DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.002
常瑨予,武志涛,李琪,等.京津风沙源生态系统服务时空分布及冷热点分析[J].水土保持学报,2024,38(3):216-226.
CHANG Jinyu, WU Zhitao, LI Qi, et al. Spatiotemporal distribution of ecosystem services and analysis of cold and hot spots in Beijing-Tianjin sandstorm source region[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):216-226.

京津风沙源生态系统服务时空分布及冷热点分析

常瑨予[1],武志涛[1],李 琪[1],梁寒雪[1],杜自强[1],雷添杰[2],孙 斌[3]
(1.山西大学黄土高原研究所,太原 030006;2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;
3.中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091)

摘 要:[目的] 为明晰京津风沙源区生态系统服务时空格局特征及识别其冷热点,评估京津风沙源区实施生态工程后的生态效益及生态影响。**[方法]** 基于京津风沙源区 2000—2017 年的遥感、气象、土壤、土地利用等数据,利用 CASA(carnegie-ames-stanford approach)模型、InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade offs)模型、RWEQ(revised wind erosion equation)模型和 RUSLE(revised universal soil loss equation)模型分别估算产水量、土壤保持、固碳和防风固沙服务,采用 Getis-Ord Gi* 统计指数方法,识别京津风沙源区生态系统服务冷热点区域。**[结果]** (1)2000—2017 年各项生态系统服务功能均呈现上升趋势,4 项生态系统服务功能的高值区集中在研究区的东南部,低值区集中在研究区的西北部。(2)2000—2017 年 4 项生态系统服务均在京津风沙源西南部的鄂尔多斯高原沙化土地治理区出现明显的热点面积增加现象;固碳服务热点区域面积显著增加,其中,浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区和坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区的冷点区域向热点区域转化;产水服务冷热点面积占比没有明显变化,热点区主要集中在研究区南部坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区,冷点区分布较为零散;防风固沙服务冷点区域面积增加;土壤保持服务冷热点区域面积占比很小且变化不大,区域土壤保持供给能力比较平均。(3)多重生态系统服务结果显示,研究区东南部区域能够提供 2 项及以上的高值生态系统服务功能,属于重点生态系统服务功能供给区,约占整个研究区 15.5%。(4)2000—2017 年林地 4 项生态系统服务热点面积占比较高,草地和林地的固碳服务功能热点面积显著增加,林地可提供较高的综合生态系统服务功能。**[结论]** 京津风沙源治理工程的实施使得区域内总体生态系统服务功能提升。研究结果可为评估京津风沙源治理工程恢复成效提供一定科学数据,最终实现京津地区生态环境的可持续发展。

关键词: 生态系统服务;热点分析;时空分异;京津风沙源
中图分类号:K903 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242-(2024)03-0216-11

Spatiotemporal Distribution of Ecosystem Services and Analysis of Cold and Hot Spots in Beijing-Tianjin Sandstorm Source Region

CHANG Jinyu[1], WU Zhitao[1], LI Qi[1], LIANG Hanxue[1], DU Ziqiang[1], LEI Tianjie[2], SUN Bin[3]
(1.*Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*;
2. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing* 100081, *China*;
3. *Research Institute of Resource Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study was aimed to assess the ecological benefits and ecological impacts after the implementation of the ecological project in the Beijing-Tianjin wind and sand source area. [**Methods**] Based on the remote sensing, meteorological, soil, and land use data of the Beijing-Tianjin wind and sand source area from 2000—2017, the CASA (Carnegie-Ames-Stanford approach) model, the InVEST (Integrated valuation of ecosystem services and trade offs) model, RWEQ (Revised wind erosion equation) model, and RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) model, the water yield, soil conservation, carbon sequestration and

收稿日期:2023-07-08 **修回日期:**2023-10-15 **录用日期:**2023-11-30 **网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-04-09
资助项目:山西省科技创新人才团队项目(202204051001010);国家自然科学基金项目(41977412);山西省科技战略研究专项(202204031401006)
第一作者:常瑨予(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事生态系统服务研究。E-mail:13663451620@163.com
通信作者:武志涛(1985—),男,博士,教授,主要从事地表变化、景观生态学及 3S 技术服务研究。E-mail:wuzhitao@sxu.edu.cn

wind and sand services were estimated respectively. The Getis-Ord Gi^* statistical index method was used to identify the ecosystem services hot and cold spots in the Beijing-Tianjin wind and sand source area. [**Results**] (1) Each ecosystem service function showed an increasing trend from 2000 to 2017, and the high value areas of the four ecosystem service functions were concentrated in the southeast of the study area, and the low value areas were concentrated in the northwest of the study area. (2) All four ecosystem services showed a significant hotspot area increase in the Ordos Plateau sandy land management area in the southwestern part of the Beijing-Tianjin wind and sand source from 2000 to 2017; The area of hotspot for carbon sequestration services increased significantly, of which the cold spots in the Hunshandak-Khorqin sand land control area and the hilly mountainous area of the Damshang Plateau in northern North China had transformed into hotspots. The hotspot area of water production service did not change significantly, and the hotspot area was mainly concentrated in the southern part of the study area in the Damshang Plateau and the hilly and mountainous water conservation management area in northern China, and the distribution of the hotspot area is more scattered. The cold spot area of windbreak and sand fixation service had increased in area; The area of the cold spot area of soil conservation service had a small percentage and not much change, and the regional capacity of soil conservation and supply was relatively average. (3) The results of multiple ecosystem services showed that the southeastern region of the study area is able to provide two or more high-value ecosystem service functions and belongs to the key ecosystem service function supply area, accounting for about 15.5% of the whole study area. (4) The four ecosystem service hotspot areas of forest land accounted for a relatively high percentage of the area from 2000 to 2017, and the hotspot areas of carbon sequestration service functions of grassland and forest land increased significantly, and forest land can provide a high level of integrated ecosystem service functions. [**Conclusion**] The implementation of the Beijing-Tianjin wind and sand source control project has improved the overall ecosystem service function in the region, and the results of the study can provide scientific data for assessing the effectiveness of the restoration of the Beijing-Tianjin wind and sand source control project, and ultimately realizing the sustainable development of the ecological environment in the Beijing-Tianjin region.

