

DOI: 10.11779/CJGE202202006

渗流作用下多孔介质内颗粒迁移与堵塞规律研究

周永潮¹, 许恒磊¹, 陈佳代¹, 张仪萍¹, 唐耀^{*2}, 彭宇³

(1. 浙江大学市政工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 渗流作用下细颗粒在多孔介质中的迁移穿透与堵塞规律对于防止岩土内部侵蚀、提高人工渗滤设施性能具有重要意义。为此, 以砾石为填料, 基于 X-CT 技术开展了多孔介质内颗粒在渗流作用下的迁移与堵塞规律研究。研究表明, 颗粒在多孔介质中的穿透率总体上随着渗流流速的增大而增大, 但不同粒径比工况下, 渗流流速对穿透率影响呈现出较大差异。通过 X-CT 扫描发现, 小粒径比 (d_{ss}/d_{fs}) 下, 颗粒在后期呈现稳定的竖向分布, 呈现堵塞状态, 而在大 d_{ss}/d_{fs} 条件下, 竖向累积截留曲线呈直线分布且持续变化, 表明颗粒发生持续穿透。在此基础上, 分析了粒径比与渗流流速对颗粒迁移的影响规律与物理堵塞形成阈值, 确定了堵塞形成的上下阈值线。进一步通过量纲分析发现, 耦合参量 $(d_{ss}/d_{fs})^{2.1} Re^{*1.8} (tu^*/H)^{0.2}$ 是预测颗粒穿透率 m^* 的最佳无量纲参量, 并确定了计算穿透率的表达式。

关键词: 渗流; 多孔介质; 颗粒; 迁移; 堵塞

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)02-0255-09

作者简介: 周永潮(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事城市水环境及新型可持续排水系统的教学和科研工作。E-mail: zhoutang@zju.edu.cn。

Particle migration and clogging in porous media with seepage

ZHOU Yong-chao¹, XU Heng-lei¹, CHEN Jia-dai¹, ZHANG Yi-ping¹, TANG Yao², PENG Yu³

(1. The Institute of Municipal Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and

Geoenvironmental Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3 College

of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The migration and clogging of fine particles in porous media with seepage are of great significance for preventing the internal erosion of soils and improving the performance of artificial filtration facilities. The migration and clogging in the gravel substrate under the seepage are studied based on the X-CT technology. The results indicate that the migration of particles in porous media generally increases with the increase of seepage velocity, and its influence is significantly different under different particle size ratios. The X-CT results indicate that the particles present a stable vertical distribution in the column and clogging formed under the smaller d_{ss}/d_{fs} . However, the vertical accumulative interception curve of particles presents a linear distribution and changes continuously, indicating that the particles penetrate continuously under the higher d_{ss}/d_{fs} . On this basis, the threshold whether particles penetrating or clogging is determined. Moreover, the factor of $(d_{ss}/d_{fs})^{2.1} Re^{*1.8} (tu^*/H)^{0.2}$ is the best dimensionless parameter for calculating the penetration rate of particles, and the relevant formula is developed.

Key words: seepage; porous medium; particle; migration; clogging

0 引言

渗流作用下多孔介质中细颗粒迁移运动问题涉及到许多工程领域。如渗流作用下土体细颗粒从承力骨架中迁移流失产生内部侵蚀现象从而导致管涌、地陷等问题^[1]; 细颗粒在多孔介质中的截滤、堆积则会引起地下水回灌的反滤层、雨水下渗的渗透路面、地下污水渗滤处理系统等人工渗滤设施的堵塞问题^[2], 从而导致人工渗滤设施净化效率降低, 甚至最终失效。因此, 研究渗流条件下颗粒在多孔介质内的迁移与堵

塞规律对于预防工程灾害、提高人工渗滤设施净化效果具有重要意义。

渗流条件下多孔介质内颗粒的迁移堵塞问题一直是国内外研究的热点之一。在多孔介质细颗粒迁移方面, 陈星欣等^[3]利用土柱试验, 研究了重力对饱和和多

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878597, 51908493); 浙江省分析测试项目 (LGC19E020001)

收稿日期: 2021-02-01

***通信作者** (E-mail: yaotang@zju.edu.cn)

孔介质中颗粒运输的影响,发现重力和渗流速度是影响饱和多孔介质中颗粒运输的重要因素。白冰等^[4]开展了圆柱穿透试验,对天然硅粉悬浮颗粒在饱和的石英多孔介质的穿透规律进行了研究,发现颗粒粒径、渗流速度对颗粒的穿透过程影响较大。同时穿透过程中,悬浮颗粒的浓度也是影响颗粒穿透的主要因素^[4]。除了颗粒粒径与渗流流速外,多孔介质孔隙结构也是影响颗粒迁移的因素之一。Garcia 等^[5]通过沥青混合料的渗流堵塞试验发现,孔隙直径是影响颗粒迁移的主要因素,而孔隙迂曲度、欧拉数和孔隙率对细颗粒在多孔介质中的堵塞率没有显著影响。

针对颗粒在多孔介质中的堵塞问题,前人也进行了大量研究,Liu 等^[6]通过微流体芯片试验对颗粒的物理堵塞机理展开研究,将堵塞类型分为依赖堵塞(新堵塞处存在一个或多个相邻孔道被堵塞)与独立堵塞(新堵塞处无相邻孔道被堵塞);Ye 等^[7]通过河砂填充柱的渗流试验提出了表层截留、内部阻塞与附着三种颗粒堵塞类型;Du 等^[8]则将堵塞分为表面堵塞、内部堵塞和混合堵塞 3 种类型,这与 Gerber 等^[9]提出的深度沉积(颗粒被输移到填料层某一深度处并最终停止)与表面沉积(颗粒被阻塞在填料层表面,积聚并产生堆积)两种堵塞类型具有相似的规律。同时,多位学者分别从宏观与微观角度对颗粒在多孔介质中的输移堵塞分布进行了分析。Zhang 等^[10]通过可渗透路面堵塞的模拟试验,将堵塞的微观过程分为快速堵塞阶段、堵塞恢复阶段、缓慢堵塞阶段、稳定堵塞阶段等 4 个阶段。而对于堵塞的影响因素研究方面,多位学者以填料与细颗粒的中值粒径之比(d_{ss}/d_s)为主要评价指标,发现粒径比越小越容易形成堵塞^[11-12];Alem 等^[13]考虑流体运动的驱动作用,以渗流流速为指标,发现低流速会促使颗粒在多孔介质表层产生沉积,高流速则会增大颗粒的堵塞深度。

