

扬州市长江沿岸森林生态系统服务功能价值评估

戚阳艳¹, 万 欣^{2,3*}, 江 浩^{2,3}, 王 火^{2,3}

(1. 江苏省森林资源监测中心, 江苏 南京 210036; 2. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153;
3. 江苏扬州城市森林生态系统国家定位观测研究站, 江苏 扬州 225000)

摘要:扬州范围内长江沿岸森林位于长江生态廊道范围核心区,是当地居民的生存和发展的天然绿色屏障,对扬州市国土的生态安全、生物多样性保护和经济社会可持续发展具有重要作用。该研究根据2018年江苏省森林资源变更调查数据及实地调研,并结合现有的文献资料,对扬州市长江沿岸宽1 km范围内的森林生态系统服务价值进行估算。结果表明:扬州市长江沿岸宽1 km森林生态系统服务功能的总价值为5 481.96万元/a。在8大生态服务功能中,森林固碳释氧的功能价值占比最高,为2 684.41万元/a,占总价值的48.97%,其次是涵养水源,森林防护和森林游憩的价值占比最低。建议扬州市应大力发展长江沿岸森林建设,以增加长江沿岸森林整体的生态服务价值,同时运用多种监测手段监测长江沿岸森林面积和树种变化等。此外,建议在长江沿岸增设森林生态监测站点,为长江沿岸森林的保护管理及合理利用提供科学依据和技术支撑。

关键词:森林;生态服务功能;价值评估;长江;扬州市

中图分类号:F326.2;S718

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2021.02.005

Assessment of ecological service function's value of forests along the Yangtze River in Yangzhou City

Qi Yangyan¹, Wan Xin^{2,3*}, Jiang Hao^{2,3}, Wang Huo^{2,3}

(1. Forest Resources Monitoring Centre of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China; 2. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China; 3. Yangzhou Long-term Observation Station of Urban Ecosystem, Yangzhou 225000, China)

Abstract: The forests along the Yangtze River in Yangzhou are located in the core area of the ecological corridor of the Yangtze River, which is a green barrier for the survival and development of local residents, and plays an important role in the ecological security, biodiversity protection and sustainable economic and social development of Yangzhou city. In this study, the forest ecosystem service value within 1 km along the Yangtze River in Yangzhou was calculated based on the forest resource change survey data and field investigation in Jiangsu Province in 2018, as well as the existing literature. The results showed that the total value of forest ecosystem services for 1 km along the Yangtze River in Yangzhou was 54 819 600 ¥ per year. Among the eight ecological service functions, the functional value of forest carbon sequestration and oxygen release accounted for the highest, accounting for 26 844 100 ¥ per year, accounting for 48.97% of the total value, followed by water conservation, forest protection and forest recreation value accounted for the lowest. It is suggested that the forest construction along the Yangtze River should be vigorously developed in Yangzhou to increase the overall ecological service value of the forest along the Yangtze River. At the same time, a variety of monitoring methods should be used to monitor the changes of forest area and tree species along the Yangtze River. In addition, it is suggested to set up forest ecological monitoring stations along the Yangtze River to provide scientific basis and technical support for the protection, manage-

收稿日期:2021-02-10;修回日期:2021-02-27

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目“江苏长江沿岸景观防护林构建与生态修复技术研究”(CX(19)1004);中央财政林业科技推广示范资金项目“长江河滩湿地修复与生态防护林营建技术推广示范”(苏[2019]TG01);江苏省林业科技创新与推广项目“江苏长江湿地滨岸带修复技术研究示范”(LYKJ[2019]41)

作者简介:戚阳艳(1983-),女,浙江诸暨人,工程师,研究生。研究方向:森林资源管理。E-mail: 158644437@qq.com。

* **通信作者:**万 欣(1983-),女,山东济宁人,高级工程师,博士。研究方向:森林生态学。E-mail: 691069685@qq.com。

ment and rational utilization of forests along the Yangtze River.

Key words: Forest; Ecological service function; Value assessment; Yangtze River; Yangzhou City

江苏省扬州市位于长江下游,属于长三角城市群Ⅱ型大城市,是长江三角洲的重要组成部分。扬州范围内长江沿岸森林位于长江生态廊道范围核心区,能改善和维持区域当地的生态环境平衡,为当地居民的生存和发展提供了天然的绿色屏障,对扬州市国土生态安全、生物多样性保护和经济社会可持续发展具有重要作用。

本研究依据中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)^[1]中的指标和计算方法,结合扬州市长江沿岸森林的调查数据及现有的文献资料,对扬州市长江沿岸宽 1 km 范围内的森林生态系统服务价值进行估算,以期为今后扬州市长江沿岸森林的保护、规划及管理提供科学依据和理论指导。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

