

# 基于生态足迹法的高速公路生态环境影响评价

——以宝汉线为例

宫先达, 梁雯, 刘康

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

**摘要:** 以生态足迹法为基础, 阐述了高速公路建设对生态环境的影响。以高速公路宝(宝鸡市)汉(汉中市)线为例, 将污染消纳生态足迹考虑其中, 计算了高速公路修建前后沿线县域生态足迹与生态容量的变化, 预测评价了研究段公路建设对当地生态环境的影响程度。研究结果表明, 高速公路建设后, 沿线的县域人均生态赤字增加  $0.0164 \text{ hm}^2$ , 生态压力指数较建设前略有增加, 表明高速公路的修建对区域生态环境和自然生态系统的安全性产生了一定的影响。

**关键词:** 宝汉铁路; 生态足迹; 高速公路; 生态压力指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0296-05

中图分类号: X24

## Eco-environmental Impact Assessment of Highway Construction Based on Ecological Footprints Method

—A Case Study on the Baoji—Hanzhong Highway

GONG Xian-da, LIANG Wen, LIU Kang

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

**Abstract:** Based on ecological footprint analysis method, the impacts of highway construction on ecological environment were investigated in a case study of the Baoji—Hanzhong highway. Ecological footprint of pollutants was taken into account to calculate the change of the ecological footprint and ecological capacity for the counties along the highway before and after the highway construction. The impacts of the highway construction on local ecological environment were also evaluated and predicted. The ecological deficit of the counties along the highway increased by  $0.0164 \text{ hm}^2$  and the ecological tension index also increased slightly after the construction of the Baoji—Hanzhong highway, which implies that the local ecological environment and ecological safety have been affected by the highway construction.

**Keywords:** Baoji—Hanzhong Highway; ecological footprint; highway; ecological tension index

从 1988 年建成我国第一条高速公路——沪(上海)嘉(定)高速公路开始, 经过 20 年, 我国高速公路建设事业取得了飞速发展。高速公路对开发沿线自然资源、旅游资源, 发展地方经济, 促进地区交流, 改善投资环境, 加强国防建设等都具有重要意义。但是, 公路建设项目必然会占用土地, 破坏植被, 影响自然地貌、自然景观以及建设区域内的文物古迹、人文景观、自然水体、动植物的生存环境等, 必将给公路建设项目所在区域的生态环境产生重大影响<sup>[1]</sup>。在公路建设项目的决策阶段, 对项目实施后可能带来的生态环境影响进行综合分析评价, 及时发现问题, 指导设计与施工, 从而减少或避免项目建设对区域

生态环境产生的负面影响是十分必要的<sup>[2]</sup>。因此, 开展公路建设生态影响评价, 对实现公路建设与社会、经济、环境效益互相协调具有重要的战略意义。

由于我国公路环境保护研究还处在起步阶段, 研究侧重于高速公路建设、营运对生态环境的影响, 且以定性评价为主, 不能准确指出公路建设对生态环境的影响程度和改善措施。采用生态足迹法可以定量地反映出高速公路项目建设和运营中生物资源消费、能源消费以及污染消纳对生态环境造成影响, 可为政府部门提供高速公路建设的决策依据。本文以拟建的高速公路宝汉线为例, 在计算公路沿线的生态足迹和生态容量现状值的基础上, 以生态赤字和生态

收稿日期: 2011-05-22

修回日期: 2011-07-21

资助项目: 国家科技基础性工作专项重点项目“秦巴山区基础资料整理与数据库建设”(2007FY110800)

作者简介: 宫先达(1990—), 男(汉族), 山东省济南市人, 本科生, 主要从事环境科学专业的学习。E-mail: gongxianda123@gmail.com。

通信作者: 刘康(1963—), 男(汉族), 陕西省西安市临潼区人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态评价与规划研究。E-mail: liuk63@126.com。

