

## 中国城市群碳平衡仿真模拟研究

郭海湘, 杨钰莹, 左芝鲤

**摘要:**以武汉城市圈、京津冀城市群、珠三角城市群、呼包鄂城市群、杭州都市圈、兰西城市群和哈长城市群为研究对象, 基于系统动力学理论, 利用灰色预测建立了城市碳平衡系统的动态模型, 并借助 Any-Logic 软件模拟仿真城市群和各个城市的碳平衡演化轨迹, 从而发掘各城市在当前发展模式可能存在的问题。结果表明: 加大科技投入的调整模式最能有效提升城市碳平衡水平。在 2009 年至 2020 年间, 武汉城市圈、兰西城市群碳平衡水平整体呈小幅度下降趋势, 部分城市下降幅度较大; 京津冀城市群、珠三角城市群、呼包鄂城市群碳平衡水平演化轨迹整体较为平稳, 少数城市呈现明显的下降趋势; 杭州都市圈中除个别城市碳平衡水平下降外, 其他城市碳平衡水平均呈上升趋势; 哈长城市群各城市碳平衡水平变化差异较大, 但整体趋势是下降的。最后, 根据各城市的发展情况和资源条件提出提升区域碳平衡水平的对策和方法。

**关键词:** 中国城市群; 碳平衡; 灰色预测; 系统动力学; 仿真模拟

**中图分类号:** F299.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2018)02-0114-12

**DOI:**10.16493/j.cnki.42-1627/c.2018.02.012

长期以来, 我国政府高度重视气候变化问题, 把绿色低碳发展作为生态文明建设的重要内容, 提倡坚持走新型城镇化道路, 建设低碳城镇。在低碳城镇建设过程中, 除了要减少碳排放, 还应增加碳吸收, 两者中和形成的碳平衡水平是评价低碳城镇发展的重要标准。随着社会经济的快速发展, 伴随着城市规模的扩大和城际之间交通条件的改善, 尤其是高速公路的出现, 相邻城市辐射的区域不断接近并部分重合, 城市之间的经济联系越来越密切, 相互影响越来越大, 逐渐形成了城市群。《国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要(草案)》明确提出, 城镇化方向要走以城市群为主体形态的城市化道路。因此, 以城市群为主要空间载体的低碳研究已成为现在和未来区域研究的主要方向。随着国家大力推进新型低碳城镇建设, 各地区相继出台了一些碳排放标准, 力图做到碳排放与碳吸收相平衡, 达到较高的碳平衡水平。本文以武汉城市圈、京津冀城市群、珠三角城市群、呼包鄂城市群、杭州都市圈、兰西城市群和哈长城市群为例, 基于 2009—2015 年的数据进行系统仿真分析, 模拟 2009 年至 2020 年内各城市碳平衡发展趋势, 发掘城市碳平衡水平发展所面临的问题, 提出在低碳发展背景下提升区域碳平衡水平的对策和方法, 以期对其他地区新型城镇化的发展有所借鉴与指导。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“灾害多级联动模式下城市群综合承灾能力的评价与仿真研究”(71573237); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目“城市综合承灾能力测算”(NCET-13-1012); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目“大数据背景下突发公共事件的关联关系挖掘与预测”(15YJA630019)

**作者简介:** 郭海湘, 中国地质大学(武汉)经济管理学院教授、博士生导师(湖北 武汉 430074); 杨钰莹, 中国地质大学(武汉)经济管理学院硕士研究生

## 一、文献综述

在碳循环研究领域, 大多数学者侧重于对森林、农田、草地、土壤等自然碳循环方面开展研究, 而较少涉及城市碳循环领域<sup>[1]</sup>。随着国家和地方政府对低碳城镇化建设的重视, 城市碳循环领域也开始受到学者的关注。多数研究者认为碳平衡是指在某一区域系统中碳的排放和吸收在数量或质量上相等或相抵。如杨立等<sup>[1]</sup>在研究中写到, 《京都协议书》认定固定的陆地碳汇量可以作为工业化国家的碳减排量, 碳平衡是指碳源和碳汇在数量或质量上相等。王磊等<sup>[2]</sup>认为, 当城市碳输出高于生态系统的碳汇能力时, 碳平衡量处于不平衡状态, 城市系统的碳排放承载能力较低。黄华等<sup>[3]</sup>指出, 城市低碳发展实际是城市碳排和碳汇两大系统实现相对理想状态的碳平衡过程。

近年来, 也有学者定量分析区域碳平衡。如杨立等<sup>[4]</sup>对曲周县 2000—2011 年的碳源和碳汇值进行了计算, 并定量分析了区域碳平衡。赵荣钦等<sup>[5]</sup>采用 2009 年中原经济区县域单元的各种统计数据及土地利用数据, 对县域空间的碳收支状况进行了核算分析。彭文英等<sup>[6]</sup>从碳平衡角度探讨城市和乡村之间的生态关系, 建立碳平衡的生态补偿计算方法。黄华等<sup>[3]</sup>基于碳平衡视角研究了广东省 12 个地级市低碳发展的特征及影响碳平衡的主要因素。余光英等<sup>[7]</sup>将碳平衡引入土地适宜性评价研究中, 分别从经济、生态、社会角度建立了基于碳平衡的城市圈土地适宜性评价指标体系。王磊等<sup>[2]</sup>以天津为例, 动态测度了碳排放的通量代谢特征与碳平衡变化规律。

另外一部分学者从区域碳排放或碳吸收的角度进行研究。如宋德勇等<sup>[8]</sup>根据中国能源平衡表估算了 30 个省市的碳排放, 并采用 STIRPAT 模型分析了城镇碳排放及区域差异的影响因素。路正南等<sup>[9]</sup>利用灰色预测对江苏省碳排放量进行了预测。刘华军<sup>[10]</sup>在研究中采用 IPCC 的计算方法, 根据化石能源消费量精确测算了各省的二氧化碳排放量。Su 等<sup>[11]</sup>基于碳排放与其影响因素的关系构建了碳排放量预测模型。Zhao 等<sup>[12]</sup>采用分解法研究碳排放影响因素。朱勤等<sup>[13]</sup>基于居民消费数据定量评估人口城镇化对碳排放的影响。李玉敏等<sup>[14]</sup>采用对数平均 Divisia 指数结构分解模型对碳排放量分解, 来研究能源消耗。段晓男等<sup>[15]</sup>评价了我国湿地的固碳速率和固碳潜力。赵晶等<sup>[16]</sup>利用 IPCC 方法测算了能源活动和水泥生产过程中的碳足迹和植被固碳量。Fang 等<sup>[17]</sup>对森林、草地、灌草丛及农作物的碳汇进行了估算。钱杰<sup>[18]</sup>针对大都市碳循环提出城市碳通量的计算方法。匡耀求等<sup>[19]</sup>分析生态系统温室气体排放源得到总碳汇量。汤洁等<sup>[20]</sup>结合 CASA 模型和土壤微生物呼吸模型, 估算了 2001—2010 年吉林西部的植被净初级生产力、净生态系统生产力。谢淑娟等<sup>[21]</sup>分析了中国发展碳汇农业的主要路径并提出政策建议。

