



望天树根系特征分析与生物量估算

金艳^{1,2}, 何在新³, 邓蝶^{1,2}, 刘玥^{1,2}, 阿彪^{4,5}, 陶庆^{6**}, 谭正洪^{1,2**}

(1. 云南大学 植被结构功能与建造全国重点实验室, 云南昆明 650500; 2. 云南大学 生态与环境学院, 云南昆明 650500; 3. 云南西双版纳国家级自然保护区勐腊管护所, 云南 勐腊 666300; 4. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南省森林生态系统稳定性与全球变化响应重点实验室, 云南 勐仑 666303; 5. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站, 云南 勐腊 666303; 6. 云南西双版纳国家级自然保护区管护局, 云南 景洪 666100)

摘要:望天树(*Parashorea chinensis*)作为我国热带雨林的标志性树种,其根系生长及生物量特征的研究对于理解热带雨林植被的地下生态过程至关重要.本研究以自然倾倒的露生层望天树根系为研究对象,采用激光雷达技术对根系进行三维扫描与重建,从而还原其在原位土壤中的空间分布.同时,结合根系直径和长度的实测数据,对根系的形态结构与空间特征进行了系统分析.基于异速生长方程,构建了仅依赖根系直径的根系生物量估算模型($R^2 = 0.98$).研究结果表明,望天树根系主要分布在土壤浅层,且根系主要沿水平方向延伸以支撑地上生物量的稳定生长.粗根在根系系统中占主导地位(基径 > 5 mm),占总根系的 74%.此外,根系直径随长度呈指数缩减趋势,并且生物量估算显示,根系生物量与直径之间存在显著的异速生长关系($p < 0.01$).本研究为热带植物根系生物量的可视化和量化提供了方法参考.

关键词:望天树; 根系; 生物量; 异速生长; 激光雷达

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-7971(2026)00-0001-09

龙脑香科植物在东南亚热带雨林中占据特殊地位,该科树种作为冠层优势种^[1],以 70 余 m 的惊人高度和巨大的地上生物量成为东南亚热带碳储量的重要载体^[2-4].我国热带雨林与东南亚北部的热带雨林毗邻,其植物区系属于印度-马来雨林群系的一部分,被认为是东南亚热带雨林的延伸^[5].但是,我国的热带雨林位于热带北缘,属于热带向亚热带过渡的区域,该区域存在明显的旱雨季差异,其水分、热量和海拔条件是热带雨林树种所能忍受的极限^[6].因此,仅有少数龙脑香科植物在我国分布,其中最为典型的要属西双版纳热带季节雨林中的望天树(*Parashorea chinensis*).

望天树是我国热带雨林露生层(emergent layer,指雨林中那些高度超过主冠层的树木)的标志性树种,也是国家一级重点保护野生植物.望天树独特的生态适应性使其成为热点研究对象,尽管其生长

在季节性干旱区(旱季长达 6 个月),且面临高大冠层(60 m 以上)带来的水分传输挑战,望天树仍在我国热带地区形成了单优势种群落^[1].这种珍稀性与生态适应性引发学者对其生理机制和生存策略展开广泛研究^[7-9].目前,针对龙脑香科植物(包括望天树)的研究多集中于地上部分,如光合作用、功能性状和适应策略等^[10-13],却少有地下根系的研究^[14],尤其是根系空间分布、生物量大小等关键问题尚不明确.因此,亟需采用有效方法开展根系研究,以揭示龙脑香科植物的完整适应策略.

根系作为植物生长与存活的关键器官,承担着养分吸收、水分运输和机械支撑等重要功能,同时也是热带雨林生物量的核心组成部分^[15-17].在复杂的土壤环境中,根系通过空间竞争获取有限的水分和资源.现有研究多集中于作物、灌木及人工林等易于采样的植物,通过分析根系分布与土壤特性的

收稿日期:2025-06-19; 接受日期:2026-11-20; 网络出版日期:2026-03-28

基金项目:云南省科技计划项目(202301BF070001-015, 202101BC070002); 云南省兴滇英才支持计划.

作者简介:金艳(1997-),女,云南人,博士生,主要研究生态系统生态学. E-mail: jinyan8197@163.com.

** 通信作者:陶庆(1976-),男,云南勐腊人,高级工程师,主要研究生物多样性保护. E-mail: 409256765@qq.com.

谭正洪(1982-),男,湖南人,博士,教授,主要研究微气象与植被碳平衡. E-mail: tan@ynu.edu.cn.

关系,揭示植物的生物量分配模式及其对植物生长的影响^[18-20].根系研究方法可分为直接法和间接法^[21].直接法(如根系挖掘法, root excavation 和坑测法, soil pit)虽精度较高^[22-23],但成本高昂且难以在植被茂密的热带森林中实施.间接法各有局限,异速生长模型虽被广泛应用^[16, 24-25],但其建立仍需依赖破坏性采样收集数据.探地雷达技术^[26-27]虽具有非破坏性优势,却因根系交错难以区分个体,限制了其在复杂热带森林中的应用.由于热带雨林根系极低的可视性与可及性,导致龙脑香科等冠层巨树(高度超 60 m)的深层根系研究仍是当前生态学的重大挑战.

