

京西门头沟区典型生态系统服务功能及其价值评估^{*}

冯朝阳¹, 高吉喜¹, 韩永伟¹, 吕世海¹, 林 栋^{1,2}, 刘尚华^{1,3}

(1. 中国环境科学研究院 生态所, 北京 100012; 2. 甘肃农业大学 草业学院, 兰州 730070; 3. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010019)

摘 要: 依据区域主要生态环境问题及人地关系的突出矛盾, 明确对稳定区域自然生态系统与缓解生态环境问题起主要作用的生态系统服务功能类型, 对典型的生态系统服务功能类型进行价值评估, 并提出区域生态环境建设的指导性建议。以北京市门头沟区自然生态系统为研究对象的生态系统服务功能评价表明: 其水源涵养价值约为 1.882×10^9 元/a, 土壤保持价值约为 9.743×10^6 元/a, 固碳释氧总价值约为 4.32×10^9 元/a, 吸收 SO_2 的价值为 6.35×10^6 元/a, 吸收氮氧化物的价值为 3.09×10^5 元/a, 滞尘效益价值为 6.710×10^7 元/a; 门头沟区自然生态系统以上几项典型的生态系统服务功能价值为 6.286×10^9 元/a, 在改善城市环境质量方面发挥出巨大的作用。该区域的主要生态环境问题是传统社会经济发展对自然资源与环境带来的压力, 解决该问题的出路是进行生态恢复与建设, 并充分发挥植被生态系统的各项功能、改善生态环境, 以此为契机发展当地特色经济。

关键词: 生态系统服务功能; 水源涵养; 土壤保持; 门头沟区

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2009)03-0232-05

Representative Ecosystem Services and Their Valuation of Mentougou District, Beijing

FENG Chaoyang¹, GAO Jixi¹, HAN Yongwei¹, LYU Shihai¹, LIN Dong^{1,2}, LIU Shanghua^{1,3}

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Pratacul2 ture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Ecology and Environmental Sci2 ence, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: Based on the core ecological environment problems, the research held the main ecosystem service types that played main role to the stability region natural ecosystem and the alleviation ecological environment problems, and appraised the value of typical ecosystem services, and put forward the region ecological environment construction guidance proposal. The results of the evaluation on natural ecosystem serves of Mentou vallely area region, west of Chinese capital city indicated: the value of water conservation, soil maintenance, assimilation of CO_2 and O_2 release, SO_2 absorption, absorption of nitrogen oxide compound and air purification was 1.882×10^9 yuan/a, 9.743×10^6 yuan/a, 4.32×10^9 yuan/a, 6.35×10^6 yuan/a, 3.09×10^5 yuan/a, and 6.710×10^7 yuan/a respectively. The total value of the above typical ecosystem services of Mentou vallely area's natural ecosystem function was 6.286×10^9 yuan/a, so that Mentou vallely area played the huge role in the aspect of improving the urban environment quality.

Key words: ecosystem services; water2source conservation; soil conservation; Mentougou district

生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用。它不仅为人类提供了食物、医药及其它工农业生产原料, 而且维持了人类赖以生存和发展的生命支持系统^[122]。自然生态系统具有多种生态系统服务功能^[344], 不仅为人类提供产品和生物资源, 更

重要的是在维持生物多样性、调节水文、净化环境以及维持土壤肥力等方面的功能^[5], 充分发挥其中的调节功能有助于缓解区域紧张的人地关系, 改善区域生态环境状况。

大城市的郊区处于城市中心区的周围, 与市区相比具有更高的植被覆盖率和较低的人口密度, 郊

^{*} 收稿日期: 20081213
基金项目: 北京市科学技术委员会项目(D0605046040191); 国家环保公益项目(200709029, 2008467125)
作者简介: 冯朝阳(1979-), 博士, 主要从事森林生态系统与生态系统服务功能研究。E-mail: fengchy@gamil.com
通信作者: 高吉喜(1964-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 研究员, 主要从事区域生态学研究。E-mail: gaojx@caes.org.cn.