压力指数反映该区域的环境现状,为宝汉线高速公路的生态环境影响评价奠定基础。

## 1 研究区概况

规划建设的高速公路宝汉线工程项目跨关中平原、秦岭山区、汉中原,地理坐标为东经  $106^{\circ}00'$ — $108^{\circ}00'$ ,北纬  $33^{\circ}50'$ — $34^{\circ}40'$ 。行政区划属陕西省宝鸡市、汉中市,主要涉及宝鸡市眉县、太白县、凤县,以及汉中市留坝县、勉县等地区。

高速公路起于宝鸡市眉县,常兴互通式立交以东 3.20 km,设枢纽互通式立交与连霍线西宝高速公路相连接,止于石门枢纽互通式立交。项目路线全长约 206.32 km,全线共设桥梁 203 座,其中,特大桥 15 座,大桥 158 座,中桥 30 座;共设隧道 80 座,其中,特长隧道 5 座,长隧道 5 座,中隧道 22 座,短隧道 48 座,全线桥隧占路线总长的 68.86%;拟设互通式立交 12 处,互通式立交连接线 4 处。

## 2 数据来源、研究方法

### 2.1 数据来源

项目建设各类占地和交通量预测来源于高速公路项目可研报告,资源和能源消费以及污染物排放等相关数据来自沿线各县(区)2008 年统计年鉴,以及《宝鸡市统计年鉴 2008》、《汉中市统计年鉴 2008》、《陕西省统计年鉴 2008》,并在此基础上对数据进行合理的计算和汇总。

### 2.2 研究方法

生态足迹 EF(ecological footprint,又译为生态占用)是由加拿大环境经济学家 William 和 Wackernagel 于 20 世纪 90 年代提出的一种基于生物物理量的度量评价可持续发展程度的概念和方法<sup>[3]</sup>。

2.2.1 生态足迹的计算方法 生态足迹实质上是将区域内人类生产、生活消费项目,转化为生态生产性土地面积,再通过均衡因子,转化为生态足迹。人均生态足迹计算公式为:

$$E_f = \sum_{i=1}^n r_i \cdot A_i \quad (1)$$

式中: $E_f$ ——人均生态足迹; $n=0,1,2,3,4,5$  分别代表化石能源地、可耕地、牧草地、森林、水域、建成地; $r_i$ ——均衡因子,采用世界自然基金会(WWF)2006 年提出的取值,森林和化石能源地为 1.34,耕地和建筑用地为 2.21,牧草地为 0.49,水域为 0.36; $A_i$ ——人均  $i$  种消费项目折算的区域内某类生态生产性面积<sup>[3]</sup>。

2.2.2 生态容量的计算方法 主要采用资源产出法进行生态容量的计算,资源产出法的计算方法同样来源于生态足迹的计算方法<sup>[4]</sup>。

$$A_{ce} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{E_{P_i}} \cdot \overline{y_{F_i}} \cdot e_{F_i} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot E_{P_i}}{E_{P_i}} \cdot \overline{y_{F_i}} \cdot e_{F_i} \\ = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \overline{y_{F_i}} \cdot e_{F_i} \quad (2)$$

式中: $A_{ce}$ ——生态容量( $\text{ghm}^2$ ); $P_i$ ——影响区域内第  $t$  类生态生产性土地的资源生产量( $t$ ); $E_{P_i}$ ——第  $i$  类生态生产性土地的单位产量( $t/\text{hm}^2$ ); $A_i$ ——第  $i$  类生态生产性土地的面积( $\text{hm}^2$ ); $y_{F_i}$ ——第  $i$  类生态生产性土地的平均产量调整因子; $e_{F_i}$ ——第  $i$  类生态生产性土地的等量化因子。

2.2.3 生态赤字的计算方法 生态赤字的计算公式如下:生态赤字=生态足迹-生态容量。如果区域的生态足迹超过了区域所能提供的生态容量,就出现生态赤字;如果小于区域的生态承载力,则表现为生态盈余。

