

DOI: 10.5846/stxb202108142245

苏宁, 丁国栋, 杜林芳, 杨光, 雷燕慧, 赵媛媛. 人类活动对资源型城市生态系统服务价值的影响——以鄂尔多斯为例. 生态学报, 2022, 42(16): 6543-6553.

Su N, Ding G D, Du L F, Yang G, Lei Y H, Zhao Y Y. Impact of human activities on ecosystem services value of resource-based city: A case study in Ordos, the Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6543-6553.

人类活动对资源型城市生态系统服务价值的影响 ——以鄂尔多斯为例

苏 宁¹, 丁国栋^{1,2}, 杜林芳³, 杨 光⁴, 雷燕慧¹, 赵媛媛^{1,2,*}

1 北京林业大学水土保持学院 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

2 北京林业大学水土保持学院 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083

3 北京节能环保中心, 北京 101160

4 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018

摘要:资源型城市通过资源开采驱动城市快速发展,同时通过生态恢复维持生态系统稳定。探究典型人类活动对资源型城市生态系统服务的消极和积极影响对于可持续城市建设具有重要意义。以鄂尔多斯市为例,基于 1990—2018 年土地利用/覆盖、NDVI 等数据,修订了生态系统服务价值计算方法,量化了区域生态系统服务价值的时空格局,进而评估了人类活动过程对生态系统服务的影响。研究表明,研究时段内鄂尔多斯市城镇建设用地、林地和草地面积总体增加,耕地及未利用土地面积减少。区域生态系统服务总价值总体呈上升趋势,从 1990 年的 2312.24 亿元上升至 2018 年的 2421.38 亿元,增加了 4.72%。2000 年以后鄂尔多斯市退耕还林、未利用地植被恢复等措施使得生态系统服务价值增加了 113.53 亿元,同期城镇建设用地扩展占用生态生产用地导致生态系统服务价值减少了 91.36 亿元,生态建设的积极影响大于城镇建设用地扩展的消极影响。

关键词:土地利用/覆盖变化;生态系统服务价值;城镇化;生态建设;鄂尔多斯市

Impact of human activities on ecosystem services value of resource-based city: A case study in Ordos, the Inner Mongolia

SU Ning¹, DING Guodong^{1,2}, DU Linfang³, YANG Guang⁴, LEI Yanhui¹, ZHAO Yuanyuan^{1,2,*}

1 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Yanchi Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Beijing Energy Conservation and Environmental Protection Center, Beijing 101160, China

4 College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

Abstract: Resource-based cities experience rapid urban development by resource mining and maintain ecosystem stability by ecological restoration. Assessing negative and positive impacts of typical human activities on ecosystem services of resource-based cities is of great significance for sustainable urban development. Taking Ordos, Inner Mongolia as an example, this study improved the calculation method of ecosystem service value (ESV) based on the land use/cover and normalized difference vegetation index (NDVI) data. Then the spatiotemporal patterns of regional ESV were quantified from 1990 to 2018. We selected the urban expansion and ecological restoration as the typical human activities. The positive and negative impacts of the human activities on the ESV were then evaluated. Results showed that the grassland and unused land

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41971130);中央高校基本科研业务费专项资金(PYX202122,PTYX202123)

收稿日期:2021-08-14; 网络出版日期:2022-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuanyuan0402@bjfu.edu.cn

covered more than 80% of the total area in Ordos City. The urban land area indicated a general increasing trend mainly by occupying cropland and grassland, with an annual increasing rate of 0.36%, 4.34% and 10.27% during 1990—2000, 2000—2010 and 2010—2018, respectively. The woodland area showed a continually growth during the three periods and the grassland area increased since 2000. Both of the increase were mainly converted from the unused land. The total ESV of Ordos City generally increased from 231.22 billion yuan in 1990 to 242.14 billion yuan in 2018 with an increase rate of 4.72%. Driven by the land use/cover changes, the spatial pattern of ESV change varied in time and space. The hotspots with significant ESV increase moved from northwest of Hangjin and Donsheng District during 1990—2000 to south of Hangjin and Yijinhuoluo during 2000—2010 and southwest of Hangjin during 2010—2018. The cold spot with significant ESV decline were mainly located in the middle of Hangjin during 1990—2000 and 2000—2010, in Dalate-Dongsheng-Yijinhuoluo belt. After the year of 2000, the returning cropland to forests and the restoration of unused land in Ordos City made an ESV increase of 11.35 billion yuan. And meantime, the occupation of ecological land and production land by urban expansion led to a decrease of 9.14 billion yuan in ESV. We conclude that the positive influences of ecological constructions were greater than the negative impacts of urban expansion. The coefficient adjustment of the ESV is beneficial to differentiate the ESV provided by grassland and forest with different coverage. We suggested to pay more attention to the protection and restoration of grasslands with mediate or low coverage in order to improve the regional ecosystem services.

Key Words: land use/cover change; ecosystem service value; urbanization; ecological construction; Ordos

资源型城市是指资源产业在工业产业中占有较大比重的城市^[1],中国共拥有 262 座资源型城市。资源型城市在人类活动强烈,城镇迅速扩展的同时,随着资源的开采和资源储量的持续减少,生态环境被破坏、生态脆弱性和敏感性不断增强,因而需要开展大量生态建设以维持区域生态系统稳定性^[2-3]。鄂尔多斯是典型的资源型城市,已探明煤炭储量占全国煤炭总储量的 1/6^[4],城镇人口比例从 2000 年初的 38.30% 增加到 2018 年的 74.49%,同期城镇建设用地面积也在持续上升^[5]。与此同时,鄂尔多斯市位于毛乌素沙地腹地,是我国荒漠化最严重的地区之一,区域生态系统脆弱,抵抗外界干预能力较差^[6-7]。在城镇建设用地扩展和区域大规模生态建设等人类活动作用下,区域生态系统的可持续性一直是学者关注的热点问题。因此,探究以鄂尔多斯市为代表的资源型城市中人类活动对生态系统的影响,对于区域的可持续管理具有重要意义。

