

DOI: 10.5846/stxb201407251506

刘晓, 王铮, 邓吉祥. 配额目标约束下区域减排的最优控制率. 生态学报, 2016, 36(5): - .

Liu X, Wang Z, Deng J X. The Optimal Control Rate of Regional Emission Reduction Targets under the Constraint of Quotas. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): - .

配额目标约束下区域减排的最优控制率

刘 晓^{1,2}, 王 铮^{2,3,*}, 邓吉祥^{2,4}

1 湖南省社会科学院, 长沙 410003

2 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062

3 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190

4 中共湖南省委党校, 长沙 410006

摘要: 研究了区域碳排放配额目标给定下, 如何确定一个保障经济平稳增长的最优碳排放控制率问题。首先文章提出了一个最优减排率确定的计算流程, 并且根据前瞻性原则、人口原则、GDP 原则、GDP-人口原则、支付能力原则五种不同的碳排放配额分配原则, 确定了中国各省市自治区可能的最优减排率。其次文章选取 5 个中国省区上海、山西、湖南、云南以及新疆作为案例地区, 在计算得到这些地区的减排率的约束下, 分析了在社会福利最大化的情况下各区域分配的配额获得的经济增长路径和能源碳排放路径。模拟结果发现, 中国在各种减排约束下各区域的经济增长路径呈阶梯式下降的趋势。能源碳排放呈先升后降的整体趋势, 各个省市自治区要实现 2030 年后不再增加碳排放, 是要进一步努力的。最后文章得出各东部省份在 GDP 原则分配的配额约束下减排控制率最小, 西部省份在支付能力原则下减排控制率最小, 而中部省份则在人口原则下减排控制率较小。五个原则中前瞻性原则适合中国推进的碳减排配额方法。

关键词: 碳减排; 减排控制率; 配额; 气候变化

The Optimal Control Rate of Regional Emission Reduction Targets under the Constraint of Quotas

LIU Xiao^{1,2}, WANG Zheng^{2,3,*}, DENG JiXiang^{2,4}

1 Hunan academic of social science, Changsha 410003, China

2 Key Laboratory of Geographical Information Science, Ministry of State Education of China, East China Normal University, Shanghai 200062, China

3 Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

4 Hunan Party School of Provincial Committee of C.P.C., Changsha 410006, China

Abstract: Allocation of carbon dioxide emission rights is one of the effective ways to reduce carbon dioxide emissions. Therefore, an annual reduction rate needs to be determined to achieve this goal gradually. Given the negative effect of the emission reduction on economy, it is necessary to perform the emission reduction under the conditions of optimal and balanced economic growth, without causing an economic crisis. Hence, an optimal and balanced economic growth pathway is taken into account during calculations of the optimal control rate of carbon dioxide emission reduction. In this study, consequently, we try to determine the optimal control rate of carbon dioxide emission reduction that ensures balanced economic growth, with the constraint of the objective of a certain regional carbon dioxide emission quota. First, we present a calculation flow chart showing how to achieve the optimal control rate of carbon dioxide emission reduction. On the basis of the flow chart, we describe an algorithm aimed at determining the optimal control rate of carbon dioxide emission reduction

基金项目: 国家重大研究计划(973)项目(2012CB955800); 国家社会科学基金(14CJY032); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05150900)

收稿日期: 2014-07-25; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzheng@casipm.ac.cn

and use it to calculate such a rate for each province given their carbon dioxide emission quota determined by means of the allocation principles forward-looking, population, GDP, GDP-population, and ability-to-pay. A higher control rate of carbon dioxide emission reduction means more efforts are needed to reduce the carbon dioxide emission. Furthermore, in this study, we selected five provinces and autonomous regions of China (Shanghai, Shanxi, Hunan, Yunnan, and Xinjiang) as research cases, analyzed the path of economic growth and energy-induced carbon dioxide emission with the objective of welfare maximization and the constraint of carbon dioxide emission quota for the participating regions. The simulation shows that the growth rate of the economy drops gradually under the constraints of carbon dioxide emission reduction in all regions. For instance, the economic growth rate of Shanghai is lower than that in other eastern provinces and even negative along with a decline of the economic growth rate at later development stages (with the principle of ability-to-pay). Shanghai has to purchase carbon dioxide emission quota rights to keep the positive economic growth rate in the future. Shanxi attains a lower emission reduction rate by means of the forward-looking principle, which maintains Shanxi's economic growth rate at a relatively high level. Hunan stays on a similar path of economic growth and an emission reduction rate with various allocation principles. Therefore, the principle of emission right allocation has a smaller effect on the economy and on the reduction rate. Yunnan shows a higher economic growth rate with the principle of ability-to-pay, followed by the scenario involving the population principle. With the principle of GDP, the economic growth rate is the lowest. Similarly, Xinjiang achieves the highest economic growth rate with the principle of ability-to-pay, and lowest or even negative growth rate with the GDP or GDP-population principle. The carbon dioxide emission will first increase and then decrease, and the peak years of carbon dioxide emission are 2032 for Shanghai, 2033 for Hunan, 2036 for both Yunnan and Xinjiang, and 2039 for Shanxi province. Hence, more efforts are needed if these provinces want to achieve their carbon dioxide emission peak before 2030. Finally, we found that eastern provinces require the minimum reduction rate when using the GDP principle; western provinces by means of the ability-to-pay principle; and central provinces by means of the population principle. Among all the allocation principles, the forward-looking principle is suitable for China to allocate the carbon dioxide emission rights from the standpoint of carbon dioxide control and regional disparities in growth rate.

