

# 基于LUCC-ESs矩阵的京津冀城市群 基础供给服务模型构建

李晓静<sup>1</sup> 高阳<sup>2</sup> 李双成<sup>3,†</sup>

1. 山西财经大学公共管理学院, 太原 030006; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;  
3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

**摘要** 针对传统生态系统服务评价方法的主观性强以及评价案例之间可比性差等问题, 建立基于改进的LUCC-ESs矩阵的生态系统服务评估的方法。该方法基于土地利用覆被类型, 建立不同覆被类型的生态系统服务价值量单元, 形成LUCC-ESs评价矩阵, 计算不同覆被类型的生态系统服务, 可以在一定程度上规避由不同核算方法和价值单位引起的结果差异, 使结果具有可比性和实用性。京津冀城市群生态系统服务评价表明, 基础供给服务的供给空间格局具有区域性, 与自然资源的存赋和土地生产力高度相关; 需求服务的空间格局在城市中心区聚集, 向城市周围逐渐递减, 表现出与人口空间格局一致的流动性和聚集性, 京津冀区域内外的基础服务呈现共同向京津冀城市中心区聚集的趋势。

**关键词** LUCC-ESs 矩阵; 基础供给服务; 空间格局; 京津冀城市群

## Basic Supply Service Model of Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on LUCC-ESs Matrix

LI Xiaojing<sup>1</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>, LI Shuangcheng<sup>3,†</sup>

1. School of Public Administration, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

**Abstract** As the traditional ecosystem service evaluation methods have the disadvantageous as high subjectivity and low comparability, a LUCC-ESs matrix evaluation method is improved. Based on the land use/cover types, the proposed method calculates the ecosystem service units, then builds the LUCC-ESs matrix to evaluate the ecosystem services. This method can avoid different outcomes obtained by different calculation methods, and make these test results comparable and practical. The application of the basic supply service in the Beijing-Tianjin-Hebei region indicates that the spatial pattern of the basic supply services is regional and highly connected with resource reserves and land productivities. The spatial pattern of the demand service appears the same movement and aggregation characteristics as that of the population, which decreases from the city center to suburban. The basic services both inside and outside Beijing-Tianjin-Hebei region converge to the urban center.

**Key words** LUCC-ESs matrix; basic supply service; spatial pattern; Beijing-Tianjin-Hebei region

在以地理学家为主体的生态系统研究中, 已经把基于土地利用/土地覆被(land use-cover change, LUCC)的生态系统服务(ecosystem services, ESs)作为一项重要研究内容<sup>[1]</sup>。LUCC被认为是ESs变化

的重要驱动力之一<sup>[2]</sup>。基于土地利用的生态系统服务评价空间模型可以提供明确的空间信息, 支持复杂系统及相互关系的评价<sup>[3]</sup>, Daily<sup>[4]</sup>和Costanza等<sup>[5]</sup>的全球生态系统服务核算以及谢高地等<sup>[6]</sup>利用单位

面积生态系统价值当量因子计算中国生态系统服务,都是基于 LUCC 来完成。

目前,生态系统服务实物评价的方法比较成熟,主要包括实物评估法、货币价值评估法和能值评估法<sup>[7]</sup>。实物评估法主要通过调查和统计,获得生态系统服务实物量数据,适用于实物形态生态服务供给评估(如粮食供给等)。货币价值评估利用市场价值、费用支出、机会成本和条件价值,获取待评价服务货币价值,直观地反映人们的支付意愿。但是,由于生态系统的复杂性和人类认知的局限性,很多重要生态系统服务尚未被认知,无法直观地反映市场价值或价值,加上价格受市场波动影响,使得生态系统服务价值有失客观。能值评估法以太阳能能量为基本衡量单位,与能量流动相结合,研究不同时间和空间尺度下生态系统提供的服务或产品,但分析过程不完全遵循热力学定律。此外,由于选取参数和研究角度的不同,不同研究结果在空间或时间上的联系和延续性较差,使得评价结果的实用性较差。

Burkhard 等<sup>[8]</sup>提出一种基于 LUCC 的 ESs 评价方法(LUCC-ESs 矩阵),能快速地反映区域差异的生态系统服务评价模型,已应用于欧洲的 CORINE 项目。该方法通过对不同土地覆被提供生态系统服务的能力进行分级,与传统的价值或物质质量核算途径相比,可以规避由不同核算方法和价值单位引起的结果差异,并使其具有一定的普适性。尤其是生态系统服务中的调节服务和支持服务等间接价值<sup>[9]</sup>,在应用中能更明确地反映不同土地利用提供服务的能力及人类需求。但是,此方法存在争议和缺陷:1) Burkhard 方法的基础地类与我国现行的土地利用分类方式不同。在 CORINE 项目中,Burkhard 等对该地区 44 种土地覆被类型的服务供给和需求进行评价,而中国目前采用 12 个一级类、56 个二级类的两级分类体系,两种分类体系不匹配;2) 该方法形成的矩阵表主要反映欧美发达国家的土地覆被与生态系统服务之间的关系,对中国等发展中国家,生态系统服务价值的构成和等级未必适用。

