

中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素

朱文博¹, 李双成², 朱连奇¹

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004; 2. 北京大学城市与环境学院,
地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 区域间由供给与消费不均衡所引起的生态系统服务流动, 逐渐成为新的研究热点。选取具有代表性的食物供给服务、淡水供给服务和固碳服务, 运用生态系统服务足迹算法和多区域间投入产出模型, 核算中国省区典型生态系统服务足迹和省域间的动态流动以及影响因素。研究表明: 中国省域人均食物供给服务足迹为 $1.16 \text{ hm}^2/\text{人}$, 人均淡水供给服务足迹为 $0.06 \text{ hm}^2/\text{人}$, 人均固碳服务足迹为 $2.92 \text{ hm}^2/\text{人}$, 但由于人口数量、地区发展和单位能耗等因素的影响而具有明显的区域差异性, 因此供给与需求的不均衡导致了服务足迹在空间上的流动。同时, 生态系统服务足迹与各影响因子呈正相关, 表明生态环境与经济增长的可持续发展转好的拐点还未出现。

关键词: 生态系统服务足迹; 多区域间投入产出模型(MRIO); 生态系统服务流

DOI: 10.11821/dlyj020171049

1 引言

作为地理学研究的热点领域, 20多年来生态系统服务的内涵和外延不断演进, 从最初认识与研究生态系统服务形成的过程与机理, 到近年来越来越关注人类需求与福祉; 从静态层面服务供给的货币化衡量, 到动态的兼顾多层次利益相关者的综合评估, 更加重视生态系统服务的区域差异性、动态变化和时空耦合以及服务流动等方面的研究^[1,2]。生态系统服务以物流、能流和信息流等形式支撑人类社会的生存和发展, 其效能既包括提供食物、淡水和生产生活资料等基础服务, 也包括精神愉悦和文明发展的文化服务、维系地球系统正常演进的环境支撑与调节服务^[3,4]; 其形成取决于生态系统结构、生境条件、开发利用程度等因素的空间异质性, 而人类与日俱增的不同层次的需求则是生态系统服务流动的根本驱动力^[5,6]; 因而服务流的方向与强度具有较强的人文属性, 也反映了社会经济发展水平的区域差异^[7-13]。生态系统服务的域外效应、供给与消费的空间不重合必然会产生服务产品的流动, 区位论就成为生态系统服务流动研究的理论基础^[14]。生态系统服务流研究的核心目标是建立服务供给与消费之间的时空关联, 为生态系统服务补偿政策的制定提供科学依据^[15]。

生态系统服务流研究主要集中在理论框架构建、服务价值的实现过程分析、基于流动模型估算生态系统服务承载力, 建立生态服务供给与消费之间的空间耦合关系^[11,12,16]。现有研究虽然明晰了生态系统服务从供给到消费区域的流动过程, 量化出生态系统服务的源区, 但并没有精准地刻画出流动路径并模拟其流动过程, 同时也忽略了投入对生态

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2018-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590843)

作者简介: 朱文博(1989-), 女, 河南开封人, 讲师, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: zhuwb517@163.com

通讯作者: 李双成(1961-), 男, 河北平山人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态系统服务与区域社会福祉耦合机制研究。E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

系统服务流动的影响,不能全面地反映生态系统服务流动的特征。为了解决这些问题,美国佛蒙特大学充分考虑地形、植被、土壤、土地利用等地理要素的区域差异性,利用概率贝叶斯网络分析生态系统服务从供给到消费的流动路径,开发了模拟生态系统服务供给、消费、损耗和流动过程并制图的“服务路径属性网络”(Service path attribution networks, SPANs)模型,包括碳流动、洪水调节、淡水供给等8个模块,并运用于生态系统服务流动模拟^[17]。但由于SPANs模型需要多学科理论支撑和海量数据,目前运用此模型模拟的成果还较为鲜见。InVEST模型虽然广泛应用于分析生态系统服务的空间格局,跟踪土地利用/覆被变化所引起的生态系统服务能力的改变,但模型运行需要的主要是土地利用/覆被等相关环境参数,不能全面反映生态系统服务的真实投入产出,也无法评估其社会及美学价值^[18]。多区域投入—产出模型(The multi-regional input-output model, MRIO)可以较为全面地反映区域之间商品和服务的流动,为区域间环境与产业关联研究提供了一种数据需求量低、结果精度高的数量经济学方法,广泛应用于碳足迹和水足迹研究中^[19-21]。本研究运用MRIO模型,以IGBP“全球可持续性科学”(global science for global sustainability)中的三个核心问题—碳循环、食物系统和水资源为研究对象,选取具有代表性的食物供给服务、淡水供给服务和调节服务的流动开展研究,探讨中国生态系统服务供给与消费的空间异质性和生态系统服务的流动规律。

2 研究方法与数据来源

本研究运用生态系统服务足迹(Ecosystem services footprint, ESF)模型和多区域投入—产出模型,模拟分析中国30个省(自治区、直辖市)(除港、澳、台和西藏的数据无法获得外)的生态系统服务流动及其影响因素。

