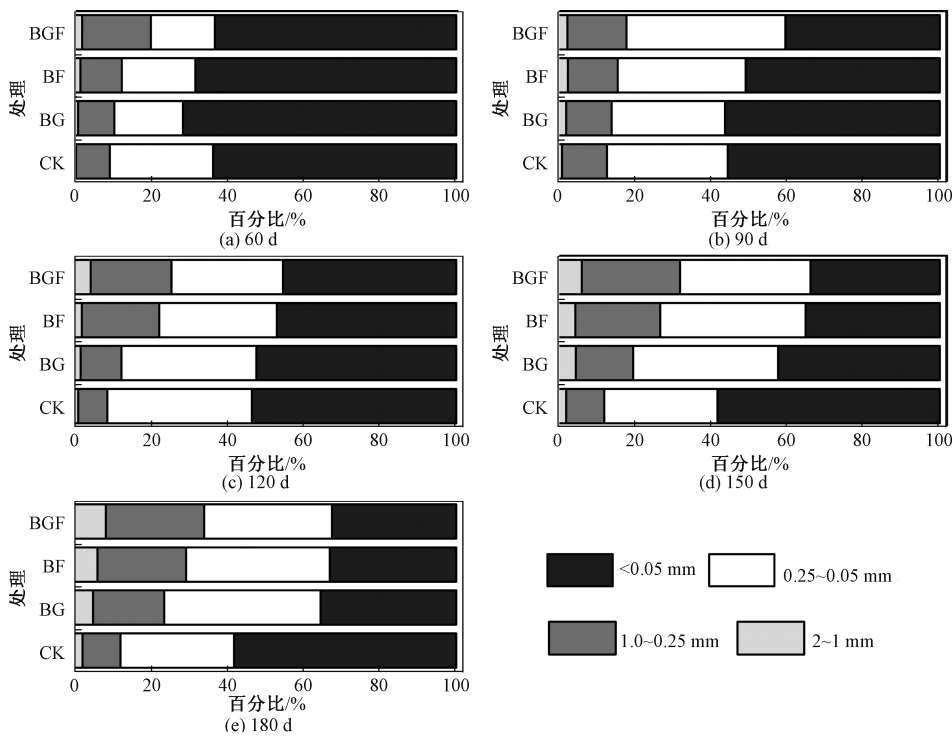


图 2 湿筛条件下赤泥团聚体组成  
Fig.2 Wet sieve fractions of residue samples

### 2.3 基质改良对赤泥团聚体稳定性的影响

通过湿筛得到团聚体组成分布后分别计算其平均重量直径 MWD 和可蚀性因子  $K$ ,探究石膏和蚯蚓粪肥对赤泥稳定性与抗蚀性的影响(图 3)。处理 180 d 后,团聚体平均重量直径由 0.15 分别增加到 0.26、0.30、0.34,可蚀性因子由 0.36 分别降低到 0.33、0.31、0.30。蚯蚓粪肥添加对赤泥团聚体 MWD 值影响比石膏更明显,而 MWD 值主要取决于大团聚体含量,这表明有机质更有

利于赤泥较大粒径团聚体的形成和稳定。蚯蚓粪肥本身为细微颗粒且其中含有大量的微生物,而微生物的新陈代谢产物能有效促进赤泥颗粒的团聚。Villar 等<sup>[37]</sup>发现微生物分泌的多糖和真菌菌丝的缠绕作用使得土壤颗粒能更好地团聚。赤泥碱性强、盐分含量高,容易引起胶体双电层的分散,从而阻碍赤泥团聚体的形成,石膏添加能够降低钠盐含量,促进赤泥团聚结构的形成与稳定<sup>[38]</sup>。可蚀性因子  $K$  值作为土壤颗粒团聚和抗

蚀性的一个重要指标,与土壤抗侵蚀能力呈现负相关, $K$  值越大,则土壤稳定性越差<sup>[39]</sup>。随着处理时间的延长,BG、BF 和 BGF 组 MWD 值逐渐增加, $K$  值逐渐减小,表明赤泥团聚体稳定性也逐渐增加。Verdenelli 等<sup>[30]</sup>指出,蚯蚓粪肥能改善土

