

DOI: 10.5846/stxb201801230176

黄龙生,王兵,牛香,宋庆丰.济南市森林生态系统服务功能的维持机制.生态学报,2018,38(23): - .

Huang L S, Wang B, Niu X, Song Q F. Research on maintenance mechanism for ecosystem services function of forests in Ji'nan City. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

济南市森林生态系统服务功能的维持机制

黄龙生^{1,2}, 王 兵^{1,2}, 牛 香^{1,2,*}, 宋庆丰^{1,2}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206

摘要: 森林作为陆地生态系统的重要组成部分, 在维持生物多样性、固碳、水源涵养和木材供应等方面起着不可替代的作用。依据《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008), 以济南市 12 个林分类型为研究对象, 对济南市森林生态系统服务功能维持机制进行研究, 得出济南市年森林生态系统涵养水源、保育土壤、固碳释氧、林木积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护的总价值为 251.80 亿元。其中, 涵养水源、固碳释氧、生物多样性保护排在前三位; 不同林分类型生态系统服务功能价值量中黑杨类和柏类占绝对优势, 而泡桐、落叶松和竹林生态系统服务功能较弱; 不同林龄生态系统服务功能价值量以中幼龄林为主; 济南市森林生态系统服务功能的维持机制, 受到森林资源面积、林龄结构、森林起源以及自然保护区建设等诸多因素的影响。

关键词: 森林生态系统; 生态系统服务功能; 维持机制; 济南市

Research on maintenance mechanism for ecosystem services function of forests in Ji'nan City

HUANG Longsheng, WANG Bing, NIU Xiang*, SONG Qingfeng

1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Beijing Collaborative innovation center for eco-environmental improvement with forestry and fruit trees, Beijing 102206, China

Abstract: As an important component of the terrestrial ecosystem, forests play an irreplaceable role in maintenance of biodiversity, carbon sequestration, water conservation, and timber supply. Based on the criteria for evaluating forest ecosystem services function (LY/T1721—2008), 12 forest types in Ji'nan were selected as the research object, and the maintenance mechanism of the forest ecosystem services function in Ji'nan city was studied. It was concluded that the annual forest ecosystem in Ji'nan has a value of 25.18 billion yuan for water conservation, soil conservation, carbon fixation and oxygen release, nutrient accumulation, air purification, and biodiversity conservation. Among these, water conservation, carbon fixation and oxygen release, and biodiversity conservation were ranked as the top 3. *Populus nigra* L. and *Platycladus orientalis* L. are dominant in the ecosystem services value of different stand types, whereas *PPaulownia fortunei*, *Larix* spp. and Bamboo are less dominant. The value of the ecosystem services function of forests of different ages is mainly provided by middle-age and young forests. The maintenance mechanism of forest ecosystem services function in Ji'nan is affected by many factors, including forest resource area, stand structure, forest origin, and nature reserve construction.

Key Words: forest ecosystem; ecosystem services function; maintenance mechanism; Ji'nan City

基金项目: 中国森林核算及纳入绿色经济评价研究(2018-R28); 科技创新服务能力建设-协同创新中心-林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2017_014207_000024)

收稿日期: 2018-01-23; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: niuxiang@caf.ac.cn

森林作为陆地生态系统的重要组成部分,在维持生物多样性、固碳、水源涵养和木材供应等方面起着不可替代的作用^[1-3],其在应对气候变化、改善生态环境、保障人体健康等方面也越来越引起人们的重视^[4-6]。因此,森林生态系统服务有助于人类福祉,应当加强保护,努力不断提升森林生态系统服务功能在国外,早在1949年就有相关学者对森林效能开展研究^[7]。随后,人们开始对森林某个单一的生态功能进行评价^[8-11]。进入20世纪90年代后,国外在森林生态系统服务功能价值评估方法中出现了旅游价值法、意愿调查法、市场替代法、条件价值法及资产价值法等^[12-15]。随着可持续发展战略的提出,森林生态系统服务功能评价指标体系的研究工作也得到发展^[16]。我国对森林生态系统服务和评价指标体系的研究,起步较晚但发展很快。1983年,中国林学会开展“森林综合效益评价研究”,并对中国早期的森林生态效益评价起到推动作用。随后,出现了森林价值及其环境价值的核算^[17],对自然保护区生物多样性价值研究^[18]对区域森林生态系统服务功能及价值进行评估和动态分析^[19],对森林环境价值纳入国民经济收入核算的系统研究^[20],对森林资源从生产有机物价值和多种生态效能价值2方面进行系统评价^[21],对生态公益林从生态、社会和经济3方面建立生态公益林建设效益评价指标体系^[22]。2008年,国家林业局发布《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008)^[23](以下简称《规范》),依据《规范》,王兵等根据第三次、第四次、第五次、第六次、第七次和第八次森林资源清查数据先后对全国生态系统服务功能及其价值进行评估^[24-25]。

济南市森林生态系统主要为柏类和松类为典型代表。本文以济南市境内森林植被为研究对象,依托济南市周边的森林生态站,依据“规范”开展济南市主要优势树种的服务功能研究,量化分析济南市不同林分类型森林生态系统服务功能的强弱,进而对济南市森林生态系统服务功能维持机制进行探讨。以期为科学开展生态环境保护及制定相关社会经济发展政策提供重要科学依据,从而促进济南市乃至山东省生态环境的改善和可持续发展。

1 研究区概况

济南市位于116°11′—117°44′E、36°2′—37°31′N之间,处于山东省西北部。济南市地貌大致呈南高北低态势,由南向北依次分布着低山丘陵区、山前平原区、黄河冲积平原区。位于长清区摩天岭海拔988.8 m,为该区最高海拔。济南地区属于暖温带半湿润季风型气候,在胶东丘陵及鲁中南山地丘陵阻挡之下,海洋性气候被削弱,年平均气温14.1℃,无霜期190—235,年日照时数2490—2730 h,降雨多集中在6—9月,多年平均降水量为585—800 mm。该区土壤地带性规律较明显,以棕壤、褐土、潮土、风沙土等为主。济南市森林面积约24.46万hm²,人工林面积占绝对优势,主要分布有侧柏(*Platycladus orientalis* L.)、落叶松(*Larix* spp.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、白杨(*Populus alba*)、黑杨(*Populus nigra* L.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、泡桐(*Paulownia fortunei*)等常见的北方树种^[26]。