2.1 生态系统服务足迹

生态系统服务足迹是基于生态足迹模型构建的,用维持一个人、地区、国家的生存所需要的生态生产性土地面积来表示人类对生态系统服务的消费^[22,23]。中国省级行政单元总生态系统服务足迹算法如下^[24]:

$$esf = \sum_k esf_k = \sum_k \sum_j \left(r_{j,k} \times \sum_i \frac{c_i}{IP_i} \right) \quad (1)$$

式中: esf 为总生态系统服务足迹; esf_k 为 k 种类型生态系统服务足迹; $r_{j,k}$ 为第 j 类土地利用类型的 k 种生产系统服务均衡因子; c_i 为 i 种生态系统服务的总消费量; IP_i 为第 i 种生态系统服务消费单位面积国家平均供给量。

生态系统服务足迹模型具有传统生态足迹可在不同土地类型之间进行比较的特点,且相对独立,不同生态系统服务之间具有可比性,从而更全面更真实地反映人类社会对生态系统服务的利用程度。

食物供给类型包括粮食、肉、蛋、水产、蔬菜、水果和奶等直接供给,与传统模型中基于生物质的消费生态足迹计算基本一致,均衡因子采用WWF的最新标准^[25]。

从生态足迹角度出发评价水资源有两种途径:一是基于水足迹理论,从绿水(土壤水)、蓝水(地表水和地下水)和灰水(稀释污染达到安全标准的水量)三个方面综合核算,全面、直观地考察生产服务活动的用水状况,进而计算一个部门、地区或国家的“水足迹”(m³)^[26,27];另一种是将水资源相关消耗折算成水域面积(hm²),称之为水生态足迹(water ecological footprint)^[27-29]。为使生态系统服务足迹核算保持单位一致,本研究选取后者,总体思路为:

$$ESF_w = N \times esf_w = N \times r_w \times (W/P_w) \quad (2)$$

式中: ESF_w 为淡水供给服务总足迹 (hm^2); N 为人口数; esf_w 为人均淡水供给服务足迹 ($\text{hm}^2/\text{人}$); r_w 为水资源的均衡因子; W 为消耗的水资源量 (m^3); P_w 为水资源区域平均生产力 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。在水文学中, 平均产水模数的概念为计算时段内为地表水资源量与地下水资源量中扣除重复计算量除以计算区域的面积, 公式如下:

$$P_w = V/S \quad (3)$$

式中: V 为计算时段内区域的水资源总量 (m^3); S 是研究区域的面积 (hm^2); P_w 为计算时段内的平均产水模数 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), 即区域内水资源平均生产力。

本研究基于传统生态足迹计算中的能源碳汇法进行计算, 即吸收单位化石能源消费释放的二氧化碳所需要的林地面积。

$$resf = \frac{\sum_i U_i \times T_i}{A_i} \quad (4)$$

式中: $resf$ 是固碳服务足迹; U_i 是煤炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和火电七类能源消费量; T_i 是不同能源标准热值折算系数; A_i 是各类能源供给 1 千兆焦标准热值所需林地面积 (hm^2)。

2.2 多区域间投入产出模型(MRIO)

MRIO 模型反映区域之间商品和服务的流动, 可以反演碳足迹和水足迹的流动路径^[21,30]。多区域投入—产出表结构如表 1 所示。

直接消耗矩阵 $A^r = (a_{ij}^r)$ 由 $a_{ij}^r = z_{ij}^r / x_j^s$ 推导出, 式中: z_{ij}^r 表示从 r 区域 i 部门到 s 区域 j 部门的财政流动; x_j^s 是 s 区域 j 部门的总产出量; y^s 表示 s 区域对 r 区域产品的最终需求; x 列向量代表每个区域所有经济部门 (x_j) 的总产出, 也即是总投入。

$$A = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \cdots & A^{1n} \\ A^{21} & A^{22} & \cdots & A^{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{n1} & A^{n2} & \cdots & A^{nn} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y^{11} & Y^{12} & \cdots & Y^{1k} \\ Y^{21} & Y^{22} & \cdots & Y^{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y^{n1} & Y^{n2} & \cdots & Y^{nk} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

MRIO 模型可描述为:

$$x = Ax + Y \quad (6)$$

$$x = (I - A)^{-1}Y \quad (7)$$

式中: $(I - A)^{-1}$ 是 Leontief 逆矩阵; I 是单位矩阵。为了计算产品和服务中的隐含生态系统服务 (Embodied ecosystem services, EES), 用食物、淡水和能源消费代表环境外延以扩展 MRIO 表^[23]。

表 1 多区域投入—产出模型结构示意图

Tab. 1 The structural schematic diagram of multi-regional input-output model

		中间投入				最终使用		总产出
		区域 r		区域 s		区域 r	区域 s	
		部门1	部门2	部门1	部门2			
中间投入	区域 r	部门1		Z_{ij}^r		y^r		x_j^s
		部门2						
	区域 s	部门1						
		部门2						
总投入				x_j^s				
生态系统服务足迹								

