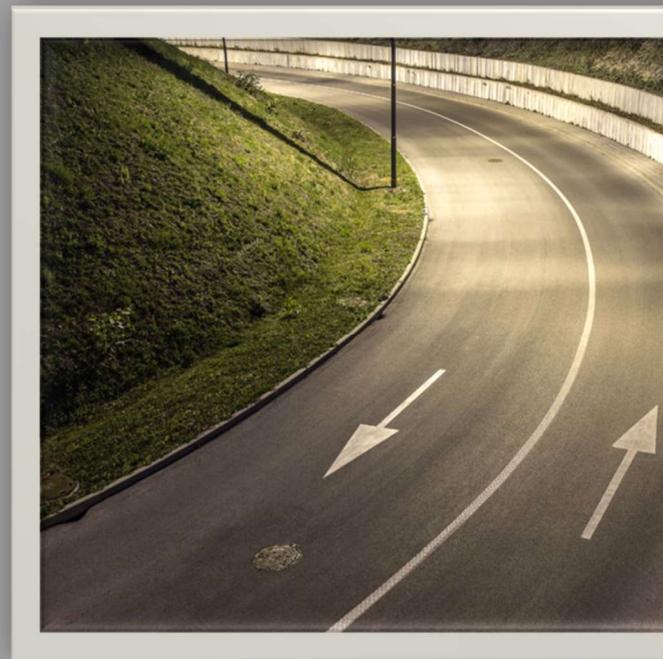


Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document

低影响开发可持续道路系统： 设计、建设与管理



美国联邦公路局可持续路面技术工作组 /编著
同济大学 李辉 等/译

FHWA Sustainable Pavements Technical Working Group (SPTWG)

Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document

低影响开发可持续道路系统：设计、建设与管理

美国联邦公路局可持续路面技术工作组编著

同济大学 李辉 等译

苏交科集团股份有限公司 朱浩然 等译

摘要

通过搜集和综合多渠道的与可持续性相关的大量技术信息，本资料可为建设可持续性路面系统提供参考。本资料讨论了路面寿命周期中各阶段的可持续性问题，涵盖了道路材料的开采/加工、设计、建设、使用、养护/翻修和报废的各个阶段，特别强调了关注具体工程背景和多角度权衡在选择可持续性方案中的重要性。本资料的 11 个章节要点总结如下：

第 1 章 简介

本章总体介绍可持续性发展的理念及其在路面工程中的重要性。此外，本章还描述了本资料的主要讨论范围和目标读者。

- **什么是可持续性？** 大部分关于可持续性的定义起源于 1987 年世界环境与发展委员会（WCED，通常被称为布伦特兰委员会）的描述：“可持续发展是既满足当代人的需求又不损害子孙后代满足他们自己需求的发展模式。”此外，可持续性还常被作为一个综合指标，用来评价一个项目对经济，环境和社会影响三要素的考虑是否平衡；这三大要素常被称为“三道底线”，对可持续性的重视，某种程度上也就是对三大要素重要性的认可。然而，这些要素的相对重要性直接取决于具体工程背景，比如工程项目具体目标、要求、特点、位置、材料、约束以及业主的总体目标。

- **系统框架下讨论可持续性。** 在此框架下，可持续路面系统的建设关键就是权衡考虑多方面的要求。在某些情况下，孤立的采用某个具体可持续的方案，可能并不能达到预期目标（甚至可能适得其反）。比如，如果一种回收材料需要从较远距离运输到施工现场，它的经济和环境成本超过使用回收材料带来的收益时，这样的方案就不会提高项目的可持续性。只有持续贯彻此类的多角度权衡，才能最终使路面行业走向更可持续性。

- **资料的内容范围。** 本资料主要涉及半永久铺面的道路的路面结构&路面材料的可持续性问题。

- **目标读者。** 本资料主要面向来自美国各州交通厅内部工作人员以及交通厅项目的外部承包人员。具体包括负责美国公路网设计、建设、保存和

养护、材料、施工工程师、监理，设计和规划人员等。

第 2 章 路面可持续性的概念

本章介绍了与路面可持续性相关的一些概念。包括可持续性定义、路面生命周期的分期、可持续性涉及的方面和它们之间的权衡，以及可持续性的量化方法。

- **可持续路面的定义。**“可持续”在路面行业中包括路面的以下几种能力：(1)实现其建设的工程目标，(2)保护和恢复(理想情况下)周围生态系统，(3)经济地使用金融、人力和环境资源，(4)满足人类基本的需要，如健康、安全、平等、就业、舒适和幸福。

