

DOI: 10.5846/stxb201804180886

王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. 生态学报, 2019, 39(3): - .

Wang Z Z, Zhang L W, Li X P, Wang P T, Li Y J, Lu Y H, Yan J P. The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征

王壮壮¹, 张立伟^{1,*}, 李旭谱¹, 王鹏涛², 李英杰³, 吕一河⁴, 延军平¹

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 西安外国语大学 旅游学院·人文地理研究所, 西安 710128

3 密歇根州立大学系统综合与可持续发展研究中心, 美国 东兰辛 48823

4 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100086

摘要: 生态系统服务热冷点的识别及其空间格局特征研究对生态保护规划有着重要的意义。目前有关生态系统服务热冷点的识别多采用直接分类法, 缺乏对空间关系特征的综合研究。以延河流域为例, 综合集成多源数据来模拟 4 种生态系统服务(土壤保持、植被碳固定、产水、洪水调节)的热点与冷点时空格局变化特征。主要结论为: ①2001—2012 年, 延河流域土壤保持服务在流域下游高于上游, 中游地区增长较快。植被碳固定服务和洪水调节服务在流域南部地区较强, 且在中下游呈上升趋势。产水服务呈现“南北低、中间高”的分布格局, 在流域上游呈下降趋势, 在中下游呈上升趋势。②生态系统服务热点主要分布在延河中下游南部地区, 冷点主要分布在延河上游地区。延河中下游南部地区 4 种生态系统服务均较强。生态系统服务保护效率最高的是延河上游。③延河流域林地的土壤保持服务、植被碳固定服务和洪水调节服务均强于其他土地利用类型, 而产水服务较弱, 湿地则相反。草地的土壤保持服务和植被碳固定服务相对较强。耕地的 4 种服务强于裸露地, 裸露地的 4 种服务均较弱。湿地的土壤保持服务、植被碳固定服务和洪水调节服务保护效率最高, 林地的产水服务保护效率最高。研究结果以期为流域生态系统服务保护与恢复决策提供理论支撑。

关键词: 生态系统服务; 生态系统服务制图与模拟; 热点与冷点; 生态保护; 延河流域

The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale

WANG Zhuangzhuang¹, ZHANG Liwei^{1,*}, LI Xupu¹, WANG Pengtao², LI Yingjie³, LU Yihe⁴, YAN Junping¹

1 School of Geography and Tourism of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 School of Tourism & Research Institute of Human Geography, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China

3 Center for Systems Integration and Sustainability, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA

4 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China

Abstract: There is a great significance for ecological protection planning to identify the hotspots and coldspots of ecosystem services and to research their spatial-temporal patterns. Nowadays, direct classification is used in identification of the hotspots and coldspots of ecosystem services, but there is no comprehensive research on the characteristics of their spatial relationships. Taking the Yanhe River basin as an example, comprehensive multi-source data integration was used to simulate the changes in the spatial-temporal patterns of hotspots and coldspots of four ecosystem services (soil conservation, vegetation carbon sequestration, water yield, and flood regulation). The main conclusions of this paper are as follows: ①

基金项目: 国家自然科学基金(41601182, 41871187, 41471097, 41771220); 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2017JQ4009, 2018JQ4025); 国家重点研发计划(2016YFC0501601)

收稿日期: 2018-04-18; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlw@snnu.edu.cn

During 2001 - 2012, the soil conservation service in the Yanhe River basin was higher in the lower reaches than in the upper reaches, while its growth in the middle reaches was rapid. The ecosystem services of vegetation carbon sequestration and flood regulation were strong in the southern region of the basin and were rising in the middle and lower reaches. The distribution pattern of water yield fit a model of "high value in north and south, and low value in middle," which shows a downward trend in the upper reaches of the basin and an upward trend in the middle and lower reaches. ② The hotspots of ecosystem services are mainly distributed in the south of the middle and lower reaches of Yanhe, while the coldspots are mainly distributed in the upper reaches of Yanhe. The four ecosystem services were all strong in the south of the middle and lower reaches of the Yanhe River. The area with the highest efficiency of ecosystem service protection was the upper reaches of Yanhe. ③ The ecosystem services of soil conservation, vegetation carbon sequestration, and flood regulation were better in forest lands in the Yanhe River basin than they were in other land-use types, while the water yield service was weaker. The wetlands were the opposite. Soil conservation and vegetation carbon sequestration were relatively better in grasslands than in other land-use types. The four services were stronger in cultivated land than in bare land, and the four services were much weaker in bare land than in other land-use types. The land-use type with the highest conservation efficiencies of soil conservation, vegetation carbon sequestration, and flood regulation was wetlands, and the land-use type with the highest conservation efficiency of water yield was forest lands. The results of this study are expected to provide theoretical support for the conservation and restoration of ecosystem services in watersheds.

Key Words: ecosystem services; ecosystem services mapping; hotspot and coldspot; ecological conservation; Yanhe watershed

生态系统服务是自然界为人类贡献的各种惠益,包括有形的物质资源和无形的服务等益处^[1-4],通常分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务 4 种类型^[3]。生态系统服务是人与自然关系研究的重要纽带,受到学者们越来越多的重视。目前,生态系统服务价值评估^[5]、生态系统服务制图与模拟^[6]、服务间的权衡与协同关系研究^[7-8]、生态系统服务提供、需求及其流动关系^[9]、生态系统服务保护^[10-11]、生态补偿与生态系统服务支付^[12]等方向都是其重要的研究领域。生态系统服务研究的重要目的是辅助决策者制定出更好的生态保护规划与管理方案,以促进人类社会和自然环境的可持续发展^[3]。因此,对研究区的生态系统服务提供能力进行量化制图,为决策者提供揭示决策区域生态系统服务综合特征的、直观可视化的、量化的、空间位置明晰的评价结果就显得尤为重要^[6]。生态系统服务提供是指某研究区域(生态系统)在特定的时空尺度内生产一系列能被人类利用的生态系统产品和服务的能力,这种能力的大小可以通过价值量或物质量来度量^[12-13]。生态系统服务提供的空间制图能有效识别出区域生态系统服务提供能力较强和相对较弱的区域,是生态系统服务优先保护区划定的关键环节。