食物消费 (Consumptive food, CF) 可由以下公式计算:

$$CF = k_c(I - A)^{-1}Y \quad (8)$$

式中: k_c 是各省市经济部门食物消费的列向量; CF 是由最终消费所驱动的食物供给服务在各省市各部门间的流动矩阵。

淡水消费 (Consumptive fresh water, CW) 和能源消费 (Consumptive energy, CE) 计算公式如下:

$$CW = k_w(I - A)^{-1}Y \quad (9)$$

$$CE = k_e(I - A)^{-1}Y \quad (10)$$

2.3 STIRPAT 模型方法

York 等将经典的 IPAT 等式, 即环境影响 (I) 恒等于人口 (P)、富裕度 (A , 人均消费量) 和技术水平, 即单位生态系统服务消耗的环境影响 (T) 的乘积, 演变成随机回归影响模型—STIRPAT 模型研究人文因素对生态系统服务足迹 (I) 的影响^[31], 公式如下:

$$\ln(I) = a + b \ln(P) + c \ln(A) + d \ln(T) + e \quad (11)$$

式中: a 为常数; P 、 A 和 T 的系数 b 、 c 和 d , 而 e 则是误差项。当 $a=b=c=d=e=1$ 时, IPAT 等式则变化为 STIRPAT 模型。根据公式 (11), 如果 P 、 A 和 T 三个驱动因子中两个因子维持不变, 另一驱动因子对环境变化的影响视为该因子对环境变化的贡献度, 该方法类似于经济学中的弹性系数分析法^[32]。

2.4 数据来源

国家统计局国民经济核算司自 1987 年编制全国投入产出表以来, 已经编制了 1987 年、1992 年、1997 年、2002 年、2007 年和 2012 年 6 张投入产出表 (基本表), 每 5 年编制一次。本研究采用《2012 年中国投入产出表》和《2012 年中国区域投入产出表》(不包括西藏和港、澳、台); 食物供给服务足迹数据来源于《2013 年中国统计年鉴》; 淡水供给服务中的农业和服务业用水来自《2013 年中国水资源公报》; 能源消费数据源于中国排放清单数据库网 (China Emission Accounts & Datasets, <http://www.ceads.net/>)。

3 结果分析

根据 2012 年中国统计年鉴和中国多区域间投入产出表, 计算各省食物供给服务足迹总量、人均食物供给服务足迹、万元 GDP 食物供给服务足迹、进出口食物供给服务足迹总量、人均进出口食物供给服务足迹、万元 GDP 进出口食物供给服务足迹等指标。其中, 生态系统服务足迹总量反映生态系统的供给能力, 人均生态系统服务足迹表征不同省份间生态系统服务供给的空间格局, 引入万元 GDP 生态足迹反映区域生态生产性面积的利用效率^[33]。由于文章篇幅所限, 将各指标降序排列后, 选取排名前十的省份进行展示和分析。

3.1 食物供给服务

根据 MRIO 表和 2012 年中国统计年鉴的食物生产与消费的相关数据进行运算, 结合 WWF 均衡因子^[25]得到中国食物供给服务足迹空间格局, 各指标前 10 名省份如图 1 所示。

从图 1 中可见, 广东、四川、江苏、山东和河南等人口大省, 食物供给服务足迹总量较高, 同时也是食物供给服务的流动的主要进出口省份; 上海、广东、北京、浙江、天津和江苏等人均 GDP 高的经济发达省份人均食物供给服务足迹较高, 尤其是上海人均食物供给服务足迹为 $2.23 \text{ hm}^2/\text{人}$, 远超过全国人均 $1.16 \text{ hm}^2/\text{人}$ 的水平, 需要大量进口服务来满足本地消费。沿海地区的广东、海南、福建和浙江等都是人均出口食物供给服务大省, 而由于使用生产生态足迹法, 上海的排名也比较靠前; 万元 GDP 生态系统服务足迹