尽管多孔介质内细颗粒的迁移和堵塞方面已开展了较为广泛的研究,但在渗流作用下,多孔介质内颗粒的迁移堵塞规律仍缺乏深入认识,颗粒在多孔介质中的穿透量与粒径比、渗流流速等影响因素的定量关系仍缺乏深入了解,颗粒在多孔介质中由迁移运动至形成截虑堵塞的判别依据也缺乏理论基础。为此,本文以砾石为填料,开展了多孔介质内颗粒在渗流作用下的迁移与堵塞规律研究,基于 X-CT 技术揭示了不同因素下颗粒在多孔介质内的迁移与堵塞机制,分析了粒径比与渗流流速对颗粒迁移的影响规律与物理堵塞形成阈值,并通过量纲分析定量表征了颗粒穿透率,对多孔介质内细颗粒的运动规律的认识具有一定的科学意义和应用价值。

1 研究方法

1.1 试验装置

本研究采用砾石填料柱的多孔介质,填料柱由有机玻璃制成,高 260 mm,内径 50 mm,分成进水区、填料区和出水区,如图 1 所示。填料区下部设有网格尺寸为 1 mm×1 mm 钢丝网的承托层,可承托填料,同时不阻碍细颗粒穿透。出水区用于收集出水及可穿透细颗粒,出水区下连接可拆卸底盘,用于收集可穿透颗粒。填料柱上端连接水箱,确保连续进水。出水口处连接蠕动泵,通过出水流量控制多孔介质渗流流速。试验开始前,填料柱内装填砾石颗粒,经过反复振捣确保砾石颗粒压实,砾石填料层高度为 150 mm。制样完成后在样品表面铺设总质量为 M 的塑料砂细颗粒。随后,蠕动泵以低流速逆向进水,水位逐渐从柱子底部上升以排除多孔介质内空气,保证试验的饱和和渗流。试验开始后,蠕动泵设置好相应流量,正向出水,进行饱和和渗流,当运行 120 min 后,粒径比最大组表层细颗粒基本均透入填料内部,因此,以 120 min 作为试验结束时间。停止试验后取下底盘,取出底盘中的颗粒并在 105 °C 条件下烘干至恒重(GB11901-89),称量其质量 m 。

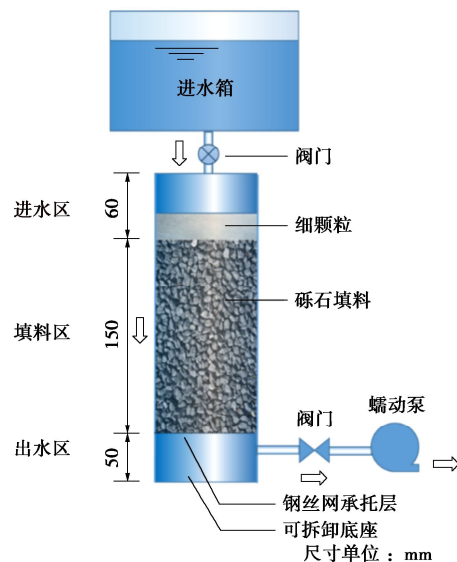


图 1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 试验材料

试验中组成多孔介质的填料为砾石,按粒度分为 7 种,其筛分粒径分别为 2~3, 3~4, 4~5, 5~6, 6~7, 7~8, 8~9 mm。试验采用的细颗粒为 III 型树脂砂,密度为 1.4 g/cm³,稍大于水,按粒度分为 6 种,级配曲线如图 2 所示。具体试验工况及参数如表 1 所示。

