

DOI: 10.5846/stxb201801310261

刘金雅,汪东川,张利辉,汪翡翠,胡炳旭,陈俊合,孙志超.基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算.生态学报,2018,38(12):

Liu J Y, Wang D C, Zhang L H, Wang F C, Hu B X, Chen J H, Sun Z C. Estimation of the ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-boundary improvement. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12):

基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算

刘金雅¹,汪东川^{1,2,*},张利辉¹,汪翡翠¹,胡炳旭¹,陈俊合¹,孙志超¹

1 天津城建大学地质与测绘学院,天津 300384

2 天津城建大学,天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室,天津 300384

摘要:从京津冀城市群生态环境一体化角度出发,结合 13 个地市的行政边界、泰森多边形边界和基于最小累计阻力模型构建的最小累计阻力边界 3 种不同类型的界限,对传统基于行政边界的生态系统服务价值评估方法进行改进,以估算出京津冀城市群 13 个地市实际获得的生态系统服务价值。结果表明:(1) 13 个地市对应的泰森多边形边界、生物多样性最小累计阻力边界和文化服务最小累计阻力边界与 13 个地市的行政边界相差较大;(2) 京津冀城市群各生态系统服务总价值为 4544.81 亿元,13 个地市实际获得的生态系统服务价值差别较大,空间上呈现出由北向南的下降趋势;(3) 与传统方法的估算结果相比,北京市、石家庄市、承德市、衡水市、廊坊市、秦皇岛市、唐山市和邢台市实际获得的生态系统服务总价值增加,其中唐山市的增加量最大,超过 56.50 亿元,其他地市实际获得的生态系统服务总价值减少,天津市减少量最大,超过 98 亿元;(4) 敏感性分析结果表明京津冀生态系统服务总价值相对于生态系统服务价值系数稳定,因此估算方法有效,研究结果可信。

关键词:京津冀城市群;生态环境一体化;泰森多边形;最小累计阻力边界;生态系统服务价值

Estimation of the ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-boundary improvement

LIU Jinya¹, WANG Dongchuan^{1,2,*}, ZHANG Lihui¹, WANG Feicui¹, HU Bingxu¹, CHEN Junhe¹, SUN Zhichao¹

1 School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

2 Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

Abstract: Regarding the ecological environmental integration of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, the combination of administrative, Tessellation polygon, and minimum accumulative resistance boundaries based on the minimum cumulative resistance model was used to improve the traditional evaluation method of the ecosystem service value based on administrative boundaries, to estimate the actual ecosystem service value of 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. The results showed that (1) the Tessellation polygon and minimum accumulative resistance boundaries of biodiversity conservation and cultural service corresponding to the 13 cities are relatively different from the administrative boundaries; (2) the total ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration is 454.481 billion yuan, and the actual ecosystem service value obtained by the 13 cities are very different, showing a downward spatial trend from North to South; (3) compared with the estimation results of the traditional method, the actual ecosystem service values

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0503001)

收稿日期:2018-01-31; 修订日期:2018-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mrwangdc@126.com

acquired in Beijing, Shijiazhuang, Chengde, Hengshui, Langfang, Qinhuangdao, Tangshan, and Xingtai cities increased. Among them, Tangshan City had the largest increase of > 5.65 billion yuan, whereas the actual ecosystem service value obtained by the other cities decreased, with the largest decrease in Tianjin, which exceeded 9.8 billion yuan; (4) the results of the sensitivity analysis showed that the change of the total ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration was stable to the value of ecosystem service; therefore, the estimation method was effective and the research result was credible.

Key Words: Beijing-Tianjin-Hebei; urban agglomeration; ecological environmental integration; Tessellation polygon; minimum cumulative resistance boundary; ecosystem service value

生态系统作为生物与环境的统一,是人类生存和发展的基础^[1]。生态系统服务是指生态系统所形成、维持的人类赖以生存和发展的自然环境条件与效用^[2-3],不仅为人类生产生活提供直接的生态产品,还通过调节、支持等功能提供间接服务^[4-5],对其价值进行定量评估是生态资源合理配置和生态环境有效保护的基础和前提^[6-7],在实现人与自然可持续性发展和全球生态安全等方面至关重要。

自 1997 年 Costanza 等最早对全球生态系统服务价值进行估算以来^[8],国内外众多学者在此基础上,纷纷针对不同区域^[9-10]、不同尺度^[11-12]、不同类型^[13-14]的生态系统服务价值进行评估,评估结果广泛应用在生态环境保护^[15-16]、生态功能分区^[17-18]、土地利用优化配置^[19-20]和生态补偿决策^[21-22]等多个方面。特别的,随着近年来全球生态环境问题的不断加剧,生态系统服务价值作为衡量生态环境质量的重要指标,其评估研究也已成为生态系统可持续性研究的热点问题^[23-24]。在我国的生态系统服务价值研究中,被大多数学者接纳和采用的是谢高地等在对我国 200 多位生态学者进行问卷调查的基础上,提出的适合我国生态环境的单位面积生态系统服务价值当量表,该表依据千年生态系统评估的方法,将生态系统服务功能分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四大类^[25-27],然后结合不同类型生态系统的面积来对其生态服务价值进行定量评估。但是现有的针对不同区域的生态系统服务价值评估研究,大都以省市、区县的行政边界^[28-31]作为生态系统划分和生态系统服务价值评估的界限。然而生态系统服务功能是生态系统所固有的,用以生态系统维持和发展的基础,其部分服务功能的影响已经超越了行政边界的限制,具有全局性、一体化的特点^[32]。因此,由行政边界确定的一个城市、区域的生态系统服务价值已经存在不足。

京津冀地区几十年的经济快速发展导致了该地区生态环境严重恶化,人与自然之间的矛盾日益突出,严重威胁着该地区的生态安全^[33]。2015 年《京津冀协同发展规划纲要》的发布,不仅将生态环境保护作为率先突破的重点领域之一,还将京津冀协同发展、打造京津冀世界级城市群上升为重大国家战略^[34]。因此,作为生态环境保护的基础与前提,京津冀城市群的生态系统服务价值评估应该突破传统行政边界的界限,从生态环境一体化角度出发,对该地区 13 个地市的不同生态系统服务功能进行有效划分,以评估 13 个地市实际获得的生态系统服务价值、实现京津冀城市群生态资源的合理配置和人与自然的可持续发展。

本研究从京津冀城市群生态环境一体化角度出发,结合 13 个地市的行政边界、泰森多边形边界和基于最小累计阻力模型构建最小累计阻力边界三种不同类型的界限,对 13 个地市实际获得的生态系统服务价值进行有效、合理的评估,并将其与传统方法的估算结果进行对比分析,并利用敏感性分析方法探讨京津冀生态系统服务价值对生态系统的响应。以为京津冀城市群生态环境的建设与保护、自然资源核算和生态补偿等决策提供有力依据。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