Key Words: Carbon Emissions Reduction; Control Rate; Quota; Climate Change

IPCC AR5 继续强调了全球气候控制问题,其关键是 CO₂ 的排放控制,有效方式之一就是碳排放权分配。碳排放权分配会促使各区域努力将其碳排放权限定在该区域的排放目标之下,这需要每年采取一定的减排率来逐步实现。2008 年的经济危机后,一个新的视角产生了:区域的碳减排率控制不能刺激经济危机发生^[1]。因此,只能在经济最优平稳增长条件下实行碳减排目标,即减排率必须控制在经济系统的最优平稳增长轨道下,这就是最优减排率问题。

这一问题的原始提法是关于减排率计算。在该领域,国内外的主流研究途径是建立气候变化经济学模型来计算合适的减排率,涌现了大量知名的 IAM 模型。在 IPCC AR5 中,IMAGE(Integrated Model to Assess Greenhouse Effect. IMAGE)模型、MERGE 模型(Model of Evaluating Region and Global Effects of GHG Reduction Policy. MERGE)、MESSAGE 模型(Model of Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts. MESSAGE)、POLES 模型(Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. POLES)等 14 个气候变化经济学模型被用于计算未来碳排放情景下的减排与控制问题。其中,最早的工作是 Nordhaus 建立了 DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy)模型^[2],并由 Nordhaus, Yang 发展为多区域的 RICE 模型,对区域减排率进行了求解,但没有考虑平稳增长的问题^[3]。Pizer 基于 DICE 模型发展的 state-contingent 模型,考虑不确定性参数,对全球最优 CO₂ 的减排率进行了模拟研究^[4]。崔丽丽、王铮以经济子模型、气候子模型和趋势子模型组成的 CGE 模型为基础,利用不确定性参数对确定我国合理的 CO₂ 减排率进行了模拟分析^[5]。沈子荣对单位 GDP 碳减排率的计算方法进行了简单介绍与比较,在此基础上对中国单位 GDP 碳减排

率进行了计算与分析,得出采用不变价格和购买力平价的计算方法更为科学^[6]。但是这些方法并没有从经济平稳增长的角度考虑,更没有受到碳排放配额的约束。另外,中国一些新的研究虽然对未来碳排放情景进行了分行了分析^[7-8]或是强调了减排的最优化问题^[9]或是对经济增长下的减排目标进行了研究^[10],但是仍然回避经济平稳增长问题。本文试图在经济平稳增长条件下确定减排目标,在此基础上,作为理论检验,本文结合中国各区域的减排控制问题作了应用研究。

计算平稳增长下减排目标的最优减排率,首先应计算平稳增长条件下实现减排目标的可能性,以区域平稳增长下未来碳排放需求量的评估模型^[11]和 Nordhaus 的评估模型为基础^[12],确定碳排放配额分配权,其次,综合考虑 5 个碳排放公平分配的原则,对区域的配额进行分配,在各原则分配的配额基础上,对中国的减排控制率进行计算,以期分析未来的经济发展过程中,中国各省市自治区在不同配额分配原则分配的配额约束下的经济增长路径、能源消费路径以及能源碳排放路径的变化,以及分析各区域在何种分配原则下差距最小的减排控制率,最后,为中国制定配额分配方案提供决策参考,同时探讨区域实行碳减排目标后的减排控制率计算问题。

1 模型

1.1 区域的碳排放需求

区域是一个经济体,在考虑能源的条件下,参考 Nordhuas 构建的含减排控制率的生产函数^[2],一个区域生产函数具有如下形式:

$$Y(t) = A_0 e^{vt} K(t)^\alpha (E(t)(1-\mu))^{1-\alpha} L(t)^\gamma \quad 0 < \alpha, \gamma < 1 \quad (1)$$

式中, μ 为区域给定碳排放量下的减排控制率,当 $\mu=0$ 即无减排情景; $Y(t)$ 为区域的社会总产出; $K(t)$ 为第 t 期的各个区域的资本; $E(t)$ 为第 t 期的区域的能源消费量; $L(t)$ 为第 t 期的区域的劳动投入; $A_0 e^{vt}$ 为区域第 t 期的技术水平, v 为区域的能源强度下降速率; α 为区域的资本产出弹性; 能源的产出弹性设为 $1-\alpha$; γ 为区域的劳动力的产出弹性。根据能源强度的定义即生产一单位经济产出所需能源消费量,其定义为

$$\tau = E(t)/Y(t) \quad (2)$$

其中 τ 表示能源强度,把能源强度的公式代入到生产函数中,则社会总产出 $Y(t)$ 关于能源强度的函数形式可以表示:

$$Y(t) = A_0 e^{vt} K(t)^\alpha [(1-\mu)\tau(t)Y(t)]^{1-\alpha} L(t)^\gamma \quad (3)$$

公式进一步化简成:

$$Y(t) = (A_0 e^{vt})^{1/\alpha} K(t) [(1-\mu)\tau(t)]^{1-\alpha} L(t)^\gamma \quad (4)$$

资本积累方程写为:

$$\dot{K}(t) = (1-\delta-\theta\tau(t))Y(t) - C(t) \quad (5)$$

其中, θ 为能源综合成本, δ 为资本折旧率, $C(t)$ 为第 t 期的社会总消费。另外,每个社会成员的效用为个人消费 c 的函数,函数形式为:

$$u(c(t)) = \frac{c(t)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} \quad (6)$$

社会计划者追求的目标是让社会福利最大化,即社会成员数为 $N(t)$ 的效用现值之和为最大:

$$\max \int_0^\infty u[c(t)] N(t) e^{-\rho t} dt = \int_0^\infty \frac{1}{1-\sigma} (C(t)^{1-\sigma} N_0^\sigma e^{(n\sigma-\rho)t} - N_0 e^{(n-\rho)t}) dt \quad (7)$$