Keywords: ecosystem services; hot spot analysis; spatiotemporal differentiation; Beijing-Tianjin sandstorm source

Received: 2023-07-08　　**Revised**: 2023-10-15　　**Accepted**: 2023-11-30　　**Online**(www.cnki.net): 2024-04-09

生态恢复工程能够提供大量的生态系统服务。随着社会经济发展和人类活动的增强,区域自然生态系统受到人类干扰的影响越来越大,让原本脆弱的生态环境愈加恶化[1]。2005 年联合国发布的千年生态系统评估(the millennium ecosystem assessment, MA)报告[2]表明,过去半个世纪,全球 24 项生态系统服务已有 15 项发生退化。因此,在人类社会快速发展过程中,科学合理地评估生态系统服务有利于促进生态系统政策制定和管理,对提升人类福祉具有重要的现实意义[3]。近年来,我国实施许多具有针对性的大型生态恢复工程项目,评估工程实施后生态系统服务功能变化及跟踪监测工程的生态效益显得尤为重要。

生态系统服务评估已展开大量工作,许多专家学者[4-13]利用多种模型方法对不同生态系统服务功能进行评估,评估结果可利用 GIS 软件直接呈现空间分布图,具有直观可视化、空间位置明晰等特点[5-6]。主要分为多种生态系统服务格局研究和单一生态系统服务时空格局研究 2 大类,李子辉等[4]利用 RWEQ 和 InVEST 模型综合评估云南省固碳、产水与土壤保持服务;潘换换等[7]利用 RWEQ、InVEST、CASA 模型对山西煤田多项生态系统服务进行评估;张彪等[8]利用 RWEQ 模型评估分析 2000—2015 年京津风沙源区域防风固沙功能的整体变化及其区域差异;杜佳衡等[9]利用 InVEST 模型对大理州永平县水生态系统服务功能进行时空变化分析;窦苗[10]基于 InVEST 模型对横断山区产水功能时空变化进行研究;王欢等[11]基于 GIS 手段和 RUSLE 模型综合土地利用、坡度、降雨、高程、岩性、植被覆盖度等影响因子模拟土壤侵蚀;李天宏等[12]基于 RUSLE 模型

分析延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化；张镱锂等[13]利用 CASA 模型估算青藏高原高寒草地的固碳功能。

冷热点分析是利用 GIS 空间统计分析方法识别生态系统服务较好和较差区域的方法，其结果可反映研究区域内一种或多种生态系统服务的供给能力[14-15]。热点概念最初主要用于研究生物多样性优先保护区方面，之后经过逐步发展和完善，冷热点分析被应用于多领域，如经济、土地利用变化及生态系统服务空间格局变化等[16]。刘浩等[17]利用热点分析识别经济发展的格局演化；吕立刚等[18]采用空间冷热点布局方法分析 30 年来江苏省土地利用变化特征及生态环境响应规律；杜佳衡等[9]通过冷热点分析识别产水服务和水质净化服务两项服务的空间分布规律，并划分其重要性等级；高会等[15]对太行山区各类土地利用类型中生态系统服务冷/热点区域面积比例进行统计分析表明，水域、森林和湿地热点区域面积比例较大；赵筱青等[19]研究发现，综合热点区空间分布格局与林地和石漠化程度有很大的一致性。因此，利用空间统计方法分析生态系统服务时空分布规律可更加清晰全面地评估生态工程实施成果，明晰各区域生态系统服务供给能力的差异。

京津风沙源治理工程是我国为改善京津及其周边地区生态环境质量而实施的一项重大的生态工程，生态恢复工程实施后，迫切需要进一步开展京津风沙源区生态系统服务时空格局及冷热点分析。因此，选取 CASA、InVEST(产水模块)、RWEQ、RUSLE 4 种模型综合评估 2000—2017 年京津风沙源工程区的固碳(NPP)、产水量(WY)、防风固沙(SF)、土壤保持(SC)4 项主要生态系统服务功能，分析京津风沙源区的单一和多重冷热点空间分布格局，识别 4 项服务在不同土地利用类型上热点与冷点的空间分布和聚集情况，以期为京津风沙源治理工程恢复成效评估提供一定科学数据，最终实现京津地区生态环境的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2002 年党中央国务院为保障与改善京津地区人民生存发展环境和经济社会可持续发展，批准启动京津风沙源治理工程，对北方生态脆弱地区进行综合治理，京津风沙源一期工程建设范围涉及北京、天津、河北、山西及内蒙古 5 省(区、市)的 75 个县(旗、市、区)，建设期为 2001—2012 年。2012 年 9 月，国务院常务会议讨论通过《京津风沙源治理二期工程规划(2013—2022 年)》[20]，决定实施京津风沙源治理二期工程。研究区为京津风沙源区二期工程区域(105°30′—121°01′E，36°49′—46°40′N)，西起内蒙古乌拉特后旗，东至内蒙古阿鲁科尔沁旗，南起陕西省定边县，北至内蒙古东乌珠穆沁旗。总面积为 70.6×10^4 km^2，沙化土地 20.2×10^4 km^2，沙化土地占比超 30%。该区域包括陕西省、内蒙古自治区、北京市、天津市、山西省和河北省的共计 138 个县(旗、市、区)。工程综合生物气候区划、自然地理特征、荒漠化发生要素相似性和行政区域的完整性等因素，将二期工程治理区域划分为 5 个建设区，包括乌兰察布高原退化荒漠草原治理区、鄂尔多斯高原沙化土地治理区、浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区、坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区(图 1)。

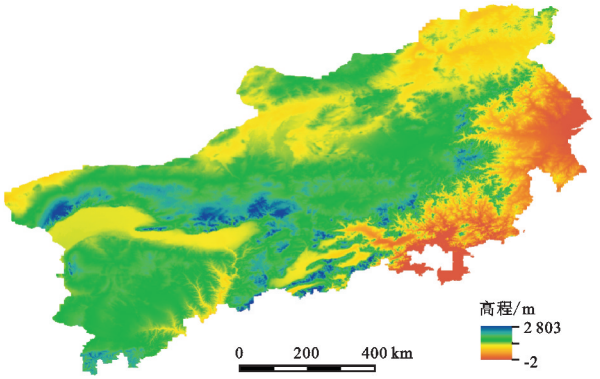


图 1 研究区概况

Fig. 1 Situation of study area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 气象数据 研究选取的 2000—2017 年气象数据，来源于中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)。其中，降水、温度数据来自中国逐月降水量、月平均气温数据集，空间分辨率为 1 km，年降水量采用累计求和的计算方法，即将逐月降水量相加得到年降水量；风速数据来自中国区域地面要素驱动数据集，空间分辨率为 0.1°，所使用的风速数据包括逐日数据和逐月数据；雪深数据来自中国雪深长时间序列数据集，其空间分辨率为 25 km。以上数据均在 ArcGIS 10.8 软件中使用重采样工具统一空间分辨率为 1 km。

1.2.2 土壤数据 研究计算所需的土壤数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)，主要从中提取土壤砂粒、黏粒、粉砂、土壤有机质、碳酸钙含量等数据，满足 RWEQ 等模型参数计算。

1.2.3 遥感数据 研究选取的 2000—2017 年 MODIS NDVI 时间序列数据来自美国地球资源观测系统(earth observation system，EROS)数据中心提供

月值空间分辨率为 1 km 的 MODIS 植被指数产品(MOD13A3)。研究区覆盖 5 景数据,分别为 h25v04、h26v04、h26v05、h27v04、h27v05。利用 MRT(modis re-projection tool)对影像数据进行重投影、拼接和数据转换,并提取其中的 NDVI 时间序列数据进行后续运算。

1.2.4　地形数据　DEM(数字高程模型)数据来自国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)提供的中国数字高程模型数据集,空间分辨率为 1 km。该数据是坡度提取和小流域生成的基础和依据。

