



氧化铝赤泥堆场团聚体的分形特征

朱 锋^{1,2}, 韩福松¹, 薛生国^{1,2}, 郭 颖¹, 李 萌¹, 廖嘉欣¹

(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)

摘 要: 以赤泥堆场为研究对象, 采用分形学理论, 研究不同堆存年限赤泥团聚体粒径分布与赤泥理化性质(容重、孔隙度、pH、电导率、可交换盐基)的相关关系。结果表明: 随着堆存年限的增加, 赤泥理化性质得到一定程度的改善, 赤泥团聚体的稳定性逐步增加; 赤泥团聚体分形维数为 2.70~2.85, 随堆存年限的增加, 赤泥团聚体分形维数逐渐降低; 赤泥团聚体分形维数与赤泥理化性质和团聚体稳定性均呈显著相关性, 表明分形维数能够很好地表征赤泥的理化性质和团聚稳定性。

关键词: 赤泥; 赤泥堆场; 分形维数; 团聚体; 土壤化

中图分类号: X173, TF09

文献标志码: A

有色金属工业为国民经济发展提供了大量的金属原材料, 也带来一系列影响深远的环境问题^[1]。铝是国民经济发展和国防建设必不可少的战略金属材料, 与国民经济的关联度高达 91%, 而氧化铝是生产铝的主要原材料^[2]。赤泥是氧化铝工业生产过程中排放的高碱性固体废弃物, 因其富含 Fe_2O_3 (20%~50%) 呈红褐色, 而称之为赤泥^[3]。在氧化铝生产过程中, 铝土矿中的 Al_2O_3 组分进入溶液, 而 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等杂质矿物以及添加剂石灰则通过反应以复杂化合物形式进入渣中形成赤泥, 每生产 1 t 氧化铝产生 1.0~2.0 t 赤泥^[4]。全球积存的待处理赤泥约 30 亿 t, 并以每年 1.2 亿 t 的速度递增^[5]。我国是世界第一大氧化铝生产国和消费国, 占全球总产量的 39%, 年产生赤泥 6000 多万 t, 迄今堆存量高达 3.5 亿 t^[6]。赤泥堆存不仅占用大量土地, 同时也造成周边土壤和水体污染。由于赤泥碱性强、盐分含量高、综合利用难度大、堆场生态重建难, 赤泥环境安全问题已成为制约氧化铝行业可持续发展的重要问题^[5]。开展赤泥土壤化处置技术研究, 实现赤泥堆场的植被重建和生态恢复是一种有发展前景的赤泥规模化处置方法, 但是赤泥理化性质与普通土壤差异较大, 物理结构不良, 严重影响植物根系生长^[7]。如何改良赤泥的物理结构, 使其转变成为一种类似土壤的生长基质, 是赤泥堆场实现植被重

建的关键因素之一。

土壤是由固体、液体和气体三相物质组成的疏松多孔体, 固体颗粒(单粒和复粒)在内外因素综合作用下相互团聚成一定形状和大小且性质不同的团聚体(土壤结构体), 对土壤水分、空气、热量的运动和物质的转化产生重要影响^[8]。良好的土壤团聚结构能够提高土壤的抗蚀性, 有利于植物的生长^[9]。土壤团聚体是矿物颗粒和有机物质等结合形成的不同尺度的多孔结构单元, 是土壤结构的基本单元, 也是土壤结构形成的基础。土壤团聚体的大小、分布及其稳定性影响土壤的抗侵蚀性、保水性、透气性和生物活性, 在改善土壤肥力、提高生产力、调节土壤环境等方面具有重要的作用。土壤粒径分布是土壤的重要物理性状之一, 影响土壤的水力特征、土壤肥力状况以及土壤侵蚀等。近年来, 利用分型学理论描述土壤结构特征的方法在土壤学中的应用越来越广, 利用分形理论可以进一步揭示土壤的其他物理化学性状以及其对生态环境的指示意义。土壤分形特征研究的核心主要围绕土壤颗粒分形维数展开, 土壤颗粒的分形维数主要用于描述土壤的质地及与土壤物理性质的联系, 分形维数的大小能够反映土壤质地中粘粒、粉粒和砂粒含量变化^[10]。目前, 关于土壤颗粒分形维数的计算方法有很多。其中, TURCOTTE^[11]采用土壤粒径分布的数量

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41371475); 国家公益性(环保)行业科研专项(201509048); 中南大学研究生科研创新项目(2015zzts034)

收稿日期: 2015-12-03; **修订日期:** 2016-04-03

通信作者: 薛生国, 教授, 博士; 电话: 13787148441; E-mail: sgxue70@hotmail.com; sgxue@csu.edu.cn

来计算土壤颗粒的分形维数, 但其颗粒的数量难以直接通过实验得到, 同时其数值会受到假设和实际符合程度的影响, 进而影响了分形维数 D 的准确计算。杨培岭等^[12]选用土壤粒径的质量分布取代体积和数量来计算土壤的分形维数, 操作简单准确, 被广泛应用在不同类型土壤粒径分形维数与土壤理化性质的研究中, 但是在金属矿冶区废弃地基质的分形维数方面研究未见报道。

