北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

干旱半干旱区灌木生物量多尺度建模与碳库特征解析

蒯悦 王春梅 豆小敏 严海飞 李晨曦

Multiscale modeling of shrub biomass and analysis of carbon pool characteristics in arid and semi-arid regions: a case study of the Hubq Desert, Inner Mongolia of northern China

Kuai Yue, Wang Chunmei, Dou Xiaomin, Yan Haifei, Li Chenxi

引用本文:
蒯悦, 王春梅, 豆小敏, 严海飞, 李晨曦. 干旱半干旱区灌木生物量多尺度建模与碳库特征解析[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4):50–60. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250017
Kuai Yue, Wang Chunmei, Dou Xiaomin, Yan Haifei, Li Chenxi. Multiscale modeling of shrub biomass and analysis of carbon pool characteristics in arid and semi–arid regions: a case study of the Hubq Desert, Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4):50–60. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250017

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250017

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

东北林区10种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型研建
Developing stand volume, biomass and carbon stock models for ten major forest types in forest region of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200058

黑龙江西部地区人工小黑杨立木可加性生物量模型
Additive system of biomass equations for planted *Populus simonii* × *P. nigra* in western Heilongjiang Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2018, 40(11): 58–68. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180062

库布齐沙地柠条叶生物量及营养估测模型
Estimation models of leaf biomass and nutrient content for *Caragana korshinskii* in Kubuqi Sandy Land of northern China
北京林业大学学报, 2018, 40(8): 33–41. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180044

杉木人工林灌木层生物量模型构建
Biomass model construction of shrub layer of Chinese fir plantation
北京林业大学学报, 2018, 40(3): 34–41. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170257

北京市公园绿地中灌木生长形态的美景度评价及影响因子研究
Scenic beauty estimation of shrub growth morphology and its influencing factors in park of Beijing
北京林业大学学报, 2019, 41(10): 83–90. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190069

立地条件对宁夏中部干旱风沙区柠条生物量分配格局的影响
Effects of site conditions on biomass allocation patterns of *Caragana korshinskii* in arid aeolian sand regions, middle area of Ningxia of northwestern China
北京林业大学学报, 2020, 42(12): 91–100. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200162

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250017

干旱半干旱区灌木生物量多尺度建模与碳库特征解析
——以库布齐沙漠为例

蒯 悦[1] 王春梅[1] 豆小敏[1] 严海飞[2] 李晨曦[1]
（1. 北京林业大学环境科学与工程学院，北京 100083；2. 国能国华(广西)新能源有限公司，广西 南宁 530000）

摘要:【目的】灌丛生态系统具有独特的生物学特性，为完善干旱区碳计量体系并提升区域碳汇管理效能，本研究系统评估库布齐沙漠 3 种典型灌木的碳储量特征，为荒漠生态系统碳平衡核算提供支撑。**【方法】**针对库布齐沙漠地区沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭 3 种典型灌木，采用样方调查和无人机遥感影像两种方法计量区域碳储量。通过样方调查构建灌木生物量（M）与冠幅面积（C）及体积（V）的最佳预测模型；利用无人机获取灌丛覆盖度，建立生物量与覆盖度的关系模型。将模型估算的灌丛碳储量与实测的土壤、凋落物碳储量相结合，得到区域生态系统碳储量。**【结果】**(1)沙柳（$M_S = 0.563C^{2.563}$，$R^2 = 0.710$，$P < 0.001$）和柠条锦鸡儿（$M_C = 1.776C^{1.315}$，$R^2 = 0.873$，$P < 0.001$）生物量主要受冠幅面积调控，而梭梭（$M_H = 1.694V^{0.952}$，$R^2 = 0.585$，$P < 0.001$）生物量与灌木体积显著相关。(2)构建了以灌丛覆盖度为自变量的沙柳（$R^2 = 0.896$，$P < 0.001$）、柠条锦鸡儿（$R^2 = 0.861$，$P < 0.05$）和梭梭（$R^2 = 0.937$，$P < 0.001$）生物量回归模型。(3)研究区域生态系统碳储量为 50.12 ~ 59.33 t/hm^2，其中土壤、生物质（灌丛与凋落物）的碳储量分别为 46.68 ~ 53.87 t/hm^2、3.38 ~ 6.53 t/hm^2，土壤、生物质（灌丛与凋落物）对生态系统碳储量的平均贡献率分别为 90.52%、9.48%。**【结论】**本研究构建了 3 种典型灌木生物量方程，填补了最新发布的造林碳汇方法学中荒漠灌木的计量空白，并计算出库布齐沙漠腹地灌丛的碳储量。研究成果为优化区域灌丛生态系统管理提供科学依据，进而提升灌丛在区域碳固持中的作用。

关键词：库布齐沙漠；灌木；生物量模型；碳储量
中图分类号：S793 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)04−0050−11
引文格式：蒯悦，王春梅，豆小敏，等. 干旱半干旱区灌木生物量多尺度建模与碳库特征解析——以库布齐沙漠为例［J］. 北京林业大学学报，2025，47(4)：50−60. Kuai Yue, Wang Chunmei, Dou Xiaomin, et al. Multiscale modeling of shrub biomass and analysis of carbon pool characteristics in arid and semi-arid regions: a case study of the Hubq Desert, Inner Mongolia of northern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 50−60.

Multiscale modeling of shrub biomass and analysis of carbon pool characteristics in arid and semi-arid regions: a case study of the Hubq Desert, Inner Mongolia of northern China

Kuai Yue[1] Wang Chunmei[1] Dou Xiaomin[1] Yan Haifei[2] Li Chenxi[1]
(1. School of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. National Energy Guohua (Guangxi) New Energy Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: [**Objective**] Shrub ecosystems possess unique biological characteristics. To improve the carbon accounting system in arid regions and enhance regional carbon sink management efficiency, this study systematically evaluated the carbon storage characteristics of three typical shrubs in the Hubq Desert, Inner Mongolia of northern China, providing methodological support for carbon balance accounting in desert

收稿日期: 2025−01−15 **修回日期:** 2025−03−13
基金项目: 北京市自然科学基金项目(8232039)，国家自然科学基金项目(41971024)和北京林业大学大学生创新项目(S202410022220)。
第一作者: 蒯悦。主要研究方向：生态系统碳固持。Email: KuaiYue0401@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学环境科学与工程学院。
责任作者: 王春梅，博士，教授。主要研究方向：全球气候变化及生物地球化学循环。Email: wangcm@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

ecosystems. [**Method**] For the three typical shrubs of *Salix psammophila*, *Caragana korshinskii* and *Haloxylon ammodendron* in the Hubq Desert, we used quadrat surveys and drone remote sensing imagery to quantify regional carbon storage; constructing the optimal prediction model for shrub biomass (*M*), crown area (*C*), and volume (*V*) through sample plot investigation; using drones to obtain shrub coverage and establish a relationship model between biomass and coverage. The regional ecosystem carbon storage is the sum of model-estimated shrub carbon storage and the measured soil and litter carbon storage. [**Result**] (1) The biomass of *S. psammophila* ($M_S = 0.563C^{2.563}$, $R^2 = 0.710$, $P < 0.001$) and *C. kroshinskii* was most strongly correlated with crown area ($M_C = 1.776C^{1.315}$, $R^2 = 0.873$, $P < 0.001$), while the biomass of *H. ammodendron* was most closely related to shrub volume ($M_H = 1.694V^{0.952}$, $R^2 = 0.585$, $P < 0.001$). (2) Regression models for biomass based on shrub cover were established for *S. psammophila* ($R^2 = 0.896$, $P < 0.001$), *C. korshinskii* ($R^2 = 0.861$, $P < 0.05$), and *H. ammodendron* ($R^2 = 0.937$, $P < 0.001$). (3) Carbon storage of ecosystem in the study area ranged in 50.12−59.33 t/ha, with soil, biomass (shrubs and litter) accounting for 46.68−53.87 t/ha and 3.38−6.53 t/ha, respectively. The average contribution rates of soil, biomass (shrubs and litter) to the carbon storage of the ecosystem were 90.52% and 9.48%, respectively. [**Conclusion**] The biomass equations for three typical shrubs constructed in this study fill the gap of shrub species in the Chinese Certified Emission Reduction-14-001-V01 and calculate the carbon storage of shrublands in the study area. This lays the foundation for more scientifically assessing and managing the shrub ecosystems in the Hubq Desert region, thereby enhancing their role in regional carbon sequestration.

