

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. 生态学报 2011, 31(15): 4405-4414.

Liu H Y, Wang Z, Ma X Z. Predictions of net carbon emissions based on the emissions and forest carbon sinks in Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4405-4414.

排放与森林碳汇作用下云南省碳净排放量估计

刘慧雅¹, 王 铮^{1,2,*}, 马晓哲³

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062;

2. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190; 3. 河南省科学院地理研究所, 郑州 450052)

摘要:以云南省为例, 用马尔科夫链计算能源结构, 在经济增长模型基础上基于动态最优化理论估计能源消费碳排放, 并基于 CO₂ FIX 模型计算云南省森林碳汇, 预测在能源消费碳排放和森林碳汇共同作用下的从 2008 到 2050 年碳净排放量。研究发现云南省能源消费碳排放量和碳净排放量曲线都呈“倒 U”型, 在 2035 年达到高峰, 高峰值分别为 129.71 MtC 和 118.89 MtC; 在森林碳汇中, 原有森林的碳汇作用在现在和未来一段时间内处于主导地位, 但新造林有着巨大的碳汇潜力, 所以在保护原有森林的同时要植树造林, 从生态学角度抵消碳排放; 森林碳汇只能减少小部分碳排放, 更主要的是改善云南省的能源结构, 加快技术进步速度, 开发水电等新能源, 从根本上减少温室气体的排放。

关键词:碳排放; 森林碳汇; 原有森林; 新造林

Predictions of net carbon emissions based on the emissions and forest carbon sinks in Yunnan Province

LIU Huiya¹, WANG Zheng^{1,2,*}, MA Xiaozhe³

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

2 Institute of Policy and Management Science, CAS, Beijing 100190, China

3 Institute of Geographical Science, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China

Abstract: This study calculated the energy structure of Yunnan Province by using a Markov chain, estimated carbon emissions from energy consumption based on an economic growth model and dynamic optimization theory, computed forest carbon sinks based on the CO₂ FIX model, and predicted net carbon emissions from 2007 to 2050. Furthermore, we analyzed the factors which influenced carbon emission reduction and the contribution of forest carbon sinks, and then investigated a low-carbon economy. The results showed that the curves of carbon emissions from energy consumption and net carbon emissions were an inverted "U" shape, with a peak value of 129.71 MtC in 2035 and 118.89 MtC in 2035. The percentage of coal in the energy structure of Yunnan decreased year by year, while oil, natural gas and non-carbon energy increased slowly, with the non-carbon energy component increasing the fastest among the three thus allowing the energy structure of Yunnan to probably reach a steady state in 2042. In addition, according to emissions targets required in China, an annual decreasing rate of energy intensity of 2.7% is needed. However, our models show that the predicted energy intensity of Yunnan does not reach these targets in the short term. This means that it is currently not possible to achieve the goal of our nation. If the non-carbon energy component in Yunnan's energy structure is improved to 20% in 2050, carbon emissions can be reduced by 12.3% and this is greater than the amount of carbon sinks in 2050, but lower than its peak. The construction of carbon sinks and the use of non-carbon energy are very effective ways to reduce carbon emissions. In

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-305-4); 国家自然科学基金(41071089)

收稿日期: 2010-12-18; 修订日期: 2011-06-13

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

terms of forest carbon sinks, the original forest plays a valuable role now and in the immediate future. But, any new forest also has a huge potential as a carbon sink, so afforestation should be encouraged while protecting the original. However, new forests have a growing period, so they cannot reach their full capacity as a carbon sink for many years. Therefore, from the standpoint of carbon sink accumulation, the original forest sinks are still an important part, and are irreplaceable. But these trees can only offset a portion of the provinces' total carbon emissions; what is more important is to radically reduce greenhouse gas emissions by improving the energy structure of the economy, by increasing the speed of technological progress being made and developing hydropower and other (in particular renewable) energy sources. It can also be shown that the per capita net carbon emissions have the same trend along with total carbon emissions, with a peak of 2.18 tC/person in 2035. The amount of per capita emissions is 1.17 tC globally, 1.12 tC in China, and 5.18 tC in the United States. However, in 2009 the amount of per capita emissions is 0.77 tC in Yunnan, below the national level, and is far lower than that of the United States. By 2020, the amount of per capita net carbon emissions will likely be 1.40 tC in China, and that of Yunnan, 1.69 tC, which is 0.29 tC more than that for the whole country.

Key Words: carbon emissions; forest carbon sinks; original forest; new forest

哥本哈根会议指出,气候变化是当今面临的最重大挑战之一,而二氧化碳是温室气体的主要成分。全球二氧化碳浓度已经从 1700 年的 $280 \mu\text{mol/mol}$ 升至 2006 年的 $381 \mu\text{mol/mol}$ ^[1]。根据 IPCC 国家温室气体清单指南,能源消费、工业生产、农业生产和废弃物处理等过程中都会排放温室气体,但我国 90% 的碳排放来自能源消费中化石燃料的燃烧,因此研究能源消费的碳排放是碳排放研究的重点。很多学者已经在二氧化碳排放领域展开研究。王铮、朱永彬等^[2]计算各省碳排放系数,将全国碳排放量分摊到各省,研究各省的碳排放。朱永彬、王铮等^[3]在产业结构稳定条件下预测了全国的能源消费和碳排放高峰值,得出全国的能源消费和碳排放 EKC 曲线。胡初枝等^[4]构建中国碳排放的因素分解模型,定量分析经济规模、产业结构和碳排放强度对碳排放的贡献。朱勤等^[5]通过对 STIRPAT 模型的扩展,应用岭回归方法计量分析人口、消费及技术因素对碳排放的影响。但以上碳排放的研究领域主要在全国层次上展开,而中国经济发展不均衡,存在区域性差异,如果将减排的任务目标具体到省份上,还需要研究区域碳排放。

