

陕北黄土高原生态系统服务供需格局及其演变

陈泓文, 巩杰

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:为探究陕北黄土高原生态系统服务供需格局及其时空变化,利用2000—2015年陕北黄土高原土地利用和相关地理数据等,在定量评估生态系统服务供给和需求的基础上,构建生态系统服务供需综合参数,分析了研究区生态系统服务供需格局及其变化。结果表明:(1)2000—2015年研究区各类供给服务数量均有所增加,但生态系统服务的供给格局总体变化不大;其中供给服务增幅最大(22.05%),调节服务增幅最小(2.41%);供给呈现为北部高值、中部中值、中东部较低值和中部偏北低值格局。(2)生态系统服务需求逐年增加,但整体生态系统服务需求格局大体保持不变。增幅最大的影响因素是GDP总量(20.93倍),最小的是人口总量(1.17倍);研究期间,生态系统服务需求大体保持南部和中东部以低需求和较低需求类型为主、中西部以中需求和较高需求为主、北部以高需求为主的格局。(3)综合研究区生态系统服务供需整体状况,形成4种生态系统服务供需类型和4种演变方式。综上,2000—2015年陕北黄土高原区生态系统服务供需均有所增加,但供需格局大体保持一致。

关键词:生态系统服务供给;生态系统服务需求;供需格局;陕北黄土高原

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0226-07

Supply and Demand Pattern of Ecosystem Services and Its Change in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province

CHEN Hongwen, GONG Jie

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to reveal the distribution pattern and its spatiotemporal change of ecosystem services supply and demand in the Loess Plateau in northern Shaanxi Province, the ecosystem service supply and demand of the study area was quantitatively assessed and mapped via the land use and related geographical data from 2000 to 2015, the ecosystem services supply and demand integrated index was constructed, and the change pattern of the ecosystem service supply and demand was analyzed. The results show that: (1) the quantities of various supply services in the study area have increased, while the whole ecosystem service supply pattern was not changed obviously; from 2000 to 2015, the increase of supply services was obvious (22.05%), and the increase of regulation services was small (2.41%); during the study period, the ecosystem service supply maintained a pattern of high value in the north, median value in the middle, lower value in the middle and eastern part, and the lowest value in the mid-north; (2) the demand for ecosystem services has increased year by year, but the total supply pattern of ecosystem services was no obvious change; the largest increase was the total GDP (20.93), and the smallest was the total population (1.17); during the study period, the demand for ecosystem services generally maintained a pattern of lowest and lower demand in the south and mid-east, medium and higher demand in the central and western regions, and highest demand in the north; (3) comprehensively considering the overall characteristics of the supply and demand of ecosystem services in the study area, four types of ecosystem service supply and demand and four change modes were formed. In conclusion, the supply and demand of ecosystem services increased finally with little change of the spatial pattern in the Loess Plateau in northern Shaanxi Province from 2000 to 2015.

收稿日期:2020-10-28

修回日期:2020-12-08

资助项目:国家自然科学基金重大项目“中国北方干旱半干旱区敏感生态系统对气候变化的适应性与应对策略”(4179420015)

第一作者:陈泓文(2000—),女,陕西西安人,本科在读,研究方向为自然地理学。E-mail:chenhw18@lzu.edu.cn

通信作者:巩杰(1975—),男,甘肃宁县人,理学博士,教授,主要从事景观生态学、生态系统服务、环境遥感与生态评价研究。E-mail:jgong@lzu.edu.cn

Keywords: ecosystem service supply; ecosystem service demand; supply and demand pattern of ecosystem service; Loess Plateau in northern Shaanxi Province

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是未来地球、地球观测生物多样性观测网络(GEO-Bon)、生物多样性和生态系统服务政府间平台(IPBES)等国际科学计划的核心研究内容之一^[1-3]。其中,生态系统服务供需的时空变化是 ES 研究的重要内容^[4-7],而生态系统服务供需关系时空变化研究已成为新的研究热点^[8-11]。通过探讨生态系统服务供需格局及其演变的研究,对于有效提升生态系统服务供给质量、改善区域生态系统服务具有重要意义。

