

城市工业区绿地生态服务功能的计量评价 ——以武汉钢铁公司厂区绿地为例

陈 芳¹, 周志翔^{1,*}, 肖荣波^{1,2}, 王鹏程¹, 李海防^{1,3}, 郭尔祥⁴

(1. 华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

3. 桂林工学院旅游学院, 桂林 541004; 4. 武汉钢铁公司, 武汉 430083)

摘要:城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,在改善城市环境质量上发挥了重要作用。特别是在城市大型工业区,其环境质量的改善更是依赖于绿地生态服务功能。以城市绿地固定二氧化碳、释放氧气、蒸腾吸热、减少污染物、滞尘、减噪等6项生态服务功能作为城市工业区生态效益计量评价的指标体系,在对武汉钢铁公司厂区绿地实地调查的基础上,并结合绿地GIS和各层片叶面积指数,对厂区绿地叶面积绿量进行了定量研究。并通过各层片单位叶面积生态效益值的测定,定量研究了城市工业区绿地的生态服务功能。结果表明,厂区绿地叶面积总绿量是1694.21 hm²,以乡土乔木树种为主,其中落叶乔木绿量为399.8 hm²,常绿乔木绿量为409.0 hm²。城市绿地的生态效益取决于绿地叶面积绿量和植被生态功能,植被生态功能由组成植物本身的冠形、叶表面特性及生理特性决定。单位叶面积日固碳释氧量和蒸腾吸热量均以草本类最大;常绿乔木叶片对SO₂污染物的年吸收量最大,为0.81 g·m⁻²·a⁻¹;而常绿灌木和落叶灌木叶片的滞尘能力较强,草本类滞尘能力最弱。武钢厂区园林绿地生态服务功能的年总货币值为人民币20100.21万元,以夏季蒸腾吸热效益的货币值最高,达16330.56万元。其次是固定二氧化碳效益的货币值为2969.39万元,固定CO₂量为23850.50 t·a⁻¹。吸收SO₂量为6563.44 kg·a⁻¹,其货币化值所占比重最小,只有0.39万元。厂区园林绿地年释放O₂量为17345.82 t·a⁻¹,年滞尘量2884.51 t·a⁻¹。在城市工业区绿化中,应根据绿地功能需要,配置适应环境且生态功能强的树种,并通过绿地合理的复层结构来增加单位绿地面积上的绿量水平,以增强绿地的生态服务功能,有效地改善工矿企业的环境质量。

关键词:城市绿地;环境质量;生态服务功能;叶面积指数;计量评价

文章编号:1000-0933(2006)07-2229-08 中图分类号:Q14,X22 文献标识码:A

Estimation of ecosystem services of urban green-land in industrial areas: A case study on green-land in the workshop area of the Wuhan Iron and Steel Company

CHEN Fang¹, ZHOU Zhi-Xiang^{1,*}, XIAO Rong-Bo^{1,2}, WANG Peng-Cheng¹, LI Hai-Fang^{1,3}, GUO Er-Xiang⁴, (1. Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. Wuhan Iron and Steel Company, Wuhan 430083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2229 ~ 2236.

Abstract: Green-land is a vital component of an urban ecosystem and plays an important role in purifying the environment. Especially in large-scale industrial districts, the ecological services provided by vegetation are beneficial to protecting local environments. In this study, amounts of CO₂ absorbed, O₂ released, heat absorbed through transpiration, SO₂ reduced, dust retention and noise reduction have been selected as main variables of study. These indexes allow qualitative assessment of

基金项目:湖北省科技攻关资助项目(2002AA201C57)

收稿日期:2005-12-12;修订日期:2006-04-23

作者简介:陈芳(1975~),女,湖北江夏人,博士生,主要从事园林生态、绿地生态服务功能研究.E-mail: qdchenfang@163.com

致谢:钟颖飞、宫莉霞、魏华、张源长、胡昆、史梅容等同志参加了部分调查研究工作,谨致谢意

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: whzhouzx@163.com

Foundation item: The project was supported by the Foundation of the Government of Hubei Province (No. 2002AA201C57)

Received date: 2005-12-12; Accepted date: 2006-04-23

Biography: CHEN Fang, Ph.D. candidate, mainly engaged in green space ecology and ecosystem services. E-mail: qdchenfang@163.com

ecological services based on the leaf area during the field work in the workshop area of the Wuhan Iron and Steel Company. Generally, the identified indexes were calculated from the observed data collected in field survey.

The green-land leaf area was obtained through investigation of synusia (No.2 synusia devised by H.Gams in 1918) structure and covering, leaf area index (LAI). All the indexes were calculated based on the estimated leaf area. This was combined with an assessment of value through brought by the ecosystem. The areas of interest included CO₂ absorption with the carbon tax, O₂ release with the value of marketed products, heat absorption by transpiration with the substitution of electricity, SO₂ absorption and dust retention with the market valuation, noise reduction with the will-paying. The ecological services of green-land in urban industrial areas were estimated by measuring the ecologic benefit per unit. The results showed:

(1) Most trees planted in the workshop area were native species. Of them, the majority were of arbor decent. The leaf area was highest in different synusia. The evergreen and deciduous arbors were 409.0 hm² and 399.8 hm², respectively. And the sum of leaf area in different workshop areas was 1694.21 hm².

