

北京市延庆区生态系统生产总值核算及空间化

牟雪洁, 王夏晖, 张 箫, 饶 胜, 朱振肖

(生态环境部 环境规划院, 北京 100012)

摘 要:延庆区是北京市的生态涵养区之一,持续为北京市及周边地区提供生态系统产品和服务,具有重要生态价值。运用市场价值法、影子工程法、替代成本法、旅行费用法、支付意愿法等方法,对延庆区 2016 年生态系统产品供给、调节服务、文化服务 3 大类 17 项服务功能进行了核算,利用不同乡镇、不同类型生态系统单位面积价值进行了空间化研究。结果表明:(1) 2016 年,延庆区生态系统生产总值(GEP)为 335.63 亿元,其中调节服务价值最高,占比为 91.4%;产品供给和文化服务价值相对较低,占比分别为 3.8%,4.8%;(2) 从不同生态系统服务类型看,生命维护和栖息地保护价值最高,为 146.0 亿元,占 GEP 比例为 43.5%,其次为气候调节、土壤保持、固碳释氧、水源涵养等,占 GEP 比例分别为 15.8%,12.1%,10.0%,5.4%,上述 5 项服务价值量之和占 GEP 的 86.8%;(3) 从不同生态系统类型看,森林>湿地>农田>草地>城镇>裸地,其中森林生态系统生产总值最高,为 268.79 亿元,占比为 80.1%;其次为湿地、农田,占比分别为 10.9%,7.8%;(4) 从单位面积价值量看,湿地>森林>农田>草地>裸地>城镇,湿地单位面积价值为 1.18 亿元/km²,分别是森林和农田类型的 5.9 倍、16.8 倍;(5) GEP 的供给与需求在空间上不匹配,人口较为集聚的平原地区是生态系统服务的主要需求区,但 GEP 相对较低;人口较少的山区为 GEP 主要供给区。

关键词:生态系统生产总值;生态系统服务;空间化

中图分类号:X196

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0265-10

Accounting and Mapping of Gross Ecosystem Product in Yanqing District, Beijing

MOU Xuejie, WANG Xiahui, ZHANG Xiao, RAO Sheng, ZHU Zhenxiao

(Chinese Academy of environmental planning, Beijing 100012, China)

Abstract: Yanqing District is one of the ecological conservation areas in Beijing, and provides ecosystem goods and services for Beijing and surrounding areas continuously, which has important ecological value. In this paper, multiple methods such as market value, shadow engineering, replacement cost, travel cost, willingness to pay were used to value the ecosystem product supplies, regulating and cultural services of Yanqing District in 2016, which includes 17 services. And value mapping was conducted based on the value per unit area of different towns and villages and different types of ecosystem. The results showed that: (1) gross ecosystem product (GEP) of Yanqing District in 2016 was 33.563 billion Yuan, among which the regulating service value was the highest, accounting for 91.4% of the GEP; value of product supplies and cultural service were relatively low, accounting for 3.8%, 4.8% respectively; (2) from the aspect of different ecosystem services, value of life maintenance and habitat protection was the highest, which was 14.6 billion Yuan, accounting for 43.5% of the GEP, followed by climate regulation, soil conservation, carbon sequestration and oxygen release, water conservation, accounting for 15.8%, 12.1%, 10.0%, 5.4%, respectively; the sum of four service values mentioned above accounted for 81.4% of the GEP in Yanqing; (3) from the aspect of different ecosystem types, GEP decreased in the order: forest>wetland>farmland>grassland>city> bare

收稿日期:2019-02-11

修回日期:2019-03-20

资助项目:科技部国家重点研发计划“典型区域生态承载力与产业一致性评价技术研究”(2017YFC0506602)

第一作者:牟雪洁(1988—),女,山东烟台人,硕士,助理研究员,主要从事区域生态系统服务价值评估研究。E-mail:mouxj@caep.org.cn

通信作者:饶胜(1978—),男,江西抚州南丰县人,硕士,正高级工程师,主要从事国家、区域和城市生态系统保护、评估、规划理论和方法研究。E-mail:raosheng@caep.org.cn

land; the value of forest ecosystem was the highest, which was 26.879 billion Yuan, accounting for 80.1% of the GEP; wetland and farmland accounted for 10.9% and 7.8%, respectively; (4) value per unit area decreased in the sequence: wetland>forest>farmland>grassland>bare land>city, the value of wetland per unit area was the highest, which was 118 million Yuan/km², and was 5.9 times of that of forest and 16.8 times of that of farmland; (5) the supply and demand of GEP did not match in space, which means that plain areas with relatively concentrated population were the main demand areas for ecosystem services, while the mountainous areas were main supply areas of GEP.

Keywords:gross ecosystem product; ecosystem services; mapping.

自然生态系统不仅为人类提供了生产与生活所必需的粮食、医药、木材及工农业生产的原材料,还具有调节气候、涵养水源、保持水土、净化水气等重要生态功能,更创造与维持了地球生命支持系统^[1]。生态系统服务是人类从生态系统中获取的惠益^[2],是人类赖以生存与发展的基础^[3]。自 20 世纪 90 年代 Costanza 等^[4]和 Postel 等^[5]发表生态系统服务价值研究成果以来,生态系统服务价值研究越来越受到重视,成为地理学、生态学、经济学的前沿和热点,生态系统服务价值核算也逐渐涵盖全球、国家、区域、流域等不同空间尺度和森林、草地、湿地、农田等不同生态系统类型^[6]。然而,随着经济发展与生态环境保护的矛盾日益突出,如何将生态效益纳入经济社会发展评价体系,建立一个国家或地区独立的生态系统产品与服务核算方法体系成为当前各国研究的重大课题。在此背景下,我国学者提出了“生态系统生产总值(Gross Ecosystem Product,GEP)”这一概念,旨在建立一套与国内生产总值(Gross Domestic Product,GDP)相对应的统计核算体系。生态系统生产总值是生态系统为人类福祉和经济社会可持续发展提供的产品与服务价值的总和,包括产品提供价值、调节服务价值、文化服务价值 3 类^[2]。此后许多学者进行了大量核算研究^[2,7-8],这些评估结果从经济价值角度直观反映自然生态系统为人类社会提供的巨大福祉和惠益,对政府决策者开展生态系统保护与管理工作提供了重要数据基础和科学依据,也能够促进提升公众的生态保护意识。但总体来看,当前研究多关注对某一行政区域生态系统生产总值的数量核算,对价值量的空间化研究相对较少。

