DarSIA：用于多孔介质动态双尺度图像处理的开源 Python 工具箱

Jan Martin Nordbotten[1,2], Benyamine Benali[3], Jakub Wiktor Both[1], Bergit Brattekås[3], Erlend Storvik[1,4], Martin A. Fernø[3,2]

[1] 耦合地下动态建模中心，卑尔根大学数学系 n, 挪威[2] 挪威研究中心，Postboks 22 Nygårdstangen, 5838 卑尔根[2] 卑尔根大学物理与技术系，挪威[3] 西挪威应用科学大学计算机科学、电气工程与数学科学系，挪威

关键词：图像处理、多孔介质、升尺度、软件

亮点：

- 用于对多孔介质中的过程图像及图像序列进行双尺度和多尺度分析的新型开源软件库。• 图像正则化与升尺度的无缝集成。• 多层级图像配准

摘要

理解多孔介质流动本质上是一项多尺度挑战，其核心在于将孔隙尺度过程汇总为连续介质描述，或达西尺度描述。这一挑战也直接体现在图像处理上：颗粒和界面可能清晰可见，但测量时往往需要连续参数。经典图像处理并不适用于这种情形，因为大多数技术没有明确利用图像中包含明确物理过程这一事实。

在此，我们将经典图像处理概念应用于我们所定义的多孔材料及其内部过程的“物理图像”。这通过开发一种新型开源图像分析工具箱得以实现，该工具箱专为多孔材料图像时间序列而设计。

1. 引言

要理解现代多孔介质中的多相流与输运，必然需要同时讨论两个基本尺度：一方面，是相对而言较为

清楚的复杂孔隙空间（在实际中往往未知）内的流体动力学。另一方面，是所谓“达西尺度”上的有效方程，而这些方程仍存在争议。达西尺度被认为足够大，因此可以将分选良好的颗粒堆积体（如球体）视为均质连续材料。

利用孔隙尺度物理学在达西尺度上建立本构定律，一直是多孔介质领域最重要、研究最深入的理论问题之一。相关的开创性论文最早可追溯至 Hubbert [1] （另见 [2, 3, 4]）。这些理论进展得到了大量物理实验和计算实验的支持。在实验方面，我们重点介绍同步辐射断层成像、微型CT和 PET-CT 扫描，以及高分辨率摄影等技术。在计算方面，我们重点介绍流体动力学直接数值模拟、格子玻尔兹曼模拟和网络模型。

然而，尽管人们开展了大量物理和计算实验研究，以增进对孔隙到岩心尺度的理解，但对于如何在达西尺度上解读孔隙尺度数据，仍鲜有共识。一种常见的低阶方法是使用“平均窗口”对数据进行滤波，但这是一种非常粗略的正则化，往往既会保留底层几何中的噪声，也会引入显著的尺度依赖效应 [5, 6]。一种更具数学性的方法是采用均质化技术 [7], ，但当存在陡峭梯度时（例如饱和度前缘附近），这些方法并不适用。在本文中，我们将深入探讨图像正则化方法，并将其作为一种从孔隙尺度向达西尺度进行数据升尺度的新方法。

图像处理领域不断发展，涌现出大量用于规范化图像数据的工具，适用于二维和三维图像。这些工具体现在综合软件包的开发中，例如 OpenCV 库 [8] 和 scikit-image 库 [9]。此类软件包若为开源，既可作为图像处理研究的通用开发平台，也可为需要进行图像处理的用户提供先进的工具集。

遗憾的是，大多数标准图像处理工具本质上都只针对单一尺度，未明确考虑物理尺寸，也没有专门针对多孔介质中普遍存在的双尺度结构提供功能。本文介绍一款开源图像处理工具箱的开发，该工具箱通过针对性地使用 OpenCV 和 scikit-image 并加以专门扩展，专为处理多孔介质的双尺度图像而设计。鉴于其专业用途，该工具箱命名为“DarSIA”，是“达西尺度图像分析”（Darcy-Scale Image Analysis）的简称。

DarSIA 工具箱旨在处理单张图像、成对图像的比较，以及涉及二维和三维多孔材料内部动态的图像时间序列。我们的主要目标和贡献如下：

- 将图像视为“物理图像”，明确为其配备空间分布图，并赋予图像数据物理解释。
- 认识到多孔介质图像中孔隙空间和孔隙度的特殊性。• 提供从孔隙尺度到岩心尺度的升尺度功能。• 提供多层级图像配准功能，以便直接对不同时间和/或不同实验中的图像进行逐点比较。

随着本文的发表，现提供一个面向对象的 Python 包，其中包含这一方向的初步功能，[10], 具体内容详见以下各节。然而，这并非一份关于最终产品的报告，而同样旨在邀请大家参与其中[1]。

本文其余部分的结构如下：第 2 节介绍 DarSIA 的理论框架和主要代码组件。第 3 节通过一个具体案例展示 DarSIA 在实验数据中的应用。最后，第 4 节概述 DarSIA 的后续发展愿景。

2. DarSIA 工具箱

DarSIA 的开发遵循三项关键要求，这也使其有别于标准图像处理工具箱。首先，我们始终将图像视为物理域的表征。其次，物理对象可能具有多尺度特性，其中典型例子是孔隙尺度与达西尺度的结合。第三，我们通常关注比较分析，既包括时间序列意义上的比较，也包括重复实验之间的比较。接下来的三个小节将分别介绍实现这三个目标所需的工具。

2.1. 初始化物理对象的图像标准图像格式提供局部坐标系

（通常以像素为单位），并为该坐标系附加一个可观测函数（通常是颜色、放射性强度或类似属性）。这是一种对现实的表征，而现实本身可以配备物理空间中的坐标系（例如以国际单位制单位表示），并提供某种物理信号（例如光反射、放射性或类似信号）。为了建立这种联系，需要将坐标以及函数值从图像变换到物理系统中。图 2.1 对此作了说明，我们将其形式化如下：

定义 1：对于一个位于 $m \geq n$ 维空间中的物理对象的 n 维物理图像，我们指的是以下构造：

1) 一个图像域 $Y \subset \mathrm{R}^n$，由 p 个可观测量的强度表示 $c(y)$: $Y \to \mathrm{R}^p$。2) 一个物理域 $X \subset \mathrm{R}^m$。3) 一个光滑双射映射 $\phi : Y \to X$。4) 至少 $q \geq 1$ 种解释 $f : \mathrm{R}^p \to \mathrm{R}^q$。

上　　述构造使我们能够直接将物理图像表示为 $f(x) \equiv f\left(c\left(\phi^{-1}(x)\right)\right.$　　$\left.\right)$。

记号。在下文中，向量值解释 f 的各个分量用索引 $j = 0$、……、 $q - 1$标记，即第一个解释为 f_0。此外，虽然从抽象意义上讲，我们允许任意维度，但在实际应用中，我们预计 $2 \leq n \leq m \leq 4$，也就是说，维度至少为二维图像，至多为三维延时成像。

[1] 活跃的代码开发：https://github.com/pmgbergen/DarSIA

当物理图像属于多孔材料时，我们将解释的索引从 0 开始，并始终假设第一个解释 f_0（$\boldsymbol{x}$）是孔隙尺度图像的孔隙空间指示函数，即对固体和孔隙空间分别取值 0 和 1。对于含有噪声的图像（这才是常态，而非例外），孔隙空间指示函数的取值可以在区间 $[0,1]$内。

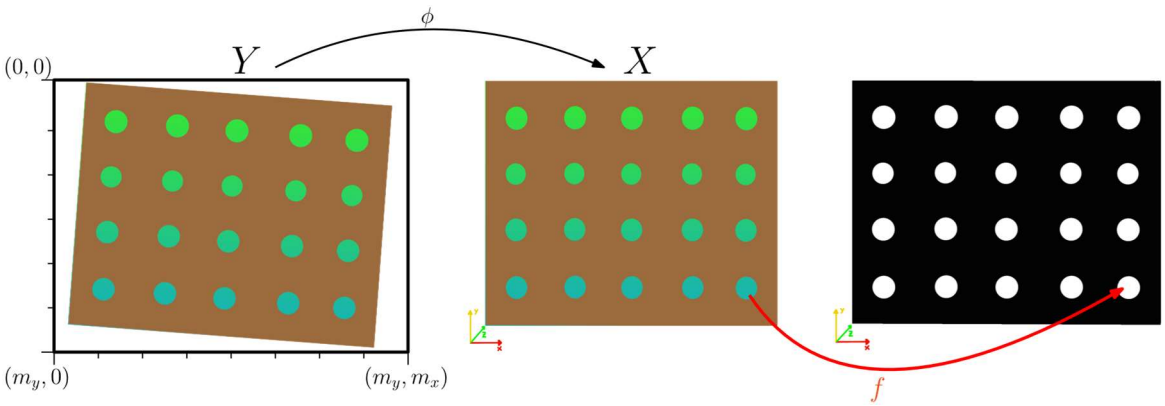

图 2.1。定义 1 的示意图。这里，左侧的 Y 是像素域中的图像，其维度为$(m_y,\ m_x)$；中间和右侧的 X 则是物理域。映射 ϕ 是一个光滑双射，用于在这两个区域之间转换。对于中间的图像，解释函数 f 就是恒等映射，将颜色强度值映射为其自身；而对于最右侧的图像，解释函数会将图像 Y 中的强度值 c 映射为 1（此处以白色表示），如果 c 表明该处是孔隙；否则映射为 0（此处以黑色表示）。

注释 1：物理图像的定义有一种通俗的解释：Y 是物理区域X的图像，并且图像Y 中的每个点 y 都与物理对象X中的一个点精确对应。我们要求将图像量R^p 解释为物理量R^q。因此，对于标准三色图像，$p=3$ 和图像量可以是红、绿、蓝通道的强度值，其中解释$(\boldsymbol{x})f_0$表示孔隙空间指示量，而解释$(\boldsymbol{x})f_1$表示多孔结构中存在单色示踪剂（即$q=2$）。

如定义 1 所示，相较于图像的标准概念，物理图像这一概念提供了额外的空间结构。标准图像文件格式通常不会编码这种额外结构（不过我们特别指出，DICOM 等格式包含等效信息），而 DarSIA 的首要关键功能就是为图像文件补充所需结构，使其能够作为物理图像进行处理。

我们强调，映射 ϕ 的定义所允许的一般性是必需的，尤其是在图像中的坐标（像素）并非只是物理坐标重新缩放后的结果时。这可能是由镜头畸变或与图像采集相关的其他过程造成的。

在传统的图像分析软件中，图像通常表示为由 p 个 $\boldsymbol{c}\in\mathrm{R}^{m_y\times m_x\times p}$ 值强度组成的数组，其中数组的每个元素 $\boldsymbol{c}$ 都称为像素。在 DarSIA 中，这个数组还包含图像所表示的物理实体的信息。因此，初始化 DarSIA 图像需要两个要素：图像数组，以及

有关图像物理表示的信息。对于二维图像，只需指定宽度 w、高度 h 和原点 o （图像左下角在所选坐标系中的位置），即可初始化 DarSIA 图像（稍后将介绍更高级的初始化方式）。

```
import darsia
图像 = darsia.Image(c_arr, width = w, height = h, origin = o)
```

Code 2.1. 导入 Python 包 DarSIA，并在 DarSIA 中初始化一幅"物理图像"，其中图像数组 ay `c_arr` = $\boldsymbol{c}$ ，宽度 `w` = w，高度 `h` = h，原点 `o` = o。

图像初始化后，其元数据会被存储，并可通过内置的保存方法与图像数组一同保存。如果希望之后打开完全相同的图像，可以在初始化图像时直接读取元数据和图像数组。

此外，初始化时还会为图像创建一个坐标系。因此，它包含一个映射 ϕ ，用于连接图像 Y （在离散情形下通过常规矩阵索引访问）与物理图像 X（以常规物理笛卡尔坐标表示）。通过上述初始化，该映射 ϕ 构成了一种多维尺度变换。这使用户能够根据物理坐标访问图像中的区域和位置。

```
子区域 = darsia.extractROI(image, ll, ur)
```

代码 2.2。通过物理坐标从物理图像中提取矩形子区域。其中， `ll` 是子区域的左下角， `ur` 是右上角。

DarSIA 实现了用于提取子区域的功能，并据此构建了图块结构。通过指定图像应划分成的图块数量以及图块之间的重叠程度，可以得到一个图像数组，其中每幅图像代表一个图块。之后可以分别修改这些图像，并可根据需要将它们拼接起来，从而形成完整物理图像的新表示。

```
图块 = darsia.Patches(image, num_v, num_h) 图块[i][j
] = 某项修改 new_image = patches.assemble()
```

