

DOI: 10.5846/stxb202108182292

邱陈澜, 王彩侠, 章瑞, 冯悦, 张云路, 李雄, 王凯平. 京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征. 生态学报, 2022, 42(23): 9590-9603.

Qiu C L, Wang C X, Zhang R, Feng Y, Zhang Y L, Li X, Wang K P. Characteristics of ecological space carbon sequestration service function and its relationship with landscape pattern in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9590-9603.

京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征

邱陈澜¹, 王彩侠^{2,3}, 章 瑞¹, 冯 悦¹, 张云路^{1,*}, 李 雄¹, 王凯平¹

1 北京林业大学园林学院, 北京 100083

2 北京东方畅想建筑设计有限公司, 北京 100083

3 中国农业大学农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083

摘要:在全球气候变暖、城市群快速发展导致景观格局破坏与生态系统服务功能受损的背景下,研究城市群生态系统服务功能与景观格局的关系具有重要的意义。基于以上背景与前人研究,选取在中国经济社会发展中最具代表性的城市群京津冀城市群,通过遥感解译、ArcGIS 10.6 制图分析及 SPSS 软件相关性分析等,从土地利用的角度研究其生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征,并提出相关探讨。结果表明:1)京津冀生态空间中耕地、林地、草地均为碳汇用地,2000—2018 年期间用地面积排序为:耕地>林地>草地,用地面积减少量排序为:林地>耕地>草地。耕地为研究区东南半部的主导类型,林地作为区域西北半部的主导类型,草地分布呈与林地相间状态。2018 年北京市内西北部大面积的林地转化为耕地。2)2000—2018 年期间生态空间三种用地的年固碳量排序为:耕地>林地>草地,用地年固碳量增长量排序为耕地>林地>草地。从平均单位固碳量来说,四个时间点均表现为:林地>耕地>草地。单位固碳量区域分布差异明显且随时间变化量大。3)不同生态空间用地的固碳量与不同景观指数的相关性结果不同。耕地年总固碳量与其各景观指数没有明显相关性;林地年总固碳量与最大斑块指数(LPI)、景观形状指数形状指数(LSI)、景观百分比(PLAND)有 0.01 级别的显著正相关性;草地年总固碳量与斑块密度(PD)、景观百分比(PLAND)有 0.05 级别的显著正相关性,与景观形状指数(LSI)有 0.01 级别的显著正相关性;生态空间总固碳量与 LSI 有 0.01 级别的显著正相关性。最后,根据研究结果提出了相关原因讨论,同时基于固碳服务功能与景观格局的关系特征,从土地利用角度提出了京津冀生态空间土地利用优化策略,最后,根据研究结果提出了相关原因讨论,同时基于固碳服务功能与景观格局的关系特征,从土地利用角度提出了京津冀生态空间土地利用优化策略,对全球变暖之下城市群生态环境可持续发展提供了方法指导和借鉴。

关键词:生态空间;土地利用;固碳服务功能;景观格局;景观指数;相关性分析

Characteristics of ecological space carbon sequestration service function and its relationship with landscape pattern in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

QIU Chenlan¹, WANG Caixia^{2,3}, ZHANG Rui¹, FENG Yue¹, ZHANG Yunlu^{1,*}, LI Xiong¹, WANG Kaiping¹

1 School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Orient Perspective Engineering Design Co.Ltd., Beijing 100083, China

3 China Agricultural University Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2021ZY33);国家自然科学基金青年科学基金项目(51908034);国家林草局重点项目(2019132703);国家林草局重点项目(2020132109)资助

收稿日期:2021-08-18; **网络出版日期:**2022-07-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyunlu1986829@163.com

Abstract: In the context of global warming and the rapid development of urban agglomerations leading to the destruction of landscape patterns and the impairment of ecosystem service functions, it is important to study the relationship between ecosystem service functions and landscape patterns in urban agglomerations. Based on the above background and previous studies, this paper selects the most representative urban cluster in China's economic and social development, the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, and studies its ecological spatial carbon sequestration service function and its relationship with the landscape pattern from the perspective of land use through remote sensing interpretation, ArcGIS 10.6 mapping analysis and SPSS software correlation analysis, and proposes relevant discussions. The results show that: 1) the cultivated land, forest land and grassland are carbon sink lands in the ecological space of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. The land area ranking during 2000—2018 was cultivated land > forest land > grassland, while the land area reduction ranking was forest land > cultivated land > grassland. (2) The annual carbon sequestration of the three types of land in ecological space during 2000—2018 was ranked as follows: arable land > forest land > grassland, and the increase in annual carbon sequestration of land was ranked as arable land > forest land > grassland. In terms of average carbon sequestration per unit, all four time points showed that forest land > cropland > grassland. (3) The correlation between the amount of carbon sequestered by different ecological sites and different landscape indices was different. There was no significant correlation between the annual total carbon sequestration of cropland and its landscape indices; the annual total carbon sequestration of forest land had a significantly positive correlation at 0.01 level with the largest patch index (LPI), landscape shape index (LSI) and percent of landscape (PLAND); the annual total carbon sequestration of grassland had a significantly positive correlation at 0.05 level with the patch density (PD) and PLAND, and a significantly positive correlation at 0.05 level with the LSI. The total annual carbon sequestration in grassland was significantly and positively correlated with patch density and percent of landscape at 0.05 level, and with LSI at 0.01 level; the total carbon sequestration in ecological space was significantly and positively correlated with LSI at 0.01 level. Finally, a discussion of the relevant causes is presented. The study also proposes a strategy for optimizing ecological land use in ecological space of the Beijing-Tianjin-Hebei from the perspective of land use based on the relationship between carbon sequestration service function and landscape pattern.

Key Words: ecological space; land use; carbon sequestration service function; landscape pattern; landscape index; correlation analysis

气候变暖是当前全球面临的重要环境问题之一,气候变化研究的一个重要任务是阐明陆地生态系统的碳汇演变、固碳能力以及未来演变趋势^[1-2]。生态系统通过捕获大气中的碳并将其固定起来抵消人类向大气中排放的一部分 CO₂,从而起到调节气候的作用^[3],城市建设用地外的植物群落,如耕地、林地、草地等,可以更高效地将空气中的 CO₂等温室气体固定在植物及土壤中^[4]。近年来众多研究表明,土地利用通过改变地表自然覆被与人类活动强度来影响陆地生态系统碳循环^[5-6],农业生产、森林草地的退化、城市建设等土地利用方式的变化引起的碳排放增加是导致气候变暖的重要因素^[7]。生态系统服务是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[8],固碳服务功能是生态系统服务功能的重要评价指标之一^[9]。因此,宜从生态空间土地利用的视角开展固碳服务功能研究^[10]。借鉴国内外学者研究,本文采用的生态空间定义及范围为:城市建设用地外的所有绿色植被覆盖的土地类型(含农地等)^[11]。景观格局及其变化是自然和人为多种因素相互作用所产生的对一定区域生态环境体系的综合反映,是土地利用与时空变化研究的重要分析手段^[12]。在城市化进程快速发展之下,城市群原有生态空间的破坏^[13]使得各类景观破碎化,影响了景观格局中的物质循环、能量流动^[14],包括固碳服务功能在内的生态系统服务功能。城市群作为主体城市化区域和核心经济发展区^[15],其健康可持续发展已成为我国经济社会可持续发展的主导力量^[16],然而持续遭到破坏^[13]的生态空间为城市群碳汇效应与碳平衡可持续发展带来挑战。因此,探索大尺度城市群生态