传统的生态保护状况评估和保护地的划定通常以物种和生物多样性为主导指标,但是该方法也存在许多局限,比如对物种及其生境需求的研究还不够全面、概念和分类还比较混乱、物种分布范围估计不准确、缺乏物种选择的标准方法、监测和验证不足等缺陷^[14]。因此,加强生态系统服务保护优先区的研究,尝试从生态系统服务的视角来评估服务的供需状况并划定保护优先区,对生态环境保护和实现生态系统服务的供需平衡有着重要的意义^[15-19]。从生态保护效率的角度来说,保护行动应该有明确的目标,把有限的人力、物力和财力投入到保护的重点地区或者关键地区^[18,20]。为了识别区域生态系统服务的较好和较差区域,国内外学者开始把热点(Hotspot)和冷点(Coldspot)概念纳入到生态系统服务制图研究中,为生态保护或恢复区域的划定提供科学依据。热点这一概念是在 20 世纪 80 年代由 Norman Myers 提出^[21],最初是指物种的丰富度、特有物种分布和物种危险度比较大的区域,并主要应用于生物多样性优先保护区研究。近年来,国内外学者也越来越多地把热点这一概念运用在生态系统服务制图研究中,提出了相应的热点概念,但是由于研究背景的不同,提出的热点概念往往具有差异性。比如, Gos 等^[22]认为热点是指一种生态系统服务或者生态系统服务簇的

高值区域。李英杰等^[10]认为热点是指某种生态系统服务的生物物理学价值比较高的区域。Spano 等^[23]认为热点是指大多数生态系统服务提供达到最高水平的空间位置,而冷点则相反。在生态系统服务研究中,虽然众多学者对热点的定义略有差异,但都存在共同点,即认为热点是生态系统服务占比高、管理价值比较大的地区。综合以上对热点的定义,生态系统服务提供热点(冷点)可以认为是区域内一种或多种生态系统服务提供能力相对较强(较弱)的区域。

生态系统服务提供的热点与冷点制图方法总体可以分为直接分类法和空间统计分析方法。前者根据生态系统服务提供能力的空间高低分布格局,直接使用保护面积与保护量作为保护目标来划分热点与冷点区域。由于缺乏划定热点临界值的信息,一些学者往往根据模型估算的生态系统服务量值的大小来划定热点和冷点区。例如,张立伟等^[11]直接采用分位数分类法对中国多种生态系统服务保护优先区进行了分类,或者根据预先设置的研究区保护面积比例(10%或20%)作为保护目标来选择热点优先保护区^[24]。刘焱序等^[25]将生态系统服务高值样本进行叠加,取前20%的高值区作为热点,以识别生态系统服务与生态系统健康高值区的空间组合规律。Xiao 等^[26]将前40%高值区视为热点临界值。可见,直接分类法具有简单直观的优点,但是该方法所得出的热点区会出现许多破碎斑块无法客观取舍的缺陷,而且由于热点选取标准的不同和取值的不确定性,使得热点区相关研究之间无法方便地进行横向和纵向的对比参照。因此,有学者开始关注热点区的斑块连接和方法选取问题。例如,李英杰等^[10]采用 G_i^* 统计方法来探讨区域热点与冷点区的空间位置,并对比分析了核密度估计(Kernel Density Estimation)、莫兰指数(Moran's I)和 G_i^* 统计(Getis-Ord G_i^* statistics)三种冷热点制图方法,指出 G_i^* 统计方法以其对冷热点进行统计显著性分级和斑块连通性较好而更具科学性和优越性。生态系统服务冷热点能有效揭示区域生态系统服务提供能力的空间差异,对生态系统服务保护优先区的划定具有指导作用(图1)。考虑生态系统服务的系统性保护策略将会使传统的基于生物多样性的保护从理论上更加完备、实践上更加高效,有利于促进生态保护理论、方法和应用的发展与完善^[14]。

延河流域地处黄土丘陵沟壑区,退耕还林(草)工程对生态环境的影响一直是众多学者关注的焦点^[27-28]。该流域的生态系统服务研究主要集中在服务的评估、权衡、土地利用变化和人类活动对生态系统服务的影响等方面。例如,Zheng 等^[29]研究了延河流域植被净生产能力和产水服务之间的权衡热点问题,指出在权衡热点区更容易找到生态系统服务权衡的形成机理和影响原因。苏常红等^[30]分析了延河流域退耕还林(草)工程、工业发展、劳动力转移和居住方式转变对土地覆被变化和生态系统服务的影响,发现这些人类活动是造成土地利用方式转变的主要原因,并在不同程度上造成了服务之间的权衡。综合来看,延河流域生态系统服务研究亟需加强,在生态系统服务提供量化评估和服务保护方面的研究还比较少。因此,本文综合集成延河流域土壤保持服务、植被碳固定服务、产水服务、洪水调节服务,通过模型定量估算2001—2012年延河流域4种生态系统服务,运用逐像元线性回归法分析4种生态系统服务的时空格局变化特征,采用 G_i^* 统计方法和生态保护效率评价方法定量评估延河流域4种生态系统服务在空间上和不同土地利用方式下的服务提供能力差异和保护效率差异。研究结果以期为流域尺度的生态系统服务保护优先区的划定提供理论支撑。

1 资料来源与研究方法

1.1 研究区概况

延河是黄河右岸、中游段的一级支流,发源于陕西省靖边县,自西北向东南流经志丹、安塞、延安、延长等县市,于延长县南河沟乡凉水岸附近汇入黄河,干流总长286.9 km,流域面积7725 km²,主要支流包括杏子河、坪桥川、蟠龙川、西川、南川等。延河可以分为上、中、下游三段:上、中游的分界是安塞县的化子坪;中、下游的分界是延安市宝塔区的甘谷驿^[31]。延河流域属于暖温带大陆性半干旱季风气候,降水年内分配不均匀,多集中在7—9月份,且多暴雨。该区属于典型的黄土丘陵沟壑区,土壤类型以土质疏松、抗侵蚀能力差的黄绵土为主,全流域水土流失严重,流失面积占流域总面积的88.9%,是黄河泥沙的主要来源之一^[29]。

