DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2018.02.028

离子型稀土矿体中溶液非均匀性渗透对浸取率的影响①

罗嗣海[1]，罗 涛[1]，王观石[1,2*]，刘 剑[1]，胡世丽[1]，朱冬梅[1]

(1 江西理工大学建筑与测绘工程学院，江西赣州 341000；2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所，兰州 730000)

摘 要：为研究离子型稀土矿体中浸取剂溶液的非均匀渗透对浸取率和浸取深度的影响，在江西安远的离子型稀土矿山开展了亮蓝和硫酸铵混合溶液的注液坑入渗试验，亮蓝用于示踪溶液渗透过程，硫酸铵用于反映渗透过程的离子交换，获取矿体中溶液的非均匀渗透过程，运用形态学图像处理技术，计算染色剖面染色图像指数和多重分形谱谱宽，分析非均匀渗透过程对稀土离子浸取深度的影响。研究结果表明：江西安远离子型稀土矿体非均匀性参数变异系数属于中等变异性，浸取剂溶液在稀土矿体的渗透过程具有多重分形性质，相对于基质流深度、染色深度和染色面积比等剖面染色图像指数，多重分形谱谱宽与优先流比对非均匀渗透过程更灵敏；随优先流比增加，浸取率降低，浸取深度也减小。

关键词：原地浸矿；离子型稀土矿；非均匀性；浸取率

中图分类号：TD865 文献标识码：A

江西赣南是华南造山系南岭造山带风化壳离子吸附型稀土矿富集区，也是我国乃至全球重要的重稀土资源生产地[1]，目前采用原地浸矿技术回收离子型稀土资源[2]。

受物理、化学风化等地质作用，稀土矿体内形成具有空间变异性的孔隙结构，直接影响矿体渗透系数和离子型稀土元素品位的空间分布规律。高度变异性和各向异性是土壤的基本特性，而土壤中水流的运动是非均匀和各向异性的，大量的野外试验[3-6]及室内观测[7]都表明了非均匀流动是一种普遍的规律。

渗透系数的空间分布规律对离子型稀土资源浸取率具有重要影响，如，从正在进行原地浸矿的矿块中取尾矿化验得出，渗透性好的区域中具有稀土含量低和铵含量高的特点，容易产生沟流偏流和过度浸取现象，而渗透性差的区域具有稀土含量较高和铵含量低的特点，容易产生浸矿剂滞留和浸取不足；从停止注液有较长时间的原地浸矿矿块中取尾矿化验得出，滞留区域内稀土残留量与铵残留量之间有反比关系，渗透性好的区域中稀土残留量与铵残留量都低，渗透性差的区域中稀土含量和铵含量都比较高，渗透性更差的区域则属于浸矿盲区，浸矿剂难以到达[8]。

土壤染色剂是观测水流运动和溶质运移的一种较为直接的观测手段，盛丰等[9]通过土壤剖面染色图像中一定的染色面积比所对应的染色深度评价了土壤优先流，在一定程度上揭示了优先流的发育状况。本文通过亮蓝和硫酸铵混合溶液的注液坑入渗试验，亮蓝用于示踪溶液渗透过程，硫酸铵用于反映渗透过程的离子交换，研究离子型稀土矿体中浸取剂溶液的非均匀渗透对浸取率和浸取深度的影响。

1 材料与方法

1.1 注液坑染色示踪试验

在江西安远县某离子型稀土矿山进行了 2 个注液坑染色示踪试验，为了确保 2 个注液坑试验之间不相互干扰，注液坑间的距离大于 5 m。试验现场如图 1 所示，在矿块内挖一长 140 cm，宽 130 cm，深 40 cm 的坑，先开挖注液坑 15 cm，平整坑底，在坑底取 10 个矿样，继续向下开挖 15 cm，再取 10 个矿样，全部取样完毕后，将注液坑开挖至设计深度。取回的矿样用于测试试验处的原矿品位。

配制 500 L 的亮蓝浓度为 4 g/L 和硫酸铵浓度为 2% 的混合溶液，亮蓝用于示踪溶液渗透过程，硫酸

①基金项目：国家自然科学基金项目(51664015，51264008，51674125)、教育厅科技项目(GJJ150658)和江西省教育厅科技落地计划项目(KJLD14042)资助。

* 通讯作者(wgsky010@126.com)

作者简介：罗嗣海(1966—) ，男，江西兴国人，博士，教授，主要从事岩土力学与地基处理、环境岩土工程方面的研究。E-mail：drsoil@163.com

铵用于反映渗透过程的离子交换。将坑底平整后，向注液坑注入预先配制的混合溶液，试验过程中，为防止溶液的蒸发作用和降雨的稀释，在每个注液坑上覆盖 2 m × 2 m 的塑料薄膜。