据统计资料显示,长江沿岸江苏段的森林植被类型极为丰富,且大多属于水土保持类森林,农田防护林和防风固沙林极少。

本研究通过实地勘察调研,统计出扬州市长江沿岸宽 1 km 范围有 12 类林分类型的森林,分别是水杉林、樟类林、榉树林、杨树林、柳树林、速生阔叶林、阔叶混交林、竹林、桃树林、银杏林、桑树林及其他果树林。各植被类型森林面积统计如表 1 所示。

表 1 扬州市长江沿岸宽 1 km 各植被类型森林面积

林分类型	森林面积/hm ²
水杉	0.28
樟类	0.68
榉树	0.43
杨树	204.89
柳类	14.91
速生阔叶树	22.42
阔叶混	7.92
杂竹	1.40
桃	0.48
其他果树	1.10
银杏	32.99
桑	7.06
合计	294.56

1.2 估算方法

依据《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)^[1]和扬州市长江沿岸森林的实际状况,森林生态系统的服务功能分为 8 大类,即涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、森林防护、生物多样性保护、森林游憩。本研究也将以这 8 类服务功能对扬州市长江沿岸森林生态系统服务功能的价值进行估算。

1.2.1 涵养水源的价值 森林涵养水源功能是指森林对降水的截留、吸收和贮存,将地表水转为地表径流或地下水的功能。主要功能表现在增加可利用水资源、净化水质和调节径流 3 个方面。依据《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)^[1],涵养水源功能的价值评估选择调节水量和净化水质这 2 个指标进行估算。

(1)调节水量的价值:本研究选用水量平衡法对扬州市长江沿岸的森林不同林分类型的涵养水源功能进行评估,求和后得到调节水量总功能,计算公式如下:

$$U_{调}=10C_{库}A(P-E-C)$$
 (1)

式中, $U_{调}$ 为林带年调节水量价值(元/a); $C_{库}$ 为水库建设单位库容投资(元/m³); A 为森林面积(hm²); P 为林外年降水量(mm/a); E 为林分蒸散量(mm/a); C 为地表径流量(mm/a)。

(2)净化水质的价值:森林在调节水量的同时也净化了等量的水质,因此扬州市长江沿岸森林年净化水量等于年调节水量。在此基础上利用替代工程法,根据净化水质工程的成本计算年净化水质价值,公式如下:

$$U_{水质}=10KA(P-E-C)$$
 (2)

式中, $U_{水质}$ 为林带年净化水质价值(元/a); K 为水的净化费用(元/t); A 为森林面积(hm²); P 为林外年降水量(mm/a); E 为林分蒸散量(mm/a); C 为地表径流量(mm/a)。

1.2.2 保育土壤的价值 森林保育土壤功能是指森林中活地被物和凋落物层截留降水,降低水滴对表土的冲击和地表径流的侵蚀作用;同时林木根系固持土壤,防止土壤崩塌泻溜,减少土壤肥力损失以及改善土壤结构的功能。本研究选择森林固土和保肥作用 2 个指标来计算森林年保育土壤价值。

(1) 森林固土的价值:本研究运用此方法分别计算出扬州市长江沿岸不同林分类型森林的年固土量,求和后得到固土总量,其计算公式为:

$$U_{\text{固土}} = AC_{\pm}(X_2 - X_1) / \rho \quad (3)$$

式中, $U_{\text{固土}}$ 为林分年固土价值(元/a); A 为林带面积(hm^2); C_{\pm} 为挖取和运输单位体积土方所需费用(元/ m^3); X_1 为林地土壤侵蚀模数[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; X_2 为无林地土壤侵蚀模数[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; ρ 为林地土壤容重(t/m^3)。

(2) 森林保肥的价值:森林在固土的同时也固持了土壤中大量的营养物质(N,P,K,有机质等),扬州市长江沿岸森林年保肥量通过各林分类型有林地比无林地每年减少土壤侵蚀量中N,P,K,有机质的含量来计算,其公式如下:

$$U_{\text{肥}} = A(X_2 - X_1)(NC_1/R_1 + PC_1/R_2 + KC_2/R_3 + MC_3) \quad (4)$$

式中, $U_{\text{肥}}$ 为林分保肥价值(元/a); A 为林带面积(hm^2); X_1 为林地土壤侵蚀模数[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; X_2 为无林地土壤侵蚀模数[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; N 为林分土壤平均含氮量(%); P 为林分土壤平均含磷量(%); K 为林分土壤平均含钾量(%); M 为林分土壤平均有机质含量(%); C_1 为磷酸二铵化肥价格(元/t); C_2 为氯化钾化肥价格(元/t); C_3 为有机质价格(元/t); R_1 为磷酸二铵化肥中含氮量(%); R_2 为磷酸二铵化肥中含磷量(%); R_3 为氯化钾化肥中含钾量(%)。

1.2.3 固碳释氧的价值 森林生态系统是陆地碳的主要储存库。森林固碳释氧功能是指植物通过光合作用固定大气中的 CO_2 同时释放 O_2 。参照国家林业局行业标准^[1]中对森林固碳释氧功能及价值的评估方法,得出以下计算公式:

(1) 森林固碳的价值

$$U_{\text{碳}} = AC_{\text{碳}}(1.63R_{\text{碳}}B_{\text{年}} + F_{\text{土壤碳}}) \quad (5)$$

式中, $U_{\text{碳}}$ 为林分年固碳价值(元/a); A 为林带面积(hm^2); $C_{\text{碳}}$ 为固碳价格(元/t); $R_{\text{碳}}$ 为 CO_2 中碳的含量,为27.27%; $B_{\text{年}}$ 为林分净生产力[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; $F_{\text{土壤碳}}$ 为单位面积林分土壤年固碳量[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]。

(2) 森林释氧的价值:通过计算各林分类型的释氧量并求和得到森林释氧总量,计算公式如下:

$$U_{\text{氧}} = 1.19C_{\text{氧}}AB_{\text{年}} \quad (6)$$

式中, $U_{\text{氧}}$ 为林分年释氧价值(元/a); A 为林带

面积(hm^2); $C_{\text{氧}}$ 为氧气价格(元/t); $B_{\text{年}}$ 为林分净生产力[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]。

1.2.4 积累营养物质的价值 森林积累营养物质功能是指森林植物通过生化反应,在大气、土壤和降水中吸收N,P,K等营养物质并贮存在体内各器官的功能。森林植被的积累营养物质功能对降低下游面源污染及水体富营养化有重要作用。

参照国家林业局行业标准^[1]中对森林积累营养物质功能及价值的评估方法,得出以下计算公式:

$$U_{\text{营养}} = AB_{\text{年}}(N_{\text{营养}}C_1/R_1 + P_{\text{营养}}C_1/R_2 + K_{\text{营养}}C_2/R_3) \quad (7)$$

式中: $U_{\text{营养}}$ 为林分年营养物质积累价值(元/a); A 为林带面积(hm^2); $B_{\text{年}}$ 为林分净生产力[$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; $N_{\text{营养}}$ 为林木含氮量(%); $P_{\text{营养}}$ 为林木含磷量(%); $K_{\text{营养}}$ 为林木含钾量(%); C_1 为磷酸二铵化肥价格(元/t); C_2 为氯化钾化肥价格(元/t); C_3 为有机质价格(元/t); R_1 为磷酸二铵化肥中含氮量(%); R_2 为磷酸二铵化肥中含磷量(%); R_3 为氯化钾化肥中含钾量(%)。

1.2.5 净化大气环境的价值 森林净化大气环境功能具体指森林生态系统具有吸收、过滤、阻隔和分解大气污染物(如二氧化硫、氟化物、粉尘等),以及降低噪音、提供负离子、降低空气含菌量等功能。参照国家林业局行业标准^[1]中对森林净化大气环境功能及价值的评估方法,本研究选择提供负离子、吸收污染物(二氧化硫、氟化物、氮氧化物)、降低噪音、滞尘共4个指标对扬州市长江沿岸宽1 km内森林的净化大气环境功能的价值进行估算。

(1) 提供负离子功能的价值

$$U_{\text{负离子}} = 5.256 \times 10^{15} \times AHK_{\text{负离子}}(Q_{\text{负离子}} - 600) / L \quad (8)$$

式中, $U_{\text{负离子}}$ 为林分年提供负离子价值(元/a); A 为林带面积(hm^2); H 为林带高度(m); $K_{\text{负离子}}$ 为负离子生产费用(元/个); $Q_{\text{负离子}}$ 为林带负离子浓度(个/ cm^3); L 为负离子寿命(min)。

(2) 吸收污染物功能的价值

$$U_{\text{二氧化硫}} = K_{\text{二氧化硫}} Q_{\text{二氧化硫}} A \quad (9)$$

$$U_{\text{氮氧化物}} = K_{\text{氮氧化物}} Q_{\text{氮氧化物}} A \quad (10)$$

$$U_{\text{氟化物}} = K_{\text{氟化物}} Q_{\text{氟化物}} A \quad (11)$$

式中, $U_{\text{二氧化硫}}$ 、 $U_{\text{氮氧化物}}$ 、 $U_{\text{氟化物}}$ 为林带年吸收二氧化硫、氮氧化物、氟化物的价值(元/a); $K_{\text{二氧化硫}}$ 、 $K_{\text{氮氧化物}}$ 、 $K_{\text{氟化物}}$ 为二氧化硫、氮氧化物、氟化物治理费

用(元/kg); $Q_{\text{二氧化硫}}$ 、 $Q_{\text{氮氧化物}}$ 、 $Q_{\text{氟化物}}$ 污染物为单位面积林带年吸收二氧化硫、氮氧化物、氟化物量[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; A 为林带面积(hm^2)。