图1显示了济南市主要林分类型的分布情况。由图可知,济南市主要乔木林种分布于南部和东南部,经济林主要分布于中部地区,北部地区分布有人工栽植的黑杨类和白杨类等起防护作用的林种。

表1—表3反映了济南市主要林分类型、不同林龄及不同林种的基本情况。由表1可知,济南市主要林分类型中,人工林面积占99.54%,其中,柏类面积分布最多,占44.66%,其次为黑杨类占38.86%。由表2可知,济南市森林主要以幼龄林和中龄林为主,面积分别占48.79%和41.67%。由表3可知,济南市不同林种面积分布从大到小依次为防护林(41.78%)>经济林(33.26%)>用材林(24.96%)。综上可知,济南市森林的基本概况为,以人工林为主,中幼林比重较大,防护林和经济林在全市森林中起主导作用。

2 研究方法

2.1 评价指标及测算公式

依据《规范》,本研究从6项森林生态系统功能(涵养水源、保育土壤、固碳释氧、林木积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护)分别开展测算分析。对于生物多样性保护功能的评估,依照《规范》,基于

Shannon 指数法,结合濒危指数体系、特有种指数体系和古树年龄指数体系^[27-29]进行修正,进而参照《森林生态系统生物多样性监测与评估规范》(TY/T2241—2014)进行评估测算。指标体系及相关计算公式详情参照[23,25,30-33]。

2.2 森林资源数据来源

根据济南市周边的泰山和黄河三角洲森林生态站长期、连续及定位观测数据集并结合第八次山东省森林资源生态服务功能评估,本研究将济南市森林生态系统林分划分为柏类(侧柏)、落叶松、松类(油松、黑松)、栎类(麻栎)、刺槐、白杨、黑杨、泡桐、落叶松、其他软阔类、经济林和灌木 12 个林种。此次测算分析的森林资源数据来自济南市林业局发布的 2015 年森林资源二类调查数据。

2.3 社会公共数据来源

在济南市森林生态系统服务功能评估测算过程中,需要将物质量转化为价值量,该转化过程涉及到的社会公共数据主要由我国权威机构所发布(济南市物价局网站^[34]、中国供应商网^[35]、等),以及全国第八次森林生态系统服务功能评估^[24]和中国森林资源核算研究^[25]的相关参数(表 4)。

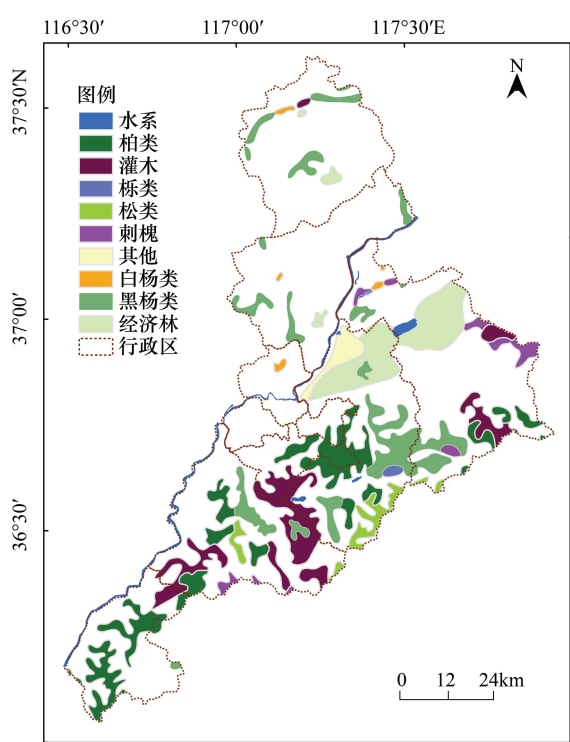


图 1 济南市主要林分类型分布
Fig.1 Distribution of main forest types in Ji'nan

表 1 济南市主要林分类型面积、蓄积统计

Table 1 Area and accumulation statistics of main forest types in Ji'nan											
起源 Origin	项目 Project	柏类 Cypress forest	落叶松 Larch forest	松类 Pine forest	栎类 Quercus forest	刺槐 Robinia pseudoacacia forest	白杨类 Poplar forest	黑杨类 Populus nigra L. forest	泡桐 Paulownia forest	其他软阔 Other broad-leaved	合计 Total
天然林 Natural forests	面积/hm ²	571.41	—	—	—	314.88	30.83	—	—	219.14	1136.27
	蓄积/m ³	6313.58	—	—	—	2661.65	1932.38	—	—	3343.04	14156.10
人工林 Plantation	面积/hm ²	109235.28	1.80	9778.56	2065.10	15516.12	2529.90	95030.90	53.68	9225.40	243436.73
	蓄积/m ³	3379379.10	0.40	590049.22	122210.29	692231.33	263247.13	8226323.41	5504.70	340213.70	12807588.01

表 2 济南市森林各林龄组面积、蓄积统计

Table 2 Area and accumulation statistics of forest age groups in Ji'nan						
项目 Project	合计 Total	幼龄林 Young forest	中龄林 Middle age forest	近熟林 Near-mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Overmature forest
面积 Area /hm ²	244573.00	119318.60	101904.05	11735.37	10943.03	671.96
面积比重 Proportion/%	100	48.79	41.67	4.80	4.47	0.27
蓄积 Accumulation /m ³	13633409.94	5469724.07	6055960.70	1079766.07	954338.70	73620.40
蓄积比重 Proportion/%	100	40.12	44.42	7.92	7.00	0.54

