

高空间异质性区域生态系统服务供需与驱动力分析

——以四川省为例

胡昂^{1,2} 吴侯思¹ 黄莹¹ 刘子逸¹ 周欣颖¹ 王一沛¹ 刘杰¹ 干晓宇¹¹

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 四川 610065;

2. 东京大学 生产技术研究所, 日本 东京 153-8505)

【摘要】: 生态系统服务供需平衡对于区域可持续发展具有重要意义。当前, 对具有高空间异质性区域的生态系统服务供需驱动力分析还有待进一步深入。因此, 以四川省为例, 对省内水生产、粮食生产、碳固持、水源涵养、土壤保持、休闲游憩 6 项生态系统服务的供需进行量化, 针对服务的供需盈缺和空间聚集模式进行分析, 并利用冗余分析法(RDA)在全省和生态分区 2 个尺度上对供需分别进行了关键驱动力的筛选, 旨在为分区分管措施提供依据。结果表明: (1) 6 项服务在总量上均处于供需盈余状态; (2) 所有服务供需分布、盈缺状况、空间聚集模式均表现出明显的空间异质性, 该特征与生态区分布有明显关联; (3) 降水量、耕地面积、坡度以及地区生产总值 4 项驱动因子在空间上的分布不均衡性是造成研究区供给及需求分别呈现高度空间异质性的最主要原因; 2 个尺度上驱动力分析结果的不同, 说明驱动力在四川省对服务的影响存在一定的尺度效应; 不同分区服务的主要驱动力的类型、影响顺序、影响方向存在的明显差异, 说明在以四川省为代表的高空间异质性区域, 供给与需求驱动力的分区探寻具有一定必要性。

【关键词】: 生态系统服务 供需平衡 空间异质性 驱动力 四川省

【中图分类号】: X171.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)05-1062-15

生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)是生态系统提供给人类的惠益^[1]。随着社会发展, 生态系统服务的过度的、不合理消耗会导致其供需失衡^[2], 进而导致生态系统退化^[3,4]。关注生态系统服务供需过程, 识别其供需失衡问题, 从供需两侧进行生态系统服务管理, 能够有效促进区域社会、经济、环境的可持续发展。现有研究表明, 生态系统服务在空间上常常具有一定的异质性^[5,6,7,8], 在地理、社会、经济存在高度空间异质性的区域, 这一现象将会更加明显。针对这类区域, 有必要实施分区分管实现对生态系统服务供需的因地制宜的精细化、差异化的管理^[9]。近期研究表明, 驱动力对生态系统服务的影响在空间上也具有不均衡性^[10,11]。针对不同区域的关键驱动力的筛选是实现分区分管的前提。排序分析中的冗余分析方法(Redundancy Analysis, RDA)可以一次性实现多种服务与多种驱动因子之间的相关性分析^[2,12], 是一种高效的驱动力筛选方法。因此, 本研究将 RDA 用于高空间异质性区域的供需驱动力分区筛选。

四川省不同区域地形地貌、社会经济特征悬殊, 环境条件具有高空间异质性, 同时, 还承担着维护国家生态文明建设的重要

作者简介: 胡昂(1974~), 男, 教授, 主要研究方向为城市可持续发展. E-mail: ang.hu6@scu.edu.cn; 干晓宇 E-mail: ganxy@scu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51108284)

职责,是长江上游重要的生态屏障和水源涵养地^[13]。但是,省内环境普遍脆弱,生态资源损耗严重,生态系统供需矛盾突出,给区域可持续发展造成威胁^[14]。本研究运用地理信息技术和统计学方法,选择水生产、粮食生产、碳固持、水源涵养、土壤保持、休闲游憩6项生态系统服务,首先,进行供给与需求的量化制图,明晰各项服务空间分布特征;其次,通过空间分析,明晰供需数量差异和空间聚集模式;最后,利用排序分析方法筛选不同生态区影响生态系统服务的主要驱动因素。以期能为四川省可持续的、精细化的生态管理提供科学依据、理论支持和直观的决策辅助。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

四川省位于26° 03' N~34° 19' N和97° 21' E~108° 31' E之间,横跨中国几大地貌单元,地势西高东低,由西北向东南倾斜,相对高差达7300m,平原、丘陵、山地、高原四种地貌类型俱全。全省国土面积48.16×10⁵km²,包含21个市州,183个区县,2018年末常住人口8341万人。自然生态环境类型丰富,是我国的水资源、生物资源、农业资源大省^[15]。气候条件地带性变化异常明显,东部四川盆地位于亚热带季风性湿润气候区,降水丰富,气温较高,日照较少;西部高原地区呈现出垂直气候带分布,冬季寒冷且时间长,全年气温较低,降水集中,日照充足。2017年研究制定的《四川省“十三五”生态保护与建设规划》^[14]综合考虑不同区域复杂的地形地貌、自然气候、资源禀赋、社会经济文化特征,将四川省划分为成都平原、盆地丘陵、盆周山地、川西南山地、川西高山峡谷和川西北高原6个生态分区,分区划分方式见图1。

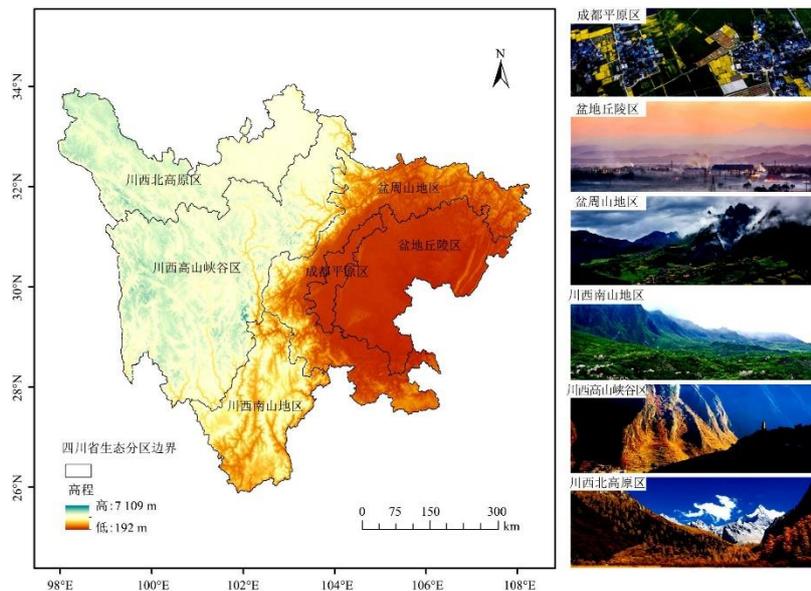


图1 四川省生态区划分

1.2 数据来源

研究所用2015年土地利用/覆被数据、归一化植被指数数据(NDVI)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),空间分辨率为1km。土地利用划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地6类。DEM高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),分辨率30m,在ArcGIS平台中重采样为1km。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),包含了四川省44个站点的温度、降水数据,利用克里金插值法生成空间分布数据,分辨率设置为1km。土壤数据来源于基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集,包含土壤深度、土壤

