



2022年ITASC智能交通智慧城市国际会议：生态智慧交通基础设施论坛暨生态道路专委会成立大会

生态低碳道路：研究与展望

李辉

同济大学

2022年5月21日

□ 教育经历

- 2001.8 - 2005.6 **东南大学** 土木工程，学士
- 2005.8 - 2008.6 **东南大学** 道路与铁道工程，硕士
- 2008.1 - 2010.6 **加州大学戴维斯分校** 环境与资源经济学，硕士
- 2008.9 - 2012.11 **加州大学戴维斯分校** 土木与环境工程，博士



李辉
同济大学

□ 工作经历

- 2012.12 - 2014.5 **加州大学戴维斯分校** 土木与环境工程系，博士后
- 2014.6 - 2015.4 **加州大学**路面研究中心(加州大学-戴维斯/伯克利)，助理研究员
- 2015.2
国家“千人计划”青年项目
- 2015.5 – 2020.6 **同济大学** 交通运输工程学院，教授、博士生导师
- 2020.7 – 至今 **同济大学** 交通运输工程学院/城市交通研究院，长聘教授、博士生导师

主研领域: 生态道路交通基础设施



汇报内容

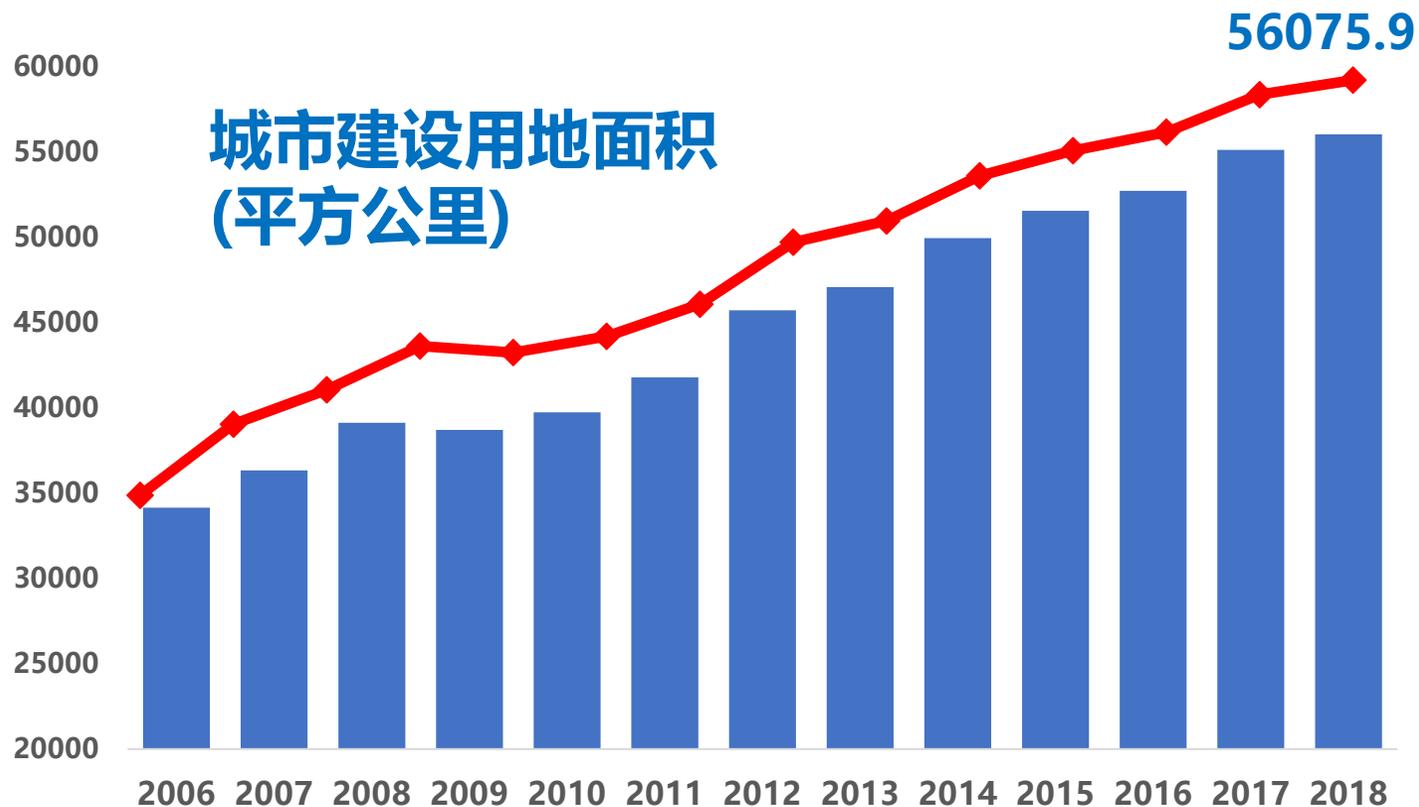
一 | 背景

二 | 生态道路技术研究

三 | 低碳道路技术路径

四 | 生态道路推广应用

五 | 研究展望



注：数据来源于住房和城乡建设部发布的《城乡建设统计公报》。



城镇化进程 → 高强度的城市开发



冰川融化



海平面上升

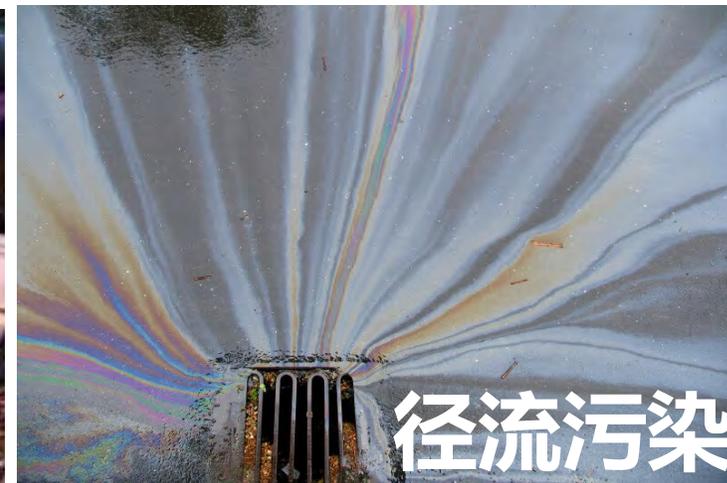
全球变暖的趋势逐年显现



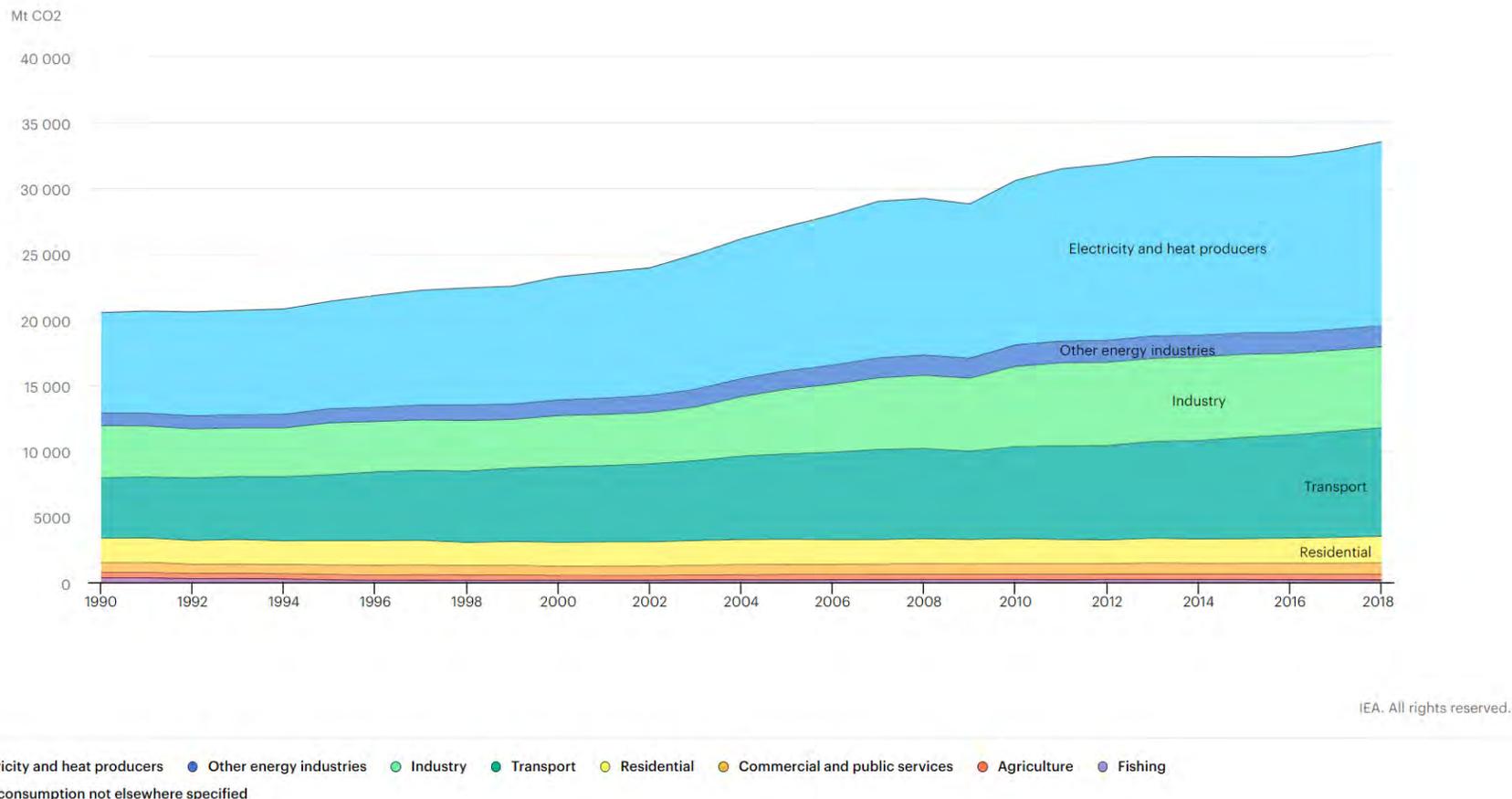
洪涝灾害



物种灭绝



城市治水是我国城市建设中面临的巨大挑战

CO₂ emissions by sector, World 1990-2018

- 交通部门 (2018) :
8258.0 Mt CO₂
- 交通部门碳排放量呈**持续上升趋势**

来源: [IEA – International Energy Agency](https://www.iea.org/)

交通部门的碳排放占比较大，且逐年上升

背景：政策



1997年12月



京都议定书

2009年12月



哥本哈根协议

2015年12月12日



巴黎气候变化大会

2015年12月12日



巴黎协定

2021年11月



格拉斯哥

2020年9月22日

七十五届联合国大会
一般性辩论上的讲话

2020年12月12日

气候雄心峰会上的
讲话

2021年4月22日

领导人气候峰会上
的讲话

2021年9月21日

七十六届联合国大会
一般性辩论的讲话

2020年11月17日

金砖国家领导人第十
二次会晤上的讲话

2021年1月25日

达沃斯论坛的特别
致辞

2021年7月6日

中国共产党与世界政党领
导人峰会上的主旨讲话

2021年10月14日

第二届联合国全球可持
续交通大会开幕式讲话



密集“减碳”政策轨迹——从全球视角到中国角度

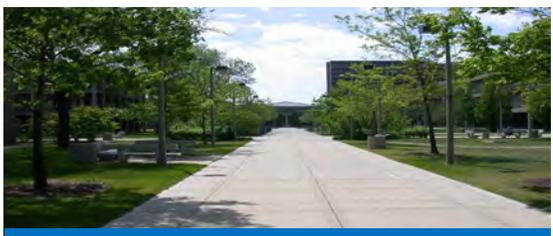
各类道路硬化铺装面广、量大 → 总铺装率高，城市 ≥ 20%



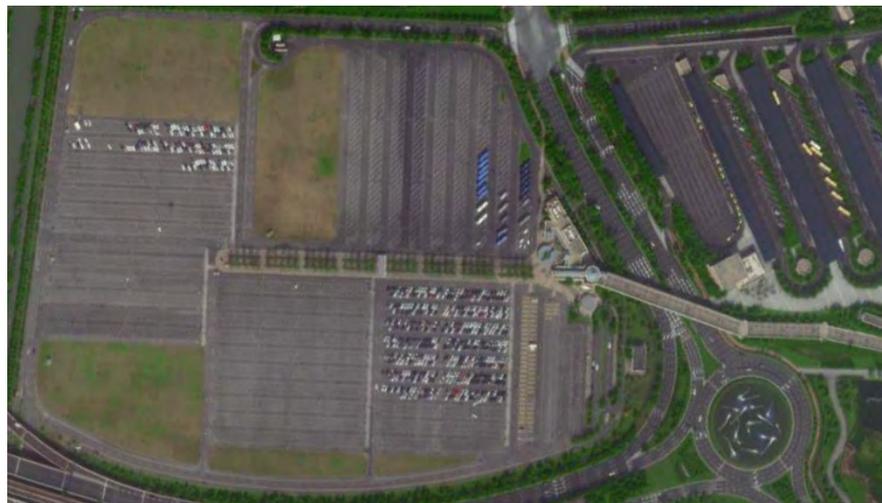
城市道路



广场、停车场



慢行步道、运动场



大量密实、黑色硬化铺装
满足交通需求同时
带来系列环境问题

交通强国
生态文明

绿色低碳交通



高速公路



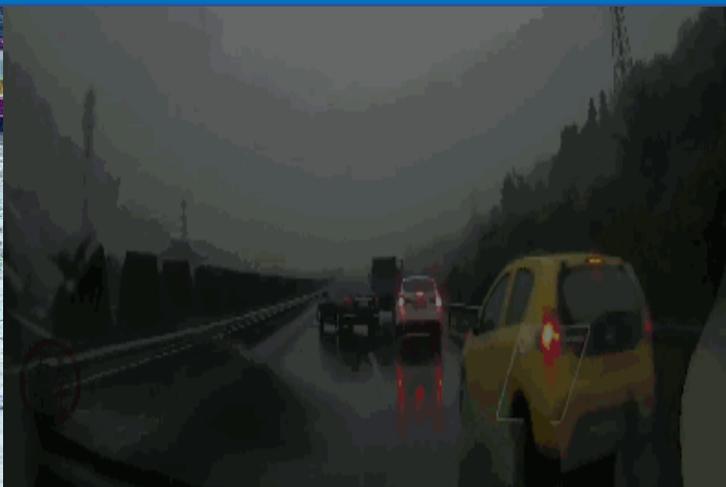
机场铺面



港口道路、堆场

道路铺装建设模式是交通绿色低碳发展的关键

问题1：路面密实不透水→道路积水、行车安全、径流污染



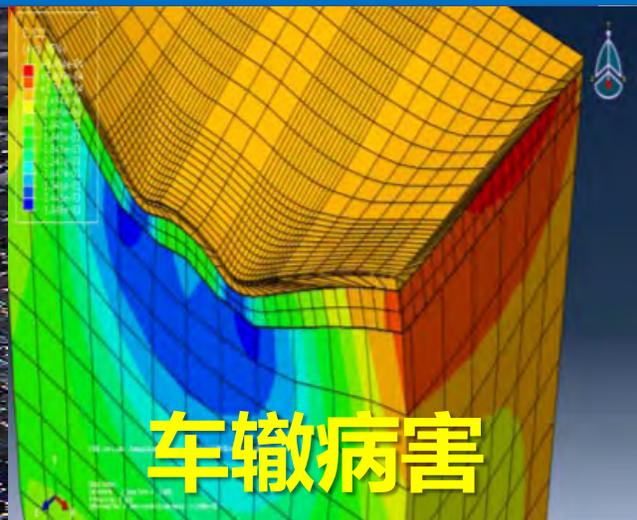
悬浮固体、氮磷、重金属

问题2：路表黑色高吸热→热岛效应、热舒适性差、缩短寿命



70°C+

黑色铺面



车辙病害



热老化

问题3：路域(水、土、气、声、光、热等多介质环境)生态差→噪音大、碳排多



原材料生产



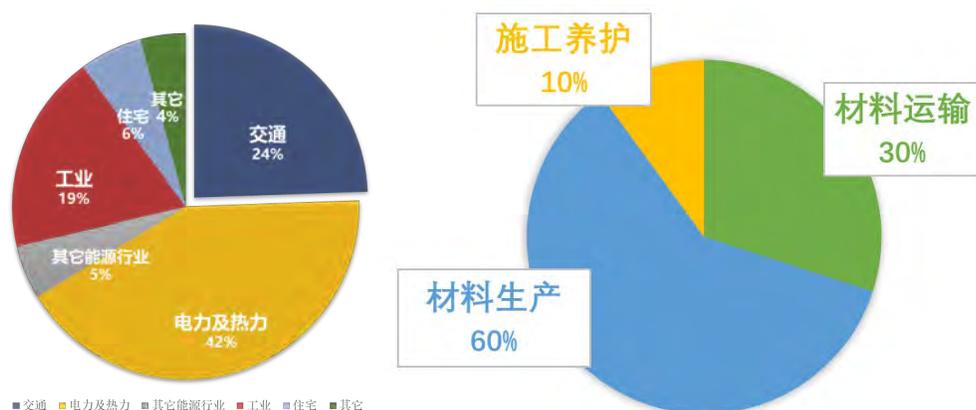
材料运输



施工建设



养护管理



交通领域碳排放占各行业24%

道路交通基础设施生命周期各阶段大量碳排放

问题4：生命周期生态低碳综合评价体系缺失

水文水质评价

室外人体热舒适

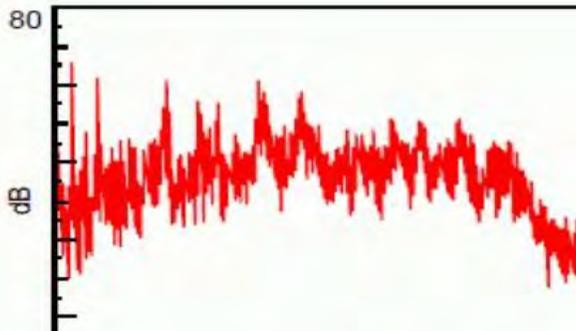
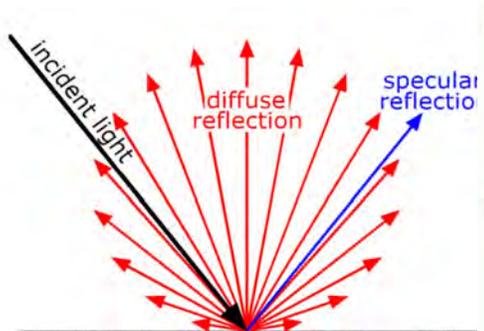
原材料生产阶段

施工阶段



生态道路综合效益评价体系缺失

生命周期碳足迹评价边界模糊、核算结果不可靠



混合反射眩光安全

交通噪声 -> 降噪

使用阶段

养护阶段

综合材料、环境工程等开展生态低碳道路多学科交叉研究



汇报内容

一 | 背景

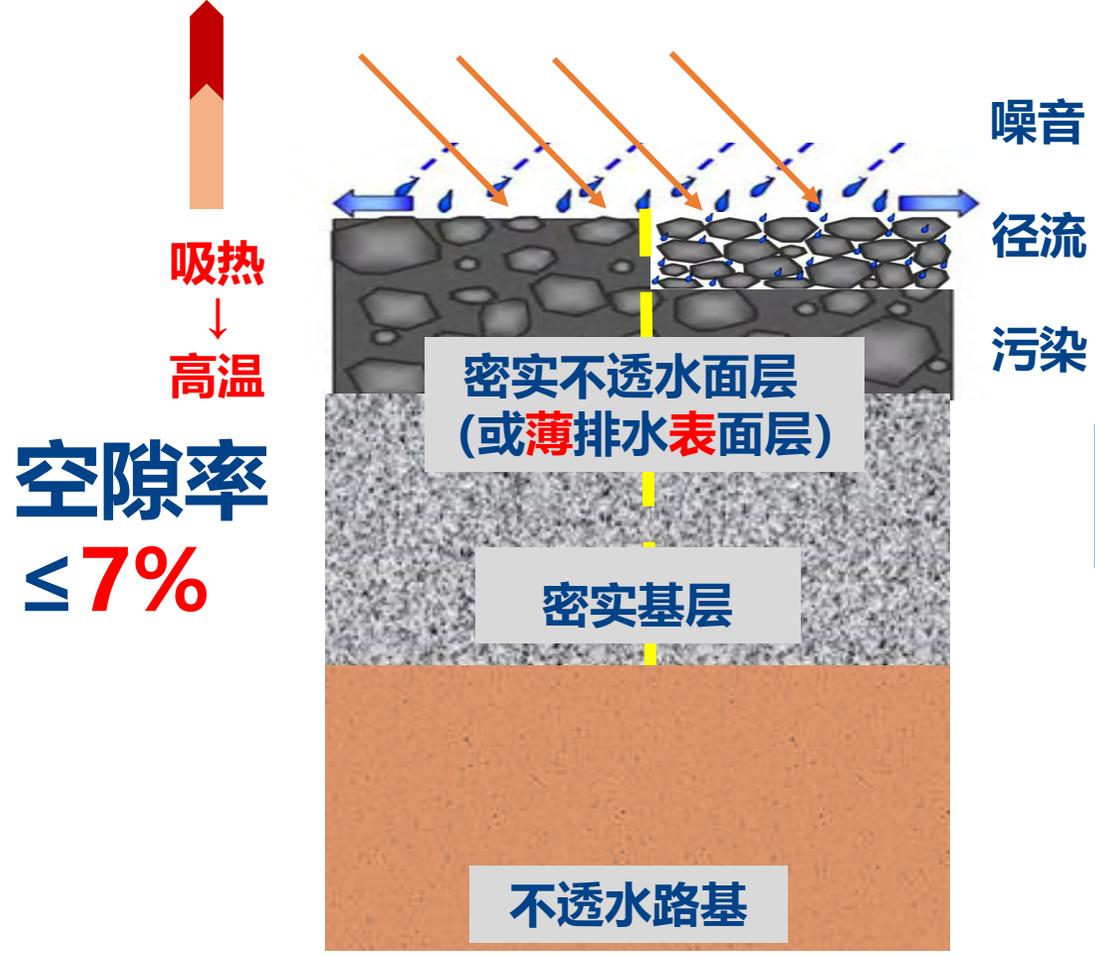
二 | 生态道路技术研究

三 | 低碳道路技术路径

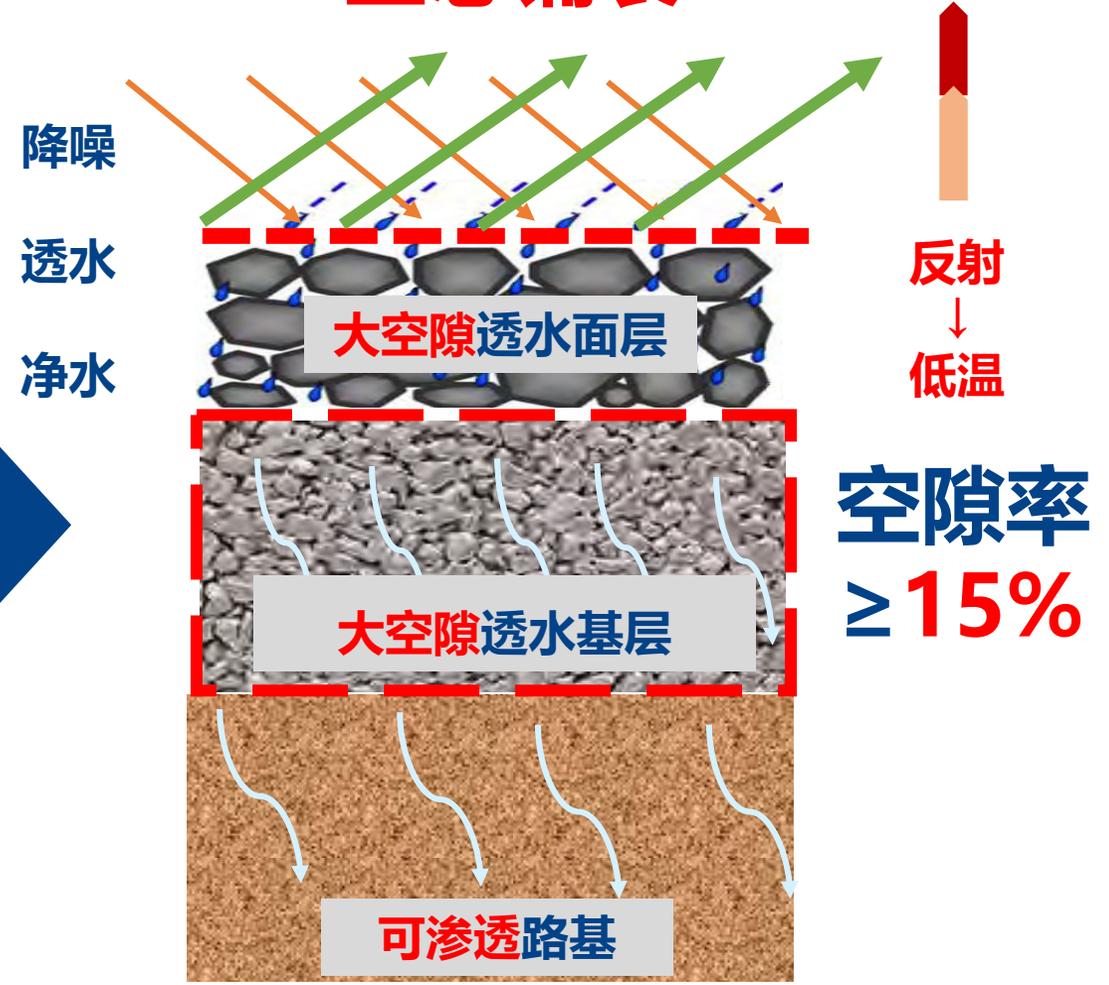
四 | 生态道路推广应用

五 | 研究展望

传统铺装



生态铺装



水泥基、沥青基大空隙多层透水铺装：复合生态功能+交通承载
(高效透水、净水、降温、减碳)

