

云南少数民族地区能源碳排放预测及减排路径研究^{*1}

杨红娟，程元鹏

（昆明理工大学，昆明 650093）

摘要：基于少数民族地区碳排放系统中部分信息不完全、样本小的问题，本文选择灰色理论中 GM（1，1）模型预测碳排放。预测结果表明：2020 年末，云南省少数民族地区碳排放量较 2012 年将增长一倍。选取人口、人均 GDP、第三产业比率、城市化率和能源消耗强度建立 STIRPAT 模型，分别运用岭回归法和偏最小二乘法排除多重共线性的干扰对模型进行回归。两种回归方法的结果较为相似，得到：人口是云南少数民族地区碳排放增长的最大驱动因素，其次是城市化率和人均 GDP，而能源消耗强度和第三产业比率能够有效的控制碳排放的增长。针对实证分析的结果，本文提出相应的减排路径。

关键词：少数民族地区；碳排放预测；岭回归；偏最小二乘回归；减排路径

一、引言

温室效应逐年增强，自然灾害频发，严重阻碍了人类的发展。IPCC 第四次报告^[1]表明，温室气体的过度排放是导致温室效应最主要原因，其中二氧化碳约占 75 %。位于中国西南边睡的云南是一个多民族的省份，少数民族地区的发展在整个云南发展战略中有着举足轻重的地位。工业化进程的加快，能源消耗不断提升，导致碳排放量急剧增加，严重威胁当地脆弱的生态系统。科学的预测云南少数民族地区碳排放，有助于准确判断碳排放量的变动趋势，并通过对其影响因素的分析研究该地区的减排路径。

自低碳经济这一概念提出以来，国内外众多学者纷纷开始探寻如何实现低碳发展，其中关于碳排放的研究成为焦点，研究内容主要包括碳排放预测和碳排放影响因素，根据碳排放量的变动趋势来研究其减排路径。Mckibbin 等^[2]认为精准的碳排放预测有利于我们确定未来经济发展速度和结构。赵息^[3]、杜强^[4]、王磊^[5]等利用过往碳排放数据分别预测了 2020 年中国碳排放量，2011—2020 年中国各省区碳排放量以及天津未来碳排放量。碳排放系统是一个涉及经济、生态、人类发展等多项领域的复杂系统，很多碳排放预测方法需要充足的样本才能提高模型的精确度。而少数民族地区样本容量较少且碳排放系统信息不完全，灰色理论中 GM（1，1）模型恰好可以解决这一问题。灰色理论由我国著名学者邓聚龙教授 1982 年提出，经过多年的发展和改进，其在预测中应用极其广泛。王正新等^[6]提出了无偏 GM（1，1）模型及其参数优化方法，通过数值模拟和实例分析，证明了模型精度得到显著提高；任晓松^[7]等利用 GM（1，1）模型预测了中国 2011—2020 年工业碳排放，为未来工业碳排放的减排提供了数据；吴振信等^[8]利用 GM（1，1）模型对北京市 2011—2015 年碳排放强度进行了预测，为节能减排提供依据。对于碳排放影响因素的研究，Ehlich 等率先提出 IPAT 模型进行影响因素分析，后续又演变为 ImPACT 模型和 STIRPAT 模型。Richard York^[9]等对这三种模型进行了比较分析，总结出各自的优缺点。众学者认为 STIRPAT 模型是经典、有效的碳排放

¹ **作者简介：**杨红娟（1966—），女，昆明理工大学教授，博士生导师，研究方向：可持续发展；程元鹏（1991—），男，昆明理工大学研究生，研究方向：可持续发展。

***基金项目：**国家自然科学基金项目“基于生态文明的少数民族农户低碳行为模式研究—以云南为例”（71263030），项目负责人：杨红娟；国家自然科学基金项目“云南少数民族贫困地区生态文明建设的关键因素和有效路径研究”（71463034），项目负责人：杨红娟。

影响因素分析模型，它通过人口、财富、技术这三个指标来研究人类活动与环境的关系，有效的弥补了其他模型无法分析非单调函数的缺陷。王宪恩等^[10] 利用 STIRPAT 模型对吉林省的碳排放进行了情景预测，根据预测结果分析各因素对峰值的影响，由此对吉林省发展次序提出了建议；张丽峰等^[11] 利用 STIRPAT 模型分析了人口、城市化结构、居民消费和经济规模对于北京碳排放的动态影响；马宏伟等^[12] 利用 STRPAT 模型研究了经济活动人口比重、人均 GDP、能源消费结构、城市化水平、人均消费和对外贸易对我国人均二氧化碳排放的影响。