1.2.5　土地利用数据　土地利用数据来自文献[21]发表的公开数据集,分辨率为 30 m,满足研究需要。

1.3　研究方法

1.3.1　生态系统服务估算　选取防风固沙、产水量、土壤保持和固碳 4 种服务作为研究区主要的生态系统服务类型,2000—2017 年各服务计算方法均一致。

(1)防风固沙

采用 RWEQ 模型评估京津风沙源区防风固沙功能的变化,计算公式为:

$$\mathrm{SRQ}=10\times(SL_p-SL_r)\times A \tag{1}$$

$$\mathrm{SRA}=\frac{\mathrm{SRQ}}{A} \tag{2}$$

$$SL_p=\frac{2z}{sp^2}\times Q_{\mathrm{pmax}}\times \mathrm{e}^{-(z/sp)^2} \tag{3}$$

$$Q_{\mathrm{pmax}}=109.8\times(WF\times EF\times \mathrm{SCF}\times K') \tag{4}$$

$$sp=150.71\times(WF\times EF\times \mathrm{SCF}\times K')^{-0.371\,1} \tag{5}$$

$$SL_r=\frac{2z}{sr^2}\times Q_{\mathrm{rmax}}\times \mathrm{e}^{-(z/sr)^2} \tag{6}$$

$$Q_{\mathrm{rmax}}=109.8\times(WF\times EF\times \mathrm{SCF}\times K'\times C) \tag{7}$$

$$sr=150.71\times(WF\times EF\times \mathrm{SCF}\times K'\times C)^{-0.371\,1} \tag{8}$$

式中:SRQ 为防风固沙量(t/a);A 为研究区面积(hm^2);RA 为防风固沙能力(t/hm^2);SL_p 为潜在风蚀量(kg/m^2);Q_{pmax}为潜在风力的最大输沙能力(kg/m);sp 为潜在关键地块(m);SL_r 为实际风蚀量(kg/m^2);Q_{rmax}为实际风力的最大输沙能力(kg/m);sr 为实际关键地块(m);z 为下风向距离(取 50m);WF 为气象因子(kg/m);EF 和 SCF 分别为土壤可蚀性因子和土壤结皮因子;K 和 C 分别为土壤糙度因子与植被因子。各个因子具体计算方法参考文献[7]。

(2)产水服务

产水功能的估算基于 InVEST 模型实现,计算公式为:

$$Y_{xj}=\left(1-\frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x}\right)\times P_x \tag{9}$$

式中:Y_{xj}为土地覆被类型 j 上栅格单元 x 的年均产水量(mm);AET_{xj}为土地覆被类型 j 在栅格单元 x 上的年实际蒸散量(mm);P_x 为栅格 x 上的年降水量(mm)。具体计算方法结合 InVEST 模型说明手册及参考文献[9]。

(3)土壤保持

土壤保持量计算借助 RUSLE 模型计算,实际土壤侵蚀量是在有植被覆盖和水土保持措施情况下的土壤侵蚀量,计算公式为:

$$A_{\mathrm{p}}=\mathrm{RKLS} \tag{10}$$

$$A_{\mathrm{r}}=\mathrm{RKLSCP} \tag{11}$$

$$A_{\mathrm{s}}=A_{\mathrm{p}}-A_{\mathrm{r}} \tag{12}$$

式中:A_{p} 为单位面积潜在土壤侵蚀量[t/(hm^2·a)];A_{r} 为单位面积实际土壤侵蚀量[t/(hm^2·a)];A_S 为单位面积土壤保持量[t/(hm^2·a)];R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm^2·h·a)];K 为土壤可蚀性因子[(t·hm^2·h)/(MJ·hm^2·mm)];L 和 S 分别是坡长和坡度因子,无量纲;C 为植被覆盖和经营管理因子,无量纲;P 为土壤保持措施因子,无量纲。各因子采用的计算方法参考文献[12]。

(4)固碳功能

固碳服务计算基于 CASA 模型(carnegie ames stanford approach),计算方法参考文献[13]。计算公式为:

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{SOL}(x,t)\times\varepsilon \tag{13}$$

式中:SOL(x,t)表示像元 x 处 t 月份的太阳总辐射量(MJ/m^2);ε(x,t)为植物在像元 x 处 t 月份的实际光能利用率(gC/MJ)。

1.3.2　冷热点分析　生态系统服务热点是某一地区内一种或若干种服务供给能力相对突出的地域,冷点则是较弱的区域。借助 GIS 软件下的 Getis-Ord Gi* 模块进行该项分析,可直接在空间上反映高值区(热点区域)与低值区(冷点区域)的集聚。计算公式为:

$$G^*=\frac{\sum_{i=1}^{n}Q_{ij}-\bar{a}\sum_{i=1}^{n}Q_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}a_i^2}{n}-a^{-2}}\sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}Q_{ij}^2-\left(\sum_{i=1}^{n}Q_{ij}\right)^2\right]}{n-1}}} \tag{14}$$

式中:G^* 为栅格 i 的集聚指数;a_i 为栅格 i 的属性值;Q_{ij}为权重矩阵;n 为总单元个数;$\bar{a}$ 为所有像元生态系统服务总量的平均值。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务时空格局变化

由图 2 可知，固碳服务空间分布存在明显的异质性，高值区主要集中在研究区南部及东部地区，低值区主要集中在研究区西部和西北部等地区，固碳能力整体呈自西北至东南部逐渐递增的基本格局。从划分的 5 个亚区来看，固碳服务低值区主要分布在乌兰察布高原退化荒漠草原亚区大部分地区、鄂尔多斯高原沙化土地亚区西北部分地区，该地区植被类型多以荒漠为主，植被覆盖度低，固碳能力较弱；NPP 高值区主要分布在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养亚区东南部地区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原亚区东北角及其与浑善达克—科尔沁沙地沙化土地亚区北部衔接的中间过渡地带，该地区组合植被类型以林地和草地为主，地区植被覆盖度较高，固碳能力较强。从时间上来看，研究时段内年均 NPP 为 287.66～377.89 g C/m^2，2000 年最低，为 287.66 g C/m^2，2013 年最高，为 409.87 g C/m^2，多年均值为 349.84 g C/m^2。