云南省地处中国西南,是一个多民族的高原山区省份,在地理结构上具有特殊性。云南省的经济相对落后,但是煤炭丰富、水电蕴藏量大。另一方面,云南省森林资源居于全国第二,森林覆盖量大,使得碳汇相对丰富。2010 年云南获批的 CDM 项目居全国首位,260 个 CDM 项目,这将为我国未来带来更多的碳减排抵消额,对云南及全国的经济的发展有着重要的政治经济意义,而有着丰富森林资源的云南,森林碳汇无疑是 CDM 的一项重要内容。马晓哲、王铮^[6]计算了中国各省市自治区(除台湾省)的森林碳汇,得出内蒙古、云南和四川等省是重要的碳增汇区域。而森林集中了陆地约有 85% 的生物量,是陆地生态系统中最大的碳库^[7]。因此在研究碳减排问题时,有必要结合 CDM 项目进程,考虑森林碳汇。所以本文以云南省为例,基于动态最优化理论计算云南省的能源消费,分析中国区域碳排放;并且用 CO_2FIX 模型计算云南省的森林碳汇,研究用碳汇抵消部分碳排放后云南省的碳净排放量。

1 研究方法

本文以云南省为例,估算能源结构,运用动态最优化理论估算最优经济增长率,预测未来到 2050 年的能源消费量,然后通过 IPCC 中碳排放量的基本估算方法计算能源消费的碳排放量。另外本文还运用 CO_2FIX 模型,用森林面积数据和树种参数计算的森林碳汇。基于本文的计算,将考虑进碳汇抵消作用的碳排放量叫作碳净排放量,从宏观概念上研究云南省区域碳排放。本文的主要方法如图 1 所示。

1.1 基础模型

Moon 和 Sonn^[8]将能源投入引入生产函数,构造了 Cobb-Douglas 生产函数,从而研究能源强度与经济产出之间的关系。朱永彬等^[3]在此基础上进一步将劳动力和技术进步引入生产函数,假设社会总人口为 N ;就

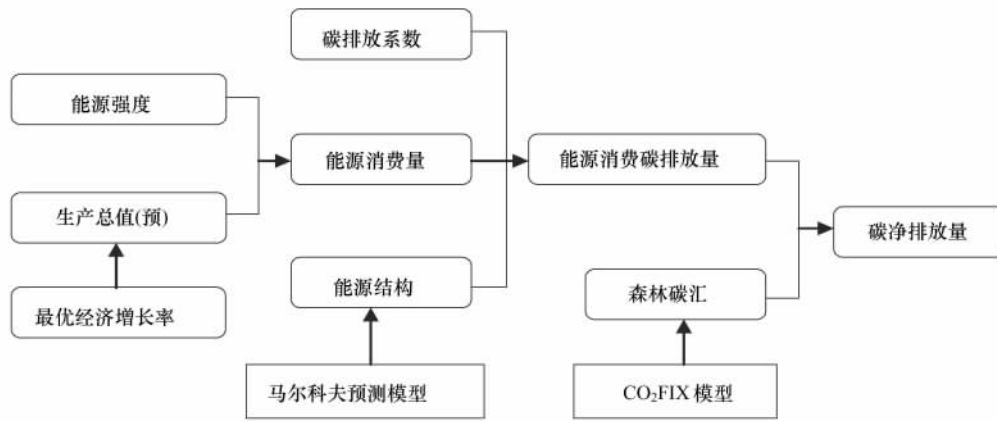


图1 云南省碳净排放计算流程图

Fig.1 Flow chart used for computing net carbon emissions in Yunnan

业人口占总人口的比重,即劳动参与率为 ω ;未来人口平均年增长率为 n 。改进后的生产函数如式(1):

$$Y(t) = (A_0 e^{vt})^{1/\alpha} \tau(t)^{(1-\alpha)} (\omega N_0 e^{nt})^{\gamma/\alpha} K(t) \quad 0 < A < 1 \quad (1)$$

根据动态最优控制理论,得到在消费与产出同步增长即不发生经济危机时的经济最优增长率如式(2):

$$g = (n - \frac{\rho}{\sigma}) + \frac{1}{\sigma}(\varepsilon - \theta)(A_0 e^{vt})^{1/\alpha} \tau(t)^{(1-\alpha)} (\omega N_0 e^{nt})^{\gamma/\alpha} \quad (2)$$

式中, $Y(t)$ 为总产出,按2000年价格计算的国内生产总值,单位为亿元; $E(t)$ 为能源投入,单位为Mote; $K(t)$ 为资本投入,按2000年价格计算,用永续存盘法计算出的资本形成总额,单位为亿元; $L(t)$ 为就业人员数,单位为万人; b 为外生给定的世界市场能源价格; σ 为风险厌恶系数, σ^{-1} 即消费的跨时替代弹性; $\varepsilon = 1 - \delta$,其中 δ 为折旧率; ρ 为时间偏好。

能源强度为能源消费量与GDP的比值。根据1990、1992、1995、1997、2000、2002年共6个年份的投入产出表拟合,得到能源强度呈指数下降趋势,因此将能源强度关于时间的函数关系表述为式(3):

$$\tau_t = \tau_0 e^{vt} \quad (3)$$

式中, τ_t 为第 t 年的能源强度, τ_0 为初始年份的能源强度, v 为能源强度增长率。

显然一个区域能源消费的碳排放有两个动力因子:其一是经济增长消费的碳在增加碳排放,其二是技术进步降低能源强度,导致的碳排放减少。这里要特别强调的是,式(2)是保持产出与消费平衡经济不发生危机的最优增长率,偏离这个增长率,可能会触发经济危机。

