

# 宁波余姚市防护林带生态系统服务功能价值评估

荆贝贝<sup>1</sup>, 张希金<sup>1</sup>, 李晓旭<sup>1</sup>, 涂克环<sup>1</sup>, 达良俊<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241; 2. 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江 宁波 315114;  
3. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

**摘 要:**以宁波余姚市防护林带为研究对象,建立了含有调节功能、文化功能和支持功能 3 大类共 15 项评估指标的生态系统服务功能价值评估指标体系,利用市场价值法、影子工程法和条件价值法等,定量评估了防护林带生态系统服务价值。结果表明:余姚市防护林带生态系统服务功能总价值为 24 310.79 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 24.31 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;净化大气环境、调节温湿度和涵养水源这 3 项功能是宁波防护林带的主导生态服务功能,分别占总价值的 50.78%、24.45% 和 16.89%;与具有相似防护功能的上海市环城绿带相比,余姚市防护林带的生态系统服务功能单位面积价值稍低于上海市环城绿带。研究结果能为余姚市区域经济可持续发展和绿色 GDP 的核算提供科学依据。

**关键词:**防护林带;生态系统服务功能;价值评估

**中图分类号:**S718.55      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)04-0081-06

## Evaluation of the Ecosystem Service of Urban Shelter Forests in Yuyao, Ningbo

JING Bei-bei<sup>1</sup>, ZHANG Xi-jin<sup>1</sup>, LI Xiao-xu<sup>1</sup>, TU Ke-huan<sup>1</sup>, DA Liang-jun<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Tiantong Forest Ecosystem National Research Station, Ningbo, Zhejiang 315114, China;

3. Shanghai Key Laboratory for Ecology of Urbanization Process and Eco-restoration, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** The shelter forests occurring in Yuyao were chosen as research objects. Their ecosystem services were evaluated by establishing an ecosystem service value evaluation index system, which were composed of 3 types of ecosystem services: regulatory services, cultural services, support services, and included 15 indexes totally. Then the economic values of ecosystem services were evaluated by using methodologies, including market valuation, shadow price and conditional valuation. The results indicated that the total value of shelter forests in Yuyao was 243.107 9 million yuan·a<sup>-1</sup>, with a mean value per area of 243 100.2 yuan·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. Purifying the atmosphere environment, adjusting the temperature and humidity and water conservation function were the major ecological services of the forests, which accounted for 50.78%, 24.45% and 16.89% of total value, respectively. Comparing to Shanghai Green Belt with similar protective functions, the ecosystem service value per area of shelter forests in Yuyao was lower than that of Shanghai. The results could be applied for the Yuyao regional economic sustainable development and green GDP accounting.