(3) 降噪功能的价值

$$U_{\text{噪音}} = K_{\text{噪音}} A_{\text{噪音}} \quad (12)$$

式中, $U_{\text{噪音}}$ 为林带年降低噪音价值(元/a); $K_{\text{噪音}}$ 为降低噪音费用(元/km); $A_{\text{噪音}}$ 为林带面积折合为噪音墙的千米数。

(4) 滞尘功能的价值

$$U_{\text{滞尘}} = K_{\text{滞尘}} Q_{\text{滞尘}} A \quad (13)$$

式中, $U_{\text{滞尘}}$ 为林带年滞尘价值(元/a); $K_{\text{滞尘}}$ 为降尘清理费用(元/kg); $Q_{\text{滞尘}}$ 为单位面积林带年滞尘量[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; A 为林带面积(hm^2)。

1.2.6 森林防护的价值 《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中森林防护价值的计算公式是针对农田防护林和防风固沙林 2 种林型而言的,即通过计算增加的农作物及牧草年产量来计算森林防护价值。但经实际调查研究,扬州市内长江沿岸的森林类型多数属于水土保持林,几乎没有因森林防护而增加的农作物及牧草,因此不能按照《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中森林防护价值的计算公式。

本研究参考江苏省森林资源监测中心提供的数据和方法,计算公式如下:

$$U_{\text{防护}} = U_{\text{水土保持林}} A \quad (14)$$

式中, $U_{\text{防护}}$ 为森林防护价值(元/a); $U_{\text{水土保持林}}$ 为单位面积水土保持林的防护价值[元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]; A 为林带面积(hm^2)。

1.2.7 生物多样性保护的价值 生物多样性对于生态系统结构的完整与功能的健全有着重要的意义,是人类社会生存和可持续发展的基础。森林生态系统以其复杂的组织结构,成为物种生存、繁殖与进化的庇护所,反映了森林生态系统的支持功能。

$$U_{\text{生物}} = S_{\text{生}} A \quad (15)$$

式中, $U_{\text{生物}}$ 为林带年物种保育价值(元/a); $S_{\text{生}}$ 为单位面积年物种损失的机会成本[元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]; A 为林带面积(hm^2)。

1.2.8 森林游憩的价值 本研究采用费用支出法,在江苏统计年鉴所公布的近 3 a 扬州市旅游年收入情况的基础上,由扬州市单位面积森林游憩平均价值估算出扬州市长江沿岸森林游憩服务功能价值。计算公式如下:

$$U_{\text{游憩}} = U_{\text{省游憩}} A \quad (16)$$

式中, $U_{\text{游憩}}$ 为森林游憩价值(元/a); $U_{\text{省游憩}}$ 为扬州市单位面积森林游憩平均价值[元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]; A 为林带面积(hm^2)。

2 结果与分析

2.1 涵养水源的价值

根据森林涵养水源价值的计算公式(1)和(2),并参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中的社会公共数据,公式中 $C_{\text{库}}$ (水库建设单位库容投资)为 6.110 7 元/ m^3 ; K (水的净化费用)为 2.09 元/t。 P (林外年降水量):参考江苏统计局公开发布的 2017—2019 年江苏统计年鉴,对扬州市近 3 a 的年降水量取平均值即为年降水量。经计算,林外年降水量 P 为 1 440.13 mm/a。 E (林分蒸散量):参考近年来长江三角洲的相关监测数据及文献^[2-4],各林分类型的蒸散率为:杉类 58.90%;混交林 46.44%;硬阔类 37.4%;杨 47.79%;软阔类 45.8%;竹林 50.50%;其他树种 41.65%。由蒸散率及降水量 P 计算可得相对应林分类型的蒸散量。由于扬州市总体地形坡度不大、土层深厚,从全省、全年这一大尺度来看扬州市林区总体地表径流量非常小可忽略不计,另外我国许多学者在对全国或区域大尺度范围内森林涵养水源功能的研究^[5-8]中,也同样对地表径流进行了忽略,因此本研究对 C (地表径流量)忽略不计。

由此得出扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林调节水量和净化水质的价值分别为 1 371.36 万、469.04 万元/a,涵养水源的总价值为 1 840.40 万元/a。此外,在 12 类林分类型的森林中,杨树林的调节水量和净化水质的价值最高,分别高达 941.38 万元/a 和 321.97 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,涵养水源功能价值最低的是水杉林,只有 1.37 万元/a。

可见,阔叶纯林涵养水源的能力最强,优于阔叶混交林和水杉林。有研究表明,与针叶林相比,杨树林的凋落物量多且分解快,腐殖质增多能提高土壤肥力,且土壤疏松度和通气性增强可形成最佳的土壤结构,从而提高了渗透速度,地表径流量减小,土壤持水性能提升,林分持水量增大^[5-7]。

2.2 保育土壤的价值

2.2.1 固土价值 根据森林固土价值的计算公式(3),并参考相关文献资料^[8-9], X_1 (林地土壤侵蚀模数):江苏省林地土壤侵蚀模数为 2—4 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$),本研究取平均值 3 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。 X_2 (无林地土

