

## 可持续视角下多肽修饰药物载体的绿色设计、 环境优化与风险调控研究

方宝 周光旭 刘敏 易旭东

太极集团重庆涪陵制药厂有限公司，重庆

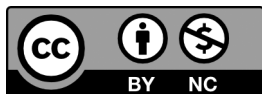
**摘要** | 多肽修饰的药物载体不只是充当前沿的药物递送平台，更因为其在分子层面表现出的可编程特质，成为实现绿色制药及可持续医疗的关键技术之一，本研究以探究其增强药物靶向性、生物相容性，以及可控释放等传统优势为基础，重点将环境科学与可持续性视角引入。系统介绍了如何依托多肽序列的理性构思，同步增进载体的治疗效果与环境友好水平，包括借助可再生原料、设计可评估的环境降解路径，以及降低合成环节的环境损耗，透彻分析了多肽修饰载体排放后可能会面临的环境归宿及生态风险问题，给出了覆盖全生命周期的环境影响评估架构。通过整合治疗作用效果、体内安全情况及生态毒理学数据，构建起多维度的评估体系，面对从合成到环境归宿的系列挑战，对多肽载体在精准治疗与环境可持续发展交叉领域展现的广阔前景进行展望，指出其未来在降低医疗系统整体生态负荷、实现循环经济方面有极大潜力。

**关键词** | 多肽；药物载体；绿色合成；可持续性

Copyright © 2025 by authorx (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



### 1 引言

药物递送系统是现代药物治疗的核心组成要素，其目的是对药物在体内的分布进行空间、时间和剂量上的精准调控，以让药物疗效尽可能大，副作用尽可能小<sup>[1]</sup>。现今多数研究及实践主要聚焦于载体在人体内部的性能优化，却相对忽略了其从原材料获取、生产、使用到废弃这一全生命周期对生态环境造成的潜在影响。传统的纳米载体、脂质体及聚合物载体在合成过程中或许会涉及高能耗与有害溶剂的耗用；未完全代谢的载体材料或活性药物成分可能会进入水循环系统，给水生生物及生态系统造成潜在威胁，一些难降解的合成高分子材料有可

能形成持久性微塑料污染，而像抗生素等药物排放到环境中，更加重了微生物耐药性（AMR）的传播危机<sup>[2]</sup>。因此，推动新一代药物递送技术发展，必然要在追求高效治疗的过程中，积极响应绿色化学与可持续发展的国际倡议。

面对这一背景情形，多肽修饰的药物载体凭借其特有的分子可设计性，彰显出平衡治疗需求跟环境安全的双重潜质，氨基酸借由肽键连接成了多肽，为自然界存在的生物分子，具备不错的生物相容性和原本就有的生物降解性<sup>[3]</sup>。更核心的是，采用理性化的序列设计方式，可在分子层面精准把控多肽材料的性能，不仅可以实现对其在人体内靶向递送与可控释放行为的编程安

通讯作者：周光旭，太极集团重庆涪陵制药厂有限公司高级技师。

文章引用：方宝，周光旭，刘敏，等. 可持续视角下多肽修饰药物载体的绿色设计、环境优化与风险调控研究[J]. 环境与资源, 2025, 7(2): 311-316.

<https://doi.org/10.35534/er.0702026>

排,还可拓展到对其在自然环境里归宿与降解路径的主动设计。这致使多肽载体在结束治疗工作后,可<sup>[4]</sup>。基于多肽修饰表现出来的强大可设计属性,可按照不同的治疗与环境需求对多肽序列加以优化,设计出能贴合多样化需求的智能载体。

本文聚焦可持续视角,开展多肽修饰药物载体设计优化策略研究,在凭借多肽修饰提升药物靶向性、细胞摄取效率与可控释放水平的同时,将重点分析如何依照绿色设计理念,在提高载药效率、增强稳定性的基础上,进一步将其环境降解特性、生态安全性和全生命周期的影响纳入考量范围,通过探究多肽修饰对治疗效能、免疫原性以及潜在环境风险的具体影响,并整合体

外、体内及环境范畴的综合评估资料,本文欲为面向未来的、绿色可持续的药物递送系统创新提供系统的理论支撑与技术方向展望。

## 2 多肽修饰药物载体概述与环境属性拓展

### 2.1 药物载体类型及其环境相容性初探

常见的药物载体系统主要包含纳米粒、脂质体以及聚合物载体成分,其材料的抉择本身就包含着不同的环境相关意义,如表1所示。多肽修饰可以跟这些载体实现结合,在增进其治疗效能的同时,采用引入特定的环境响应序列的方式,让载体的环境归宿更便于控制<sup>[5]</sup>。

