

“双碳”目标下的生态文明建设

——以珊瑚礁生态系统为例

蔡中华等

摘要：在工业文明迈向生态文明的关键转型期，发展理念与方式面临根本性变革，探寻限“碳”且促发展的生态文明构建路径成为学界与社会关注焦点。文章运用文献综述与对比分析方法，深入剖析珊瑚礁生态系统，揭示其“外在繁荣与内在碳中和”的运行机制：物质流、代谢流和信息流高效运转，达成废物与资源全利用；高生产和高消费互补、生态位在竞争中高度分化，实现资源匮乏下的繁荣；凭借清晰有序的边界规则，历经多次物种大灭绝仍保持高生物多样性。基于此，从资源利用、供需关系、竞争模式和边界规则等维度，为“碳中和”目标下的生态文明建设归纳经验启示，为中国实现“双碳”目标提供理论支撑，助力推动生态文明建设实践。

关键词：生态文明；珊瑚礁生态系统；繁荣；可持续；碳中和

中图分类号：X171.4;X145 **文献标识码：**A **文章编号：**1673-5706 (2025) 01-0096-08

工业革命以来，化石能源的广泛使用，导致二氧化碳大量释放，引起全球气候变化，进而引发人类社会可持续发展的大讨论。2020年，习近平总书记向世界提出中国力争2030年前实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”的“双碳”承诺，并将其纳入生态文明建设的整体布局^[1]。其中，“碳达峰”是碳排放达到最高值后由增转降的历史拐点，意味着社会经济发展与碳排放不再呈强正相关关系；“碳中和”则是社会发展中通过节能减排、循环利用和碳封存技术，实现“碳”的近零排放。

“双碳”概念用耗“碳”多少表示国家发展过程中资源消耗的增量。因此，多数研究认为，碳的

排放权近似于社会的发展权，限碳即限制社会经济的整体发展。能否在实现“双碳”目标下保持社会的可持续发展与社会经济的繁荣，是实现生态文明建设的首要问题。本文从自然生态系统中找方法、谋出路，并从中借鉴对人类文明建设具有强关联性和迁移价值的生态特征，以期在纷繁的生态文明建设路径中找出有效路径，为实现“双碳”目标提供参考。

一、工业文明向生态文明转型过程的关键问题

人类文明的发展已经历了原始文明、农业文明、工业文明三个阶段，每一次文明的转变都推动生产力水平极大的提升。工业革命彻底改变了

人类过去的生产范式,开启了人类对高生产力水平的极致追求^{[2][3]}。中国经过40多年改革开放,急速的繁荣伴随着资源消耗和资源浪费,产生了大量垃圾、废物甚至污染物质,自然生态平衡被打破,环境负荷日趋严峻,生态资源难以匹配社会的高速发展,社会发展难以持续,工业文明向生态文明转型迫在眉睫^[4]。

(一) 资源利用“范式”未改变的问题

生态文明转型面临诸多挑战,首先是能源消耗问题。一方面,中国现今的能源结构仍以煤炭为主,2023年煤炭占能源消费总量的55.3%,且在中国式现代化的建设目标下,能源增长的刚性需求不可避免,短期内煤炭相关能源转型难度较大^{[5][6]};另一方面,2001年以来中国制造业能源效率上升速度较为缓慢,且在各行业间差异显著,而制造业作为国家经济运行的主产业、能源消耗的主源头,其能源效率是中国节能降耗的关键^[7]。近年来,中国大力推进能源转型、发展可再生资源,着力实现循环经济和清洁生产,2023年中国十个品种再生资源回收总额达到1.3万亿元^[8],然而,可再生资源产业规模扩大并未形成正向环境效应,废水、废气和固体废弃物等污染物排放量过高的问题仍未解决^[9]。可以说,现有的资源利用方式主要着眼于调整能源利用结构、减少非再生能源开采、提高可再生资源利用等,仍存在工业文明模式下的自然资源依赖和废物排放问题。在工业文明向生态文明转型过程中,资源利用“范式”仍未改变,没有实现生态文明理念中现有自然资源有效性的最大化。

