

DOI: 10.5846/stxb202107101858

周新宇, 孟士婷, 黄庆旭, 张瀚, 杨梦露, 焦晨泰. 结合生态系统服务供需和人类福祉的区域规划. 生态学报, 2022, 42(14): 5748-5760.

Zhou X Y, Meng S T, Huang Q X, Zhang H, Yang M L, Jiao C T. Combining supply and demand of ecosystem services and human well-being for regional planning. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5748-5760.

结合生态系统服务供需和人类福祉的区域规划

周新宇¹, 孟士婷^{1,2}, 黄庆旭^{1,2,*}, 张瀚¹, 杨梦露¹, 焦晨泰¹

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室人与环境系统可持续研究中心, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部自然资源学院土地资源与区域发展研究中心, 北京 100875

摘要: 生态系统服务与人类福祉的和谐关系是区域规划的基石。现有的区域规划较少同时考虑生态系统服务的供需和流域居民的福祉差异。以城市化流域——官厅水库流域为例, 应用改进后的 CASA 模型、IPCC 清单法、SolVES 模型和问卷调查量化食物供给、碳固持和文化服务以及人类福祉, 再结合服务的供需关系及人类福祉水平开展聚类分区, 并针对各区情况提出规划建议。结果显示, 官厅水库流域内食物供给和文化服务供大于求, 而碳固持服务供不应求。流域福祉位于中等水平, 分值为 3.44 (满分 5 分)。其中, 居民的基本物质需求分值最高 (3.64), 收入分值 (3.00) 明显低于流域整体水平。除此之外, 居民认为供水、医疗条件和收入这些福祉要素仍有待改善。流域可分为城市发展区、城郊休闲区、生态涵养区和文化建设区。在各区需采用因地制宜的方式, 通过增大植被覆盖面、开展文旅产业和推动冰雪项目等形式, 提高居民生活质量和维持区域可持续性。

关键词: 流域管理; 城市化; 官厅水库流域; 景观可持续科学; 区域规划

Combining supply and demand of ecosystem services and human well-being for regional planning

ZHOU Xinyu¹, MENG Shiting^{1,2}, HUANG Qingxu^{1,2,*}, ZHANG Han¹, YANG Menglu¹, JIAO Chentai¹

1 Center for Human-Environment System Sustainability, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The harmonious relationship between ecosystem service and human well-being is the foundation of regional planning. However, few studies have integrated the supply and demand of ecosystem service and the differences in the well-being of local residents in the watersheds into regional planning, which could lead to biased policies which focus on either ecological conservation or human well-being. Here, this study took the urbanizing watershed—the Guanting Reservoir Watershed as the research region, which includes the host city of the 2022 Winter Olympic Games (Zhangjiakou city) and some counties that were labeled as impoverish counties before 2021. This study applied the improved CASA model, the IPCC inventory method, and the SolVES model to quantify the supply and demand of three ecosystem services (i.e., food provision, carbon sequestration and cultural service), and collected questionnaires face to face to quantify the satisfaction and importance of human well-being from multiple dimensions (i.e., basic material needs, health, security and income). Then, we divided the watershed into four sub-regions based on the result of supply—demand relationship for ecosystem service and the level of human well-being by the cluster analysis. On this basis, place-based planning suggestions were formed according to their features and existing policies. The results showed that the supply of food provision and cultural service were greater than the demand, while the supply of carbon sequestration was less than the demand, with supply-

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41971225); 北京市自然科学基金面上项目 (8192027)

收稿日期: 2021-07-10; 采用日期: 2022-11-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qxhuang@bnu.edu.cn

demand ratios of 135.6%, 193.5% and 27.8%, respectively. Local residents' well-being was at a medium level, with an average score of 3.44 out of 5. Among the four dimensions of human well-being, the residents' score for basic material demand (3.64) was the highest; the score for income (3.00) was significantly lower than the overall level, and the scores for health and security were 3.53 and 3.58, respectively. In addition, local residents believed that water provision, medical condition, and income were highly important for the quality of life and should be further improved. The watershed can be divided into urban development subregion (high cultural service supply and demand—high well-being), suburban recreation subregion (high food provision supply and demand—medium well-being), ecological conservation subregion (low cultural service supply and demand—high well-being) and cultural construction subregion (high cultural service supply and demand—low well-being). It is recommended to adopt placed-based solutions in regional planning, such as increasing vegetation coverage, developing cultural tourism industries, and promoting ice and snow projects to improve residents' quality of life and maintain regional sustainability.

Key Words: watershed management; urbanization; Guanting Reservoir watershed; landscape sustainability science; regional planning

生态系统服务是指人类从生态系统中获得的效果与利益^[1],其供需关系的匹配程度反映了环境承载能力和社会发展的需要之间的关系。人类福祉是人们在生活中所享受的具有意义的整体感受,达到这一感受的过程中要满足人们物质和精神上的需求^[2]。生态系统服务和人类福祉的和谐关系是区域规划的基石^[3]。在快速城市化流域,城市化带来的自然环境和社会经济变化可能加剧生态系统服务供需矛盾^[4-5],影响流域居民的福祉^[6-7]。因此,流域的区域规划策略需要同时考虑生态系统服务的供需匹配情况和居民福祉特征。

现有研究已经将生态系统服务纳入区域发展规划^[8-9]。常见的实现方式有3种。第1种是以生态系统服务的价值为标准,建立生态补偿机制^[10-12]或是通过情景分析选择适宜的发展策略^[13-14]。第2种是从生态系统服务的供给角度出发,分析各类服务的空间分布特征和权衡关系^[15-17]。第3种是在生态系统服务供给的基础上结合专家建议进行区域规划^[18-20]。但是,现有区域规划案例大多仅考虑生态系统服务的供给和需求,或单单考虑了居民福祉,较少同时考虑生态系统服务的供需以及区域居民的福祉,无法保障生态系统服务和人类福祉的和谐关系和多种利益相关者的福祉。

结合生态系统服务供需和人类福祉评估可以有效识别区域规划的挑战,为区域发展制定针对性的措施。通过评估生态系统服务供需关系可以掌握其空间异质性程度并反映生态系统服务对经济发展的影响,从而识别出需要优先关注的地区^[21-23]。在此基础上,结合对人类福祉的评估则可以在完善生态系统服务供需的同时,提升各地区居民的生活满意度,缓解人地矛盾^[24]并提出利于区域规划且更有针对性的政策建议。

