



# 基于不同主体的生态系统服务流时空特征及 影响因素研究 ——以苹果供给服务为例

陈文婷<sup>1</sup>, 陈海<sup>1</sup>, 贾哲<sup>2</sup>, 耿甜伟<sup>3</sup>

(1. 西北大学 城市与环境学院/陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127;  
2. 西安科技大学 马克思主义学院, 陕西 西安 710054; 3. 太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619)

**摘要** 揭示食物供给服务流的时空特征及影响因素是保证粮食安全、确保该服务持续供给的必要前提和重要依据。以苹果供给服务为例, 首先构建了研究理论框架, 随后采用空间自相关、地理探测器等方法分析了客商、企业、电商3类主体作用下苹果供给服务流(apple provision service flow, APEF)的时空特征及影响因素。结果表明: ①APEF时间上呈季节式变化, 秋季流量最高, 夏季最少, 受节假日影响“波峰”型态势明显, 不同主体差异较大; ②空间上呈“喇叭”状多核心分布, 主要流向为华东、华南、西南地区, 其中客商呈“南—北”走向的放射状, 企业呈“三核三线”状, 电商呈“多核心串珠状”; ③APEF的主要影响因素包括苹果产量、经济发展和消费水平。研究结论可为解决生态系统服务供需时空错配及科学管理提供理论参考。

**关键词** 生态系统服务流; 主体; 时空变化; 影响因素

中图分类号: K901 DOI: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2024-02-011

## Spatiotemporal characteristics and influencing factors of ecosystem services flow based on different entities: A case study of apple provisioning services

CHEN Wenting<sup>1</sup>, CHEN Hai<sup>1</sup>, JIA Zhe<sup>2</sup>, GENG Tianwei<sup>3</sup>

(1. College of Urban and Environmental Science, Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and  
Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China;  
2. School of Marxism, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
3. Institute of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China)

**Abstract** Revealing the spatiotemporal characteristics and influencing factors of food supply service flow is a necessary prerequisite and important basis for ensuring food security and sustainable supply of this service. Taking Apple's supply services as an example, a research theoretical framework was first constructed. Then, methods such as spatial autocorrelation and geographic detectors were used to analyze the spatiotemporal characteristics and influencing factors of Apple Provision Service Flow (APEF) under the influence of three main entities: merchants, enterprises, and e-commerce. The results show that ① the APEF time shows a seasonal

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(41971271, 41871185); 山西省基础研究计划(202203021222243)。

第一作者: 陈文婷, 女, 博士研究生, 从事生态系统服务研究, 202010223@stumail.nwu.edu.cn。

通信作者: 陈海, 男, 教授, 博士生导师, 从事土地利用及可持续发展研究, chw@nwu.edu.cn。

variation, with the highest flow in autumn and the lowest in summer. The "peak" trend is significantly affected by holidays, and there are significant differences among different subjects. ②In terms of space, it is distributed in a "trumpet" shape with multiple cores, mainly flowing towards the eastern, southern, and southwestern regions of China. Among them, customers are in a radial shape with a "south-north" direction, enterprises are in a "three core and three line" shape, and e-commerce is in a "multi-core bead string" shape. ③The main influencing factors of APEF include apple production, economic development, and consumption level. The research conclusion can provide theoretical reference for solving the spatiotemporal mismatch between supply and demand of ecosystem services and scientific management.

**Keywords** ecosystem service flow; entities; spatiotemporal variations; influencing factors

作为未来地球(Future Earth)、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(The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)等计划的核心研究内容之一<sup>[1-2]</sup>, 如何从生态和社会的综合视角来理解生态系统服务(ecosystem services, ES)从生态系统到人类社会的流动过程已逐渐受到学术界的关注<sup>[3-4]</sup>。其中,探讨不同主体对生态系统服务流时空传输的影响,揭示ESF(ecosystem services flow, ESF)的流动特征与影响因素已经成为当前ESF研究的热点内容<sup>[5-6]</sup>。研究对于揭示生态系统服务流的流动机制<sup>[7]</sup>,探讨不同主体对ESF的差异化影响,实现ES在供给区与受益区间的合理流动,促进ES的持续发展与科学管理具有重要的理论和现实意义<sup>[8-9]</sup>。

生态系统服务流实质上是要建立供给区与需求区之间的时空关联<sup>[10]</sup>,从供需关系揭示ESF时空特征已经逐渐得到学界广泛应用,并在近年来成为ESF研究的主流<sup>[11]</sup>。学者早期多关注ESF研究理论框架的提出,如Liu和Villamagna等从ESF流动过程到涉及主体入手,建立ES的因果反馈联系,提出了人与自然耦合系统中远程生态系统服务流传递过程框架<sup>[12-13]</sup>,也有学者从供需关联及ESF传递过程构建了生态系统服务的流动框架<sup>[14]</sup>,在框架讨论的基础上揭示ES供给区与受益区的空间关系,并开始尝试绘制ESF成为当前研究的重点<sup>[15]</sup>。特别是近年来有学者通过供需比或供需差的方式模拟流量<sup>[16]</sup>,基于服务属性模拟流向的方式,实现了对ESF流向与流量的计算与绘图。目前分析单一服务流已经成为揭示ESF特征的主要途径<sup>[17-18]</sup>,如水源涵养服务、碳固持服务、防风固沙服务<sup>[19-23]</sup>。已有研究成功探索了ESF的研究内容并建立了ESF的研究范式,为

ESF研究提供了重要参考。但目前研究主要聚焦于基于单一服务尤其是基于自然属性流动的ES,对于传递过程或传递载体依托人力完成ESF的研究还不多见,缺乏不同主体对ESF的差异化影响的研究。如其中最典型的供给服务,包括粮食、果蔬等,与其他服务相比,该类服务往往存在较为明显的供需时空错配问题<sup>[6]</sup>,为了实现供需平衡,在人力等主体作用下,该服务从供给区向受益区流动<sup>[6,24]</sup>,特别是在不同主体影响下,其流动路径与过程差异显著<sup>[25]</sup>。

