

基于修正的生态足迹区域可持续发展评价

杨海真, 李爱梅, 叶田

(同济大学环境科学与工程学院长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对传统的生态足迹模型在区域可持续发展评价中存在的不足, 将其分为消费性生态足迹和生产性生态足迹, 并以苏州为案例, 计算分析了其 1993 年~2002 年的可持续发展状况, 测算了其历年的生态经济系统发展能力. 结果表明: 苏州十年的人均生产性生态赤字均小于全球人均生态赤字 0.4 hm^2 , 人均消费性生态赤字则均大于 0.4 hm^2 , 其生态环境是区域可持续、全球不可持续型, 且生态效率逐年提高; 生态经济系统发展能力逐年上升, 增加生态足迹多样性是增强发展能力的有效途径; 修正后的生态足迹模型及采用的发展能力测算方法可较准确评价区域的可持续发展状况.

关键词: 生态足迹; 可持续; 发展能力; 评价

中图分类号: X 321

文献标识码: A

Regional Sustainability Evaluation Based on Modified Ecological Footprint

YANG Haizhen, LI Aimei, YE Tian

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The original ecological footprint model was based on counting consumption of resources, and the consumptive ecological footprint and productive ecological footprint were introduced to overcome the deficiency in evaluation of regional sustainability. And then a case study was made of the Suzhou city, the sustainable development status and eco-economic system development capacity from 1993 to 2002 were assessed and analyzed. The results show that the productive ecological deficits per capita are all less than that of the global 0.4 hm^2 , while the consumptive ecological deficits per capita are more than that of the global. The ecological environment is regional sustainable but unsustainable relative to the world, and the ecology efficiency increases year after year. The ecological footprint diversity indexes remain stable and the eco-economic system sustainable development capacity increase year after

year. The effective way of increasing sustainability capacity is to increase ecological footprint diversity. The resized model and measurement method of sustainable development capacity proposed could better evaluate sustainability of a region.

Key words: ecological footprint; sustainability; development capacity; assessment

区域可持续发展评价是可持续发展研究的热点和前沿. 由加拿大生态经济学家 Rees^[1] 首先提出的生态足迹是一个较好的可持续发展定量分析指标, 在世界范围内得到了广泛的应用和认可^[2-3]. 但原始的生态足迹是基于消费的资源量来核算得到的, 当其应用于全球可持续评价时, 由于全球生态系统是一个自给自足的封闭系统, 消费的资源量与生产的资源量是相等的, 因而可反映人类对全球生态系统的影响. 但当其应用于区域层次的可持续评价时, 由于区域存在进出口, 区域的消费量与生产量并不相等, 一个区域可能完全依靠进口来满足当地人口的消费, 从而把生态压力转移到进口这些资源的区域, 而当地的生态系统得到较好保护, 那么由基于消费量核算的生态足迹指标就不能真实地反映出区域人口对当地的生态系统的压力, 也就不能真实地反映该区域的可持续发展状况. 而且往往会得出越是发达地区, 其生态足迹越高, 其发展越不可持续的不合理结论. 熊德国等^[4] 人最先注意到这点不足, 并提出了相应的修正方法, 但是其并没有对所提出的方法进行实证应用和可行性分析. 本文利用区域较长时间序列数据对该修正方法加以应用, 并结合 Ulanowicz 的发展能力计算公式, 对案例区域可持续发展状况进行了评价, 同时结合计算结果对所采用的修正方法及发展能力计算方法评价区域可持续发展状况的可行性进行了分析, 以期区域可持续发展

收稿日期: 2009-05-04

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2006BAJ11B04)

作者简介: 杨海真(1956—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为环境管理与评价. E-mail: haizhen@tongji.edu.cn

展提供合理的指导.

1 研究方法

1.1 生态足迹模型简介

生态足迹法是一组基于土地面积的量化指标,其从需求方面计算生态足迹的大小,即将区域所消费的资源 and 能源转化为提供这种物质流和能量流所必需的各种生物生产性土地面积;从供给方面计算生态承载力,即区域能提供的生物生产性土地面积.通过二者的比较来评价研究对象的可持续发展状况.

