

文章编号:1671-6833(2024)03-0007-07

河南省森林固碳量与碳汇价值评估

于鲁冀¹, 张亚慧¹, 樊雷², 王莉^{1,3}, 刘莹莹¹

(1. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省土地整理中心, 河南 郑州 450003; 3. 郑州大学 河南省
减污降碳协同工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了解当前黄河中下游森林固碳量及碳汇价值现状, 助力黄河流域生态保护和高质量发展, 基于全国森林清查和国土调查数据, 以河南省为例, 结合蓄积量转换法原理运用改进后的生物量转换因子连续函数法来测算森林固碳量动态变化和碳汇价值。结果表明: 河南省森林固碳量由 2008 年的 1.76×10^8 t 上升至 2018 年的 2.78×10^8 t, 年固碳量较高的森林类型为阔叶混和栎类, 固碳量按龄级分布状况为幼龄林最大、过熟林最小, 森林固碳量的空间格局表现为“西、南高, 东、北低”, 主要分布在南阳、洛阳和三门峡; 森林碳汇价值由 2008 年的 492.47 亿元增加至 2018 年的 778.68 亿元, 年均增长 28.62 亿元, 2018 年阔叶混、栎类和杨树的碳汇价值占碳汇总价值的 79.93%。针对当前河南省森林建设存在的问题, 提出提升森林固碳能力和推动森林碳汇价值实现的建议, 可为促进黄河流域高质量发展提供强劲动力。

关键词: 森林; 固碳量; 碳密度; 碳汇价值; 蓄积量; 空间分布; 价值评估

中图分类号: X37; S719

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.06.002

森林能将大气中的 CO_2 吸收, 并将其固存到植被或土壤里^[1], 是生态系统中最大的碳库。当前全国 CO_2 排放量增速放缓, 但总量仍呈现上升趋势。为应对 CO_2 排放导致的气候变化, 森林固碳是关键一环。因此, 定量评估森林固碳量及碳汇价值对保障人民的生产生活、合理开发利用森林资源、制定林业相关管理政策、促进碳汇生态产品价值实现等具有重要意义。

当前碳汇计量方法主要包括生物量法、蓄积量法、生物量回归方程和转换因子连续法等^[2]。近年来, 多位学者基于森林资源清查结果对全国或某一地区的森林固碳量展开研究^[3], 其中生物量转换因子连续函数法、蓄积量扩展法是使用较多的固碳量评估方法^[4-5]。学者普遍认为以上两种方法的技术要求低且可行性较强, 但生物量转换因子连续函数法仅对森林林木生物量固碳量进行估算^[6], 未考虑林下植被和林地固碳量, 不能准确反映森林生态系统的固碳量, 而蓄积量扩展法考虑的固碳量较为全面, 但存在计算较为宏观、精度不高等缺点^[7]。因此, 基于蓄积量扩展法原理, 对生物量转换因子连续

函数法进行改进, 不仅保障了计算精度且对森林固碳量的分析较为全面。

目前关于黄河流域森林固碳量的研究成果多是从国家和流域尺度获得的^[8-11], 针对流域特定省份的不同林种固碳量研究较少, 现有的森林固碳研究不仅测算方法单一, 且为 2003、2008、2013 年的森林固碳量数据^[12-15], 缺少近几年黄河流域的森林固碳量动态变化和碳汇价值的研究。河南省作为黄河中下游生态保护的重要主体和建设黄河流域生态屏障的坚实力量, 2021 年底, 在《河南省“十四五”生态环境保护 and 生态经济发展规划》中提出, 要坚持“双碳”引领, 全力打造黄河流域生态保护和高质量发展示范区, 增强生态系统固碳增汇能力。

鉴于此, 本文基于第七次和第九次森林资源连续清查资料, 结合蓄积量扩展法原理, 运用改进后的生物量转换因子连续函数法, 对 2008 年至 2018 年黄河中下游河南省森林固碳量变化及其空间分布情况进行评估分析, 并运用造林成本法评估森林碳汇经济价值, 为未来提升黄河流域森林经营管理水平、开展森林碳汇交易和制定生态补偿标准提供参考。

收稿日期: 2023-05-11; 修订日期: 2023-06-15

基金项目: 中国工程院院地合作项目(2021HENZDA01); 河南省自然资源厅资助项目(20210717A)

作者简介: 于鲁冀(1962—), 男, 山东威海人, 郑州大学教授, 主要从事环境管理与经济研究, E-mail: yulujie@126.com。

引用本文: 于鲁冀, 张亚慧, 樊雷, 等. 河南省森林固碳量与碳汇价值评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(3): 7-13. (YU L J, ZHANG Y H, FAN L, et al. Evaluation of carbon sequestration and carbon sink value of forests in Henan Province[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(3): 7-13.)

