

文章编号: 1008-2786-(2020)4-483-12
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000527

青藏高原生态系统服务的时空分布特征与供需关系

徐凌星^{1,2}, 杨德伟^{1,3*}, 刘丹丹⁴, 林浩曦^{2,5,6}

(1. 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 4. 华侨大学 旅游学院, 福建 泉州 362021;
5. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 6. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 当前, 全球气候变化与人类活动正在影响和改变着高寒脆弱的青藏高原生态系统。本文以生态系统服务为切入点, 通过构建服务供需关系测度模型, 并运用相关分析、热点探测等空间分析手段, 揭示 1995—2015 年间青藏高原生态系统服务供给分布、需求分布和供需关系的时空特征。结果表明: (1) 高原生态系统服务供给水平自东南向西北方向减少, 一直到西北边缘再急剧上升。2005 年前, 供给变化以稳定和上升为主, 2005 后, 供给变化以波动和下降为主。 (2) 高原西北边缘、东缘、南部的中心城镇为生态系统服务需求高水平地区, 高原北部、腹地及藏东南地区为服务需求低值区。高原北部和腹地的需求水平保持稳定, 东部需求水平上升明显。 (3) 高原南部为典型的服务供需盈余区, 高原东缘和西北边缘为典型的服务供需赤字区, 高原北部和腹地集中分布着服务供需相对均衡区, 在时间变化上表现出供需赤字区域略有缩减、供需盈余面积下降的特征。研究可为地球“第三极”的生态系统管理和可持续发展规划决策提供理论参考。

关键词: 生态系统服务; 供需关系; 时空格局; 青藏高原

中图分类号: X144; X821

文献标志码: A

生态系统服务用于表示生态系统为人类社会供应的各种产品和服务^[1], 是关联自然环境条件、生态过程和人类福祉的核心概念^[2-3]。而生态系统服务供需分析由于密切关联了生态系统供给潜力与人类多元需求, 逐渐成为生态系统管理的重要手段^[3]。

已有的生态系统服务分类评估体系及国际上涌现出的 InVEST、ARIES、RUSLE、SWAT 等一批生态模型, 被广泛应用于从本地到全球不同尺度的多项或单项生态系统服务的供给量化研究中^[1,3-5]。也有学者通过估算单位服务功能的定价或基于单位面积价值当量法, 实现服务价值的货币化核算^[3]。相

比之下, 服务需求研究常借助社会经济、土地利用或灯光数据等指标来间接评估人类对生态系统服务的整体需求, 或通过对公众偏好和意愿调查结果作为某一类服务的需求指标, 此类研究往往存在不能完整表征人类需求、量化难度较大的问题^[3,6-7]。基于已有的生态系统服务量化方法, 许多学者通过匹配服务供给、需求的空间布局情况, 以判定服务供需的数量特征与空间关系。其中, 国外学者重点关注中、小尺度生态系统服务流的空间制图, 即, 对生态系统服务从供给端到需求端流动过程的空间可视化^[9-10]。国内学者常关注市域或省域尺度的生态系统服务供需格局特征,

收稿日期 (Received date): 2019-05-12; 改回日期 (Accepted date): 2020-04-10

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41690142)。[National Natural Science Foundation of China (41690142)]

作者简介 (Biography): 徐凌星 (1995-), 女, 福建宁德人, 硕士研究生, 主要研究方向: 生态系统服务。[XU Lingxing (1995-), female, born in Ningde, Fujian province, M. Sc. candidate, research on ecosystem services] E-mail: lxxu@iue.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 杨德伟 (1978-), 男, 教授, 主要研究方向: 地理-社会-生态过程与可持续性科学。[YANG Dewei (1978-), male, Ph. D., professor, specialized in geo-socio-ecological processes and sustainability science] E-mail: younglansing@gmail.com

聚焦揭示区域生态系统服务的供需平衡关系及其时空分异规律^[8,11-12]。总体而言,当前对生态系统服务的供需分析简易量化了区域的服务供需格局,便于管理者进行生态系统资源的合理配置,但在指标选择上存在一定的局限性,量化方法还有待进一步优化。

作为全球海拔最高、面积最大的高原,青藏高原的存在对其本身及邻近地区的生态安全和人类福祉产生着深刻的影响^[13]。全球“第三极”的青藏高原素有“全球有机碳库”、“全球生物多样性保护区”、“世界文化圣地”、“亚洲水塔”之称,为人类提供重要的生态系统服务^[13-14]。在当前的青藏高原生态系统服务研究中,学者们多聚焦局部地区的单项服务供给能力,或基于生态模型、价值估算等方法对整个青藏高原开展综合服务研究,但较少涉及对青藏高原服务需求的量化,也鲜少系统关注区内服务在长时间尺度下的变化特征^[13,15-17]。综合来看,既有研究较少将整个青藏高原生态系统服务的供给能力

与需求水平相关联,对区内服务的时空格局特征与供需平衡状况关注不足。

本研究基于 1995、2000、2005、2010 和 2015 年的青藏高原数据,开展生态系统服务时空分布特征与供需关系研究。其中,对生态系统服务供给量和需求量的时空特征分析,重点通过服务供给与需求量化及空间分析来实现;对区域服务供需关系的识别则是在供需量化的基础上,通过供需指数模型、相关分析和热点探测等空间分析手段来实现。

1 研究区概况

青藏高原位于我国西部及西南部,地跨 $26^{\circ}10' \sim 39^{\circ}30'N$ 、 $73^{\circ}20' \sim 104^{\circ}20'E$,涵盖了西藏、青海、新疆南部、甘肃西南部、四川西部和云南西北部,约占地 $2.53 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图 1)。高原生态系统多样,冻土、冰雪、河湖广布。区内社会经济发展的空间差异显著,海拔较低的河谷地带通常为人类农牧

