

基于域—生物群系—功能群分类的生态系统类型识别及时空格局变化分析

——以河北省太行山区为例

毕善婷¹, 陈影^{1,3}, 李泽², 屈爽², 赵文超², 梁阅兵²

(1.河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071000; 2.河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 3.河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000)

摘要: [目的] 科学识别河北省太行山区生态系统类型, 是理解河北省太行山区生态系统时空分布格局和支撑生态系统分类管理的基础。[方法] 基于域—生物群系—功能群(RBE)的分类原理, 构建了包括3个1级, 8个2级和24个3级类的生态系统分类体系, 并集成多源数据, 开展了2000和2020年的河北省太行山区生态系统的分类制图。基于RUSLE模型、InVEST模型和热点分析等方法, 分析生态系统服务的时空格局演变。[结果] ①河北省太行山区20 a间建设用地生态系统增加最多, 主要来自农田生态系统。农田生态系统缩减了61 105.95 hm², 以雨养农田为主。受人类活动的影响, 河流和人工湿地面积分别增加了5 584.32和2 535.66 hm², 而林地和草地生态系统减幅分别为0.96%和8.18%。未利用地生态系统受研究区生态保护措施影响减少5 800.68 hm²。②生态系统服务值受生态系统类型分布影响总体呈现西高东低的分布格局, 除粮食供给服务为西低东高, 主要是由于农田主要分布在东部地区。③冷热点区域空间分布整体上具有重叠性, 但仍有差异。[结论] 提出的分类体系具有可行性, 分类精度达到80%以上, 符合研究区的生态系统类型变化趋势, 可为识别山区生态系统分类和生态系统保护修复政策提供科学支撑, 进而促进山区生态发展目标和可持续发展的实现。

关键词: 生态系统分类; 生态系统服务; 时空分布格局; 河北省太行山区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)02-0236-09

中图分类号: X171.1

文献参数: 毕善婷, 陈影, 李泽, 等. 基于域—生物群系—功能群分类的生态系统类型识别及时空格局变化分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 236-244. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.025; Bi Shanting, Chen Ying, Li Ze, et al. Ecosystem type recognition and spatiotemporal pattern change analysis based on realms-biomes-ecosystem classification [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 236-244.

Ecosystem Type Recognition and Spatiotemporal Pattern Change Analysis

Based on Realms-Biomes-Ecosystem Classification

—A Case Study of Taihang Mountains Area in Hebei Province

Bi Shanting¹, Chen Ying^{1,3}, Li Ze², Qu Shuang², Zhao Wenchao², Liang Yuebing²

(1. School of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China;

2. School of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000,

China; 3. Key Laboratory of Agricultural Ecological Environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: [Objective] The ecosystem types in the Taihang Mountain area of Hebei Province were scientifically identified in order to provide a basis for understanding the spatial and temporal distribution pattern of ecosystems in the area and to support ecosystem classification management. [Methods] Based on the classification principle of realms-biomes-ecosystem (RBE) functional groups, a classification system

收稿日期: 2023-10-18

修回日期: 2023-11-08

资助项目: 河北省重点研发项目“基于障碍特征分异的河北省滨海盐碱地生态改良关键技术研究”(202327506D); 国家自然科学基金项目“农村居民点空闲地形成机理及其再利用模式”(42071249); 河北省科技厅科技合作项目“阳原县盐碱地适宜作物种植技术示范与推广”

第一作者: 毕善婷(1999—), 女(汉族), 安徽省淮南市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源调查与评价。Email: bishanting814@163.com。

通信作者: 陈影(1981—), 男(汉族), 河北省沧州市人, 博士, 副教授, 主要从事土地生态整治与修复以及土地多功能调查、评价与规划方面的研究。Email: chenqy_2005@163.com。

including 3 primary classes, 8 secondary classes and 24 tertiary classes was constructed, and multi-source data was integrated to carry out classification mapping of the ecosystems in the Taihang Mountains area in Hebei Province in 2000 and 2020. The spatio-temporal evolution of ecosystem services was analyzed based on the RUSLE model, the InVEST model, and hot spot analysis. [Results] ① The construction land ecosystem in the Taihang Mountain area increased the most during the past 20 years, mainly coming from the farmland ecosystem. The farmland ecosystem decreased by 61 105.95 hm² and was dominated by rain-fed farmland. Due to the influence of human activities, the areas of rivers and constructed wetlands increased by 5 584.32 hm² and 2 535.66 hm², respectively, while the areas of forest and grassland ecosystems decreased by 0.96% and 8.18%, respectively. The area of the unused land ecosystem decreased by 5 800.68 hm² due to the ecological protection measures instituted in the study area. ② The distribution of ecosystem types affected the overall distribution pattern of ecosystem service values, with high values in the west and low values in the east. The exception was for food supply service values where the distribution was low in the west and high in the east, mainly because farmland was located in the eastern region. ③ The spatial distribution of cold spots and hot spots generally overlapped, but there were still differences. [Conclusion] The classification system proposed in this study is feasible, with a classification accuracy of greater than 80%, which is in line with the trend for ecosystem type changes in the study area. This classification system can provide scientific support for the identification of mountain ecosystem classification and ecosystem protection and restoration policies, thereby promoting the realization of mountain ecological development goals and sustainable development.