区植被在改善城市环境质量方面发挥了巨大的作用,其中包括水源涵养、大气调节与净化等方面的作用。在我国干燥的华北土石山地区,土层薄、坡度大,加之开发历史悠久、人类活动影响强烈,对原始的自然植被破坏严重^[6],成为水土流失严重的地区。建国后进行的各项人工造林工程,特别是正在实施的太行山绿化工程和京津风沙源治理工程等人工保护与恢复举措,都促进了该区域的植被建设与保护,有助于稳定区域生态系统结构与功能。以北京市门头沟区的自然生态系统为研究对象,着重探讨几项对维持其自身及区域生态系统平衡与稳定起关键作用的生态系统服务功能,并明确以上几项功能对城市中心区的重要作用与意义;为充分发挥城市郊区高植被覆盖率的优势与功能、改善城市整体的生态环境质量提供理论依据。

1 区域概况及生态环境问题

门头沟区在北京城区正西偏南,位于 115°25′00″E-116°10′07″E 和 39°48′34″N-40°10′37″N,面积 1 455 km²,地势西北高,东南低;其西部山地是北京西山的核心部分,海拔 1 500 m 左右的山峰有 160 余座;研究区属中纬度大陆性季风气候,土壤为地带性褐土;植被为暖温带落叶阔叶林,林地均为灌木林或杂木混交林,森林覆盖率为 40%~60%。

研究区总人口 23.6 万人,是北京市西部发展带的中心区域,也是北京生态涵养发展区的重要组成部分,其生态环境建设有助于实现门头沟区由“黑(煤炭)白(石灰石)经济”向“绿色经济”的转变,并可以减少对下游京津地区的洪患威胁与粉尘来源。

门头沟区植被生态系统是北京市自然生态体系的重要组成部分,具有水源涵养、土壤保持以及调节与净化大气环境等方面的功能,以上几项功能的发挥对北京市自然生态系统的平衡与稳定具有重要作用,同时可以缓解城区人口密集与社会经济发展带来的多种环境压力。

2 研究方法

在现有众多有关生态系统服务功能评价的研究中,主要可分为物质质量评价法和价值量评价法两类评价方法^[7]。物质质量评价法主要是从物质质量的角度对生态系统提供的服务进行整体评价,价值量评价法主要是从价值量的角度对生态系统提供的服务进行评价。本研究利用价值量评价法对门头沟区自然生态系统进行典型生态系统服务功能的评估,主要包括涵养水源、保持土壤、调节与净化大气 3 种功能。

2.1 水源涵养功能的价值评估方法

植被涵养水源效能的量化,是准确进行其价值核算的基础。在此之上,才能进一步对植被涵养水源的价值进行估算,价值估算的方法主要有 3 种:替代工程法(也称作影子工程法)、地下径流增长法和采伐损失法^[8]。本研究采用替代工程法的核算原理对门头沟区植被的水源涵养价值进行计算。在利用替代工程法计算植被涵养水源的价值过程中,其关键是:正确地估计植被涵养水源的水量、选择适宜且便于计价的水利工程、考虑人们的支付意愿^[8]。

首先根据研究区的植被覆盖状况,可以将自然生态系统划分为森林和草地 2 大类植被类型,其中森林生态系统分为土壤蓄水能力(式 1)、拦蓄降水能力(式 2)、增加地表有效水量(式 3) 3 部分计算,草地生态系统根据赵同谦等的研究成果进行估算(式 4)^[9,10];再根据各部分水量采用不同的替代工程价格,通过计算得出植被生态系统整体的涵养水源价值。

土壤蓄水能力:

$$S_c = \sum_{i=1}^n C_i \# A_i \tag{1}$$

式中: S_c))) 土壤总蓄水量; C_i))) 第 i 个林地类型土壤蓄水量; A_i))) 面积; n))) 林地类型数量。

拦蓄降水能力:

$$Y = A(P - E - C) \tag{2}$$

式中: Y))) 拦蓄水量; A))) 拦蓄降水面积; P))) 降水量; E))) 蒸散量; C))) 地表径流量。

增加地表有效水量:

$$V = \sum_{i=1}^n S_i(H_i - H_0) \tag{3}$$

式中: V))) 地表有效水量增加量; S_i))) 第 i 林地类型的面积; H_i, H₀))) 对照样地与第 i 林地类型的单位面积拦蓄降水能力; 根据资料^[11],一般实测 H₀ = 92.30 m³/hm。