1.2 生态足迹理论的修正

本文将传统的生态足迹概念,扩展为消费性生态足迹和生产性生态足迹.消费性生态足迹是指提供区域人口消费的自然资源或消纳废物的具有生物生产力的土地面积.传统的生态足迹即是基于消费量核算得到的,故消费性生态足迹计算模型与传统的生态足迹与生态承载力计算模型相同.生产性生态足迹是指一个区域从本区域生态系统中实际取得的资源量所需的生物生产性土地面积.生产性生态足迹可真实反映人类活动对当地生态系统的压力,生产性生态盈余或生态赤字可作为真实的反映生态环境可持续性的指标.生产性生态足迹的计算模型与消费性生态足迹的计算模型基本相同,核算对象不同,即其只将区域人口所消费的当地的资源量折算成生物生产性土地面积,而不考虑区域的进出口量.

1.3 生态经济发展能力计算

无论是生态系统还是经济系统,多样性理论被广泛地用来探讨系统结构与系统所表现出来的特征之间的关系^[5-6].Ulanowicz^[7]认为,多样性与发展能力相关,并利用能源流、信息理论和投入产出技术提出了一个增长与发展之间的一般理论.采用系统产出(用能量产出表征)的大小和组织(与多样性、系统结构之间的信息交流等有关)来定义系统的发展. Temple^[8]首先意识到生态系统和经济系统存在“类质同像”现象,并利用 Ulanowicz 的发展能力公式,以能源消费为网络流量介质,分析了能源多样性与发展能力的关系,结果表明,能源多样性与人均国内生产总值(GDP)呈显著正相关.这些研究都局限于独立的生态系统和经济系统,没有考虑人类活动对生态系统的影响.随着人类活动对自然的影响日益加剧,我国学者徐中民^[9]认为研究的背景系统应由生态系统和经济系统扩展到生态经济系统,而且多样

性与生态经济系统发展能力密切相关,并且其首次将反映人类对自然利用程度的生态足迹指标应用到生态经济系统多样性测算中,即将生态足迹中采用的不同土地类型面积作为测算生态经济系统多样性的指标,并采用 Ulanowicz 的发展能力公式分析了中国 1999 年的发展能力,完善了前人研究中没有考虑人类活动对生态系统的影响的缺陷.这一方法在省、县(市)层面上得到了推广应用^[10-11],本文亦采用该方法对苏州市的生态足迹多样性和发展能力进行测算.

(1) 生态足迹多样性计算

生态足迹多样性指数采用 Shannon-Weaver 公式^[12]来进行计算:

$$H = - \sum [P_i \ln P_i] \quad (1)$$

式中: H 是多样性指数; P_i 为第 i 种土地类型的面积在总生态足迹中所占的比例.

(2) 生态经济系统发展能力计算

按 Ulanowicz 的发展能力公式^[7],生态经济发展能力可由生态足迹乘以由式(1)计算得到的生态足迹多样性指数得到:

$$C = E_F (- \sum [P_i \ln P_i]) \quad (2)$$

式中: C 为发展能力; E_F 为国家或地区的生态足迹.

2 案例分析

2.1 研究区域概况

苏州市位于江苏省南部,长江三角洲中部.全市总面积 8 488 km²,现辖 8 个区(沧浪、平江、金阊、虎丘、吴中、相城、苏州工业园区、苏州新区)和 5 个县级市(常熟、张家港、太仓、昆山、吴江),2008 年户籍人口达 629 万人.苏州市在江苏省和全国经济布局中都占有重要的地位,对中国东部地区国民经济发展具有重要的示范作用.据 2003 年苏州市统计年鉴统计,2002 年 GDP 总值首次突破 2000 亿元大关,居江苏省第一位,长三角第二位,全国第五位.但是随着工业化、城镇化的不断发展及人口的增长,苏州市的人地矛盾日益严重,在经济快速发展的同时,也给生态环境带来了许多负面的影响.

2.2 苏州时间序列生态足迹(1993 年~2002 年)计算与分析

生态足迹概念经过扩展,分为消费性生态足迹与生产性生态足迹两种.消费性生态足迹由生物资源消费(主要包括农产品和木材)和能源消费计算相

加得到. 生产性生态足迹由生物资源生产和能源生产两部分计算相加得到. 由于苏州市能源基本来源于进口, 故生产性生态足迹只计算生物资源生产足迹. 且因缺乏苏州国内贸易量及进出口的详细数据, 文中未进行贸易调整估算. 但消费性生态足迹与生产性生态足迹之差可近似看成是进出口贸易生态足迹. 由于统计资料有限, 关于人均指标值皆是基于各年的户籍人口数进行计算的.

