



付婷婷, 张天柱. 基于能值分析的北京市2016—2022年可持续发展水平综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(05): 17-27.
FU Tingting, ZHANG Tianzhu. A comprehensive evaluation of the sustainable development level of Beijing from 2016 to 2022 based on emergy analysis[J].
Journal of China Agricultural University, 2025, 30(05): 17-27.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.02

基于能值分析的北京市2016—2022年可持续发展水平综合评价

付婷婷 张天柱*

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100193)

摘要 为分析北京市可持续发展现状, 解读北京市资源环境利用状况, 以北京市2016—2022年可持续发展水平为研究对象, 基于2016—2022年《北京统计年鉴》、2016—2022年《中国统计年鉴》数据, 运用社会、经济、生态、可持续性四大能值综合指标, 采用能值分析方法, 计算北京市2016—2022年城市系统代谢能值, 并对该地区可持续发展水平进行评价。结果表明: 1) 北京市可再生资源丰富, 潜力大, 但能源利用以不可再生资源为主, 除2020年, 社会效益指标中能值密度、人均能值均逐年增加, 表明经济发展强度增加, 人口承载力不变, 人口减少, 说明环境压力增大; 2) 北京市经济效益指标中, 净能值产出率稳定, 货币能值比率自2019年起下降, 能值交换率除2020—2021年外, 不断上升, 经济发展向好; 3) 除2020和2021年外, 北京市生态效益指标中, 环境负载率逐年增加, 能值自给率水平偏低且逐年减少, 多依靠外来资源, 能值废弃率减少, 废物利用水平增加; 4) 北京市可持续发展指数、城市健康能值指数、环境可持续指数波动减小, 可持续发展水平减小。本研究可为城市发展政策提供依据。

关键词 能值分析; 北京市; 可持续发展; 综合评价

中图分类号 F290

文章编号 1007-4333(2025)05-0017-11

文献标志码 A

A comprehensive evaluation of the sustainable development level of Beijing from 2016 to 2022 based on emergy analysis

FU Tingting, ZHANG Tianzhu*

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To analyze the status quo of sustainable development in Beijing and interpret the utilization status of resources and environment in Beijing, based on the data of Beijing Statistical Yearbook 2016 and China Statistical Yearbook 2016 and 2022, this study takes Beijing's sustainable development level in 2016 and 2022 as research object. By applying the four comprehensive indicators of social, economic, ecological and sustainability energy value, this paper adopts emergy analysis method to calculate the metabolizable energy value of urban system in Beijing in 2016 and 2022, and evaluates the sustainable development level of this region. The results show that : 1) Beijing is rich in renewable resources and has great potential. Its energy utilization is mainly non-renewable resources, and there is the medium value density of social benefit index in Beijing. Except for the year 2020, the per capita energy value in Beijing increased year by year, indicating that the economic development intensity increased, the population carrying capacity remained unchanged, and the population decreased. Therefore, the environmental pressure in Beijing increased. 2)

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD12B03)

第一作者: 付婷婷(ORCID:0009-0009-4178-4845), 硕士研究生, E-mail: futtsupreme@qq.com

通讯作者: 张天柱(ORCID:0009-0008-1198-710X), 教授, 主要从事城乡规划、设施农业工程研究, E-mail: zhangtianzhu@263.net

In the economic benefit index of Beijing, the net emergy output rate is stable, the monetary emergy ratio has decreased since 2019, and the emergy exchange rate has kept rising except in 2020 and 2021, indicating there was a good economic development in Beijing. 3) Except for the years 2020 and 2021, in Beijing's ecological benefit indicators, the environmental load rate increased year by year, the level of emergy self-sufficiency rate is relatively low and decreased year by year and relied heavily on external resources. The emergy waste rate decreased and the level of waste utilization increased; 4) The fluctuation of Beijing's sustainable development index, the urban health energy index and environmental sustainability index decreased, and the sustainable development level decreased. This study provides a scientific basis for formulating urban development policies.

Keywords emergy analysis; Beijing; sustainable development; comprehensive evaluation

可持续发展在1972年斯德哥尔摩举行的联合国人类环境研讨会上首次提出。1987年,世界环境与发展委员会发表的报告《我们共同的未来》^[1],正式将可持续发展概念定义为:“能满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”^[2]。自1996年第八届全国人民代表大会第四次会议以来,我国将可持续发展作为国家发展战略之一。

能值分析理论由美国生态学家 Odum^[3]首先提出,在我国,蓝盛芳等^[4]论述了能值分析方法与原理,指出能值分析是以能值为基准,把生态系统或生态经济系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一标准的能值来衡量和分析,从中评价其在系统中的作用和地位。任何形式的能量均源于太阳能,故常以太阳能为基准来衡量各种能量的能值,称为太阳能值(solar emergy)。能值理论客观表述了生态环境与人类生产活动的关系,逐渐成为研究区域生态经济系统可持续发展的重要手段^[5]。马永强等^[6]以闽三角城市群为研究对象,基于能值分析方法结合城市代谢理论,从不同维度系统分析闽三角城市群能值代谢状况及可持续发展水平,并对不同城市群间和城市群内进行对比分析;丁豪等^[7]采用能值分析法,分析了郟城县1978—2019年种植业生产系统可持续发展指数的变化趋势,并具体分析了可持续发展指数对能值投入的敏感性以及单位面积上不同作物的可持续发展指数;胡聘等^[8]采用能值理论与分析方法,对北京市1990—2001年的能值结构动态进行了分析,并采用人均能值、能值密度、生态功能潜力、人口基本承载力、能值自给率、能值货币比率、环境负载率、输入能值比等重要能值指标对该时期北京市城市生态系统的能值状况作了详细分析;张妍等^[9]采用能值分析方法,引入“生态效率”概念,构建了城市物质代谢生态效率的度量