空间的碳汇演变,探究其固碳服务功能与景观格局的关系,是在应对气候变化背景下对城市群生态系统服务功能的研究深化,对改善区域气候、提升区域生态环境功能及实现城市群区域健康可持续发展具有重要意义。近年来学者对森林^[17-18]、草地^[19]、耕地^[20-21]等不同生态空间土地利用类型及不同区域^[22-23]的碳汇演变及固碳能力等做了相关研究,同时对于景观格局与生态系统服务^[24-27]的关系做了大量相关研究。以上研究具有相当好的基础,但是具有针对的土地类型较为单一,选取的区域尺度较小,选取的区域对象不够典型,少有结合热点探讨某一种特定生态系统服务功能与景观生态格局之间的相关性等问题。在上述分析的基础上,为响应国家碳中和政策和低碳发展的目标,应对城市群生态空间土地利用变化带来的气候环境问题,本文选取京津冀区域中人口最为稠密、土地利用方式复杂、经济社会胁迫效应显著的,以北京、天津两大超级城市为核心的城市群区域作为研究对象,从生态空间不同土地利用类型出发,对京津冀城市群固碳服务功能时空变化及其与景观格局之间的关系特征进行研究探讨。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

京津冀地区是我国的“首都经济圈”,也是我国的三大城市群之一,是中国北方地区经济发展、人口聚集的中心,在中国经济社会发展中具有重要的战略地位。本研究将北京、天津、承德、唐山、张家口、保定、沧州、廊坊 8 个城市划定为研究区域(图 1),地处东经 113°40′—119°19′,北纬 37°29′—42°37′。位于黄河下游以北,北靠燕山山脉,南朝华北平原,西倚太行山,东临渤海湾,属于典型温带季风气候,地势由西北向东南逐渐倾斜,降水量自东南向西北递减,地貌类型多样。根据 2018 年统计数据,该区域总面积 16 万平方千米,NDVI 平均值为 0.753,其中耕地面积占总用地类型的 45.87%,林地占 22.36%,草地占 16.80%,水域占 3.55%,建设用地占总 10.50%,城镇化率高达 70%,是中国北方城镇化发展最为迅速的区域,具备发展成为世界级城市群的巨大潜力。

1.2 数据来源及处理

研究数据包括基础地理信息数据、土地利用数据、遥感数据等。基础地理信息数据及行政区划来源于中国

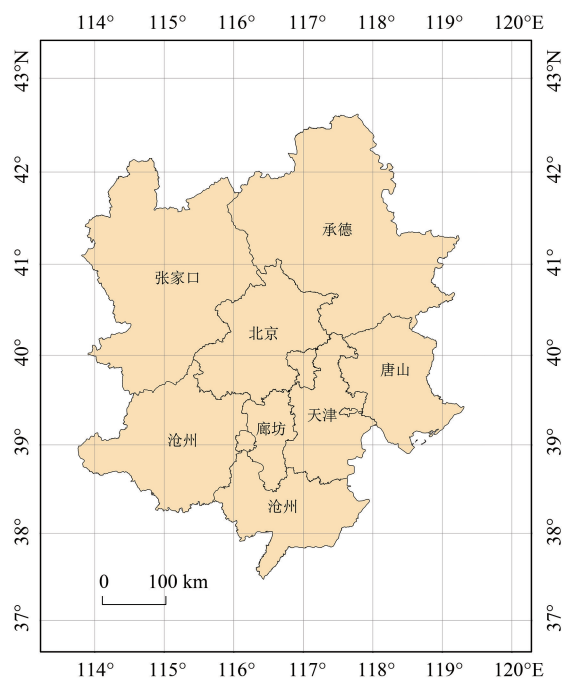


图 1 研究区域位置图

Fig.1 Location map of the study area

科学院资源环境科学数据中心;生态空间土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,分为耕地、林地、草地 3 类;遥感数据来自国家地理信息空间数据云平台。以上数据分辨率均为 1km×1km。

通过对比 1998—2018 年 NDVI 的平均值,根据突变点并结合京津冀的发展历程筛选出具有代表性的 4 个时间:2000 年、2005 年 2015 年和 2018 年,基于 ENVI 5.5 和 ArcGIS 10.6 软件对遥感影像数据进行波段合成、镶嵌、裁剪、大气校正等预处理,参考《土地利用现状分类》(GB/T21010—2007),结合研究区的实际情况及研究目的将研究区的土地利用类型划分为林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用地 6 类,根据本文所采用的生态空间定义选择耕地、林地、草地 3 种用地,利用 ENVI 软件对影像进行监督分类,建立土地利用覆盖空间数据对分类后的图像进行分类精度评估,总的精确度高于最低允许精度要求。获得不同时期景观组分分类图后,在 ArcGIS 10.6 中进行计算并制作专题图进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化计算

通过 ArcGIS 10.6 图形切割处理和面积平差计算,实现 2000、2005、2015、2018 四年分别的生态空间土地利用分类面积汇总,分别计算出当年生态空间耕地、林地、草地 3 个类型的土地面积及阶段变化量。

1.3.2 生态空间固碳量时空分布计算

植被固碳能力可以用植物所固定的总初级生产力减去植物的呼吸作用的差值来表示^[28],即植被 NPP,本研究 NPP 分布如图 2 所示,NPP 数据来源于资源环境科学与数据中心及国家地理信息空间数据云平台。本研究使用 NPP 数值通过 ArcGIS 10.6 栅格计算方法来估算京津冀城市群单位面积(以 1km×1km 为单位)固碳量分布及京津冀城市群生态空间不同用地平均单位面积固碳量及年总固碳量。

文本采用的区域生态空间固碳量计算公式如下^[29]:

$$G_v = 1.63R_c \times A \times NPP$$

式中, G_v 为植被年固碳量(kg), R_c 为 CO₂中碳的含量(kg),取值 27.27%, A 为生态空间面积(hm²)。

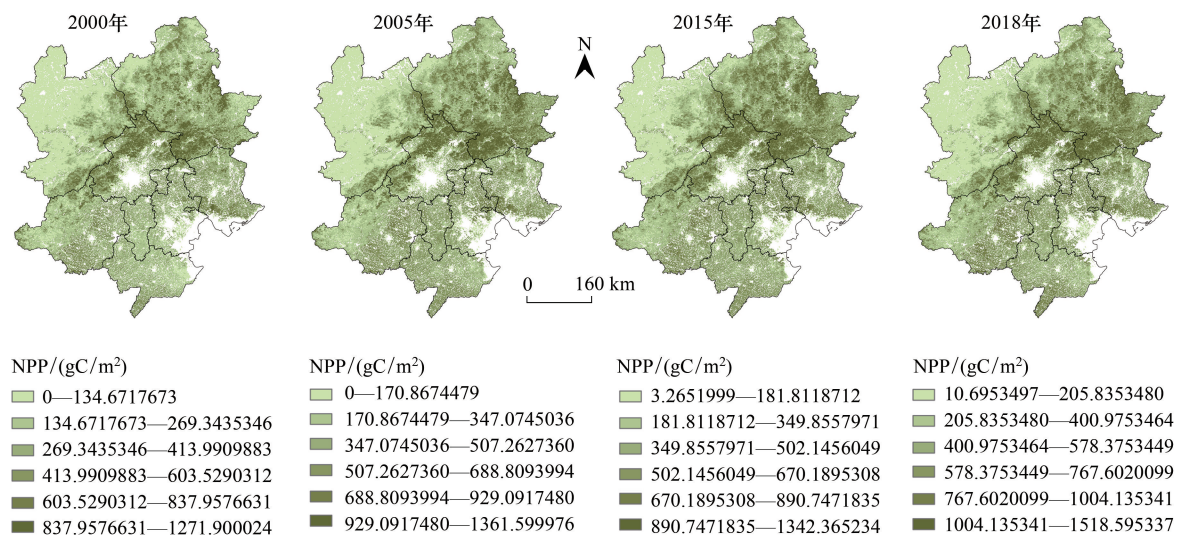


图2 2000、2005、2015、2018年分别的净初级生产力(NPP)分布图

Fig.2 Net primary productivity (NPP) distribution for the four years 2000, 2005, 2015 and 2018