京津冀城市群地处中国华北地区,位于 113°34'—120°05'E, 36°00'—42°40'N 之间,包括北京市、天津市以及河北省内的石家庄市、保定市、沧州市、承德市、邯郸市、衡水市、廊坊市、秦皇岛市、唐山市、邢台市和张家

口市,共 13 个地市,总面积近 22 万 km^2 ,常住人口超过 1 亿,不仅是我国重要的政治中心、文化中心,也是我国北方经济规模最大、发展程度最高的经济核心区。京津冀城市群东临渤海湾,西倚太行山,南面华北平原,北接燕山山脉^[33],区域地形呈现由西北向东南的半环状逐级下降分布特点,是华北平原和环渤海重要的生态屏障区,具有重要的防风固沙、水源涵养和水土保持功能^[34]。

1.2 研究数据

本文以下载于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)京津冀城市群 2015 年的 Landsat8 OLI 影像(空间分辨率 30 $\text{m} \times 30 \text{m}$)作为主要数据源,结合野外调查及相关历史数据,在软件 ArcGIS 10.2 的支持下,对研究区进行人工目视解译得到京津冀城市群 2015 年的土地利用数据。解译的土地利用类型包括林地、草地、水域、耕地、人工表面和未利用地 6 种。由于下文对京津冀城市群生态系统服务价值的估算是基于栅格数据,所以先将解译出的土地利用数据进行栅格化处理,栅格大小确定为 100 $\text{m} \times 100 \text{m}$ 。另外,进行京津冀城市群 2015 年 ESV 估算时用到的粮食统计数据来自《2016 中国粮食年鉴》。

2 研究方法

2.1 京津冀城市群单位面积生态系统服务价值当量因子表的确定

谢高地等在 2015 年提出的单位面积生态系统服务价值当量表中,将生态系统进行二级分类,分为旱地、水田、针叶、针阔混交、阔叶、灌木、草原、灌草丛、草甸、湿地、荒漠、裸地、水系和冰川积雪 14 种类型^[27]。据此,确定本文的生态系统服务价值当量因子表时,就需要将生态系统二级分类的 14 种类型与本文的 6 种土地利用类型进行对应,根据郭亚鸽、刘玉等研究成果中的京津冀城市群土地利用一级分类与对应二级分类的面积和比例^[35-36],在此不考虑人工表面的生态系统服务价值^[18,24,37-38],生成京津冀城市群单位面积生态系统服务价值当量因子表(表 1)。该表中将 1 hm^2 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值定义为 1,其他生态系统服务价值当量因子是指该生态系统产生的生态服务相对于农田食物生产服务的贡献大小^[25]。

表 1 京津冀城市群单位面积生态系统服务价值当量因子表

Table 1 Ecosystem service equivalent value per unit area of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

生态系统服务 Ecosystem service		生态系统类型 Ecosystem types					
		林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	耕地 Farmland	人工表面 Artificial surface	未利用地 Unused land
供给服务 Supply service	食物生产	0.23	0.23	0.74	0.86	0.00	0.02
	原料生产	0.53	0.34	0.28	0.39	0.00	0.02
	水资源供给	0.27	0.19	7.15	-0.03	0.00	0.01
调节服务 Regulatory service	气体调节	1.75	1.21	1.00	0.68	0.00	0.09
	气候调节	5.24	3.19	2.55	0.36	0.00	0.2
	净化环境	1.56	1.05	5.16	0.1	0.00	0.15
	水文调节	3.85	2.34	86.64	0.32	0.00	0.17
支持服务 Support service	土壤保持	2.13	1.47	1.21	1.01	0.00	0.11
	维持养分循环	0.16	0.11	0.09	0.12	0.00	0.01
	生物多样性	1.94	1.34	3.61	0.13	0.00	0.1
文化服务 Cultural service	美学景观	0.85	0.59	2.46	0.06	0.00	0.05

2.2 不同生态系统服务功能有效界限的确定

2.2.1 行政边界

生态系统服务功能中的供给服务,由于其通过粮食生产(将太阳能转为可食用的动、植物产品)、原料生产(将太阳能转为生物能,提供人类生产、生活原材料)等方式^[26]直接影响着区域的经济的发展,因而具有行政区域的特点,所以对于京津冀城市群供给服务的评估应该以 13 个地市的行政边界为界限。

2.2.2 泰森多边形

泰森多边形作为一种常用的平面剖分方法,是由一组相邻点间的垂直平分线组成的连续多边形,常被用于解决空间选址、连接度和可达性等多种空间分析问题。其特点就是在多边形内任意位置的点距离该多边形内样点的距离最近,距离相邻多边形内样点距离远,并且每个多边形内有且仅有一个样点。换句话说,泰森多边形是根据空间距离的远近,将样点进行空间平面分配,而生态系统服务中的部分服务功能,如气候调节功能(植被通过其根系吸收土壤中的水分,然后经过叶片蒸腾将水分释放到大气中,从而减少水分流失,对区域气候具有调节作用),并不会因为行政边界而限制或阻断该生态服务功能的发挥,而是距离一个城市的中心点越近,那么提供给该城市的生态系统服务价值也就越高,该城市实际获得的该项生态系统服务也就越多,因此表现出的是一种空间实际距离的可达,与泰森多边形的构建原理相似。

通过专家咨询与对各项生态系统服务的考量,在此将调节服务中的气体调节(生态系统对不同空间尺度上大气化学组分的平衡效用,如吸收 SO_2 、氯化物等)、气候调节(生态系统对区域气候的调节作用,如改变降水、气温等)、净化环境(生态系统在物理、化学和生物等作用下的环境净化作用)、水文调节(生态系统的淡水过滤、保持、存储和供给等功能),以及支持服务中的土壤保持(土壤为生物生长、发育提供场所的支撑功能等)、维持养分循环(土壤中有机质的存储、还原,以及 N、C、S 等营养元素在循环中的关键作用等)共计 6 项生态系统服务功能^[2,26]的估算界限确定为以 13 个地市为样点构建的泰森多边形。在此,基于 ArcGIS 10.2 软件完成 13 个地市间泰森多边形的构建。

2.2.3 基于最小累计阻力模型确定的最小累计阻力边界

对于生态系统服务功能中的生物多样性功能,不仅指生态系统提供给各类生物繁衍的场所,还包括提供给生物进化以及生物多样性维持等生命过程的条件^[2]。由于不同的生态系统类型直接决定着生态系统服务价值的差异^[39-40],那么在确定京津冀城市群 13 个地市实际获得的该项生态系统服务价值时,就要考虑在生物进行空间扩散越过不同生态系统类型的过程中,生物的空间运动、栖息地的维护等均需要克服一定的阻力来完成,而 13 个地市之间累计阻力最小的范围就构成了各地市该项生物多样性功能的有效影响范围,最小累计阻力的边界就是该项生态系统服务功能的有效界限,它反映的是一种潜在的可达性^[41],在此,将 13 个地市的行政中心视作代表 13 个地市的“源地”。同样,对于生态系统提供的文化服务,主要指生态系统提供给人类的文化、娱乐、游憩、休闲等生态系统服务。一般认为距离 13 个地市的行政中心越近,所获得的文化服务价值就越大,那么限制 13 个地市该项生态系统服务价值大小的阻力,就应该是城市群内任土地单元距离最近的行政中心的距离,同时考虑该土地单元的空间可达性,基于这两方面影响确定的最小累计阻力边界就是该项生态系统服务功能有效影响范围的界限。