沙砾、粉粒、粘粒和有机质百分比含量。行政边界矢量数据下载自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>), 并根据中华人民共和国民政部官网信息 (<http://xzqh.mca.gov.cn/map>) 进行校正。太阳大气辐射数据从联合国粮农组织官网 (FAO) (<http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e0j.htm>) 查得。各区县社会经济统计数据来源于《四川省统计年鉴2016》及各市州、区县的统计年鉴、水资源公报、国民经济和社会发展统计公报, 包含了人口数量、城镇化率、粮食产量、地区生产总值、用水量等一系列数据。人口密度空间分布数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/search>), 分辨率1km, 根据统计年鉴中各区县的人口数据在 ArcGIS 平台中进行校正。

1.3 生态系统服务供需量化制图

根据服务与人类福祉的关系和四川省区域特征, 选择水生产 (Water Yield) 和粮食生产 (Grain Yield) 2 项供给服务, 碳固持 (Carbon Sequestration)、水源涵养 (Waterretention) 和土壤保持 (Soil Sequestration) 3 项调节服务和休闲游憩 (Recreation Services) 1 项文化服务进行供给与需求的量化和制图。服务计算方法及公式见表 1。

表 1 生态系统服务供给与需求计算公式表

名称	供/需	单位	方法	备注
水生产 WY	供给	mm	基于水量平衡法的 InVEST 模型产水模块 ^[16, 8]	$S_{WY}(x)$: 栅格单元 x 的水生产服务供给量; $AET(x_j)$: 土地利用类型 j 上栅格单元 x 的年平均蒸散发量; $P(x)$: 栅格单元 x 的年平均降水量
	需求	mm	实际用水量 ^[17]	$D_{WY}(x)$: 栅格 x 的水生产服务供给量; $D_{do}(x)$: 生活用水量; $D_{in}(x)$: 工业用水量; $D_{agr}(x)$: 农业用水量
粮食生产 GY	供给	t/km ²	粮食生产年鉴数据 ^[18]	$S_{GY}(x)$: 栅格 x 的粮食生产供给量; $NDVI(x)$: 栅格 x 的 NDVI 值; $NDVI_{sum,j}(x)$: 栅格 x 所属区县 j 的 NDVI 值总和; $G_{sum,j}$: 区县 j 的当年粮食生产总量
	需求	t/km ²	粮食消耗量 ^[18]	$D_{GY}(x)$: 栅格 x 的粮食生产需求量; $Den_{pop,ur}(x)$: 栅格 x 城市居民人口密度; $Den_{pop,ru}(x)$: 栅格 x 农村居民人口密度; Per_{ur} : 当年四川省城市居民人均粮食需求量; Per_{ru} : 当年四川省农村居民人均粮食需求量
碳固持 CS	供给	t/km ²	InVEST 模型中的碳固持模块 ^[16, 19, 20]	$S_{CS}(x)$: 栅格 x 的碳固持服务供给量; $C_{above}(x)$: 地上物质碳储量; $C_{below}(x)$: 地下物质碳储量; $C_{soil}(x)$: 土壤碳储量; $C_{dead}(x)$: 枯枝落叶碳储量
	需求	t/km ²	呼吸、农业、工业碳排放量 ^[21, 22]	$D_{CS}(x)$: 碳固持服务的需求量; $E_{re}(x)$: 居民呼吸碳排放量; $Den_{pop}(x)$: 人口密度; b_{pop} : 每人每年因呼吸而

				<p>产生的碳排放量；</p> <p>$E_{li}(x)$:牲畜呼吸碳排放量；</p> <p>$Den_{li}(x)$:牲畜密度；b_{li}:每只动物每年的碳排放量；</p> <p>$E_{agr}(x)$:农业碳排放量；</p> <p>$b_N(x)$:全年氮肥消耗量；</p> <p>$E_{in}(x)$:工业碳排放量；</p> <p>$b_{EC}(x)$:单位地区生产总值能耗，0.68 为标准煤的碳排放量系数</p>
--	--	--	--	--

名称	供/需	单位	方法	备注
水源涵养 WR	供给	mm	InVEST 水源涵养模型 ^[16, 24]	<p>$S_{WR}(x)$:栅格单元 x 的水源涵养服务供给量；</p> <p>$Velocity(x)$:流速系数；</p> <p>$TI(x)$:地形指数，无量纲，根据 DEM 计算；</p> <p>$K_{sat}(x)$:土壤饱和导水率(cm/d),可借助 Saxton 开发的 SPAW 软件计算获得；</p>
	需求	mm	实际生态用水量 ^[16]	<p>$D_{WR}(x)$:水源涵养服务需求量；</p> <p>$D_{eco}(x)$:生态用水量</p>
土壤保持 SC	供给	t/km ²	修正通用土壤流失方程 ^[25, 26]	<p>$S_{SC}(x)$:栅格单元 x 的土壤保持供给量；$R(x)$:降雨侵蚀力因子；</p> <p>$K(x)$:土壤可侵蚀因子；$LS(x)$:坡长坡度因子，无量纲；</p> <p>$CP(x)$:植物覆盖和水土保持因子，无量纲；</p> <p>$USLE(x)$:土壤侵蚀量</p>
	需求	t/km ²	修正通用土壤流失方程中的实际土壤侵蚀量 ^[17]	$D_{SC}(x)$:栅格单元 x 的土壤保持需求量
休闲游憩 RS	供给	ha/km ²	公共绿地面积占比 ^[27]	<p>$S_{rs}(x)$:栅格单元 x 休闲游憩服务的供给；</p> <p>$A_{j,gr}(x)$:栅格单元 x 所在区县 j 的建成区绿地覆盖面积；</p> <p>$NDVI(x)$:栅格单元 x 的 NDVI 值；</p> <p>$NDVI_{sum,j}(x)$:栅格单元 x 所在区县 j 的 NDVI 值总和</p> <p>$A_j(x)$:栅格单元 x 所在区县 j 的总面积</p>
	需求	ha/km ²	由人口密度和政府规划的人均绿地面积共同决定 ^[6]	<p>$D_{RS}(x)$:休闲游憩服务的需求；</p> <p>$Den_{pop}(x)$:栅格单元 x 的人口密度；</p> <p>$\rho_{gr,planning}$:政府对人均绿地面积的规划，本文采用国务院发布的《“十三五”生态环境保护规划》对 2020 年人均公园绿地面积的规划，即 14.6×10^{-4}ha/人</p>

