

基于生态足迹的广东省化石能源 用地定量研究与分析

杜鹏^{1,2}, 许军³, 夏斌¹, 杨蕾^{1,2}

(1.中国科学院广州地球化学研究所,广东 广州 510640;2.中国科学院研究生院,北京 100086;

3.江西省林业科学院,江西 南昌 330032)

摘要:以生态足迹模型为基础,通过分析森林和草原生态系统在碳循环过程中的碳蓄积能力(NEP),计算了广东省1990—2007年化石能源消费的生态足迹,并对广东省化石能源生态足迹的产值和生态压力进行了分析,提出了相应的对策。结果表明,广东在20世纪90年代至2007年的经济快速发展过程中,化石能源占地面积总量由 $6\,398.21 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 增长到 $18\,340.74 \times 10^3 \text{ hm}^2$;能源消费对生态环境的压力呈不断增加趋势,由1990年的0.57上升至2007年的1.64。以煤炭为主的能源消费结构正逐步改善,能源利用效率和经济价值不断提高。煤炭生态足迹由1990年的66%下降至2007年的45%,化石能源产值2.43万元/ hm^2 增长至16.95万元/ hm^2 。

关键词:化石能源;生态足迹;碳循环;能源足迹产值;生态压力

中图分类号:P964

文献标识码:A

文章编号:1004-874X(2010)02-0201-06

Quantitative research and analysis of supply to fossil energy land of Guangdong province based on ecological footprint

DU Peng^{1,2}, XU Jun³, XIA Bin¹, YANG Lei^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China;

3. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China)

Abstract: By analyzing the capacity of carbon accumulation of forest and grassland (NEP), this paper computes the carbon ecological footprint of fossil energy from 1990 to 2007, and analyses the result through production ratio and ecological pressure intensity of fossil energy. At end of the paper some recommendations were also mentioned. The result shows that the carbon ecological footprint of fossil energy increased from $6\,398.21 \times 10^3 \text{ hm}^2$ in 1990 to $18\,340.74 \times 10^3 \text{ hm}^2$ in 2007 and the ecological pressure intensity of fossil energy increased from 0.57 to 1.64 during this period. Coal-based energy consumption structure is being improved gradually and energy efficiency and economic value is rising continuously. The coal ecological footprint dropped from 66% in 1990 to 45% in 2007. And during the same period the production of ratio of fossil energy increased from $2.43 \times 10^4 \text{ yuan} / \text{hm}^2$ to $16.95 \times 10^4 \text{ yuan} / \text{hm}^2$.

Key words: fossil energy; ecological footprint; carbon circulation; production to energy footprint ratio; ecological pressure

生态足迹(Ecological Footprint, EF)最早是由加拿大生态经济学家 William 等^[1]在1992年提出,并由他的学生 Wackernagel 进一步完善。生态足迹方法一种衡量人类对自然资源利用程度以及自然界为人类提供的生命支持服务功能的方法。该方法通过估算维持人类的

自然资源消费量和同化人类产生的废弃物所需要的生态生产性空间面积大小,并与给定人口区域的生态承载力进行比较,来衡量区域的可持续发展状况。在生态足迹计算中,各种资源和能源消费项目被折算为耕地、草场、林地、建筑用地、化石能源土地和水域等6种生物生产面积类型^[1]。生态足迹原理概念简单,涵盖面丰富,它能够定量的评估人类活动对生态系统占用的大小,揭示了人类发展与生态系统承载能力间的关系。

