

# 基于碳足迹和碳承载力的新疆碳安全评价

韦良焕<sup>1,2</sup>, 林宁<sup>2</sup>, 鞠美庭<sup>1</sup>

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 喀什大学 化学与环境科学学院, 新疆 喀什 844006)

**摘要:** [目的] 探索新疆碳足迹和碳承载力的变化, 评价其碳安全程度, 为新疆低碳经济的发展提供理论依据。[方法] 利用碳足迹理论对新疆 2000—2014 年的碳足迹、植被碳承载力、净碳足迹进行计算分析, 并利用碳压力指数 (CTI) 构建了碳安全评价模型。[结果] 新疆碳足迹呈上升趋势, 从 2000 年的  $1.08 \times 10^8$  t 上升到 2014 年的  $5.04 \times 10^8$  t, 其中化石能源碳足迹占总碳足迹的比重达到 96%; 碳承载力不断增加, 草地固碳量所占的比重最大, 其次是森林、农田、园地和城市绿地; 人均净碳足迹、碳压力指数均呈现增长趋势, 导致新疆碳安全程度不断下降, 从 2009 年开始就处于极不安全的状态。[结论] 化石能源消费的增加是导致新疆碳足迹升高和碳安全程度下降的主要原因, 虽然其能源利用率不断提高, 但在未来一段时间仍然面临严峻的生态环境问题。

**关键词:** 碳足迹; 碳承载力; 碳压力指数; 碳安全

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)01-0281-05

中图分类号: X196

**文献参数:** 韦良焕, 林宁, 鞠美庭. 基于碳足迹和碳承载力的新疆碳安全评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 281-285. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.049; Wei Lianghuan, Lin Ning, Ju Meiting. Carbon safety assessment based on carbon footprint and carbon capacity in Xinjiang Uygur Autonomous region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 281-285. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.049

## Carbon Safety Assessment Based on Carbon Footprint and Carbon Capacity in Xinjiang Uygur Autonomous Region

WEI Lianghuan<sup>1,2</sup>, LIN Ning<sup>2</sup>, JU Meiting<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Naikai University, Tianjin 300071, China; 2. College of Chemistry and Environmental Science, Kashi University, Kashi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 844006, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of the study is to explain the changes of carbon footprint and carbon capacity and evaluate the carbon security and provide the theoretical basis for the development of low carbon economy in Xinjiang Uygur Autonomous Region. [Methods] Based on the theory of carbon footprint, we calculated the carbon footprint, carbon capacity and net carbon footprint from 2000 to 2014 in Xinjiang Region, and selected carbon ecological pressure index to develop a model for regional ecological security evaluation. [Results] The carbon footprint of Xinjiang Region increased from  $1.08 \times 10^8$  t to  $5.04 \times 10^8$  t during the period from 2000 to 2014, and the use of fossil fuel contributed 96% of total carbon footprint. The carbon capacity increased too, and the carbon quantity of grass was the largest, followed by forest, cultivated land, garden land and urban green space. The net carbon footprint and carbon ecological pressure index increased. Since 2009, it had been in a state of “terribly insecurity”, and the carbon security was decreasing. [Conclusion] The increased consumption of fossil energy is the main cause of the growth of its carbon footprint and the decline of its carbon security. Although the efficiency of energy continued to improve in Xinjiang Region, it is still facing serious eco-environment problems in the future.

**Keywords:** carbon footprint; carbon capacity; carbon ecological pressure index; carbon security

收稿日期: 2016-05-27

修回日期: 2016-06-12

资助项目: 天津市科技支撑国际合作项目“生物质固废生产纤维素及其高值转化的关键技术研发”(13RCGFSP14300); 天津市科技支撑科技创新体系及平台建设项目“生物质固废资源化技术服务平台”(14TXGCCX00012)

第一作者: 韦良焕(1981—), 女(汉族), 陕西省富平县人, 博士研究生, 副教授, 主要从事生物质固废资源化研究。E-mail: weilianghuanabc@126.com。