综上, 现有研究大多是集中在区域碳排放或区域碳吸收的估算, 几乎都是趋于静态数据的研究, 预测碳排放或碳吸收的研究较少。本文基于系统动力学仿真的方法, 采用灰色预测模型建立各城市 and 城市群碳平衡水平的预测模型。以武汉城市圈<sup>①</sup>、京津冀城市群、珠三角城市群等 7 个城市群中所包含的 46 个城市为样本, 分别收集各个城市 2009—2015 年的数据, 运用灰色预测 DGM(1, 1) 模型, 构建各指标的时间预测函数并代入城市碳平衡系统动力学模型, 仿真出各城市 2009 年至 2020 年的碳平衡水平值, 比较分析各城市十二年的碳平衡水平演化轨迹, 发现存在的问题。

<sup>①</sup> 武汉城市圈包括武汉、黄石、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、鄂州、潜江、天门 9 个城市, 本文在搜集数据时, 由于天门缺失数据较多, 故只选取了除天门以外的 8 个城市进行研究。

## 二、研究方法 with 数据来源

### (一) 研究方法

灰色预测用等时距观测到的反映预测对象特征的一系列数量值构造灰色预测模型, 预测未来某一时刻的特征量, 或达到某一特征量的时间<sup>[22]</sup>。建模步骤为: 把原始数据加工成生成数, 对残差修订后, 建立差分微分方程模型, 基于关联度收敛的分析, 预测模型所得数据须经过逆生成还原后才能用, 采用“五步建模”法, 建立一种差分微分方程模型。

研究中发现, 因为数据收集的困难性, 即无法从一个统一的年鉴中找出数据, 不可避免地会造成数据来源的多元化, 随之带来统计口径存在一定差异, 这使得部分数据在时间序列中的值突高突低。对这种振荡型数据需要进行平滑化处理, 处理方法如下:

设振荡序列  $X^0 = (x^0(1), x^0(2), \dots, x^0(n))$ , 另设序列最大值为  $M = \max\{x^0(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$ , 最小值为  $m = \min\{x^0(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$ , 则称  $T(X^0) = M - m$  为序列  $X^0$  的振幅。

令  $x^0(k)d = \frac{[x^0(k) + T(x^0)] + [x^0(k+1) + T(X^0)]}{4}$  ( $k = 1, 2, \dots, n-1$ ), 则  $x^0D = (x^0(1)d, x^0(2)d, \dots, x^0(n-1)d)$  为平滑化处理后生成的序列,  $D$  为序列  $X^0$  的一阶平滑性算子, 序列  $X^0D$  为序列  $X^0$  的平滑序列。

对平滑处理后的数据序列  $X^0D$  采用灰色预测 DGM(1, 1) 模型构建时间响应函数, 并将函数还原为原时间序列的预测模型, 数据的预测值即由该模型产生。

根据灰色预测模型建模步骤, 得到震荡序列的灰色预测模型, 转换后得到如下公式:

$$\hat{x}^{(0)}(t) = F * \text{pow}(\beta_1, t-3) - \text{pow}(-1, t) * [F * \text{pow}(\beta_1, -1) - C - T(X^{(0)})] - T(X^{(0)})$$

该公式即为系统动力学模型中变量输入值。因此, 本文首先使用灰色预测来处理多元化数据信息, 并构建时间预测函数, 进而通过代入系统动力学仿真模型, 来预测各地区的碳平衡水平。

### (二) 数据来源

本文数据来自城市群各城市 2009—2015 年的统计年鉴, 包括: (1) 碳排放指标数据、能源消费数据。能源消耗量来源于各地方统计年鉴, 以及《中国环境统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国城市年鉴》、《中国低碳年鉴》。(2) 碳吸收指标数据。耕地、林地、草地和湿地面积来源于各城市统计年鉴和各地区统计公报及林业局统计数据。(3) 能源碳排放系数。各能源碳排放系数来源于 IPCC《国家温室气体排放清单指南》。(4) 碳吸收系数。碳吸收系数参考现有相关研究文献。各城市的碳排放量、碳吸收量和碳平衡水平的计算方法如下:

1. 碳排放量。在本文中, 计算各地区的碳排放量采用的是地区各种类的化石能源消耗与其相应的碳排放系数的乘积作为地区碳排放量的方法。由于碳排放量计算具有不确定性, 同时受实验数据的客观限制, 为了数据的统一性, 本文以能源消耗和耕地碳排放为主要碳源, 以使用较为广泛的煤炭、焦炭等 9 种能源的消耗量及耕地面积作为自变量, 碳排放系数如表 1 所示。其具体计算公式为 (单位为吨):

$$\text{碳排放量} = \text{煤炭量} \times 0.7559 + \text{焦炭量} \times 0.8550 + \text{原油量} \times 0.5857 + \text{燃料油量} \times 0.06185 + \text{汽油量} \times 0.5538 + \text{柴油量} \times 0.5921 + \text{煤油量} \times 0.5714 + \text{液化石油气量} \times 0.5042 + \text{天然气量} \times 0.4483 + \text{耕地面积} \times 3.3639$$

2. 碳吸收量。在本研究中, 各地区碳吸收量的计算方法为以林地、草地、湿地和耕地作为碳吸收主体, 因为自然界中它们的覆盖面积和吸收二氧化碳的量较大。各类型植被碳吸收系数如表 1 所示。其具体计算公式为 (单位为吨):

$$\text{碳吸收量} = \text{林地面积} \times 3.8069 + \text{草地面积} \times 0.9 + \text{湿地面积} \times 0.57 + \text{耕地面积} \times 0.52$$

