DOI: 10.5846/stxb201911162475

艾萨迪拉・玉苏甫,玉米提・哈力克,阿不都拉・阿不力孜,买尔当・克依木.基于地面 LiDAR 数据的塔里木河下游胡杨林结构参数反演.生态 学报,2020,40(13):4555-4565.

Asadilla YUSUP, Ümüt HALIK, Abdulla ABLIZ, Maierdang KEYIMU. Terrestrial laser scanning for retrieving the structural parameters of *Populus* euphratica riparian forests in the lower reaches of the Tarim River, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13):4555-4565.

基于地面 LiDAR 数据的塔里木河下游胡杨林结构参 数反演

艾萨迪拉·玉苏甫^{1,2},玉米提·哈力克^{1,2,*},阿不都拉·阿不力役³,买尔当·克依木⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046

2 新疆维吾尔自治区绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046

3 新疆大学旅游学院,乌鲁木齐 830046

4 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

摘要:以塔里木河下游天然胡杨林为研究对象,利用 Riegl VZ-1000 型地面激光扫描仪(Terrestrial Laser Scanning, TLS)获取离 河道不同距离的 8 个样方内 513 棵胡杨的三维点云数据,通过建立冠层高度模型、Hough 变换等方法获取单木株数和结构参 数,并与传统的每木检尺实测数据和无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)低空影像进行对比,验证激光雷达方法的测树精 度;对 TLS 获取的胡杨树形参数进行相关性分析,并建立关系模型;探讨不同水胁迫条件(不同离河道距离,不同地下水埋深) 对胡杨单木结构参数的影响;最后按不同径级划分胡杨的年龄,得出各龄级胡杨所占比例。结果表明:(1)TLS 能够高精度获取 不同密度和长势的胡杨单木株数和结构参数,单株准确分割比率为94%一100%,相对于 UAV 低空影像更为准确;(2)TLS 获取 的胡杨树高(Tree height, TH)、胸径(Diameter at breast height, DBH)、冠幅直径(Crown diameter, CD)和冠幅面积(Crown area, CA)与传统实测值拟合度 R²较高,分别为 0.95、0.97、0.77 和 0.84、表明实测数据和 TLS 获取数据无明显差异;(3)胡杨 CD、CA 分别与 TH 呈显著正相关,其相关性系数为 0.73、0.67;基于此构建了胡杨 TH 与 CD 的关系模型,即 TH = 2.6274×CD^{0,706}, R² 为 0.64;(4)根据径级划分胡杨年龄段可知,DBH 为 15—30 cm 的近熟林比例最大,占 8 个样方内监测胡杨总株数的 47%,表明胡 杨种群年龄结构相对稳定并总体态势良好,呈现了生态输水对塔河下游胡杨种群恢复有明显的促进作用。总之,激光雷达技术 能够客观反映胡杨树形结构参数,可替代耗力、耗费、耗时的传统实测方法,为时时掌握胡杨林生长发育、长势动态以及多尺度、 多时相生态耗水研究提供高精度信息,为干旱区荒漠河岸林的有效保护与可持续管理提供科学依据。 **关键词**:雷达;地面激光扫描:胡杨;树木结构参数;塔里木河

Terrestrial laser scanning for retrieving the structural parameters of *Populus* euphratica riparian forests in the lower reaches of the Tarim River, China

Asadilla YUSUP^{1, 2}, Ümüt HALIK^{1, 2, *}, Abdulla ABLIZ³, Maierdang KEYIMU⁴

1 College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang Uighur Autonomous Region, Urumqi 830046, China

3 College of Tourism, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

4State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Terrestrial Laser Scanning (TLS) is one of the Light Detection and Ranging (LiDAR) system which has been widely used for measuring three-dimensional (3D) structure of forests, yet it has not been used for the desert riparian

基金项目:国家自然科学基金项目(U1703102, 31860134, 31800469)

