

区域能源碳排放系统开发及应用

黄蕊^{1,2}, 王 铮^{2,3,4}, 邓吉祥⁵, 吴 静³

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023; 3. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080; 4. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 5. 中共湖南省委党校, 湖南 长沙 410006)

摘要: 气候保护需要落实到区域层面上, 区域实施碳减排政策前需要对自身的碳排放需求进行核算, 开发区域能源碳排放系统以支持政府决策显得尤为必要。在介绍区域能源碳排放需求的经济动力学模型基础上, 基于 GIS 的区域能源碳排放需求系统的开发过程, 给出了应用实例。基于区域能源碳排放需求分析系统, 可以方便地计算和查询中国各省市自治区未来的能源碳排放需求。基于 GIS 模块, 通过模型用户可以对不同区域的能源碳排放, 并可方便地存储和输出。例如, 以江苏省和山东省为例进行对比, 可以发现山东省的能源碳排放总量和人均碳排放都比江苏省大。模型设置不同的情景分析, 给各地政府实施碳减排措施提供决策支持, 如以天津市为例, 模拟了不同政策情景下对天津未来能源碳排放量的影响。此外, 系统实现了面向国际谈判需求的多区域合成的碳排放需求估计, 为国家参与气候谈判争取更多的主动权, 对高度发展中国家的碳排放趋势进行的预测结果显示在平稳增长趋势下, 高度发展中国家的能源消费高峰值和能源碳排放峰值均出现在 2029 年。

关键词: 碳排放; 人均碳排放; 系统开发

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2015)04-0427-06

气候变暖已经在全球范围内达成广泛共识^[1]。在全球变暖的背景下, 一个区域参与气候保护, 制定一个公平合理的气候保护方案以应对气候变化显得尤为必要^[2-5]。对于区域政府来说, 制定这样一个方案, 首要任务是估计本区域未来的碳排放需求。这种碳排放需求有 2 方面意义, 首先这种需求能够满足经济增长, 对于发展中国家来说, 经济增长尤为必要。其次这个增长过程应该满足经济增长平稳, 不能因为减排而导致经济危机。

针对这种情况, 很多学者开始研究保障区域经济平稳增长的碳排放需求问题^[6-13]。Wang 等^[14], 朱永彬等^[15], 王铮等^[16]针对中国的情况, 发展了 Moon 等^[17]的能源消费预测模型, 构建了经济保持最优平稳增长下的能源消费碳排放预测模型。由于这个模型的基本特性是经济在最优平稳增长路径上达到社会福利最大, 这里的最优平稳要求定义了区域碳排放的实际需求, 也就是在人口合理

增长, 能源结构和产业结构优化, 能源强度下降的情景下, 经济保持增长所需要的碳排放量; 多余的碳排放意味着经济系统不是运行在平稳增长轨道上, 因此是不需要的。利用这个模型, 黄蕊等^[18]计算了上海的能源碳排放需求曲线, 刘晓等^[19]计算了湖南的能源消费量与能源碳排放需求曲线, 刘慧雅等^[20]计算了碳源与碳汇作用下的净碳排放需求曲线。然而, 这个计算过程繁琐复杂, 需要反复校正。为了增强模型的实用性, 本文开发了基于 GIS 的区域碳排放需求分析系统 (Regional Carbon Emissions Requirements Analysis System, RCERAS), 以期决策者更有效地制定减排政策提供支持。

1 模型体系构造

在 RCERAS 开发过程中, 从软件工程^[21,22]的角度看, 首先需要明确任务目标。RCERAS 模型的基本思想是根据人口增长情况, 计算未来的保持平稳增长的最优增长率, 进而求出未来 GDP 总量;

收稿日期: 2014-01-25; 修订日期: 2014-05-12

基金项目: 国家重大研究计划(973)项目(2012CB955803)资助。

作者简介: 黄蕊(1987-), 女, 河南焦作人, 博士, 主要研究方向为计算地理学。E-mail: huangrui4420@163.com

通讯作者: 王 铮, 教授。E-mail: wangzheng@casipm.ac.cn

另一方面根据技术进步,估计未来的能源强度变化。GDP总量与能源强度之积就是未来的保障经济平稳最优增长的能源消费需求。在计算得到能源消费需求后,结合能源结构可以得到各种能源的消费量,再由各种能源的消费量和各种能源的碳排放系数分别相乘,得到各种能源的碳排放总量。对各种能源的碳排放量求和得到区域的碳排放需求总量。

