

中国生态系统服务功能价值空间差异变化分析

陈俊成^{1,2} 李天宏^{1,2,†}

1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: lth@pku.edu.cn

摘要 基于土地利用/覆盖数据, 应用谢高地提出的生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)评价体系, 对2000, 2010和2015年中国各省级行政区(不含港、澳、台地区)的生态系统服务功能价值进行评估, 并分析其空间差异的变化特征。结果表明, 全国ESV从2000年的159171亿元/年增长至2015年的161802亿元/年。我国ESV空间分布特征为东部高、西部低。人均ESV的空间差异程度比地均ESV大, 但自2000年至2015年均有所减小, 在总体差异中, 区域间差异一直占较大的贡献率。2000—2015年, ESV增加的省份主要在西部和北部, 而东部和南部地区ESV有减少的趋势。

关键词 生态系统服务功能; 空间差异; 土地利用; 价值评估; 中国

Changes of Spatial Variations in Ecosystem Service Value in China

CHEN Juncheng^{1,2}, LI Tianhong^{1,2,†}

1. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2. The Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: lth@pku.edu.cn

Abstract Based on land use and land cover data, with the valuation systems developed by Xie, the ecosystem service values (ESV) of China (except Hong Kong, Macao and Taiwan Province) in 2000, 2010 and 2015 were analyzed, and their spatial and temporal distributions and variations were analyzed. The results show that ESV in China grew from 15917.1 billion yuan per year in 2000 to 16180.2 billion yuan per year in 2015. The ecosystem service value in China showed high level in the eastern provinces and low level in the western provinces. The spatial variations of ESV per capita were greater than those of ESV per unit area, but both of them decreased from 2000 to 2015, which were dominated by variations among regions. Provinces with increasing ESV concentrated in the west and the north of the country, while provinces with decreasing ESV concentrated in the east and the south.

Key words ecosystem services; spatial variations; land use; valuation; China

定量评估生态系统对人类经济社会的贡献, 对正确认识和评估人类与自然之间的关系尤为重要, 亦是一项艰巨的任务^[1]。1997年, Costanza等^[2]提出的生态系统服务功能价值(ecosystem service value, ESV)评估体系为定量评估人们从生态系统获取的效益及协调经济发展与生态保护提供了一种有效途径。目前, 生态系统服务功能价值的评估方法种类较多, 一般分为两类: 基于现有基础统计数据进行的直接计算以及基于土地利用/覆盖数据进行的间接分析计算^[3]。直接计算法主要针对某种特定的生

态系统服务功能, 包括市场定价法、生产率法、旅行费用法、防护/重置/替代成本法以及意愿调查法等^[4]。随着计算方法的不断发展和完善, 开始出现集成的生态系统服务功能计算模型, 如GUMBO模型^[5]和InVEST模型^[6]等, 其中InVEST模型已在多个国家和地区取得成功的应用^[7-10]。直接计算法能得出较精确的结果, 但由于不同研究者使用的方法和数据来源不尽相同, 故存在数据难以获得、研究结果难以进行横向比较的问题。与之相比, 基于土地利用/覆盖数据进行的间接分析计算方法因其数据资

料相对容易获取、成本相对较低等特点而得到越来越多的关注和应用^[11-12]。谢高地等基于 Costanza 的方法框架,提出中国生态系统服务价值因子当量表^[13-15],被广泛应用于国内生态系统价值的评估及相关研究^[16-19]。

在目前国内的研究成果中,按照研究范围的大小,可分为地区层面的研究^[20-25]和全国范围的研究^[26-30],后者的文献数量少于前者,但后者的成果更有代表性和概括性。此外,现有研究多侧重于生态系统服务功能价值总量评估及其随时间的变化^[31-35],而关于全国生态系统服务功能价值空间分异特征及空间差异随时间变化的研究罕见报道。

总体而言,谢高地等^[13-15]的评价体系因其数据获取成本低、计算简便、结果直观以及对生态系统适用性更强等优点,可应用于中国较大尺度的生态系统服务功能价值评估。本文利用中国 2000, 2010 和 2015 年的土地利用/覆盖数据,基于文献[14]的评价方法体系,在评估该 3 年全国(不含港、澳、台地区)生态系统服务功能价值变化的基础上,以省为单位,重点分析我国生态系统服务功能的空间差异及其变化特征,以期为中国区域协调发展政策的制定提供科学参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

本研究区域为中国港、澳、台地区以外的各省、直辖市和自治区。中国领土范围广,地势复杂多变,整体趋势西高东低,高原、山地、盆地、丘陵和平原等主要地形均有分布。纬度、与海洋的距离以及海拔的变化范围之大,产生多种气候类型,从热带气候到寒温带气候,从季风气候到大陆性气候,还有高山高原气候。气候与地势之多变,造就中国生态系统的多样性与区域特异性,例如西北地区的荒漠生态系统,西南和东北地区的森林生态系