模型,从代谢流量及其效率2个方面核算了北京市1990—2004年资源环境及经济发展的代谢情况;宋涛等^[10]以能值理论为基础,通过城市新陈代谢系统能值结构、能值使用强度、能值环境压力和系统产出效率的测度,对北京市2011年城市新陈代谢系统的物质流、能量流、货币流和人口流进行综合集成。能值分析应用于城市系统,可客观地反映自然界和人类经济活动的内在规律,并为区域可持续发展评估提供了可靠的比较尺度^[11]。

当前,在全球气候变化和环境问题日益严峻的背景下,实现何种可持续发展、如何实现可持续发展已经成为国际政治角力和话语权构建的重要议题^[12]。可持续发展有利于改善和维持健康的经济、生态和社会系统,促进人类发展^[13]。北京市作为我国首都,发展速度快,实施可持续发展战略是解决城市环境与发展之间矛盾的重要举措,有利于合理利用能源,实现城市永续发展。为反映近年来北京市各项指标动态,选取2016—2022年数据分析北京市可持续发展水平,为城市政策制定提供数据参考。

已有研究运用能值分析构建能值指标,对不同城市系统能值结构进行了分析,为本研究提供了可借鉴的理论和方法,但是目前尚缺乏针对北京市可持续发展的能值分析。因此,本研究拟以2016—2022年北京市可持续发展水平为研究对象,依据北京2016—2022年的官方公开统计数据,采用能值分析方法,定量化计算北京市能值结构及利用效益,综合评价北京市可持续发展水平,以期为北京城市可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京地处华北平原北部,总面积16 410.54 km²,

全市划分共 16 个区,常住人口 2 189 万人。据《北京市 2023 年国民经济和社会发展统计公报》^[14]:2023 年全年实现地区生产总值 43 760.7 亿元,按不变价格计算,比上年增长 5.2%,全年全市居民人均可支配收入 81 752 元,比上年增长 5.6%,经济活力持续增强,全年新设企业 29.7 万户,比上年增长 20.3%,城市绿化覆盖率为 49.8%。

1.2 数据来源

数据来源为 2016—2022 年《北京统计年鉴》^[15]和 2016—2022 年《中国统计年鉴》^[16]。

1.3 研究方法

1.3.1 能值分析法

本研究采用能值分析法,将北京市输入、输出能量转换为太阳能值,统一能值尺度以衡量不同类别的能量,分析讨论北京市能值使用情况,采用社会、经济、生态和可持续性评估四大效益指标,细分为 12 个具体指标,定量分析北京市 2016—2022 年人类活动对环境的影响。评价指标选取和能值转换率结合了孙玉峰等^[17]、梁慧玲等^[18]、刘畊源等^[19]、璩路路等^[20]研究。本研究评价指标选择情况见表 1。

表 1 本研究评价指标选择

Table 1 Evaluation index selection in this study

指标 Index	一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification	能值转化率 Transformity
输入能值 <i>I</i> Input energy	可再生资源 <i>R</i> Renewable resources	太阳能 Sunlight	1.00 sej/J
		风能 Wind energy	7.90×10^2 sej/J
		雨水势能 Rain geopotential	1.00×10^8 sej/kg
		雨水化学能 Rain chemical	7.01×10^3 sej/J
	不可再生资源 <i>N</i> Non-renewable resource	标准煤 Standard coal	1.97×10^{12} sej/kg
		电力 Electricity	7.96×10^{11} sej/(kW·h)
		水 Water	1.00×10^8 sej/kg
输出能值 <i>O</i> Output energy	进口流 <i>I</i> The flow of imported	进口货币 Import currency	1.66×10^{12} sej/元
	服务资源能值 <i>S</i> Service resource energy value	出口总值 Total export	1.66×10^{12} sej/元
		生产总值 Gross domestic product	8.67×10^{12} sej/元
	废弃物能值 <i>W</i> Waste energy	废固 Solid waste flow	1.80×10^9 sej/g
		废水 Waste water	6.66×10^8 sej/g
		废气 Waste gass	6.66×10^8 sej/g

注:依据 2016—2022 年《北京统计年鉴》^[15],煤炭、石油、天然气能源消费总量统一换算为标准煤用量,能值计算采用标准煤转换率。

Note: According to *Beijing Statistical Yearbook* (2016-2023)^[15]. The total energy consumption of coal, oil and natural gas is uniformly converted into the standard coal consumption, the emergy is calculated using the conversion rate of standard coal.

1.3.2 能值计算

以下能值计算参考庞利敏^[21]、刘畊源等^[22],计算公式如下:

$$EV_i = E_i \times T_i$$

式中:EV_{*i*}为*i*种能量能值,sej;*E_i*为*i*种能量值;*T_i*为*i*种能值转化率。

$$EV_{sun} = S \times Q \times T_{sun}$$

式中:EV_{sun}为太阳能值,sej;*S*为土地面积,km²; *Q*为太阳光年平均辐射量,Kcal/cm²; *T_{sun}*为太阳能值转化率,sej/J。

$$EV_{wind} = 0.5 \times S \times \rho_{空} \times Cd \times 3.154 \times 10^7 \times (V \times$$

$$3.16)^3 \times T_{wind}$$

式中:EV_{wind}为风能能值,sej;*S*为土地面积,km²; $\rho_{空}$ 为空气密度,kg/m³; *Cd*为陆地风应力拖拽系数; *V*为年平均风速,m/s; *T_{wind}*为风能能值转化率,sej/J。

$$EV_{rg} = S \times R \times G \times T_{rg}$$

式中:EV_{rg}为雨水化学能值,sej;*S*为土地面积,km²; *R*为降雨量,mm; *G*为吉布斯自由能; *T_{rg}*为雨水化学能转化率,sej/J。

$$EV_{rc} = S \times h \times R \times \rho_{雨} \times g$$

式中:EV_{rc}为雨水势能能值,sej;*S*为土地面积,km²; *h*为海拔高度,m; *R*为降雨量,mm; $\rho_{雨}$ 为雨水密度,

g/cm^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

北京市土地面积 $16\,410.54\text{ km}^2$; 北京市平均海拔 43.5 m ; 太阳光年平均辐射量 $105\text{ Kcal}/\text{cm}^2$; 雨水密度 $1\text{ g}/\text{cm}^3$; 吉布斯自由能 $4.94\text{ J}/\text{g}$; 重力加速度