目前,ES 供需研究主要集中在 ES 供给和需求的量化、供给与需求关系等方面。定量评估 ES 供给和需求的方法主要有生态系统服务价值量^[12-14]和生物物理指标法^[15-17]。生物物理指标法可反映各类 ES 的生态学意义,但对所有 ES 类型的空间整合难度较大,且模型参数确定较为繁琐,往往采用单一时间断面的静态分析;而价值量法虽然模糊了各类 ES,但可对所有类型服务进行空间整合,且方法较为简单。从供需整体的视角来分析生态系统服务供需格局是目前的研究热点。相关研究多采用两种方式:一是采用主观打分的方式对 ES 的供给与需求进行评估^[18-19],二是采用客观定量方法评估 ES 供给与需求^[20-22]。主观打分法所需数据较少,方法简单易行,但主观性较大,往往进行静态分析;客观评估法所需数据较多,但较为客观,可进行 ES 时空变化研究。由于缺乏数据支持以及供需平衡分析的理论,生态系统服务供需关系的研究比较零散^[2,23]。已有学者基于 Z-score 标准化方法探讨供需空间分异、供需失衡等方面^[7,20,24],为生态系统服务供需关系的研究提供了有益的借鉴。陕北黄土高原是退耕还林工程的重点实施区域,近年来社会经济也发生显著变化。目前,探讨和分析黄土高原 ES 的研究主要集中在 ES 的供给等方面,虽有部分学者对该区的生态系统服务需求进行研究^[25-26],但对该区生态系统服务供需格局及其变化的研究还不多见。该区社会经济和自然环境的变化,是否影响到该区 ES 的供给和需求?如果有影响,供需的格局发生了什么变化?

因此,本文拟以陕北黄土高原为例,基于价值当量法计算生态系统服务供给,基于构建的生态系统服务需求参数评估生态系统服务需求;在此基础上,分析该区生态系统服务供需的时空分异;利用构建的生态系统服务供需综合参数,分析研究区 ES 的供需格局及其演变,并给出未来的研究方向。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

陕北黄土高原(35°02'—39°35'N, 107°15'—110°15'E),是黄土高原与内蒙古高原的过渡区,地势整体呈西北高、东南低,处于暖温带大陆性季风半湿润气候向温带半干旱气候过渡区,年均温 8~12℃,年平均降水量 350~600 mm。按照地形地貌可将其分为北部风沙草滩区、中部黄土丘陵沟壑区、南部梁状低山丘陵区。该区包括榆林、延安两个地级市的 25 县(市/区)。研究区现有 612.93 万人, GDP 总量为 3 821.54 亿元,社会消费品零售总额为 637.49 亿元(2015 年)。同时,该区也是国家重点生态功能区—黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区,经过近 15 a 的退耕还林,该区耕地、水域和未利用土地有较大减少,林地、草地和水域面积有较大增加。其中,耕地从 2000 年的 28 416.74 km²减少到 2015 年的 25 404.78 km²,水域则从 638.78 km²减少到 615.56 km²,未利用土地从 4 630.44 km²减少到 4 554.45 km²;林地从 2000 年的 10 988.69 km²增加到 2015 年 12 167.63 km²,草地从 34 691.45 km²增加到 36 089.24 km²,建设用地从 297.67 km²增加到 1 032.32 km²(中国西部环境与生态科学数据中心)。退耕还林工程对该区域的生态环境影响较大,加之该区社会经济变化显著,为分析和探讨生态系统服务供需格局及其变化提供了良好的平台。

1.2 数据来源

本研究数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心的陕西省 2000 年、2015 年 1:10 万土地利用矢量数据集,精度达 95%以上;参照土地利用现状分类标准和相关研究成果^[27-28],去掉不提供生态服务的建设用地与提供 ES 较少的未利用土地,仅保留耕地、林地、草地、水域 4 种土地利用类型。社会经济数据,如 GDP 总量、社会消费品零售总额、人口总量均来自研究区对应年份的统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务供给计量方法 借鉴谢高地等^[28]提出的价值当量换算法确定研究区域生态系统服务价值当量表,采用以研究区单位面积粮食产量与全国单位面积粮食产量之比确定陕西省生态系统服务价值当量的修正系数为 0.82,进而得到陕西单位面积生态系统服务价值当量(表 1)。具体方法如下:

$$EV=\sum_{i=1}^nA_i\cdot UV_i\tag{1}$$

式中:EV 为研究区生态系统服务总价值即生态系统服务总供给;*i* 为用地类型;*A_i* 为第 *i* 种用地类型的面积;*UV_i* 为第 *i* 种用地类型的单位面积价值。通过公式(1)得到陕西单位面积生态系统服务价值当量表(表 1)。本文未将建设用地和未利用土地纳入表 1,主要是因为建设用地几乎不产生生态系统服务,而研究区未利用土地面积较小,且价值当量低,其提供的服务价值仅为耕地的 17.59%,草地的 11.9%,水域的 3.13%。