结合延河流域特征和水文站点分布,运用 ArcSWAT 工具,把延河流域整体划分为六个子流域区(图2),

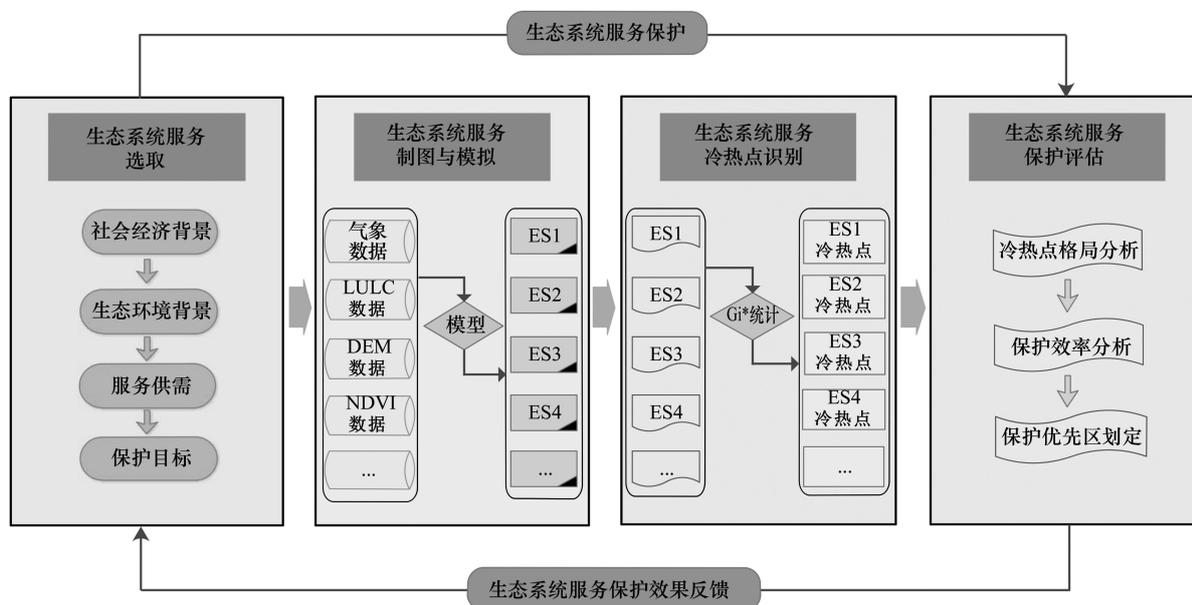


图1 生态系统服务冷热点与生态系统服务保护的关系

Fig.1 The relationship between hotspots and coldspots of ecosystem service and ecosystem service conservation

LULC: 土地利用和土地覆盖, Land Use and Land Cover; DEM: 数字高程模型, Digital Elevation Model; NDVI: 植被覆盖指数, Normalized Difference Vegetation Index; ES1: 第一种生态系统服务, 1st Ecosystem Service (ES2, 3, 4 与 ES1 命名规则一致)

其中 I 区代表杏子河水文站以上的流域范围; II 区代表安塞站以上的流域范围; III 区代表杏子河站、安塞站和延安站之间的流域范围; IV 区代表枣园站以上的流域范围; V 区代表枣园站、延安站和甘谷驿站之间的流域范围; VI 区代表甘谷驿站以下的流域范围, 主要指延河下游地区。

1.2 数据来源

本文使用的基础数据包括: 延河流域气象观测数据、DEM 高程数据、土地利用数据、NDVI 数据和土壤类型数据(表 1)。利用 ArcGIS 10.2 工具箱中的样条函数插值工具(spline)和数据转换工具(conversion tools)进行数据格式上的均一化处理, 最终转换为分辨率 250 m 的栅格数据。

表 1 延河流域基础数据

Table 1 The basic datasets sources of Yanhe basin

数据名称 Data name	数据类型 Data type	时间 Time	分辨率 Resolution/m	数据来源 Data sources
气象数据 Meteorological data	矢量点	2001—2012	—	http://data.cma.cn/
DEM 数据 DEM data	栅格	2004	90	http://gdem.ersdac.jpacesystems.or.jp/
LULC 数据 LULC data	矢量面	2001, 2012	30	http://www.landcover.org/data/
NDVI 数据 NDVI data	栅格	2001—2012	250	http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/
土壤类型数据 Soil type data	栅格	2001	1000	http://westdc.westgis.ac.cn

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务制图方法

土壤保持服务常用的衡量指标是土壤保持量(Soil conservation, 简称 SC)。本文采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)估算生态系统的土壤保持量^[8,10], 其结果为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值, 其中潜在土壤侵蚀量是指在无植被覆盖、不采取水保措施情况下的土壤侵蚀量, 实际土壤侵蚀量是指存在植被覆盖和水保措施条件下的土壤侵蚀量。植被碳固定服务采用植被净初级生产力来衡量。植被净初级生产力(Net Primary Production, 简称 NPP), 指植被在单位时间、单位面积累积的有机物数量, 即绿色植物光合作用后产生

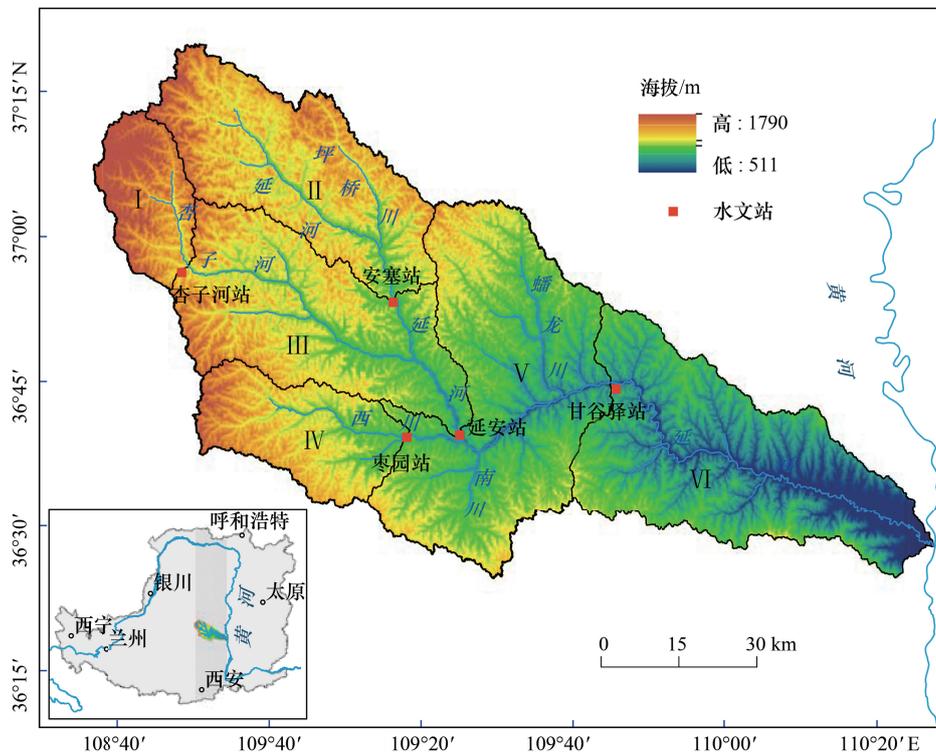


图2 延河流域示意图

Fig.2 The sketch map of Yanhe basin

的有机物质总量减去自身呼吸消耗后的实际积累量,本文采用 CASA 模型进行估算^[32,33]。产水服务 (Water Yield, 简称 WY) 采用区域水量平衡法进行评价^[8,34], 利用区域水分的输入量降水与输出量蒸散发的差值, 得到区域生态系统的产水量。生态系统洪水调节服务 (Flood Regulation, 简称 FR) 通过年暴雨天 (24 h 降水总量超过 50 mm) 降雨量与地表径流两者的差值计算得到, 其中地表径流量采用 SCS-CN 径流模型进行估算^[35]。