生态系统服务是指人类从生态系统中获得的惠益,是生态系统评估的重要指标^[8]。人类可持续发展离不开生态系统服务,同时人类活动也在积极(例如,生态系统管理、生态恢复)或消极(例如,土地开垦、城市化与工业化)地影响着生态系统服务^[9]。生态系统服务价值是量化生态系统服务的最常用指标,其是生态系统对人类价值的直接表现^[8]。Costanza 等^[8]于 1997 年首次采用当量因子法将生态系统服务货币价值化,并在全球范围内对 16 个生物群落的 17 项生态系统服务的经济价值进行了评估。之后生态系统服务价值的评估方法^[10-12]及应用^[13-17]成为研究的热点,欧阳志云等^[18]采用相同的方法,评估了中国陆地生态系统服务价值;谢高地等^[19-21]不断对该方法进行修订,确定了中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量,并提出适合我国的评估方法。但在区域范围内进行价值评估时,学者们大多只基于粮食数据对价值当量进行简单修正,对于植被覆盖度的差异未予以考虑,这会使生态系统服务价值无法反映真实情况,影响评估的客观性。

因此,本研究以内蒙古鄂尔多斯市为研究区,采用 1990—2018 年土地利用/覆盖变化、归一化植被(NDVI)和社会经济统计等数据,揭示以城镇建设用地扩展和生态建设为代表的人类活动特征;提出基于植被覆盖度的生态系统服务价值当量修正方法,量化区域生态系统服务价值时空格局;进而评估城镇建设用地扩展和生态恢复双过程对生态系统服务价值的积极和消极影响,研究结果对建立生态产品价值实现机制、维持和提高区域发展可持续性及其人类福祉具有重要意义。

1 研究区概况

鄂尔多斯市(图 1)地处内蒙古自治区西南部(37°35'—40°51'N, 106°42'—111°27'E),总面积 8.67 万

km²。区域西北高、东南低,北部为黄河冲积平原区,东部为丘陵沟壑区,西部为波状高原区,中部为库布其沙漠,南部为毛乌素沙地。区域属温带大陆性气候,气候干旱,东部地区降水量平均在 300—400mm,西部地区降水量在 190—300mm,年蒸发量高达 2000—3000mm,年平均气温在 5.3—8.7℃,风速为 2.7—3.7m/s,年大风日数约 40d。该区所处位置既是半干旱向干旱过渡区、风沙高原向黄土高原过渡区,也是农牧交错区,库布其沙漠和毛乌素沙地占总面积的 49%,这导致该区受风蚀影响非常严重,加之资源开采破坏地表覆盖,使得风蚀导致的土地荒漠化加剧。土地荒漠化、沙尘暴、水土流失、草场退化、资源开发等问题让该区生态系统非常脆弱。

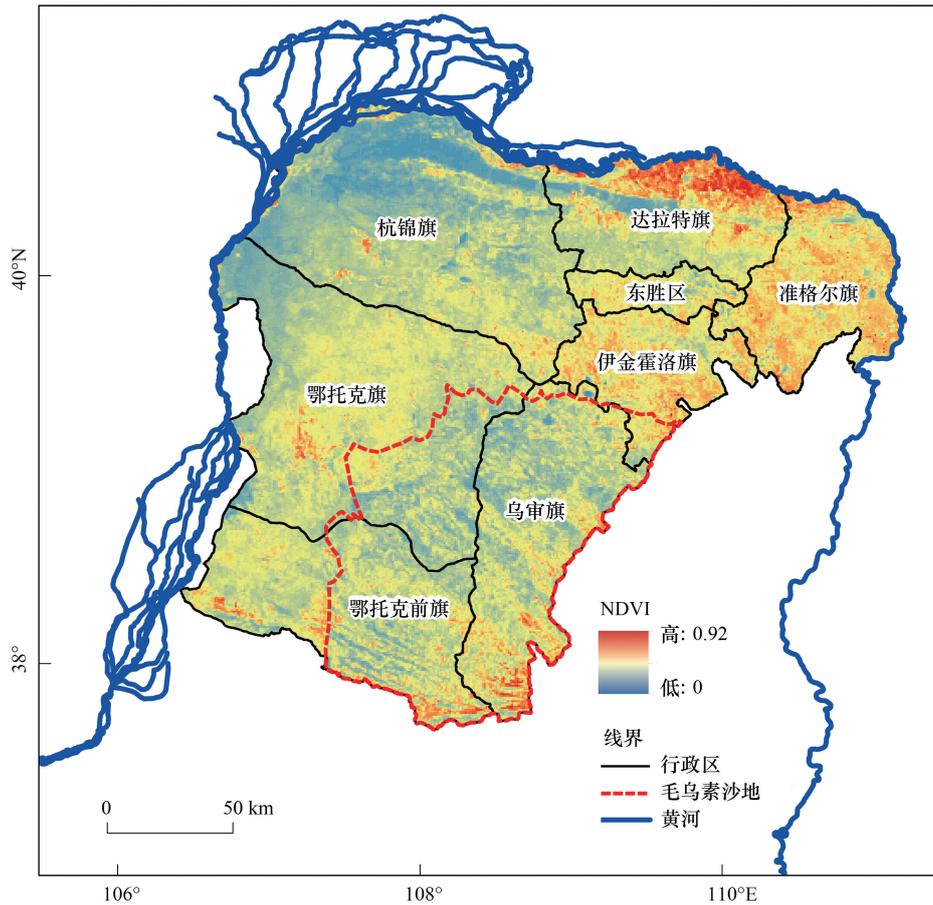


图 1 研究区

Fig.1 The study area

NDVI: 归一化植被 Normalized difference vegetation index

鄂尔多斯市 70%地表下埋藏着煤炭资源,其 80%的 GDP 来源于煤炭开采^[4],是典型的资源型城市^[22]。2018 年,鄂尔多斯市 GDP 为 3763.2 亿元,占内蒙古自治区 GDP 的五分之一;人均 GDP 为 18.19 万元,位于内蒙古自治区第一。区域进行煤炭资源开发的同时,也注重生态环境的保护。同时实施“两个双百万”、“五区”绿化、禁牧、天然林保护工程、三北防护林工程、建立生态自然恢复区等生态建设保护措施。目前,已形成了较为成熟的沙地和沙漠治理模式,荒漠化实现了由严重恶化到整体遏制的历史性转变。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究使用的 1990、2000、2010、2018 年土地利用/覆盖数据及植被 NDVI 数据均来源于中国科学院资源