1.3.3 景观指数选取计算

景观指数是高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置等方面特征的简单定量指标^[30],不同类型的景观指数反映了景观格局在不同水平的演变以及景观结构的变化^[31],在众多景观格局的分析方法中,景观指数的应用最为广泛。本文根据研究区的景观格局特点,为从景观结构、景观多样性、空间异质性、景观破碎度和人类活动影响程度等多方面研究区域景观格局特征,分别选取了包含斑块水平、类型水平、景观水平 3 种尺度的 7 种景观指数,分别为斑块密度 PD、最大斑块指数 LPI、斑块形状指数 LSI、景观百分比 PLAND、Shannon 多样性指数 SHDI、Shannon 均匀度指数 SHEI、景观聚集度 CONTAG,通过 Fragstats 4.2 软件对各景观指数进行计算。各指标计算方法及生态学意义见表 1^[30]。

1.3.4 固碳量与景观指数相关性检验

选用 2018 年 8 个城市 3 种类型用地的固碳量与其相对应的几种景观指数,通过 SPSS 26 软件中的 pearson 相关系数、双尾 T 检验进行相关系数的显著性检验,得到相应固碳量与景观指数之间的相关关系,以此反映京津冀城市群不同类型用地景观格局和其固碳服务功能的相关关系。

2 结果与分析

2.1 2000—2018 年京津冀城市群生态空间土地利用变化分析

由京津冀城市群生态空间土地覆被解译分类表(表 2)和京津冀生态空间土地覆被分布图(图 3)可知京津冀生态空间用地类型在 2000—2018 年间的分布与面积变化情况。在 2000 年、2005 年、2015 年、2018 年四年,3 种用地的面积大小排序均为耕地>林地>草地,耕地为优势景观类型。耕地面积在 2000—2005 年、2005—2015 年两个阶段减少,增幅分别为-1.06%及-1.05%,在 2015—2018 年间增加,幅度为 0.48%,

表 1 景观指数说明表
Table 1 Illustrative table of landscape indices

景观指数 Landscape index	数学模型 Mathematical models	含义 Meaning	生态意义 Ecological significance
斑块密度 Patch Density(PD)	$PD = \frac{N}{B}$	N 表示景观中某类斑块的数 量, B 表示某类斑块的面积,公 式表示每平方千米的斑块数。 取值范围: $PD > 0$	反映景观空间异质性程度以及景观斑块的破碎 化程度。
最大斑块指数 Largest Patch Index (LPI)	$LPI = \frac{\max a_i}{A} \times 100\%$	$\max a_i$ 为景观类型 i 中面积最 大的斑块, A 为景观总面积。 取值范围: $0 < LPI \leq 100$	反映景观中的优势种、内部种的丰富度等生态 特征。
斑块形状指数 LSI Landscape Shape Index (LSI)	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	E 为景观总所有斑块边界的总 长度; A 为景观总面积。取值 范围: $LSI \geq 1$	当景观中只有一个正方形斑块时, $LSI = 1$;当景 观中斑块形状不规则或偏离正方形时, LSI 增大。
景观百分比 Percentage of Landscape (PLAND)	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A}$	n 表示景观类型 i 的斑块个数, a_{ij} 为景观类型 i 的第 j 个斑块 的面积, A 为景观总面积。取 值范围: $0 \leq PLAND \leq 100$	表示某一景观类型占总景观面积的百分比,是 帮助确定景观中优势景观元素的依据之一。
Shannon 多样性指数 Shannon's Diversity Index (SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)$	P_i 为景观类型 i 所占面积的比 例, m 为景观类型的数目。取 值范围: $SHDI \geq 0$	当景观中只有一种斑块类型时, $SHDI = 0$;当斑 块类型增加或各类型斑块所占面积比例趋于相 近时, $SHDI$ 值相应增加。反映景观在结构、功 能上的多样性,用以揭示景观的复杂程度,反映 景观异质性,对斑块类型非均衡分布的情况比较 敏感。
Shannon 均匀度指数 Shannon's Evenness Index(SHEI)	$SHEI = \frac{- \sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)}{\ln m}$	公式分子 $- \sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)$ 是 Shannon 多样性指数。当结果值趋近 1 时,景观斑块分布的均匀程度 趋近最大。取值范围: $0 \leq SHEI \leq 1$	当 $SHEI$ 趋于 1 时,景观斑块分布的均匀程度亦 趋于最大。比较不同景观格局多样性均衡水平 的重要指标。
景观蔓延度 Contagion Index (CONTAG)	$CONTAG = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \left[\ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \quad (100)$	p_i 为类型斑块所占的面积百分 比; g_{ik} 为 i 类型斑块和 k 类型 斑块毗邻的数目; m 景观中的 斑块类型总数目。取值范围: $0 < CONTAG \leq 100$	表征景观不同斑块类型的团聚程度或延展趋 势,包括空间信息。 $CONTAG$ 较大,表明景观中 的优势斑块类型形成了良好的连接;反之,则表 明景观是具有多种要素的散布格局,景观的破 碎化程度较高。

到 2018 年总面积减少了 2094.837km²,总增幅为-1.65%。林地面积在 3 个阶段均表现为减少,在 2000—2005 年间、2005—2015 年间增幅均-0.08%,在 2015—2018 年间减量增幅剧增,达到 10.44%,到 2018 年总面积减少了 7300.558km²,总增幅为-10.44%。草地面积在 3 个阶段同样均减少且减量微小,增幅分别为-0.44%、-0.26%、-2.37%,到 2018 年时总面积减少了 508.119km²,总增幅为-0.46%。2000—2018 年间 3 种用地面积总减少量排序为林地>耕地>草地,总增幅量排序同为林地>耕地>草地。总生态空间用地面积在 3 个阶段均表现为减少,总减量达 9903.515km²,增幅为-0.46%。

表 2 2000、2005、2015、2018 年的生态空间土地覆被解译分类表

Table 2 Classification results of ecological spatial land cover interpretation for the four years 2000, 2005, 2015 and 2018