在生态文明建设的战略演变中,党的二十大报告已规划出与高质量发展相协同的“绿色转型”路径,需要以“系统观”等新的思维方法开展生态文明建设工作,更强调体系性和实践性^[10]。目前,如何明确能源转型的方向,充分发挥“绿水青山”的效能,挖掘可替代的生物能源;如何增加碳汇,实现碳排放与碳汇的平衡,真正做到“零碳发展”,切实解决资源短缺等问题有待思考。

(二) 社会发展与“碳中和”的矛盾问题

世界各国关于“发展与碳排放”的激烈交锋,源自2009年被喻为“拯救人类的最后一次机会”

的哥本哈根世界气候大会。发达国家要求发展中国家参与全球减排、限排温室气体的行动并承担法定义务;而发展中国家则需要碳配额实现自身的发展。在此背景下,“碳”被用作一种通用的能量货币,来评估自然资源和能量利用与社会经济发展的关系,耗“碳”量即代表发展过程中的能耗量,充分凸显出社会发展与节能减排的“矛盾”。

作为最大的发展中国家,中国减排面临的国际压力更重,经济发展需求更高。对此,中国在第75届联合国大会上正式提出“双碳”目标,将“碳”视作评估发展过程中资源利用的通货符号,为实现“碳中和”是实现繁荣、可持续的生态文明的重要一环。然而,根据1952–2023年中国GDP与CO₂排放量变化情况(见下图)可知,中国在近年的减排进程中,CO₂排放量虽有控制却仍呈逐年递增的态势。中国当前的CO₂排放量约占全球总排放量的1/4,减排压力巨大^[11]。与此同时,中国单位GDP能耗水平依然很高,是世界平均水平的1.5倍,是发达国家的2–3倍^[12],社会发展与“碳中和”之间的“矛盾”依旧突出。未来,如何在达成“双碳”目标的基础上,确保社会发展的可持续繁荣,仍是中国生态文明建设中势必解决的首要问题。

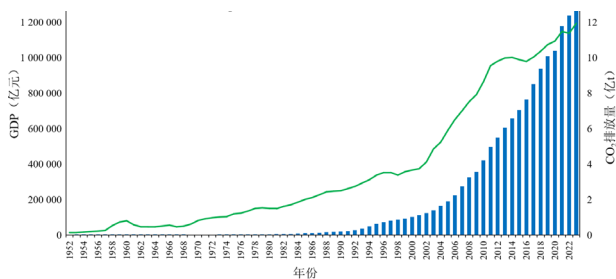


图 1952–2023 年中国 GDP 与 CO₂ 排放量变化情况

数据来源: 中国国家统计局 (<https://www.stats.gov.cn/>) 和 Our world in data (<https://ourworldindata.org/>)。

中国在实现工业文明向生态文明的转变过程中,必将在发展理念和发展方式上发生“范式”的根本改变,但在经历了改革开放的快速繁荣后,如何避免“范式”改变带来市场规则波动,确保市场稳定性,亦是难点之一。

实现人与自然协同发展的奋斗目标,除了挖掘自然资源、发挥自然碳汇功能,效法自然可谓是最行之有效的“捷径”之一,即通过学习地球

上存活了近 30 亿年的“生态社会”的发展规律,探索人类社会生态文明转型的建设路径。海洋生态系统是自然界高生产力的代表,其中,与红树林、海草床和盐沼等典型的高生产力系统相比,珊瑚礁生态系统最贴近生态文明期望达到的“碳中和”、繁荣和可持续(见下表)。它周围环境营养盐含量极低,堪称海底营养荒漠,却繁荣 5 亿年之久,具有几个生态系统中最高的初级生产力和生物多样性,被誉为“海洋中的热带雨林”和“蓝色沙漠中的绿洲”。由此可知,单纯的物质和能量供给以及丰富的资源,不足以成为珊瑚礁生态系统持续繁荣和超高生产力的依据。因此,本文试图从珊瑚礁生态系统中谋方法,寻找中国生态文明建设的有效路径。

