

浑河流域上游森林生态服务空间流转价值及其对沈阳城市段供水量影响的通径分析

蒋毓琪, 陈珂

(沈阳农业大学 经济管理学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: [目的] 探究浑河流域上游森林生态服务空间流转价值对沈阳市水资源供给量的影响, 为制定流域森林生态补偿标准提供科学依据。[方法] 以森林生态服务空间流转为视角, 借助 ArcGIS 9.3 软件的 Buffer 与 Intersect 分析工具测算出 2010—2014 年浑河上游向沈阳城市段空间流转的生态服务价值, 利用通径分析法, 对沈阳城市段水资源供给量的影响展开研究。[结果] 2010—2014 年浑河流域上游向沈阳城市段空间转移的总价值为 56.47 亿元; 上游森林水源涵养与保持水土的生态服务通过地表水、地下水与化学需氧量共同作用于沈阳城市段供水量。[结论] 浑河流域上游森林生态服务空间流转价值产生正外部效应, 对沈阳城市段供水量影响是由多个因素直接作用、间接作用共同决定的结果。

关键词: 生态服务价值; 空间流转; 供水量; 浑河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0285-06

中图分类号: S715, S718

文献参数: 蒋毓琪, 陈珂. 浑河流域上游森林生态服务空间流转价值及其对沈阳城市段供水量影响的通径分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 285-290. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.047; Jjang Yuqi, Chen Ke. Path analysis on impacts of forest ecological service value transfer in upstream of Hunhe River basin on water supply in Shenyang City cluster[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 285-290. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.047

Path Analysis on Impacts of Forest Ecological Service Value Transfer in Upstream of Hunhe River Basin on Water Supply in Shenyang City Cluster

JIANG Yuqi, CHEN Ke

(College of Economics and Management, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: [Objective] The aim of study was to analyze the effects of forest ecological service value transfer from upstream in Hunhe River basin on water supply in Shenyang City cluster, which might contribute to make forest ecological compensation standard of the river basin. [Methods] From the perspective of forest ecological service transfer, forest ecological service value transferred from upstream were calculated with ArcGIS 9.3 buffer and overlay analysis platform from 2010 to 2014, and then it studies the effects of forest ecological service on water supply in Shenyang City cluster were studied using the path analysis. [Results] Forest ecological service value transferred from the upstream in Hunhe River basin reached 5.647 billion RMB from 2010 to 2014. Forest ecological service of the water conservation and the soil conservation in the upstream had impacted on the water supply in Shenyang City cluster by surface water, groundwater and chemical oxygen demand (COD). [Conclusion] Forest ecological service value transfer in the upstream generates positive externality, which comprehensively influences on the water supply in Shenyang City cluster by direct effect and indirect effect from multiple factors.

Keywords: ecological service value; spatial transfer; water supply; Hunhe River basin

收稿日期: 2017-04-24

修回日期: 2017-06-25

资助项目: 沈阳市科技局软科学研究专项“沈阳城市森林生态安全的评价、预警与调控对策研究”(F16-233-5-15)

第一作者: 蒋毓琪(1983—), 男(汉族), 山西省大同市人, 博士研究生, 主要研究方向为林业经济管理。E-mail: jiangyuqi881@163.com。

通讯作者: 陈珂(1972—), 女(汉族), 山西省临汾市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事林业经济理论与政策等方面的研究。E-mail: chenkeyaya@163.com。

