

DOI: 10.5846/stxb201305271199

赵先贵, 马彩虹, 肖玲, 郝高建, 王晓宇, 蔡文龙. 西安市温室气体排放的动态分析及等级评估. 生态学报, 2015, 35(6): 1982-1990.

Zhao X G, Ma C H, Xiao L, Hao G J, Wang X Y, Cai W L. Dynamic analysis of greenhouse gas emission and evaluation of the extent of emissions in Xi'an City, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1982-1990.

西安市温室气体排放的动态分析及等级评估

赵先贵^{1,*}, 马彩虹², 肖玲¹, 郝高建¹, 王晓宇¹, 蔡文龙¹

¹ 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062

² 陕西理工学院历史文化与旅游学院, 汉中 723001

摘要: 为了解西安市温室气体排放的动态规律和排放水平, 基于全球标杆的温室气体排放等级评价方法, 并采用国际公认的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》和基于IPCC的《省级温室气体编制指南》推荐的方法对西安市的温室气体排放进行了动态分析和排放等级评估。结果表明, 从1995年到2011年, 西安市温室气体排放呈快速上升趋势, 16年间温室气体排放量从 $1207.16 \times 10^4 \text{t}$ 上升为 $3934.17 \times 10^4 \text{t}$, 年均增高7.66%。增幅最高的是水泥温室气体(年均增高11.75%)、废弃物(8.77%)和能源(7.63%), 农业年均降低1.74%, 林业固碳年均增加3.56%。从温室气体构成看, 能源占80.13%—90.55%, 水泥占1.75%—7.49%, 农业占1.86%—8.01%, 林业固碳占-2.58%—-5.22%, 废物处理占7.52%—16.38%。可见能源消费的增加是导致西安市温室气体排放增长的主要原因, 林业碳汇能力有待提高。万元GDP温室气体排放不断降低, 说明西安市碳减排方面的科技进步在不断提高。人均、单位面积温室气体排放量和排放指数增速很快, 年均增幅分别达5.84%、7.66%和6.84%。西安市温室气体排放等级持续增高, 16年间从较低等级(I_c)上升为中下等级(II_a), 目前距应对气候变暖目标(I_b)已高出两个亚级, 温室气体排放增高的趋势不容忽视。

关键词: 温室气体; 温室气体排放; 评估; 气候变暖; 西安市

Dynamic analysis of greenhouse gas emission and evaluation of the extent of emissions in Xi'an City, China

ZHAO Xiangui^{1,*}, MA Caihong², XIAO Ling¹, HAO Gaojian¹, WANG Xiaoyu¹, CAI Wenlong¹

¹ College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

² College of History and Tourism, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China

Abstract: Global warming caused by greenhouse gas emission may cause severe environmental and social problems. Greenhouse gas accounting has become a hotly debated research topic. Internationally, some research has been undertaken on greenhouse gas accounting and some progress has been made; however, there are many shortcomings in this field. The main problem is that current research is mainly focused on carbon emission, particularly carbon emission from fossil fuel combustion, and is less involved in carbon fixation and ways of assessing regional carbon emission levels. In addition, the actual emission figures for greenhouse gases nationally and regionally in China were unknown. Although much research relates to carbon emission, the results are difficult to compare owing to inconsistent research methods and standards. Xi'an City, a historical and cultural tourist city in China, lies in the radiation center of the Guan-Tian economic zone. It is the economic, cultural, education, manufacturing and high-tech industry hub of northwest China. Xi'an will be an international metropolis in China in the near future. However, research relating to the greenhouse gas footprint in Xi'an is scarce. In this

基金项目: 陕西省软科学研究计划项目(2012KRM48); 国家社会科学基金项目(14XKS019); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-1214)

收稿日期: 2013-05-27; **网络出版日期:** 2014-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxg@snnu.edu.cn

paper, the author proposed an evaluation system for greenhouse gas (GHG) emission to the level of global benchmarking using the methods recommended by the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories and the Chinese Guidelines for Provincial Greenhouse Gas Inventories, and using this a dynamic analysis of GHG emission and evaluation of the extent of GHG emission in Xi'an City was performed. The results showed that, from 1995 to 2011, GHG emission showed a rapidly rising trend in Xi'an City, increasing from 1207.16×10^4 t to 3934.17×10^4 t, which represented an average annual increase of 7.66%. The largest increase was for cement (an average annual increase of 11.75%), waste (8.77%) and energy (7.63%) GHG. Agricultural GHG emission showed an annual reduction of 1.74%, while forestry carbon sequestration showed an annual average increase of 3.56%. In a breakdown of emissions, energy GHG accounted for 80.13%—90.55%, cement GHG for 1.75%—7.49%, agricultural GHG for 1.86%—8.01%, forestry carbon sequestration for -2.58%—-5.22%, and waste treatment GHG for 7.52%—16.38%. An increase in energy consumption is the main cause of the increase in GHG emission in Xi'an City, and forestry carbon sequestration capacity needs to be improved. In Xi'an City, the GHG emission per 10,000 Yuan GDP was constantly decreasing, and progress in the science and technology of carbon emission has continuously improved. The GHG emission per capita, per unit area and per carbon emission index has increased very quickly, showing an average annual increase of 5.84%, 7.66% and 6.84% respectively. The carbon emission state in Xi'an City has increased continually from a low level (I_c) to a middle level (II_a), which was an increase of two sub-grades and which was two grades higher than the target set for the control of global climate warming. The increasing trend in carbon emission cannot be ignored.