年份 Year	指标 Index	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	总生态空间用地 Total eco-spatial land
2000	面积/km ²	126967.8089	69895.8216	47320.2356	244183.8661
2005	面积/km ²	125612.1817	69833.5733	47112.7094	242558.4644
	增长/km ²	-1355.6272	-62.2483	-207.5262	-1625.4017
	增幅/%	-1.07	-0.09	-0.44	-0.67
2015	面积/km ²	124282.3211	69777.4637	46990.6150	241050.3998
	增长/km ²	-1329.8606	-56.1096	-122.0944	-1508.0646
	增幅/%	-1.06	-0.08	-0.26	-0.62
2018	面积/km ²	124872.9719	62595.2634	46812.1160	234280.3513
	增长/km ²	590.6508	-7182.2003	-178.499	-6770.0485
	增幅/%	0.48	-10.29	-0.38	-2.81
2000—2018	总增长/km ²	-2094.837	-7300.5582	-508.1196	-9903.5148
	总增幅/km ²	-1.65	-10.45	-1.07	-4.06

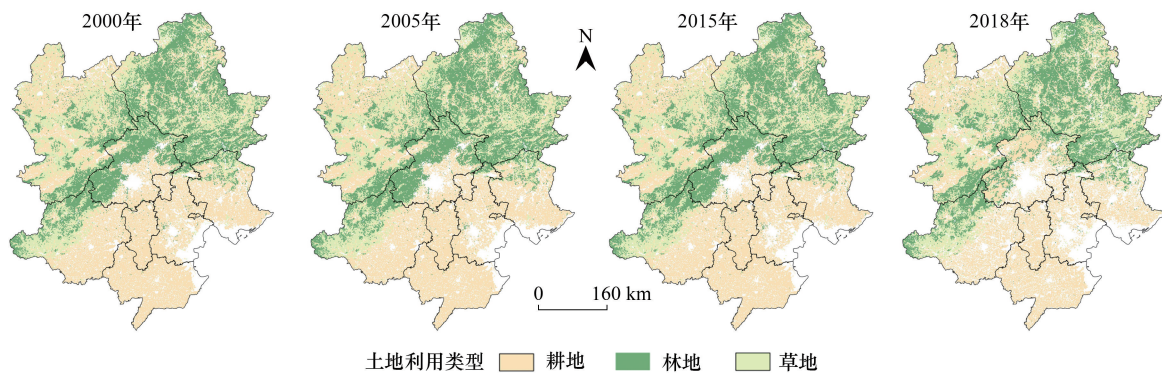


图 3 2000、2005、2015、2018 年分别的生态空间土地覆被分布图

Fig.3 Ecological spatial land cover distribution for the four years 2000, 2005, 2015 and 2018

从京津冀城市群生态空间土地利用类型分布来看,耕地作为区域东南半部的主导类型,林地作为区域西北半部的主导类型,草地的分布则多与林地相间。耕地其主要分布于研究区西北部的张家口境内、区域中部及东南部包括北京市区周边、唐山、天津、廊坊、沧州及保定。林地和草地的分布紧密程度较高,主要分布于研究区东北至西南上部包括承德大部及北京西北部、保定东北部及张家口东部。从时间变化来看,2000 年、2005 年、2015 年 3 个时间点耕地、林地、草地的地域分布情况基本不变,2018 年北京市内西北部大面积的林地转化为耕地。

2.2 2000—2018 年京津冀城市群生态空间固碳分布与演变分析

由 2000 年、2005 年、2015 年、2018 年 4 年生态空间各类型用地总固碳量表(表 3)可知京津冀生态空间 3 种用地年固碳量在 2000—2018 年间的增长量与增长比例的情况。在 2000 年、2005 年、2015 年、2018 年 4 年,3 种用地的年固碳量大小排序均为耕地>林地>草地。耕地年固碳量在 2000—2005、2005—2015、2015—2018 年 3 个阶段均表现为增加,2000—2005 年间增幅最大,达到了 38.45%,后两个时期的增幅分别为 3.07%、11.28%,2000—2018 年期间总增幅为 58.80%。林地年总固碳量在 2000—2005 年、2015—2018 年两个阶段表现为增加,增幅分别为 24.42%、6.70%,在 2005—2015 阶段表现为减少,增幅为-8.42%,2000—2018 年期间总增幅为 21.90%。草地年固碳量在 2000—2005 年、2005—2015 年、2015—2018 年 3 个阶段均表现为增加,增幅分别为 35.63%、5.64%、8.20%,2000—2018 年期间总增幅达到 55.03%。2000—2018 年间 3 种用地年固碳量总增长排序为耕地>林地>草地,总增幅量排序为耕地>草地>林地。生态空间年总固碳量在 2000—2005 与 2015—2018 年两个阶段表现为增加,且在 2000—2005 期间增幅较大,增幅分别为 32.21%与 9.22%。生态空间年总固碳量在 2005—2015 间表现为减少,增幅为-1.01%。2000—2018 年间表现为增加,总增幅为 42.95%。

表 3 2000、2005、2015、2018 年生态空间各类型用地总固碳量表

Table 3 Table of total carbon sequestration by type of land in ecological space for four years 2000, 2005, 2015 and 2018

年份 Year	指标 Index	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	生态空间 Total ecological space
2000	固碳量/kg	2034264004330	1941288682515	713424002200	4688976689045
2005	固碳量/kg	2816465606564	2415420885323	967607362176	6199493854063
	增长/kg	782201602234	474132202808	254183359976	1510517165018
	增幅/%	38.45	24.42	35.63	32.21
2015	固碳量/kg	2903000280576	2211885275535	1022200875600	6137086431711
	增长/kg	86534674012	-203535609788	54593513424	-62407422352
	增幅/%	3.07	-8.42	5.64	-1.01
2018	固碳量/kg	3230371708608	2366523281070	1106040605856	6702935595534
	增长/kg	32737142832	154638005535	83839730256	565849163823
	增幅/%	11.28	6.70	8.20	9.22
2000—2018	总增长/kg	1196107704287	425234598555	392616603656	2013958906489
	总增幅/%	58.80	21.90	55.03	42.95

由 2000 年、2005 年、2015 年、2018 年 4 年生态空间用地平均单位固碳量表(表 4)及 4 年的耕地单位面积固碳量分布图(图 4)可知 2000—2018 年间研究区耕地平均单位固碳量、不同地区耕地的单位面积固碳量差异及变化情况。单位面积固碳量反应的特定位置固碳能力的强弱,从区域分布来看,4 个时间点的单位面积固碳量区域差异较为显著,总体上均呈由西北部至东南部递增的趋势,在东南部区域又以唐山中大部,保定东南部及天津西北部数值最高。从时间变化来看,2018 年北京西北部数值显著增大。从研究区平均单位固碳量与最高单位固碳量的数值关系来看,四年研究区耕地的平均单位固碳量分别为 16021990.406、22421947.245、23247808.804、25869464.899kg/km²,而四年研究区内耕地的最大单位固碳量分别为 75914728、82781000、77993328、90501928kg/km²。耕地平均单位固碳量与最大单位固碳量的数差异较大,反应出耕地单位固碳值普遍较低。同时,虽然研究区耕地平均单位固碳量与最大单位固碳量均逐个时期递增,但最大单位固碳量的增加幅度远大于与平均单位固碳量,导致平均值与最大值差距逐渐增大。

表 4 2000、2005、2015、2018 年生态空间各类型用地平均单位固碳量表/(kg/km²)

Table 4 Table of average carbon sequestration per unit by type of land in ecological space for four years 2000, 2005, 2015 and 2018