收稿日期:2019-11-16; 修订日期:2020-04-18

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: halik@ xju.edu.cn

forests systematically. In this study, TLS (Riegl VZ-1000, Austria) was applied for measuring the growth parameters of Populus euphratica riparian forests in the lower reaches of the Tarim River, northwestern China. We chose eight forest sample plots, which contained 513 individual trees, with different vertical distances from the river bank and acquired point cloud data. The biometric parameters of every single tree were extracted by establishing crown height model (CHM) and Hough transform methods. At the same time, the parameters measured by TLS were compared with the manual test value and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) image for verifying accuracy. The aim of this study is to explore the advantages and verifying accuracy of the TLS for riparian forest survey. We also analyzed the correlation between the parameters and impact of hydro-environmental factors which include the distance from river bank and ground water depth. Our results showed that: 1) TLS could acquire the majority of individual tree structure parameters at high precision about 94%-100%, higher than the results of UAV. 2) The correlation with manual test value of tree height (TH), diameter at breast height (DBH), crown diameter (CD) and crown area (CA) were 0.95, 0.97, 0.77 and 0.84, respectively. It showed that there was no significant difference between the hand-measured data and the TLS-obtained data. 3) There were significant positive correlation between TH and CD, CA of P. euphratica individual trees in our sample plots. The best correlation model is: TH = $2.6274 \times CD^{0.706}$, $R^2 = 0.64.4$) According to P. euphratica age group divided by DBH grade, the near mature trees (DBH: 15-30 cm) occupied the highest proportion (47%). It indicated that the age structure of P. euphratica population was relatively stable and the overall situation was satisfying, and demonstrated the hysteresis effects of man-made ecological water conveyance since 2001 and the restoration trends of P. euphratica riparian forest ecosystem along the Tarim River. In short, the LiDAR technology can objectively reflect the biometric and structure parameters of P. euphratica forest, which can substitute the traditional tree measurement methods that are labor-intensive, cost-intensive and time-consuming. TLS can provide high-precision information for monitoring the tree growth and vitality dynamics of P. euphratica riparian forests, and provide a useful tool and scientific basis for the effective protection and sustainable management of desert riparian forests in arid areas.

Key Words: Light Detection and Ranging (LiDAR); Terrestrial Laser Scanning (TLS); *Populus euphratica*; tree structure parameters; Tarim River

胡杨(Populus euphratica Oliv.)属于杨柳科(Salicaceae)杨属(Populus)的阔叶落叶乔木,集中生长在沙漠中河流两岸,是我国西北干旱区乃至中亚荒漠区内陆河流域沿河植被的主体,具有耐旱、耐寒、耐盐碱特征,维持干旱区生态系统结构、功能及稳定性的关键种群,归类为国家二级保护濒危树种^[1]。我国胡杨林总面积为39.5×10⁴ hm²,占全球胡杨林面积的61%,主要分布在塔里木河(简称塔河)、黑河流域、柴达木盆地西部、河西走廊等地区域;新疆的胡杨林面积占全国的91%,其中89%分布于塔里木盆地^[1-2]。由于人类对水土资源开发利用的不合理,自20世纪70年代开始,塔河下游断流了近30a,地下水位下降,胡杨林植被大面积衰败,土地沙漠化加剧,区域生态环境严重受损^[3-4]。基于此,我国政府累计投资107亿元用于塔河流域的综合治理,自2000年5月至2019年11月,已对塔河下游实施了20次人工生态输水,累计输水量达81.5×10⁸ m^{3[5-6]}。生态输水后,塔河下游河道两岸地下水位逐步抬升,使为优势种的荒漠河岸植被日趋复苏,区域生态退化得到遏止^[7]。国内外对胡杨林的研究主要集中在干旱胁迫和人工输水对胡杨生理、生态的影响^[8]、胡杨林群落结构、多样性和稳定性^[9-10]、胡杨种群分布格局^[11]、胡杨叶片功能性状^[12-13]及光合作用、蒸腾、耗水量等生理活动的问题上^[14-15]。

植被结构参数是区域地表过程、生态与水文模型中常用的基本参数^[16],也是生态环境演变研究的重要依据。因此,对胡杨林结构参数、长势动态、时空分布格局进行定点监测,为时时掌握塔河流域荒漠河岸林生态系统结构与功能的变化提供基础数据。由于塔河下游自然条件恶劣,传统的野外测树方法耗时费力,需要大量人力和物力。此外,胡杨林林分结构变化缓慢微妙,常受水胁迫的影响,不同水环境条件下植被长势差异大、结构复杂,树形结构参数不易精确监测。因此,找出一种高效、快速地获取胡杨树形和林分结构参数的科