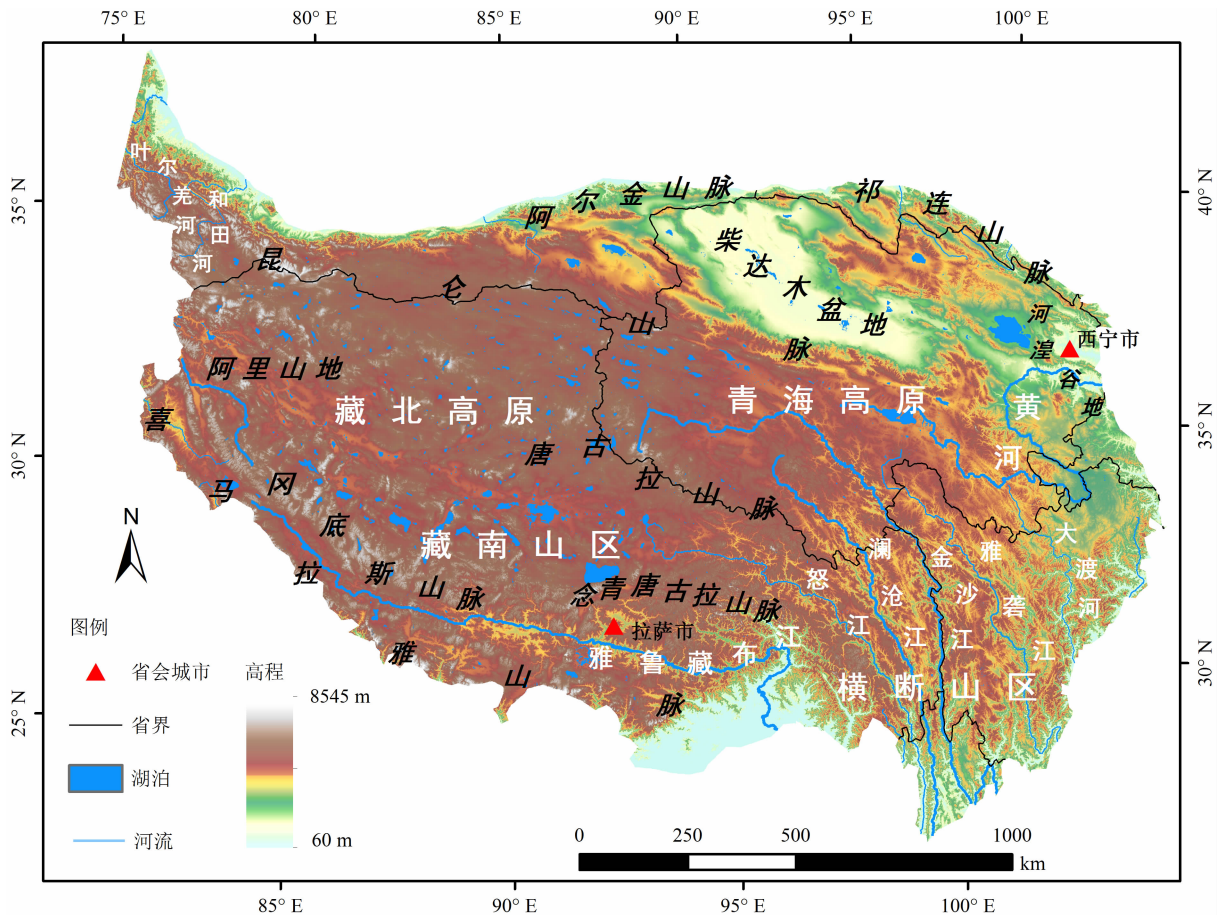


图 1 研究区位图

Fig. 1 Location of the Qinghai-Tibet Plateau, China

生产和生活的密集区,而在高原腹地及藏东南山地等区域,人口却极为稀少。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文所涉及的冻土地温源自寒区旱区科学数据中心(<http://data.casnw.net>);蒸散数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);生态系统生产力、土壤有机碳、冻土活动层厚度数据由 DOS-TEM 模型模拟而成,并采用 ArcGIS 的 Kriging 插值法形成面数据^[18];高程、气象、NDVI、土地利用、行政边界、人口及 GDP 空间分布公里网格数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>);宗教文化场所分布源自 Open Street Map 数据集(<http://www.geofabrik.de>);各市年末牲畜存栏数源自各省统计年鉴农业统计单元;各省人均水资源量源自中国统计年鉴资源与环境统计单元。除行政区划为 2015 年的全国行政边界数据外,其余均为 1995、2000、2005、2010、2015 年的数据。其中,行政边界、宗教文化场所分布为矢量类型数据,其余空间数据为分辨率为 1 km 的栅格数据;以行政区域为单位的牲畜存栏数和水资源数据,需要通过空间网格化处理,转化为分辨率为 1 km 的栅格数据(详见表 1 注解)。

2.2 生态系统服务供给核算

生态系统服务供给量表示生态系统提供产品和服务的能力^[9]。本文参考千年生态系统评估框架^[5]、效存德等提出的冰冻圈服务体系^[19]及以往的青藏高原研究,提取出九类生态系统服务。各类服务及其算法见表 1。本文通过假定各类服务在促进区域发展及人类福祉提升上具有相同的重要性,给各服务小类的指标赋以相应权重,计算九类生态系统服务供给量;通过求对应服务小类的平均值,核算出支持、调节、供给和文化四类服务亚类的供给值;再通过计算服务亚类的平均值,得到生态系统服务综合供给量。在参与上述计算之前,各类服务供给量需通过 z-score 标准化方法处理,公式如下:

$$x = \frac{x_i - x_{\text{mean}}}{s} \quad (1)$$

$$x_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - x_{\text{mean}})^2} \quad (3)$$

式中, x 为标准化后的生态系统服务量; x_i 为 1 km 网格 i 的服务量; x_{mean} 为区内服务平均值; s 为区内服务标准差; n 为区内 1 km 网格总数。

2.3 生态系统服务需求核算

生态系统服务需求量可定义为人类社会使用的生态系统服务数量^[10,26]。考虑到区域的生态系统服务需求特征及数据可获得性,本文选取人口密度和地均 GDP 来间接量化服务需求^[8]。公式如下:

$$ESD_i = \lg(POP_i + 1) \times \lg(GDP_i + 1) \quad (13)$$

式中, ESD_i 为 1 km 网格 i 的生态系统服务需求量; POP_i 、 GDP_i 分别为该 1 km 网格人口密度(人·km⁻²)和地均 GDP(元·km⁻²)。对数统计有助于适当弱化社会经济水平在不同区域的明显差异。

2.4 生态系统服务供需指数计算

本文构建的供需指数用于表示生态系统服务的供需关系,指数越大,则服务供需关系越盈余,指数越小,则供需关系越赤字^[11]。公式如下:

$$ES_i = ESS_i - ESD_i \quad (14)$$

式中, ES_i 代表 1 km 网格 i 的生态系统服务供需指数(取值区间 -1 ~ 1); ESS_i 、 ESD_i 分别为网格 i 对应的服务供给量和需求量,在参与供需指数运算前,上述服务供给、需求量需通过 z-score 标准化处理(取值区间 0 ~ 1)。

