

北京城市化进程对生态系统服务的影响

付梦娣, 肖能文, 赵志平, 高晓奇, 李俊生

(中国环境科学研究院 生物多样性研究中心, 北京 100012)

摘要:基于熵值法对 1993—2013 年北京城市化水平进行了综合测度,以 1993 年、2003 年、2013 年 3 期遥感数据为基本信息源,采用 GIS 技术和 InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs,生态系统服务与权衡综合评价)模型,分析了北京市土地利用和生态系统服务时空变化特征,并研究了北京城市化进程对生态系统服务的影响。结果表明:北京城市化综合水平不断提高,主要表现为社会和空间城市化,其次是人口城市化,而经济城市化的影响相对较弱;全市土地利用变化剧烈,建设用地和草地大幅增长,林地稍有增长,耕地和水体缩减严重;城市生态系统固碳服务呈现先增加后减少的趋势,总体上碳储量减少了 5%,水源供给和土壤保持服务分别增加 216% 和 76%。林地、草地面积的增加和耕地面积的减少改善了土壤保持服务,森林的扩张同时也改善了固碳服务,但温度和降水条件的限制导致后 10 a 固碳服务出现明显减少,人口聚集和城市硬化地表的增加则是导致城市生态系统水源供给服务大幅增长的主要原因。由于城市生态系统水源供给服务这块短板,建议放缓或停止北京城市化发展进程,重点加强其社会、经济城市化发展质量。

关键词:城市化; 城市生态系统服务; 北京市; InVEST 模型

中图分类号:F291; F301.2; X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0235-05

Effects of Urbanization on Ecosystem Services in Beijing

FU Mengdi, XIAO Nengwen, ZHAO Zhiping, GAO Xiaoqi, LI Junsheng

(Biodiversity Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: We analyzed the evolution of Beijing's urbanization level with the entropy method from 1993 to 2013. Based on the remote sensing images in 1993, 2003 and 2013, the spatial and temporal variation characteristics of land use and ecosystem services were examined by using GIS technology and InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) models. The effects of urbanization on ecosystem services were also detected in Beijing. The results showed that the urbanization of Beijing continuously increased from 1993 to 2013. The urbanization represented the fast development of the society and space urbanization, followed by the population urbanization, and the economy urbanization was the weakest. The land use had a great change: urban construction sites and grassland area increased, forest area slightly increased, and farmland and water area decreased. Carbon sequestration service increased firstly and then decreased, with a reduction of 5% carbon storage in total in the past 20 years. Water supply service and sediment retention increased by 216% and 76%, respectively. The increased forestland and grassland and decreased farmland improved the ability of sediment retention. The expansion of forest improved the ability of carbon sequestration service from 1993 to 2003, but temperature and precipitation had decreased this ability since 2003. The increase in population gathering and hardened ground were the main reasons for increased water supply service. Owing to the limitation of water supply service, we suggest to stop or slow the speed of the urbanization in Beijing, and focus on the development quality of society and economic urbanization.

Keywords: urbanization; urban ecosystem services; Beijing; InVEST model

维持和改善城市生态系统服务、提高人类福祉、促进可持续发展是当前城市生态学研究的重要议题之一^[1]。全球城市化背景下,城市生态系统的结构、

功能及其空间演化过程受到较大影响,其可提供的服务也受到明显制约。如何缓解和降低城市化带来的负面影响,进而提高城市生态系统可持续性是当前城

市发展所面临的重要挑战。以往对城市生态系统服务的研究多以静态的、价值量评估为主^[2-4],对物质量的动态变化及成因研究相对较少^[5-6],而关于城市化对生态系统的影响机制及其规律还有待深入研究^[7]。

