

墨香财经学术文库

“十二五”辽宁省重点图书出版规划项目

国家社科基金青年项目（17CTJ010）资助

Comprehensive Evaluation Method  
of Environmental Quality and China's Practice

# 环境质量综合评价方法 与中国实践

祝志杰 ◎ 著

FE 东北财经大学出版社  
Dongbei University of Finance & Economics Press



墨香财经学术文库

“十二五”辽宁省重点图书出版规划项目

国家社科基金青年项目（17CTJ010）资助

Comprehensive Evaluation Method  
of Environmental Quality and China's Practice

# 环境质量综合评价方法 与中国实践

祝志杰 著

## 图书在版编目 (CIP) 数据

环境质量综合评价方法与中国实践 / 祝志杰著. —大连: 东北财经大学出版社, 2019.5

(墨香财经学术文库)

ISBN 978-7-5654-3488-4

I. 环… II. 祝… III. 环境质量评价-综合评价-研究-中国 IV. X821.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 046798 号

东北财经大学出版社出版发行

大连市黑石礁尖山街 217 号 邮政编码 116025

网 址: <http://www.dufep.cn>

读者信箱: [dufep@dufe.edu.cn](mailto:dufep@dufe.edu.cn)

大连永盛印业有限公司印刷

幅面尺寸: 170mm×240mm 字数: 278 千字 印张: 19.25 插页: 1

2019 年 5 月第 1 版

2019 年 5 月第 1 次印刷

责任编辑: 李 彬 周 慧

责任校对: 冯志慧

封面设计: 冀贵收

版式设计: 钟福建

定价: 48.00 元

教学支持 售后服务 联系电话: (0411) 84710309

版权所有 侵权必究 举报电话: (0411) 84710523

如有印装质量问题, 请联系营销部: (0411) 84710711

## 前言

---

随着社会的发展，综合评价方法逐渐成为一种有效的评价形式，存在于人类生活的各个方面，综合评价过程具有系统性、目标性，评价结果具有科学性、合理性，能够使决策者做出正确的选择，这必将产生一定的经济效益和社会价值。自工业革命以来，特别是随着信息化社会的到来，人类改造自然与社会的能力呈现出立体式急速增长。诚然，人类在长时间的经济、科技与社会高速发展的过程中，创造了光辉灿烂的物质技术文明，极大地满足了人们的物质文化需求，但在此过程中逐步暴露出来的环境问题已经成了全球性的重大问题。

正是在此背景下，本书试图实现环境质量综合评价的研究及将研究结论实践于中国实际情况，对各类环境问题进行深度剖析，在实践的基础上寻求环境质量与经济发展问题的基本对策。基于对综合评价理论和方法的研究，笔者根据自身的经验和在研究中积累的成果尝试编撰了本书。本书涵盖了对有关环境问题的综合评价理论体系和方法的基础内容，分别对自然资源经济效用、中国能源利用效率、经济发展与环境质量互动关系、水质评估、环境质量预测、空气质量预测、可持续发展能