代码 2.3。此处，从图像创建了一个图像块对象，其中包含 `num_v` · `num_h` 个图块；`num_v` 和 `num_h` 分别表示垂直方向和水平方向上的图块数量。每个图块都是独立的物理图像，可按照矩阵索引约定访问。此外，还可以根据需要修改每个图块。此处，`some_modification` 是一个占位符，表示用于替换图块 `[i][j]` 的某个图像。最后，可以使用 `assemble` 方法重新组装图块；重叠部分通过凸组合进行合并。

DarSIA 可接收标准颜色格式的输入数组 $\boldsymbol{c}$ 。此外，借助内置方法，可以轻松地在三色颜色空间与单色颜色空间之间切换，或将图像限制为单色颜色空间；也就是说，可以选择对物理图像的特定解释方式，以供后续分析。

高级初始化。 实际上，图像常常存在系统性缺陷，且存在变化

```
图像.toRGB() 图像.
toHSV() 图像.t
oGray()
```

代码 2.4 给定物理图像的色彩空间转换，此处以转换为红绿蓝颜色模型、色调-饱和度-明度颜色模型和灰度为例。

不一致性，后者出现在图像时间序列的语境中。仔细的图像分析

需要为所有图像采用统一的设置，因此 DarSIA 提供了一系列校正方法，包括系统性几何畸变校正、强度值波动校正、图像对齐，以及复杂的孔隙空间变形校正，下面将对此进行简要说明。

图像采集不完善常会导致几何畸变。典型问题包括所选画幅大于感兴趣区域、物理实体并非平面、相机未居中对准物理对象，以及相机或扫描仪执行的自动校正。这些问题会使图像中物理对象的形状呈现失真，如图 2.1 所示。DarSIA 提供了多种工具，可通过裁剪、透视变换、拉伸和图像鼓胀校正，准确修正这类影响。可用参考点对校正精度至关重要。为便于拟合参考点，DarSIA 提供了在 DarSIA 图像中添加网格的功能，网格表示笛卡尔坐标系。

```
网格图像 = image.add_grid(dx = v, dy = h)
```

代码 2.5。在 DarSIA 图像中添加笛卡尔网格，其中 `v`和`h`分别表示垂直和水平网格线之间的距离。

例如，摄影图像中的颜色和照明波动可能自然发生，例如相机未经校准，或场景处于多变的照明条件下。这类波动会直接影响$\boldsymbol{c}$提供的颜色及其强度值配准，而这些信息对后续分析十分重要。为解决这一问题，DarSIA 可以将每个输入数组$\boldsymbol{c}$ 映射为校正后的数组$\tilde{\boldsymbol{c}}$，其中映射的定义旨在以最优方式（依据适当的度量）将图像中的参考部分变换为预先设定的参考颜色，这些颜色可以对应已定义的标准颜色，也可以来自参考图像；换言之，$\tilde{\boldsymbol{c}}[k] - \tilde{\boldsymbol{c}}_{ref}[k]$ 应尽可能小。此处，k 表示图像参考部分的索引，而$\tilde{\boldsymbol{c}}_{ref}$ 表示一组参考颜色。为此，系统使用了开源库 color-science 中的功能[11] 。

最后，对于多图像分析而言，将图像与某个参考图像对齐至关重要。DarSIA 提供了两种图像对齐功能，在成本和精度上各有不同。首先，可以利用有限的一组固定点，通过平移来实现对齐，使这些固定点达到最佳匹配。更复杂的做法是确定一个更通用的变形图，从而对齐不同图像中的孔隙空间。这项功能是一种重要的分析工具，将在第 2.4 节中详细说明。

总之，所有提及的校正都可以在物理图像初始化时应用，从而能够在参照基准图像进行半自动校正的基础上进一步微调。

```
# 单图像校正
color_c =  darsia.颜色校正(roi_color)
curv_c =  darsia.曲率校正(config)

# 相对于物理参考图像的校正
drift_c =  darsia.漂移校正(reference_image, roi_drift)
deform_c =  darsia.DeformationCorrection(reference_image, 图块)

# 次级物理图像的高级图像初始化
次级图像 =  darsia.Image(
        c_arr,
        颜色校正 =  color_c,
        曲率校正 =  curv_c,
        漂移校正 =  drift_c,
        变形校正 =  deform_c
)
```

代码 2.6。 DarSIA 图像也可以在初始化时应用各种校正，包括参照参考图像进行校正。其中，`c_arr` 是输入数组，`color_c` 是颜色校正，利用区域内某个参考区域的信息；`curv_c` 是形状校正对象，包含所有用于裁剪、膨胀和拉伸操作的微调参数（此次还包含几何的所有信息，包括宽度、高度和原点，参见代码 2.1）；`drift_c` 是漂移校正，通过简单的平移使图像与参考图像对齐；`deform_c` 则使孔隙空间相对于参考图像对齐，参见第 2.4.1 节。在多图像比较的语境中，`secondary_image` 一词至关重要，参见第 2.4 节。

备注 2（支持的数据类型）。除支持将图像读取为数组外，DarSIA 目前还支持多种标准数据类型作为输入数据。具体而言，支持 PNG、JPG 和 TIF 图像。系统提供了读取时间戳等基本元数据的功能，可用于分析图像时间序列。目前正在进行的开发旨在支持原生包含空间元数据的数据格式（例如 DICOM）。

备注 3（面向对象代码设计）。DarSIA 的面向对象设计支持高效的缓存和簿记，使接口更加精简，同时提升多图像分析的性能。

2.2 物理图像的正则化与尺度变化在经典图像处理中，正则化图像

c（y）指的是在衡量与原始图像的保真度 c（y）和对噪声的惩罚之间寻求折中。这通过平衡两个度量指标来实现：我们记作 D 的度量用于衡量图像之间的偏差，而记作 N 的度量用于衡量图像中的噪声。我们为噪声度量设置一个正则化参数 μ，它通常是一个线性权重，用于平衡这两个度量指标。在此框架下，正则化图像定义为 [12] [13] [14]

$$\bar{c}(y) = \arg\inf_{u} D(c,u) + N(u;\mu_c) \tag{1}$$

尽管图像处理文献很少强调这一点，但要实现分辨率无关正则化，正则化参数 μ_c 必须在像素和颜色尺度两方面进行适当缩放。

将正则化参数应用于物理图像时，它便具有了物理意义。下面我们重新表述正则化物理图像的定义：

$$\bar{f}(x) = \arg\inf_{u} D(f,u) + N(u;\mu_f) \tag{2}$$

为便于论述，我们暂且考虑常见的 D 和 N取值，由此得到 Rudin-Osher-Fatemi（ROF）正则化 [15], ，即加权的 L^2 范数和 $W^{1,1}$半范数（亦称全变差）：

$$D(f,u;\omega_f) = \frac{1}{2}\|f-u\|^2_{2,\omega_f} = \frac{1}{2}\int \omega_f (f-u)^2\, dV \qquad \text{and} \qquad N(u;\,\mu_f) = \mu_f|\nabla u|_1 = \mu_f\int |\nabla u| dV \tag{3}$$

为了使这些项相加具有意义，我们注意到正则化参数 μ_f的单位必须为 $[LF]$，其中 F 是 f 的单位，而 L 是与 X坐标系的空间长度尺度相关的单位。

因此，对物理图像进行正则化时，正则化参数 μ_f 与图像分辨率无关，但可理解为定义了观测下限。具体而言，如果 f表示浓度（无量纲，取值范围为 0 到 1），那么 μ_f 的单位就是长度。此外，对于多孔介质的物理图像，我们可以为物理域指定一个长度尺度 l_{pore}，并将其解释为特征孔径。此时，对于 $\mu_f \ll \mathrm{l}_{pore}$，正则化图像将保留多孔结构，只滤除频率高得多的振荡。结果是孔隙尺度图像。相反，对于 $\mu_f \gg \mathrm{l}_{pore}$，正则化图像将滤除孔隙尺度的信息，仅保留达西尺度的信息。结果是达西尺度图像。

基于多孔材料的单张孔隙尺度图像 c（$\boldsymbol{y}$），因此，通过简单的正则化，我们既可以提取正则化后的孔隙尺度物理图像，记为 g（$\boldsymbol{x}$） $= f(\boldsymbol{x};\ \omega_f = 1,\ \mu_f \ll \mathrm{l}_{pore})$，也可以提取相对平滑的达西尺度物理图像，记为$G$（$\boldsymbol{x}$）$= f(\boldsymbol{x};\ \omega_f = 1,\ \mu_f \gg \mathrm{l}_{pore})$。

多孔材料的一个普遍特征是，某些变量可能只存在于固体（例如矿物组成、材料应力）或流体相（相组成、饱和度、流体压力）中。在某些情况下（通常对于守恒量而言），直接将这些变量从孔隙尺度正则化到达西尺度是合适的；在这种情况下，这些量在图像 G 中已经作为达西尺度量提供。特别地，对于所有孔隙尺度物理图像，我们注意到孔隙空间由 g_0（$\boldsymbol{x}$） 给出，而孔隙度的适当定义便是正则化后的孔隙空间 G_0（$\boldsymbol{x}$）。

另一方面，其他量通常相对于其所属的相进行正则化（例如相组成或压力）。为便于说明，我们考虑一种解释 $g_1(\boldsymbol{x})$，它只有在孔隙空间中才有意义。在固体中，这种解释仍然有定义（因为我们处理的是图像），但它不具有物理意义。因此，朴素的达西尺度解释 $G_1(\boldsymbol{x})$ 并不具有物理相关性。为此，我们必须滤除固相。上一节提供的工具可以结合起来实现这一点：事实上，由于孔隙尺度指示函数 $g_0(\boldsymbol{x})$ 在孔隙空间中取值为 1，在固体中取值为 0，因此乘积 $g_1(\boldsymbol{x})g_0(\boldsymbol{x})$ 会抹去固相中的所有信息。这表明，可以使用与空隙空间成正比的空间依赖权重对图像进行正则化，即 $\omega_f = g_0(\boldsymbol{x})$。采用这种选择后，我们得到正则化孔隙空间图像 $G^p(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x};\, \omega = g_0, \mu_f \gg \mathrm{l}_{pore})$，以及类似地得到正则化固体空间图像 $G^s(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x};\, \omega = 1 - g_0, \mu_f \gg \mathrm{l}_{pore})$。

备注 4：我们强调，对于多孔材料在孔隙尺度上的任意物理图像 $f(\boldsymbol{x})$，经过正则化后，我们至少可以得到同一物理图像的四种不同表示：一幅正则化孔隙尺度图像 $g(\boldsymbol{x})$，以及三幅达西尺度图像 $G(\boldsymbol{x})$、$G^p(\boldsymbol{x})$ 和 $G^s(\boldsymbol{x})$，参见图 2.2。后三幅图像分别对应整个材料、孔隙空间和固体空间的升尺度。这在概念上与多孔介质的标准平均理论 [1] [2] [3] [4] [5] [6] 相一致。

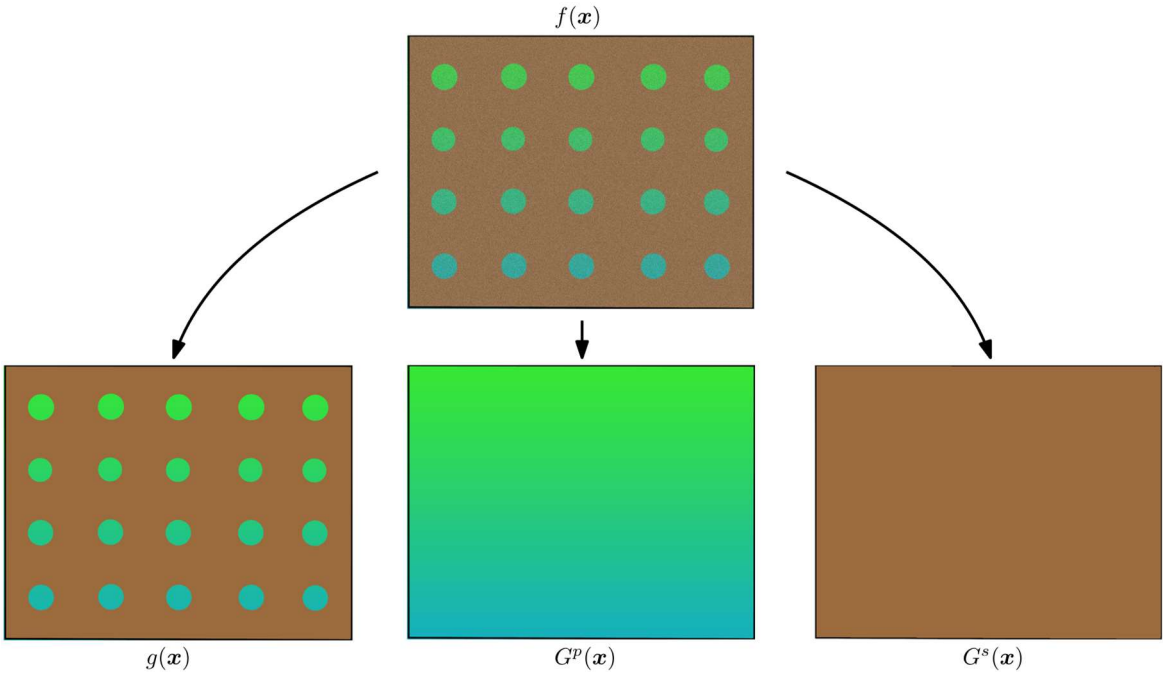

图 2.2。上述不同正则化方式的示意图。此处，顶部图像以三种不同方式进行了正则化：$g(\boldsymbol{x})$ 是孔隙尺度正则化，去除了 $f(\boldsymbol{x})$ 中存在的噪声；$G_p(\boldsymbol{x})$ 是正则化孔隙空间图像；$G_s(\boldsymbol{x})$ 是固体空间图像。