典型海洋生态系统基本特性对比表

生态系统	定义	形成时间	生长位置及营养来源	生物多样性	初级生产力 [gC/(m ² ·a)]
珊瑚礁 ^{[13][14]}	由活珊瑚、死亡珊瑚的骨骼及其它礁区生物共同堆积组成的聚集体	5 亿年前	固着生长于透明度高的海底,周围营养物质含量极低	最丰富,含 25% 海洋物种	1500-5000
红树林 ^{[15][16]}	以红树植物为主的常绿乔木或灌木群落	7000 万年前	位于海陆交错区,陆地径流带来丰富的营养物质	超过 2000 种生物	1915-3669
海草床 ^[17]	大面积的连片海草(草本高等植物)	1 亿年前	位于近海海岸带,海底上升流持续供给营养物质	约 100 种生物	~ 543
盐沼 ^{[18][19]}	受周期性潮汐影响而成的土壤盐渍化并长有盐生植物的地段	4 万年前	位于河口或海滨浅滩,陆源物质输入带来大量营养物质	植物种类少,群落结构简单	1000-1600

二、珊瑚礁生态系统的特性与机理

(一) 珊瑚礁生态系统的特性

珊瑚礁生态系统仅占海洋 0.1% 的面积,却生活着海洋中近 25% 的生物类群,主要有:以造礁石珊瑚为主的造礁生物,以底栖藻类、浮游藻类和共生藻为主的光合自养藻类,以肉食性鱼类为主的顶级捕食者,以及草食性动物、浮游生物和底栖生物等,其 90% 的初级生产力都来自于底栖植物,因此多位于清澈的浅海中^{[20][21]}。珊瑚个体本身是一种动物,由无数微小的珊瑚虫聚集形成,珊瑚虫体内共生着虫黄藻。珊瑚礁生态系统具有自然生态系统中最高的初级生产力水平[1500-

5000 gC/(m²·a)],但净生产力近乎为 0,实现了系统内所有资源的高效利用。珊瑚礁丰富的食物网结构、近乎完善的生态位开发使其经历了四次冰川和六次物种大灭绝事件,至今依然是地球上最生生不息的繁荣系统。

此外,珊瑚礁生态系统本身也是人类社会可持续发展的重要一环。珊瑚礁通过钙化作用生成碳酸钙,可将碳以石灰岩的形式永久封存,每年固定约 9 亿 t 碳^[22]。尽管由于此过程伴随 CO₂ 的释放,使其“源—汇”属性争议不断^[23],但越来越多的证据支持了珊瑚礁的碳汇功能^{[24][25]}。近年来,全球超过 54% 的珊瑚礁出现白化,影响着至少 53 个国家和地区,这主要归因于温度升高、海洋酸化、水质污染和过度捕捞等,其中,CO₂ 等温室气体排放导致的全球变暖是白化的主要原因^[26]。因此,人类社会的大力减排,能够有效缓解珊瑚白化,同时,充分了解珊瑚礁繁荣的机理,使其免受人类碳排放的胁迫,增加其碳汇功能,也能更好地服务国家“碳中和”战略的实施。那么,珊瑚礁生态系统如何做到低资源消耗下的高生产力,其得以持续繁荣的内在机制主要有哪些?

(二) 珊瑚礁生态系统繁荣的机理

1. 资源的高效循环与无损利用。珊瑚礁生态系统作为一个开放的系统,它不仅能有效富集环境中的各类营养物质,而且启动了全营养循环模式,通过对各类生源要素的反复循环、反复利用、高效运转,形成了许多相互依存、充分互补的共生体系,达到了 C、N、P 等营养物质和能量在系统内的“中和”,保障其不需要过多外界资源便能维持高生产力。

珊瑚礁生态系统高孔隙率、高渗透性的特点,使其在开放流动的海域中如同一张流网,能高效捕获并富集海水中的营养物质,随后迅速在系统内循环利用^[27]。珊瑚礁上的碎屑质量超过浮游动物的生物量,这可能是其二次生产的关键。尽管流经珊瑚礁的水体中 N、P 浓度一直很低,但这两种营养物质能够被细菌反复分解,并被初级生产者反复利用,物质循环速度可达外海的几十倍至数百倍^[28]。就珊瑚个体而言,其超强生产力主要依赖于共生体(珊瑚虫—虫黄藻)之间的高效物