1 研究区域概况

河南省位于中国中部,地处黄河流域中下游,东部与安徽省、山东省接壤,北部与河北省、山西省相邻,西部与陕西省相连,南部与湖北省交界,全省总面积为 $16.7\times10^4\text{ km}^2$,地势西高东低,境内有山地、平原、丘陵。据第九次森林资源连续清查资料,河南省森林面积为 $4.03\times10^6\text{ hm}^2$,森林覆盖率和森林蓄积量分别达到了 24.14%和 $2.07\times10^8\text{ m}^3$ 。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 森林固碳量评估方法

综合考虑研究的可操作性、经济性与准确性等因素,选取生物量转换因子连续函数法测算河南省森林林木生物量固碳量,但在此方法基础上结合蓄积量扩展法原理,考虑林下植被(含凋落物)和林地固碳量。

生物量转换因子连续函数法是由 Fang 等^[16]提出的,具体公式为

$$B = aV + b. \tag{1}$$

式中: B 为森林单位面积生物量, t/hm^2 ; V 为森林单位面积蓄积量, m^3/hm^2 ; a 、 b 为转换参数。

以往运用生物量转换因子连续函数法研究森林固碳量多采用 Fang 等^[16]基于全国 758 个生物量样地拟合得到的 21 个林种生物量与蓄积量间的转换参数,存在样本数不足的缺陷。Zhang 等^[17]基于全国 3 543 个样地的实测生物量和体积数据,对转换参数进行拟合改进,极大地提高了估算精度^[5]。故本文采用 Zhang 等^[17]的相关研究,选取河南省 10 个森林蓄积量和面积具有优势的林种(柏木、栎类、杨树、马尾松、油松、硬阔类、软阔类、阔叶混、针阔混和针叶混),各林种的生物量与蓄积量转换参数见表 1。

森林生物量乘以生物量碳转化系数即得到森林林木生物量固碳量,具体公式为

$$C_0 = \delta \sum B_i A_i. \tag{2}$$

式中: C_0 为森林林木生物量固碳量, t ; B_i 为第 i 类林种生物量, t ; A_i 为第 i 类林种的面积, hm^2 ; δ 为生物量碳转化系数,本研究选择国际上普遍使用的生物量碳转化系数 0.5^[18]来计算森林的固碳量。

所研究的森林固碳量包括森林林木生物、林下植物和林地的固碳量。该森林固碳量计算原理与蓄积量扩展法^[19]相同,在蓄积量扩展法中,林木生物量固碳量分别与林下植物、林地相对应的碳转换系

表 1 河南省主要林种生物量与蓄积量转换参数
Table 1 Conversion parameters of biomass and volume of main forest species in Henan Province

林种	a	b	R^2
柏木	0.490 4	30.427 0	0.960 8
栎类	0.784 8	16.715 0	0.954 2
杨树	0.625 1	11.462 0	0.853 7
马尾松	0.663 2	7.265 6	0.795 9
油松	0.770 9	8.863 1	0.925 4
硬阔类	0.891 8	28.441 0	0.810 3
软阔类	0.891 8	28.441 0	0.810 3
阔叶混	0.739 3	43.210 0	0.731 4
针阔混	0.438 5	52.905 0	0.717 9
针叶混	0.744 2	26.806 0	0.702 6