上述讨论促使我们选择将图像正则化既用作噪声去除方法，也用作改变图像尺度的框架。在 DarSIA 中，实现了一种旨在获得达西尺度图像的全变差正则化技术。

```
正则化图像 = darsia.tv_denoising(image, omega, mu, l)
```

代码 2.7. 使用分裂布雷格曼算法进行全变分去噪 *[16]*，其中`omega`= ω_f （空间变化）和`mu`= μ_f （空间变化），而`l`是与特定算法相关的惩罚参数。

这里，对标准正则化实现的一项重要扩展，是能够像方程 (3) 中那样采用空间相关度量。当正则化方法旨在获得达西尺度图像时，空间相关（逐像素定义）的正则化参数 $\mu_f(\boldsymbol{x})$ 尤为有用，因为正则化参数 μ_f 必须具有合适的量级，才能从图像 $\mu_f \gg l_{pore}$ 中去除孔隙尺度特征。如果图像中存在颗粒尺寸明显不同的区域，采用统一的正则化参数可能并不可行：参数取值过大将导致图像过度正则化，甚至连达西尺度特征也会变得模糊。为求解修正后的全变分正则化问题，DarSIA 实现了分裂布雷格曼算法，并对噪声项进行分解，得到一种全变差去噪方法，即各向异性全变差去噪方法，参见 [16], ，该方法支持空间变化惩罚。

最后，我们提到，开源 Python 库中有多个优秀的全变差去噪实现，可用于常数 μ_c 情形，适合用于获取 $G(\boldsymbol{x})$。尤其是 Scikit-image [9], ，其中包含多种标准方法，例如用于各向同性和各向异性正则化的分裂布雷格曼算法，以及 Chambolle算法 [17]。这些实现的效率高于 DarSIA 中的实现，但截至撰写本文时，它们尚不支持空间相关正则化参数，因此不适合直接用于计算 $G_s(\boldsymbol{x})$ 和 $G_p(\boldsymbol{x})$。

2.3 单图像分析工具正如备注 4 中所指出的，
从一个 s

对于单幅图像，这里重点介绍的一类实用工具是几何分割和图像标注，即识别图像中的特定细节并为其添加标记。对于具有复合材料结构的图像，例如由不同相组成的非均质介质，常见任务是将图像划分为各个均质区域。如果这些区域具有不同的强度值，就可以通过阈值分割检测出它们。另一方面，如果不同区域的强度值范围有所重叠，而均质区域的界面处仅存在强度值跃变，则可改用基于梯度的方法来区分均质区域（梯度模较低）和界面（梯度模较高）。结合分水岭分割算法 [9] ，同样可以识别出各个均质区域。DarSIA 提供了多种基于梯度的方法，所需用户输入量各不相同；用户输入越多，可控性越强。这对于在照明不均匀条件下拍摄的图像尤其有帮助。

这里重点介绍一类适用于单幅图像的实用工具，即几何分割和图像标注，也就是识别并标记图像中的特定细节。对于具有复合材料结构的图像，例如由多个相组成的非均质介质，一个常见任务是将图像拆分为单独的均质区域。如果这些区域具有不同的强度值，则阈值分割可以实现对它们的检测。另一方面，如果均质区域的特征是一个与其他区域共享的数值范围，并且均质区域的界面处仅存在强度值的跳变，那么基于梯度的方法可以区分均质区域（梯度模较低）和界面（梯度模较高）。结合分水岭分割算法 [18], ，即可再次识别均质区域。DarSIA 提供了多种基于梯度的方法，其差异在于用户输入程度的不同，从而提供更多控制；例如，这些方法对于在非均匀照明条件下拍摄的图像很有帮助。

```
标签 = darsia.segment(c_arr)
```

代码 2.8. 基于梯度的几何分割和图像标注示例：利用分水岭算法对图像进行处理。可通过多种选项和参数微调性能；此处未作示例。

2.4 多图像比较分析工具

大多数多孔介质研究都涉及动态过程，既可能是某一相内部的输运，也可能是某一相被另一相置换，甚至是流体与固体之间的水力-力学耦合。此外，物理实验和计算实验通常会在不同配置间稍作调整后反复进行，因此有必要对不同实验进行比较。因此，多图像比较工具具有重要价值。为便于说明，本节将讨论针对两幅图像的比较工具，但所讨论的内容自然适用于任意有限数量的图像。

2.4.1 对齐孔隙空间令 $g^R(\boldsymbol{x})$ 和 $g^S(\boldsymbol{x})$
为两个重

建后的同一多孔材料的孔隙尺度图像，前者为“参考”图像，后者为一幅（或多幅）“次级”图像。我们假设实验设计包含足够的空间参考点，且图像的坐标几乎对齐。然而，在实践中，图像中几乎总会存在一些扰动，

即使对于刚性多孔材料，几何也可能不同，因此孔隙空间 g_0^R 和 g_0^S 不必完全相同。因此，第一步分析通常是寻找一个连续映射 $\psi : X \to X$，使得g_0^R（$\boldsymbol{x}$）$= g_0^S(\psi$（$\boldsymbol{x}$）$)$，并且我们先验地假设 $\psi \approx Id$为恒等变换。这样的映射 ψ 必然不是唯一的（孔隙空间内的任何局部变形都不会改变 $g_0^S(\psi$（$\boldsymbol{x}$）$)$），因此我们希望映射 ψ 在某种意义上具有规则性（或者说，在最小化问题中具有相对"较低的能量"）。我们采用灵活的分治算法来构造这样的规则映射。就实用算法而言，仿射映射和透视映射发挥着特殊作用，因为已有高效实现可用于变形图像，例如 OpenCV 库 [8]提供的实现；借助这些方法，DarSIA 能够使用分片定义的仿射映射对图像进行变形，同时确保全局连续。

分治策略。 核心思想是将对全局映射 ψ 的求解分解为：在图像的图块上寻找局部平移，并通过插值将它们组装起来，其中全局映射定义在 X 上。该方法可以直接扩展为多层扩展。下面将进一步详细解释该方法的各个组成部分。

划分。 首先，将区域 X 划分为图块 $p_j = 1$、……、 P，相应地得到参考图像和次级图像的子图像 $g^{R,j}$ 和 $g^{S,j}$，参见图 2.3（使用 $I = 1$）。

局部映射。 对于每个图块 p_j，目标是高效地在定义域为 p_j 的透视映射空间中寻找低能量映射 $\tilde{\psi}_j$： $p_j \to \mathrm{R}^d$，此处将其记为 Ψ_j。 使用局部化度量D_j （稍后将对此进行更详细的讨论），$\tilde{\psi}_j$ 被定义为极小化元

$$\tilde{\psi}_j = \arg \inf_{\psi' \in \Psi_j} D_j \left(g^{R,j}(\boldsymbol{x}), g^{S,j}\left(\psi'(\boldsymbol{x})\right)\right)$$

我们注意到，不同图块之间并未施加相容性要求。不过，为了确保高保真度，只有当映射 $\tilde{\psi}_j$ 实际上几乎仅为平移时，才会予以信任；因此，有些情况下图块不会被分配局部映射。

全局化步骤。 局部映射 $\tilde{\psi}_j$， $j = 1$， ……， P 通过径向基函数（RBF）插值组合起来，从而定义一个作用于整个区域 X 的全局辅助映射。RBF 插值的一大优势是具有无网格特性，对输入没有严格要求。因此，输入采用图块中心坐标与有效平移构成的高保真度配对，同时加入基于专家知识的附加条件。例如，若已知多孔介质在某些方向上固定，则可在法向施加齐次边界条件。随后，插值得到一个平滑的辅助函数 $\tilde{\psi}$： $X \to \mathrm{R}^d$，并对低保真度图块进行连续填补。

分片仿射插值及其高效应用。根据构造，RBF 插值 $\tilde{\psi}$满足 $g_0^R(\boldsymbol{x}) \approx g_0^S\left(\tilde{\psi}(\boldsymbol{x})\right)$。尽管这是理论上的目标，但由于 $\tilde{\psi}$ 具有一般性，目前尚无现成算法能够高效地将其应用于大型数组，从而实现图像变形。不过，鉴于已有高效的图像变形算法 [8], ，我们现在采用一种基于网格、全局连续、在图块上分段仿射的插值方法，并将 $\tilde{\psi}$ 插值到由图块构成的笛卡尔网格上。最后，ψ 可以在每个图块上高效计算。同样，ψ^{-1} 也可以进行近似和计算。

上述配准过程已在 DarSIA 中实现。

```
# 基于参考图像和划分定义分析对象
变形分析 = darsia.DeformationAnalysis(
        参考图像,
        图块
)

# 查找全局映射 ψ̃ 以匹配两幅图像的孔隙空间
变形分析(次级图像)

# 应用分片仿射变换 ψ 对齐两幅图像
变换后的图像 = deformation_analysis.apply(次级图像)
```

代码 2.9。 DarSIA 基于逐块比较实现孔隙空间对齐。

局限性与技术要求。分治方法采用基于 ORB 算法 [19] 的高效特征检测与匹配，并结合 RANSAC 算法 [20]，在特征之间搜索透视双射 $\tilde{\psi}_j$，同时剔除错误匹配的异常特征对。这要求经过分块的子图像 $g^{R,j}$ 和 $g^{S,j}$ 具有足够的分辨率和尺寸，从而包含足够数量的不同特征。图块大小的另一个自然下限由两幅图像本身及其对应的偏差ψ决定；只有当子图像包含相同的特征时，才能对它们进行比较。对于 ψ，有两种方法可以降低对低分辨率搜索空间的需求。一种是使用重叠图块。另一种是对上述方法进行迭代多层扩展，原则上旨在检测甚至相当一般的大变形。

多层扩展。 通过不断更新辅助图像，可以直接将上述分治算法扩展为迭代多层算法。

为此 ，考虑图块 $p_{i,j}$ of $X, i = 1 \ldots I, j = 1 \ldots P_i$ 的 I-多层划分，参见图 2 .3.