- **可持续性是一个目标。**因为在近期修建真正意义上的可持续路面的难度，追求可持续性更应该被视为不断发展并向最终目标持续改进的一个过程。因此，本资料强调“可持续性最佳实践”，这些实践包括可以将路面可持续性向前推动的操作程序、具体行动和方法。

- **可持续性需关注具体工程背景。**对于特定的路面系统，为了确定最佳的可持续性实践方法，需要对其所在工程背景以及路面系统对这些背景的具体影响作一个全面的考虑。同时，最终采取的操作也必须适应业主对项目的总体目标。

- **路面的可持续性中的大量的问题。**路面可持续性涉及大量问题，其中包括诸如温室气体排放，能源消耗，对栖息地的影响，水质变化，水文循环，空气质量，交通工具移动能力，交通便利性，货运，社区，不可再生资源枯竭和经济发展等问题。同样，这些问题应该在特定项目的范围和业主的总体目标范围内综合考虑。

- **不停发展中的可持续性的测量方法。**只有能“测量”可持续性，才能建立基准和评估进步。当前主要有四种测量工具或方法可以用来量化可持续性。它们包括性能评估，全寿命周期成本分析(LCCA)，生命周期评价(LCA)和可持续性的评级体系。这些方法可以单独或者结合在一起进行可持续性的评估。各方法通常局限于评估可持续性的一个特定部分或对于评估所有部分提供的细节较少，因此协同使用多种工具很多时候可以为对可持续提供一个更全面的评估。在建立路面 LCA 的框架和边界方面还有大量的工作有待完

成；除现有的评级体系有少量涉及以外，衡量路面系统产生的不同社会影响的指标目前还不存在。

- **多角度权衡的重要性。**多角度权衡的本质是进行一个更全面意义上的效益/成本分析（即考虑的不仅仅是经济）。即使收益和成本难以量化，在多角度权衡过程中采用一致的方法可以避免产生无意的偏差，这一点是很重要的。一般情况下，这些需要考虑的角度应该包括相关部门或项目的各事项的优先度，各方价值，潜在方案可能产生的成本，影响的大小、影响的时长和风险。

第3章 材料方面提高路面的可持续性

本章综述了一些在路面施工中经常使用的材料，包括集料，沥青和胶凝材料(cementitious material)，并阐述了这些材料的生产和使用会对路面系统总体可持续性产生的影响。讨论的阶段包括从材料的生产加工到运达现场施工场地，不管是已经堆放在现场还是出厂前都在评价的范围中。此外，本章还讨论了路面使用的钢材、加筋纤维、混凝土联锁块(interlocking concrete paver)、土壤改性剂和稳定剂、土工合成材料等其他材料对可持续性的影响。

- **考虑材料生命周期内各阶段影响的重要性。**我们需要考虑从材料开采到加工，建设，使用以及最终寿命终止各阶段的影响，本部分将讨论材料选择决策过程中所涉及的一些问题，如回收材料的使用、工业副产品、废料(RCWMS)的使用，整体施工难易，高品质的材料和运输成本/影响之间的权衡，以及严格的规范下可能遇到的不可预知的后果。

- **集料对可持续性的影响。**该部分讨论了一些可提高集料生产可持续性的具体措施。总体来讲，尽量减少使用原材料，提高当地材料和耐久性RCWMS材料的使用比例可以提高项目整体的可持续性。更广泛的将RCWMS作为骨料推广使用，将更多“边际”集料(“marginal” aggregate)使用到路面系统中，用更可持续性的方式长途运输集料，都是我们未来将要面临的进一步挑战。

