

DOI: 10.5846/stxb202008192168

占焱, 于洋, 吴秀芹. 湟水流域生态系统服务供需匹配关系. 生态学报, 2021, 41(18): 7260-7272.

Zhan T, Yu Y, Wu X Q. Supply-demand spatial matching of ecosystem services in the Huangshui River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7260-7272.

湟水流域生态系统服务供需匹配关系

占 焱^{1,2}, 于 洋^{1,2}, 吴秀芹^{1,2,*}

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

2 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要: 生态系统服务供需可以反映出区域生态经济发展协调水平, 在空间上量化生态系统服务的供给和需求, 识别生态系统服务的供需匹配关系, 对区域生态系统可持续管理具有重要意义。湟水流域是西北生态屏障建设的重要组成部分, 其生态系统服务供需平衡直接关系到青海东部地区的生态安全, 为了识别流域生态系统服务供需匹配状况, 综合集成多源数据, 运用多种生物物理模型定量评估湟水流域食物生产、产水、土壤保持和碳固定服务, 刻画流域内生态系统服务供需格局的空间特征, 揭示各项生态系统服务供需的空间聚集模式, 生成具有高度连通性的区域, 为生态优先保护区划分提供参考。研究表明: (1) 湟水流域生态系统服务供给和需求在空间分布上具有高度异质性, 除去产水服务, 其他三项生态系统服务整体上能够满足流域内部需求, 但局部区域仍然呈现明显的赤字特征; (2) 不同生态系统服务的供需比差异明显, 由高到低依次为是碳固存(0.188)、食物生产(0.114)、土壤保持(0.026)和产水服务(-0.021), 各项服务的供需比都具有显著的空间差异; (3) 流域内生态系统服务供需的空间错配现象突出, 除产水服务外, 各项生态系统服务都有“高供给低需求”地区和“低供给高需求”地区, “高供给低需求”区主要分布在流域上游生态基底条件好的区域, “低供给高需求”区集中在流域中下游的河湟谷地; (4) 土地利用类型影响生态系统服务供需平衡, 流域实现供需平衡需要适度增加林草地比例, 控制耕地和城市用地的扩张。研究系统分析了湟水流域生态系统服务供需盈亏状况, 可为流域生态系统可持续管理与土地资源决策提供科学支撑。

关键词: 生态系统服务; 湟水流域; 热点与冷点; 供需平衡

Supply-demand spatial matching of ecosystem services in the Huangshui River Basin

ZHAN Tian^{1,2}, YU Yang^{1,2}, WU Xiuqin^{1,2,*}

1 Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

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

Abstract: Supply and demand of ecosystem services can reflect the coordination level of regional eco-economic development. Spatially quantifying the supply and demand of ecosystem services and identifying the mismatch between them are significant to regional ecosystem sustainable management. Huangshui River Basin is an important part of ecological barrier construction in Northwest China. The balance between supply and demand of ecosystem services is directly related to the ecological security of Qinghai Province. Based on the comprehensive multi-source data, multiple biophysical models were used to quantitatively evaluate the supply and demand of food production, water yield, soil conservation and carbon sequestration in Huangshui River Basin. The aim was to show the spatial characteristics of the supply and demand of ecosystem services and to reveal the spatial aggregation pattern of supply-demand in the basin. The results show that: (1) The spatial distribution supply and demand of ecosystem service is highly heterogeneous in Huangshui basin. Except for

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671080)

收稿日期: 2020-08-19; 网络出版日期: 2021-06-15

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

water yield service, other ecosystem services can meet the internal demand of the basin, but there are still obvious deficit characteristics in some regions. (2) The supply-demand ratio of different ecosystem services is significantly different. It ranks from great to small as follows: carbon sequestration (0.118), food production (0.114), soil conservation (0.026), and water yield service (-0.021). There were significantly spatial differences in the supply-demand ratios of various services in the watershed. (3) The spatial mismatch between supply and demand was prominent in the Huangshui River Basin. Except for water yield service, other ecosystem services have “high supply and low demand” areas and “low supply and high demand” areas. (4) The type of land use affects the balance between supply and demand of all ecosystem services. To achieve the balance between supply and demand, the proportion of forest and grass land should be moderately increased and the expansion of cultivated land and urban land should be controlled. This paper systematically analyze the supply and demand of ecosystem services in Huangshui River Basin, which can provide theoretical support for ecosystem management and decision-making of land resource allocation.

Key Words: ecosystem services; Huangshui River Basin; hotspot and coldspot; supply and demand matching

生态系统服务在生态和经济利益方面为人类福祉做出贡献,并能为区域环境决策提供理论支撑^[1-2]。生态系统服务的供需平衡是区域可持续发展理论的重要组成部分,也是阐明人类社会与自然环境相互作用的关键^[3]。因此,识别生态系统服务供给和需求的空间格局,分析生态系统服务供需的空间关联特征,有利于提高生态系统管理效率^[4],为生态系统服务纳入区域发展决策提供路径^[5]。

早期的研究主要从经济价值的角度评估生态系统服务^[6],着重于生态系统服务的供给上^[7-8]。近年来,生态系统服务的研究强调人类社会的重要地位^[9],一些学者已经意识到,生态系统服务涉及到生物物理、社会文化、经济等多个领域^[10-12],需要将研究重点从生态系统服务的供应延伸到价值释放的过程^[13],包括供应、流动、需求和消费^[14-16],生态系统服务评估应尝试整合这些过程^[12]。现已有不少学者将生态系统服务的供应和社会需求纳入到生态系统服务评估中,主要集中在供给服务^[17-18]、调节服务^[19-20]、文化服务^[21-23]这三种服务类型,侧重于定量分析生态系统供需的空间分异和平衡状况,以供需匹配度为指标,基于像元揭示生态系统服务供需在空间上的匹配性,提供详细可视化结果,但同时也会产生斑点效应,政策制定者难以对实际环境中的特定单元进行干预。因此,对生态系统服务供需的空间聚集进行研究,识别较大且同质的供需不匹配关键区位,对区域政策制定和生态补偿机制的研究具有重要意义^[24],在进行生态保护和补偿时,优先考虑流域内供给处于盈余的区域;对生态系统服务高需求地区应因地制宜的实施生态建设与修复^[25]。

湟水流经的河湟谷地集中了青海省近 60% 的人口,工农业产值占全省的一半以上。流域北依祁连山国家级自然保护区,南邻三江源生态保护区,其生态环境的保护有利于维护全省经济发展态势和社会稳定,支撑西北生态屏障建设。因此,本文以湟水流域为例,从利益相关者的需求出发,采用不同的方法和指标定量评估四项关键生态服务供需状况,利用探索性空间数据分析方法(冷热点分析)揭示各种生态系统服务供需的空间聚类特征,并探讨生态系统服务供需平衡与土地利用结构的关系。研究结果可为流域尺度的生态系统管理和生态优先保护区划分提供理论支撑。

