

生态文明 之碳均衡

林秀群 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

生态文明之碳均衡

林秀群 著

北京

冶金工业出版社

2019

内 容 提 要

本书以“云南省现代管理与新型工业化研究基地项目——基于生态系统碳承载力的碳均衡目标实现机制研究”的研究报告为基础,提出了“生态文明建设的目标是力争降低碳超载率直至实现碳均衡”的观点,同时构建了生态系统碳承载力的测算模型、CO₂排放量的计算模型和碳超载及碳平衡的判定模型,并对云南省的相关数据进行了实证研究;围绕提高生态系统碳承载力和降低经济系统碳排放量两大核心目标,研究了碳均衡目标实现机制。

本书可供从事生态文明建设、可持续发展的研究人员和管理人员阅读,也供相关领域的从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

生态文明之碳均衡/林秀群著. —北京:冶金工业出版社,
2019. 8

ISBN 978-7-5024-8159-9

I. ①生… II. ①林… III. ①二氧化碳—排气—研究—
云南 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 144741 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 郑小利 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8159-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2019 年 8 月第 1 版,2019 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.25 印张; 227 千字; 166 页

55.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前言



碳均衡视角的生态文明建设机制，需要围绕“降低碳排放量、提高生态系统碳承载力”“力争降低碳超载率直至实现碳均衡”进行。

书中采用剔除法，以《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2017)为基础，将陆地生态系统细分为7个一级子系统，分别是耕地、园地、林地、草地、公共管理及服务用地、水域及水利设施用地和其他，进一步细分为26个二级子系统。选择了用NEP度量单位面积二级子系统的碳承载力，以此为基础，构建了生态系统碳承载力的测算模型。

将化石能源消费和水泥生产过程碳酸盐分解产生的 CO_2 作为主要碳源，构建了 CO_2 排放量的计算模型。

碳均衡是 CO_2 排放的质量与生态系统碳承载力基本相等的状态。利用碳排放量和生态系统碳承载力的关系，构建了碳均衡、不同程度碳赤字的判定模型。

实证研究发现：

(1) 2012年，云南省出现了轻微的碳超载现象。2012年和2013年的碳超载率分别约为3.99%和6.56%。该结果与张一群在《经济问题探索》中发表的文章“生态足迹与生态承载力评价——以云南省为例”中所述内容(2105年)的结论基本一致。

(2) 2014年，云南省碳排放量的预测值为25440.79万吨，生态系统的碳承载力约为22006.28万吨 CO_2 。即碳排放量将超出生态系统承载力预测值约3400万吨 CO_2 。

(3) 通过LMDI 1模型，发现能源强度、产业结构、能源结构是云南省碳排放量递增的主要驱动因素。



(4) 利用泰尔指数法,发现工业和交通运输业是云南省碳强度高的两大主要产业,也是云南省减碳的两个重点产业。

(5) 围绕碳均衡目标,提出了建立碳排放总量目标的碳交易机制、碳补偿机制、森林 CAD 机制的建议。

(6) 将碳均衡目标管理机制作为我国生态相对良好地区现阶段生态文明建设的目标。以碳为联系纽带,将生态系统碳承载力的提升目标分解为森林、灌木林、水田、水浇地、旱地、园地、湿地等子系统的碳承载力提升目标,有利于将生态系统恢复目标细化,便于各级政府的管理。围绕碳均衡目标,从能源强度、产业结构、能源结构等方面,以工业和交通运输业为重点,制定减碳的措施。

本书以“云南省现代管理与新型工业化研究基地项目——基于生态系统碳承载力的碳均衡目标实现机制研究”的研究报告为基础编写,杨红娟老师对本书的总体架构进行了把关,唐向阳研究员对本书所涉及的数据的收集付出了辛苦的劳动,裴红宇老师在模型的构建方面献计献策。研究生童祥轩和葛颖也对本书的编写给予了大力帮助。

在此,向他们及“基于生态系统碳承载力的碳均衡目标实现机制研究”课题组成员表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2019年3月