收稿日期:2009-10-07

作者简介:杜鹏(1982-),男,在读博士生, E-mail: dpng1982@gmail.com

生态足迹方法的具有很宽的应用尺度,从全球尺度,一直可以延伸到国家、地区、社区、学校、家庭和个人尺度。目前生态足迹已经成为国际公认的评价自然资源消耗的方法,许多国际组织和国家已利用生态足迹来审视生态经济发展状况,并以此来评估生态经济发展政策。全球环境保护组织世界自然基金会(World Wildlife Fund, WWF) 每两年发布一次的《地球生命力报告》(Living Planet Report) 主要就是通过生态足迹方法对自然资源的消耗进行评价的^[2];瑞士洛桑国际管理学院(IMD)也选用生态足迹作为环境基础设施评价标准;耶鲁大学环境法学与政策研究中心(Yale Center for Environmental Law and Policy)与欧盟研究中心(Research Center of the European Commission)等单位合作,每年定期公布的全球环境可持续指标(ESI),已经将生态足迹作为评估废弃物与消费压力的依据^[3]。生态足迹理论于20世纪90年代末期引入国内,生态足迹相关应用性研究也同时展开。徐中民等^[4]介绍了生态足迹的概念及计算模型,还计算了甘肃省1998年的生态足迹^[5],陈东景等^[6]应用生态足迹理论对我国西北地区(陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆)1999年的生态足迹进行了计算研究。2003年,胡新艳等^[7]对广东省生态足迹进行计算和研究。2003年,郭秀锐等^[8]以广州为例对城市生态足迹进行了计算和分析。

生态足迹的计算基于以下两个基本事实:(1) 人类可以确定自身消费的绝大多数资源及其产生的废弃物的数量;(2) 这些资源和废弃物能转换成相应的生物生产面积^[1]。其计算公式如下:

$$EF=N \cdot (ef)=N \cdot \sum w_i A_i = \sum w_i (c_i/P_i) \quad (1)$$

式中, EF 为总的生态足迹, N 为人口数, ef 为人均生态足迹, i 为消费商品和投入的类型, w_i 为均衡因子,(因为单位面积耕地、化石燃料土地、牧草地、林地等的生物生产能力差异很大,为了使计算结果转化为一个可比较的标准,需要在每类型生物生产面积前乘上一个均衡因子); A_i 为生产第*i*项消费项目人均占用的实际生物生产性土地面积; c_i 为第*i*种商品的人均消费量; p_i 为第*i*种消费商品的全球平均生产能力。生态足迹是每种消费商品的生物生产性面积与均衡因子乘积的总和。

随着世界经济的增长和人口数量膨胀,人类消费的生态足迹自20世纪80年代后就超过了地球生态系统的生产能力^[9],其中化石能源消费产生的 CO_2 的生态足迹的比例占整个生态足迹的比重也日益增大。自我国改革开放以来,社会经济迅速发展,快速的经济发

展和以煤炭为主的能源消费结构特点共同决定了我国 CO_2 的排放量的快速增长。截至2004年我国的 CO_2 年排放量为 $5\ 005.7 \times 10^6$ t,仅次于美国居于世界第2位^[9],化石能源的消费和温室气体排放给我国的可持续发展带来了巨大的压力和挑战。

广东省作为我国经济较为发达的省份之一,在经济快速发展的过程中同样伴随着能源消费量和温室气体排放量快速增长,如何使经济、社会和生态环境可持续发展成为广东发展过程中急需解决的重要难题。本文根据生态系统的碳循环理论,通过净生态系统生产量(NEP),计算并分析了广东省1990—2007年间化石能源碳排放量的生态足迹量和变化趋势,并通过生态足迹的产值和生态压力揭示广东省化石能源消费的效率和对生态环境压力的变化趋势,为广东能源结构调整提供一定理论依据,并为我国其他地区的发展提供借鉴。

1 陆地生态系统碳循环

1.1 陆地生态系统的碳的固定过程

进入工业社会以来,人类由于使用煤炭、石油和天然气等化石燃料,以及加速毁林和破坏草原,向大气排放的 CO_2 的平均浓度从过去42万年中的 $180 \sim 300 \mu L/L$ ^[10]上升到目前的 $370 \mu L/L$ ^[11]。在过去的几十年里,大气 CO_2 浓度的增加70%~90%来自化石燃料的燃烧,其余部分主要由于土地利用的变化所致。

