

基于生态足迹和物质流的可持续性分析与评价 ——以石家庄市为例

李 爽¹, 张国臣¹, 王丽艳^{1,2}

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

摘 要:以生态足迹模型和物质流分析为核心工具,对 2002—2011 年石家庄市的生态足迹和物质流代谢进行了分析与可持续性评价。结果表明:(1) 研究时段内石家庄市人均生态足迹总体上呈上升趋势,2011 年达到 $6.964\ 207\ \text{hm}^2/\text{人}$,人均生态承载力由 $0.251\ 515\ \text{hm}^2/\text{人}$ 下降到 $0.213\ 777\ \text{hm}^2/\text{人}$,此期间内历年均为生态赤字,至 2011 年人均生态赤字已高达 $6.750\ 43\ \text{hm}^2/\text{人}$ 。表明石家庄市对自然资源的利用超出了生态承载力的范围,生态发展处于不可持续状态。(2) 石家庄市直接物质输入总体呈增长趋势,由 2002 年的 $57\ 695.72\ \text{万 t}$ 增加到 2011 年的 $75\ 434.04\ \text{万 t}$,区域资源开采活动不断增强,具有资源依赖性,资源开发比较粗放,区域内隐藏流(DHF)成为环境压力的主要来源。(3) 与 2002 年相比,2011 年物质生产力(MP)增加了 1.78 倍,数据显示其在物质利用效益方面有了改善,但资源利用效率仍较低。

关键词:生态足迹; 物质流; 可持续发展; 石家庄

中图分类号:F127; F205

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0226-06

Analysis and Evaluation on Shijiazhuang City Based on Ecological Footprint and Material Flow

LI Shuang¹, ZHANG Guo-chen¹, WANG Li-yan^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Environmental Evolution and Ecological Construction Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: Ecological footprint model and material flow analysis were used to analyze and evaluate Shijiazhuang ecological footprint and sustainability metabolic material flow from 2002 to 2011. The results showed that: (1) in the study period, Shijiazhuang City, the per capita ecological footprint overall presented the upward trend, it reached up to $6.964\ 207\ \text{hm}^2/\text{person}$ in 2011, per capita ecological carrying capacity decreased from $0.251\ 515\ \text{hm}^2/\text{person}$ to $0.213\ 777\ \text{hm}^2/\text{person}$, ecological deficit was significant during this period, and the per capita ecological deficit had reached to $6.750\ 43\ \text{hm}^2/\text{person}$ in 2011, these showed that use of natural resources in Shijiazhuang City was beyond the scope of ecological carrying capacity, and ecological development was not sustainable; (2) overall direct material input of Shijiazhuang City presented increasing trend from $5.77 \times 10^8\ \text{t}$ in 2002 to $7.54 \times 10^8\ \text{t}$ in 2011, regional resource extraction activities were growing with resource dependencies, and resource development was also more extensive, the hidden region stream (DHF) had become the major source of environmental stress; (3) compared to that in 2002, material productivity (MP) increased by 1.78 times in 2011, the data showed its effectiveness in substance use had improved, but the use efficiency of resource was still low.

Key words: ecological footprint; material flow; sustainable development; Shijiazhuang City

石家庄市在 2013 年被评为全国环境质量最差的城市之一,主要体现在生态自然环境较脆弱、环境容量小、污染物自然更新速率低、资源匮乏等方面,总体资源环境承载力较为有限。近年来,随着石家庄市环境污染程度和资源消耗程度的进一步加重,该地区资

源环境系统的支持功能下降已经成为制约地区发展的瓶颈。

本文将生态足迹模型和物质流研究方法相结合,完善生态足迹携带信息不足的缺点,对石家庄市可持续发展状态提供更客观的评价,使两种不同视角的定

收稿日期:2013-07-27

修回日期:2013-08-27

资助项目:河北省教育厅项目(Z2009126);河北师范大学博士基金项目(L2007B17)