赤泥团聚结构较差, 难以支撑原生植物的生长。改良剂的添加能够改良赤泥的物理结构, 但资源消耗较大, 且难以在堆场上实现较为稳定的植被^[11]。原生演替虽然时间较长, 但无需人力财力介入, 在废弃矿区生态恢复过程中对周边的生态环境产生的风险较小^[13]。SANTINI 等^[14]通过对圭亚那某堆存超过 30 年的赤泥堆场进行野外生态调查发现, 不需要采取人工措施, 自然风化过程也能够改良赤泥的相关理化特性, 进而支持自然植被的定植。COURTNEY 等^[15]通过对人工改良赤泥的研究指出赤泥成土过程中容重、孔隙度、水稳性团聚体等物理参数均可作为赤泥堆场土壤形成的参考指标。由于在原生演替过程中, 赤泥基质逐渐向类似土壤的结构转化, 通过分形理论来定量描述赤泥土壤化过程中赤泥团聚体粒径分布, 可以更好地评价赤泥团粒结构及其团聚稳定性。

2013~2014 年对中国典型氧化铝企业赤泥堆场进行生态调查, 发现华中某氧化铝企业 20 年的赤泥堆场上乡土植物开始入侵, 已出现土壤化现象^[9]。国内外从赤泥风化过程中物理团聚结构及其颗粒分形的相关研究未见报道。本文作者以赤泥堆场作为研究对象, 应用颗粒分形模型对不同堆存年限赤泥的团聚结构分布进行研究, 探讨赤泥团聚体的分形特征, 为实现赤泥土壤化和堆场植被重建提供理论支撑。

1 实验

1.1 研究区域

研究区域位于华中某氧化铝企业赤泥堆场, 该区域属暖温带大陆性季风气候, 春夏秋冬四季分明。年平均温度 14 ℃, 年平均降水量 560 mm。氧化铝工业生产过程中排放的赤泥由高架管道运输到赤泥堆场, 堆场中心的赤泥通过机械外翻的方式堆砌在赤泥库边, 新鲜的赤泥进而排放到赤泥堆场的中间, 长此以往, 形成椎状阶梯形的赤泥库。目前, 赤泥库已经闭

库, 在明确不同阶梯层赤泥的堆存时间后, 选取 5 个不同堆存年限的区域, 开展生态调查和赤泥样品采集。

1.2 样品采集

2014 年 8~9 月对赤泥库区进行系统调查, 选取堆存 1 年赤泥(Z1), 堆存 4 年赤泥(Z2), 堆存 6 年赤泥(Z3), 堆存 10 年赤泥(Z4)和堆存 20 年赤泥(Z5) 5 块区域进行样品采集, 其中堆存 20 年赤泥上出现草本植物的自然定植。每块区域选取 3 个点位进行采集, 深度 0~20 cm, 每个点位采用梅花形采样法进行采样并混合均匀。此外, 每个点位均用环刀进行采样, 用于分析赤泥容重和孔隙度。样品带回实验室, 经自然风干后, 去除石砾及植物根系, 过孔径 2 mm 筛备用。

1.3 赤泥理化性质分析

容重(ρ_B)采用环刀法进行测定, 颗粒密度(ρ_p)采用比重瓶法测定, 其总孔隙度 P_p 通过下列公式计算得出^[12]:

$$P_p = \frac{\rho_B - \rho_p}{\rho_B} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ_B 为容重; ρ_p 为颗粒密度。

赤泥含水量的测定采用烘干称取质量法^[16]。pH 值使用雷磁 PHS-3C 型 pH 计测定, 电导率(EC)使用 DDS-307 型电导率仪测定, 可交换盐基(钙、镁、钾、钠)经醋酸铵提取后采用 ICP-AES 测定, 可交换钠离子含量(γ)通过下列公式计算得出^[17]:

$$\gamma = \frac{x_{Na^+,e}}{\sum x_{(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^++Na^+),e}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $x_{Na^+,e}$ 为赤泥中可交换钠离子的质量摩尔浓度, mol/kg; $x_{(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^++Na^+),e}$ 为赤泥中可交换盐基质量摩尔浓度, mol/kg。

