

西南大学

硕士学位论文

基于能值生态足迹模型的内蒙古自治区生态承载力与生态安全
研究

姓名：刘海涛

申请学位级别：硕士

专业：生态学

指导教师：谢小玉

20110528

基于能值生态足迹模型的内蒙古自治区

生态承载力与生态安全研究

生态学专业硕士研究生：刘海涛

指导教师：谢小玉 副教授

摘要

作为我国北部生态屏障的内蒙古自治区曾以丰茂的草原闻名遐迩，如今草场退化、土地沙漠化、水土流失严重、沙尘暴频繁发生，正逐步成为威胁华北地区乃至全国的沙尘发源地。人们开始认识到生态承载力即是问题的实质，是区域经济可持续发展的关键。但是，目前国内外生态承载力的研究还停留在定性判断的基础上，并且方法涉及的指标因素众多，操作起来比较困难。因此建立生态安全评价指标体系和定量评价模型，就成为生态安全评价研究的核心，生态足迹在这种情况下发展起来的，成为一种新兴的、重要的评价一个地域生态安全与否的方法，成为被广泛用来定量化测度可持续发展的方法之一。

本研究以西部大开发背景下快速发展的内蒙古自治区作为案例区，研究区内生态承载力与生态安全问题。尝试将能值理论、生态足迹模型与生态安全有机结合分析内蒙古自治区生态承载力供需状况，客观准确地探讨和把握区域现在生态安全的状况及其未来动态变化，为区域可持续发展提供对策建议，避免生态环境恶化及其对社会经济发展造成的不利影响，保障区域经济与生态的协调发展。主要结论如下：

(1) 运用传统生态足迹模型及改进的能值生态足迹模型计算了内蒙古自治区 2000~2009 年的生态足迹及生态承载力，对两种不同计算方式的结果作了对比，并以此验证能值生态足迹模型的可行性及可信度。2000~2009 年的传统及能值生态足迹模型计算的结果均表明：内蒙古自治区生态承载力在此时间序列中呈波动变化，而生态足迹却呈现出明显的增长趋势；化石燃料用地、耕地及草地的生态足迹对内蒙古自治区人均生态承载力的影响非常明显，其中影响最大的是化石燃料用地的生态足迹；各年份生态足迹均值后生态足迹由大到小依次为：化石能源用地>耕地>草地>林地>建筑用地>水域。

(2) 利用传统及能值生态足迹模型计算出生态赤字/盈余，并由此得出生态压力指数，为避免构建指标体系掺杂主观及标准不统一的情况，均采用生态足迹及生态承载力的相关生态安全指标，对内蒙古自治区 2000~2009 年的生态安全现状进行综合分析评价。结果显示：本区生态承载力波动式变化；区域生态足迹、区域生态赤字、生态压力指数均呈明显增长趋势。根据生态安全综合评价可得出：2000~2009 年内蒙古自治区生态环境处于较安全状态，但

其相关指数随年份有明显的增加趋势。

(3) 利用灰色预测模型预测了 2010~2019 年内蒙古自治区生态足迹及生态承载力，并由此计算生态赤字及生态压力指数，对未来的生态安全趋势做出了预测分析及预警评定。结果显示，2010~2019 年内蒙古自治区生态承载力有下降的趋势，而区域人均生态足迹明显增大；区域生态赤字及生态压力指数增大。生态安全评价结果表明，2010~2019 年，内蒙古自治区生态安全等级处在较安全状态，但结合生态压力指数不难得出生态安全状态将会呈下降趋势，这也将会造成生态环境的恶化。2010~2019 年的生态安全预警级别较前十年有所升高，预计 2017 年将达到 2 级（中警），预警级别会随时间的推移逐年较快上升。

(4) 由于人口数量增加、城镇化及资源开发利用不合理等因素影响，内蒙古自治区面临资源、环境及发展等方面的诸多挑战。要改善其现在乃至未来的不安全发展状态，今后应当坚定不移地实施以生态保护与发展并重的政策方针，加大科研力度并积极采用先进的技术，合理适度开发各种土地资源，努力提高资源利用效率，大力推行可持续循环发展模式和生态产业链条，逐步建立资源节约型的社会生产及消费体系，促使该区域的经济社会与生态环境全面协调发展。

关键词：生态安全；能值生态足迹；生态承载力；内蒙古自治区；

Study on Ecological Capacity and Ecological Security of Inner Mongolia Autonomous Region Based on the Energy Ecological Footprint

Applicant for Master Degree: LIU Hai-tao

Supervisor: Prof. XIE Xiao-yu

Abstract

As China's northern ecological barrier, Inner Mongolia is known to lush grassland, and now grassland degradation, land desertification, soil erosion and frequent sandstorms, they are gradually becoming dust in North China and threat to our country's birthplace. Human began to realize that Ecological capacity is the real problem and it is the key to sustainable development of regional economy. However, the current domestic and international ecological capacity remains at the basis of qualitative judgments, and the method of indicators related to many factors, so the operation is more difficult. Therefore the establishment of evaluation index system of ecological safety and quantitative evaluation model to become the core of ecological security assessment research, the ecological footprint in this case developed into an emerging and important regional ecological security evaluation of a method or not, become a widely used quantitative measure of sustainable development methods.

In this study, the context of developing the western region of Inner Mongolia, the rapid development of areas as a case study the problem of ecological carrying capacity of the region to carry out eco-security. Try will be able to value theory, Ecological Footprint and Ecological Safety in Inner Mongolia, organic combination of ecological carrying capacity of supply and demand, objectively and accurately explore and grasp the situation of regional ecological security of current and future dynamics of regional sustainable development to provide protection for the ecological security Suggestions to prevent environmental degradation and its adverse social impact of economic development, protection of regional sustainable economic development, accelerate the narrowing gap between east and west. The main conclusions are as follows:

(1) Through the traditional ecological footprint and the energy ecological footprint model to calculate the ecological footprint and the ecological capacity in Inner Mongolia from 2000 to 2009, and compare the results of two different calculations one by one. Thus verify the feasibility and reliability of the energy ecological footprint. The results of the traditional ecological footprint and the energy ecological footprint model all show that ecological capacity of Inner Mongolia in this time series fluctuated, but the ecological footprint was growing trend preached. The ecological footprint per capita ecological capacity of fossil energy land, arable land and grassland in Inner Mongolia is very

obvious. And the ecological footprint of fossil fuel sites was the greatest impact. The average ecological footprint of the year after a large ecological footprint as small as: fossil fuel land> farmland> grassland> woodland> Building sites> waters.

(2) According to the traditional ecological footprint and the energy ecological footprint model to calculate the ecological deficit/surplus and ecological pressure index. The construction index system of article used the relevant indicators of ecological security of the ecological footprint and ecological capacity to comprehensive analysis and evaluation of current situation in Inner Mongolia from 2000 to 2009. which in order to avoid the subjective and the standards are not uniform doping situation, The results showed: ecological capacity changes fluctuated; regional ecological footprints; Ecological deficit increased every year, and grew with significant trend; The ecological pressure index grew with significant trend. According to ecological security evaluation can be drawn from Inner Mongolia: environment in a relatively safe state from 2000 to 2009, but the relevant index has increased significantly with the trend of the year.

(3) According to the gray forecasting model to predict the ecological footprint and ecological capacity in Inner Mongolia from 2010 to 2019, calculating the ecological deficit and ecological security, and made the prediction of trends of ecological security and early warning assessment in the future. The results showed: the ecological capacity in Inner Mongolia will be in a downward trend from 2010 to 2019, the regional per capita ecological footprint will increase significantly, Ecological deficit and ecological pressure index will increase. Ecological security evaluation results show that the ecological security in Inner Mongolia will be in a relatively safe level from 2010 to 2019, but the combination of ecological pressure index is not difficult to come to the security state will decline, which will cause deterioration of ecological environment. The ecological security level in Inner Mongolia has increased over the previous decade from 2010 to 2019, is expected to reach Level 2 by 2017 (the police), forecast and early warning level will increase over time increased rapidly year by year.

(4) Using the increasing population in Inner Mongolia, urbanization, the development of resource and utilization of irrational factors. Inner Mongolia is facing resources, environment, development, and so many challenges. In order to improve its current status and future development trend of unsafe. In the future to a firm implementation both ecological protection and development of policy guidelines, increased research efforts and the use of advanced technology. Rational Development and a variety of land resources to improve the output per unit area of existing natural resources. And promote the sustainable recycling and eco-industrial chain development model vigorously. In the end, establish a resource-saving system of social production gradually and consumption to promote the region's economy, society and ecological environment of comprehensive and coordinated development.

Key words: ecological security; energy ecological footprint; ecological capacity; Inner Mongolia

第一章 引言

1. 1 选题背景及意义

1. 1. 1 选题背景

纵观人类文明的发展史，人类在经历了与自然敬畏、适应与服从的原始文明和农业文明后，通过工业革命进入了征服自然的工业文明时代。但是，人类享受传统工业化发展带来的物质财富的同时，也不可避免的面临两方面的严重失衡：一是，全球资源过度消耗、生态失衡、生物物种减少、环境恶化、水土流失、沙漠化扩大、气候异常以及频繁的自然灾害等问题的出现，已严重破坏了人与自然的平衡；二是，少数发达国家富裕起来，而大多数国家债务负担不断加重，贸易条件恶化，人民的温饱问题尚未解决，贫穷和不发达现象日益加剧。全球性的生态问题日趋严重，恶化的环境状况开始直接影响到人类生活的质量，生态安全日趋受到威胁，甚至威胁到人类的生存，迫使人们开始关注生态安全问题^[1]。最近几十年，人类从无限制的依赖生态系统，过度索取资源到生态系统的治理到可持续发展的提出，已清楚地意识到“社会—经济—环境”是个统一的、复合的系统。如何实现经济社会发展的同时更有效地保护生态环境，使之可持续发展成为我国当前和未来面临的重大课题。

作为我国北部生态屏障的内蒙古自治区曾以丰茂的草原闻名遐迩，如今草场退化、土地沙漠化、水土流失严重、沙尘暴频繁发生，正逐步成为威胁华北地区乃至全国的沙尘发源地。有关调查资料显示，在自然状态下全区约有 3220 万 hm^2 土地变为沙漠、裸岩、戈壁等。人为原因和自然原因严重破坏导致全区约 1730 万 hm^2 土地出现退化，分别主要有 612 万 hm^2 土地沙化，136 万 hm^2 砾石化，436 万 hm^2 水土流失，365 万 hm^2 沙丘活化，181 万 hm^2 盐渍化。内蒙古自治区约 4950 万 hm^2 为生态环境恶劣区域，是全区总面积的 42.93%。

脆弱的生态环境压力在粗放式的经济发展和高强度的资源开发下进一步扩大，由此人类开始认识到生态承载力即是问题的实质，是区域经济可持续发展的关键。但是，目前国内外生态承载力的研究还停留在定性判断的基础上，并且方法涉及的指标因素众多，操作起来比较困难。因此建立生态安全评价指标体系和定量评价模型，就成为生态安全评价研究的核心，生态足迹在这种情况下发展起来的，成为一种新兴的、重要的评价一个地域生态安全与否的方法^[2]，成为被广泛用来定量化测度可持续发展的方法之一。本研究将能值理论、生态足迹模型与生态安全有机结合，来研究内蒙古的可持续发展状态，评价区内生态安全程度，为政府管理部门的决策提供科学的理论依据。

1. 1. 2 研究目的与意义

当前我国经济发展快速，资源型的经济总量持续扩张，而内蒙古自治区全面可持续发展面临的最大问题是资源短缺和生态承载力下降，生态安全已成为制约内蒙古自治区社会经济

发展的瓶颈。多年来,基于可持续发展理念的生态承载力研究一直是多学科共同关注的焦点。但是,由于生态承载力研究比较复杂,当前这方面的研究还落后于实践的需求。本研究基于这样的判断,以西部大开发背景下快速发展的内蒙古自治区作为案例区,研究区内生态承载力问题,开展生态安全研究。尝试将能值理论、生态足迹模型与生态安全有机结合分析内蒙古自治区生态承载力供需状况,探讨和把握区域生态安全现状及其未来动态变化,为区域可持续发展提供对策建议,避免生态环境恶化及其对社会经济发展造成的不利影响,加快缩小东西部地区的差距。

本研究尝试将能值理论、生态足迹与生态安全有机结合分析内蒙古自治区生态承载力供需状况,融合不同研究领域,在一定程度上具有理论意义。

首先,研究方法上,一方面,由于生态足迹模型存在一定的缺陷,因此本研究将能值理论与生态足迹结合运用,基于能值理论进行生态足迹计算是比较新的研究成果,研究评价生态安全,是对生态足迹模型不足的弥补,是对生态安全评价方法的有效尝试,丰富了生态安全评价研究的方法。另一方面,在能值-生态足迹模型研究的基础上运用灰色预测法进一步对内蒙古自治区的生态承载力和生态足迹进行定量预测,揭示该区生态安全的未来状况与变化趋势,使预测结果更加可信。

其次,研究内容上,许多学者对生态安全从的不同角度进行了研究,如生态系统服务评价的研究^[3],协调资源、环境、经济发展的研究^[4],生态危机与环境保护研究等^[5]。但是,从“生态学”角度出发基于可持续发展理论以生态平衡、永续利用、自然保护等对生态安全进行评价和预警的研究比较少^[6]。本研究基于生态承载力和生态安全评价又进一步对生态安全预测与预警进行了研究,不仅顺应了生态足迹研究的发展趋势,而且扩展了生态安全研究的内容,拓宽了生态安全研究的视角。

生态安全与人类生存安全密切相关,与经济安全、军事安全、政治安全等同等重要^[1]。生态安全是所有区域进行资源开发必须遵循的可持续发展准则^[7]。本研究以内蒙古自治区为研究区域,基于能值理论进行生态足迹计算,对内蒙古自治区生态承载力进行计算评价,改进研究方法分析其结果,研究评价生态安全,客观准确地把握区域生态安全的现在与未来状况及其动态变化,不仅具有一定理论意义,还具有非常重要的实践意义。

内蒙古自治区长期以来以资源依赖型产业和粗放型经济发展为主。随着资源型经济总量的不断扩张,资源与发展之间的矛盾日益凸显,生态安全问题已成为制约内蒙古自治区经济发展的瓶颈。定量测算生态承载力和生态足迹,开展生态安全研究,对内蒙古自治区的可持续发展决策具有非常重要意义,有利于解决区域生态环境恶化及其对经济发展造成的不利影响,有利于维护内蒙古自治区经济的持续发展和社会稳定,有利于政府转变执政理念,改变以GDP增长作为政府的首要目标和社会发展重要指标的发展思路,强调经济发展的同时又不忽视发展中的生态安全问题。

1. 2 研究内容与技术路线

1. 2. 1 研究内容

本文以我国内蒙古自治区为研究区域，以区域可持续发展为研究方向，以基于“能值-生态足迹”理论为切入点，开展区域范围的生态承载力与生态安全研究。研究内容主要有包括：

(1) 综述国内外生态安全研究现状、生态足迹、能值分析理论，概括其他学者对传统生态足迹模型的改进，分析本研究的重点与难点。探索能真实反映生态承载力与生态安全状况的生态足迹的改进方法。

(2) 内蒙古自治区生态足迹和生态承载力动态分析。通过采用生态足迹并恰当选用消费足迹及生产足迹，运用“能值-生态足迹”模型对传统生态足迹法进行改进，计算内蒙古自治区 2000~2009 年的生态足迹和生态承载力，揭示其动态变化。

(3) 内蒙古自治区生态承载力和生态安全现状评价。通过计算人均生态赤字/盈余、生态压力指数、生态足迹多样性指数，按时间序列（2000~2009 年）对内蒙古自治区进行生态安全综合测度与动态分析，揭示该区生态安全状况及其动态变化。

(4) 内蒙古自治区生态承载力和生态安全预测。对内蒙古自治区 2010~2019 年的生态承载力和生态足迹运用加权灰色模型进行预测，计算人均生态赤字/盈余、生态压力指数、生态足迹多样性指数，揭示该区生态安全的未来状况与变化趋势。

(5) 内蒙古自治区生态承载力和生态安全预警。在预测的基础上，对区内 2010~2019 年的生态承载力和生态安全不良状况进行预警，并提出保障区域生态承载力和生态安全的对策。

1. 2. 2 研究方法

在具体的研究过程中，本研究主要采取以下的基本研究方法：

(1) 文献分析方法和实地调查方法相结合。一方面通过大量的国内外文献检索，把握生态足迹的研究前沿，并通过基础理论分析，为分析框架的建立以及实证分析奠定理论基础；另一方面，通过对研究区域进行实地调查，搜集相关资料数据，为理论分析和实证分析奠定基础。

(2) 规范分析法。在研究过程中，通过规范分析确立研究的基本分析框架，为区域可持续发展能力评价提供理论依据和判断标准。

(3) 能值理论与生态足迹模型的结合。根据能量系统理论观，生态系统以及包括人类社会经济系统在内的其他别的系统，均可视为能量系统。能量可用于表达和了解生命与环境、人类社会经济与自然的关系。但不同类别的能量存在能质和能级的根本差异，不可作简单的加减和比较。美国著名生态学家 H.T.Odum 于 20 世纪 80 年代后期提出的能值理论，以太阳能值为统一尺度，解决了这一难题，为生态系统和生态经济系统的定量分析研究开拓了新途径。

(4) 灰色预测法。灰色预测是基于灰色系统理论的一种预测方法，它是将无规律的原始数据，通过生成方法处理，变成比较有规律的时间序列数据，即根据数据处理方法找数据间

的规律，再按微分方程拟合法建立灰色动态模型，然后用微分方程的解来实现系统的预测。灰色预测建模方法简便易行，计算简单，所需信息量少，原始数据分布特征和样本量无特殊要求，数据处理能力强，预测却可以达到很高的精度。

1. 2. 3 技术路线

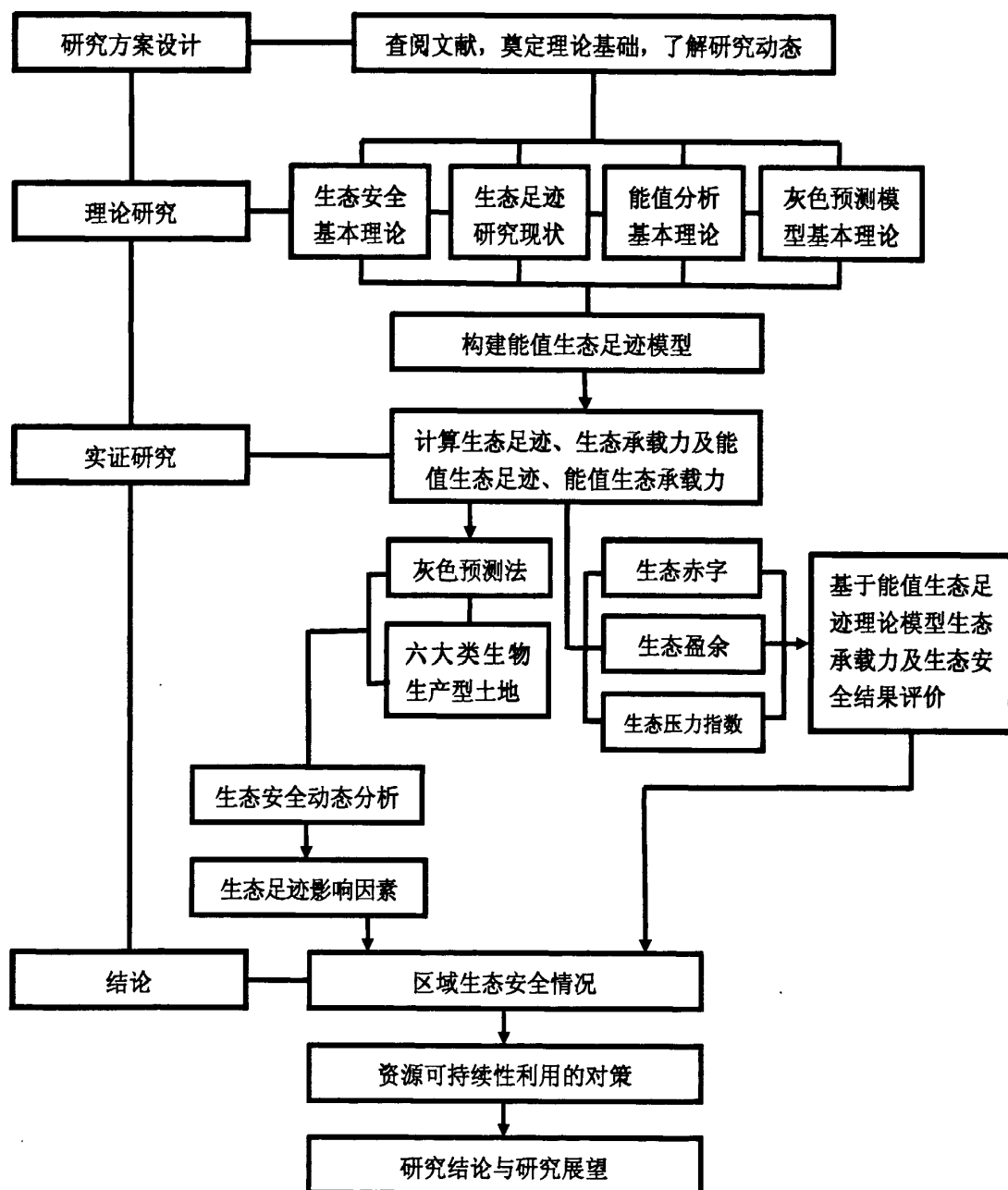


图 1 技术路线

Fig 1 Technological routes of the research

第二章 文献综述

2. 1 生态安全研究综述

2. 1. 1 国外生态安全研究进展

20 世纪 40 年代国外开始研究生态安全 (Ecological security), 目前国际社会还未有一个明确的概念^[8]。一般以国际应用系统分析研究所 (IASA) 1989 年提出的概念为代表, 认为生态安全是指在人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会次序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态, 包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全, 组成一个复合人工生态安全系统^[9]。