3. 碳平衡水平。众所周知, 排放到大气中的碳存在碳循环过程, 一部分被生态环境吸收, 超过环境承载能力后, 有一部分会在环境空气中累积。区域空气中二氧化碳排放量过多, 将会对区域环境造成一定影响。城市低碳发展实际上是实现“碳排—碳汇”动态平衡逐步优化的过程, 实质是减少二氧化碳排放量, 提高城市碳固化中和能力, 碳排放与碳吸收两者中和, 形成碳平衡水平。在碳平衡视角下, 碳平衡轨迹能够表现经济活动对城市系统碳循环的扰动效应。碳平衡曲线可以作为衡量一个城市是否低碳的依据, 并反映出不同阶段城市碳平衡组合关系的特征。本研究中的碳平衡水平不是指碳吸收量等于碳排放量, 而是衡量一个地区碳吸收抵消碳排放的程度。一个地区碳平衡水平值越大, 说明其低碳化水平越高, 反之说明低碳化水平越低。其具体计算公式为 (单位为吨): 碳平衡水平 = 碳吸收量 - 碳排放量。

表 1 城市碳平衡指标系数

一级指标	二级指标	碳排放系数 (tC/t 标准煤) 或碳吸收系数 (t/hm <sup>2</sup> )
碳排放	煤炭	0.7559
	焦炭	0.8550
	原油	0.5857
	燃料油	0.6185
	汽油	0.5538
	柴油	0.5921
	煤油	0.5714
	液化石油气	0.5042
	天然气	0.4483
	碳吸收	耕地 <sup>[14]</sup>
林地 <sup>[23][24]</sup>		3.8069
草地 <sup>[23][25]</sup>		0.9
湿地 <sup>[14]</sup>		0.57
耕地 <sup>[14]</sup>		0.52

### 三、模型构建与仿真实验

本文使用能基于系统动力学模型建模的 AnyLogic 对地区碳平衡的演化进行仿真模拟。

#### (一) 碳平衡的因果关系分析

碳平衡的约束决定了政府政策、科技投入、环境投入等一些碳减排因素, 通过分析各因素内在的因果关系, 得出图 1。

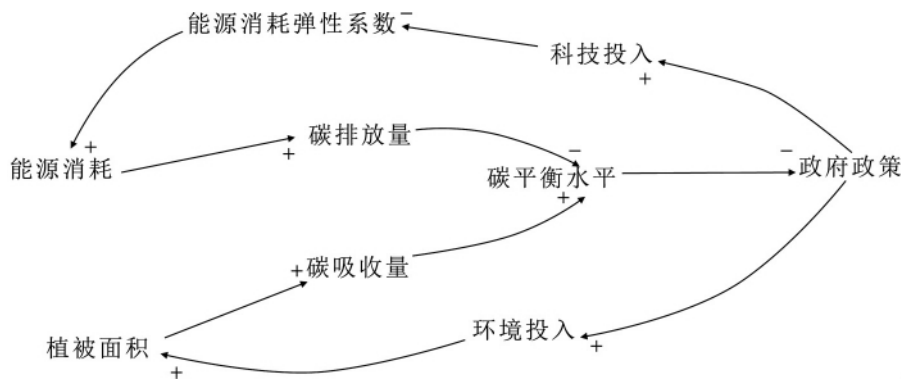


图 1 城市碳平衡影响因素的因果关系图

由图 1 可以看出系统里面各因素之间的因果关系, 如下。通过系统中各因素之间的相互作用, 实现模型模拟。各影响因素参数设置参考相关文献<sup>[26][27][28]</sup>。

能源消耗 ↑ → 碳排放量 ↑ → 城市碳平衡水平 ↓ → 政府政策的实施 → 科技投入 ↑ → 能源利用效率 ↑ → 能源消费弹性系数 ↓ → 能源消耗 ↓ → 碳排放量 ↓ → 碳平衡水平 ↑

能源消耗 ↑ → 碳排放量 ↑ → 城市碳平衡水平 ↓ → 政府政策的实施 → 环境投入 ↑ → 植被面积 ↑ →

碳吸收量  $\uparrow$   $\rightarrow$  碳平衡水平  $\uparrow$

(二) 碳平衡仿真模型建立

一个城市的碳排放量与碳吸收量相互影响, 构成了碳平衡, 即地区碳排放和碳吸收组成了影响碳平衡水平的反馈回路, 因此系统动力学模型能较好地模拟地区碳平衡变化规律。根据图 1 可以得出城市碳平衡系统动力学模型 (如图 2 所示)。