3 天后待染料充分下渗，沿注液坑长度方向等间距竖向开挖 6 个剖面，开挖剖面深度为 85 cm，拍照和取样。为防止开挖过程中工具对土壤剖面产生影响，先用锄头粗开挖 18 cm，然后用小刀对剖面进行精细处理，以保证土壤平整和无染色污染，如图 1 所示。尾矿取样时，在竖直方向上每个剖面分为 5 层，各层间的距离均为 15 cm，每层上取 6 个尾矿样品，每个样品之间水平间隔 20 cm。一个剖面一共 30 个样，每个样品取了 500 ~ 800 g，测试尾矿样品的稀土品位和 NH_4^+ 含量。

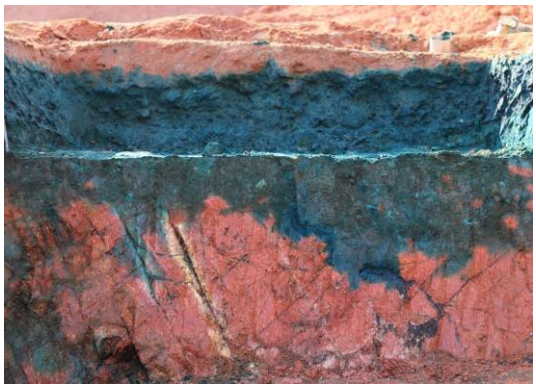


图 1 注液坑染色示踪试验现场
Fig.1 Pit site of liquid injection staining tracer

1.2 图像处理

首先使用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对拍摄的原始图片进行几何校正，再使用 Photoshop CS 软件对校正后的照片进行处理，统计染色面积。采用颜色替换功能将染色区域进行颜色替换，然后将照片转换为灰度模式，染色区域变成黑色或灰黑色，未染色区域为白色。调整阈值使黑色区域与实际染色区域面积一致，此时染色与未染色部分分别为黑色和白色。然后将照片转换为.bmp 位图格式，形成黑白二元文件。利用 Matlab 7.0 软件对位图进行处理，输出照片二元(0, 1)信息矩阵。1 为白色元素，代表未染色；0 为黑色元素，代表染色。统计染色元素个数，根据照片分辨率计算其染色面积和染色比例。

1.3 数据处理

1.3.1 染色图像指数　国内外研究者在对土壤优先流的研究过程中得出了一些染色图像评价指数用以评价优先流的发育程度，主要包括：染色面积比、优先流比、基质流深度和染色深度等[10-11]。

1) 土壤剖面染色面积比 D_C：

$$D_C = \left(\frac{D}{D + N_D} \right) \times 100\% \tag{1}$$

式中：D_C 为土壤剖面染色面积比；D 为土壤剖面总染色面积(cm^2)；N_D 为土壤剖面未染色面积(cm^2)。

2) 优先流比 P_F：

$$P_F = \left(1 - \frac{U_{\mathrm{niFr}} W}{T_{\mathrm{otStAr}}} \right) \times 100\% \tag{2}$$

式中：P_F 为土壤剖面优先流区染色面积比；U_{niFr} 为土壤剖面基质流区对应的土壤剖面深度(cm)；W 为土壤剖面水平宽度(cm)；T_{otStAr} 为土壤剖面染色区总面积(cm^2)。

1.3.2 矿体非均匀渗透的多重分形谱　由于浸矿剂溶液在矿体是非均匀渗透作用，最大入渗深度以上的矿体并未完全染色，因此均匀流不能完全描述浸矿剂溶液运动的非均匀特征[12-13]。为便于表述，建立直角坐标系，注液坑长度方向为 x 方向，宽度方向为 y 方向，深度方向为 z 方向，z 方向向下为正。对于某一纵向开挖剖面 x 位置处，引入实际入渗深度 $h(x)$，其计算公式为：

$$h(x) = \sum_{i=1}^{n} \beta(x, z) \Delta h_i \tag{3}$$

式中：$h(x)$为 x 位置的实际入渗深度，如果亮蓝经过垂直剖面位置 (x, z) 则被染色，$\beta(x, z) = 1$，反之，$\beta(x, z) = 0$；Δh_i 为开挖剖面 x 位置处相邻两像素表示的间距(以像素为单位)；n 为 x 位置最大入渗深度对应的像素数目。

