

# 上海

## 环境科学集

上海环境科学编辑部 编

SHANGHAI  
HUANJING KEXUEJI

上海科学技术出版社  
Shanghai Scientific & Technical Publishers

(第  
17  
辑)

# 上海环境科学集(第17辑)

上海环境科学编辑部 编

上海科学技术出版社

### 图书在版编目 (CIP) 数据

上海环境科学集. 第17辑 / 上海环境科学编辑部编.  
—上海: 上海科学技术出版社, 2016.11  
ISBN 978-7-5478-3248-6

I. ①上… II. ①上… III. ①环境科学—上海—文集 IV. ①X-125.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 220960 号

### 上海环境科学集·第17辑

上海环境科学编辑部 编

上海世纪出版股份有限公司 出版  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行  
200001 上海福建中路193号 [www.cwen.co](http://www.cwen.co)

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 889×1194 1/16 印张 9

字数: 200千字

2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-3248-6/X·39

定价: 40.00元

# 编 委 会

主 编：夏德祥

副 主 编：林卫青

执行副主编：唐东雄

|      |     |     |
|------|-----|-----|
| 编 委： | 夏德祥 | 林卫青 |
|      | 顾友直 | 唐东雄 |
|      | 梁丹涛 | 张 弛 |

# 目 次

|                                                |                     |
|------------------------------------------------|---------------------|
| 多晶硅光伏电池板的生命周期可持续评价·····                        | 李 劲 张 杭 吴政治 等 ( 1 ) |
| 景观文化服务研究现状及发展对策·····                           | 姚 荣 刘玉虹 贾志斌 等 ( 9 ) |
| 广州市夏季室内 PM <sub>2.5</sub> 中金属元素的污染水平与来源分析····· | 朱凤芝 任明忠 张漫雯 等 (18)  |
| 石洞口邻近海域环境状况及监测建议·····                          | 伦凤霞 田 华 姚勇华 等 (24)  |
| 高效降解菌剂 PCL 对苯酚及 TCE 的共代谢降解性能研究·····            | 张施阳 (29)            |
| 污泥炭化处置技术比较分析·····                              | 张 林 刘 云 (35)        |
| 上海市青浦区景观格局的区域生态风险评价·····                       | 阮俊杰 王 敏 王贺亚 等 (40)  |
| 地质体内元素含量与水体质量的关系分析·····                        | 代 净 乔 宁 (46)        |
| 生态文明系统解构与建设思考·····                             | 韩振秋 (50)            |
| 矿区城市地表水体超标对地下水影响分析·····                        | 题正义 乔 宁 秦洪岩 (54)    |
| 基于 Android 的空气质量监控系统设计与应用·····                 | 宋榕荣 (57)            |
| 京津冀生态环境支撑区发展路径探讨·····                          | 牛 伟 肖立新 李佳欣 (61)    |
| 污水处理中硝化和反硝化效率研究·····                           | 马 克 (65)            |
| 水质评价模型建立及影响因素显著性分析·····                        | 董春胜 王 阳 (69)        |
| 甘肃省化学品生产环境风险特点和防控对策·····                       | 刘 兰 韩庆荣 郭秉堂 等 (73)  |
| 汽车尾气管和燃煤烟囱颗粒物微形貌及其 X-射线能谱分析研究<br>·····         | 陈满荣 张卫国 俞立中 (78)    |
| 程序控温-王水消解-原子荧光法测定土壤总汞·····                     | 吕 睿 (84)            |
| 基于资源环境承载力的水泥行业环境管理类型区划分研究·····                 | 陈永高 张瑞斌 (89)        |

|                                                   |                     |
|---------------------------------------------------|---------------------|
| 浙江省氮排放量评估及减氮潜力研究·····                             | 吕 越 陈忠清 (94)        |
| 农村污水处理技术比较分析·····                                 | 黄丽芳 彭理达 (101)       |
| 矿区城市雾霾天气影响因素分析·····                               | 乔 宁 (105)           |
| 基于 Z-score 模型的废水排放总量与浓度综合分析研究·····                | 宋 赧 吴 阳 董小林 等 (110) |
| 经济增长与环境污染的联动关系研究——以天津市为例·····                     | 王会芝 (116)           |
| 水产生态养殖对水环境的影响分析·····                              | 张 莉 方晓宇 唐作芬 (121)   |
| 复合纳米纤维膜载体固定化 HRP 对 2,4-二氯苯酚的催化去除及其影响因素研究<br>····· | 刘思佳 (125)           |
| 移动模块化水处理系统应付水环境突发事件探讨·····                        | 任志鹏 (131)           |
| 中日储罐呼吸排放量计算方法比较分析·····                            | 丁蔚文 邬坚平 张钢锋 等 (134) |

# 多晶硅光伏电池板的生命周期可持续评价

## A Study on Life Cycle Sustainability Assessment of Polycrystalline Silicon Photovoltaic Module

李 劲<sup>1</sup> 张 杭<sup>2</sup> 吴政治<sup>1</sup> (1. 昆明理工大学质量发展研究院, 昆明 650093; 2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093)

Li Jin<sup>1</sup> Zhang Hang<sup>2</sup> Wu Zhengzhi<sup>1</sup> (1. Quality Development Institute of Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

**摘要** 可持续消费与生产兼顾了环境保护、经济发展与社会公平,一直是全世界共同追求的目标。生命周期评价(LCA)因侧重于环境面分析而不能满足对复杂产品的可持续评价。通过联合国环境规划署(UNEP)的生命周期可持续评价理论(LCSA),探讨了产品可持续性评价的方法及应用。由于LCSA相关的评价框架尚不完整,通过文献探讨,分别制定了以清单分析和影响评估为基础的LCSA评价框架。以多晶硅光伏产品作为研究案例,经环境、经济、社会3个层面的可持续热点分析发现,硅晶片是多晶硅光伏电池板的改进重点。研究成果可作为企业管理者评价与分析产品可持续性的参考依据。

**关键字:** 生命周期可持续评价 社会生命周期评价 多晶硅光伏电池板

**Abstract** Sustainable consumption and production taking account of environment protection, economic development and social justice are always the common goals of all over the world. Life cycle assessment (LCA) is a conventional analytical method focusing, however, on environmental aspects whilst hardly fulfilling the demands for assessing sustainability of complex products. Hence, it is attempted to explore a method of product sustainability assessment and its application through UNEP's life cycle sustainability assessment (LCSA). As the LCSA is still in its infancy, the assessment framework has not yet been complete. Through literature searching, two evaluation frameworks were developed based on inventory-oriented analysis and impact-oriented assessment respectively. A product of polycrystalline silicon photovoltaic module was taken as a study case, and several sustainable hotspots were analysed in terms of environmental, economic and social aspects. It has indicated that silicon wafer would be the key that needed to be improved. The findings could be a reference to enterprise managers for evaluating and analysing the sustainability of products.