- **沥青材料对可持续性的影响。**近年来，沥青类材料的使用呈现出很多新的特点。用再生沥青混合料(RAP)和再生沥青瓦(RAS)代替普通沥青胶结

料的情况显著增加。此外，沥青胶结料聚合化水平提高，向沥青中掺加橡胶改善其性能已是一种常规做法，这样的改性沥青可以更好满足现代铺面和耐久性要求，提高安全性，降低噪音，也可以用来设计特殊沥青混凝土以改进路面结构的承载能力。本部分提出了多种提高沥青混合料可持续性的方法，包括降低热拌沥青混合料(HMA)和温拌沥青混合料(WMA)中新胶结料和新骨料的使用比例，降低混合料生产中能源的消耗和气体的排放，使用胶结料替代材料，延长沥青混合料的使用寿命，降低材料运输的影响。延长密封层的寿命，减少新材料的需求，在有必要的地方增加路面的反射率。

- **水泥混凝土类材料对可持续性的影响。** 此类材料面临的主要挑战在于，作为此类材料的主要胶结料的硅酸盐水泥的生产是一个高能耗和高温室气体排放的过程。降低能耗和温室气体排放水平的最好方式就是降低硅酸盐水泥在路面混合料中的使用。通过改进骨料的级配，使用石灰石硅酸盐水泥(PLC)和复合硅酸盐水泥，在混凝土拌合厂中增加辅助性胶凝材料(SCMs)的使用都可以达到这一目标。其他可以提高混凝土材料可持续性的方法包括在混凝土生产中降低水的使用，提高 RCWMs 和“边际”集料(“marginal” aggregate)的使用，以及提高路面混凝土的耐久性。

第 4 章 路面和修复设计对提高可持续性的影响

本章讲述了沥青和水泥混凝土路面的设计过程中的可持续性。着重讨论了新的路面设计和结构翻修(重建和加铺罩面)。在对不同路面设计方案的讨论中，提出了“投资回收期”这样的概念。这对评估初期成本或环境影响较大的设计方案的可持续性有着非常重要的作用。

- **改进的路面设计方法。** 力学-经验法的路面设计提供了一个更有效的路面设计方法。该方法能够综合考虑当前交通，气候以及当地设计条件，有助于最终设计的整体可持续性。

- **使用材料的最优化。** 创新型的路面设计方案将材料选择和道路横截面设计综合考虑，这样既能满足路面性能需要，还能获得更佳的环境和经济效益。

- **路面设计效果的评估。** 通过使用 LCA，LCCA 和评级系统评价不同

路面设计方案的环境和社会影响，从而在此基础上进行改进。此外，在使用阶段（use phase）很关键的几个问题，比如平整度，噪音，雨洪管理，都可以在设计阶段加以考虑，这样可以提前控制使用阶段中这些问题可能产生的影响。

- **常用设计策略。**介绍了一些可以提高可持续性的常用设计策略，包括长寿命沥青和混凝土路面，嵌补(inlay)，使用当地材料，快速施工，降噪表层，预制块路面系统（包括混凝土联锁块），便于雨洪管理的路面设计，以及设计阶段提前考虑使用阶段的影响。

- **路面设计新趋势。**在路面设计领域的新趋势包括继续改进路面的力学-经验设计法，综合考虑设计方案和环境影响，综合考虑新材料的运用以及其对应的维护和重建成本，整合不同性能指标，以及提高平整度的预测模型。

第 5 章 施工阶段提高路面可持续性

本章简单叙述了在修建沥青和水泥混凝土路面中提高可持续性方面的关键要素。这些要素包括施工规范，施工准备和和实施，施工机械油耗和尾气排放量，建筑材料管理和处理，施工质保和有效封闭道路方式。

- **路面施工对可持续性的影响。**路面施工会对工程总体可持续性产生影响。例如，与施工相关的油耗，尾气排放，颗粒物的产生，噪音的产生，交通延误和堵塞等，这些都属于典型的与施工过程密切相关的影响。此外，由于可能对居民、企业和当地生态系统造成影响，施工场地周围的区域也会受到路面施工的影响。

- **提高路面施工作业的可可持续性。**为提高路面施工过程中可持续性，我们可以优化施工计划和工序，控制侵蚀和沉积，有效管理因施工造成的交通延误，控制现场的设备和施工噪音以及有效管理建筑垃圾。与此同时，相关施工规范应该继续要求改进施工设备的运行效率，降低燃烧排放物(如挥发性有机物和氮氧化物)，柴油微粒以及扬尘。当然，保证施工质量是建造耐久性路面的基本要求，这也是提高总体可持续性必不可少的要素。