RCERAS 选取了 Logistic 模型作为人口预测的基础:

$$p(t) = p_M / (1 + ae^{-\theta t}) \quad (1)$$

式中, p_M 是区域可以承载的最大人口数, θ 是人口自然增长率(即增长率减去死亡率), $a = p_M/p_0 - 1$, 其中 p_0 是初始时刻的人口数。本文 p_M 是外生的^[23,24]。

能源强度 τ 被定义为能源投入与经济产出之比,如式(2)所示。

$$\tau = \frac{E}{Y} \quad (2)$$

王铮等^[16]通过对历年的能源强度进行拟合,发现中国的能源强度变化为指数形式下降,如式(3)。

$$\tau = b_0 e^{b_1 t} \quad (3)$$

数据检验的结果显示3个产业拟合的相关系数分别为0.787, 0.933, 0.940, 在统计意义上这个模型可以接受。

王铮等^[15]得到经济系统保持平稳增长的最优增长率为:

$$g^* = (\lambda - \frac{\rho}{\sigma}) + \frac{1}{\sigma}(\varepsilon - \theta\tau)(A_0 e^{v\tau})^{1/\alpha} \tau^{(1-\alpha)/\alpha} (\omega N_0 e^{m\tau})^{\gamma/\alpha} \quad (4)$$

式中, N_0 、 n 、 ω 分别为基年的人口数据、人口增长率以及劳动参与率; ρ 、 σ 为效用函数中的参数; ε 为折旧后剩余比例; θ 为能源综合成本; A_0 和 v 为初始全要素生产率水平及其增长率; α 与 γ 分别为资本与劳动力的产出弹性。由式(4)很容易预测出GDP。

能源结构 $S(t)$ 可以通过马尔科夫模型预测得来^[16], 如式(5)所示:

$$S(t) = S(t_0)P^{t-t_0} \quad (5)$$

式中, $S(t) = (s_1, s_2, s_3)$, 表示第 t 年份品种能源 $i(i=1, 2, 3)$ 在能源消费结构中的占比。这里考虑了3种能源: 煤、石油、天然气, 煤和石油是统称, 其中煤包括原煤、洗精煤等品种, 石油原油、汽油等。 $S(t_0)$ 表示基年的能源结构, P 为转移矩阵。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, p_{ij} 表示 i 能源的消耗比例向 j 能源转移的可能性。问题在于如何获得 p_{ij} 的估计。估计的基本思路是: 以转移矩阵中的元素为变量, 以实际能源结构与通过转移矩阵得到的能源结构的误差最小为目标建立一个优化模型, 寻找一个最优的转移矩阵。定义矩阵 R 为误差矩阵, 优化的目标是寻找一个转移矩阵, 使 R 中的元素值尽可能接近0。

$$\begin{aligned} & \min_i \left\{ \max_j \left\{ |r_{ij}| \right\} \right\} \\ & \{S' = S * P + R \\ & 0 \leq P_{ij} \leq 1 \\ & \sum_{j=1}^3 P_{ij} = 1 \\ & i, j = 1, 2, 3 \\ & \text{其中 } R = (r_{ij})_{3 \times 3} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, r_{ij} 为矩阵 R 中的元素。 $S = \begin{pmatrix} S(1) \\ S(2) \\ \dots \\ S(t-2) \\ S(t-1) \end{pmatrix}$,

$$S' = \begin{pmatrix} S(2) \\ S(3) \\ \dots \\ S(t-1) \\ S(t) \end{pmatrix}, \text{ 这里 } S(k) \text{ 是历史能源数据。}$$

由能源消费量、能源结构以及各种能源的碳排放系数可以计算出各年的能源消费碳排放量:

$$C(t) = E(t) \sum_i s_i(t) c_i \quad (8)$$

式中, $C(t)$ 、 $E(t)$ 分别代表第 t 年的能源碳排放量、能源消费量。 c_i 表示分品种能源 i 的碳排放系数。

2 系统设计与实现

2.1 系统需求

根据软件工程的思想^[21,22]和区域经济发展的特点^[25], RCERAS 应该满足下列功能性需求和非功能性需求:

1) 系统能够对区域基本的经济指标数据如历史GDP、人口、资本存量、能源结构、技术进步等数据进行储存和管理, 包括数据输入、处理、输出等, 这些数据是预测分析的基础。