$9.8\text{ m}/\text{s}^2$ 。

1.3.3 效益指标计算

本研究效益指标计算借鉴赵凯茜等^[23]、王浩等^[24]、刘畊源等^[25], 具体效益指标及含义详见表2。

表 2 效益指标计算方式

Table 2 Calculation method of benefit index

指标类型 Indicator type	分类 Classification	表达式 Expression	单位 Unit	含义 Implication
社会效益指标 Social benefit index	能值密度 ED	$ED=U/S$	sej/ ($\text{m}^2\cdot\text{年}$)	能值代谢对环境施加的压力。式中: U 为总能值; S 为区域面积。
	人均能值 EPP	$EPP=U/n$	sej/人	反应地区能值利用强度。式中: n 为人口数。
	人口承载力 PCC	$PCC=(R+I)/(U/n)$		评估当前系统人口压力。
经济效益指标 Economic benefit index	净能值产出率 NEYR	$NEYR=(R+N+I)/I$		评价系统经济活动能值利用效率。
	货币能值比率 EMR	$EMR=U/\text{GDP}$	sej/元	表明该地区科技利用综合效益和经济开发能力。式中: GDP 为生产总值。
	能值交换率 EER	$EER=I/\text{EXP}$		评价系统对外交易的收益情况。式中: EXP 为出口总值。
生态效益指标 Ecological benefit index	环境负载率 ELR	$ELR=(U-R)/R$		公共系统的环境压力。
	能值自给率 ESR	$ESR=(R+N)/U$		评估自然环境支撑人类活动的的能力。
	能值废弃率 EWR	$EWR=W/U$		衡量生态系统废弃物的环境压力程度。
可持续性评估指标 Sustainability assessment indicator	环境可持续指数 ESI	$ESI=NEYR/ELR$		评估地区可持续发展水平。
	可持续发展能值指标 EISD	$EISD=NEYR\times EER/ELR$		评价单位环境压力下系统的社会经济效益。
	城市健康能值指数 EUEHI	$EUEHI=(NEYR\times EER\times ED)/(ELR\times EMR)$		评价城市系统的生态健康水平。

2 结果与分析

2.1 能值转化结果及分析

分析2016—2022年《北京统计年鉴》^[15]数据可知:北京市常住人口逐年减少,煤使用量2017、2018、2019、2020和2022年相较前一年分别减少43.7%、44.0%、33.8%、24.1%、68.9%,煤在能源消费总量中占比连年减少;石油在能源消费总量中占比波动减少,从2016年占比33.14%减少至2022年占比23.06%;天然气使用量连年增加,2022年较

2016年增幅达21.3%;电力的使用除2020年外持续增加,总不可再生资源使用量波动上升。从产业结构来看:北京市生产总值构成第一产业占比由2016年的0.5%下降至2022年的0.3%;第二产业占比在16%~18%,波动下降;第三产业由2016年82.3%上升至2022年83.9%,可见北京市生产总值以第三产业为主。北京地区生产总值由2016年27 041.2亿元增长至2022年41 610.9亿元,连年稳步增长。废固排放量自2020年起逐年减少,废水的排放量先减后增,从2020年起逐年增加,废气排放

量波动减少,除废水外,向环境中排放废物总量减少,环境保护有所成效。可吸入颗粒物(PM10)年平均浓度值由 2016 年 $92\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 逐年下降至 2022 年 $54\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,细颗粒物(PM2.5)年平均浓度值由 2016 年 $73.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 逐年下降至 2021 年 $30.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,空气质量提升明显。利用获得的北京 2016—2022 年各能量原始数据,计算各能量能值,结果见表 3。可见:北京市可再生资源丰富,每年可再生资源能值约是不可再生资源总消耗能值的 1.5~2.5 倍,可再生资源潜力大;不可再生资源能值消耗波动上升;除 2020 年,进口能值连年上升,2022 年进口能值是 2016 年的 2 倍之多,进口能值增加迅速;北京市

总能值中进口流做主要贡献,可再生资源和不可再生资源能值占比微小,除 2020 年,北京市总能值逐年上升,2022 年是 2016 年总能值的近 2 倍,说明北京市 7 年来社会经济发展快,换取的能值巨大;北京市第三产业在经济发展中占比越来越重,服务资源能值逐年攀升;废弃物能值 2016—2019 年逐年减少,在 2020—2022 年增加,且数值均超过 2016 年废弃物能值量。2020 年各数值均有不同程度变化,2021—2022 年城市经济恢复活力。

2.2 效益指标结果及分析

2.2.1 效益指标核算

北京市 2016—2022 年效益指标核算结果见表 4。

表 3 北京市 2016—2022 年输入、输出能值核算结果
Table 3 Calculation results of input and output emergy in Beijing from 2016 to 2022 sej

