

# 国际水电可持续性评价技术发展动态

水电中心 隋欣、柳春娜

## 1 学科方向

可持续发展，一方面成为全球或国家的战略目标选择，另一方面又成为诊断区域开发及其健康运行的标准。由于工业化带来的资源枯竭、环境污染、生态破坏等严重问题，迄今为止，可持续发展已经成为 21 世纪“人口——自然资源——生态环境——社会——经济”复杂巨系统的运行规则，是世界各国共同面对的中心问题之一。水能是目前技术成熟、经济上可承受的可再生能源，但开发活动引起的移民、生态影响也日益受到重视，国际社会开始不断探索对水电开发规划和具体工程项目开展综合评价，瑞士绿色水电认证、美国低影响水电、IHA《水电可持续性指南》和《水电可持续性评价规范》的出台，推动国际水电可持续开发进程。

我国水能资源占世界第一位，水能资源开发在国家温室气体减排、能源供应方面具有重要的地位。我国在水能资源开发利用中也日益重视生态保护、移民社会影响等问题，促进水能资源持续高效利用是行业的战略。借鉴国际经验，建立与国际接轨的水电开发技术、方法、标准体系，对促进水电开发的长远发展具有重要作用。近年来我国将 IHA《规范》引入中国，国家水电可持续发展研究中心完成了澜沧江景洪和糯扎渡水电站的可持续性评估工作，开展了中国水电可持续发展的研究工作，完成了乌江梯级水电可持续发展评价课题，国家能源局积极推动《中国水电可持续性评价指南》的编制工作。

水电可持续性评价涉及社会、经济、环境、管理、技术等多个层面，旨在获得水电开发利用综合效益的最大化。开展中国水电可持续性评价是全面认识和评价能源体系中水电能源地位和作用的重要手段，也是破解水电建设项目生态及移民瓶颈的重要依据。开展中国水电可持续性评价对于促进和实现国家能源战略，加强水电行业管理，促进水电事业的又好又快发展具有重要意义，同时也是贯彻落实党的十八大和十八届三中全会精神，满足生态文明建设战略目标的需要。

## 2 调研背景概述

通过开展国际水电可持续性评价技术文献调研，可为吸收借鉴国际经验，解决水电可持续性评价关键技术问题，形成适合我国国情、具有可操作性的水电可持续性评价技术方法体系提供技

术支撑，为破解具有行业性质的《中国水电可持续性评价指南》编制过程中面临的技术瓶颈提供技术保障，从而指导和推动中国水电可持续性评价工作的全面实施。

调研报告编写组采用了文献计量学的方法，梳理了在《Energy》、《Renewable & Sustainable Energy Reviews.》、《Energy Policy》、《Energy Economics》等期刊上与水电可持续发展相关的 424 篇论文。并在此基础上，应用统计分析方法进一步筛选精读了 2007 年至今与水电可持续性发展相关度较高的 18 篇文献，并进行了参考文献追踪，补充收集了 14 篇最新水电可持续性评价技术英文文献。针对逐级收敛筛选的 32 篇英文文献，对国际水电可持续性概念及评价技术进行了梳理和分析。

### 3 当前学科发展新动向和值得关注点

#### 3.1 本学科发展的新方向和值得关注点

电力能源需求是经济和社会可持续增长的关键要素，以满足人口、城镇化和工业化的要求。近年来，关于可持续性提出了很多不同的概念，根据 Kreibich 的总结，关于可持续发展约有 70 余种不同的定义<sup>[1]</sup>。Parris and Kates 指出，世界范围内已有超过 500 种可持续性概念<sup>[2]</sup>。Renn et al. 根据包含范围的数量和内容，对这些可持续性概念进行了分类。其中，单一核心的概念是最早提出的，主要关注生态影响<sup>[3]</sup>。在这个概念中，可持续性被定义为长期生态系统的和谐性；社会和经济指标虽然是位于生态保护指标之后的，但在政策制定和决策过程中仍需要考虑<sup>[4]</sup>。总体上，能源系统的经济 and 生态可持续性评价在已有研究中受到广泛关注，但是社会可持续性的相关研究较少<sup>[5,6]</sup>，现有社会可持续性研究都集中在可持续能源供给方面<sup>[2,7,8]</sup>。