与农业生态系统中的作物产品相关的ESF被描述为复杂的人类-环境系统,该系统从农业领域的作物生产到最终消费者<sup>[7]</sup>。作为典型的供给服务,苹果供给服务的流动实际上是将自然资源(来自大自然的营养素、水和能量)和人类投入(化肥、种子、能源和劳动力)有机结合<sup>[26-28]</sup>,而后从自然生态中向人类社会流通,它的流量、流向、流速等均受人类活动影响,但目前有关苹果供给服务流动的研究报道较少。本研究以中国唯一符合苹果生产气候指标要求的优生区——洛川苹果为例,在分析不同主体影响下(apple provision service flow, APEF)的空间聚类及时间变化特征的基础上,探讨了影响APEF的驱动因子及因子间的交互作用。研究结果可从理论上揭示不同主体对APEF的时空特征差异化影响,也为在实践中制定合理的产业发展政策提供参考。

## 1 研究区概况及研究基础

### 1.1 研究区概况

洛川县地处渭北黄土高原沟壑地带,暖温湿润干旱大陆季风气候,平均海拔1 100 m,土层厚达80~200 m,年平均气温9.2℃,年降雨量622 mm,无霜期170 d,日照2 552 h,昼夜温差15.7℃<sup>[29]</sup>。洛

川县海拔较高,光照充足,昼夜温差大,雨热同季,得天独厚的自然资源优势,使洛川成为全国唯一符合苹果生产气候指标要求的优生区。洛川县域面积约为 1 804 km<sup>2</sup>,截止 2020 年,耕地约 4.33 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,其中苹果种植面积约 3.53 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,苹果种植面积占比耕地比重高达 83%,占县域面积接近 20%,人均苹果种植面积 0.35 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,居全国之首。2020 年全县总人口 22.06 万人,其中农业人口 16.1 万人。全县 95% 的农民种植苹果,农民收入的 95% 来源于苹果<sup>[30]</sup>。苹果种植已成为洛川县的支柱性产业,并在苹果的仓储、物流、销售方面已经形成了较为完善的产业链,因此以洛川为例,为本研究的开展提供了理想的研究平台。

1.2 研究框架

本研究提出了不同主体影响下的 APEF 概念框架(见图 1),从以下 3 个层次论述该框架。

1)理论基础。生态系统服务通过不同尺度的空间流动(从局地到全球)为人类提供福利,不同载体的生态系统服务受多种因素影响,其流动过程均有不同,生态系统服务流传递到需求区所需时间也有明显差异<sup>[31]</sup>。苹果作为可以全年流通的食物供给产品,不同时间段 APEF 的流量、流速均有不同。更为重要的是其流动过程受主体影响较大,主体不同,往往流通方式不同,最终会影响流量与流速。

2)主体划分。本研究基于已有成果并结合实地走访,特别是对洛川县苹果产业中心年报、周报的文本进行分析,提出 3 类主体在苹果流动过程中发挥的重要作用,即客商、企业和电商。

具体而言,主体(客商)是指外来的专业苹果采购商,由当地的“代办”与农户交易,一部分苹果直通市场(冷链专线运输),一部分存储冷库,根据需求按时按量向市场发货,直达目的地,量大次数多,客商一般都有固定市场档口和销售渠道。主体(企业)是指在当地有自持的苹果基地的公司,由“经理人”与合作农户联系、收购苹果,存储在冷库中。企业在一、二线城市建立专卖店,经营方式包括企业自营、合作经营或授权经营。专卖店销售区域以市内为主,基本可以覆盖各城市主城区。主要由线下店仓一体化实体门店、线上 APP、市区内免费配送的物流服务(冷链专线运输)3 个部分构成。主体(电商)是指网上自主经营的个体户,随着互联网技术的不断发展,传统的 APEF 流通模式也发生了改变。一些公司和微商利用互联网有效选择、并自发建立了一些网络信息平台,用来推进苹果流通(快递运输)。

3)框架解释。如图 1 所示, APEF 分为 4 个组成部分:供给区、流通主体、流通过程和受益区。总体而言, APEF 流通过程是指不同的主体(客商/企业/电商)通过不同形式(代办/经理人/自行购买)采用不同的运输方式(冷链/专线/快递)通过不同的流通过程(线下购买/企业派送/客户自提/线上下单)实现从生产者到消费者流通的全过程。该概念框架的核心在于突出主体作用的差异性,即主体不同,服务的流通方式不同,最终会影响苹果流通的数量与方向。在图中用线条的粗细来表示不同的购买途径或运输方式之间流动强度及数量差异,用线条的颜色表示不同主体产生的流向路径。

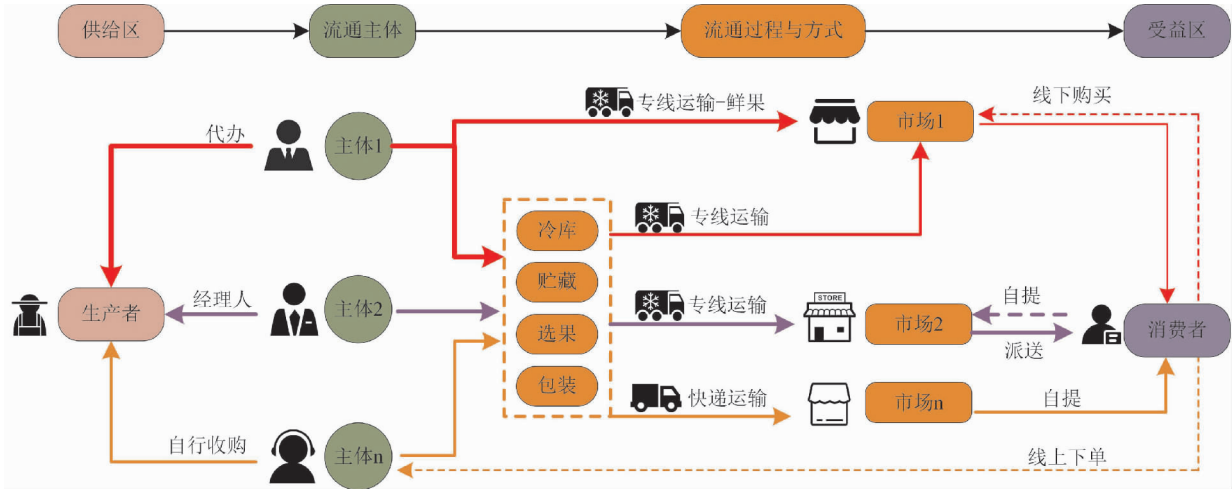


图 1 APEF 在不同主体下的流动路径  
Fig. 1 Flow paths of APEF under different entities

## 2 研究数据与方法

### 2.1 数据来源

本文数据主要通过实地调研与线上搜索整理获得,其中通过实地走访洛川县 213 家冷库企业,获得每家冷库出入库记录单,得到洛川县客商苹果物流数据。通过实地走访 135 家营销企业,获得 63 家专卖店苹果流通数据。通过洛川县邮政局获得 2019 年 9 月—2020 年 8 月苹果在线成交交易数据。此外,其余数据如人均可支配收入、居民消费品零售总额等通过查询洛川县统计年鉴获得。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 空间自相关