2) 系统可以根据基础的经济指标数据, 输入

政策变量,计算出未来区域的能源消费量和能源碳排放量等关键数据,并得出分析结果。

3) 系统对计算结果,既可以以文件形式输出,也可以实现可视化输出。

4) 由于涉及空间数据,特别是考虑到系统可以扩展为多区域的,因此数据管理和输出是基于GIS的。

RCERAS 需要有良好的用户操作界面,高效完成系统的各种功能,并有着良好可移植性和可维护性,便于其他用户使用和以后软件更新升级。

根据上述分析,RCERAS 系统采用 Microsoft Visual Studio 2008 开发平台,并以 C#作为开发语言,SQL Server 作为数据库,基于 ArcGIS Engine 进行二次开发,完成了系统开发。

2.2 系统设计

RCERAS 系统采用模块化设计,主要模块包括数据处理模块、参数估计模块、模型计算模块和基于GIS的可视化输出模块。

数据处理模块分为数据输入和数据处理,用户可以输入历史年份各区域的GDP、人口、资本存量、劳动参与率、劳动力、能源消费等,在数据处理菜单下,用户可以计算出模型需要的基本数据,如剔除通货膨胀后的GDP数据和资本存量数据,能源消费数据统一折算为Mtoe,以及各区域历史年份的能源强度数据。

参数估计模块:在输入数据后需要对生产函数、人口函数和效用函数进行参数估计。需要用的算法采用matlab实现,在C#中调用M文件编译的.dll组件。

计算结果模块:为了让用户对各区域经济社会数据有充分的了解,计算结果菜单下,系统首先给出能源强度变化趋势和人口增长趋势,然后计算经济增长率,结合能源强度,得到最终的能源消费需求量和碳排放需求量数据。在此之前,还需要计算能源结构变化过程和其他的指标数据,如人均GDP、人均碳排放量、碳排放强度等。用户可以从多个方面对区域的数据进行对比,以便支持决策。

输出显示模块:系统设计了图形输出功能,并且同时可以输出2个及2个以上区域的能源碳排放。系统基于 ArcGIS Engine 进行二次开发,使用到的控件和库包括 AxMapControl、AxTOCControl、AxToolbarControl 等。用户通过选择字段和年

份,可以对某一年各区域的能源碳排放量和人均碳排放量等进行分级设色,方便用户直观看出各区域碳排放量的多少,并可实现放大、缩小、平移和查询等功能。

2.3 数据库设计

为了便于数据更新和维护,采用 SQL Server 2005 数据库来管理数据,根据需求 RCERAS 创建了 22 张表存储数据。除此之外,为了方便计算和调用每张表里的数据,RCERAS 创建了 7 张视图,这样简化用户对数据理解的同时,也可以简化操作,同时还可以作为一种安全机制。通过视图用户只能查看视图中提供的数据,而不用知道这些数据来源于哪些表。如果某一用户想要访问视图的结果集,必须授予其访问权限。视图所引用表的访问权限与视图权限的设置互不影响^[26]。

3 模型应用案例

3.1 碳排放趋势模拟

基于 RCERAS 系统,可以快速的分析经济平稳增长下各区域的能源碳排放情况。本文给出的应用案例分别是对比中国江苏省和山东省碳排放趋势和高度发展中国家碳排放趋势预测。前者可以实现不同区域之间的对比,后者表示系统可以将分散的经济体根据需要进行组织合并。

3.1.1 江苏省与山东省的碳排放趋势

图1显示了基于历史数据处理(山东省和江苏省 1978~2011 年统计数据^[27-28])和参数估计后,RCERCS 模型模拟出来的山东省和江苏省的能源消费碳排放数据。

从图1中可以看出,江苏省和山东省的能源碳排放都呈现出先增长后降低的倒“U”型曲线,山东省的EKC曲线特征更为明显,江苏省的能源碳排放量已经基本稳定。这与2个省份的能源结构和产业结构有关。从能源结构看,2005年江苏省煤炭、石油、天然气、其它能源所占的比例分别是70.94%、19.15%、0.04%、4.39%。而山东省的煤炭和石油所占的比例接近99%。从产业结构看,目前,山东省正处于工业化中期阶段,产业结构呈现“二、三、一”的结构关系,第二产业尤其是高排放工业比重较高,而江苏省第三产业所占比重较高。