环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。土地利用/覆盖数据包括 6 个一级类和 25 个二级类。为了更准确的反映草地所提供的生态系统服务价值,故在进行生态系统服务价值计算时,将草地细分为高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地三类,进行价值系数的调整。统计数据包括稻谷、小麦、玉米的播种面积、单产及单位面积净利润,数据来源为《国家统计局关于粮食产量的公告》及《全国农产品成本收益资料汇编》;鄂尔多斯市粮食产量数据来自政府网站文件《鄂尔多斯市国民经济和社会发展统计公报》;行政区划数据采用国家基础地理信息中心所提供的 1:100 万比例尺数据。

2.2 人类活动的量化

土地利用/覆盖变化是人类活动最直接的表达方式^[23]。因此,本研究通过土地利用/覆盖变化来体现人类活动的过程。同时,结合鄂尔多斯市发展特征,重点关注城镇建设用地(包括城乡、工矿和居民用地)扩展和生态建设过程。城镇建设用地扩展主要指其他地类转为城镇建设用地的过程;生态建设过程主要包括植树造林种草、封山育林、退耕还林还草、禁牧和轮牧等,土地利用/覆盖变化上主要表现为其他地类转为草地、林地等地类,以及植被覆盖度增加的过程,本文选取土地利用动态度和转移矩阵方法来分析城镇建设用地扩展和生态建设情况。

土地利用动态度计算公式为:

$$F = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中, F 为研究时段内各土地利用类型变化的动态度(%); U_2 为所计算地类在研究期末的面积, U_1 为所计算地类在研究期初的面积。 T 为研究时段的时间长度(a)。

转移矩阵可以表现土地利用/覆盖类型间相互转换的情况,本文将研究区分为林地、草地、耕地、水域、城镇建设用地、未利用土地 6 类,并对其进行转移矩阵分析。

2.3 生态系统服务价值分析

2.3.1 生态系统服务价值评估

区域生态系统服务价值计算公式为^[24]:

$$ESV = \sum_{j=1}^n (VC_j \times A_j) \quad (2)$$

$$ESV_s = VC_{js} \times A_j \quad (3)$$

式中, ESV 为研究区自然生态系统所能提供的服务价值(元); VC_j 为第 j 类土地利用类型或不同亚类草地单位面积生态服务价值系数(元/hm²); A_j 为不同土地利用/覆盖类型或不同亚类草地的面积。 ESV_s 为单项生态系统服务价值(元), VC_{js} 为单项生态系统服务价值系数(元/hm²)。

其中,在“中国生态系统单位面积生态服务价值当量表^[21]”的基础上,对单位面积生态系统服务价值系数中草地、林地的标准当量因子系数进行修正。本文依据中国科学院的分类标准将研究区草地分为低覆盖度草地(覆盖度在 5%—20%的天然草地)、中覆盖度草地(覆盖度在 20%—50%的天然草地和改良草地)和高覆盖度草地(覆盖度>50%的天然草地、改良草地和割草地);将林地分为有林地(郁闭度>30%的天然林和人工林)、灌木林(郁闭度>40%、高度在 2m 以下的矮林地和灌丛林地)、疏林地(郁闭度为 10%—30%的林地)和其他林地(未成林造林地、迹地、苗圃及各类园地),结合中国不同亚类草地、林地类型上植被平均覆盖度与草地、林地总体平均植被覆盖度的比值,来计算修正因子。计算方法如下。

$$E_{mi} = E_i \times C_i \quad (4)$$

$$C_i = N_i / \bar{N} \quad (5)$$

式中, E_{mi} 表示草地或林地生态系统第 i 个亚类的生态系统服务 n (气候调节、水源涵养、土壤形成与保护等 9 项服务功能)的单位面积价值当量因子; E_i 表示“中国生态系统单位面积生态服务价值当量表^[21]”中生态系统服务 n 的当量因子; C_i 为草地或林地第 i 个亚类的修正系数; N_i 为草地或林地亚类 i 在中国范围内的平均

植被覆盖度; \bar{N} 为中国草地或林地的平均植被覆盖度。

参考谢高地等“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^[20]”的处理方法进行 1 个标准当量因子生态系统服务价值的计算,得到当量因子 D 。通过修订公式计算鄂尔多斯市当量因子的值,修订公式为:

$$\varphi = \frac{Q}{Q_0} \quad (4)$$

式中, φ 为鄂尔多斯市修订系数, Q 为 1990—2018 年鄂尔多斯市平均粮食单产, Q_0 为 1990—2018 年全国平均粮食单产。

计算鄂尔多斯市当量因子,计算式为:

$$D_0 = \varphi \times D \quad (5)$$

式中, D_0 为鄂尔多斯市 1 个当量因子的生态系统服务价值量 (元/hm²), φ 为鄂尔多斯市修订系数, D 表示 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量 (元/hm²); 计算得到鄂尔多斯市一个当量因子的价值为 4172.76 元/hm²。

在修正的当量因子基础上,计算得到鄂尔多斯市各土地利用/覆盖类型的单位面积生态系统服务价值 (表 1)。基于此,我们计算了鄂尔多斯市 1990—2018 年生态系统服务价值的变化。

表 1 鄂尔多斯市生态系统服务价值表/(元/hm²)

