

# 气候生态产品价值核算方法初探

赵思遥<sup>1,2</sup> 李博<sup>1,2</sup>

(1 中国气象局气象发展与规划院, 北京 100081; 2 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147)

**摘要:** 气候系统是复杂耦合生态系统的重要组成部分, 风、光、水等资源的开发利用对于完善生态产品价值实现机制具有不可忽视的作用。全国气象部门已针对气候生态产品价值实现开展了大量实践探索, 但气候生态产品体系构建与价值核算研究尚处于起步阶段。本文在梳理生态产品价值核算国内外研究进展的基础上, 明晰了气候生态产品价值内涵, 初步构建了包括供给服务、调节服务、文化服务的气候生态产品价值核算体系, 进一步细化为7项核算指标并给出其实物量与价值量的核算方法。在此基础上, 提出未来建立健全气候生态产品价值核算机制的政策建议, 为进一步开展气候生态产品价值核算, 促进“绿水青山”与“金山银山”双向转换提供参考。

**关键词:** 气候生态产品, 价值实现, 价值核算, 指标体系

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.06.003

## A Preliminary Study on the Value Accounting Method of Climate Ecological Products

Zhao Siyao<sup>1,2</sup>, Li Bo<sup>1,2</sup>

(1 CMA Institute for Development and Programme Design, Beijing 100081;

2 CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147)

**Abstract:** Climate system is an important component of the complex coupled ecosystem. The exploitation and utilization of the resources such as wind, light and water play an important role in improving the value realization mechanism of ecological products. Currently, meteorological authorities across the country have conducted a large number of practical explorations regarding the value realization of climate ecological products. However, the research on the construction of the climate ecological product system and value accounting is still in its initial stage. Based on the research progress of the ecological product value accounting, we clarify the connotation of climate ecological product value, and preliminarily construct the value accounting system of climate ecological products, including supply services, regulation services and cultural services. We further refine the system into seven accounting indicators and provide methods for calculating their quantities and values. At the same time, policy recommendations are proposed for establishing a sophisticated climate ecological product value accounting mechanism in the future. It is aimed to provide reference for the further implementation of value accounting of climate ecological products and for the promotion of the two-way conversion between “lucid waters and lush mountains” and “mountains of gold and silver”.

**Keywords:** climate ecological product, value realization, value accounting, indicator system

### 0 引言

“草木植成, 国之富也”, 良好的生态环境本身蕴含着巨大的经济社会价值。促进生态产品价值转换, 是深入贯彻落实习近平生态文明思想、积极践行“绿水青山就是金山银山”理念的重要实践举措, 对推动国民经济绿色低碳转型发展具有重要意义。近年来我国生态产品价值实现逐渐从政策动议走入政策实

践, 浙江、陕西等多省份相继开展生态产品价值核算工作, 全国不同层级上形成了一大批先进做法与典型案例。

气候系统中的风、光、水和大气成分等资源与其他自然生态资源相连互存, 构成了各部分相互作用的耦合生态体系。气候资源价值的开发利用对于完善生态产品价值实现机制具有不可忽视的作用。2022年国务院印发的《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》提出了“气候生态产品”的概念, 并提出有关要求——“建立气候生态产品价值实现机制, 打造气象公园、天然氧吧、避暑旅游地、气候宜居地等气候生态品牌”。多地气象部门结合现有业务, 联合生态、农业等相关部门开展气候生态产品价值实现的有益实

收稿日期: 2023年5月19日; 修回日期: 2023年11月15日  
第一作者: 赵思遥(1991—), Email: zhaosiyao99@163.com  
通信作者: 李博(1987—), Email: 125699827@qq.com  
资助信息: 中国气象局软科学研究重点项目(2022ZDIANXM22);  
中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室开放研究课题(2024013)

践,包括清洁能源开发利用、生态修复型人工影响天气、气候宜居地与气象公园评定等,有力推进了气候资源效益转化。然而气候生态产品开发的系统性实践刚刚开始,要进一步实现其规范化、规模化,仍面临着概念定义不清,产品清单不完善,产品价值难度量的困难<sup>[1]</sup>。当前对于生态产品价值核算的工作多集中在陆地、海洋、森林、农田等生态系统,针对气候系统的研究尚未系统性开展。针对以上问题,研究确定气候生态产品的概念,开展其价值量化核算方法探索对于推进气候生态产品价值实现意义重大,既能丰富现有生态产品体系的内涵,又能扩展其价值核算的外延,是促进“绿水青山”与“金山银山”双向转换的重要抓手。

## 1 生态产品价值核算研究进展及应用

### 1.1 生态产品价值核算国内外研究及实践进展

对生态系统产生的价值进行量化核算的思路最初来自Costanza等<sup>[2]</sup>,研究提出生态系统直接和间接地为人类福利做出贡献,是地球总经济价值的重要组成部分,推动了此后学界关于生态产品价值核算评估的长期探索与实践。2001年联合国正式启动了“千年生态系统评估”(Millennium Assessment, MA)项目,评估生态系统变化对人类福祉所造成的影响,为保护生态系统并促进其可持续性发展奠定科学基础<sup>[3]</sup>。此后,2007年由德意志银行提出的“生态系统与生物多样性经济学”行动倡议迅速得到国际社会的响应,主要研究关于生物多样性与生态系统的价值评估和政策应用,是继MA后的又一项针对生态系统和生物多样性的重要研究计划,为生态资源的管理提供新的理论方法和技术支持<sup>[4-5]</sup>。在2001—2005年的MA项目后,联合国持续推进该项研究,在先前项目基础上于2012年发布了环境经济综合核算体系,包括两个核心组成部分:《2012年环境经济核算体系:中心框架》和《2012年环境经济核算体系:实验性生态系统核算》。这是生态价值核算领域的一个非常重要的体系,被视作自然资源与环境经济核算的基本框架与技术指南,指导多个国家和地区陆续编制了各自的生态资源核算体系,为开展相关工作奠定了良好的基础<sup>[6-9]</sup>。