力等问题进行研究，共分为七章。本书的基本结构如下：第一章主要是对自然资源经济效益的概念、评价方法及研究发展进行了详细介绍，讨论环境给经济发展带来的资源效用产生的过程。第二章是对中国能源利用效率的测度方法的研究，能源是推动经济发展的关键所在。使用 Bootstrapped-DEA 非参数统计方法进行实证分析，对中国 30 个省域的全要素能源利用效率进行了测度，并通过 Malmquist 指数分解法对全要素能源效率进行分解，最后通过 Moran I 指数对中国省域全要素能源利用效率的空间相关性进行检验，研究某一省份是否受到其相邻省份经济活动的影响，立足于中国经济的健康稳定发展，采用科学合理的方法对能源利用效率进行测度，期望为中国经济发展提供帮助。第三章是关于经济发展与环境质量互动关系的研究，对比该问题的几种模型方法应用的利弊，最终选择半参数广义可加模型（GAM）分析金砖国家碳排放、能源消耗量和经济增长之间的关系。第四章采用分类器算法对水质进行评估，水资源质量的评价已经成为地球生态环境综合评价中不可或缺的内容，应选用适当的改进算法对 BP 人工神经网络模型进行改进，从而能够更加适应评价对象的特征情况，以提高模型对水质评价的准确性。第五章主要是对环境质量预测方法的研究。为了研究排放的二氧化碳、经济和消费的能源之间的关系，该部分选择从两个方面来进行分析。一方面是通过使用协整检验和误差修正模型，另一方面是根据布谷鸟优化前、后的灰色预测模型和 ARIMA 预测模型对未来的碳排放趋势进行判断并将上述模型进行对比分析，最终结合实际情况对我国实施低碳环保型可持续发展战略提供建议。第六章是基于机器学习的空气质量预测方法研究。在城市的 AQI 预测中，改进粒子群算法优化的支持向量机模型比单纯的支持向量机模型的预测效果要好，然而在改进粒子群算法优化的支持向量机模型上组建的组合预测模型也很好证明了组合预测模型比单一模型具有更好的预测效果，这种组合模型在城市 AQI 预测中有着比单一方法更好的准确性及适用性。第七章是对可持续发展能力评价方法的研究。本部分的研究遵循经济统计方法的研究思路，将经济学理论与统计学方法有机地结合，以发现、证实和解决现实经济问题为目标，以前人研究成果为基础，提出了可持续发展能力的经济学解释，并

以理论结合实际为原则，采用目前较为先进的面板数据的估计方法，最终对东北老工业基地可持续发展能力的状况进行分析，通过对东北三省可持续发展能力趋势的比较分析，对东北三省的可持续发展能力状况进行评价，试图找出东北三省可持续发展能力建设中的不足，并据此给出合理的政策性建议。

本书简明透彻地分析了综合评价方法在各环境问题中的理论应用，也尽量选择既能体现综合评价方法特点，又贴近实际情况的实证分析，并且步骤具体。本书内容丰富，尽管在撰写过程中做出了很多努力，但由于笔者水平有限，书中难免存在疏漏，敬请广大读者批评指正。

祝志杰

2019年3月

# ■ 目录

## 第一章 核算视角下自然资源经济效用评价方法研究 / 1

- 1.1 自然资源经济效用的界定 / 1
- 1.2 自然资源经济效用的边际分析 / 8
- 1.3 自然资源经济使用的个人效用与社会效用 / 19
- 1.4 自然资源经济效用形成的一般过程 / 36

## 第二章 基于投入产出分析的中国能源利用效率测度方法研究 / 44

- 2.1 思想与原理 / 44
- 2.2 模型与步骤 / 48
- 2.3 应用与案例 / 54

参考文献 / 75

附录 / 76

### 第三章 基于回归模型的经济发展与环境质量互动关系研究 / 79

#### 3.1 思想与原理 / 79

#### 3.2 模型与案例 / 83

#### 参考文献 / 108

### 第四章 基于分类器算法的水质评估方法研究 / 109

#### 4.1 思想与原理 / 109

#### 4.2 模型与步骤 / 115

#### 4.3 应用与案例 / 125

#### 参考文献 / 136

### 第五章 基于时序分析的环境质量预测分析 / 138

#### 5.1 思想与原理 / 138

#### 5.2 模型与步骤 / 142

#### 5.3 应用与案例 / 152

#### 参考文献 / 169

### 第六章 基于机器学习的空气质量预测方法研究 / 170

#### 6.1 思想与原理 / 170

#### 6.2 模型与案例 / 173

#### 6.3 AQI 指数预测模型与案例 / 191

#### 6.4 AQI 指数组合预测模型与案例 / 203

#### 参考文献 / 217

### 第七章 可持续发展能力评价方法研究 / 219

#### 7.1 绪论 / 219

7.2 可持续发展能力研究综述 / 225

7.3 可持续发展能力的经济学解释与数学表征 / 239

7.4 实证研究思路及模型设计 / 256

7.5 东北老工业基地可持续发展能力的实证分析 / 265

参考文献 / 288

附录 / 295

# 第一章 核算视角下自然资源经济 效用评价方法研究

在环境质量与经济发展的互动关系中，环境可以向经济系统提供生产和生活所需的各种自然资源，作为整个国民经济的物质投入，环境的资源功能推动了经济发展，使得整个社会可以利用的总效用增加。在这个过程中，环境提供的自然资源给经济系统带来了相应效用，因此可以将这种效用称为自然资源的经济效用。下面，我们将详尽讨论环境给经济发展带来的资源效用所产生的过程。