1.3.2 逐像元线型回归方法

为了估算上述四种生态系统服务在空间上的年际变化率, 本文采用一元线型回归方程, 通过 ArcGIS 10.2 中的栅格计算器, 定量估算 4 种服务在空间上的年际变化趋势。计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中, Slope 为某一种服务的年际变化率; x_i 为年份 (2001—2012), \bar{x} 为年份均值; y_i 为某一种服务 x_i 年份的栅格单元值, \bar{y} 为某一种服务的栅格单元多年均值。

1.3.3 Gi* 空间统计方法

在 GIS 平台中提供了基于 Getis-Ord Gi* 统计指数的热点分析工具 (hotspot analysis)。通过计算各个斑块之间的 Z 得分, 可以直接在空间中反映高值区 (热点区域) 与低值区 (冷点区域) 的集聚, Z 值越高, 说明热点区域的集聚越明显^[10,12]。其计算公式如下:

$$Gi^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (2)$$

式中, x_j 为斑块 j 的属性值; w_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间的空间权重矩阵; n 为总斑块数; 其中:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n-1} - (\bar{X})^2} \quad (4)$$

1.3.4 生态保护效率评价方法

生态系统服务保护优先区域的保护成效的评估方法计算公式如下^[11]:

$$SE = \left(\frac{E_p}{E} \right) / \left(\frac{S_p}{S} \right) \quad (5)$$

式中, SE 是生态系统服务空间保护成效指标; E_p 是优先保护区域的生态系统服务保护总量; E 是优先保护区域的总面积; S_p 是整个研究区的生态系统服务总量; S 为研究区总面积。如果优先区的 SE 指数值大于 1, 则表明该优先区域的生态系统服务保护成效较高, 若小于 1, 则说明该优先区的生态系统服务空间保护成效较差。 SE 空间保护成效指数的值为无单位正数。

2 结果分析

2.1 四种生态系统服务时空格局变化特征

分别计算 2001—2012 年延河流域土壤保持服务、植被碳固定服务、产水服务和水文调节服务的多年均值和年际变化率(图 3), 结果显示: (1) 土壤保持服务多年均值的空间分布总体呈现从上游到下游逐渐递增的趋势。其中, 高值点主要集中在 VI 区, 低值点主要分布在 II 区, 其区内均值分别为 $145.34 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $121.91 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 两者相差 $23.43 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。 II、III 和 V 3 个区域的土壤保持服务年际增长较快, 而 I、IV 和 VI 3 个区域年际增长较慢。(2) 植被碳固定服务多年均值和年际变化率具有明显的空间分布特征。在多年均值方面, 高值点主要分布在 IV、V 和 VI 的南部边缘地区, 低值点主要分布在 I、II 和 III 3 个区域。在年际变化率方面, 除了 IV 和 V 的南部边缘区呈明显下降趋势外, 流域其他地区总体呈现上升趋势。(3) 产水服务多年均值的高值点主要分布在 VI、IV 和 III 3 个区域, 其区内均值为 103.83 mm , 低值点主要分布在 I、II 和 V 3 个区域, 其区内均值为 92.37 mm 。在年际变化率方面, I、III 和 IV 3 个区域的产水服务总体呈现下降趋势, II、V 和 VI 3 个区域总体呈现上升趋势。(4) 洪水调节服务多年均值的高值点主要分布在 IV、V 和 VI 3 个区域, 低值点主要分布在 I、II 和 III 3 个区域, 延河流域洪水调节服务多年均值与植被碳固定服务多年均值的分布状态大体相同, 即服务量主要分布在延河流域南部地区。在年际变化率方面, V 和 VI 区的洪水调节服务呈递增趋势, 而 I、II、III 和 IV 呈现递减趋势。

综上所述, 在 2001—2012 年延河流域土壤保持服务下游高于上游, 中游地区增长速度较快。植被碳固定服务和洪水调节服务的多年均值分布大致相同, 即服务量高值点主要分布在流域南部地区。植被碳固定服务在流域南部地区呈递减趋势, 其他地区总体呈上升趋势。产水服务呈现“南北低中间高”分布格局, 其中产水服务和洪水调节服务的年际变化率空间分布大体相同, 即东部地区服务呈现下降趋势, 西部地区呈现上升趋势。

2.2 四种生态系统服务的热点与冷点格局特征分析

2.2.1 多年均值的热点与冷点格局特征

根据 2001—2012 年 4 种生态系统服务年均值栅格数据, 利用 Gi* 热点分析工具, 计算得到 4 种生态系统服务年均值冷热点栅格图(图 4), 并对冷热点面积和服务保护效率进行统计分析(图 5a, 5b)。结果显示: (1) 延河流域土壤保持服务热点面积占比呈现明显的“阶梯状”特征, 即从 I 区到 VI 区数值逐渐增大, 反映了土壤保持服务从上游到下游逐渐增强的趋势。除了 I 和 II 区土壤保持服务冷点的面积大于热点外, 其他区域