国内针对生态资源进行核算的早期尝试可追溯至1988年,国务院发展研究中心对森林、水源等自然资源进行价值量核算,并将自然资源核算纳入国民经济体系<sup>[10]</sup>。此后,中国学者对生态系统相关资源的价值核算研究开始成体系地发展起来。欧阳志云等<sup>[11]</sup>以生态系统服务功能概念对中国陆地生态系统的服务功能和服务价值进行了评估,这是首次真正意义上

对中国生态系统价值进行的体系化、标准化、量化的评估与核算。此后,许多区域化的价值核算在生态系统服务概念下开展,针对森林、陆地、湿地、草地等生态系统进行了测算<sup>[12-17]</sup>。2013年,欧阳志云等<sup>[18]</sup>正式提出了生态系统生产总值(Gross Ecosystem Product, GEP)的概念,将其定义为生态系统为人类福祉和经济社会可持续发展提供的产品与服务价值的总和,并构建了核算体系与指标清单。以贵州省2010年数据为例,其年度GEP为20013.46亿元,人均GEP为57526元,是当年该省人均国内生产总值(GDP)的4.3倍。GEP作为一个全新的概念,其指标体系与评估方法的提出为国内生态系统相关价值核算的研究提供了全新的视角和方法。自此,在GEP概念框架下我国生态系统价值核算正式进入实践阶段。2013年,国内首个GEP核算项目由世界自然保护联盟、亿利公益基金会、北京师范大学联合在内蒙古库布齐沙漠开展。2015年,深圳市盐田区利用GEP体系首次核算了自然生态系统和人居环境生态系统的价值<sup>[19]</sup>。2020年,宋昌素等<sup>[20]</sup>针对青海省进行GEP核算,发现2000—2020年青海省GEP增加了32.6%。同时,还有学者针对浙江丽水市<sup>[21]</sup>、内蒙古阿尔山市<sup>[22]</sup>等地区进行GEP核算,在数据核算的基础上提出生态产品价值实现机制与应用路径。

大量研究和实践探索验证了现有GEP核算体系和方法的现实意义,在一定程度上表明GEP可以作为生态效益评估的指标,并作为对GDP的重要补充对政策效益和生态保护成效开展评估,同时为建立市场化、多元化的生态补偿机制提供依据,作为重要参考信息支撑生态文明建设相关决策制定。随着GEP核算体系和方法研究的不断完善,2020年起,浙江、江西、贵州、深圳、南京和黄山等省(市)均颁布了有关GEP核算技术规范的地方标准。2022年10月,国家发展改革委、国家统计局在系统总结国内外生态产品总值核算理论研究成果和实践探索经验基础上,联合印发《生态产品总值核算规范(试行)》(以下简称《规范》),明确了生态产品总值核算的体系、清单、算法、数据等细节,对于构建标准化的生态价值实现政策体系具有重大而深远的意义。

### 1.2 生态产品价值核算体系与方法

生态系统的复杂性决定了生态价值核算的难度,采用何种分类、利用怎样的方法均会对核算结果产生很大的影响。当前生态产品的分类框架并不完全统一,最早提出生态系统服务功能的Costanza等<sup>[2]</sup>将生态功能细分为17类体系,包括大气调节、气候调

节、扰动调节、水分调节、水供应等，体系完整但细分较多。此后，有很多学者和机构对生态系统服务功能进行了分类，其中比较有代表性的包括：1) 依据生态系统服务功能，将生态产品划分为有形产品、调节服务、文化服务以及支持服务，如MA项目即为此种分类；2) 依据物品所有权属性，将生态产品分为具有公共（准公共）物品属性的原生态产品，具有俱乐部或私人物品属性的衍生态产品，以及人类参与后产出的农产品、休闲旅游等产品和文化服务；3) 依据生态产品产生或覆盖的空间区域可分为全国性公共生态产品、区域（流域）性公共生态产品、社区型公共生态产品和“私人”生态产品<sup>[23]</sup>。后续研究多在以上3种分类逻辑基础上进行细化或调整，例如欧阳志云等<sup>[18]</sup>构建的GEP核算体系参照了MA分类，主要分为物质产品（物质服务）、调节服务、文化服务这三类。

生态产品价值核算方法在研究探索中也产生了多种体系。Mitchell等<sup>[24]</sup>根据数据来源和方法是否直接产生货币价值，将价值评估方法分为包括竞争性和模拟性的市场价格的使用、旅行费用法、特征值法、意愿调查法等。此外，基于市场理论的评价方法，将生态资源的价值评估方法划分为直接市场法、模拟市场法和代替市场法三类：直接市场法是直接对生态系统服务的价值通过现有市场价值来转化计算；模拟市场法是根据消费者的支付意愿和净支付意愿来衡量生态系统服务的价值；代替市场法是通过转换为“影子价格”或等同功能类型的价格来表示生态系统服务的经济价值。

## 2 气候生态产品价值指标体系构建

### 2.1 气候生态产品的内涵与价值组成

在定义气候生态产品的概念之前，我们首先要明确“生态产品”的概念。欧阳志云等<sup>[11]</sup>认为生态系统具有为人类提供食品、医药及其他生产生活原料，并且提供人类生存所必需的环境条件的价值。曾贤刚等<sup>[23]</sup>提出生态产品是指维持生命支持系统，保障生态调节功能，提供环境舒适性的自然要素。物质产品、文化产品和生态产品是支撑现代人类生存和发展的三类产品。生态产品这个概念在国家政策层面的首次提出是在2010年国务院发布的《全国主体功能区规划》中，指的是“维系生态安全、保障生态调节功能、提供良好人居环境的自然要素，包括清新的空气、清洁的水源和宜人的气候等”。其中明确提到了“宜人的气候”一词。适宜的光照、气温、降水、风等气候要素均可在一定的技术和经济条件下为人类提供物质和能量，通过风能、太阳能、农业气候资源和空中云水