目 录



1 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 相关概念的界定	3
1.2.1 陆地生态系统的界定	3
1.2.2 陆地生态系统主要承载对象的界定	3
1.2.3 碳均衡目标的界定	4
1.3 国内外研究现状	5
1.3.1 碳承载力研究的历史演进	5
1.3.2 陆地生态系统碳承载力的研究现状	6
1.3.3 碳均衡目标的实现机制研究现状	7
1.3.4 研究述评	8
1.4 主要研究内容和主要方法	8
1.4.1 主要研究内容	8
1.4.2 主要研究方法	9
1.5 本章小结	10
2 碳循环和生态文明	11
2.1 碳循环与气候变化	11
2.1.1 生态系统的碳循环	11
2.1.2 碳排放量变化趋势	11
2.1.3 大气二氧化碳浓度的变化	12
2.1.4 碳排放对全球变暖的影响	12
2.2 生态危机	12
2.2.1 生态危机的内涵	12
2.2.2 生态危机的原因	13
2.3 生态文明	15
2.3.1 生态文明的内涵	15



2.3.2 生态文明建设的路径	16
2.4 我国生态文明建设的战略目标	17
2.4.1 生态文明建设已经上升为国家战略	17
2.4.2 我国生态文明建设的目标	17
2.4.3 碳排放考核目标	18
2.5 本章小结	18
3 碳锁定与碳超载、碳均衡的关系	19
3.1 碳锁定现象的特征	19
3.1.1 碳排放量持续递增, 且大气中的 CO_2 浓度持续升高	19
3.1.2 气温增幅不断加大	19
3.1.3 中国的雾霾现象越来越严重	20
3.2 国内外碳锁定的判定方法及述评	20
3.2.1 碳锁定的研究现状	21
3.2.2 碳锁定的原因分析	22
3.2.3 关于碳锁定判定的研究述评	23
3.3 碳超载视角的碳锁定的判定	25
3.3.1 碳锁定的判定模型	25
3.3.2 碳超载与碳锁定的关系	27
3.4 基于碳超载的碳锁定机理分析	28
3.4.1 碳锁定是经济增长目标机制和异化消费论的必然结果	28
3.4.2 森林子系统碳承载力的下降是碳锁定的另一重要推动力	30
3.4.3 建设用地的扩张是农田子系统碳承载力下降的主要原因	32
3.5 碳锁定与碳均衡的关系	33
3.5.1 碳锁定是碳超载的后果	33
3.5.2 碳锁定将加大碳均衡目标实现的困难	33
3.6 本章小结	33
4 生态系统碳承载力和区域碳排放量的计算模型	35
4.1 生态系统的概念和分类标准	35
4.1.1 生态系统的概念	35
4.1.2 陆地生态系统碳循环	36
4.1.3 陆地生态系统的分类原则	37
4.1.4 陆地生态系统的分类标准	38
4.2 陆地生态系统碳承载力的时间序列模型构建	40



4.2.1	陆地生态系统碳承载力的基本概念	40
4.2.2	基于 NEP 的 b_{ij} 度量标准	40
4.3	区域碳排放量的时间序列计算模型	42
4.3.1	二氧化碳的主要来源	42
4.3.2	云南省主要碳源的界定	44
4.3.3	碳排放量的计算	45
4.3.4	区域化石能源消费的碳排放测算	46
4.3.5	水泥生产过程中石灰石分解产生的二氧化碳	47
4.3.6	区域碳排放量计算模型	48
4.4	区域碳超载现象判定模型和碳超载现象的界定	48
4.4.1	区域碳失衡或碳超载现象判定模型	48
4.4.2	区域碳超载现象的描述	48
4.5	本章小结	49
5	云南省生态系统碳承载力和碳排放量实证研究	50
5.1	NEP 的空间变化规律	50
5.1.1	森林的分类及其 NEP 空间变化特征	50
5.1.2	NEP 的纬度变异规律	50
5.2	云南省二级陆地生态子系统的 NEP	51
5.2.1	云南省地理位置分析	51
5.2.2	云南省二级陆地生态子系统 NEP 确定原则	52
5.2.3	森林和灌木林的 NEP 值	53
5.2.4	灌溉水田 (水浇地)、旱地的 NEP 值	55
5.2.5	其他子系统的 NEP 值	57
5.3	二级陆地生态子系统面积数据	58
5.3.1	二级陆地生态子系统的面积的来源	58
5.3.2	二级陆地生态子系统的面积和 NEP 值	60
5.4	云南省碳承载力计算、碳超载分析	60
5.4.1	云南省碳承载力的计算结果	60
5.4.2	云南省碳排放量计算结果	61
5.4.3	云南省碳超载现象的判定	62
5.4.4	基于 NEP 纬度变异规律的云南省碳承载力计算结果 与生态足迹法的比较	64
5.5	子系统不同分类方法和 NEP 不同数据来源的碳承载力结果的比较	64
5.5.1	计算模型	65