表 3 济南市有林地不同林种面积、蓄积统计

Table 3 Area and accumulation statistics of different forest types for forestland in Ji'nan				
项目 Project	合计 Total	林种 Forest category		
		防护林 Protection forest	经济林 Economic forest	用材林 Timber forest
面积 Area/hm ²	241776	101017	80423	60336
比重 Proportion/%	100	41.78	33.26	24.96

表 4 济南市森林生态系统服务功能评价研究社会公共数据表 (2015 年推荐使用价格)

Table 4 Social public data sheet for study on service function evaluation of forest ecosystem in Ji'nan (Recommended price in 2015)

编号 Number	名称 Name	单位 Unit	2015 年数值 Numerical values in 2015	来源及依据 Source and basis
1	水库建设单位库容投资	元/m ³	6.89	中华人民共和国审计署, 2013 年第 23 号公告: 长江三峡工程竣工财务决算草案审计结果, 三峡工程动态总投资计 2485.37×10 ⁵ 元; 水库正常蓄水位高程 175 米, 总库容 393×10 ⁸ m ³ 。贴现至 2015 年
2	水的净化费用	元/t	4.20	济南市居民用自来水现行水价, 来源于济南市物价局官方网站 ^[34]
3	挖取单位面积土方费用	元/m ³	46.20	根据 2002 年黄河水利出版社出版《中华人民共和国水利部水利建筑工程预算定额》(上册) ^[36] 中人工挖土方 I 和 II 类土类每 100 m ³ 需 42 工时, 人工费依据济南市《人工定额济建标字[2015]1 号文》取 110 元/工日
4	磷酸二铵含氮量	%	16.00	化肥产品说明
5	磷酸二铵含磷量	%	48.00	
6	氯化钾含钾量	%	55.00	
7	磷酸二铵化肥价格	元/t	3160.00	来源于济南市物价局官方网站 2015 年磷酸二铵、氯化钾化肥年均价零售价格
8	氯化钾化肥价格	元/t	2730.00	
9	有机质价格	元/t	800.00	有机质价格根据中国供应商网(http://cn.china.cn/) ^[35] 2015 年济南鸡粪有机肥平均价格
10	固碳价格	元/t	917.18	采用 2013 年瑞典碳税价格: 136 美元/吨二氧化碳, 人民币对美元汇率按照 2013 年平均汇率 6.2897 计算, 贴现至 2015 年
11	制造氧气价格	元/t	4826.67	根据中国供应商网(http://cn.china.cn/) ^[35] 2015 年济南医用氧气市场价格。40 L 规格储气量为 5800 L, 氧气的密度为 1.429 g/L, 零售价格为 40 元
12	负离子生产费用	元/10 ¹⁸ 个	7.96	根据企业生产的适用范围 30 m ² (房间高 3m)、功率为 6 W、负离子浓度 1000000 个/m ³ 、使用寿命为 10 a、价格每个 65 元的 KLD-2000 型负离子发生器而推断获得, 其中负离子寿命为 10 min; 根据济南市物价局官方网站济南市电网销售电价, 居民生活用电现行价格为 0.5469 元/kW h
13	二氧化硫治理费用	元/kg	1.26	依据国家发改委、财政部、国家环境保护部、国家经贸委令第 31 号; 山东省财政厅、物价局、环保局财综[2003]586
14	氟化物治理费用	元/kg	0.69	号; 财政部、国家发改委、国家环境保护部财综[2003]38 号; 山东省政府令第 183 号; 山东省物价局、财政厅、环保局皖价费[2008]111 号。价格从发布之日起沿用至 2015 年
15	氮氧化物治理费用	元/kg	0.63	
16	降尘清理费用	元/kg	0.15	
17	PM ₁₀ 所造成健康危害经济损失	元/kg	30.34	根据 Nowak 等(2013) ^[37] 对美国 10 个城市绿色植被吸附空气颗粒物对健康价值影响的研究中, 每吨 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 所造成健康危害经济损失平均分别为 4500 美元和 691748.88 美元。其中, 人民币对美元汇率按照 2013 年平均汇率 6.2897 计算, 价值贴现至 2015 年
18	PM _{2.5} 所造成健康危害经济损失	元/kg	4665.12	
19	草方格固沙成本	元/t	23.67	根据《草方格沙障固沙技术》计算得出, 铺设 1 m×1 m 规格的草方格沙障, 每公顷使用麦秸 6000 kg, 每千克麦秸 0.4 元, 即 2400 元/hm ² ; 用工量 245 个工(日), 人工费依据《建设工程量清单计价规范》取 100 元/工日, 即 24500 元/hm ² ; 另草方格维护成本 150 元/hm ² , 合计 27050 元/hm ² 。根据《沙坡头人工植被防护林体系防风固沙功能价值评价》, 1 m×1 m 规格的草方格沙障每公顷固沙 1142.85 t, 即 23.67 元/t
20	生物多样性保护价值	元 hm ⁻² a ⁻¹	—	根据 Shannon-Wiener 指数计算生物多样性保护价值, 即:

续表

编号 Number	名称 Name	单位 Unit	2015 年数值 Numerical values in 2015	来源及依据 Source and basis
			—	Shannon-Wiener 指数 <1 时, $S_{\pm}$ 为 3000[元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$];
			—	$1 \leq \text{Shannon-Wiener 指数} < 2$, $S_{\pm}$ 为 5000[元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$];
			—	$2 \leq \text{Shannon-Wiener 指数} < 3$, $S_{\pm}$ 为 10000[元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$];
			—	$3 \leq \text{Shannon-Wiener 指数} < 4$, $S_{\pm}$ 为 20000[元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$];
			—	$4 \leq \text{Shannon-Wiener 指数} < 5$, $S_{\pm}$ 为 30000[元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$];
			—	$5 \leq \text{Shannon-Wiener 指数} < 6$, $S_{\pm}$ 为 40000[元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$];
				Shannon-Wiener 指数 ≥ 6 时, $S_{\pm}$ 为 50000[元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$]