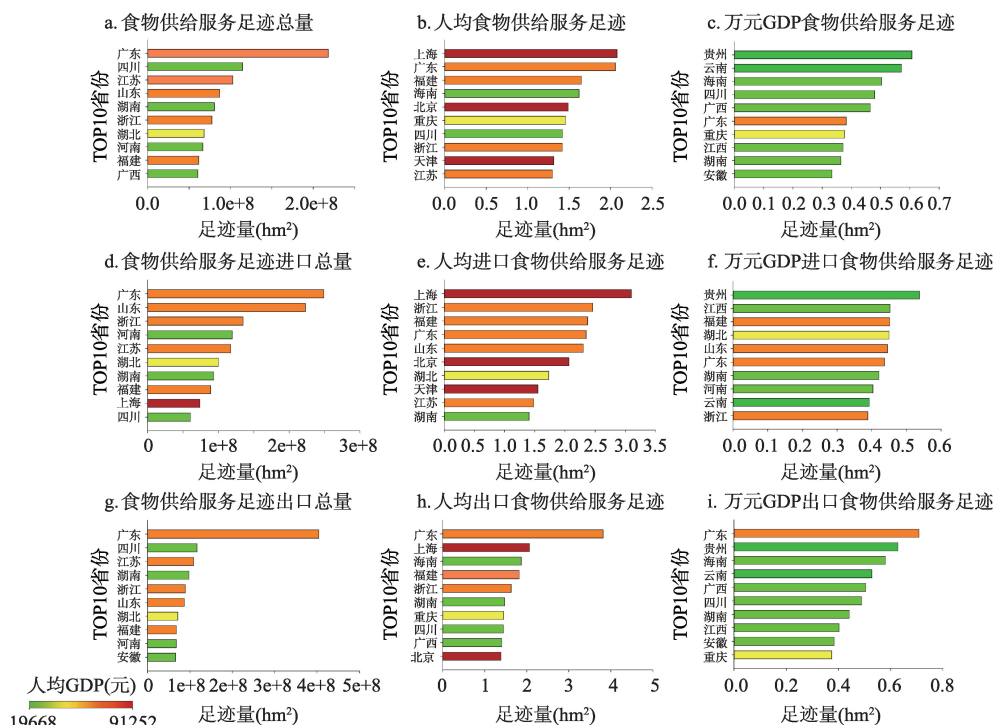


图1 食物供给服务足迹Top10分析

Fig. 1 Top 10 analysis of food provision ecosystem service

较高的集中在人均GDP较低的经济较不发达省份,如贵州、云南和海南等省份,食物供给服务足迹总量和进出口量都高于其他省份,反映了这些省份生产效率低下的现状。

3.2 淡水供给足迹

淡水供给包括工业、农业、居民生活和生态用水,其中生态用水包括部分河湖、湿地人工补水和城市环境用水^[34]。中国2012年淡水资源平均生产能力为2946 m³/hm²^[35],以此为基础计算淡水供给服务足迹各指标前10名省份如图2所示。

由图2可知,分省数据中东部的江苏、广东、黑龙江等和西部的新疆淡水供给服务足迹总量较高,人均GDP较高的上海、广东、浙江等经济发达省份淡水供给服务足迹进口较多,而除广东和江苏两个沿海省份,多是经济较不发达省份;新疆、宁夏、黑龙江、内蒙古等以农业为主要产业类型的省(区)的人均淡水服务供给足迹较大,经济较为发达的上海、浙江、福建、江苏和北京等省(市)人均进口淡水供给服务足迹较高,人均出口淡水服务足迹较大的仍是内陆的新疆、宁夏、内蒙古和沿海的广东、江苏等省(区);万元GDP生态系统服务足迹较高的仍是新疆、宁夏、黑龙江等水资源丰富但人均GDP较低的省(区)。

3.3 固碳服务足迹

固碳服务足迹主要研究基于能源消费的气候调节服务。固碳服务足迹各指标前十名省份如图3所示。

综合分析中国大陆除西藏以外的30个省(自治区、直辖市)的固碳服务足迹,结果如图3所示。分省数据中,人均GDP较高的山东、浙江、江苏、广东和内蒙古等省(区)的固碳服务足迹总量相对较高,且依赖进出口固碳服务,山西和辽宁也向外出口大量固碳服务;内蒙古的人均固碳服务足迹最高,为2.92 hm²/人,远超过全国人均足迹0.98 hm²/人,宁夏、浙江和山西其次,上海、浙江、北京、天津、山东和江苏等经济发