5.5.2	数据来源	67
5.5.3	基于系数法的农田农作物净碳汇量结果	68
5.5.4	不同 <i>NEP</i> 系数来源的云南省碳承载力计算结果的比较	69
5.6	本章小结	70
6	云南省碳排放量目标值的预测研究	71
6.1	均衡理论的发展历程和分类	71
6.1.1	一般均衡理论	71
6.1.2	纳什均衡理论	72
6.2	目标管理和碳强度目标	73
6.2.1	目标管理理论的提出和发展	73
6.2.2	低碳经济发展过程中的目标管理思想	73
6.2.3	碳强度目标的弊端	74
6.3	云南省实现碳均衡目标的基本构想	75
6.3.1	碳均衡的分类	76
6.3.2	云南省碳均衡目标的界定及实现思路	77
6.4	基于碳承载力的 2014 年云南省碳排放量目标值的预测	77
6.4.1	碳承载力预测值的基本思路	77
6.4.2	碳承载力关键子系统的识别	78
6.4.3	2014 年云南省关键子系统的面积变化趋势分析	79
6.4.4	2014 年云南省碳排放量目标值的确定	80
6.5	2014 年云南省碳排放量目标值与预测值的比较	80
6.5.1	能源消费量 (<i>EC</i>) 和实际 GDP (<i>RG</i>) 的对数值的 AR 模型	80
6.5.2	碳排放量递增的稳定性分析	82
6.5.3	2014 年能源消费碳排放量的预测值	82
6.5.4	2014 年水泥生产碳酸盐分解的碳排放量 D_{2yt}	84
6.5.5	2014 年的碳排放量目标值与预测值的比较	85
6.6	本章小结	85
7	云南省碳均衡目标实现机制	86
7.1	碳排放总量目标机制是中国低碳经济发展的必然选择	86
7.1.1	中国行政减排机制简介	86
7.1.2	发达国家的总量控制与交易机制	87
7.2	云南省碳均衡目标实现机制的主要内容	87
7.2.1	云南省碳均衡目标实现机制的主要内容	87



7.2.2 碳均衡目标机制的实质和分解	88
7.3 碳交易和补偿机制的分类和发展	89
7.3.1 基线信用机制	89
7.3.2 总量交易机制	90
7.3.4 自愿碳补偿机制和强制碳补偿机制	92
7.4 我国碳交易制度存在的主要问题	93
7.4.1 碳排放总量目标的制定和初始分配权的缺失	93
7.4.2 碳排放权界定不清	94
7.4.3 管理体系不够完善	94
7.5 建立云南省碳均衡目标的市场交易机制	95
7.5.1 加快明确碳排放权的产权性质	95
7.5.2 基于碳承载力预测值制定碳排放总量的目标值	96
7.5.3 确定碳排放交易覆盖范围	97
7.5.4 建立碳排放权分配标准	98
7.5.5 碳排放权配额的分配方式	98
7.6 建立云南省内部的 CDM 机制	99
7.6.1 CDM 机制的内涵	99
7.6.2 区域内部 CDM 机制有利于促进生态系统碳承载力的提升	99
7.6.3 云南省应用 CDM 机制的条件分析	100
7.6.4 云南省内部 CDM 机制的设计	102
7.6.5 建立云南省内部森林碳汇补偿机制	103
7.7 建立个体自愿碳补偿机制	106
7.7.1 建立碳交易所和产品碳补偿标识制度	106
7.7.2 建立旅游者实施碳补偿制度	106
7.8 本章小结	107
8 基于终端消费的云南省碳排放特征及减排对策	109
8.1 云南省能源消费量分析	109
8.1.1 云南省能源生产	109
8.1.2 云南省能源消费	109
8.2 终端消费的碳排放总量测算及驱动因素研究	110
8.2.1 研究综述	111
8.2.2 云南省终端能源消费碳排放的测算模型	112
8.2.3 云南省终端能源消费 CO ₂ 排放因素分解模型及测算	114
8.2.4 因素分解结果	116