$S_{\pm}$: 单位面积物种多样性价值, The value of species diversity per unit area(元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)

3 结果与分析

3.1 济南市森林生态系统服务功能测算结果

济南市森林生态系统服务功能的物质质量和价值量的测算结果分别如表 5 和表 6 所示。由表 5 可知,济南市森林生态系统年涵养水源量为 8.26 亿 m^3 ;年固土量为 1448.57 万 t;年固碳量为 76.81 万 t;年释氧量为 160.12 万 t;年林木积累营养物质质量合计为 2.08 万 t;年提供负氧离子 20.87×10^{24} 个,年吸收二氧化硫量为 4340.61 万 kg,年吸收氟化物 69.61 万 kg,年吸收氮氧化物 192.97 万 kg;年吸滞 TSP 635.40 万 t,年滞纳 PM_{10} 1979.27 t,年滞纳 $\text{PM}_{2.5}$ 502.48 t。从物质质量的测算结果可以看出,济南市森林在维持其生态系统服务功能方面效果显著。

表 5 济南市森林生态系统不同林分类型生态服务功能物质质量

Table 5 Physical of forest ecosystem services of the different forest types in Ji'nan

林种 Forest type	$G_{\text{调}}$	$G_{\text{固土}}$	$G_{\text{固N}}$	$G_{\text{固P}}$	$G_{\text{固K}}$	$G_{\text{固M}}$	$G_{\text{固碳}}$	$G_{\text{释氧}}$	G_{N}
柏类 <i>Platycladus orientalis</i> L.	2.27	539.24	106.06	15.82	79.50	1448.46	13.20	19.54	15.00
落叶松 <i>Larix</i> spp.	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01
松类 Pine forest	0.21	52.90	15.33	1.64	6.92	139.60	1.65	2.63	2.54
栎类 <i>Quercus</i> forest	0.05	11.94	3.11	0.24	3.70	34.04	0.29	0.38	0.34
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0.46	91.77	25.65	2.75	17.47	277.27	4.18	6.19	6.01
白杨类 <i>Populus alba</i>	0.06	13.09	1.89	0.87	0.57	17.14	1.28	3.07	3.11
黑杨类 <i>Populus nigra</i> L.	2.36	473.79	170.81	46.55	11.66	609.40	40.63	95.55	96.69
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	<0.01	0.16	0.02	0.01	0.14	0.18	0.01	0.03	0.03
其他软阔 Other broad-leaved	0.08	43.10	9.66	3.42	2.02	56.45	4.92	11.71	15.75
经济林 Economic forest	2.39	140.42	17.93	6.87	19.87	95.74	8.47	16.10	12.51
灌木林 Shrubs	0.38	82.14	36.06	4.11	41.09	250.23	2.18	4.92	3.62
竹林 Bamboo	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
合计 Total	8.26	1448.57	386.52	82.28	182.96	2928.56	76.81	160.12	155.60
林种 Forest type	G_{P}	G_{K}	$G_{\text{负离子}}$	G_{SO_2}	G_{HF}	G_{NO_x}	G_{TSP}	$G_{\text{PM}_{10}}$	$G_{\text{PM}_{2.5}}$
柏类 <i>Platycladus orientalis</i> L.	0.88	2.04	688.41	2312.53	47.22	65.88	361.81	1127.69	287.34
落叶松 <i>Larix</i> spp.	<0.01	<0.01	0.02	0.04	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.01
松类 Pine forest	0.22	1.09	170.33	115.00	0.49	5.87	32.46	159.05	37.84
栎类 <i>Quercus</i> forest	0.02	0.09	20.26	18.31	0.62	1.24	2.19	5.61	1.12
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	0.39	1.52	134.89	140.14	0.79	9.50	16.02	104.60	20.92
白杨类 <i>Populus alba</i>	0.19	0.71	15.73	18.72	0.11	1.27	2.12	6.25	1.70
黑杨类 <i>Populus nigra</i> L.	5.85	21.97	677.13	842.43	4.75	57.02	96.08	251.07	68.08
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	<0.01	0.01	0.27	0.61	<0.01	0.03	0.11	0.48	0.14
其他软阔 Other broad-leaved	0.45	10.75	80.05	83.58	2.01	5.66	9.55	51.85	14.96
经济林 Economic forest	0.91	4.29	275.01	707.36	12.93	38.22	101.07	212.47	54.73
灌木林 Shrubs	0.32	1.14	24.86	101.86	0.69	8.28	13.98	60.14	15.64
竹林 Bamboo	<0.01	<0.01	0.03	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.01
合计 Total	9.23	43.61	2086.99	4340.61	69.61	192.97	635.40	1979.27	502.48

$G_{\text{调}}$: 涵养水源, Water conservation ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $G_{\text{固土}}$: 固土物质质量, Soil fixation (10^4 t/a); $G_{\text{固N}}$: 固氮物质质量, Nitrogen fixation (10^2 t/a); $G_{\text{固P}}$: 固磷物质质量, Phosphorus fixation (10^2 t/a); $G_{\text{固K}}$: 固钾物质质量, Kalium fixation (10^2 t/a); $G_{\text{固M}}$: 固定有机质物质质量, Organic matter fixation (10^2 t/a); $G_{\text{固碳}}$: 森林固碳物质质量, Carbon sequestration (10^4 t/a); $G_{\text{释氧}}$: 释放氧气物质质量, Oxygen release (10^4 t/a); G_{N} : 林木积累氮物质质量, Accumulation of nitrogen for forest (10^2 t/a); G_{P} : 林木积累磷物质质量, Accumulation of phosphorus for forest (10^2 t/a); G_{K} : 林木积累钾物质质量, Accumulation of kalium for forest (10^2 t/a); $G_{\text{负离子}}$: 提供负离子物质质量, Negative iron supply (10^{25} 个/a); G_{SO_2} : 吸收二氧化硫物质质量, Physical of absorption of SO_2 (10^4 kg/a); G_{HF} : 吸收氟化物物质质量, Physical of absorption of HF (10^4 kg/a); G_{NO_x} : 吸收氮氧化物物质质量, Physical of absorption of NO_x (10^4 kg/a); G_{TSP} : 吸滞 TSP 物质质量, Physical of absorption of TSP (10^4 t/a); $G_{\text{PM}_{10}}$: 滞纳 PM_{10} 物质质量, Physical of absorption of PM_{10} (t/a); $G_{\text{PM}_{2.5}}$: 滞纳 $\text{PM}_{2.5}$ 物质质量, Physical of absorption of $\text{PM}_{2.5}$ (t/a)