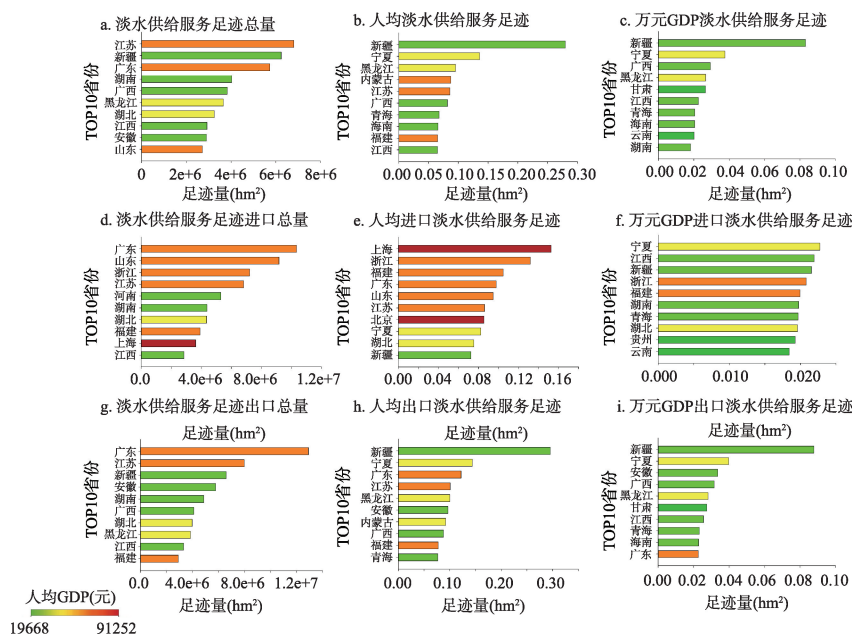


图2 淡水供给服务足迹Top10分析

Fig. 2 Top 10 analysis of fresh water provision ecosystem service

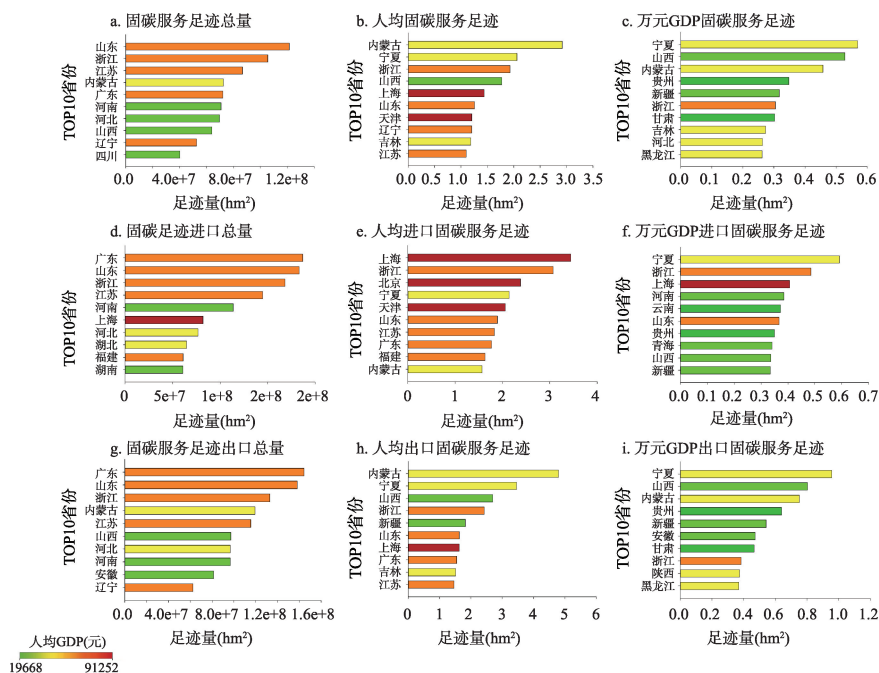


图3 固碳服务足迹Top10分析

Fig. 3 Top 10 analysis of carbon sequestration ecosystem service

达地区人均进口固碳服务在全国各省（自治区、直辖市）名列前茅，而内蒙古、宁夏和山西分列人均出口固碳服务前三名；万元GDP足迹较高的省（自治区）集中在人均GDP低且出口固碳服务的地区如宁夏、山西、内蒙古、贵州和新疆等。

3.4 基于STIRPAT模型的驱动力分析

选取2012年中国各省(区、市)的食物供给服务足迹(I_f)、淡水供给服务足迹(I_w)和固碳服务足迹(I_c)为因变量,人口(P)、人均GDP(A_1)、城镇化率(A_2)和万元GDP的足迹消费量(T)作为影响因素,构建三种生态系统服务足迹STIRPAT模型。所选的指标见表4。

表5列出各模型的分析结果。食物供给服务足迹回归模型中,由于 A_1 没有通过 t 检验,且本文食物供给服务足迹核算所采用的是生产生态足迹法,因而主要运用 A_2 检验发展对环境的影响。在所有分析模型中, T 与 A_2 之间存在较强的自相关被剔除。