指标 Index	分类 Classification	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
可再生资源 R Renewable resources	太阳能 Sunlight	7.21×10^{19}	7.21×10^{19}	7.21×10^{19}	7.21×10^{19}	7.21×10^{19}	7.21×10^{19}	7.21×10^{19}
	风能 Wind emergy	1.58×10^{19}	1.58×10^{19}	1.36×10^{19}	1.58×10^{19}	1.36×10^{19}	1.17×10^{19}	1.17×10^{19}
	雨水势能 Rain geopotential	4.68×10^{23}	4.03×10^{23}	3.82×10^{23}	2.84×10^{23}	3.69×10^{23}	4.89×10^{23}	4.09×10^{23}
	雨水化学能 Rain chemical	3.80×10^{20}	3.27×10^{20}	3.11×10^{20}	2.31×10^{20}	3.00×10^{20}	3.97×10^{20}	3.32×10^{20}
不可再生资源 N Non-renewable resource	煤、石油、天然气能值 Total emergy of coal, oil and natural gas	1.01×10^{23}	9.93×10^{22}	1.02×10^{23}	1.02×10^{23}	9.05×10^{22}	9.27×10^{22}	8.57×10^{22}
	电力 Electricity	8.12×10^{22}	8.52×10^{22}	9.07×10^{22}	9.31×10^{22}	9.07×10^{22}	9.79×10^{22}	1.02×10^{23}
	水 Water	3.51×10^{21}	2.98×10^{21}	3.55×10^{21}	2.46×10^{21}	2.58×10^{21}	6.13×10^{21}	2.37×10^{21}
进口流 I The flow of imported	进口货币 Import currency	2.52×10^{25}	2.99×10^{25}	3.70×10^{25}	3.90×10^{25}	3.09×10^{25}	4.03×10^{25}	5.08×10^{25}
服务资源能值 S Service resource emergy	出口总值 EXP Total export	5.69×10^{24}	6.57×10^{24}	8.10×10^{24}	8.58×10^{24}	7.72×10^{24}	1.02×10^{25}	9.78×10^{24}
	生产总值 GDP Gross domestic product	2.34×10^{26}	2.59×10^{26}	2.87×10^{26}	3.07×10^{26}	3.11×10^{26}	3.55×10^{26}	3.61×10^{26}
废弃物能值 W Waste emergy	废固 Solid waste flow	3.10×10^{22}	3.22×10^{22}	3.28×10^{22}	3.29×10^{22}	2.59×10^{22}	2.18×10^{22}	2.07×10^{22}
	废水 Waste water	1.11×10^{24}	8.86×10^{23}	8.39×10^{23}	7.73×10^{23}	1.41×10^{24}	1.56×10^{24}	1.58×10^{24}
	废气 Waste gas	1.09×10^{20}	1.24×10^{20}	9.92×10^{19}	7.79×10^{19}	6.51×10^{19}	5.92×10^{19}	5.29×10^{19}

可见:受疫情影响,各项指标在2020年呈反常态势,在2021—2022年有所恢复。整体上北京市经济效益呈

增加态势,能值利用强度增加,环境压力随之增加,环境负载率增加,可持续发展指标降低。

表 4 效益指标核算结果
Table 4 Benefit index calculation results

指标 Index	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
能值密度/(sej/(m ² ·年)) Emergy density	1.58×10 ⁷	1.86×10 ⁷	2.29×10 ⁷	2.41×10 ⁷	1.92×10 ⁷	2.50×10 ⁷	3.13×10 ⁷
人均能值/(sej/人) Per capita emergy	1.18×10 ¹⁸	1.39×10 ¹⁸	1.72×10 ¹⁸	1.80×10 ¹⁸	1.44×10 ¹⁸	1.87×10 ¹⁸	2.35×10 ¹⁸
人口承载力 Population carrying capacity	2.18×10 ⁷	2.18×10 ⁷	2.18×10 ⁷	2.18×10 ⁷	2.18×10 ⁷	2.18×10 ⁷	2.18×10 ⁷
净能值产出率 Net emergy yield ratio	1.03	1.02	1.02	1.01	1.02	1.02	1.01
货币能值比率/(sej/元) Emergy to money ratio	9.59×10 ¹¹	1.02×10 ¹²	1.14×10 ¹²	1.12×10 ¹²	8.75×10 ¹¹	1.00×10 ¹²	1.24×10 ¹²
能值交换率 Emergy exchange ratio	4.43	4.55	4.57	4.55	4.00	3.97	5.20
环境负载率 Environmental loading ratio	5.42×10 ¹	7.45×10 ¹	9.72×10 ¹	1.38×10 ²	8.41×10 ¹	8.29×10 ¹	1.24×10 ²
能值自给率 Emergy self-support ratio	2.53×10 ⁻²	1.94×10 ⁻²	1.54×10 ⁻²	1.22×10 ⁻²	1.76×10 ⁻²	1.67×10 ⁻²	1.17×10 ⁻²
能值废弃率 Emergy of wastes to total emergy ratio	4.39×10 ⁻²	3.01×10 ⁻²	2.32×10 ⁻²	2.04×10 ⁻²	4.58×10 ⁻²	3.85×10 ⁻²	3.11×10 ⁻²
环境可持续指数 Environmental sustainability index	1.89×10 ⁻²	1.37×10 ⁻²	1.04×10 ⁻²	7.35×10 ⁻³	1.21×10 ⁻²	1.23×10 ⁻²	8.13×10 ⁻³
可持续发展能值指标 Emergy index of sustainable development	8.38×10 ⁻²	6.22×10 ⁻²	4.77×10 ⁻²	3.34×10 ⁻²	4.84×10 ⁻²	4.87×10 ⁻²	4.22×10 ⁻²
城市健康能值指数 Emergy index of urban health	1.38×10 ⁻⁶	1.13×10 ⁻⁶	9.63×10 ⁻⁷	7.20×10 ⁻⁷	1.06×10 ⁻⁶	1.22×10 ⁻⁶	1.07×10 ⁻⁶

2.2.2 社会效益指标结果及分析

北京市社会效益指标核算结果见图1。可见:除2020年,北京市能值密度、人均能值均逐年增加,表明能值利用强度增加,经济发展强度增加,能值代谢对环境施加的压力也随之增加,能值密度、人均能值趋势相同,增速逐渐加快,人口压力维持在较高水平。

2.2.3 经济效益指标结果及分析

北京市经济效益指标核算结果见图2。可见:北京市净能值产出率稳定,且整体在较高水平,能值投入回报率高,产出能值可观。货币能值比率除2020年短暂下降,其余年份增加,说明单位经济产出所消耗的能值量增多,科技利用综合效益和经济

开发能力有待提升。北京市能值交换率2016—2018年增加,表明区域对外交易优势增加,受疫情短暂影响,2019年开始减少,2022年回升,对外交易仍处于有利位置。