年份 Year	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	生态空间 Total ecological space
2000	16021990.406	27774357.419	15076585.653	19351989.365
2005	22421947.245	34588531.660	20538448.872	25689837.068
2015	23247808.804	35336453.285	21836300.932	26606650.853
2018	25869464.899	37806906.322	23627288.110	29097177.530

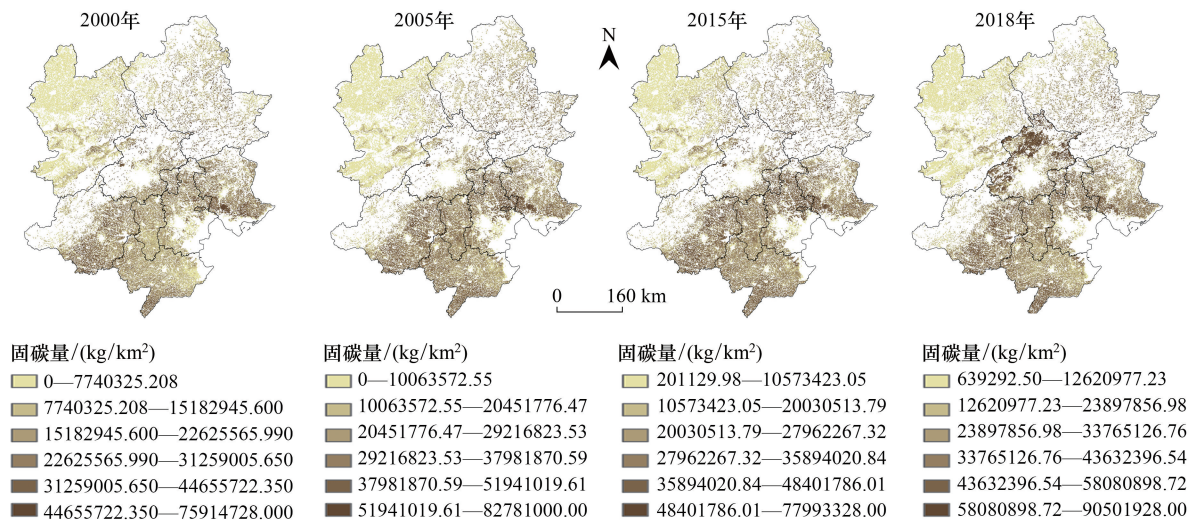


图 4 2000、2005、2015、2018 年分别的耕地单位面积固碳量分布图

Fig.4 Distribution of carbon sequestered per unit area of cropland for each of the four years 2000, 2005, 2015 and 2018

由 2000 年、2005 年、2015 年、2018 年 4 年生态空间用地平均单位固碳量表(表 4)及 4 年的林地单位面积固碳量分布图(图 5)可知 2000—2018 年间研究区林地平均单位固碳量、不同地区林地的单位面积固碳量差异及变化情况。从区域分布来看,4 个时间点的林地单位固碳量均呈总体上由分布区中部向四周扩散的趋势,北京市内林地单位面积固碳量值处于较高水平,承德及保定次之,承德市内东南部的数值水平接近于北京数值,往西北部则逐渐递减。从各时间变化来看,2018 年北京西北部固碳数值明显减小。从研究区平均单位固碳量与最高单位固碳量的数值关系来看,四年研究区林地的平均单位固碳量分别为 27774357.419、34588531.660、35336453.285、37806906.322kg/km²,而 4 年研究区内林地的最大单位固碳量分别为 75352352、84405128、82687096、90595952kg/km²。同耕地,林地平均单位固碳量与最大单位固碳量的数值差异大,反应出林地单位固碳值普遍较低。研究区林地平均单位固碳量与最大单位固碳量均逐个时期递增,但平均值与最大值差距无明显增大。

由 2000 年、2005 年、2015 年、2018 年 4 年生态空间用地平均单位固碳量表(表 4)及 4 年的草地单位面积固碳量分布图(图 6)可知 2000—2018 年间研究区草地平均单位固碳量、不同地区草地的单位面积固碳量差异及变化情况。从区域分布来看,4 个时间点的草地单位固碳量总体上均呈由东北及西南部向中部递减的趋势,承德大部与保定西部区域数值较高,张家口区域数值较低。从时间变化来看,2000—2018 年期间变化呈现出高数值向承德东部移动的趋势。从研究区平均单位固碳量与最高单位固碳量的数值关系来看,4 年研究区草地的平均单位固碳量分别为 15076585.653、20538448.872、21836300.932、23627288.110kg/km²,而四年研究区内草地的最大单位固碳量分别为 78310456、81950336、79896704、90595952kg/km²。同耕地与林地,草地平均单位固碳量与最大单位固碳量的数差异较大,反应出草地单位固碳值普遍较低。在时间变化上,研究区林地平均单位固碳

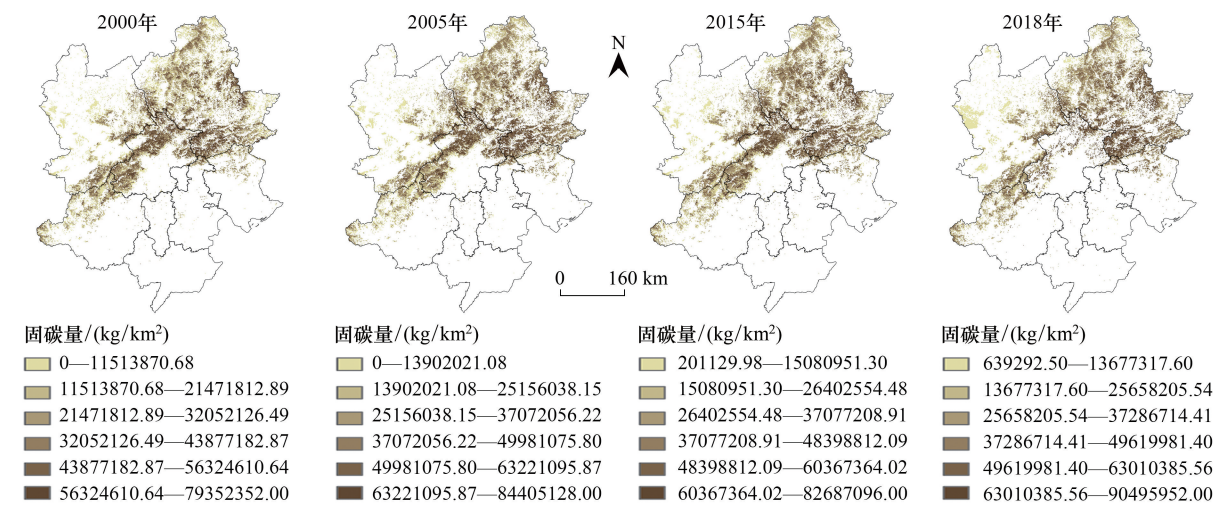


图 5 2000、2005、2015、2018 年分别的林地单位面积固碳量分布图

Fig.5 Distribution of carbon sequestered per unit area of forest land for four years 2000, 2005, 2015 and 2018 respectively