统,青藏高原地区与长江中下游地区的湖泊生态系统等等,它们提供的生态系统服务供养了一切生命的繁衍生息。

1.2 数据来源

本研究使用的 2000, 2010 和 2015 年土地利用/覆盖数据来自中国地理国情云平台(<http://www.dsac.cn>),比例尺为 1:25 万,投影方式为 Albers 正轴等面积双标准纬线圆锥投影。土地利用/覆盖类型分为 6 大类 25 小类(表 1)。生产总值(全国及地区)、三大产业比重、总人口、建成区面积和城镇人口的数据来源为国家统计局的国家数据网站(<http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>)。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务功能价值的计算

Costanza 等^[2]把全球土地利用分为 16 种类型,为每种土地利用类型的每种服务功能赋予单位面积的价值,求和得出全球的生态系统服务价值。谢高地等认为 Costanza 的评价方法未能很好地与中国的实际生态系统服务状况相匹配,他们于 2003 年在 Costanza 等提出的生态系统服务价值化评估方法的基础上,通过对众多具有生态学背景的专业人员进行问卷调查,得出中国生态系统服务评估单价体系^[13]。该体系将 Costanza 分类的 17 种生态系统服务功能重新整合为 9 大类:气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料、娱乐和文化。在土地类型的生态系统服务价值量化方法方面,他们将单位面积的农田食物生产服务的价值当量设为 1.0,得到其他土地类型与生态系统服务功能的对应价值当量。单位面积的农田食物生产服务的价值当量相当于 1 公顷全国年平均产量的农田自然粮食产量的经济价值,以此可将各土地类型与生态系统服务功能的价值当量转换成当年的生态系统服务单价。在 2003 年研究的基础上,谢高地等^[14]于 2008 年发

表 1 土地利用/覆盖原始数据分类标准
Table 1 Classification of raw data of land use and land cover

大类	小类
耕地	水田、旱地
林地	有林地、灌木林、疏林地、其他林地
草地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
水域	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、海涂、滩地
城乡、工矿、居民用地	城镇、农村居民点、工交建设用地
未利用土地	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地、其他未利用土地

表修订后的单位面积生态系统服务价值当量表,如表2所示。文献[14]中未提及建设用地的生态系统服务功能价值,故本研究将其服务功能价值当量视为0。

本文使用谢高地等^[14]的单位面积生态系统服务价值当量,计算中国各省2000,2010和2015年的生态系统服务功能价值。生态系统服务单价表的生成使用2007年的价格数据。根据相关研究,1个生态系统服务价值当量因子的经济价值量等于全国平均粮食单产市场价值的1/7^[13]。中国2007年平均粮食单价为1.78元/kg,2000—2015年平均粮食单位面积产量为4844.55 kg/hm²,可计算出生态系统服务

价值当量因子的经济价值量为1231.90元/(hm²·年)。由此得出生态系统服务单价,如表3所示。

由于原始数据中的土地利用类型分类与谢高地等^[14]的土地利用类型分类并不一一对应,因此对原始数据做归并处理,对应关系如表4所示。将原始数据中各省重新分类后的土地利用类型面积乘以其单位面积的生态系统服务功能价值,再对其求和,即可得出各省及全国(港、澳、台除外)的生态系统服务功能价值。

1.3.2 生态系统服务功能价值的空间差异分析

本研究采用变异系数(CV)和泰尔系数(T)对生态系统服务价值的空间分异进行定量表征。

表2 单位面积生态系统服务价值当量^[14]
Table 2 Equivalent value per unit area of ecosystem services^[14]

一级类型	二级类型	森林	草地	农田	湿地	河流湖泊	荒漠	建设用地
供给服务	食物生产	0.33	0.43	1.00	0.36	0.53	0.02	0
	原材料生产	2.98	0.36	0.39	0.24	0.35	0.04	0
调节服务	气体调节	4.32	1.50	0.72	2.41	0.51	0.06	0
	气候调节	4.07	1.56	0.97	13.55	2.06	0.13	0
	水文调节	4.09	1.52	0.77	13.44	18.77	0.07	0
	废物处理	1.72	1.32	1.39	14.40	14.85	0.26	0
支持服务	保持土壤	4.02	2.24	1.47	1.99	0.41	0.17	0
	维持生物多样性	4.51	1.87	1.02	3.69	3.43	0.40	0
文化服务	提供美学景观	2.08	0.87	0.17	4.69	4.44	0.24	0
	合计	28.12	11.67	7.90	54.77	45.35	1.39	0

表3 不同土地利用类型的生态系统服务功能价值
Table 3 Ecosystem service value of different land use categories

土地利用类型	生态系统服务功能价值/(元·hm ⁻² ·年 ⁻¹)	土地利用类型	生态系统服务功能价值/(元·hm ⁻² ·年 ⁻¹)
森林	34641.0	河流湖泊	55866.6
草地	14376.3	荒漠	1712.3
农田	9732.0	建设用地	0.0
湿地	67471.1		

表4 土地利用类型对应关系
Table 4 Equivalent of land use categories between raw data and Xie's method

文献[14]的土地类型	对应的原始数据土地类型
森林	有林地、灌木林、疏林地、其他林地
草地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
湿地	海涂、滩地、沼泽地
湖泊/河流	河渠、湖泊、水库坑塘
荒漠	永久性冰川雪地、沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石砾地、其他未利用土地
农田	水田、旱地
建设用地	城镇、农村居民点、工交建设用地、填海造地