对于某一纵向开挖剖面，以实际入渗深度分布描述流动非均匀特性，ε 为测量尺度，将剖面分为 $m(\varepsilon)$ 个区间，令 $\mu_j(\varepsilon)$ 是空间标度为 $j(1 \leqslant j \leqslant m(\varepsilon))$的区间样本平均值的归一化入渗深度值。

$$\mu_j(\varepsilon) = h_j(x) \Big/ \sum_{j=1}^{m} h_j(x) \tag{4}$$

式中：$\Sigma \mu_j = 1$；$h_j(x)$ 是测量尺度为 ε 的第 j 个区间入渗深度之和；m 是尺度为 ε 的区间数目。

对归一化入渗深度值 $\mu_j(\varepsilon)$ 的 q 次方加权求和，设多重分形系统的配分函数为 $\chi_q(\varepsilon)$，其数学表达式满足：

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum \mu_j^q(\varepsilon) = \varepsilon^{\tau(q)} \tag{5}$$

式中：$\tau(q)$ 为质量指数。如后面等式成立，则配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 与 ε 有如下关系：

$$\tau(q) = \frac{\ln\left[\chi_q(\varepsilon) \right]}{\ln \varepsilon} \quad (\varepsilon \to 0) \tag{6}$$

如果 $\ln[\chi_q(\varepsilon)]$ 随 $\ln\varepsilon$ 的变化有较好的线性关系，表明入渗深度分布具有多重分形属性，$\ln[\chi_q(\varepsilon)] \sim \ln\varepsilon$ 曲线斜率就是 $\tau(q)$。通过加权处理可以对一个分形集内部的结构进行精细研究。根据质量指数 $\tau(q)$，可以得到广义分形维数 D_q：

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1} = \frac{\ln\left[\chi_q(\varepsilon)\right]}{(q-1)\ln\varepsilon} \qquad (\varepsilon \to 0) \tag{7}$$

式中：D_q 是随不同的 q 值而有不同意义的分形维数，当序列是均匀分布时，$D_q = 1$。当 $q = 1$ 时，$\chi_1(\varepsilon) = \Sigma\mu_j(\varepsilon) = 1$，由此得出 $\tau(1) = 0$，这时广义分形维数 D_1 称为信息维数[14]；当 $q = 2$ 时，D_2 称为相关维数，反映在一定距离内，流动模式的相似程度。

奇异指数 $\alpha = \alpha(q)$ 是 q 的非线性递减函数，可以通过勒让德变换后得 α、$f(\alpha)$、$\tau(q)$ 关系如下[15]：

$$\alpha(q) = \frac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}q} \tag{8}$$

$$f\left[\alpha(q)\right] = \alpha(q)q - \tau(q) \tag{9}$$

计算各剖面分形谱的步骤：①采用式 (3) 处理染色图像后，得到各剖面不同水平位置的实际入渗深度；②采用式(4)对入渗深度进行归一化后得到 $\mu_j(\varepsilon)$，把 $\mu_j(\varepsilon)$ 的值代入式 (5) 中计算出配分函数；③利用式 (6) 即可计算出质量指数的关系曲线，对质量指数的关系曲线求导计算出 α，利用式(9)计算出分形谱函数 $f(\alpha)$。

2　结果与分析

2.1　矿体染色图像指数分析

以注液坑一的第 1 剖面为例，说明染色图像指数的计算过程，如图 2 所示，将竖向开挖剖面的照片转换为灰度模式，运用第 3 部分的公式计算出稀土矿体染色图像指数，用以评价优先流发育程度，注液坑一的计算结果见表 1，注液坑二的计算结果见表 2。

图 2 所示剖面的最大染色深度为 49.0 cm，染色面积比为 65.40%。本次试验定义单位土层 (1 mm) 在 80% 以上的染色面积为基质流染色区域[16-17]，该剖面对应的基质流染色深度为 26.3 cm，优先流占整个区域的百分比为 17.94%。

计算剖面染色图像指数的变异系数，计算结果见表 3。按照变异系数的划分等级：变异系数<10%，弱变异性；10%<变异系数<100%，中等变异性[18]，由表 3 可知，矿体非均匀性参数变异系数都属于中等变异性。由表 3 可知，矿体剖面染色图像指数的变异系数存在着较大差异，其中优先流比的变异性最大，其次是基质流深度和染色深度，染色面积比的变异性最小。