1.2 能源消费碳排放计算模型

根据IPCC^[9]计算指南,通过云南省的能源消费量、能源结构和能源碳排放系数,第 i 年的能源消费的碳排放量计算公式如式(4):

$$A_i = \sum_{j=1}^3 E_i q_{ij} c_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, A_i 是第 i 年碳排放量, E_i 是第 i 年的能源消费总量, q_{ij} 是第 i 年 j 能源消费量在能源消费总量中的百分比, c_j 是 j 能源碳排放系数。

这里的碳排放系数为每单位标准油所释放的单位碳等价物。能源的碳排放系数主要取决于燃料的碳含量,因此能源的碳排放系数可以基于燃烧的燃料总量和燃烧中平均碳含量进行估算。本文采用朱永彬、王铮等^[3]根据IEA2005中1980—2005年各能源品种的消费量及其对应的碳排放量数据进行线性拟合,得出煤、石油、天然气的碳排放系数相对于各能源品种的碳排放系数,分别为1.0052、0.753和0.6173。

1.3 森林碳汇计算模型

内蒙古、黑龙江、云南以及四川等省是我国未来重要的森林碳增汇区。因此作为一个森林植被茂密的碳

汇大省,研究云南省的碳排放,必须计算它的碳汇。碳汇一般指从空气中清除二氧化碳的过程、活动和机制。在林业中主要是指植物吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被或土壤中,从而减少该气体在大气中的浓度。本文中的森林碳汇有两大来源:原有森林和新造林。本文用 CO₂FIX 目前最新版本 V3.2 估算森林碳汇。模型中,总固碳量计算公式如式(5):

$$C_{\text{total}}(t) = C_b(t) + C_s(t) + C_p(t) \quad (5)$$

式中, $C_b(t)$, $C_s(t)$, $C_p(t)$ 分别表示在时间 t 贮存于单位面积的活立木、土壤有机物以及木质产品中的碳量, $C_{\text{total}}(t)$ 表示单位面积碳汇总量,单位为 MgC/hm^2 。

但森林系统的含碳量不能直接表示森林碳汇量,因为森林残余物或木质产品的报废物作为生物质能燃烧时,是部分碳回到大气中去,因此森林碳汇量表示为式(6):

$$A = C_{\text{total}}(t) + C_{\text{bio}}(t) \quad (6)$$

式中, A 代表单位面积造林减少的大气碳总量, $C_{\text{bio}}(t)$ 表示单位面积内由于生物质能源的应用排放到大气中的碳量。

通过参数设定后, CO₂FIX 模型可以计算活立木、土壤、林产品的单位面积累计含碳量,森林生态系统的单位面积累计含碳总量和森林从大气中吸收的单位面积累计碳汇量。

2 参数估计

2.1 能源强度

根据式(3)得到 v 值,找到能源强度之间的关系,很容易根据历史能源强度数据估算出未来的能源强度。首先对式(3)进行对数变换:

$$\ln(\tau_t) = \ln(\tau_0) + vt + \varepsilon \quad (7)$$

式中, $\ln(\tau_0)$ 设为 β , ε 为误差项,对式(7)进行回归分析,统计结果如表1所示。线性回归统计结果的拟合程度很好, $R^2 = 0.978$,都在 10^{-10} 的数量级上显著。拟合得出能源强度增长率为 -0.02 。

2.2 经济变量

用改进后的生产函数来获得未来经济平稳增长路径下的排放量,首先对模型的参数进行估计。对式(1)进行对数变换得到线性统计模型,如式(8)。

$$\ln(Y(t)/E(t)) = \ln(A_0) + \alpha \ln(K(t)/E(t)) + \gamma \ln(L(t)) + vt + \varepsilon \quad (8)$$

式中, $\ln(A_0)$ 设为 a_0 , α 为资本产出弹性, γ 为劳动力产出弹性, ν 为全要素生产率的增长率, ε 为误差项。

本文采用云南省的历史生产总值作为经济产出数据,并且以2000年的价格为基准进行转换。资本存量没有直接的数据,本文采用 Goldsmith^[10] 永续盘存法对资本存量进行核算,当期资本总量 = 上期资本总量 - 折旧 + 当期资本增量。张军^[11] 等计算得到各省的折旧率为 9.6%,因此本文将云南省的资本折旧率取 9.6%。

劳动力数据来自中国统计年鉴的云南省的年底就业人员数。能源消费量数据来自《中国能源统计年鉴》。各经济变量取 1989—2007 年的时间序列作为样本数据。运用 SPSS 软件对模型进行回归分析,计算出经济最优增长模型参数,结果如表2所示。

通过统计模型进行线性回归,方程的拟合程度很好, $R^2 = 0.989$,都在 0.2% 的水平上显著。拟合得出资本的产出弹性 α 为 0.57,劳动力的产出弹性 γ 为 1.376,能源的产出弹性为 0.43。回归出全要素生产率 A 的增长率 ν 值为 -0.027 。

表1 能源强度参数估计

参数 Parameter	参数值 Value	T	显著性水平 Sig.
β	-3.897	-117.78	0
ν	-0.020	-9.87	0

表2 生产函数参数估计

参数 Parameter	参数值 Value	T	显著性水平 Sig. / %
a_0	-8.732	-4.532	0.137
ν	-0.027	-4.407	0.187
α	0.570	6.503	0.001
γ	1.376	5.323	0.018