1 研究区概况

湟水(36°02'—37°28'N, 100°41'—103°04'E)是黄河上游左岸一级支流,以达坂山为分水岭,南侧为湟水干流,北侧为支流大通河,流域总范围 3.29 万 km²,分属青海和甘肃省的 20 个县(区)。湟水干流源于青海省海晏县大坂山南坡,至民和县享堂村汇大通河后注入黄河,干流全长 374 km,流域面积 1.77 万 km²。大通河作为流域内最大的支流,自天峻县托勒南山流出,向东流经刚察、祁连、门源等 11 个县(区),其流域范围近湟水流域总面积的一半(图 1)。流域地势整体呈西北高东南低,海拔在 1578—5188 m 之间,受地质构造和水系发育的影响,流域内地形复杂多样,峡谷川地交错分布。

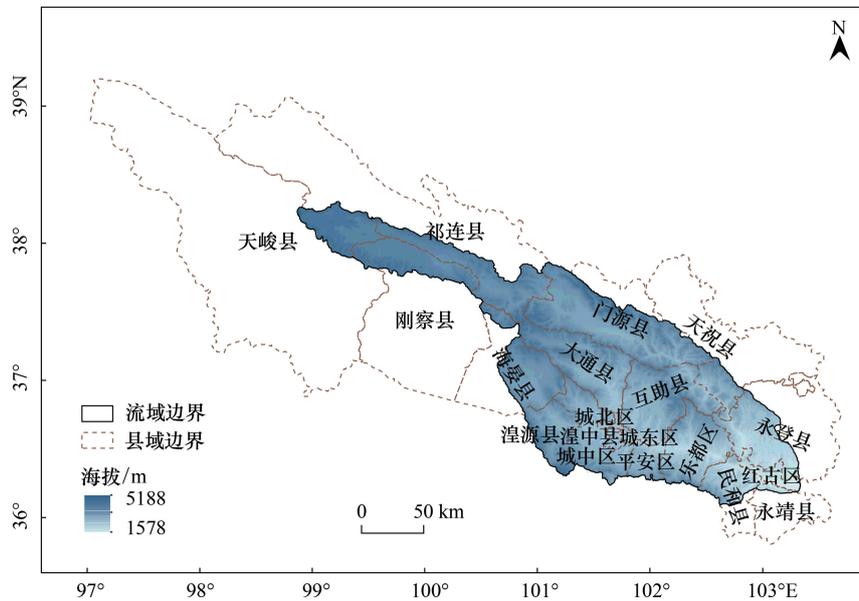


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the research area

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本文使用的基础数据研究数据分别为:土地利用数据来源于2015年欧空局全球陆地覆盖数据,空间分辨率为300 m,并参照张磊等^[26]对GlobCover进行分类系统转换,将一级分类系统中的林地进一步划分为林地和灌丛,裸露地进一步划分为裸地、荒漠及冰川,得到本文的土地利用分类系统;降水等气量观测数据来自中国气象数据网,选取研究区域及周边共13个气象站点,运用插值生成降水、气温和潜在蒸发量数据;NDVI数据采用美国地质调查局(USGS)的MODIS13Q1产品,分辨率为250 m;DEM数据来自中国科学院资源环境科学数据中心;土壤类型及质地数据来自基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集,分辨率为250 m;社会经济数据来源于各市(州)统计年鉴与甘肃、青海省水资源公报;参考闫庆武等^[27],基于流域内各乡镇人口数和居民点分布,生成了人口密度分布栅格数据。为了统一以上多源数据的空间分辨率,统一重采样为300 m分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务供给估算

针对湟水流域自然地理特征,本文评价了食物生产、产水、土壤保持、碳固定4项典型生态系统服务,具体估算方法如表1所示。

(1) 食物供给需求

食物生产服务需求是以各区县的人均食物需求量乘以人口密度的方法求得,其中人均食物需求量以2015年所在省市的主要食品人均消费量计算(表2),计算公式如下:

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{pcfc}} \times P_{\text{op}} \quad (1)$$

式中, F_{tot} 是食物需求量(t/km^2), F_{pcfc} 为人均食物需求量(kg), P_{op} 为栅格人口密度($\text{人}/\text{km}^2$)。

2.2.2 生态系统服务需求估算

(2) 产水服务需求

本文将产水需求等同于人类对淡水的实际消费量,包括农业用水、家庭生活用水和工业用水,计算公式

如下:

$$W_{tot} = W_{agr} + W_{dom} + W_{\uparrow} = I_{agr} \times L_{agr} + I_{dom} \times P_{op} \times 365/1000 + I_{\uparrow} \times GDP \quad (2)$$

式中, W_{tot} 是淡水总需求量, W_{agr} 、 W_{dom} 和 W_{\uparrow} 分别代表农业、生活和工业对水的需求。 I_{agr} 表示每 hm^2 灌溉年用水量 (m^3/hm^2), I_{dom} 表示人均生活用水量 ($L \text{ 人}^{-1}d^{-1}$), I_{\uparrow} 表示单位国内生产总值用水量 ($m^3/万元$), L_{agr} 表示农用地面积 (hm^2), P_{op} 为栅格人口密度 ($人/km^2$), GDP 为栅格国内生产总值密度 ($万元/km^2$)。