作者简介:李爽(1987—),女,辽宁北票市人,硕士研究生,研究方向:区域可持续发展。E-mail:627516893@qq.com

通信作者:王丽艳(1976—),女,河北唐山市人,副教授,博士研究生,研究方向:区域可持续发展。E-mail:wangliyan96@163.com

量评价方法得到融合应用,并根据评价得出结论,提出相应的生态转型建议。

1 研究模型

1.1 生态足迹模型

生态足迹分析方法是 1992 年加拿大生态经济学家 William Rees 和其博士生 Wackernagel 提出的一种度量可持续发展程度的生物物理方法^[1-2],是指生产一定人口所消费的资源 and 吸纳这些人口产生的废弃物所需要的生态生产性土地面积。其计算公式^[3]:

$$EF=Nef=N\sum_{i=1}^n(r_i c_i/p_i)$$

式中: i ——消费商品的类别;EF——总的生态足迹; N ——人口数;ef——人均生态足迹; r_i ——均衡因子; c_i ——第 i 种商品的人均消费量; p_i ——第 i 种消费商品的平均生产能力。

生态承载力指一个地区所能提供给人类的生态生产性土地面积,将两者相比,评价系统为“生态赤字”或“生态盈余”,反映区域可持续发展现状^[4-5]。在生态承载力的计算中,由于不同地区的资源禀赋不同,不仅单位面积耕地、草地、林地、建筑用地、海洋(水域)等的生态生产能力差异很大,而且单位面积同类型生物生产面积的生态生产力也差别很大。因此,不同地区同类生物生产性土地的面积是不能直接进行对比的,需要对不同类型的面积进行调整。不同地

区的某类生物生产性面积所代表的区域产量与世界平均产量的差异可用“产量因子”(yield factor)来校正^[6]。因此,生态承载力的计算公式为^[3]:

$$EC=Nec=N\sum_{j=1}^6(a_j r_j y_j)$$

式中:EC——总生态承载力; N ——人口数;ec——人均生态承载力; a_j ——人均生物生产性土地面积; r_j ——均衡因子; y_j ——不同类型生态生产性土地产量因子; j ——生物生产性土地的类型。

如果计算的生态足迹超过了区域所能提供的生态承载力,就会出现生态赤字;如果小于区域的生态承载力,则表现为生态盈余。区域的生态赤字或生态盈余,反映了区域人口对自然资源的利用状况。其计算公式:

$$ER=EC-EF; \quad ED=EC-EF$$

式中:ER——生态盈余;ED——生态赤字;EF——生态足迹;EC——生态承载力。

1.2 物质流分析法

物质流分析(Material Flow Analysis,MFA)是目前研究环境—经济系统物质资源新陈代谢的一种常用方法,是针对一个系统(产品系统、经济系统、社会系统等)的物质和能量的输入、迁移、转化、输出进行定量化的分析与评价方法。根据本文可持续发展分析研究的需要,构建以下物质流计算模型(表 1)及物质流分析指标作为研究依据(表 2)。

表 1 生态系统物质输入与输出类目及其度量指标

项目		本地物质输入指标		项目		本地物质输出指标	
水输入	供水量或用水量			废水排出	工业废水和生活污水		
	生物物质(农、林、牧、渔生物产量)						
固体物质输入	非生物物质:化石燃料(原煤、原油和天然气,按标准煤计算)、金属和非金属矿物(金、铝、铁、铁矿石等)			输出平衡项	化石燃料燃烧废气排放量		
					工业废气(二氧化硫、工业烟粉尘)排放量		
输入平衡项	氧气(消耗于化石燃料、工业生产、生物和土壤呼吸)				生物和土壤呼吸排放的二氧化碳量		
	植物光合作用消耗的二氧化碳量				植物光合作用排放的氧气量		
进口物质				固体废弃物输出	工业和生活固体废弃物排放量		
					农药化肥流失量		
				出口物质	原材料出口量		

表 2 物质流主要分析指标及计算

指标组成	分 类	简写	计算公式
物质输入指标	直接物质输入量	DMI	区域内物质提取+进口
	物质输入总量	TMI	直接物质输入量+区域内隐藏流
	物质需求总量	TMR	物质输入总量+进口物质的隐藏流
物质输出指标	直接物质输出量	DMO	区域内物质输出量+出口
	区域内物质输出总量	TRO	区域内物质输出量+区域内隐藏流
	物质输出总量	TMO	区域内物质输出总量+出口
物质消耗指标	区域内物质消耗量	DMC	直接物质输入—进口
平衡指标	物资库存净增量	NAS	总物质输入—总物质输出
强度和效率指标	物质消耗强度	IMC	物质消耗总量/人口基数(或 GDP)
	物质生产力	MP	GDP/区域内物质消耗量