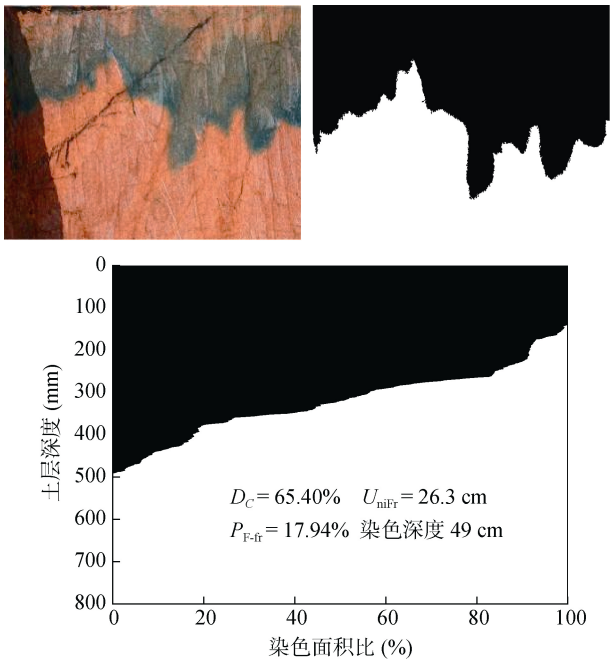


图 2　注液坑一的剖面染色图像(y = 20 cm)

Fig. 2　Dyeing image of NO.1 pit profile for liquid injection (y = 20 cm)

表 1　注液坑一的剖面染色图像指数

Table 1　Parameters of dyeing image of No.1 pit profile for liquid injection

剖面位置 (cm)	染色面积比(%)	基质流深度(cm)	染色深度 (cm)	优先流比 (%)
y = 20	65.40	26.3	49.0	17.94
y = 40	77.90	60.5	84.4	7.98
y = 60	79.83	56.6	77.4	8.39
y = 80	46.24	21.1	65.1	29.91
y = 100	60.42	26.8	57.3	22.59
y = 120	61.09	27.4	57.8	22.41

表 2　注液坑二的剖面染色图像指数

Table 2　Parameters of dyeing image of No.2 pit profile for liquid injection

剖面位置 (cm)	染色面积比(%)	基质流深度(cm)	染色深度 (cm)	优先流比 (%)
y = 20	69.45	23.5	43.6	22.39
y = 40	70.67	34.1	54.1	10.81
y = 60	74.72	33.1	53.8	17.66
y = 80	82.00	42.9	57.4	8.85
y = 100	80.03	46.0	64.2	10.48
y = 120	77.14	44.6	65.3	11.47

为便于比较，定义归一化系数：

$$\lambda = \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \tag{10}$$

式中：λ 为归一化系数；S_i 为第 i 剖面的染色面积比、基质流深度、染色深度或优先流比；$S_{\min}$ 为染色面积

表 3 剖面染色图像指数的变异系数
Table 3 Variation coefficient of dyeing image parameters of pit profiles for liquid injection

注液坑编号	参数	平均值	标准差	变异系数(%)
一	染色面积比(%)	65.15	12.45	19.10
	基质流深度(cm)	36.45	17.31	47.49
	优先流比(%)	18.20	8.66	47.55
	染色深度(cm)	65.17	13.39	20.55
二	染色面积比(%)	75.67	5.02	6.63
	基质流深度(cm)	37.37	8.70	23.29
	优先流比(%)	13.61	5.26	38.65
	染色深度	56.40	7.96	14.12

比、基质流深度、染色深度或优先流比的最小值；S_{max}为染色面积比、基质流深度、染色深度或优先流比的最大值。

分别将染色面积比、基质流深度、染色深度和优先流比进行归一化，归一化后如图 3 所示：

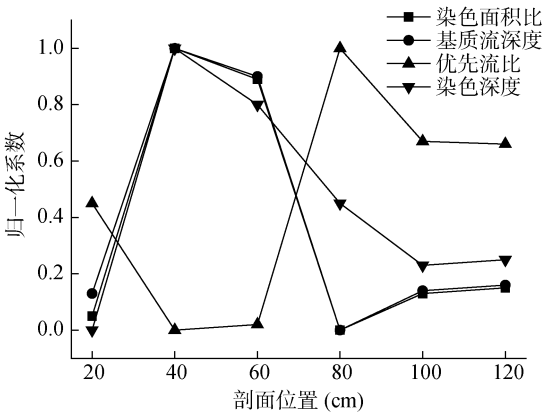


图 3 注液坑一染色图像指数间的关系
Fig. 3 Relationship between parameters of dyeing image of NO.1 pit profile for liquid injection

由图 3 可以看出随着染色面积比的增大，基质流深度和染色深度也增大，则说明染色面积比、基质流深度和染色深度呈正相关关系；随着优先流比增大，染色面积比和基质流深度减小，则说明优先流比与染色面积比、基质流深度和染色深度呈负相关关系。这与 Bargués 等[17]在对林地、干旱区不同立地的研究中发现，土壤剖面染色面积比越大，在一定程度上说明优先流程度越低；以及陈晓冰等[19]在土壤优先流程度定量评价中得出，基质流深度越大，其优先流发育程度越低的结论相同，通过染色图像指数的变异性分析，得出优先流比的灵敏性比其他参数高。