加入减排控制率后的改进模型变为以下最优控制问题:

$$\begin{aligned} & \max \int_0^{\infty} \frac{1}{1-\sigma} (C(t) - \sigma N_0^\sigma e^{(n\sigma-\rho)t} - N_0 e^{(n-\rho)t}) dt \\ & \text{s.t. } \dot{K}(t) = (1 - \delta - \theta\tau(t)) Y(t) - C(t) \\ & M_Q(t) \leq MQT \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $M_Q(t)$ 表示区域的累积碳排放量, MQT 表示区域的碳配额量。接下来, 由目标函数及状态方程构造 Hamilton 函数:

$$H = \frac{1}{1-\sigma} (C(t) - \sigma N_0^\sigma e^{(n\sigma-\rho)t} - N_0 e^{(n-\rho)t}) + \lambda \dot{K}(t) \quad (9)$$

将(4)式代入到(9)式中得:

$$H = \frac{1}{1-\sigma} (C(t) - \sigma N_0^\sigma e^{(n\sigma-\rho)t} - N_0 e^{(n-\rho)t}) + \lambda [(1 - \delta - \theta\tau(t)) Y(t) - C(t)] \quad (10)$$

这是系统的 Hamilton 函数。根据最优控制理论, 为获得(7)定义的拉姆齐函数最大必要条件, 必须满足以下条件:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial C(t)} = C(t) - \sigma N_0^\sigma e^{(n\sigma-\rho)t} - \lambda = 0 \quad (11)$$

即

$$\lambda = C(t) - \sigma N_0^\sigma e^{(n\sigma-\rho)t} \quad (12)$$

$$\dot{\lambda} = - \frac{\partial H(t)}{\partial K(t)} = - \lambda [1 - \delta - \theta\tau(t)] \frac{\partial Y(t)}{\partial K(t)} \quad (13)$$

对生产函数式(4)求关于资本偏导, 得到如下结果:

$$\frac{\partial Y}{\partial K} = (A_0 e^{nt})^{1/\alpha} [(1 - \mu)\tau(t)] \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) L(t) \frac{\gamma}{\alpha} \quad (14)$$

对(12)式两边取对数得:

$$\sigma \ln(N_0) + (n\sigma - \rho)t - \sigma \ln(C(t)) = \ln(\lambda(t)) \quad (15)$$

取(15)式的时间导数得:

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = (n\sigma - \rho) - \sigma \frac{\dot{C}}{C} \quad (16)$$

将(14)代入(13)得到:

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = - (1 - \delta - \theta\tau) (A_0 e^{nt})^{1/\alpha} [(1 - \mu)\tau] (1 - \alpha) / \alpha L^{\gamma/\alpha} \quad (17)$$

将式(16)与式(17)合并得到式(18):

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = - (1 - \delta - \theta\tau(t)) (A_0 e^{nt})^{1/\alpha} [(1 - \mu)\tau(t)] (1 - \alpha) / \alpha L^{\gamma/\alpha} = (n\sigma - \rho) - \sigma \frac{\dot{C}}{C} \quad (18)$$

当社会实现经济增长与消费增长平衡即为经济的平稳增长, 于是整理(18), 有保障平稳增长的最优消费增长率为

$$g_t = \frac{\dot{C}}{C} = (n\sigma - \rho) + \frac{1}{\sigma} (1 - \delta - \theta\tau(t)) (A_0 e^{nt})^{1/\alpha} [(1 - \mu)\tau(t)] (1 - \alpha) / \alpha L^{\gamma/\alpha} \quad (19)$$

令社会总人口为 N , 劳动参与率为 ω , 即: 就业人口占总人口的比重, n 为未来人口平均年增长率。则 t 年的劳动力与人口分别为:

$$L(t) = \omega(t) N(t) \quad (20)$$

$$N(t) = N_0 e^{nt} \quad (21)$$

将它们与式(20)合并, 即可整理得保持经济平稳增长的黄金增长率为:

$$g_t = (n - \frac{\rho}{\sigma}) + \frac{1}{\sigma}(1 - \delta - \theta\tau(t)) (A_0 e^{nt})^{1/\alpha} [(1 - \mu)\tau(t)]^{(1 - \alpha)/\alpha} (\omega N_0 e^{nt})^{\gamma/\alpha} \quad (22)$$

式(22)确定的增长率即为人口增长率为 n , 减排率为 μ 时的经济平稳最优增长率。即经济增长理论所谓的黄金增长率^[13]。于是得区域未来经济平稳增长的经济总量的期望估计:

$$Y_t = Y_{t-1}(g_t + 1) \quad (23)$$

$$M(t) = E(t) (S_t^c \varphi_c + S_t^o \varphi_o + S_t^g \varphi_g) \quad (24)$$

其中 $M(t), E(t)$ 分别为第 t 年的能源碳排放量和能源消费量。 $\varphi_c, \varphi_o, \varphi_g$ 分别为煤炭, 石油, 天然气的排放系数, S_t^c, S_t^o, S_t^g 分别为 t 年煤炭, 石油, 天然气所占的能源比例。显然, 如果给定 $[0, T]$ 的减排率, 则可以求出这一期间的排放量

$$M_Q(T) = \sum_{t=1}^T M(t) \quad (25)$$

如果给定区域配额 MTQ 则我们可以找一个减排率 $\mu > 0$ 令 $M_Q(T) = MTQ$ 成立, 即可确定区域在给定配额下的减排率。式(25)即是一个区域内保持经济平稳增长的碳排放需求。

1.2 给定配额下区域最优碳减排变率

区域碳排放不仅受到经济增长需求的约束, 还受区域碳配额的约束。本文在给定区域碳排放配额后, 计算了能够保障区域在碳减排约束下的经济平稳增长轨道上的最优碳减排率。进一步, 由于减排率不可能集中在目标年实现, 因此需要 $\Delta Y(t) = \mu Y(t - 1)$ 的跃迁, 这一跃迁, 必然对经济产生较大的冲击, 因此实际减排过程要求的是让减排率从 0 减排逐渐增加, 即最初的减排率 $\mu(t = 0) = 0$ 逐步变大, 最终实现碳减排目标的减排率过程 $\mu(t)$