学方法具一定的实践意义。

激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)作为主动遥感的一个分支,其独有的穿透性能够到达森林 冠层之下,比光学遥感更优势的获取森林垂直结构参数^[17],能够获取目标物表面的三维点云数据(Point cloud)。根据平台的不同,LiDAR 分为机载激光雷达(Areal Laser Scanning, ALS)和地面激光雷达(Terrestrial Laser Scanning, TLS)两大类。ALS 能获取大区域监测数据,但树冠层下结构信息难以完整获取,而 TLS 可填 补这一点,能够较完整的获取森林结构参数^[18]。目前 LiDAR 主要应用在森林单木分割、植被类型分类^[19-21], 森林生态参数反演^[22-23],生物量、蓄积量和碳储量估算^[24-25],森林干扰因素监测^[26-27]等领域。

本文利用地面激光扫描(TLS)技术,获取生长态势复杂的荒漠河岸林点云数据,定量反演胡杨单木结构 参数及种群结构信息,提升与完善传统树木测量方法,力求方法上有所创新,满足荒漠河岸林生态系统长期定 位监测的需要。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外工作在新疆若羌县阿拉干村(40°08′50″N, 88°21′28″E)国家级公益林管护站范围内设置的长期监测 样地内进行。此地位于塔里木河下游中段,新疆生产站设兵团农二师 34 团以南 90 km 处,塔克拉玛干沙漠与 库鲁克沙漠之间,属暖温带荒漠极端干旱气候区,年均降水量仅为 20—50 mm,年均蒸发量却高达 2500—3000 mm^[28],植被类型单一,主要是由胡杨为建群种的荒漠河岸植被^[29]。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置

根据胡杨种群分布特征,选择了离河道不同距离的 8 个 50 m×50 m 样方(L1—L8)。地下水位数据由塔 里木河流域管理局布设的 6 个长期监测井(G2—G7)和研究团队自己安装的 6 个气压式 Baro—Diver 地下水 位监测仪(D1—D6)来获取,见图 1。

1.2.2 参数提取方法

利用奧地利瑞格公司生产的 Riegl VZ-1000 型地面激光雷达扫描仪(TLS),其测距范围为 2.5—1400 m, 最大扫描速度为 3.0×10⁵点/s,扫描精度为±5 mm/100 m,视场范围为 360°×100°,角度分辨率 1.8″,GPS 误差 2 m(详见:www.riegl.com/nc/products)。野外 TLS 扫描工作于 2018 年 7 月 18 日至 28 日进行,根据样方 L1— L8 的微地貌条件,植被茂密程度,在每个样方内架设 6—8 个扫描站点,每站的扫描时间约为 10—20 min(粗 扫 10 min/站,精扫 20 min/站),测站间重叠度大于 50%,扫描时平均风速小于 3 级风(<3.3 m/s)。其中样方 L3,从地面 30 m 高的观测塔上进行了精细扫描,获取了较大面积的样方点云数据,因此只布设了 3 个站点,8 个样方共获取 49 个站点的点云数据。为了验证 TLS 获取数据的精度,在每个样方内分别选 8—10 棵胡杨,利 用布鲁莱斯(Blume-Leiss)测高仪、胸径尺、皮尺对筛选样木进行每木检尺实测,记录其树高(Tree height, *TH*)、胸径(Diameter at breast height, DBH)、冠幅直径(Crown diameter, *CD*)、冠幅面积(Canopy area, *CA*)等参 数,样方具体参数和 TLS 扫描站点信息见表 1。

1.2.3 点云数据处理步骤

利用 RiSCAN PRO 2.2 软件对多站扫描数据进行拼接,平均标准误差为 0.8 cm。利用北京数字绿土公司 开发的 Lidar360 3.0 软件对数据进行预处理,具体技术路线与工作步骤如图 2 所示。

利用大疆精灵 PHANTOM 4 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)对各样方进行 50 m 高程的低空航 拍,样方 L1 的影像,通过 ArcMap 10.2 软件对 UAV 影像进行矢量化处理,获取各样方内的胡杨单木株数信 息。对 TLS 获取的多站扫描数据进行拼接和预处理,生成点云高程图,从蓝色到红色表示高度的增加;利用 三角网滤波算法分类出地面点和植被点;利用三角网算法生成数字高程模型/ Digital Elevation Model, DEM 和数字表面模型/ Digital Surface Model, DSM;从 DSM 减去 DEM 得到冠层高度模型/ Canopy Height Model,