## 1.1 自然资源经济效用的界定

### 1.1.1 SEEA 的环境资产分类

SEEA 的环境资产分类包括三个较为宽泛的范畴，它们分别是自然资源、土地和地表水以及生态系统，具体见表 1-1。

表 1-1                      SEEA（2003）环境资产分类表

|        |                          |
|--------|--------------------------|
| EA.1   | 自然资源                     |
| EA.11  | 矿物和能源（立方米、吨、油当量吨、焦耳）     |
| EA.12  | 土壤资源（立方米、吨）              |
| EA.13  | 水资源（立方米）                 |
| EA.14  | 生物资源                     |
| EA.141 | 林木资源（立方米）                |
| EA.142 | 除林木资源外的作物和植物资源（立方米、吨、数目） |
| EA.143 | 水生资源（吨、数目）               |
| EA.144 | 动物资源（除水生资源外）（数目）         |
| EA.2   | 土地和地表水（公顷）               |
| EA.21  | 建筑和基础结构用地                |
| EA.22  | 农业用地及相关地表水               |
| EA.23  | 有林地及相关地表水                |
| EA.24  | 主要水体                     |
| EA.25  | 其他土地                     |
| EA.3   | 生态系统                     |
| EA.31  | 陆地生态系统                   |
| EA.32  | 水体生态系统                   |
| EA.33  | 大气系统                     |
| EA.M   | 备忘项——无形环境资产              |
| EA.M1  | 矿产勘探                     |
| EA.M2  | 可转让的自然资源利用许可和特许权         |
| EA.M3  | 可交易残余物排放许可               |
| EA.M4  | 其他无形非生产的环境资产             |

注：来源于 SEEA（2003）中文版。

SEEA 关于环境资源的分类是本章环境质量研究的范围基础，同时也为环境质量对经济增长的效用分析提供了很好的研究视角。自然资源主要代表环境对经济发展的资源功能；土地和地表水可以代表自然资源对经济副产品的受纳功能；生态系统代表自然资源为经济生产提供的生态服务功能；无形环境资产则考虑了环境资源的产权分配对经济发展的影响。

### 1.1.2 融入自然资源投入的生产函数

研究环境质量对经济发展资源效用的形成过程，其研究起点是生产过程，通过对生产函数的构建与分析，我们可以刻画经济生产的一般过程，典型的经济生产函数如下：

$$Q = f(K, L) \quad (1.1)$$

式中： $Q$  表示经济生产的产出； $f(x)$  为生产函数，表示一定量的生产要素投入，在一定的技术条件水平下所能生产的最大产出量； $K$  和  $L$  分别表示生产三要素中的资本和劳动力投入。

在公式 (1.1) 所示的生产函数中，并没有将自然资源的投入这一中间消耗作为影响产量的内生要素。由于在研究环境质量与经济发展互动关系的过程中，可用于生产的自然资源作为生产的投入将环境质量与经济发展联系起来，因此，基于本章的研究范畴，我们需要对传统的生产函数进行必要的补充。具体见公式 (1.2)。

$$Q = f(K, L, R) \quad (1.2)$$

与公式 (1.1) 相比，公式 (1.2) 对经济生产过程中的投入要素进行了重新划分：人造资本  $K$ ，劳动力  $L$  和用于生产的自然资源  $R$ 。鉴于本章研究的内容只涉及环境与经济，且劳动力的投入可以看做一种特殊的资本投入——人力资本，为了方便研究，我们将融入自然资源的生产函数简化为如下形式：

$$Q = f(K, R) \quad (1.3)$$

### 1.1.3 效用视角下自然资源投入的经济产出

在公式 (1.3) 中，传统的经济产出是指通过资本和自然资源的投入，在一定的技术条件下经济活动所能提供的物质产品。那么，在效用视角下，自然资源和资本的一定投入导致的经济产出是否等同于传统的经济产出呢？要回答这一问题，需要从效用的定义出发，效用是指人们通过某种商品或服务的消费产生的满足感，至少这种消费活动能够被有效地虚拟，显然满足感这一主观标准是很难用物化的产出直接准确表示的。在生产过程中，环境向经济系统提供了生产所需要的物质要素，按