北京作为快速发展的超大规模城市,是中国城市化发展最快、最典型地区之一。从 20 世纪 90 年代开始,北京城市发展加速,常住人口以每年 35 万的速度增加,尤其是 2000 年以来,城市人口增长更为迅速,以每年 78 万的速度增加。相应地,城市建成区面积也以每年 13 km² 的速度扩张,2000 年以后更是以每年 109 km² 的速度扩张^[8],导致城市土地利用发生了巨大的变化。造成北京市水资源不足、城市发展空间回旋余地小、生态系统服务的供需矛盾等问题十分突出^[9]。如何在巨大的发展压力和较为脆弱的生态条件下,有效地维护和恢复城市的生态系统服务,增强城市土地资源承载力,协调城市发展和生态保护之间的矛盾,实现人与自然的和谐共处,已成为当前北京城市发展所面临的重要挑战。

生态系统服务与权衡综合评价(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)模型是生态系统服务评估常用的工具,该模型运行较简单,并且已取得了良好的模拟效果^[10-11]。本文拟利用该模型评估城市化发展对生态系统服务的影响,以期为北京建设生态文明城市提供基础数据。

1 研究区概况

北京市辖 14 区 2 县,土地总面积 16 410.54 km²。地处华北平原西北边缘,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 12.77℃,年均降水量 548.86 mm,年均蒸发量 1 785 mm。境内有永定河、潮白河、北运河、大清河和冀运河 5 大水系,大小河流 200 余条,大中小型水库 85 座,大型引水渠 4 条。全市森林覆盖率为 40.1%,地带性植被为落叶阔叶林和温性针叶林,主要树种包括侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、栎类(*Quercus sppi*)、桦树(*Betula allegansis*)、山杨(*Populus davidiana*)等,在不同的海拔高度和坡向形成不同的优势种。土壤类型以褐土、潮土、棕壤和粗骨土为主。全市中度以上土壤侵蚀所占比重之和为 27.24%^[12],属轻度水力侵蚀,水蚀的主要形式是坡面侵蚀和细沟、小切沟侵蚀,并伴有重力侵蚀和泥石流。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

数据主要包括:(1)土地利用数据,以北京 3 期 9 景 Landsat TM 影像作为基本信息源,结合北京市土地

利用现状图、30 m×30 m 分辨率的数字高程模型(DEM)以及野外实测的地物光谱数据,采用人工交互解译的方法提取土地利用信息,经过精度验证及成果修订后形成北京市土地利用矢量数据。(2)气候数据,来源于中国气象局数据共享中心,包括日平均温度、相对湿度、降水量和日照时数等。其中,降水量的空间分布格局通过 ANUSPLIN 插值软件^[13]将研究区及周边气象站点的降水量观测值进行插值获得,空间分辨率为 1 km×1 km;各气象站点的潜在蒸散(ET₀)采用联合国粮农组织(FAO)1998 年对 Penman-Monteith 模型修订后的版本^[14]计算获得,并进一步借助 ANUSPLIN 插值软件得到其空间分布格局,空间分辨率为 1 km×1 km。(3)土壤数据,通过对 1:100 万土壤空间属性数据栅格化获得。(4)NPP(净初级生产力),采用周广胜等^[15]的自然植被 NPP 模型得到。(5)城市化水平综合测度各类指标数据来源于 1993—2013 年的《中国城市统计年鉴》和《北京统计年鉴》。

2.2 城市化水平综合测度

本次研究在总结前人研究成果的基础上^[16-18],提出北京城市化水平综合测度指标体系(表 1)。由人口城市化、经济城市化、社会城市化和空间城市化 4 大类 18 项指标构成,采用熵值法确定权重,以消除多指标变量间信息的重叠和人为确定权重的主观性。

表 1 北京城市化水平综合测度指标体系

目标层	系统层 (权重)	指标层 (单位)	权重
城市 化 水 平	人口城市化 (0.2450)	城镇人口规模(万人)	0.0546
		城镇人口比重(%)	0.0520
		二、三产业就业人口(万人)	0.0852
		城市人口密度(人/km ²)	0.0532
	经济城市化 (0.2287)	人均 GDP(元)	0.0581
		人均工业总产值(元)	0.0703
		第三产业增加值占 GDP 比重(%)	0.0251
		城镇经济密度(万元/km ²)	0.0752
	社会城市化 (0.2626)	恩格尔系数(%)	0.0333
		人均用电量(度/人)	0.0468
		万人在校大学生数(人/万人)	0.0522
		万人拥有医生数(人/万人)	0.0988
	空间城市化 (0.2637)	万人拥有公共汽车数(辆/万人)	0.0315
		建成区面积(km ²)	0.0718
		建成区绿化覆盖率(%)	0.0377
		人均建成区面积(m ² /人)	0.0585
		人均公共绿地面积(m ² /人)	0.0581
		人均城市道路面积(m ² /人)	0.0376