**Key words:** Life cycle sustainability assessment (LCSA) Social life cycle assessment  
Polycrystalline silicon photovoltaic module

可持续发展(sustainable development, SD)一直是全球共同追求的最终目标。2012年联合国会议为改进可持续发展的体制框架,提升了联合国环境规划署(UNEP)的地位,将原本理事机构改为全体会员制,即非政府组织、青年、妇女、原住民、地方政府、企业及其他利益团体,均可全程参与UNEP理事会及全球环境决策。由此可知目前全球对于可持续发展的重视。而可持续发展的评价主要依靠三大支柱,即环境层面、经济层面和社会层面的完整评价<sup>[1]</sup>。

能源是推动国家经济发展的基本动力,在人民生活和国家安全方面占极重要的地位。目前,世界组织和各国政府面临着4个能源方面的挑战,即:能源安全、应对气候变化、减少污染物和有害健康物质、解决能源

国家自然科学基金,编号:50906035;云南省自然科学基金,编号:2009ZC012X;昆明理工大学人才培养基金项目,编号:14118310。

第一作者李劲,男,1971年生,2008年毕业于昆明理工大学环境与新能源技术研究所,博士,副教授。

危机。因此,再生能源的推动与发展日益重要。在环境层面,再生能源除了产生较小的环境影响外,在经济层面也带来“绿色经济”的契机,而绿色经济是一种低碳、资源高效和社会包容型经济<sup>[2]</sup>。2009年 UNEP 提出“全球绿色新政”的理念,呼吁投资转向可创造更多工作机会的环境计划,修复支撑全球经济的自然生态系统,以解决全球变暖与经济衰退的双重危机。从以上可知,无论可持续发展还是绿色经济,均不再只注重单一层面的研究。但目前常用的评价工具均侧重于对单一层面的评估,如清洁生产(CP)、生命周期成本(LCC)等。而单一层面评估可能会导致经营者决策时发生偏颇。若决策者只注重产品的经济效益,而不去了解产品可能会造成的环境影响,就可能导致产品引发环境污染,影响产品销售和产生额外成本(罚款等),从而对环境或社会均带来负面影响,进而影响企业经济效益。因此,全面评价必将日益受到重视,而生命周期可持续评价可实现此目的。

目前生命周期可持续评价有广泛的应用,上至国家决策评估,小至产品评价,如 Ugwu 等<sup>[3]</sup>提供了可持续评价的权重和方法,并提出了一套非洲国家可以使用的框架。Wood 等<sup>[4]</sup>的研究旨在扩大可持续评价的方法,以帮助偏远地区的政策指导。温室气体减排备受关注,Michlik 等<sup>[5]</sup>提出生物质能源在温室气体减排上是一个不可忽略的重要项目。然而根据经验,每个地区的生物质能源型态或政策,均会影响当地或其他地方,因此对于生物质能源进行生命周期可持续评价就格外重要。Huang 等<sup>[6]</sup>为了满足发展中国家温室气体减排和可持续发展的目标,以我国建筑业为对象,通过文献探讨并引入多属性评估,分析了 11 个主要建筑节能技术。Moriizumi 等<sup>[7]</sup>提出了一套简易的生命周期可持续评价来研究红树林的可持续管理,其研究结果表明,严格的保护系统是最可持续管理红树林的办法,但该研究的指标过于单一,对可持续评价而言太主观而不够全面。Sydorovych 等<sup>[8]</sup>以农业为示范案例,使用联合分析法进行了较为灵活的框架设置,主要目的是提供不同利益关系人之间的比较。综上所述,生命周期可持续评价是重要且应用广泛的理论。光伏产品是再生能源领域的一支重要力量,然而却很少将生命周期可持续评价方法应用于光伏产品。因此,本文以再生能源—多晶硅光伏产品作为生命周期可持续评价案例,进行热点分析,以期为企业进行产品决策时提供参考依据。

## 1 研究方法

### 1.1 生命周期可持续评价

UNEP 于 2011 年发布的《迈向生命周期可持续评价(Towards a Life Cycle Sustainability Assessment)》<sup>[9]</sup>,是一份完整描述生命周期可持续评价的文件。为了达到可靠且稳定的可持续评价,必须应用生命周期观点采取全面性评估,跨领域、多层面进行评估。

目前普遍使用(环境)生命周期评价(ELCA)以衡量环境层面的可持续性,但类似方法在对经济层面生命周期成本(LCC)以及社会层面生命周期评价(S-LCA)的可持续评价受到限制。由于这些方法均以生命周期评价为基础,又均以 ISO 14040(目标范畴、清单分析、影响评估和解释)为基础,可组合为一个总体方法学生命周期可持续评价(LCSA)。Klöpffe<sup>[10]</sup>和 Finkbeiner<sup>[11]</sup>等建议将 3 个技术合并,通过生命周期和 3 个层面(环境、经济、社会)的角度来研究可持续性(见式 1):

$$LCSA=ELCA+LCC+S-LCA \quad (1)$$

将 ELCA、LCC 和 S-LCA 结合起来有助于对产品全面评估,并能提供更多与可持续相关的背景。下面介绍 LCSA 的通用指标和建议。

### 1.2 生命周期可持续评价框架的建构

在大量文献参考的基础上,以 UNEP 的《迈向生命周期可持续评价》为基础,本文提出了综合环境层面、经济层面和社会层面的指标体系(见图 1),主要分为原料阶段、生产制造阶段、使用阶段和最终处置阶段。每一阶段均考虑运输与原料投入,并根据产品特性与适用度对指标进行了删减。因此,只要评估对象为产品便可按照该框架 3 个层面进行分析。