本文基于 Burkhard 等<sup>[8]</sup>的研究,根据中国区域土地利用/覆被和社会经济发展状况,对 LUCC-ESs 矩阵进行改进,以我国土地利用分类现状为基础,以京津冀城市群为研究区,构建生态系统服务供需矩阵,对供给服务中的食物供给和能源供给进行模拟,形成基础供给服务,以期为京津冀城市群土地

可持续管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

京津冀城市群是中国经济增长的“第三极”<sup>[10]</sup>,是中国重要的政治、经济和文化中心。根据国家统计局公布的 GDP 数据,京津冀地区 GDP 总值约为全国的 10%,并且 GDP 占比呈逐年上升的趋势。随着雄安新区的建设,京津冀城市群的区位优势更加凸显。然而,社会经济快速发展的同时,也会付出较大的资源和环境代价,水土流失、土地退化和雾霾等生态与环境恶化的态势没有得到根本的缓解,天津、唐山、石家庄、邯郸、保定和邢台 6 个城市表现出“生态超载”<sup>[11-12]</sup>。2001—2009 年间,除环渤海滨海区的生态系统服务价值呈增加趋势外,其他区域均不同程度地减少<sup>[13]</sup>。区域的生态系统服务价值总体上呈小幅下降趋势,经济增长与生态系统承载力之间的矛盾已成为京津冀地区社会经济可持续发展的重要制约因素<sup>[14]</sup>。2010 年第六次人口普查数据显示,京津冀的人口规模达到 1.04 亿,占全国人口的 7.79%;人口密度高达 484 人/km<sup>2</sup>,近 4 倍于全国平均人口密度,是全国人口密度最高的地区之一;其人均生态系统服务量远低于全国平均水平,北京最低,其次是天津、河北<sup>[15]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文使用的土地利用数据基于 MODIS 遥感影像解译获得,时间为 2010 年,空间分辨率为 500 m×500 m。空间化人口数据来自中国科学院地理科学与资源研究所,时间为 2010 年,空间分辨率为 1000 m×1000 m。食物需求计算依据来自《中国食物与营养发展纲要(2001—2010 年)》中 2010 年食物与营养发展总体目标。

食物供给中的粮食、油料、蔬菜、肉、蛋、奶、水产以及一次能源供给中的煤炭、石油、天然气、风力等数据来自中国统计年鉴(1996—2013 年)、北京统计年鉴(1996—2013 年)、天津统计年鉴(1996—2013 年)、河北统计年鉴(1996—2013 年)、中国农村统计年鉴(2011 年)和中国食物工业年鉴(2011 年)。

### 2.2 LUCC-ESs 基础供给矩阵模型构建方法

生态系统服务的供给指在某一时刻或时段内,某特定区域可以提供某种或一系列生态系统服务簇

的能力,依赖于生态系统类型、区域生态状况以及人类对土地利用和土地覆被的改变。生态系统服务可以供给至该特定区域,也可以流动至其他区域。

生态系统服务的需求指在某一时刻或时段内,某特定区域对所有生态系统产品及服务的使用总和。生态系统服务供给可以来源于该特定区域,也可以来源于其他区域。

区域生态系统服务供给与需求的关系见图1,区域内生态系统服务供给与需求之间的差值为生态系统服务盈余或赤字。

根据不同土地利用类型提供生态系统服务的能力,建立LUCC-ESs矩阵,构建方法如下。

1) 制定LUCC-ESs基础供给矩阵的土地利用类型。依据京津冀地区区域特点以及土地利用现状数据,将土地利用类型合并为耕地、园地、林地、草地、居民点及独立工矿用地、未利用土地和水域等7类,在土地利用现状基础上进行服务评价。

2) 制定LUCC-ESs基础供给矩阵的服务类型。根据Costanza<sup>[5]</sup>、千年生态系统评估报告(Millennium Ecosystem Assessment, MA)<sup>[16]</sup>和De Groot<sup>[17]</sup>等提供的生态系统服务列表以及Müller等<sup>[18-19]</sup>描述的生态完整性组成列表,形成一个生态系统服务集。将生态系统服务分成4类:生境支持、供给服务、调解服务和文化服务。其中,基础供给(以食物供给和能源供给为代表)分为粮食、油料作物、蔬菜、肉类、牛奶、鲜蛋、水产品 and 能源的8个服务类型。

3) 核算LUCC-ESs基础供给矩阵的服务能力。采用粮食、油料、蔬菜、肉类、牛奶、鲜蛋和水产品产量数据,计算每类食物所含的能量,然后基于中国土地利用分类,将粮食、油料和肉类按照耕地面积,蔬菜和鲜蛋按照园地面积,奶类按照草地面积,水产品按照水域面积,分别计算每个单位面积

的食物供给能量总值。

4) LUCC-ESs基础供给矩阵的服务能力矩阵赋值。分别计算各地类对不同基础供给服务的供给和需求,并通过野外调查、室内建模和专家知识方法,对56个服务能力矩阵(7个土地利用类型为横列、8个服务类型为纵列)赋值。不同土地利用类型提供生态系统服务的能力定义如下:0代表土地利用类型没有提供特定生态系统服务的相关能力,1代表低相关能力,2代表一般相关能力,3代表中等相关能力,4代表高相关能力,5代表极高相关能力。