Keywords: ecosystem classification; ecosystem services; spatial and temporal distribution pattern; Taihang Mountains area in Hebei Province

生态系统是由植物和动物以及它们之间的联结和环境构成的整体^[1],国际生物多样性保护和可持续发展战略现已充分认识到确保不同空间尺度生态系统多样性的必要性。《生物多样性公约》《欧洲栖息地指令》《泛欧生物和景观多样性战略》和《欧洲景观公约》都侧重于生态系统多样性和由于自然和/或人为因素的作用和相互作用而产生的景观多样性^[2]。在这些举措的推动下,近些年来,生态系统分类受到越来越多的关注。目前 USGS, CORINE, IGBP, UMD, FAO, ESA 和中国的相关学者^[1-4]都先后提出了各自的土地利用/覆被分类系统。关于生态系统类型的分类,有着悠久的发展历史,起源于俄罗斯和北欧,在加拿大南部和美国也有许多变异。Mona 等^[5]在 1:100 万尺度下,根据地貌、气候和植被将伊朗生态系统进行分类,共获得 119 个同质生态单元,并根据主导植被类型将其划分为 21 个国家陆地生态系统。Giulia 等^[6]利用景观保育指数总结环境质素,评估各土地单元的保育状况,并绘制了意大利 3 个陆地地区、24 个陆地系统和 149 个陆地面。刘亚群等^[7]人以生态系统服务功能和人类干预为主线构建了一个包括 9 个 1 级和 25 个 2 级的分类方案。但目前还没有全球一致的生态系统分类,以反映对变化和管理的功能反应,而科学认知生态系统结构是制定可持续生态系统管理战略的先决条件。关于生态系统类型的研究甚少,大多是基于土地利用/覆被的分类。因此,

本研究将功能和生物群系整合到类型化的层次结构中,根据域—生物群系—功能群分类原理,形成了一个新的生态系统分类方案,为国家对重大生态问题的决策、生态系统分类管理、宏观调控和科学决策提供科学数据支撑。

生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统中获得的收益^[8-9]。作为连接人类社会与自然生态系统的“桥梁”,体现了自然生态系统对人类社会的福祉,是人类社会赖以生存和发展的环境与资源基础^[10-11]。联合国千年系统评估将生态系统服务功能分为供应、支持、调节和文化服务功能 4 类,这些功能与生态系统衔接,可以体现出人类获得的各种直接的和间接的、有形的和无形的效益。粮食供给(FS)、水源涵养(WY)、土壤保持(SR)、碳储存(CS)和生境质量(HQ)是至关重要的生态系统服务^[12],已引起社会、资源和环境可持续发展的广泛关注。近年来,越来越多的人开始关注探索 ES 的空间分布和时间变化特征,多涉及生态系统服务价值评估、优化管理等方面^[13-15]。而基于空间统计分析,从空间视角对多种生态系统服务类型的空间格局分析较少,且大多都是基于土地利用类型对 ES 进行评价^[16-18]。土地利用类型仅仅反映了土地利用方式的差异,而生态系统是一个类型多样且具有空间异质性的整体,它可以直接改变生态系统的结构和功能,从而影响生态系统服务的可持续性和变化。生态系统结构和功能为区域安

全的设计和管理、维护生态系统的价值、实现生态系统的稳定和耦合社会自然系统的平衡提供了坚实的基础。因此针对生态系统服务的评价,基于生态系统类型进行研究更为贴切,而现有与生态系统类型结合的研究少之又少。因此本研究基于生态系统类型进行生态系统服务评价对于解决研究区生态环境问题至关重要,是土地利用规划保护自然资本和协调人类发展目标的关键前提。

山地是生态系统中类型最为丰富的,且针对生态系统服务评价的研究是最少的,尽管其通常被视为遗产地或受保护的景观,但是由于气候、人口和经济变化,其生态系统日益受到威胁,因此山区生态环境的保护显得尤为重要。河北省太行山区作为北京生态安全战略格局的山区生态圈,是华北平原的生态屏障。近年来,太行山区经济的快速发展和土地利用的急剧变化、农业集约化、人口城镇化,严峻考验着这个人们赖以生存的生态系统。因此,本研究基于域—生物群系—功能群构建生态系统分类体系,以河北省太行山区为例,科学认识和识别生态系统结构,对生态系统进行分类,分析其 2000—2020 年的类型变化;然后对 5 个生态系统服务时空分布格局进行量化和映射。研究结果可为区域生态系统分类、山区生态系统保护和土地管理提供参考,并对制定山区生态系统改善和修复政策具有重要意义。

1 研究区概况、数据与研究方法

1.1 研究区概况

河北省太行山区(34°34′—40°43′N, 110°14′—114°33′E),位于河北省境内西部,山脉整体呈东北—西南走势,山体北侧高、南侧低、东部陡、西部缓,且大部分海拔在 1 200 m 以上。属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温在 10 ℃左右,年降水量在 534 mm 左右。同时,这里还有丰富的自然资源。但由于该区矿产资源的过度开发利用和土地利用类型的转变,水土流失和土地退化导致土壤有机质的流失,生物多样性下降、生态环境退化、生态系统服务功能丧失,区域生态安全受到严重威胁,对生态系统可持续发展和建设构成巨大的挑战。21 世纪的河北省太行山区是华北平原的生态屏障,生态系统保护修复是可持续发展战略格局体系下维护国家生态安全的重要任务。

1.2 数据来源及预处理

本研究基础数据包括:①2000 和 2020 年土地利用/覆被数据,来源于中国科学院资源环境科学与数

据中心和地球大数据科学工程(由中国科学院空天信息创新研究院研究团队发布),空间分辨率为 30 m。②DEM,NDVI 数据来源于地理空间数据云,空间分辨率为 30 m。③2000—2020 年的气象数据,包括降水量、潜在蒸散发数据,来源于国家青藏高原科学数据中心,空间分辨率 1 000 m;④2000—2020 年 NPP 数据来源于美国地质调查局(USGS)的 MOD17A3 HGF Version 6.0 产品,空间分辨率为 500 m。⑤相关社会经济数据来源于各地的统计年鉴。⑥其他数据,包括行政区、流域、水系、植被类型等矢量数据均来自于中国科学院资源与环境科学数据中心。使用 ArcGIS 和 ENVI 对源数据进行预处理,将所有数据统一重采样为投影坐标系 WGS_1984_UTM_zone_49N,空间分辨率为 30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 RBE 分类体系

(1) 分类原则与指标。参考相关学者^[19-20]提出的分类方法,在罗海江等^[21]提出的生态土地分类原则和指标基础上,以生态异质性、完备性、历史数据的连续性、主导性为原则,以地形因素、植被覆盖度、土地利用方式、人类活动等作为主要分类指标。