资源等形式成为人类生产和生活必不可少的自然资源，进而产生价值。因此，结合此前学者对“生态产品”相对成熟的定义，气候生态产品是指气候系统要素在不损害生态系统稳定性和完整性前提下，为提高物质资源供给、保障生态调节功能、维持良好人居环境所提供的各种最终物质产品和服务。气候生态产品是生态产品在气候调节方面的细化和拓展，在概念上，既遵循了生态产品定义的服务功能，更突出如风、光、水等气候要素的重要作用。

从定量化核算气候生态产品价值的角度出发，在明晰气候生态产品概念内涵的基础上，考虑对气候生态产品进行分类。任玉洁等<sup>[25]</sup>将大气资源这类重要的“非实物态”自然资源分为供应价值、调节价值、文化价值及支持价值，这4类价值的范围与国务院《全国主体功能区规划》中的定义保持一致。姜海如等<sup>[26]</sup>从优质气候生态产品的角度提出包括全域性全时季系列旅游产品、季节性休养康养产品、品牌化标识化绿色农林牧渔产品在内的更为具体化的价值分类。姚霞等<sup>[27]</sup>则将气候生态产品分为气候资源、气候调节、气候固碳及气候品牌4个方面，并进一步细化为风力发电资源价值核算、光伏发电资源价值核算、水力发电资源价值核算、植被调节价值核算、空气调节价值核算、陆地固碳机制核算、海洋固碳机制核算以及气候品牌价值核算共8项具体核算内容。

综合考虑前人研究并参照国家《规范》中的分类标准，本文将气候生态产品价值分为三类：供给服务、调节服务和文化服务。在系统性地梳理探索气候生态资源开发利用的现有业务开展情况并结合未来发展趋势的基础上，进一步细化为7个指标，构建了如图1所示的气候生态产品核算体系。其中：1) 供给服务为气候生态系统提供的物质供给，包括直接来源于气候系统中风、光、水等自然要素的物质产品，以及在优质的气候生态环境供给下农林牧渔等生产过程产生的物质产品；2) 调节服务为降水、环流等气候要素对特定区域生态环境的整体调节，为维持或改善人类生存环境提供的价值；3) 文化服务为良好的气候生态环境提供的景观旅游价值，为提高人类生活质量带来的价值。

需要特别注意的是，本文定义的气候生态产品价值指的是风、光、降水等狭义的气候系统要素，而非广义的包含大气圈、水圈、陆地表面、冰雪圈和生物圈在内的物理系统。

### 2.2 气候生态产品价值的核算方法

对于气候生态产品价值的核算，包括实物量与价

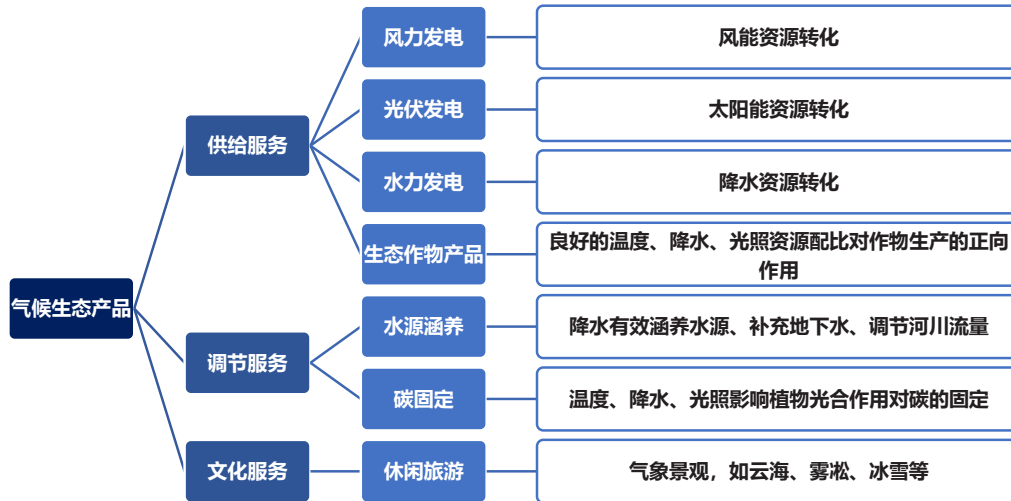


图1 气候生态产品价值指标体系

Fig. 1 Indicator system of climate ecological product value

值量两个核算对象。实物量指的是气候生态产品的物理总量，例如清洁能源发电总量等；价值量是气候生态产品所具有的货币价值。对各项指标的实物量及价值量的具体核算方法，同时参考了国家《规范》与欧阳志云等<sup>[28]</sup>提出的方法。

### 2.2.1 供给服务指标

#### 2.2.1.1 清洁能源供给

随着我国“碳达峰与碳中和”（简称“双碳”）目标的确立，能源结构转型战略和举措随之提出。作为能源战略转型的重要支柱，合理开发利用风力、光伏、水力发电等清洁能源是实现“双碳”目标的重要抓手。2022年国家能源局发布的数据显示，截至9月底，全国累计风力发电装机容量约3.5亿kW，同比增长16.9%；光伏发电装机容量约3.6亿kW，同比增长28.8%。稳定的可再生能源涉及风、光、降水等多种气候要素，其资源年景与气候状态息息相关：平均风速、风功率密度、总太阳辐射量、日照时数、降水量、降水频次等均对清洁能源供给有着明显影响。选取一定时间段内风力、光伏、水力发电的总发电量作为实物量评价指标：

$$E_{cc} = \sum_{i=1}^n E_{cei}, \quad (1)$$

式中， $E_{cc}$ 为清洁能源（风力、光伏、水力发电）总发电量（单位： $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）； $E_{cei}$ 为第*i*种清洁能源的发电量（单位： $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）。

价值量一般采用市场价值法进行核算：

$$V_{cc} = \sum_{i=1}^n (E_{cei} \times P_{cei}), \quad (2)$$

式中， $V_{cc}$ 为清洁能源（风力、光伏、水力发电）总供

给价值（单位：元）； $P_{cei}$ 为第*i*种清洁能源的电价（单位：元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）。