壤侵蚀模数);江苏省无林地土壤侵蚀模数为 18—31.5 t/(hm²·a),本研究取平均值 24.75 t/(hm²·a)。 ρ (林地土壤容重):江苏省林地土壤平均容重为 1.2 t/m³;参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中的社会公共数据, C_{\pm} (挖取和运输单位体积土方所需费用)为 12.6 元/m³。

由此得出每种植被类型的固土价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林固土价值为 6.73 万元/a。此外,在 12 类林分类型的森林中,杨树林的固土功能价值最高,达 4.68 万元/a。其次是银杏和速生阔叶林,固土价值最低的是水杉林,固土价值只有 63.95 元/a。

2.2.2 保肥价值 根据森林保肥价值的计算公式(4),并参考近年来江苏省各林分土壤养分相关文献资料^[10-12], N (林分土壤平均含氮量):江苏省主要林分土壤含氮量 0.069%—0.166%,其中针阔混交林(杨树杉木混交)含氮量为 0.069%,杨树林土壤含氮量为 0.246%,水杉林土壤含氮量为 0.332%,其他植被类型土壤含氮量按照以上数据的平均值 0.471%计算。 P (林分土壤平均含磷量):江苏省主要林分土壤含磷量 0.071%—0.113%,其中杉木林土壤含磷量为 0.145%,杨树林土壤含磷量为 0.121%,其他植被类型土壤含磷量按照以上数据的平均值 0.156%计算。 K (林分土壤平均含钾量):江苏省主要林分土壤含钾量 1.025%—1.451%,本研究中各林分土壤含钾量按照平均值 1.238%计算。 M (林分土壤平均有机质含量):江苏省主要林分土壤有机质含量 0.018 6%—0.034 4%,其中软阔混交林土壤有机质为 0.56%,杨树林土壤有机质含量为 0.393%,其他植被类型土壤有机质含量按照以上数据平均值 0.719%计算。参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中的社会公共数据, C_1 (磷酸二铵化肥价格):2 400 元/t; C_2 (氯化钾化肥价格):2 200 元/t; C_3 (有机质价格):320 元/t; R_1 (磷酸二铵化肥中含氮量):14.0%; R_2 (磷酸二铵化肥中含磷量):14.15%; R_3 (氯化钾化肥中含钾量):50%。

由此可计算得出每种植被类型的保肥价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林保肥功能的价值为 104.58 万元/a。此外,在 12 类林分类型的森林中,杨树林的保肥功能价值最高,达 73.07 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,保肥功能价值最低的是水杉林,保肥价值只有 0.10 万元/a。有研究表明,杨树林的土壤侵蚀能力及土壤有机质等含量均高于针

叶林,本研究结果与前人研究结果一致^[11-12]。

2.3 固碳释氧的价值

根据森林固碳释氧价值的计算公式(5)和(6),参考森林生态系统服务功能评估规范^[1], $C_{\text{碳}}$ (固碳价格)为 1 200 元/t; $C_{\text{氧}}$ (氧气价格)为 1 000 元/t; $R_{\text{碳}}$ 是 CO₂中碳的含量,为 27.27%。结合长江三角洲城市森林多年发表的相关文献^[13-14]可得出: $B_{\text{年}}$ (林分净生产力):阔叶混交林净生产力为 15.279 t/(hm²·a),杨树林净生产力为 11.321 t/(hm²·a),常绿阔叶混交林净生产力为 11.508 t/(hm²·a);杉类净生产力为 8.466 t/(hm²·a),其他类型林分按照以上数据的平均值 9.061 t/(hm²·a)计算。 $F_{\text{土壤碳}}$ (单位面积林分土壤年固碳量):以江苏省主要林分土壤年平均固碳量 59.9 t/(hm²·a)为准。

由此计算得出每种植被类型的固碳价值和释氧价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林固碳和释氧功能的价值分别为 2 292.82 万,391.59 万元/a。固碳释氧的总价值为 0.27 亿元/a。此外,在 12 类林分类型的森林中,杨树林的固碳释氧功能价值最高,达 1 872.50 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,固碳释氧功能价值最低的是水杉林,其固碳释氧价值仅为 0.28 万元/a。

2.4 积累营养物质的价值

根据森林积累营养物质价值的计算公式(7),通过查阅近年来长江三角洲地区森林生态系统相关文献^[15-17]中的监测资料,可得出: $B_{\text{年}}$ (林分净生产力):阔叶混交林净生产力为 15.279 t/(hm²·a),杨树林净生产力为 11.321 t/(hm²·a),常绿阔叶混交林净生产力为 11.508 t/(hm²·a);杉类林的净生产力为 8.466 t/(hm²·a),其他类型林分按照以上数据的平均值 9.061 t/(hm²·a)计算。 $N_{\text{营养}}$ (林木含氮量):江苏省主要林分的林木含氮量为 1.21%—3.37%,本研究取平均值 2.29%计算。 $P_{\text{营养}}$ (林木含磷量):江苏省主要林分的林木含磷量为 0.4%—0.95%,本研究取平均值 0.675%计算。 $K_{\text{营养}}$ (林木含钾量):江苏省主要林分的林木含钾量为 1.2%—3.14%,本研究取平均值 2.17%计算。由此得出扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林积累营养物质功能的价值为 198.28 万元/a。此外,在 12 类林分类型的森林中,杨树林积累营养物质功能价值最高,达 139.76 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,积累营养物质功能价值最低的是水杉林,仅为 0.14 万