2009 年 12 月哥本哈根联合国气候变化大会的召开,预示着全球气候变暖将是各国未来很长一段时间需要考虑和解决的环境问题之一。而导致全球气候变暖的主要原因是大气中以 CO<sub>2</sub> 为代表的温室气体的不断排放。碳足迹作为测算碳排放的一种方法成为国内外很多学者研究的热点之一。

在国外,碳足迹的研究开始的比较早,分别从概念内涵、计算方法以及实例计算开展研究,研究尺度包括个人/产品、家庭、组织机构、城市以及国家等包括的产业部门涵盖工业、交通、建筑、供水、医疗等<sup>[1-3]</sup>。在国内,有很多学者对碳足迹的内涵、核算方法等做了介绍<sup>[4-5]</sup>,还有学者对不同区域、不同尺度的碳足迹进行研究,比如吕靖焯等<sup>[6]</sup>对中国能源消费碳足迹的动态变化进行研究,赵荣钦等<sup>[7]</sup>对中国不同产业空间的碳足迹和碳排放强度进行了研究,白翠媚等<sup>[8]</sup>对武汉市土地利用变化的碳排放和碳足迹进行了分析研究,在已有报道中对以碳足迹方法研究某一区域碳排放的研究较多,涉及碳固定的较少,其中赵先贵<sup>[9]</sup>、廖启迪<sup>[10]</sup>、肖玲等<sup>[11]</sup>对北京市、厦门市和山东省的碳足迹和碳承载力动态变化进行了分析研究,这些研究主要都是针对经济较发达的省市碳平衡的研究,对于经济欠发达地区的碳平衡研究较少。新疆维吾尔自治区行政区包括 23 个市,7 个地区,5 个自治州。68 个县和自治县,矿产资源丰富,全疆煤炭预测量为  $2.19 \times 10^{12}$  t,占全国的 40%,石油、天然气的资源量分别占到全国的 30% 和 34%,而且油气勘探开发的潜力巨大,远景十分可观<sup>[12]</sup>。再加之在西部计划和对口援疆政策的扶持下,新疆经济迅速发展,同时也会加剧能源和资源的大量消耗,因此,本文拟在计算新疆能源、特殊工业碳足迹和植被碳承载力的基础上,构建碳压力指数模型用以评价新疆碳安全状态,为新疆节能减排以及低碳经济的发展提供帮助,同时也可以填补新疆碳安全评价研究的空白。

## 1 研究方法

### 1.1 碳足迹

碳足迹是指某种产品或活动在其整个生命周期中所产生的直接和间接的 CO<sub>2</sub> 排放量<sup>[9]</sup>。碳足迹越大,表示该区域 CO<sub>2</sub> 排放量越多。本文主要测算新疆化石能源和工业水泥的碳足迹,化石能源的种类主要是煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气。计算模型如下:

$$F = N \times f = A \times F_d = E + I \quad (1)$$

式中: $F$ ——区域碳足迹(t); $f$ ——人均碳足迹(t/人); $N$ ——人口数量(人); $A$ ——区域面积

(hm<sup>2</sup>); $F_d$ ——碳足迹密度,即单位面积碳足迹(t/hm<sup>2</sup>); $E$ ——化石能源的碳足迹(t); $I$ ——水泥生产的碳足迹(t)。下同。

$$E = \sum (E_i \times F_i) \quad (2)$$

式中: $E_i$ ——第  $i$  种能源的消费量(t); $F_i$ ——第  $i$  种能源的 CO<sub>2</sub> 排放系数。

$$I = I_y \times D \quad (3)$$

式中: $I_y$ ——水泥产量(t); $D$ ——水泥生产过程的 CO<sub>2</sub> 排放系数。

能源的 CO<sub>2</sub> 排放系数采用卞小红等<sup>[13]</sup>根据 2006 年 IPCC 数据计算的结果。水泥生产排放的 CO<sub>2</sub> 包括化石能源消费排放、碳酸盐煅烧等方面<sup>[14]</sup>。其中能源消费的 CO<sub>2</sub> 排放已经包含在化石燃料消费计算中,这里仅测算碳酸盐煅烧过程中分解产生的碳足迹。