质循环和代谢产物利用。虫黄藻可以将光合作用产物（如 CO_2 、糖类、氨基酸等）提供给珊瑚虫进行生长和钙化，珊瑚虫则将自身代谢废物（如 CO_2 、N、P 等）提供给虫黄藻作为养分^[29]。类似这样的共生系统在珊瑚礁中广泛存在（珊瑚与虫黄藻、海葵与虫蓝藻、海葵与鱼等），极大提高了生产的有效性，降低了系统熵的产生。

珊瑚礁生态系统低能耗下的高生产，在开放系统建立了一个高效的内循环世界，实现了流入系统各类生源要素的可持续利用，不仅达到了人类世界所期望的“碳中和”，更达到了系统内部所有物质能量的“中和”。

2. 高生产与高消费的供需平衡和近零排放。珊瑚礁生态系统是一个食物网结构异常丰富、互补共生的系统。珊瑚礁群落总初级生产力与群落总呼吸的比率近似于 1，系统代谢的物质能量主要在系统内回收存储，并用于维持自身的生长消耗，几乎没有浪费和剩余^[30]。虽然其初级生产力水平极高，但几乎所有的产能都得到了有效利用，净生产力约为 $0 \pm 0.7 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，仅占全球海洋生态系统净初级生产量的 1%，是一个近零排放的系统^{[31][32]}。

珊瑚礁生态系统的近零排放，得益于强大的生产与旺盛的需求达到了供需平衡。珊瑚礁生态系统各营养级上的生物量呈现出“倒置营养金字塔”结构，即消费者（无脊椎动物和鱼类）的生物量大于初级生产者（蓝藻、甲藻和其它光合原生生物以及各种藻类）^[33]。就珊瑚个体而言，其本身也可能是一种“倒置营养金字塔”的生物量结构，因为其体内生产者虫黄藻的生物量可能不足消费者珊瑚虫动物组织的 5%，却提供着珊瑚虫几乎所有的热量需求^[34]。珊瑚礁生态系统食物网结构极度发达，有丰富的消费层级，食物链分级高达 9–10 级。庞大的消费需求一方面促进了珊瑚礁生态系统初级生产力发展水平不断提高，并形成了很多共生系统；另一方面丰富的生物多样性加重了系统的有效竞争，进而推动了系统的有效演化。而看似较小的生产端归因于虫黄藻等生产者的短周期、高周转、长时序的循环演替，虽然其当下现存生物量可能不多，但实际负责生产的

生物量总量极高，产生的有效能更多。珊瑚礁生态系统庞大层级的消费端和快速周转的生产端协调共进，在具备高生产力的同时，也拥有高消费力，可以达到充分消耗、吸收、互补、协同和共生的效果，真正构建了近零排放的“碳中和”世界。

3. 丰富的生物多样性和生态位。珊瑚礁生态系统在充分竞争有限空间的基础上，分化出了丰富的生态位。造礁珊瑚及其它造礁生物分泌的钙质骨骼，经过长年的堆积侵蚀形成了复杂的三维空间结构，具有无数的洞穴和孔隙，不同的时间位、空间位和资源位便成为其中生物激烈竞争的对象^[35]。激烈的竞争促进了相似物种生态位发生分化，保留下更适应环境的发育特征，提高了物种多样性和丰富度。研究人员通过实验发现，种间竞争对珊瑚礁生长率的影响大于种内竞争，这更加促进了生物的适应性分化和生态弹性的形成，对推动系统演化、层级形成有积极影响^[36]。