2.5 生态系统服务供需盈亏格局识别

生态系统服务供需盈亏格局分析主要基于 ArcGIS 中的分析模块展开。首先利用 Feature Class 工具将研究区划分为 24 700 个 10 km 网格。基于 Zonal statistics 工具,统计各 10 km 网格对应的历年生态系统服务供给值、需求值和供需指数。以 10 km 网格为单位,在 Moran's I 工具判定区域服务供需指数满足空间自相关的条件下(Moran's I 指数为正,且 Z 值高于 2.58),采用 Hot Spot Analysis 工具,对供需指数进行热点探测,量测服务供需指数的高、低聚集度^[27]。本研究将高值集聚区定义为服务供需盈余热点区,低值集聚区定义为服务供需赤字热点区,剩余区域定义为服务供需相对均衡区^[11]。

表 1 青藏高原生态系统服务供给评估指标体系
Tab. 1 Classification of ecosystem services supply for the Qinghai-Tibet Plateau, China

亚类	小类	指标	权重	单位	公式	
支持服务	冻土稳定支撑	工程稳定系数(ESC)	1	—	$ESC = MAGT + \Delta Z_{alt}$	(4)
	土壤养分维持	氮、磷、钾含量(NC)	0.5	$\text{g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	$NC = 2.22 \times NPP_i \times A_i \times \sum_{i=1}^n N_i P_i K_i$	(5)
		土壤有机质(SOM)	0.5	$\text{g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	$SOM = SOC \times 2.22 \times 1.724$	(6)
	物种栖息	生物丰度指数(BIO)	1	—	$B = (0.35 \times A_1 + 0.21 \times A_2 + 0.28 \times A_3 + 0.11 \times A_4 + 0.04 \times A_5 + 0.01 \times A_6) / A$	(7)
调节服务	固碳调节	净生态系统生产力(NEP)	1	$\text{g C} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	—	
	温湿调节	蒸散发(ET)	1	$\text{w} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	—	
	水源涵养	水源涵养量(WC)	1	$\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	$WC = \sum_{i=1}^n (P_i - R_i - ET_i) \times A_i$ $R = P_i \times \theta_i$	(8)
供给服务	林草供给	牲畜密度(GI)	1	羊单位 $\cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	$GI_{j,i} = \frac{NDVI_{j,i}}{\sum_{i=1}^n NDVI_{j,i}} \times \frac{GA_{j,i}}{A_{j,i}} \times SU_{j,i}$	(9)
	水资源供给	用水量(WR)	1	$\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	$WR_{j,i} = Q_j \times P_{j,i}$	(10)
文化服务		景观美学系数(LA)	0.5	—	$LA = \sum_{i=1}^n F_i \times A_i$	(11)
		宗教文化系数(RC)	0.5	—	$RC = \sum_{j=1}^{\eta} \left(\frac{P_{j,i}}{P_{2015j}} \times RI_i \right)$	(12)

注:1.公式(4)中, $MAGT$ 为多年冻土年平均地温($^{\circ}\text{C}$)的标准化值; ΔZ_{alt} 为多年冻土活动层厚度(m)标准化值的变化量^[20]。由于季节性冻土的冻结状态只在月至季节尺度维持,本文直接将季节冻土区视为提供冻土支持服务水平最高的区域,无须参与上述计算。

2.公式(5)中, N_i 、 P_i 、 K_i 分别为第*i*类生态系统的氮、磷、钾含量系数(%); NPP_i 为第*i*类生态系统的净初级生产力; A_i 为第*i*类生态系统的面积(km^2)^[21]。

3.公式(6)中, SOC 为土壤有机碳,2.22为碳含量转为干物质量的系数,1.724是土壤有机碳转为土壤有机质的系数。

4.公式(7)中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 A_6 分别表示林地、草地、水域、耕地、建设用地、未利用地面积; A 为区域总面积^[22]。

5.公式(8)中, P_i 、 R_i 、 ET_i 分别为第*i*类生态系统的年平均降水量、地表径流量、蒸散发量(mm); A_i 为第*i*类生态系统面积(km^2); θ_i 为生态系统*i*的径流系数^[23]。

6.公式(9)根据1 km 网格植被覆盖情况分配地区放牧密度,式中, $NDVI_{j,i}$ 为行政区域*j*内1 km 网格*i*的NDVI值; $GA_{j,i}$ 为网格*i*的草地面积(km^2); $A_{j,i}$ 为网格*i*总面积(km^2); SU_j 为区域*j*内统一用羊单位转换的牲畜总量(羊单位)^[24]。

7.公式(10)根据1 km 网格人口密度分配各地区的用水量,式中, Q_j 为行政区域*j*的人均用水量($\text{m}^3/\text{人}$); $P_{j,i}$ 为区域*j*网格*i*的人口密度(人 $\cdot \text{km}^{-2}$)。

8.公式(11)中, F_i 为第*i*类生态系统的美学景观价值当量(km^{-2}); A_i 为第*i*类生态系统面积(km^2)^[25]。

9.公式(12)中, RI_i 为1 km 网格*i*的宗教文化场所核密度标准化值; $P_{j,i}$ 为第*j*年网格*i*人口密度(人 $\cdot \text{km}^{-2}$); $P_{2015,i}$ 为2015年网格*i*的人口密度(人 $\cdot \text{km}^{-2}$)。

3 研究结果

3.1 生态系统服务供给的时空特征

为识别生态系统服务的空间分异规律,图2采用能实现差异最大化分级的自然间断点法将标准化的服务供给值划分为5级,用以表示青藏高原服务的相对供给能力^[28]。整体而言,高原的服务供给值

由东南部向西北部逐渐减小,直到西北边缘再次突增。其中,高原东南部的滇西北横断山和藏东南雅鲁藏布江下游是历年的服务供给高值区,而高原东部的河湟谷地(青海东部西宁、海东地区)和高原西北部的昆仑山西段(新疆西南部喀什、和田地区)则为近年来新兴的服务供给高水平区。结合区域特征来看,前者水热条件优越,是支持、调节服务供给的高水平地区,后者人口增长明显,农牧生产条件优