#### 1.2.1 环境层面

主要参考 ISO14040 的 ELCA,分别从原料阶段、生产制造阶段、使用阶段和最终处置进行指标制定,并配以国务院工信部设计之表单进行清单分析。

#### 1.2.2 经济层面

主要参考方法为 LCC,指产品或服务从形成到消失各阶段的有形与无形成本。因此,将此阶段分为:生命周期阶段的原料投入成本、不在生命周期阶段的固定成本(如建厂成本等)和外部成本。其中外部成本是指不在企业营运范围内,但又因企业营运造成影响的成本。此成本以往均由人民负担,不符合社会正义与公平,因此本文将外部成本内部化。外部成本包



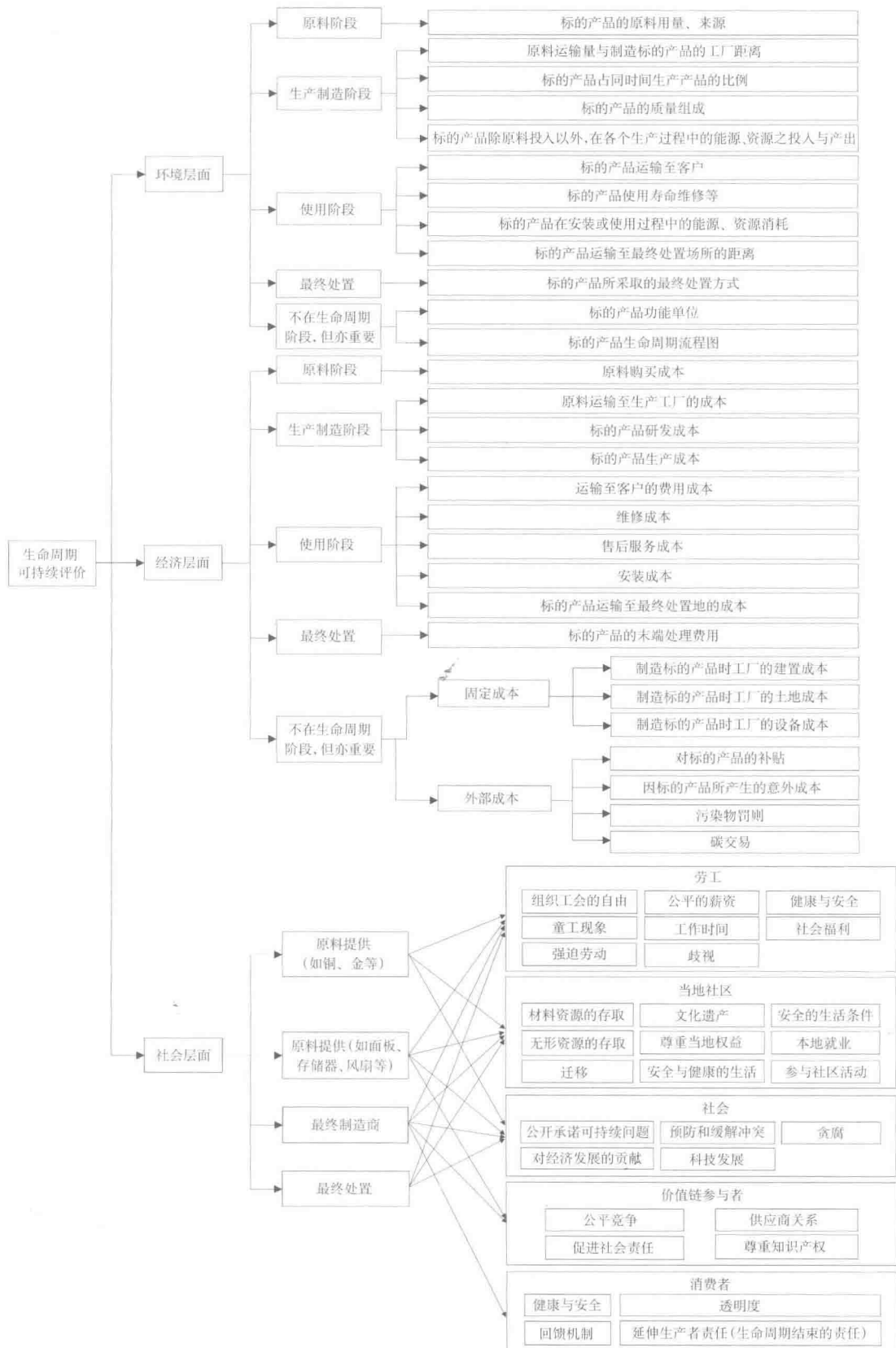


图1 生命周期可持续评价指标

括:政府补贴、意外成本、污染物罚则(空污费等)和碳交易。

### 1.2.3 社会层面

主要参考 UNEP 的《迈向生命周期可持续评价》<sup>[9]</sup> 文件和《产品社会生命周期评价指南(Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products)》<sup>[12]</sup> 文件。由于 S-LCA 评估难以全面量化,本文以半量化方式进行分析,主要分为劳工、当地社区、社会、价值链参与者和消费者等五大层面,再细分为 30 项小指标。UNEP 文件指出,S-LCA 不适合进行产品分配;因此,将制造商与供应商各视为一个单位进行评估。最后,指标的评估会因对象不同而有所区别,指出如下。

(1) 原料阶段(如硅、金等)的评选:主要为劳工、当地社区和社会 3 项主要指标。

(2) 原件提供的供应商(如面板等)的评选:为劳工、当地社区、社会和价值链参与者 4 项主要指标。

(3) 最终制造阶段的评选:除了上述指标外增加了“消费者”指标的评选。

(4) 最终处置阶段的评选:主要为劳工、当地社区和社会 3 项主要指标。

## 2 数据收集

### 2.1 功能单位与系统边界

评价对象为多晶硅光伏电池板(见图 2)。其长、宽、高分别为 1 668 mm、1 000 mm、40 mm,重量 20 kg。1 片模块,内含 60 个电池片,标准发电瓦数为 240 W。功能单位为 1 片 PV 模块(含 60 个电池片)。产品生命周期评价的系统边界范围为原料开采与制造、光伏模块产品制造组装、产品包装到离开组织的大门口等阶段,阶段内的运输活动也包含在此次清单分析范围内,但没有考虑产品配送、产品使用阶段和产品弃置阶段的结果。多晶硅光伏电池板的制作程序见图 3。