Key words: Hubq Desert; shrub; biomass model; carbon storage

当前全球温室效应加剧，各国积极寻求增汇减排措施。2020 年我国正式提出“双碳”战略，力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。陆地生态系统是全球碳库的主要组成部分，其中森林在碳循环中扮演着至关重要的角色，它既是大气重要的碳汇，也是潜在的碳源[1]。提升森林生态系统碳固持是应对大气 CO_2 浓度增加趋势的重要方法之一[2]。

目前，我国森林生物量和碳储量计量方面的研究主要集中于乔木林，且乔木生物量和碳储量计量研究已形成了较为成熟的相关标准[3]。然而，灌丛也是森林生态系统的重要组成部分，在我国分布面积高达 69.2 万 km^2，占全国国土面积的 7.3%，但其碳储量计量研究仍面临诸多困难。灌木具有生命力强、萌生力强、生产力高、适生范围宽等特点，具有保持水土、涵养水源和防风固沙等生态功能[4]。灌木在生物学特性上与乔木林存在差异，其在立体结构上呈现丛生、低矮的形态，缺少乔木一样明显的主杆，这使得传统的二元立木求积式方法难以适用于灌木生物量的估测[5]。并且，灌木具有较大的空间分布变异性、形态大小变异性和不同平茬期特性[6]，缺少草本植被的连续性和均匀性特点，所以灌木的生物量测定相对困难。

灌木生物量的传统测定方法主要有样方法、标准木法和相对生长法等。然而，每株灌木的生长状况和形态各异，精确测量生物量需要逐枝进行基径和高度的测量工作。据统计柠条锦鸡儿（*Caragana kroshinskii*）单株分枝数量可达 523 枝[7]。这种传统测量方式不仅野外工作量大、耗时耗力，而且容易受到环境因素和人为误差的影响，从而降低测量精度。

近些年，随着遥感技术的发展，人们可以更加快速且无破坏性地测定生态系统的碳储量。其中，传统的卫星影像法通常适用于大尺度区域植被影像研究，激光雷达遥感技术可获得准确的土地覆盖分类信息。随着多尺度分析技术不断优化，评估可通过两种或多种方法的组合获得更准确的结果，例如利用多源遥感数据、地面调查数据、连续清查数据相结合的方法[8]，估算植被的地上碳储量，并且基于植被覆盖指数和灌木地上生物量建立高精度的模型[9]。对于中小尺度区域，无人机遥感可以获得更高精度的生物量估算数据，且无人机遥感成本低廉、数据易获取、机动性高、灵活性好，为传统卫星平台提供有效的信息补充。

2023 年颁布的造林碳汇方法学（CCER-14-001-V01）中，更新了灌木减排量核算模型与参数[10]，但灌木种类不够全面，涵盖区域主要为云南、四川和西藏等，未涉及内蒙古自治区。内蒙古自治区与其他地区环境差异较大，其中部的库布齐沙漠区域由于气候干旱、土壤沙化等原因，成为典型的干旱半干旱生态系统。灌木是该区域重要的植被类型，根据《内蒙古自治区第三次国土调查主要数据公报》，全区灌木林覆盖面积达到 765.6 万 hm^2[11]，并随着气候变化逐年扩展[12]。先前研究证实[13]，沙柳（*Salix psammophila*）、

柠条锦鸡儿和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是该地区主要的灌木种，沙柳对干旱气候的适应性和抵抗力较其他物种更为突出；在半干旱生态系统中，柠条锦鸡儿具有更强的抵御极端干旱逆境的能力[14]，并且有较高的碳储量[15]；而梭梭有较强渗透压调节能力，可以更好地适应干旱环境[16]。所以，针对该地区自然环境和植物种类，建立技术简单、易于推广且精度较高的碳储量计量方法，准确估算库布齐沙漠典型灌木生物量与碳储量，对评估干旱半干旱区域碳库及促进林业碳汇的发展至关重要[17]。

本研究以库布齐沙漠腹地的典型灌木沙柳、柠条锦鸡儿与梭梭为研究对象，采用两种计量方法：一是通过样方调查法，构建灌木生物量与形态学指标之间的最佳计量模型，从而估算区域灌丛碳储量；二是利用无人机遥感技术获取灌丛覆盖度信息，并据此构建覆盖度与生物量的关系模型，进一步得出3种典型灌木在研究区的碳储量，为该区域灌丛碳储量的科学计量提供有力的技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于内蒙古自治区中西部鄂尔多斯市的杭锦旗北部(39°15′～40°45′ N，107°00′～109°30′E)，地处库布齐沙漠腹地，属于干旱、半干旱气候，少雨并且四季温差大(图1)。全年平均气温介于5.5～8.0 ℃，年降水量平均为295.2 mm，潜在蒸发量为2 500.0 mm。土壤以棕钙土、栗钙土和灰漠土为主。该区域植被覆盖度较低，且空间分布差异显著。自2011年起，该地区逐步推行人工灌丛种植计划，主要种植沙柳、柠条锦鸡儿以及梭梭等。人工扦插种植时，沙柳和梭梭行距、株距分别为8 m、1 m，植株密度为2 490 株/hm^2，柠条锦鸡儿行距、株距均为2 m，植株密度为4 500 株/hm^2，平均成活率为85%。除了沙柳、柠条锦鸡儿及梭梭外，该区域还自然散布着耐旱或耐盐碱的草本植物，如沙针茅(*Stipa glareosa*)、短花芨芨草(*Stipa breviflora*)、中亚细柄黍(*Ptilagrostis pelliotii*)以及盐穗木(*Halogeton glomeratus*)等。

1.2 样方设置和样品采集

1.2.1 样方数量及样方布设

根据3种典型灌木在库布齐沙漠的分布特点，选择杭锦旗北部的伊和乌素苏木和吉日嘎朗图镇作为沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭3种典型人工灌丛的调查地点，在这两个地点分别对这3种灌木进行了采样(图1)。

监测样地数量参考碳汇造林方法学(CCER-14-001-V01)附录E中样地数量计算公式[10]。研究区域草本植被稀少，碳储量计量忽略草本碳层，选取灌木、凋落物和土壤有机碳3个碳层。

$$n=\left(\frac{t_{\mathrm{VAL}}}{E}\right)^2\times\left(\sum_i w_i S_i\right)^2 \tag{1}$$

式中：n为所需样方数；t_{VAL}为可靠性指标(本研究查表取值1.645，无量纲)；E为单位面积生物质碳储量估计值允许的绝对误差限值，t/hm^2(以C计，下同)，采用碳层单位面积生物质碳储量估计值的10%；