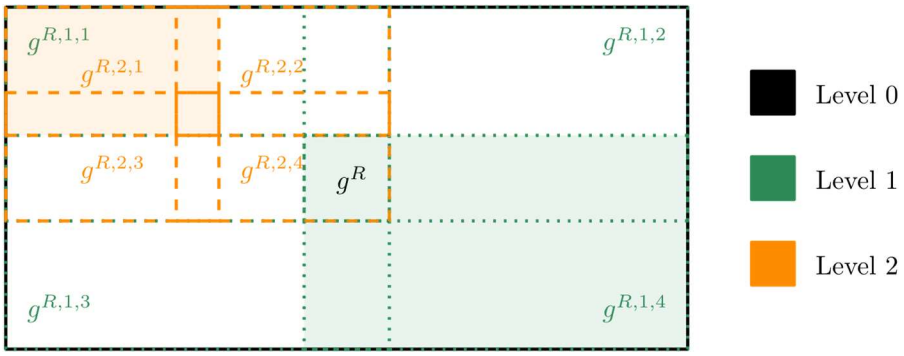

图 2.3。 多层重叠划分 $\{p_{i,\ j}\}_{i,\ j}$ 的 X （对于 $I = 2$）以及参考图像的相应子图像 g^R，用于2级分治算法，此处记为 $g^{R,\ i,\ j}$。

在遍历各层 $i = 1 \ldots I$ 时，持续跟踪当前最佳的（辅助）全局映射 $\tilde{\psi}^i$，并以自然的初始猜测 $\tilde{\psi}^0 = Id$ 为起点；同时，应为 $i = 0 \ldots I$ 提供相应的分片仿射插值 ψ^i。随后，在每一层 $i = 1 \ldots I$，使用上述分治算法确定一个辅助全局映射$\tilde{\psi}$，此时基于划分 $\{p_{i,j}\}_j$

以及孔隙尺度图像 g_0^R 和 $g_0^S(\psi^{i-1}(\boldsymbol{x}))$。随后递归定义整体的 i 级近似 $\tilde{\psi}^i$，即 $\tilde{\psi}^i = \tilde{\psi} \circ \tilde{\psi}^{i-1}$；这里稍微滥用一下记号，两个函数的复合表示在所有插值点上对该复合进行

无网格 RBF 插值。因此，i 级迭代可以简要概括为：寻找 $\tilde{\psi}^i = \tilde{\psi} \circ \tilde{\psi}^{i-1}$，使得（在某种意义上）

$$\tilde{\psi} = \arg\inf_{\psi'} D\left(g^R(\boldsymbol{x}), g^S\left(\psi'\left(\psi^{i-1}(\boldsymbol{x})\right)\right)\right) \tag{5}$$

其中，分片仿射插值 ψ^{i-1} 对应于 $\tilde{\psi}^{i-1}$，其定义为对所有 i 级低能映射依次进行 RBF 插值。最后，我们令 $\tilde{\psi} = \tilde{\psi}^I$，并得到作为分片仿射插值的 ψ。需要指出的是，由于使用无网格 RBF 插值在不同层级之间传递信息，因此对 I 级划分 $p_{i,\ j}$。 的层级结构没有兼容性条件。不过，逐步细化的图块是一种自然的选择，尤其有助于高精度地确定大变形。

```
analysis.multilevel(次级图像, 多级图块) 转换后的数据 =  analysis.apply(参考数据, inverse=
True)
```

代码 2.10。用于对齐孔隙空间的多层级变体，以及通过应用 ψ^{-1}.将参考数据变形至次级图像的孔隙空间。

备注 5（将孔隙空间对齐作为分析工具）。对于可变形多孔介质，校正项ψ（$\boldsymbol{x}$）将给出材料的局部位移场，可用于计算材料应变等。

备注 6（转换静态数据）。附加到参考图像上的数据（例如第 2.3 节所述的几何分割）可以通过 ψ^{-1} 进行扭曲，并附加到次级图像上，参见代码 2.10。

备注 7（将孔隙空间对齐作为校正）。最后，$g^S \circ \psi$ 映射到参考图像 g^R上。考虑相应的未正则化物理图像 f^R 和 f^S，定义校正后的物理图像 $f^{R,\ S}(\boldsymbol{x}) = f^S(\psi(\boldsymbol{x}))$，以表示次级图像已在局部进行校正，使其与物理参考图像相匹配。事实上，这一校正步骤属于 DarSIA 图像的高级初始化，参见代码 2.6。对齐孔隙空间后，物理图像现在可以直接进行比较 $f^{S,\ R}(\boldsymbol{x}) - f^R(\boldsymbol{x})$。这类比较是分析孔隙空间动力学的核心，下一小节将对此进行详细说明。

2.4.2 达西尺度孔隙空间动力学分析孔隙空间动力学的研究是多孔

介质研究的核心。数十年来，成像领域一直在对流动过程，尤其是输运，进行可视化和分析，重点关注孔隙尺度。DarSIA秉持类似理念，支持对相同的孔隙空间现象进行成像分析，但侧重于达西尺度。DarSIA尤其关注单相流和多相流中被动示踪剂的输运，以及材料变形；其目标是提供足以作为测量技术使用的分析质量。感兴趣的达西尺度量包括浓度和饱和度等连续量，以及用于指示特定相的二值数据。

为了对传输现象进行成像，物理层面需要一种“视觉标记”，其特性会随主导的、正在发生的物理过程而变化，例如移动前沿、浓度梯度等。选择不当的标记会在图像中产生较差的信号，必然增加图像分析作为定量工具的不确定性。标记物的选择一方面取决于成像设备。例如，PET扫描仪使用放射性示踪剂，而一般来说，被动染料适用于照片。另一方面

手动操作时，标记物必须确保信号强度足够高，与背景介质形成较大对比，并对物理学特性足够敏感，从而使信号与感兴趣量之间至少能够建立单射映射。要获得最佳结果，必须对实验方案与图像分析进行校准。这种校准包括一项重要的用户输入：选择对物理图像的适当解读方式，例如，在照片的语境下选择合适的颜色通道。

话虽如此，设 $f^R(\boldsymbol{x})$ 和 $f^{S,\,R}(\boldsymbol{x})$ 为同一多孔材料的两幅物理图像，如备注 7 所述，且两者的孔隙空间彼此对齐；我们假设其中存在某种意义上的良好视觉标记。此外，设 $f_1^R(\boldsymbol{x})$ 和 $f_1^{S,\,R}(\boldsymbol{x})$ 是用于分析孔隙空间动力学的适当解释。核心思路是通过考察差值 $f_1^{S,\,R}(\boldsymbol{x}) - f_1^R(\boldsymbol{x})$，滤除背景固体。这个相对量具有若干值得强调的性质：

- 如果参考图像对应于一种"非活动"状态，例如未饱和多孔介质，那么 $f_1^{S,\,R}(\boldsymbol{x}) - f_1^R(\boldsymbol{x})$ 就能标识"活动"孔隙空间，足以用作 $f_1^{S,\,R}$ 正则化中的孔隙空间指示量；经过适当缩放使其无量纲且数量级为 1 后，即可按第2.2节所述使用。• 通过分析相对量 $f_1^{S,\,R}(\boldsymbol{x}) - f_1^R(\boldsymbol{x})$，可以检测孔隙空间中的独立特征，例如气泡；这些特征对标记物的反映仅略有不同。特别是，即使参考图像对应于饱和条件，也可以进行检测。因此，相对量是通过有效上尺度化量化饱和度的手段。

照片与物理图像之间的区别。为了比较图像以及照片这一具体示例（相对于PET图像），孔隙空间中的信号强度通常可能处处非零，因为只有黑色才对应于信号消失。相反，信号取决于视觉标记的选择，并受"非活跃"条件的影响。因此，照片之间的差异至关重要，在实践中，这些差异可能早在定义物理图像这一步就已体现出来，参见定义1，即通过将颜色映射为信号$f(c)$。例如，对比不同流体条件下（如充气或充水）的两幅图像，可以获得孔隙空间指示量f_0，因为固相将是两幅图像中未发生变化的部分。我们强调，尽管实际照片（因此也包括图像）可能高度依赖于视觉标记，但将信号转换为具有物理意义的孔隙空间量（即物理图像的定义）时，应尽可能不受标记选择的影响。

注释 8： 我们通过简单的阈值分割，展示如何从图像差异中构建最简单的物理解释，即将解释表示为包含二值数据的物理图像

$$f_1 \colon c^S(\boldsymbol{x}) \mapsto \chi_I\big(c^S(\boldsymbol{x}) - c^R(\psi^{-1}(\boldsymbol{x}))\big)$$

其中，χ_I 表示某个区间 I 的特征函数。这种阈值分割通常可用于定义孔隙空间指示函数 f_0。一个更复杂的示例是采用下限和上限截断的仿射转换，例如定义类似变量的连续体积浓度

$$f_2 \colon c^S(\boldsymbol{x}) \mapsto \min\left(\max\big(\alpha \cdot \big(c^S(\boldsymbol{x}) - c^R(\psi^{-1}(\boldsymbol{x}))\big) + \beta, 0\big), 1\right)$$

这里，c^S（$\boldsymbol{x}$）和c^R（$\boldsymbol{x}$）分别表示次级照片和参考照片；我们特别强调使用ψ^{-1} 来对齐孔隙空间。还可以采用更多转换模型，具体取决于所用的视觉标记。

为便于定义需要参考图像（例如照片）的物理图像，DarSIA 提供了定义上述两种解释 $f_1(\boldsymbol{x})$ 和 $f_2(\boldsymbol{x})$ 及其达西尺度孔隙空间变体的功能，还提供了校准工具，包括针对非均质介质的扩展功能。

```
# 设置参考图像、正则化和阈值化参数二值浓度分析 =
d
a
r
s
i
a.
BinaryConcentrationAnalysis(reference_image,regulzation_parameters,thresholding_patameters)#
确定相的位置指示函数 = binary_concentration_analysis(secondary_image)
```

代码2.11。 DarSIA 实现了将二值数据提取为达西尺度物理图像。

```
# 固定参考图像及用于定义达西尺度的参数浓度分析=
d
a
rsia.ConcentrationAnalysis(reference_image,regularization_parameters)#
校准与体积注入相匹配的线性模型 concentration_analysis.calibrate([
calibration_image_1, calibration_image_2, ...],injection_rate = val)#
根据次级图像确定物理图像浓度 = concentration_analysis(secondary_image)
```

代码2.12。 DarSIA 实现了将浓度类数据提取为达西尺度物理图像。转换基于一组图像进行校准，这组图像应对应于某一注入速率下的体积注入。经过校准的转换器最终可确定任意次级图像所对应的浓度。

2.5 可视化工具

可视化**在通量分**析，尤其是在处理图像数据时。因此，DarSIA 还提供了一些功能，用于可视化和后处理第 2.4 节中确定的数据。第 3 节将通过示例展示以下许多工具的用法。

我们重点介绍孔隙空间对齐图 ψ 的可视化，参见第 2.4.1 节；该图通过矢量符号图显示位移。

```
deformation_analysis.plot()
```

代码2.13。 显示变形分析结果的 矢量符号图，参见代码 2.9。

此外，还提供与多张物理图像相关的二值数据，这些数据按照第 2.4.2 节所述确定，例如随时间推进或来自不同实验运行。可视化二值数据的比较，检测任意数量的分割图像之间的独特特征和重叠，从而能够比较不同实验。此外，

此功能可用于计算图像中每种颜色（以及不同重叠情况）所占的比例，也可以为这些比例任意设置权重。

```
比较_分割比较 = darsia.SegmentationComparison(n) 比较_图像 = 分割_比较(seg_1, seg_2, ..., seg_n) 颜色_比例, *_ =分割_比较.颜色_分数(comparison_image)
```

代码 2.14. 与多张物理图像相关的一组二值数据（n 个）的示意图。此外，还量化了唯一分段与重叠分段的比例，例如可用于研究物理变异性。

最后，借鉴颗粒追踪的思路，可以对传播前沿处的指尖进行无监督检测，从而追踪其时空变化。具体而言，依次检测两个不同时间点的指尖，并将其相互关联。除了研究指长、起始时间等，还可以可视化指尖在时空中的轨迹。

```
轮廓分析 = darsia.ContourAnalysis([seg_1, seg_2, ..., seg_n])
contour_analysis.plot_finger_trajectories()
```

代码 2.15. 时空中移动的指尖轨迹的可视化。

3. 多孔介质二维图像的应用

DarSIA 旨在成为一种通用工具，用于分析二维和三维实验孔隙尺度数据。尽管如此，其最初开发的契机源于 FluidFlower 概念和实验计划[21] [22] [23]所提供的高分辨率摄影数据。因此，本节将展示如何使用 DarSIA 分析在 FluidFlower 实验装置中开展的多孔介质实验所拍摄的二维图像。不过需要指出的是，DarSIA 的实现旨在具有通用性，因此也可以采用类似的方法处理其他图像或实验装置。

FluidFlower 概念是一套米级实验装置，可用于构建深度相对较浅（在某种意义上可忽略不计）的三维多孔介质，并配备玻璃前面板，以便观察多孔介质的一个主要侧面。因此，它提供了一种本质上二维的多孔介质。将未固结砂分层填入其中，并划分为均质区域，便可构建相对复杂的介质，包括断层结构和具有封闭作用的类似盖层的层。最后，可注入水、示踪剂和 CO_2 等各种流体。使用 pH 敏感染料后，可以直观地观察流体流动。通过采集图像来监测实验。因此，FluidFlower 实验装置可用于研究未固结多孔介质中的多相多组分流动领域的各种问题，而 DarSIA 这样的工具则可用于开展定量研究。事实上，DarSIA 与 FluidFlower 实验装置结合，已成功用于研究示踪剂流动 [24] 以及 CO_2封存实验 [22] [23]。