1.4 赤泥团聚体分析

赤泥样品采用湿筛法测定。称取 50 g 风干赤泥样品小心放于滤纸上, 然后沿滤纸慢慢加水, 直至赤泥样品达到饱和状态。将饱和的赤泥样品小心放于水桶内最上层套筛中, 慢慢浸没并小心倾倒入套筛上。本组套筛设置 3 个筛子(孔径分别为 1 mm, 0.25 mm 和 0.05 mm)。将套筛放在震荡机上, 震荡 2 min 后取出套筛。将留在各级筛子上的团聚体用去离子水轻轻洗入烧杯中, 烘干称取质量。团聚体的平均质量直径($\bar{D}_M$)和几何平均直径($\bar{D}_G$)的计算公式如下^[18]:

$$\bar{D}_M = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i w_i \quad (3)$$

$$\bar{D}_G = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (4)$$

式中： $\bar{X}_i$ 为某一粒径团聚体平均直径； w_i 为某一粒径团聚体组分所占的含量(质量分数)。

1.5 团粒结构分形维数的计算

赤泥团粒结构的分形维数应用杨培岭等^[19]提出的用粒径的质量分布表征的土壤分形模型来计算。其团聚体颗粒质量分布于平均粒径的分形关系式为

$$D = \frac{3 - \lg(w_i / w_0)}{\lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})} \quad (5)$$

式中： D 为赤泥团粒结构的分形维数； w_i 为直径小于 d_i 的累积质量分数； w_0 为赤泥团聚体样品总质量分数； $\bar{d}_i$ 为相邻粒级 d_i 和 d_{i+1} 之间团聚体平均直径； $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级赤泥团聚体平均直径。计算赤泥团聚体粒径的分形维数 D 时，首先求出赤泥样品不同粒径团聚体的 $\lg(w_i / w_0)$ 和 $\lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})$ 值，然后通过 SPSS 19.0 进行线性回归分析，求得其斜率 K ，最终赤泥团聚体粒径的分形维数的计算公式为

$$D = 3 - K \quad (6)$$

1.6 数据处理与分析

实验数据采用 Microsoft Excel 2010, SPSS version 19.0 和 Origin8.0 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，在假设方差齐性条件下采用 Duncan(D)检验，在未假设方差齐性条件下采用 Dunnett's T3 检验。所有图表均通过 Origin 8.0 进行绘制。

表 1 不同堆存年限赤泥的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of bauxite residues in different stacking ages

Residue sample No.	Bulk density/ (g·cm ⁻³)	Porosity/ %	Moisture content/%	Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	pH	σ / (mS·cm ⁻¹)	Exchangeable Na ⁺ content/ (mol _c ·kg ⁻¹)	γ /%
Z1	1.91±0.05d	43.88±6.59a	22.76±2.14a	5.71±0.26a	10.98±0.13d	3.73±0.53d	0.20±1.40c	72.51±0.32d
Z2	1.90±0.06c	45.15±5.38a	24.83±1.62a	5.24±0.14b	10.75±0.08c	2.95±0.28c	0.17±1.32b	72.83±1.17d
Z3	1.84±0.05b	45.32±4.34a	25.63±1.84a	5.85±0.33b	10.92±0.06d	1.41±0.25b	0.17±1.25b	65.67±0.82c
Z4	1.72±0.02b	48.50±0.29ab	30.05±1.72ab	8.00±0.30c	10.58±0.07b	0.95±0.09b	0.11±1.19a	49.65±1.98b
Z5	1.39±0.03a	58.24±3.81b	36.23±2.57b	10.81±0.29d	9.45±0.10a	0.36±0.10a	0.10±1.12a	28.99±1.19a

Different letters (a, b, c, d) mean significant difference ($P \leq 0.05$).

2 实验结果

2.1 不同堆存年限赤泥理化性质的变化

赤泥较差的物理结构、营养元素的缺失和较高的盐碱性是限制赤泥堆场植物生长的主要因素。表 1 所列为不同堆存年限赤泥的理化性质。从表 1 可以看出，赤泥容重较大，不利于植物根系的生长；有机碳含量较低，难以提供植物生长所需的营养元素。此外，较高的 pH 和盐分也使得植物难以在赤泥堆场上存活。随着堆存年代的增加，赤泥容重逐渐降低，有机碳含量逐渐增加。同时，赤泥的盐碱性也得到了一定的改善，pH 由 10.98 下降到 9.45，电导率由 3.73 mS/cm 下降到 0.36 mS/cm，可交换钠盐含量也在显著下降。赤泥堆场表层的赤泥在干湿冻融以及外界气候条件下，其颗粒组成可能会发生变化，导致其容重和孔隙度的改变。赤泥中可溶性碱性物质的溶出以及不溶性碱性物质的部分溶解，是赤泥自然堆存过程中 pH 逐渐降低的潜在原因。JONES 等^[17]指出，随着堆存时间的增加，赤泥中的氧化钙逐渐风化成方解石，这也可能是赤泥 pH 降低的可能原因。此外，自然淋溶过程中可交换阳离子的浸出以及钙-钠离子的交换，导致赤泥的盐分含量逐渐降低^[14]。此外，乡土植物的生长和根际微生物的新陈代谢活动也可能是赤泥相关理化性质逐渐改良的原因之一。

2.2 不同堆存年限赤泥团聚体粒径组成

良好的团聚结构对于植物的正常生长至关重要。在湿筛条件下，赤泥团聚体颗粒以<0.05 mm 为主，其含量在 30%~55%之间，而 1~2 mm 团聚体含量最少，其含量不超过 15%(见表 2)。原生赤泥团聚体(Z1)颗粒

