

资源环境承载力与中国经济发展可持续性模拟

牛方曲^{1,2}, 孙东琪¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国西南地缘环境与边疆发展协同创新中心, 昆明 650500)

摘要: 1978年改革开放以来中国经济创造了长期高速增长的奇迹,但人和自然关系出现严重不协调,突出表现为资源的过度消耗与环境污染的加剧。与此同时,为实现2050年成为现代化强国的目标,中国亟需持续发展。为此,中国学者和政府需着力解决问题是,在未来中长期内,中国应当期望多高的经济增长率及其对应的发展模式或调控手段? 本文对影响乃至决定国民经济增长的资源环境支撑系统以及建立在这之上的发展模式进行分析,揭示经济增长及发展模式与支撑系统之间的耦合关系,模拟发展与环境之间相互作用过程,阐释未来经济增长可能的方案及其对资源环境支撑系统(主要因素)的要求,对中国资源环境状态和发展状态做出预警。模拟结果显示,为实现2050年进入发达国家行列并保持良好生态环境的发展目标,在考虑技术进步会改善资源利用效率和污染排放的前提下,中国采取3.8%~6.3%的经增速较为适宜。在该区间内,3.8%~4.4%是较为安全的发展速度,而4.4%~6.3%的发展速度则要求较高的技术进步。本文所构建的系统动力学模型可用于对比分析不同发展情景,选择更优发展方案,为实现国家的可持续发展提供决策支持。本研究也是对“未来地球”框架文件的响应,从人口和产业发展速度方面发展了资源环境承载力的理论体系,具有重要理论探索意义和应用价值。

关键词: 资源环境承载力;人—地系统;可持续发展;增长速度;系统动力学

DOI: 10.11821/dlxb201912013

1 引言

中国自1978年改革开放以来,造就了近40年高速经济增长的奇迹,但同时也出现一系列严重的不平衡和不和谐的问题,突出表现为资源的过度消耗与环境污染的加剧。为缓解矛盾,中国面临调整发展速度的选择。但是中国在经历了如此长时间的高速发展,依然未能进入高收入行列,属于中等收入国家^[1],为避免进入中等收入陷阱,需要继续保持一定发展速度。中国中长期发展目标是2050年建成现代化强国。现代化的重要标志是完成城市化和工业化,拥有发达的第三产业^[2]。为缓解人—地关系并实现既定发展目标,中国转型发展势在必行。为此中央提出“稳增长、调结构”,并力促创新发展。对此政府和学术界需面临的问题是:中国适宜增长速度是多少、该如何转型发展?

影响乃至决定国民经济增长的支撑因素包括资源供给、水土资源保障、环境和生态

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971162); 国家重点基础研究发展计划(2016YFC0503506) [Foundation: National Natural Science Foundation, No.41971162; National Key Research and Development Program, No.2016YFC0503506]

作者简介: 牛方曲(1979-), 安徽淮南人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事区域与城市发展模拟分析研究, 旁及交通地理、“一带一路”研究。E-mail: niufq@lreis.ac.cn

通讯作者: 孙东琪(1985-), 山东单县人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事区域与城市发展研究。
E-mail: sundq@igsrr.ac.cn

系统承载力等,以及建立在这些要素之上的产业增长潜力、发展模式^[3]。各要素的供给是有限的,需考虑支撑因素的供给能力,避免透支这些要素。

关于发展与资源环境的研究在地理学发展长河中具有悠久历史。早期用因果关系来解释不同发展阶段国家的地理环境及其关系,形成了地理环境决定论与或然论。直到现代,才以相互作用论来解析发展与环境之间的关系。1972年来自世界各地的几十位科学家、经济学家、教育家聚集于罗马,共同编写出版了“增长的极限—罗马俱乐部关于人类困境的报告”一书,深刻地阐述了地球上人口增长、粮食生产、工业发展、资源消耗、环境污染等将使地球的支撑能力达到极限的原理,提醒人们要调整发展方式和生活方式来达到人与环境之间的协调^[3]。1992年、2014年又出版了第二版和第三版,更加详细、系统地分析论证了人类发展已经大大超过地球生态系统的承载能力,即“过冲”现象的出现。2012年2月国际“未来地球过渡小组”研究出了一份框架文件:“未来地球:全球可持续发展研究”,强调人类活动可能对地球系统造成急剧的、不可逆转的变化,倡议开展资源环境和可持续发展的综合研究,为政府提供政策建议^[4-5]。就具体研究方法上,学者们也开展了大量探索,较为熟知的有人口论^[6]、生态足迹^[7-9]、能值^[10-11]、NPP^[12-13]等,为研究人地关系、实施可持续发展提供了有效途径。