Table 1 Ecosystem services value of Ordos City

生态系统服务 Ecosystem services	耕地 Arable land	草地 Grassland			林地 Forest land				水域 Water	未利用 土地 Unused land
		低覆盖 度草地 Low	中覆盖 度草地 Medium	高覆盖 度草地 High	有林地 Forested land	灌木林 Shrub forest	疏林地 Sparse forest	其他林地 Other forest		
气体调节 Gas regulation	2086	2267	3500	4149	16404	13934	13405	12700	0	0
气候调节 Climate regulation	3714	2550	3938	4668	12654	10749	10341	9797	1919	0
水源涵养 Water conservation	2504	2267	3500	4149	14998	12740	12256	11611	85041	125
土壤保持 Soil conservation	6092	5526	8532	10114	18279	15527	14937	14151	42	83
废物处理 Waste disposition	6843	3712	5732	6794	6140	5215	5017	4753	75861	42
生物多样性保护 Biodiversity protection	2963	3089	4769	5653	15279	12979	12486	11829	10390	1419
食物生产 Food production	4173	850	1313	1556	469	398	383	363	417	42
原材料生产 Raw materials	417	142	219	259	12186	10351	9958	9434	42	0
娱乐文化 Entertainment	42	113	175	207	5999	5096	4902	4644	18110	42
总和 Total	28834	20516	31679	37551	102406	86990	83687	79282	191822	1753

2.3.2 生态系统服务价值的空间分布特征

将研究区划分为 5km×5km 的网格单元,对不同网格生态系统服务价值进行分级符号化的直观展示。首先,运用空间自相关 Moran I 指数^[25]来分析生态系统服务价值的聚类情况, Moran $I > 0$ 说明数据呈现了空间正相关的表征。 Z 得分表示标准差的倍数, P 值表示概率,一般情况下 $P < 0.1$ 认为结果可靠。进一步,采用热点分析 Getis-Ord G_i^* ^[26] 描绘网格单元的 ESV 值在空间上的聚集程度,采用热点分析的方法得到热点图来直观

的反映高值(热点)和低值(冷点)的聚集情况。本研究空间分析均在 ArcGIS 10.3 平台进行。

3 结果与分析

3.1 1990—2018 年城镇建设用地扩展和生态建设过程

鄂尔多斯市草地所占面积最大,其次是未利用土地,二者总覆盖度高于 80%。草地主要分布在鄂托克旗、伊金霍洛旗和准格尔旗,未利用土地主要分布在杭锦旗、鄂托克前旗和乌审旗。1990—2018 年,鄂尔多斯市城镇建设用地面积持续扩大,且扩展速度持续增加。1990—2000 年、2000—2010 年和 2010—2018 年 3 个时段年均扩展速度分别为 0.36%、4.34% 和 10.27%。草地和耕地是城镇建设用地主要占用的类型(图 2)。从各旗县来看,1990—2000 年、2000—2010 年和 2010—2018 年城镇建设用地面积增速最快的分别是鄂托克旗(1.34%)、伊金霍洛旗(11.81%)和东胜区(39.85%)。

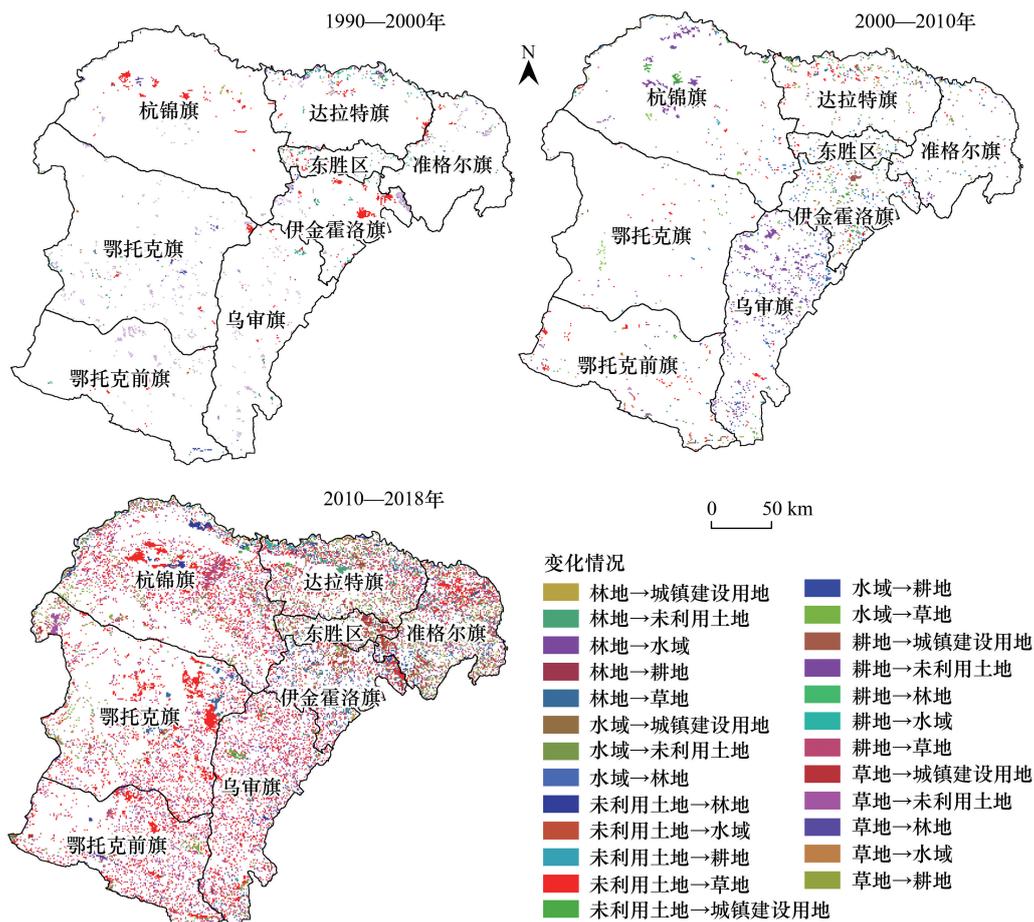


图 2 鄂尔多斯市 1990—2018 年土地利用/覆盖变化

Fig.2 Land use/cover changes in Ordos City from 1990 to 2018

同期,林地面积持续增加,草地面积在 2000 年前后表现出一定的差异。1990—2000 年,草地减少 315km²,林地增加 97km²。草地变化主要体现为高、中覆盖度草地转为低覆盖度草地,低覆盖度草地转为未利用土地,主要分布在鄂托克旗和乌审旗;林地增量主要由未利用土地转换而来,分布在杭锦旗和东胜区。2000—2010 年,草地和林地分别增加 1117km²和 74km²,增加的草地以中覆盖度草地为主,主要来自于未利用土地和耕地,分布在鄂托克前旗、达拉特旗及伊金霍洛旗等旗县;增加的林地大部分来自耕地和未利用土地,主要分布在伊金霍洛旗、东胜区及达拉特旗。2010—2018 年,草地和林地分别增加了 1658km²、58km²,增加的