5) 生态系统服务空间制图。根据矩阵表中的服务供给和需求,按地类和人口空间布局,进行生态系统服务的空间制图。

## 2.3 基于能量核算的基础供给服务计算

食物和能源供给是与日常生活关系紧密、满足人类最基本需求、为社会运转提供根本能量动力的基础生态系统供给服务,统称为基础供给服务。食物供给服务包括粮食、蔬菜、油料作物、肉类、蛋类、奶类和水产品的供给等,能源供给服务包括原煤、原油、天然气、水电、风电等由自然直接供给的一次能源供给。基础供给服务的供给取决于区域自然环境、资源禀赋和开发程度等,基础供给服务需求的影响因素包括政策、人口、市场和管治等。

### 2.3.1 食物供给服务

食物供给服务分为粮食、油料作物、蔬菜、水果、肉类、牛奶、鲜蛋和水产品8类,基于能量的食物供给服务的计算公式为

$$p_x = \frac{P_x}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^8 A_{ikx}} = \frac{\sum_{i=1}^8 Y_x T_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^8 A_{ikx}}$$

其中,  $p_x$  为区域  $x$  中食物供给服务单位面积供给量,  $P_x$  为区域  $x$  提供的食物供给服务的供给总能量,  $i$  为

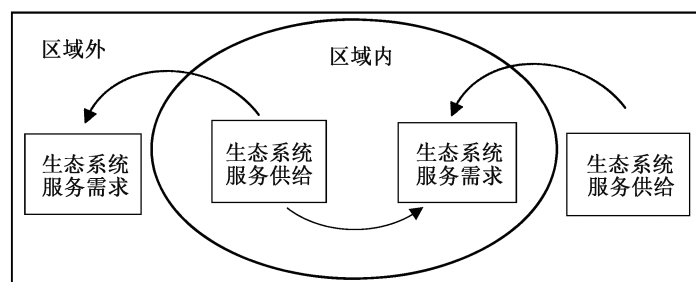


图1 区域生态系统服务供给与需求

Fig. 1 Regional ecosystem services supply and consumption

核算的食物种类,  $A_{ikx}$  为区域  $x$  内可以提供食物  $i$  的土地利用类型  $k$  的面积,  $T_i$  为第  $i$  种食物供给服务的能量热值,  $Y_x$  为区域  $x$  提供食物  $i$  的数量。

食物供给服务需求分为粮食、食用油、蔬菜、肉类、牛奶、鲜蛋和水产品, 计算公式为

$$c_x = \frac{C_x}{35.12468 \text{ pop}_x},$$

其中,  $c_x$  为区域  $x$  中食物供给服务需求量,  $C_x$  为区域  $x$  提供的食物供给服务需求总能量值,  $\text{pop}_x$  为区域  $x$  中的人口总量。《中国食物与营养发展纲要(2001—2010年)》中规定, 为保障合理的营养结构, 人均摄入能量需达到 2300 kcal/d, 约为  $3.51 \times 10^{10}$  J/a, 其中粮食 155 kg, 蔬菜 147 kg, 食用植物油 10 kg, 肉类 28 kg, 蛋类 15 kg, 奶类 16 kg, 水产品 16 kg。根据各类食物具有的能量, 得到每人每年所需各类食物总能量, 继而基于栅格化的人口分布, 计算每栅格中的食物需求能量总值。

### 2.3.2 能源供给服务

一般来说, 能源供给包括原煤、原油、天然气、水电、风电等 5 种由自然直接供给的一次能源, 不包含由煤炭等燃烧形成的火电等二次能源。计算公式为

$$e_x = \frac{E_x}{\sum_{k=1}^K A_{kx}} = \frac{\sum_{i=1}^5 M_{ix} H_i}{\sum_{k=1}^K A_{kx}},$$

其中,  $e_x$  为区域  $x$  中能源供给服务单位面积供给量,  $E_x$  为区域  $x$  提供的能源供给服务供给总能量,  $i$  为核算的能源种类,  $M_{ix}$  为区域  $x$  提供的  $i$  类能源的原始量,  $H_i$  为第  $i$  种能源供给服务的能量热值,  $A_{kx}$  为区域  $x$  内可以提供能源的土地利用类型  $k$  的面积。

能源供给服务需求种类与服务供给相同, 计算公式为

$$n_x = \frac{N_x}{\text{pop}_x} = \frac{\sum_{i=1}^8 I_{ix} H_i}{\text{pop}_x},$$

其中,  $n_x$  为区域  $x$  中能源供给服务单位面积需求量,  $N_x$  为区域  $x$  中能源供给服务供给总需求,  $I_{ix}$  为区域  $x$  需求的  $i$  类能源的原始量。

将基于能量核算方法得到的食物和能源供给/需求相加, 得到总食物供给/需求和能源供给/需求, 总供给减去总需求, 得到食物和能源供给服务盈余

与赤字。

上述食物和能源供给服务计算公式中的单位质量热值供给来自世界能值协会(<http://www.emergy.society.com/>), 单位个人热值需求计算依据《中国食物营养发展纲要(2001—2010)》和国家统计局公布数据(表 1)。