表 1 陕北单位面积生态系统服务价值
元/hm²

| 一级类型 | 二级类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 |
|------|--------|----------|----------|----------|-----------|
| 供给服务 | 食物生产 | 3798.93 | 810.07 | 1061.47 | 2234.67 |
| | 原料生产 | 251.40 | 1843.60 | 1564.27 | 642.47 |
| | 水资源供给 | -7346.46 | 949.73 | 865.93 | 23156.71 |
| 调解服务 | 气体调节 | 3100.60 | 6061.53 | 5502.86 | 2150.86 |
| | 气候调节 | 1592.20 | 18156.65 | 14553.25 | 6396.73 |
| | 净化环境 | 474.87 | 5391.13 | 4804.53 | 15502.98 |
| | 水文调节 | 7597.86 | 13240.38 | 10670.52 | 285590.10 |
| 支持服务 | 土壤保持 | 27.93 | 7402.32 | 6703.99 | 2597.80 |
| | 维持养分循环 | 530.73 | 558.67 | 502.80 | 195.53 |
| | 生物多样性 | 586.60 | 6731.93 | 6089.46 | 7122.99 |
| 文化服务 | 美学景观 | 251.40 | 2960.93 | 2681.60 | 5279.39 |

1.3.2 生态系统服务需求计量方法 借鉴彭建^[20]和 Gu^[21]等研究,本文选取人口总量、GDP 总量、居民消费强度等指标反映 ES 需求,其中居民消费强度以居民消费水平表征,该指标引自统计年鉴。为降低某些区域部分指标过高而对研究结果可能的影响,参考已

表 2 研究区生态系统服务价值及其占比

| ES 类型 | 2000 年 | | 2005 年 | | 2010 年 | | 2015 年 | |
|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | 价值/亿元 | 占比/% | 价值/亿元 | 占比/% | 价值/亿元 | 占比/% | 价值/亿元 | 占比/% |
| 供给服务 | 83.69 | 2.66 | 91.85 | 2.87 | 103.63 | 3.16 | 102.14 | 3.14 |
| 调节服务 | 2264.04 | 71.98 | 2296.53 | 71.65 | 2329.58 | 71.09 | 2318.58 | 71.19 |
| 支持服务 | 661.61 | 21.03 | 677.51 | 21.14 | 700.03 | 21.36 | 693.83 | 21.31 |
| 文化服务 | 136.08 | 4.33 | 139.24 | 4.34 | 143.63 | 4.39 | 142.44 | 4.36 |
| 合计 | 3145.42 | 100.00 | 3205.13 | 100.00 | 3276.87 | 100.00 | 3256.99 | 100.00 |

2000—2015 年陕北黄土高原 ES 供给价值的整体格局大体保持不变。为便于分析,本文依照自然断点法对上述年份进行类型划分,可将 ES 划分为 5 种类型:低、较低、中、较高和高(图 1)。由图 1 可知,2000—2015 年陕北黄土高原 ES 供给的整体格局为:高值区主要分布在研究区北部,西部和南部有零星分布,中值区主要集中在研究区中部,较低值区主要集中在研究区的中东部,低值区则零星分布在研究区中部偏北。

有研究,通过取对数使计算结果更加平稳^[20-21]。方法如下:

$$ES_d=\lg D_{i1}\times\lg D_{i2}\times\lg D_{i3}\tag{2}$$

式中:ES_d 为各评价单元的生态系统服务需求总量;*D_{i1}* 为地均 GDP;*D_{i2}* 为人口密度;*D_{i3}* 为消费强度。

1.3.3 生态系统服务供需综合参数(ESSDC) 借助 Z-score 方法进行标准化处理,消除数据量级带来的影响,确保数据间的可比性。在此基础上,引入生态系统服务供需综合参数,对研究区生态系统服务供需类型进行划分,以此探讨 ES 供需格局及其变化。ESSDC 是区域生态系统服务供给和生态系统服务需求之间的比值,即:

$$ESSDC=\frac{EV_i}{ES_{di}}\tag{3}$$

式中:EV_{*i*} 为区域 *i* 的生态系统服务总价值,即生态系统服务总供给;ES_{*di*} 为区域 *i* 的生态系统服务的总需求。

2 结果与分析

2.1 研究区生态系统服务供给时空分异

2000—2015 年,陕北黄土高原 4 类服务总量在增加,且调节服务所占比例最大。从表 2 中可以看出:2010 年 4 类服务及其总量达到最大,尽管 2015 年有所减少,但与 2000 年相比,各类服务及其总量均有较大增加。同时,4 类服务虽然在 4 个年份中所占的比例有所变化,但调节服务所占比例均超过了 70%,且从大到小的顺序没有改变,即保持调节服务、支持服务、文化服务和供给服务的次序。

