交通低碳化与韧性化: 研究与实践

Decarbonization and Resilience of Transportation: Research and Practice

李 辉

同济大学

2023年6月17日

个人简介

李 辉

口 教育经历

- 2008.09 - 2012.11　美国加州大学戴维斯分校 (土木与环境工程)　工学博士
- 2008.09 - 2011.06　美国加州大学戴维斯分校 (环境与资源经济学)　工学硕士
- 2005.08 - 2008.06　东南大学 (道路与铁道工程)　工学硕士
- 2001.08 - 2005.06　东南大学 (土木工程)　工学学士

口 工作经历

- 2020.07 - 至今　同济大学 交通运输工程学院　长聘教授、博士生导师
- 2015.05 - 2020.06　同济大学 交通运输工程学院　教授、博士生导师
- 2014.06 - 2015.04　美国加州大学路面研究中心 (戴维斯/伯克利)　助理研究员
- 2012.12 - 2014.05　美国加州大学戴维斯分校　博士后

口 人才项目

- 2015.02　国家海外高层次人才 (中组部)

主研领域: 低碳-韧性交通基础设施

同济大学可持续交通研究中心
Center for Sustainable Transportation at Tongji University

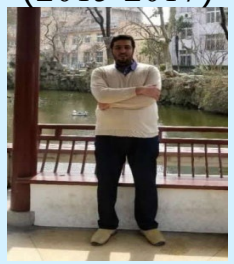
世界交通运输大会 WORLD TRANSPORT CONVENTION

同济大学 TONGJI UNIVERSITY

李 辉 教授

博士后

朱浩然
(2015-2017)

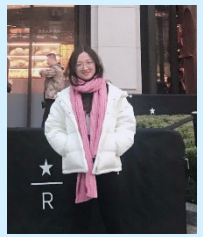


Behzad Ghadimi
(2018-2019)

博士生, 16人

张毅(2021)

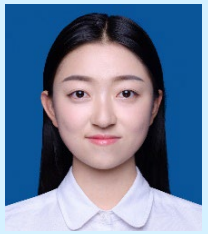
张恒基(2020)



谢宁

杨炳

代震



刘佳雯

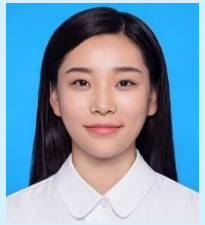
杨洁

王子鹏

张雪

贾明

韩雨钊



孙杨

万瑶宇

任家兴

姜宇哲

王蕾

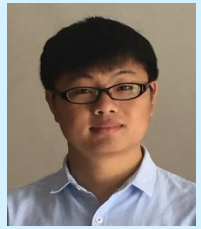
硕士生, 16人

王宇(2018)

李昊臻(2019)

马瑰宝(2020)

梁霄(2020)



王寒冰(2020)

周浩南(2020)

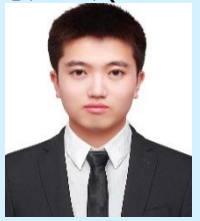
朱宇昕(2021)

葛乃玲(2021)

田雨(2022)

左鑫(2022)

张犁



王硕

侯云强

周易潭

贲昊

王果

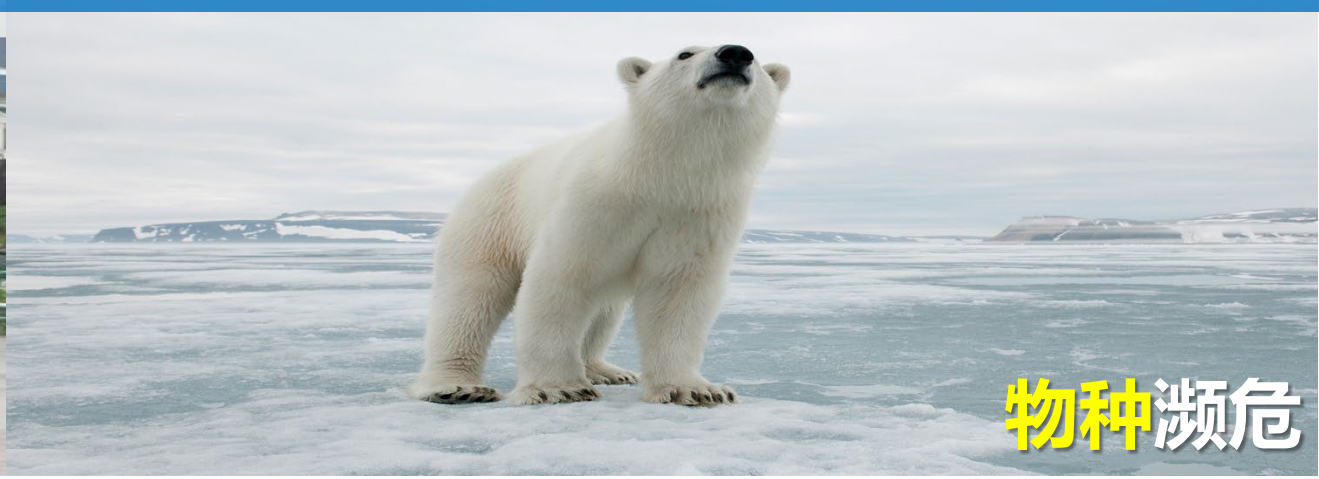
报告内容

CONTENTS

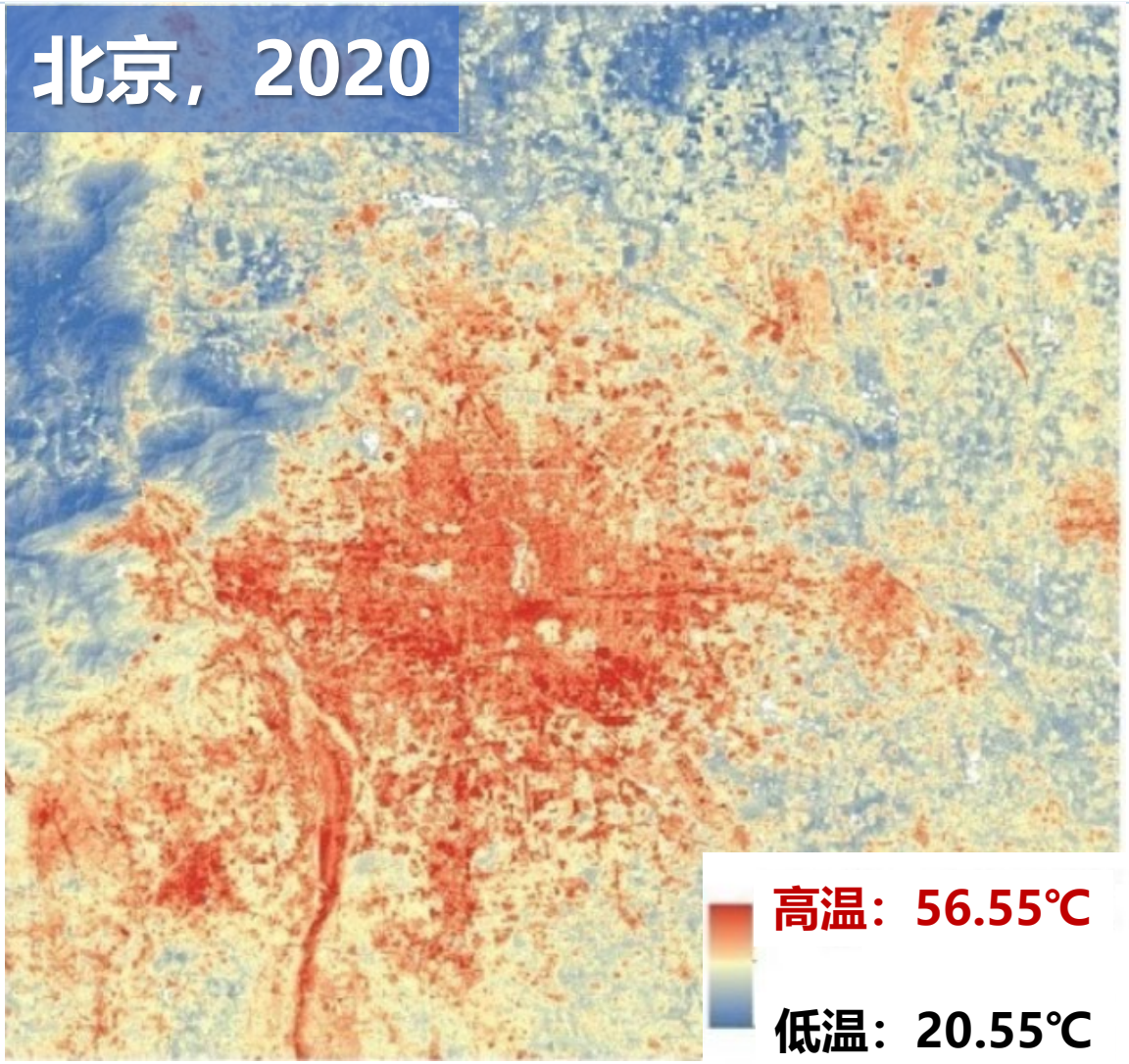
01 研究背景与重大需求
02 碳排放测算分析与转型路径
03 韧性评估与提升技术
04 政策建议与展望

01 研究背景：全球变暖趋势逐年显现

全球变暖趋势逐年显现



01 研究背景：热岛效应愈演愈烈



高强度建设开发加剧了城市热岛效应

01 研究背景：极端事件威胁严峻

2012年7月北京特大暴雨

2020年新冠疫情交通管制

2021年7月河北大桥垮塌

2021年7月河南特大暴雨

2021年10月山西暴雨山洪

2021年12月湖北高速桥面侧翻

自然灾害频发，公共卫生事件重发，重大安全事故多发

01 研究背景：内涝灾害损失惨重

道路中断

道路淹没

基础淘空

道路塌陷

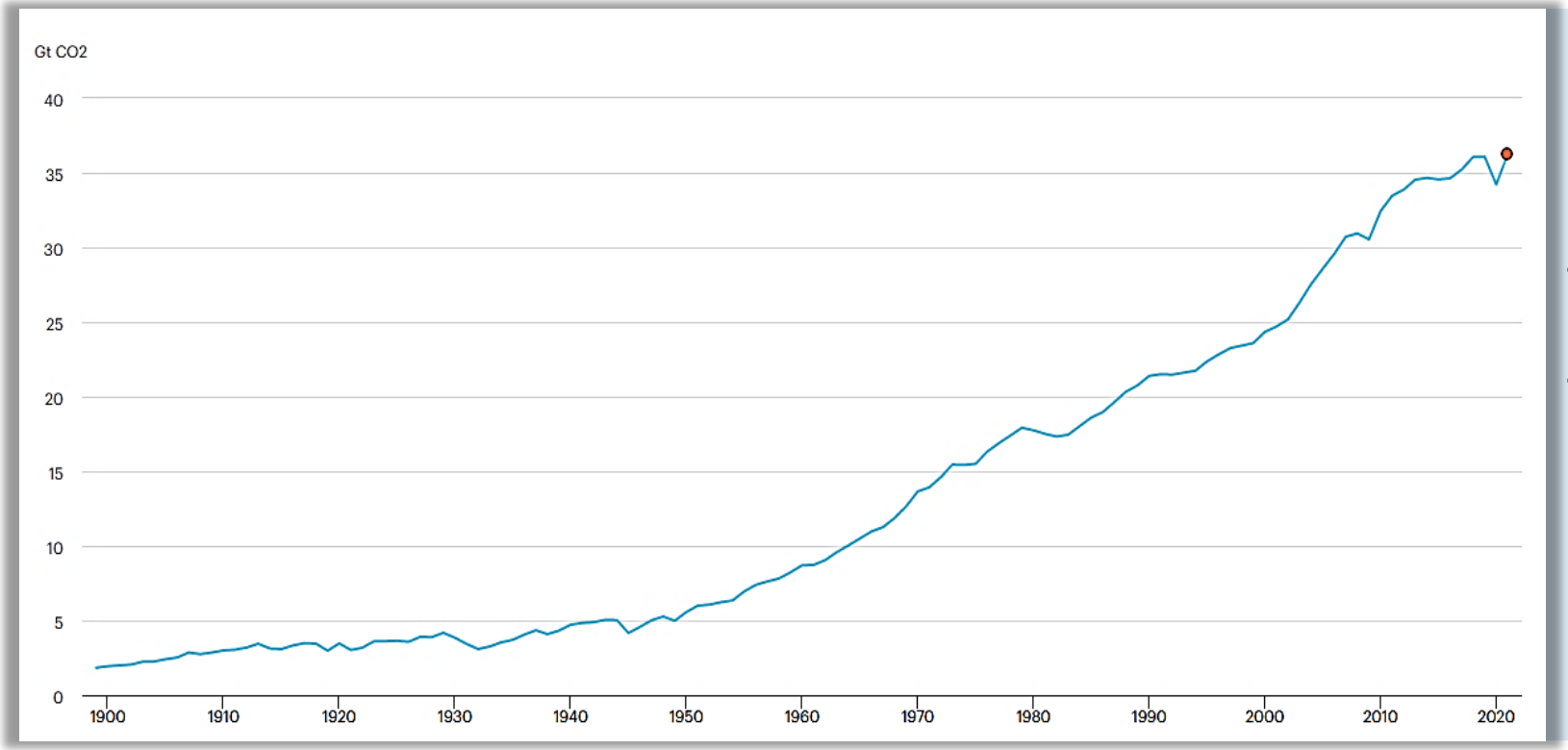
管廊浸水

护坡垮塌

7.20郑州特大暴雨：1478.6万人受灾，398人死亡失踪，直接经济损失1200.6亿元

01 研究背景

世界二氧化碳排放总量（1990-2021）



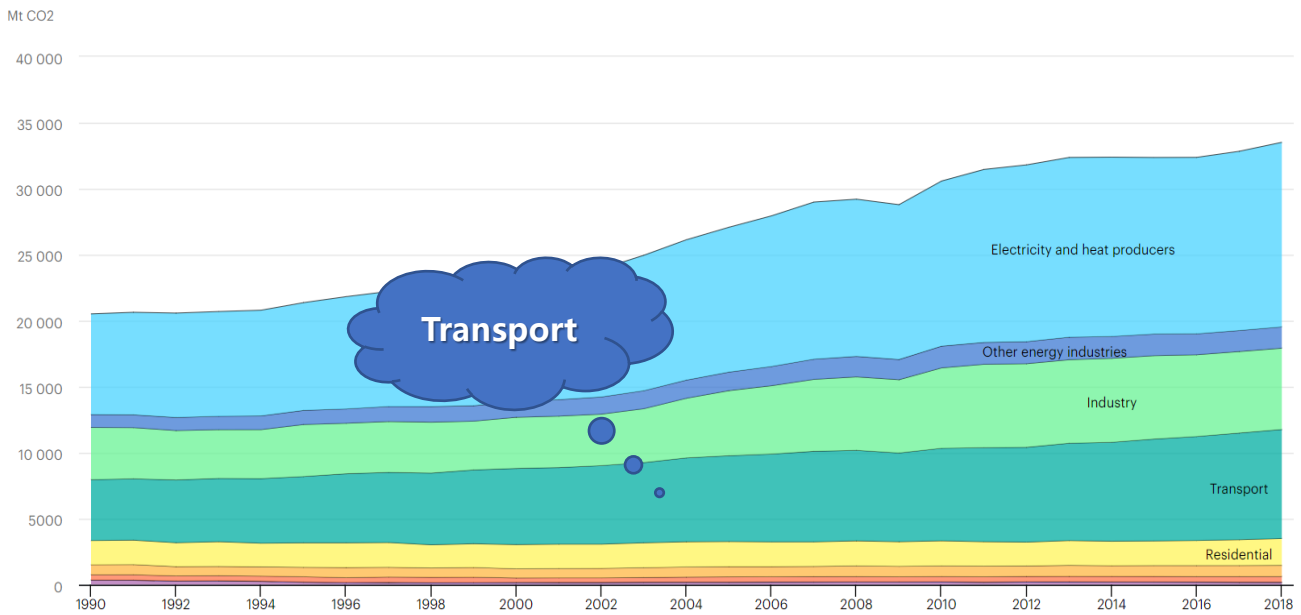
- 呈现持续上升趋势
- 2021年，碳排量达 36.3Gt CO_2

来源: IEA – International Energy Agency

碳排放是控制全球变暖的关键

01 研究背景

CO_2 emissions by sector, World 1990-2018



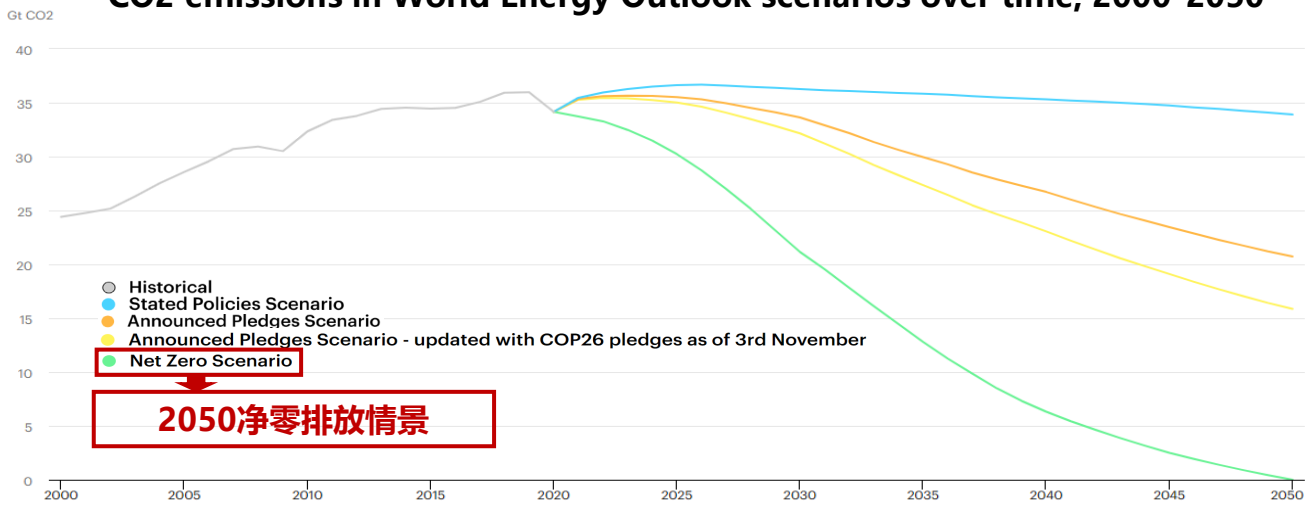
- 交通部门（2020）：7.2 Gt CO_2
- 交通部门碳排量呈持续上升趋势