表 1 生态系统服务供给量化方法

Table 1 Method for evaluating ecosystem service

生态系统服务 Ecosystem services	原理与方法 Principles and methods	计算过程 Calculation process
食物生产 Food production	依据农作物和畜产品产量与 NDVI 线性关系, 进行食物产量的分配 ^[28]	$G_{(i,j)} = G_{sum(i,j)} \times \frac{NDVI_{(i,j)}}{NDVI_{sum}} \quad (3)$ <p>式中: $G_{(i,j)}$ 为像元 j 的食物总产量; $G_{sum(i,j)}$ 为各县 (区) 粮食、肉类、奶制品和水产品总产量; $NDVI_{(i,j)}$ 为 i 县 (区) j 像元的归一化植被指数; $NDVI_{sum}$ 为各县耕地、草地和水三者 NDVI 值之和</p>
产水 Water yield	区域水量平衡法, 即产水量为区域水分的输入量与输出量之差, 通过降水量减蒸散量计算得到 ^[29-31]	$WY = P_{rep} - ET \quad (4)$ $ET = \frac{P_{rep} \left(1 + \omega \frac{PET}{P_{rep}}\right)}{1 + \omega \frac{PET}{P_{rep}} + \left(\frac{PET}{P_{rep}}\right)^{-1}} \quad (5)$ <p>式中: WY 为像元的产水量 (mm); ET、P_{rep} 分别为像元的年实际蒸散量 (mm) 和年降水量 (mm); PET 为每个像元 x 的潜在蒸散量; ω 为植被可利用系数</p>
土壤保持 Soil conservation	RUSLE 模型 ^[32-33]	$SC = RKLS - USLE = R \times K \times LS - R \times K \times LS \times C \times P \quad (6)$ <p>式中: SC 为土壤保量; $USLE$ 为土壤侵蚀量 (t/hm^2); R 为降雨侵蚀因子; K 为土壤可侵蚀因子; LS 为地形因子; P 为水土保持因子; C 为植被覆盖因子</p>
碳固定 Carbon sequestration	光合作用方程 ^[33-34]	植物利用光合作用获得 90% 以上的干物质, 每吸收 1.63g 的 CO_2 能生成 1g 干物质, 而干物质中 45% 的成分为碳, 因此可推算固碳量为 $NPP/45\% \times 1.63$

表 2 2015 年流域内居民家庭主要食品人均消费量

Table 2 Average annual food consumption in Huangshui River Basin in 2015

区域 Region	粮食 Food/kg	油类 Oil/kg	蔬菜 Vegetables/ kg	肉类 Meat/kg	水产品 Aquatic products/kg	蛋 Egg/kg	奶 Milk/kg	瓜果 Melon and fruit/kg	总计 Total/kg
西宁	105.42	9.28	78.21	24.91	3.74	5.57	25.01	35.46	287.6
甘肃	159.9	9.8	73.8	18.0	2.0	7.6	13.4	49.0	333.5
青海	117.6	9.5	62.7	23.2	2.1	4.3	17.4	27.9	264.7

甘肃、青海省数据来自《中国住户调查年鉴 2016》; 西宁市数据来自《西宁统计年鉴 2016》

表 3 流域内行政区用水指标统计表

Table 3 Average annual water demand for agricultural, domestic, and industrial use

区域 Region	农田灌溉均用水量 Average annual water use for irrigation per hectare/ (m^3/hm^2)	城镇人均生活用水量 Average daily urban residential water use/ ($L \text{ 人}^{-1}d^{-1}$)	农村人均生活用水量 Average daily rural residential water use/ ($L \text{ 人}^{-1}d^{-1}$)	单位国内生产 总值工业用水量 Average annual industrial water use per unit of GDP/($m^3/万元$)
兰州市	6495	172	38	60
武威市	7245	151	43	387
临夏市	7635	135	37	202
海东市	7290	90	72	142
海北藏族自治州	4455	71	69	20
海西蒙古族藏族自治州	10830	99	80	184
西宁市	7875	109	73	45

青海省数据来自《2017 年青海省水资源公报》; 甘肃省数据来自《2015 年甘肃省水资源公报》

(3) 土壤保持服务需求

本文将土壤实际侵蚀量当作土壤保持服务的需求,计算公式如下:

$$USLE = R \times K \times LS \times P \times C \quad (7)$$

式中,USLE 为土壤侵蚀量(t/hm^2); R 为降雨侵蚀因子; K 为土壤可侵蚀因子; LS 为地形因子; P 为水土保持因子; C 为植被覆盖因子。

(4) 碳固定服务需求

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的 Kaya 碳排放恒等式:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP \quad (8)$$

式中, E 代表能源消费,GDP 表示国内生产总值,POP 表示人口数量。 CO_2 排放可以拆分为四个因素:碳排放强度(CO_2/E)、能源消费强度(E/GDP)、人均 GDP (GDP/POP) 和人口规模(POP)。当碳排放强度和能源消费强度恒定时 CO_2 与 GDP 呈正相关。因此,在市级能源消耗总量数据基础上,以区县的 GDP 占比作为权重,计算各区县 2015 年的排放量。

2.2.3 生态系统服务供需匹配度

生态系统服务的实际供给与人类需求的关系可能为赤字或盈余,根据等式计算的生态系统服务供需比(ESDR),可用于反映区域间的供需特征^[25]。

$$ESDR = \frac{S - D}{(S_{max} + D_{max}) / 2} \quad (9)$$

式中, S 、 D 指生态系统服务的实际供给量与需求量; S_{max} 是指流域内服务供应的最大值; D_{max} 是指流域内服务需求的最大值。ESDR>0 表示生态系统服务供应充足,ESDR=0 表示供需达到平衡,ESDR<0 表示服务需求未得到满足。

表 4 2015 年流域内行政分区能源消费统计表

Table 4 Energy consumption in Huangshui River Basin in 2015

指标 Index	兰州市	武威市	临夏市	海东市	海北藏族 自治州	海西蒙古族 藏族自治州	西宁市
能源消费总量 Energy consumption/(万 t 标准煤)	2405	321	236	711	98	954	2141

甘肃省数据来自《甘肃省“十三五”节能减排综合工作方案甘政发〔2017〕54 号》;青海省数据来自《青海省“十三五”节能减排综合工作方案青政〔2017〕53 号》

生态系统服务综合供需比率(CESDR)用于反映流域生态系统服务供需匹配的总体情况:

$$CESDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ESDR_i \quad (10)$$

式中, n 表示生态系统服务类型总数; $ESDR_i$ 是特定生态系统服务的供需比。

2.2.4 生态系统服务供需热点与冷点时空格局

本文使用 ArcGIS 平台中的热点分析工具(hotspot analysis),利用 Getis-Ord G_i^* 统计指数识别出高值和低值要素在空间上发生局部聚类的位置,其 Z 值越高则表示空间聚集越明显^[35]。将冷热点分析运用到生态系统服务中,其输出结果可以呈现更好的连续性表面,便于区域生态系统管理^[36]。生态系统服务供需热点表明生态供应远高于需求的地区,冷点表明需求远高于供应的地区,其计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{SD \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (11)$$

式中, x_j 为格网单元 j 的属性值; w_{ij} 为格网 i 与格网 j 之间的空间权重矩阵; n 为总格网数; \bar{X} 为均值, SD 为标准差。其中:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \tag{12}$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n-1} - (\bar{X})^2} \tag{13}$$