在陆地生态系统森林和草原对碳的固定起到了最为重要的作用^[12-13]。陆地生态系统对碳的固定过程主要取决于碳的输入和输出过程。碳的输入过程主要通过植物光合作用将大气中的碳存储在植物体内,固定为有机化合物;碳的输出过程主要指森林土壤和动物的异养呼吸过程以及凋落物的矿质化过程实现。光合作用过程又称初级生产过程(primary production),植物通过光合作用将 CO_2 转化为有机物贮存起来,光合作用生成有机物的速率被称为总初级生产力(GPP, gross primary productivity)。植物光合作用同时,还通过呼吸作用不断地将有机物分解为 CO_2 和水等简单的无机物。植物GPP扣除用于自养呼吸(RA)的部分,得到了植物净初级生产力(NPP, net primary productivity)。存储于植物体内的碳通过分解作用向大气和土壤转移,即异氧呼吸(RH)。剩余在活植物体内的碳净积累增量即净生态系统生产量(NEP, net ecosystem production),NEP能够反应生态系统的固定碳能力。NEP的表达式如公式2所示。

$$NEP=GPP-RA-RH \quad (2)$$

1.2 陆地生态系统碳的固定数量

陆地生态系统作为人类活动的主要区域,碳循环的过程受人类活动影响巨大,一方面通过能源消耗和工业生产,直接向大气中排放 CO₂ 等温室气体,另一方面通过改变土地利用来影响 CO₂ 的吸收和固定。全球各地陆地生态系统的碳存储与气候、土壤类型、植被种类有着密切的关系。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)2001年发布数据(表1)^[14],可知约占陆地面积27.6%的森林生态系统蓄积了约77%的碳量,其中面积占12%的热带森林蓄积了46%的碳量,说明森林特别是热带森林对碳蓄积起到了十分重要的作用。此外,占地约23.2%的热带草原和温带草原贡献约16%的碳蓄积,其中也以热带草原的贡献为主。由此可知,陆地生态系统中森林和草原对碳的固定起到了决定性的作用,合计占总蓄积的93%。

表1 全球植被和地表1m深土壤碳储存的分布

生态系统	面积 (10 ⁹ hm ²)	比例 (%)	碳蓄积 10 ⁹ tC		
			植被	土壤	碳蓄积量占总植被的比例
热带森林	1.76	11.6	212	216	0.45494
温带森林	1.04	6.9	59	100	0.12661
北方森林	1.37	9.2	88	471	0.18884
热带草原	2.25	14.9	66	264	0.14163
温带草原	1.25	8.3	9	295	0.01931
沙漠及半沙漠	4.55	30.0	8	191	0.01717
苔原	0.95	6.4	6	121	0.01288
湿地	0.35	2.3	15	225	0.03219
农田	1.60	10.6	3	128	0.00644
合计	15.12	100.0	466	2011	1.00000

2 化石能源生态足迹的计算

化石能源用地,在 Rees 传统生态足迹理论体系中,能源消费的生态足迹就是指能源生产及其消费后吸收其所产生 CO₂ 需要的空间^[1]。本文化石能源生态足迹的计算过程如图1所示。在计算化石能源碳生态足迹的过程中,化石能源消费产生的 CO₂ 通过不同种类化石能源单位质量燃烧热量和碳排放系数折算化石能源排碳量,再通过排碳量转化为 CO₂ 的排放量;森林和草原的固碳量是通过森林和草原的植被净生产力 NEP 求得。最后通过化石能源 CO₂ 的排放量和森林草原的固碳能力求得化石能源生态足迹^[15]。其中各类能源碳排放系数是根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[16]发布数据(表2)进行计算的。

3 广东省化石能源生态足迹

3.1 研究区概况

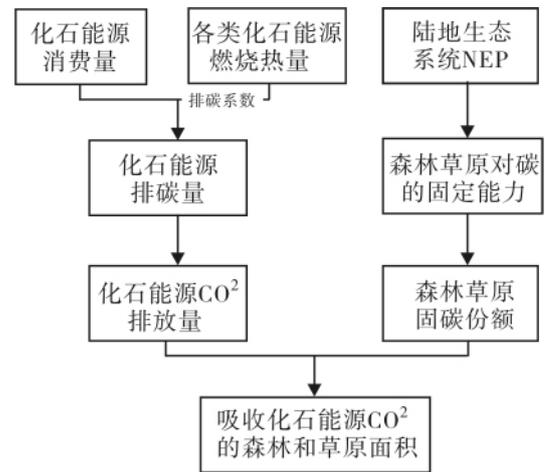


图1 化石能源生态足迹计算流程

表2 世界森林和草原年平均 NEP^[13]