(2) The ecological benefits of green-land mainly depend on the amount of green space. The capacity of the ecological service of plant was determined by the physiological characteristic of plant and leaf surface as well as by the structure of tree crown. Since the synusias were composed by various plants with different capacity, their ecological benefits were different. While the SO₂ reduction absorbed by evergreen was the highest at 0.81 g·m⁻²·a⁻¹ of all synusias. And the ability of evergreen shrub and deciduous shrub was stronger, while that of the herbaceous plant was the weakest.

(3) In 2001, the total green-land area was 312.38 hm² in the workshop area of the Wuhan Iron and Steel Company. The amount of CO₂ absorbed, O₂ released and dust retention reduced by green-land in the workshop area were 23850.50 t·a⁻¹, 17345.82 t·a⁻¹ and 2884.51 t·a⁻¹, respectively. The total value of ecological benefits was 201,002,100 Yuan. Among them, the value of heat absorption was the highest at 163,305,600 Yuan, followed next by that of CO₂ absorption at 29,693,900 Yuan. The amount of SO₂ reduction was lowest at about 3,900 Yuan. In addition, the value of O₂ released, dust retention and noise reduction were 6,938,300, 490,400 and 570,000 Yuan respectively.

In summary, the plants with better adaptation and ecological effect should be strategically chosen and combined in different ways for their diverse benefits in varying ecological environments. The leaf area also could increase by combining the arbor, shrub and herb to realize the maximum ecological benefits, giving greater ecological service for improved environments in industrial districts.

Key words: urban vegetation; environmental quality; ecosystem services; leaf area index; quantitative analysis

城市绿地作为城市中的自然成分,在改善环境质量、维持碳氧平衡方面具有不可替代的作用。自 20 世纪 90 年代以来,森林生态服务功能的计量研究已成为生态学、林学和经济学界研究的热点^[1-9],这些研究对于认识森林环境价值^[10-12],建立森林环境价值补偿制度^[13],促进森林环境可持续发展起着重要的作用。在寸土寸金的的城市环境中,城市绿地建设作为城市可持续发展战略的一个重要内容,对其生态服务功能进行计量研究有助于人们对城市绿地无形效益的价值有深入详细的了解。城市绿地由于植物种类多样、结构复杂、破碎化程度高等特点,给城市绿地生态服务功能的计量研究带来了很大困难。目前对城市绿地系统单项生态效应的研究较多^[14-19],但对其生态服务功能进行系统详细的计量研究较少^[20-22]。实际上,政府在投资绿地建设时需要考虑园林绿地在改善城市环境上究竟具有多大的生态价值,以便于效益核算和投资决策;企业也希望从投资绿地建设中获得经济补偿。城市工业区是城市环境恶化的一个重要污染源,其自然景观退化严重、土地开发强度大、环境条件恶化,生态系统极为脆弱,其生态系统的调控更是主要依赖于绿地的生态服务功能。因此,开展工业区园林绿地生态服务功能的计量研究,有利于缓解政府及企业投资目标与绿地建设目标的矛盾,对促进企业生态环境改善、支撑企业可持续发展有着重要意义。本文以武钢厂区绿地为研究对象,定量研究武钢厂区绿地的生态服务功能,以期在城市绿地群落配置和工业区的绿化树种的选择提供基础,并为城市绿化效益的计量研究提供科学依据。

1 研究地点概况

武汉钢铁公司位于武汉市青山区,地理位置介于东经 $114^{\circ}21' \sim 114^{\circ}28'$,北纬 $30^{\circ}35' \sim 30^{\circ}40'$ 。该区域属亚热带润湿季风气候,雨量充沛,年平均降水量 1284 mm,降水相对集中于 6~8 月;年平均气温 16.4°C ,夏季高温持续时间长;无霜期 211~272 d,年日照总时数 1810~2100 h。该公司由主厂区、工业港、生活区等组成,总面积 4502.76 hm^2 ,是一个特大型钢铁生产区域。其中主厂区包括焦化、烧结、炼钢、炼铁、轧钢等 26 个主体厂及部分机关单位,面积为 1560.23 hm^2 。厂区工业排放污染及交通污染严重,主要污染物为 SO_2 等。多年来通过花园式企业和道路绿化建设,绿地覆盖率大幅度提高,2002 年厂区绿化覆盖面积达 312.38 hm^2 ,绿地率达 20.02% ^[14],企业生态环境明显改善。主厂区所应用园林植物分属 69 科 142 种,其中阔叶乔木 53 种(包括 7 个常绿树种,46 个落叶树种),针叶树 16 种,灌木 48 种,草本 25 种,分布于厂区防护林、专类园、观赏草坪及道路绿带等绿地的 518 个斑块中。道路绿带斑块总数多达 438 个,其面积占厂区绿地面积的 66%;防护林斑块 33 个,占厂区绿地面积的 20%;专类园和观赏草坪在厂区布置较少。绿地总面积达 137.98 hm^2 ,但斑块平均面积仅 2663.71 m^2 ,破碎化指数较高^[14]。