#### 2.2.1.2 生态作物产品

气候生态环境中的光、热、水资源总量及其相互关系构成了作物生长发育的基本自然条件，其优劣和变化直接关系到作物产量的高低和品质的好坏<sup>[29]</sup>。已有研究中有两种主流方法衡量气候资源对作物产量的影响。方法一采用气候生产潜力作为衡量指标，气候生产潜力是指当土壤、养分等条件处于最适状态，仅由水、温等气候资源决定的单位面积土地上可获得最高植物生物学产量或经济产量<sup>[30]</sup>。利用这样的衡量方式，可以排除人为因素以及机械力对作物生产的影响，单纯衡量气候自然资源对作物生产的贡献<sup>[31-32]</sup>，其实物量计算公式为：

$$E_{cp} = \sum_{i=1}^n (Y_i \times M_i), \quad (3)$$

$$Y_i = Y_{Ti} \times F_i(p), \quad (4)$$

$$Y_{Ti} = Y_{Qi} \times F_i(t), \quad (5)$$

式中， $E_{cp}$ 为气候自然资源贡献下的作物总产量（单位： $\text{kg}$ ）； $Y_i$ 为第*i*种作物的气候生产潜力（单位： $\text{kg}/\text{hm}^2$ ）； $M_i$ 为第*i*种作物的种植面积（单位： $\text{hm}^2$ ）； $Y_{Ti}$ 为第*i*种作物的光温生产潜力（单位： $\text{kg}/\text{hm}^2$ ）； $F_i(p)$ 为第*i*种作物的水分订正系数，一般与作物生育期的降水量和作物需水量有关； $Y_{Qi}$ 为第*i*种作物的光合生产潜力（单位： $\text{kg}/\text{hm}^2$ ）； $F_i(t)$ 为第*i*种作物的温度订正系数<sup>[33]</sup>。

方法二采用气候贡献率作为衡量指标，利用作物产量和历史气候数据构建统计模型，确定作物产量对气候要素的响应<sup>[34]</sup>：

$$E_{cp} = \sum_{i=1}^n (E_{cpi} \times Y_{cpi}), \quad (6)$$

式中,  $E_{cpi}$ 为第*i*种作物的总产量(单位: kg);  $Y_{cpi}$ 为第*i*种作物的气候变化响应敏感度, 一般使用历史数据回归方法得出<sup>[35]</sup>。

利用方法一或方法二计算实物量后, 气候资源贡献下作物生产的价值量为:

$$V_{cp} = \sum_{i=1}^n (E_{cpi} \times P_{cpi}), \quad (7)$$

式中,  $V_{cp}$ 为作物总供给价值(单位: 元);  $P_{cpi}$ 为第*i*种作物市场平均售价(单位: 元/kg)。

## 2.2.2 调节服务指标

### 2.2.2.1 水源涵养

气候系统对某地区的水源涵养主要指通过降水过程保持土壤水分、补充地下水、调节河川流量、增加可利用水资源量的功能。研究采用水量平衡法计算水源涵养量:

$$Q_{wr} = A \times (P_R - R_O - E_V) \times 10^{-3}, \quad (8)$$

式中,  $Q_{wr}$ 为水源涵养量(单位:  $m^3$ );  $A$ 为核算区域面积(单位:  $m^2$ );  $P_R$ 为核算时段内的总降水量(单位: mm);  $R_O$ 为地表径流量(单位: mm);  $E_V$ 为蒸散发量(单位: mm)<sup>[18]</sup>。

优质的自然云水气候条件对于生态调节与维持起着重要作用, 同时需要特别注意的是, 年降水总量包括自然降水与人工增雨/雪两部分。据中国气象局数据调查显示, 我国可开发的潜在云水资源达每年2800亿t, 相当于7个三峡水库的水量, 是巨大的“空中水库”。我国气象部门持续推进人工影响天气工作, 2013—2022年, 全国气象部门在粮食主产区和重要农产品生产区实施飞机人工增雨作业超5000架次、火箭高炮增雨作业90000次, 年均增雨面积约500万 $km^2$ , 人工影响天气工作年均产生直接或间接经济效益约320亿元, 在水源涵养、保障国家粮食安全、促进生态保护与修复方面发挥了巨大作用。人工影响天气主动干预在减灾性保障以及趋利型服务中产生的价值, 可通过区域历史回归统计检验法得出人工干预的降水比例, 根据历史数据统计, 该比例大约在10%~30%<sup>[36-37]</sup>。

水源涵养价值主要表现在缓解水资源短缺方面的经济价值, 研究多采用影子工程法, 模拟建设与气候生态系统水源涵养量相当的蓄水设施, 以建设该水利设施所需要的成本核算水源涵养价值<sup>[18]</sup>:

$$V_{wr} = Q_{wr} \times (C_{we} + P_{we} \times D_r), \quad (9)$$

式中,  $V_{wr}$ 为水源涵养价值(单位: 元);  $C_{we}$ 为水库单

位库容的年运营成本(单位: 元/ $m^3$ );  $P_{we}$ 为水库单位库容的工程造价(单位: 元/ $m^3$ );  $D_r$ 为水库年折旧率。

### 2.2.2.2 碳固定

植被通过光合作用吸收并固定空气中的 $CO_2$ , 是生态系统碳循环中的重要碳汇之一<sup>[38]</sup>。研究表明, 降水、气温、光照等气候条件的改变可通过影响植被的呼吸速率、光合作用速率、蒸散发和内部物质循环过程影响植被净初级生产力, 进而改变植被的固碳量<sup>[39-42]</sup>。在估算气候生态系统的碳固定指标时, 采用净生态系统生产力方法:

$$Q_{ctCO_2} = Q_{tCO_2} \times R_c, \quad (10)$$

$$Q_{tCO_2} = (M_{CO_2} / M_C) \times NEP \times A \times t, \quad (11)$$

$$NEP = NPP \times \alpha, \quad (12)$$

式中,  $Q_{ctCO_2}$ 为气候要素贡献的固碳量(以 $CO_2$ 量计算, 下同, 单位: g);  $Q_{tCO_2}$ 为生态系统固碳量(单位: g);  $R_c$ 为气候贡献率;  $M_{CO_2} / M_C$ 为C转化为 $CO_2$ 的系数;  $NEP$ 为净生态系统生产力(单位:  $g/(m^2 \cdot a)$ );  $A$ 为核算区域面积(单位:  $m^2$ );  $t$ 为核算时间(单位:a);  $NPP$ 为净初级生产力(单位:  $g/(m^2 \cdot a)$ );  $\alpha$ 为 $NEP$ 与 $NPP$ 的转换系数。