植被类型	面积 (10 ⁸ hm ²)	碳蓄积量 (10 ⁹ t)	年固碳量 (10 ⁸ t)	1hm ² 年均的 NEP(t)
热带森林	17.6	2120	103.84	5.90
温带森林	10.4	590	46.8	4.50
北方森林	13.7	880	8.22	0.60
草原	35	750	33.19	0.95

广东省作为我国改革开放的先行者和典范,借助优惠政策和毗邻港澳的区位优势,经济高速发展,1978—2005年间,年均GDP增长13.7%,按1978年不变价格计算,广东省实现GDP增长21.4倍^[17]。广东省在经济快速发展的同时,能源消费量也在不断上升,从1990—2007年,广东省一次化石能源消费量由3387.65万t标准煤增长到13216.2万t标准煤,化石能源消费总量增长了近3倍。这些化石能源的大量消费对广东及周边地区的生态环境产生了巨大的压力。

3.2 广东省化石能源碳足迹计算结果

广东省化石能源生态足迹的计算过程中根据全球森林和草原吸收碳的份额(林地82.72%、草地17.28%)计算^[18]。各类化石能源所需的森林面积和草原面积经过与均衡因子相乘处理后的1990、1995、2000、2005、2006和2007年化石能源总生态足迹见表3,在计算过程中森林均衡因子取1.1,草原均衡因子取0.5^[3]。由于天然气等化石能源在总的能源消费中比重很小,在本文中不予计算其生态足迹。

3.3 计算结果分析

根据计算结果(图2)可知,1990—2007年广东省的能源消费数量伴随着GDP的快速增长,也呈现出迅速增长的趋势。在GDP值从1990年的1559.21亿元增长到2007年的31084.40亿元的过程中,化石能源

表 3 广东省化石能源碳足迹计算结果

能源品种		1990年	1995年	2000年	2005年	2006年	2007年
煤炭	使用量(10 ⁴ t)	2597.26	3728.23	3053.33	3997.33	4725.33	5271.06
	排碳量(10 ⁴ t)	1475.55	2118.08	1734.66	2270.96	2684.55	2994.60
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	4868.91	6989.09	5723.89	7494.04	8858.28	9881.34
焦炭	使用量(10 ⁴ t)	107.88	135.76	149.69	302.76	303.81	456.42
	排碳量(10 ⁴ t)	77.93	98.07	108.14	218.71	219.47	329.72
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	257.14	323.60	356.82	721.69	724.20	1087.97
原油	使用量(10 ⁴ t)	19.26	3.65	6.40	4.56	68.61	14.72
	排碳量(10 ⁴ t)	16.11	3.05	5.36	3.81	57.38	12.31
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	53.16	10.08	17.67	12.58	189.35	40.60
燃料油	使用量(10 ⁴ t)	124.53	183.83	236.93	467.25	611.77	588.38
	排碳量(10 ⁴ t)	105.60	155.89	200.92	396.24	518.78	498.95
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	348.44	514.39	662.97	1307.46	1711.83	1646.39
汽油	使用量(10 ⁴ t)	96.20	191.00	204.62	479.50	524.26	569.35
	排碳量(10 ⁴ t)	81.45	161.73	173.25	406.00	4438.98	482.08
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	268.77	533.66	571.68	1339.69	1464.73	1590.73
煤油	使用量(10 ⁴ t)	21.48	38.08	60.79	104.47	106.97	116.32
	排碳量(10 ⁴ t)	18.68	33.11	52.86	90.84	93.01	101.14
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	62.17	110.21	175.95	302.36	309.60	336.64
柴油	使用量(10 ⁴ t)	175.97	283.91	470.37	874.74	917.97	972.38
	排碳量(10 ⁴ t)	154.03	248.50	411.70	765.66	803.47	851.10
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	508.23	819.98	1358.47	2526.39	2651.19	2808.34
液化石油气	使用量(10 ⁴ t)	11.69	108.80	186.17	355.07	314.15	353.33
	排碳量(10 ⁴ t)	9.51	88.53	151.49	288.93	255.63	287.52
	生态足迹 (10 ³ hm ²)	31.38	292.14	499.88	953.38	843.52	948.73
合计(10 ³ hm ²)		6398.21	9593.14	9367.34	14657.57	16752.69	18340.74

