京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合能值代谢效率及环境压力分析

方创琳^{1,2*}, 任宇飞^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

* E-mail: fangcl@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2017-01-09; 接受日期: 2017-03-24; 网络版发表日期: 2017-05-04

国家自然科学基金重大项目(批准号: 41590840、41590842)资助

摘要 在解析城市群地区城镇化与生态环境之间近远程耦合关系的基础上, 借助城市能值代谢方法, 分析了1980~2014年近35年京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合代谢效率及环境压力。结果表明: (1) 近35年来京津冀城市群地区总代谢能值呈上升趋势, 经历了由近程要素主导向远程要素主导的转变过程, 远程要素代谢能值总量占总代谢能值的比重由1980年的30.87%上升到2014年的67.43%, 能值外向度不断提高, 城市群发展对远程要素的依赖程度越来越大。(2) 近35年来京津冀城市群近远程要素能值代谢强度加速下降, 由1980年的 1.15×10^{21} Sej/亿元下降到2014年 9.69×10^{19} Sej/亿元, 体现出京津冀城市群经济效率不断提高; 相应地人均能值量由1980年的 7.8×10^{15} Sej/人增加到2014年 5.83×10^{16} Sej/人, 反映了京津冀城市群地区社会福利水平逐步提高。(3) 近35年来京津冀城市群地区近远程要素能值代谢的环境负荷率不断提升, 环境压力不断增大。近程要素能值代谢的环境负荷率由1980年的8.30上升到2014年的43.46, 同期远程要素能值代谢的环境负荷率由4.15上升到92.03。本文定量解决了京津冀城市群发展对远程要素依赖程度和远程要素输入对城市群造成的环境负荷压力问题, 提出的研究结论为京津冀城市群地区有效控制外来人口增长、逐步疏解北京非首都功能、优化调整经济结构、提高经济运行效率、治理环境污染和推进京津冀协同发展等提供了定量的决策参考依据。

关键词 城镇化, 生态环境, 近远程耦合, 能值代谢总量, 能值代谢强度, 环境压力, 京津冀城市群

1 引言

城市群作为国家新型城镇化的主体形态, 在中国生产力布局格局中承担着战略支撑点和增长极点的重要作用, 但在发展过程中面临着日益严重的资源与生态环境胁迫压力(Bai等, 2014; 方创琳等, 2016)。为了协

调好城市群地区城镇化与生态环境之间的矛盾关系, 中国地理学者引入物理学中的耦合概念, 将城镇化与生态环境之间交互胁迫的现象定义为城镇化-生态环境耦合(黄金川和方创琳, 2003), 旨在挖掘城镇化与生态环境两大系统内部的交互胁迫规律以及演化机制, 最终实现系统间优势互补、良性交互及协调提升途径

中文引用格式: 方创琳, 任宇飞. 2017. 京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合能值代谢效率及环境压力分析. 中国科学: 地球科学, 47: 833-846, doi: [10.1360/N072016-00318](https://doi.org/10.1360/N072016-00318)

英文引用格式: Fang C L, Ren Y F. 2017. Analysis of emergy-based metabolic efficiency and environmental pressure on the local coupling and telecoupling between urbanization and the eco-environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Science China Earth Sciences, 60: 1083-1097, doi: [10.1007/s11430-016-9038-6](https://doi.org/10.1007/s11430-016-9038-6)

(刘耀彬和宋学锋, 2005; 方创琳和杨玉梅, 2006; 张胜武等, 2012; Onafowora和Owoye, 2014). 国际人地耦合研究小组(CHANS)在研究计划中强调, 人与自然耦合系统的集成研究可揭示人地关系新的复杂格局和过程, 而单独的自然科学或者社会科学的研究不能揭示这种规律(Alberti等, 2011), 国内相关学者分别从不同视角分析人与自然耦合关系, 解析耦合气候系统模式(马洁华和王会军, 2014)、区域海气耦合模式(彭世球等, 2012)、土壤-植被-水文耦合机制(李小雁, 2011)、城市公共安全应急响应的耦合机制(李强和顾朝林, 2015)和气候转冷的社会影响机制(方修琦等, 2013)等. 可见, 开展城市群地区城镇化与生态环境耦合关系的研究, 既是面向人文与自然要素综合研究的重要方向之一, 也是未来地球系统科学研究的前沿领域.

2 问题的提出

从系统论的角度分析, 城市群地区城镇化与生态环境之间的耦合关系, 不仅表现为系统内部城镇化与生态环境各要素之间的非线性耦合关系(称其为近程耦合关系), 而且表现为系统外部城镇化与生态环境要素之间的非线性耦合关系(称其为远程耦合关系), 则城市群系统城镇化与生态环境内外部各要素之间的非线性耦合关系理论上可称其为近远程耦合关系. 从能值代谢的角度揭示这种极为复杂的近远程耦合关系, 可为进一步探讨城市群地区城镇化与生态环境的非线性耦合关系提供全新的突破点. 如何从近远程要素能值代谢的角度, 借助城市能值代谢方法, 定量测算城市群地区城镇化与生态环境近远程要素的耦合代谢效率与代谢强度? 如何进一步定量揭示近远程要素代谢能值的环境负荷压力? 是本文尝试回答的问题. 基于此, 本文从理论和实证两个方面出发, 以京津冀城市群地区为例, 提出城镇化与生态环境各要素之间近远程耦合的理论框架, 利用城市代谢分析法定量测度城市群系统外部要素与系统内部要素共同作用下的近远程耦合关系, 进而分析近远程要素代谢能值对京津冀城市群发展的影响程度和由此带来的环境负荷压力. 本文对近程耦合关系、远程耦合关系和近远程耦合关系的定义分别如下.