基于最小累计阻力模型,确定京津冀城市群 13 个地市生物多样性和文化服务两项生态系统服务的累计阻力表面,计算公式为^[41-42]:

$$\text{MCR} = f_{\min} \sum_{i=1, k=1}^{i=m, k=13} (D_{ik} R_i) \quad (1)$$

式中, MCR 为从 13 个地市行政中心扩散到空间任一点的最小生态系统服务累计阻力; f_{\min} 为空间任一点对 13 个地市取生态系统服务累计阻力的最小值; m 为土地单元数量; k 为京津冀城市群 13 个地市; D_{ik} 为生态系统服务由地级市 k 扩散到空间任一点越过土地单元 i 的距离; R_i 为土地单元 i 对生态系统服务向某个方向扩散过程中产生的阻力,两种类型的生态系统服务对应的土地单元阻力赋值及依据见表 2。

借助 ArcGIS 10.2 软件,基于上述阻力构建生物多样性和文化服务的阻力面;以京津冀地区 13 个地市的行政中心为源点,利用 ArcGIS 10.2 中的 Cost Distance 工具生成 13 个地市生态系统服务累计阻力表面;再利用水文分析中的 Basin 工具对京津冀的空间范围进行剖分,确定 13 个地市各自的生物多样性和文化服务的有效界限。

表 2 京津冀城市群生态系统服务阻力赋值

Table 2 Ecosystem service cost values of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

生态系统服务 Ecosystem service	阻力类型 Resistance types	分级标准 Classification standard	阻力赋值 Resistance value	指标权重 Weight	分级依据 Classification basis
生物多样性 Biodiversity conservation	土地利用类型	林地	10	0.7	[43-44]
		草地	40		
		水域	30		
		耕地	100		
		人工表面	800		
		未利用地	500		
	高程 / m	(,100]	40	0.1	[45]
		(100,400]	100		
		(400,1000]	300		
		(1000,)	500		
			800		
坡度 / °	(0,5]	40	0.2	[46]	
	(5,15]	80			
	(15,25]	150			
	(25,35]	300			
	(35,45]	500			
	(45,)	800			
		1000			
文化服务 Cultural service	距最近地市中心 的距离/km	(,10]	20	0.7	[47]
		(10,30]	40		
		(30,50]	90		
		(50,70]	200		
		(70,100]	300		
		(100,)	400		
	距最近道路的距离 (包括铁路、国道、省 道、县乡路) / km	(,1]	20	0.3	[47]
		(1,3]	60		
		(3,5]	100		
		(5,)	200		

2.3 京津冀 13 个地市生态系统服务价值的确定

参考《2016 中国粮食年鉴》中的北京市、天津市和河北省 2015 年各粮食作物的播种面积、粮食单产以及对应的全国平均价格,确定京津冀城市群单位面积农田食物生产服务经济价值^[48]:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{s_i p_i q_i}{S} (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

式中, E_a 为单位面积农田生态系统提供的食物生产服务功能的经济价值(元/hm²); i 为研究区粮食作物的种类,京津冀城市群的主要作物有稻谷、小麦、玉米和大豆; n 为研究区共有的粮食作物种类,在此 $n=4$; s_i 为第 i 种粮食作物在研究区的种植面积(hm²); S 为 n 种粮食作物总的种植面积(hm²); p_i 为第 i 种粮食作物的全国平均价格(元/kg); q_i 为第 i 种粮食作物的单产(kg/hm²)。1/7 是指在没有人力投入的自然生态系统提供的经济价值是现有单位面积农田提供的食物生产服务经济价值的 1/7^[25,48]。

根据表 2 与京津冀城市群单位面积农田食物生产服务经济价值,确定京津冀城市群的其他生态系统单位面积生态服务价值,并结合各种生态系统的面积估算出京津冀城市群的生态系统服务总价值,计算公式如下:

$$E_{ij} = f_{ij} E_a (i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, 11) \quad (3)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{11} A_i E_{ij} \quad (4)$$

式中, E_{ij} 为单位面积第 i 种生态系统对应的第 j 种生态系统服务价值 (元/hm²) ; f_{ij} 为第 i 种生态系统对应的第 j 种生态系统服务价值当量因子; i 为 6 种生态系统类型; j 为表 2 中生态系统服务功能类型, 包括食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观共 11 种; ESV 为京津冀城市群生态系统服务总价值 (元); A_i 为第 i 种生态系统的面积 (hm²) 。

2.4 敏感性分析

为了验证本文确定的当量因子是否适合京津冀地区每一类生态系统的生态服务功能, 在此利用经济学中的弹性系数概念来验证生态系统服务总价值 ESV 对 6 种生态系统价值系数 E_i 的敏感度 CS ^[49]。通过对 6 种生态系统类型林地、草地、水域、耕地、人工表面和未利用地的生态服务价值系数上下调整 50%, 来确定生态系统服务总价值对生态服务价值系数的依赖程度^[3,38,50] :

$$CS = \left| \frac{(ESV' - ESV) / ESV}{(E'_i - E_i) / E_i} \right| \tag{5}$$

式中, CS 为敏感度系数; ESV 和 ESV' 分别为调整前、后的生态系统服务总价值; E_i 和 E'_i 分别为调整前、后的 6 种生态系统服务价值系数; i 为 6 种生态系统类型。

3 结果与分析

3.1 不同生态系统服务功能的有效界限

对于生物多样性和文化服务两项生态系统服务有效界限的确定, 首先利用 Cost Distance 工具生成 13 个地市该两项生态系统服务的累计阻力表面 (图 1), 其中累计阻力随着距 13 个地市行政中心距离的增加而呈现出不断增大的趋势, 而 13 个地市间累计阻力最大的边界就构成了 13 个地市各自的生物多样性有效界限和文化服务有效界限。