表 2 不同堆存年限赤泥团聚体粒径组成

Table 2 Aggregate fraction distribution of bauxite residues in different stacking ages

Residue sample No.	Aggregate size/mm			
	1–2	0.25–1	0.05–0.25	<0.05
Z1	0.15±0.02a	19.75±1.75a	26.75±2.19b	53.35±2.64d
Z2	2.98±0.49b	25.80±1.74b	28.83±2.70c	42.39±4.92c
Z3	4.29±0.75c	26.45±1.11c	28.50±1.37c	40.76±1.08b
Z4	5.10±0.83d	35.82±2.26d	16.75±1.36a	42.23±1.93c
Z5	15.13±0.80e	35.60±1.84d	17.37±0.48a	31.90±1.62a

Different letters (a, b, c, d, e) mean significant differences ($P\leq0.05$).

较细, <0.05 mm 粒径团聚体含量达到 53.35%。随着堆存年代的增加, 1~2mm 和 0.25~1 mm 水稳性大团聚体含量显著增加, 而<0.05 mm 团聚体含量有一定程度的下降。自然堆存过程中, 雨水的浸透和风力的侵蚀作用可能对于赤泥颗粒的再团聚具有积极的作用, 细小的颗粒在一定条件下团聚形成较大的颗粒, 并且形成较大的孔隙^[20]。植物根系能够提供有机碎片, 释放多价金属离子, 进而促进微小颗粒的絮凝, 微生物通过矿化大分子量的化合物提供土壤酶, 并释放胞外多糖也能够胶结土壤颗粒^[21], 进而可能导致堆存 20 年赤泥水稳性大团聚体含量显著增加。

2.3 不同堆存年限赤泥团聚体稳定性及分形特征

平均质量直径($\bar{D}_M$)和几何平均直径($\bar{D}_G$)是评价土壤团聚体稳定性的主要指标。目前, 许多研究者将团聚体稳定性等土壤物理质量参数用来评价矿区废弃地基质物理性状上^[22]。通过对自然堆存过程中赤泥团聚体 $\bar{D}_M$ 值和 $\bar{D}_G$ 值比较发现, 随着堆存年代的增加, 赤泥团聚体 $\bar{D}_M$ 和 $\bar{D}_G$ 均有一定程度的增加(见图 1(a)), 表明自然风化过程能够增加赤泥的团聚体稳定性。

应用回归分析法可以计算得到不同堆存年限赤泥团粒结构的粒径分布的分形维数 D 。不同堆存年限赤泥团聚体粒径分布的分形维数均在 2.70~2.85 之间(见图 1(b))。由于赤泥颗粒也是一种分散的多孔介质, 相比于土壤, 其结构性状也具有统计意义上的自相似性质。随着堆存年代的增加, 赤泥团聚体粒径分布的分形维数逐渐降低, 表明赤泥团聚体粒径在逐渐增大, 赤泥团聚结构在逐步改善。

3 分析与讨论

赤泥团聚结构粒径分布的分形维数取决于赤泥不

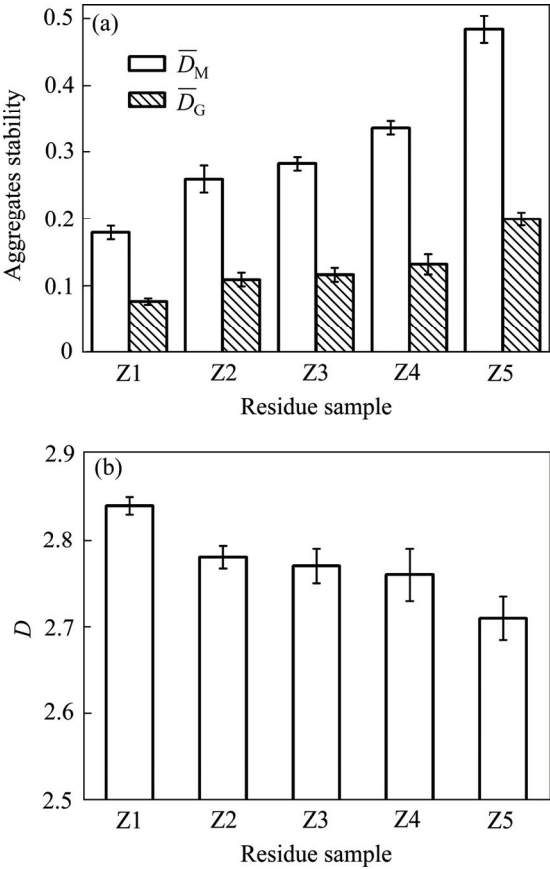


图 1 不同堆存年限赤泥团聚体稳定性与分形维数($n=3$)
Fig. 1 Aggregates stability and fractal dimension of bauxite residues in different stacking ages ($n=3$)