接下来，我们将介绍一些用于分析上述实验图像的工作流程，尤其是与国际 FluidFlower 基准研究 [25] [26] [27] 相关的工作流程。关键要点包括第 2 节介绍的概念，例如正确初始化、相检测、孔隙空间对齐，以及 CO_2 分布研究，并以两种配置（注入开始后 5 小时和 24 小时）为例。我们认为，处理真实数据时采用这些工作流程十分自然，并预期它们也可作为原型应用于其他物理

实验。事实上，同样的方法已用于从照片中提取连续浓度数据[24], ，其中包括模型校准，详情见第 3.6 节。

在基准测试中，使用了 FluidFlower 系列中最大的实验装置，其宽度为 2.8 m，高度为 1.5 m，深度则在 18 – 28 mm 之间变化。该装置局部平坦，但整体呈弯曲状，因此用照相机拍摄时，投影到二维画布上会产生强烈的非线性投影。使用高分辨率相机（35.5 MP，信噪比较好）时，可以清晰分辨最粗砂中的颗粒，但无法分辨最细的砂。为便于进行可控的颜色校正和光照校正，实验装置上安装了标准化的 ClassicColorChecker，DarSIA 可以利用它。最后，地层中充满了水和 pH 指示剂，从而能够通过视觉区分水、CO_2饱和水和气态 CO_2, （参见图 3.1）。

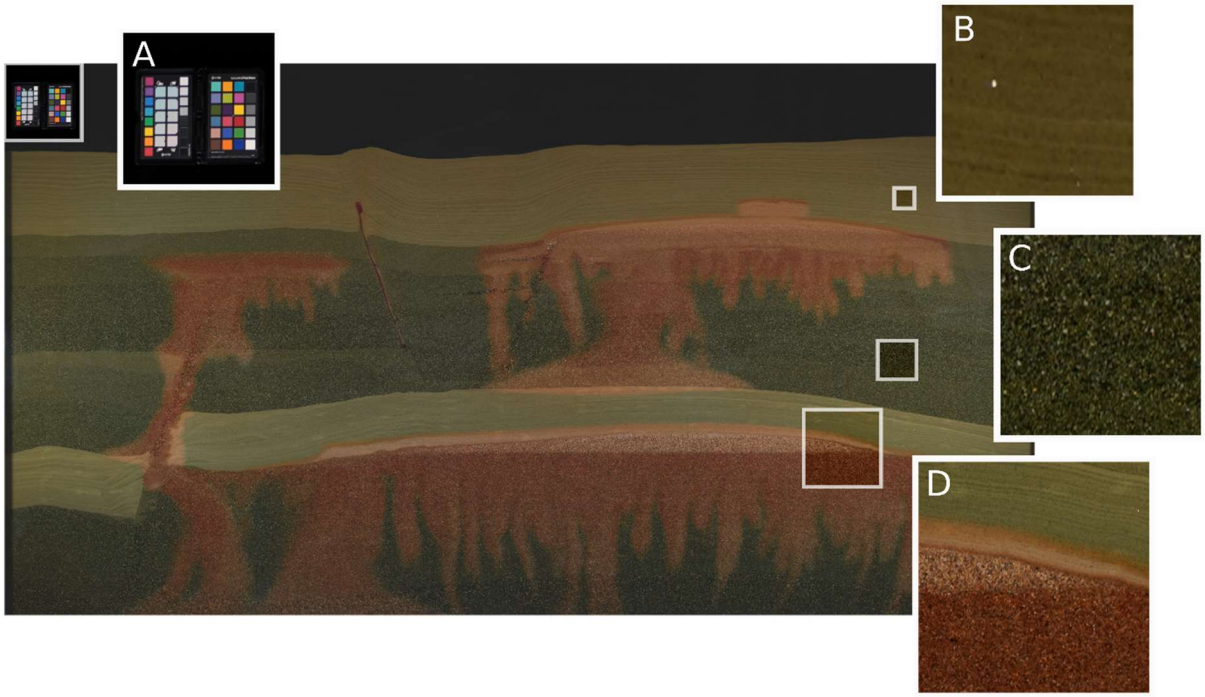

图 3.1。图像分析输入示意图。国际基准研究中 FluidFlower 基准几何结构内的 CO_2 注入情况，重点展示了与图像分析相关的特性：(A) 用于可控颜色校正的标准化色卡；(B) 明亮的细粒砂，以相对较低的分辨率拍摄——可见带有闪光效应的单个颗粒；(C) 较暗的粗砂，以相对较高的分辨率拍摄，与其余较粗砂相似；(D) pH 指示剂与 CO_2 发生反应，从而可以区分水、溶解的 CO_2 和气态 CO_2。

3.1 初始化物理图像三维物理组

它被设计成一个曲面实体 [21], ，但在局部具有自然的二维特征。因此，按照第 2.1 节所述，需要一个双射 ϕ: $Y \to X$ ，而这比单纯的线性缩放更复杂，因为 $Y \subset \mathrm{R}^2$ ，而 $X \subset \mathrm{R}^3$。除了应用透视变换，将介质的角映射到具有正确物理尺寸的矩形区域外，还采用多项式膨胀和拉伸校正，从而将看似非矩形的储层变形为真正的矩形。由于这并非易事，而且在区域内部没有参考点的情况下，准确校正区域的不确定性相对较大，因此拍摄了 FluidFlower 的校准照片，并将间距均匀为$10\ \mathrm{cm} \pm 1\ \mathrm{mm}$的激光网格投影到表面上。结合 DarSIA 中可在图像上叠加网格进行绘图的功能，便可确定校正映射 ϕ

并达到足够的精度，从而能够定义笛卡尔坐标系及相应的、有意义的度量，见图 3.2。

3.2 相的检测

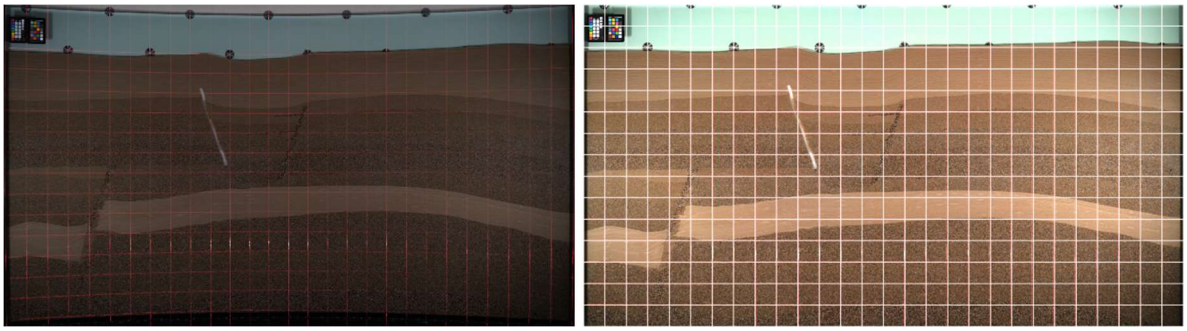

图 3.2. 左： FluidFlower未经处理的图像，上方投射了激光网格；由于FluidFlower呈弯曲形状，图像发生了畸变，且照明效果不佳。右：经过畸变校正和颜色校正的图像，上方叠加了人工网格，以辅助微调并检查校正结果。

FluidFlower 的几何结构设计为层状结构，由六种内部均质的砂相组成，不同相以其粒度分布为特征。这些相的颜色和亮度通常略有不同，因此与 CO_2 接触时，对 pH 敏感染料的响应也各不相同。因此，考虑到基本的颜色运算，如第 2.4.2 节所述，多图像分析中的解释差异需要针对每种相分别进行分析。此外，由于存在非均匀照明，每个均质区域都必须单独处理，而不能对所有相采用相同的处理方式。

DarSIA 使用基于梯度的几何分割来检测部分层。请注意，正如图 3.3 的图注所述，图像中部不同层之间的差异在视觉上并不十分明显。尽管如此，图像分析仍能得出连贯的结果，并正确识别出主要结构。

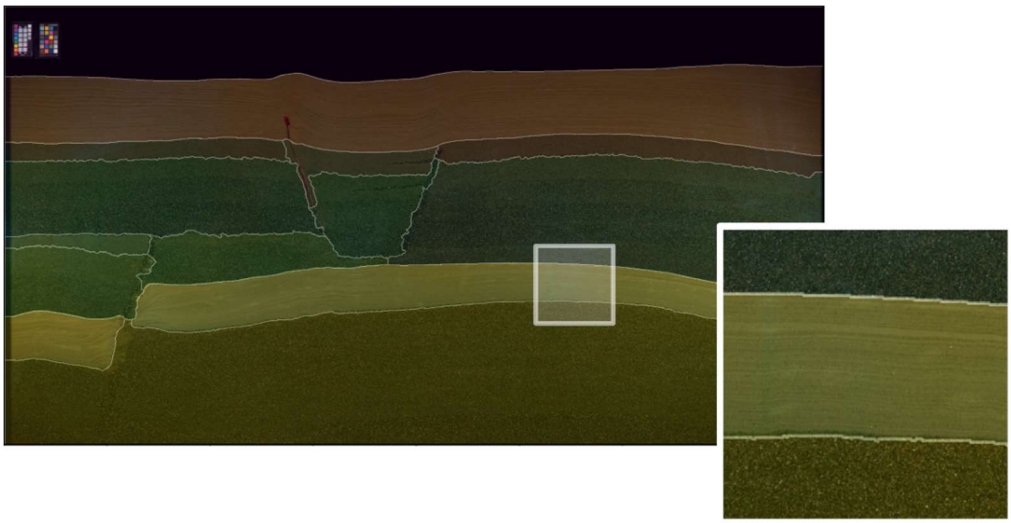

图 3.3. 已分割并标注的FluidFlower基准几何。不同标注区域以不同颜色显示，界面以白线突出显示。几何体中间带的若干层未进行完整的细节分割。在此处，强度梯度较弱，加上为有效执行强度分割而需要对图像进行正则化，这给分水岭算法带来了挑战。放大图显示，由于使用了正则化，检测到的（下方）界面存在轻微的不准确。

人类视觉感知表明，我们应该能够准确地剖析介质。然而，由于砂粒之间存在细微的非均质性，加之

不同相之间的粒度分布差异很小，即使对人类而言，准确识别砂体结构也并非易事。作为事后评论，如果实验采用视觉对比度更高的砂，砂层的识别或许会更加容易。

3.3 对齐孔隙空间以 FluidFlower 几何结构

由未固结砂构成，因此砂倒入实验装置后，在流体流动产生的应力作用下会继续沉降。若要研究多相过程的物理变异性，这种砂体沉降并不理想；[22], 但另一方面，它也是观察饱和颗粒介质中流动时一个值得关注的现象。因此，精确量化砂体沉降随时间变化的空间分布图可能很有意义。基于多层级特征检测的变形分析（参见第 2.4.1 节）可实现此类空间量化，如图 3.4 所示。

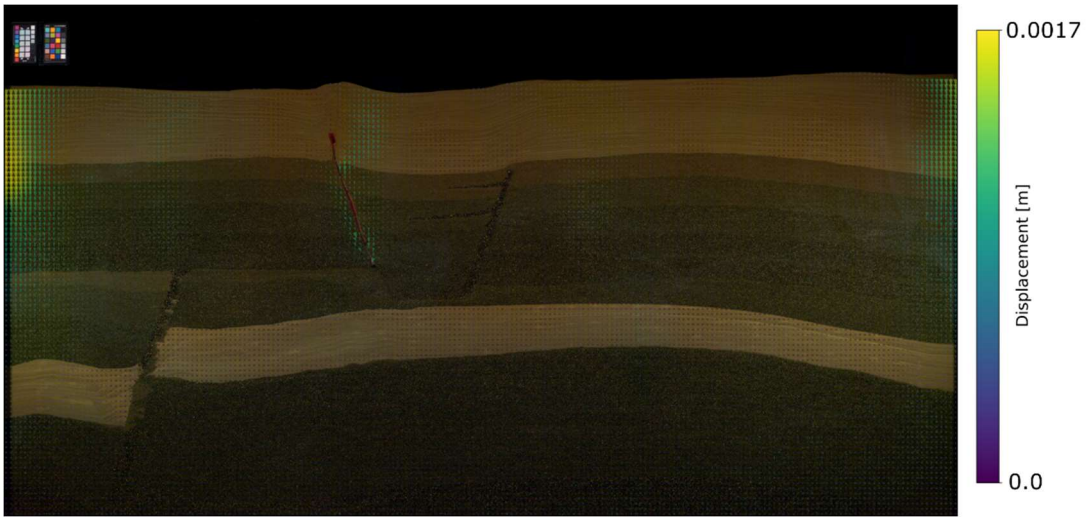

图 3.4。 为对齐两幅不同基准图像中配置的孔隙空间所需的有效变形；这两幅图像分别对应 FluidFlower基准测试前两次实验运行的注入开始时刻。DarSIA 能够检测约 1.7 毫米（甚至更小）的局部位移，相当于约 6 个像素。矢量符号图通过代码2.13中展示的可视化功能生成。