可揭示数据的空间依赖和空间异质性,以及探测变量的空间关联性和集聚特征,分为全局空间自相关和局部空间自相关<sup>[32]</sup>。全局 Moran's  $I$  计算公式为

$$I(d) = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

式中: $I$  为全局 Moran 指数,取值范围为 $[-1, 1]$ ,用以衡量苹果流量的聚集特征; $n$  为市级行政单元的数量; $x_i$  和  $x_j$  分别为市  $i$   $j$  的苹果流量, $\bar{x}$  为苹果流量平均值,Moran 指数为正,表明苹果流量空间分布呈正相关,且值越大,相关性越显著。

由于全局自相关不能明确表示空间集聚或异常的具体位置,因此为探究各市域苹果流量与相邻市的空间关联及差异程度,进一步采用局部空间自相关进行分析,其计算公式为

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_j, (i \neq j) \quad (2)$$

式中: $I_i$  为正时表示高值被高值包围(高-高),即某市苹果流量较高,其周围城市流量也较高;或低值被低值包围(低-低),即某市苹果流量较低,周围城市流量也较低; $I_i$  为负表示低值被高值包围(高-低),即某市苹果流量较高,周围城市流量较低;或高值被低值包围(低-高),即某市苹果流量较低,周围城市流量较高。

#### 2.2.2 地理探测器

地理探测器是探测空间分层异质性及其背后驱动因素的空间统计学方法,地理探测器的因子

探测可以识别影响因子,交互探测可以解释影响因子对因变量的交互作用,是研究复杂地理因素驱动作用机理的有效工具<sup>[33]</sup>。本文运用地理探测器下的因子探测器对苹果服务流的空间分布差异进行探讨,因子探测能够探测某因子  $X$  在多大程度上解释了属性  $Y$  的空间分异,再进一步使用交互作用探测器,评估影响 APEF 流动空间分布的两两因子之间的交互作用。某因子  $X$  对属性  $Y$  的影响程度用  $q$  值度量,表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: $h = 1, 2, \dots, L$ ,  $L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层; $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差。 $p$  值为显著性检验, $q$  值为解释力, $q$  值越大表示自变量  $X$  对属性  $Y$  的解释力越强,反之则越弱。在本文中,某指标的  $q$  值越大,表明该指标对流量的解释作用就越强,该指标对流量的影响就越大。

本文中将整体数量( $Y_1$ )、客商( $Y_2$ )、企业( $Y_3$ )、电商( $Y_4$ ) 4 种 APEF 设为因变量,从生产、人口、经济和交通因素 4 个维度出发,选取各省苹果产量( $X_1$ )、常住人口( $X_2$ )、人均可支配收入( $X_3$ )、居民消费品零售总额( $X_4$ )、GDP( $X_5$ )、空间距离( $X_6$ )、货运量( $X_7$ )、运输网密度( $X_8$ ) 8 个因子为自变量。

## 3 APEF 的时空分布特征

### 3.1 APEF 时间变化特征

#### 3.1.1 年内变化特征

洛川县 APEF 年内流量的时间变化呈波浪型走势(见图 2),单样本卡方检验结果显示,APEF 流量与季节、月份的  $p$  值均小于 0.001,说明 APEF 流量随季节、月份的变化特征存在统计学意义。本图时间序列基于苹果生长周期制定,9 月多为苹果成熟期,故将其设定为研究期初。由图 2 可知,研究时段内 APEF 流量集中于秋季(9—11 月),占比高达 46%,冬季流量占比为 21%,次年 1 月中下旬流量出现了一定反弹,春季流量占比为 23%,4、5 月有两次小高峰,夏季流量占比为 10%,7、8 月份流通量最少。

从不同的主体来看,客商秋季流量占全年客商总量的 41%,全年流量峰值均在 10 月,5、6 月销量基本持平,夏季 7、8 月份销量最少。企业秋

季流量总量占企业总量 40%, 全年流量峰值也在 10 月, 电商秋季流量占电商总量的 38%, 全年流量峰值在 11 月, 12 月消费意愿减弱较多, 3 月电商流量还高于企业, 7、8 月份发货量极少。

综上所述, 洛川县各主体流量年内变化特征

与总体特征基本一致, 年内均呈现较为明显的波峰, 依次为 9 月、1 月、11 月、2 月、4 月和 5 月, 与我国主要节假日时间高度吻合, 说明洛川县苹果流量变化受特殊日期变化明显。

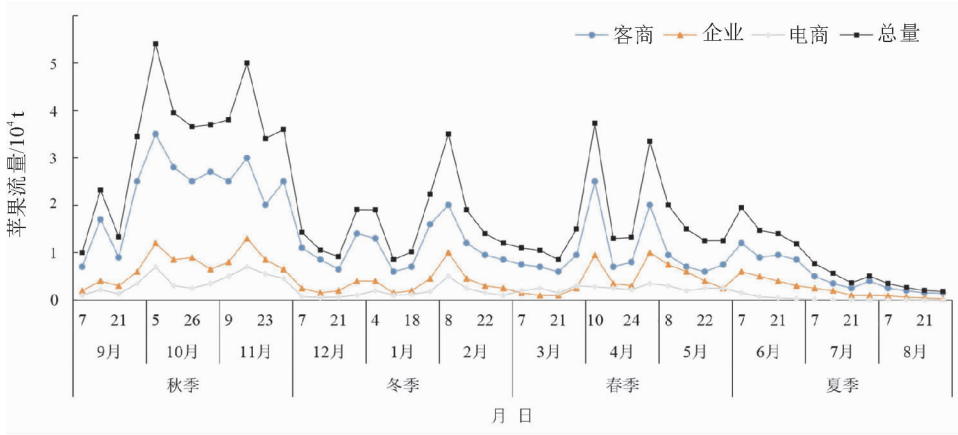


图 2 APEF 流量时间变化特征

Fig.2 Temporal variations in APEF

3.1.2 特殊日期变化特征

苹果本质上作为商品存在, 其流动方向与过程表现出明显的经济属性, 因此受节假日, 电商活动日等特殊日期影响较大。统计表明 APEF 流量最大的时间段多发生于节假日。基于法定节假日以及“双十一”分别考察不同主体作用下的苹果