生态安全评价是生态系统评价的一种, 是指在生态环境质量评价成果的基础上, 按照生态环境系统能为人类社会提供服务以及保证人类社会可持续发展的前提下, 对照一定的标准对生态环境系统进行的生态安全评估^[10]。生态安全评价主要包括行业生态安全评价、区域生态安全评价和国家生态安全评价^[11]。评价方法主要有生态综合评价方法、生态系统安全方法、景观生态学法和生态安全承载力方法等^[12]。

国外的学者从 20 世纪 80 年代开始从不同角度关注和探讨生态安全评价, 在实践上有了较显著的成果。在宏观上, 主要是对生态安全的概念及生态安全与军事战略、国家安全和可持续发展等进行研究^[10]。联合国环境规划署 1988 年针对危害严重的环境污染问题提出了“阿佩尔计划 (Apell)”, 首次正式提出环境安全的概念^[13]。经济合作与发展组织 (OECD) 1990 年遵照七国首脑会议的要求, 开展生态环境指标研究, 首次提出“压力—状态—响应”模型的概念框架。1998 年各国发表《生态安全与联合国体系》, 对生态安全的概念、成因、影响和未来发展趋势进行了探讨。此后, 国外许多学者基于生态安全角度对社会安全和国家安全进行研究^[14]。

在微观上, 国外最初主要研究基因工程生物及环境污染的生态风险评价和毒理化学物质的使用对生态安全的影响, 后来开始研究与生态系统安全有关的生态环境监测和预警^[15]。前苏联 Vaskhnil 研究了杀虫剂、除草剂、和杀真菌剂等老鼠和鱼体内的富集情况, 针对杀虫剂对生态系统的生态安全影响方面的评价^[16]。美国学者的 Kapustka LA 等在种群和群落的水平上对杀虫剂的生态安全进行了分析, 通过风险预测对进行生态安全评价^[17]。Jorgensen 等提出使用活化能、结构活化能和生态缓冲量来评价生态系统健康^[18]。Quigleyetal 从生态安全的角度对哥伦比亚河流域的生态安全进行评估, 建立区域尺度的安全评价的指标体系。Bartelletal 运用综合水生系统模型 (CASM) 评估加拿大魁北克省的有害化学品对河流、湖泊和水库造成的生态风险。Rapport 等用活力、恢复力、组织结构、维持生态系统服务、管理、减少投入、对相邻系统的危害和人类健康等八项指标对生态系统健康评价。

2. 1. 2 国内生态安全研究进展

20 世纪 90 年代起国内开始研究生态安全, 目前我国生态安全的研究相对落后。1998 年, 史培军发表的《人地系统动力学与生态安全建设》标志着我国生态安全研究的开始^[19]。生态安全内涵丰富并且具有复杂性, 因此, 国内生态安全的含义也尚未统一^[20]。曲格平认为生态安全的含义为: 一是预防生态恶化引发社会动荡; 二是预防生态环境破坏引起经济衰退削弱经济的可持续发展^[2]。左伟则认为生态安全指国家赖以生存所需的生态与环境处于不受或少受威胁的正常状态。陈国阶指出生态安全是指人类赖以生存的生态与环境处于正常和可持续发展状态^[21]。

随着生态安全的发展生态安全评价也随之兴起, 国内很多学者开始对生态安全评价进行研究。在研究内容上, 我国生态安全研究对象比较广泛, 具有多样性。董雪旺以五大连池为研究对象, 发展了关于旅游地的生态安全理论, 创建了旅游地生态安全评价的理论框架^[22]。李鸿凯以湿地为研究对象, 对湿地进行了生态安全评价, 以保护生物多样性^[23]。王强以草地为研究对象, 分析其退化现状, 提出我国草地生态系统的生态安全评价^[24]。肖笃宁等对干旱内流区进行研究, 讨论了绿洲的生态安全和内陆河流域生态安全的保障措施^[9]。屈波在研究三峡库区生态安全的基础上提出了针对性的措施^[25]。熊鹰等进行湖南省农业生态安全评价, 提出保护农业生态环境可持续发展的对策^[26]。刘晶以吉林省为研究对象进行生态安全评价, 对不良状况做出预警并提出生态安全维护对策^[27]。

研究方法上, 多数学者是在现有并不完善的评价指标体系上进行的, 而将生态安全评价、预测、预警综合研究的相对较少。王韩民对生态安全采用系统论理论进行研究。吴国庆利用 PSR 模型对区域农业生态安全进行研究, 建立了农业生态安全评价指标。左伟等对区域生态安全评价指标与标准进行了研究^[16]。陈东景等基于状态—压力—响应的角度设计了评价生态安全的指标体系的方法^[28]。吴开亚建立的区域生态安全的主成份投影评价模型, 成为区域生态安全评价和生态安全实践的理论基础^[29]。龚建周等以我国八个城市为研究对象, 建立了回归模型对其进行生态安全评价和生态安全预测^[30]。

2. 2 生态足迹理论研究综述

2. 2. 1 国外生态足迹理论研究进展

20 世纪 70 年代, 国外开始对生态足迹进行研究, 生态足迹又称为生态占用、生态痕迹或者生态脚印。1975 年, Jasson AM 对哥特兰岛渔业生产为对象研究其应满足的海洋生态环境的面积^[31]; 1986 年, Vitousek P 利用生态足迹测算人们对自然资源系统利用的净初级生产力^[32]。生态足迹的概念由 William Rees 和 Wackernagel M 于 1992 年提出: 任何已知人口的生态足迹是指生产这些人口消费的物质和能量所需的生物生产土地面积及吸纳这些人口产生的废弃物所需的生物生产土地面积的总和。生态足迹方法 (Ecological Footprint Analysis, EFA) 是一种基于生物物理量的评价测度可持续发展程度的方法^[33]。生态足迹方法中, 一个地区能供给的

人类的生态生产性土地面积总和为该地区的生态承载力，而人类每一项消费所需要的生态生产性土地面积的总和即为生态足迹。

国外对生态足迹的研究主要从全球尺度、国家尺度和区域尺度。从全球尺度，1997~2002年 Wackernagel 等 5 次对全球生态足迹进行了测算。从国家尺度，Wackernagel 等将生态足迹与生态承载力结合研究瑞典等地区。D.P.Vuuren 等测算不丹、贝宁、哥斯达黎加以及荷兰等的生态足迹^[34]。Helmut Haberl 等对奥地利 1926~1995 年的生态足迹进行了测算^[35]。从区域尺度，Marc Bagliani 研究分析意大利 Siena 省的生态足迹^[36]。Van Vuuran 等对荷兰的部分城市的生态足迹进行了研究，并对各城市间进行了比较研究^[37]。Warren Rhodes 等研究了中国香港地区的生态足迹^[38]。Garry W 等测算了新西兰 16 个地区的生态足迹^[39]。Feng J 计算了中国台湾地区的生态足迹^[40]。

2.2.2 国内生态足迹理论研究进展

1999 年生态足迹概念引入我国，得到了广泛的关注和应用。国内研究比较倾向于理论的介绍，在实证研究方面，对区域生态足迹时间动态变化的研究较少，研究尺度的水平研究还处于探索和应用实践阶段。就我国而言，对单独具有地域、空间、行政独立性的最基本区域单元的省、直辖市和自治区作为案例进行生态足迹研究，有很强的实践和理论意义。

生态足迹在发展过程中，国内许多学者对生态足迹研究领域、生态足迹计算模型进行了探究，有了一定程度上的发展。在研究区域上，徐中民、陈东景等对中国 1999 年生态足迹进行分析，测算了中国“万元 GDP 生态足迹，并计算中国生态足迹的多样性^[41]。徐中民等对甘肃省 1998 年的生态足迹进行了测算和研究^[42]。苏绮等运用生态足迹分析方法，对北京和上海两市 1999 年居民食物、衣着、生活用品和用能等生活消费占用的生态空间进行了测算^[43]。谢高地等对中国的生态空间占用进行了研究^[44]。鲁春霞等评价了青藏高原自然资产利用的生态空间占用^[45]。李金石等对澳门特别行政区 2001 年的生态足迹进行了计算^[46]。

在生态足迹计算模型上，Zhao Sheng 等^[6]应用能值分析对生态足迹进行了改进，将研究区域的能量流和物质流转化为生物生产性土地面积，计算研究区域的能值生态足迹、能值生态承载力和生态盈余或生态赤字，完整地构建起了能值足迹模型^[47]。张芳怡等以江苏为研究对象，利用两种模型进行了对比研究^[48]。王建源等用 EMA 对山东省 EF 进行研究^[49]。刘钦普利用 EF-EMA 对江苏耕地进行了可持续分析，并引入了新的评价指标：生态差额指数^[50]。陈春峰等采用此模型计算黑龙江的 EF 现状。赵志强等利用 EF-EMA 以深圳为例提出了开放系统的研究方法^[51]。刘森等对 EF-EMA 进行了改进^[52]。结果显示，EF-EMA 在一定程度上克服了 EF 的缺陷，能更真实的反映研究区域生态经济系统的环境状况，具有较大的发展前景。本研究利用 EF-EMA 对内蒙古自治区可持续发展现状进行了分析，并同 EF 的计算结果做了比较。

2. 3 能值分析研究综述

2. 3. 1 基本概念和方法

能量系统包括生态系统和人类社会经济系统，系统各组成部分及其作用都涉及到能量的流动、转化和贮存。因此，评价生态环境承载力可以应用能值分析。把能值分析与生态足迹相结合，能够为评价生态承载力和生态安全的分析研究开辟新方法。

20 世纪 80 年代，能值分析（Emergy Analysis, EMA）理论由美国生态学家 H.T.Odum 为首创立的。理论主要包括能量系统、能值链、能值、体现能、能量转换率及信息等。其理论基础是：生态经济系统是自组织系统，所有的任何形式的能都来自太阳能。能量的流动，形成具有较高能量等级的新形式的能^[53]。H.T.Odum^[54]对能值的定义为：能值实质上是一种包被能，是一种流动或储存的能量所包含另一种类别能量的数量，称为该能量的能值”。应用过程中，根据不同能量之间存在的转换关系，一般用太阳能值来衡量某一能量的能值，即“任何流动或储存的能量所包含的太阳能之量，称为该能量的太阳能值”，单位是太阳能焦耳^[55]。H.T.Odum 基于地球系统和生态经济角度换算出自然界和人类社会主要能量类型的太阳能值转换率，用于国家、区域或城市系统的能值分析。能值分析充分考虑了不同能力间质和等级的差异性、自然资源对生态系统的作用等，合理地对自然环境资源的价值进行了定量评估。通过能值分析为反映环境资源和经济状况提供了客观标准，为环境与经济的转化与发展应采取的对策提供了科学的理论依据^[56]。

能值分析中一个的重要概念是能值转换率，计算不同的能量能值转换率，建立等级之间的联系，对不同质的资源进行统一尺度上的量化计算。其含义为：形成每单位某种能量所需的另一种能量之量即为该能量的能值转换率，单位为 sej^[57]。

能值分析一般采用以下指标：能值产出率、能值投入率、能值自给率、能值交换率、能值扩大率、净能值产出率、环境负载率、能值货币价值、能值货币比率、能值使用强度、人均能值使用量、电力能值使用量比、能值持续性指数等^[58]。能值分析基本步骤主要有以下七个步骤：第一，收集基本资料；第二，绘制能量系统图和能值系统图；第三，编制能值分析表；第四，构建系统的能值综合结构图；第五，建立能值指标体系；第六，系统模拟；第七，系统的发展评价和策略分析^[59]。

2. 3. 2 国外能值分析研究现状

自能值分析理论创建，国际学术界就对其非常重视，相关理论与实践研究也有了较快的发展与逐步完善。目前，国外对能值理论及其分析方法的研究涉及自然、社会等，应用于评价地区流域系统环境资源、环境政策、经济投入和发展模式、环境管理、发展计划与政策等方面。

1996 年 H.T.Odum 发表能值分析专著深刻阐述了能值概念、理论与分析方法。2000 年出版的“Modeling For All Scales”，介绍了生态系统能值综合分析模型、动态模拟软件以及相关

应用程序。1999 年, Buranakarm 利用能值理论对建筑材料的循环利用进行了研究, 确定了再循环利润的最佳措施或指标。同年, Gullen Trujillo 运用能值理论分析可持续发展的替代模式——生态旅游, 认为生态旅游并不是最有效的维护森林的活动。2000 年, Tilley 分析了森林生态系统的自然财富。上世纪 70 年代开始, 国外能值理论及分析方法的相关理论研究得到广泛应用。空间尺度上, 从全球循环到国家^[60]、区域^[61]、城市^[62]、企业等各种尺度。生态系统类型方面, 研究对象从农业^[63]、养殖业、林业、草原、生态工程、环境治理^[64]、工业系统等类别的生态经济系统的分析与评价研究。

2. 3. 3 国内能值分析研究现状

20 世纪 90 年代我国学者蓝盛芳引入能值分析理论, 尽管国内能值分析研究开始较晚, 但能值分析理论方法和应用都有很大发展。我国学者不仅把能值理论用于生态经济系统的分析^[55], 并且还进行了不同时空尺度的实例研究^[65]。近些年来, 除了加大对理论的进一步研究, 应用领域也更加广泛。主要研究集中在以下几个方面: (1) 研究尺度多样化, 涉及尺度有国家, 省域、城市^[66]、县域、典型区域或流域等; (2) 研究内容从宏观到微观。如: 农业生态系统、工业生态系统、湿地系统生态功能评价^[67]、自然保护区、旅游生态系统。微观研究主要有单一作物、微观系统能值分析研究。(3) 种植业生态系统应用研究。主要研究内容包括: 行政区域农业生态经济系统的能值指标分析, 特定区域农业生态系统能值分析, 农牧业生态系统, 养殖业系统。(4) 理论探索及评价指标方面的研究。此外, 将能值分析运用到城市垃圾及废弃物处理系统的研究中, 提出了合理的废弃物处理方法^[68]。张芳怡等将能值分析进一步与生态足迹结合, 提出了新的生态足迹模型, 在可持续发展定量研究上又拓展了一步^[69]。

2. 4 灰色预测理论

随着科学技术的高速发展, 在现代社会的经济活动、科研活动以及人们的日常生活中, 信息的交流已日趋重要, 不可或缺。如何有效地提取、筛选、处理信息, 已引起人们的普遍关注和高度重视。灰色预测理论正是应运而生的一门新兴学科。20 世纪八十年代初我国著名学者邓聚龙教授提出灰色系统理论, 并由由此发展起来。灰色系统理论以信息论、系统论的角度作为研究对象的研究起点。物质、能量和信息构成了客观世界, 而物质的新陈代谢和能量间的相互转化, 是通过信息进行的。

灰色预测是对既含有已知信息又含有不确定信息的系统进行预测, 就是对在一定范围内变化的、与时间有关的灰色过程进行预测。该方法对样本含量和概率分布没有严格的要求, 是一种“少数据”建模的方法, 且对不规律的数列预测更为有效。

2. 4. 1 GM(1, 1)模型的构建

GM(1, 1)模型是最常用的灰色预测模型, 建立 GM(1, 1)只需一个数列 $x^{(0)}$ 。当数列非负时, 累加生成能使其转化为有规律的递增数列。

$$\text{令 } \mathbf{x}^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)),$$

$$\text{记 } x^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m)$$

得到一次累加生成数列:

$$\mathbf{x}^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n) = x^{(0)}(1), x^{(1)}(1) + x^{(0)}(2), \dots, x^{(1)}(n-1) + x^{(0)}(n))$$

$$\mathbf{x}^{(1)} \text{ 相应的微分方程为: } \frac{dx^{(1)}(t)}{dt} - \alpha x^{(1)} = \mu$$

其中: α 称为发展灰数; μ 称为内生控制灰数。

记 $\hat{\mathbf{a}}$ 为待估参数向量, $\hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \mu \end{bmatrix}$ 利用最小二乘法求解, 解得:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}$$

$$\text{其中 } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(1) - x_1^{(1)}(2)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(n-1) + x_1^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$$

求解微分方程, 即可得预测模型:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{\mu}{\alpha}] e^{-\alpha k} + \frac{\mu}{\alpha} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

然后进行累减, 便可以得到预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

2. 4. 2 GM(1, 1)模型的检验

GM(1, 1)模型建立后要进行检验, 本文采用残差检验、后验差检验对建立的模型进行检验, 从而确定模型的可信度。

(1) 残差检验

设原始数列

$$\mathbf{x}^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2) \dots x^{(0)}(n))$$

预测值为

$$\hat{\mathbf{x}}^{(0)} = \{ \hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(1) \dots \hat{x}^{(0)}(n) \}$$

残差检验是一种直观的逐点进行比较的算术检验方法，它是把预测模型的模拟数据与实际计算数据相比较，观测其相对误差是否满足要求。

$$\varepsilon^{(0)} = (\varepsilon(1), \varepsilon(2) \dots \varepsilon(n))$$

相对误差为

$$e(n) = \frac{\varepsilon(n)}{x^{(0)}(n)} 100\%$$

(2) 后验差检验

后验差检验是按照残差的概率分布进行检验的，属于统计概念。设初始数据序列 $x^{(0)}$ 及残差序列 ε 的方差分别为 S_x^2 和 S_ε^2 。

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2 \qquad S_\varepsilon^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon})^2$$

则计算后验差比值

$$C = \frac{S_\varepsilon}{S_x}$$

小误差概率

$$p = P\{|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6475 S_\varepsilon\}$$

均方差比值 C 越小越好，小误差概率 p 越大越好。模型的精度由 C 和 p 共同刻画。一般的，模型精度分为四级，见下表。

预测模型的小误差概率(P)和后验差比值(C)

Least error Probability(P) and Posterior error ratio(C)		
预测模型精度等级	P	C
一级（好）	>0.95	<0.35
二级（合格）	>0.80	<0.50
三级（勉强）	>0.7	<0.65
四级（不合格）	<=0.7	>=0.65

第三章 研究区域概况

3. 1 内蒙古自治区地理位置与行政区划

内蒙古自治区疆域辽阔，地跨“三北”（中国东北、西北、华北）地区，东起东经 126° 29′，西北东经 97° 10′，东西直线距离为 400 多 km。内蒙古东部与黑龙江、吉林、辽宁三省毗邻，南部、西南部与河北、山西、陕西、宁夏四省区接壤，西部与甘肃省相连，北部与蒙古国为邻，东北部与俄罗斯交界，国界线长达 4221km。土地总面积 118.3 万 km²，占全国总面积 12.3%。