珊瑚礁生态系统丰富的生物多样性构建出完善的生态网络，对系统整体的稳定性、资源利用率和抗逆性都大有裨益。研究表明，生产力层级、营养竞争与利用和生物相互作用等，都会受到生物本身属性的强烈影响，如：体型大小、生长快慢、特殊摄食习性、捕食、寄生、竞争等^[37]。因此，生物多样性高能够增加更多生物组合特性和物种之间的协同作用，从而涌现出新的品类和新的资源利用模式，增强生态系统的综合功能，进而实现更完整的资源利用，独特功能的类群改变生物或非生物环境，其它类群的性能也随之提高。

珊瑚礁生态系统在有限的空间内，通过充分的竞争不断分化出丰富的生态位，物种数量多、进化速度快、生物多样性极高。不同生物对各自偏好资源的针对性捕获，不仅通过资源的充分利用实现效能最大化，而且通过代谢产物再循环利用，减少了系统熵的产生，实现系统熵最小化，促进了资源在系统内部的“自我中和”，使珊瑚礁生态系统达到长久稳定、持续繁荣的效果。

4. 清晰有序的边界规则。珊瑚礁生态系统多位于清澈的浅海中，对海水透明度的要求十分严格。珊瑚礁生态系统的初级生产力主要来自于底栖固定化生长的植物和藻类而非浮游植物，因此

系统通过适应性进化建立起清晰的边界规则,让阳光能够尽可能多地照耀到每一寸海底,兼顾固定化生产的高效与阳光的充分利用,所有物种在各自适合的生态位稳定生长,这应当是珊瑚礁生态系统持续稳定繁荣最重要的边界规则。举例来说:即使是海洋灾害之首的风暴潮,发育成熟的珊瑚礁生态系统不仅不会受到风暴潮的彻底破坏,还能够削减 97% 的风暴潮能量,为沿海居民带来强大的保护^[38];但如果大量污水排入,珊瑚礁生态系统的生产力水平将立刻下降,生长繁殖严重受阻^[39]。因为风暴潮属于短时灾害,不会打破珊瑚礁生态系统已建立的有序规则,系统能够通过自我修复,最大程度减轻风暴潮的侵蚀;而污水排入则会使系统富营养化,导致珊瑚礁生态系统发生范式转变,浮游植物会因为营养丰富而疯长,造成光遮蔽,抢夺生态位,影响底栖植物生长,令原本清晰透明的水体变得浑浊紊乱,打破了系统的规则和稳定性。

珊瑚礁生态系统不被轻易打破的边界规则,成为系统内部生命体和谐共生的天然屏障,即便是最底层的生物也能够得到阳光与能量的充分供给,更加确保了系统的长久稳定,做到可持续繁荣发展。

三、珊瑚礁生态系统对生态文明建设的启示

珊瑚礁生态系统高效的物质循环与再利用能力、高生产与高消费的稳定平衡、丰富生态网络以及清晰有序的边界规则,是其持续繁荣的秘诀。这为中国建设“碳中和”的生态文明道路提供了很好的参考价值。

(一) 资源效益和利用率最大化

自然资源之于社会,就像营养之于珊瑚。在生态文明建设过程中,我们可以借鉴珊瑚礁生态系统营养捕获和高效可循环再利用模式,不是无限度增加物质和能量供给,实现数量增长;也不是不断追求最大效率和发展速度,而是提高资源的循环与可持续利用的“有效性”,用少量的自然资源谋求更高的经济收益。

资源效益最大化而非发展速度最大化。在改革开放背景下,中国经济已完成了资源无序开发与利用的野蛮生长时期,生产力水平得到了显著

提升,亟需进行“范式”转变。现在中国在世界大环境中就如同珊瑚礁处于开放海域一样,应摆脱对资源的过分依赖,选择更适合的发展模式,将经济发展从单纯依靠增加资源消耗的数量型增长,转变为降本增效,提升内涵,提升附加值的高质量发展模式。构建“碳中和”的生态文明,要减少资源消耗,延长资源的开发与使用链条,要从能源转型和技术突破多方面入手,大力推动生产和生活方式的全面深刻转变,使资源效益最大化。