2 数据来源及处理方法

2.1 生态足迹数据来源及处理方法

本文的数据主要来源于 2003—2012 年石家庄市统计年鉴。生态足迹计算的基础数据包括^[6]:消费的自然资源和能源数据以及各类土地的供给数据。根据石家庄市的情况,将自然资源消费数据分为:粮食、油料、棉花、蔬菜、干果、水果、肉类、禽蛋、奶类、蜂蜜、水产品、木材。能源消费数据分为:原煤、原油、天然气和电力。土地供给数据包括:耕地、林地、草地、水域、建筑用地,由于目前没有专门留出吸收 CO₂ 的土地,所以对此暂不予考虑。本文的计算采用 WWF2004 报告^[7]给出的均衡因子,产量因子则沿用 Wackernagel^[8]关于中国生态足迹报告中所采用的值。根据世界环境与发展委员会(WCED)的报告,在计算区域的生态承载力时应留出 12%的生态生产性土地面积,用以保护区域内生态环境及生物多样性。

2.2 物质流分析数据处理方法

为了避免重复计算,在生物物质统计中人工饲养的且以农产品为饲料的畜产品和水产品不记入生物物质统计数据中。原木的单位为 m³,质量换算系数采用台湾的经验数据^[9],在无从知道进口树种的情况下,统一取 1.2 m³ 为 1 t。化石燃料按 0.7 kg/m³ 折算成重量单位^[10]。计算进入系统中的气体量存在很大的困难,为了简化计算过程,本文只考虑 O₂ 和 CO₂ 的输入量,化石燃料燃烧耗氧量用 CO₂ 和 SO₂ 排放量估算,即按氧在其分子中的质量比例推算,将化石燃料燃烧排放的 CO₂ 乘以 0.73 与 SO₂ 排放量的 0.5 倍相加^[11]。生物呼吸耗氧量是用生物(包括人和动物,后者主要指家畜如牛、羊、猪等)的数量乘以相应类别生物年均呼吸耗氧量求得,人类呼吸耗氧量通过食物消耗量来间接估算^[12-13]。土壤呼吸耗氧量根据输出端土壤呼吸排放的 CO₂ 量推算(氧在 CO₂ 和 O₂

分子中的物质质量的比为 1)。植物光合作用消耗的 CO₂ 量近似用农、林产品产量乘以 1.47 求得^[14]。将农业施用化肥作为固体废弃物,因为化肥输入到农田后,极为容易转化为污染物流入到生态系统中。化石燃料燃烧中产生的 CO₂ 计算与其耗氧量的计算方法相同^[13]。人类呼吸排放,用摄入食物总量乘 0.338 来计算。动物呼吸作用排放的 CO₂ 量,根据与耗氧量之间的比例来计算。本文按耕地面积来计算,每 1 hm² 耕地年均二氧化碳排放量取 25.60 t^[13]。植物光合作用排放的氧气量,由输入端植物光合作用消耗的 CO₂ 量推算。

本文主要采用产品产量、人均产品消费量、能源消费量、交通运输量等数据对石家庄市进口量进行估计。在计算隐藏流中农业剩余物主要统计农作物秸秆,方法是通过农作物草谷比来估算^[15]。化石燃料、金属及非金属矿物隐藏流采用生态包袱平均比率进行计算。按照德国 Wupperttal 研究所对全球隐藏流系数的研究结果,原油为 1:1.22,原煤为 1:6。考虑到中国煤炭资源以硬煤为主,因此在计算煤炭隐藏流时,煤的隐藏流系数为 1:2.36^[16]。房屋建筑的工程挖方量用当年建筑竣工面积进行估算。

3 结果与分析

3.1 石家庄市生态足迹供给与需求分析

由于 10 a 的数据繁多,计算过程较为复杂,本文仅以 2011 年的生态足迹计算为例,由表 3 可知,2011 年石家庄市人均生态足迹为 6.964 207 hm²/人。其中化石燃料的生态足迹最大,其次为林地和草地,耕地、建筑用地和水域类所占比重较少;人均生态承载力仅为 0.213 993 hm²/人,总的承载水平比较低下,生态赤字高达 6.750 214 hm²/人。利用上述计算方法,分别计算出石家庄市 2002—2011 年的人均生态足迹、人均生态承载力及生态赤字。