(2) 分类方案。本研究基于领域—生物群系—功能群(realms-biomes-ecosystem, RBE)^[22]分类标准,根据自然和人为等驱动因素对生态系统进行分类(表 1)。这个新的分类系统确定了 3 个领域、8 个生物群系和 24 个功能群。1 级分类基于反映生态过程和功能特性的对比介质,定义生态系统的 2 个核心领域:陆地和淡水生态系统。由于自然界的连续变化,随着生态系统性质的持续变化,两个核心领域之间会产生一个过渡领域,因此本研究还界定了过渡领域,即陆地—淡水生态系统,这些领域拥有自己独特的组织和功能。2 级分类—生物群系(biome)是一类生态系统,其成员具有类似的植被结构和过程,并在全球不同地点重复出现,是由生态系统结构的广泛特征和一个或几个调节主要生态功能的共同主要生态驱动因素联合而成。人类活动通过与土地利用相关的结构性操作,以及生物群的移动和人为气候变化,成为关键驱动力。依据土地的自然生态和利用属性,共划分出农田、林地、草地、建设用地、未利用地、河流、人工湿地和沼泽湿地 8 个 2 级类型。3 级分类是一个生物群落内的一组相关生态系统,它们共享共同的生态驱动力,这反过来促进了该群体的相似生物特征^[22]。生态系统功能群根据气候、地形、植被覆盖度、土地利用结构、土壤、地质、人为因素等进行区分。

表 1 生态系统分类体系
Table 1 Ecosystem classification system

I 级编码	I 级分类	II 级编码	II 级分类	III 级编码	III 级分类	定义
1	陆地生态系统	11	农田	111	雨养农田	依靠天然降雨为主要灌溉水源且远离水源的农田
				112	灌溉农田	以人为灌溉方式为主的农田
				121	常绿阔叶林	亚热带温暖湿润地区常绿阔叶树种组成的森林
		12	林地	122	落叶阔叶林	温带大陆性气候生长的冬季落叶,夏季绿叶的森林
				123	常绿针叶林	寒温带地区由喜寒干燥的针叶树种组成的森林
				124	落叶针叶林	寒温带由冬季落叶,夏季绿叶的针叶林树种组成的森林
				125	灌木林	以灌木为主的植被类型
				126	稀疏植被	以早生或超早生植物为主的植被类型,植被覆盖度低
		13	草地	131	低覆盖度草地	植被覆盖度(FVC)大于 30%且小于等于 50%的草地
				132	中覆盖度草地	FVC 大于 50%且小于等于 70%的草地
				133	高覆盖度草地	FVC 大于 70%的草地
		14	建设用地	141	城镇用地	实施城镇规划占用的土地
				142	农村居民点	农村人口集聚的场所
				143	其他建设用地	除城镇用地和农村居民点以外的用地
		15	未利用地	151	沙地	地表由沙覆盖的、植被较少的地区
152	盐碱地			盐碱化度较高影响作物生长的土地		
153	裸地			无植被生长的裸露地面		
2	淡水生态系统	21	河流	211	平原河流	地形起伏度大于 50 且小于等于 200 的水流
				212	丘陵河流	地形起伏度大于 200 且小于等于 500 的水流
				213	山地河流	地形起伏度大于 500 的水流
				214	其他水体	地形起伏度小于等于 50 的河流
		22	人工湿地	221	水库坑塘	人为开挖或天然形成的蓄水调节水流的水利工程建筑物
3	陆地—淡水生态系统	31	沼泽湿地	311	沼泽地	长期受积水浸泡,水草茂密的泥泞地区
				312	滩地	河流边淤积而成的平地或水中的沙洲

(3) 分类制图方法。由于河北省太行山区属于内陆区域,基于实际调研和相关数据资料,以海拔高度、土地利用结构、植被覆盖度、坡度、地形起伏度和土壤类型为主要指标,通过 ArcGIS 软件重采样、插值等预处理方法,获取各栅格的指标属性,然后通过栅格综合、分区统计和空间分析制图等方法,对生态系统类型进行识别。对于陆地生态系统,基于土地利用数据,首先将水域、湿地部分剔除。然后以植被覆盖度(FVC)、土地利用结构、植被类型和气候数据区分出农田、林地、草地、建设用地和未利用地 5 个生物群系。根据降雨量以及距水域的距离远近,将农田生物群系划分为两个功能群:灌溉农田和雨养农田,体现土地管理方式、生产力、灌溉方式和干旱指数等的差异;气候数据、植被覆盖类型以及 FVC 是划分林地的关键指标,将 $FVC < 15\%$ 的林地判定为稀疏植被,然后基于植被覆盖类型数据将其划分为常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林、灌木林,体现了生态系统水土保持能力和碳固持的差异;基于 Landsat 8 OLI 数据,根据像元二分模型^[23]计算区域的

植被覆盖度(FVC),草地生物群系按照 FVC 将其界定为低覆盖度($FVC > 30\%$)、中覆盖度($FVC > 50\%$)和高覆盖度草地($FVC > 70\%$),展现了草地生产力和退化程度的差异。本研究参照中国土地利用类型,将建设用地划分为城镇用地、农村居民点和其他建设用地,体现了人类活动强度和集聚的差异;未利用地划分为沙地、盐碱地和裸地。淡水生态系统参照中国河网、流域类型图以及人为因素划分为河流和人工湿地两个生物群系。河流生物群系主要依照地形因素将其划分为山地河流(地形起伏度 > 500 m)、丘陵河流(地形起伏度 > 200 m)、平原河流(地形起伏度 > 50 m)和其他水体,体现出河流流速及水源涵养功能的差异;根据中国土地利用类型二级分类将水库坑塘归为人工湿地。陆地—淡水生态系统参照全球生态系统类型学以及研究区实际情况,将沼泽湿地归于这一类,并根据中国土地利用类型以及季节性因子划分为沼泽地和滩地(洪泛平原)。