为了研究能源的利用效率,笔者还计算了万元 GDP 碳足迹,即碳足迹与 GDP 比值。其大小代表了每单位 GDP 的碳消耗量,将碳排放与经济效益挂钩,万元 GDP 碳足迹越大,代表能源利用效率越低,反之则越大。

### 1.2 碳承载力

碳承载力是指某一区域各种植被光合作用固定的 CO<sub>2</sub> 的量。植被固碳除了森林及草地外,还需考虑农作物的固碳。碳承载力测算模型为:

$$C = N \times c = A \times C_d = C_f + C_g + C_p \quad (4)$$

式中: $C$ ——区域碳承载力(t); $N$ ——人口数量(人); $c$ ——人均碳承载力,即区域碳承载力总量与其人口的比值(t/人); $C_d$ ——单位面积的碳承载力,即区域碳承载力总量与其面积的比值(t/hm<sup>2</sup>); $C_f$ ——森林的固碳量(t); $C_g$ ——草地的固碳量(t); $C_p$ ——农作物的固碳量(t)。下同。

森林和草地的固碳量的计算公式为:

$$C_i = S_i \times C_{NEP,i} \times 44/12 \quad (5)$$

式中: $C_i$ —— $i$  类植被的固碳量(t); $S_i$ —— $i$  类植被的面积(hm<sup>2</sup>); $C_{NEP,i}$ ——1 hm<sup>2</sup> 的  $i$  类植被 1 a 吸收的碳量。净生态系统生产力(NEP)的取值没有统一,依据吴庆标等<sup>[15]</sup>利用森林清查数据中的中国各森林植被带的估算参数,将研究区森林植被的 NEP 取 1.43 t/(hm<sup>2</sup>·a);根据前人的研究结果,草地植被 NEP 取 0.36 t/(hm<sup>2</sup>·a);灌木植被可视为介于森林和草地植被的中间类型,其 NEP 取森林和草地的平均值;城市绿地 NEP 取 0.62 t/(hm<sup>2</sup>·a);由于园地脚森林稀疏,因此其 NEP 取森林的  $\frac{1}{3}$ ;  $\frac{44}{12}$  为 C 与 CO<sub>2</sub> 的换算系数。

农作物固碳量( $C_p$ )采用生物量方法计算,公式为:

$$C_p = \beta \times C_c \times \frac{44}{12} \times \sum \frac{P_i}{Y_i} \quad (6)$$

式中: $P_i$ ——第  $i$  种作物的经济产量(t),主要为小麦、玉米、稻谷、大豆、棉花和油菜籽、胡麻、葵花、甜菜、薯类以及蔬菜等主要农作物; $Y_i$ ——经济系数,即经济产量与生物产量之比; $\beta$ ——校正系数,依据秸秆进入工业(造纸、板材)的份额计算,取值为 0.05; $C_c$ ——生物量与固碳量之间的换算系数,该文取 0.5。

### 1.3 净碳足迹

净碳足迹定义为某一地区碳足迹与碳承载力的差额,当碳足迹大于碳承载力时,净碳足迹为正值,表明该区域为碳源,会增加气候变暖的趋势;两者相等表示碳平衡;后者大于前者表示碳承载力盈余,则说明该区域为碳汇,有利于遏制气候变暖。计算公式为:

$$D = N \times d = A \times D_d = F - C \quad (7)$$

式中: $D$ ——某一区域的净碳足迹(t); $d$ ——人均净碳足迹(t/人); $D_d$ ——单位面积净碳足迹(t/hm<sup>2</sup>)。下同。