中国地理学界对此响应集中体现在“人—地关系”及其对发展的影响方面。关于区域发展研究兴起于20世纪70年代中后期,80-90年代地理学者开始了较为广泛的区域发展的理论和方法研究,但这些研究涉及到自然和人文的跨学科研究很少,基本上都是经济地理学者承担完成的。中国政府于1994年发布了“中国21世纪议程”,由此在全国范围内出现了关于可持续发展的研究热潮。大量的研究聚焦到可持续发展的基本原理和中国的区域性可持续发展战略研究及规划。进入21世纪后,学者广泛地研究了环境与发展各要素之间相互作用机制,突出表现为“资源环境承载力评价”研究^[14-22],为实现可持续发展起到了有效的辅助决策作用。该领域有丰富的文献,封志明等学者对近百年来的资源环境承载力研究进行了回顾^[23]。但目前,对于结合实际的发展与环境研究和可持续发展研究仍然薄弱。在长时期内,中国学者对于发展与环境的关系特别是如何评估高速增长的代价、如何确定中国不同时期合理的增长速度方面的关注较少。实践中诸多问题的出现说明前瞻性不足,在经济增长的模式和速度方面研究有待深化。

本文着眼于经济增长与资源环境要素相互作用关系,分析中国目前发展方式存在的问题,在此基础上模拟支撑要素对不同经济发展速度、模式的支撑能力,探寻适宜的发展速度和发展模式,为制定中国转型发展策略提供参考和依据。本研究有助于推动国内可持续发展研究,也是对“未来地球”框架文件倡议的重要响应。

2 中国经济增长问题简析

根据《中国统计年鉴(2018)》,1978年改革开放以来中国人口(不含港澳台地区)和GDP不断增长(图1),GDP增速明显高于人口,表明中国人均GDP不断提高。中国2017年经济增速为6.9%,人均GDP为8881美元,仍属中等收入水平^[1]。人口方面,1978-2017年基本呈线性增长。2015年以前人口年均增长0.126亿人,而2015年放开二胎^①之后年均增长0.075亿,增速有所下降。美国2010-2017年GDP年均增速2.1%,人口年均增长0.023亿,2017年人均GDP为59531美元。按照目前的经济和人口增长速度,

① 中国1978年开始实行计划生育政策,要求一对夫妇生育一个孩子;2015年开始实行“二胎政策”,即一对夫妇可生育两个孩子。

2023 年人均 GDP 将达到 12838 万美元, 进入高收入行列, 并于 2048 年超过美国 2017 年收入水平。

参考美国、英国、日本等发达国家城市化及产业发展^[24-25]状况可知, 实现现代化需达到 75% 以上的城市化率 (人口城市化), 同时完成工业化并实现三产业占比达到 60% 以上。中国城市化率由 1978 年 17.92% 增长到 2017 年的 58.52%, 年均增长 1.03 个百分点; 第三产业占比由 1978 年的 24.6% 升至 2017 年的 51.6%, 年均增长 0.69 个百分点。按照此速度, 中国将于 2030 年实现 60% 的三产占比, 2033 年完成 75% 的人口城市化率。

水资源利用方面, 2017 年中国水资源总量为 28761.2 亿 m^3 , 用水总量 6043.4 亿 m^3 (21%), 人均用水量 435.91 m^3 。有关研究显示, 区域用水总量超过其水资源总量的 20% 即为缺水, 用水量超过 40% 为较严重缺水, 而超过 70% 以上即为严重缺水^[26-27]。按照目前的经济增速和用水强度, 中国将在 2028 年进入较严重缺水状态。

水环境质量方面, 化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 是水环境质量的重要衡量指标。根据地表水环境质量标准 (I 类、II 类水 COD 容量 $\leq 15 \text{ mg/L}$) 可计算得出中国水资源 COD 总容量为 4314.18 万 t。2017 年全国 COD 排放量为 1021.97 万 t, 剩余容量为 3292.21 万 t。按照目前 COD 排放强度, 随着经济发展, 水环境容量将于 2039 年超载。

土地资源利用方面, 2020 年全国建设用地总规模控制为 4071.93 万 hm^2 ^[28]。2017 年全国建设用地为 3957.41 万 hm^2 , 剩余 114.52 万 hm^2 。近 5 年建设用地年均增长 52.94 万 hm^2 , 按照该速度建设用地将于 2021 年用完, 据此规划建设用地量可以满足 2020 年用地要求。

能源消耗方面, 中国 2017 年能耗总量为 435818.63 万 t 标准煤。能源消费来自进口和本地开采两部分, 以常用的煤炭、石油、天然气为例, 三者总探明储量为 18729894.81 万 t 标准煤, 2017 年三者总消费为 386176 万 t 标准煤, 其中来自国内开采量为 297990 万 t 标准煤。2007-2017 年中国能源生产弹性系数 (即能源生产量年均增速与国民经济年均增速的比值) 为 0.45, 6.9% 的经济增速对应能源消耗增速为 3.11%, 据此, 2052 年上述常用能源将枯竭。