图 1 塔里木河下游阿拉干断面样地分布情况

Fig.1 Distribution of sample plots in Arghan transect in the lower reaches of the Tarim River

TLS:地面激光雷达 Terrestrial laser scanning;L:下游样方 Lower reaches sample plots;G:地下水位监测井 Ground water monitoring well;D:气压 式地下水位监测井 Baro-Diver ground water monitoring well

CHM,由该模型生成单木种子点并对样方进行单木分割,获取胡杨株数、TH、CD、CA值。考虑地形起伏对提取DBH的影响,对点云数据进行归一化处理,每个点的高程值Z_i减去对应DEM值;切取Z轴上1.2—1.4 m范围内的点云,利用Hough变换法拟合点云提取DBH值^[18](图3)。胡杨龄级按照王世绩等研究结果进行划分为5个级别,分别为I级幼龄林:DBH≤5 cm;Ⅱ级中龄林:5 cm<DBH≤15 cm;Ⅲ级近熟林:15 cm<DBH≤30 cm;

Ⅳ级成熟林:30 cm<DBH≤50 cm; V级过熟林(或老龄树):DBH>50 cm^[1]。

Table 1 Sample plots information and TLS scan sites distribution												
样地 Plot	离河道距离 Distance from rive/m	单木株数 Number of trees/N	实测株数 Number of measured trees/N	实测树高 Measured <i>TH</i> /m		实测胸径 Measured DBH/cm		实测冠幅 Measured <i>CD</i> /m		扫描站点数 Num. of scan sites		
				最小值 Min	最大值 Max	最小值 Min	最大值 Max	最小值 Min	最大值 Max	粗扫 Rough	精扫 Fine	speed/ (m/s)
L1	20	95	10	5.9	7.9	24.64	28.70	6.10	11.65	5	1	1.4
L2	100	69	10	8.1	10.4	28.70	49.00	5.57	7.86	5	1	2.1
L3	200	36	8	6.2	13.0	27.50	32.10	5.40	8.23	2	1	2.0
L4	400	42	8	7.6	11.8	30.30	51.50	6.26	9.16	5	1	2.5
L5	600	63	10	4.2	8.0	19.80	54.40	4.90	9.10	5	1	1.6
L6	800	50	10	6.1	7.7	20.00	40.90	3.87	6.95	7	1	1.7
L7	1000	123	10	5.4	9.1	22.00	27.30	3.68	6.03	6	1	1.2
L8	1200	34	8	3.6	7.6	63.00	86.00	6.70	10.20	6	1	1.1





图 2 TLS 样地单木结构参数提取流程图

Fig.2 Flow chart of tree parameters extraction by TLS

2 结果与分析

2.1 单木参数提取

2.1.1 单木分割

对 8 个样方内实际统计的 513 棵胡杨进行 TLS 扫描和 UAV 航摄,TLS 点云数据能够准确分割出了 501 棵,占总株数的 97%;UAV 影像分割出的单木株数为 458 棵,占总株数的 89%,表明地面 TLS 的单木识别效率 比低空 UAV 的好(图 4)。各样方内分布的胡杨株数有所差异,经换算得知,样方 L1 的胡杨分布密度为 380 株/hm²(由 95 株/50 m×50 m 而换算),TLS 单木分割比率为 94%;样方 L2—L8 的胡杨分布密度分别为 270、180、158、225、192、324、74 株/hm²,TLS 单木分割率为 95%、100%、100%、98%、98%、97%和 100%;可知,各样 方胡杨分布密度的大小对 TLS 单木分割结果的影响不明显。

2.1.2 单木结构参数提取和验证

从 TLS 单木分割结果中获取了每棵胡杨的树高/TH; 拟合胸径部位的点云数据获取了胸径/DBH;将单棵树的点云投影到平面来提取了树冠直径/CD 和冠幅面积/CA;其中, TLS 对 DBH 的提取比率为90%外, 对 TH、 CD 和 CA 的提取比率均达到97%(表3)。为了检验数据的精度, 对 TLS 获取值与实测数据进行了比较。TLS 获取的 TH、DBH、CD、CA 值和地面实测值之间的拟合度 R²较高, 分别为 0.95、0.97、0.77 和 0.83, 其 Pearson 相 关系数均大于 0.90, 呈现非常显著(图 5)。

地面激光雷达点云数据拼接(扫描点: S1—S6)

