

文章编号:1671-1637(2015)02-0010-12

绿色生态型城市道路评价指标体系

李满良¹, 郑晨¹, 王朝辉¹, 曾伟², 狄升贯²

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘要:为科学合理地评价绿色生态型城市道路, 确立了绿色生态型城市道路概念, 从设计合理性、道路功能效果、节能减排效果、绿化效果和环境保护效果五方面提出了绿色生态型城市道路评价指标体系, 包括5个一级指标、14个二级指标与31个三级指标, 并对各指标进行了阐述, 确定了各指标的评价标准, 提出了基于Spearman等级相关系数组合赋权方法与区间逼近方法的绿色生态型城市道路评价方法, 并对中新天津生态城绿色生态型道路进行了评价。评价结果表明: 中新天津生态城绿色生态型道路21个三级指标评定结果为优, 其余10个指标评定结果为良; 12个二级指标评定结果为优, 其余2个指标评定结果为良; 一级指标中设计合理性与环境保护效果评定结果为良, 其余指标评定结果为优; 绿色生态型城市道路评价指标集合到评价等级优的距离为3.82, 为评价指标集合到各评价等级的最小距离, 中新天津生态城绿色生态型道路评价结果为优, 与实际相符, 因此, 绿色生态型城市道路评价指标体系与评价方法合理、可靠。

关键词:道路工程; 生态型城市道路; 评价指标体系; 评价方法; 综合赋权

中图分类号:U412.1 **文献标志码:**A

Evaluation index system of green ecotype city road

LI Man-liang¹, ZHENG Chen¹, WANG Chao-hui¹, ZENG Wei², DI Sheng-guan²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: In order to evaluate green ecotype city road scientifically and rationally, the concept of green ecotype city road was proposed, and the evaluation index system was set up from 5 aspects, namely, rationality of design, effect of road function, energy-conservation and emission-reduction effect, greening effect and environmental protection effect. 5 first grade indexes, 14 second grade indexes and 31 third grade indexes were elaborated, and their evaluation standards were determined. The evaluation method of green ecotype city road was established on the basis of Spearman rank correlation coefficient combination determining method and interval approximation method. The green ecotype road of China-Singapore Tianjin Ecotype City was evaluated by using the method and the index system. Evaluation result shows that for the road, 21 third grade indexes are excellent and 10 third grade indexes are good. 12 second grade indexes are excellent and 2 second grade indexes are good. 2 first grade indexes, namely, rationality of design and environmental protection effect are good and the rest are excellent. The distance between the excellent evaluation grade and the evaluation index set of green ecotype city road is 3.82, and is smallest in the distances between the evaluation index set and the evaluation grades, which shows the green

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术项目(2014-R1-019); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1211003)

作者简介: 李满良(1974-), 男, 河南漯河人, 长安大学讲师, 工学博士研究生, 从事城市规划研究。

导师简介: 王健伟(1965-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 长安大学教授, 工学博士。

ecotype city road is excellent and the evaluation result is consistent with the reality. Therefore, the evaluation index system and the evaluation method are reasonable and reliable. 34 tabs, 21 refs.

Key words: road engineering; ecotype city road; evaluation index system; evaluation method; combination determining weight

Author resumes: LI Man-liang (1974-), male, lecturer, doctoral student, +86-29-82334741, gl01@chd.edu.cn; WANG Jian-wei (1965-), male, professor, PhD, +86-29-82334221, wjianwei@chd.edu.cn.

0 引言

保护地球环境,维持生态平衡,寻求与自然的和谐发展,走可持续发展道路已成为人们关注的焦点^[1-2]。在道路建设中,发展绿色生态型道路符合中国节约资源、保护生态环境为主的可持续发展的要求,因此,绿色生态型城市道路必将成为城市道路发展的方向^[3-5]。近年来,不少学者对绿色生态型道路的概念进行了初步探讨,彭波等提出生态公路是以生态效益、经济效益和社会效益协调发展为目标,运用生态学的科学原理指导公路工程实践,将公路的设计、建设与自然环境相融合,形成行车安全舒适、运输高效便利、景观完整和谐的带状公路交通生态系统和区域交通生态系统^[6-8];秦晓春等对绿色公路的内涵与特点进行界定,建立了低碳理念下绿色公路建设的关键技术与应用体系^[9-10];Fábos等提出了绿色公路理念与评价体系,将绿色公路定义为基于可持续发展定义与要求,将一系列优良的可持续性发展实践运用于公路设计和施工过程中的公路项目,提出绿色公路的评价指标^[11-12];王晓华等针对绿色生态型城市道路横断面优化提出了交通安全、降噪、空间伸缩、道路绿化、视觉美感、公众满意、土地利用、建设投资等八大指标评价标准,建立了基于模糊重构 DEA 的绿色生态型城市道路横断面的优化模型。但是目前国内外均尚未明确提出绿色生态型道路的概念,许多人对绿色生态型道路的内涵产生了混淆,在中国建设的生态型道路中,大都是以公路绿化为主要措施,没有评价绿色生态型道路整体功能。

为了合理评价生态型道路的整体功效,本文确立了绿色生态型城市道路概念,提出包括5个一级指标、14个二级指标、31个三级指标的绿色生态型城市道路评价指标体系,并对各指标进行了阐述,确定了各指标评价标准;基于评价指标体系,建立基于Spearman等级相关系数组合赋权方法与区间逼近方法的绿色生态型道路评价方法,并对中新天津生

态城绿色生态型道路进行了综合评价。

1 绿色生态型城市道路概念

绿色生态型城市道路是指在道路的全寿命周期内,最大限度地节约资源,保护环境和减少污染,为人们提供健康、舒适、高效的道路使用环境。绿色是指对环境无害,能充分利用自然资源,节能减排,废物回收再利用,倡导绿色交通为导向,在对周围环境负影响最小的情况下建造的道路,又称为可持续发展道路、生态道路与节能环保道路等。绿色生态型道路要求尽量使用节能环保与可回收再利用材料,以人、自然和道路协调发展为目标^[13-14]。

2 绿色生态型城市道路评价指标体系

2.1 评价指标体系建立的原则

为了有效衡量道路绿色生态化的程度与分析生态型城市道路的影响因素,建立评价指标体系要充分考虑科学性原则、系统性原则、可操作性原则、独立性原则、可比性原则与实际性原则。