流量在特殊时间节点的变化特征, 苹果从供给区流动到需求区需要提前备货, 包装, 发出, 所以选取节假日前的一周流量考察特殊节点时间的变化特征(见图 3), 由于中秋与国庆、春节与元宵发货时间基本重叠, 故分析过程中将放在一起加以分析。

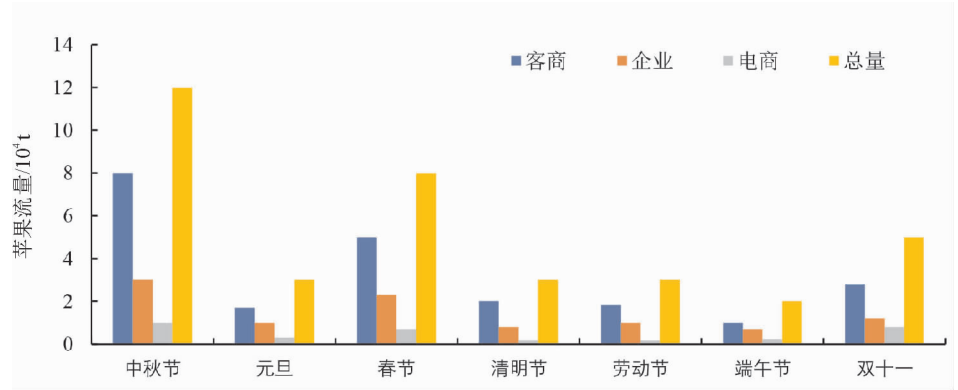


图 3 苹果流量的节假日变化

Fig.3 Apple flow variations during holidays

节假日变化特征为, 在科技助力下, 苹果可在冷库中长时间存放以确保全年流通。节假日苹果流量占比 40%, 相应的流通速度较快。总体上, 客商在节假日流量占比最大, 企业次之, 电商最少。中秋节与国庆节苹果流通速率全年最高, 春节和元宵节苹果需求较大, 清明、五一和端午节也有小高峰。“双十一”苹果流量为 50 000 t, 是电商日均销售的最高峰。

客商中秋节流量占总流量的 2/3, 为其流量峰值; 企业对节假日因素更为敏感; 电商对节假日敏感度最低, 中秋、双十一、春节分列所有节假日流量前三位, 其他节日流量相差不大。

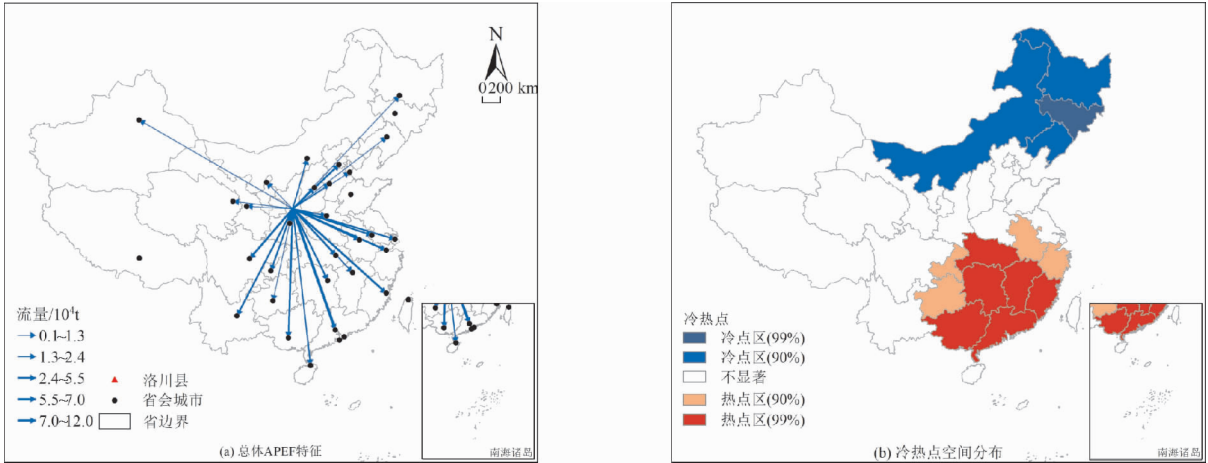
3.2 APEF 的空间分布特征

3.2.1 APEF 总体分布特征

根据企业订单量, 客商发货量, 以及全年电商订单量的流通过程信息, 绘制从供给区到需求区

的点对点连线图(省域落点标记在各省行政中心),以此分析 APEF 的流向和流量,进而揭示空间流动路径[见图 4(a)]。按照自然断点分级法分为 5 级,从图中可知 APEF 总体流向分布极不均衡,呈“喇叭”状多核心空间格局,核心流入区位于胡焕庸线东南侧,其中广东、福建、浙江、上海、四川、广西位居前列,而东北及西北区域流入较少。进一步使用冷热点分析法探究省域尺度空

间分布规律[见图 4(b)],发现冷热点分布区都呈现出明显的核心-边缘结构,99% 置信度下的热点区位于广东、福建、广西、湖北等地区,属于极高值聚类。其外围是置信度为 90% 的临近省份浙江、重庆、云南等热点区,属于次高值聚类。99% 的冷点区为吉林省,其外围是置信度为 90% 的邻近省份黑龙江、辽宁、内蒙。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