3.1.2 高发展中国家碳排放趋势模拟

在减排政策分析中,需要将经济性质相同的国家组织为一个整体,求出其碳排放量,这是一个

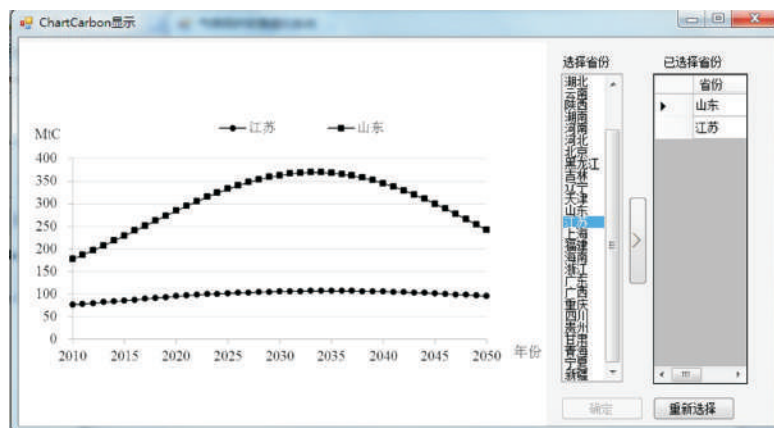


图1 RCERCS模型模拟的江苏省和山东省能源消费碳排放趋势

Fig. 1 Trend of energy carbon emissions in Jiangsu province and Shandong province in RCERCS model

多区域合成问题。这里以高发展中发展中国家为例来探讨。

所谓高发展中国家是依据2010年联合国发展项目人类发展报告中的人类发展指数标准划分(http://en.wikipedia.org/wiki/Human_Development_Index),发展指数主要由寿命、受教育程度和收入3个维度方面衡量,将发展中国家划分为高发展水平国家、中发展水平国家、低发展水平国家^[5]。基于世界银行的经济数据和历史排放数据(<http://data.worldbank.org/>),系统模拟发现高发展中国家的能源消费量与碳排放量也呈现出先增加后减少的EKC曲线特征,能源碳排放高峰值是 $1\ 556.48 \times 10^6\text{t}$,出现在2029年。这与中国承诺2030年左右达到碳排放高峰一致,由此可见,2030年高峰是容易取得国际认可的。

3.2 政策模拟分析

基于RCERAS,可以分析不同政策作用下区域碳排放需求的变化。RCERAS设计了3种政策情景:调整能源结构、调整产业结构,以及综合采用这2种手段。

本文以天津市为例探讨不同政策情景下未来天津市的能源消费量和能源碳排放量(基础数据来源于天津市1978~2011年统计数据^[29])。设定在保证能源总供给不变的前提下,到2050年,能源碳排放减少到基准情况的70%的目标下,模拟能源结构优化后,天津市未来各年的能源碳排放。模拟发现在给定目标下,煤以1.0%的速度下降,石油以0.9%的速度下降,天然气以1.3%的速度上升,非碳能源以1.6%的速度上升。能源

结构调整后,天津市的能源碳排放显著下降,峰值为28.50Mt,出现在2025年,与能源结构调整前相比,提前了5 a。从计算结果看,对天津这样能源结构较先进的城市,仅仅依靠能源结构调整,要达到这个减排目标也是困难的,特别是在核电站受到普遍质疑时,将非碳能源比例提高到45%是困难的。对天津市进行产业结构调整的情景模拟发现,在目标约束下,天津市第一产业将以0.7%的速度下降,第二产业以1.7%的速度下降,第三产业以1.2%的速度上升。考虑到京津地区产业的互补性,这种产业结构调整也存在困难。当采取同时进行能源结构优化和产业结构调整的情景模拟显示,天津市能源碳排放峰值出现在2025年,峰值为27.24Mt,减排效果更好^[30]。

3.3 专题图显示

RCERAS具备强大的专题制图和显示功能,能以分层设色的分级图表现出不同时间、不同碳排放指标的空间分布特征。同时,该系统还具有人机交互界面简单、使用灵活等优点,该系统的主要功能及显示界面及功能如图2所示,图中数字表示的功能为:① 选择显示不同的碳排放指标,主要包括能源碳排放量显示和人均碳排放量显示;② 选择相关指标所需的分级数;③ 设置指标渲染的起始和终止颜色;④ 选择显示不同年份的能源碳排放指标,可显示年份为2011~2050年;⑤ 可显示相关指标的图例;⑥ 可用于专题图显示或制作专题图;⑦ 可对图层进行放大、缩小、平移、查询、显示和保存等操作;⑧ 专题图显示。

