

我国绿色公路发展与展望

交通运输部公路科学研究所 王旭东

2023年05月

0 引言

绿色公路是绿色交通中的重要组成部分，旨在按照系统论和周期成本思想，来**统筹**公路的建设质量、能源耗用、生态影响、资源利用、污染排放和运行效率之间的关系，**统筹**公路规划、设计、建设等全过程，以占用**最小**的资源、消耗**最少**的能源、**最低**的污染排放以及**最轻**的环境影响，来获得**最优**的工程质量和相应高效的运输服务，实现外部刚性约束与公路内在供给之间**最大限度**的平衡。

质量 + 经济 + 能耗 + 生态

1

不同历史阶段对绿色公路的需求

- 1949年末，全国能勉强的通车的公路里程仅有8.07万km，没有一、二级公路，绝大部分是砂石路面，高级、次高级路面仅有300km。
- 1953年，交通部公路总局材料试验室开展石灰、水泥稳定土研究，后定为国家重点研究课题“缺乏砂石地区修筑晴雨通车路面研究”。
- 1961年9月，交通科学研究所与河北交通厅在天津至唐山巩固芦台段首次试铺渣油表处路面。1963年2月，国务院批转交通部《关于在现有路面上加铺沥青磨耗层的请示报告》。1964年，交通部组织鉴定，号召大力推广。



不同历史阶段对绿色公路的需求

“六五”到“八五”

我国典型的半刚性基层
试验路



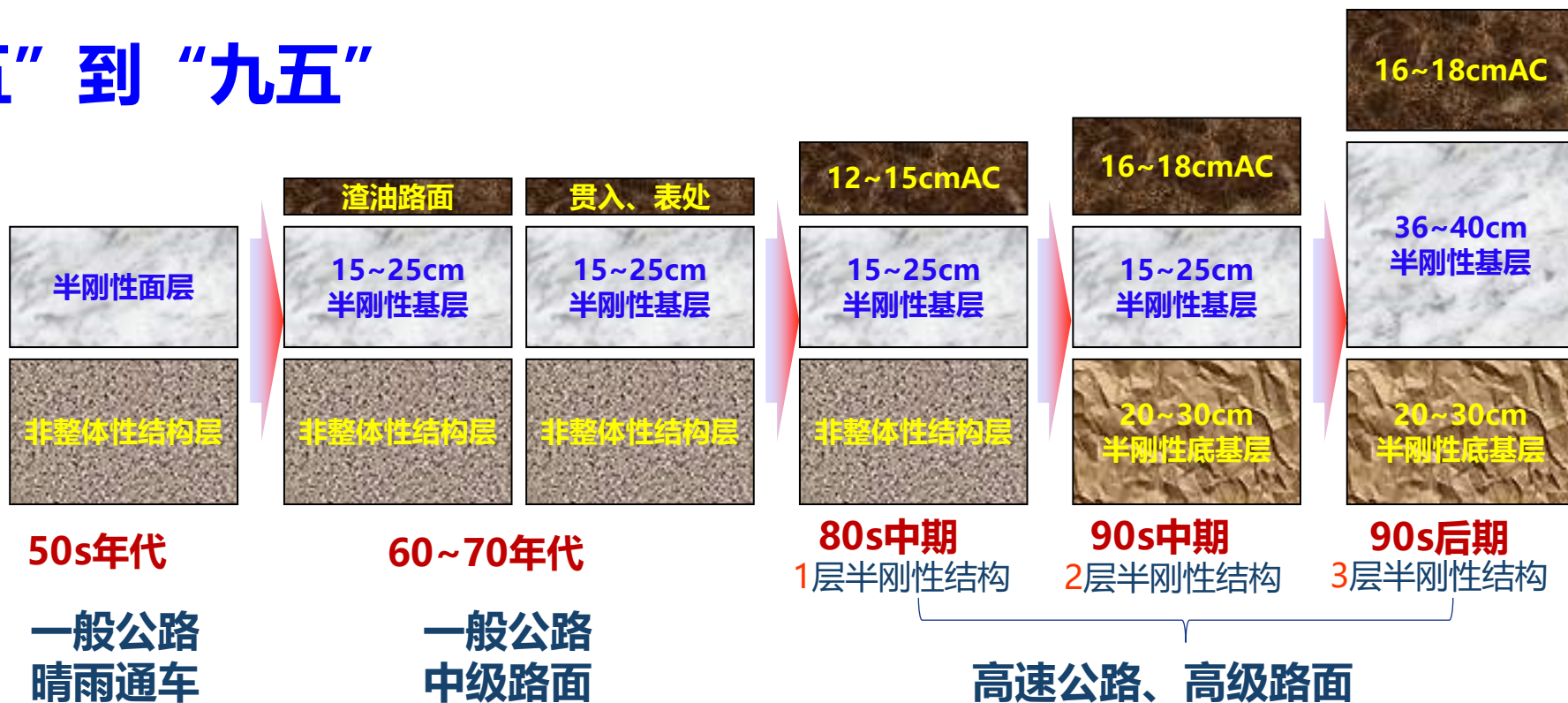
选择“强基、薄面、稳土基”的半刚性基层结构，作为我国路面工程的典型结构，是绿色公路的选择。

- 1) 承载能力高，使用寿命长；
- 2) 就地取材，经济节约；
- 3) 能源消耗少，碳排放低；
- 4) 具有广泛的路基适用性，解决结构性的早期损坏问题。

1985年，“提高路面质量若干主要技术问题的研究”的研究报告，推广应用半刚性基层和底基层。

不同历史阶段对绿色公路的需求

“六五”到“九五”