2 研究方法

2.1 生态服务功能计量的指标体系和货币化方法

针对城市绿地主要生态服务功能和钢铁企业排放污染物的特点,并遵循评价因子的系统性、独立性、可测性和定量性的原则,确定以绿地固定二氧化碳、释放氧气、蒸腾吸热、减少污染物、滞尘、减噪等 6 项生态服务功能构建工业区绿地生态效益计量评价的指标体系,并利用经济学的方法进行相应的货币化。绿地固定二氧化碳效益的货币化方法为碳税法,采用瑞典的碳税率 $150 \$ \cdot \text{t}^{-1}$ ^[23,24],取人民币与美元汇率比为 8.3 yuan. $\$^{-1}$;释放氧气效益根据生产成本法,按工业制氧成本 $0.4 \text{ yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$ 货币化^[25];蒸腾吸热效益用等效效益替代法货币化,根据植物叶片的蒸腾量和水的汽化热计算出蒸腾吸热值,再将热能转化为电能,按武汉市居民用电平均电费价格 0.5 元/度计(武汉市物价局,2003);减少污染物效益和滞尘效益用市场价值法,根据《中国生物多样性国情研究报告》分别按每减少 1 kg SO_2 污染物的投资成本是 0.6 元和每削减 1t 粉尘的成本为 170 元计算^[20,25];郎奎建用支付意愿法得到森林减噪价值为 $5 \text{ yuan}/(\text{dB} \cdot \text{m})$ (m 指森林临街道的单位长度)计算^[2]。

2.2 绿地 GIS 建立与数据提取

根据城市绿地植物种类组成多样、结构复杂、破碎化程度高的特点,以武钢工业区 IKONOS 卫星遥感影像和武钢工业区 1:10000 地形图为基础,实地确定每个绿地斑块的范围,并编号调查每个斑块内各层片的植物种类、层盖度、种盖度等,统计各斑块中每个层片的物种数、种的频度等相关指标,建立武钢工业区绿地 GIS^[26],提取厂区绿地斑块的面积、周长、层片结构及主要构成植物种盖度等特征值,作为绿地生态服务功能效益计量的基础数据。

2.3 绿地生态服务功能指标的定量方法

叶片是植物发挥其生态功能的主要器官,因此叶面积绿量是定量城市绿地生态服务功能大小的一个关键量。在每一个绿地斑块中以针叶乔木、常绿阔叶乔木、落叶阔叶乔木、常绿灌木、落叶灌木、绿篱、草本地被等 7 个层片(H.Gams 的第二级层片)作为生态效益的基础定量单元。先根据各层片主要园林植物的叶面积指数(L)、绿地斑块的面积(S)、层片中各主要构成植物的种盖度(C),计算绿地斑块中各层片的绿量;再以各类型斑块层片中代表植物单位叶面积生态效益指标测定值(G)为依据,确定斑块各层片生态效益指标的定量值;最后结合研究区域各层片的总绿量值及其单位叶面积生态效益指标测定值来计量某类型绿地及厂区所有绿地的生态效益值。生态效益指标的计量模型为:

$$W_j = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\sum_{r=1}^m (S_r \cdot C_{ir} \cdot L_i) \right] G_{ij} \right\}$$

式中, W_j 为研究区域绿地的第 j 个评价指标的生态效益值; S_r 为研究区域绿地第 r 绿地斑块的面积, r 为绿地斑块序号($r = 1, 2, \dots, m$), m 为绿地斑块总数; C_{ir} 为第 r 绿地斑块中层片 i 的盖度, i 为层片类型($i = 1,$

2, ..., n), n 为层片总数; L_i 为第 i 层片的叶面积指数; G_{ij} 为第 i 层片中单位叶面积第 j 个生态效益指标的测定值。

2.4 城市绿地各生态服务功能评价指标的测定与统计

(1)固定二氧化碳、释放氧气和蒸腾吸热量 在植物生长期利用 TPS-1 型便携式光合测定系统,选择各层片的代表树种(共 22 种)测定单位叶面积的净光合速率和蒸腾速率。同一树种选定 3~5 株长势良好的标准木。由于树体不同位置叶片所受光照强度不同,统一选择树冠外围南侧中部的同一位置对叶片进行光合测定。每天 7:00~19:00 每间隔 1h 测定 1 次。分别于春季和夏季各连续测定 1 个月。根据各层片代表树种测得的净光合速率和光合作用方程式计算其单位叶面积每天的固碳释氧量,年固碳释氧量按植物一年中进行光合作用的天数计,常绿树种按一年 360d 计,落叶树种按一年生长季 270d 计,绿地蒸腾吸热量按夏季 7、8、9 三个月份植物叶片的蒸腾量计^[6,22]。

(2)SO₂ 吸收 由于植物在落叶前叶片部分硫的积累量最高,根据武钢厂区的污染状况将厂区范围划分为重度污染区(焦化烧结区)、中度污染区(二炼钢)和轻度污染区(厂前),以华中农业大学校园内植物样本为对照,分别在这 3 个等级的污染区和对照区内对具代表性的 22 种共有植物进行采样。采样时间定在植物落叶前的 9 月进行,用吸光比浊法测定叶片含硫量^[17,27]。