Carrera and Mack 指出仅评价可持续发展经济和生态多样性是不够的，还需要考虑能源技术的社会效应。社会可持续性评价是近年来能源可持续性研究中关注的焦点<sup>[9]</sup>。Ribeiro et al. 指出，可持续能源项目规划中应该考虑社会评价，并提出了 100 个社会可持续性评价指标<sup>[10]</sup>。Onat and Bayar 指出，社会可持续性评价可从环境影响的外部效益和人类方面的外部成本两个角度来考虑<sup>[11]</sup>。Renn et al. 进一步扩充了可持续性概念核心，定义了五个核心内容的可持续性，即社会、经济、生态、文化和机构的稳定性<sup>[3]</sup>。也有学者在研究过程中，将文化与机构的稳定性划归社会范畴中<sup>[2]</sup>。Sternberg 强调，水电可持续性应包括技术、经济、环境和社会四个方面，这四个方面与水电建设项目共生<sup>[12]</sup>。

总体上，能源电力领域的可持续性概念是“持续提高电力能源的生产能力，维持生产阶段废弃材料的数量可以被清理，保证人类的健康风险在尽可能低的成本，实现采用包括环境资源在内的初始材料的能源生产过程”。简言之，可持续能源生产与绿色能源的概念类似，旨在制造减少自然资源的消耗量，降低有害气体的生产量，淘汰产生高耗能的电力生产产业链，从而实现减缓全球气候变暖，平衡世界经济发展<sup>[11]</sup>。

## 3.2 国际水电可持续性评价方法

水电可持续性定量评价方法主要包括系统动力学方法<sup>[13]</sup>、能源投资回报率方法<sup>[14]</sup>、模糊层次分析法<sup>[15,16]</sup>和多准则决策分析方法<sup>[17,18]</sup>等。其中，能源投资回报率方法主要是用来进行多种能源开发方式的比较分析，仅用于水电可持续性评价过程中不同能源方案的比较研究，在此不做详细介绍。相比于系统动力学和模糊层次分析方法，多准则决策分析方法是在国际上应用较为普遍的能源可持续性评价的工具。相对于经济和环境指标，社会可持续发展评价涉及范畴较广，研究过程中选取的指标差异较大，因此，本报告对国家社会可持续发展评价指标体系也进行了综述。

### 3.2.1 系统动力学方法

系统动力学（System Dynamic，SD）是一种以反馈控制理论为基础、以计算机仿真技术为手段的研究复杂社会经济系统的定量方法，由美国麻省理工学院 Forrester 教授于 20 世纪 50 年代中期创立。该方法是在总结运筹学的基础上，综合系统理论、控制论、信息反馈理论、决策理论、系统力学、仿真与计算机科学等基础上形成的，以复杂的大系统为研究对象，从系统的整体出发，着重分析系统内部子系统之间的因果关系以及信息反馈环的动态行为特征，应用计算机模拟技术求得系统的宏观行为，建立各个要素及相互作用的流图与模拟模型，实施不同的政策调控，从而寻求解决问题的途径，以实现系统的优化控制。对于可持续发展而言，系统动力学的应用主要体现在通过建立系统模型，从人口、资源与环境等角度对区域可持续发展战略的政策进行仿真分析，在此基础上对比得出最优模型，并最终根据假设的条件制定本地区可持续发展的方针政策。

Musango 等应用系统动力学方法理论建立了技术可持续性评价概念模型（a systems approach to technology sustainability assessment，SATSA）<sup>[13]</sup>，见图 1。