1.3.2 生态系统服务量化 生态系统服务是指人类从生态系统中获得的一切利益,包括供应、调节、文化

和支持服务。具体来说,粮食供给服务是生态系统供给服务的直接体现,是根据农作物产出与 NPP 之间的相当大的相关性来量化的^[24]。水源涵养是指生态系统拦截或储存来自降水的水资源的能力,使用 InVEST 模型的产水量模块进行计算^[25]。水土保持是指生态系统提供的水土流失控制、拦沙、污泥储存等能力,利用 RUSLE 模型进行计算,具体公式参考文献^[26-27]。碳储存是指生态系统捕获和储存大气二氧化碳的能力,是一种初级调节服务,也是气候调节的重要指标,计算公式为 InVEST 模型的碳封存模块^[28-29]。生境质量是指生态系统保证物种生存、繁殖和交流的能力,与生物多样性正相关,采用 InVEST 模型的生境质量模块进行计算^[30-31]。

1.3.3 热点分析法 生态系统服务的冷热点分析是一种反映生态系统服务的高值或低值在空间上的聚集情况及其聚类方式。在 GIS 平台中使用基于 G_i^* 统计指数 (Getis-Ord G_i^* statistics) 的热点分析工具分析生态系统服务的冷热点区域。参考王蓓等人^[32] 研究结果,进行生态系统服务冷热点分区。

2 结果与分析

2.1 河北省太行山区生态系统分类的时空格局变化

本研究依照上述分类体系(表 1),科学识别了河北省太行山区 2000 年和 2020 年的生态系统类型,共识别出 3 个一级类型、8 个二级类型和 24 个三级类型。通过混淆矩阵进行分类精度评价,分类精度达到 80% 以上。如图 1 所示,陆地生态系统几乎覆盖全域,占总生态系统面积的 97.32%。近 20 a 河北省太行山区生态系统类型的时空分布均发生了一定的变化,农田生态系统从空间上看,分布在东部和西北部等地区,地势较为平坦,适合耕作;相对于 2000 年,受城市扩张和退耕还林、还草的影响,农田生态系统破碎度增加,其面积减少了 61 106 hm^2 (表 2),大部分转换为建设用地生态系统,其次就是林草生态系统(图 2)。是因为随着城镇化的发展,城镇规模在不断扩大,以及退耕还林还草工程的实施,使得农田面积减少和耕地破碎成为普遍现象。

林、草地生态系统从空间上看呈 S 形分布。2020 年林、草地生态系统相比于 2000 年减少 128 998.44 hm^2 ,高、中覆盖度草地减少和温带低覆盖度草地增加,主要转为农田和林地生态系统,发生在张家口和东部部分区域,涉县的转换最为凸显。近年来,防治水土流失,是生态环境建设的急迫任务。退草还耕、退耕还草还林工程相继实施,致使农田生态系统和草地生态系统交替互转。

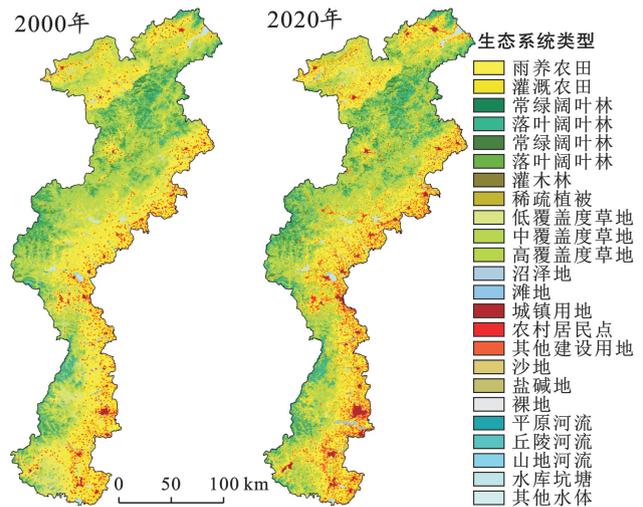


图 1 河北省太行山区 2000 和 2020 年生态系统类型的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of ecosystem types in Taihang Mountain area of Hebei Province in 2000 and 2020

表 2 河北省太行山区 2000 和 2020 年生态系统分类及面积

Table 2 Classification and area of ecosystem in Taihang Mountain area of Hebei Province in 2000 and 2020

I 级分类	II 级分类	III 级分类	面积/ hm^2	
			2000 年	2020 年
1	11	111	$1\ 272.45 \times 10^3$	$1\ 219.59 \times 10^3$
		112	86.03×10^3	77.77×10^3
		121	0.16×10^3	0.15×10^3
		122	499.58×10^3	505.63×10^3
		123	169.83×10^3	165.15×10^3
	12	124	0.24×10^3	0.28×10^3
		125	3.73×10^3	4.00×10^3
		126	61.38×10^3	52.62×10^3
		131	258.73×10^3	64.00×10^3
		13	132	527.64×10^3
	14	133	703.65×10^3	$1\ 027.97 \times 10^3$
		141	24.00×10^3	54.73×10^3
		142	126.18×10^3	202.16×10^3
		143	110.26×10^3	195.40×10^3
		151	0.79×10^3	1.11×10^3
15	152	2.50×10^3	0.15×10^3	
	152	22.86×10^3	19.08×10^3	
	2	211	4.89×10^3	9.70×10^3
		212	6.92×10^3	9.86×10^3
		213	0.40×10^3	0.52×10^3
214		4.26×10^3	1.97×10^3	
3	22	221	27.07×10^3	29.60×10^3
	31	311	10.29×10^3	13.53×10^3
		312	47.64×10^3	41.25×10^3

随着城镇化经济的快速发展以及工业化建设的需要,城镇急需向外围继续扩大,加上当地政府对耕地保护的意识淡薄,许多城镇占用农田,建设用地生态系统相比于 2000 年增加面积最多,为 191 861.82 hm²,如图 2 所示主要来自于农田生态系统,其次就是林草地生态系统,分布在东部,地势较为平坦的地区,即人口密集的地区,其他地方也零星分布。未利用地生态系统分布较少,且呈减少趋势,盐碱地和裸地减少较多,主要得益于近些年来研究区域生态保护修复工程,如盐碱地改良技术等取得了一定的成效。河流和人工湿地生态系统较 2000 年都呈增加趋势,分布较为分散;陆地—淡水生态系统面积较 2000 年减少,但减少面积较少,淡水生态系统和陆地—淡水生态系统的增加主要来自于农田和草地生态系统,主要得益于湿地保护政策。