(3)滞尘量 一般认为 15 mm 的雨量即可冲掉植物叶片的降尘,然后重新滞尘^[17,27]。因此采用重量法在植物完全展叶后的 6 月份,于大雨后的连续晴天从树冠的内外上下多点采样。其中,阔叶树种采 20~30 片叶(大叶 10 片左右),针叶树种采标准小枝 250~300 g,草坪类剪取 10×10 cm² 面积范围内的地上部分,样品带回实验室用蒸馏水洗净蒸干称重。

(4)减噪量 林带的宽度及植被紧密程度是决定林带减噪效果的两个重要因素^[25],Naturvårdsverket 于 1996 年研究得出 5 m 带宽以上的林带,减噪效果为 2 dB,50 m 宽的林地减噪效果为 3~6 dB(A)^[28,29]。武钢厂道路纵横交错,厂区以道路绿化为主,大部分道路绿化带宽在 5 m 以上。本研究从武钢工业区园林绿地 GIS 中获取各绿地斑块临街的长度,以 2 dB 作为各绿地斑块的减噪效果。

3 结果与分析

3.1 武钢厂区园林绿地主要园林植物调查分析

对武钢厂区 518 个绿地斑块进行的植物调查表明(表 1),出现频次最多的是樟树,达 153 次;出现次数较多在 50~100 之间的有广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、悬铃木(*Platanus orientalis*)、雪松(*Cedrus deodara*)、圆柏(*Sabina chinensis*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)、珊瑚树(*Viburnum awabuki*)、海桐(*Pittosporum tobira*)。这些树种普遍是本地的乡土树种,适应性强,尤其是抗性较强,广泛适合在工矿企业环境中生长。落叶灌木在武钢种植较少,园林绿化树种主要以常绿植物为主;草本植物出现频次较多,这是由于要增强绿化效果,改善厂区环境,厂区园林绿地多以复层结构为主,草本植物见缝插针地种植于间隙空地中。这些都是工业区长期绿化选育的结果,也是对工业环境长期适应的结果。

表 1 武钢厂区绿地不同植被层片类型主要植物频次
Table 1 Frequency of dominant plant species of different synusia type in Wugang workshop area

层片类型 Synusia type	植物种(频次) Plant species(frequency)
针叶乔木 Coniferous arbor	雪松 <i>Cedrus deodara</i> (70)、圆柏 <i>Sabina chinensis</i> (64)
落叶乔木 Deciduous arbor	悬铃木 <i>Platanus orientalis</i> (86)、柳树 <i>Salix babylonica</i> (28)、杨树 <i>Populus tomentosa</i> (23)、石榴 <i>Punica granatum</i> (12)
常绿乔木 Evergreen arbor	广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> (97)、枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i> (13)、樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> (153)、桂花 <i>Osmanthus fragrans</i> (50)
落叶灌木 Deciduous shrub	紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> (43)、紫荆 <i>Cercis Chinensis</i> (16)
常绿灌木 Evergreen shrub	珊瑚树 <i>Viburnum awabuki</i> (77)、夹竹桃 <i>Nerium indicum</i> (40)
绿篱 Green fence	海桐 <i>Pittosporum tobira</i> (58)、红檵木 <i>Loropetalum Chinensis</i> var. (24)、大叶黄杨 <i>Euonymus japonicus</i> (28)、金叶女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> Ait. Var(10)、十大功劳 <i>Mahonia fortunei</i> (23)、小叶女贞 <i>Ligustrum quihouir</i> (36)
草本类 Grasses	早熟禾 <i>Poe annua</i> (25)、马尼拉 <i>Zoysia matrella</i> (21)

3.2 武钢厂区绿地生态服务功能指标的量化分析

3.2.1 不同层片单位叶面积生态服务功能分析 不同层片之间单位叶面积日平均的生态效益值有较大差异(表 2)。由于不同植物叶片结构的差异和春、夏两季日照强度的不同,导致叶片在固定 CO₂ 量和释放 O₂ 量上的层片间差异和季节间差异。平均每天固定 CO₂ 和释放 O₂ 值最大的是常绿灌木,其次是草和绿篱,针叶类最小;夏季蒸腾吸热最强的是草本,其单位叶面积日蒸腾量达 1.51 kg·m⁻²·d⁻¹,这与禾本科植物输导组织发达、生理功能旺盛且叶表受光照较充足有关。常绿乔木与常绿灌木的日平均蒸腾量较小,只有 0.69 kg·m⁻²·d⁻¹ 和 0.75 kg·m⁻²·d⁻¹,主要是由于常绿植物角质层发达且气孔密小,水分蒸腾要小一些;植物叶片吸收 SO₂ 量是一年测定值,常绿乔木对 SO₂ 的年吸收值最大,为 0.81 g·m⁻²·a⁻¹,落叶灌木年吸收值 SO₂ 值最小,只有 0.11 g·m⁻²·a⁻¹,其它植被类型单位叶面积 SO₂ 的年吸收值相差不大;在植被的滞尘生态功能中,滞尘能力与不同个体叶表面特性、叶片大小、树冠结构、枝叶密度等有关,其中常绿灌木和落叶灌木的滞尘能力较强,草本种类滞尘能力最弱。

表 2 不同层片类型单位叶面积单位时间生态效益的比较

Table 2 Comparison of ecological benefits with per leaves area in different synusia type