Key Words: greenhouse gas; greenhouse gas emission; evaluation; climate warming; Xi'an City

温室气体排放导致的全球变暖可能引起严重的自然环境和社会问题^[1-3],对气候变暖及其机制的争论也达到了前所未有的程度^[4]。温室气体核算成为研究的热点之一^[5-6]。Hertwich 等研究了国家^[7]、城市^[8]等不同尺度的碳足迹^[9];祁悦等分别研究了中国的能源^[10-13]、农作物生产^[14]、不同产业^[15-16]的碳足迹;李媛等分别研究了青海^[17]、甘肃^[18]、山东^[19]、上海^[20]、北京^[21]的碳足迹。由于国际气候谈判是以国家(地区、经济体)为基本单位,因此关于国家或区域温室气体排放的研究成为各国政府最为重视的领域之一。随着《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[22]和 2011 年中国《省级温室气体编制指南》^[23]的出台,人们逐渐将碳足迹的研究范围扩展到温室气体足迹的研究^[24],Wiedmann 等^[25]等研究了英国的温室气体足迹;覃小玲^[26]、杨谨等^[27]分别研究了深圳和重庆市的温室气体排放清单。虽然国内外温室气体核算研究已有不少案例,取得了一定进展,但也存在诸多不足,表现为已有的研究多侧重碳排放,较少涉及碳固定,且主要集中在能源消费引起的碳排放;缺少区域温室气体排放等级的评估方法;另外,中国至今没有掌握全国及各地区人为活动排放的温室气体实际数量^[28],有关的研究论文虽很多,但由于研究方法不统一,也很少与国际公认的方法和标准完全相衔接,其研究结果无法汇总和相互比较,更难得到国际谈判的认定^[28]。西安是闻名世界的历史文化旅游名城古都,关天经济区的辐射中心,中国中西部地区重要的科研、高等教育、国防科技工业和高新技术产业基地,拟建成国际化大都市。有关西安市温室气体排放及等级评估未见报道。本文提出了基于全球标杆的温室气体排放等级评价体系,采用《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》和中国《省级温室气体编制指南》推荐的方法对西安市温室气体排放进行了动态分析和排放等级评价,研究结果可为政府有关部门制定碳减排政策和发展低碳经济提供科学依据。

1 研究区概况

西安市位于东经 $107^{\circ}40'$ — $109^{\circ}49'$ 和北纬 $33^{\circ}39'$ — $34^{\circ}45'$ 之间,地处关中平原中部,北临渭河,南依秦岭。西安市辖 9 区 4 县,总面积 10108 km^2 ,2011 年常住人口 851.34×10^4 人。年均温 $13.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 589.4 mm ,耕地面积 258593.3 hm^2 ,草地面积 12802.2 hm^2 ,林地面积 508390 hm^2 ,森林覆盖率 41.42%。西安市 2010

年实现生产总值 3241.49×10^8 元。农业经济方面,2010 年西安市全年粮食总产 221.65×10^4 t,单产 356.5 kg。工业经济方面,2010 年西安市实现规模以上工业总产值 3125.36×10^8 元,同比增长 26%;规模以上工业万元增加值能耗为 0.7 t 标准煤,超额完成“十一五”工业能耗下降 27% 的目标。

2 研究方法

2.1 温室气体核算方法

目前温室气体核算方法有投入产出分析、生命周期、混合生命周期^[29-30]和 IPCC 等方法,但 IPCC 方法是目前最权威的区域温室气体核算体系^[31],本文采用 IPCC 方法,核算范围符合 SCOPE1 和 SCOPE2,即包括直接排放和电力的间接排放。

2.1.1 能源部门

能源部门碳的排放主要来自于化石能源的燃烧,核算方法如下:

$$E_e = \sum_j \left(AC_j \times NCV_j \times EF_j \times COF_j \times \frac{44}{12} \times 10^{-3} \right) \quad (1)$$

式中, E_e 为能源部门温室气体排放量(10^4 t); AC_j 为燃料 j 的消费量(10^4 t 或 10^8 m³); NCV_j 为燃料 j 的低位热值(TJ/Gg); EF_j 为燃料 j 单位热值含碳量(t C/TJ); COF_j 为燃料 j 的碳氧化率;44/12 是 CO₂与 C 分子量的比值; 10^{-3} 为单位转换系数。