2.3 生态系统服务评估

(1)固碳。基于植被地上生物量估算碳库,进而评价生态系统碳固定功能^[19]。

$$V_c = \sum_{j=1}^m NPP_j \times 1.63 \quad (1)$$

式中: V_c 为固碳量; NPP_j 为第 j 类生态系统类型的净初级生产力 $[g/(m^2 \cdot a)]$ 。

(2) 水源供给。采用 InVEST 模型对北京市生态系统水源供给服务进行定量评估^[20],其产水模块基于水量平衡原理,忽略地下水的影响,认为栅格单元的降雨量减去实际蒸散后的水量即为水源供给量,包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量和冠层截留量。

(3) 土壤保持。采用 InVEST 模型的通用水土流失方程(USLE)进行评价^[21]。

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中: A 为栅格 x 的土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$;LS为坡度坡长因子; C 为作物/植被覆盖和管理因子; P 为工程措施因子。土壤保持量即潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量之间的差值,就是因植被覆盖和水土保持措施而减少的土壤侵蚀量^[20]。

3 结果与分析

3.1 城市化综合水平演变过程分析

从城市化子系统的权重上看(表1),社会城市化和空间城市化的权重均在0.25以上,表明1993—2013年北京的城市化主要表现为社会和城市空间城市化。测评结果表明:北京城市化综合水平呈现不断上升的趋势,由1993年的0.1166上升到2003年的0.4522,再升至2013年的0.8910,与一般常用的人口城市化指标(即城镇人口占总人口比重)呈现明显的正相关,Pearson Correlation系数达0.979。

城市化各子系统水平在不断提高同时也表现出不同的演变特征(图1),1993—2002年,主要表现为社会城市化,它对北京城市化的贡献在37.21%以上;2003—2009年,主要表现为空间城市化,它对北京城市化的贡献在31.91%以上;2010—2013年,主要表现为人口城市化,它对北京城市化的贡献在27.5%以上;与此同时,经济城市化对北京城市化的贡献也不断提高,2013年已达到了25.67%。总体而言,各子系统城市化水平不断提高并趋于协调。

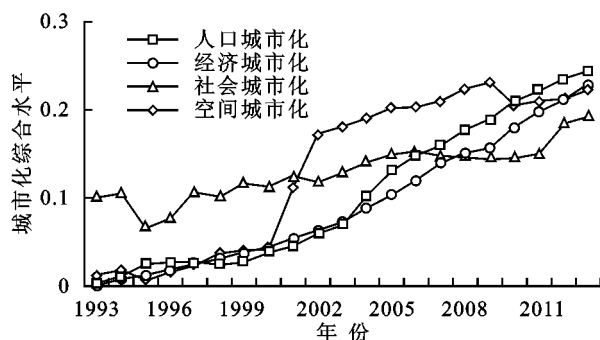


图1 1993—2013年北京城市化子系统的演变过程

3.2 土地利用变化分析

1993—2003年,变化较大的土地利用类型依次为建设用地、耕地和林地。建设用地面积增加796.33 km²,增加部分主要由耕地、林地和草地转入,其中工矿交通用地面积增加505.20 km²,城镇用地面积增加217.24 km²,农村居民点面积增加73.88 km²。耕地面积减少499.23 km²,减少的部分绝大多数转出为建设用地。林地面积减少157.82 km²,其中有林地面积减少95.20 km²,减少的部分主要转出城镇用地和工矿交通用地。