生态道路技术研究：四大技术瓶颈



空隙率大、结构复杂



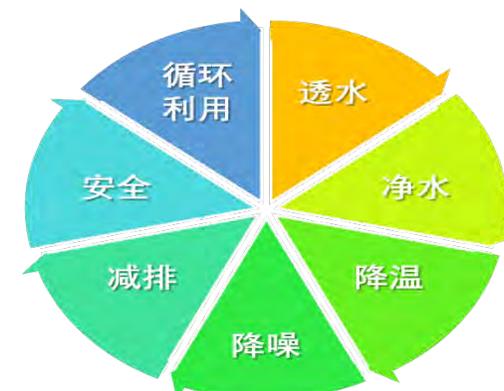
强度低、耐久性差

瓶颈1

大空隙材料力学性能与生态功能难协同



空隙易堵塞



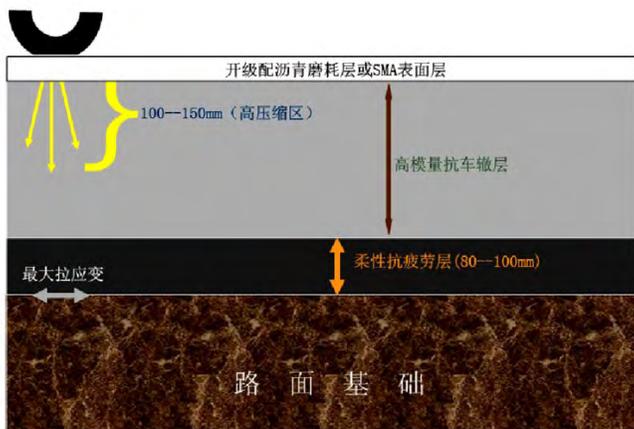
透水、净水、降温、降噪等生态功能待提升

亟需研发高强耐久、生态长效的道路新材料

生态道路技术研究：四大技术瓶颈



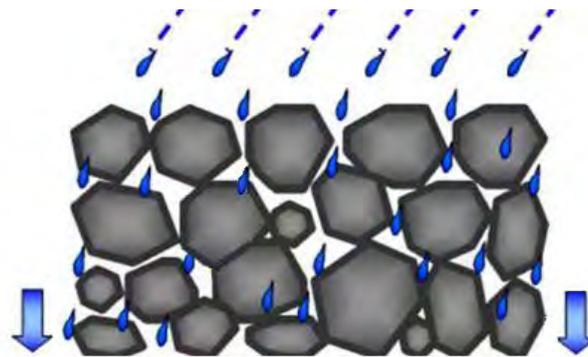
透水基层承载能力低



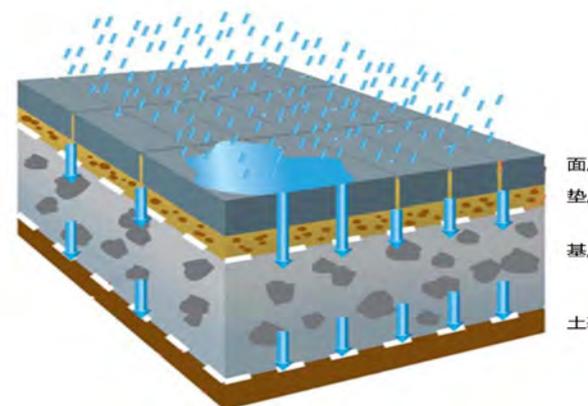
仅考虑力学指标

瓶颈2

生态道路结构设计方法缺失



透蓄水功能不足



生态功能指标缺失

亟需构建生态道路力学-生态双性能平衡结构设计方法

生态道路技术研究：四大技术瓶颈



温/湿控要求高



施工效率/质量低



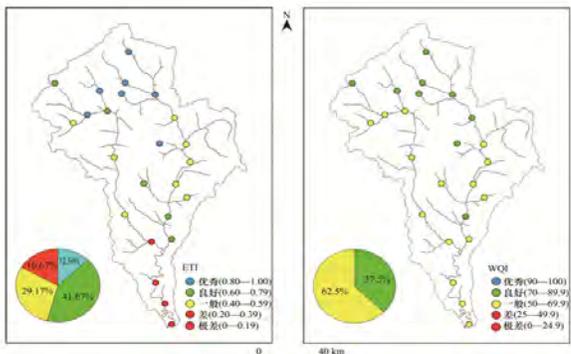
传统养护不适用



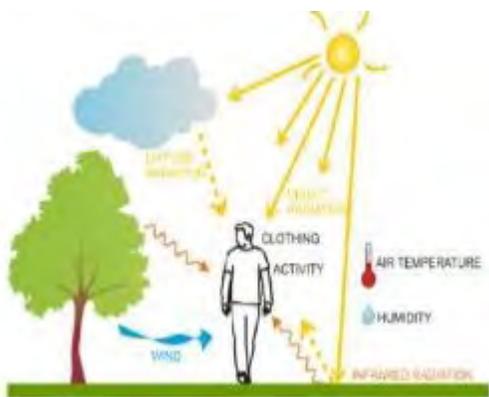
透水功能衰减快

亟需研发生态道路**高效**施工、**精细**养护技术

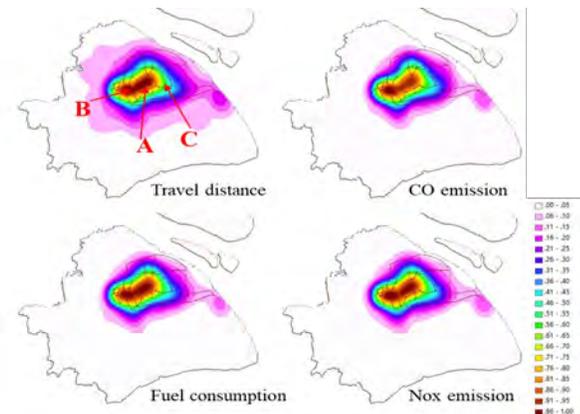
生态道路技术研究：四大技术瓶颈



透水净水



降温防眩



碳排放等污染



经济成本

亟需建立生态道路全生命周期综合效益评价体系

生态道路技术研究：科研项目

12年重大科研项目攻关（国家级5项）

类别	项目来源	项目名称
生态道路 铺装材料	国家重点研发计划 (2016YFE0108200)	低影响开发海绵城市 透水铺装 关键技术研究及应用 (中美)
	国家科技支撑计划 (2011BAJ04B05)	固体废弃物 本地化再生建材利用成套技术
	国家自然科学基金项目 (5150080567)	源位生态渗滤技术阻滞道路 径-渗流污染 的作用机理及方法
力学-生态 双性能 结构设计	国家重点研发计划 (2016YFE0118200)	基于海绵城市建设的多路径 资源再生混凝土 技术与应用
	国家自然科学基金项目 (5150080567)	路面材料全频谱 光学反射降温 特性与评价模型
	上海市府间科技合作项目 (17230711300)	城市地表径流雨水 污染净化 功能型环保材料研究 (中德)
智能施工 精细养护	上海市科委科技项目 (10DZ1202500)	大型交通枢纽 低碳建设 关键技术和示范
综合效益 评价	上海市科技创新计划项目 (16DZ1202000)	海绵城市 生态道路 成套技术与示范



研究架构

提出了**生态-力学双性能**协同设计理论

复合生态功能

材料多尺度空隙
结构双性能设计

力学性能

研发了生态道路**施工与养护**新技术

生态功能
高效提升技术

重载道路
基层加固技术

智能施工技术

精细养护体系

建立了全生命周期**综合效益**评价方法

水文水质

光热环境

吸声指数

碳排放

经济成本

理论
创新

技术
创新

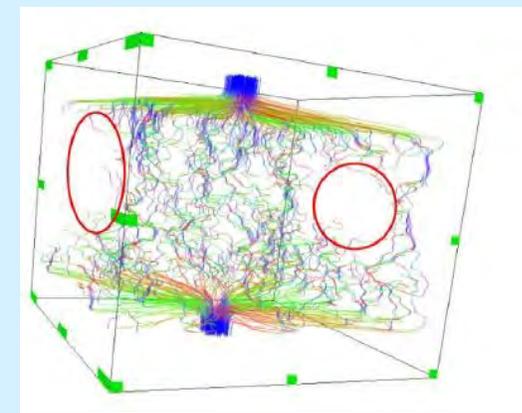
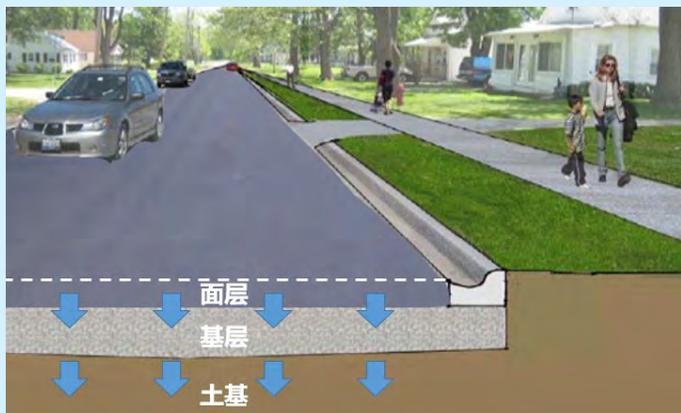
方法
创新

支撑

传统道路
生态化
转型升级

创新成果一

提出了高透水、强净水、强降温、低眩光、强降噪等
多功能铺装生态化方法

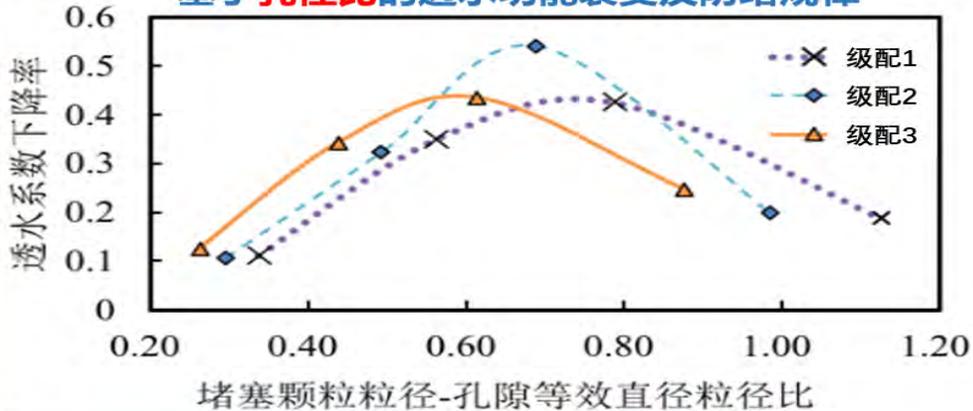


20篇SCI论文，3项发明专利，2部技术标准，1部独立英文专著

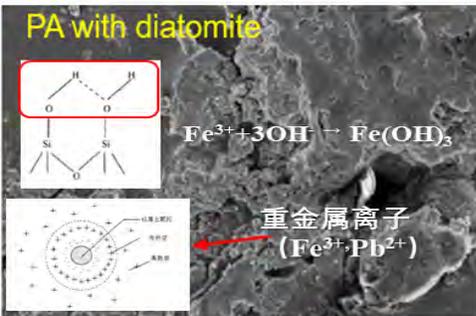
1.1 探明了铺装材料多尺度空隙特征与渗滤特性，建立了多尺度空隙-透水-净水功能模型，研发了高透水、强净水的生态新材料（透水率提升至 3mm/s，污染物综合去除率≥50%）。

多尺度空隙-透水-净水功能关联机制

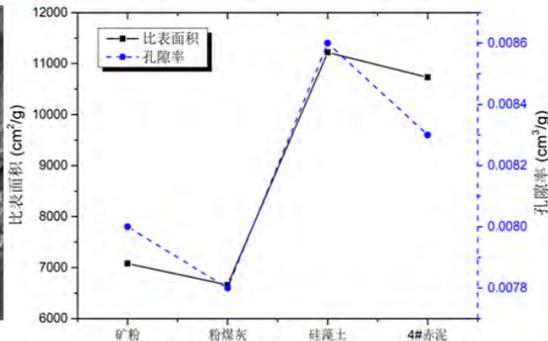
基于孔径比的透水功能衰变及防堵规律



净水性能关键指标：微观孔隙数量与比表面积



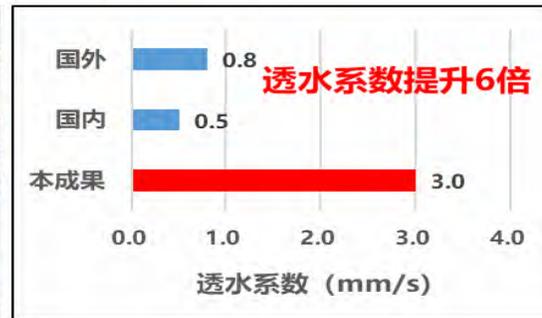
SEM 微观孔隙净水



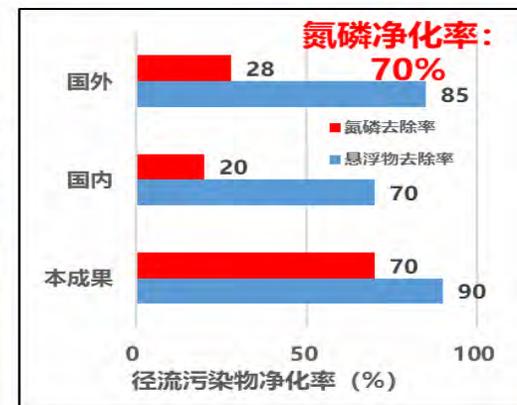
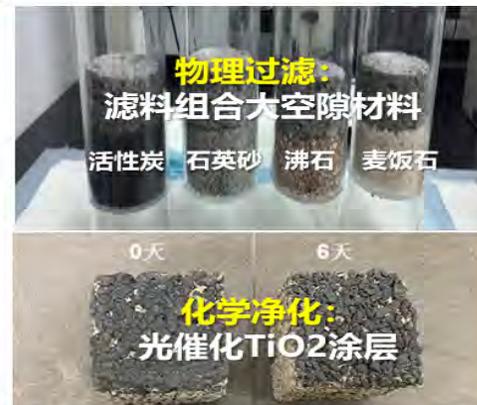
BET 比表面积表征

高透水、强净水生态道路功能型铺装材料

高透水生态道路功能型铺装材料



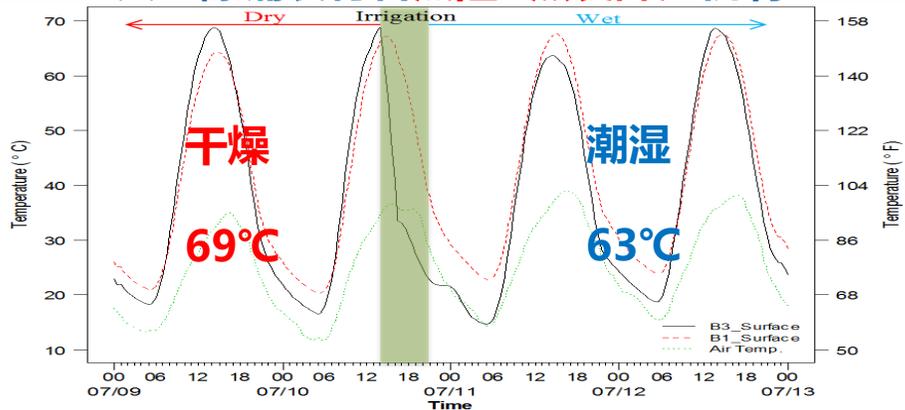
强净水生态道路功能型铺装材料



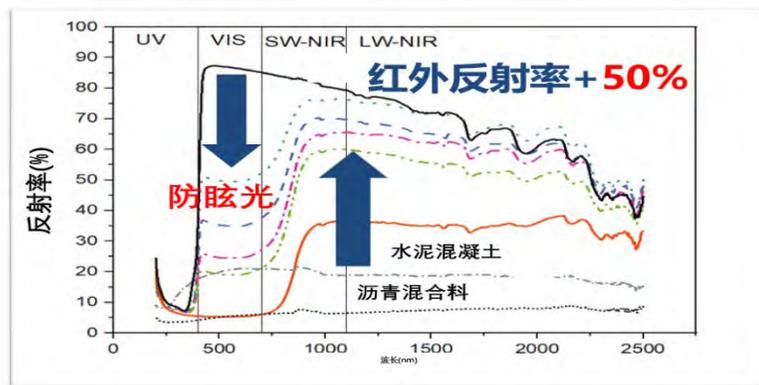
1.2 揭示了铺装材料全频谱混合反射光热机制，建立了全频谱反射率-亮度系数-降温指标表征模型，研发了同色异谱的耐污防眩红外反射降温材料(夏季路表高温降低幅度达5-12°C)。

生态道路功能型铺装材料光热特性

大空隙铺装材料热阻+蒸发降温机制

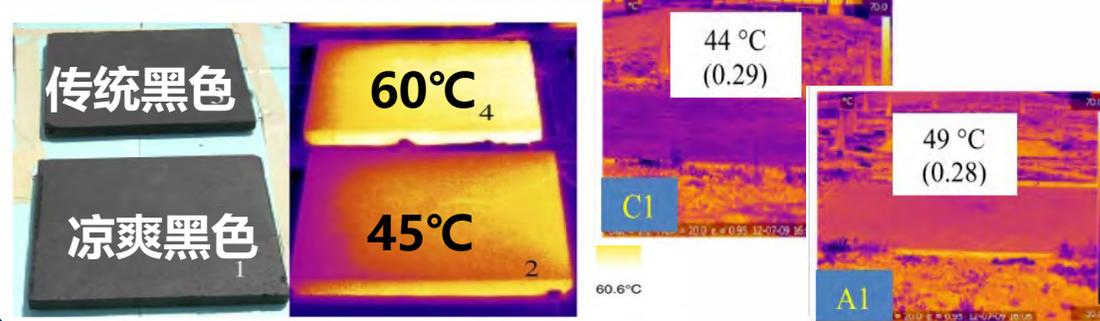


全频谱反射率-防眩-降温关联模型



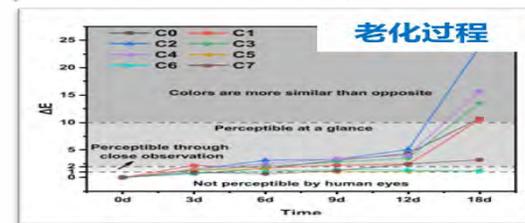
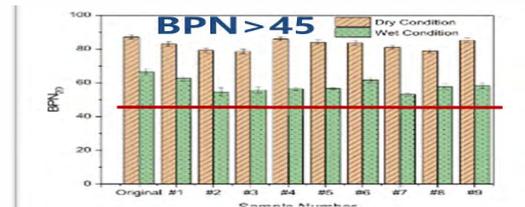
同色异谱深色系红外反射降温材料

同色异谱、红外反射降温功能型涂层



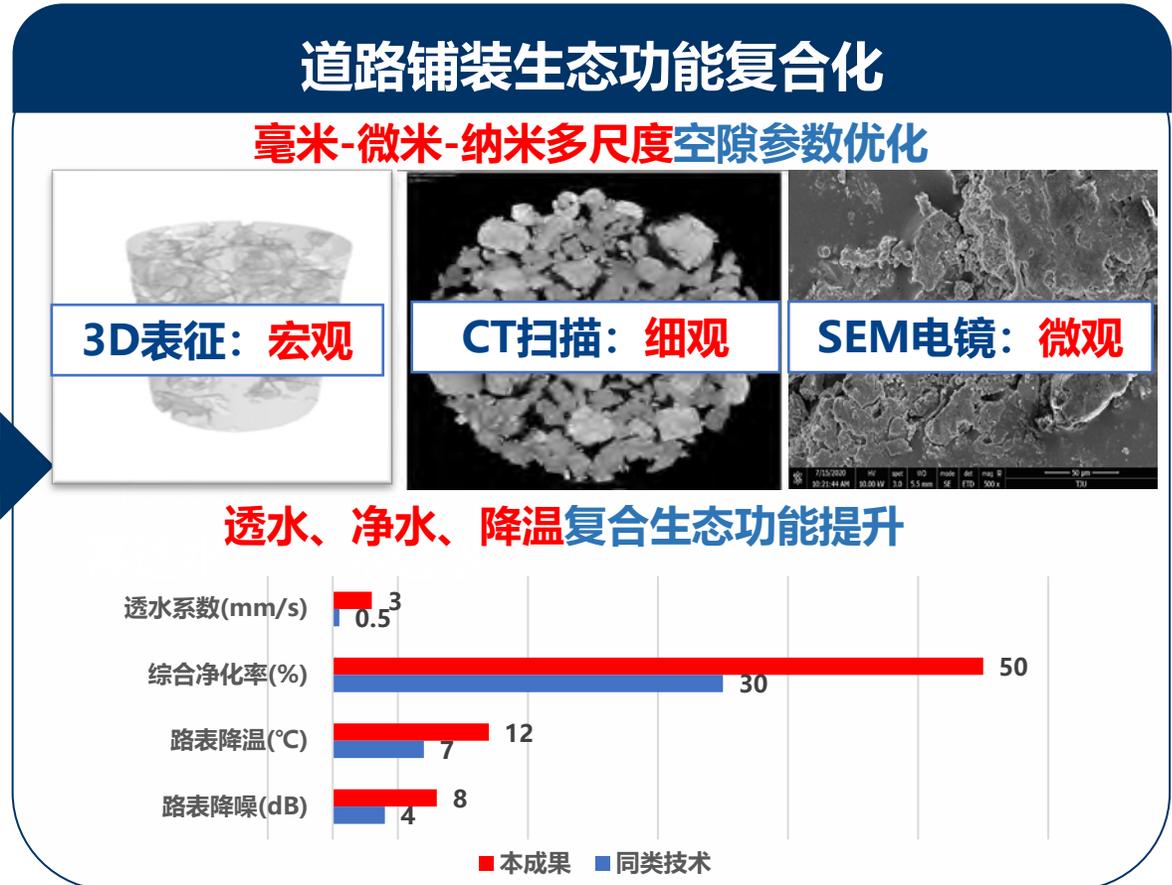
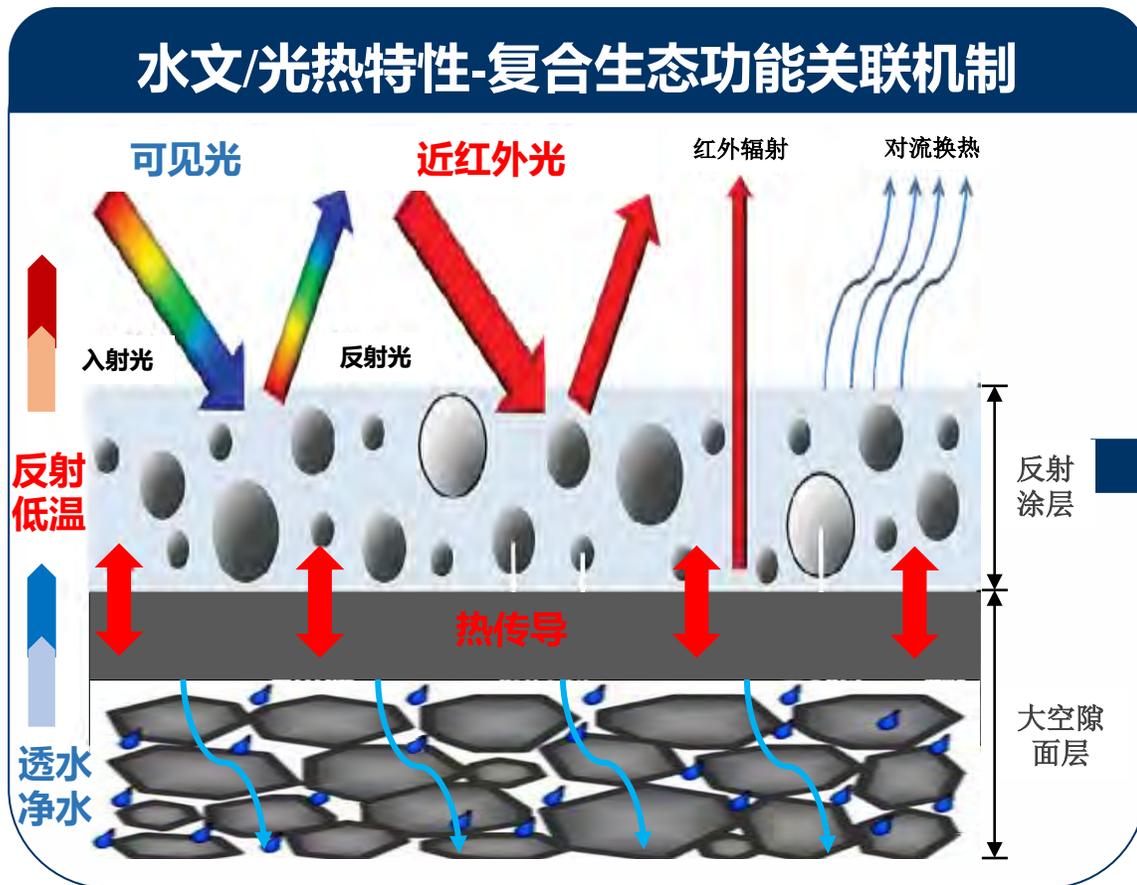
材料/波段	可见光%	近红外光%
白色涂层	66.98	79.61
深色反射涂层	28.91	55.39
沥青混合料	4.80	6.71
水泥	18.89	19.96

低亮度、防眩光



抗滑、耐磨、耐老化

1.3 提出了基于多尺度空隙结构及全频谱反射特性平衡优化的透水、净水、降温、降噪功能综合提升方法，实现了生态道路铺装多功能统一化。



世界卫生组织(WHO)在城市健康全球报告(Global Report on Urban Health)中引用了申请人生态功能型铺装材料光热特性的成果，认为“大空隙透水路面及反射型降温路面可替代城市中的传统不透水路面，降低城市温度”



society and international organizations to strengthen urban resilience to heat through adaptation and mitigation strategies. Resilience to heat waves and urban heat islands can be strengthened by strategies that address the short-term effects and by efforts to mitigate the broader challenges of urbanization and global warming. Ways to adapt include raising public awareness on health risks of heat waves, developing early warning systems that provide advance notice to the public about predicted high temperatures and increasing capacity among health-care workers to recognize and treat heat-related illnesses.