内蒙古自治区行政区划见图 2。

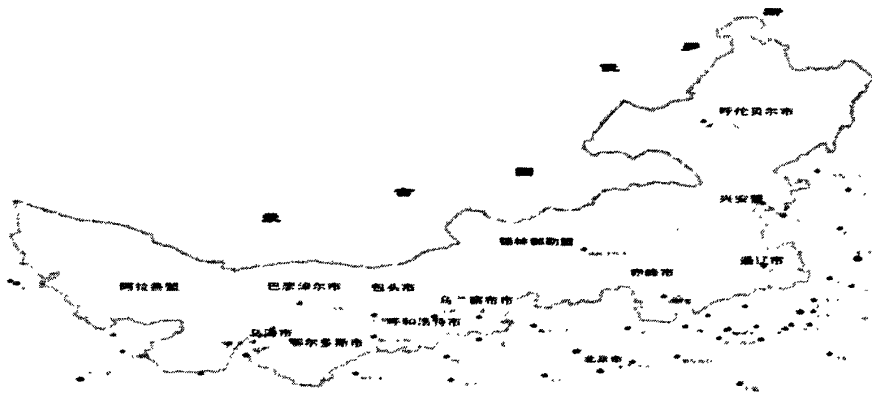


图 2 内蒙古自治区行政区划

Fig. 2 The administrative divisions of Inner Mongolia

3. 2 内蒙古自治区自然环境概况

3. 2. 1 地质地貌

内蒙古自治区地域辽阔，地层发育齐全，岩浆活动频繁，成矿条件好，矿产资源丰富。以北 42° 为界，可分为两个 I 级大地构造单元。42° 线以北为天山—内蒙古—兴安地槽区，以南为华北地台区。中、新生代时受太平洋板块向西俯冲的影响，内蒙古东部地区形成北北东向的构造火山岩带，即新华夏系第三隆起带。内蒙古存在着两个全国著名的 II 级成矿带，就在这两大工级构造单元接触部轴和新华夏系第三隆起带上。前者为华北地台北缘金、铜多金属 II 级成矿带，后者为大兴安岭 II 级铜多金属成矿带。

内蒙古自治区的地貌以蒙古高原为主体，具有复杂多样的形态。除东南部外，基本是高原，占总土地面积的 50% 左右，由呼伦贝尔高原、锡林郭勒高原、巴彦淖尔-阿拉善及鄂尔多斯等高平原组成，平均海拔 1000m 左右，海拔最高点贺兰山主峰 3556m。高原四周分布着大兴安岭、阴山（狼山、色尔腾山、大青山、灰腾梁）、贺兰山等山脉，构成内蒙古高原地貌的脊梁。内蒙古高原西端分布有巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布其、毛乌素等沙漠，总面积 15 万 km²。在大兴安岭的东麓、阴山脚下和黄河岸边，有嫩江西岸平原、西辽河平原、土

默川平原、河套平原及黄河南岸平原。这里地势平坦、土质肥沃、光照充足、水源丰富，是内蒙古的粮食和经济作物主要产区。在山地向高原、平原的交接地带，分布着黄土丘陵和石质丘陵，其间杂有低山、谷地和盆地分布，水土流失较严重。全区高原面积占全区总面积 53.4%，山地占 20.9%，丘陵占 16.4%，河流、湖泊、水库等水面面积占 0.8%。

3. 2. 2 气候与水文

内蒙古属典型的中温带季风气候，具有降水量少而不匀、寒暑变化剧烈的显著特点。冬季漫长而寒冷，多数地区冷季长达 5 个月到半年之久。其中 1 月份最冷，月平均气温从南向北由零下 10℃ 递减到零下 32℃，夏季温热而短暂，多数地区仅有一至两个月，部分地区无夏季。最热月份在 7 月，月平均气温在 16℃~27℃ 之间，最高气温为 36℃~43℃。气温变化剧烈，冷暖悬殊甚大。降水量受地形和海洋远近的影响，自东向西由 500mm 递减为 50mm 左右。蒸发量则相反，自西向东由 3000mm 递减到 1000mm 左右。与之相应的气候带呈带状分布，从东向西由湿润、半湿润区逐步过渡到半干旱、干旱区。这里晴天多，阴天少，日照时数普遍都在 2700h 以上，长时达 3400h。冬春季多风大，年平均风速在 3m/s 以上，蕴藏着丰富的光热、风能资源。

内蒙古自治区境内共有大小河流 1000 余条，祖国的第二大河-黄河，由宁夏石咀山附近进入内蒙古，由南向北，围绕鄂尔多斯高原，形成一个马蹄形。其中流域面积在 1000 km² 以上的河流有 70 多条；流域面积大于 300 km² 的有 258 条。有近千个大小湖泊。全区地表水资源为 671 亿 m³，除黄河过境水外，境内自产水源为 371 亿 m³，占全国总水量的 1.67%。地下水资源为 300 亿 m³，占全国地下水资源的 2.9%。扣除重复水量，全区水资源总量为 518 亿 m³。年人均占有水量 2370m³，耕地每公顷平均占有水量 1 万 m³，平均产水模数为 4.41 万 m³/km²。内蒙古水资源在地区、时程的分布上很不均匀，且与人口和耕地分布不相适应。东部地区黑龙江流域土地面积占全区的 27%，耕地面积占全区的 20%，人口占全区的 18%，而水资源总量占全区的 65%，人均占有水量 8420m³，为全区均值的 3.6 倍。中西部地区的西辽河、海滦河、黄河 3 个流域总面积占全区的 26%，耕地占全区的 30%，人口占全区的 66%，但水资源仅占全区 25%，其中除黄河沿岸可利用部分过境水外，大部分地区水资源紧缺。

3. 2. 3 土壤与植被

内蒙古自治区地域辽阔，土壤种类较多，其性质和生产性能也各不相同，但其共同特点是土壤形成过程中钙积化强烈，有机质积累较多。根据土壤形成过程和土壤属性，分为 9 个土纲，22 个土类。在 9 个土纲中，以钙层土分布最少。内蒙古土壤在分布上东西之间变化明显，土壤带基本呈东北—西南向排列，最东为黑土壤地带，向西依次为暗棕壤地带、黑钙土地带、栗钙土地带、棕壤土地带、黑垆土地带、灰钙土地带、风沙土地带和灰棕漠土地带。其中黑土壤的自然肥力最高，结构和水分条件良好，易于耕作，适宜发展农业；黑钙土自然肥力次之，适宜发展农林牧业。

内蒙古境内植被由种子植物、蕨类植物、苔藓植物、菌类植物、地衣植物等不同植物种类组成。植物种类较丰富,已搜集到的种子植物和蕨类植物共计 2351 种,分属于 133 科,720 属。其中引进栽培的有 184 种,野生植物有 2167 种(种子植物 2106 种,蕨类植物 61 种)。植物种类分布不均衡,山区植物最丰富。东部大兴安岭拥有丰富的森林植物及草甸、沼泽与水生植物。中部阴山山脉及西部贺兰山兼有森林、草原植物和草甸、沼泽植物。高平原和平原地区以草原与荒漠旱生型植物为主,含有少数的草甸植物与盐生植物。内蒙古境内草原植被由东北的松辽平原,经大兴安岭南端山地和内蒙古高原到阴山山脉以南的鄂尔多斯高原与黄土高原,组成一个连续的整体,其中草原植被包括世界著名的呼伦贝尔草原、锡林郭勒草原、乌兰察布草原、鄂尔多斯草原等。荒漠植被主要分布于伊克昭盟西部、巴彦淖尔盟西部和阿拉善盟。主要由小半灌木盐柴类和矮灌木类组成,共有种子植物 1000 多种。植物种类虽不丰富,但地方特有种的优势作用十分明显。

3. 2. 4 资源分布

在内蒙古辽阔富饶的土地上,有茂密的森林、丰美的草场、肥沃的农田、广阔的水面、众多的野生动植物和无穷无尽的矿藏资源。据估算,全区近 300 个大小城镇国有土地资源产量在 2000 亿元以上,全区矿产储量潜在价值(不含石油、天然气)达 13 万亿元,居全国第三位。

内蒙古现有耕地 549 万 hm^2 ,人均占有耕地 0.24 hm^2 ,是全国人均耕地的 3 倍,实际可利用的耕地面积超过 800 万 hm^2 ,人均耕地面积居全国首位。内蒙古农业区和半农半牧区主要分布在大兴安岭和阴山山脉以东和以南。河套、土默川、西辽河、嫩江西岸平原和广大的丘陵地区,有适于农作物生长的黑土、黑钙土、栗钙土等多样性土壤地带和可利用的地上地下资源,从而形成自治区乃至我国北方的重要粮仓。内蒙古农作务多达 25 类 10266 个品种,主要品种有小麦、玉米、水稻、谷子、莜麦、高粱、大豆、马铃薯、甜菜、胡麻、向日葵、蓖麻、蜜瓜、黑白瓜籽等许多独具内蒙古特色的品种,其中莜麦、荞麦、华莱士瓜颇具盛名。还有发展苹果、梨、杏、山楂、海棠、海红果等耐寒耐旱水果的良好条件。

内蒙古天然草场辽阔而宽广,总面积位居全国五大草原之首,是我国重要的畜牧业生产基地。草原总面积达 8666.7 万 hm^2 ,其中可利用草场面积达 6800 万 hm^2 ,占全国草场总面积的 1/4。内蒙古现有呼伦贝尔、锡林郭勒、科尔沁、乌兰察布、鄂尔多斯和乌拉特 6 个著名大草原,生长有 1000 多种饲用植物,饲用价值高、适口性强的有 100 多种,尤其是羊草、羊茅、冰草、披碱草、野燕麦等禾本和豆科牧草非常适于饲养牲畜。从类型上看,内蒙古东北部的草甸草原土质肥沃,降水充裕,牧草种类繁多,具有优质高产的特点,适宜于饲养大畜,特别是养牛;中部和南部的干旱草原降水较为充足,牧草种类、密度和产量虽不如草甸草原,但牧草富有营养,适于饲养马、牛、羊等各种牲畜,特别宜于养羊;阴山北部和鄂尔多斯高原西部的荒漠草原,气候干燥,牧草种类贫乏,产草量低,但牧草的脂肪和蛋白质含量高,

是小畜的优良放牧场地；西部的荒漠草场很适合发展骆驼。著名的三河马、三河牛、草原红牛、乌珠穆沁肥尾羊、敖汉细毛羊、鄂尔多斯细毛羊、阿尔巴斯绒山羊等优良畜种在区内外闻名遐迩。

内蒙古森林总面积约 1406.6 万 hm^2 ，占全国森林总面积的 11%，居全国第二位，是国家重要的森林基地之一。森林覆盖率达 13.8%，高于全国 13.4% 的平均水平。森林总蓄积量 11.2 亿立方米，居全国第四位。树木种类繁多，全区乔灌木种达 350 多种。内蒙古森林资源大部分集中在大兴安岭北部山地，林木蓄积量占全区林地活立木蓄积量的 3/4 以上，被誉为“祖国的绿色宝库”。这里盛产的兴安落叶松、白桦、黑桦等，均为著名的的优质林木。此外，在罕山、阴山、贺兰山等山地也生长着成片的天然次生林。罕地区的云杉、油松、柞木、山杨林；大青山、乌拉山、蛮汉山的山杨、白桦林；贺兰山的云杉、松树林以及大青沟阔叶林等，都具有较高的经济和科学研究价值。人工林也是内蒙古森林中不可缺少的组成部分。全区人工林保存面积达 237 万 hm^2 ，比解放前人工林面积增长 52 倍。

内蒙古各类植物 2351 种，其中野生植物 2167 种，引种栽培的有 184 种。这些植物已分属于 133 科，720 属，被列为第一批国家保护的珍稀野生植物的有 24 种。野生植物按经济用途可分为十几类。纤维植物有樟子松、落叶松、大叶草、芦苇、红柳等 70 多种。中草药有人参、天麻、麻黄、肉苁蓉、柴胡、甘草等 500 多种。榛子、山杏、金莲花、松籽等几十种植物的种子是榨油的好原料。酿造的重要原料有越桔、笃斯、悬钩子、山樱桃等。几十种食用植物中尤以猴头、口蘑和发菜最负盛名。内蒙古兽类分属于 24 科，有 114 种，占全国兽类 450 种的 25.3%。兽类中具有产业价值的 50 余种，珍贵稀有动物 10 余种。鸟类分属于 51 科，有 365 种，占全国鸟类的 31%。被列入国家一、二、三类保护的兽类和鸟类共同 49 种。蒙古野驴和野骆驼属于世界上最珍贵的兽类，驯鹿是内蒙古特有的动物，还有百灵鸟是自治区区鸟。全区有啮齿动物 54 种，约占全国种数的 1/3，多属害兽。

3. 3 内蒙古自治区社会经济概况

内蒙古自治区是蒙古族为主体的少数民族自治区，也是中国历史上第一个民族自治区，现辖九市三盟：呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市、呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市、乌兰察布市、巴彦淖尔市、乌海市；兴安盟、锡林郭勒盟、阿拉善盟。进入新世纪以来，内蒙古自治区从 2000-2009 年的 9 年间 GDP 年均增速为 18.7%，在西部 12 个省市区中，增速最快，并远远高于全国平均水平。2009 年全区 GDP 总量 9081 亿元，同比增长 17.0%；固定资产投资达到 7380 亿元，同比增长 33.8%；财政收入达到 1441 亿元，同比增长 30.1%；城镇人均可支配收入达到 18900 元，同比增长 14.5%；农牧民人均纯收入达到 7254 元，同比增长超 50%；三次产业结构为 9.9:52.3:37.8。农牧业稳定发展，牲畜存栏头数稳定在 1 亿头以上；工业快速发展，煤炭产量、外送电量、风电并网装机容量均居全国首位，液态奶产量占全国 60% 以上；服务业较快发展；城镇化率达到 55%。

第四章 内蒙古自治区生态安全预算与动态研究

通过划分生产消费账户以及确定参数,首先利用传统生态足迹及生态承载力模型,对内蒙古自治区的生态足迹和生态承载力进行计算并作出分析。其次利用“能值-生态足迹”计算内蒙古自治区的生态足迹和生态承载力并作分析,然后进一步对生态足迹模型与传统模型计算结果比较分析最后计算生态压力指数,进一步选取生态压力指数作为区域生态安全评价指标,对生态安全等级进行划分,来对评价内蒙古自治区的生态安全现状。

4. 1 内蒙古自治区传统生态足迹及生态承载力计算与分析

由于生态足迹计算过程中所涉及的基础数据较多,所以,本部分主要以内蒙古自治区 2010 年统计数据为例对生态足迹和生态承载力等指标进行分析。按照数据来源和采取方法不同,计算生态足迹时获取数据的方法有两种:第一种是自上而下法,即根据地区性或全国性的统计资料来查取该核算地区的资源生产总量、出口总量、进口总量和年终库存总量,从而获地区各类产品的消费总量的数据,计算出总的生态足迹后再除以地区总人口,得到人均生态足迹。第二种是自下而上法,此方法主要通过发放社会调查问卷、居民访问等方式直接获得人均消费数据,来计算区域人均生态足迹。本文采用的是第一种方法,文中数据来源于中国国家统计局《中国统计年鉴》(2001~2010)、《内蒙古自治区年鉴》(2001~2010)、《中国农村统计年鉴》(2001~2010);气象水文数据为多年年平均值,来源于所在地气象台站和当地气象年鉴;计算过程中文中涉及的能量转换率,能值转换率选择均来自相关参考文献^[70]。

4. 1. 1 内蒙古自治区 2009 年生态足迹计算与分析

生态足迹计算是以下四条基本假设为前提:第一,内蒙古自治区所消费的绝大多数自然资源是可以确定,并且来源于各类生产性土地。第二,内蒙古自治区的居民所消耗的资源能够全部转化,不需计算废物流。第三,假设 1hm 面积代表一种利用方式,某年的所有类型公顷数表示同等数量的生态承载力,因此它们可以通过加权累加之后计算出生态承载力。第四,人类所消费的生物资源与能源量可以对应于各类土地利用类型的面积,且其可通过加权进行汇总。

依据生态足迹的概念以及指标,生态足迹的计算首先要依据掌握的数据资料,划分具体的消费项目。根据我国国民经济和社会发展的统计指标及内蒙古自治区的实际情况,内蒙古自治区生态足迹计算过程中生物资源帐户共计 24 项。依次是:耕地包括水稻、小麦、玉米、高粱、谷子、莜麦、糜子、荞麦、薯类、棉花、豆类、大豆、油料、麻类、猪肉共 15 项;林地包括木材和水果共 2 项;草地包括牛肉、羊毛、羊肉、奶类、蜂蜜和禽蛋共 6 项水域包括水产品这 1 项。其计算公式为:

$$EF = N \times (ef) = N \times \sum_{j=1}^n A_j = N \times \sum_{j=1}^n (P_j - I_j - E_j) / (Y_j \times N) (j = 1, 2, 3, \dots, 6)$$

式中：EF—总人口的生态足迹；

ef—人均生态足迹， hm^2/cap ；

r_i —均衡因子；

N—人口数；

A_i —第 i 种消费项目折算的人均生物生产面积， hm^2/cap ；

P_i —第 i 种消费项目的年生产量；

I_i —第 i 种消费项目的年进口量。

根据《2010 年内蒙古自治区统计年鉴》的统计数据，列出各种主要生物资源消费量，依据全球平均产量，计算出各生物资源的总的生态足迹，进一步计算出人均生态足迹。内蒙古自治区 2009 年生物资源帐户生态足迹计算结果见表 1。

表 1 内蒙古自治区生物资源帐户生态足迹

Table 1 Ecological Footprint accounts of biological resources in Inner Mongolia				
项目	全球平均产量 (kg/hm^2)	生产量 (t)	总足迹 (hm^2)	人均足迹 (hm^2/cap)
耕地				7.20E-01
水稻	2744	6.48E+05	2.36E+05	9.75E-03
小麦	2744	1.71E+06	6.24E+05	2.58E-02
玉米	2744	1.34E+07	4.89E+06	2.02E-01
高粱	2744	3.85E+05	1.40E+05	5.79E-03
谷子	2744	1.44E+05	5.25E+04	2.17E-03
莜麦	2744	1.70E+04	6.20E+03	2.56E-04
糜子	2744	2.50E+04	9.11E+03	3.76E-04
荞麦	2744	6.50E+04	2.37E+04	9.78E-04
薯类	12607	1.61E+06	1.28E+05	5.28E-03
棉花	1000	1.00E+03	1.00E+03	4.13E-05
豆类	1856	1.43E+06	7.72E+05	3.19E-02
大豆	1856	1.14E+06	6.16E+05	2.54E-02
油料	1856	1.20E+06	6.44E+05	2.66E-02
麻类	1500	1.00E+04	6.67E+03	2.75E-04
猪肉	74	6.86E+05	9.27E+06	3.83E-01
林地				8.51E-02
木材	1.99	3.93E+06	1.98E+09	8.16E-02
水果	3500	2.95E+05	8.43E+04	3.48E-03
草地				2.27E+00
牛肉	33	4.74E+05	1.44E+07	5.94E-01
羊毛	15	1.28E+05	8.52E+06	3.52E-01
羊肉	33	8.82E+05	2.67E+07	1.10E+00
奶类	502	9.34E+06	1.86E+07	7.68E-01
蜂蜜	50	4.52E+03	9.04E+04	3.73E-03
禽蛋	400	4.89E+05	1.22E+06	5.05E-02
水域				1.51E-01
水产品	29	1.06E+05	3.65E+06	1.51E-01

考虑到数据的可获得性，能源帐户共计 6 项。依次是：化石能源消费包括原煤、焦炭、原油、汽油、柴油共 5 项；电力消费有 1 项。根据《2010 年内蒙古自治区统计年鉴》的统计数据，列出 2009 年内蒙古自治区各种主要能源消费量，依据全球平均能源足迹与折算系数，计算出各种能源的总生态足迹，进一步计算人均生态足迹。内蒙古自治区 2009 年能源帐户计算结果见表 2。

表 2 内蒙古自治区能源帐户生态足迹

Table 2 Ecological Footprint accounts of Energy Account in Inner Mongolia

项目	全球平均足迹 (hm ²)	折算后的消费量(kg)	总足迹 (hm ²)	人均足迹 (hm ² /cap)
化石能源用地				9.96E+00
原煤	55	6.04E+08	1.10E+07	9.49E+00
焦炭	55	1.84E+07	3.34E+05	3.93E-01
原油	71	1.93E+06	2.72E+04	4.71E-02
汽油	71	4.97E+05	6.99E+03	1.25E-02
柴油	71	5.11E+05	7.20E+03	1.27E-02
建筑用地				9.26E-03
电力(10000kwh)	1000	2.24E+07	2.24E+04	9.26E-03