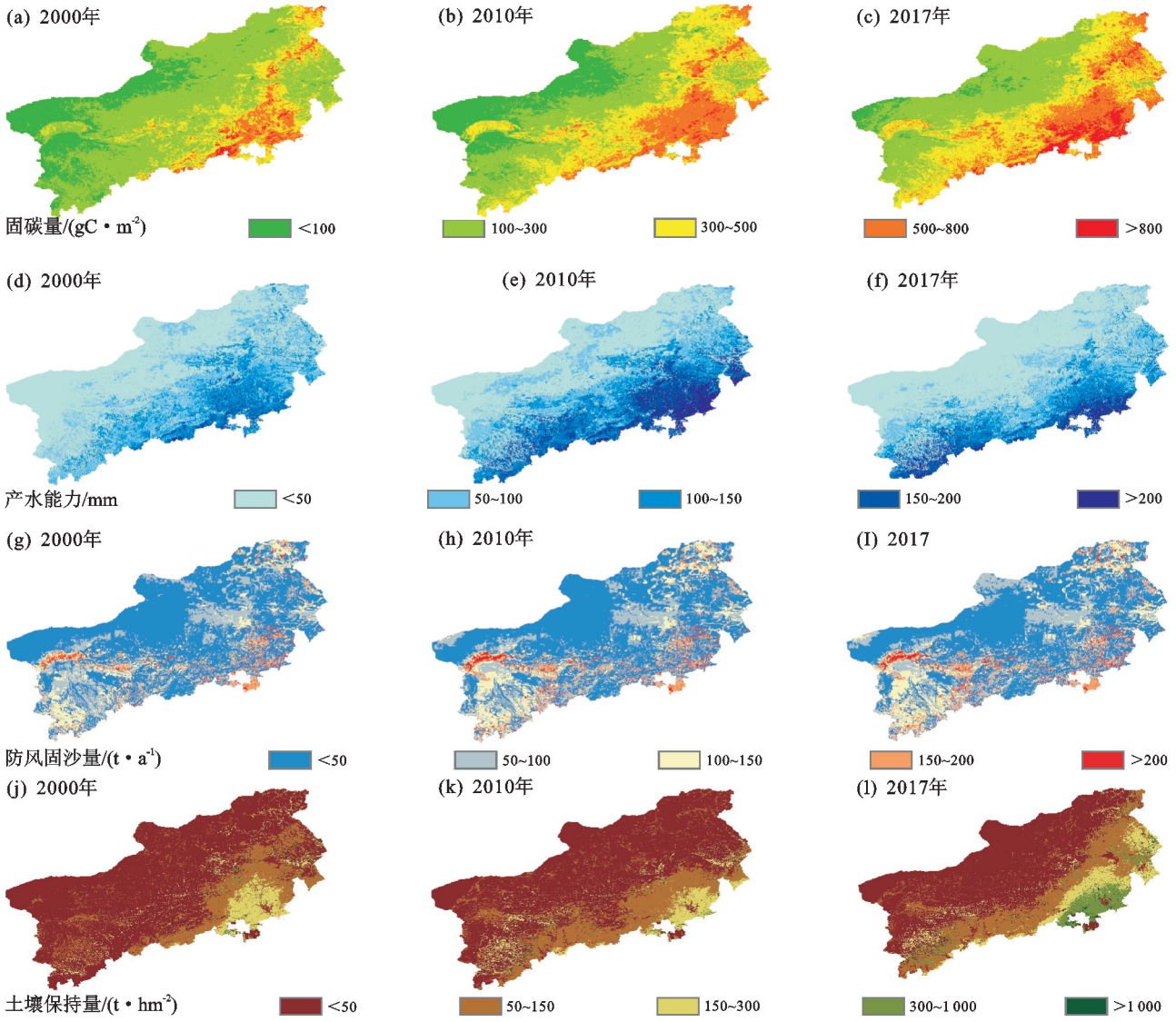


图 2 2000—2017 年京津风沙源区生态系统服务时空分布及变化

Fig. 2 Temporal and spatial distribution and changes of ecosystem services in sandstorm source areas of Beijing and Tianjin from 2000 to 2017

产水服务分布同样存在明显的空间异质性，总体表现为南高北低。低值区分布在乌兰察布高原退化荒漠草原亚区西部和锡林郭勒高原—乌珠穆沁旗盆地退化草原亚区西部地区，高值区主要分布在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养亚区东南部地区。京津风沙源区地域广阔，区域气候差异大，降水量自西北向东南递增，使得产水服务能力南高北低。从时间变化来看，2000—2017 年京津风沙源区的产水量呈缓慢增加趋势，产水能力从 2000 年的 56.09 mm 增长至 2017 年的 61.89 mm，多年平均产水能力为 74.38 mm，多年平均产水量为 528.47 亿 m^3。

防风固沙服务在 5 个亚区上表现出的空间差异较

大。高值区主要分布在鄂尔多斯高原沙化土地治理区,其次是坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区和浑善达克—科尔沁沙化土地治理区,低值区主要集中在乌兰察布高原退化荒漠草原治理区,零散分布于乌兰察布高原退化荒漠草原治理区西北边缘地区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区中部和浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区西南缘等地区。从时间来看,2000—2010 年,研究区防风固沙能力得到显著提高,此后至 2017 年,防风固沙服务空间格局基本保持稳定,研究时间段内呈波动上升趋势。2000—2017 年,京津风沙源区防风固沙功能明显提升,防风固沙量为 35.09～43.26 亿 t,2001 年最低,2013 年最高,多年平均防风固沙量为 40.06 亿 t。

土壤保持功能具有明显的空间异质性,自北向南呈上升趋势。土壤保持功能低值区占比最高,低值区分布较为零散,主要分布在北部 2 个亚区向中部的过渡地带,高值区分布范围广且较为集中,主要分布在鄂尔多斯高原沙化土地治理亚区西南一角、浑善达克—科尔沁沙地沙化土地亚区东南角和坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养亚区东南部。在工程实施后,区域整体的土壤保持能力得到显著提升。同时,土壤保持能力低值区与沙地分布较为一致,沙地的土壤松散,流动性强,保水性差,遇强降雨易被冲蚀,引起严重的水土流失。从时间变化来看,2000—2010 年,土壤保持服务功能下降,而在 2010—2017 年出现大幅上升。2000—2017 年,研究区土壤保持功能呈上升态势,多年平均土壤保持能力达 78.85 t/hm^2,2007 年最低,为 44.47 t/hm^2,2016 年最高,为 105.23 t/hm^2;年平均土壤保持量为 56.02 亿 t,2007 年最低,为 31.60 亿 t,2016 年最高,为 110.57 亿 t。

2.2　单项生态系统服务冷热点空间格局

基于 4 项生态系统服务评估的基础上,采用 Getis—Ord Gi* 统计指数的热点分析工具对研究区冷热点区域进行识别,评估 4 项主要生态系统服务 2000 年与 2017 年冷热点区域空间分布及面积占比,并对比分析京津风沙源区 2000—2017 年多年均值的冷热点区域空间分布格局。结果可对比分析生态恢复工程实施前期和后期生态系统服务集聚变化及综合评估多年生态工程实施下研究区生态系统服务供给变化。

2.2.1　*固碳服务*　2000 年固碳服务热点区集聚在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区东部,冷点区位于浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区大部分地区、坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区西部地区、鄂尔多斯高原沙化土地治理区部分地区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区西部地区。从垂直梯度来看,2000 年固碳服务热点地区在低山丘陵区和高山区都有分布。2017 年固碳服务热点区域明显增加,生态恢复工程颇有成效,浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区大部分地区和坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区西部地区的冷点区域都向热点区域转化。