变异系数反映一组数据在平均值上的离散程度,可用于测定区域生态系统服务功能价值的空间差异程度。变异系数越大,表明研究地区生态系统服务价值差异程度越大。计算公式为

$$CV = \frac{1}{ESV_{p_0}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ESV_{p_i} - ESV_{p_0})^2}{n}}, \quad (1)$$

其中, n 为省份数目, ESV_{p_i} 为第 i 个省份的地均或人均生态系统服务功能价值, ESV_{p_0} 为所有省份地均或人均生态系统服务功能价值的平均数。

泰尔系数常用来表征区域经济不平衡程度^[36], 本文将其作为衡量区域生态系统服务功能价值不平衡程度的定量指标。泰尔系数的取值范围为 0~1。泰尔系数越大, 表明区域间生态系统服务功能价值差异程度越大。计算公式为

$$T = T_{WR} + T_{BR} = \sum_i \sum_j \frac{ESV_{ij}}{ESV} \ln \frac{ESV_{ij}/ESV}{S_{ij}/S}, \quad (2)$$

$$T_{BR} = \sum_i \frac{ESV_i}{ESV} \ln \frac{ESV_i/ESV}{S_i/S}, \quad (3)$$

$$T_{WR} = \sum_i \frac{ESV_i}{ESV} T_{pi} = \sum_i \frac{ESV_i}{ESV} \sum_j \frac{ESV_{ij}}{ESV_i} \ln \frac{ESV_{ij}/ESV_i}{S_{ij}/S_i}, \quad (4)$$

其中, T 表示各省间的泰尔系数, T_{BR} 表示区域间泰尔系数, T_{pi} 表示第 i 个区域内部各省间的泰尔系数, T_{WR} 为各区域内部省间泰尔系数的加权平均值, ESV_{ij} 表示第 i 个区域第 j 个省份的生态系统服务功能价值, S_{ij} 表示第 i 个区域第 j 个省份的面积。式(2), (3)和(4)表述全国各省间泰尔系数、区域间泰尔系数与各区域内部省份间泰尔系数的关系。

按照中国统计年鉴的分组方法, 将全国大陆 31 个省级行政区分为六大区域: 华北、东北、华中与华南、华东、西南、西北(表 5)。分别算出各省间总的泰尔系数与区域间的泰尔系数后, 即可得出区

表 5 中国六大区域包含的省份
Table 5 Provinces in the 6 regions of China

区域	省份
华北地区	北京、天津、河北、山西、内蒙古
东北地区	黑龙江、吉林、辽宁
华东地区	上海、江苏、浙江、山东、安徽、福建、江西
华中与华南地区	河南、湖北、湖南、广东、广西、海南
西南地区	四川、重庆、贵州、云南、西藏
西北地区	陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆

域间差异与区域内部差异对总体生态系统服务功能价值差异程度的贡献。

2 结果与分析

2.1 全国生态系统服务功能价值变化

表 6 为 2000, 2010 和 2015 年全国(不含港、澳、台)生态系统服务功能价值的统计情况。可以看出, 15 年来, 全国的生态系统服务功能价值有所增长, 从 2000 年的 159171 亿元/年增长至 2015 年的 161802 亿元/年, 增长期集中在前 10 年。因测量技术变化和填海造地等原因, 我国土地面积在过去 15 年间有所增长, 因此地均生态系统服务功能价值增幅比总量的增幅低。人均生态系统服务功能价值的增幅呈负值, 表明 15 年来中国人均生态系统服务功能价值有较大的减少。

2.2 各省地均与人均生态系统服务功能价值

2000, 2010 和 2015 年各省地均及人均生态系统服务功能价值如图 1 所示。不难看出, 除新疆维吾尔自治区以外, 我国各省的地均 ESV 均在 10000~30000 元/(年·hm²)之间。其中, 2000 年地均 ESV 最高的省份为海南省(28712 元/(年·hm²)), 2010 和 2015 年则为江西省(27482 元/(年·hm²)和 27279 元/(年·hm²))。各省的地均 ESV 差距较小, 但由于各省份面积差异较大, 其 ESV 总量呈现较大的差异。与地均 ESV 相比, 我国人均 ESV 的省间差距巨大, 从不到 1000 元/(年·人)(如上海)至近 1000000 元/(年·人)(如西藏)均有分布, 跨越将近 4 个数量级。

2.3 中国生态系统服务功能价值空间差异变化

2.3.1 空间分布变化

图 2 为中国生态系统服务功能价值空间分布, 这里采用地均 ESV 为指标, 结合图 1(a)进行分析。可以发现, 我国生态系统服务功能价值总体呈现

表 6 2000, 2010 和 2015 年全国生态系统服务功能价值
Table 6 ESV of China in 2000, 2010 and 2015

时间	ESV 总量/ (亿元·年 ⁻¹)	地均 ESV/(元· 年 ⁻¹ ·hm ⁻²)	人均 ESV/(元· 年 ⁻¹ ·人 ⁻¹)
2000 年	159171	16814	12633
2010 年	161345	16942	12096
2015 年	161802	16952	11803
前 10 年增幅/%	1.37	0.76	-4.25
后 5 年增幅/%	0.28	0.06	-2.43
总增幅/%	1.65	0.82	-6.57