同粒径团聚体的质量分数。在自然堆存过程中, 赤泥水稳性团聚体的粒径分布与赤泥的相关理化性质都存在着一定程度的关联, 如赤泥的容重、孔隙度、盐碱性等。

3.1 赤泥团聚体分形特征与容重和孔隙度的关系

土壤容重和孔隙度是土壤物理性状的重要指标, 能够体现土壤的松紧状况, 影响土壤的水热状况、保

肥性和透气性等。不同堆存年限赤泥团聚体分形维数与其容重和孔隙度的相关性见图2。从图2中可以看出,分形维数 D 与容重成显著正相关关系($r=0.862^{**}$, $P<0.01$),而与孔隙度成显著负相关关系($r=-0.679^{**}$, $P<0.01$)。表明赤泥团聚体分形维数可以为赤泥的物理性状提供一定的参考价值,容重越大,孔隙度越小,分形特征越明显。赤泥团聚体粒径分布的分形维数越高,表明赤泥团粒结构越紧实,颗粒间的孔隙越小,赤泥孔隙度降低,容重增加。随着堆存年限的增加,赤泥团聚体粒径逐渐增大,赤泥中较大的团聚体含量逐渐增加,从而使赤泥的孔隙度增大,因此赤泥团聚体分形维数与其孔隙度呈负相关关系。姚晶晶等^[23]指出,土壤分形维数不但可以在一定程度上反应土壤密度和毛管孔隙度的变化,也能够很好地反映土壤总孔隙的变化。

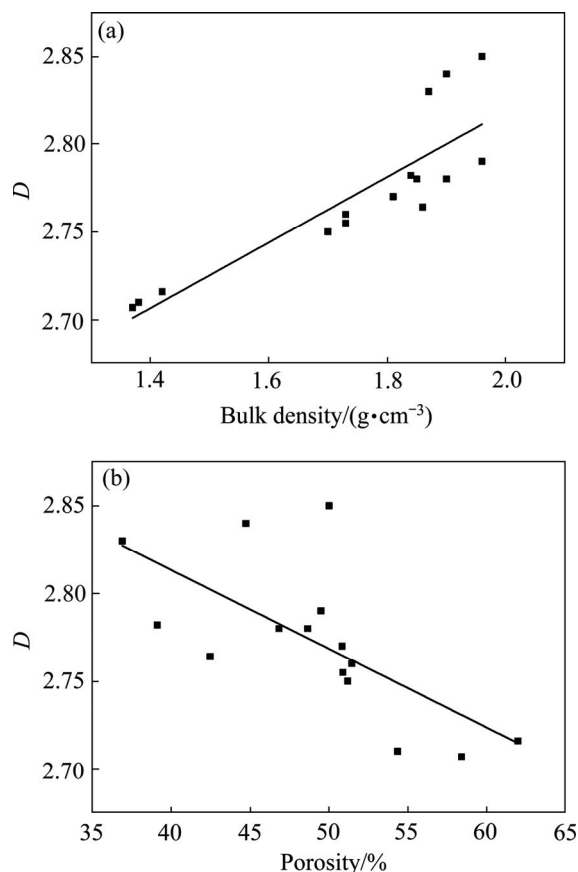


图2 赤泥团聚体分形维数(D)与容重和孔隙度的相关性

Fig. 2 Relationship between fractal dimension (D) with bulk density and porosity of bauxite residues