壤结构,促进土壤黏粒絮凝,提高土壤的稳定性与抗蚀性。BGF 组可蚀性因子  $K$  最小,表明联合添加石膏+蚯蚓粪肥,其抗侵蚀能力最强。石膏和蚯蚓粪肥均有利于赤泥团聚体的稳定,其稳定性效果为:石膏+蚯蚓粪肥>蚯蚓粪肥>石膏。

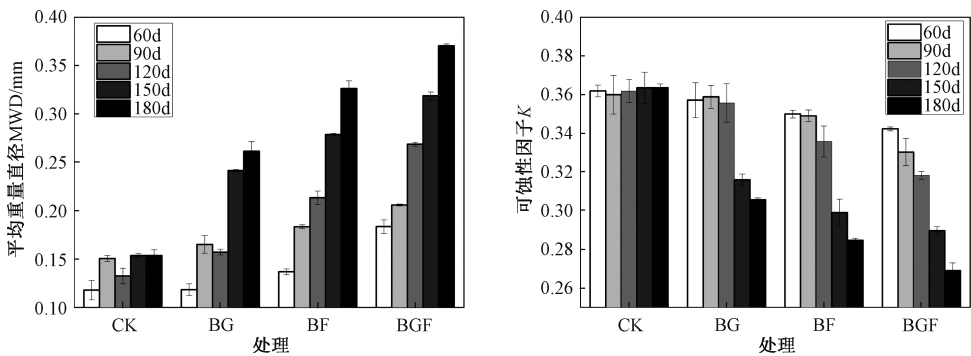


图 3 湿筛条件下赤泥团聚体平均重量直径 MWD 和可蚀性因子 ( $K$ )

Fig.3 Changes in the mean weight diameter and erodibility factor under the wet sieving condition

3 结论

石膏能显著降低赤泥 pH,蚯蚓粪肥能增加 TOC 含量,相比于对照组,处理 60 d 时 BGF 组 pH 由 10.54 降低到 8.79,TOC 含量由  $3.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  增加到  $15.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;干筛条件下,大团聚体的形成效果在处理 90 d 时最佳,CK、BG、BF 和 BGF 组大团聚体含量分别为 53.79%、73.02%、79.34%、84.75%。各处理组对赤泥团聚体形成的结果为: BGF>BF>BG>CK;湿筛条件下,BG、BF 和 BGF 组水稳性大团聚体含量、MWD 值随着处理时间延长而逐渐增加,可蚀性因子  $K$  逐渐降低,赤泥团聚体稳定性及抗蚀性均逐渐提高。对赤泥团聚体稳定性效果为: BGF>BF>BG>CK;石膏与蚯蚓粪肥均能有效改善赤泥的理化性质及物理结构,促进赤泥团聚体形成及稳定。

参考文献

[ 1 ] 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.

[ 2 ] 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):12 822-12 834.

[ 3 ] 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):1 120-1 132.

[ 4 ] Liu X M, Zhang N, Sun H H, et al. Structural investigation

relating to the cementitious activity of bauxite residue: red mud[J]. Cement and Concrete Research, 2011,41(8):847-853.

[ 5 ] Liu Y J, Naidu R. Hidden values in bauxite residue (red mud): recovery of metals[J]. Waste Management, 2014, 34 (12): 2 662-2 673.

[ 6 ] Liu W C, Chen X Q, Li W X, et al. Environmental assessment, management and utilization of red mud in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 84:606-610.

[ 7 ] Jones B E H, Haynes R J. Bauxite processing residue: a critical review of its formation, properties, storage, and revegetation[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, 41(3):271-315.

[ 8 ] 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): 1 174-1 183.

[ 9 ] Kong X F, Tian T, Xue S G, et al. Development of alkaline electrochemical characteristics demonstrates soil formation in bauxite residue undergoing natural rehabilitation [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(1): 58-67.

[ 10 ] 程乙,任昊,刘鹏,等. 不同栽培管理模式对农田土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3 521-3 528.

[ 11 ] 江春玉,刘萍,刘明,等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 138-149.

[ 12 ] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30 (4): 1 035-1 041.

