

文章编号:1006-2106(2007)05-0043-04

## 可持续发展的“绿色铁路”系统研究\*

熊 风\*\* 杨立中 罗 洁 贺玉龙

(西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:**研究目的:通过剖析生态环境价值和绿色技术,系统分析“绿色铁路”的内涵和研究范畴及其评价系统。

**研究方法:**分析现有的指标体系框架模式,运用专家评判法和主成分分析法对因子进行识别和筛选,运用层次分析法计算绿色铁路指标权重。

**研究结果:**建立了绿色铁路模糊综合评判的框架和步骤,对绿色铁路专家评判的思路和方法进行了阐述,并针对绿色铁路评价体系提出权重确定和综合评判的方法和思路。

**研究结论:**绿色铁路是一种新型的可持续发展的交通运输理念,其核心内涵是社会、经济、资源和环境的协调发展,通过自身优势减少并最终实现对生态环境不产生负效应,避免人类活动对外部环境的过度索取,以实现我国铁路设计、修建、运营和管理的可持续发展为最终目的,是落实科学发展观,构建社会主义和谐社会和建设资源节约型、环境友好型社会的必然选择。

**关键词:**绿色铁路;可持续发展;指标体系;评价体系

**中图分类号:**X322 **文献标识码:**A

## Research on Green Railway System of Sustainable Development

XIONG Feng, YANG Li-zhong, LUO Jie, HE Yu-long

(Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract: Research purposes:** Through making deep analyses of the value of ecological environment and green technology, the systematic analyses are made for the intension, research ranges and evaluation system of green railway.

**Research methods:** Through making analyses of the frame and mode of the existing index system, the factors are decided and selected by adopting experts evaluation method and main component analysis method, and the calculation of the weight of green railway is also made by adopting step analysis method.

**Research results:** The frame and procedure have been established for fuzzy evaluation of green railway in all-round way, the explanation is given of the thoughts and method of experts evaluation of green railway, and the method and thoughts put forward on decision and evaluation of the weight of green railway system.

**Research conclusions:** Green railway is a new transport concept for sustainable development of transport, and its core intension is harmonious developments in the areas of society, economy, resource and environment. Construction of green railway can reduce and make no negative effects on ecological environment for the purpose of sustainable development of railway. Green railway is a natural choose for taking a scientific approach to development, building a harmonious society and a resource conservation-minded society as well as an environment-friendly society.

**Key words:** green railway; sustainable development; index system; evaluation system

20 世纪以来,人口剧增、资源过度消耗、生态环境 恶化等情况日益突出,成为全球性的重大问题,严重地

\* 收稿日期:2006-10-24

基金项目:铁道部科技研究开发重点项目(2005Z003)

\*\* 作者简介:熊风,1979 年出生,男,博士研究生。

阻碍了经济发展和人类生活质量的提高,绿色意识就诞生于这种困惑与反思中<sup>[1]</sup>。1987年,联合国环境与发展委员会在《我们共同的未来》的报告中,明确的提出了“可持续发展”问题;世界银行1996年出版的《可持续运输:政策变革的关键》专著中提出并阐述了“可持续运输”这一概念;1997年英国土木工程学会运输理事会在举行可持续发展会议上对可持续运输的定义是“可持续性和可持续发展相容的运输”。因此,寻求可持续发展已成为人类的共识,对于在社会经济发展中起到巨大作用的运输动脉铁路,人们也相应提出了更高更新的要求:不仅要求铁路能够方便、迅达、安全、舒适、清洁,同时也注重了铁路与生态环境的和谐性、协调性,以实现铁路建设的可持续发展。

## 1 “绿色铁路”的概念及内涵

人们一般从自然生态方面理解“绿色”,即以“绿色”泛指保护地球生态环境的活动、行为、思想和观念等。具体地讲,绿色的含义包括2个方面:一是保护和创造和谐的生态环境,以维护人类社会的持续发展;二是依据“红色”禁止、“黄色”示警、“绿色”通行的惯例,以“绿色”表示合乎科学性、规范性,以绿色表示保护人类通行无阻的可持续发展行为<sup>[2]</sup>,而“绿色技术”(Green Technology)概念的产生与绿色技术的全面发展,则是人类由工业文明走向生态文明的标志<sup>[3]</sup>。一般而言,绿色技术就是保护环境,维持生态平衡,节约能源、资源,促进人类与自然和谐发展的思想、行为、技艺、方法的总称<sup>[4]</sup>。美、日、英、法、德等发达国家经过30多年的研究,对铁路勘测、设计、建设、运营中如何保证自然经济效益,天然资源利用和保护,保护动、植物及各种自然特性,保护名胜古迹和风景等都已有了较完整的规范和手册<sup>[5]</sup>。虽然发达国家对于铁路的科学研究优于我国,但是也缺乏“绿色铁路”领域的研究,因而我国科研工作者没有现成的模式可循。