## 3 生态容量和生态足迹变化

### 3.1 建成前的生态足迹和生态容量

#### 3.1.1 建设前的生态足迹

(1) 生物资源消费和能源消费生态足迹。根据宝汉线沿线县域(眉县、太白县、凤县、留坝县、勉县)生物资源和消费以及污染物的排放特点,确定生态足迹计算主要包括生物资源消费、能源消费和污染物消纳 3 大类。其中生物资源消费分为粮食、经济作物、水果、蔬菜、木材、动物产品、水产品等 7 类;能源消费分为煤炭类、石油类、气体、电力等 4 类;污染物消纳分为水污染消纳、大气污染消纳、固体废物污染消纳 3 大类。由于生态足迹指标要求计算净消费量,所以在生物资源和能源的消费额中考虑了贸易部分。在经过等量化处理后得到沿线县域生物资源消费和能源消费生态足迹的计算量(表 1)。

(2) 污染消纳生态足迹。在目前传统的国内外对生态足迹的应用中,通常只计算研究区域内消费所形成的生态足迹,然而这些消费难免会产生污染和废弃物,因此,传统的生态足迹模型存在着对污染和废弃物所占用的生态足迹的疏漏与忽略。本文将这一生态环境的损失纳入生态足迹计算模型中。

本文将排放的污染物分为废水、废气、固体废物。废水包括生活废水、工业废水。废气包括  $\text{SO}_2$ 、烟尘和粉尘。固体废物包括工业固体废物和生活垃圾。将污染物生态足迹分为水污染生态足迹、大气污染生态足迹、固体废物排放的生态足迹。

表 1 高速公路宝汉线工程沿线县域生物资源消费和能源消费生态足迹现状

土地类型	总面积/hm <sup>2</sup>	人均面积/m <sup>2</sup>	等价因子	总均衡面积/hm <sup>2</sup>	人均均衡面积(m <sup>2</sup> /人)
可耕地	73 913.25	793.23	2.21	163 348.28	1 753.04
牧草地	1 148 110.14	12 321.42	0.49	562 573.97	6 037.50
林地	16 790.79	180.20	1.34	22 499.65	241.46
化石能源地	561 122.74	6 021.92	1.34	751 904.47	8 069.38
建成地	400.72	4.30	2.21	885.60	9.50
水域	98 675.17	1 058.97	0.36	35 523.06	381.23
合计				1 536 735.03	16 492.11

结合陕西省生态立县的目标, 积极推广生态技术, 提倡能源节约, 为此在污染物的生态足迹计算中, 污水全部采用生态工程处理的方法计算。生态处理工程主要就是利用湿地消纳污水的生态功能特点, 将水污染处理过程中的占地转化为湿地面积。废水排放占用的湿地的面积以  $1 \text{ t/hm}^2/\text{d}^{[5-8]}$  标准折算。林地能对大气中的污染物起到吸收、固定、分解等净化作用。因此, 本文把大气污染生态足迹转化为吸收同等大气污染物所需要的林地面积。综合考虑不同物种的吸收特性和生态足迹计算模型当中对生态生产性土地功能的唯一性, 将同一林地假定为只对一种污染物有吸收特性。通过统计年鉴得知公路沿线县域主要大气污染物质主要有 3 类: 二氧化硫、粉尘、烟尘。根据国内外的相关研究<sup>[9-13]</sup>, 本文采用林地对二氧化硫的吸收能力为  $0.089 \text{ t/hm}^2$ , 对粉尘、烟尘的吸收能力为  $10.11 \text{ t/hm}^2$ 。固体废弃物一方面占用各类型的土地, 同时它本身就是一种污染源, 处理不当, 容易造成对大气、土壤、水体的破坏, 使生态生产性土