通过以上研究发现，不同的方法可以很好的分析碳排放系统对应的模块，但并不能对整个碳排放系统进行很好的研究。一个地区的碳排放系统往往是复杂多变的，组合模型可以更完整的分析碳排放系统，所得到的结果也更有说服力。本文利用 GM(1, 1) 和 STIRPAT 组合模型对云南少数民族地区能源碳排放进行了短期预测，根据未来的变动趋势，分析了云南少数民族地区能源碳排放的影响因素，以此来研究该地区的减排路径。研究成果为云南少数民族地区“十三五”期间低碳经济的发展提供了理论依据，同时也是对少数民族地区生态文明建设研究文献的重要补充。

二、研究区域

少数民族地区是指以少数民族为主聚集生活的地区。云南是我国少数民族最多的省份，全国 56 个民族均有分布，其中人口在 5000 人以上的民族有 26 个。截止 2012 年末，云南少数民族人口占云南省总人口的 33.37%。云南少数民族分布呈现“大杂居，小聚居”的特点，全省共有 8 个少数民族自治州：楚雄彝族自治州、红河哈尼族彝族自治州、文山壮族苗族自治州、西双版纳傣族自治州、大理州白族自治州、德宏傣族景颇族自治州、怒江傈僳族自治州、迪庆藏族自治州。2012 年云南少数民族自治州 GDP 为 2756.56 亿元，占云南省的 31.46%，截止 2012 年末其基本情况如表 1 所示，本文选取 8 个少数民族自治州来研究云南少数民族地区碳排放现状，并进行预测和减排路径分析。

表 1 2012 年末云南少数民族地区基本情况表

	土地面积 (万平方千米)	年末总人口 (万人)	生产总值 (亿元)	规模以上工业 企业单位数(个)	工业综合能源消耗量 (万吨标准煤)
楚雄州	2.93	271.9	570.02	181	182.55
红河州	3.29	456.1	905.43	226	811.38
文山州	3.22	356.1	478.02	132	247.01
西双版纳州	1.97	114.9	232.64	51	20.18
大理州	2.95	349.3	672.09	207	267.78
德宏州	1.15	122.9	201.00	83	133.81
怒江州	1.47	53.8	74.94	20	52.56
迪庆州	2.39	40.5	113.63	20	26.43
自治州合计	19.37	1765.50	3247.97	920	1741.7
云南省合计	39.41	4659	10309.47	3211	6125.91

云南省八个自治州中面积最大的为红河州，在人口、经济、工业化程度方面也高于其他自治州，所有指标远高于相对落后的怒江州，说明云南少数民族地区发展水平极不平衡。八个自治州的累计面积占全省面积的 49.15%，人口占全省人口的 37.89%，生产总值占全省生产总值的 31.50%，规模以上工业企业单位数占全省规模以上工业企业单位数的 28.6%，工业

能源消耗量占全省工业能源消耗量的 28 . 43 % 由此可见云南少数民族地区范围广、人口多，但是其发展水平相对落后。在未来的发展中，少数民族地区的发展关系到整个云南的发展，少数民族地区的生态保护更关系到整个云南的生态文明建设。

三、碳排放预测

（一）数据来源

本文涉及的碳排放为能源消耗所排放的二氧化碳，由于云南省少数民族地区能源消耗的主体来源于工业，故用云南省八个自治州工业能源消耗量代表该地区的能源消耗水平。以此为基准，计算出云南省八个自治州能源消耗产生的二氧化碳排放量，其中一次能源包括原煤、焦炭、汽油、煤油、柴油，二次能源为电力。基础数据来源于《云南省能源统计年鉴》^[13]，一次能源碳排放系数来源于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[14]，二次能源碳排放系数来源于《省级温室气体清单编制指南》（发改办气候[2011] 1041 号）。

（二）碳排放的计算

目前计算碳排放的方法主要有直接系数法、碳足迹算法、投入产出法、生命周期法，计算能源碳排放一般采用直接系数法，该方法可以很好的反应不同能源对于温室效应的影响，计算结果也较为准确。