使得(26)式成立

$$M_Q(T) = \sum_{t=1}^T M(t) < MTQ \quad (26)$$

减排率 $\mu(t)$ 是受经济平稳增长的碳排放约束的情况下, 达到社会福利最大化的减排率, 即最优减排率。为防止由于减排的跃变导致经济的波动, 假定减排是每年按固定比率增加的, 即满足 $\frac{d\mu(t)}{dt} = \eta$, 于是有

$$\mu(t) = \mu_0 \exp(\eta t) \quad (27)$$

成立。换言之, 求最优减排率 $\mu(t)$ 的问题, 转化为求减排最优减排率的变率问题, 我们称之为最优减排变率。为了求得最优减排变率, 把(27)带入经济平稳增长的经济总量(23), 于是以

$$\min_{\eta \in \Omega} (M_Q(\eta; T) - MTQ) \quad (28)$$

为目标, 用某种最优化算法, 搜索求出给定配额 MTQ 下的减排率年变化 η , 即为最优减排变率, 其意义是每年需要以该速度提高碳减排控制率。 Ω 为减排变率集合, 范围为 $[0, \mu]$ 。其计算流程图如图 1 所示。

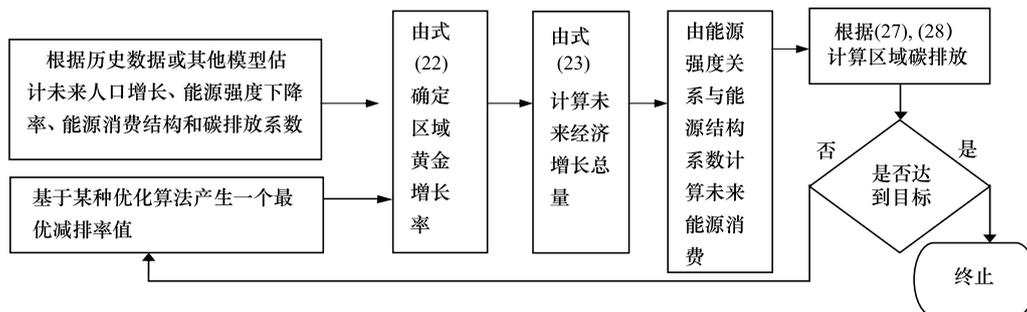


图 1 区域最优减排率计算流程图

Fig. 1 The flow diagram of the optimal carbon emission reduction rate in region

2 区域碳减排率的确定

区域碳减排率是由区域碳排放配额确定的,要确定个区域的减排配额,需要先行确定碳配额分配原则。本文根据中国的实际经济情况,以及 1990—2009 年累积碳排放量、人口量、GDP 量以及计算得到的经济平稳增长下 2010—2050 年的 GDP、人口以及碳排放需求量等考虑 5 个分配原则进行分配 5 个原则控制下,减排率不同各自可能形成若干情景,本文关心的是最优减排率情景。具体 5 个原则是:

(1) 前瞻性原则

前瞻性原则即为根据经济平稳增长条件下未来各省市自治区的碳排放需求量与全国碳排放总需求量的比例分配碳排放权配额。未来各省市自治区的碳排放需求量根据减排率为 0 时的黄金增长率,应用式(23)—(28)计算出。前瞻性原则依据未来碳排放需求量来分配碳排放权配额,有利于各区域尤其是经济较发达的区域在未来的经济发展过程中保持经济的连贯性。

(2) 人口原则

人口原则即根据经济平稳增长条件下未来各省市自治区的人口在全国总人口中的比例来分配碳排放权配额。这一原则体现每个人都具有同等利用自然资源的权利,遵循了区域中的每个人对所在区域都享有同等的排放权。理论上,人口原则使得人口较多但是经济欠发达地区的排放配额较充裕,有利于促进欠发达区域经济发展,但对人口较少而经济发展较快的省区形成一定的阻碍。

(3) GDP 原则

GDP 原则又称世袭原则,是根据经济平稳增长条件下未来各区域的 GDP 量与全国总 GDP 的比例来分配碳排放权配额。这一原则主要与各区域的经济状况与趋势相关,经济发展较好,经济总量较大的区域所分配碳排放权配额相对较多。以 GDP 为原则分配碳排放权配额使得原来相对富裕区域的经济发展不会因为大幅度减排而影响经济发展的连续性,从而有利于经济发展水平高。但对于经济总量较低的区域,由于所分配的配额量相对较少,且受区位,历史因素等原因影响,在未来的发展过程中所分配的配额量也较少,从而不利于贫穷地区的发展,导致区域差距扩大。

(4) GDP-人口原则

针对人口原则和 GDP 原则的优劣,GDP-人口原则是根据经济平稳增长条件下未来各区域的 GDP 和人口按相同的权重进行组合,即在人口分配原则和 GDP 分配原则下分配的配额的基础上按相同的权重重新分配得到总量。这一原则主要是基于中国各省域经济发展的不平衡性以及人口分布的不均衡性而设定,有助于缩小区域的差距。

(5) 支付能力原则

支付能力原则是根据区域经济水平差异,将区域的减排成本与其经济状况联系,具体是使区域可获得的碳排放权与人均 GDP 成反比^[14]。支付能力原则可以使得人口规模较大和人均 GDP 较低的区域分配更多的配额,而人口较少以及人均 GDP 较高的区域则需承担更多的减排义务。

作为例子,本文在表 1 中给出各种配额原则下中国各区域的碳排放强度的最优碳减排变率 η ,它们构成了相应的减排情景。但是必须强调的是,本文的区域适合于科学意义上的区域(region)是科学学抽象思维。模型可以用于它世界,有可能中国、美国,还可以用于山东、湖南,或者烟台、曲阜。