1.4 生态系统服务供需盈缺及空间聚集模式分析

1.4.1 生态系统服务供需盈缺分析

生态系统服务供需比(ESDR)是将生态系统服务供给与需求联系起来,反应不同区域供需数量盈余、平衡、不足性质的一种方法^[28,29]。计算公式如下:

$$ESDR_i(x) = \frac{S_i(x) - D_i(x)}{(S_{max} + D_{max}) / 2} \quad (1)$$

式中: $S(x)$ 和 $D(x)$ 分别表示位于栅格单元 x 处生态系统服务 i 的供给值和需求值; $S_{max}(x)$ 为研究区域内生态系统服务 i 供给量的最高值,即供给的最大值; $D_{max}(x)$ 为研究区域内生态系统服务 i 需求量的最高值,即需求的最大值。ESDR _{i} (x) 正值表示该项生态系统服务在栅格单元 x 处盈余,零值表示平衡,负值表示缺乏。

1.4.2 生态系统服务供需空间聚集模式分析

通过双变量局部空间自相关模型(LISA),可将四川省生态系统服务供给与需求的空间聚集模式划分为四类,即“高供给-高需求”、“高供给-低需求”、“低供给-高需求”和“低供给-低需求”。在此基础上,结合供需数量分析,判断某一生态区管理是否需要增加供给或减少需求以实现供需平衡。分析在 GeoDa 软件中完成^[27]。

1.5 生态系统服务供需驱动力分析

1.5.1 驱动因子选择

本研究希望通过因子筛选获得影响四川省重要生态系统服务供需的关键驱动因素。备选驱动因子的选择主要基于以下原则:(1)可以被量化,且指标之间相互独立;(2)能够反映自然地理、气候、经济或社会的一个重要方面;(3)数据的可获取性^[12]。此次分析共计选择了 12 项驱动因素^[2,12,30,31],包括降水量(PRCP.)、温度(T)和坡度(Slope)3 项自然因子,耕地面积(Farmland)、林地面积(Forest)、草地面积(Grass.)和建设用地面积(Construc)4 项土地利用因子,地区生产总值(GRP)、工业产值(Indus.)和社会消费品零售总额(Retail)3 项经济因子以及总人口数(PopTotal)、城镇化率(UrbaRate)2 项人口统计因子。

1.5.2 排序分析

本研究通过排序分析进行驱动因子的筛选。统计四川省 183 个区县的 6 项生态系统服务供需总量和 14 项驱动因子的总量。数据导入 Canoco5.0 软件(MicrocomputerPower,美国)分析^[32]。分别以全省、各生态区为对象(分析生态分区时只包含某一分区的区县数据)进行排序分析。根据软件中的去趋势对应分析(DCA)进行模型选择,梯度长度均小于 3,选择 RDA 模型。RDA 分析提供统计学结果和排序图。在排序图中,生态系统服务和驱动因子由带箭头的线段表示,箭头越长、夹角的余弦值越大,说明两个变量之间相关关系越紧密,即驱动因子对生态系统服务变化的解释能力越强;箭头夹角小于 90°,表示变量之间的正相关关系,箭头夹角大于 90°,表示变量之间的负相关关系。

2 结果与讨论

2.1 生态系统服务供需分布特征

在生态系统服务供给与需求的空间分布特征方面,所有服务均呈现明显空间异质性,其异质性特征与生态区分布有明显关联(图 2)。水生产、粮食生产和休闲游憩服务的供给和需求以及碳固持服务需求明显集中于成都平原、盆地丘陵区以及盆周山区中部;碳固持和土壤保持服务供给主要集中于川西南山地、盆周山地区和川西高山峡谷区北部及东部;水源涵养服务供给、土

壤保持服务需求集中于川西高山峡谷；水源涵养需求集中于成都平原区。除去土壤保持，所有服务均在省会成都表现出最高的需求量。此外，工业城市攀枝花市也在水生产、粮食生产、碳固持、休闲游憩服务中呈现出了明显高于周边区域的服务需求。

2.2 生态系统服务供需盈缺及空间聚集模式分析

在全省尺度，总量上，所有服务均处于供需盈余状态(供给量>需求量),空间分布上，数量盈缺方面(图 3),水生产、碳固持服务以盈余区域为主，粮食生产、土壤保持、休闲游憩以平衡区域为主，水源涵养服务以缺乏区域为主；空间聚集模式方面(图 4),水生产、粮食生产、休闲游憩服务以“高供给-高需求”和“低供给-低需求”模式为主，碳固持、水源涵养服务以“高供给-低需求”、“低供给-高需求”和“低供给-低需求”模式为主；土壤保持服务以“低供给-低需求”、“高供给-高需求”和“低供给-高需求”模式为主。