绿色铁路的概念为:以环境价值为尺度,运用各种绿色技术,在确保铁路运输的安全、快捷、高效的条件下,不断减小铁路及配套设施对生态环境的负面影响,具有良好的经济效果和可持续发展能力的铁路。具体地说,绿色铁路包括以下含义:

- (1) 将铁路产业的外部不经济性内部化;
- (2) 铁路修建、运营和管理适合我国绿色GDP核算要求;
- (3) 减少对生态环境的所有不利影响;
- (4) 节约各种能源和资源;
- (5) 铁路与自然和谐发展;
- (6) 具备完善的安全保障体系;
- (7) 具备更高的运输速度和更强的运输能力。

从绿色铁路的定义可知,它包括了铁路及配套设施如车辆、站场等从“勘测选线——施工建设——运营维护——报废回收”的所有环节。绿色铁路的内涵包括以下几个方面:

(1) 经济持续发展:绿色铁路建设的根本目的是为了促进区域经济增长,经济的发展是摆脱贫困、获得环境改善和社会进步的基础。

(2) 社会不断进步:绿色铁路建设以改善和提高生活质量为目标,与社会的进步相适应。

(3) 自然资源可持续利用:绿色铁路建设要以自然资产为基础,与资源的承载能力相协调,保持资源的持续利用。

(4) 生态环境保持和改善:绿色铁路中“绿色”两字的即意味着保护、维护和改善生态环境。

(5) 经济、社会、资源和环境的协调发展。

总之,绿色铁路建设要求以环境价值为尺度。从价值论观点看,在铁路建设中运用绿色技术,实质上是通过投入人力、物力、财力,减少和消除因为铁路建设这种人类经济活动对生态环境产生的破坏和不良影响,避免人类活动对于外部环境的过度索取,保护好对于人类发展更有价值和长远利益的自然环境,同时加快铁路建设的现代化、智能化、人性化进程,从而提高铁路运输的竞争能力。

## 2 “绿色铁路”评价研究

我国是一个典型的大陆性国家,需要有一种强有力的运输方式将整个国家和国民经济联系起来,铁路无疑是最适合我国经济地理特征和人们收入水平的区域骨干运输方式。本文研究的“绿色铁路”是一个新的研究领域,它的范畴包括铁路建设中的生态环境保护、水土保持、地质灾害防治,以及铁路运营、维护中的污染控制治理等诸多方面。

### 2.1 绿色铁路指标体系

绿色铁路指标体系的关键问题主要集中在绿色铁路各项指标的具体量化和指标体系的建立。指标体系(Indicator System)的建立是进行预测或评价研究的前提和基础,它是将抽象的研究对象按照其本质属性和特征的某一方面的标识分解成为具有行为化、可操作化的结构,并对指标体系中每一构成元素(即指标)赋予相应权重的过程。

#### 2.1.1 绿色铁路指标体系的框架研究和指标筛选

根据文献[6],目前国内外通用的指标体系的框架模式可以归纳为:(1)压力-响应模型(stress-response model);(2)基于经济学的模型(economics-based model);(3)三成分模型(three-component or three model);(4)人类-生态系统福利模型(linked

human - ecosystem well - being model) ;(5) 多资本模型(multiple capital model) 。绿色铁路指标体系在综合已有框架模式的基础上,在框架搭建、因子筛选、权重确定、无量纲化等方面进行深入研究。绿色铁路指标的选择考虑以下几个方面:

- 2.1.1.1 设计阶段:(1) 对通过不利工程地质条件的线路合理选择;(2) 对不利地质条件的工程修复设计;(3) 设计线路对沿线自然保护区的避让和减少扰动;(4) 对沿线生态脆弱地区水土保持方案合理设计等。
- 2.1.1.2 施工阶段:(1) 施工阶段产生废物的有效控制,如隧道弃渣的妥善处理,施工废水的处理和合理排放等;(2) 施工阶段产生的噪声和扬尘控制,如降低施工噪声对附近居民的干扰,通过合理措施减少施工扬尘等;(3) 通过生物修复控制沿线水土流失,如林草覆

- 盖率、扰动土地治理率的大小等。
- 2.1.1.3 运营阶段:(1) 运营阶段三废的有效控制,如列车运营产生垃圾的回收和集中处置、沿线站场生活废水的生化处理等;(2) 运营阶段噪声、振动和电磁控制,如在沿线环境敏感点是否设置吸声式声屏障、城镇周边铁路建设噪声控制、是否采用无缝钢轨等;(3) 机车车辆控制,如是否采用密闭式车辆卫生间减少排泄物的沿线排放,推广电气化高速列车节约能源减少有害物质排放,使用了馈电弓与绝缘器减少电磁辐射等。
- 运用专家评判法、主成分分析法等对绿色铁路各项指标因子进行分析、识别和筛选,可以得出影响评价结果的主要影响因子,建立相应的绿色铁路指标体系,指标集如表1所示。

表1 绿色铁路评价指标

一级指标	二级指标	三级指标
铁路		车辆速度(km/h),车流密度(辆/h),万车事故率(%),运输成本(元/车)等
社会		人口密度(万人/km <sup>2</sup> ),人口迁移量(万人/km <sup>2</sup> ),恩格尔系数等
经济		区域人均GDP(元),基尼指数,人均收入增长率(%),就业指数等
资源		单位运距能耗(t·kJ/km),能源消耗产出比(%),经济土地占用量(km <sup>2</sup> )等
环境	生态	沿线绿化率(%),生态补偿率(%),动物通道(个/10 <sup>2</sup> km)等
	噪声	等效声级(dB),干线两侧噪声达标率(% )等
	振动	道路两旁垂直方向产生的振动级(dB)等
	电磁波	干线两侧电磁辐射影响距离(km)等
	三废	单位里程废气排放量/浓度(t/km, mg/l·km),单位里程污水排放达标率/污染指数(%),单位里程固废排放量/无害化处理率/分选回收率(t/km, %)等
	景观	景观协调度,廊道效应,对风景名胜的避让,对文物古迹的保护程度等

2.1.2 绿色铁路指标体系的权重研究

我国幅员辽阔,由于社会经济背景和资源环境基础差异,在铁路建设的不同工程阶段对环境、生态、景观和地质环境等的影响程度也有差异,因此在进行绿色铁路评价时,针对工程所处的不同地区、不同阶段,评价指标体系和指标权重也各有侧重。我国绿色铁路指标体系中各类指标的权重反映了评价者对各类指标在绿色铁路评价中的重视程度,可采用专家评分法与层次分析法(AHP)相结合进行权重确定。

层次分析法(Analytical Hierarchy Process 简称AHP)是20世纪70年代由美国运筹学家T. L. Stay提出的一种定性与定量相结合的系统分析方法<sup>[7]</sup>。此方法基本原理是将复杂的问题分成若干有序的层次,由专家和决策者对所列指标通过两两比较重要程度,逐层进行判断评分,利用计算判断矩阵的特征向量确定下层指标对上层指标的重要性权重,并辅之一致性检验,以保证评价者思维判断的符实性。AHP法可容纳不同决策者的经验判断,是一种有效的定性与定量相结合、主观与客观相结合的决策方法。为了使所

确定的权重更具科学性和代表性,尽量增加样本数量,邀请多位相关学科的专家、学者和工程师进行专家评分,并综合专家评分构造判断矩阵,确定每层指标的相对重要性权重。根据西南山区铁路内昆线沿线地区特点,结合现场调研成果,确定出了内昆线运营阶段绿色铁路评价的因素、指标(三级指标略)及相应权重,如表2所示。