Longer-term initiatives must be aimed at altering the use of urban spaces and building materials in cities. City planners can intervene to encourage people to be more responsible. There are reflective, permeable pavements that can replace impermeable surfaces in cities and reduce urban temperatures (259). They can increase the share

259. Li H, Harvey JT, Holland TJ, Kayhanian M. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environ Res Lett.* 2013;8:015023. doi:10.1088/1748-9326/8/1/015023.

澳大利亚可持续工程协会主席、Recycling主编 Michele John教授引用了申请人关于同色异谱的深色系红外反射降温材料的研究，认为“本研究成果与传统路面材料相比，近红外反射率可达60%(传统为30-40%)”



buildings

MDPI

Review

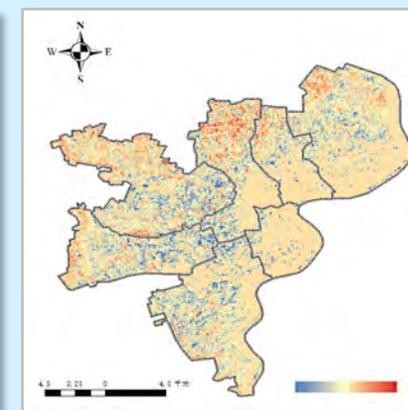
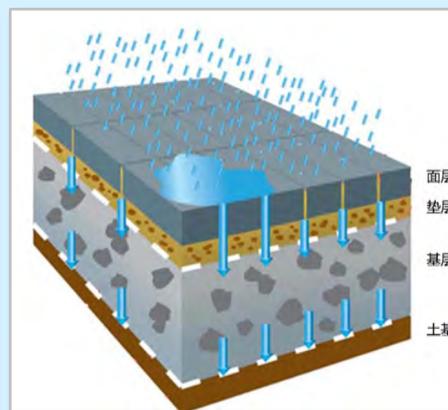
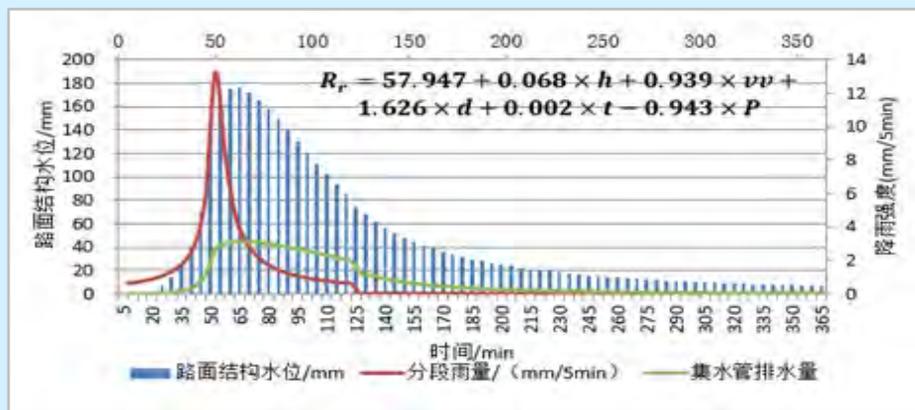
Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies

V. R. Sankar Cheela ^{1,2}, Michele John ^{1*}, Wahidul Biswas ^{1,3} and Prabir Sarker ^{3,4}

complied with standards for water, alkali, skid, and abrasive resistance. Xie et al. [44] investigated an application of water-based reflective coatings for reflective pavements. Optical and durability performance of near-infrared TiO₂ reflective coatings including skid-resistance, anti-abrasion, and film hardness were studied. The results showed that the near-infrared reflectance of the coating reached 60% compared with a conventional coating. The summary of studies investigating the cooling effect using coatings and their characteristics of reflective pavements is presented in Table 2.

创新成果二

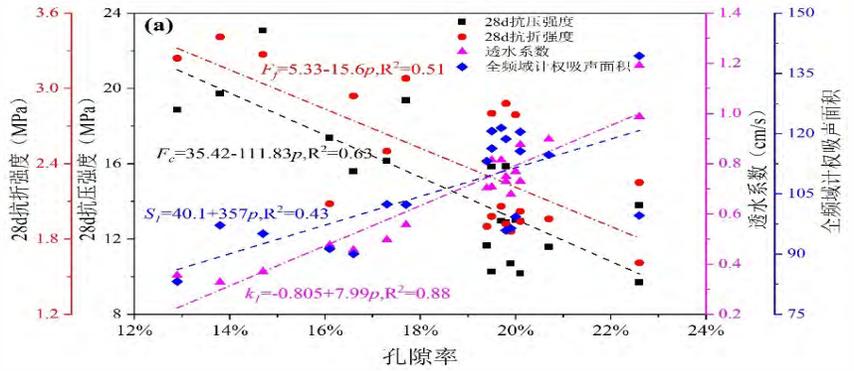
创建了力学-生态平衡协同理论与技术



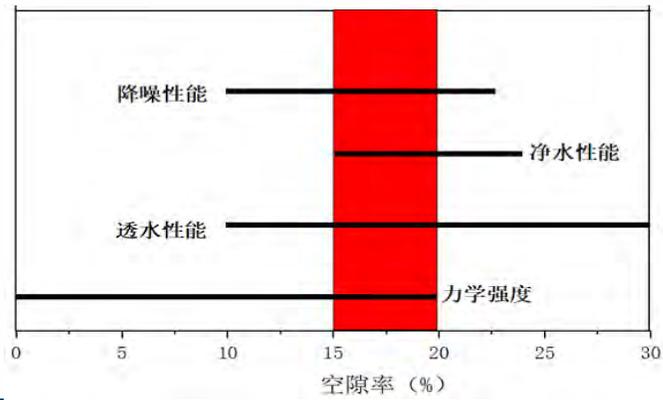
2.1 揭示了空隙特征-力学性能-生态功能的交互影响机制，构建了生态铺装多孔材料强度-渗流平衡协同理论，提出了多孔材料耐久性能协同提升新方法。

力学-生态平衡设计

空隙-力学强度-生态功能相关关系



基于空隙特征优化的材料平衡设计

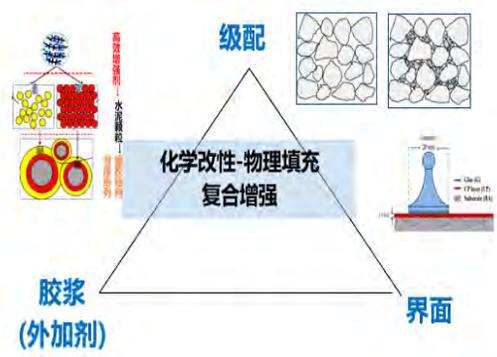


最佳空隙率：
15-20%

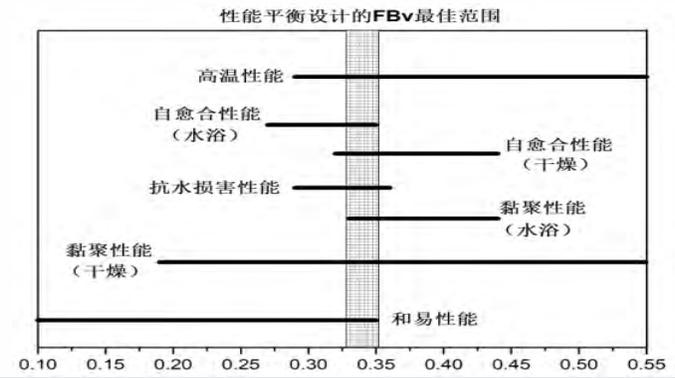
最佳孔径比：
0.6-0.8

耐久性与生态功能平衡协同

大空隙水泥基材料：复合改性协同增强技术



大空隙沥青基材料：基于胶浆体系力学性能优化设计



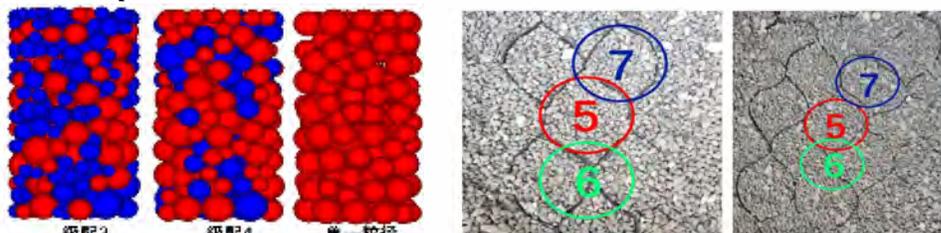
2.2 提出了结构透蓄水功能与变形/疲劳力学性能协同控制模型，创建了基于力学和渗流模型的铺装结构双性能平衡协同理论，保证了生态铺装的结构耐久性。

力学稳定性及水文分析模型

基层结构透蓄水功能与力学稳定性平衡

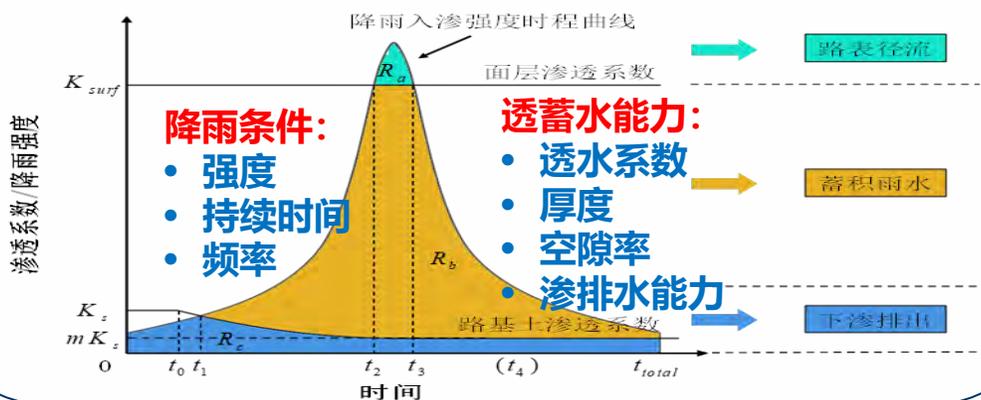
SSR (应力比) 透水基层永久变形模型:

$$\varepsilon_p = 0.0007 * \sigma_3^{1.2341} * SSR^{2.337} * N^{0.4107}$$



离散元本构模型 级配优化及土工格栅/土工室加固

雨水入渗-蓄水-排空水文设计



力学与生态双性能分析模型

① 变形控制模型

$$\begin{cases} SSR = \frac{\tau_f}{\tau_{max}} \\ \tau_f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \varphi = \frac{\sigma_d}{2} \cos \varphi \\ \tau_{max} = c + \sigma_f \tan \varphi \\ \sigma_f = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi = \frac{\sigma_d + 2\sigma_3}{2} - \frac{\sigma_d}{2} \sin \varphi \end{cases}$$

② 疲劳寿命模型

$$N_f = 10^{17.61(1 - \sigma_f / MR)} \quad (\text{大空隙水泥})$$

$$N_f = 2 * 10^{-19} \varepsilon_t^{-7.5307} \quad (\text{大空隙沥青})$$

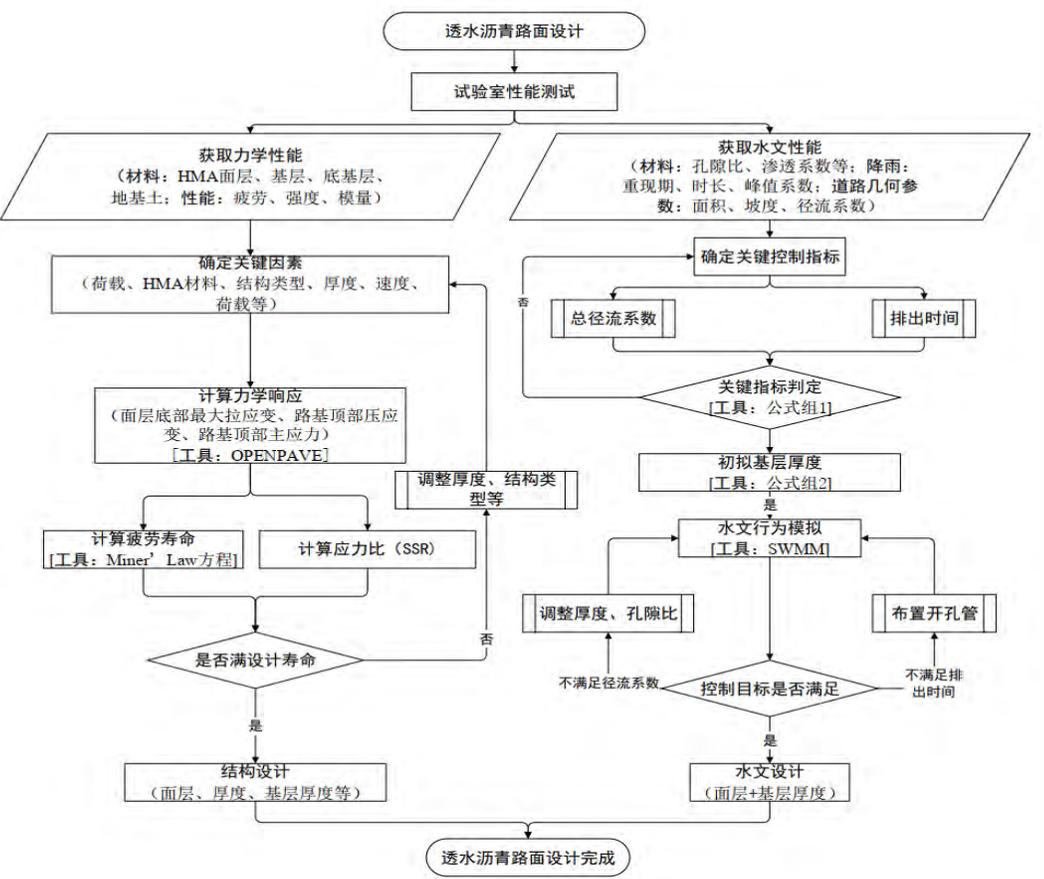
③ 径流控制模型

透水系数、蓄水能力、净水能力

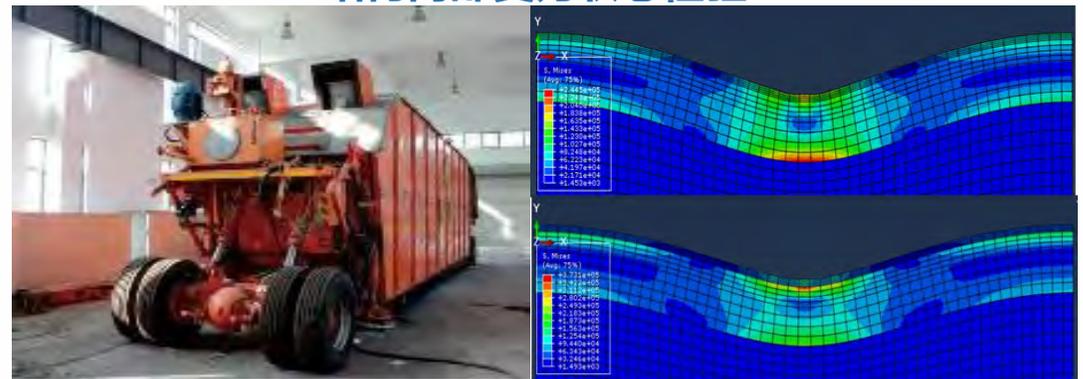
$$R_0 - 0.1 < 1 - \frac{Inf_3 * A_3 + H_0 * A_1 * (1 - R_1) + H_0 * A_4 * (1 - R_4)}{A_0 * H_0} < R_0 + 0.1$$

2.2 提出了结构透蓄水功能与变形/疲劳力学性能协同控制模型，创建了基于力学和渗流模型的铺装结构双性能平衡协同理论，保证了生态铺装的结构耐久性。

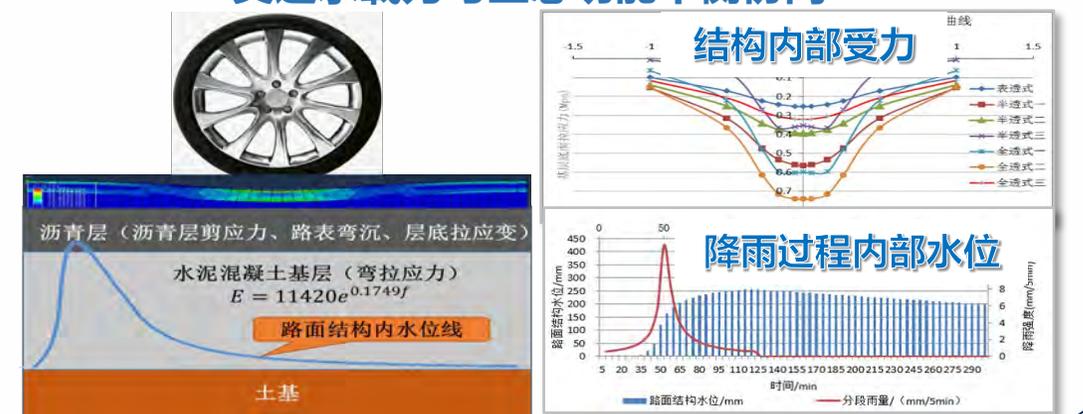
力学-生态协同设计方法



结构内部受力状态检验



交通承载力与生态功能平衡协同





生态道路技术研究：创新成果二



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

报告编号：202107864

科技项目咨询报告

项目名称：生态道路建设关键技术与综合效益评价

委托人：同济大学

委托日期：二〇二一年六月四日

咨询机构：中国科学院上海科技查新咨询中心

中国科学院上海科技查新咨询中心
二〇二一年制

首次实现生态道路碳排放等环境效益与经济成本的综合评价，开发了生态道路全生命周期综合评价系统。

文献对比分析表明，国内未见市政道路透水沥青混凝土路面施工研究，透水路面主要以骨架空隙型为主要结构模式，孔隙率在18%~25%，通过高孔隙度的骨料作为主要的材料可以确定各项性能要求，具有高强度再生骨料混凝土的回收工艺及性能研究；未见关于路面性能变化规律的沥青路面预防性养护决策技术研究；未见绿色高速公路施工能耗统计与低碳技术，创建了耦合施工活动的公路施工能耗二元统计方法，创建了基于矢量和阵形式的耦合施工活动的公路施工能耗二元统计方法，可精准获取公路施工全过程各专业施工活动的动态能耗及物料土壤数据，较传统方法数据精度提高20%，明确了压实、搅拌、摊铺等各专业施工活动的能耗定额，建立了各施工活动能耗与物料的多元影响模型，从时空二维尺度阐明了公路施工活动工程量与能耗水平的内在关联规律，为公路施工节能减排调控提供了理论依据，构建了基于LCA的公路生命周期能耗及碳排放计算体系；国外未见研究透水路面基层集料对雨水灌溉回水的影响，未见路面材料的使用寿命评价，根据360-4040对不同类型的路面进行了生命周期评价（LCA），通过调查不同的案例情景，量化了环境影响的削减潜力，通过改善路面性能（如收水、阻水和平整度）可以最大限度地减少空气污染。

综上所述，项目开展“生态道路建设关键技术与综合效益评价”，探明了生态道路材料多层次空间特征与复合生态功能的交互作用机理，通过材料与结构优化，协同提升了生态道路透水、净水、降噪、降尘、尾气降解等复合功能，建立了生态道路材料高通平衡设计方法，结合赤泥、生物油等回收材料，实现了材料强度和耐久性显著改善，同时降低道路建设成本20%以上，建立了生态力学双性能耦合分析模型与结构设计方法，结合自主研发智能化养护控制系统，实现了施工质量智能化控制与精准养护，构建了生态道路全生命周期综合效益评价体系，实现生态道路碳排放等环境效益与经济成本的综合评价，开发了生态道路全生命周期综合评价系统等方面未见相关公开出版物报道，具有新颖性和良好的市场应用价值。

经分析，该项目总体技术达到国际先进水平，其中在生态道路材料双性能协同设计理论、道路干面状态实时降温方法、综合物理过滤-化学降解多级径流净化等技术居国际领先地位。

经分析，该项目的总体技术达到国际先进水平，在道路双性能协同设计、全时降温方法及多级径流净化技术居国际领先。

中国科学院上海科技查新咨询中心：
总体技术国际先进，道路双性能协同设计、全时降温及多级径流净化技术国际领先。

中国科学技术交流中心

国科交函字〔2021〕26号

中国科学技术交流中心关于下达国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目综合绩效评价结论的通知

各项目负责人：

你单位牵头承担的项目执行期已满。按照《国家重点研发计划管理暂行办法》（国科发资〔2017〕152号）和《国家重点研发计划资金管理办法》（财科教〔2017〕113号）等文件要求，我中心组织对该项目进行了综合绩效评价，现将综合绩效评价结论下达你单位。

一、项目综合绩效评价结论

综合绩效评价结论：通过
 技术平均分：93.4，财务平均分：91
 结余资金（万元）：28.74，应上交结余（万元）：0

二、有关要求

附件

项目综合绩效评价专家意见表

重点专项名称	政府间/港澳台重点专项		
项目编号	2016YFE0108200	项目名称	低影响开发海绵城市透水铺装关键技术研究与及应用
项目负责人	李辉	项目牵头单位	同济大学

专家意见：本项目开展了水泥混凝土透水铺装多孔材料的强度、耐久性、沥青混凝土透水铺装多孔材料的强度及功能改性，重载交通条件下耐久性透水铺装结构等研究，提出了透水铺装结构力学和水文双性能设计方法，建立了智能化施工与精细化养护体系，开发了透水铺装全生命周期分析软件，研究成果已经应用于国内及巴基斯坦、科特迪瓦、美国等国家的实际工程。

中外合作单位定期进行学术交流，开展合作研究。
 本项目完成了任务书规定的各项指标。

综合绩效评价意见：
 通过
 未通过
 结论

完成各项规定指标，综合绩效通过，成果已成功应用于国内及美国、巴基斯坦、科特迪瓦等国家的实际工程。

中国科技部-国家重点专项评价：
技术平均分93.4，财务平均分91，综合绩效优秀



中國工程院

Chinese Academy of Engineering

2021年6月17日，中国公路学会在西安组织召开了“生态道路建设关键技术与综合效益评价”项目成果评价会。评价委员会(专家名单附后)听取了项目组的成果汇报，审阅了相关技术资料，经质询讨论，形成如下评价意见：

一、项目组提供的资料齐全、内容完整，数据翔实，符合科技成果评价要求。

二、项目组通过理论与数值分析、室内外试验与工程实践相结合，对生态道路建设关键技术及综合效益评价进行了系统研究，取得了以下创新性成果：

1. 揭示了生态道路材料多尺度空隙特征与生态功能、力学性能的关联性，建立了基于空隙-强度平衡的材料设计方法，自主研发了多种绿色生态道路材料。

2. 提出了基于强度性能和渗流特性二者相互平衡的双性能设计方法及协同提升技术，为适于重载交通的生态道路建设提供了技术支撑。

3. 研发了生态道路智能建设管理系统与养护设备，创建了生态道路智能施工与精准养护技术。

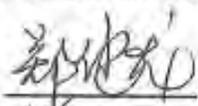
4. 开发了生态道路全生命周期综合效益评价分析系统，提出了生态道路全生命周期环境效益与经济效益的优化方法。

三、项目研究成果

该成果获得多项专利、软件著作权，形成技术标准多项，项目成果在30余个实体道路工程得到应用，并推广应用到美国加州、德国科隆和“一带一路”沿线部分国家，经济、社会和环境效益显著，推广应用前景广阔。

综上所述，该项目研究成果总体上达到国际先进水平，其中基于强度性能和渗流特性二者相互平衡的双性能设计方法达到国际领先水平。

评价委员会主任：



副主任：



2021年6月17日

郑健龙院士等行业权威专家评价意见：
“总体国际先进水平，双性能平衡设计方法达到国际领先水平。”

澳大利亚水教育与研究委员会主席Ataur Rahman教授在透水路面雨洪管理实践论文中肯定了申请人提出的“力学-生态结构双性能平衡协同理论”。

THEMATIC ISSUE

Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion

Upeka Kuruppu¹ · Ataur Rahman¹ · M. Azizur Rahman²

Received: 7 February 2018 / Accepted: 29 April 2019 / Published online: 17 May 2019
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019



Li et al. (2014) estimated the effective thickness of each layer on bearing capacity of permeable interlocking concrete pavement structures. Their findings were validated by carrying out a mechanistic examination of a test track.