故本文采用直接系数法计算碳排放，其中一次能源碳排放计算公式如下：

$$C_1 = \sum_{i=1}^5 E_i \times f_i \times p_i \times o_i \tag{1}$$

公式（1）中 C_1 代表一次能源碳排放总量； E_i 代表云南省八个自治州第 i 种一次能源的消耗量； f_i 代表第 i 种一次能源的标煤折算系数； p_i 代表第 i 种一次能源的碳排放系数； o_i 代表第 i 种一次能源的碳氧化率； $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表原煤、焦炭、汽油、煤油、柴油。

表 2 一次能源碳排放系数

能源名称	标煤折算系数	二氧化碳排放系数	碳氧化率
原煤	0.7143 kgce/kg	1.9003 kg - CO2/kg	0.94
焦炭	0.9714 kgce/kg	2.8604 kg - CO2/kg	0.93
汽油	1.4714 kgce/kg	2.9251 kg - CO2/kg	0.98
煤油	1.4714 kgce/kg	3.0179 kg - CO2/kg	0.98
柴油	1.4571 kgce/kg	3.0959 kg - CO2/kg	0.98

云南少数民族地区二次能源消耗主要为电力，且云南省属于南方电网区域，其碳排放计算公式如下：

$$C_2 = e \times q \quad (2)$$

公式（2）中 C_2 代表二次能源消耗碳排放总量； e 代表电力的消耗量； q 代表该区域的电力碳排放系数。

表 3 二次能源（电力）碳排放系数

电网区域	二氧化碳排放（kg/kw. h）
华北	1.246
东北	1.096
华东	0.928
华中	0.801
西北	0.977
南方	0.714
海南	0.917

云南少数民族地区能源碳排放（ C ）由一次能源碳排放（ C_1 ）和二次能源碳排放（ C_2 ）构成，其公式如下：

$$C = C_1 + C_2 \quad (3)$$

利用上述公式，根据表 2、表 3 的系数，计算出云南少数民族地区 2005-2012 年碳排放量如表 4 所示：

表 4 云南少数民族地区 2005 - 2012 年碳排放量（万吨）

地区	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
楚雄	392.7206	411.1814	453.3798	495.5781	501.3991	517.3604	498.1195	533.9847
红河	1732.194	1982.443	2229.142	2475.84	2757.208	2923.449	3259.464	3305.421
文山	192.9205	245.8554	289.4741	333.0928	360.3557	378.1166	440.1484	554.3411
西双版纳	41.2181	32.63799	30.75627	28.87455	30.91272	28.62132	29.11883	35.23396

地区	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
大理	385.551	451.5055	427.5233	403.5412	381.3728	415.4583	485.9121	588.2299
德宏	81.35948	93.09263	108.7085	124.3244	131.5134	164.779	202.3079	232.997
怒江	33.02305	68.18748	64.03811	59.88874	55.70297	53.11777	56.61216	102.2645
迪庆	26.50413	34.06328	34.28362	34.50397	30.65122	36.67925	40.14193	57.31352
合计	2885.491	3318.967	3637.306	3955.644	4249.116	4517.581	5011.825	5409.786

由于 2007 年云南省各地区能源消耗数据缺失，故用 2006 年和 2008 年的平均值作为 2007 年的数值。根据上表所知，云南少数民族地区累计碳排放总体呈现上升趋势。其中楚雄州由 392.7206 万吨增长到 533.9847 万吨，增长率为 35.97%，年均增长率为 4.49%；红河州由 1732.194 万吨增长到 3305.421 万吨，增长率为 90.82%，年均增长率为 9.6%；文山州由 192.9205 万吨增长到 554.3411 万吨，增长率为 187.34%，年均增长率为 16.27%；西双版纳州由 41.2181 万吨下降到 35.233 万吨，增长率为-21.80%，年均增长率为-2.22%，其呈现 U 型变化，拐点在 2008 年；大理州由 385.551 万吨增长到 588.2299 万吨，增长率为 52.57%，年均增长率为 6.22%；德宏州由 81.35948 万吨增长到 232.997 万吨，增长率为 186.37%，年均增长率为 16.21%；怒江州由 33.02305 万吨增长到 102.2645 万吨，增长率为 209.68%，年均增长率为 17.52%；迪庆州由 26.50413 万吨增长到 57.31352 万吨，增长率为 116.24%，年均增长率为 11.65%；历年累计碳排放量由 2885.491 万吨增长到 5409.786 万吨，增长率为 87.48%，年均增长率为 9.39%。截止 2012 末云南少数民族地区碳排放量最大的是红河州，最小的是迪庆州，二者约相差 56 倍；增长速度最快的是怒江州，速度最慢的是西双版纳州，二者相差接近 20 个百分点。由此可见，云南省少数民族各自治州碳排放变动模式差异较大。