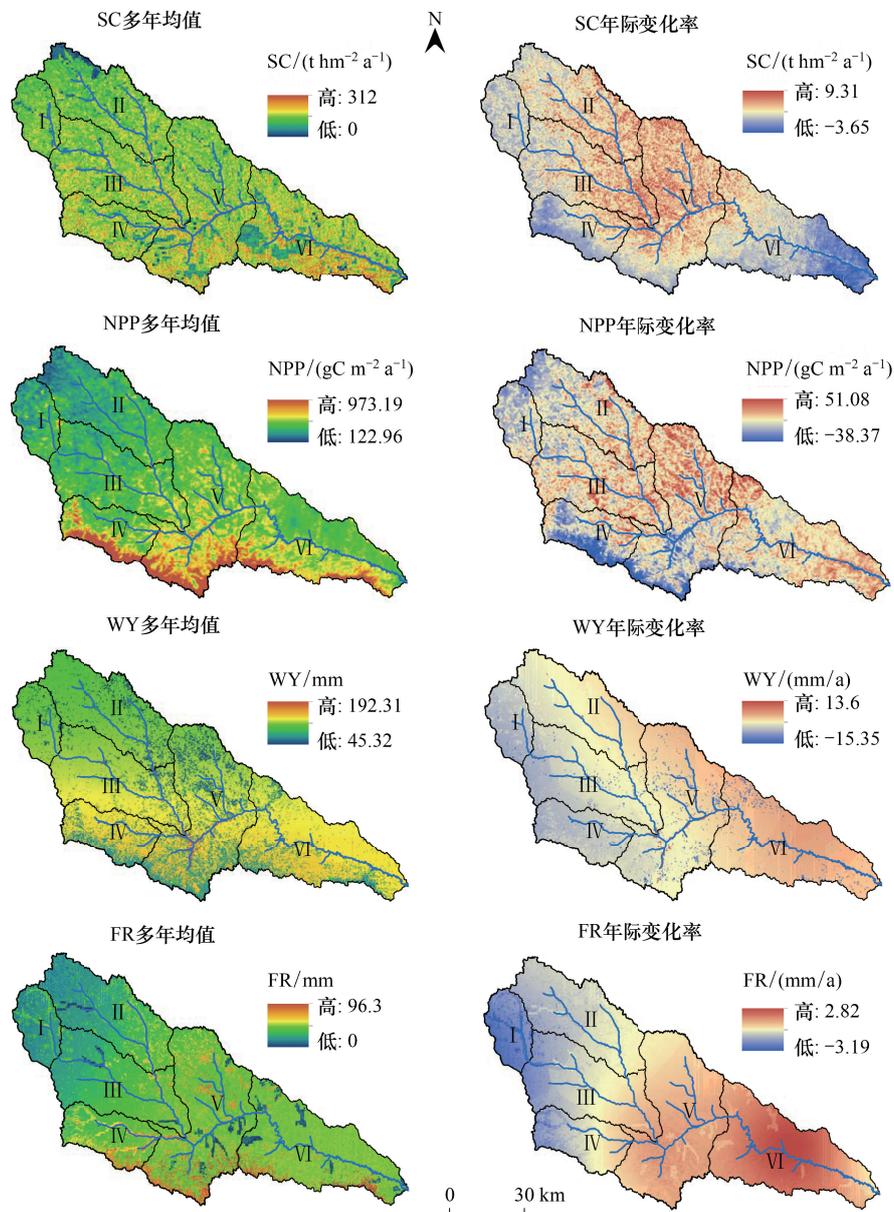


图3 2001—2012年延河流域四种生态系统服务多年均值和年际变化率

Fig.3 The annual average and interannual variation of four ecosystem services in Yanhe basin between 2001 and 2012

SC: 土壤保持, Soil Conservation; NPP: 植被净初级生产力, Net Primary Production; WY: 产水, Water Yield; FR: 洪水调节, Flood Regulation

的热点面积均大于冷点。从保护效率来看,保护效率最高的区域是II区,其次是I区,主要位于延河上游地区。(2)植被碳固定服务热点分布特征十分明显。热点几乎全部分布在IV、V和VI3个区域,其服务量占全流域的67%。冷点则几乎全部分布在I、II和III3个区域,其服务量仅占全流域的33%。因此,延河中下游的植被碳固定服务强于上游地区。从保护效率来看,II区的保护效率最高,其次是I区。(3)产水服务热点面积占比最大的是VI区,其次是IV和V区,主要位于延河中下游南部地区。冷点面积占比较大的是II和V区,主要位于延河中上游地区。总体来看,延河中下游南部地区的产水服务较强,而中上游地区较弱。从保护效率来看,II区的保护效率最高,其次是V区。(4)洪水调节服务热点的空间分布与植被碳固定服务相似。热点几乎全部分布在IV、V和VI区,而冷点几乎全部分布在I、II和III区。因此,延河流域中下游的洪水调节服务比上游地区强。从保护效率来看,II区的保护效率最强,其次是III区。

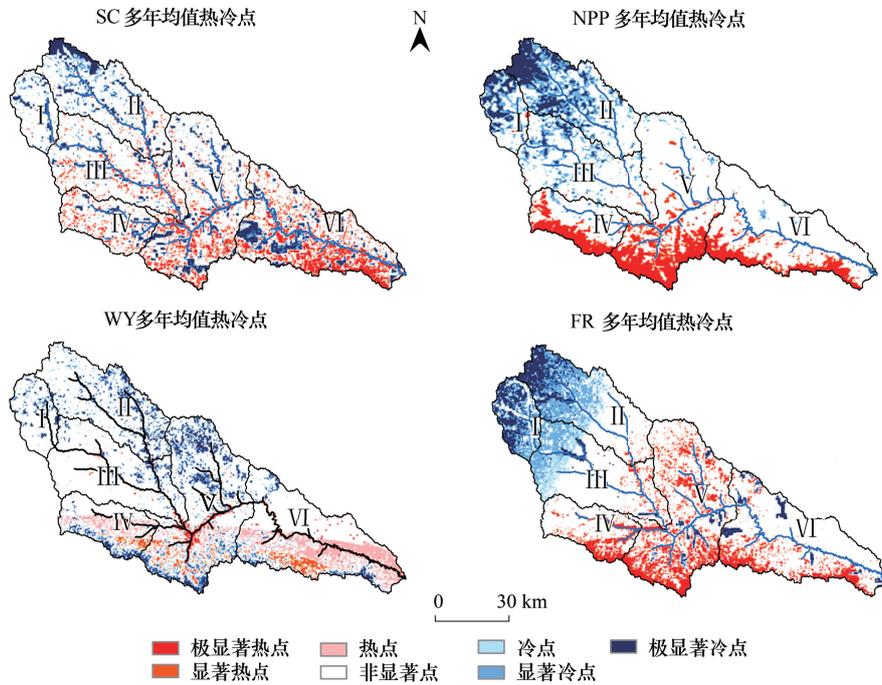


图 4 2001—2012 年延河流域四种生态系统服务年均值冷热点

Fig.4 The hotspots and coldspots of the annual average of four ecosystem services in Yanhe basin between 2001 and 2012