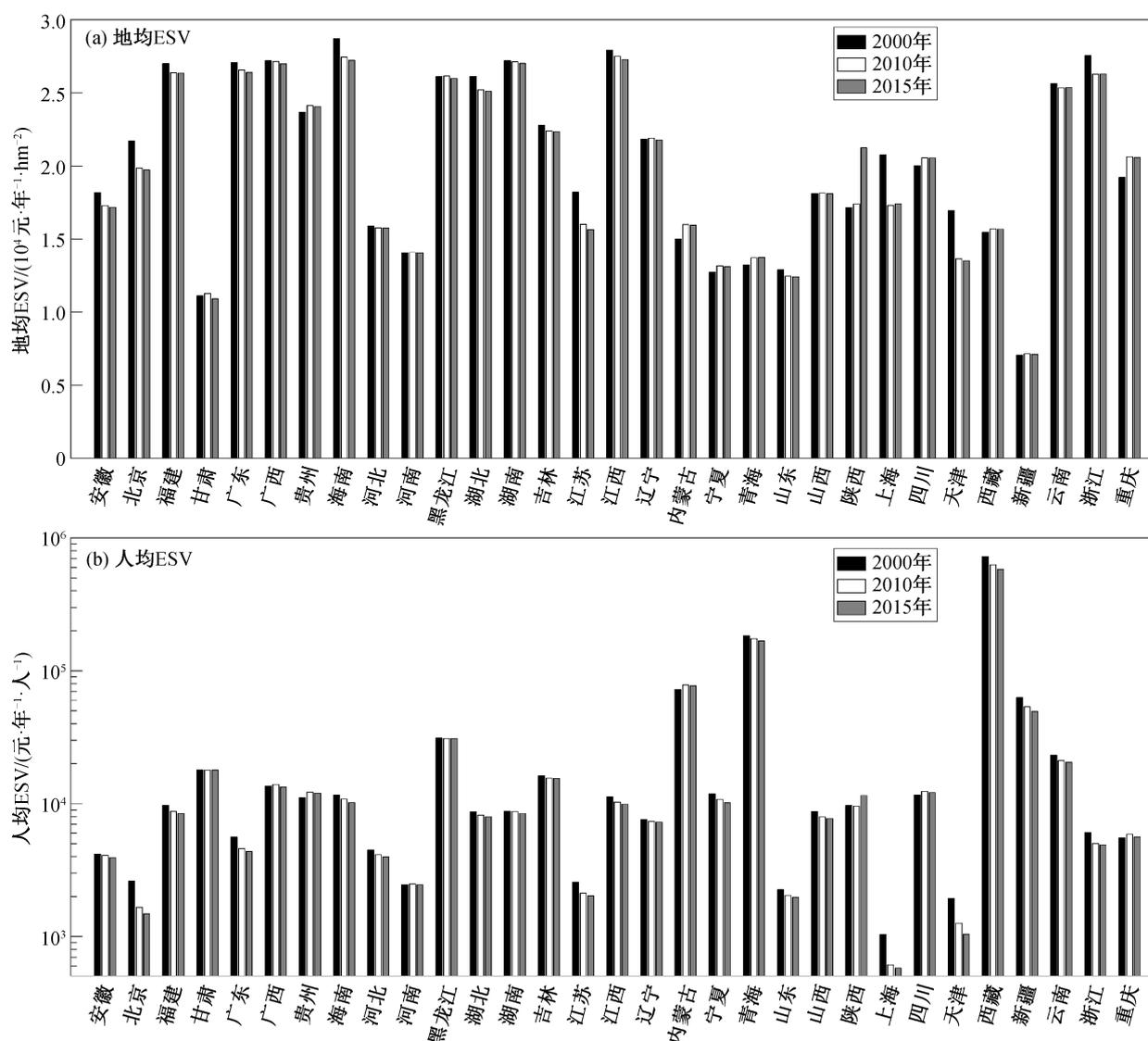


图1 中国各省区地均及人均ESV

Fig. 1 ESV of per unit area and per capita of provinces in China

“东部高、西部低”的态势。华南及东南沿海省份生态系统服务功能价值普遍较高，浙江、福建、湖南、湖北、江西、广东、广西和海南8个省份地均ESV均超过25000元/(年· hm^2)；其次为东北地区与西南地区，东三省及云南、四川、贵州地均ESV均高于20000元/(年· hm^2)。相比之下，华北地区与西北地区生态系统服务功能价值较低，其中新疆地均ESV不足10000元/(年· hm^2)。

图3直观地展现中国各省生态系统服务功能价值的变化情况。2000—2010年，各省的生态系统服务功能价值有增有减，但变化幅度不大，集中在 ± 1000 元/(年· hm^2)。增量最大的省份为重庆市，为

1430元/(年· hm^2)，减少量最大的省份为上海市，为3455元/(年· hm^2)。ESV增加的地区集中在我国西部和北部，这些地区虽然地均ESV增幅不大，但广袤的面积使其对中国ESV总量的增加做出巨大的贡献。ESV减少的地区集中在我国东部和南部，特别是经济较发达地区，其中上海、天津和江苏的地均ESV减少量位列前三。2010—2015年，除陕西、青海、云南、上海和浙江外，其他省份的地均ESV均呈小幅度下降趋势。