回归方程所选择的指标可以解释食物供给服务足迹的88.78%,拟合较好。

$$\ln I_f = 10.842 + 1.067 \ln P + 1.728 \ln A_2 \quad (12)$$

由式(12)可知,影响食物供给服务足迹的主要人文因素是人口和城镇化率。系数>1,说明驱动因子变化的幅度超过环境变化的幅度,即人口每增加1%,将引起食物供给

表4 2012年中国各地区生态系统服务足迹STIRPAT模型指标表

Tab. 4 Indicators of STIRPAT model for ecosystem service footprint in 2012

省份	食物供给 服务总足迹 I_f (hm ²)	淡水供给服务 总足迹 I_w (hm ²)	固碳服务 总足迹 I_c (hm ²)	人口 P (万)	人均GDP A_1 (万元/人)	城镇化率 A_2	万元GDP 足迹 T_f (hm ² /万元)	万元GDP 足迹 T_w (hm ² /万元)	万元GDP 足迹 T_c (hm ² /万元)
北京	30788863	456911	16595945	2069	8.64	0.862	0.172	0.003	0.093
天津	18598808	298411	17003369	1413	9.13	0.815	0.144	0.002	0.132
河北	50732375	2402488	69785311	7288	3.65	0.468	0.191	0.009	0.263
山西	20818641	926507	63972997	3611	3.35	0.513	0.172	0.008	0.528
内蒙古	26352882	2301259	72679427	2490	6.38	0.578	0.166	0.014	0.458
辽宁	51558173	1785193	52666550	4389	5.66	0.656	0.208	0.007	0.212
吉林	25710524	1651310	32596921	2750	4.34	0.537	0.215	0.014	0.273
黑龙江	32807971	4562460	35881359	3834	3.57	0.569	0.240	0.033	0.262
上海	49454131	1547444	34165615	2380	8.48	0.893	0.245	0.008	0.169
江苏	102921072	7242379	86838220	7920	6.83	0.630	0.190	0.013	0.161
浙江	77630892	2490906	105664724	5477	6.33	0.632	0.224	0.007	0.305
安徽	57365373	3717834	28898834	5988	2.87	0.465	0.333	0.022	0.168
福建	61738076	2572417	29134367	3748	5.26	0.596	0.313	0.013	0.148
江西	48116331	3325855	18796939	4504	2.87	0.475	0.372	0.026	0.145
山东	86904420	2737322	121633069	9685	5.16	0.524	0.174	0.005	0.243
河南	66700714	3021290	70897089	9406	3.15	0.424	0.225	0.010	0.240
湖北	68056305	3664834	38620295	5779	3.85	0.535	0.306	0.016	0.174
湖南	80721174	4175876	33613000	6639	3.34	0.466	0.364	0.019	0.152
广东	218071795	5565825	72209254	10594	5.39	0.674	0.382	0.010	0.127
广西	60605429	3870431	19150819	4682	2.78	0.435	0.465	0.030	0.147
海南	14373067	542064	4838343	887	3.22	0.515	0.503	0.019	0.169
重庆	42924581	1053859	17012069	2945	3.87	0.570	0.376	0.009	0.149
四川	114613672	3045278	40296953	8076	2.96	0.435	0.480	0.013	0.169
贵州	41594794	1155339	23832441	3484	1.97	0.364	0.607	0.017	0.348
云南	58864737	1880268	24485969	4659	2.21	0.393	0.571	0.018	0.238
陕西	22224569	1120299	27463544	3753	3.85	0.500	0.154	0.008	0.190
甘肃	18785140	1532122	17083539	2578	2.19	0.388	0.332	0.027	0.302
青海	5951649	354050	4533092	573	3.3	0.475	0.314	0.019	0.239
宁夏	5348692	906035	13325911	647	3.62	0.507	0.228	0.039	0.569
新疆	19799408	7385305	23795527	2233	3.36	0.440	0.264	0.098	0.317

表5 生态系统服务足迹STIRPAT模型回归系数
Tab. 5 Regression coefficient of STIRPAT model for ecosystem service footprint

指标	B			Std. Error			t Stat		
	f	w	c	f	w	c	f	w	c
常数项	10.84	11.23	9.22	1.08	0.33	0.004	10.00	33.59	2603.08
人口 (P)	1.07	1.03	0.9998	0.08	0.04	0.00025	13.57	28.22	3930.67
人均GDP (A ₁)		1.65	0.9979		0.16	0.0013		10.59	743.56
城镇化率 (A ₂)	1.73		0.0030	0.76		0.0026	2.29		1.143
万元GDP足迹 (T)		0.97	0.9999		0.05	0.0005		21.09	2094.80

$R_f^2=0.8878, R_w^2=0.9754, R_c^2=0.99。$

服务足迹增加 1.067%；城镇化率每提高 1%，与之相应的食物供给服务足迹就增加 1.728%。

淡水供给服务足迹回归模型选择的指标可以解释服务足迹的 97.54%，方程拟合较好。

$$\ln I_w = 11.227 + 1.033 \ln P + 1.651 \ln A_1 + 0.965 \ln T_w \quad (13)$$

由式 (13) 计算得出，人口数量与淡水供给服务足迹总量成正比，STIRPAT 多元回归分析的系数为 1.033，说明驱动因子变化的幅度超过环境变化的幅度，即人口每增加 1%，将引起淡水供给服务足迹增加 1.033%。人均 GDP 每提高 1%，将引起水足迹提高 1.651%。万元 GDP 足迹每提高 1%将导致水足迹提高 0.965%。

基于 STIRPAT 模型对固碳服务足迹进行多元回归分析，结果显示，所选择的指标能解释固碳服务足迹的 99%，自变量城镇化率 (A₂) 没有通过 t 检验，被剔除。因此，生态系统固碳服务 STIRPAT 回归方程为：

$$\ln I_c = 9.216 + 0.9998 \ln P + 0.9979 \ln A_1 + 0.9999 \ln T_c \quad (14)$$

由式 (14) 中可以看出，固碳服务足迹中，万元 GDP 足迹消费量的回归系数最大，为 0.9999，说明在不考虑其他因素的情况下，地区能源消费强度每增加，固碳服务足迹总量平均增加 0.9999。人口每增加 1%，CO₂排放量平均增加 0.9998，二者之间呈正相关关系。人均 GDP 的回归系数为 0.9979，表明人均每增加 1%，固碳服务足迹平均增加 0.9979。在经济快速发展的同时，也必然伴随着相应的能源消耗及其 CO₂排放。