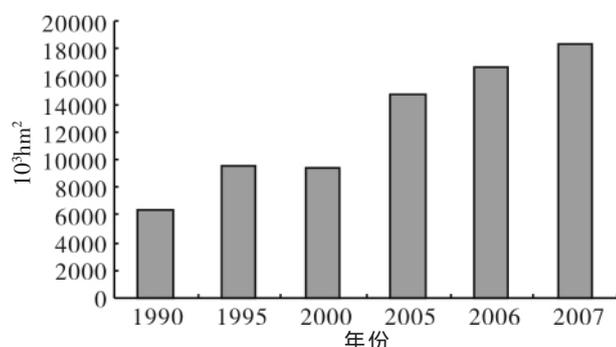


图 2 1990—2007 年广东省化石能源生态足迹

消费的生态足迹也由 $6\ 398.21 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 增长到 $18\ 340.74 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 1995—2000 年间生态足迹出现了短暂的负增长, 这主要是由于在此期间, 我国能源资源相对过剩, 加上经济紧缩政策, 和东南亚金融危机的影响, 使广东省对煤炭的消耗相对较低, 使经济发展相对放慢, 能源消耗随之减少。2000 年后, 随着我国国民经济进入新的快速增长阶段, 在城市化、工业化加速等一系列外部因素的作用下, 经济的快速增长带动了能源消耗的不断攀升, 致使能源足迹不断增大。

在 GDP 增长了近 20 倍的同时, 广东省化石能源生态足迹增长了不到 3 倍, 主要有以下几个原因: 第一, 在广东近十几年的发展过程中, 广东省能源消费的结构和效率在不断地优化和提高。期间广东减少了排放大量温室气体的原煤的使用比例, 油品的消费呈现上升趋势。同时由于技术进步和不断地产业调整与升级, 也使得广东省能源利用效率大幅提高。第二, 由于广东对电力能源的使用比重不断增加, 2005 年电力在终端能源消费结构中的比重突破 50%^[17], 使得广东的万元 GDP 的生态足迹呈快速下降趋势。电力能源的使用虽然并不直接排放温室气体, 但是在我国以火力为主的电力的生产过程中仍然会排放出大量以 CO₂ 为主的温室气体, 而广东又是电力的输入大省, 从而也将部分生态足迹转移到了电力输出地区。第三, 通过改革开放后不断地发展, 广东省的产业结构不断调整和升级, 对化石能源消费需求相对较少的第三产业不断发展壮大, 第三产业在地区经济中的比例由 1990 年的 35.8% 上升至 2007 年的 43.3%^[17], 也使得广东省化石能源生态足迹增长速度远远落后于经济增长速度。

3.3.1 化石能源种类生态足迹分析 根据广东省各类化石能源的生态足迹计算结果,煤炭、油类和液化石油气三类化石能源生态足迹所占比例如图3所示。从1990年至2007年间煤炭化石能源生态足迹由66%下降到2007年的45%,油类消费生态足迹的由16%上升至26%,液化石油气生态足迹由18%上升至29%。可见广东省化石能源消费中煤炭和焦炭的贡献仍然巨大,造成了巨大运输压力和环境问题。但呈现下降趋势,油类和液化石油气的贡献率成上升趋势。这说明广东省能源消费结构在逐步改善,虽然仍以煤炭作为主要能源,但燃烧效率更高的油类和液化石油气的使用量在逐步上升。

