

中国绿色经济展望

基于系统动力学模型的仿真分析

佟贺丰 杨 阳 王静宜 封 颖◎著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

中国绿色经济展望

基于系统动力学模型的仿真分析

佟贺丰 杨 阳 王静宜 封 颖◎著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

中国绿色经济展望：基于系统动力学模型的仿真分析 / 佟贺丰等著. —北京：科学技术文献出版社，2015. 10

ISBN 978-7-5189-0653-6

I. ①中… II. ①佟… III. 绿色经济—经济发展—研究—中国 IV. ①F124.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 206157 号

中国绿色经济展望——基于系统动力学模型的仿真分析

策划编辑：周国臻 责任编辑：周国臻 赵 斌 责任校对：赵 瑗 责任出版：张志平

出 版 者 科学技术文献出版社
地 址 北京市复兴路15号 邮编 100038
编 务 部 (010) 58882938, 58882087 (传真)
发 行 部 (010) 58882868, 58882874 (传真)
邮 购 部 (010) 58882873
官 方 网 址 www.stdp.com.cn
发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者 北京高迪印刷有限公司
版 次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
字 数 309千
印 张 14
书 号 ISBN 978-7-5189-0653-6
定 价 58.00元



版权所有 违法必究

购买本社图书，凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责调换

前言

自 2011 年，联合国环境规划署（以下简称环境署）《迈向绿色经济：实现可持续发展和消除贫困的各种途径》（以下简称《绿色经济》报告）出版，绿色经济越来越被各国政府和研究人员重视。中国政府在绿色转型发展方面积极部署。从提出科学发展观到建设两型社会，再到把生态文明提升到“五位一体”的战略地位，《关于加快推进生态文明建设的意见》提出，“协同推进新型工业化、城镇化、信息化、农业现代化和绿色化”，首次提出“绿色化”，与原来倡导的“新四化”并举，都充分展现了中国政府绿色转型的决心。

《绿色经济》报告最重要的结论是：2010—2050 年，每年将全球国内生产总值的 2% 投资于 10 个主要经济部门，便可推动全球向低碳绿色经济转型。这种转型不但将为经济发展注入新动力，还能催生大量就业机会，并对消除极端贫困至关重要，同时可减少气候变化、水资源短缺等带来的风险。这一结论的得出，主要来自 Millennium Institute（以下简称 MI）构建的 T21 World 模型的模拟结果。MI 与中国科学技术信息研究所（以下简称中信所）自 20 世纪 90 年代就签署了合作协议，进行建模人员的培训与交流，并在 2010 年共建了“ISTIC-MI Joint Lab”。中信所构建的中国可持续发展模型（T21 China），以 MI 的 T21 模型框架为基础，结合中国的客观实际，对中国可持续发展过程中遇到的众多问题进行了相关研究。

2013 年，环境署资助中信所一项课题“China's Green Economy Scenarios Based on the Threshold 21 China Model”。通过该课题，构建一个针对中国绿色经济发展的模型，通过模型模拟，分析发展绿色经济对中国经济、社会、环境系统的潜在影响。绿色经济有共同的原理，但实现路径要根植于国家特点，通过建模进行情景分析，可以对比不同发展路径的优劣，利用系统思想，构建一幅中国绿色经济发展的清晰图景。

中信所佟贺丰副研究员承担了课题的研究和组织工作，环境署绿色经济专家盛馥来和美国千年研究所屈慰双博士都为研究提供了具体指导和宝贵意见。课题主要研究人员还包括中信所的杨阳、王静宜、封颖等人。环境署驻华代表处的蒋南青和咨询专家曲铮铮也为本研究提供了实质性支持。本书的撰写，杨阳主要负责农业与交通部分，王静宜主要负责可再生能源与城市生活垃圾部分，封颖主要负责国外情况的收集整理，其余部分皆由佟贺丰撰写。