2.3.2 变异系数

表7列出2000, 2010和2015年全国各省地均及人均ESV变异系数。可以看出，在相同的年份下，

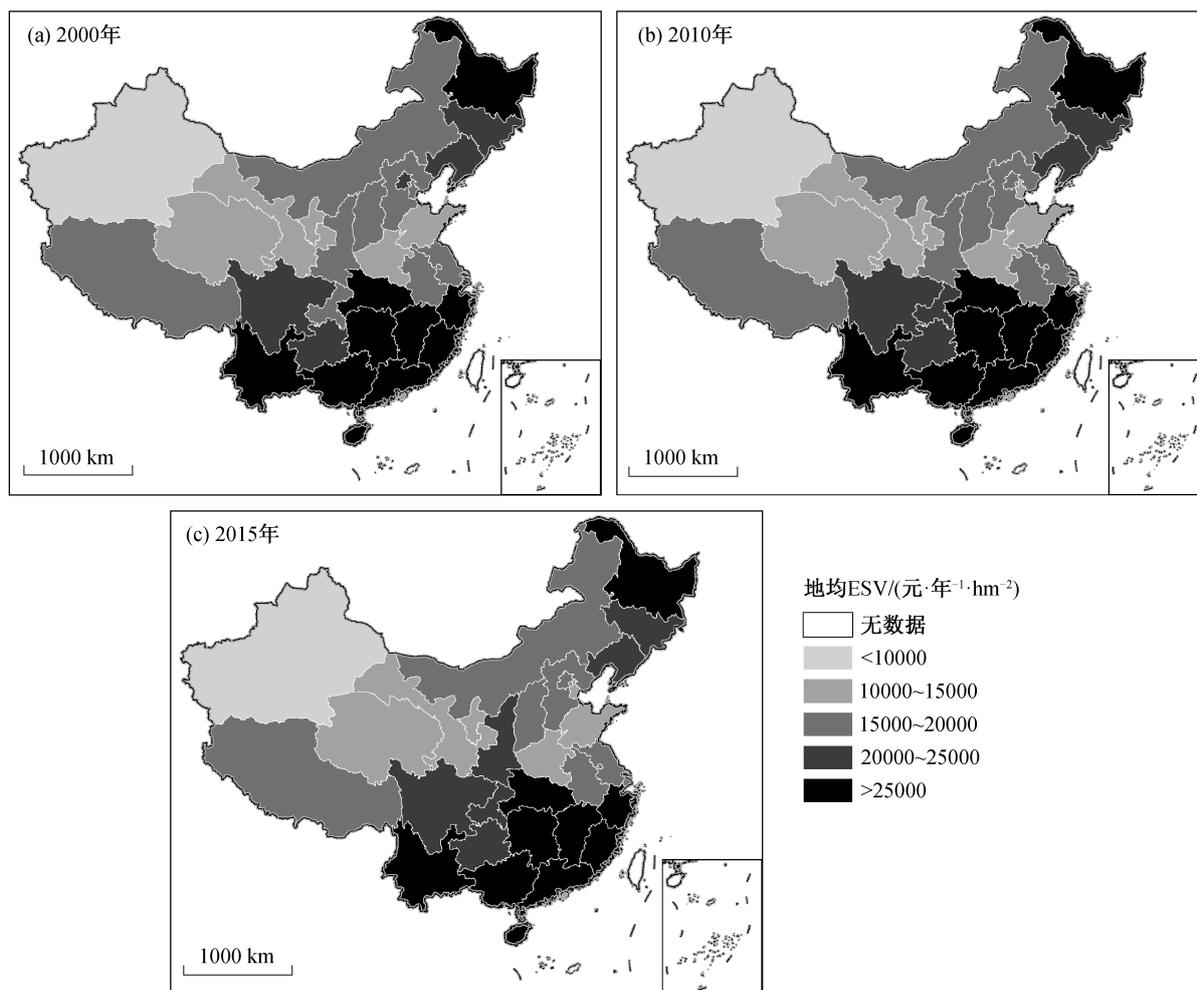


图2 中国生态系统服务功能价值空间分布
Fig. 2 Space distribution of ESV in China

人均ESV的变异系数均比地均ESV变异系数大一个数量级,这种差异是由聚居现象使得人口在空间上分布不均匀导致的。无论是地均ESV还是人均ESV,其变异系数均有随时间下降的趋势,但地均ESV的变异系数下降得非常少,可以认为基本上保持不变。通过对ESV变异系数的分析,可以确定中国人均ESV的空间差异自2000年起的15年间有下降的趋势,但地均ESV空间差异的变化不明显。

2.3.3 泰尔系数

表8为2000,2010和2015年全国各省ESV的泰尔系数。可以看出,各省ESV的泰尔系数随时间有所下降,说明中国在2000至2015年生态系统服务功能的空间差异程度变小,这与2.3.2节所得结论相符。

综合变异系数以及泰尔系数的分析结果,可以

确定,自2000年至2015年,中国ESV的空间差异程度有所下降。

2.4 讨论

2.4.1 变化原因分析

2000—2015年全国生态系统服务功能价值变化结果表明,中国的生态系统服务状况在21世纪的头10年保持稳中向好的状况,但在2010—2015年间,生态系统服务功能价值的增幅减缓。