生态足迹和生态承载力计算中产量因子皆由研究区域每年的实际平均产量和对应年的世界平均产量计算得到. 均衡因子根据 Wackernagel 对长时间均衡因子的测算成果^[13]来选取, 由于各年均衡因子的变化较小, 故采用 1999 年前后各五年的均衡因子的平均值作为均衡因子. 计算所得的苏州市 1993 年~2002 年人均生态足迹与人均生态承载力如图 1 所示.

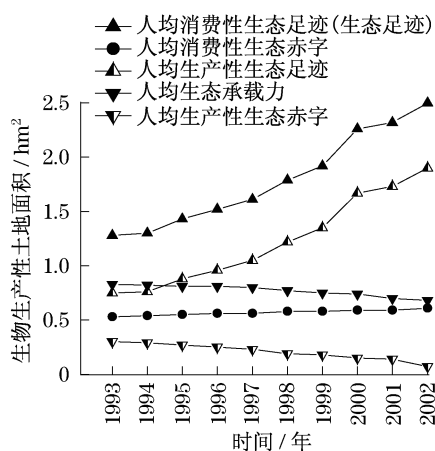


图 1 人均生态承载力、消费性和生产性生态足迹及生态赤字

Fig. 1 Ecological capacity, consumptive, productive ecological footprint and ecological deficit per capita

据世界自然基金会(WWF)发布的《2004 年地球生态报告》^[14], 2001 年全球人均生态赤字为 0.4 hm^2 , 文中评价研究区域生态环境的可持续性在此前提下进行. 由图 1 可知, 苏州市十年的人均生产性生态赤字均小于全球人均生态赤字 0.4 hm^2 , 且随时间的延续逐渐变小. 这说明该时期内研究区域的人类活动对当地的生态压力较小, 且逐年减少, 由此认为苏州的生态环境是区域可持续型的. 然而, 历年人均消费性生态赤字均大于全球人均生态赤字 0.4 hm^2 , 且逐年增大. 说明该地区对生态环境的影响规模超过了按照公平原则^[4](假定地球上人人具有同等享用资源的权利, 那么各地区可利用的生态容量为人

口数量与生态阈值的乘积)所分摊的可利用的生态容量, 且影响程度呈上升趋势, 由此看出, 苏州过多地占用了人类的资源, 其生态环境是全球不可持续型.

苏州市十年人均生产性生态足迹与人均消费性生态足迹相比, 人均消费性生态足迹总是大于人均生产性生态足迹, 且随着时间的延续, 两者间的差距越大, 即苏州市进口的生态足迹越来越大, 这表明苏州市人口消费越来越依赖进口, 越来越依赖其他地区的生物承载力, 那么这将使得本区域的生态系统面临可能退化或崩溃的风险, 同时本地区的经济和社会发展也将面临很大的风险.

2.3 历年万元 GDP 生态足迹与生态效率

生态足迹将区域所消耗的资源 and 能量转化为统一的量纲即生物生产性土地面积, 那么相同量的经济产出, 其所耗用的生态足迹大小, 就可用来衡量城市的生态利用效率. 本文利用万元 GDP 所耗用的生态足迹, 来反映生态利用效率. 万元 GDP 耗用的生态足迹越大, 反映生态效率越低; 反之, 则生态效率越高. 因此, 为反映苏州市生态利用效率, 本文根据生态足迹数据对苏州市万元 GDP 生态足迹进行了计算(如图 2 所示), 由计算结果得知, 1993 年苏州市万元 GDP 生态足迹为 1.38 hm^2 , 2002 年为 0.70 hm^2 , 万元 GDP 生态足迹总体呈下降趋势, 这反映出苏州市的生态利用效率的提高和经济增长方式的良性转变.

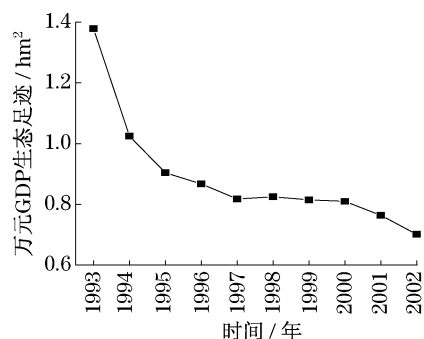


图 2 1993 年~2002 年万元 GDP 生态足迹

Fig. 2 Ten thousands GDP ecological footprint from 1993 to 2002

与全国相比, 1999 年全国平均万元 GDP 所占用的消费性生态足迹为 2.04 hm^2 , 高于发达国家平均水平, 反映出我国生态利用效率比较低^[9]. 而苏州市 1999 年万元 GDP 的生态足迹为 0.81 hm^2 , 低于全国平均水平. 与西部地区 12 省(区市)的平均水平 2.72 hm^2 相比^[9], 苏州市万元 GDP 生态足迹相对更

低.这也从侧面反映了苏州市生态利用效率较高.但要想进一步节约资源、实现经济集约型发展,还需在生产活动中进一步提高资源转化效率,在消费活动中进行广泛的生态文化宣传,提倡生态消费.

