

北京市森林生态系统的水源涵养功能

张 彪^{1,2}, 李文华¹, 谢高地¹, 肖 玉¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:以北京市森林资源第 6 次二类调查数据为基础, 采用区域水量平衡法和土壤蓄水能力评估了森林水源涵养的功能, 并重点分析了不同类型和区位条件下森林涵养水源功能的差异。结果表明: 2004 年北京市森林生态系统涵养水源 $1.26 \times 10^9 \text{ m}^3$; 其中, 怀柔区、延庆县、密云县、门头沟区和房山区的森林是水源涵养功能的主要贡献者 (累积贡献率 63.3%); 从森林类型来看, 阔叶林和灌木林是水源涵养的主体 (累积贡献率 80.8%); 位于不同海拔高度的森林对水源涵养功能的贡献不同, 其中位于海拔 $< 100\text{m}$ 、 $100 \sim 500\text{m}$ 和 $500 \sim 800\text{m}$ 森林的贡献率分别为 29%、30.7% 和 23.3%; 而且位于不同坡位的森林涵养水源的贡献也不同, 其中平地和全坡的森林最高, 贡献率分别为 37.12% 和 40.7%。

关键词:森林生态系统; 水源涵养; 北京市

文章编号: 1000-0933(2008)11-5619-06 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Characteristics of water conservation of forest ecosystem in Beijing

ZHANG Biao^{1,2}, LI Wen-Hua¹, XIE Gao-Di¹, XIAO Yu¹

1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5618 ~ 5624.

Abstract: Based on the data of Category II of the sixth forest inventory in Beijing (2004), the water conservation of the forest ecosystem was estimated by means of the regional water balance method as well as on the soil-water storage ability. The characteristics of water conservation of different forest types in different locations were analyzed. The result showed that a volume of $1.26 \times 10^9 \text{ m}^3$ water was conserved in the forest ecosystem. Huairou District, Yanqing County, Miyun County, Mentougou District and Fangshan District were the main contributors of water conservation, and their cumulative ratio reached 63.3%. Broadleaf forest and shrub forest contributed 80.8% of the water conservation in Beijing forest ecosystem. Water conservation of forests located in the region differs with attitude. The forests with average elevation of $0 - 100\text{m}$, $100 - 500\text{m}$ and $500 - 800\text{m}$ contributed 29%, 30.7% and 23.3%, respectively. Different slope location also has an effect on water conservation, and those forests located in the flat ground and in the hills contribute with 37.12% and 40.7%, respectively.

Key Words: forest ecosystem; water conservation function; Beijing

随着全球水资源需求量的不断增加以及水环境的急剧恶化, 水资源紧缺已成为世人所共同关注的全球性问题^[1], 由于森林生态系统与水资源的关系密切^[2], 森林的水源涵养作用引起了人们的高度重视^[3,4], 尤其是

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (30230090; 30770410)

收稿日期: 2008-04-09; **修订日期:** 2008-07-08

作者简介: 张彪 (1980 ~), 男, 山东郓城人, 博士生, 主要从事生态服务功能研究. E-mail: zhangb8010@126.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30230090; 30770410)

Received date: 2008-04-09; **Accepted date:** 2008-07-08

Biography: ZHANG Biao, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecosystem service. E-mail: zhangb8010@126.com

干旱、半干旱地区森林生态系统的水源涵养功能已成为目前生态服务功能研究的热点^[5,6]。森林的水源涵养功能是指森林生态系统通过林冠层、枯落物层和土壤层拦截滞蓄降水^[7],从而有效涵蓄土壤水分和补充地下水、调节河川流量的功能^[8]。大量研究与实践证明^[7],区域水量平衡法是目前计量水源涵养功能最为有效也最为常用的方法,不过它是针对研究区整体所进行的评价计量,有助于反映区域森林涵养水源的整体状况,但是难以反映评价区域内部水源涵养功能的差异;尤其重要的是,随着森林资源价值核算工作的不断深入,森林价值评估逐渐由全国、区域等大尺度转向区县、地块等小尺度,因此同一区域内的不同森林类型以及不同区位条件下森林涵养水源功能的差异值得关注。