## 2.4 基于能量核算的京津冀城市群 LUCC-ESs 基础供给服务矩阵

基于能量核算方法, 构建京津冀城市群 LUCC-ESs 供给矩阵、需求矩阵和供需平衡矩阵。

京津冀地区 LUCC-ESs 供给能力的相关强度矩阵(表 2)中, 每一类土地覆被类型针对不同供给服务下细类产品计算单位面积的生产强度, 并分成 5 个等级, 空白表示该土地覆被类型不能生产该类的基础供给服务。可以看出, 耕地可以生产除蔬菜和水产品外的大多数细类基础供给服务, 对粮食和油料作物的生产达到 5 级水平。其中, 对油料作物的生产效率最高, 为  $5.55 \times 10^{13}$  J/km<sup>2</sup>, 对牛奶的生产效率最低, 为  $3.37 \times 10^{12}$  J/km<sup>2</sup>。园地主要生产蔬菜和能源两个细类的基础供给服务, 对蔬菜的生产强度达到  $1.81 \times 10^{13}$  J/km<sup>2</sup>, 为 4 级供给水平。林地、草地、居民点及独立工矿用地和未利用土地都可以提供能源供给, 为  $9.05 \times 10^{12}$  J/km<sup>2</sup>, 达到 2 级水平。水产品全部由水域这一覆被类型提供, 强度为  $6.09 \times 10^{12}$  J/km<sup>2</sup>, 达到 3 级供给水平。由表 2 可知, 京津冀城市群地区耕地种植作物水平较高, 对粮食和油料作物的供给水平均达到最高等级。由于本地区牲畜以圈养为主, 故肉类、牛奶、鲜蛋也由耕地供给, 但与全国水平相比, 供给效率明显不足, 分别为 2 类、1 类和 3 类。另外, 蔬菜和水产品等供给的效率分别为 4 级和 3 级水平, 在全国同地类处于中上

表 1 基础供给服务供给与需求热值转换基础表

Table 1 Heat value conversion basis of basic supply service

单位	供给	需求/(J·人 <sup>-1</sup> )
粮食	$1.41 \times 10^7$ J/kg	$1.90 \times 10^9$
油料作物	$3.70 \times 10^7$ J/kg	$3.70 \times 10^8$
蔬菜	$3.01 \times 10^6$ J/kg	$4.82 \times 10^8$
肉类	$7.66 \times 10^6$ J/kg	$2.45 \times 10^8$
牛奶	$1.80 \times 10^6$ J/kg	$5.76 \times 10^7$
鲜蛋	$1.60 \times 10^7$ J/kg	$2.88 \times 10^8$
水产品	$1.16 \times 10^7$ J/kg	$2.55 \times 10^8$
能源	$2.93 \times 10^7$ kg 标准煤	$7.10 \times 10^{10}$

表 2 京津冀地区 LUCC-ESs 供给能力的相关强度矩阵

Table 2 Correlation strength matrix of LUCC-ESs supply capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region

供给	耕地		园地		林地		草地		居民点及独立工矿		未利用地		水域	
	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )
粮食	5	9.52×10 <sup>12</sup>												
农作物 油料	5	5.55×10 <sup>13</sup>												
蔬菜			4	1.81×10 <sup>13</sup>										
食物 肉类	2	3.18×10 <sup>13</sup>												
牲畜 牛奶	1	3.37×10 <sup>12</sup>												
鲜蛋	3	2.32×10 <sup>13</sup>												
水产品													3	6.09×10 <sup>12</sup>
能源供给	2	9.05×10 <sup>12</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>

水平。总体看来,本地区基础供给服务对耕地依赖作用较大,因此,耕地生态系统的稳定性和生产能力直接决定该地区居民的基础供给。

京津冀城市群地区土地覆被类型与生态系统服务需求的相关强度矩阵(表 3)中,分别计算各地类对不同基础供给服务的需求。可以看出,由于开展种植业需要种子,因此耕地对粮食、油料作物以及蔬菜都有少量需求,分别为  $1.20 \times 10^{12}$ ,  $2.33 \times 10^{11}$  和  $3.03 \times 10^{11}$  J/km<sup>2</sup>,另外,还需要一定数量的能源供给,为  $4.47 \times 10^{13}$  J/km<sup>2</sup>。园地需要少量能源供给,为  $3.05 \times 10^{13}$  J/km<sup>2</sup>。另外,该地区畜牧业需要一定数量的种畜,折合为肉类、牛奶和鲜蛋的需求分别为  $4.29 \times 10^{10}$ ,  $1.01 \times 10^{10}$  和  $5.04 \times 10^{10}$  J/km<sup>2</sup>。该区域的主要消费来自居民消费,分布在居民点及独立工矿用地这一土地覆被类型上,均达到 5 级或 4 级水平。其中,对粮食的消费达到  $2.80 \times 10^{12}$  J/km<sup>2</sup>,为食物供给服务中需求最高;对能源供给服务需求达到  $1.04 \times 10^{14}$  J/km<sup>2</sup>,为各种土地覆被利用类型中需