在热带雨林生态系统中,树木死亡后往往保持直立状态缓慢分解^[28-30].本研究基于一棵自然倒伏于陡坡的望天树(树高 60 余 m,胸径 104.4 cm,枝下高 38 m),倾倒是使其根系系统近乎完全裸露,为研究该国家一级保护植物的根系特征提供了独特的机遇.本研究以望天树根系为研究对象,旨在:(1)建立根系三维重建方法,还原望天树在土壤中的自然生长状态;(2)基于实测数据构建仅依靠根系特征的生物量估算模型.据文献检索可知,这是首次针对望天树这类高大乔木的完整根系开展的专项研究,研究成果将为龙脑香科植物地下生态学研究提供重要的方法学参考和基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况 望天树根系源于云南省西双版纳傣族自治州勐腊县补蚌村的热带季节雨林(21°37'4"N, 101°34'56"E).研究区地处东南亚热带北缘,由于受到季节性干旱和热量不足的影响,存在明显的季节变化.全年可分为雾凉季(11—2月)、干热季(3—4月)和雨季(5—10月),雾凉季温度偏低(17.5℃),浓雾笼罩,干热季温度较高(日间最高温度可达 38℃),雾气易散^[31],雨季温度高且较湿润,降水量达全年降水量(1 493 mm)的 87%左右.

研究区为原始热带季节雨林,物种丰富,以望天树(*P. chinensis*)、假海桐(*Pittosporopsis kerrii*)、短刺锥(*Castanopsis echidnocarpa*)、蚁花(*Mezzettiopsis creaghii*)、毛猴欢喜(*Sloanea tomentosa*)等占优势.望天树多生长在谷底平缓、山坡陡峭的低地沟谷^[7],树高可达 60 多 m,独占了主冠层(20~30 m)以上的空间(emergent canopy).研究区的土壤类型为砖红壤,土壤主要由沙土(sand)组成(~50%),其次是

粘土(clay, ~30%)和粉土(silt, ~20%).土壤呈酸性(pH=4.5~5.5)^[1].

1.2 数据收集与分析

1.2.1 根系直立生长状态的模拟 首先,将沿山坡向下倾倒是的根系上多余的树干锯断(树干向下,根系在坡上,图 1),其次,使用高压水枪清理根系上附着的土壤和石块,然后利用手持移动式激光雷达扫描仪(SLAM100)环绕树根 360°进行扫描.将扫描好的数据导入 LiDAR360 中进行剪切、去噪和重采样,得到点云数据.最后,利用 Python 对提取的点云数据进行坐标旋转,还原望天树根系在土壤中自然生长的状态[图 2(a)].

1.2.2 根系直径和长度的量化 由于勐腊核果木(*Drypetes hoaensis*)和望天树的根系交织生长,难以人力分离,手持激光雷达的扫描结果会受到勐腊核果木根系的干扰,导致数据无法准确反映目标树种的根系特征.因此,我们利用卷尺、胸径尺和游标卡尺,基于发育根序法^[33]对较完整、露出土壤的根系长度和直径进行了测量.每根根系的各级分支均从基径(D_0)位置开始,每隔 10 cm 测量 1 次直径 $[D(Z)]$,用于分析根系直径沿根长的缩减速率 ρ .

1.2.3 根长的估算 树木倾倒是产生的巨大力量使得一些根系断在土层中,故通过量化现存根系长度(Z_{actual})和直径变化来推算不同基径的根系对应的理论根长(Z_{max})是必要的.全过程一共量化了 220 根分枝,将每级分支直径沿根长的变化进行线性回归,得到各根系直径的缩减速率 ρ ,然后从中剔除直径数量 $N < 3$ 和显著性 $p > 0.05$ 的数据后,用剩余的满足条件的根系数据计算理论根长(106 根).

(1) 直径随长度的变化:

$$D(Z) = \rho Z + D_0,$$

$$\frac{dD(Z)}{dZ} = \rho,$$

式中: ρ 为线性回归得到的缩减速率, Z 为距离根系基部的长度, D_0 为根系基径(此时的根系长度为 $Z = 0$), $D(Z)$ 为根系长度 Z 处对应的根系直径.

(2) 理论根长的估算:

$$\rho = \rho_k \times D(Z),$$

$$\frac{dD(Z)}{dZ} = \rho_k \times D(Z).$$

积分:



图中紧挨着望天树生长的是勐腊核果木 (*Drypetes hoensis*), 两棵树一同倒下, (c) 图中白色圆圈标记的浅色根系是勐腊核果木的根系, 其余较粗的黑色根系是望天树的根系.