表 1 试验工况及参数

Table 1 Experimental programs

填料粒径 d_{ss}/mm	颗粒粒径 d_b/mm	填料层高度 H/mm	孔隙率 φ	流量 $Q/(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	填料粒径 d_{ss}/mm	颗粒粒径 d_b/mm	填料层高度 H/mm	孔隙率 φ	流量 $Q/(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$
2.5	0.372	149.6	0.427	106.40	5.5	0.118	2.5	0.372	149.6
2.5	0.328	149.9	0.427	106.40	5.5	0.328	2.5	0.328	149.9
2.5	0.202	149.7	0.427	106.36	5.5	0.238	2.5	0.202	149.7
2.5	0.169	151.6	0.427	106.36	5.5	0.202	2.5	0.169	151.6
2.5	0.202	150.9	0.427	98.22	5.5	0.169	2.5	0.202	150.9
2.5	0.169	150.1	0.427	98.22	5.5	0.328	2.5	0.169	150.1
2.5	0.202	149.1	0.427	90.01	5.5	0.238	2.5	0.202	149.1
2.5	0.169	152.2	0.427	90.01	5.5	0.202	2.5	0.169	152.2
2.5	0.202	150.6	0.427	81.76	5.5	0.169	2.5	0.202	150.6
2.5	0.169	151.3	0.427	81.76	5.5	0.328	2.5	0.169	151.3
2.5	0.202	150.3	0.427	73.62	5.5	0.238	2.5	0.202	150.3
2.5	0.169	150.4	0.427	73.62	5.5	0.202	2.5	0.169	150.4
2.5	0.372	148.4	0.427	130.90	5.5	0.169	2.5	0.372	148.4
2.5	0.372	148.3	0.427	122.70	5.5	0.202	2.5	0.372	148.3
2.5	0.372	148.3	0.427	114.50	5.5	0.169	2.5	0.372	148.3
3.5	0.372	150.7	0.434	106.21	5.5	0.328	3.5	0.372	150.7
3.5	0.238	150.8	0.434	106.40	5.5	0.202	3.5	0.238	150.8
3.5	0.169	148.8	0.434	106.36	5.5	0.169	3.5	0.169	148.8
3.5	0.118	148.9	0.434	106.30	6.0	0.372	3.5	0.118	148.9
3.5	0.372	149.3	0.434	98.15	6.0	0.238	3.5	0.372	149.3
3.5	0.328	149.9	0.434	98.26	6.5	0.372	3.5	0.328	149.9
3.5	0.169	148.4	0.434	98.22	6.5	0.328	3.5	0.169	148.4
3.5	0.118	148.7	0.434	98.16	6.5	0.238	3.5	0.118	148.7
3.5	0.372	150.8	0.434	89.99	6.5	0.169	3.5	0.372	150.8
3.5	0.328	149.9	0.434	89.99	6.5	0.118	3.5	0.328	149.9
3.5	0.169	149.8	0.434	90.01	6.5	0.372	3.5	0.169	149.8
3.5	0.118	150.7	0.434	90.01	6.5	0.328	3.5	0.118	150.7
3.5	0.372	150.1	0.434	81.85	6.5	0.169	3.5	0.372	150.1
3.5	0.328	151.1	0.434	81.85	6.5	0.372	3.5	0.328	151.1
3.5	0.169	148.9	0.434	81.76	6.5	0.328	3.5	0.169	148.9
3.5	0.372	149.6	0.434	73.62	6.5	0.169	3.5	0.372	149.6
3.5	0.169	148.9	0.434	73.60	6.5	0.372	3.5	0.169	148.9
3.5	0.372	150.0	0.434	122.70	6.5	0.328	3.5	0.372	150.0
4.5	0.328	151.6	0.437	106.40	6.5	0.169	4.5	0.328	151.6
4.5	0.202	150.7	0.437	106.36	6.5	0.372	4.5	0.202	150.7
4.5	0.372	150.8	0.437	98.26	6.5	0.328	4.5	0.372	150.8
4.5	0.328	150.2	0.437	98.15	6.5	0.169	4.5	0.328	150.2
4.5	0.202	149.7	0.437	98.22	6.5	0.328	4.5	0.202	149.7
4.5	0.372	151.3	0.437	89.99	6.5	0.328	4.5	0.372	151.3
4.5	0.328	150.2	0.437	89.99	6.5	0.328	4.5	0.328	150.2
4.5	0.202	148.2	0.437	90.01	6.5	0.328	4.5	0.202	148.2
4.5	0.372	148.9	0.437	81.85	6.5	0.328	4.5	0.372	148.9
4.5	0.328	151.1	0.437	81.85	6.5	0.169	4.5	0.328	151.1
4.5	0.202	147.8	0.437	81.79	6.5	0.328	4.5	0.202	147.8
4.5	0.202	151.6	0.437	73.60	6.5	0.169	4.5	0.202	151.6
4.5	0.328	149.5	0.437	163.71	6.5	0.328	4.5	0.328	149.5
4.5	0.328	148.2	0.437	155.40	6.5	0.169	4.5	0.328	148.2
4.5	0.328	149.9	0.437	147.40	6.5	0.328	4.5	0.328	149.9
4.5	0.328	150.9	0.437	138.79	6.5	0.169	4.5	0.328	150.9
4.5	0.328	148.6	0.437	130.90	6.5	0.328	4.5	0.328	148.6
4.5	0.328	150.3	0.437	122.70	6.5	0.169	4.5	0.328	150.3
4.5	0.328	148.3	0.437	114.50	6.5	0.169	4.5	0.328	148.3
4.5	0.328	151.7	0.437	106.30	6.5	0.169	4.5	0.328	151.7
4.5	0.328	148.6	0.437	98.16	6.5	0.169	4.5	0.328	148.6
4.5	0.328	148.9	0.437	90.01	7.5	0.202	4.5	0.328	148.9
5.5	0.328	149.1	0.422	106.36	7.5	0.202	5.5	0.328	149.1
5.5	0.238	151.0	0.422	106.30	8.5	0.328	5.5	0.238	151.0
5.5	0.202	151.3	0.422	106.30	8.5	0.328	5.5	0.202	151.3
5.5	0.169	150.9	0.422	106.36	8.5	0.328	5.5	0.169	150.9

1.3 检测与分析方法

(1) 多孔介质孔隙率的测定

多孔介质的初始孔隙率 φ 由质量体积法测得:

$$\varphi = \left(1 - \frac{M_{ss}}{V_{ss}\rho_{ss}}\right) \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中, M_{ss} 为填料试样质量, V_{ss} 为填料试样体积, ρ_{ss}

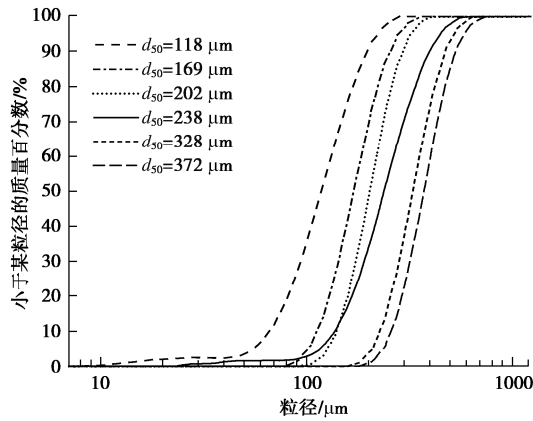


图2 树脂砂级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of resin sand

为填料试样的真密度, 其中, 试样的真密度采用排水法测定。

(2) 细颗粒穿透率的测定

试验过程中, 利用蠕动泵保证填料柱内流量恒定为 Q ; 试验结束后, 在 105°C 条件下将出水口收集颗粒烘干至恒重并称量其质量记为 m 。在运行过程中定义细颗粒穿透率 m^* 、平均孔隙流速 u^* 如下:

$$m^* = \frac{m}{M}, \quad (2)$$

$$u^* = \frac{Q}{\phi \pi r^2}, \quad (3)$$

式中, r 为填料柱内径, ϕ 为对应工况下砾石填料孔隙率, M 为试验开始前在填料试样表面铺设的塑料砂的总质量。

(3) X-CT 分析

本文采用 X-CT 技术对颗粒穿透与堵塞过程进行原位测试与分析, 为保证扫描尺寸及精度, 对填料层堵塞与迁移变化最大的上层 70 mm 部分进行扫描。X-CT 采用 Nikon XTH 225/320 LC 型微焦点工业 CT 机, 扫描时工作电压为 160 kV, 电流为 150 μA , 通过 0.25 mm 厚的铜滤波器减少 X 射线束的硬化, X 射线源距探测器距离为 1018 mm, 样品距射线源的距离为 218.7 mm, 在此扫描参数下, 分辨率为 0.0341 mm。扫描过程中每隔 0.5 s 生成一张投影, 总共生成 2500 张投影, 每张投影的尺寸为 200×2000 像素。采用软件包 CT-Pro 3D (Nikon Metrology) 处理原始投影数据集, 重构出 16bit 的三维 RAW 体积文件。然后使用 VGStudio MAX 3.1 软件 (Volume Graphics GmbH) 对该体积文件进行切片与灰度阈值分割等操作, 最终得到沿直径方向纵剖面的二维 TIFF 图像。其中, 孔隙的灰度阈值为 16001~16734, 颗粒的灰度阈值为 16734~17748, 填料的灰度阈值为 17748~19419。具体灰度分布如图 3 所示。

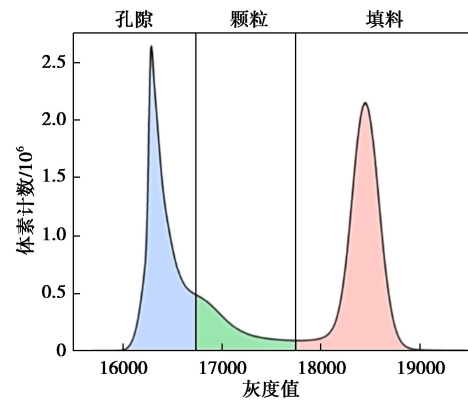


图3 灰度阈值分割

Fig. 3 Threshold values of grey scale

获取二维图像后, 以填料表层为零水平面 ($H=0$), 利用 ImageJ 计算深度 H 以上部分颗粒在填料层中的截留率 R_H :

$$R_H = \frac{C_H}{C_t}, \quad (4)$$

式中, C_H 为深度 H 以上部分中颗粒含量 (g), C_t 为初始总颗粒质量 (g)。 C_H 与 C_t 的值通过像素数 (pixel) 来求解。

2 结果与讨论

2.1 多孔介质中细颗粒输移与堵塞规律

细颗粒在多孔介质内的迁移堵塞过程如图 4 所示。由图 4 可知, $d_{ss}/d_{fs}=6.72$, $u^*=182.78 \text{ m/d}$ 工况下, 表层堆积颗粒在水流作用下逐渐向多孔介质内部迁移, 运行 20 min 时, 多孔介质上部孔隙结构中堆积了大量的颗粒, 上层孔隙结构几乎被颗粒充满。但越往下颗粒在多孔介质孔隙结构中的分布迅速减少。Gerber 等^[12]研究也发现随着粒径比 d_{ss}/d_{fs} 的减小, 颗粒的最终堵塞深度会越来越靠近填料表层, 且粒径比越小, 表面沉积开始得越快, 堆积得越多。这是由于小粒径比情况下, 颗粒在输移过程中更易遇到与本身尺寸相近的孔道而产生沉积, 即在沉积前输移的路径更短, 深度更小。而后续颗粒的不断在此处积聚, 最终导致较浅处堵塞的形成。Gibson 等^[14]的研究也发现小粒径比工况下细颗粒只堵塞了靠近床层表面的一层较薄的砾石孔隙, 阻止了随后的渗透。另外, 由图 4 可知, 运行 30 min 后, 表层颗粒基本没有减少, 颗粒在多孔介质中的竖向分布规律相较于 20 min 时基本不变。从图 5 (a) 中也可发现, 前 20 min, 相同高度下颗粒竖向累积截留率减少, 说明颗粒在渗流作用下逐渐向多孔介质内迁移, 而 20 min 后, 累积截留率规律基本不变, 竖向 40~45 mm 处累积截留率达到 100%, 这说明颗粒在多孔介质内形成了稳定沉积。

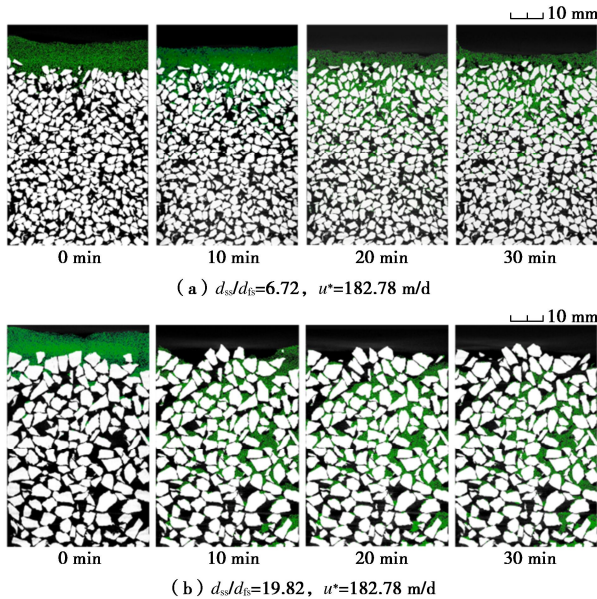


图4 两种工况下细颗粒在多孔介质中的穿透与堵塞过程
(绿色为细颗粒, 白色为砾石填料)

Fig. 4 CT images of migration and clogging of fine particles in porous media (fine particles in green, gravel substrate in white)