点云滤波分类

点云分类 噪点 高植被点 低植被点 地面点

数字高程模型

10 m

无人机航拍图 (50 m高度)



\$5 高度/m ■ 9.2

4.6



S2





图 3 TLS 数据处理步骤

Fig.3 Processing steps of TLS point cloud data

表 3 胡杨单木结构参数提取结果

单木参数 Tree parameters	提取参数株数 Extracted trees number/N	漏检株数 Missed extract trees number/N	提取比率 Extraction ratio/%	平均值 Average value
树高 Tree height(TH)	501	12	97	7.50 m
胸径 Diameter at breast height (DBH)	465	45	90	28.90 cm
树冠直径 Crown diameter(CD)	501	12	97	4.63 m
冠幅面积 Crown area(CA)	501	12	97	18.85 m ²

2.2 单木参数之间的相关性分析

通过胡杨各参数进行相关性分析得知,TH与CD、CA之间的Pearson相关性系数分别为0.73、0.67,相关





Fig.4 Comparison of hand, TLS and UAV segmented P. euphratica tree number



图 5 TLS 估算数据与实测数据的拟合验证 Fig.5 Comparison of TLS estimated and field measured value of tree structure parameters

性显著;但 DBH 与 TH, CD 之间的相关性系数为 0.23 和 0.45, 相关性不显著(表 4)。

表 4 胡杨各参数之间的相关性矩阵									
Table 4 The correlation matrix between the tree parameters									
- 树高 TH 胸径 DBH 冠幅直径 CD 冠幅面积 CA									
树高 TH	1								
胸径 DBH	0.237 **	1							
冠幅直径 CD	0.732 **	0.445 **	1						
冠幅面积 CA	0.668 **	0.460 **	0.971 **	1					

* *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

基于相关性分析结果,进一步对 300 棵胡杨的 TH 和 CD 值进行了方程拟合,散点图有一定的规律性。基

4561

于此,用线性函数、对数函数、二次函数、幂函数和指数函数进行回归模拟。其中,幂函数曲线拟合度 R²最高为 0.639,显著性检验概率 P<0.01,相关性显著(表 5)。因此,TH=2.6274×CD^{0.706}可以近似模拟胡杨树高与冠幅之间的数学关系。利用该模型对其他 200 棵胡杨的 TH 值进行预测,拟合度 R²为 0.61。

Table 5 <i>TH</i> and <i>CD</i> relational model parameters								
模型 Model	方程 Equation	R^2	F	Sig.	$oldsymbol{eta}_0$	$\boldsymbol{\beta}_1$	$oldsymbol{eta}_2$	
线性函数 Linear	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$	0.603	408	0.000	2.412	1.161		
对数函数 Logarithmic	$y = \beta_0 + \beta_1 \ln (x)$	0.600	404	0.000	1.012	4.584		
二次函数 Quadratic	$y = \beta_0 + \beta_1 \chi + \beta_2 \chi^2$	0.619	217	0.000	0.655	1.988	-8.8×10^{-2}	
幂函数 Power	$y = \beta_0(x^{\beta_1 X})$	0.639	477	0.000	2.627	0.706		
指数函数 Exponential	$y = \beta_0 e^{\beta_1 X}$	0.582	374	0.000	3.388	0.170		

表 5 树高与冠幅直径的关系模型参数

2.3 单木参数对地下水位的响应

随离河道距离的增加,地下水位下降,单位面积胡杨林分密度有减少趋势。在离河道 20 m 处,地下水位 为 2.4 m,林分密度为 380 株/hm²,而离河道 1200 m 处,地下水位埋深在 8 m 以下,林分密度为 74 株/hm²,见 图 6。为了探讨不同地下水埋深对胡杨单木结构参数的影响,进行单因素方差分析,单木结构参数为因变量,地下水埋深为控制变量。结果显示,地下水埋深在 2—4 m 范围内,*TH*、DBH、*CD* 平均值没有显著差异,分别 为 7.2 m、24.5 cm、4.1 m;地下水埋深在 4—6 m 区域,*TH*、DBH、*CD* 平均值相对较高,均为 9.6 m、32.6 cm、5.6 m;地下水埋深在 6—8 m 处,*TH* 急剧下降、DBH 变大、CD 略变小,均为 5.9 m、41.4 cm、4.3 m,见图 7。