来源: IEA – International Energy Agency

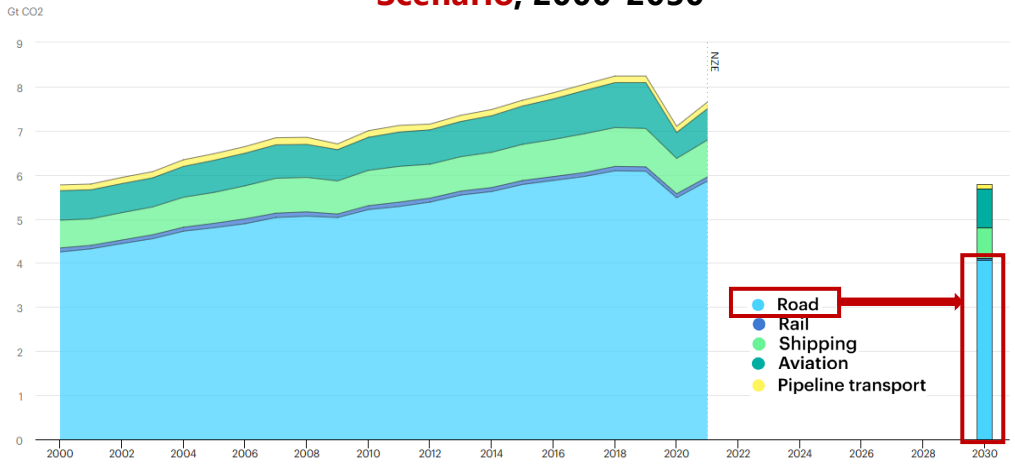
交通部门的碳排放占比较大，且逐年上升

01 研究背景

CO2 emissions in World Energy Outlook scenarios over time, 2000-2050



Global CO2 emissions from transport by sub-sector in the Net Zero Scenario, 2000-2030

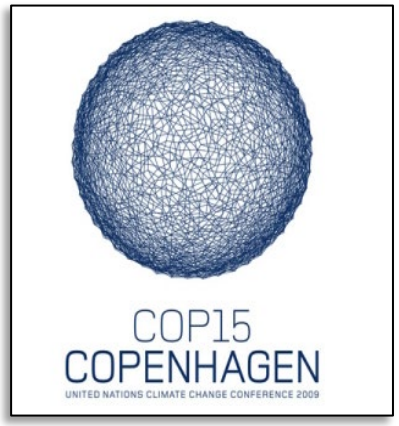


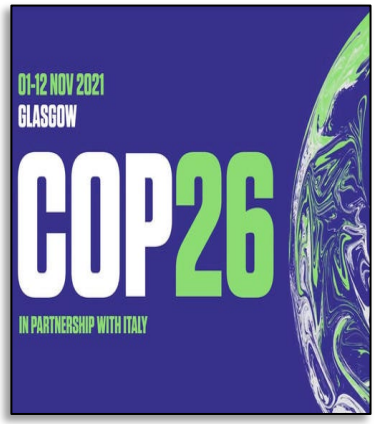
来源: IEA – International Energy Agency

实现2050净零排放道路交通行业任重道远

01 研究背景

全球碳减排行动





京都议定书	哥本哈根协议	巴黎 气候变化大会	巴黎协定	格拉斯哥	CCUS 国际会议
温室气体含量稳定在一个适当的水平。	商讨《京都议定书》一期承诺到期后的后续方案。	“中国计划2030年排放达峰且将努力早日达峰”。	温度上升控制在2℃以内，并努力限制在1.5℃以内。	进一步推动各国恪守减排承诺并主动采取措施。	加强CCUS技术创新，提出碳中和目标下CCUS技术发展方向。
1997年12月	2009年12月	2015年12月12日	2015年12月12日	2021年11月	2023年4月

持续“减碳”政策轨迹—全球共同目标

01 研究背景

中国碳减排行动

2020.9.30

2030前达峰，争取2060实现碳中和。”

联合国生物多样性峰会的讲话

2020.12.16-18

抓紧制定2030年前碳达峰行动方案。

2020年中央经济工作会议

2020.12.12

气候雄心峰会

2030年单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%。

2021.10.29

绿色交通“十四五”发展规划

加快形成绿色低碳运输方式，促进交通与自然和谐发展。

2023.4.1

《碳达峰碳中和标准体系建设指南》

构建结构合理、层次分明、适应经济社会高质量发展的碳达峰碳中和标准体系。

密集“减碳”政策轨迹—中国重点贯彻/执行

01 研究背景：道路设施缺乏低碳、韧性化

各类道路硬化铺装面广、量大 → 总铺装率高，城市铺装≥20%

交通强国
生态文明 → 韧性可持续交通

路面建设追求耐久、密实、不透水，造成系列低碳韧性问题

报告内容

CONTENTS

01 研究背景与重大需求

02 碳排放测算分析与转型路径

03 韧性评估与提升技术

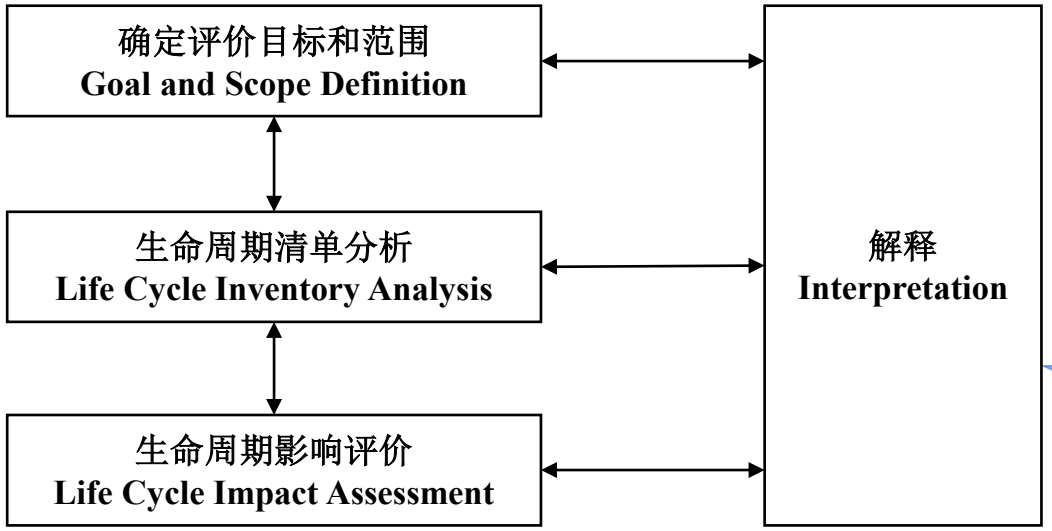
04 政策建议与展望

02 碳排放测算与分析方法

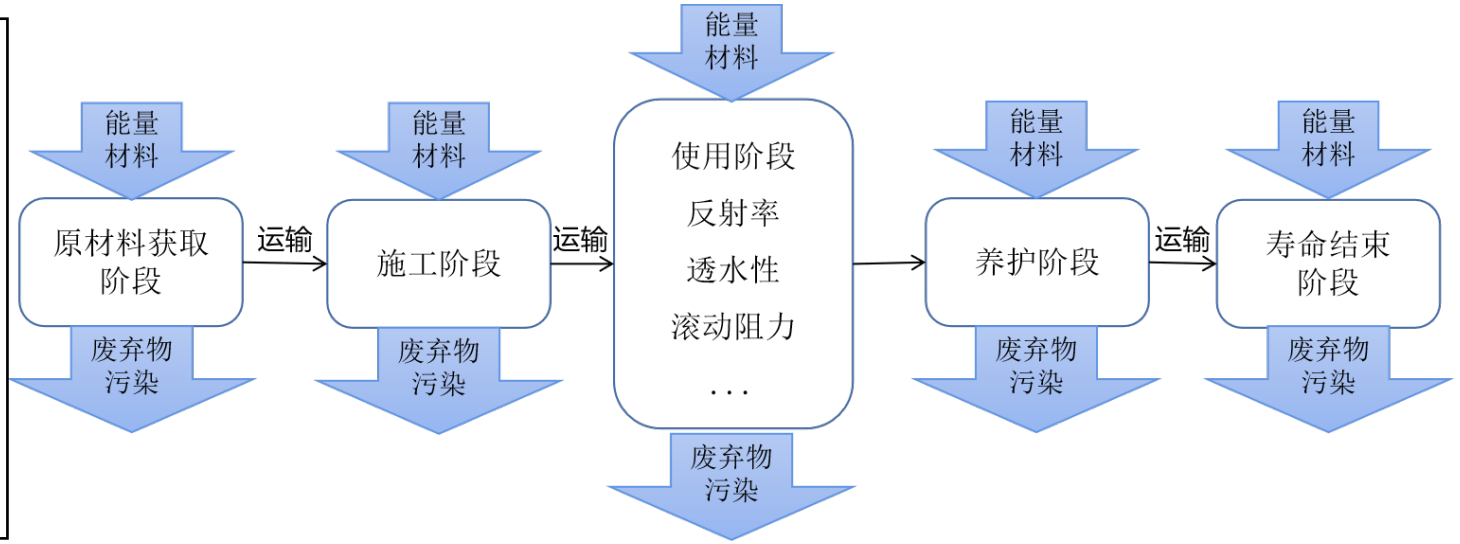
2.1 碳达峰全生命周期分析法（Life Cycle Assessment）

- 科学合理的**碳排放量化体系**是分解“双碳”目标，为交通减排提供**数据支撑、方向指导**的重要依据。
- 生命周期评估(LCA)——评估环境影响的从“摇篮”到“坟墓”的分析技术。
- 交通基础设施生命周期包括**材料**加工运输、**施工、运营管理、养护、废弃**等阶段。

全生命周期评价框架



交通基础设施全生命周期划分



LCA是国际公认的环境影响评估工具

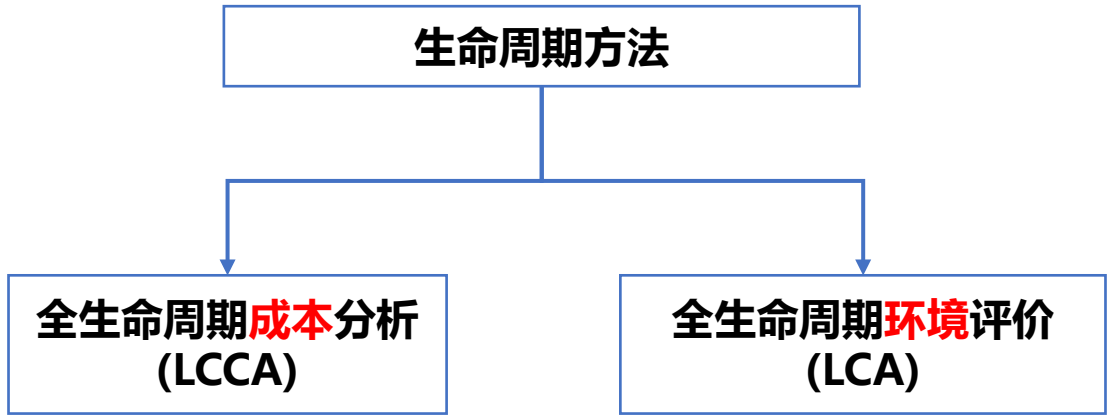
02 碳排放测算与分析方法

交通基础设施全生命周期各阶段碳排放

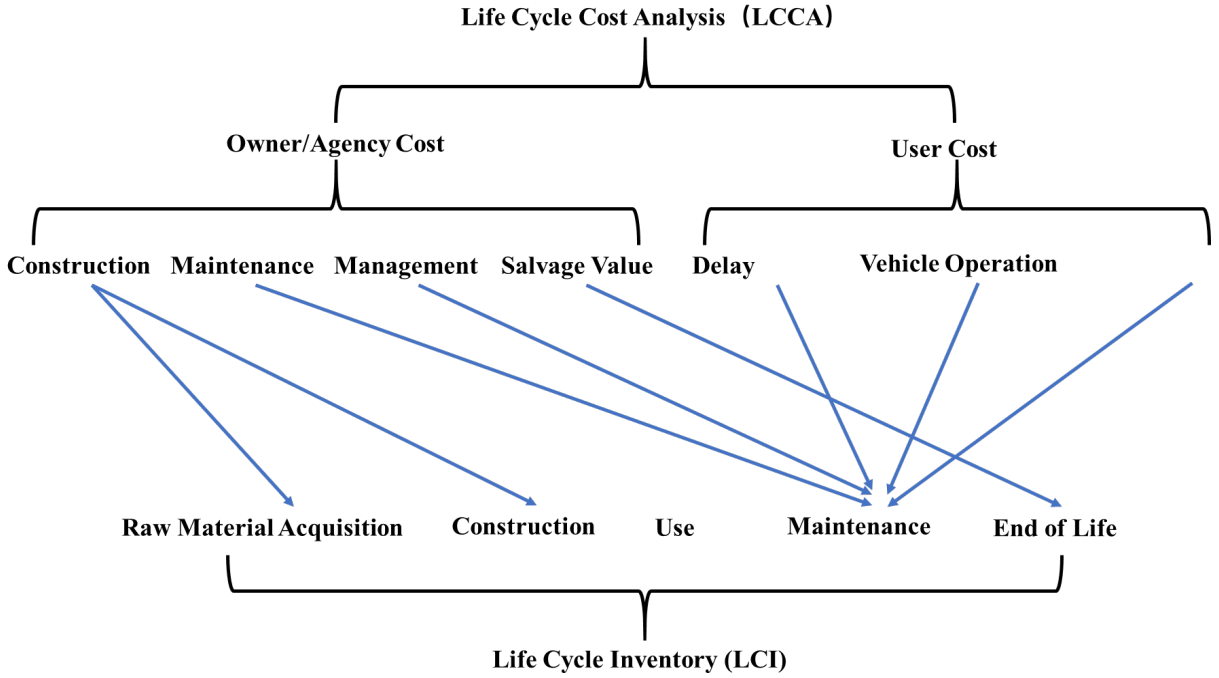
02 碳排放测算与分析方法

2.2 碳中和政策成本效益分析（Life Cycle Cost Analysis）——成本分析

- **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。**
  - **业主成本：是指路面的管理和运营者所承担的成本—路面初期建设费用，养护费用，路面管理费用等。**
  - **用户成本：路面的使用者所付出的经济成本—车辆运营过程中产生的车辆损耗、人身财产损失等。**