**Key words:** shelter forest; ecosystem service; value evaluation

森林生态系统服务功能是指森林生态系统与生态过程所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条

件与效用<sup>[1]</sup>。量化评价森林生态系统的服务功能,有助于促进林业在国民经济中的主导地位,有助于

收稿日期:2015-08-21 修回日期:2015-12-25

基金项目:上海森林生态系统定位观测网络布局研究(G151202);上海常见绿化树种重金属富集能力的研究(G141208)。

作者简介:荆贝贝,女,硕士研究生,研究方向:城市生态学。E-mail:739050773@qq.com

\*通信作者:达良俊,男,教授,研究方向:城市生态学和植被生态学。E-mail:ljda@des.ecnu.edu.cn

对森林资源的科学利用和有效保护<sup>[2-3]</sup>。科学地评价森林生态系统的服务功能非常重要,已是生态学与生态经济学研究的热点<sup>[4]</sup>。近年来,国内外在生态系统价值评估方面做了大量的研究和理论探索<sup>[5-6]</sup>。日本在 1978—2001 年对全国森林生态效益进行了 3 次价值评估<sup>[7]</sup>。Costanza<sup>[2]</sup>等在 1997 年对全球生物圈生态系统服务价值进行了估算。后来,Ayres<sup>[8]</sup>、Serafy<sup>[9]</sup>、Ronnback<sup>[10]</sup>、Bjorklund<sup>[11]</sup>、Bolund<sup>[12]</sup>等进一步探讨了生态系统服务功能价值的研究。2005 年千年生态系统评(MillenniumEco-system Assessment,简称 MA)完成,来自 95 个国家的 1 360 位知名学者对生态系统及其对人类福祉的影响进行了开拓性、多尺度的综合评估<sup>[4]</sup>。2014 年,Costanza<sup>[13]</sup>等对关于全球生态系统服务功能价值从 1997—2001 年的变化开展深入研究。20 世纪 90 年代以后,国内引入了生态系统服务功能评价方法<sup>[14-17]</sup>。由于评估指标体系和评估方法的差异较大,使得彼此之间难以比较<sup>[2,18]</sup>。2008 年,国家林业局颁布了《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721-2008)(以下简称评估规范)<sup>[19]</sup>,确定了中国森林生态系统服务功能评估的指标体系和评估方法。

城市防护林主要的生态服务功能是保持水土、涵养水源、调节气候、净化环境等,是城市森林中不可缺少的一部分<sup>[20-22]</sup>。相比于已经开展了十分丰富研究的自然生态系统<sup>[23]</sup>,针对城市森林,特别是城市防护林的生态系统服务功能价值研究不多见,此外,与《评估规范》<sup>[19]</sup>相比,本研究中净化大气环境功能新增了夏季降温增湿、抑菌和阻滞 PM<sub>2.5</sub> 3 项指标。本研究以宁波市辖区余姚市防护林带为研究对象,参考文献和实测结果,对宁波防护林带服务功能进行定量分析和价值评估,并与具有相似防护功能的上海市环城绿带的生态效益相比,诊断防护林带的功能现状,为提高防护林带的生态服务功能提供科学依据。

## 1 研究区概况

余姚市为宁波市下属县级市,位于 121°09'E、30°30'N,属亚热带北缘,四季分明,是典型的季风型气候。年平均气温 16.2℃,最热月(7 月)均温为 28.3℃,最冷月(1 月)均温为 4.1℃。年降水量约为 1 550 mm,受到海陆位置和地形影响,降水自东南向西北递减。

余姚市防护林带西起黄家埠镇,东至小曹娥镇,全长 33.1 km,涉及黄家埠镇、临山镇、泗门镇、小曹

娥 4 个镇,总面积为 1 000.00 hm<sup>2</sup>(2013 年),经实地调查,植被类型主要是常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和落叶针叶林,优势种为女贞(*Ligustrum lucidum*)、杜英(*Elaeocarpus decipiens*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、杨树(*Populus* spp.)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等,对优势种抽样调查,记录其结构特征(表 1)。为获取各指标计算所需参数,于 2013 年分别在防护林带植物生长的复苏期(3 月)、茂盛期(6 月)和凋落期(11 月)进行实地采样和测定。

表 1 生态服务功能测定样地的物种组成  
Table 1 Species composition of sampling plots for ecological service function evaluation

样点	树种	高度/m	胸径/m	生活型
1 号样点	女贞 ( <i>L. lucidum</i> )	4.0±0.5	8.5±0.4	常绿阔叶乔木
	杜英 ( <i>E. decipiens</i> )	5.0±0.5	15.0±0.3	常绿阔叶乔木
2 号样点	马尾松 ( <i>P. massoniana</i> )	12.5±0.3	20.5±0.5	常绿针叶乔木
	广玉兰 ( <i>M. grandiflora</i> )	10.5±0.5	20.0±0.4	常绿阔叶乔木
3 号样点	杨树 ( <i>Populus</i> spp.)	14.0±0.5	31.0±0.4	落叶阔叶乔木
	水杉 ( <i>M. glyptostroboides</i> )	13.0±0.5	14.0±0.3	落叶针叶乔木