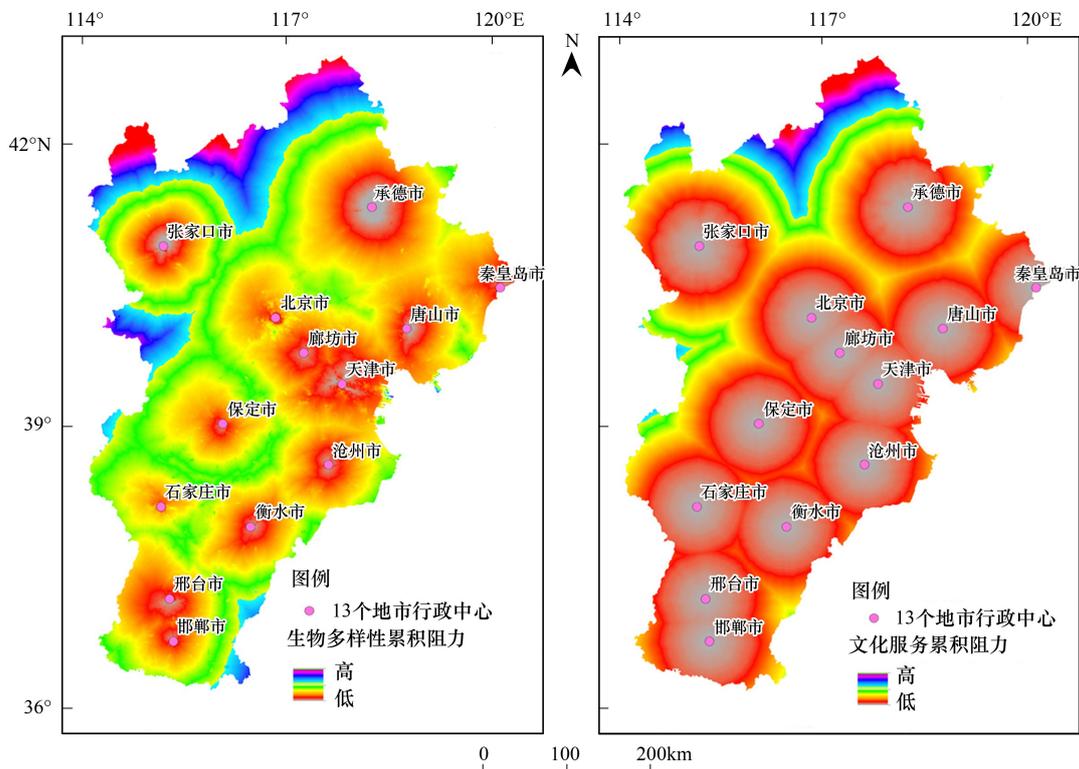


图 1 生物多样性和文化服务的累计阻力表面

Fig.1 The cumulative resistance surfaces for biodiversity conservation and cultural service

京津冀城市群 13 个地市的行政边界、泰森多边形边界、基于生态系统服务阻力生成的生物多样性和文化服务的最小累计阻力边界如图 2 所示。

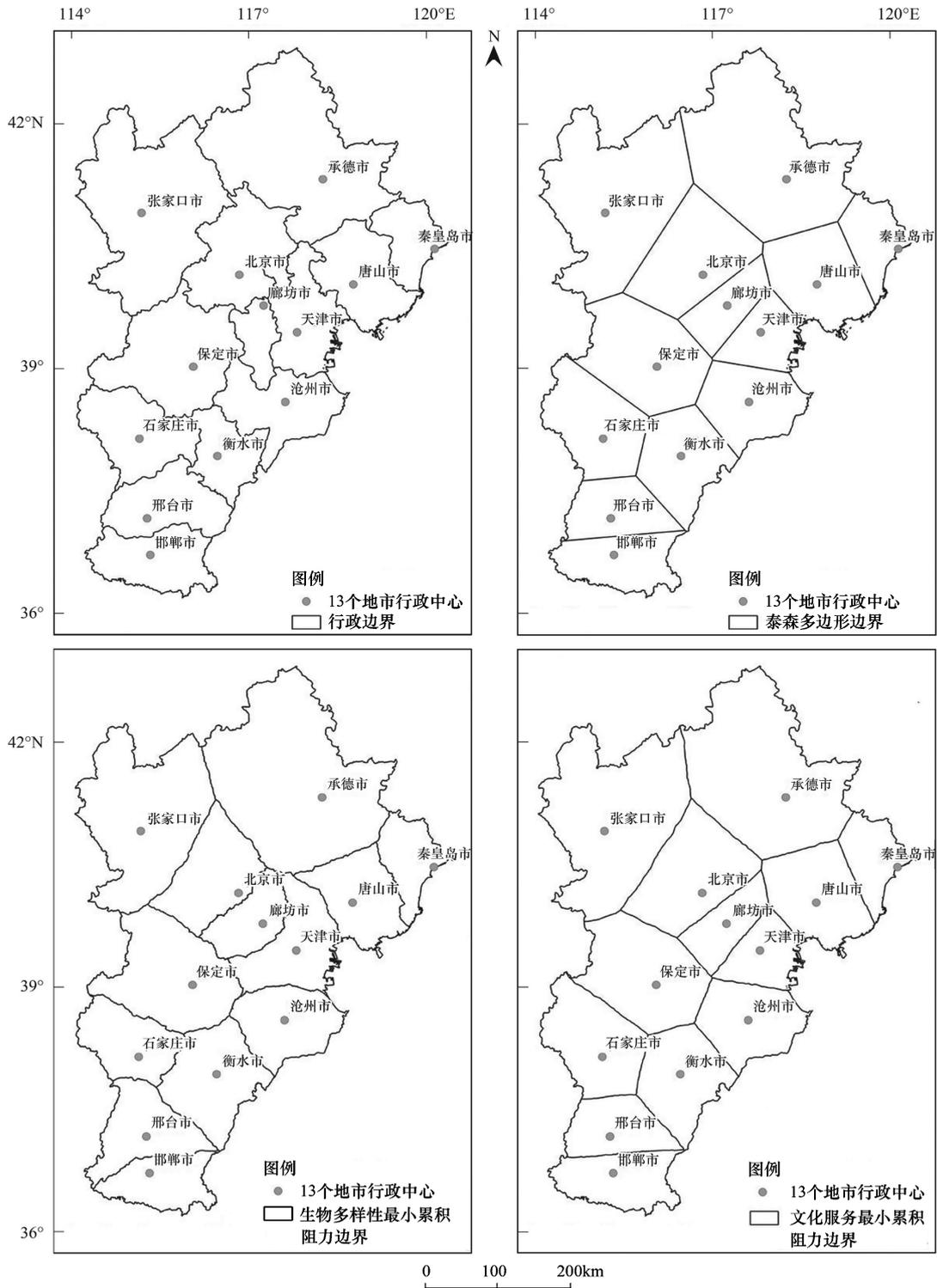


图 2 京津冀城市群不同生态系统服务的有效界限

Fig.2 Effective boundaries of different ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

相比 13 个地市的行政边界,基于 13 个地市行政中心构建的泰森多边形边界、生物多样性和文化服务的最小累计阻力边界分别是按照不同规则进行空间的等分,与 13 个地市的行政边界相差较大。其中,泰森多边形