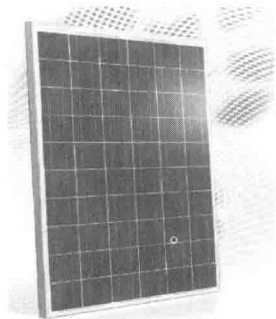


图2 多晶硅光伏电池板

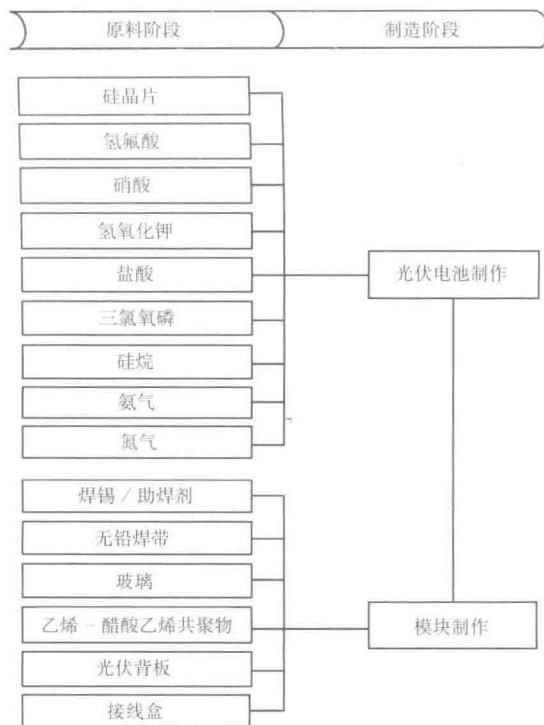


图3 多晶硅光伏电池板的制作程序

## 2.2 影响评价

### 2.2.1 环境层面

仅考虑温室气体的影响,温室气体依照《PAS 2050: 2011 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》计算。针对此次清单分析使用的计算规则以及引用的排放系数数据库见下:

① 产品温室气体排放量量化方式为:

$$\text{排放量} = \text{活动数据} \times \text{排放系数} \times \text{GWP 值}。$$

② LCA 计算软件: Simapro V 7.2.3。

③ 排放系数数据库: Ecoinvent System Process、ETH-ESU 96 System Process、IDEMAT 2001、Airborne emission。

④ GWP 值: IPCC 2007 第 4 版数值。

### 2.2.2 经济层面

成本数据属于敏感数据,本文参考公开信息,除年报数据外,还包含网站的公开市场价格信息及相关文献。其计算公式:

$$\text{成本} = \text{公开价格} \times \text{适当比例}$$

### 2.2.3 社会层面

参考 UNEP《产品社会生命周期评价指南》和我国

江苏省某光伏企业于 2013 年发布的 LCA 生态标签内部文件进行绩效和影响评价计算。

2.3 研究限制

2.3.1 环境层面

仅考虑温室气体影响。对于因时间、人力及供应商配合等问题而无法查到的数据,利用生命周期评价工具的资料或国际上通用数据代替计算之。

2.3.2 经济层面

由于成本信息的敏感性及收集的困难性,本文成本数据仅包括原料阶段的原料购买成本、制造阶段的生产成本(仅含电力成本)及外部成本中的意外成本,即罚单成本。另配合研究需要,对于公开价格,按产能贡献比例作为分配依据;对于整体供应链信息,按适当比例作为分配依据。

2.3.3 社会层面

由于供应商社会层面提供数据的时效性,本次调查采用自主性调查法,即针对网站可搜索到的资料进行专家评分。另考虑调查的边际效益,未进行全面供应商社会面评比,而是考虑主要产品组成,按照产品重量达 50% 以上且碳排放达 80% 的原则,进行供应商选择。

3 结果与讨论

主要以江苏某光伏企业根据本案例所拟定的生命周期评价框架进行自行清单分析,并提供部分数据给本案例研究之用,就 3 个层面(环境、经济和社会)进行说明。

3.1 环境层面

环境层面主要讨论碳足迹(见表 1)。结果表明,多晶硅光伏电池板的主要碳排放来源为硅晶片,131.41 kg (CO<sub>2</sub>)eq 约占碳足迹总量的 46.46 %。对于环境层面来说,硅晶片是优先考虑减量的对象。

3.2 经济层面

由于清单资料涉及企业机密,本文的经济层面数据参考公开网站资料及相关分配,比如:原料的购买成本参考了市场上该原料的公开价格,而不考虑实际购买成本。此外,除环境污染罚款进行相关计算外,其总体数据没有纳入其他外部成本,结果见表 2。多晶硅光伏电池板的成本最高来源为硅晶片 4 680 元,约占总成本的 29.83 %。

3.3 社会层面

本案例所选择的评价对象为多晶硅光伏电池板,占产品质量达 50% 以上且碳排放达 80% 才进行评估。计算结果见表 3,其中玻璃对社会负面影响较大,为 6 分。

3.4 综合绩效评估

传统评估结果只考虑单一层面,无法综合判定决策。比如:1 家企业在购买原料 A 或 B 时,若仅以经济面考虑而选择成本较低的产品 A,但后续因其环境污染所造成的影响,导致原料 A 必须付出的总成本远大于初期购买成本。但要进行 3 个层面的比较,由于环境、经济和社会的衡量尺度与单位各不同而有困难,如何以多目标决策的方式提供综效很重要(见表 4),分别有不同的清单评估结果。因此,综合评估的重点在于