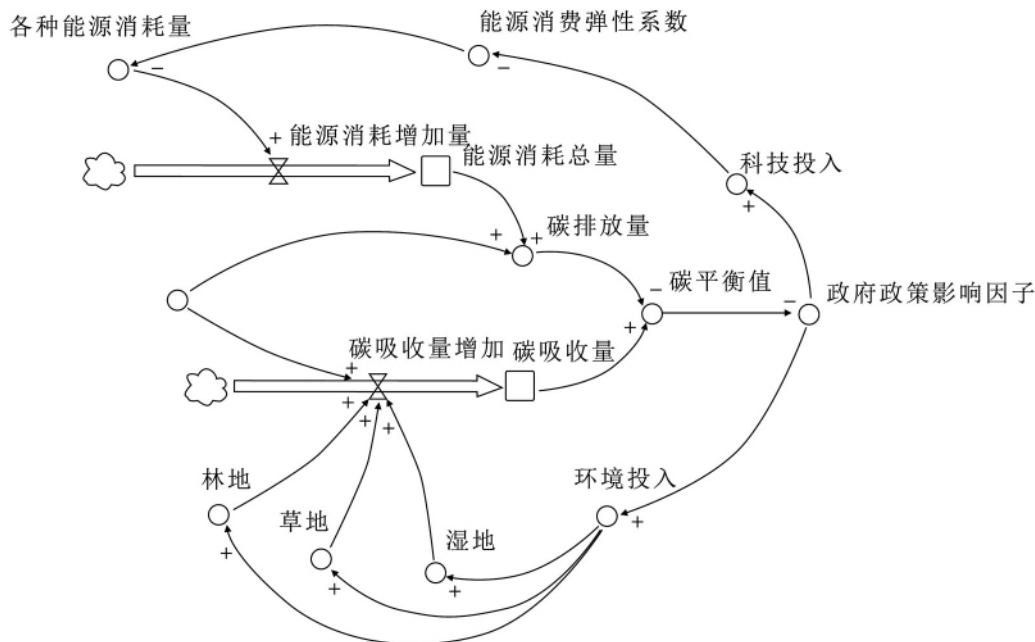


图 2 城市碳平衡系统动力学模型

城市碳平衡系统包括碳排放系统和碳吸收系统。两个系统直接相互联系, 共同影响城市的碳平衡水平。碳排放子系统如图 3 所示, 碳吸收子系统如图 4 所示。

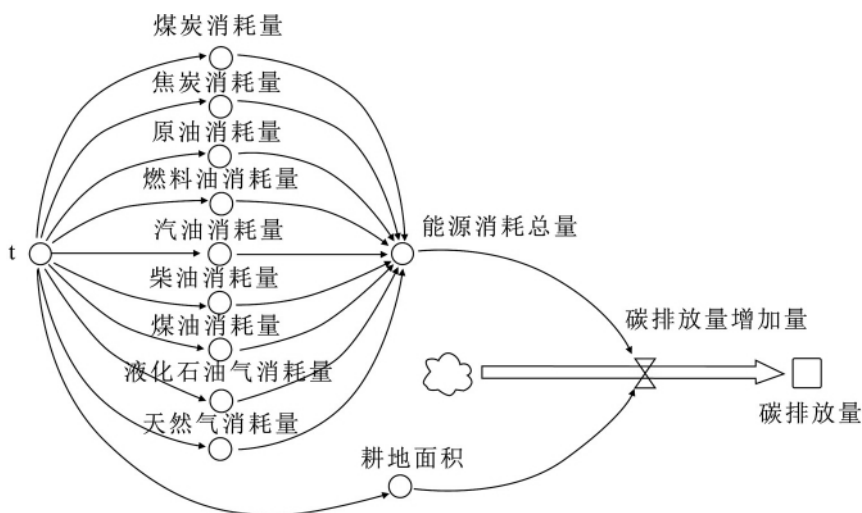


图 3 碳排放子系统

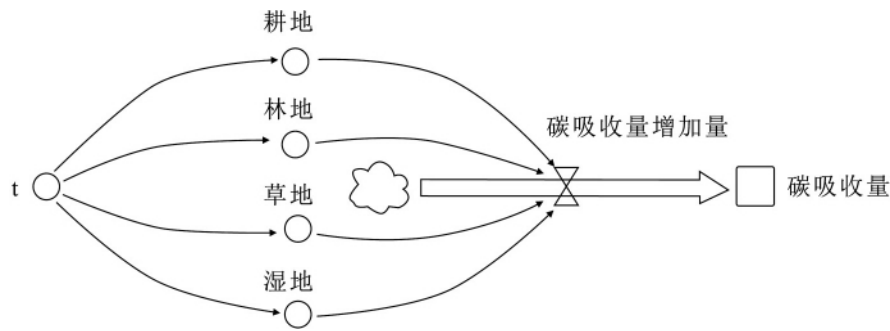


图4 碳吸收子系统

在仿真实验中, 用实验中的 1 毫秒表示实际时间中的 1 年。通过实验模型的运行, 来模拟城市未来的碳平衡演化趋势。

### (三) 模型检验

城市碳平衡指标体系中的每一个指标都作为一个变量。本文通过平滑算子对震荡序列进行平滑化, 从而提高对数据的预测精度。平滑后的数据采用灰色预测 DMG (1, 1) 模型构建碳平衡灰色预测模型, 并以预测武汉城市圈各城市碳平衡值为例进行相关步骤说明。

1. 模型精度检验。通过收集各城市 2009—2015 年的各指标数据, 计算各指标变量的时间响应函数并得到预测函数, 进行精度分析 (如表 2 所示)。预测残差都小于 0.03, 平均相对误差都小于 5%, 表明预测精度均很好。

表2 灰色预测模型精度分析

公式	残差	平均相对误差 (%)	公式	残差	平均相对误差 (%)
(1)	0.006 6	3.618 2	(8)	0.009 2	2.639 9
(2)	0.000 2	0.197 5	(9)	0.000 1	0.310 8
(3)	0.017 6	1.325 2	(10)	0.006 1	0.197 4
(4)	0.002 6	2.039 1	(11)	0.001 1	0.176 4
(5)	0.000 7	4.144 3	(12)	0.017 5	4.757 3
(6)	0.002 4	2.187 3	(13)	0.003 9	1.056 3
(7)	0.001 5	4.432 8			

受篇幅限制, 本文仅列出武汉市各指标变量的计算公式, 单位为百万吨或百万公顷, 如下所示:

$$\text{原煤消耗量} = 2.338146 * \text{pow}(1.1036, t - 3) + 0.550056264 * \text{pow}(-1, t) - 0.9007 \quad (1)$$

$$\text{焦炭消耗量} = 8.353744246 * \text{pow}(0.9855, t - 3) - 0.196755754 * \text{pow}(-1, t) - 1.8377 \quad (2)$$

$$\text{原油消耗量} = 10.7242928 * \text{pow}(1.0328, t - 3) - 0.267307202 * \text{pow}(-1, t) - 2.9823 \quad (3)$$

$$\text{燃料油消耗量} = 0.16052865 * \text{pow}(0.8618, t - 3) - 0.01547135 * \text{pow}(-1, t) - 0.0894 \quad (4)$$

$$\text{汽油消耗量} = 0.098891826 * \text{pow}(0.9097, t - 3) + 0.048891826 * \text{pow}(-1, t) - 0.059 \quad (5)$$

$$\text{柴油消耗量} = 0.121530 * \text{pow}(0.8553, t - 3) + 0.014210 * \text{pow}(-1, t) - 0.0303 \quad (6)$$

$$\text{煤油消耗量} = 0.006843 * \text{pow}(0.8562, t - 3) + 0.002843 * \text{pow}(-1, t) - 0.0032 \quad (7)$$

$$\text{液化石油气消耗量} = 0.174329 * \text{pow}(1.234, t - 3) - 0.025371 * \text{pow}(-1, t) - 0.1043 \quad (8)$$

$$\text{天然气消耗量} = 2.718266 * \text{pow}(1.1271, t - 3) - 0.5469 * \text{pow}(-1, t) - 0.237564 \quad (9)$$

$$\text{耕地面积} = 0.215336 * \text{pow}(0.9884, t - 3) - 0.001294 * \text{pow}(-1, t) - 0.0095 \quad (10)$$

$$\text{林地面积} = 0.245945 * \text{pow}(1.0094, t - 3) - 0.000718 * \text{pow}(-1, t) - 0.019451 \quad (11)$$

$$\text{草地面积} = 0.004040 * \text{pow}(1.1351, t - 3) - 0.000090 * \text{pow}(-1, t) - 0.002120 \quad (12)$$

$$\text{湿地面积} = 0.341183 * \text{pow}(0.9999, t - 3) - 0.010882 * \text{pow}(-1, t) - 0.016264 \quad (13)$$