4 结论及讨论

4.1 结论

本文选取食物供给、淡水供给和固碳三种典型生态系统服务类型，基于生态足迹理论和多区域投入产出表，核算全国 30 省市自治区（香港、澳门、台湾和西藏除外）的生态系统服务足迹，以及隐含在产品贸易过程中的生态系统服务流动格局，并分析了影响生态系统服务足迹的主要驱动力。主要研究结论如下：

(1) 中国生态系统服务足迹具有明显的区域差异性。受到人口数量、地区富裕程度和单位能耗等因素的影响，中国各省区人均食物供给服务足迹为 1.16 hm²/人，呈现纬度地带性差异，以秦岭—淮河为界，南方省（区、市）人均食物供给服务足迹高于北方；人均淡水供给服务足迹为 0.06 hm²/人，呈现东南西北高中部低的空间格局；人均固碳服务足迹为 2.92 hm²/人，表现为北方和东部高，中西部凹陷的格局。

(2) 供给与需求空间不均衡是服务足迹流动产生的根本原因。经济发展较好的省份，如广东省、江苏省和浙江省，三种生态系统服务进出口流动均十分活跃。对于进口

地区如上海市来说,生态系统服务流是一种外来资源补给,可以减轻本地生态压力;对于出口地区如内蒙古和新疆来说,原本存在盈余的地区通过转移使资源得以合理配置,但若本身就已经存在严重赤字,无疑会加大当地的生态压力,需要调整产业和进出口结构。

(3) 根据STIRPAT模型,生态系统服务足迹与人口、经济发展和万元GDP消耗均呈现正相关关系。也就是说生态环境与经济增长的可持续发展转好的拐点还未出现。

4.2 讨论

本文整合了已有研究中的“生态足迹”“水足迹”和“碳足迹”等,融合为“生态系统服务足迹”概念,将其统一为“hm²”面积单位,测度单位更加具象化,便于横向对比和理解。结合“虚拟水”概念,运用多区域投入产出表,实现典型生态系统服务在行政单元间的动态核算。合理运用生态系统服务流动手段,可有效平衡地区间自然资源的分布不均衡,与人们的消费需求存在明显的空间错位。因气候、地理、资源禀赋等自然因素限制与经济社会因素影响,本地资源通常无法完全满足本地所有消费需求。地区间贸易作为辅助性手段在促进经济发展的同时也带来了生态系统服务流动,有效缓解资源稀缺地区的生态压力。

涉及到生态—经济两大复杂系统,囿于统计机制所限,只能采用技术手段进行估计和推演,因此可能存在误差。尤其是投入产出数据,要五年周期发布,暂时无法进行长时间序列核算。

参考文献(References)

- [1] 李双成,王珏,朱文博,等.基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架.地理学报,2014,69(11): 1628-1639. [Li Shuangcheng, Wang Jue, Zhu Wenbo, et al. Research framework of ecosystem services geography from spatial and regional perspectives. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1628-1639.]
- [2] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.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. [Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973.]
- [3] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全.地球科学进展,2009,24(6): 571-576. [Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576.]
- [4] Galli A, Wiedmann T, Ercin E, et al. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, 2012, 16(16): 100-112.
- [5] Zaets I, Kramarev S, Kozyrovska N. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [6] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [7] 李双成.生态系统服务地理学.北京:科学出版社,2014. [Li Shuangcheng. *The Geography of Ecosystem Services*. Beijing: Science Press, 2014.]
- [8] 朱文博,王阳,李双成.生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析.生态学报,2014,34(10): 2460-2469. [Zhu Wenbo, Wang Yang, Li Shuangcheng. A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2460-2469.]
- [9] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, Bodegom P M V, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39(4): 24-33.
- [10] 吴健生,牛妍,彭建,等.基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995-2009年中国地级市能源消费动态.地理研究,2014,33(4): 625-634. [Wu Jiansheng, Niu Yan, Peng Jian, et al. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS Nighttime Light. *Geographical Research*, 2014, 33(4): 625-634.]
- [11] Maass J M, Balvanera P, Castillo A, et al. Ecosystem services of tropical dry forests: Insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology & Society*, 2005, 10(1): 585-607.
- [12] Turner W R, Brandon K, Brooks T M, et al. Global biodiversity conservation and the alleviation of poverty. *Bioscience*, 2012, 62(1): 85-92.