2003—2013年,变化较大的土地利用类型依次为耕地、建设用地和草地。耕地面积减少288.43 km²,减少的部分转出为建设用地、林地和草地,转出面积分别为194.81,64.51,26.56 km²;建设用地面积增加203.65 km²,其中工矿交通用地面积增加228.34 km²,城镇用地面积增加16.90 km²,农村居民点面积减少41.59 km²;草地面积增加132.72 km²,主要由建设用地和耕地转入。

3.3 生态系统服务时空变化分析

随着北京城市化进程的不不断提高,全市生态系统服务也相应发生了显著变化(表2,附图3)。1993—2013年,全市生态系统固碳服务呈先增加后减少的趋势,3期的固碳量分别为 5.33×10^6 , 7.41×10^6 , $5.08 \times 10^6 t$,总体上碳储量减少了5%。从地理空间来看,全市植被净初级生产力具有明显的地貌分异特征,西部和北部山区到平原农耕区,再到主城区,NPP总量逐渐减小。植物形成的产量是其自身生物学特征与外界环境因子相互作用的结果^[15],植被生产力受降水、温度和太阳辐射条件影响,不同区域的主要影响因子不同,西部和北部山区为多年生自然植被受温度影响显著,东南部平原区植被主要以旱地作物为主受降水影响较大,山区与平原交界地带植被多为灌木光照对其生产力影响更为明显。1993—2003年,山区林地面积增加是该时间段内固碳量增加的主要原因;近年来北京地区降水量、太阳辐射呈现下降趋势,而气温则不断增加^[22],表明植被可利用的水分不断减少,影响了植被的长势而减少了固碳量。

全市的水源供给量在研究期内逐渐增加,3期的年均产水深分别为88.69,141.14,280.15 mm,水源供给量分别为14.57,23.19,45.99亿m³,总的来看水源供给量增长了2.16倍。从空间上来看,全市产水量的空间分布极不平衡,中部地区产水量最大,可达6711.86 m³/hm²,西部地区产水量最少,最低值仅为109.1 m³/hm²。从水量平衡角度来看,降水和实际蒸散是影响生态系统水源供给量的主要因子,土

地利用则是通过改变下垫面状况影响地表实际蒸散,进而影响区域水循环的过程。随着城市的快速发展,城区面积的扩展必然引起周边林地和耕地面积的缩减,改变城市生态系统的结构,影响地表实际蒸散,此外,城市不透水面积的增加阻碍了地下水回补过程,导致北京市地下水位连年下降,因此城市建成区的产水量较大,城市生态系统水源供给量逐年增多。

全市的土壤保持总量也呈现出逐渐增加的变化趋势,3 期的土壤保持量分别为 8.50,10.13,14.93 亿 t,总体上增加 76%,这表明研究期内全市生态系统土壤保持服务持续得到改善。1993 年、2003 年、2013 年全市土壤侵蚀模数分别为 2.26,2.58,3.75 t/(km²·a),呈

现逐渐增大趋势,主要由于 3 个时段的降雨侵蚀力逐渐增强,分别为 3 134.46,3 774.59,5 829.72 (MJ·mm)/(hm²·h·a)。2003—2013 年北京山区土壤保持量增幅比前 10 年更加明显,这是由于该时期林地面积的大幅度增加引起的,土壤保持量在 1 200~3 300 t/hm² 的区域占全市总面积的 41.74%。从地理空间来看,土壤保持量各等级分布区域大致相同,怀柔、密云、延庆、门头沟和房山等山区,植被覆盖度大于 80%,土壤侵蚀面积和模数均较小,土壤保持能力最大;山区与平原交界地带坡度较大,且多为人工林,土壤保持量较低;平原地区是人类生产生活频繁地区,建设用地和耕地为主要用地类型,其土壤保持量最低。