（三）GM（1.1）模型

1. 模型构建。灰色系统理论将随机因素看成是一定范围内变化的灰色量，用一组时间序列数据建立系统，把原始性数据进行 m 次累加生成规律性强的累加生成序列，之后再对模型进行 m 次累减还原成预测值。当取值为 1，并作一次累加生成系统序列，即建立了 GM（1.1）模型。碳排放问题是一个复杂的系统，具有信息不完全、样本较少的特点，而灰色系统理论恰好可以解决小样本预测问题。因此，本文利用 GM（1.1）模型预测云南少数民族地区碳排放具有合理性。

具体计算步骤如下：

第一步：令 $x^{(0)}$ 为建模序列

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) ;$$

第二步：对模型进行一次累加

$$x^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x^{(0)}(j)$$

$$\text{得到 } x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) ;$$

第三步：计算出微分方程

$$\frac{dx^{(1)}(k)}{dk} + b_1 x^{(1)}(k) = b_2 ;$$

第四步：令发展系数为 a , b 为灰色作用量, $\hat{a}$ 为待估参数向量, 即 $\hat{a} = (a, b)^T$, 则灰微分方程的最小二乘估计参数列满足

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$$

$$\text{其中 } Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(1) \\ x^{(0)}(2) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} ;$$

第五步：解模型方程

得到模型的时间响应序列为 $\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a}; (k = 1, 2, \dots, n);$

第六步：进行累减，还原预测值

$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) (k = 1, 2, \dots, n)。$

根据表里的数据简历云南少数民族地区和历年累计碳排放灰色系统 GM(1, 1) 模型：

$$C(t+1) = 40039.418025e^{0.080045t} - 37153.926871 \\ (t = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

公式中（4）C 为 t + 1 年度云南少数民族地区碳排放总量，其中 2005 年为原始年，即 2005 年时，t = 0，C（1）代表 2005 年云南少数民族地区碳排放总量。

根据这一模型分别计算出 2005 — 2012 年每年碳排放的预测值，如表 5 所示：

表 5 云南少数民族地区碳排放预测数据

年份	碳排放实际值 (万吨)	碳排放预测值 (万吨)	残 差 (万吨)	相对误差 (%)
2005	2885.491154	2885.491154	0	0
2006	3318.96711	3336.699152	17.73204	0.534264
2007	3637.305634	3614.764163	-22.5415	-0.61973
2008	3955.644159	3916.001821	-39.6423	-1.00217
2009	4249.116143	4242.343227	-6.77292	-0.1594
2010	4517.581204	4595.880409	78.29921	1.733211
2011	5011.824672	4978.879739	-32.9449	-0.65734
2012	5409.785596	5393.796455	-15.9891	-0.29556

2 . 模型精度检验

(1) 平均相对误差检验。将预测值和实际值的差值称为残差，一般通过它来衡量模型的精度，最常用的指标是平均相对误差。具体的方法为计算出该组模型的平均相对误差，根据平均相对误差所处的精度等级区间，来判断模型的精度等级。经计算得：

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 \Delta_k, \text{ 其中 } \Delta_k = \left| \frac{\varepsilon_k}{x_k^{(0)}} \right| \text{ 为 } k \text{ 点的相对误差；}$$

$$\bar{\Delta} = 0.625\% < 1\%, \text{ 模型的预测精度为一级。}$$

(2) 后验差比值检验。

$$x_0 \text{ 均方差: } S_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{X}]^2};$$

$$\text{残差的均方差: } S_2 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n [\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}]^2};$$

$$\text{后验差比值: } v = \frac{S_2}{S_1}; \text{ 小误差概率: } p =$$

$$\{P | \varepsilon(k) - \bar{\varepsilon} | < 0.6745 S_1\};$$

$$\text{计算得: } v = \frac{S_2}{S_1} = \frac{37.51569}{848.200684} = 0.0442; p =$$

$$\{P | \varepsilon(k) + 2.73244 | < 569.524\} = 1。$$

因为：值小于 0.35，而 p 值大于 0.95，所以模型的预测精度为一级。

上述两种检验结果都表明该模型预测精度为一级，所以该模型可以很好的预测云南少数民族地区中短期碳排放。因此，本文利用该预测模型对云南少数民族地区 2013 — 2020 年碳排放进行预测，结果如图 1 所示：