2.2 非均匀渗透的多重分形谱分析

对于注液坑一的第 1 剖面(y = 20 cm)，设定 q 的取值范围为 [–10, 10]，运用式(5)和式(6)计算得到 $\ln[\chi(\varepsilon, q)]$ 与 $\ln\varepsilon$ 间的变化关系，如图 4 所示。由图 4 可知，$\ln[\chi(\varepsilon, q)]$ 与 $\ln\varepsilon$ 具有良好的线性关系，表明矿体非均匀渗透深度分布具有自相似性和多重分形特征。

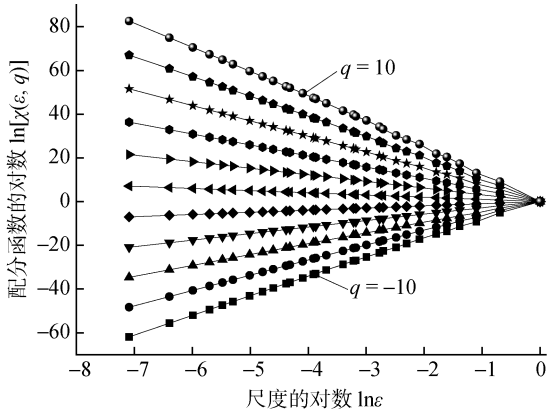


图 4 注液坑一的配分函数与尺度的关系(y = 20 cm)
Fig. 4 Relationship between partition function and scale of NO.1 pit profile for liquid injection(y = 20 cm)

运用式(8)和式(9)计算注液坑一的各剖面实际入渗深度的多重分形谱，计算结果如图 5 所示。由图 5 可知：各剖面的分形谱是非对称的。多重分形谱的宽度 $\Delta\alpha(\Delta\alpha = \alpha_{max}-\alpha_{min})$ 反映了概率分布范围的大小，能反映地下水的非均匀流动，概率分布越不均匀，相应的 $f(\alpha)$ 曲线越宽，及 $\Delta\alpha$ 值越大。$\Delta\alpha$ = 0 时，则表示归一化后的指数概率分布是完全均匀分布。注液坑一的多重分形谱的谱宽计算结果见表 4，注液坑二的多重分形谱的谱宽计算结果见表 5。计算两个注液坑多重分形谱谱宽的变异系数，注液坑一的谱宽变异系数为 49.83%，注液坑二的谱宽变异系数为 59.25%，两者比较接近，同属中等变异性。

分别将注液坑一各剖面的优先流比和谱宽 $\Delta\alpha$ 进行归一化，归一化后如图 6 所示。由图 6 可知，优先

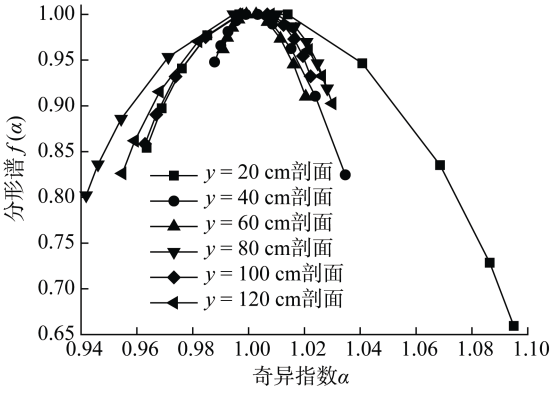


图 5 注液坑一实际入渗深度的多重分形谱
Fig. 5 Multifractal spectra of actual infiltration depths of NO.1 pit profile for liquid injection

表 4　注液坑一的多重分形谱谱宽
Table 4　Widths of multifractal spectra of NO.1 pit profile for liquid injection

剖面位置(cm)	α_{min}	α_{max}	谱宽 $\Delta\alpha$
y = 20	0.963	1.095	0.132
y = 40	0.988	1.035	0.047
y = 60	0.991	1.020	0.030
y = 80	0.942	1.028	0.086
y = 100	0.963	1.022	0.059
y = 120	0.955	1.030	0.075

表 5　试验坑二的多重分形谱谱宽
Table 5　Widths of multifractal spectra of NO.2 pit profile for liquid injection