2.2 评价指标体系的构建

本文通过系统调查和深入分析,提出绿色生态型城市道路评价指标体系见表1。

2.2.1 设计合理性

道路施工难度与道路建设地区周边生态平衡问题主要取决于路线与道路横断面的设计,因此,从横断面设计效果、线形质量合理性和景观适宜性三方面对道路设计合理性进行评价。

(1)横断面设计效果。交通安全是绿色道路交通系统的重要内容,关系到道路使用者的切身利益。影响横断面交通安全的主要因素是机动车道宽度、道路分隔和道路照明,设机动车道宽度为 $A(m)$,对应的评价标准见表2。

据调查道路的便捷性及其对环境的影响是对居民满意程度影响的主要因素,因此,从这两方面分析公众满意度,对应的评价标准见表3。

影响横断面噪声的主要因素有行车速度、行道

表 1 评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system

一级指标	二级指标	三级指标
设计合理性	横断面设计效果	交通安全指数
		公众满意度指数
		降噪效果指数
		视觉美感指数
		土地利用指数
		空间伸缩指数
	线形质量合理性	道路通行能力指数
		交通安全指数
		行车舒适指数
	景观适宜性	道路与环境协调指数
道路功能效果	排水效果	空隙率
	降噪效果	空隙率
		区域噪声达标指数
	缓解城市热岛效果	温差指数
节能减排效果	新材料应用效果	低碳环保材料使用指数
	新技术应用效果	技术效果指数
		技术应用指数
	材料回收与废物利用效果	循环材料利用指数
		废弃物利用指数
绿化效果	绿化植物选择效果	滞尘杀菌能力指数
		降温增湿指数
		固碳释氧能力指数
	道路绿化面积效果	绿化覆盖指数
		人均绿地占有水平指数
	绿化交通功能效果	视线诱导指数
		缓解疲劳指数
环境保护效果	降低大气污染效果	空气综合污染指数
		交通污染弹性指数
	降低水污染效果	施工污水垃圾处理指数
		路面残留物污染指数
		污水处理达标指数

表 2 交通安全分级标准

Tab. 2 Grading standards of traffic safety

分级	交通安全指数
优	$A=3.75$, 四幅路, 两侧设置照明灯
良	$A \in [3.50, 3.75)$, 3 幅路, 中心设置照明灯
中	$A \in [3.00, 3.75)$, 3 幅路, 单侧设置照明灯
次	$A \in [3.00, 3.50)$, 2 幅路, 单侧设置照明灯
差	$A < 3.00$, 1 幅路, 不设置照明灯

表 3 公众满意度分级标准

Tab. 3 Grading standards of public satisfaction

分级	公众满意度指数
优	交通出行快速、便捷, 显著改善了城市环境, 公众非常满意
良	交通出行得到改善, 城市环境逐步向良性方向发展, 公众比较满意
中	交通出行稍微改善, 城市环境有向良性发展的趋势, 公众满意度一般
次	交通稍有拥堵, 城市环境稍有恶化, 公众不满意
差	交通拥堵仍然存在, 城市环境有所恶化, 公众很不满意

树绿带宽度与步行道至建筑红线的距离, 因此, 从这三方面来分析降噪效果的分级标准, 设行道树绿带宽度为 $B(m)$, 步行道至建筑红线的距离为 $C(m)$, 对应评价标准见表 4。

表 4 降噪效果分级标准

Tab. 4 Grading standards of noise reduction effect

分级	降噪效果指数
优	没有紧急刹车, $B \geq 2.00, C \geq 4$
良	紧急刹车很少, $B \in [1.75, 2.00), C \in [3, 4)$
中	紧急刹车较少, $B \in [1.50, 1.75), C \in [2, 3)$
次	紧急刹车较多, $B \in [1.00, 1.50), C \in [1, 2)$
差	紧急刹车频繁, $B < 1.00, C < 1$

城市道路横断面设计视觉美感主要指道路景观设计, 主要取决于建筑高度与道路宽度的协调性, 用道路宽度 K 与建筑高度 L 之比 K/L 来表示, 对应的评价标准见表 5。根据有关资料分析: $K/L=1$ 时高度和分隔有匀称感; $K/L < 1$ 时空间封闭感强; $4 \geq K/L > 1$ 时空间封闭性减弱, 有离开感; $K/L > 4$ 时失去相互间的影响力。一般认为 $1 < K/L < 2$ 既具有封闭空间的能力又没有建筑压迫感, 在这种空间比例下的步行空间可取得一定的亲切感和热闹气氛。

表 5 K/L 的标尺Tab. 5 Scales of K/L

K/L	$[1, 2)$	$[2, 3)$	$[3, 4)$	$[4, +\infty)$	$(0, 1)$
分级	优	良	中	次	差

在横断面设计时必须充分考虑土地利用情况, 做到既满足道路建设要求又不浪费土地资源, 达到绿色环保要求, 采用道路红线宽度对城市道路横断面进行评价。据调查城市快速路红线宽度以 $50 \sim 60 m$ 为宜, 主干道以 $36 \sim 50 m$ 为宜, 支路小于 $24 m$ 。设快速路红线宽度为 $D(m)$, 主干道为 $E(m)$, 支路为 $F(m)$, 对应的评价标准见表 6。

表 6 土地利用分级标准
Tab. 6 Grading standards of land use

分级	土地利用指数
优	$D \leq 50, E \leq 40, F \leq 20$
良	$D \in (50, 55], E \in (40, 45], F \in (20, 22]$
中	$D \in (55, 60], E \in (45, 50], F \in (22, 24]$
次	$D \in (60, 65], E \in (50, 55], F \in (24, 26]$
差	$D > 65, E > 55, F > 26$

绿色生态型道路横断面设计要充分考虑道路今后发展的需要,为拓宽机动车道与港湾式公交停靠站的设置等提供空间,空间伸缩可以通过非机动车道、人行道、中央分隔带与机非分隔带宽度来实现,设非机动车道宽度为 $G(\text{m})$,人行道宽度为 $H(\text{m})$,中央分隔带宽度为 $I(\text{m})$,机非隔离带宽度为 $J(\text{m})$,对应的评价标准见表 7。