特别感谢胡秀莲、刘虹（中国能源研究所），金周英（中国社会科学院），王小鲁（中国改革基金会国民经济研究所），王金霞（中国科学院农业政策研究中心），邓小勇

（北京交通发展研究中心），崔源声（中国水泥情报所），俞海（环境保护部环境与经济政策研究中心），许光清（中国人民大学），蒋洪强（环境保护部环境规划院），武文生（长城战略咨询），邹乐乐（中国科学院），李锋亮（清华大学），徐琳瑜（北京师范大学），高和然（德稻教育机构），徐丽萍（北京科技研究院）等专家学者在研究过程中提出的宝贵意见。感谢责任编辑周国臻老师的辛勤工作。中信所的所内重点工作“科技监测、重点科技领域深度分析与决策支持平台建设”为本书的出版提供了资助。

需要说明的是，绿色经济的相关研究在全球范围内刚刚兴起，我们对绿色经济的认识更是处于初级阶段。加上模型构建与写作在短期内完成，本书在构架和内容上肯定存在很多不足之处，期待读者更多的反馈与指教。希望本书的研究内容，能够发挥系统动力学模型的政策实验室作用，为政府的决策提供借鉴。也希望能够为国内的绿色经济相关研究加一把薪柴，让未来中国经济社会生活中充满清新的绿色。

目 录

形势与问题

1 绪 论	3
1.1 研究目标	3
1.2 模型构建	3
1.3 情景设置	4
2 主要研究结论	5
2.1 中国的绿色转型已经迫在眉睫	5
2.2 中国已经开始了向绿色经济转轨的积极行动	10
2.3 走绿色发展道路，中国可以实现更有质量的经济增长	14
2.4 传统产业通过改造可以完成绿色转型	16
2.5 绿色就业中存在一部分非正规就业，急需政策保护	17
3 政策建议	19
3.1 绿色经济的发展需要多方面政策措施的协同促进	19
3.2 运用多种财政与税收工具支持绿色投资	20
3.3 政府发挥主导作用，引导公众绿色消费	21
3.4 关注长远目标，支持绿色技术创新	23
参考文献	24

背景与理论

4 研究概述	29
4.1 绿色经济的概念与内涵	29
4.2 绿色经济的发展目标	30
4.3 系统思考视角下的绿色经济	31
4.4 相关概念解析	32

4.5	研究目标	35
	参考文献	36
5	模型介绍	37
5.1	模型构建的目的和意义	37
5.2	模型构建的方法	42
5.3	建模工具	44
5.4	模型的参数选择和设置	44
	参考文献	45
6	情景设置	46
6.1	情景设置思路	46
6.2	具体情景设置	47
	参考文献	58
7	模拟结果	59
7.1	基准情景分析	59
7.2	3种情景的对比分析	67
7.3	与其他研究的情景对比	74
7.4	强化低碳情景	80
	参考文献	82

主要领域分析

8	绿色农业	85
8.1	内容简介	85
8.2	机遇与挑战	87
8.3	模型	90
8.4	政策建议	100
	参考文献	101
9	绿色林业	103
9.1	内容简介	103
9.2	机遇与挑战	104
9.3	模型	108
9.4	政策建议	112
	参考文献	114

10 绿色建筑	115
10.1 内容简介	115
10.2 机遇与挑战	117
10.3 模型	125
10.4 政策建议	130
参考文献	131
11 可再生能源及核能	132
11.1 概述	132
11.2 中国发展可再生能源的现状、挑战与机遇	134
11.3 投资可再生资源	142
11.4 情景分析	148
11.5 政策建议	155
参考文献	156
12 城市固体废弃物管理	157
12.1 概述	157
12.2 绿色城市固体废弃物管理的现状、挑战与机遇	158
12.3 模型构建	164
12.4 情景分析	169
12.5 主要结论与政策建议	173
参考文献	175
13 绿色交通	177
13.1 内容简介	177
13.2 机遇与挑战	180
13.3 模型	184
13.4 研究结论和前景展望	195
参考文献	195
14 水泥产业的绿色转型与发展	197
14.1 内容简介	197
14.2 机遇与挑战	198
14.3 模型	202
14.4 研究结论和政策建议	209
参考文献	213

形势 与问题



1 绪 论

1.1 研究目标

——通过模型模拟，分析发展绿色经济对中国经济、社会、环境系统的潜在影响。

环境署的《绿色经济》报告表明，每年将全球生产总值的2%投资于10个主要经济部门，便可推动全球向低碳绿色经济转型。本研究不再构建模型去验证这个结论，而是模拟主要行业在发展绿色经济过程中，需要的绿色投资额度，带来的绿色就业数量，并且对中国的经济、社会、环境会产生怎样的整体影响。迈向绿色经济有多种可能的途径，本研究通过情景分析，对比不同发展路径的优劣，利用系统思想，构建一幅中国绿色经济发展的清晰图景。