Fig.6 Tree density change trend with the distance of river





2.4 胡杨种群龄级结构分析

根据王世绩等^[1]的胡杨径级划分标准来分组统计得知,各样方内幼龄(I)和中龄(Ⅱ)胡杨株数所占的比例较小,分别为7.2%和10.9%,主要分布在地下水埋深2—4 m的河岸或古河道附近区域;近熟林(Ⅲ)和成熟林(Ⅳ)所占的比例最大,分别为47.9%和29.5%,在各样方内普遍分布;过熟林(Ⅴ)株数只占4.5%,比例最少,集中分布在离河道1000 m以外的地下水埋深较低的区域,见图8。

3 讨论

本研究利用地面激光扫描(TLS)技术,有效的获取了塔河下游不同长势的胡杨单木结构参数,并结合研究区地下水埋深条件,分析了在不同离河道距离的水胁迫下胡杨的生长与空间分布状况。研究结果不仅体现了TLS技术在荒漠稀疏植被生态研究中的优越性,而且为塔河流域河岸林生态系统研究提供了有效的基础



图 8 胡杨径级随河道距离的变化 Fig.8 DBH level change trend of *P. euphratica* with the distance of river

数据和技术支撑。

从本文结果来看,通过 CHM 单木分割方法,利用 TLS 点云数据能够准确的分割出样地内 90%以上的胡 杨单株,并有效的获取胡杨 TH、DBH、CD、CA 等树形参数。影响 TLS 扫描精度的各种因素中,扫描站点的布 设很重要,如果测站间的扫描重叠度小于 50%,容易形成扫描盲区,而不能获取完整的数据。通过分析单木 分割中检漏的树木位置发现,大部分检漏树主要分布在样方边缘,而且 DBH 值偏小,没能完整扫描,从而产生 单木分割误差。在野外测量时,风速的大小也对扫描精度产生影响,塔河下游风沙天气较为频发,所以 TLS 数据采集时尽量避免风的影响。当风强达到 3 级时,树木枝叶轻微摆动,不能获取有效的数据。因此本研究 中,TLS 野外扫描工作基本上在风速低于 3.3 m/s 的时间段进行的,故数据精度基本上没有受到风的影响。林 分密度对 TLS 单木分割精度的影响较小,由于长期受干旱缺水的影响,塔河下游的胡杨基本上以单株线性随 机分布格局为主,且种群分布比较稀疏^[30]。Hopkinson 等研究表明,TLS 的单木分割功能更适合于单层的、树 冠间很少有重叠的稀疏林^[31]。

TLS 获取的单木参数与实测值之间的拟合度较高,从高分辨率点云数据中能够较准确的获取 TH 值;大部分胡杨树干横切面接近于圆形,因此 Hough 变换拟合点云形成的圆直径值与实测 DBH 值基本吻合,其差异较小。但是,TLS 获取的和实测的 CD 值拟合度相对较低,主要原因是部分胡杨树冠相互交叠,难以准确分开冠幅;除此之外,传统人工实测方法中也容易产生误差。通过胡杨各参数进行统计分析可知,TH 与 CD 之间存在相关性关系^[32],基于此构建的关系模型相对于其他同类算法更好地预测 TH 值。胡杨 DBH 与年龄有明显的正相关性^[33],通过对 DBH 值进行龄级划分得知,近熟林和成熟林所占的比列最大,表明研究区胡杨种群生长与更新良好。

TLS 技术能够精细构建胡杨高密度三维点云结构,但是原始点云数据冗余大,需要进行精简处理^[34]。不同的预处理方法会影响数据处理速度和单木分割效果。除此之外,TLS 较适合样方尺度的森林植被监测,在整个流域大尺度森林监测中还是有一定的局限性。因此在后续的研究中,应考虑 TLS 与机载激光雷达(ALS)融合使用,从而获取大尺度、高精度的荒漠河岸林结构参数。

4 结论

(1)利用地面激光扫描仪(TLS)对塔河下游阿拉干断面离河道不同距离的 8 个胡杨林样方进行监测,获取了胡杨单木株数和树形结构参数。通过实测统计的胡杨株数对比可知,TLS点云数据比 UAV 低空影像更准确的获取单木株数信息。TLS能够高精度的获取胡杨 TH、DBH、CD、CA 等结构参数,通过其与地面实测数

