

基于 InVEST 模型的甘肃省祁连山林区乔木林碳储量 时空变化研究

赵方圆^{1,2}, 王琼芳^{1,2*}, 张华堂^{1,2}, 陈智平^{1,2}, 张璐^{1,2}

(1. 甘肃省生态资源监测中心, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省林业调查规划院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:以祁连山林区乔木林为研究对象,基于甘肃省林地更新数据和中国土地覆盖及地形数据,运用 InVEST 模型估算和分析祁连山林区乔木林的碳储量时空变化特征。结果表明,1)研究区乔木林碳储量的分布呈现北部片状—中部点状片状—南部线状的分布特征。2)2016—2019 年研究区乔木林碳储量增长了 258.91 万 t,年均碳汇量 86.30 万 t。3)2016、2019 年云杉的碳储量占比最大,平均占比 88.82%,且以最具未来碳汇潜力的中龄林和近熟林增长为主,主要分布在海拔 2 500~3 500 m、坡度 10°~40°的阴坡和半阴坡及半阳坡。4)2016—2019 年,牧草地、耕地、未利用地、建设用地向林地转移 1 219.22 hm²,呈现牧草、耕地、未利用地、建设用地向林地回转的趋势。研究结果一定程度上反映了研究区森林碳汇功能向良性转变,表明了退耕还林、人工造林等生态治理工程的有效性。

关键词:InVEST 模型;祁连山林区;碳储量

中图分类号:S718.556

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0233-08

Temporal and Spatial Variations of Arbor Forest Carbon Storage of Gansu Province Based on InVEST Model in the Forest Area of the Qilian Mountains

ZHAO Fang-yuan^{1,2}, WANG Qiong-fang^{1,2*}, ZHANG Hua-tang^{1,2}, CHEN Zhi-ping^{1,2}, ZHANG Lu^{1,2}

(1. Gansu Provincial Ecological Resources Monitoring Center, Lanzhou 730020, Gansu, China;

2. Gansu Provincial Forestry Survey and Planning Institute, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Based on the forest land update data in Gansu Province in 2016 and 2019, China's land cover data and topographic data, the InVEST model was used to estimate and analyze the temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the arbor forests in the Qilian Mountains. The results showed that 1) the distribution of carbon storage in arbor forests in the study area presented the distribution characteristics of northern flaky-central point flaky-southern linear. 2) In 2016 and 2019, the carbon storage of arbor forests in the study area increased by 25 900 t, with an average annual carbon sink of 863 000 t. 3) In 2016 and 2019, the carbon storage of spruce accounted for the largest proportion, with an average proportion of 88.82%, and the growth of middle-aged and near-mature forests with the most potential carbon sinks in the future was the main growth, mainly distributed on shady, semi-shady and semi-sunny slopes with an altitude of 2 500—3 500 m and a slope of 10°—40°. 4) From 2016 to 2019, 1 219.22 hm² of pasture land, cultivated land, unused land, and construction land turned back to forest land. The above results reflect the benign transformation of the forest carbon sink function in the study area, indicating the effectiveness of ecological governance projects such as returning farmland to forests and artificial afforestation.

Key words: InVEST model; Qilian Mountain forest area; carbon storage

收稿日期:2022-07-30 修回日期:2022-09-26

基金项目:甘肃省自然科学基金(20JR5RA090)。

第一作者:赵方圆。研究方向:林业资源调查规划、林业碳汇。E-mail:770883039@qq.com

*通信作者:王琼芳。研究方向:林业碳汇。E-mail:493161684@qq.com

森林碳储量的变化在很大程度上影响着陆地生态系统的碳汇功能。甘肃省地处我国西北内陆,长期以来受荒漠化、水土流失等重大环境问题的制约,森林资源较少且分布不均匀。此外,由于气候、地形等自然原因导致造林管护难度较大,恢复林草、扩大森林植被存在很大的挑战。截至 2017 年,祁连山森林覆盖率由 20 世纪 50 年代的 22.4% 减少到 14.4%,乔木林地、灌木林地向疏林地、草地的变化趋势愈加明显^[1-2]。2017 年,祁连山国家级自然保护区生态环境破坏问题突出,甘肃省先后印发出了《全省林业系统自然保护区生态环境保护问题自查整改实施方案》《甘肃祁连山国家级自然保护区矿业权分类退出办法》等文件,加快实施祁连山生态移民、祁连山山水林田湖草沙生态保护修复等工程^[3]。在此生态整治背景下,祁连山林区碳储量时空变化研究可评估祁连山地区的生态治理成效,为今后的林地资源管理和决策提供参考。