注:软阔类包括榆树和其他软阔类,硬阔类包括刺槐和其他硬阔类。

数相乘即可得到对应的固碳量。林木生物量固碳量即森林树木包括枝丫、树根等生物量的固碳量;林下植物固碳量即森林树木下生长的植物和树叶、树枝、枯木残体等凋落物的固碳量;林地固碳量即森林土壤固碳量^[7],具体公式为

$$C = C_0 + C_1 + C_2 = C_0 + \eta C_0 + \lambda C_0. \tag{3}$$

式中: C 为森林总固碳量, t ; C_0 为林木生物量固碳量, t ; C_1 为林下植物固碳量, t ; C_2 为林地固碳量, t ; η 为林下植物碳转换系数,取 0.195; λ 为林地碳转换系数,取 1.244(以上系数取自国际通用的 IPCC 默认通用值^[19])。

2.1.2 森林碳汇价值评估方法

当前中国森林碳汇价值评估未统一方法,而不同的方法得出的结果具有较大差异,使用较多的方法主要有造林成本法、市场价值法、碳税法^[20]。本文选取从成本角度估算碳汇价值的造林成本法核算森林碳汇价值,具体公式为

$$U = C \times M. \tag{4}$$

式中: U 为森林碳汇价值,元; C 为森林总固碳量, t ; M 为单位碳汇价格,元/ t ,选取造林成本 279.73 元/ t ^[21]。

2.2 数据来源及处理

河南省各林种的面积、蓄积量数据来源于第七次和第九次森林资源连续清查资料,河南省各市的森林面积来源于河南省二类森林资源调查、第三次全国国土调查。由于河南省二类森林资源调查和第三次全国国土调查主要于 2007 年和 2019 年开展,与本文研究的 2008 年和 2018 年河南省固碳量年份较为接近,故将以上年份的各市森林面积代替所研究年份的数据。采用各市森林面积占全省森林面积的比重作为各市森林固碳的比例,以估算各市森林

固碳量。

3 结果与分析

3.1 不同林种固碳量动态变化

2008—2018 年河南省主要林种固碳量变化情况见表 2。森林的固碳量和碳密度分别由 2008 年的 1.76×10^8 t、 63.14 t/hm^2 增加到 2018 年的 2.78×10^8 t、 85.94 t/hm^2 ,高于贾松伟^[13]利用生物量转换因子连续函数法计算得到的 2008 年森林固碳量 0.70×10^8 t,接近张明珠^[22]基于蓄积量扩展法得到的 2008 年森林固碳量约 1.50×10^8 t,可见结果具有一定可靠性。

表 2 2008—2018 年河南省主要林种固碳量
Table 2 Carbon sequestration of main forest types in Henan Province from 2008 to 2018

林种	固碳量/ 10^4 t		碳密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$		年均固碳量/ $(10^4\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$
	2008 年	2018 年	2008 年	2018 年	
柏木	297.23	536.79	49.70	50.26	23.96
栎类	4 872.68	5 845.96	57.95	75.11	97.33
杨树	5 307.53	5 659.29	57.61	90.75	35.18
马尾松	562.56	660.45	37.48	62.90	9.79
油松	345.61	402.90	44.83	61.05	5.73
硬阔类	2 504.43	1 349.29	78.88	79.14	-115.51
软阔类	553.48	1 193.74	57.30	72.52	64.03
阔叶混	2 494.11	10 745.61	99.21	101.02	825.15
针阔混	583.82	1 206.11	95.71	95.12	62.23
针叶混	83.66	236.69	65.36	70.03	15.30

不同林种的固碳量及碳密度变化存在较大差异。在 2008—2018 年间,河南省主要林种的固碳量和碳密度均增加,仅硬阔类固碳量和针阔混碳密度略下降,不同林种的年均固碳量表现为阔叶混最大、硬阔类最小。

2008 年河南省固碳量前 4 的林种为杨树、栎类、硬阔类和阔叶混;2018 年为阔叶混、栎类、杨树和硬阔类,该 4 类林种因其面积和蓄积量优势,固碳量位于全省前列。相较于 2008 年,2018 年阔叶混、

栎类、杨树和硬阔类的固碳变化率分别为 330.84%、19.97%、6.63%、-46.12%。相对于纯林,阔叶混交林树种组成多样化的特点可以使其提高韧性、降低风险,从而适应气候变化。河南省近年来加大了对混交林的种植力度,故其蓄积量和面积增加较多。而刺槐等硬阔类多是在 20 世纪 50—60 年代从国外栽植,多数已进入轮伐期;此外由于人地矛盾突出,伐刺槐等林种改种经济林等现象时有发生,导致近年来硬阔类面积和蓄积量减少,固碳能力下降。