形是根据 13 个地市的空间距离进行平面的等分,其表示的是空间资源有效配置效率最高的范围;而生物多样性和文化服务的最小累计阻力边界是根据阻力范围进行平面的等分,其代表的是该两项生态系统服务在空间的有效影响范围。由于文化服务考虑的主要阻力是距离 13 个地市行政中心的距离,所以计算出的最小累计阻力边界比较接近泰森多边形的边界,而生物多样性主要受土地利用类型的影响,所以其最小累计阻力边界与泰森多边形边界相差较大。

基于上述京津冀城市群不同生态系统服务功能的有效界限,分别统计各个边界下京津冀城市群各生态系统类型的面积,以对京津冀城市群 13 个地市的生态系统服务价值进行估算。

3.2 京津冀 13 个地市 2015 年生态系统服务价值估算

3.3.1 生态系统服务价值系数的确定

基于 2015 年京津冀地区的粮食统计资料,由公式(1)确定 1 个生态系统服务价值当量因子的经济价值量为 1766.10 元/hm²,根据公式(2)可以确定单位面积各生态系统服务类型的价值系数(表 3),再结合不同生态系统类型的面积就可以对京津冀地区的生态系统服务价值进行估算。

表 3 京津冀城市群生态系统服务价值系数/(元/hm²)

Table 3 Ecosystem service value coefficients of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

生态系统服务 Ecosystem service		生态系统类型 Ecosystem types					
		林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	耕地 Farmland	人工表面 Artificial surface	未利用地 Unused land
供给服务 Supply service	食物生产 食物生产	406.20	406.20	1306.91	1518.85	0.00	35.32
	原料生产	936.03	600.47	494.51	688.78	0.00	35.32
调节服务 Regulatory service	水资源供给	476.85	335.56	12627.62	-52.98	0.00	17.66
	气体调节	3090.68	2136.98	1766.10	1200.95	0.00	158.95
	气候调节	9254.36	5633.86	4503.56	635.80	0.00	353.22
支持服务 Support service	净化环境	2755.12	1854.41	9113.08	176.61	0.00	264.92
	水文调节	6799.49	4132.67	153014.90	565.15	0.00	300.24
	土壤保持	3761.79	2596.17	2136.98	1783.76	0.00	194.27
	维持养分循环	282.58	194.27	158.95	211.93	0.00	17.66
文化服务 Cultural service	生物多样性	3426.23	2366.57	6375.62	229.59	0.00	176.61
	美学景观	1501.19	1042.00	4344.61	105.97	0.00	88.31

3.3.2 改进方法估算的生态系统服务价值

对于京津冀城市群的供给服务采用行政边界进行估算;调节服务中的气体调节、气候调节、净化环境、水文调节,以及支持服务中的土壤保持、维持养分循环共计 6 项生态系统服务采用泰森多边形进行估算;生物多样性和文化服务分别采用各自的最小累计阻力边界进行估算,估算结果如表 4 所示。

估算结果表明,针对京津冀城市群区域整体,各生态系统服务的总价值为 4544.81 亿元。从生态系统服务功能类型来看,服务价值最高的是各生态系统提供的调节服务,为 3058.64 亿元,占总价值的 67.30%,其中的水文调节服务价值>气候调节服务价值>净化环境服务价值>气体调节服务价值;其次是占总价值为 19.43%的支持服务,表现在土壤保持、维持养分循环以及生物多样性保护 3 个方面;供给服务占总价值的比例较低,为 9.72%,主要以水资源供给服务为主;生态系统服务价值最低的是文化服务,为 161.46 亿元,占京津冀地区各生态系统服务总价值的 3.55%。在生态系统类型方面,提供的生态系统服务价值由高到低依次为林地>水域>耕地>草地>未利用地>人工表面。其中以林地、水域、耕地 3 种生态系统提供的生态系统服务价值为主,占总价值的比例分别为 50.62%、26.02%、14.50%;另外 3 种生态系统类型提供的生态系统服务价值较少,均不超过总价值的 10.00%。

表 4 京津冀城市群 13 个地市的生态系统服务价值/(亿元)

方法 Method	13 个地市 13 Cities	生态系统服务功能类型 Ecosystem service types											生态系统类型 Ecosystem types				总计 Total
		生态系统服务功能类型 Ecosystem service types							生态系统类型 Ecosystem types				未利用地 Unused land				
		供给服务 Supply service	调节服务 Regulatory service	支持服务 Support service	文化服务 Cultural service	林地 Forest	草地 Grass-land	水域 Water	耕地 Farm-land	人工表面 Artificial surface							
改进方法 Improved method	北京市	28.67	317.66	87.75	19.09	332.86	24.81	73.65	21.77	0.00	0.00	0.09	453.18				
	天津市	44.93	298.02	27.79	7.97	4.47	2.75	338.30	33.01	0.00	0.00	0.18	378.71				
	石家庄市	24.85	186.07	56.62	11.16	176.51	23.61	33.49	45.06	0.00	0.00	0.04	278.72				
	保定市	41.96	241.46	85.76	13.77	247.21	10.43	59.18	66.12	0.00	0.00	0.01	382.95				
	沧州市	37.14	183.04	31.02	5.24	3.09	0.28	179.70	73.37	0.00	0.00	0.01	256.45				
	承德市	72.65	712.35	260.08	47.05	943.58	66.43	40.15	41.62	0.00	0.00	0.35	1092.13				
	邯郸市	21.59	69.27	26.45	3.66	46.56	3.91	18.07	52.42	0.00	0.00	0.01	120.97				
	衡水市	16.85	56.94	29.24	2.20	10.01	0.57	24.54	70.11	0.00	0.00	0.00	105.23				
	廊坊市	11.58	43.97	16.63	1.68	9.07	0.78	25.77	38.24	0.00	0.00	0.01	73.86				
	秦皇岛市	14.98	124.94	35.44	6.81	103.07	16.06	43.46	19.53	0.00	0.00	0.03	182.16				
	唐山市	37.43	322.78	46.61	11.23	66.01	14.65	280.28	57.06	0.00	0.00	0.05	418.05				
	邢台市	21.64	82.06	37.68	4.99	68.38	27.86	8.07	42.00	0.00	0.00	0.08	146.38				
	张家口市	67.27	420.07	142.09	26.59	289.88	209.13	57.99	98.83	0.00	0.00	0.18	656.01				
总计 Total		441.54	3058.64	883.16	161.46	2300.71	401.27	1182.65	659.13	0.00	0.00	1.04	4544.81				
传统方法 Traditional method	北京市	28.67	271.38	81.71	16.22	295.00	20.23	61.55	21.12	0.00	0.00	0.09	397.99				
	天津市	44.93	384.36	36.89	10.77	17.71	3.01	412.17	43.86	0.00	0.00	0.19	476.95				
	石家庄市	24.85	146.23	52.20	8.67	138.22	21.16	27.21	45.32	0.00	0.00	0.03	231.95				
	保定市	41.96	280.04	92.44	16.20	286.00	12.67	64.84	67.10	0.00	0.00	0.02	430.63				
	沧州市	37.14	187.18	33.32	5.39	3.97	0.36	181.59	77.10	0.00	0.00	0.01	263.03				
	承德市	72.65	719.01	245.71	47.76	934.71	67.48	38.15	44.44	0.00	0.00	0.35	1085.12				
	邯郸市	21.59	78.53	32.65	4.18	59.09	4.71	18.59	54.55	0.00	0.00	0.02	136.95				
	衡水市	16.85	38.67	17.82	1.45	5.54	0.46	19.30	49.49	0.00	0.00	0.00	74.79				
	廊坊市	11.58	28.29	12.91	1.14	7.34	0.54	12.55	33.48	0.00	0.00	0.00	53.92				
	秦皇岛市	14.98	115.32	35.51	6.64	106.28	16.09	31.20	18.84	0.00	0.00	0.03	172.44				
	唐山市	37.43	270.93	43.75	9.43	58.03	15.19	236.42	51.86	0.00	0.00	0.04	361.55				
	邢台市	21.64	80.77	35.57	4.72	51.81	26.51	10.94	53.37	0.00	0.00	0.07	142.71				
	张家口市	67.27	457.95	162.67	28.89	337.00	212.87	68.13	98.60	0.00	0.00	0.18	716.78				
总计 Total		441.54	3058.64	883.16	161.46	2300.71	401.27	1182.65	659.13	0.00	0.00	1.04	4544.81				