延庆区属于北京市的生态涵养区,生态功能十分重要,是北京市乃至京津冀地区重要的生态屏障。尽管自然生态本底较好,但经济发展相对落后,其良好的生态系统产品与服务价值并未得到充分认识。因此,本文选取延庆区作为研究对象,开展生态系统生产总值(GEP)核算研究,同时探索研究价值量的空间

化,旨在量化区域产品与服务提供价值及空间分异特征,让人们认识到生态系统服务的巨大效益和社会福祉,同时为延庆区乃至北京市政府制定生态补偿等相关制度提供科学依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

延庆区(40°16′—40°47′N,115°44′—116°34′E)位于北京市西北部,地处燕山山脉西北端,地貌类型以山地为主,北、东、南三面环山,西邻官厅水库,中部凹陷形成山间盆地,属于北京市的生态涵养区,生态区位十分重要。全区国土总面积约为1 994.88 km²,2016 年末总人口 32.7 万人,国内生产总值(GDP)为 122.7 亿元。地处温带与中温带、半干旱与半湿润的过渡地带,属温带大陆性气候,年平均气温 8.7℃,年平均降水量 436 mm。2016 年森林覆盖率为 58.41%,森林、农田生态系统为主要的生态系统类型(表 1),其中森林主要位于山区,农田主要位于平原地区(图 1)。

表 1 2016 年延庆区不同生态系统面积和比例

生态系统类型	面积/km ²	比例/%
森林	1355.03	67.93
草地	27.04	1.36
湿地	31.00	1.55
农田	400.15	20.06
城镇	164.20	8.23
裸地	17.46	0.88

1.2 数据来源

本文采用的生态系统类型数据来自延庆区国土局,为 2016 年延庆区土地利用变更调查数据,并根据核算需要进行了重新归类;产品统计资料、旅游收入等数据主要来自延庆区统计局、旅游委等部门;气象数据主要来自延庆区气象局,并采用克里金插值法将其插值到空间格点;土壤属性数据来自延庆区园林绿化局;人口空间分布数据来自中国科学院资源环境科学数据中心^[9]。

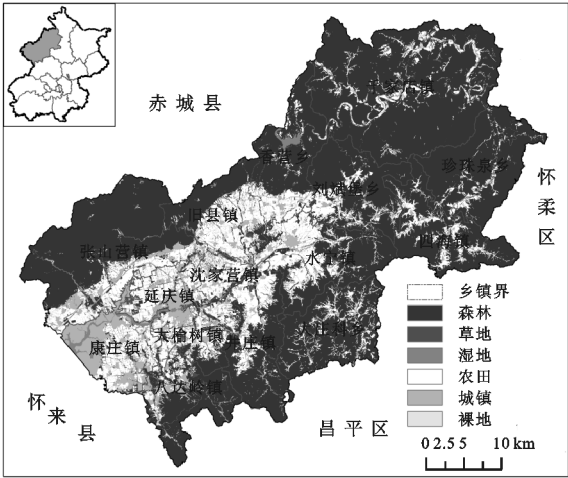


图 1 延庆区位置及生态系统类型

1.3 核算指标与方法

结合延庆区生态系统结构与特征,以生态系统服务功能价值评估理论为基础,将延庆区 GEP 核算分为产品供给服务、调节服务、文化服务三大类共 17 项指标(表 2),具体核算方法如下所述。

表 2 延庆区 GEP 核算指标与方法

服务类别	核算指标	价值量核算方法
产品供给服务	农业产品	市场价值法
	林业产品	
	畜牧业产品	
	水产品	
	水资源	
	可再生生物质能源	
调节服务	土壤保持	替代成本法
	防风固沙	恢复成本法和替代成本法
	水源涵养	影子工程法
	洪水调蓄	影子工程法
	大气环境净化	替代成本法
	水质净化	替代成本法
	固碳释氧	替代成本法
	气候调节	替代成本法
	病虫害控制	防护成本法
文化服务	生命维护与栖息地保护	保育成本法
	自然景观游憩	旅行费用法

1.4 产品供给服务价值

主要采用市场价值法进行评价,同时根据生态系统服务的最终收益原则,实地调查并扣除了农业产品、畜牧业产品、水产品等部分产品供给服务的人工成本。公式如下:

$$V_p = \sum_{i=1}^n EP_i \times (P_i - H_i) \tag{1}$$

式中: V_p 为生态系统产品供给服务总价值; EP_i 为第*i*类生态系统产品产量; P_i 为第*i*类生态系统产品的单

价(元/kg); H_i 为第*i*类生态系统产品单位产量的人工投入成本(元/kg),主要通过实地调查获取。

1.5 调节服务价值

1.5.1 土壤保持价值 采用通用水土流失方程,用潜在土壤侵蚀量与现实土壤侵蚀量之差^[10]评价土壤保持功能量;采用替代成本法,从减少土地废弃、减少泥沙淤积、保持土壤肥力 3 个方面评估土壤保持价值量。

土壤保持总价值为:

$$V_1 = V_{1d} + V_{1n} + V_{1f} \tag{2}$$

其中减少土地废弃的价值为:

$$V_{1d} = SC \times P_t \times \rho \times h \tag{3}$$

式中: V_{1d} 为减少土地废弃的经济价值(元/a); SC 为土壤保持量(t/a); ρ 为土壤容重(t/m³),取 1.25 t/m³; h 为土壤层厚度,取 0.3 m; P_t 为土地废弃的机会成本,采用 2016 年延庆区单位国土面积农林牧渔总产值、水资源及可再生生物质能源之和计算。

减少泥沙淤积的价值为:

$$V_{1n} = 24\% \times SC \times C_f / \rho \tag{4}$$

式中: V_{1n} 为土壤保持减少泥沙淤积的价值(元/a),按照我国流域泥沙运动规律,土壤侵蚀流失泥沙的 24%淤积于水库、河流、湖泊,需清淤作业^[2]; C_f 为水库工程清淤费用(元/m³),参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[11],根据价格指数折算到 2016 年为 18.2 元/t。

保持土壤肥力的价值为:

$$V_{1f} = \sum_i SC \times C_i \times R_i \times P_i \tag{5}$$

式中: V_{1f} 为保持土壤肥力的价值(元/a); C_i 为土壤中氮、磷、钾及有机质的纯含量,根据《中国土种志》中延庆区 4 种典型土种剖面,取表层土氮、磷、钾及有机质含量的平均值,分别为 0.17%,0.08%,2.17%,3.5%; R_i 为氮、磷、钾元素转换成相应肥料(尿素、过磷酸钙、氯化钾)的比率,分别取 2.17,8.33,2.22; P_i 为尿素、过磷酸钙、氯化钾、有机质价格(元/t),参考全国化肥网^[12]及北京市场价格确定。