层片类型 Synusia type	吸收 CO ₂ 量(g·m ⁻² ·d ⁻¹) Amount of CO ₂ absorption		释放 O ₂ 量(g·m ⁻² ·d ⁻¹) Amount of O ₂ release		蒸腾水量 (kg·m ⁻² ·d ⁻¹) Amount of H ₂ O ₂ transpiration	吸收 SO ₂ 量 (g·m ⁻² ·a ⁻¹) Amount of SO ₂ absorption	滞尘量 (g·m ⁻² ·d ⁻¹) Amount of dust retention
	春季 Spring	夏季 Summer	春季 Spring	夏季 Summer			
针叶乔木 Coniferous arbor	2.98	3.76	2.17	2.74	1.27	0.53	0.59
落叶乔木 Deciduous arbor	4.84	3.59	3.52	2.61	1.02	0.35	0.60
常绿乔木 Evergreen arbor	5.51	3.92	4.00	2.85	0.69	0.81	0.67
落叶灌木 Deciduous shrub	5.19	3.76	3.78	2.74	0.96	0.11	0.86
常绿灌木 Evergreen shrub	7.10	4.83	5.17	3.51	0.75	0.39	0.80
绿篱 Green fence	5.82	5.66	4.23	4.11	1.28	0.21	0.69
草本 Grasses	5.94	9.33	4.32	6.78	1.51	1.55*	0.20*

* 单位时间单位覆盖面积上的草本类吸收 SO₂ 量和滞尘量 The amount of SO₂ absorption and dust retention of grasses in unit coverage and unit time

3.2.2 不同层片生态服务功能年效益分析 根据厂区绿地不同层片植物的叶面积绿量及其各项生态服务功能指标的日平均效益值,并结合具体环境的植物一年中的生长日数,得到绿地的年生态效益指标的量化值(表 3)。在武钢厂区 7 种植物层片类型中,由于绿篱种植较密,枝叶集中,故绿篱叶面积指数最大,达 13.62;其次是落叶乔木和常绿乔木,最小的是落叶灌木,只有 5.78,各层片叶面积指数及其覆盖面积决定了各层片的绿量。武钢厂区园林绿地绿量为 1694.21 hm²,其中乔木种类绿量最大,落叶乔木绿量为 399.8 hm²,常绿乔木绿量为 409.0 hm²,它们分别占总绿量的 23.6%和 24.1%,这反映了城市绿化以乔木为主。武钢厂区因为污染较为严重,一些落叶灌木在污染环境中生长势较弱、种植较少,落叶灌木的绿量最小,只有 60.5 hm²。而草本的绿量达 388.4 hm²,占总绿量的 22.3%,仅低于落叶乔木和常绿乔木,这是因为厂区绿地结构多以乔灌草结合,且各冠层交错,乔灌层下的裸地多以种植草本来补绿,这体现了武钢绿化见缝插针的特点。

各层片年生态效益值与其叶面积绿量水平及单位叶面积的生态效益值是一致的(表 3),草本类绿量水平仅略低于落叶乔木和常绿乔木的绿量水平,且其生理功能旺盛,单位叶面积的固定 CO₂、释放 O₂、夏季蒸腾水分的生态功能均强于其它层片类型,因此年固碳释氧量和蒸腾吸热量均以草本类最大;常绿乔木和落叶乔木的绿量水平最高,且滞尘能力和吸收 SO₂ 较强,其年吸收 SO₂ 量与年滞尘效益量以常绿乔木和落叶乔木最大。在各项生态效益指标值中,落叶灌木的绿量最低,其年生态效益值也是最低。草本类因其单位面积的滞尘功能远小于其它类型植被,其年滞尘效益值又居末位。可见,园林绿地生态效益值的大小取决于绿地绿量的大小和植被生态功能的大小。

表 3 不同层片类型年生态效益量化结果

Table 3 Results of annual ecological benefits of different synusia type

层片类型 Synusia type	针叶乔木 Coniferous arbor	落叶乔木 Deciduous arbor	常绿乔木 Evergreen arbor	落叶灌木 Deciduous shrub	常绿灌木 Evergreen shrub	绿篱 Green fence	草本 Grasses	总计 Total
叶面积指数 Leaf area index	6.61	10.75	10.07	5.78	11.4	13.62	9.49	—
覆盖面积 Covered area(hm ²)	18.74	37.19	40.62	10.48	12.39	12.58	40.93	—
绿量 Vegetation quantity(hm ²)	123.88	399.78	409.01	60.55	141.20	171.35	388.43	1694.21
吸收 CO ₂ 量 Amount of CO ₂ absorption(t·a ⁻¹)	1083.75	4772.39	5495.06	770.81	2418.67	2666.94	7413.69	23850.50
释放 O ₂ 量 Amount of O ₂ release(t·a ⁻¹)	788.18	3470.83	3996.41	560.59	1759.03	1939.60	5391.77	17345.82
蒸腾吸热 Transpiration heat absorption(× 10 ⁹ kJ·a ⁻¹)	101.41	264.01	183.48	37.58	68.66	141.54	379.13	1175.80
吸收 SO ₂ 量 Amount of SO ₂ absorption(kg·a ⁻¹)	653.98	1477.22	2747.89	53.90	542.78	351.01	736.68	6563.44
滞尘量 Amount of dust retention(t·a ⁻¹)	262.77	651.11	991.68	140.08	407.98	426.00	4.89	2884.51