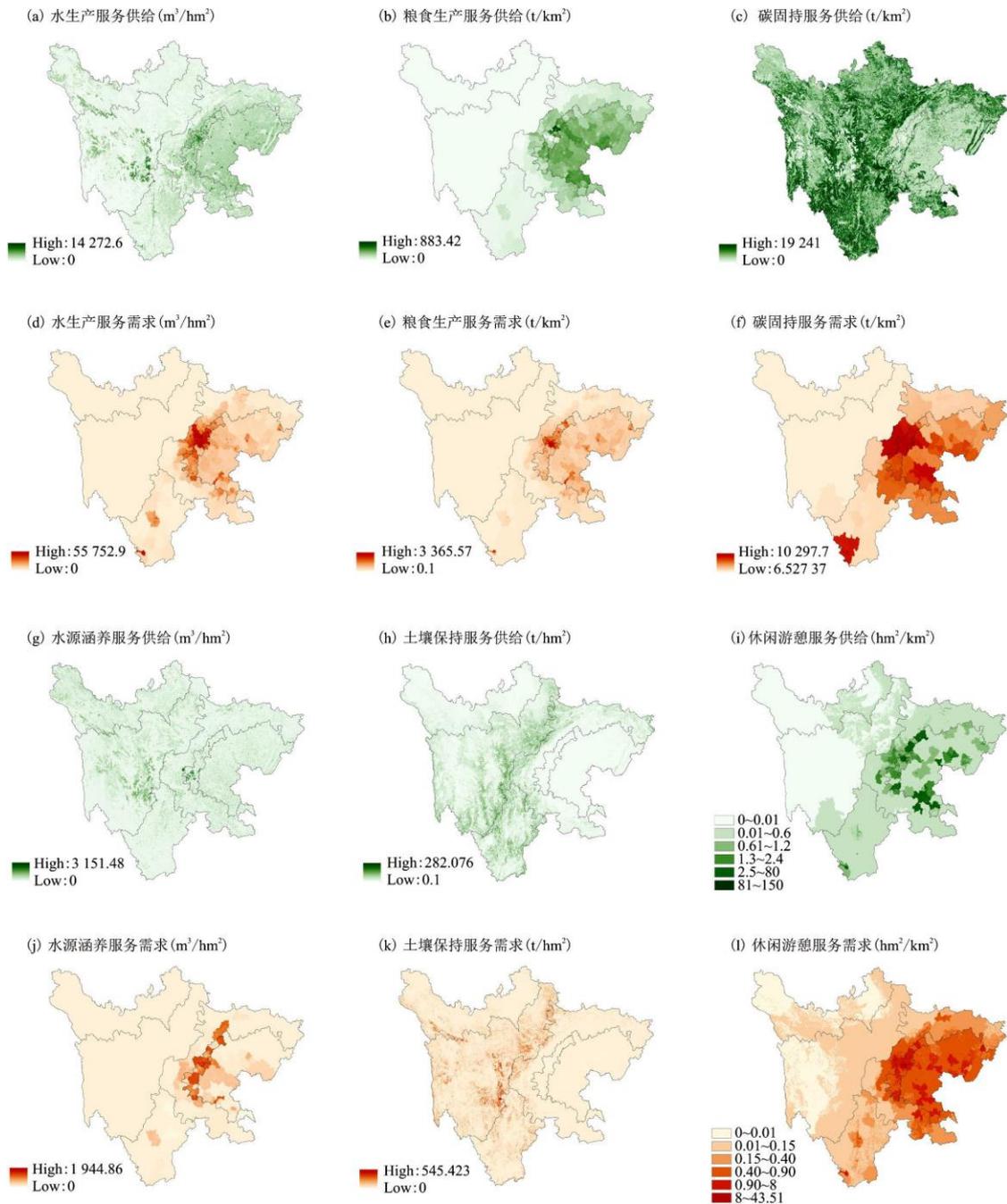


图 2 四川省各项生态系统服务供需空间分布图

在生态分区尺度, 各分区供需匹配特征明显、差异显著。一方面, 在供需数量盈缺的空间分布上呈现出不同程度的盈余、平衡和缺乏状况(图 3)。例如, 水生产服务中, 盆地丘陵区整体以盈余状态为主, 面积超过 80%; 成都平原区盈余区域和缺乏区域分别约占到分区总面积一半; 川西南山地区有近一半区域处于盈余状态, 但仍有 20% 和 25% 的平衡区域和缺乏区域。另一方面, 即便在数量盈缺状态相似的情况下, 各分区的供需聚集模式也可能存在一定差异(图 4), 因此管理视角存在区别。以水源涵养服务为例, 成都平原和川西高山峡谷区存在大面积的供需缺乏区域亟待管理, 但成都平原的缺乏区为“低供给-高需求”聚集模式, 需要同时进行供给的提高以及需求的降低, 川西高山峡谷区的缺乏区为“低供给-低需求”聚集模式, 可仅从供给角度进行管理。

在 ArcGIS 平台中利用全局莫兰指数对各项生态系统服务供给、需求和供需比在空间分布上的聚集程度进行量化分析, 并进行显著性检验。如表 2 所示, 各项生态系统服务供给、需求和供需比在 1% 显著性水平下均为正值, 表明各项生态系统服务的供给、需求和供需比存在具有统计学意义的空间自相关性, 在空间分布上存在明显的高低值聚集分布特征。

2.3 生态系统服务供需驱动力分析

2.3.1 全省尺度生态系统服务供需驱动力分析

全省尺度生态系统服务与驱动因子的排序结果中, 供给与需求分析的前两轴分别共解释 71.48% 和 57.11% 的变量(图 5)。将排序图中影响各项服务的主要驱动力(重要性排序前 3)信息提炼得图 6。根据图 5、6 结果, 在全省尺度, 影响四川省服务供给的最主要驱动力有降水量、坡度和耕地面积。降水量是水生产、水源涵养、休闲游憩服务的最主要影响因素, 其中, 与休闲游憩为负相关; 随着坡度的增加, 碳固持、土壤保持服务量呈最明显的增加趋势; 耕地面积是粮食生产服务最重要的影响因素, 且相关性为正。除总人口数外, 需求的主要驱动力为地区生产总值和坡度, 地区生产总值对水生产、粮食生产、碳固持、水源涵养、休闲游憩 5 项服务有最重要的影响; 坡度对土壤保持需求有最重要的影响。综上, 降水量、耕地面积、坡度和地区生产总值 4 项驱动因子在四川省明显的空间分布不均衡性是造成 6 项生态系统服务的供给及需求呈现高度空间异质性的最重要原因。