在下文中,为简洁起见,以后我们谈到 * * 原则,均值 * * 原则下的最优减排情景。各省市自治区以 2010 到 2050 年 GDP 需求量,人口需求量以及碳排放需求量为基础,假设 2010—2050 年国际碳排放权配额分配给中国的总配额量约为 75 Gtc,由于总配额量可根据将来国际上最终确定的实际数据进行调节,其最终数字需要修正,但并不影响适合各省域发展的配额原则的选择。从表 1 中可以看出,不同配额原则对具体的区域即各个地方减排要求不尽一致。

表 1 各中国省市自治区(区域)配额约束下的碳排放强度下降速率(%)

Table 1 The descent rate of carbon intensity under constraint of quote

省市区	前瞻性原则	GDP 原则	人口原则	GDP 人口原则	支付能力原则
Province	Foresight principle	GDP principle	Population principle	GDP-POP principle	Payment capacity principle
北京	0.0154	0.0000	0.0147	0.0052	0.0317
上海	0.0138	0.0060	0.0526	0.0202	0.1047
天津	0.0175	0.0000	0.0431	0.0129	0.0926
重庆	0.0157	0.0159	0.0000	0.0039	0.0000
辽宁	0.0146	0.0219	0.0383	0.0326	0.0530
山东	0.0147	0.0055	0.0176	0.0108	0.0316
江苏	0.0142	0.0000	0.0000	0.0000	0.0172
福建	0.0127	0.0000	0.0104	0.0026	0.0234
海南	0.0136	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
河北	0.0164	0.0497	0.0234	0.0340	0.0188
浙江	0.0169	0.0214	0.0246	0.0230	0.0337
广东	0.0189	0.0000	0.0091	0.0000	0.0307
山西	0.0101	0.0603	0.0463	0.0525	0.0475
安徽	0.0115	0.0053	0.0034	0.0043	0.0066
江西	0.0172	0.0017	0.0047	0.0032	0.0125
湖北	0.0133	0.0135	0.0103	0.0119	0.0140
湖南	0.0197	0.0356	0.0196	0.0268	0.0196
河南	0.0145	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
黑龙江	0.0894	0.0239	0.0000	0.0002	0.0150
吉林	0.0197	0.0440	0.0243	0.0329	0.0234
内蒙古	0.0184	0.0660	0.0740	0.0699	0.0895
云南	0.0176	0.1040	0.0104	0.0334	0.0000
陕西	0.0133	0.0366	0.0186	0.0261	0.0165
广西	0.0102	0.0370	0.0061	0.0155	0.0000
四川	0.0105	0.0204	0.0000	0.0037	0.0000
贵州	0.0117	0.0981	0.0091	0.0270	0.0000
甘肃	0.0144	0.0283	0.0000	0.0105	0.0000
青海	0.0200	0.0932	0.0220	0.0443	0.0032
宁夏	0.0111	0.1017	0.0361	0.0509	0.0222
新疆	0.0121	0.0537	0.0148	0.0275	0.0056

根据国家统计局的法定统计模式,这里各区域主要是指中国经济(统计体)包含的 30 个省、市、自治区,不包括香港、澳门、台湾,西藏数据缺少,按惯例可以略去。以下各表、图同。

从表 1 可以发现,在 GDP 原则下,东部地区和西部地区的减排下降速率相差较大。其中,东部大部分省份的减排下降速率较小,而西部地区则减排下降速率很大,其中最大的为宁夏,按 10.17% 的速率下降。可见在 GDP 原则下要使得西部地区需要更大的下降速率才能累积碳排放量小于配额量。而西部地区在历史上经济基础,自然条件都较差,加大减排速率势必会导致西部地区经济总量下降更快,加剧西部地区贫困,扩大东西差距。在人口原则下,内蒙古的减排速率最大,其次为山西,天津,宁夏,辽宁等省。这些省份中内蒙古,山西的能源碳排放量较多,但限于人口因素导致人口分配原则下的配额相对较少,使得配额和未来累积碳排放量之间的差距较大,从而两省在人口原则下的减排速率较大。而天津,宁夏未来累积碳排放量较小,但同样由于人口较少在人口原则下分配的配额量远低于其累积碳排放量,因此,其减排控制率较大。GDP 人口原则下各省之间的减排速率相对比 GDP 原则和人口原则下的减排速率差距小,但是比前瞻性原则下的减排速率大。在支付能力原则,西部地区除内蒙古外,其他省份的减排速率都较小,因此西部地区基本能实现累积碳排放需求量低于支付能力原则下分配的配额量的约束目标。东部地区除海南外大部分省份的减排速率都偏大。这主要是因为支付能力原则下分配的配额较大,使得累积碳排放需求量与配额的差距较小。

此外,通过表 1 可以发现,在前瞻性原则下除青海省减排下降速率为 0.02 外,各区域的减排下降速率处于 0.01—0.02 之间,说明前瞻性原则下各区域分配的配额量与累积碳排放需求量的差距都较小,在社会福利最大化的情况下,能以最小的减排控制率满足累积碳排放量小于配额量这一约束目标。

3 典型地区的碳减排控制

3.1 减排控制率下的经济增长路径

根据前面得到的减排率,可以求出在社会福利最大化的情况下,根据各区域分配的配额获得的经济增长路径。本文计算了 5 个分配原则下,全国 30 个区域的平稳增长率情况,限于篇幅,这里选取 5 个中国省区上海、山西、湖南、云南作为典型地区。选取的理由是上海是中国的制造业中心,山西为能源大省,能源碳排放居全国前列,湖南则是典型的中国中部正在快速工业化的地区,其人口、GDP、碳排放量都居全国中位,云南属于人口较多,经济总量较低的西南省份,新疆自治区则是人口和经济都不高的西北省区。