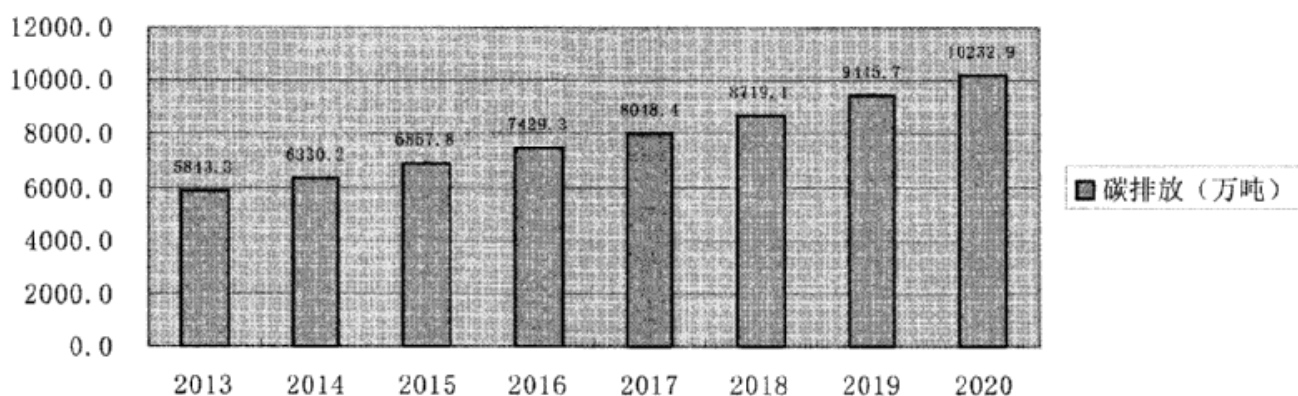


图1 2013 – 2020 年云南少数民族地区碳排放预测值 (2013 – 2020)

由预测的结果可以看出,如果按照现有的模式发展,到2020 末云南少数民族地区碳排放将达到102 犯.9 万吨,接近2012 年的两倍,年平均增长率为8.29 %。未来的十年是云南省工业化快速发展的十年,而且云南少数民族地区碳排放的增长速度明显快于实际 GDP 的增长速度,因此需要研究云南少数民族地区的减排路径,为该地区的可持续发展建言献策。

四、影响因素分析

(一) STIRPAT 模型

STIRPAT 模型是经典的碳排放影响因素分析模型,其在 IPAT 模型的基础上加入随机干扰项对遗漏项进行了假设检验以及对于非线性关系函数仍然可以很好的反映各影响因素驱动力的大小。STIRPAT 是一种随机回归影响模型,即:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (5)$$

公式(5)中a 为比例常数项,b、c、d 为三个因素的指数项,e 为误差项。

本文根据云南少数民族地区发展特点,在已有研究成果的基础上,利用 STIRPAT 模型构建碳排放与其影响因素关系的计量模型:

$$I = aP^b A_1^{c_1} A_2^{c_2} T_1^{d_1} T_2^{d_2} \quad (6)$$

公式(6)中环境影响(I)表示碳排放量,人口因素(P)代表总人口(P),经济因素(A)包括人均

GDP(A₁)、第三产业比率(A₂),技术因素(T)包括城市化率(T₁)、能源消耗强度(T₂)。为了构建线性方程,在公式两边同时取对数,将公式(6)转换为对数形式:

$$\ln I = a + b \ln P + c_1 \ln A_1 + c_2 \ln A_2 + d_1 \ln T_1 + d_2 \ln T_2 + e \quad (7)$$

公式（7）中 a 为公式（6）的对数项， e 为随机误差项， b 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 均为模型参数。

（二）数据处理

公式中 5 个自变量的数据均来源于历年《云南省统计年鉴》^[15]、《云南省能源统计年鉴》。其中为了消除通货膨胀的影响，人均 GDP 根据《云南省统计年鉴》中不变价格转换指数，转换为以 2005 年为基期的实际人均 GDP；能源消耗强度按前述转换后的 GDP 进行计算。相关变量的数据如表 6 所示：