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置

采取平均布点和代表性布点的原则,采样及测定点设置在具有代表性的 G92 杭州湾环城高速公路两侧的防护林带,并设置 3 个样点,样点 1 的主要树种是杜英和女贞,样点 2 的主要树种是马尾松和广玉兰,样点 3 的主要树种是杨树和水杉。1 号与 2 号样点相距 14.2 km,2 号与 3 号样点相距 12 km,每个样点内设 3 个 20 m×20 m 的样方,每个样方间隔 10 m(图 1)。

### 2.1 评估指标体系与方法

结合宁波防护林带实地考察情况和建设目的,参考《评估规范》(王兵等,2008)<sup>[19]</sup>,选取了其中的调节、文化和支持 3 类功能、8 个类别、15 项评估指标,同时增加了抑菌、阻滞 PM<sub>2.5</sub>、夏季降温增湿 3 项新的评价指标,结合野外测量及室内样品分析并参考国家森林生态系统长期定位观测数据和成果资料,建立了对余姚防护林的生态系统服务价值评估体系(表 2)。

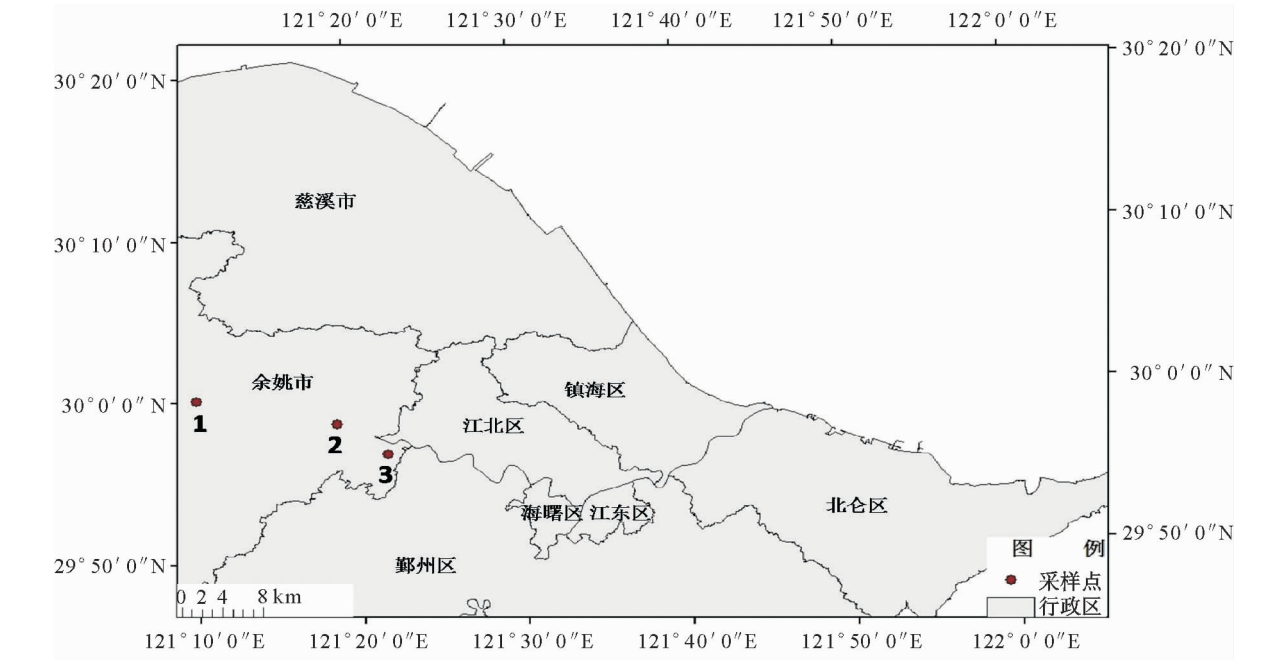


图 1 研究样点分布

Fig. 1 Sample point distribution in Yuyao

表 2 生态系统服务价值评估指标体系

Table 2 Ecosystem service value evaluation index system

功能类型	指标类别	评价指标	评估方法	公式	来源
调节功能	涵养水源	调节水量	影子工程法	$U_{\text{调}} = 10C_{\text{库}} A(P - E - C)$	(1) 《评估规范》
		净化水质	条件价值法	$U_{\text{净}} = 10KA(P - E - C)$	(2) 《评估规范》
	固土保育	固持土壤	影子工程法	$U_{\text{固土}} = AC \pm (X_2 - X_1) / \rho$	(3) 《评估规范》
		净化大气环境	提供负离子	替代成本法	$U_{\text{负离子}} = 5.256 \times 10^{15} \times AHK_{\text{负离子}} (Q_{\text{负离子}} - 600) / L$
	吸收污染物		替代成本法	$U_{\text{污染物}} = W_{\text{净化}} C_{\text{电}}$	(5) 《评估规范》
	降噪		影子工程法	$U_{\text{噪音}} = K_{\text{噪音}} A_{\text{噪音}}$	(6) 《评估规范》
	抑菌		替代成本法	$U_{\text{抑菌}} = W_{\text{菌}} C_{\text{电}}^{[24]}$	(7) 本研究新增
	阻滞 PM <sub>10</sub>		市场价值法	$U_{\text{滞尘}} = K_{\text{滞尘}} Q_{\text{滞尘}} A$	(8) 《评估规范》
	阻滞 PM <sub>2.5</sub>		替代成本法	$U_{\text{PM2.5}} = W_{\text{PM2.5}} C_{\text{电}}^{[25]}$	(9) 本研究新增
	调节温湿度	夏季降温增湿	替代成本法	$U_{\text{降温}} = W_{\text{降温}} C_{\text{电}}^{[26]}$	(10) 本研究新增