表2 内昆线运营阶段绿色铁路评价的因素及权重

因素层	一级指标	权重	二级指标	权重	总权重
内昆线运营期	铁路	0.288 3			0.288 3
	社会	0.110 4			0.110 4
	经济	0.111 7			0.111 7
	资源	0.109 1			0.109 1
	环境	0.380 5	生态	0.163 7	0.062 3
			噪声	0.382 2	0.145 4
			振动	0.083 1	0.031 6
			电磁波	0.303 4	0.115 4
			三废	0.043 5	0.016 5
	景观		景观	0.024 1	0.009 2

2.2 绿色铁路系统评价体系

交通运输系统环境评价方法多达数十种<sup>[8]</sup>,但由

于评价视角不同,至今尚未形成统一的标准评价方法。目前常用的评价方法主要包括:综合指数法、模糊数学评判法、加权灰色关联度法、人工神经网络法、3S 信息系统、数值仿真模拟法等。由于绿色铁路的影响因素、指标较多,因此采用综合评价方法进行绿色铁路评价。

### 2.2.1 模糊综合评判方法

根据表 1 建立的绿色铁路评价指标体系,铁路的“绿色”与否是和铁路本身及其通过区域的社会状况、经济状况、能源使用状况、环境质量状况密不可分的,每一个子系统都对母系统的综合评价结果起着重要的作用。考虑绿色铁路指标体系因素较多及各因素之间的并列、从属关系,将因素集分为 3 级,因此,绿色铁路模糊评判综合模型由 3 层系统构成:

#### 2.2.1.1 三级评判

绿色铁路模糊综合评判模型三级评判因素集  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  共划分为 5 个主要因素,分别对应绿色铁路指标体系中第一级因素层: {铁路  $U_1$ , 社会  $U_2$ , 经济  $U_3$ , 能源  $U_4$ , 环境  $U_5$ }; 三级评判集  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  共划分为 5 个等级,即  $V = \{\text{非绿色铁路, 浅绿色铁路, 准绿色铁路, 绿色铁路, 深绿色铁路}\}$ 。

#### 2.2.1.2 二级评判

对于铁路  $U_1$ , 社会  $U_2$ , 经济  $U_3$ , 能源  $U_4$ , 环境  $U_5$ , 分别设置二级因素集和评判集。如对于环境  $U_5$ , 令二级因素集  $U_5 = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  划分为 6 个主要因素,即  $U_5 = \{\text{生态 } u_{51}, \text{水土流失 } u_{52}, \text{噪声电磁 } u_{53}, \text{三废 } u_{54}, \text{地质灾害 } u_{55}, \text{人文景观 } u_{56}\}$ ; 二级评判集  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  划分为  $m$  个等级,如 5 个等级:  $V_5 = \{\text{最劣, 较差, 中等, 较好, 最优}\}$ 。

#### 2.2.1.3 初级评判

对于二级因素层,如生态  $U_{51}$ , 令  $U_{51} = \{\text{沿线绿化率 } u_{511}, \text{生态补偿率 } u_{512}, \dots, \text{敏感点动物通道设置率 } u_{51n}\}$ , 令初级评判集  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  划分为  $m$  个等级,如 4 个等级即:  $V_{51} = \{\text{差, 中, 良, 优}\}$ ;

结合对绿色铁路指标体系整体优化的要求,采用对所有因素依权重大小均衡兼顾、使各因素都起作用的加权平均模型  $M(\cdot, +)$  算子进行综合评判:

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{ij}, (j=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

从初级评判开始层层递推,最后得出综合评判结果,得出对三级评判集  $V = \{\text{非绿色铁路, 浅绿色铁路, 准绿色铁路, 绿色铁路, 深绿色铁路}\}$  中的最大隶属度,即为最终的评判结果。

### 2.2.2 专家系统综合评判方法

专家系统是人工智能中目前较活跃的一个分支。它是一个具有大量专门知识与经验的程序系统,应用

人工智能技术,根据一位或多位专家提供的特殊领域的知识、经验进行推理和判断,模拟专家做决定的过程,来解决那些需要由专家决定的复杂问题,提出专家水平的决策或建议<sup>[9]</sup>,基本路线如图 1 所示。为了降低绿色铁路的知识门槛,让不具备专家知识的普通工作人员充分理解绿色铁路的优势和必要性,利用计算机技术建立绿色铁路专家评价系统供普通工作人员使用不失为一种好的方法。绿色铁路专家系统的特点是将按照建设的不同时段分类的绿色铁路专家系统的程序,同时按照沿线生态系统分类作为专家系统的入口进行整合,即针对铁路沿线穿越的不同生态系统,针对铁路勘探、设计、施工和运营的不同阶段,得出与其相适应的专家知识和建议,绿色铁路专家系统框架如图 2 所示。