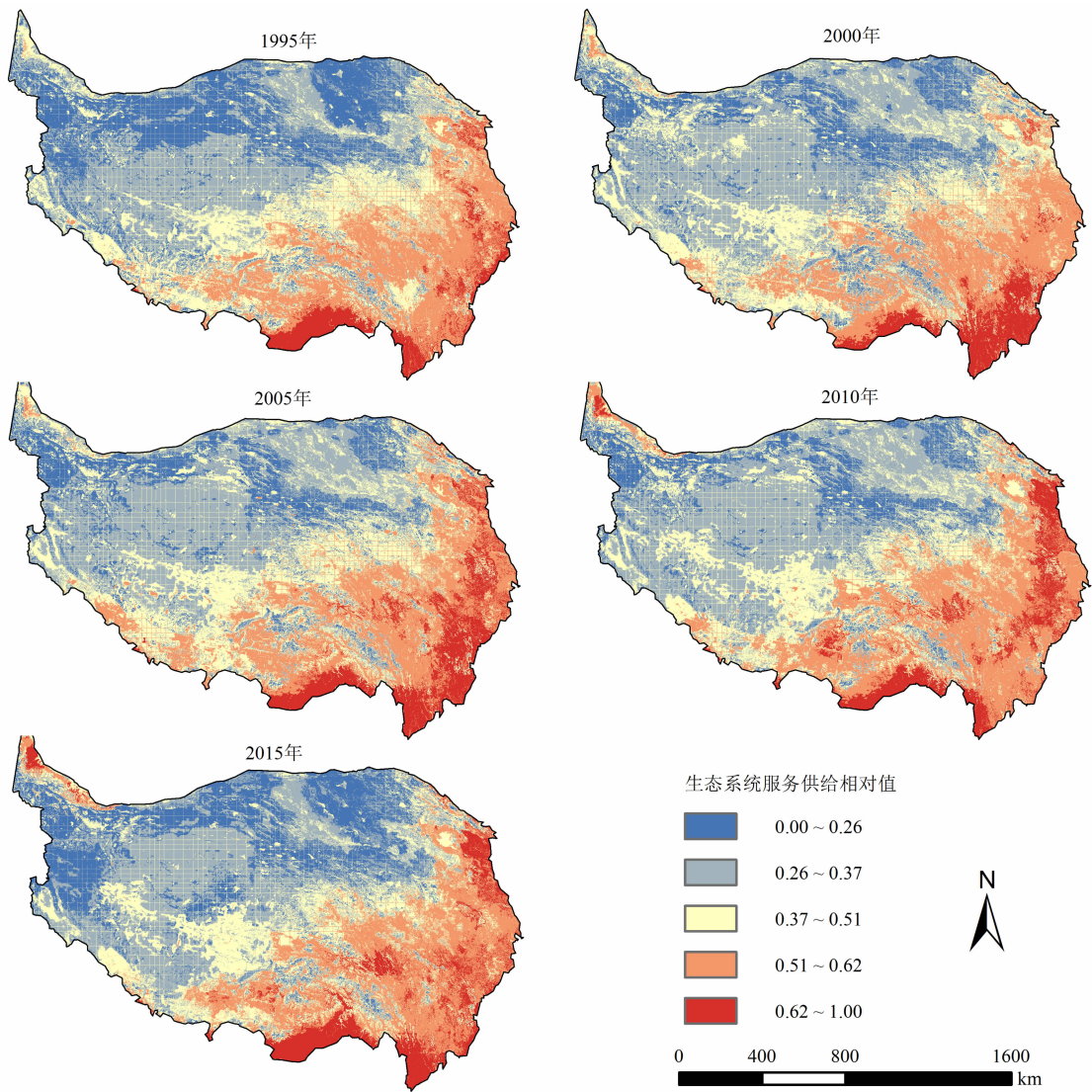
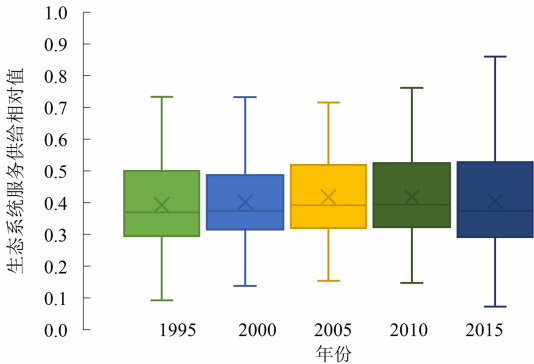


图 2 1995—2015 年青藏高原生态系统服务供给水平空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecosystem services supply on the Qinghai-Tibet Plateau during 1995—2015

越,支持、供给和文化服务增长明显。在高原北部的柴达木盆地、昆仑山、藏北高原,以高寒荒漠—草原为主,人烟稀少,一直是服务供给低值区。

图 3 绘制了服务供给相对值变化的箱型图,表示高原服务供给能力的动态特征。整体而言,1995—2015 年间高原服务的供给能力呈现先稳定上升后波动下降的趋势。具体来看,以 2005 年为界,区内服务供给水平的平均值、中位数先上升后下降,2015 年的供给最高值和最低值分别居于历年最高、最低。分析原因发现,服务供给值上升主要受与人类活动密切相关的供给、文化服务增强影响,服务供给值降低则与调节、支持服务下降相关。图 2 显示 1995—2005 年间,高原服务供给高值区扩张趋势明显,原供给水平较高的川西横断山和青海东部河



注:箱型图自上而下分别为最大值、上四分位数、平均值、中位数、下四分位数、最小值。

图 3 1995—2015 年青藏高原生态系统服务供给水平变化

Fig. 3 Change of ecosystem services supply on the Qinghai-Tibet Plateau during 1995—2015

湟谷地的供给水平进一步上升,而高原北部(昆仑山和柴达木盆地)的供给低值区逐渐向供给中值区发展。而在 2005 之后,横断山区等高原东部供给高值区面积缩减,柴达木盆地东部、阿里山地等高原北部的供给低值区进一步扩张,分析发现,供给水平下降区域多为受人类活动和气候变化影响的生态敏感区,区内冻土退化、土地沙化或山地灾害较为严重。

3.2 生态系统服务需求的时空特征

图 4 将标准化的生态系统服务相对需求值按自然间断点法分为 5 个等级,结果显示青藏高原的服务需求水平存在明显的区域差异。高原北部、腹地及藏东南地区,面积辽阔、人烟稀少,服务需求极低;

高原西北边缘、东缘、南部等地的中心城镇,面积虽小,但人口聚集,对服务的需求量高。从分布范围看,需求高值区主要集中在河流谷地,主要包括:位于塔里木河上游(和田河和叶尔羌河)的新疆西南部;位于黄河流域的青海东部和甘肃南部地区(以河湟谷地为典型);长江各支流(雅鲁藏布江、金沙江、澜沧江、怒江等)流经的藏南地区;大渡河、澜沧江流经的川西及滇西北地区。

图 5 是基于图 4 服务需求相对值绘制的箱型图,用以表示高原服务需求水平的时序变化特征。可以发现,1995—2015 年间高原服务需求水平逐年增强,尤其是对应的平均值、中位数和最高值都呈现