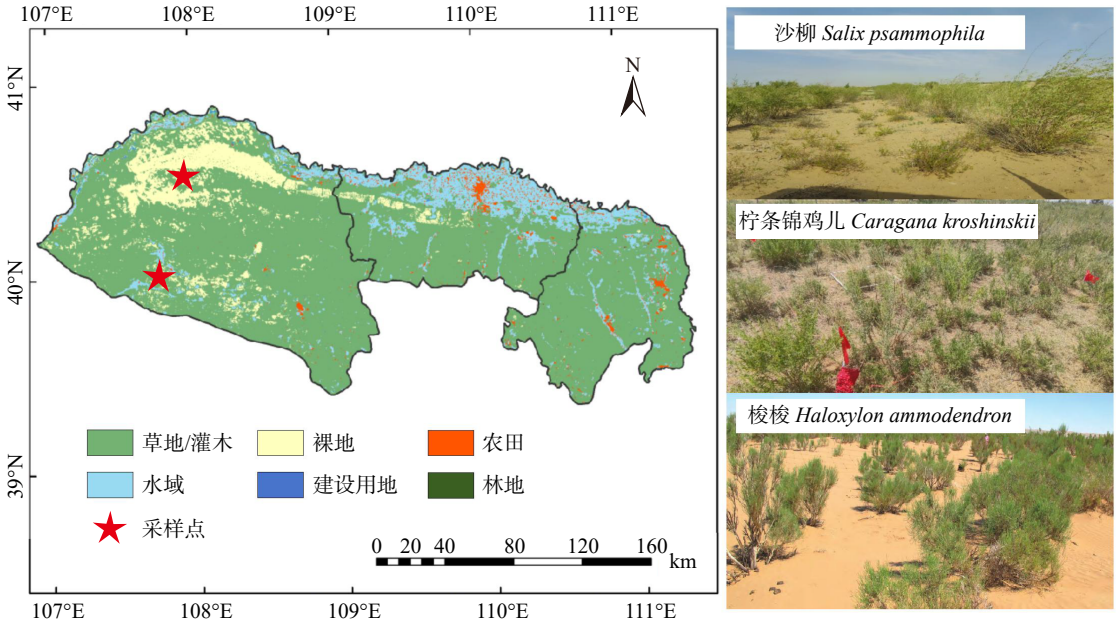


图1 研究区域地理位置

Fig. 1 Geographical location of the research area

S_i为研究区域边界第i项目碳层单位面积碳储量估计值的标准差，t/hm^2(以 C 计，下同)，采用碳层单位面积生物质碳储量估计值的 10%；w_i为研究区域边界第i项目碳层的面积权重，取值为 1。i为研究碳层，i = 1(灌木层)，2(土壤层)，3(凋落物层)。

从《省级温室气体清单编制指南》中获取全国灌丛全林平均生物量为 17.99 t/hm^2，IPCC 国家清单指南的默认灌木含碳率为 50.00%[18]，二者相乘计算得到式(1)中灌木碳层单位面积生物质碳储量估计值为 9.00 t/hm^2，E 与 S_1 的取值均为 0.90 t/hm^2；基于前期实地调研和实验室对研究区土壤与凋落物进行初步分析，土壤碳储量估计值为 25.00 t/hm^2，S_2 取值为 2.50；凋落物碳储量估计值为 0.20 t/hm^2，S_3 取值为 0.02；带入计算得到 3 种灌木样方数之和为 40 个，为保证 ± 10% 的精度，另外选取 4 个采样样方用于灌木生物量模型的精度验证，合计采样样方数为 44 个。

在有代表性的地段设置面积为 30 m × 30 m 的沙柳和梭梭灌木样方，面积为 20 m × 20 m 的柠条锦鸡儿样方。每个调查区域设置 2 个重复样方，并确保样方之间的最小边缘距离达到 5 m，最大不超过 50 m。同时用全球定位系统记录每个样方的经纬度和海拔。使用卷尺对灌木的形态学指标进行测定(图 2a)，具体包括植株的高度(H)、南北冠幅(a)和东西冠幅(b)。

1.2.2　灌木及凋落物样品采集与室内分析

根据样方内灌木平均株高和冠幅，确定标准木，每个样方选取 1 ~ 3 株标准木。采用全挖法获取标准株生物量(图 2b)。具体做法是收集灌木所有地上部分，并挖取地下全部根系，按照地上和地下部分营养器官将其分离，分别称量鲜质量，剪枝分段后放入密封袋带回实验室。

凋落物包括灌木的枯枝、枯叶等器官。在每个标准地中布设 4 个 5 m × 5 m 的小样方，小样方位于灌木样方中心点至样方四角的中心处。将样方内的凋落物全部收集，记录质量后装袋密封带回实验室。

样品带回实验室后清洗干净，在 120 ℃ 下杀青 30 min，采用烘干机(101-1AB 型)进行 65 ℃ 烘干至恒质量，使用粉碎机(JJ-668)粉碎，称量后使用元素分析仪(Elementar vario MACRO cube，德国)测定碳含量。

1.2.3　土壤采集与室内分析

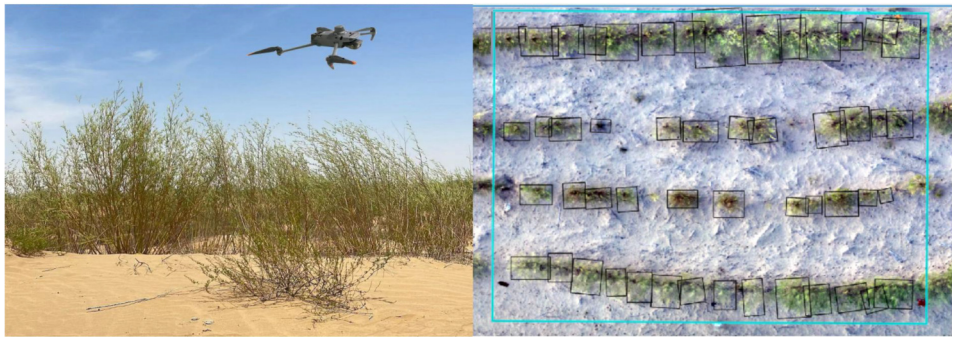
采用系统布点法在标准样方中布点，挖 100 cm 深剖面，分别采集 0 ~ 30 cm、30 ~ 60 cm、60 ~ 100 cm 的土壤样品(图 2c)，采用环刀法测定土壤容重。土壤样品用自封袋带回实验室，风干粉碎过 100 目筛，用元素分析仪测定土壤碳含量。

1.2.4　基于无人机采集研究区域遥感影像

在无云、无风的晴朗天气，选用 DJI Phantom 4 Pro 型号的无人机执行拍摄任务(图 2d)。无人机在 20 m，以 3 m/s 的速度匀速飞行，每隔 1 s 拍摄一张照片，确保影像间 70% 的重叠率。各指定区域的拍摄覆盖面均为 50 m × 200 m，所捕获的影像属于可



a 灌木形态学指标测量　　b 全挖法采集标准株　　c 土壤样品采集



d 无人机遥感影像采集　　e 调查样方遥感影像

图 2　样方调查和无人机遥感数据获取

Fig. 2　Sample plot survey and drone remote sensing data acquisition

见光范畴，且具备 0.01 m 的高空间分辨率。

1.3 数据分析

1.3.1 灌木生物量与形态学指标回归模型的建立

在本研究中，从灌木植株中直接测量得到的形态学指标包括南北冠幅（a）、东西冠幅（b）和株高（H），通过计算或推导出来的指标包括冠幅面积（C）和灌木体积（V）[19]。

$$C = \frac{\pi}{4}ab \tag{2}$$

$$V = \frac{\pi}{4}abH \tag{3}$$

为了检验实测生物量与灌木形态学指标间相关性的统计显著性，采用 R4.3.2 软件进行 Mantel 检验，获取相关系数及其对应的显著性水平（P 值）。

基于数据的实际情况，通过模型的拟合优度和残差分析，发现线性函数、二次函数、对数函数、幂函数以及指数函数在拟合效果上相对更优，能够更好地反映灌木生物量与形态学指标之间的关系，可以提高模型的适用性和预测精度。通过对比拟合系数，确定拟合效果最优（即拟合系数最高）的函数作为最佳估算模型。