生命周期方法

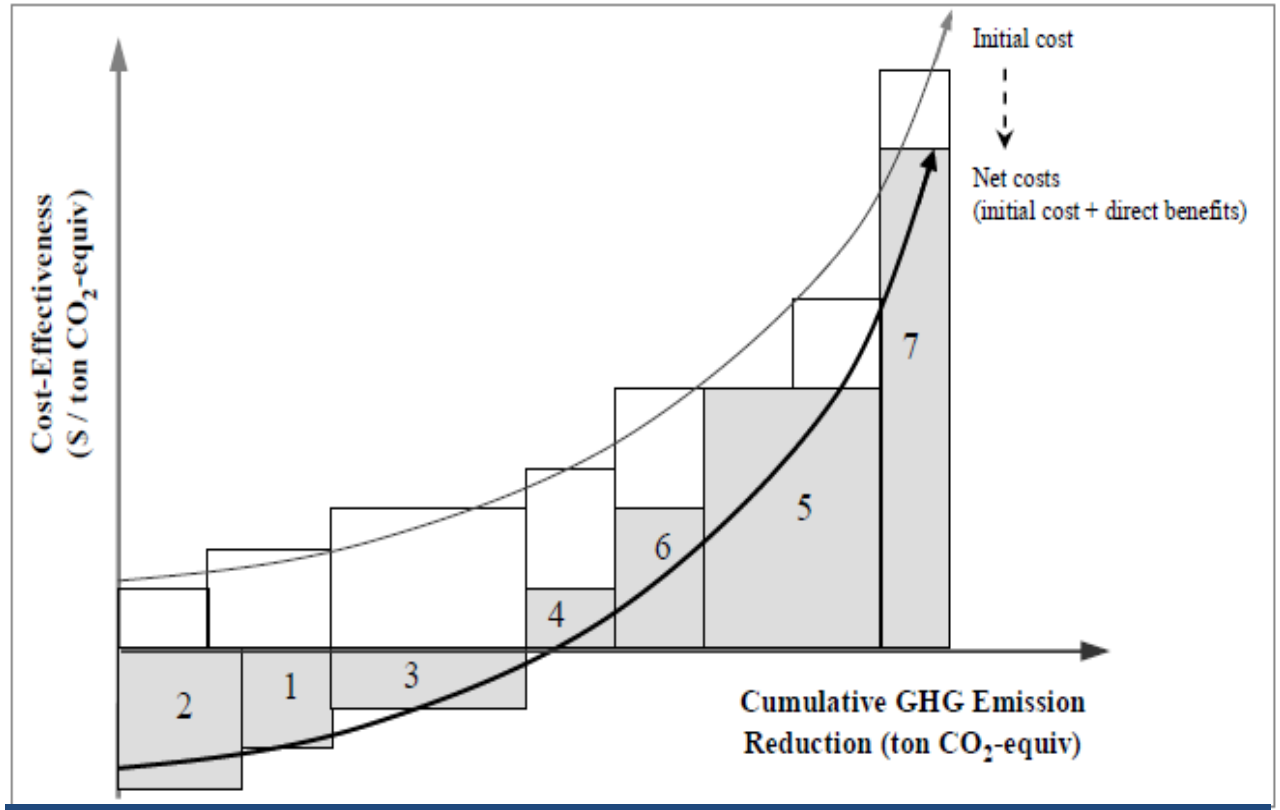


LCCA 分析方法

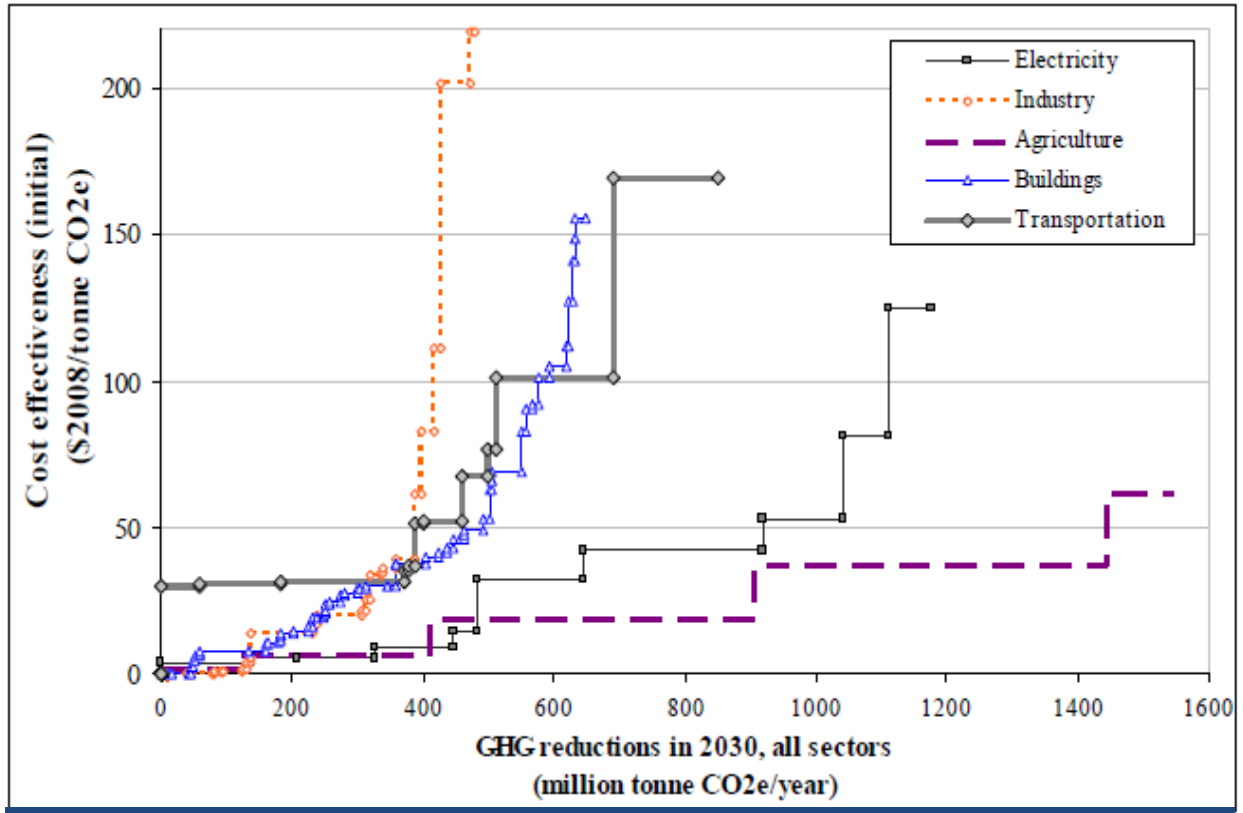
02 碳排放测算与分析方法

2.2 碳中和政策成本效益分析（Life Cycle Cost Analysis）—— 成本效益分析

- 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

02 碳排放测算与分析方法

2.3 LCA & LCCA综合评价方法

- **全生命周期分析法（Life Cycle Assessment: LCA）**
  - **环境（LCA或eLCA）**
  - **社会（SLCA）**
- **全生命周期成本效益分析（Life Cycle Cost Analysis: LCCA）**

同

某一**完整系统**的**整个生命周期**

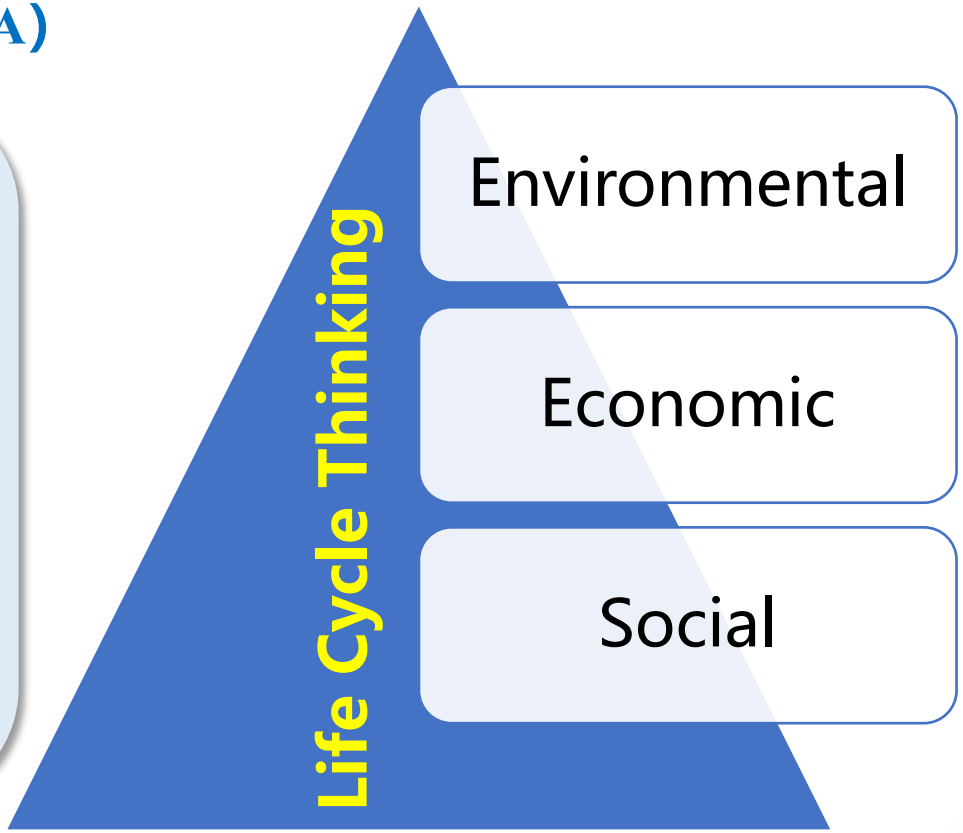
分析**道路基础设施**时使用**相同**的生命周期

异

LCCA针对**经济**影响

LCA注重**环境**影响，能源使用和有限资源的耗竭

SLCA针对**社会**影响

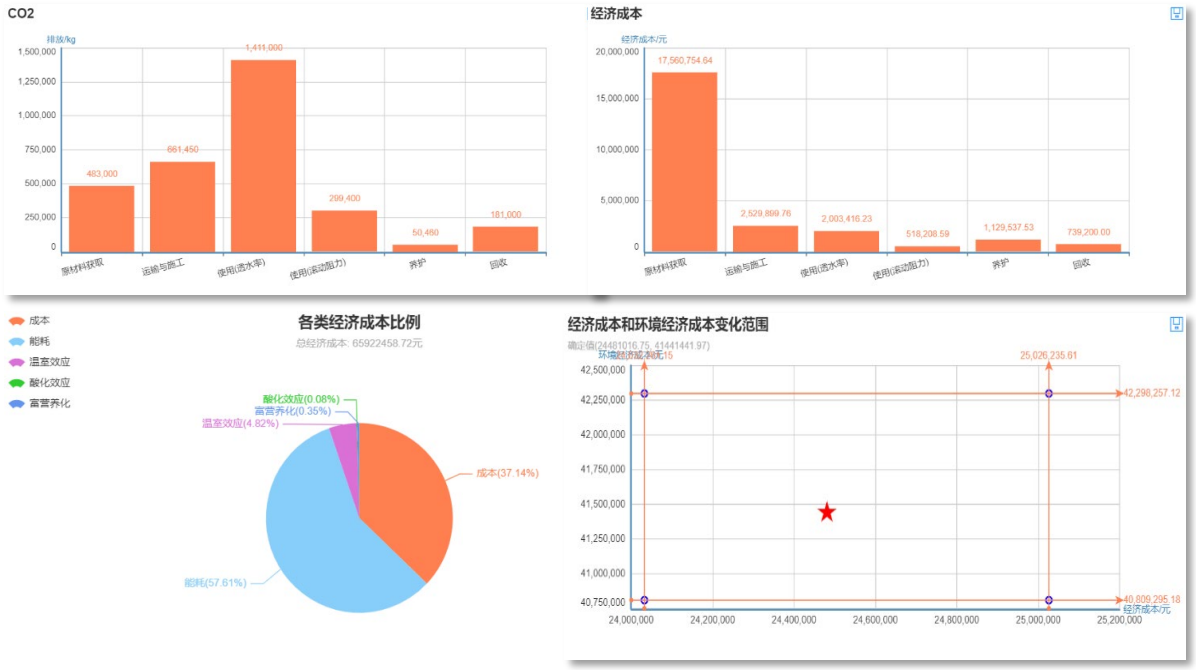


02 碳排放测算与分析方法

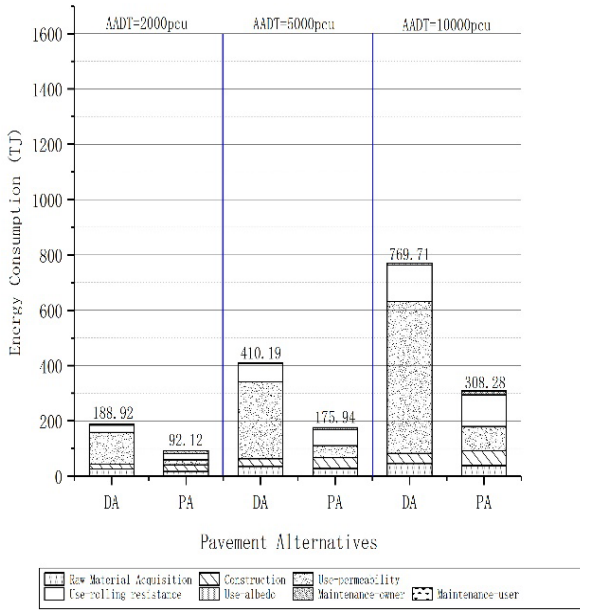
2.3 LCA & LCCA综合评价方法

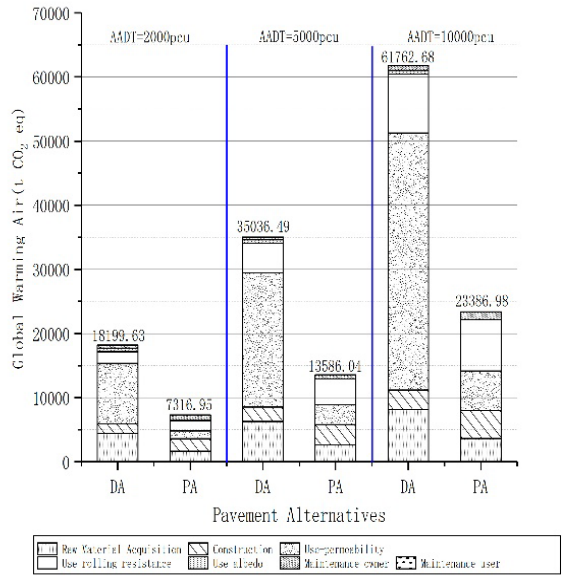
- 基于全生命周期分析框架的**经济成本**和**环境影响**(能源、排放、人类健康)综合评价方法；
- 透水路面：能源↓ 60%，温室气体排放↓ 50%，酸化空气排放↓ 40%，人体毒性↓ 40%。

LCA系统评价结果输出



PA环境效益





✓ **道路全寿命周期管理与综合评价系统：** http://csts.tongji.edu.cn

✓ **Initial evaluation methodology and case studies for life cycle impact of permeability of permeable pavements[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2018.**

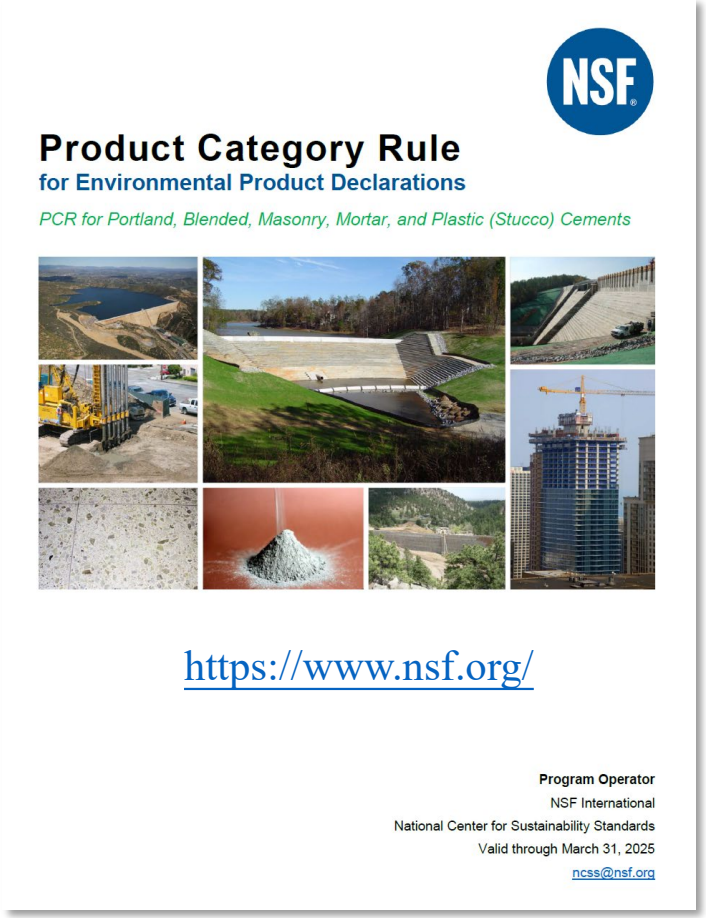
02 碳排放测算与分析方法

2.4 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/

参考资料：STANDARDIZATION I O F. 14025: Environmental labels and declarations—Type III environmental declarations—Principles and procedures[J]. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.

02 碳排放测算与分析方法

2.5 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.

参考资料：Rangelov M, Dylla H L, Harvey J, et al. Tech Brief: Environmental Product Declarations: Communicating Environmental Impact for Transportation Products[R]. United States. Federal Highway Administration, 2021.

02 碳排放测算与分析方法

2.5 产品环境声明 (EPD)

Environmental Facts

Functional unit: 1 metric ton of asphalt concrete

Primary Energy Demand [MJ]	$4.0x10^3$
Non-renewable [MJ]	*$3.9x10^3$*
Renewable [MJ]	*$3.5x10^2$*
Global Warming Potential [kg CO_2-eq]	79
Acidification Potential [kg SO_2-eq]	0.23
Eutrophication Potential [kg N-eq]	0.012
Ozone Depletion Potential [kg CFC-11-eq]	$7.3x10^{-9}$
Smog Potential [kg O_3-eq]	4.4

Boundaries: Cradle-to-Gate
Company: XYZ Asphalt
RAP: 10%

环境标签

功能单位: 1 吨沥青混凝土

一次能源消耗[MJ]	$4.0x10^3$
不可再生 [MJ]	*$3.9x10^3$*
可再生 [MJ]	*$3.5x10^2$*
全球变暖潜值[kg CO_2-eq]	79
酸化影响[kg SO_2-eq]	0.23
富营养化[kg N-eq]	0.012
臭氧消耗[kg CFC-11-eq]	$7.3x10^{-9}$
烟气[kg O_3-eq]	4.4

边界：摇篮到大门
公司: XYZ Asphalt
RAP: 10%

Example LCA results

国外路面材料已有应用EPD的示例

02 低碳化转型路径

2.6 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）

参考：丁仲礼等. 中国碳中和框架路线图研究. 中科院学部第七届学术年会, 2021.

02 低碳化转型路径

2.6 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

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

工程封存技术	碳移除/捕捉途径	潜力(亿吨CO_2/年)
二氧化碳化学品	烟道气等CO_2→化学产品	3~6
二氧化碳燃料	烟道气等CO_2→燃料	10~42
混凝土碳捕集	烟道气等CO_2→水泥混凝	1~14
提高原油采收率	烟道气等CO_2→储油池	1~18
微藻生产	CO_2→微藻生物	2~9

CCUS

参考：丁仲礼等. 中国碳中和框架路线图研究. 中科院学部第七届学术年会, 2021.