根据上述分析, 中国按照目前的模式, 虽然可在 2050 年前进入高收入行列, 实现现代化, 但将面临严重的资源消耗和环境污染, 表明资源环境支撑系统不足以支撑目前粗放的增长方式, 探寻适宜发展速度与模式不容回避。

3 研究方法

3.1 模型及数据

系统动力学模型 (System Dynamics, SD) 适合于模拟真实世界非线性变化过程^[29-30]。而人一地关系 (或社会经济—环境) 系统正是一个包含多要素相互作用的复杂动力系统。SD 模型在资源环境承载力评价中也得到广泛应用^[30-32]。鉴于研究问题的特点, 本文构建 SD 模型, 称作中国模型 (China Model, CM), 模拟中国社会经济与资源环境要素的

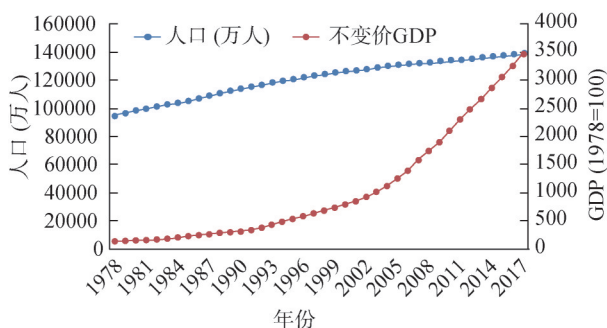


图1 1978-2017年中国经济与人口发展状况

Fig. 1 Economic and population growth in China from 1978 to 2017

相互作用过程, 探索适宜的发展速度和发展模式。模型以2017年为基年, 逐年预测未来情况直至2050年。开发平台采用VensimDSS。统计数据来自于《中国统计年鉴(2018)》《中国环境统计年鉴(2018)》《中国城市建设统计年鉴(2018)》。

3.2 CM模型的建构

CM模型包括人口模块、经济模块、水资源利用模块、环境模块、能源模块、土地利用模块, 各模块相互联系。

(1) 人口模块。人口模块根据历史变迁规律预测人口变化趋势、城市人口增长、城市化过程。在中国, 人口的变迁除了受出生率、死亡率、移民等多种因素影响外, 还会受计划生育政策和生育意愿影响。根据前文分析, 在2015放开二胎之后中国人口增速反而下降, 表明目前中国人的生育意愿并不强烈、生育观念已经发生变化。因此, 可以预见中国人口增长将进入拐点。本文采用世界银行对中国人口总量的预测结果^[25]。根据世界银行的预测, 中国人口将于2028年达到峰值14.17亿, 然后下降, 2050年为13.36亿。2017年中国城市化率为58.52%, 若到2050年完成75%的城市化率, 年均需要增长0.50个百分点。

(2) 经济模块。经济模块用于模拟经济增长、产业结构变迁过程。2017年中国GDP总量为12.3万亿美元。将各年份GDP预测值与上述人口预测值相结合可计算出人均GDP。产业结构方面, 近几十年来中国的第一产业占比稳定, 平均值为7.9%, CM模型依然设定第一产业占比稳定在该值; 2017年三产占比51.6%, 若在2050年完成产业升级、实现60%的三产占比, 则三产占比年均需增长0.25个百分点; 根据一产和三产占比可以求得二产占比。CM模型中, 经济增速和产业结构是调整参数, 即待确定的参数。

(3) 水资源利用模块。水资源利用模块用于模拟用水总量的变化, 包括生产用水和生活用水。中国水资源总量为28761.2亿m³, 其中一产、二产、生活用水(包括三产)分别为3766.4亿m³、1277亿m³、838亿m³。而一产、二产GDP分别为65467.6亿元、334622.6亿元, 人口为13.9亿。由此可得出生产和生活用水强度: 一产用水强度0.385亿m³/亿美元、二产用水强度0.026亿m³/亿美元, 生活用水强度0.0060亿m³/万人。另外, 生态用水占用水总量的2.8%, CM模型采用该生态用水比例。未来各年份的总用水量是一产用水、二产用水、生活用水、生态用水之和, 如公式(1)所示:

$$w = GDP \times r_{pri} \times 0.385 + GDP \times (1 - r_{pri} - r_{ter}) \times 0.026 + pop \times 0.0060 + w_{eco} \quad (1)$$