表1 多晶硅光伏电池板的环境层面数据

| 序号 | 部件         | 环境层面[总排放,kg(CO <sub>2</sub> )eq] | 比例(%) |
|----|------------|----------------------------------|-------|
| 1  | 导电胶        | 1.15                             | 0.41  |
| 2  | 气体         | 4.34                             | 1.53  |
| 3  | 化学品(含硝酸等)  | 1.23                             | 0.43  |
| 4  | 硅晶片        | 131.41                           | 46.46 |
| 5  | 铝框         | 47.30                            | 16.73 |
| 6  | 接线盒        | 0.19                             | 0.07  |
| 7  | 无铅焊带       | 0.10                             | 0.04  |
| 8  | 乙烯-醋酸乙烯共聚物 | 4.14                             | 1.46  |
| 9  | 玻璃         | 14.45                            | 5.11  |
| 10 | 其他         | 1.09                             | 0.39  |
| 11 | 光伏电池制作     | 51.76                            | 18.30 |
| 12 | 模块制作       | 25.67                            | 9.08  |

表2 多晶硅光伏电池板的经济层面数据

| 序号 | 部件         | 经济层面(成本,元) | 比例(%) |
|----|------------|------------|-------|
| 1  | 银胶         | 853        | 5.44  |
| 2  | 导电胶        | 3 128      | 19.93 |
| 3  | 气体         | 3 285      | 20.94 |
| 4  | 化学品(含硝酸等)  | 61         | 0.39  |
| 5  | 硅晶片        | 4 680      | 29.83 |
| 6  | 铝框         | 453        | 2.89  |
| 7  | 接线盒        | 37         | 0.23  |
| 8  | 无铅焊带       | 244        | 1.56  |
| 9  | 乙烯-醋酸乙烯共聚物 | 466        | 2.97  |
| 10 | 玻璃         | 2 353      | 15.00 |
| 11 | 其他         | 25         | 0.16  |
| 12 | 光伏电池制作     | 105        | 0.67  |
| 13 | 模块制作       |            |       |

表3 多晶硅光伏电池板的社会层面数据

| 序号 | 部件         | 社会层面<br>(1~6分,1分对社会最具社会效益,6分对于社会具有负面影响) |
|----|------------|-----------------------------------------|
| 1  | 硅晶片        | 4.67                                    |
| 2  | 铝框         | 4                                       |
| 3  | 接线盒        | 4.87                                    |
| 4  | 无铅焊带       | 4.67                                    |
| 5  | 乙烯-醋酸乙烯共聚物 | 5                                       |
| 6  | 玻璃         | 6                                       |
| 7  | 光伏电池制作     | 3.2                                     |
| 8  | 模块制作       |                                         |

整合 3 个层面的指标。

本文选用的整合方法为热点法,即通过热点来衡量生命周期哪一阶段造成的影响最大。由于本文的生命周期可持续评价并未特别强调各层面的重要性,因此权重各为 1:1:1。为使数据能同时考虑 3 个层面的热点效应,将数据进行归一化处理(见表 5),再采用相加模式,代表综合结果,也称为“可持续热点”。结果见表 6 与图 4。发现可持续热点,对于多晶硅光伏电池板,优先改善硅晶片将使环境、经济和社会 3 方面可获最大效益,其余依次为铝框、玻璃、光伏电池制作+模块制作、乙烯-醋酸乙烯共聚物、接线盒和无铅焊带。此结果能为企业进行可持续发展提供很大帮助。比如,若单

就环境层面,可能的策略是原物料的替换;若纳入经济层面考虑,可能替换的幅度与顺序就会有所调整;若再纳入社会层面,可能会慎选适合的供应商合作。因此,有助于决策者综合考虑可持续产品的开发。

3.5 生命周期可持续评价的效益

3.5.1 协助决策者进行产品可持续性的判断(内部管理工具)

在本文的分析结果中,经济层面指标最欠缺。但如果企业内部进行分析,经济层面数据的获得会更容易。本文分析发现,单以碳足迹来看,硅晶片的改善空间最大;如在社会层面则以玻璃最高。因此,企业可以很容易辨认出,本次产品在供应商中的问题(环境、经

表4 多晶硅光伏电池板的 3 个层面比较

| 序号 | 部件         | 环境层面<br>[总排放, kg(CO <sub>2</sub> )eq] | 经济层面<br>(成本, 元) | 社会层面<br>(1~6 分, 1 分对社会最具社会效益,<br>6 分对于社会具有负面影响) |
|----|------------|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|
| 1  | 银胶         | —                                     | 853             | —                                               |
| 2  | 导电胶        | 1.15                                  | 3 128           | —                                               |
| 3  | 气体         | 4.34                                  | 3 285           | —                                               |
| 4  | 化学品(含硝酸等)  | 1.23                                  | 61              | —                                               |
| 5  | 硅晶片        | 131.41                                | 4 680           | 4.67                                            |
| 6  | 铝框         | 47.30                                 | 453             | 4                                               |
| 7  | 接线盒        | 0.19                                  | 37              | 4.87                                            |
| 8  | 无铅焊带       | 0.10                                  | 244             | 4.67                                            |
| 9  | 乙烯-醋酸乙烯共聚物 | 4.14                                  | 466             | 5                                               |
| 10 | 玻璃         | 14.45                                 | 2 353           | 6                                               |
| 11 | 其他         | 1.09                                  | 25              | —                                               |
| 12 | 光伏电池制作     | 51.76                                 | 105             | 3.20                                            |
| 13 | 模块制作       | 25.67                                 |                 |                                                 |

表5 多晶硅光伏电池板的 3 层面热点分析

| 序号 | 部件         | 环境层面    | 经济层面    | 社会层面    |
|----|------------|---------|---------|---------|
| 1  | 银胶         | —       | 0.182 3 | —       |
| 2  | 导电胶        | 0.008 8 | 0.668 3 | —       |
| 3  | 气体         | 0.033 0 | 0.701 9 | —       |
| 4  | 化学品(含硝酸等)  | 0.009 4 | 0.013 0 | —       |
| 5  | 硅晶片        | 1.000 0 | 1.000 0 | 0.78    |
| 6  | 铝框         | 0.359 9 | 0.096 8 | 0.67    |
| 7  | 接线盒        | 0.001 4 | 0.007 8 | 0.81    |
| 8  | 无铅焊带       | 0.000 8 | 0.052 2 | 0.78    |
| 9  | 乙烯-醋酸乙烯共聚物 | 0.031 5 | 0.099 5 | 0.83    |
| 10 | 玻璃         | 0.110 0 | 0.502 7 | 1.00    |
| 11 | 其他         | 0.008 3 | 0.005 4 | —       |
| 12 | 光伏电池制作     | 0.589 2 | 0.022 4 | 0.533 3 |