积累营养物质	林木营养积累	市场价值法	$U_{\text{营养}} = AB_{\text{年}} (N_{\text{营养}} C_1 / R_1 + P_{\text{营养}} C_1 / R_2 + K_{\text{营养}} C_2 / R_3)$	(11) 《评估规范》	
支持功能	固碳释氧	固碳	碳税法	$U_{\text{碳}} = 1.63AC_{\text{碳}} R_{\text{碳}} B_{\text{年}}$	(12) 《评估规范》
		释氧	工业制氧影子法	$U_{\text{氧}} = 1.19C_{\text{氧}} AB_{\text{年}}$	(13) 《评估规范》
	生物多样性保护	物种保育	条件价值法	$U_{\text{生物}} = S_{\text{生}} A$	(14) 《评估规范》
文化功能	森林游憩	森林游憩	条件价值法	$U_{\text{游憩}} = nS_{\text{个人支付意愿}} A_{\text{人}}$	(15) 《评估规范》

3 结果与分析

3.1 涵养水源

参考 2013 年宁波市水利局水资源公报<sup>[27]</sup>, 2013 年余姚市防护林带降水量  $P=1\,750.3\text{ mm}$ , 水分蒸发量  $E=1\,123.1\text{ mm}$ ; 全市地表径流  $C=843.4\text{ mm}$ ; 据《评估规范》<sup>[19]</sup>, 根据公式(1)(2), 计算出余姚防护林带涵养水源价值为  $4\,106.01\text{ 万元 a}^{-1}$ , 单位面积价值为  $4.11\text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。

3.2 固持土壤

阔叶林林地侵蚀模数为  $0.3\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[28]</sup>, 针叶林林地侵蚀模数为  $1.3\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[28]</sup>。根

据公式(3)计算得出余姚防护林带固定土壤价值为  $39.06\text{ 万元} \cdot \text{a}^{-1}$ , 单位面积价值  $0.04\text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.3 净化大气环境

3.3.1 提供负离子 在样地内同时用负离子仪检测负离子浓度, 余姚市林内平均负离子浓度  $Q_{\text{负离子}}=900\text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 林外平均负离子浓度为  $650\text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 根据公式(4), 计算得出余姚防护林带提供负离子价值为  $8\,715.88\text{ 万元} \cdot \text{a}^{-1}$ , 单位面积价值为  $8.72\text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.3.2 吸收污染物 余姚市防护林带周边的主要大气污染物是  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HCL}$  和  $\text{HF}$  等, 故

