

森林生态系统储存了全球陆地碳的主要部分，其中以上生物量（AGB）占据了碳库的核心地位。定量评估 AGB 的时空变化，对于揭示碳源汇动态、评估气候变化影响和制定减排策略具有重要意义。Saatchi 等（2011）<sup>[1]</sup>通过融合地面调查与遥感资料，首次绘制了全球热带森林碳库基准图，为后续动态监测奠定了基准线；Asner 等（2009）<sup>[2]</sup>在亚马逊地区采用高分辨率成像光谱仪（AIRS）与 Landsat 数据，详细刻画了局地生物量空间分布，为区域尺度碳通量估算提供了数据支持。

近年来，Landsat 系列卫星影像因其长期且免费开放的数据积累，成为森林时空动态监测的核心数据源。针对多时相影像的变化检测与趋势分析，研究者提出了多种算法框架。Verbesselt 等（2010）<sup>[3]</sup>利用 BFAST 方法对 NDVI 时间序列进行趋势与季节性分解，实现了森林扰动及恢复过程的自动检测；Zhu 和 Woodcock（2014）<sup>[4]</sup>提出的 CCDC 算法，通过对所有可用 Landsat 数据进行逐像元动态分段，能够灵敏捕捉土地覆盖持续变化。Kennedy 等（2010）<sup>[5]</sup>进一步在 LandTrendr 框架中，将时间序列分段算法与像元线性拟合相结合，实现了对森林扰动和恢复的精细监测。

为实现多时相以上生物量（AGB）栅格数据的像元级趋势分析，本研究首先对各期栅格数据进行空间对齐与配准，然后基于分块处理构建时间序列数据立方体，最后在像元层面应用最小二乘回归与显著性检验，计算趋势参数并生成统计结果栅格。

在数据预处理阶段，本文选取了五个具有代表性的时间节点（1998、2003、2008、2013、2018 年）对应的 AGB 估算栅格影像，统一读取为单波段矩阵，并将其空值（NoData）替换为数学意义上的 NaN，以利于后续数值计算。为保证各期数据的空间可比较性，对每幅影像分别检查其坐标参考系（CRS）与仿射变换矩阵：若所有数据具有相同 CRS 且非单位仿射变换，则直接按该参考对齐；否则，采用两种策略中的一种——异 CRS 数据通过双线性插值重投影到参考 CRS 下的相应空间格网，若缺失地理参考信息或难以精确投影，则以数组中心为基准，对所有矩阵进行等尺寸中心裁剪，以获得公共覆盖区域。此步骤确保了后续对同一像素位置的时间序列计算具有一致的空间坐标。

空间对齐完成后，将整个区域划分为若干块（block），每块大小依据原始数据的存储块尺寸或预设窗口尺寸确定。分块策略有助于降低内存峰值需求，并行或逐块加载数据，同时保持对大尺度栅格的可扩展处理能力。对于每个块，在各期影像中截取相同空间窗口，构建形状为  $N \times H \times W$  的三维数组，其中  $N$  为时间点数， $H$  与  $W$  分别为块的行列像素数。对应位置的 NaN 值用于掩膜，确保仅在观测值存在时参与统计。

针对每个像元位置  $(i, j)$ ，其时间序列  $\{y_k\}_{k=1}^N$  对应年份  $\{x_k\}_{k=1}^N$ （例如 1998、2003、...），采用普通最小二乘法拟合线性模型

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

其中  $\beta_1$  为变化速率（斜率）， $\beta_0$  为截距。在矩阵运算中，令向量  $x = [x_1, \dots, x_N]^T$  与  $y = [y_1, \dots, y_N]^T$ ，并构建掩膜指示向量  $\mathbf{m}$ （仅选择有效观测）。斜率与截距的封闭形式解为

$$\beta_1 = \frac{\sum (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sum (x_k - \bar{x})^2}, \quad \beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}$$

其中条目求和仅在  $\mathbf{m} = 1$  时进行， $\bar{x}$  与  $\bar{y}$  分别为有效观测下的均值。

为量化拟合优度，引入皮尔逊相关系数

$$r = \frac{\sum (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_k - \bar{x})^2 \sum (y_k - \bar{y})^2}}$$

在此基础上，应用基于  $r$  统计量的双侧  $t$  检验，以检验趋势斜率的显著性：

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}, \quad p = 2[1 - F_v(|t|)], \quad v = n - 2$$

其中  $n$  为该像元有效观测点数,  $F_v$  为自由度为  $v$  的 Student  $t$  分布累计函数。当  $n < 3$  或  $|r| \approx 1$  时, 该像元的  $p$  值留空以避免数值不稳定。

此外, 为直观反映研究期内的相对变化, 引入首尾百分比变化指标

$$\Delta\% = \frac{y_N - y_1}{y_1} \times 100\%$$

仅在首末观测值均有效且  $y_1 \neq 0$  时计算。

完成上述计算后, 分别将  $\beta_1$ 、 $\beta_0$ 、 $r$ 、 $p$  及  $\Delta\%$  以相同块窗口写回对应栅格波段, 最终生成五幅统计结果栅格。全区平均 AGB 时序亦通过对各期像元和计数累计后求比值得到, 并用于绘制区域平均时序曲线。