结合我国实际情况，发展了具有中国特色的半刚性基层路面结构的建造体系，
 在世界上独树一帜。

1

不同历史阶段对**绿色**公路的需求

欧洲5代道路的划分

——FEHRL 2009

第一代

通道，土路、碎石路、
手摆块石等

第二代

有铺装的路面
——防尘土

第三代

平整、舒适的路面
——沥青路面、水泥路面

第四代

汽车专用或高速公路



世界第一条高速公路

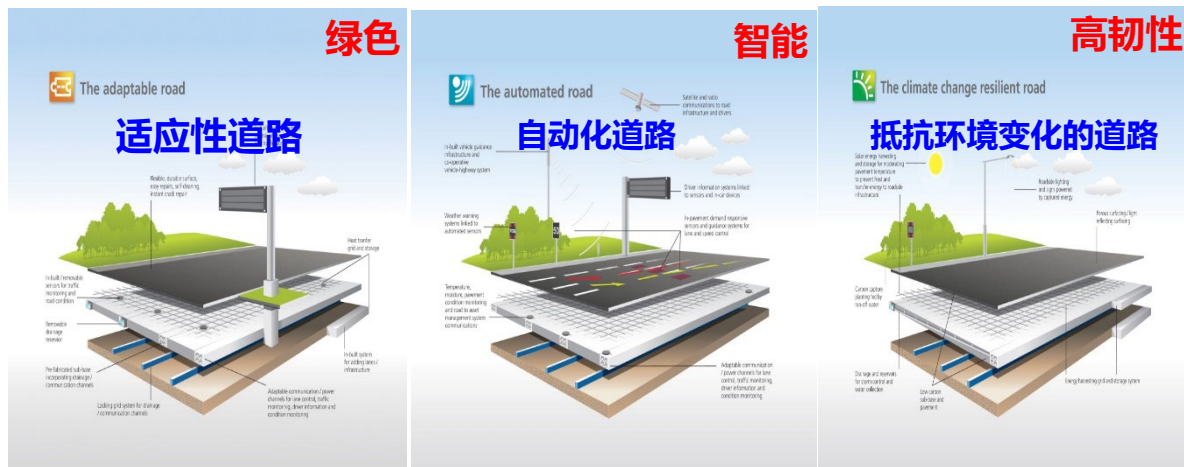
——1932年，德国（科隆~波恩）



不同历史阶段对**绿色**公路的需求

第五代

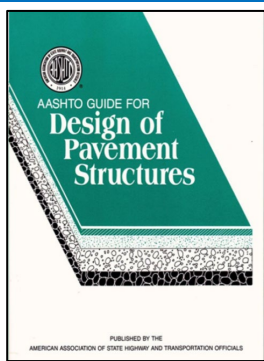
绿色、智能、高韧性



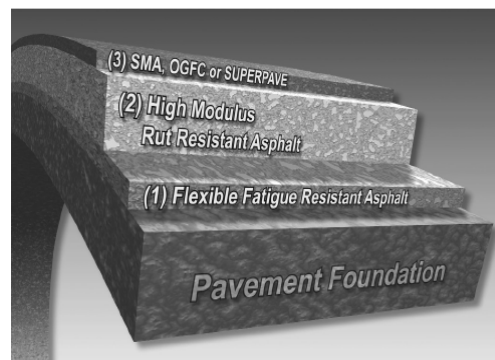
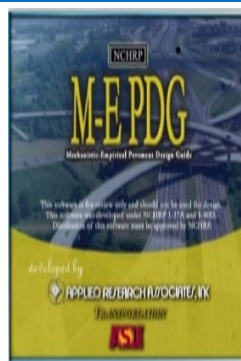
□ 当前处于从第四代向第五代道路发展的**过渡阶段**，而建设长寿命路面是实现第五代道路的基础。



欧洲制定长寿命指南



美国制定50+寿命设计指南



欧洲、美国提出的全厚式长寿命沥青路面典型结构

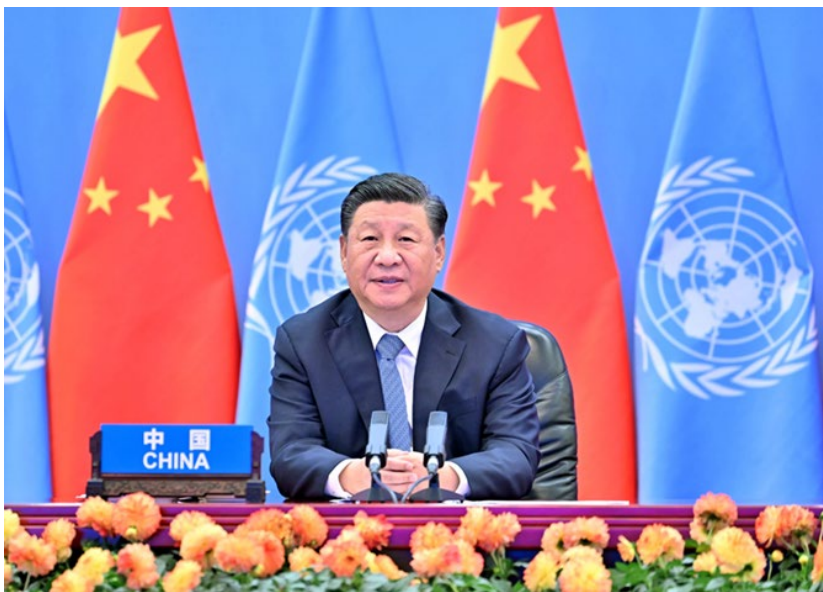


美国50年路面发展路线图

1

不同历史阶段对**绿色**公路的需求

- 2021年10月，习总书记在第二届联合国全球可持续交通大会上指出：“要加快形成**绿色低碳**交通运输方式，加强**绿色**基础设施建设，让交通更加环保，出行更加低碳。”