元/a。

2.5 净化大气环境的价值

2.5.1 提供负离子功能价值 根据森林提供负离子功能价值的计算公式(8),参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中的社会公共数据, $K_{\text{负离子}}$ (负离子生产费用)为 5.818 5 元/(10^{18} 个); L 为负离子寿命为 10 min。参考近年来发表的有关江苏省各植被类型特征的文献资料^[18-20],针叶林负离子浓度取 1 507 个/ cm^3 ,阔叶林负离子浓度取 1 161 个/ cm^3 ,竹林负离子浓度取 1 135 个/ cm^3 ,经济林负离子浓度取 682 个/ cm^3 ,灌木林负离子浓度取 614 个/ cm^3 。 H 为林带高度(m):杉类、阔叶林以 12 m 计算,经济林以 5 m 计算,竹林以 8 m 计算,灌木林以 3 m 计算。由此计算得出每种植被类型提供负离子功能价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林提供负离子功能的价值为 0.59 万元/a。此外,在 12 类林分类型的森林中,杨树林的提供负离子功能价值最高,高达 0.42 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,提供负离子功能价值最低的是桃林,仅为 0.60 万元/a。

2.5.2 吸收污染物价值 根据森林吸收污染物功能价值的计算公式(9)、(10)和(11),并参考相关文献资料^[21-25], $Q_{\text{二氧化硫}}$:杉类林单位面积年吸收 SO_2 量为 65.174 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,阔叶林单位面积年吸收 SO_2 量为 444.322 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,竹林单位面积年吸收 SO_2 量为 8.887 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,经济林单位面积年吸收 SO_2 量为 0.497 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,灌木林单位面积年吸收 SO_2 量为 105.887 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。 $Q_{\text{氮氧化物}}$:杉类林单位面积年吸收 NO_x 量为 2.577 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,竹林的单位面积年吸收 NO_x 量为 0.154 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,经济林的单位面积年吸收 NO_x 量为 0.003 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,阔叶林的单位面积年吸收 NO_x 量为 2.807 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,灌木林的单位面积年吸收 NO_x 量为 1.795 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。 $Q_{\text{氟化物}}$:杉类林的单位面积年吸收氟化物量为 3.325 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,竹林的单位面积年吸收氟化物量为 0.350 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,经济林的单位面积年吸收氟化物量为 0.034 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,阔叶林的单位面积年吸收氟化物量为 30.072 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,灌木林的单位面积年吸收氟化物量为 4.175 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中的社会公共数据, $K_{\text{二氧化硫}}$ (二氧化硫治理费用)为 1.20 元/kg; $K_{\text{氮氧化物}}$ (氮氧化物治理费用)为 0.63 元/kg; $K_{\text{氟化物}}$

(氟化物治理费用)为 0.69 元/kg。

由此计算得出每种植被类型吸收污染物功能价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林吸收 SO_2 的功能价值为 15.16 万元/a,吸收 NO_x 的功能价值为 0.05 万元/a,吸收氟化物的功能价值为 0.95 万元/a。因此,扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林吸收污染物功能的总价值为 15.8 万元/a。此外,在 12 种林分类型的森林中,杨树林的吸收污染物功能价值最高,高达 11.39 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,吸收污染物功能价值最低的是桃树林,仅为 0.30 万元/a。

2.5.3 降噪价值 根据森林降噪功能价值的计算公式(12),参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中的社会公共数据, $K_{\text{噪音}}$ (降低噪音费用)为 400 000 元/km,按照 100 元/ m^2 隔音墙(高 4 m)成本计算。 $A_{\text{噪音}}$ 按照噪音墙 4 m 高的标准^[1],由林带面积折合为噪音墙的千米数。由此计算得出每种植被类型降噪功能价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林降噪功能价值为 2.95 万元/a。此外,在 12 种林分类型的森林中,杨树林的降噪功能价值最高,高达 2.049 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,降噪功能价值最低的是水杉林,仅为 0.003 万元/a。