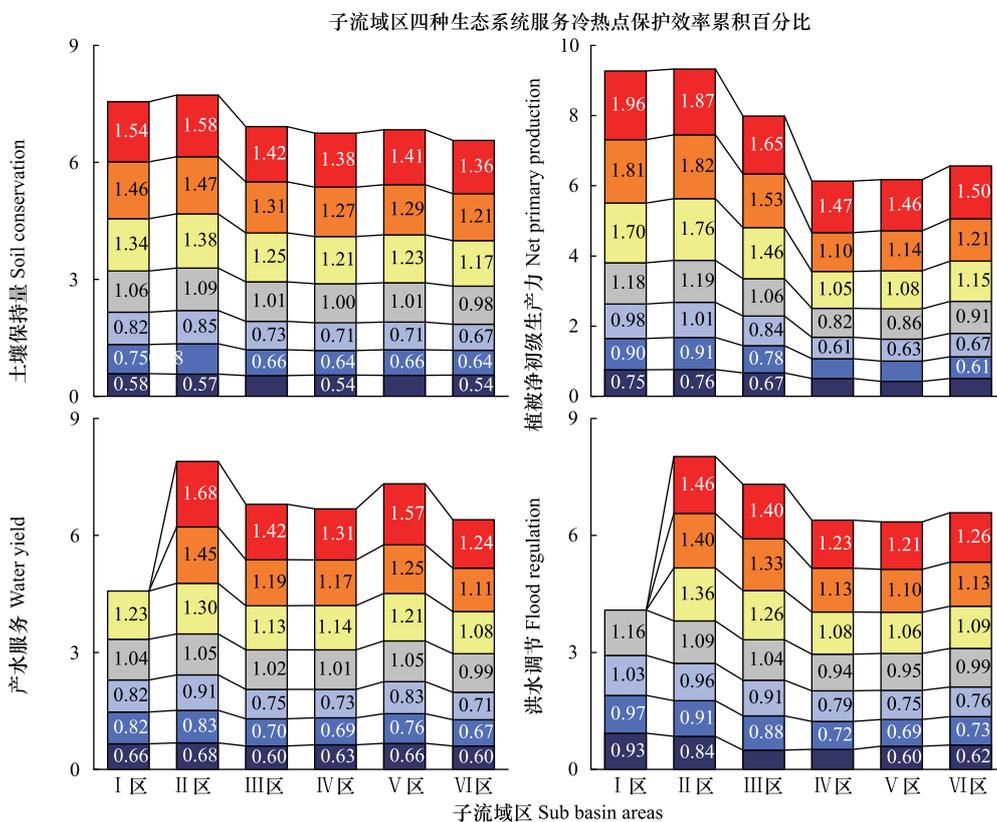
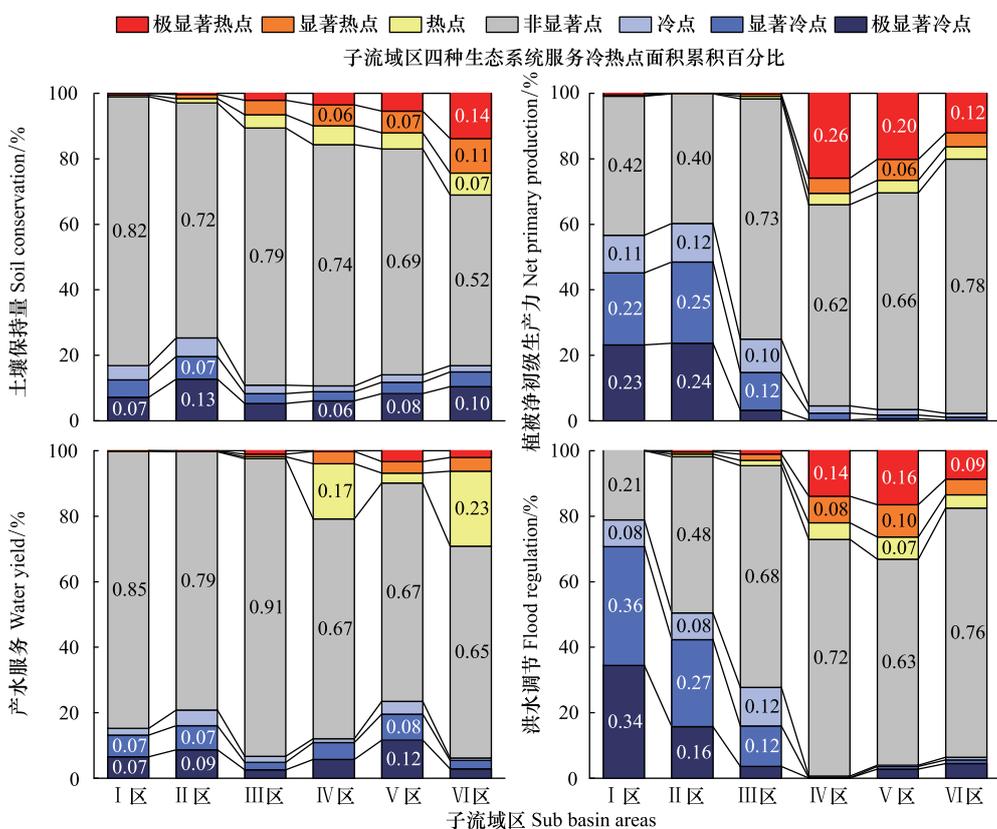
极显著热点(冷点)代表 99% 的置信水平;显著热点(冷点)代表 95% 的置信水平;热点(冷点)代表 90% 的置信水平

综上所述,热点面积占比较大的区域,相应的服务提供能力越强。从分区上看,4 种生态系统服务热冷点的空间分布大体相似,热点主要分布在 IV、V 和 VI 3 个区域,即延河中下游南部地区;冷点主要分布在 I、II 和 III 3 个区域,即延河上游地区。因此,延河中下游南部地区的 4 种生态系统服务强于延河上游地区。从保护效率上看,4 种生态系统服务保护效率最高的均是 II 区,主要指延河上游地区。

2.2.2 不同土地利用方式与生态系统服务冷热点关系特征

统计分析延河流域林地、草地、湿地、耕地和裸露地 5 种偏自然土地利用类型的 4 种生态系统服务的冷热点面积、保护效率累积百分比(图 5c, 5d),结果显示:(1)在土壤保持服务方面,热点面积在林地的分布比例最大,其次是草地和耕地,而冷点面积在湿地内的分布比例最大。因此,林地的植被碳固定服务强于其他土地利用类型。从保护效率来看,湿地的土壤保持服务保护效率最高。(2)在植被碳固定服务方面,林地内的热点面积分布比例最大,其次是草地和耕地,冷点在湿地内分布的比例最大,其次是裸露地。此外,林地内的热点面积占比均远大于冷点。因此,林地的植被碳固定服务强于其他土地利用类型,而湿地和裸露地的植被碳固定服务较差。从保护效率来看,湿地的植被碳固定服务保护效率最高。(3)在产水服务方面,湿地内的热点面积比例最大,其次是耕地和裸露地,而林地内的冷点面积比例最大。因此,湿地的产水服务强于其他土地利用类型。从保护效率来看,林地的产水服务保护效率最高。(4)在洪水调节服务方面,林地内的热点面积占比最大,其次是草地和耕地。因此,林地的洪水调节服务强于其他土地利用类型。从保护效率来看,湿地的洪水调节服务保护效率最高。

综合来看,延河流域林地的土壤保持服务、植被碳固定服务和洪水调节服务均强于其他土地利用类型,而林地的产水服务明显偏低。湿地则相反,其产水服务强于其他土地利用类型,而其他 3 种服务明显偏低。草地的土壤保持服务、植被碳固定服务相对较高。耕地的 4 种服务强于裸露地,而裸露地的 4 种服务均较弱。在保护效率方面,湿地的土壤保持服务、植被碳固定服务和洪水调节服务保护效率最高,林地的产水服务保护效率最高。