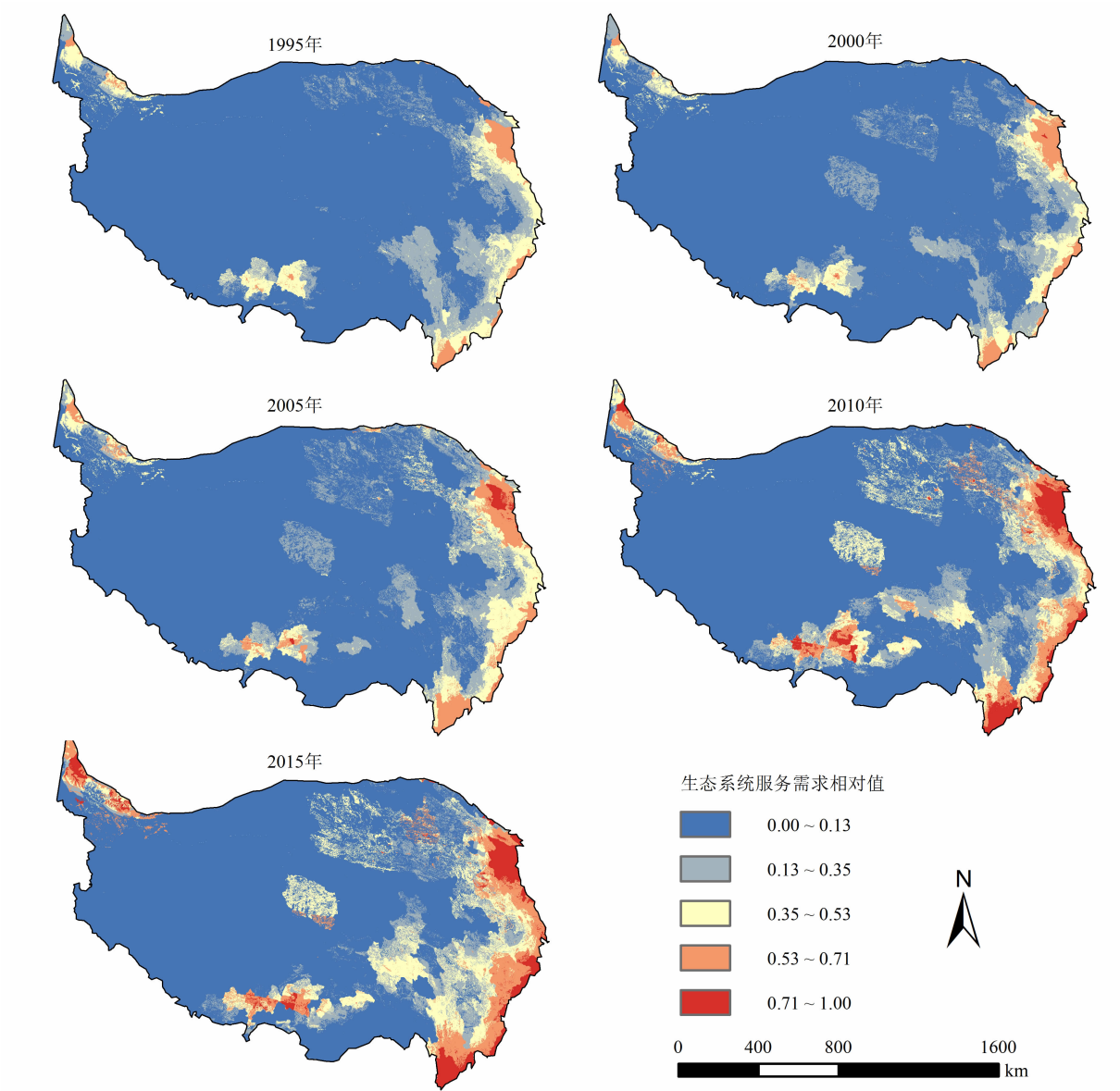
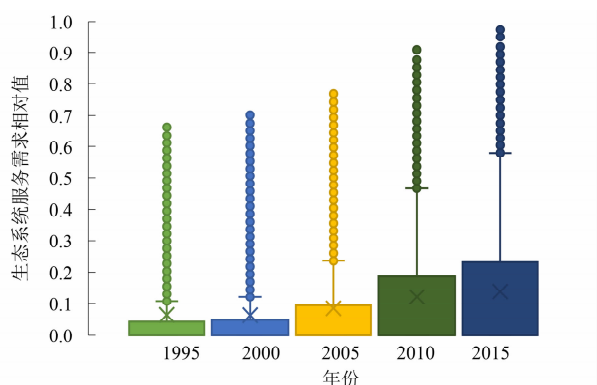


图 4 1995—2015 年青藏高原生态系统服务需求水平空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecosystem services demand on the Qinghai-Tibet Plateau during 1995—2015



注:箱型图自上而下分别表示:离群值、最大值、上四分位数、平均值、中位数、下四分位数、最小值。

图5 1995—2015年青藏高原生态系统服务需求水平变化

Fig. 5 Change of ecosystem services demand on the Qinghai-Tibet Plateau during 1995—2015

上升趋势。同时,箱形图中离群值逐年上升,间接表明研究区的服务需求分异日趋明显。图4显示,位于高原东部、南部和西北边缘的服务需求高值区正进一步向周边地区扩张,尤以青海东部、四川西部和云南南部为典型,这主要是由于上述地区人口聚集,社会经济发展较为快速,需求增势明显。而在高原北部、腹地及南部的藏东南地区,人烟稀少,一直是稳定的服务需求低值区。

3.3 生态系统服务供需盈亏的时空特征

由生态系统服务供需指数分布图(图6)可知,青藏高原南部供需指数高,高原中部、北部供需指数较低,高原西北边缘、东部、南部藏南地区的中心城镇地带供需指数极低。空间相关性分析结果显示,供需指数的 Moran's I 在 0.89 以上,且通过显著性检验,表明 1995—2015 年高原服务供需指数呈现显著的空间集聚特征。

在通过空间相关性检验后,采用热点探测方法,可进一步识别高原生态系统服务供需格局特征(图7)。其中,服务供需盈余热点区表现出服务高供给、低需求的典型供需关系,集中分布在藏东南、藏东、青海南部等高原南部,其中藏东南地区的供需盈余特征最为明显。供需赤字热点区以服务供给水平较高和人类生产、生活需求过高特征为主,集中分布在新疆西南部、青海东部、川西—滇西北等高原西北边缘和东缘地区,小范围分布在以拉萨地区为中心

的高原南部藏南地区。供需相对均衡区表现出相对均衡的服务供需关系,广泛分布在高原腹地和西部,零散分布在高原东部的祁连山西、柴达木盆地、黄河源区。

从图7的时间变化看,高原北部的生态系统服务供需赤字区呈现缩减态势,供需盈余区呈现一定的扩张趋势。如,昆仑山中段通过改善生态环境等,该区的生态系统服务供需关系在 1995—2000 年间由赤字逐渐转变为相对均衡。而受区域泥石流、山体滑坡等山地灾害的影响,川西横断山区多地出现服务供需盈余区转变为相对均衡区、供需盈余区转变为赤字区等现象。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究构建了生态系统服务供给量、需求量和供需指数测度模型,结合相关分析、热点探测等空间分析手段,首次系统分析了青藏高原生态系统服务供给能力和需求水平的时空特征及供需关系。主要结果如下:

(1)生态系统服务供给水平由高原东南部向西北部减少,在西北边缘又急剧上升。1995—2005 年间,区内服务供给能力整体趋于稳定和上升趋势,2005—2015 年间,供给水平呈现整体波动和下降态势。供给上升区主要分布在高原东缘、西北边缘的城镇,下降区集中在高原西部和东南部的生态敏感区。

(2)高原西北边缘、东缘、南部的中心城镇为生态系统服务需求高水平地区,而服务需求低值区主要分布于高原北部、腹地及南部藏东南地区。1995—2015 年间,高原服务需求量以稳定或上升变化为主,其中,2005—2015 年间高原东部的服务需求增长最为明显。

(3)高原南部的生态系统服务表现出典型的供需盈余特征,高原东缘、西北边缘的中心城镇地带为典型的供需赤字热点区,剩余的高原北部和西部则为供需相对均衡区。1995—2015 年间,高原出现供需赤字状态缓降、供需盈余面积下降的变化趋势。

4.2 讨论

鉴于青藏高原的复杂性和特殊性,相应的生态

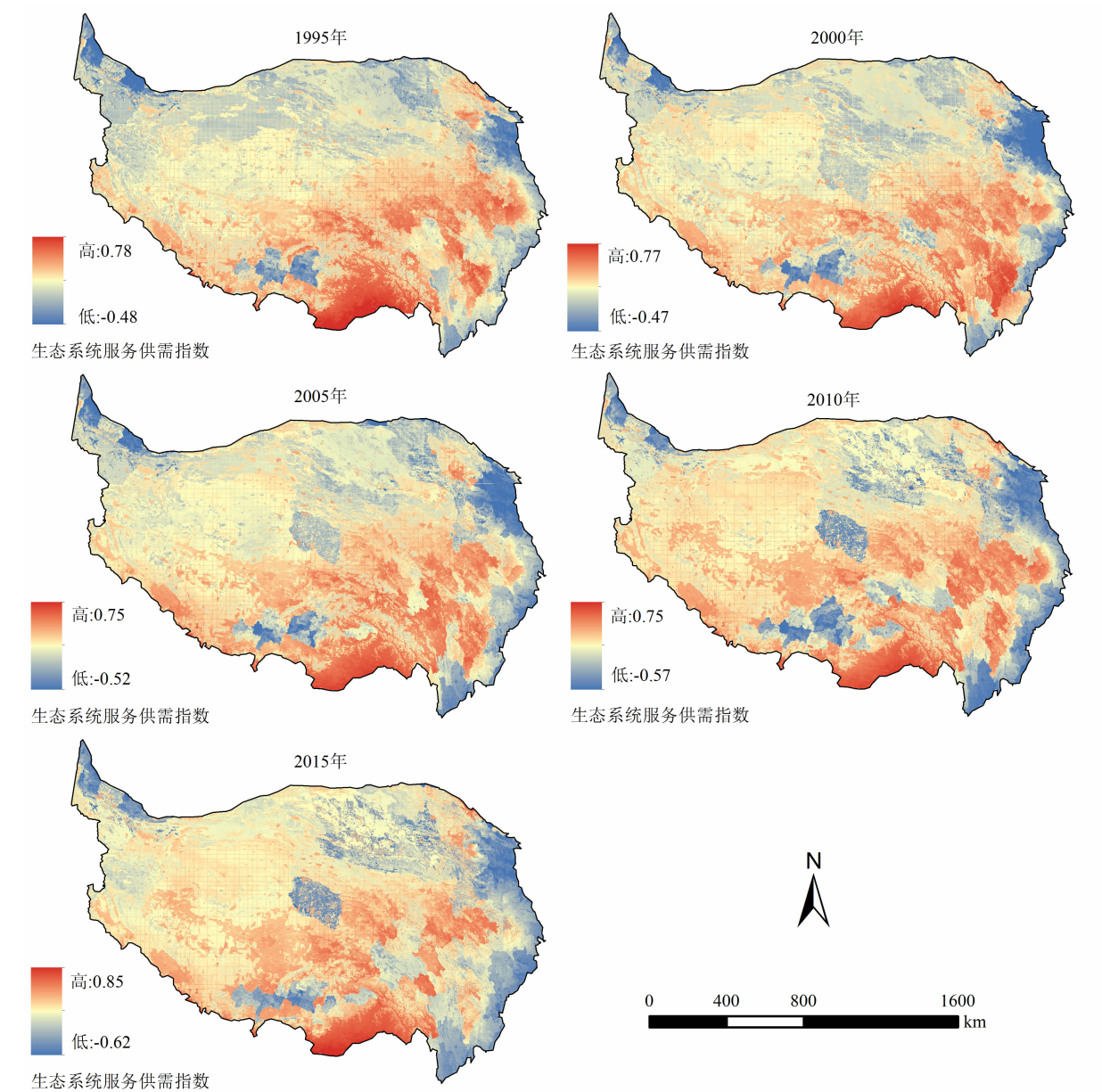


图 6 1995—2015 年青藏高原生态系统服务供需指数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of supply-demand index of ecosystem services on the Qinghai-Tibet Plateau during 1995—2015

系统服务综合评估和供需研究成果有限,本文通过参考过往的生态系统服务量化研究,系统评估了青藏高原生态系统服务的供给量、需求量和供需关系。一方面,本研究选择冻土稳定支撑、温湿调节等服务类型,尽量弥补以往青藏高原生态系统服务供给研究对冻土、冰川等冰冻圈要素的忽略,但对关键服务的筛选、方法的选择是否科学,仍然有待后续的对比研究和实地调研。另一方面,基于社会经济指标的生态系统服务需求算法,存在一定程度的不确定性和有限性,同时很难做到对各类生态系统服务需求

的定量,因此,修正当前的生态系统服务需求算法是今后有待解决的难点。

通过研究生态系统服务发生明显变化的地区,可以间接推断气候变暖、人类活动对青藏高原生态系统服务的影响。一方面,在冻土退化、土地沙化或山地灾害等生态系统严重退化地区,服务供给水平下降明显;另一方面,在人类活动频繁地区,可供应的供给、文化服务水平提升明显,对区内生态系统服务的综合需求程度呈现增长趋势,但这可能会以影响区域支持、调节服务的可持续供给为代价,进而在