近年来,中国经济发展与生态环境之间的矛盾已成为人口资源环境可持续发展的瓶颈,主要表现为资源约束趋紧、生态系统退化与水资源缺乏。2015年9月21日,中共中央、国务院发布《生态文明体制改革总体方案》中第18条指出,按照节水优先、空间均衡、控制总量与保障安全的方针,完善水资源利用管理。森林资源作为“天然水库”,其涵养水源与保持水土生态服务在控制水量、改善水质等方面发挥着重要作用,尤其流域森林生态系统具有空间整体性强、地区关联度高的特点,其生态服务空间发生流转除了满足上游地区需要外,还对下游水资源供给产生影响。生态系统服务(ecosystem services)指人类社会借助生态系统的结构与功能直接或间接获取自身发展所需的支持产品和服务^[1]。生态系统服务在经济社会可持续发展中发挥着重要作用,其外溢价值测算成为学术界广泛关注的焦点。Brouwer^[2]认为,传统的生态服务价值以静态评估为主,他在环境价值转移的研究现状和潜在应用价值的基础上,提出了动态评估的研究路径与方法。由于流域生态系统提供的“服务功能”是动态的,其价值在空间范围通过某种媒介发生流动、传递。这就意味着某一特定区域提供的生态服务价值发生空间转移,对其他区域产生不同层次、不同大小的效用^[3-4]。Troy^[5]以美国3个州为例,借助GIS工具,对生态服务价值的空间差异性分布及空间转移进行了分析。范小杉等^[6]以北京市门头沟区森林植被对城区净化大气、防风固沙生态服务功能较为典型,通过构建生态资产空间转移评价技术模型对向城区流转的森林生态资产进行评价。乔旭宁等^[7]选取渭干河流域为研究对象,借助GIS平台,测算出流域上游向下游地区空间转移的生态服务价值。陈江龙等^[8]以南京市为例,根据保护型的主功能区对开发区提供的生态系统服务价值,计算出各保护区所得补偿金比例。从已有成果来看,大多数研究集中于整个生态系统服务价值测算,而针对流域某一类生态服务价值动态测算的定量研究还很少。

森林是全球生态系统的主体,其生态系统服务功能对水资源影响已得到国内外学者共识^[9-10]。流域森林生态服务对水资源的作用主要表现在涵养水源与保持水土两个方面。森林作为水源涵养量与水环境化学物质变化最敏感的载体,分析流域尺度的生态水文过程,有益于探讨流域水资源供给量与水质演化^[11]。森林与水资源循环之间存在着紧密联系,通过林冠层、枯枝落叶层涵蓄大气降水、土壤层调节地表地下径流,影响水资源循环,达到保持水土流失与改善水质的目的^[12]。卜红梅等^[13]以汉江上游金水河

为例,利用具有代表性集水区的年降水量、不同森林类型面积以及林冠截留率等数据,测算了森林生态系统的水源涵养量,并通过监测、现场采样、对比分析的方法,得出流域针叶林森林生态系统能够降低大气降水中溶解性固体总量(TDS), HCO_3^- , SO_4^{2-} 与 NO_3^- 等的含量,起到净化水质作用。森林资源对水资源的作用是综合、动态过程,而流域内上游地区森林生态服务对下游地区对水资源影响的研究却很少受到关注。本研究以森林生态服务空间流转为视角,借助ArcGIS 9.3软件的Buffer与Intersect分析工具测算出浑河上游向沈阳城市段空间流转的生态服务价值,利用通径分析方法,旨在研究上游森林资源生态服务流转价值对沈阳城市段水资源供给量的影响。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

浑河是辽河上游的重要支流,发源于辽宁省抚顺市清原县,从东北向西南分别流经沈阳市、辽阳市、鞍山市和营口市等中部城市群,最后流入辽东湾,全长415 km。浑河流域上游是指大伙房水库以上山区段,主要涉及抚顺市清原县、新宾县和抚顺县;沈阳城市段主要指苏家屯区、铁西区、沈河区、和平区与浑南新区等。沈阳市长期存在“水质性缺水”及严重浪费的问题,人均水资源占有量为 341 m^3 ,分别为全省和全国人均占有量的 $2/5$, $1/6$ ^[14]。2015年,沈阳全市森林资源面积为 $2.18\times 10^5\text{ hm}^2$,其中城市段森林资源面积 $7.40\times 10^4\text{ hm}^2$,占全市森林面积的33.83%;沈阳市森林覆盖率为32.6%,城市段森林覆盖率仅为8.09%。沈阳城市段年均水资源量为 $4.07\times 10^7\text{ m}^3$,仅为全市水资源量的1.7%,其中水资源中所含化学需氧量、生化需氧量、氨氮、高锰酸盐等指数均超出地表水V类水质标准。近年来,流域上游地区大面积营造人工林,使上游地区森林面积为 $6.95\times 10^5\text{ hm}^2$,森林覆盖率达66.50%,使上游森林生态系统的涵养水源(净化水质、调节水量)与保持水土的功能增强,为下游沈阳城市段水资源提供了保障。