02 低碳化转型路径

2.6 从“人”的角度减碳

- **绿色出行方式**
  - **慢行交通：以步行及自行车为主体、低速环保助动车 (≤20 km/h) 为过渡性补充的非机动交通**
  - **公共/共享出行：地铁、公交等公共出行方式，共享单车、电单车、汽车等共享出行行为**

城市低碳出行 —— 慢行交通发展

公共/共享出行

健康绿色的出行方式选择

02 低碳化转型路径

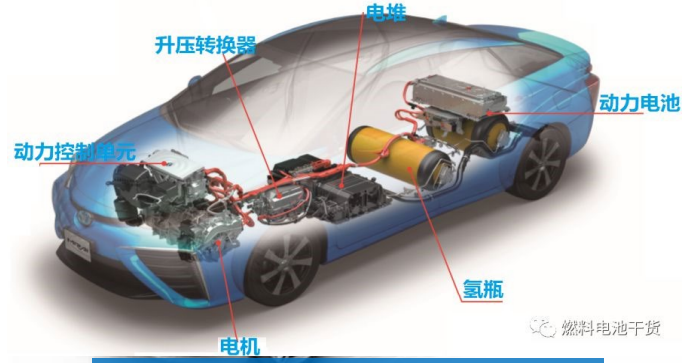
2.6 从“车”的角度减碳

社会客车及出租车是城市交通运输行业能源消耗的主体，是最大的碳排放源

- **轻量化**
- **传统内燃机燃油效率提升**
- **新能源的利用（低碳能源）：**
  - **纯电动汽车**
  - **混合动力汽车**
  - **燃料电池技术**

纯电动汽车

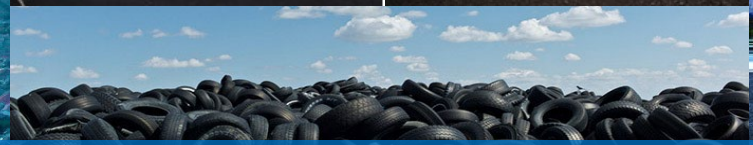
混合动力卡车



氢燃料汽车

02 低碳化转型路径

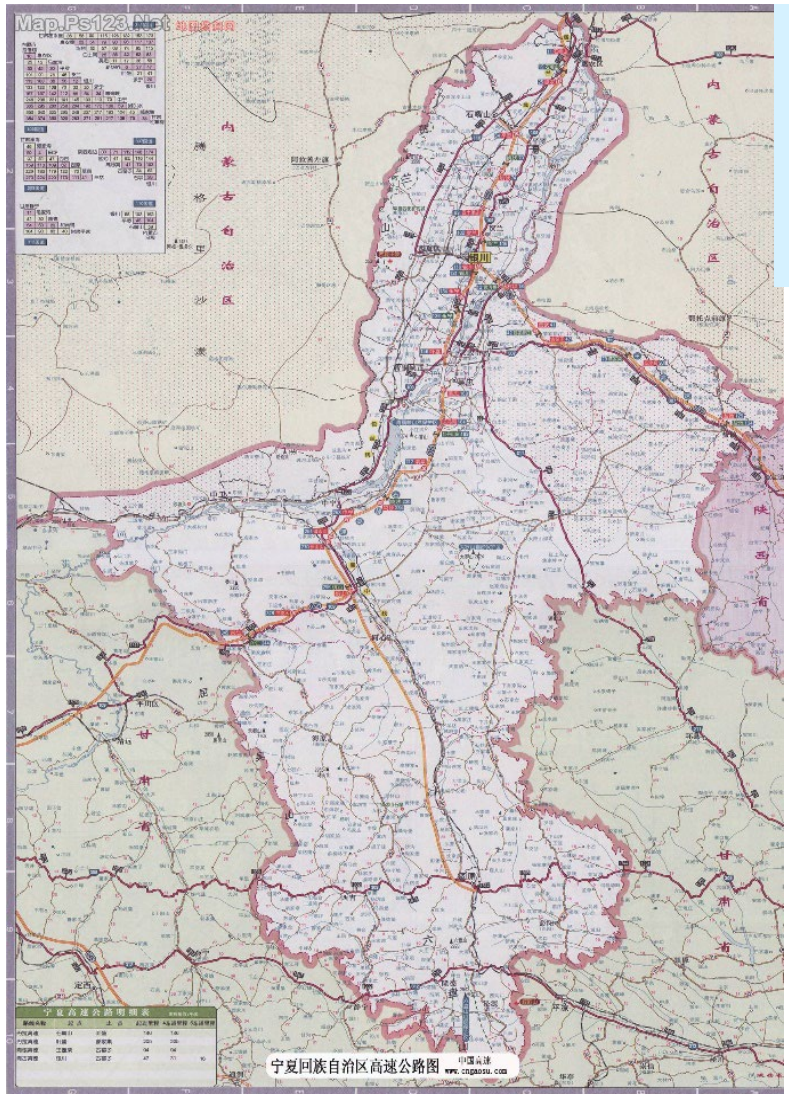
2.6 从“路”的角度减碳



规划设计 ➔ 材料生产 ➔ 施工工艺及组织 ➔ 运营管理 ➔ 养护维修 ➔ 废弃回收

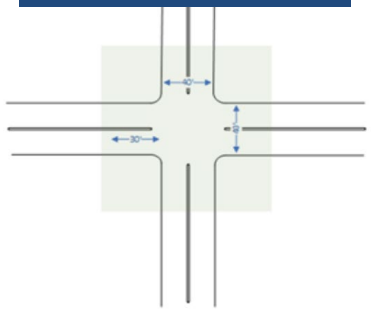
02 低碳化转型路径

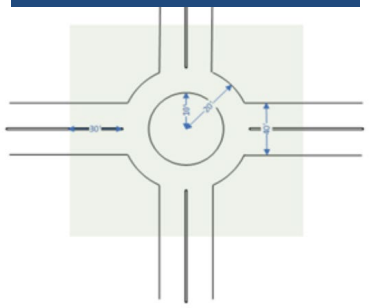
2.6 从“路”的角度减碳：规划设计阶段



- 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**



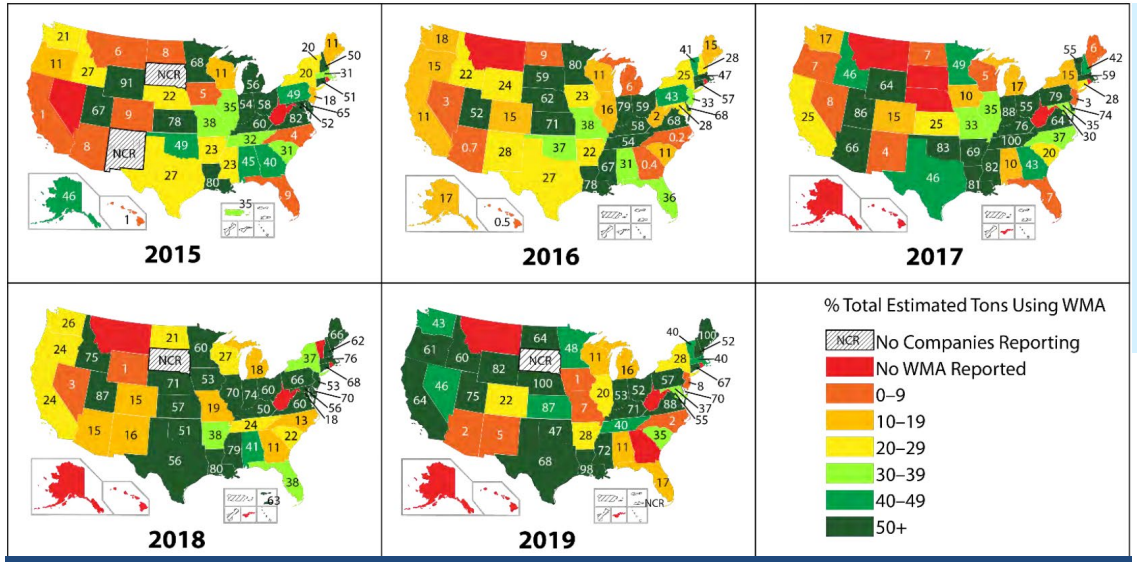


		Intersection		Roundabout	
		Life Cycle Agency Costs		Life Cycle Assessment (tonne CO_2e)	
Life Cycle Stages	**Year**	**Intersection**	**Roundabout**	**Intersection**	**Roundabout**
Materials and Construction	0	$130,700	$190,800	5.34	6.58
Materials and Maintenance (4% discount rate applied to costs)	7	$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

02 低碳化转型路径

2.6 从“路”的角度减碳：材料生产阶段

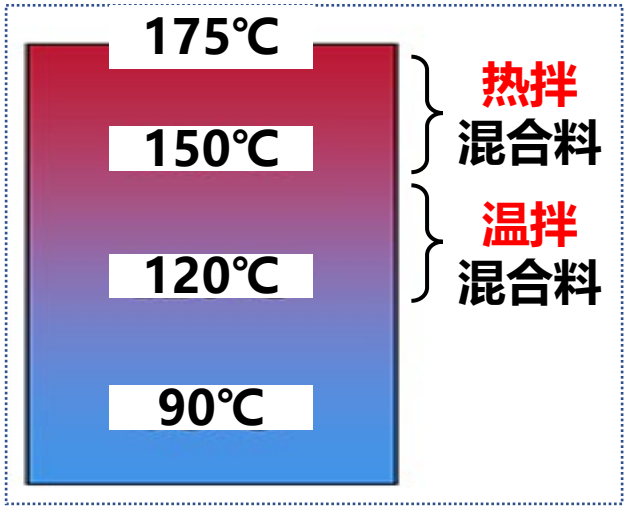


美国2015-2019年温拌沥青混合料技术发展快速

- **温拌/冷拌技术**：降低沥青拌合、摊铺温度，降低能耗及碳排放
- **固废利用**：固废赤泥、钢渣、粉煤灰、废旧轮胎、废塑料等
- **路面材料再生**：充分利用旧料，减污降碳协同增效
- **新型低碳路面材料**：聚氨酯、聚氨酯改性沥青、地聚物水泥等

国家统计局：2022年全国水泥产能为21.18亿吨

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



02 低碳化转型路径

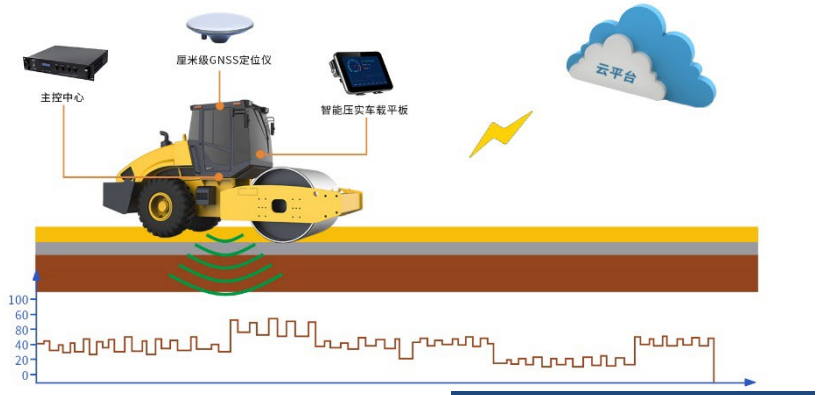
2.6 从“路”的角度减碳：施工阶段

- **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

3D摊铺



智能压实

生态道路智能化施工管控系统

智能管控平台

无人化施工

02 低碳化转型路径

2.6 从“路”的角度减碳：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

02 低碳化转型路径

2.6 从“路”的角度减碳：养护维修阶段

- **高效低碳养护策略**，加强预防性养护，保证路面服务水平
- **绿化养护**，修复沿线生态，预防水土流失
- 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）
  - 就地热再生、冷再生技术
  - 雾封层技术、薄层罩面技术
  - 高性能天然沥青混凝土

新能源养护车

微罩面预防性养护

乳化沥青冷再生

报告内容

CONTENTS

01 研究背景与重大需求

02 碳排放测算分析与转型路径

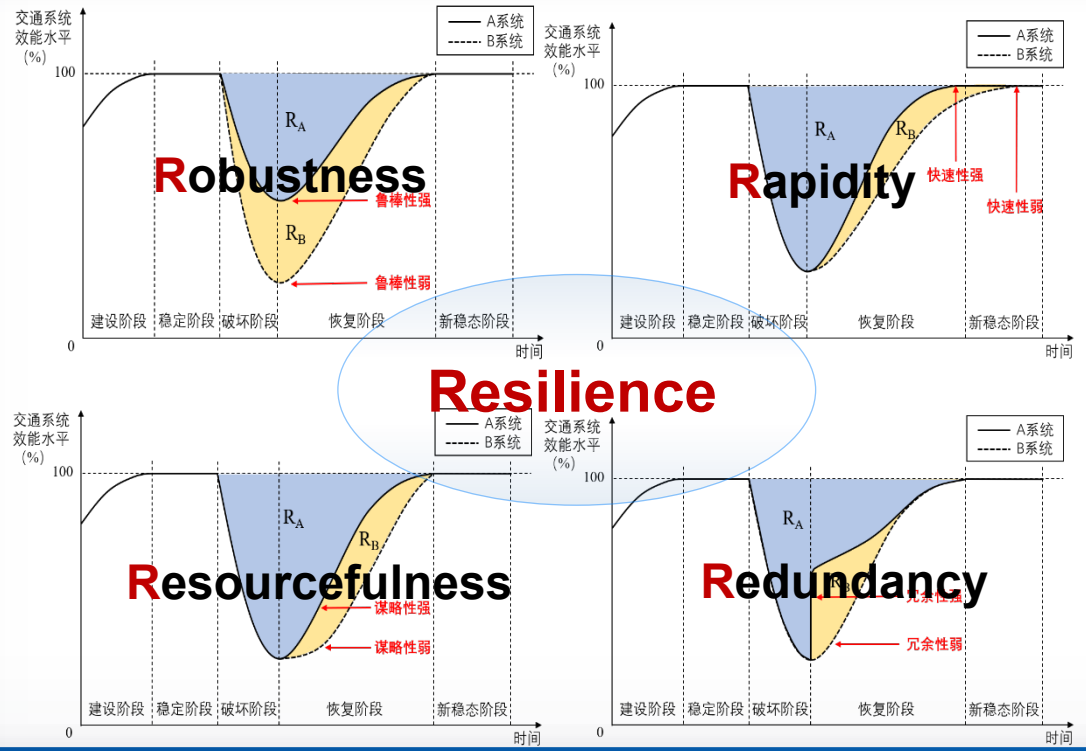
03 韧性评估与提升技术

04 政策建议与展望

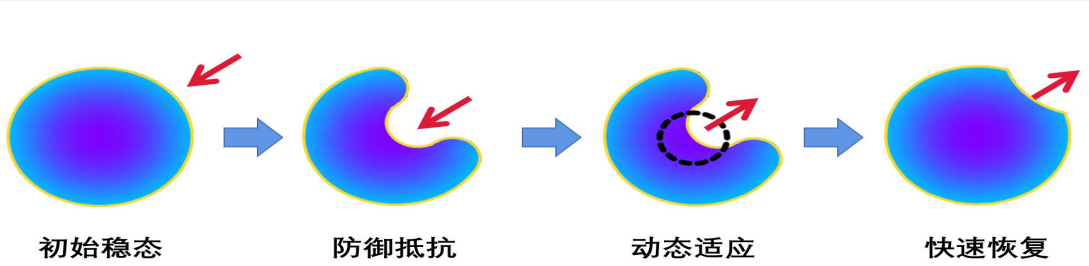
03 韧性评估及提升技术：维度、过程及特征

韧性“3D”——工程、生态、社会

韧性“4R”——鲁棒、快速、谋略、冗余



韧性“3F”——抵抗力、适应力、恢复力



03 韧性评估及提升技术

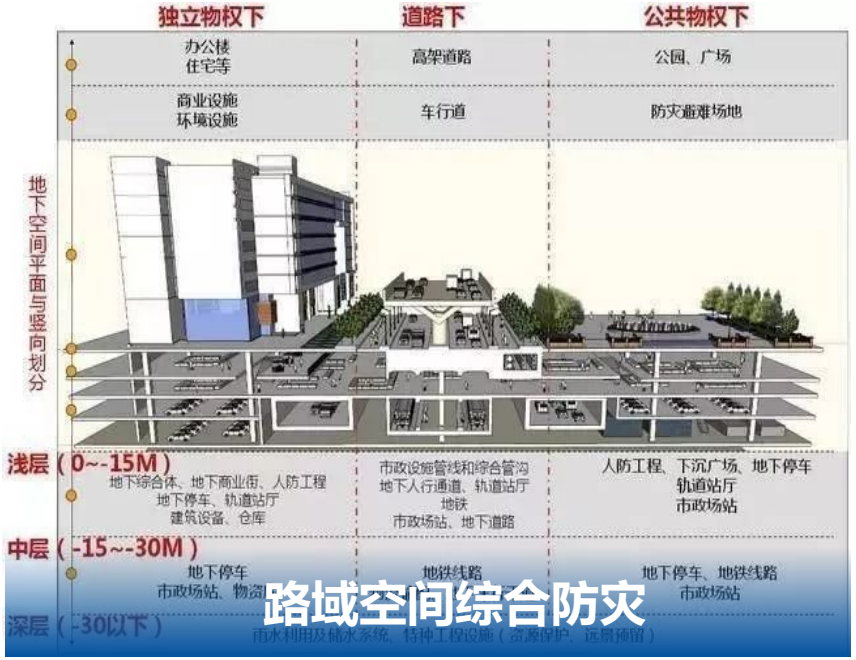
路域空间基础设施韧性建设 | 城市基础设施体系智慧化管理 | 城市防灾系统应急能力提升

抵抗力 »

重新定义城市道路空间功能——平灾结合、平战结合

道路地下综合管廊

多功能应急空间



路域空间综合防灾

- 城市新区新建道路应根据功能需求，同步建设**地下综合管廊**，提升城市**抗灾韧性**
- 地上空间与地下空间互通互联，构建交通、避难等**多功能路域防灾空间**，提升城市**安全韧性**