本文以官厅水库流域为研究区,对该区域城市生态系统服务供需和人类福祉进行评估,以期为流域未来规划实践提供参考。首先,量化流域内食物供给服务、碳固持服务和文化服务的供需并分析其匹配关系。然后,采用问卷调查的方法,评估流域内人类福祉水平。最后,结合生态系统服务供需和人类福祉的结果,将流域划分为四类区域,并针对每个区域的发展情况提出建议。

1 研究区与数据

1.1 研究区

官厅水库流域位于我国京冀晋境内,总面积 46790 km²,由桑干河、洋河和永定河 3 个子流域组成(图 1)。位于流域下游的官厅水库地处张家口市怀来县和北京市延庆区境内,是北京市重要的供水水源地之一^[25]。流域在区划范围内包含北京、张家口、大同、朔州和乌兰察布下辖的 26 个区县。该区属温带大陆性季风气候,年均气温 6—8℃,年均降雨量约为 400 mm,湿地资源十分丰富^[26]。

官厅水库流域生态系统服务类型多样。位于洋河子流域的张家口市自然景观多样,并有着深厚的历史文化底蕴,境内有 12 处 4A 级旅游景区和 43 处全国重点文物保护单位。永定河上游的怀来县被归入国家重点生态功能区,有着“中国葡萄之乡”的美誉^[27-28]。另外,流域内张家口市多地属于环京津贫困带,贫困人口比例较高,人类福祉普遍偏低^[29]。因此,从结合生态系统服务供需和人类福祉的角度出发,以官厅水库为研究区,进行城市化流域的区域规划研究具有一定的代表性。

1.2 数据

本文中所使用的数据可分为五大类(表 1),分别是问卷调查数据、社交媒体评论数据、环境要素数据、人口分布数据和社会经济统计数据。

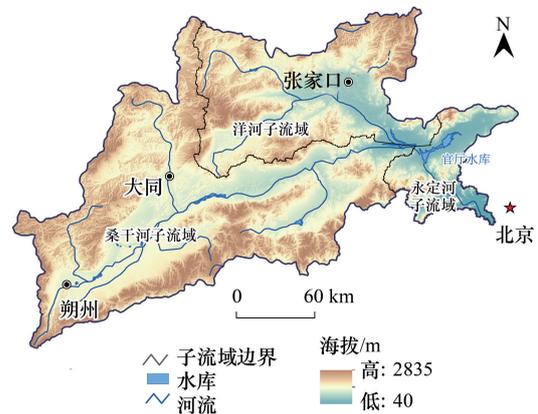


图 1 研究区

Fig. Study area

表 1 研究所用数据

Table 1 Data used in the study

类型 Type	内容 Content	分辨率 Resolution	来源 Source
问卷调查 Questionnaire	人类福祉打分 文化服务打分和代表点标记	—	实地调研
社交媒体评论 Social media reviews	包括商户名称、经纬度信息、商户评分星级和评论文本	—	大众点评网【周边游】
环境要素 Environmental factors	DEM	90 m	资源环境数据云平台
	2016 年 NDVI	300 m	NASA 的 MOD13Q1 产品
	2015 年土地利用/覆被	30 m	刘纪远等(2018)
	道路和水体矢量	—	国家基础地理信息中心
	距最近水体/道路的水平距离	90 m	欧式距离
人口分布 Population distribution	2016 年流域内月平均温度、月总降水量和太阳辐射总量	—	中国气象数据网
	2015 年中国人口空间分布	1 km 网格	资源环境数据云平台
社会经济统计 Socioeconomic data	各城市的分行业能源消耗量、城镇和农村人口数量、耕地面积、灌溉面积、牲畜养殖存栏数、农用机械总动力、化肥施用量和地区生产总值三次产业结构占比	—	北京、张家口、大同、朔州、中国统计年鉴
	分性别人口数、人口年龄结构、人口受教育水平、地区总 GDP、地区人均 GDP、高速公路里程、A 级景区数据	—	北京、张家口、大同、朔州、乌兰察布统计年鉴
	粮食、蔬菜、油料产量 肉类、奶类、水产品产量 人均食物消耗量	—	北京、张家口、大同、朔州、内蒙古统计年鉴

DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; NDVI: 归一化指数 Normalized difference vegetation index

2 方法

本文的主要方法分为 3 个步骤,技术路线图如下(图 2)。首先利用基础数据分别量化了 3 种典型生态系统服务的供给与需求。然后,通过问卷调查得到流域居民福祉特征。最后,结合服务供需关系和人类福祉展开聚类分析,并综合各分区特征提出改善福祉的政策建议。

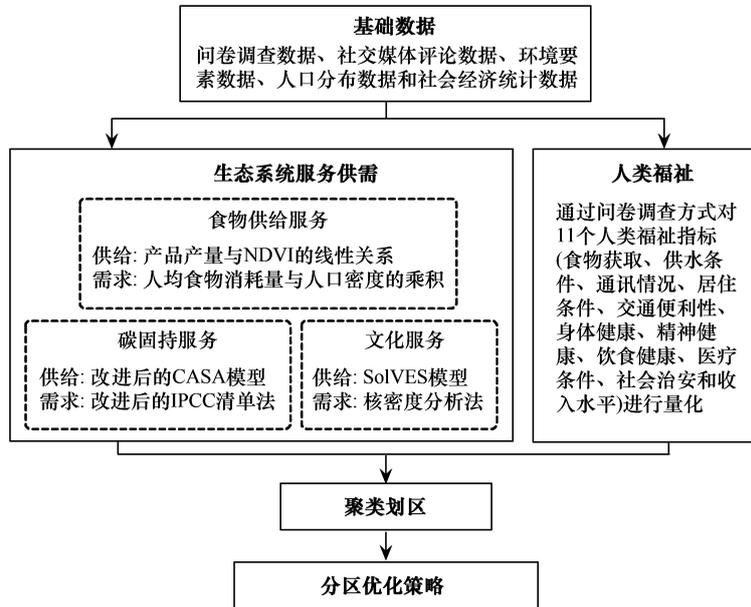


图 2 技术路线图

Fig.2 Technical procedures of this study

NDVI: 归一化指数 Normalized difference vegetation index

2.1 量化流域典型生态系统服务的供需关系

本文选择食物供给服务、调节服务和文化服务作为流域的典型生态系统服务,并分析其供需关系。首先,它们分别对应了三类生态系统服务,即供给服务、调节服务和文化服务。其次,已有研究发现,区域碳固持服务由于跟地表植被类型关系紧密,跟多种调节服务呈现显著相关(见 2.1.2)。所以,调节服务仅考虑了碳固持服务。第三,官厅水库流域内有丰富的自然景观和文化遗产,所以选择了 3 种文化服务(见 2.1.3)。最后,由于数据限制等原因^[30-31],本文没有考虑水质净化等调节服务。