3.2 各龄级林种固碳量动态变化

2008—2018 年间河南省森林各龄级的面积、蓄积量、固碳量和碳密度变化情况见图 1。

河南省森林面积、蓄积量、固碳量按龄级分布均表现为幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林。河南省 2008 年的森林碳密度按龄级分布状况与前者完全相反,2018 年与前者相比有少许变化,表现为过熟林>成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林。2008 年和 2018 年幼龄林面积分别占各林龄总面积的 60.07%和 54.03%。2018 年幼龄林蓄积量比 2008 年净增加了 $0.15\times10^8\text{ m}^3$,固碳量增长率为 47.53%。过熟林的碳密度从 2008 年的 134.74 t/hm^2 减少至 2018 年的 122.91 t/hm^2 ,但均为龄级组中最高。2008—2018 年,除中龄林面积减少了 10.86%外,其余林龄的面积均增加,近熟林的面积增长最多,增长率为 183.57%;各林龄的蓄积量和固碳量均增加,其中成熟林增长率最高,分别为 281.07%和 195.29%,过熟林的增长率最低,分别为 13.48%和 6.58%。

表 3 所示为 2008 年和 2018 年河南省 10 个林种不同龄级组的固碳量。不同林种各龄级的固碳量变化较大。2008—2018 年间,柏木、软阔类、阔叶混和针叶混的幼龄林、中龄林、近熟林固碳量均增长,杨树、油松和硬阔类的幼龄林、中龄林固碳量呈现出减小趋势,杨树、马尾松和油松的近熟林、成熟林固碳量呈现增加趋势,栎类和阔叶混的成熟林固碳量

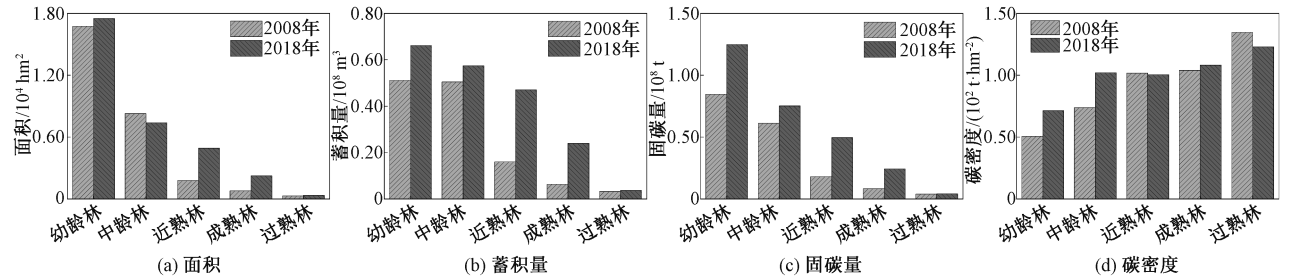


图 1 河南省森林各龄级的面积、蓄积量、固碳量和碳密度

Figure 1 Area, volume, carbon sequestration and carbon density of forests at different ages in Henan Province

均增加、过熟林均减小,硬阔类和软阔类的成熟林固碳量均减小、过熟林均增加。

表 3 不同林种各龄级的固碳量

Table 3 Carbon sequestration of different forest types at different ages						
林种	年份	固碳量/10 ⁴ t				
		幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
柏木	2008	163.80	103.23	30.20		
	2018	314.89	130.52	91.38		
栎类	2008	2 785.36	1 328.10	430.80	174.69	153.72
	2018	3 850.13	1 310.41	401.70	261.60	22.13
杨树	2008	2 151.47	2 450.39	535.39	145.76	24.52
	2018	316.69	1 041.08	2 707.17	1 434.39	159.96
马尾松	2008	281.38	169.03	93.96	18.18	
	2018	72.04	324.18	191.96	72.28	
油松	2008	76.62	175.11	63.13	18.38	12.36
	2018	24.31	167.98	157.30	53.31	
硬阔类	2008	1 111.74	717.72	273.26	265.06	136.65
	2018	410.87	278.81	228.25	258.42	173.06
软阔类	2008	269.41	178.11	55.59	50.37	
	2018	504.02	398.75	259.08	14.47	17.41
阔叶混	2008	1 339.80	729.96	209.72	149.80	64.84
	2018	6 266.91	3 393.56	791.97	247.83	45.34
针阔混	2008	244.47	232.82	106.53		
	2018	657.55	366.67	80.09	85.75	
针叶混	2008	47.03	26.59	10.05		
	2018	80.14	110.58	45.97		