[ 13 ] Zhu F, Xue S G, Hartley W, et al. Novel predictors of soil genesis following natural weathering processes of bauxite residues[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(3):2 856-2 863.

[ 14 ] 朱锋,韩福松,薛生国,等. 氧化铝赤泥堆场团聚体的分形

- 特征[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(6): 1316-1323.
- [15] Santini T C, Fey M V. Spontaneous vegetation encroachment upon bauxite residue (red mud) as an indicator and facilitator of in situ remediation processes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(21):12 089-12 096.
- [16] 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.
- [17] Zhu F, Cheng Q Y, Xue S G, et al. Influence of natural regeneration on fractal features of residue microaggregates in bauxite residue disposal areas. *Land[J]. Land Degradation & Development*, 2018, 29(1): 138-149.
- [18] Jones B E H, Haynes R J, Phillips I R. Influence of organic waste and residue mud additions on chemical, physical and microbial properties of bauxite residue sand [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, 18 (2):199-211.
- [19] Courtney R, Kirwan L. Gypsum amendment of alkaline bauxite residue: plant available aluminium and implications for grassland restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42:279-282.
- [20] Courtney R G, Jordan S N, Harrington T. Physico-chemical changes in bauxite residue following application of spent mushroom compost and gypsum[J]. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(5):572-581.
- [21] Saha D, Kukal S S. Soil structural stability and water retention characteristics under different land uses of degraded lower himalayas of North-West india [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(3):263-271.
- [22] Falsone G, Celi L, Stanchi S, et al. Relative importance of mineralogy and organic matter characteristics on macroaggregate and colloid dynamics in MG-Silicate dominated soils [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(7):1 700-1 708.
- [23] Sinha R K, Agarwal S, Chauhan K, et al. The wonders of earthworms & Its vermicompost in farm production; Charles Darwin's 'friends of farmers', with potential to replace destructive chemical fertilizers [J]. *Agricultural Sciences*, 2010, 1(2):76-94.
- [24] Zhu F, Hou J T, Xue S G, et al. Vermicompost and gypsum amendments improve aggregate formation in bauxite residue [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7):2 109-2 120.
- [25] Wu C, Wang Q L, Xue, S G, et al. Do aeration conditions affect arsenic and phosphate accumulation and phosphate transporter expression in rice (*Oryza sativa* L.)? [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (1): 43-51.
- [26] Jones B E H, Haynes R J, Phillips I R. Influence of organic waste and residue mud additions on chemical, physical and microbial properties of bauxite residue sand [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, 18 (2):199-211.
- [27] Ma R, Cai C, Li Z, et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 149:1-11.
- [28] 刘雷, 安韶山, 黄华伟. 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20):6 670-6 680.
- [29] Courtney R G, Timpson J P. Nutrient status of vegetation grown in alkaline bauxite processing residue amended with gypsum and thermally dried sewage sludge: a two year field study[J]. *Plant and Soil*, 2004, 266:187-194.
- [30] Verdenelli R A, Lamarque A L, Meriles J M. Short-term effects of combined iprodione and vermicompost applications on soil microbial community structure[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 414:210-219.
- [31] Cheng M, Xiang Y, Xue Z, et al. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 124:77-84.
- [32] 尹建道, 张鹏程, 张建唐, 等. 土壤改良基质对天津滨海盐土的改良效果研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(2): 419-424.
- [33] Levy G J, Stern R, Agassi M, et al. Microaggregate stability of kaolinitic and illitic soils determined by ultrasonic energy [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(3): 803-808.
- [34] Harris M A, Rengasamy P. Sodium affected subsoils, gypsum, and green-manure; inter-actions and implications for amelioration of toxic red mud wastes [J]. *Environmental Geology*, 2004, 45(8):1 118-1 130.
- [35] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163.
- [36] 石宗琳, 王加旭, 梁化学, 等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 387-399.
- [37] Villar M C, Petrikova V, Díaz-Raviña M, et al. Changes in soil microbial biomass and aggregate stability following burning and soil rehabilitation[J]. *Geoderma*, 2004, 122(1):73-82.
- [38] 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.
- [39] Zhang K. L, Shu A P, Xu X L, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6):1 002-1 011.