剖面位置(cm)	α_{min}	α_{max}	谱宽 $\Delta\alpha$
y = 20	0.969	1.026	0.058
y = 40	0.969	1.035	0.066
y = 60	0.984	1.151	0.167
y = 80	0.989	1.025	0.036
y = 100	0.988	1.042	0.054
y = 120	0.978	1.087	0.108

流比和谱宽 $\Delta\alpha$ 呈正相关关系，随着优先流比的增大，$\Delta\alpha$ 也增大；则概率分布越不均匀，相应的 $f(\alpha)$ 曲线越宽，越非对称分布，溶液在矿体中的非均匀性渗透就越强。

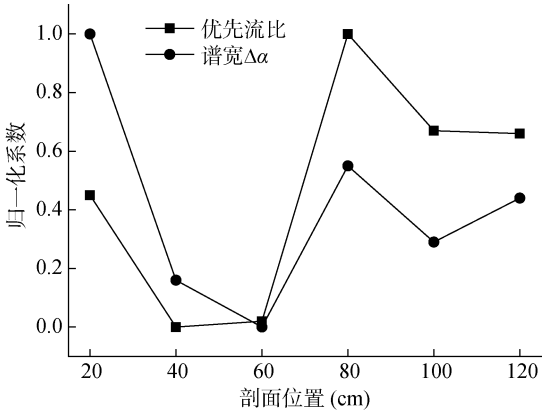


图 6　注液坑一的优先流比和谱宽的关系
Fig. 6　Relationship between preferential flow fraction and spectral width of No.1 pit profile for liquid injection one

2.3　浸取率分析

本试验矿样检测为离子相稀土品位和 NH_4^+含量。测得原矿离子相稀土平均品位为 0.66 g/kg，注液坑一的离子相稀土平均品位和 NH_4^+平均含量如图 7 所示。

由图 7 可知，离子相稀土品位在 0 ~ 45 cm 的范围内随深度的增加而增大，因为浅层的稀土被浸取出

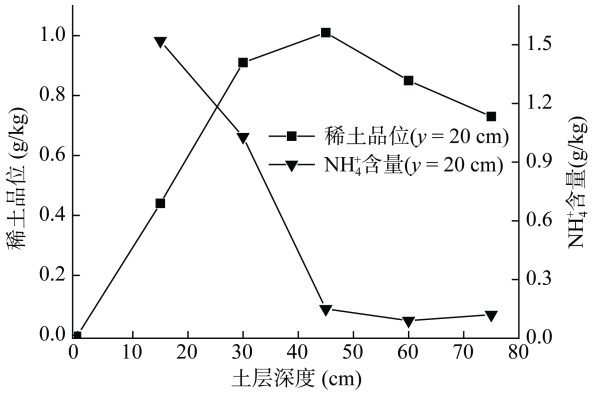


图 7　尾矿离子相稀土品位和 NH_4^+含量与深度的关系
Fig. 7　Relationship between REO grade and NH_4^+ content and depth

来后又被深层的土壤反吸附，从而导致在 0 ~ 45 cm 的范围内随深度的增加而增大；在 45 ~ 75 cm 的范围内随深度的增加而渐趋稳定，因为在 45 ~ 75 cm 的范围内浸取反应随深度的增加而变弱，则导致深层土壤反吸附的稀土离子越来越少。NH_4^+含量随深度的增加而减小。在 0 ~ 45 cm 的深度范围内离子相稀土品位和 NH_4^+含量的变化比较大，因为 0 ~ 30 cm 为基质流深度，稀土浸取反应比较充分。上述分析表明：本次试验的影响深度为 45 cm。在开挖深度范围内，提出浸取率的计算公式：

$$\zeta_k = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{k} \frac{P_{w,i-1} + P_{w,i}}{2} h_i}{\sum_{i=1}^{k} P_{y,i} h_i}\right) \times 100\% \qquad (11)$$

式中：ζ_k 为 1 ~ k 层的平均浸取率；$P_{w,i}$ 为第 i 层的尾矿品位；$P_{y,i}$ 为第 i 层的原矿品位；h_i 为第 i 层的厚度(cm)。

将各层原矿品位、尾矿品位和厚度代入式(11)，计算得到浸取率与深度的关系，注液坑一的计算结果见表 6，注液坑二的计算结果见表 7(开挖了 6 个剖面，只在 3 个剖面取尾矿矿样测试品位)。

表 6　注液坑一的浸取率**(%)**
Table 6　Leaching rates of No.1 pit profile for liquid injection

剖面位置(cm)	深度(cm)					
	0	15	30	45	60	75
y = 20	100	66.67	32.2	6.31	0	0
y = 40	100	98.84	97.67	92.64	71.80	48.14
y = 60	100	53.79	43.56	36.11	20.45	11.82
y = 80	100	68.18	25.00	1.52	0	0
y = 100	100	95.45	54.92	23.74	0	0
y = 120	100	96.21	43.56	4.04	0	0