——发挥系统动力学模型的政策实验室作用，为政府的决策提供依据。

发展绿色经济是一项复杂的系统工程，不是某项政策或措施能够单独实现的。同时，绿色经济转型是一种长期行为，一些投入和措施往往需要经过一段时间才能看到效果。因此，在模拟绿色经济发展时，不能仅看现状，还要对投入和措施进行综合考察，看其对未来的影响，识别并解决可持续发展进程中出现的问题。

1.2 模型构建

T21 China 由中国科学技术信息研究所与美国千年研究所共同开发。该模型基于美国千年研究所（MI）的 T21（Threshold 21）模型框架，针对本研究的需要，做了进一步的模型扩展和完善。

本研究主要从农业、森林、绿色建筑（城市供热）、可再生能源（风能、太阳能、水电、生物质能）和核能、城市生活垃圾、城市交通、水泥产业7个行业对绿色经济进行界定和模拟。其中，农业、森林、绿色建筑、可再生能源和核电、城市生活垃圾作为主要的绿色产业进行模拟，水泥产业作为传统产业绿色转型的案例进行模拟，城市交通主要关注其能源需求和排放情况，不对其绿色投资与就业情况进行模拟。

和支持《绿色经济》报告的 T21 World 模型一样，本模型旨在分析绿色经济的相关影响，而非揭示中国进行绿色投资的可能性。模拟是为了进一步激励政府和其他利益相关者对于向绿色经济过渡做进一步的思考和更详细的分析。模型对每个行业的绿色投资和绿色就业

模拟并不全面，可能并未包括该行业全部的绿色相关因素，在引用相关数字的时候，应该注意到这一点。

1.3 情景设置

研究中设置基准、绿色和褐色 3 个情景。本研究对 7 个行业从绿色政策、绿色投资、绿色技术和绿色消费 4 个方向选择了一些变量作为政策变量，这些变量都对未来的发展具有潜在影响，并且都是可能发生变化的一些政策点。将这些变量按照高、中、低 3 种设置，形成 3 个变量集合，即 3 种发展路径。根据中国已有的一些政策规划和专家的发展预测，设置一条基准情景。同时，还设置了绿色发展的情景，在该情景中，在绿色政策、绿色投资、绿色技术和绿色消费 4 个方面都有进一步的强化。同时，为了对传统粗放式发展路径的未来影响有清晰的认识，又设置了褐色情景，这个情景是如果延续原有粗放式发展思路最有可能发生的一种情景。

从情景设置的时间节点看，在 2020 年、2030 年和 2050 年分别进行了设置。2020 年和 2050 年分别是中国两个一百年奋斗目标的时间节点：第一个一百年，到 2020 年左右全面建成小康社会；第二个一百年，到 2050 年左右实现中华民族伟大复兴的梦想。2030 年则是处于中间段的一个重要时间点，起到承上启下的作用。

改变模型中的任何一个变量都可以做一次新的模拟。模型的基准情景可以展望中国未来发展绿色经济面临的主要问题和相关影响。更重要的是，可以在模型中随时改变某个或某几个关键政策变量，来进行一次新的模拟，让决策者了解不同战略选择或外部条件的变化会对将来产生怎样的影响。模型的结构、假设、公式和数据要求都很透明，因此能够让用户参与，达成共识，讨论政策。

迈向绿色经济有多种途径，模型的情景只是呈现可能的方案。本研究所依据的 T21 China 模型呈现的是可选方案而不是预测，可以看到各情景下不同的未来。

2 主要研究结论

2.1 中国的绿色转型已经迫在眉睫

30 多年的经济增长奇迹, 增强了中国的国力, 但对环境也造成了很多负面影响。中国许多地区的水、空气和土地等都出现了不容忽视的污染问题。根据《2013 中国环境状况公报》(环保部, 2014), 中国水环境质量不容乐观, 十大流域的 I ~ III 类、IV ~ V 类和劣 V 类水质^① 的比例分别为 71.7%、19.3% 和 9.0%; 4778 个地下水监测点位中, 较差和极差水质的监测点比例为 59.6%。在空气方面, 2013 年全国平均雾霾日数为 35.9 天, 比 2012 年增加 18.3 天, 为 1961 年以来最多; 74 个重点监测城市如果按照新空气质量标准衡量, 仅海口、舟山和拉萨 3 个城市达标, 达标率仅 4.1%。耕地土壤环境质量堪忧, 现有土壤侵蚀总面积 2.95 亿公顷, 占国土面积的 30.7%。农村环境形势严峻, 突出表现为工矿污染压力加大, 生活污染局部加剧, 畜禽养殖污染严重。