电力调入调出间接温室气体排放的核算方法如下:

$$E_p = AC_p \times Q \times 10 \quad (2)$$

式中, E_p 为电力调入调出间接温室气体排放总量(10^4 t),调入时为正值,调出时为负值; AC_p 为差额电量(10^8 kW h); Q 为区域电网供电平均温室气体排放因子(kg/kW h),西安所在地区的缺省值为 0.997;10 为单位间的换算系数。

2.1.2 工业过程

工业生产过程所产生的温室气体排放只计算水泥生产过程中原料分解转化而释放的 CO₂,因为工业生产过程中燃料燃烧所释放的 CO₂已在化石燃料的计算中所包含。根据省级指南每生产 1 t 水泥由原料分解产生 0.538 t CO₂/t 熟料。

2.1.3 农业

稻田 CH₄排放的核算方法如下:

$$E_r = \sum (EF_i \times AD_i \times 10^{-3}) \quad (3)$$

式中, E_r 为稻田 CH₄排放总量(10^4 t); EF_i 为 i 类型稻田 CH₄排放因子(kg/hm²); AD_i 为 i 类型稻田的水稻播种面积(10^4 hm²); 10^{-3} 是单位换算系数。

农用地 N₂O 排放的核算方法如下:

$$E_f = \sum [(N_c + N_m + N_s) \times EF + (N_{lp} \times 0.2\% + N_{in} \times 0.1\%) + (N_{in} \times 1.5\%)] \quad (4)$$

式中, E_f 为农用地 N₂O 排放总量(10^4 t N); N_c 、 N_m 、 N_s 分别为化肥氮、粪肥氮、秸秆还田氮(10^4 t N); EF 为对应的 N₂O 排放因子(kg N₂O-N/kg N_{in}); N_{lp} 为畜禽粪便氮(10^4 t N); N_{in} 为总氮输入量(10^4 t N)。

动物肠道发酵及粪便管理甲烷排放采用以下公式计算:

$$E_{ae} = \sum (EF_{ae,i} \times AP_i \times 10^{-3}) \quad (5)$$

式中, E_{ae} 为肠道发酵或粪便管理温室气体排放量(t CH₄/a); $EF_{ae,i}$ 为 i 类牲畜的排放因子(kg CH₄头⁻¹ a⁻¹); AP_i 为 i 类牲畜的头数(10^4 只),研究对象包括牛、马、驴、猪和羊。

2.1.4 林业及其他土地利用

森林和其他木质生物质生物量碳贮量的变化,包括乔木林、散生木、四旁树、疏林生长生物量碳吸收;竹

林、经济林、灌木林生物量碳贮量变化;以及活立木消耗碳排放。核算方法如下:

$$C = [V \times \overline{SVD} \times \overline{BEF} \times (GR - CR) + A_i \times B_i \times X] \times 0.5 \times 44 / 12 \quad (6)$$

式中, C 是植被的固碳量 (10^4 t CO_2); V 为活立木的总蓄积量 (10^4 m^3); \overline{SVD} 为木材密度的加权平均值 (t/m^3); \overline{BEF} 为生物量转换系数的加权平均值, 即生物量与树干生物量的比值 (无量纲); GR 和 CR 分别为活立木年均蓄积量生长率与消耗率 (%); A_i 和 B_i 分别是竹林 (或经济林、灌木林) 面积年变化 (hm^2) 和平均单位面积干物质生物量 (t/hm^2); 0.5 是生物量含碳率, 其余同上。

2.1.5 废物处理部门

由于西安市没有无害化焚烧处理厂, 所有城市固体废弃物均为填埋处理, 本文仅计算填埋处理过程中温室气体的排放, 公式如下:

$$E_i = \left(W_t \times W_f \times MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12} - R \right) \times (1 - OX) \quad (7)$$

式中, E_i 表示填埋处理产生的甲烷排放量 ($10^4 \text{ t CH}_4/\text{a}$); W_t 为固体废弃物总量 (10^4 t/a); W_f 为固体废弃物填埋处理率; MCF 为各管理类型垃圾填埋场的甲烷修正因子; DOC 为可降解有机碳 (kg C/kg 废弃物); DOC_f 为可分解的 DOC 比例; F 为垃圾填埋气体中甲烷比例; $16/12$ 为甲烷/碳分子量比率; R 为甲烷回收量 ($10^4 \text{ t CH}_4/\text{a}$); OX 为氧化因子。

废水 (生活污水和工业废水) 处理 CH_4 排放的核算方法如下:

$$E_{wt} = (T \times B_0 \times MCF - R) + \sum_i [(T_i - S_i) \times EF_i - R_i] \quad (8)$$