2.2 研究区生态系统服务需求时空分异

2000—2015 年研究区生态系统服务需求各个参数增加明显。由表 3 可以看出,除人口总量保持较低的平稳增长外(1.17 倍),GDP 总量、社会消费品零售总额和生态系统服务需求均有较大变化。其中,GDP 总量增幅最大,与 2000 年相比,2015 年约为期初的 20.93 倍,社会消费品零售总额约为 15.91 倍。受 GDP 总量、社会消费品零售总额较大变化的影响,生态系统服务需求增长约为期初的 3.4 倍。

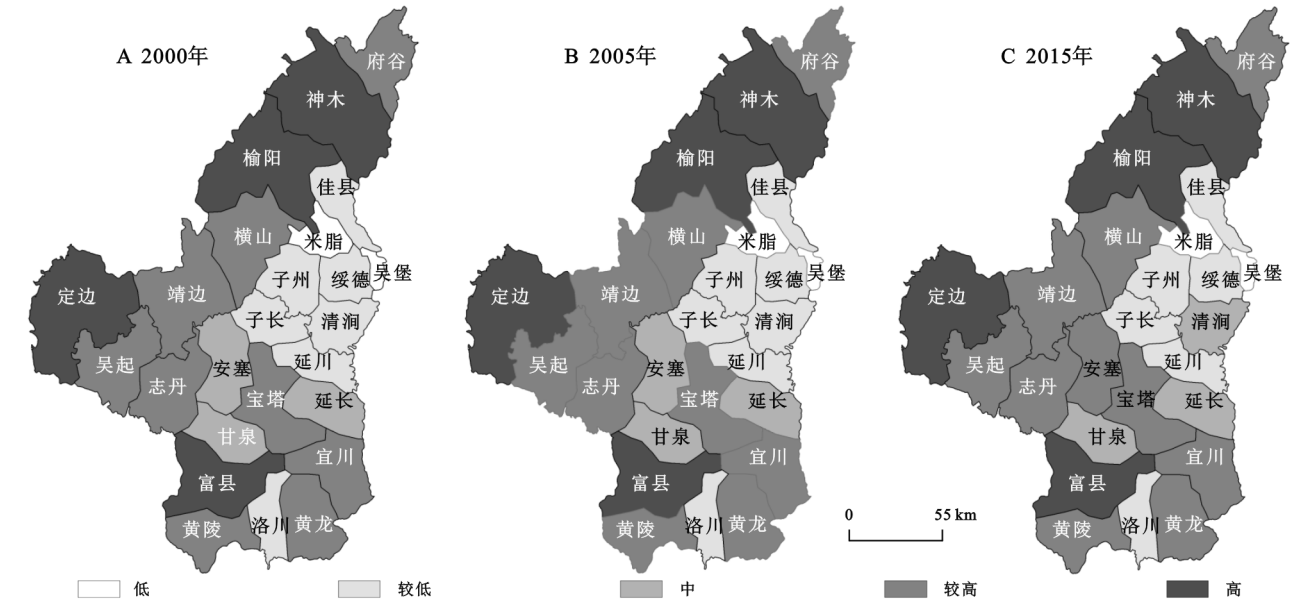


图 1 研究区生态系统服务供给类型

| 需求参数 | 2000 年 | 2005 年 | 2010 年 | 2015 年 |
|-------------|---------|---------|----------|----------|
| GDP 总量/亿元 | 182.62 | 691.35 | 2642.44 | 3821.54 |
| 人口总量/人 | 5226740 | 5490622 | 5947168 | 6129282 |
| 社会消费品零售额/万元 | 400653 | 1176442 | 3086685 | 6374966 |
| 生态系统服务需求 | 4924.13 | 8859.97 | 14356.53 | 16672.61 |

表 3 研究区生态系统服务需求及参数值

体保持不变(图 2);研究区南部和中东部以低需求和较低需求类型为主,中西部以中需求和较高需求为主,北部以高需求为主。但从研究区整体看,生态系统服务需求呈现整体增加的趋势,主要表现在低和较低需求类型的县(市/区)减少,中等和较高类型区域增加。生态系统服务需求类型变化在研究区中部和南部表现较为明显。

