

## 附录1 研究区信息概况

### Appendix 1 Overview of information in the study area

公园名称 Park name	简称 Abbreviation	总面积 Total area (ha)	周长 Perimeter (km)	水域面积 Water area (ha)	陆地面积 Land area (ha)	距市中心距离 Distance to city center (km)	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	样点数 Number of sites
天坛公园 Temple of Heaven Park	TT	194.10	6.03	0.00	194.10	3.00	0.60	5
陶然亭公园 Taoranting Park	TRT	51.76	3.90	16.15	35.61	5.00	0.58	6
紫竹院公园 Zizhuyuan Park	ZZY	45.73	3.48	18.90	26.83	7.20	0.60	6
莲花池公园 Lianhuachi Park	LHC	44.60	2.93	12.60	32.00	7.50	0.49	7
龙潭湖公园 Longtanhu Park	LTH	42.30	2.78	19.47	22.83	5.50	0.51	5
中山公园 Zhongshan Park	ZS	19.49	2.08	3.80	15.69	0.30	0.49	5
柳荫公园 Liuyin Park	LY	17.47	1.93	6.27	11.20	5.80	0.57	5
太阳宫公园 Taiyanggong Park	TYG	33.45	2.47	1.19	32.26	8.20	0.51	5
地坛公园 Ditan Park	DT	32.80	3.37	0.00	32.80	4.30	0.53	4
月坛公园 Yuetan Park	YT	8.26	1.20	0.00	8.26	3.90	0.57	4