2. 模型正确性检验。对比武汉城市圈 2009—2015 年的碳平衡实际值与预测值, 检测预测结果的可靠性 (如图 5 所示)。

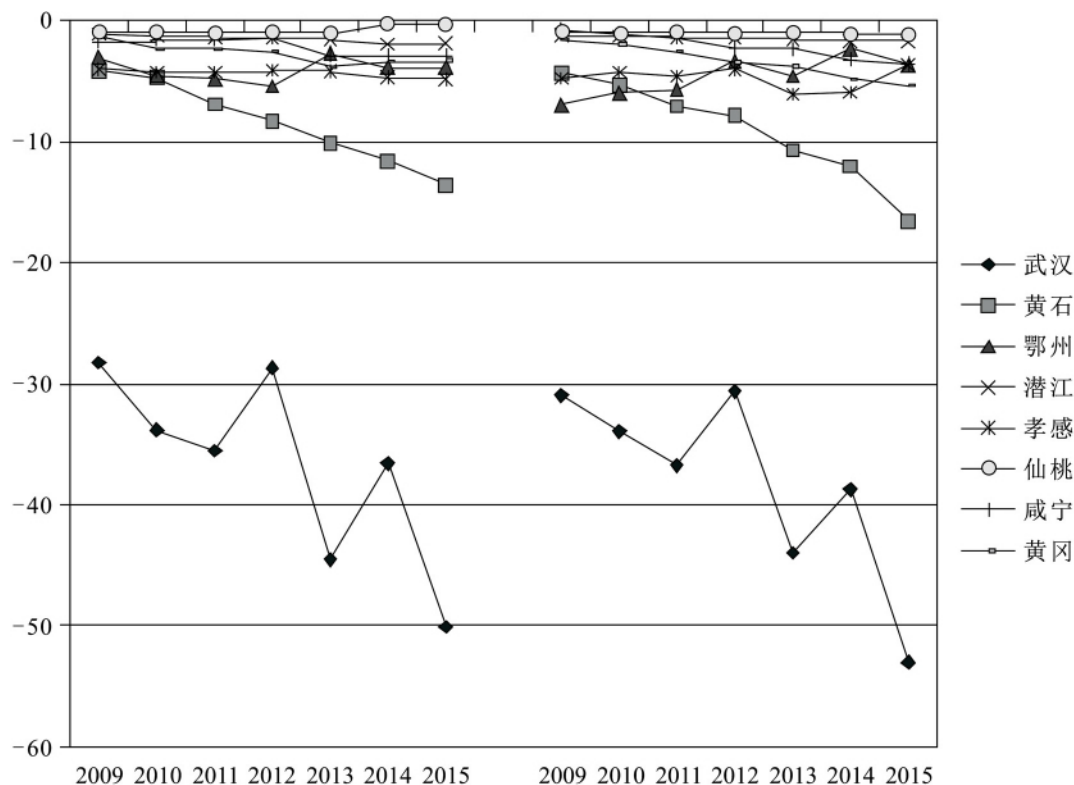


图 5 2009—2015 年武汉城市圈各城市碳平衡实际值与预测值

注: 左侧折线代表实际值, 右侧折线代表预测值, 横坐标表示年份, 纵坐标表示碳平衡值, 单位为百万吨, 图中各城市碳平衡值均为负值, 表明各城市碳平衡水平都在临界值以下。

由上图可知, 武汉城市圈各城市 2009 年至 2015 年的碳平衡实际值与仿真预测值基本一致。

#### (四) 模型的情景设定

为了比较不同政策调整下, 不同因素对碳平衡的影响大小及其变化趋势, 本文在建立中国城市群城市碳平衡系统动力学模型结构的基础上, 通过调整控制变量, 模拟城市在不同政策调控下的发展模式 (如表 3 所示)。

表 3 模型的情景设定

情景	情景设计
情景一	参数设置和发展趋势保持现有数据, 不实施任何减排措施。
情景二	政府参与调控, 增加环境投入, 主要是增加绿化容量, 提高碳吸收量。
情景三	政府参与调控, 主要是加大科技投入力度, 提高能源利用率, 减少能源消耗, 实现减排。

#### (五) 城市群城市碳平衡仿真分析

本文对 7 个城市群 2009—2020 年的仿真数据进行计算处理, 得到各城市群三种模式下的平均碳平衡水平发展轨迹 (如图 6、7、8 所示, 图中纵坐标为城市群城市碳平衡水平值, 单位为百万吨)。

图 6 是情景一模式, 保持现有的发展模式不变, 7 个城市群碳平衡水平呈下降趋势, 排名较稳定, 呼包鄂城市群排名第一, 兰西城市群紧跟其后, 武汉城市圈和杭州都市圈分别居第三和第四, 但在 2013 年二者排名相互替换, 珠三角城市群和哈长城市群分别位于第五和第六, 京津冀城市群的碳平衡水平与其他城市群差距较大。由此可见, 城市群碳平衡水平并不完全遵循东、中、西部依次递增或者递减的地理分布规律。