为了找到能够检测到仅几像素大小相对位移的变形映射，图像必须划分得较细。然而，如第 2.4.1 节所述，如果分辨率不足，寻找局部变形映射可能颇具挑战，尤其是在采用细致划分时。FluidFlower 数据集的分析中可以观察到这一现象。对于最细的砂（图像中最亮的部分），通常无法检测到单个砂粒。事实上，由于砂样制备得十分精细，反而产生了一个意料之外的结果：在最细砂层中的小图块内，可能没有足够的可识别特征来计算局部变形图。这体现了多层级变形分析极具价值的一种情形，因为较大的变形块仍会包含可识别特征（即使最细砂层内部没有，砂层边界处至少也有），参见图 3.5。

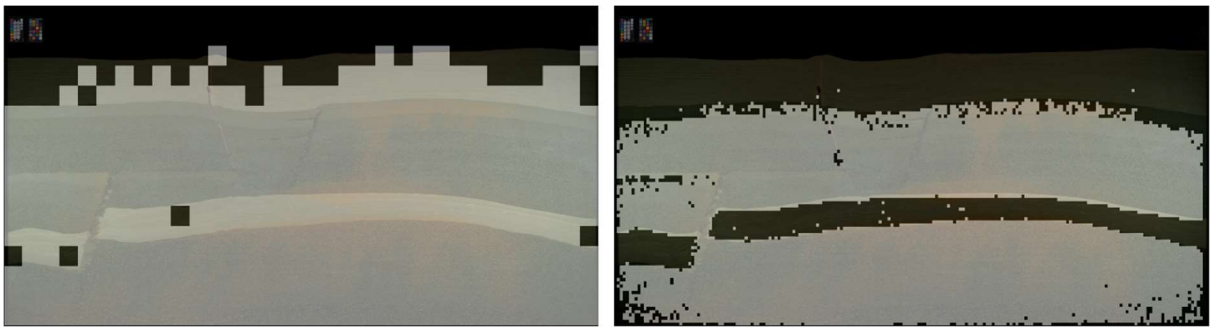

图 3.5。DarSIA 变形分析工具的示意图（调试功能），展示了为每个图块成功找到相关联的有效平移；浅色图块表示成功，深色图块表示失败。左：粗层级分析成功（32 × 16 个图块）。右：后续细层级分析成功（200 × 100 个图块）。请注意，对于具有最低每颗粒尺寸相对分辨率的最细/最亮砂型，存在系统性失败。

3.4 相分割

对于整个实验过程的细尺度图像延时序列，提取达西尺度孔隙空间量一直是该基准测试中备受关注的内容。如[22],所详述，所选用的 pH指示剂无法用于提取连续浓度和饱和度分布。不过，可以进行图像分析，并引入二值相指示器作为物理图像，参见第 2.4.2 节。根据 pH 指示剂接触 CO_2, 时的颜色和强度响应（参见图 3.1），可以将图像分割为三个不同相对应的区域：洁净水、含较高 CO_2浓度的水，以及 CO_2 气体。

所采用的流程如下。首先，检测所有 CO_2 （包括水相和气相中的 CO），将其与水分离。其次，识别含有气态 CO_2 的区域，并将其作为整体 CO_2 的一部分。两种方法都基于第 2.4.2 节所述的阈值分割，因此从分析人员的角度来看，需要选择合适的单色信号和阈值参数。对于后者，了解介质的非均质结构（参见第 3.2 节）后，便可针对每个检测层选择定制的参数。这里我们考虑两种参数选择方式：半自动动态阈值分割和手动调节阈值分割。

参考图像正如第

2.4.2 节所述，三色照片必须与参考图像相关联，以便转换为二值数据。这里选择的参考图像为仅被水饱和的几何。注入 CO_2 之前，已拍摄了若干此类图像。尽管不存在物理变化，但这些参考图像之间的差异并不接近于 0，参见图3.6。由于实验室中的照明波动，将其中一张照片选作单一参考图像时，会检测到错误的“非活跃”信号。为缓解这一问题，基本上将所有参考图像的逐点最大值选作最终参考图像。从某种意义上说，该流程起到了清除信号中系统噪声的作用。

单色颜色空间的选择用于剖析图像并区分

水和 CO_2 以及气态 CO_2, 时，需要选择一种合适的单色解释来解读图像差异，参见第 2.4.2 节。检测任何 CO_2 ，等同于检测相对于参考图像的任何变化。在三色（RGB）图像比较中，固体空间应产生零值（在色彩空间中为黑色），而任何非零贡献都可与活性相关联，因此也可与某些 CO_2相关联。

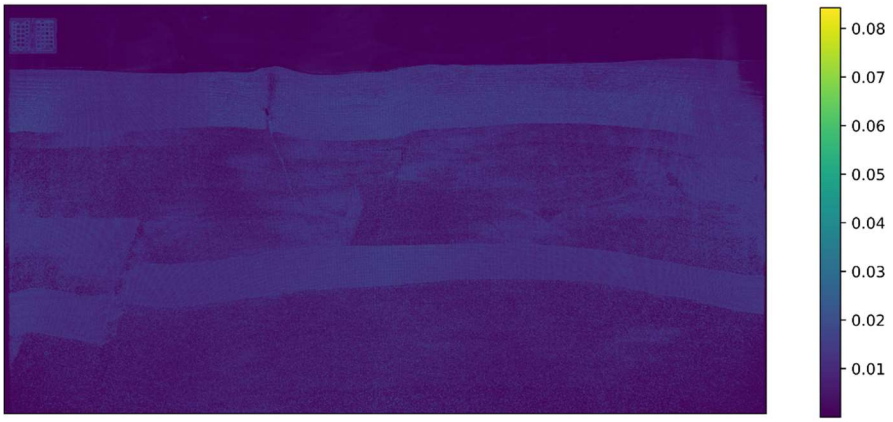

图3.6。 10个图像差值的逐点最大值（蓝色通道，后续用于CO_2气体分割），用于比较次级“参考图像”与“真实”参考图像。刻度以单位的分数表示。因此，这些看似都是同一配置的图像，采集时间相隔仅数分钟。色卡和储层的反射表明存在系统性照明变化。此外，不同砂型对光线的反射也可能不同。总体而言，在该数据集中，图像中预计会出现高达RGB刻度2–3%的非预期变化。

使用 CMYK（青色-品红色-黄色-黑色）色彩空间，特别是黑色通道（对应黑色），可以实现合适的单色解释，并基于阈值分割进行所需的分割，参见图3.7。事实上，这种选择似乎不受所考虑的各种 pH指示剂影响；考虑到不同 pH指示剂的颜色光谱差异很大，这简化了选择过程 [23]。类似地，也可以选用专门的单色颜色空间来检测气态 CO_2。

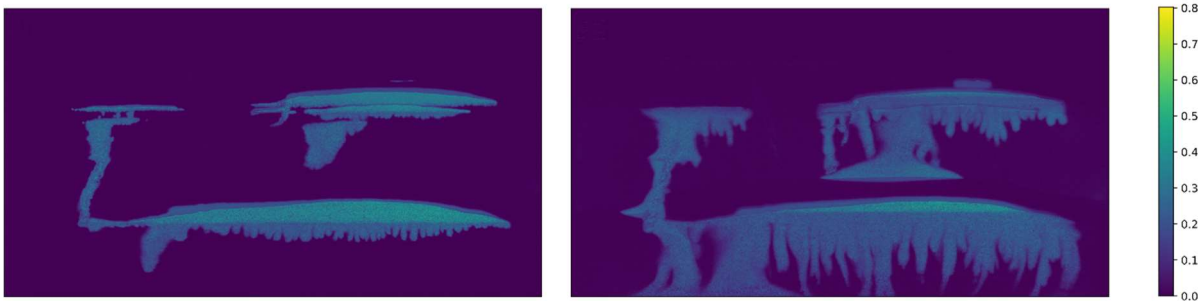

图3.7。 FluidFlower基准数据集中信号差值的黑色通道的负值。左图：CO_2 注入结束时（注入开始后5小时）。右图： 注入开始后24小时。CO_2 羽流与水相区域（信号几乎为0）呈现出截然不同的信号。此外，气相区域似乎具有较大的数值范围。不过，在左图中也可以看到，水相区域局部出现了相近的强度值。

理想情况下，图像差值的单色表示无需经过任何阈值分割即可识别目标相，而是实际连续浓度的一种（可能为非线性的）变换。然而，由于 pH 指示剂存在局限性（激活范围较小且会发生沉淀），这一点无法在该数据集中实现。

阈值参数校准选择合适的单色表示后

为进行图像解读，必须选取合适的阈值化参数；DarSIA 对代码2.11和2.12进行了扩展，使其适用于非均质介质，并允许将第3.2节中的几何分割作为输入。这属于校准过程。理想情况下，应针对每种砂型开展受控的敏感性研究，以确定适用于任意构造几何的合适取值。在当前情境中，校准使用的是实验过程中采集的图像。由于缺少受控参考图像

可实现的自动化程度有所降低，因此需要更多人类专家知识的投入，并进行视觉检查及相应的微调。采用后者这种遵循标准训练-验证-测试范式的校准流程，并不能保证鲁棒性。

为了帮助完成此类校准过程，DarSIA 包含一系列动态的无监督直方图阈值化方案，这些方案接近广为人知的 Otsu阈值化方法[28], ，但针对以下情形进行了调整：不存在应被分离的“前景”或“背景”，参见图 3.8。动态阈值分割至少有两种使用方式。一种方式是将动态阈值参数用作进一步调节的初始猜测。或者，如果对结果精度的要求较低，例如在快速原型开发环境中[23], ，也可以以无监督的方式直接使用动态阈值分割，而无需进行人工调整。

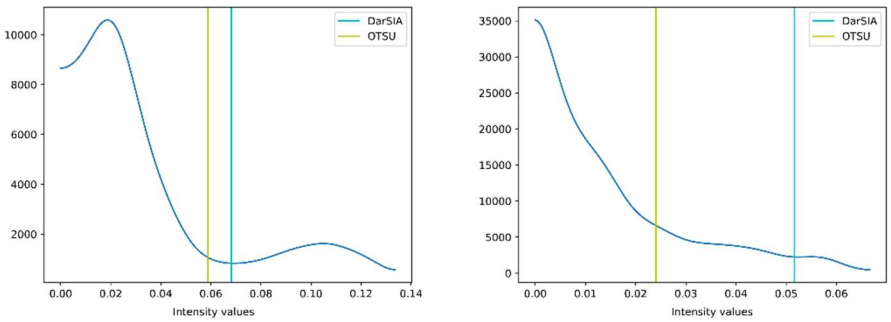

图 3.8。 直方图分析：检查单个检测到的均质区域（参见第 3.2 节），以寻找适用于检测气态 CO_2 的阈值参数。比较标准 Otsu阈值分割与 DarSIA 提供的更审慎的选择。左图： 注入开始后 5 小时。可以识别出两个明显的强度峰值，分别代表背景（低值）和前景（高值）。原则上，介于两者之间的某个值似乎是进行恒定阈值化的良好候选值。Otsu 和 DarSIA 给出的值相对接近。右图： 注入开始后 24 小时，展示了均质区域受到信号影响但不存在明显强度峰值的典型情形。Otsu 和 DarSIA 给出了两个不同的值，其中 DarSIA 仍接近根据 5 小时情况预测的值。

图 3.9 展示了静态和动态异质阈值化技术的比较。其中，静态方法经过校准，能够稳健地应用于整个 FluidFlower基准数据集，而动态方法则会针对每幅图像进行调整。总体而言，两种算法都捕捉到了实验数据的主要特征。然而，细看分割结果时会发现，这两种算法在区域的不同部分各有优缺点。我们再次强调，最终结果不仅取决于图像分析算法，也取决于实验中选用的视觉标记物。