表 1 常见药物载体类型及其环境相容性相关特点介绍

Table 1 Introduction to common drug carrier types and their environmental compatibility characteristics

类型	构成	优点	与环境相容性特点	多肽修饰的潜在环境增益
纳米粒	天然/合成高分子材料	粒径小,靶向性好,提高药物稳定性	材料本身的生物降解性是决定其环境风险的关键;合成过程可能产生废物	设计酶敏感肽涂层,促进载体在环境微生物作用下的分解;引导载体在特定环境位点聚集与降解
脂质体	磷脂、胆固醇	结构类似细胞膜,生物相容性和生物降解性好	磷脂为天然成分,环境降解性通常较好;但稳定性可能影响其在处理设施中的去除率	修饰环境响应型多肽,使脂质体在进入自然环境后发生结构瓦解,加速降解
聚合物载体	天然或合成高分子材料	可调性好,载药量高,可实现长效释放	PLGA、PCL等脂肪族聚酯在堆肥条件下可降解	将多肽作为连接臂或功能嵌段,构建更易被环境微生物识别和利用的杂化聚合物,优化降解路径

### 2.2 多肽修饰的概念与多维优势

所谓多肽修饰,就是通过化学或物理方式把特定

序列的多肽引入载体表面或骨架,以赋予载体功能或增强其功能的技术<sup>[4]</sup>,其优势已跳出传统的治疗增强范畴,延展至环境维度,如表2所示。

表 2 多肽修饰药物载体优势

Table 2 Advantages of peptide-modified drug carriers

优势	描述(传统治疗视角)	描述(环境可持续性视角)
靶向性	识别细胞表面受体,实现精准递送,减少全身暴露	降低环境药物负荷:精准递送意味着更低剂量的药物即可起效,从源头减少了可能排入环境的药物总量
生物相容/降解性	作为天然生物分子,多肽能够避免免疫反应并减少毒性。在体内被酶降解,无长期蓄积毒性	环境可降解性设计:多肽序列可被设计为对土壤或水体中的特定微生物酶敏感,确保载体在完成治疗使命后能在自然环境中有效矿化,避免微塑料样持久性污染
细胞摄取效率	多肽能够通过细胞表面的受体结合,促进内吞,提高细胞内药物浓度	关联效应:高效摄取可能降低所需载体总量,间接减少材料的环境排放
可调性与设计灵活性	可定制序列以结合不同靶点或调控释放动力学	绿色材料平台:可利用来源于农业废弃物的氨基酸,或设计可循环再生的多肽基材料,支持循环生物经济

### 2.3 多肽的选择:纳入环境安全标准

选定用于起到修饰作用的多肽时,应开展多维度、系统性的综合筛选,其标准应包括以下四个层面。

(1) 治疗效能维度:囊括靶向性(针对特定靶标的高亲和力以及特异性的序列)和细胞穿透能力(对于胞内的药物递送,可选择像TAT、Penetratin这类高效细胞穿透肽)<sup>[6,7]</sup>。

(2) 体内安全及药代动力学层面:要求多肽具有充分的体内稳定性,防止过早降解掉,同时具备可控的生物降解性,以实现药物适时释放与载体安全地清除;

需选择低免疫原性序列以保障治疗的安全可靠。

(3) 生产及经济可行性维度:要综合考量合成成本、工艺复杂程度以及规模化生产的可行性,筛选具有高性价比的候选多肽。

(4) 环境可持续性维度:此维度主要涉及以下三个方面,环境里降解情况预估,也就是优先筛选能够在自然环境中完全、迅速降解的多肽序列;生态毒性潜在性筛查,依靠计算毒理学模型或者标准生物测试方法,全面评估其潜在的生态风险;以及绿色的合成路径,对合成工艺的原子经济性、绿色溶剂使用情况及能耗水平做