3.3 武钢厂区园林绿地生态服务功能的经济价值

通过统计武钢厂区绿地各生态服务功能指标的总定量值,经货币化转化得到其生态效益的经济价值(表 4)。武钢厂区园林绿地生态服务功能总的货币值为人民币 20100.21 万元。绿地夏季吸热量为 1.18×10^{12} kJ·a⁻¹,其货币化值所占比重最大,为 16330.56 万元;叶片年吸收 SO₂ 量为 6563.44 kg·a⁻¹,其货币化值所占比重最小,为 0.39 万元。厂区园林绿地年固定 CO₂ 量为 23850.50 t·a⁻¹,货币化为人民币 2969.39 万元;年释放 O₂ 量为 17345.82 t·a⁻¹,其货币值为 693.83 万元;年滞尘量 2884.51 t·a⁻¹,货币值为 49.04 万元;由武钢工业区园林绿地 GIS,得到武钢厂区绿地临道路的长度为 57007.01 m,则其减噪效益为 570070.1 dB,货币值为 57.00 万元。

表 4 厂区园林绿地生态服务功能的经济价值

Table 4 Ecological benefits and ecological values of green-land in the workshop area

评价指标 Evaluation index	吸收 CO ₂ 量 (t·a ⁻¹) Amount of CO ₂ absorption	释放 O ₂ (t·a ⁻¹) Amount of O ₂ release	蒸腾吸热 (10 ⁹ kJ·a ⁻¹) Transpiration heat absorption	吸收 SO ₂ (kg·a ⁻¹) Amount of SO ₂ absorption	滞尘量 (t·a ⁻¹) Amount of dust retention	减噪(dB) Benefit of noise reduction	总价值 Total
生态效益值 Ecological benefits	23850.50	17345.82	1.18×10^9	6563.44	2884.51	570070.10	—
生态价值(× 10 ⁴ yuan a ⁻¹) Ecological value	2969.39	693.83	16330.56	0.39	49.04	57.00	20100.21

4 结论与讨论

武钢厂区绿化以适应性强、抗性强的悬铃木 (*Platanus orientalis*)、樟树 (*Cinnamomum camphora*)、桂花 (*Osmanthus fragrans*)、圆柏 (*Sabina chinensis*)、海桐 (*Pittosporum tobira*) 等乡土树种为主,并能较好地发挥生态服务功能。草本类单位面积叶片日固碳释氧量和蒸腾吸热量均最大;而叶表革质的常绿乔木与常绿灌木的日蒸腾量则较小。在以 SO₂ 为主要污染排放物的武钢工业区,常绿乔木对 SO₂ 的年吸收值最大,为 0.81 g·m⁻²·a⁻¹,落叶灌木的年吸收值 SO₂ 值最小,只有 0.11 g·m⁻²·a⁻¹。各层片的滞尘能力与不同植物个体特性有关,其中常绿灌木和落叶灌木的滞尘能力较强,草本类滞尘能力最弱。

园林绿地生态效益取决于绿地绿量和植被生态功能。叶片是植物进行固碳释氧、蒸腾吸热等生态功能的主要器官,因而叶面积绿量是进行生态效益定量的基础,在很大程度上决定了园林绿地的生态服务功能的大小。在武钢厂区绿地中,叶面积总绿量是 1694.21 hm²,乔木类叶面积绿量最大,其中落叶乔木绿量为 399.8 hm²,常绿乔木绿量为 409.0 hm²,落叶乔木层片和常绿乔木层片的年滞尘效益和吸收 SO₂ 效益均明显高于其它层片,这反映了城市绿化以乔木为主。草本类绿量水平稍次于常绿乔木和落叶乔木,但其生理功能旺盛,故年固碳释氧量和蒸腾吸热量均以草本种类最大,其次是常绿乔木和落叶乔木。

武钢厂区园林绿地生态服务功能的年总货币值为人民币 20100.21 万元,其中以夏季蒸腾吸热效益的货

币值最高,达 16330.56 万元,其次是固定二氧化碳效益的货币值 2969.39 万元,年吸收 SO_2 量为 $6563.44 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,其货币化值所占比重最小,只有 0.39 万元。厂区园林绿地固定 CO_2 量为 $23850.50 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,年释放 O_2 量为 $17345.82 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,年滞尘量 $2884.51 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

城市绿地的生态服务功能所含内容丰富,其生态效益评价指标根据绿地性质及所在功能区不同而有所差异^[5]。采用固定二氧化碳、释放氧气、蒸腾吸热、减少污染物、滞尘、减噪这 6 项生态效益指标作为生态服务功能计量评价的指标体系,能较好地反映城市工业区园林绿地的生态服务功能。本研究运用 GIS 技术并结合实地调查定量叶面积绿量,从而得到武钢厂区园林绿地生态服务功能较为准确的货币值,也有研究应用遥感技术或模型进行绿量和生态服务功能的研究^[8,21],但由于目前技术的限制,遥感技术在植被种类的辨别上还有一定难度^[30],并且有些生态服务功能还没有找到合适的定量与核算方法,如绿地的杀菌、释放负氧离子、生物多样性等生态功能^[6,20,24]。随着遥感技术的引入和定量技术的发展,以及计量方法的深入研究,城市绿地生态服务功能的计量研究将会更全面、更合理。