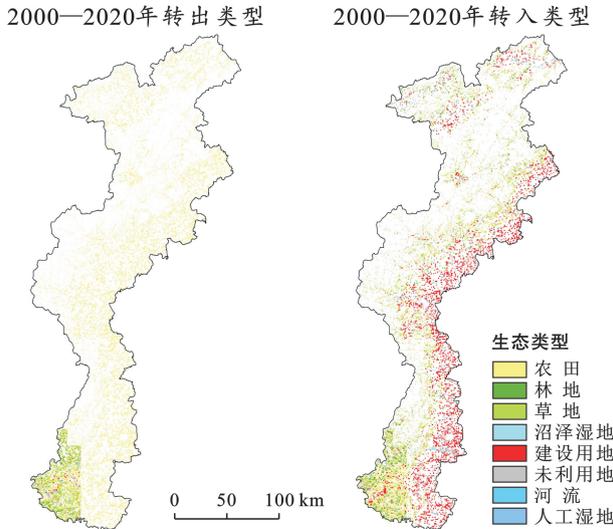


图 2 河北省太行山区生态系统类型转移的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem type transfer in Taihang Mountain area of Hebei Province

2.2 河北省太行山区生态系统服务评价

2.2.1 生态系统服务分布格局 2000—2020 年河北省太行山区的粮食供给服务、土壤保持呈现逐年增加的趋势,而产水量、碳储存和生境质量年均变化不显著,略有下降。主要是由于近年来随着农业技术的发展与各地政府不断加强惠农强农力度,优化农业结构,推进农业技术提升,使得粮食产量得以提高。但与之而来的就是生态环境受到一定的破坏,使得碳储存和生境质量服务下降。从空间分布来看(图 3),粮食供给服务大致呈现西低东高的分布格局。西北部地区粮食产量较高,是由于近年来当地政府出台相关政策保护农业,使得粮食产量较高。粮食产量低值区主要分布在西部,该区域地形结构复杂,山地、丘陵交

错分布,耕地数量较少,因此粮食产量较低。产水量服务南部均高于北部,2020 年河北省太行山区全域的产水量大部分均有明显的增长,但东南部产水量有明显下降。这一现象产生的原因是近年来降雨量的增加,致使区域产水量普遍增长。土壤保持、碳储存和生境质量均呈现出西高东低的分布格局,年际空间差异不明显。与生态系统类型关系密切,植被覆盖度作为刻画地表植被覆盖的重要参数,高植被覆盖度表明生物多样性丰富,可以显著提高产水量、碳储存和生境质量服务。

2.2.2 生态系统服务空间热点分析 由图 4 可以看出,粮食供给的热点区域主要分布在东部和西北部,冷点区域主要分布在北部和东南部地区。水源涵养、土壤保持、碳储存和生境质量的冷热点区域在空间分布上较为相似,热点区域集中在西部和中部偏北地区,而西北部和东部区域则为冷点区域,部分地区存在细微差异,如东部地区零星分布着土壤保持和碳储存的热点区域,南部土壤保持冷点区域主要分布在东南部。热点区面积的比例排序为:生境质量>碳储存>粮食供给>水源涵养>土壤保持,生境质量和碳储存服务在空间上高值区聚集效应较为明显。冷点区面积比例排序为:土壤保持>碳储存>粮食供给>生境质量>水源涵养,土壤保持和碳储存服务在空间上低值区聚集效应较为显著。综上所述,5 项生态系统服务的冷热点区域在整体分布上具有相似性和重叠性,但仍有所差异。面积分布较为接近,但生境质量服务热点区的面积比例较高,土壤保持服务的冷点区所占比例较高。

3 讨论

(1) 生态系统分类结果验证及其与其他分类系统的区别。本研究以域—生物群系—功能群结构为主线,科学识别河北省太行山区,形成 3 个一级、8 个二级和 24 个三级类的生态系统分类方案,刻画了生态系统的类型组合和过渡特征。例如,将沼泽湿地归为陆地—淡水过渡生态系统,与淡水生态系统区分开。分类方案具有科学性和合理性^[7,9,33-34],适用于中小尺度生态系统识别与监测,服务于宏观尺度生态系统的类型识别和分类管理。该分类集成了多源数据,未来可以综合其他自然和人为因素,进一步优选识别生态系统分类指标,在此基础上进一步细分和改进,使分类结果更稳定。最后,本研究只开展了三级分类,且适用于中小尺度,未来可综合其他因素探索适合于微小尺度的分类体系,并将分类体系拓展至更高一级的分类。