草地主要来自未利用土地,在整个区域内均有分布;林地增加的面积主要来自于草地和未利用土地,主要分布在乌审旗、伊金霍洛旗、东胜区、准格尔旗及杭锦旗。

3.2 1990—2018 年生态系统服务价值变化

如表 2,鄂尔多斯市 2018 年生态系统服务价值为 2421.38 元,草地贡献了 65% 以上。1990—2018 年,区域生态系统服务价值先下降后上升,整体呈上升趋势。从 1990 年的 2312.24 亿元上升至 2018 年的 2421.38 亿元,上升了 109.14 亿元(4.72%)。各地类生态系统服务价值在不同时期也表现出一定差异,林地服务价值持续上升,29 年上升了 22.21 亿元(15.09%);未利用土地服务价值先上升后下降,总体下降了 3.47 亿元(8.15%);耕地服务价值持续下降了 6.03 亿元(4.52%);草地服务价值先下降后上升,总体上升了 66.90 亿元(4.22%)。

表 2 鄂尔多斯市各土地利用/覆盖类型生态系统服务价值(ESV)

Table 2 Ecosystem services value (ESV) of various land use/cover types in Ordos City

土地利用类型 Land use type	1990 年		2000 年		2010 年		2018 年	
	ESV/ ($\times 10^8$ 元)	占比/%						
耕地 Arable land	133.39	5.77	130.82	5.71	130.76	5.63	127.36	5.26
有林地 Forested land	73.32	3.17	78.24	3.42	91.96	3.96	96.57	3.99
灌木林 Shrub forest	41.93	1.81	44.10	1.93	44.37	1.91	39.75	1.64
疏林地 Sparse forest	28.37	1.23	28.87	1.26	26.11	1.12	31.72	1.31
其他林地 Other forest	3.49	0.15	3.88	0.17	3.49	0.15	1.27	0.05
水域 Water area	404.17	17.48	409.73	17.88	397.45	17.11	433.71	17.91
未利用地 Unused land	42.57	1.84	43.22	1.89	41.38	1.78	39.10	1.61
低覆盖度草地 Low coverage grassland	341.76	14.78	366.27	15.99	342.02	14.72	339.72	14.03
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	721.69	31.21	718.24	31.35	862.81	37.14	860.85	35.55
高覆盖度草地 High coverage grassland	521.55	22.56	467.58	20.41	382.53	16.47	451.33	18.64
合计 Total	2312.24	100.00	2290.96	100.00	2322.87	100.00	2421.38	100.00

从空间分布来看,区域生态系统服务价值低值区集中分布在库布齐沙漠和毛乌素沙地,此外区域相对较高(图 3)。东北部达拉特旗-东胜区-伊金霍洛旗-准格尔旗一带生态系统服务价值主要集中在 360—480 万元/ km^2 ,西南部鄂托克旗-鄂托克前旗一带生态系统服务价值以 240—360 万元/ km^2 为主。位于鄂尔多斯市西北和东南部的杭锦旗和乌审旗生态系统服务价值基本小于 240 万元/ km^2 。区域生态系统服务价值具有较强的空间相关性,1990、2000、2010、2018 年的 Moran I 指数分别为 0.486、0.489、0.513 和 0.469 ($Z > 2.58, P < 0.01$)。1990—2000 年,生态系统服务价值减少较为显著的区域(冷点)主要分布在乌审旗、鄂托克前旗和杭锦旗中部(图 4);生态系统服务价值显著增加的区域(热点)主要分布在杭锦旗西北部、东胜区及周边区域。2000—2010 年,生态系统服务价值减少较为显著的区域(冷点)主要分布在杭锦旗北部及乌审旗;生态系统服务价值显著增加的区域(热点)主要分布在伊金霍洛旗和杭锦旗南部。2010—2018 年,生态系统服务价值减少较为显著的区域(冷点)主要分布在达拉特旗-东胜区-伊金霍洛旗一带;生态系统服务价值显著增加的区域(热点)主要分布在杭锦旗-鄂托克旗-鄂托克前旗一带。

4 讨论

4.1 单位面积生态系统服务价值当量系数调整的必要性

生态系统服务价值的评估方法主要分为两类,一类是基于单位服务功能价格法,另一类是基于单位面积的价值当量法^[27]。价格法所需参数较多、计算相对复杂;而价值当量法更为直观,数据需求相对较小,适用于