测定处理后的样品中硫、氮、氯、氟等元素的含量。本研究采用替代成本法计算防护林带的吸收污染物价值。根据公式(5)计算,得出余姚市防护林带吸收污染物价值为 1 184.97 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值 1.18 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.3.3 降噪 降噪价值采用修筑噪音隔离墙的影子工程法进行评估,据《评估规范》,修筑噪音隔离墙费用( $K_{\text{噪音}}$ )为 40 万元·km<sup>-1</sup>。余姚市防护林换算成噪音隔离墙长度为 60.7 km。根据公式(6)计算林带降噪功能价值,将总价值变换求得一年价值,公式为: $V=Ur$ ,计算可得各林带降低噪音功能总价值为 129.90 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 0.13 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.3.4 抑菌 采用自然沉降法采集群落内外空气细菌含量,余姚市防护林带林内平均菌落数为 11 个,林外平均菌落数为 29 个,下降了 62.07%,抑菌服务功能效果明显。要使其达到防护林带相同的抑菌效果,则大概每天需要紫外灭菌灯工作 2 h<sup>[25]</sup>,据公式(7)计算林带抑菌功能价值为 403.69 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 0.40 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.3.5 阻滞 PM<sub>10</sub> 将采集的植物叶片带回,称重,

将叶片表面的粉尘清除,再次称重,差值为粉尘质量,记录粉尘质量。然后测定叶片干重、比叶面积、叶面积指数,换算得出平均每公顷林带年滞尘量( $Q_{\text{滞尘}}$ )。依据公式(8)计算出林带阻滞 PM<sub>10</sub> 粉尘功能价值为 330.23 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 0.33 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.3.6 阻滞 PM<sub>2.5</sub> 在多样地林内外同时采用美国 Dyls 空气质量 PM<sub>2.5</sub> 粒子计数器(型号 Dc1100pro)监测 PM<sub>2.5</sub> 浓度。3 个样点的测定结果显示,其中 2 个样点林带内平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著低于林带外对照旷地的 PM<sub>2.5</sub> 浓度,1 个样点林带内平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于林带外旷地对照组。采用替代成本法计算林带降低 PM<sub>2.5</sub> 浓度价值,根据公式(9)计算 PM<sub>2.5</sub> 的功能价值为 1 579.96 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 1.58 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.3.7 净化大气价值总和 防护林带净化大气环境功能包括提供负离子、吸收污染物、降噪、抑菌、阻滞 PM<sub>10</sub> 和阻滞 PM<sub>2.5</sub>,将 6 项功能的价值相加得出防护林带净化大气环境价值的总和为 12 344.63 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 12.34 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(表 3)。

表 3 林带净化大气环境价值

Table 3 Purifying atmosphere environment value of shelter forests							万元·a <sup>-1</sup>
提供负离子	吸收污物	降噪	抑菌	阻滞 PM <sub>10</sub>	阻滞 PM <sub>2.5</sub>	净化大气环境价值	单位面积价值 /(万元·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
8 715.88	1 184.97	129.90	403.69	330.23	1 579.96	12 344.63	12.34

3.4 调节温湿度

林带夏季降温 1.72℃,增湿 22.5%。在夏季的降温作用可直接减少城市空调的使用<sup>[26]</sup>。因此,以空调降温增湿达到与林带同样效果时所耗电能的费用代替林带降温功能价值。依据公式(10)计算林带降温增湿功能价值为 5 944.75 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 5.94 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.5 积累营养物质

林木营养积累是指林木对营养元素 N、P、K 的富集。根据宁波市林业局公报<sup>[29]</sup>,算出余姚市的林分年净生产力分别为 3.69 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。浙江地区平均林木含氮量 N 营养、含磷量 P 营养和含钾量 K 营养分别为 2.42%、0.19% 和 1.70%<sup>[30]</sup>。根据公式(11),计算得到余姚市防护林带积累营养物质价值为 191.89 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 0.19 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.6 固碳释氧