表 3 2011 年石家庄市生态足迹及生态承载汇总

土地类型	生态需求				生态供给			
	人均面积 (hm ² /人)	均衡 因子	均衡面积 (hm ² /人)	人均面积 (hm ² /人)	均衡 因子	产量 因子	均衡面积 (hm ² /人)	生态赤字
耕地	0.26683	2.19	0.584358	0.052169	2.19	1.66	0.189653	0.394705
林地	1.86469	1.38	2.573272	0.036043	1.38	0.91	0.045263	2.528009
草地	2.25972	0.48	1.084666	0.000025	0.48	0.19	0.000271	1.084395
水域	0.04148	0.36	0.014933	0.001512	0.36	1	0.000544	0.014389
化石燃料用地	1.944241	1.38	2.683053	—	1.38	0	0	2.683053
建筑用地	0.010925	2.19	0.023925	0.007443	2.19	1.66	0.007443	0.016482
12%生物多样性保护							—0.0291809	
人均生态足迹			6.964207	人均生态承载力			0.213993	6.750214

2002—2011 年间,石家庄人均生态足迹由 5.431 271 $\text{hm}^2/\text{人}$ 上升为 6.964 207 $\text{hm}^2/\text{人}$ (表 4),总体呈上升的趋势。可见,随着经济的快速发展,石家庄市对其自然资源的利用程度逐年增大。从生态足迹的构成来看(图 1),各土地类型的人均生态足迹之间存在较大差异,耕地所占比例由 10.9% 下降到 8.4%,林地比例由 51.6% 下降到 36.9%,草地比例由 19.7% 下降到 15.6%,化石燃料用地比例由 17.5% 上升到 38.5%,建筑用地比例由 0.1% 上升到 0.4%,水域比例基本稳定。可见石家庄市的发展主要是通过消耗自然资源存量来弥补生态承载力的不足。

表 4 2002—2011 年石家庄市生态足迹总量盈亏情况

年份	人均生态足迹需求	人均生态足迹供给	生态赤字
2002	5.431271	0.251515	5.179756
2003	5.771578	0.250079	5.521499
2004	5.355823	0.248964	5.106859
2005	6.332036	0.247647	6.084389
2006	6.618009	0.237503	6.380506
2007	6.042635	0.237916	5.804719
2008	5.671413	0.232419	5.438994
2009	5.221121	0.226104	4.995017
2010	6.160778	0.219297	5.941481
2011	6.964207	0.213777	6.750430

注:人均生态足迹供给已扣除 12% 的生物多样性保护面积。

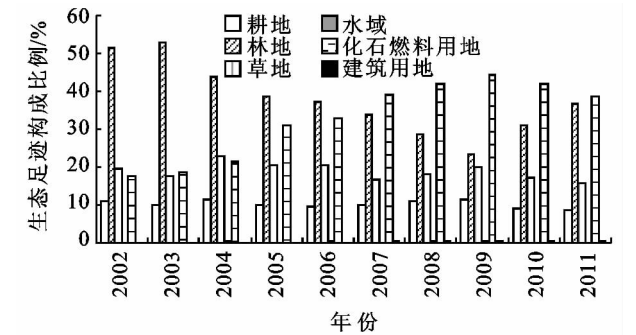


图 1 2002—2011 年石家庄市不同用地类型生态足迹构成比例

人均生态承载力逐渐下降,由 0.251 515 $\text{hm}^2/\text{人}$ 下降为 0.213 777 $\text{hm}^2/\text{人}$,主要原因是耕地面积的下降。人均生态赤字由 5.179 756 $\text{hm}^2/\text{人}$ 增加至 6.75 043 $\text{hm}^2/\text{人}$,总体上基本保持稳定。但随着人均生态足迹需求的迅速上升,预计石家庄市人均生态赤字将会越来越大,生态系统的不稳定性也会不断增强,生态环境处于不可持续状态。

3.2 石家庄市物质输入、物质输出及资源利用可持续性分析

3.2.1 输入端物质流分析 从输入方面看,在 2002—2011 年石家庄市本地物质输入中(图 2),水输入量最大,且有上升的趋势,固体物质输入从 4 939.11 万 t 上升至 14 578.66 万 t,输入平衡项(也就是气体