2000—2015 年生态系统服务需求的空间格局大

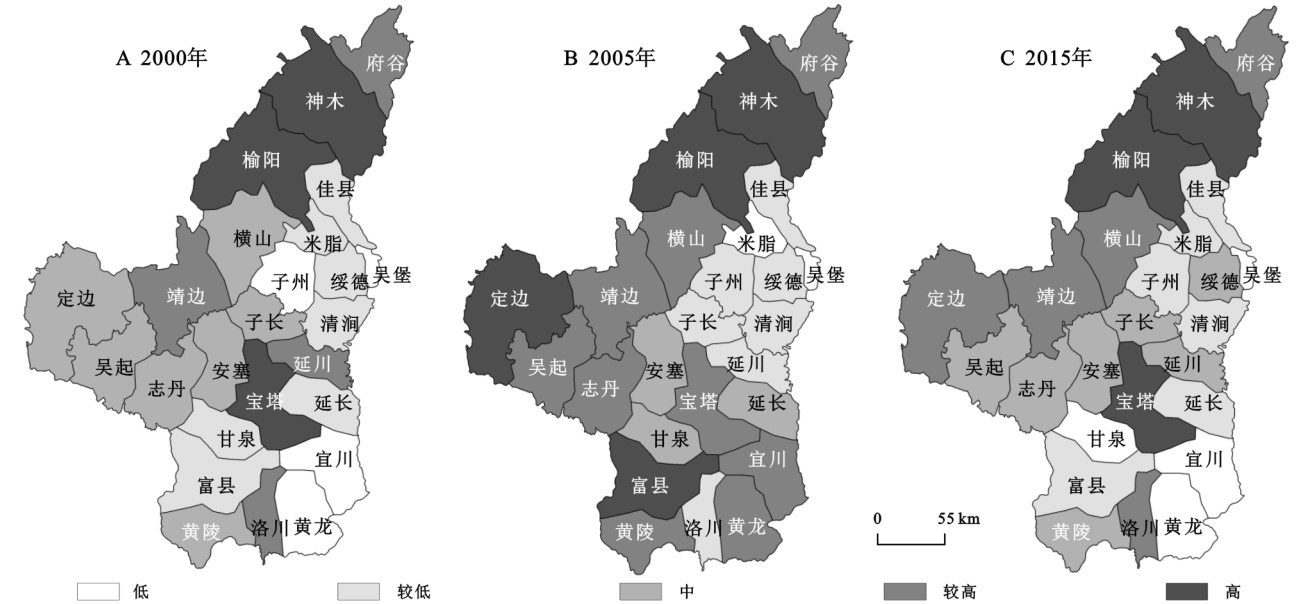


图 2 研究区生态系统服务需求类型

2.3 研究区生态系统服务供需格局及其演变

为从供给与需求整体上探讨研究区生态系统服务时空分异,本文首先通过 Z-score 方法对生态系统服务供需数据进行标准化,得到研究区 2000 年、2005 年和 2015 年生态系统服务供需特征表;其次,基于公式(3)计算生态系统服务供需综合参数;最后,基于上述计算结果对研究区生态系统服务供需类型进行划

分,以此探讨其供需格局及其变化。

表 4 为研究期间保持供需特征一致的县(市/区)表。陕北黄土高原共有 25 个县(市/区),有 20 个县(市/区)的供需特征保持不变(表 4),因此,研究区整体的供需特征大体保持一致。由表 4 可以看出:

(1) 类型 I 和类型 IV 中的县(市/区)ES 的供给特征一致,ES 的需求特征相反。两种类型的县(市/区)均拥

有较大面积的林草地;类型Ⅰ有较大面积的草地,类型Ⅳ有较大面积的林地,使得其 ES 的供给大于研究区供给的平均水平;与类型Ⅳ相比,类型Ⅰ中的县(市/区)在研究期间社会经济发展迅速,ES 的需求增幅较大;

表 4 研究区各县(市/区)ES 供需类型特征

| 类型名称 | 县(市/区)名称 | ES 供给特征 | ES 需求特征 |
|------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Ⅰ | 府谷、榆阳、横山、宝塔区、靖边县、神木县、定边县、志丹县 | $S_i > \bar{S}$ | $D_i > \bar{D}$ |
| Ⅱ | 洛川 | $S_i < \bar{S}$ | $D_i > \bar{D}$ |
| Ⅲ | 佳县、子洲、绥德、米脂、吴堡、清涧、延长 | $S_i < \bar{S}$ | $D_i < \bar{D}$ |
| Ⅳ | 富县、宜川、吴起、黄龙 | $S_i > \bar{S}$ | $D_i < \bar{D}$ |