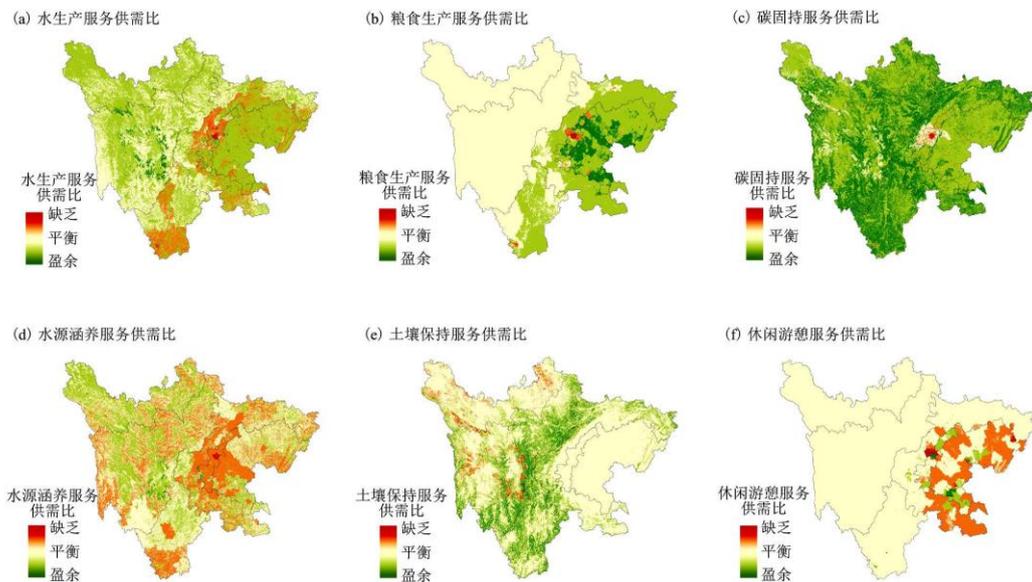


图 3 四川省各项生态系统服务供需盈缺状况空间分布

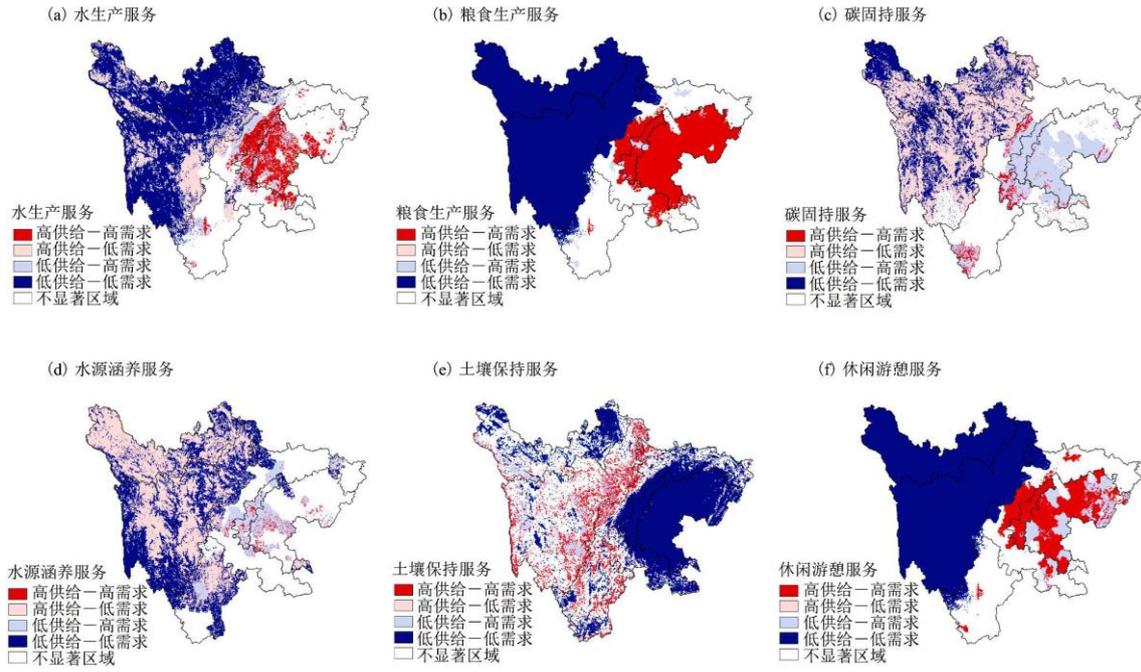


图 4 四川省各项生态系统服务供需空间聚集模式分布

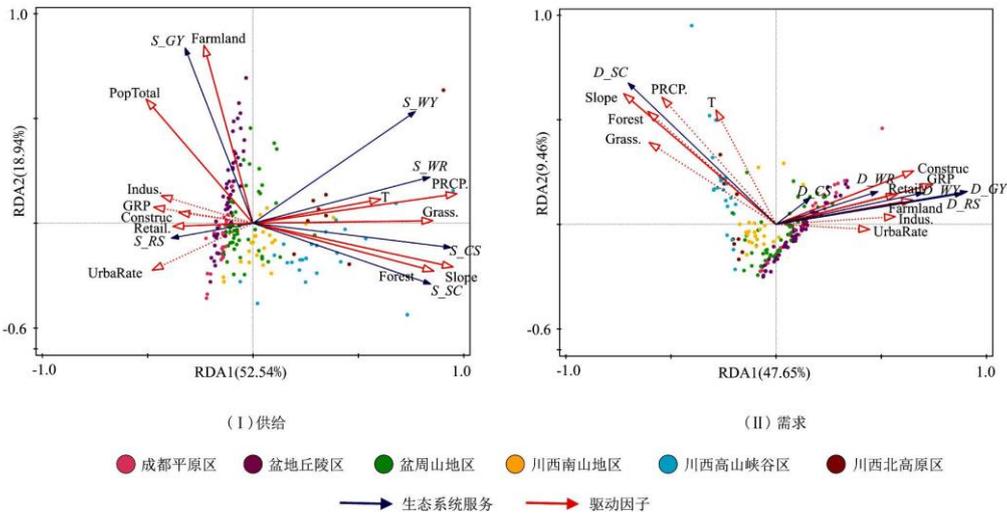


图 5 全省尺度生态系统服务供给、需求与驱动因子的 RDA 排序图

表 2 生态系统服务供给、需求和供需比 Moran' sI 统计表

生态系统服务供给	莫兰指数	P 值	生态系统服务需求	莫兰指数	P 值	供需比	莫兰指数	P 值
水生产服务供给	0.67	<0.01	水生产服务需求	0.75	<0.01	水生产服务供需比	0.76	<0.01
粮食生产服务供给	0.71	<0.01	粮食生产服务需求	0.72	<0.01	粮食生产服务供需比	0.80	<0.01
碳固持服务供给	0.78	<0.01	碳固持服务需求	0.78	<0.01	碳固持服务供需比	0.74	<0.01

水源涵养服务供给	0.65	<0.01	水源涵养服务需求	0.76	<0.01	水源涵养服务供需比	0.75	<0.01
土壤保持服务供给	0.77	<0.01	土壤保持服务需求	0.69	<0.01	土壤保持服务供需比	0.76	<0.01
休闲游憩服务供给	0.82	<0.01	休闲游憩服务需求	0.78	<0.01	休闲游憩服务供需比	0.79	<0.01