从广东省一次性能源消费的构成上分析,1990—2005年原煤超过50%、原油接近30%、天然气小于4%,而我国能源消费结构中原煤、原油和天然气的比例

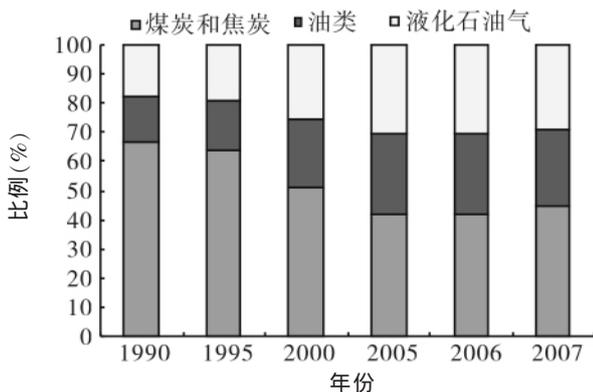


图3 1990—2007年广东省各类化石能源生态足迹比例

(2005)分别为67.7%、22.7和2.6%^[17]。广东省化石能源消费中原煤消费比例小于全国平均水平,石油消费则高于全国平均水平,广东省能源消费结构优于全国平均水平,但是与世界一次能源消费情况(原煤25.5%、原油37.5%、天然气24.3%)比较,煤炭使用比例仍然很高,而原油和天然气的使用比例仍然偏低,能源结构总体还不平衡,对生态环境的造成巨大压力。

3.3.2 化石能源生态足迹经济价值分析 本文使用单位能源生态足迹产值(Production to Energy Footprint Ratio, PEFR)^[19]来评估化石能源生态足迹的经济价值。能源生态足迹产值即单位能源生态足迹创造的经济价值,通过GDP与能源生态足迹比值计算,研究区域内的PEFR越高,说明该地区能源生态足迹较少,或该区经济发展迅速,单位面积土地产值较高,单位生态足迹能够创造较高的经济价值,经济发展具有更高的可持续性。

从图4可以看出,广东省化石能源生态足迹经济价值由1990年呈逐步上升趋势,由1990年2.43万元/hm²增长到2007年的16.95万元/hm²,增长了近7倍,说明广东省经济在告诉发展的同时,能源使用效率在不断提高,单位土地面积产生的经济价值不断增加。广东省PEFR大幅高于全国同期平均水平,2005年为全国平均水平的近6倍,说明广东省化石能源使效率高于全国平均水平,并且已接近国际一些能源经济价值较高的发达国家^[20]。

3.3.3 化石能源生态足迹压力分析 化石能源消费产生的以CO₂为主的温室气体需要通过生态系统吸收固定,能源生态足迹压力(Ecological Pressure Intensity of

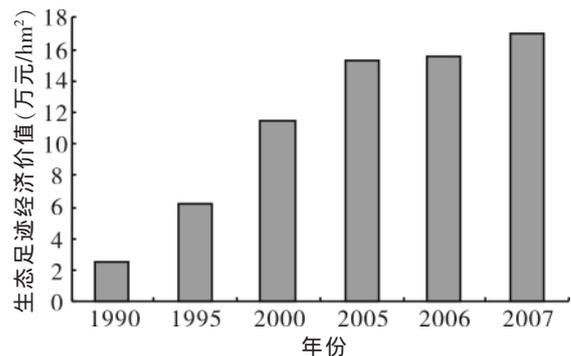


图4 1990—2007年广东省化石能源经济价值

Fossil Energy Footprint, EPIFEF) 是研究区能源生态足迹与森林和草原折算面积比值^[20]。当能源生态足迹越大是表示该区域能源消费对该地区的生态环境压力越大。1990—2007年,化石能源生态足迹压力呈不断上升趋势,由1990年的0.57增长到2007年的1.64,生态足迹压力增大了近2倍,高于全国平均水平(图5)。由此可见,随着广东省经济快速发展,生态环境压力增长速度也在不断增加,特别是2000年后的增长幅度较大,这为广东省的生态环境安全敲响了警钟。