参数 σ 和 ρ , 可以通过模型中的实际数据进行校准。估算出的 1978—2007 年的最优经济增长率必须与实际的经济增长率相似。根据这个约束条件调节参数 σ 和 ρ , 取 $\sigma = 1.7$, $\rho = 0.026$ 。

令式(2)对能源强度的导数为零, 得出最优消费增长率达到最大时所对应的能源强度和各参数存在如式(9)的函数关系。

$$\tau_m = \frac{\varepsilon(1-\alpha)}{\theta} \quad (9)$$

式中, τ_m 为 1978—2007 年的能源强度最大值。已知 α 和 ε , 可以求出参数 θ 。

2.3 森林碳汇系统

森林碳汇由两部分组成, 新造林和原有森林。云南省的新造林树种包括云南松、思茅松、杉木、栎类、针阔混和阔叶混, 原始森林树种还包括高山松、桦木和硬阔类。由于各种林分单位面积的碳汇作用不同, 原有森林分为幼龄、中龄和近熟 3 种树龄。

据第六次全国森林资源清查数据^[12], 原有森林林分面积如表 3, 全国无林地面积共计 5732.32 万 hm^2 , 其中云南省的无林地面积共 421.81 万 hm^2 , 居全国第二, 仅次于内蒙古的无林地面积。根据我国的林业发展规划, 到 2020 年森林覆盖率要达到 23% 以上。本文假设我国从 2005 年开始造林, 全国年造林面积 250 万 hm^2 。那么到 2020 年, 新造林面积达到 4000 万 hm^2 , 到 2027 年可完成全国无林地造林 5732.32 万 hm^2 。在假设条件下, 将全国的年造林面积按各省无林地面积比例分配给各省, 再将其平均分配至各造林树种, 得到各树种未来每年的年造林面积。

表 3 云南省原有森林面积

树种 Species	幼龄 Young forest	中龄 Half-mature forest	近熟 Near-mature forest
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	77265	44385	22732
思茅松 <i>Pinus kesiya</i>	7200	8640	6563
高山松 <i>Pinus densata</i>	1440	1920	1768
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	15830	15360	2400
栎类 <i>Quercus</i>	79027	28153	23643
桦木 <i>Birch</i>	4800	1920	2057
硬阔类 <i>Hardwood species</i>	10080	9593	11200
针阔混 <i>Needle broadly mix</i>	38713	21753	12343
阔叶混 <i>Broadleaf mix</i>	63980	25907	13867

从模型方法可以看出, CO_2FIX 模型将森林分成 4 个模块计算碳功能, 生物量模块、土壤模块、林产品模块和生物质能源模块。计算森林单位面积碳汇时, 需要在各个模块设定参数。

生物量模块中, 需要设定树种的木质密度、枝叶根的年更新率、生长期和采伐期等参数。根据多种数据来源, 本文筛选计算出所需参数如表 4。树种的碳含量均采用 IPCC 缺省值 0.5 MgC/Mg 干质量。

表 4 生物量模块使用参数

Table 4 The parameters of Biomass module

树种 Species	木材干质量密度 Wood density (dry mass) / (Mg 干质量/ m^3)	枝/叶/根年更新率 Branch/Foliage/ Root turnover rate	生长期/月 Growing season	轮伐期 Rotation/ a	CAI 及干、枝、叶、根净 生产力参考文献 Data source references of CAI and net productivity of stem, branch, foliage, root
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	0.483	0.05/0.33/0.1	3—10	60	[13, 14]
思茅松 <i>Pinus kesiya</i>	0.454	0.05/0.33/0.1	3—10	60	[13, 14]
高山松 <i>Pinus densata</i>	0.413	0.05/0.33/0.1	3—10	60	[13, 14]
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.307	0.05/0.33/0.1	3—11	25	[15, 16]
栎类 <i>Quercus</i>	0.676	0.05/1.00/0.1	3—10	45	[17, 18]
桦木 <i>Birch</i>	0.541	0.05/1.00/0.1	4—10	45	[19, 14]
硬阔类 <i>Hardwood species</i>	0.598	0.05/0.33/0.1	3—11	35	[20, 14]
针阔混 <i>Needle broadly mix</i>	0.405	0.05/0.50/0.1	3—10	45	[20, 18]
阔叶混 <i>Broadleaf mix</i>	0.482	0.05/0.50/0.1	4—11	40	[21, 22]

土壤模块中的气象数据,包括月平均气温和月平均降水量,采用来自 World Climate^[23]网站的气候数据,云南省内多个城市气象数据的平均值。本文考虑土壤模块中初始的枝、干、叶均假设为零,即默认为上述无林地均为长期无人种植。其余参数采用默认参数。林产品该模块中,软件提供了高、低两组参数,考虑到我国省份的实际情况,选用低处理以及低回收效能的参数。生物质能源模块,本文研究均采用模型提供的默认参数。根据上述设定,可以计算出树种单位面积碳汇量。

3 计算及分析

3.1 能源结构预测

本文采用《中国能源统计年鉴》中云南省各个年份的数据,求出了 1991—2005 年的能源结构。其中煤为煤炭和焦炭数据和,油为原油、燃料油、汽油、煤油和柴油之和,天然气即天然气,非碳为电力数据。利用 1991—2005 年数据预测出云南省未来从 2008 年到 2050 年主要年份能源结构如表 5 所示。从表中可以看出,在目前趋势下,2015 年之前云南省能源结构有很小的变化,之后便逐渐趋于稳定,仅非碳能源在未来结构演变中呈上升趋势。从能源消费结构预测表中,还可看出富碳能源煤比低碳能源石油和天然气下降速度更快,说明低碳能源所占比例增加,平均碳排放系数减小。化石燃料中富碳能源比重减小,低碳能源比重上升,使化石能源平均碳排放系数减小。