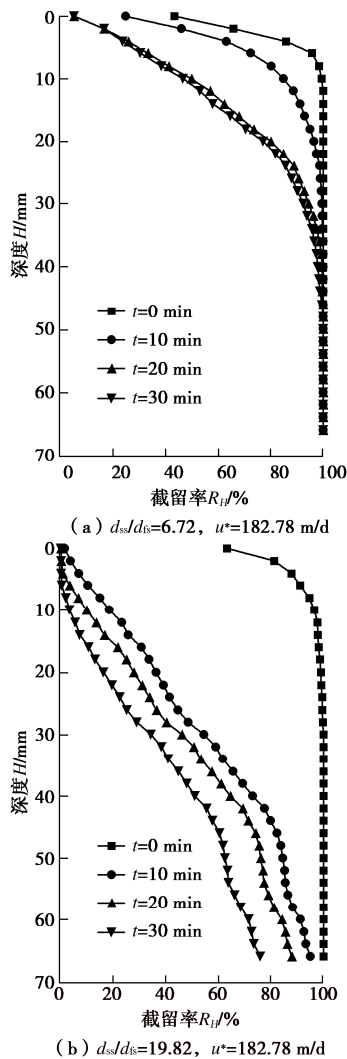


图5 两种工况下细颗粒在多孔介质中的累积截留率

Fig. 5 Distribution of accumulated retention rate of fine particles in porous media

在 $d_{ss}/d_{fs}=19.82$, $u^*=182.78$ m/d 工况下, 表层颗粒在运行初期迅速向多孔介质内部迁移, 表层颗粒逐渐减少, 颗粒层逐渐向下运移。从图 5 (b) 也可发现, 相同高度下, 颗粒截留率随时间持续减少, 同时, 截留率沿着多孔介质向下逐渐均匀增加, 这与 Gibson 等^[14]的研究结果较为一致, 说明在大粒径比工况下, 渗流作用使得颗粒持续向多孔介质内部迁移并发生穿透。尽管此工况下 CT 扫描图中也发现多孔介质孔隙内被颗粒堵塞充满的现象, 但由于多孔介质孔隙尺寸明显大于颗粒粒径, 导致孔隙内堵塞并不稳定, 孔隙内颗粒在渗流作用下将进一步向下迁移, 这一状态即为暂态堵塞^[16]。

2.2 多孔介质中细颗粒输移与堵塞判别准则

不同粒径比条件下, 相同时间内细颗粒穿透率 m^* 随孔隙平均渗流流速 u^* 变化的结果如图 6 所示。由图 6 可知, 在渗流条件下, 颗粒穿透率总体上随着渗流流速的增大而增大, 表明大渗流流速下颗粒在多孔介质中的迁移量明显增加, 颗粒堵塞率则显著降低, 这与前人的研究结果较为一致^[8], Liu 等^[16]研究也发现多孔介质中颗粒的迁移与截留和渗流流速密切相关。同时, 由图 6 可知, 渗流流速对颗粒穿透率的作用规律也受到粒径比的显著影响, 在 $d_{ss}/d_{fs}=6.72$ 的工况下, 颗粒随着渗流流速的增大均未产生穿透; 而当 $d_{ss}/d_{fs}=38.46$ 时, 颗粒穿透率随着流速的增大则迅速增大。

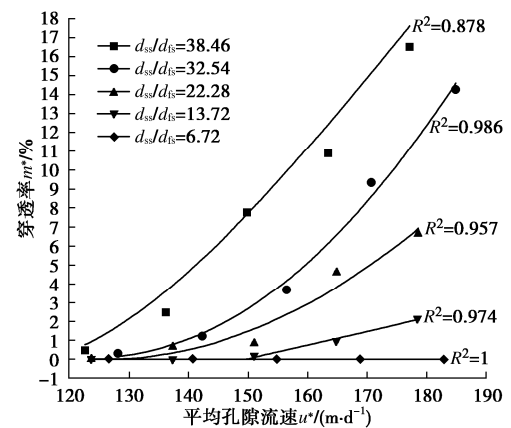


图6 不同粒径比与渗流流速下颗粒在多孔介质中的穿透率

Fig. 6 Penetration rates of fine particles through porous media with various particle size ratios and seepage velocities

将渗流流速与穿透率的影响进行拟合, 可得到不同粒径比下颗粒穿透率与渗流流速的关系, 如表 2 所示。当 $d_{ss}/d_{fs}=6.72$ 时, 穿透率与渗流流速的零次方相关, 即不同渗流流速下均无法穿透, $d_{ss}/d_{fs}=13.72$ 的工况为一种临界情况, 当 $u^*<152.78$ m/d 时也未产生穿透, 当 $u^*>152.78$ m/d 时, m^* 与 u^* 为一次函数关系。

表 2 不同粒径下颗粒穿透率与平均渗流速度的拟合表达式

Table 2 Fitting formulas in terms of penetration rate of fine particles and mean seepage velocity with various particle sizes					
d_{ss}/d_{fs}	拟合曲线公式	A	B	C	D
38.46	$m^*=A+Bu^*+Cu^{*2}+Du^{*3}$	89.80 ± 773.75	-2.00 ± 15.75	0.01 ± 0.11	$-2.55 \times 10^{-5} \pm 2.36 \times 10^{-4}$
32.54	$m^*=A+Bu^*+Cu^{*2}$	39.53 ± 80.82	-0.63 ± 1.03	$2.49 \times 10^{-3} \pm 3.26 \times 10^{-3}$	—
22.28	$m^*=A+Bu^*+Cu^{*1.5}$	61.26 ± 22.04	-0.98 ± 0.29	$3.96 \times 10^{-3} \pm 9.10 \times 10^{-4}$	—
13.72	$m^*=A+Bu^*$	-10.83 ± 1.38	$0.07 \pm 8.36 \times 10^{-3}$	—	—
6.72	$m^*=0$	—	—	—	—

在 $d_{ss}/d_{fs}=22.28, 32.54, 38.46$ 的工况下, 则 m^* 与 u^* 分别为 1.5, 2.0, 3.0 次函数关系, 即粒径比越大, 渗流流速对穿透率的影响越显著。这主要是因为较大的粒径比工况下, 多孔介质孔隙相较于颗粒粒径具有较大的尺寸, 颗粒在多孔介质内的堆积结构不稳定, 更易受到水流冲刷而发生内部侵蚀^[10]。