近程耦合关系是指从区内尺度分析城市群地区城镇化与生态环境各近程要素之间存在的一对一、

一对多和多对多的非线性交互胁迫与交互促进关系, 其中的近程要素为城市群所在地域范围内产生的一切促使城市发展的要素, 包括水资源、土地资源、食物、矿产资源和能源等.

远程耦合关系则是从区际尺度分析城市群地区城镇化与生态环境各近程要素之间存在的一对一、一对多和多对多的非线性交互胁迫与交互促进关系; 其中的远程要素为由城市群外部输入到城市群内部的一切要素和从城市群内部输出到外部区域的一切要素, 包括进口水资源量、矿产资源量以及对外贸易量、出口量等.

近远程耦合关系是从尺度耦合的角度分析城市群地区城镇化与生态环境各近程要素与远程要素之间存在的一对一、一对多和多对多的非线性交互胁迫与交互促进关系, 其中尺度耦合是指区内尺度与区际尺度的空间耦合. 真正意义上的城市群地区是存在着内外部物质能量输入输出的开放系统, 因而存在着极为复杂的内外部要素交互胁迫与交互促进的近远程动态耦合关系(图1). 从城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合过程来看, 城市群地区本身自给的近程要素为城市群提供了发展基础, 外部要素向城市群进一步供给所需远程的物质和能量输入, 为城市群经济发展提供了源源不断的动力, 自下而上的来自于不同空间尺度要素向城市群集聚的结果最终导致城镇化与生态环境系统耦合关系发生了变化. 变化的原因来自于, 近远程要素在城市群城镇化与生态环境系统中进行了物质与能量的交换, 交换过程包括生态环境系统为城镇化提供资源保障作用, 城镇化系统则产出口口集聚、经济集聚与环境污染等过程, 对生态环境系统产生胁迫作用, 该过程可以看作城市群的近远程要素代谢过程, 这种代谢过程改变着城镇化与生态环境的近远程耦合关系.

目前, 国际上对城镇化与生态环境之间的近程耦合关系研究较多, 对远程耦合关系的研究刚刚起步, 而对近远程耦合关系的研究尚属空白. 2013年Liu等首次提出了远程耦合(Telecoupling)概念与研究框架(Liu和Yang, 2013; Liu等, 2013), 集成了社会经济和环境系统跨越距离相互影响对当地人地耦合关系的影响, 并提出了未来远程耦合需研究的问题, 这些问题主要关于远程耦合系统的主控因素、机理及动态演变过程. 接着, Liu等在《Science》发文将远程耦合归为全球

图1 城镇化与生态环境各要素近远程耦合关系示意图

可持续发展中的系统集成研究方法(Liu等, 2015), 体现了远程耦合研究在未来城市可持续发展研究中的重要性, 构建了多尺度耦合模式, 强调了远程耦合研究需关注多尺度空间中系统间的对比研究. 远程要素的研究主要集中在土地资源(Eakin等, 2014)、水资源(Deines等, 2015)、能源、食物等方面, 如2015年Liu等认为发展中国家利用本地廉价生态资源将原材料和制成品出口到发达国家的过程增加了本地人类活动对环境的刺激性, 将会导致社会不稳和供当地人生活的生态环境系统服务发生退化. Fang等(2016)通过远程耦合框架构建了能源系统远程耦合分析系统, 分析了中国和欧洲国家间的太阳能交易对双方人地耦合系统带来的影响, 认为这种远程耦合过程将导致中国就业率和税收的上升, 但也会造成潜在的污染物和温室气体排放量上升, 对于欧洲国家, 将会减少城市“热岛”效应和二氧化碳排放. 2016年Gasparri等采用远程耦合框架分析了北非与南非的大豆贸易, 认为大豆种植面积的扩大是造成北非森林砍伐和生物多样性降低的重要驱动力, 为政府解决农业生产对环境造成的问题提出了强有力的建议(Gasparri等, 2016). 由以上分析可发现, 以某一个远程要素(水、土、能源、食物等)为切入点, 分析城镇化与生态环境之间的远程耦合关系, 提出远程耦合模式, 进一步上升为从尺度耦合角度分析城镇化与生态环境之间的近远程耦合关系, 提出近远程耦合模式, 是未来研究的主要方向.

3 计算方法与数据来源

3.1 城市能值代谢分析法

Abel Wolman于1965年提出了早期的城市代谢(Urban metabolism)概念, 通过同自然界生物体代谢过程的对比研究, 将城市代谢定义为物质、能量、食物输入城市和上述输入在城市中的转变以及废物输出城市的完整过程(Niza等, 2009). 2011年Kennedy等对早期概念进行丰富与完善后提出: 城市代谢是城市中致使城市发展、能源生产、废品回收的一切科技性和社会经济性过程的总和(Kennedy等, 2011). 城市代谢研究经历了50年的发展历程, 其研究方法分化为能值分析法(Energy analysis)和物质流分析法(Material flow analysis)2个主要方向. 能值分析法由Odum于20世纪80年代提出, 主要内容是将物质能量用单位太阳能进行表示, 以单位能值为基准, 通过测度资源、产品或劳务形成所需间接或直接利用的太阳能解释代谢流的流动和贮存的过程(Odum, 1983). 物质流分析法则从实物质量出发, 解释了单位质量(通常为吨)的城市能源、物质以及能量从原始物质转变为城市所需商品与排泄废物的流动特征以及转化效率(Kennedy等, 2015). 两种方法都充分体现城市-生态交互系统间物质和能量的转换过程, 但由于不同物质的物理属性差异, 导致物质流分析法很难集成研究不同物质的转化过程, 对于城市-生态环境系统的经济、社会、人口等要素特