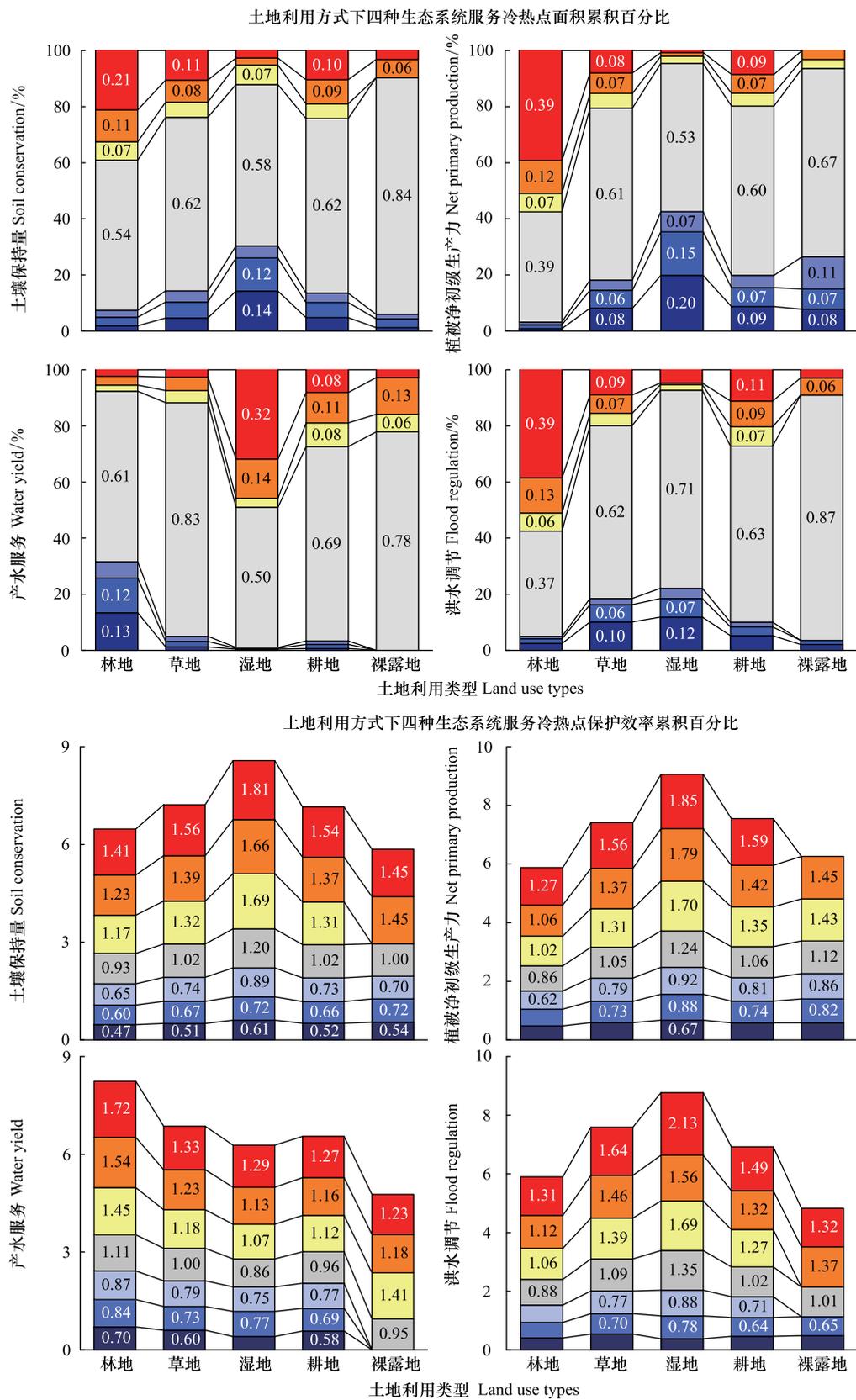


图5 2001—2012年延河流域子流域区与不同土地利用类型下的四种生态系统服务冷热点面积与保护效率累积百分比

Fig.5 The cumulative percentage of area and conservation efficiency of the hotspot and coldspot of the four ecosystem services under subbasin area and different land use types in Yanhe basin between 2001 and 2012

3 结论与讨论

3.1 结论

本文综合集成 2001—2012 年延河流域多源数据,分析了 4 种生态系统服务的时空格局变化特征,采用生态系统服务冷热点制图方法和生态保护效率评价方法分析了 4 种生态系统服务提供能力的空间差异和生态保护效率差异。基本结论如下:

(1)2001—2012 年,延河流域土壤保持服务下游高于上游,中游地区增长速度较快。植被碳固定服务和洪水调节服务在流域南部地区较强。植被碳固定服务在流域南部地区呈递减趋势,其他地区总体呈上升趋势。产水服务呈现“南北低,中间高”的分布格局,其中产水服务和洪水调节服务在流域东部地区呈下降趋势,在西部地区呈上升趋势。

(2)生态系统服务热点面积越大,相应的服务提供能力越强。延河流域生态系统服务热点主要分布在中下游南部地区,冷点主要分布在上游地区。从生态系统服务保护效率看,4 种生态系统服务保护效率最高的均是 II 区,即延河流域上游地区。

(3)延河流域林地的土壤保持服务、植被碳固定服务和洪水调节服务均强于其他土地利用类型,而产水服务较弱,湿地则相反。草地的土壤保持服务和植被碳固定服务相对较强。耕地的 4 种服务强于裸露地,裸露地的 4 种服务均较弱。在保护效率方面,湿地的土壤保持服务、植被碳固定服务和洪水调节服务保护效率最高,林地的产水服务保护效率最高。

3.2 讨论

生态系统服务保护优先区的研究有利于生态保护规划和资源优化配置以及改善传统的基于生物多样性的保护策略^[14]。保护优先区划定的第一步是对研究区内生态系统服务的提供能力做出评估。通过 G_i^* 统计分析方法,能够有效识别服务提供能力相对较强和较弱的区域,并对提供能力进行统计显著性分级,使得评估结果更加科学^[10]。从保护效率的角度来说,为了实现资源的优化配置,人力和物力应该投入到保护效率比较高的地区。采用生态保护效率评价方法,能够对区域内生态保护效率做出评估,识别出保护效率比较高的区域。因此,将 G_i^* 统计分析方法和生态保护效率评价方法结合,从服务提供能力和保护效率两个角度对流域生态系统服务做出评估,为生态保护规划和保护优先区的划定提供参考。