3 结果与分析

3.1 湟水流域生态系统服务供需分布格局

湟水流域 2015 年食物生产服务、产水服务、土壤保持服务、碳固定服务的总供给量分别 6.75×10^6 t, 10.89×10^8 m³, 70.30×10^6 t, 185.41×10^6 t, 需求量分别为 1.27×10^6 t, 16.37×10^8 m³, 22.53×10^6 t, 18.66×10^6 t, 总体来看, 除产水服务外, 其他三项服务的总需求量均小于总供给量(图 2、表 5)。食物生产服务、产水服务、碳固定服务的高需求区域主要分布于湟水流域中、下游段河谷地带, 特别是西宁至兰州沿线的区县, 这些地区河谷阶地台面相对平坦, 水热条件良好, 适宜居住和工农业的开展, 人口密度高, 生态系统服务需求量大。平均土壤保持需求最高的是民和回族土族自治县, 为 1705.26 t/km², 其次为城中区、乐都区和互助土族自治县等浅山区, 浅山区坡陡沟深, 土壤贫瘠, 是流域水土流失最严重的地区。

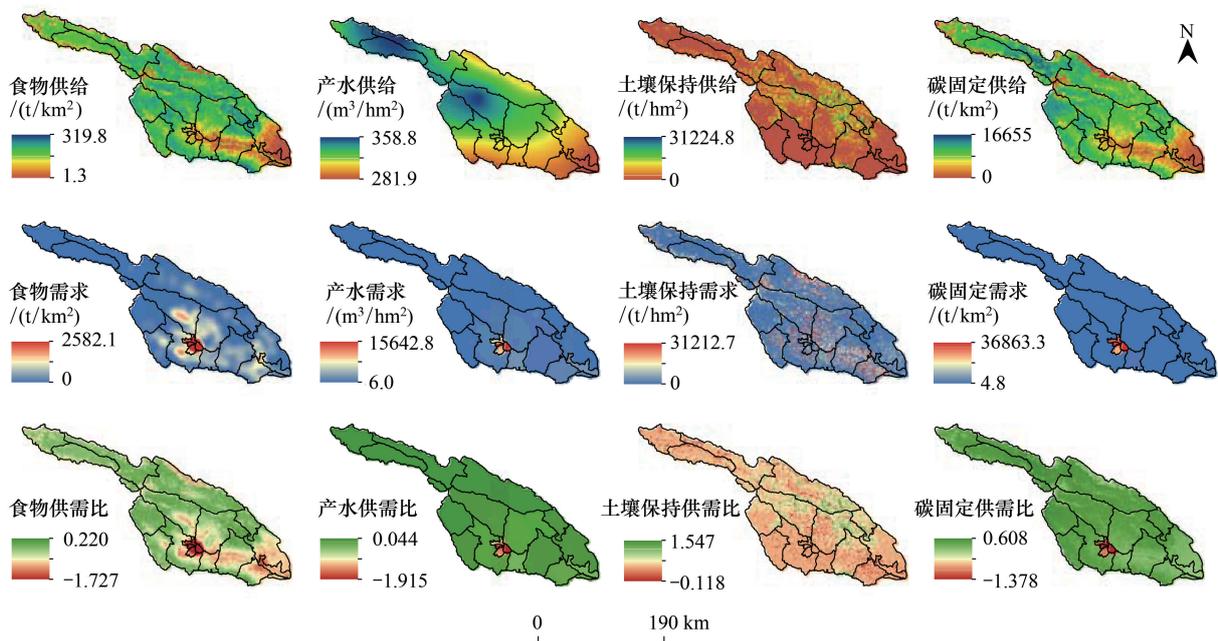


图 2 湟水流域生态系统服务供需分布图

Fig.2 Spatial distribution of supply and demand of ecosystem services in Huangshui River Basin

食物生产总量较高的区域主要集中在海晏盆地、湟源盆地等耕地资源较为集中的区域和天祝藏族自治县、大通回族土族自治县等畜牧业发达的县域; 海拔越高的地区降水量越大且蒸散量小, 因此产水服务受海拔影响, 供给量总体呈现由西北向东南降低的变化趋势, 刚察县单位面积产水最高 (352.28 m³/hm²), 最低的为永靖区 (289.11 m³/hm²); 海晏县、大通回族土族自治县、天祝藏族自治县等植被覆盖度较高的地区碳固存服务和土壤保持服务总供给量较高。

表 5 湟水流域各区县生态系统服务平均供需量

Table 5 Supply and demand of ecosystem services in Huangshui River Basin

名称 Name	食物生产		产水		土壤保持		碳固定	
	Food supply/(t/km ²)		Water yield/(m ³ /hm ²)		Soil conservation/(t/km ²)		Carbon storage/(t/km ²)	
	供给 Supply	需求 Demand	供给 Supply	需求 Demand	供给 Supply	需求 Demand	供给 Supply	需求 Demand
流域 Watershed	203.70	38.40	328.65	494.64	2121.56	679.79	5595.19	563.20
互助土族自治县	219.54	46.95	330.02	784.02	3551.51	976.59	5679.74	360.35
乐都区	179.87	36.72	312.79	5964.15	2379.73	1216.72	4746.18	327.05
民和回族土族自治县	178.84	75.17	299.67	9676.56	744.86	1705.26	4620.25	454.38
平安区	178.94	52.64	310.17	13441.61	415.82	839.68	4732.08	1022.91
门源回族自治县	215.16	10.00	329.49	6391.58	3841.49	697.73	5582.03	35.48
城北区	152.99	863.18	325.67	484.10	396.58	906.63	4053.28	22059.06
城东区	130.08	908.12	319.81	66.51	324.38	768.37	3254.70	25087.63
城中区	155.58	511.17	316.52	31.29	503.46	1319.51	3963.72	17057.37
城西区	135.39	986.79	322.01	697.06	632.36	811.10	3617.21	36863.26
大通回族土族自治县	233.17	45.96	346.91	446.49	3191.85	748.69	6313.62	407.38
湟中县	225.95	68.18	319.24	749.53	429.07	810.09	6237.28	718.11
湟源县	222.95	29.83	318.38	563.18	358.88	713.31	6343.92	198.49
天峻县	180.35	0.24	345.51	45.92	699.12	438.24	4999.02	4.84
刚察县	197.76	1.60	352.28	1028.24	1030.92	352.02	6126.80	13.62
祁连县	217.15	1.07	342.85	1598.16	1871.03	255.88	6627.04	11.58
海晏县	231.26	2.89	345.30	8.79	1704.80	267.67	6797.56	35.18
天祝藏族自治县	236.79	7.87	324.32	6.74	4380.06	161.68	6584.54	32.76
永登县	132.63	34.57	303.88	285.75	1234.13	370.02	3448.79	123.72
红古区	92.77	52.66	291.83	392.97	124.16	362.64	2490.12	1509.21
永靖区	116.96	32.36	289.11	1692.35	351.27	806.52	3012.16	145.08