- **新兴技术和施工工艺。**为了提高施工效率，施工质量和监控水平，一大批新技术正在被采用。比如智能压实，无绳 3D 摊铺，红外热成像扫描以

及实时平整度测量技术。同时，还有一些新的建造技术，例如双层混凝土摊铺技术和厂拌冷铺沥青混合料的使用，很有可能彻底变革现有的施工状况，减少不可再生原材料的使用以及最大程度利用 RCWMs。

第 6 章 使用阶段提高路面可持续性

本章将讨论道路使用阶段影响路面系统可持续性的因素。它们包括对车辆的滚动阻力，车辆燃料消耗，车轮在路面上产生的噪音，雨洪管理，路面热学性能，照明和安全等。这些因素会影响水质，空气质量，最终影响人类健康。

- **达到和保持平整度。** 对于路面尤其是重载路面，在竣工时保证最大的路面的平整度并在使用寿命期内尽量保持一定平整度，是提高燃油经济性和降低机动车排放的关键。

- **公共设施维修产生的开挖。** 在城市里，路面平整度经常受因公共设施需要而产生的开挖和随后回填质量的影响。应尽可能地减少公共设施上方路面的开挖次数，在无法避免时，应最大程度保证回填质量。对于新建路面，也可以将公共设施埋设在重交通路面区域以外的合适地方。

- **结构的响应和燃油的经济性。** 为评估不同路面结构的燃油经济性，不同数学模型和大量现场试验表明：在不同条件下，不同路面结构对车辆荷载的响应具有一定的影响。然而不同于平整度，这个影响造成的燃油经济性很大程度上依赖于路面温度，车辆种类和车速。为使相关模型能有效运用于不同地区的不同交通和气候条件下的多种路面，大量的校正工作还有待完成，这一工作仍在进行当中。

- **噪音排放。** 尽管通常条件下其他因素比路表特性对噪音水平的影响更大。但对周围的社区和生态环境，路表产生的噪音还是会有很大影响。轮胎-路面噪声的降低可通过选择合适的路面材料和/或表面纹理。

- **雨洪管理。** 透水路面可以有效吸收和贮存路面雨水径流，补给地下水，降低排水沟中的污染物。透水路面的使用也可减少储水池塘和截水沟的设置，从而更加有效利用土地。这类路面目前主要用在一些低交通量路段和停车场区域。

- **城市热岛效应 (UHIE)。** 路表的反射性和城市热岛效应之间的关系

非常复杂。影响的因素包括城市规模的大小，路面的密度，日光的反射率，路边绿化程度，建筑物特点与分布以及当地气候等。在某些特定情况下，路表反射率的影响可能是非常显著的，这就需要根据给定的项目具体情况进行评估。目前，还不清楚对于不同的城市结构、气候区域和其他的变量下，路面日光反射对城市热岛效应的发展产生多大程度的影响。现在针对城市热岛现象的研究仍在进行当中，将来有望得到更全面的理解。

- **照明。**现有照明系统需要很高的能量，这对经济和环境有着非常显著的影响。尽管目前已知路表的亮度会对实际人工照明的需求量产生影响，但因为路表亮度会随着时间而改变，所以目前这方面知识的实际应用潜力还不清楚。一些开发和采用新的自适应照明系统的相关工作正在进行当中。这种系统可以只在需要的时候提供必要的照明，在降低经济，环境和社会成本方面具有很大的潜力。

- **安全。**很多因素可以影响道路的安全，比如路表平整度、摩阻力、横向坡度、孔隙率以及减速带之类的设施。平整的路面可以提供舒适的行车条件，减少司机注意力的分散。高的摩阻力在匝道和转弯路段等特殊情况下就显得特别重要。足够的横坡对于提高路面排水和避免水漂是非常必要的。透水路面可以减小飞溅情况的发生（因此可以提高雨天情况下的可见度）；减速带可以提醒司机情况的变化。