中国各省人均ESV差异巨大,造成这种现象的主要原因是人口分布不均匀。中国东部地势平坦,适宜居住,同时经济发展加速的城市化使得人口大量地聚居,再加上北京、上海和天津等直辖市占地面积较小,这种辖区小而人口多的格局使得这些地方人均ESV偏低。反观西藏和青海等地,地广人稀,生态系统受到的扰动较少,因此这些地区虽

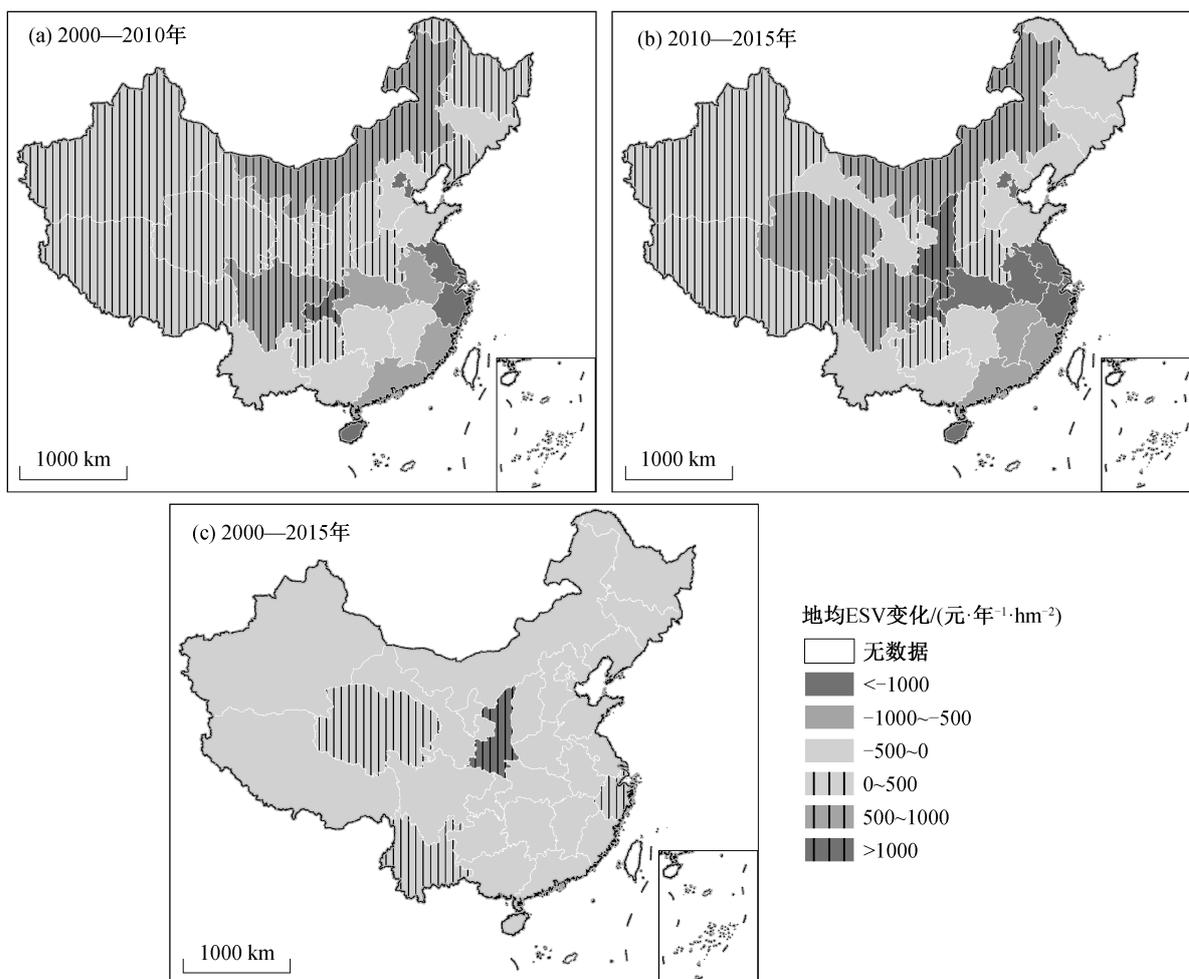


图3 中国各省生态系统服务功能价值变化情况
Fig. 3 Changes of ESV of provinces

表7 各省地均及人均ESV变异系数

Table 7 CV of ESV per unit capita and per area of provinces

年份	地均ESV	人均ESV
2000	0.2883	3.087
2010	0.2880	2.970
2015	0.2864	2.909

表8 各省ESV泰尔系数

Table 8 Theil index of ESV of provinces

年份	各省间	区域间	区域间差异贡献率/%
2000	0.0803	0.0556	69.21
2010	0.0754	0.0506	67.07
2015	0.0759	0.0480	63.21

然地均ESV较低,但人均ESV却与其他省份拉开相当的差距。总体而言,生态系统服务功能价值总量的地区间差异、省份面积的区别以及人口聚居导致的人口分布不均匀是导致中国人均ESV地区间差异巨大的主要原因。