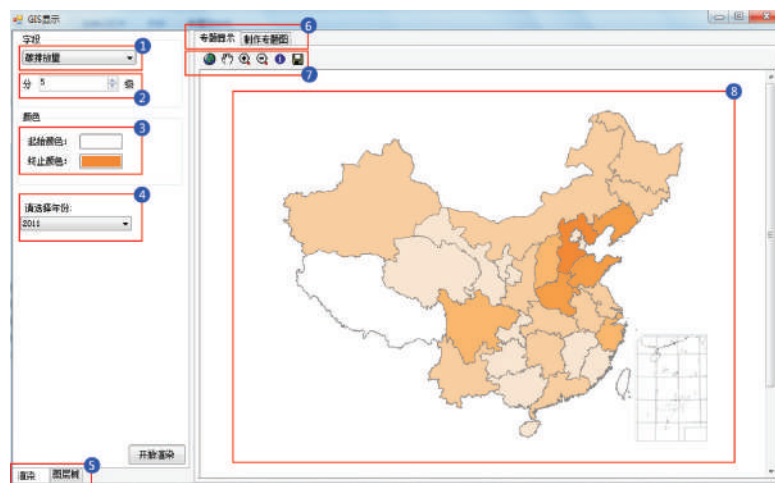


图2 RCERCS模型多区域显示系统界面

Fig.2 system interface of multi-area display in RCERCS model

4 结论

本文针对区域碳排放特点,介绍了基于GIS的区域能源碳排放需求系统模型构建原理和系统设计,并给出了该系统的应用案例。研究表明,该模型可以对各省区能源消费碳排放进行科学地预测,估算未来各省区在保持平稳最优增长下的能源碳排放需求。基于此系统,可以实现区域能源碳排放需求的计算、查询、存储和显示功能,可以对不同政策下不同区域的能源碳排放进行模拟分析,并可对不同的减排政策进行模拟,给政府提供决策支持。

参考文献:

- [1] IPCC, Climate change 2007: synthesis report. Contribution of workinggroups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2007.
- [2] Stem N. Stem Review on the Economics of Climate Change. Report to the Prime Minister and the Chancellor of the Exchequer On the Economics of Climate Change, London, United Kingdom. 2006.
- [3] Nordhuas W D, Yang Z L. Regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies[J]. The American Economic Review, 1996, **86**:741~746
- [4] 王 铮, 吴 静, 李刚强等. 国际参与下的全球气候保护策略可行性[J]. 生态学报, 2009, **29**(5): 2407~2417.
- [5] 王 铮, 张 帅, 吴 静. 一个新的RICE簇模型及其对全球减排方案的分析[J]. 科学通报, 2012, **57**(26): 2507~2515.
- [6] Alfredo M, Julio S. The impact of household consumption patterns on emissions in Spain[J]. Energy Economics, 2010, **32**(1):

176-185.

- [7] Svirejeva H A, Schellnhuber H J. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: Using the model based on the population density distribution[J]. Ecological Modelling, 2008, **216**(2): 208-216.
- [8] 吕可文, 苗长虹, 尚文英, 等. 工业能源消耗排放行业差异研究—以河南省为例[J]. 经济地理, 2012, **32**(12): 15~33.
- [9] 刘红光, 刘卫东, 范晓梅. 贸易对中国产业能源活动碳排放的影响[J]. 地理研究, 2011, **30**(4): 590~600.
- [10] 张 艳, 秦耀辰, 闫卫阳等. 我国城市居民直接能耗的碳排放类型及影响因素[J]. 地理研究, 2012, **31**(2): 345~356.
- [11] 郭义强, 郑景云, 葛全胜. 一次能源消费导致的二氧化碳排放量变化[J]. 地理研究, 2010, **29**(6): 1027~1036.
- [12] 王 晓, 齐 晔. 经济结构变化对中国能源消费的影响分析[J]. 中国人口资源与环境, 2013, **23**(1): 49~54.
- [13] 孙昌龙, 靳 诺, 张小雷, 等. 城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异[J]. 地理科学, 2013, **33**(3): 266~272.
- [14] Wang Z, Zhu Y, Peng Y. Carbon emissions trends with optimal balanced economic growth of China and the USA and some abatement options for China. J. Geogr. Sci. 2013, **23**(6): 991-1004. DOI: 10.1007/s11442-013-1058-y.
- [15] 朱永彬, 王 铮, 庞丽等. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测[J]. 地理学报, 2009, **64**(8): 935~944.
- [16] 王 铮, 朱永彬, 刘昌新等. 最优增长路径下的中国碳排放估计[J]. 地理学报, 2010, **64**(8): 1559~1968.
- [17] Moon Y S, Sonn Y H. Productive energy consumption and economic growth: An endogenous growth model and its empirical application [J]. Resource and Energy Economics. 1996, **18**: 189-200.
- [18] 黄 蕊, 朱永彬, 王 铮. 上海市能源消费趋势和碳排放高峰估计[J]. 上海经济研究, 2010, (10): 81~90.
- [19] 刘 晓, 熊 文, 朱永彬, 等. 经济平稳增长下的湖南省能源消费量及碳排放量预测[J]. 热带地理, 2011, **31**(5): 310~315.