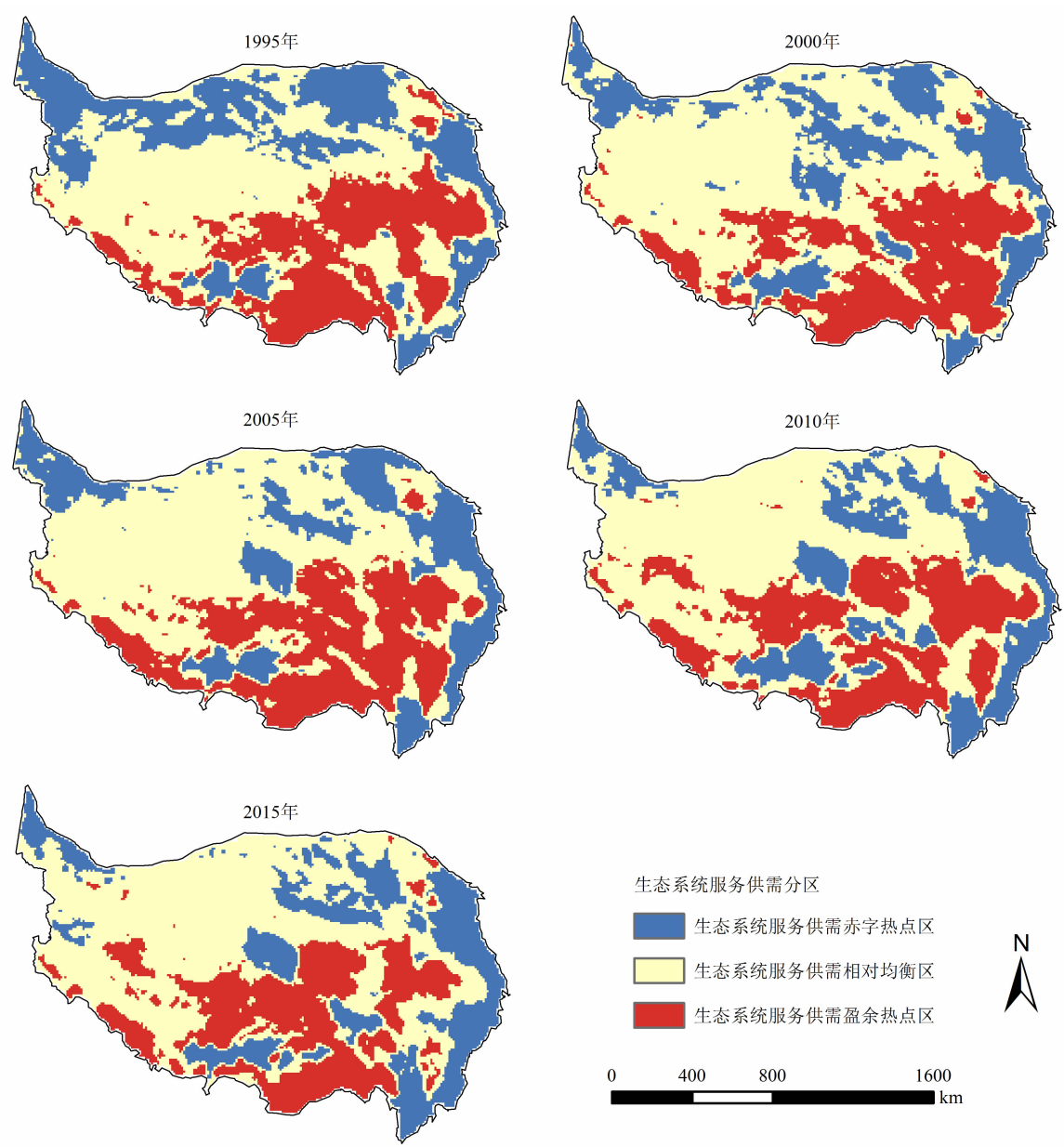


图 7 青藏高原生态系统服务供需盈亏热点空间分布

Fig. 7 Hotspot regions of ecosystem services supply-demand surpluses and deficits on the Qinghai-Tibet Plateau

未来削弱区域生态系统服务的综合供给水平。而识别青藏高原生态系统服务的影响机制,精确分析服务变化的原因,还需结合后续的量化研究。

综上,在本文已初步形成较为系统的生态系统服务供需评估方法的基础上,未来应考虑进一步完善生态系统服务供需核算方法,并开展对各类生态系统服务的供需关系和驱动机制分析,进而为青藏高原地区生态保护与区域发展提供有益参考和可实施的具体措施。

致谢:感谢中国科学院寒区环境与工程研究所

宜树华研究员、吴通华研究员为本文提供的数据支持!感谢中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所方一平研究员为本研究提供的宝贵建议!

版权申明:本文是第一作者硕士学位论文《生态系统服务动态评估与区划方案研究——以青藏高原为例》的相关研究,采用了学位论文的基础数据,但在研究方法和内容上更侧重于对生态系统服务供需数量与时空特征的解析。硕士论文版权归属原培养单位:中国科学院城市环境研究所。特此申明。

参考文献 (References)