$R_c$ 的计算可利用气候要素分离法<sup>[43]</sup>, 基于集成生物圈模型的驱动因素定量分离气候要素与其他要素对植被初级生产力的影响, 估算固碳量变化的气候贡献率。固碳指标的价值量为:

$$V_{ctCO_2} = Q_{ctCO_2} \times 10^{-6} \times C_c, \quad (13)$$

式中,  $V_{ctCO_2}$ 为固碳价值(单位: 元);  $C_c$ 为单位碳价(单位: 元/t)。

在固碳价值量计算中多使用代替成本法, 例如单位造林成本、工业生产过程中的减排成本、人工固碳成本、温室效应损失成本等相关价值代替<sup>[44-45]</sup>。此外, 市场价值法也适用于碳这类的交易产品, 在市场交易范畴内, 固碳价值的核算多采用碳税率法或直接采用碳交易价格进行确定<sup>[46]</sup>。自2021年6月全国碳交易市场正式开启, 截至2022年9月, 全国碳市场碳排放配额累计成交量超1.95亿t, 累计成交额达85.59亿元。

### 2.2.3 文化服务指标

气候资源作为旅游发展中的战略性资源, 已成为各地旅游经济中增长最快、最富活力、群众感知度最直接的发展方向之一。中国气象局在提升气候生态品牌价值方面开展了一系列工作, 持续开展“中国气候宜居城市”“中国天然氧吧”“避暑旅游目的地”等系列品牌标志评定授予。《2021年中国天然氧吧绿皮书》显示, 2019—2020年“天然氧吧”地区旅游人数和旅游

收入实现逆势增长。

本研究选取通过国家气候标志认定的气候生态景区年旅游总人次作为实物量评价指标：

$$N_t = \sum_{i=1}^n N_{ti}, \quad (14)$$

式中， $N_t$ 为游客总人次； $N_{ti}$ 为第*i*个气候生态景区内的年游客总人次。

对旅游康养类的气候生态产品价值，研究一般采用旅行费用法<sup>[47]</sup>或综合文化价值量计算方法<sup>[48]</sup>，本研究以旅行费用法进行计算，综合考虑消费水平、游玩时间、旅行费用等方面：

$$V_t = \sum_{j=1}^n (N_{vj} \times C_{vj}), \quad (15)$$

$$C_{vj} = T_j \times W_j + S_j, \quad (16)$$

$$S_j = S_{vj} + S_{sj} + S_{mj}, \quad (17)$$

式中， $V_t$ 为气候生态景区休闲旅游总价值（单位：元）； $N_{vj}$ 为*j*地到该气候生态景区旅游的总人次； $C_{vj}$ 为游客平均旅游成本（单位：元），分为直接消费与间接成本两部分，间接成本为*T<sub>j</sub>*日与*j*地的日平均工资 $W_j$ （单位：元）的乘积，直接消费 $S_j$ （单位：元）为交通费用 $S_{vj}$ （单位：元）、食宿费用 $S_{sj}$ （单位：元）与门票费用 $S_{mj}$ （单位：元）的总和。

### 3 气候生态产品价值核算实例

清洁能源供给是目前气候生态产品价值实现过程中实践经验最丰富，科技支撑与业务基础最扎实的板块。以清洁能源供给分项指标为例，分析近10年该领域的总体特征与变化情况，以此为基础进一步考察指标体系的合理性，并讨论未来的改进方向。

据《中国能源统计年鉴》统计，截至2021年底，全国发电装机容量约为23.8亿kW，其中可再生能源发电装机达到10.6亿kW，占总发电装机容量的44.8%。图2给出了清洁能源（主要指风力、光伏、水力发电3种与气候生态系统联系最紧密的清洁能源，下同）占比较高的部分省（区、市）2012—2021年发电量与清洁能源占比。其中云南、四川水力发电量全国领先，两个省年平均降水量超850 mm，充沛的水资源供给加之独特的地形地貌赋予其得天独厚的水力发电条件。内蒙古、新疆风力发电量优势明显，平均风力发电量占其总发电量比例超15%。新疆阿勒泰、哈密地区70 m高度平均风速可达7.0 m/s左右，内蒙古乌兰察布地区可达7.5 m/s，风能资源储备十分可观。光伏发电相对于水力、风力发电起步较晚，总体发电量与传统发电方式有一定差距，相对突出的省（区、市）主要集中在西北地区，主要得益于其优

异的气象条件与光照密度。西藏西部（由于总发电量较低未在图2中显示）、青海西部、新疆东南部、甘肃北部等年日照时数约为3200~3300 h，年辐射总量在6680~8400 MJ/m<sup>2</sup>。“日光之城”拉萨年平均晴天108 d，高于我国同纬度其他地区。

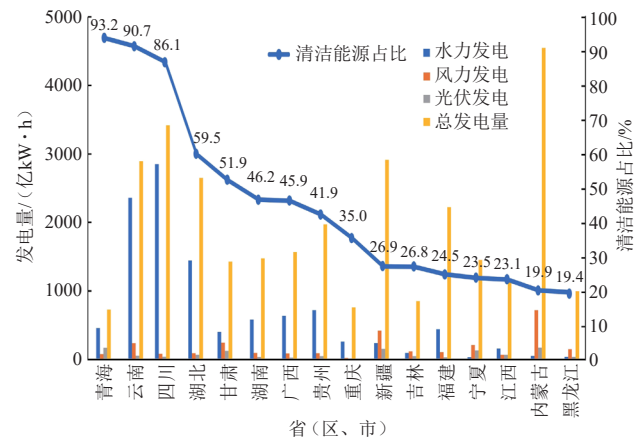


图2 2012—2021年部分省(区、市)平均发电量及清洁能源占比  
Fig. 2 Average power generation and proportion of clean energy in some provinces (autonomous regions and municipalities) from 2012 to 2021