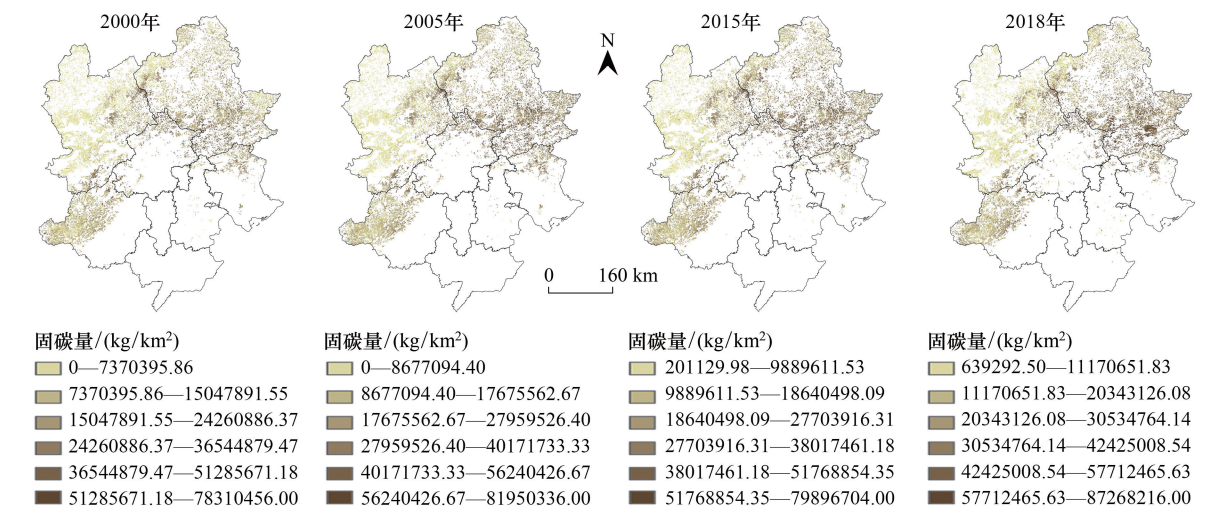


图 6 2000、2005、2015、2018 年分别的草地单位面积固碳量分布图

Fig.6 Distribution of carbon sequestration per unit area of grassland for each of the four years 2000, 2005, 2015 and 2018

量逐个时期递增,但最大单位固碳量在 2000 年、2005 年与 2015 年变化不大,在 2018 年数值增大明显,同时平均值与最大值差距也在 2018 年显著增大。

2.3 2018 京津冀城市群生态空间不同土地利用类型固碳服务功能与景观指数关系分析

使用 2018 年研究区 8 个城市生态空间三类用地的相关数据,通过 SPSS 26 软件中的 pearson 相关系数、双尾 T 检验对各城市生态空间相应景观指数表(表 5)及各城市不同类型生态空间用地年总固碳量(表 6)进行相关系数的显著性检验,不同类型的景观格局指数与不同类型用地的年总固碳量的相关性结果如上表(表 7、8、9、10)所示:耕地年总固碳量与其对应的各景观指数没有明显相关性;林地年总固碳量与最大斑块指数(LPI)、斑块形状指数(LSI)、景观百分比(PLAND)有 0.01 级别的显著正相关性,相关性指数分别为 0.969、0.858、0.915,表明林地固碳量越大时,其斑块形状复杂程度及斑块分离程度越大,内部的优势景观斑块占比增大,优势景观越突出;草地年总固碳量与斑块密度(PD)、景观百分比(PLAND)有 0.05 级别的显著正相关性,相关性指数分别为 0.756、0.790,与斑块形状指数(LSI)有 0.01 级别的显著正相关性,相关性指数为 0.907,

说明草地的年总固碳量越大时,内部斑块的破碎化程度越大,优势景观越突出,斑块形状越不规则。生态空间总固碳量与其斑块形状指数(LSI)有 0.01 级别的显著正相关性,相关性指数为 0.879,说明生态空间年总固碳量越大,斑块形状复杂程度越大,斑块分离程度越大。

表 5 2018 年京津冀 8 个城市不同类型用地景观指数表

Table 5 2018 Beijing-Tianjin-Hebei Landscape Index Tables for Different Types of Sites in Eight Cities

景观指数 Landscape index	城市 City	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	总生态空间用地 Total eco-spatial land
斑块密度 Patch Density (PD)	北京	0.0210	0.0294	0.0254	0.0758
	天津	0.0213	0.0157	0.0132	0.0502
	承德	0.0391	0.0137	0.0351	0.0880
	张家口	0.0159	0.0182	0.0279	0.0620
	保定	0.0202	0.0119	0.0125	0.0446
	沧州	0.0014	0.0025	0.0020	0.0059
	廊坊	0.0058	0.0070	0.0023	0.0151
	唐山	0.0208	0.0178	0.0203	0.0589
最大斑块指数 Largest Patch Index (LPI)	北京	46.4144	5.5177	0.9727	46.4144
	天津	76.4796	5.5162	0.2490	76.4796
	承德	1.1435	38.9225	4.5385	38.9225
	张家口	23.1858	5.1141	4.1391	23.1858
	保定	43.5024	11.6333	20.0118	43.5024
	沧州	99.1439	0.0206	0.0309	99.1439
	廊坊	83.9136	0.0929	0.1393	83.9136
	唐山	55.7579	2.3622	1.1319	55.7579
斑块形状指数 Landscape Shape Index (LSI)	北京	31.1387	26.9333	23.1029	32.0681
	天津	26.1752	9.1220	9.8462	27.3862
	承德	55.8081	43.8358	57.0000	49.3433
	张家口	45.1944	30.6932	46.0909	43.7242
	保定	37.1622	20.7073	27.2409	37.0843
	沧州	24.1980	4.9000	4.4000	24.4569
	廊坊	18.6412	5.3846	3.2222	18.8939
	唐山	29.5355	17.1250	18.7869	31.7790
景观百分比 Percentage of Landscape (PLAND)	北京	65.5319	24.3258	10.1424	—
	天津	88.8719	7.9295	3.1986	—
	承德	19.9853	51.2226	28.7921	—
	张家口	49.0203	23.8845	27.0952	—
	保定	50.3302	22.1757	27.4941	—
	沧州	99.4946	0.2579	0.2476	—
	廊坊	98.6305	0.9053	0.4643	—
	唐山	73.0438	15.6127	11.3435	—
Shannon 均匀性指数 Shannon's Evenness Index (SHEI)	北京	—	—	—	0.7764
	天津	—	—	—	0.3786
	承德	—	—	—	0.9311
	张家口	—	—	—	0.9515
	保定	—	—	—	0.9417
	沧州	—	—	—	0.0321
	廊坊	—	—	—	0.0739
	唐山	—	—	—	0.6975
Shannon 多样性指数 Shannon's Diversity Index (SHDI)	北京	—	—	—	0.8529
	天津	—	—	—	0.4159
	承德	—	—	—	1.0230
	张家口	—	—	—	1.0453
	保定	—	—	—	1.0346
	沧州	—	—	—	0.0353
	廊坊	—	—	—	0.0811
	唐山	—	—	—	0.7663

续表

景观指数 Landscape index	城市 City	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	总生态空间用地 Total eco-spatial land
景观蔓延度指数 Contagion Index (CONTAG)	北京	—	—	—	26.9141
	天津	—	—	—	69.9509
	承德	—	—	—	11.2072
	张家口	—	—	—	14.5640
	保定	—	—	—	22.3168
	沧州	—	—	—	97.3480
	廊坊	—	—	—	93.7383
	唐山	—	—	—	40.4127