1.5.2 防风固沙价值 采用修正风蚀方程 RWEQ^[13]评价防风固沙功能量;采用治理沙化土壤的成本和减少风蚀土壤肥力损失 2 个方面评估防风固沙价值量。

防风固沙价值量为:

$$V_2 = V_{2c} + V_{2f} \tag{6}$$

沙化土壤的治理成本为:

$$V_{2c} = [SR \times A / (\rho \cdot h)] \times c \tag{7}$$

式中: V_{2c} 为治理沙化土壤的价值(元/a); SR 为固沙量(t/a); A 为生态系统面积(m²); ρ 为沙砾堆积密

度,取 $1.4\text{t}/\text{m}^3$; h 为土壤沙化标准覆沙厚度,取 0.1m ; c 为治沙工程的平均成本 ($\text{元}/\text{m}^2$),根据京津风沙源治理工程补助资金政策标准,经价格折算到 2016 年为 $4.60\text{元}/\text{m}^2$ 。

减少风蚀土壤肥力损失为:

$$V_{2f} = \sum_i \text{SR} \times C_i \times R_i \times P_i \quad (8)$$

式中: V_{2f} 为保持土壤肥力的价值 ($\text{元}/\text{a}$)。

1.5.3 水源涵养价值 主要评价森林、草地、农田生态系统水源涵养量。其中,森林生态系统主要采用综合蓄水法^[14-16]进行评价,草地生态系统采用降水储存量法^[17]评价,农田生态系统采用农作物截留水和土壤蓄水能力法^[18-19]评估。水源涵养的价值主要体现在增加有效水量,改善水质和调节径流价值,因此采用替代工程法,以水库建设成本来评估。

$$V_3 = W \times c \quad (9)$$

式中: V_3 为水源涵养总价值量 ($\text{元}/\text{a}$); W 为区域内总的水源涵养量 (m^3); c 为建设单位库容的工程成本 ($\text{元}/\text{m}^3$),参考《森林生态系统服务功能评估规范》^[11],经价格指数折算到 2016 年为 $8.23\text{元}/\text{m}^3$ 。

1.5.4 洪水调蓄价值 延庆区主要湿地类型为沼泽湿地和库塘湿地。因此,本文选用沼泽、库塘可调蓄洪水量评估洪水调蓄功能量。采用替代工程法,通过水库建设成本评估洪水调蓄价值量。

其中,沼泽湿地洪水调蓄能力主要根据已有研究成果参数^[20]计算,全国单位面积沼泽土壤的蓄水能力约为 $1.0 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{km}^2)$,洪水期平均最大淹没深度为 0.3m ,因此沼泽湿地洪水调蓄量计算公式为:

$$W_s = 1.0 \times 10^6 \times S + 0.3 \times 10^6 \times S \quad (10)$$

式中: W_s 为沼泽湿地的洪水调蓄能力 (m^3); S 为沼泽面积 (km^2)。

库塘湿地洪水调蓄能力通过实际洪水调蓄库容来计算,其中小型、大中型水库根据延庆区水库设计的防洪库容计算;坑塘水面则通过经验模型,按其总库容的 35% 进行计算^[20]。

$$W_R = 0.35 C_t \quad (11)$$

式中: W_R 为库塘防洪库容 (m^3/a); C_t 为库塘总库容 (m^3)。

洪水调蓄价值量为:

$$V_4 = c \times (W_s + W_R) \quad (12)$$

式中: V_4 为生态系统洪水调蓄价值 ($\text{元}/\text{a}$); c 为建设单位库容的造价 ($\text{元}/\text{m}^3$)。

1.5.5 大气环境净化价值 选用生态系统吸收二氧化硫、氮氧化物和烟粉尘量等 3 项指标评估生态系统大气环境净化的能力。以各类大气污染物的治理成

本估算大气环境净化价值量。

$$V_5 = \sum_{i=1}^3 c_{ai} \times Q_{aj} \quad (13)$$

式中: V_5 为生态系统大气环境净化价值 ($\text{元}/\text{a}$); c_{ai} 为 i 种大气污染物的单位治理成本,根据《中国环境经济核算技术指南》^[21]和《排污费征收标准管理办法》^[22]确定,经价格指数折算,2016 年烟粉尘、 SO_2 、 NO_x 的单位治理成本分别为 $1\,875.9\text{元}/\text{t}$ 、 $1\,186.4\text{元}/\text{t}$ 、 $3\,410.1\text{元}/\text{t}$; Q_{aj} 分别为生态系统每年吸收 SO_2 、 NO_x 、烟粉尘量 (t),采用生态系统单位面积大气污染物吸收量^[8,23]与各类生态系统面积乘积计算。

1.5.6 水质净化价值 选用湿地生态系统吸收 COD、总氮、总磷量等 3 项指标评估湿地水质净化功能量。以 COD、总氮、总磷的治理成本来估算生态系统水质净化价值。

$$V_6 = \sum_{j=1}^3 c_{wj} \times Q_{wj} \quad (14)$$

式中: V_6 为生态系统水质净化的价值 ($\text{元}/\text{a}$); c_{wj} 为治理水体污染物的成本,根据《中国环境经济核算技术指南》^[21]确定,经价格指数折算,2016 年 COD、总氮、总磷的单位治理成本分别为 $22.15\text{元}/\text{kg}$ 、 $8.13\text{元}/\text{kg}$ 、 $2.84\text{元}/\text{kg}$; Q_{wj} 为湿地生态系统对 j 种水污染物的净化量,采用生态系统单位面积各类污染物吸收量^[8,24]与延庆区生态系统面积乘积计算。

1.5.7 气候调节价值 采用森林、草地、农田生态系统的植被蒸腾以及湿地水面蒸发消耗能量作为气候调节功能量,其中不同生态系统类型单位面积蒸腾消耗热量根据已有文献成果^[25]确定,单位体积水体蒸发耗电量取 $125\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。采用替代工程法,以空调等效降温和加湿器等效增湿需要耗电的价格评估气候调节价值量。

$$V_7 = Q_c \times p \quad (15)$$

式中: V_7 为生态系统气候调节的价值 ($\text{元}/\text{a}$); Q_c 为气候调节总功能量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{a}$); p 为电价 ($\text{元}/\text{kW} \cdot \text{h}$),根据北京市市场价格取 $0.5\text{元}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