对于京津冀城市群的 13 个地市而言,各地市生态系统服务总价值差别较大。其中,实际获得的生态系统服务总价值较高的地市包括承德市和张家口市,分别为 1092.13 亿元和 656.01 亿元,占 13 个地市生态系统服务总价值的比例分别为 24.03% 和 14.43%,这不仅与这两个地市的占地面积较大有关,还与两个地市及周边的土地利用状况有关。对于承德市,由于市内和周边地区存在大面积的林地,所以仅林地单一生态系统服务提供的生态系统服务总价值就达到了 943.58 亿元,远远大于其他地市;而对于张家口市,市内的大面积草原和周边良好的土地利用状况,同样保证了该地区生态系统服务的有效性。其次,作为直辖市的北京市与天津市,由于其独特的地理位置,使其能与周边地市共享生态系统服务,所以在经济快速发展的同时,其实际享受的生态系统服务总价值也较高,分别达到 453.18 亿元和 378.71 亿元,其中北京市的生态系统服务价值主要来源于林地,达到 332.86 亿元,而天津由于靠近渤海湾,包含大面积的湿地,所以由水域提供的生态系统服务价值为 338.30 亿元。其余地市中,与北京市、天津市实际获得的生态系统服务总价值相似的是唐山市和保定市,分别为 418.04 亿元和 382.95 亿元,而其余几个地市实际获得的生态系统服务总价值较小,占 13 个地市的比例均不超过 7.00%。

结合 13 个地市在京津冀城市群的地理位置可知,13 个地市实际获得的生态系统服务总价值在空间上的分布差异较大,总体呈现出由北向南的下降趋势。生态系统服务价值较大的地市为承德市、张家口市和北京市,主要分布于京津冀北部的燕山地区和西部的太行山地区处,相比较京津冀南部地区,这些地区的自然资源丰厚,存在大面积的林地和草地资源,如承德市、张家口市内的林地和草地面积总和分别超过 3 万 km^2 、2 万 km^2 ,远远大于其他地市的林地和草地资源面积,因此大量的林地和草地资源不仅为地区的农牧业提供丰富的原材料,还在区域的气候调节、环境净化、水文调节、土壤保持和生物多样性的保护方面起到了显著作用,同时也给人类提供了大量的旅游、休闲、娱乐等文化服务功能^[51]。而对于京津冀南部的衡水市、邢台市和邯郸市等,市内平缓的地形条件为耕作提供了良好的地形条件,这些地区存在的大面积耕地,除了提供食物生产、原料生产等供给服务外,也在土壤保持、气体调节等方面发挥着积极的服务作用,因此土地利用类型的限制使得这部分地区实际所享受到的生态系统服务价值明显小于位于京津冀北部地区的地市。位于京津冀中部地区的沧州市、保定市和石家庄市等,市内的土地利用类型既包括部分陡峭的山地,也包含部分较为平坦的耕地,因此这些地市实际所享受到的供给服务、调节服务、支持服务和文化服务价值适中,介于京津冀北部地市和南部地市之间。所以从京津冀区域生态环境一体化角度考虑,为了避免生态系统服务空间分布的不均衡,应该在京津冀城市群范围内合理规划产业结构、产业管理与人力资源配备,优化自然资源的空间配置,统筹环境保护工作,通过政府部门、企业和公民等不同层次的行动主体的通力合作、共同管理,以保证各个地市实际所享受的生态系统服务价值均衡^[52]。如对于生态系统服务价值较小的京津冀南部地市衡水市、邢台市和邯郸市等,在发展农业以保证地区食物、原料等供给服务外,还应注重地区林草资源和水资源等的保护与规划发展,以保证地区气体、气候和水文调节等调节服务和生物多样性保护,同时大力发展文化服务功能,以使得区域实际享受到的生态服务价值均衡高效。

3.2.3 改进、传统两种方法的生态系统服务价值估算结果比较

对利用改进、传统两种方法估算的京津冀城市群 13 个地市的生态系统服务价值结果进行比较(表 4),发现由于两种方法统计的该地区总面积以及各生态系统类型的总面积都相同,所以在京津冀城市群尺度上,两种估算的各生态系统服务功能、各生态系统类型和对应的生态系统服务总价值都相同,而在 13 个地市尺度上,两种方法的估算结果相差较大。

对于北京市、石家庄市、承德市、衡水市、廊坊市、秦皇岛市、唐山市和邢台市,通过改进方法估算出的生态系统服务总价值比传统方法估算的结果高,说明这几个地市实际获得的生态系统服务总价值要大于传统方法的估算结果,其中增加量最大的是唐山市,超过 56.50 亿元;而其他地市实际获得的生态系统服务总价值要小于传统方法的估算结果,减少量最大的是天津市,超过 98 亿元。以唐山市为例,供给服务的行政区域性使得两种方法估算的供给服务价值同为 37.43 亿元;由于唐山市对应的泰森多边形范围大于其行政范围,除草地