求最高。

将供给能力矩阵和需求矩阵叠加,形成京津冀地区土地覆被类型与生态系统服务供需平衡关系矩阵(表 4),并根据盈余/赤字的大小分为 11 个等级(-5 到+5)。 $-5$  等级代表赤字最大,  $+5$  等级代表盈余最大,  $0$  等级代表供需基本平衡,空格代表本土地覆被类型对该类生态系统服务既无供给,也无需求。可以看出,本区域耕地除蔬菜为赤字,能源为基本平衡外,对粮食、油料作物、肉类、牛奶、鲜蛋的供给均为盈余,尤其对油料作物的供给盈余达到  $5.53 \times 10^{13}$  J/km<sup>2</sup>。居民点及独立工矿用地对各类供给服务均为赤字,其中对粮食的赤字为  $2.80 \times 10^{12}$  J/km<sup>2</sup>,为最高赤字水平,表明该地区人口分布较为密集,对各类生态系统服务的需求均处于较高水平,从而出现大量的赤字区域。

### 3 京津冀城市群基础供给服务空间格局

京津冀城市群基础供给服务的空间格局和特征

表 3 京津冀地区 LUCC-ESs 需求能力的相关强度矩阵

Table 3 Correlation strength matrix of LUCC-ESs demand capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region

供给	耕地		园地		林地		草地		居民点及独立工矿		未利用地		水域	
	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )
粮食	1	1.20×10 <sup>12</sup>							5	2.80×10 <sup>12</sup>				
农作物 油料	1	2.33×10 <sup>11</sup>							5	5.44×10 <sup>11</sup>				
蔬菜	1	3.03×10 <sup>11</sup>							5	7.09×10 <sup>11</sup>				
食物 肉类							1	4.29×10 <sup>10</sup>	5	3.60×10 <sup>11</sup>				
牲畜 牛奶							1	1.01×10 <sup>10</sup>	5	8.47×10 <sup>10</sup>				
鲜蛋							1	5.04×10 <sup>10</sup>	5	4.23×10 <sup>11</sup>				
水产品									4	3.75×10 <sup>11</sup>			1	1.04×10 <sup>11</sup>
能源供给	2	4.47×10 <sup>13</sup>	1	3.05×10 <sup>13</sup>			1	1.24×10 <sup>13</sup>	5	1.04×10 <sup>14</sup>				

表 4 京津冀地区 LUCC-ESs 的供需平衡矩阵  
Table 4 LUCC-ESs supply and demand balance matrix in Beijing-Tianjin-Hebei region

供给	耕地		园地		林地		草地		居民点及独立工矿		未利用地		水域	
	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )	等级	强度/ (J·km <sup>-2</sup> )
食物供给	粮食	4	8.32×10 <sup>12</sup>						-5	-2.80×10 <sup>12</sup>				
	农作物 油料	4	5.53×10 <sup>13</sup>						-5	-5.44×10 <sup>11</sup>				
	蔬菜	-1	-3.03×10 <sup>11</sup>	4	1.81×10 <sup>13</sup>				-5	-7.09×10 <sup>11</sup>				
	肉类	2	3.18×10 <sup>13</sup>				-1	-4.29×10 <sup>10</sup>	-5	-3.60×10 <sup>11</sup>				
	牲畜 牛奶	1	3.37×10 <sup>12</sup>				-1	-1.01×10 <sup>10</sup>	-5	-8.47×10 <sup>10</sup>				
	鲜蛋	3	2.32×10 <sup>13</sup>				-1	-5.04×10 <sup>10</sup>	-5	-4.23×10 <sup>11</sup>				
水产品									-4	-3.75×10 <sup>11</sup>			2	5.98×10 <sup>12</sup>
能源供给	0	-3.56×10 <sup>13</sup>	1	-2.14×10 <sup>13</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>	1	-3.37×10 <sup>12</sup>	-3	-9.53×10 <sup>13</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>	2	9.05×10 <sup>12</sup>

可通过空间制图来表达,以土地利用现状和人口栅格化数据为底图来获取。

### 3.1 基础供给服务供给空间格局

如图 2(a)所示,京津冀城市群食物总供给服务的供给表现出明显的空间异质性。整个京津冀地区年食物供给服务的供给为  $3.49 \times 10^{18}$  J/a,按照能够供给食物的土地利用类型计算,单位面积的食物供给能力为  $1.21 \times 10^{13}$  J/(km<sup>2</sup>·a)。其中,北京市最低,为  $1.02 \times 10^{17}$  J/a,折合为  $6.22 \times 10^{12}$  J/(km<sup>2</sup>·a);其次是天津市,为  $2.14 \times 10^{17}$  J/a,折合为  $1.84 \times 10^{13}$  J/(km<sup>2</sup>·a);河北省最高,为  $3.17 \times 10^{18}$  J/a,折合为  $1.69 \times 10^{13}$  J/(km<sup>2</sup>·a),高值区域主要分布在东南部平原地区,低值区域主要为北部草原及山地区。从能量的角度来看,河北省耕地较多,食物供给能力更高,北京市

居中,天津市单位面积食物供给服务最低,提供的食物中包含的能量较低。总体上,区域内食物供给的服务呈现东南高而西北低的格局。东南平原地区是食物供给服务的重要区域。与其他地区相比,北京、天津和石家庄等人口密集的大型城市食物供给服务的供给能力相对较低。