本质安全性、质量效益转
型、高质量发展

至2035年的《国家公路网规划》，国家高速公路总里程为16.2万公里。提质增效是紧迫问题。



2 绿色路面工程的两层含义

□ 概念的澄清。宏观上：低碳=长寿命=绿色

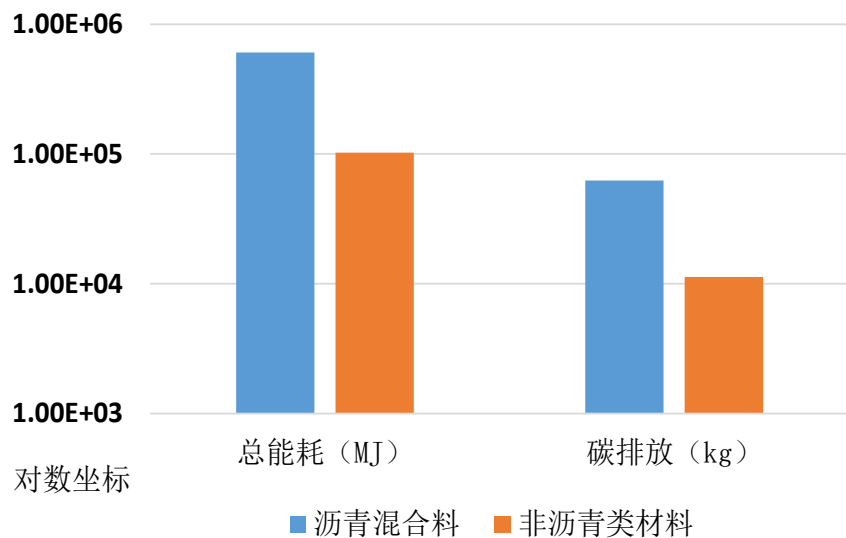
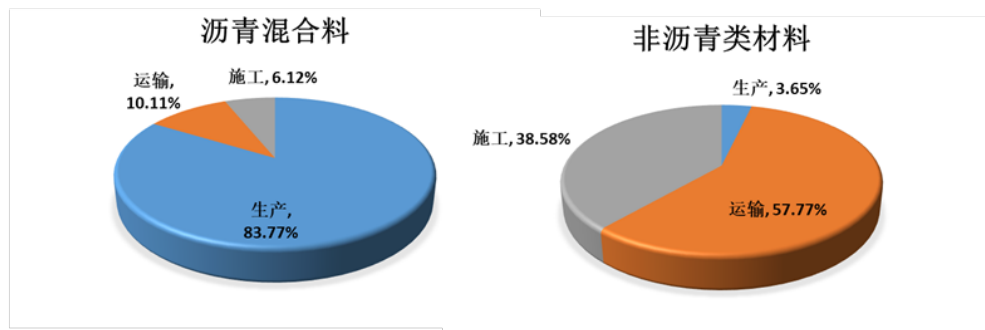
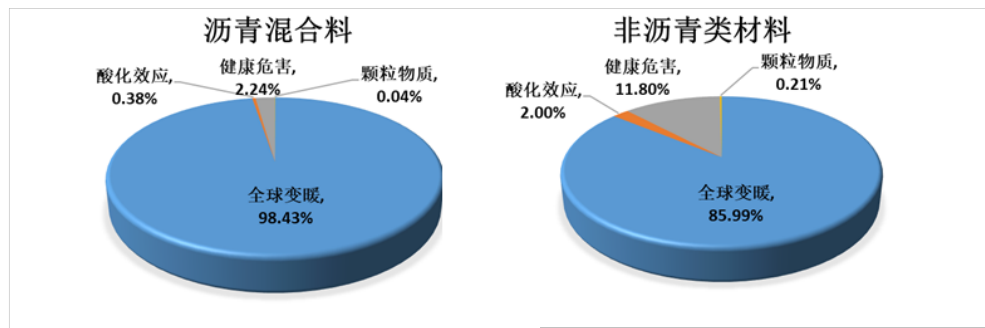


图1：单位体积沥青混合料及非沥青类材料的能耗与碳排放比较

沥青混合料及非沥青类材料的能耗比例对比图



沥青混合料及非沥青类材料的碳排放四类指标比例图



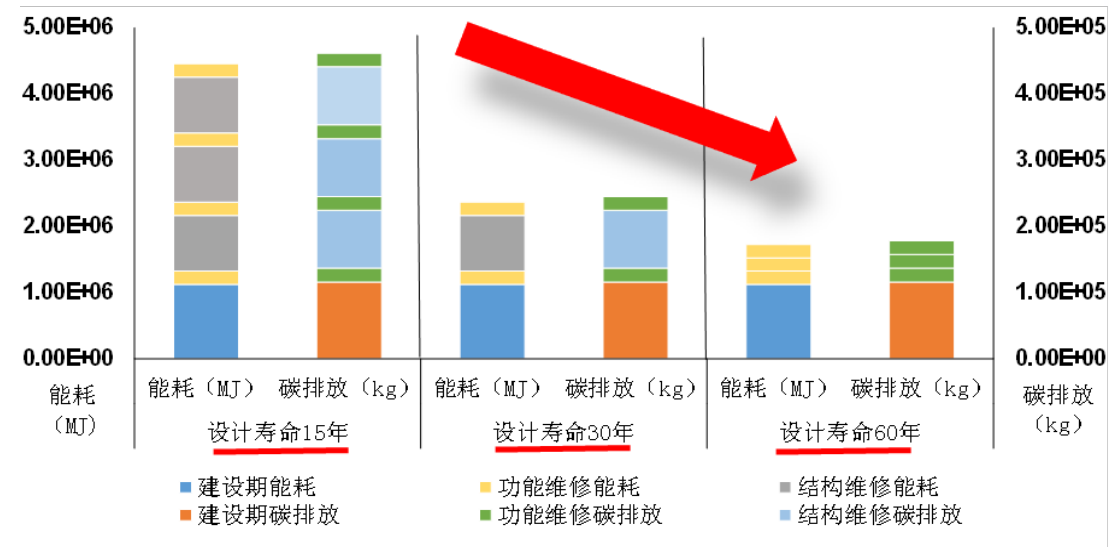
2 绿色路面工程的两层含义

□ 关于小绿色与大绿色

使用“绿色、环保的材料和工艺”修筑路面工程，如：各种形式的冷/热再生、温拌/冷拌沥青混合料、橡胶沥青及其混合料、超薄沥青混凝土罩面——狭义、**小绿色**。



修筑长寿命的路面工程，或者通过大修、改建，将既有工程改建成长寿命路面。以延长使用寿命，减少养护维修次数，降低全寿命周期内的资源消耗和碳排放——广义、**大绿色**。



不同设计寿命标准，60年使用周期的能耗和碳排放比较

3 我国绿色、长寿命路面工程发展

我国有希望、有能力建设长寿命的路面工程。

国内外沥青路面设计寿命的对比

国家	美国 AASHTO1993	美国 MEPDG	法国	日本	英国	德国	南非	中国
设计基准期	50	99	30	40	30	30	25	15
标准轴载 (kN)	80	80	130	100	80	100	80	100

- **优势：**我国早期修建的高速公路不少已超过当初**15年**的设计寿命，达到**20多年**，说明我国现有的路面结构**有希望**实现长寿命的目标。同时，近40年公路建设大发展积累下的丰富的实践经验；经济发展，带来的具有世界先进水平的科研能力和人才资源。
- **不足：**缺乏系统、长期工程验证和观测的**数据**，缺乏自主完善的设计理论和方法，相关设计模型、技术指标大多来自与国外，缺乏本国的有效验证。