外,其统计的各生态系统类型的面积都大于利用行政边界统计出的面积,由此计算出的调节服务价值大于传统方法计算结果;虽然生物多样性的最小累计阻力边界范围小于行政边界范围,使得计算出的生物多样性服务价值减少,但是减少量小于利用泰森多边形边界计算出的土壤保持、维持养分循环的增加量,所以改进方法计算出的唐山市实际获得的支持服务功能价值大于传统方法计算结果;由于文化服务的最小累计阻力边界与泰森多边形边界比较接近,所以计算出的文化服务价值也高于传统方法,综上,唐山市实际获得生态系统服务功能价值高于传统方法计算结果。而对于天津市,改进方法估算出的生态系统服务总价值低于传统方法估算值的主要原因就在于调节服务价值的减少,根本原因是利用 13 个地市的行政中心构建的泰森多边形是根据 13 个地市之间的平面距离进行空间范围的等分,而忽略了 13 个地市行政边界的不规律性,所以天津市对应的泰森多边形边界远小于天津市的行政边界,由此估算出的生态系统服务价值小于传统方法估算结果。由此,比较唐山市和天津市实际获得的生态系统服务总价值可知,部分生态系统服务功能的服务范围早已打破了行政边界的限制,呈现脱域化^[53]、全局性、一体化的特点,所以各个地市不仅要努力提高自身生态环境的质量,还需要注重有效的区域生态环境保护协同和共治,在现有国家治理体系的框架之下,最大限度地统一各地市的步调与行动,以使共同利益最大化^[52]。

3.4 敏感性分析结果

由生态系统服务价值的敏感性分析结果(表 5),可知 ESV 对 E_i 的敏感性指数都小于 1,由高到低依次为林地、水域、耕地、草地、未利用地和人工表面。敏感性指数最高值为林地的 0.51,当林地的生态系服务价值系数增加 1%时,京津冀的生态系统服务总价值增加 0.51%。因此,京津冀总生态系统服务价值量的变化相对于生态系统服务价值系数是稳定、缺乏弹性的,由此可以肯定估算方法有效,满足京津冀城市群生态系统服务价值的估算。

表 5 京津冀城市群生态系统服务价值敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis of ecosystem service value in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

生态系统类型 Ecosystem types	敏感度系数 Coefficient of sensitivity	生态系统类型 Ecosystem types	敏感度系数 Coefficient of sensitivity
林地 Forest	0.51	耕地 Farmland	0.15
草地 Grassland	0.09	人工表面 Artificial surface	0
水域 Water	0.26	未利用地 Unused land	0

4 结论

生态系统服务价值的合理评估是生态资源合理配置和生态环境有效保护的基础和前提。本文从京津冀城市群生态环境一体化角度出发,结合 13 个地市的行政边界、泰森多边形边界和基于最小累计阻力模型构建的最小累计阻力边界 3 种不同类型的界限,对传统基于行政边界的生态系统服务价值评估方法进行改进,以估算出京津冀城市群 13 个地市实际获得的生态系统服务价值,并将其与传统方法的估算结果进行对比分析,最后结合敏感性分析,探讨京津冀地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应,得出以下结论:

(1) 13 个地市对应的泰森多边形边界表示的是空间资源有效配置效率最高的范围,生物多样性最小累计阻力边界和文化服务的最小累计阻力边界代表的是该两项生态系统服务在空间的有效影响范围,与 13 个地市的行政边界相差较大。

(2) 京津冀城市群各生态系统服务总价值为 4544.81 亿元,各生态功能类型的价值量由高到低依次为调节服务>支持服务>供给服务>文化服务,不同生态系统类型提供的生态服务价值由高到低依次为林地>水域>耕地>草地>未利用地>人工表面。13 个地市实际获得的生态系统服务价值差别较大,空间上呈现出由北向南的下降趋势。为了避免生态系统服务空间分布的不均衡,从京津冀区域生态环境一体化角度考虑,应该优化京津冀城市群范围内自然资源的空间配置,统筹环境保护工作,以保证各个地市实际所享受的生态系统服务

价值更加均衡高效。

(3)北京市、石家庄市、承德市、衡水市、廊坊市、秦皇岛市、唐山市和邢台市实际获得的生态系统服务总价值要大于传统方法的估算结果,其中增加量最大的是唐山市,超过 56.50 亿元;而其他地市实际获得的生态系统服务总价值要小于传统方法的估算结果,减少量最大的是天津市,超过 98 亿元。

(4)通过对京津冀城市群进行生态系统服务价值的敏感性分析发现,各生态系统对应的生态服务价值的敏感度均小于 1,说明京津冀总生态系统服务价值量的变化相对于生态系统服务价值系数是稳定的,因此本文估算方法有效,研究结果可信。

5 讨论

(1)本文结合京津冀 13 个地市的行政边界、泰森多边形边界和最小累计阻力边界,估算出各地市实际获得的生态系统服务价值。在此,13 个地市对应的泰森多边形边界和最小累计阻力边界是根据 13 个地市的行政中心进行的确定,该方法同样适用于县城、乡镇等不同尺度,同时结合人口数据可以估算出不同尺度下人均实际获得的生态系统服务价值。鉴于本文的重点是从京津冀城市群一体化角度,确定各地市的生态系统服务价值,同时考虑到数据短期内难以获取的问题,本文只在京津冀 13 个地市的尺度上进行了讨论和分析,不同尺度的研究可以作为后续的研究重点。

(2)本文基于谢高地等构建的单位面积生态系统服务价值当量表来制定京津冀地区的当量因子表,表中没有考虑人工表面的生态系统服务价值。然而城镇、村庄、工矿等人工表面的建设会因为改变土地利用方式,降低水源涵养、生物多样性保护等多种生态系统服务功能,同时增加娱乐等文化服务,因此人工表面会提供正负价值。鉴于此,在以后的研究中可以尝试对其进行定量描述^[1,54-55],以更确切的对生态系统服务价值进行估算。

(3)在基于最小阻力模型确定生物多样性最小累计阻力边界和文化服务最小累计阻力边界的过程中,阻力类型的选取和赋值是参考现有研究成果进行确定的,而针对不同的研究区域,其生态系统服务的影响因子及对应的权重也不尽相同。对此,今后仍需具体的定量方法进行确定与进一步的研究。

参考文献 (References):

- [1] 李晓赛,朱永明,赵丽,田京京,李静. 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. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 373-381.
- [2] 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. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [3] 李涛,甘德欣,杨知建,王宽,齐增湘,李晖,陈希. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3787-3796.
- [4] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,安静. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. 生态学报, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [5] 刘海,殷杰,林苗,陈晓玲. 基于 GIS 的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化研究. 生态学报, 2017, 37(8): 2575-2587.
- [6] Ye Y Q, Zhang J E, Chen L L, Yang Y O, Parajuli P. Dynamics of ecosystem service values in response to landscape pattern changes from 1995 to 2005 IN Guangzhou, southern China. Applied Ecology and Environmental Research, 2015, 13(1): 21-36.
- [7] Wan L L, Ye X Y, Lee J, Lu X Q, Zheng L, Wu K Y. Effects of urbanization on ecosystem service values in a mineral resource-based city. Habitat International, 2015, 46: 54-63.
- [8] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital I. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [9] Yirsaw E, Wu W, Shi X P, Temesgen H, Bekele B. Land use/land cover change modeling and the prediction of subsequent changes in ecosystem service values in a coastal area of China, the Su-Xi-Chang region. Sustainability, 2017, 9(7): 1204.
- [10] Li G D, Fang C L, Wang S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. Science of the Total Environment, 2016, 545-546: 609-620.
- [11] Zhang Y S, Zhao L, Liu J Y, Liu Y L, Li C S. The impact of land cover change on ecosystem service values in urban agglomerations along the coast of the bohai rim, China. Sustainability, 2015, 7(8): 10365-10387.
- [12] 陈美球,赵宝苹,罗志军,黄宏胜,魏晓华,吕添贵,许莉. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化. 生态学报, 2013, 33(9): 2761-2767.