图 4 APEF 的总体分布特征

Fig. 4 Overall spatial distribution pattern of APEF

3.2.2 客商 APEF 分布特征

对客商 APEF 按市域分布进行探讨[见图 5(a)]。可以看出,客商 APEF 呈“南—北”走向放射状空间分布格局。其中,华南和华东地区流量最大,主要是以广州、深圳、东莞、江门等为主的“大湾区”和以上海、杭州、南京、苏州、福州、厦门等为主的东部沿海地区。西南地区则以成都、重庆、南宁等城市为主。选取市域尺度进行空间自相关分析,运用全局自相关中的 Moran’s *I* 衡量 APEF 的集聚特征, Moran’s *I* 指数为 0.073 ( $p = 0.004$ ),表明客商 APEF 在空间分布具有明显的空间集聚特征(显著水平为 0.01)。进一步采用局部空间自相关分析揭示空间分布格局及其集聚特征。计算 Local Moran’s *I*,在通过显著性检验的基础上绘制了 LISA 集聚图[见图 5(b)]。客商 APEF 的高-高类型区主要分布在广州、东莞、深圳、桂林、杭州、嘉兴、福州。部分高-高类型区(如广州、杭州等城市)周围分布一些低-高地区(赣州、茂名、江门、温州、宁波、苏州等城市)。低-低类型区主要分布在吉林、沈阳、呼和浩特、银川、太原等地区。高低类型区分布在北京。

3.2.3 企业 APEF 分布特征

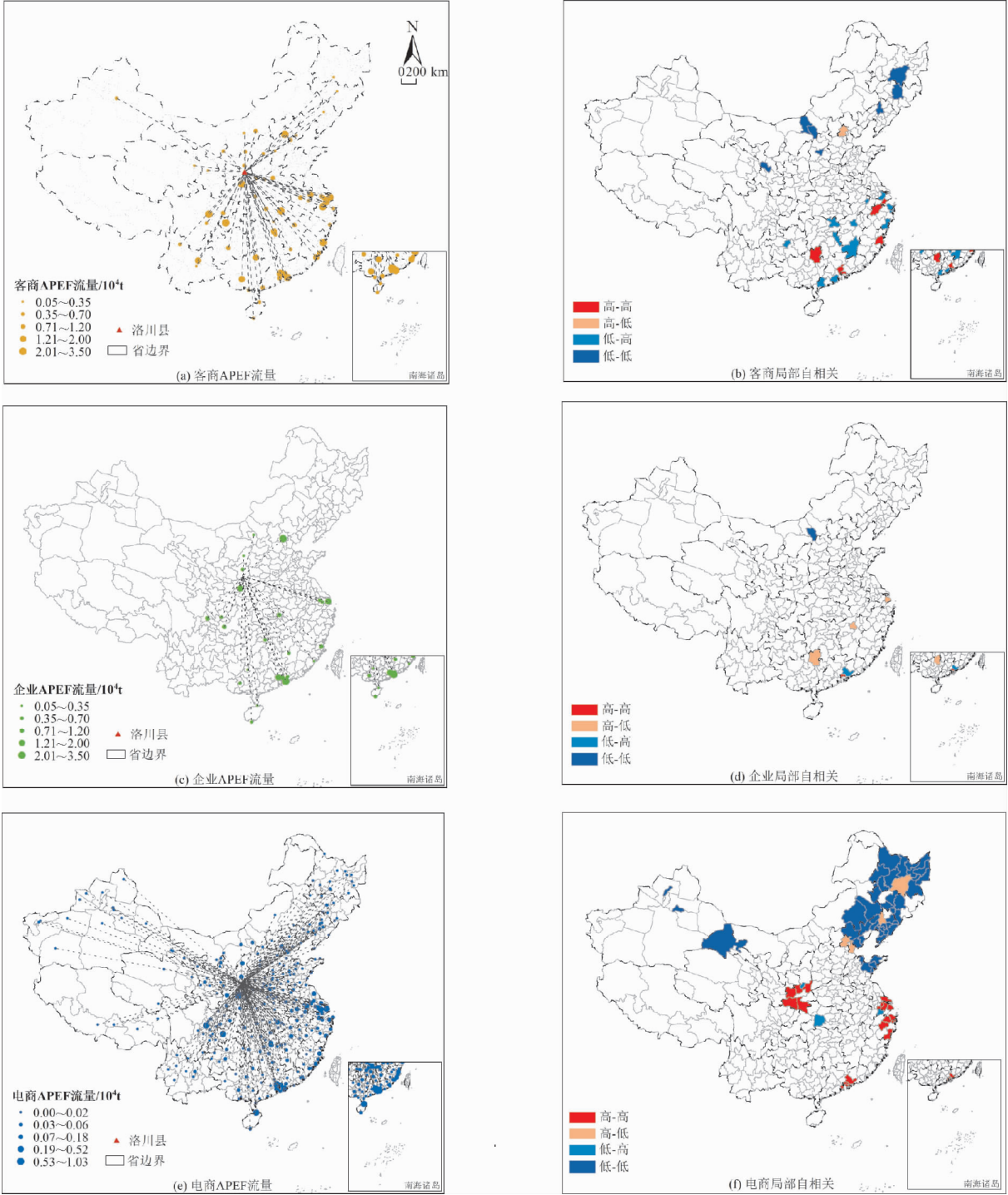
进一步对企业 APEF 进行探讨[见图 5(c)]。企业 APEF 呈“南—北”走向“三核三线”状。主要是以北京、上海、广州特大城市为核心呈线状分布。企业的专卖店以点状门店向面状区域提供苹果供给服务,主要布局在一、二线城市。专卖店布局在北京、上海、广深一线城市的有 23 家。同时,除杭州、福州、成都等省会城市外,还有一些非省会城市如厦门、泉州、三亚、无锡、苏州等。此外还有部分布局在陕西各个地级市。企业全局自相关中的 Moran’s *I* 指数为 0.079 ( $p = 0.005$ ),表明在空间分布上具有明显的空间集聚特征(显著水平为 0.01)。根据 LISA 图[见图 5(d)]可以看出高高类型区主要分布在上海、东莞。高-低类型区主要分布在桂林和南昌。低-高类型区分布在高-高类型区附近如惠州,低-低类型区分布在南宁、鄂尔多斯或呼和浩特。