式中, E_{wt} 为废水处理 CH_4 排放总量 (10^4 t); T 为生活污水中有机物总量 (10^4 t BOD); B_0 甲烷最大产生能力; MCF 为甲烷修正因子; i 表示不同的工业行业; T_i 为工业废水中可降解有机物的总量 (10^4 t COD); S_i 为以污泥方式清除掉的有机物总量 (10^4 t); EF_i 为排放因子 ($\text{kg CH}_4/\text{kg COD}$); R 和 R_i 分别是生活污水和工业废水处理的甲烷回收量 (10^4 t)。

废水处理 N_2O 排放的核算方法如下:

$$E_i = [(P \times P_r \times F_{NPR} \times F_{NON-CON} \times F_{IND-COM}) - N_s] \times EF_E \times 44 / 28 \times 10^{-7} \quad (9)$$

式中, E_i 为废水处理 N_2O 的年排放量 (10^4 t); P 为人口数 (10^4 人); P_r 为每年人均蛋白质消耗量 (kg/人); F_{NPR} 为蛋白质中的氮含量 (kg N/kg 蛋白质); $F_{NON-CON}$ 为废水中的非消耗蛋白质因子; $F_{IND-COM}$ 为工业和商业的蛋白质排放因子, 默认值 = 1.25; N_s 为随污泥清除的氮 (kg N/a); EF_E 为废水的 N_2O 排放因子 ($\text{kg N}_2\text{O/kg N}$); $44/28$ 为 N_2 与 N_2O 的转化系数。

温室气体排放总量以 CO_2 当量 (CO_{2e}) 表示, 即将不同种类温室气体按其对应温室效应的贡献程度, 乘以相应的温室气体全球变暖潜势值 (GWP) 而获得, 文中涉及的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 1、25 和 298。

2.2 温室气体排放等级评估方法

首先需要考虑的是, 区域可容纳的最高的温室气体排放量究竟是以单位面积还是以人均承担量为标准来衡量? 从理论上讲, 似乎以面积衡量更合适, 面积较大的区域应该具有较高的温室气体排放权。但实际上以往的评判多以人口数量承担总量, 很少考虑面积大小问题。在专家问卷中也设计了此问题, 大多数专家认为应同时考虑面积大小和人口数量问题, 同时尤其要考虑发展中国家的发展权和人的生存权问题, 适当加大人口因子的权重。据此, 本文提出人均温室气体排放指数 (W_p) 和单位面积的温室气体排放指数 (W_a) 两个概念。人均温室气体排放指数定义为区域人均温室气体排放量 (e) 与应对全球气候变化目标的人均温室气体排放量 (e_g) 的比值; 单位面积的温室气体排放指数定义为单位面积的温室气体排放量 (E_a) 与应对全球气候变化目标的单位面积温室气体排放量 (E_g) 的比值; 这两个指数分别从人均和单位面积视角反映了区域温室气体排放对全球气候变化贡献的大小。为了便于判断某一区域温室气体排放对全球气候变化影响的总体状况, 在上述两个概念的基础上, 构建出区域温室气体排放指数模型 (W)。根据专家问卷调查的结果, 暂定 W_p 和 W_a

在温室气体排放等级评估中的权重分别为 0.70 及 0.30; 分别对 2 项指标进行标准化处理, 标准化处理后的 2 个指数之和便构成了温室气体排放指数:

$$W = 0.7 \times \frac{W_p}{W_{p,max}} + 0.3 \times \frac{W_a}{W_{a,max}} \quad (10)$$

式中, W 为温室气体排放指数; W_p 为人均温室气体排放指数, $W_p = e/e_g$; W_a 为单位面积的温室气体排放指数, $W_a = E_a/E_g$; e 和 E_a 分别为人均和单位面积的温室气体排放量 ($t, t/hm^2$); e_g 、 E_g 分别为应对全球气候变化目标的人均、单位面积温室气体碳排量 ($t, t/hm^2$)。斯特恩报告提出了全球减排温室气体长期目标和分担原则^[32], 该报告按照温室气体浓度限制在 500 mL/m³ CO₂ 当量的排放轨迹进行测算, 指出 2050 年全球温室气体排放总量至少比 1990 年减少 50%, 降至 200 亿 t CO₂ 当量, 人均约 2 t CO₂ 当量, 并提出以此作为各国承担减排义务的原则。全球面积为 5.1 亿 km², 其中陆地面积占 29.2%, 陆地面积中再减去没有人居住的南极洲 (占陆地面积 9.4%) 和沙漠 (占陆地面积 33%) 的面积, 全球的人居面积为 8577.79 万 km²。故应对全球气候变化目标的单位面积碳排放量为 2.33 t/hm²。因此, 应对全球气候变化目标的人均和单位面积温室气体排放量分别暂定为 2 t、2.33 t/hm² (对应的 W 为 0.06)。 $W_{p,max}$ 、 $W_{a,max}$ 分别是全球人均温室气体排放指数、单位面积温室气体排放指数最大值, 利用世界资源研究所 (WRI)^[33] 公布全球温室气体排放数据计算了世界温室气体排放量前 30 名的国家或地区的 W_p 和 W_a , 经分析对比, 当 $W_{p,max}$ 、 $W_{a,max}$ 分别为 15 和 35 时 W 有很好的区分度。