1.3.2 生态系统碳储量计量

灌木层和凋落物层碳储量计算公式[20]如下。

$$D_{SLC} = BC_{SL} \tag{4}$$

式中：D_{SLC} 为灌木和凋落物碳储量（t/hm^2）；B 为灌木生物量或凋落物现存量（t/hm^2）；C_{SL} 为灌木或凋落物的含碳率（%）。

土壤碳储量计算公式[21]如下。

$$D_{SOC} = C_S DE \tag{5}$$

式中：D_{SOC} 为土壤碳储量（kg/m^2）；C_S 为土壤含碳率（g/kg）；D 为土壤容重（g/m^3）；E 为土层厚度（m）。

生态系统碳储量为灌木、凋落物和土壤碳储量的总和。

1.3.3 基于无人机遥感影像估算区域碳储量

为提升遥感影像的估算精度，引入机器学习算法，进行多源数据融合分析[22]。通过 eCognition 软件平台，对影像实施面向对象的分类处理，设置具体分割参数（scale：500，shape：0.4，compactness：0.6），随后采用最邻近算法执行影像分类，提取灌丛覆盖度。基于标准样方的生物量数据与灌丛覆盖度，构建相关性模型。将该模型应用于软件处理所得的整个研究区域灌丛覆盖度数据，计算得到灌木生物量，结合区域内灌木组分的含碳率，计算得到研究区灌丛的碳储量。

2 结果与分析

2.1 基于形态学指标建立灌木生物量回归模型

2.1.1 灌木形态特征的测量数据

沙柳的株高平均值达到 2.11 m，冠幅面积平均值为 3.37 m^2，体积平均值为 7.11 m^3。柠条锦鸡儿的平均株高 1.27 m，冠幅面积均值约为沙柳的 1/2（1.83 m^2），体积均值约为沙柳的 1/3（2.32 m^2）。梭梭的株高平均值为 1.88 m，冠幅面积均值相对最高（3.49 m^2），体积平均值为 6.56 m^3（表 1）。不同灌木种类在灌丛大小上存在差异，其中沙柳的体积偏大，梭梭体积中等，柠条锦鸡儿的体积相对最小。

2.1.2 灌木生物量与形态学指标的相关性分析

灌木生物量与形态学指标相关性 Mantel 检验结果中，沙柳与柠条锦鸡儿这两种灌木的生物量与冠幅面积呈显著相关（$P < 0.001$）。而梭梭的生物量与

表 1 灌木生长基本特征

Tab. 1 Basic characteristics of shrub growth

灌丛类型	项目	样方数量	每公顷灌木株数	灌木形态学指标				
				株高/m	南北冠幅/m	东西冠幅/m	冠幅面积/m^2	体积/m^3
沙柳 *Salix psammophila*	最大值	15	1 622	3.26	5.10	4.80	15.21	47.16
	最小值		677	0.84	0.50	0.50	0.28	0.28
	平均值		1 011	2.11	2.06	2.09	3.37	7.11
	标准差		92	0.53	0.73	0.81	1.13	1.07
柠条锦鸡儿 *Caragana kroshinskii*	最大值	10	2 488	2.10	2.60	2.60	5.31	9.66
	最小值		1 111	0.33	0.30	0.20	0.81	0.23
	平均值		2 075	1.27	1.56	1.50	1.83	2.32
	标准差		124	0.36	0.43	0.43	0.26	0.39
梭梭 *Haloxylon ammodendron*	最大值	15	1 611	4.63	3.30	3.50	9.63	35.58
	最小值		822	1.00	0.40	0.40	0.16	0.16
	平均值		1 505	1.88	2.28	2.39	3.49	6.56
	标准差		148	0.37	0.44	0.43	0.83	0.53

灌木体积之间呈显著相关($P < 0.001$)。柠条锦鸡儿的冠幅与生物量的相关系数高达 0.815，沙柳的冠幅与生物量的相关系数达到 0.794，表明冠幅面积是这两个灌木种生物量估算的关键因子。此外，梭梭的体积与生物量的相关系数为 0.758，这表明体积是梭梭生物量估算的关键因子。此外，从灌木形态学指标之间的皮尔逊系数大小可以看出，相较于株高，3 种灌木的体积均与冠幅面积有着更强的线性关系(图 3)。

2.1.3　灌木生物量与形态学指标建立的回归模型

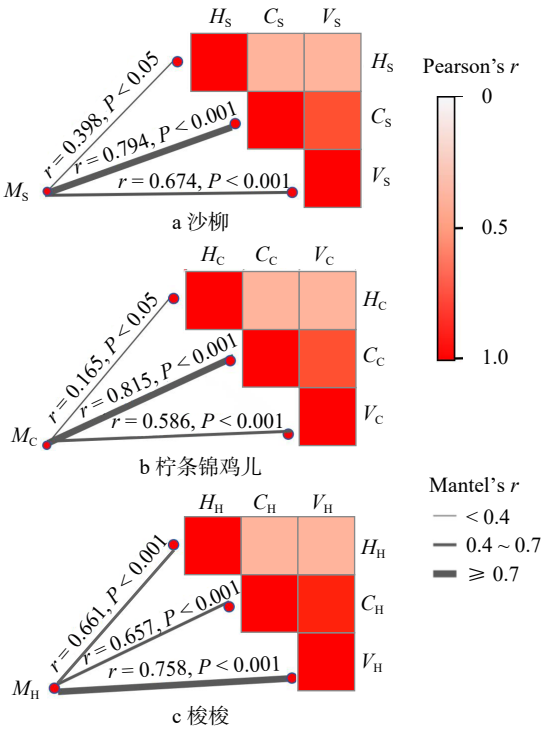
基于相关性分析，选择冠幅作为沙柳和柠条锦鸡儿的自变量因子，选择体积作为梭梭的自变量因子，分别建立 3 个灌木种的生物量回归方程(表 2)。沙柳的生物量 M 和冠幅面积 C 的关系以幂函数模型拟合最佳($M_S = 0.563C_S^{2.563}$, $P < 0.001$，图 4a)，柠条锦鸡儿以冠幅面积 C 为自变量的幂函数模型拟合效果最佳($M_C = 1.776C_C^{1.315}$, $P < 0.001$，图 4b)，而梭梭则以体积 V 为自变量的幂函数模型表现最优($M_H = 1.694V_H^{0.952}$, $P < 0.001$，图 4c)。

为了评估所建立灌木生物量模型的精度，用未参与建模的剩余灌木数据进行精度检验。对 3 种灌木的生物量数据进行回归拟合分析，其拟合函数的斜率分布于 0.89 ~ 1.02 区间，表明实测值与估算值之间存在显著的正相关关系($R^2 > 0.92$)。经统计学验证，所建立的灌木生物量方程均达到显著性水平($P < 0.001$)。证实了所建立的回归模型在灌木生物量估算中具有可靠的预测精度和应用有效性。

2.2　基于生物量和形态学指标模型计量区域灌丛碳储量

2.2.1　灌木及土壤含碳率

沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭样地凋落物的干质量均值分别为 0.40、0.21 和 0.44 t/hm^2(以 C 计，下同)，梭梭样地的凋落物量相对最高。沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭灌木凋落物的含碳率分别为 32.10%、30.05% 和 31.21%，凋落物碳储量均值分别为 0.13、0.06 和 0.14 t/hm^2(图 5a)。在同种灌木的凋落物碳储量分析



M_S、H_S、C_S 和 V_S 分别为沙柳的生物量、株高、冠幅面积和体积；M_C、H_C、C_C 和 V_C 分别为柠条锦鸡儿的生物量、株高、冠幅面积和体积；M_H、H_H、C_H 和 V_H 分别为梭梭的生物量、株高、冠幅面积和体积。