1.2 流域森林生态服务功能流转类型的界定

在国内外学者对生态服务功能流转类型界定的基础上^[15-16],可知生态系统不同服务功能的流转范围、影响因素与流转特征。流域森林资源作为生态服务功能间转移的载体,其涵养水源(净化水质、调节水量)与保持水土功能不仅发生转移,而且随着区域间空间距离增大而递减。本文将流域森林生态服务功能界定为涵养水源(净化水质、调节水量)与保持水土。

1.3 数据来源

所用数据来源于 2010—2014 年的《辽宁统计年鉴》、《辽宁省年国民经济和社会发展统计公报》、《辽宁省水资源公报》、《沈阳市水资源公报》与《抚顺统计年鉴》,流域森林面积主要从 2013 年辽宁省土地利用现状矢量图中地类图斑(DLTB)提取。

1.4 研究方法

1.4.1 流域上游森林生态服务空间转移价值 浑河流域上游与沈阳市段所辖区域森林植被类型为栎树、落叶松、红松、油松、椴树、杨树、杉木和针叶混交林(表 1),其不同森林类型单位面积生态服务价值(表 2)。

表 1 浑河流域上游—沈阳市段森林资源

10⁴ hm²

	流经区域	栎树	落叶松	红松	油松	椴树	杨树	针叶混交林	总计
上游地区	清原县	12.88	10.87	0.58	0.43	0.16	—	2.95	27.87
	新宾县	15.59	7.84	0.62	0.58	0.21	—	5.36	30.20
	抚顺县	5.30	3.32	0.27	0.70	0.07	—	1.78	11.44
	小计	33.77	22.03	1.47	1.71	0.44	—	10.09	69.51
	沈阳城市段	—	1.38	1.34	1.22	—	2.96	0.50	7.40

注:清原县、新宾县与抚顺县的不同树种数据采用步长千与林枫的研究成果^[17-18];沈阳城市段不同树种数据来自王文权的研究成果^[19]。

表 2 流域不同森林类型单位面积生态服务价值

10⁴ 元/hm²

森林类型	涵养水源价值		保持水土价值	单位面积总价值
	水量调节价值	净化水质价值		
栎类林	0.76	0.57	0.26	1.59
落叶松	0.87	0.58	0.26	1.71
红松	0.87	0.58	0.26	1.71
油松	0.87	0.55	0.26	1.68
椴树	0.76	0.51	0.28	1.55
杨树	0.75	0.43	0.28	1.46
杉木	0.73	0.63	0.26	1.62
针叶混交林	0.76	0.63	0.27	1.66
合计	7.13	5.26	2.41	14.80
平均	0.79	0.58	0.27	1.64

注:栎类林、杨树、杉木、针叶混交林的数据来自白杨、欧阳志云等的研究成果^[20];落叶松、红松、油松、椴树的数据均来自张志旭的研究成果^[21],调节水量价值与保持水土价值借鉴程晓玲的研究成果^[22]。

由于清原县、新宾县和抚顺县的森林资源的气温、日照、降雨等自然因素以及立地条件差异较小,借鉴林枫对新宾县不同森林类型生物量的测算结果^[23],参考方精云等^[24]确定生物量与净初级生产力之间的函数关系,计算出浑河流域上游地区与沈阳城市段森林资源的净初级生产力,再进一步确定调整系数^[25],得到生态系统服务总价值,可表示为:

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_j E_{ij} K_i \quad (1)$$

式中: V ——森林生态服务价值; i ——森林生态服务功能类型; j ——森林类型; S_j ——第 j 类森林面积; E_{ij} ——第 j 类森林提供的第 i 类生态服务价值; K_i ——功能性调整系数。

康弗斯^[26]于 1949 年提出断裂点概念及计算方法,本研究借助断裂点模型计算出上游地区生态服务价值的流转半径^[27],通过借助 ArcGIS 9.3 的 Intersect 功能,确定上游地区分别对沈阳城市段的流转面积,测算 2010—2014 年上游地区向沈阳城市段空间流转的森林生态服务价值,可表示为:

$$V_{ij} = P_{ij} \frac{V_j}{D_{ij}^2} S \quad (2)$$

式中: V_{ij} ——从上游地区到下游转移的生态服务价值总量; D_{ij} ——上游地区核心点与下游地区核心点间的距离; S ——转移的生态服务辐射面积; P_{ij} ——上游地区向下游地区生态服务流转的影响因子,由于受森林等介质的影响,一般取值为 0.6^[28]。

1.4.2 上游森林生态服务空间流转对沈阳城市段水资源影响 1921 年,美国学者赖特(Wright)最先提出了通径分析法。通径分析(path analysis)是用于分析变量间的相互关系以及自变量对因变量的影响程度,它不仅能够解释自变量对因变量的直接作用,还能估计出自变量对因变量的间接作用^[29-30]。森林与水的关系十分复杂,但森林生态系统对水资源的影响大致可归结为水量调节与水质净化两个方面。水量调节是通过森林植被对洪水蓄积和径流补给作用进而对水资源再分配来实现^[31];水质改善是通过森林对河流悬移质含量、水温、溶解氧(D_o)以及化学成分的影响来实现^[32]。本文将浑河上游森林资源的水源涵养与保持水土的空间流转价值 X_1 (10⁸ 元)作为重要因素,从水量与水质两方面选取地表水与地下水 X_2 (10⁸ m³)、化学需氧量 X_3 (10⁴ t)与水质达标率 X_4 (%),共同构成影响沈阳城市段供水量 Y (10⁸ m³)指标体系(表 3)。

表 3 沈阳城市段 2010—2014 年供水量影响因子

年份	森林生态服务空间 流转价值/ 10^8 元	地表水与地下水/ 10^8 m^3	化学需氧量/ 10^4 t	水质达标率/ %	供水量/ 10^8 m^3
2010	10.81	46.40	0.95	94.86	28.40
2011	10.84	45.44	0.94	95.89	28.43
2012	11.28	47.71	0.93	99.50	28.76
2013	11.60	47.71	0.92	97.64	28.98
2014	11.94	48.19	0.94	100.00	29.00

由于选取自变量的单位和取值范围不同,需要借助标准化处理来消除量纲的影响^[33]。本文运用级差标准化的方法处理各项指标(表 4)。

表 4 研究区 2010—2014 年供水量与影响因子标准化

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
2010	0.00	0.35	1.00	0.00	0.00
2011	0.03	0.00	0.90	0.20	0.05
2012	0.42	0.83	0.80	0.90	0.60
2013	0.71	0.83	0.70	0.54	0.96
2014	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00

通径分析的基本原理是通过每两个自变量之间与因变量之间的相关系数构成求解通径系数的标准化多元线性回归方程的正规方程组,分别得出产生直接作用和间接作用的直接通径系数和间接通径系数。在通径分析中,自变量对因变量的影响程度还受决定系数影响,倘若决定系数显著,那么通径分析成立,否则通径分析无意义。此外,自变量对因变量的综合作用程度取决于决策系数,决策系数可以将自变量对因变量的综合作用进行排序,排序最先的变量为主要决策变量,但排序最后的变量并不意味着其直接决定作用小^[34]。总之,通径分析是在逐步回归方程建立的基础上,依据直接通径系数、间接通径系数以及决策系数,判定各自变量对因变量的直接影响、间接影响以及综合影响。