如图 2(b)所示,京津冀城市群的能源供给以化石能源为主,无法根据土地利用类型来区分,因此其在各省市行政边界内均分。整个京津冀城市群地区年能源供给服务的供给为  $4.05 \times 10^{19}$  J/a。北京市的单位面积能源供给量最低,为  $1.41 \times 10^{18}$  J/a,折合为  $8.59 \times 10^{13}$  J/(km<sup>2</sup>·a);天津市最高,为  $1.53 \times 10^{19}$  J/a,折合为  $1.32 \times 10^{15}$  J/(km<sup>2</sup>·a);河北省居中,为  $2.38 \times 10^{19}$  J/a,折合为  $1.27 \times 10^{14}$  J/(km<sup>2</sup>·a)。

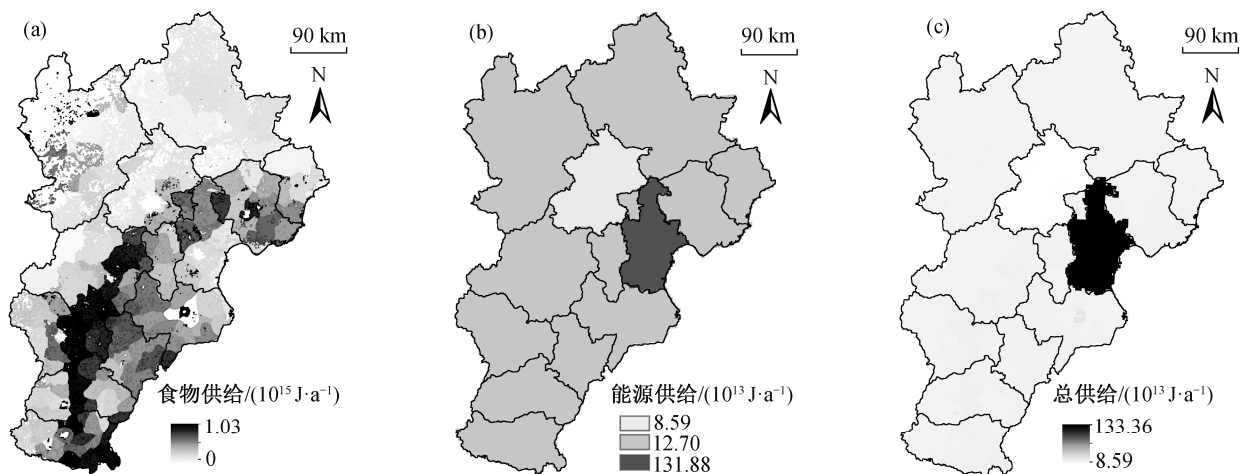


图 2 京津冀地区基础供给服务的供给空间格局  
Fig. 2 Basic supply space pattern in Beijing-Tianjin-Hebei region

将以上两种服务相加,得到基于能量核算的京津冀城市群地区2010年基础供给服务供给空间格局,如图2(c)所示。从总量来看,北京市为 $1.51 \times 10^{18}$  J/a,天津市为 $1.55 \times 10^{19}$  J/a,河北省为 $2.70 \times 10^{19}$  J/a。从不同土地利用类型单位面积供给量来看,按照可产生基础供给服务的土地类型面积来计算单位面积的基础供给能力,北京市最低,为 $9.21 \times 10^{13}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ );天津市最高,为 $1.33 \times 10^{15}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ );河北省为 $1.44 \times 10^{14}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。从能量的角度核算,天津市单位面积土地的基础供给能力更强,尤其是其提供的能源供给服务包含的能量较高,河北省居中,北京市单位面积基础供给服务最低,其食物和能源的需求和消费更多依赖于外部调入。

### 3.2 基础供给服务需求空间格局

从图3(a)可以看出,京津冀城市群地区食物供给服务需求与人群集聚高度相关,高值区域主要分布在东南部平原地区,低值区域主要为北部草原及山地区。北京市人口较多,食物供给服务的需求较高,为 $4.20 \times 10^{13}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),天津为 $3.93 \times 10^{13}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),河北为 $1.35 \times 10^{13}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。京津冀区域平均水平为 $1.70 \times 10^{13}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),但是总体上呈现东南高、西北低的格局。

京津冀城市群地区化石能源供给服务需求集中在人口密集的城市区域(图3(b))。其中,北京市为 $2.04 \times 10^{19}$  J/a,折合为 $1.24 \times 10^{15}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ );天津市为 $1.92 \times 10^{19}$  J/a,折合为 $1.72 \times 10^{15}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),单位面积最高;河北省为 $8.06 \times 10^{19}$  J/a,折合为 $4.30 \times 10^{14}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),单位面积最低。

将食物与能源供给服务需求相加,得到基于能量核算的京津冀城市群地区基础供给服务总需求空间格局(图3(c))。人口密集区域是基础供给服务需求的集中区。在东部和南部平原地区,呈现弧形的需求高值带,张家口市和承德市相对需求较低。相对而言,能源供给需求决定总基础供给服务需求的空间格局,其中北京市为 $1.28 \times 10^{15}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),天津市最高,为 $1.76 \times 10^{15}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),河北省最低,为 $4.44 \times 10^{14}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。其中天津的工业结构变化对能源消费增长的影响显著<sup>[20]</sup>,尤其是重工业能耗占全部工业能耗的90%以上<sup>[21]</sup>。