根据数据列出各种生态生产性土地的总面积，并依据相对的均衡因子进行调整，对内蒙古自治区生态足迹进行汇总，2009 年人均生态足迹见表 3。

表 3 内蒙古自治区 2009 年人均生态足迹

Table 3 The Ecological footprint in Inner Mongolia (2009)

土地类型	总面积 (万 hm ²)	均衡因子	均衡面积 (hm ² /cap)
耕地	7.20E-01	2.8	2.01E+00
林地	8.51E-02	1.1	9.36E-02
草地	2.87E+00	0.5	1.44E+00
化石能源用地	9.96E+00	1.1	1.09E+01
水域	1.51E-01	0.2	3.02E-02
建筑用地	9.26E-03	2.8	2.59E-02
总计			1.45E+01

依据表 3 计算结果可以看出，内蒙古自治区 2009 年人均生态足迹为 14.5hm²/cap。其中，化石燃料的消费足迹最大，为 10.9hm²/cap，约为总生态足迹的 75%，这充分说明内蒙古自治区的能源消费占较大的比例。其次依次为耕地、草地、林地、水域和建筑用地。

4. 1. 2 内蒙古自治区 2009 年生态承载力计算与分析

生态承载力计算即是计算一个地区总的生态生产性土地面积。均衡因子分别取：耕地 2.8、林地 1.1、草地 0.5、化石燃料地 1.1、水域 0.2、建筑用地 2.8^[42]。产量因子分别取：耕地 2.51、林地 0.95、草地 0.19、化石燃料用地 0.95、水域 1、建筑用地 2.51^[71]。生态承载力计算公式：

$$EC = N \times (ec) = N \times (a_j \times r_j \times y_j) \quad (j = 1, 2, 3, \dots 6)$$

式中：EC—区域总人口的生物承载力，hm²；

ec—人均生物承载力，hm²/cap；

y_j—产量因子；

r_j—均衡因子；

a_j—人均生物生产面积，hm²/cap。

根据各类统计年鉴与内蒙古自治区政府部门的统计数据，计算出各年内蒙古自治区耕地、林地、草地、化石能源用地、水域及建筑用地的总面积，并根据相应的均衡因子和产出因子得到生态承载力。计算生态承载力时，需要扣除 12% 的生态承载力面积用来生物多样性保护，然后得到可利用生态承载力面积。同样由于涉及数据较多，以 2009 年为例计算生态承载力。内蒙古自治区 2009 年人均生态承载力计算结果见表 4。

表 4 内蒙古自治区 2009 年人均生态承载力
Table 4 Per capita ecological capacity in Inner Mongolia (2009)

土地类型	总面积 (万 hm ²)	均衡因子	产量因子	均衡面积 (hm ² /cap)
耕地	2.95E-01	2.8	2.51	2.07E+00
林地	1.81E+00	1.1	0.95	1.90E+00
草地	3.58E+00	0.5	0.19	3.40E-01
水域	3.84E-02	0.2	1	7.68E-03
建筑用地	2.40E-04	2.8	2.51	1.69E-03
生态承载力				4.32E+00
生物多样性保护 (12%)				5.18E-01
可用生态承载力				3.86E+00

从表 4 的计算结果可以看出：内蒙古自治区的人均生态承载力为 4.32 hm²/cap。按照世界环境与发展委员会的报告建议，留出 12% 的生物生产性土地作为生物多样性保护用地，扣除 0.518 hm²/cap，内蒙古自治区实际人均生物承载力为 3.86 hm²/cap。

4. 1. 3 内蒙古自治区 2000~2009 年生态足迹计算与分析

刘冬梅认为在计算较长时间序列时，需要将上年的生态赤字/盈余转入下年的计算中^[72]，但是一般当年的生态赤字已经由生态环境恶化或区域外贸易来进行补偿，而生态盈余也通过区域外的贸易进行了转移，因此，本研究在计算较长时间序列的生态足迹时是以当年的生态

足迹和生态承载力比较来比较当年生态盈亏情况，每年生态赤字/盈余不转入下年的计算当中。按照前文所述算法可计算出内蒙古自治区 2000~2009 年生态足迹，计算结果见表 5。

表 5 内蒙古自治区 2000~2009 年生态足迹
Table 5 The Ecological Footprint in Inner Mongolia (2000~2009)

年份	耕地均衡 面积 (万 hm ²)	林地均衡 面积 (万 hm ²)	草地均衡 面积 (万 hm ²)	化石能源用 地均衡面积 (万 hm ²)	水域均衡 面积 (万 hm ²)	建设用地 均衡面积 (万 hm ²)	人均生态 足迹 (hm ² /cap)
2000	1.84E+00	7.78E-02	4.82E-01	1.42E+00	2.06E-02	5.10E-04	3.84E+00
2001	1.88E+00	6.78E-02	5.01E-01	1.59E+00	2.17E-02	1.97E-02	4.07E+00
2002	1.92E+00	7.53E-02	5.08E-01	2.45E+00	2.25E-02	3.99E-01	5.37E+00
2003	1.77E+00	6.20E-02	6.88E-01	3.01E+00	2.11E-02	2.74E-02	5.58E+00
2004	2.03E+00	9.02E-02	9.17E-01	4.16E+00	2.23E-02	3.45E-03	7.22E+00
2005	2.25E+00	8.19E-02	1.12E+00	4.93E+00	2.39E-02	4.46E-02	8.45E+00
2006	2.35E+00	8.40E-02	1.29E+00	5.66E+00	2.51E-02	5.97E-02	9.46E+00
2007	1.79E+00	9.91E-02	1.30E+00	6.64E+00	2.67E-02	8.10E-02	9.95E+00
2008	2.06E+00	8.20E-02	1.34E+00	8.67E+00	2.81E-02	8.92E-02	1.23E+01
2009	2.01E+00	9.36E-02	1.44E+00	1.09E+01	3.02E-02	2.59E-02	1.45E+01

根据以上计算结果，可以把内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态足迹的变化绘制成图 3。

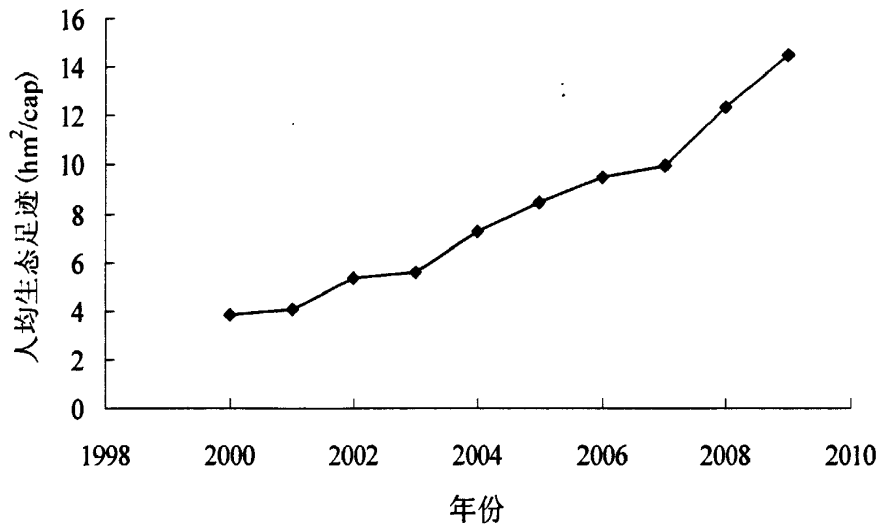


图 3 内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态足迹的变化

Fig. 3 The Change in per capita ecological footprint in Inner Mongolia (2000~2009)

从图表可以看出 2000~2009 年内蒙古自治区人均生态足迹总体呈上升趋势，特别是 2007~2009 年期间。主要有以下原因：人口数量增加，对生态自然开发利用增大；城市化的进程加快，同时加大对能源的需求；生活水平不断的提高，对粮食、蔬菜等资源需求增大。

为了进一步了解各类生物生产性土地生态足迹的增加（或减小）对内蒙古自治区生态足迹年际变化的贡献情况，将内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态足迹的构成绘制成图 4。

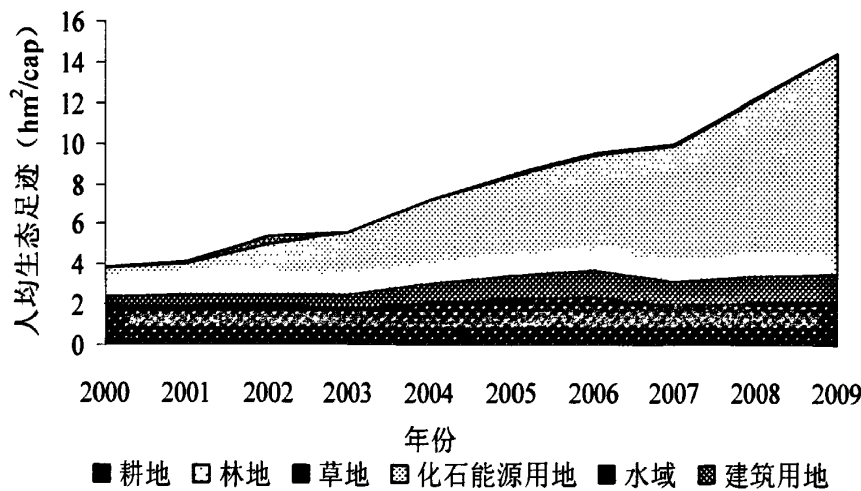


图 4 内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态足迹的构成

Fig. 4 The composition of ecological footprint in Inner Mongolia (2000~2009)

从图 3 可以得出：耕地、草地和化石能源用地的生态足迹变化对内蒙古自治区人均生态足迹的影响很大，建筑用地影响次之，而水域和林地的生态足迹变化对人均生态足迹变化的影响较小。

4. 1. 4 内蒙古自治区 2000~2009 年生态承载力计算与分析

按照前文所述算法可计算出内蒙古自治区 2000~2009 年生态承载力，计算结果见表 6。

表 6 内蒙古自治区 2000~2009 年生态承载力

Table 6 The Ecological carrying capacity in Inner Mongolia (2000~2009)

年份	耕地 均衡面积 (万 hm ²)	林地 均衡面积 (万 hm ²)	草地 均衡面积 (万 hm ²)	二氧化碳 扩散地 (万 hm ²)	水域均衡 面积 (万 hm ²)	建筑用地 均衡面积 (万 hm ²)	生态 承载力 (hm ² /cap)	有效生态 承载力 (hm ² /cap)
2000	2.10E+00	1.40E+00	3.47E-01	0.00E+00	7.22E-03	8.29E-04	3.86E+00	3.39E+00
2001	2.08E+00	1.35E+00	3.46E-01	0.00E+00	7.55E-03	6.19E-04	3.78E+00	3.33E+00
2002	2.04E+00	1.32E+00	3.46E-01	0.00E+00	7.54E-03	1.06E-03	3.72E+00	3.27E+00
2003	2.03E+00	1.79E+00	3.46E-01	0.00E+00	7.20E-03	6.73E-04	4.17E+00	3.67E+00
2004	2.10E+00	1.78E+00	3.45E-01	0.00E+00	7.80E-03	7.02E-04	4.23E+00	3.73E+00
2005	2.17E+00	1.78E+00	3.45E-01	0.00E+00	7.54E-03	8.24E-04	4.30E+00	3.78E+00
2006	2.20E+00	1.78E+00	3.44E-01	0.00E+00	7.77E-03	1.03E-03	4.33E+00	3.81E+00
2007	2.08E+00	1.77E+00	3.42E-01	0.00E+00	7.73E-03	1.45E-03	4.20E+00	3.70E+00
2008	2.08E+00	1.76E+00	3.41E-01	0.00E+00	7.71E-03	1.51E-03	4.19E+00	3.69E+00
2009	2.07E+00	1.90E+00	3.40E-01	0.00E+00	7.68E-03	1.69E-03	4.32E+00	3.80E+00

为了更加清晰地表示出人均生态承载力的年际变化，现将内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态承载力的计算结果绘制成图 5。

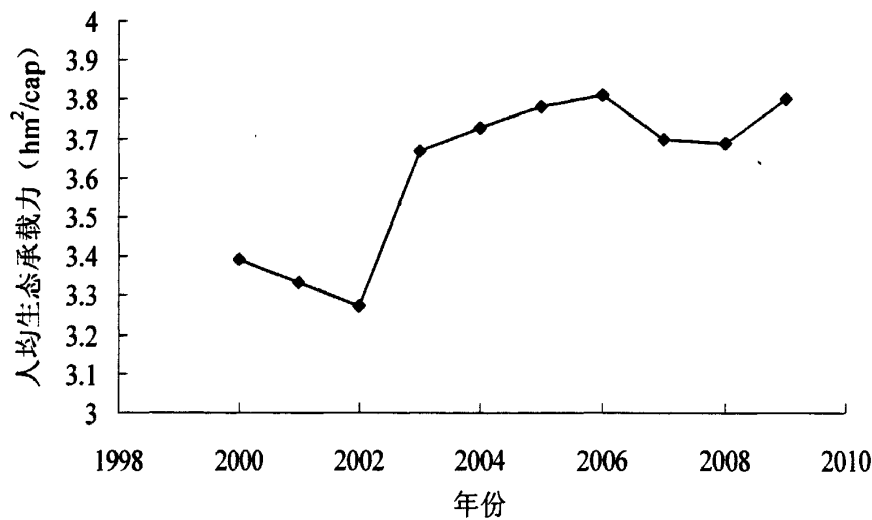


图 5 内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态承载力

Fig. 5 The Change of ecological carrying capacity in Inner Mongolia (2000~2009)

从图表可以看出，内蒙古自治区人均生态承载力在一定范围内呈波动变化。内蒙古自治区 2006 年的人均生态承载力相对较高，主要原因由于降水量较丰沛，可更新资源能值较大。

为了解各类生物生产性土地对内蒙古自治区人均生态承载力年际变化的贡献情况，将内蒙古自治区 2000~2009 年生态承载力的构成绘制成图 6。

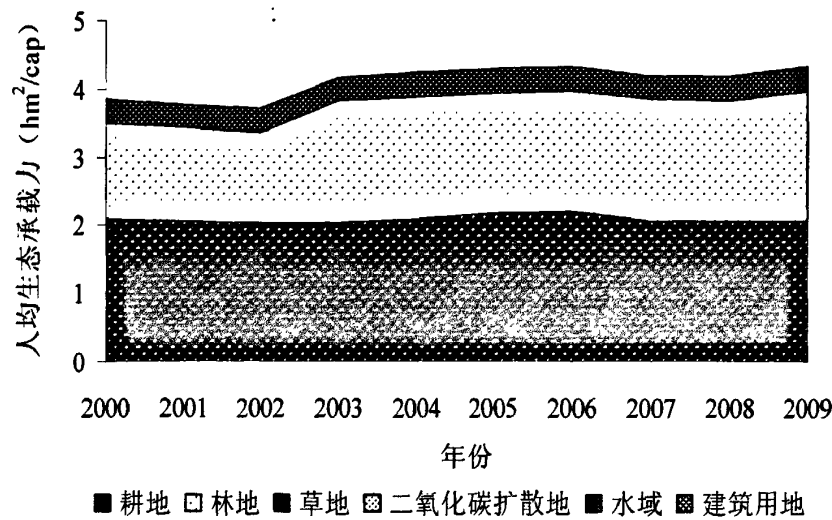


图 6 内蒙古自治区 2000~2009 年生态承载力的构成

Fig. 6 The composition of ecological carrying capacity in Inner Mongolia (2000~2009)

根据图 6 可以得出：耕地和林地对内蒙古自治区人均生态承载力的贡献很大，草地贡献次之，而水域、二氧化碳扩散地和建筑用地对人均生态承载力变化的贡献较小。

生态足迹和生态承载力都是用生物生产性土地面积来衡量的，因此，它们可以直接比较，当一个地区的生态承载力小于生态足迹时，即出现“生态赤字”；当其大于生态足迹时，则产

生“生态盈余”。生态赤字表明该地区的环境负荷超过了其生态承载力，要满足现有水平的消费需求，该地区或是从地区之外进口所欠缺的资源以平衡生态足迹，或是通过消耗自身的自然资本来弥补供给流量的不足。该值从某种程度上可定量反映一个地区的可持续发展状况。

据生态承载力和生态足迹的计算结果，可以了解区域的生态赤字情况，内蒙古自治区2000-2009 年人均生态赤字动态变化趋势见图 7。

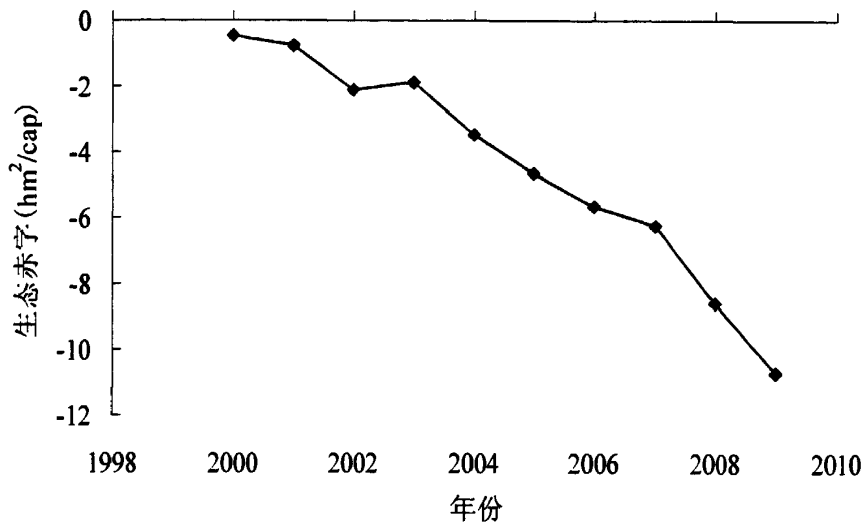


图 7 内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态赤字动态变化趋势

Fig. 7 The Changing trends of ecological deficit in Inner Mongolia (2000~2009)

如图 7 所示，内蒙古自治区 2000~2009 年持续出现生态赤字，并有加剧的趋势。除 2003 年内蒙古自治区人均生态赤字低于上年外，其余年份均保持较快速度增长。2009 年已增加到 $-10.7\text{hm}^2/\text{cap}$ ，生态环境呈现不可持续发展状态。

4. 2 内蒙古自治区能值生态足迹及生态承载力计算与分析

4. 2. 1 内蒙古自治区 2009 年能值生态足迹计算与分析

根据Zhao Sheng等^[6]的研究，改进EF就是将EMA与EF的理论框架相结合，首先把各种不同类型、不同等级的能量流通过能值转换率，换算成可以直接进行加减的太阳能值，然后引入能值密度，将各消费项目的太阳能值换算成相对应的生物生产性土地面积，从而计算出研究区域的能值生态足迹。计算公式如下

$$EF - EMA = N \cdot ef = N = \sum (c_i / p)$$

式中，EF-EMA—区域能值生态足迹； hm^2

ef—人均生态足迹， hm^2/cap ；

A_i —第*i*种资源的人均生态足迹； hm^2/cap ；

C_i —第*i*种资源的人均能值, sej/cap;

p —区域可更新总能值/区域土地面积, sej/hm²;

在计算生态足迹时, 由于目前无法获得人类消耗的所有资源的统计数据, 计算所得的生态足迹均小于实际值。内蒙古自治区2009年基于能值生态足迹计算结果见表7。

表 7 内蒙古自治区 2009 年能值生态足迹

Table 7 The emergy ecological footprint in Inner Mongolia (2009)