目前通过土地利用类型评估碳储量变化的相关研究主要有 CASA 模型、InVEST 模型等,其中 InVEST 模型以土地利用数据为基础,对区域景观下特定时间段的生态系统的碳储量进行估算,是目前较为成熟、可靠性较高的一种评估方法。刘晓娟等^[4]以土地利用的视角模拟了 2100 年的陆地生态系统碳储量,刘洋等^[5]预测了 2040 年疏勒河流域的生态系统碳储量,刘冠等^[6]估算了 1999—2016 年陕西省延安南部麻塔流域的碳储量,并探讨了坡度、坡向、坡位对碳储量的影响。巩杰等^[7]分析了甘肃白龙江流域生境质量时空分异特征。张影等^[8]评估了白龙江流域碳储量时空分布格局。基于 InVEST 模型计算区域碳储量的研究往往是一个地类只给出一组地上、地下、土壤和死亡有机质的碳密度,且无年际变化,数据来源于相似研究年限、相似研究地域的土地利用类型碳密度,计算依托于土地利用类型的面积转移这一个变量,而蓄积、树龄、土壤条件、地形等多因子共同影响乔木林的碳密度值。本研究基于 2016、2019 年森林资源管理年度更新数据,通过样本筛选将蓄积量等属性因子合格的小班提取出来,通过生物量扩展因子法计算出研究区乔木林不同龄组、不同优势树种的地上、地下部分及土壤碳密度,再运用 InVEST 模型分不同研究年限、龄组、优势树种对乔木林的地上、地下部分及土壤碳密度分别赋值进而计算研究区乔木林碳储量,从而提升模型估算的准确度。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

甘肃省祁连山林区地处我国西北内陆,跨张掖、

武威、金昌、山丹马场、兰州市,总面积 1.86 万 km²,地理坐标 36°76′—39°73′N,97°39′—103°76′E,海拔 1 800~5 564 m,属高山、中山地貌。年降水量 300~500 mm,植被垂直分布规律明显。主要树种有青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏、桦木(*Betula*)等。多年来,西部林牧交错矛盾突出,野生动物及其栖息地环境不断恶化,生态环境脆弱问题突出。

1.2 数据来源

1.2.1 土地利用数据 数据源自 Landsat 的 2016 年和 2019 年 2 个年度的分辨率为 30 m 的中国土地覆盖数据集(CLCD)^[9]。

1.2.2 研究区范围界线和乔木林蓄积量数据 研究区范围界线和乔木林蓄积量数据基于 2016、2019 年森林资源管理年度更新数据。参考全国第九次森林资源清查数据和林业资源管理资料,利用 ArcGIS10.6 软件对甘肃省林地一张图数据中的小班区划形状、优势树种、龄组、面积等空间部分和属性部分因子进行现地验证,将核实通过的小班提取出来作为研究区乔木林碳密度测算的基础数据,数据具备准确性和实效性。

1.2.3 地形数据 DEM 数据来源于 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission),分辨率为 30 m。在 ArcGIS10.6 软件下对数据进行镶嵌,裁切、重分类得到研究区的海拔、坡度、坡向栅格数据。

1.3 研究方法

1.3.1 乔木林碳密度的计算 乔木林碳储量、林下碳储量(灌木层和枯落物)和土壤碳储量如式(1)一式(3)所示^[10],具体参照《甘肃省 2018 年土地利用、土地利用变化及林业碳汇计量监测技术方案》^[10]。基于 2016、2019 年森林资源管理年度更新数据库中蓄积量数据,运用生物量扩展因子法计算出研究区乔木林各龄组、各优势树种地上部分和地下部分、土壤的碳密度(表 1)。

$$C_{\text{乔}} = \sum_{i=1}^n \{A_i \cdot V_i \cdot B_{\text{EF}i} \cdot D_i \cdot (1+R_i) \cdot C_{\text{F}i}\} \quad (1)$$

$$C_{\text{林下}} = \alpha \cdot C_{\text{乔}} \quad (2)$$

$$C_{\text{土壤}} = \beta \cdot C_{\text{乔}} \quad (3)$$

$$Q_c = C/S \quad (4)$$

式中: $C_{\text{乔}}$ 为乔木层碳储量,t; n 为优势树种总数; A 为林地面积, hm²; V 为蓄积量, m³ · hm⁻²; B_{EF} 为林木地上生物量与树干生物量的比; D 为木材基本密度; R 为树种根茎比; C_{F} 为生物量含碳率, α 为林下植物碳转换系数,取值 0.195^[10]; β 为土壤碳转换系数,取值 1.244^[10]。 Q_c 为碳密度, t · hm⁻²; C 为碳储量, t; S 为林地面积, hm²。

表 1 祁连山林区乔木林分优势树种分龄组碳密度

Table 1 Carbon Density of Dominant Tree Species of Arbor Stands by Age Group in Qilian Mountains