2.5.4 滞尘功能价值 根据森林滞尘功能价值的计算公式(13),参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[1]中的社会公共数据, $K_{\text{滞尘}}$ (降尘清理费用)为 0.15 元/kg;此外根据相关文献资料^[26-29],阔叶林、竹林的单位面积年滞尘量为 10.11 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;针叶林的单位面积年滞尘量为 33.2 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其他乔木林的单位面积年滞尘量为 16.74 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,灌木林的单位面积年滞尘量为 5.47 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。由此估算得出每种植被类型滞尘功能价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林滞尘功能价值为 48.93 万元/a。此外,在 12 种林分类型的森林中,杨树林的滞尘功能价值最高,高达 31.07 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,滞尘功能价值最低的是桃树林,仅为 0.04 万元/a。

2.6 森林防护的价值

根据森林防护功能价值的计算公式(14),并参考相关文献资料^[30-31],江苏省水土保持林的年防护价值为 826.0 元/a。计算得出每种植被类型森林防护功能价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林防护功能价值为 24.33 万元/a。此外,在 12 种林分类型的森林中,杨树林的森林防护功能价值最高,可达

16.92 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,森林防护功能价值最低的是水杉林,仅有 0.02 万元/a。

2.7 生物多样性保护的价值

根据 Shannon-Wiener 指数计算物种保育价值,共划分为 7 级^[1]:当指数 <1 时, $S_{生}$ 为 3 000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$);当 $1 \leq \text{指数} < 2$ 时, $S_{生}$ 为 5 000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$);当 $2 \leq \text{指数} < 3$ 时, $S_{生}$ 为 10 000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$);当 $3 \leq \text{指数} < 4$ 时, $S_{生}$ 为 20 000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$);当 $4 \leq \text{指数} < 5$ 时, $S_{生}$ 为 30 000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$);当 $5 \leq \text{指数} < 6$ 时, $S_{生}$ 为 40 000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$);当 H 指数 6 时, $S_{生}$ 为 50 000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。根据所划分的 7 个等级可得出对应的 $S_{生}$ 。参考相关文献^[32-33]得出,杉类林的 Shannon-Wiener 指数为 1.568、竹林的 Shannon-Wiener 指数为 1.640、经济林的 Shannon-Wiener 指数为 0.952、阔叶林的 Shannon-Wiener 指数为 3.665、灌木林的 Shannon-Wiener 指数为 2.735。

由此计算得出每种植被类型生物多样性保护价值。扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林生物多样性保护功能的价值为 515.83 万元/a。此外,在 12 种林分类型的森林中,杨树林的生物多样性保护功能价值最高,可达 409.78 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,生物多样性保护功能价值最低的是水杉林,仅有 0.14 万元/a。

2.8 森林游憩的价值

本研究以扬州市单位面积森林游憩价值作为扬州市长江沿岸森林单位面积游憩功能价值,通过查阅文献资料^[32],得出扬州市森林游憩价值在 1 546.76 万元/a,结合扬州市森林面积统计数据,计算出扬州市单位面积森林游憩价值,进而估算出扬州市长江沿岸森林游憩服务功能价值。由此得出扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林游憩的总价值为 39.13 万元/a。此外,在 12 种林分类型的森林中,杨树林的游憩功能价值最高,可达 27.22 万元/a,其次是银杏和速生阔叶林,游憩功能价值最低的是水杉林,仅为 0.04 万元/a。

3 小结

依据中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)^[1]中的指标和计算方法,结合扬州市长江沿岸森林的调查数据及现有的文献资料,扬州市长江沿岸宽 1 km 森林生态系统的 8 大服务功能(涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、森林防

护、生物多样性保护、森林游憩)的价值分别为 1 840.40 万,111.31 万,2 684.41 万,198.28 万,68.27 万,24.33 万,515.83 万,39.13 万元/a。因此,扬州市长江沿岸宽 1 km 森林生态系统服务功能的总价值为 5 481.96 万元/a。

表2 扬州市长江沿岸宽 1 km 内森林生态系统服务功能价值

功能类别	评估指标	各项指标价值量 /(万元/a)	总价值 /(万元/a)	占比 /%
涵养水源	调节水量	1 371.36	1 840.40	33.57
	净化水质	469.04		
保育土壤	固土	6.73	111.31	2.03
	保肥	104.58		
固碳释氧	固碳	2 292.82	2 684.41	48.97
	释氧	391.59		
积累营养物质	营养积累	198.28	198.28	3.62
	负氧离子	0.59		
净化大气环境	吸收污染物	15.80	68.27	1.25
	减噪	2.95		
	滞尘	48.93		
生物多样性保护	物种保育	515.83	515.83	9.41
森林防护	森林防护	24.33	24.33	0.44
森林游憩	森林游憩	39.13	39.13	0.71
总计	-	-	5 481.96	100

此外,由扬州市长江沿岸 1 km 森林生态系统的 8 大服务功能价值的占比可知,森林 8 大服务功能价值差异较大,其中森林固碳释氧的功能价值占比最高,达到了 48.97%,其次是涵养水源,森林防护和森林游憩的价值占比最低。

由此可见,扬州市应大力发展长江沿岸森林建设,以增加长江沿岸森林整体的生态服务价值,同时运用多种监测手段监测长江沿岸森林面积和树种变化等。此外,建议在长江沿岸增设森林生态监测站点,为长江沿岸森林的保护管理及合理利用提供科学依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准(LY/T 1721-2008):森林生态系统服务功能评估规范[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [2] 王祖华.淳安县森林生态系统服务功能价值评价研究[D].南京:南京林业大学,2008.
- [3] 曹静.南京紫金山森林植物多样性及其价值评估[D].南京:南京林业大学,2011.
- [4] 刘晶淼,周秀骥,余锦华,等.长江三角洲地区水和热通量的时空变化特征及影响因素[J].气象学报,2002,60(2):139-145.