项目	所包含有效能 (J)	能量转换率 (sej/J)	太阳能值 (sej)	人均太阳能值 (sej/cap)	总生态足迹 (hm ²)	人均能值生态足迹 (hm ² /cap)
耕地						1.23E+00
水稻	1.06E+16	3.59E+04	3.82E+20	1.58E+13	1.55E+05	6.38E-03
小麦	2.69E+16	6.80E+04	1.83E+21	7.55E+13	7.40E+05	3.06E-02
玉米	2.21E+17	2.70E+04	5.98E+21	2.47E+14	2.42E+06	9.99E-02
高粱	6.28E+15	8.30E+04	5.21E+20	2.15E+13	2.11E+05	8.71E-03
谷子	2.28E+15	3.59E+04	8.17E+19	3.37E+12	3.31E+04	1.37E-03
莜麦	2.69E+14	3.59E+04	9.64E+18	3.98E+11	3.91E+03	1.61E-04
糜子	3.95E+14	3.59E+04	1.42E+19	5.85E+11	5.75E+03	2.37E-04
荞麦	1.03E+15	3.59E+04	3.69E+19	1.52E+12	1.49E+04	6.17E-04
薯类	2.63E+16	2.70E+04	7.10E+20	2.93E+13	2.88E+05	1.19E-02
棉花	1.62E+13	1.90E+06	3.08E+19	1.27E+12	1.25E+04	5.15E-04
豆类	2.96E+16	8.30E+04	2.46E+21	1.02E+14	9.97E+05	4.12E-02
大豆	2.37E+16	6.90E+05	1.63E+22	6.75E+14	6.62E+06	2.73E-01
油料	3.05E+16	6.90E+05	2.10E+22	8.69E+14	8.53E+06	3.52E-01
麻类	1.63E+14	8.30E+04	1.35E+19	5.59E+11	5.48E+03	2.26E-04
蔬菜	3.45E+16	2.70E+04	9.32E+20	3.85E+13	3.78E+05	1.56E-02
甜菜	2.74E+15	8.49E+04	2.33E+20	9.60E+12	9.42E+04	3.89E-03
猪肉	1.37E+16	1.70E+06	2.33E+22	9.63E+14	9.45E+06	3.90E-01
林地						9.29E-02
木材	4.32E+16	4.40E+04	1.90E+21	7.85E+13	7.70E+05	3.18E-02
水果	9.74E+14	5.30E+05	5.16E+20	2.13E+13	1.48E+06	6.11E-02
草地						1.53E+00
牛肉	9.92E+15	4.00E+06	3.97E+22	1.64E+15	1.61E+07	6.63E-01
羊肉	1.84E+16	2.00E+06	3.69E+22	1.52E+15	1.49E+07	6.17E-01
奶类	2.71E+16	1.71E+05	4.63E+21	1.91E+14	1.88E+06	7.75E-02
禽蛋	2.69E+15	1.71E+05	4.60E+20	1.90E+13	1.86E+05	7.70E-03
水域	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.95E-02
水产品	5.83E+14	2.00E+06	1.17E+21	4.81E+13	4.72E+05	1.95E-02
化石能源用地						4.28E+00
原煤	4.50E+18	3.98E+04	1.79E+23	7.39E+15	8.67E+07	3.58E+00
原油	9.04E+16	5.40E+04	4.88E+21	2.02E+14	1.98E+06	8.17E-02
汽油	1.29E+17	6.60E+04	8.52E+21	3.52E+14	3.45E+06	1.42E-01
天然气	1.71E+17	4.80E+04	8.22E+21	3.39E+14	3.33E+06	1.37E-01
柴油	3.10E+17	6.60E+04	2.04E+22	8.44E+14	8.28E+06	3.42E-01
建筑用地						1.29E+00
电力	4.64E+17	1.59E+05	7.37E+22	3.04E+15	2.99E+07	1.29E+00
小计						8.23E+00

提取表 7 中的相关生物生产性土地的 EF-EMA，构建 2009 年内蒙古自治区 EF-EMA 结构图 8。

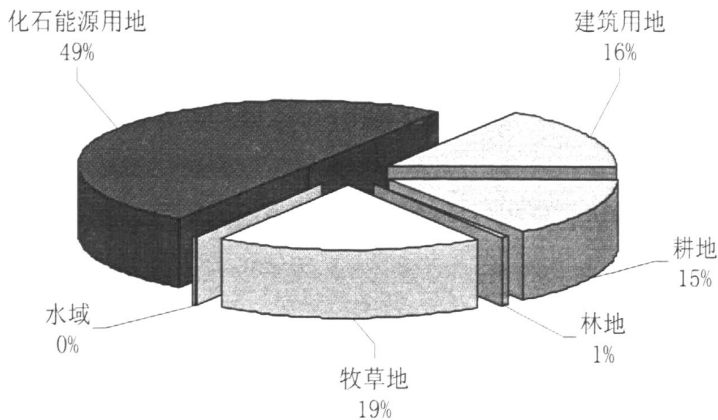


图 8 内蒙古自治区能值生态足迹结构图 (2009)

Fig. 8 The Structure of EMA-EF in Inner Mongolia Autonomous Region (2009)

由图表可以得出，在内蒙古自治区各类土地类型的人均能值足迹构成比例中，化石能源用地所占比例最大，达 49%，其次是草地、建筑用地和耕地，分别为 19%、16%、15%，说明内蒙古自治区的消费主要体现在对化石能源、农牧产品及建筑用地的消费上。

4. 2. 2 内蒙古自治区 2009 年能值生态承载力计算与分析

自然资源可分为可更新资源和不可更新资源两类。因为不可更新资源的消耗速度比其再生速度要快，加之人类的不断利用会日益枯竭。因此，只有充分合理地利用可更新资源，生态承载力才能具有可持续性。对此，计算生态承载力时，只考虑可更新资源的能值。

根据能值理论，本研究生态承载力的计算主要计算以下 5 种可更新资源：太阳辐射能、风能、雨水势能、雨水化学能和地球旋转能，由于风能、雨水势能和雨水化学能都是太阳光的转化形式，为了避免重复计算，根据能值理论，同一性质的能量投入只取其最大值。因此，在本模型中，根据收集到的原始数据，分别乘上各分项的能量转换率和太阳能值转换率，得到各项目的太阳能值，用太阳能值比上内蒙古自治区的总人口数，得出人均能值，再根据公式计算出人均能值生态承载力。计算公式如下：

$$EC - EMA = N \cdot ec = 0.88N \cdot e/p$$

式中，EC-EMA—能值生态承载力；
ec—人均生态承载力；
e—可更新资源的人均太阳能值；
p—区域平均能值密度。

内蒙古自治区 2009 年基于能值生态承载力计算结果见表 8。

表 8 内蒙古自治区 2009 年能值生态承载力

Table 8 The Emergy Ecological Capacity in Inner Mongolia (2009)

项目	原始数据 (J)	能值转换率 (sej/J)	太阳能值 (sej)	人均能值 (hm ² /cap)	人均能值生态承载力 (hm ² /cap)	区域能值生态 承载力 (hm ²)
太阳辐射能	6.29E+21	1.00E+00	6.29E+21	2.60E+14	8.29E-02	9.81E+10
风能	1.28E+17	1.50E+03	1.92E+20	7.91E+12	2.52E-03	2.99E+09
雨水势能	1.66E+19	1.54E+04	2.56E+22	1.06E+15	3.37E-01	3.99E+11
雨水化学能	3.29E+19	8.89E+03	2.92E+23	1.21E+16	3.85E+00	4.55E+12
地球循环能	1.18E+18	2.90E+04	3.43E+22	1.42E+15	4.52E-01	5.35E+11

从表中可以看出，可更新能源由大到小依次是：雨水化学能 > 雨水势能 > 地球旋转能 > 太阳辐射能 > 风能，因此，取雨水雨水势能为可更新资源的总能值。

4. 2. 3 内蒙古自治区 2000~2009 年能值生态足迹计算与分析

根据上文基于能值生态足迹算法，内蒙古自治区 2000~2009 年基于能值生态足迹计算结果见表 9。

表 9 内蒙古自治区 2000~2009 年能值生态足迹

Table 9 The emergy ecological footprint in Inner Mongolia (2000~2009)

年份	耕地 (hm ²)	林地 (hm ²)	草地 (hm ²)	化石能源用地 (hm ²)	水域 (hm ²)	建筑用地 (hm ²)	人均能值生态足迹 (hm ² /cap)
2000	1.13E+00	2.71E-02	5.42E-01	1.49E+00	1.33E-02	4.23E-03	3.69E+00
2001	9.19E-01	2.37E-02	5.08E-01	2.28E+00	1.26E-02	2.41E-01	3.99E+00
2002	1.09E+00	5.52E-02	5.06E-01	2.21E+00	1.37E-02	4.76E-02	3.92E+00
2003	7.27E-01	1.29E-01	7.14E-01	1.37E+00	7.99E-02	3.10E-01	3.33E+00
2004	8.45E-01	2.61E-01	8.44E-01	1.65E+00	1.40E-02	3.69E-01	3.98E+00
2005	1.17E+00	2.94E-02	9.00E-01	2.49E+00	1.31E-02	5.53E-01	5.16E+00
2006	1.07E+00	2.85E-02	9.64E-01	2.88E+00	1.30E-02	6.84E-01	5.64E+00
2007	9.13E-01	3.85E-02	1.14E+00	3.81E+00	1.60E-02	1.04E+00	6.96E+00
2008	1.08E+00	3.21E-02	1.15E+00	4.07E+00	1.62E-02	1.05E+00	7.40E+00
2009	1.23E+00	9.29E-02	1.53E+00	4.28E+00	1.95E-02	1.29E+00	8.23E+00

为了更深入的了解能值生态足迹的变化状况，提取表中数据绘制内蒙古自治区 2000~2009 年人均能值生态足迹变化趋势图 9。

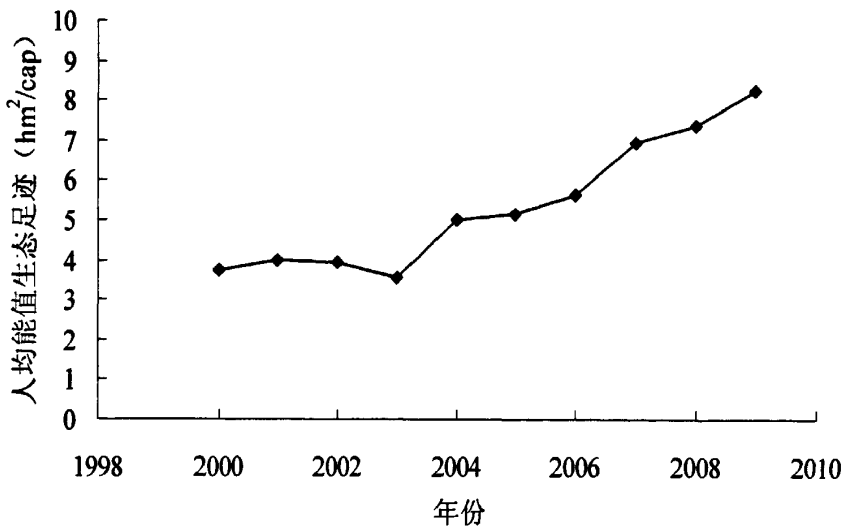


图 9 内蒙古自治区 2000~2009 年人均能值生态足迹变化趋势

Fig. 9 The Changing trends of emergy ecological footprint in Inner Mongolia (2000~2009)

从图表中可以看出：人均能值生态足迹除了在 2003 年有所下降外，其余年份均快速增长，2000~2009 年内蒙古自治区人均能值生态足迹总体呈上升趋势。

为了进一步了解各类生物生产性土地生态足迹的增加（或减小）对内蒙古自治区能值生态足迹年际变化的贡献情况，从而便于把握控制内蒙古自治区人均能值生态足迹增加（或减小）的重点，现将内蒙古自治区 2000~2009 年能值生态足迹的构成绘制成图，见图 10。从图中可以看出：草地、耕地和化石能源用地的生态足迹变化对内蒙古自治区人均生态足迹的贡献很大，建筑用地贡献次之，而水域和林地的生态足迹变化对人均生态足迹变化的影响较小。这个结果与传统模型计算的结果是一致的。

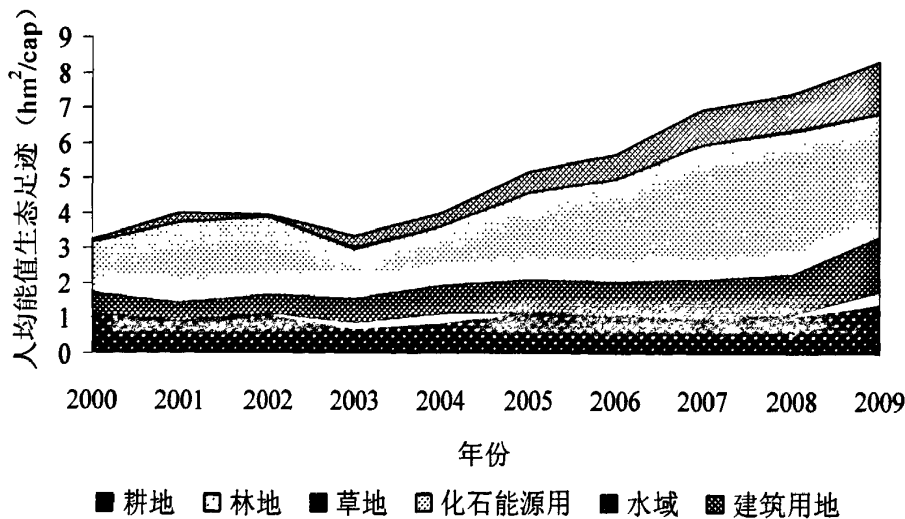


图 10 内蒙古自治区 2000~2009 年能值生态足迹的构成

Fig. 10 The composition of emergy ecological footprint in Inner Mongolia (2000~2009)

通过分析同一地类人均生态足迹的年际变化可知，耕地足迹以相对恒定的速度持续增长；通过对同一年份不同地类的需求量进行比较，对内蒙古自治区各类生物生产性土地按其生态足迹大小进行了排序：2000 年~2009 年间，化石燃料用地 > 耕地 > 草地 > 建筑用地 > 林地 > 水域。因此，控制内蒙古自治区生态足迹增加的难点和重点就在于控制化石燃料用地的需求量。

为了更清楚直观地表示生态足迹构成比例，现选择内蒙古自治区 2001 年、2004 年及 2009 年的生态足迹构成百分比图绘制成图 11。

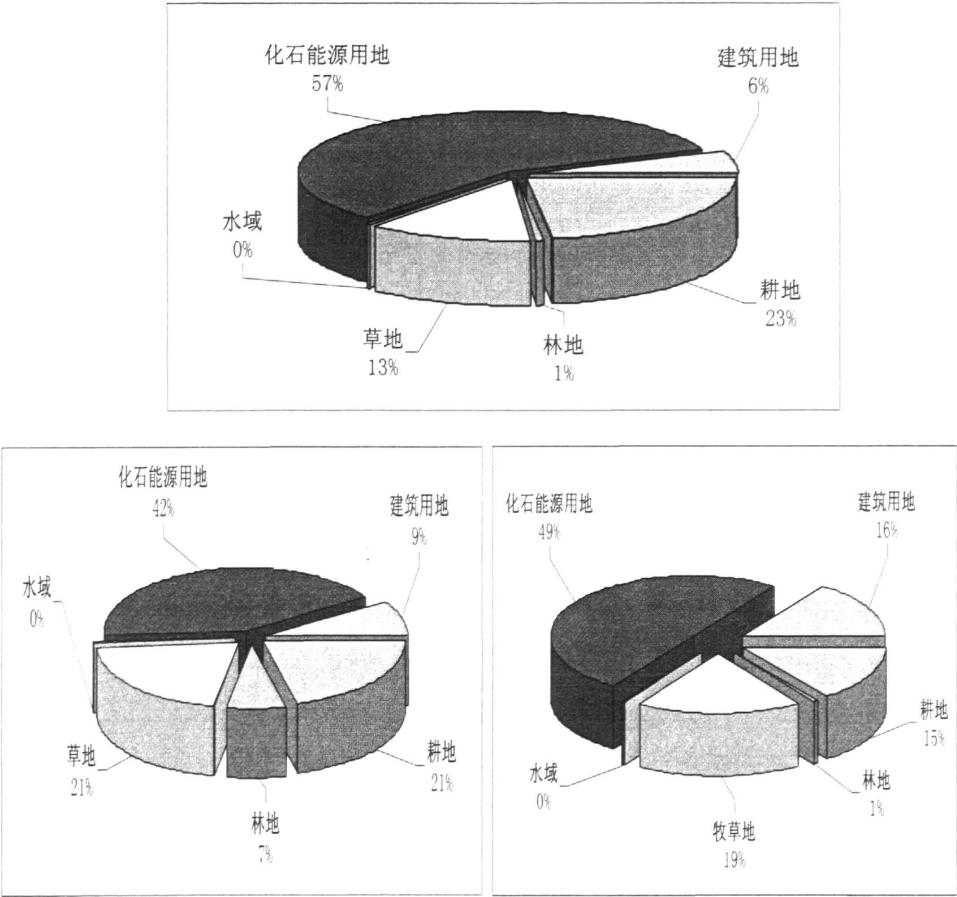


图 11 内蒙古自治区能值生态足迹构成百分比

Fig. 11 The Percentage composition of emery ecological footprint in Inner Mongolia

由图可以看出，化石能源用地所占的比重最大，这在一定程度上说明了对化石能源用地的使用处于过度状态，而水域及林地所占比重较小，这也说明内蒙古自治区生物生产性土地使用不协调。

为了更进一步清晰地表示出各生物生产性土地需求量的动态变化，将内蒙古自治区 2000~2009 年各生物生产性土地的人均生态足迹绘制成图 12。不但可以纵向分析其变化趋势来把握控制内蒙古自治区生态足迹增长的重点，还可以通过横向比较同一年份不同生物生产性土地的需求量，以便于更好地协调它们的使用。

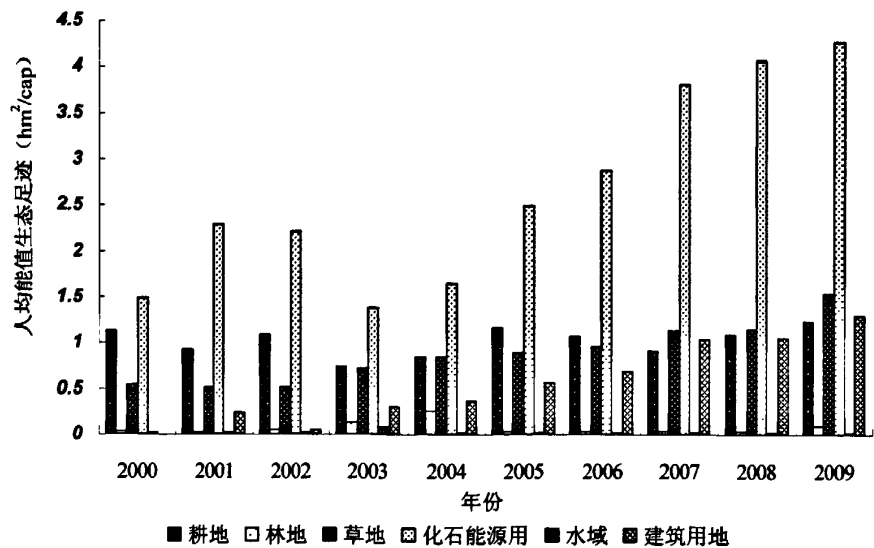


图 12 内蒙古自治区能值生态足迹构成百分比

Fig. 12 The Percentage composition of emergy ecological footprint in Inner Mongolia

由图 12 知，内蒙古自治区的生态足迹在 6 类生物生产性土地中，化石能源用地和耕地占很大比重，在 70% 以上。考虑到土地利用的均衡性和可持续性，应该适当减少对化石能源用地和耕地的使用，尤其应尽量控制化石能源用地，与此同时应该适当提高其它生物生产性土地的比重。

4. 2. 4 内蒙古自治区 2000~2009 年能值生态承载力计算与分析

如前所述，本模型中主要考虑 5 种可更新资源：太阳辐射能、风能、雨水势能、雨水化学能和地球旋转能，将各可更新资源的有效能乘以相应的太阳能值转换率，就得到其太阳能值。内蒙古自治区 2000~2009 年可更新资源的太阳能值的计算结果见表 10。

通过太阳能值的计算结果可以得出，在太阳辐射能、风能、雨水势能和雨水化学能中，最大项是雨水势能。

表 10 内蒙古自治区 2000~2009 年可更新资源的太阳能值

Table 10 Solar value of renewable resources in Inner Mongolia (2000~2009)