综合性评价，目的是从源头到终端践行可持续理念。

### 3 融合可持续理念的多肽修饰药物载体设计策略

多肽修饰不仅能增强载体的靶向性，还能切实优化其体内外的行为模式，本研究由可持续视角切入，对经典设计策略做进一步拓展。

#### 3.1 靶向设计：从病灶累积到环境减排

主动靶向设计的核心要义是利用多肽跟病变细胞表面特异性受体（像肿瘤细胞高表达的整合素、EGFR等）的高亲和力结合，达成药物的精准输送<sup>[8]</sup>。此策略不光提升了病灶处的药物浓度，还强化了治疗成效，更深层的价值体现在其环境效益上，也就是借助“精准治疗”达成“源头减排”。

跟依赖被动EPR效应的传统纳米载体相比，被特异性多肽（例如RGD肽）修饰的载体能主动对靶细胞进行识别，切实提高递送效率，达成相同疗效所需的药物与载体的总剂量大幅下降，剂量的削减直接造就了关键的环境优势：在源头上削减了最终有可能经排泄渠道进入环境的药物活性成分及其载体材料的总负荷。

多肽介导的主动靶向不仅是一项治疗技术的新发展，更是把药物研发的思维从传统的“疗效—毒性”二维权衡理念，转向“疗效—安全性—环境可持续性”三者整合综合设计的关键举措，为从源头上降低医药产品对环境的压力提供了有效途径。

#### 3.2 生物降解性与释放控制：贯穿体内外的可控生命周期

多肽的可降解性是其环境友好属性的主要依托，可持续设计策略需把降解控制范围从体内延伸到环境。

(1) 双重响应降解设计。所设计出的多肽连接键及载体结构，既可以响应肿瘤微环境刺激（例如低pH、高MMP酶）释放药物，同样能在自然环境（如污水处理厂的特定运行条件）下降解，向载体里引入能被环境中广泛存在的微生物蛋白酶切割的序列<sup>[9]</sup>。

(2) 从“控制排放”到“安全崩解”。保障药物释放完成后，载体骨架可进一步在环境因素触发情况下，分解成容易被微生物充分利用的寡肽或氨基酸，杜绝形成有潜在环境长期留存性的纳米或微米级残留物。

#### 3.3 细胞摄取与内吞途径：效率提升与材料减量化

对于需在细胞内发挥作用的药物而言，增强细胞摄取效率不只是一跟疗效挂钩，还跟环境状况紧密挂钩，借助细胞穿透肽（CPP）（如TAT、Penetratin）开展修饰工作，可明显提高载体的跨膜传递水平<sup>[10, 11]</sup>。

此效率的提高直接产生了资源环境方面的效益。为达成同样的胞内药物浓度，需投送的载体总量得以下降，进而形成“效率提高—物料减少”的良性循环，此

做法首先从生产起始环节降低了原材料与能源的消耗；从使用阶段减少了最终进入环境体系的载体材料总量。该策略从根本上实现了绿色化学“预防优于治理”原则的践行，借助前端设计的创新实现了资源节约与排放管理的统一，对细胞摄取途径进行优化，是多肽修饰技术把治疗精准性和环境可持续性进行内在衔接的关键依据。

#### 3.4 载体表面改性：平衡长效循环与环境降解

载体表面改性乃是调节其体内行为的重要手段，传统的聚乙二醇（PEG）化等“隐形”涂层可明显减少蛋白质吸附和免疫识别，增长血液循环所花费的时间，进而增强药物在肿瘤部位的聚集，但这类化学性能稳定、不易降解的聚合物，可能在载体排出体外后，在自然环境中长期留存，引发潜在的生态隐患，为实现可持续而进行的设计，需要在保证体内治疗效果与促进环境安全降解之间找到精妙平衡，目前的前沿策略主要围绕以下两个方向展开。

(1) 构建可脱落式“隐形”涂层。该策略的核心要义是构建“智能”连接键，该连接键在人体稳定的血液循环及肿瘤微环境中维持完整形态，保障涂层的“隐形”效能；但当载体进入特定自然环境，像下水道里特定的pH值环境，或是富含某些微生物酶的污水处理过程中时，连接键能被快速切断，让PEG涂层从载体表面脱离。暴露在外面的载体核心（一般由PLGA、多肽等可降解材料构成）会被环境微生物有效识别并分解，这样便实现从“体内长期稳定”到“环境快速崩碎”的按需转变。

(2) 开展可环境降解绿色替代材料的开发。探究采用本身具备优良生物相容性并能在环境中完全矿化的天然材料，去替换传统PEG，亲水性多糖衍生物（如透明质酸、壳聚糖衍生物等）或某些通过设计合成的亲水多肽序列，它们既能提供一定空间位阻效应，进而减少蛋白吸附，又能作为天然的有机质在环境系统中被快速代谢，这类材料达成了“功能”与“归宿”的统一，是从源头上破解材料环境持久性问题的根本手段。