3 我国绿色、长寿命路面工程发展

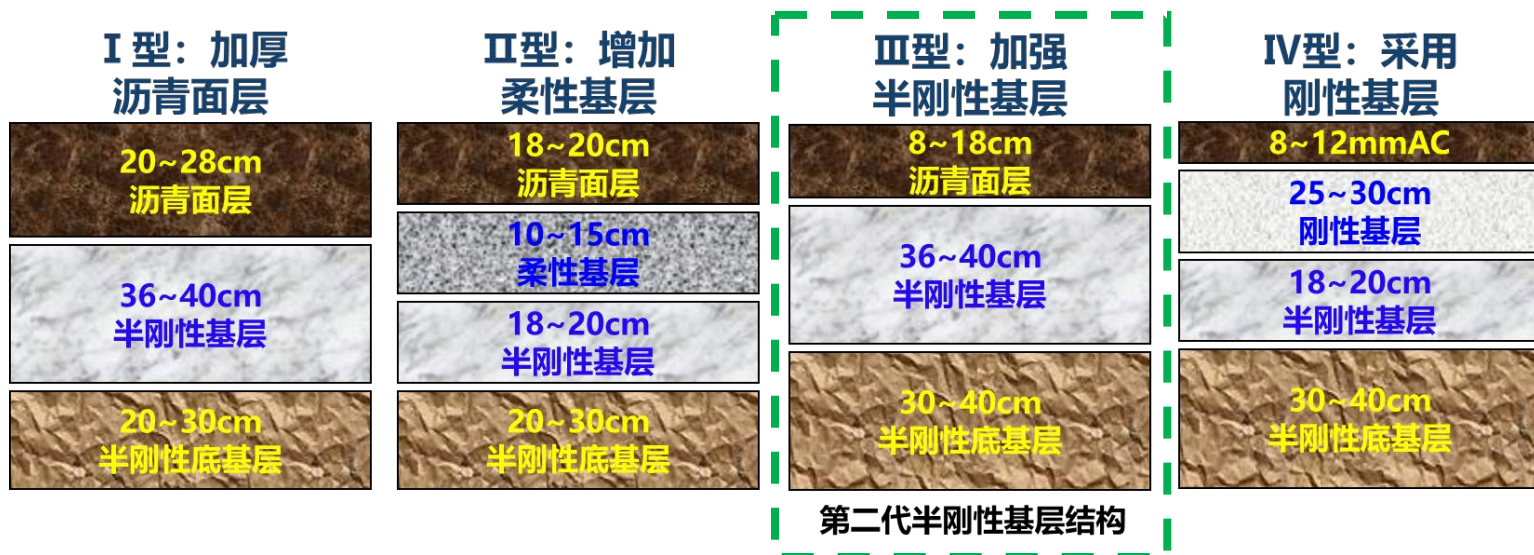
本世纪二十年

□ 本世纪初，我国公路建设面临着早期损坏的问题，同时，建设耐久、长寿命的路面工程，已逐渐成为世界路面工程技术发展的方向。如何建造适用于我国国情的长寿命路面已成为我国路面工程领域广泛关注的热点。



交通部公路科学研究所、同济大学、河南省设计院、山东交科院等单位修建了**多种结构形式**的长寿命沥青路面试验路。

多种长寿命路面结构的选择



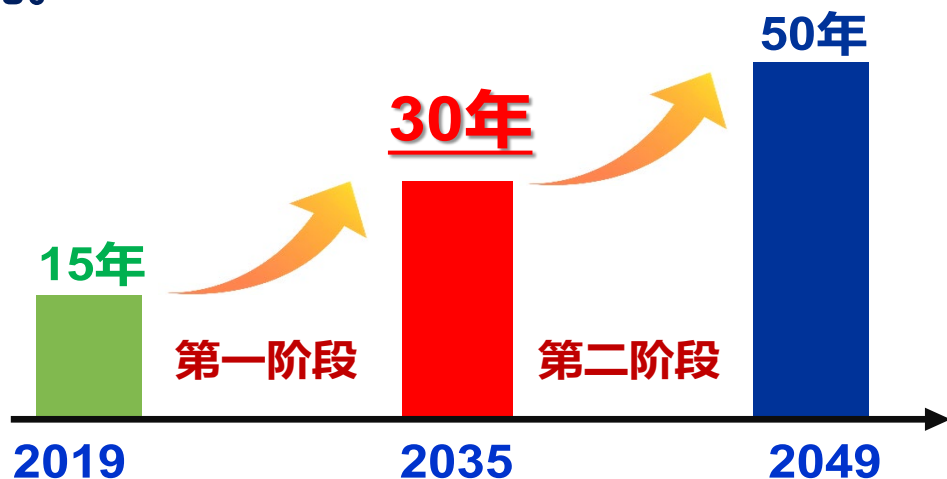
反映出对沥青路面长期服役行为认知的差异。

哪一类结构更符合我国国情？哪一个更绿色？

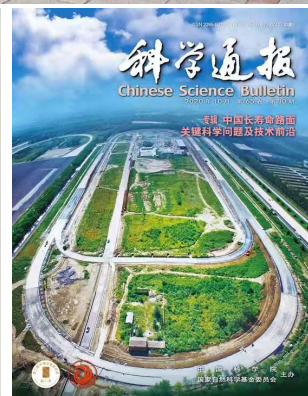
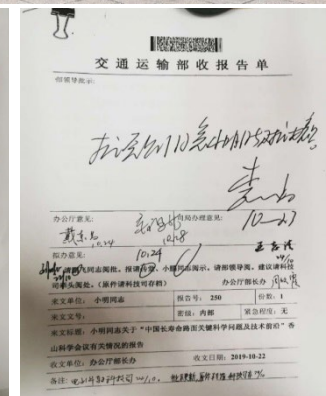
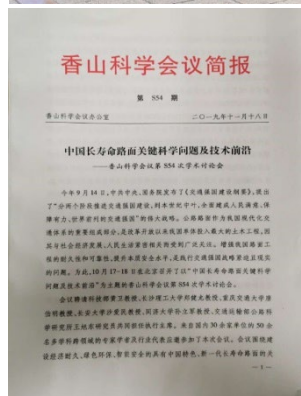
- 2005年交通部正式立项，由沙庆林院士领衔开展“重载交通长寿命半刚性路面关键技术的研究”。
- 2009年，交通运输部立项“重载交通沥青路面设计施工关键技术研究及示范应用”。
- 2011年，交通运输部立项编制“公路长寿命沥青路面技术规程”。