地的生产能力和功能下降。本文在计算固体废物排放占用的生态供给时, 假设排放的固体废物全部处理, 根据沿线各县域具体情况, 其固体废弃物主要为工业固体废弃物和生活垃圾, 并且对固体废弃物的处理绝大部分是采用堆积填埋的方式。依据相关资料进行估算<sup>[14-15]</sup>, 中国单位生态生产性土地面积可容纳的固体废弃物的量为  $10.19 \text{ t/hm}^2$ , 而且一般选择生态生产能力比较低的土地, 因此均衡因子取值为 1。由此计算得出沿线县域污染消纳足迹(见表 2)。

通过对高速公路宝汉线工程沿线县域生物资源消费、能源消费和污染消纳 3 个生态足迹账户的计算, 得出沿线人均生态足迹总量为  $20 344.30 \text{ m}^2$ 。

3.1.2 建设前的生态容量 根据式(2)计算高速公路沿线县域生态容量。对于产量因子的选择, 由于 5 个县域分别属于宝鸡市和汉中市, 且整体情况接近于陕西省各个方面的平均水平, 因此产量因子参考陕西省平均产量水平<sup>[16]</sup>。经过数据处理后, 得到沿线县域生态容量现状(表 3)。

表 2 高速公路宝汉线工程沿线县域污染消纳生态足迹现状

污染物质	排放量/t	湿地吸收能力/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	林地吸收能力/ ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$ )	单位土地可堆积 量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	均衡 因子	人均生态足迹 ( $\text{m}^2/\text{人}$ )
生活污水	52 012	1			1	558.188
工业废水	119 114	1			1	1 278.322
SO <sub>2</sub> 排放量	16 263		0.09		1	1 968.789
烟尘粉尘的排放量	4 023.940		10.11		1	4.272
工业固体废弃物	147.385			10.19	1	0.155
生活垃圾	40 315.798			10.19	1	42.460
合计						3 852.186

表 3 高速公路宝汉线工程沿线县域生态容量现状

土地类型	总面积/hm <sup>2</sup>	人均面积/m <sup>2</sup>	均衡因子	产量因子	人均承载力( $\text{m}^2/\text{人}$ )
耕地	91 448.36	981.42	2.21	1.66	3 600.42
牧草地	13 479.00	144.66	0.49	0.19	13.47
林地	888 113.82	9 531.16	1.34	0.91	11 622.30
化石能源地	0	0	1.34	0	0
建成地	35 343.19	379.30	2.21	1.66	1 391.50
水域	14 303.65	153.51	0.36	1.00	55.26
未利用地	39 393.48	422.77	1.00	1.00	422.77
人均生态容量					17 105.72
扣除 12%生物多样性保护面积					2 052.69
可利用的人均生态容量					15 053.04

3.1.3 建设前的生态赤字分析 在已知生态足迹与生态容量的基础之上,通过计算得出高速公路沿线县域生态赤字为 5 291.26 hm<sup>2</sup>。

3.2 预测建成后的生态足迹和生态容量

宝汉线建设和运营对沿线县域消费生态足迹、污染生态足迹、生态容量的影响表现为交通方式的变化,污染消纳增加,生态生产性土地利用类型变化,土地单位生态生产力下降等方面。其中,交通方式的变化对消费生态足迹产生影响;污染物的增加对污染消纳生态足迹产生影响;生态生产性土地利用类型变化和土地单位生态生产力下降则对生态容量产生影响。

3.2.1 建成后的生态足迹 宝汉线总长 206.32 km,根据可行性研究报告预测 2015 年平均交通量将达到 18 587 pcu/d。其中:pcu(passenger car unit)为标准车当量数,pcu 也称当量交通量,是将实际的各种机动车和非机动车交通量按一定的折算系数换算成某种标准车型的当量交通量,折算系数在我国的《公路工程技术标准》和《城市道路设计规范》均有规定。按照当量小客车耗油量 5 L/100 km,每升汽油 0.85 kg,统一转换为柴油,年柴油消耗量按下式计