表 6 各变量初始数据

年份	人口 (万人) P	人均 GDP (元/人) A1	第三产业 比例 (%) A2	城市化率 (%) T1	能源消耗强度 (吨标准煤/万元) T2	碳排放总量 (万吨) I
2005	1690.1	6351.535	40.8392	25.8860	1.092602615	2885.491
2006	1701.4	6667.400	34.2548	27.0366	1.026285914	3318.967
2007	1709.2	7006.217	34.0398	28.6450	0.997054219	3637.306
2008	1719	7387.642	35.0111	30.0989	0.963623669	3955.644
2009	1729	7302.980	37.2534	31.2146	0.978589096	4249.116
2010	1745.9	7529.736	36.9882	31.6914	0.989117216	4517.581
2011	1756.1	7938.895	35.8406	33.5118	1.069117853	5011.825
2012	1765.5	8213.000	35.4340	36.3013	1.20116822	5409.786

（三）实证分析

对公式（6）中的 5 个自变量以及因变量取对数，并进行两两相关性检验，得到变量间相关系数矩阵，如表 7 所示：

表 7 相关系数矩阵

	I	P	A1	A2	T1	T2
I	1.000	.988	.946	-.312	.991	.290
P	.988	1.000	.896	-.211	.980	.366
A1	.946	.896	1.000	-.581	.916	.085
A2	-.312	-.211	-.581	1.000	-.262	.185
T1	.991	.980	.916	-.262	1.000	.374
T2	.290	.366	.085	.185	.374	1.000

由上表可知，该组数据之间存在明显的多重共线性，如果对模型进行最小二乘回归，得到的回归系数误差较大。本文利用岭回归和偏最小二乘法分别对模型进行回归，排除多重共线性的影响，使模型回归结果更精确。

1. 岭回归分析。岭回归分析是一种专门分析共线性数据的有偏估计回归方法，其通过在正规方程中引入有偏常数来求回归估计量。虽然 R^2 可能会变小，但是显著性会明显提高，可以有效的解决多重共线性的问题。本文将岭回归系数 K 的范围设为 $0 \sim 1$ ，以 0.05 为间隔，选择大量不同的岭回归系数 K 估计模型的回归系数，并选取使模型系数趋于稳定的 K 值进行参数估计。具体的岭迹图 2 所示：