物质输入)总体增幅不大,进口物质从 7 720 万 t 上升至 15 246 万 t,直接物质输入(DMI)从 57 695.72 万 t 增至 75 434.04 万 t,表明本地资源开采活动不断增强,尽管进口物质持续上升,但在直接物质输入中所占比重仍然很小,这也说明石家庄市的经济发展物质来源主要依靠本地开采,具有资源依赖性。

物质输入总量(TMI)从 62 831.84 万 t 增至 97 386.39 万 t,物质需求重量(TMR)从 93 711.84 万 t 增至 15 8370.39 万 t,物质输入总量和物质需求总量的上升趋势表明石家庄市生态经济系统对自然资源和物质的动用在增加,生态系统为人类提供服务的质量逐渐变差,经济系统运行的可持续性在减弱。

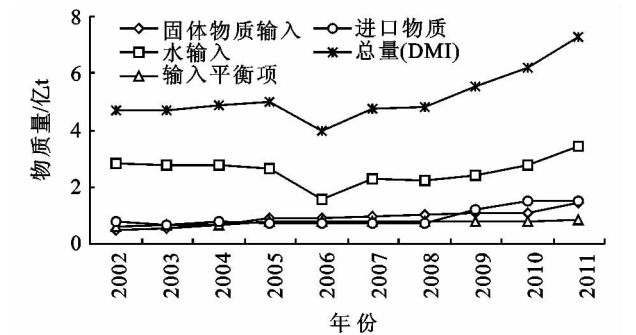


图 2 2002—2011 年石家庄市输入端各项指标物质质量

3.2.2 输出端物质流分析 从输出方面看,2002—2011 年石家庄市废水排放量最大,从 42 909.81 万 t 上升至 54 222.48 万 t,其次是废气的排放,从 10 285.31 万 t 上升至 11 942.94 万 t,总体上升幅度不大(图 3),这主要与石家庄市加强环境治理有关。石家庄市直接物质输入量(DMO)和区域内物质输入总量(TRO)从 2002 年的 73 135.72 万 t、62 831.84 万 t 分别增长到 2011 年的 105 927.4 万 t、97 386.39 万 t。区域内开采隐藏流逐年增加,从 5 136.12 万 t 增加至 21 952.35 万 t(表 5),比 2002 年增加了 3.27 倍,化石燃料和金属非金属矿开采量最大,在区域开采隐藏流中占主导地位,进出口隐藏流在 10 a 间也稳定增长,与 2002 年相比,2011 年进口隐藏流增加 0.97 倍,出口隐藏流也增加了 0.97 倍。

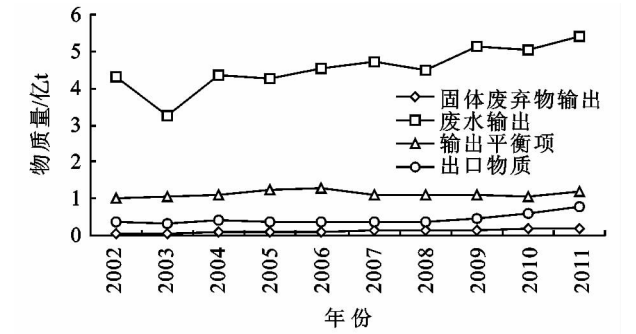


图 3 2002—2011 年石家庄市输出端各项指标物质质量

表 52002—2011 年石家庄市隐藏流统计情况

万 t

年份	区域开采隐藏流					进出口隐藏流	
	未进入经济系统的秸秆	化石燃料	金属非金属	剩余土石方	总量	进口	出口
2002	727.65	3540.81	452.38	415.28	5136.12	30880.00	15440.00
2003	706.69	4093.20	552.90	677.69	6030.48	26682.68	13341.32
2004	752.77	4246.30	698.61	1122.02	6819.70	31330.68	15665.32
2005	833.50	7552.23	905.80	956.53	10248.06	28122.68	14065.32
2006	1104.32	5838.64	1043.46	1376.13	9362.55	28653.32	14326.68
2007	850.01	9634.64	1194.36	1091.09	12770.10	29904.00	14952.00
2008	869.63	9656.97	1746.60	1445.05	13718.25	29533.32	14766.68
2009	844.79	9640.03	2201.57	1445.86	14132.25	48762.68	18332.00
2010	877.51	11099.11	1958.68	2734.05	16669.35	60986.68	24381.32
2011	917.25	11743.40	3853.06	5438.64	21952.35	60984.00	30493.32