由表 6 可知,济南市年森林生态系统不同林分类型生态服务功能价值为 251.80 亿元,其中,年涵养水源价值为 90.68 亿元,年保育土壤价值为 19.64 亿元,年固碳释氧价值为 65.01 亿元,年林木积累营养物质价值为 3.95 亿元,年净化大气环境价值为 34.21 亿元,年滞纳 PM_{10} 价值为 0.59 亿元,年滞纳 $PM_{2.5}$ 价值为 23.43 亿元,年生物多样性保护价值为 38.31 亿元。由测算结果可知,济南市森林生态系统涵养水源价值最高,其次为固碳释氧价值,林木积累营养物质价值量最低。

表 6 济南市森林生态系统不同林分类型生态服务功能价值量/(亿元)

Table 6 The value of forest ecosystem services of the different forest types in Ji'nan

林分类型 Forest types	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	$U_{\text{总}}$
柏类 <i>Platycladus orientalis</i> L.	24.93	6.37	8.28	0.37	19.50	0.33	13.38	13.01	72.46
落叶松 <i>Larix</i> spp.	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
松类 Pine forest	2.26	0.73	1.10	0.07	2.32	0.05	1.77	1.67	8.15
栎类 <i>Quercus</i> forest	0.57	0.17	0.18	0.02	0.10	<0.01	0.05	0.70	1.73
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	5.00	1.31	2.62	0.15	1.27	0.03	0.98	2.71	13.06
白杨类 <i>Populus alba</i>	0.69	0.14	1.23	0.08	0.12	<0.01	0.08	0.20	2.46
黑杨类 <i>Populus nigra</i> L.	25.98	7.41	38.31	2.43	4.82	0.08	3.18	12.54	91.49
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.05
其他软阔 Other broad-leaved	0.87	0.52	4.69	0.42	0.87	0.02	0.7	1.61	8.98
经济林 Economic forest	26.21	1.35	6.61	0.32	4.23	0.06	2.55	5.15	43.87
灌木林 Shrubs	4.16	1.64	1.98	0.09	0.97	0.02	0.73	0.71	9.55
竹林 <i>Bamboo</i>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
合计 Total	90.68	19.64	65.01	3.95	34.21	0.59	23.43	38.31	251.80

U_1 : 涵养水源价值, Value of water conservation; U_2 : 保育土壤价值, Value of soil conservation; U_3 : 固碳释氧价值, Value of carbon fixation and oxygen released; U_4 : 林木积累营养物质价值, Value of nutrients accumulation; U_5 : 净化大气环境价值, Value of purification of atmosphere environment; U_6 : 滞纳 PM_{10} 价值, Value of absorb PM_{10} ; U_7 : 滞纳 $PM_{2.5}$ 价值, Value of absorb $PM_{2.5}$; U_8 : 生物多样性保护价值, Value of biodiversity conservation; $U_{\text{总}}$: 总价值量, Total value

从图 2 可知,济南市森林生态系统涵养水源、固碳释氧、生物多样性保护和净化大气环境 4 项服务功能的价值量分别占济南市森林生态系统服务功能总价值量的 36.01%、25.82%、15.21% 和 13.59%, 合计占到总生态系统服务功能价值量的 90.63%, 体现了相当大的优势。济南市森林生态系统服务功能价值量从大到小排序为: 涵养水源>固碳释氧>生物多样性保护>净化大气环境>保育土壤>林木积累营养物质。

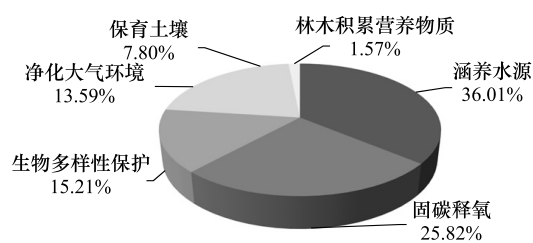


图 2 济南市森林生态系统服务功能价值量比例

Fig.2 The proportion of the value of forest ecosystem services in Ji'nan

3.2 济南市不同林分类型生态系统服务价值量

由图 3 可知,济南市森林生态系统不同林分类型生态系统服务价值以黑杨类和柏类为主,其中黑杨类价值量(91.49 亿元)最大,其次为柏类(72.46 亿元),最小的为落叶松和竹林,均小于 0.01 亿元。不同林分类型生态服务功能价值量排序为黑杨类(91.49 亿元)>柏类(72.46 亿元)>经济林(43.87 亿元)>刺槐(13.06 亿元)>灌木林(9.55 亿元)>其他软阔类(8.98 亿元)>松类(8.15 亿元)>白杨类(2.46 亿元)>栎类(1.73 亿元)>泡桐(0.05 亿元)>落叶松(<0.01 亿元)>竹林(<0.01 亿元)。济南市不同林分类型生态系统服务功能价值量这种分布趋势,与不同林分类型自身特性及其分布面积和蓄积量有直接的关系。

3.3 济南市不同林龄生态系统服务功能价值量

乔木林的林龄组根据不同树种的生物学特性和经营利用目的的不同,将其生长过程划分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林 5 个龄组。不同林种不同发育阶段其生态系统服务功能各不相同,因此,根据不