第 7 章 提高可持续性的路面养护和保存措施

本章介绍了一些最常用的沥青和水泥混凝土路面的养护和保存措施。当前对如何量化路面养护和保存措施可持续性的信息很有限，很多现行的分析也很主观。但是，通过认真的处治方案选择、材料的考虑、处治时机，处治方案的设计和施工，提高路面系统的可持续性还存在很大的空间。

- **将路面管理系统和路面保存联系起来。**资产管理系统和路面整体可持续性的考虑应该更深入的进行整合。这些考虑包括在分析路面性能时分析环境方面的影响。

- **不同交通量的影响。**对高交通量线路，尽管高频率的维修会造成经济上的高额费用（包括道路封闭/交通中断），维修后改善的路况或许可以使

交通工具对环境的影响降低，从而达到可持续发展的目标。对低交通量线路，通过在适当时间的正确维修可以降低全寿命周期成本，从而也能提高可持续性。

- **影响处治方案选择的因素。**影响的关键因素包括路面的处治历史，整体性能的需要或要求，施工的限制，全寿命周期成本，生命周期评价结果等。

- **可持续处治方案的通常特点。**因多种影响因素的存在，处治措施对路面系统的可持续发展的影响很难直接评价。但总的来说，可持续处治方案通常具备一些共同的特点，比如需要使用更少的材料，能在最长时间内保持路面的平整度等。同时，在比较不同处治方案时，应该对备选方案对路面整个生命周期的不同阶段影响进行分析。遗憾的是，现有数据还不足以支持对养护和保存方案对环境影响的分析。

第 8 章 报废阶段的考虑

本章讨论了在报废阶段的措施对沥青和水泥混凝土路面可持续性的影响。一些该阶段提高路面系统可持续性的关键问题和方法如下：

- **增加 RCWMs 的使用。**这些材料实际上可用于路面结构的每一层，这样可以有效提高路面可持续性。材料的回收过程可以通过不同技术在场外（比如中心拌合场）或者现场进行。

- **回收材料的“最大利用”。**这里的“最大利用”是指优先使用回收材料，以获得最大的可持续性。这就要求考虑回收和利用某个具体材料涉及的所有花费。以 RAP 为例，将其作为新沥青混合料的替代而不仅仅是作为集料使用，可以最大程度上利用这种回收材料，这样的结论当然也已考虑了材料运输和回填可能引起的费用。

- **报废阶段采用的具体可持续性策略。**讨论了多种沥青和水泥路面使用报废阶段有助于可持续发展的策略方法，包括沥青路面的厂拌再生，全深度再生，以及将回收的混凝土作为基层材料或者作为新的水泥或沥青混凝土的骨料。这些措施的选择取决于具体项目的需要，具体工程背景以及业主目标。由于可用回填的空间的逐渐减小以及路面拆除物本身回收利用的价值，在道路报废阶段直接回填路面拆除物的做法越来越少了。

第 9 章 系统框架下的路面可持续性

本章介绍了一些本资料其他地方没有涉及的关于可持续性的考虑。尽管这些考虑很多时候不容易被量化，但它们同样可能对最后的决策产生影响。

- **使用系统分析方法。**当评估和整合路面系统对其他方面可持续的影响时，就需要采用一个全系统的方法，只有这样才有可能对路面和道路设施的影响进行全局性和整体性的分析。

- **路面的作用。**在一个更大的系统中，对路面的各方面的作用进行了讨论，其中包括美学，历史和文化的象征，公共设施开挖的影响，异味、烟尘、颗粒物的影响等。美学对路面设计影响的一个例子就是犹他州的 9 号公路，为使路面与周围环境相匹配，选择使用了当地的红色火山炭渣碎石作为封层铺面。

- **新兴技术。**在这一领域许多新技术正在不断涌现，比如光催化路面的应用，预制块路面系统的不断发展以及能够产生能量的路面的发展。

第 10 章 路面可持续性的评估

本章说明了路面可持续性的评价方法及其重要性。概括性地介绍了可持续性评级系统以及 LCCA 和 LCA 方法。

- **评估可持续性的必要性。**为了推进对路面可持续方面的考虑，有一种可以量化评估的方法就显得很重要，有了这样的方法就可以建立一个基准，从而可以并对未来在可持续方面是否取得了进步进行评估。综合运用全寿命周期成本分析，生命周期评价和可持续评级系统可以提供一种定量分析路面在经济，环境和社会各方面的可持续性。