图 3　灌木生物量与形态学指标相关性 Mantel 检验结果

Fig. 3　Mantel test result for the correlations between shrub biomass and morphological indexes

中，沙柳调查样方的凋落物碳储量变异最大，其他两种灌木的凋落物碳储量在均值附近呈正态分布。

土壤层含碳率随土壤深度增加而逐渐降低，均值为 0.53% ~ 0.43%，远低于灌木和凋落物组分。沙柳在 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 60 cm 深度的土壤碳储量高于柠条锦鸡儿和梭梭，而在 60 ~ 100 cm 深度的土层，碳储量约为柠条锦鸡儿和梭梭的 1/3，沙柳土壤碳储量(53.87 t/hm^2)高于柠条锦鸡儿(46.68 t/hm^2)和梭梭(50.73 t/hm^2)(图 5b)。

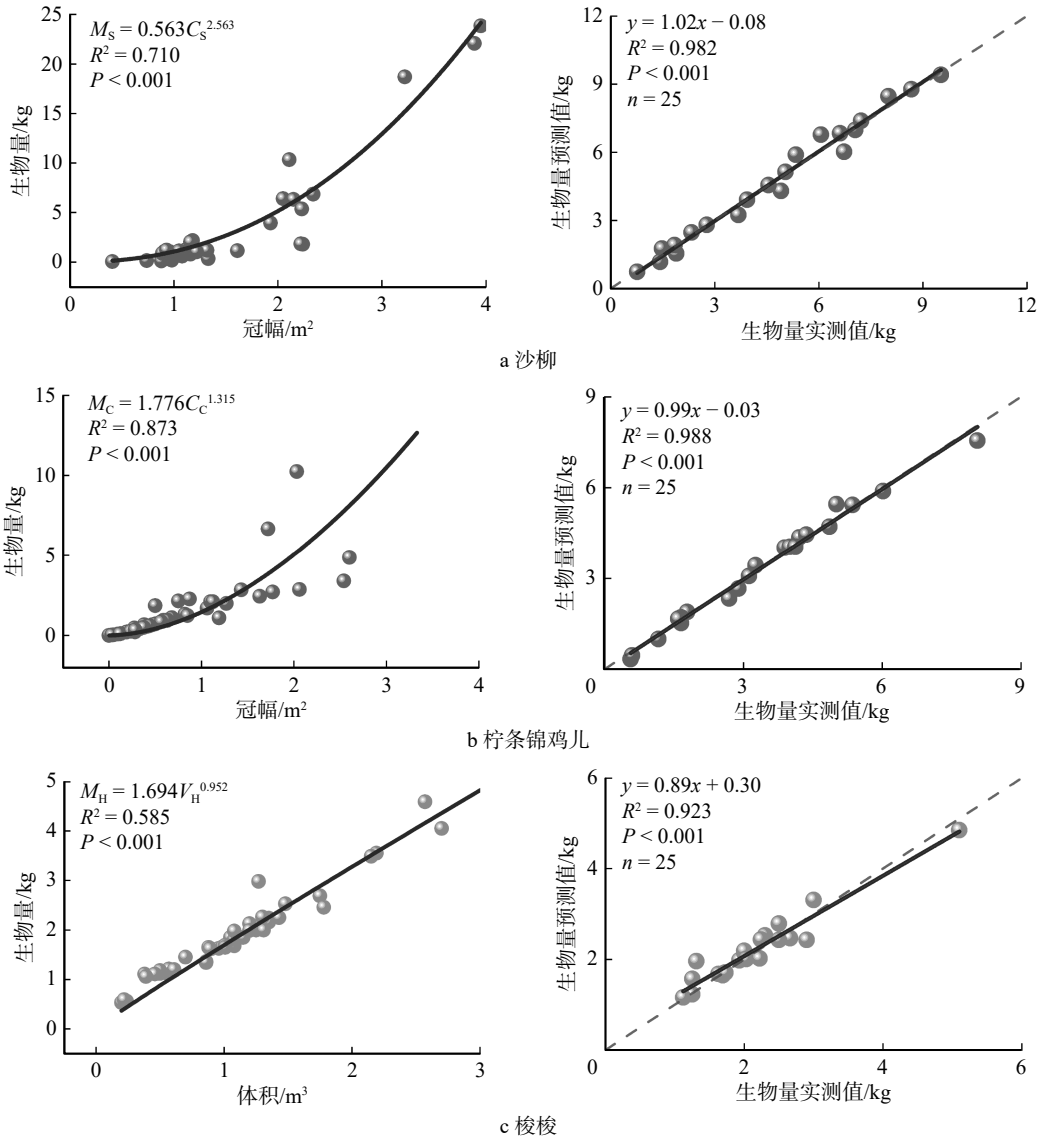
沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭的灌木根冠比分别为 2.21、1.30 和 1.26；沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭地上部

表 2　灌木生物量与形态学指标的回归分析

Tab. 2　Regression analysis of shrub biomass and morphological indexes

回归方程	沙柳		柠条锦鸡儿		梭梭	
	R^2	P	R^2	P	R^2	P
$y = \beta_0 + \beta_1 x$	0.631	< 0.001	0.666	< 0.001	0.574	< 0.001
$y = \beta_0 + \beta_1 \ln x$	0.541	< 0.001	0.497	0.005	0.528	< 0.001
$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$	0.651	< 0.001	0.793	< 0.001	0.578	< 0.001
$y = \beta_0 \beta_1^x$	0.636	< 0.001	0.797	< 0.001	0.491	< 0.001
$y = \beta_0 x^{\beta_1}$	0.710	< 0.001	0.873	< 0.001	0.585	< 0.001

注：x为自变量因子，沙柳和柠条锦鸡儿的x为冠幅面积，梭梭的x为体积。y为生物量。β_0、β_1、β_2为模型参数。



n 为样本量; 虚线为 1∶1 验证线。

图 4 灌木生物量模型建立与精度检验

Fig. 4 Establishment of shrub biomass model and accuracy testing

分含碳率分别为 42.80%、45.06% 和 43.61%; 地下部分含碳率分别为 41.11%、38.65% 和 41.42%。3 种典型灌木各组分含碳率介于 38.65% ~ 45.06%, 分析 3 种灌木根冠生物量比重, 并与所测量根冠含碳率相结合, 即可计算出灌木整株含碳率。其中梭梭平均含碳率最高(42.39%), 沙柳次之(41.64%), 柠条锦鸡儿相对偏低(41.43%), 3 种灌木含碳率均小于 IPCC 国家清单指南的默认灌木含碳率缺省值 50.00%。