余姚市的林分净生产力( $B_{\text{年}}$ )为 3.69 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。本研究采用碳税法,据《评估规范》<sup>[19]</sup>,国际固碳价格( $C_{\text{碳}}$ )为 150 美元·t<sup>-1</sup>。采用工业制氧影

子法,制造氧气成本( $C_{\text{氧}}$ )为 1 000 元·t<sup>-1</sup>,根据公式(12)(13)计算林带固碳释氧价值为 591.65 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 0.59 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.7 生物多样性保护

根据对防护林带的 Shannon-Wiener 指数的计算,1≤余姚市防护林带的物种保育等级  $H''$ <2。根据《评估规范》,1≤Shannon-Wiener 指数<2 时,单位面积年物种损失的机会成本( $S_{\text{生}}$ )为 5 000 元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。根据公式(14),计算林带生物多样性保护价值为 500.00 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值为 0.50 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(表 4)。

3.8 森林游憩

采用随机问卷调查方式,样本容量均为 100 人,调查数据显示愿意支付( $S_{\text{个人支付意愿}}$ )2 元进入林带游憩的市民占到 95%,每个市民平均每年愿意进入林带游憩的次数( $n$ )为 2.6 次。根据公式(15),计算得出余姚防护林带森林游憩价值为 592.80 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积价值 0.59 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3.9 防护林带生态系统服务功能总价值

合计上述 8 类生态服务功能的价值,余姚市防

护林带生态系统服务功能的总价值为 24 310.79 万元·a<sup>-1</sup>,单位面积生态系统服务功能价值为 24.31 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。3 大功能组中价值排序均为调节功能>支持功能>文化功能,8 类功能价值按从大到小排序依次为:净化大气环境>调节温湿度>涵养水源>森林游憩>固碳释氧>生物多样性保护>积累营养物质>固持土壤(图 2)。排序前三的生态系统服务功能分别占总价值的 50.78%、24.45% 和 16.89%,说明这 3 项功能是余姚防护林带的主导生态服务功能,与建设初衷一致。

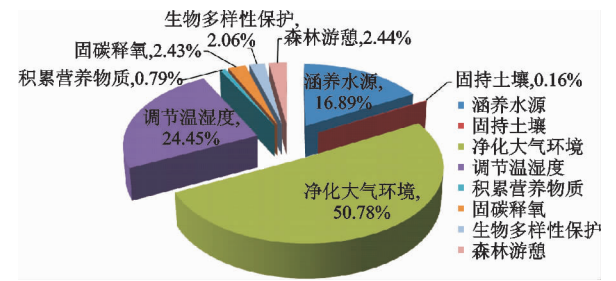


图 2 余姚市防护林带生态系统服务功能价值的比例组成  
Fig. 2 Percentages of each ecosystem service value of shelter forest in Yuyao

4 结论与讨论

4.1 评估指标体系的改进

本研究参考了 2002 年联合国千年生态系统评估工作组(MA)提出的 4 大功能组和《评估规范》,建立了 3 大功能组、15 项评估指标体系。与《评估规范》相比,本研究中净化大气环境功能新增了夏季降温增湿、抑菌和阻滞 PM<sub>2.5</sub> 3 项指标。沈沉沉<sup>[24]</sup>、范昕婷<sup>[31]</sup>的研究表明森林的降温增湿效应可以有效地改善城市热岛效应,因此,众多评估研究中均将其归入评估体系中<sup>[24]</sup>。国内的研究对于抑菌和阻滞 PM<sub>2.5</sub> 这 2 方面的生态价值评估不多见,国内外对 PM<sub>10</sub> 的污染特征开展了大量的研究<sup>[32-33]</sup>,但关于阻滞 PM<sub>2.5</sub> 功能价值的评估尚未见报道。与较粗的大气颗粒物 PM<sub>10</sub> 相比,PM<sub>2.5</sub> 粒径小,富含大量的有毒、有害物质且在大气中的停留时间长,输送距离远,因而对人体健康和大气环境质量的影响更大<sup>[34]</sup>;且绝大部分关于 PM<sub>2.5</sub> 的研究只是针对其污染来源以及变化分布规律的定性研究<sup>[35]</sup>。因此,将阻滞 PM<sub>2.5</sub> 功能纳入城市森林生态服务功能评估体系是非常迫切和有必要的<sup>[36]</sup>。