进一步关注清洁能源供给指标实物量随时间变化趋势。风力、光伏、水力发电占比最高的省(区)分别为内蒙古、青海与四川。从图3可见，近年来，内蒙古风力发电、四川水力发电和青海光伏发电的发电量均稳步增加。首先，这样的增长趋势与国家能源政策、市场宏观导向息息相关；此外，与之紧密联系的气候背景也起到一定程度的正向作用，例如，有研究表明，过去10年四川省平均降水量呈增多趋势<sup>[49]</sup>，内蒙古地区平均风速也显著增强<sup>[50]</sup>，阿拉善地区增加趋势尤为显著。

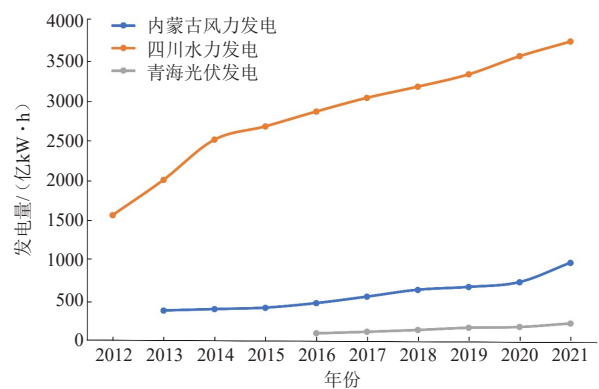


图3 2012—2021年内蒙古风力发电、四川水力发电和青海光伏发电发电量变化(部分早期统计数据暂缺)

Fig. 3 Changes in power generation of wind power in Inner Mongolia, hydropower in Sichuan and photovoltaic power in Qinghai from 2012 to 2021 (some early statistical data is currently missing)

以2018年为例,依据国家能源局发布的《2018年度全国电力价格情况监管通报》相关数据,计算清洁能源占比较高部分省(区、市)的价值量指标。图4中分别给出了2018年风力、光伏、水力发电的总价值。以各地电力企业平均上网电价为基准,四川、云南、湖北水力发电价值量约为400亿~800亿元;内蒙古、新疆风力发电价值量分别为约280亿元与165亿元;青海、甘肃、新疆、宁夏、内蒙古光伏发电价值量约在80亿~110亿元。

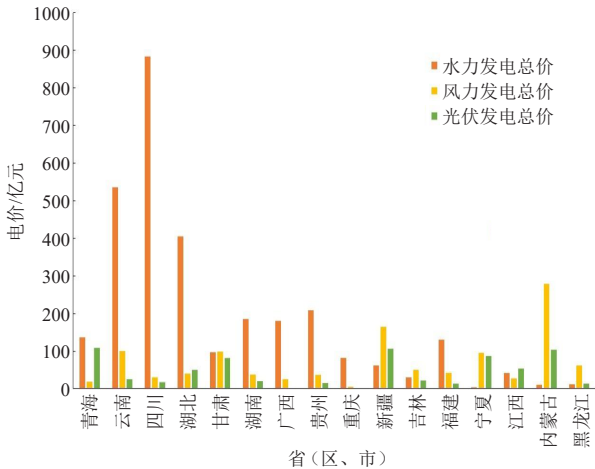


图4 2018年部分省(区、市)清洁能源总价值  
Fig. 4 Total value of clean energy in some provinces (autonomous regions and municipalities) in 2018

随着风力、光伏、水力发电等清洁能源转化效率不断提高、技术持续进步,气候生态产品价值也随之增加。以青海为例,其太阳能资源极为充沛的气候禀赋为光伏发电产业提供了良好的气候背景,在此基础上,青海谋划制定了一系列光伏发电产业集聚化发展、规模化发展的策略,相继建成了全球最大的单体光伏电站、水光互补电站、光伏发电实证基地等。根据《青海省清洁能源发展报告2022》,青海光伏电力除自身消纳外,还通过建设特高压外送通道,与河南、江浙等签订合作协议等举措积极外输,“青豫直流”工程年输送电量约412亿kW·h,在杭州亚运会期间,青海输送了超过7000万kW·h由以光伏发电为主的清洁电力,创造的经济效益相当可观。同时,光伏发电产业的发展又为光伏制造业的发展壮大创造了有利条件,2023年,青海引进天合光能、亚洲硅业、晶科能源等一大批光伏制造龙头企业入驻,形成了较为完整的光伏产业链,成为青海经济社会发展的新引擎。

#### 4 讨论与展望

本文遵循生态产品服务功能,突出风、光、水等

气候要素的重要作用,在内涵上对原有生态产品定义进行了限定与延伸,定义了气候生态产品的概念。以供给服务、调节服务、文化服务为分类,结合气象部门实际业务基础构建了气候生态产品清单体系并设计核算方法。以清洁能源供给指标为例进行了实例验证,得出的分析结果与自然资源变化趋势、经济社会发展趋势相协调,验证了指标具有一定的合理性,但在具体计算过程中,仍发现有部分细节问题尚待优化。

1) 指标具体核算方法仍待改进。以清洁能源指标为例,其实物量的核算方法与数据来源均较为直接,由于发电量纳入国家年度统计工作,数据来源权威可靠,质量持续稳定。然而价值量的核算面临着一些不确定因素:首先,统计来源较多,本文计算的上网电价数据来源于《全国电力价格情况监管通报》,但《中国电力统计年鉴》《中国电力行业》及部分机构发布的企业调查年鉴也同时统计了该数据。不同来源之间统计口径、时段等都有或多或少的差异,导致价值量的核算在数据来源选取方面存在困难。其次,数据稳定性不够。上网电量的价格同时受到国家宏观政策调控和市场竞价的影响,如2019年国家能源局对风力发电、光伏发电进行了调整,取消了此后新建项目的上网电价国家补贴,导致2019年前后价值量之间在一定程度上不可比,连续性受到影响。气候生态产品作为一种非常规的价值承载商品,显性的价值量较难通过简单方法进行评估,其隐性的价值属性需要经过不断地研究和实践论证,摸索出能够同时满足政策监督和市场运作的核算方法,并保障核算结果的科学性和可比性。在后续指标核算工作中,需要根据具体情况对指标计算方式、参数等进行调整,以期更准确地衡量气候生态产品价值的特征与长期发展趋势。