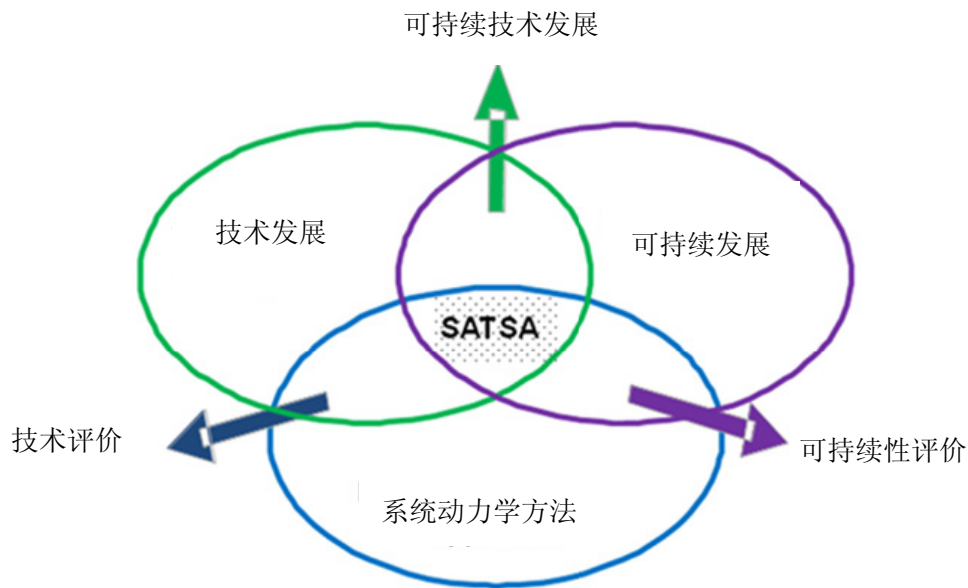


图 1 技术可持续性评价概念模型 (SATSA)

Musango and Brent 基于 SATSA 概念框架, 提出了生物能技术可持续性评价模型 (BIOTSA)<sup>[19]</sup>, 并以 Vensim 软件平台为依托, 仿真和分析了生物能的生产过程, 提出了生物能技术可持续性的评价指标, 见表 1<sup>[20]</sup>。

表 1 生物能技术可持续性评价指标体系

分类	指标
经济	生物能生产、生物能利益、GDP
社会	雇佣率、社会感知
环境	土地利用类型变化、空气污染、生物能副产品、水资源、能源消耗

### 3.2.2 模糊层次分析法

模糊层次分析评价是以模糊数学为基础, 应用模糊关系合成的原理, 将一些边界不清、不易定量的因素定量化, 从多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价的一种方法。

模糊层次分析评价方法步骤包括, 建立评价因素 (指标) 集; 建立 (决策) 评语集; 确定指标权向量; 建立单因素评价矩阵, 计算各被评指标的评价结果向量; 最后进行果评价。

### 3.2.3 多准则决策分析方法

#### (1) 多准则决策分析与成本效益分析的区别

如果项目和决策对目标的影响能够通过经济评价方法衡量, 所有由建设项目引发的影响和效益均可纳入传统的成本效益分析决策框架。然而, 一些建设项目带来的大尺度社会和生态影响难以直接货币量化, 多准则决策分析则可作为成本效益分析的补充方法进行综合量化评价。

多准则决策分析主要从三个方面区别于传统的成本效益分析方法。首先，成本效益分析着眼于效率；多准则决策分析既包括效率，也兼顾考虑社会或其他形式的公平。第二，成本效益分析要求定量测量效果，容许应用各种价格；多准则决策分析则包括定量数据、定性数据和半定量数据三种情况。最后，成本效益分析使用的价格可根据公平权重进行调整；多准则决策分析不要求使用价格，与定价相对，多准则决策分析侧重于对不同群体的相对优先性赋予权重。因此，如果效率是唯一的标准，且用来评价效率的价格又是可得的，则成本效益分析方法更可取。然而，现实情况下由于可应用的量化数据较少，大尺度社会和生态影响往往难以量化，因此，多准则决策分析方法的应用范围更为广泛。

### (2) 应用于能源可持续性评价的多准则决策分析指标

Wang 等学者对截至 2008 年有关能源供应系统可持续性评价的国际期刊论文进行了综述，统计了技术、经济、环境和社会四个方面的评价指标在文献中应用的频次，为找出普遍关注性的指标提供基础。研究结果（如表 2 所示）表明<sup>[17]</sup>，投资成本和二氧化碳排放量两个指标在能源供应系统可持续性评价中出现的次数最高；效率、投资成本、二氧化碳排放量和就业机会分别是最常见的技术、经济、环境和社会评价指标。

表 2 不同评价指标在文献中应用的频次

领域	标准	应用频次
技术	效率	15
	一次能源比率	4
	安全性	9
	可靠性	9
	成熟性	3
	其他	-
经济	投资成本	24
	营运维护成本	13
	燃料费	9
	电力成本	7
	净现值	5
	偿还期	4
	使用期限	4
	等值年成本	4
	其他	-
环境	NO <sub>x</sub> 排放量	12
	CO <sub>2</sub> 排放量	21
	CO排放量	3
	SO <sub>2</sub> 排放量	8

领域	标准	应用频次
	粉尘排放量	5
	非甲烷挥发性有机化合物	3
	土地利用	10
	噪声	6
	其他	-
社会	社会认可度	4
	就业机会	9
	社会效益	5
	其他	-