2.2.4 生态效益指标结果及分析

北京市2016—2022年生态效益指标核算结果见图3。可见:2016—2019年、2022年北京市环境负载率增速明显,说明环境压力大,在2020—2021年有所减少,但水平仍较高,2016年环境负载率54.2,在2022年达到124.0,环境压力随经济发展而增加,环境负载率指资源环境系统处于相对平衡状态下,所能承受的人口压力以及经济规模的大小,环境负

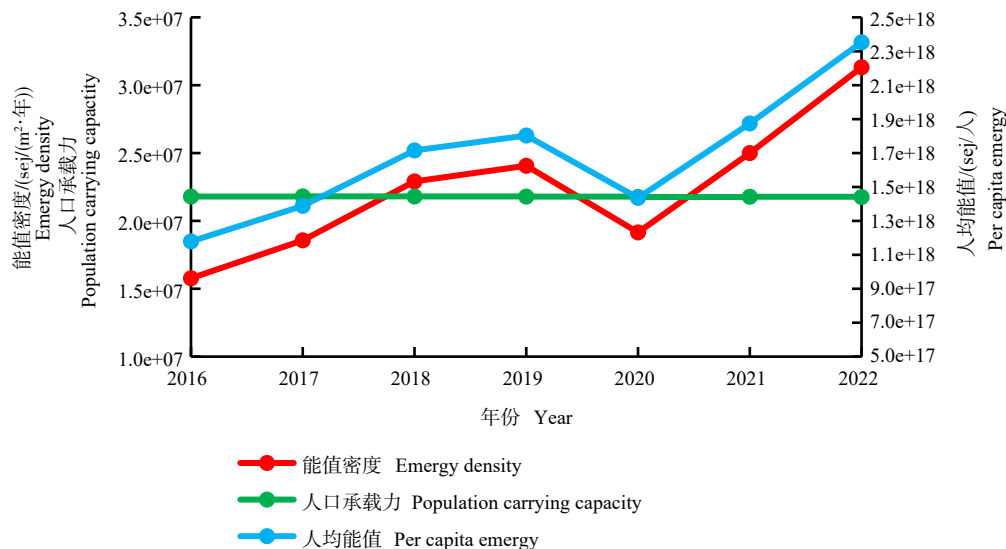


图1 北京市社会效益指标核算结果

Fig. 1 Beijing social benefit index calculation results

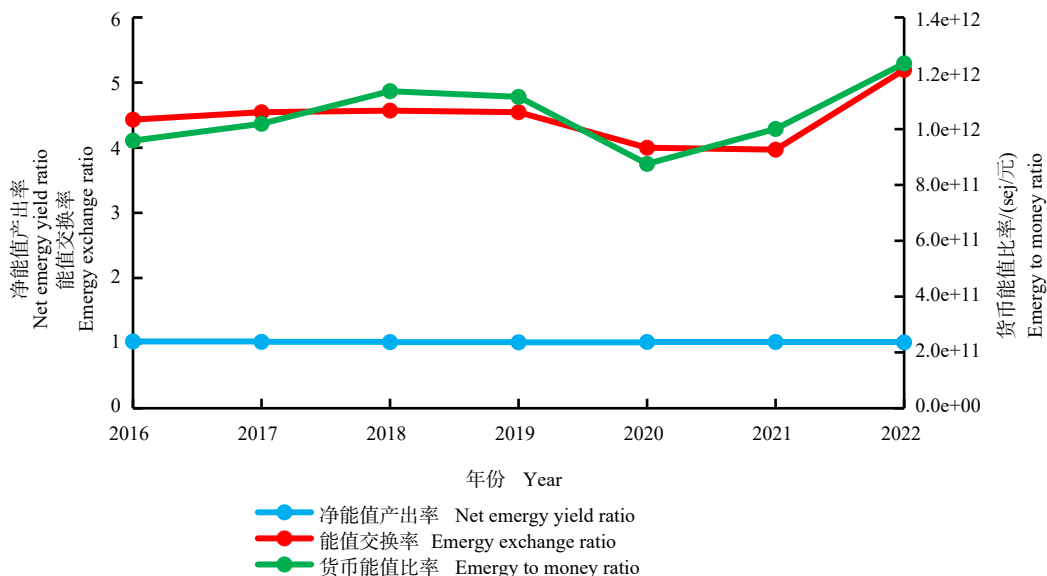


图2 北京市经济效益指标核算结果

Fig. 2 Beijing economic benefit index calculation results

载率高,系统能值利用水平高,但是该值不是越大越好,超出系统环境承受力,将造成系统环境崩溃^[26]。以 Rown 等^[27]的划分标准衡量,环境负载率 ≥ 10 为高负荷;北京市能值自给率水平很低,且仍在波动减少,说明北京市对本地资源利用率低,多依靠外来资源;2022年能源消费量是生产量的1.78倍,能源消耗量中不可再生资源占比达81.4%,自2016年来,能源消耗中可再生资源占比逐年增加,但主要能源消耗仍以不可再生资源为主;能值废弃率在2016—2019年减少,说明对废弃

物综合利用率在增加,相关技术发展有成效。

2.2.5 可持续性指标结果及分析

北京市可持续性指标核算结果见图4,可见:北京市环境可持续指数、可持续发展能值指标、城市健康能值指数波动下降,且趋势一致。其中可持续发展指数远远 <1 ,说明北京市是资源消耗型城市^[28];可持续发展能值指标减少,说明北京市单位环境压力下社会经济效益减少,可持续发展水平降低;北京市城市健康能值指数减小,说明北京市城市生态系统健康有待加强。