2) 指标体系仍待丰富完善。国内外比较通用的生态产品分类方法包括基于生态产品功能属性、供给属性、消费属性等多种视角的分类<sup>[50]</sup>。目前已经公开发布的生态产品核算体系中较多依据生态产品的供给属性进行分类,例如权威的国家级《规范》囊括了森林、草地、湿地、农田、荒漠、城市、海洋等生态系统类型,具体核算指标分为物质供给、调节服务与文化服务共3类18种;生态环境部环境规划院发布的《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》中的指标体系也依照相同的分类,列出共3类19项指标。本文对气候生态产品的分类在一级指标类别上与上述两份指南相似,但由于气候生态产品不同于普通的流通性商品,其涉及的地域广阔、类型众多、产生价值的过程

不够直接,在核算指标的界定上目前选择了比较严格的准入方式,选择了与气候要素关联最紧密的、产生价值最显著的指标进行核算,指标的丰富度与完备度仍需进一步调整完善,未来可研究将更多气候生态产品价值实践相关工作纳入现有清单体系中,例如生态修复型人工影响天气服务、气候效应评估、气候可行性论证等。

3) 具体落地机制仍待探索。气候生态产品价值实现的参与方众多,包括政府、企业、个人等多种主体都是价值实现的责任方,同时也是受益方。在具体核算过程中,由于气候生态产品价值核算体系覆盖自然与经济社会生活中的众多指标,每个指标的计算都需要大量复合型数据与技术参数,要在保证核算结果及时、准确、科学的同时,还要有利于面向多种主体进行产品的推广与落地,如何在核算与实践间构建良好机制尚待研究。一是要提升数据获取能力。在最大限度利用当前生态观测站网数据的同时,尝试运用遥感、卫星等资料弥补观测手段和资料的不足,并积极调动社会化观测力量,扩展数据丰富程度。二是要加强核算参数的本地化调整应用。气候生态系统的地域异质性非常明显,我国地理特征上横跨5个气候带,在进行区域化的产品价值核算时,要根据地域特征调整关键特征技术参数,在国家通用技术标准的范畴内,建立本地化的技术参数库,降低核算难度,保证结果的动态统一,有利于统筹管理的同时促进气候生态产品的价值流通。三是要建立健全相关制度体系。营造良好规范的制度环境,推动气候生态价值保护与利用作为评价指标纳入发展规划及监督管理体系中,通过合理的指标设置,统筹谋划气候生态产品开发保护,充分发挥引导及规范作用,建立符合市场供需环境的政策措施。

### 参考文献

- [1] 高晓龙,林亦晴,徐卫华,等.生态产品价值实现研究进展[J].生态学报,2020,40(1):24-33.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] UNEP, IOC/UNESCO. An Assessment of Assessments: Findings of the Group of Experts Pursuant to UNGA Resolution 60/30[M]. Valletta: Progress Press Ltd., 2009.
- [4] Ring I, Hansjürgens B, Elmqvist T, et al. Challenges in framing the economics of ecosystems and biodiversity: the TEEB initiative[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(1-2): 15-26.
- [5] 杜乐山,李俊生,刘高慧,等.生态系统与生物多样性经济学(TEEB)研究进展[J].生物多样性,2016,24(6):686-693.
- [6] Remme R, Lof M, de Jongh L, et al. The SEEA EEA biophysical ecosystem service supply-use account for the Netherlands[R]. Wageningen: Wageningen University & Research, 2017.
- [7] Lof M, Bogaart P, Hein L, et al. The SEEA-EEA ecosystem condition account for the Netherlands[R]. Wageningen: Statistics Netherlands and Wageningen University, 2019.
- [8] Hurlings E, Schenau S, Hein L, et al. Experimental monetary valuation of ecosystem services and assets in the Netherlands[R]. Wageningen: Wageningen University & Research, 2019.
- [9] Nel J L, Driver A. National river ecosystem accounts for South Africa[R]. Pretoria: South African National Biodiversity Institute, 2015.
- [10] 扬之.自然资源核算研究及其进展[J].中国人口·资源与环境,1990(4):91-92.
- [11] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613.
- [12] 何浩,潘耀志,朱文泉,等.中国陆地生态系统服务价值测量[J].应用生态学报,2005,16(6):1122-1127.
- [13] 毕晓丽,葛剑平.基于IGBP土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估[J].山地学报,2004,22(1):48-53.
- [14] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [15] 韩维栋,高秀梅,卢昌义,等.中国红树林生态系统生态价值评估[J].生态学报,2000,19(1):40-46.
- [16] 王瑞杰,覃志豪.基于MODIS数据的中国草地生态体系价值估算研究[J].中国草地学报,2007,29(1):50-54.
- [17] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,等.中国森林生态系统服务功能价值评估[J].生态学报,2005,25(8):2096-2102.
- [18] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等.生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J].生态学报,2013,33(21):6747-6761.
- [19] 卞文志.用“价格标签”体现生态价值——深圳市盐田区首创“城市GEP”核算体系[J].环境保护与循环经济,2015(3):18-19.
- [20] 宋昌素,欧阳志云.面向生态效益评估的生态系统生产总值GEP核算研究——以青海省为例[J].生态学报,2020,40(10):3207-3217.
- [21] 欧阳志云,林亦晴,宋昌素.生态系统生产总值(GEP)核算研究——以浙江省丽水市为例[J].环境与可持续发展,2020,45(6):80-85.
- [22] 王莉雁,肖焱,欧阳志云,等.国家级重点生态功能区生态系统生产总值核算研究——以阿尔山市为例[J].中国人口·资源与环境,2017,27(3):146-154.
- [23] 曾贤刚,虞慧怡,谢芳.生态产品的概念、分类及其市场化供给机制[J].中国人口·资源与环境,2014,24(7):12-17.
- [24] Mitchell R C, Carson R T. Using Surveys to Value Public Goods: the Contingent Valuation Method[M]. New York: RFF Press, 2013.
- [25] 任玉洁,张跃政.大气生态价值实现的特殊性分析及金融支持路径研究[J].现代金融导刊,2022(4):16-21.
- [26] 姜海如,肖芳.关于建立生态产品价值实现主体差异机制的思考[J].中国发展观察,2021(5):43-44,13.
- [27] 姚霞,王阔,郁珍艳,等.气候生态产品价值核算体系研究进展及应用[J].浙江气象,2022,43(3):1-8.
- [28] 欧阳志云,肖焱,朱春全.生态系统生产总值(GEP)核算理论与方法[M].北京:科学出版社,2021.
- [29] 罗海平,邹楠,胡学英,等.1980—2019年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J].资源科学,2021,43(6):1234-1247.
- [30] 郭建平.气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J].应用气象学报,2015,26(1):1-11.
- [31] 侯西勇.1951—2000年中国气候生产潜力时空动态特征[J].干旱区地理,2008,31(5):723-730.
- [32] Chavas D R, Izaurralde R C, Thomson A M, et al. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6/7): 1118-1128.
- [33] 候光良.关于我国作物气候生产力估算问题的讨论[M]//中国农业气候资源和农业气候区划集.北京:气象出版社,1986.
- [34] Shi W J, Tao F L, Zhang Z. A review on statistical models for identifying climate contributions to crop yields[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(3): 567-576.
- [35] Lobell D B, Burke M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11): 1443-1452.
- [36] 王婉,姚展予.人工增雨统计检验结果准确度分析[J].气象科技,2009,37(2):209-215.
- [37] 李宏宇,嵇磊,周胤,等.北京地区人工增雨效果和防雷经济效益