t · hm⁻²

优势树种	龄组	2016		2019	
		地上、地下部分碳密度	土壤碳密度	地上、地下部分碳密度	土壤碳密度
桦类(<i>Betula</i> spp.)	幼龄林	18.19	18.94	22.67	23.60
	中龄林	27.90	29.04	31.30	32.58
	近熟林	34.26	35.66	37.65	39.20
	成熟林	38.35	39.92	40.62	42.29
	过熟林	24.87	25.89	25.85	26.91
阔叶混	幼龄林	16.57	17.25	23.30	24.25
	中龄林	16.83	17.52	19.20	19.98
	近熟林	25.94	27.00	27.85	28.99
	成熟林	30.79	32.05	34.18	35.59
柳树(<i>Salix</i>)	过熟林	12.92	13.45	13.96	14.54
	幼龄林	0.00	0.00	0.00	0.00
	中龄林	0.00	0.00	0.00	0.00
	近熟林	3.40	3.54	3.51	3.65
落叶松(<i>Larix gmelinii</i>)	成熟林	0.00	0.00	0.00	0.00
	过熟林	7.19	7.49	7.27	7.57
	幼龄林	6.09	6.34	7.56	7.86
	中龄林	7.19	7.48	8.98	9.35
其他柏类(<i>Cupressaceae</i> spp.)	近熟林	5.84	6.08	6.71	6.99
	成熟林	22.64	23.57	24.56	25.57
	过熟林	9.96	10.36	0.00	0.00
	幼龄林	14.02	14.60	15.69	16.33
其他软阔类	中龄林	27.54	28.67	29.38	30.58
	近熟林	35.65	37.11	37.52	39.06
	成熟林	28.26	29.42	29.41	30.61
	过熟林	0.00	0.00	0.00	0.00
其他硬阔类	幼龄林	3.93	4.09	0.00	0.00
	中龄林	6.08	6.33	6.72	7.00
	近熟林	6.11	6.36	6.36	6.62
	成熟林	10.57	11.01	10.70	11.14
杨类(<i>Populus</i> spp.)	过熟林	9.66	10.05	0.00	0.00
	幼龄林	15.82	16.47	22.19	23.10
	中龄林	15.95	16.60	17.12	17.82
	近熟林	26.06	27.13	27.40	28.52
油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>)	成熟林	29.96	31.19	30.81	32.08
	过熟林	0.00	0.00	0.00	0.00
	幼龄林	5.69	5.93	7.76	8.08
	中龄林	13.71	14.27	10.54	10.97
云杉(<i>Picea asperata</i>)	近熟林	17.97	18.71	18.39	19.15
	成熟林	21.02	21.88	21.76	22.65
	过熟林	23.98	24.96	25.42	26.46
	幼龄林	0.00	0.00	0.00	0.00
针阔混	近熟林	26.77	27.86	30.74	32.00
	成熟林	62.25	64.80	67.52	70.29
	过熟林	0.00	0.00	0.00	0.00
	幼龄林	27.99	29.14	29.04	30.23
针叶混	中龄林	34.79	36.21	45.53	47.39
	近熟林	53.94	56.15	65.78	68.48
	成熟林	35.98	37.45	33.86	35.25
	过熟林	26.24	27.32	27.56	28.69
针叶混	幼龄林	11.83	12.32	13.53	14.09
	中龄林	24.29	25.28	37.35	38.89
	近熟林	30.64	31.89	52.20	54.34
	成熟林	32.22	33.54	42.05	43.78
针叶混	过熟林	10.51	10.94	24.90	25.92
	幼龄林	20.11	20.94	31.93	33.23
	中龄林	25.30	26.34	30.30	31.55
	近熟林	67.94	70.72	75.89	79.00
针叶混	成熟林	65.31	67.98	71.99	74.94
	过熟林	0.00	0.00	0.00	0.00

1.3.2 土地利用数据的处理 在 ArcGIS10.6 软件支持下,在同一坐标系(CGS-WGS-1984)的基础上运用祁连山林区范围界线对 2016 年和 2019 年 2 个年度的中国土地覆盖数据集(CLCD)进行裁切得到研究区的光栅数据,提取 2016、2019 年森林资源管理数据库中的乔木林小斑图层,用此图层对研究区的光栅数据进行裁切得到乔木林栅格数据集。基于 2016、2019 年森林资源管理年度更新数据库中蓄积量数据,运用生物量扩展因子法计算出研究区乔木林各龄组、各优势树种乔木层、林下、土壤的碳储量及平均碳密度,其中乔木层和林下碳储量之和为 InVEST 模型中的地上部分和地下部分碳储量之和。由于死亡有机质碳库数据难以获取且其碳储量相对较小,本研究只考虑三大碳库碳储量,见式(5)。本研究将除乔木林以外的其他土地利用类型碳密度值设为 0。

$$C_{ij-total} = C_{ij-above} + C_{ij-below} + C_{ij-soil} \quad (5)$$

式中: i 为优势树种; j 为龄组; $C_{ij-above}$ 、 $C_{ij-below}$ 、 $C_{ij-soil}$ 分别为乔木林优势树种 i 龄组 j 的地上部分、地下部分和土壤碳储量, t。

1.3.3 土地利用类型转移矩阵

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: S 为土地利用类型转移矩阵; S_{ij} 为研究初期 i 类土地到研究末期转为 j 类土地的面积; n 为土地类型数。每个行值和列值表示该土地类型的转移和转入类型及其大小。