由此可见, 颗粒在多孔介质内的运动受到了粒径比与渗流流速的双重影响, 也即渗流流速与粒径比制约着颗粒的迁移与堵塞, 通过本试验结果可以得到考虑颗粒粒径和渗流速度的颗粒堵塞与穿透相图如图 7 所示。

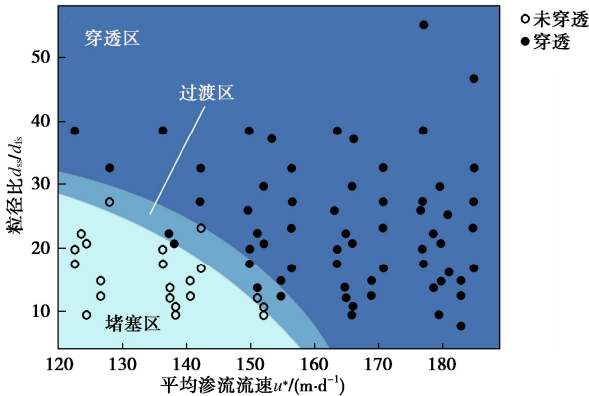


图 7 多孔介质内颗粒穿透与堵塞相图

Fig. 7 Phase diagram of penetration and clogging of fine particles in porous media

由图 7 可知, 在颗粒穿透与堵塞之间存在着较为清晰的分界, 小于该分界范围内的工况, 颗粒均未穿透, 可认为细颗粒在多孔介质内形成稳定的堵塞, 该区域可称为堵塞区; 而当粒径比与渗流流速大于该分界条件的, 颗粒则能穿透多孔介质, 形成细颗粒的内部侵蚀, 该区域可视为穿透区。因此, 该分界可视为颗粒在多孔介质内迁移与堵塞的阈值。关于颗粒在多孔介质中的堵塞判别国内外学者也提出了不同的阈值判别方法, 如 Gibson 等^[14]以 $d_{ss}^{15}/d_{fs}^{85} > 15.4$ 作为颗粒穿透的判别依据; Davis 等^[15]则提出了以 $d_{ss}/(d_{fs}\sigma_{ss})$ 作为判别颗粒是否穿透的指标 (σ_{ss} 为填料的几何标准差), 当 $d_{ss}/(d_{fs}\sigma_{ss}) > 27$ 时, 颗粒发生穿透。虽然 Garner 等^[17]认为土体内部颗粒侵蚀受到颗粒尺寸及水力条件等因

素的耦合影响, 但是尚没有考虑水力条件的颗粒穿透判别准则。本研究则发现颗粒堵塞与穿透的判别阈值同时受粒径比和平均渗流流速的影响, 根据试验结果可以确定穿透与堵塞的分界线。在分界线附近存在颗粒穿透与未穿透的不确定现象, 形成一个不确定的过渡区, 因此, 本文研究提出多孔介质中细颗粒迁移与堵塞判别的上下阈值线, 超过上阈值线则发生穿透, 而低于下阈值线则堵塞。通过试验数据拟合, 颗粒堵塞判别的上下阈值线为

$$d_{ss}/d_{fs} = 37.5 - 5.16e^{\frac{u^*-118}{27.5}} \quad (\text{上阈值线}) \quad (5)$$

$$d_{ss}/d_{fs} = 37.8 - 12.16e^{\frac{u^*-128}{29.3}} \quad (\text{下阈值线}) \quad (6)$$

2.3 多孔介质中细颗粒穿透率定量表征

细颗粒在多孔介质中的迁移穿透易造成较大破坏, 为此, 本文进一步研究穿透率与影响因素之间的定量关系。如前述分析, 穿透率 m^* 与粒径比 d_{ss}/d_{fs} 、平均孔隙流速 u^* 以及运行时间 t 具有较大相关性, 同时也受到填料层内部孔隙结构^[5]与流体性质的影响。孔隙结构主要通过填料层的渗透率 K 、粗糙度 k_s 与填料层高度 H 来表征^[18-19], 渗流流体性质则主要有流体黏度 μ 和密度 ρ 。因此, 穿透率 m^* 为

$$m^* = f\left(\frac{d_{ss}}{d_{fs}}, u^*, K, k_s, \mu, \rho, H, t\right) \quad (7)$$

式中, d_{ss}/d_{fs} 量纲为 1, k_s 可认为与填料粒径 d_{ss} 成正比^[20], 即 $k_s = \alpha d_{ss}$ 。通过 π 定理进行量纲分析。选取 u^*, μ, ρ, t 作为基本量, 则有

$$\pi_1 = d_{ss} u^* \rho \mu^{-1} \quad (8)$$

$$\pi_2 = K^{0.5} u^* \rho \mu^{-1} \quad (9)$$

$$\pi_3 = t u^* / H \quad (10)$$

将式 (8) ~ (10) 代入式 (7), 得

$$m^* = f\left(\frac{d_{ss}}{d_{fs}}, \frac{d_{ss} u^* \rho}{\mu}, \frac{K^{0.5} u^* \rho}{\mu}, \frac{t u^*}{H}\right) \quad (11)$$

根据 Huston 等^[15]的定义, 表观粗糙度雷诺数 Re^* 与表观佩克莱数 R_k 分别为

$$Re^* = \frac{d_{ss} u^* \rho}{\mu} \quad (12)$$

$$R_K = \frac{K^{0.5} u^* \rho}{\mu} \quad (13)$$

将式 (12), (13) 代入式 (11) 得

$$m^* = f\left(\frac{d_{ss}}{d_{fs}}, Re^*, R_K, \frac{tu^*}{H}\right) \quad (14)$$

为验证穿透率 m^* 与式 (14) 中各参量的相关性, 建立 m^* 与 d_{ss}/d_{fs} 、 m^* 与 Re^* 、 m^* 与 R_K 以及 m^* 与 tu^*/H 的线性回归拟合方程。其中, 填料层渗透率 K 根据 Kozeny-Carman 方程估算^[21]:

$$K = 0.0056 d_{ss}^2 \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (15)$$