利用公式 (10) 对世界温室气体排放大国试评估, 通过对试评估结果的聚类分析, 结合考虑世界各国及中国部分省市的温室气体排放总量、人口、国土面积、生态环境和社会经济发展状况, 制定了温室气体排放等级划分标准 (表 1)。按此划分标准, 属于高排放的国家有美国、加拿大、澳大利亚、荷兰等, 中等排放的有欧盟、俄罗斯、日本、韩国等, 低排放的有中国、印度、巴西、墨西哥等。可见, 该等级划分标准能较科学地区分不同的排放水平。

表 1 温室气体排放等级划分标准

Table 1 The grade of greenhouse gas emission

等级 Grade	I			II			III		
温室气体排放指数 GHG emission index	<0.2			0.20—0.49			≥0.50		
表征状态 Token state	低排放			中等排放			高排放		
亚级 Sub-grade	I _a	I _b	I _c	II _a	II _b	II _c	III _a	III _b	III _c
亚级排放指数 Sub emission index	<0	0—0.06	0.07—0.19	0.20—0.29	0.30—0.39	0.40—0.49	0.50—0.59	0.60—0.69	≥0.70
表征状态 Token state	碳汇	很低	较低	中下	中等	中上	较高	很高	极高

2.3 数据来源

研究所需要的数据主要来源于 2000—2011 年的《西安统计年鉴》、《西安年鉴》、《陕西统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》和《中国林业统计年鉴》等, 另外也通过陕西省林业厅、农业厅等行业主管部门以补充统计年鉴中缺乏的数据。

3 结果与分析

3.1 西安市温室气体排放动态分析

1995 年至 2011 年, 西安市温室气体排放呈明显上升趋势 (图 1)。温室气体排放总量从 1207.16×10⁴t 上升为 3934.17×10⁴t, 增幅为 255.90%, 年均增高 7.66%。其中, 能源消费产生的温室气体从 972.45×10⁴t 增长到 3152.49×10⁴t, 增幅为 224.18%, 年均增高 7.63%; 水泥生产过程产生的温室气体从 27.97×10⁴t 增长到 165.43×10⁴t, 增幅为 491.53%, 年均增加 11.75%; 农业生产过程产生的温室气体从 96.70×10⁴t 波动降低到 73.07×10⁴t, 降幅为 24.43%, 年均降低 1.74%; 林业固碳从 57.94×10⁴t 增加到 101.39×10⁴t, 增加了 74.99%, 年均增加

3.56%;废弃物处理过程产生的温室气体从 $167.99 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到 $644.57 \times 10^4 \text{ t}$, 增高了 283.69%, 年均增高 8.77%。从各部门温室气体的构成比例看, 16 年间, 能源温室气体占总温室气体的比例为 80.13%—90.55%, 水泥占 1.75%—7.49%, 农业占 1.86%—8.01%, 林业碳减排占 -2.58%—-5.22%, 废弃物处理占 7.52%—16.38%。从 3 种温室气体的构成比例看(以 CO_2e 计算), CO_2 、 CH_4 和 N_2O 分别占总温室气体的 78.07%—90.55%、8.73%—19.70%、0.68%—2.23%。可见能源消费的增加是导致西安市温室气体排放增长的主要原因, 且以 CO_2 占绝对优势。