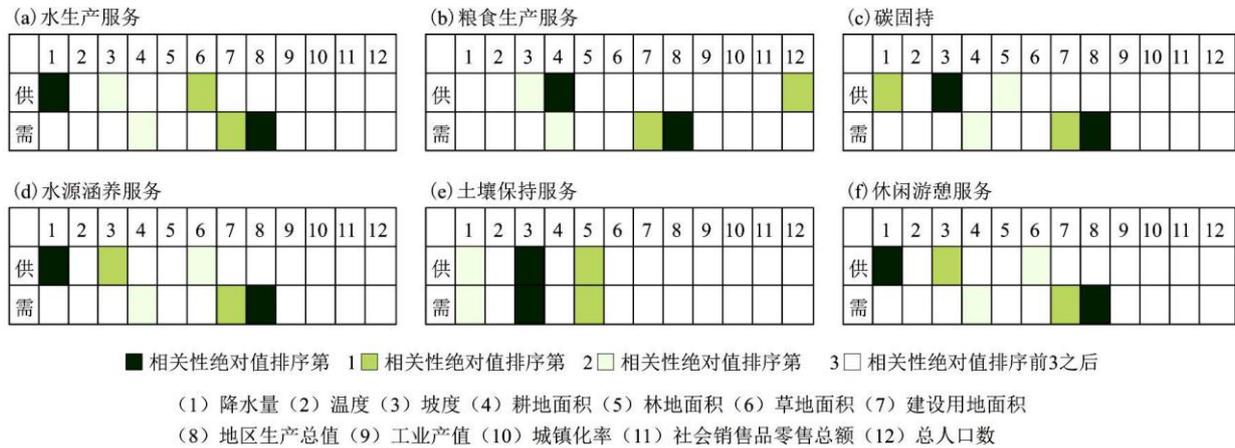


图 6 全省尺度生态系统服务供给与需求主要驱动力

2.3.2 生态分区尺度生态系统服务供需驱动力分析

分区尺度的 RDA 排序结果显示了在不同生态分区中各项服务供给或需求与驱动因子之间的相关性(图 7、图 9),将图中影响各服务的主要驱动力(重要性排序前 3)信息提炼得图 8、10。生态区尺度下,影响不同服务供需的最重要驱动力类型与全省尺度分析结果不同。以 2 项服务为例:在碳固持服务供给中,全省尺度下,坡度是最主要驱动力,而在分区尺度下,4 个区域(成都平原、盆地丘陵、川西南山地、川西北高原)主要由降水量驱动,2 个区域(盆周山地、川西高山峡谷)主要由林地面积驱动;在水源涵养供给中,全省尺度下,降水量是服务最重要的驱动力,而在分区尺度下,降水仅是 4 个区域(成都平原、盆周山地、川西高山峡谷、川西北高原)的最主要驱动力,其余 2 个区域(盆地丘陵、川西南山地)分别主要由总人口数和草地面积驱动。由此可见,驱动力在四川省的影响范围有限。

另外,生态系统服务供需的主要驱动力在分区之间存在明显差异。供给方面,成都平原区生态系统服务量受到了所有类型驱动因素的主要影响,包括 2 个自然因子(降水和温度)、2 个土地利用因子(耕地面积和林地面积)、1 个经济因子(地区生产总值)和 1 个人口统计因子(城镇化率);而盆地丘陵区只受到自然(降水)、人口统计(总人口数)和土地利用(耕地面积、林地面积)3 个类型驱动因素的主要影响,川西高山峡谷区只受到自然(坡度、温度、降水量)和土地利用(林地面积、耕地面积、草地面积)2 个类型因子的主要影响。需求方面,成都平原区生态系统服务量同样受到了所有类型驱动因素的主要影响,包括土地利用(建设用地面积、林地面积)、经济(地区生产总值)、自然(降水量、坡度)和人口统计(城镇化率),而盆地丘陵和川西高山峡谷区只受到土地利用、经济和自然 3 个类型、盆周山地和川西南山区只受到经济和土地利用 2 个类型驱动因素的主要影响。除类型外,在不同分区中,主要驱动力的影响顺序、影响方向也有所区别。在成都平原、盆地丘陵和川西高山峡谷区,林地面积的增加是土壤保持供给产生的最主要因素,而在盆周山地,林地对该服务的影响次于坡度;在川西高山峡谷区,耕地面积的增加可以降低水源涵养需求,而在盆地丘陵区,该因子的增加会造成该服务需求的增长。综上,驱动力的分区探讨和服务的分区管控对于四川省生态系统服务供需管理具有十分的必要性。

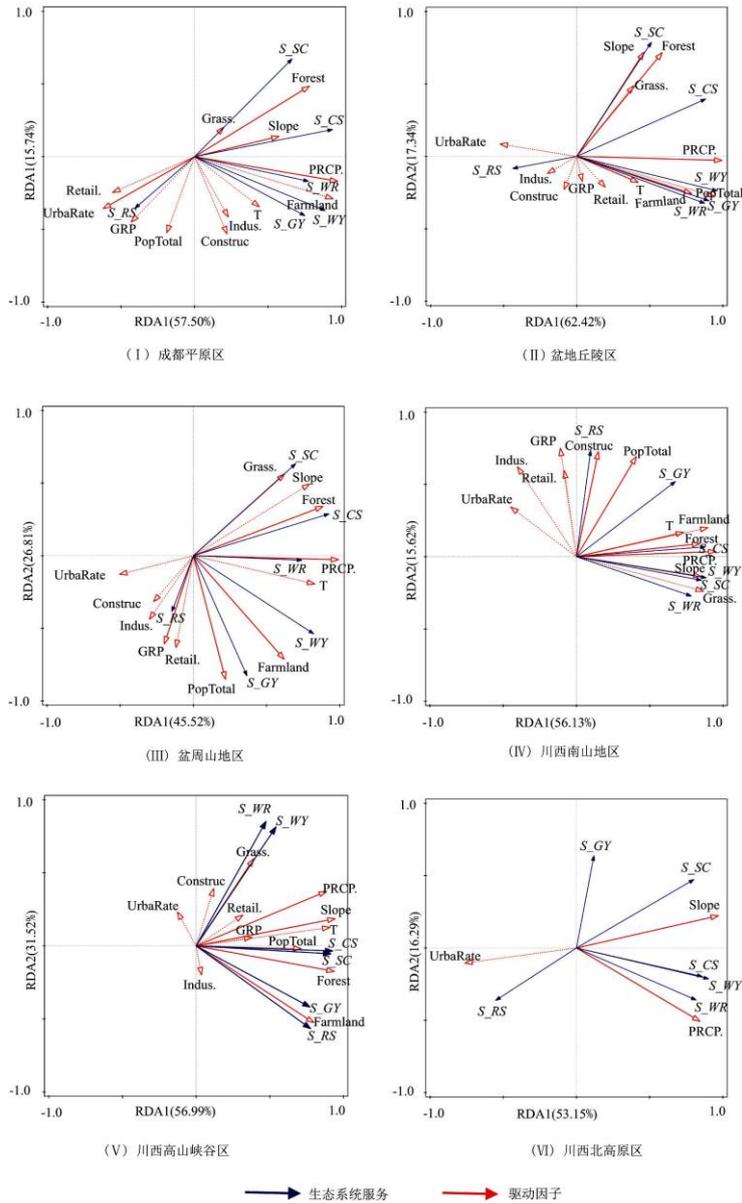


图7 分区尺度生态系统服务供给与驱动因子的 RDA 排序图

2.4 生态系统服务供需分区管理

根据以上结果，结合各区域条件，提出差异化的生态系统服务供需管理方法。成都平原区生态系统服务供给和需求均受到城镇化率、降水量、林地面积和地区生产总值的主要影响，有必要有序引导和科学控制建设用地扩张、调节人口空间分布，改善城市下垫面蒸散发性能，加强城郊森林公园建设、提高林地质量，优化调整产业结构、鼓励新技术推广、降低单位 GDP 能耗。盆地丘陵区服务供、需均受到降水量和耕地面积的主要影响，有必要完善高品质的建成区绿色基础设施，开展农业污染综合治理、实施退化农田修复，推广集约化生产、建立稳定的耕作系统，推进休闲农业产业化、规范化、品牌化发展。盆周山地区服务供、需均受到林地面积的主要影响，建议结合不同情况对区域内以原始森林为主的珍贵资源采取封山育林、飞播造林与人工造林的恢复方法，实施退耕还林还牧，立体创新发展森林生态旅游、科普教育，发展果树经济林、草食牲畜、林下养殖。川西南山地区服务供、需均受到草地面积的主要影响，有必要采取水土保持、石漠化治理措施，实施脆弱地带植被恢复，规范水利水电建设，严禁过垦过牧、无序开采。川西高山峡谷区服务供、需受到了坡度、降水量、耕地面积、林地面积和草地面积的重要影响，必须加