3.3 资源利用及可持续性分析

物质输出总量(TMO)从 6 6691.84 万 t 增至 105 009.72 万 t(表 6),总体呈上升趋势,但分别在 2003 年和 2008 年出现下降。近几年来石家庄市作为河北省重点建设城市之一,工业生产规模的不断扩大,必然就导致其在发展过程中对矿产、建筑原料以及能源等高隐流、高排放的物质需求量的增加。与此同时,也暗示着石家庄市将面临巨大的生态包袱和矿山复垦的压力,从而进一步增大了环境恶化的风险。

通过表 6 可以得出,在物质消耗方面,2002—2011 年石家庄市区域内物质消耗量(DMC)从 53 835.72 万 t 上升至 67 810.71 万 t,这就意味着对自然资源的消耗程度越来越大,对自然界的干扰也越来越强烈,不利于石家庄市建立资源节约型城市。从物质平衡方面看,物资库存净增量(NAS)呈上升趋势,

与 2002 年相比,2011 年增至 53 360.67 万 t,表明石家庄市区域物质财富的增长水平在提高。从强度和效率来看,2002—2011 年石家庄市物质消耗强度(IMC)总体呈上升趋势,从 82.31 t/人增长至 116.98 t/人,表明石家庄市离环境、经济系统可持续发展的目标还较远,经济发展主要是以增加资源消耗和环境破坏为代价的,并且随着人口数量的不断增多,资源消耗和环境破坏还会有增长的趋势。研究时段内物质生产力(MP)2011 年达到 602.07 元/t,相比 2002 年增幅为 178%,尽管增幅很大,但在其绝对数量上,石家庄市物质生产力仍处于较低水平。经济增长模式仍然是以“高投入、高消耗、高污染”、资源开发粗放、利用率低下等为主要特征,高速经济的发展与增长对生态资源的依赖程度较大。

表 62002—2011 年石家庄市物质流指标汇总

年份	物质流/万 t								IMC(t/人)	MP/ (元·t ⁻¹)
	DMI	TMI	TMR	DMO	TRO	TMO	DMC	NAS		
2002	57695.72	62831.84	93711.84	73135.72	62831.84	66691.84	53835.72	27020.00	82.31	216.33
2003	47286.36	53316.84	79999.52	60627.68	53316.84	56652.17	43951.03	23347.35	69.55	301.36
2004	59488.62	66308.32	97639.00	75153.94	66308.32	70224.65	55572.29	27414.35	85.07	271.93
2005	59718.55	69966.61	98089.29	73783.87	69966.61	73482.94	56202.22	24606.35	56.82	297.41
2006	62954.37	72316.92	100970.24	77281.05	72316.92	75898.59	59372.70	25071.65	88.41	320.44
2007	63184.52	75954.62	105858.62	78136.52	75954.62	79692.62	59446.52	266166.00	91.27	381.66
2008	60551.76	74270.01	103803.33	75318.44	74270.01	77961.68	56860.09	25071.65	88.31	478.99
2009	68092.52	82224.77	130987.45	86424.52	82224.77	86807.77	63509.52	44179.68	110.57	472.57
2010	68789.12	85458.47	146445.15	93170.44	85458.47	91553.80	62693.79	54891.35	113.97	542.48
2011	75434.04	97386.39	158370.39	105927.4	97386.39	105009.72	67810.71	53360.67	116.98	602.07

4 结论与建议

2002—2011 年间,基于生态足迹和物质流分析的可持续发展评价显示,生态经济系统已开始背离可持续发展方向发展。虽然石家庄市污染物排放量的增长幅度已较小,环境状况也有所改善,但是经济发展物

质来源仍然主要依靠本地采掘,且资源开采活动逐年增强,对资源的依赖性过大。作为河北省重点建设的城市,石家庄市当前面临着环境污染严重、资源枯竭、矿山复垦压力、资源开发粗放、土地资源紧张等问题,而其中最主要的矛盾即是经济增长与区域资源和环境容量之间的矛盾,针对石家庄市目前存在的问题,