2.1.1 食物供给

食物供给服务供需的空间化参考刘立程等的研究^[32],根据农作物和畜产品产量与 NDVI 的线性关系^[33-34]。量化所需 3 种地类的服务供给量和流域总供给量的计算公式如下:

$$S_{\text{food}} = S_{\text{crop}} + S_{\text{grass}} + S_{\text{water}} \tag{1}$$

$$S_i = S_{\text{sum}} \times \frac{\text{NDVI}_i}{\text{NDVI}_{\text{sum}}} \tag{2}$$

式中, S_{food} 、 S_{crop} 、 S_{grass} 和 S_{water} 分别表示流域内栅格 i 的食物供给总量、耕地、草地和水体的食物供给量; S_i 表示某地类中栅格 i 的食物供给量; S_{sum} 表示地类对应的作物总产量; NDVI_i 和 NDVI_{sum} 分别表示栅格 i 的 NDVI 值以及所属地类的 NDVI 值总和。

量化食物供给服务需求的公式如下:

$$D_{\text{food}} = \bar{D} \times \rho_{\text{pop}} \tag{3}$$

式中, D_{food} 表示流域内栅格 i 的食物需求量; \bar{D} 表示人均食物消耗量; ρ_{pop} 表示人口密度,经重采样处理后分辨率为 300 m。为了验证结果,利用县级粮食、油料、水产品以及肉奶类总产量作为食物供给数据,将人均食物消耗量与各县人口数的乘积作为食物需求数据,对粮食供给服务供需进行了验证。结果表明,两种方法食物供给服务整体均为供大于求,不同地区的供需关系也相对一致。

2.1.2 调节服务

由于碳固持服务与区域多种调节服务的相关性较大^[35-37],故调节服务中仅考虑了碳固持服务。本文利

用改进后的 CASA 模型和 IPCC 清单法分别对流域范围内碳固持服务的供给和需求进行量化^[38]。首先,利用朱文泉等在 CASA 模型基础上发展的净初级生产力(NPP)遥感估算模型进行计算^[39]。

$$NPP(i, t) = APAR(i, t) \times \varepsilon(i, t) \quad (4)$$

$$APAR(i, t) = SOL(i, t) \times FPAR(i, t) \times 0.5 \quad (5)$$

$$\varepsilon(i, t) = T_{\varepsilon_1} \times T_{\varepsilon_2} \times W_{\varepsilon} \times \varepsilon_{\max} \quad (6)$$

$$FPAR(i, t) = \frac{NDVI(i, t) - NDVI_{x, \min}}{NDVI_{x, \max} - NDVI_{x, \min}} \quad (7)$$

式中, $APAR(i, t)$ 、 $\varepsilon(i, t)$ 和 $SOL(i, t)$ 分别表示像元 i 在 t 月吸收的光合有效辐射、实际光能利用率和太阳辐射总量; $FPAR(i, t)$ 表示植物对光合有效辐射的吸收占比; 0.5 表示光合有效辐射在太阳辐射总量中的占比; T_{ε_1} 和 T_{ε_2} 是温度胁迫因子, 分别反映高、低温对光能利用率的影响; W_{ε} 是水分胁迫因子, 反映土壤水分条件对光能利用率的影响; ε_{\max} 表示植物的最大光能利用率; $NDVI_{x, \max}$ 和 $NDVI_{x, \min}$ 分别表示第 x 种植被类型对应 NDVI 的最大值和最小值。

其次, 采用改进后的 IPCC 清单法量化对流域碳固持服务的需求, 即计算人为碳排放。具体计算公式如下:

$$E = (v_{\text{urban}} + v_{\text{rural}} + v_{\text{industry}} + v_{\text{crop}}) \times 0.273 \quad (8)$$

式中, E 表示流域的碳固持服务需求量; v_{urban} 、 v_{rural} 、 v_{industry} 和 v_{crop} 分别表示城市、农村居民、工业交通以及农耕用地的碳排放量; 0.273 是 CO_2 中 C 的质量分数。其中, 城市用地、农村居民用地以及工业交通用地的碳排放量根据各行业与土地利用类型的对应关系, 由化石燃料的消耗量与其对应排放因子^[40]的乘积加所得, 数据来自文献^[27]。

2.1.3 文化服务

结合问卷调查数据和社交媒体评论数据, 对官厅水库流域内 3 种文化服务, 即美学服务、历史文化服务和娱乐康养服务的供需关系进行量化^[4]。基于预调研结果和当地政府的规划政策, 对 SoIVES 模型可量化的 12 种文化服务进行筛选合并后选用上述 3 种服务。

利用问卷调查量化流域生态系统文化服务的供给。根据已有研究^[41], 采用随机抽样方法, 计划发放问卷 750 份, 最终回收有效问卷 623 份, 回收率为 83.1%。在此基础上, 结合环境要素数据, 利用 SoIVES 模型对文化服务的供给进行空间制图^[42]。首先, 通过核密度函数和平均最近邻工具将标记点空间化^[43]。其次, 通过最大熵模型将环境要素数据代入运算中, 以经归一化处理的钱数分配为权重, 得到分值区间为 0—10 的文化服务供给数据。

利用核密度方法空间化社交媒体评论数据, 量化文化需求^[44]。我们通过抓取大众点评网的本地游客评论量化 3 种文化服务的需求。为保证数据质量, 首先在筛选数据过程中剔除内容不符、相似度高且体验经历较少的评论以及去除与当地自然环境关联性低的场馆。并通过参考 Hale 等^[45]的方法, 以评论中含有的关键词或短句为依据, 将其归为对应文化服务的提供方。经筛选发现, 流域内多个地点能同时满足居民对不同类型文化服务的需求, 符合条件的商户数量共 376 家, 其中能满足美学、历史文化和娱乐康养服务需求的分别有 156 个、137 个和 194 个, 有效评论数共 40493 条。最后, 根据评论中的星级打分均值为各点服务需求程度赋值, 因此文化服务的需求与评论数量无关。在此基础上, 输入各点的位置信息, 利用核密度分析工具对评论数据进行栅格化处理^[33], 经过加和、求均值得到分值区间为 0—10 的文化服务需求数据。