3.2 生态系统服务供需数量匹配评价

湟水流域食物生产、产水、土壤保持、碳固定服务和综合服务供需比分别为 0.114, -0.021, 0.026, 0.188, 0.077, 整体而言, 湟水流域生态系统服务供给较为充分, 除产水服务外生态系统提供的其他三种服务能基本满足内部对生态系统服务的需求或消耗, 但分配不均衡。城北区、城东区、城中区、城西区 4 项服务以及综合服务供需比均小于 0, 是流域供需矛盾最严重的区域; 天祝县生态系统服务供需状况最好, 综合服务供需比高达 0.130, 其次分别为海晏县、祁连县、门源回族自治县等县。综合来看, 湟水一级支流大通河流经区县的生态系统服务供需比高于湟水干流区域。

就各项服务而言, 食物生产服务供需比较高的地区分布在海晏县、天祝藏族自治县、祁连县等农牧区; 产水服务供需比高的地区为天峻县、刚察县、祁连县, 这些地区是支流大通河的上游源头区, 海拔在 3000 m 以上, 降水丰沛且蒸散量少; 土壤保持服务供需比较高的地区和碳固定服务类似, 集中在祁连县仙米国家森林公园、大通县北部察汗河森林公园、海晏县东部水源涵养地等植被覆盖较好的区域。

3.3 生态系统服务供需空间匹配评价

3.3.1 生态系统服务的热点与冷点格局特征分析

本文将研究区划分成较小的地块单元, 便于流域生态系统的管理。综合考虑不同地块尺寸热点分析效果, 将研究区划分成单位面积为 1000 hm²的正六边形地块共 420 个, 然后对研究单元供需匹配度 ESDR 的平均值进行冷热点分析, 冷点表示生态系统需求高于供应的集聚地区(低供给-高需求区), 而热点表示供应高于需求的集聚地区(高供给-低需求区), 其中置信水平高于 95% ($z > +1.96$ 或 $z < -1.96$) 的热点和冷点被认为是生态系统服务供需不匹配的关键区域。因此, 根据 z 值将流域划为“低于 -1.96”(区域 1), “从 -1.96 至 -1.65”

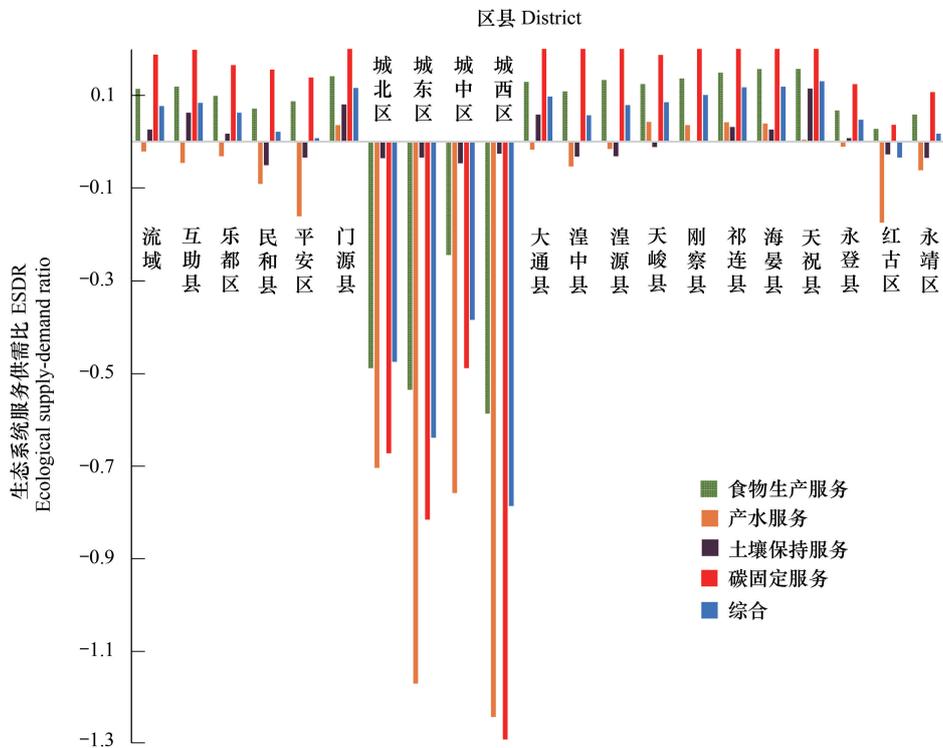


图3 湟水流域各区县生态系统服务供需比

Fig.3 ESDR in each district and county of Huangshui River Basin

(区域2),“从-1.65至+1.65”(区域3),“从+1.65至+1.96”(区域4)和“大于+1.96”(区域5)共五类区域,表示湟水流域生态系统服务可持续管理的不同需求(图4)。

从图4可以看出,各类生态系统服务中区域3(非显著区)的面积最大,其次为区域1(赤字严重区)和区域5(盈余充足区),少量的六边形构成区域2(赤字一般区)和4(盈余一般区)。湟水流域人口稠密,工业较发达,且多为冶金、煤炭、化工、毛纺等高耗水行业,用水量很大而产水量不足,故无产水服务热点,特别是民和县、永登县等干旱山区和西宁城区,需求明显得不到满足。土壤保持服务和碳固存服务供应过剩的地区分布在西北部自然度较高的地区,森林资源丰富,有仙米、北山等多个国家级森林公园,是湟水流域的水源涵养区。流域东南部的西宁主城区和兰州市区食物生产和碳固存的需求没有得到满足,这些地区耕地和林地面积少,同时人口聚集,建设用地分布密集且规模较大,食物和碳固存需求高而供给低。互助县、乐都县和民和县等流域中下游地区,植被覆盖度不高,地力瘠薄,地貌多为黄土低山丘陵沟壑地,沟底与山梁顶部高差可达600 m,因此水土流失严重,土壤保持服务供给不足。

3.3.2 不同土地利用方式与生态系统服务冷热点关系特征

本文以箱线图表示五类区域生态系统服务供应和需求的平均水平,并计算了不同区域的土地利用结构,以分析土地利用类型对生态系统服务供需的影响。

由图5可知,每项生态系统服务区域间的土地利用结构差距较大,食物生产服务区域1(赤字严重区)的特点是耕地和城市用地比例相对较高,分别为37%和8%,而区域5(盈余充足区)土地利用类型基本为草地和林地,面积占比分别为94%和2%,且水体与湿地的比例相对较高,面积占比为3%,是区域1的3倍。除区域5林地的比例高达41%,碳固存服务区域间的土地利用结构与食物生产基本一致。土壤保持服务供应过剩地区的土地利用类型主要为草地和林地,而需求过剩区耕地的比例高达30%。与土壤保持服务类似,产水服务低供给区的特点是耕地比例高,区域1和2的耕地面积均大于27%,远高于区域3。综合来看,4项生态系统