从面积占比来看,2000—2017 年,NPP 热点区域面积占比由 14.18%大幅上升至 36.84%,冷点区域面积占比由 31.43%大幅下降至 6.62%。热点区域大幅度上升的同时,冷点区域占比大幅下降,表明区域固碳水平的提升。超过 20%区域已由冷点区转化为热点区,表明区域整体生态系统功能的提升,生态工程的实施起到积极作用。同时,热点区域分布相对集中,冷点区域则分布较为零散,需要采取相应措施对生态功能较弱地区加以治理,改善生态系统环境(图 3)。

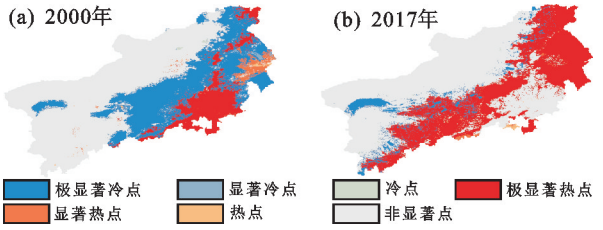


图 3　2000 年和 2017 年固碳服务冷热点空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of cold and hot spots of carbon sequestration services in 2000 and 2017

2.2.2　*产水服务*　2000 年产水服务热点区集聚在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区东南部的广大地区,占比达全区面积的 24.42%;冷点区位于乌兰察布高原退化荒漠草原治理区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区、鄂尔多斯高原沙化土地治理区的部分地区,分布较为零散,占比约为 14.87%,2000 年产水服务热点区域大于冷点区域,显著冷热点区域占比相对较大。2017 年产水服务热点区集聚在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区,占比为 22.28%,较 2000 年面积小幅下降;冷点区位于浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区西部、鄂尔多斯高原沙化土地治理区部分地区,同时,在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区西北部边缘地带也出现冷点的集聚现象,占比为 16.66%,较 2000 年小幅增加。对比来看,冷热点区域占比均小幅变动,表明该区域生态工程的开展对产水功能的影响较小。研究区东南角出现新的冷点集聚现象,推测 2000—2017 年城市化进程可能对该地区的产水服务功能有所影响,但产水服务的热点区域大部分仍集中在研究区的南部地区(图 4)。

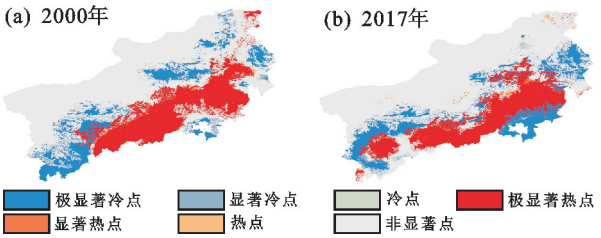


图 4 2000 年和 2017 年产水量服务冷热点空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of cold and hot spots for water production service in 2000 and 2017

2.2.3 防风固沙服务 2000 年防风固沙热点区分布面积较广，占比高达 78.35%；而冷点区位于鄂尔多斯高原沙化土地治理区和乌兰察布高原退化荒漠草原治理区西部地区、浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区和坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区的东部部分地区，占比约为 13.15%。2017 年防风固沙热点区分布主要集中在鄂尔多斯高原沙化土地治理区东部地区、乌兰察布高原退化荒漠草原治理区、坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区的部分地区，面积占比为 22.28%；冷点区零散分布于研究区各个区域。仅对比 2000 年和 2017 年防风固沙服务热点区域面积来看，热点所占面积比例下降明显，冷点区所占面积上升。鄂尔多斯高原沙化土地治理区冷点区域面积减少，二期生态恢复工程实施效果明显(图 5)。

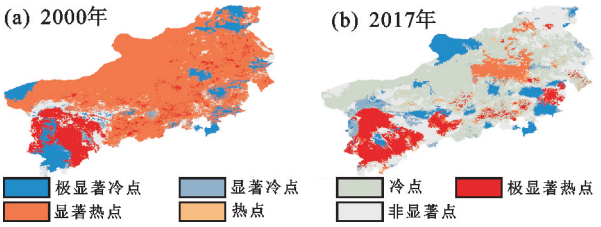


图 5 2000 年和 2017 年防风固沙服务冷热点空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of cold and hot spots for wind prevention and sand fixation services in 2000 and 2017

2.2.4 土壤保持服务 2000 年土壤保持服务热点区在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区南部地区集聚，在浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区零星分布，占全区面积的 2.94%；冷点区集中分布在鄂尔多斯高原沙化土地治理区中部地区以及浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区东部地区，占比达4.29%，冷热点面积占比较小，非显著冷热点面积占绝大部分地区，证明研究区内空间上整体土壤保持服务能力比较平均。2017 年土壤保持服务热点区集聚在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区东南角，占比为 1.14%；冷点区同样集聚在坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区东南部，占比为 3.18%。与 2000 年相比，2017 年土壤保持服务冷热点区域面积空间变化也不明显，但鄂尔多斯高原沙化土地治理区是二期新增工程区域，得益于工程的积极效应，鄂尔面图多斯高原沙化土地治理区土壤保持服务冷点占比大的现象得到显著改善，反观研究区中部部分地区，在工程实施的后续阶段，土壤保持能力有所下降，应加以重点关注(图 6)。

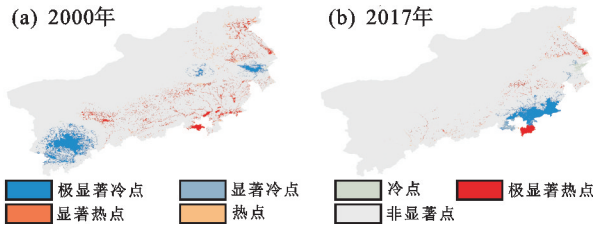


图 6 2000 年和 2017 年土壤保持服务冷热点空间分布

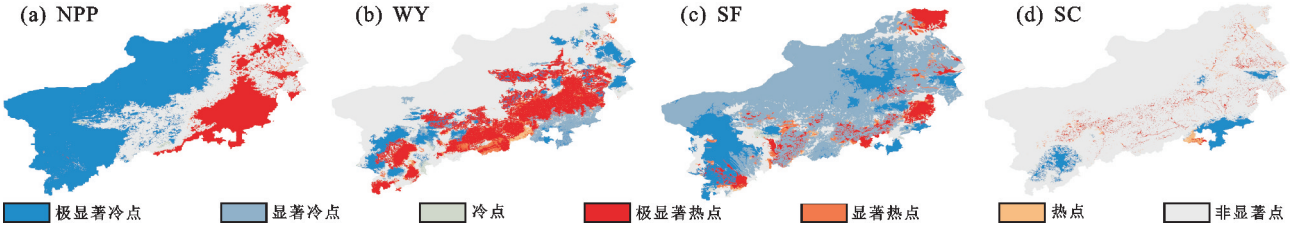
Fig. 6 Spatial distribution of cold and hot spots of soil conservation service in 2000 and 2017