### (3) 应用于能源可持续性评价的多准则决策分析指标权重确定方法

能源可持续性评价中，多准则决策分析指标权重确定方法包括主观权重法、客观权重法和组合加权方法。各种权重确定方法在文献中出现的次数见表 3。多准则决策分析方法中可应用的权重确定方法见表 4。总体上，层次分析法（Analytic Hierarchy Process 简称 AHP）依然是最常用的权重确定方法。

表 3 不同指标权重确定方法在文献中应用的频次

权重类别	权重确定方法		文献中应用频次
等权重	-		10
顺序权重	主观权重法	层次分析法	8
		西莫斯法	3
		两两对比法	7
		同种条件下某指标优先法	7
		其他	-
	客观权重法	熵值法	3
	组合加权法	加法合成	3

表 4 多准则决策分析指标权重确定方法

类别	权重方法
主观权重	简单的多属性评级技术、摆动方法、权衡法、西莫斯法、成对比较法、层次分析法、最小二乘法、特征向量法、德尔菲法、矩阵分析法
客观权重	加权分析法、最小均方法、最大最小偏差法、熵值法、TOPSIS 方法、垂直和水平法、变异系数法、多目标优化方法、相关系数法、主成分分析法
组合权重	乘法合成法、添加合成法

### (4) 应用于能源可持续性评价的多准则决策分析指标综合量化方法

能源可持续性评价中，多准则决策分析指标综合量化方法在文献中应用的频次，见表 5。

表 5 不同指标综合量化方法在文献中应用的频次

类别	多准则决策分析方法	文献中应用频次
初级的	加权分析法	10
独立合成的	层次分析法	13
	模糊集方法	10
	灰关联方法	4
高级的	偏好顺序结构评价法	5
	ELECTRE 法	9
其他	NAIADE 法	2
	MACBETH 法	1
	PAIRS 法	1

(5) 应用于水电可持续性评价的多准则决策分析指标体系

Liu et al. 对近期文献报道的水电可持续性量化评价指标进行了梳理, 见表 6<sup>[21]</sup>。Supriyasilp 等学者针对泰国北部平河流域的 64 个水电站, 应用多准则决策分析方法, 从发电量、工程财务、社会经济、环境和利益相关者参与等五个方面建立了水电建设项目可持续性评价指标体系<sup>[22]</sup>, 见表 7。综上所述, 近年来国际水电可持续性评价中, 社会及移民、区域经济及企业财务、环境、工程技术、利益相关者参与等五个方面指标是关注的重点。

表 6 水电可持续性量化评价指标

文献来源	指标示例
Larson and Larson <sup>[23]</sup>	装机容量和水库面积比例 (kW/Ha)
	发电和水库用地的比例 (MWh/yr/Ha)
	预计移民投入和发电的比例 (¥/MWh/yr)
Carrera and Mack <sup>[9]</sup>	发电过程中噪音严重影响的居民的数量
	群体感知的景观审美减值比例
Onat and Bayar <sup>[24]</sup>	单位能源投入 (\$/kWh)
	二氧化碳排放 (g/kWh)
	水资源消耗 (kg/kWh)
	土地利用 (km <sup>2</sup> /GW)
Begic and Afgan <sup>[25]</sup>	资源消耗系数 (例如燃油材料系数和绝缘材料消耗系数) (kg/kWh)
	环境影响系数 (例如 CO <sub>2</sub> 和 NO <sub>x</sub> 排放系数) (kg/kWh)
	经济系数 (例如能源成本系数) (\$/kWh)
	社会系数 (例如工作系数) (h/kWh)

表 7 泰国北部平河流域层面水电可持续性评价指标体系[22]

准则层	要素层	类型	权重
发电量 (A) (0.181)	A1 装机容量	定量	0.288
	A2 年发电量	定量	0.421
	A3 车间电力载荷	定量	0.121
	A4 输电线长度	定量	0.170
工程和财务(B) (0.141)	B1 技术可行性、施工技术难度	定性	0.033
	B2 通道形状	定性	0.039
	B3 通道斜率	定量	0.081
	B4 河道年径流量	定量	0.062
	B5 施工现场可达性	定量	0.039
	B6 预计开发周期	定量	0.052
	B7 效益\分成\多目标性	定性	0.044
	B8 工程造价	定量	0.154
	B9 内部收益率	定量	0.101
	B10 净现值	定量	0.080
	B11 发电成本	定量	0.315
社会经济 (C) (0.234)	C1 地区安全	定性	0.499
	C2 社会冲突	定性	0.165
	C3 水资源问题	定性	0.126
	C4 土地利用问题	定性	0.084
	C5 合法合规性	定性	0.071
	C6 基础设施和服务	定性	0.055
环境 (D) (0.355)	D1 河道形态和生态流量	定性	0.626
	D2 栖息地丧失和水土流失	定性	0.125
	D3 河岸坍塌	定性	0.090
	D4 地面沉降	定性	0.090
	D5 施工粉尘和噪音	定性	0.069
利益相关者参与 (E) (0.089)	E1 电力短缺	定性	0.380
	E2 公众理解水平	定性	0.290
	E3 接受程度	定性	0.190
	E4 调查反馈	定性	0.140