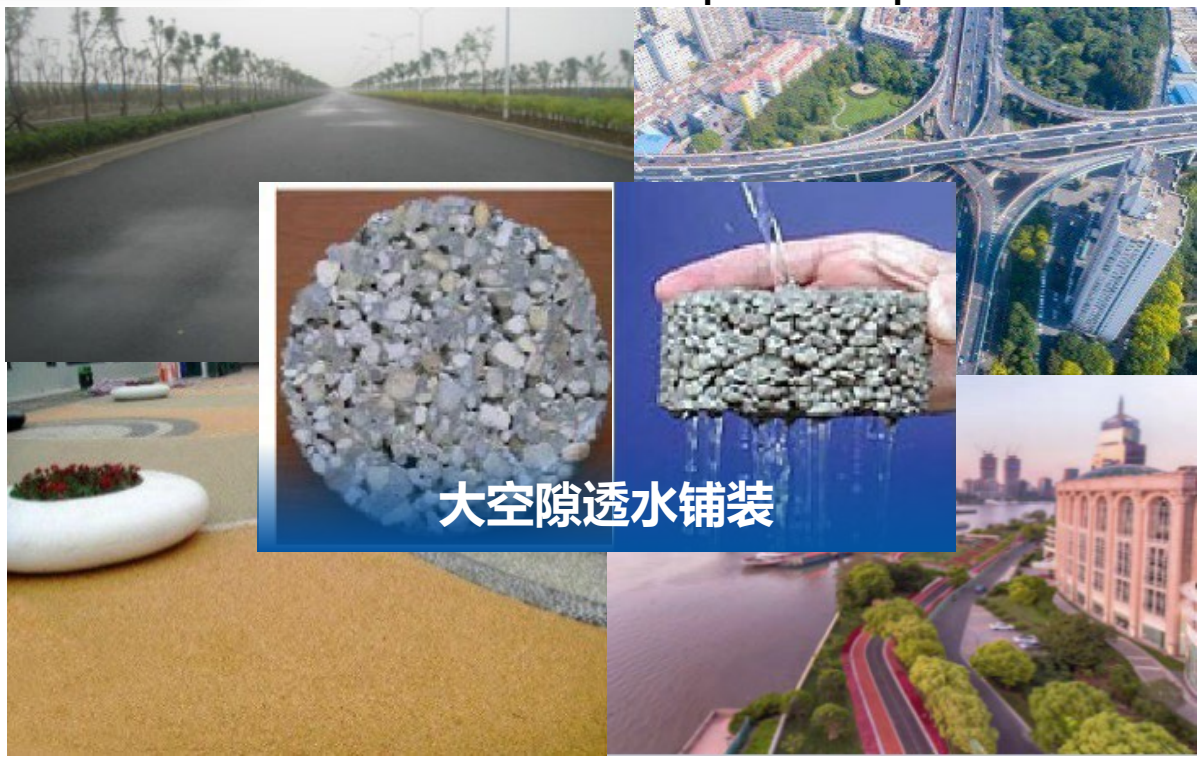
03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施韧性建设 | 城市基础设施体系智慧化管理 | 城市防灾系统应急能力提升

抵抗力 »

低影响开发（LID）——基于自然的解决方案（NbS）

Low-Impact Development　　Nature-based Solution



城市道路硬化铺装面积率达20%以上，雨洪韧性、生态韧性亟待提升

03 韧性评估及提升技术

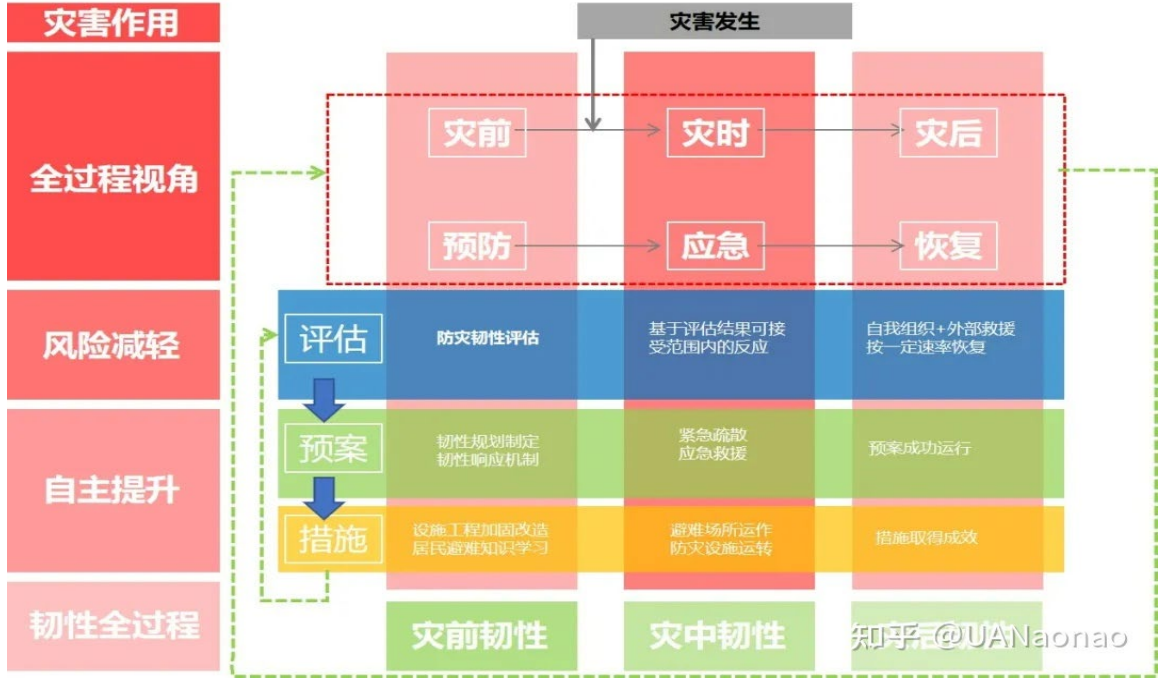
路域空间基础设施
韧性建设

**城市基础设施体系
智慧化管理**

城市防灾系统
应急能力提升

适应力 »

提升基础设施智慧化管理水平——全过程、跨主体、多维度



- **全过程**：灾前预防预警、灾中抵抗适应、灾后恢复提升
- **多灾种**：雨洪、台风、地震、冰雪、高温、事故
- **跨主体**：交通、电力、水利、供热、环卫、消防、通信
- **多维度**：工程韧性、安全韧性、生态韧性……

03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施
韧性建设

**城市基础设施体系
智慧化管理**

城市防灾系统
应急能力提升

适应力 »

城市间道路基础设施互联互通，城市群衔接干线保通保畅

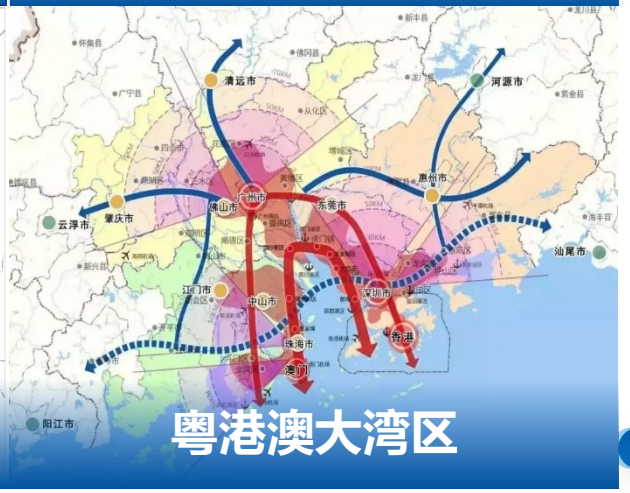
北京都市圈

上海都市圈

关中平原城市群

武汉都市圈

中原城市群



粤港澳大湾区

**道路基础设施统筹规划，智慧管理
提升城市群整体区域运输联通水平**

03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施
韧性建设

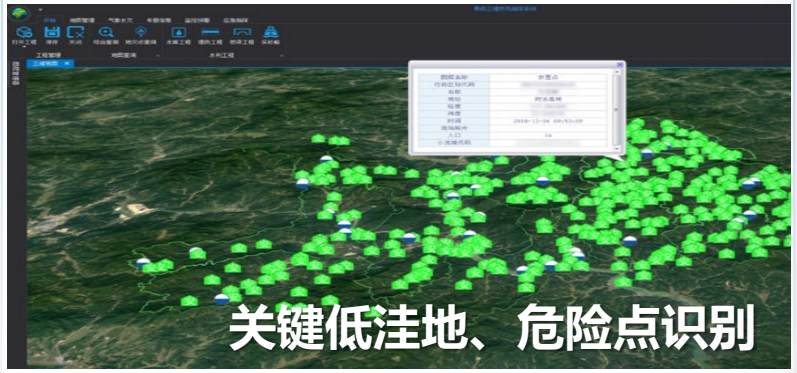
城市基础设施体系
智慧化管理

**城市防灾系统
应急能力提升**

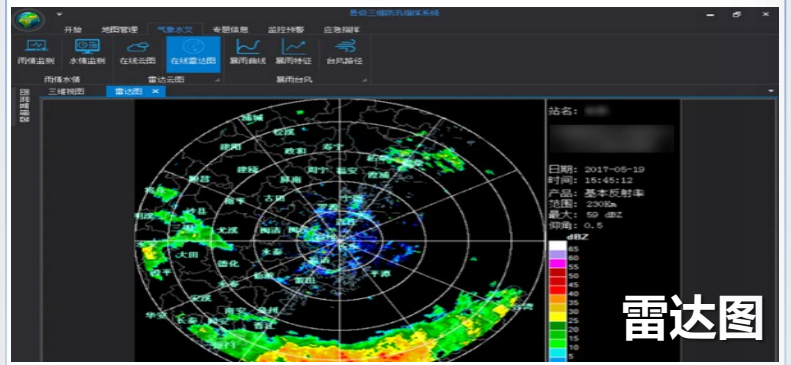
恢复力 »

灾害全过程主动响应——灾前预警部署

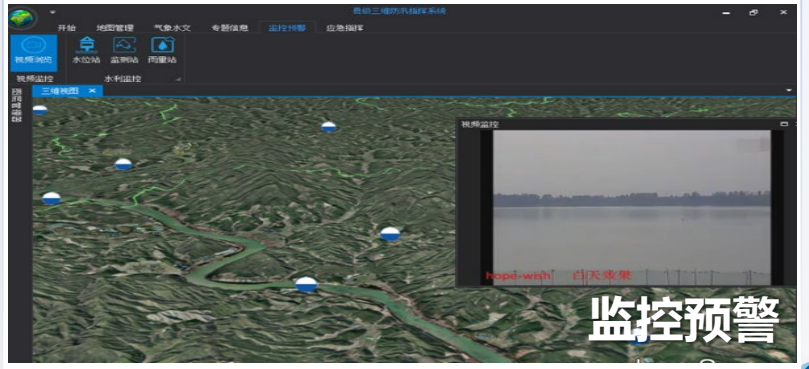
三维GIS模拟实际空间信息



卫星数据监测气象变化



洪水演进模拟与监控预警平台



03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施
韧性建设

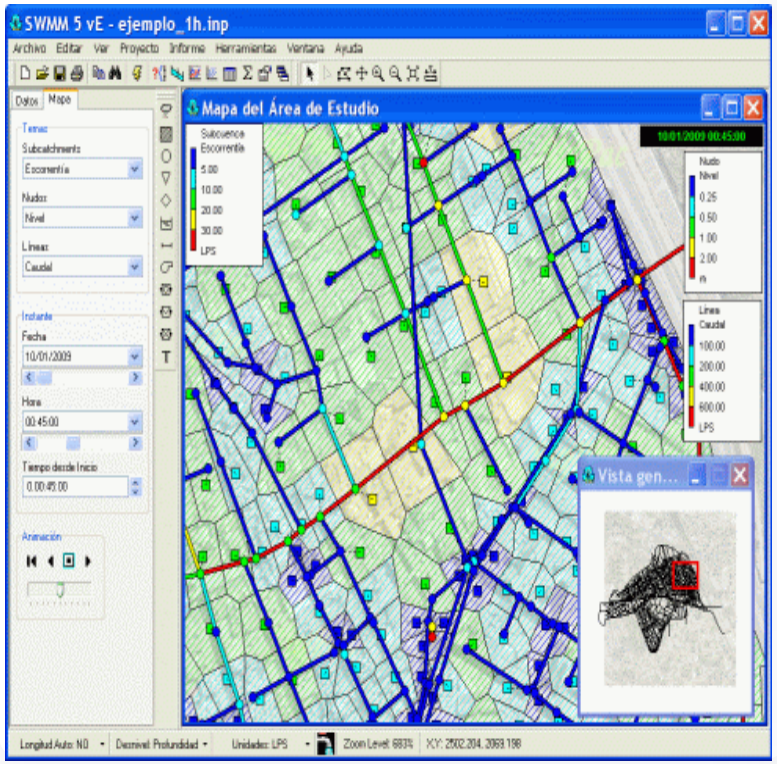
城市基础设施体系
智慧化管理

**城市防灾系统
应急能力提升**

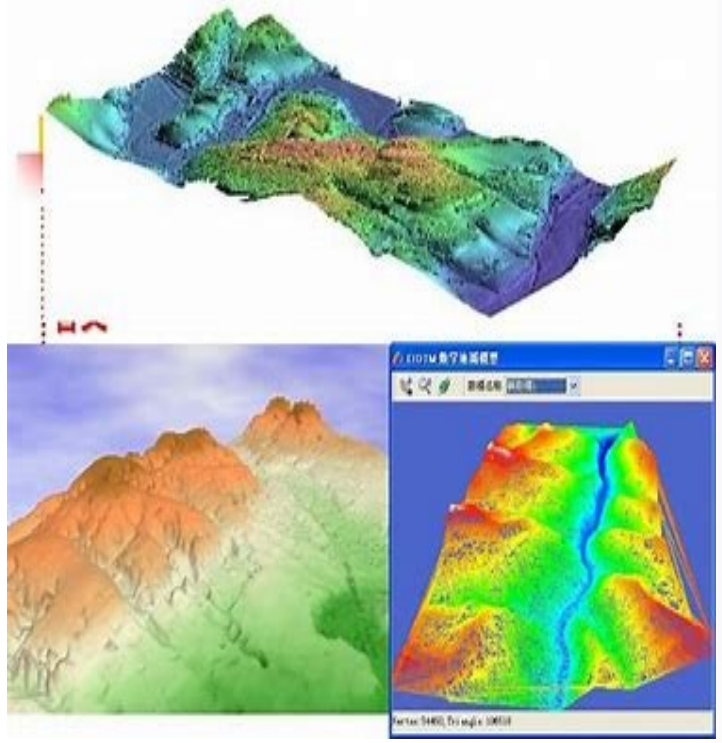
恢复力 »

灾害全过程主动响应——灾中损失评估

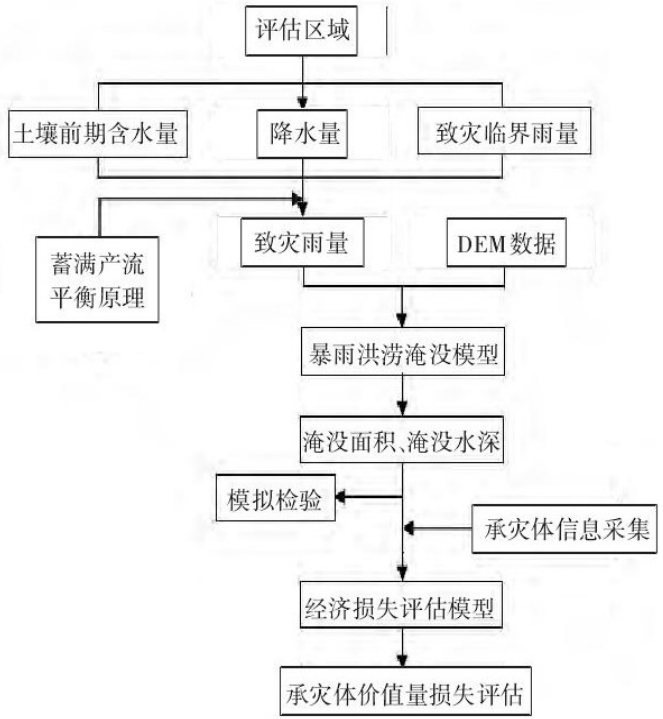
水文模型：SWMM, SWAT



数字高程模型DEM



雨洪灾害评估模型



03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施韧性建设 | 城市基础设施体系智慧化管理 | **城市防灾系统应急能力提升**

恢复力 »

灾害全过程主动响应——灾后快速恢复

暴雨造成城市内涝，冲走地基中的泥土，易造成路面坍塌或者凹陷

三维探地雷达（GPR）检测

- 利用天线发射和接收高频电磁波来探测介质内部物质特性和分布规律。
- 目前主要用于考古、矿产勘查、灾害地质调查、岩土工程勘察、工程质量检测、建筑结构检测以及军事目标探测等领域。

基于3D激光扫描技术的路面损坏检测系统

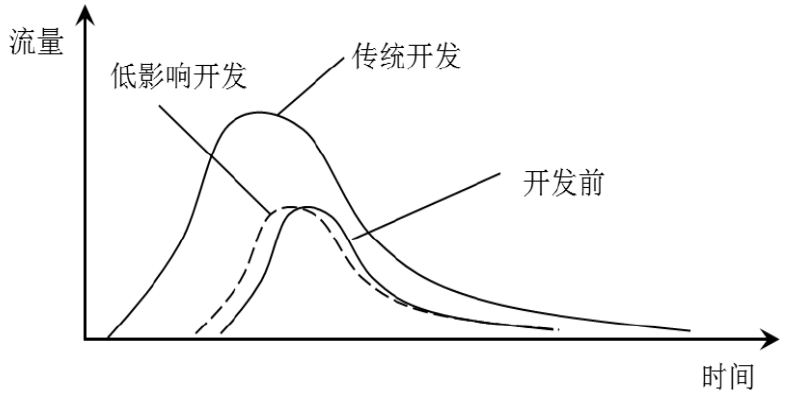
- 采用线激光直射路面用面阵相机拍摄激光线在路面上的投影，通过图像处理获得路面上每点高程差。快速识别拥包、车辙、坑槽和沉陷等常见变形损坏。