中国的经济增长与自然资源的大量消耗紧密相连。2010 年中国单位国内生产总值 (GDP) 能耗是世界平均水平的 2.2 倍 (张平, 2011)。中国的能源消耗从 1990 年的 9.87 亿吨标准煤, 增长到 2012 年的 36.17 亿吨标准煤, 增长了 3.66 倍 (国家统计局, 2013)。中国人均生态空间越来越短缺。2008 年, 中国的人均生态足迹^② 为 2.1 全球公顷, 为其自身生态系统供给能力 (0.87 公顷) 的 2.5 倍 (WWF, 2014)。整个社会经济体系对自然资源和环境问题更为敏感。

环境污染和气候变化的影响正在中国各地显现。极端天气现象 (洪水、干旱、蔓延全国的雾霾天气等) 正在变得越来越频繁, 已切实威胁到社会进步、经济发展和公众的日常生活。2013 年以来, 中东部地区持续高发的雾霾, 引发公众对空气质量和环境污染问题的高度关注。2013 年 1 月底, 全国雾霾面积就达到 143 万平方公里 (董冠洋, 2013)。2014 年 2 月 20 日起, 浓重的雾霾在北京及华北大部分地区持续 7 天不散。

此外, 中国还面临严峻的碳排放约束。对比世界各国, 尤其是发达国家的发展历程, 中国近 20 年走过了高速经济增长和高碳排放的发展之路。对比 2009 年中国和世界二氧

① I 类~III 类可以作为饮用水, IV 类~劣 V 类为污水。

② 生态足迹是衡量人类对地球可再生自然资源需求的工具, 通过计算满足人类消费所需的生物生产性土地 (含水域) 面积来表示, 指一个人、地区、国家或全球的消费所需要的或者能够容纳人类所排放的废弃物的、具有生物生产力的地域面积。

化碳排放强度（World Bank, 2010; BP, 2010），中国是世界平均水平的 3.25 倍（图 2-1）。并且，中国人均二氧化碳排放已经超过了世界平均水平。如果 2050 年全球升温幅度要控制在 2℃ 以内，留给中国的排放空间极其有限。按照模型的基准情景，中国的二氧化碳排放量从 2026 年开始进入增长的平台期，但要到 2042 年达到峰值后才开始真正下降。2026 年中国的二氧化碳排放总量约为 115 亿吨^①，并开始进入缓慢增长期，既不大幅增长，又没有明显的下降，2050 年仍然保持在 116 亿吨左右。

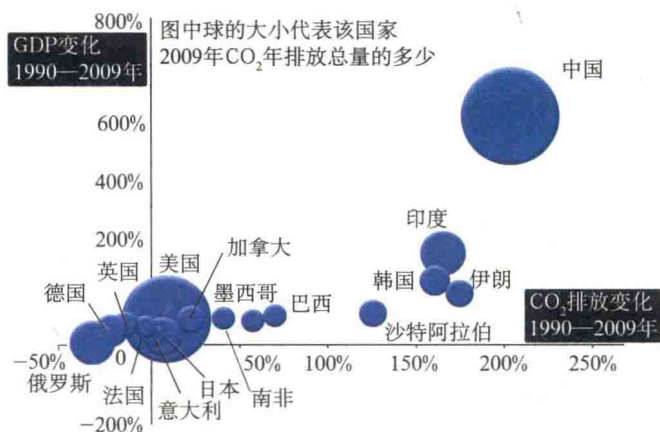


图 2-1 1990—2009 年世界主要国家 GDP 和二氧化碳排放变化
(数据来源: 2010 年世界银行和 BP 公司数据)