征的解释能力不足. 而能值分析法通过将系统的能物流、货币流、人口流、信息流转换成统一标准能值进行测度与分析, 综合评价系统结构、功能特征和生态经济效益. 因此, 能值分析法在北京(Zhang等, 2013)、深圳(Su等, 2011)、巴黎等国内外特大城市中得到了广泛应用. 鉴此, 本文采用城市代谢能值分析法, 借鉴相关学者研究成果(蓝盛芳, 2002; Brown和Ulgiati, 2004; Franzese等, 2009; Ascione等, 2009; Kennedy等, 2015; Lou等, 2015), 定量分析城市群地区人文要素(即人口、经济、社会、全球化、投资、贸易)和自然要素(即水资源、土地资源、能源、生态、环境、气候)之间的近远程耦合关系及能值代谢效率(图2).

能值分析法以太阳能为基准衡量所有产品和服务活动的太阳能值(Solar Emery), 单位为太阳能焦耳(Sej), 任何物质与能量都有相对应的转换比率(Sej J^{-1})(Brown和Ulgiati, 2004). 不同代谢流的能量值(E_m)的计算公式为

$$E_m = \sum_i T_i \times E_i, \quad (1)$$

式中, T_i 为输入 i 的能值转换率; E_i 为资源 i 的具体数目, 单位常用克(g)或焦耳(J)表示. 根据上述公式, 可以获

得任何物质、能量以及劳务形成所直接或间接使用的太阳能值.

京津冀城市群地区近远程新陈代谢效率变化的能值测度指标包括结构特征、代谢强度、代谢压力和代谢系统可持续发展水平等, 根据资料的可获得性, 选取年代谢总量、远程要素依赖度、代谢通量、近程环境承载力、远程环境承载力5项指标作为近远程代谢效率评估指标, 这些指标描述了城镇化与生态环境近远程耦合代谢过程中投入和产出的能值变化特征, 宏观上刻画了京津冀城市群地区近远程要素的运转表现. 计算公式如下:

$$U = R + IR + N + IM, \quad (2)$$

$$EER = (IM + EX) / (U + EX + W), \quad (3)$$

$$EG = U / GDP, EP = U / P, \quad (4)$$

$$LELR = N / (R + IR), \quad (5)$$

$$TELR = IM / (R + IR), \quad (6)$$

式(2)中, U 代表年代谢总量, 是系统使用的总能值量(单位为Sej), 由输入到城市群地区的近程要素, 包括

图2 基于城市代谢的城市群地区近远程耦合系统示意图

蓝色箭头表示交互胁迫作用, 橙色箭头表示城镇化的反馈胁迫压力

可更新自然资源(R)、可更新资源(IR)、不可更新资源(N)和远程要素进口资源(IM)之和构成,是城市群地区近远程耦合代谢系统总通量的表征;

式(3)中, EER 代表远程要素依赖度,也叫能值外向度,主要刻画城市群地区近远程耦合代谢系统对远程要素的依赖程度; EX 表示输出能值, W 代表近程输出要素废弃物,包括固体废弃物、废水和废气等。

式(4)中, EG 是能值货币比,表示能值代谢效率,单位为Sej/亿元,用来反映城市群地区能值代谢强度,综合反映了财富购买能值的能力(Caviglia-Harris等, 2009),其值越小越好; EP 是能值人口比,单位为Sej/人,表示代谢通量,为每个人所拥有的能值量,是人口能值福利的标志,其值的变化可以反映出城市居民物质生活水平的变化情况; GDP 代表地区生产总值, P 代表人口。

式(5)中, $LELR$ 代表城市系统近程的环境承载压力,是本地不可再生能值与可再生能值之和的比值,刻画了系统中近程要素能值利用的强弱程度,数值越高表明对该类要素对环境系统造成的压力越大。

式(6)中, $TELR$ 为城市系统远程的环境承载压力,是远程输入能值与可再生能值之和的比值,刻画了系统中远程要素能值利用的强弱程度,数值越高表明该类要素对环境系统造成的压力越大。

3.2 指标选取

根据城市能值代谢分析法,构建京津冀城市群地区近远程要素代谢指标体系(表1),依据Ingwersen和Kennedy(Ingwersen, 2010; Kennedy等, 2014)研究成果确定了不同输入要素和输出要素的能值转换率。近远程要素代谢指标分为代谢输入要素与输出要素,近程输入要素包括可更新资源(R)、本地的可更新资源(IR)、本地的不可更新资源(N),远程输入资源包括系统的进口资源项目(IM);近程输出要素包括废弃物(W),远程输出要素包括输出能值(EX)。具体来看,可更新资源包括自然形成的太阳光能、风能、自来水等可更新资源,本地的可更新资源包括人类种植饲养形成的农、肉、水产品以及城市用水总量。不可更新资源包括社会、经济发展所需不可再生的重要原始物质及能量,如钢材、原油、汽油、水泥等项目。进口能值项目综合城市人文要素,从能体现物质流、人力流、

资金流、全球化要素出发,选择燃料油、天然气、南水北调水量、实际利用外资数、贸易输入、就业人口净增数和旅游外汇收入;输出能值部分(EX)及废弃物(W)主要包括贸易输出和三废能值项目。