草地生态系统用草地蓄水效应来衡量其水源涵养的价值,计算式如式(4)。

$$Q = A \# (J_0 \# K) \# R \tag{4}$$

式中: Q))) 与裸地相比较,草地截留降水和涵养水分增加量; A))) 研究区草地面积; (J₀ # K))) 研究区多年平均产流降雨量; J₀))) 计算区多年均降雨总量; K))) 研究区产流降雨量占降雨总量的比例; R))) 与裸地或皆伐迹地相比较,草地生态系统截留降水、减少径流的效益系数。

2.2 土壤保持功能的价值评估方法

植被保持土壤的功能包括保护土地资源、防止土壤流失、保持土壤肥力、防止泥沙滞留和淤积等;

进行水土保持价值核算的方法有潜在土壤侵蚀损失法、替代工程法、综合费用效益法 3 种^[11]。本研究通过 ArcGIS 地理信息系统的分析、计算功能,运用水土流失方程的修改式(式 5)估算门头沟区植被生态系统的土壤保持量,以潜在土壤侵蚀量与现实土壤侵蚀量的差值表示生态系统的土壤保持量^[5]。

$$A_c = R \# K \# LS \# (1 - C \# P) \quad (5)$$

式中: A_c))) 单位面积水土保持量; R))) 降雨侵蚀力指数; K))) 土壤可蚀性因子; LS))) 坡长坡度因子; C))) 地表植被覆盖因子; P))) 水土保持措施因子。

再依据计算得出的水土保持量,分别估算:减少土地损失(式 6)、减少土壤肥力损失(式 7)、减少泥沙淤积(式 8)和减少泥沙滞留(式 9)的价值。

减少土地损失的价值:

$$E_d = A_c \# P / (10^4 Q \# h) \quad (6)$$

式中: E_d))) 减少土地损失的价值; P))) 植被单位面积的机会成本; Q))) 土壤容重; h))) 土壤层厚度。

减少土壤肥力损失的价值:

$$E_n = A_c \sum_{i=1}^n E_{P_{1i}} \# P_{2i} \# P_{3i} + A_c \# P \quad (7)$$

式中: E_n))) 保肥效益经济评价; P_{1i}))) 土壤中氮、磷、钾含量; P_{2i}))) 纯氮、磷、钾折算成化肥的比例(分别为 132/14, 132/31, 75/39); P_{3i}))) 化肥的市场销售价; P))) 有机质价值。

根据我国主要流域泥沙运动规律,土壤流失的泥沙有 24% 淤积在水库江河湖泊^[12],采用蓄水成本计算植被生态系统减少泥沙淤积的经济价值。

$$E_a = 0.24 \# A_c \# C_a / Q \quad (8)$$

式中: E_a))) 减少泥沙淤积的经济价值; C_a))) 水库工程费用; Q))) 泥沙的容重值。

减少泥沙滞留的价值:

$$E_s = 0.24 \# A_c \# C_a / Q \quad (9)$$

式中: E_s))) 减少泥沙淤积的经济价值; C_a))) 挖取单位体积泥沙的费用; Q))) 泥沙的容重值。

2.3 大气调节与净化功能的价值评估方法

生态系统中植物的光合作用和呼吸作用,与大气进行 CO_2 和 O_2 交换,固定大气中的 CO_2 ,同时释放 O_2 ,维持了地球大气中的 CO_2 和 O_2 的动态平衡,减缓温室效应,为提供人类生存的最基本条件;而且植被具有吸收大气中污染物、吸附和滞留粉尘的功能,从而使大气污染物含量降低,净化了大气。

2.3.1 净第一性生产力估算 植被的净第一性生产力(NPP)与叶面积指数(LAI)有密切关系,而 NDVI 又能灵敏地反应 LAI 的变化^[13]:

$$NPP = -0.6394 - 67.064 \ln(1 - NDVI) \quad (10)$$

利用 2005 年 7 月 25 日的研究区 Landsat TM+ 影像,利用 RS 和 GIS 方法计算 NDVI 值,再通过 LAI 估算出 NPP。

2.3.2 固碳释氧功能的价值评估方法 根据光合作用方程,植物每生产 1.00 g 干物质可吸收 1.62 g CO_2 ,同时释放 1.19 g 氧气。以植被生态系统的净第一性生产力为基础,测算出研究区生态系统每年固定 CO_2 和释放 O_2 的量,然后再用瑞典碳税成本值(40.94 美元/t)计算,其中美元对人民币的汇率按 1 B 8 换算,得出研究区植被生态系统固定 CO_2 的价值;用中国工业制氧成本 0.4 元/kg 计算释放氧气的价值。