## 附录2 基于LiDAR提取的42个植被结构变量

### Appendix 2 42 vegetation structure variables extracted based on LiDAR data

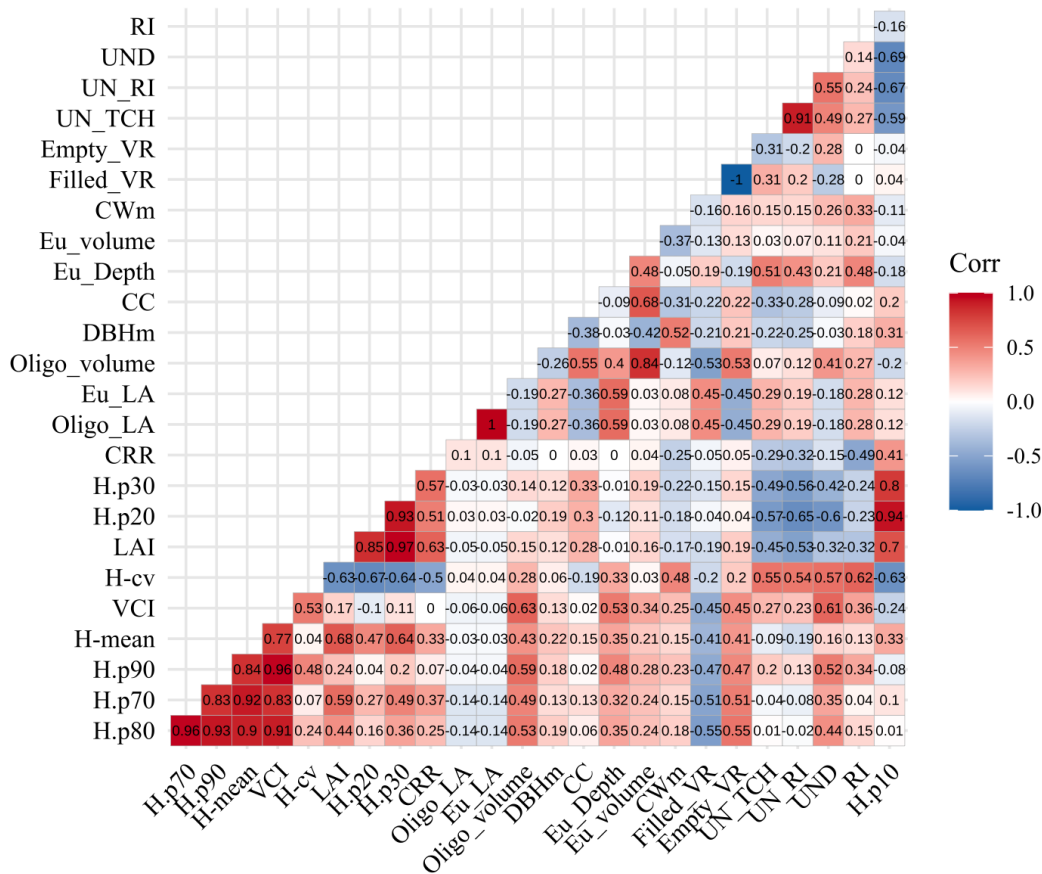
植被三维结构变量 Vegetation structural variable	简称 Abbreviation	参数描述及其生态学意义 Parameter description and ecological significance
平均树高 Mean tree height	Hm	乔木个体的高度平均值, 反映林分总体发育程度、光照资源的垂直分配和潜在栖息空间高度。
平均枝下高 Mean height to crown base	HCBm	乔木个体树冠分枝点或冠下缘高度的均值, 表征林下空间开放程度。
点云最大高度(H-max)	H-max	指示优势树和冠层顶端高度。
点云高度平均值(H-mean)	H-mean	反映总体层次结构的发育水平。
高度偏度(H-skewness)	H-skewness	判断样地植被点云高度分布是否对上层或下层偏移, 反映垂直不对称性。
高度变异系数(H-cv)	H-cv	反映样地植被点云垂直结构异质性与多样性。
冠层表面高度 Top of canopy height	TCH	一个点云区域内冠层表面的代表性高度, 指冠层顶部的统计高度(Asner & Mascaro, 2014)。
林下表面高度 Understory top-of-surface height	UN_TCH	基于林下点云计算的高度模型平均值, 指示林下植被高度发育。
高度百分位数 Height percentiles of point cloud	H.p X	点云高度分布的第X百分位数( $X^h$ , 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95), 反映林分垂直结构与异质性。
树木密度 Tree density	TD	反映乔木株数密度, 对群落竞争强度和资源分配具有重要意义(Ouyang et al., 2023)。
林下密度 Understory density	UND	林下植被点占有所有植被点的比例, 反映林下繁茂程度与遮蔽性。
平均胸径 Mean diameter at breast height	DBHm	反映林分林木体积和生长状况的关键参数(Ouyang et al., 2023)。
平均冠幅 Mean crown width	CWm	乔木树冠水平投影特征尺度的均值, 反映光照和降水截留。
平均树冠体积 Mean crown volume	CVm	乔木个体的冠层体积均值, 反映林分水平空间占据程度。
冠层覆盖度 Canopy cover	CC	乔木树冠垂直投影面积占地面面积的比例(Ma et al., 2017), 衡量光照穿透性与栖息地封闭性。
林下覆盖度 Understory canopy cover	UN_CC	林下植被垂直投影面积占地面面积的比例, 衡量林下植被的水平封闭性。
上层冠层覆盖度 Canopy cover above mean height	CCm	高于点云平均高度(H-mean)处的冠层覆盖度。表示上层的光照遮蔽和栖息位。
叶面积指数 Leaf area index	LAI	根据激光雷达穿透指数与比尔定律计算得到的叶面积指数(Bouvier et al., 2015)。反映植被对光能的利用程度, 是光能利用和生产力的核心指标。
粗糙度指数 Rumple index	RI	植被外表面面积与地表面积之比, 揭示冠层表面复杂度和异质性(Jenness, 2004; Kane et al., 2010)。
林下粗糙度指数 Understory rumple index	UN_RI	林下植被外表面面积与地表面积之比, 揭示林下结构的复杂度。
垂直复杂度指数 Vertical complexity index	VCI	根据植被叶面积密度和香农-维纳熵指数计算的复杂度指数(van Ewijk et al., 2011; de Almeida et al., 2019), 与垂直层次复杂度和生态位多样性相关。
冠层起伏比 Canopy relief ratio	CRR	表征冠层局部开阔程度与起伏性变化(Pike & Wilson, 1971; Wang et al., 2020)。
空体素占比 Empty volume ratio	Empty_VR	空体素表示样地空间中没有植被点的空间(Lefsky et al., 1999), 空体素占比表示空体素占有所有体素数量的比例, 反映林分空间空隙度。

填充体素占比 Filled volume ratio	Filled_VR	填充体素表示样地空间中有植被点的空间(Lefsky et al., 1999), 填充体素占比表示填充体素占所有体素数量的比例。反映植被填充程度和栖息空间饱和度。
透光区体积 Euphotic volume	Eu_volume	透光区是指在填充体素中激光能量占总能量的65%以上的区域, 透光区体积表示透光区体素总体积(Lefsky et al., 1999)。表征枝叶透光度高, 较为疏松的空间, 通常分布在靠近冠层顶部的空间。
透光区体积比 Euphotic volume ratio	Eu_VR	透光区体素占填充体素的比例。表征疏透程度高的空间比例, 该指标与植被光合效率密切相关。
透光区叶面积 Euphotic leaf area	Eu_LA	透光区中计算的叶面积指数, 揭示冠层上层光合潜力与枝叶分布特征。
透光区深度 Euphotic depth	Eu_Depth	透光区垂直深度, 反映透光层厚度与冠层通透性。
寡光区体积 Oligophotic volume	Oligo_volume	寡光区(Oligophotic)是指在填充体素中除透光区以外的区域(Lefsky et al., 1999), 寡光区体积表示寡光区体素总体积。反映枝叶结构紧密的空间, 可能是林冠中下层或林下遮蔽区域。
寡光区体积比 Oligophotic volume ratio	Oligo_VR	寡光区体素占所有填充体素的比例。衡量遮蔽空间在林分结构中的占比。
寡光区叶面积 Oligophotic leaf area	Oligo_LA	寡光区中计算的叶面积指数。
寡光区深度 Oligophotic depth	Oligo_Depth	寡光区垂直深度。