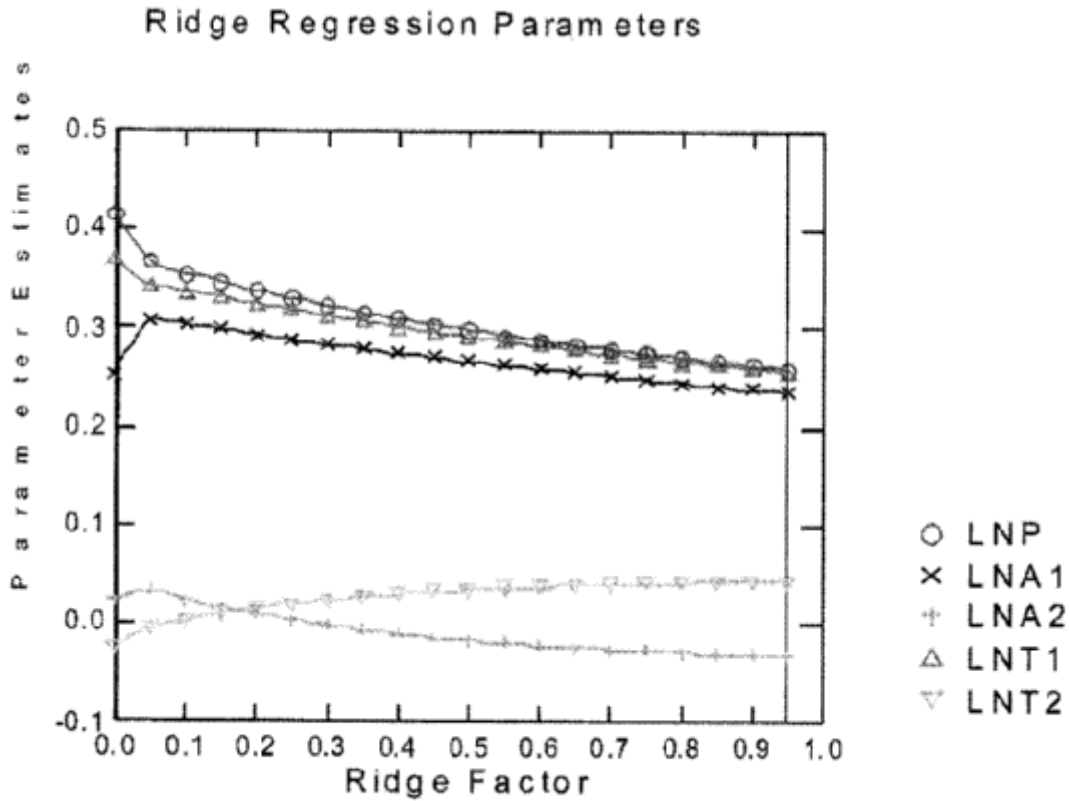


图 2 岭迹图

由上图可知，当 $K = 0.1$ 时，回归系数开始趋于稳定且各项指标均通过检验，得到对应的回归方程为：

$$\ln I = -34.430 + 4.787 \ln P + 0.514 \ln A_1 + 0.087 \ln A_2 + 0.637 \ln T_1 + 0.010 \ln T_2 \quad (8)$$

根据岭回归分析结果可知，人口、人均 GDP、第三产业比率、城市化率、能源消耗强度每增加 1% ，将分别引起碳排放量相应增加 4.787% 、 0.514% 、 0.087% 、 0.637% 和 0.010% 。由此可见，五种影响因素和云南少数民族地区碳排放量增长均呈正相关，其中最大的影响驱动因素是人口，其次为城市化率和人均 GDP，第三产业比率与能源消耗强度驱动作用微弱。

2. 偏最小二乘回归分析。偏最小二乘回归是通过最小化误差平方和找到一组数据的最佳函数匹配。它可以很好的解决文中数据存在的多重共线性、样本容量小等问题，得出的自回归系数可解释性更强。本文应用偏最小二乘法，对模型中的五个自变量和一个因变量进行线性回归，得到了前三个成分对碳排放量方差的累计解释能力 (R^2) 为 0.99163 ，第四个成分的解释能力 (R^2) 不足 0.05 ，故提取前三个成分即可，得到的偏最小二乘回归方程为：

$$\ln I = -39.905 + 5.600 \ln P + 0.426 \ln A_1 + 0.083 \ln A_2 + 0.700 \ln T_1 - 0.075 \ln T_2 \quad (9)$$

根据偏最小二乘回归分析结果可知，人口、人均 GDP、第三产业比率、城市化率每增加 1%，将分别引起碳排放量相应增加 5.600%、0.426%、0.083%、0.700%，而能源消耗强度每增加 1% 将使碳排放量减少约 0.075%。能源消耗强度与碳排放量呈负相关，其他四个因素均与云南少数民族地区碳排放量呈正相关，最终结果与岭回归分析结果较为相似。人口仍然是碳排放量增长的主要的驱动因素，城市化率和人均 GDP 其次，且城市化率驱动能力略高于人均 GDP 驱动能力，第三产业比率对碳排放量增长的驱动作用仍较微弱，能源消耗强度对于碳排放量有着微弱的抑制作用。

五、减排路径

（一）提升人口素质，弘扬少数民族淳朴自然观

根据两种方法的分析结果，人口皆为最主要的驱动因素。2005 年—2012 年这 7 年间，云南少数民族地区人口从 1690.1 万人增长到 1765.5 万人，人口增长速度过快导致整个社会的能源消耗量快速增长。人类行为是一切能源消费的出发点，同样也是碳排放的主要来源。在坚持“计划生育”这一基本的国策的同时，充分利用好少数民族敬天敬地，敬山敬树，敬畏生命，敬畏自然的特点，鼓励淳朴的生态观，对有利于生态文明建设的习俗发扬光大，对破坏当地生态系统的习俗进行改善。少数民族地区人们的生活与自然更加紧密，通过加大“低碳生活”的宣传力度，让当地群众了解二氧化碳等温室气体过量排放所带来的危害，提高人们的减排意识。