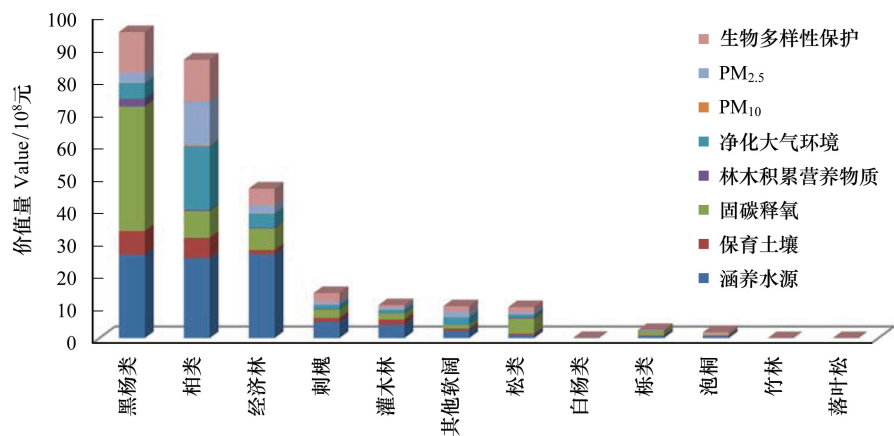


图 3 济南市不同林分类型生态系统服务功能价值量分布图

Fig.3 The historgam of the value of ecosystem services of the different stand types in Ji'nan

同龄组划分计算出济南市森林生态系统不同林龄的生态系统服务价值,此外,本研究中不同林龄生态系统服务价值测算的统计不包含灌木林、经济林和竹林。计算结果详见表 7。

从表 7 计算结果不难发现,济南市森林生态系统不同林龄生态系统服务功能价值量存在很大的差异。各龄组生态系统服务功能价值量呈现幼龄林(96.79 亿元)>中龄林(82.66 亿元)>近熟林(9.52 亿元)>成熟林(8.87 亿元)>过熟林(0.54 亿元)的趋势。

表 7 济南市森林生态系统不同林龄生态服务功能价值量/(亿元)

Table 7 The value of forest ecosystem services of the different stand age in Ji'nan

林龄 Stand age	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	$U_{总}$
幼龄林 Young forest	29.43	8.12	27.53	1.73	14.15	0.25	9.83	15.83	96.79
中龄林 Middle-aged forest	25.13	6.94	23.51	1.48	12.09	0.21	8.40	13.52	82.66
近熟林 Nearly mature forest	2.89	0.80	2.71	0.17	1.39	0.02	0.97	1.56	9.52
成熟林 Mature forest	2.70	0.74	2.52	0.16	1.30	0.02	0.90	1.45	8.87
过熟林 Overmature forest	0.16	0.04	0.15	0.01	0.08	0.00	0.05	0.09	0.54
合计 Total	60.31	16.65	56.42	3.54	29.01	0.51	20.15	32.45	198.38

图 4 为济南市不同林龄生态系统服务功能价值量比例分布,由图可知,济南市森林生态系统当中,幼龄林和中龄林生态系统服务功能价值量比例达 90.46%,其中,幼龄林生态服务功能价值量稍微高于中龄林,表明济南市森林生态系统服务功能中,中幼龄林占绝对优势。过熟林生态系统服务功能价值量比重最小,仅为 0.27%。

4 讨论

济南市森林生态系统服务功能的维持机制与其森林资源自身的属性和特征直接关系。其森林资源存在以下特征:

1)资源面积。济南市不同林分类型生态服务功能物质质量排序前几位的均为柏类、黑杨类和经济林,排后几位的均为泡桐、竹林和落叶松。由济南市森林资源面积统计数据可知,排序前三的同样为柏类、经济林和黑杨类,而排序后三位的为泡桐、竹林和落叶松。由此可见,不同林分类型生态系统服务功能物质质量的大小与其面积呈正相关性。济南市不同林分类型中,柏类和黑杨类的各项生态系统服务强于其他树种,这 2 个树种均为本区域的地带性植被且与其分布面积有直接的关系。黑杨类和柏类的面积占全市森林总面积的 83.52%,其生态系统服务功能价值量占全市总价值量的 65.12%;泡桐和落叶松面积占全市森林总面积的 0.02%,其生

态系统服务功能价值量仅占全市总价值量的 0.03%。

2) 林龄结构。林分因子中,林分年龄对净初级生产力的变化影响较大,中龄林和近熟林有绝对的优势^[38]。林分蓄积随着林龄的增加而增加,随着时间的推移,幼龄林逐渐向成熟林的方向发展,从而使林分蓄积量得以提高^[39]。从济南市森林资源数据中可以看出,幼龄林和中龄林面积占全市森林总面积的 90.46%,济南市柏类和黑杨类的幼龄林和中龄林面积占济南市森林总面积的 55.05%,这足以说明此 2 个树种及济南市大部分森林资源正处于林木生长速度最快的阶段,林木的高生长带来了较强的森林生态系统服务。

3) 森林起源。天然林拥有生物圈中功能最完备的动植物群落,其结构复杂、功能完善、生态稳定性高。人工林和天然林群落结构与物种多样性方面存在着巨大差异,天然林的群落层次比人工林复杂,物种多样性比人工林丰富。而人工林由于其集约化的经营管理措施,使得林分结构良好,林分的生长速度要快于天然林,因此,其固碳释氧功能由于速生的特性而发挥着相当重要的作用。不同起源固碳释氧单位面积生态效益物质质量中,人工林高于天然林,这主要是由于人工林在人为的培育和栽培下,在适宜生长环境下的林分净生产力高于天然林^[40]。由于在经济发展过程中,济南市的原生森林资源受到了严重的破坏,现存森林主要以人工林为主,人工林占其森林资源总面积的 99.54%,加上合理的经营管理措施,使得济南市森林可以高效、稳定地发挥其生态系统服务。