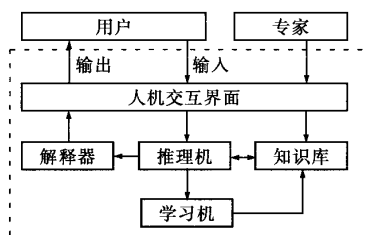


图 1 专家系统的基本路线图

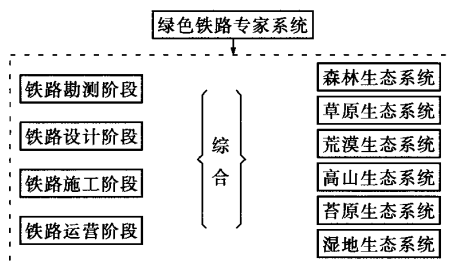


图 2 绿色铁路专家系统框架图

绿色铁路专家系统建立的具体步骤如下:

- (1) 建立绿色铁路专家系统知识库;
- (2) 规则库、数据库、图形库和推理机的建立;
- (3) 利用高级计算机语言进行程序编制和数值模拟;
- (4) 利用可视化语言进行人机交互界面的开发;
- (5) 调试运行。

利用建立好的绿色铁路专家系统进行评判,能够对既有线路和新建线路的可持续发展有从定量到定性的认识,即认知当前线路是否为“绿色铁路”,是否符合可持续发展的基本观点,这些研究成果必将为我国

(下转第 66 页)

### 3 横向刚度比较

旧桥规范要求限制宽跨比不小于  $1/20$  来保证桥梁的横向刚度,而本桥宽跨比为  $5.75/64 = 0.09 > 1/20$ ,满足旧桥规范要求。但通过有限元软件建立  $64\text{ m}$  跨下承式简支栓焊钢桁架空间模型,计算桥梁结构在标准有车风压及标准列车荷载作用下的横向自振频率为  $2.032\text{ Hz}$ ,根据新规范,桥梁横向自振频率需大于  $65/L^{0.8} = 2.33\text{ Hz}$  ( $L$  为跨度),故原桥横向刚度不满足新规范要求,需进行加固以保证铁路能正常运行。

### 4 结论

新旧钢桥规范在对纵向联结系的长细比限值,横

向刚度的描述,中心压杆轴向容许应力折减系数,各种构件疲劳容许应力的检算等方面存在差异,导致了老式  $64\text{ m}$  简支栓焊钢桁梁桥在刚度和构造等方面无法满足新规范要求,而强度也几乎达到新规范的临界值,随着高速铁路的发展和列车运载量的提升,需要对老式钢桥进行加固处理,以满足列车安全运营的要求。

### 参考文献:

- [1] 李富文,伏魁先,刘学信. 钢桥[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.
- [2] TB J2—85,铁路桥梁钢结构设计规范[S].
- [3] TB 10002.2—2005,铁路桥梁钢结构设计规范[S].

(编辑 慕成娟)

(上接第 46 页)

铁路事业大发展起到积极作用。

### 3 结论

综上所述,“绿色铁路”体系是一种新型的可持续发展的交通运输理念,也是一个新的研究领域。它的范畴包括铁路建设中的生态环境保护、水土保持、地质灾害防治,以及铁路运营、维护中的污染控制治理等诸多方面。绿色铁路的核心内涵是社会、经济、资源和环境的协调发展,并通过自身优势减少并最终实现对生态环境不产生负效应,避免人类活动对于外部环境的过度索取,以实现我国铁路设计、修建、运营和管理的可持续发展为最终目的,是落实科学发展观,构建社会主义和谐社会和建设资源节约型、环境友好型社会的必然选择。

### 参考文献:

- [1] 王慧炯,等. 可持续发展与交通运输[M]. 北京:中国铁

道出版社,2000.