3.2 碳排放量预测

考虑到云南省人口和经济增长水平在全国处于中等水平,接近于全国的平均趋势,因此本文中云南省的人口用全国人口增长率来计算。通过模型求得 2008 年到 2050 年的能源强度、最有经济增长率、GDP、能源消费量和碳排放量结果如表 6 所示。从表中可以看出,能源强度逐渐降低,这说明生产单位 GDP 的经济效益需要的能源逐年降低。由于能源强度的降低,以及其他因素的影响,经济最优增长率预测数据从 2008 年开始逐年减小,但整个国民经济的生产总值逐年上升。而能源消费量和碳排放量都呈现先增多后减少的现象,在 2035 年同时达到高峰,高峰值分别为 148.76 Mtoe 和 129.71 MtC。

表 5 云南省能源消费结构主要年份预测结果

Table 5 Predicted energy consumption structure of Yunnan Province during 2008—2050 / %

年份 Year	煤 Coal	石油 Oil	天然气 Natural gas	非碳 Non-C
2010	80.89	8.72	1.10	9.29
2015	78.60	9.51	2.07	9.82
2020	78.43	9.48	2.06	10.02
2025	78.39	9.48	2.06	10.07
2030	78.38	9.47	2.06	10.09
2035	78.38	9.47	2.06	10.09
2040	78.38	9.47	2.06	10.09
2045	78.38	9.47	2.06	10.09
2050	78.38	9.47	2.06	10.09

表 6 2008—2050 云南省经济变量和碳排放预测结果

Table 6 Predicted economic variable and carbon emissions of Yunnan Province during 2008—2050

年份 Year	能源强度 ^① Energy intensity /(toe/万元)	最优经济增长率 Optimal economic growth rate/%	生产总值/亿元 GDP	能源消费量 ^② Energy consumption /Mtoe	碳排放量 ^③ Carbon emissions /MtC
2010	0.0127	10.90	5119	65.06	56.90
2015	0.0115	8.45	7894	91.06	79.45
2020	0.0104	6.47	11085	115.80	100.98
2025	0.0094	4.70	14282	134.93	117.65
2030	0.0086	3.26	17105	146.07	127.36
2035	0.0078	2.09	19268	148.76	129.71
2040	0.0070	1.20	20695	144.54	126.03
2045	0.0064	0.55	21454	135.65	118.27
2050	0.0058	0.05	21636	123.93	108.05

①toe = 1 吨标准油; ②Mtoe = 10⁶ 吨标准油; ③MtC = 10⁶ 吨碳

为了更直观的研究能源消费和碳排放的关系,本文做出了云南省能源消费和碳排放变化趋势图,如图 2

所示。

碳排放系数决定了单位能源的碳排放量,各种能源碳排放系数不同,因此,有必要从能源结构的角度研究碳排放。这里计算了各种能源的碳排放,分别研究煤、石油和天然气的碳排放,如图3。可以看出煤的碳排放量远远高于石油和天然气碳排放量,和能源消费总量的碳排放量相差不大,并且煤的碳排放曲线和碳排放总量相似,高峰时间也出现在2035年,高峰值为101.66 MtC。相反,云南省石油和天然气碳排放量都很少,石油在13 MtC以下,而天然气碳排放量在3 MtC以下,和煤的碳排放量相比是微乎其微的。这个结果和云南省的能源结构有直接关系。云南省油气资源贫乏,正处于高速发展的阶段,工业、建筑业等对能源的需求量很大,短期内改变煤炭为主的能源结构几乎不可能。对于云南省来说,它大量的水力资源,据估计,云南省水力资源理论蕴藏量为10364万kW,占全国蕴藏量的15.3%,居全国第三。因此可以考虑加大水力资源开发来缓解云南省的碳排放。但是云南省水力资源开发可能引出某些生态问题,例如怒江大坝就引起的众多的争议。从表5可以看出,以水电供应为代表的非碳能源供应,如果按照现有的发展模式,很可能只能停留在10%左右,这样云南的碳排放会居高不下。如果把水力资源开发量提高,若到2050年,水电供应达到总能源的20%,并用于替代煤,这样可能减少12.34 MtC碳排放,从气候保护的角度看,这个目标很值得采纳。

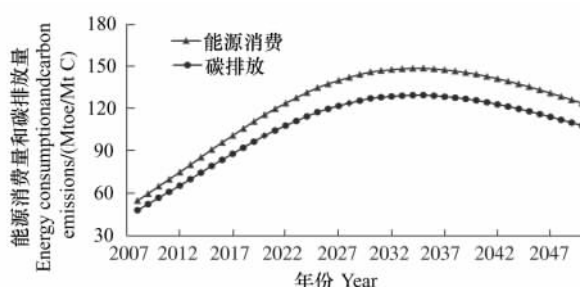


图2 2007—2050年能源消费和碳排放预测趋势图

Fig. 2 Estimated carbon emissions and gross energy consumption of Yunnan Province during 2007—2050