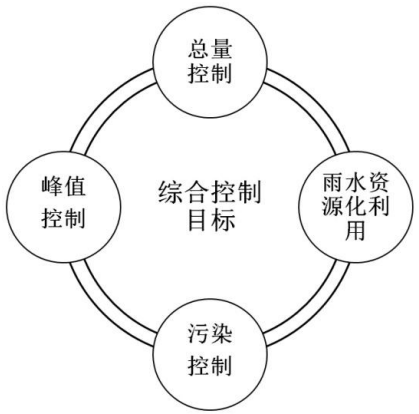
03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施韧性建设 | **城市基础设施体系智慧化管理** | **城市防灾系统应急能力提升**

雨洪韧性 » 海绵城市（Sponge City）

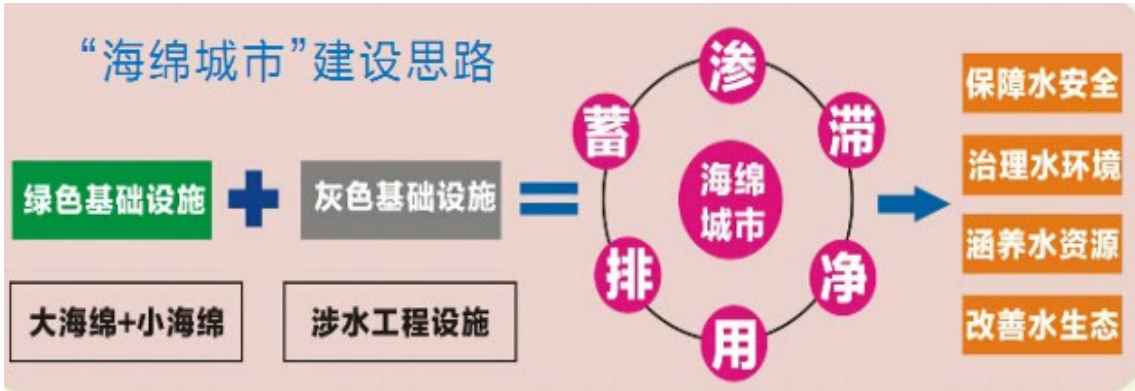
- **保存或恢复**自然生态功能，形成**良性**生态水**循环**。
- 海绵城市是实现从快排、及时就近排出、快速排干的**工程排水**时代跨入到“**渗、滞、蓄、净、用、排**”六位一体的**综合排水、生态排水**的历史性、战略性的转变。





传统城市
- 改造自然
- 地面硬化
- 改变原有生态
- 粗放式建设
- 地表径流量大增

海绵城市
- 顺应自然
- 人与自然和谐
- 保护原有生态
- 低影响开发
- 地表径流量不变

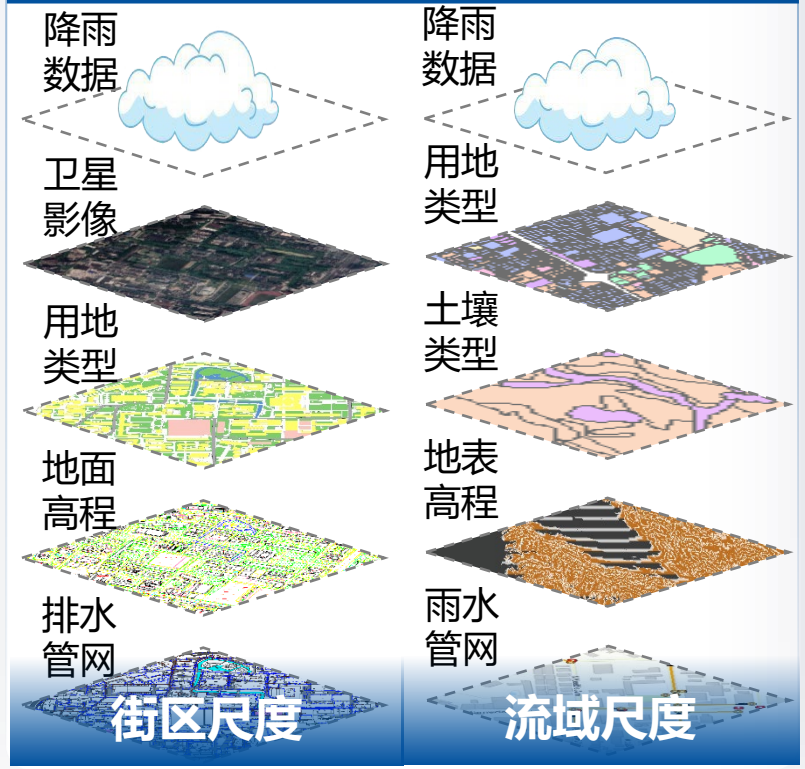


03 韧性评估及提升技术

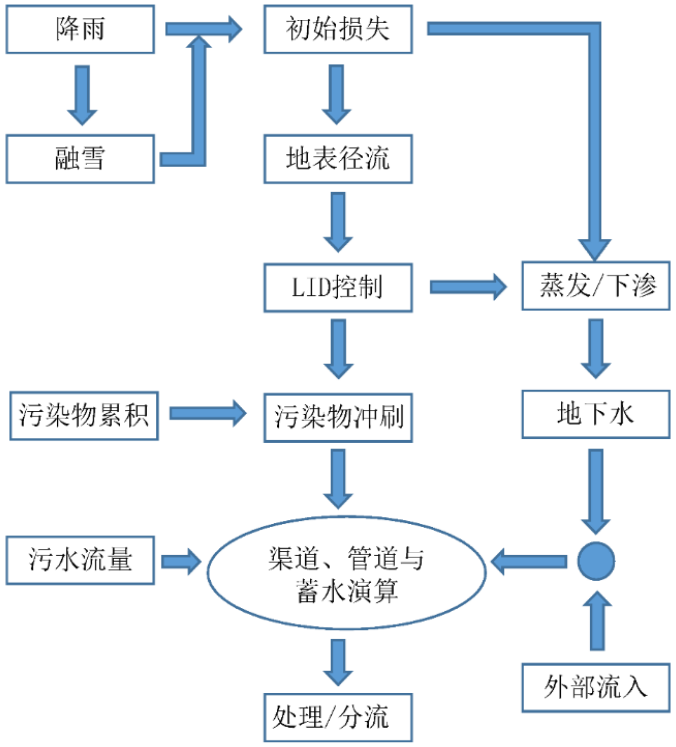
路域空间基础设施韧性建设 | **城市基础设施体系智慧化管理** | **城市防灾系统应急能力提升**

雨洪韧性 » 海绵城市（Sponge City）：SWMM雨洪风险模拟评价

降水-径流模型构建



雨洪风险动态模拟



海绵城市综合评价

03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施韧性建设 | **城市基础设施体系智慧化管理** | **城市防灾系统应急能力提升**

雨洪韧性 » 海绵城市（Sponge City）：透水铺装多尺度水文分析

- ✓ 径流系数 -60%~-15%
- ✓ 径流峰值 -62%~-13%
- ✓ 检查井溢流量 -75%~-15%
- ✓ 溢流检查井数量 -23%~-2%
- ✓ 总固体悬浮物净化 >800kg

街区尺度：同济大学(60.1公顷)

- ✓ 气候变化： 主要因素
- ✓ 城市化： 次要因素
- ✓ 针对措施：0.89%面积全透水铺装

完全移除气候变化(RCP4.5)负面影响

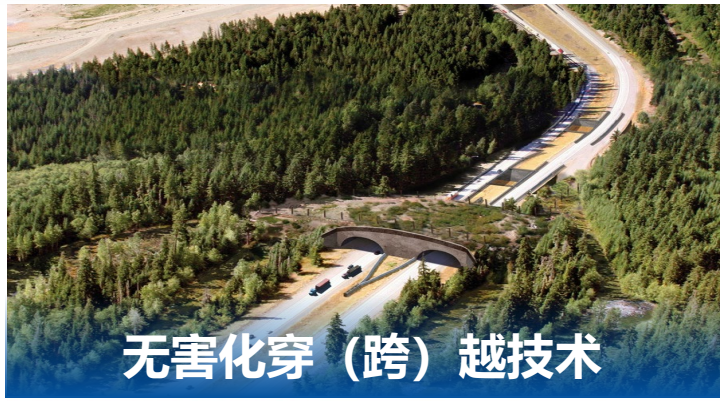
流域尺度：美国加州San Jose（135km²）

- 街区尺度：**精细化预测**透水铺装**低影响开发效果**，比选综合效益最优方案
- 流域尺度：**宏观分析**透水铺装对**气候变化、快速城市化**带来的雨洪影响减缓效果

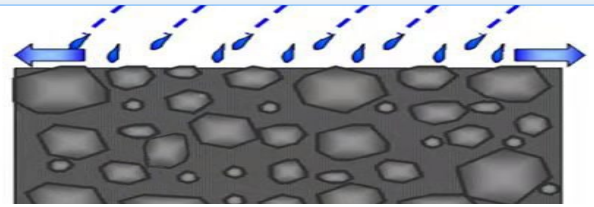
03 韧性评估及提升技术

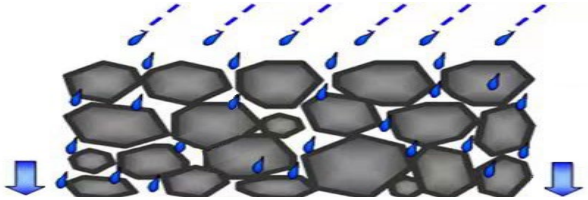
路域空间基础设施 韧性建设	城市基础设施体系 智慧化管理	城市防灾系统 应急能力提升

生态韧性 » 生态道路（Ecological Road）——降温降噪、疏水畅流


无害化穿（跨）越技术

路基边坡生态防护





项目	传统铺装	大空隙透水铺装
空隙率	3~5%	18~25%
路表径流	80~100%产生	小于10%
噪声	67~80分贝	降低5~8分贝
热岛效应	高吸热率	降低5~10℃
安全	雨天易产生水雾、水漂	雨天视线好、抗滑性能高

将传统道路耐久性单一目标转为生态-韧性多目标平衡

03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施
韧性建设

城市基础设施体系
智慧化管理

城市防灾系统
应急能力提升

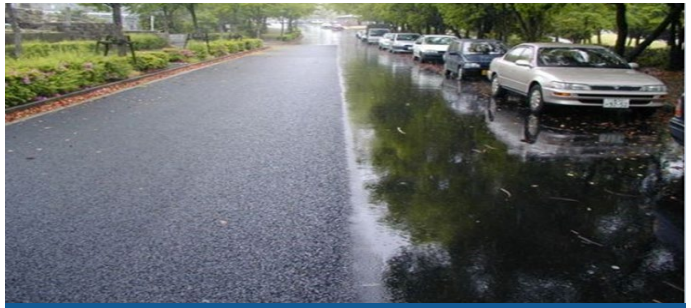
生态韧性 » 生态道路（Ecological Road）——降温降噪、疏水畅流

强度、耐久性

孔隙率

生态-韧性道路

材料升级



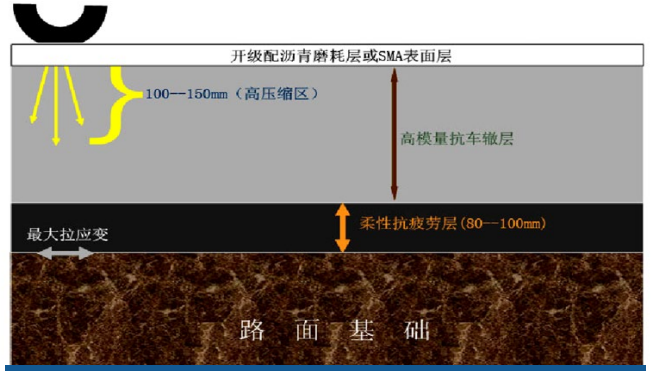
透水、净水

降温、降噪

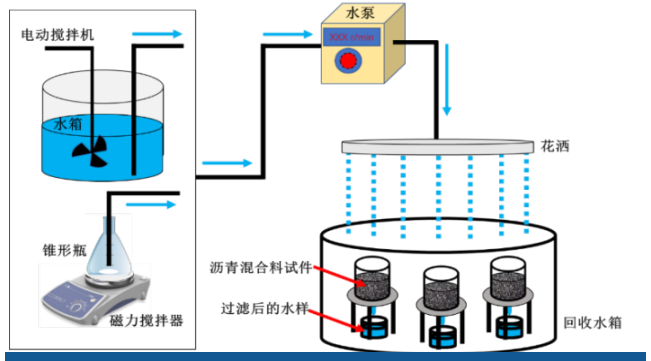
03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施韧性建设 | **城市基础设施体系智慧化管理** | **城市防灾系统应急能力提升**

生态韧性 » 生态道路（Ecological Road）——降温降噪、疏水畅流



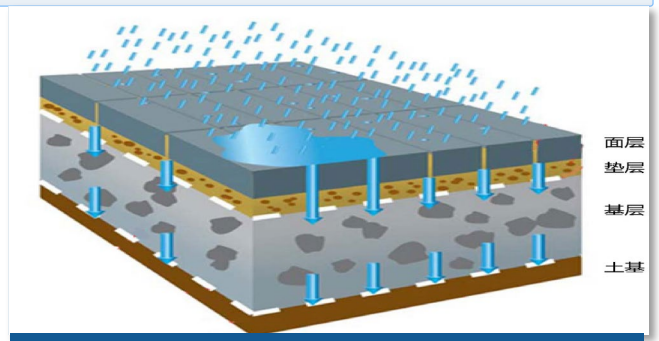
力学指标



污染物去除率

生态-韧性道路

结构优化



水量控制指标

生态指标

03 韧性评估及提升技术

路域空间基础设施
韧性建设

城市基础设施体系
智慧化管理

城市防灾系统
应急能力提升

生态韧性 » 生态道路（Ecological Road）——降温降噪、疏水畅流

温控要求高

施工效率低

生态-韧性道路
建养提效

传统养护不适用

透水性能衰减快

报告内容

CONTENTS

01 研究背景与重大需求

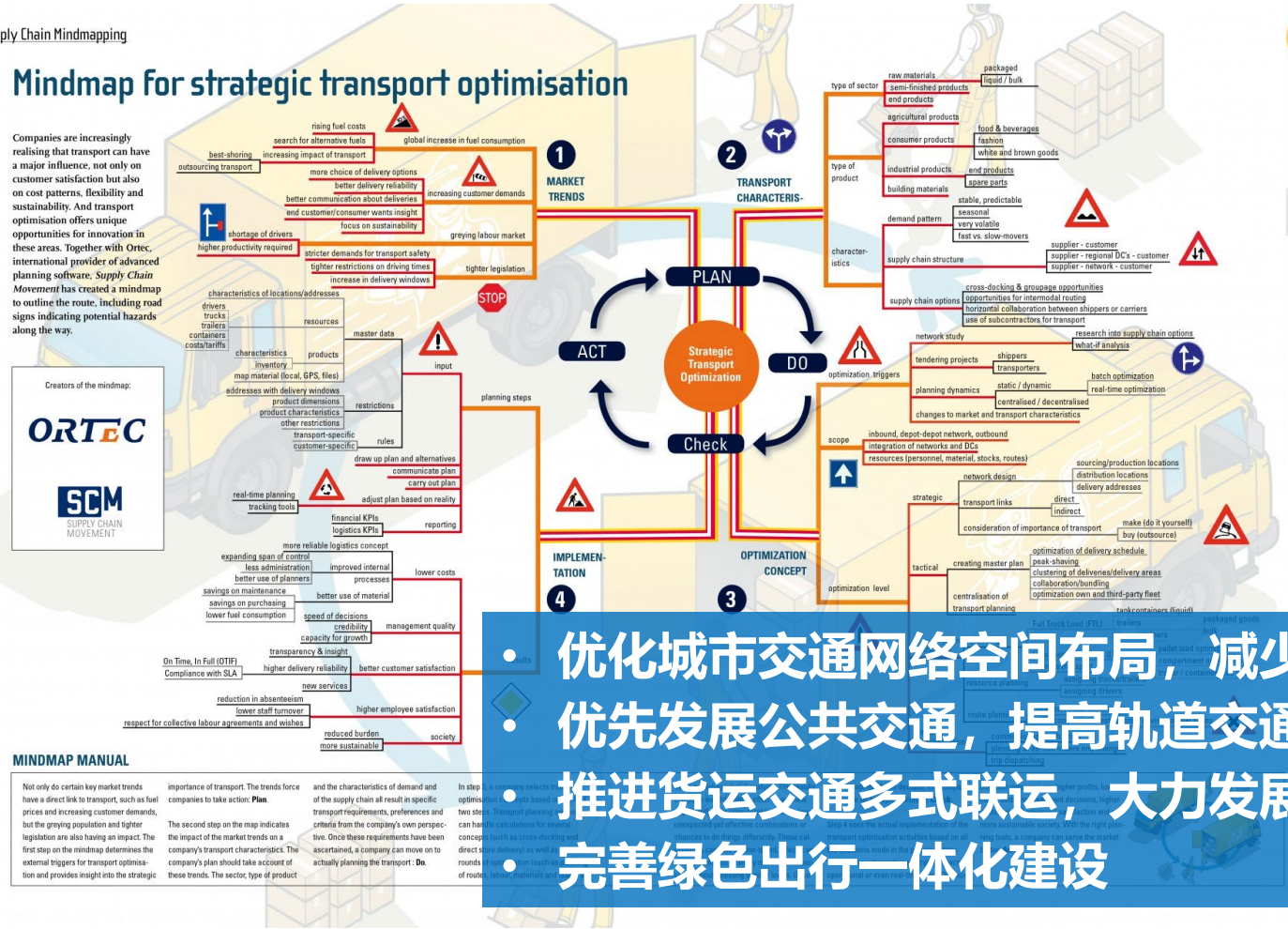
02 碳排放测算分析与转型路径

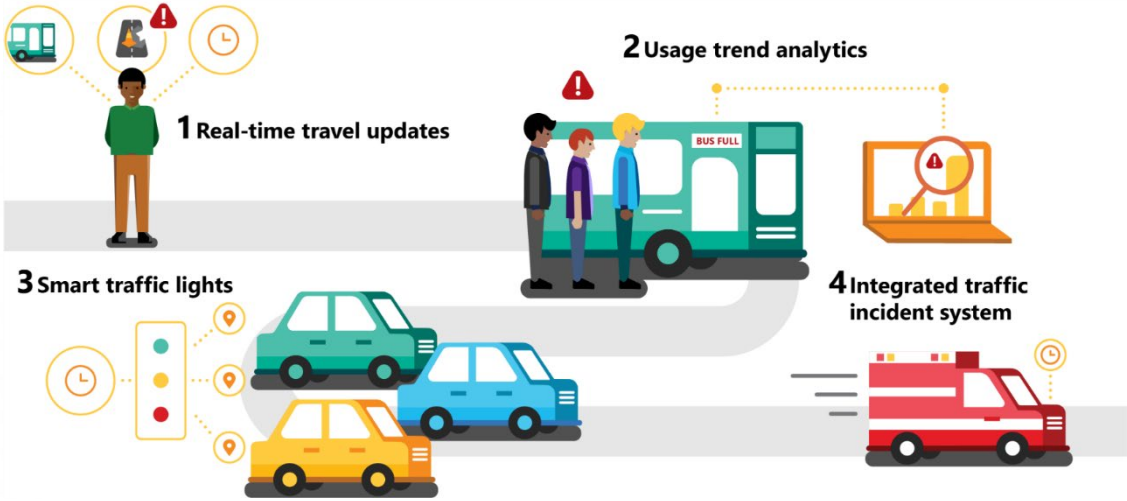
03 韧性评估与提升技术

04 政策建议与展望

04 政策建议与展望：低碳建设

调整城市空间及交通运输结构





- 优化城市交通网络空间布局，减少长距离出行需求
- 优先发展公共交通，提高轨道交通客运分担率
- 推进货运交通多式联运，大力发展铁水联运
- 完善绿色出行一体化建设