表6 多晶硅光伏电池板之可持续热点分析

| 序号 | 部件          | 可持续热点 |
|----|-------------|-------|
| 1  | 硅晶片         | 2.78  |
| 2  | 铝框          | 1.12  |
| 3  | 接线盒         | 0.82  |
| 4  | 无铅焊带        | 0.83  |
| 5  | 乙烯-醋酸乙烯共聚物  | 0.96  |
| 6  | 玻璃          | 1.61  |
| 7  | 光伏电池制作+模块制作 | 1.14  |

济或社会),并据此分辨企业对于该产品的期望(该产品的存在或销售将以环境为主、经济为主、社会为主还是以可持续发展为主)。

3.5.2 良好的社会形象(对外沟通工具)

评估结果也可让大众了解,企业并不只是关注产品的经济效益,而是将产品可能引发的环境和社会问题也一并纳入考虑,可消除大众对于企业的负面印象(如唯利是图等)。

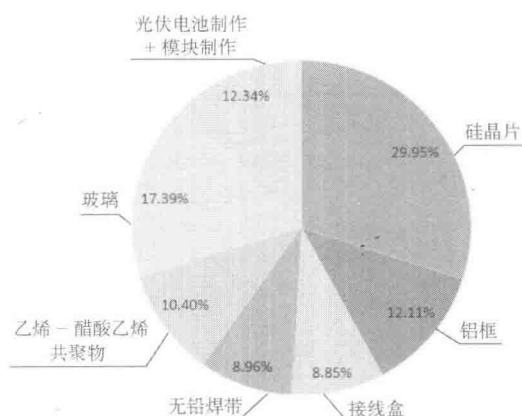


图4 多晶硅光伏电池的可持续热点分析

#### 4 结论与建议

生命周期可持续评价尚属新颖方法学,需要有更多运用、更多数据和在相关具体领域的进一步研究。

(1) 对于再生能源而言,生命周期可持续评价极为重要。但从目前的文献看,能源的可持续评价还不完整,相关研究偏向于环境层面或经济层面的评估,其中社会层面的评估最少。

(2) 进行再生能源产品的可持续评价时,发现 LCSA 会因为不同再生能源产品或对象而有不同的评价指标,但总体来说评价框架上仍然是一样的。因此,建议借助 UNEP《迈向生命周期可持续评价》框架,建立我国产品生命周期评价与可持续管理框架。

(3) 以江苏某光伏企业的光伏产品—多晶硅光伏电池板为例,通过生命周期可持续评价以及热点法分析结果表明,硅晶片的整合数据为 2.78,其次为玻璃 1.61、铝框 1.12、光伏电池制作+模块制作 1.14、乙烯-醋酸乙烯共聚物 0.96、无铅焊带 0.83 和接线盒 0.82。因此,优先改善硅晶片可使环境、经济和社会 3 方面获得最大效益,即对于该产品的可持续具有多目标的综合效果。

#### 5 参考文献

- [1] SINGH R K, MURTY H R, GUPTA S K, et al. An overview of sustainability assessment

methodologies [J]. Ecological Indicators, 2012,9(2): 281-299.

- [2] UNEP. Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication [M]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2011.
- [3] UGWU O O, HAUPT T C. Key performance indicators and assessment methods for infrastructure sustainability-a South African construction industry perspective [J]. Building and Environment, 2007,42 (2):665-680.
- [4] WOOD R, GARNETT S. Regional sustainability in Northern Australia-A quantitative assessment of social, economic and environmental impacts [J]. Ecological Economics, 2010,35(6):1877-1882.
- [5] MICHLIK L A, LUCHT W, BONDEAU A, et al. Integrated assessment of sustainability trade-offs and pathways for global bioenergy production: Framing a novel hybrid approach [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011,15(6):2791-2809.
- [6] HUANG B, YANG H, MAUERHOFFER V. Sustainability assessment of low carbon technologies-case study of the building sector in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2012,32(1):244-250.
- [7] MORIIZUMI Y, MATSUI N, HONDO H. Simplified life cycle sustainability assessment of mangrove management: a case of plantation on wastelands in Thailand [J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(16-17):1629-1638.
- [8] SYDOROVYCH O, WOSSINK A. The meaning of agricultural sustainability: Evidence from a conjoint choice survey [J]. Agricultural Systems, 2008,98 (1):10-20.
- [9] UNEP. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment [M]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2011.
- [10] KLÖPPFER W. Life cycle sustainability assessment of products [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2008,13(2):89-95.
- [11] FINKBEINER M, SCHAU E, LEHMANN A. Towards life cycle sustainability assessment [J]. Sustainability, 2010,2(10):3309-3322.
- [12] UNEP/SETAC. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products [M]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2009.

责任编辑 梁丹涛 (收到修改稿日期:2015-09-21)

# 景观文化服务研究现状及发展对策

## Current Status of the Study on Landscape Cultural Services and Measures for Their Development

姚 荣<sup>1,2,3</sup> 刘玉虹<sup>2,3</sup> 贾志斌<sup>2\*</sup> 王立新<sup>2</sup> 刘华民<sup>4</sup> (1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300400; 2. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 3. 中科院烟台海岸带研究所滨海湿地实验室, 烟台 264003; 4. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021)

Yao Rong<sup>1,2,3</sup> Liu Yuhong<sup>2,3</sup> Jia Zhibin<sup>2\*</sup> Wang Lixin<sup>2</sup> Liu Huamin<sup>4</sup> (1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300400; 2. College of Environment Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021; 3. Laboratory of Coastal Wetland, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003; 4. College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021)