3 我国绿色、长寿命路面工程发展

□ 2019年，召开香山科学会议，业内达成研发“中国长寿命路面技术”的共识，开展应用基础研究，建立长期性能观测网，并分两阶段实施。——有望提前实现。



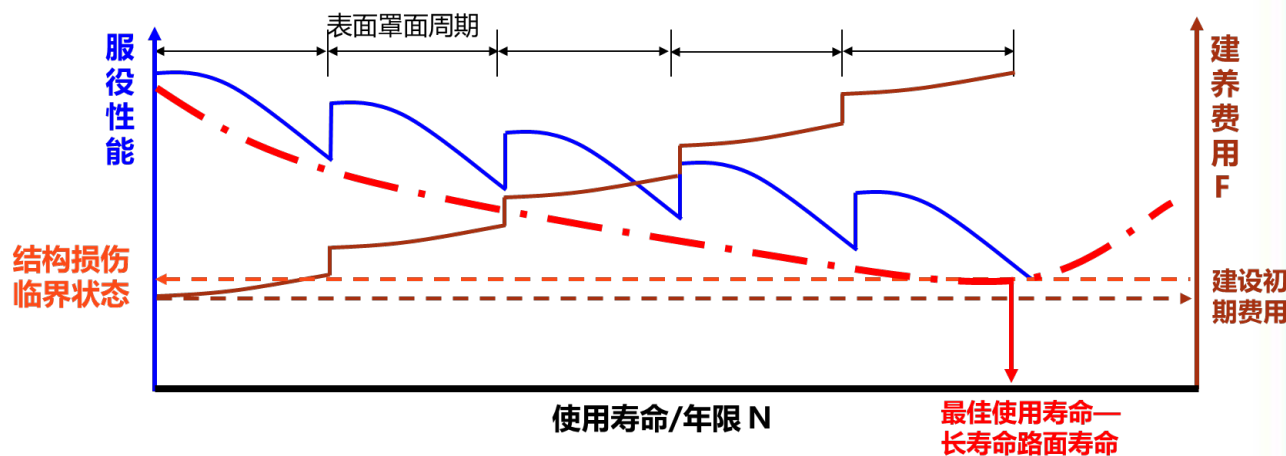
香山科学会议第S54次学术讨论会
中国长寿命路面关键科学问题及技术前沿



3 我国绿色、长寿命路面工程发展

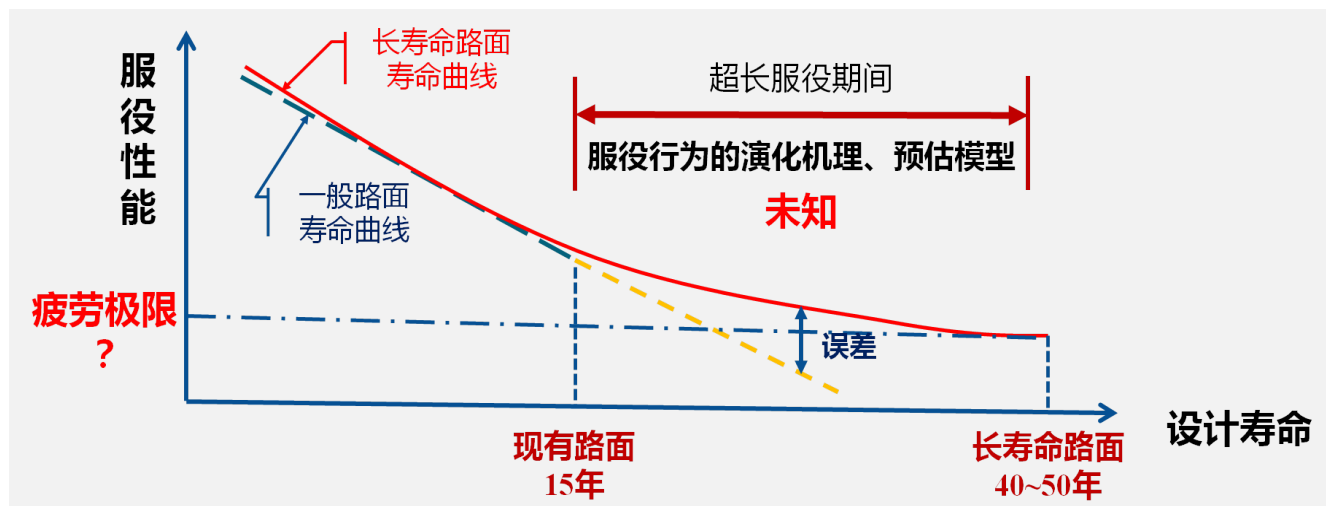
□ 长寿命路面是**全寿命周期内技术经济最优化**的路面。不仅仅是定性的“理念”，更是定量的技术标准和体系；是实现设计—施工一体化的路面建造技术；是建—养一体化技术；是建设绿色、智慧交通的具体体现和基础平台。

□ 研发长寿命路面建设和养护技术，将是我国路面工程设计与建造技术的革命；也是我国路面工程从跟跑、并跑、集成创新，到实现领跑、原始创新的**契机**。



3 我国绿色、长寿命路面工程发展

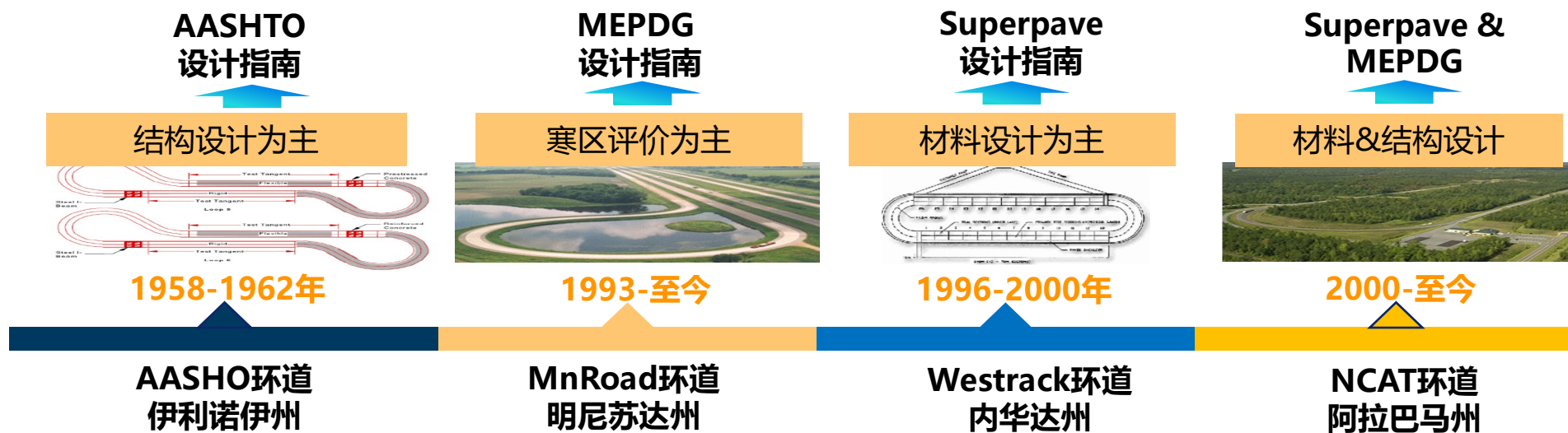
- 研发长寿命路面设计与建造技术的**难点**在于：如何获取超长服役周期内，路面服役性能的演化规律，建立相应的设计体系、模型和指标，并**验证**之。



- 两个主要手段：
 - 1) 足尺路面环道的加速加载试验；
 - 2) 长期性能野外科学观测。

4 足尺路面环道与长期性能观测网

- 正常的路面工程的服役周期较长，对于长寿命路面，至少50年，由此产生在自然环境条件下开展加速加载试验的研究手段——足尺环道加速加载试验。
- 以空间换时间，模拟真实使用状态下的服役性能的演化规律，获取**等荷载周期**的试验数据。是目前最有效的研究手段，也是国际上通用的方法。