- [2] 王梦恕,等. 21 世纪的铁路[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [3] Samir B Billates, Nadia A Basly. Green Technology and Design for the Environment[M]. Tayler&Francis,1999.
- [4] 甘德建. 绿色技术和绿色技术创新——可持续发展的当代形式[M]. 社会科学,2003,11 (2):22-25.
- [5] Hans Paukert, International Railway[J]. Rail International, 2002,12(3):30-33.
- [6] 徐娟. 可持续发展指标体系的评价与创新的可能途径[D]. 昆明:云南师范大学,2005.
- [7] 宁晓秋. 模糊数学原理与方法[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2004.
- [8] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [9] 约翰·德尔金. 高级专家系统的原理、设计及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.

(编辑 马 丽)

# 可持续发展的“绿色铁路”系统研究

作者：[熊风](#)，[杨立中](#)，[罗洁](#)，[贺玉龙](#)，[XIONG Feng](#)，[YANG Li-zhong](#)，[LUO Jie](#)，[HE Yu-long](#)  
作者单位：[西南交通大学](#)，成都，610031  
刊名：[铁道工程学报](#)   
英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)  
年，卷(期)：2007，24(5)  
被引用次数：3次

## 参考文献(9条)

1. [王慧炯](#) [可持续发展与交通运输](#) 2000
2. [王梦恕](#); [干昆蓉](#) [21世纪的铁路](#) 2001
3. [Samir B Billates](#); [Nadia A Basly](#) [Green Technology and Design for the Environment](#) 1999
4. [甘德建](#) [绿色技术和绿色技术创新——可持续发展的当代形式](#) [期刊论文]-[社会科学](#) 2003(02)
5. [Hans Paukert](#) [International Railway](#) 2002(03)
6. [徐娟](#) [可持续发展指标体系的评价与创新的可能途径](#) [学位论文] 2005
7. [宁晓秋](#) [模糊数学原理与方法](#) 2004
8. [郭亚军](#) [综合评价理论与方法](#) 2002
9. [约翰·德尔金](#) [高级专家系统的原理、设计及应用](#) 2005

## 本文读者也读过(8条)

1. [刘琪](#), [周文钊](#), [潘存荣](#) [铁路客运专线建设项目可持续发展评价研究](#) [期刊论文]-[科技信息 \(科学·教研\)](#) 2008(18)
2. [Li De jun](#) [战略装车点在铁路多经企业可持续发展的途径分析](#) [期刊论文]-[中国铁路](#) 2008(7)
3. [陆小建](#), [杨立中](#), [贺玉龙](#), [LU Xiao-jian](#), [YANG Li-zhong](#), [HE Yu-long](#) [满足可持续发展的绿色铁路](#) [期刊论文]-[环境科学与管理](#) 2006, 31(7)
4. [国建华](#) [时代呼唤“绿色交通”——铁路与我国交通运输的可持续发展](#) [期刊论文]-[铁道知识](#) 2010(1)
5. [刘泽君](#) [浅论高速铁路与可持续发展](#) [期刊论文]-[魅力中国](#) 2010(30)
6. [陶文祥](#) [我国铁路可持续发展的若干问题研究](#) [学位论文] 2006
7. [刘庭联](#), [Liu Tinglian](#) [铁路绿色施工现状与评价指标体系研究](#) [期刊论文]-[价值工程](#) 2010, 29(10)
8. [薛艳冰](#), [任民](#), [Xue Yanbing](#), [Ren Min](#) [铁路可持续发展评价体系研究](#) [期刊论文]-[铁道经济研究](#) 2010(5)

## 引证文献(3条)

1. [熊春梅](#), [杨立中](#) [西南山区建设“绿色铁路”的研究——以黔东南州为例](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2010(3)
2. [李化建](#), [谢永江](#), [谭盐宾](#), [易忠来](#), [冯仲伟](#) [高速铁路混凝土绿色度评价](#) [期刊论文]-[铁道学报](#) 2012(11)
3. [熊春梅](#), [杨立中](#), [贺玉龙](#) [基于生态足迹的西南山区资源可持续利用研究——以黔东南苗族侗族自治州为例](#) [期刊论文]-[中国人口·资源与环境](#) 2009(5)

引用本文格式：[熊风](#), [杨立中](#), [罗洁](#), [贺玉龙](#), [XIONG Feng](#), [YANG Li-zhong](#), [LUO Jie](#), [HE Yu-long](#) [可持续发展的“绿色铁路”系统研究](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2007(5)