表 6 2018 年京津冀 8 个城市不同类型用地年总固碳量表/kg

Table 6 2018 Beijing-Tianjin-Hebei Landscape Index Tables for Different Types of Sites in Eight Cities

城市 City	耕地固碳量 Farmland carbon sequestration	林地固碳量 Forestland carbon sequestration	草地固碳量 Grassland carbon sequestration	总生态空间固碳量 Total ecological space carbon sequestration
北京	542517953552.73	206762906190.60	76961667720.45	826242527463.78
天津	257717411516.51	28248376544.98	4904349286.24	290870137347.73
承德	347337229741.47	1368882456540.00	570984930674.79	2287204616956.30
张家口	290890723332.20	318731231936.62	199872037596.50	809493992865.32
保定	505295596614.44	185524751663.10	164605985718.93	855426333996.47
沧州	492166034761.37	1025519835.39	902334561.60	494093889158.36
廊坊	235713853834.54	1561917979.16	1090004214.54	238365776028.24
唐山	343022706276.33	81035629949.87	50745462583.56	474803798809.76

表 7 2018 年不同景观格局指数与耕地固碳功能的对应相关性

Table 7 Corresponding correlations between different landscape pattern indices and carbon sequestration function of cropland in 2018

	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	斑块形状指数 LSI	景观百分比 PLAND
耕地年总固碳量 Total annual carbon sequestration on farmland	-0.036	-0.006	0.044	-0.128

* * 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著

表 8 2018 年不同景观格局指数与林地固碳功能的对应相关性

Table 8 Corresponding correlations between different landscape pattern indices and forest land carbon sequestration functions in 2018

	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	斑块形状指数 LSI	景观百分比 PLAND
林地年总固碳量 Total annual carbon sequestration on forestland	0.113	0.969 **	0.858 **	0.915 **

* * 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著

表 9 2018 年不同景观格局指数与草地固碳功能的对应相关性

Table 9 Corresponding correlations between different landscape pattern indices and the carbon sequestration function of grasslands in 2018

	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	斑块形状指数 LSI	景观百分比 PLAND
草地年总固碳量 Total annual carbon sequestration on grassland	0.756 *	0.294	0.907 **	0.790 *

* * 在 0.01 级别(双尾),相关性显著;* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著

表 10 2018 年不同景观格局指数与生态空间固碳功能的对应相关性

Table 10 Corresponding correlations between different landscape pattern indices and the carbon sequestration function of grasslands in 2018

	斑块密度 <i>PD</i>	最大斑块指数 <i>LPI</i>	斑块形状指数 <i>LSI</i>	Shannon 均匀性指数 <i>SHEI</i>	Shannon 多样性指数 <i>SHDI</i>	景观蔓延度 <i>CONTAG</i>
生态空间年总固碳量 Total annual carbon sequestration in ecological space	0.675	-0.622	0.879 **	0.645	0.645	-0.692

* * 在 0.01 级别(双尾),相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾),相关性显著

3 讨论

3.1 生态空间不同土地利用类型固碳量及固碳能力变化及差异

根据京津冀城市群生态空间固碳分布与演变结果来看,同一用地类型在研究区不同区域、不同时期的固碳能力不同且差异较大。探讨原因,可能与不同用地的植物类型及其所在地的自然地理条件对固碳方式的影响有关。从植物种类来说,固碳量数值大小与植被 NPP 值大小有关,不同地点植物种类差异会导致其固碳功能差异^[21]。从碳储密度来说,森林生态系统平均植物碳贮存密度为 189mg/hm²,草原和农田植物碳贮存密度分别为 21mg/hm²和 5mg/hm²^[32]。从土地利用影响因素来说,耕地固碳功能不同于林地、草地固碳功能,耕地是人工控制下的开放式自然生态系统,固碳受气候状况、土壤类型、管理措施、计量时间等多因素影响^[20],其固碳能力在不同的时空尺度上存在较大差异,应充分考虑系统碳循环过程;林地净固碳量与森林植被碳吸收、土壤碳释放、枯枝落叶分解速率等关系密切,受林分类型和大小、地形地貌、气候等因素影响^[33-34],例如,微生物相对容易分解利用碳氮比低的灌木林枯落物,使乔木固沙林土壤有机物较多停留在土壤中,造成其总碳累积速率与效应比灌木林高^[35];草地有机碳固定受气候、植被、土壤理化特性以及人类活动等诸多物理、生物和人为因素交互作用的影响,人文因素包括灌溉、引种、补播及松土改良等的土地利用和土地管理措施,自然因素包括温度、降水等气候因子及大气 CO²浓度等^[36-37]。

3.2 基于不同土地利用类型固碳服务功能与景观指数的关系的生态空间优化策略

根据固碳功能与景观指数的相关性结果来看,不同生态空间用地类型的固碳功能与不同景观指数的相关性不同,各个景观指数对固碳量的变化均无明显负向作用。但本实验仅研究了其相关性,对于相互作用的因果方有待进一步研究证实。针对生态空间不同用地类型所相关的不同景观指数的特点,可采取提高与其相关性强的景观指数的措施或增强该类型用地的固碳服务功能进行相互间的优化提升。在影响景观格局的可能因素方面,社会经济的发展、城市产业结构的调整等造成城市建设用地规模扩大和生态空间萎缩,改变了景观格局^[38],进而对生态空间用地固碳服务功能造成影响。生态空间土地利用类型耕地、林地、草地都为碳汇用地,综合研究结果,优化生态空间用地结构可以更合理地利用土地,提高碳汇效益。优化策略应落实到具体的碳汇用地调整上,如:增加林地等碳汇能力佳的用地类型;通过重组生态廊道、碳汇斑块来提升碳汇效益;严格划定保护隔离线和缓冲区域,把受人类活动干扰的区域转移到低汇区;可持续地优化城乡土地利用结构,形成耕地、林地、草地按合理比例混合的布局形式等。从土地利用角度出发,同时结合城市群特点与景观生态学、国土空间规划等相关理论,对研究区生态空间进行策略优化,可以为提升京津冀群的碳汇效益及整体碳循环,创造健康可持续的健康低碳环境提供指导。

4 结论

本研究利用 1998—2018 年间京津冀地区的发展进程中具有代表性的 4 个时间点(2000 年、2005 年、2015 年、2018 年)生态空间 3 种用地类型耕地、林地、草地的土地覆被及植被固碳量数据,研究了生态空间土地利用变化、单位面积固碳量及年总固碳量的变化和分布特点,利用 2018 年 8 个城市各自的生态空间用地固碳量

与不同景观指数的关系,研究了生态空间固碳服务功能与景观格局的关系特征,并根据上述研究结果提出相关探讨。

研究表明:

(1)京津冀生态空间中耕地、林地、草地均为碳汇用地,2000—2018 年期间用地面积排序为:耕地>林地>草地,用地面积减少量排序为:林地>耕地>草地。耕地为研究区东南半部的主导类型,林地作为区域西北半部的主导类型,草地分布呈与林地相间状态。从时间变化来看,2000 年、2005 年、2015 年 3 个时间点耕地、林地、草地的分布情况基本不变,2018 年北京市内西北部大面积的林地转化为耕地。