3.3 数据来源

本文所用数据来源于《中国统计年鉴》(1981~2015)、《北京市统计年鉴》(1981~2015)、《天津市统计年鉴》(1981~2015)、《河北省经济年鉴》(1981~2015),历年《天津市水资源公报》、《河北省气候公报》、《中国城市统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》及历年北京市、天津市、河北省《国民经济和社会发展统计公报》。特别说明的是,由于本文研究时序较长,尽管采用的社会经济发展指标存在统计口径不一致的问题,但对地理科学研究的规律与格局并不会产生偏差,社会统计数据问题仍然是每一个地理工作者需要在未来进行深入研究的问题。

4 计算结果分析

4.1 总代谢能值及近远程要素代谢结构分析

(1) 近35年京津冀城市群总代谢能值呈加速上升趋势。1980~2014年京津冀城市群地区总代谢能值总体上升,但上升幅度在不同阶段具有明显的差异性(图3)。其中,1980~2000年总代谢能值略有上升,由1980年的 5.32×10^{23} Sej上升至2000年的 1.18×10^{24} Sej,年均增长幅度为4.06%,反映出“六五”到“九五”时期,京津冀城市群地区社会经济发展所消耗的能值总量较低且提升幅度较小;2001~2010年总代谢能值快速波动上升,由2001年的 1.24×10^{24} Sej上升至2010年的 4.75×10^{24} Sej,年均上升幅度为7.32%,反映出“九五”到“十一五”期间,京津冀城市群地区社会经济发展所消耗的能值总量较高且提升幅度较快。在此期间,京津冀城市群地区受高速城镇化发展影响,大批劳动力的涌入与城市建设规模的不断扩大使得10年间所消耗能值总量是过去20年消耗能值总量的1.6倍;2011~2014年总代谢能值缓慢上升,由2011年的 5.87×10^{24} Sej上升至2014年的 6.44×10^{24} Sej,年均上升幅度为3.14%。反映出“十二五”时期,京津冀城市群地区社会经济发展所消耗的

表1 京津冀城市群地区近远程要素指标体系与能值转换率

要素分类	指标类型	能值项目	单位	能值转换率 (Sej/Unit)
近程要素	输入要素	太阳光能	J	1
		风能	J	2.45×10^3
		可更新自然资源(R) 降雨(化学能)	J	3.05×10^4
		降雨(势能)	J	4.70×10^4
		地球循环能	J	5.80×10^4
		城市用水总量	g	2.27×10^4
		可更新资源(IR) 农产品(粮食产量)	J	3.36×10^5
		肉产品(肉类产量)	J	3.36×10^5
		水产品(水产品产量)	J	3.36×10^5
		表土损失	J	7.4×10^4
		钢材	g	3.02×10^9
		原煤	J	6.72×10^4
		原油	J	5.04×10^4
		汽油	J	1.86×10^5
		不可更新资源(N) 柴油	J	1.86×10^5
	输出要素	燃料油	J	6.25×10^4
		电力	J	1.6×10^5
		天然气	J	8.06×10^4
		水泥	g	2.07×10^5
		化肥	g	1.69×10^7
		固体废物	g	1.8×10^9
		废弃物(W) 废水	g	6.66×10^8
		废气	g	6.66×10^8
	输入要素	燃料油	J	6.25×10^4
		天然气	J	8.06×10^4
		南水北调	g	2.27×10^4
		进口资源(IM) 外资投入	\$	9.37×10^{12}
		贸易输入	\$	9.37×10^{12}
		就业人口净增	J	674×10^6
		旅游外汇总额	\$	1.66×10^{12}
远程要素	输出要素	输出能值(EX) 贸易输出	\$	6.34×10^{12}

能值总量快速上升趋势得到遏制, 期间采取了积极稳妥的城镇化发展策略, 明确了各城市功能定位和产业布局, 促进了大中小城市协调发展, 提升了区域城镇

化质量及资源使用效率.
(2) 近35年来近远程要素能值代谢结构经历了由近程要素占主导转为远程要素占主导的过程. 1980~2014

图 3 1980~2014 年京津冀城市群地区代谢能值总量及其组成分析图
U, 年代谢总量; R, 可更新自然资源, IR, 可更新资源; N, 不可更新资源; IM, 远程要素进口资源

年近程不可更新资源(N)与远程输入要素(IM)的能值所占比重始终较高. 其中, 1980~2003年期间近远程代谢结构主要由不可更新资源(N)与远程输入要素(IM)构成, 年均比例占44.77%, 而远程输入要素能值年均比例占32.09%; 2004~2014年远程输入要素能值所占比例迅速上升, 由2004年的47.10%上升至2014年的67.43%, 逐渐超越近程不可更新资源能值比例, 成为近10年来近远程代谢结构的主要部分. 而近程不可更新资源能值所占比例逐年下降, 由2004年的42.17%降至2014年的28.47%. 由此看出京津冀城市群地区经历了由近程要素主导逐渐向远程要素主导转变的过程(表2).

(3) 近35年京津冀城市群分省市总代谢能值加速上升, 北京天津以远程要素代谢占主导, 河北省以近程

要素代谢占主导. 1980~2014年间, 北京、天津、河北的代谢能值分别由1980年的 2.43×0.4^{23} 、 6.50×0.5^{22} 、 2.24×0.2^{23} Sej上升到2014年的 3.58×0.5^{24} 、 1.39×0.3^{24} 、 1.73×0.7^{24} Sej, 年均增长速度分别为8.23%、9.36%和6.19%, 代谢能值总量和年均增长速度与三省市经济发展程度基本一致. 三省市的发展依靠了本地区提供的近程要素能值和购买输入的远程要素能值, 系统的近远程资源结构决定了城市发展的方向及水平. 北京市供应的代谢能值主要由远程输入能值构成, 天津市供应的代谢能值由近程不可更新资源能值和远程输入能值构成, 河北省供应的代谢能值则主要由近程不可更新资源能值构成.