大泥石流、滑坡和土地沙化治理力度，加大公益林建造力度，开展退化草甸、森林、湿地的生态治理，划定建设红线、严管水电工程、禁止生态破坏。川西北高原区服务供、需受到了降水量、坡度、城镇化率、地区生产总值的重要影响，必须修复沼泽湿地和高山草甸、天然灌木林等特色生态资源、构建生态廊道、保护物种栖息地，重要区域实施禁牧休牧、还湿还草，提高城区绿化水平，在当前重点依托特色自然资源发展旅游业的背景下，规范景区管理，优化升级旅游产业链和品牌质量，避免对生态资源的单一的、不合理的、过度的依赖。

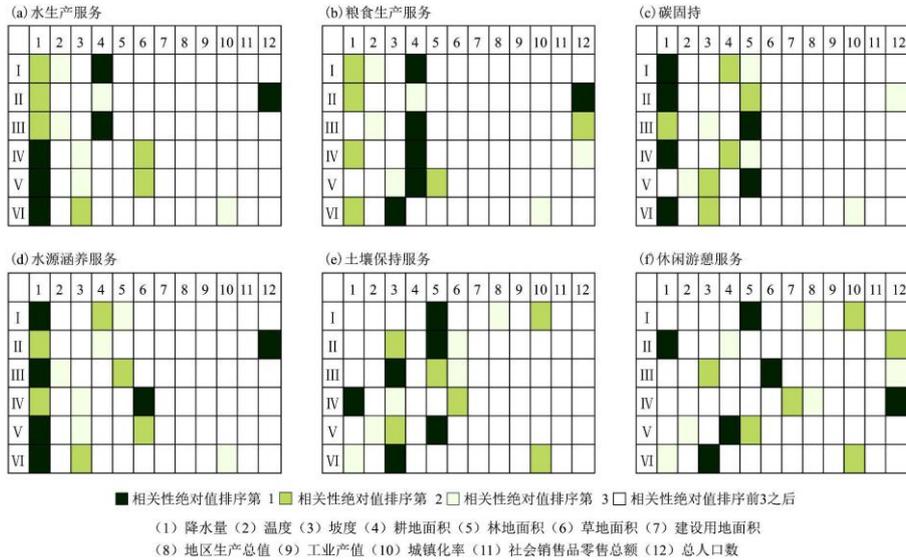


图 8 生态区尺度生态系统服务供给主要驱动力

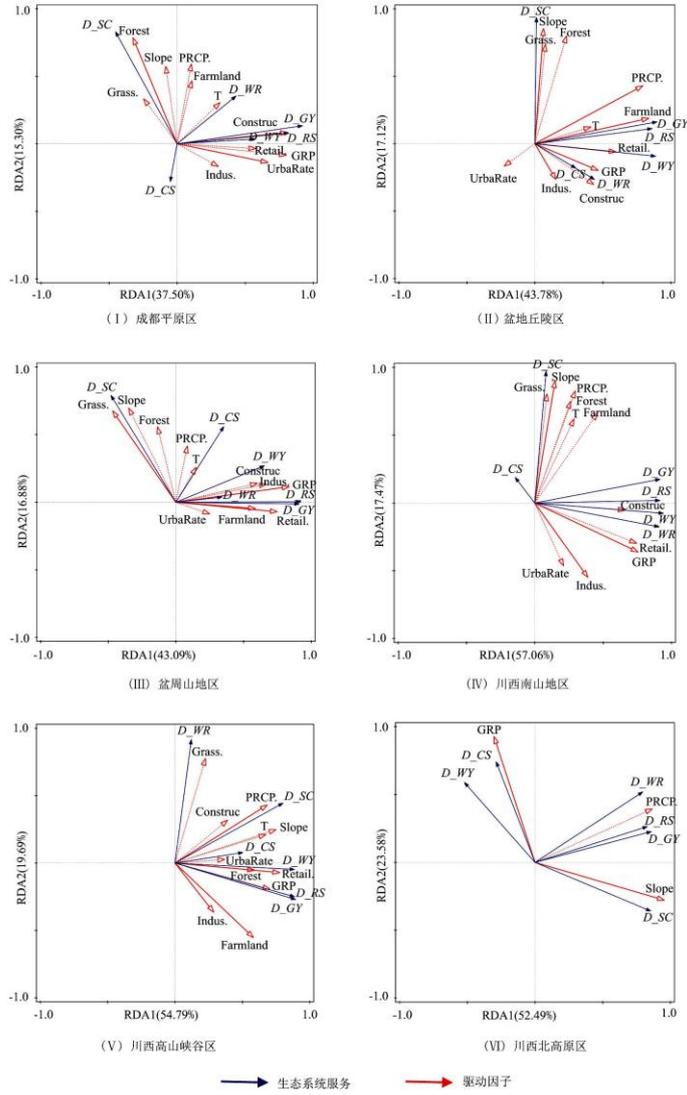


图9 分区尺度生态系统服务需求与驱动因子的 RDA 排序图

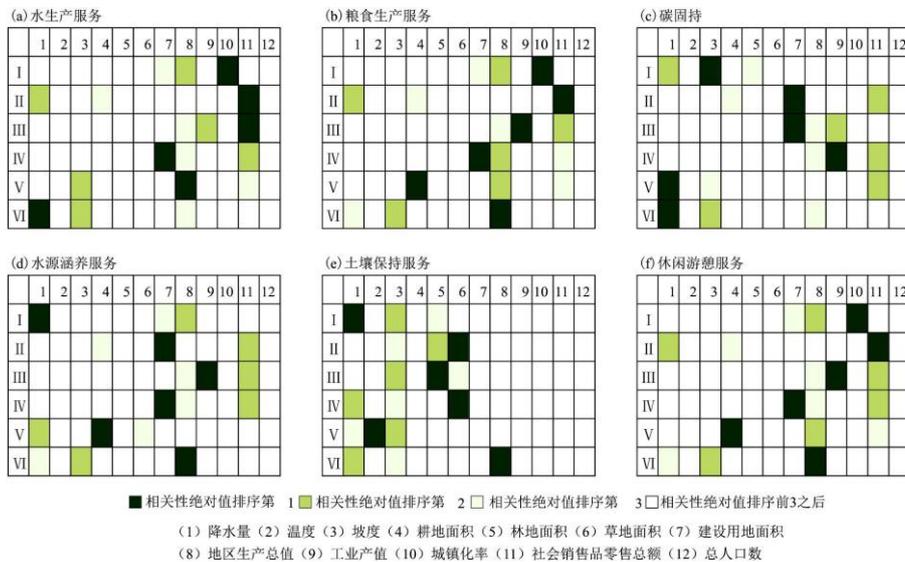


图 10 生态区尺度生态系统服务需求主要驱动力

3 结论

本文以具有高空间异质性的四川省为例,选取 6 项生态系统服务进行了供需量化制图、供需盈缺及空间聚集模式分析,并在全省和生态分区 2 个尺度进行了 RDA 驱动力分析,主要结论如下:

(1)在空间分布方面,各服务供给与需求均呈现出不同程度的空间异质性,且其分布特征与生态分区的空间分布具有一定关联。位于东部的成都平原、盆地丘陵和盆周山地区是水生产、粮食生产、休闲游憩服务供给和除土壤保持外所有服务需求的集中区,西部的川西南山地、川西高山峡谷、川西北高原区是碳固持、水源涵养、土壤保持服务供给和土壤保持服务需求的集中区。

(2)全省范围内,所有服务均存在较大的总量盈余。通过供需盈缺和空间聚集模式分析识别出四川省生态系统服务供需的“盈余”、“平衡”和“缺乏”三种数量情况以及“高供给-高需求”、“高供给-低需求”、“低供给-高需求”和“低供给-低需求”四种空间聚集模式。结果显示,各分区呈现出不同程度的供需盈缺空间分布情况,即便在盈缺状态相似的情况下,不同分区的供需聚集模式也可能存在一定差异。6 个生态分区呈现出的具有差异的供需数量匹配和空间聚集特征,可为相应区域供需问题的发现以及供给、需求或供需两侧 3 种管理视角的选择提供依据。

(3)驱动力分析结果显示,四川省 6 项生态系统服务供给和需求分别都呈现明显空间异质性的原因主要与降水量、耕地面积、坡度以及地区生产总值 4 项驱动因子在省内的空间分布不均衡性有关。分别以全省和生态分区为分析尺度,影响各服务供需的最重要驱动力类型存在较大不同,说明四川省供需驱动力存在一定的尺度效应。除类型外,不同分区中,主要驱动力的影响顺序、影响方向也存在差异。综上,在四川省,生态系统服务供需的精细化管理十分有必要,驱动力的分区探讨和服务的分区管控是重要的实施手段。

参考文献:

- [1]COSTANZA ROBERT,D' ARGE RALPH,DE GROOT RUDOLF,et al.The value of the world` ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387(6630):253-260.
- [2]WU XUE,LIU SHILIANG,ZHAO SHUANG,et al.Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply,demand and balance in China[J].Science of the Total Environment,2019,652:1375-1386.
- [3]GEIJZENDORFFER R I,MARTIN-LOPEZ B,ROCHE P K.Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments[J].Ecological Indicators,2015,52:320-331.
- [4]谢高地,曹淑艳,鲁春霞,等.中国的生态服务消费与生态债务研究[J].自然资源学报,2010,25(1):43-51.
- [5]SCHIRPKE UTA,CANDIAGO SEBASTIAN,EGARTER VIGL LUKAS,et al.Integrating supply,flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services[J].Science of The Total Environment,2019,651:928-941.
- [6]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[J].长江流域资源与环境,2019,28(9):2080-2091.

-
- [7]李博, 石培基, 金淑婷, 等. 石羊河流域生态系统服务价值的空间异质性及其计量[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3):943-951.
- [8]刘立程, 刘春芳, 王川, 等. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例[J]. 生态学报, 2019, 74(9):1921-1937.
- [9]李颖明, 黄宝荣. 我国的分区实践与环境管理分区研究[J]. 生态经济, 2010(2):169-172.
- [10]BENJAMIN B, MARION K, YING H, et al. Ecosystem service potentials, flows and demands—concepts for spatial localisation, indication and quantification[J]. Landscape Online, 2014, 34:1-32.
- [11]PENG J, TIAN L, LIU Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608:706-714.
- [12]SUN X, TANG H J, YANG P, et al. Spatiotemporal patterns and drivers of ecosystem service supply and demand across the conterminous United States: A multiscale analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703.
- [13]文博. 四川划定生态保护红线之绿色发展理念[J]. 资源与人居环境, 2018(8):46-50.
- [14]四川省人民政府. 四川省“十三五”生态保护与建设规划[Z]. 2017.
- [15]王程昕. 近三十年四川省政府生态环境保护政策演变及问题研究[D]. 电子科技大学, 2019.
- [16]SHARP RICHARD, JAMES DOUGLASS, STACIE WOLNY, et al. InVEST 3.10.2 User's Guide. <http://releases.naturalcapitalproject.org/>. 2020.
- [17]王亚璐. 基于城乡梯度的生态系统服务供需研究——以汾河上游流域为例[D]. 山西大学, 2019.
- [18]CHEN FEIYAN, LI LING, NIU JIQIANG, et al. Evaluating ecosystem services supply and demand dynamics and ecological zoning management in Wuhan, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(13).
- [19]黄从红. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能研究[D]. 北京林业大学, 2014.
- [20]包玉斌. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究[D]. 西北大学, 2015.
- [21]董丽青. 基于 SPANs 模型碳固定服务和水产出服务供给, 需求和服务流的量化评估与制图[D]. 山西师范大学, 2018.
- [22]杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 等. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例[J]. 资源科学, 2019, 41(3):557-571.
- [23]SAHLE M, SAITO O, FURST C, et al. Quantification and mapping of the supply of and demand for carbon storage and sequestration service in woody biomass and soil to mitigate climate change in the socio-ecological environment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624:342-354.

-
- [24]傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报, 2013, 33(3):789-797.
- [25]林世伟. “三江并流”区生态系统服务空间权衡与协同关系研究[D]. 云南大学, 2016.
- [26]刘春芳, 王伟婷, 刘立程, 等. 西北地区县域生态系统服务的供需匹配——以甘肃古浪县为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(9):2177-2190.
- [27]ZHANG Y, LIU Y F, ZHANG Y, et al. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 637-638:780-790.
- [28]CUI F Q, TANG H P, ZHANG Q, et al. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: A case study in Hulunbuir, China[J]. Ecosystem Services, 2019, 39.
- [29]CHEN J Y, JIANG B, BAI Y, et al. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation[J]. Science of the Total Environment 2019, 650:1426-1439.
- [30]邓焯炜, 廖振良. 生态系统服务驱动因素及供需研究进展[J]. 环境科技, 2020, 33(1):74-78.
- [31]杨超. 中原城市群土地生态服务价值空间分布及社会驱动因素差异研究[D]. 河北经贸大学, 2018.
- [32]KATJA K, MARTIN-LOPEZ B, PHILLIPS P M, et al. Key landscape features in the provision of ecosystem services: Insights for management [J]. Land Use Policy, 2019, 82:353-366.