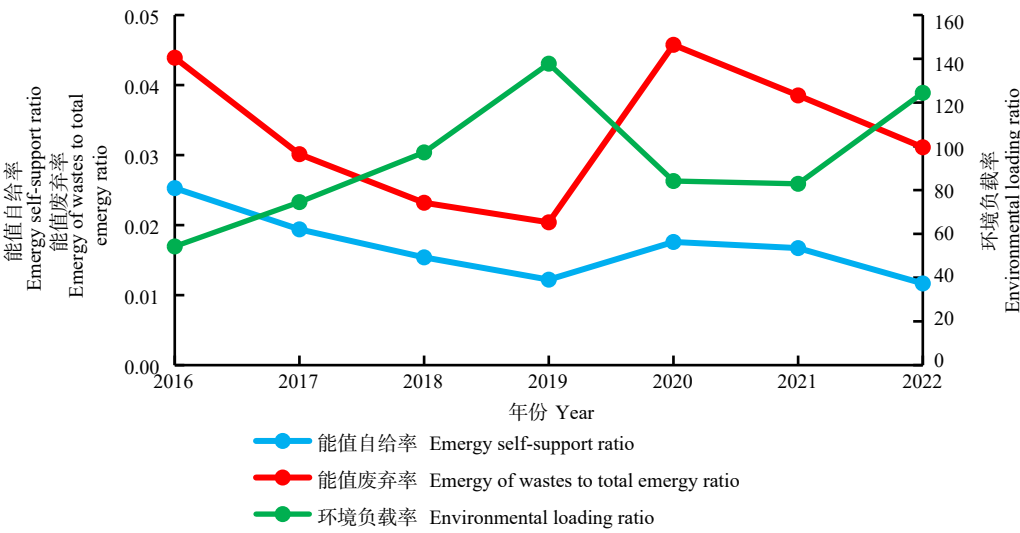


图3 北京市生态效益指标核算结果

Fig. 3 Calculation results of ecological benefit index in Beijing

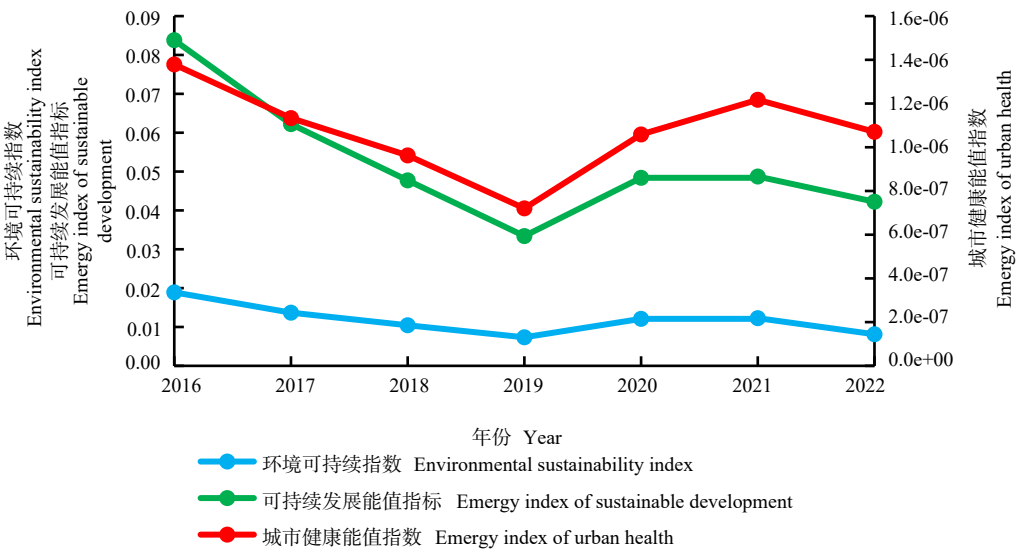


图4 北京市可持续性指标核算结果

Fig. 4 Beijing sustainability index accounting results

3 讨论与结论

3.1 北京市能值变化趋势

本研究发现北京城市发展大量依赖于外部的能值输入,与胡聃等^[8]对北京市1990—2001年的能值结构动态的研究结果一致。本研究中,北京市总能值中进口能值和服务资源能值做主要贡献,这与宋涛等^[29]研究北京城市新陈代谢进出口能值的增长已成为北京城市代谢系统能值消费上升的主要动力结论相似。本研究发现,2020年前后,北京市

经济水平稳步增长,政府着力科技创新,发展高精尖产业,经济效益高。“十三五时期”,生态环境保护措施有效实施,废气能值逐年减少,清洁能源能值增加。然而,受疫情影响,能值密度、人均能值都在2020年下降,能值利用强度减小,环境压力也随之减小,货币能值比率、能值交换率均有一定程度减少,经济活动受到影响;在2020年后,经济指标恢复上升状态,经济活动能值利用效率提高,可持续指标保持在2019年水平之上,环境压力增速减缓,有效抗击疫情,恢复生产生活。本研究中,北京市人

均能值高,经济发展快,同孙晓瑞等^[30]研究厦门2017年人均能值 4.89×10^{17} sej/人相比,北京同年的人均能值 1.39×10^{18} sej/人是其近3倍,同厦门2017年能值密度 11.50×10^{14} sej相比,北京同年 4.89×10^7 sej差距明显,说明北京市经济发展快,但地域面积大,是厦门的近10倍,能值密度不及厦门。北京市2016—2022年人口承载力不变,人口压力始终显著,常住人口逐渐减少,侧面也说明了环境总压力在增加。胡彪等^[31]研究表明,天津市2016年、2020年能值产出率1.38、1.27,能值比率 6.05×10^9 、 5.90×10^9 ,能值交换率0.79、0.84,与北京市这2个年份相比产出能值相似,但是天津市能值回报率更高,北京市能值交换率较高,这与城市的产业结构和发展侧重点有关,北京的产业结构以服务业和高科技产业为主,具有较高的能值交换率,天津则是以制造业为主,能实现较高的能值回报率,且北京市近年来更注重环境保护,因此天津能值回报率更高。

3.2 结论与建议

为探明北京市可持续发展现状,本研究以北京市2016—2022年间的可持续发展水平为研究对象,探究了北京市2016—2022年能值构成情况及利用效益。主要结论与建议如下:

1)北京市能值利用强度大、密度高,环境压力大,因可再生资源丰富,应加强科技投入,研究高效、方便的可再生资源利用方式,提高对可再生资源的利用率,减少对不可再生资源的依赖性,节能减排,为可持续发展打下坚实基础;

2)北京市经济水平高,发展快,货币能值比率、能值交换率水平高,应注重净能值产出率的提高,科技是第一生产力,要做好科研开发,资金投入,结果产出等工作,提高科技成果转化,做好应用示范工作,提高能值利用效率;

3)北京市自然环境压力增强,环境支撑人类活动能力减弱,人民生活水平提高,废物产生量也不断增加,应对这部分能值进行源头减少,呼吁居民减少浪费,并做好废气废水处理、回收利用。由于地少人多,经济发展强度大,要继续做好绿化工作,保障生态保护红线,提高居民环保意识,一方面减少污染,一方面治理废物;

4)北京市可持续发展水平正在降低,环境压力下的经济效益降低,环境保护的力度跟不上经济发

展速度的增强。因此,应加快转变能源结构,继续推进绿色转型,推广绿色生产生活,有效增加环境对人类活动的承载力。

参考文献 References

- [1] 世界环境与发展委员会. 我们共同的未来[M], 王之佳, 柯金良译. 长春: 吉林人民出版社, 1997
World Commission on Environment and Development. *Our Common Future* [M], Wang Z J, Ke J L translated. Changchun: Jilin People's Publishing House, 1997 (in Chinese)
- [2] 李浩嘉. 试论可持续发展[J]. 中国经贸, 2017(10): 138
Li H J. Let's talk about sustainable development [J]. *China Business Update*, 2017(10): 138 (in Chinese)
- [3] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making* [M]. New York: Wiley, 1996
- [4] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131
Lan S F, Qin P. Emergy analysis of ecosystems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 129-131 (in Chinese)
- [5] 邓锦山, 向晓宇, 丁鹏凯, 邵怀勇. 基于能值分析的绵阳市城市生态经济系统健康评价[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(3): 158-164, 169
Deng J S, Xiang X Y, Ding P K, Shao H Y. Health evaluation of urban ecological economic system in Mianyang city based on emergy analysis [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(3): 158-164, 169 (in Chinese)
- [6] 马永强, 税伟, 陶煜, 吴朝玮, 吴可欣, 李慧, 孙晓瑞, 郑佳瑜. 基于能值分析的闽三角城市群代谢可持续性评估[J]. 地球环境学报, 2023, 14(3): 361-376
Ma Y Q, Shui W, Tao Y, Wu C W, Wu K X, Li H, Sun X R, Zheng J Y. Evaluation of metabolic sustainability of Fujian triangle urban agglomeration based on emergy analysis [J]. *Journal of Earth Environment*, 2023, 14(3): 361-376 (in Chinese)
- [7] 丁豪, 李宗新, 张文君, 钱欣, 樊庆琦, 李升东. 基于能值分析的种植业生产系统可持续发展水平评价: 以山东省郓城县为例[J]. 江西农业学报, 2023, 35(6): 200-206
Ding H, Li Z X, Zhang W J, Qian X, Fan Q Q, Li S D. Evaluation of sustainable development level of planting production system based on emergy analysis: A case study of Yuncheng County, Shandong Province [J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2023, 35(6): 200-206 (in Chinese)
- [8] 胡聃, 文秋霞, 李锋, 王震, 冯强, 张艳萍. 北京城市生态系统的能值动态分析[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(6): 1-4
Hu D, Wen Q X, Li F, Wang Z, Feng Q, Zhang Y P. Analysis of emergy dynamic in Beijing urban ecosystem [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2006, 19(6): 1-4 (in Chinese)
- [9] 张妍, 杨志峰. 北京城市物质代谢的能值分析与生态效率评估[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1892-1899
Zhang Y, Yang Z F. Emergy analysis of urban material metabolism and evaluation of eco-efficiency in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(11): 1892-1899 (in Chinese)