本文以北京市森林生态系统为研究对象,以北京市第6次森林资源二类调查小班数据(2004年)为基础,首先根据区域水量平衡法评估了区域尺度上森林涵养水源的功能量,然后以每个林地小班土壤蓄水能力和面积为综合权重,得到了各小班的涵养水源量,最后比较分析了不同区县、不同森林类型以及位于不同海拔高度和坡位上的森林涵养水源的功能及其差异。本研究不仅有助于揭示北京市具有重要涵养水源服务的森林主体,进一步提高人们对森林生态服务的认识,而且有利于较小尺度上森林资源价值的核算和不同区位条件下森林资源的建设与管理。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

北京市位于华北平原的西北部($39^{\circ}28' \sim 41^{\circ}05' \text{ N}$, $115^{\circ}25' \sim 117^{\circ}30' \text{ E}$),土地总面积 16807.8 km^2 ,其中山区面积约占 62%,平原区占 38%。北京市气候属暖温带半湿润季风大陆性气候,多年平均气温 12.0°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 $4000 \sim 4600 \text{ h}$,无霜期 $150 \sim 200 \text{ d}$,多年平均降水量 638.8 mm ,降水分布极不均匀,主要集中在夏季,多以暴雨形式出现,年蒸发量达 $1800 \sim 2000 \text{ mm}$ 。北京市境内有永定河、潮白河、北运河、大清河和冀运河五大水系,大小河流 200 多条,长 2700 km ,大中小型水库 85 座,总库容约 $7.4 \times 10^9 \text{ m}^3$,大型引水渠 4 条。

1.2 森林资源现状

根据北京市第6次二类资源清查结果,2004年森林面积 $9.18 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中针叶林面积 $1.37 \times 10^5 \text{ hm}^2$,阔叶林面积 $3.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$,针阔混交林面积 $6.81 \times 10^4 \text{ hm}^2$,以及灌木林地 $3.21 \times 10^5 \text{ hm}^2$;森林资源主要分布在密云、怀柔、延庆和平谷等区县,优势树种以柞树为主,其次为侧柏、油松和杨树等;林种结构主要是防护林,占到林分面积的 83.1%,其次为特种用途林和用材林,分别占林分总面积 11.7% 和 5.2%;北京市森林以幼龄林为主,占总林分面积的 58.4%;林分平均郁闭度为 0.51,平均胸径 9.6 cm 。北京市森林土壤类型多样,主要有山地草甸土、山地棕壤、褐土、潮土、沼泽土、水稻土和风砂土等,地带性土壤为褐土,而且随海拔高度的变化,土壤类型呈现明显分异规律。

2 研究方法

本评价是在 ARCGIS9.0 和北京市森林资源第6次二类调查小班数据基础上实现的,首先采用区域水量平衡法计算北京市森林生态系统涵养水源总量,然后根据林地小班蓄水能力(土壤厚度与非毛管孔隙度)和林地面积确定水源涵养功能的综合权重,最后计算出每个林地小班的涵养水源量。

2.1 区域森林水源涵养量

区域尺度上森林涵养水源量根据水量平衡法^[9]计算,公式为:

$$W = (1 - \rho) \times R \times A \quad (1)$$

式中, W 为森林涵养水源量($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), ρ 为多年平均蒸发散率(%), R 为年降水量(mm), A 为森林生态系统面积(hm^2)。

2.2 小班森林水源涵养量

林地小班尺度上森林涵养水源量的计算重点在于确定涵养水源功能的权重。研究证明^[10,11],森林涵养水源的功能主要是由土壤层贮水完成的,而土壤层厚度和非毛管孔隙度可综合反映森林土壤涵养水源的潜在能力^[12],因此采用林地土壤层厚度和非毛管孔隙度(如表1)与林地面积组合成涵养水源权重,如公式(2)

所示:

$$\alpha_i = \frac{d_i \times c_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n (d_i \times c_i \times A_i)} \quad (2)$$