8.2.5	驱动因素分类分析	116
8.2.6	对策和建议	121
8.3	云南省减排重要产业的分析及选择	122
8.3.1	产业碳排放强度	122
8.3.2	碳排放强度产业分解分析	123
8.3.3	碳排放强度产业差异分析	125
8.3.4	减排重要产业的选择研究	127
8.4	本章小结	129
9	基于农田系统净碳汇的碳补偿	131
9.1	云南省农田生态系统及其碳源、碳汇界定	131
9.1.1	云南省农田区位特征	131
9.1.2	数据来源	132
9.1.3	农田碳汇和碳源的界定与分类	132
9.2	云南省农作物碳吸收量估算	133
9.2.1	计算方法	133
9.2.2	计算结果	133
9.3	云南省农田生产过程投入产生的碳排放量	134
9.3.1	计算方法	134
9.3.2	估算结果	134
9.4	云南省农田土壤净固碳量	134
9.4.1	计算方法	134
9.4.2	计算结果	135
9.5	云南省农田净碳汇量	135
9.6	云南省农田碳补偿机制的框架	136
9.6.1	补偿主体和补偿客体	137
9.6.2	补偿原则	137
9.7	补偿标准	139
9.7.1	云南省农田净碳汇补偿标准	139
9.7.2	低碳耕种补偿	139
9.7.3	碳排放强度的补偿标准	140
9.7.4	要素补偿标准	142
9.8	补偿手段	143
9.8.1	资金补偿	144
9.8.2	实物补偿	145



9.8.3 政策补偿	145
9.8.4 技术补偿	146
9.9 本章小结	146
10 结语	147
10.1 研究结论	147
10.2 创新之处	148
10.3 研究不足和展望	150
参考文献	151
附录	159
附录 A 基于终端消费的能源碳排放量计算	159
附录 B 云南能源消费品种及其碳排放量	160
附录 C 农田生态系统农作物碳吸收量的计算数据	161
附录 D 农田生态系统农作物耕种过程的碳排放量计算	163
附录 E 农田生态系统碳强度计算所需面积的数据	165



绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

(1) 气温升高、雾霾加剧。美国国家海洋和大气管理局发布的全球气候分析报告指出:2014~2015 年冬季,地球经历了 1880 年以来的最暖冬季,全球表面平均温度较 20 世纪的平均值偏高 0.79°C ,高出原有的最暖冬季 0.04°C 。中国滇藏高原区显著增暖趋势在 1961~1990 年开始出现^[1];云南省最高气温和最低气温的变化均呈明显的增温趋势,最高气温和最低气温的极大值都出现在 2010 年^[2]。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告中指出:2011 年大气中的浓度 CO_2 达到 391×10^{-6} ,该值较 1975 年升高了 40%;1880~2012 年全球海陆表面平均温度升高了 0.85°C 。2015 年 12 月,雾霾再次袭击了包括华北、华东在内的大半个中国。

白万平等(2013 年)选取全球 161 年的时间序列数据,运用线性和非线性等方法检验了碳排放量和气温变化之间的统计因果关系,结果表明:碳排放量增加导致的大气中 CO_2 浓度升高是气温升高的原因,且气温递增大约滞后于碳排放量递增 29 年^[3]。其实质是人类主要经济活动排放的 CO_2 超出了陆地、海洋生态系统的承载力^[4]。