4.2 与上海城市防护林带的对比

上海市与宁波余姚同处华东地区,地理位置相近,气候相似。2010 年上海市环城绿带生态系统服务功能单位面积价值为 27.35 万元·hm<sup>-2</sup>·

a<sup>-1</sup><sup>[37]</sup>,本研究中余姚市防护林带生态系统服务功能单位面积价值分别为 24.31 万元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> (表 4)。

表 4 上海和余姚防护林带单位面积价值  
Table 4 Comparing per unit area value of urban shelter forest in Shanghai and Yuyao

服务功能	单位面积价值/(万元·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	
	上海	余姚
涵养水源	4.89	4.11
固土保育	0.05	0.04
净化大气环境	6.62	12.34
调节温湿度	10.22	5.94
积累营养物质	—	0.19
固碳释氧	3.29	0.59
生物多样性保护	1.12	0.50
森林游憩	1.16	0.59
总和	27.35	24.31

本次评估中余姚市防护林带调节温湿度和固碳释氧单位面积价值小于上海市环城绿带的评估价值。一方面这可能与上海城市“热岛效应”比余姚更明显有关<sup>[38-39]</sup>,另一方面,上海环城绿带建立的时间(1998 年)比余姚防护林建立的时间(2003 年)更早,林分更加成熟,生物量更大,调节生态系统能力更好。

上海环城绿带的生物多样性保护和森林游憩功能的单位面积价值远高于余姚。前者与上海市环城绿带植物配置,结构比较合理,植被种类较多<sup>[40]</sup>,物种保育等级更高有关;后者与上海环城绿带部分标段形成了公园型绿带、游客较多、森林文化功能发挥程度较高<sup>[18]</sup>有关。相反地,余姚防护林带净化大气环境单位面积价值远大于上海市环城绿带的评估价值,可能是 2 个原因造成:本研究中对于吸收污染物价值采用了替代成本法和新增了阻滞 PM<sub>2.5</sub> 功能这项指标。

致谢:感谢华东师范大学城市生态与植被生态研究室宋坤老师对于论文修改提出的宝贵意见。

参考文献:

[1] DAILY G C. Natures services; societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D C: Island Press, 1997.  
[2] COSTANZA R, ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.  
[3] 和爱军. 浅析日本的森林公益机能经济价值评价[J]. 中南林业调查规划, 2002, 21(2): 48-54.  
[4] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being; synthesis[M]. Washington D C: Island Press, 2005.  
[5] 靳芳, 鲁绍伟, 余新晓, 等. 森林生态系统服务功能价值评估问

题[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 18-22.

JIN F, LU S W, YU X X, *et al.* On forest ecosystem services and its evaluation in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3): 18-22. (in Chinese)

[6] 郭朝霞, 邓玉林, 王玉宽, 等. 森林生态系统生态服务功能研究进展[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1): 173-177.

GUO Z X, DENG Y L, WANG Y K, *et al.* Progress on ecological service function of forest ecosystems[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1): 173-177. (in Chinese)

[7] 王兵, 鲁绍伟, 尤文忠, 等. 辽宁省森林生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1792-1798.

WANG B, LU S W, YOU W Z, *et al.* Evaluation of forest ecosystem services value in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology. 2010, 21(7): 1792-1798. (in Chinese)

[8] AYRES R U. The price-value paradox[J]. Ecological Economics, 1998, 25: 17-19.

[9] SERAFY S. Pricing the invaluable: the value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998, 25: 25-27.

[10] RONNBACK P. The ecological basis for economic value of seafood production supported by mangrove ecosystems[J]. Ecological Economics, 1999, 29: 235-252.

[11] BJORKLUND J, LIMBURG K E, RYDBERG T. Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: an example from Sweden[J]. Ecological Economics, 1999, 29: 269-291.