式中: w 为总用水量; r_{pri} 、 r_{ter} 分别为一产和三产的占比; pop 为人口数量; w_{eco} 为生态用水量。

(4) 环境模块。本模块用于模拟水环境质量的变化过程。水环境质量受很多因素影响, 本文采用常用的COD含量表征水环境质量随经济发展的变化过程。根据经济和污染排放数据可以得出生产和生活污染排放强度: 第一产业排放强度为0.0455万t/亿美元, 第二产业排放强度为0.0026万t/亿美元, 生活排放强度为0.0053万t/万人。据此可以求出COD排放总量, 如公式(2)所示:

$$ttlCOD = GDP \times r_{pri} \times 0.0455 + GDP \times r_{sec} \times 0.0026 + pop \times 0.0053 \quad (2)$$

式中: $ttlCOD$ 为生产和生活COD排放总量; r_{pri} 、 r_{sec} 分别为一产和二产的占比; pop 为人口总量。为保持水环境质量, COD排放总量 $ttlCOD$ 不能超过水环境总容量的上限。

(5) 能源模块。能源模块用于模拟能源消耗变化过程, 能源消费包括生产和生活两个方面。根据各产业能源消耗、生活能源消耗、GDP、人口可计算得出各类能耗强度: 一产能耗强度为0.871万t/亿美元、二产能耗强度6.767万t/亿美元、三产能耗强度1.31万t/亿美元、居民能耗强度0.39万t/万人。据此, 随着人口和经济的增长, 可计算出各年份

的能源消耗总量,如公式(3)所示:

$$E = GDP_p \times 0.871 + GDP_s \times 6.767 + GDP_t \times 1.31 + pop \times 0.39 \quad (3)$$

式中: E 为能耗总量; GDP_p 、 GDP_s 、 GDP_t 分别为一、二、三产 GDP; pop 为人口数量。

社会经济发展受可用能源总量的限制。可用能源来自本地或进口两个方面。以常用能源煤炭、石油、天然气计算,2017年消耗本地能源总量为297990万t标准煤,占总能耗的66.4%。而2017年三者探明储量总和为18729894.81万t标准煤。每年三类常用能源的剩余量为总储量减去消耗总量。如公式(4)所示:

$$E_a = E_{three_ttl} - \sum_i (E_i \times 66.4\%) \quad (4)$$

式中: E_a 为剩余能源总量; E_{three_ttl} 为三类常用能源总量; E_i 为第 i 年份能源消费量。根据公式(3)和(4)可以计算出剩余储量能够支撑的经济和人口总量。

(6) 土地利用模块。本模块用于模拟建设用地变化增长过程。2017年城市建设用地面积为55155.47 km²,包括居住用地、工业用地、三产用地。结合产业GDP和人口可计算得出各类建设用地强度:工业用地强度为0.2652 km²/亿美元、第三产业用地强度为0.0864 km²/亿美元、居住用地强度0.2087 km²/万人,据此可计算出产业发展和人口增长所需的用地增量,如公式(5)所示。

$$\Delta Land_c = \Delta GDP_s \times 0.2652 + \Delta GDP_t \times 0.0864 + \Delta Urban_pop \times 0.2087 \quad (5)$$

式中: $\Delta Land_c$ 为新增产业和居住用地总量; ΔGDP_s 、 ΔGDP_t 分别为二、三产 GDP 增量; $\Delta Urban_pop$ 为城市人口增量。居住和产业用地的不断增长,但总量不能超过剩余规划建设用地总量,即114.52万hm²。

(7) 模块的集成—CM的建构。将上述各个模块集成,建立系统动力学模型(图2)。各大模块的核心要素采用深色标注。该模型输入参数包括人口、GDP、产业结构、各产业和人口的资源消耗强度、污染排放强度、人口和GDP增速,以及其他的调控参数。输出是未来各个年份的剩余建设用地、剩余水资源量、剩余环境容量、剩余能源储量等预