4 足尺路面环道与长期性能观测网



在沙庆林院士的倡议下，我院2014年修建了我国第一条，也是世界上第一条**以长寿命路面全寿命周期服役性能验证为目标**的足尺路面试验环道，是国际上**结构形式最完整**的试验环道。



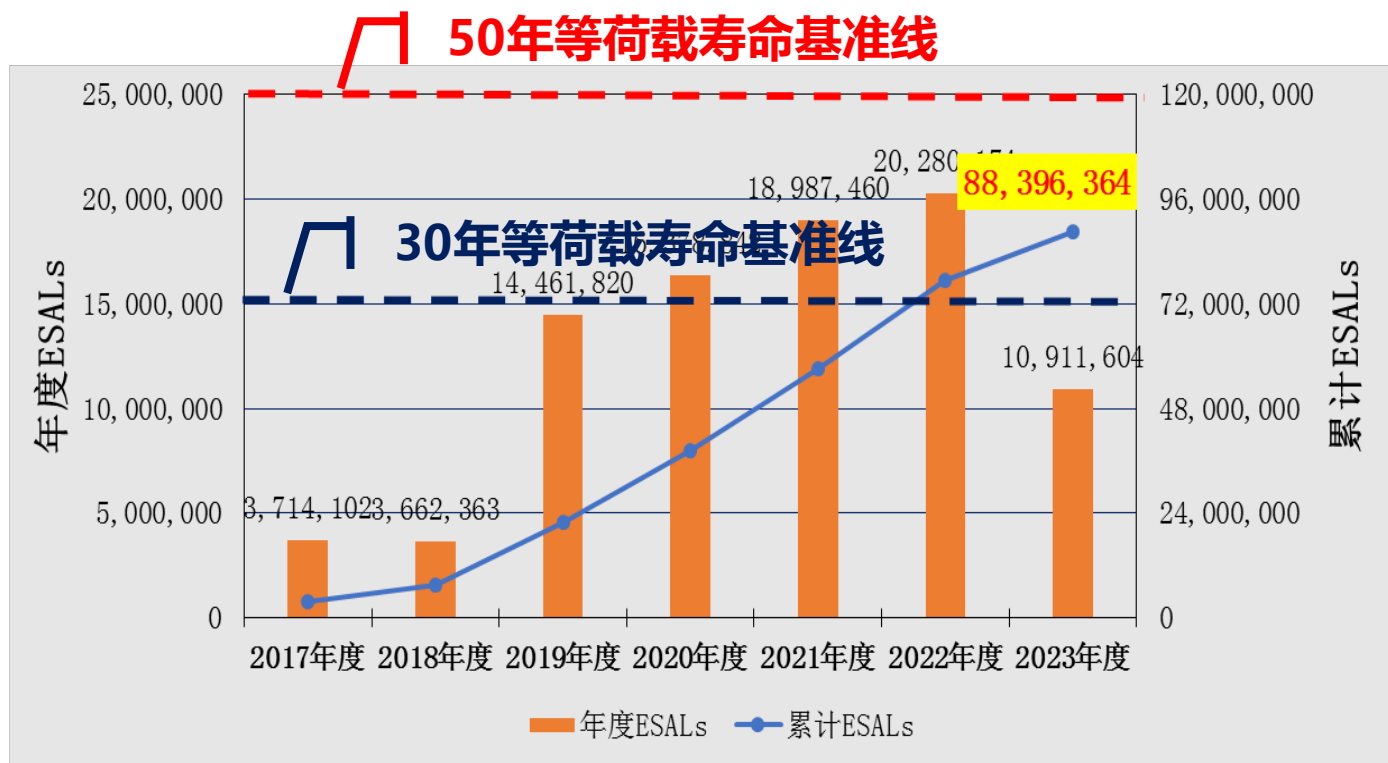
I类: 12cmAC 半刚性基层结构			II类: 12cmAC 复合式基层结构		III类: 16-18cmAC 半刚性基层结构			IV类: 24-28cmAC 倒装式基层结构		V类: 24-28cmAC 厚沥青混凝土结构			VI类: 36cmAC 厚沥青混凝土结构			VII类: 48-52cmAC 全厚式结构		
STR1	STR2	STR3	STR4	STR5	STR6	STR7	STR8	STR9	STR10	STR11	STR12	STR13	STR14	STR15	STR16	STR17	STR18	STR19
12cmAC	12cmAC	12cmAC	12cmAC	12cmAC	16cmAC	18cmAC	18cmAC	18cmAC	28cmAC	28cmAC	24cmAC	24cmAC	24cmAC	36cmAC	36cmAC	36cmAC	52cmAC	48cmAC
20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	24cm LCC	24cm CC	20cm CBG-A	18cm CBG-A	18cm CBG-B	18cm CBG-B	20cm GB	20cm CBG-A	20cm GB	20cm CBG-A	20cm CBG-B	20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	52cmAC	48cmAC
20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	18cm CBG-A	18cm CBG-B	18cm CBG-B	20cm CBG-B	20cm CBG-A	20cm CBG-B	20cm CBG-A	20cm CBG-B	20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG	20cm CBG
20cm CS	20cm CS	20cm GB	20cm CS	20cm CS	20cm CS	20cm CS	20cm CS	20cm CS	20cm CBG-B	20cm CBG-A	20cm CBG-B	20cm CBG-A	20cm CBG-B	20cm CBG-A	20cm CBG-A	20cm CBG-A	48cm GB	20cm CBG
20cm CS									20cm CS	20cm CS	20cm CS	20cm CS	20cm CS	44cm GB	20cm CS	20cm CS	48cm GB	

土基

4

足尺路面环道与长期性能观测网

经过6年半的加载，该环道已完成8000万次ESALs的加载试验，系统积累19种沥青路面长期服役性能的演化数据；实现**30年**等荷载周期的加载试验的阶段目标。在“十四五”期间将完成**50年**的加载任务。



4 足尺路面环道与长期性能观测网

基于“结构设计功能化、材料设计均衡化、施工工艺均一化和质量控制过程化”的“四化”建造技术体系，可以将我国高速公路沥青路面的设计寿命从15年提升至30年。——实体工程经验的积累+环道8000万次验证。



足尺路面环道与长期性能观测网

传统单向疲劳损伤

本项目提出的双向疲劳损伤

自上而下压剪疲劳 / 自下而上弯拉疲劳

沥青路面的双向疲劳损伤模式

裂缝与车辙的对偶性

递进的寿命累计过程

AC	AC	AC	AC
Base2	Base2	Base2	Base2
Base1	Base1	Base1	Base1
Sub-base2	Sub-base2	Sub-base2	Sub-base2
Sub-base1	Sub-base1	Sub-base1	Sub-base1
路基	路基	路基	路基