### 3.2.4 社会可持续性评价指标体系及量化方法

#### (1) 社会评价指标范畴

传统的社会评价指标主要围绕着如何正确评价建设项目对人类生活质量的影响。Bauer 研究表明, 社会评价指标是“统计学、统计系列和所有其他形式的基础, 社会指标的应用, 可表征评价对象所处的状况和水平, 并能够体现价值观和社会目标”<sup>[23]</sup>。Garrelts and Flitner 强调了社会



评价指标的信息作用,建议在满足评价要求的前提下,尽量减少统计指标的数量,避免信息量的超载。

虽然最初的社会评价指标主要用于评价区域社会经济增长,例如 GDP<sup>[26]</sup>。但近年来,社会指标的应用范围越来越广泛,涉及技术影响评价和政治策略效果评价等方面。Andersen 对社会指标研究局限于定性描述现象提出了批评,指出目前大多数已有社会评价指标研究仅仅是收集数据,缺少用来指导指标选择的理论研究,社会影响定量评价理论的匮乏是这一现象的主要原因<sup>[27]</sup>。为突破这一瓶颈,现有社会学研究中定量评价概念或者模型呈现多样化趋势,包括,生活方式,文化模式,价值观等<sup>[28, 29]</sup>。但是,至今尚无统一的基础理论框架用于指导社会评价指标的选择。

## (2) 社会可持续性评价理论框架

针对能源项目, Afgan and Carvalho 提出了能源社会可持续性评价理论框架,建立了多层次多种能源可持续性评价系统,涵盖能源系统的技术方面和社会方面,例如创造就业机会、周围人群健康情况等,但并未提出社会可持续性的基本概念<sup>[30]</sup>。尽管如此,鉴于理论框架的指导意义,该方法至今仍在大量的文献中广泛使用<sup>[31]</sup>。Dincer 强调了可再生能源在长期电力供应中的重要性,但并没有建立社会可持续性的指标<sup>[32]</sup>。Elghali et al. 尝试建立了生物能源系统的可持续性评价框架,并提出可持续能源技术应该满足经济发展水平,生态状况和社会认可度<sup>[23]</sup>。Assefa 和 Frostell 通过调研瑞士案例,分析了能源技术系统的可持续性,强调社会可持续性指标中需要重点关注社会认可度<sup>[8]</sup>。总体上,现有社会可持续性评价研究虽然给出了理论框架,但仍缺少社会可持续性的清晰概念和定量评价方法<sup>[2, 8]</sup>。

## (3) 社会可持续性评价指标体系及方法

Ribeiro et al. 对水电规划中社会可持续性评价研究进行了总结和梳理;总体上,随着发达国家越来越多的采用可再生能源技术,在方案规划时,社会评价一直以主观的专家参与方式为主要研究方法;该研究对现有能源规划社会可持续性评价研究中指标体系形成方法、具体评价指标、研究内容、评价模型进行了综述<sup>[33]</sup>,见表 8,以全面掌握社会可持续性评价的发展动态。总体上,文献调研与专家打分是目前能源规划中社会可持续性评价的主要方法。