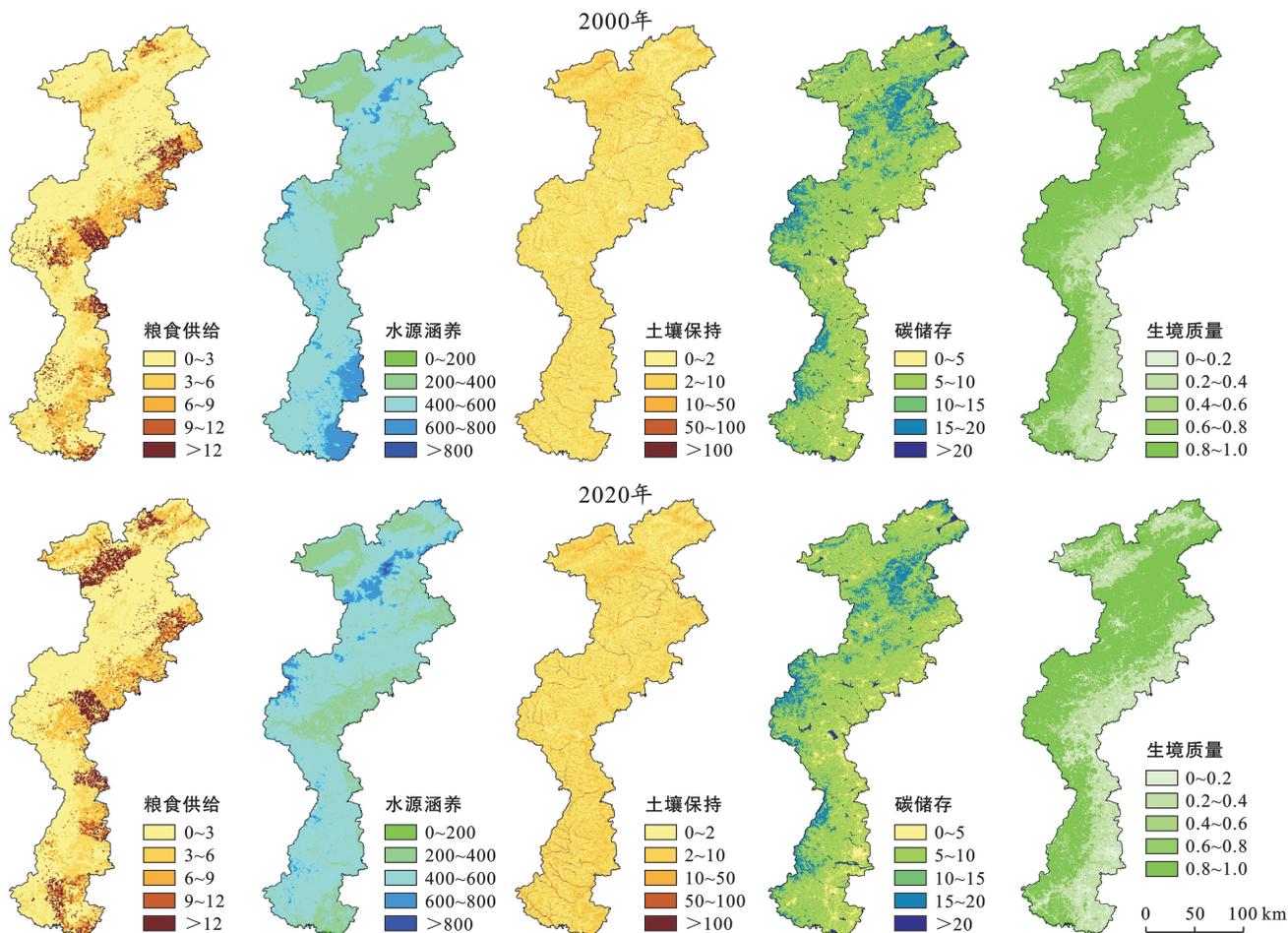


图 3 河北省太行山区 2000 和 2020 年生态系统服务时空分布

Fig.3 Temporal and spatial distribution of ecosystem services in Taihang Mountain area of Hebei Province in 2000 and 2020

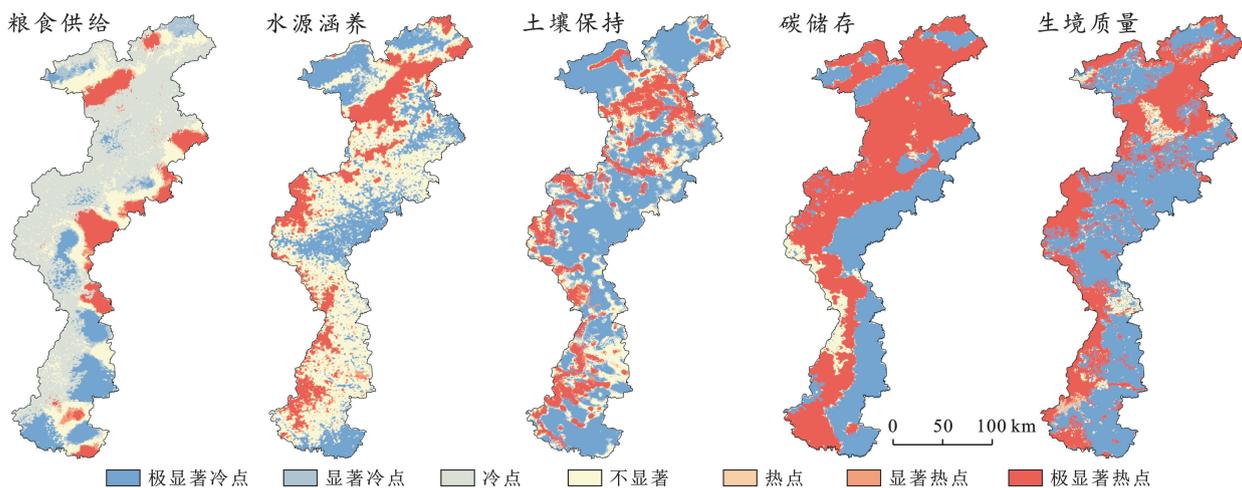


图 4 河北省太行山区生态系统服务冷热点分布

Fig.4 Distribution of cold and hot spots of ecosystem services in Taihang Mountains of Hebei Province

(2) 河北省太行山区生态系统服务评价。河北省太行山区地处河北省西部,是京津冀地区生态景观的重要组成部分。近年来国内外对于生态系统服务空间格局的研究日益成熟,但采用空间统计方法分析生态系统服务时空分布的研究还依然不足。本研究

对河北省太行山区粮食生产、产水量、土壤保持、碳储存和生境质量 5 个生态系统服务进行了测算,基于栅格尺度对生态系统服务时空分布进行可视化分析。除了采用 InVEST 和 RUSLE 模型对生态系统服务进行空间制图外,还应用了空间统计方法分析各项生

态系统服务的冷热点空间分布特征。但在研究过程中,由于数据获得的困难性,本研究仅选取了供给、调节和支持服务进行评价,分析不够全面,缺少对文化服务的评估。下一步需要考虑更全面的生态系统服务,也可以考虑比较不同空间尺度下生态系统的时空变化趋势,有助于确定不同生态系统之间的尺度差异。

4 结论

(1) 河北省太行山区生态系统由 3 个领域,8 个生物群系和 24 个功能群组成。2000—2020 年间,研究区陆地生态系统几乎覆盖全域,农田、草地、沼泽湿地和未利用地面积均有所减少,其他生态系统类型相对增加,其中农田、草地和建设用地的转换最为明显,表明这一时期河北省太行山区人类活动对原始生态系统产生了较强的干扰作用。