(2) 低碳经济的成绩和碳排放量被高估的研究成果。中国政府已经向世界庄严承诺:将采取自主行动使 2020 年的单位 GDP 碳排放比 2005 年减少 40%~45%,非化石能源占总能源的比例达到 15%,新增加森林面积 4000 万公顷,增加木材蓄积量 30 亿立方米。中国低碳经济取得世人瞩目的成绩,2013 年碳排放强度与 2005 年下降了 28.5%,相当于少排放 CO_2 25 亿吨。森林是的主要承载子系统,2014 年 2 月 25 日中国国家林业局公布了第八次全国森林资源清查成果。清查显示,中国目前森林覆盖率达到了 21.63%,比第七次清查时提高了 1.27%,植树造林取得了一定的成绩。2015 年 12 月 6 日,云南省发改委相关负责人郑重声明,2014 年云南省碳强度较 2013 年降低 20.67%,较 2010 年降低 39.72%,超额完成“十二五”期间下降 16.5%的目标任务。

由中国科学院上海高等研究院研究员魏伟团队联合哈佛大学、清华大学等



24 所科研机构组成的科研团队, 历时 4 年开展针对中国实际情况的中国碳排放核算工作, 统计了中国所有行业部门化石能源燃烧的碳排放及水泥生产过程的碳排放, 覆盖了中国 99% 的能源消费量。因为灰分比较高的中国煤炭的平均含碳量约为 54%, 而 IPCC 默认值为 75%, 中国碳排放总量比先前估计低 10%~15%^[5]。

1.1.2 研究意义

党的“十八大”报告、“十九大”报告提出, 建设生态文明是关系人民福祉、关乎民族未来的长远大计。面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势, 必须树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念, 把生态文明建设放在突出地位, 融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设的各方面和全过程, 努力建设美丽中国。

(1) 理论意义。碳均衡目标的研究, 有助于明晰生态文明的概念, 丰富生态文明的理论体系; 有利于完善我国现阶段生态文明建设目标的理论体系, 进而丰富目标管理理论。

陆地生态系统碳承载力、碳源的界定对碳均衡目标制定的科学性有较重要的理论意义, 能有力完善低碳经济发展视角的区域生态文明的外延。

(2) 实践意义。云南省居于我国生态环境保护的前沿, 处于伊洛瓦底江、金沙江、怒江、澜沧江、红河和珠江等 6 大水系源头或上中游, 是全球生物多样性最为富集的地区之一。苔藓、蕨类、竹类种类占全国的比重均超过了 50%, 被子植物、裸子植物、两栖类和淡水鱼类分别占全国的 43.9%、37%、42.3% 和 43.3%。

化石能源消费量是能源消费总量与一次电消费量的差, 而丰富的水能资源使一次电 (以水电为主) 消费量与能源消费总量的比值远高于全国平均水平 (见表 1-1); 热带、亚热带和温带森林组合增强了单位面积森林的碳承载力, 达到 52.93% 的森林覆盖率, 表明云南省森林面积位居全国前列, 两者共同提高了云南省森林子系统的碳承载力。

表 1-1 2005~2012 年云南省和全国一次电与能源消费总量比值的比较 (%)

项目	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
云南	21.11	17.62	17.93	23.79	21.22	23.98	27.72	29.78
全国	6.8	6.7	6.8	7.7	7.8	8.6	8	9.4