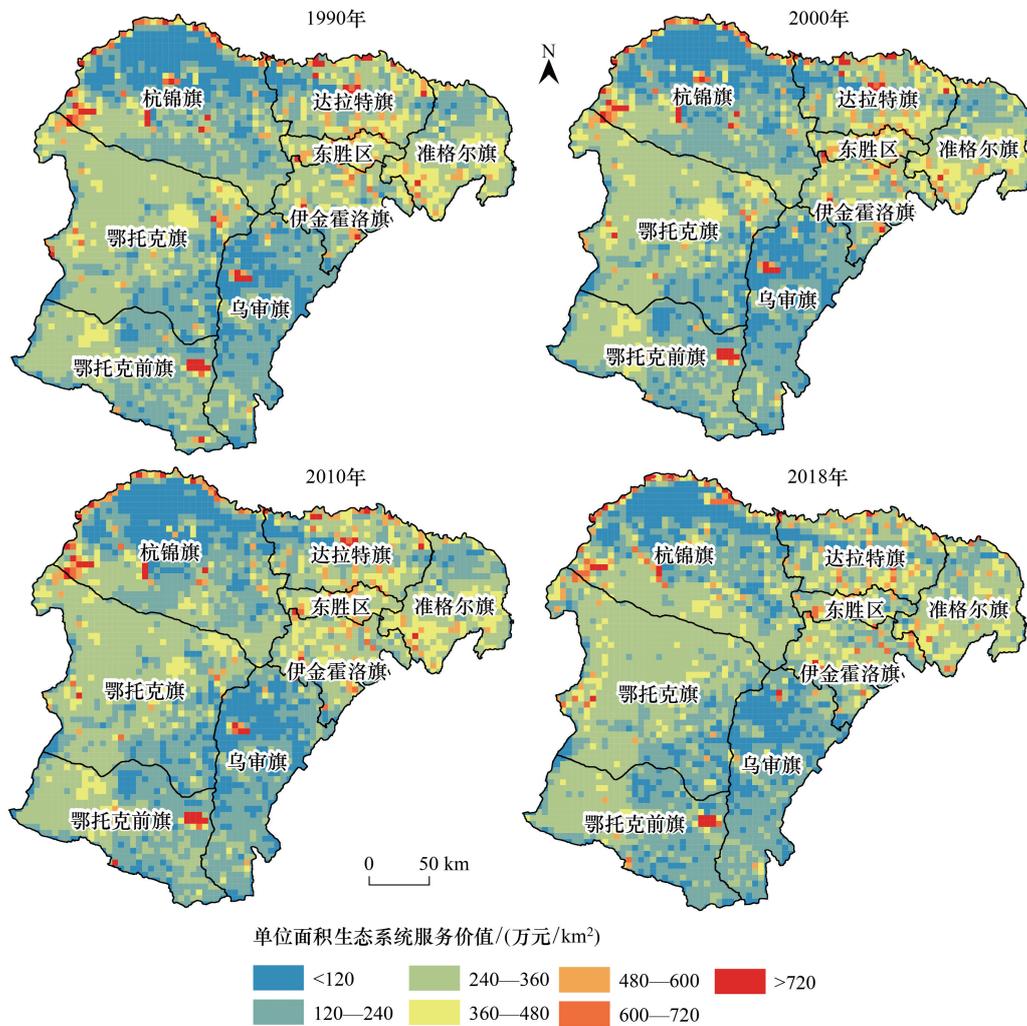


图3 鄂尔多斯市生态系统服务价值空间分布

Fig.3 The spatial distribution of ecosystem services value in Ordos City

区域及全球尺度的生态系统服务价值评估^[20]。在使用价值当量法进行价值评估的研究中^[28-30],主要基于粮食数据对1个标准当量因子的生态系统服务价值量进行本土化修正,并未考虑草地、林地植被覆盖度的渐变特征。为提高评估的准确性,本文在对1个标准当量因子的价值量进行本土化修正的同时,基于植被覆盖度对“中国生态系统单位面积生态服务价值当量表^[21]”中草地、林地的当量系数进行本土化修正。对比结果发现(表3),系数调整会明显影响鄂尔多斯市草地和林地生态系统服务价值评估结果。系数调整后,林地服务价值在1990年、2000年、2010年和2018年较调整前分别增加了4.42亿元、3.56亿元、7.64亿元和5.74亿元;草地服务价值在同期较调整前分别减少了26.08亿元、47.91亿元、46.86亿元和32.41亿元。对林、草地进一步分析发现,29年间灌木林和其他林地价值减少,有林地和疏林地价值增加;低、高覆盖度草地价值总体减少,中覆盖度草地价值增加。本研究在一定程度上提高了生态系统服务价值评估的客观性,并为草地、林地当量系数的修正提供了参考。但系数调整基于植被覆盖度的渐变特征进行,对于耕地、水域、未利用土地等植被覆盖度渐变特征不明显或无植被覆盖的土地利用/覆盖类型不适用,具有一定的局限性。

4.2 区域人类活动对资源型城市生态系统服务的影响

鄂尔多斯市属于典型的资源型城市,自2001年撤盟改市以来,经济迅速发展,大量的企业和个人向城市集中,涌入城市的人口直接推动了城镇和基础设施的建设,加之国家西部大开发战略及2014年之后国家新型