2.3.3 大气污染物吸收功能的价值评估方法 参考 5 中国生物多样性国情研究报告^[14]以及周冰冰等^[11]的研究成果,植被可以吸收 SO_2 、氟化物以及氮氧化物等大气污染物,并能够对吸收量进行估算;再依据每消减同一重量的大气污染物质的成本价格,可以计算植被吸收大气污染物功能的价值。根据净化功能机制研究现状和研究区基础资料齐备程度,进行区域尺度的生态系统吸收大气污染物功能,本研究主要针对自然生态系统的 SO_2 和氮氧化物 2 种典型大气污染物吸收功能进行评价。

2.3.4 滞尘功能的价值评估方法 利用实地测量的植物叶片滞尘数值得出常绿乔木、落叶阔叶乔木、灌木以及草地 4 种不同植物类型的平均滞尘能力,再与遥感方法估算出的叶面积指数以及植被统计数据相结合,评估研究区自然植被的总体滞尘能力、滞尘量与滞尘效益^[15]。

3 结果与分析

3.1 涵养水源价值

门头沟区森林生态系统的土壤蓄水能力为 4.92 @ $10^7 m^3/a$,根据目前的北京市生活用水价格 3.70 元/ m^3 ,因此森林土壤蓄水量的价值是 1.82 @ 10^8 元/a;研究区以森林生态系统为主体的植被覆盖面积 > 1 198 km^2 ,林区蒸散量占年总降水的比例为 60%^[11],在忽略所产生的全部地表径流量时,获得研究区的最大拦蓄水量 2.7 @ $10^8 m^3/a$,将此拦蓄水量价值等同于等容积水库的价值,单位库容造价采用 5.714 元/ m^3 ^[16],因此森林的拦蓄降水价值为 1.542 @ 10^9 元/a;森林生态系统增加地表有效水量 3.838 @ $10^7 m^3/a$,根据目前北京市生活用水的价格,得出门头沟区森林生态系统每年增加的地表有效水的价值为 1.42 @ 10^8 元/a。

研究区草地生态系统以中度覆盖度的低地、山地草地为主,根据 2000 年的影像解译结果,其面积有 94.64 km²。研究区多年均产流降雨量 $P > 20$ mm,多年均降雨总量为 563.4 mm;K 和 R 分别取 0.4 和 0.22^[11]。门头沟区草地生态系统的水源涵养量为 $4.35 @10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,根据北京市生活用水价格,计算出门头沟区草地生态系统的水源涵养价值为 $1.61 @10^7$ 元/a。将以上各个部分的计算结果相加,得到门头沟区自然生态系统的水源涵养价值约为 $1.882 @10^9$ 元/a。

3.2 土壤保持价值

门头沟区植被生态系统的土壤保持量为 $1.57 @10^5 \text{ t/a}$ 。根据北京市林业局的研究结果,门头沟区的土壤耕作层平均厚度为 30 cm,林地土壤容重平均为 1.10 t/m^3 ^[16],植被减少土壤流失、保护土地的价格采用土地买卖最高价 5 480.5 元/hm² 计算,则减少土地损失的价值为 $2.61 @10^5$ 元/a;根据北京市林地表层土壤肥力状况有机质含量平均为 3%,全氮含量平均为 0.19%,全磷含量平均为 0.02%,全钾含量平均为 0.08%,薪材转换成土壤有机质的比例 2 B 1 和薪材的机会成本价格 51.3 元/t 计算^[11],以及目前市场上磷酸二铵价格为 2 928 元/t,氯化钾为 1 935 元/t,计算得出门头沟区植被减少土壤有机质损失的价值为 $4.83 @10^5$ 元/a,减少氮、磷、钾养分土壤损失的价值为 $3.299 @10^6$ 元/a;取泥沙的容重值为 1.27 t/m^3 ,单位库容造价为 5.714 元/m³,则植被减少水