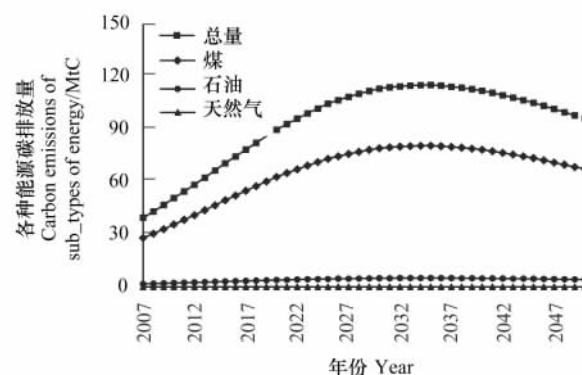


图3 2007—2050年各种能源碳排放预测趋势图

Fig. 3 Estimated carbon emitted by sub-types of energy during 2007—2050

这里要强调指出,尽管在保持目前的能源结构趋势下,云南省碳排放达到峰值后会变得下降缓慢,但是云南省的能源强度和碳排放强度是持续下降的。国务院会议决定到2020年中国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%到45%,即每年下降2.7%到3%。表7给出了云南省碳排放强度及其相关量的计算结果。数据显示,以2008年为基年,云南省的平均碳排放强度下降率在未来10a平均为1.51%,预测结果和国家的实际目标有一定的距离。云南省的碳排放强度下降率先增大后减小,在2036年为1.79%,开始超过经济增长率1.66%。与2005年相比求得,为保持云南省经济平稳增长,到2020年云南省能源强度仅可下降26.62%。因此云南省要达到2020年乃至2050年的减排目标,开发非碳能源是必不可少的,除非放弃经济增长。

表7 2008—2050年云南省碳排放强度和碳排放强度下降率

Table 7 Estimated carbon emissions intensity and declining rate of carbon emissions intensity of Yunnan Province during 2008—2050

年份 Year	碳排放强度 Carbon emissions intensity /(MtC / $\times 10^6$ 元)	碳排放强度下降率 Declining rate of carbon emissions intensity / %
2015	1.038	1.501
2020	0.959	1.615
2025	0.881	1.702
2030	0.807	1.759
2035	0.738	1.791
2040	0.674	1.802
2045	0.615	1.797
2050	0.562	1.778

3.3 碳净排放量计算

虽然云南省的能源消费加快碳排放,但是云南省森林资源丰富,它的森林碳汇可以抵消一部分碳排放。森林碳汇分为两部分,原有森林碳汇和新造林碳汇。在这里分别对原有森林碳汇、新造林碳汇和森林碳汇总量进行计算分析。

图4显示了原有森林、新造林以及森林整体的年碳汇量。原有森林年碳汇量整体呈下降趋势,而新造林年碳汇量先是逐渐上升至最高值,然后稳定一段时间后缓慢下降,到2050年和原有森林的年碳汇量持平,降至最低点。容易看出,在2006年至2027年起始阶段原有森林碳汇是森林碳汇的主要构成。但是原有森林年碳汇量随时间逐年下降,而新造林年碳汇相反,因此在2028年,新造林年碳汇量为7.65 MtC,超过原有森林年碳汇量6.91 MtC。

图5显示了原有森林、新造林以及森林整体的以2005年为起始点的累积碳汇量。容易看出,2015年之前云南省森林累积碳汇主要以原有森林为主,而新造林的碳汇能力微乎其微。但在2015年之后新造林在森林累积碳汇中开始承担重要责任,2030年之后原有森林的累积碳汇逐渐稳定。到2050年原有森林累积碳汇量增至368.53 MtC,新造林的累积碳汇量增至216.55 MtC。

从增长趋势上看,新造林有很大碳汇潜力,因此植树造林在未来云南省碳减排工作中将会做出巨大的贡献,但是由于新造林有砍伐期,它的碳汇能力也不会一直持续下去。从碳汇累计量上看,原有森林的碳能力仍是森林碳汇的重要组成部分,对于现在抑或未来的作用都是不可替代的。所以植树造林可以增加森林碳汇;而维护现有的生态资源,维持生态平衡,在发展低碳经济过程中也是一定要坚持的。

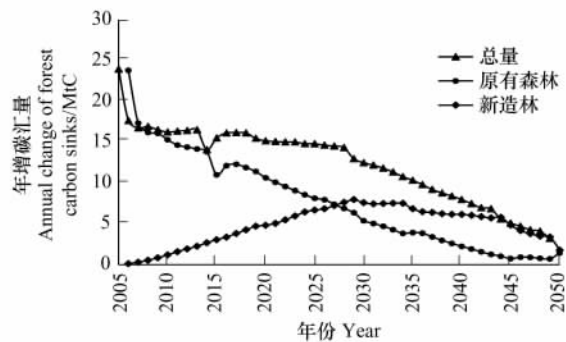


图4 云南省森林年增碳汇量

Fig. 4 Estimated annual Change of forest carbon sinks of Yunnan Province

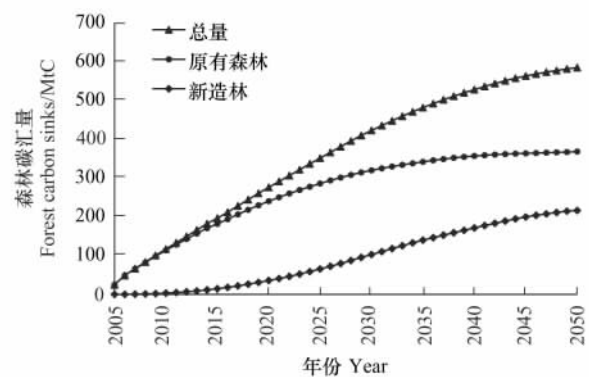


图5 2005—2050年云南省碳汇累积结果图

Fig. 5 Estimated cumulative forest carbon sinks of Yunnan Province during 2005—2050

本文做出了能源消费和碳汇同时作用下的云南省碳净排放和人均碳净排放的排放趋势图,研究云南省的排放与碳汇作用下的碳排放情况,以及基于人口规模下的人均排放量。

图6中加入森林碳汇的碳净排放量和碳排放量有着相同的趋势,仍然随时间先上升后下降。综合上文的结果说明云南省碳排放不会随着经济增长持续增加,会在政策环境下和特定阶段后发生变化,不再和经济增长同步,而是略有降低,因此云南省的碳排放存在EKC曲线。结果显示经森林碳汇调整后的碳排放量仍然在2035年达到高峰,高峰值为118.89 MtC;森林碳汇作用在近几年内能抵消一定量的碳排放。