1.5.8 固碳释氧价值 选用固碳量 (CO_2) 和释氧量 (O_2) 作为生态系统固碳释氧功能量,主要通过植被净初级生产力 (NPP) 来核算。分别采用碳社会成本法和工业制氧成本法评估固碳价值和释氧价值,最后得到固碳释氧总价值,计算公式如下:

$$V_8 = \text{CO}_2 \times \text{CP} + \text{OR} \times C_y \quad (16)$$

式中: CO_2 为生态系统固碳量 (t/a); CP 为碳社会成本,采用美国环保署研究得到的碳社会成本^[26],经汇率折算和价格指数折算到 2016 年为 $790.90\text{元}/\text{t}$;

OR 为生态系统释氧量(t/a); C_y 为制氧成本^[11](元/t),经价格指数折算到 2016 年为 1 266.49 元/t。

1.5.9 病虫害控制价值 采用生态系统的病虫害自愈面积评估生态系统病虫害控制功能量;采用防治成本法,用发生病虫害后自愈的面积和人工防治病虫害的成本来核算其价值。

$$V_9 = NF_a \times (MF_r - NF_r) \times P_b \quad (17)$$

式中: V_9 为病虫害控制功能价值(元/a); NF_a 为天然林面积(km²); MF_r 为人工林病虫害发生率或非综合防治农田病虫害发生率(%); NF_r 为天然林病虫害发生率或综合防治农田病虫害发生率(%),根据延庆区园林局调查数据,分别取 15%和 1.5%; P_b 为单位面积病虫害防治的费用,根据延庆区园林局调查数据,取 0.09 元/m²。

1.5.10 生命维护和栖息地保护价值 生态系统为生物物种提供生存与繁衍的场所,对重要珍稀、濒危野生动植物起到生命维护和栖息地保护功能。

$$V_{10} = K_{1i} \times K_{2i} \times S_i \times A_i \quad (18)$$

式中: V_{10} 为生命维护和栖息地保护价值(元/a); A_i 为森林面积(km²); K_{1i} 为*i*类森林自然度调整系数,其中自然保护区内森林取 5; K_{2i} 为*i*类森林生态区位调整系数,自然保护区内森林取 2; S_i 为单位面积物种保育价值(元/km²),结合森林资源二类清查小班数据计算 Shannon-Wiener 指数为 3.65,根据《自然资源(森林)资产评价技术规范》^[27],经价格指数折算到 2016 年为 2 707 000 元/(km²·a)。

1.6 文化服务价值

主要运用支付意愿调查法^[28]核算公园绿地游憩价值;采用分区旅行费用法^[29]核算自然景观游憩价值,包括消费者支出和消费者剩余,计算公式如下:

$$UV = (STC + SCS) / SN \times TN \quad (19)$$

式中:UV 为总游憩价值;STC 为样本游客的旅行费用之和;SCS 为样本游客消费者剩余之和;SN 为样本游客数;TN 为当年景区接待游客总数。

样本游客的消费者剩余为:

$$CS_i = \int_{C_i}^{\infty} f(C_i) dC_i \quad (20)$$

$$SCS = \sum_{i=1}^n (CS_i \times N_i) \quad (21)$$

式中: CS_i 为第*i*个费用区间内单个游客消费者剩余; $f(C_i)$ 为游客个人意愿需求曲线函数; N_i 为第*i*个费用区间内的调查游客样本数。

样本游客的旅行费用为:

$$STC = \sum_{i=1}^n (C_i \times N_i) \quad (22)$$

式中: C_i 为第*i*个费用区间内单个游客的旅行费用。

1.7 价值量空间化

结合延庆区 2016 年生态系统类型数据和 GEP 核算结果,分别计算不同乡镇、不同类型生态系统单位面积价值量,在此基础上将产品供给、洪水调蓄、气候调节、大气环境净化、水质净化、病虫害控制、文化等服务价值数量赋值到不同生态系统类型斑块,进行空间制图,空间分辨率为 2 m×2 m。其中水产品价值根据大、中、小型水库及坑塘单位面积价值分别进行空间化赋值,农产品价值分别根据不同乡镇的耕地和园地单位面积价值进行空间化赋值,洪水调蓄价值根据不同大、中型水库和坑塘单位面积价值进行空间化赋值,文化服务价值根据不同类型自然景观单位面积价值分别进行空间化赋值。

2 结果与分析

2.1 产品供给价值

2016 年,延庆区产品供给总价值为 12.84 亿元,占 GEP 的 3.8%。其中农业产品价值 2.29 亿元,林业产品价值 1.18 亿元,畜牧业产品价值 4.18 亿元,水产品价值 0.20 亿元,水资源供给价值 4.79 亿元,可再生生物质能源价值 0.21 亿元(表 3)。产品供给价值以水资源供给价值、畜牧业产品价值为主,分别占产品供给总价值的 37%,33%。

从不同生态系统类型看,农田生态系统产品供给价值最高,为 6.7 亿元,占产品供给总价值的比例为 52%;其次为湿地和森林生态系统,价值量分别为 5.0 亿元、1.2 亿元,占比分别为 39%,9%。从空间上看,单位面积产品供给价值较高的区域主要位于平原地区,尤其是水库、坑塘等湿地类型区域,其次为耕地、园地、森林等类型区域(图 2A)。从各乡镇看,延庆镇、张山营镇、康庄镇等湿地类型较多的乡镇产品供给价值较高,分别为 2.54 亿元、2.48 亿元、1.42 亿元,占产品供给服务总价值的比例分别为 19.8%,19.3%,11.0%,珍珠泉乡最低(图 3A)。

2.2 调节服务价值

2016 年,延庆区调节服务总价值为 306.73 亿元(表 3),占延庆区 GEP 的 91.4%。其中,生命维护和栖息地保护价值最高,为 146.0 亿元,占 GEP 比例为 43.5%,其次为气候调节、土壤保持、固碳释氧等,分别为 52.92 亿元、40.66 亿元、33.47 亿元,占 GEP 比例分别为 15.8%,12.1%,10.0%;水源涵养、洪水调蓄、防风固沙、水质净化、大气环境净化、病虫害控制