年份	太阳辐射能 (sej)	风能 (sej)	雨水势能 (sej)	雨水化学能 (sej)	地球循环能 (sej)
2000	6.29E+21	1.92E+20	2.26E+22	2.58E+23	3.43E+22
2001	6.29E+21	1.92E+20	2.60E+22	2.97E+23	3.43E+22
2002	6.29E+21	1.92E+20	2.41E+22	2.76E+23	3.43E+22
2003	6.29E+21	1.92E+20	4.06E+22	4.64E+23	3.43E+22
2004	6.29E+21	1.92E+20	3.25E+22	3.50E+23	3.43E+22
2005	6.29E+21	1.92E+20	2.70E+22	3.09E+23	3.43E+22
2006	6.29E+21	1.92E+20	2.88E+22	3.29E+23	3.43E+22
2007	6.29E+21	1.92E+20	2.45E+22	2.79E+23	3.43E+22
2008	6.29E+21	1.92E+20	3.15E+22	3.71E+23	3.43E+22
2009	6.29E+21	1.92E+20	2.56E+22	2.92E+23	3.43E+22

从表中可以看出：雨水势能及雨水化学能在各个年份存在较大差异，这是因为降水量的年际变化较大，而各年份的太阳辐射能、风能及地球旋转能均保持不变。内蒙古自治区 2000~2009 年基于能值生态承载力计算结果见表 11。提取表中数据，绘制内蒙古自治区 2000~2009 年人均能值生态承载力变化趋势图 13。

表 11 内蒙古自治区 2000~2009 年能值生态承载力
Table 10 The Energy Ecological Capacity in Inner Mongolia (2000~2009)

年份	太阳能值 (sej)	人均能值 (hm ² /cap)	人均能值生态承载力 (hm ² /cap)	区域能值生态承载力 (hm ²)
2000	2.96E+23	1.25E+16	3.68E+00	1.05E+08
2001	3.31E+23	1.39E+16	3.72E+00	1.06E+08
2002	3.10E+23	1.30E+16	3.65E+00	1.05E+08
2003	4.98E+23	2.09E+16	3.28E+00	1.10E+08
2004	3.85E+23	1.61E+16	3.71E+00	1.00E+08
2005	3.43E+23	1.29E+16	3.79E+00	1.06E+08
2006	3.64E+23	1.38E+16	3.94E+00	1.02E+08
2007	3.14E+23	1.16E+16	3.86E+00	1.05E+08
2008	3.80E+23	1.23E+16	3.75E+00	1.00E+08
2009	3.26E+23	1.21E+16	3.85E+00	1.03E+08

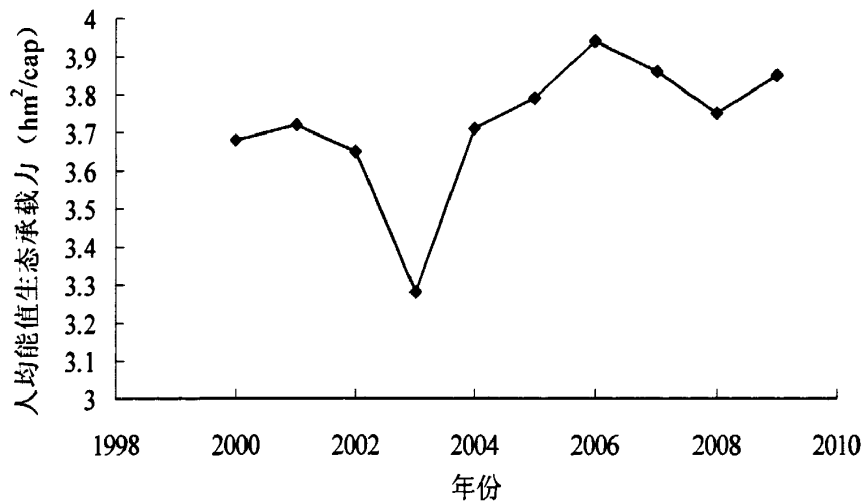


图 13 内蒙古自治区能值生态承载力变化趋势

Fig. 13The Changing trends of emergy ecological capacity in Inner Mongolia

从图表可以看出，在一定范围内内蒙古自治区人均生态承载力是呈波动变化的。2000~2003 年，内蒙古自治区人均生态承载力呈下降趋势，此期间只有 2001 年出现短暂的上升。2003~2009 年，其人均生态承载力虽然出现小浮上升下降但总体基本保持不变。这主要由于人类活动所产生的环境污染和生态破坏一定程度上导致区域生态承载力的下降，但是自然环境存在自我调节能力，在一定时间范围内可以恢复的，所以生态承载力是可以出现缓慢的

回升，加之近年来内蒙古自治区大力推展生态建设活动，在一定程度上避免了生态承载力急剧下降，提高了生态的自我调节能力。

为了直观的展现能值生态承载力、生态足迹及生态赤字/盈余的变化情况，绘制人均能值生态供需图 14。

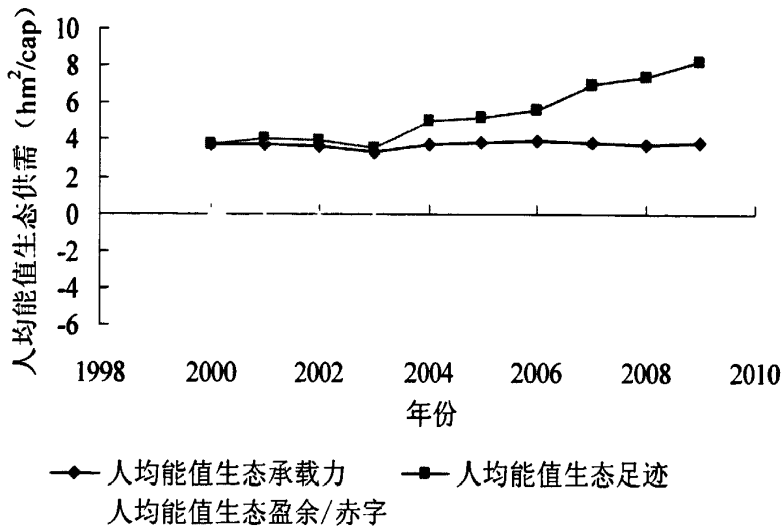


图 14 内蒙古自治区能值生态足迹、生态承载力和生态赤字比较

Fig. 14 The Comparison among ecological footprint, ecological capacity and ecological deficit

从图 14 可以看出内蒙古自治区生态足迹与生态赤字几乎是同步增长的，这是因为土地资源是有限的，尽管科学技术水平和管理水平不断进步，内蒙古自治区各生物生产性的产量因子都有所提高，但是由于土地沙化、耕地的减少、森林的采伐以及草地的退化等原因，造成内蒙古自治区总的生态承载力在一定程度上有所减少，加之生态足迹不断增长，对生态足迹的需求量也就会越大，所以生态赤字呈逐年增长趋势。

4. 3 基于能值生态足迹模型与传统模型计算结果比较分析

4. 3. 1 生态足迹计算结果比较

传统模型与基于能值生态足迹计算结果对比见图 15。从图 15 中可以看出：基于能值方法计算的生态足迹略低于传统模型生态足迹计算。主要原因是传统模型计算采用的是全球平均生产力、均衡因子、产量因子等相对指标计算的，而本研究在能值分析理论基础上，计算过程中采用的能值转换率、能值密度等更加稳定的参数，在较长时间序列的生态足迹计算上能更好地反映出区域生态经济系统的发展变化。

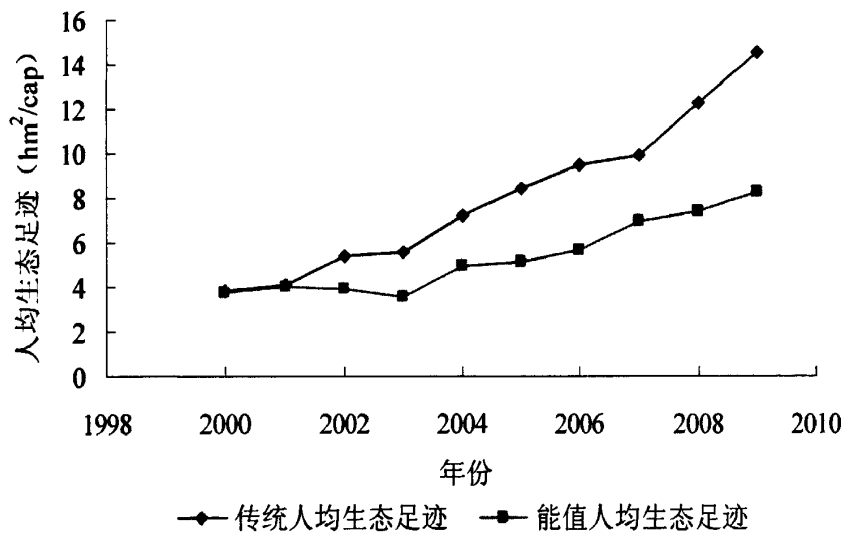


图 15 内蒙古自治区传统生态足迹和能值生态足迹比较

Fig. 15 The Comparison between traditional ecological footprint and emergy ecological footprint

此外，从图 15 可以清楚地看出，两条曲线趋势走向基本相似，但其中传统模型计算结果在 2003 年时生态足迹比 2002 年略低，而 2009 年时生态足迹比 2008 年高，这与本研究计算结果有所差异。我们分析，生态足迹呈现略微增长的趋势是较为合理的，说明基于能值方法结果在精确度方面比传统模型计算结果有一定的提高。

4. 3. 2 生态承载力计算结果比较

传统模型方法与基于能值方法的生态承载力计算结果对比见图 16。从图可以清楚地看出，两条曲线趋势走向大体相似，并且两种方法计算得到的承载力都在 3.0~4.0hm²/cap 之间。传统模型方法计算的生态承载力从 2000~2002 年呈下降趋势，而基于能值方法计算的生态承载力在这区间呈上升趋势。内蒙古自治区生态承载力的变化主要是由于经济发展对资源的急剧消耗造成 2003~2004 年生态承载力有所下降；但是随着科学技术的发展，以及国家对于资源保护利用管理的加强，单位面积产量有所上升，在 2003 后生态承载力又开始呈上升趋势。

通过分析可以得出：基于能值的生态承载力计算方法以粮食、蔬菜、肉、蛋等资源的实际产出为基础，能较敏感的反映出内蒙古自治区各个时期生态产出和资源利用率的变化，计算结果更为合理，而传统模型方法只计算实际土地面积的大小，忽略忽略了土地生产率提高等事实，因而计算的生态承载力存在一定的不合理性。

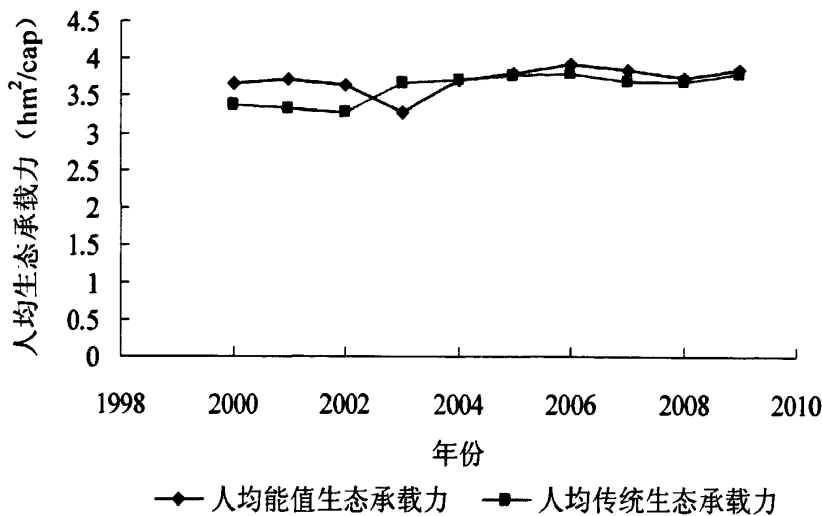


图 16 内蒙古自治区传统生态承载力和能值生态承载力比较

Fig. 16 The Comparison between traditional ecological capacity and energy ecological capacity

4. 3. 3 生态赤字/盈余计算结果比较

根据前文相关计算结果，内蒙古自治区 2000~2009 年传统模型方法与基于能值方法的生态赤字/盈余结果对比见图 16。

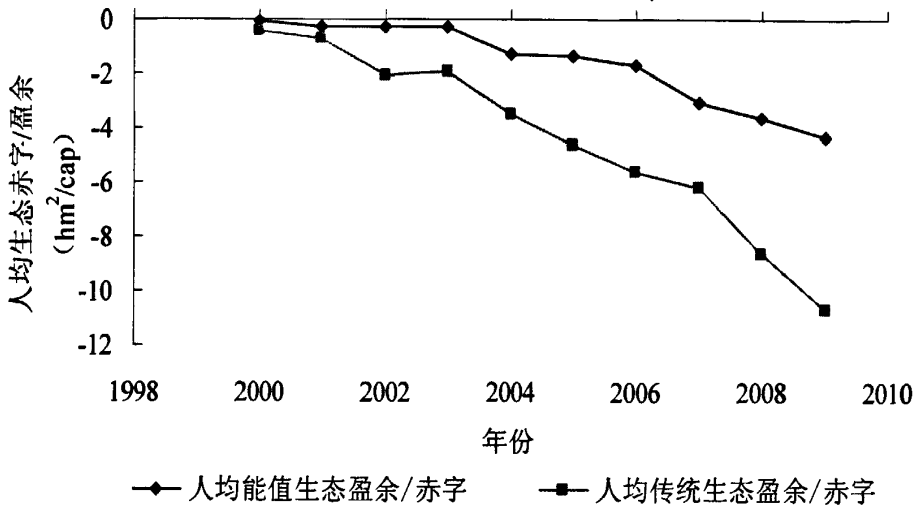


图 17 内蒙古自治区传统生态赤字和能值生态赤字比较

Fig. 17 The Comparison between traditional ecological deficit and energy ecological deficit

从图 17 中可以清楚看出：两条曲线趋势走向大体相似，但是基于能值方法要低于传统模型方法计算的生态赤字，更好地反映了土地利用情况和实际生产能力，进而能有效减小生态赤字扩大化现象。传统模型方法结果没有考虑到土地利用方式多样化的特征，可能会低估实

际的生态承载力，所以会造成计算的生态赤字普遍偏大的系统误差，造成评价结果的不合理。

4. 4 生态安全动态分析与评价

4. 4. 1 生态安全动态分析

生态安全动态分析方法有很多种，本研究主要采用生态压力指数进行分析。生态压力指数也被称为生态足迹强度指数^[73]，是指一个区域单位生态承载面积上的生态足迹。需注意的是生态压力指数中的生态足迹是指本地的生态足迹，这样才能使生态足迹的作用对象与区域的生态承载面积相一致。生态压力指数的计算公式如下：

EFI = EF_d / EC

式中，EFI—生态压力指数；

EF_d—本地生态足迹；

EC—生态承载力；

因为EF_d>0 且 EC>0， 所以当 0<EFI<1 时，EF_d<EC，生态资源供给大于需求，区域处于生态安全状态；当 EFI=1 时，EF_d=EC，生态资源供需达到平衡，区域处于生态安全临界状态；当 EFI>1 时，EF_d>EC，单位生态承载面积所要承受的压力大于它能够提供的支撑能力，供需出现不平衡，生态安全受到威胁，且 EFI 与 1 相差越大，生态不安全程度就越大。

利用内蒙古自治区区域生态承载力和本地生态足迹的计算结果，可以计算出内蒙古自治区 2001~2010 年的生态压力指数，见表 12。

表 12 内蒙古自治区 2000-2009 年的生态压力指数

Table 12 The Ecological pressure index in Inner Mongolia (2000-2009)

年份	生态压力指数	年份	生态压力指数
2000	1.02	2005	1.36
2001	1.07	2006	1.43
2002	1.07	2007	1.80
2003	1.08	2008	1.97
2004	1.34	2009	2.14

从表 12 可以得到：内蒙古自治区 2004~2009 年生态足迹强度不断增大，生态环境所承受的压力也不断增加，生态安全受到了威胁。生态压力指数由 2004 年的 1.34 增长到 2009 年的 2.14，增长速度很快。

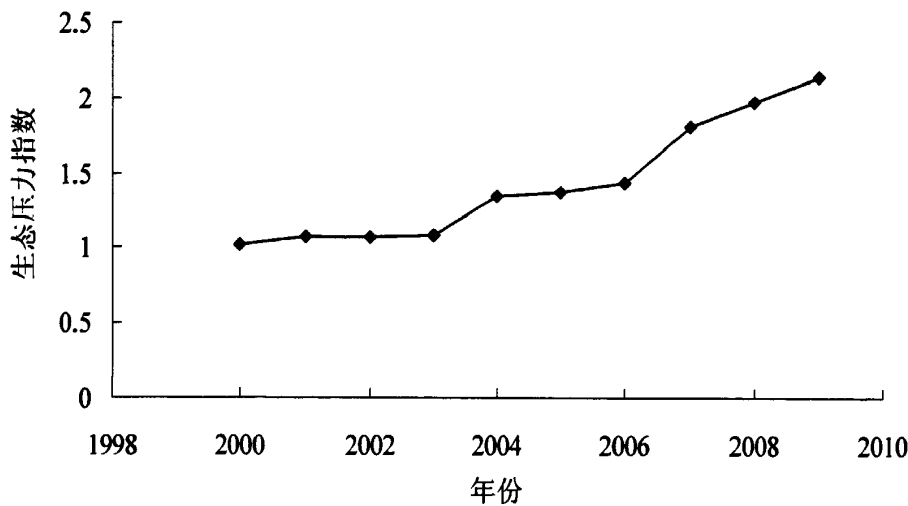


图 18 内蒙古自治区生态 2000~2009 年生态压力指数变化趋势

Fig. 18 The changing trends of the ecological pressure index in Inner Mongolia (2000~2009)

如图所示，内蒙古自治区生态环境所承受的压力除了在 2002 年及 2003 年稍有所缓解外，基本保持较快的增长速度，生态压力强度逐年在不断地增加。

4. 4. 2 生态安全现状评价

生态足迹法从具体的生物物理量角度研究自然资本消费的空间，将一个地区或者国家的资源、能源消费同自己所拥有的生态能力进行比较，进而判断一个国家或地区的发展是否处于生态承载力的范围内，是否具有安全性。生态足迹法具有形象、综合、简明和易于计算的特点，但生态赤字只是一个绝对数值，不能很好地反映其与区域资源禀赋条件的关系。考虑到单位承载面积上的生态足迹能更好地反映生态环境所承受的压力，本研究采用生态压力指数（EFI）对区域生态安全进行测度。

首先对生态安全等级进行划分，由于生态压力越大，生态安全程度越低，但其阈值的确定具有一定的难度。在此引用“生态协调系数”^[74]，其计算公式如下：

$$DS = (efd + ec) / \sqrt{efd^2 + ec^2}$$

式中，DS—区域人均生态协调系数；

efd—人均本地生态足迹；

c—人均生态承载力；

因为 $efd > 0$ ， $ec > 0$ ，所以 $1 < DS \leq 1.414$ 。当 DS 越接近 1 时，协调性越差；当 DS 越接近 1.414 时，协调性越好；当 $DS = 1.414$ 时，区域生态需求和供给平衡，处于最佳协调状态。

生态压力指数阈值可以根据生态协调系数和区域的生态安全状况关系来确定，二者关系如下：

$$DS = (ef_d + ec) / \sqrt{ef_d^2 + ec^2} = \frac{ef_d}{ec} + 1 / \sqrt{\left(\frac{ef_d}{ec}\right)^2 + 1} = (EFI + 1) / \sqrt{EFI^2 + 1}$$