**摘要** 通过检索 2003~2014 年国内外关于景观文化服务的文献, 将相关文献分为 7 类, 即景观文化服务功能、生态建设、生态文明、生态风险、生态补偿、景观文化服务价值评估、文化景观管理; 并在此基础上, 对检索文献的研究内容、数量、研究方法等进行对比分析。分析结果显示: 在内容方面, 国内外文献侧重的领域不同; 在数量方面, 国外文献各方向的数量相对均衡, 而国内文献侧重研究景观文化服务价值和景观文化服务功能; 在研究方法方面, 国内外研究方法类同, 但在评估体系、价值核算标准等方面存在差异。根据文献分析结果, 探讨了当前景观文化服务发展的难点, 并对其未来发展趋势进行了预测。

**关键词:** 景观生态学 景观服务 景观文化服务

**Abstract** Through the retrieval of domestic and overseas literatures for the period 2003~2014 about landscape cultural services, they could be divided into seven categories, i.e., landscape cultural service function, ecological construction, eco-civilisation, ecological risk, ecological compensation, evaluation of landscape cultural services and cultural landscape management. A comparative analysis was hereby conducted on their study contents, number of papers published, research methodologies, and etc. It was shown that there were different fields emphasised in the domestic and overseas literatures. In view of the number of literatures, the overseas ones were balanced in all aspects whilst the domestic ones stressed researches in values and functions of landscape cultural services. Similarities in both domestic and overseas research methodologies were found, whereas there were differences in assessment systems and value accounting criteria in between. Based on those analyses, nodi in development of landscape cultural services were discussed and its trend was predicted as well.

**Keywords:** Landscape ecology Landscape services Landscape cultural services

景观是由不同土地单元镶嵌组成、具有明显视觉特征的地理实体, 是人与环境的相互作用的空间复合系统及自然人文综合体<sup>[1]</sup>, 兼具经济、生态和美学价值<sup>[2]</sup>。景观功能是指景观结构与生态学过程的相互作用, 或景观结构单元之间的相互作用<sup>[3]</sup>。

景观服务功能是指景观为满足人类需求直接或间接提供的产品和服务, 主要包括供给功能、调节功能、

生境功能和文化功能等, 其理论核心主要包括空间异质性、生态系统的整体性及生物多样性与稳定性。目前, 对景观文化服务功能没有明确定义, 根据 Global

内蒙古自然科学基金项目, 编号: 2013MS0506。

第一作者姚荣, 女, 1990 年生, 2012 年毕业于内蒙古大学历史与旅游文化学院, 在读博士研究生。

\*通信联系人, nmhsjzb@163.com。

MEA、TEEB 以及 de Groot 的景观尺度分类等指标来源分析,景观文化功能可包含美学价值、历史价值、休闲与旅游价值、教育与科研价值、地方归属感和其他非物质价值等含义。为了进一步明确景观文化服务功能含义及服务类型,本研究通过搜集近 10 年 SCI(Web of Science)和 CNKI 相关文献,整合了当前涉及景观文化服务文献的不同研究方向,通过数据比较,提出其未来的研究方向及发展趋势。

## 1 国内外景观文化服务研究进展

### 1.1 景观文化服务功能文献检索概况

由于国内涉及景观文化服务文献相对较少,因此在 CNKI 采取关键词全文搜索,而在 SCI 采取关键词搜索(见图 1 至图 4),可以发现:国内外都越来越关注景观文化服务功能的研究,国内研究显著多于国外,说

明国内关注景观文化功能研究的需求更高。通过景观服务功能与景观文化服务功能的比较,国内外更趋向研究景观文化功能。

### 1.2 国内外研究

20 世纪 80 年代,景观生态学作为生态学和环境科学领域的新兴综合交叉学科,逐渐得到蓬勃发展<sup>[4]</sup>,景观文化服务功能作为其一部分,相对研究较少,属于新兴学科。本文通过衔接景观生态学相关进展,对涉及景观文化服务的相关论文进展做出总结。

#### 1.2.1 国外研究进展

1990 年,国际景观生态学会设立了包括农业生态系统、景观生态学、城市生态学、地理信息系统、文化生态学、景观生态规划等 10 个工作组<sup>[5]</sup>,标志国际学会对景观生态及其功能开始充分重视。

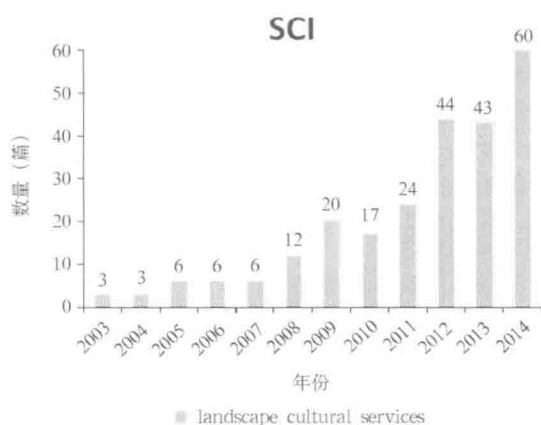


图1 Web of Science 检索 SCI 文章发表数量  
(关键词:Landscape Cultural Services)

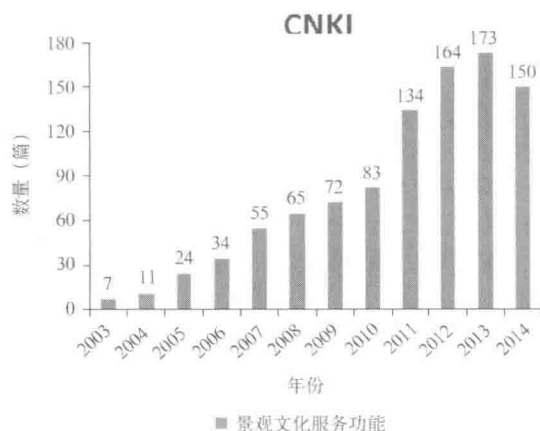


图2 CNKI 检索中文文章发表数量  
(关键词:景观文化服务功能)