- [10] 宋涛, 蔡建明, 杜姗姗, 倪攀, 丁悦. 基于能值分析的北京城市新陈代谢研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 37-42
Song T, Cai J M, Du S S, Ni P, Ding Y. Emergy analysis of urban metabolism in Beijing [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(1): 37-42 (in Chinese)
- [11] 李海涛, 李明阳. 基于能值的哈萨克斯坦可持续发展评价[J]. 自然资源学报, 2020, 35(9): 2218-2228
Li H T, Li M Y. Evaluation of Kazakhstan's sustainability based on emergy theory [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2218-2228 (in Chinese)
- [12] 陈杨. 从持续收获到永续发展: 可持续发展理念的近代源流与中国道路[J]. 福建师范大学学报: 哲学社会科学版, 2024(3): 44-55, 169-170
Cheng Y. From sustained yield to everlasting development: Historical origins and Chinese pathway of sustainable development [J]. *Journal of Fujian Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2024(3): 44-55, 169-170 (in Chinese)
- [13] 周太东. 再论可持续发展: 含义、支柱及启示[J]. 可持续发展经济导刊, 2022(12): 22-25
Zhou T D. The meaning, pillar and inspiration of sustainable development [J]. *China Sustainability Tribune*, 2022(12): 22-25 (in Chinese)
- [14] 北京市统计局. 北京市2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2024-09-15]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaui/202403/t20240321_3596451.html
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing 2023 national economic and social development statistical bulletin [EB/OL]. [2024-09-15]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaui/202403/t20240321_3596451.html (in Chinese)
- [15] 北京市统计局. 北京市统计年鉴, 2016—2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016—2022
Beijing Municipal Bureau of Statistics. *Beijing Statistical Yearbook*, 2016—2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016—2022 (in Chinese)
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴, 2016—2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016—2022
National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*, 2016—2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016—2022 (in Chinese)
- [17] 孙玉峰, 郭全营. 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 710-717
Sun Y F, Guo Q Y. Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 710-717 (in Chinese)
- [18] 梁慧玲, 林玉蕊. 基于能值分析法核算福建省2012年绿色GDP[J]. 信息系统工程, 2014(10): 102-103
Liang H L, Lin Y R. The green GDP of Fujian Province in 2012 was calculated based on the emergy analysis method [J]. *China CIO News*, 2014(10): 102-103 (in Chinese)
- [19] 刘耕源, 杨志峰. 能值分析理论与实践: 生态经济核算与城市绿色管理[M]. 北京: 科学出版社, 2018
Liu G Y, Yang Z F. *Emergy Analysis Theory and Practice: Eco-Economic Accounting and Urban Green Management* [M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese)
- [20] 璩路路, 师学义, 刘畅. 基于能值的资源型城市新陈代谢过程对比分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 279-284
Qu L L, Shi X Y, Liu C. Comparative analysis of resource-oriented urban metabolisms based on the emergy theory [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 279-284 (in Chinese)
- [21] 庞利敏. 杭州城市生态系统能值分析[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2009
Pang L M. Emergy analysis of urban ecosystem in Hangzhou [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2009 (in Chinese)
- [22] 刘耕源, 杨青, 杨志峰, 张妍. 一种草地生态系统服务价值评估方法[P]. 中国, CN202010324954.3. 2020-09-01
Liu G Y, Yang Q, Yang Z F, Zhang Y. A method for assessing the value of grassland ecosystem services [P]. China, CN202010324954.3. 2020-09-01 (in Chinese)
- [23] 赵凯茜, 李翅. 能值分析方法在社区环境可持续发展评估中的应用[J]. 国际城市规划, 2023, 38(5): 74-82
Zhao K X, Li C. Application of emergy analysis method in evaluating the sustainable development of community environment [J]. *Urban Planning International*, 2023, 38(5): 74-82 (in Chinese)
- [24] 王浩, 吉玉. 基于能值分析法的重庆市可持续发展研究[J]. 价值工程, 2021, 40(2): 90-93
Wang H, Ji Y. Research on sustainable development of Chongqing City based on energy analysis [J]. *Value Engineering*, 2021, 40(2): 90-93 (in Chinese)
- [25] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 张妍, 张力小. 基于能值分析的城市生态系统健康评价: 以包头市为例[J]. 生态学报, 2008, 28(04): 1720-1728
Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Zhang Y, Zhang L X. Emergy-based urban ecosystem health assessment: A case study of Baotou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1720-1728 (in Chinese)
- [26] 陈昌洪, 唐笛. 基于能值分析的成渝地区双城经济圈农业绿色发展评价[J]. 西南科技大学学报: 哲学社会科学版, 2024, 41(1): 26-33
Chen C H, Tang D. Evaluation of agricultural green development in Chengdu-Chongqing economic circle based on emergy analysis [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology: Philosophy and Social Science Edition*, 2024, 41(1): 26-33 (in Chinese)
- [27] Brown M T, Ulgiati S. Emergy assessment of global renewable sources [J]. *Ecological Modelling*, 2016, 339: 148-156
- [28] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environmental loading and sustainability an emergy analysis of Italy [J]. *Ecological Modelling*, 1994, 73(3-4): 215-268
- [29] 宋涛, 蔡建明, 杜姗姗, 倪攀, 丁悦. 基于能值分析的北京城市新陈代谢研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 37-42
Song T, Cai J M, Du S S, Ni P, Ding Y. Emergy analysis of urban metabolism in Beijing [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(1): 37-42 (in Chinese)
- [30] 孙晓瑞, 税伟, 郑佳瑜, 陶煜, 李慧. 基于能值分析的厦门城市代谢可持续性评估[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4342-4353
Sun X R, Shui W, Zheng J Y, Tao Y, Li H. Evaluation of metabolic sustainability in Xiamen based on emergy analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4342-4353

Sinica, 2021, 41(11): 4342-4353 (in Chinese)

- [31] 胡彪, 苑凯, 李新龙, 牛亭云, 关玉琼. 基于能值分析的城市生态经济系统可持续性评价: 以天津市为例[J]. 科技管理研究, 2022, 42(22): 55-63

Hu B, Yuan K, Li X L, Niu T Y, Guan Y Q. Sustainability assessment

of urban ecological-economic system based on emergy analysis: A case study of Tianjin [J]. *Science and Technology Management Research*, 2022, 42(22): 55-63 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 付婷婷, 中国农业大学水利与土木工程学院农建系硕士研究生。本科毕业于海南大学园艺学院设施农业科学与工程专业。参与市规划项目 1 项, 近两年发表论文 1 篇。硕士、本科在读期间均获得 2 次奖学金, 本科获得过 2 次三好学生。



通讯作者简介: 张天柱, 博士, 中国农业大学教授, 长期专注于现代农业科技推广、农业产业化研究、设施农业和农业规划的研究和教学, 尤其擅长农业生物环境工程、农业建筑与农业规划等方向的研究。十余年来在全国累计推广各种类型温室超过 500 hm², 主持农业园区项目和农业产业化项目 557 项, 其中 61 项获得国家级荣誉; 主持和参与国际科研项目 3 项, 国家星火计划课题和“863 计划”等国家级科研项目 9 项, 省部级科研项目 40 余项; 获得授权专利约 500 余项; 发表期刊论文 160 余篇, 其中国内核心期刊论文 40 余篇, 主编出版专业著作 28 本, 公开讲座培训数百场。荣获国家科学技术进步奖 2 项、省部级奖励 8 项、北京市奖励 6 项、中国农业大学校级奖励 10 项、行业协会奖励 10 余项, 包括国家科学技术进步奖、中华农业科技奖、教育部科学技术进步奖、北京市农业技术推广奖、华夏建设科学技术奖、中国农学会农业科技园区分会优秀专家奖、北京农业产业化龙头企业协会突出贡献奖等多项奖励。