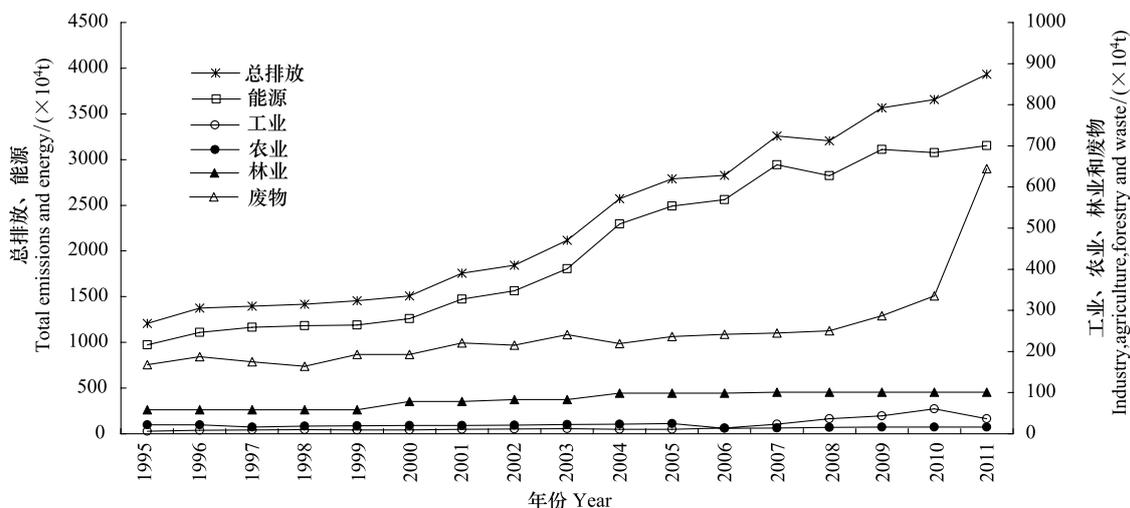


图 1 西安市温室气体构成及动态变化

Fig.1 The component and trends of greenhouse gas in Xi'an City

3.2 基于人均、单位面积、万元 GDP 温室气体排放的动态分析和排放等级评估

1995—2011 年, 西安市人均和单位面积温室气体排放持续增长(表 2)。人均温室气体排放量从 1.86 t 增加到 4.62 t, 增高了 148.14%, 年均增高 5.84%; 单位面积的温室气体排放量从 12.09 t/hm^2 增加到 39.41 t/hm^2 , 增长了 225.90%, 年均增高 7.66%。同期西安市人口增幅(31.34%)远小于温室气体排放的增幅(255.90%), 故温室气体排放量的人均值仍有较高的增长幅度。

表 2 人均、单位面积、万元 GDP 温室气体排放量和等级评估结果

Table 2 GHG per capita, per unit area and per 10 000 Yuan GDP, and evaluation of GHG emission extent

年份 Year	人均温室气体 GHG per capita/ t	单位面积温室气体 GHG per unit area/(t/hm ²)	温室气体排放指数 GHG emission index	温室气体排放等级 GHG emission grade	万元 GDP 温室气体 GHG per 10000 Yuan/t
1995	1.86	12.09	0.09	I _e	3.65
1996	2.10	13.76	0.10	I _e	3.38
1997	2.11	13.98	0.10	I _e	2.85
1998	2.12	14.21	0.10	I _e	2.70
1999	2.16	14.58	0.11	I _e	2.52
2000	2.19	15.12	0.11	I _e	2.34
2001	2.53	17.60	0.13	I _e	2.39
2002	2.62	18.46	0.13	I _e	2.23
2003	2.96	21.22	0.15	I _e	2.24
2004	3.55	25.76	0.18	I _e	2.33
2005	3.76	27.95	0.20	II _a	2.12
2006	3.75	28.32	0.20	II _a	1.84
2007	4.26	32.62	0.22	II _a	1.75

续表

年份 Year	人均温室气体 GHG per capita/ t	单位面积温室气体 GHG per unit area/(t/hm ²)	温室气体排放指数 GHG emission index	温室气体排放等级 GHG emission grade	万元 GDP 温室气体 GHG per 10000 Yuan/t
2008	4.15	32.10	0.22	II _a	1.38
2009	4.56	35.71	0.24	II _a	1.31
2010	4.32	36.63	0.24	II _a	1.13
2011	4.62	39.41	0.26	II _a	1.02

西安市的温室气体排放指数从 1995 年的 0.09 逐年上升到 2011 年的 0.26, 增幅为 155.48%, 年均增高 6.84% (表 2)。温室气体排放的等级从较低 (I_c) 升高至中下等级 (II_a)。其中 1995—2004 年为较低等级 (I_c), 2005—2011 年为中下等级 (II_a)。可见 1995 年以来, 西安市从低温室气体排放 (I) 上升到中等温室气体排放 (II), 温室气体排放增高的趋势不容忽视。

西安市同期万元 GDP 温室气体排放量有不断降低的趋势 (表 2), 万元 GDP 温室气体排放量从 3.65 t 波动下降到 1.02 t, 降低了 72.13%, 年均降低 7.67%。说明西安市的碳减排技术在不断提高。

4 讨论

4.1 构建温室气体排放等级评价体系的意義

在区域温室气体排放研究中, 其目的是通过测算区域的碳平衡状况来评估该区域的温室气体排放对全球气候变暖贡献的大小, 这样似乎区域温室气体排放总量是最好的指标了。但由于不同国家或地区的人口数量和面积大小不同, 对不同区域间相互比较时, 仅用区域温室气体排放总量作为指标恐有失公平。因此, 本文采用人均和单位面积的温室气体排放量指标, 以消除人口和面积的影响。另外, 在应对全球气候变化的谈判中, 常以温室气体排放量或人均温室气体排放量作为评估温室气体排放高低的主要指标。由于人口数量和国土面积不同, 不同国家或地区用温室气体排放量或人均温室气体排放量相互比较都有不科学的一面。在确定人口和面积两个因子在温室气体排放等级评估中的权重时, 本文将两者的权重暂定为 0.7 和 0.3, 以体现以人为本、人的生存权和发展权优先的原则, 兼顾了面积大小不同国家间在区域发展上的公平性, 并把温室气体排放等级评估的标杆基于全世界, 在对全球 30 个温室气体排放大国或地区及中国部分省市的试评估中, 显示了很好的区分度。