2.1.4 量化 3 种生态系统服务的供需关系

食物供给、碳固持和文化服务供需关系参考 Zhao 和 Sander 的方法^[46], 以区县为统计单元, 用供需比来表示供需关系。

$$R = S/D \quad (9)$$

式中, R 、 S 和 D 分别为上述 3 种服务的供需比、供应量和需求量。当 R 等于 1 时, 服务供需平衡, R 大于 1 则

供大于求, R 小于 1 表示供不应求, 供需关系需要改善。

2.2 评估主观人类福祉

本文结合联合国《千年生态系统评估》的人类福祉概念框架^[1]与 Wei 等在玛纳斯河流域的研究^[47], 将收入、生活基本需求、健康和安安全全四类福祉要素细分为 11 个指标, 通过问卷调查方式进行量化。

对上述各类福祉要素的测算需要综合指标的重要性和满意度, 其中指标重要性以打分形式量化, 分值区间为 1—10 分, 得分作为各指标权重^[2]。指标满意度的量化选用李克特量表, 分值与满意度成正比, 区间为 1—5 分。流域整体福祉分值取四类福祉要素的平均值, 公式如下:

$$HWB = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n w_{ij} \times R_{ij} \quad (10)$$

$$w_{ij} = \frac{j}{\sum_1^n w} \quad (11)$$

式中, HWB 表示区域的整体福祉分值; w_{ij} 表示第 i 类福祉要素中第 j 个指标的权重; R_{ij} 表示第 i 类福祉要素中第 j 个指标的满意度分值; $\sum_1^n w$ 表示第 i 类福祉要素所有指标的重要性分值之和。

2.3 聚类分析生态系统服务供需与人类福祉的特征

运用层次聚类的方法, 以区县为单元, 将 3 种典型生态系统服务的供需比、整体福祉分值以及四类福祉要素归一化(式 12), 分析生态系统服务与人类福祉的不同组合特征^[9]。其中聚类分析的样本间距离选择欧氏距离, 输出树状图并对分区的生态系统服务供需关系和福祉特征进行讨论。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (12)$$

式中, x' 表示归一化后的值, x 表示某类服务的供需比或某项福祉分值, x_{\min} 表示该类数据的最小值, x_{\max} 表示该类数据的最大值。

3 结果与分析

3.1 食物供给服务的供需关系

官厅水库流域整体及其 3 个子流域的食物供给服务均呈现供大于求的特征, 大多区县的服务供需比在 100—200% 之间, 流域整体水平为 135.6%。从空间分布上来看, 流域北部地区服务供需比较高(图 3)。具体地, 桑干河子流域的食物供给服务供需比为 144%, 在流域内供需关系最好。洋河子流域和永定河子流域的服务供需比分别低于平均水平 5.2% 和 28.2%(表 2), 其中, 位于这两个流域内的张家口市和门头沟区服务供需比未达 30%。

表 2 流域内 3 种生态系统服务的供需关系

Table 2 Supply and demand of three ecosystem services in the watershed

流域类型 Watershed type	食物供给服务供需比 Supply-demand ratio of food supply service/%	碳固持服务供需比 Carbon demand and supply ratio/%	文化服务供需比 Supply-demand ratio of cultural services/%
整体 Whole	135.6	27.8	193.5
桑干河子流域 Sang-kan River Subwatershed	144.0	26.9	220.2
洋河子流域 Yang River Subwatershed	130.4	27.2	192.0
永定河子流域 Yongding River Subwatershed	107.4	42.9	58.4

3.2 碳固持服务的供需关系

官厅水库流域整体及其 3 个子流域的碳固持服务均呈现供不应求的特征,其中流域整体供需比为 27.8%。空间分布上,服务供需比从周边城市逐渐向大同市、阳高县和张家口地区降低(图 4)。

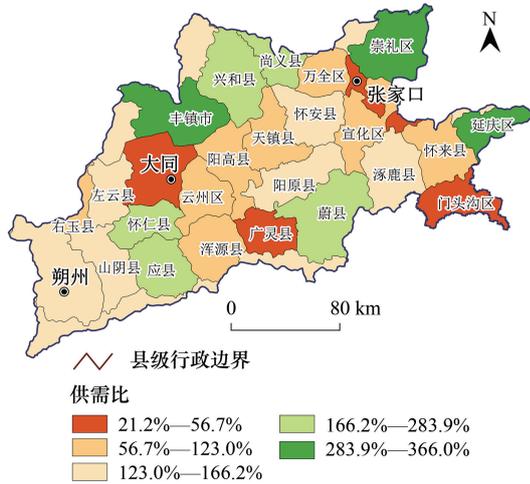


图 3 流域食物供给服务的供需关系(自然断点法分级)

Fig.3 The relationship between the supply and demand of food supply service

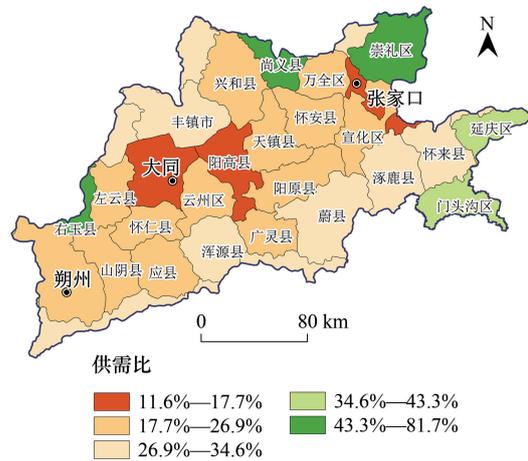


图 4 流域碳固持服务的供需关系(自然断点法分级)

Fig.4 Supply-demand relationship of carbon sequestration service

在 3 个子流域中,洋河子流域和桑干河子流域的服务供需比均低于整体水平,分别为 27.2%和 26.9%(表 2)。前者各地区间的服务供需缺口差异性较大,占流域供需缺口的 40.3%。后者的服务供需关系最为紧张。只有永定河子流域的服务供需比高于流域整体水平,为 42.9%。

3.3 文化服务的供需关系

官厅水库流域的文化服务供大于求,流域整体的服务供需比为 193.5%。空间分布上,流域东部的服务供需比低于流域中部和西部(图 5)。3 个子流域中,桑干河子流域的服务供需关系最好,供需比为 220.2%,其中 12 个区县的文化服务供大于求,整体呈现高供给-低需求的特征(表 2)。永定河子流域和洋河子流域的服务供需比分别为 58.4%和 192.0%,整体均呈现低供给-高需求的特征,两个子流域内的延庆区、门头沟区和张家口崇礼区的文化服务供不应求。