图7显示,云南省的人均排放量和云南省碳排放总量有相同的趋势,也是先增加后减少,人均碳排放量在2031年达到高峰,为2.408 tC/人,人均碳净排放量在2035年达到高峰,为2.186 tC/人。据世界银行的报告,2009年世界人均碳排放量为1.17 tC/人,中国人均碳排放量为1.12 tC/人,而美国人均碳排放量为5.18 tC/人。2009年云南人均碳排放量为1.136 tC/人,略高于全国水平,远远低于美国人均碳排放量。到2020年,朱永彬、王铮等^[3]计算的全国人均碳净排放为1.4 tC/人,而云南省的人均碳净排放为1.69 tC/人,较全国平均高出0.29 tC/人。云南省的人均排放量和全国情况接近,因此研究云南省的碳排放问题对我国今后将碳

减排任务具体到各省份的工作有着重要的意义。

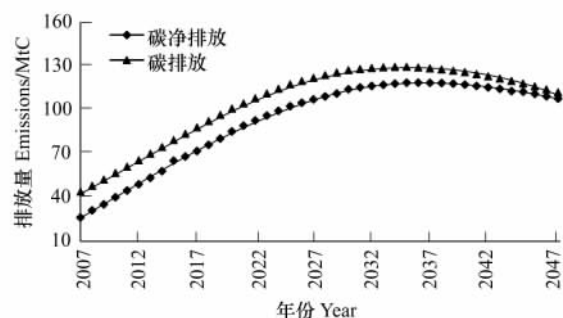


图6 2007—2050 年加入碳汇作用的云南省碳净排放量

Fig. 6 Estimated net carbon emissions of Yunnan Province by adding carbon sinks during 2007—2050

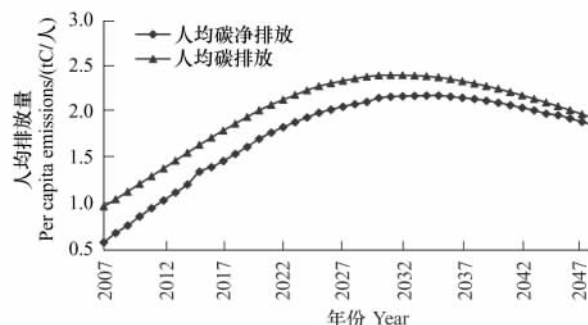


图7 2007—2050 年云南省人均碳净排放量

Fig. 7 Estimated per capita net carbon emissions of Yunnan Province during 2007—2050

4 结论

本文将能源消费碳排放转化为最优化控制问题,基于动态最优化理论估算云南省的经济最优增长率,最终预测未来到2050年能源消费碳排放量。本文运用CO₂FIX模型估算云南省未来到2050年的森林碳汇。结合以上工作,能计算在能源消费碳排放和森林碳汇同时作用下的云南省的碳净排放量。通过模拟分析,本文得出以下结论。

(1) 回归出能源强度增长率为-0.02,和朱永彬,王铮等^[3]计算的全国能源强度增长率-0.0423相差比较大。因此作为西部地区的省份之一,云南省的节能减排技术相对全国水平较为落后。

(2) 能源结构预测结果显示,其中煤的百分比逐年下降,而石油、天然气和非碳能源以很小的幅度逐年上升,其中非碳能源上升速度相对较快,能源结构在2042年达到稳定状态。

(3) 云南省的能源消费和能源消费碳排放趋势图高峰时间都在2035年出现,高峰值分别为148.76 Mtoe和129.71 MtC。云南省的碳排净放,同样在2035年出现高峰,高峰值为118.89 MtC。云南省的碳排放存在EKC曲线。

(4) 数据表明,新造林有着巨大碳汇潜力,意味着云南的CDM项目在再造林方向的可行性,这对云南乃至国家在碳交易市场中有着重要的经济意义。但是在未来的一段时间内原始森林仍然是主要的碳汇源,保护原有森林依然是碳减排工作的重要任务。

(5) 在能源结构整个变动过程中,云南煤炭的所占百分比一直在78%以上,而云南省的潜力能源水电确维持在10%,不再上升。但是假设在2050年云南省的水电资源充分发挥效用,提高至20%,结果可以减少12.34 MtC的碳排放量。这个数据高于云南省2050年的碳汇值3.24 MtC,低于碳汇峰值16.79 MtC,与2008年到2050年的碳汇平均值12.06 MtC持平。这说明,加强新能源的使用是实现碳减排的持久而有效的途径。

本文在计算碳净排放排放量过程中,只考虑了森林碳汇,没有考虑水泥的碳排放。总的来讲,利用云南省的天赋资源水电改善能源结构,发展旅游产业优化产业结构;植树造林,保护原有森林,都是云南省在未来碳减排工作。

References:

- [1] Levine M D, Aden N T. Global carbon emissions in the coming decades: the case of China. Annual Review of Environment and Resources, 2008, 33(11): 19-38.
- [2] Wang Z, Zhu Y B. Study on the status of carbon emission in provincial scale of China and countermeasures for reducing its emission. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, 23(2): 109-115.
- [3] Zhu Y B, Wang Z, Pang L, Wang L J, Zou X P. Simulation on China's economy and prediction on energy consumption and carbon emission under optimal growth path. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(8): 935-944.