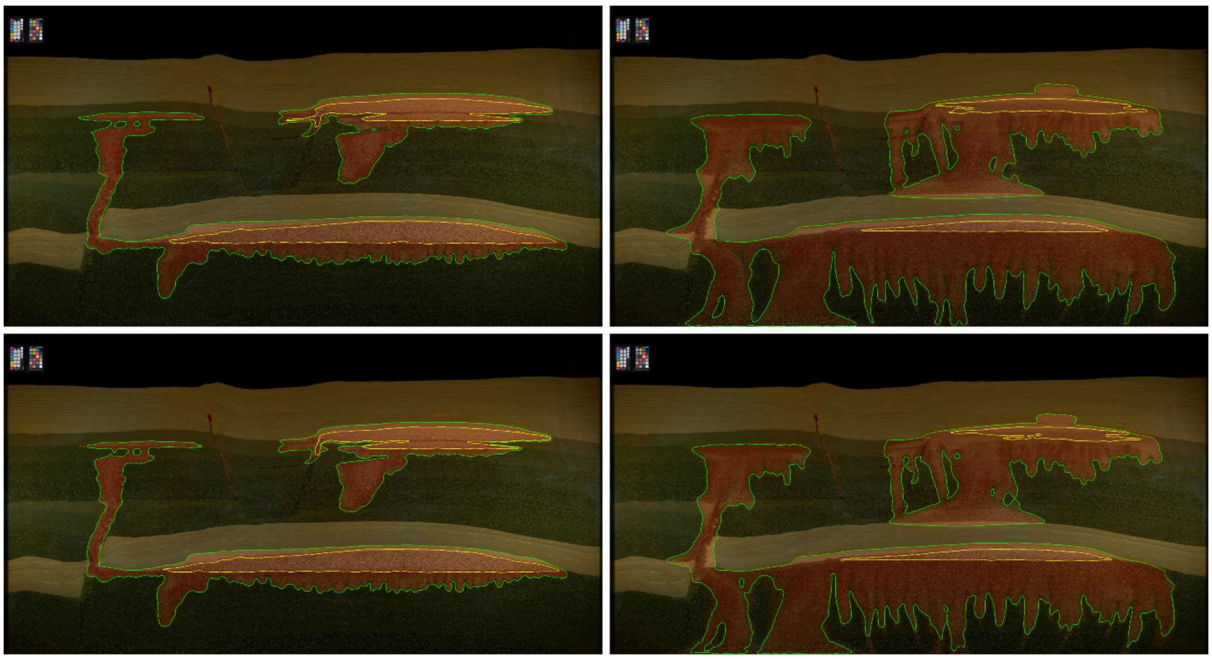

图3.9. FluidFlower 基准几何结构中 CO_2 注入的相分割。气态 CO_2 和 CO_2饱和水分别以黄色和绿色等值线表示。上：静态阈值分割。下：动态阈值分割。左：注入开始后 5 小时。右：注入开始后 24 小时。讨论见正文。

任何动态几何分割（包括上述相分割）都为进一步分析提供了可能。借助视觉方式，分割结果在强度方面具有稀疏性，因此只需将不同配置简单叠加在同一画布上，就能直接进行比较，参见代码 2.14 和图 3.10。

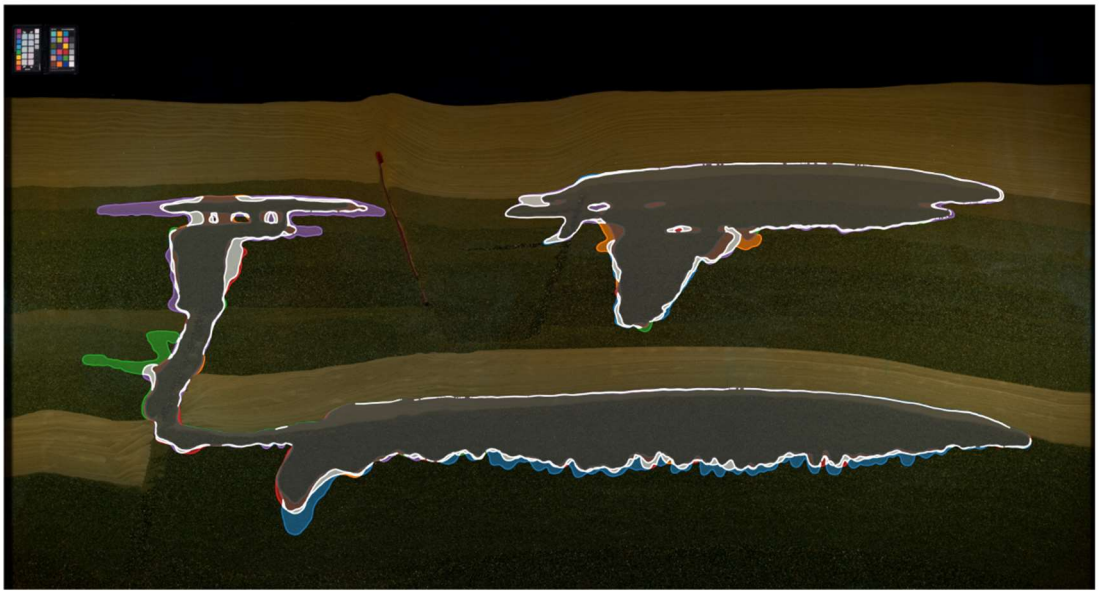

图3.10. 国际 FluidFlower 基准研究全部（五次）实验运行在注入开始后 5 小时的视觉比较。除灰度外，每种不同颜色表示几何结构中 CO_2 的不同位置，而灰色值表示重叠区域。深灰色表示所有实验运行，浅灰色仅表示其中少数几次。目视检查证实，观察到的变异性源于物理因素，而非分割算法造成的伪影。有关 FluidFlower 中开展的 CO_2 实验的物理变异性的进一步讨论，请参见 *[22]*。

3.5 密度驱动的对流混合

定位流体相的二值数据包含有关传播前沿的信息。在多组分流中，密度驱动指进的发展（标志着密度驱动的对流混合的开始）也可理解为扩散前沿的不稳定扰动，这一现象是一个值得关注的课题，尤其是在 CO_2 封存的背景下（例如参见 [29, 30, 31]）。DarSIA 提供了确定二值数据边界极值点的功能。因此，可以有效识别指尖。对于延时图像，还可以进一步在时空中跟踪其位置，并将其绘制出来，参见代码 2.15。

FluidFlower 基准实验还展示了水相中溶解的 CO_2所引发的此类密度驱动指进。图 3.11 展示了识别指尖的可能性；此处识别范围限定在国际基准研究 [25], 相关的某个感兴趣区域（C 区），而相应的指尖轨迹则见图 3.12。除了绘图之外，还可以进一步利用这些指尖的时空位置分析各种特性，例如不稳定指进生长的起始时间、特征波长和速度。

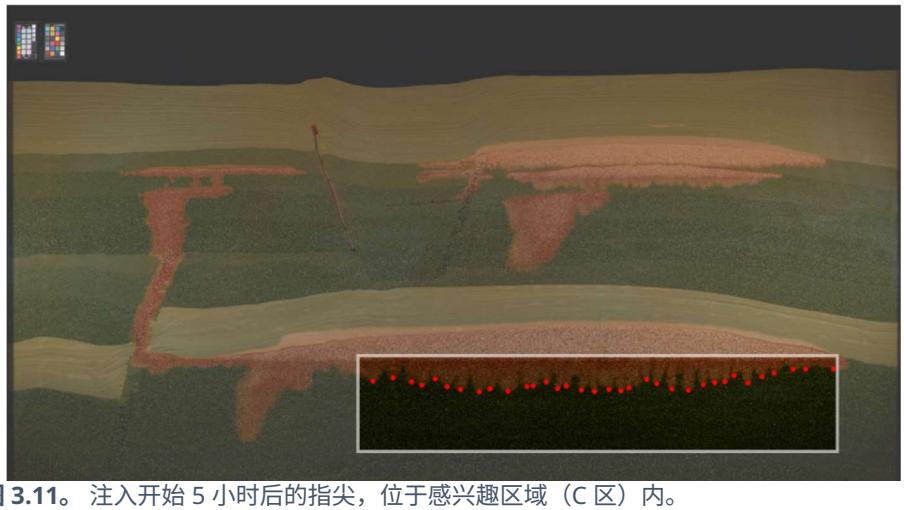

图 3.11。 注入开始 5 小时后的指尖，位于感兴趣区域（C 区）内。

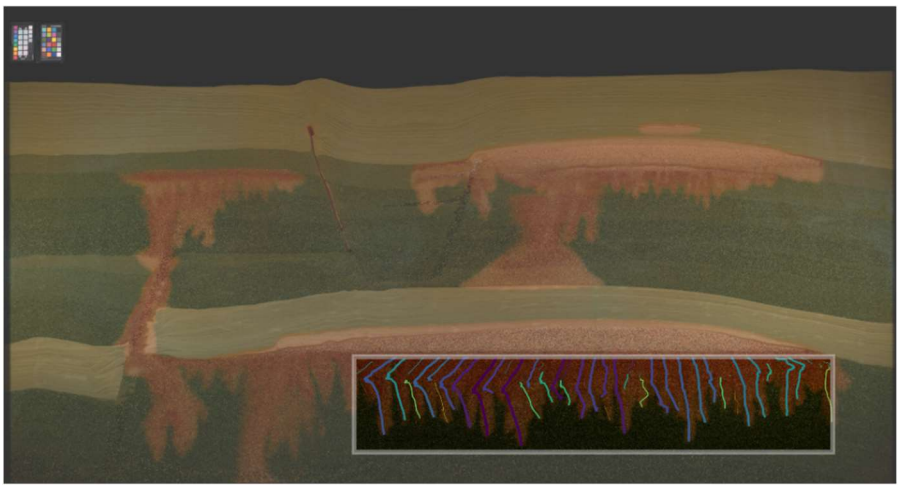

图 3.12。 穿过 C 区的指进轨迹。路径的粗细与其相对长度（相对于最长路径）相关，仅用于可视化，以突出显示主要轨迹。请注意，由于地层中的环流，轨迹会出现之字形变化

3.6 达西尺度示踪剂浓度图

按照第 3.4 节所述的类似流程，DarSIA 可用于从多孔介质二维图像中提取连续数据。以下以在中型 FluidFlower 实验装置中开展的一项示踪剂实验为例进行说明，参见图 3.13；该实验装置的特性与大型实验装置相似，参见图 3.1。此处所述实验 [24], 分为三个阶段：首先，以恒定注入速率向均质介质中注入单色示踪剂；其次，将注入速率提高一倍；最后停止注入，参见图 3.14。

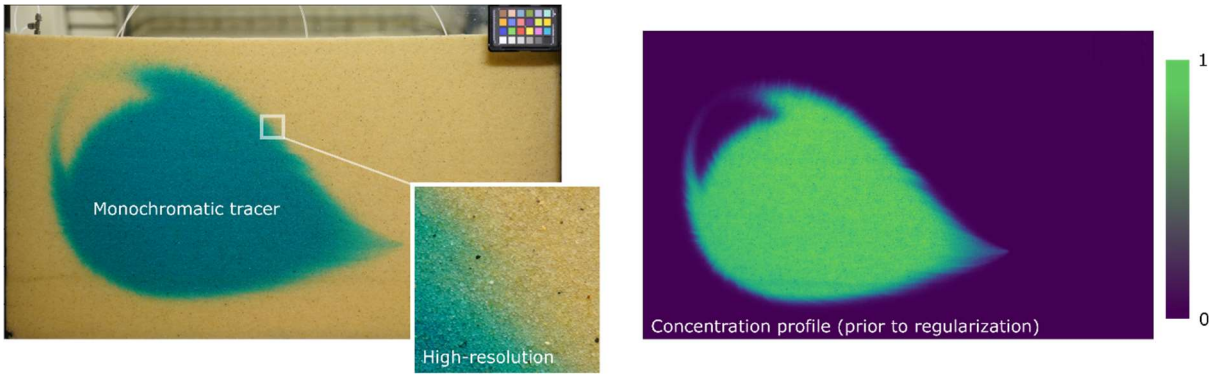

图3.13。 在中型 FluidFlower 实验装置中进行的均质介质示踪剂实验。左： 实验照片，放大显示过渡区。右：示踪剂浓度转换后的孔隙空间解译，采用与第3.4节类似的流程获得，但针对的是连续数据。

为从相应的照片中提取具有物理意义的数据，我们遵循第 2.4.2 节所述的流程。通过将图像与参考图像进行比较，可以分离出孔隙空间，从而分析示踪剂浓度。为将单色信号强度（此处为灰度）与实际示踪剂浓度关联起来，我们采用线性转换，因此需要合适的缩放参数。可根据一组校准图像对这些参数进行校准，从而得到实际的浓度剖面，见图 3.13。图 3.14 展示了所述实验的校准及其验证结果，表明其性能令人满意。