图 1 望天树倾倒后根系的实际情况

Fig. 1 The actual situation of the *Parashorea chinensis* root system after it falls down

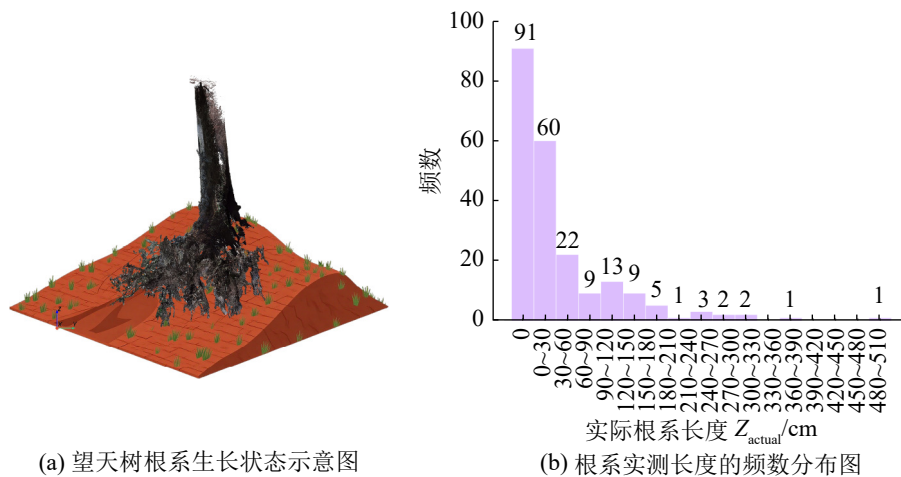


图 2 望天树根系生长状况及根系长度的频数统计图

Fig. 2 Growth status of the root system of *Parashorea chinensis* and the frequency distribution of the root length

$$\ln D(Z) = \rho_k \times Z + C_0,$$

$$D(Z) = e^{\rho_k \times Z} \times D_0,$$

$$Z = \frac{\ln \frac{D(Z)}{D_0}}{\rho_k}.$$

式中, ρ_k 表示 ρ 和 $D(Z)$ 间的相关系数, C_0 为常数, 当 $Z=0$ 时, $e^{C_0} = D_0$, 其余指标的含义和前文表述一

致, 不再赘述. 基于上述渐近线方程, 本研究取 $D(Z) = 0.3 \text{ cm}$ 作为阈值, 此时对应的根系长度 Z 为理论最大值.

1.2.4 异速生长模型构建及生物量估算 在根系基部、中间和尖端分别锯下 5 cm 长的分段, 带回实验室测量直径和鲜重并进行烘干处理, 65 °C 烘 2 周至恒重后, 记录干重. 利用直径和鲜重、干

重数据来构建异速生长模型:

$$y = \beta x^\alpha$$

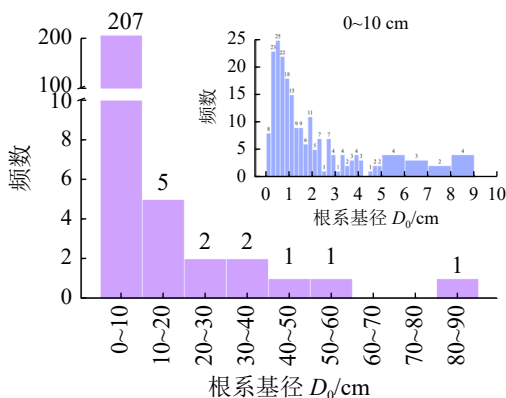
式中: x 、 y 代表不同的植物生长指标, β 为异速生长常数, 即性状关系截距, α 为异速生长指数, 即斜率。

基于计算的根系理论长度 (Z_{\max})、基径 (D_0) 和异速生长关系, 来估算根系生物量。针对每级分支根系, 从基径 D_0 开始, 沿根系每增加 5 cm, 计算出对应的 $D(Z)$, 然后将各分段的直径代入干重异速生长方程, 计算出每 5 cm 分段的干重, 最后累加所有分段, 即得到整根根系的生物量。

2 结果

2.1 望天树根系的生长状况

为了解露生层望天树根系的生长状况, 对不同分支根系的长度和基径进行了统计 (图 2、3)。频数分布结果和直立生长示意图显示, 望天树的根系多沿着坡面生长, 分布于土壤表层, 并未延伸至土层深处, 主要以几根长度较长、基径较粗的根系来增强稳定性, 支撑望天树在陡峭山坡上生长。从整体情况来看, 望天树根系长度和基径的频数分布均呈现偏态分布, 长度多小于 200 cm, 大多数根长集中在 0~60 cm 范围内, 95% 的根系基径在 0~10 cm。参照热带雨林中根系的分类标准^[22], 望天树的小根 (small-root, $D_0 < 5$ mm) 不多, 绝大部分为粗根 (coarse roots, $D_0 > 5$ mm, 占 74%), 但是大径级粗根的数量也有限 ($D_0 > 20$ cm)。



右上的插图是基径为 0~10 cm 内具体基径的频数分布。

图 3 望天树根系基部直径的频数分布图

Fig. 3 Frequency distribution of the root base diameter of the *Parashorea chinensis*