(2)2000—2018 年期间生态空间 3 种用地的年固碳量排序为:耕地>林地>草地,用地年固碳量增长量排序为耕地>林地>草地。从平均单位固碳量来说,4 个时间点均表现为:林地>耕地>草地。从单位固碳量时空变化来看,区域分布差异明显且随时间变化量大。

(3)从生态空间不同用地类型的固碳量与景观格局的关系来看,耕地年总固碳量与其各景观指数没有明显相关性;林地年总固碳量与最大斑块指数(LPI)、斑块形状指数(LSI)、景观百分比(PLAND)有 0.01 级别的显著正相关性;草地年总固碳量与斑块密度(PD)、景观百分比(PLAND)有 0.05 级别的显著正相关性,与斑块形状指数(LSI)有 0.01 级别的显著正相关性;生态空间总固碳量与斑块形状指数(LSI)有 0.01 级别的显著正相关性。

根据研究结果提出了相关原因讨论,同时基于固碳服务功能与景观格局的关系特征,从土地利用角度提出了京津冀生态空间土地利用优化策略。本文对前人研究进行了理论补充及实验完善,对全球变暖之下城市群生态环境可持续发展提供了方法指导和借鉴。本文仅选取京津冀城市群进行分析说明,对于其他城市群区域存在的差异性未能顾及;不同类型的生态空间用地与景观指数的相关性差异原因尚未确凿;仅研究了其相关性,对于相互作用的因果方及作用机制有待深入。

参考文献(References):

- [1] 李健,毛德华,蒋子良,李科.长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究.生态经济,2019,35(8):28-34,66-66.
- [2] 李双成,赵志强,王仰麟.中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制.地理科学进展,2009,28(1):63-70.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being. Washington: Island Press, 2005.
- [4] Nabuurs G J, Schelhaas M J, Mohren G M J, Field C B. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999. Global Change Biology, 2003, 9(2): 152-160.
- [5] 赵荣钦,黄贤金,揣小伟.中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向.中国土地科学,2016,30(12):83-92.
- [6] 韩骥,周翔,象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展.生态学报,2016,36(4):1152-1161.
- [7] 张强,韩永翔,宋连春.全球气候变化及其影响因素研究进展综述.地球科学进展,2005,20(9):990-998.
- [8] 谢高地,鲁春霞,成升魁.全球生态系统服务价值评估研究进展.资源科学,2001,23(6):5-9.
- [9] Bösch M, Elsasser P, Franz K, Lorenz M, Moning C, Olschewski R, Rödl A, Schneider H, Schröppel B, Weller P. Forest ecosystem services in rural areas of Germany: Insights from the national TEEB study. Ecosystem Services, 2018, 31: 77-83.
- [10] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向.地理学报,2014,69(8):1130-1144.
- [11] 王甫园,王开泳,陈田,李萍.城市生态空间研究进展与展望.地理科学进展,2017,36(2):207-218.
- [12] 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.
- [13] 石羽.辽中城市群碳源碳汇空间格局优化研究[D].天津:天津大学,2017.
- [14] 彭月,王建力,魏虹.重庆市土地利用景观格局现状及其破碎化分析.西南大学学报:自然科学版,2008,30(6):83-87.
- [15] 顾朝林.经济全球化与中国城市发展.北京:商务印书馆,2000:9-27.
- [16] 苗长虹.城市群作为国家战略:效率与公平的双赢.人文地理,2005,20(5):13-19.
- [17] 肖建武,康文星,尹少华,谢欣荣.城市森林固碳释氧功能及经济价值评估——以第三个“国家森林城市”长沙市为实证分析.林业经济问题,2009,29(2):129-132.
- [18] 樊江文,钟华平,梁飏,石培礼,于贵瑞.草地生态系统碳储量及其影响因素.中国草地,2003,25(6):51-58.
- [19] 李景,吴会军,武雪萍,蔡典雄,王碧胜,梁国鹏,姚宇卿,吕军杰.15 年保护性耕作对黄土坡耕地区土壤及团聚体固碳效应的影响.中

国农业科学, 2015, 48(23): 4690-4697.

- [20] 陈丽, 郝晋珉, 王峰, 尹钰莹, 高阳, 段文凯, 杨君. 基于碳循环的黄淮海平原耕地固碳功能研究. 资源科学, 2016, 38(6): 1039-1053.
- [21] 张翀, 任志远. 陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评. 地理研究, 2015, 34(8): 1522-1534.
- [22] 董玉红, 刘世梁, 王军, 侯笑云. 基于景观格局的土地整理风险与固碳功能评价. 农业工程学报, 2017, 33(7): 246-253.
- [23] 潘远珍, 袁兴中, 刘红, 王芳, 周李磊, 张梦婕, 张丹. 重庆梁平区景观格局演变对生态系统服务价值的影响. 园林, 2021, 38(4): 81-88.
- [24] 顾泽贤, 赵筱青, 高翔宇, 谢鹏飞. 澜沧县景观格局变化及其生态系统服务价值评价. 生态科学, 2016, 35(5): 143-153.
- [25] 李慧杰, 牛香, 王兵, 赵志江. 生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究——以武陵山区退耕还林工程为例. 生态学报, 2020, 40(13): 4316-4326.
- [26] 许吉仁, 董霁红. 南四湖湿地景观格局变化的生态系统服务价值响应. 生态与农村环境学报, 2013, 29(4): 471-477.
- [27] 郑博福, 黄琼瑶, 陶林, 谢泽阳, 艾彪, 朱元皓, 朱锦奇. 赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2021, 41(15): 5940-5949.
- [28] 饶日光, 张琳, 王照利, 申永涛. 陕西省退耕还林工程固碳释氧服务功能评价. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 249-254.
- [29] 于贵瑞, 王秋风, 刘迎春, 刘颖慧. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础. 地理科学进展, 2011, 30(7): 771-787.
- [30] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000: 108-111.
- [31] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S, Stisen S, Diouf A. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semi-arid Sahel. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(3): 173-188.
- [32] Ajtay G L, Ketner P, Duvigneaud P. Terrestrial primary production and phytomass//Bolin B, Degens E T, Kempe S, Ketner P, eds. The Global Carbon Cycle. Chichester: John Wiley&Sons, 1979: 129-181.
- [33] 刘畅, 李凤日, 贾炜玮, 甄贞. 基于局域统计量的黑龙江省多尺度森林碳储量空间分布变化. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2493-2500.
- [34] 马长欣, 刘建军, 康博文, 孙尚华, 任军辉. 1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估. 生态学报, 2010, 30(6): 1412-1422.
- [35] 赵伊博, 方皓月, 江光林, 咎燕, 刘思艺, 刘思凝, 王丽霞, 谭波, 李晗, 游成铭, 徐振锋, 张丽. 川西高山峡谷区不同类型彩叶林枯落物和土壤生态化学计量特征. 四川农业大学学报, 2020, 38(6): 685-692.
- [36] 高树琴, 赵霞, 方精云. 我国草地的固碳功能. 中国工程科学, 2016, 18(1): 73-79.
- [37] 戴尔阜, 黄宇, 赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展. 生态学报, 2015, 35(12): 3908-3918.
- [38] 解修平, 周杰, 张海龙, 张秋义, 刘小强. 关中——天水经济区土地利用变化模拟预测及景观格局动态变化. 干旱区地理, 2013, 36(3): 482-490.