模拟结果发现,中国在各种减排约束下各区域的经济增长路径呈阶梯式下降,阶梯是与劳动力参数设置遵循以五年为一个时间段的中短期规划有关的,加之劳动参与率较小,出现整体下降趋势。

图 2 是上海市经济增长率在减排控制率约束下的变化,各原则下的经济增长率下降趋势一致。再注意到表 1,减排控制率越大,对经济增长率的影响越大,其值与基年的值差距也越大。上海市在支付能力原则下,上海市的经济增长率在初始年的经济增长率就低于 2%,随着增长速度的下降,在后期甚至出现负增长。在这种情况下,上海只能有购买碳排放权来维持自己的增长。上海的增长率变化,表现中国东部将普遍遭遇的挑战。

在图 3 中,我们给出了中国能源基地山西省的经济增长率变化,可以看出山西省在前瞻性原则下的经济增长速率大于其他原则下的经济增长率。由于山西省煤炭资源比较丰富,是我国产煤大省,在未来经济发展过程中能源结构始终以碳排放量较多的煤为主,累积能源碳排放需求总量较大,使得山西省在前瞻性原则下分配的碳排放配额较多。因此,在较高的配额量约束下,满足社会福利最大化目标所获得的累积碳排放量也较多,导致山西省在前瞻性原则下的减排控制率较小,经济增长率可以维持在较高水平。其他原则,在减排后期都出现负增长要求。

湖南省是中国中部工业化快速发展的地区,其 GDP、人口在中国处于中间地位。图 4 是湖南省在减排控制率约束下的经济增长路径的变化。从图 4 可以看出湖南省各原则下的经济增长曲线基本重叠,在不同减排控制率下各原则的经济增长路径保持一致,原因主要有两方面,一方面说明湖南省 5 个原则下的减排控制率差距不大,另一方面说明湖南省的减排控制率对整个经济生产过程的影响较小。由于减排控制率在生产过程中主要是通过对能源投入来影响经济总量,再通过经济总量的减少来降低碳排放量。而湖南省在配额约束下的能源强度下降速率较快,使得减排率对经济的影响较小。比较图 3 和图 4,我们发现,作为能源基地的山西,应该就可能满足它的排放需求。相反,以湖南省为代表新兴工业化的省份,由于其具有中间的人口数和产业规模,不同的配额原则影响其实并不大。

图 5,图 6 分别为位于西南、西北的云南和新疆的经济增长路径。从图 5,图 6 可以发现,云南省经济增长率在支付能力原则下的经济增长率最大,其次是人口原则,在 GDP 原则下的经济增长率最小,这代表了大部分西部地区的经济增长率的趋势。落后的经济以及较多的人口,使得西部地区在支付能力原则下和人口原则

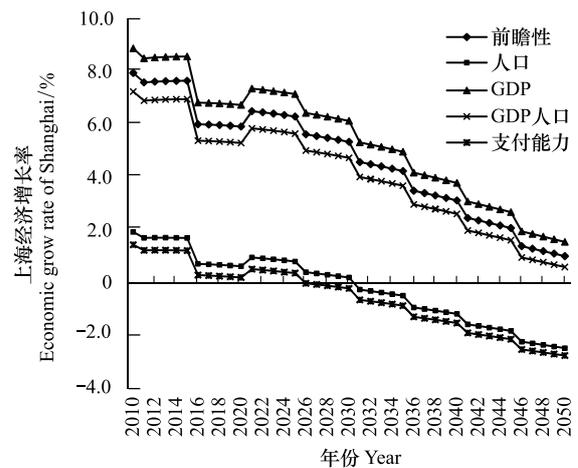


图 2 上海减排控制率下经济增长率变化路径

Fig. 2 The variation path of economic growth rate under the control of carbon emission reduction rate in Shanghai

下分配的配额量较多。在配额目标较大的前提下,若要获得较大的累积碳排放量,经济总量势必也较大,因此,在支付能力以及人口原则下的经济增长率较大。新疆自治区在支付能力原则下的经济增长率最大,在 GDP 原则和 GDP 人口原则下的经济增长率较低并出现负值。这主要是由于在两原则下的低碳配额量所导致,要实现在 GDP 原则下和 GDP 人口原则下的低配额量,须加大减排控制率,但此举又将导致经济呈负增长。可见,经济落后地区并不适合按 GDP 原则和 GDP 人口原则分配配额量。

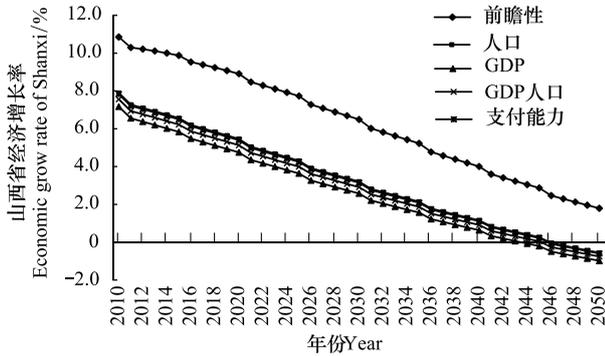


图3 山西减排控制率下经济增长路径

Fig. 3 The variation path of economic growth rate under the control of carbon emission reduction rate in Shanxi

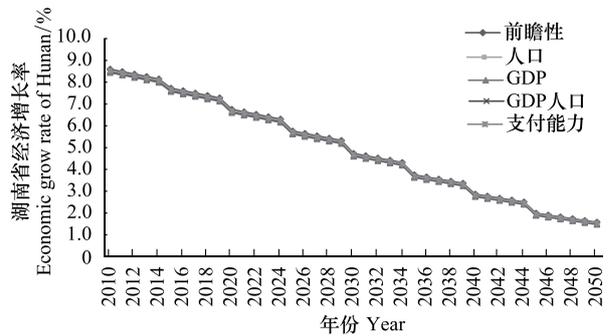


图4 湖南减排控制率下经济增长路径

Fig. 4 The variation path of economic growth rate under the control of carbon emission reduction rate in Hunan