照质量守恒定律，生产过程一定会产生相应的物质产品。物质产品本身并不能产生相应的效用，通过相关的供给和需求过程，生产者和消费者都会得到相应的效用，这一效用产生的过程实际是一个物质产品转化为服务的过程，因为人们提供服务的过程离不开物质基础的支持，一定量的物质基础对应一定量的服务产出，任何一种物质产出都可以通过合理的方式虚拟成为提供生活服务的过程。具体见公式（1.4）。

$$SE = f(Q)$$

(1.4)

式中：SE 表示国民经济的服务产出，其产出量或产出总值是由一定量的物质产出决定的。公式（1.4）看上去与国民经济核算中产出的划分相矛盾，因为在国民经济总量核算体系中，产出是包括物化的产品和人们提供的服务的，两者是对等且分别核算的统计指标。而公式（1.4）将物质产出作为人们提供服务的投入，两者的关系由核算上的独立对等变为投入产出关系。在这里，我们需要做出两点解释：

首先，效用视角下的服务产出是一个更为广义的概念，既包括国民经济核算中的物化产品能为人们生活提供的服务，同时也包括核算体系中的服务产出，效用视角下的服务产出的界定范围大于核算体系的服务范围，是一个虚拟的广义概念。例如，在理发师提供服务的过程中，在核算体系中只将理发师的劳动作为服务产出进行核算，而理发师使用的剪刀不被计入发廊的产出。而在效用视角下，发廊的产出不仅包括理发师的劳动服务，同时也包括剪刀提供的物化服务，将剪刀作为提供服务的主体，其同样在剪发过程中提供了服务，因为剪刀的质量也直接影响了服务的水平，导致了消费者感受的不同。效用视角下自然资源的经济产出构成如图 1-1 所示：

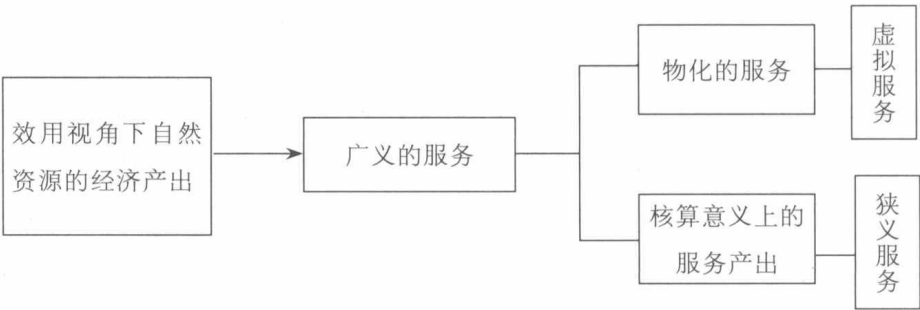


图 1-1 效用视角下自然资源的经济产出构成图

其次,核算意义上服务产出的提供离不开物质产出,只有将物质产出与物化产出通过一定方式的结合才能最终实现服务产出的提供。因此,存在如下式所示的投入产出关系:

$$SE = f[Q, i(Q)] \quad (1.5)$$

在公式(1.5)中,  $i(x)$  表示核算意义上的服务产出是由物质产出决定的,函数的具体形式由物质产出和服务产出的结合方式决定,可以看出,核算意义上的服务产出也可以通过物质产出间接表示,即效用视角下的广义服务产出都是可以由物质产出表示的,即公式(1.4)。

相比于物化的实物产出,虚拟成服务的广义产出更能准确全面地反映出人的主观感受。因此,在效用分析中,应将包括物化服务和狭义服务的广义服务作为自然资源投入到经济系统后转化的产出,并以此建立衡量自然资源经济效用的基础指标。