4.2 西安市应对碳危机的对策

随着经济的发展, 西安市的温室气体排放还会进一步提高, 温室气体排放压力将不断加大。那么如何在 不影响经济发展、不降低人们生活水平的前提下, 降低温室气体排放指数呢? 建议从如下几方面着手:

(1) 调整能源消费结构。西安市温室气体排放以能源排放占绝对优势, 2011 年温室气体排放由大到小的顺序依次为能源 (80.13%)、废物 (16.38%)、水泥 (4.20%)、农业 (1.86%)、林业 (-2.58%)。从能源消费结构看, 西安市煤炭消费量占能源总消费的 90% 以上, 远高于中国平均水平 (68.4%)。而消费同样数量煤炭和天然气, 煤炭要比天然气多排放 50% 的 CO₂。若能减少煤的消费, 进行能源消费结构调整, 如汽车和取暖改用天然气, 充分利用太阳能、风能、农村沼气能, 开发核能发电等, 则可大幅度降低温室气体排放指数。

(2) 提高森林覆盖率, 增加植被固碳量。从本文的研究结果看, 西安市 2011 年林业固碳仅占温室气体总量的 2.58%。西安市的森林覆盖率由 1995 年的 30% 提高到目前的 44.99%, 世界森林覆盖率最高的国家 (南美的圭亚那) 高达 97.5%, 日本、韩国和挪威都在 60% 以上, 说明西安市的森林覆盖率还有很大的提升空间。

(3) 控制人口, 减少浪费, 提倡低碳生活。在有限的植被资源下, 植被固碳量也是有限的。西安市在过去的 16 年中人口增长了 31.34%。人口急剧增长将使温室气体排放不断增大。应对全球气候变化的目标是年人均温室气体排放量 2.0 t^[32]。2007 年全球人均温室气体排放量为 4.3 t, 中国为 3.9 t, 而美国则高达 19.6 t^[33]; 同年西安市为 4.26 t, 高于中国平均水平, 接近全球人均值, 是应对全球气候变化的目标的 2.13 倍。

(4)大力发展“次生”生物燃料。“次生”生物燃料使用生活垃圾、餐厨废油、苔藻及其他不与粮食、饲料作物直接竞争的生物原料生产,既有利于大幅减少温室气体排放,又能避免增加农田土壤荷载压力,有利于保持农田土壤质量、实现农业的可持续发展。目前欧盟正在大力发展“次生”生物燃料。西安市城区每天产生的生活垃圾为3500 t左右(180万 t/a)。目前城区绝大部分垃圾仅作无害化填埋,作为生物燃料利用的潜力很大。中国废弃油脂的量约占食用油总消费量的20%—30%。以人均消费食用油20.5 kg计(2011年),西安市每年产生废油3.49万—5.24万 t。将废弃油脂作为能源利用,不仅可减少温室气体排放,也可消除地沟油返回餐桌等安全隐患。

(5)发展绿色交通模式。2013年7月西安市规划部门编制出未来绿色交通出行的《西安市综合交通规划》,将通过TOD发展模式、BRT快速公交、优化公交线路设计等,使公共交通的使用最大化。发展绿色交通对有效治污减霾、减少私家车出行,缓解城市交通拥堵,降低温室气体排放具有重要意义。

5 结论

本文利用《2006年IPCC国家温室气体清单指南》和中国《省级温室气体编制指南》推荐的方法对西安市1995—2011年的温室气体排放进行了动态分析和温室气体排放等级评估,结论如下:

(1)西安市温室气体排放呈快速上升趋势,能源消费的增加是导致西安市温室气体排放增长的主要原因,林业碳汇能力有待提高。16年间温室排放量从 $1207.16 \times 10^4 \text{t}$ 上升为 $3934.17 \times 10^4 \text{t}$,年均增高7.66%。增幅最高的部门是水泥(年均增高11.75%)、废弃物(8.77%)、能源(7.63%),农业年均降低1.74%,林业固碳年均增加3.56%。从温室气体构成看,能源占80.13%—90.55%,水泥占1.75%—7.49%,农业占1.86%—8.01%,林业固碳占-2.58%—-5.22%,废物处理占7.52%—16.38%。

(2)人均、单位面积温室气体排放量和温室气体排放指数增速很快,年均增幅分别达5.84%、7.66%和6.84%。西安市温室气体排放等级持续增高,16年间从较低(I_c)升高至中下等级(II_a),目前距应对气候变暖目标(I_b)已高出了两个亚级,温室气体排放增高的趋势不容忽视。