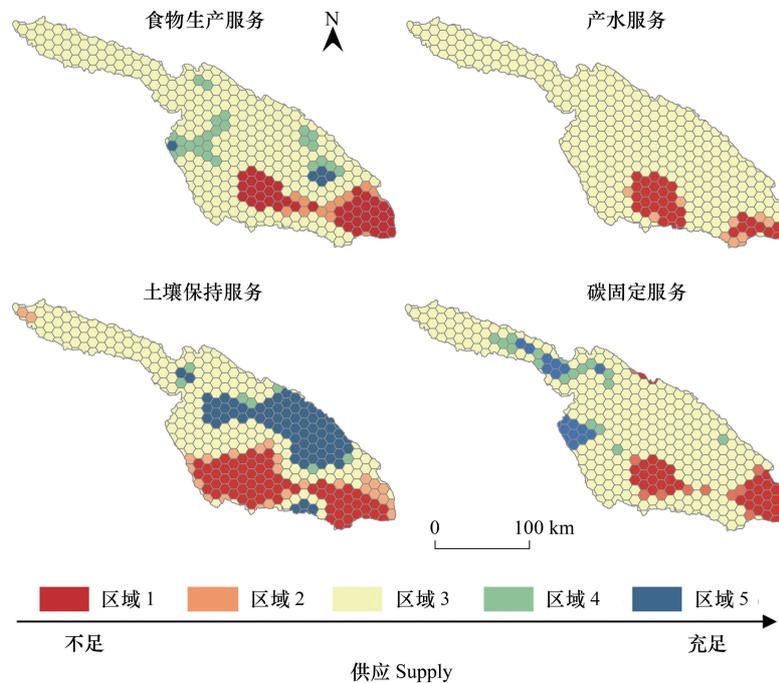


图4 湟水流域各项生态系统服务冷热点空间分布

Fig.4 The hotspots and coldspots of four ecosystem services in Huangshui River Basin

服务的供需在区域3(非显著区)表现出相对平衡状态,并且土地利用结构类似,草地的占比最高为75%,耕地、林地、城市用地、水体与湿地的比例分别13%、9%、2%、2%左右,随着林地和草地面积占比的增大,流域4项生态系统服务的供给水平会显著增高,这说明林草地占比是平衡流域生态关系的关键。

4 讨论

4.1 生态保护区及优先级的确定

生态系统服务供需关系对于环境决策至关重要,其分析结果可用于划定优先保护区域或识别管理干预措施应集中的区域。已有研究表明青藏高原存在较大的保护缺口,保护区的扩大应优先考虑对生物多样性和生态系统服务均有价值的地区^[37]。考虑到空间邻近效应,如果不加强邻近区域的生态保护,保护区可能会损失相当一部分生态系统服务价值^[38-39]。本文使用基于Getis-Ord G_i^* 的冷热点分析将生态系统服务供给和需求结合起来,在研究区内生成大的空间集聚区,有利于提高生态管理成效。

生态保护区具有游憩、美学等功能,具有很高的文化服务价值,本文仅从供给服务和调节服务对生态保护优先区进行划定,文化服务以及多种生态系统服务供需的权衡协同关系将是下一阶段的重点研究内容,并基于上述研究结果,考虑保护成本和风险等因素,建立完善的生态保护优先区划定理论框架。

4.2 湟水流域生态系统服务供需特征

为了更好地突出该区域生态系统服务稀缺性和必要性,本文针对湟水流域的区域特性,选择能够显著改善人类生活质量并对区域可持续发展产生重要影响的核心功能,分别为食物供给、产水、土壤侵蚀以及碳固存服务。采取生态过程模型(RUSLE)计算实际侵蚀来量化需求,而产水、食物供给、碳固定需求都属于商品消费类型,则采取社会经济指标来量化需求。以消费量作为需求的直接指标不包括未满足需求,加之研究区统计数据只能细化到市级或省级,评估生态系统服务需求量较为粗糙。

从生态系统服务供需匹配度的角度来看,产水服务的供需矛盾最大,与赵翠平等^[40]评价湟水流域生态环境状况的结果相似,也符合水资源是限制区域发展关键因素的学界认识^[41-42]。水资源不足与研究区所处区