4) 自然保护区。济南市柏类和黑杨类这 2 个树种大部分分布于南部低山丘陵区,实际上分布于山区的自然保护区内。自然保护区是开展生物多样性和自然遗产就地保护最为经济有效的途径,是人类经济持续发展的重要保障。保护区内的生态系统具有较高的完整性和稳定性,因此,其提供的生态系统服务也更为显著。济南市近些年来森林公园与自然保护区建设工程为其森林资源的保护和进一步扩展奠定了基础,对提高济南市森林生态系统服务功能起到了积极推动作用。

在研究方法上,本文对森林生态系统服务功能的测算,采用的是分布式测算方法^[36]。森林生态系统服务功能的测算是一项庞杂的系统工程,适合将研究内容划分成多个均质化的生态测算单元进行评估^[41]。分布式测算方法是目前评估森林生态系统服务所采用的较为科学的方法,在诸多森林生态系统服务功能评估案例中也证实了运用该方法能够保证评估结果的准确性和可靠性^[31]。结合分布式测算方法将济南市森林生态系统按照行政区、优势树种(组)和林龄组等三级测算单元,再结合不同立地条件的对比观测,最终确定了 600 个相对均质化的生态系统服务功能评估单元,进而保证了济南市森林生态系统服务功能评估的科学性。

本研究的价值量评估,是基于多年来运用森林生态连清体系在不同尺度评估森林生态系统服务功能的实践基础之上,遵循“等效替代法则”和“权重当量平衡”的基本原则。等效替代法则要求在森林生态系统服务物质质量向价值量转化过程中,从森林生态系统服务原理和过程着手,用价格产生方式尽可能等效的替代生态系统服务产生方式,这样的价格形式更为合理。确定等效替代的价格参数后,不同价格的选取又影响着森林生态系统各项服务价值的比例关系,不同地区不同林分类型的生态系统服务各项之间比例不同,因此需要对不同服务项之间的价值权重进行再平衡。通过等效替代和权重平衡,进而使得生态系统各项服务价值更能反映森林生态环境的实际情况。例如,森林生态系统消洪补枯的作用与水库的功能类似,因此,遵循等效替代法则,采用影子工程法,即影子工程价格把森林拦蓄水量转换成水利工程需要拦蓄相同水量所需库容造价;在对森林生态系统滞纳 PM_{2.5} 功能价值量化过程中,采用疾病成本法和人力资本法,用由细颗粒物引起的疾病、误工、心理、精神方面经济损失进行替代。

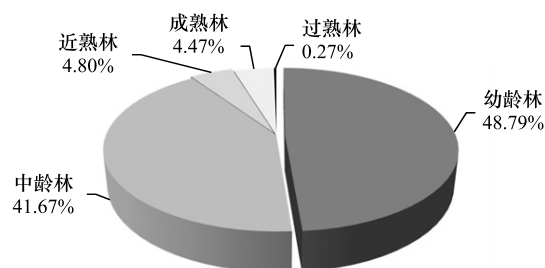


图 4 济南市不同林龄生态系统服务功能价值量比例分布

Fig.4 The proportion of the value of forest ecosystem services of the different stand age in Ji'nan

5 结论

本研究选取济南市 12 个树种,从森林生态系统涵养水源、保育土壤、固碳释氧、林木积累营养物质、净化大气环境及生物多样性保护等 6 项功能对济南市森林生态系统服务功能及价值量进行定量评估,并对其生态服务功能的维持机制进行了探讨。主要研究结论如下:

1)济南市年森林生态系统服务 6 项功能价值为 251.80 亿元,各项服务功能价值量从大到小排序为:涵养水源>固碳释氧>生物多样性保护>净化大气环境>保育土壤>林木积累营养物质。表明济南市森林生态系统服务功能以涵养水源、固碳释氧和生物多样性保护为主。

2)济南市不同林分类型生态服务功能价值量大小排序为:黑杨类>柏类>经济林>刺槐>灌木林>其他软阔类>松类>白杨类>栎类>泡桐>落叶松>竹林。黑杨类和柏类占绝对优势,而泡桐、落叶松和竹林生态系统服务功能较弱。济南市森林生态系统在兼顾提升泡桐、落叶松和竹林等弱势林种生态服务功能的同时,进一步强化黑杨类、柏类和经济林的发展,充分发挥出济南市特色林木的生态效益,进而促进济南市生态文明建设。

3)济南市不同林龄生态系统服务功能价值量以中幼龄林为主,各龄组生态系统服务功能价值量呈现幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林的趋势。济南市在森林经营和保护过程中,加强中幼龄林的管理,不断提升和巩固其在区域生态系统功能中的主导作用,同时要注重成熟林和过熟林生态功能的发挥,努力确保成熟林和过熟林的存量,充分发挥其森林游憩的功能,进而凸显其在生态和经济效益中的作用。

4)济南市森林生态系统服务功能的维持机制,受到森林资源面积、林龄结构、森林起源以及自然保护区建设等诸多因素的影响。在充分把握好这些规律的基础之上,今后济南市森林生态建设和森林生态系统服务功能提升过程中,北部黄河冲积平原区应扩大乡土树种如黑杨类、白杨类的覆盖面积,以增强水土保持和农田防护等功能;中部山前平原区适宜种植经济林种,在扩大森林覆盖提升森林生态服务功能的同时也相应增加了区域的经济收入,中部城区及其周边应适当种植柏类和松类等本地树种,以提升森林治污减霾和森林“氧吧”功能,从而净化城市大气环境,提高居民生活质量;南部低山丘陵区在保护现有森林资源的同时,进一步种植柏类、松类、刺槐、黑杨类等树种,巩固该区森林涵养水源、固土保肥等功能。济南市森林生态系统服务功能的发挥将为该区和其他区域的生态建设提供有益的科学参考。

参考文献 (References):