To understand the performance of PPS due to excessive vehicular loading, University of California Pavement Research Center (UCPRC), Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), Concrete Masonry Association of California and Nevada and California Nevada Cement Association jointly conducted a research project (Li et al. 2013, 2014,

俄罗斯科学院研究人员L.A. Pasechnik引用了申请人基于胶浆的大空隙沥青混凝土力学性能优化设计体系的成果，认为“可有效利用固废赤泥提高胶浆材料力学性能”。



Russian Academy of Sciences

A promising process for transformation of hematite to magnetite with simultaneous dissolution of alumina from red mud in alkaline medium

L.A. Pasechnik*, V.M. Skachkov, E.A. Bogdanova, A. Yu Chufarov, D.G. Kellerman, I.S. Medyankina, S.P. Yatsenko

Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 91, Perovskaya St, 620090 Ekaterinburg, Russia

1. Introduction

A large amount of bauxite residues called red mud (RM) has been accumulated in the disposal areas of alumina enterprises. Each plant producing 1 million tons of alumina per year stores 1–1.5 million tons of RM, generating thereby economic and environmental problems (Tsakiridis et al., 2006; Pontikes and Angelopoulos, 2013; Evans, 2016). The RM produced in the Bayer process preserves more than 15–25 wt% of Al_2O_3 and up to 10 wt% of caustic lye (Na_2O), resulting in a high pH of RM normally over 12. Leakage of alkaline solution of RM slurry can be harmful for the groundwater and soil nearby. However, the high content of iron oxides (45–55 wt%) makes some types of RM a promising feedstock for ferrous metallurgy (Liu and Naidu, 2014; Liu and Li, 2015). Such valuable components as titanium, calcium, silicon and rare elements are discharged with RM in the pond liquor, too. Apart from its disposal into slime dump, attempts have been made to use RM for the production of cement and mortars (González-Triviño et al., 2018), pigments and ceramic materials (Rukhlyadeva et al., 2015;

Carneiro et al., 2018; Wang et al., 2018a; Zhang et al., 2018), for the restoration of contaminated lands and other industrial and environmental purposes (Chanshan and Ganguly, 2011; Xue et al., 2016; Zhu et al., 2016; Bray et al., 2018).

Depending on the feedstock and the technology, RM can contain more than 15 chemical compounds which have different magnetic properties. Regular companions of alumina in the feedstock derivatives are iron-containing minerals, the main of which – hematite $\alpha-Fe_2O_3$ and magnetite Fe_3O_4 – change little if at all in the technological process, while goethite $\alpha-FeOOH$, maghemite $\gamma-Fe_2O_3$, and siderite $FeCO_3$ transform to stable hematite. The properties of these minerals (magnetic susceptibility and specific weight in Tables A.1 and A.2 (Kulikov et al., 1985)) and the content affect the applicability of industrial separation methods for ore dressing. The larger is the ratio of magnetic susceptibilities χ_1/χ_2 of two minerals, the more effective is their magnetic separation. Magnetic phases such as magnetite, hematite, goethite, and shamosite were recovered from nonmagnetic minerals of calcite, hydrogarnet and aluminosilicates by high- and/or medium-

创新成果三

研发了生态道路**智能施工**与**精细养护**技术。



1项发明专利，1项技术标准，6项软件著作权，4篇SCI

3.1 研发了基于多源固废的道路基层低碳新材料与施工技术

固废赤泥基生态沥青路面材料

赤泥间隙孔结构锚固增韧机理

d)

填料颗粒与苯乙烯硬段之间的锚固作用非常强

干压空隙率: 47.9%

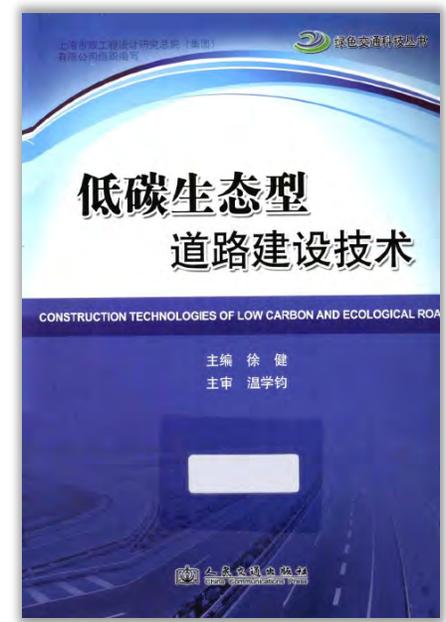
图例: 填料 (red star), 自由沥青 (black circle), 填料吸附的结构沥青 (blue star), 填料+结构沥青 (blue star with red dot), SBS改性剂 (green wavy line)

赤泥微粒填充效应提高抗疲劳性能

沥青相 (asphalt phase), 填料 (filler), 填料-沥青界面 (filler-asphalt interface), 裂缝扩展 (crack extension)

抗飞散剥落性能

材料	3000次	5000次
4#	13.9	18.8
4#改性	7.4	15.1



提高道路材料固废利用率，有效减少了原材料消耗和工程能耗排放

3.2 研发了生态道路智能化施工技术及信息管控平台。



智能化施工



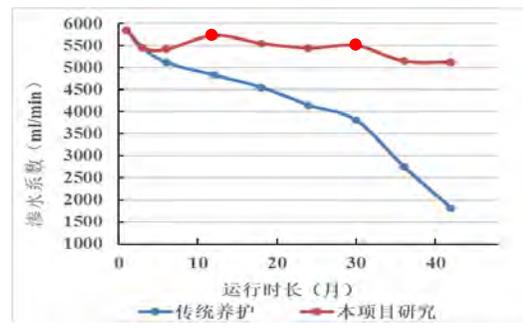
智能管控平台



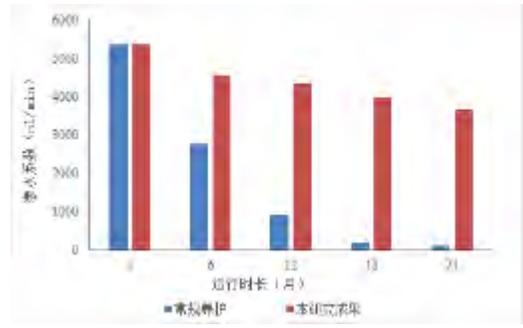
✓ A practical shear rate on modified asphalt binders for optimum compaction temperature determination in asphalt mixture design. *Materials and Structures*, 2017, 50: 61. (SCI JCR Q2, IF 3.4)

实现**压实度**与**空隙率**精准控制，提高施工质量

3.3 建立了生态道路精细化养护体系，研发了多功能养护装备。

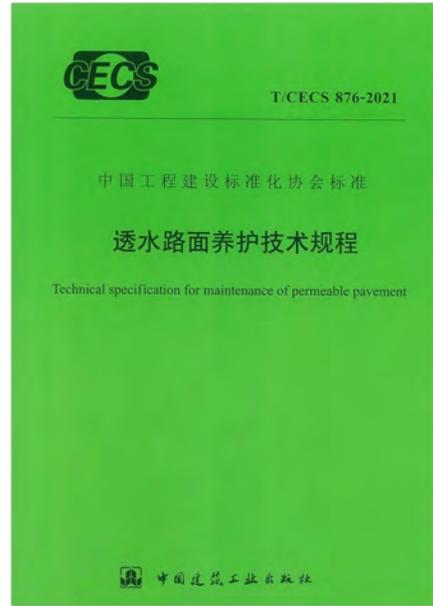


功能衰变规律



养护前后渗水系数

透水功能衰变模型：
$$y = 4300.63 + \frac{1425.9}{1 + \left(\frac{x}{8.92}\right)^{3.8}}$$



首部透水铺装
养护标准



大型透水铺装养护车



小型透水铺装养护车



养护前

养护后

养护装备 透水恢复率≥70%

透水功能寿命由3-5年提升至10年以上

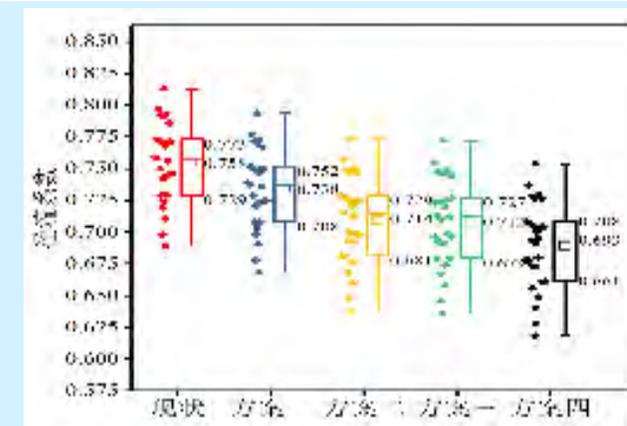
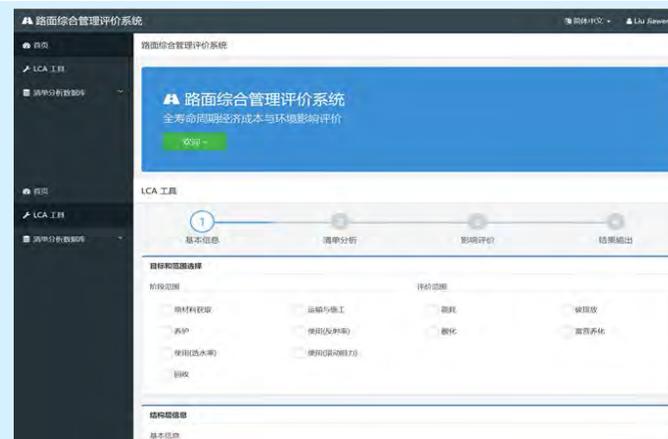
主要技术指标和先进性比较

主要成果	本项目创新	国内同类技术	国外同类技术
多源固废 道路基层 建造技术	基层新材料与施工技术, 降低碳排放 20-30%	降低施工碳排放 15-20%	降低施工碳排放 20%左右
智能施工 平台	智能化施工 提高施工质量 25%	机械施工	数字施工
精细化 养护体系	透水恢复率$\geq 70\%$ 透水功能寿命 ≥ 10年	透水恢复率 30% 3-5年	透水恢复率 40% 5-10年

传统:施工质量低、养护效果差; 本成果:施工质量高、养护效果好³⁷

创新成果 四

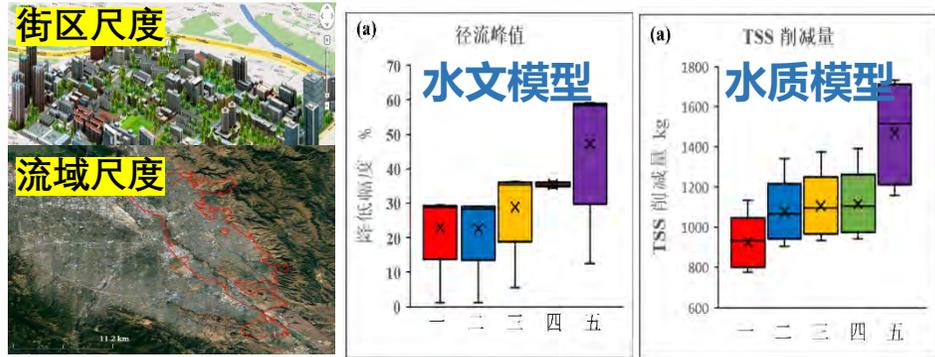
构建了生态铺装生命周期综合效益 优化设计新方法



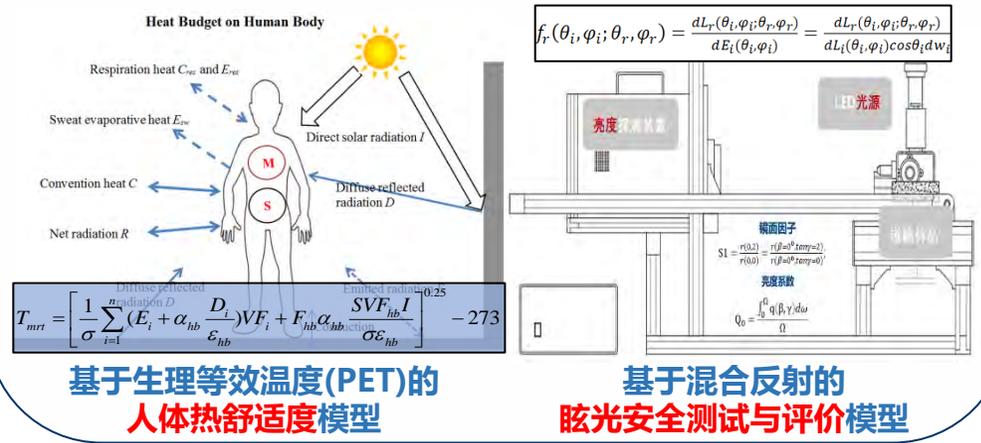
4.1 建立了生态铺装水文水质、光热环境、碳排放等环境效益量化模型，提出了面向水、热、碳等的环境设计指标和分析方法，支撑了全生命周期环境效益设计分析。

生态道路功能型铺装环境影响量化模型

水文水质量化模型

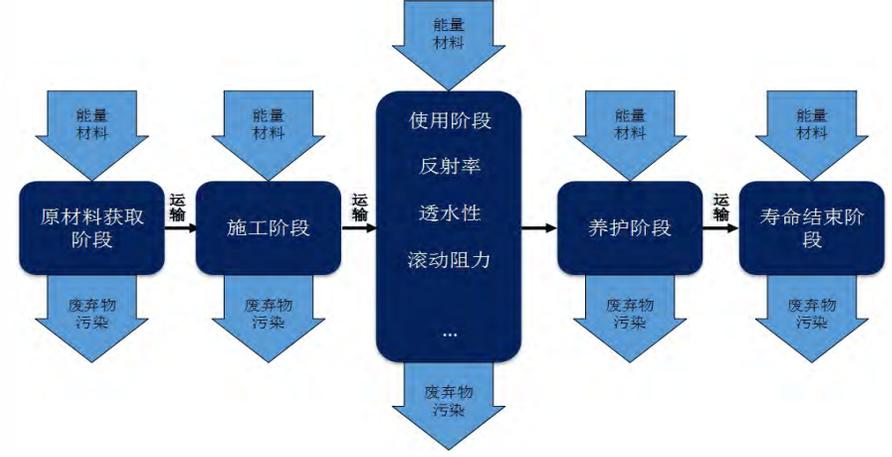


光热影响量化模型



全生命周期环境效益综合评价方法

环境效益综合评价方法



环境效益综合量化模型

能耗与碳排放

$\sum_{j=1}^{m(i)}$ 第j种材料或设备用量 × 单位用量i种能耗 × i种能源单位碳排放

透水性

$$E = n \times d \times \alpha \times \min\{P \times (1 - \varphi) \times A_p \times \sigma, (ET_0 \times K - \gamma P) \times S \times \beta\}$$

净水率

$$\Delta M_i = \gamma_i \times \beta_i \times P \times A_p \times n$$

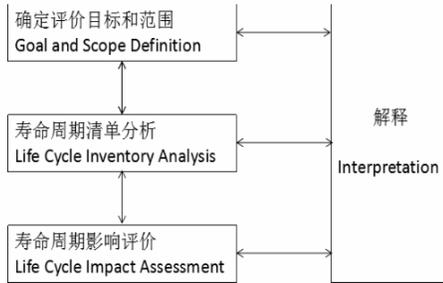
反射率

$$0.01\alpha = \frac{1.087 \times RF \times t}{0.217 \times t - 44.78e^{-t/172.9} - 6.26e^{-t/18.51} - 0.22e^{-t/1.186} + 51.26} \quad [kgCO_2]$$

4.2 建立了全生命周期环境效益与经济成本的耦合分析模型，提出了生态铺装环境效益与经济成本的综合分析方法，实现了生态铺装全生命周期综合设计。

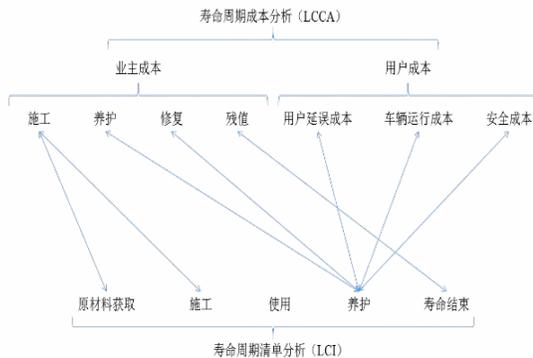
全生命周期经济成本及环境效益综合评价

传统方法



成本分析
环境效益
相互独立

本项目方法

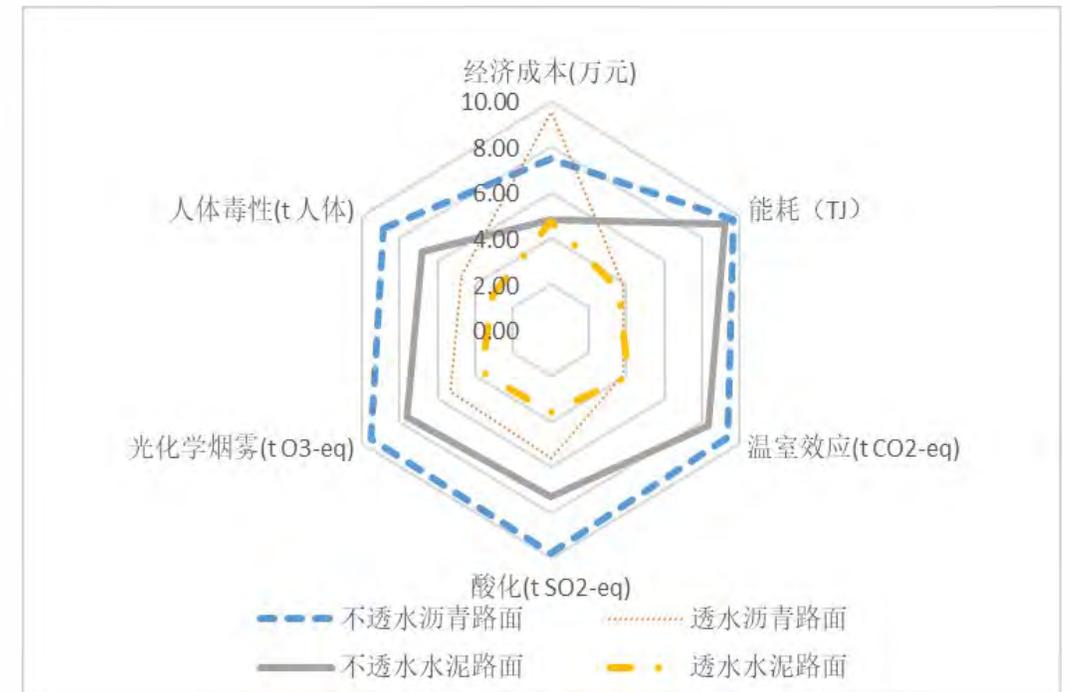


全生命周期
成本分析
+
环境效益
综合效益



经济成本与环境效益平衡协同

不同路面方案经济成本与环境效益归一化对比



4.3 建立了全生命周期环境效益与经济成本的耦合分析模型，提出了生态铺装环境效益与经济成本的综合分析方法，实现了生态铺装全生命周期综合设计。

生态铺装生命周期综合设计软件系统

多模块设计系统 (<https://csts.tongji.edu.cn/lca>)

清单分析数据库与结果可视化

路面综合管理评价系统

多模块设计系统

1 基本信息 2 清单分析 3 影响评价 4 结果输出

目标和范围选择

阶段范围

评价范围

原材料获取 运输与施工 养护 使用(反射率) 使用(透水率) 回收

能耗 碳排放 酸化 富营养化

结构层信息

基本信息

路面综合管理评价系统

材料清单

材料名称: 碎石

材料类别: 骨料

单位: 1kg

成本(元): 0.08-0.4

成本来源: 碎石(反斗)

能耗(MJ): 2.85e-2

CO₂: 3.30e-3

CH₄: 9.85e-6

材料名称	材料类别	单位	成本(元)	成本来源	能耗(MJ)	CO ₂	CH ₄
碎石	骨料	1kg	0.08-0.4	碎石(反斗)	2.85e-2	3.30e-3	9.85e-6
花岗岩	骨料	1kg	0.08-0.2	花岗岩(反斗)	2.40e-2	2.27e-3	7.10e-6
石灰岩	骨料	1kg	2-4	石灰岩(反斗)	3.62e-2	4.26e-3	1.28e-5
沥青	沥青	1kg	2-4	沥青(反斗)	1.26e+0	3.61e-1	4.76e-3

原材料获取 运输与施工 养护 使用(反射率) 使用(透水率) 使用(滚动阻力) 回收

结果显示

材料名称	用量(t)	成本(元)	能耗(MJ)	排放(kg)							
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	SO ₂	NO _x	Pb	Zn
碎石	77562.485	6204998.80-31024994.00	2.29e+0	2.56e+5	7.64e+2	1.50e+0	1.40e+3	5.99e+2	2.01e+3	8.66e+2	3.15e-1
花岗岩	4000.000	960000.00-1920000.00	6.06e+6	1.73e+6	2.29e+4	1.45e+1	6.91e+4	1.94e+4	1.42e+4	2.28e+3	3.07e+1
改性沥青	828.284		4.48e+6	2.68e+5	2.68e+5	2.68e+5	3.56e+2	1.35e+3	1.14e+3		
水	3184.615			2.24e+6	1.81e+3	5.29e+0	1.43e+3	1.28e+3	3.28e+3	1.97e+4	9.20e+3
石灰	3184.615	1273846.00-2292230.50		4.31e+6	3.55e+3	2.04e+2	2.29e+3	1.24e+4	4.44e+2	1.15e+0	3.81e-1

请选择材料

碎石: 碎石(反斗) 碎石(反斗) 碎石(反斗)

改性沥青: 改性沥青(FunbitameLife Cycle Inventory) 改性沥青(FunbitameLife Cycle Inventory)

石灰: 石灰(反斗) 石灰(反斗)





美国环保署(EPA)评价申请人建立的生态道路功能型铺装雨洪调控效益分析模型，“可为预测透水路面或其他雨水控制技术的寿命及行为提供有效参考”。



Long-term effects of three types of permeable pavements on nutrient infiltrate concentrations

Mostafa Razzaghamanesh^{a,*}, Michael Borst^b

^a Former ORISE Postdoc at U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development Edison, NJ 08837-3679, United States of America, Currently Research Fellow at One Water Solution Institute (OWSI) Department of Civil and Environmental Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, United States of America
^b U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2890 Woodbridge Ave., MS-104, Edison, NJ 08837-3679, United States of America

study on various aspects of permeable pavements in California, suggested permeable pavement water quality studies should be continued to correspond to the expected 20-year life span of the systems. With such data, it would be possible to predict the future behavior of permeable pavement or other stormwater control measures using statistical techniques.