国内的环境压力和碳排放约束，要求中国走更加低碳的道路。根据荷兰环境评估署（PBL）发布的《2013 年全球二氧化碳排放趋势报告》，2012 年中国二氧化碳排放量为 99 亿吨^②，占全球排放比例约为 29%，约为美国和欧盟之和，新增排放占当年全球排放增长的 2/3（PBL, 2013）。即使在模型的强化低碳情景下^③，中国的二氧化碳排放峰值仍然不够明显。在该情景下，中国的二氧化碳排放峰值将在 2023 年出现，排放量约为 91.91 亿吨，之后开始下降，但直到 2050 年仍将维持在 70 亿吨以上。对比本研究与中国国家发改委能源所（ERI）（2050 中国能源和碳排放研究课题组，2009）、英国 Tyndall 气候研究中心（Wang T, 2010）、美国劳伦斯伯克利国家实验室（Zhou N, 2010）和国际能源署（IEA, 2010）的模拟结果可以看出，在不使用碳捕获、利用与封存（CCUS）相关技术和推出影响经济的强制减排措施下，中国的二氧化碳排放很难有大幅下降（图 2-2）。

以煤为主的能源结构和直燃煤比重过高是引发雾霾污染的重要原因，进行煤炭总量控制势在必行（表 2-1）。中国的煤炭消费量从 2000 年的 14 亿吨增长至 2011 年的 34 亿吨，11 年间增长了 143%（国家统计局，2013）。2012 年中国煤炭消费量超过全球的 50%，煤

① 这里的二氧化碳排放只包括来自化石能源消费的相关排放。
② 该报告的二氧化碳排放不但包括了化石燃料来源，还包括原油、水泥生产及其他非能源燃料使用的排放，所以数值高于本模型的模拟结果。
③ 本情景在绿色情景的基础上，进一步提升可再生能源和核能的装机，提高发电和供热中天然气的比例。

炭占国内能源消费比重接近 70%（BP，2013），远高于经济合作与发展组织（OECD）国家的平均水平（20%）。面对这种形势，《煤炭工业发展“十二五”规划》中已经明确规定，2015 年全国煤炭产量和消费总量都控制在 39 亿吨左右（国家能源局，2012）。如果想缓解环境问题，还需要制定更强的煤炭消费总量控制计划。煤炭消费的减少，需要可再生能源、核能以及天然气等其他类型能源的补充。

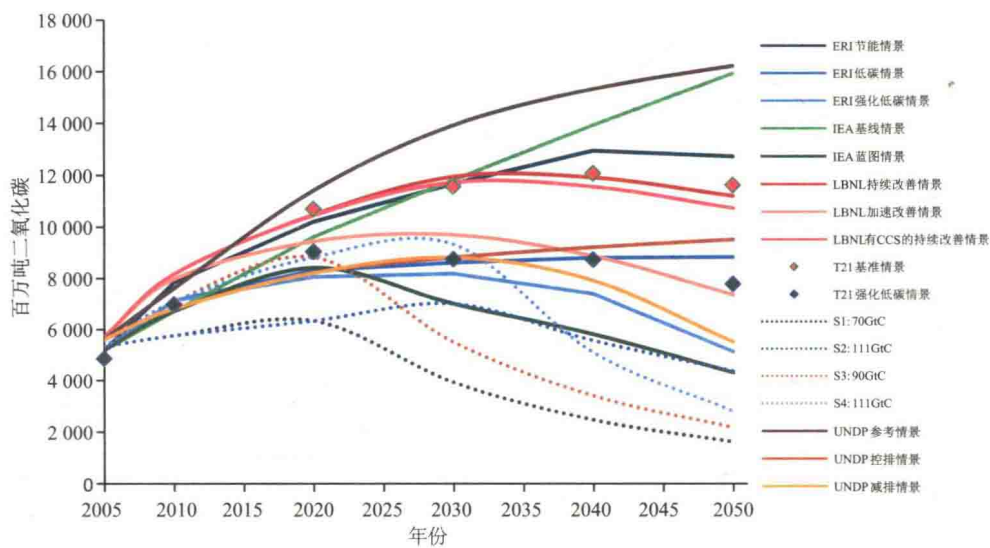


图 2-2 多个研究关于中国 2005—2050 年二氧化碳排放情景对比

表 2-1 2010 年中、美、欧煤炭消费、大气污染与温室气体排放比较

	煤炭 (百万吨油当量)	SO ₂ (万吨)	NO _x (万吨)	PM ₁₀ (万吨)	PM _{2.5} (万吨)	大气 Hg (吨)	CO ₂ (亿吨)
中国	1713.5	2267.8	2273.6	1277.8	—	825.2	67.03
美国	524.6	860.0	1243.9	1023.2	413.4	103.0	58.27
欧盟	269.7	501.5	937.4	197.1	129.3	73.4	40.65