算:柴油消耗量(kg)=日均交通量(pcu/d)×道路长度(100 km)×柴油重量(kg/L)×耗油量(L/100 km)×运营天数(d)。得出公路运输年消耗柴油 59 488.42 t,柴油热量折算系数为 42.71 GJ/t,全球平均吸收能力为 93 GJ/hm<sup>2</sup>。则高速公路修建后化石能源地生态足迹增加了 30 334.98 hm<sup>2</sup>,人均增加了 325.55 m<sup>2</sup>。

建成后污染消纳足迹增加的主要是汽车尾气中 SO<sub>2</sub> 的排放。按下式计算:SO<sub>2</sub> 排放量(g)=年均交通量(pcu/d)×耗油量(L/100 km)×道路长度(100 km)×运营天数(d)×单位柴油 SO<sub>2</sub> 产生量(g/L)。其中柴油为燃料的汽车二氧化硫排放量为 3.24 g/L<sup>[17]</sup>。根据计算得出年释放 SO<sub>2</sub> 的量为 226.76 t。由此得出污染消纳足迹增加了 2 557.88 hm<sup>2</sup>,人均增加了 27.45 m<sup>2</sup>。

综上所述,高速公路建成后人均生态足迹增加了 353.00 m<sup>2</sup>,达到 2.07 hm<sup>2</sup>。

3.2.2 建成后的生态容量 根据设计方案,高速公路建设占用土地的面积见表 4。

根据土地利用类型对高速公路建设后的生态容量进行计算,结果见表 5。

表 4 高速公路宝汉线工程占用土地的面积

hm<sup>2</sup>

土地利用	眉县	太白县	凤县	留坝县	勉县
耕地	456.54	1 079.36	458.97	1267.47	124.17
草地	0	779.94	0	0	0
林地	580.52	1 906.37	946.67	3 359.13	449.51
化石能源地	0	0	0	0	0
建筑用地	19.04		5.16	18.01	
水域	0	0	0	35.17	0
未利用地	26.85	0	0	0	0

表 5 高速公路宝汉线工程建成后沿线县域生态容量现状

土地类型	总面积/hm <sup>2</sup>	人均面积/m <sup>2</sup>	均衡因子	产量因子	人均生态容量(m <sup>2</sup> /人)
耕地	87 625.79	940.39	2.21	1.66	3449.92
草地	12 699.06	136.29	0.49	0.19	12.69
林地	880871.62	9 453.44	1.34	0.91	11 527.53
化石能源地	0	0	1.34	0	0
建筑用地	47 249.92	507.08	2.21	1.66	1 860.28
水域	14 268.48	153.13	0.36	1.00	55.13
未利用地	39 366.63	422.48	1.00	1.00	422.48
人均生态容量					17 328.03
扣除 12%生物多样性保护面积					2 079.36
可利用的人均生态容量					15 248.66

3.3 建成前后的生态足迹和生态容量对比

在上述计算的基础上,得出高速公路建设前后生态足迹与生态容量对比。此外,在区域生态足迹与生态容量测算的基础上,可进行区域生态安全分析和评

判。根据生态盈余或赤字判断其是否处在安全状态并利用生态压力指数表示生态安全程度,其模式为:

$$T = \frac{E_F}{E_C} \quad \text{或} \quad t = \frac{e_f}{e_c}$$

式中： $T, t$ ——区域生态足迹压力指数； $E_F$ ——区域生态压力总量； $E_C$ ——区域生态承载力总量； $e_f$ ——区域人均生态压力； $e_c$ ——区域人均生态承载力<sup>[18]</sup>。生态压力反映了某区域的生态足迹与生态容量的比例关系，该指数越大，说明区域的生态压力越大，自然生态系统的安全性越差(表 6)。

表 6 高速公路修建前后沿线县域的  
综合生态足迹与生态容量比较

时段	人均生态容量 ( $\text{hm}^2/\text{人}$ )	人均生态足迹 ( $\text{hm}^2/\text{人}$ )	人均生态赤字 ( $\text{hm}^2/\text{人}$ )	生态压力指数
建设前	1.51	2.03	0.53	1.350
建成后	1.53	2.07	0.55	1.357
变化量	+0.02	+0.04	+0.02	+0.006