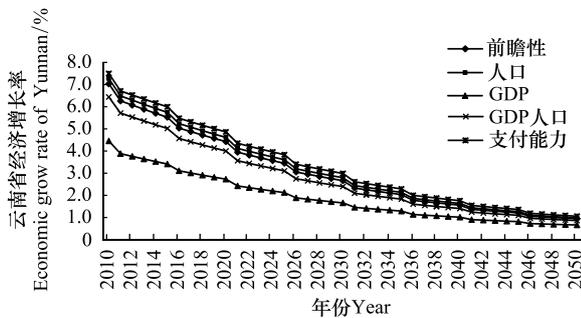


图5 云南减排控制率下经济增长路径

Fig. 5 The variation path of economic growth rate under the control of carbon emission reduction rate in Yunnan

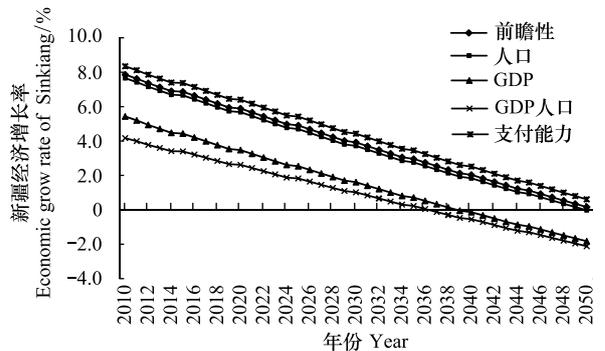


图6 新疆减排控制率下经济增长路径

Fig. 6 The variation path of economic growth rate under the control of carbon emission reduction rate in Sinkiang

比较各种减排配额给定的路线,我们可以发现保持5个区域在减排过程中的经济增长始终存在正的增长率的只有按前瞻性原则实现碳配额分配。

3.2 减排控制率下的能源碳排放路径

在配额目标约束下获得了未来各区域不同原则下的能源消费路径的情况,乘以碳排放系数与各区域的能源结构可获得各区域不同原则下的能源碳排放路径。结果如图7—10所示。

从图7可以看出,上海在减排约束下各原则的能源碳排放整体呈下降趋势。在GDP原则和前瞻性原则下的碳排放高峰年在2032年和2030年达到高峰后随之下降,这反映了我国东部在正常情况下的碳排放将出现

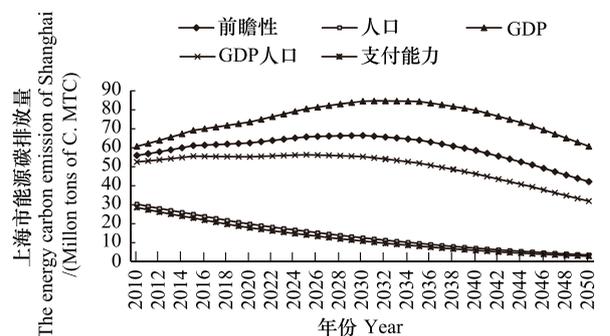


图7 上海市减排控制率下能源碳排放路径

Fig. 7 The variation path of energy carbon emission under the control of carbon emission reduction rate in Shanghai

库茨涅兹曲线。注意到 Wang, Zhu, Peng (2013) 得到在最优排放下中国碳排放的峰值出现在 2032 年^[11], 而上海在减排情况下才能实现 3032 年高峰, 可见由上海为代表的东部地区碳减排任务较重。

另一个代表性省份湖南的碳排放量变化如图 8 所示, 几乎所有分配原则, 都导致湖南省在 2033 年附近出现碳排放高峰, 这与预期相一致。不过前瞻性原则下碳排放量相对较高。实际上这种情况在山西更为突出 (图 9)。

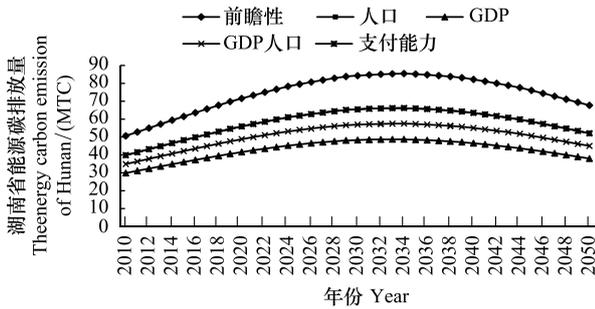


图 8 湖南省减排控制率下能源碳排放路径

Fig. 8 The variation path of energy carbon emission under the control of carbon emission reduction rate in Hunan

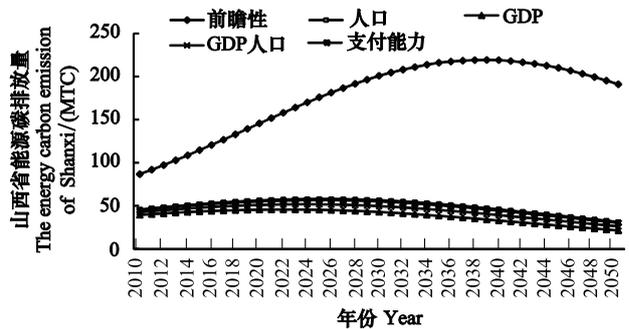


图 9 山西省减排控制率下能源碳排放路径

Fig. 9 The variation path of energy carbon emission under the control of carbon emission reduction rate in Shanxi