据的对比验证,拟合精度较高,分别达到95%,97%,77%和84%。

(2)单木结构参数之间的相关性分析结果表明,*TH*与*CD*、*CA*之间有显著相关性。在此基础上,构建的 *TH*与*CD*关系模型为*TH*=2.6274×*CD*^{0.706},预测结果拟合度*R*²为 0.61。

(3) 随离河道距离的增加,地下水位的下降,单位面积林分密度逐渐减少。不同地下水埋深条件下胡杨 树形参数之间有差异,地下水埋深在4—6 m 的区域,*TH*、DBH、*CD* 平均值相对较高。

(4)研究区胡杨种群径级划分结果可知, DBH 在 15—30 cm 的近熟林最多, 约占总胡杨数的一半。胡杨 种群发展趋势稳定, 人工输水工程的生态效益逐步呈现。

(5)激光雷达能够客观反映胡杨林树形结构参数,可替代耗力、耗费、耗时的传统手测方法,为时时掌握 胡杨林生长发育、长势动态变化以及多尺度、多时相生态耗水研究提供高精度信息,为干旱区荒漠河岸林的有 效保护与可持续管理提供科学依据。

致谢:新疆国土资源信息中心借用激光雷达仪器设备,中测瑞格测量技术新疆分公司魏万海先生在数据处理 方面给予指导,新疆畜牧科学院工程咨询中心艾力亚・艾尼瓦尔、新疆大学资源与环境科学学院研究生买吾 拉夏・木巴热克、巴比尔江・迪力夏提在野外工作中给予帮助,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 王世绩,陈炳浩,李护群.胡杨林.北京:中国环境科学出版社,1995.
- [2] 赵正帅,郑亚琼,梁继业,韩占江,李志军.塔里木河流域胡杨和灰叶胡杨克隆分株空间分布格局.应用生态学报,2016,27(2): 403-411.
- [3] 新疆维吾尔自治区人民政府,中华人民共和国水利部. 塔里木河流域近期综合治理规划报告. 北京:中国水利水电出版社, 2002.
- [4] 阿依加马力・克然木,玉米提・哈力克,塔依尔江・艾山,买尔当・克依木,祖皮艳木・买买提,艾力亚尔・艾尼瓦尔.流域水文变化 对胡杨荒漠河岸林林窗及形成木特征的影响. 生态学报, 2019, 39(17): 6322-6331.
- [5] 邓铭江,杨鹏年,周海鹰,徐海量.塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略.干旱区研究,2017,34(4):717-726.
- [6] 杨轶. 水生态文明 描绘人水和谐美丽画卷. 中国水利, 2019, (19): 72-73.
- [7] 徐海量, 樊自立, 杨鹏年, 玉米提・哈力克, 艾力西尔・库尔班, 阿不都米吉提・阿不力克, 凌红波, 赵新风, 张鹏. 塔里木河近期治理 评估及对编制流域综合规划的建议. 干旱区研究, 2016, 33(2): 223-229.
- [8] 马晓东,钟小莉,桑钰.干旱胁迫下胡杨实生幼苗氮素吸收分配与利用.生态学报, 2018, 38(20): 7508-7519.
- [9] 徐梦辰,陈永金,刘加珍,王丹,刘亚琦.塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态.生态学报,2016,36(9):2646-2655.
- [10] 韩路, 王海珍, 牛建龙, 王家强, 柳维扬. 荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水位梯度的响应. 生态学报, 2017, 37(20): 6836-6846.
- [11] 周莹莹, 陈亚宁, 朱成刚, 陈亚鹏, 陈晓林. 塔里木河下游胡杨(Populus euphratica) 种群结构. 中国沙漠, 2018, 38(2): 315-323.
- [12] 黄文娟, 李志军, 杨赵平, 梁继业, 白冠章. 胡杨异形叶结构型性状及其与胸径关系. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2347-2352.
- [13] 热孜也木・阿布力孜,玉米提・哈力克,塔依尔江・艾山,祖皮艳木・买买提,热依拉・木民.塔里木河下游胡杨叶片性状特征及其对 水分胁迫的响应.东北林业大学学报,2019,47(5):46-51.
- [14] 高冠龙,冯起,张小由,鱼腾飞.黑河下游影响荒漠河岸胡杨林蒸腾的冠层与大气耦合分析.高原气象,2018,37(1):234-239.
- [15] Keyimu M, Halik Ü, Kurban A. Estimation of water consumption of riparian forest in the lower reaches of Tarim River, northwest China. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(16): 547.
- [16] 苏阳, 祁元, 王建华, 徐菲楠, 张金龙. 基于 LiDAR 数据的额济纳绿洲胡杨(Populus euphratica)河岸林植被覆盖分类与植被结构参数提取. 中国沙漠, 2017, 37(4): 689-697.
- [17] 何兴元,任春颖,陈琳,王宗明,郑海峰.森林生态系统遥感监测技术研究进展.地理科学,2018,38(7):997-1011.
- [18] 郭庆华, 苏艳军, 胡天宇, 刘瑾. 激光雷达森林生态应用——理论、方法及实例. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [19] Liang X L, Kankare V, Hyyppä J, Wang Y S, Kukko A, Haggren H, Yu X W, Kaartinen H, Jaakkola A, Guan F Y, Holopainen M, Vastaranta M. Terrestrial laser scanning in forest inventories. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 63-77.
- [20] Ma Q, Su Y J, Tao S L, Guo Q H. Quantifying individual tree growth and tree competition using bi-temporal airborne laser scanning data: a case study in the Sierra Nevada Mountains, California. International Journal of Digital Earth, 2018, 11(5): 485-503.
- [21] Li W K, Guo Q H, Jakubowski M K, Kelly M. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012, 78(1): 75-84.