04 政策建议与展望：低碳建设

建设低碳交通基础设施

- 提高大宗固废综合利用水平
- 加快绿色低碳工艺与装备应用
- 提高预防性养护水平，延长服役寿命
- 开发路域绿色能源

04 政策建议与展望：低碳建设

提高城市交通智慧管控水平

- 推广全生命周期评价方法 (LCA)
- 多域一体城市交通与基础设施协同高效智慧管理
- 提升综合交通系统信息化管理效率

LCA在线系统：

http://csts.tongji.edu.cn

04 政策建议与展望：韧性建设

韧性规划建设 理论创新

全方位韧性量化评价指标体系、规划-建设-运行全周期韧性提升理论体系

韧性基础设施 数字赋能

大数据、物联网、北斗定位等技术赋能道路交通系统运行与管理

利用AI技术强化灾害识别及趋势预判

韧性普查制度 风险监测

定期开展基础设施韧性风险普查，精准定位基础设施韧性缺失的脆弱节点

快速排查韧性风险，因时因地实施科学的韧性提升策略

韧性交叉学科 人才培养

模拟技术、评估技术、规划方法、运维技术以及智慧化研究等领域

交通、土木、信息、环境等工程科学 + 经济、管理、法律等社会科学

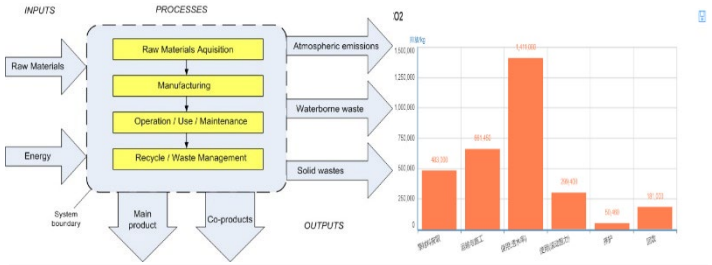
理论-技术-制度-人才培养溯本求源，久久为功

同济大学中国交通研究院低碳交通研究中心

1. 低碳交通发展咨询服务

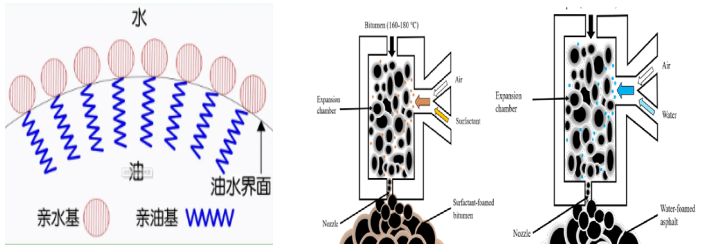
地区交通减碳规划与政策咨询

低碳基础设施方案咨询



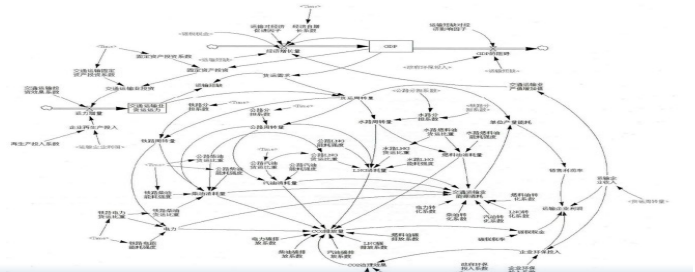
全生命周期碳排放测算与评估

2. 低碳交通前沿技术研究



低碳道路基础设施材料

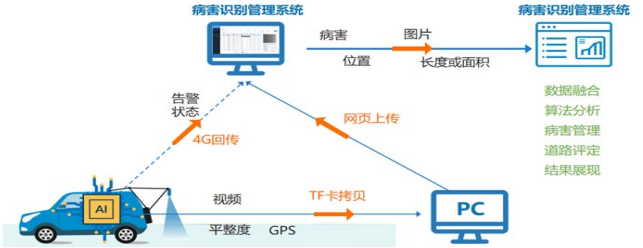
交通系统碳排放预测技术



基于AI的交通低碳路径技术

3. 低碳产品与服务产业化应用

低碳道路工程产业化



低碳基础设施方案咨询

全生命周期碳排放测算与评估

韧性交通研究进展

2022十大前沿科学问题　如何全方位精准评价城市综合交通系统及基础设施韧性?

中国科学技术协会
China Association for Science and Technology

荣誉证书

李兴华、李辉：

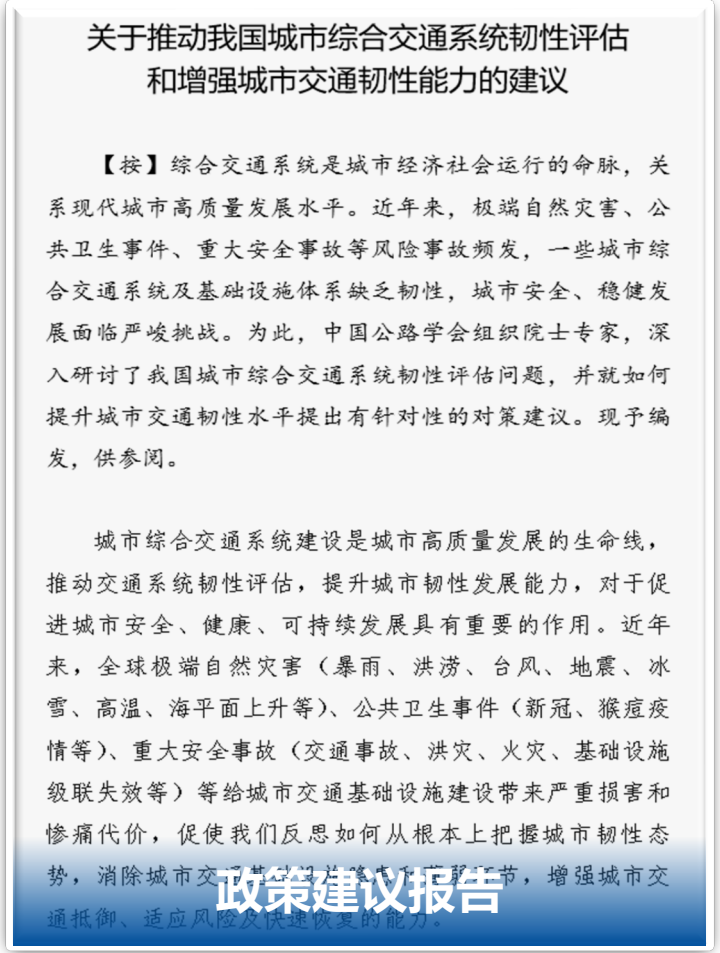
您积极参与中国科协2022重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题征集发布活动，推荐的“如何全方位精准评价城市综合交通系统及基础设施韧性？”成功入选2022十大前沿科学问题。

特发此证，以资鼓励

中国科协科学技术创新部　中国科协学会服务中心

2022年8月

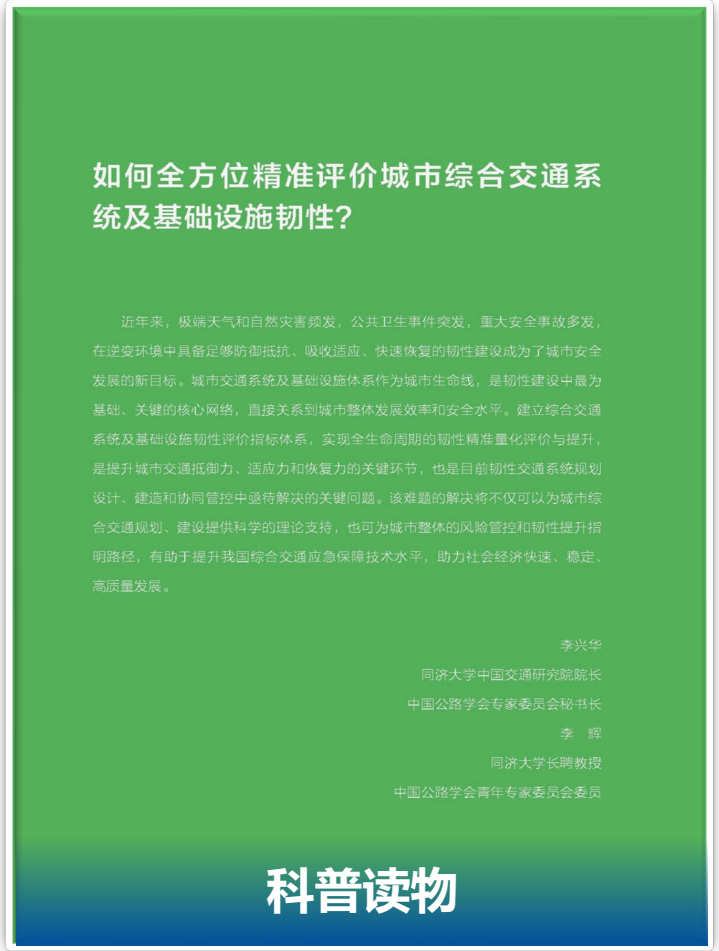
前沿科学问题


关于推动我国城市综合交通系统韧性评估和增强城市交通韧性能力的建议

【按】综合交通系统是城市经济社会运行的命脉，关系现代城市高质量发展水平。近年来，极端自然灾害、公共卫生事件、重大安全事故等风险事故频发，一些城市综合交通系统及基础设施体系缺乏韧性，城市安全、稳健发展面临严峻挑战。为此，中国公路学会组织院士专家，深入研讨了我国城市综合交通系统韧性评估问题，并就如何提升城市交通韧性水平提出有针对性的对策建议。现予编发，供参阅。

城市综合交通系统建设是城市高质量发展的生命线，推动交通系统韧性评估，提升城市韧性发展能力，对于促进城市安全、健康、可持续发展具有重要的作用。近年来，全球极端自然灾害（暴雨、洪涝、台风、地震、冰雪、高温、海平面上升等）、公共卫生事件（新冠、猴痘疫情等）、重大安全事故（交通事故、洪灾、火灾、基础设施级联失效等）等给城市交通基础设施建设带来严重损害和惨痛代价，促使我们反思如何从根本上把握城市韧性态势，消除城市交[illegible]节，增强城市交通抵御、适应风险及快速恢复的能力。

政策建议报告


如何全方位精准评价城市综合交通系统及基础设施韧性?

近年来，极端天气和自然灾害频发，公共卫生事件突发，重大安全事故多发，在逆变环境中具备足够防御抵抗、吸收适应、快速恢复的韧性建设成为了城市安全发展的新目标。城市交通系统及基础设施体系作为城市生命线，是韧性建设中最为基础、关键的核心网络，直接关系到城市整体发展效率和安全水平。建立综合交通系统及基础设施韧性评价指标体系，实现全生命周期的韧性精准量化评价与提升，是提升城市交通抵御力、适应力和恢复力的关键环节，也是目前韧性交通系统规划设计、建造和协同管控中亟待解决的关键问题。该难题的解决将不仅可以为城市综合交通规划、建设提供科学的理论支持，也可为城市整体的风险管控和韧性提升指明路径，有助于提升我国综合交通应急保障技术水平，助力社会经济快速、稳定、高质量发展。

李兴华
同济大学中国交通研究院院长
中国公路学会专家委员会秘书长
李　辉
同济大学长聘教授
中国公路学会青年专家委员会委员

科普读物

4项成果凝练任务，2场高层次专家研讨会，1份高质量政策建议报告

韧性交通研究进展

研讨会议

城市综合交通系统和基础设施韧性评估及提升

专家学者共聚一堂，为韧性交通建设指明前进方向

韧性交通研究进展

科研项目

城市综合交通系统和基础设施韧性评估及提升

序号	项目名称	项目来源	项目类型
1	复杂环境下智能交通协同管控技术	科技部	国家重点研发项目
2	低影响开发海绵城市透水铺装关键技术研究及应用	科技部	国家重点研发项目
3	路网运营风险分析与动态调控理论	科技部	国家重点研发项目
4	地铁网络客流预测与韧性地铁评价体系与示范应用	上海市科委	重点项目
5	基于大数据的上海路网韧性评估及提升策略研究	上海市科委	科技创新
6	洪涝灾害下城市道路基础设施与交通系统全寿命韧性评估及提升	国家自然科学基金	重点国际合作项目
7	极端洪涝灾害下城市道路基础设施及交通系统韧性评估与提升技术	科技部	“政府间国际科技创新合作”重点专项
8	抗爆炸冲击韧性机场道面材料结构设计及高效应急抢修技术等		

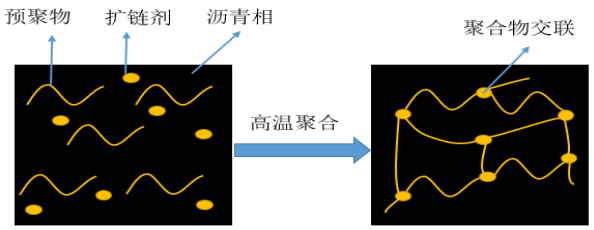
韧性交通学科交叉，强强联合优势互补

已有基础及未来发展规划

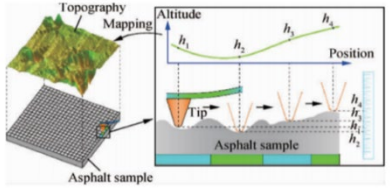
研究基础 | 1. 道路新材料 | 2. 公路智慧养护 | 3. 碳排放测算 | 4. 服务区提升