2.4 生态足迹多样性与生态经济发展能力计算与分析

根据苏州市生态足迹的计算结果计算出各类土地面积占总消费性生态足迹的百分比如图3所示.由图3可知,苏州市消费性生态足迹中各类土地构成的比例变化比较明显,能源消费所需的土地面积所占比例增加较快,从1993年的31.25%增加到2002年的57.36%;耕地所占比例则呈下降趋势,从1993年的40.89%降低到2002年的20.89%;其他类型的土地面积所占比例变化较小.这种变化说明人们日常生活的大部分资源消耗主要体现在能源的消耗上,这虽然从侧面反映了苏州市工业的迅速发展和人民生活水平的提高,但是过多的能源消费也是消费性生态足迹增大和生态赤字增大的主要原因.面临全球和全国生态赤字逐渐增加的生态现实,而同时又要保证区域人民生活水平的提高,当地政府需采取有效的措施来减少生态赤字.如加强土地管理,采取好的土地经营措施确保现有的生产性土地不让位于城市化、盐渍化,避免生物生产力土地面积减少;加大产业结构调整,提高制造业和家庭的能源利用效率,减少废物和加强循环利用等.同时当地政府也要制定相应的资源有效利用和技术革新的相关政策和激励措施.

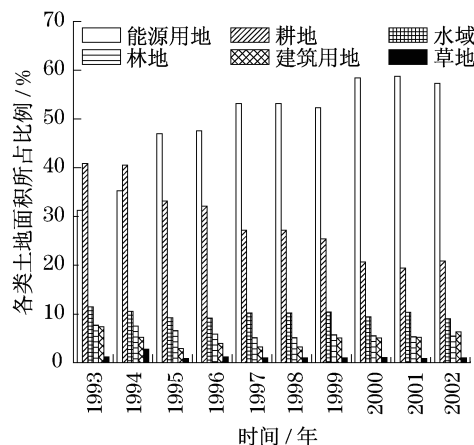


图3 生态足迹中各类土地面积所占比例

Fig.3 Percent of various lands of ecological footprint

由生态足迹多样性和发展能力公式,计算得到苏州历年生态足迹多样性指数与发展能力值如图4所示.由图4可知,苏州市1993年~2002年期间生

态足迹多样性指数波动较小,基本保持平稳状态,这说明在该期间区域内的人类活动对当地生态系统中六类生物生产性土地造成的影响较均衡,生态经济系统较稳定.而苏州市的生态经济发展能力则表现出较大的增长.发展能力公式表明,区域生态经济系统发展能力由生态足迹多样性指数和生态足迹需求两方面决定,而研究区域的生态足迹多样性指数变化不大,那么发展能力的提高则是主要依靠生态足迹需求的增长得以提高的.对比图1和图4可发现苏州市发展能力的增长模式与人均消费性生态足迹的增长模式基本上保持一致,这也进一步印证了这一点.这似乎说明,生态足迹需求的增长就意味着生态经济系统发展能力的增强,然而本文所理解的生态经济系统发展能力模型是一个经济学概念,其基本前提是生态系统的供给能力在一定程度上是无限的且能够迅速满足需求.在此条件下,即在生态盈余较大时,适度增加有效需求能够提高生态系统的利用率并增强其发展能力,但是在已经出现生态赤字且生态系统的供给能力短期内不可能有大的突破的情况下,就不能简单盲目地套用经济学模式一味地增加需求来增强发展能力,这样做只会使得生态赤字进一步加大,导致生态系统走向崩溃,而应该从提高生态足迹的多样性指数,即增加土地类型利用的多样化着手.