北京市远程输入能值的比例从1980年的63.64%

表 2 1980~2014 年京津冀城市群地区近远程要素代谢能值结构变化表

年份		1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014
近程要素代谢量占代谢总量的比重(%)	北京市	36.36	33.03	42.44	35.56	28.82	15.31	7.34	5.39	5.05	4.47	4.44
	天津市	87.37	89.19	91.08	74.46	55.95	44.21	45.75	40.55	37.91	36.48	36.84
	河北省	99.49	99.27	99.15	97.40	96.78	93.83	87.21	85.15	87.45	86.36	86.47
	京津冀城市群地区	69.13	62.52	72.46	68.91	61.39	48.72	38.04	33.09	32.38	31.49	32.57
远程要素代谢量占代谢总量的比重(%)	北京市	63.64	66.97	57.56	64.44	71.18	84.69	92.66	94.61	94.95	95.53	95.56
	天津市	12.63	10.81	8.92	25.54	44.05	55.79	54.25	59.45	62.09	63.52	63.16
	河北省	0.51	0.73	0.85	2.60	3.22	6.17	12.79	14.85	12.55	13.64	13.53
	京津冀城市群地区	30.87	37.48	27.54	31.09	38.61	51.28	61.96	66.91	67.62	68.51	67.43

上升到2014年的95.56%(图4a)。天津市从1980~1995年期间供应能值主要以近程的不可更新资源能值为主,从2000年开始,天津发挥自身制造业优势建成为中国北方重要的经济中心,远程输入能值所占比重由2000年的44.05%上升到2014年的63.16%。说明随着对外开放力度的不断加大以及国家将天津滨海新区纳入国家战略以来,以滨海新区为主体的天津市大力发展第三产业,输入贸易、外资能值得到提升(图4b)。河北省从1980~2014年的35年间始终以近程要素能值输入占主导地位,2014年这一比例为86.74%,尽管远程要素输入

能值比例有所提升,但提升幅度不大,比重始终较低,反映了河北省社会经济发展依赖于资源消耗型、环境污染型、劳动密集型的能源、原材料等重化工业,面临着经济结构调整和污染防治的巨大压力(图4c)。

4.2 能值外向度及对远程要素的依赖程度分析

能值外向度(EER)反映了京津冀城市群地区社会经济发展对远程要素的依赖程度。由图5看出,近35年京津冀城市群能值外向度越来越高,对远程要素的依

图4 1980~2014年京津冀城市群分省市代谢能值及其代谢结构示意图

(a) 北京代谢能值及代谢结构; (b) 天津代谢能值及代谢结构; (c) 河北代谢能值及代谢结构。U, 年代谢总量; R, 可更新自然资源; IR, 可更新资源; N, 不可更新资源; IM, 远程要素进口资源

图5 1980~2014年京津冀城市群分省市能值外向度(EER)动态变化示意图

赖程度越来越大. 其中, 北京、天津、河北三省市的能值外向度可分为3个阶段: 1980~1995年为需求稳定阶段, 三省市能值外向度(EER)分别由1980年的0.20、0.06、0.01增加到1995年的0.29、0.12、0.02, 北京市对远程要素依存度相对最高, 河北省相对最低. 三省市经济发展对远程能值需求格局未发生改变, 社会经济发展都以自给资源为主; 1996~2007年为相对快速增长阶段, 三省市能值外向度分别从1996年的0.29、0.20、0.03上升到2007年的0.73、0.53、0.10, 分别为1996年的2.52倍、2.65倍和3.33倍. 北京市社会经济发展由自给资源为主转为购进资源为主, 天津市开始由自给资源为主转为自给资源与购进资源并重, 河北省依然对外依存度较低; 2008~2014年为缓步上升阶段. 三省市能值外向度先下降随后缓慢上升, 能值外向度分别从2009年的0.64、0.46和0.08上升到2014年的0.77、0.54和0.11. 北京市在1980年后逐渐实现产业结构由“二、三、一”向“三、二、一”的转变, 以第三产业为主带动经济发展, 以至于逐渐依赖来自远程的资金、服务、劳动力等要素的输入与资金输出, 体现出外向型城市代谢模式. 天津市是老工业城市, 在历史上又是老工商城市, 利用改革开放后创造的极为有利的发展服务业的政策与环境, 在经济发展过程中逐渐进行结构优化, 从能值外向度上体现了天津市现代服务业的提高和工业化的发展, 逐渐体现出外向型城市代谢模式. 河北省是中国矿产资源大省, 也是北京

市和天津市的主要能源供应地, 资源禀赋的特点使得河北省在很长一段时间内大力发展重工业, 在此时期相对的不需要依赖远程要素的输入与输出, 能值外向度上表现为始终处于相对较低水平.