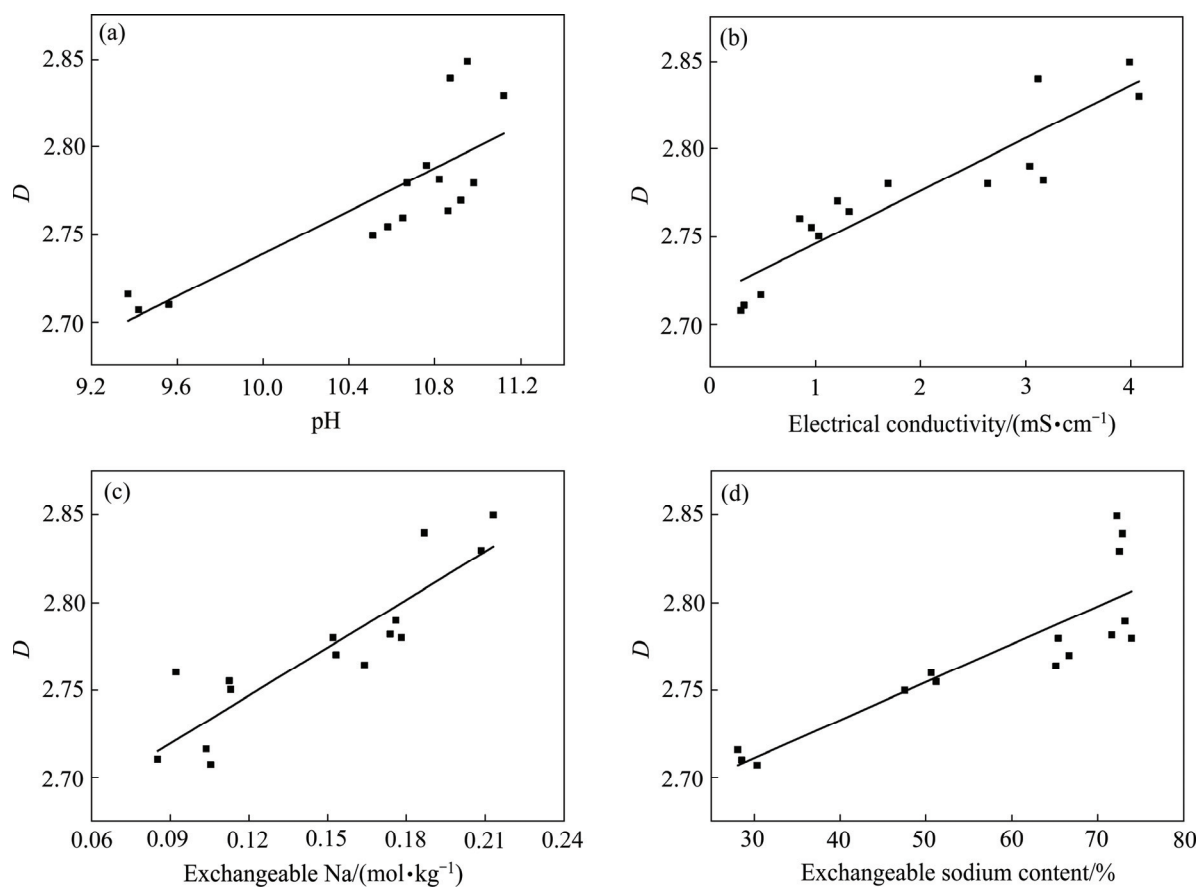
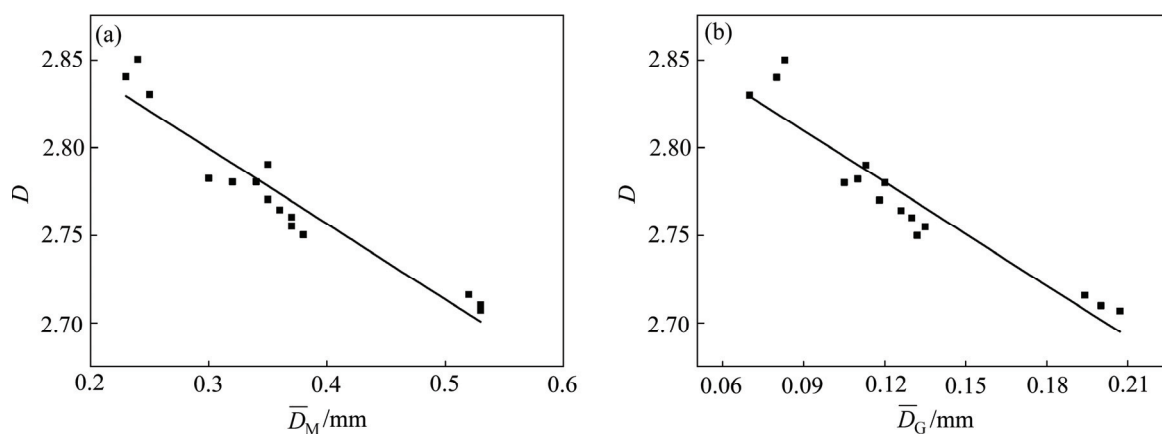
3.2 赤泥团聚体分形特征与赤泥盐碱性的关系

赤泥较高的盐碱性导致植物难以在赤泥堆场上定植。较高的盐碱性也不利于赤泥颗粒的团聚,严重影响赤泥物理结构的稳定性。不同堆存年限赤泥团聚体

分形维数与其pH、电导率、可交换钠离子含量和可交换钠离子比的相关性见图3。从图3中可以看出,分形维数 D 与pH、电导率、可交换钠盐和可交换钠离子比均呈正相关关系($r=0.819^{**}$, $r=0.915^{**}$, $r=0.894^{**}$, $r=0.866^{**}$; $P<0.01$)。pH、电导率和可交换钠离子是影响土壤微小颗粒的分散或絮凝的主要因素。碱性条件下,较高的pH和可交换钠盐含量均利于颗粒的分散^[24]。大量可交换钠离子的存在无法在土壤胶体双电层中形成离子桥,从而使其晶格膨胀,促使土壤胶体中聚合物和黏粒的分散。随着堆存年限的增加,赤泥的碱性和可交换钠离子含量逐渐下降,赤泥中可溶性盐逐渐流失,赤泥中微小颗粒得到凝聚,使得较大团聚体含量逐步增加,团聚体粒径慢慢增大,从而使其分形维数也呈现出下降的趋势。赤泥团聚体分形维数能够较好的表征赤泥的盐碱性,碱性越强,电导率越高,赤泥的分形特征越明显。