表 8 能源规划中社会可持续性评价研究进展

参考文献	形成指标体系方法	评价指标	研究内容	评价模型
Kowalski, Stagl et al.	能源专家访谈, 情景分析	区域自治性	比较可再生能源技术	MCDA (ROMETHEE)
		社会凝聚力		
		社会正义		
		景观质量		
		噪音		
Kahraman and Kaya	文献调研	全国能源政策目标的兼容性	比较可再生能源技术	MCDA (模糊 AHP)
		政治接受度		
		社会接受度		
		政党影响		
Karakosta et al.	收集官方数据	就业贡献率	评价能源政策导则	SWOT 分析
		弱势群体生活质量改进		
Roth et al.	收集官方数据	物理安全	风电选址项目	MCDA
		政策稳定和合法性		
		社会发展		
		景观和住宅区质量影响		
		人体健康影响		
Gamboa and Munda	访谈, 包括环境学家、政府和工业股东	各市区收入	比较革新能源技术	社会多准则评价
		就业数		
		视觉影响		
		森林丢失量		
		噪音滋扰		
		二氧化碳减排量		
Doukas et al.	25 个公立和私人能源机构集体工作	就业贡献率	比较电力技术	MCDA
		区域发展贡献率		
GallegoCarrera and Mack	文献研究、能源专家访谈、Delphi 方法过程	系统可持续需求	比较电力生产技术	MCDA
		能源供应多样性		
		资源储量		
		废弃物管理		
		市场信号的灵活应对		
		技术发展灵活性		
		能源系统造成潜在冲突		
		采取行动的意愿性		
		依靠参与决策的过程		
		公民对系统的接受度		
		事故风险特征		
运行风险特征				

参考文献	形成指标体系方法	评价指标	研究内容	评价模型
		风险管理的信任要素 正常健康状况的影响 事故对健康的影响 恐怖分子的潜在威胁共计 成功攻击的反应 公平生活的条件 感知的公平性 景观区质量影响		
Ferreira et al.	文献研究、能源专家访谈、Delphi方法过程	噪音影响 鸟类和野生动物影响 视觉冲击力 社会接受度	比较电力生产技术	MCDA (AHP)
Beccali et al.	不详	劳动影响 市场成熟度 政治、立法和行政的兼容性	比较可再生能源技术	MCDA (ELECTRE III)
Cavallaro and Ciraol	作者数据分析	社会认可度 生态系统影响 噪音影响 视觉影响 二氧化碳减排量	风电布局问题	MCDA (NAIADE)
Evans et al.	文献研究	视觉 鸟击 噪音 移位 农业 河流损伤 地震活动 气味 污染	比较可再生能源技术	假定权重分析
Vera and Langlois	官方数据收集	电力可获性 电力的负担能力 差距 健康安全	可持续发展指标体系建立	-
Assefa and Frostell	文献研究	知识水平 知觉 恐惧	能源技术可持续评价	ORWARE (瑞士评价工具)
Begic and Afgan	文献研究	就业率 多样性	比较电力生产技术	MCDA (ASPID)
Streimikiene and Sarvutyte	文献研究	具体技术工作机会 食品安全风险	比较电力生产技术	假定权重分析

参考文献	形成指标体系方法	评价指标	研究内容	评价模型
		致命事故经验		
		严重事故知觉		
Alberts	文献研究	噪声	评价风电影响	Delphi 方法
		野生动物		
Krajnc and Domac	不详	可能影响的区域失业	生物能社会经济环境评价	SCORE 模型
		避免的失业成本		
		电力自给生产		
Del Río and Burguillo	作者数据分析	就业影响	可再生能源可持续性评价	案例比较研究性评价
		人口统计		
		能源影响		
		教育影响		
		生产影响		
		生产区域多样化影响		
		当地资源整合		
		社会凝聚力和人类发展		
		收入分配和对贫困的影响		
		其他经济利益		
		当地的参与和感知项目好处		
		旅游业影响		
		本地产业影响		
		市政预算影响		
Werner and Schäfer	文献研究	水资源质量和数量	特定的太阳能项目社会可持续性评价	当地社区调研和问卷
		人力资源		
		社会认可度		

Carrera and Mack 开展了近 20 年能源系统社会影响评价相关文献调研，应用的关键词包括“社会指标”、“可持续性指标”、“环境指标”、“能源指标”。结果表明，欧盟和其它欧洲国家能源系统社会评价中共使用了 1320 个指标；根据指标区间范围、指标一致性、指标涵盖信息量、指标适用性、指标全面性和非线性、指标可区分不同的能源技术、数据收集的可获性、数据分类等 9 个原则，筛选了其中的 26 个指标，如表 9 所示；这套指标是目前相关研究中相对较深入和全面，适用范围较广的社会可持续性评价指标体系<sup>[9]</sup>。