3.4 官厅水库流域人类福祉特征

流域整体的福祉分值为 3.44,属于中等水平(图 6)。从四类福祉要素得分情况可以看出,居民的基本物质需求能得到满足且满意度分值最高,为 3.64,收入情况满意度最低且明显低于流域整体水平,为 3.00。流域所有指标得分与其重要性的相关系数为-0.17,呈弱负相关。这也在一定程度上说明,居民认为的重要福祉要素仍需进一步改善。

通过分析居民对各评价指标的满意度可以发现,通讯情况、身体和精神健康 3 个指标的得分较高,分别为 3.77、3.75 和 3.68,各高于流域整体分值 0.24、0.22 和 0.15(图 7)。这与流域内食物供给服务供大于求以及城市化基础设施完善有一定联系。而医疗条件和收入指标得分较低,分别为 3.12 和 3.00,各低于流域整体分值

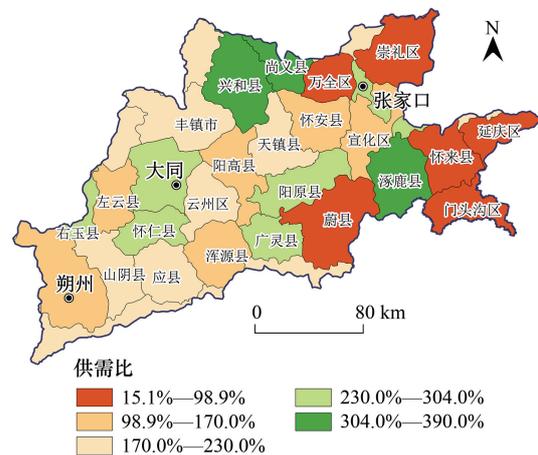


图 5 流域文化服务的供需关系(采用自然断点法分级)

Fig.5 The relationship between the supply and demand of cultural services

0.41 和 0.53。结合满意度和重要性选取供水、医疗条件和收入 3 个指标计算相关性,结果为-0.88,呈显著负相关,表示居民对于这几个福祉指标仍有较大的提升需求。

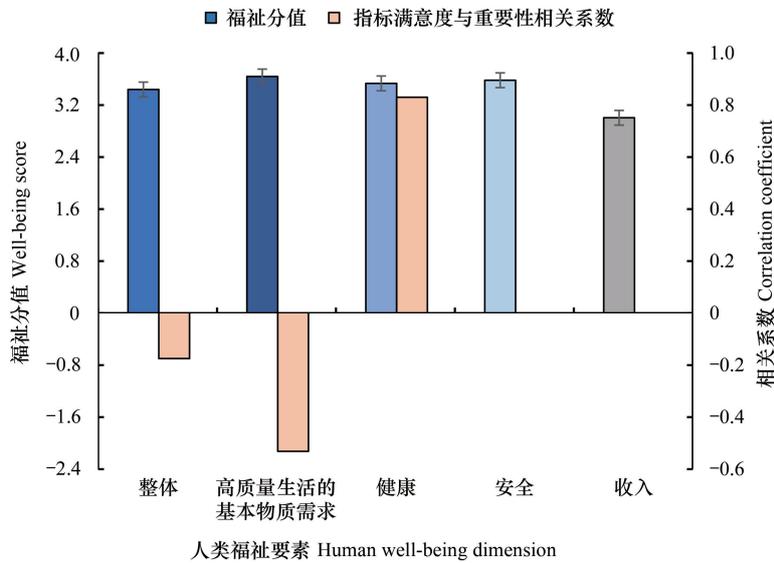


图 6 人类福祉要素分值

Fig.6 The score of each human well-being dimension

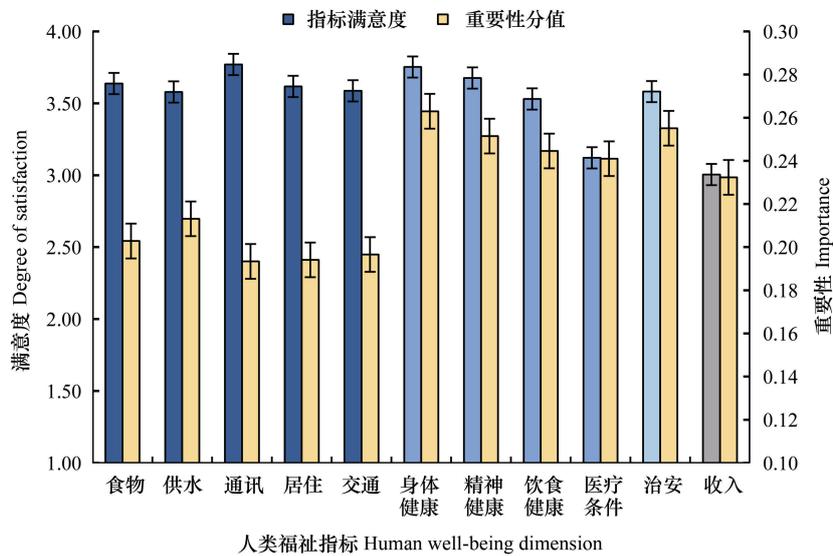


图 7 人类福祉各指标得分

Fig.7 The satisfaction and importance of each human well-being dimension

3.5 不同生态系统服务供需类型下的福祉特征

根据流域内的生态系统服务供需和居民福祉关系类型将区域划分为城市发展区、城郊休闲区、生态涵养区和文化建设区。此外,受到人类福祉调研采样点的限制,聚类结果中出现多处无数据区(图 8)。

城市发展区的文化服务供大于求,食物供给服务和碳固持服务的供需比较低。此区域中,食物供给服务和碳固持服务的供需比分别低于整体水平 33.7%和 6.8%(表 3)。这表明该区域的城市化水平较高,人口密度大,城市公园和娱乐场所较多。该区域的福祉分值为 3.46,比流域整体水平高 0.02。其中,高质量生活基本需求、收入和健康三类要素分值均高于整体水平。居民的收入较高,日常生活基本需求得到满足,有固定的游