2 结果与分析

2.1 祁连山林区 2016—2019 年碳储量时空变化特征

空间分布上,研究区中部和东南部的乔木林分布相对密集,也为碳储量分布较高的区域。碳储量

的分布呈现北部片状—中部点状片状—南部线状的分布特征(图 1),北部的点状分布集中于肃南县的西北部,该地区地类以牧草地和未利用地为主,中部片状主要集中于肃南县的东南部,南部大通河流域呈线状分布。将前后 2 期碳储进行栅格减法运算发现碳储量增加的区域集中在肃南县的西北部、天祝县和山丹马场。研究区各县区的乔木林碳储量均有不同程度的增长,其中山丹马场增长最快,其次为山丹县,碳储量分县区统计见表 2。

2.2 研究区乔木林海拔、坡度、坡向梯度的碳储量和碳密度变化特征

2.2.1 海拔梯度变化 在土地利用数据和 DEM 地形数据的基础上使用 InVEST 模型对研究区 2016、2019 年乔木林各龄组各优势树种及对应海拔、坡度、坡向的碳储量进行估算。将研究区海拔分为 4 个梯度: $<2\ 500$ 、 $2\ 500 \sim 3\ 000$ 、 $3\ 000 \sim 3\ 500$ 、 $>3\ 500$ m。如表 3 所示,2016 年和 2019 年, $2\ 500 \sim 3\ 000$ m 海拔范围的乔木林碳储量占比最大,为 $58.58\% \sim 59\%$,其次为 $3\ 000 \sim 3\ 500$ m,占比 $39.23\% \sim 39.64\%$,其中 $2\ 500$ m 海拔以下的碳储量相对较低是由于该海拔梯度多分布灌木和草丛,人类活动较多导致,海拔 $3\ 500$ m 以上已经越过绝大部分森林植被的林线,只分布较少面积的云杉和其他柏类,碳储量最低。碳密度随海拔增长波动增减,2016—2019 年各个海拔梯度的碳储量和碳密度较 2016 年均有所提升,森林碳汇能力加强。

2.2.2 坡度梯度变化 基于数字地形高程模型(DEM)数据,在 ArcGIS10.6 软件下处理得出坡度栅格数据,通过重分类将坡度数据分为 6 类: $<10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、 $>50^\circ$ 。如表 3 所示,碳储量随坡度增加呈现先增后减的趋势,在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的碳储量值最大,与张影等^[8]的研究结果相似,主要原因是该坡度梯度植被生长受人类活动影响较少,分布的乔木林面积最多。2016、2019 年

表 2 祁连山林区乔木林分县区碳储量

Table 2 Carbon storage of arbor forests in counties and districts in Qilian Mountains

县(区)	县域面积/hm ²	2016 年碳储量/t	2019 年碳储量/t	碳储量增长率(%)
永昌县	39 897.88	224 015.08	273 431.04	22.1
凉州区	20 714.52	257 907.33	309 931.92	20.2
古浪县	9 219.47	100 821.73	116 041.94	15.1
天祝县	388 394.46	4 092 027.02	5 123 398.82	25.2
甘州区	9 419.89	41 538.89	48 801.35	17.5
肃南县	1 206 486.61	5 416 904.07	6 673 488.51	23.2
民乐县	32 122.85	428 640.30	504 639.90	17.7
山丹县	25 291.31	389 620.91	466 588.79	19.8
山丹马场	132 553.96	94 462.25	118 717.75	25.7
合计	1 864 100.96	11 045 937.59	13 635 040.03	23.4

碳密度随坡度增加呈现先减后增的趋势。6 个坡度的碳储量和碳密度在 2016—2019 年均有增加。

2.2.3 坡向梯度变化 不同坡向的地表温度、植被受太阳辐射时间、雪线的高度以及降雨量存在差异,进而影响植被的碳储量的分布。将坡向栅格数据分为 4 类:阴坡(0°~45°,315°~360°),半阴坡(45°~135°)阳坡(135°~225°)半阳坡(225°~315°),如表 3 所示,在坡向梯度上,碳储量从大到小依次是阴坡、半阳坡、半阴坡、阳坡。碳密度从大到小依次是阴坡、(半阴坡;半阳坡)、阳坡。甘肃地处干旱半干旱区域,日照时间长,阴坡相对于阳坡水分、肥力等自然条件明显好于阳坡,更有利于植被的自然存活和生长,2019 年的碳储量和碳密度较 2016 年

均有增加,阴坡的碳储量和碳密度增加趋势更加明显。

2.3 乔木林各优势树种、龄组的碳储量分布和变化特征

2016—2019 年中龄林、近熟林碳储量占比分别 35.4%~36.5%、60.4%~60.8%。2016—2019 年中龄林、近熟林、碳储量分别增加了 106.72、152.18 万 t。2016 年和 2019 年云杉的碳储量占比最大,为 88.9%~89.5%,3 a 间碳储量增长也为最大,为 238.26 万 t。碳储量增长率最大的是杨类(688.5%),其次是桦树(192.9%)、针阔混(146%),且以幼龄林增长最为显著,2016、2019 年研究区乔木林优势树种各龄组的碳储量如图 2 所示。