2010—2015年,中国仅有少数省份的地均ESV有所增长,其他省份的地均ESV均呈现下降的趋势,但在全国水平上,中国仍然实现ESV的增长(总量增长0.28%,地均增长0.06%)。其原因因为地均

ESV增加的省份增幅相对较大(如陕西省的植树造林政策在这5年间成果集中体现,使其地均ESV获得高达3852元/(年·hm²)的升幅),它们抵消了ESV下降的省份造成的亏损,并导致2010—2015年间全国ESV总量的增长。纵观15年,地均ESV增加的省份数量比下降的少,但由于前者的面积和增幅较大,全国ESV在2000—2015年总体上仍呈现上升趋势。后5年的上升趋势相比前10年显著下降。

2000—2015年,中国ESV空间差异程度有所下

降,其原因有积极和消极两个方面。积极原因是生态系统服务功能价值较低的省份通过合理的开发土地和改善原有的土地利用方案,使得生态系统服务功能得到恢复或增加(如内蒙古地区);消极原因是原本生态系统服务功能价值较高的省份在15年间对土地的不合理开发,对生态系统造成负面的影响,使得生态系统服务功能价值下降(如江苏和上海)。两种因素的共同作用造成我国在2000—2015年生态系统服务功能的区域差异程度变小。

此外,对泰尔系数的分析还表明,生态系统服务功能的区域间差异在总体差异中占有较大的贡献率。这说明我国生态系统服务功能的区域差异主要由区域间的差异引起,区域内部的差异相对较小。我国六大区域都具有较为独特的地理和气候特点,在各区域内部均形成相对独特的生态系统,这一自然因素对我国生态系统服务功能差异的产生起到重要的作用。

2.4.2 同类研究的对比与展望

对生态系统服务价值评估的绝对值与所选择的方法有关,不同方法得到的结果有时甚至会相差很大。在单个生态系统的研究中,姜立鹏等^[37]利用一个基于净初级生产力和植被覆盖率的估算方法,得出2003年中国草地ESV为27153亿元(折算为2007年,下同),与本文估算的2000年草地生态系统的ESV相比,差异达60%。赵同谦等^[38]利用直接法估算得出中国2000年陆地水生态系统的ESV为20455亿元,比本研究的估算结果多出近50%。Niu等^[33]估算的2008年中国森林ESV为90917亿元,比本研究2010年的森林ESV结果(78489亿元)多14%。孙新章等^[39]对2003年中国农田生态系统ESV的评估结果为30452亿元,比本研究2000年结果多55%。任鸿昌等^[40]对中国西部地区荒漠生态系统ESV的估算结果则比本研究多出500%以上。在全国尺度的同类研究中,何浩等^[41]利用遥感技术,结合生态学方法估算2000年中国陆地ESV为191186亿元,比本研究结果多17%。造成差异的原因很多,除研究方法不同外,各文献中对生态系统服务功能的界定、对某类生态系统的鉴定方法以及生态系统内部的再细分方法均有所不同。

谢高地等^[13-15]提出的生态系统服务功能价值评价体系由于简洁方便而得到广泛使用,但该体系对土地利用类型的分类较粗略。在未来的研究中,可以考虑建立一个生态系统分类更为详细的体系。

在具体的生态系统服务功能的种类上,随着研究的日渐深入,越来越多的生态系统服务功能被发现,某些原先被认为不具有生态系统服务功能的地区,也被指出具有相当的生态系统服务功能价值。以冰川与荒漠为例,在谢高地等的体系中,这两种生态系统或土地类型被归并到一起进行赋值和研究,现在认为这种做法是不严谨的。最近有学者对这两种生态系统的服务功能价值分别进行研究,如张宏锋等^[42]应用影子工程法得出2006年新疆玛纳斯河流域冰川生态系统服务功能价值为960.1亿元,黄湘等^[43]通过研究提出荒漠生态系统服务功能价值的评价方法。此外,谢高地的评价体系没有对建设用地的生态系统服务功能进行调查和研究。建设用地有没有生态系统服务功能,其拥有的是正面的还是负面的生态系统服务功能价值,仍是一个亟待解决的问题。

尽管不同方法估算的ESV值有差异,但本文通过2000,2005和2015年3个时间段的数据研究中国ESV的空间变化及其随时间的变化,主要指标计算的是相对量,在一定程度上排除了不同估算方法对绝对值大小的影响。本研究揭示的生态系统服务功能价值的空间差异以及随时间的变化规律对区域协调发展的政策制定具有科学参考价值。

3 结论

本研究以中国各省份(不含港、澳、台)的土地利用数据为基础,使用谢高地等^[14]提出的评价方法,对中国各省份2000,2010和2015年的生态系统服务功能价值进行评估,分析其在时间及空间上的分布和变化特征,得到如下主要结论。

1) 全国生态系统服务功能价值从2000年的159171亿元/年增长至2015年的161802亿元/年,增幅为1.65%。我国生态系统服务功能在这15年间稳中略增,增幅逐渐变小。

2) 我国各省地均ESV主要分布在10000~30000元/(年·hm²)范围内,差异较小,但人均ESV差异巨大,跨越近4个数量级。生态系统服务功能本身的地区间差异、省份面积的差别以及人口聚居导致的人口分布不均匀是导致中国人均ESV地区间差异巨大的主要原因。