- [5] 靳 芳,鲁绍伟,余新晓,等.中国森林生态系统服务功能价值评价[J].生态学报,2005,16(8):1531-1536.
- [6] 余新晓,鲁绍伟,靳 芳.中国森林生态系统服务功能价值评估[J].生态学报,2005,25(8):2096-2102.
- [7] 徐成立,王雄宾,余新晓,等.北京山地森林生态服务功能评估[J].东北林业大学学报,2010,38(7):79-82.
- [8] 韩素芸.湖南省主要森林类型生态服务功能及价值评价[D].长沙:中南林业科技大学,2010.
- [9] 钱永先.老山林场森林生态服务功能价值的评价分析[D].南京:南京林业大学,2011.
- [10] 黄 进.苏南丘陵山区主要森林类型防水蚀功能评价[D].南京:南京林业大学,2011.
- [11] 杨 东.苏北海堤防护林土壤肥力特性研究[D].南京:南京林业大学,2005.
- [12] 王琳贤,杨 浩,张明礼,等.镇江地区不同地类土壤侵蚀¹³⁷Cs法初步研究[J].中国水土保持,2011,6:26-28.
- [13] 卢义山,梁珍海,吴仲祥,等.苏北海堤防护林主要造林树种林分生物量与生产力的研究[J].江苏林业科技,2000,27(2):12-15.
- [14] 唐罗忠,黄宝龙,杨文忠.扬州市里下河地区杨树人工林的碳储量及其动态[J].南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(2):1-6.
- [15] 高志强,刘纪远.中国植被净生产力的比较研究[J].科学通报,2008,53(3):317-326.
- [16] 余 超,王 斌,刘 华,等.中国森林植被净生产量及平均生产力动态变化分析[J].林业科学研究,2014,27(4):542-550.
- [17] 苏继申,庄家尧,顾 叶,等.南京市城市森林固碳制氧效益研究[J].林业科技开发,2010,24(3):49-52.
- [18] 王晓杰.徐州市森林植被碳储量与固碳价值研究[D].南京:南京林业大学,2012.
- [19] 姚瑞玲,丁贵杰,王 胤.不同密度马尾松人工林凋落物及养分归还量的年变化特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(5):83-85.
- [20] 陶宝先,张金池,俞元春.苏南丘陵区典型森林生态系统服务价值估算[J].生态环境学报,2010,19(9):2054-2060.
- [21] 唐小华.苏北农田防护林生态服务功能价值评估—以新沂市为例[D].南京:南京林业大学,2011.
- [22] 倪健忠.扬州市 2005-2010 年森林资源动态变化[D].南京:南京林业大学,2012.
- [23] 刘 磊.基于多源数据的森林生物量与生产力估算研究[D].南京:南京林业大学,2010.
- [24] 刘 斌.扬州市 2003-2012 年植树造林结构与成效浅析[J].江苏林业科技,2013,40(1):10-12.
- [25] 范 云.马鞍山市森林生态系统服务功能价值评估与分析[J].江苏林业科技,2019,46(6):1-6.
- [26] 郭益力,张 静,鲁小珍,等.南京不同绿地类型空气负离子浓度[J].安徽农业科学,2013,41(7):3077-3078,3083.
- [27] 关蓓蓓.上海市崇明岛生态用地空气负离子特征及其主要影响因子研究[D].上海:华东理工大学,2015.
- [28] 中国生物多样性研究报告编写组.中国生物多样性国情研究报告[M].北京:中国环境科学出版社,1998.
- [29] 方 颖,张金池,王玉华.南京市主要绿化树种对大气固体悬浮物净化能力及规律研究[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):36-40.
- [30] 王志科,余 华,殷云龙,等.近十年扬州市公路绿化综合效益评估与分析[J].植物资源与环境学报,2012,21(4):94-99.
- [31] 沈沉沉.上海市环城绿带生态系统服务功能评价及其价值评估[D].上海:华东师范大学,2011.
- [32] 李思刚,蒋婷婷,曹国华.基于扬州市森林资源普查成果的生态效益评价与分析[J].江苏林业科技,2019,46(1):29-33.
- [33] 黄道京.广西姑婆山国家森林公园森林生态服务功能评价研究[D].长沙:中南林业科技大学,2014.