### 4 面向效能与安全的系统优化策略

为让多肽修饰药物载体达成高效、安全、可控要求，且可顺利实现临床转化应用，仅仅依赖基础设计是无效的，必须依靠系统的优化策略来提升其整体属性与实用价值。

#### 4.1 分子结构优化：在稳定与降解间寻求平衡

对多肽分子做结构优化是改善其性能的主要手段，借助环化、添加D型氨基酸或非天然氨基酸等化学修饰手段，能有效加强多肽对体内蛋白酶的抵御效果，从而延长其血液循环半衰期，让药物在抵达靶点前能维持结构的完整以及功能活性，这种试图提升“体内稳定性”

的工程化改造，往往会以削弱“环境可降解性”作为潜在代价，经过大量修饰的多肽骨架，其构象和化学键可能不再能被自然环境中微生物酶系有效识别及切割，导致其排出体外之后降解速度迟缓，面临长期残留的潜在风险。

可持续的分子设计不该追求单一的极端稳定性，而是要在“治疗所需的稳定”与“对环境友好的降解”之间谋求动态平衡，这表明在设计阶段就得引入生命周期的思维理念，采用计算模拟来预测修饰位点对酶切敏感性的效应，然后配合体外降解实验进行验证。优化的策略聚焦于追求“精准稳定化”，而不是实现“全局稳定化”，可采用部分环化这一策略，仅加固多肽序列中最易被破坏或关键的酶切位点，并非把整个分子给环化掉；或者实施定点修饰手段，仅在特定位置引入D型氨基酸以保障关键肽键，同时保留一定量的天然L型氨基酸序列片段，以保障环境微生物酶还有启动降解进程的“切入点”。

#### 4.2 载药效率优化：践行原子经济性原则

加大载体的载药量与封装率，其意义远不只是改善经济效益与增强疗效；从实质意义上看，这是把绿色化学核心原则“原子经济性”落实到药物递送系统设计和生产全流程的直接实践，原子经济性试图在化学合成中最大程度运用原料中的每一个原子，让这些原子最终融入目标产物，目的是从根源上降低甚至杜绝废物产生。

在多肽修饰药物载体的研发进程里，更高的载药效率说明为了产出一个满足既定治疗剂量要求的制剂单位，可减少投入的载体材料、药物活性成分以及相关辅料的总体数量，这种“减量化”效应于产业层面激起了一系列正向的连锁反应：原材料的消耗得以降低，合成及纯化步骤的能源需求相应下降，生产过程中产生的副产物、废溶剂以及不合格中间体的总量也得到了有效管控，提高载药效率不但对制剂本身予以优化，更直接、明显地降低了从原料开采、化工生产直至产品制造整个链条的资源环境压力。

此理念推动技术开展创新，研究者正打算通过增进多肽序列与载体材料的相容性、设计更新奇的“锁-钥”式药物结合位点，以及研制新型自组装的方案，来生成拥有更高载药体量和更有效封装性能的纳米结构，采用对多肽进行功能化设计，让其可以实现靶向病变细胞的功能，又可利用静电、疏水或主客体相互作用高效负载药物分子，由此达成“一材兼具多能”，在分子层面增进原子利用效率。

#### 4.3 实施生物相容性与免疫原性优化：延伸到生态契合性

在传统药物递送系统所构建的评价体系里，生物相容性与免疫原性的优化重点留意载体在人体里的安全性，意在防止炎症反应、免疫识别和清除现象，以保证

治疗达到效果且患者安全，当我们把评估的边界从人体拓展到整个生态系统的范畴时，该优化维度就得同步进化为“生态相容性”，这要求我们在设计、筛选多肽序列的阶段，不单单要实现它对人体的低免疫原性，还一定要有前瞻性地评价其对非靶标环境生物（尤其是水生生物）的潜在风险。