线性回归结果如图 8 所示。

图 8 (a) ~ (d) 中各方程的相关系数 R^2 分别为 0.455, 0.097, 0.101, 0.04, 总体上 m^* 与 d_{ss}/d_{fs} 、 Re^* 、 R_K 及 tu^*/H 相关性较差, 其中 d_{ss}/d_{fs} 稍优于其他三参数, 说明在单一量纲 1 参量中, d_{ss}/d_{fs} 能相对更好地预测 m^* 的值, 但单一参数与穿透率的相关性仍然不佳。

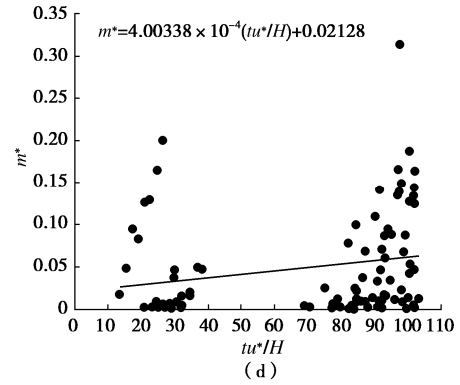
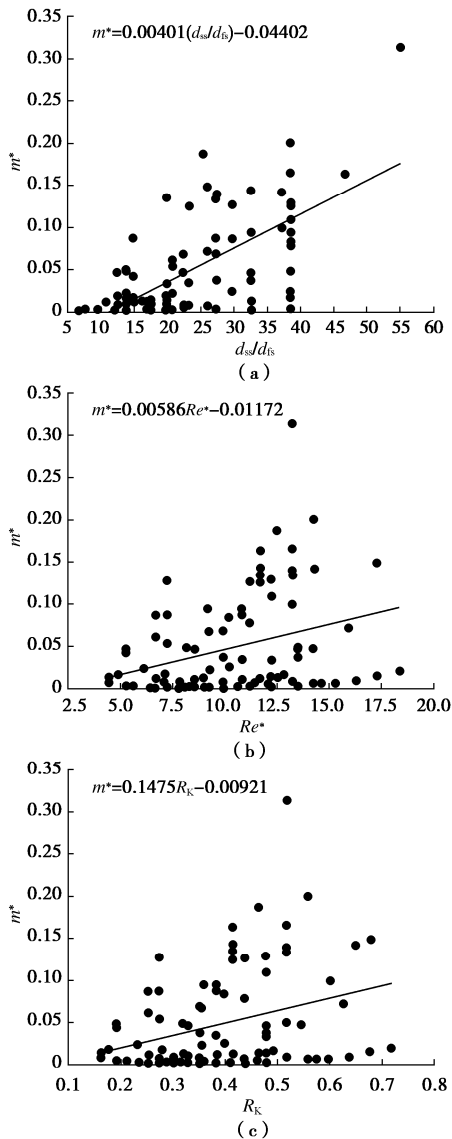


图 8 不同单一参数与穿透率的线性回归结果

Fig. 8 Linear regression of penetration rate with a single parameter

为进一步探究预测 m^* 的最佳无量纲参量, 将式 (14) 转化为

$$m^* = f\left[\left(\frac{d_{ss}}{d_{fs}}\right)^a (Re^*)^b R_K^c \left(\frac{tu^*}{H}\right)^d\right] \quad (16)$$

运用最小二乘法建立不同 a , b , c 值条件下 $m^* (d_{ss}/d_{fs})^a (Re^*)^b R_K^c (tu^*/H)^d$ 的线性回归方程, 发现当 $a=2.1$, $b=1.8$, $c=0$, $d=0.2$ 时, 复合参数与穿透率相关性最强, 结果如图 9 所示。

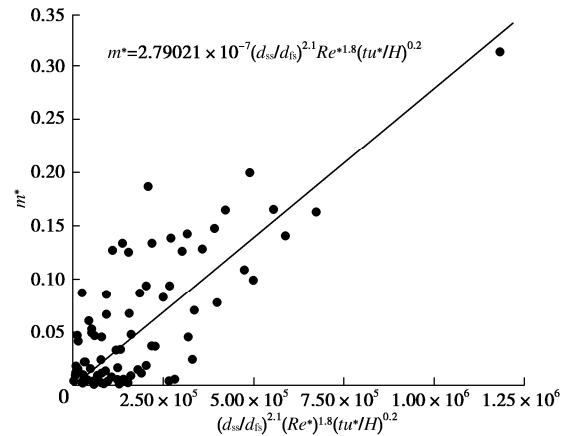


图 9 复合参数与穿透率的线性回归结果

Fig. 9 Linear regression of penetration rate with multiple parameters

由图 9 所示, R^2 达到 0.769, 此时穿透率的计算公式为

$$m^* = 2.79021 \times 10^{-7} \left(\frac{d_{ss}}{d_{fs}}\right)^{2.1} (Re^*)^{1.8} \left(\frac{tu^*}{H}\right)^{0.2} \quad (17)$$

结果表明, 粒径比与表观粗糙度雷诺数以及归一化运行时间的耦合参量 $(d_{ss}/d_{fs})^{2.1} (Re^*)^{1.8} (tu^*/H)^{0.2}$ 是预测穿透率 m^* 的最佳无量纲参量, 表观佩克莱数 R_K 对穿透率的预测影响不大。由于试验工况的限制, 此表达式适用范围为 $6.72 \leq d_{ss}/d_{fs} \leq 55.08$, $1.1 \text{ mm/s} \leq u^* \leq 3.2 \text{ mm/s}$ 。超过此范围的穿透情况仍需进一步试验验证。

3 结 论

本文以砾石填料柱的物理堵塞为主要研究对象,结合 X-CT 技术,并运用量纲分析的方法研究了多孔介质中细颗粒的穿透与堵塞规律,得出以下 3 点结论。

(1) 在渗流场作用下,颗粒在多孔介质中的穿透率总体上随着渗流流速的增大而增大,但不同粒径比工况下,渗流流速对穿透率影响呈现出较大差异。在较小粒径比下,多孔介质内颗粒在 20 min 后即达到稳定,累积截留率沿填料层竖向迅速增大并在 45 mm 处达到 100%,形成稳定的颗粒堵塞层。而对于较大粒径比的工况,在运行过程中,颗粒持续穿透,竖向累积截留率曲线呈现直线分布。