斯坦福大学研究人员Wang Chenghao肯定了生态道路功能型铺装全生命周期环境效益评价成果，认为“用生态道路代替密实沥青路面，可以有效减少能源消耗和碳排放、以及铅、锌等污染”。

Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review

Chenghao Wang^{a,b,*}, Zhi-Hua Wang^a, Kamil E. Kaloush^a, Joseph Shacat^c

^a School of Sustainable Engineering and the Built Environment, Arizona State University, Tempe, AZ, 85287, USA
^b Department of Earth System Science, Stanford University, Stanford, CA, 94305, USA
^c National Asphalt Pavement Association, Greentbelt, MD, 20770, USA



lyses for permeable pavements in recent years, and a few have included the estimated benefits in the use phase [133–137]. One example is an LCA conducted in Shanghai, in which the authors considered the benefits related to urban flooding risks, water recycling, and water purification, and found that replacing dense graded asphalt pavement with permeable pavements can reduce energy consumption and emissions of carbon, lead, and zinc [138]. However, the focus of these studies is primarily on using permeable pavements for urban stormwater man-

技术类别	技术指标	本项目成果	国内外
生态道路 铺装材料	大空隙沥青材料飞散率	$\leq 5\%$	10~15%
	大空隙水泥材料强度	抗压 ≥ 45 MPa/ 抗折 ≥ 4.5 MPa	20~25 MPa/2.5MPa
	透水率	≥ 3 mm/s	0.5~0.8 mm/s
	氮磷污染物去除率	$> 70\%$	20~40%
生态道路 结构设计	路面设计方法	力学-生态双性能设计方法	力学性能设计方法
生态道路 智能建养	施工技术	智能化施工	数字化施工
	养护装备透水恢复率	$\geq 70\%$	30~40%
综合 效益评价	全生命周期 综合评价体系	面向生态道路的多环境要素分析平台	针对传统道路的专用评价软件

国际领先

国际先进

国际领先

国际先进



汇报内容

一 | 背景

二 | 生态道路技术研究

三 | 低碳道路技术路径

四 | 生态道路推广应用

五 | 研究展望

碳中和宏观路径 —— 两个维度：降碳与固碳

降碳

固碳

非碳能源技术迭代发展过程，主要分为三步

未来能源消费总量预测：考虑GDP增长及人口变化特征

↓ 明确

↓ 明确

非碳能源利用率阶段性提高

非碳能源利用率阶段性提高

第一步
化石能源的**清洁高效利用**与**耦合替代**

第二步
可再生能源**多能互补**与**规模应用**

第三步
低碳能源**智能化多能融合**

确保非碳能源的**稳定输出**及**高效利用**（风、光等）

碳中和宏观路径 —— 两个维度：降碳与固碳

降碳

固碳

自然过程吸收 + 生态建设 + 工程封存 = 排放量 → 碳中和

陆地生态系统的现状固碳能力测算

陆地生态系统的固碳潜力预测分析

自然吸收过程
固碳能力的基数

生态建设

工程封存

工程封存技术

碳移除/捕捉途径

潜力(亿吨CO₂/年)

二氧化碳化学品

烟道气等CO₂→化学产品

3~6

二氧化碳燃料

烟道气等CO₂→燃料

10~42

混凝土碳捕集

烟道气等CO₂→水泥混凝

1~14

提高原油采收率

烟道气等CO₂→储油池

1~18

微藻生产

CO₂→微藻生物

2~9

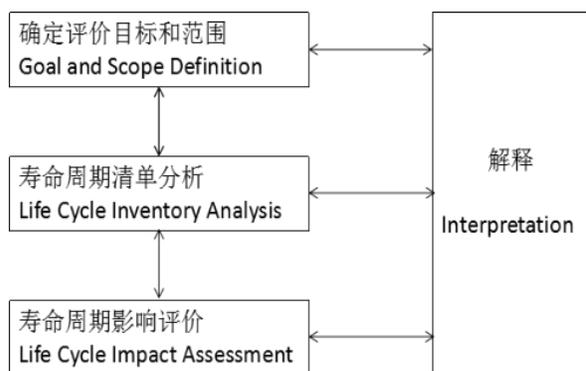
CCUS

生态建设	潜力(亿吨CO ₂ /年)
生物能源碳捕捉和储存	5~50
矿物碳化	20~40
森林碳汇	5~47
土壤碳封存	32~72
生物炭	4.7~30

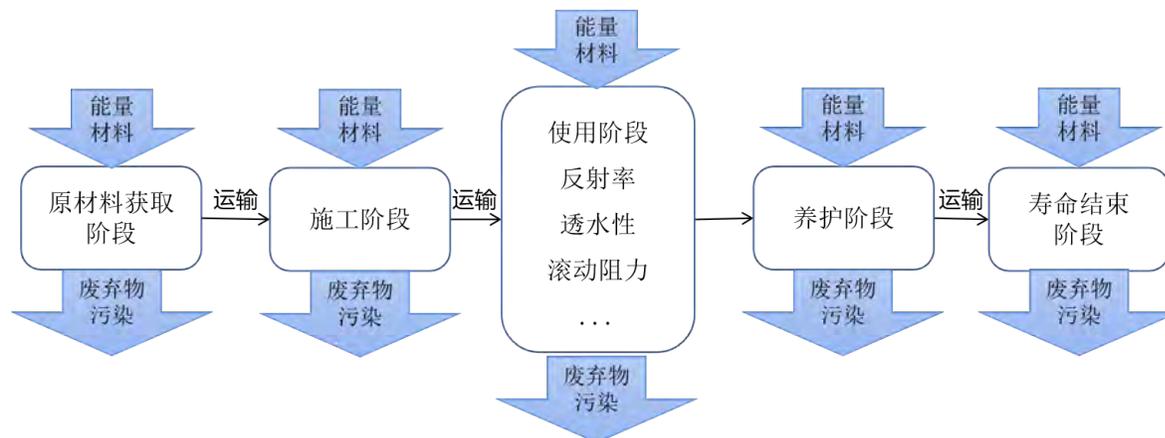
碳排放生命周期评价法 (Life Cycle Assessment)

- 生命周期评价(LCA)——评估环境影响的从“摇篮”到“坟墓”的分析技术。
- LCA方法是全球交通系统碳排放评估的有效方法，在欧美国家得到广泛应用。
- 情景分析法：预测未来不同场景下事情发生的可能结果，比较不同情景下的减排潜力。

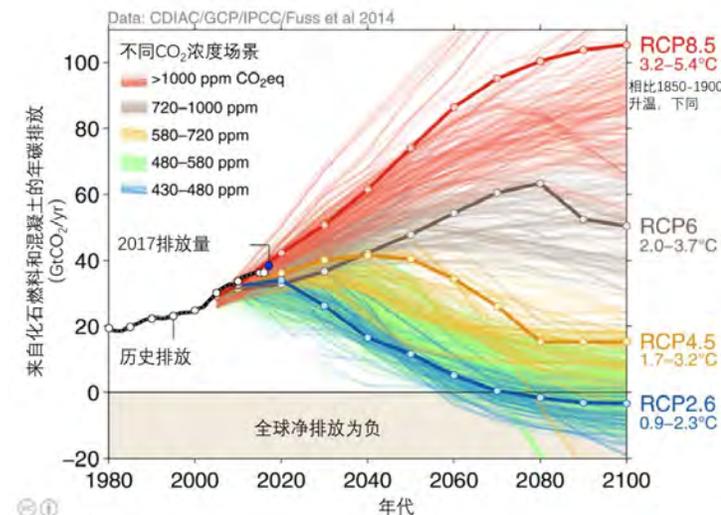
全生命周期评价框架



交通基础设施全生命周期划分



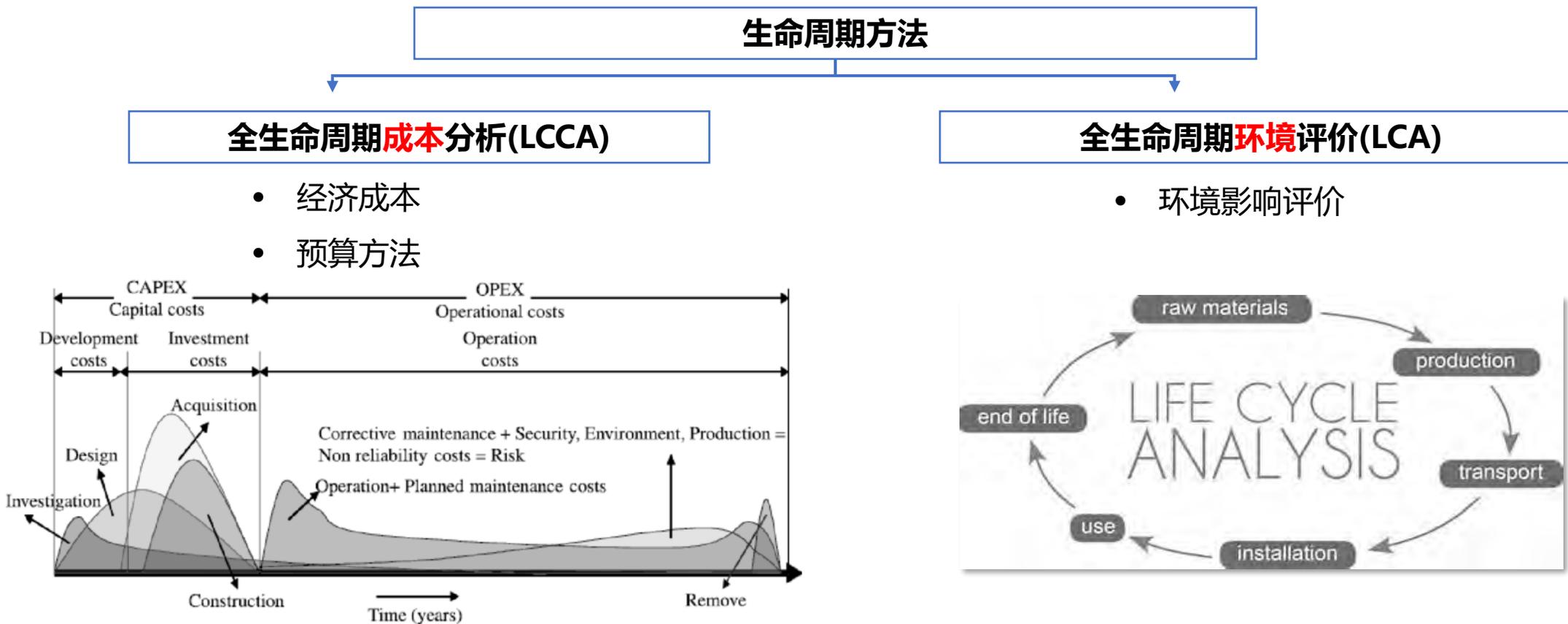
IPCC情景分析



LCA是国际公认的环境影响评估工具

碳排放成本效益分析 (Life Cycle Cost Analysis)

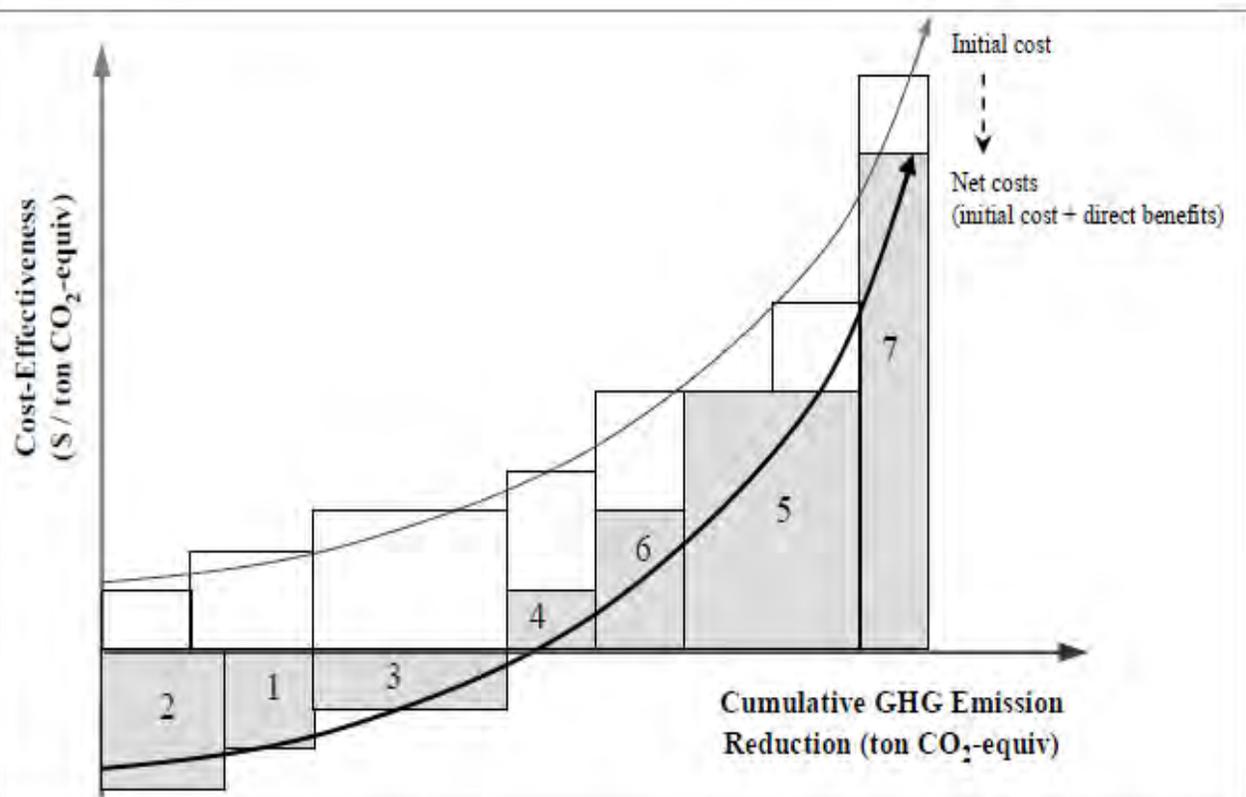
□ **全生命周期成本分析(LCCA)** – 是一种计算生命周期中发生的总成本的方法。



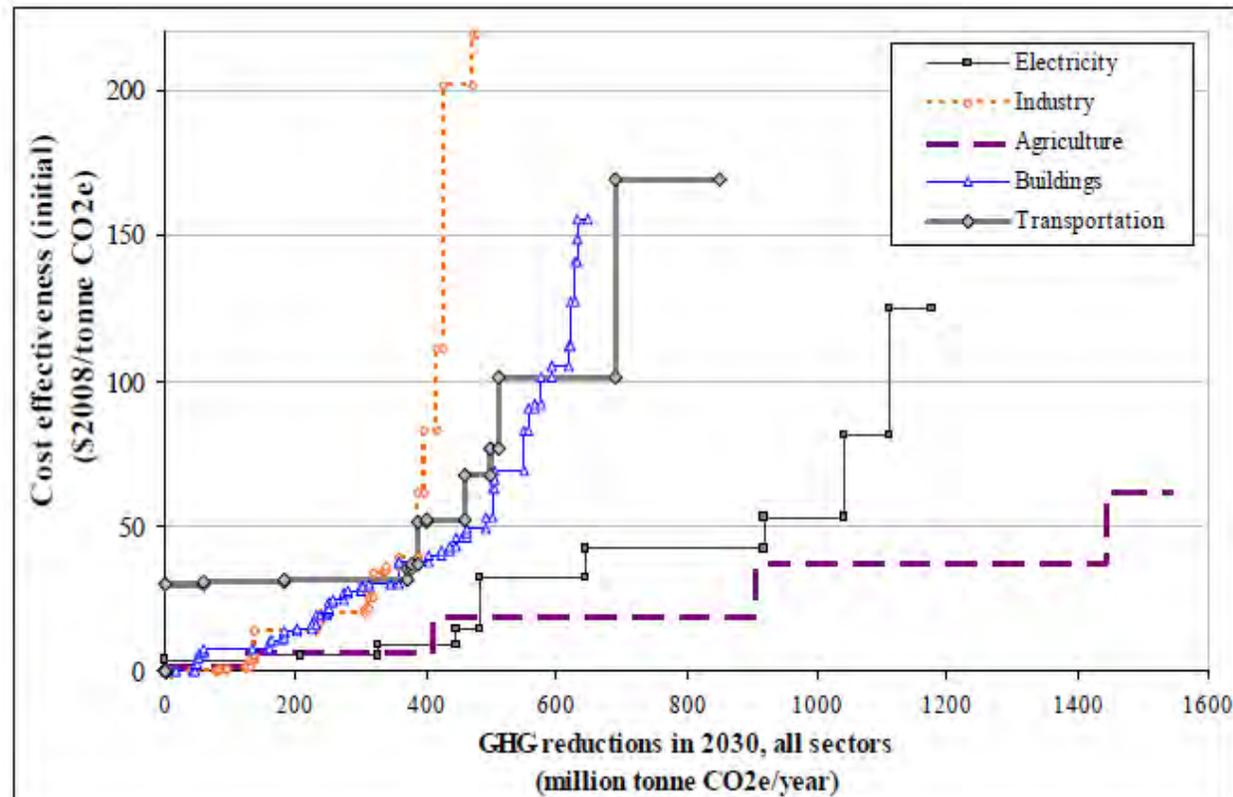
广泛应用于辅助政府部门进行方案比选与决策

碳排放成本效益分析 (Life Cycle Cost Analysis)

- 成本效益分析：拟议政策的**总收益超过总成本**，该措施将增加公共福利，并被称为“**经济有效**”。
- 采用“**成本效益曲线**”将**减排能力和成本效益**相关联，评估减排政策的**技术成本、生命周期节能效益和减排潜力**，用以衡量不同减排政策实施优先级。



美国不同减排政策的成本效益曲线



美国不同经济行业的成本效益曲线

碳排放生命周期分析法 —— 案例研究

长三角生态绿色一体化发展示范区碳达峰方案和碳中和战略研究

道路交通基础设施“碳达峰、碳中和”路径

研究目标

测算两区一县道路交通基础设施生命周期碳排放

预测碳达峰时间与碳排放量

提出碳中和路径并分析效益

研究内容

道路交通基础设施全生命周期碳排放测算与特征分析

道路交通基础设施碳达峰时间与达峰量预测

道路交通基础设施碳中和路径与综合效益分析

研究方案

调研并建立两区一县道路碳排放清单数据库

全生命周期各阶段碳排放量计算 (LCA)

分析碳排放特征并提出影响因素

绘制碳排放总量随时间变化曲线

模型拟合并预测碳达峰时间与达峰量

基于情景分析的两区一县碳达峰预测

道路交通基础设施减碳路径策略分析

减碳政策全生命周期经济成本分析 (LCCA)