表 7 空间伸缩分级标准
Tab. 7 Grading standards of spatial flexibility

分级	空间伸缩指数
优	$G > 5.0$ 或 $H > 6.5$ 或 $I > 8.0$ 或 $J > 6.0$
良	$G \in (4.5, 5.0]$ 或 $H \in (5.0, 6.5]$ 或 $I \in (7.0, 8.0]$ 或 $J \in (4.5, 6.0]$
中	$G \in (4.0, 4.5]$ 或 $H \in (4.5, 5.0]$ 或 $I \in (6.0, 7.0]$ 或 $J \in (3.0, 4.5]$
次	$G \in (3.5, 4.0]$ 或 $H \in (4.0, 4.5]$ 或 $I \in (5.0, 6.0]$ 或 $J \in (2.0, 3.0]$
差	$G \leq 3.5$ 或 $H \leq 4.0$ 或 $I \leq 5.0$ 或 $J \leq 2.0$

(2)线形质量合理性。道路线形设计包括道路的平面线形和纵断面线形,道路线形质量影响道路通行能力、交通安全和行车舒适性,良好的道路通行能力会给城市带来较大的效益,采用道路行车通畅程度来表征其通行能力,对应的评价标准见表 8。

表 8 道路通行能力与交通安全分级标准
Tab. 8 Grading standards of road traffic capacity
and traffic safety

分级	通行能力指数	交通安全指数
优	道路非常通畅	出行安全系数非常高,未有人身财产安全事故
良	道路比较通畅	出行安全系数比较高,很少有人身财产安全事故
中	道路有拥堵趋势	出行安全系数一般,人身财产安全事故较少
次	道路比较拥堵	出行安全系数较差,人身财产安全事故较多
差	道路非常拥堵	出行安全系数很差,人身财产安全事故频发

城市道路最重要的线形设计目标是要同时保证机动车驾驶人和行人的安全,交通安全指标通过道路使用者人身财产安全作为其分级标准,其相应的指标用交通安全指数表示,对应的评价标准见表 8。绿色生态型道路线形设计的另一个目的是满足行车舒适性要求,行车舒适会使驾驶人心情愉悦,间接提高道路的交通安全,行车舒适性指标是指道路使用者在道路行驶时对道路功能的主观评价,对应的评价标准见表 9。

表 9 行车舒适性分级标准
Tab. 9 Grading standards of riding comfort

分级	优	良	中	次	差
行车舒适性指数	行车非常舒适	行车较舒适	行车可以接受	行车不舒适	行车很不舒适

(3)景观适宜性。绿色生态型道路要求道路与景观相适宜,这样才能更加体现生态型城市与自然相融合的内涵,景观适宜性评价指标指道路与周围景观融洽程度,用道路与环境协调指数表示,对应的评价标准见表 10。

表 10 景观适宜性分级标准
Tab. 10 Grading standards of landscape suitability

分级	景观适宜性指数
优	道路和周围景观非常融洽
良	道路和周围景观较适宜
中	道路和周围景观互不影响
次	道路和周围景观不融洽
差	道路和周围景观非常不融洽

2.2.2 道路功能效果

道路的排水效果和降噪效果均与道路路面的空隙率有关,中华人民共和国住房和城乡建设部公布的《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190—2012)中规定透水沥青混合料的空隙率为 18%~25%;《透水混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)中规定透水水泥混凝土路面空隙率为 11%~17%,因此,排水效果和降噪效果均采用空隙率作为评价指标,其分级标准见表 11。据相关资料显示,噪声在 30~40 dB 不会影响人们的日常生活,即区域噪声达标,超过 50 dB 则会影响人们的日常生活,因此,通过社会影响程度来标定区域噪声达标指数,其分级标准见表 12。缓解城市热岛效果是通过温度降低幅度来表示,采用路面温度和路内温度之差作为评价指标,用温差指数表示,其分级标准见表 13。

2.2.3 节能减排效果

绿色生态型道路节能减排效果主要体现在新材

表 11 排水与降噪效果分级标准

Tab. 11 Grading standards of drainage and noise reduction effects

分级	优	良	中	次	差
排水效果/%	(23,25]	(20,23]	(18,20]	(16,18]	(12,16]
降噪效果/%	(22,25]	(20,22]	(18,20]	(16,18]	(14,16]
	沥青路面	(22,25]	(20,22]	(18,20]	(16,18]
	水泥路面	(15,17]	(13,15]	(11,13]	(9,11]
		(15,17]	(13,15]	(11,13]	(7,9]

表 12 区域噪声分级标准

Tab. 12 Grading standards of regional noise

分级	区域噪声达标指数
优	道路区域噪声未对社会造成影响
良	道路区域噪声对社会稍微有影响
中	道路区域噪声对社会有一定影响
次	道路区域噪声对社会影响严重
差	道路区域噪声对社会影响非常严重

表 13 缓解城市热岛效果分级标准

Tab. 13 Grading standards of remission urban heat island effect

分级	优	良	中	次	差
温差指数/℃					
	沥青路面	>8	(6,8]	(4,6]	(2,4]
	水泥路面	>6.5	(5,6.5]	(3,5]	(2,3]
	透水砖路面	>7.5	(6,7.5]	(4,6]	(2,4]
					≤2
					≤2
					≤2

料、新技术和循环材料与废旧材料应用上。

(1)新材料应用效果。绿色生态型道路新材料指选择当地低碳环保材料,其相应的指标采用低碳环保材料使用指数表示,对应的评价标准见表 14。

表 14 低碳环保材料使用分级标准

Tab. 14 Grading standards of use of low-carbon eco-friendly materials

分级	低碳环保材料使用指数
优	新材料既满足路用功能又经济环保,整条道路都采用新材料
良	新材料基本满足路用功能,2/3 道路长度采用新材料
中	新材料路用功能一般,1/3 道路长度采用新材料
次	新材料路用功能较差,300 m 试验段采用新材料
差	新材料路用功能很差,100 m 试验段采用新材料

(2)新技术应用效果。绿色生态型道路新技术是指对路面施工采用新的技术达到节能环保效果,对应的评价标准见表 15。

(3)材料回收与废物利用效果。绿色生态型道路要求尽量采用经济环保材料,采用可循环利用材料和废旧材料正是体现绿色生态型道路要求,对应

的评价标准见表 16。

表 15 新技术应用效果分级标准

Tab. 15 Grading standards of using effect of new technologies

分级	技术效果指数	技术应用指数
优	道路功能明显优于普通道路	整条道路都采用新技术
良	道路功能比普通道路稍强	2/3 道路长度采用新技术
中	道路功能与普通道路差不多	1/3 道路长度采用新技术
次	道路功能比普通道路差	300 m 试验段采用新技术
差	道路功能明显比普通道路差	100 m 试验段采用新技术