- [4] Hu C Z, Huang X J, Zhong T Y, Tan D. Character of carbon emission in China and its dynamic development analysis. *China Population Resources and Environment*, 2008, 18(3): 38-42.
- [5] Zhu Q, Peng X Z, Lu Z M, Yu J. Analysis model and empirical study of impacts from population and consumption on carbon emissions. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(2): 98-102.
- [6] Ma X Z, Wang Z. Estimation of Provincial forest carbon sink capacities in Chinese mainland. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(9): 883-889.
- [7] Wang S H, Zhang M Z, Zhao P A, Chen J X. Modelling the spatial distribution of forest carbon stocks with artificial neural network based on TM images and forest inventory data. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 998-1008.
- [8] Young-Seok M, Yang-Hoon S. Productive energy consumption and economic growth: an endogenous growth model and its empirical application. *Resource and Energy Economics*, 1996, 18(2): 189-200.
- [9] United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007-The Fourth IPCC Assessment Report (Synthesis Report)*. UN: IPCC, 2007.
- [10] Goldsmith R W. A perpetual inventory of national wealth//oldsmith R W, ed. *Studies in Income and Wealth*. New York: National Bureau of Economic Research, 1951.
- [11] Zhang J, Wu G Y, Zhang J P. The Estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. *Economic Research Journal*, 2004, (10): 35-44.
- [12] Ministry of Forestry in the People's Republic of China. *Forest Resources Statistics of China (1999-2003)*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 75-137.
- [13] Forest of Yunnan Editor Committee. *Forest of Yunnan*. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1986: 79-172.
- [14] Feng Z H, Wang X K, Wu G. Biomass and Productivity of China Forest Ecological System. Beijing: Science Press, 1999: 187-187.
- [15] Chen C X. Studies of compilation of standard yield table of seedling stand of *Cunninghamia lanceolata* in general product area in Fujian. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2004, 31(4): 1-14.
- [16] Chen C Y, Liao L P, Wang S L. *Cunninghamia Lanceolata Plantations Ecology*. Beijing: Science Press, 2000: 134.
- [17] Ministry of Forestry in the People's Republic of China. *Forest of Liaoning*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1991: 92.
- [18] Liu Y C, Wu M Z, Guo Z M, Jiang Y X, Liu S R, Wang Z Y, Liu B D, Zhu X L. Biomass and net productivity of *Quercus variabilis* forest in Baotianman Natural Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 569-574.
- [19] Forest of China Editor Committee. *Forest of China (Volume 3)*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000: 1338.
- [20] Zhan Y S, Ao X Y, Lin F, Shao J F, Huang X F. Studies on the productivity of the secondary *Castanopsis fargesii* and *Schima superba* stands in Jiangxi Province. *Forest Research*, 1998, 11: 618-622.
- [21] Chinese Academy of Sciences. *Populus*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1959: 25-30.
- [22] Zhang X Q, Meng Y Q, Liu M R, Zhang F X. Research on the net productivity and nutrient accumulation of the natural forest of *Populus cathayana* × *P. simonii*. *Forest Research*, 1995, 8: 219-296.
- [23] World Climate. World climate. [2009-12-23]. <http://www.worldclimate.com/>.

参考文献:

- [2] 王铮, 朱永彬. 我国各省区碳排放量状况及减排对策研究. *中国科学院院刊*, 2008, 23(2): 109-115.
- [3] 朱永彬, 王铮, 庞丽, 王丽娟, 邹秀萍. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测. *地理学报*, 2009, 64(8): 935-944.
- [4] 胡初枝, 黄贤金, 钟太洋, 谭丹. 中国碳排放特征及其动态演进分析. *中国人口资源与环境*, 2008, 18(3): 38-42.
- [5] 朱勤, 彭希哲, 陆志明, 于娟. 人口与消费对碳排放影响的分析模型与实证. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(2): 98-102.
- [7] 汪少华, 张茂震, 赵平安, 陈金星. 基于 IM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟. *生态学报*, 2011, 31(4): 998-1008.
- [11] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000. *经济研究*, 2004, (10): 35-44.
- [12] 中华人民共和国林业部. *全国森林资源统计 (1999-2003)*. 北京: 中国林业出版社, 2005: 75-137.
- [13] 《云南森林》编写委员会. *云南森林*. 昆明: 云南科技出版社, 1986: 79-172.
- [14] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. *中国森林生态系统的生物量和生产力*. 北京: 科学出版社, 1999: 187-187.
- [15] 陈昌雄. 福建杉木一般产区实生林标准收获表的编制研究. *福建林业科技*, 2004, 31(4): 1-14.
- [16] 陈楚莹, 廖利平, 汪思龙. *杉木人工林生态学*. 北京: 科学出版社, 2000: 134-134.
- [17] 中华人民共和国林业部. *辽宁森林*. 北京: 中国林业出版社, 1991: 92-92.
- [18] 刘玉萃, 吴明作, 郭宗民, 蒋有绪, 刘世荣, 王正用, 刘保东, 朱学凌. 宝天曼自然保护区栓皮栎林生物量和净生产力研究. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 569-574.
- [19] 《中国森林》编辑委员会. *中国森林 (第三卷)*. 北京: 中国林业出版社, 2000: 1338-1338.
- [20] 詹有生, 敖向阳, 林飞, 邵锦峰, 黄晓风. 江西次生栲树木荷林生产力的研究. *林业科学研究*, 1998, 11: 618-622.
- [21] 中国林业科学研究院. *杨树*. 北京: 中国林业出版社, 1959: 25-30.
- [22] 张小泉, 孟永庆, 刘命荣, 张复兴. 五台青杨天然林净生产力与营养元素积累的研究. *林业科学研究*, 1995, 8(3): 219-296.