4.3 近远程要素能值代谢强度分析

(1) 近35年来京津冀城市群地区近远程要素能值代谢强度加速下降. 通过测度1980~2014年京津冀城市群能值代谢强度发现, 京津冀城市群地区近远程要素能值代谢强度由1980年 1.15×10^{21} Sej/亿元下降到2000年 1.18×10^{20} Sej/亿元, 再下降到2010年的 1.09×10^{20} Sej/亿元, 到2014年下降到 9.69×10^{19} Sej/亿元(图6), 体现出京津冀城市群地区经济效率不断提高. 相应地, 人均能值量由1980年的 7.8×10^{15} Sej/人增加到2000年 1.3×10^{16} Sej/人, 再增加到2010年的 4.54×10^{16} Sej/人, 到2014年增加到 5.83×10^{16} Sej/人(图7), 反映了京津冀城市群地区随着第二产业逐渐向第三产业的转移, 科技的进步, 经济效率不断提高, 社会福利水平逐步提高, 人民生活水平不断改善.

(2) 近35年来京津冀城市群分省市近远程要素能值代谢强度快速下降. 从1980~2014年的35年间, 北京、天津和河北的近远程要素能值代谢强度都经历了快速下降的过程, 说明随着社会生产力提升、科技进步与产业转型, 三省市经济效率大幅度提高, 但提升

图6 1980~2014年京津冀城市群地区能值代谢强度变化图

图7 1980~2014年京津冀城市群地区人均能值变化

幅度呈现出阶段性的时空差异性. 1980年能值代谢强度最高的城市为北京市(1.74×10^{21} Sej/亿元), 其次为河北省(1.02×10^{21} Sej/亿元), 最后为天津市(6.27×10^{20} Sej/亿元), 可以看出, 在起始年份北京市的能值代谢强度最大, 经济效率较低. 北京市在2000年后能值代谢强度出现波动式上升, 原因一方面来自于, 随着产业结构的调整, 北京市第三产业比重快速提升, 远程输入的贸易类能值呈逐年上涨趋势, 带动了能值代谢强度的提高; 另一方面来自于奥运会的举办对北京城市代谢系统通量产生了提升作用, 但2007~2009年的全球

金融危机又对北京城市代谢系统通量产生了负面作用. 所以, 直到2014年京津冀城市群地区能值代谢强度最高的城市仍为北京市(1.64×10^{20} Sej/亿元), 此为天津市(7.75×10^{19} Sej/亿元).

4.4 近远程要素能值代谢的环境负荷压力分析

(1) 京津冀城市群地区近远程要素能值代谢的环境负荷压力不断加大. 1980~2014年京津冀城市群地区近程要素与远程要素能值代谢的环境负荷率一直呈上升趋势(图8). 其中, 近程要素能值代谢的环境负

图8 1980~2014年京津冀城市群地区近远程要素环境负荷率变化示意图

荷率由1980年的8.30上升到2014年的43.46, 35年间上升了5倍, 年均上升速度为4.99%; 远程要素能值代谢的环境负荷率由1980年的4.15上升为2014年的92.03, 35年间升高了22倍, 年均上升速度为9.54%。可以看出, 自1980年改革开放以来, 京津冀城市群地区随着城市规模的不断扩张、大量人口流入引发各种生产要素的集聚, 远程要素能值代谢的环境负荷率已由1980年相当于近程要素能值代谢环境负荷率的0.5倍变为2014年的2.12倍, 城市面临的环境压力的根源逐渐由本地近程要素转变为远程要素。虽然资金与劳动力等远程要素被视为城市具有经济活力的重要表征, 在城镇化发展过程中作用明显, 但不可忽视的是如果不加以调控, 不仅加剧了地区间社会经济发展不平衡, 更加剧了地区经济发展与生态环境间的矛盾。

(2) 近35年京津冀城市群地区三省市近远程要素能值代谢的环境负荷率不断加大。一是从远程要素能值代谢的环境负荷率差异性分析, 1980~2014年北京市近程要素能值代谢的环境负荷率处于较低水平, 2006年之前近程要素能值代谢的环境负荷率呈上升趋势, 2006年出现拐点, 随之呈下降趋势, 说明北京市在社会经济发展过程中通过产业转型和提倡使用清洁能源等方法取得了显著效果, 降低了近程要素带来的环境压力(图9)。同期, 天津市和河北省近程要素能值代谢的环境负荷率始终呈上涨趋势, 分别从1980年的1.66、1.94上升到2014年的13.36、6.67, 由于天津市可再生资源 and 近程可更新资源总量较小, 本身生态承载能力有限, 近程不可更新资源的大量使用使得天津市近程要素影响下的生态承载力压力较大。河北省近程环境负荷率在2011年前呈快速上涨趋势, 2011年受去产能与淘汰落后产能政策影响, 能源的使用量以及生产量出现了下降, 上升幅度明显放缓。二是从远程要素能值代谢的环境负荷率差异性分析, 1980~2014年北京市远程要素能值代谢的环境负荷率均大于天津市与河北省, 2000年后城市生态环境系统远程要素环境负荷率呈波动式快速上升趋势, 由2000年的9.42迅速上升到2014年的87.13。并且与天津市和河北省的差距进一步扩大, 2014年北京市远程要素能值代谢的环境负荷率已是天津市(24.62)的3.54倍和河北省(1.20)的72倍。说明北京市受到远程要素输入和人口过度集中影响, 导致城市面临严峻的环境承载压力。天津市远程要素能值代谢的环境负荷率在1994年前保持着

稳定, 1994年后提升速度较快, 由1994年的0.34上升到2014年的24.62, 年均增长幅度23.88%, 尽管远程要素能值代谢的环境负荷率小于北京市, 但资金和人口的快速流入使得城市同样面临着环境压力风险。河北省环境负荷率受远程要素影响最低, 说明河北省现有可更新资源对输入城市的资金和人口等远程要素的承载性相对较高。