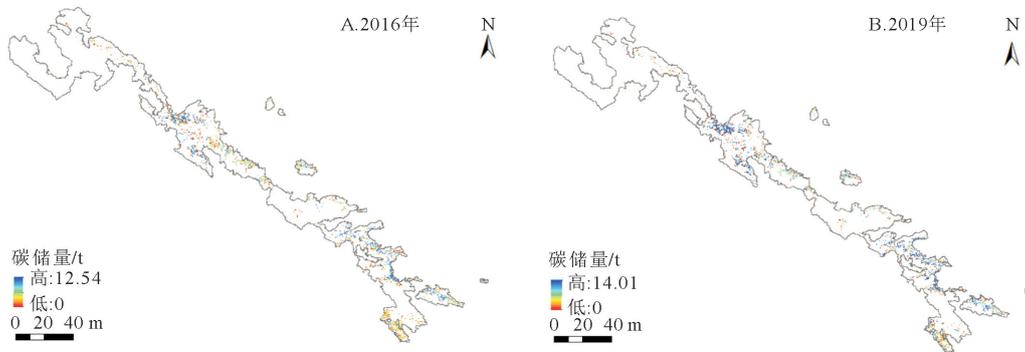


图 1 2016、2019 年祁连山林区乔木林碳储量分布

Fig. 1 Distribution of carbon storage in arbor forests in 2016 and 2019 in Qilian Mountains

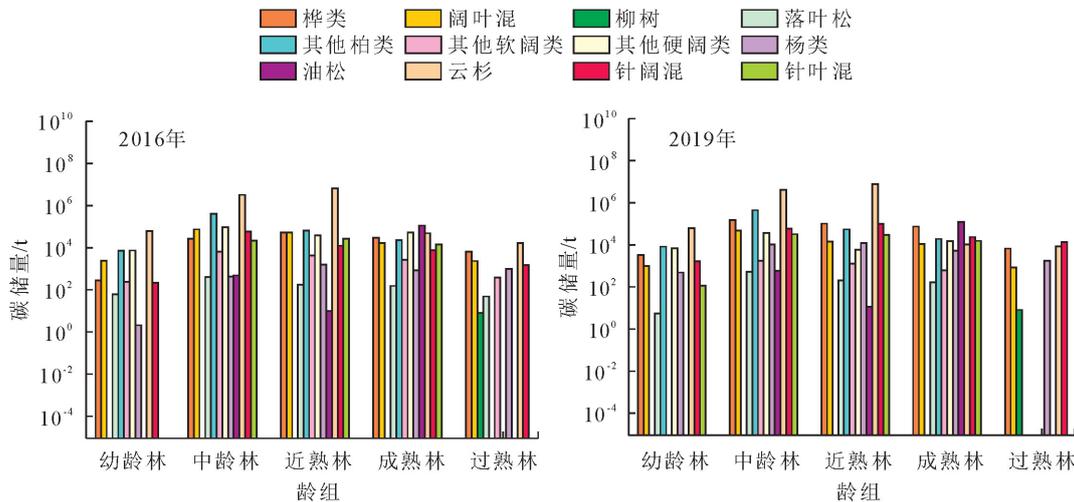


图 2 乔木林各龄组各优势树种碳储量

Fig. 2 Carbon storage of different dominant tree species in each age groups of arbor forests

分优势树种和龄组对各梯度海拔碳储量进行统计分析发现,如图 3 所示,乔木林碳储量主要分布在海拔 2 500~3 500 m,2016—2019 年,云杉在海拔 2 500~3 000 m 碳储量占比达到 91.34%,且以中龄林(34.10%)和近熟林(64.85%)为主。在海拔 3 000~3 500 m,云杉碳储量占比 86.73%,以中龄林(32.22%)和近熟林(66.91%)为主。在海拔

3 000~3 500 m,其他柏类占比 8.33%,以中龄林(81.31%)为主。分析各优势树种各龄组在不同坡度梯度下碳储量分布发现,如图 4 所示,云杉作为研究区的主要树种,在坡度<10°、10°~20°、20°~30°、30°~40°、40°~50°、>50° 6 个坡度梯度碳储量占比分别为 6.26%、28.27%、39.23%、22.89%、3.12%、0.22%,随坡度增加呈现先增后减的趋势。

不同树种和龄组的碳储量在坡向梯度上也存在差异,通过分析发现,如图 5 所示,研究区主要树种云杉的碳储量按坡向梯度从大到小为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡。云杉在不同海拔、坡度、坡向梯度均有不同程度碳储量增长,云杉树种固碳能力的提升表明了近年来研究区退化林修复、森林抚育等工程对林地质量提升产生了非常积极的影响。

2.4 祁连山林区土地利用变化及其对碳储量的影响

土地利用类型的变化直接影响到碳储量的变化,如表 4 所示,2016—2019 年,牧草地、耕地、未利

用地、建设用地向林地转移 1 219.22 hm²,呈现牧草、耕地、未利用地、建设用地向林地回流的趋势,核心区牧民逐步搬迁,部分天然牧草在气候、土壤、环境等因素作用下成长为灌木林和有林地,部分适宜开垦为耕地的荒草地被开发成耕地,生态建设加强后,保护区范围建设项目有序退出,退耕还林,未利用土地和建设用地规划更加合理,研究区在环境保护整改方面取得成效,此外天然林保护、退耕还林、生态移民、封山禁牧等林业生态工程建设上的效果良好,生态环境日益好转。