表 2 北京市生态系统服务物质质量

年份	单位面积 NPP/ (g·m ⁻² ·a ⁻¹)	碳固定/ 10 ⁶ t	单位面积水源供给量/ (m ³ ·hm ⁻²)	水源供给量/ 10 ⁸ m ³	单位面积土壤保持量/ (t·hm ⁻²)	土壤保持量/ 10 ⁸ t
1993	199.20	5.33	887.70	14.57	517.94	8.50
2003	276.97	7.41	1412.94	23.19	617.54	10.13
2013	190.09	5.08	2802.73	45.99	910.02	14.93

4 讨论与结论

4.1 讨论

基于熵值法和综合测度指标体系,应用于北京城市化进程研究,能够较全面、完整地反映出北京城市化的综合发展状况。研究时段内北京城市化综合水平不断提高,1993—2002 年主要表现为社会城市化,2003—2009 年主要表现为空间城市化,该时期城市用地增长过快,用地增速与城市化发展速度不协调,2010—2013 年则主要表现为人口城市化,而经济城市化的影响相对较弱,滞后于其他方面的城市化。方创琳等^[23]在中国城市化发展质量的研究中指出,近 30 年中国城市化进程提质速度慢于提速速度,分类城市化发展质量呈现出经济城市化<社会城市化<空间城市化的态势。北京城市化进程与中国城市化发展的趋势与特征基本一致。

随着城市化进程的加速,北京市域内土地利用发生了巨大的变化,主要表现为建设用地和草地大幅增长,林地稍有增长,耕地和水体缩减严重。由于退耕还林和重点林业生态工程等一系列政策的实施,全市有林地、灌木林面积持续增加,未成林地、宜林荒山逐渐减少,森林碳汇作用明显,而在后 10 年,植被生产力受温度和降水变化的影响,固碳服务出现明显的减少。本次研究发现,人口聚集和城市硬化地表的增加是导致城市生态系统水源供给服务大幅增长的主要原因。城市人口的不断增加,城市水资源供需矛盾日益突出,北京市平原区主要地下水开采区地下水位已

经处于历史的较低水位处,地下水资源已处于极度的过量开采状态^[24],南水北调的实施强化了本市的生态系统服务。北京市地形以山地为主,水土流失范围分布较广,部分地区水土流失程度严重,城市化带来的大规模建设更是对土壤和植被的破坏,对此北京市实行了多年的退耕还林还草和水土保持措施,有效遏制了全市严重的水土流失状况,使得城市生态系统土壤保持服务持续增大,空间分布图也显示研究时段内山区及山前坡地土壤保持量明显增加。由于不同城市存在城市化发展路径、气候变化、土地利用变化等方面的差异,城市化对生态系统服务的影响不尽一致。黄云凤等^[25]探讨半城市化地区生态系统服务对土地利用变化的响应过程,得出生态系统服务总量随着土地利用强度增加呈现波动性变化,调节和支持服务呈现显著的负相关关系;蔡邦成等^[26]通过对昆山城市化与生态系统服务之间的耦合关系研究表明,生态系统服务随着城市化水平的提高并非单纯呈下降趋势,而是呈现不规则“U”型耦合状态;程琳等^[27]对中国 9 个超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变的研究得出,城市化对中国超大城市的生态系统服务存在负效应,但生态系统服务价值量减少程度不显著,主要由于其周边地区的生态系统服务的输入,强化了本市的生态系统服务。

按照城市化水平与生态系统服务动态演变的对比结果,适时适度发展城市化显得尤为迫切。由于北京城市生态系统水源供给服务这块短板,需依靠其他地区水资源来维持本市城市化进程,建议放缓或停止

北京城市化发展进程,重点加强其社会、经济城市化发展质量,优化城市空间布局和城镇规模结构,提高其空间投入产出效益。

自然植被 NPP 模型可用于较大尺度上的生态系统碳储量变化分析,为进一步提高生态系统碳储量的估算精度,NPP 数据应与实地监测数据相结合,实现反演参数的本地化。此外,由于缺少相关调查数据的限制,本研究缺少植被土壤层和枯枝落叶层的碳储量估算。气候变化和土地利用变化是影响城市生态系统服务的主要因素,二者对其协同作用机理尚有待进一步研究。