注: S_i 和 D_i 分别为 i 县(市/区)ES 的供给和需求; \bar{S} 和 \bar{D} 分别为研究区 ES 平均供给和平均需求。

(2) 类型Ⅱ和类型Ⅲ中的县(市/区)ES 的供给特征一致,ES 的需求特征相反。两种类型的县(市/区)拥有的林草地面积较少,使得其 ES 的供给小于研究区供给的平均水平;与类型Ⅲ相比,类型Ⅱ中的县(市/区)在研究期间社会经济发展迅速,尤其是苹果产业发展迅速,使得其 ES 的需求增幅较大。

为了解研究区 2000—2015 年生态系统服务供需格局的演变,依据各县(市/区)在 ES 供给和需求方面的变化和特征,总结出该区生态系统服务供需格局及其演变特征:

(1) 2000 年、2005 年和 2015 年生态系统服务时空格局大体保持一致(图 3A)。主要是因为研究区西部和北部林草地面积大,加之该区大部分县市持续高速增长的 GDP 总量和社会消费品零售总额,形成生态系统服务供给与需求均大于或等于研究区平均水平的区域;研究区的中东部属于黄土丘陵沟壑区,生态环境较差,同时该区 GDP 总量和社会消费品零售总额增长较快,由此形成需求高于平均水平,而供给小于平均水平的区域;研究区南部虽然林草地面积大生态环境良好,但该区 GDP 总量和社会消费品零售总额增长较少,则形成供给大于平均水平,而需求小于研究区平均水平的区域。

(2) 2000 年、2005 年和 2015 年生态系统服务格局演变大体有 4 种方式:方式 a 为供需均有较大增加;方式 b 为需求略有增加,供给有较大增加;方式 c 为需求有较大增加,供给略有增加;方式 d 为供需均略有增加。4 种方式的空间分布见图 3B;方式 a 的各县(市/区)退耕还林较多,林草地面积有较大增加;同时,这些区域的社会经济有长足发展,GDP 总量和社会消费品零售总额的增幅较大;方式 b 的各县(市/区)与方式 a 较为类似,退耕还林较多,林草地面积有较大增加,ES 供给有较大增加,但上述区域 GDP 总量、社会消费品零售总额虽有所增加,但幅度较小;方式 c 的各县(市/区)林地、草地和水域面积较大,退耕还林政策影响较小,但上述区域 GDP 总量和社会消

费品零售总额的增长幅度较大;方式 d 的各县(市/区),林草地覆盖率较高,退耕还林政策影响较小,且 GDP 总量和社会消费品零售总额的增长幅度较小。

依据研究区 ES 供需类型及其演化方式,对该区主要类型县(市/区)的生态系统服务供需提出相应的对策和措施:

类型Ⅰ中的(市/区),其生态系统服务格局演化大多采用方式 b、方式 c 和方式 d,建议在保持 ES 供给适度增长的基础上,进一步提升其 ES 需求的增长幅度。这主要是因为该类县市生态环境已有较大改善,加之资源较为丰富,可保持 ES 需求较大增长。

类型Ⅱ仅有洛川县,其生态系统服务格局演化采用方式 d,建议在保持 ES 供给适度增长的基础上,进一步提升和完善其苹果产业,提升 ES 的需求增长幅度。这主要是因为该县生态环境已有较大改善,加之苹果产业还有较大提升空间,可保持 ES 需求较大增长;

类型Ⅲ中的县(市/区),其 ES 格局演化大多采用方式 a 和方式 b,建议在保持 ES 供给适度增长的基础上,适当放缓 ES 需求的增长幅度。主要是因为该类区域大规模退耕还林工作基本停止,ES 供给大幅度提升状况也趋于停止。保持适度 ES 需求的增长,有利于该类县(市/区)的可持续发展。

类型Ⅳ中的县(市/区),其生态系统服务格局演化大多采用方式 a 和方式 c,建议在保持现有 ES 供给的基础上,进一步提升其 ES 需求的增长幅度。主要是因为该类县(市/区)生态环境较好,ES 需求提升的空间较大。