2 结果与分析

2.1 浑河流域上游森林生态服务空间流转价值测算结果

通过公式(1)得到生态系统服务总价值(表 5)。

利用公式(2)得出 2010—2014 年上游地区向沈阳城市段空间流转的森林生态服务价值量(表 6)。

表 5 浑河流域上游地区与沈阳城市段

		生态服务价值		亿元/($hm^2 \cdot a$)	
		涵养水源价值		保持水土 价值	总价值
流经区域		净化水质 价值	水量调节 价值		
上游 地区	清原县	15.97	22.54	7.29	45.80
	新宾县	16.79	23.10	7.62	47.51
	抚顺县	6.42	8.95	2.93	18.30
	小计	39.18	54.59	17.84	111.61
沈阳城市段		4.07	6.41	2.10	12.58

表 6 浑河流域上游 2010—2014 年空间流转

		生态服务价值		亿元/($hm^2 \cdot a$)	
年份	涵养水源价值		保持水土 价值	总价值	
	水量调节价值	净化水质价值			
2010	5.51	3.50	1.80	10.81	
2011	5.52	3.51	1.81	10.84	
2012	5.65	3.59	1.85	11.28	
2013	5.88	3.75	1.93	11.60	
2014	6.08	3.87	1.99	11.94	

2.2 相关分析

相关分析是利用适当的数据描述变量之间线性相关强弱程度的过程,借助相关系数衡量变量彼此的线性相关程度较为准确^[35]。选择 Pearson 简单相关系数分析影响因子与沈阳城市段供水量以及因子间的线性相关程度(表 7)。从表 7 中可看出,影响因子与供水量的相关系数大小排序为: $X_1(0.969 4) > X_2(0.907 6) > X_4(0.828 5) > X_3(-0.676 9)$ 而 X_1 与供水量的相关度最高达到 0.969 4,其中 X_1, X_2, X_4 与供水量呈正相关,而 X_3 与其呈负相关关系。

表 7 供水量与影响因子之间相关系数

相关系数	X_1	X_2	X_3	X_4	Y	显著水平 p
X_1	1.000 0	0.889 7	-0.486 4	0.838 3	0.969 4	0.006 4
X_2	0.889 7	1.000 0	-0.491 5	0.844 9	0.907 6	0.033 3
X_3	-0.486 4	-0.491 5	1.000 0	-0.469 5	-0.676 9	0.209 4
X_4	0.838 3	0.844 9	-0.469 5	1.000 0	0.828 5	0.083 0
X	0.969 4	0.907 6	-0.676 9	0.828 5	1.000 0	0.000 1

2.3 通径分析

结合 2010—2014 年沈阳城市段水资源影响因素,利用 DPS 7.05 统计软件,可得到与沈阳城市段水资源影响模型与通径系数,并在此基础上进行通径分析。从通径分析表 8 可以看出,调整后的相关性显著,通过 F 检验,说明通径分析成立。 $R_a=0.9984$, $p=0.001<0.05$,方程通过 5% 的显著性检验。说明沈阳城市段水资源是由上游森林的水源涵养与保持水土的空间流转价值 X_1 、地表水与地下水 X_2 与化学需氧量 X_3 共同决定。此外, Durbin-Watson 统计量

$d=2.8335$,说明模型拟合性较强且可用。

流域森林生态服务是动态变化的,上游生态服务以森林为媒介,通过林冠层、枯落物层及土壤层的过滤、吸附、交换、吸收等作用拦蓄降水、涵养水分、补充地下水,调节河川流量。在森林生态系统对土壤化学物质产生作用过程中,水环境化学物质含量也随之发生改变,减少水资源化学需氧量,以河流为通道,从而使下游水质得到改善。

$$y=0.4242X_1+0.0365X_2-6.5380X_3+28.3241 \quad (3)$$

式中: Y ——供水量; X_i ——供水量的影响因子。

表 8 供水量与影响因子之间的通径分析

要素	直接作用	$\rightarrow X_1$	$\rightarrow X_2$	$\rightarrow X_3$	间接作用	总作用	决策系数
X_1	0.7160	—	0.1279	0.1255	0.2534	0.9694	0.8756
X_2	0.1437	0.6370	—	0.1268	0.7368	0.9075	0.4183
X_3	-0.2580	-0.3483	-0.0706	—	-0.4189	-0.6769	0.2828