式中, α_i 为第 i 个森林小班的水源涵养权重, d_i 和 c_i 分别表示第 i 个林地小班的土壤层厚度 (cm) 和土壤非毛管孔隙度 (%), A_i 为林地小班面积 (hm^2)。

表 1 北京市不同优势树种林地土壤非毛管孔隙度

Table 1 Soil non-capillary porosities of forestlands with different dominant tree species in Beijing

优势树种 Dominant tree specie	侧柏 ^[13] <i>Platycladus orientalis</i>	油松 ^[14] <i>Pinus tabulaeformis</i>	柞栎 ^[15] <i>Quercus dentata</i>	杨树 ^① <i>Populus</i>	桦树 ^[16] <i>Betula platyphylla</i>
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	9.69%	9.8%	8.1%	16.6%	10.85%
优势树种 Dominant tree specie	山杨 ^[16] <i>Populus davidiana</i>	阔叶树 ^[15] <i>Broadleaf tree</i>	灌木 ^[13] <i>Shrub</i>	刺槐 ^[16] <i>Robinia pseudoacacia</i>	落叶松 ^[16] <i>Larix principis-rupprechtii</i>
非毛管孔隙度 Non-capillaryporosity	8.96%	10.5%	8.68%	7.95%	6.9%

数据均为引用文献中测定数据的平均值 Data derived from the average of referred literatures

3 结果分析

根据北京市统计数据^[17], 2004 年北京市降水量 483.3 mm, 多年蒸发散率为 72%^[18], 根据公式(1) 计算得到 2004 年北京市森林生态系统共涵养水源 $1.26 \times 10^9 \text{ m}^3$, 单位面积森林涵养水源量 $1372.57 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

3.1 不同区县森林水源涵养功能的差异

北京市森林资源主要集中分布在西部和北部的房山区、延庆县、怀柔区等 14 区县, 评价结果表明: 怀柔区森林涵养水源的功能最大, 其贡献率^②为 16.3%, 其次为延庆县(14.56%)、密云县(11.69%)、门头沟区(10.69%)、房山区(10.02%)、昌平区(8.48%)、平谷区(8.37%)和顺义区(5.21%), 上述 8 个区县森林涵养水源的累积贡献率达到了 85.3%, 其余 6 个区县森林对水源涵养量的贡献较小, 其中石景山区森林的水源涵养贡献率最低, 仅为 0.28%; 从单位面积森林涵养水源量来看, 通州区最大, 为 $3225.72 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 其次为顺义区($3099.40 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、朝阳区($2920.66 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、大兴区($2735.37 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、海淀区($2180.69 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)和丰台区($2139.84 \text{ m}^3/\text{hm}^2$), 其余区县森林涵养水源能力均小于 $2000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。森林涵养水源的贡献率综合取决于森林面积和单位面积涵养水源能力两个因素(如图 1), 其中平谷区、昌平区、房山区、门头沟区、密云县、延庆县和怀柔区森林涵养水源的贡献率与其森林面积比例的相关性较高, 即森林面积越大, 其水源涵养功能的贡献越大; 而顺义区、通州区、大兴区、海淀区、朝阳区、丰台区和石景山区森林与其单位面积涵养水源能力有较高的相关性。

3.2 不同森林类型水源涵养功能的差异

北京市森林生态系统主要有针叶林、阔叶林、混交林和灌木林 4 种类型, 其中, 阔叶林和灌木林涵养水源功能的贡献最大, 其贡献率分别为 57.8% 和 23% (二者累积贡献率为 80.8%), 而针叶林和混交林的贡献率仅为 11.9% 和 7.16%; 就单位面积森林涵养水源量来看, 阔叶林最高, 为 $1863.98 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 其次为混交林和针叶林, 分别为 $1322.11 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $1094.1 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌木林单位面积涵养水源功能最低, 为 $902.22 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。由图 2 可以发现, 阔叶林水源涵养贡献率最高(57.88%), 与其面积和单位面积水源涵养能力都最大有关, 灌木林水源涵养贡献率较高(23.04%), 这是由于其面积较大所致, 尽管针阔混交林单位面积涵养水源能力并不低, 但是其面积所占比例最小, 以至于其涵养水源的贡献率最低(7.16%)。