(2) 生态系统服务总体呈现西高东低的分布格局,高植被覆盖度能够显著提升生态系统服务功能,西部以林草生态系统为主,因此生态系统服务功能较好;只有粮食供给服务西低东高,主要是由于农田主要分布在东部地区。

(3) 粮食供给的热点区域主要分布在东部和西北部,冷点区域主要分布在北部和东南部地区;水源涵养、土壤保持、碳储存和生境质量的冷热点区域在空间分布上较为相似,热点区域主要分布在西部和中部偏北地区,冷点区域主要分布在西北部和东部区域,但在局部地区存在一定的差异。5 项生态系统服务的冷热点区域空间分布有所差异,但整体上具有重叠性,且面积分布较为接近,除生境质量服务热点区的面积比例较高。

参考文献 (References)

[1] 张景华,封志明,姜鲁光.土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J].资源科学,2011,33(6):1195-1203.
Zhang Jinghua, Feng Zhiming, Jiang Luguang. Progress on studies of land use/land cover classification systems [J]. Resources Science, 2011,33(6):1195-1203.

[2] 曹宇,莫利江,李艳,等.湿地景观生态分类研究进展[J].应用生态学报,2009,20(12):3084-3092.
Cao Yu, Mo Lijiang, Li Yan, et al. Wetland landscape ecological classification: Research progress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(12):3084-3092.

[3] 欧阳志云,张路,吴炳方,等.基于遥感技术的全国生态系统分类体系[J].生态学报,2015,35(2):219-226.
Ouyang Zhiyun, Zhang Lu, Wu Bingfang, et al. An ecosystem classification system based on remote sensor information in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35

(2):219-226.

- [4] Grekousis G, Mountrakis G, Kavouras M. An overview of 21 global and 43 regional land-cover mapping products [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015,36(21):5309-5335.
- [5] Azizi Jalilian M, Shayesteh K, Danehkar A, et al. A new ecosystem-based land classification of Iran for conservation goals [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020,192:1-17.
- [6] Capotorti G, Guida D, Siervo V, et al. Ecological classification of land and conservation of biodiversity at the national level: The case of Italy [J]. Biological Conservation, 2012,147(1):174-183.
- [7] 刘亚群,吕昌河,傅伯杰,等.中国陆地生态系统分类识别及其近 20 年的时空变化[J].生态学报,2021,41(10):3975-3987.
Liu Yaqun, Lü Changhe, Fu Bojie, et al. Terrestrial ecosystem classification and its spatiotemporal changes in China during last 20 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(10):3975-3987.
- [8] McGill B J, Miller S N. New catalogue of Earth's ecosystems [J]. Nature, 2022, 610(7932): 457-458.
- [9] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [10] 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[J].生态学报,2014,34(1):216-223.
Xiao Qiang, Xiao Yang, Ouyang Zhiyun, et al. Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(1):216-223.
- [11] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.
Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China [J]. Advances in Earth Science, 2009,24(6):571-576.
- [12] Xue Chenli, Zhang Huiqiong, Wu Simin, et al. Spatial-temporal evolution of ecosystem services and its potential drivers: A geospatial perspective from Bairin Left Banner, China [J]. Ecological Indicators, 2022,137:108760.
- [13] 于海霞,王禹骁.东江流域生态系统服务价值的时空演变及空间分异机制[J].应用生态学报,2023,34(9):2498-2506.
Yu Haixia, Wang Yuxiao. Spatio-temporal variations of ecosystem service value and its spatial heterogeneity mechanism in the Dongjiang River Basin, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(9):2498-2506.

- [14] 谈旭,王承武.伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J].应用生态学报,2023,34(10):2747-2756.
Tan Xu, Wang Chengwu. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value in Ili Valley and its driving factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(10):2747-2756.
- [15] 乔斌,曹晓云,孙玮婕,等.基于生态系统服务价值和景观生态风险的生态分区识别与优化策略:以祁连山国家公园青海片区为例[J].生态学报,2023,43(3):986-1004.
Qiao Bin, Cao Xiaoyun, Sun Weijie, et al. Ecological zoning identification and optimization strategies based on ecosystem service value and landscape ecological risk: Taking Qinghai Area of Qilian Mountain National Park as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3):986-1004.
- [16] 王子尧,孟露,李惊,等.低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究[J].生态学报,2023,43(9):3571-3581.
Wang Ziyao, Meng Lu, Li Liang, et al. Multi-scenario simulation of land use and ecosystem services in Beijing under the background of low-carbon development [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3571-3581.
- [17] 朱青.基于土地利用模拟的泛河流域生态系统土壤保持服务研究[D].陕西 西安:西安科技大学,2021.
Zhu Qing. Research on soil conservation services of Pan River basin ecosystem based on land use simulation [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [18] Wang Xiaozhen, Wu Jianzhao, Liu Yulin, et al. Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2022,311:114835.
- [19] 高晗.湖南省土地分类及分区研究[D].湖南 长沙:湖南农业大学,2019.
Gao Han. Research on land classification and zoning in Hunan Province [D]. Changsha, Hunan: Hunan Agricultural University, 2019.
- [20] 赵东阳.阜平山区土地类型划分及其在农用地质量评价中的应用[D].河北 保定:河北农业大学,2022.
Zhao Dongyang. Classification of land types in the Fuping Mountain area and its application in agricultural land quality evaluation [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2022.
- [21] 罗海江,白海玲,王文杰,等.面向生态监测与管理的国家级土地生态分类方案研究[J].中国环境监测,2006(5):57-61.
Luo Haijiang, Bai Hailing, Wang Wenjie, et al. The Study of Land-Ecosystem Classification for Eco-monitoring & Eco-management [J]. Environmental Monitoring in China, 2006,22(5):57-61.
- [22] Keith D A, Ferrer-Paris J R, Nicholson E, et al. A function-based typology for earth's ecosystems [J]. Nature, 2022,610(7932):513-518.
- [23] 应奎,李旭东,程东亚.贵州人口老龄化空间格局演变及环境成因[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):334-345.
Ying Kui, Li Xudong, Cheng Dongya. Spatial pattern evolution and environmental causes of population aging in Guizhou Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(2):334-345.
- [24] Liao Qiang, Li Tong, Wang Qiyu, et al. Exploring the ecosystem services bundles and influencing drivers at different scales in Southern Jiangxi, China [J]. Ecological Indicators, 2023,148:110089.
- [25] 李益敏,李馥豪,赵筱青,等.云南省文山市生态系统服务的权衡/协同关系[J].长江流域资源与环境,2022,31(11):2545-2555.
Li Yimin, Li Yuhao, Zhao Xiaoqing, et al. Spatial and temporal patterns and interrelationships of ecosystem services in Wenshan City, Yunnan Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(11):2545-2555.
- [26] 王丰,刘金铜,付同刚,等.基于 RUSLE 模型的太行山区土壤侵蚀时空分异特征及影响因子研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(7):1064-1076.
Wang Feng, Liu Jintong, Fu Tonggang, et al. Spatiotemporal variations in soil erosion and its influence factors in Taihang Mountain Area based on RUSLE modeling [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(7):1064-1076.
- [27] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(2):19-24.
- [28] 李瑾璞.基于 InVEST 模型的土地利用变化与生态系统碳储量研究[D].河北 保定:河北农业大学,2020.
Li Jinpu. Research on land use change and ecosystem carbon storage based on InVEST Model [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2020.
- [29] 张晗.基于 GIS 和 InVEST 模型的安远县生态系统服务功能评价[D].江西 南昌:江西农业大学,2019.
Zhang Han. Evaluation of ecosystem service function in Anyuan County based on GIS and InVEST Model [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2019.