3) 我国生态系统服务功能价值的空间分布特征为“东部高、西部低”。华南及东南沿海省份生态系统服务功能价值普遍较高,其次为东北地区和西

南地区, 华北地区和西北地区的生态系统服务功能价值较低。对我国生态系统服务功能价值的变异系数及泰尔系数的分析表明, 人均ESV空间差异程度比地均ESV大。自2000年到2015年, 中国的生态系统服务功能的空间差异程度有所减小, 区域间差异在总体差异中一直占有较大的贡献率。

4) 自2000年至2015年, 生态系统服务功能价值增加的省份集中在我国的西部和北部, 生态系统服务功能价值减少的省份则集中在我国东部和南部经济较为发达的地区。总体而言, 生态系统服务功能价值下降的省份比上升的省份稍多。

参考文献

- [1] Groot R, Brander L, Ploeg S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50–61
- [2] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15): 253–260
- [3] Su Shiliang, Li Delong, Hu Yi'na, et al. Spatially non-stationary response of ecosystem service value changes to urbanization in Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2014, 45(5): 332–339
- [4] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 62–90
- [5] Boumans R, Costanza R, Farley J, et al. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 529–560
- [6] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, et al. InVEST 3.6.0 user's guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2019
- [7] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔卓, 等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 183–189
- [8] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2014, 34(1): 216–223
- [9] Terrado M, Acuña V, Ennaanay D, et al. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin. *Ecological Indicators*, 2014, 37(1): 199–209
- [10] Bhagabati N K, Ricketts T, Sulistyawan T B S, et al. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans. *Biological Conservation*, 2014, 169: 147–156
- [11] Lautenbach S, Kugel C, Lausch A, et al. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 676–687
- [12] Felix E, Armsworth P, Anderson B, et al. The impact of proxy-based methods on mapping the distribution of ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(2): 377–385
- [13] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189–196
- [14] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 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
- [15] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 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
- [16] 苏飞, 张平宇. 基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调发展评价——以大庆市为例. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 471–477
- [17] 杨依天, 郑度, 张雪芹, 等. 1980—2010年和田绿洲土地利用变化空间耦合及其环境效应. *地理学报*, 2013, 68(6): 813–824
- [18] 蒋晶, 田光进. 1988年至2005年北京生态服务价值对土地利用变化的响应. *资源科学*, 2010, 32(7): 1407–1416
- [19] 赖元长, 李贤伟, 冯帅, 等. 退耕还林工程对四川盆地周低山丘陵区生态系统服务价值的影响——以洪雅县为例. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 755–768
- [20] 石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 等. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. *地理学报*, 2010, 65(6): 708–714
- [21] 石惠春, 师晓娟, 刘鹿, 等. 兰州城市生态系统服务价值评估方法与结果比较. *中国人口: 资源与环境*, 2013, 23(2): 1–4
- [22] 胡海胜. 庐山自然保护区森林生态系统服务价值评估. *资源科学*, 2007, 29(5): 28–36
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 等. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(7): 1011–1020
- [26] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. *科学*

- 通报, 2000, 45(1): 17–22
- [27] 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(4): 375–384
- [28] 毕晓丽, 葛剑平. 基于IGBP土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估. 山地学报, 2004, 22(1): 48–53
- [29] 石焱, 王如松, 黄锦楼, 等. 中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析. 科学通报, 2012, 1(9): 720–731
- [30] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740–1746
- [31] Li Tianhong, Li Wenkai, Qian Zhenghan. Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1427–1435
- [32] Wu Kaiya, Ye Xinyue, Qi Zhifang, et al. Impacts of land use/land cover change and socioeconomic development on regional ecosystem services: the case of fast-growing Hangzhou metropolitan area, China. *Cities*, 2013, 31(2): 276–284
- [33] Niu Xiang, Wang Bing, Liu Chunjiang, et al. Economical assessment of forest ecosystem services in China: characteristics and implications. *Ecological Complexity*, 2012, 11(11): 1–11
- [34] Wan Lunlai, Ye Xinyue, Lee J, et al. Effects of urbanization on ecosystem service values in a mineral resource-based city. *Habitat International*, 2014, 46: 54–63
- [35] Wang Jianhua, Tian Jinghan, Li Xiaoyan, et al. Evaluation of concordance between environment and economy in Qinghai Lake Watershed, Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(5): 949–960
- [36] 代合治, 段福庆, 周琦. 基于不同空间尺度的山东省区域经济差异研究. 地理与地理信息科学, 2015, 31(2): 76–80
- [37] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究. 自然资源学报, 2007, 22(2): 161–170
- [38] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 自然资源学报, 2003, 18(4): 443–452
- [39] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(4): 55–60
- [40] 任鸿昌, 孙景梅, 祝令辉, 等. 西部地区荒漠生态系统服务功能价值评估. 林业资源管理, 2007, 1(6): 67–69
- [41] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统服务价值测量. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1122–1127
- [42] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华, 等. 新疆玛纳斯河流域冰川生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2009, 29(11): 5877–5881
- [43] 黄湘, 李卫红. 荒漠生态系统服务功能及其价值研究. 环境科学与管理, 2006, 31(7): 64–70