注:决定系数=0.99918; 剩余通径系数=0.02857; 调整后的相关系数 $R_a=0.9984$; 显著水平 $p=0.001<0.05$ 。

2.4 偏相关分析

偏相关分析是指当两个变量与其他变量相关时,将剔除其他变量影响,仅分析 2 个变量间相关程度的过程。本文采用偏相关分析,通过偏相关系数有利于进一步探讨影响因子与供水量之间直接相关程度(表 9)。从表 9 可得知,上游森林水源涵养与保持水土的空间流转价值(X_1)、化学需氧量(X_3)与沈阳城市段供水量 Y 偏相关显著,而地表水、地下水 X_2 与沈阳城市段供水量 Y 不显著,这与通径分析结果存在一定差异,但地表水与地下水对沈阳城市段供水量有着不可忽视的影响。

表 9 供水量与影响因子之间的偏相关分析

偏相关系数	t 检验值	显著水平 P
$r(y, x_1)=0.9961$	11.3540	0.0077
$r(y, x_2)=0.9153$	2.2721	0.1510
$r(y, x_3)=-0.9919$	7.8041	0.0160

流域上游森林林冠层截留大气降水,使得林内穿透水携带大量养分降落到林地上,枯落物层作为土壤与大气降水物质能量交换的界面,对林内穿透水进行蓄水、调节与下渗,在重力作用下进入土壤,通过土壤孔隙间传导,增加土壤水含量,发生地表径流、壤中流与下渗形成潜流,特别是在枯水期增加地表水与地下水流量。同时,地表水与地下水在森林流域水文循环过程中,流动的水资源化学需氧量减少,以河流为通道,流转至流域下游,产生流域生态环境外部效应的空间流转现象。流域上游森林生态服务发生空间转移不仅可以调节水量,还有利于改善下游水质,所产

生的正外部效应通过地表水、地下水与化学需氧量间接作用于沈阳城市段供水量。

3 结论

(1) 浑河流域上游森林生态服务价值为 111.61 亿元,而沈阳城市段森林生态服务价值为 12.58 亿元。在森林资源作为介质的作用下,上游除了满足自身森林生态服务功能外,2010—2014 年向沈阳城市段空间转移总价值为 56.47 亿元。

(2) 浑河流域上游森林水源涵养与保持水土空间流转的生态服务是影响沈阳城市段供水量的重要因素。从上游森林资源生态服务的空间流转价值与沈阳城市段供水量的相关系数为 0.9694 以及偏相关系数为 0.9961 来看,说明两者存在很强的相关性,上游森林生态服务在空间范围发生流转对沈阳城市段供水量产生正外部效应,为沈阳城市段对上游进行生态补偿提供了依据。

(3) 浑河流域上游森林水源涵养与保持水土空间流转的生态服务通过地表水、地下水与化学需氧量综合作用于沈阳城市段供水量。从上游森林资源生态服务的空间流转价值与沈阳城市段供水量的决策系数为 0.8756 来看,沈阳城市段供水量是由多个因素直接作用、间接作用共同决定的结果。

[参 考 文 献]

- [1] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 386(1): 253-260.
- [2] Brouwer R. Environmental value transfer: State of the