表 3 乔木林海拔、坡度、坡向梯度的碳储量和碳密度

Table 3 Carbon storage and carbon density of arbor forests under different altitudes, slopes, and aspect gradients

分类	梯度	2016 年碳储量 ($\times 10^4$ t)	2016 年碳密度/ ($t \cdot hm^{-2}$)	2019 年碳储量 ($\times 10^4$ t)	2019 年碳密度/ ($t \cdot hm^{-2}$)
海拔	2 500 m 以下	19.54	81.92	23.93	100.54
	2 500~3 000 m	647.11	86.23	804.50	107.50
	3 000~3 500 m	437.84	84.38	534.95	104.07
	3 500 m 以上	0.11	88.09	0.12	103.62
坡度	0°~10°	65.54	90.05	80.54	111.21
	10°~20°	301.59	87.54	371.95	108.40
	20°~30°	438.62	84.16	542.16	104.56
	30°~40°	259.69	83.92	321.04	104.59
	40°~50°	36.14	88.20	44.20	109.17
	50°以上	3.02	89.57	3.62	109.28
坡向	阴坡	682.12	87.62	845.67	109.15
	半阴	152.67	84.02	187.53	103.91
	半阳	227.49	83.93	280.75	104.43
	阳坡	42.31	68.95	49.56	81.59

表 4 祁连山林区 2016—2019 年土地利用类型转移矩阵

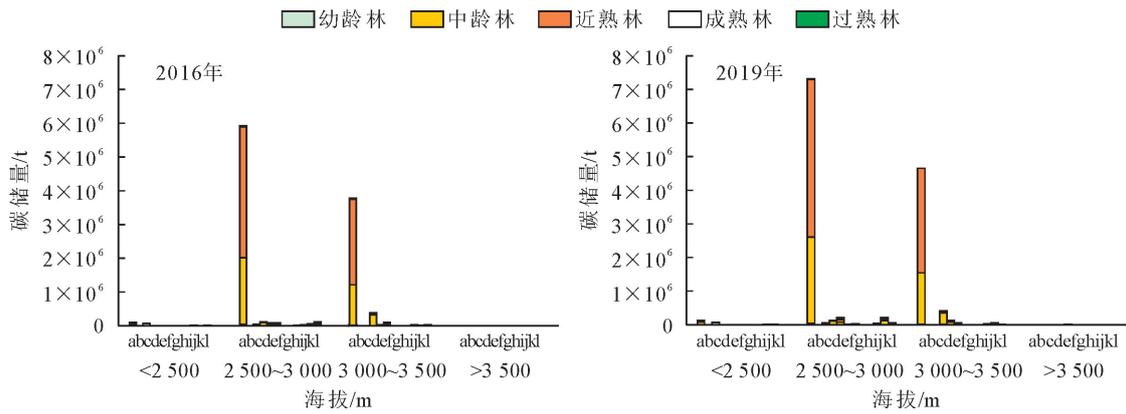
Table 4 Transfer matrix of land utilize category from 2016 to 2019 in Qilian Mountain forest area

土地利用类型	林地	耕地	牧草地	水域	未利用地	建设用地
林地	691 984.64	0.55	39.51	0.71	2.43	4.10
耕地	8.79	17 279.72	0.04	0.00	0.00	1.06
牧草地	1 149.35	44.39	713 302.02	5.65	0.02	32.14
水域	6.80	0.00	5.37	46 350.37	0.00	21.29
未利用地	93.19	0.00	0.00	0.63	349 710.07	1.57
建设用地	14.48	1.90	4.62	0.15	0.00	7 564.59

3 结论与讨论

InVEST 模型可以很好的探究地形因素对碳储量的影响,刘冠等^[6]基于模型估算了 1999—2016 年麻塔流域的碳储量,得出了碳储量增加的空间位置主要分布在半阴坡、中上坡以及坡度 10°~30°的区域,张影等^[8]得出了白龙江流域碳储量海拔和坡度的高值主要分布在 1 500~3 500 m 和 25°~40°区段,与本研究的林地的碳储量空间分布特征相似,主要原因是林地是区域碳储量的主要贡献地类,植被的生长条件受地形因素的影响也比较明显。而前人研究对林地碳密度的选取主要引用他人文献中相近