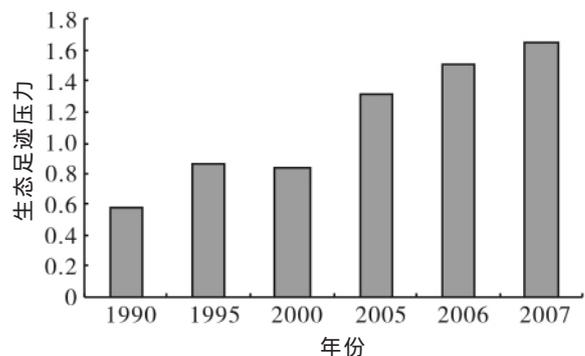


图5 1990—2007年广东省化石能源生态足迹压力

4 结论与讨论

本文根据植物 NEP 值计算在碳循环过程中森林和草原生态系统的对碳的固定能力,并通过计算各种类型化石能源的碳排放数据,计算了广东省 1990、1995、2000、2005、2006、2007 年化石能源碳生态足迹,并根据计算结果对广东省化石能源消费变化趋势、经济价值和生态环境压力进行了分析。结果表明,1990—2007 年,广东省化石能源生态足迹经济价值不断增加,能源使用效率逐步提高,在 GDP 增长了近 20 倍的同时,化石能源生态足迹仅增长了近 3 倍;能源结构不断调整,煤炭化石能源所占比例不断下降。但是广东省化石能源生态足迹总量依然巨大,而且仍呈现不断上升趋势,以煤炭为主的能源消费结构还没有根本改变,生态环境所承受的压力不断增加,这一方面与广东省经济快速的发展和人口的不断增加有关,同时也与广东省能源和产业结构有关。

广东省作为我国改革开放的前沿和经济最为发达的省份之一,必须进一步提高能源的使用效率,调整能源消费结构,缓解化石能源消费对生态环境造成的压力。为达到这一目标,可以采用以下一些措施:(1)保护生态环境,整合土地资源,加大植树造林力度,使广东省生态承载力不断增加;(2)结合先进的科学技术和和管理方法提高能源的使用效率,增加化石能源的经济价值,使化石能源消费总量得到有效控制;(3)调整能源结构,在不断改善化石能源消费结构的同时,增加核电、风电、太阳能等低污染、低排放能源的消费比例;(4)优化产业结构,加快由能源消费由粗放型向集约化的转变过程,大力发展低污染、低排放、高效益的信息产业和服务产业。

参考文献:

- [1] William E Rees. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. *Environmental Urban*, 1992(4):121-130.
- [2] WWF. Living Planet Report 2000 [EB/OL]. http://www.panda.org/news/facts/publications/living_planet_repo-rt/lpr2006/index.cfm, 2007-04-17.
- [3] M Wackernagel, Chad Monfreda, Niels B Schulz, et al. Calculating national and global ecological footprint time series: Resolving conceptual challenges [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21: 271-278.
- [4] 徐中民,张志强.可持续发展定量研究的几种新方法评价[J]. *中国人口、资源与环境*, 2000, 10(2):60-64.
- [5] 徐中民,张志强.甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5):607-615.
- [6] 陈东景,许中民,程国栋,等.中国西北地区的生态足迹[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(2):164-169.
- [7] 胡新艳,刘一明.广东省 2001 年生态足迹的计算与分析[J]. *广东地质*, 2003, 18(2):63-68.
- [8] 郭秀锐,杨居荣,毛显强.城市生态足迹计算与分析——以广州为例[J]. *地理研究*, 2003, 22(5):655-662.
- [9] World Bank. World development indicators 2008. http://www.stats.gov.cn/tjsj/qtsj/gjsj/2008/t20090609_402564036.htm.
- [10] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctic[J]. *Nature*, 1999, 399:429-436.
- [11] NOAA/CMDL. Climate monitoring and Diagnostics Laboratory Summary Report No.26 (2000-2001) [R]. A - available at <http://www.cmdl.noaa.gov/publications/annrpt26/index.html>, 2003-03-27.
- [12] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pool and sand flux of global forest ecosystem [J]. *Science*, 1994, 262: 185-190.
- [13] 谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,等.基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. *生态学报*, 2008, 28(4):1729-1735.
- [14] IPCC. Land Use, Land-use Change and Forestry [A]. A special report of IPCC [R]. Cambridge University Press, 2001.
- [15] William E Rees. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. *Environmental Urban*, 1992(4):121-130.
- [16] IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national Greenhouse Gas inventories: Workbook [EB/OL]. <http://www-ipcc2nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>.
- [17] 中华人民共和国统计局.广东统计年鉴 2008[M].北京:中国统计出版社,2008.
- [18] 广东省植物研究所.广东植被[M].北京:科学出版社,1976.
- [19] 刘彦兰.1990—2003 年台湾能源生态足迹推估与能源效益分析研究[D].台北:国立台湾大学,2005.
- [20] 李智,鞠美庭,刘伟,等.中国 1996—2005 年能源生态足迹与效率动态测度与分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(6):55-60.