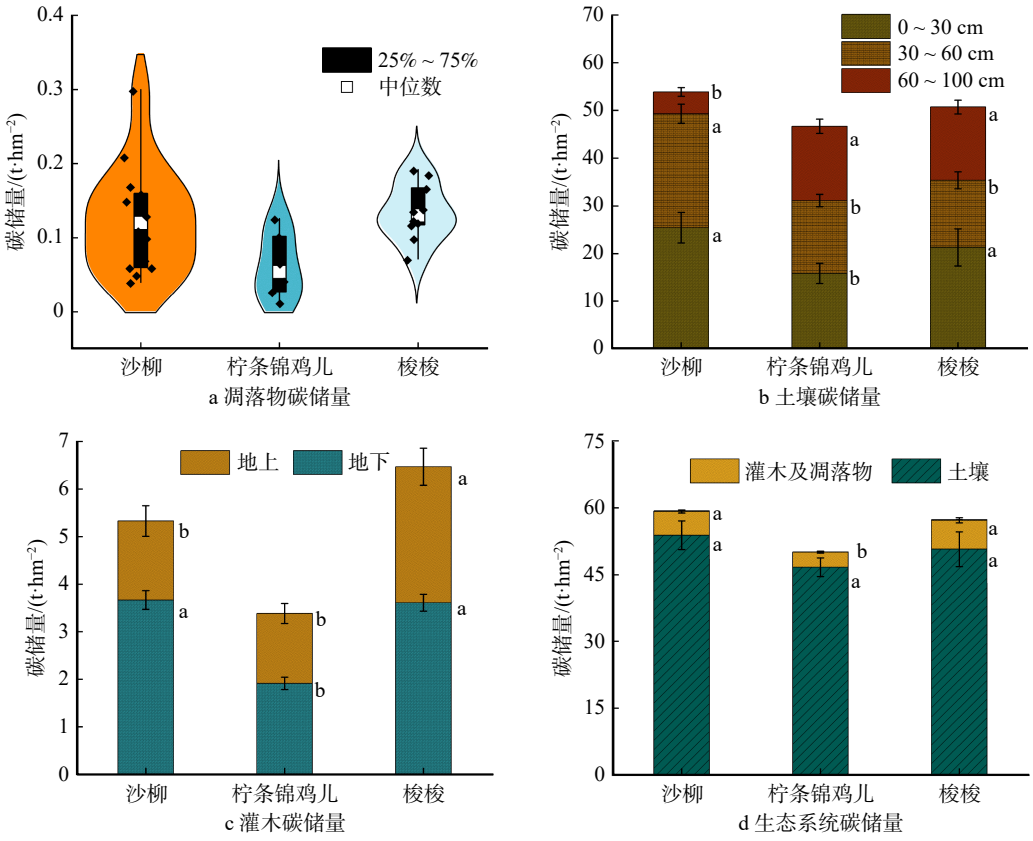
2.2.2 基于灌木生物量模型计量区域灌丛碳储量

研究区 3 种灌木单位面积密度为柠条锦鸡儿(2 075 株 /hm²) > 梭梭(1 505 株 /hm²) > 沙柳(1 011 株/hm²)。将沙柳和柠条锦鸡儿的平均冠幅(3.37 和 1.83 m²)和梭梭的平均体积(6.56 m³)分别带入对应的灌木生物量回归模型, 得到沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭单株的生物量分别为 12.67、3.93 和 10.15 kg, 结合株数密度计算得到平均生物量分别为 12.81、8.16 和 15.28 t/hm²。

结合 3 种灌木的含碳率, 研究区域 3 种灌木的生物质碳储量分别为 5.33、3.38 和 6.47 t/hm²(图 5c), 对应的生态系统碳储量分别为 59.33、50.12 和 57.34 t/hm², 其中, 土壤碳储量的占比为 88.24% ~ 92.60%, 占绝对优势, 灌丛生物量碳储量占比为 7.28% ~ 11.52%, 凋落物碳储量占比不足 1%(图 5d)。按研究区分布面积(沙柳 9 356 hm²、柠条锦鸡儿 6 589 hm²、梭梭 4 600 hm²)推算, 总固碳量分别为 5.55×10^5、3.30×10^5 和 2.64×10^5 t。

2.3 基于无人机遥感影像计量区域灌丛碳储量

基于灌木生物量回归模型对样方生物量进行估测, 结合无人机遥感影像获取研究区灌丛覆盖度。



不同小写字母表示不同物种间碳储量差异显著($P < 0.05$)。

图 5　凋落物、土壤、灌木和生态系统的碳储量

Fig. 5　Carbon storage of litter, soil, shrubs and ecosystem

沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭研究区域灌丛的平均覆盖度分别为 21.62%、34.74% 和 29.94%。通过建立灌丛覆盖度(c)与生物量(m)的线性回归模型(图 6),得到沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭的生物量回归模型分别为 $m_S = 0.50c_S + 1.44$, $m_C = 0.24c_C + 0.18$ 和 $m_H = 0.54c_H - 0.76$。

将 3 种灌木的盖度带入生物量回归模型,得到研究区沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭灌丛平均生物量分别为 12.26、8.52 和 15.40 t/hm^2。结合 3 种灌木的含碳率和研究区域面积,得到 3 种灌丛的生物质碳储量分别为 5.10、3.53 和 6.53 t/hm^2,生态系统碳储量分别为 59.10、50.27 和 57.40 t/hm^2,研究区域 3 种灌木的固碳量分别为 5.53×10^5、3.31×10^5 和 2.64×10^5 t。将遥感结果与样方调查方法得到的生态系统碳储量进行成对样本 t 检验,计算得到 t 值(0.058)远小于查表(自由度为 2,显著性水平为 0.05)得到的临界值(4.303),故两种方法计算出的结果无显著差异($P < 0.05$)。

3　讨　　论

3.1　建立快捷且精度较高的灌丛碳储量计量方法

在干旱和半干旱地区,灌木分布呈斑块状且具有较大的空间分异性。灌木没有明显主干导致传统乔木生物量估算方法在灌丛计量中存在明显局限

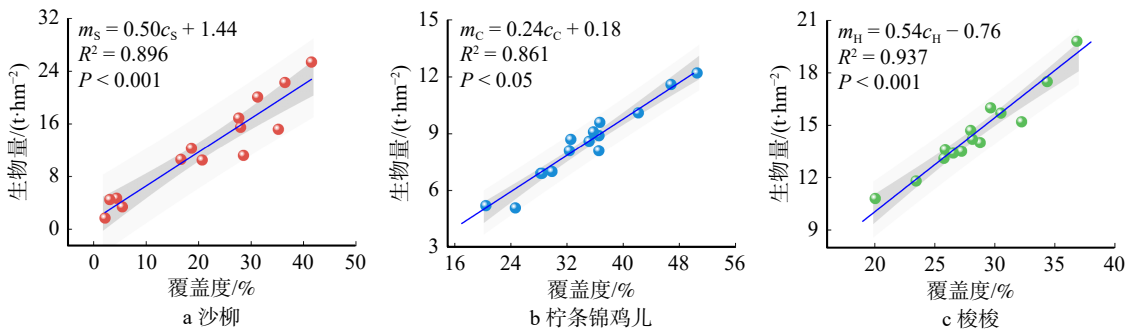


图 6　基于灌丛覆盖度构建的生物量回归模型

Fig. 6　Constructing biomass regression model based on shrub coverage

性：基于单枝基径与株高的逐枝测量模式不仅大幅增加野外工作量，其测量误差的累积效应还会显著降低区域尺度碳储量的估算精度。本研究以库布齐沙漠 3 种典型灌木为研究对象，通过构建冠幅或株高的生物量估算模型（图 4），实现了基于易测生长参数的高效生物量反演。该方法通过降低测量复杂度提升了区域推广可行性，为荒漠生态系统碳汇精准计量提供了技术支撑。但需指出，本方法仍受限于沙漠植被固有的空间异质性，且样方调查工作量大且耗时，难以覆盖大面积区域。

无人机遥感技术利用高分辨率影像和先进建模算法，能够快速、精准地获取中小尺度区域生物量数据，显著减少人力物力的投入，是未来生态监测的重要发展方向。准确性是评价无人机遥感影像在植被生物量估算领域效果的重要指标。本研究基于最邻近分类法，提取无人机遥感影像中灌丛盖度信息，构建的灌丛生物量−盖度模型的拟合优度（R^2）为 0.86 ~ 0.93。已有学者基于无人机遥感影像构建我国西北部草原植被生物量模型，估算结果与实测值匹配精度为 81%[23]；而我国东部农作物植被生物量模型的最佳 R^2 达 0.78[24]。综上，无人机遥感在中小尺度生物量估算中表现出较高精度。近年来，无人机遥感影像分类常常基于机器学习，可以提供比传统回归模型更准确的估计值，植被生物量与遥感变量之间有更高的相关系数（$R^2 = 0.89$）[25]，传统生物量回归模型与机器学习技术构建的混合模型相比，残余标准误差降低了 0.002 3~0.059 1[26]。其中，在针对荒漠植被遥感分类中，无人机遥感影像提供的高分辨率的有效影像，消除了卫星影像的一些限制[27]，图像处理后得到灌丛的覆盖度参数，结合盖度为自变量的生物量方程，估算区域灌木生物量具有更高的精度。