3.3 赤泥团聚体分形特征与团聚体稳定性的关系

赤泥团聚体粒径分布的分形维数能够在一定程度上反映赤泥水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量对赤泥结构和稳定性的影响趋势,分形维数越高,表明赤泥水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量越低,赤泥结构越紧实,通透性越差,分形维数越低,表明赤泥中水稳性大团聚体含量越多,赤泥的物理结构和团聚体稳定性越好。随着堆存年限的增加,赤泥中水稳性大团聚体含量逐渐增多,赤泥团聚体水稳性逐渐增加,同时大团聚体含量的增加导致赤泥团聚体分形维数的降低。表明赤泥团聚体分形维数与团聚体稳定性能够成一定的负相关关系。GHANBARIAN等^[25]运用分形模型对土壤团粒结构进行研究,发现分形维数与土壤团聚体稳定性具有明显对应关系,分形维数能够作为一个指标表征土壤团聚体水稳性。AHMADI等^[26]应用多个分形模型探究土壤分形维数与团聚体稳定性的相关关系,发现分形维数与土壤团聚体水稳性和抗蚀性有极好的相关关系,相比于平均质量直径($\bar{D}_M$)和几何平均直径($\bar{D}_G$)等团聚体稳定性评价指标,分形维数能够更好地表征土壤的稳定性和抗蚀性。从图4中可以看出,赤泥团聚体粒径分布分形维数与平均质量直径和几何平均直径均呈显著负相关关系($r=-0.956^{**}$, $r=-0.944^{**}$; $P<0.01$),表明分形维数能够客观的表征赤泥中水稳性大团聚体含量及团聚体粒径大小组成,进而反映赤泥团粒的结构形状及其水稳性,为赤泥团聚体稳定性及抗蚀性等物理性状评价方面提供了一个新的指标。

图 3 赤泥团聚体分形维数(D)与赤泥盐碱性的相关性Fig. 3 Relationship between fractal dimension (D) with alkalinity and salinity of bauxite residues图 4 赤泥团聚体分形维数(D)与团聚体稳定性的相关关系Fig. 4 Relationship between fractal dimension (D) with aggregates stability of bauxite residues

4 结论

1) 随着堆存年限的增加, 赤泥的容重降低、有机碳含量上升、可交换钠盐含量下降、pH 值降低, 理化

性质得到改善, 团聚体稳定性逐步增强。

2) 赤泥团聚体分形维数 D 为 2.70~2.85, 随着堆存年代的增加, 水稳性大团聚体含量逐渐升高, 分形维数逐渐降低。

3) 赤泥团聚体分形维数 D 与赤泥的理化性质(容重、孔隙度、pH、电导率和可交换钠离子比等)均呈

显著相关关系,表明赤泥团聚体分形维数能够很好的反映赤泥的相关理化性质。

4) 赤泥团聚体分形维数 D 与赤泥团聚体稳定性呈显著负相关关系,表明分形维数能够很好地表征赤泥的物理结构性状,这对构建赤泥分形维数与团聚结构、水肥条件的定量关系模型具有重要意义,也为赤泥堆场土壤化处置和植被重建提供科学参考。

致谢:

感谢英国 Harper Adams University 的 William Hartley 博士对论文 Abstract 进行润色修改!

REFERENCES

- [1] WU C, ZOU Q, XUE S G, MO J Y, PAN W S, LOU L Q, WONG M H. Effects of silicon (Si) on arsenic (As) accumulation and speciation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss (ROL)[J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 447–453.
- [2] 李小斌, 刘祥民, 刘桂华, 彭志宏, 刘业翔. 强化烧结法生产氧化铝新工艺的研究与实践[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(6): 1031–1036.
LI Xiao-bin, LIU Xiang-ming, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong, LIU Ye-xiang. Study and application of intensified sintering process for alumina production[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(6): 1031–1036.
- [3] 许国栋, 敖宏, 余元冠. 可持续发展背景下世界铝工业发展现状、趋势及我国的对策[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(7): 2040–2051.
XU Guo-dong, AO Hong, SHE Yuan-guan. Current status and development trend of aluminum industry in world and strategy suggestions in China under background of sustainable development[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(7): 2040–2051.
- [4] YU Z L, SHI Z X, CHEN Y M, NIU Y J, WANG Y X, WAN P Y. Red-mud treatment using oxalic acid by UV irradiation assistance[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 456–460.
- [5] XUE S G, ZHU F, KONG X F, WU C, HUANG L, HUANG N, WILLIAM H. A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(2): 1120–1132.
- [6] 张迪, 于海燕, 潘晓林, 翟玉春. 氧化铝赋存形式对低钙烧结熟料矿相转化的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(12): 3497–3504.
ZHANG Di, YU Hai-yan, PAN Xiao-lin, ZHAI Yu-chun. Effect of alumina existing formation on mineralogical transformation of sintered clinker with low lime dosage[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(12): 3497–3504.
- [7] GRAFE 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.
- [8] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 37–62.
CHEN Huai-man. *Environmental soil science*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 37–62.
- [9] ZHU F, XUE S G, WILLIAM H, HUANG L, WU C, LI X F. Novel predictors of soil genesis following natural weathering processes of bauxite residues[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 2856–2863.
- [10] 张法升, 刘作新. 分形理论及其在土壤空间变异研究中的应用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1351–1358.
ZHANG Fa-sheng, LIU Zuo-xin. Fractal theory and its application in the analysis of soil spatial variability: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5): 1351–1358.
- [11] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B2): 1921–1926.
- [12] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896–1899.
YANG Pei-ling, LUO Yuan-pei, SHI Yuan-chun. Characterization of soil fractal dimension with the weight of particle size distribution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896–1899.
- [13] BRADSHAW A. The use of natural processes in reclamation — advantages and difficulties[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 51(2/4): 89–100.
- [14] 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): 12089–12096.
- [15] COURTNEY R, HARRINGTON T, BYRNE K A. Indicators of soil formation in restored bauxite residues[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 63–68.
- [16] 张学礼, 胡振琪, 初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. *土壤通报*, 2005, 36(1): 118–123.
ZHANG Xue-li, HU Zhen-qi, CHU Shi-li. Research process on determination method of soil moisture content[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 118–123.
- [17] 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.
- [18] 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): 6670–6680.
LIU Lei, AN Shao-shan, HUANG Hua-wei. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetation on the loess plateau[J]. *Acta Ecological*