\*体素是指通过将点云数据划分为三维体素单元, 量化植被在三维空间中的分布特征和填充状态, 本研究使用0.5\*0.5\*0.5 m的体素分辨率进行计算(Soma et al., 2021)。

## 参考文献

- Asner GP, Mascaro J (2014) Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment*, 140, 614–624.
- Bouvier M, Durrieu S, Fournier RA, Renaud JP (2015) Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 156, 322–334.
- de Almeida CT, Galvão LS, de Oliveira Cruz e Aragão LE, Ometto JPHB, Jacon AD, de Souza Pereira FR, Sato LY, Lopes AP, de Alencastro Graça PML, de Jesus Silva CV, Ferreira-Ferreira J, Longo M (2019) Combining LiDAR and hyperspectral data for aboveground biomass modeling in the Brazilian Amazon using different regression algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111323.
- Jenness JS (2004) Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin*, 32, 829–839.
- Kane VR, McGaughey RJ, Bakker JD, Gersonde RF, Lutz JA, Franklin JF (2010) Comparisons between field- and LiDAR-based measures of stand structural complexity. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 761–773.
- Lefsky MA, Cohen WB, Acker SA, Parker GG, Spies TA, Harding D (1999) Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70, 339–361.
- Ma Q, Su YJ, Guo QH (2017) Comparison of canopy cover estimations from airborne LiDAR, aerial imagery, and satellite imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10, 4225–4236.
- Ouyang S, Gou MM, Lei PF, Liu Y, Chen L, Deng XW, Zhao ZH, Zeng YL, Hu YT, Peng CH, Xiang WH (2023) Plant functional trait diversity and structural diversity co-underpin ecosystem multifunctionality in subtropical forests. *Forest Ecosystems*, 10, 100093.
- Pike RJ, Wilson SE (1971) Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 1079–1084.
- Soma M, Pimont F, Dupuy JL (2021) Sensitivity of voxel-based estimations of leaf area density with terrestrial LiDAR to vegetation structure and sampling limitations: A simulation experiment. *Remote Sensing of Environment*, 257, 112354.
- van Ewijk KY, Treitz PM, Scott NA (2011) Characterizing forest succession in central Ontario using lidar-derived indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77, 261–269.
- Wang DZ, Wan B, Liu J, Su YJ, Guo QH, Qiu PH, Wu XC (2020) Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast Hainan Island in China using an upscaling method from field plots, UAV-LiDAR data and sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101986.



附录3 植被结构变量的Spearman相关系数矩阵图。图中植被结构变量缩写对应的生态含义详见附录2。

Appendix 3 Spearman's rank correlation matrix of vegetation structural variables. The ecological meanings corresponding to the abbreviations of vegetation structural variables in the figure are detailed in Appendix 2.

附录4 各植被变量的平均荷载绝对值

Appendix 4 The average absolute factor loading for each vegetation variable

植被变量 Vegetation variable	平均荷载绝对值 Average absolute factor loading	植被变量 Vegetation variable	平均荷载绝对值 Average absolute factor loading
Empty_VR	0.383	H.p10	0.334
Filled_VR	0.383	Eu_LA	0.330
Eu_Depth	0.376	Oligo_LA	0.330
TCH	0.373	LAI	0.327
CVm	0.365	UN_TCH	0.323
RI	0.364	DBHm	0.321
H.p30	0.362	H.p60	0.318
Hskewness	0.358	UN_RI	0.309
HCBm	0.358	Eu_VR	0.306
CWm	0.358	Oligo_Depth	0.302
H.p20	0.356	CRR	0.295
CC	0.353	H-mean	0.290
Hm	0.352	H.p95	0.282
Oligo_volume	0.351	CTHK	0.282
Oligo_VR	0.350	VCI	0.281
Eu_volume	0.344	H.p70	0.280
H.p40	0.341	H-max	0.274
H.p50	0.339	CCm	0.272
TD	0.338	H-cv	0.266
UND	0.334	H.p90	0.256
Empty_VR	0.383	H.p80	0.251

表中植被结构变量缩写对应的生态含义详见附录2。The ecological meanings corresponding to the abbreviations of vegetation structural variables in the table are detailed in Appendix 2.