2.2.5 生态系统服务多年均值冷热点分析 根据 2000—2017 年京津风沙源区 4 项主要生态系统服务多年平均值数据，利用热点分析和 GIS 工具计算得到 4 项生态系统服务的多年均值冷热点图，以此反映研究区 18 年的生态系统服务供给能力的多年平均水平。结果显示：(1)4 项生态系统服务的热点地区都普遍集中在东南部，冷点地区主要集中在西北部及中部地区，分布较不均匀。而东南角的地区除固碳功能外，其他 3 项生态系统服务功能均出现冷点集聚现象，证明该地区的多年总体生态系统服务功能较弱。(2)固碳多年均值热点分析可知，冷点和热点区域呈明显的空间集聚性，冷点区域集中分布于研究区西北地区，热点区域集中分布于东南部地区；土壤保持功能在研究区内整体分布较为均匀；产水服务热点区域面积分布大，其次是非冷热点区域，证明该区域产水功能较强。防风固沙冷点面积远大于热点面积。(3)固碳和防风固沙功能多年均值热冷点分析相较于单项冷热点分析中 2000 年和 2017 年结果差异较大，说明 2000 年和 2017 年可能存在极值。而土壤保持与产水服务多年均值热冷点区域面积结果与 2000 年和 2017 年结果保持基本一致，证明全区的 2 项生态系统服务供给趋于较为稳定态势(图 7)。

2.3 多重生态系统服务冷热点空间格局

根据分析发现，不同生态系统服务功能在同一区域内具有重叠性。因此，利用 ArcGIS 中叠加分析工具可得到研究区的多重生态系统服务冷热点空间格局，该结果对于分析某一区域生态系统服务综合供给能力具有重要指示意义。对京津风沙源区 4 项生态系统服务的热点区域进行叠加分析表明，热点数量为 0 和 1 的热点区域分布面积最大，即能够提供单项生态系统服务功能热点区域和不显著区域面积较大，多数地区可提供 1 项生态系统服务功能；热点数量为 2

的综合生态系统服务的热点区域,其分布与提供单项生态系统服务的热点区域交错分布,主要集中于东南部的河北省内;热点数量为 3 的综合生态系统服务功能热点区域,集中分布于东部内蒙古省内地区;极少数热点数量为 4 的区域,零星分布于研究区东南部区域。总体来看,能够提供多项高值生态系统服务功能的热点区域较少,绝大部分区域只能提供 2 项及以下的高值生态系统服务功能。因此,对于能够提供综合高生态系统服务功能区域在后续生态恢复工程期间及工程结束后都应该加以重点保护(图 8)。



注:极显著热点(冷点)为 $p<0.001$;显著热点(冷点)为 $p<0.01$;热点(冷点)为 $p<0.05$。

图 7　2000—2017 年 4 种生态系统服务多年均值冷热点

Fig. 7　Cold and hot spots of annual average of four ecosystem services from 2000 to 2017

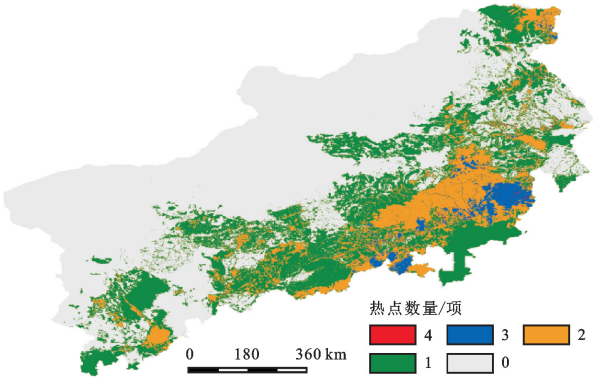


图 8　多重生态系统服务热点空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of multi-ecosystem service hot spots

2.4　不同土地利用类型生态系统服务冷热点比较

对研究区的耕地、草地、林地 3 种主要土地利用类型的 4 种生态系统服务冷热点面积占比进行统计分析(图9)显示,2000年固碳、产水量、防风固沙、土壤保持在耕地热点面积占比分别为 51.24%,26.36%,35.68%,49.38%,其中,固碳功能在耕地上热点面积占比最多,冷点面积占比分别为 0,4.07%,10.87%,1.39%。2000 年固碳、产水量、防风固沙、土壤保持在草地热点面积占比分别为 4.96%,12.49%,82.07%,0.33%,其中,防风固沙功能在草地上的热点面积占比远高于其他 4 项生态系统服务,冷点面积占比分别为 24.34%,16.66%,12.97%,1.38%,土壤保持冷点区域和热点区域在草地占比面积都是最小,表明在草地上的土壤保持功能的不显著性。2000 年固碳、产水量、防风固沙、土壤保持在林地的热点面积占比分别为28.37%,30.95%,80.39%,94.69%,土壤保持功能在林地的热点区域占比明显高于其他生态系统服务功能,其次是防风固沙服务,冷点面积占比分别为 37.55%,21.58%,10.56%,4.70%,土壤保持功能的冷点面积占比最低。

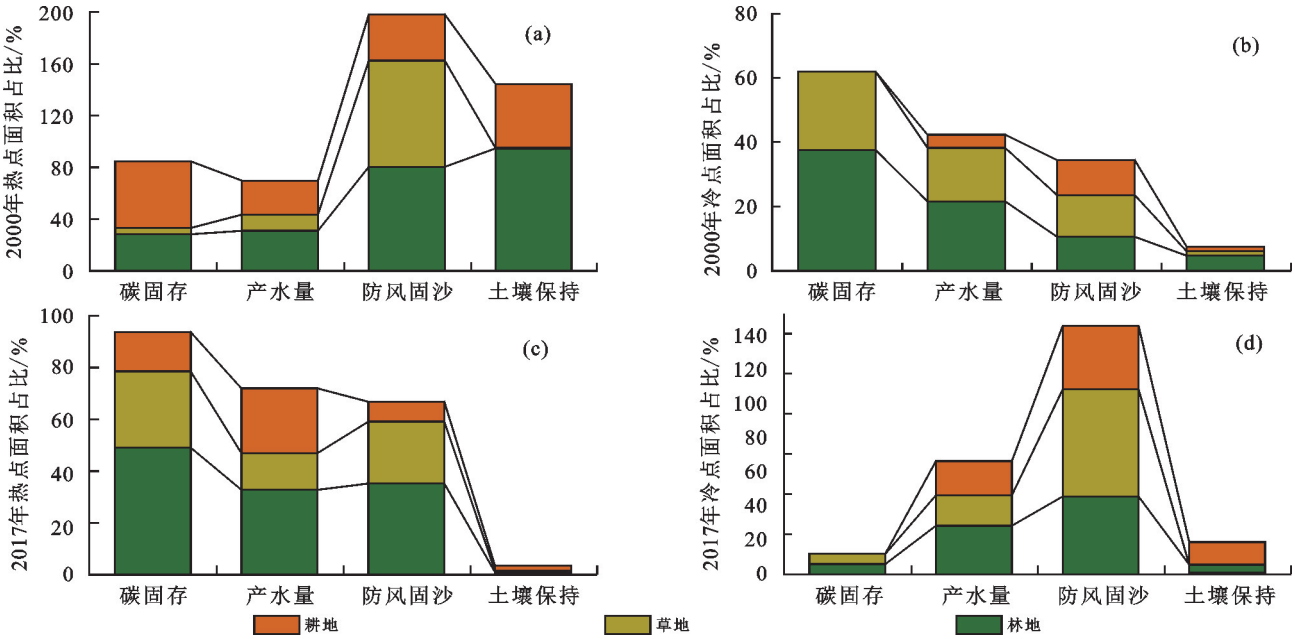


图 9　不同土地利用类型生态系统服务冷热点面积占比

Fig. 9　Proportion of cold and hot spots in ecosystem services of different land use types