- Sinica, 2013, 33(20): 6670–6680.
- [19] 吴 尧, 姚 健, 吴永波, 薛建辉. 岷江上游典型植被下土壤分形特征及对水分入渗的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 12–16.
- WU Yao, YAO Jian, WU Yong-bo, XUE Jian-hui. Fractal characteristics of soils and their effects on water infiltration under typical vegetations in upper reaches of Minjiang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 12–16.
- [20] AN S, HUANG Y, ZHENG F. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 41(3): 286–292.
- [21] AMEZKETA E. Soil Aggregate Stability: A Review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2/3): 83–151.
- [22] ASENSIO V, VEGA F A, ANDRADE M L, COVELO E F. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils[J]. Chemosphere, 2013, 90(2): 603–610.
- [23] 姚晶晶, 张洪江, 张友焱, 周泽福, 程金花, 贺龙云. 晋西黄土丘陵区不同植物群落的土壤分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 23–29.
- YAO Jing-jing, ZHANG Hong-jiang, ZHANG You-yan, ZHOU Ze-fu, CHENG Jin-hua, HE Long-yun. Soil fractal characteristics of different vegetation communities in Loess Hilly Region, Western Shanxi Province[J]. Science of Soil and Water Conversation, 2014, 12(5): 23–29.
- [24] QADIR M, SCHUBERT S. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils[J]. Land Degradation & Development, 2002, 13(4): 275–294.
- [25] GHANBARIAN B, DAIGLE H. Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis[J]. Geoderma, 2015, 245: 98–103.
- [26] AHMADI A, NEYSHABOURI M R, ROUHIPOUR H, ASADI H. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility[J]. Journal of Hydrology, 2011, 400(3/4): 305–311.

Fractal characteristics of bauxite residue aggregates in red mud yard

ZHU Feng^{1,2}, HAN Fu-song¹, XUE Sheng-guo^{1,2}, GUO Ying¹, LI Meng¹, LIAO Jia-xin¹

(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: In order to quantitatively explore the physical structure of the residues, the fractal theory was used to measure the relationship between aggregate fractal dimension and physico-chemical properties of bauxite residues. The results show that, with the stacking age increasing, the physico-chemical properties are ameliorated, whilst the improvements in aggregates are observed. Under natural soil-forming processes, the fractal dimension decreases gradually, ranging from 2.85 to 2.70. The fractal dimension is positively correlated with bulk density, pH, electrical conductivity, and the exchangeable sodium percentage ($r=0.862$, $r=0.819$, $r=0.915$, and $r=0.866$, respectively; $P<0.01$), and is negatively correlated with the porosity, the mean mass diameter ($\bar{D}_M$) and geometric mean diameter ($\bar{D}_G$) ($r=-0.679$, $r=-0.956$ and $r=-0.944$, respectively; $P<0.01$). It is proposed that aggregate fractal dimension may be used as a new indicator to evaluate physical conditions, such as aggregate stability and erosion durability of bauxite residues.

Key words: bauxite residues (red mud); red mud yard; fractal dimension; aggregates; soil formation

Foundation item: Project(41371475) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (201509048) supported by the Environmental Protection's Special Scientific Research for Chinese Public Welfare Industry; Project(2015zzts034) supported by PhD Student Innovation Project, China

Received date: 2015-12-03; **Accepted date:** 2016-04-03

Corresponding author: XUE Sheng-guo; Tel: +86-13787148441; E-mail: sgxue70@hotmail.com; sgxue@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)