5 讨论与结论

城市群地区是一个近远程要素交叉耦合的开放复杂巨系统, 其中近程要素是指城市所在地域范围内产生的一切推动城市经济社会发展的要素, 远程要素是指由城市地域范围外输入城市的一切推动城市社会经济性活动的要素。伴随城市群的扩展和对要素资源需求的不断扩大, 城市群本身的近程要素越来越无法满足城市群可持续发展的需求, 大量的远程要素不断输入, 由此对城市群地区的生态环境造成压力。本文从理论上解析了城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合的基本框架, 借助城市代谢能值分析法, 以京津冀城市群地区为例, 分析了1980~2014年间城镇化与生态环境近远程耦合代谢效率及环境压力。得出如下结论:

(1) 近35年京津冀城市群地区总代谢能值呈上升趋势, 远程要素代谢能值总量取代近程要素占主导地位。远程要素代谢能值占总代谢能值的比重由1980年的30.87%, 上升到2014年的67.43%, 体现出京津冀城市群地区的能值外向度越来越高, 城市发展对远程要素的依赖程度越来越大。其中北京市的远程要素代谢能值占总代谢能值的比重由1980年的63.64%增加到2014年的95.56%, 天津市由12.63%增加到63.16%; 而河北省则由0.51%增加到13.53%。北京市和天津市随着城市发展逐渐成为高度依赖于外界能源、资金、人力等远程要素不断输入的外向型城市代谢系统, 而河北省属于依赖自身自然资源发展的内向型城市代谢系统。

(2) 近35年来京津冀城市群地区近远程要素能值代谢强度加速下降, 人均能值量不断上升。近远程要素能值代谢强度由1980年 1.15×10^{21} Sej/亿元下降到2000年 1.18×10^{20} Sej/亿元, 再下降到2014年的 9.69×10^{19} Sej/亿元, 体现出京津冀城市群地区经济效率不断提高。相应地, 人均能值量由1980年的 7.8×10^{15} Sej/人增加到

图9 1980~2014年京津冀城市群地区近远程要素代谢能值的环境负荷率变化示意图

2014年的 5.83×10^{16} Sej/人, 反映了京津冀城市群地区社会福利水平逐步提高, 人民生活水平不断改善。

(3) 近35年来京津冀城市群地区近远程要素能值代谢的环境负荷压力不断加大。近程要素能值代谢的环境负荷率由1980年的8.30上升到2014年的43.46, 年均上升速度为6.80%; 远程要素能值代谢的环境负荷率由1980年的4.15上升为2014年的92.03, 年均上升速度为12%。远程要素输入量和输出量的不断增长加剧了北京、天津城市代谢系统的风险, 已经成为导致北京市、天津市城市环境压力加大的主要原因。和北

京、天津发展模式不同, 河北省经济发展多依赖本地近程要素, 这类要素多为矿产资源、工业原料、电力产品等能源重化工业发展所需资源, 这类产业发展导致河北省成为京津冀城市群地区污染的主要来源, 为京津冀城市群地区未来可持续发展埋下隐患, 必须加大产业升级转型步伐。

(4) 本文提出的城镇化与生态环境近远程耦合分析框架, 弥补了以往学者侧重于研究城镇化与生态环境近程耦合关系研究的缺陷, 将二者耦合关系由近程耦合拓展到远程耦合和近远程耦合关系研究的新视

野上, 为今后的人地耦合关系研究提供了新的研究思路. 提出的京津冀城市群地区近远程要素能值代谢结构由近程要素占主导转为远程要素占主导的过程、以及能值代谢强度加速下降、环境负荷压力加大的结论, 为京津冀城市群地区有效控制外来人口增长、逐步疏解北京非首都功能、优化调整经济结构、提高经济运行效率、治理环境污染、推进京津冀协同发展等提供了定量的决策参考依据.

(5) 值得讨论的问题是, 本文在理论和实证研究中也发现了一些尚未解决的问题. 具体包括: 跨越距离的两个或以上城市系统互相进行近远程要素交换, 这个过程分别会对输入输出方的城市化与生态系统带来多大的影响? 强度该如何测度? 系统内部近程要素和跨越长距离的远程要素的一对一、一对多、多对多关系如何体现? 等等. 受到数据可得性限制, 尚无法以地级城市和县级城市为空间尺度单元进行能值代谢总量、能值代谢强度和能值代谢环境压力的研究, 如何提高分析结果的准确性有待继续研究. 近远程要素影响下的城镇化与生态环境耦合研究涉及到城市系统与生态系统, 未来需要结合地理学、生态经济学、管理学和空间经济学等多学科知识综合研究近远程耦合关系及近远程耦合理论问题.