同一龄级不同林种固碳变化量也具有较大差异。2008—2018 年间,在幼龄林中,阔叶混、针阔混的固碳增长率较高,分别为 367.75%和 168.97%,杨树和马尾松的固碳降低较多,分别为-85.28%和 -74.40%;在中龄林中,除栎类、杨树、油松、硬阔类的固碳量减少外,其余林种的固碳量均增加,其中阔叶混的固碳量增幅为 364.90%;在近熟林中,杨树的固碳量增长最多,由 2008 年的 5.35×10^6 t 增长至 2018 年的 2.71×10^7 t,而针阔混的降幅最高,为 24.82%;在成熟林和过熟林中,固碳量增幅最高的

林种均为杨树,其增幅分别达到了 884.08%和 552.37%,而成熟林中软阔类下降幅度最大,过熟林中栎类下降幅度最大。

近年来河南省注重优化树种结构,改变纯林现象,故加大了对混交林的科学营造力度。因此,在 2008—2018 年间,由于阔叶混、针阔混、针叶混等混交林林种的中幼龄林面积和蓄积量增加,故混交林的幼龄林、中龄林固碳量增幅较高。

3.3 森林固碳量空间分布动态变化

图 2 为河南省森林固碳量空间变化情况。由图 2 可知,河南省森林固碳量主要呈现“西、南高,东、北低”的空间格局,其中固碳量主要分布在南阳市、洛阳市和三门峡市,2018 年这三市固碳总量为 1.56×10^8 t,占全省总量 55.90%,固碳量最小的为漯河市,其固碳量为 81.42×10^4 t,仅占全省总量的 0.29%,表明河南省森林固碳量存在较大的空间差异。这是由于河南省森林资源分布不均,50%以上林业用地、森林面积和森林蓄积分布在伏牛山区,故位于伏牛山区的地市固碳量占全省一半以上。2008—2018 年,除商丘市、濮阳市和漯河市外,其余地市森林固碳量均增加,其中洛阳市增幅最大,为 86.10%,平顶山市次之,为 84.37%,而商丘市的降幅最大,达到了 47.33%。主要原因可能在于 10 年间洛阳市、平顶山市扎实推进国土绿化行动,其山地和丘陵面积分别占全市土地总面积的 80%和 70%,是国土绿化提速行动的主要战场,故森林资源呈现数量增加、质量提高的态势,而商丘市是国家粮食生产核心示范区,土地资源首先要保障粮食供给,10 年间由于林地面积减小而固碳量呈现下降态势。

此外,河南省各市森林固碳量等级高低与各龄级森林的固碳量强弱有直接关系,固碳量等级越高,其幼龄林和中林龄的固碳量占比越高。中龄林、幼龄林主要分布在三门峡、洛阳、南阳和信阳市,主要是因为豫西伏牛山区、豫南桐柏山和大别山区是省

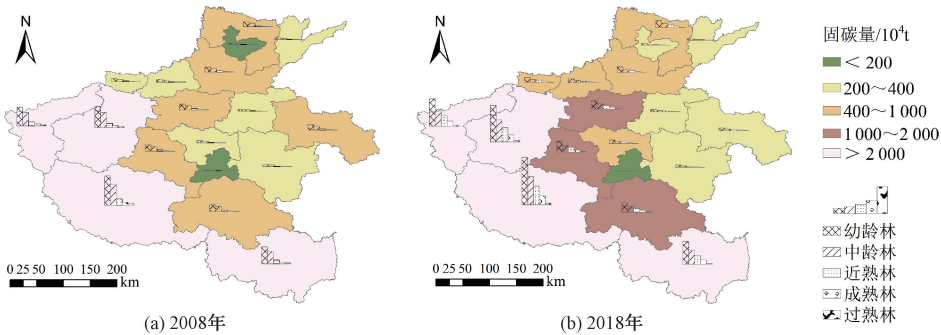


图 2 河南省森林固碳量空间变化

Figure 2 Spatial change of forest carbon sequestration in Henan Province

内科学开展国土绿化的重点区域,近年来通过在该区域进行造林工作,形成的中龄林、幼龄林面积较多,故未来应加强对该区域中龄林、幼龄林的抚育工作,优化林分结构,培育稳定的森林生态系统,以促进碳汇能力提升。