- [13] Fujii H, Sato M, Managi S. Decomposition analysis of forest ecosystem services values. *Sustainability*, 2017, 9(5): 687.
- [14] Adekola O, Mitchell G, Grainger A. Inequality and ecosystem services: The value and social distribution of Niger Delta wetland services. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 42-54.
- [15] 朱文德, 陈锦, 魏天兴. 北京市生态系统服务价值时间变化和区域差异分析. *林业调查规划*, 2011, 36(2): 38-42.
- [16] 赖敏, 吴绍洪, 尹云鹤, 潘韬. 三江源区基于生态系统服务价值的生态补偿额度. *生态学报*, 2015, 35(2): 227-236.
- [17] 翟水晶, 钱谊, 侯建兵. 洪泽湖湿地生态服务功能分区及其效益分析. *农村生态环境*, 2005, 21(3): 71-73.
- [18] 熊善高, 万军, 龙花楼, 于雷. 重点生态功能区生态系统服务价值时空变化特征及启示——以湖北省宜昌市为例. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 296-302.
- [19] 段瑞娟, 郝晋珉, 张洁瑕. 北京区位土地利用与生态服务价值变化研究. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 21-28.
- [20] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 秦建新. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例. *地理研究*, 2015, 34(4): 691-700.
- [21] 周晨, 丁晓辉, 李国平, 汪海洲. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究——以生态系统服务价值为视角. *资源科学*, 2015, 37(4): 792-804.
- [22] 戴君虎, 王焕炯, 王红丽, 陈春阳. 生态系统服务价值评估理论框架与生态补偿实践. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 963-969.
- [23] 李恒哲, 李超, 陈召亚, 郭年冬, 许岷, 王树涛. 基于分区的环京津土地生态服务价值及灰色预测. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 221-227.
- [24] 唐秀美, 陈百明, 路庆斌, 韩芳. 生态系统服务价值的生态区位修正方法——以北京市为例. *生态学报*, 2010, 30(13): 3526-3535.
- [25] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [26] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [28] 马程, 李双成, 刘金龙, 高阳, 王阳. 基于 SOFM 网络的京津冀地区生态系统服务分区. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1383-1393.
- [29] 陈阳, 张建军, 杜国明, 付梅臣, 刘凌霄. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变. *生态学报*, 2015, 35(18): 6157-6164.
- [30] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [31] 曾杰, 李江风, 姚小微. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 883-891.
- [32] 刘兴元, 牟月亭. 草地生态系统服务功能及其价值评估研究进展. *草业学报*, 2012, 21(6): 286-295.
- [33] 孙文博, 苗泽华, 孙文哲. 京津冀地区生态系统服务价值变化及其与经济增长的关系. *生态经济*, 2015, 31(8): 59-62.
- [34] 王晶晶, 迟妍妍, 许开鹏, 张丽苹, 葛荣凤. 京津冀地区生态分区管控研究. *环境保护*, 2017, 45(12): 48-51.
- [35] 刘玉, 蒙达, 周艳兵, 高秉博. 京津冀地区粮食产量变化及其作物结构分析. *经济地理*, 2014, 34(8): 125-130.
- [36] 郭亚鸽. 面向对象的 HJ-1CCD 和 TM 影像土地覆盖信息提取研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [37] 姜翠红, 李广泳, 程滔, 陈占涛, 张浩然. 青海湖流域生态服务价值时空格局变化及其影响因子研究. *资源科学*, 2016, 38(8): 1572-1584.
- [38] 向悟生, 李先琨, 丁涛, 黄玉清, 何成新, 陆树华. 土地利用变化对漓江流域生态服务价值影响. *水土保持研究*, 2009, 16(6): 46-50, 55-55.
- [39] 蔡邦成, 陆根法, 宋莉娟, 黄和平, 韩尚富, 陈克亮. 土地利用变化对昆山生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 3005-3010.
- [40] Kindu M, Schneider T, Teketay D, Knoke T. Changes of ecosystem service values in response to land use/land cover dynamics in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 137-147.
- [41] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [42] 马欢, 岳德鹏, 于强, 张启斌, 尹波, 吕奇. 生态脆弱区防护网络构建及分区研究——以磴口县为例. *西北林学院学报*, 2017, 32(4): 193-202.
- [43] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [44] 古璠, 黄义雄, 陈传明, 程栋梁, 郭佳蕾. 福建省自然保护区生态网络的构建与优化. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1013-1020.
- [45] 袁钟, 赵牡丹, 刘蕊娟. 基于最小成本距离与改进引力模型的城市绿地网络构建与优化. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 45(2): 104-109.
- [46] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1611-1618.
- [47] 吴榛, 王浩. 扬州市绿地生态网络构建与优化. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1976-1985.
- [48] 肖玉, 谢高地, 安凯. 莽措湖流域生态系统服务功能经济价值变化研究. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 676-680.
- [49] 凌红波, 徐海量, 樊自立, 张青青. 基于生态经济功能区划的玛纳斯河流域生态服务价值评价. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1535-1543.
- [50] 王成, 魏朝富, 邵景安, 高明, 蒋伟. 区域生态服务价值对土地利用变化的响应——以重庆市沙坪坝区为例. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1485-1489.
- [51] 王彦芳. 京津冀地区生态系统服务价值估算与分析. *环境保护与循环经济*, 2017, 37(7): 50-54.
- [52] 常纪文, 汤方晴. 京津冀一体化发展的环境法治保障措施. *环境保护*, 2014, 42(17): 26-29.
- [53] 王喆, 周凌一. 京津冀生态环境协同治理研究——基于体制机制视角探讨. *经济与管理研究*, 2015, 36(7): 68-75.
- [54] 汪樱, 李江风. 基于生态服务价值的乡镇土地利用功能分区——以湖北省神农架木鱼镇为例. *国土资源科技管理*, 2013, 30(6): 20-27.
- [55] 冉圣宏, 吕昌河, 贾克敬, 齐永华. 基于生态服务价值的全国土地利用变化环境影响评价. *环境科学*, 2006, 27(10): 2139-2144.