## 4 结论

高速公路建成后，将其他类型的土地转化为建成地，由于建成地产量调整因子和均衡因子的乘积相对于其他土地利用类型大，因此人均生态容量有所增加，增加了  $195.63 \text{ m}^2$ 。这表明，宝汉线高速公路的修建对于沿线县域的城市化水平贡献了一份力量，使其城市化水平有所提高，并必将随着经济的发展势加快城市化进程。但是高速公路建成后，增加了化石能源的消耗，化石能源消费的人均生态足迹增加了  $325.55 \text{ m}^2$ ；同时产生污染物质，污染消纳人均生态足迹增加了  $27.45 \text{ m}^2$ 。人均生态足迹增加量大于人均生态容量增加量表明沿线县域城市化的发展是以生态足迹的增加为代价。高速公路建设后，沿线县域生态压力指数增加了 0.006，这说明高速公路的修建对区域生态环境和自然生态系统的安全性产生了一定的影响。

本研究对生态足迹法在高速公路生态环境影响评价中的应用进行了探讨，并以高速公路宝汉线为例，计算高速公路修建前后沿线县域生态足迹与容量的变化，预测评价研究段公路建设在影响范围内对各土地类型改变的影响程度。结果表明，将生态足迹分析法应用于公路建设生态环境影响评价的可行性。

同时本研究还有如下需要进一步探讨的问题：  
(1) 生态足迹分析试图将人类的各种资源消费和污染消纳归于 6 类土地中，归纳时往往忽略了不同经济结构、社会组织形式、生产技术和人类消费模式所造成的生态产品和服务的用地不同，由此低估或高估人类活动对生态环境的影响。(2) 生态足迹分析对自然

系统的生态功能描述不完整，如污染对环境影响的估算不足，由此造成污染处理的用地归属不明。(3) 生态足迹的分析计算是基于现有的经济统计数据，较难预测未来的可持续趋势，需要设置不同的情景进行分析和评价。

### [参 考 文 献]

- [1] 赵剑强. 公路交通与环境保护[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 16-17.
- [2] 郑志华, 崔宝军. 高速公路评价区生态环境影响综合评价初探[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 2004, 27(1): 46-48.
- [3] Wachernagel M, Riss W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriella Island, Canada: New Society Publisher, 1996.
- [4] 刘年丰, 谢鸿宇, 肖波, 等. 生态容量及环境价值损失评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 12-20.
- [5] 靳国正. 我国城市污水几种处理工艺简介[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(4): 21-25.
- [6] 陈国喜. SBR 生化系统的应用及其进展[J]. 环境科学进展, 1998, 6(2): 35-39.
- [7] 王建龙, 文湘华. 现代环境生物技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 276-300.
- [8] 沈德中. 污染环境的生物修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 311-319.
- [9] 薛建辉, 李苏萍. 城市森林效益与可持续性研究展望[J]. 南京林业大学学报: 人文社会科学版, 2002, 2(1): 31-35.
- [10] 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [11] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [12] 李文华, 欧阳志云, 赵景柱. 生态系统服务功能[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 204-221.
- [13] 赵岩, 司继涛. 城市固体废弃物处理技术政策方法 I: 模型研究[J]. 北京大学学报, 2007, 43(6): 834-838.
- [14] 杜吴鹏, 高庆先. 中国城市生活垃圾处理及趋势分析[J]. 环境科学研究, 2006, 19(6): 115-120.
- [15] 李晓. 基于德国经验寻找中国垃圾处理的出路[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(10): 107-109.
- [16] 林波, 薛惠锋, 蔡琳, 等. 陕西省 2004 年生态足迹计算与分析[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 174-178.
- [17] 方品贤, 江欣, 奚元福. 环境统计手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1985: 298.
- [18] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 597-606.