#### 1.1.4 自然资源经济效用的产生:从经济生产率到效用生产率

在确定什么是效用视角下自然资源的经济产出后,我们需要说明这一产出是如何实现的,即自然资源经济效用是如何产生的。这一过程可以用公式(1.6)和公式(1.7)进行描述说明。

$$rU = \frac{SE}{Q} * \frac{Q}{R} = \frac{SE}{R} = rse * rq \quad (1.6)$$

$$Ur = U(ru) = U(rse, rq) \quad (1.7)$$

式中:  $rU$  为效用生产率,表示单位自然资源投入的经济效用产出,用以衡量以效用为产出的生产效率;  $rse$  为服务效率,表示单位物质产出的投入所能转化的广义服务产出量,用以衡量物质投入到服务过程中的转化效率;  $rq$  则是传统意义的经济产出率,表示单位生产要素投入所能带来的产出量,用以衡量生产的经济效率;  $Ur$  表示自然资源的经济效用;  $U(x)$  则是效用函数,用以表示消费者对不同消费束的偏好程度。

公式(1.6)描述了效用视角下资源环境经济产出的形成过程。这一过程可以细分为两个步骤:

### 一、经济生产过程

经济生产过程的起点也是整个自然资源经济效用产生的起点，即环境向经济生产过程提供生产所用的自然资源。在一定的生产关系作用下，环境提供的自然资源转化为经济生产的产品，这是一个单一的物质形态转化过程。通过上述对效用概念的讨论可知，环境质量与经济发展互动过程中效用的来源应该包括生产过程，因为通过产品的出售和取得收入的消费使用，生产者会获得相应的效用，但这一效用并不是环境向经济生产提供自然资源所产生的唯一效用。在随后的非经济生产过程中还会产生一定的自然资源经济效用。

### 二、物质服务化转化过程

在效用视角下，产出的获得不是经济生产的最终目的，其最终目的应是通过生产获取相应的效用。如何实现从物化的产品到自然资源经济效用产生的转变，需要物质服务化的转化过程。所谓的物质服务化实质是一个虚拟的消费或提供服务的过程，一定量的服务产出需要一定量的物质产出作为基础，即使在这一过程中物质产品本身没有提供服务，但其服务产出可以被有效地虚拟。还是理发师和剪刀的例子，剪刀作为一种固化的实物并不能像理发师一样向消费者提供服务，但其服务产出可以通过与理发师的结合被有效地虚拟，比如一个理发师使用一把剪刀一天能为多少人服务。服务量的多少通过物质产品与人的结合实现了量化衡量和判断。

通过公式（1.6）包含的两个过程可以清晰地描述效用视角下资源环境经济产出的形成过程。那么，自然资源经济效用是如何产生以及如何衡量的呢？解释这一问题需要借助公式（1.7）。

在公式（1.6）中，两阶段的不同步骤，产生了三种不同的效率：生产效率、服务效率和资源的经济效用产出效率，并且在三者间存在简单的乘积关系，换句话讲，生产效率和效率共同决定了资源的经济效用产出效率。显而易见，自然资源的经济效用必然受资源的经济效用产出效率影响，即经济效用产出效率越大，等量的自然资源投入到经济生产过程中获得的效用也就越大。由此可见，自然资源的经济效用是由服务效率和生产效率共同决定和构成的，如图 1-2 所示。