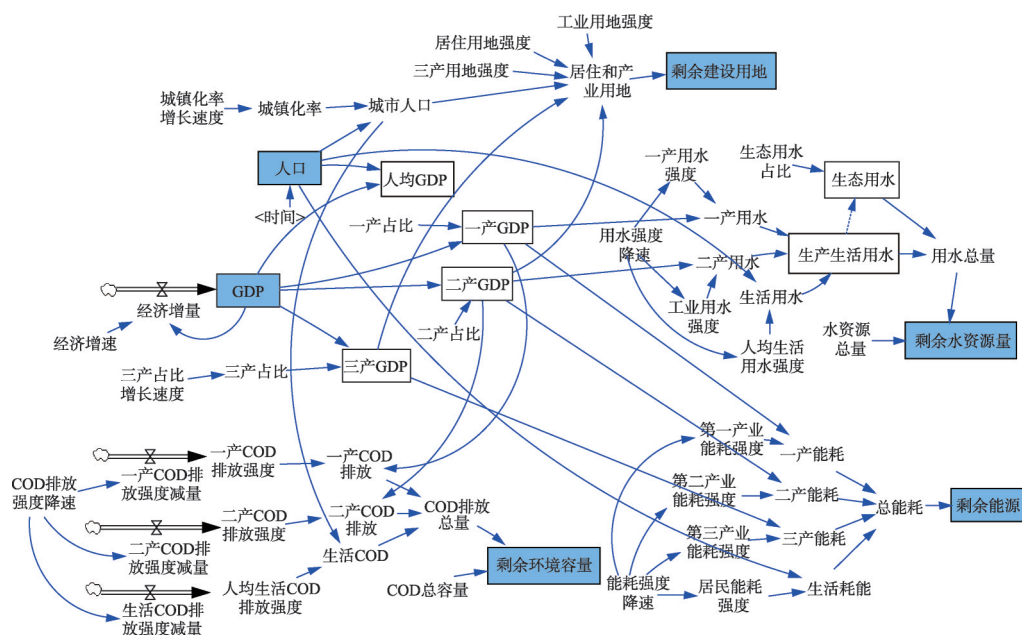


图2 系统动力学模型:中国模型

Fig. 2 System dynamics: China Model

测变量。GDP、人口、产业结构的变化将导致模拟结果发生变化, 同样地, 资源消耗强度与污染排放强度的调整也会导致模拟结果发生变化。利用CM模型, 根据要达到的发展目标, 可求解适宜发展速度和发展模式。

4 情景设置与结果分析

为实现2050年进入发达国家行列这一目标, 本文设定了不同的发展情景, 探索适宜发展速度和模式。本文设定发达国家标准: 资源环境支撑系统良好、高收入、现代化。根据前文讨论, 本文设定现代化标准为: 75%以上的城市化率和60%以上三产占比。

情景1, 本情景用于求解在现有的技术水平下, 可采取的最大发展速度。换言之, 若保持目前的资源消耗强度及污染排放强度, 为于2050年进入发达国家行列, 维持资源环境不超载, 可采取的最大发展速度和发展模式是多少? 为于2050年实现现代化, 完成城市化率75%, 并实现产业转型, 三产占比达到60%, 城市化率和三产占比年均增长分别为0.50个百分点、0.25个百分点。较之目前的态势, 城市化速度和产业转型速度均有所下降。CM模拟结果显示, 为保持2050年前不超载, 最大能支撑的经济增长速度是3.8%。在该速度下, 2027年人均GDP达12650美元, 进入高收入国家行列。因此, 采用3.8%的经济增速, 中国可实现2050发展目标, 进入发达国家行列, 并且维持良好的资源环境支撑系统。

情景2, 该情景参考美国的技术发展水平解析最乐观的发展速度。本情景是在情景1的基础上增加了技术进步的影响。技术的进步可提高资源利用效率、改善污染排放。可获取的数据显示美国近年资源消耗与污染排放较为平稳, 2015水耗强度为0.029亿 m^3 /亿美元^[33-34], 是中国目前水耗强度的60%, 若中国2050达到该水平, 则需年均下降1.22个百分点; 美国2017能耗1.647万t标准煤/亿美元GDP^[35], 是中国能耗强度的45%, 若中国2050年达到该值, 需年均下降1.67个百分点; 由于污染排放与能源消费有着直接的联系, 本文设定污染排放与能耗同等的改善速度。在此基础上, CM模拟结果显示, 最高可采取6.3%的发展速度。在该速度下中国可于2023年实现现代化、进入高收入行列。因此, 若2050年中国的技术水平会达到美国目前水平的情况下, 采取6.3%的速度发展, 可确保中国于2050年前进入成为发达国家。

情景3, 该情景用于解析最优发展速度, 是在情景1的基础上加以合理的技术进步, 模拟求解最大发展速度。对于该情景而言, 度量技术进步速度是关键环节。国家信息中心评价结果显示, 2000年后中国技术进步速度年均增长0.42%^[36]。基于该研究, 本文设定未来中国资源消耗强度、污染排放强度按照此速度不断改善, CM模拟结果显示, 最大可采取4.4%的增长速度。该速度下, 中国将于2025年进入高收入行列。因此, 该速度可确保2050年前进入发达国家行列。

上述各发展情景对应的参数如表1所示。综合以上模拟结果, 为于2050年实现现代化, 城市化率和三产发展最低年均增长分别为0.50个百分点、0.25个百分点; 发展速度方面, 维持现有的技术条件, 中国可以采取的最大发展速度为3.8%; 在乐观的相信技术不断进步并于2050年达到美国目前水平, 中国可以采取的最大增长速度为6.3%; 参考中国2000年以来的技术进步速度, 4.4%的增长速度较为适宜。据此, 中国适宜发展速度区间为3.8%~6.3%。基于该模拟结果, 3.8%~4.4%是较为安全的发展速度, 而4.4%~6.3%的发展速度则面临更大的调整, 要求足够的技术水平的提升。如果和技术进步足够乐观, 可以考虑提升速度, 否则需放缓发展速度, 以降低对资源环境冲击。