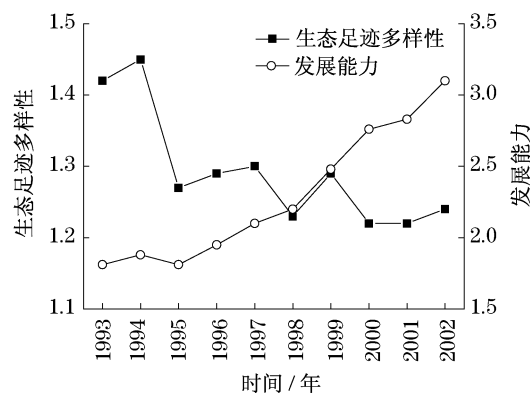


图4 生态足迹多样性与生态经济发展能力变化

Fig.4 Changes of ecological footprint diversity and eco-economic development capacity

3 评价方法的可行性分析

3.1 生态足迹指标分析

利用修正后的生态足迹模型对案例区域分析表明,苏州市十年的人均生产性生态赤字均小于全球人均生态赤字 0.4 hm^2 ,且随着时间的延续逐渐减

小;十年的人均消费性生态赤字则均大于全球人均生态赤字,且随着时间的延续逐渐增大,这与苏州的发展情况吻合.苏州近年来大力发展经济与科技,已由原来一个以农业生产为主的地区转变为以工业生产为主的经济发达地区,其所需商品、能源逐渐依赖进口,消费水平逐渐提高,但是消费水平的提高所带来的生态压力并没有太多作用于本地区,而更多地转移到了提供这些商品和能源的地区.苏州市消费性生态足迹与生产性生态足迹两者之差即贸易进口生态足迹随着时间的逐渐增大也反映了苏州市越来越往外向型经济发展.通过计算区域的生产性生态足迹,真实反映了区域人类活动对当地生态系统的压力,可较准确评价区域的可持续发展状况;通过计算区域的人均消费性生态足迹分析了区域人口由于消费而对全球生态系统压力的贡献,可用来评价区域发展的公平性.同时可避免用原始的生态足迹法来评价区域可持续发展时可能得出的不合理结论——区域越发达,其生态足迹越高,发展越不可持续.

3.2 生态经济发展能力分析

利用生态足迹的计算结果对生态多样性和经济发展能力指数进行计算发现,1993年~2002年苏州市生态多样性指数变化不大,基本保持平稳状态.这说明在该期间区域内的人类活动对当地生态系统中六类生物生产性土地造成的影响较均衡,这与苏州的实际发展状况较相符.苏州市生态足迹多样性指数多年保持基本稳定,其原因与苏州市存在大量如钢铁、纺织、化工、建材、造纸等高能耗产业的特点相关,能源用地在生态足迹中占有很大比重,降低了生态足迹类型的均匀度,所以减少能源用地的比重是提高生态足迹多样性的重要途径.近年来,随着苏州市对产业结构和产品结构的调整,以及推行清洁生产,发展循环经济,开展节能宣传等多项措施的实施,能源利用水平有了较大提高,其经济发展能力将会进一步提高,城市的社会经济发展模式也将逐渐朝着可持续发展转变.

同时,将苏州市历年生态经济系统发展能力与人均GDP(以1990年不变价)进行相关性分析可知(见图5),二者有较大的正相关性,相关系数 R^2 达0.96,这与徐中民^[9]等对1999年全国29个省生态经济系统发展能力与各省人均GDP进行相关分析,得到两者呈较大的正相关性的结论一致.这说明以消费性生态足迹为指标,采用Ulanowicz的发展能力公式计算的生态经济系统发展能力可以较好地反映

生态经济系统发展状况.

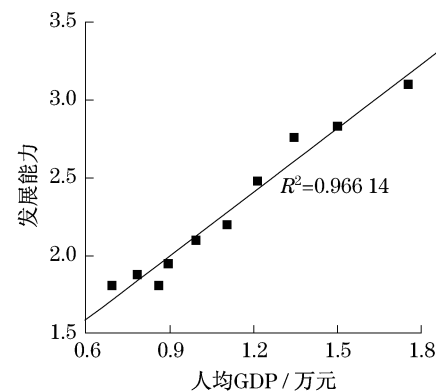


图5 生态经济发展能力与人均GDP之间的关系

Fig.5 Relationship between eco-economic development capacity and per capita GDP

4 结论

本文将传统的生态足迹概念扩展为消费性生态足迹与生产性生态足迹两部分,并在计算中选取逐年变化的均衡因子和产量因子来计算区域长时间序列的生态足迹,较准确地评价了区域人类活动对当地生态系统的压力,准确反映了区域的可持续发展状况;研究区域生态经济系统发展能力与人均万元GDP有较好的正相关性,表明本文采用的发展能力测算方法能较好测算区域的可持续发展能力.本文主要对生态足迹模型在区域可持续评价中影响生态足迹水平的主要因素进行了修正,比较准确的定量还必须考虑诸如区域的进出口量、外来人口、边界条件等诸多因素的影响,今后将针对这些问题深入研究,以便更准确地反映区域的可持续发展状况.