①刘晨峰. 北京地区杨树人工林能量与水量平衡研究. 北京林业大学博士论文, 2007 年

②涵养水源量占北京市森林涵养水源总量的比例, 下同

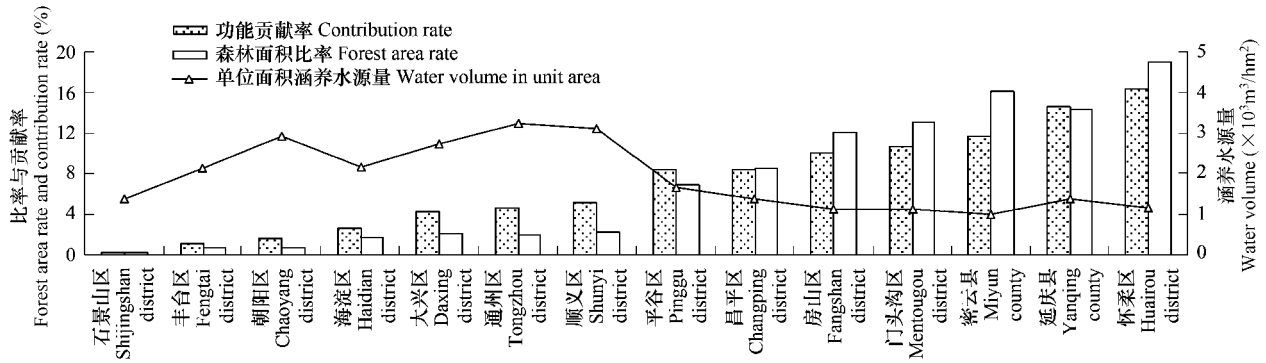


图1 北京市14区县森林生态系统涵养水源功能特征

Fig. 1 Characteristics of water conservation in 14 districts of Beijing

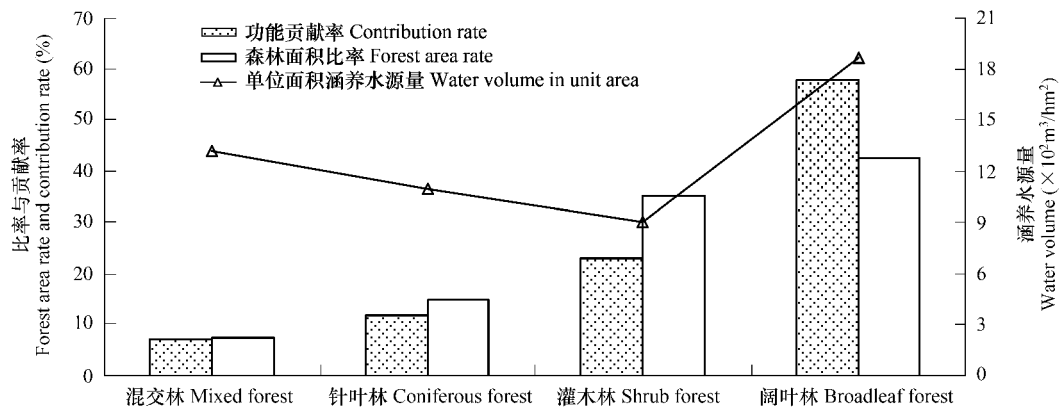


图2 北京市不同森林类型涵养水源功能特征

Fig. 2 Characteristics of water conservation in different forest types of Beijing

3.3 不同海拔高度森林水源涵养功能的差异

根据北京市森林资源分布地区的海拔高度,可以划分为<100m、100~500m、500~800m、800~1000m和>1000m等5个级别(如图3)。结果发现,北京市森林的水源涵养功能主要来自于海拔800m以下地区(其累积贡献率为83%),其中,<100m、100~500m和500~800m海拔高度上的森林涵养了总水源量的29%、30.7%和23.3%,位于海拔高度800~1000m和>1000m的森林涵养水源功能的贡献率较低,分别为10.3%和6.7%;不同海拔高度上森林单位面积涵养水源量不同,其中位于海拔<100m的森林单位面积涵养水源能