参考文献

- 方修琦, 萧凌波, 魏柱灯. 2013. 18~19世纪之交华北平原气候转冷的社会影响及其发生机制. *中国科学: 地球科学*, 43: 810–823
- 方创琳, 杨玉梅. 2006. 城市化与生态环境交互耦合系统的基本定律. *干旱区地理*, 29: 1–8
- 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 2016. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 71: 531–550
- 黄金川, 方创琳. 2003. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. *地理研究*, 22: 211–220
- 蓝盛芳. 2002. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社. 40–41
- 李强, 顾朝林. 2015. 城市公共安全应急响应动态地理模拟研究. *中国科学: 地球科学*, 45: 290–304
- 李小雁. 2011. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. *中国科学: 地球科学*, 41: 1721–1730
- 刘耀彬, 宋学锋. 2005. 城市化与生态环境耦合模式及判别. *地理科学*, 25: 408–414
- 马洁华, 王会军. 2014. 一个基于耦合气候系统模式的气候预测系统的研制. *中国科学: 地球科学*, 44: 1689–1700
- 彭世球, 刘段灵, 孙照渤, 李毅能. 2012. 区域海气耦合模式研究进展. *中国科学: 地球科学*, 42: 1301–1316
- 张胜武, 石培基, 王祖静. 2012. 干旱区内陆河流域城镇化与水资源环境系统耦合分析——以石羊河流域为例. *经济地理*, 32: 142–148
- Alberti M, Asbjornsen H, Baker L A, Brozovic N, Drinkwater L E, Drzyzga S A, Jantz C A, Fragoso J, Holland D S, Kohler T T A, Liu J J, McConnell W J, Maschner H D G, Millington J D A, Monticino M, Podestá G, Pontius Jr. R G, Redman C L, Reo N J, Sailor D, Urquhart G. 2011. Research on coupled human and natural systems (CHANS): Approach, challenges, and strategies. *Bull Ecol Soc Am*, 92: 218–228
- Ascione M, Campanella L, Cherubini F. 2009. Environmental driving forces of urban growth and development: An emergy-based assessment of the city of Rome, Italy. *Landsc Urban Plan*, 93: 238–249
- Bai X M, Shi P J, Liu Y S. 2014. Society: Realizing China's urban dream. *Nature*, 509: 158–160
- Brown M T, Ulgiati S. 2004. Emergy analysis and environmental accounting. *Encycl Energy*, 2: 329–354
- Caviglia-Harris J L, Chambers D, Kahn J R. 2009. Taking the “U” out of Kuznets. *Ecol Econ*, 68: 1149–1159
- Deines J M, Liu X, Liu J. 2015. Telecoupling in urban water systems: An examination of Beijing's imported water supply. *Water Int*, 41: 1–20
- Eakin H, DeFries R, Kerr S, Eric F L, Liu J G, Peter J M, Messerli P, Reenberg A, Rueda X, Simon R S. 2014. Significance of telecoupling for exploration of land-use change. *Rethinking Global Land Use in an Urban Era*. In: Lupp J, ed. *Strüngmann Forum Reports*. vol. 14. Cambridge: MA: MIT Press. 142–160
- Fang B, Tan Y, Li C B, Cao Y, Liu J G, Schweizer P J, Shi H, Zhou B, Chen H, Hu Z. 2016. Energy sustainability under the framework of telecoupling. *Energy*, 106: 253–259
- Franzese P P, Rydberg T, Russo G F, Ulgiati S. 2009. Sustainable biomass production: A comparison between gross energy requirement and emergy synthesis methods. *Ecol Indicators*, 9: 959–970
- Gasparri N I, Kuemmerle T, Meyfroidt P, Waroux Y, Kreft H. 2016. The emerging soybean production frontier in southern Africa: Conservation challenges and the role of south-south telecouplings. *Conserv Lett*, 9: 35–47
- Ingwersen W W. 2010. Uncertainty characterization for emergy values. *Ecol Model*, 221: 445–452
- Kennedy C, Pincetl S, Bunje P. 2011. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environ Pollut*, 159: 1965–1973
- Kennedy C A, Stewart I, Facchini A, Cersosimo I, Mele R, Chen B, Uda M, Kansal A, Chiu A, Kim K G, Dubeux C, Lebre La Rovere E, Cunha B, Pincetl S, Keirstead J, Barles S, Pusaka S, Gunawan J, Adegbile M,

- Nazariha M, Hoque S, Marcotullio P J, González Otharón F, Genena T, Ibrahim N, Farooqui R, Cervantes G, Sahin A D. 2015. Energy and material flows of megacities. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 5985–5990
- Kennedy C, Stewart I D, Ibrahim N, Facchini A, Mele R. 2014. Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities. *Ecol Indicators*, 47: 7–15
- Liu J, Hull V, Batistella M, DeFries R, Dietz T, Fu F, Hertel T W, Izaurralde R C, Lambin E F, Li S, Martinelli L A, McConnell W J, Moran E F, Naylor R, Ouyang Z, Polenske K R, Reenberg A, de Miranda Rocha G, Simmons C S, Verburg P H, Vitousek P M, Zhang F, Zhu C. 2013. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecol Soc*, 18: art26
- Liu J, Mooney H, Hull V, Davis S J, Gaskell J, Hertel T, Lubchenco J, Seto K C, Gleick P, Kremen C, Li S. 2015. Systems integration for global sustainability. *Science*, 347: 1258832–1258832
- Liu J, Yang W. 2013. Integrated assessments of payments for ecosystem services programs. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 16297–16298
- Lou B, Qiu Y, Ulgiati S. 2015. Emergy-based indicators of regional environmental sustainability: A case study in Shanwei, Guangdong, China. *Ecol Indicators*, 57: 514–524
- Niza S, Rosado L, Ferrão P. 2009. Urban metabolism. *J Ind Ecol*, 13: 384–405
- Odum H T. 1983. *Systems Ecology: An introduction*. New York: John Wiley & Sons. 25–28
- Onafowora O A, Owoye O. 2014. Bounds testing approach to analysis of the environment Kuznets curve hypothesis. *Energy Econ*, 44: 47–62
- Su M, Yang Z, Chen B. 2011. Limiting factor analysis of urban ecosystems based on emergy—A case study of three cities in the Pearl River Delta in China. *Procedia Environ Sci*, 5: 131–138
- Zhang Y, Liu H, Chen B. 2013. Comprehensive evaluation of the structural characteristics of an urban metabolic system: Model development and a case study of Beijing. *Ecol Model*, 252: 106–113