(3)西安市碳减排方面的科技进步在不断提高。万元GDP温室气体排放量从3.65 t波动下降到1.02 t,年均降低7.67%。

参考文献(References):

- [1] Lim H J, Yoo S H, Kwak S J. Industrial CO₂ emissions from energy use in Korea: a structural decomposition analysis. *Energy Policy*, 2009, 37(2): 686-698.
- [2] Kaku K. Global warming and climate change of Asian countries including Japanese domestic greenhouse gas (GHG) reduction in the filed of poultry and swine industries. *Procedia Engineering*, 2011, 8: 511-514.
- [3] De_Richter R, Caillol S. Fighting global warming: The potential of photocatalysis against CO₂, CH₄, N₂O, CFCs, troposphere O₃, BC and other major contributors to climate change. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2011, 12(1): 1-19.
- [4] 方精云, 朱江玲, 王少鹏, 岳超, 沈海花. 全球变暖、碳排放及不确定性. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(10): 1385-1395.
- [5] 耿涌, 董会娟, 郝凤明, 刘竹. 应对气候变化的碳足迹研究综述. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 6-12.
- [6] Peters G P. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2(4): 245-250.
- [7] Van Heddeghem W, Vereecken W, Colle D, Pickavet M, Demeester P. Distributed computing for carbon footprint reduction by exploiting low-footprint energy availability. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28(2): 405-414.
- [8] Sovacool B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4856-4869.
- [9] Brown M A, Southworth F, Sarzynski A. The geography of metropolitan carbon footprints. *Policy and Society*, 2009, 27(4): 285-304.
- [10] 祁悦, 谢高地, 盖力强, 张彩霞, 李士美. 基于表现消费量法的中国碳足迹估算. *资源科学*, 2010, 32(11): 2053-2058.
- [11] 纪芙蓉, 赵先贵, 朱艳. 中国化石能源与电能利用碳排放足迹研究. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(1): 77-81.
- [12] Chuai X W, Lai L, Huang X J, Zhao R Q, Wang W J, Chen Z G. Temporospacial changes of carbon footprint based on energy consumption in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 110-124.

- [13] 卢俊宇, 黄贤金, 陈逸, 肖潇. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析. 地理研究, 2013, 32(2): 326-336.
- [14] Cheng K, Pan G X, Smith P, Luo T, Li L Q, Zheng J W, Zhang X H, Han X J, Yan M. Carbon footprint of China's crop production-An estimation using agro-statistics data over 1993-2007. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 142(3/4): 231-237.
- [15] 曹淑艳, 谢高地. 中国产业部门碳足迹追踪分析. 资源科学, 2010, 32(11): 2046-2052.
- [16] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. 地理学报, 2010, 65(9): 1048-1057.
- [17] 韩艳莉, 陈克龙, 陈英玉, 苏茂新, 陈亮. 1999-2008 年青海省碳足迹动态变化研究. 生态经济, 2011, (2): 54-56, 60.
- [18] 焦文献, 陈兴鹏, 贾卓. 甘肃省能源消费碳足迹变化及影响因素分析. 资源科学, 2012, 34(3): 559-565.
- [19] 肖玲, 赵先贵, 许华兴. 山东省碳足迹与碳承载力的动态研究. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 152-157.
- [20] 郭运功, 汪冬冬, 林逢春. 上海市能源利用碳排放足迹研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(2): 103-108.
- [21] 赵先贵, 马彩虹, 肖玲, 胡攀飞. 北京市碳足迹与碳承载力的动态研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 8-12.
- [22] 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南. [2013-02-06]. <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/16953034.html>.
- [23] 省级温室气体编制指南. [2013-02-16]. <http://wenku.baidu.com/view/c28d051b52d380eb62946df5.html>.
- [24] 陈其颢, 朱林, 王圣, 赵刚, 左漪. 江苏省温室气体排放清单基础研究. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 1-4.
- [25] Wiedmann T, Barrett J. A greenhouse gas footprint analysis of UK Central Government, 1990-2008. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(8): 1041-1051.
- [26] 覃小玲, 卢清, 郑君瑜, 尹沙沙. 深圳市温室气体排放清单研究. 环境科学研究, 2012, 25(12): 1378-1386.
- [27] 杨谨, 鞠丽萍, 陈彬. 重庆市温室气体排放清单研究与核算. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(3): 63-69.
- [28] 吕达仁, 丁仲礼. 应对气候变化的碳收支认证及相关问题. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 395-402.
- [29] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展. 生态经济, 2011, (4): 76-80.
- [30] 董雪旺. 国内外碳足迹研究进展述评. 浙江工商大学学报, 2013, (2): 67-75.
- [31] 陈红敏. 国际碳核算体系发展及其评价. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9): 111-116.
- [32] Stern N. *Stern Review: The Economics of Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [33] 世界各国碳排放量排名. [2012-10-16]. <http://www.chinaxhj.org/content.asp?id=590>.