3.2.4 电商 APEF 分布特征

对电商 APEF 进行探讨[见图 5(e)]。电商因其终点位置既定,苹果流空间分布相对广泛、分散,围绕供给区呈“南—北”走向的“多核心串珠

状”。空间分布上主要有三个聚集地,珠三角、长三角,以及陕西内部,而东北、新疆、西藏等偏远地区较少,其余在其他地区零散分布。全局自相关中的 Moran's  $I$  指数为 0.034( $p=0.000$ ),在空间分布上具有明显的空间集聚特征(显著水平为 0.001)。根据 LISA 图[见图 5(f)]可以看出高高

类型区主要分布在距离供给区较近的西安、宝鸡、安康等城市。其他两个高-高类型区和客商、企业较为相似,主要分布在长三角和珠三角。低-高类型区分布在高-高类型区附近。低低类型区连片集中分布于东北地区 and 西北地区,包围着高低类型区(如北京、天津,沈阳、哈尔滨)。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

图 5 不同主体 APEF 的空间分布特征  
Fig. 5 Spatial distribution patterns of APEF for different entities

4 APEF 空间流动路径的影响因素

4.1 单因子探测结果

使用地理探测器分析各因子的影响强度,结果如表 1 所示。

1)整体流量影响因子由表 1 可知,APEF 空间分布差异的主要因素影响大小依次为 GDP (0.547) > 苹果产量(0.421) > 人均可支配收入(0.407) > 居民消费品零售总额(0.403) > 货运量(0.401) > 运输网密度(0.400) > 常住人口(0.393)。说明经济基础、自然条件、市场活力、交通通达性和货运承载力是影响洛川 APEF 空间分布差异的主要因素。常住人口属于次级解释因子,而仅有空间距离的因子解释力未通过显著性检验,说明随着交通运输技术的发展,空间距离对苹果跨区域需求影响越来越小,即消费者不会因为空间距离过远而不产生需求,也不会因为空间距离较近而产生需求。

2)影响不同主体的 APEF 空间分布差异的主

要因素。客商的测算结果中,GDP、苹果产量和居民消费品零售总额是核心影响因子,说明经济较发达且不属于苹果供给区的城市对苹果需求量较大。企业的测算结果中人均可支配收入、居民消费品零售总额和 GDP 是核心影响因子,因为企业在一些发达城市铺设专卖店,大多以礼盒装形式销售,目标群体主要是企事业单位,大型公司年货订单等等,受众群体较小,苹果流量总体不大,所以受人均可支配收入和地方经济消费水平影响较大,常住人口和空间距离影响力较小。电商的测算结果中人均可支配收入、居民消费品零售总额和空间距离是核心影响因子。由于电商的 APEF 属于消费者线上随机下单,因此人均可支配收入和居民消费品零售总额为核心因子。值得注意的是快递运输存在保鲜问题,尤其到了夏季,温度太高不利于苹果长途运输,电商流量很小,因此空间距离、交通通达性、货运承载力也是重要因素。电商流量整体较小,随机性比较大,因此受 GDP 和常住人口影响较小。

表 1 APEF 空间流动路径探测因子体系与探测结果  
Tab.1 Factor system and detection results of APEF spatial flow path detection

| 编码             | 变量        | 整体流量  |       | 客商    |       | 企业    |       | 电商    |       |
|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                |           | q     | p     | q     | p     | q     | p     | q     | p     |
| X <sub>1</sub> | 苹果产量      | 0.421 | 0.26  | 0.394 | 0.036 | 0.322 | 0.078 | 0.395 | 0.030 |
| X <sub>2</sub> | 常住人口      | 0.393 | 0.048 | 0.323 | 0.061 | 0.074 | 0.745 | 0.250 | 0.158 |
| X <sub>3</sub> | 人均可支配收入   | 0.407 | 0.045 | 0.248 | 0.202 | 0.382 | 0.048 | 0.484 | 0.016 |
| X <sub>4</sub> | 居民消费品零售总额 | 0.403 | 0.034 | 0.393 | 0.048 | 0.346 | 0.032 | 0.450 | 0.016 |
| X <sub>5</sub> | GDP       | 0.547 | 0.006 | 0.425 | 0.022 | 0.339 | 0.066 | 0.343 | 0.056 |
| X <sub>6</sub> | 空间距离      | 0.273 | 0.138 | 0.295 | 0.108 | 0.178 | 0.334 | 0.410 | 0.028 |
| X <sub>7</sub> | 货运量       | 0.401 | 0.035 | 0.366 | 0.052 | 0.319 | 0.100 | 0.409 | 0.034 |
| X <sub>8</sub> | 运输网密度     | 0.400 | 0.047 | 0.385 | 0.059 | 0.207 | 0.365 | 0.408 | 0.032 |

4.2 交互探测结果

APEF 空间流动分布差异是由多种影响因子共同作用的结果,进一步运用地理探测器的交互

作用探测器来获取各个影响因子对苹果整体服务流空间流动分布的交互作用(见表 2)。

表 2 APEF 空间流动路径各探测因子交互作用  
Tab.2 Interactions among factors in APEF spatial flow paths

|          | 苹果产量 | 常住人口 | 人均可支配收入 | 居民消费品零售额 | GDP | 空间距离 | 货运量 | 运输网密度 |
|----------|------|------|---------|----------|-----|------|-----|-------|
| 苹果产量     |      |      |         |          |     |      |     |       |
| 常住人口     | 非线性  |      |         |          |     |      |     |       |
| 人均可支配收入  | 非线性  | 双因子  |         |          |     |      |     |       |
| 居民消费品零售额 | 双因子  | 双因子  | 双因子     |          |     |      |     |       |
| GDP      | 双因子  | 双因子  | 双因子     |          |     |      |     |       |
| 空间距离     | 非线性  | 双因子  | 双因子     | 非线性      | 非线性 |      |     |       |
| 货运量      | 非线性  | 双因子  | 双因子     | 双因子      | 双因子 | 双因子  |     |       |
| 运输网密度    | 双因子  | 双因子  | 双因子     | 双因子      | 双因子 | 双因子  | 双因子 |       |

注: $q(A \cap B) > q(A) + q(B)$  为非线性增强, $q(A \cap B) > \text{Max}(q(A), q(B))$  为双因子增强。