### 1.4 碳安全评价

碳安全属于生态安全范畴,是指某一区域的环境、气候以及人们的正常生产、生活等不受碳排放影响的保障程度。碳安全评价的主要依据是区域碳收支平衡对生态环境的压力程度,如果压力越大,则安全程度越低,反之则越安全<sup>[16]</sup>。区域碳安全等级标准的划分,主要依据是碳收支平衡,而碳压力指数是衡量碳收支平衡的一个重要指标之一。碳压力指数参考生态压力指数<sup>[17]</sup>,是指某一区域碳足迹和植被碳承载力的比值,其大小可以反映某一区域人类活动对生态环境造成的影响,碳压力指数越大,说明该区域生态环境压力也越大,反之则越小。计算公式为:

$$CTI = F/C \quad (8)$$

式中:CTI——某一区域碳压力指数; $F$ ——区域碳足迹(t); $C$ ——区域碳承载力(t)。

根据碳压力指数划分碳安全评价等级标准,见表 1 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳足迹和万元 GDP 碳足迹的变化

根据 2001—2015 年《新疆统计年鉴》<sup>[18]</sup> 的能源消费数据和水泥生产量以及 GDP 值,通过公式(1),

(2)和(3)计算了新疆 2000—2014 年碳足迹和万元 GDP 碳足迹(如表 2 所示)。从表 2 可以看出,新疆碳足迹呈上升趋势,从 2000 年的  $1.08 \times 10^8$  t 上升到 2014 年的  $5.04 \times 10^8$  t,增幅 366.94%,年均增长 11.64%。其中化石能源碳足迹从 2000 年的  $1.04 \times 10^8$  t 增长到 2014 年的  $4.83 \times 10^8$  t,增幅为 363.27%,年均增长 11.57%,占新疆总碳足迹的 96%以上;水泥生产碳足迹增幅为 467.40%,年均增长 13.20%。

表 1 碳安全评价等级划分标准

等级	碳压力指数	表征状态
1	<0.50	很安全
2	0.51~0.80	较安全
3	0.81~1.00	稍不安全
4	1.01~1.50	较不安全
5	1.51~2.00	很不安全
6	>2.00	极不安全

另外,新疆 GDP 从 2000 年的  $1\ 363.56 \times 10^8$  元增加到 2014 年的  $9\ 273.46 \times 10^8$  元,增幅为 580.09%,年均增长 14.68%。通过计算万元 GDP 碳足迹,新疆万元 GDP 碳足迹从 2000—2014 年一直呈下降趋势,从 2000 年的 7.58 t 下降到 2014 年的 5.44 t,说明近几年在国家西部计划和对口支援的扶持下,新疆经济发展很快,同时也导致对一次能源的大量消耗,致使能源碳足迹不断增加;但万元 GDP 碳足迹的变化趋势也表明政府节能减排政策的实施使得能源利用率不断上升。

表 2 2000—2014 年新疆碳足迹构成、GDP 以及万元 GDP 碳足迹

年份	化石能源/ 10 <sup>4</sup> t	水泥生产/ 10 <sup>4</sup> t	总计/ 10 <sup>4</sup> t	GDP/ 10 <sup>8</sup> 元	万元 GDP 碳足迹 (t/10 <sup>4</sup> 元)
2000	10 421.24	380.66	10 801.90	1 363.56	7.58
2001	10 723.44	417.05	11 140.49	1 491.6	7.01
2002	11 257.53	437.63	11 695.16	1 612.65	7.25
2003	12 331.09	479.82	12 810.91	1 886.35	6.79
2004	14 102.45	515.52	14 617.97	2 209.09	6.62
2005	15 842.72	527.74	16 370.46	2 604.14	6.29
2006	18 057.45	567.16	18 624.61	3 045.26	6.12
2007	19 669.29	653.13	20 322.42	3 523.16	5.77
2008	21 804.84	710.923	22 515.76	4 183.21	5.38
2009	25 488.51	871.08	26 359.59	4 277.05	6.16
2010	28 547.32	1 020.41	29 567.73	5 437.47	5.44
2011	33 790.9	1 347.97	35 138.87	6 610.05	5.32
2012	40 949.52	1 834.27	42 783.79	7 505.31	5.7
2013	44 116.02	2 299.25	46 415.27	8 360.24	5.55
2014	48 278.06	2 159.85	50 437.91	9 273.46	5.44