表 16 循环材料与废弃物利用分级标准

Tab. 16 Grading standards of utilization of recycled materials and wastes

分级	可循环材料利用指数	废弃物利用指数
优	整条道路都采用可循环利用材料	整条道路都采用废弃物作材料
良	2/3 道路长度采用可循环利用材料	2/3 道路长度采用废弃物作材料
中	1/3 道路长度采用可循环利用材料	1/3 道路长度采用废弃物作材料
次	300 m 试验段采用可循环利用材料	300 m 试验段采用废弃物作材料
差	100 m 试验段采用可循环利用材料	100 m 试验段采用废弃物作材料

2.2.4 绿化效果

绿化效果是影响绿色生态型道路环境的关键,绿化面积与绿化植物的选择直接影响道路生态系统状况,道路绿化同时也具有交通功能,给驾驶人带来视线诱导和缓解疲劳的作用,因此,采用绿化植物选择效果、道路绿化面积效果和绿化交通功能效果作为绿化效果评价指标。

(1)白蜡、臭椿、馒头柳、桧柏与金银木等具有滞尘杀菌作用,国槐与紫薇等具有降温增湿作用,女贞、臭椿与毛白杨等具有固碳释氧作用,这些都有助于道路生态系统的保护,因此,可采用滞尘杀菌能力指数、降温增湿指数和固碳释氧能力指数作为绿化植物选择效果评价指标,评价标准见表 17、18。

(2)绿色生态型道路绿化面积能够体现道路绿化生态化程度,其相应的指标采用绿化覆盖指数和人均绿地占有水平指数表示。绿化覆盖指数是道路绿化率的定性评价指标,道路绿化率是道路绿化总宽度与道路红线宽度的比值。通常情况下道路绿化总宽度为道路红线宽度的 15%~30%,因此,采用均值方法对道路绿化覆盖进行分级,对应的评价标准见表 19。

表 17 滞尘杀菌能力与降温增湿分级标准
Tab. 17 Grading standards of removal-bactericidal
dust capacity and cooling-humidifying capacity

分级	滞尘杀菌能力指数	降温增湿指数
优	植物叶面无尘土,具有非常强的杀菌能力	植物具有良好的降温增湿能力
良	植物叶面稍有尘土,具有较强的杀菌能力	植物具有好的降温增湿能力
中	植物叶面尘土可见,具有一定的杀菌能力	植物具有一定的降温增湿能力
次	植物叶面尘土明显,杀菌能力不佳	植物稍微具有降温增湿能力
差	植物叶面尘土非常明显,杀菌能力很差	植物无降温增湿能力

表 18 固碳释氧分级标准
Tab. 18 Grading standards of carbon fixation and oxygen release

分级	固碳释氧指数
优	植物具有良好的固碳释氧能力
良	植物具有好的固碳释氧能力
中	植物具有一定的固碳释氧能力
次	植物稍微具有固碳释氧能力
差	植物无固碳释氧能力

表 19 绿化覆盖与人均绿地占有水平分级标准
Tab. 19 Grading standards of greening coverage and
per capita greening possession level

分级	优	良	中	次	差
绿化覆盖指数/%	>30	(20,30]	(15,20]	(10,15]	≤10
人均绿地占有水平指数	绿地占有水平非常合理	绿地占有水平较合理	绿地占有水平稍不合理	绿地占有水平较小	绿地占有水平非常小

(3)绿化道路具有交通功能,其相应的指标通过视线诱导指数和缓解疲劳指数表示。视线诱导是指道路对驾驶人的引导功能;缓解疲劳是指道路对驾驶人的心理诱导,通过周围景物来缓解驾驶人的疲劳,对应的评价标准分别见表 20、21。

表 20 视线诱导分级标准
Tab. 20 Grading standards of sight induction

分级	优	良	中	次	差
视线诱导指数	非常有利于视线诱导	较有利于视线诱导	有利于视线诱导	不利于视线诱导	非常不利于视线诱导

表 21 缓解疲劳分级标准
Tab. 21 Grading standards of relieving fatigue

分级	优	良	中	次	差
缓解疲劳指数	非常有利于缓解疲劳	较有利于缓解疲劳	有利于缓解疲劳	不利于缓解疲劳	非常不利于缓解疲劳

2.2.5 环境保护效果
绿色生态型道路必须是环保型道路,环保效果可以通过降低大气污染效果和降低水污染效果来评价。

(1)在道路施工过程中,路面材料加工和铺筑散发的气体与道路车辆排放的尾气都会造成大气污染,采用空气综合污染指数和交通污染弹性指数表示。空气综合污染指数是通过空气中有有害气体如 SO₂、NO₂ 等排放量作为分级指标,交通污染弹性指数是以道路上行驶车辆尾气排放量对环境带来的影响作为分级指标,对应的评价标准见表 22。

表 22 降低大气污染效果分级标准
Tab. 22 Grading standards of reducing atmospheric pollution effect

分级	优	良	中	次	差
空气综合污染指数	未有污染	轻微污染	一般污染	严重污染	非常严重污染
交通污染弹性指数					

(2)降低水污染效果采用施工污水垃圾处理指数、路面残留物污染指数和污水处理达标指数进行评价。施工污水垃圾处理指数是通过施工垃圾分类处理方法与工艺作为分级指标;路面残留物污染指数是以道路上残留物数量作为分级指标;污水处理达标指数是以污水处理方法对环境造成影响作为分级指标,对应的评价标准见表 23。

表 23 降低水污染效果分级标准
Tab. 23 Grading standards of reducing water pollution effect

分级	优	良	中	次	差
施工污水垃圾处理指数	处理方案非常合理	处理方案比较合理	处理方案一般	处理方案不合理	处理方案非常不合理
路面残留物污染指数	未有污染	轻微污染	一般污染	较多污染	非常多污染
污水处理达标指数	处理方案非常合理	处理方案比较合理	处理方案一般	处理方案不合理	处理方案非常不合理

3 绿色生态型城市道路评价方法

在大多数评价体系中,主观赋权法的决策准确性与可靠性略差,随意性大,客观赋权有时计算结果无法解释^[15-17],通常的评价方法未研究指标数据代表的可靠性,未曾从整体逼近进行考虑,因此,为了解决以上问题,本文提出了基于综合赋权与区间逼近的绿色生态型道路评价方法^[18-21]。