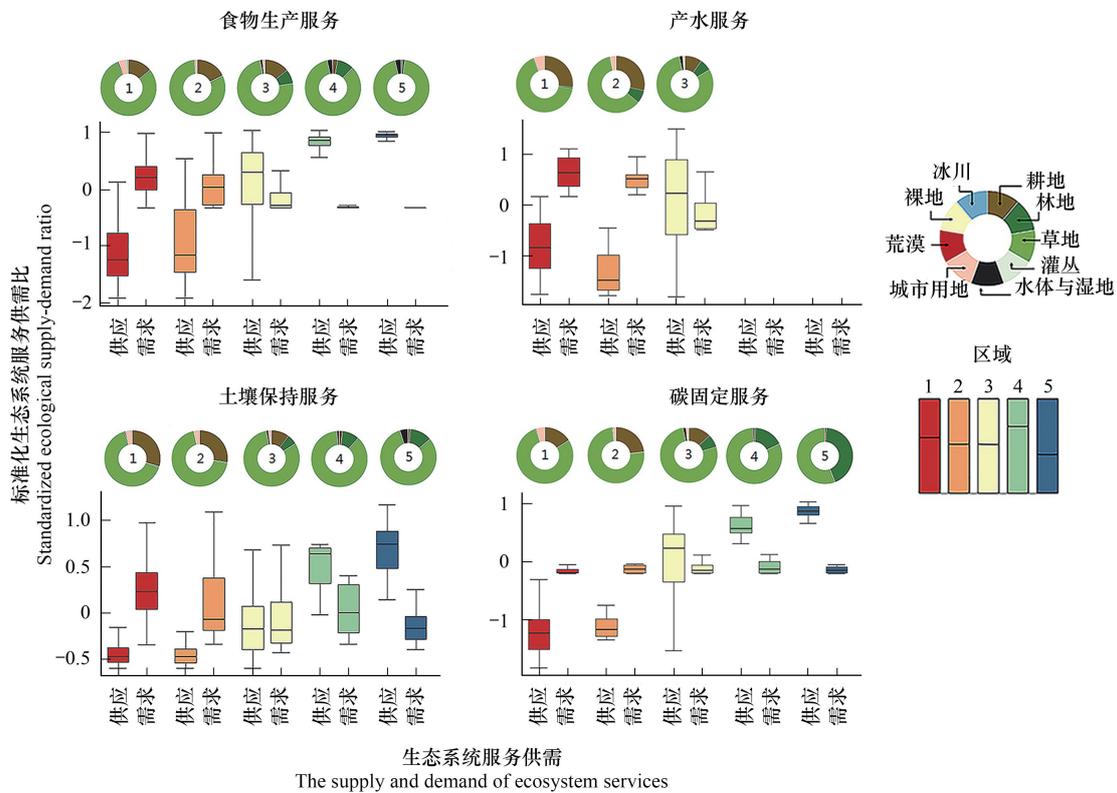


图 5 湟水流域四种生态服务供需冷热点下的土地利用结构

Fig.5 different land use types under the hotspot and coldspot of the four ecosystem service supply-demands in Huangshui River Basin

位相关, 湟水位于青藏高原与黄土高原的交汇地带, 属于半干旱的高原大陆性气候, 自然资本提供的产水服务相对较弱。再加上在西部大开发政策的影响下, 流域内城镇化进程迅速发展^[43], 人类活动强度显著增大, 已有研究表明湟水流域人类活动对径流减少的影响超过了 50%, 人类活动主要是通过人工造林、水利工程等方式改变水循环过程, 导致径流量的减少^[44]。近年来, 湟水流域实施大规模的林业生态工程, 人工林会加大蒸散量从而加剧产水服务供需脱节^[41]。

从空间分布来看, 湟水流域生态系统供需具有显著空间异质性, 造成了上下游间生态与经济发展失衡。上游属于高寒山区, 以原始森林和高山草地等原生态自然景观为主, 自然基底好, 生态资源丰富, 且人口稀少, 是青海省相对贫困的区域, 生态系统服务供给充沛。在过去的几十年, 城市化和工业化进程加快导致了中下游的城镇迅速扩张, 大量生态用地被人类开发建设, 生态系统服务供给水平下降, 人口聚集带来的高需求得不到满足。已有研究指出湟水谷地 2008—2014 年经济发展和生态环境的协调性不断提高, 但其矛盾仍然是制约整体协调发展水平的重要原因^[45], 本文印证了以上结论。未来应建立完善的流域生态服务市场和补偿机制, 实现湟水流域的绿色发展^[46]。

4.3 生态保护区及优先级的确定

根据研究区供需冷热点的划分和土地利用对生态系统服务供需的影响, 可通过土地利用结构的优化来改善流域的生态环境, 平衡流域尺度的供求关系。湟水流域供需冷热点间的土地利用结构迥异, 赤字严重区的耕地和城市用地占比相对较高, 盈余充足区的林草地占比达 90% 上。有学者在湖北省^[47] 和上海市^[48] 的研究也发现, 生态系统服务供需达到平衡需要更高的绿地比和更低的建设用地比。值得注意的是, 在黄土高原的多项研究中发现^[49-51], 由于林地的各项服务间权衡冲突相对明显, 草地更适合干旱半干旱地区的生态恢复。因此, 湟水流域在实施生态工程时要控制草地与林地间的比例, 以支持更高水平的生态系统服务供需协同作

用,人工林构建要重视林分类型和龄组的选择^[52],保障流域森林生态系统的碳水平衡。

湟水河源头地区以及大通河的上游地区,是流域生态保护的重点区,既要加强保障生态系统服务的可持续供应,同时也要积极发展生态旅游等产业,拉动投资,吸纳社会劳动力,把生态效益更好的转换为经济效益。中下游以西宁、兰州为代表的赤字严重区,是湟水流域的生态修复区,这些地区不仅缺乏生态资源,而且生态空间分散,可通过增加小型公园数量,控制建设用地过快扩张,实施生态修复工程等举措来调节供需矛盾。对于流域内供需较为平衡的区域,可通过构建生态廊道并提高生态廊道的连通性,促进生态系统服务从供给高水平区向低水平区的流动。

5 结论

以湟水流域为例,从利益相关者的角度评估了四项生态系统服务的供给与需求,识别出每种服务供需空间错配的关键区域,说明了各项服务供需平衡与土地利用方式的关系,得到以下结论:

(1) 湟水流域各项生态系统服务的供给与需求分布呈现不同的特点,食物生产、产水和碳固定服务供给总体呈现由西北向东南递减的趋势,这3项生态系统服务的高需求区也类似,由河流谷地等人口聚居区向四周辐射分布,土壤保持服务供给核心区位于流域北部,即支流大通河上中游和干流上游河源一带,土壤保持服务需求高的区域为湟水河中下游的低山丘陵区。

(2) 湟水流域生态系统服务供需数量匹配较好,三类服务整体上供给量大于需求量,其中碳固定服务供需比最高为0.188,食物生产和土壤保持服务次之,产水服务不能满足流域内部的需求,供需比为-0.021。

(3) 流域供需格局空间失衡现象较为明显,除产水服务无供需热点外,各项生态系统服务都有供需冷热点,热点即“供给多-需求少”的地区主要分布在湟水河上游生态基底条件好的区域,冷点即“供给少-需求多”的地区集中在湟水流域中下游经济发展水平较高的河湟谷地,流域上下游生态与经济发展不平衡。

(4) 土地利用类型对生态系统服务供需平衡影响较大,林地和草地面积占比的增高能显著提高流域生态系统服务供应水平,这说明优化流域自身土地利用格局,可以减少生态系统服务赤字和空间错配,实现生态系统服务供需的“扭亏为盈”。

参考文献 (References):

- [1] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: a review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 159-171.
- [2] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [3] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: a review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [4] Geijzendorffer I R, Martín-López B, Roche P K. Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 320-331.
- [5] Roces-Díaz J V, Vayreda J, Banqué-Casanovas M, Díaz-Varela E, Bonet J A, Brotons L, De-Miguel S, Herrando S, Martínez-Vilalta J. The spatial level of analysis affects the patterns of forest ecosystem services supply and their relationships. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1270-1283.
- [6] 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.
- [7] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [8] Mensah S, Veldtman R, Assogbadjo A E, Ham C, Kakaï R G, Seifert T. Ecosystem service importance and use vary with socio-environmental factors: a study from household-surveys in local communities of South Africa. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 1-8.
- [9] Gissi E, Burkhard B, Verburg P H. Ecosystem services: building informed policies to orient landscape dynamics. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2015, 11(3): 185-189.
- [10] Bastian O, Syrbe R U, Rosenberg M, Rahe D, Grunewald K. The five pillar EPPS framework for quantifying, mapping and managing ecosystem