$N_{总} = N_{sub-base1} + N_{sub-base2} + N_{base1} + N_{base2} \approx (1.7 \sim 2.1) N_{sub-base1}$

疲劳模型

我国规范 $N_{f1} = 6.32 \times 10^{15.96-0.29\beta} k_a k_b k_{T1}^{-1} \left(\frac{1}{\epsilon_a}\right)^{3.97} \left(\frac{1}{E_a}\right)^{1.58} (VFA)^{2.72}$

MEPDG $N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}}$

法国 $\epsilon_{t,ad} = \epsilon$

车辙/永久变形模型

我国规范 $R_{ai} = 2.31 \times 10^{-8} k_{Ri} T_{pef}^{2.93} p_i^{1.80} N_{es}^{0.48} (h_i / h_0) R_{0i}$

MEPDG $\Delta p_{(AC)} = \epsilon_{p(AC)} h_{AC} = \beta_{1r} k_z \epsilon_{r(AC)} 10^{k_r} N^{k_3 \beta_3 r} T^{k_2 \beta_2 r}$

沥青路面抗力模型的三维度统一范式

抗力模型新范式

$$\xi = \sum_i \sum_j (\Phi \cdot \Psi \cdot \Theta)$$

实现抗力模型表达的标准化和科学化

- Φ —— 内因：结构与材料因素
- Ψ —— 外因：荷载与环境因素
- Θ —— 力学响应指标
- $\sum_i \sum_j ()$ —— 空间与时间尺度的累计

正演分析

传统模量取值方法

反演分析

基于材料模量响应行为的新方法

实测校验

沥青路面非线性正、反力学分析算法

$D_3/D_0 = A - B \cdot \ln(E_1/E_3 + C)$

理论弯沉盆 / 实际弯沉盆

三个经验模型 / 多目标拟合

输出反算模量

与传统的线弹性力学方法相比，显著提高可靠性。

$\epsilon_{x-反} = A \cdot \epsilon_{x-实}^B$

传统模型

基本模型 $Q(N,T) = F(N) \cdot T$

本项目耦合模型

基本模型 $Q(N,T) = F(N) \cdot T + P(T)$

荷载—环境耦合的服役性能演化模型

与传统单一荷载演化模型相比，拟合精度和预测精度显著提高，幅度达40-50%。

神经网络

多元统计

$$RD = a \cdot \lg N + b \cdot \sin(c \cdot T) + d$$

$$RD = a \cdot (\lg N)^2 + c \cdot \sin(d \cdot T) + e$$

$$RD = a \cdot \lg N + b \cdot \sin(c \cdot T) + d \cdot \lg N \cdot \sin(c \cdot T) + e$$

$$RD = a \cdot (\lg N)^2 + c \cdot \sin(d \cdot T) + e \cdot \lg N \cdot \sin(d \cdot T) + f$$

4 足尺路面环道与长期性能观测网

- 长期性能的野外科学观测与足尺环道研究是“**点与面**”的关系，是**从特殊到一般、麻雀与大象**的关系。
- 相较于足尺环道研究，长期性能的野外科学观测，在地域环境和条件方面覆盖面更广，便于掌握真实荷载状态下，不同气候和地质条件下路面使用性能的差异性，完善设计模型和指标的区域适用性。
- 客观来说，受野外观测条件的局限性，野外观测的指标、手段、频率不如足尺路面试验环道观测的完善、可靠。因此，两种途径各有特点，相辅相成。