2.2 望天树根系长度的模拟

每根根系的基径和缩减速率 ρ 之间的线性拟合关系 (图 4) 表明, 基径越大、越粗的根系, 随着根长的延长, 直径的缩减速

率越快, 二者之间达到显著相关 ($p < 0.001$), 整体根系直径的缩减速率 ρ_k 为 -0.0101 。将整体缩减速率和实测基径值代入理论根系长度的推算公式, 可以发现基径和根长呈正相关关系, 当基径超过 80 cm 时, 最大预测根系长度可近 600 cm [图 5(a)]。随着根系的生长, 直径呈指数缩减, 越靠近基径的位置缩减速度越快, 当根系变细后, 直径缩减速度大大减小, 以变化不大的直径继续向前生长。例如, 前 100 cm, 直径可以从 86 cm 缩减到 30 cm, 而从 300 cm 到根尖 (≈ 600 cm), 直径仅在 5 cm 的范围内变化。

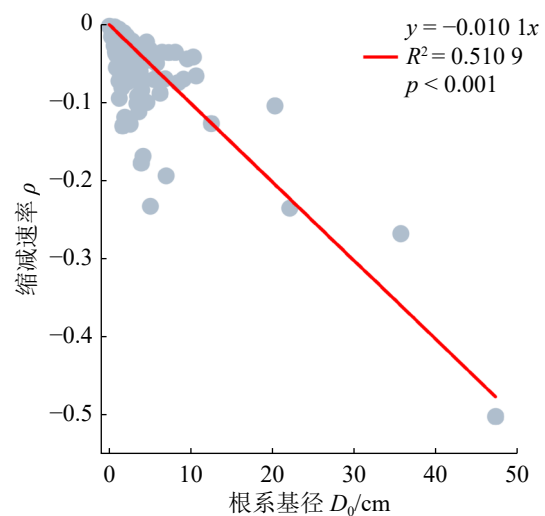


图 4 望天树根系各分支的基径和其对应的缩减速率 ρ 之间的关系

Fig. 4 Relationship between the base diameters of the *Parashorea chinensis* root system and their corresponding reduction rates ρ

每根根系的生长状况存在差异, 根系的缩减速率不一致, 将基于缩减速率和基径计算出的根系长度同实际测量长度对比发现 [图 5(b)], 实际测量的根长仅为预测根长的 0.37, 显著低于预测根长。

2.3 望天树根系生物量估算

分段根系 (5 cm) 的鲜重、干重随直径变化呈显著的异速生长模式 (图 6), 异速生长指数均显著大于 1, 根系生物量的增长速率明显快于根系直径。在直径较小的根尖部分, 生物量随直径变化缓慢, 从根尖到根基部, 随着直径逐渐增大, 生物量的变化变得迅速, 其中以鲜重尤为明显。在根尖位置, 鲜重和干重之间的差异不大, 但随着直径增加, 鲜重以更快的速率增大, 二者之间的差异变大。

基于基径和对应的根长估算结果, 结合生物量异速生长方程, 模拟了根系生物量的变化情况 (图 7), 结果显示, 基径和生物量之间呈正相关关系,

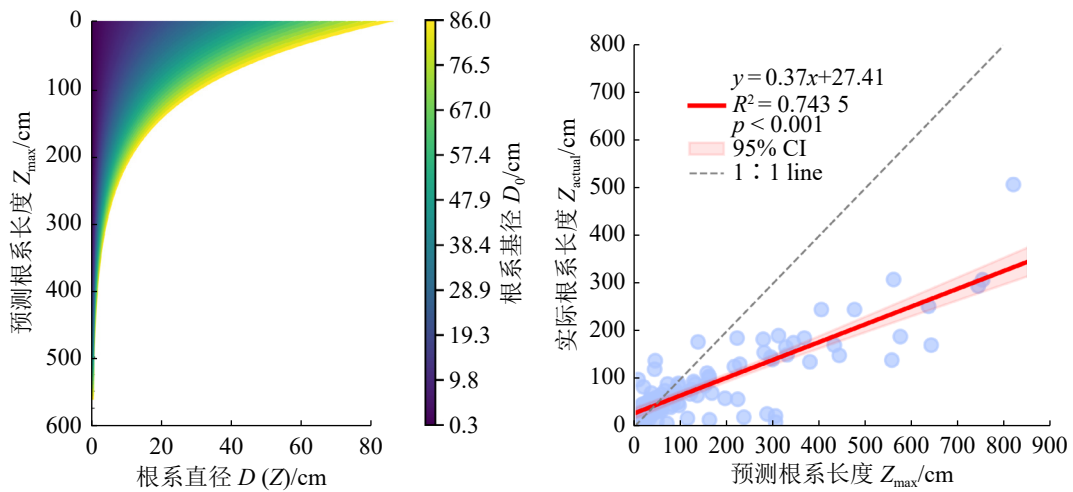


图 5 不同基径根系对应的理论根长模拟

Fig. 5 Simulation of theoretical root lengths corresponding to root systems with different base diameters