## 2.2 碳承载力的构成和变化

碳承载力的大小代表了一个区域植被的碳固定能力。作者根据公式(4),(5)和(6)计算了新疆2000—2014年森林、草地、园地、城市绿地和农作物的固碳量如表3所示。

表3 2000—2014年新疆碳承载力构成  $10^4$  t

年份	森林	草地	园地	农田	城市绿地	合计
2000	3 441.78	6 779.59	33.59	187.10	4.35	12 446.41
2001	3 441.78	6 778.66	34.40	196.48	3.90	12 456.21
2002	3 441.78	6 779.19	38.82	228.59	4.42	12 494.79
2003	3 441.78	6 773.57	51.70	220.23	4.67	12 494.94
2004	3 544.18	6 760.49	58.71	234.07	5.08	12 606.52
2005	3 544.18	6 753.21	61.92	244.53	5.11	12 613.95
2006	3 544.18	6 748.46	63.57	276.15	4.10	12 642.46
2007	3 547.32	6 747.75	63.71	310.77	7.42	12 683.97
2008	3 547.01	6 747.02	63.71	291.87	7.78	12 665.39
2009	3 547.01	6 747.02	63.71	357.98	8.27	12 732.98
2010	3 547.01	6 747.02	63.65	386.13	8.57	12 762.38
2011	3 547.01	6 747.02	63.65	411.20	10.02	12 789.91
2012	3 547.01	6 747.02	63.65	407.82	11.26	12 788.77
2013	3 547.01	6 747.02	63.65	415.69	12.18	12 798.55
2014	3 547.01	6 747.02	63.65	450.15	12.06	12 833.89

从表3可以看出,新疆碳承载力主要由森林、草地、园地、农田和城市绿地构成,总碳承载力虽在不断增加,但也不容乐观。从2000年的 $1.24 \times 10^8$  t增加到2014年的 $1.28 \times 10^8$  t,增幅仅仅只有3.11%;其中森林、草地的碳承载力在这些年变化不大,园地、农田和城市绿地的碳承载力在不断升高。在新疆碳承载力组成中,草地固碳量占总碳承载力的52.27%~54.47%,森林固碳量约占28%左右,农田固碳量占1.5%~3.2%,园地固碳量占0.3%~0.5%,城市绿地固碳量占0.03%~0.08%。其中草地固碳量所占的比重最大,其次是森林、农田、园地和城市绿地,因此,草地固碳量是新疆碳承载力的重要组成部分。

## 2.3 人均碳足迹和人均碳承载力

新疆2000—2014年人均碳足迹、人均碳承载力和人均净碳足迹变化趋势如图1所示。从图1中可以看出新疆2000—2014年人均碳足迹呈现增加趋势,从2000年的5.84 t增加到2014年的21.94 t,增幅275.71%,年均增长9.92%;而人均碳承载力反而呈现下降趋势,从2000的6.73 t下降到2014年的5.58 t,因此,从2004年开始,人均碳足迹和碳承载力的差距越来越大,导致人均净碳足迹快速增长;同期新疆人口从2000年的 $1.85 \times 10^7$ 人增加到2014

年的 $2.30 \times 10^7$ 人,增幅为24.28%,远远小于碳足迹的增长幅度。而应对全球气候变化的年人均碳足迹目标为2.0 t,2007年全球人均碳足迹为4.3 t,中国为3.9 t<sup>[10]</sup>。到2014年新疆人均碳足迹为21.94 t,是应对全球气候变化人均碳足迹目标的9.97倍,是2007年全球和中国人均碳足迹的4.10和4.63倍。