资源循环全利用。生态系统与工业社会最大的不同在于生态系统中的绝大部分物质都可以基于系统各个组分的作用,重新进入系统,实现资源或者要素的循环再利用,极大节约了成本,提高了资源利用的有效性。工业社会将废弃物作为垃圾,生态系统应将废弃物作为资源,从工业文明到生态文明是理念转变,做到资源充分循环与利用。如:城市污水处理最主要的是处理水中的 N、P,但是 N、P 本身却是植物生长必要的养料,如果采用污水资源化技术,将城市污水中的 N、P 转化为有效的肥料,不仅可以降低污水处理的能耗,而且可以变废为宝。

(二) 保持供需两旺促进持续繁荣

极高的生产力水平与多层级丰富的食物网结构,是珊瑚礁生态系统保持繁荣的关键原因。在资源的供需匹配上,不能仅以提高生产力水平,提升产能为发展目标,应通过推动多样性的高需求拉动高生产,只有实现供需两端的相对平衡、相互促进,才能推动生态文明的持续繁荣。

提高生产有效性。生产力水平并非单纯取决于生产效率,更取决于生产的有效性,让生产出的产品有足够的市场需求,不是生产效率最大化,而是功率最大化,这也是实现“碳中和”下高生产的关键。在劳动者、资金等可投入资源有限的情况下,应通过科技创新提高产品的丰富度,生产出更多商品的品类,引导消费升级,满足更多层级的消费者使用。比如,发展数字经济,不仅应当在提高效率方面发力,也要在利用数据获取新机遇方面发力,否则单纯的高效率有可能仅仅改变资源或财富的分配而不是增加资源或财富。

拓展消费层级。中国工业文明的建设和发展一直都在为提升生产力水平铺路,虽然生产力水平发展很快,但是消费水平明显不足。改革开放40多年,投资、消费和出口一直是驱动经济的三驾马车,但是核心驱动主要停留在出口和投资,拓展消费层级是推动生态文明社会经济繁荣发展的重要环节。在欧美经济脱钩和逆全球化的大背景下,应持续开拓国内的消费市场,从生产端创新产品引导消费,从消费端发展新的消费模式,拓展国内的消费层级,满足更多不同需求等级的消费者。

(三) 在竞争中驱动产业“进化”

珊瑚礁生态系统的生物多样性和生态多样性源于系统的有效竞争。珊瑚礁生态系统在充分竞争中使生态系统生态位得到了最有效的开发,通过系统的高度竞争、合作、共生和共栖,推动生物不断演化,从而成为地球上生物多样性最高的系统。

在生态文明建设面临的社会竞争关系中,应通过有效竞争带动产业链的不断迭代,构建繁荣的产业生态。在竞争中推动系统产生新产品和新品类,通过技术、产品不断升级,形成产品差异化升级,而非在竞争中驱动系统“内卷”,导致系统做无用功。商品在生产、流通、销售和使用的过程中无不存在着竞争,同行企业为了增加产品销售量、实现资本积累,就容易竭尽全力在竞争中彼此消耗,导致物质贬值的同时劳动力也贬值,引起劳动力市场的竞争,个体“收益努力比”降低,最终甚至产生过度竞争下的“自杀性社会”^[40]。2020年“内卷”迅速成为网络流行词,正是在当今社会经济飞速发展下,激烈竞争导致内耗问题激化的体现^[41]。

在竞争中革新。科技是第一生产力,科技创新可以帮助提高系统的有效性,为企业发展筑起更宽的护城河,提升企业的竞争力。同时,科技创新还能引导消费市场,助力消费升级。不仅增加产品的多样性,更能推动新产业或者新品类的“涌现”。如:智能手机颠覆了传统手机,直接推动了移动互联网的革命。传统家电企业无效“内卷”的代价只能使产品降价销售,严重影响经济

效益;科技创新和互联网革命却可以帮助家电企业进行万物互联,将电视机延伸成投影仪、平板电脑、监视器,将电冰箱、空调、洗衣机结合成智能家居,将生活、健康都联系起来,不仅能提升产品丰富度,满足不同顾客的需求,还能带动更多的产业协同发展。发掘同类资源的更多可开发功用,从而拉动消费升级,减少资源浪费,实现有限资源下社会大繁荣的有效途径。