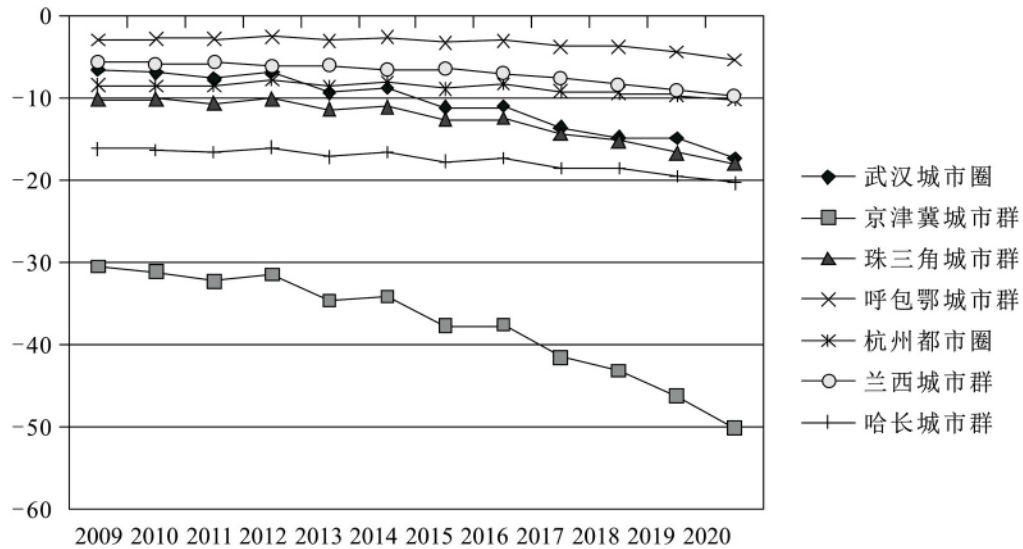


图 6 情景一模式下 2009—2020 年城市群碳平衡水平演化轨迹

图 7 是情景二模式, 主要是从增加碳汇的角度进行调整, 加大对环境的投入, 提高森林储蓄量, 强化对森林资源的保护。在这种模式下, 各城市的碳平衡水平整体有小幅度提升, 但各城市林地、草地、湿地等资源有限, 增加碳汇的能力也会受到限制。

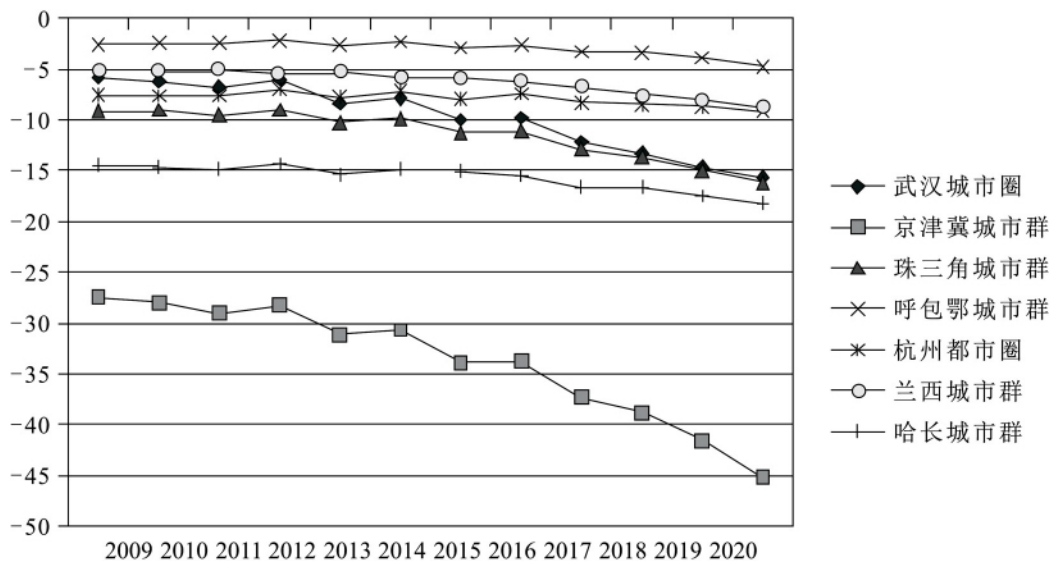


图 7 情景二模式下 2009—2020 年城市群碳平衡水平演化轨迹

图 8 是情景三模式, 政府加大调整力度, 主要是增加科技投入, 促进低碳技术进步, 调整能源

结构,使能源消耗弹性系数降低,减少城市对化石能源的消耗。在这种模式下,各城市碳平衡水平在原有变化轨迹上整体有了明显提升的趋势,说明这种调整模式比情景二更能有效提升城市碳平衡水平。

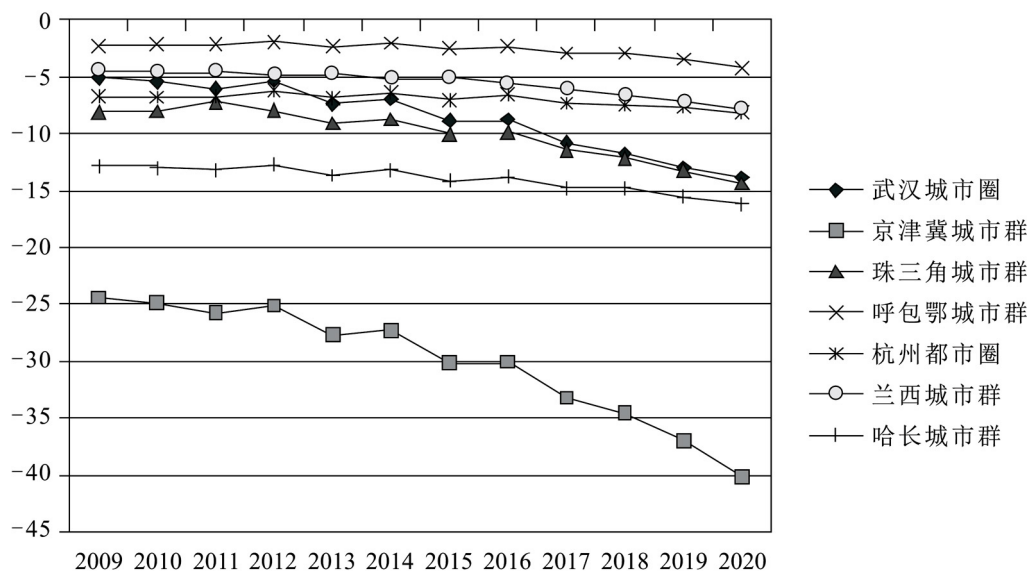


图 8 情景三模式下 2009—2020 年城市群碳平衡水平演化轨迹

(六) 城市群城市碳平衡水平整体分析

本文对 7 个城市群 46 个城市 2009 年到 2020 年的城市碳平衡水平进行仿真并分析了各城市群碳平衡水平演化轨迹 (如表 4 所示); 同时, 对 46 个城市分类并对其主要特点和发生原因进行了剖析 (如表 5 所示)。