(2) 不同渗流流速与粒径比工况下细颗粒在多孔介质中的堵塞与穿透存在明显的边界,边界附近颗粒的穿透则存在一个不确定的过渡区,根据这一规律,确定了渗流条件下细颗粒能否穿透多孔介质的上下阈值边界线。

(3) 在穿透率定量关系研究中,粒径比与表观粗糙度雷诺数的耦合参量 $(d_{ss}/d_{fs})^{2.1}(Re^*)^{1.8}(tu^*/H)^{0.2}$ 是预测 m^* 的最佳无量纲参量,据此确定了颗粒穿透多孔介质的定量表达式。

参考文献:

- [1] 罗玉龙, 速宝玉, 盛金昌, 等. 对管涌机理的新认识[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1895 - 1902. (LUO Yu-long, SU Bao-yu, Sheng Jin-chang, et al., New understandings on piping mechanism[J], Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1895 - 1902. (in Chinese))
- [2] FELL R, WAN C F, CYGANIEWICZ J, et al. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(4): 307 - 314.
- [3] 陈星欣, 白 冰. 重力对饱和多孔介质中颗粒输运特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1661 - 1667. (CHEN Xing-xin, BAI Bing. Effect of gravity on transport of particles in saturated porous media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1661 - 1667. (in Chinese))
- [4] 白 冰, 张鹏远, 宋晓明, 等. 渗透作用下多孔介质中悬浮颗粒的迁移过程研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10): 1786 - 1793. (BAI Bing, ZHANG Peng-yuan, SONG Xiao-ming, et al. Transport processes of suspended particles in saturated porous media by column seepage tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1786 - 1793. (in Chinese))
- [5] GARCIA A, ABOUFOUL M, ASAMOAHA F, et al. Study the influence of the air void topology on porous asphalt clogging[J]. Construction and Building Materials, 2019, **227**: 116791.
- [6] LIU Q, ZHAO B, SANTAMARINA J C. Particle migration and clogging in porous media: a convergent flow microfluidics study[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, **124**(9): 9495 - 9504.
- [7] YE X Y, CUI R J, DU X Q, et al. Mechanism of suspended kaolinite particle clogging in porous media during managed aquifer recharge[J]. Groundwater, 2019, **57**(5): 764 - 771.
- [8] DU X Q, YE X Y, ZHANG X W. Clogging of saturated porous media by silt-sized suspended solids under varying physical conditions during managed aquifer recharge[J]. Hydrological Processes, 2018, **32**(14): 2254 - 2262.
- [9] GERBER G, RODTS S, AIMEDIEU P, et al. Particle-size-exclusion clogging regimes in porous media[J]. Physical Review Letters, 2018, **120**(14): 148001.
- [10] ZHANG J, SHE R, DAI Z X, et al. Experimental simulation study on pore clogging mechanism of porous pavement[J]. Construction and Building Materials, 2018, **187**: 803 - 818.
- [11] HUA G F, ZHU W, ZHAO L F, et al. Clogging pattern in vertical-flow constructed wetlands: Insight from a laboratory study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **180**(1/2/3): 668 - 674.
- [12] ZHANG J, MA G D, DAI Z X, et al. Numerical study on pore clogging mechanism in pervious pavements[J]. Journal of Hydrology, 2018, **565**: 589 - 598.
- [13] ALEM A, ELKAWAFI A, AHFIR N D, et al. Filtration of kaolinite particles in a saturated porous medium: hydrodynamic effects[J]. Hydrogeology Journal, 2013, **21**(3): 573 - 586.
- [14] GIBSON S, ABRAHAM D, HEATH R, et al. Vertical gradational variability of fines deposited in a gravel framework[J]. Sedimentology, 2009, **56**(3): 661 - 676.
- [15] HUSTON D L, FOX J F. Clogging of fine sediment within gravel substrates: dimensional analysis and macroanalysis of experiments in hydraulic flumes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **141**(8): 04015015.
- [16] 王子佳. 城市雨洪水地下回灌过程中悬浮物堵塞规律的

实验研究[D]. 长春: 吉林大学,2012. (WANG Zi-jia, Laboratory Research on the Law of Suspended Solids Clogging During Urban Stormwater Groundwater Recharge[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese))

[17] GARNER S J, FANNIN R J. Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event[J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2010, **17**(3): 93 - 98.

[18] WU F C, HUANG H T. Hydraulic resistance induced by deposition of sediment in porous medium[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **126**(7): 547 - 551.

[19] REIDENBACH M A, LIMM M, HONDZO M, et al. Effects of bed roughness on boundary layer mixing and mass flux across the sediment-water interface[J]. Water Resources Research, 2010, **46**(7): W07530.

[20] FLACK K A, SCHULTZ M P, BARROS J M. Skin friction measurements of systematically-varied roughness: probing the role of roughness amplitude and skewness[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2020, **104**(2/3): 317 - 329.

[21] CHAPUIS R P, AUBERTIN M. On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(3): 616 - 628.

彩色插图索引

DOI: 10.11779/CJGE202202003 一文彩色插图	.....	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202202006 一文彩色插图	.....	(封 2)
DOI: 10.11779/CJGE202202010 一文彩色插图	.....	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202202011 一文彩色插图	.....	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202202012 一文彩色插图	.....	(后插 3)
DOI: 10.11779/CJGE202202015 一文彩色插图	.....	(后插 5)
DOI: 10.11779/CJGE202202016 一文彩色插图	.....	(后插 6)
DOI: 10.11779/CJGE202202018 一文彩色插图	.....	(封 3, 封 2)
DOI: 10.11779/CJGE202202021 一文彩色插图	.....	(封 2)
DOI: 10.11779/CJGE202202022 一文彩色插图	.....	(后插 5)