利工程泥沙淤积的价值为 $1.70 @10^5$ 元/a;按照挖掘 1 m³ 泥沙的费用为 15 元计算,则植被减少泥沙滞留的价值为 $4.45 @10^5$ 元/a。综合以上各部分的价值估算结果,门头沟区自然生态系统的土壤保持价值约为 $9.743 @10^6$ 元/a。

3.3 固碳释氧价值

门头沟区的生态系统净第一性生产力(NPP)为 428.03 万 t 干物质,依据光合作用方程计算可得其吸收 CO₂ 的量为 697.69 万 t,释放 O₂ 的量为 509.36 万 t;利用以上的价格标准折算成人民币,其中门头沟区吸收 CO₂ 的价值为 $2.285 @10^9$ 元/a,释放 O₂ 的价值为 $2.037 @10^9$ 元/a。门头沟区自然生态系统的固碳释氧总价值约为 $4.32 @10^9$ 元/a。

3.4 吸收大气污染物价值

3.4.1 吸收 SO₂ 价值 依据5中国生物多样性经济价值评估6及相关研究成果,阔叶林吸收 SO₂ 的能力为 88.65 kg/hm²;针叶林类平均为 215.60 kg/hm²^[14],灌木林吸收 SO₂ 能力为 63.18 kg/hm²,草本植物吸收 SO₂ 能力为 46.25 kg/hm²^{[12][18]}。

通过计算针叶林、阔叶林、混交林、灌木林、草地吸收 SO₂ 能力,估算研究区净化 SO₂ 的总能力;再设定 SO₂ 的投资及处理成本为 0.6 元/kg^[14],分别估算研究区净化 SO₂ 的价值。得出总价值为 $6.35 @10^6$ 元/a,其中由于门头沟区灌木林面积相对较大,计算所得净化 SO₂ 的价值最高为 $2.787 @10^6$ 元/a,草地最低为 $2.63 @10^5$ 元/a(表 1)。

表 1 各植被类型吸收 SO₂ 能力及价值

类 型	针叶林	阔叶林	混交林	灌木林	草地
面积/hm ²	8581.9	27846.5	7763.3	75923.5	9469.3
吸收 SO ₂ 能力/(kg # hm ⁻²)	215.60	88.65	152.13	61.18	46.25
价值/(元 # a ⁻¹)	1110154	1481155	708618	2786999	262772
总计/(元 # a ⁻¹)	6349700(约 635 万元/a)				

3.4.2 吸收氮氧化物价值 据韩国科学技术处测定每 1 hm² 森林的氮氧化物吸收量为 6.0 kg,采用中国大气排污收费标准的筹资型标准的平均值 1.34 元/kg^[11],估算研究区森林吸收氮氧化物的总能力。结果为:门头沟区森林对氮氧化物的吸收价值为 $3.09 @10^5$ 元/a,在消减氮氧化物污染方面起到重要作用。

3.5 植被滞尘价值

利用实测植物叶片滞尘数值,并对所测植物依照常绿乔木、落叶阔叶乔木、灌木以及草地等 4 种不同植物类型进行分类,计算各植物类型的平均滞尘能力,再与遥感方法估算出的叶面积指数以及植被

统计数据相结合,评估研究区总体的自然植被滞尘能力、滞尘量与滞尘效益。结果表明:门头沟区自然植被具有明显的滞尘功能,其年滞尘量为 $3.947 @10^5 \text{ t/a}$,由此带来的滞尘效益价值为 $6.710 @10^7$ 元/a。其中,灌木林和落叶阔叶林 2 种植被类型是研究区自然植被滞尘能力、年滞尘量以及滞尘效益的主要组成部分;常绿乔木的滞尘时间长于其他任何植物种类,其年滞尘量方面与滞尘能力方面相比,所占比例有所增加^[15]。

4 结论与讨论

该研究以北京市门头沟区为例,探讨了大城市

周边区域自然生态系统的生态系统服务功能,着重评估有助于缓解区域突出生态环境问题、维持研究区自然生态系统平衡与稳定的水源涵养、大气调节与净化等几项功能。以此说明处于大城市中心区周围的郊区,由于具有相当于城区更高的植被覆盖率和较低的人口密度,其自然生态系统在改善城市环境质量方面所发挥的巨大作用。