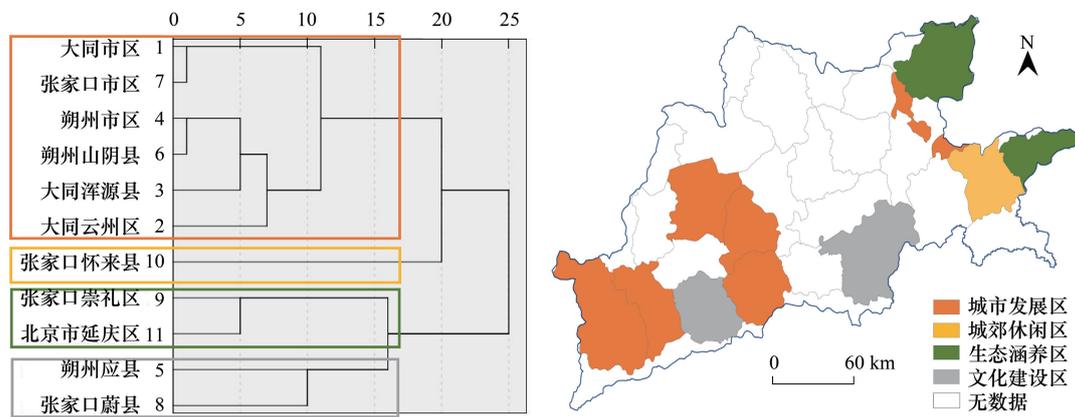


图 8 生态系统服务供需和人类福祉的聚类结果

Fig.8 Clusters of counties based on the supply and demand of ecosystem services and human well being

憩场所,且医疗条件和个人健康状况优于其它地区。流域内属于城市发展区的区县共 6 个,为大同市区、张家口市区、朔州市区、朔州山阴县、大同浑源县和大同云州区。

城郊休闲区的文化服务供不应求,食物供给服务和碳固持服务的供需比处于中等水平。其中碳固持服务供需比高于流域整体水平,文化服务和食物供给服务分别低于整体水平 124.5%和 33.6%(表 3)。这表明该区域现有的农业资源和娱乐产业丰富适于开展休闲活动,但文化服务的供给不足难以完全满足人们的需求。此外,城郊休闲区的福祉水平与流域整体相似,福祉分值为 3.44,其中高质量生活的基本需求和安全要素高于整体水平。相比之下,当地的医疗条件和福利待遇还有待提高。流域内的城郊休闲区以怀来县为代表,临近北京和张家口,是城市居民到水库周边休闲娱乐的首选之处。

表 3 流域各区域生态系统服务供需与人类福祉要素分值

Table 3 Supply and demand of ecosystem services and the score of human well-being factors in different region of the watershed

区域类型 Type	生态系统服务供需 Supply-demand ratio of Ecosystem service/%			人类福祉要素 The score of human well-being			
	食物供给 Food supply	碳固持 Carbon sequestration	文化 Culture	高质量生活的 基本物质需求 Material needs	健康 Health	安全 Security	收入 Income
城市发展区 Urban Development	101.9	21.0	180.0	3.67	3.59	3.54	3.14
城郊休闲区 Suburban Recreation	102.0	34.6	15.1	3.65	3.41	3.83	2.91
生态涵养区 Ecological Conservation	344.5	53.8	70.4	3.69	3.63	3.83	2.97
文化建设区 Cultural Construction	243.8	29.0	150.0	3.49	3.45	3.55	2.87

生态涵养区的文化服务供需比较低,碳固持服务和食物供给服务供大于求。与城市发展区不同的是该区域除文化服务供需比低于流域整体水平,剩余两类服务的供需比均高于整体水平(表 3)。生态涵养区的福祉分值为 3.53,是流域整体水平的 1.03 倍且在四类区域中最高。各福祉要素中,除收入要素外,其余三类要素分值均高于整体水平,这意味着良好的生活环境使人们的生活需求得到基本满足,但对于收入的满意度还有待提高。从空间分布上看,该区域包括北京延庆区和张家口崇礼区,这两个地区既是首都的生态安全屏障地区,也是 2022 年冬奥会的举办地。

文化建设区的文化服务和食物供给服务供大于求,碳固持服务供不应求。从供需比来看,文化服务、食物供给服务和碳固持服务的供需比分别高于流域平均水平 10.4%、108.2%和 1.2%(表 3)。但该区域的福祉分

值为 3.42,在四类区域中最低,和四类福祉要素分值均低于流域整体水平。该区域的经济发展在流域内相对落后,其丰富的历史文化资源还有充足的发展空间可以被用来提升人类福祉、改善居民生活质量。流域的文化建设区包括张家口蔚县和朔州应县,两地位于桑干河子流域,历史文化悠久,旅游资源丰富。

4 讨论

4.1 结合生态系统服务供需和福祉特征制定针对性策略

建议根据流域内四类区域的生态系统服务供需与福祉的关系,有针对性地采取措施以改善人类福祉,优化关键生态系统服务的供需关系,促进区域的可持续发展(表 4)。

表 4 流域内各区域类型的生态系统服务供需、福祉水平及优化措施

Table 4 The supply and demand of ecosystem services, well-being levels and optimization measures in different regions of the watershed

区域类型 Type	生态系统服务供需 Ecosystem service supply and demand			人类福祉 Human well-being	存在问题 Problem	优先关注 Priority attention	解决对策 Solutions
	食物供给 Food supply	碳固持 Carbon sequestration	文化 Culture				
城市发展 Urban development	-	-	+	整体较高 各项较高	植被覆盖率低空气、水污染	湿地保护碳减排	加强城市绿化,保护湿地统一碳排放核算,推动第二产业转型
城郊休闲 Suburban recreation	+	○	-	整体中等收入和健康低	文化服务供不应求,基础设施和居民收入与周围地区存在差距	空间规划产业优化	明确“三线”划定开展新型旅游产业,提高当地农民收入
生态涵养 Ecological conservation	+	+	-	整体较高仅收入低	居民收入低,旅游业在发展阶段	环境保护冬奥会举办	生态补偿推动冰雪旅游
文化建设 Cultural construction	-	-	+	各项均低	历史文化资源未被充分利用,存在贫困问题	扶贫政策旅游资源开发	开展旅游扶贫和手工业扶贫;加强文化宣传

+表示供大于求或供需比较高,-表示供不应求,○表示供需比为中等水平

城市发展区整体情况较好但应注重优化碳固持服务的供需关系,以建造可持续发展的宜居城市。为应对城市人口激增等问题,该区域内大量植被区域被建设用地取代,致使碳固持服务供需比显著降低。考虑到城市绿化能改善居住环境并提升居民福祉^[48],建议通过加强城市绿地建设和湿地保护,充分发挥植物和湿地的固碳作用,填补供需缺口。例如,综合区域地理位置和气候特点选取固碳释氧能力强的植被类型用于绿化^[49],以及在主要河流滨水带设立湿地保护公园。针对服务需求应注重煤炭产业的减排行动。对处于转型阶段的资源型城市,调整第二产业占比的具体措施可以借鉴鲁尔工业区的改造方式。例如,建设生态工业园区推动第三产业发展^[50],以及通过清洁能源替代、能源循环利用等方式进行碳减排工作。