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253 – 260.
- [2] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式 [J]. *地理学报*, 2011, **66**(12): 1618 – 1630. [LI Shuangcheng, LIU Jinlong, ZHANG Caiyu, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(12): 1618 – 1630]
- [3] 郭朝琼, 徐昔保, 舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展 [J]. *生态学报*, 2020, **39**(6): 2086 – 2096. [GUO Chaoqiong, XU Xibao, SHU Qiang. A review on the assessment methods of supply and demand of ecosystem services [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(6): 2086 – 2096.
- [4] RUDOLF S G, MATTHEW A W, BOUMANS R J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services [J]. *Ecological Economics*, 2002, **41**(3): 393 – 408.
- [5] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystem and human well-being: synthesis [M]. Washington, D C: Island Press, 2005: 7 – 8.
- [6] PENA L, CASADO-ARZUAGA I, ONAINDIA M. Mapping recreation supply and demand using an ecological and a social evaluation approach [J]. *Ecosystem services*, 2015, **13**: 108 – 118.
- [7] AYANU Y Z, CONRAD C, NAUSS T, et al. Quantifying and mapping ecosystem services supplies and demands: a review of remote sensing applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8529 – 8541.
- [8] 彭建, 杨畅, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区 [J]. *生态学报*, 2017, **37**(13): 4562 – 4572. [PENG Jian, YANG Yang, XIE Pan, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(13): 4562 – 4572]
- [9] BURKHARD B, KANDZIORA M, YING Hou, et al. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification [J]. *Landscape Online*, 2014, **34**: 1 – 32.
- [10] EGARTER V L, DEPELLEGRIN D, PEREIRA P, et al. Mapping the ecosystem service delivery chain: Capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 422 – 436.
- [11] 欧维新, 王宏宁, 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 [J]. *生态学报*, 2018, **38**(17): 6337 – 6347. [OU Weixin, WANG Hongning, TAO Yu. A land cover-based assessment of ecosystem services supply and demand dynamics in the Yangtze River Delta region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(17): 6337 – 6347]
- [12] 石忆邵, 史东辉. 洞庭湖生态经济区生态服务供需平衡研究 [J]. *地理研究*, 2018, **37**(9): 1714 – 1723. [SHI Yishao, SHI Donghui. Study on the balance of ecological service supply and demand in Dongting Lake ecological economic zone [J]. *Geographical Research*, 2018, **37**(9): 1714 – 1723]
- [13] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估 [J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(2): 189 – 196. [XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(2): 189 – 196]
- [14] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设 [J]. *地理学报*, 2012, **67**(1): 3 – 12. [SUN Honglie, ZHENG Du, YAO Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(1): 3 – 12]
- [15] 程琳琳, 黄婷, 刘焱序. 基于改进价值当量因子的 1992—2015 年青藏高原生态系统服务价值演化分析 [J]. *水土保持通报*, 2019, **39**(5): 242 – 248. [CHENG Linlin, HUANG Ting, LIU Yanxu. Analysis on evolution of ecosystem services value in Qinghai-Tibet Plateau based on improved value equivalent factors from 1992 to 2015 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(5): 242 – 248]
- [16] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 等. 青藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征 [J]. *自然资源学报*, 2016, **31**(4): 543 – 555. [HUANG Lin, CAO Wei, WU Dan, et al. The temporal and spatial variations of ecological services in the Tibet Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(4): 543 – 555]
- [17] 于格, 鲁春霞, 谢高地, 等. 基于 RS 和 GIS 的青藏高原草地生态系统土壤水分保持功能及其经济价值评估——以生长季为例 [J]. *山地学报*, 2006, **24**(4): 498 – 503. [YU Ge, LU Chunxia, XIE Gaodi, et al. Water holding capacity of grassland ecosystem and their economic valuation in Qinghai-Tibetan Plateau based on RS and GIS [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(4): 498 – 503]
- [18] YI Shuhua, WANG Xiaoyun, QIN Yu, et al. Responses of alpine grassland on Qinghai-Tibetan plateau to climate warming and permafrost degradation: a modeling perspective [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**(7): 074014.
- [19] 效存德, 王世金, 秦大河. 冰冻圈服务功能及其价值评估初探 [J]. *气候变化研究进展*, 2016, **12**(1): 45 – 52. [XIAO Cunde, WANG Shijin, QIN Dahe. A preliminary study on cryosphere service function and its value estimation [J]. *Climate Change Research*, 2016, **12**(1): 45 – 52]
- [20] 吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性 [J]. *科学通报*, 2013, **58**(2): 115 – 130. [WU Qingbai, NIU Fujun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(2): 115 – 130]

- [21] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, **19**(5): 607–613. [OU YANG Zhiyun, WANG Xiaoke, MIAO Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, **19**(5): 607–613]
- [22] HJ/T 192–2006. 生态环境状况评价技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. [HJ/T 192–2006. Technical specification for eco-environmental assessment [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006]
- [23] 龚诗涵,肖洋,郑华,等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, **37**(7): 2455–2462. [GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(7): 2455–2462]
- [24] WANG Jiyan, LI Ainong, BIAN Jinhu. Simulation of the grazing effects on grassland aboveground net primary production using DNDC model combined with Time-Series remote sensing data—a case study in Zoige plateau, China [J]. Remote Sensing, 2016, **8**(3): 168.
- [25] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(8): 1243–1254. [XIE Gaode, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, **30**(8): 1243–1254]
- [26] VILLAMAGNA A M, ANGERMEIER P L, BENNETT E M. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery [J]. Ecological Complexity, 2013, **15**: 114–121.
- [27] 郭椿阳,高建华,樊鹏飞,等. 基于网格尺度的永城市土地利用转型研究与热点探测[J]. 中国土地科学, 2016, **30**(4): 43–51. [GUO Chunyang, GAO Jianhua, FAN Pengfei, et al. Land use transition and hotspots detection in Yongcheng City based on the grid scale [J]. China Land Science, 2016, **30**(4): 43–51]
- [28] STEINER F, MCSHERRY L, COHEN J. Land suitability analysis for the upper Gila River watershed [J]. Landscape and Urban Planning, 2000, **50**(4): 199–214.

Spatiotemporal Distribution Characteristics and Supply-Demand Relationships of Ecosystem Services on the Qinghai-Tibet Plateau, China

XU Lingxing^{1,2}, YANG Dewei^{1,3*}, LIU Dandan⁴, LIN Haoxi^{2,5,6}

(1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, Fujian, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

4. College of Tourism, Huaqiao University, Quanzhou 362021, Fujian, China;

5. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

6. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Under the backgrounds of global climate change and fragile alpine environment, any anthropogenic disturbance will impact the functional stability of ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau, China (QTP). These ecosystem degradations exert strong influences on ecosystem functions, and further threaten the supply of human well-being on the QTP. To achieve sustainable and resilient ecosystem management, an appropriate quantification and related spatial visualization of ecosystem service supply and demand are increasingly needed for the QTP. Thus, a measurement model of supply-demand relationship and spatial analysis methods, i. e., correlation analysis and hot spot detection, were proposed in this study to investigate the characteristics of supply distribution, demand distribution, and supply-demand relationship of ecosystem services during 1995–2015 on the QTP. The results showed that: (1) The ecosystem services supply gradually decreased from the southeast to the northwest, and rose

sharply on the northwestern edge of the QTP. The supply level of ecosystem services was mainly stably rising from 1995 to 2005, while showed the declining fluctuations from 2005 to 2015. (2) The high-level areas of ecosystem services demand were concentrated in the central cities on the northwestern, eastern, and southern edges of the QTP, and the low-demands areas were concentrated on the northern, the hinterland, and the southeastern QTP. From 1995 to 2015, the demand level of ecosystem services remained stable on the northern and the hinterland of the QTP, and increased significantly on the eastern QTP. (3) The supply-demand surplus hotspots of ecosystem services were concentrated on the southern QTP; The deficit hotspots were in central cities on the eastern edges and northwestern of the QTP, while the relative balance areas were located on the northern and hinterland QTP. During 1995 – 2015, the areas reduction of supply-demand deficit and surplus hotspots were observed in the QTP. Our results could provide a useful reference for ecological protection and regional development of the QTP, and contribute to the systematic evaluation and sustainable management of ecosystem services for different alpine ecosystem in the cryosphere.

Key words: ecosystem service; supply-demand relationships; spatiotemporal pattern; Qinghai-Tibet Plateau