（二）统筹城乡发展，合理地推进城市化进程

地区发展必然会导致城市化水平的提高，但是不能盲目的扩大城市规模，应当坚持城市与农村和谐发展。城市化水平过快，导致乡村人口向城市迅速转移。城市人口迅速膨胀势必要求城市基础设施规模扩大，在这一过程中涉及大量的建筑工程和能源消费，导致该地区的碳排放量增加。与此同时，许多少数民族地区由于人力资源短缺，丰富的资源没有得到合理的利用而造成浪费，提高了二氧化碳的相对排放量。面对这种人口结构的变动，需要因地制宜，统筹兼顾。少数民族农村地区要大力推广沼气等清洁能源，提高供电普及率，逐步减少一次能源的使用量；城市地区要加大天然气的普及率，完善低碳公共交通体系，将低碳行为纳入社区考核标准，倡导低碳生活方式。让农村可以更好的为城市服务，与此同时城市也要带动周边的农村共同发展。

（三）加快产业结构转型，不断提高经济发展质量

两种方法中，人均 GDP 对于云南少数民族地区碳排放的影响均较大。这就警示我们近年来，虽然云南少数民族地区经济发展迅速，但是很大程度上是以牺牲环境而获得的。第三产业比率和能源消耗强度对于碳排放的促进微弱甚至有抑制作用，表明云南省少数民族地区必须坚持发展第三产业，充分的利用当地旅游资源优势，大力推行以“旅游业为中心”，带动周边服务业发展，做大做强少数民族文化产业。在工业方面，逐步减少高耗能产业，充分利用当地的水能、太阳能等新型能源，实现工业化和自然环境的和谐发展，从而更好地为第三产业服务。

参考文献：

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change [R] . Climate Change 2007 — Synthesis Report , 2007 : 1 - 2 .

-
- [2] WJ Mckibbin , D Pearce et al , Long term projections of carbon emissions [J] . International Journal of Forecasting , 2007 , 23 (4) : 637 — 653 .
- [3] 赵息, 齐建民, 刘广为. 基于离散二阶差分算法的中国碳排放预测[J] . 干旱区资源与环境, 2013 , 27 (1) : 63 — 69 .
- [4] 杜强, 陈乔, 杨锐. 基于 Logistic 模型的中国各省碳排放预测[J] . 长江资源流域与环境, 2013 , 2 (22) : 143 — 151 .
- [5] 王磊. 基于投入产出模型的天津市碳排放预测研究[J] . 生态经济, 2014 , 30 (1) : 52 — 56 .
- [6] 王正新, 党建国, 练郑伟. 无偏 GM (1 . 1) 模型模型及其应用[J] . 中国管理科学, 2011 , 19 (4) : 144 — 151 .
- [7] 任晓松, 赵国浩. 中国工业碳排放及其影响因素灰色预测分析—基于 STIRPAT 模型[J] . 北京交通大学学报(社会科学版), 2014 , 13 (4) : 15 — 24 .
- [8] 吴振信, 石佳. 基于 STIRPAT 模型和 GM (1 . 1) 模型的北京能源碳排放影响因素分析及趋势预测[J] . 中国管理科学, 2012 , 20 : 503 — 509 .
- [9] Richard York , Eugene A . Rosa , Thomas Dietz . STIRPAT , IPAT and ImPACT : analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J] . Eco - logical Economics , 2003 (46) : 351 — 365 .
- [10] 王宪恩, 王泳漩, 段海燕. 区域能源消费碳排放峰值预测及可控性研究[J] . 中国人口. 资源与环境, 2014 , 24 (8) : 9 — 16 .
- [11] 张丽峰. 北京人口、经济、居民消费与碳排放动态关系研究[J] . 干旱区资源与环境, 2015, 29 (2) : 8 — 13 .
- [12] 马宏伟, 刘思峰, 赵月霞等. 基于 STIRPAT 模型的我国人均二氧化碳排放影响因素分析[J] . 数理统计与管理, 2015 , 35 (2) : 243 — 253 .
- [13] 云南省统计局, 云南省工业和信息化委员会, 云南省能源统计年鉴(2013) [M] . 云南: 云南科技出版社, 2013 : 16 — 208 .
- [14] Eggleston H . S , Buendia L , et al . 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[M] . 日本: 日本全球环境战略研究所, 2006 : 5 — 25 .
- [15] 云南省统计局. 云南省统计年鉴(2013) [M] . 北京: 中国统计出版社, 2013 : 45 — 401 .