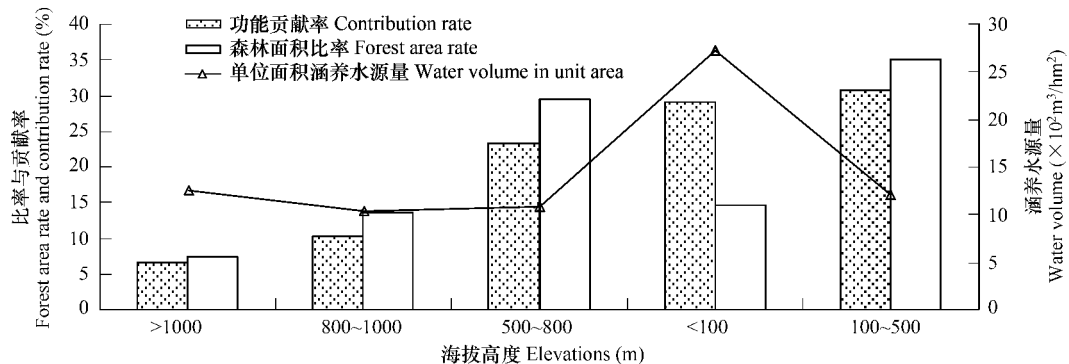


图3 位于不同海拔高度森林涵养水源功能特征

Fig. 3 Characteristics of water conservation in Beijing's forests with different elevations

力最大,为 $2729.36 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,而位于海拔高度 $>1000\text{m}$ 和 $100 \sim 500\text{m}$ 处的森林单位面积涵养水源能力比较接近,分别为 $1248.56 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $1206.22 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,海拔 $500 \sim 800\text{m}$ 和 $800 \sim 1000\text{m}$ 处森林的涵养水源能力差异不大,分别为 $1081.95 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $1037.32 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;可见,海拔高度 $100 \sim 500\text{m}$ 和 $500 \sim 800\text{m}$ 地区的森林,其涵养水源的贡献率较高主要受其森林面积较大的影响,而海拔高度 $<100\text{m}$ 地区的森林,其水源涵养价值贡献率较高与其单位面积森林涵养水源能力最高有关。

3.4 不同坡位森林水源涵养功能的差异

根据北京市森林资源二类调查数据,林地坡位共分为脊部、上坡位、中坡位、下坡位、山谷、平地 and 全坡 7 种类型(如图 4),其中位于全坡的森林水源涵养贡献率最高,为 40.7% ,其次平地森林的涵养水源贡献率为 37% ,二者的累积贡献率达到了 77.8% ;就其单位面积森林涵养水源能力来看,平地森林的单位面积涵养水源量最大,为 $2530.13 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,其次为山谷、下坡位、脊部的森林,其单位面积涵养水源量分别为 1978.08 、 1405.78 、 $1119.93 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,位于中坡位和上坡位的森林涵养水源能力比较接近,分别为 $1088.57 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $1053.76 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,而位于全坡的森林单位面积涵养水源的能力最小,仅为 $1009.91 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;可见,尽管全坡上森林的涵养水源能力最低,但是其面积比重最大,因此其水源涵养功能的贡献率(40.70%)仍高于其他坡位上森林,平地上的森林涵养水源能力和面积比率都较高,因而其水源涵养贡献率也较高(37.12%),而位于山谷、脊部和其他坡位的森林,尽管其单位面积涵养水源量并不低,但是由于它们的面积太小,因而其水源涵养的贡献率并不高。