然而, 据《全国生态功能区规划》数据: 我国轻度、中度、高度脆弱的生态环境类型区域面积分别占总面积的 14.35%、32.02%、53.63%, 情况堪忧。

本书以生态地位尤其重要、能源消费结构较优的云南省碳承载力、碳排放量、碳均衡目标为研究对象, 判定云南省的碳排放量是否超出了碳承载力, 计算



云南省碳超载量,研究碳均衡目标实现机制,为云南省低碳经济的发展和生态文明的建设提供决策依据。

1.2 相关概念的界定

1.2.1 陆地生态系统的界定

陆地与海洋是地球最重要的两大生态系统,其碳承载力是生态承载力的重要组成部分。陆地生态系统是一个植被-土壤-气候相互作用的复杂大系统,它由耕地(或农田)、园地、林地、建设用地、水域以及其他等生态子系统组成。云南是内陆省份,无海洋,所以海洋生态子系统不在本项目的研究之内。陆地是参与大气碳循环的主要生态子系统。其中,林地是陆地生态系统中碳承载力最强的子系统。

1.2.2 陆地生态系统主要承载对象的界定

陆地生态系统把大气中的 CO_2 作为原料,通过光合作用将其转变为人类和其他动物生存所必需的葡萄糖,即生态系统的碳循环实质是“ CO_2 循环”的简称。 CO_2 是光合作用所需要的原材料,人类无需实现也不可能实现碳的零排放。《联合国气候变化框架公约》虽然重视 6 种温室气体的减排,但主要把 CO_2 浓度控制在 400×10^{-6} 以内,作为遏制气温增幅在 2°C 以内的努力指标^[6]。

中国现阶段碳强度目标只涉及 6 种 GHG 中的 CO_2 ,且只覆盖能源活动和水泥生产过程。根据国务院《关于印发中国应对气候变化国家方案的通知》(国发(2007 年) 17 号),中国能源活动和水泥生产过程的 CO_2 排放超过全部 GHG 排放的 80%^[7]。

水泥生产包括工艺排放和化石能源消耗排放两部分,两者合计约占到中国碳排放总量的 11.3%^[8]。Schimel 的研究表明,人类活动中的化石燃料消耗和水泥生产是 CO_2 排放的主要来源,占人为碳排放总量的 78%左右^[9]。

现阶段,我国绝大多数碳减排目标的研究仅仅涉及到化石能源消耗部分,它在一定程度上有悖于国家碳强度目标的。中国水泥生产技术一般分为新型干法和传统方法,其中新型干法由预分解窑煅烧、现代粉磨、物料均化和计算机集散控制等先进生产技术组成,传统方法包括立窑、湿法窑、立波尔窑和中空干法窑等落后的煅烧设备。

新型干法与传统方法相比具有产品质量好、生产规模大、能量消耗低、劳动生产率高等特点。无论是哪一种方法,水泥工业生产工艺过程基本一样,主要包括:生料制备→熟料煅烧→水泥制成三个阶段。

水泥工业产生的 CO_2 主要包括两部分:



(1) 能源消耗的二氧化碳排放, 包括燃煤燃烧直接产生的二氧化碳和电力消耗间接产生的 CO_2 , 这部分已经包括在能源消耗排放的 CO_2 部分;

(2) 石灰质原料中碳酸盐分解释放的 CO_2 , 化学方程式分别为式 (1-1) 和式 (1-2):



“碳”指来源于化石能源消费和水泥生产工艺原料碳酸钙、碳酸镁分解产生的 CO_2 ; 陆地生态系统的碳承载力的“碳”是指生态系统植被和土壤“净吸收”化石能源消费排放和水泥生产工艺原料碳酸钙、碳酸镁分解产生的 CO_2 。

1.2.3 碳均衡目标的界定

区域碳承载力是“区域陆地生态系统碳承载力”的简称, 是区域内陆地生态系统能够承载化石能源消费活动和水泥生产活动碳酸盐分解产生的 CO_2 的质量的最大值。对于像云南、贵州等内陆地区来说生态系统只有陆地生态系统一种类型, 区域碳承载力也可以简称为碳承载力。

设某区域第 t 年内化石能源消费和水泥生产碳酸盐分解排放的 CO_2 的质量为 D_t (单位: 10^4t CO_2) (discharge of CO_2 , 简称 D) 与区域生态系统碳承载力 B_t (单位: 10^4t CO_2) (bearing or carrying capacity of CO_2 , 简称 B) (t 表示时间序列对应的年份)。