数据来源：The Climate Analysis Indicators Toll developed by the World Resources Institute。

（1）能源消耗

中国的一次能源消费总量很难下降。在基准情景中，中国的一次能源消耗要在 2048 年达到 66.13 亿吨标准煤以后才会开始下降，2050 年约为 66.07 亿吨标准煤（图 2-3）。中国的电力需求将持续上升，2050 年将达到 12 万亿千瓦时^①。发电量中化石能源发电量将占 50.14%，其中煤电约占 41.06%，而可再生能源和核电的比例将接近一半，达到 49.86%。

（2）水资源

中国的水资源将长期处于短缺状态。基准情景中，需求量将在 2021 年左右达到峰值，

① IEA 预测的基准情景中国 2050 年的电力需求是 10.63 万亿千瓦时。

约为 6746 亿吨。胡鞍钢等通过估算认为，中国的用水总量峰值年为 2020 年，约为 6700 亿吨（清华大学国情研究中心，2011）。居民生活用水将长期保持增长态势，从 2010 年的 815 亿吨增长到 2050 年的 1549 亿吨，几乎翻倍。

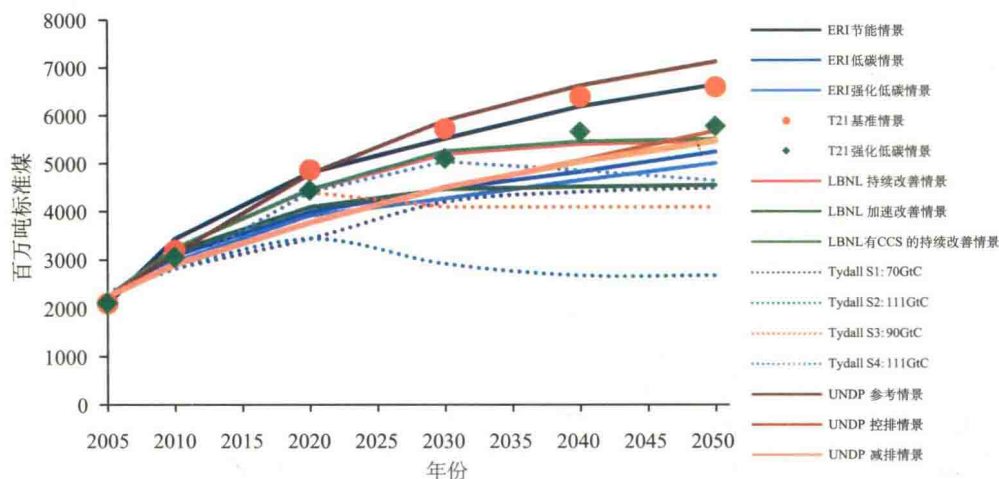


图 2-3 多个研究关于中国 2005—2050 年的能源消耗情景对比

（3）农业

传统化学农业向绿色农业的转型已经成为必然的选择。中国单位农业土地面积施用化肥量全球最高。2012 年中国使用化肥折合纯量达到 5839 万吨，使用农药 180 万吨，塑料薄膜 238 万吨（陈锡文，2014）。据环保部的污染物调查，农业生产所排放的各种污染物占到整个国家各种污染物排放的一半左右（陈锡文，2014）。农业土地的重金属超标问题也越来越突出。

（4）消费

居民收入水平的提高以及政府扩大内需的政策取向，将带动农业、交通和建筑等领域的消费持续上升。1990 年中国城乡家庭人均收入为 1510 元，2012 年达到 24565 元。在基准情景中，即使使用不变价，2050 年的城乡家庭人均收入也将是 2010 年的 6 倍多。如此快速增长的居民收入，很难抑制其带来的相应消费需求的升级。如果没有必要的政策干预，中国未来消费增长和消费模式改变所带来的环境压力将持续加大。