- art and future prospects [J]. *Ecological Economics*, 2000, 32(1): 137-152.
- [3] 王振波, 于杰, 刘晓雯. 生态系统服务功能与生态补偿关系的研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(6): 17-22.
- [4] 徐梦月, 陈江龙, 高金龙, 等. 主体功能区生态补偿模型初探[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(10): 1404-1408.
- [5] Troy A, Wilson M A. Mapping ecosystem services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 435-449.
- [6] 范小彬, 高吉喜, 温文. 生态资产空间流转及价值评估模型初探[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(5): 160-164.
- [7] 乔旭宁, 杨永菊, 杨德刚. 生态系统服务功能价值空间转移评价: 以渭干河流域为例[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 1008-1014.
- [8] 陈江龙, 徐梦月, 苏曦, 等. 南京市生态系统服务空间流转[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 5087-5095.
- [9] 李文华, 何永涛, 杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 398-406.
- [10] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 480-491.
- [11] 彭焕华. 黑河上游典型小流域森林—草地生态系统水文过程研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2011.
- [12] 周金星, 彭镇华, 李世东. 森林生态工程建设对水资源的影响[J]. *世界林业研究*, 2002, 15(6): 54-60.
- [13] 卜红梅, 党海山, 张全发. 汉江上游金水河流域森林植被对水环境的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1341-1348.
- [14] 武云甫, 任晓燕, 张旻. 沈阳市的缺水与水价问题[J]. *城市公共事业*, 2002, 16(2): 17-19.
- [15] Groot R. A typology for the classification description and valuation of ecosystem functions, goods, and service[J]. *Ecological Economics*, 2002, 40(3): 393-408.
- [16] 俞厚未. 生态服务的价值实现: 兼以水系为例[D]. 上海: 复旦大学, 2004.
- [17] 步长千, 胡志斌, 于立忠, 等. 辽宁省清原县森林资源结构及其空间优化配置[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1070-1076.
- [18] 林枫. 抚顺市森林碳储量评估[J]. *辽宁林业科技*, 2012(4): 23-24.
- [19] 王文权. 辽宁森林资源[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [20] 白杨, 欧阳志云, 郑华, 等. 海河流域森林生态系统服务功能评估[J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 2029-2039.
- [21] 张志旭. 河北雾灵山自然保护区森林生态系统服务功能价值评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [22] 程晓玲. 雾灵山野生植物资源价值评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [23] 林枫. 辽宁新宾县森林碳储量研究[J]. *防护林科技*, 2012(3): 17-18.
- [24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [25] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 373-381.
- [26] Converse P D. New laws of retail gravitation[J]. *Journal of Marketing*, 1949, 14(3): 379-384.
- [27] 谷景祎, 周廷刚, 郭丽敏. 基于断裂点理论与加权 Voronoi 图的京津冀地区城市影响范围研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(1): 65-69.
- [28] 范小彬, 高吉喜, 温文, 等. 生态资产空间流转及价值评估模型初探[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(5): 160-164.
- [29] 叶剑平, 蒋妍, 罗伊·普罗斯特曼, 等. 2005 年中国农村土地使用权调查研究: 17 省调查结果及政策建议[J]. *管理世界*, 2006(7): 77-84.
- [30] 李焕, 徐建春, 李翠珍, 等. 生态用地配置对土地集约利用影响的通径分析: 以浙江省开发区为例[J]. *中国土地科学*, 2011, 25(9): 42-47.
- [31] 饶恩明, 肖焱, 欧阳志云, 等. 中国湖泊水量调节能力及其动态变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6225-6231.
- [32] 施立新, 余新晓, 马钦彦. 国内外森林与水质研究综述[J]. *生态学杂志*, 2000, 19(3): 52-56.
- [33] 蒋毓琪, 孙鹏举, 刘学录. 城乡结合部土地利用变化的驱动要素分析: 以兰州市和平镇为例[J]. *甘肃农业大学学报*, 2013, 48(3): 110-115.
- [34] 袁志发, 周静芋, 郭满才, 等. 决策系数: 通径分析中的决策指标[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2001, 29(5): 131-133.
- [35] 朱家彪, 杨伟平, 粟卫民. 基于多元逐步回归与通径分析的临澧县建设用地驱动力研究[J]. *经济地理*, 2008, 28(3): 488-491.