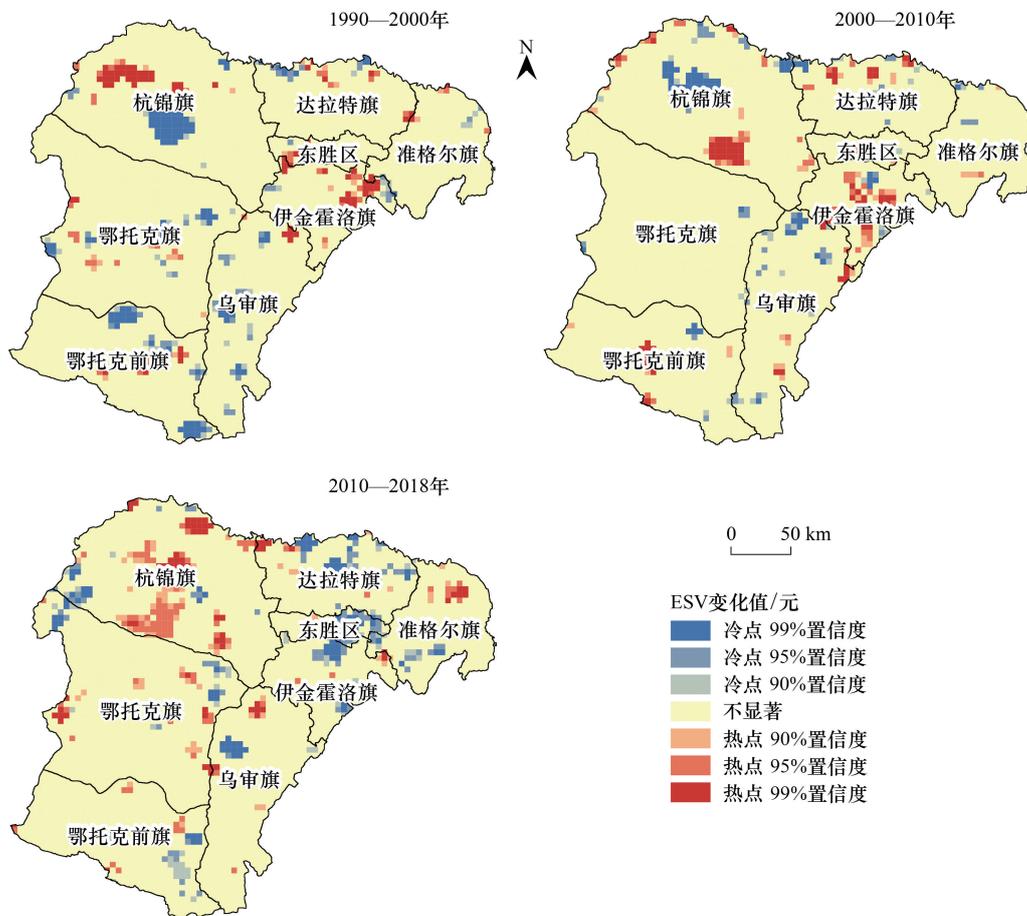


图4 鄂尔多斯市生态系统服务价值(ESV)变化量冷热点分析

Fig.4 Hotspot analysis on the change of ecosystem services (ESV) value in Ordos City

城镇规划的不断推进,鄂尔多斯市城镇建设用地面积在1990—2000年、2000—2010年、2010—2018年分别增加了28 km²、347 km²、942 km²,城镇化速度不断加快,区域资源优势得到逐步释放。但与此同时,城镇建设用地的不断增加会使自然植被遭到破坏、减少生物多样性、破坏土地结构稳定性^[31],并占用大量生态用地,导致土地沙化扩展速度加快^[32],生态系统服务水平降低。1990—2018年,鄂尔多斯市各土地利用/覆盖类型均有被城镇建设用地占用的现象,其中草地、耕地和未利用土地是被占用的主要类型。由此导致生态系统服务价值在1990—2000年、2000—2010年、2010—2018年分别丧失了1.21亿元、34.06亿元和57.30亿元(表4)。生态系统服务的丧失会对人类福祉产生消极影响,并对区域生态安全构成直接威胁^[33]。

生态恢复被认为是改善生态系统服务,应对环境退化的有效手段^[34]。为改善区域生态环境,鄂尔多斯市相继实施了天然林保护工程(2001年)、“三北”防护林体系建设第四期工程(2001年)、天然草原植被恢复和建设(2001年)、日元贷款项目(2001年)、退耕还林工程(2001年)和野生动植物保护及自然保护区建设工程(2004年)等国家重点生态建设工程。相关研究表明,生态工程的实施使区域生态系统服务得到明显改善^[34]。本文进一步研究发现,鄂尔多斯市2000年以来退耕还林还草(耕地转为林地、草地)、草原植被恢复(未利用地等其他地类转为草地)和造林工程(未利用地等其他地类转为林地)分别贡献了17.3亿元、77.86亿元和18.35亿元,生态系统服务增量约为113.53亿元(表5),大于同期城镇建设用地扩展带来的损失。

区域人类活动对生态系统服务的影响存在明显空间异质性,冷热点分布广泛。1990—2000年,生态系统服务价值区域显著变化的主要原因是草地与未利用土地之间的相互转化,如杭锦旗内的热点区即为未利用土地转化为草地(草原植被恢复)的区域,冷点区则是草地转化为未利用土地(草场退化)的区域。这与张彦儒

等^[25]对鄂尔多斯市 1988—2000 年景观结构分析中的结论相吻合。2000—2010 年,生态系统服务价值变化显著的热点区主要为耕地转化为林地(退耕还林)、耕地转化为草地(退耕还草)和未利用土地转化为草地(草原植被恢复)的区域,冷点区主要分布在杭锦旗的库布其沙漠和东部城区,主要原因是区域草地转化为未利用土地和城镇建设用地扩展占用其他地类。2010—2018 年,热点区主要为未利用土地转化为草地(草原植被恢复)的区域,冷点区则主要分布在作为市政府驻地的东胜区以及大型煤矿所在的东部区旗^[35],原因是城镇建设用地扩展占用其他地类。

表 3 鄂尔多斯市林、草地生态系统服务价值对比/($\times 10^8$ 元)

Table 3 Comparison of forest and grassland ecosystem services value in Ordos City

		1990 年	2000 年	2010 年	2018 年
系数调整前 Before coefficient adjustment	草地总价值	1611.08	1600.48	1634.22	1684.31
	林地总价值	142.69	151.53	158.28	163.57
系数调整后 After coefficient adjustment	低覆盖度草地	341.76	366.27	342.02	339.72
	中覆盖度草地	721.69	718.24	862.81	860.85
	高覆盖度草地	521.55	467.58	382.53	451.33
	草地总价值	1585.00	1552.09	1587.36	1651.90
	有林地	73.32	78.24	91.96	96.57
	灌木林	41.93	44.10	44.37	39.75
	疏林地	28.37	28.87	26.11	31.72
	其他林地	3.49	3.88	3.49	1.27
	林地总价值	147.11	155.09	165.92	169.31

表 4 城镇建设用地扩展占用其他土地导致的生态系统服务价值变化

Table 4 Changes in the ecosystem services value caused by the expansion of urban construction land and the occupation of other land

城镇扩展占用的土地类型 Types of land occupied by urban expansion	ESV 变化值 Changes of ESV/($\times 10^8$ 元)		
	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2018 年
耕地 Arable land	-0.14	-6.14	-9.16
有林地 Forested land	-0.09	-1.92	-4.68
灌木林 Shrub forest	-0.05	-1.43	-2.26
疏林地 Sparse forest	-0.04	-1.09	-1.33
其他林地 Other forest	-0.01	-0.17	-0.18
水域 Water area	-0.38	-7.92	-14.17
未利用土地 Unused land	0.00	-0.26	-0.30
低覆盖度草地 Low coverage grassland	-0.14	-4.01	-6.67
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	-0.06	-6.77	-14.31
高覆盖度草地 High coverage grassland	-0.30	-4.35	-4.25
合计 Total	-1.21	-34.06	-57.30

表 5 生态建设过程中的生态系统服务价值变化

Table 5 Changes in the ecosystem services value in the process of ecological construction