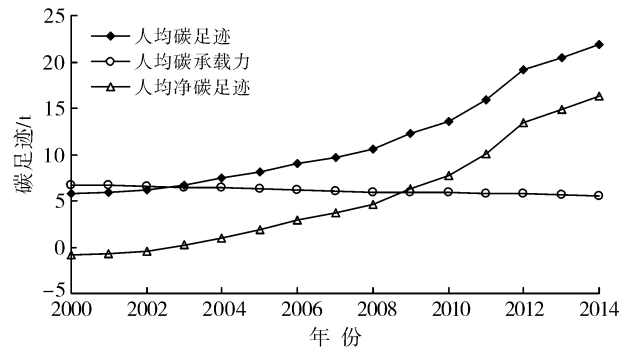


图1 2000—2014年新疆人均碳足迹、人均碳承载力和人均净碳足迹

## 2.4 碳压力指数和碳安全评价

根据2000—2014年新疆碳足迹和碳承载力计算碳压力指数(CTI)如图2所示。从图2可以看出,研究期内新疆CTI呈上升趋势,从2000年的0.87增加到2014年的3.93,增幅为352.84%,年均增长11.39%。碳安全状态在2000年就已经是稍不安全,从2009年开始就处于极不安全的状态,说明新疆碳安全等级逐年下降,气候变暖的趋势也不断增强。

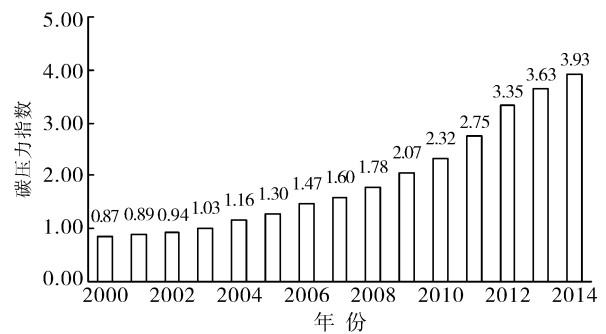


图2 2000—2014年新疆碳压力指数

## 3 讨论

由于化石能源在消费的过程中具有一定的流通性,且燃烧产生的温室气体 $\text{CO}_2$ 在大气中具有扩散性。因此,某一区域消费的化石能源碳足迹造成的生态环境压力不可能只由该区域单独承担,且实际计算和分析中能源消费的流通性和气体的扩散性也很难定量评估;如仅以好坏来区分发展状况,采用“非此即

彼”的二元评价模式评价区域的发展状况也不现实<sup>[19]</sup>。

为了能够定量评估其碳安全状态,作者提出了碳压力指数(CTI)。依据 CTI 的大小划分了碳安全评价的六级标准。当  $CTI < 1$  时,说明区域能源消费碳足迹小于植被碳承载力,碳安全状态良好;当  $CTI = 1$  时,说明区域能源消费碳足迹和植被碳承载力相等,此时处于碳安全预警状态;当  $CTI > 1$  时,说明能源消费碳足迹大于了植被碳承载力,人类活动对生态环境的影响超过了自然环境的调控能力,加剧了温室效应,碳安全逐级恶化。赵先贵<sup>[9]</sup>等计算了北京市 CTI 从 1999 年的 13.29 增加到 2009 年的 17.33,魏媛等<sup>[20]</sup>计算了贵州省 CTI 从 2002 年的 1.41 上升到 2012 年的 2.34,碳安全等级逐年降低;邱高会<sup>[17]</sup>、朱莉莎等<sup>[21]</sup>分析了四川省和天水市的碳安全状况,它们的碳安全等级分别自 2001 和 2007 年以后长期处于 6 级“极不安全”的状态之中;本文计算的新疆碳安全状态从 2009 年开始处于“极不安全”状态,与郭鹏程等<sup>[22]</sup>对新疆生态安全的评价结论相一致。说明目前新疆维吾尔自治区受人类活动的影响,气候变暖的趋势逐年增强,面临的生态环境压力也逐年增大。虽然近几年由于节能减排政策的实施,新疆化石能源利用率不断提高,但是要在新疆发展低碳经济,实施可持续发展,除了提高能源利用率以外,在调整能源和产业结构,减少一次能源的使用,不断开发无污染或少污染的清洁能源,有效利用生物质能的同时,还要植树造林,增加城市园林绿化设施,减少温室气体的排放。