[12] BOLUND P, HUNHAMMAR S. Ecosystem services in urban areas[J]. Ecological Economics, 1999, 29: 293-301.

[13] COSTANZA R. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.

[14] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.

OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 607-613. (in Chinese)

[15] 谢高地, 张钊铨, 鲁春霞. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.

[16] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458: 1009-1013.

[17] 于格, 鲁春霞, 谢高地. 青藏高原草地生态系统服务功能的季节动态变化[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 47-51.

[18] 赵忠宝, 李克国, 曾广娟, 等. 秦皇岛市森林生态系统服务功能评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 31-36.

[19] 王兵, 杨锋伟, 郭浩, 等. 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.

[20] 吴国强, 余思澄, 王振健. 上海城市环城绿带规划开发理念初探[J]. 城市规划, 2001, 25(4): 74-75.

[21] 张庆费, 郑思俊, 夏楠, 等. 上海城市绿地植物群落降噪功能及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2295-2230.

[22] 康文星, 吴耀兴, 何介南, 等. 城市森林生态系统服务价值指标体系与评价方法[J]. 林业科学, 2008, 44(12): 129-134.

KANG W X, WU Y X, HE J N, *et al.* Index system and methods for evaluating urban forest ecosystem service value[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(12): 129-134. (in Chinese)

[23] BRAAT L C, GROOT R. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy[J]. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 4-15.

[24] 沈沉沉, 尹俊光, 张净, 等. 宁波市镇海区生态公益林生态系统服务价值评估[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2012(4): 1-11.

[25] 涂克环. 宁波防护林带生态系统服务功能定量分析与价值评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

[26] 李庆兰, 任珺, 徐江坤, 等. 兰州市城市植被生态系统服务功能价值研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(1): 26-29.

[27] 宁波市水利局. 2013 年宁波市水资源公报[EB/OL]. [2014-03-25] [http://www.nbwater.gov.cn/News\\_view.aspx?CategoryId=14&ContentId=20720](http://www.nbwater.gov.cn/News_view.aspx?CategoryId=14&ContentId=20720).

[28] 王祖华, 蔡良良, 关庆伟, 等. 淳安县森林生态系统服务价值评估[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(5): 757-761.

[29] 宁波市林业局. 2013 宁波市林业局公报[EB/OL]. [2014-07-08] <http://linyj.ningbo.gov.cn/>

[30] 靳芳, 余新晓, 鲁绍伟, 等. 中国森林生态系统生态服务功能及其评价[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.

[31] 范昕婷, 郭雪艳, 方燕辉, 等. 上海市环城绿带生态系统服务价值评估[J]. 城市环境与城市生态, 2013, 26(5): 1-5.

[32] CAO J J, SHEN Z X, CHOW J C, *et al.* Seasonal variations and sources of mass and chemical composition for PM<sub>10</sub> aerosol in Hangzhou, China[J]. Particuology, 2009, 7(10): 161-168.

[33] ZHANG Y F, XU H, TIAN Y Z, *et al.* The study on vertical variability of PM<sub>10</sub> and the possible sources on a 220 m tower, in Tianjin, China[J]. Atmos Environ, 2011, 45(34): 6133-6140.

[34] 王珩, 于金莲. 大气中 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响因素及其污染变化特征分析[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2004, 33(3): 98-102.

[35] 吴海龙, 余新晓, 师忱, 等. PM<sub>2.5</sub> 特征及森林植被对其调控研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 116-122.

[36] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 190-200.

[37] 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.

[38] ZHOU L M, DICKINSON R E, TIAN Y H, *et al.* Evidence for a significant urbanization effect on climate in China[J]. PNAS, 2004, 101: 9540-9544.

[39] ZHANG K X, WANG R, SHEN C C, *et al.* Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 169: 101-112.

[40] 管群飞, 徐岭. 上海市环城绿带植物群落构建初步研究[J]. 中国园林, 2009(6): 92-94.

GUAN Q F, XU L. Preliminary study of the green belt plant community building in Shanghai[J]. Chinese Landscape Architecture, 2009(6): 92-94. (in Chinese)