表 7 注液坑二的浸取率(%)
Table 7 Leaching rates of NO.2 pit profile for liquid injection

剖面位置(cm)	深度(cm)					
	0	15	30	45	60	75
y = 40	100	90	73.33	36.67	0	0
y = 60	100	93.33	83.33	42.22	0	0
y = 80	100	96.67	93.33	76.67	0	0

对 0 ~ 45 cm 范围内浸取率与深度的关系进行线性拟合，拟合公式为：

$$\zeta = a - bz \quad (12)$$

式中：ζ是浸取率；z 是土层深度 (cm)；a 和 b 为浸取率随深度的变化系数，为拟合参数，b 反映了浸取率随深度的变化快慢程度，b 的单位为 cm^{-1}。

采用式(12) 拟合浸取率与深度的关系，注液坑一的拟合结果见表 8，注液坑二的拟合结果见表 9。从表 8 和表 9 可知，拟合效果较好，表明线性拟合是有效的。

表 8 注液坑一的浸取率与深度的拟合结果
Table 8 Fitting results of leaching rates and depths of NO.1 pit profile for liquid injection

剖面位置(m)	截距 a	斜率 b	相关系数 R^2
y = 20	69.4	0.69	0.86
y = 40	118.89	1.19	0.67
y = 60	74.8	0.84	0.85
y = 80	57.28	0.57	0.81
y = 100	60.05	0.60	0.92
y = 120	55.1	0.55	0.84

表 9 注液坑二的浸取率与深度的拟合结果
Table 9 Fitting results of leaching rates and depths of NO.2 pit profile for liquid injection

剖面位置(m)	截距 a	斜率 b	相关系数 R^2
y = 40	68.56	0.67	0.88
y = 60	66.88	0.68	0.75
y = 80	172.00	1.71	0.75

前述分析表明，多重分形谱谱宽和优先流比对溶液在矿体中的非均匀渗透过程相对更灵敏，考虑到优先流比计算简单，且不同剖面的优先流比绝对变化值更大，本文选择优先流比作为量化矿体中溶液非均匀渗透过程的参数，分析优先流比对浸取率的影响。

由浸取率与深度的线性关系可知，在相同深度下，系数 b 越大，则稀土浸取率越小，即：b 值越大，表明随深度增加，浸取率变化越慢。图 8 为拟合系数 b 与优先流比的关系，从图 8 可以看出，随优先流比增加，系数 b 近似成负指数减小。

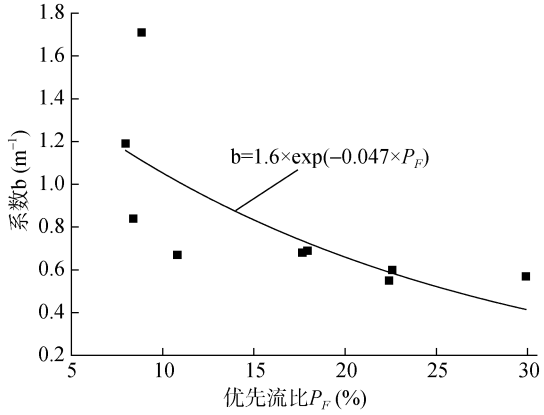


图 8 拟合系数 b 与优先流比的关系
Fig. 8 Relationship between fitting coefficient b and preferential flow fraction

设浸取率为 80% 对应的深度为有效浸取深度 z_e，由式(12)计算得到有效浸取深度与优先流比的关系，如图 9 所示。图 9 表明，随优先流比增加，浸取深度呈负指数减小，即矿体非均匀渗透现象越明显，浸取率越低，有效浸取深度越小。

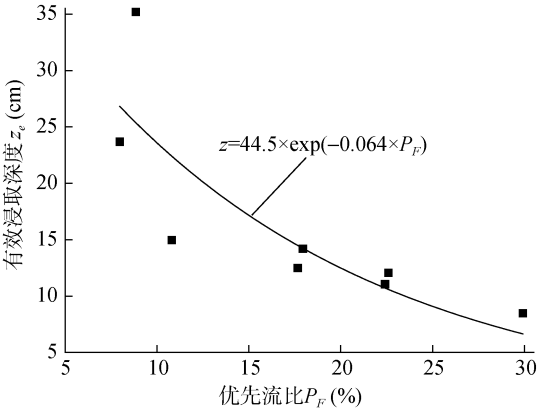


图 9 浸取深度与优先流比的关系
Fig. 9 Relationship between leaching depth and preferential flow fraction