## 4 结论

(1) 从新疆碳足迹变化可知,一方面,新疆 2000—2014 年碳足迹呈现上升趋势,且化石能源碳足迹占总碳足迹的比重最大,达到 96% 以上,说明新疆化石能源的消费是导致碳足迹升高的主要原因;另一方面,在化石能源碳足迹中煤炭足迹占的比重最高,占化石能源碳足迹的 53%~57%。

(2) 新疆 2000—2014 年碳承载力不断增加,但增加的速度远不如碳足迹的增加速度快,这一现象导致其 2000—2014 年净碳足迹呈现快速上升趋势,从 2000 年的  $-1.64 \times 10^7$  t 增加 2014 年的  $3.76 \times 10^8$  t,增加了 23.87 倍。从 2003 年开始,新疆净碳足迹大于零,碳承载力小于了碳足迹,出现了碳亏损状态,不断加剧了新疆气候变暖的趋势。

(3) 2000—2014 年新疆人均净碳足迹、碳压力指数均呈现增长趋势,且到了 2014 年新疆人均碳足迹远远高于应对全球气候变化人均碳足迹 9.97 倍,

高于 2007 年全球和中国人均碳足迹的 4.10 和 4.63 倍,碳压力指数也从 2000 年的 0.87 增加到 2014 年的 3.93,导致新疆碳安全程度不断下降。

综上分析可知,在西部大开发和国家援疆政策实施以来,新疆的经济快速发展,能源消费也在不断增长,导致新疆生态环境面临着较大的压力。在今后的发展中,应该依托新疆的资源和能源,尝试调整产业结构、实施清洁生产、开发新能源以及增加城市园林和绿地的建设,实现新疆十二五规划中提出的坚持 2 个可持续的发展,突出生态文明建设,注重保护和建设生态环境,推动优势资源科学合理有序开发,走资源开发可持续、生态环境可持续之路,实现经济效益与生态效益、环境效益的有机统一。

## [参 考 文 献]

- [1] 王微,林剑艺,崔胜辉,等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术,2010,33(7):71-78.
- [2] Wiedmann T, Minx J. A Definition of “Carbon Footprint”[M]// Pertsova C C. Ecological Economics Research Trends. Hauppauge N Y, USA: Nova Science Publishers, 2008:1-11.
- [3] Sovacool B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment[J]. Energy Policy, 2010,38(9):4856-4869.
- [4] 计军平,马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济:学术版,2011(4):76-80.
- [5] 罗运阔,周亮梅,朱美英. 碳足迹解析[J]. 江西农业大学学报:社会科学版,2010,9(2):123-127.
- [6] 吕靖焯,张金锁,李朋林,等. 中国能源消费碳足迹的动态变化研究[J]. 西安科技大学学报,2014,34(5):539-545.
- [7] 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[J]. 地理学报,2010,65(9):1048-1057.
- [8] 白翠媚,梅昀,张苗. 武汉市土地利用变化碳排放及碳足迹分析[J]. 湖北农业科学,2015,54(2):313-317.
- [9] 赵先贵,马彩虹,肖玲,等. 北京市碳足迹与碳承载力的动态研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(10):8-12.
- [10] 廖啟迪,龚福海. 厦门市碳足迹与碳承载力动态分析[J]. 福建建筑,2014(11):1-3.
- [11] 肖玲,赵先贵,许华兴. 山东省碳足迹与碳承载力的动态研究[J]. 生态与农村环境学报,2013,29((2):152-157.
- [12] 杜左龙,陈闻君. 新疆能源消费碳足迹变化、影响因素及其演进分析[J]. 兰州商学院学报,2014,30(5):16-23.
- [13] 卞晓红,张绍良,张韦唯,等. 区域能源利用的碳足迹及其对生态经济影响分析[J]. 辽宁城乡环境科技,2011(1):42-46.