地域的林地平均碳密度值,研究重点集中在土地利用类型之间的转移对碳储量的时空变化影响,忽略了不同优势树种和龄组的碳储量差异,本研究区的优势树种以云杉为主,2016 年面积占比达到 80%,其中中龄林和近熟林占比达到 98%,通过模型计算得出研究区乔木林的平均碳密度从 66 $t \cdot hm^{-2}$ (2016 年)提升为 81.71 $t \cdot hm^{-2}$ (2019 年),高于 2010 年甘肃省乔木林平均碳密度 51.80 $t \cdot hm^{-2}$ ^[12],高于 2016 年甘肃省天然林碳密度 41.95 $t \cdot hm^{-2}$ ^[13]。云杉属于寒温性针叶林,单位蓄积和单位碳储量较高,赵传燕等^[14]研究得出祁连山青海云杉的碳密度为 100.46 $t \cdot hm^{-2}$,本研究通计算得



a. 云杉; b. 落叶松; c. 油松; d. 其他柏类; e. 桦类; f. 其他硬阔类; g. 杨类; h. 柳树; i. 其他软阔类; j. 针叶混; k. 针阔混; l. 阔叶混。下同。

图 3 不同海拔梯度下各优势树种各龄组的碳储量

Fig. 3 Carbon storage of dominant tree species and age groups under different altitude gradients

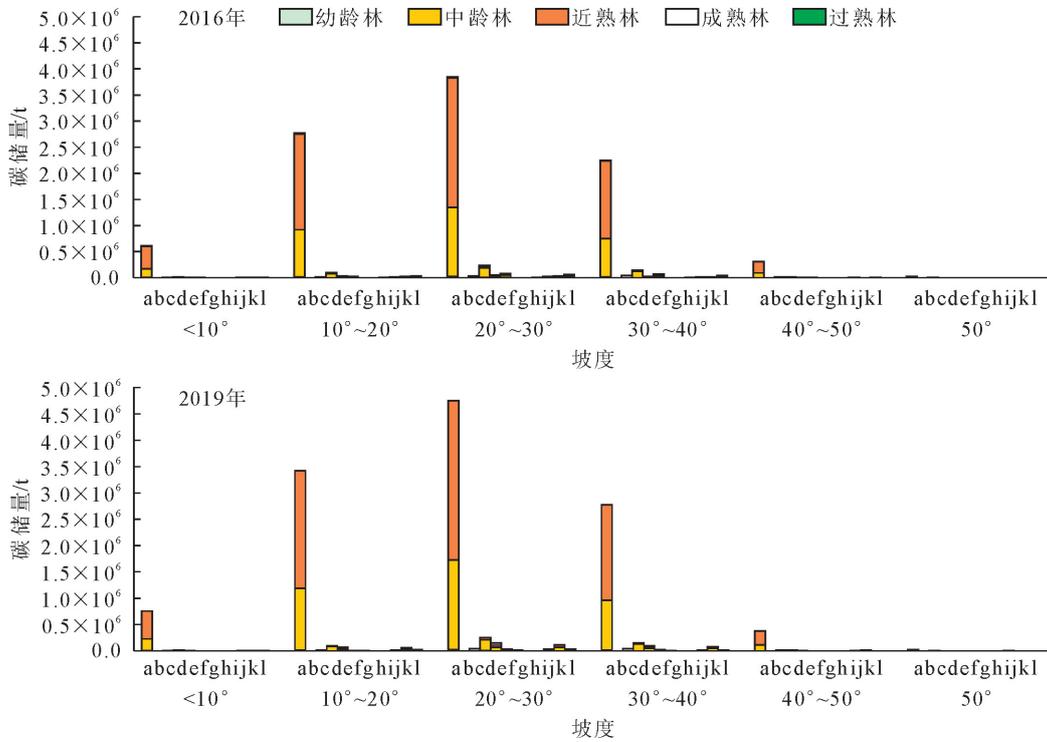


图 4 不同坡度梯度下各优势树种各龄组的碳储量

Fig. 4 Carbon storage of dominant tree species and age groups under different slope gradients

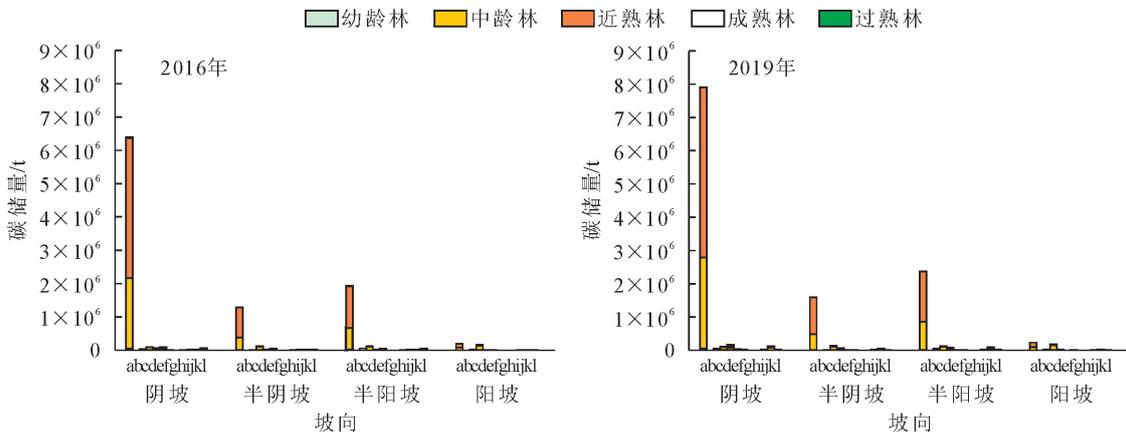


图 5 不同坡向下各优势树种各龄组的碳储量

Fig. 5 Carbon storage of dominant tree species and age groups in different aspects