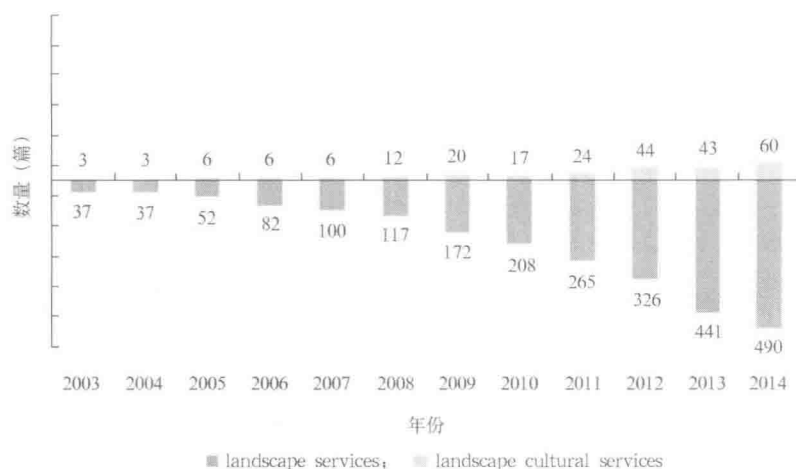


图3 SCI 关键词检索相关文献数量对比情况  
(关键词:Landscape Services 和 Landscape Cultural Services)



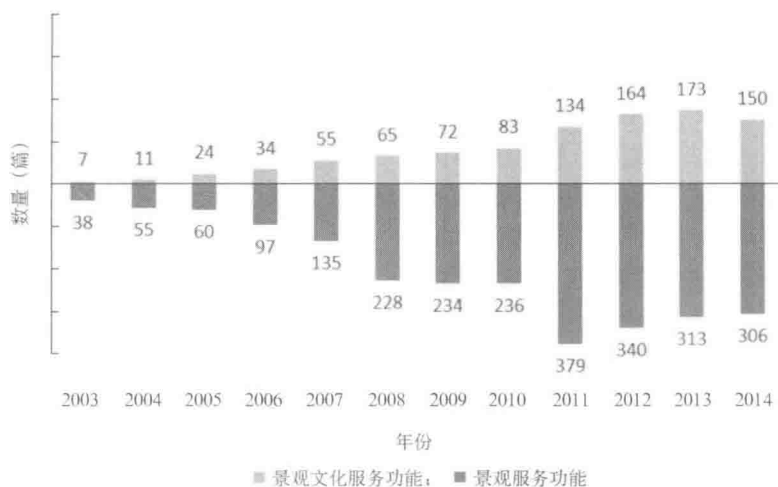


图4 CNKI 关键词检索相关文献数量对比情况  
(关键词:景观服务功能和景观文化服务功能)

1990~2000年,国外研究重点主要集中在景观服务类型分类细化及与人的耦合关系初探,例如 Kongjian Yu 用聚类分析解析了旅游者对景区景观的期望值及其对游客行为的影响和不同游客对同一景观的认知会根据其社会活动、经历、性格和行为的不同而产生差异<sup>[6]</sup>;David Rapport 揭示了景观服务功能评估需要结合社会学和自然科学<sup>[7]</sup>;Daily 根据生态组成的服务过程及功能的传递,细化了生态服务的分类<sup>[8]</sup>。

2000~2009年,景观制度建设、规划设计、管理等方向也开始涉及景观文化服务的内容,例如 Claya 以照片形式对美国犹他州的居民进行了感知评价调查,揭示了公众参与对景观管理措施起主导作用<sup>[9]</sup>;同时,3S 技术也开始应用于景观文化功能调查,例如 Svancara 用 3S 技术监测黄石国家公园保护区景观动态类型分布,分析景观功能,提出了评估管理措施,为邻域保护提供借鉴<sup>[10]</sup>。

2010年至今,景观服务的研究内容愈加多元化,逐步探究景观服务间的相互关系,具体包括:①不同景观功能间的相互关系。如 de Groot 评估了景观文化功能,揭示了景观文化、调节、支持、供给功能间的相互关系<sup>[11]</sup>;②景观服务在生态补偿和生态敏感区应用研究。Willemsen 分析了荷兰 GelderseVallei 地区 7 项景观服务分析,提出景观破坏的生态补偿政策<sup>[12]</sup>。Anna Hermann 通过对不同景观尺度和景观类型上的服务热点定位,建立了生态敏感区的景观服务评价工具<sup>[13]</sup>。③评价主体更加多元化。Rocco Scolozzi 用德尔菲等方法,建立了以专家评价为主的生态系统评估体系<sup>[14]</sup>。

Nora Fagerholm 用信息汇总的方式,收集了相关利益者对于景观丰度、生物物种多样性系数的评价,为制定地区景观管理体系提供了依据<sup>[15]</sup>;④景观服务与人类福祉相辅相成。例如 Wu 详细论述了生态和景观服务对人类福祉、可持续发展的重要性,明确了生物多样性和生态服务功能共同决定自然资本和自然社会系统之间的物质流<sup>[16]</sup>,阐明人类需求与福祉和环境紧密相关。⑤景观评价体系创建。Hermann 用社会经济、意愿评估法,根据研究区位置和空间分布,对其建立景观评价体系<sup>[17]</sup>。根据评估模型进行外推,结合 LULC 赋值,使其景观服务价值可视化。

#### 1.2.2 国内研究进展

1989年中国景观生态协会成立,标志着中国的景观研究学逐渐起步。傅伯杰通过对欧洲、美洲景观学进展研究,提出景观学发展的四大趋势:景观的结构、功能、稳定性、异质性、物质交换,能量转化过程,景观生态系统的动态变化和模拟,人工景观生态系统<sup>[18]</sup>。

2000~2009年,景观生态学逐步涉及人类福祉,例如郭建国提出应该把人类和人类活动整合到景观生态学中,并且重点关注了景观水平的生物多样性保护和可持续性发展<sup>[19]</sup>。并且景观服务价值评估逐渐成为学科热门,评估对象呈现多样化,以自然景观为例,评估对象包括流域、湖泊、海洋/海湾、湿地/沼泽、高原、森林、红树林、荒漠/沙漠、草原、岩溶地区等。

2010年至今,主要包含以下发展方向:①景观服务认识不断深化,研究层次也愈加丰富。王让会分析了景观异质性、景观功能、景观研究方法研究主要进展,