设计合理性、道路功能效果、节能减排效果、绿化效果 and 环境保护效果均为定性分析指标,需要一定的赋值,本文采用专家百分制打分进行单因素模

糊评价,确定指标的区间数,其中专家打分对应的离散语言标尺见表 24^[18-20]。

表 24 评价指标的离散语言标尺

Tab. 24 Scales of discrete languages of evaluation indexes

标尺	优	良	中	次	差
评分	90~100	80~90	60~80	50~60	0~50

3.1 主观赋权

根据专家咨询与分析结果,绿色生态型道路评价体系中设计合理性、道路功能效果、节能减排效果、绿化效果 and 环境保护效果 5 个一级指标的主观权重见表 25。设计合理性的二级指标的横断面设计效果、线形质量合理性和景观适宜性的主观权重分别为 0.40、0.30、0.30,其中,横断面设计效果的三级指标的交通安全指数、公众满意度指数、降噪效果指数、视觉美感指数、土地利用指数和空间伸缩指数主观权重分别为 0.20、0.15、0.17、0.15、0.17、0.16,线形质量合理性的三级指标的道路通行能力指数、交通安全指数和行车舒适指数主观权重分别为 0.34、0.34、0.32;道路功能效果的二级指标的排水效果、降噪效果和缓解城市热岛效果的主观权重分别为 0.34、0.33、0.33,其中,降噪效果的三级指标的空隙率和区域噪声达标指数的主观权重为 0.50;节能减排效果的二级指标的新材料应用效果、新技术应用效果和材料回收与废物利用效果的主观权重分别为 0.34、0.33、0.33,其中,新技术应用效果的三级指标的技术效果指数和技术应用指数的主观权重为 0.50,材料回收与废物利用效果的三级指标的循环材料利用指数和废弃物利用指数的主观权重为 0.50;绿化效果的二级指标的绿化植物选择效果、道路绿化面积效果和绿化交通功能效果的主观权重分别为 0.30、0.35、0.35,其中,绿化植物选择效果的三级指标的滞尘杀菌能力指数、降温增湿指数和固碳释氧能力指数的主观权重分别为 0.34、0.33、0.33,道路绿化面积效果的三级指标的绿化覆盖指数和人均绿地占有水平指数的主观权重为 0.50,绿化交通功能效果的三级指标的视线诱导指数和缓解疲劳指数的主观权重为 0.50;环境保护效果的二级指标的降低大气污染效果和降低水污染效果的主观权重为 0.50,其中,降低大气污染效果的三级指标的空气综合污染指数和交通污染弹性指数的主观权重为 0.50,降低水污染效果的三级指标的施工污水垃圾处理指数、路面残留物污染指数和污水处理达标指数的主观权重分别为 0.34、0.30、0.36。

表 25 一级指标主观权重

Tab. 25 Subjective weights of first grade indexes

一级指标	设计合理性	道路功能效果	节能减排效果	绿化效果	环境保护效果
主观权重	0.21	0.22	0.22	0.20	0.15

3.2 客观赋权

设方案集 M 与指标集 N 分别为

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\} \quad (1)$$

$$N = \{N_1, N_2, \dots, N_m\} \quad (2)$$

式中: M_i 为方案 i ; N_j 为指标 j ; n 为决策方案个数; m 为方案中的指标个数。

方案集 M 与指标集 N 构成决策矩阵 X 为

$$X = (x_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为方案 i 的第 j 个指标值。

对原始指标值进行归一化处理,得

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} & \text{效益型指标} \\ \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (4)$$

则决策矩阵 X 变为归一化决策矩阵 Y

$$Y = (y_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: y_{ij} 为归一化指标值; x_j^{\max} 、 x_j^{\min} 分别为所有方案中 j 指标的最大值和最小值。

最小隶属度加权平均偏差法的权重为

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n g_j - y_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n g_j - y_{ij}} \quad (6)$$

$$g_j = \max\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\} \quad (7)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的权重。

均方差法的权重为

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^m \sigma_j} \quad (8)$$

$$\sigma_j = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - P_j)^2} \quad (9)$$

$$P_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (10)$$

3.3 组合赋权

(1) 计算 Spearman 等级相关系数。假定有 s 种赋权方法,其相关系数为

$$\rho_{ak} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m (\omega_{aj}^0 - \omega_{kj}^0)^2}{m(m-1)(m+1)} \quad (11)$$

式中: ρ_{ak} 为第 a 种赋权方法和第 k 种方法之间的 Spearman 等级相关系数; ω_{aj}^0 为采用第 a 种方法测出的第 j 个指标权重。

(2) 寻找相对一致性最高的方法。首先,找出 Spearman 等级相关系数中的最大者

$$\rho_{uv} = \max(\rho_{ak}) \quad (12)$$

然后,比较方法 u 和方法 v 与其他方法的 Spearman 等级相关系数大小,选出较大者,假设为方法 u ,也就是说 u 在所有赋权方法中是一致性相对最高的一种赋权方法,其他方法与方法 u 的 Spearman 等级相关系数构成相关向量 ρ_u

$$\rho_u = (\rho_{u1}, \rho_{u2}, \dots, \rho_{us}) \quad (13)$$

(3) 将 ρ_u 进行归一化处理,得到方法的权向量 W 为

$$W = (\omega_1^0, \omega_2^0, \dots, \omega_s^0) \quad (14)$$

$$\omega_a = \frac{\rho_{ua}}{\sum_{a=1}^s \rho_{ua}} \quad (15)$$

式中: ω_a^0 为方法 a 的权重。

(4) 指标的综合权重为

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) = W \cdot W^0 =$$

$$(\omega_1^0, \omega_2^0, \dots, \omega_s^0) \cdot \begin{bmatrix} \omega_{11}^0 & \dots & \omega_{1m}^0 \\ \vdots & & \vdots \\ \omega_{s1}^0 & \dots & \omega_{sm}^0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: W^0 为 s 种方法对 m 种指标的权矩阵; θ 为指标权向量; ω_{aj}^0 为方法 a 对指标 j 的权重; θ_j 为指标 j 的综合权重。

由此可见,Spearman 等级相关系数是通过把各个赋权法有机集成起来,在一定程度上克服了单一赋权法的不足之处。

把综合权向量 θ 与决策矩阵 X 相乘后,可得到指标评价矩阵 R

$$R = (r_1, r_2, \dots, r_n) = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \cdot \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

综合评价指标的分值 r 为

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (18)$$

式中: r_i 为方案 i 的分值。

3.4 区间逼近法

设指标 j 各方案指标值 x_{ij} 服从平均值为 \bar{x}_j 和标准偏差为 S 的正态分布,其双边置信区间为

$$\bar{x}_j - u_{\alpha/2} S / \sqrt{n} < x_{ij} < \bar{x}_j + u_{\alpha/2} S / \sqrt{n} \quad (19)$$