- [20] 刘慧雅,王 铮,马晓哲.排放与森林碳汇作用下云南省碳净排放量估计[J].生态学报,2011,31(15): 4405~4414.
- [21] Shari L P, Joanne M A. Software Engineering: Theory and Practice (4th Edition) [M], New Jersey: Prentice Hall, 2009.
- [22] 王 铮,丁金宏.理论地理学概论[M].北京:科学出版社,1994.
- [23] 翟石艳,王 铮,马晓哲,等.区域碳排放量的计算-以广东省为例[J].应用生态学报,2011, 22(6):1543~1551.
- [24] Hiroshi K,Sadanori K,Naoya K. Solving a large scale semi-definite logit model[J]. Computational Management Science.2012, (7):111-120.
- [25] Peter N. Handbook of Regional and Urban Economics[M]. Amsterdam: North-Holland Publ. Co.,1986.
- [26] Gavin P. Beginning Database Design[M]. Birmingham, Wrox, 2005.
- [27] 山东省统计局.山东统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 2012.
- [28] 四川省统计局.四川统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 2012.
- [29] 天津市统计局.天津统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 2012.
- [30] Huang R,Wang Z.Prediction on tianjin's energy carbon emission and emission reduction scenarios analysis[J]. Journal of US-China Public Administration.2012,9(10):1134-1147.

Regional Carbon Emissions System Development and Application

HUANG Rui^{1,2}, WANG Zheng^{2,3,4}, DENG Ji-xiang⁵, WU Jing³

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development Application, Nanjing, Jiangsu 210023, China;
3. Institute of Policy and Management Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 4. Key Laboratory of Geographical Information Science, Ministry of State Education of China, East China Normal University, Shanghai 200062, China;
5. Hunan Party School of Provincial Committee of Chinese Communist Party, Changsha, Hunan 410006, China)

Abstract: Appropriate management measures are required for the areas involved in climate protection. According to these requirements, the Regional Carbon Emissions Requirements Analysis System (RCERAS) was developed to provide data support and policy analysis for the implementation of regional carbon emission reduction policies. This article briefly shows the economic dynamics model of the regional demand for carbon emissions, as well as the development and design of the GIS-based RCERAS. With RCERAS, future carbon emissions demand of China's provinces and autonomous regions can be calculated easily. The results of energy carbon emissions can be queried, stored and displayed. With the help of GIS, the users can get the pictures of different regions and compare them directly, as well as export the image. In this article the carbon emissions of Jiangsu Province and Shandong Province are compared. Shandong's carbon emissions are much higher than Jiangsu's carbon emissions both from the point of the amounts and per capita. Different scenario analysis are made to provide decision support to local governments to implement carbon emission reduction measures, including energy structure regulation, industry structure adjustment and the mix of both. In this article, Tianjin is taken as an example, the result shows the effects of different reduction measures. International-oriented multi-regional synthesis of carbon emissions demand can also be calculated by implementing the system, which can provide more information and strive for more initiative for our government to participate in the climate negotiations. In the study, we take high developing countries as a whole and estimate their future energy consumptions and CO₂ emissions. The results show that peak year of their energy consumption and carbon emissions would be in 2029.

Key words: carbon emissions; carbon emissions per capita; system design