

基于CLCD生成地表粗糙度的技术依据与方法说明

摘要: 本文档旨在为利用中国30米年度土地覆盖数据（CLCD）生成地表粗糙度（rou）文件提供一套完整的技术依据和方法论解释。内容涵盖数据源的权威性、坐标系处理的合理性、关键参数选取的科学依据。

1. 方法论概述

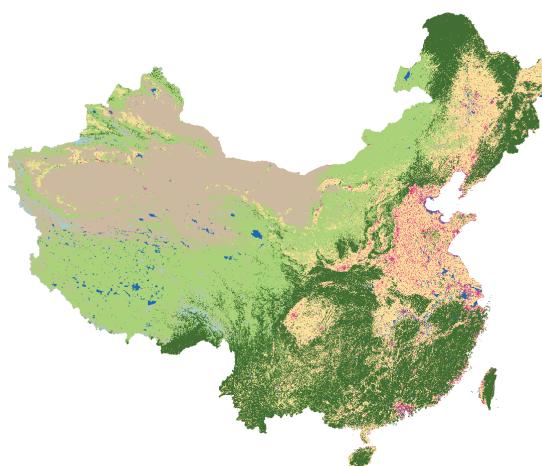
本方法通过处理权威的土地覆盖遥感数据，将其映射为空气动力学粗糙度长度（ z_0 ），并进一步推算出等效障碍物高度（ h ），最终生成适用于风场模拟的 .rou 格式文件。该流程是风能评估和大气边界层研究中的标准实践，确保了输入参数的科学性和可追溯性。

2. 数据来源与坐标系处理

2.1. 数据来源：中国30米年度土地覆盖数据 (CLCD)

本流程采用的CLCD (China Land Cover Dataset) 是由武汉大学团队发布的具有高时空分辨率的土地覆盖产品。

- 权威性与精度:** 该数据集基于Landsat影像，在Google Earth Engine平台上生成，提供了自1990年以来中国区域30米分辨率的逐年土地覆盖分类。其分类系统包含耕地、森林、灌丛、草地、水体、雪/冰、裸地、不透水面/城镇及湿地九大类，与 `mapping.yaml` 中的分类相匹配。根据官方发布，该数据集的总体精度（Overall Accuracy）稳定在79%左右，能够满足区域尺度风场模拟对下垫面分类的需求。
- 数据格式与投影:** 数据以云优化GeoTIFF (COG) 格式提供，其中 `*_albert.tif` 文件采用了Albers 等积投影，这是一种适用于国家尺度分析的标准投影方式。



2.2. 坐标系处理流程

为了进行精确的距离和面积计算，并与主流风能模拟软件（如WAsP）的工作流保持一致，本方法对坐标系进行了标准化处理。

- 重投影至UTM:** 脚本首先将Albers投影的CLCD数据裁剪并重投影到局地的通用横轴墨卡托 (UTM) 投影。UTM是WGS84坐标系下的分区投影，以米为单位，是风能和地形分析领域的推荐做法，能有效避免地理坐标系（经纬度）在高纬度地区的变形问题。

- **处理工具与方法:** 整个流程利用了地理空间数据处理的“黄金标准”工具集——GDAL。
`gdalbuildvrt` 用于构建虚拟栅格以拼接数据, `gdalwarp` 则负责裁剪和重投影。
 - **重采样方法:** 在处理分类栅格数据 (如土地覆盖类型) 时, 为防止类别值被插值计算污染 (例如, 将“水体”和“森林”插值为一个不存在的中间类别), 脚本采用了 `nearest-neighbor` (最近邻) 重采样方法。这在GDAL文档和行业实践中被明确推荐为分类数据的最佳实践。

3. 关键参数的选取依据

3.1. 从土地覆盖到粗糙度长度 (z_0) 的映射

将土地覆盖类型通过查表法映射为粗糙度长度 z_0 是大气科学和风工程领域的成熟方法。本流程中文件定义的 z_0 值参考了多个权威来源, 包括 WMO (世界气象组织) 指南、EPA (美国环保署) 手册以及 Davenport-Wieringa 分类等。该参数基于文献和行业标准的初始配置, 可根据场址的实测数据或再分析风气候数据进行局地化校正。

各类别 z_0 取值依据:

- **水体 (Water):** 0.0002 m。这是一个典型的开阔水面 z_0 值。部分风能软件 (如 WAsP) 为特殊标识, 会将水体 z_0 设为 0。
- **草地 (Grassland):** 0.05 m。处于常见草地/开阔地 z_0 范围 (0.03–0.05 m) 内。
- **耕地 (Cropland):** 0.10 m。位于低矮作物的 z_0 范围 (0.10–0.25 m) 内。
- **灌丛/湿地 (Shrub/Wetland):** 0.07 m。属于灌木地表的 z_0 范围 (0.05–0.5 m)。
- **裸地 (Barren):** 0.02 m。符合荒地的 z_0 典型值 (0.01–0.03 m)。
- **森林 (Forest):** 0.50 m。这是一个相对保守的森林 z_0 值, 文献中常见范围为 0.5–1.5 m。
- **城镇 (Urban):** 0.40 m。该值对应于郊区或低密度建成区, 属于保守设定。市中心的 z_0 可达 2m 以上。
- **雪/冰 (Snow/Ice):** 0.001 m。与光滑冰雪表面的 z_0 值 (0.001–0.005 m) 一致。

合理性说明: 正如新欧洲风能图谱 (NEWA) 项目所指出的, 土地覆盖到 z_0 的映射表不存在唯一的“真值”, 而是一种工程化的约定。因此, 将 `mapping.yaml` 作为一个可配置的参数文件是合理的, 并允许用户根据特定场址的实际情况或验证数据进行后续优化。