3.4 不同林种碳汇价值估算

基于造林成本法测算得到的河南省森林碳汇经济价值由2008年的492.47亿元增加至2018年的778.68亿元,单位面积森林碳汇价值在2008年和2018年分别为13 661.31元/hm²和24 040.00元/hm²,森林碳汇总价值和单位面积价值分别增长了286.21亿元和10 378.69元/hm²,不同林种的碳汇价值量见图3。

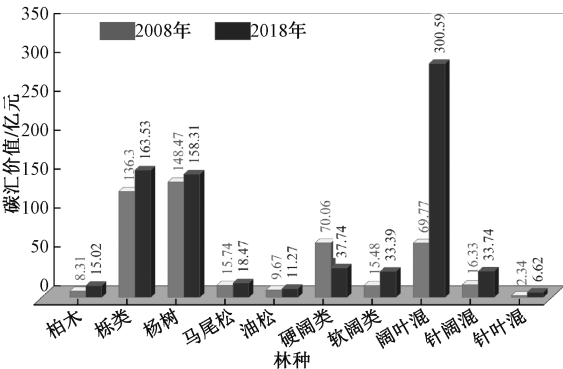


图3 不同林种碳汇价值量

Figure 3 Carbon sink value of different forest types

2008—2018年,10个林种的碳汇价值均增加,但不同林种的碳汇价值量变化具有较大差异,其中碳汇价值较高的林种由杨树>栎类>硬阔类(2008年)转变为阔叶混>栎类>杨树(2018年)。2018年森林碳汇的主要贡献者阔叶混、栎类和杨树的碳汇价值分别为300.59亿元、163.53亿元和158.31亿元,3个林种的碳汇价值总量占2018年森林碳汇总价值的79.93%,其中阔叶混的碳汇价值增长幅度最大。随着河南省森林固碳量的增加,其碳汇价值也随之增加,探索通过市场化方式实现森林碳汇价值是未来林业发展的方向和趋势。

4 结论与建议

(1)河南省森林固碳量由2008年的 1.76×10^8 t上升至2018年的 2.78×10^8 t,不同林种的年固碳量表现为阔叶混>栎类>软阔类>针阔混>杨树>柏木>针叶混>马尾松>油松>硬阔类,碳密度由2008年的63.14 t/hm²增加到2018年的85.94 t/hm²。

(2)河南省面积、森林蓄积量和固碳量按龄级分布状况均为幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林,碳密度按龄级分布状况为过熟林>成熟林>中

龄林>近熟林>幼龄林。

(3)河南省森林固碳量的空间分布呈现“西、南高,东、北低”的格局,其中固碳量主要分布在南阳市、洛阳市和三门峡市,且固碳量等级越高的地市,其幼龄林和中林龄的固碳量占比也越高。

(4)河南省森林碳汇经济价值从2008年的492.47亿元增长到2018年的778.68亿元,年均增长28.62亿元。阔叶混、栎类和杨树是河南省森林碳汇的主要贡献者,2018年3个林种碳汇总价值占河南省森林碳汇总价值的79.93%。

(5)在未来的森林建设中,要充分考虑河南省区域地理条件,科学规划各区域林业建设,在保障土地供给与造林需求的基础上,多构建混交林,加大中幼龄林的抚育工作,提升现有森林质量促进森林碳汇功能增强。此外,要尽快探索开展“碳汇生态补偿”“碳汇交易”等碳汇价值实现路径,促进森林碳汇生态价值转化为经济价值。

参考文献:

[1] 蔡伟祥,徐丽,李明旭,等. 2010—2060年中国森林生态系统固碳速率省际不平衡性及调控策略[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1808—1820.
CAI W X, XU L, LI M X, et al. Imbalance of inter-provincial forest carbon sequestration rate (2010—2060) in China and its regulation strategy[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1808—1820.
[2] SUN W L, LIU X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China[J]. Forest Ecosystems, 2019, 7(1): 39—52.
[3] 陈元媛,温作民,谢煜. 森林碳汇的公允价值计量研究: 基于森林资源培育企业的角度[J]. 生态经济, 2018(4): 45—49.
CHEN Y Y, WEN Z M, XIE Y. Fair value measurement on forest carbon sink from the view of forest resources cultivation enterprises[J]. Ecological Economy, 2018(4): 45—49.
[4] 张峰,彭祚登. 北京市森林碳储量与碳汇经济价值研究[J]. 林业资源管理, 2021(6): 52—58.
ZHANG F, PENG Z D. Biomass carbon stocks and carbon stock economic value of forests in Beijing[J]. Forest Resources Management, 2021(6): 52—58.
[5] 张春华,居为民,王登杰,等. 2004—2013年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1739—1749.
ZHANG C H, JU W M, WANG D J, et al. Biomass carbon stocks and economic value dynamics of forests in Shandong Province from 2004 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1739—1749.

[6] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
LIU G H, FU B J, FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 733-740.

[7] 令狐大智,罗溪,朱帮助. 森林碳汇测算及固碳影响因素研究进展[J]. 广西大学学报(哲学社会科学版), 2022, 44(3):142-155.
LINGHU D Z, LUO X, ZHU B Z. Research progress on calculation of forest carbon sink and influencing factors of carbon sequestration [J]. Journal of Guangxi University (Philosophy and Social Science), 2022, 44(3):142-155.

[8] LI P, ZHU J, HU H, et al. The relative contributions of forest growth and areal expansion to forest biomass carbon [J]. Biogeosciences, 2016, 13(2): 375-388.

[9] YANG J M, JI X X, DEANE D, et al. Spatiotemporal distribution and driving factors of forest biomass carbon storage in China: 1977-2013[J]. Forests, 2017, 8(7): 263.

[10] 张煜星,王雪军,蒲莹,等. 1949—2018 年中国森林资源碳储量变化研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1-14.
ZHANG Y X, WANG X J, PU Y, et al. Changes in forest resource carbon storage in China between 1949 and 2018[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 1-14.

[11] 贾松伟. 黄河流域森林植被碳储量分布特征及动态变化[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 78-82, 88.
JIA S W. Carbon storage of forest vegetation and its dynamic changes in Yellow River Basin based on continuous forest resources inventory[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 78-82, 88.

[12] 光增云. 河南省森林碳储量及动态变化研究[J]. 林业资源管理, 2006(4):111-116, 122.
GUANG Z Y. Study on changes in forest biomass carbon storage in Henan Province[J]. Forest Resources Management, 2006(4):111-116, 122.

[13] 贾松伟. 河南省乔木林碳储量动态变化及其碳汇经济价值估算[J]. 河南农业科学, 2014, 43(5):149-153.
JIA S W. Dynamic changes of carbon storage and estimation of carbon sink economic value of high-forest in Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, 43(5):149-153.

[14] 光增云. 河南森林植被的碳储量研究[J]. 地域研究与开发, 2007, 26(1):76-79.
GUANG Z Y. Study on forest biomass carbon storage in Henan Province[J]. Areal Research and Development, 2007, 26(1):76-79.

[15] 刘领,王艳芳,悦飞雪,等. 基于森林清查资料的河南省森林植被碳储量动态变化[J]. 生态学报, 2019, 39(3):864-873.
LIU L, WANG Y F, YUE F X, et al. Dynamic of forest vegetation carbon storage in Henan Province based on forest inventory data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3):864-873.

[16] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[17] ZHANG C H, JU W M, CHEN J M, et al. China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008[J]. Climatic Change, 2013, 118(3): 933-948.

[18] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等. 1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4678-4686.
ZHANG C H, WANG L Y, SONG Q W, et al. Biomass carbon stocks and dynamics of forests in Heilongjiang Province from 1973 to 2013 [J]. China Environmental Science, 2018, 38(12): 4678-4686.

[19] 张娟,陈钦. 森林碳汇经济价值评估研究——以福建省为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5):121-128.
ZHANG J, CHEN Q. Study on economic value assessment of forest carbon sequestration-taking Fujian Province as an example[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2021,43(5):121-128.