减碳政策成本效益分析曲线绘制与决策方案制定

预期成果

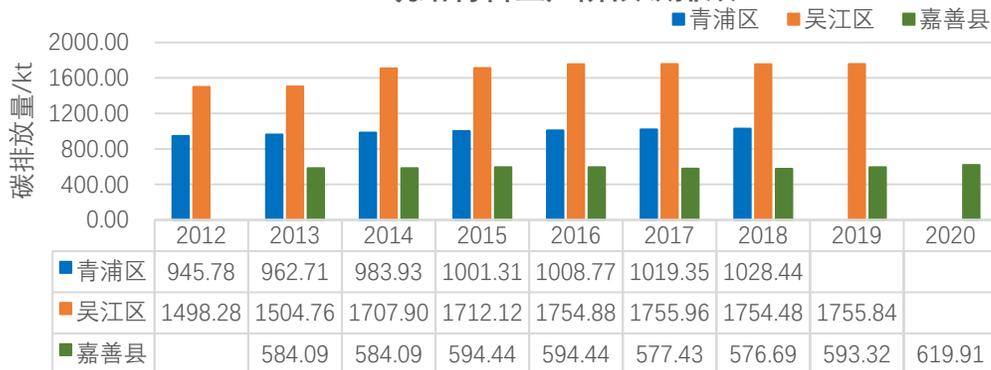
两区一县道路交通基础设施“碳达峰”精准预测与“碳中和”策略效益评价

道路交通基础设施碳排放生命周期评价技术路线

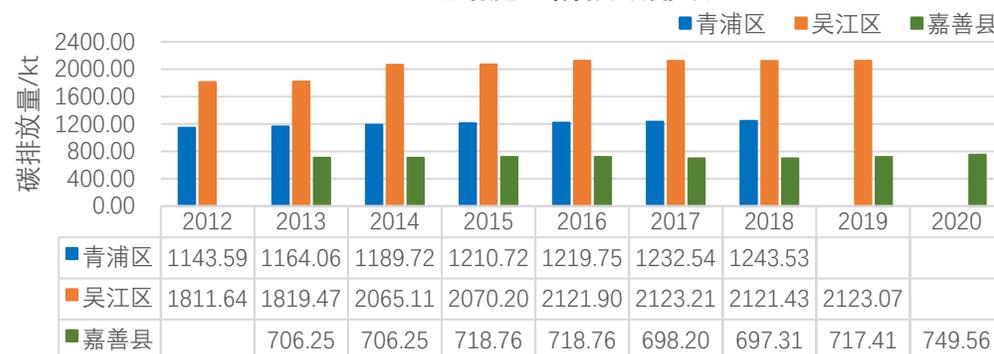
碳排放生命周期分析法 —— 案例研究

长三角一体化示范区(上海青浦区、苏州吴江区、浙江嘉善县)道路基础设施碳排放评价

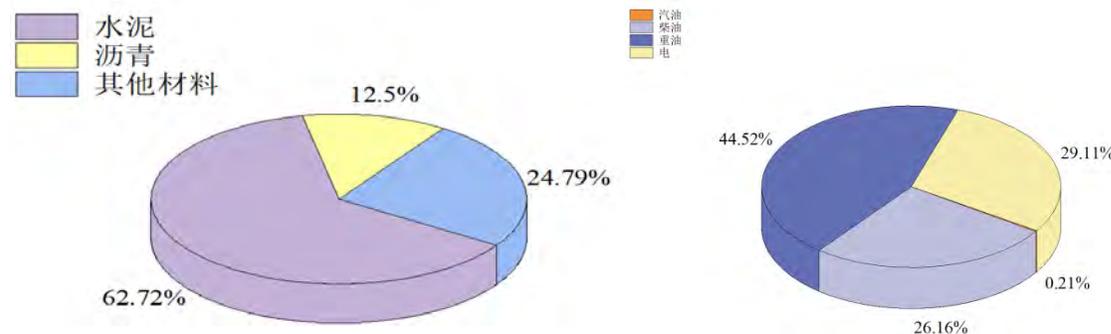
筑路材料生产阶段碳排放



道路施工阶段碳排放



养护阶段碳排放总量



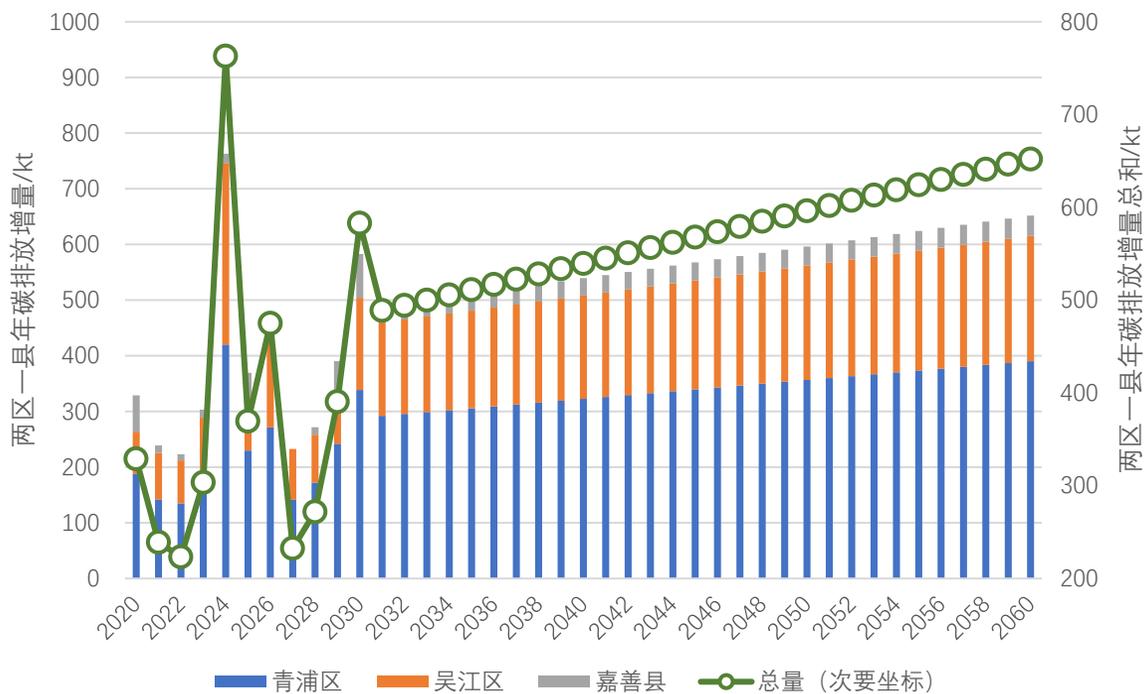
现状:材料和施工阶段是碳排放的主要环节,也是减碳的重点

碳排放生命周期分析法 —— 案例研究

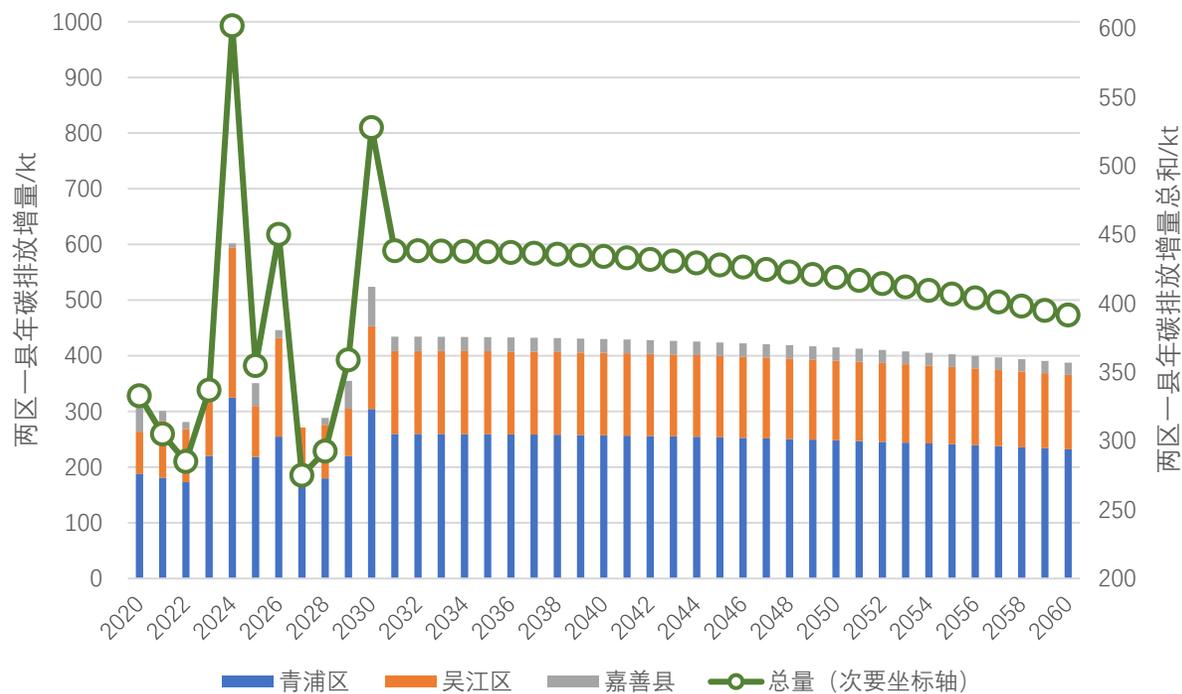
长三角一体化示范区(上海青浦区、苏州吴江区、浙江嘉善县)道路基础设施碳排放情景分析

考虑**低碳环保材料**、**新能源机械设备**、**低碳高效施工工艺**等技术的发展

基准情景



最优情景



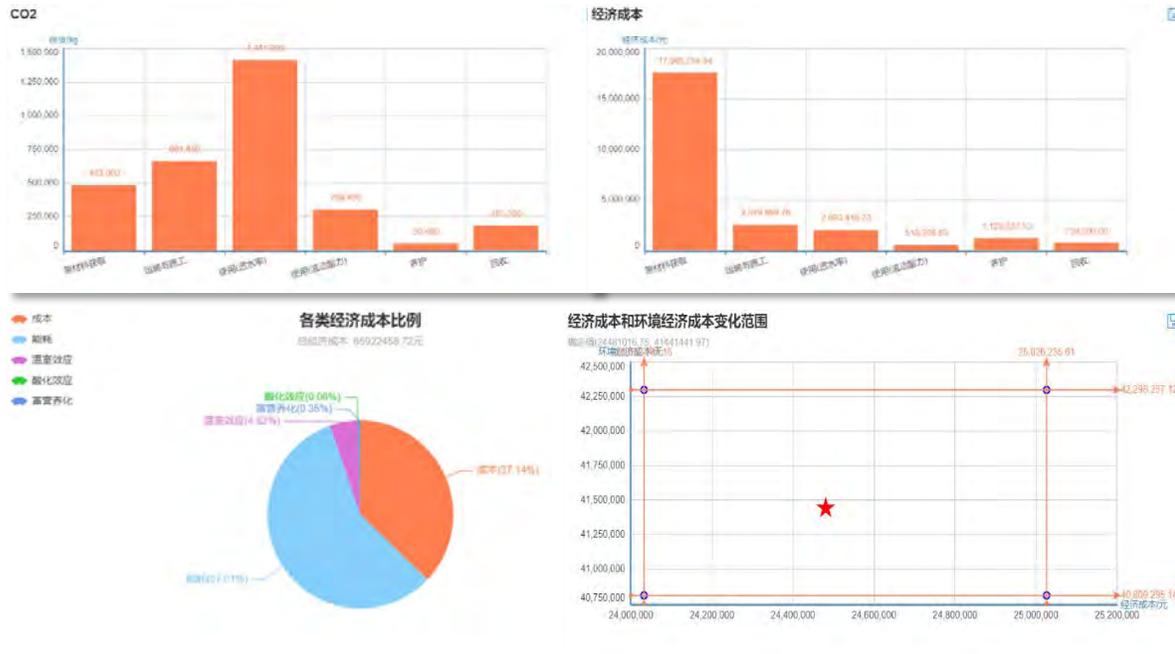
预测:全生命周期低碳技术的应用可使“碳达峰”提前到来



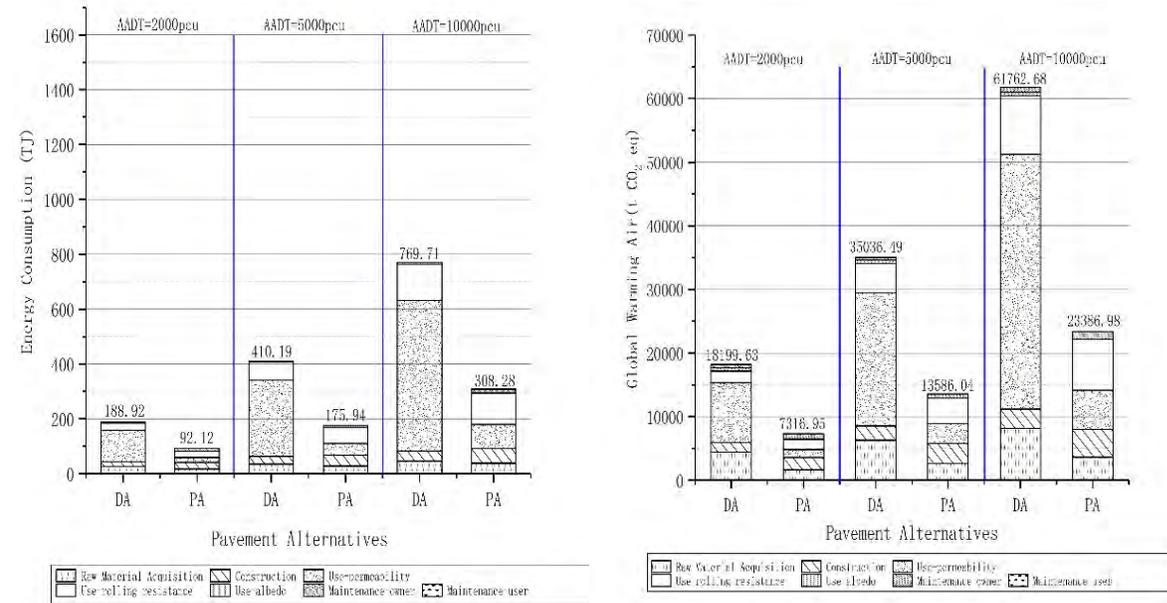
LCA & LCCA的综合评价方法：透水路面分析案例

- 基于全生命周期分析框架的**经济成本**和**环境影响**(能源、排放、人类健康)综合评价方法;
- 透水路面: 能源↓60%, 温室气体排放↓50%。

LCA系统评价结果输出



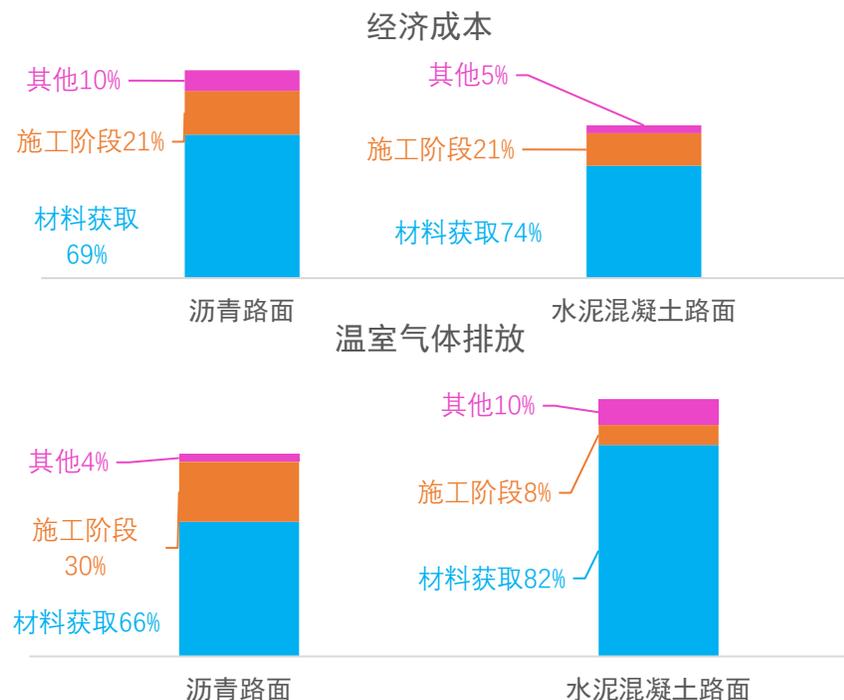
PA环境效益



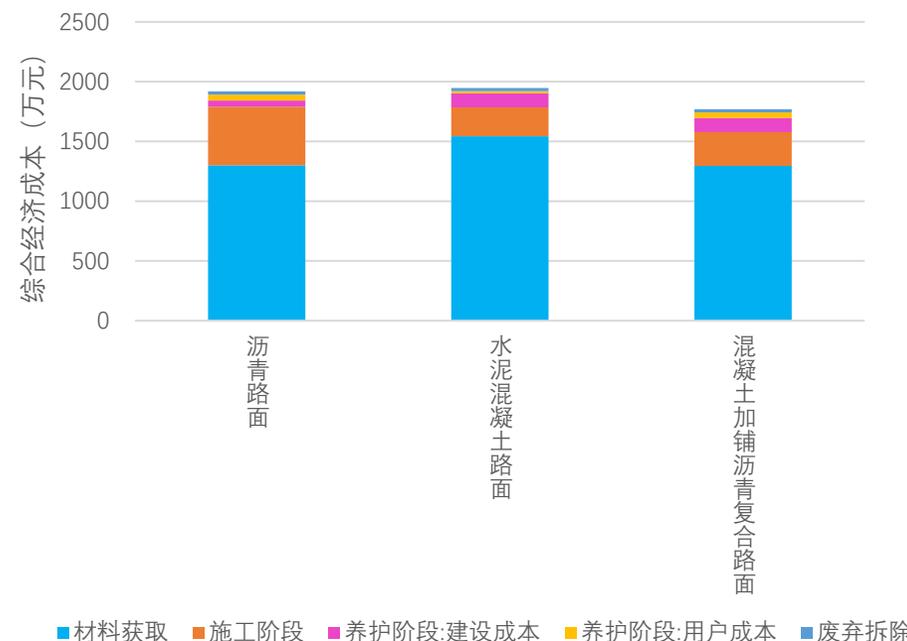
LCA & LCCA的综合评价方法：重载路面分析案例

- 引入二氧化碳排放影子价格，重点评估重载路面经济成本与碳排放情况
- 水泥路面的原材料阶段碳排放占比约80%，相当于沥青路面生命周期全部碳排放

水泥混凝土及沥青路面主要特点



三种典型路面综合评价结果



产品种类规则 (PCR)

PCR是LCA评价细化与规范化、迈向实际应用的重要基础，也是编制EPD(Environment Product Declaration)报告的准则。

产品种类规则(Product Category Rule, PCR)是指对一个或多个产品种类进行III型环境声明（环境产品声明）所必须满足的一系列规则、要求和指南。

- 欧洲标准化委员会建立了产品环境足迹(Product Environmental Footprint, PEF)认证体系，已发布几十种产品的PEFCR，广泛涵盖各个行业。
- 美国、日本、德国等国家逐渐形成了各自的产品环境认证体系，发布了广泛的PCR以指导环境报告的编制。



<https://www.nsf.org/>

产品环境声明 (EPD)

□ 产品环境声明(Environmental Product Declaration, EPD)

透明的、经过验证的产品制造的环境影响报告，也可称为第III类环境声明，是行业根据国际标准化组织(ISO)标准14025 (ISO 2006)制定的产品标签。

□ EPD的制定运用了**生命周期评价(LCA)**的方法，并遵循了产品种类规则(PCR)中描述的行业共识方法。

□ EPD制定步骤：

- 第一步是制定产品种类规则(PCR)
- 第二步是针对产品或材料开展生命周期评价(LCA)
- 第三步是编制环境产品声明(EPD)
- 第四步是报告的鉴定与发布

材料	来源
硅酸盐水泥	美国材料与试验协会 (ASTM)
钢	美国钢筋混凝土协会 (CRSI)
沥青混合料	美国国家沥青路面协会 (NAPA)
混凝土	美国预制混凝土协会
集料	美国材料与试验协会 (ASTM)

美国许多行业协会已开展道路材料的EPD编制

Table 1. Example of a hypothetical EPD for an asphalt mix design (courtesy of National Asphalt Pavement Association).²

TRACI Impact Indicator	Unit	Materials	Transport	Production
Global Warming Potential	kg CO ₂ -Equiv.	83.4	11.8	168
Ozone Depletion	kg CFC-11-Equiv.	1.81e-08	5e-10	8.55e-11
Acidification	kg SO ₂ -Equiv.	0.486	0.0577	1.08
Eutrophication	kg N-Equiv.	0.0263	0.00373	0.0207
Smog Air	kg O ₃ -Equiv.	8.23	1.81	13.3

Note: Impacts for Test Mix 1, a dense-graded Superpave asphalt mixture, categorized as a hot-mix asphalt mixture, produced within a temperature range of 100 to 250°F.

产品环境声明 (EPD)

□ EPD的特殊性分类

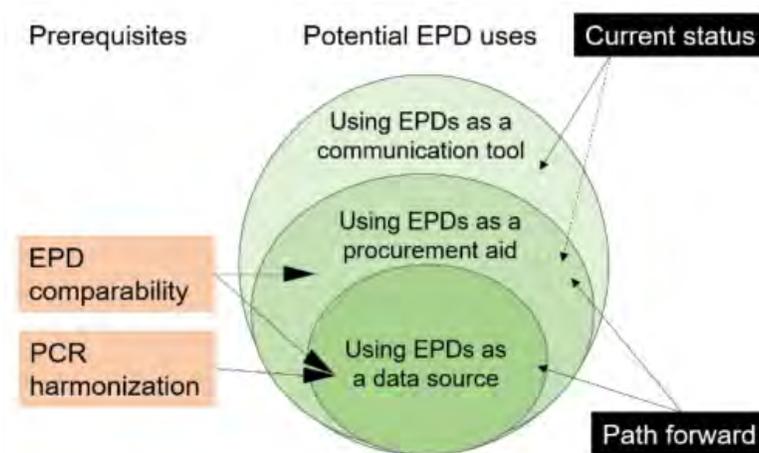
- **确定具体生产工艺的特定产品：**例如某一设施/工艺生产的沥青混合料。
- **某一类产品：**包含不同设施/工艺生产的多类沥青混合料。
- **某行业产品：**例如水泥行业的产品（行业平均值）。

□ 制定EPD的主要目的：

- 为材料或产品生命周期评价提供可验证的、透明的环境信息；
- 为工程采购提供决策基础；
- 提高生产效率，并促进环境改善；
- 鼓励环保产品的推广使用；
- 为各类生命周期评价提供数据支持。



Source: FHWA
Figure 3. EPD types based on specificity.
Note: PFS EPD = product- and facility-specific EPD.



Source: FHWA
Figure 4: Potential uses of EPDs.

道路生命周期减碳路径：规划设计阶段

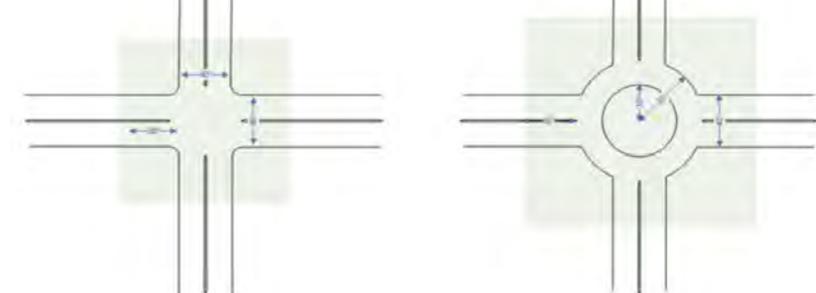
长三角地区高速公路规划示意图



- 路线规划布局多指标优化
- 生态选线选址、生态修复
- 合理规划保证服役寿命



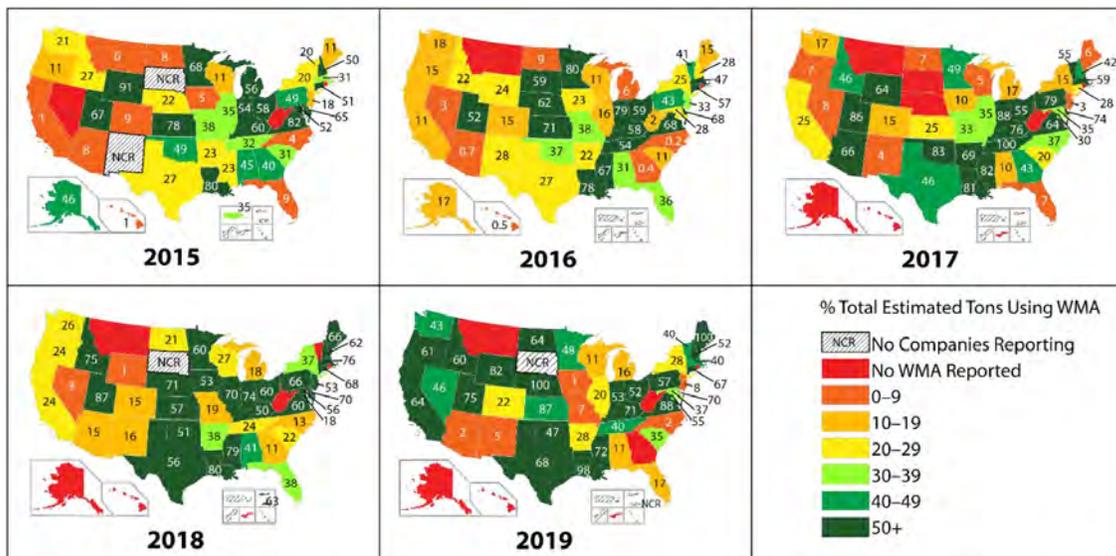
Intersection → Roundabout



		Intersection		Roundabout	
		Life Cycle Agency Costs		Life Cycle Assessment (tonne CO ₂ e)	
Life Cycle Stages	Year	Intersection	Roundabout	Intersection	Roundabout
Materials and Construction	0	\$130,700	\$190,800	5.34	6.58
Materials and Maintenance (4% discount rate applied to costs)	7	\$103,300	\$69,500	5.55	4.98
	14	\$78,500	\$52,800	5.55	4.98
	21	\$59,700	\$40,100	5.55	4.98
Total		\$372,200	\$353,200	22	21.52
Life Cycle Net Savings		\$19,000		0.48	

- 详细设计阶段确保道路服务水平
- 优化平纵线形
- 附属设施位置选择合理

道路生命周期减碳路径：材料阶段

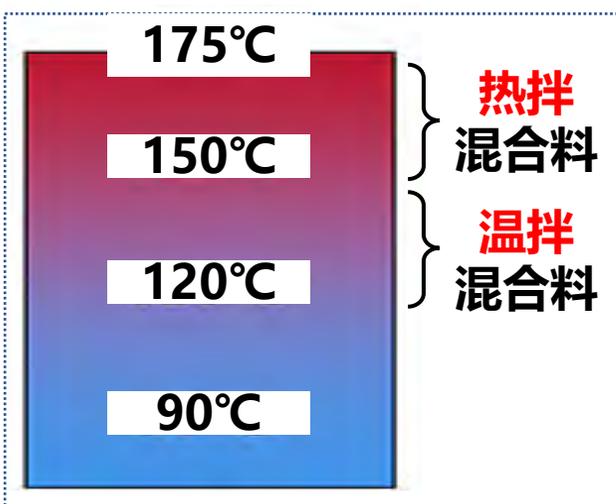


美国2015-2019年温拌沥青混合料技术发展快速

- **温拌技术**：降低温度，降低能耗及碳排放
- **固废利用**：固废赤泥、工业废渣、废旧轮胎等。
- **路面材料再生**：利用旧料，降低碳排放
- **低碳水泥混凝土**：工业固废替代水泥，比传统能耗低

国家统计局：2020年全国水泥产能为23.77亿吨

替代水泥	节煤 (万t/年)	CO ₂ 减少 (万t/年)	粉尘减少(万t/年)	SO ₂ 减少 (万t/年)
1%	558.6	1519.4	185.4	4.8



道路生命周期减碳路径：施工阶段

- **施工机械**能源清洁化，设备动态管理，及时养护维修。
- **绿色能源**收集与利用，太阳能等。
- **新兴施工工艺及技术**：**智能压实**、**3D摊铺**、**实时平整度测量技术**等
- **优化施工组织方案**，提高施工组织效率。



优化施工方案



电动渣土车

生态道路智能化施工管控系统



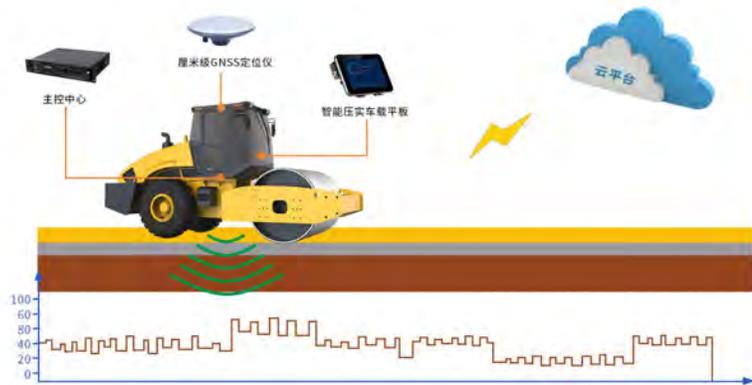
智能管控平台



无人化施工



3D摊铺



智能压实

道路生命周期减碳路径：运营阶段

- **太阳能** —— 光伏效应，光→电（结合地区丰富的太阳能资源）
- **机械能** —— 压电路面，变形→电
- **风能** —— 风能→机械能→电能，供给监控系统、照明设备等