出研究区对应年份的各优势树种的碳密度的值,分优势树种在 InVEST 模型中进行碳密度赋值,有助于提升模型估算准确性。

结果表明:在分布特点上,研究区碳储量的分布呈现北部片状—中部点状片状—南部线状的分布特征。2016—2019 年,碳储量随海拔梯度先增后减,从大到小依次为 2 500~3 000、3 000~3 500、<2 500、>3 500 m;随坡度梯度先增后减,20°~30°坡度梯度的碳储量值最大;坡向梯度的碳储量分布为阴坡>半阳坡>半阴坡>阳坡。碳密度随海拔梯度波动增减;随坡度梯度先减后增;碳密度的坡向分布为阴坡>(半阴坡;半阳坡)>阳坡。2016—2019 年,乔木林年均碳汇量达到 86.30 万 t。在增长量上,云杉的碳储量增长量最大(238.26 万 t),占乔木林碳储量总增加值(258.91 万 t)的 92%,碳储量在海拔、坡度、坡向梯度均有不同程度增长,且以未来碳汇潜力的中龄林和近熟林碳储量增长为主。此外土地利用类型转移呈现出牧草、耕地、未利用地、建设用地向林地回转的趋势,这在一定程度上反应了天然林资源保护、森林抚育、林地植被的恢复、退化林修复、补植补造等工程和林地保护措施有效地改善了生态环境,一定程度上提升了林地林木质量和研究区碳汇潜力。

参考文献:

- [1] 马学威,熊康宁,张俞,等. 森林生态系统碳储量研究进展与展望[J]. 西北林学院学报,2019,34(5):62-72.
MA X W, XIONG K N, ZHANG Y, *et al.* Research progresses and prospects of carbon storage in forest ecosystems[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 62-72. (in Chinese)
- [2] 汪有文. 祁连山生态环境问题及治理措施[J]. 吉林农业, 2018(22):128.
- [3] 陈琰. 多元治理视域下祁连山自然保护区生态环境治理体系建设研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [4] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. 热带地理, 2019, 39(3):397-409.
LIU X J, LI X, LIANG X, *et al.* Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model[J]. Tropical Geography, 2019, 39(3): 397-409. (in Chinese)
- [5] 刘洋,张军,周冬梅,等. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10):4052-4065.
LIU Y, ZHANG J, ZHOU D M, *et al.* Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065. (in Chinese)
- [6] 刘冠,李国庆,李洁,等. 基于 InVEST 模型的 1999—2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1):267-274.
LIU G, LI G Q, LI J, *et al.* Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model. [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274. (in Chinese)
- [7] 巩杰,马学成,张玲玲,等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3):191-196.
GONG J, MA X C, ZHANG L L, *et al.* Spatiotemporal variation of habitat quality in Bailongjiang watershed in Gansu based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 191-196. (in Chinese)
- [8] 张影,谢余初,齐姗姗,等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8):1585-1593.
ZHANG Y, XIE Y C, QI S S, *et al.* Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang watershed in Gansu based on InVEST model[J]. Resources Science, 2016, 38(8): 1585-1593. (in Chinese)
- [9] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8).
- [10] 石小亮,张颖,韩争伟. 森林碳汇计量方法研究综述——基于北京市的选择[J]. 林业经济, 2014, 36(11):44-49.
SHI X L, ZHANG Y, HAN Z W. Review of forest carbon sink measurement methods——based on choice of Beijing[J]. Forestry Economic, 2014, 36(11): 44-49. (in Chinese)
- [11] 廖慧,舒章康,金君良,等. 1980—2015 年黄河流域土地利用变化特征与驱动力[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(1): 129-139.
LIAO H, SHU Z K, JIN J L, *et al.* Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River basin from 1980 to 2015[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 129-139. (in Chinese)
- [12] 彭焕华,姜红梅,赵传燕. 甘肃省森林植被碳储量及空间分布特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7):154-158.
PENG H H, JIANG H M, ZHAO C Y. Carbon storage of forest vegetation and its spatial distribution in Gansu Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(7): 154-158. (in Chinese)
- [13] 程小云,张龙生,李源,等. 甘肃省天然林碳汇现状及其动态变化分析[J]. 西部林业科学, 2020, 49(2):82-90.
CHENG X Y, ZHANG L S, LI Y, *et al.* Analysis on status and dynamic changes of natural forest carbon sink in Gansu Province[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(2): 82-90. (in Chinese)
- [14] 赵传燕,冯兆东,刘勇. 祁连山区森林生态系统生态服务功能分析——以张掖地区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1):66-70.
ZHAO C Y, FENG Z D, LIU Y. Analysis of Ecological Service of Forest Ecosystem in Qilian Mountain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(1): 66-70. (in Chinese)