- 合模型的双柏县滑坡易发性评价[J].自然灾害学报, 2021,30(4):213-224.
- Wu Changrun, Jiao Yuanmei, Wang Jinliang, et al. Frequency ratio and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of landslide in Shuangbai County [J]. Journal of Natural Disasters, 2021,30(4):213-224.
- [23] 邓念东,崔阳阳,郭有金.基于频率比—随机森林模型的滑坡易发性评价[J].科学技术与工程,2020,20(34):13990-13996.
- Deng Niandong, Cui Yangyang, Guo Youjin. Frequency ratio-random forest-model-based landslide susceptibility assessment [J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(34):13990-13996.
- [24] 刘瑞,李露瑶,杨鑫,等.基于因子强关联分析方法的滑坡易发性评价[J].地球与环境,2021,49(2):198-206.
- Liu Rui, Li Luyao, Yang Xin, et al. Landslide susceptibility mapping based on factor strong correlation analysis method [J]. Earth and Environment, 2021,49(2):198-206.
- [25] 秦红富,谈树成,施旖奇,等.基于CF-LR组合模型的地质灾害易发性评价:以云南省宁洱哈尼族彝族自治县为例[J].人民长江,2022,53(7):119-127.
- Qin Hongfu, Tan Shucheng, Shi Yiqi, et al. Geological hazard susceptibility assessment based on CF-LR combined model: Case of Ning'er Hani and Yi Autonomous County, Yunnan Province [J]. Yangtze River, 2022,53(7):119-127.
- [26] 付豪,李为乐,陆会燕,等.基于“三查”体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测[J/OL].武汉大学学报(信息科学版),1-17[2024-03-16].<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220418>.
- Fu Hao, Li Weile, Lu Huiyan, et al. Early detection and monitoring of potential landslides in Danba County based on the “space-air-ground investigation system” [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-17 [2024-03-16]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220418>.
- [27] 张晓博,周萍,张焜,等.基于GIS和CF-Logistic回归模型地质灾害易发性评价:以青海湟中县为例[J].沉积与特提斯地质,2023,43(4):797-807.
- Zhang Xiaobo, Zhou Ping, Zhang Kun, et al. Evaluation method of geological hazard susceptibility: A case study on GIS and CF-Logistic regression model in Huangzhong, Qinghai [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023,43(4):797-807.
- [28] 王毅,李升甫,马洪生,等.山区公路脆弱地质环境灾害多方法早期识别及路线优化[J/OL].武汉大学学报(信息科学版),1-15[2024-03-16].<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230214>.
- Wang Yi, Li Shengfu, Ma Hongsheng, et al. Multi-method early identification and route optimization of vulnerable geological environment hazards on mountainous highways [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-15 [2024-03-16]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230214>.
- ~~~~~
- (上接第 244 页)
- [30] 王晓晨.基于 InVEST 模型的陕西秦岭(渭河流域)生态系统服务评估[D].陕西 西安:西北大学,2022.
- Wang Xiaochen. Ecosystem service assessment of Qinling Mountains in Shaanxi Province based on InVEST model [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwestern University, 2022.
- [31] 陈田田,彭立,王强.基于生态系统服务权衡的生态安全多情景决策[J].中国环境科学,2021,41(8):3956-3968.
- Chen Tiantian, Peng Li, Wang Qiang. Scenario decision of ecological security based on the trade-off among ecosystem services [J]. China Environmental Science, 2021,41(8):3956-3968.
- [32] 王蓓,赵军,胡秀芳.石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J].生态学报,2018,38(21):7582-7595.
- Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(21):7582-7595.
- [33] 王洪宽.河北太行山区生态安全评价与安全格局构建[D].河北 石家庄:河北地质大学,2022.
- Wang Hongkuan. Eco-logical security assessment and security pattern construction in the Taihang Mountains of Hebei Province [D]. Shijiazhuang, Hebei: Hebei University of Geosciences, 2022.
- [34] 康园园,于淑会,尚国珩,等.基于LUCC的太行山区生态系统服务价值时空特征分析[J].河北地质大学学报,2022,45(4):96-103.
- Kang Yuanyuan, Yu Shuhui, Shang Guoyi, et al. Analysis of the spatiotemporal characteristics of ecosystem service value in the Taihang Mountains based on LUCC [J]. Journal of Hebei University of Geosciences, 2022,45(4):96-103.