最终结果表明,门头沟区自然生态系统的水源涵养价值约为 1.882×10^9 元/a, 土壤保持价值约为 9.743×10^6 元/a, 固碳释氧总价值约为 4.32×10^9 元/a, 吸收 SO_2 的价值为 6.35×10^6 元/a, 吸收氮氧化物的价值为 3.09×10^5 元/a, 滞尘效益价值为 6.710×10^7 元/a。门头沟区自然生态系统以上几项典型的生态系统服务功能价值为 6.286×10^9 元/a。

研究区的主要生态环境问题是传统社会经济发展对自然资源与环境带来的压力,而解决该问题的出路则是进行生态恢复与建设,并充分发挥植被生态系统的各项功能、改善生态环境,以此为契机发展当地特色经济。针对门头沟区自然生态系统现状,在生态恢复与植被建设中进行植被群落的合理配置,使自然生态系统的综合生态系统服务功能可以更加有效的发挥,为北京城市中心区提供可靠的绿色屏障作用。最大程度发挥城市郊区高植被覆盖率的优势与功能,改善城市整体的生态环境质量。

受到现有科学技术水平、计量方法和研究手段等因素的限制,无法对森林生态系统服务功能进行十分确切评价,其价值体现仍然是不完全的^[19]。对门头沟区自然生态系统的生态系统服务功能评价也只是选取其中几项进行的,但这一评估结果仍然清楚地表明了北京门头沟区自然生态系统在维持区域生态系统稳定和促进首都社会经济持续发展中的重大作用。

参考文献:

[1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystem [M]. Washington D C: Island Press. 1997.

[2] 欧阳志云,王如松. 生态系统服务功能与可持续发展 [C]//赵景柱,欧阳志云,吴钢. 社会-经济-自然复合生态系统可持续发展研究,北京:中国环境科学出版社,1999.

[3] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态

经济价值评价[J]. 应用生态学报,1999,10(5):632-640.

[4] 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.

[5] 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[J]. 应用生态学报,2000,11(4):481-484.

[6] 陈利顶,傅伯杰. 华北山区环境综合整治与生态建设[J]. 环境科学进展,1997,5(5):632-69.

[7] 赵景柱,肖寒,吴刚. 生态系统服务的物质量评价与价值量评价两类方法的比较研究[J]. 应用生态学报,2000,11(2):290-292.

[8] 李金昌. 生态价值论 [M]. 重庆:重庆大学出版社,1999.

[9] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 草地生态系统服务功能分析及其评价指标体系[J]. 生态学杂志,2004,23(6):155-160.

[10] 赵同谦,欧阳志云,贾良清,等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报,2004,24(6):1101-1110.

[11] 周冰冰,李忠魁,侯元兆,等. 北京市森林资源价值 [M]. 北京:中国林业出版社,2000.

[12] 欧阳志云,王如松,杨建新. 中国生物多样性间接价值评估初步研究 [C]//王如松. 现代生态学的热点问题研究,北京:中国科学技术出版社,1996:402-421.

[13] 郑元润,周广胜. 基于 NDVI 的中国天然森林植被净第一性生产力模型[J]. 植物生态学报,2000,24(1):2-12.

[14] 中国生物多样性国情研究报告编写组. 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,1997.

[15] 冯朝阳,高吉喜,田美荣,等. 京西门头沟区自然植被滞尘能力及效益研究[J]. 环境科学研究,2007,20(5):152-159.

[16] 朱绍文,张立,孙春林. 八达岭林场森林资源价值评估及生态效益经济补偿的初步探讨[J]. 北京林业大学学报,2003,25(增刊):72-74.

[17] 罗红艳,李吉跃,刘增. 绿化树种对大气 SO_2 的净化作用[J]. 北京林业大学学报,2000,22(1):45-50.

[18] 黄银晓,林舜华,韩荣庄,等. 北京主要绿化植物和土壤对大气中硫的积累特点及其指示、净化作用[J]. 植物学报,1990,32(5):380-389.

[19] 余新晓,秦永胜,陈丽华,等. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究[J]. 生态学报,2002,22(5):622-630.