当置信概率 $1-\alpha$ (α 为显著水平) 取 95% 时,正态分布临界值 $u_{\alpha/2}$ 为 1.96,可得各指标的区间数为

$$x_{ij} \in (\bar{x}_j - 1.96 S / \sqrt{n}, \bar{x}_j + 1.96 S / \sqrt{n}) \quad (20)$$

假设某指标实测数据的区间数为 $[b, c]$,该区间数所在的级别等级度量值为 $[z_e^L, z_e^U]$,计算待评指标区间数到该区间数所在单项指标等级的距离 d_e ,按照最小的 d_e 值确定待评方案的评估级别^[21]

$$d_e = \sqrt{(b - z_e^L)^2 + (c - z_e^U)^2} \quad (21)$$

式中: z_e^L 为等级 e 的分值上限; z_e^U 为等级 e (共计 p 个等级) 的分值下限。

(1) 效果指标体系的确定。由于绿色生态型道路评价指标共分为 3 级,在评价时,逐级采用区间数逼近决策模型进行多指标综合评价,最终得到绿色生态型道路的综合效果值。

设上级指标 O 中 m 个下级指标分值集为 $\{O_1, O_2, \dots, O_m\}$,各指标评价等级集为 $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_p\}$, Q_e 为功能效果等级,其功能效果评价标准见表 26, z_{ej}^U 与 z_{ej}^L 为指标 j 的分类上、下限值。

表 26 单指标等级划分标准

Tab. 26 Grading standards of single indexes

指标	O_1	...	O_j	...	O_m
分值	$z_{e1}^L \sim z_{e1}^U$...	$z_{ej}^L \sim z_{ej}^U$...	$z_{em}^L \sim z_{em}^U$

(2) 决策矩阵的建立。设待评指标 O 的功能效果分值集为 $\{[z_{01}^L, z_{01}^U], [z_{02}^L, z_{02}^U], \dots, [z_{0m}^L, z_{0m}^U]\}$, 且 $z_{0j}^L \leq z_{0j}^U$, 则指标分数决策矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} [z_{01}^L, z_{01}^U] & \dots & [z_{0m}^L, z_{0m}^U] \\ \vdots & & \vdots \\ [z_{p1}^L, z_{p1}^U] & \dots & [z_{pm}^L, z_{pm}^U] \end{bmatrix} \begin{matrix} Q_0 \\ \vdots \\ Q_p \end{matrix} \quad (22)$$

式中: Q_0 为待评指标 O 所属等级。

(3) 区间数决策评价矩阵的确立。将决策矩阵 Z 与权重向量 θ 进行集结,得到区间数决策评价矩阵 T 为

$$T = \begin{bmatrix} [q_{01}^L, q_{01}^U] & \dots & [q_{0m}^L, q_{0m}^U] \\ \vdots & & \vdots \\ [q_{p1}^L, q_{p1}^U] & \dots & [q_{pm}^L, q_{pm}^U] \end{bmatrix} \begin{matrix} Q_0 \\ \vdots \\ Q_p \end{matrix} =$$

$$\begin{bmatrix} [z_{01}^L \theta_1, z_{01}^U \theta_1] & \cdots & [z_{0m}^L \theta_m, z_{0m}^U \theta_m] \\ \vdots & & \vdots \\ [z_{p1}^L \theta_1, z_{p1}^U \theta_1] & \cdots & [z_{pm}^L \theta_m, z_{pm}^U \theta_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ \vdots \\ Q_p \end{bmatrix} \quad (23)$$

(4)决策评定准则。决策评价准则为评价方案到各等级距离越短越接近,最短距离所在等级为待评方案的评价等级, Q_0 到 Q_e 的距离为

$$d_e = \sqrt{d_{e1}^2 + d_{e2}^2 + \cdots + d_{em}^2} \quad (24)$$
$$d_{ej} = \max \left\{ |q_{0j}^L - q_{ej}^L|, |q_{0j}^U - q_{ej}^U| \right\}$$

表 27 设计合理性评价指标效果分值

Tab. 27 Effect scores of rational design evaluation indexes

二级指标	横断面设计效果						线形质量合理性			景观适宜性
三级指标	交通安全指数	公众满意度指数	降噪效果指数	视觉美感指数	土地利用指数	空间伸缩指数	道路通行能力指数	交通安全指数	行车舒适指数	道路与环境协调指数
评分 1	90	89	91	88	92	94	87	90	91	89
评分 2	87	91	93	87	90	91	95	93	94	91
评分 3	89	89	89	89	93	96	86	87	89	93
评分 4	91	90	92	85	91	93	90	89	89	90
评分 5	86	88	90	88	92	92	91	90	90	92

表 28 道路功能评价指标效果分值

Tab. 28 Effect scores of road function evaluation indexes

二级指标	排水效果	降噪效果		缓解城市热岛效果
三级指标	空隙率	空隙率	区域噪声达标指数	温差指数
评分 1	93	93	90	92
评分 2	93	93	92	92
评分 3	93	93	93	92
评分 4	93	93	90	92
评分 5	93	93	91	92

表 29 节能减排评价指标效果分值

Tab. 29 Effect scores of energy-conservation and emission-reduction evaluation indexes

二级指标	新材料应用效果	新技术应用效果		材料回收与废物利用效果	
三级指标	低碳环保材料使用指数	技术效果指数	技术应用指数	可循环材料利用指数	废弃物利用指数
评分 1	91	92	94	94	90
评分 2	88	90	91	91	93
评分 3	94	90	87	87	96
评分 4	92	95	95	93	94
评分 5	95	86	88	95	90

表 30 绿化评价指标效果分值

Tab. 30 Effect scores of greening evaluation indexes

二级指标	绿化植物选择效果			道路绿化面积效果		绿化交通功能效果	
三级指标	滞尘杀菌能力指数	降温增湿指数	固碳释氧能力指数	绿化覆盖指数	人均绿地占有水平指数	视线诱导指数	缓解疲劳指数
评分 1	91	90	92	91	88	88	88
评分 2	90	88	88	95	90	91	94
评分 3	95	97	98	96	91	95	88
评分 4	92	92	88	96	94	96	92
评分 5	96	89	91	93	93	88	87

绿色生态型道路中采用下一级指标评价上一级指标,采取组合赋权的方法确定权重并计算结果,最终将一级指标分值与主观权重相乘以式(23)和(24),得出绿色生态型道路功能效果评价价值。