表 9 欧洲能源系统的社会可持续性评价指标

能源供应的连续性	能源储备能力
	能源供应的主要来源
	按目前的速度，探明储量可使用的时间
	废弃物管理

	系统的灵活性，对市场变化做出反应
	新技术发展的灵活性
政治稳定和合法性	能源系统发展潜力对社会的危害
	非政府组织和其他公民的意愿
	各种技术决策过程的依赖度
	居民对电站的接受度调查
风险的社会组成	定性风险特点
	预期的正常运行的结果
	风险管理中的信任
	正常运行的破坏
	严重事故的破坏
	遭到破坏的可能性
	遭到攻击最大的可能
生活质量	社会福利预算中的有效电力成本
	技术具体的工作机会
	在周围社区的风险感知和利益分配
	能源系统的土地利用
	能源系统造成的公共区域不可进入
	审美景观的减值
	居民主观满意度
	能源生产所造成的噪音影响
	能源设施传输高峰期引起的交通拥堵

## 4 总结

### 4.1 结论

(1) 国际社会对水电可持续性概念的认识，涵盖社会、经济、环境和技术等多方面内容。

(2) 有必要在借鉴国际水电可持续性评价技术方法的基础上，针对我国的国情，提出一套中国水电可持续性评价指南。

(3) 从水电可持续性评价技术方法角度，多准则决策分析方法可综合考虑流域社会、经济、生态子系统及各子系统与水电建设项目之间的关系，在决策分析中可考虑人类不同目标和价值取向，融入决策者的思想，适合处理流域生态系统及水电可持续性评价这类复杂的多属性多目标群决策问题，并可对受多种因素制约的事物和现象作出一个总体评价。该技术方法更适合在中国水电可持续性评价中应用，研究方法相对简便，研究结果相对可靠，易于推广应用。

(4) 社会及移民、区域经济及企业财务、环境、工程技术、利益相关者参与五个方面指标是国际水电可持续性研究中关注的重点。社会可持续性评价指标体系及量化方法可以综合考虑社

会、经济、环境等因素，主要用于能源规划社会可持续性评价研究中，但仍缺少基础理论框架、清晰概念和定量评价方法用于指导社会评价指标的选择。

#### 4.2 对水利水电学科及行业发展的建议，未来发展思路和新兴增长点

(1) 现有国际水电可持续性研究具有多元化特征，采用的水电可持续性评价指标体系具有框架性特性，亟需结合不同国家的实际情况、资源禀赋条件、社会经济发展水平、水电开发程度等开展水电可持续性评价技术本土化工作。具有普遍意义和行业性质的中国水电可持续性指南是有益的尝试，可为国家能源局提供水电开发规划、设计、施工、运行四个阶段全过程监管工具。

(2) 现有国际和中国水电可持续性评价多基于水电站层面。中国水能资源富集于金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、乌江、长江上游、南盘江红水河、黄河上游、湘西、闽浙赣、东北、黄河北干流以及怒江等水电基地，其装机总量约占全国技术可开发量的 50%。雅鲁藏布江、金沙江、怒江开发程度分别为 0.6%、40.2%和 0%，未来发展潜力巨大。因此，亟需针对流域复合生态系统特征，提出流域水电可持续性评价技术方法，用于系统分析水电梯级开发对社会、经济、生态系统的综合影响。

(3) 中国水电可持续性评价对于水电企业内部管理具有重要意义。水能资源开发是将自然资源变成社会财富的过程。通过水电可持续性评价可将水电开发的经济性与生态环境影响的外部不经济性放在相同层面和位置进行综合评判和协调。通过开展水电可持续性评价，有利于平衡水电开发经济效益和生态环境负面代价，规范水电企业的开发行为，并为我国水电企业走出国门，开展境外水电开发活动提供国际标准和行为准则。

(4) 运行期水电管理面临着如何更好的协调水电站运行调度与区域社会经济发展是每个水电企业面临的难题。水电工程适应性管理作为相互矛盾形势下处理与解决水库工程运行管理问题的一整套管理方法，允许对各种理论、技术和措施的实施效果通过监测手段进行论证和检验，并基于新的认识和信息反馈，结合最新技术进展，对原有调度和生态环境保护方案进行修改、完善和提高。与传统管理模式相比，适应性管理在管理范式、管理体制、管理目标、管理手段方面都有了一定的突破。水电可持续评价可为运行期工程适应性管理提供面向社会（水电移民）、经济、生态多元利益主体的综合影响及效益数据，对于制定多元化适应性管理目标、提高管理精度和效果具有重要意义。