### 3.3 基础供给服务的空间格局

将基础服务的供给和需求相减,即得到京津冀地区基础供给服务盈余/赤字的空间格局,如图4所示。可以看出,京津冀城市群地区整体基础供给服务处于供不应求状态,赤字达到 $3.74 \times 10^{14}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),特别是城市区域均处于赤字状态。北京市赤字情况最为严重,为 $1.19 \times 10^{15}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),天津市赤字为 $4.23 \times 10^{14}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),河北省赤字为 $2.30 \times 10^{14}$  J/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。图4表明,京津冀城市群地区的基础供给服务主要源自区外的调入,以食物和能源为代表的基础供给服务并不是京津冀地区的优势生态系统服务,本区域内部供给不能够满足区域消费需求,特别是能源供给服务方面,需求远大于消费。

## 4 结论与讨论

京津冀基础供给服务供求矩阵的案例证明,通

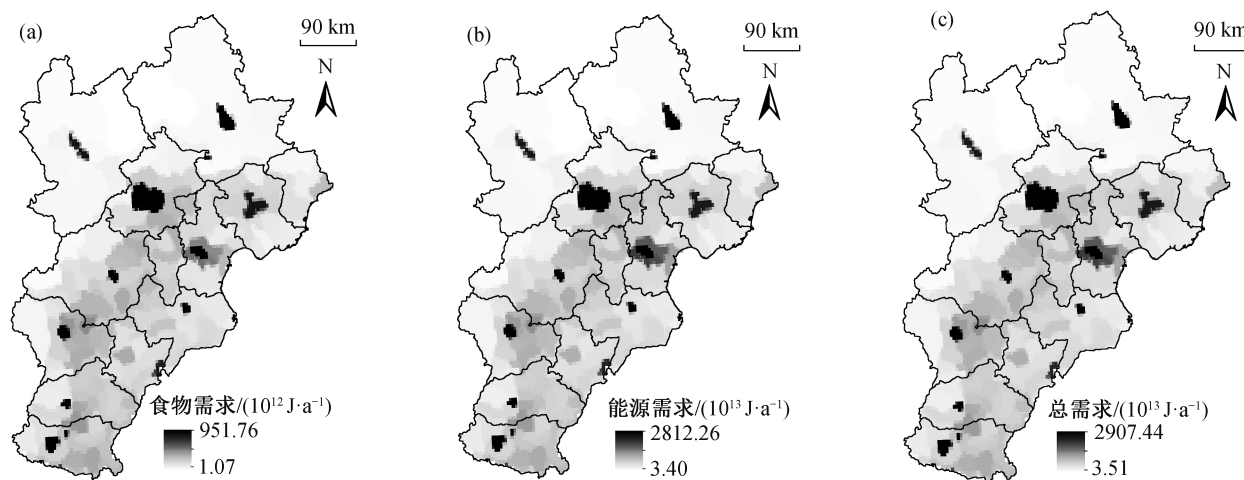


图3 京津冀地区基础供给服务的需求空间格局

Fig. 3 Basic demand space pattern in Beijing-Tianjin-Hebei region

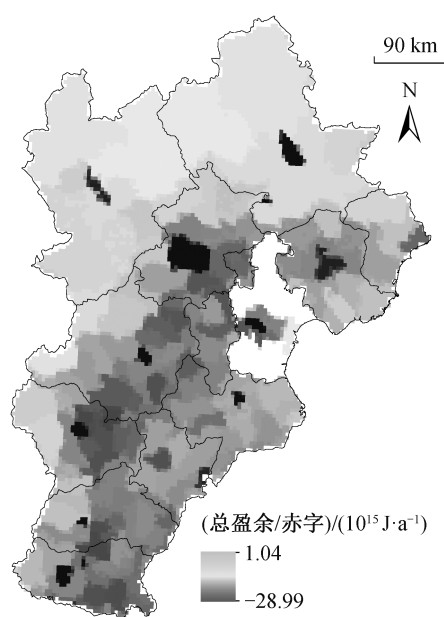


图 4 京津冀地区基础供给服务总盈余/赤字  
Fig. 4 Total surplus/deficit of basic supply services in Beijing-Tianjin-Hebei region

过专家评估和统计数据构建的基于土地利用类型的 LUCC-ESs 基础供给服务矩阵模型及其生态系统服务评价是可行的。以此为基础,可进行基于土地利用类型的基础供给服务和基于人口分布格局的基础供给服务需求的空间制图。供给服务中的粮食供给呈自东南向西北递减的趋势,同时,在城市扩张的影响下,粮食供给服务还表现出在城镇周围聚集并向外扩张的空间格局。供给服务中的能源供给基于一次能源的资源赋存和开采状况,基础供给服务供给空间格局具有区域性,与自然资源的存赋和土地生产力高度相关。需求服务聚集的地区主要在城市中心区,并向城市周围逐渐递减,食物供给服务的需求和能源供给服务的需求表现出空间分布的一致性,供给服务需求的空间格局表现出与人口空间格局一致的流动性和聚集性。另外,尽管统计数据表明京津冀地区基础服务整体上表现为赤字,然而京津冀地区基础供给服务盈余/赤字的空间格局表现出城市中心区赤字“岛”,远离城市的区域逐渐盈余,说明基础服务流动表现为京津冀区域内外的基础服务共同向京津冀城市中心区聚集的趋势。