4 中新天津生态城绿色生态型道路评价

采取基于综合赋权与区间逼近相结合的方法对中新天津生态城绿色生态型道路进行评价,5 位专家对三级指标打分情况见表 27~31。

表 31 环境保护评价指标效果分值

Tab. 31 Effect scores of environmental protection evaluation indexes

二级指标	降低大气污染效果		降低水污染效果		
三级指标	空气综合污染指数	交通污染弹性指数	施工污水垃圾处理指数	路面残留物污染指数	污水处理达标指数
评分 1	92	94	90	90	86
评分 2	88	91	86	86	90
评分 3	96	88	84	92	88
评分 4	90	90	89	89	90
评分 5	89	86	87	96	93

4.1 权重计算

以横断面设计评价为例,计算指标区间数,根据以上专家打分结果,置信概率取 95%,计算得各指标的区间数见表 32。

表 32 各指标的区间数

Tab. 32 Intervals of indexes

指标	均值	区间数
交通安全指数	88.6	86.7~90.5
公众满意度指数	89.4	88.4~90.4
降噪效果指数	91.0	89.6~92.4
视觉美感指数	87.4	86.0~88.8
土地利用指数	91.6	90.6~92.6
空间伸缩指数	93.2	91.5~94.9

将交通安全指数、公众满意度指数、降噪效果指数、视觉美感指数、土地利用指数和空间伸缩指数作为组合赋权的三级指标,构成横断面设计评价指标集,则决策矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} 90 & 89 & 91 & 88 & 92 & 94 \\ 87 & 91 & 93 & 87 & 90 & 91 \\ 89 & 89 & 89 & 89 & 93 & 96 \\ 91 & 90 & 92 & 85 & 91 & 93 \\ 86 & 88 & 90 & 88 & 92 & 92 \end{bmatrix}$$

以上各指标均为效益型指标,计算可得归一化矩阵 Y 为

$$Z = \begin{bmatrix} [86.7, 90.5] & [88.4, 90.4] & [89.6, 92.4] \\ [90.0, 100.0] & [90.0, 100.0] & [90.0, 100.0] \\ [80.0, 90.0] & [80.0, 90.0] & [80.0, 90.0] \\ [60.0, 80.0] & [60.0, 80.0] & [60.0, 80.0] \\ [50.0, 60.0] & [50.0, 60.0] & [50.0, 60.0] \\ [0.0, 50.0] & [0.0, 50.0] & [0.0, 50.0] \end{bmatrix}$$

将决策矩阵与权重向量进行集结,得到区间数

$$Y = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.33 & 0.50 & 0.75 & 0.67 & 0.60 \\ 0.20 & 0.60 & 0.80 & 0.40 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.33 & 0.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 0.67 & 0.75 & 0.00 & 0.33 & 0.40 \\ 0.00 & 0.00 & 0.25 & 0.75 & 0.67 & 0.20 \end{bmatrix}$$

按最小隶属度加权平均偏差法得客观权重为 (0.188, 0.110, 0.134, 0.165, 0.183, 0.220),按均方差法得客观权重为 (0.191, 0.122, 0.156, 0.179, 0.175, 0.177),专家主观权重为 (0.20, 0.15, 0.17, 0.15, 0.17, 0.16),按基于 Spearman 等级相关系数的组合赋权法计算可得横断面设计评价各下级指标综合权重为 (0.19, 0.13, 0.15, 0.16, 0.18, 0.19)。

将综合权向量与决策矩阵相乘,得出评价矩阵为 (90.8, 89.7, 91.0, 90.4, 89.4),最终计算得横断面设计评价指标分值为 90.3。

4.2 单项评价

采用区间数逼近法进行各单项指标评价,交通安全指数分值区间为 [86.7, 90.5],其与优等级距离 d_1 为

$$d_1 = \sqrt{(86.7 - 90)^2 + (90.5 - 100)^2} = 10.06$$

距离良等级距离 d_2 为

$$d_2 = \sqrt{(86.7 - 80)^2 + (90.5 - 90)^2} = 6.72$$

$d_1 > d_2$,因此,交通安全指标为良。

4.3 综合评价

以横断面设计评价为例,横断面设计的决策矩阵 Z 为

$$\begin{bmatrix} [86.0, 88.8] & [90.6, 92.6] & [91.5, 94.9] \\ [90.0, 100.0] & [90.0, 100.0] & [90.0, 100.0] \\ [80.0, 90.0] & [80.0, 90.0] & [80.0, 90.0] \\ [60.0, 80.0] & [60.0, 80.0] & [60.0, 80.0] \\ [50.0, 60.0] & [50.0, 60.0] & [50.0, 60.0] \\ [0.0, 50.0] & [0.0, 50.0] & [0.0, 50.0] \end{bmatrix} \begin{matrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{matrix}$$

决策评价矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} [16.5, 17.2] & [11.5, 11.8] & [13.4, 13.9] & [13.8, 14.2] & [16.3, 16.7] & [17.4, 18.0] \\ [17.1, 19.0] & [11.7, 13.0] & [13.5, 15.0] & [14.4, 16.0] & [16.2, 18.0] & [17.1, 19.0] \\ [15.2, 17.1] & [10.4, 11.7] & [12.0, 13.5] & [12.8, 14.4] & [14.4, 16.2] & [15.2, 17.1] \\ [11.4, 15.2] & [7.8, 10.4] & [9.0, 12.0] & [9.6, 12.8] & [10.8, 14.4] & [11.4, 15.2] \\ [9.5, 11.4] & [6.5, 7.8] & [7.5, 9.0] & [8.0, 9.6] & [9.0, 10.8] & [9.5, 11.4] \\ [0.0, 9.5] & [0.0, 6.5] & [0.0, 7.5] & [0.0, 8.0] & [0.0, 9.0] & [0.0, 9.5] \end{bmatrix} \begin{matrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{matrix}$$

计算得横断面设计评价指标集合到优、良、中、次、差等级的距离分别为 3.43、3.78、11.96、16.07 与 36.65,按照评定原则,计算结果中 d_1 最小,即横断面设计指标集合到优等级的距离最短, Q_1 所在等