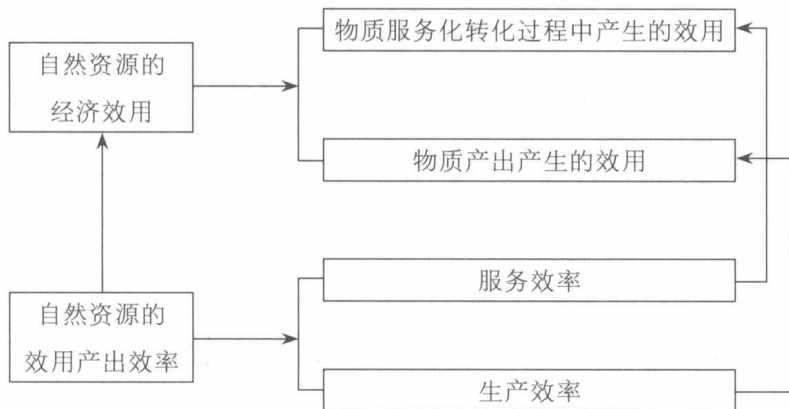


图 1-2 自然资源的经济效用产生机制图

图 1-2 说明了自然资源的经济效用产生过程和决定因素，自然资源的经济效用是由自然资源的效用产出率决定的，这种效用产出率可以划分为服务效率和生产效率。需要注意的是，用生产率或效率表示效用水平的方法并不是十分准确的，或者说效率和生产率的提高是效用扩大的必要条件，但并不一定是充分条件。这一问题的出现主要是源于效率提升方式的不同，试想一下，如果效率的提升是通过减少自然资源的投入为前提的<sup>①</sup>，那么势必会导致产出的减少，最终导致物质服务化过程中效用的形成总量，即效率提高的前提是产出的减少，至于最终总效用是否变化还要比较效率提高导致的效用增量与产出减少带来的效用减量间的大小关系。如果经济生产过程更注重效率则总效用增加；反之，如果经济生产过程更注重产出总量则总效用减少。通过上述讨论，我们可以对公式（1.7）进行修正，其表达式变化为：

$$U_r = U(r_u, Q, SE) = U(r_{se}, r_q, Q, SE) \quad (1.8)$$

公式（1.8）既从效率角度考察了服务效率和生产效率对自然资源经济效用的影响，同时也从总量角度考察了物质产出和服务产出对自然资源经济效用的影响，系统地描述了自然资源经济效用产生和决定的全过程。

<sup>①</sup> 在生产过程中，自然资源投入的减少会带来正的外部效应，从而导致社会总效用的增加。但在这里我们研究的是环境质量对经济发展效用的产生机制，研究的目标是经济效用，自然资源投入的减少会带来产出量下降，经济效用减少。但如果考虑总效用的正负变化，还要考虑减少的自然资源投入带来的环境效用增量是否会超过经济效用的减少量。

## 1.2 自然资源经济效用的边际分析

上面的讨论分析了环境系统向经济系统提供生产所需的自然资源而产生效用的作用机理，在此基础上，下面将对这一效用的变化规律进行经济学描述，采用的主要分析方法是边际分析法。

### 1.2.1 自然资源经济效用边际变化的决定因素

在微观经济学的研究中，消费者对正常商品的消费是具有边际效用递减规律的，如图 1-3 所示，即在存在商品 A 和 B 的情况下，商品 A 消费数量的提升，虽然不会导致消费者总效用的减少，但由于相对于商品 B，商品 A 对消费者的满足感相对下降，每增加一单位商品 A 的支出，其给消费者带来的效用将减少，即商品 A 的边际效用减少。

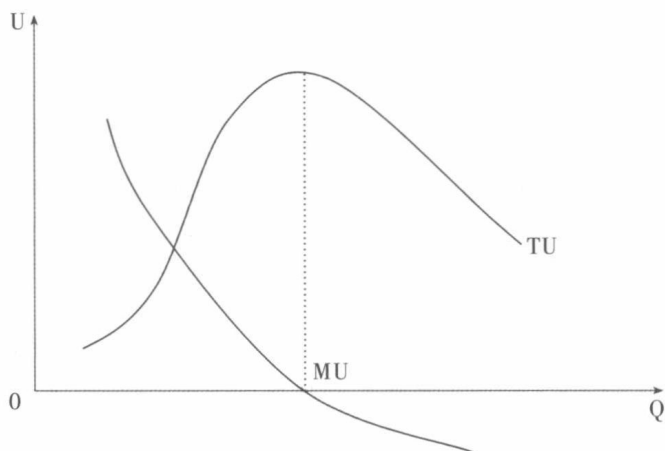


图 1-3 边际效用递减规律示意图

图 1-3 所示为正常商品消费的边际递减规律。在微观经济学中，边际效用递减规律具有局部普遍性，那么，在自然资源经济效用的产生过程中是否同样存在边际效用递减规律呢？还是回到环境向经济生产提供生产所需的自然资源这一研究起点。在第一步的经济生产过程中，微观经济学也提供了一个普遍存在的规律，即边际产出递减规律，这条规律同样适用于自然资源作为生产要素使用的生产过程，因为经济生产是一个纯技术生产过程，根据物质守恒定律，生产过程实际是物质从一种