式中，DS—区域人均生态协调系数；

ef_d—人均本地生态足迹；

ec—人均生态承载力；

EFI—生态压力指数

根据关系式，通过计算所得数据绘制生态协调系数与生态压力指数关系图 19。

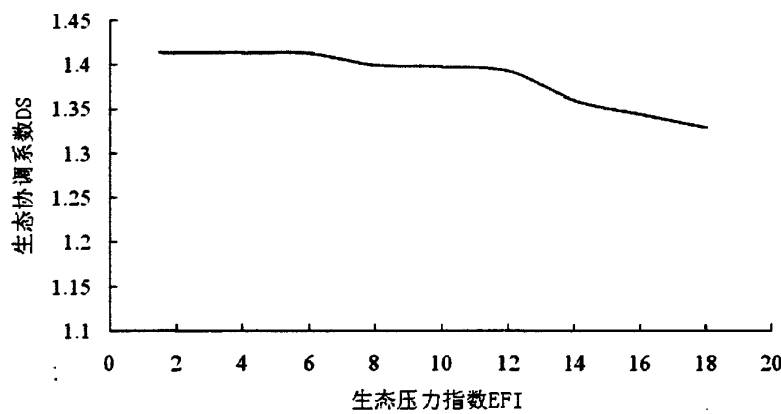


图 19 生态协调系数与生态压力指数的关系图

Fig. 19 Ecological coordination factor and ecological pressure index diagram

从图中可以看出：生态协调系数随着生态压力指数的不断增加而逐渐降低，趋势非常明显。当生态压力较小时，生态协调性较高，生态环境处于安全状态，随着生态压力的增加，生态协调性明显下降，生态安全程度随之降低；当生态压力增加到一定程度时，生态环境趋于不协调、不安全。简而言之，生态协调系数由大幅下降到趋缓的过程反映了生态环境由较安全进入不安全的状态。因此，利用生态协调系数趋缓变化的临界值确定生态安全等级^[74]，见表 13。

表 13 生态安全等级的划分

Table 13 The classification of ecological security

生态安全等级		生态压力指数范围值
1	安全	0~1.0
2	较安全	1.0~10.0
3	轻度不安全	10.0~18.0
4	中度不安全	18.0~24.0

5	重度不安全	24.0~30.0
6	极度不安全	30.0 以上

根据内蒙古自治区 2001~2009 年生态压力指数的计算和确定的生态安全等级，现将内蒙古自治区 2001~2009 年的生态安全状况进行评价，评价结果见表 14。

表 14 内蒙古自治区 2000~2009 年的生态安全状况

Table 14 The condition of ecological security in Inner Mongolia (2000~2009)

年份	生态安全等级	生态安全评价	年份	生态安全等级	生态安全评价
2000	2	较安全	2005	2	较安全
2001	2	较安全	2006	2	较安全
2002	2	较安全	2007	2	较安全
2003	2	较安全	2008	2	较安全
2004	2	较安全	2009	2	较安全

由表 14 可以得出：2000~2009 年，内蒙古自治区生态环境处于较安全状态。但结合生态压力指数变化的趋势来看，生态环境将很快进入不安全状态。

第五章 内蒙古自治区生态安全预测

动态预测分析是研究区域生态安全的一个重要方法，可以弥补静态直观性的缺陷。本章将依据前章数据建立灰色预测模型 GM(1, 1)，对内蒙古自治区 2010~2019 年的能值生态承载力及能值生态足迹进行预测分析，从而对内蒙古自治区未来的生态安全发展状况作以动态预测与评价，并对不持续、不安全状况进行预警，提出相关合理生态安全维护可行性建议及对策。

5. 1 能值生态足迹预测

大量的实践研究表明，选取适当的数据建模可使预测精度进一步提高，并且选取的数据越新，预测结果就越有效。因此，本文选取内蒙古自治区 2000~2009 年人均能治生态足迹的计算结果作为预测的基础数据建立 GM(1, 1)模型。

表 15 灰色预测模型基础数据
Table 15 Grey prediction model based on data

n	1	2	3	4	5
$x^{(0)}(n)$	3.69	3.99	3.92	3.33	3.98
n	6	7	8	9	10
$x^{(0)}(n)$	5.16	5.64	6.96	7.40	8.23

能值生态足迹模型 GM(1, 1)模型:

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5), x^{(0)}(6), x^{(0)}(7), x^{(0)}(8), x^{(0)}(9), x^{(0)}(10))$$

$$= (3.69, 3.99, 3.92, 3.33, 3.98, 5.16, 5.64, 6.96, 7.40, 8.23)$$

其 1-AGO 累加生成数列为

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), x^{(1)}(4), x^{(1)}(5), x^{(1)}(6), x^{(1)}(7), x^{(1)}(8), x^{(1)}(9), x^{(1)}(10))$$

$$= (3.69, 7.68, 11.60, 14.93, 18.91, 24.07, 29.71, 36.67, 44.07, 52.30)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(9) + x^{(1)}(10)) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.69 & 1 \\ -9.64 & 1 \\ -13.27 & 1 \\ -16.92 & 1 \\ -21.49 & 1 \\ -26.89 & 1 \\ -33.19 & 1 \\ -40.37 & 1 \\ -48.19 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5), x^{(0)}(6), x^{(0)}(7), x^{(0)}(8), x^{(0)}(9), x^{(0)}(10)]^T$$
$$= [3.99 \ 3.92 \ 3.33 \ 3.98 \ 5.16 \ 5.64 \ 6.96 \ 7.40 \ 8.23]^T$$

参数列:

$$\hat{a} = (B^TB)^{-1}B^TY = \begin{bmatrix} -0.12 \\ 2.57 \end{bmatrix}$$

从而模型:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} - 0.12x^{(1)} = 2.57$$
$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ak} + \frac{u}{a} = 25.11e^{-0.12k} - 21.42$$
$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = 25.11e^{-0.12k}(1 - e^{-0.12k})$$

得到能值生态足迹 GM(1, 1)模型:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(0)}(1) = 3.69 & k = 0 \\ \hat{x}^{(0)}(k+1) = 25.11e^{-0.12k}(1 - e^{-0.12k}) & k = 1, 2, \dots \end{cases}$$

表 16 生成模型模拟数据与实际计算数据比较

Table 16 Generated simulated data compared with the actual calculated data

生成模型模拟数据	实际计算数据	相对误差
$\bar{x}^{(0)}(2)=3.19$	$x^{(0)}(2)=3.99$	-0.2508
$\bar{x}^{(0)}(3)=3.59$	$x^{(0)}(3)=3.92$	-0.0919
$\bar{x}^{(0)}(4)=4.04$	$x^{(0)}(4)=3.33$	0.1757
$\bar{x}^{(0)}(5)=4.55$	$x^{(0)}(5)=3.98$	0.1253
$\bar{x}^{(0)}(6)=5.12$	$x^{(0)}(6)=5.16$	-0.0078
$\bar{x}^{(0)}(7)=5.76$	$x^{(0)}(7)=5.64$	0.0208
$\bar{x}^{(0)}(8)=6.48$	$x^{(0)}(8)=6.96$	-0.0741
$\bar{x}^{(0)}(9)=7.30$	$x^{(0)}(9)=7.40$	-0.0137
$\bar{x}^{(0)}(10)=8.21$	$x^{(0)}(10)=8.23$	-0.0024

模型的精度检验:

残差序列:

$$\varepsilon^{(0)} = (\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4), \varepsilon(5), \varepsilon(6), \varepsilon(7), \varepsilon(8), \varepsilon(9), \varepsilon(10))$$
$$= (0, -0.8, -0.33, 0.71, 0.57, -0.04, 0.12, -0.48, -0.1, -0.02)$$

残差的均值和方差:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 \varepsilon(k) = -0.041$$
$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 (\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon})^2 = 0.202$$

因此， $S_2=0.449$ 。

$\bar{x}^{(0)}$ 的均值、方差

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} x^{(0)}(k) = 5.23$$

$$S_2 = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2 = 2.767$$

因此 $S_1=1.663$ 。

$C= S_2/S_1=0.270<0.35$

小误差概率： $0.6745S_1=1.122$

显然 $| \varepsilon(k) - \bar{\varepsilon} | < 0.6475 S_1 < 1.122 \quad k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

所以 $p=P\{ \varepsilon(k) - \bar{\varepsilon} | < 0.6475 S_1 \} = 1 > 0.95$

本模型的模拟精度为一级。故可用此模型进行预测，根据模型对内蒙古自治区 2010~2019 年的人均能值生态足迹进行相关预测计算，得到以下结果，见表 16。

表 17 内蒙古自治区 2010~2019 年能值生态足迹预测结果

Table 17 The result of prediction of emergy ecological footprint in Inner Mongolia (2010~2019)

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
人均能值 生态足迹 (hm ² /cap)	9.24	10.40	11.71	13.18	14.83	16.70	18.79	21.15	23.80	26.79

由表 16 可知，2010~2019 年内蒙古自治区人均能值生态足迹增幅明显。因此，这必将导致区域人均生态赤字的增大，使整个区域的发展呈不可持续状态，从而更进一步威胁区域的生态安全。

5. 2 能值生态承载力预测

选取内蒙古自治区 2000~2009 年人均生态承载力的计算结果作为预测的基础数据建立 GM(1, 1)模型。

表 18 灰色预测模型基础数据

Tab 18Grey prediction model based on data

n	1	2	3	4	5
$y^{(0)}(n)$	3.68	3.72	3.65	3.28	3.71
n	6	7	8	9	10
$y^{(0)}(n)$	3.79	3.94	3.86	3.75	3.85

能值生态承载力模型 GM(1, 1)模型：

$y^{(0)} = (y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), y^{(0)}(4), y^{(0)}(5), y^{(0)}(6), y^{(0)}(7), y^{(0)}(8), y^{(0)}(9), y^{(0)}(10))$

$$= (3.68, 3.72, 3.65, 3.28, 3.71, 3.79, 3.94, 3.86, 3.75, 3.85)$$

其 1-AGO 累加生成数列为

$$\begin{aligned} y^{(1)} &= y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), y^{(0)}(4), y^{(0)}(5), y^{(0)}(6), y^{(0)}(7), y^{(0)}(8), y^{(0)}(9), y^{(0)}(10) \\ &= (3.68, 7.40, 11.05, 14.33, 18.04, 21.83, 25.77, 29.63, 33.38, 37.23) \end{aligned}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(y^{(1)}(1) + y^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(y^{(1)}(2) + y^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(y^{(1)}(9) + y^{(1)}(10)) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.54 & 1 \\ -9.23 & 1 \\ -12.69 & 1 \\ -16.19 & 1 \\ -19.94 & 1 \\ -23.80 & 1 \\ -27.70 & 1 \\ -31.51 & 1 \\ -35.31 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} Y &= [y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), y^{(0)}(4), y^{(0)}(5), y^{(0)}(6), y^{(0)}(7), y^{(0)}(8), y^{(0)}(9), y^{(0)}(10)]^T \\ &= [3.72, 3.65, 3.28, 3.71, 3.79, 3.94, 3.86, 3.75, 3.85]^T \end{aligned}$$

参数列:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} -0.01 \\ 3.53 \end{bmatrix}$$

从而模型:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} - 0.01x^{(1)} = 3.53$$

$$\hat{y}^{(1)}(k-1) = (y^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ak} - \frac{u}{a} = 356.68e^{-0.01k} - 353$$

$$\hat{y}^{(0)}(k+1) = \hat{y}^{(1)}(k+1) - \hat{y}^{(1)}(k) = 356.68e^{-0.01k}(1 - e^{-0.01k})$$

得到能值生态承载力 GM(1, 1)模型:

$$\begin{cases} \hat{y}^{(0)}(1) = 3.68 & k = 0 \\ \hat{y}^{(0)}(k-1) = 356.68e^{-0.01k}(1 - e^{-0.01k}) & k = 1, 2, \dots \end{cases}$$

表 19 生成模型模拟数据与实际计算数据比较

Table 19 Generated simulated data compared with the actual calculated data

生成模型模拟数据	实际实际计算数据	相对误差
$\bar{y}^{(0)}(2)=3.68$	$y^{(0)}(2)=3.72$	-0.0109
$\bar{y}^{(0)}(3)=3.62$	$y^{(0)}(3)=3.65$	-0.0082
$\bar{y}^{(0)}(4)=3.25$	$y^{(0)}(4)=3.28$	-0.0091
$\bar{y}^{(0)}(5)=3.70$	$y^{(0)}(5)=3.71$	-0.0027
$\bar{y}^{(0)}(6)=3.73$	$y^{(0)}(6)=3.79$	-0.0158
$\bar{y}^{(0)}(7)=3.86$	$y^{(0)}(7)=3.94$	-0.0203
$\bar{y}^{(0)}(8)=3.80$	$y^{(0)}(8)=3.86$	-0.0155
$\bar{y}^{(0)}(9)=3.84$	$y^{(0)}(9)=3.75$	0.0240
$\bar{y}^{(0)}(10)=3.88$	$y^{(0)}(10)=3.85$	0.0078

模型的精度检验：

残差序列：

$\varepsilon^{(0)}=(\varepsilon(1),\varepsilon(2),\varepsilon(3),\varepsilon(4),\varepsilon(5),\varepsilon(6),\varepsilon(7),\varepsilon(8),\varepsilon(9),\varepsilon(10))$

$= (0, -0.14, -0.03, -0.03, -0.01, -0.06, -0.08, -0.06, 0.09, 0.03)$

残差的均值和方差：

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{9} \sum_{k=2}^{10} \varepsilon(k) = -0.021 \qquad S_2^2 = \frac{1}{9} \sum_{k=2}^{10} (\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon})^2 = 0.0029$$

因此， $S_2=0.054$ 。

$\bar{y}^{(0)}$ 的均值、方差

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} y^{(0)}(k) = 3.72 \qquad S_1^2 = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} (y^{(0)}(k) - \bar{y})^2 = 0.029$$

因此 $S_1=0.170$ 。

$C= S_2/S_1=0.318<0.35$

小误差概率： $0.6745S_1=0.1149$

显然 $|\varepsilon(k)- \bar{\varepsilon}|<0.6475 S_1<0.1149 \qquad k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

所以 $p=P\{\varepsilon(k)- \bar{\varepsilon}|<0.6475 S_1\} =1>0.95$

本模型的模拟精度为一级。故可用此模型进行预测，根据模型对内蒙古自治区 2010~2019 年的人均能值生态承载力进行相关预测计算，得到以下结果，见表 20。

表 20 内蒙古自治区 2010~2019 年能值生态承载力预测结果

Table 20 The result of prediction of emergy ecological capacity in Inner Mongolia (2010~2019)

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
人均能值										
生态承载力 (hm ² /cap)	3.92	3.95	3.99	4.03	4.07	4.02	3.96	3.93	3.87	3.76

由表 20 可知, 2010~2014 年期间内蒙古自治区人均生态承载力虽有小幅增长的趋势, 这在一定程度上体现了国家近年来开展的人与自然和谐发展的成效。但 2015~2019 年的人均生态承载力呈下降趋势, 在生态足迹逐年增长的情况下, 生态赤字将会随之提升, 生态环境恶化, 区域将处于不可持续发展状态。

5. 3 生态安全预测分析

根据 2010~2019 年能值生态承载力及生态足迹的预测结果, 可以根据相关公式计算出内蒙古自治区 2010~2019 年的人均生态赤字/盈余, 计算结果见表 21。

表 21 内蒙古自治区 2010~2019 年人均生态赤字/盈余

Table 21 The Per capita ecological deficit / surplus in Inner Mongolia (2010~2019)

年份	生态赤字/盈余 (hm ² /cap)	年份	生态赤字/盈余 (hm ² /cap)
2010	-5.32	2015	-12.68
2011	-6.45	2016	-14.83
2012	-7.72	2017	-17.22
2013	-9.15	2018	-19.93
2014	-10.76	2019	-23.03

从表中数据可以看出, 2010~2019 年内蒙古自治区生态赤字总体趋势呈增长趋势, 由此可得出内蒙古自治区在未来的发展过程中, 由于生态足迹的不断增长, 人均需求逐年增加, 而自然的供给却在减少, 到 2019 年人均生态赤字达到-23.03hm²/cap。人类需求已远远超过了自然的负荷能力, 生态环境状况恶化。

根据前章表述, 生态压力指数能根据区域单位面积上的生态足迹的大小反映区域生态环境是否处于可持续发展状态, 因此采用生态压力指数对区域安全进行测度评价。根据前文内蒙古自治区 2010~2019 年的区域生态承载力和生态足迹的预测结果, 可以计算出内蒙古自治区 2010~2019 年的生态压力指数, 见表 22。

表 22 内蒙古自治区 2010~2019 年的生态压力指数

Table 22 The Ecological pressure index in Inner Mongolia (2010~2019)

年份	生态压力指数	年份	生态压力指数
2010	2.36	2015	4.15
2011	2.63	2016	4.74
2012	2.93	2017	5.38
2013	3.27	2018	6.15
2014	3.64	2019	7.13

从表 22 可以得到: 内蒙古自治区 2010~2019 年生态足迹强度依然不断增大, 生态环

境所承受的压力也随之不断增加。生态压力指数由 2010 年的 2.36 增长到 2019 年的 7.13。

根据前文已经确立的相关生态安全分级标准，对内蒙古自治区 2011~2019 年的生态环境的安全性进行评价，其结果见表 23。

表 23 内蒙古自治区 2010~2019 年生态安全预测状况

Table 23 The condition of ecological security in Inner Mongolia (2010~2019)

年份	生态安全等级	生态安全评价	年份	生态安全等级	生态安全评价
2010	2	较安全	2015	2	较安全
2011	2	较安全	2016	2	较安全
2012	2	较安全	2017	2	较安全
2013	2	较安全	2018	2	较安全
2014	2	较安全	2019	2	较安全

由表 23 可以看出，2010~2019 年，内蒙古自治区生态安全等级处在较安全状态，但结合表 22 的生态压力指数可以得出生态安全状态将会呈下降趋势，这也必将会造成生态环境的急剧恶化。

5. 4 生态安全预警与应对措施

5. 4. 1 生态安全预警

根据参考生态安全分级的标准，可以将生态安全评价等级与生态安全预警等级建立对应关系，预警等级可划分为 0~5 个级别，即无警—生态安全，轻警—生态较安全，中警—轻度不安全，重警—中度不安全，巨警—重度不安全，酷警—极度不安全，因此可以得到与区域生态安全预警等级相对应的区域生态压力指数的范围值^[27]，其结果见表 21。

表 24 生态安全预警级别

Table 24 The level of ecological security warning

预警级别	预警程度	生态压力指数
0	无警	0~1.0
1	轻警	1.0~5.0.0
2	中警	5.0~10.0
3	重警	10.0~15.0
4	巨警	15.0~20.0
5	酷警	20.0 及以上

表 25 内蒙古自治区 2010~2019 年生态安全预警结果

Table 25 The results of ecological security warning in Inner Mongolia (2010~2019)

年份	预警级别	预警状态	年份	预警级别	预警状态
2010	1	轻警	2015	1	轻警
2011	1	轻警	2016	1	轻警
2012	1	轻警	2017	2	中警
2013	1	轻警	2018	2	中警
2014	1	轻警	2019	2	中警

根据内蒙古自治区 2010~2019 年生态压力指数的相关数据, 并且结合以上预警级别标准, 可以得到各年份的生态安全预警结果, 见表 25。

由表 25 可以得出, 内蒙古自治区 2010~2019 年的生态安全预警级别有所升高, 预计 2017 年将达到 2 级(中警), 预测预警级别会随时间的推移较快上升。因此, 迫切需要采取措施遏制日益增长的生态压力, 不然内蒙古自治区区域生态安全将会呈现出严重的不安全状态, 严重威胁生态环境的可持续发展。

5. 4. 2 应对措施

基于上文对内蒙古自治区生态安全和生态承载力的研究, 针对内蒙古生态环境现状, 提出保护生态环境、提高生态安全性的应对措施:

(1) 合理利用现有自然资源, 提高资源利用率和综合利用水平。对现有天然草地进行改良, 提高草地质量和载畜量。积极转变畜牧业生产方式, 大力推行休牧、轮牧、禁牧, 发展农区畜牧业和舍饲圈养, 既可以保证畜产品的稳定增长, 又可以有力地促进草原生态的恢复。

(2) 大力实施退耕还林、退牧还草、“三北”防护林、天然林保护、京津风沙源治理、水土保持等生态重点建设工程, 不断改善生态环境, 避免生态环境继续恶化, 并逐步使其向良性循环的方向发展。

(3) 合理编制土地利用规划, 使土地的利用以及资源管理模式朝着数量、质量和生态保护这三个目标发展。建立土地集约利用机制, 提高土地利用效率。加强科技创新, 减少土地的粗放利用和闲置, 提高利用水平。同时, 要调整产业结构, 积极提高草地、水域生产面积的比例, 发展多种生产模式, 大力发展林业产业, 走产业化发展之路, 变资源优势为经济优势。加强天然珍稀荒漠树种的采种工作, 开展荒漠树种的繁育工作。