级为优,因此,横断面设计评价等级为优。

根据同样的计算方法得到二级与一级指标的等级和相应的指标值分别见表 33、34。

按照评定原则,在最终计算结果中,最小 d_1 为

表 33 二级指标综合评价结果

Tab. 33 Comprehensive evaluation result of second indexes

二级指标	横断面设计效果	线形质量合理性	景观适宜性	排水效果	降噪效果	缓解城市热岛效果	新技术应用效果
评价结果	优	良	优	优	优	优	优
效果分值	90.30	90.08	91.00	93.00	92.10	92.00	93.20
二级指标	材料回收与废物利用效果	新材料应用效果	绿化植物选择效果	道路绿化面积效果	绿化交通功能效果	降低大气污染效果	降低水污染效果
评价结果	优	优	优	优	优	优	良
效果分值	92.30	92.00	91.86	92.73	90.79	90.46	88.99

表 34 一级指标综合评价结果

Tab. 34 Comprehensive evaluation result of first grade indexes

一级指标	设计合理性	道路功能效果	节能减排效果	绿化效果	环境保护效果
效果分值	90.4	92.4	92.1	91.8	89.7
评价结果	良	优	优	优	良

3.82,即该绿色生态型道路指标集合到等级 Q_1 的距离最短, Q_1 所在等级为优,因此,绿色生态型道路的评价等级为优。

5 结 语

(1)确定并阐述了绿色生态型城市道路概念,明确了其发展目标,提出其必须具备可持续发展、节能减排、良好道路功能与良好景观生态效应 4 个要素。

(2)首次建立了绿色生态型城市道路评价指标体系,确定了指标评价标准。

(3)建立了基于 Spearman 等级相关系数组合赋权法,采用区间逼近法对各三级评价指标进行单项评价,对二级和一级指标进行综合评价,最终获得绿色生态型道路整体评价价值。

(4)中新天津生态城绿色生态型道路评价结果为优,评价结果符合实际,方法科学合理,应用便捷,可对生态型道路进行有效评价。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 黄 勇,汪亚峰,肖 飞,等.公路景观生态规划研究综述[J].长江流域资源与环境,2010,19(增2):161-164.
HUANG Yong, WANG Ya-feng, XIAO Fei, et al. A review of landscape eco-planning for road[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(S2): 161-164. (in Chinese)
- [2] LEE J, EDIL T B, BENSON C H, et al. Use of BE²ST in-highways for green highway construction rating in Wisconsin[C]// WEINSTEIN N. Green Streets and Highways 2010. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010: 480-494.
- [3] MCPHERSON E G, SIMPSON J R, XIAO Qing-fu, et al. Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 99(1): 40-50.
- [4] TOLEMAN R, ROSE G. Partnerships for progress: towards sustainable road systems[J]. Transportation Research Record, 2008(2067): 155-163.
- [5] PENG B, CAI C L, YIN G K, et al. Evaluation system for CO₂ emission of hot asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(2): 116-124.
- [6] 彭 波,李文瑛,杜 迁,等.道路绿化美学在高速公路中应用[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(2):28-31.
PENG Bo, LI Wen-ying, DU Qian, et al. The application of highway landscape aesthetic in expressway[J]. Journal of

- Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(2): 28-31. (in Chinese)
- [7] 陈红,梁立杰,杨彩霞.可持续发展的公路建设生态观[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):69-71,103.
- CHEN Hong, LIANG Li-jie, YANG Cai-xia. Ecological view of sustainable development highway construction[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 69-71, 103. (in Chinese)
- [8] LEE J, EDIL T B, BENSON C H, et al. Building environmentally and economically sustainable transportation infrastructure: green highway rating system[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2013, 139(12): 1-10.
- [9] FÁBOS J G, RYAN R L. An introduction to greenway planning around the world[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 76(1-4): 1-6.
- [10] 秦晓春,沈毅.关于推进公路交通行业生态文明建设的思考[J].交通标准化,2014,42(3):3-6.
- QIN Xiao-chun, SHEN Yi, Thinking about promoting construction of ecological civilization in highway transport industry[J]. Transportation Standardization, 2014, 42(3): 3-6. (in Chinese)
- [11] FÁBOS J G, RYAN R L. International greenway planning: an introduction[J]. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2): 143-146.
- [12] 郝培文,蒋小茜,石载.绿色公路理念及评价体系[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(5):30-35.
- HAO Pei-wen, JIANG Xiao-qian, SHI Zai. Concept of green road and its evaluation system[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2011, 28(5): 30-35. (in Chinese)
- [13] TUNER T. Greenway planning in Britain: recent work and future plans[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 76(1-4): 240-251.
- [14] GIORDANO L C, RIEDEL P S. Multi-criteria spatial decision analysis for demarcation of greenway: a case study of the city of Rio Claro, São Paulo, Brazil[J]. Landscape and Urban Planning, 2008, 84(3/4): 301-311.
- [15] EKEL P, QUEIROZ J, PARREIRAS R, et al. Fuzzy set based models and methods of multicriteria group decision making[J]. Nonlinear Analysis, 2009, 71(12): 409-419.
- [16] SRDJEVIC B. Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis[J]. Computers and Operations Research, 2005, 32(7): 1897-1919.
- [17] 王朝辉,王选仓,高建立,等.高等级公路复合式路面养护标准[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(6):19-23.
- WANG Chao-hui, WANG Xuan-cang, GAO Jian-li, et al. Maintenance standards of composite pavement on high-level highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(6): 19-23. (in Chinese)
- [18] 王朝辉,王丽君,杨育生,等.高速公路建设费用控制决策体系[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(5):40-44,51.
- WANG Chao-hui, WANG Li-jun, YANG Yu-sheng, et al. Decision system of expressway construction cost control[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 40-44, 51. (in Chinese)
- [19] 袁玉玲,王选仓,王朝辉.公路建设投资决策系统分析及评价[J].公路,2008(5):133-138.
- YUAN Yu-ling, WANG Xuan-cang, WANG Chao-hui. Analysis and evaluation of highway construction investment decision-making system[J]. Highway, 2008(5): 133-138. (in Chinese)
- [20] 朱建国,王朝辉.高速公路建设精细化管理效果评价体系[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(2):52-57.
- ZHU Jian-guo, WANG Chao-hui. Effect evaluation system of freeway construction meticulous management[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(2): 52-57. (in Chinese)
- [21] 王朝辉,王选仓,马士宾.基于区间数逼近法的路面使用性能综合评价[J].公路交通科技,2009,26(1):21-24.
- WANG Chao-hui, WANG Xuan-cang, MA Shi-bin. An approximating method of interval numbers for comprehensive evaluation of pavement performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(1): 21-24. (in Chinese)