表 1 各情景参数

Tab. 1 Parameters of each development scenario

参数类型	参数	当前态势	情景1	情景2	情景3
人口、 城市化	人口增长	750 万/年	世界银行 预测值	世界银行 预测值	世界银行 预测值
	城市化速度(百分点/年)	1.03	0.5	0.50	0.50
产业经济	三产发展占比增长(百分点/年)	0.69	0.25	0.25	0.25
	经济增长速度(%)	6.9	3.8	6.3	4.4
水资源	一产用水强度(亿 m ³ /亿美元)	0.385	0.385	下降 1.22 百分点/年	年均改善 0.42%
	二产用水强度(亿 m ³ /亿美元)	0.026	0.026	下降 1.22 百分点/年	年均改善 0.42%
水环境	生活用水强度(亿 m ³ /万人)	0.0060	0.0060	下降 1.22 百分点/年	年均改善 0.42%
	一产 COD 排放强度(万 t/亿美元)	0.0455	0.0455	下降 1.67 百分点/年	年均改善 0.42%
	二产 COD 排放强度(万 t/亿美元)	0.0026	0.0026	下降 1.67 百分点/年	年均改善 0.42%
	生活 COD 排放强度(万 t/万人)	0.0053	0.0053	下降 1.67 百分点/年	年均改善 0.42%
能源	一产能耗强度(万 t 标准煤/亿美元)	0.8710	0.871	下降 1.67 百分点/年	年均改善 0.42%
	二产能耗强度(万 t 标准煤/亿美元)	6.7670	6.767	下降 1.67 百分点/年	年均改善 0.42%
	三产能耗强度(万 t 标准煤/亿美元)	1.3100	1.3100	下降 1.67 百分点/年	年均改善 0.42%
	生活能耗强度(万 t 标准煤/万人)	0.3900	0.3900	下降 1.67 百分点/年	年均改善 0.42%
土地资源	工业用地强度(km ² /亿美元)	0.2652	0.2652	0.2652	0.2652
	三产用地强度(km ² /亿美元)	0.0864	0.0864	0.0864	0.0864
	居住用地强度(km ² /万人)	0.2087	0.2087	0.2087	0.2087

5 讨论

诸多资源要素是可以通过市场流动实现跨区占用，因此资源的利用可以来自本地也可以进口。关注当地资源消耗，本文评价了社会经济系统对本地资源的消耗强度。未来社会经济系统的改变可能会增加进口的比例，降低对本地资源的利用强度。因此，为提升模拟结果的准确性与可靠性，需要进一步考虑社会经济系统对外部资源依赖的变化趋势。除此以外，技术的进步可使人类有能力提升资源利用效率、减少污染排放，甚至开发出新的替代资源。但技术进步速度难以量化和预测，而且技术进步也可能产生新的污染，成为一把双刃剑。这都增添了模拟结果的不确定性。为确保社会经济发展的可持续性，模拟过程中可以考虑给予技术进步较小的权重，毕竟较慢的发展速度和资源的盈余比过冲发展更具可持续性。

本研究宏观上模拟了全国尺度上三大类产业发展及人口增长与资源环境支撑系统的作用关系，而不同产业部门资源环境效应存在差异，尤其是包含诸多部门的工业。为了辅助更为精细的产业决策，需在细分产业的基础上开展更为微观的模拟分析。同时，人口和产业分布受区位条件的影响，通常不会均匀分布于国土空间上，即便在全国层面，社会经济总体量处于可承受范围内，而在经济密度较高的区域可能已经出现超载情况。为实现对子区域可持续发展的决策支撑，需在更细尺度开展应用研究。

时间序列方面，本文结合中国的发展战略目标，模拟分析了 2050 年前实现现代化并进入高收入国家行列的发展情景，探寻相对优选速度和发展模式，未关注更长时间的发展，模拟结果并不能说明某种发展速度可以在 2050 年后一直持续下去。至于更长远的发展，有理由相信随着科学技术的发展，资源环境的支撑能力会有进一步提升。就本模型的作用而言，可用于检验不同发展情景，为决策提供参考，而非代替决策。

6 结论

中国经济的长期高速增长致使资源过度消耗、生态环境逐渐恶化。同时,为实现现代化、跻身高收入发达国家行列,中国又需要保持一定的发展速度。直面持续发展和改善环境两个方面的诉求,中国致力于稳增长、调结构,并力促创新发展。为此,学者和政府面临的问题是,采取何种发展速度和发展模式较为适宜?本文构建了系统动力学模型,称作CM模型,模拟经济发展、城市化、产业结构与资源环境支撑系统的相互作用关系,解析适宜发展速度和发展模式。