- **全寿命周期成本分析。**全寿命周期成本分析是一种被广泛用来评估路面系统对经济影响的技术。它的核心在于分析整个生命期内某一个项目组成所产生的初建费用和未来产生的费用，从而来评估该组成部分的总体经济性。这里的未来费用主要包括养护，用户使用，重建，翻修，恢复和重铺所产生的成本。在美国最为广泛使用的路面 LCCA 工具是联邦公路管理局的 *RealCost* 软件。

- **生命周期评价。**生命周期评价是一种定量分析路面系统在整个使用

寿命周期内对环境的影响的新兴技术，衡量标准包括与环境相关的多个指标（常见的有能源消耗以及温室气体排放，但还有很多其他方面因素）。目前还没有路面专用的生命周期评价工具，但是一些软件可以通过适当改造以应用于评估路面对环境的影响。

- **可持续性评级系统。**可持续性评级系统实质上包含一个各种可持续相关的实践方法的清单，每个方法操作对应一个评分(通常以“点”为单位)通过这种方式，可持续性最佳实践的不同计量单位（例如雨水径流中污染物的含量，路面设计寿命，回收材料的吨数，能量的消耗/节约，步行可达性，生态环境的连通性甚至艺术价值），都可以使用相同的单位（点）表示出来，从而可以进行对比。本资料也介绍了一系列与路面有关的评级系统（比如，Greenroads®、INVEST、Envison™、GreenLITES）。

- **各评估方法的综合。**LCA、LCCA 和评级系统可以单独或者结合起来去定量评价可持续性的各个方面。但是最终会根据业主/管理部门的各事项的优先度，这个项目的特征以及在更大的系统范围内的目标，选择出最合适的方法（或一组方法）。

第 11 章 结论

本章总结了几种有利于建设可持续性路面系统的技术和创新。同时，为促进本领域的进一步发展，也给出了一些具体实施的建议。

- **技术和创新。**一系列的技术和创新被应用到提高路面可持续性上，其中包括增加回收材料的使用，WMA 技术作为标准工艺的采用，在混凝土中降低硅酸盐水泥的用量，增加 SCMs 和 RCWMs 的用量，优化材料和横截面设计，以及路面保存涉及的处治操作的更大规模的使用。

- **可持续性的趋势。**在路面可持续领域出现了一些新的趋势，比如更加意识到道路使用阶段的重要性，对路面系统只是一个更大系统中的一小部分的认知，可持续性评价工具的开发和改进。

- **可持续具有背景敏感性。**可持续性与具体工程背景密切相关。可持续性策略取决于项目的特征、现有可利用的材料和技术，以及该项目具体的经济、环境和社会目标。

- **可持续的实施。** 可持续策略在路面系统中的应用的关键因素包括国家和州级政府的组织领导，关键利益相关方的合作，有效的教育和宣传，相关知识的完善，集中研究计划的安排，以及有效的 LCA 工具的开发和应用。

《低影响开发可持续道路系统：设计、建设与管理》

翻译及校核分工表

分工	章节	完成人	
翻译部分	摘要	张毅、王宇、李辉	
	第一章	王宇	
	第二章	郑炳锋	
	第三章	朱浩然	
	第四章	刘化学	
	第五章	张毅	
	第六章前半部分	李昊臻	
	第六章后半部分	张毅、王宇、李昊臻	
	第七章	柳陈文	
	第八、九章	张毅	
	第十章	周清雯	
校核部分	第十一章、词汇表	王宇	
	摘要	李辉、陆海珠、谢宁	
	第一章	张毅、谢宁、刘佳雯	
	第二、三、四章	朱浩然、李辉、 刘佳雯、谢宁、 葛乃玲、代震	
	第五章	王宇、葛乃玲、杨炳	
	第六章	张毅、葛乃玲、 张雪、左鑫	
	第七、八章	张恒基、葛乃玲、 贾明、田雨	
	第九、十章	李昊臻、朱宇昕、 杨洁、李准	
	第十一章、词汇表	张毅、朱宇昕、冯勇	
	排版、封面	排版	张恒基、贾明
		封面设计	谢宁