生态建设 Ecological construction	ESV 变化值 Changes of ESV/($\times 10^8$ 元)	
	2000—2010 年	2010—2018 年
退耕还林(耕地转为林地) Returning cropland to forest project	1.49	1.13
退耕还草(耕地转为草地) Returning cropland to grassland project	5.27	9.41
草原植被恢复(其他地类转为草地) Grassland vegetation restoration	30.80	47.08
造林工程(其他地类转为林地) Afforestation project	8.54	9.81
合计 Total	46.10	67.43

5 结论

本文基于土地利用/覆盖和归一化植被指数数据,分析了 1990—2018 年以城镇建设用地扩展和生态恢复为代表的人类活动,并在此基础上调整生态系统服务当量因子的价值系数,揭示同期区域生态系统服务价值

时空格局,进而评估城镇建设用地扩展和生态恢复双过程对生态系统服务价值的积极和消极影响。研究发现 1990—2018 年,区域生态系统服务总价值呈总体上升趋势,但经历了先下降后上升的过程。2000 年以后,鄂尔多斯市城镇建设快速发展的同时,生态恢复效果也十分显著。2000—2018 年,城镇建设用地通过占用生态生产用地导致生态系统服务价值损失约 91.36 亿元,但同时退耕还林和林草恢复等措施使得生态系统服务价值增加了 113.53 亿元,生态建设的积极影响大于城镇建设用地扩展的消极影响。我们建议区域今后还应注重对中低覆盖度草地的保护和恢复,促进生态系统服务的进一步提升。

参考文献 (References):

- [1] 樊杰,孙威,傅小锋.我国矿业城市持续发展的问题、成因与策略.自然资源学报,2005,20(1):68-77.
- [2] 李俊莉,曹明明.基于能值分析的资源型城市循环经济发展水平评价——以榆林市为例.干旱区地理,2013,36(3):528-535.
- [3] 贾晓晴,赵奎涛,胡克.资源型城市转型发展探讨——以盘锦市为例.城市发展研究,2011,18(1):109-113.
- [4] 董天,肖洋,张路,肖焱,郑华,欧阳志云.鄂尔多斯市生态系统格局和质量变化及驱动力.生态学报,2019,39(2):660-671.
- [5] 米媛,姜博,陈颜,崔顺利.基于 SLEUTH 模型的鄂尔多斯城市扩张模拟分析.中国农业大学学报,2019,24(2):183-190.
- [6] 蒙古军,张彦儒,周平.中国北方农牧交错带生态脆弱性评价——以鄂尔多斯市为例.中国沙漠,2010,30(4):850-856.
- [7] 孙泽祥,刘志锋,何春阳,郭建国.中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响——以呼和浩特-包头-鄂尔多斯城市群地区为例.自然资源学报,2017,32(10):1691-1704.
- [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. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [9] 郑华,欧阳志云,赵同谦,李振新,徐卫华.人类活动对生态系统服务功能的影响.自然资源学报,2003,18(1):118-126.
- [10] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2): 219-242.
- [11] Kozak J, Lant C, Shaikh S, Wang G X. The geography of ecosystem service value: the case of the Des Plaines and Cache River wetlands, Illinois. *Applied Geography*, 2011, 31(1): 303-311.
- [12] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [13] Wang S, Zhang B, Xie G D, Zhai X, Sun H L. Vegetation cover changes and sand-fixing service responses in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area. *Environmental Development*, 2020, 34: 100455.
- [14] 甘爽,肖玉,徐洁,王洋洋,余付勤,谢高地.呼伦贝尔草原草甸生态功能区建设效益评价.生态学报,2019,39(16):5874-5884.
- [15] 王洋洋,肖玉,谢高地,徐洁.基于 RWEQ 的宁夏草地防风固沙服务评估.资源科学,2019,41(5):980-991.
- [16] 徐洁,谢高地,肖玉,李娜,江源,陈文辉.国家重点生态功能区生态环境质量变化动态分析.生态学报,2019,39(9):3039-3050.
- [17] 张彪,王爽,李庆旭,谢高地.基于防风固沙服务空间流动的区域关联度——以京津风沙源治理工程区为例.资源科学,2020,42(5):969-979.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 董天,张路,肖焱,郑华,黄斌斌,欧阳志云.鄂尔多斯市生态资产和生态系统生产总值评估.生态学报,2019,39(9):3062-3074.
- [23] 刘纪远,宁佳,匡文慧,徐新良,张树文,颜长珍,李仁东,吴世新,胡云锋,杜国明,迟文峰,潘涛,宁静.2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征.地理学报,2018,73(5):789-802.
- [24] 秦艳丽,时鹏,何文虹,霍春平,李鹏,李占斌,杨殊桐,冯朝红.西安市城市化对景观格局及生态系统服务价值的影响.生态学报,2020,40(22):8239-8250.
- [25] 张彦儒,蒙古军,周婷.鄂尔多斯 1988—2000 年景观结构和功能动态分析.干旱区资源与环境,2009,23(5):49-55.
- [26] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [27] 郭椿阳,高尚,周伯燕,高建华.基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究.生态学报,2019,39(10):3482-3493.
- [28] 高星,杨刘婉青,李晨曦,宋昭颖,王杰.模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应.生态学报,2021,41(20):7974-7988.
- [29] 张杰,李清泉,吴祥茵,张晨晨,王敬哲,郭国锋.基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析.生态学报,2021,41(21):8375-8386.
- [30] 贾毅,张松林.南水北调中线工程途经区生态服务价值的时空变化.生态学报,2021,41(18):7226-7237.
- [31] 王莉雁,肖焱,江凌,饶恩明,欧阳志云,郑华.城镇化发展对呼包鄂地区生态系统服务功能的影响.生态学报,2016,36(19):6031-6039.
- [32] 刘彦随, Gao J. 陕北长城沿线地区土地退化态势分析.地理学报,2002,57(4):443-450.
- [33] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展.地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [34] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [35] 张鹏飞,潮洛濛.资源型城市城镇化水平格局及驱动因素研究——以鄂尔多斯为例.资源开发与市场,2016,32(1):31-36.