[20] 徐洪振,张吉岗,郑沛. 基于碳交易市场的云南省森林生态固碳价值评估[J]. 生态经济, 2019, 35(4):33-38.
XU H Z, ZHANG J G, ZHENG P. Evaluation of carbon sequestration value of forest ecosystem in Yunnan Province based on market mechanism of carbon trading [J]. Ecological Economy, 2019, 35(4):33-38.

[21] 黄宰胜,陈钦. 基于造林成本法的林业碳汇成本收益影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38(3):485-492.
HUANG Z S, CHEN Q. Influencing factors analysis of forestry carbon sequestration cost-benefit based on afforestation cost methods[J]. Resources Science, 2016, 38(3):485-492.

[22] 张明珠. 近 15 年中国省域森林碳储量时空演变分析[J]. 林业调查规划, 2018, 43(4): 1-6.
ZHANG M Z. Spatio-temporal evolution of forest carbon reserves in China in recent 15 years[J]. Forest Inventory and Planning, 2018, 43(4): 1-6.

Evaluation of Carbon Sequestration and Carbon Sink Value of Forests in Henan Province

YU Luji¹, ZHANG Yahui¹, FAN Lei², WANG Li^{1,3}, LIU Yingying¹

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Province Land Consolidation Center, Zhengzhou 450003, China; 3. Research Centre of Engineering and Technology for Synergetic Control of Environmental Pollution and Carbon Emissions of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This study was carried out to understand the current status of forest carbon sequestration and carbon sink value in the middle and lower reaches of the Yellow River, and to contribute to the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. Based on the data of national forest inventory and land survey, the principle of accumulation conversion method and the improved continuous function method of biomass conversion factor were used to measure the dynamic changes of forest carbon sequestration and carbon sink value in Henan Province. The results showed that the forest carbon sequestration in Henan Province increased from 1.76×10^8 t to 2.78×10^8 t from 2008 to 2018, and the forest type with higher annual carbon sequestration was mixed broadleaf forest and quercus. The distribution of carbon sequestration by age class was the largest in young forests and the smallest in over mature forests. The spatial pattern of forest carbon sequestration was "high in the west and south, low in the east and north", mainly distributed in Nanyang, Luoyang and Sanmenxia. The value of forest carbon sinks increased from 49.247 billion yuan in 2008 to 77.868 billion yuan in 2018, an average annual increase of 2.862 billion yuan. The carbon sink value of mixed broadleaf forest, quercus and populus accounted for 79.93% of the carbon aggregation value in 2018. Finally, suggestions on carbon sequestration capacity and realization of forest carbon sink value were made, for the high-quality development in the Yellow River Basin.

Keywords: forest; carbon sequestration; carbon density; carbon sink value; stock volume; space distribution; value evaluation

(上接第 6 页)

Analysis of Ground Penetrating Radar Wave Field Characteristics of Dam Face Disengaging Repaired by Polymer Grouting

FANG Hongyuan^{1,2}, DONG Zhifeng^{1,2}, XUE Binghan^{1,2}, LEI Jianwei^{1,2}

(1. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the effect of polymer grouting in repairing the dam face disengaging, the ground penetrating radar wave field of the dam face disengaging was studied. A calculation models of the dam with panel disengaging repaired by polymer grouting was established based on the finite-difference time-domain method and the perfectly matched layers boundary conditions. The effects of radar center frequency, degree of panel disengaging repair, size of disengaging area, face thickness and reinforcement on ground penetrating radar (GPR) wave field characteristics of the dam face disengaging repaired by polymer grouting were analyzed. The results showed that the resolution of GPR profile increased gradually with the increase of the excitation source center frequency. The horizontal interfacial reflection wave generated in the GPR profiles increased with the length of the disengaging area. The time interval between horizontal reflectors on the GPR profiles increased with the depth of the disengaging area. The amplitudes of the bypassed and diffracted waves in the disengaging repair area decreased with the increase of the dam face thickness. The electromagnetic waves emitted by the GPR encountered the steel reinforcement and generated a wave field. The reflected waves at the upper and lower interfaces of the disengaging area were divided by the strong bypass waves, which made it difficult to judge the horizontal length of the reflected waves.

Keywords: dams; polymer grouting; finite-difference time-domain; face disengaging; ground penetrating radar; wave field characteristics