- [22] 郭庆华,刘瑾,陶胜利,薛宝林,李乐,徐光彩,李文楷,吴芳芳,李玉美,陈琳海,庞树鑫.激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应 用现状与展望.科学通报,2014,59(6):459-478.
- [23] Huang Y M, Hou S L, Ling H B, Xu H L. Trunk volume prediction of individual *Populus euphratica* trees based on point clouds analysis. Ecological Indicators, 2018, 95: 964-971.
- [24] Véga C, Vepakomma U, Morel J, Bader J L, Rajashekar G, Jha C S, Ferêt J, Proisy C, Pélissier R, Dadhwal V K. Aboveground-biomass estimation of a complex tropical forest in India using LiDAR. Remote Sensing, 2015, 7(8): 10607-10625.
- [25] Li M Q, Im J, Quackenbush L J, Liu T. Forest biomass and carbon stock quantification using airborne LiDAR data: a case study over Huntington Wildlife Forest in the Adirondack Park. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(7): 3143-3156.
- [26] 刘峰, 谭畅, 王红, 龙江平. 基于 LiDAR 的亚热带次生林林窗对幼树更新影响分析. 农业机械学报, 2017, 48(3): 198-204.
- [27] Li Y M, Guo Q H, Su Y J, Tao S L, Zhao K G, Xu G C. Retrieving the gap fraction, element clumping index, and leaf area index of individual trees using single-scan data from a terrestrial laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 130: 308-316.
- [28] Halik Ü, Aishan T, Betz F, Kurban A, Rouzi A. Effectiveness and challenges of ecological engineering for desert riparian forest restoration along China's largest inland river. Ecological Engineering, 2019, 127: 11-22.
- [29] Keyimu M, Halik Ü, Betz F, Dulamsuren C. Vitality variation and population structure of a riparian forest in the lower reaches of the Tarim River, NW China. Journal of Forestry Research, 2018, 29(3): 749-760.
- [30] 王希义,彭淑贞,徐海量,凌红波,岳俊生.基于生物量的塔里木河下游胡杨(Populus euphratica)生态服务价值评估.生态学报,2019, 39(4):1441-1451.
- [31] Hopkinson C, Lovell J, Chasmer L, Jupp D, Kljun N, van Gorsel E. Integrating terrestrial and airborne LiDAR to calibrate a 3D canopy model of effective leaf area index. Remote Sensing of Environment, 2013, 136: 301-314.
- [32] Aishan T, Halik Ü, Betz F, Gärtner P, Cyffka B. Modeling height-diameter relationship for *Populus euphratica* in the Tarim riparian forest ecosystem, Northwest China. Journal of Forestry Research, 2016, 27(4): 889-900.
- [33] 买尔当・克依木,玉米提・哈力克,Betz F,古力比亚・乌买尔,古丽卡玛尔・迪力木拉提. 输水影响下胡杨胸径生长量时空变化.森林 与环境学报,2016,36(2):148-154.
- [34] 李增元,刘清旺,庞勇.激光雷达森林参数反演研究进展.遥感学报,2016,20(5):1138-1150.