2017年固碳、产水量、防风固沙、土壤保持在耕地热点面积占比分别为15.15%,25.02%,7.65%,1.99%,其中,产水量在耕地上的占比最高,冷点区域占比面积分别为0.12%,17.08%,31.67%,11.22%,植被生产冷点面积在耕地上的占比最小。2017年固碳、产水量、防风固沙、土壤保持在草地热点面积占比分别为29.43%,14.15%,23.93%,0.46%,土壤保持功能在草地上的占比面积最低,冷点面积占比为5.11%,15.22%,53.42%,0.01%,土壤保持的冷点面积占比最低。2017年固碳、产水量、防风固沙、土壤保持在林地热点面积占比分别为49.10%,32.80%,35.21%,1.03%,其中,植被固碳功能占比最高,土壤保持占比最低、冷点区域占比为5.05%,24.17%,38.75%,4.79%,防风固沙占比最高,土壤保持最低。

2000—2017年,固碳功能在林地和草地的热点面积占比增加约20%,固碳的冷点面积占比大幅下降;产水量在耕地上的冷点面积占比增加13%,在其他2类土地利用类型上基本不变;防风固沙服务的热点区域面积占比均呈下降趋势,冷点区域面积占比呈现上升趋势;土壤保持功能在草地上热点区域面积占比小幅增加,在林地和耕地上均呈下降趋势,冷点区域面积占比在草地呈下降趋势,林地和草地有小幅上升。总体来看,林地能够提供较高的综合生态系统服务功能供给,且2000—2017年,随着工程实施固碳功能热点面积显著上升,表明京津风沙源恢复治理工程成效显现。

3 讨论

京津风沙源区二期工程区是为改善和优化京津及其周边地区生态环境状况而实施的生态工程[20],因此,从长时间序列角度,持续监测该地区生态系统服务功能变化可为实时掌握生态工程的实施效果和存在问题提供必要的信息支撑。利用热点分析工具可有效识别和分析生态系统服务功能区高值和低值的集聚现象[16],对研究区的提供服务能力进行显著性分级[16]。识别分析单项生态系统服务2000—2017年冷热点区域、多年均值冷热点区域、多重生态系统服务热点面积叠加,以及不同土地利用类型上生态系统服务的冷热点面积占比,可实现从多个角度综合有效地评估研究区内不同区域的生态系统服务供给能力和集聚效应,可为基于供给侧生态系统服务和土地利用角度优化提升生态系统服务能力奠定基础[22],同时为后续评估生态恢复成效及生态影响提供一定的数据支撑。

研究区生态系统服务高值多分布于南部地区,总体呈从西北至东南地区递增趋势,研究结果与武海岩等[23]对京津风沙源区水源涵养服务评估和邢晓语[24]对于京津风沙源区域生态系统服务评估结果一致。进一步的热点分析对于这一变化反应更为清晰,4项生态系统服务的热点区域集聚明显南部高于北部地区。从地势条件来看,京津风沙源区东南部海拔较低,相较于北部草原来说,东南部的气候条件更好,利于植被生长[25],从而影响防风固沙、固碳等生态功能,因此,成为生态系统服务功能的热点集中区域[25]。此外,京津风沙源区生态服务功能逐年上升,退耕还林/还草作为我国生态恢复和建设的重大举措[26],生态效应在各区域逐步显现[27],是我国生态改善的主要驱动力之一。

土地利用类型及变化作为影响生态系统服务时空变化的关键因子,通过直接或间接影响生态系统的格局与过程,改变生态系统服务的提供能力[22]。赵筱青等[19]研究发现,综合热点区空间分布格局与林地和石漠化程度有很大的一致性,其研究证明土地利用类型是影响生态系统服务综合供给能力的重要原因之一。本研究区北部土地利用类型以草地为主,相比之下,南部地区的林地提供能力更加具有稳定性,具有更高的植被生产和水土保持功能,其生态效益发挥更具长期性[28-30],因此,在后续生态工程实施中要同时关注草地和林地的修复和恢复,要注重生态工程成果的维持和质量的提升,对于冷点区域而言,要对该区域保持持续监测,采取相应对策提高生态系统服务功能。

本研究主要的局限性为生态系统的评估缺乏实地探测的一手数据,在之后的研究需要结合采集数据进行。研究区的部分区域出现生态系统服务功能降低或增加交替出现,推测可能由于极端气候的出现或者人类活动的干扰,以及不同生态工程的重叠等多种因素导致,其驱动因素需要分段讨论或者对于某一年的生态系统服务功能区突变情况进行归因分析,对此后续还需要进一步研究。

4 结论

(1)2000—2017年,京津风沙源区各项生态系统服务功能均呈波动上升趋势,空间分布异质性明显。高值区主要集中分布在东南部地区,低值区集中分布于西北部,呈从西北向东南部递增态势。

(2)单项热点分析结果表明,2000—2017年,固碳服务热点区域面积大幅度增加,主要集中在南部地区,有明显的非冷热点区域及冷点区域向热点区域转变的现象;防风固沙和土壤保持功能在二期工程实施重点区域,鄂尔多斯高原沙化土地治理区明显由冷点区域向热点区域转化现象,工程实施成效明显;产水

服务热点区域明显增多。

(3)多项生态系统冷热点分析表明,能够提供 2 项及以上的生态系统服务功能地区主要集中在研究区中部和南部,面积约占 15.5%。

(4)不同土地利用类型的生态系统服务冷热点区域面积占比结果显示,不同的土地利用类型的变化在一定程度上影响着生态系统服务功能的高低。2000—2017 年,林地和草地的固碳功能呈上升趋势,林地提供较高的综合生态系统服务功能。

参考文献:

[1] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J].Science,1997,277(5325):494-499.

[2] HASSAN R M, SCHOLES R, ASH N. Ecosystems and human well-being[M]. Washington: Island Press, 2005.

[3] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J].Ecology Letters,2009,12(12):1394-1404.

[4] 李子辉,张亚,巴永等.云南省植被固碳能力与产水、土壤保持服务冷热点识别[J/OL].中国环境科学,1-14[2023-12-28] https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230908.002.
LI Z H, ZHANG Y, BA Y D. Cold and hot spots identification for carbon sequestration capacity, water yield and soil conservation services of vegetation in Yunnan Province[J/OL]. China Environmental Science: 1-14[2023-12-28]. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230908.002.