高性能低碳耐久道路新材料

1.高性能聚氨酯改性沥青材料

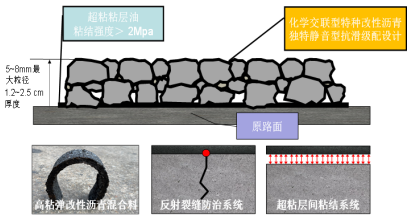


2.橡胶粉-SBS复合改性高黏抗老化沥青材料



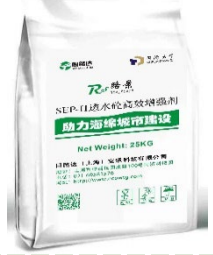
纳米尺度-沥青改性

3. 冷拌冷铺超薄磨耗层



生态道路建养新材料

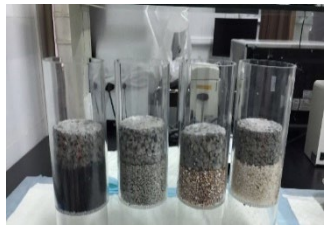
1.多孔透水水泥混凝土增强材料 高强度+高透水

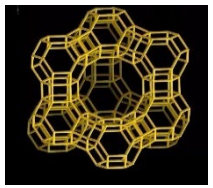


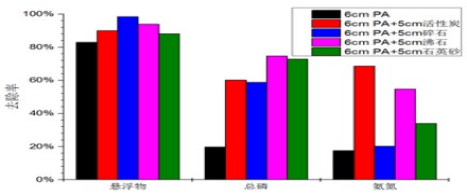
2.防眩控热路表涂层罩面技术 防眩 + 降温

夏季路表降温5-10℃

3.路面净水沥青烟抑制剂技术 高效净水、抑烟







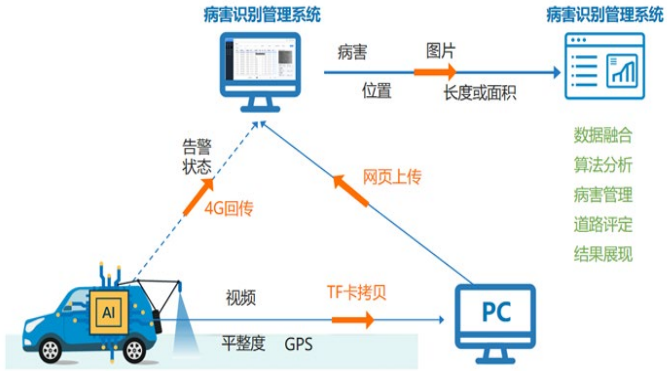
净化效果

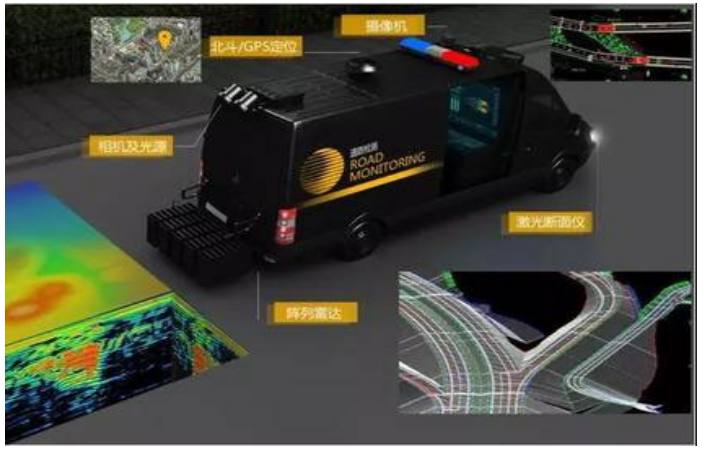
已有基础及未来发展规划

研究基础

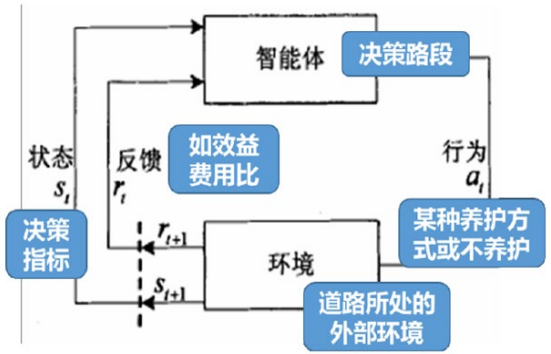
1. 道路新材料
2. 公路智慧养护
3. 碳排放测算
4. 服务区提升

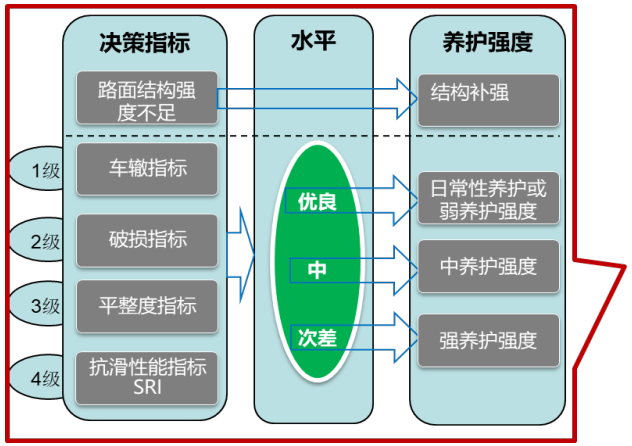
公路状况特征快速检测技术



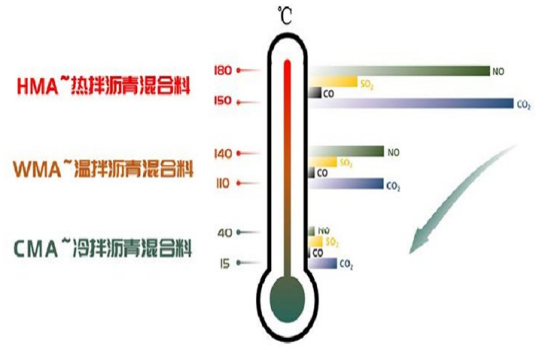


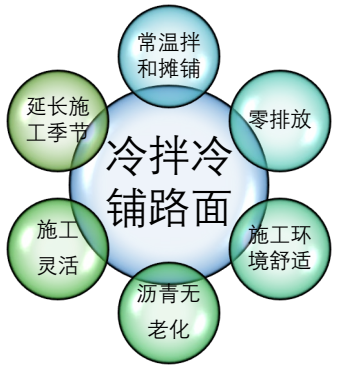
养护方案智能决策技术





高性能低碳养护材料和技术





已有基础及未来发展规划

研究基础 | 1. 道路新材料 | 2. 公路智慧养护 | 3. 碳排放测算 | 4. 服务区提升

全生命周期碳排放评价

1. 道路全生命周期碳排放评价方法
2. 道路全生命周期环境-经济综合评价系统
3. 道路全生命周期碳排放评价标准化

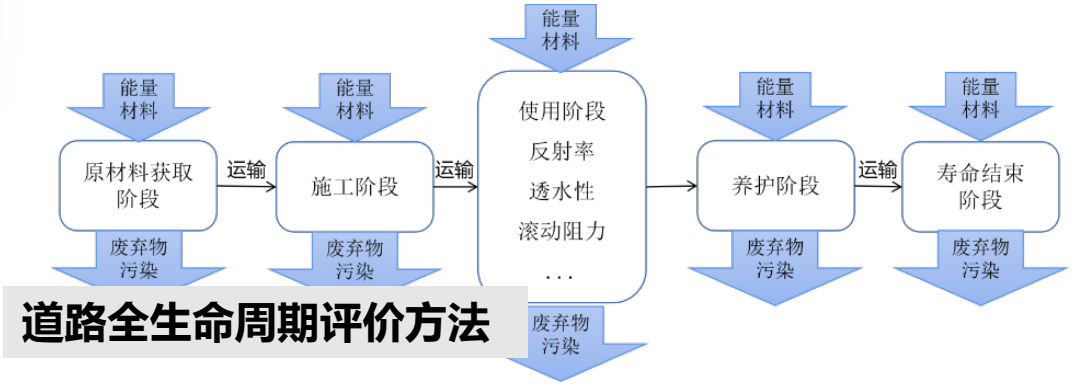
生命周期评价模型

$$Materials\ Production = \sum_i (M_i \times C_i)$$

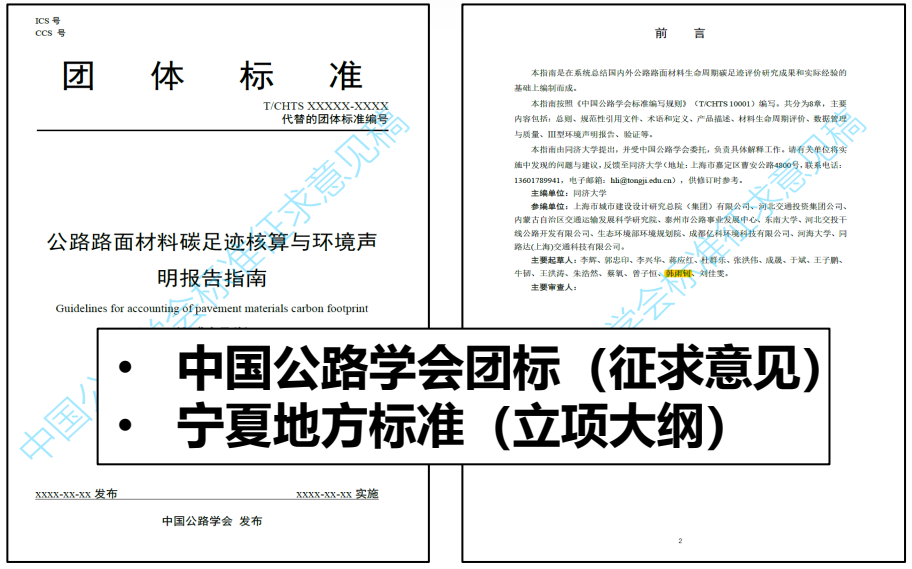
$$Mixing\ and\ heating = \sum_f \sum_e (T_e \times E_{e,f} \times C_f)$$

$$Transport = \sum_f \sum_p (T_p \times E_{p,f} \times C_f)$$

$$Construction = \sum_f \sum_d (T_d \times E_{d,f} \times C_f)$$



道路全生命周期评价方法


团 体 标 准

T/CHTS XXXXX-XXXX
代替的团体标准编号

公路路面材料碳足迹核算与环境声明报告指南

Guidelines for accounting of pavement materials carbon footprint

xxxx-xx-xx 发布 xxxx-xx-xx 实施

中国公路学会 发布

前 言

- 中国公路学会团标（征求意见）
- 宁夏地方标准（立项大纲）

https://csts.tongji.edu.cn/lca

公路全生命周期综合评价系统

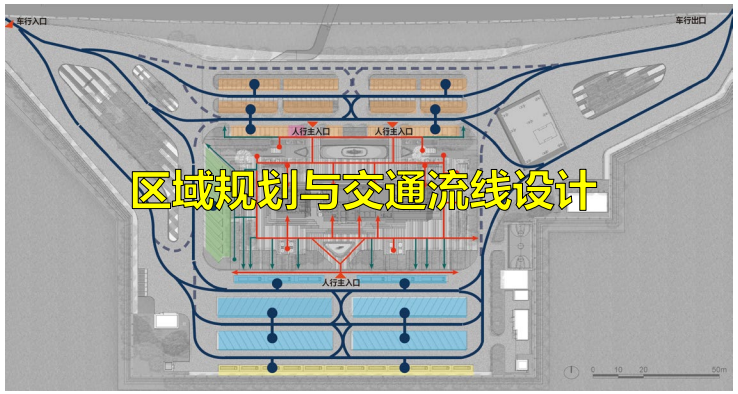
已有基础及未来发展规划

研究基础

1. 道路新材料
2. 公路智慧养护
3. 碳排放测算
4. 服务区提升

服务区低碳化、生态化、智慧化提升改造

1. 方案咨询与设计



2. 可再生能源系统

3. 智能管控系统

4. 建维新材料与新技术

The International Journal of Transportation Science and Technology (IJTST)

Scope:

- Innovative research: enhances the **safety, efficiency, reliability, resilience, and sustainability of person and freight transportation**.

Sponsor: Tongji University

Press: Tongji University Press

Publishing: Open Access, Publishing Services by Elsevier B.V.

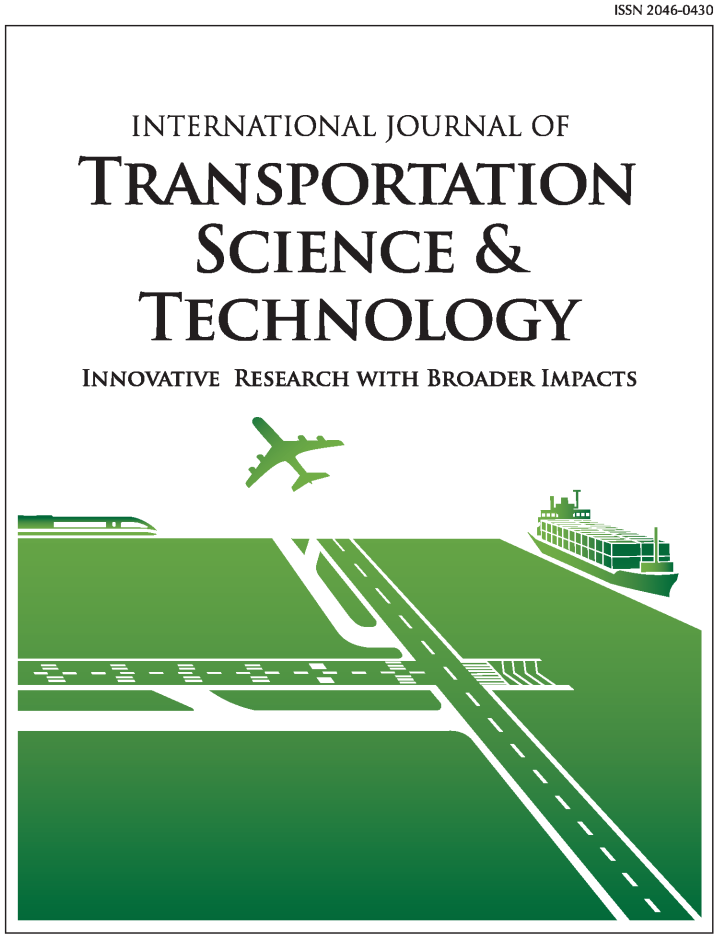
EI, IF: 3.4; SJR: Q1; CiteScore 2022: 6.6

Paper Submission

http://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-transportation-science-and-technology

Pubished Articles

http://www.sciencedirect.com/science/journal/20460430/9



Editors-in-Chief:

Prof. Zhongyin Guo, Prof. Wei (David) Fan, Prof. Ruey Long Cheu,

Copyright © 2021 Tongji University and Tongji University Press.
ISSN 2046-0430 .Publishing Services by Elsevier B.V.

Transportation Research Part D: Transport and Environment

Scope:

- **Environmental impacts** of **transportation, policy** responses to those impacts, and their implications for the design, planning, and management of transportation systems.

SCI, IF: 7.0; CiteScore 2022: 10.5

SI: Call for Papers on Ecological Effects of Road Transportation

(Paper submission deadline: December 31, 2023)

Keywords: Transportation, Highway, Road ecology, Near-road environmental impacts, Eco-friendly solutions

Guest Editors

Hui Li, Prof., Tongji University, China, hli@tongji.edu.cn
John Harvey, Prof., University of California, Davis, US
Gordon Airey, Prof., University of Nottingham, Nottingham, UK
Zhen Leng, Prof., The Hong Kong Polytechnic University, China
Yun Wang, Researcher, China Academy of Transportation Sciences, China

shorturl.at/hirGI

Co-Editors-in-Chief

Jason Xinyu Cao, PhD
Ying-En (Ethan) Ge, PhD

Copyright © 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved
Online ISSN: 1879-2340. Print ISSN: 1361-9209

WORLD TRANSPORT CONVENTION
世界交通运输大会 | 2023
June 14th- 17th, China Optics Valley Convention & Exhibition Center | Wuhan, China
Innovation, Low Carbon, Circulation and Sharing – A More Sustainable Transport

Session: Low-carbonization and Resilience of Transportation

会议时间：2023-06-17 08:30 - 12:25　　会议地点：中国光谷科技会展中心会议厅1-3
主办单位：中国公路学会青专委、同济大学、宁夏公路勘察设计院有限责任公司、上海市创造学会生态道路专委会

在线会议链接
腾讯：425354708

发起人

李　辉
中国公路学会青专委委员
同济大学长聘教授

特邀嘉宾

王大鹏
中国公路学会副秘书长
中国公路学会青专委委员
WTC执委会运行中心主任

孙立军
同济大学长聘教授

李兴华
中国公路学会专家委秘书长
中国公路学会青专委委员
同济大学中国交通研究院院长

时间	嘉宾	内容	主持人
8:30-8:35	王大鹏	论坛开幕式	/
Session 1 “低碳韧性道路”议题研讨			孙立军
8:35-8:55	John Harvey	Recommendations for Use of EPDs in Procurement and for LCA Input	
8:55-9:10	黄宝山	道路交通基础设施韧性建设：国际视角 Resilience Construction of Transportation Infrastructure: International Perspective	
9:10-9:25	黄晓明	道路交通基础设施韧性提升关键技术研究 Research on Key Technologies for Resilience Enhancement of Road Transportation Infrastructure	
9:25-9:40	王旭东	我国绿色公路的发展与展望 Development and Prospects of Green Roads in China	
9:40-9:55	吕松涛	长寿命道路设计理论与方法-践行长寿即最大化的低碳理念 Long-life Road Design Theory and Method - Practicing the Concept that Long-life is the Maximum Low-carbon	
9:55-10:10	王予红	车辆编队技术与道路性能对碳排放影响的综合评价 Comprehensive Evaluation of the Impact of Vehicle Formation Technology and Road Performance on Carbon Emissions	
10:10-10:25	苗英豪	气候变化对道路工程的影响及对策 Climate Change Impacts and Adaptation Strategies for Road Infrastructure	
茶歇（10:25-10:35）			

时间	嘉宾	内容	主持人
Session 2 “低碳韧性交通”议题研讨			李兴华
10:35-10:55	王忠仁	应对环境改变，增加交通韧性的投资规划 An Investment Plan to Mitigate Climate Change and Increase Transportation Resilience	
10:55-11:10	徐洪磊	道路运输低碳发展的实践与方向 Practice and Direction of Low-carbon Development in Road Transport	
11:10-11:25	陈喜群	智慧城市网约共享出行管理 On-Demand Shared Mobility Management for Smart Cities	
11:25-11:40	王芳	风沙环境高速公路运营安全韧性提高路径研究 The Improvement Path of Expressway Operation Safety Resilience In Sand Environment	
11:40-11:55	廖霖	低碳耐久型公路护栏的开发与应用研究 Research on the Development and Application of Low-carbon and Durable Highway Barriers	
11:55-12:10	邢丽娜	太钢高强韧经济型不锈钢公路护栏整体解决方案 Overall Solution for High Strength and Toughness Economic Stainless Steel Highway Guardrail of TISCO	
12:10-12:25	李辉	交通低碳化与韧性化：研究与实践 Decarbonization and Resilience of Transportation: Research and Practice	

联系方式: hli@tongji.edu.cn

交通低碳化与韧性化: 研究与实践

感谢倾听
欢迎交流

李 辉

同济大学 长聘教授

hli@tongji.edu.cn

15102158555