3 讨论

目前,生态系统服务价值当量法^[28-29]多用于区域及全球尺度 ES 价值的评估,本文依据研究区的实际情况修正了参数,结果表明生态系统服务价值当量法也适用于中小尺度生态系统价值的评估。同时,本文从研究区 ES 供给、需求及供需整体视角,基于生态系统服务供需综合参数,探讨和分析该区生态系统服

务供需格局及其演变。研究发现:该区社会经济和自然环境的变化,虽然影响到该区 ES 的供给和需求的数量,但对 ES 供需格局的影响较小。其中,ES 供给的数量和格局的变化主要受土地利用数量和格局的变化。研究期间,研究区林草地面积的数量有较大变化,但林草地总体格局大体保持一致。这与研究区各个县(市/区)坡耕地数量和退耕还林规模有较大联系;ES 需求的数量和格局与需求所选指标和不同县(市/区)资源禀赋、社会经济发展状况相关。类型 I

所包含的 8 个县(市/区)均资源禀赋较好,有较为优越的煤炭、石油和天然气资源;类型 II 中的洛川县,其苹果产业得到较大发展。但由于本研究供需单位不一致,还不能直接研究该区的供需匹配程度及其格局变化。因此,未来的研究主要集中在两个方面:一是进一步完善 ES 的需求指标,增强对研究区内部需求差异性的表达;二是借鉴其他学者的研究^[19-20],通过单位一致的 ES 供需的计量,分析研究区生态系统服务供需匹配程度,及其可能的时空分异规律。