等价值量较低。

从不同生态系统类型看,森林生态系统调节服务价值最高,为 264.1 亿元,占调节服务价值的比例为 86.1%;其次为湿地生态系统,价值量为 22.8 亿元,占比为 7.4%,其余类型相对较低。湿地平均单位面积调节服务价值最高,为 0.73 亿元/km²,是森林生态系统的 3.8 倍,是草地和农田生态系统的近 20 倍。分别统计不同生态系统对单项调节服务价值的贡献,结果表明,森林生态系统对生物维护和栖息地保护、大气环境净化、土壤保持、防风固沙、水源涵养、固碳释氧、气候调节等价值的贡献较大,贡献率分别为 100%,93.6%,92.8%,78.7%,87.8%,75.8%,63.7%;湿地生态系统则具有较高的水质净化、洪水调蓄价值,贡献均为 100%(图 4)。

从空间上看,调节服务价值较高的区域主要位于湿地生态系统和山区森林生态系统,尤其是自然保护区范围最高,中部平原地区相对较低(图 2B)。从各乡镇看,千家店镇、张山营镇等森林生态系统较丰富的区域调节服务价值较高,分别为 73.76 亿元、62.87 亿元,占调节服务总价值的比例分别为 24.0%,20.4%,沈家营镇最低(图 3B)。

2.3 文化服务价值

2016 年,延庆区 A 级自然景观接待游客 217.77 万人次,农业观光园接待游客 89.8 万人次,延庆区文化服务总价值为 16.07 亿元,占 GEP 比例为 4.8%。其中 A 级自然景观游憩价值最高,为 13.35 亿元,占文化服务总价值的 83.1%;农业观光园、城市公园绿地游憩价值相对较低,分别为 2.47 亿元、0.26 亿元(表 3)。从不同生态系统类型看,湿地生态系统文化服务价值最高,为 8.9 亿元,占文化服务总价值的 64.6%;其次为森林、农田生态系统,分别为 3.56 亿元、3.36 亿元,占比分别为 21%,17.1%。湿地生态系统单位面积文化服务价值最高,为 0.006 亿元/km²,是森林、农田的 3 倍。

从空间上看,文化服务价值呈现较明显的西北部高、东南部低的格局(图 2C)。其中,千家店镇的百里山水画廊、旧县镇的龙庆峡、康庄镇的野鸭湖湿地等自然景观单位面积文化服务价值最高,其次是张山营镇、八达岭镇的森林自然景观,平原地区的农田生态系统文化服务价值相对较低。从各乡镇看,旧县镇、千家店镇文化服务总价值较高,分别为 7.97 亿元、2.75 亿元,分别占文化服务总价值的 49.3%,17.2%(图 3C)。

2.4 GEP 综合分析

2016 年,延庆区生态系统生产总值为 335.63 亿元,是当年 GDP 的 2.74 倍。其中,生态系统调节服务价值最高,是产品供给服务价值的 23.9 倍。

从不同生态系统类型看(表 4),森林生态系统提供的服务总价值最高,为 268.79 亿元,占 GEP 的比例为 80.1%;其次为湿地生态系统,为 36.64 亿元,占 GEP 的比例为 10.9%;第三为农田生态系统,为 26.25 亿元,占 GEP 的比例为 7.8%;草地、城镇、裸地等提供的服务价值相对较低。从单位面积价值看,延庆区湿地生态系统平均单位面积价值量最高,为 1.18 亿元/km²,其次为森林、农田生态系统,分别为 0.20 元/km²,0.07 元/km²。湿地平均单位面积价值是森林的 5.9 倍,是农田的 16.8 倍。

从空间上看(图 2),延庆区 GEP 较高的区域主要位于山区森林生态系统和湿地生态系统,尤其是山区自然保护区内的森林生态系统,白河堡水库、官厅水库、野鸭湖湿地自然保护区、龙庆峡周边等湿地生态系统,平原地区农田生态系统 GEP 相对较低。从各乡镇看,千家店镇、张山营镇 GEP 最高,分别为 76.89 亿元、67.20 亿元,分别占延庆区 GEP 的 22.9%,20.0%,沈家营镇最低(图 3)。

此外,将 GEP 空间分布图与人口密度图(图 5)进行空间叠加分析发现,价值量的供给与需求在空间上极不匹配,人口较为集聚的平原地区是生态系统服务的需求区,对 GEP 的需求较高,而实际 GEP 供给较低;人口较少的山区是生态系统服务的主要供给区,人均 GEP 相对较高(图 6)。

3 讨论

本文在已有研究基础上,探索建立了适合北京市延庆区的 GEP 核算技术方法体系和参数,并重点在产品供给、调节服务以及价值空间化方面进行了一定改进和创新:一是根据最终服务原则,产品供给服务价值核算时,基于实地调查扣除了各类产品的人工投入成本;二是依据《自然资源(森林)资产评价技术规范》^[27]和通用国际生态系统服务分类方案^[30],在调节服务价值核算中增加“生命维护和栖息地保护”指标,重点评估自然保护区建设对物种及栖息地的保育价值,更加突出延庆区作为生态涵养区的功能定位;三是根据生态系统服务的空间异质性特征,在价值数量核算基础上,进行了价值的空间化研究,为后续生态系统服务价值的供给与需求研究奠定了基础。