若存在 $D_t < B_t$, 则该区域的碳排放量在生态系统碳承载力范围之内;

若存在 $D_t = B_t$, 则表明该区域的碳排放量与生态系统的碳承载力刚好相等, 即表示该区域刚好实现了碳均衡目标;

若存在 $D_t > B_t$, 则表明该区域的碳排放量超出了生态系统的碳承载力。

设 $\Delta_t = D_t - B_t$ (t 表示时间序列对应的年份), 如何缩小 Δ_t 的值并力争实现碳均衡目标是生态文明建设进程中的重要一环。

(1) $\Delta_t < 0$, 即 $D_t < B_t$ 。表示区域内化石能源消费和水泥生产排放的 CO_2 能被陆地生态系统净吸收并储存植被和土壤碳库中。该区域化石能源消费和水泥生产排放的 CO_2 不会造成大气中 CO_2 浓度的升高。若各区域都出现了 $\Delta_t < 0$ 的情形, 则大气中 CO_2 的浓度将逐渐递减。

(2) $\Delta_t = 0$, 即 $D_t = B_t$ 。表示区域内化石能源消费和水泥生产排放的 CO_2 的质量等于区域碳承载力, 表示该区域实现了碳均衡目标。即碳均衡是区域 $D_t = B_t$ 的临界或理想状态, 或区域碳排放量在碳承载力附近波动的一种状态, 是区域碳均衡目标的简称。若各区域都实现了碳均衡目标, 则大气中的 CO_2 浓度将稳定在现有水平上。

(3) $\Delta_t > 0$, 即 $D_t > B_t$ 。表示区域内碳排放量超出了碳承载力的范围, 超出部



分将积累在大气中并使得大气中 CO_2 浓度升高，进而导致地球表面极端天气和气温升高。

第一，若 Δ_i 呈现不断递增的趋势，则需要制定遏制 Δ_i 递增的目标和机制；

第二，若 Δ_i 表现为在某一个值上下波动的情形，则需要制定使 Δ_i 递减的目标和机制；

第三，若 Δ_i 呈现不断下降的变化趋势，则需要制定使 Δ_i 趋于零的目标和机制。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 碳承载力研究的历史演进

20 世纪早期，承载力研究集中在生物承载力研究领域，生物学家的关注点集中在野生动物保护、野外种群增长观察、牧业载畜量管理等方面，多采用实验室模拟或野外直接观察法验证 Logistic 方程的拟合情况和种群数量极限的存在^[10,11]。1949 年，美国的 Allan A. William 提出了土地人口承载力的概念：在不引起土地退化并维持一定生活水平的前提下，一个区域能永久供养的人口数量及人类活动水平^[12]。

二十世纪六七十年代，全球性资源环境危机爆发，人类发展与自然界之间的关系问题受到学界的广泛关注，环境、资源承载力的研究成果递增。1995 年诺贝尔经济学奖获得者 Arrow 等在《Science》上发表的“经济增长、承载力和环境”一文，提出了环境承载力是经济活动是否可持续发展的判定标准，该观点在学界和政界产生了极大的反响^[13]。20 世纪 90 年代初，加拿大生态经济学家 Willam 和 Wackemagel 提出生态足迹（ecological footprint）的概念，使承载力的研究从生态系统中的单一要素转向整个生态系统。

学界对生态承载力的认识还未达成一致（见表 1-2），从承载主体来看主要是环境系统、生态系统、地球生物圈等，承载的对象主要包括人群在内的种群数量、经济活动，承载力大小的描述包括容量、最大值、阈值、能力、限值等。

表 1-2 生态承载力的基本含义

基本概念	承载力的大小	承载主体	承载对象
某一特定环境条件下（主要指生存空间、营养物质、阳光等生态因子的组合），某种生物个体存活的最大数量 ^[14]	容量或最大值：饱和水平（saturation level）、上线（upper limits）、最大种群数量（maximum populations）或 S 形曲线渐近线（asymptotes） ^[15]	种群以外的特定环境系统	种群