园林绿地各层片植被生态功能由构成植物本身的冠形、叶表特性及生理特性决定,生态效益指标值在各层片间和季节上表现出显著的差异,并且叶面积绿量在很大程度上决定了园林绿地生态服务功能的大小。在城市工业区绿化中应根据绿地功能需要,配置适应环境且生态功能强的树种,并通过绿地合理的复层结构来增加单位绿地面积上的绿量水平,以增强绿地的生态服务功能^[17],能有效地改善工矿企业的环境质量。

References:

- [1] Han W D, Gao X M, Lu C Y, *et al.* The ecological values of mangrove ecosystems in China. *Ecologic Science*, 2000,19(1):40~45.
- [2] Lang K J, Li C S, Yin Y, *et al.* The measurement theory and method of 10 forest ecological benefits for forestry ecological engineering. *Journal of Northeast Forestry University*, 2000,28(1):1~7.
- [3] Xiao H, Ouyang Z Y, Zhao J Z, *et al.* Forest ecosystem services and their ecological valuation-A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan Island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000,11(4):481~484.
- [4] Zhang X H, Yang Z F, Mao X Q, *et al.* Study on ecological benefits of public forest and countermeasures, Guangzhou. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004,40(4):22~26.
- [5] Zhong Q L, Xie L Y, Qiu S W. A study on the types and the benefit evaluation indicator systems of ecological forests. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis*, 1999,21(1):103~106.
- [6] Yang Q, Chen Z H, Shen H B. A study on the indirect valuation of the forest ecosystem in Baiyun Mountain. *Ecologic Science*, 2002,21(1):72~75.
- [7] Zhou X F, Jiang M Y. Qualification, evaluation, and compensation for forest benefits in Heilongjiang Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999,35(3):97~102.
- [8] Wang Y Y, Yang M C, Pan Y Z, *et al.* Valuation of the organic matter produced by terrestrial vegetation ecosystems in China in 1995 based on remote sensing. *Ecology and Environment*, 2005,14(4):455~459.
- [9] David S R. A note on the valuation of ecosystem services in production. *Resources for the Future*, 2001,4:1~16.
- [10] Myrick F A. (Zeng X G) Trans. Measurement of environmental and resource values — theory and methods. Beijing: China Renmin University Press, 2002: 1~38.
- [11] Howarth R, Farber S. Accounting for the value of ecosystem services. *Ecological Economics*, 2002,41:421~429.
- [12] Farber S C, Costanza R, Wilson M A. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics*, 2002,41:375~392.
- [13] Fei S M, Peng Z H, Zhou J X, *et al.* A discussion on the compensation of forest ecological benefit. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004,40(4):171~179.
- [14] Zhou Z X, Shao T Y, Wang P C, *et al.* The spatial structures and the dust retention effects of greenland types in the workshop district of Wuhan Iron and Steel Company. *Acta Ecologica Sinica*, 2002,22(12):2036~2040.
- [15] Chen W, He X Y, Zhang Y, *et al.* Dust absorption effect of urban conifers in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003,14(12):2113~2116.
- [16] Zhao Y, Chen Z L, Wu M Z, *et al.* The depurative effect of greenland on SO_2 in air in Pingdingshan mining area. *Journal of Henan Agricultural University*, 2002,36(1):59~69.
- [17] Xue J L, Xie Y P, Li J P, *et al.* Accumulation of air sulfide pollutant in the body of plants in Taiyuan City. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2001,14(1):47~49.
- [18] Li F, Wang R S. Evaluation, planning and prediction of ecosystem services of urban green space: A case study of Yangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2003,23(9):1929~1936.
- [19] Zhang X X, Gu R Z, Chen Z X. Dust removal by green areas in the residential quarters of Beijing. *Journal of Beijing For University*, 1997,19(4):12~

17.

- [20] Xie W, Du H, Wang Z X, *et al.* Research on integrated environmental efficiency from urban-circulating forest in Fushun City, *Journal of Plant Resources and Environment*, 1998, 7(2):42 ~ 47.
- [21] Han H X, Gao J, Liu G L. Ecological benefits assessment of urban vegetations by remote sensing and GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2301 ~ 2304.
- [22] Chen Z X, Su X H, Liu S Z, *et al.* The ecological effects & benefit of urban landscape in Beijing. *Journal of Chinese Landscape Architecture*, 1998, 14(2): 51 ~ 54.
- [23] Zhang S H, Zhao G Z, Tian Y Z, *et al.* Study on value the ecological environment valuation of forestry resources-For case by Hunchun forestry in Changbai Mountain. *Journal of Yanbian University (Natural Science)*, 2001, 27(2):126 ~ 134.
- [24] Zhang S H, Zhu Z, Li Q H. Ecological benefits of Changbai Mountain forest reserves: The case of Wangqing forest. *Resoucer Science*, 2002, 24(6):74 ~ 79.
- [25] Xue D Y, Bao H S, Li W H. A valuation study on the indirect values of forest ecosystem in Changbaishan Mountain biosphere reserve of China. *China Environmental Science*, 1999, 19(3):247 ~ 252.
- [26] Xiao R B, Zhou Z X, Xie Y, *et al.* The establishment of GIS database in Wuhan iron and steel industrial district. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2003, 22(5):512 ~ 515.
- [27] Cai Y L, Song Y C. Adaptive ecology of lianas in tiantong evergreen broad-leaved forest, Zhejiang, China I. Leaf anatomical characters. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(1):90 ~ 98.
- [28] Bolund Per, Hunhammar Sven. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29:293 ~ 30.
- [29] Naturvårdsverket. Roadnoise Nordic calculation models. Stockholm, 1996, 110.
- [30] Zhu W Q, He X Y, Chen W, *et al.* Quantitative analysis of urban forest structure: A case study on Shenyang arboretum. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12):2090 ~ 2094.