4.2 结论

(1) 北京城市化综合水平不断提高,主要表现为社会和空间城市化,其次是人口城市化,而经济城市化的影响相对较弱。

(2) 城市生态系统固碳服务呈现先增加后减少的趋势,总体上碳储量减少了 5%,水源供给和土壤保持服务分别增加 216%和 76%。

(3) 林地草地面积的增加和耕地面积的减少改善了土壤保持服务,森林的扩张同时也改善了固碳服务,但温度和降水条件的限制导致后 10 年固碳服务出现明显减少,人口聚集和城市硬化地表的增加则是导致城市生态系统水源供给服务大幅增长的主要原因。

参考文献:

- [1] 毛齐正,黄甘霖,邬建国. 城市生态系统服务研究综述[J]. 应用生态学报,2015,26(4):1023-1033.
- [2] Alam M, Dupras J, Messier C. A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services[J]. Ecological Indicators,2016,60:38-44.
- [3] Peng J, Liu Y, Wu J, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China[J]. Landscape and Urban Planning,2015,143:56-68.
- [4] 彭文甫,周介铭,罗怀良,等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值损益估算:以成都市为例[J]. 水土保持研究,2011,18(4):43-51.
- [5] 李锋,叶亚平,宋博文,等. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变:以常州市为例[J]. 生态学报,2011,31(19):5623-5631.
- [6] 周忠学. 城市化对生态系统服务功能的影响机制探讨与实证研究[J]. 水土保持研究,2011,18(5):32-38.
- [7] 胡喜生,洪伟,吴承祯. 福州市土地生态系统服务与城市化耦合度分析[J]. 地理科学,2013,33(10):1216-1223.
- [8] 谢高地,张彪,鲁春霞,等. 北京城市扩张的资源环境效应[J]. 资源科学,2015,37(6):1108-1114.
- [9] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京城市扩张的生态底线:基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划,2010(2):19-24.
- [10] 黄从红,杨军,张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展[J]. 生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.
- [11] Wang Z, Mao D, Li L, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992—2012 in the Sanjiang Plain of China[J]. Science of the Total Environment,2015,514:119-130.
- [12] 袁爱萍,路炳军,段淑怀,等. 北京市土壤侵蚀监测方法探讨[J]. 中国水土保持科学,2011,9(2):1-3.
- [13] Hutchinson M F, Xu T B. ANUSPLIN version 4.4 user guide[Z]. Canberra: The Australian National University, 2013.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M]. Rome: FAO, 1998.
- [15] 周广胜,罗天祥. 自然植被净第一性生产力模型及其应用[J]. 林业科学,1998,34(5):2-11.
- [16] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报,2009,64(4):387-398.
- [17] 贾琦,运迎霞. 京津冀都市圈城镇化质量测度及区域差异分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(3):8-12.
- [18] Zhao J, Chai L. A novel approach for urbanization level evaluation based on information entropy principle: A case of Beijing[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications,2015,430:114-125.
- [19] 国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范 LY/T 1721—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [20] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. InVEST 2.6.0 user's guide[Z]. Stanford: The Natural Capital Project,2011.
- [21] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [22] 杨军,欧春泉,陈斌,等. 1951—2012 年北京市气象因素变化特征研究[J]. 环境与健康杂志,2014,31(5):395-398.
- [23] 方创琳,王德利. 中国城市化发展质量的综合测度与提升路径[J]. 地理研究,2011,30(11):1931-1946.
- [24] 李文鹏,郑跃军,郝爱兵. 北京平原区地下水位预警初步研究[J]. 地学前缘,2010(6):166-173.
- [25] 黄云凤,崔胜辉,石龙宇. 半城市化地区生态系统服务对土地利用/覆被变化的响应:以厦门市集美区为例[J]. 地理科学进展,2012,31(5):551-560.
- [26] 蔡邦成,周慧平. 昆山城市化与生态系统服务的关系定量研究[J]. 环境保护科学,2010,36(4):40-42.
- [27] 程琳,李锋,邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变[J]. 生态学报,2011,31(20):6194-6203.