（5）粮食

中国的粮食消费量还将进一步增长。根据联合国世界粮食计划署的数据库^①，中国的人均能量消耗从 1990 年的 2562 千卡/人/天增长到 2009 年的 3036 千卡/人/天（图 2-4）。2009 年中国人均能量供给比发展中国家人均能量供给高出 8.3%，比世界平均水平高出 7.2%。中国的人均肉类消费从 1990 年的 25 千克增长到 2011 年的 59 千克。未来中国的肉类消费量还有很大提升空间，与谷物生产相比，肉类的生产需要消耗更多的资源。

① 联合国世界粮食计划署，<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>

（6）建筑

中国的建筑面积将长期保持全球最大。中国的城镇人均住房建筑面积从 1990 年的 13.7 平方米，增加到 2012 年的 32.9 平方米；农村人均住房面积从 1990 年的人均 17.8 平方米，增加到 2012 年的 37.1 平方米（国家统计局，2013）。在基准情景中，中国 2050 年城镇住宅建筑面积将达到 523.4 亿平方米，农村住宅总建筑面积 172.7 亿平方米，公共建筑面积 245 亿平方米。2050 年仅建筑供热能耗就将达到约 5.7 亿吨标准煤。

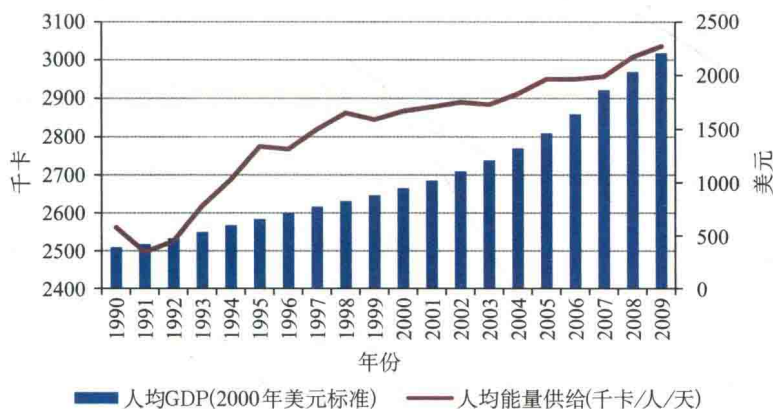


图 2-4 中国的人均 GDP 与人均能量供给

（数据来源：世界银行，世界粮食计划署）

（7）汽车

中国的千人汽车拥有量将大幅上升。中国的私人汽车拥有量从 1990 年的 82 万辆增加到 2012 年的 8839 万辆，增长了 100 多倍（国家统计局，2013）。在基准情景中，中国 2050 年千人私家车拥有量将达到 466 辆，仍低于美国（812 辆，2010 年）、德国（634 辆，2008 年）、日本（589 辆，2009 年）、法国（575 辆，2007 年）等国现在的水平（维基百科，2013）。交通部门能源消耗将达到 17.77 亿吨标准煤，成为最大的能耗部门之一。因为庞大的私家车数量和货运需求，中国的石油需求巨大，2050 年将达到 13.51 亿吨，而石油对外依存度将达到 84.99%，远超过警戒线。公众的出行方式同样发生了巨大的改变，出行距离正在不断上升，私人汽车的出行比例正在提高，而自行车和步行等绿色交通方式的出行比例在不断下降（图 2-5）。

（8）农村及城市化

农村与城市收入差距的缩小，也将带动农民消费能力的增长。过去广大农村多采用秸秆等燃料采暖和做饭烧水，现在则越来越多地改用煤、天然气、电等商品能源。特别是新农村建设加速了这个进程。农村产生的生活垃圾大量在住宅附近堆放。如果未来考虑将农村生活垃圾统一处理，模拟显示每年需要多处理 5000 万～7000 万吨的生活垃圾。

要避免城市化的“锁定效应”。中国的城市化率在未来还会不断提高，在基准情景中，2050 年将达到 75%。在如此快速的城市化进程中，如果中国不能走一条更加绿色的发展道路，城市化进程中基础设施建设在高碳状态下完成，将把中国锁定在高碳和高消耗状态。在模