探测结果显示,影响因子两两之间均为增强关系,包括非线性增强型和双因子增强型,不存在独立及减弱的关系,双因子增强说明两因子交互作用的影响力均大于各单一因子的影响力,非线性增强说明两个因素交互作用的影响力要大于其分别单独作用时的影响力之和。其中,对 APEF 空间分布差异性影响力水平最高的关键交互因子是苹果产量和人均可支配收入,影响力达到 0.889,这说明城市经济消费水平和苹果稀缺性在空间叠加后,对 APEF 空间分布起到主导作用。例如我国大多南方城市属于苹果需求区,加之苹果比可替代水果(例如柑橘、梨)售价高,因此南方发达城市因经济发达消费水平较高,对苹果消费能力较强,APEF 流量较大。同时,苹果产量和居民消费品零售总额、常住人口、运输网密度、货运量、空间距离、GDP 的交互影响力分别为 0.846、0.828、0.803、0.798、0.785、0.781,表明苹果产量直接决定了供给区与需求区,在不种植苹果的地区经济越发达,交通通达性越好,货物承载力越大,苹果流量越大。而居民消费品零售总额与空间距离、GDP 与空间距离、人均可支配收入与常住人口也会产生很强的非线性增强,将在很大程度上提高其对 APEF 空间分布差异的影响力水平。

综上所述,基于单因子探测结果可发现经济要素对流量的影响较大,而在交互探测中发现两两因子交互作用均呈增强型,尤其是常住人口、空间距离和运输网密度,虽然单个因子决定力较小,但在与其他因子空间叠加后,呈现出交互效应大幅度跃升的现象。因此,无论对于企业、电商或是客商,在设计产品销路时应首先考虑经济水平较高的区域,在此基础上综合考虑常住人口、空间距离、运输网密度等交互后作用显著提升的影响因子,以便于拓展销路、增加销量。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本文以苹果供给服务为例,借助空间自相关、地理探测器模型等方法,在揭示客商、企业、电商 3 类主体作用下苹果供给服务流的时空转移特征的基础上,分析了其时空特征的影响因素,主要结论如下。

1) 时间分布特征。APEF 受季节月份变化影

响明显,其中秋季流量最高,占比 46%,冬季和春季较少;夏季最少。同时,苹果流量受节假日影响呈“峰”型态势;不同主体变化量差距较大,客商最高,企业次之,电商最少,但各主体变化过程与总体变化特征基本吻合。

2) 空间分布特征。APEF 在空间上呈“喇叭”状多核心分布格局,主要流向华东、华南及西南地区。需求区集聚特征明显,冷热点分布区都呈现出明显的核心-边缘结构,热点区呈现以广东、福建、广西、湖南等省份的圆团状分布;冷点区呈现出以内蒙古、吉林、黑龙江等省份的带状分布。其中,客商 APEF 主要流向了大湾区和东部沿海地区。空间分布呈“南-北”走向的放射状,东部沿海地区为高-高、低-高聚集,中部城市大多为不显著地区,西北和东北地区呈低-低聚集;企业 APEF 在空间上呈现出“三核三线”状,主要是以北上广特大城市为核心的线状分布特征;电商 APEF 在空间上呈“多核心串珠状”,高-高类型区分布在陕西省以及长三角和珠三角。低-低类型区连片集中分布于东北地区和西北地区。

3) 时空特征影响因素。APEF 空间分布差异的影响因素大小依次为 GDP、苹果产量、人均可支配收入、居民消费品零售总额、货运量、运输网密度常住人口以及空间距离。由单因子探测可知,影响客商 APEF 空间分布的主要因素是 GDP、苹果产量和居民消费品零售总额,影响企业 APEF 空间分布的主要因素是人均可支配收入、居民消费品零售总额和 GDP,影响电商 APEF 空间分布的主要因素是人均可支配收入、居民消费品零售总额和空间距离。由因子交互作用探测可知,所有交互因子对 APEF 空间分布差异的影响力相对于单个因子都有所增强。其中,对 APEF 空间分布差异性影响力水平最高的关键交互因子是苹果产量和人均可支配收入,而常住人口、空间距离、运输网密度虽然单个因子决定力较小,但在与其他因子空间叠加后,呈现出交互效应大幅度跃升的现象。

### 5.2 讨论

通过上述分析可发现,APEF 流量最明显的时间特征是其波峰与节假日高度吻合,按季节排序,秋季流量最高,其余依次为春季、冬季、夏季。这是由于秋季是苹果的鲜果流通季节,且中秋与国庆双节流量效应明显;春季的清明节、劳动节等,处在新季水果上市之前,市场其他水果青黄不

接,是库存苹果流通的黄金时间,农历正月的春节和元宵节也刺激了苹果需求量;冬季则主要销售库存苹果,运输成本较高,终端价格上升,而其他可替代性水果的上市冲击了苹果市场,使得流量迅速下降;夏季大量鲜果上市,因此夏季流量最低。就主体而言,客商总体特征符合预期结果,春节期间销量最好,夏季主要用于依靠固定渠道备货。因为苹果礼品属性更强,受节假日影响因素更大,春节、清明节、劳动节等节假日会使企业有可观的流量。电商流量高峰主要在节假日和电商特有的“双十一”购物节,夏季因为气温过高,快递运输没有冷链不利于苹果保鲜,电商发货量极少。

通过分析 APEF 空间特征发现,虽然 3 类主体均呈东、南部流量高、流向密集的特征,但电商流向目的地更发散,城市分布较为均匀,企业则明显集中于上海、广州等大城市,客商介于两者之间。APEF 出现这种分布特征的主要原因是受主体作用的影响。由于采用线上交易,电商可以突破空间的限制,其目标群体分布也更为广泛。企业专卖店以点状门店向面状城市区域提供服务,承接企业的 APEF 往往需要大型市场和雄厚的资本作为依托,因此,在企业作用下呈现出明显的一二线城市聚集特征。客商的运输费用及采买费用较高,这也对客商提出了要求,销售范围基本包括了中国南部的大中型城市。客商 APEF 的高-高类型城市不仅为当地吸引了大量的苹果需求量,还通过溢出效应流向周边的需求区;低-高类型城市主要集中于南部省会城市的周边地区;低-低类型经济发展水平较低,消费力不高,并且周边有其他苹果供给区;高-低类型区某个特定高需求区,且周边区域因靠近环渤海产区为低需求区。因此,相较于企业而言客商来源更加广泛,而与电商相比,其空间聚集性又更加突出。由于不同主体的目标群体及流通方式不同,从而导致了不同主体影响下 APEF 呈现不同的特征。