表 3 2016 年延庆区各项生态系统服务实物量与价值量				
核算项目	服务类型	具体指标	功能量	价值量/亿元
产品供给服务	农业产品	粮食(t)	99545.8	2.29
		油料(t)	79.4	
		药材(t)	330.6	
		蔬菜(t)	63863.3	
		鲜果(t)	17957.1	
		干果(t)	2775.2	
		饲料(km ²)	4.0	
		花卉(km ²)	5.6	
		草坪(km ²)	0.2	
	林业产品	木材(m ³)	27844	1.18
		猪(头)	109699	
	畜牧业产品	牛(头)	4905	4.18
		羊(只)	53571	
		家禽(万只)	299.6	
		鲜蛋(t)	37639.4	
		鲜奶(t)	47146.6	
	水产品	鱼类(t)	2327	0.20
		工业用水(万 t)	222.5	
	水资源	生活用水(万 t)	1195.9	4.79
		农业用水(万 t)	2359.8	
		生态用水(万 t)	1810.3	
		薪柴(t)	35000	0.21
	可再生生物质能源	沼气(m ³)	3208000	
产品供给价值小计				12.84
调节服务	土壤保持	减少土地废弃(亿 t)	0.23	40.66
		减少泥沙淤积(亿 t)	0.04	
		保持土壤肥力(亿 t)	0.02	
	防风固沙	减少土地沙化(万 t)	290.74	5.94
		保持土壤肥力(万 t)	27.3	
	水源涵养	水源涵养量(亿 m ³)	2.18	17.94
		水库调蓄量(亿 m ³)	1	
	洪水调蓄	坑塘调蓄量(万 m ³)	44.19	8.44
		沼泽调蓄量(万 m ³)	0.01	
		净化 SO ₂ 量(万 t)	3.27	0.46
	大气环境净化	净化 NO _x 量(万 t)	0.12	
		净化粉尘量(万 t)	0.14	
	水质净化	净化 COD 量(万 t)	0.34	0.82
		净化总氮量(万 t)	0.07	
		净化总磷量(万 t)	0.02	
	固碳释氧	固碳量(万 t)	195.09	33.47
		释氧量(万 t)	142.42	
	气候调节	森林蒸腾降温增湿(亿 kW·h)	65.88	52.92
		草地蒸腾降温增湿(亿 kW·h)	0.58	
		湿地蒸发降温增湿(亿 kW·h)	25.27	
		农田蒸腾降温增湿(亿 kW·h)	10.8	
	病虫害控制	森林病虫害控制(km ²)	79.15	0.07
	生命维护和栖息地保护	物种保育	—	146.00
调节服务价值合计				306.73
文化服务	景观游憩	A 级自然景观(万人次)	217.77	13.35
		农业观光园(万人次)	89.8	2.47
		公园绿地	—	0.26
	文化服务价值合计			16.07
	GEP 合计			335.63

表 4 2016 年延庆区不同生态系统各项服务价值量 亿元

服务类别	核算内容	森林	草地	湿地	农田	城镇	裸地	合计
产品供给	产品供给	1.18	—	4.99	6.67	—	—	12.84
	气候调节	34.00	0.30	13.04	5.58	—	—	52.92
	水源涵养	15.90	0.12		1.93	—	—	17.94
调节服务	病虫害控制	0.07	—	—	—	—	—	0.07
	土壤保持	37.70	0.14	0.17	1.94	0.47	0.24	40.66
	防风固沙	4.67	0.07	0.01	1.09	0.05	0.05	5.94
	水质净化	—	—	0.82	—	—	—	0.82
	大气净化	0.43	0.00	—	0.03	—	—	0.46
	固碳释氧	25.27	0.36	0.27	5.67	1.66	0.24	33.47
	洪水调蓄	—	—	8.44	—	—	—	8.44
文化服务	生命维护和栖息地保护	146.0	—	—	—	—	—	146.00
	文化服务	3.56	0.00	8.90	3.36	0.26	—	16.07
	GEP 合计	268.80	0.99	36.64	26.25	2.44	0.53	335.64

注：—表示不适合评估。

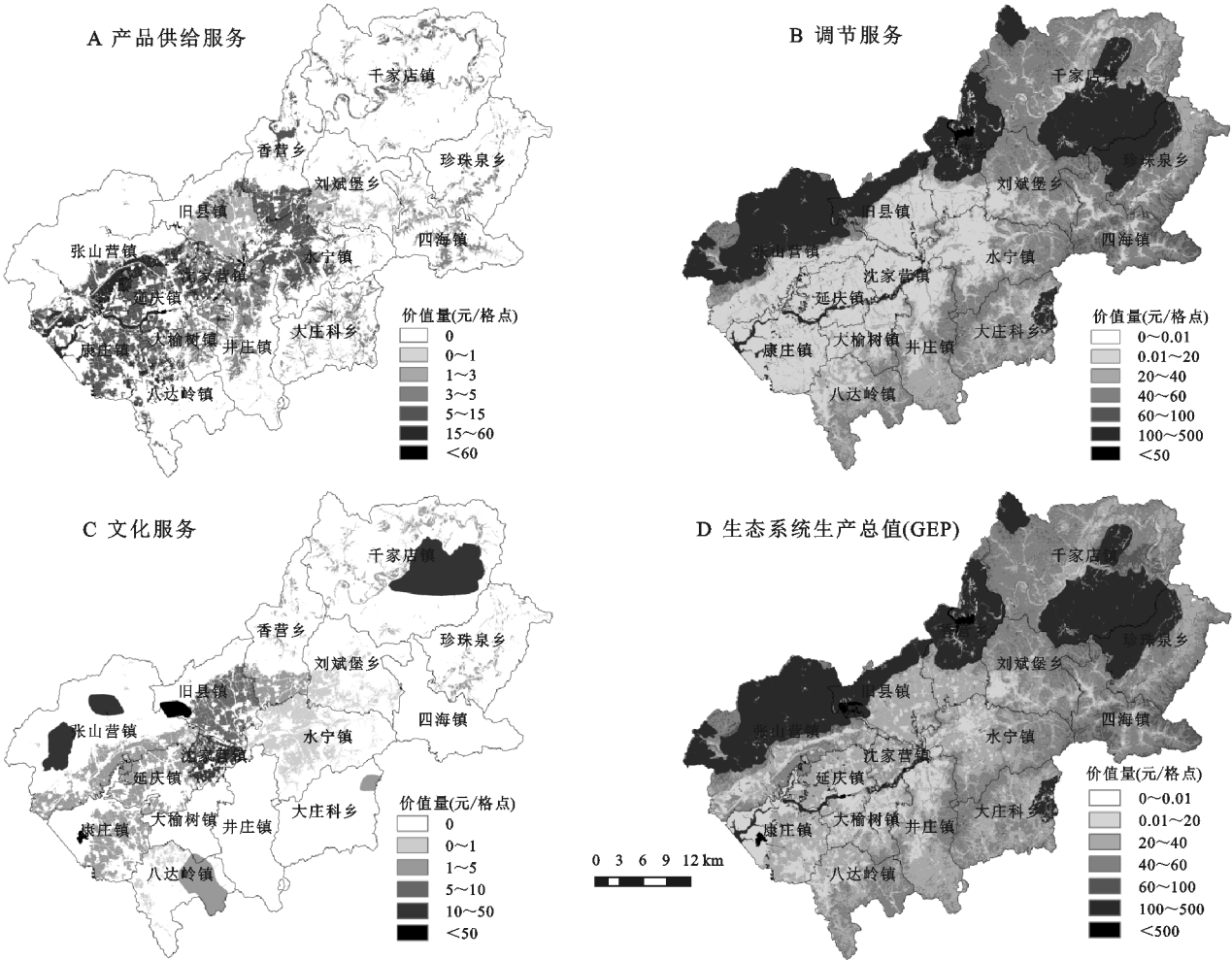


图 2 2016 年延庆区各项服务价值和 GEP 空间分布

由于生态系统生产总值(GEP)核算涉及生态学、经济学等多学科领域,可供选择的核算指标、模型方法和参数较多,尽管不同学者对此已开展了较为深入的研究^[2,6],但至今仍没有形成较为统一、规范的核算技术方法体系,使评估结果的可比性、应用性较差,