- services. *Ecosystem Services*, 2013, 4:15-24.
- [11] Castro A J, Verburg P H, Martín-López B, García-Llorente M, Cabello J, Vaughn C C, López E. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: a landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132:102-110.
- [12] Martín-López B, Gómez-Baggethun E, García-Llorente M, Montes C. Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment. *Ecological Indicators*, 2014, 37:220-228.
- [13] 王大尚, 郑华, 欧阳志云. 生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(6):1747-1753.
- [14] Ritzema H, Kirkpatrick H, Stibinger J, Heinhuis H, Belting H, Schrijver R, Diemont H. Water management supporting the delivery of ecosystem services for grassland, heath and moorland. *Sustainability*, 2016, 8(5):440.
- [15] 严岩, 朱捷缘, 吴刚, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8):2489-2496.
- [16] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6):960-973.
- [17] Boithias L, Acuña V, Vergoñós L, Ziv G, Marcé R, Sabater S. Assessment of the water supply:demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471:567-577.
- [18] Shi Y S, Shi D H, Zhou L L, Fang R B. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2020, 115:106418.
- [19] Stürck J, Schulp C J E, Verburg P H. Spatio-temporal dynamics of regulating ecosystem services in Europe-the role of past and future land use change. *Applied Geography*, 2015, 63:121-135.
- [20] Baró F, Haase D, Gómez-Baggethun E, Frantzeskaki N. Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: a quantitative assessment in five European cities. *Ecological Indicators*, 2015, 55:146-158.
- [21] Baró F, Palomo I, Zulian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. *Land Use Policy*, 2016, 57:405-417.
- [22] Peña L, Casado-Arzuaga I, Onaindia M. Mapping recreation supply and demand using an ecological and a social evaluation approach. *Ecosystem Services*, 2015, 13:108-118.
- [23] Schirpke U, Meisch C, Marsoner T, Tappeiner U. Revealing spatial and temporal patterns of outdoor recreation in the European Alps and their surroundings. *Ecosystem Services*, 2018, 31:336-350.
- [24] 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.
- [25] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. *生态学报*, 2017, 37(17):5846-5852.
- [26] 张磊, 吴炳方, 李晓松, 邢强. 基于碳收支的中国土地覆被分类系统. *生态学报*, 2014, 34(24):7158-7166.
- [27] 闫庆武, 卞正富, 张萍, 王红. 基于居民点密度的人口密度空间化. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(5):95-98.
- [28] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(9):1921-1937.
- [29] Liu Y X, Lü Y H, Fu B J, Harris P, Wu L H. Quantifying the spatio-temporal drivers of planned vegetation restoration on ecosystem services at a regional scale. *Science of the Total Environment*, 2019, 650:1029-1040.
- [30] Zhao M Y, Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wang Y L. Mapping watershed-level ecosystem service bundles in the pearl river delta, China. *Ecological Economics*, 2018, 152:106-117.
- [31] 郭洪伟, 孙小银, 廉丽姝, 张大智, 徐燕. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(9):2899-2906.
- [32] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook*, No. 703, 1997.
- [33] Jiang C, Wang F, Zhang H Y, Dong X L. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000-2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration. *Ecological Engineering*, 2016, 97:258-271.
- [34] Li J, Zhou Z X. Natural and human impacts on ecosystem services in Guanzhong-Tianshui economic region of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(7):6803-6815.
- [35] 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):823-834.
- [36] 徐传语, 王志芳. 阳江市生态系统服务冷热点方法研究. *科学技术创新*, 2018, (34):118-119.
- [37] Li S C, Zhang H, Zhou X W, Yu H B, Li W J. Enhancing protected areas for biodiversity and ecosystem services in the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecosystem Services*, 2020, 42:101090.
- [38] Lorilla R S, Kalogirou S, Poirazidis K, Kefalas G. Identifying spatial mismatches between the supply and demand of ecosystem services to achieve a sustainable management regime in the Ionian Islands (Western Greece). *Land Use Policy*, 2019, 88:104171.

- [39] Schröter M, Remme R P. Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: comparing hotspots with heuristic optimisation. *Landscape Ecology*, 2016, 31(2):431-450.
- [40] 赵翠平, 龚家国, 王浩, 王英, 杨苗. 基于遥感的湟水流域生态环境状况评价. *中国农村水利水电*, 2018, (6):68-71.
- [41] Xu Z H, Wei H J, Dong X B, Liu Y X, Xue H L. Evaluating the ecological benefits of plantations in arid areas from the perspective of ecosystem service supply and demand-based on emergy analysis. *Science of the Total Environment*, 2020, 705:135853.
- [42] Ling H B, Xu H L, Fu J Y, Fan Z L, Xu X W. Suitable oasis scale in a typical continental river basin in an arid region of China: a case study of the Manas River Basin. *Quaternary International*, 2013, 286:116-125.
- [43] Fu Z H, Zhao H J, Wang H, Lu W T, Wang J, Guo H C. Integrated planning for regional development planning and water resources management under uncertainty: a case study of Xining, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 554:623-634.
- [44] 张调风, 朱西德, 王永剑, 李红梅, 刘彩红. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估. *资源科学*, 2014, 36(11):2256-2262.
- [45] 郭婧, 周学斌, 任君, 王芳萍, 魏珍, 师燕, 周华坤. 青海省湟水谷地经济发展与生态环境耦合协调度的时空分异. *水土保持研究*, 2018, 25(6):242-250.
- [46] 周景博, 冯相昭. 流域绿色发展路径探索——基于生态系统服务供需平衡的视角. *环境保护*, 2019, 47(21):48-51.
- [47] 杨冕, 张艺千, 王春晓. 湖北省关键生态系统服务供需状况的时空变化研究. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(9):2080-2091.
- [48] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, Xu X B, Alatalo J M. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation. *Science of the Total Environment*, 2019, 650:1426-1439.
- [49] Luo Y, Lü Y H, Fu B J, Zhang Q J, Li T, Hu W Y, Comber A. Half century change of interactions among ecosystem services driven by ecological restoration: quantification and policy implications at a watershed scale in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 651:2546-2557.
- [50] 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.
- [51] Pan Y, Xu Z R, Wu J X. Spatial differences of the supply of multiple ecosystem services and the environmental and land use factors affecting them. *Ecosystem Services*, 2013, 5:4-10.
- [52] 李旭华. 长白山阔叶红松林区植被生产力与水分利用关系研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.