## 参考文献

- [1] Nachhaltige Entwicklung, Leitbildf Ur Die Zukunft von Gesellschaft., Wirtschaft Und Gesellschaft[M]. Beltz: Weinheim/Basel.
- [2] Parris T M, R K. Characterizing and measuring sustainable development.[J]. Annual Review of Environment and Resources. 2003, 28: 559-586.
- [3] Renn O, M D, Schweizer, et al. U" ber den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit[M]. M" unchen. O" kom..
- [4] Voß A, Rath-Nagel S, I. E. A conceptual frame-work for sustainable electricity supply. EUSUSTEL —WP 8.2.[R]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2005.
- [5] Jovanovic S, Brukmajster D. Maintenance of industrial plants as a part of corporate social responsibility.[J]. VTT Symposium. 2007: 7-19.
- [6] Towards a European system of social indicators. Theoretical framework and system architecture.[J]. Social Indicator Research., 58: 47-87.
- [7] Union E. Energy and Sustainable Development in the European Union[R]., 2002.
- [8] Assefa G, B. F. Social sustainability and social acceptance in technology assessment: a case study of energy technologies.[J]. Technology in Society. 2007(29): 63-78.
- [9] Carrera, Mark. Sustainability assessment of energy technologies via social indicators: Results of a survey among European energy experts[J]. Energy Policy. 2010(38): 1030-1039.
- [10] Ribeiro F, Ferreira P, Araújo M. The inclusion of social aspects in power planning[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2011(15): 4361-4369.
- [11] Onat N, Bayar H. The sustainability indicators of power production systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2010(14): 3108-3115.
- [12] R. S. Hydropower: dimensions of social and environmental coexistence.[J]. 2008, 12: 1588-1621.
- [13] K. M J, C. B A, B. A, et al. A system dynamics approach to technology sustainability assessment: The case of biodiesel developments in South Africa[J]. Technovation. 2012, 32: 639-651.
- [14] Font De MoraE, Torres C, A. V. Assessment of biodiesel energy sustainability using the energy return on investment concept. [J].
- [15] Varun R P, Bhat I K. A figure of merit for evaluating sustainability of renewable energy systems.

- [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2010(14): 1640-1643.
- [16] Kahraman C, I. K. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives.[J]. *Expert Systems With Applications*. 2010, 37: 6270-6281.
- [17] Wang J J, Jing Y Y, Zhang C F. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2009, 37: 2263-2278.
- [18] Supriyasilt, Pongput K, T. B. Hydropower development priority using MCDM method.[J]. *Energy Policy*. 2009, 37: 1866-1875.
- [19] Musango J K, Brent A C. A conceptual framework for energy technology sustainability assessment.[J]. *Energy for Sustainable Development*. 2011, 1(15): 84-91.
- [20] Musango J K. *Technology Assessment of Renewable Energy Sustainability in South Africa*,[D]. Stellenbosch University, 2012.
- [21] J. L, J. Z, Y. S Z, et al. Sustainability in hydropower development—A case study[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013(19): 230-237.
- [22] Supriyasilt T, KobkiatPongput B, Thanaboonyasirikul. Hydropower development priority using MCDM method[J]. *Energy Policy*. 2009, 37: 1866-1875.
- [23] 卢玉. “十二五” 电价展望及建议[J]. *中国电力企业管理*. 2011(5): 34-37.
- [24] Onat, Baryar. The sustainability indicators of power production systems[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2010, 14: 3108-3115.
- [25] Begic, Afgan. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case[J]. *Energy*. 2007, 32: 1979-1985.
- [26] Garrelts H, Flitner M. Social monitoring and indicators—a review of current debates with regard to the implementation of the ecosystem approach[Z]. Bremen.
- [27] Esping-Andersen G. *Social Indicators and Welfare Monitoring*. [G]. 2000.
- [28] Bourdieu. *Die feinen Unterschiede*. [G]. Suhrkamp.: 1987.
- [29] S. H. *Soziale Ungleichheit in Deutschland*. [G]. VS Verlag: 2005.
- [30] Afgan, Carvalho. In: *Sustainable Assessment Method for Energy Systems*[R]. Boston, 2000.
- [31] Afgan, Carvalho. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants[J]. *Energy*. 2002, 27: 739-755.
- [32] I. D. Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems.[J]. *International*



Journal of Energy Research. 2007, 31: 29-55.

- [33] Ribeiro F, Ferreira P, Araújo M. The inclusion of social aspects in power planning[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2011(15): 4361-4369.