[5] WANG C S, SUN G Y, DANG L J. Identifying ecological red lines: A case study of the coast in Liaoning Province[J].Sustainability,2015,7(7):9461-9477.

[6] THOMPSON B S, PRIMAVERA J H, FRIESS D A. Governance and implementation challenges for mangrove forest payments for ecosystem services (PES): Empirical evidence from the Philippines[J]. Ecosystem Services,2017,23:146-155.

[7] 潘换换,吴树荣,姬倩倩,等.山西煤田生态系统服务时空格局及驱动力[J].应用生态学报,2021,32(11):3923-3932.
PAN H H, WU S R, JI Q Q, et al. Spatio-temporal pattern and driving forces of ecosystem services in coalfields of Shanxi Province, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(11):3923-3932.

[8] 张彪,李庆旭,王爽,等.京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异[J].自然资源学报,2019,34(5):1041-1053.
ZHANG B, LI Q X, WANG S, et al. Spatial-temporal changes and regional differences of the sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region[J]. Journal of Natural Resources,2019,34(5):1041-1053.

[9] 杜佳衡,王锦.基于 InVEST 模型的大理州永平县水生态系统服务功能时空变化分析[J].西部林业科学,2021,50(6):91-102.
DU J H, WANG J. Analysis of spatio-temporal changes of water ecosystem service function in Yongping county, dali prefecture based on InVEST model[J]. Journal of West China Forestry Science,2021,50(6):91-102.

[10] 窦苗.基于 InVEST 模型的横断山区产水功能时空变化及其影响因素研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
DOU M. Analysis of spatio-temporal changes of water ecosystem service function in Yongping county, dali prefecture based on InVEST model[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2018.

[11] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
HUAN H, GAO J B, HOU W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: Based on the geographical detector method[J].Acta Geographica Sinica, 2018,73(9):1674-1686.

[12] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001-2010 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
LI T H, ZHENG L N. Soil erosion changes in the Yanhe watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7): 1164-1175.

[13] 张镱锂,祁威,周才平,等.青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J].地理学报,2013,68(9):1197-1211.
ZHANG Y L, QI W, ZHOU C P, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009[J].Acta Geographica Sinica, 2013,68(9):1197-1211.

[14] 王立群,乔娜,康瑞斌.京津风沙源治理工程生态影响及评估研究进展和展望[J].林业经济,2013(6):13-17.
WANG L Q, QIAO N, KANG R B. Review of the research on ecological effects and evaluation of sandstorm source control project in and around Beijing and Tianjin[J].Forestry Economics,2013,35(6):13-17.

[15] 高会,付同刚,梁红柱,等.太行山区生态系统服务冷热点区域识别及其权衡/协同关系分析[J].中国生态农业学报,2022,30(7):1045-1053.
GAO H, FU T G, LIANG H Z, et al. Cold/hot spots identification and tradeoff/synergy analysis of ecosystem services in Taihang Mountain area[J].Chinese Journal of

Eco-Agriculture,2022,30(7):1045-1053.

[16] 王壮壮,张立伟,李旭谱,等.流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J].生态学报,2019,39(3):823-834.
WANG Z Z, ZHANG L W, LI X P, et al. The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(3):823-834.

[17] 刘浩,马琳,李国平.京津冀地区经济发展冷热点格局演化及其影响因素[J].地理研究,2017,36(1):97-108.
LIU H, MA L, LI G P. Pattern evolution and its contributory factor of cold spots and hot spots of economic development in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geographical Research,2017,36(1):97-108.

[18] 吕立刚,周生路,周兵兵,等.区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究:以江苏省为例[J].地理科学,2013,33(12):1442-1449.
LU L G, ZHOU S L, ZHOU B B, et al. Land use transformation and its eco-environmental response in process of the regional development: A case study of Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica,2013,33(12):1442-1449.

[19] 赵筱青,石小倩,李驭豪,等.滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J].地理学报,2022,77(3):736-756.
ZHAO X Q, SHI X Q, LI Y H, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan[J]. Acta Geographica Sinica,2022,77(3):736-756.

[20] 刘彦平,张国红,杨跃军,等.《京津风沙源治理工程二期规划》战略调整[J].林业调查规划,2013,38(6):92-95.
LIU Y P, ZHANG G H, YANG Y J, et al. Strategic adjustment on the second phase of planning of Beijing-Tianjin sandtorm-control project[J]. Forest Inventory and Planning,2013,38(6):92-95.

[21] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925.

[22] 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[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
FU B J, ZHANG L W. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography,2014,33(4):441-446.

[23] 武海岩,赵媛媛,杜林芳,等.京津风沙源治理工程区土地利用/覆盖变化对生态系统水源涵养服务的影响[J].北京林业大学学报,2023,45(4):88-100.
WU H Y, ZHAO Y Y, DU L F, et al. Effects of land use/cover changes on water retention services in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project Area[J]. Journal of Beijing Forestry University,2023,45(4):88-100.

[24] 邢晓语.京津风沙源治理工程区生态系统服务评估及防风固沙空间流动研究[D].北京:中国农业科学院,2021.
XING X Y. Assessment of ecosystem services and study on spatial flow of wind prevention and sand fixation in Beijing-Tianjin sand source control engineering[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2021.

[25] 潘换换,吴树荣,杨琪雪,等.山西煤田生态系统服务热(冷)点时空格局[J].干旱区地理,2021,44(6):1686-1695.
PAN H H, WU S R, YANG Q X, et al. Spatiotemporal pattern of hotspots (coldspots) of ecosystem services in coalfields of Shanxi Province[J]. Arid Land Geography,2021,44(6):1686-1695.

[26] 曹梦琪,蔡英楠,张丽,等.卧龙自然保护区典型生态系统服务时空变化研究[J].生态学报,2021,41(23):9341-9353.
CAO M Q, CAI Y N, ZHANG L, et al. Temporal and spatial variation of typical ecosystem services in Wolong Nature Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(23):9341-9353.

[27] 苏常红,王亚璐.汾河上游流域生态系统服务变化及驱动因素[J].生态学报,2018,38(22):7886-7898.
SU C H, WANG Y L. Evolution of ecosystem services and its driving factors in the upper reaches of the Fenhe River watershed,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(22):7886-7898.

[28] LI Y G, LIU W, FENG Q, et al. Quantitative assessment for the spatiotemporal changes of ecosystem services, tradeoff-synergy relationships and drivers in the semi-arid regions of China[J]. Remote Sensing,2022,14(1):e239.

[29] FISHER B, POLASKY S, STERNER T. Conservation and human welfare: Economic analysis of ecosystem services[J]. Environmental and Resource Economics,2011,48(2):151-159.

[30] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(3):726-736.
LI Q F, LUO Y C, LIU G, et al. Effects of land use change on ecosystem services: A case study in Miyun Reservoir watershed[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(3):726-736.