3 结论

1) 江西安远离子型稀土矿体非均匀性参数变异系数都属于中等变异性，矿体剖面染色图像指数的变异系数存在着较大差异，其中优先流比的变异系数最大，其次是基质流深度和染色深度，染色面积比的变异系数最小。

2) 浸取剂溶液在江西安远类型稀土矿体的渗透过程具有多重分形性质，非均匀渗透现象越突出，多重分形谱谱宽越大，多重分形谱宽与优先流比呈正相关关系，且比剖面染色图像指数更灵敏。

3) 通过线性拟合浸取率与深度的变化规律，设浸取率为 80% 对应的深度为有效浸取深度，试验结果

表明，随优先流比增加，浸取率越低，浸取深度越小。

参考文献：

[1] 赵芝, 王登红, 陈振宇, 等. 江西龙南稀土花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、内生矿化特征及成因讨论[J]. 地球学报, 2014, 35(6): 719–725

[2] 袁长林. 中国南岭淋积型稀土溶浸采矿正压系统的地质分类与开采技术[J]. 稀土, 2010, 31(2): 75–79

[3] 盛丰, 王康, 张仁铎, 等. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 101–108

[4] Dahan O, Nativ R, Adar E M, et al. On fracture structure and preferential flow in unsaturated chalk[J]. Ground Water, 2000, 38(3): 444–451

[5] 李萼, 王康, 张仁铎, 等. 非均匀流动示踪试验及活动性流场模型的应用[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 37–45

[6] 王康, 张仁铎, 周祖昊, 等. 土壤非均匀水流运动和溶质迁移显色示踪方法研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 603–610

[7] 吴庆华, 朱国胜, 崔皓东, 等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 118–127

[8] 李永绣, 侯潇, 王悦, 等. 离子吸附型稀土矿层渗透性和稀土收率的确定方法: 中国, 2014108371245.[P]. 2015-04-29

[9] 盛丰, 方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究[J]. 土壤, 2012, 44(1): 144–148

[10] 王康, 张仁铎, 王富庆, 等. 土壤水分运动空间变异性尺度效应的染色示踪入渗试验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 158–163

[11] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. Catena, 2009, 78(1): 36–47

[12] 王康, 张仁铎, 缴锡云. 多孔介质中非均匀流动特性的染色示踪试验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 662–667

[13] 谢华, 王康, 张仁铎, 等. 土壤水入渗均匀特性的染色示踪试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 1–4

[14] 孙洪泉. 分形几何与分形插值[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 88–89

[15] Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6): 1033–1041

[16] 吴庆华, 张家发, 蔺文静, 等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 82–90

[17] Bargués Tobella A, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. Water Resources Research, 2014, 30(7): 3342–3354

[18] 潘洋, 冯秀娟, 马彩云, 等. 基于 GIS 的离子型稀土堆浸尾矿区稀土分布研究[J]. 稀土, 2015(3): 9–13

[19] 陈晓冰, 张洪江, 程金花, 等. 基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 93–100

Effect of Heterogeneity of Leaching Solution on Leaching Rate in Ionic Rare Earth Ore Body

LUO Sihai[1], LUO Tao[1], WANG Guanshi[1,2*], LIU Jian[1] , HU Shili[1], ZHU Dongmei[1]

(1 *School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering*, *Jiangxi University of Science and Technology*, *Ganzhou*, *Jiangxi* 341000, *China*; 2 *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: In order to study the effect of heterogeneity of leaching solution on leaching rate and leaching depth in ionic rare earth ore body, an infiltration test was carried out in the ion-type rare-earth mine in Anyuan of Jiangxi with the mixed solution of brilliant blue and ammonium sulfate, in which brilliant blue was used for tracing the permeation process of leaching solution while ammonium sulfate used for reflecting the permeation process of ion exchange. The inhomogeneous permeation process of the solution in ore body was obtained, and morphological image processing technique was used to determine the parameters of dyeing images and the widths of multi-fractal spectra of the staining profiles. The effect of inhomogeneous permeation process on the leaching depth of rare earth ions was also analyzed. The results showed that the variation coefficient of inhomogeneous parameters were medium, leaching agent had multi-fractal properties in inhomogeneous permeation process. Multi-fractal spectrum width and preferential flow fraction were more sensitive to inhomogeneous permeation process compared with the depth of matrix flow, the dyeing image parameters, such as the dyeing depth and dyeing area ratio. With the increase of the preferential flow fraction, the leaching rate and the leaching depth decreased.

Key words: *In-situ* leaching; Ionic rare earth mine; Heterogeneity; Leaching rate