参考文献:

- [1] 韩维栋,高秀梅,卢昌义,等.中国红树林生态系统生态价值评估. *生态科学*, 2000, 19(1):40 ~ 45.
- [2] 郎奎建,李长胜,殷有,等.林业生态工程 10 种森林生态效益的计量理论方法. *东北林业大学学报*, 2000, 28(1):1 ~ 7.
- [3] 肖寒,欧阳志云,赵景柱,等.森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. *应用生态学报*, 2000, 11(4):481 ~ 484.
- [4] 张小红,杨志峰,毛显强,等.广州市公益林生态效益价值分析及管理对策. *林业科学*, 2004, 40(4):22 ~ 26.
- [5] 钟全林,谢利玉,邱水文.生态公益林类型及其效益评价指标体系研究. *江西农业大学学报*, 1999, 21(1):103 ~ 106.
- [6] 杨琼,陈章和,沈鸿标.白云山森林生态系统间接经济价值评估. *生态科学*, 2002, 21(1):72 ~ 75.
- [7] 周晓峰,蒋敏元.黑龙江省森林效益的计量、评价及补偿. *林业科学研究*, 1999, 35(3):97 ~ 102.
- [8] 王艳艳,杨明川,潘耀忠,等.中国陆地植被生态系统生产有机物质价值遥感估算. *生态环境*, 2005, 14(4):455 ~ 459.
- [10] A. 迈里克.弗里曼着.曾贤刚译.环境与资源价值评估——理论与方法.北京:中国人民大学出版社, 2002.1 ~ 38.
- [13] 费世民,彭镇华,周金星,等.关于森林生态效益补偿问题的探讨. *林业科学*, 2004, 40(4):171 ~ 179.
- [14] 周志翔,邵天一,王鹏程,等.武钢厂区绿地景观类型空间结构及滞尘效应. *生态学报*, 2002, 22(12):2036 ~ 2040.
- [15] 陈玮,何兴元,张粤,等.东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究. *应用生态学报*, 2003, 14(12):2113 ~ 2116.
- [16] 赵勇,陈志林,吴明作,等.平顶山矿区绿地对大气 SO₂ 净化效应研究. *河南农业大学学报*, 2002, 36(1):59 ~ 69.
- [17] 薛皎亮,谢映平,李景平,等.太原市空气中硫污染物在植物体内积累的研究. *城市环境与城市生态*, 2001, 14(1): 47 ~ 49.
- [18] 李锋,王如松.城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州为例. *生态学报*, 2003, 23(9):1929 ~ 1936.
- [19] 张新猷,古润泽,陈自新,等.北京城市居住区绿地的滞尘效益. *北京林业大学学报*, 1997, 19(4):12 ~ 17.
- [20] 谢维,杜华,王振兴,等.抚顺市环城整体环境效益分析. *植物资源与环境*, 1998, 7(2):42 ~ 47.
- [21] 韩红霞,高峻,刘广亮.遥感和 GIS 支持下的城市植被生态效益评价. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2301 ~ 2304.
- [22] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等.北京城市园林绿化生态效益的研究(3). *中国园林*, 1998, 14(3): 53 ~ 56.
- [23] 张三焕,赵国柱,田允哲,等.长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究. *延边大学学报(自然科学版)*, 2001, 27(2):126 ~ 134.
- [24] 张三焕,朱哲,李琼花.长白山森林生态效益资产评估研究——以汪清林区为例. *资源科学*, 2002, 24(6):74 ~ 79.
- [25] 薛达元,包浩生,李文华.长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值的评估. *中国环境科学*, 1999, 19(3): 247 ~ 252.
- [26] 肖荣波,周志翔,谢阳,等.武钢工业区地理信息数据库的建立. *华中农业大学学报*, 2003, 22(5):512 ~ 515.
- [27] 蔡永立,宋永昌.浙江天童常绿阔叶林藤本植物的适应生态学 I. 2 叶片解剖特征的比较. *植物生态学报*, 2001, 25(1):90 ~ 98.
- [30] 朱文泉,何兴元,陈玮,等.城市森林结构的量化研究——以沈阳树木园森林群落为例. *应用生态学报*, 2003, 14(12):2090 ~ 2094.