这也是本研究存在的客观局限性。除此以外,从生态系统服务理论出发,本文还存在以下不足。首先,生态系统服务的类型十分复杂、多样,仍有很多服务可能尚未被人类发掘和利用,即使已被人类普遍认识的服务类型,也存在技术方法不成熟而难以量化价值的

问题,例如基因库保存价值、科研教育价值等,本文的核算尚未涵盖延庆区全部生态系统服务类型。其次,对调节服务和部分文化服务等不具有市场价值的服务,多采用替代成本法测算其价值,而实际上成本并不等同于价值,某项生态系统服务的丧失很可能不可逆且无法简单人工替代,因此本研究对延庆区 GEP

的核算结果仅是最低估计。第三,按照最终服务原则,价值核算应与人类的直接或间接利用密切相关,即只有被人类社会真正获得的生态系统惠益才是有效价值,而本文的核算尚未考虑生态系统服务的受益者信息,包括受益对象、强度、地理位置等,可能对结果造成一定误差。

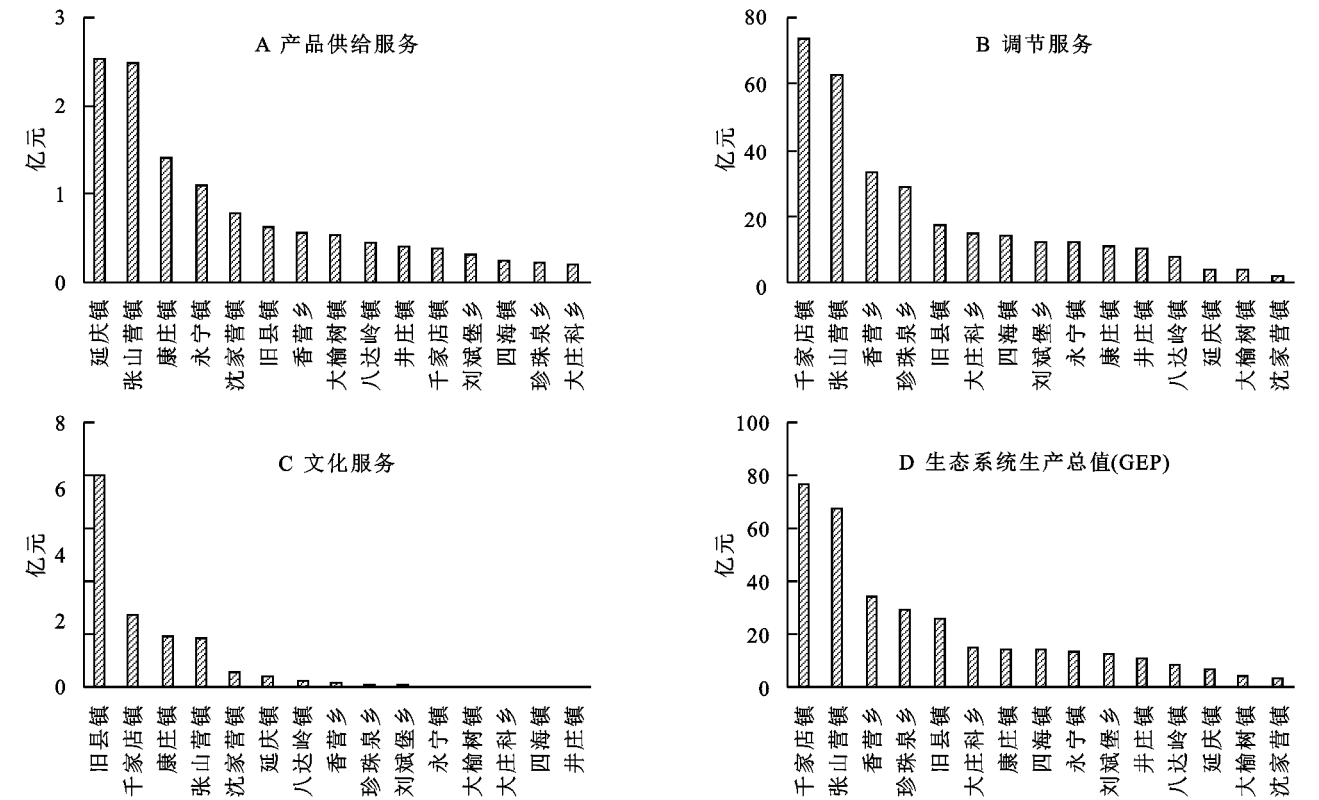


图 3 2016 年延庆区各乡镇 GEP 及各项服务价值差异

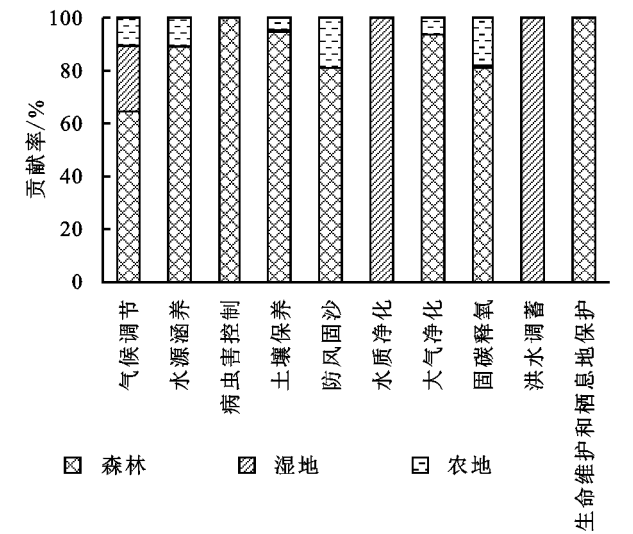


图 4 不同生态系统对各项调节服务价值的贡献率

4 结论

(1) 2016 年延庆区生态系统生产总值为 335.63 亿元,是当年 GDP 的 2.74 倍。其中调节服务价值最高,为 306.73 亿元,占 GEP 比例为 91.4%;产品供给