此外，利用无人机遥感影像估算区域生物量也有一定的局限性。比如密集植被可能导致光信号饱和，进而影响基于盖度计量的生物量估算准确性。未来研究可考虑将光学遥感图像与灌丛 LiDAR 点云数据相结合，利用 LiDAR 衍生的灌木冠层高度指数来有效解决因光信号饱和引起的生物量低估问题[28]。目前，无人机遥感技术在生物量监测中多聚焦于植被的关键生长阶段，而对整个生长周期的连续监测研究相对不足，研究表明针对植被生长季不同时期建模估测生物量，较单一时期具有更高的估算精度[29]。因此，未来改进方向应着重于增加监测频次，覆盖灌丛的全部生长周期，从而更精准地把握灌丛生物量的季节动态变化。

本研究针对内蒙古自治区库布齐沙漠腹地，通过样方调查和无人机遥感影像两种手段的野外工作，构建了 3 种典型灌木的生物量−形态学指标之间的模型，建立了生物量−覆盖度模型，两种模型计量结果经过成对样本 t 检验后，在统计学上无显著性差异（$P < 0.05$），对灌丛碳储量计量方法学进行了有益的补充。

3.2 库布齐沙漠地区灌丛碳储量分布特征

库布齐沙漠地区 3 种典型灌丛生物量分别为 12.26 t/hm^2（沙柳）、8.52 t/hm^2（柠条锦鸡儿）和 15.40 t/hm^2（梭梭），3 种典型灌木的生物量均低于全国灌木林生物量平均值（17.99 t/hm^2）[18]。灌丛生物量的积累受到气温、降水、土壤肥力等环境因子的综合影响[30]。

库布齐沙漠是干旱、半干旱气候，年均降水量低于 300 mm，土壤贫瘠，肥力低且保肥能力弱，限制了灌木生长和生物量积累。另外，相关研究表明，灌木生物量积累随年龄增长而增加，不同年龄组（0 ~ 10 a、11 ~ 20 a、21 ~ 30 a、31 ~ 40 a 以及 > 40 a）的生物量存在显著差异[31]。研究区域的灌木林主要处于 11 ~ 20 a 年龄组，种植时间短，生物量处于积累阶段。这可能也是该区域灌木林生物量低于全国平均水平的一个重要原因。

根冠比是指植被地下部分与地上部分干质量的比值，反映了灌丛对环境的响应策略，是指示生态系统碳循环的关键指标[32]。研究区 3 种典型灌木的根冠比较高，分别为 2.21（沙柳）、1.30（柠条锦鸡儿）和 1.26（梭梭），均显著高于我国主要人工灌木林的平均根冠比值 0.66[10]。生态根冠比通常与研究区降水量、植被类型、气候类型和土壤质地相关[33]。其中，随着土壤质地从黏土向沙土变化，植被的根冠比通常呈增加趋势[34]。库布齐沙漠主要由平均粒度介于 90 ~ 180 μm 的中细沙组成[35]，因其沙质土壤的水分和养分有效性较低，灌丛为了适应干旱和养分匮乏的环境，会将更多的生物量分配到根系，以增强对水分和养分的获取能力。这与生态学最优分配理论相吻合，即植物会根据生长环境的需求，优先将资源分配给最需要的器官。此外，高的根冠比有助于植被在风蚀较强的沙土地区，将根系深入土壤，避开风的侵袭，更好地适应极端干旱条件。同时，这也有助于防风固沙，对沙漠生态恢复和治理具有重要意义。在实际应用中，无人机技术可以获取地上生物量的数据，而通过已知的根冠比，可以进一步估算出地下生物量，从而更全面地评估生态系统的生物量和碳储量。这为生态系统的监测和管理提供了重要的科学依据，有助于制定更有效的生态恢复策略。

研究区 3 种灌丛生态系统碳主要储存在土壤中，土壤碳储量的贡献为 88.24% ~ 92.60%，占绝

对优势，远高于灌丛生物质碳储量占比（7.28% ~ 11.52%）。该地区的水资源短缺导致生态承载力低，灌木呈斑块稀疏分布，生物量相对较低。该研究涉及的 3 种灌木均存在平茬管理，平茬后的枝条散落在地表，一方面减少风对土壤的侵蚀；另一方面，这些凋落物分解后成为土壤有机碳的重要来源。提高土壤有机碳蓄积的管理方式，对提高灌丛生态系统碳储量具有重要意义。

4　结　　论

本研究利用样方调查与无人机遥感技术，估算了库布齐沙漠沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭 3 种典型灌木的碳储量，主要结论如下。（1）构建了基于生长参数的生物量模型：沙柳生物量（M）与冠幅面积（C）呈幂函数关系（$M_S = 0.563C^{2.563}$，$R^2 = 0.710$），柠条锦鸡儿生物量与冠幅关系为 $M_C = 1.776C^{1.315}$（$R^2 = 0.873$），梭梭生物量则与灌丛体积（V）呈现 $M_H = 1.694V^{0.952}$（$R^2 = 0.585$），3 个模型均通过显著性检验。（2）基于无人机遥感影像构建了灌丛生物量（m）和盖度（c）回归模型，沙柳（$m_S = 0.50c_S + 1.44$，$R^2 = 0.896$）、柠条锦鸡儿（$m_C = 0.24c_C + 0.18$，$R^2 = 0.861$）和梭梭（$m_H = 0.54c_H - 0.76$，$R^2 = 0.937$）模型均有较高的拟合精度。这两种模型的建立，填补了 2023 年发布的造林碳汇方法学中灌木种类的空白，显著提升了该区域灌木生物量估算的科学性和准确性。（3）沙柳、柠条锦鸡儿和梭梭 3 种典型灌木所在区域的生态系统碳储量为 50.12 ~ 59.33 t/hm^2，其中土壤碳储量贡献 88.24% ~ 92.60%，占据了主导地位。建议加强灌丛生态系统管理，同时改进土壤有机碳蓄积的管理策略，以增强区域碳固持功能。

参　考　文　献

[1] Nabuurs G J, Thürig E, Heidema N, et al. Hotspots of the European forests carbon cycle[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(3): 194−200.

[2] Brown S, Swingland I R, Hanbury T R, et al. Changes in the use and management of forests for abating carbon emissions: issues and challenges under the Kyoto Protocol[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2002, 360(1797): 1021.

[3] 北京林业大学, 北京中创碳投科技有限公司, 中国林业科学研究院, 等. 林业碳汇项目审定和核证指南: GB/T 41198—2021[S]. 北京: 国家林草局, 2021.
Beijing Forestry University, SinoCarbon, Chinese Academy of Forestry, et al. Guidelines for validation and verification of forestry carbon projects: GB/T 41198−2021[S]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2021.

[4] Zhang Z T, Wang K, Li G L, et al. Beyond shrub dieback: understory plant diversity, soil water and soil carbon storage were improved in a semi-arid region[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 545: 121267.

[5] 卜文圣, 马耀华, 刘虹冰, 等. 菌根类型和树种耐荫性对宿存枯枝碳储量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 85−92.
Bu W S, Ma Y H, Liu H B, et al. Effects of mycorrhizal types and shade tolerance of tree species on carbon storage of standing dead branches[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 85−92.