表 4 城市群碳平衡水平情况

类型	城市群	城市群碳平衡水平演化轨迹分析
整体小幅度下降, 个别城市下降幅度较大	武汉城市圈	碳平衡水平整体呈小幅度下降趋势, 武汉、黄石下降幅度较大, 武汉呈现震荡现象, 鄂州、潜江、仙桃、孝感、咸宁、黄冈演化轨迹相对集中。
	兰西城市群	兰州碳平衡水平下降幅度较大, 白银、西宁、嘉峪关碳平衡水平演化轨迹相对集中。
整体较为平稳, 少数城市呈明显下降趋势	京津冀城市群	演化轨迹整体较为平稳, 天津、唐山呈现明显的下降趋势, 张家口、沧州、秦皇岛、石家庄演化轨迹相对集中。
	珠三角城市群	演化轨迹整体较为平稳, 广州、惠州碳平衡水平呈明显下降趋势, 并伴有震荡现象, 佛山、江门、深圳、珠海、肇庆、中山演化轨迹相对集中。
	呼包鄂城市群	各城市演化轨迹整体较为平稳, 鄂尔多斯的碳平衡水平呈明显下降趋势。
呈上升趋势	杭州都市圈	除嘉兴碳平衡水平下降外, 其他城市碳平衡水平均呈上升趋势, 杭州、湖州、嘉兴演化轨迹相对集中。
变化差异较大	哈长城市群	各城市碳平衡水平变化差异较大, 牡丹江演化轨迹下降幅度较大。

如上表所示, 7 个城市群中部分城市的碳平衡水平演化轨迹较为集中, 一方面是因为这些城市在

经济、技术、能源等方面发展较为相似, 另一方面还由于城市群集聚效应以及地理区位上的相似性。

表 5 城市群城市碳平衡水平综合情况

轨迹类别	包括城市	原因分析
呈平稳上升趋势 (11 个)	鄂州、珠海、湖州、绍兴、保定、白银、四平、延吉	一是诸如煤炭、焦炭、原油等化石能源的消耗总量较小, 且呈逐年下降的趋势; 二是其土地资源利用较为合理, 林地和草地面积大幅度增加, 强大的碳汇能力足以抵消化石能源的排放强度, 因此这些城市碳平衡水平持续上升。
	北京、包头、杭州	这三个城市化石能源消耗总量虽大, 但经过多年的能源结构调整和技术进步, 风能、地热能和太阳能等清洁能源比例不断增加, 化石能源的消耗量呈明显下降趋势, 而植被面积保持不变, 因此碳平衡水平有小幅提升。
呈平稳下降趋势 (17 个)	黄石、天津、唐山、肇庆、鄂尔多斯、兰州、牡丹江	近些年来煤炭对这七个城市的经济形成重要支撑, 虽然经过多年的经济结构调整, 但仍未脱离对煤炭的依赖, 且在相当长的时期内, 一煤独大的局面难以得到根本改变。
	咸宁、黄冈、秦皇岛、沧州、中山、兰州、西宁、嘉峪关、武威、哈尔滨	这十个城市能源消耗总量较小, 但主要化石能源的消费量却逐年增加, 虽然林地和草地面积也在增加, 但增加的碳汇能力有限, 导致其碳平衡水平有小幅下降趋势。
沿水平方向发展 (11 个)	孝感、潜江、仙桃、廊坊、佛山、江门、呼和浩特、定西、长春、齐齐哈尔、大庆	这类城市碳平衡水平演化轨迹接近水平线, 在预测时间内, 这些城市主要化石能源的消耗量较小且不断下降, 而碳吸收指标里面的耕地和林地面积也在减少, 致使其碳平衡水平保持稳定。
呈震荡上升趋势 (2 个)	张家口	张家口 2014 年可再生能源发电量占全社会能源消费总量的 27%, 但新能源与传统的火电相比, 具有不稳定、不连续的特点, 因此导致化石能源中煤炭和焦炭的消耗量年变化振幅较大, 所以碳平衡水平呈现震荡现象。
	深圳	深圳近些年来城市化发展迅速, 耕地面积不断被压缩, 导致碳平衡水平上下波动, 轨迹呈现震荡现象。
呈震荡下降趋势 (5 个)	武汉	武汉近年来经济发展迅速, 各能源消耗量日益增加, 始终未找到实现低碳经济切实有效的发展路径及模式, 导致其碳平衡水平演化轨迹呈明显的震荡下降趋势。
	石家庄、广州、惠州、嘉兴	这四个城市以煤炭、电力消耗为主, 且经济增长方式仍然是依靠大量资源的投入, 随着居民生活领域资源消耗和污染物排放的刚性增长, 生产领域可利用资源和可排放空间的约束进一步加剧, 致使能源消费呈现上下波动趋势, 因此这些城市碳平衡水平演化轨迹呈明显震荡现象。

#### 四、结论及建议

本文以 7 个城市群的 46 个城市为研究对象, 通过收集各城市碳排放和碳吸收指标数据, 对各城市的碳平衡水平进行仿真模拟。研究结果表明: (1) 当前各城市正处于城镇化进程中, 很多城市的能源结构都是以煤炭等化石能源为主, 多个城市存在煤炭消费强度高问题。(2) 政策的支持与

引导对提高城市碳平衡水平有很大影响,大部分城市的碳平衡水平均有下降趋势。如果各城市仍按照当前的模式发展,碳排放和碳吸收差别会更大,碳平衡水平会持续下降。(3)增加环境投入,主要是增加绿化容量。提高碳吸收量对碳平衡有提高作用,但是各城市林地、草地、湿地等资源有限,增加碳汇的能力也会受到限制。(4)情景三发展模式,即增加科技投入对碳平衡水平提升效果最明显,表明减少化石能源的消费是直接有效的提升碳平衡水平的方式。

通过延缓城镇化进程进行强制性节能减排并不可行,因此在提升城市碳平衡水平时,一方面要减少碳排放量,另一方面要增加碳吸收量,缓解碳减排的压力。各个城市的情况并不一致,所以各城市在发展过程中,要根据各自的发展情况和资源条件来调整发展模式。本文在7个城市群碳平衡仿真模拟和预测的基础上,提出以下提升城市碳平衡水平的建议:

首先,优化能源消费结构,控制煤炭消费数量,推动能源绿色发展。各市应因地制宜发展可再生能源,加快水能、风能、太阳能等清洁能源的利用,逐步弱化经济对化石能源的依赖程度,既关注能源对经济发展的贡献,又促进能源绿色转型,实现经济社会和生态环境的协调发展。

其次,注重政府引导与政策支持。要有从中央到地方的发展规划做引导,不同地区因地制宜制定合适的节能减排政策。对于符合地区发展方式、真正促进可持续发展的低碳措施,上级政府应给予金融财税等政策的引导和支持,各城市也可以通过银行、投资公司等对节能减排技术进行研发融资。

再次,努力增加碳汇,提高绿化容量。各城市需要增加城市绿地覆盖率,因地制宜提高碳汇能力。当城市的碳吸收能力出现负增长时,更需要提高城镇化建成区绿化覆盖率,加快人工湿地建设,增强湿地固碳能力。

最后,加快产业转型升级,提高能源使用效率。各市要加大对新兴产业的扶持力度,加快高新技术开发区的发展,推动技术进步,制定贯彻分行业能耗技术标准,依靠科技创新和体制创新加快淘汰高耗能技术装备,改变高能耗支撑经济发展的现状。

#### 参考文献

- [1] 杨立,郝晋珉,艾东,等.基于区域碳平衡的土地利用结构调整——以河北省曲周县为例[J].资源科学,2011(12).
- [2] 王磊,郭灿,李慧明.天津城市系统碳通量与碳平衡测度研究[J].干旱区资源与环境,2016(11).
- [3] 黄华,蔡克光,邢谷锐.基于碳平衡视角的广东省城市低碳发展特征及对策研究[J].城市发展研究,2015(11).
- [4] 杨立,唐柳.曲周县碳平衡分析与预测[J].中国人口·资源与环境,2013(S2).
- [5] 赵荣钦,张帅,黄贤金,等.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J].地理学报,2014(10).
- [6] 彭文英,马思瀛,张丽亚,等.基于碳平衡的城乡生态补偿长效机制研究——以北京市为例[J].生态经济,2016(9).
- [7] 余光英,员开奇.基于碳平衡适宜性评价的城市圈土地利用结构优化[J].水土保持研究,2014(5).
- [8] 宋德勇,徐安.中国城镇碳排放的区域差异和影响因素[J].中国人口·资源与环境,2011(11).
- [9] 路正南,彭沙沙,王健.基于IPCC清单编制法的碳排放灰色预测——以江苏省为例[J].技术经济与管理研究,2013(9).
- [10] 刘华军,鲍振,杨骞.中国二氧化碳排放的分布动态与演进趋势[J].资源科学,2013(10).
- [11] Su, Y, X. Chen, Y. Li, et al. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014(C).
- [12] Zhao, R, N. Min, Y. Geng, et al. Allocation of carbon emissions among industries/sectors: An emissions intensity reduction constrained approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142.
- [13] 朱勤,魏涛远.居民消费视角下人口城镇化对碳排放的影响[J].中国人口·资源与环境,2013(11).
- [14] 李玉敏,张友国.中国碳排放影响因素的空间分解分析[J].中国地质大学学报(社会科学版),2016(3).
- [15] 段晓男,王效科,逯非,等.中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008(2).

- [16]赵晶,马彩虹,程世娇. 广西壮族自治区碳足迹动态分析[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2015(4).
- [17]Fang,J. Y. ,Z. D. Guo,S. L. Piao,et al. Estimation on terrestrial vegetation carbon sinks in China from 1981 to 2000[J]. *Science in China* (Series D),2007(6).
- [18]钱杰. 大都市碳源碳汇研究:以上海市为例[D]. 上海:华东师范大学,2004.
- [19]匡耀求,欧阳婷萍,邹毅,等. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境,2010(12).
- [20]汤洁,姜毅,李昭阳,等. 基于CASA模型的吉林西部植被净初级生产力及植被碳汇量估测[J]. 干旱区资源与环境,2013(4).
- [21]谢淑娟,匡耀求,黄宁生. 中国发展碳汇农业的主要路径与政策建议[J]. 中国人口·资源与环境,2010(12).
- [22]曾波. 灰色预测建模技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [23]周宾,陈兴鹏,王元亮. 区域累积碳足迹测度系统动力学模型仿真实验研究——以甘南藏族自治州为例[J]. 科技进步与对策,2010(23).
- [24]谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报,2008(4).
- [25]杨俊杰,韩波,赵广东. 草业:“绿色黄金”产业[N]. 中国高新技术产业导报,2000-09-16.
- [26]李国柱,何曼. 基于系统动力学的河北省工业碳排放研究[J]. 石家庄经济学院学报,2015(4).
- [27]张荣荣. 基于系统动力学的工业行业碳足迹研究[D]. 无锡:江南大学,2010.
- [28]刘伟,陈超凡,桓汉青,等. 基于系统动力学模型的低碳城市发展研究[J]. 环境污染与防治,2014(4).

## Simulation Study on Urban Carbon Balance of Urban Clusters in China

GUO Hai-xiang, YANG Yu-ying, ZUO Zhi-li

**Abstract:** This paper takes Wuhan city circle, Beijing-Tianjin-Tangshan urban cluster, Pearl River Delta urban cluster, Hubaoe city group, Hangzhou metropolitan area, Lanxi city group and Harbin-Changchun urban clusters as examples, and based on the theory of system dynamics, constructs the dynamic model of urban carbon balance system by using the grey prediction formula. Next, the paper uses AnyLogic software to simulate the evolution of carbon balance about urban clusters and cities so as to explore possible problems existing in various cities in the current development model. The result shows that the mode of increasing investment in science and technology can effectively enhance the carbon balance of cities. During the period from 2009 to 2020, the carbon balance level of Wuhan city circle and Lanxi city group is a slight decrease trend, and some cities decrease greatly. The carbon balance level of Beijing-Tianjin-Tangshan urban cluster, the Pearl River Delta urban cluster and Hubaoe city group is relatively stable, and some cities show a significant drop. In Hangzhou metropolitan area, the carbon balance of cities shows an upward trend except Hangzhou. The changes of carbon balance level of each city in Harbin-Changchun urban clusters are quite different, but the whole trend is declining. At last, some feasible suggestions are proposed to improve the level of urban carbon balance according to the development needs and resource conditions.

**Key words:** urban clusters of China; carbon balance; grey prediction; system dynamics; simulation

(责任编辑 朱 蓓)