应用该模型时需要注意以下几个方面。

1) LUCC-ESs 矩阵构建的前期工作中,需要的资料包括土地利用现状以及已核算的生态系统服务量。该方法的核心内容是针对区域生态系统服

务,以地类为依托,按照不同地类对服务的贡献度进行分解,将生态系统服务用矩阵和空间的形式来表达。

2) LUCC-ESs 矩阵构建过程中,尽量选择非货币计量单位计算。在生态系统服务的研究中,通过价格进行服务计量的方式颇受争议。货币单位具有一定的价值倾向,因此进行服务计量过程中易受市场的波动而不可靠,同时,不同时间和地区间的价格波动也会影响核算的时空特征。因此,LUCC-ESs 矩阵构建时选择重量、能量和面积等客观的计量单位,以便避开与服务本身无关的影响。

3) 用空间制图的方式进行基于 LUCC-ESs 矩阵的区域生态系统服务供需分析,可以为认识生态系统服务供给的潜能、服务利用中的冲突和限制、服务需求的分布和发展趋势等提供可能的思路。例如,出现大量赤字的区域,需要在强化该地区生态系统服务供给的同时,提倡生态系统服务的利用效率,减少单位面积生态系统服务能量需求,并通过市场手段或者生态系统服务付费手段,从区域以外获取服务,保障该地区的供给安全。

4) LUCC-ESs 矩阵的构建具有尺度约束性。基础供给服务矩阵是基于土地利用类型建立,由于气候、地形和生产方式等条件的影响,单位面积耕地和林地等供给产量不同,生态系统服务供给量也会受到影响,而矩阵的构建和应用区域应该为具有类似的自然地理条件、相近的生产力水平和需求习惯的区域,因此服务矩阵的构建主要为区域尺度的生态系统服务核算服务。

5) LUCC-ESs 矩阵的构建具有动态性。土地提供食物的能力会随着化肥和农业技术等社会投入得到提高,或城市聚集区对基础服务的需求会随着生活品质的提高而提高,矩阵中相应服务的供给或需求应相应地变更。同时,矩阵的建立是以专家知识和案例研究为基础,在前提条件和数据来源尽量简明的情况下,方法体系容易构建。随着数据的更新和常规观察的需要,通过数据的逐次迭代,可以对矩阵表中有变动的服务供给或需求做相应的修正。这个修正过程也是对土地利用类型与强度、地表生物信息和非生物信息不断更新和集成的过程,长期的数据更新和分析可为案例区的生产服务变化趋势预测提供有力的数据支撑。

## 参考文献

- [1] Hall W L. CHAPTER 7 — constructing a decision



- model // Brown K, Hall W L, Snook M, et al. Sustainable land development and restoration. Boston: Butterworth-Heinemann, 2010: 111–136
- [2] Haines-Young R. Land use and biodiversity relationships. *Land Use Policy*, 2009, 26: S178–S186
- [3] Dresner M. Using research projects and qualitative conceptual modeling to increase novice scientists' understanding of ecological complexity. *Ecological Complexity*, 2008, 5(3): 216–221
- [4] Daily G C. Management objectives for the protection of ecosystem services. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(6): 333–339
- [5] Costanza R, D'arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3–15
- [6] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740–1746
- [7] 范小杉, 何萍. 河流生态系统服务研究进展. *地球科学进展*, 2018, 33(8): 852–864
- [8] Burkhard B, Kroll F, Müller F, et al. Landscapes' capacities to provide ecosystem services—a concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, 2009, 15(1): 1–12
- [9] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911–919
- [10] 王明浩, 翟毅, 刘玉娜. 京津冀经济区的研究. *学习与实践*, 2005, 12(1): 21–26
- [11] 周策. 京津冀协同发展背景下河北省土地综合承载力研究[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2016
- [12] 冯海云, 李洪远, 孟伟庆, 等. 天津市 1997 年—2006 年相对资源承载力的动态测度与分析. *环境科学与管理*, 2009, 34(2): 6–11
- [13] 马程, 李双成, 刘金龙, 等. 基于 SOFM 网络的京津冀地区生态系统服务分区. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1383–1393
- [14] 孙文博, 苗泽华, 孙文哲. 京津冀地区生态系统服务价值变化及其与经济增长的关系. *生态经济*, 2015, 31(8): 61–64
- [15] 王彦芳. 京津冀地区生态系统服务价值估算与分析. *环境保护与循环经济*, 2017, 37(7): 52–56
- [16] United Nations Environmental Program. Millennium ecosystem assessment ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005
- [17] De Groot R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3): 175–186
- [18] Müller F. Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecological Indicators*, 2005, 5(4): 280–294
- [19] Müller F, Burkhard B. An ecosystem based framework to link landscape structures, functions and service // Mander, Wiggering H, Helming K. Multifunctional land use: meeting future demands for landscape goods and services. Heidelberg: Springer, 2007: 37–63
- [20] 武定军. 天津能源可持续发展的战略思考. *天津社会科学*, 2006(5): 91–92
- [21] 王泽生. 天津市能源消费结构与环境空气质量的现状分析. *中国能源*, 2009, 31(2): 31, 35–37