- [1] Chisholm R A. Trade-offs between ecosystem services: water and carbon in a biodiversity hotspot. *Ecological Economics*, 2010, 69 (10): 1973-1987.
- [2] Onaindia M, De Maunel B F, Madariaga I, Rodríguez-Loinaz G. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289: 1-9.
- [3] Cademus R, Escobedo F J, McLaughlin D, Abd-Elrahman A. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in *Pinus elliotii* forests in southeastern USA. *Forests*, 2014, 5(6): 1409-1431.
- [4] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1/3): 14-27.
- [5] 中国森林生态服务功能评估项目组. 中国森林生态服务功能评估. 北京: 中国林业出版社, 2010: 10-25.
- [6] Knoke T, Bendix J, Pohle P, Hamer U, Hildebrandt P, Roos K, Gerique A, Sandoval M L, Breuer L, Tischer A, Silva B, Calvas B, Aguirre N, Castro L M, Windhorst D, Weber M, Stimm B, Günter S, Palomeque X, Mora J, Mosandl R, Beck E. Afforestation or intense pasturing improve the ecological and economic value of abandoned tropical farmlands. *Nature Communications*, 2014, 5: 5612-5612.
- [7] Leopold A. The green lagoons//Leopold A. A Sand County Almanac. London: Oxford University Press, 1949: 150-158.
- [8] Magrath W, Arens P. The Costs of Soil Erosion on Java: A Natural Resource Accounting Approach. Environment Department Working Paper No. 18, 1989: 15-16.
- [9] Pearce D W, Turner R K. Economics of Natural Resources and the Environment. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1989: 22-23.
- [10] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services.

- Ecological Economics, 2002, 41(3): 393-408.
- [11] Adger W N, Brown K, Cervigni R, Moran D. Total economic value of forests in Mexico. *Ambio*, 1995, 24(5): 286-296.
- [12] Tobias D, Mendelsohn R. Valuing ecotourism in a tropical rain-forest reserve. *Ambio*, 1991, 20(2): 91-93.
- [13] Munasinghe M. Biodiversity protection policy: environmental valuation and distribution issues. *Ambio*, 1992, 21(3): 227-236.
- [14] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-189.
- [15] Perrings C, Folke C, Mäler K G. The ecology and economics of biodiversity loss: the research agenda. *Ambio*, 1992, 21(3): 201-211.
- [16] Maini J S. Sustainable development of forests. *Unasylva*, 1992, 43(169): 3-8.
- [17] 孔繁文, 戴广翠, 何乃蕙, 高岚. 森林环境资源核算及补偿政策研究. *林业经济*, 1994, (4): 34-47.
- [18] 薛达元, 包浩生, 李文华. 长白山自然保护区生物多样性旅游价值评估研究. *自然资源学报*, 1999, 14(2): 140-145.
- [19] 吴钢, 肖寒, 赵景柱, 邵国凡, 李静. 长白山森林生态系统服务功能. *中国科学(C 辑)*, 2001, 31(5): 471-480.
- [20] 聂华. 森林资源货币计量中的价值论基础. *北京林业大学学报*, 2002, 24(1): 69-73.
- [21] 李金昌. 价值核算是环境核算的关键. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(3): 11-17.
- [22] 李卫忠. 公益林效益评价指标体系与评价方法的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003: 87-89.
- [23] 国家林业局. LY/T 1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-6.
- [24] 中国森林生态系统服务功能评估组. 中国森林生态服务功能评估. 北京: 中国林业出版社, 2010: 20-49.
- [25] 中国森林资源核算研究项目组. 生态文明制度构建中的中国森林资源核算研究. 北京: 中国林业出版社, 2015: 86-164.
- [26] 李景全, 牛香, 曲国庆, 黄龙生, 商凯, 李传文. 山东省济南市森林与湿地生态系统服务功能研究. 北京: 中国林业出版社, 2017: 26-31.
- [27] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录 第一卷: 红色名录. 北京: 高等教育出版社, 2004: 17-19.
- [28] 苏志尧. 植物特有现象的量化. *华南农业大学学报*, 1999, 20(1): 92-96.
- [29] 全国绿化委员会, 国家林业局. 全绿字[2001] 15 号 关于开展古树名木普查建档工作的通知. 北京: 全国绿化委员会, 国家林业局, 2001.
- [30] 国家林业局. LY/T 2241-2014 森林生态系统生物多样性监测与评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-10.
- [31] 牛香, 王兵. 基于分布式测算方法的福建省森林生态系统服务功能评估. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2): 36-43.
- [32] 王兵, 李少宁, 郭浩. 江西省森林生态系统服务功能及其价值评估研究. *江西科学*, 2007, 25(5): 553-559, 587-587.
- [33] 王兵, 鲁绍伟, 尤文忠, 任晓旭, 邢兆凯, 王世明. 辽宁省森林生态系统服务价值评估. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1792-1798.
- [34] http://qpn.jinan.gov.cn/art/2017/8/4/art_16275_798994.html
- [35] <https://www.china.cn/search/f4y4b0d.shtml>
- [36] 水利部水利建设经济定额站. 中华人民共和国水利部水利建筑工程预算定额(上册). 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 1-80.
- [37] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 395-402.
- [38] 许瀛元, 张思冲, 国徽, 邢爽, 张人月. 黑龙江省森工林区用材林不同林龄树种碳汇价值研究. *森林工程*, 2012, 28(6): 4-7.
- [39] Nishizono T. Effects of thinning level and site productivity on age-related changes in stand volume growth can be explained by a single rescaled growth curve. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(12): 2276-2291.
- [40] 董秀凯, 王兵, 耿绍波. 吉林省露水河林业局森林生态连清与价值评估报告. 长春: 吉林大学出版社, 2014: 56-57.
- [41] 师贺雄, 王兵, 牛香. 基于森林生态连清体系的中国森林生态系统服务特征分析. *北京林业大学学报*, 2016, 38(6): 42-50.