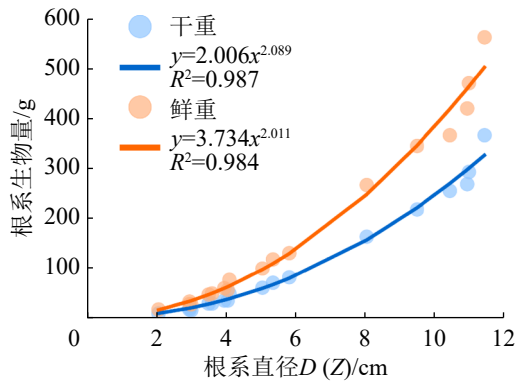


图 6 根系生物量与直径之间的异速生长关系

Fig. 6 Allometric growth relationship between biomass and diameter

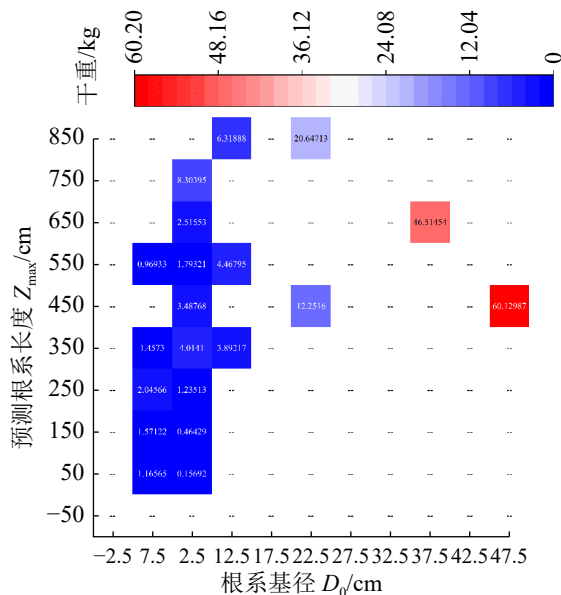


图 7 根系基径和长度对应的生物量估算

Fig. 7 Biomass estimation corresponding to root diameter and length

基径超过 45 cm, 长度超 400 cm 时, 整根根系的干重可高达 60 kg 左右. 但生物量与长度间的关系受根系基径和直径缩减速率的影响, 最长根系的生物量不一定最大.

3 讨论

对于露生层的望天树而言, 人们一直以来都存在一个疑问, 即根系如何分布、需要分配多少生物量用于根系生长才足以支撑 60 多 m 的高大树冠? 在根系研究中, 多采用实测来量化根系特征, 该方法能相对准确的定量根长、直径等信息, 但难以直观地认识完整根系的形态和空间分布特征. 大树倒下后, 直接将根系复位以观察其在土壤中的分布状态十分困难, 因此需要借助一些技术手段来实现. 雷达技术虽然不适用于直接探测热带森林地下根系的生长, 但是对于已经裸露、清理干净的根系, 则为一种可行的方法, 可以为还原根系的生长状态提供更加直观的视角. 故本研究结合激光雷达技术和实测数据, 在还原根系正常生长状态的基础上, 探讨望天树根系的特征.

研究发现, 望天树根系中小根 ($D_0 < 5 \text{ mm}$) 数量偏少, 仅为全部根系的 26%, 其中细根 ($< 2 \text{ mm}$) 数量更少 ($n = 8$), 这可能是在树木倾倒或土壤清除过程中部分丢失所导致. 粗根中大径级根系 ($> 20 \text{ cm}$) 数量虽少, 却是望天树维持整株稳定性的关键. 这些粗根多向周围延伸, 长度超过 2 m, 其余根系再从其上生长, 形成多级分支结构. 本研究对望天树根系的观察结果与最初设想不同. 在研究之前, 普遍认为望天树需要扎根于土壤深层才能支撑 60

多 m 的树冠,然而事实并非如此.从根系自然生长的示意图来看[图 2(a)],望天树的粗根并未深入土壤深层,而是多向水平方向延伸.这一特征与其他龙脑香科植物一致,例如 *Dipterocarpus cornutus* 的地下根系深度不足 2 m,但水平延伸范围可达 10 m 左右^[22].这除了可以增加植物生长的稳定性外,可能还有助于望天树获取养分.在热带季节雨林中,植物会经历长达 6 个月的旱季,这也使绝大多数植物在旱季末期换叶^[32, 34],大量的凋落物覆盖于土壤表面,待雨季来临后,潮湿高热的环境加速凋落物分解,增加了土壤表层的养分含量^[35-36].在热带雨林中物种丰富,通常植物对资源竞争激烈,望天树能成为露生层的单优势种,说明在资源利用方面有一定的优势^[1].将根系集中在浅层土壤,可能也是一种资源获取策略,有利于快速吸收养分,以增加物质能量供植物在环境条件适合的时候快速向上生长.

根系的生长和土壤环境密切相关,当根系遇到阻碍时,会绕过阻碍向前延伸,因此根系直径从基部到尖端的缩减规律存在差异.根据每个根系的规律,去估算不同基径对应的理论根长是合理的,由于根系断裂以及部分根系仍然埋于土壤中,因此基于根系长度算法推算的理论长度显著大于实测值.模拟根系生长状况和估算完整长度为我们了解根系在垂直和水平方向上的空间分布特征提供了可视化依据.