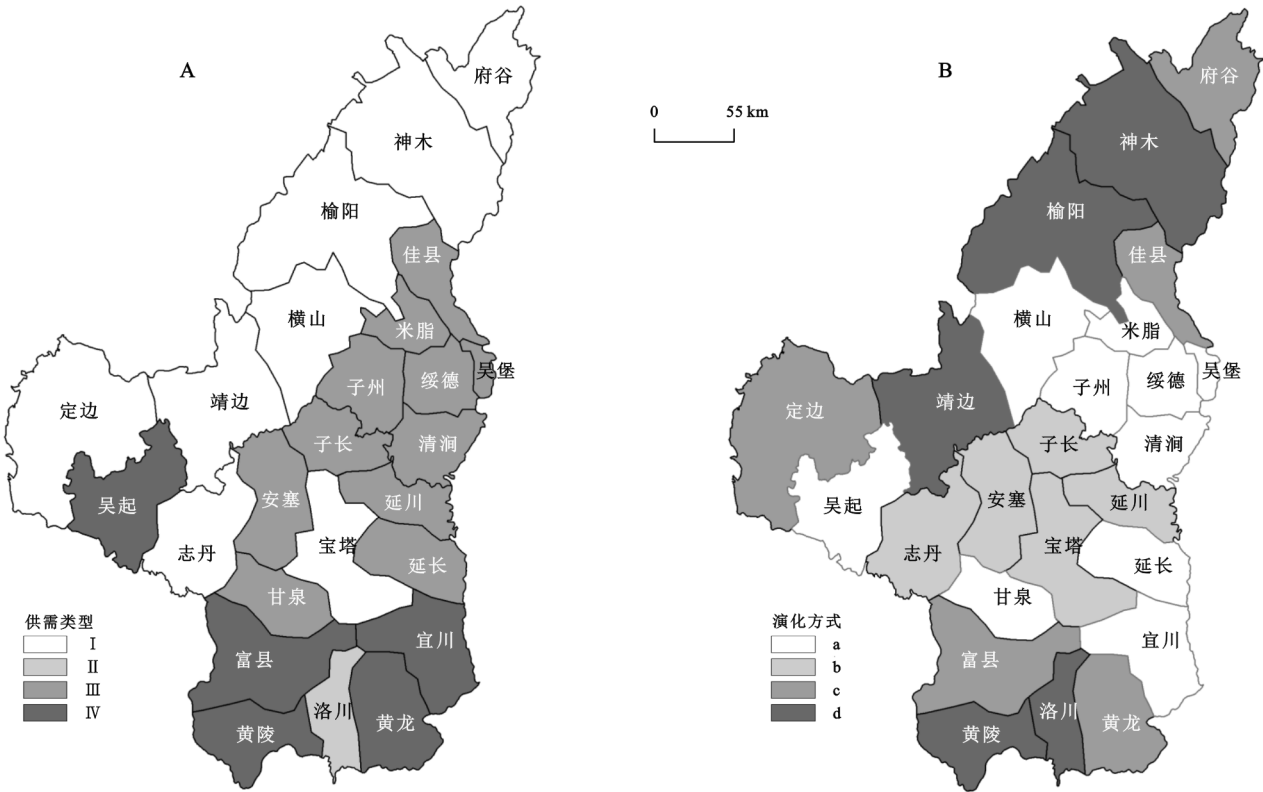


图 3 研究区生态系统服务供需类型及其演化方式

4 结论

(1) 研究区各类供给服务数量均有所增加,但整体生态系统服务供给格局大体保持不变。研究期间,供给服务由大到小的顺序为调节服务、支持服务、文化服务和供给服务,增幅最大的是供给服务(22.05%),增幅最小的为调节服务(2.41%);生态系统服务供给格局大体表现为北部高值、中部中值、中东部较低值和中部偏北低值。

(2) 生态系统服务需求逐年增加,但整体生态系统服务需求格局大体保持不变。增幅最大的因素是 GDP 总量(20.93 倍),最小的是人口总量(1.17 倍);研究期间,生态系统服务需求大体保持南部和中东部以低需求和较低需求类型为主、中西部以中需求和较高需求为主,北部以高需求为主的格局。

(3) 综合研究区生态系统服务供需整体状况,形成 4 种生态系统服务供需类型和 4 种演变方式;前者包括供需均大于平均水平、供需均小于平均水平、仅供给大于平均水平、仅需求大于平均水平 4 种类型;后者包括供需均有较大增加、供需均略有增加,仅供给有较大增加和仅需求有较大增加 4 种方式。

参考文献:

[1] 李双成,马程,王阳,等.生态系统服务地理学[M].北京:科学出版社,2014.
[2] 傅伯杰.新时代自然地理学发展的思考[J].地理科学进展,2018,37(1):1-7.
[3] Mehring M, Ott E, Hummel D. Ecosystem services supply and demand assessment: Why social-ecological dynamics matter[J]. Ecosystem Services,2018,30:124-125.
[4] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human

- Well-being: Synthesis[M]. Washington D C, Island Press, 2005.
- [5] Vihervaara P, Rönkä M, Walls M. Trends in ecosystem service research: early steps and current drivers[J]. *Ambio*, 2010, 39: 314-324.
 - [6] 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[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2177-2190.
 - [7] 贺祥, 姚尧. 基于生态系统服务供需对喀斯特山区生态风险分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 202-212.
 - [8] Geijzendorffer I R, Martín-López B, Roche P K. Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 320-331.
 - [9] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(10): 3096-3102.
 - [10] Wei H J, Fan W G, Wang X C, et al. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: A review[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
 - [11] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
 - [12] Wang X C, Dong X B, Liu H M, et al. Linking land use change, ecosystem services and human well-being: A case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 113-123.
 - [13] 刘家根, 黄璐, 严力蛟. 生态系统服务对人类福祉的影响: 以浙江省桐庐县为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1687-1697.
 - [14] 柳冬青, 张金茜, 巩杰, 等. 陇中黄土丘陵区土地利用强度—生态系统服务—人类福祉时空关系研究: 以安定区为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 637-648.
 - [15] 王大尚, 李屹峰, 郑华, 等. 密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系[J]. *生态学报*, 2014, 34(1): 70-81.
 - [16] Hossain M S, Eigenbrod F, Amoako J F A, et al. Unraveling the interrelationships between ecosystem services and human wellbeing in the Bangladesh delta[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2017, 24: 120-134.
 - [17] Wei H J, Liu H M, Xu Z H, et al. Linking ecosystem services supply, social demand and human well-being in a typical mountain-oasis-desert area, Xinjiang, China[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 44-57.
 - [18] Boithias L, Acuna V, Vergoñós L, et al. Assessment of the water supply: Demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471: 567-577.
 - [19] 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.
 - [20] 彭建, 杨旻, 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.
 - [21] Gu K K, Yang Q Q, Cheng F, et al. Spatial differentiation of Anhui province based on the relationship between supply and demand of ecosystem services[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(7): 577-583.
 - [22] 张杨, 马泽忠, 陈丹. 基于生态格局视角的三峡库区土地生态系统服务价值[J]. *水土保持研究*, 2019, 136(5): 327-333.
 - [23] 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]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2086-2096.
 - [24] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, et al. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 781-791.
 - [25] 杨莉, 甄霖, 潘影, 等. 生态系统服务供给—消费研究: 黄河流域案例[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 131-138.
 - [26] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 26-34.
 - [27] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325-337.
 - [28] 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.
 - [29] Costanza R, Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.