3.2. 从 z_0 到植被高度 (h) 的换算: $h = a \cdot z_0$

大气边界层理论和大量观测实验表明, 粗糙度长度 z_0 与形成该粗糙度的障碍物 (如植被) 高度 h 之间存在近似线性的正比关系。

- **经验关系:** 通常, z_0 约等于 $(0.05\text{--}0.2) \cdot h$, 其中“十分之一法则” ($z_0 \approx 0.1h$) 最为常用。反算可得 $h \approx (5\text{--}20) \cdot z_0$ 。
- **参数 a 的选取:** 脚本中设置的默认 `a_factor=20`, 位于该经验范围的上沿。这是一种偏于保守的设定, 倾向于生成一个较高的等效障碍物高度, 避免在模型中低估植被对风的阻挡效应。
- **理论支撑:** 更精细的冠层参数化方案 (如 Raupach, 1994) 也将 z_0 与冠层高度 h 联系起来, 并指出两者关系受叶面积指数 (LAI) 等因素影响, 这进一步说明了将 a 作为一个可调整的工程系数的合理性。

3.3. 季节性调整系数 (vege-times)

植被的 z_0 值存在显著的季节性变化，例如，落叶林在冬季的 z_0 会远小于夏季。脚本中引入的全局乘子 `vege-times`（默认为1.0）提供了一种简便的工程化手段，用于模拟不同季节（如“叶季”与“非叶季”）或进行情景分析，例如，冬季可设为0.5–0.8，夏季为1.0。

4. 文件结构与代码实现

4.1. .rou 文件格式的合理性

将粗糙度信息表达为等值线或点集是风能模拟软件的通行做法。

- **行业先例:** WAsP软件使用 `.map` 文件（矢量线格式）来定义粗糙度变化区域，而WindSim等CFD软件也支持类似的网格化或矢量格式。Global Mapper等GIS工具也内置了从土地覆盖图层直接生成和导出粗糙度图的功能。
- **格式兼容性:** 脚本生成的 `.rou` 文件是一种自定义的文本格式，通过分组等值线的形式同时记录了 z_0 和 h 。这种“左侧 z_0 、右侧 z_0 、高度、点数及坐标列”的线要素格式变体在WAsP等软件中亦有先例。只要下游的读取脚本能够正确解析，这种格式就是完全可行的。

4.2. 脚本关键参数与实现细节

- `sample` (**采样间距**): 默认为100米。考虑到CLCD的原始分辨率为30米，采用100米的采样间距可以在大幅降低数据量的同时，保留下垫面粗糙度的主要空间分布特征。欧洲NEWA项目中的 z_0 底图也采用了百米级别的分辨率。
- `quant_step_m` (**高度量化步长**): 默认为0.5米。该参数用于对计算出的植被高度 h 进行分组，以压缩等值线的数量。0.5米的步长远小于当前通过卫星遥感反演冠层高度的典型误差（RMSE通常在4-9米量级），因此这种量化不会引入实质性的精度损失。
- **裁剪缓冲 (Buffer):** 在裁剪和重投影时增加5%的缓冲区域，可以有效避免因重采样窗口外推而导致的边界像素丢失，是栅格数据处理中的常见技巧。
- **无效值处理 (-dstNodata 0):** 将输出的无效数据值设为0，并在后续处理中滤除，这与多数土地覆盖产品（通常类别编码从1开始，0代表无数据）的约定一致，避免了将数据空洞误判为有效类别。

5. 代码使用方法

该工具通过一个Python脚本(`generate_rou.py`)实现，依赖GDAL、NumPy、Rasterio和PyYAML等库。

基本使用流程:

1. **准备数据:**
 - 获取CLCD数据，可以是全国单文件(`--clcd`)或按省份存放的文件夹(`--clcd-dir`)。
 - 配置 `mapping.yaml` 文件，根据需求调整土地覆盖类别与 z_0 的映射关系、`a_factor` 等参数。
2. **执行命令:**

在命令行中运行脚本，并提供必要的参数。

```
1 python generate_rou.py \
2     --clcd-dir /path/to/your/clcd_data_directory \
3     --center "39.9,116.4" \
4     --r2 25000 \
5     --out /path/to/output/rou_file.rou \
6     --mapping /path/to/your/mapping.yaml
```

参数说明:

- `--clcd-dir` 或 `--clcd`: 指定CLCD数据源。
- `--center`: 指定模拟区域的中心点纬度和经度。
- `--r2`: 指定模拟区域的半径 (米)。
- `--out`: 指定输出 `.rou` 文件的路径。
- `--mapping`: 指定参数映射文件的路径。
- `--a`: 可选, 用于覆盖 `mapping.yaml` 中定义的 `a_factor`。
- `--vege-times`: 可选, 用于季节性调整。
- `--sample`: 可选, 采样间距。
- `--quant`: 可选, 高度量化步长。

输出:

脚本执行成功后, 将会在指定路径生成一个 `.rou` 文件, 该文件可被下游风场模拟工具读取, 用于定义地表粗糙度。

6. 结论与建议

该rou生成链路 (CLCD → z0 → h → rou) 在数据源、处理流程、参数选取和文件格式上均有充分的科学依据和行业先例支持, 是一套合理且可复现的技术方案。

- **建议:** 在文档或论文的方法部分, 建议明确声明 `mapping.yaml` 中的参数为“基于文献和行业标准的初始配置”, 并指出这些参数可“根据场址的实测数据或再分析风气候数据进行局地化校正”, 以体现研究的严谨性。对于城镇和水体等特殊下垫面, 应根据目标模拟软件 (如LES/CFD或WAsP) 的具体要求, 确认 z_0 的取值约定。