和文化服务价值相对较低,分别为 12.84 亿元、16.07 亿元,占比分别为 3.8%,4.8%。

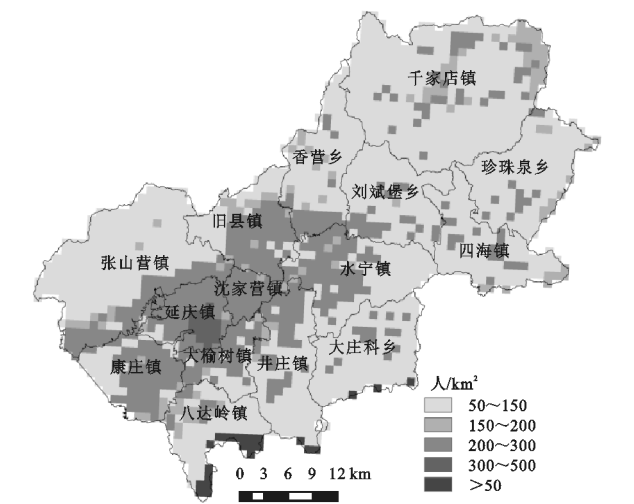


图 5 延庆区人口密度分布

(2) 从不同生态系统服务类型看,延庆区的生命维护和栖息地保护价值最高,为 146.0 亿元,占 GEP 比例为 43.5%,其次为气候调节、土壤保持、固碳释氧、水源涵

养等价值,占 GEP 比例分别为 15.8%,12.1%,10.0%,5.4%,五项服务价值量之和占延庆区 GEP 的 86.8%,说明这五项服务为延庆区生态系统的主导服务。

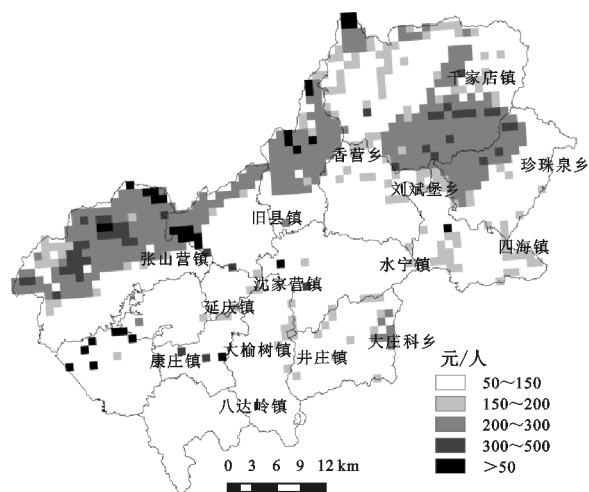


图 6 2016 年延庆区人均 GEP 分布

(3) 从不同生态系统类型看,森林生态系统生产总值最高,为 268.79 亿元,占 GEP 比例为 80.1%,其中生命维护和栖息地保护、土壤保持、固碳释氧、水源涵养等调节服务价值较高;湿地生态系统、农田生态系统价值次之,占 GEP 比例分别为 10.9%,7.8%。从单位面积价值看,湿地生态系统最高,为 1.18 亿元/km²,分别是森林和农田类型的 5.9 倍、16.8 倍。GEP 较高的区域主要位于西北部、东南部山区,这基本上与区域湿地生态系统、森林生态系统及自然保护区等的空间格局一致。

(4) GEP 的供给与需求在空间上不匹配,人口较为集聚的平原地区为生态系统服务需求区,但 GEP 相对较低;人口较少的山区主要为 GEP 供给区。

研究成果进一步验证了延庆区作为北京市生态涵养区所具有的重要生态功能,对于延庆区进一步加强森林、湿地等生态系统保护与管理,推进“两山”理论实践创新基地建设和生态文明建设具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 欧阳志云,郑华.生态系统服务的生态学机制研究进展[J].生态学报,2009,29(11):6183-6188.
- [2] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等.生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J].生态学报,2013,33(21):6747-6761.
- [3] Watson R. Living beyond our means: Natural assets and human well-being[R]. Statement from the Board, 2005.
- [4] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.

- [5] Postel S, Bawa K, Kaufman L, et al. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington Dc: Island Press, 2012.
- [6] 马国霞,赵学涛,吴琼,等.生态系统生产总值核算概念界定和体系构建[J].资源科学,2015,37(9):1709-1715.
- [7] 马国霞,於方,王金南,等.中国 2015 年陆地生态系统生产总值核算研究[J].中国环境科学,2017,37(4):1474-1482.
- [8] 王莉雁,肖焱,欧阳志云,等.国家级重点生态功能区县生态系统生产总值核算研究:以阿尔山市为例[J].中国人口·资源与环境,2017,27(3):146-154.
- [9] 徐新良.中国人口空间分布 km 网格数据集[EB/OL].中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>),2017, DOI:10.12078/2017121101.
- [10] 欧阳志云,赵同谦,赵景柱,等.海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究[J].应用生态学报,2004,15(8):1395-1402.
- [11] 国家林业局.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[S]. LY/T1721-2008,2008.
- [12] 中国化肥网.全国化肥平均价格[EB/OL]. <http://www.fert.cn/>,2016-11-16/2018-11-19.
- [13] 江凌,肖焱,欧阳志云,等.基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J].水土保持研究,2015,22(1):21-25,32,2.
- [14] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J].生态学报,2013,33(4):1019-1030.
- [15] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等.中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J].生态学报,2011,31(12):3285-3295.
- [16] 吴迪,辛学兵,裴顺祥,等.北京九龙山 8 种林分的枯落物及土壤水源涵养功能[J].中国水土保持科学,2014,12(3):78-86.
- [17] 吴丹,邵全琴,刘纪远,等.中国草地生态系统水源涵养服务时空变化[J].水土保持研究,2016,23(5):256-260.
- [18] 李晶,张微微,关中—天水经济区农田生态系统涵养水源价值量时空变化[J].华南农业大学学报,2014,35(3):52-57.
- [19] 黄晓强,赵云杰,信忠保,等.北京山区典型土地利用方式对土壤理化性质及可蚀性的影响[J].水土保持研究,2015,22(1):5-10.
- [20] 饶恩明,肖焱,欧阳志云.中国湖库洪水调蓄功能评价[J].自然资源学报,2014,29(8):1356-1365.
- [21] 於方,王金南,曹东,等.中国环境经济核算技术指南[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [22] 国家发展计划委员会,财政部,国家环境保护总局,等.排污费征收标准管理办法[J].环境工作通讯,2003(5):5-9.