(4) 严格保护矿产资源, 执行环保准入条件。禁止对生态环境具有不可恢复的破坏性影响的矿产资源开采活动, 禁止在自然保护区以及地质灾害高发区开采矿产资源。积极建立生态环境恢复治理和土地复垦的多元化投资机制。建立健全资源有偿使用制度和生态环境补偿机制, 完善生态环境保护考核制度, 强化生态环境保护责任追究, 建立健全生态环境保护与建设的长效机制。

(5) 加强生态保护宣传工作, 倡导节约型生产和消费观念。增强公众参与意识, 建立多元社区共管机制。与此同时, 由于生态足迹和生态承载力都和人口有着十分密切的关系。人口越多, 消费的就越多, 进而造成生态赤字。因此, 应大力控制人口数量, 提高人口素质, 缓解生态承载压力。

第六章 结论与展望

6.1 结论

针对内蒙古自治区生态环境特点,系统阐述了生态足迹、能值理论的国内外发展现状。在比较分析生态足迹及生态承载力概念和评价方法的基础上,采用生态压力指数、灰色预测等综合评价的方法对区域进行生态安全评价、预测及预警研究。通过系统研究得到以下结论:

(1) 运用传统生态足迹模型及改进的能值生态足迹模型计算了内蒙古自治区 2000~2009 年的生态足迹及生态承载力,对两种不同计算方式的结果作了对比,并以此验证能值生态足迹模型的可行性及可信度。2000~2009 年的传统及能值生态足迹模型计算的结果均表明:内蒙古自治区生态承载力在此时间序列中呈波动变化,而生态足迹却呈现出明显的增长趋势;化石燃料用地、耕地及草地的生态足迹对内蒙古自治区人均生态承载力的影响非常明显,其中影响最大的是化石燃料用地的生态足迹;各年份生态足迹均值后生态足迹由大到小依次为:化石燃料用地>耕地>草地>林地>建筑用地>水域。

(2) 利用传统及能值生态足迹模型计算出生态赤字/盈余,并由此得出生态压力指数,为避免构建指标体系掺杂主观及标准不统一的情况,均采用生态足迹及生态承载力的相关生态安全指标,对内蒙古自治区 2000~2009 年的生态安全现状进行综合分析及评价。结果显示:本区生态承载力波动式变化;区域生态足迹、区域生态赤字、生态压力指数均呈明显增长趋势。根据生态安全综合评价可得出:2000~2009 年内蒙古自治区生态环境处于较安全状态,但其相关指数随年份有明显的增加趋势。

(3) 利用灰色预测模型预测了 2010~2019 年内蒙古自治区生态足迹及生态承载力,并由此计算生态赤字及生态压力指数,对未来的生态安全趋势做出了预测分析及预警评定。结果显示,2010~2019 年内蒙古自治区生态承载力有下降的趋势,而区域人均生态足迹明显增大;区域生态赤字及生态压力指数增大。生态安全评价结果表明,2010~2019 年,内蒙古自治区生态安全等级处在较安全状态,但结合生态压力指数不难得出生态安全状态将会呈下降趋势,这也将会造成生态环境的恶化。2010~2019 年的生态安全预警级别较前十年有所升高,预计 2017 年将达到 2 级(中警),预警级别会随着时间的推移逐年较快上升。

(4) 由于人口数量增加、城镇化及资源开发利用不合理等因素影响,内蒙古自治区面临资源、环境及发展等方面的诸多挑战。要改善其现在乃至未来的不安全发展状态,今后应当坚定不移地实施以生态保护与发展并重的政策方针,加大科研力度并积极采用先进的技术,合理适度开发各种土地资源,努力提高资源利用效率,大力推行可持续循环发展模式和生态产业链条,逐步建立资源节约型的社会生产及消费体系,促使该区域的经济社会与生态环境全面协调发展。

6. 2 创新点

(1) 视角方面。本研究将能值理论与生态足迹结合运用对内蒙古自治区生态承载力和生态安全进行研究, 基于能值理论进行生态足迹计算, 研究评价生态安全, 是对生态足迹模型不足的弥补, 是对生态安全评价方法的有效尝试, 丰富了生态安全评价研究的方法。

(2) 方法方面。首先, 采用长时间序列的生态足迹研究, 克服了传统生态足迹法静态的缺陷, 同时, 采用基于生态足迹的生态安全指标进行生态安全动态测度, 避免了建立指标体系所带来的主观因素以及缺乏统一标准的问题。其次, 在能值-生态足迹模型研究的基础上运用灰色预测法进一步对内蒙古自治区的生态承载力和生态足迹进行多角度定量预测, 揭示该区生态安全的未来状况与变化趋势, 使预测结果更加可信。

(3) 体系方面。首先, 目前国内外对于生态安全的研究方法以定性的理论分析为主, 研究基于“能值-生态足迹”模型计算得到的生态足迹和生态承载力, 从而能够定量评价区域的可持续发展状况。其次, 基于生态承载力和生态安全评价进一步对生态安全预测与预警进行了研究, 不仅顺应了生态足迹研究的发展趋势, 而且扩展了生态安全研究的内容, 拓宽了生态安全研究的视角。

6. 3 研究的局限性

由于生态足迹模型提出的时间比较短, 本研究理论水平有限, 对某些问题的思考不够周到, 主要存在以下不足之处:

(1) 由于内蒙古自治区各地市的统计年鉴较难收集完整, 并且计算工作量也比较大, 本研究只对内蒙古自治区 2000~2009 年整体的生态经济状况进行了计算分析, 因此, 没有体现出各地市实际生态安全状况的差异。

(2) 本文分析了内蒙古自治区能值生态足迹变化, 其结果与传统生态足迹差别较大, 其中主要原因是与能值转化率的确定有着重要关系。今后的研究, 应对能值转化率进行必要的修正。

(3) 由于缺乏部分基础数据, 本研究的计算项目中没有包括矿产资源项目, 随着相关数据的不断收集, 还有待进一步完善。

(4) 在生态安全评价和预测方面, 没有充分考虑到科技进步和政府政策的改变等因素, 这也是今后需要进一步探讨的问题, 使预测结果更加科学、合理。

(5) 本研究中生物多样性保护用地的确定引用了世界平均值, 但由于实际地理环境特征不同, 不同地区的数值应该有所区别, 这一点有待进一步完善。

6. 4 研究展望

本文利用能值分析理论开展了生态安全和生态承载力研究。结合内蒙古自治区2000~2009年长时间序列的人口、资源和环境等基础资料和数据,运用灰色预测理论定量分析了内蒙古自治区的生态压力指数,评价了生态安全等级,为未来可持续发展提出了对策措施。鉴于本研究存在的诸多值得进一步深入的地方,建议在今后的研究工作可以从以下几点展开:

(1) 本研究中采用的生态足迹模型没能把生态系统提供的资源,吸纳废弃物的功能描述完全,也没有考虑污染对生态的影响。因此,现在实际所占有的生态足迹要比计算的结果更大。建议在今后的研究工作中建立反映环境污染的环境账户体系,完善环境污染估算的方法和理论,有助于定量反映研究区域环境污染的负面影响。

(2) 目前的生态足迹模型没有将回收利用资源的生态承载力纳入进来,随着循环经济的发展,资源的回收再利用率将会更加提高,生态承载力也会随之提高。例如:纸张的回收可以认为是增加了森林的供给能力。把回收利用资源的承载力考虑进来,可以在一定程度上减小对生态承载力的低估,建议在今后的工作中研究回收再利用资源的承载力。

(3) 生态足迹理论分析,逐渐向更小尺度的家庭和个人转移发展,进而应用于农业、工业、旅游等各层次各方面的可持续发展规划。建议今后的生态足迹的研究工作应基于多研究尺度并且拓展应用范围,应用于更多领域。

参考文献

- [1] 兰叶霞. 基于生态足迹的江西省生态安全时空动态定量研究[D]. 陕西师范大学学报, 2006, (1): 7-9.
- [2] 曲格平. 关注中国的生态安全之一: 生态环境问题已经成为国家安全的热门话题[J]. 环境保护, 2002, (5): 3-4.
- [3] 苏美蓉, 杨志峰, 张迪. 城市生态系统服务功能价值评估方法初探[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 52-55.
- [4] 贾蕊, 梁银河, 朱新民, 曹景珍. 山西省农业资源环境与经济协调发展评价与对策研究[J]. 国土与自然资源研究, 2007, (4): 39-40.
- [5] 胡玉婷. 三江源地区的生态危机与保护建设战略探索[J]. 青海科技, 2006, (1): 10-15.
- [6] 王韩民. 生态安全系统评价与预警研究[J]. 环境保护, 2003, (11): 30-34.
- [7] 林彰平, 刘湘南. 东北农牧交错带土地利用生态安全模式案例研究[J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 15-19.
- [8] Andy P, Dobson, Bradshaw A D, et al. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation Biology[J]. Science, 1997, 277: 515-522.
- [9] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 17(5): 24-27.
- [10] 邹长新. 内陆河流域生态安全研究——以黑河为例[D]. 南京: 南京气象学院, 2003.
- [11] 吕洪德. 城市生态安全评价指标体系的研究[D]. 东北林业大学, 2005, 3.
- [12] 章锦河, 张捷. 旅游生态足迹模型及黄山市实证分析[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 763-771.
- [13] 王清. 山东省生态安全评价研究[D]. 山东: 山东大学, 2005.
- [14] Cynil Obi, Oil. Environmental Conflict and National Security in Nigeria: Ramifications of the Ecology-Security Nexus for Sub-Regional Peace[R]. ACDISOccasional Paper, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997.
- [15] 姚解生, 田静毅. 生态安全研究进展与应用[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2007, 17(2): 47-50.
- [16] 左伟, 王桥, 王文杰, 刘建军, 杨一鹏. 区域生态评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 2(1): 67-71.
- [17] 刘年丰. 生态容量及环境价值损失评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 5-7.
- [18] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20.
- [19] 周国富. 生态安全与生态安全研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2003, 21(3): 105-108.

- [20] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤, 2003, (1): 2-7.
- [21] 陈国阶. 论生态安全[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(3): 1-3.
- [22] 董雪旺. 旅游地生态安全评价研究——以五大连池风景名胜区为例[J]. 哈尔滨师范大学(自然科学学报), 2003, 19(6): 100-105.
- [23] 李鸿凯. 向海湿地生态安全评价及恢复研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2002.
- [24] 王强, 杨京平. 我国草地退化及其生态安全评价指标体系的探索[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 27-31.
- [25] 屈波, 谢世友. 重庆三峡生态经济区生态安全及对策[J]. 地域研究与开发, 2006, 25(1): 120-124.
- [26] 熊鹰, 王克林, 吕辉红. 湖南省农业生态安全与可持续发展初探[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(5): 433-439.
- [27] 刘晶. 基于“能值-生态足迹”模型的吉林省生态安全研究[D]. 吉林大学, 2008, 4.
- [28] 陈东景, 徐中民, 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.
- [29] 吴开亚. 主成分投影法在区域生态安全评价中的应用[J]. 中国软科学, 2003, (9): 123-126.
- [30] 龚建周, 夏北成, 郭冻. 城市生态安全评价与预测模型研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(1): 107-111.
- [31] Jasson A M, Zuechetto J. Energy, economic and ecological relationship for Gotland, Sweden: A regional system study[C]. Swedish Natural Science Research Council, Ecological Bulletins, 1978.
- [32] Vitousek P, Ehrlich P, Ehrlich A, et al. Human appropriation of the products of photosynthesis[J]. BioScience, 1986, (36): 368-373.
- [33] 谢高地, 曹淑艳. 生态足迹方法作为生态系统评估工具的潜力[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 58-59.
- [34] 王瑞萍. GIS 空间分析技术应用研究[J]. 油气田地面工程, 2003, 22 (6): 1-2.
- [35] 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]. 2003, 22 (6): 618-625.
- [36] Mareo Bagliani, Alessandro Galli, Valentina Neeolucci, et al. Ecological footprint analysis applied to a sub-national area: The case of the Province of Siena (Italy)[J]. Environmental Management, 2008, (86): 354-364.
- [37] Van Vuuren DP, Smeets EMW. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands[J]. Ecological Economics, 2000, 34.
- [38] Kimberley Warren-Rhodes, Albert Koenig. Ecosystem appropriation by Hong Kong and its

- implications for sustainable development[J]. Ecological Economics, 2001, (39): 347-359.
- [39] Garry W, McDonald, Murray GP. Ecological Footprints and interdependencies of New Zealand regions[J]. Ecological Economics, 2004, (50): 49-67.
- [40] Ferng J. Local sustainable yield and embodied resources in ecological footprint analysis-a case study on the required Paddy field in Taiwan[J]. Ecological Economics, 2005, 53(3): 415-430.
- [41] 徐中民, 陈东景, 张志强, 等. 中国 1999 年的生态足迹分析[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 441-445.
- [42] 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.
- [43] 苏绮, 成升魁, 谢高地. 大城市居民生活消费的生态占用初探[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 24-28.
- [44] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁, 郑度. 中国的生态空间占用研究[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 20-23.
- [45] 鲁春霞, 谢高地, 成升魁, 张懿铨. 青藏高原自然资产利用的生态空间占用评价[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 29-35.
- [46] 李金平, 王志石. 澳门 2001 年生态足迹分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 197-203.
- [47] Helmut Haberl, Karl Heinz Erb, Fridolin Krausmann. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Austria 1926-1995 [J]. Ecological Economics, 2001, 38 (1): 25-45.
- [48] Mathis Wackernagel, Chad Monfreda, 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): 261-269.
- [49] Manfred Lenzen, CB Hansson, Stuart Bond. On the bioproductivity and land disturbance metrics of the Ecological Footprint [J]. Ecological Economics, 2006, 61 (1): 6-10.
- [50] Odum H T. Self-organization, Transformity and Information[J]. Science, 1988, 242: 1132-1139.
- [51] Zhao S, Li ZZ, Li WL. A modified method of ecological footprint calculation and its application[J]. Ecological Modelling, 2005, 185: 65-75.
- [52] 付晓, 吴刚, 刘阳. 生态学研究中的熵分析与能值分析理论[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2621-2626.
- [53] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: A comparative view[J]. Ecological Economics, 1996, (19): 219-235.
- [54] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making[M]. New York: John Wiley, 1996.
- [55] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

- [56] 赵晨. 生态系统服务价值研究: 理论、方法及应用[D]. 兰州大学, 2005: 36-45.
- [57] 隋春花, 张耀辉, 蓝盛芳. 环境-经济系统能值(Emergy)评价——介绍 Odum 的能值理论[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(1): 18-20.
- [58] 彭建, 刘松, 吕婧. 区域可持续发展生态评估的能值分析研究进展与展望[J]. 中国人口资源与环境, 2006, 16(5): 47-51.
- [59] 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.
- [60] Laganis J, Laganis M. Sensitivity analysis of the emergy flows at the solar salt production process in Slovenia[J]. Ecological Modelling, 2003(161): 195-211.
- [61] Lefroy E, Rydber T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia[J]. Ecological Modelling, 2003(161): 195-211.
- [62] Federiei M, Ulgiati S, Verdesca D et al. Efficiency and sustainability indicators for Passenger and commodities transportation systems: The case of Siena, Italy[J]. Ecological indicators, 2003, 3(3): 155-169.
- [63] Huang S L, Wu S C, Chen W B. Ecosystem, environmental quality and ecotechnology in the Taipei metropolitan region[J]. Ecological Engineering, 1995, (4): 233-248.
- [64] Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M etc. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area(Italy)[J]. Journal of Cleaner Production, 2001(9): 365-373.
- [65] 崔丽娟, 赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态能值分析研究[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1480-1485.
- [66] 隋春花, 蓝盛芳. 城市生态系统能值分析(EMA)的原理与步骤[J]. 重庆环境科学, 1999(4).
- [67] 钦佩, 黄玉山, 谭凤仪. 从能值分析的方法来看米埔自然保护区的生态功能[J]. 自然杂志, 1999(2).
- [68] 谢忠岩. 图们江流域水环境价值的能值研究[J]. 吉林农业大学学报, 2002, 24(3): 68-72.
- [69] 张芳怡, 濮励杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用——以江苏省为例. 自然资源学报. 2006, 7(21): 653-660.
- [70] 刘巽浩, 牟正国等. 中国耕作制度[M]. 北京: 农业出版社, 1993.
- [71] 徐国泉, 姜照华, 薛宏雨. 基于生态足迹理论的生态承载力分析——以大连市为例[J]. 国土资源科技管理, 2004, 03(5): 1-5.
- [72] 刘冬梅. 可持续经济发展理论框架下的生态足迹研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007, 183-185.
- [73] 李广军, 王青, 顾晓薇, 刘建兴, 丁一. 调整的生态足迹方法在辽宁省的应用研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 299-306.
- [74] 刘义军, 卢武强, 李荣. 湖北省生态足迹计算与分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2004, 38(2): 259-26.

致 谢

当论文写作到最后的一个页面，忍不住抚卷感慨！回顾 2008 年开始在西南大学开始学习以来，有多少个日子，和亲爱的老师、同学们一起，走过酷暑严寒，历经艰辛和汗水，终于完成了的终结篇一学位论文，让我真正的体会到什么叫做独立思考和学以致用。不由得怀着一颗感恩的心去珍藏往昔的点点滴滴。

本研究从前期的选题、设计、到数据收集、到后期论文的撰写和修改，都是在导师谢小玉副教授的悉心指导下，才得以顺利完成的。谢老师治学严谨，表现在对论文写作规范性要求上；同时又是仁慈宽厚，表现在与学生平等相处上，学生可以有很大的自主性。这也是我在学习中一直非常喜欢的，所以，在这种氛围下，这三年来进步很快；在生活上也给了我很多关怀与帮助，让我身在异乡仍能感受到家的温暖。在此，非常感谢我的导师，她不仅给予了学业的指导，还在为人上做出了榜样。还要感谢农学与生物科技学院的王龙昌教授、高洁教授、郑钦玉副教授、庞江春老师等传授给我理论知识，教会我学习的方法，在论文的写作上都给予了宝贵的意见和建议。同时还要对在百忙之中抽出时间评阅论文的专家、学者表示诚挚的谢意。

三年的学习生活，使我与农学与生物科技学院的各项同学们结下了深厚的友谊，这是一个欢乐、温馨、团结、奋进的集体，这是一片蕴含勃勃生机、具有强大生命力的沃土。与同学们经常的讨论与交流使我受益匪浅，在论文的撰写过程中同学们给予我许多好的意见和无私的帮助，在生活上也给了我许多关爱，使我在此度过了一段愉快、充实和难忘的时光，在此表示衷心的感谢。

谨以此文献给我的父母、女友、亲人和朋友，感谢他们给我以无私的关怀，为我的成长付出的巨大艰辛，他们的理解和支持使我能够专心完成我的学业。不管是在现在还是在将来，我所作的一切都难以回报你们对我的付出。最后，再次感谢所有关心和帮助我的朋友们，是你们为我撑起一片湛蓝的晴空，让我的生活充满了希望和快乐。

向关心、帮助与支持过我论文研究工作的老师和朋友们致以诚挚的敬意和衷心的感谢！

攻读硕士学位期间发表的学术论文和参加的科研项目

发表论文:

- [1] 刘海涛, 谢小玉, 胡小东, 徐苗苗. 基于能值生态足迹模型的内蒙古自治区生态承载力研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版). 2009, 6 (7): 145-150.
- [2] 谢小玉, 刘晓健, 刘海涛. 不同温度下镁胁迫对黄瓜光合特性和活性氧清除系统的影响[J]. 植物营养与肥科学报. 2009, 15 (5): 1231-1235.
- [3] 谢小玉, 刘海涛, 程志伟. 镁对温室黄瓜光合特性的影响[J]. 中国蔬菜. 2009, (6): 36-40.
- [4] 刘海涛, 谢小玉, 徐苗苗. 基于能值生态足迹模型新疆自治区生态承载力的研究[J]. 应用生态学报 (待发表).

参加的科研项目:

- (1) 国家“十一五”科技支撑项目: 西南季节性干旱区集雨补灌关键技术的集成与示范 (2006BAD29B08)。
- (2) 重庆市科技攻关重点项目: 重庆高温伏旱区旱作农田节水高效农作关键技术研究与示范 (CSTC,2008AB1001)。
- (3) 重庆市自然科学基金: 辣椒抗高温伏旱的机理及鉴定指标研究。
- (4) 重庆市自然科学基金项目: 甘蓝型油菜干旱胁迫应答基因表达谱的构建与分析。