[6] 刘庆超, 郭月峰, 祁伟, 等. 平茬对中间锦鸡儿叶形态及叶组织化学性状的影响 [J]. 内蒙古林业科技, 2023, 49(4): 34−40.
Liu Q C, Guo Y F, Qi W, et al. Effects of stumping on leaf morphology and leaf histochemical traits of *Caragana intermedia*[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2023, 49(4): 34−40.

[7] 格日乐, 额尔敦花, 宋想斌, 等. 6 种水土保持植物枝条的数量特征 [J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 71−76.
Gerile, Erdunhua, Song X B, et al. Branch quantity characteristic of six kinds of soil and water conservation plants[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6): 71−76.

[8] Nandal A, Yadav S S, Rao A S, et al. Advance methodological approaches for carbon stock estimation in forest ecosystems[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(2): 315−347.

[9] Chen W, Zhao J, Cao C X , et al. Shrub biomass estimation in semi-arid sandland ecosystem based on remote sensing technology[J]. Global Ecology and Conservation, 2018, 16: e00479.

[10] 生态环境部办公厅. 关于印发《温室气体自愿减排项目方法学 造林碳汇 (CCER-14-001-V01)》等 4 项方法学的通知 [EB/OL]. (2023−10−24) [2023−12−27]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231024_1043877.html.
Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on the issuance of methodologies for voluntary greenhouse gas reduction projects: afforestation carbon sink (CCER-14-001-V01) and three other methodologies [EB/OL]. (2023−10−24) [2023−12−27]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231024_1043877.html.

[11] 内蒙古自治区第三次国土调查领导小组办公室, 内蒙古自治区自然资源厅, 内蒙古自治区统计局. 内蒙古自治区第三次国土调查主要数据公报 [R]. 呼和浩特：内蒙古自治区自然资源厅, 2021.
Inner Mongolia Autonomous Region Third National Land Survey Leading Group Office, Inner Mongolia Autonomous Region Natural Resources Department, Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Statistics. The main data bulletin of the Third National Land Survey of Inner Mongolia Autonomous Region[R]. Hohhot: Inner Mongolia Autonomous Region Natural Resources Department, 2021.

[12] 王凌菲, 徐霞, 江红蕾, 等. 内蒙古温带典型草原围封十年草灌景观格局动态 [J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2234−2241.
Wang L F, Xu X, Jiang H L, et al. The dynamics of landscape pattern within a ten-year exclosure in temperate typical grassland in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2234−2241.

[13] 陈丽茹, 李秧秧. 沙柳和柠条茎水力学特性对模拟降雨改变的响应 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 507−514.
Chen L R, Li Y Y. Responses of stem hydraulic traits in *Salix psammophila* and *Caragana korshinskii* to manipulated precipitation variation[J]. The Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 507−514.

[14] Gao X, Zhao X, L H, et al. Exotic shrub species (*Caragana korshinskii*) is more resistant to extreme natural drought than native species (*Artemisia gmelinii*) in a semiarid revegetated ecosystem[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 263: 207−216.

[15] 马沈轲, 王春梅, 赵春林, 等. 西北干旱半干旱地区节水增汇植物种类筛选 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8): 122−131.
Ma S K, Wang C M, Zhao C L, et al. Screening of water-saving and sink-enhancing plant species in arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 122−131.

[16] Yang F, Lü G H. Metabolomic analysis of the response of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to drought[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(10): 9099.

[17] Gao Y, Wang S Y, Chen L Y, et al. Achieving accurate regional carbon-sink accounting and its significance for “missing” carbon sinks[J]. The Innovation, 2024, 5(1): 100552.

[18] 国家发展改革委应对气候变化司.《省级温室气体清单编制指南 (试行)》[R]. 北京: 国家发展改革委, 2011.
National Development and Reform Commission, Department of Climate Change. Provincial greenhouse gas inventory guidelines (Trial)[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2011.

[19] Abdullah M M, Al-Ali Z M, Abdullah M T, et al. Investigating the applicability of UAVs in characterizing desert shrub biomass and developing biological indicators for the selection of suitable revegetation sites[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112416.

[20] 李玉凤, 郭飞, 莫燕华, 等. 两种密度马尾松人工林生态系统碳储量及其分配特征 [J]. 广西林业科学, 2024, 53(5): 577−584.
Li Y F, Guo F, Mo Y H, et al. Carbon storages and distribution characteristics of *Pinus massoniana* plantation ecosystems with two densities[J]. Guangxi Forestry Science, 2024, 53(5): 577−584.

[21] 于欢, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土丘陵区典型人工林土壤有机碳储量的分布特征 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 100−107.
Yu H, Wei T X, Chen Y X, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon stocks in typical plantations in loess hilly region of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 100−107.

[22] Cheng F, Ou G, Wang M, et al. Remote sensing estimation of forest carbon stock based on machine learning algorithms[J]. Forests, 2024, 15(4): 681.

[23] 侯正清, 颜安, 谢开云, 等. 基于多特征融合的无人机天山假狼毒地上生物量估算 [J]. 新疆农业科学, 2024, 61(10): 2527−2536.
Hou Z Q, Yan A, Xie K Y, et al. Estimation of above ground biomass of drone *Diarthron tianschanicum* based on multi feature fusion[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(10): 2527−2536.

[24] Lu N, Zhou J, Han Z X, et al. Improved estimation of aboveground biomass in wheat from RGB imagery and point cloud data acquired with a low-cost unmanned aerial vehicle system[J]. Plant Methods, 2019, 15: 1−16.

[25] Bispo P C, Pedro R, Zimbres B, et al. Woody aboveground biomass mapping of the Brazilian savanna with a multi-sensor and machine learning approach[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2685.

[26] Silva J P M, da Silva M L M, da Silva E F, et al. Computational techniques applied to volume and biomass estimation of trees in Brazilian savanna[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109368.

[27] Al-Ali Z M, Abdullah M M, Asadalla N B, et al. A comparative study of remote sensing classification methods for monitoring and assessing desert vegetation using a UAV-based multispectral sensor[J]. Environmental Monitoring Assessment, 2020, 192(6): 389.

[28] Niu X M, Chen B J, Sun W W, et al. Estimation of coastal wetland vegetation aboveground biomass by integrating UAV and satellite remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2024, 16(15): 2760.

[29] 陈哲, 王浩, 王金洲, 等. 基于物候相机归一化植被指数估算高寒草地植物地上生物量的季节动态 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(5): 487−495.
Chen Z, Wang H, Wang J Z, et al. Estimation on seasonal dynamics of alpine grassland aboveground biomass using phenology camera-derived NDVI[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(5): 487−495.

[30] Liu M, Li D D, Hu J, et al. Altitudinal pattern of shrub biomass allocation in Southwest China[J]. PLoS One, 2020, 15(10): e0240861.

[31] Ma X Z, Wang X P. Biomass partitioning and allometric relations of the *Reaumuria soongorica* shrub in Alxa steppe desert in NW China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 468: 118178.

[32] Cairns M A, Brown S, Helmer E H, et al. Root biomass allocation in the world’s up land forests[J]. Oecologia, 1997, 111: 1−11.

[33] Ye J Z, Chao Y, Hu Y F, et al. Spatial patterns of global-scale forest root-shoot ratio and their controlling factors[J]. Science of the Total Environment, 2021, 800: 149251.

[34] Wang L M, Li L H, Chen X, et al. Biomass allocation patterns across China’s terrestrial biomes[J]. PLoS One, 2014, 9(4): e93566.

[35] Yang X P, Steven F, Hu F G, et al. Initial insights into the age and origin of the Kubuqi sand sea of northern China[J]. Geomorphology, 2016, 259: 30−39.

（责任编辑 孟 瑶 李 契
责任编委 臧润国）