对于生物量的估计,常采用的方法是利用部分生物量成分(胸径 DBH、树高 Height)去构建异速生长模型^[16, 37].目前,关于地上生物量估算的异速生长模型已有很多报道^[24, 38-39],但是由于根系挖掘难度较大,仅有少量研究构建了根系的异速生长,对于热带雨林中庞大的根系,少有研究^[25].本研究采用异速生长模型去估算根系的生物量,但建模策略与以往研究有所不同.在茂密的森林中,树高测量的误差太大,因此大多数异速生长方程选择方便测量的胸径作为唯一变量来估算生物量,即便对于地下生物量也不例外^[25].这通常需要进行大规模的破坏性采样,量化枝干和根系的重量,并结合 DBH 构建准确的生物量模型.在本研究区,望天树作为我国重点保护植物,破坏性采样不可取,无法多次重复测定 DBH 和具体根系生物量的对应关系.因此,本研究仅从根系着手,选取根系不同部位 5 cm 长的分段,构建直径和生物量之间的异速

生长模型,进而推算整根根系的总生物量.结果显示,该方法可以很好地估计根系生物量,直径和生物量之间关系显著,相关系数高达 0.98,为地下生物量的估算提供了另一思路.但在本研究中,由于望天树根系重量超过人力范围,且地处热带季节雨林,起重设备难以进入林内,少数粗根仍埋在土中,因此本文仅量化了裸露根系的生物量.

本研究以一株自然倾倒的露生层望天树根系为研究对象.在树木倾倒和土壤清理的过程中,不可避免的造成了一些根系的丢失(尤其是小根系),可能导致结果存在一定偏差.但是粗根结构保存相对完整,本研究仍可为了解望天树根系的主体构架和空间分布特征提供重要参考,为热带森林龙脑香科植物的根系研究提供基础数据支撑.由于望天树根系十分珍稀,暂时无法获取更多完整的根系来完善数据.本研究仅基于单株根系,未能精确量化根系在垂直方向上的分布,故此研究结果仅为露生层望天树根系研究的初探,旨在为日后根系研究提供方法参考和数据支撑.未来需扩大样本量,以更全面地揭示其根系的生态特征,深入了解望天树的地下生态过程.希望该方法能为今后根系的常规监测提供帮助,通过收集更多树木倾倒后的根系生长与分布数据,逐步积累,进而构建更准确的龙脑香科植物根系生物量模型.

4 结论

本研究借助手持激光雷达技术还原了望天树根系在斜坡上的生长状态,利用根系直径和长度的实测数据推算其理论长度,并基于鲜重与干重的异速生长关系构建生物量模型,实现了根系生物量的量化.研究发现,望天树根系主要分布在浅层土壤,沿水平方向延伸,通过大径级粗根支撑地上生物量的稳定生长.从基部到根尖,根系直径随根长呈指数衰减,且直径越小,缩减速率越慢.生物量和根系直径间存在显著的异速生长关系.本研究为估算地下生物量提供了方法参考,但仅是对望天树根系生长状况的初步探索,未来仍需获取更多数据以优化方法,逐步填补望天树地下根系研究的空白.

致谢:感谢西双版纳自然保护区管理局和勐腊管理所对本研究的支持,感谢云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站补蚌工作站的全体工作人员在根系挖掘和清洗过程中给予的帮助.

参考文献:

- [1] van der Velden N, Slik J W F, Hu Y H, et al. Monodominance of *Parashorea chinensis* on fertile soils in a Chinese tropical rain forest[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2014, 30(4): 311-322. DOI: 10.1017/S0266467414000212.
- [2] Banin L, Feldpausch T R, Phillips O L, et al. What controls tropical forest architecture? Testing environmental, structural and floristic drivers[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(12): 1179-1190. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2012.00778.x.
- [3] Kenzo T, Yoneda R, Sano M, et al. Variations in leaf photosynthetic and morphological traits with tree height in various tree species in a Cambodian tropical dry evergreen forest[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2012, 46(2): 167-180. DOI: 10.6090/jarq.46.167.
- [4] Born J, Pluess A R, Burslem D F R P, et al. Differing life history characteristics support coexistence of tree soil generalist and specialist species in tropical rain forests[J]. *Biotropica*, 2014, 46(1): 58-68. DOI: 10.1111/btp.12083.
- [5] 朱华. 云南热带森林植被分类纲要 [J]. *广西植物*, 2018, 38(8): 984-1004. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw.201804027.
- Zhu H. A sketch for classification of tropical forest vegetation in Yunnan[J]. *Guihaia*, 2018, 38(8): 984-1004.
- [6] 朱华, Ashton P. 中国热带-亚热带常绿阔叶林群落交错区 [J]. *科学通报*, 2021, 66(Z2): 3732-3743.
- Zhu H, Ashton P. Ecotones in the tropical-subtropical vegetation transition at the tropical margin of southern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(Z2): 3732-3743.
- [7] Deng Y, Deng X B, Dong J L, et al. Detecting growth phase shifts based on leaf trait variation of a canopy dipterocarp tree species (*Parashorea chinensis*)[J]. *Forests*, 2020, 11(11): 1145. DOI: 10.3390/f11111145.
- [8] Li W N, Ali I, Han X M, et al. Soil C, N, P, K and enzymes stoichiometry of an endangered tree species, *Parashorea chinensis* of different stand ages unveiled soil nutrient limitation factors[J]. *Forests*, 2023, 14(3): 624. DOI: 10.3390/f14030624.
- [9] Jin N, Yu X C, Dong J L, et al. Vertical variation in leaf functional traits of *Parashorea chinensis* with different canopy layers[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1335524. DOI: 10.3389/fpls.2024.1335524.
- [10] Zhang J L, Meng L Z, Cao K F. Sustained diurnal photosynthetic depression in uppermost-canopy leaves of four dipterocarp species in the rainy and dry seasons: Does photorespiration play a role in photoprotection? [J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(2): 217-228. DOI: 10.1093/treephys/tpn018.
- [11] Hiromi T, Ichie T, Kenzo T, et al. Interspecific variation in leaf water use associated with drought tolerance in four emergent dipterocarp species of a tropical rain forest in Borneo[J]. *Journal of Forest Research*, 2012, 17: 369-377. DOI: 10.1007/s10310-011-0303-4.
- [12] Kenzo T, Iida S, Shimizu T, et al. Seasonal and height-related changes in leaf morphological and photosynthetic traits of two dipterocarp species in a dry deciduous forest in Cambodia[J]. *Plant Ecology & Diversity*, 2016, 9(5/6): 505-520. DOI: 10.1080/17550874.2016.1262472.
- [13] Bartholomew D C, Banin L F, Bittencourt P R L, et al. Differential nutrient limitation and tree height control leaf physiology, supporting niche partitioning in tropical dipterocarp forests[J]. *Functional Ecology*, 2022, 36(8): 2084-2103. DOI: 10.1111/1365-2435.14094.
- [14] Chave J, Andalo C, Brown S, et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests[J]. *Oecologia*, 2005, 145: 87-99. DOI: 10.1007/s00442-005-0100-x.
- [15] Dannowski M, Block A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272: 61-76. DOI: 10.1007/s11104-004-3981-2.
- [16] Kenzo T, Ichie T, Hattori D, et al. Development of allometric relationships for accurate estimation of above- and below-ground biomass in tropical secondary forests in Sarawak, Malaysia[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2009, 25: 371-386. DOI: 10.1017/S0266467409006129.
- [17] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 等. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征 [J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2282-2289. DOI: 10.5846/stxb201511292394.
- Han C, Song M, Du H, et al. Biomass and carbon storage in roots of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations at different stand ages in Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2282-2289.
- [18] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 等. 2种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系 [J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 166-171. DOI: 10.13866/j.azr.2016.01.21.
- Guo J H, Li C J, Zeng F J, et al. Relationship between root biomass distribution and soil moisture, nutrient for two desert plant species[J]. *Arid zone research*, 2016, 33(1): 166-171.
- [19] 贾呈鑫, 李帅锋, 苏建荣, 等. 思茅松人工林根系特征与生物量分配 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 21-28.