参考文献:

- [1] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121.
- [2] Lammers A, Moles R, Walsh C. et al. Ireland's footprint: a time series for 1983—2001[J]. Land Use Policy, 2008, 25(1): 53.
- [3] 张芳,徐伟锋,李光明,等.上海市2003年生态足迹与生态承载力分析[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(1):80. ZHANG Fang, XU Weifeng, LI Guangming, et al. Analysis of ecological footprint and ecological carrying capacity of Shanghai in 2003 [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(1): 80.
- [4] 熊德国,鲜学福,姜永东.生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进[J].地理科学进展,2003,22(6):618. XIONG Deguo, XIAN Xuefu, JIANG Yongdong. Discussion on

- ecological footprint theory applied to regional sustainable development evaluation[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(6):618.
- [5] Siegel P B, Johnson T G, Alwang J. Regional economic diversity and diversification: seeking a framework for analysis[J]. *Growth Change*, 1995, 26(2):261.
- [6] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability[J]. *Ecology*, 1996, 77(2):350.
- [7] Ulanowicz R E. Growth and development: ecosystems phenomenology[M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [8] Templet P H. Energy diversity and development in economic systems: an empirical analysis[J]. *Ecological Economics*, 1999, 30(2):223.
- [9] 徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2):280.
XU Zhongmin, ZHANG Zhiqiang, CHENG Guodong, et al. Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2):280.
- [10] 吴健生, 李萍, 张玉清. 基于生态足迹的城市地域可持续发展能力评价——以深圳为例[J]. *资源科学*, 2008, 30(6):850.
WU Jiansheng, LI Ping, ZHANG Yuqing. Sustainable development capacity evaluation based on urban ecological footprint: a case study of Shenzhen [J]. *Resources Science*, 2008, 30(6):850.
- [11] 王书华, 张义丰, 毛汉英. 城郊县域生态经济协调状态与发展能力分析[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(1):96.
WANG Shuhua, ZHANG Yifeng, MAO Hanying, et al. Analysis of the coordination to economy in urban-suburb district based on ecological footprint model[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(1):96.
- [12] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [13] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961—1999: comparing the conventional approach to an ‘actual land area’ approach[J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3):261.
- [14] World Wide Fund for Nature International, United Nations Environment Program, World Conservation Monitoring Centre and Global Footprint Network. Living planet report 2004[R]. Gland: World Wide Fund for Nature, 2004.

—————
(上接第 1181 页)

- YAO Zukang. The pavement management system[M]. Beijing: China Communications Press, 1993.
- [2] 孙立军. 智能型路面管理系统的建立方法[D]. 上海: 同济大学道路与交通工程系, 1989.
SUN Lijun. The building method of intelligent pavement management system [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Road and Traffic Engineering, 1989.
- [3] 邹培国. 路面养护决策优化技术研究[J]. *中国公路学报*, 1995, 8(2):1.
ZOU Peiguo. On optimization method of pavement maintenance and rehabilitation programming[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1995, 8(2):1.
- [4] 林志栋. 路面养护决策支持分析模式之研究[D]. 台湾: 台湾国立中央大学土木工程系, 1994.
LIN Zhidong. The study on decision support system in the pavement management system[D]. Taiwan: National Central University. Department of Civil Engineering, 1994.
- [5] 刘伯莹. 网级路面管理系统研究[D]. 上海: 同济大学道路与交通工程系, 1992.
LIU Boying. Study on network level pavement management system[D]. Shanghai: Tongji University. Department of Road and Traffic Engineering, 1992.
- [6] 胡奇英, 刘建庸. 马尔可夫决策过程引论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
HU Qiyin, LIU Jianyong. An introduction to Markov decision processes[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002.
- [7] 韦宝伴. Markov 决策在网级路面管理系统中的应用[D]. 长沙: 湖南大学道路与交通工程系, 2003.
WEI Baoban. The application of Markov decision in network pavement management system [D]. Changsha: Hunan University. Department of Road and Traffic Engineering, 2003.
- [8] 彭华. 路面管理系统中的资金优化和项目优化[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2005.
PENG Hua. Modeling projects and investment optimization in pavement management system[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2005.
- [9] 施光燕, 董家礼. 最优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
SHI Guangyan, DONG Jiali. The optimization methods [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [10] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
SUN Lijun. Structural behavior study for asphalt pavement [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003.