- [13] Feng K, Siu Y L, Guan D, et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 1-701.
- [14] Hong Y, Alexer Z. "Virtual water": An unfolding concept in integrated water resources management. *Water Resources Research*, 2007, 43(12): W12301.
- [15] Palomo I, Martin-Lopez B, Potschin M, et al. National parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4(4): 104-116.
- [16] Sema-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39(4): 29-39.
- [17] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, (4): 117-125.
- [18] 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. *生态学报*, 2016 (10): 3096-3102. [Xiao Yu, Xie Gaodi, Lu Chunxia, et al. Involvement of ecosystem service flows in human wellbeing based on the relationship between supply and demand. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3096-3102.]
- [19] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹. *地理研究*, 2010, 29(9): 1639-1649. [Zhao Rongqin, Huang Xianjin. Carbon emission and carbon footprint of different land use types based on energy consumption of Jiangsu province. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1639-1649.]
- [20] 孙克, 徐中民. 基于地理加权回归的中国灰水足迹人文驱动因素分析. *地理研究*, 2016, 35(1): 37-48. [Sun Ke, Xu Zhongmin. The impacts of human driving factors on grey water footprint in China using a GWR model. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 37-48.]
- [21] Hubacek K, Sun L. Economic and societal changes in China and their effects on water use: A scenario analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(1-2): 187-200.
- [22] Burkhard B, Groot R D, Costanza R, et al. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2012, 21(3): 1-6.
- [23] Kissinger M, Gottlieb D. From global to place oriented hectares: The case of Israel's wheat ecological footprint and its implications for sustainable resource supply. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 51-57.
- [24] 高阳. 生态系统服务的多尺度和多途径模拟与核算研究. 北京: 北京大学博士学位论文, 2014. [Gao Yang. Research on the simulation and accounting of ecosystem services: A perspective from integrative geography. Beijing: Doctoral Dissertation of Peking University, 2014.]
- [25] World Wide Fund for Nature. Living planet report: 2008. www.footprintnetwork.org, 2017-10-09.
- [26] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 45-56.
- [27] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286. [Huang Linnan, Zhang Weixin, Jiang Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286.]
- [28] 洪辉. 基于生态足迹法的西安市水资源生态足迹研究. 西安: 西安建筑科技大学博士学位论文, 2007. [Hong Hui. Study on the principle of water resources ecological footprint in Xi'an. Xi'an: Doctoral Dissertation of Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.]
- [29] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 等. 城市水生态足迹变化分析与模拟. *资源科学*, 2006, 28(5): 152-156. [Wu Zhifeng, Hu Yonghong, Li Dingqiang, et al. Analyzing and modeling temporal variation of water ecological footprint in Guangzhou city of China. *Resources Sciences*, 2006, 28(5): 152-156.]
- [30] Zhao X, Liu J, Liu Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(4): 10.1073/pnas.1404130112.
- [31] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [32] 陈强强, 孙小花, 王生林, 等. 基于 STIRPAT 模型分析社会经济因素对甘肃省环境压力的影响. *西北人口*, 2009, 30(6): 58-61. [Chen Qiangqiang, Sun Xiaohua, Wang Shenglin, et al. Impact of social and economic factors on environment in Gannan province. *Northwest Population Journal*, 2009, 30(6): 58-61.]
- [33] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹. *地理学报*, 2001, 56(5): 599-610. [Zhang Zhiqiang, Xu Zhongmin, Cheng Guodong, et al. The ecological footprints of the 12 provinces of West China in 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 599-610.]
- [34] 王俭, 张朝星, 于英谭, 等. 城市水资源生态足迹核算模型及应用-以沈阳市为例. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2257-2262.

- [Wang Jian, Zhang Chaoxing, Yu Yingtan, et al. Calculation model of urban water resources ecological footprint and its application: A case study in Shenyang city of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8): 2257-2262.]
- [35] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.

Ecosystem service footprint flow and the influencing factors within provinces, China

ZHU Wenbo¹, LI Shuangcheng², ZHU Lianqi¹

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Ecosystem service (ES) has become deeply embedded in governmental decision-making. The ecosystem service flow between different regions caused by the spatial mismatch of supply and consumption has become a hotspot. This paper calculated ecosystem service footprint flow of food provision, freshwater provision, and regulation using the multi-regional input-output (MRIO) model, within the context of 15 sectors of China's domestic trade at provincial level. Conclusions are as follows: Firstly, there are obvious regional differences in ecosystem services footprint. The results show that, the per capita food provision is 1.16 hm², and the southern provinces have higher food provision service footprint than the northern, separated by Qinling Mountains and Huaihe River. It can be seen that the per capita fresh water provision service footprint is 0.06 hm², higher in the north and south, but lower in the central region, which is divided by the 800 mm annual rainfall isoline. And the per capita regulation service is 2.92 hm² and presents a pattern of higher in the northern and eastern parts, while lower in the central and western in China. Secondly, spatial mismatch of ecosystem service supply and consumption is the fundamental cause for ecosystem service footprint flow. Social development and population growth are the main driving force of the ecosystem services footprint flow. The ecosystem service footprint supplied from the sparsely populated west and southwest China transport through the domestic trade to eastern China that could get benefit from the flow and get release of the ecological pressure. Finally, according to the STIRPAT model, we verify the above three types of service footprints, which shows that the Kuznets curve does not exist, or the turning point has not improved yet. Therefore, how to coordinate the relationship between economic development and ecological conservation is the precondition of sustainable development.

Keywords: ecosystem service footprint; multi-regional input-output (MRIO) model; ecosystem service flow