结果显示,为实现2050年进入发达国家行列并保持良好生态环境的发展目标,在考虑技术进步会改善资源利用效率和污染排放的前提下,采取3.8%~6.3%的发展速度较为适宜。在该发展区间内,为降低资源环境的压力,可适当降低增长速度,反之,如果技术进步足够乐观,可以考虑提升发展速度。3.8%~4.4%是较为安全的发展速度,而4.4%~6.3%的发展速度则要求较高的技术进步。通过CM模型,可以对比分析不同发展情景,选择更优发展模式,辅助决策。本研究就适宜发展速度和模式方面,发展了资源环境承载力理论体系,具有重要的理论探索意义和应用价值。

本模型也有待深化和完善。目前依据中国的发展目标设置了基础情景,而实际社会经济的发展影响因素很多。未来可在细分产业的基础上纳入更多的社会经济和资源环境要素,开展更细尺度的应用研究,将模型拓展应用于产业结构调整、产业空间优化、资源环境管理与利用。模型准确性也依赖于经济学、人口学领域方法的改进。

参考文献(References)

- [1] World Bank. New country classifications by income level: 2017-2018. <https://blogs.worldbank.org/opendata/new-country-classifications-income-level-2017-2018>, 2017. (Accessed in Jan. 2019)
- [2] Kendall D. *Sociology in Our Times*. Boston: Cengage Learning, 2007.
- [3] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. *The Limits to Growth, A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books, 1972.
- [4] Future Earth Transition Team. Future Earth: Research for global sustainability: A framework document. http://www.homeofgeography.org/uk/News_2012/ICSU_FutEarth.pdf, 2012. (Accessed in Dec. 2019)
- [5] Lu Dadao. The framework document of "Future Earth" and the development of Chinese geographical science: The foresight of Academician Huan Bingwei's statement. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1043-1051. [陆大道. "未来地球"框架文件与中国地理科学的发展: 从"未来地球"框架文件看黄秉维先生论断的前瞻性. *地理学报*, 2014, 69(8): 1043-1051.]
- [6] Malthus T R. *An Essay on the Principle of Population* [1st ed. of 1798]. London: Pickering, 2001.
- [7] Wackernagel M, Rees B. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola: New Society Publishers, 1996.
- [8] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [9] Sutton P C, Anderson S J, Tuttle B T, et al. The real wealth of nations: Mapping and monetizing the human ecological footprint. *Ecological Indicators*. 2012, 16: 11-22.
- [10] Odum H T. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 1988, 242: 1132-1139.
- [11] Lou B, Qiu Y H, Ulgiati S. Energy-based indicators of regional environmental sustainability: A case study in Shanwei, Guangdong, China. *Ecological Indicators*. 2015, 57: 514-524.
- [12] Vitousek P M, Ehrlich P R, Ehrlich A H, et al. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience*, 1986, 36 (6): 368-373.
- [13] Thebault J, Schraga T S, Cloern J E, et al. Primary production and carrying capacity of former salt ponds after reconnection to San Francisco Bay. *Wetlands*, 2008, 28(3): 841-851.
- [14] Wei C, Guo Z Y, Wu J P, et al. Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying

- capacity in the coastal zones: A case in Nantong. *Ocean & Coast Management*, 2014, 93: 51-59.
- [15] Zheng D F, Zhang Y, Zang Z, et al. Empirical research on carrying capacity of human settlement system in Dalian City, Liaoning Province, China. *China Geographical Science*, 2015, 25(2): 237-249.
- [16] Li Tianxiao, Fu Qiang, Peng Shengmin. Evaluation of water and soil resources carrying capacity based on DPSIR framework. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(8): 128-134. [李天霄, 付强, 彭胜民. 基于 DPSIR 模型的水土资源承载力评价. *东北农业大学学报*, 2012, 43(8): 128-134.]
- [17] Mao Hanying, Yu Danlin. Regional carrying capacity in Bohai Rim. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 363-371. [毛汉英, 余丹林. 环渤海地区区域承载力研究. *地理学报*, 2001, 56(3): 363-371.]
- [18] Fan Jie, Wang Yafei, Tang Qing, et al. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V2014). *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 1-10. [樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 全国资源环境承载能力监测预警(2014 版)学术思路与总体技术流程. *地理科学*, 2015, 35(1): 1-10.]
- [19] Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yafei. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V2016). *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 266-276. [樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载能力预警(2016 版)的基点和技术方法进展. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 266-276.]
- [20] Wang S, Xu L, Yang F L, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model. *Science of Total Environment*. 2014, 472: 1070-1081.
- [21] Peng J, Du Y Y, Liu Y X, et al. How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1017-1030.
- [22] Zhang Linbo, Li Xing, Li Wenhua, et al. Human carrying capacity research: Dilemma and reasons. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 889-897. [张林波, 李兴, 李文华, 等. 人类承载力研究面临的困境与原因. *生态学报*, 2009, 29(2): 889-897.]
- [23] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: From theory to practice. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395. [封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践. *资源科学*, 2017, 39(3): 379-395.]
- [24] World Bank, World Development Indicators: Structure of output. <http://wdi.worldbank.org/table/4.2>, 2017. (Accessed in Jan., 2019)
- [25] World Bank. <https://databank.worldbank.org/source/population-estimates-and-projections>, 2019. (Accessed in Aug., 2019)
- [26] Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, et al. Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. *PLoS ONE*, 2012, 7(2): e32688. doi: 10.1371/journal.pone.0032688.
- [27] Wada Y, van Beek L P H, Viviroli D, et al. Global monthly water stress: Water demand and severity of water stress. *Water Resource Research* 2011, 47: W07518. doi: 10.1029/2010WR009792.
- [28] National Development and Reform Commission. Adjustment for National Land Use Master Plan of China (2006-2020). http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201705/t20170517_847666.html, 2016. (Accessed in Dec, 2018) [国家发改委(国家发展改革委员会), 全国土地利用总体规划纲要(2006-2020)调整方案. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201705/t20170517_847666.html, 2016. (2018 年 12 月访问)]
- [29] Winz I, Brierley G, Trowsdale S. The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resource Management*, 2009, 23: 1301-1323.
- [30] Zhou X Y, Lei K, Meng W, et al. Space-time approach to water environment carrying capacity calculation. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 302-312.
- [31] Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, et al. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process. *Ecological Modelling*, 2014, 275: 9-21.
- [32] Yang J F, Lei K, Khu S T, et al. Assessment of water environmental carrying capacity for sustainable development using a system dynamics model applied to the Tieling of the Liao River Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 5173-5183.
- [33] Dieter C A, Maupin M A, Caldwell R R, et al. Estimated Use of Water in the United States in 2015. Virginia: U.S. Geological Survey, 2018: 65.
- [34] USGS. Total Water Use. <https://water.usgs.gov/watuse/wuto.html>, 2019. (Accessed in Feb., 2019)
- [35] Statista. U.S. Energy Consumption. <https://www.statista.com/topics/833/energy-consumption/>, 2018. (Accessed in Jan.

2019)

- [36] National Information Center of China. Measurement and Decomposition of China's Total Factor Productivity. <http://www.sic.gov.cn/News/455/6841.htm>, 2016. (Accessed in Dec, 2018) [国家信息中心. 中国全要素生产率的测算及分解. (<http://www.sic.gov.cn/News/455/6841.htm>, 2016. (2018年12月访问))]

Modelling the sustainability of China's growth based on the resource and environmental carrying capacity

NIU Fangqu^{1,2}, SUN Dongqi¹

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geopolitical Setting of Southwest China and Borderland Development, Kunming 650500, China)

Abstract: Since the reform and opening up in 1978, China has created a miracle of long-term high-speed economic growth, but the relationship between man and nature has suffered a serious damage, which is highlighted by the excessive consumption of resources and the intensification of environmental pollution. As a result, China is facing a slowdown in development. At the same time, China needs to maintain a certain speed of development in order to realize the dream of a powerful nationality entering the ranks of developed countries in 2050. To this end, China is facing transformation development. Now Chinese scholars and governments need to answer this kind of question: What economic growth rate is expected along with the corresponding development modes or means of regulation in the medium and long term? The growth development mode of the national economy is influenced and even dominated by the resource and environment support system. This study is intended to reveal the coupling relationship between economic growth, development modes and the supporting system, simulate the interaction process between them, explore the possible options for future economic growth and its requirements for the resource and environmental support system (the main factors), and provide early warning regarding China's environmental and development status. The results show that in order to achieve the development goal of entering the ranks of developed countries in 2050 and maintaining a fine ecological environment, the suitable growth rate for China's economy is 3.8%-6.3% on the premise that technological progress will improve resource utilization efficiency and reduce pollution emissions. Within this speed range, on the one hand, the smaller development velocity may be adopted to reduce the pressure on resources and environment, on the other hand, higher velocity can be adopted given that we are optimistic about the technological advances. The model proposed could help to compare different development scenarios and determine a better development mode; this way provides decision support for sustainable development. This study is a response to the "Future Earth" framework document. It develops the theoretical system of the resource and environmental carrying capacity in terms of development speed. It has important theoretical exploration significance and application value.

Keywords: resource and environmental carrying capacity (RECC); human-environment system; sustainable development; growth rate; system dynamic model (SD)