(四) 打造规范有序的市场规则

清晰有序的规则是珊瑚礁生态系统长期可持续发展的基础保障。只要光照、温度、营养等大边界不变,任凭其它影响因素改变,珊瑚都能繁荣生长。构建稳定、规范、有序、边界清晰的国内大市场,使市场成为一种法律保障,而非不确定风险,才能确保生态文明建设的长久稳定。

从工业文明向生态文明的转变,是从追求高效率向追求可持续性发展的“范式”转变,其内生增长逻辑将发生根本的变化。如何探索有效的生态文明发展路径,避免在“范式”转变中因规则变化而导致系统崩塌,是文明转型中极为重要的环节。在中国加快建设现代化经济体系的时代背景下,建立高效规范、公平竞争、充分开放的全国统一大市场,使市场在资源配置中发挥决定性作用,是打开新格局、提高国际竞争力的重要一环。提升资源整合能力,严格规范各类企业,才能使产业更加可控、更加安全,国内大循环才能更加稳定长久。

四、结语与展望

本文探索性地从自然生态系统中找方法、谋出路,将珊瑚礁生态系统持续繁荣的特征规律外延至人类文明建设中,以期在现有纷繁复杂的路径中为中国实现“双碳”目标下的生态文明选择一条有理可依、行之有效的道路,为今后人类在社会发展中更好地效法自然提供示范和启示。未来,在中国构建生态文明的道路上,发展“范式”将发生根本改变,提高资源利用的有效性,推动资源再循环,为生产力水平的提升提供不竭动力。同时,从供需和竞争关系入手,在“节能减排”的资源限制下,通过创新发展推动,大力推进产业革新,提高产品多样性,实现各行各业与同行

同业的共同繁荣。优化市场规则,确保市场稳定性,为建设现代化经济体系打好坚实的基础保障,真正实现中华民族永续发展。

参考文献:

[1] 张志强,王克,王珂英,等.碳达峰、碳中和的经济学解读[N].光明日报,2021-06-22.

[2] 马克思恩格斯选集:第1卷[M].北京:人民出版社,2012.

[3] 成龙.从马克思主义时代观看当今中国所处的时代性质[J].浙江大学学报(人文社会科学版),2020,50(6).

[4] 张人仁,李婧雯.新中国成立以来生态文明建设的实践探索[J].文化创新比较研究,2020,4(6).

[5] 金之钧,张川.面向碳中和的中国能源转型路径思考[J].北京大学学报(自然科学版),2024,60(4).

[6] 王永臻,杨丽丽,门相勇,等.我国能源行业高质量发展面临的挑战与对策[J].中国矿业,2025,34(1).

[7] 关伟,高鑫,许淑婷.中国制造业行业能源效率测度及节能潜力分析[J].资源开发与市场,2023,39(10).

[8] 2024中国再生资源回收行业发展报告[J].资源再生,2024,(7).

[9] 王磊,王琐,李慧明.再生资源产业集聚与区域环境污染——来自我国省域面板数据的实证分析[J].科技进步与对策,2018,35(13).

[10] 张肖阳.新时代中国式现代化道路的“绿色演进”——基于党的十八大、十九大和二十大报告的计算文本分析[J].山东社会科学,2023,(5).

[11] 丁仲礼.深入理解碳中和的基本逻辑和技术需求[J].时事报告:党委中心组学习,2022,(4).

[12] 朱法华,王玉山,徐振,等.碳达峰、碳中和目标下中国能源低碳发展研究[J].环境影响评价,2021,43(5).

[13][20] 陈国华,黄良民,王汉奎,等.珊瑚礁生态系统初级生产力研究进展[J].生态学报,

2004,(12).

[14][22][31] 石拓,郑新庆,张涵,等.珊瑚礁:减缓气候变化的潜在蓝色碳汇[J].中国科学院院刊,2021,36(3).

[15] 范航清,陆露,阎冰.广西红树林演化史与研究历程[J].广西科学,2018,25(4).