从图 10 和图 11 可以看出, 受能源消费量影响, 云南和新疆的能源碳排放路径较为相似, 两者都是在 2036 年左右到达碳排放量高峰后下降, 并且各原则下的碳排放路径排列顺序也相近。两省相对能源消费量, 碳排放量变化不大, 表明西部地区在未来发展过程中, 主要是依靠减少能源投入使得经济总量减少来达到碳排放量减少的目的, 而非依靠提高技术进步降低能源强度来减少碳排放量。西部地区的碳减排, 是中国碳减排的难点, 特别是考虑到这些地方少数民族地区, 经济发展正属于起步阶段, 如何控制他们的碳减排, 需要进一步探索。

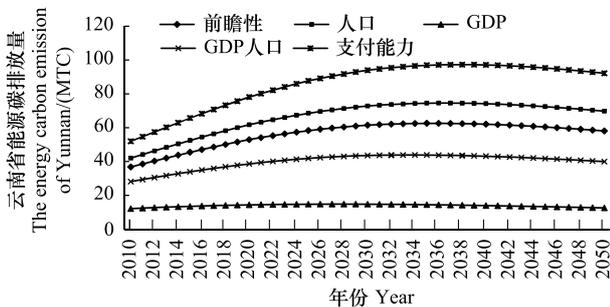


图 10 云南省减排控制率下能源碳排放路径

Fig. 10 The variation path of energy carbon emission under the control of carbon emission reduction rate in Yunnan

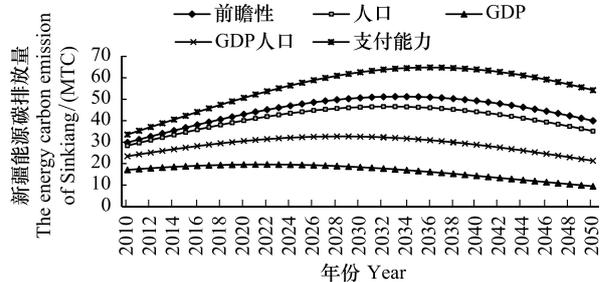


图 11 新疆自治区在不同排控制率下能源碳排放路径

Fig. 11 The variation path of energy carbon emission under the control of carbon emission reduction rate in Sinkiang

4 结论与讨论

改进 Nordhaus 的减排模型, 本文在碳排放动力学模型的基础上, 以追求社会福利最大化为目标, 以累积碳排放量受五个原则分配的配额量为约束条件构建减排控制率模型, 通过对该模型的求解, 获取各区域五个配额分配原则下的减排控制率。

通过减排控制率计算发现:

(1) 各区域在不同原则下减排控制率不同, 不同区域有适合其区域发展的分配原则。东部地区大部分省份在 GDP 原则分配的配额约束下减排控制率最小, 西部地区大部分省份在支付能力原则下减排控制率最小,

而中部地区则在人口原则下减排控制率较小的省份较多。

(2)各区域在前瞻性原则和 GDP 人口原则配额约束下的减排控制率差距较小,其中在前瞻性原则下差距最小,前瞻性原则下的减排速率差距最小,其他原则下的减排速率东西部差距都较大。所以,前瞻性原则是适合中国推进的碳减排配额方法。

此外,区域碳排放权分配和减排控制率的问题是个复杂的问题,对此还需要进一步研究的主要问题有:

(1)设置更多的情景模拟不同原则下中国各省市自治区的初始碳排放权分配。文章模拟的终端控制条件为:社会福利最大化的同时,各省域累积碳排放量小于各原则下的配额量。受目标总配额的设定影响,这一约束条件使得全国有些省份自治区在完成这一目标时,可能存在经济后期变为负增长的现象。可以设置不同的目标情景,对不同配额原则进行对比分析。

(2)进行不确定性分析。文章可进一步进行不确定性分析,以期使得结果更符合现实条件。

致谢:感谢华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室为本文提供了数据支持,感谢王铮课题组对本文细致的交流探讨。感谢中国科学院科技政策与管理科学研究所吴静副研究员对本文提供的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Zhu Y B, Wang Z. An optimal balanced economic growth and abatement pathway for China under the carbon emissions budget. *Computational Economics*, 2014, 44(2): 253-268.
- [2] Nordhaus W D. *Managing the Global Commons*. Cambridge: The MIT Press, 1994.
- [3] Nordhaus W D, Pop D. What is the value of scientific knowledge? An application to global warming using the PRICE model. *Energy Journal*, 1997, 18: 1-45.
- [4] Pizer W A. The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty. *Resource and Energy Economics*, 1999, 21(3-4): 255-287.
- [5] 崔丽丽,王铮,刘扬. 中国经济受 CO₂减排率影响的不确定性 CGE 模拟分析. *安全与环境学报*, 2002, 2(1): 39-43.
- [6] 沈子荣. 中国单位 GDP 碳减排率的计算与比较. *国际经济合作*, 2012, (4): 70-73.
- [7] 丁仲礼,段晓男,葛全胜,张志强. 2050 年大气 CO₂浓度控制:各国排放权计算. *中国科学*, 2009, 39(8): 1009-1027.
- [8] 姜克隽,胡秀莲,刘强,庄幸. 2050 低碳经济情景预测. *环境保护*, 2009, (24): 28-30.
- [9] 付雪,王桂新,彭新哲. 哥本哈根会议目标下中国行业实际减排潜力研究——基于 2007 年中国能源—碳排放—经济投入产出表的最优化模型. *复旦学报:社会科学版*, 2012, (4): 114-124.
- [10] 林伯强,孙传旺. 如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标. *中国社会科学*, 2011, (1): 64-76.
- [11] Wang Z, Zhu Y B, Peng Y M. Carbon emissions trends with optimal balanced economic growth of China and the USA and some abatement options for China. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(6): 991-1004.
- [12] Nordhaus W D. Optimal greenhouse-gas reductions and tax policy in the "DICE" model. *American Economic Review*, 1992, 83(2): 313-317.
- [13] Barro, R J., Shalaimatin, X 2002, *Economic Growth*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- [14] 吴静,马晓哲,王铮. 我国省市自治区碳排放权配额研究. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 481-488.