### 5.3 展望

本文深入探析了不同主体 APEF 的时空特征与影响因素。与现有研究相比,本研究实现了对典型供给服务流量与流向的模拟,且揭示了影响流向和流量的关键因子,可对制定合理的产业发展政策以及市场营销提供参考。但本文使用数据,特别是物流、快递、订单等数据,仅能显示发货数量与发货(供给)时间,而无法显示接收(消费)

时间,特别是消费者具体的消费时间节点,囿于数据限制,因此文中仅分析了苹果供给服务的流量与流向,而流速则尚未涉及。流速是生态系统服务研究的重要内容,也是本研究后续亟待突破的领域。此外,研究时段仅限于 2019 年 9 月至 2020 年 8 月,研究时段较短,数据量较少,对于长时间序列分析不足。随着数据的进一步完善,揭示长时期跨度下不同主体 APEF 的时空特征及影响因素也是日后需要关注的重点。

### 参考文献

- [1] DAWSON N, MARTIN A. Assessing the contribution of ecosystem services to human wellbeing: A disaggregated study in western Rwanda[J]. *Ecological Economics*, 2015, 117: 62-72.
- [2] 李双成. 生态系统服务地理学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [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] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [5] 刘慧敏, 刘绿怡, 丁圣彦. 人类活动对生态系统服务流的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3232-3242.
- [6] LIU H M, LIU L Y, DING S Y. The impact of human activities on ecosystem service flows[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3232-3242.
- [7] 耿甜伟. 基于供需关系的生态系统服务流时空特征及调节机制研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- [8] BURKHARD B, KANDZIORA M, HOU Y, et al. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification[J]. *Landscape Online*, 2014, 34: 1-32.
- [9] SHI Y S, SHI D H, ZHOU L L, et al. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106418.
- [10] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796.

- ZHAO X Y, MA P Y, LI W Q, et al. The spatiotemporal changes in the supply-demand relationship of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 76(11): 2780-2796.
- [10] DU H Q, ZHAO L, ZHANG P T, et al. Ecological compensation in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on ecosystem services flow[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331: 117230.
- [11] XU L Y, HANG Y, JIN F. Evaluating the supply-demand relationship for urban green parks in Beijing from an ecosystem service flow perspective[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 85: 127974.
- [12] LIU J G, YANG W, LI S X. Framing ecosystem services in the telecoupled Anthropocene[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(1): 27-36.
- [13] 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.
- [14] FELIPE-LUCIA M R, MARTÍN-LÓPEZ B, LAVOREL S, et al. Ecosystem services flows: Why stakeholders' power relationships matter[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132232.
- [15] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 等. 生态系统服务流定量研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2723-2730.  
LIU H M, LIU L Y, REN J Y, et al. Progress in quantitative research on ecosystem service flow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2723-2730.
- [16] ZHANG J X, HE C Y, HUANG Q X, et al. Understanding ecosystem service flows through the metacoupling framework[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110303.
- [17] 杨正忠, 徐昔保, 李景宜, 等. 生态系统服务流研究进展与展望[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(7): 827-838.  
YANG Z Z, XU X B, LI J Y, et al. Research progress and prospects of ecosystem service flow[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(7): 827-838.
- [18] GUAN D J, DENG Z, ZHOU L L, et al. How can multiscenario flow paths of water supply services be simulated? A supply-flow-demand model of ecosystem services across a typical basin in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 893: 164770.
- [19] 李晶, 任志远. 基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值评价[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2943-2950.
- LI J, REN Z Y. Research on the values of CO<sub>2</sub> fixation and O<sub>2</sub> release by landuse ecosystem in loess plateau in northern Shaanxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 2943-2950.
- [20] ZHANG C, LI J, ZHOU Z X, et al. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106974.
- [21] XIE G D, LIU J Y, XU J, et al. A spatio-temporal delineation of trans-boundary ecosystem service flows from Inner Mongolia[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(6): 065002.
- [22] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 等. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3368-3380.  
ZHANG X R, WANG X F, CHENG C W, et al. Research on spatial flow of ecosystem services in southwest karst region based on supply and demand relationship[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3368-3380.
- [23] 陈梓隆, 林静玉, 黄金良. 水质胁迫下闽东南地区流域淡水生态系统服务流研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(8): 1051-1063.  
CHEN Z L, LIN J Y, HUANG J L. A study on the service flow of freshwater ecosystems in the southeast fujian basin under water quality stress[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(8): 1051-1063.
- [24] GENG T W, CHEN H, LIU D, et al. Research on mediating mechanisms and the impact on food provision services in poor areas from the perspective of stakeholders[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(19): 10510.
- [25] 刘慧敏. 基于生态系统服务流视角的人地系统动态演化评估[J]. *环境生态学*, 2023, 5(7): 21-32.  
LIU H M. Evaluation of dynamic evolution of human earth system from the perspective of ecosystem service flow[J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(7): 21-32.
- [26] BUKEVICIUTE L, DIERX A, ILZKOVITZ F. The functioning of the food supply chain and its effect on food prices in the European Union[M]. Brussels: Office for Infrastructures and Logistics of the European Communities, 2009.
- [27] MÜLLER F, BICKING S, AHRENDT K, et al. Assessing ecosystem service potentials to evaluate terres-

trial, coastal and marine ecosystem types in Northern Germany: An expert-based matrix approach[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106116.

[28] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 335-342.

YAO J, HE X Y, CHEN W. The latest progress in research methods for ecosystem service flows [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 335-342.

[29] 孙梨梨. 洛川县水资源承载力评价及优化配置研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.

[30] 刘乐彤. 乡村振兴背景下洛川苹果生产现状及转型升级研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.

[31] 冯文彬. 基于供需关系的粤港澳大湾区生态系统服务流研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.

[32] 连虎刚, 曲张明, 刘春芳, 等. 北方防沙带河西走廊段景观格局时空演变及其防风固沙服务响应[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2518-2526.

LIANG H G, QU Z M, LIU C F, et al. The spatio-temporal evolution of landscape pattern in the Hexi Corridor section of the northern sand prevention belt and its response to wind and sand fixation services [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(6): 25-33.

[33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.

WANG J F, XU C D. Geodetectors: Principles and prospects [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.

(编辑 邵煜)