2014年美国：太阳能停车场



2016年法国：太阳能公路Wattway



压电路面



路域范围太阳能光伏板



路基边坡太阳能光伏板

道路生命周期减碳路径：养护阶段

- 高效低碳养护策略，加强预防性养护，保证路面服务水平。
- 提高养护品质，延长路面使用寿命
- “四新” 低碳养护（新技术、新工艺、新材料、新设备）
 - 冷再生、高性能沥青混凝土
 - 高性能天然沥青混凝土
 - 冷拌冷铺材料等

新能源养护车



微罩面预防性养护



乳化沥青冷再生



汇报内容

1 | 背景

2 | 生态道路技术研究

3 | 低碳道路技术路径

4 | 生态道路推广应用

5 | 研究展望

四

知识产权及推广应用

主要合作单位

河北交通投资集团公司

山东高速集团

扬州大学

中国路桥工程有限责任公司

苏交科集团股份有限公司

北京市市政工程研究院

上海砦仁环保科技发展有限公司

河南万里路桥海绵城市建设研究院

雄安新区荣乌、京德高速

交通运输部公路科学研究院

上海公路桥梁（集团）有限公司

上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

河北省高速公路延崇管理中心

重庆交通大学

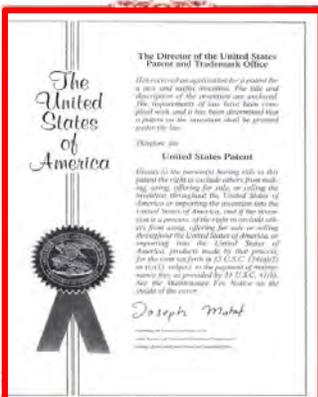
北京中天路业科技有限公司

同路达（上海）生态科技有限公司

河北曲港高速

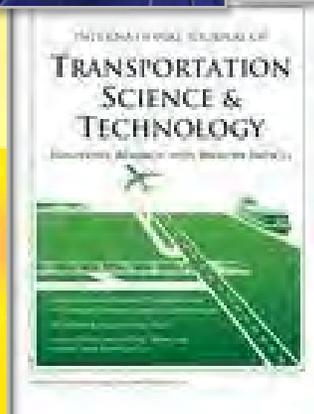
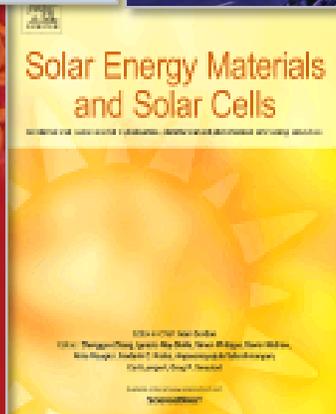
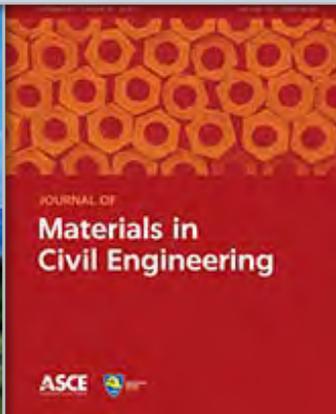
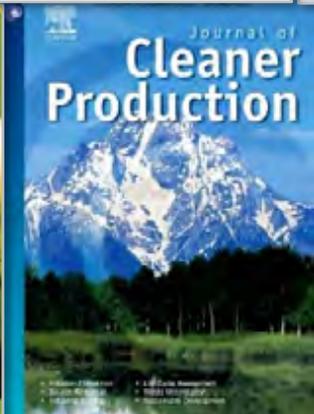
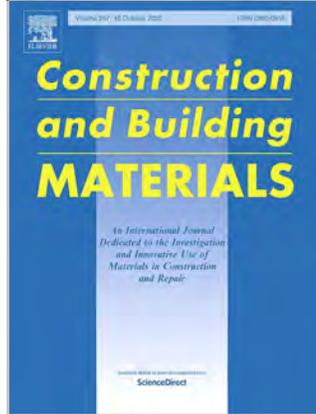
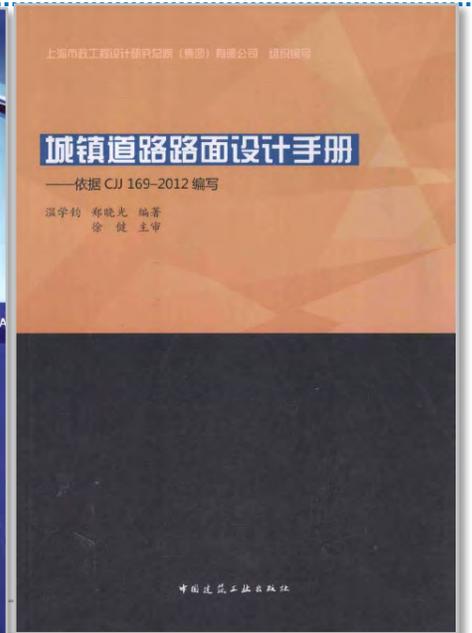
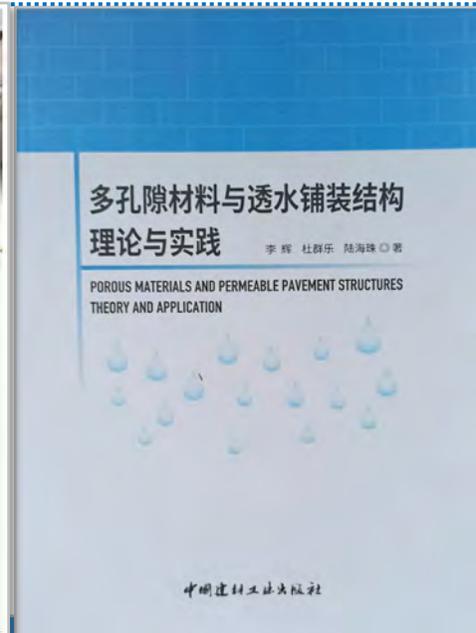
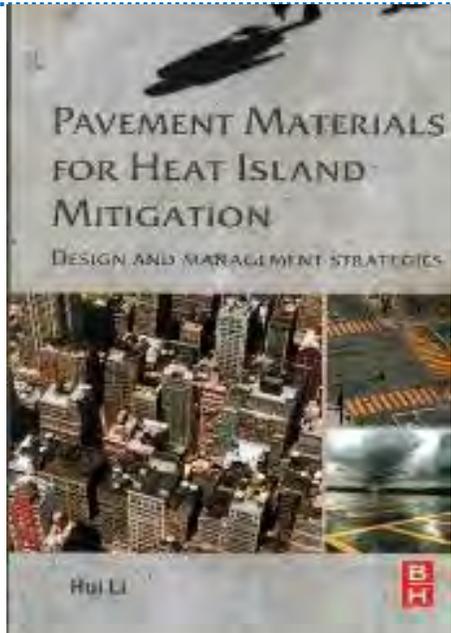
四 知识产权及推广应用

授权发明专利45项(美国专利2项，发明专利21项)，软件著作权11项。



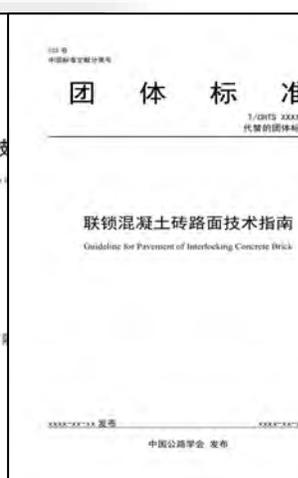
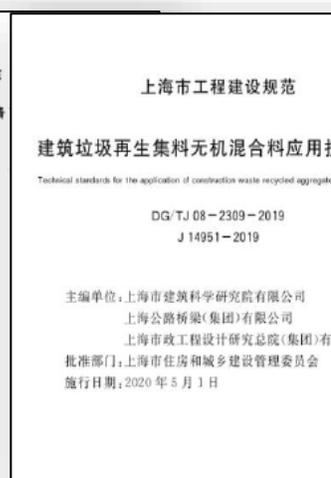
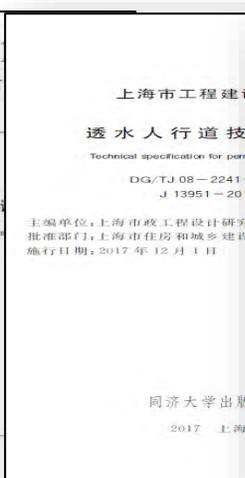
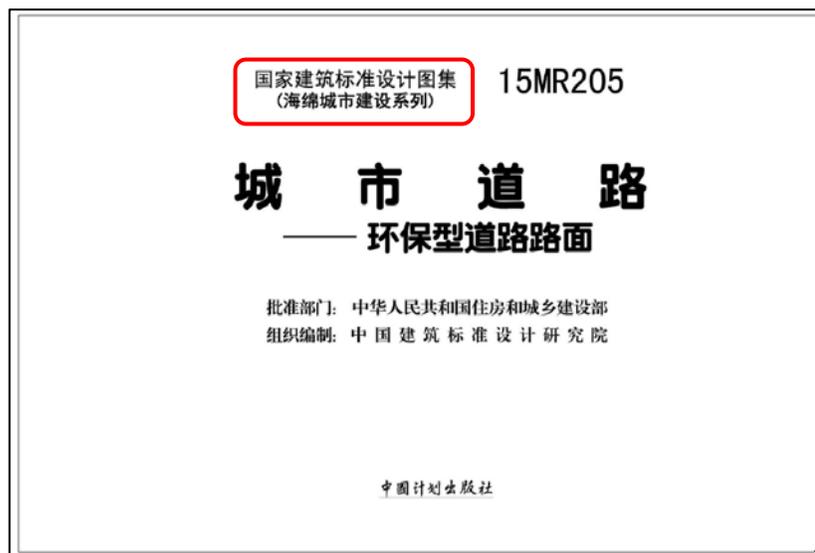
四 知识产权及推广应用

发表论文77篇 (SCI: IF3.0以上26篇, 最高IF: 9.3), 专著5部 (英文1部)。



四 知识产权及推广应用

发布12项技术标准 (国家标准2项, 行业标准2项)。



四 知识产权及推广应用

- 奥运会延崇高速公路太子城服务区、雄安新区荣乌高速、京德高速等多项重大工程；
- 上海临港国家海绵城市示范区、崇明世界级生态岛等**180余项**工程，应用面积达**360万m²**。

全国应用



四 知识产权及推广应用

同时推广应用到“一带一路”巴基斯坦绿色公路、非洲科特迪瓦生态道路、美国加州等国际生态铺装工程。



科特迪瓦生态道路



加州伯克利地铁站广场



加州大学戴维斯校园道路

全球应用



巴基斯坦绿色公路



德国巴斯夫总公司停车场



斯坦福大学校园道路

四 知识产权及推广应用

公路典型应用：冬奥会赛区连接公路通道—延崇高速公路



良好透水性能
(透水率8mm/s以上)

技术指标:

- 国内首次透水水泥铺装机械化施工：
施工效率提高60%，透水率8mm/s；
- 依据当地特色、景观/功能设计：
抗压：35MPa，抗折：4.0MPa；
抗冻性能提升30%以上。

创新成果应用于冬奥会—延崇高速太子城生态智慧服务区10,000m²铺装
采用高强耐久大空隙水泥路面、发光景观路面多种技术。



停机坪透水路面



首次透水水泥路面机械化摊铺施工



大型车位透水路面



大型车位透水路面

四 知识产权及推广应用

公路典型应用：雄安新区对外骨干公路网京德、荣乌高速公路



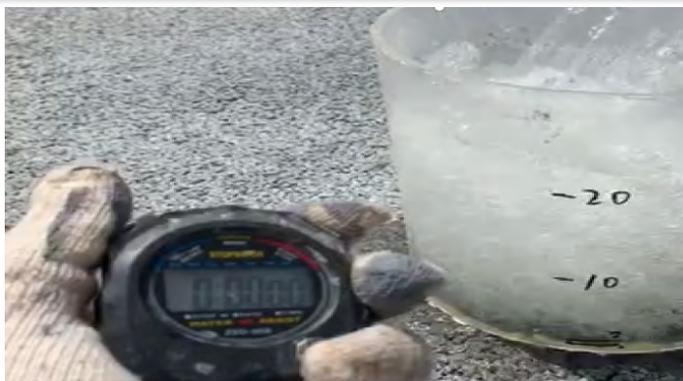
技术指标：

- 透水率 $\geq 15\text{mm/s}$;
- 抗压：30MPa, 抗折：3.5MPa;
- 耐磨BNP: 74;
- 路面降温：10°C (广场、夏季)。

核心成果应用于 雄安新区京德、荣乌高速公路 绿色生态服务区 29,000m²铺装
采用透水水泥铺装、红外反射降温涂层技术。



彩绘透水广场



高透水性(16.03 mm/s)



耐磨抗滑(BNP=74)

四 知识产权及推广应用

城市道路典型应用



上海市茸吉路



嘉闵高架



虹梅南路高架

采用排水结构设计,标段长148.5米,宽16米,
抗压强度36 MPa,抗弯拉强度4.5 MPa。

半透式双层排水路面,应用高黏改性沥青
粘附性强、抗荷载能力强、长期应用不开裂

场区道路典型应用：崇明世界级生态岛道路



企业级工法证书

工法名称：净味沥青混合料施工工法
批准文号：沪路桥司总工〔2020〕213号
工法编号：SRBGGF011-2020
完成单位：上海公路桥梁（集团）有限公司
工法主要完成人：牛晓伟、姚鸿儒、梁冲冲、原海、范元华



企业级工法证书

工法名称：环保低噪热路面施工工法
批准文号：沪路桥司总工〔2020〕213号
工法编号：SRBGGF009-2020
完成单位：上海公路桥梁（集团）有限公司
工法主要完成人：韩建勇、陈辉、刘飞、贾尚华



双层透水沥青路面2000m²；反射降温路面1100 m²



汇报内容

1 | 背景

2 | 生态道路技术研究

3 | 低碳道路技术路径

4 | 生态道路推广应用

5 | 研究展望

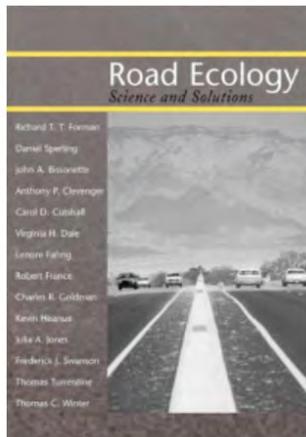


1. 道路生态学：定义

Road ecology is the study of the interaction between **human-built infrastructure** and the **natural environment**. It is a constantly evolving science that melds the interests and missions of multiple disciplines and agencies.

A *road* is an open way for the passage of vehicles,^{1015, 532} and *ecology* is the study of interactions between organisms and the environment.^{856, 776} Therefore, the combination describes the essence of *road ecology*, namely, the interaction of organisms and the environment linked to roads and vehicles. More broadly, traffic flows on an infrastructure of roads and related facilities form a *road system*. Thus road ecology explores and addresses the relationship between the natural environment and the road system.

总结：道路系统与生态系统之间的关系，改善目标是生态系统



4 parts:

- roads, vehicles, and transportation planning
- roadsides, vegetation, wildlife, and mitigation
- water sediment, chemicals, aquatic ecosystems, and the atmosphere
- road systems, major landscape types, and further perspectives.



1. 道路生态学：发展

道路生态学领域的**创始人**：Richard Forman，景观生态学之父

1995年开始研究，2003年道路生态学**首部**著作《Road Ecology: Science and Solutions》

Harvard University
Graduate School of Design

Reopening Menu Search

Faculty



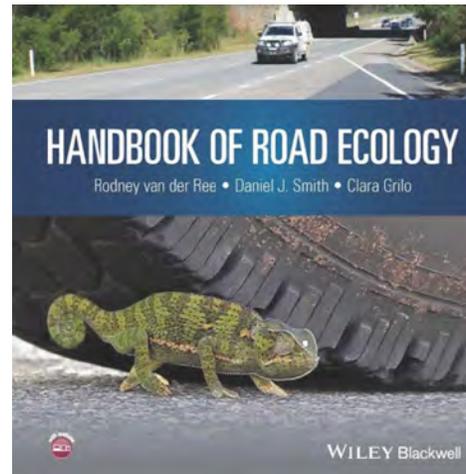
Richard T.T. Forman
Professor of Advanced Environmental Studies in the Field of
Landscape Ecology, Emeritus



1. 道路生态学：发展

- 1920之前：泥泞、侵蚀的泥土道路
- 1920-1930s：Road Kill, 野生动物事故, 少量景观设计
- 1960s：法国首次建设了150个动物通道 overpasses green bridge
- 1970s：开始关注air pollution
- 1980s：加速研究和关注(德国、法国、荷兰、瑞士→意大利→北美→加拿大)
- 1990s：空气、湿地、气候变化、野生动物通道
- 1990-2000s：5次国际会议, 在荷兰成立Infrastructure Ecology Network Europe (<https://www.iene.info/members/become-a-member/>)

Handbook Wildlife Traffic





1. 道路生态学：发展

2000-2010s:

The emerging field of road ecology has galvanized scholars and practitioners eager to address this problem. Road ecologists investigate the complex interactions between roads and the natural environment:

- How roads act as **barriers** inhibiting the movement of plants, animals, water and soils;
- How traffic **run-off contaminates** surface and underground water;
- How **particulate emissions** and **noise pollution** affect habitats;
- They also help develop and test solutions to these pervasive problems.

2010-2020s:

- 智能化监测
- 标准化及新型方法
- 特殊动物进入视野



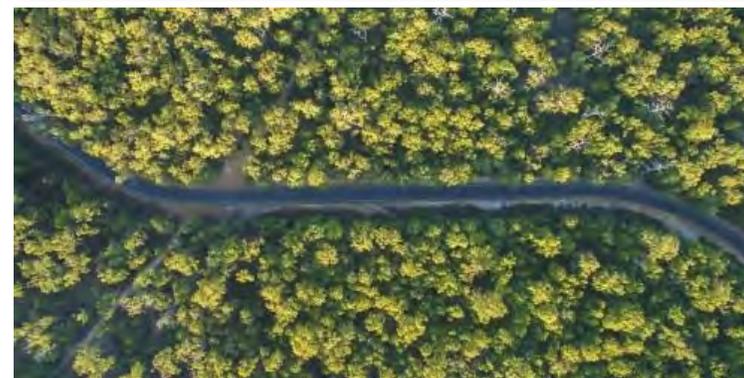
2. 道路生态学：研究范围

道路

- 路面、路肩、边沟、设计范围内的外部区域
- 通道、走廊
- 道路连接处、交叉口
- 道路网络结构（密度、Mesh网格化、连通性等）

生态

- 水、水流
- 微气候、风、大气
- 植被、生物多样性
- 人类、野生动物
- 景观生态、栖息地破碎化



The following conceptual foundations of road ecology begin with water and water flows, followed by microclimate, wind, and atmospheric effects; vegetation and biodiversity; populations and wildlife; and, finally, landscape ecology and habitat fragmentation.



2. 道路生态学：研究范围

非生物因素：水文学及水质、沉积物力学、碎屑运输力学、水及空气化学、微气候、噪音、风、光环境 (Forman and Alexander, 1998)

- Roads affect the **abiotic components** of landscapes including the hydrology, the mechanics of sediment and debris transport, water and air chemistry, microclimate and levels of noise, wind, and light adjacent to roadsides.
- The extent and intensity of the effects vary with the position of the road relative to patterns of slope, prevailing winds and surrounding land cover.



2. 道路生态学：研究范围

生物因素：

● 直接影响：

- 完全破坏活动路径中的生态系统 affect animal and plant populations directly by entirely obliterating the ecosystems in their path.
- 交通事故碰撞
- 引入外来物种的通道

● 间接影响：

- 人类活动、人类土地利用活动 The indirect effects of roads include changes or impacts that result from increased contact with humans and human land use activities.





2. 道路生态学：研究范围

生物因素：

- **交通事故碰撞原因：**
- **迁徙**路线和家园范围或领地被道路一分为二 migration routes and home ranges or territories are bisected by roads;
- **移动**路线混入交通 animals intermingle with traffic as they move along open road corridors;
- **新食物资源** new food resources, such as carrion and forage, are available in road corridors;
- “**生态陷阱**” 或**栖息地吸引** and roadside environment is attractive and serves as an “ecological trap” or habitat for some species.





2. 道路生态学：研究范围

路网的生态影响

研究较少，但影响更大、积累性：**far reaching, cumulative effects** on landscapes which have been less well-studied

景观变化及破碎化

- **空间**：densities of species are correlated either with road density (negatively) or with distance from road (positively)
- **时间**：What's more, there is a time lag between the time of road construction and the effect of species decline

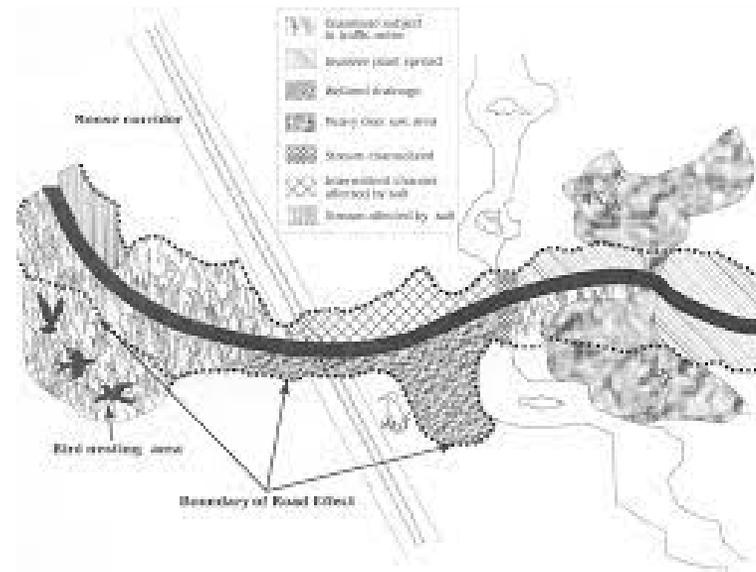




2. 道路生态学：研究范围

道路影响区

- **时空变化** The strength of the ecological effects of roads on adjacent non-road areas is a variable phenomenon, changing both **in space and time**. This “**road effect zone**” is determined as the zone adjacent to roads where one or more direct ecological effects of the road can be discerned.
- **精确范围的困难** difficulty of precisely locating the road effect zone





2. 道路生态学：研究范围

生态路网理论

- Ecological road network theory, which is comprised of basic principles of land use, transportation, network theory and ecology, provides a framework to interpret the ecological effects of road networks.
- 参数： road density, road location
- 发展方向： 稳健预测模型 It is clear that the development of **robust quantitative methods to model**, explain and predict the interactions between road network structures and landscapes are important directions for future research.



2. 道路生态学：研究范围

生态路网理论

- 当道路被视为系统时，道路效应相互作用。
- Jaeger等人(2005, 2006)使用仿真建模来预测道路配置对动物种群持久性的影响。
- 路网对于动物种群分隔作用更显著。

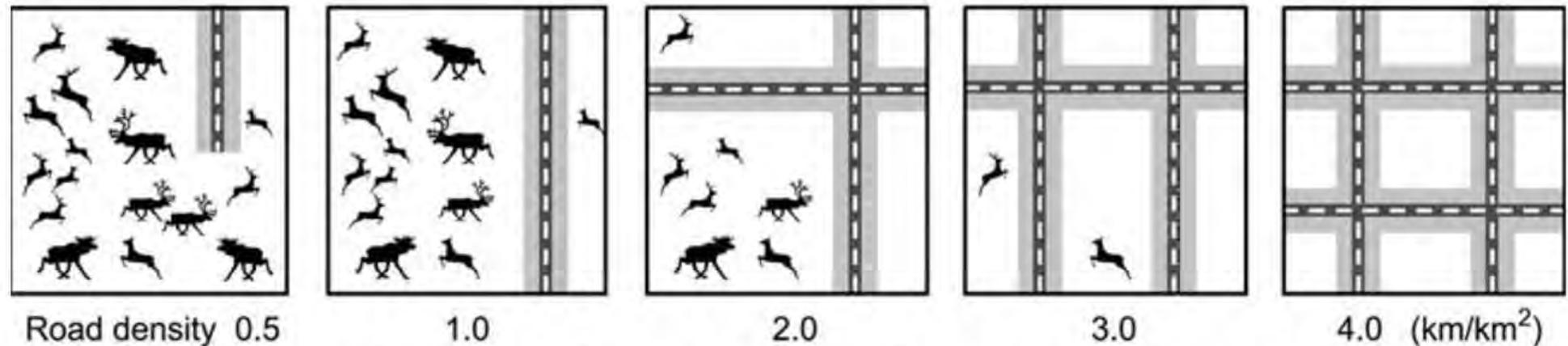


Figure 4. Schematic. Increasing road density fragments habitat into smaller patches and creates a disproportionate amount of edge habitat (from Iuell 2005).