与国内外相关研究结果相比,本文的局限性主要体现在两个方面。一方面,生态系统服务之间存在复杂的权衡协同关系,在保护优先区划定实践中往往需要对服务之间的关系进行综合考虑。例如,Zhang 等^[24]通过分析中国江西省的淡水供给、土壤保持和植被净生产力三种服务之间的权衡关系后,以保护目标和保护效率对该地区进行保护优先区划分。另一方面,生态系统服务保护优先区的划定是多种因素综合作用的结果。服务提供能力、服务满足人类需求的能力、服务风险、保护成本等因素都会对保护优先区的划定产生影响^[16]。本文仅从服务提供能力和保护效率两个角度对单种生态系统服务保护优先区进行设定。因此,对生态系统服务保护优先区的研究还亟待深入。可以从以下几个方面着手,分析生态系统服务保护优先区划定的影响因素,融入服务间权衡集成研究等,最终建立系统科学的生态系统服务保护优先区划定理论框架。

参考文献 (References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [2] 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. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Díaz S, Pascual U, Stenseke M, Martín-López B, Watson R T, Molnár Z, Hill R, Chan K M A, Baste I A, Brauman K A, Polasky S, Church A, Lonsdale M, Larigauderie A, Leadley P W, Van Oudenhoven A P E, Van Der Plaats F, Schröter M, Lavorel S, Aumeeruddy-Thomas Y, Bukvareva E, Davies K, Demissew S, Erpul G, Failler P, Guerra C A, Hewitt C L, Keune H, Lindley S, Shirayama Y. Assessing nature's contributions to people. *Science*, 2018, 359(6373): 270-272.
- [5] 李丽,王心源,骆磊,冀欣阳,赵燕,赵颜创, Bachagha N. 生态系统服务价值评估方法综述. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1233-1245.

- [6] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展. 生态学报, 2014, 34(2): 316-325.
- [7] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [8] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [9] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [10] Li Y J, Zhang L W, Yan J P, Wang P T, Hu N K, Cheng W, Fu B J. Mapping the hotspots and coldspots of ecosystem services in conservation priority setting. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(6): 681-696.
- [11] 张立伟, 傅伯杰, 吕一河, 董治宝, 李英杰, 曾源, 吴炳方. 基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究. 地理学报, 2016, 71(5): 768-780.
- [12] 李双成. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014.
- [13] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.
- [14] 吕一河, 张立伟, 王江磊. 生态系统及其服务保护评估: 指标与方法. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1237-1243.
- [15] Maron M, Mitchell M G E, Runting R K, Rhodes J R, Mace G M, Keith D A, Watson J E M. Towards a Threat Assessment Framework for Ecosystem Services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(4): 240-248.
- [16] Luck G W, Chan K M, Klien C J. Identifying spatial priorities for protecting ecosystem services. *F1000Research*, 2012, 1: 17.
- [17] Nakaoka M, Sudo K, Namba M, Shibata H, Nakamura F, Ishikawa S, Makino M, Yamano H, Matsuzaki S I S, Yamakita T, Yu X B, Hou X Y, Li X W, Brodie J, Kanemoto K, Moran D, Verones F. TSUNAGARI: a new interdisciplinary and transdisciplinary study toward conservation and sustainable use of biodiversity and ecosystem services. *Ecological Research*, 2018, 33(1): 35-49.
- [18] Cai W B, Gibbs D, Zhang L, Ferrier G, Cai Y L. Identifying hotspots and management of critical ecosystem services in rapidly urbanizing Yangtze River Delta Region, China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 191: 258-267.
- [19] Xiao Y, Xiao Q. Identifying key areas of ecosystem services potential to improve ecological management in Chongqing City, southwest China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(4): 258.
- [20] Lü Y H, Zhang L W, Zeng Y, Fu B J, Whitham C, Liu S J, Wu B F. Representation of critical natural capital in China. *Conservation Biology*, 2017, 31(4): 894-902.
- [21] Schröter M, Remme R P. Spatial prioritisation for conserving ecosystem services; comparing hotspots with heuristic optimisation. *Landscape Ecology*, 2016, 31(2): 431-450.
- [22] Gos P, Lavorel S. Stakeholders' expectations on ecosystem services affect the assessment of ecosystem services hotspots and their congruence with biodiversity. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1/2): 93-106.
- [23] Spanò M, Leronna V, Laforteza R, Gentile F. Are ecosystem service hotspots located in protected areas? results from a study in Southern Italy. *Environmental Science & Policy*, 2017, 73: 52-60.
- [24] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, Zeng Y. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [25] 刘焱序, 徐光, 姜洪源, 胡晓旭, 彭建, 宋治清, 王仰麟. 东北林区生态系统服务与健康协同分析. 地理科学进展, 2015, 34(6): 761-771.
- [26] Xiao Y, Ouyang Z Y, Xu W H, Xiao Y, Zheng H, Xian C F. Optimizing hotspot areas for ecological planning and management based on biodiversity and ecosystem services. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(2): 256-269.
- [27] Wu L, Liu X, Ma X Y. Impacts of grain for green project on spatiotemporal variations of soil erosion in a typical watershed of Chinese loess hilly and gully region. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2016, 25(11): 4506-4516.
- [28] Li Q R, Amjath-Babu T S, Zander P. Role of capitals and capabilities in ensuring economic resilience of land conservation efforts: a case study of the grain for green project in China's Loess Hills. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 636-644.
- [29] Zheng Z M, Fu B J, Feng X M. GIS-based analysis for hotspot identification of tradeoff between ecosystem services: a case study in Yanhe Basin, China. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(4): 466-477.
- [30] Su C H, Fu B J, Wei Y P, Lü Y H, Liu G H, Wang D L, Mao K B, Feng X M. Ecosystem management based on ecosystem services and human activities: a case study in the Yanhe watershed. *Sustainability Science*, 2012, 7(1): 17-32.
- [31] 李晶, 周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析. 地理学报, 2014, 69(7): 933-944.
- [32] Zhang Y L, Qi W, Zhou C P, Ding M J, Liu L S, Gao J G, Bai W Q, Wang Z F, Zheng D. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 269-287.
- [33] Li Y J, Zhang L W, Qiu J X, Yan J P, Wan L W, Wang P T, Hu N K, Cheng W, Fu B J. Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1181-1199.
- [34] Fan M, Shibata H, Chen L. Spatial conservation of water yield and sediment retention hydrological ecosystem services across Teshio watershed, northernmost of Japan. *Ecological Complexity*, 2018, 33: 1-10.
- [35] 符素华, 王向亮, 王红叶, 魏欣, 袁爱萍. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究. 干旱区地理, 2012, 35(3): 415-421.