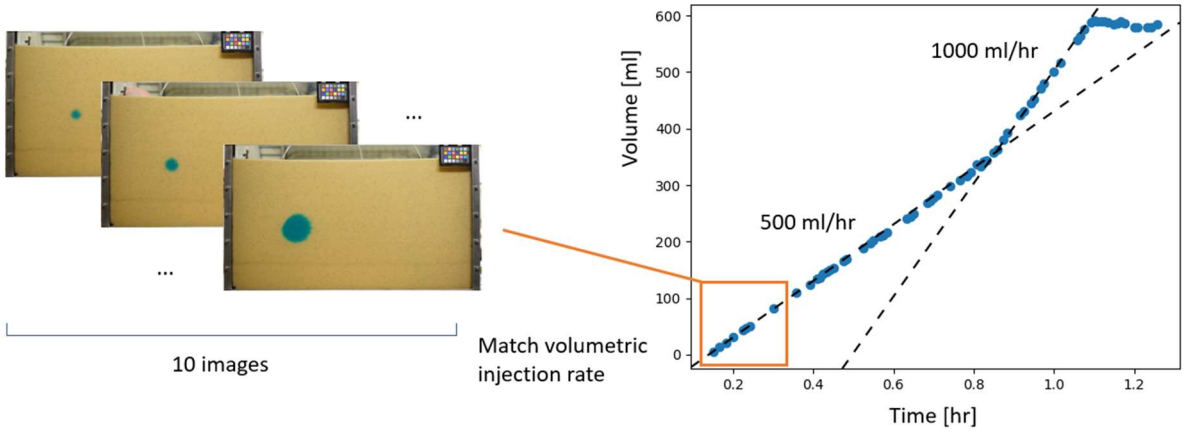

图3.14。 校准流程示意图，如代码2.12所示。校准通过将根据10张图像解译得到的有效体积注入速率与已知注入速率进行匹配来完成。通过与实验后续时刻的图像及已知注入体积进行比较，对校准进行验证；结果与实验的三个阶段均吻合良好（以500 ml/hr注入；以1000 ml/hr注入；停止注入）。

4. DarSIA 的结论与未来发展

我们的愿景是将 DarSIA 用作多孔介质实验室中的定量测量工具，既适用于实验，也适用于计算。附带物理坐标和解释信息的物理图像，使软件和专家都能够分析静态和动态孔隙空间过程的图像。我们发现，图像正则化不仅是噪声去除工具，更为从孔隙尺度到达西尺度的升尺度和分析提供了无缝框架。通过谨慎选择对物理图像的解释方式并进行充分校准，我们将该方法应用于 FluidFlower 数据集，证明其能够对真实世界数据进行定量分析。

DarSIA 要适用于实验室数据，一个重要前提是实验设计与图像分析密切配合。我们指出了若干需要谨慎处理的因素。我们特别强调，必须（也能够）依据明确界定的参考点对齐图像，并为任何动态过程恰当选择视觉标记物。当需要直接进行孔隙尺度比较时，这些概念至关重要。具体而言，如果要使用第 2.4.1 节（或第 2.4.2 节）所述算法研究微小形变（或孔隙尺度过程），那么两个图像的坐标系对齐误差必须显著小于特征位移（或特征孔径）。因此，图像校准标记物应纳入实验设计，以便确定转换模型并估计所有必要的调节参数。最后，DarSIA 背后的理念并不局限于二维图像；目前正在开展相关工作，旨在将其扩展至三维图像，并支持 PET/CT 扫描领域的标准数据类型（如 DICOM）。

认识到针对图像分析需求进行周密实验设计的重要影响后，我们设想进一步发展 DarSIA 的代码基础。未来的工作将致力于开发用户友好界面，使专家不仅能够分析图像，还能从实验一开始——即实验设计阶段——便使用该工具。为此，我们设想开发用于评估视觉媒介可用性的诊断工具。例如，在寻找最优色相—饱和度组合时，色彩空间的选择可以被视为一个约束优化问题。

从分析人员的角度来看，我们认为有必要进一步提升用户友好性，使其能够直接处理后处理结果。通过图形用户界面选择参考点以进行畸变校正调节，或选择感兴趣区域以定义色彩校正，将使 DarSIA 更易于使用。考虑到定量研究和物理变异性，我们正致力于扩展适用于比较物理图像的不同达西尺度变体的度量指标套件，从而获得比针对二值数据采用基本 L^2 思维方式更为复杂的距离度量。最优传输中的概念（例如 Wasserstein 距离）也广泛应用于图像分析的其他领域，有望实现对连续数据的有意义比较，尤其适用于传输主导过程（参见例如 [32]）。

除了上述愿景之外，DarSIA 的进一步发展还必须提升算法的计算性能。当前版本的 DarSIA 已经基于精简的数据结构，针对图像分块进行了定制化处理，使其高效且易于扩展。然而，当进入第三个空间维度，乃至有望进入第四个维度（延时三维数据）时，直接在四维空间中进行正则化在理论上显然具有优势。四维图像正则化的数值算法远非标准化（近期讨论见例如 [33]），要使其稳健且运行时间经过优化，从而在空间和时间上实现足够高的分辨率，仍需进行研发。即便是第 3 节讨论的二维图像，也有充分理由认为需要定制且快速的达西尺度图像分析算法；这一观察更凸显了上述挑战。

如第 3 节所述的二维图像，可以充分说明有必要开发定制化且快速的达西尺度图像分析算法。

最后要谈的是自动化。成像和多孔介质研究的复杂性意味着，在大多数研究应用中，DarSIA 的组件仍需由人监督使用。另一方面，在数字孪生技术等领域的一些应用中，仍有推动实验室数据实时无监督分析的需求 [24]。图像分析对无监督应用的需求，也进一步凸显了底层算法具备鲁棒性、效率和可靠性的重要性。

最后，我们重申引言中的邀请，并鼓励所有感兴趣的人士参与 DarSIA 的未来发展。

经费

JWB 的工作部分由 UoB Akademia 项目 «FracFlow» 和 Wintershall DEA 资助的 «PoroTwin» 项目提供经费。BB

参考文献

[1] M. K. Hubbert，“地下水运动理论”，《地质学杂志》，第 48 卷，页 785–944，1940 年。[2] S. P. Neuman，“达西定律的理论推导”，《力学学报》，第 25 卷，第 3 期，页 153–170，1977 年。[3] S. Whitaker，“多孔介质中流体运动理论的进展”，《工业与工程化学》，第 61 卷，第 12 期，页 14–28，1969 年。[4] W. G. Gray 和 K. O'Neill，“多孔介质流动的一般方程及其简化为达西定律”，《水资源研究》，第 12 卷，第 2 期，页 148–154，1976 年。[5] J. M. Nordbotten、M. A. Celia、H. K. Dahle 和 S. M. Hassanizadeh，“多孔介质多相流宏观尺度压力的定义”，《水资源研究》，第 44 卷，第 6 期，2008 年。[6] J. M. Nordbotten、M. A. Celia、H. K. Dahle 和 S. M. Hassanizadeh，“达西定律中宏观尺度变量的解释”，《水资源研究》，第 43 卷，第 8 期，2007 年。[7] U. Hornung，《均质化与多孔介质》，Springer Science & Business Media，1997 年。[8] G. Bradski，“OpenCV 库”，《*Dr. Dobb's* 软件工具杂志》，2000 年。[9] S. Van der Walt、S. Schönberger、J. Nunez-Iglesias 等，“scikit-image：Python 中的图像处理”，*PeerJ*，第 2 卷，文章编号 e453，2014 年。

[10] J. Both、E. Storvik、J. Nordbotten 和 B. Benali，《DarSIA v1.0》，Zenodo，2023。

[11] T. Masecal、M. Mauderer、N. Parsons 等人，《Colour 0.4.2》，*Zenodo*，2022。

[12] T. Chan 和 J. Shen，《图像处理与分析：变分法、偏微分方程、小波与随机方法》 c
》，*SIAM*，2005年。[13] G. Aubert 和 P. Kornprobst，《图像处理中的数学问题：偏微分方程与变分法》，应用数学科学，第 147 卷，2002年。[14] M. Burger、G. Gilboa、S. Osher 和 J. Xu，《非线性逆尺度空间方法》，数学科学通讯，第 4 卷，第 1 期，第 179–212 页，2006年。[15] L. I. Rudin、S. Osher 和 E. Fatemi，《基于非线性全变差的噪声去除算法，

"
《*Physica D*：非线性现象》，第 60 卷，第 1–4 期，第 259–268 页，1992年。[16] T. Goldstein 和 S. Osher，《用于 L1 正则化问题的分裂 Bregman 方法》，*SIAM* 成像科学期刊，第 323–343 页，2009年。[17] A. Chambolle，《全变差最小化算法及其应用》，《数学成像与视觉期刊》，第 20 卷，第 1 期，第 89–97 页，2004年。[18] S. Beucher，《分水岭在轮廓检测中的应用》，载于国际图像处理研讨会论文集。*CCETT*，1979年。[19] E. Rublee、V. Rabaud、K. Konolige 和 G. Bradski，《ORB：SIFT 或 SURF 的高效替代方案》，载于 *2011* 年国际计算机视觉会议，第 2564–2571 页，2011年。[20] M. A. Fischler 和 R. C. Bolles，《随机抽样一致性：一种用于模型拟合的范式及其在图像分析和自动制图中的应用》，《*ACM* 通讯》，第 24 卷，第 6 期，第 381–395 页，1981年。[21] K. Eikehaug、M. Haugen、O. Folkvord、B. Benali、E. Bang Larsen、A. Tinkova、A. Rotevatn、J. Nordbotten 和 M. Fernø，《用于地质碳封存定量研究的米尺度多孔介质流动实验设计》，*TiPM*，已投稿至本特刊。[22] M. Fernø、M. Haugen、K. Eikehaug、O. Folkvord、B. Benali、J. Both、E. Storvik、C. Nixon、R. Gawthrope 和 J. Nordbotten，《在含断层物理储层模型中进行的房间尺度二氧化碳注入》，*TiPM*，已投稿至本特刊。[23] M. Haugen、L. Saló-Salgado、K. Eikehaug、B. Benali、J. Both、E. Storvik、O. Folkvord、R. Juanes、J. Nordbotten 和 M. Fernø，《断层几何结构中米尺度实验室二氧化碳注入的物理变异性》，*TiPM*，已投稿至本期。[24] E. Keilegavlen、E. Fonn、K. Johannessen、K. Eikehaug、J. Both、M. Fernø、T. Kvamsdal、A. Rashee

d
和 J. M. Nordbotten，《PoroTwin：FluidFlower 实验装置的数字孪生》，*TiPM*，已投稿至本特刊。[25] J. Nordbotten、M. Fernø、B. Flemisch、R. Juanes 和 M. Jørgensen，《最终基准描述：FluidFlower 国际基准研究》，*Zenodo*。[26] K. Eikehaug、E. Bang Larsen、M. Haugen、O. Folkvord、B. Benali、J. Both、J. Nordbotten 和 M. Fernø，国际 *FluidFlower* 基准研究数据集，Zenodo，2023。

[27] J. Both、B. Benali、O. Folvord、M. Haugen、E. Storvik、M. Fernø 和 J. Nordbotten，国际 *FluidFlower* 基准数据集的图像分析，Zenodo，2023。[28] N. Otsu，《基于灰度直方图的阈值选择方法》，*IEEE*系统、人和控制论汇刊，第9卷，第1期，第62–66页，1979年。[29] A. Riaz、M. Hesse、H. Tchelepi 和 F. Orr，《多孔介质中重力不稳定扩散边界层的对流起始》，流体力学杂志，第548卷，第87–111页，2006年。[30] G. Pau、J. Bell、K. Pruess、A. Almgren、M. Lijewski 和 K. Zhang，《咸水含水层二氧化碳封存中密度驱动流的高分辨率模拟与表征》，*Adv. Water Resour.,*2010年。[31] M. Elenius、J. Nordbotten 和 H. Kalisch，《毛细过渡带对扩散边界层稳定性的影响》，*IMA*应用数学杂志，2012年。[32] B. Flemisch、J. Nordbotten、M. Fernø、R. Juanes 等，《FluidFlower 国际基准研究：过程、建模结果及与实验数据的比较》，*TiPM* 本特刊，已投稿。[33] K. Brehmer、H. Aggrawal、S. Heldmann 和 J. Modersitzki，《基于 SVD 的 SqN 距离度量的多幅图像变分配准》，载于《计算机视觉中的尺度空间与变分方法》，*SSVM 2019*，计算机科学讲义，第11603卷，J. Lellmann、M. Burger 和 J. Modersitzki 编，施普林格，Cham，2019年。