(下转第 291 页)

(2) 新建公路(共玉公路)的水环境质量好于运营期公路(青藏公路),表明高速公路运营后对路域水环境影响明显,随着交通量的增加,这种影响是长期的、不断累加的。

(3) SS 与其他水质参数之间均表现出不同程度的相关性,通过对 SS 采取拦、蓄、滞、滤等方法降低路域污染物含量,将会有效的减轻青藏高原地区公路路域水环境的负面影响。

(4) 路面径流是路域水环境污染的重灾区。对降雨径流进行收集处理,采用新型的路面,布置径流处理措施,将有效的降低对路域水环境的影响。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王根绪,李元首,吴青柏,等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. 中国科学, 2006,36(8):743-754.
- [2] 吴青柏,牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报,2013,58(2):115-130.
- [3] 甘华阳,卓慕宁,李定强,等. 广州城市道路雨水径流的水质特征[J]. 生态环境,2006,15(5):969-973.
- [4] 荆红卫,张志刚,郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. 中国环境科学,2013,33(2):319-327.
- [5] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability: Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas, Nev., USA, 1984[M]. Wageningen: Pudoc. 1985.
- [6] 陈莹,赵剑强,胡博. 西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. 中国环境科学,2011,31(5):781-788.
- [7] Gromaire M C, Garnaud S, Saad M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research, 2001,35(2):521-533.
- [8] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. 环境科学,2008,29(3):607-612.
- [9] Furumai H, Balmer H, Boller M. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff[J]. Water Science Technology, 2002, 46(11/12):413-418.
- [10] 陈莹,赵剑强,胡博. 西安市城市主干道路面径流污染及沉淀特性研究[J]. 环境工程学报,2011,5(2):331-336.
- [11] 李贺,张雪,高海鹰,等. 高速公路路面雨水径流污染特征分析[J]. 中国环境科学,2008,28(11):1037-1041.
- [12] 王和意,刘敏,刘巧梅,等. 城市暴雨径流初始冲刷效应和径流污染管理[J]. 水科学进展,2006,17(2):181-185.
- [13] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon[J]. Water Research, 1998,32(8):2341-2356.
- [14] Saget A, Chebbo G, Bertrand-Krajewski J L. The first flush in sewer systems[J]. Water Science and Technology, 1996,33(9):101-108.
- [15] Li Qing, Cheng Qing, Qing Ci, et al. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007,19(3):295-299.
- [16] Luo Hongbing, Luo Lin, Huang Gu, et al. Total pollution effect of urban surface runoff[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009,21(9):1186-1193.
- [17] 王书敏,郭树刚,何强,等. 城市流域降雨径流水质特性及初期冲刷现象[J]. 环境科学研究,2015,28(4):532-539.
- [18] Barrett M E, Irish L B, Malina J F, et al. Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998,124(2):131-137.
- [19] Stotz G. Investigations of the properties of the surface water runoff from federal highways in the FRG[J]. The Science of the Total Environment, 1999, 59:329-337.
- [20] Pagotto C, Legret M, Le Cloirec P. Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement[J]. Water Research, 2000,34(18):4446-4454.

(上接第 285 页)

- [14] 汪澜. 水泥生产企业 CO<sub>2</sub> 排放量的计算[J]. 中国水泥, 2009(11):21-22.
- [15] 吴庆标,王效科,段晓男,等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报,2008,28(2):517-524.
- [16] 赵先贵,韦良焕,马彩虹,等. 西安市生态足迹与生态安全的动态研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(1):2-5.
- [17] 邱高会. 区域碳安全评价及预测研究[J]. 生态经济, 2014,30(8):14-17,41
- [18] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴 2001—2015 [M]. 乌鲁木齐:中国统计出版社,2001-2015.
- [19] 纪芙蓉. 陕西省能源利用碳足迹与植被碳承载力研究 [D]. 西安:陕西师范大学,2012.
- [20] 魏媛,蔡绍洪,王名绍. 贵州喀斯特山地碳足迹和植被碳承载力动态研究[J]. 生态经济,2016,32(2):172-176.
- [21] 朱莉莎,赵先贵,吴宜珊,等. 天水市碳安全评价及预测 [J]. 陕西农业科学,2013(3):204-208.
- [22] 郭鹏程,包安明. 基于生态压力指数的新疆生态安全时空动态分析[J]. 中国沙漠,2012,32(1):235-243.