- DOI: [10.13292/j.1000-4890.201701.024](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201701.024).
Jia C X Z, Li S F, Su J R, et al. Root characteristics and biomass allocation for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(1): 21-28.
- [20] 张旭, 姚晨, 杜婷, 等. 黄土区 3 种护坡植物三维可视化模拟与根系构型参数分析 [J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1): 218-226. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.032](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.032).
- Zhang X, Yao C, Du T, et al. Three-dimensional visual simulation and root morphological parameter analysis of three slope protection plants in loess region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1): 218-226.
- [21] Addo-Danso S D, Prescott C E, Smith A R. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 359: 332-351. DOI: [10.1016/j.foreco.2015.08.015](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015).
- [22] Niiyama K, Kajimoto T, Matsuura Y, et al. Estimation of root biomass based on excavation of individual root systems in a primary dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2010, 26(3): 271-284. DOI: [10.1017/S0266467410000040](https://doi.org/10.1017/S0266467410000040).
- [23] Major J E, Johnsen K H, Barsi D C, et al. Total below-ground carbon and nitrogen partitioning of mature black spruce displaying genetic \times soil moisture interaction in growth[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 42(11): 1939-1952. DOI: [10.1139/x2012-145](https://doi.org/10.1139/x2012-145).
- [24] Hashimoto T, Kojima K, Tange T, et al. Changes in carbon storage in fallow forests in the tropical lowlands of Borneo[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 126(3): 331-337. DOI: [10.1016/S0378-1127\(99\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00104-8).
- [25] McNicol I M, Berry N J, Bruun T B, et al. Development of allometric models for above and belowground biomass in swidden cultivation fallows of Northern Laos [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 357: 104-116. DOI: [10.1016/j.foreco.2015.07.029](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.029).
- [26] Lorenzo H, Pérez-Gracia V, Novo A, et al. Forestry applications of ground-penetrating radar[J]. *Forest System*, 2010, 19(1): 5-17. DOI: [10.5424/fs/2010191-01163](https://doi.org/10.5424/fs/2010191-01163).
- [27] Cui X H, Chen J, Shen J S, et al. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(5): 711-719. DOI: [10.1007/s11430-010-4103-z](https://doi.org/10.1007/s11430-010-4103-z).
- [28] Ashton P S, Hall P. Comparisons of structure among mixed Dipterocarp forests of north-western Borneo[J]. *Journal of Ecology*, 1992, 80(3): 459-481. DOI: [10.2307/2260691](https://doi.org/10.2307/2260691).
- [29] Gale N. The aftermath of tree death: Coarse woody debris and the topography in four tropical rain forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(9): 1489-1493. DOI: [10.1139/x00-071](https://doi.org/10.1139/x00-071).
- [30] Slik J W F. El Niño droughts and their effects on tree species composition and diversity in tropical rain forests[J]. *Oecologia*, 2004, 141: 114-120. DOI: [10.1007/s00442-004-1635-y](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1635-y).
- [31] Liu W J, Zhang Y P, Li H M, et al. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China: A preliminary study[J]. *Water research*, 2005, 39(5): 787-794. DOI: [10.1016/j.watres.2004.12.002](https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.12.002).
- [32] Jin Y, Liu Y, Liu J H, et al. Energy balance closure problem over a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China: Role of latent heat flux[J]. *Water*, 2022, 14(3): 395. DOI: [10.3390/w14030395](https://doi.org/10.3390/w14030395).
- [33] 王文静, 姚起, 赵春周, 等. 典型红树植物根系组织结构及生理生态功能 [J]. *生态学杂志*, 2025, 44(7): 2399-2407. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202507.026](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202507.026).
- Wang W J, Yao Q, Zhao C Z, et al. Root tissue structure and physiological and ecological functions of typical mangrove plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(7): 2399-2407.
- [34] 谭正洪, 张一平, 宋清海, 等. 落叶作为热带雨林水分亏缺适应对策的研究: 以西双版纳热带雨林为例 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(2): 273-280.
- Tan Z H, Zhang Y P, Song Q H, et al. Leaf shedding as an adaptive strategy for water deficit: A case study in Xishuangbanna's rainforest[J]. *Journal of Yunnan University (Nature Sciences Edition)*, 2014, 36(2): 273-280.
- [35] Xu S, Liu L L, Sayer E J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7423-7433. DOI: [10.5194/bg-10-7423-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-7423-2013).
- [36] 庞宗清, 陈伟彬, 苏芳龙, 等. 凋落物和根系输入对南亚热带季风常绿阔叶林土壤养分的影响 [J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9143-9152. DOI: [10.5846/stxb202106051486](https://doi.org/10.5846/stxb202106051486).
- Pang Z Q, Chen W B, Su F L, et al. Short-term effects of altered litter and root inputs on soil water-extractable ions in a subtropical monsoon evergreen broadleaf forest, Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9143-9152.
- [37] Rutishauser E, Noor'an F, Laumonier Y, et al. Generic

- allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 307: 219-225. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.013.
- [38] Li L E, Yen T M, Lin Y J. A generalized allometric model for predicting aboveground biomass across various bamboo species[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 184: 107 215. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107215.
- [39] Zhai Y L, Wang L, Yao Y L, et al. Spatially continuous estimation of urban forest aboveground biomass with UAV-LiDAR and multispectral scanning: An allometric model of forest structural diversity[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, 360: 110 301. DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.110301.

Architecture analysis and biomass estimation of *Parashorea chinensis* root system

JIN Yan^{1,2}, HE Zaixin³, DENG Die^{1,2}, LIU Yue^{1,2}, A Biao^{4,5}, TAO Qing^{6**}, TAN Zhenghong^{1,2**}

[1. National Key Laboratory of Vegetation Structure Function and Construction, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China;

2. State Key Laboratory for Vegetation Structure, Function and Construction (VegLab), Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China;

3. Administration Station of Mengla, Xishuangbanna National Nature Reserve, Kunming 666300, Yunnan, China;

4. Yunnan Key Laboratory of Forest Ecosystem Stability and Global Change, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, Yunnan, China;

5. National Forest Ecosystem Research Station at Xishuangbanna, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, Yunnan, China;

6. Administration Bureau of Xishuangbanna National Nature Reserve, Jinghong 666100, Yunnan, China]

Abstract: Understanding its root system distribution and biomass estimation are crucial for elucidating the belowground ecological processes of tropical rainforest vegetation. As a keystone species of China's tropical rainforests, *Parashorea chinensis* plays a vital role in the emergent canopy layer. This study investigated the root system of a naturally uprooted *P. chinensis*. By using laser radar, we reconstructed the three-dimensional root architecture and restored its spatial distribution *in situ*. By integrating measured data on root diameter and length, we characterized its morphological structure and spatial arrangement. Based on allometric theory, we developed a root biomass estimation model using root diameter as the sole predictor, which achieved high predictive accuracy ($R^2 = 0.98$) for individual root biomass. Our results indicate that the root system of *P. chinensis* is primarily concentrated in shallow soil layers, providing mechanical stability for aboveground growth. Quantitative assessment shows coarse roots (diameter > 5 mm) dominate the root system (74% of total roots). Root diameter decreased exponentially with length, and allometric analysis revealed a significant relationship between root biomass and diameter ($p < 0.01$). This study provides a solution for visualizing the root system and quantifying the root biomass.

Key words: *Parashorea chinensis*; roots; biomass; allometric model; laser radar