- 评估[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 1119-1130.
- [38] Robinson D T, Brown D G, Currie W S. Modelling carbon storage in highly fragmented and human-dominated landscapes: linking land-cover patterns and ecosystem models[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(9-10): 1325-1338.
- [39] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. Greening of the Earth and its drivers[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(8): 791-795.
- [40] 孙应龙, 钱拴, 延昊, 等. 2000—2018年云南省典型矿区植被生态时空变化特征——以临沧市为例[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2381-2389.
- [41] 刘铮, 杨金贵, 马理辉, 等. 黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 113-122.
- [42] 徐雨晴, 肖风劲, 於琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [43] 邓玉娇, 王捷纯, 徐杰, 等. 广东省植被固碳量时空变化及气象贡献率研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(1): 1-8.
- [44] 刘晓辉, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统固碳功能及其价值评估[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 212-217.
- [45] 马长欣, 刘建军, 康博文, 等. 1999—2003年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1412-1422.
- [46] 谢高地, 李士美, 肖玉, 等. 碳汇价值的形成和评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 1-10.
- [47] 谢贤政, 马中. 应用旅行费用法评估环境资源价值的研究进展[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(7): 730-737.
- [48] 汪绚, 樊宝敏, 李智勇, 等. 森林文化价值评估指标体系和方法研究[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 202-212.
- [49] 段静鑫. 四川盆地降水时空变化特征及其对地形和大气气溶胶变化的响应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [50] 陆艳艳, 袁建平, 张磊, 等. 1979—2019年内蒙古发电风速变化趋势分析[J]. 科技风, 2021(20): 193-196.

(编辑: 郑秋红)

(上接16页)

### 深入阅读

- 王秀芹, 1990. 中国近代气象事业的先驱——蒋丙然[J]. 中国科技史料, 11(1): 41-54.
- 温克刚, 李德善, 刘立成, 2014. 新中国气象事业发展的壮美画卷——简评《全国基层气象台站简史》[J]. 气象科技进展, 4(6): 121-122.
- 吴增祥, 2014. 1949年以前我国气象台站创建历史概述[J]. 气象科技进展, 4(6): 60-66.
- 肖子牛, 叶梦姝, 2014. 大气科学历史进程中多学科交叉影响[J]. 气象科技进展, 4(6): 50-53.
- 谢光道, 谢义炳, 叶桂馨, 1959. 十年来我国的气象教育[J]. 气象学报, 30(3): 202-205.
- 谢明恩, 索渺清, 叶梦姝, 2019. 西南联大的气象教育与人才培养[J]. 气象科技进展, 9(1): 60-66.
- 许小峰, 张萌, 2014. 气象科技发展历程的若干回顾及启示[J]. 气象科技进展, 4(6): 6-12.
- 叶梦姝, 2014. 气象科学的发展与时间观变革的初步探索[J]. 气象科技进展, 4(6): 54-59.
- 叶梦姝, 孙楠, 刘怀玉, 2021. 试论中国气象事业自主建设的历程[J]. 气象科技进展, 11(4): 199-202.
- 张剑, 2022. 从格致到科学: 中国近代科学和科学体制化[M]. 北京: 中国工人出版社.
- 张九辰, 2003. 竺可桢与东南大学地学系——兼论竺可桢地学思想的形成[J]. 中国科技史料, 24(2): 112-122.
- 张九辰, 2010. “纪念竺可桢先生诞辰120周年座谈会和学术报告会”在北京举行[J]. 中国科技史杂志, 31(2): 234-235.
- 张萌, 杨萍, 许小峰, 等, 2018. 斜压不稳定理论的发展历程分析[J]. 气象学报, 76(2): 315-321.
- 张雪桐, 2018. 李宪之与中国近现代气象高等教育事业的发展[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 中国气象学会, 2008. 中国气象学会史[M]. 上海: 上海交通大学出版社.

(作者单位: 矫梅燕、张萌, 中国气象学会; 叶梦姝、闫佳睿、贾朋群, 中国气象局气象干部培训学院)

(编辑: 郑秋红)