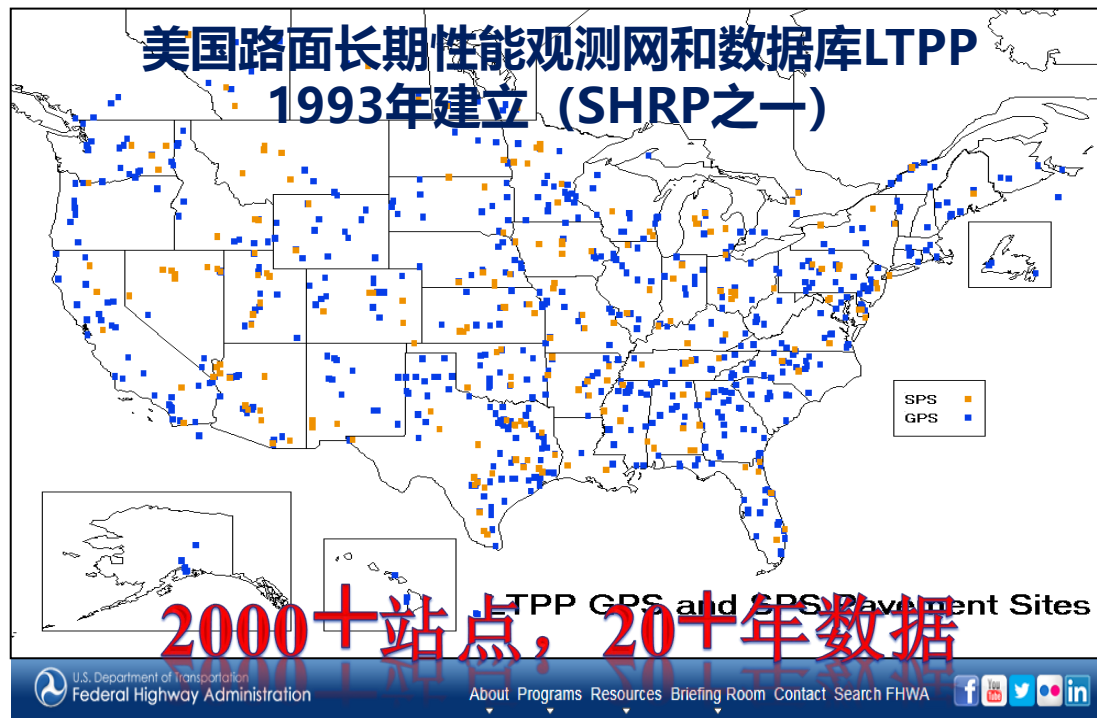


4 足尺路面环道与长期性能观测网

□ 长期性能观测首先是观测，然后才是研究，是一项科研**工作**，急不得，在这方面落后国外近**30**年。

经验：

- 1) 国家层面的统一规划；
- 2) 建立有效的运行和观测机制；
- 3) 路产路权单位的资金支持。



LTPP
InfoPave™

Data Bucket (0) | Customer Support | Help

Search Go

HOME DATA VISUALIZATION ANALYSIS TOOLS LIBRARY OPERATIONS NON-LTPP

About LTPP

The Federal Highway Administration (FHWA) Long-

Select and Download Data

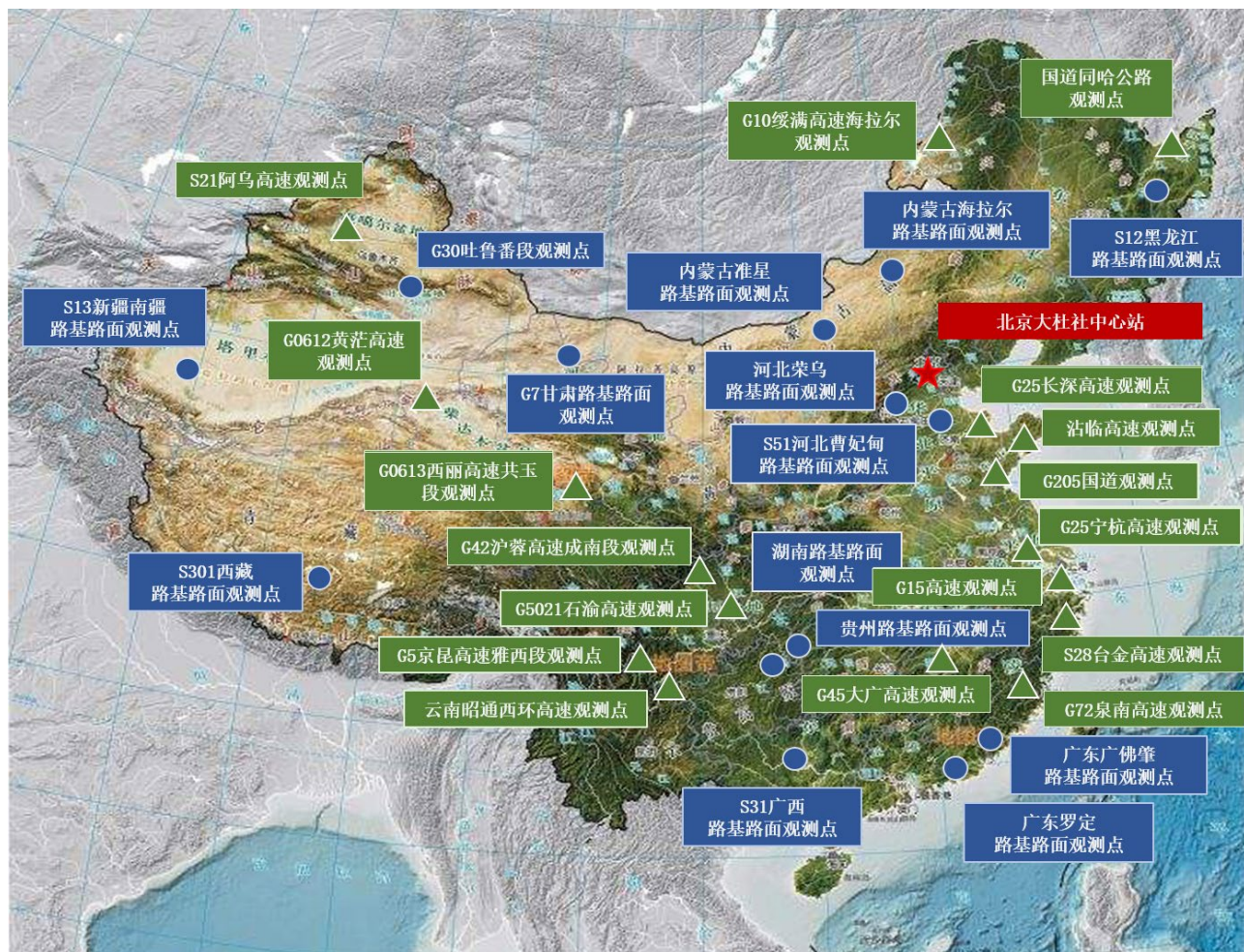
The *Select and Download Data* feature contains data

Map LTPP Sections

The *Map* feature displays LTPP pavement test sections

4

足尺路面环道与长期性能观测网



中华人民共和国交通运输部办公厅

交办科技函〔2021〕2127号

交通运输部办公厅关于 组织开展公路路基路面长期性能 科学观测网建设试点的通知

各省、自治区、直辖市、新疆生产建设兵团交通运输厅(局、委), 中央管理的交通运输企业:

为贯彻落实《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》, 推动构建符合实际、具有中国特色的交通基础设施设计建造养护理论体系, 服务交通运输高质量发展, 根据“十四五”交通运输相关规划部署, 交通运输部决定启动交通基础设施长期性能科学观测网建设。现就组织开展公路路基路面长期性能科学观测网(以下简称观测网)建设试点有关事项通知如下:

一、工作目标

针对我国公路建设、运营特点, 聚焦公路路基路面长期性能科学观测与研究, 充分利用现有工作基础、数据资源和观测点及数据中心软硬件条件, 分批次遴选符合观测网建设要求的观测点资源, 根据任务书明确的任务与责任, 按照统一标准开展条件建设与升级、数据采集与汇总、科学分析与研究, 为最终建成点面结合、多级

中华人民共和国交通运输部

科技发展函〔2022〕182号

交通运输部科技司关于进一步做好 公路路基路面长期性能科学观测网建设 2022年度试点观测点遴选工作的通知

各推荐单位, 交通运输部公路科学研究院:

根据《交通运输部办公厅关于组织开展公路路基路面长期性能科学观测网建设试点的通知》(交办科技〔2021〕2127号, 以下简称《通知》) 要求, 和部2022年推进公路路基路面长期性能科学观测网(以下简称观测网) 建设试点工作安排, 经前期广泛征集和专家评审, 19个试点观测点(名单见附件) 已通过初审。为进一步做好今年试点观测点遴选工作, 现将有关事项通知如下:

一、我司将在充分考虑观测网建设试点需要和各地各单位前期开展相关工作基础上, 综合初审结果及下阶段现场评估、任务书论证评审等情况, 研究确定今年试点观测点名单。

二、交通运输部公路科学研究院(简称部公路院) 须严格按照《通知》要求, 组织开展试点观测点的现场评估、任务书论证等工作, 并于2022年7月15日前将符合《通知》

第一阶段布局: 30个野外观测点 (13+19), 观测数据汇交于足尺环道数据中心。

- 1) 建设绿色、长寿命的路面工程是未来发展的趋势。
- 2) 足尺试验环道以证明，将我国高速公路沥青路面的设计寿命从15年，提升至30年是可行的，以“四化”为核心的路面建造技术是可以实现我国长寿命路面的第一阶段目标。
- 3) 设计理论和方法的完善以及第二阶段的验证，将是今后长寿命路面研发的主要任务，建立长期性能野外科学观测网将是重要的支撑。