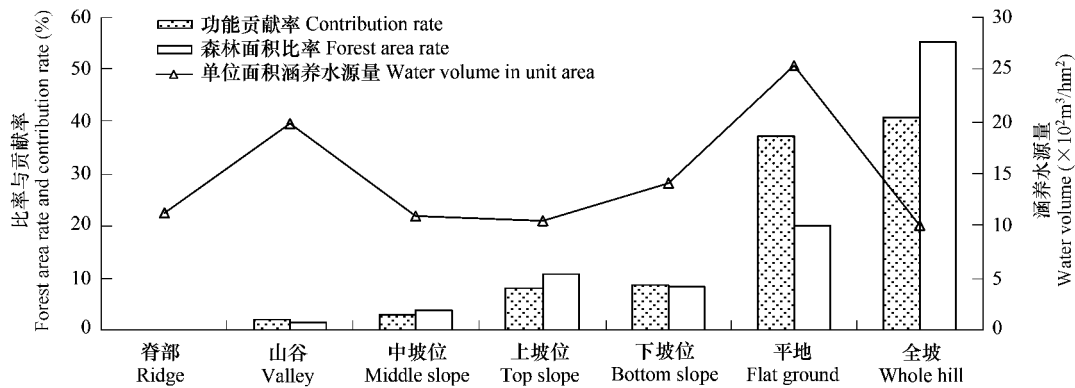


图 4 北京市不同坡位上森林涵养水源价值特征

Fig. 4 Characteristics of water conservation in Beijing forests with different slope location

4 结论与讨论

本文以北京市第 6 次二类调查森林数据为基础(2004 年),根据区域水量平衡法和土壤蓄水能力特征,计算了北京市和林地小班两个尺度上森林涵养水源的功能,并比较分析了不同森林类型和区位条件上森林涵养水源功能的差异,得出以下结论:

(1)2004 北京市森林生态系统面积 $9.18 \times 10^5 \text{ hm}^2$,年涵养水源量 $1.26 \times 10^9 \text{ m}^3$,单位森林面积平均涵养水源量 $1372.57 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;(2)不同区县森林涵养水源功能不同,其中怀柔区、延庆县、密云县、门头沟区和房山区的森林是北京市森林生态系统涵养水源功能的主体,但是通州区、顺义区、朝阳区和大兴区森林单位面积涵养水源的能力较大;(3)不同森林类型涵养水源的功能不同,其中阔叶林和灌木林涵养水源贡献最大,而从单位面积涵养水源能力来看,阔叶林 $>$ 混交林 $>$ 针叶林 $>$ 灌木林;(4)不同海拔高度上森林水源涵养功能的贡献不同,其中海拔 $<100\text{m}$ 、 $100 \sim 500\text{m}$ 和 $500 \sim 800\text{m}$ 森林为涵养水源功能的主体,其中海拔 $<100\text{m}$ 森林的涵养水源能力最高;(5)不同坡位上森林涵养水源的贡献也不同,其中平地和全坡的森林最高,但是平地森林单位面积涵养水源能力最高,而全坡森林涵养水源能力最低。

森林生态系统的水源涵养功能及其价值评估是当前生态服务功能研究的热点问题^[6],同时也是一个极

其复杂的难点问题^[12]。本研究在评价分析北京市森林生态系统涵养水源的功能及其差异的过程中,没有考虑不同林地小班上降水量和蒸发散率的差异性,尤其是较大降雨事件中产生的快速地表径流等因素的影响,由于考虑到这部分径流量较小^[19],尽管本研究所引用的参数不能十分精确地反映北京市森林生态系统涵养水源功能的真实情况,并且由于数据资源和研究方法的局限性,仅对森林生态系统的蓄水功能做出了粗略估计,但是这并不妨碍人们对于北京市森林涵养水源的功能及其差异的认识。随着未来评估方法和监测技术手段的不断完善,森林水源涵养功能的评价及其价值估算将会更加合理与准确。

References:

- [1] Jiang W L. The water resources value. Beijing: Science Press, 1998. 1—5.
- [2] Vazken Andréassian. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291:1—27.
- [3] Gao C D, Yu X X. Review on researches of water conservation forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 22 (5):78—82.
- [4] Jiang W L. Theory and method to accounting value of forest water conservative. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2):34—40.
- [5] Yu X X, Qin Y S, Chen L H, *et al.* The forest ecosystem services and their valuation of Beijing mountain areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (5): 627—630.
- [6] Zhao C Y, Feng Z D, Liu Y. Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21 (2): 157—161.
- [7] Sun L d, Zhu J Z. Benefit evaluation on water and soil conservation forest. Beijing: Science Press, 1995. 362—377.
- [8] Mu C L, Gong G T. Quantification and valuation of comprehensive benefits of protection forest in the middle and upper reaches of the Changjiang River. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2001, 22(1):15—23.
- [9] Xiao H, Ou Y 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.
- [10] Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions on major forest ecosystems in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(1):16—22.
- [11] Jin M G, Zhang R Q, Sun L F, *et al.* Temporal and spatial soil water management: a case study in the Heilonggang region, P R China. *Agricultural Water Management*, 1999, 42: 173—187.
- [12] Jin X Q. Study on the accounting of water conservation. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 1990, 18(3):65—69.
- [13] Zhou Z F. A comprehensive evaluation about soil water of different types of sites in low mountain region in Jiulongshan, Beijing. *Water Conservancy in Beijing*, 1996, 4:28—30.
- [14] Wu W Q, Li J Y, Zhang Z M, *et al.* Soil water characteristics of plantations in the west mountains of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(4):51—55.
- [15] Yu Z M, Wang L X. Benefits of water conservation forest. Beijing: China Forestry Press, 1999. 34—40.
- [16] Gao P, Wang L X. Study on the benefits of the water-reserving forest in the upper reaches of Miyun reservoir. *Bulletio of Soil and Water Conservation*, 1993, 13(1):24—29.
- [17] Beijing Statistical Bureau. Beijing statistical yearbook 2005. Beijing: China Statistics Press, 2006. 19.
- [18] Li H T. Energy balance and evapotranspiration in the warm temperate zone of the northern China. Research on the structure and function of forest ecosystem in the warm temperate zone of the northern China. Beijing: Science Press, 1997. 173—181.
- [19] Chen DL, Yu XX, Liao BH. Analysis on the function of conservation water of the Chinese forest ecosystem. *World Forestry Research*, 2005, 18 (1):49—54.

参考文献:

- [1] 姜文来. 水资源价值论. 北京:科学出版社,1998. 1~5.
- [3] 高成德,余新晓. 水源涵养林研究综述. 北京林业大学学报,2000,22(5):78~82.
- [4] 姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究. 水土保持学报,2003,17(2):34~40.
- [5] 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. 生态学报,2002,22(5):627~630.
- [6] 赵传燕,冯兆东,刘勇. 干旱区森林水源涵养生态服务功能研究进展. 山地学报,2003,21(2):157~161.
- [7] 孙立达,朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价. 北京:科学出版社,1995.362~377.
- [8] 慕长龙,龚固堂. 长江中上游防护林体系综合效益的计算与评价. 四川林业科技,2001,22(1):15~23.
- [9] 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.
- [12] 金小麒. 水源涵养的计量研究. 贵州林业科技,1990,18(3):65~69.
- [13] 周择福. 北京九龙山地山区不同立地土壤水分生态及综合评价的研究. 北京水利,1996(4):28~30.
- [14] 吴文强,李吉跃,张志明,等. 北京西山地区人工林土壤水分特性的研究. 北京林业大学学报,2002,24(4):51~55.
- [15] 于志民,王礼先. 水源涵养林效益研究. 北京:中国林业出版社,1999.34~40.
- [16] 高鹏,王礼先. 密云水库上游水源涵养林效益的研究. 水土保持通报,1993,13(1):24~29.
- [17] 北京市统计局. 北京市统计年鉴 2005. 北京:中国统计出版社,2006.19.
- [18] 李海涛. 暖温带山地森林生态系统的能量平衡及蒸发散研究. 见:陈灵芝主编. 暖温带森林生态系统结构与功能的研究. 北京:科学出版社,1997.173~181.
- [19] 陈东立,余新晓,廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. 世界林业研究,2005,18(1):49~54.