城郊休闲区的经济水平相对城市发展区较为落后,具有收入低和文化服务供给不足等特点。建议通过改善水库空间规划以及利用区域民族多样的特点开展民俗活动,缩小供需缺口。经研究发现^[51],农村居民认为生态系统服务中的调节服务和文化服务更重要。所以,基于《怀来县首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设规划(2019—2035年)》的背景,倡导凭借当地丰富的耕地资源推动第三产业的绿色发展,增加居民收入,从而形成湿地保育、水果种植和文旅康养产业相结合的发展模式^[52]。以维持生态平衡和保障水库水质为前提,减少周边地区发展对环境的影响,尽可能降低经济发展导致的人地矛盾。

生态涵养区居民福祉的增进与其优良的自然条件紧密相关,故在打造特色产业和实施生态补偿机制以提高居民收入的同时还需维持生态现状。北京延庆区和张家口崇礼区作为冬奥会的项目承办地,可开展冰雪主题的特色产业来带动旅游业发展。例如,在科技馆等场所开展冰雪主题活动或是像延庆区借助“冰雪欢乐节”推出文旅和体育结合的模式^[53]提高文化服务供给。同时在“绿色冬奥”的理念下,对生态系统进行动态监测,评估冰雪活动造成的能源消耗、噪音污染等^[54]并划分保护区。为促进区域可持续发展,可在政府主导

下建立生态补偿机制并以结合居民意愿为前提在北京和张家口地区展开实践。具体实施过程可以以张家界武陵源景区为范例,参照其规划理念进一步保护生态环境。

文化建设区的经济起步较晚,发展模式也略显保守,导致居民福祉处于较低水平。因此,未来可以通过接收周边发展转型城市的企业来发展本地经济。同时利用独特的自然条件发展特色农业种植以提高区域食物供给,以及增进城市群间联系来加大旅游宣传力度。近年也有多个城市旅游业依靠日益便利的交通和网络而兴起,像兰州在宝兰高铁开通后国内外游客同比增长 23.7%,成为国内的十大网红城市^[55]。此外,还可以发展民俗手工产业增加居民收入,防止返贫。

4.2 创新与不足

本文的创新点在于结合多种生态系统服务供需和人类福祉提出区域优化策略。量化 3 种典型生态系统服务,体现流域粮食安全、生态环境承载和文化服务的空间格局分布情况。综合人类福祉要素分值,从主观和客观两方面对流域进行聚类划区。相较而言,仅考虑生态系统服务供需的区域规划更加关注生态系统的分区优化^[56-58],有可能忽略了人们在生活中的整体感受,遗漏部分经济水平仍然较低的区县。例如,北京市延庆区、张家口市崇礼区和怀来县的食物供给和碳固持服务供需关系良好,但文化服务供不应求、收入低(表 4)。而仅考虑了人类福祉的区域规划只关注了居民主观福祉的进步和退化^[59-60],而忽略了区域自身的生态系统功能。综上所述,本文提出的方法既保障了生态系统服务和人类福祉的和谐关系,又保障了多种利益相关者的福祉,特别是考虑到贫困人口的诉求。

然而,本文还存在以下三方面的不足。一是对于生态系统服务供需动态关系研究,还有待完善像涉水生态系统服务中的水源涵养、水质净化和区域间服务流动。虽然涉水生态系统服务和碳固持服务有较好的相关性,但由于数据缺失忽视了水质净化等服务也可能造成服务的权衡。二是受数据分辨率限制计算结果的精确度仍有待提高。三是对于生态系统服务与人类福祉关系的复杂联系没有展开进一步的分析探究,只是关注了二者的组合特征。

5 结论

官厅水库流域内 3 种典型生态系统服务的供需呈现不匹配状况。食物供给和文化服务呈现供大于求的情况,供需比分别为 135.6%和 193.5%。碳固持呈现供不应求的情况,供需比为 27.8%。同时,流域福祉位于中等水平,福祉得分为 3.44。其中,居民的基本物质需求分值最高,收入分值明显低于流域整体水平。

结合区域生态系统服务供需与人类福祉特征,流域可以分为四种类型。城市发展区的文化服务供大于求,剩余两种服务的供需比较低,福祉分值较高。城郊休闲区的文化服务供不应求,剩余两种服务供需比处中等水平,福祉分值与流域整体相似。生态涵养区的碳固持服务供大于求,但文化服务供需比低,福祉分值最高。文化建设区的文化服务供大于求,碳固持服务供不应求,福祉分值最低。综上,可通过增大植被覆盖面、开展文旅产业和推动冰雪项目等形式,因地制宜地在不同地区提高居民生活质量和维持区域可持续性。

参考文献 (References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] Summers J K, Smith L M, Case J L, Linthurst R A. A review of the elements of human well-being with an emphasis on the contribution of ecosystem services. *AMBIO*, 2012, 41(4): 327-340.
- [3] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999-1023.
- [4] Meng S T, Huang Q X, Zhang L, He C Y, Inostroza L, Bai Y S, Yin D. Matches and mismatches between the supply of and demand for cultural ecosystem services in rapidly urbanizing watersheds: a case study in the Guanting Reservoir basin, China. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101156.
- [5] 欧维新, 王宏宇, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化. *生态学报*, 2018, 38(17): 6337-6347.
- [6] Huang Q X, Yin D, He C Y, Yan J B, Liu Z W, Meng S T, Ren Q, Zhao R, Inostroza L. Linking ecosystem services and subjective well-being in