2. 道路生态学：研究范围

Transport is a key source of environmental pressures in the European Union (EU) and contributes to **climate change**, **air pollution** and **noise**.

It also takes up large strips of land and contributes to **urban sprawl**, the **fragmentation of habitats** and the **sealing of surfaces**.

1. a large share of the EU's **greenhouse gas emissions** and a major contributor to **climate change**.
2. a significant source of air pollution: **air pollutants**, such as particulate matter (PM) and nitrogen dioxide (NO₂), harm **human health** and the environment
3. Road traffic is the most widespread source of **noise**, with more than 100 million people affected by harmful levels in the EEA's member countries.

总结主要影响：

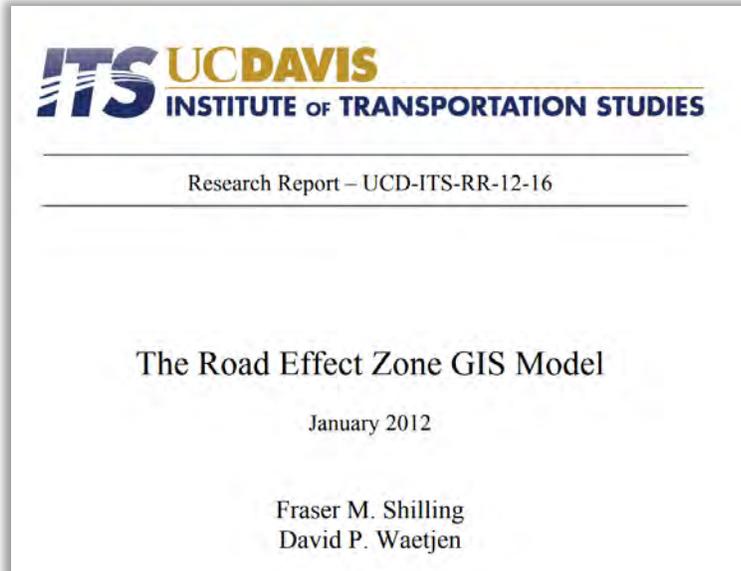
气候变化（碳排放）、空气污染、噪音、栖息地分割、不透水路表



3. 道路生态学：重要概念

道路影响区 Road Effects Zone

- The **Road-effect zone** is the area in which effects on the natural environment extend outward from a road.
- The zone of impact varies in types and degree of impact, based on distance from the roadway, environmental conditions, and traffic intensity.



Use **GIS tools** to model components of the REZ, such as traffic noise, to confirm our predictions in the field.

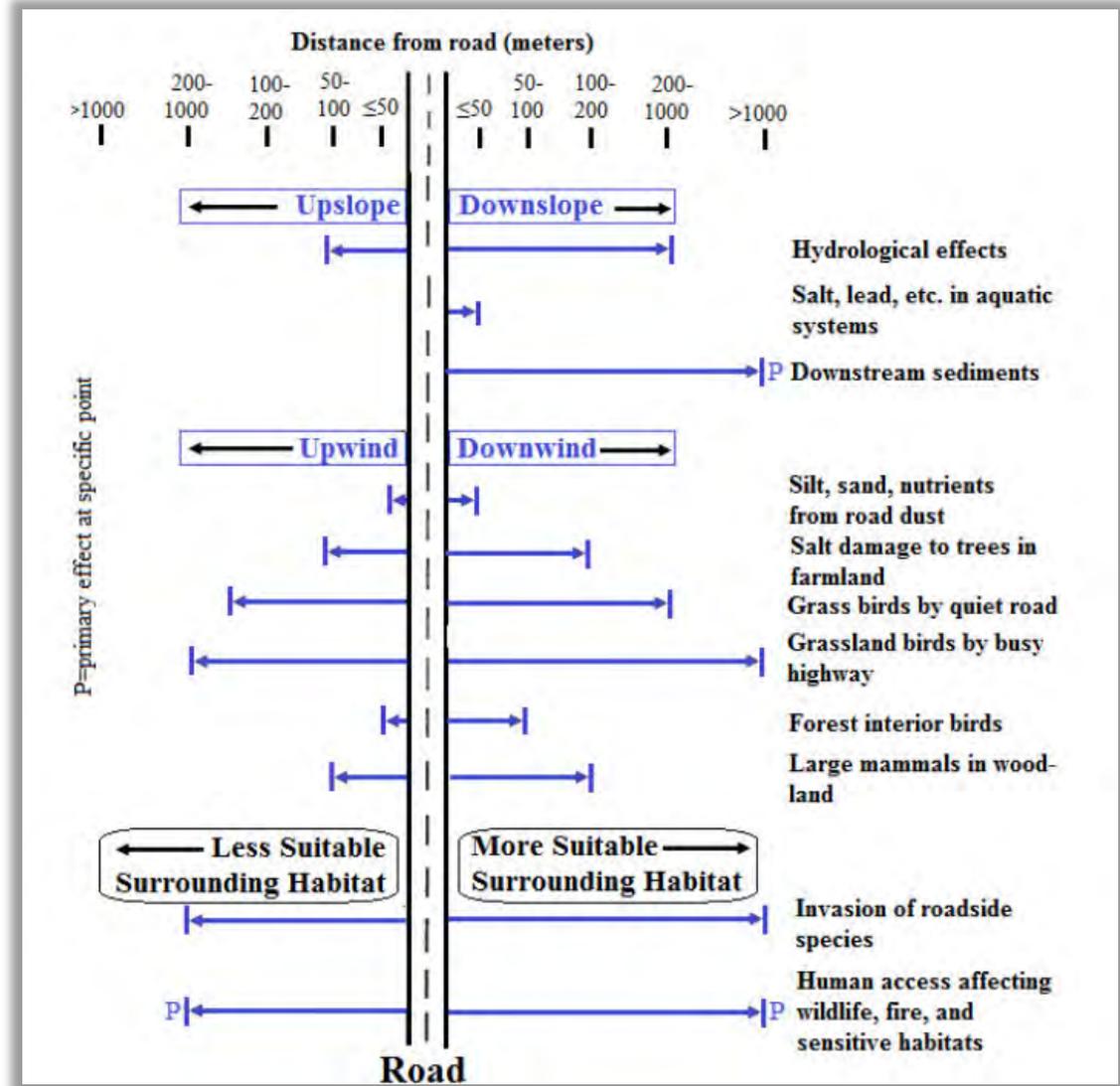
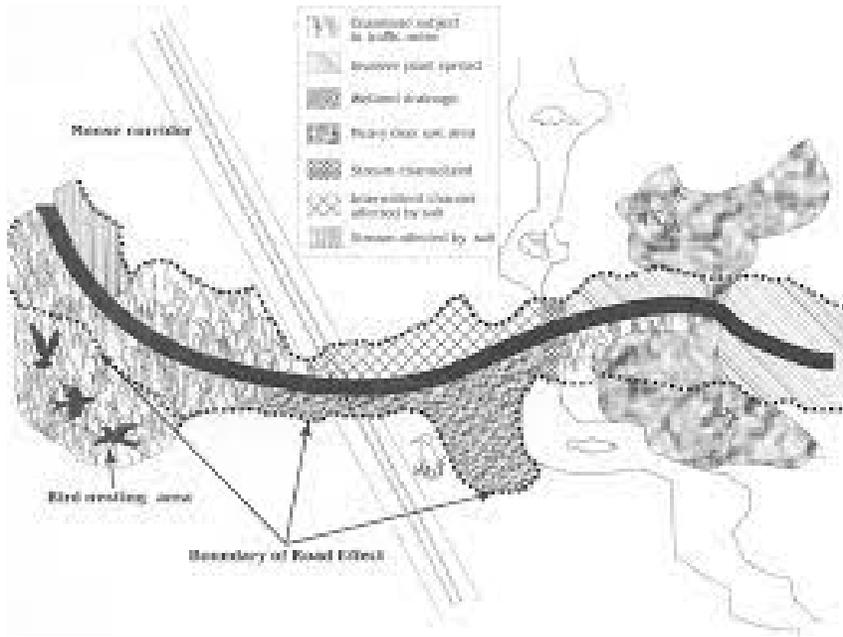
Two main types of activities were carried out: 1) a simple GIS tool was developed that spatially expressed road effects based upon values from the literature and 2) a specific road effect, traffic noise, was modeled as an example of a road effect for which purpose-built models are available.



3. 道路生态学：重要概念

道路影响区 Road Effects Zone

存在争议：
从 20 米到 2 公里或更多公里不等

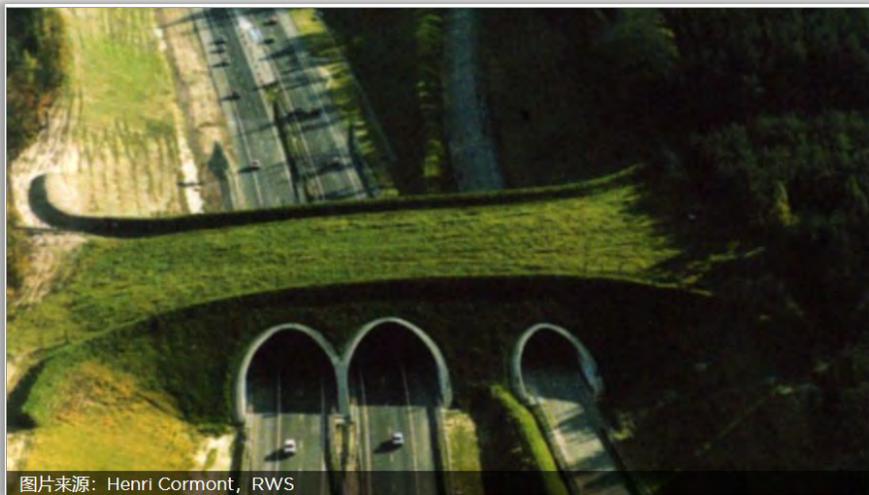


Reference: Kollarou V, Lantitsou A, Athanasopoulou A, et al. Impact of roads on ecological conditions[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and SECOTOX Conference. Mykonos island, Greece. 2013.



3. 道路生态学：无害化穿越 (wildlife crossing)

The term “**wildlife crossing structure**” describes a variety of structures that are designed or retrofitted to provide safe passage for wildlife above or below a highway



荷兰是最早在整个景观中部署wildlife crossings网络的国家之一

综合考虑因素：

Each project has its own unique set of components—**wildlife species, landscapes, management objectives, and politics**

总结目标：减少碰撞、增加联通

- (1) reduce vehicle **collisions** leading to damage, human injury, and wildlife fatalities
- (2) **connect habitats** for wildlife populations.

总结经验：

- **标准化**设计方法+**特殊化**设计（应对某些动物）相结合；
- **长期监测**的必要性（动物的学习性）；
- 穿越结构并非单一设计，需要高速公路其它区域的**围栏屏障作用**



3. 道路生态学：无害化穿越 (wildlife crossing)



图片来源: Henri Cormont, RWS

多样化的穿越结构：运河



总结：满足生态响应、成本效益佳、灵活适应性强、多样化的可持续性无害化穿越结构

- 在交通规划过程中**尽早考虑**，以避免改造或重建成本更高的问题；
- 在材料、施工和维护方面具有**成本效益**；
- 对当前和预期条件的**生态响应**；
- 对人类和野生动物都**安全**；
- **灵活或模块化**，可在其他位置使用；
- **适应性**，以促进野生动物在动态生态系统条件下的流动；
- 在材料和能源使用方面具有**可持续性**，并能应对气候变化；
- 对公众进行教育、启示和交流；
- 美丽，引人入胜且非凡。



道路生态学：相关研究单位(部分)

- [Road Ecology Center](#) at UC Davis,
- [Center for Transportation and the Environment](#) at North Carolina State University,
- Western Transportation Institute's [Road Ecology Program](#) at Montana State University.

2021

From Wildlife-Vehicle Conflict to Solutions for California Wildlife & Drivers

ROAD ECOLOGY CENTER
Roadecology.ucdavis.edu
UCDAVIS
11/10/2021

MONTANA STATE UNIVERSITY | Western Transportation Institute

Home About WTI Programs Research Centers Laboratories Professional Development Education WTI News Search ...

▶ About WTI

▶ WTI Programs

▶ Research Centers

▶ WTI Laboratories

▶ Professional Development

Focus Area: Road Ecology

[Evaluating Erosion Control Blankets Made with Waste Wool in SE Idaho](#)

[Effective Wildlife Fences Through Better Functioning Barriers at Access Roads and Jumpouts](#)



道路生态学：相关国际会议

ICOET 两年一次，加州大学道路生态学研究 中心主办

**International Conference On
Ecology & Transportation**
"Transforming Transportation Ecology in the Global Village"

2021 Virtual Conference September 22 - 29, 2021

ICOET 2021 About Past Conferences Sponsors Program

ICOET a Great Success!

Thanks to the >580 of you from 29 countries that joined us for the 11th biennial ICOET conference held virtually in September 2021. ICOET is the foremost interdisciplinary, inter-agency supported conference addressing the broad range of ecological issues related to transportation systems in all modes. The conference is organized by the Road Ecology Center (UC Davis), in collaboration with the UC Davis Institute of Transportation Studies and the National Center for Sustainable Transportation at UC Davis

Resources

Welcome to ICOET 2021

Conference Theme and Topics

Message from the ICOET Conference Chair

五 研究展望：背景



用地占比20-30%



多介质环境影响



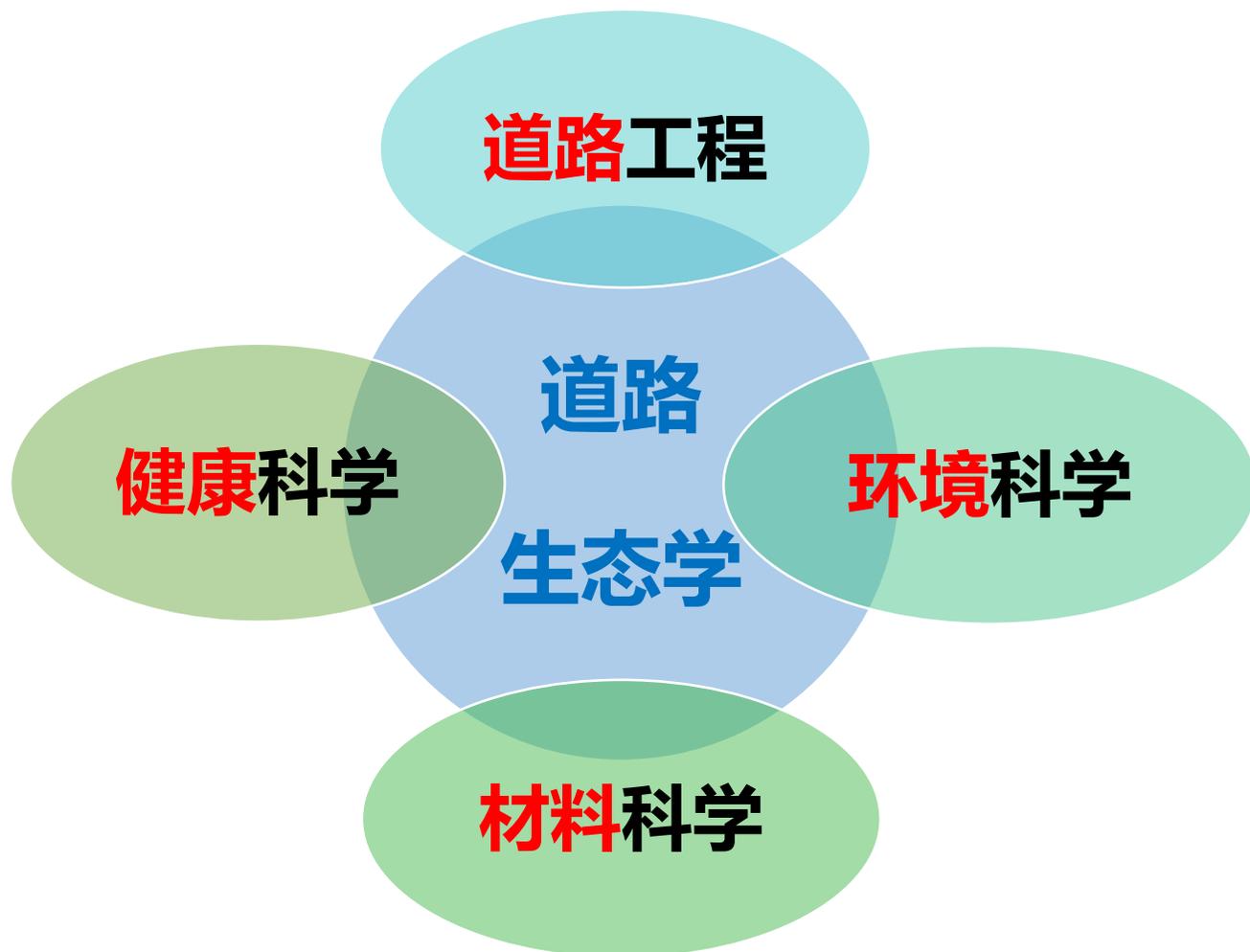
人体健康风险



道路铺装全生命周期生态影响巨大，环境健康风险不容忽视

五 研究展望：现状

多学科研究交叉，解决了单一污染控制问题



仍面临三大共性关键难题

污染迁移及扩散过程控制难

路域重金属污染物迁移过程难控制

单一污染控制技术效率低

挥发性有机物源头抑制效率低

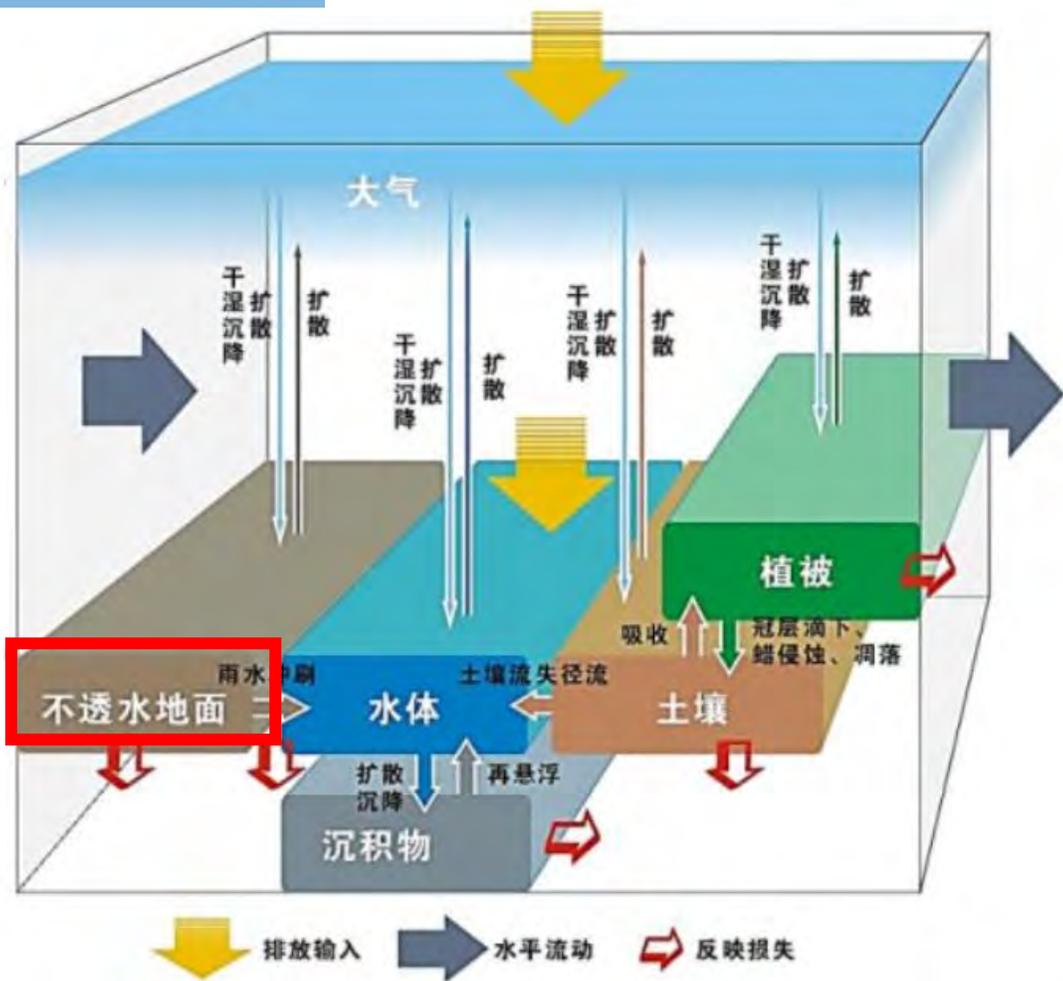
评价方法不完善

路域物理环境健康风险大

五 研究展望：目标

研究目标

1



水

土壤

大气

污染物在多介质环境中迁移转化

干湿沉降

扩散

径流

道路铺装改变了迁移通道

声

光

热

多环境要素长时序交互影响

探明道路铺装与多介质环境动态交互影响机制

五 研究展望：目标

研究目标

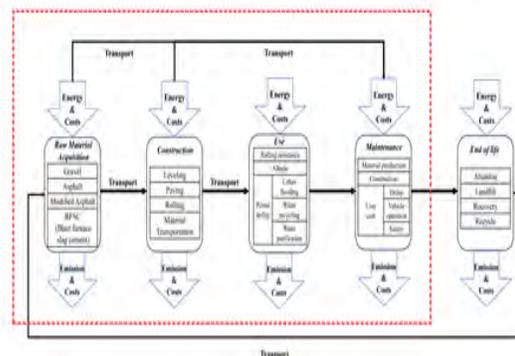
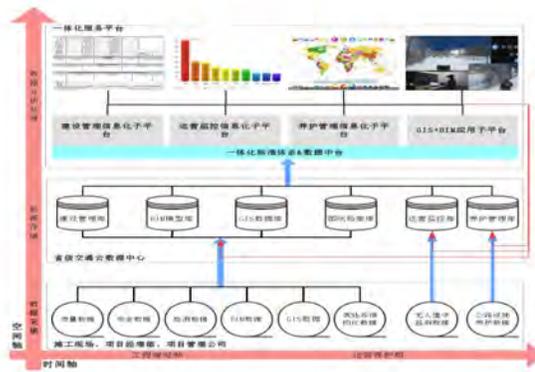
2

生态低碳道路 功能型铺装

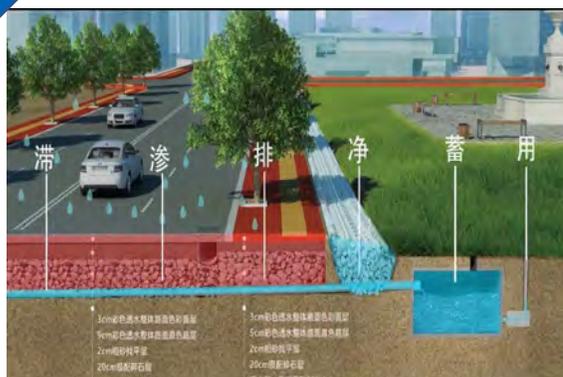
力学性能提升

生态功能增强

生命周期评价



道路铺装全生命周期生态环境影响及人体健康风险评价体系



道路铺装多介质环境污染及人体/生物健康风险综合调控技术

已有基础

开展研究

研发生态低影响建造技术，综合提升道路铺装生态友好性

研究团队： 同济可持续交通设施课题组(CST, <https://cst.tongji.edu.cn>)



李辉 教授

博士后



朱浩然
(2015-2017)



Behzad Ghadimi
(2018-2019)

博士生, 15人



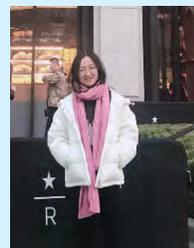
张毅(2021)



张恒基(2020)



Hady



谢宁



杨炳



代震



刘佳雯



杨洁



张雪



贾明



韩雨钊



王子鹏



孙杨



Ahmed



Gul

硕士生, 16人



王宇(2018)



李昊臻(2019)



马瑰宝(2020)



梁霄(2020)



王寒冰(2020)



周浩南(2020)



朱宇昕(2021)



葛乃玲(2021)



田雨



左鑫



张犁



侯云强



Saifullah



Palden



王硕



周易潭



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

2022年ITASC智能交通智慧城市国际会议：生态智慧交通基础设施论坛暨生态道路专委会成立大会

谢谢！
敬请批评指正！



生态道路与智慧交通论坛



该二维码7天内(5月20日前)有效，请新进入场嘉宾

李辉 同济大学

hli@tongji.edu.cn 13601789941