需要从以下几个方面进行改善:

(1) 节约利用土地,加强农业科技研究和推广应用,提高土地的生态承载力^[17],解决土地资源紧张的问题;科学管理矿产资源,减弱资源开采强度,加强对矿产资源的保护^[18],改变原有粗放式资源开发模式,降低产业经济对资源的依赖性,缓解资源匮乏的现状。

(2) 降低矿产、冶金、石化等严重污染工业在经济结构中所占的比重。实现在经济发展上制定严格的环保标准,控制引进环境污染企业和项目,建立和实施石家庄市的生态补偿机制^[19],并以此为基础来减轻石家庄市环境污染严重的程度。

(3) 全面建设和推广使用循环经济,在提高经济发展水平的同时降低对自然资源的消耗,提高资源的利用效率,能够有效地解决经济发展与资源环境承载力不足之间的矛盾^[20]。在此基础上,积极引进新技术,完成经济增长由资源推动向技术推动的转变,从而实现石家庄市生态经济系统的可持续发展^[21]。

参考文献:

- [1] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leave out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 120-130.
- [2] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint Reducing Human Impact on the Earth*[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [3] 张威,张恒庆.生态足迹方法:辽宁省2005—2007年生态足迹计算与分析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(6): 150-153.
- [4] 尹璇,倪晋仁,毛小冬.生态足迹研究述评[J]. *中国人口·资源与环境*, 2004, 14(5): 45-52.
- [5] 金丹,卞正富.基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1725-1733.
- [6] 柴志敏,刘小英,李富忠,等.2003—2007年山西省生态足迹动态变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 49-52.

- [7] WWF2004: *Living Planet Report* [EB/OL]. <http://www.China.info.gov.cn/data/200503,2004-10-10>.
- [8] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the Ecological Footprint Concept[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [9] 林锡雄.台湾物质流之建置与应用研究初探[D].台湾:中原大学,2001.
- [10] 姚星期.基于物质流核算的浙江省循环经济研究[D].北京:北京林业大学,2009.
- [11] Schuetz H, Bringezu S. *Economy-wide Material Flow Accounting(MFA): Technical Documentation*[R]. Germany: Wuppertal Institute, 1998.
- [12] 张音波,陈新庚,彭晓春,等.广东省环境经济系统的物质流分析[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 1021-1031.
- [13] 黄和平,毕军,张炳,等.物质流分析研究述评[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 368-379.
- [14] 王明星.中国气候与海平面变化及其趋势和影响(三):全球气候变暖[M].济南:山东科学技术出版社,1996.
- [15] 张礼军.基于物质流和生态足迹核算的甘肃省循环经济评价研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- [16] 刘敬智,王青.中国经济的直接物质投入与物质减量分析[J]. *资源科学*, 2005, 27(1): 46-51.
- [17] 李兰图,陈文宽,孙丽娜.江苏省土地综合承载力时空差异分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 12-16.
- [18] 李佳,雷国平,崔明哲,等.基于三角模型的矿业城市土地利用可持续性评价[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 196-201.
- [19] 杨志平.基于生态足迹变化的盐城市麋鹿自然保护区生态补偿定量研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 261-264.
- [20] 宫继萍,潘竟虎,石培基.基于生态足迹和灰色关联度的甘肃省可持续发展研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 198-201.
- [21] 赵卉卉,王远,谷学明,等.基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建:以安徽省铜陵市为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2025-2032.

(上接第225页)

参考文献:

- [1] 朱凤武,彭补拙,丁建中,等.温州市土地利用空间格局研究[J]. *经济地理*, 2001, 21(1): 101-104.
- [2] 陈述彭,赵英时.遥感地学分析[M].北京:测绘出版社,1990.
- [3] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版

- 社,2003.
- [4] 吴殿廷,乔家君,曹康,等.区域分析与规划教程[M].北京:北京师范大学出版社,2007.
- [5] 刘闯.区域土地数量分析模型及其应用[J]. *中国土地科学*, 1989, 3(3): 31-38.
- [6] 张树文,张养贞,李颖,等.东北地区土地利用/覆被时空特征分析[M].北京:科学出版社,2006.