[16] 杨昊翔,张丽,闫敏,等.基于高时空分辨率融合影像的红树林总初级生产力遥感估算[J].遥感技术与应用,2021,36(2).

[17] 高亚平,方建光,唐望,等.桑沟湾大叶藻海草床生态系统碳汇扩增力的估算[J].渔业科学进展,2013,34(1).

[18] 王秀君,章海波,韩广轩.中国海岸带及近海碳循环与蓝碳潜力[J].中国科学院院刊,2016,31(10).

[19] Hopkinson C S, Cai W Y, Hu X. Carbon sequestration in wetland dominated coastal systems: A global sink of rapidly diminishing magnitude[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4: 186-194.

[21] 赵美霞,余克服,张乔民.珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能[J].生态学报,2006,26(1).

[23] Kinsey D W, Hopley D. The significance of coral reefs as global carbon sinks— response to Greenhouse[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1991, 89(4): 363-377.

[24] Zhang S, Bai Y, He X, et al. The carbon sink of the Coral Sea, the world's second largest marginal sea, weakened during 2006-2018[J]. Science of the Total Environment, 2023, 872: 162219.

[25] Akhand A, Watanabe K, Chanda A, et al. Lateral carbon fluxes and CO₂ evasion from a subtropical mangrove-seagrass-coral continuum[J]. Science of the Total Environment, 2021, 752: 142190.

[26] 贾平凡.全球珊瑚礁白化问题亟需关注[N].人民日报(海外版),2024-04-27.

[27] 宋金明,王启栋.近40年来对南海化学

海洋学研究的新认知[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(3).

[28] Song J, Song J. Biogeochemical processes of the south china sea[J]. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas, 2010: 529–626.

[29] Xu Y, Zhang J, Huang H, et al. Coral symbiosis carbon flow: a numerical model study spanning cellular to ecosystem levels[J]. Frontiers in Marine Science, 2022 (9): 412.

[30] Allgeier J E. The ecosystem ecology of coral reefs revisited[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2024, 55: 251–270.

[32] Hatcher B G. Coral reef ecosystems: how much greater is the whole than the sum of the parts?[J]. Coral Reefs, 1997, 16(1): 77–91.

[33] Friedlander A M, Demartini E E. Contrasts in density, size, and biomass of reef fishes between the northwestern and the main Hawaiian islands: the effects of fishing down apex predators[J]. Marine Ecology Progress, 2002, 230(1): 253–264.

[34] Thornhill D J, Rotjan R D, Todd B D, et al. A connection between colony biomass and death in Caribbean reef-building corals[J]. PLoS One, 2011, 6(12).

[35] 郑新庆, 张涵, 陈彬, 等. 珊瑚礁生态修复效果评价指标体系研究进展[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1).

[36] Horwitz R, Hoogenboom M O, Fine M. Spatial competition dynamics between reef corals under ocean acidification[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1–13.

[37] McWilliam M, Chase T J, Hoogenboom M O. Neighbor diversity regulates the productivity of coral assemblages[J]. Current Biology, 2018, 28(22): 3634–3639.

[38] Elliff C I, Silca I R. Coral reefs as the first line of defense: shoreline protection in face of climate change[J]. Marine Environmental Research,

2017, 127: 148–154.

[39] 郭峰, 肖家光, 田鹏, 等. 大亚湾及大鹏半岛沿岸造礁石珊瑚现状与生态脆弱性评价[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(4).

[40] 邓曦泽. 过度竞争下的“自杀性社会”——基于技术挤压的分析和预判[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2023, 38(2).

[41] 陈倩倩. “内卷化”的政治经济学透析——基于《资本论》的文本研究[J]. 北京城市学院学报, 2022, (4).

作者: 蔡中华(通讯作者), 清华大学深圳国际研究生院教授、博士

张博雅, 清华大学深圳国际研究生院生物学博士研究生

范伟军, 深圳市社会科学院党组成员、副院长, 清华大学创新领军工程博士研究生

周进, 清华大学深圳国际研究生院副教授、博士

责任编辑: 周修琦