- rapidly urbanizing watersheds; insights from a multilevel linear model. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101106.
- [7] 霍冉, 鲁博, 徐向阳, 高俊莲, 祝婷婷. 基于当地居民感知视角的煤炭资源型城市生态系统服务福祉效应研究——以新泰市为例. *中国土地科学*, 2019, 33(9): 101-110.
- [8] Wang B J, Tang H P, Xu Y. Integrating ecosystem services and human well-being into management practices; insights from a mountain-basin area, China. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 58-69.
- [9] 刘紫玟, 尹丹, 黄庆旭, 何春阳, 薛飞. 生态系统服务在土地利用规划研究和应用中的进展——基于文献计量和文本分析法. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 236-247.
- [10] Zheng H, Robinson B E, Liang Y C, Polasky S, Ma D C, Wang F C, Ruckelshaus M, Ouyang Z Y, Daily G C. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(41): 16681-16686.
- [11] 刘桂环, 文一惠, 张惠远. 基于生态系统服务的官厅水库流域生态补偿机制研究. *资源科学*, 2010, 32(5): 856-863.
- [12] 吴乐, 孔德帅, 靳乐山. 中国生态保护补偿机制研究进展. *生态学报*, 2019, 39(1): 1-8.
- [13] 白杨. 基于生态系统服务的区域土地利用管理调控——以浙江省万全镇为例. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1641-1648.
- [14] 何玲, 贾启建, 李超, 张利, 许焱. 基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 275-284.
- [15] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717.
- [16] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 邹建国. 中国快速城市化干燥地区的生态系统服务权衡关系多尺度分析——以呼包鄂榆地区为例. *生态学报*, 2016, 36(15): 4881-4891.
- [17] 张宇硕, 吴殿廷. 京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析. *地域研究与开发*, 2019, 38(3): 141-147.
- [18] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3034.
- [19] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 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. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [20] 欧阳志云, 李小马, 徐卫华, 李煜珊, 郑华, 王效科. 北京市生态用地规划与管理对策. *生态学报*, 2015, 35(11): 3778-3787.
- [21] Quintas-Soriano C, García-Llorente M, Norström A, Meacham M, Peterson G, Castro A J. Integrating supply and demand in ecosystem service bundles characterization across Mediterranean transformed landscapes. *Landscape Ecology*, 2019, 34(7): 1619-1633.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 郝芳华, 孙峰, 张建永. 官厅水库流域非点源污染研究进展. *地学前缘*, 2002, 9(2): 385-386.
- [26] 师占海, 王道瑛. 浅析河北官厅湖湿地资源保护的重要性. *河北林业科技*, 2008, (3): 48-49.
- [27] 王博杰. 结合生态系统服务和人类福祉的怀来山盆系统可持续发展范式研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2018.
- [28] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, Kong X S, He T. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. *Science of The Total Environment*, 2019, 657: 781-791.
- [29] 张治江. “环京津贫困带”脱贫与环保困境. *理论动态*, 2012, (23): 36-43.
- [30] Bullock C, Joyce D, Collier M. An exploration of the relationships between cultural ecosystem services, socio-cultural values and well-being. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 142-152.
- [31] 位贺杰. 流域生态系统服务供需及其与人类福祉关系研究——以玛纳斯河流域为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2018.
- [32] 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.
- [33] 毛祺, 彭建, 刘焱序, 武文欢, 赵明月, 王仰麟. 耦合 SOFM 与 SVM 的生态功能分区方法——以鄂尔多斯市为例. *地理学报*, 2019, 74(3): 460-474.
- [34] Groten S M E. NDVI—Crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1495-1515.
- [35] 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.
- [36] Hou Y, Lü Y H, Chen W P, Fu B J. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions; a case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1201-1217.
- [37] Xie W X, Huang Q X, He C Y, Zhao X. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services; a case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 183-193.

- [38] 孟士婷, 黄庆旭, 何春阳, 杨双妹玛. 区域碳固持服务供需关系动态分析——以北京为例. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1191-1203.
- [39] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [40] IPCC. 2016 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories//Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, eds. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES, 2006.
- [41] Yamane T. Statistics: An Introductory Analysis. 2nd ed. New York: Harper and Row Press, 1967.
- [42] 霍思高, 黄璐, 严力蛟. 基于 SolVES 模型的生态系统文化服务价值评估——以浙江省武义县南部生态公园为例. 生态学报, 2018, 38(10): 3682-3691.
- [43] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. Applied Geography, 2011, 31(2): 748-760.
- [44] Zhai S X, Xu X L, Yang L R, Zhou M, Zhang L, Qiu B K. Mapping the popularity of urban restaurants using social media data. Applied Geography, 2015, 63: 113-120.
- [45] Hale R L, Cook E M, Beltrán B J. Cultural ecosystem services provided by rivers across diverse social-ecological landscapes: a social media analysis. Ecological Indicators, 2019, 107: 105580.
- [46] Zhao C, Sander H A. Quantifying and mapping the supply of and demand for carbon storage and sequestration service from urban trees. PLoS One, 2015, 10(8): e0136392.
- [47] Wei H J, Xu Z H, Liu H M, Ren J H, Fan W G, Lu N C, Dong X B. Evaluation on dynamic change and interrelations of ecosystem services in a typical mountain-oasis-desert region. Ecological Indicators, 2018, 93: 917-929.
- [48] Juntti M, Costa H, Nascimento N. Urban environmental quality and wellbeing in the context of incomplete urbanisation in Brazil: integrating directly experienced ecosystem services into planning. Progress in Planning, 2021, 143: 100433.
- [49] 李永杰. 北京市常见绿化树种生态效益研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2007.
- [50] 刘慧. 山西省资源型城市转型效果评价及影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [51] Yang S Q, Zhao W W, Pereira P, Liu Y X. Socio-cultural valuation of rural and urban perception on ecosystem services and human well-being in Yanhe watershed of China. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109615.
- [52] 河北省怀来县人民政府. 怀来县人民政府关于印发《怀来县首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设规划(2019-2035年)》的通知. [2021-01-18]. <http://www.huailai.gov.cn/content/2020/15946.html>.
- [53] 北京市延庆区政府. 第32届冰雪欢乐节启动. [2021-01-19]. <http://www.bjyq.gov.cn///yanqing/ywtd/jryq/1888913/index.shtml>.
- [54] 张贵海. 中国滑雪产业发展问题研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [55] 甘肃省兰州市人民政府. 兰州成国内游客数量增长最快十大“网红城市”——去年全市接待游客六千七百万人次. [2021-01-19]. http://www.lanzhou.gov.cn/art/2019/1/17/art_122_539129.html.
- [56] 彭建, 杨旸, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [57] 荣月静, 严岩, 王辰星, 章文, 朱婕缘, 卢慧婷, 郑天晨. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化. 生态学报, 2020, 40(20): 7197-7206.
- [58] 王飞儿, 郑思远, 杨泓蕊, 俞洁, 王一旭, 王浙明. 基于生态系统服务的浙江省水生态环境分区分类管控. 生态学报, 2022, 42(2): 1-10.
- [59] 朱杰, 卢春天, 石金莲, 张丽荣, 潘哲. 自然保护区居民福祉的历时性——以陕西佛坪国家级自然保护区为例. 生态学报, 2019, 39(22): 8299-8309.
- [60] 郑善文, 马默衡, 李海龙, 汪坚强, 张芯蕾. 居民福祉视角下城市中心区生态空间文化服务评价——以北京为例. 城市发展研究, 2021, 28(4): 21-27.