实现这两个层面的安全目标，需在分子设计范畴建立新的筛选准则，大量赋予多肽跨越膜层能力或增强其与靶点结合效能的结构特征，犹如富含阳离子氨基酸（犹如精氨酸、赖氨酸）或带有强疏水性属性的结构域，在人体内可能借助调控防止过度免疫激活，然而一旦进入水体环境，可能会破坏水生生物的细胞膜结构，或妨碍其正常的生理功能及繁殖，流露出生态毒性迹象。先进的优化策略将把计算毒理学预测跟标准化生态毒理实验相结合，在虚拟筛选的阶段，就可以用软件模型来预测多肽对水生生物的急慢性毒性潜力；到了实验阶段，就需把针对标准模式生物（如发光细菌、大型溞、斑马鱼胚胎等）的毒性测试整合到常规的体外安全性评价流程中。

这种把“人体免疫原性”和“生态毒性”一起考量的优化范式，说明药物载体设计理念有了一次重要的拓展深化，一种理想的多肽修饰剂不光是人体的“友好访客”，也应是生态系统这个环境的“无害过客”，借助在研发源头嵌入生态安全设计逻辑，我们能够积极预防药物产品在生命周期终点可能引发的环境问题，真正做到从“患者安全”到“行星健康”的全链条责任落实，这恰是绿色与可持续药物研发所必须有的要义。

#### 4.4 构建全链条评价体系

优化策略的有效性需借助贯穿体内、体外的综合评价体系来验证。

(1) 体外扩展评价：添加模拟环境水体中的环境稳定性测试和简易生态毒性初步判定。

(2) 体内药物代谢动力与环境归宿关联探究：衡量载体及其代谢物经排泄途径排出的比例与形态，为环境浓度预测提供关键的数据支撑。

(3) 环境归宿模拟：采用模拟污水处理系统与土壤柱等实验，考察载体在典型环境介质内的迁移、转化与去除现象。

## 5 实践案例与多维挑战

### 5.1 案例启示：产业化与绿色化协同推进

国内外领先公司的产业化实践说明，多肽修饰载体技术的发展跟绿色可持续理念的达成是携手共进的，如成都圣诺生物、默迪夫生物这般企业，在推动技术实现转化期间，已把绿色化学原则充分融入研发与生产链条里，具体实践为整个领域实现规模化与环保化提供了宝贵的经验借鉴。这些企业为绿色化付出的努力，主要体

现在对合成工艺的全面优化上,在多肽固相合成这一核心阶段,传统工艺需大量采用二甲基甲酰胺(DMF)、N-甲基吡咯烷酮(NMP)等具备环境和健康风险的极性非质子溶剂,排头企业凭借工艺革新,积极探索并采用更绿色的替换方案:专心研发和采用水相合成或更为环保的溶剂体系,从根本上减少有害物质的运用;借助优化合成循环的形态、改进洗涤步骤的模式,且打造出闭环的溶剂回收体系,把溶剂的用量削减至最低,同时明显削减了挥发性有机化合物(VOC)的排放以及废水处理的负荷压力。

采用连续流合成技术是另一个关键典范,与传统的间歇式反应釜对比,连续流生产体现出传质传热效率高、反应参数精准调控、安全性较好等长处,采用此技术进行多肽或其载体材料的制备,可以明显提高原子经济性以及反应产率,减少副产物的产出;鉴于其固有的小型化、模块化的属性,可以极大降低生产进行时的能源消耗与物料残余,凸显了“过程强化”这一绿色工程要义。

在原料选择这个阶段,前瞻性的企业已开始将目光投向供应链的可持续性,探索采购来自生物发酵工艺的氨基酸,替换完全依靠石油化工的原料途径,以此降低产品的整体碳排放足迹,这些企业的实践明显显示,产业化不只是把实验规模放大,更是依靠技术创新有步骤地降低环境足迹的过程。他们一边提升产率与纯度,在溶剂管理、能源效率发挥以及原料获取源头等方面实现了实质性提升,为多肽修饰药物载体甚至整个生物医药范畴,给出了把“绿色设计”转化为“绿色制造”的可行途径,说明了经济效益与环境效益能够协同共进、实现双赢。

## 5.2 面临的核心挑战

(1) 绿色合成及规模化的成本难题:复杂多肽进行绿色、低成本的大规模合成,还是产业化的关键阻碍。

(2) 体内外命运预估的复杂性:载体在复杂的人体环境以及变化更多样的自然环境中,其行为呈现高度不确定性,精确预判的难度不低。

(3) 长期生态风险数据量十分匮乏:尚未对多肽修饰载体长期、低剂量环境暴露的生态效应进行系统研究,风险评估的基础尚显薄弱。

(4) 标准与法规空白:针对这类新型生物基载体的环境安全性评价,尚无统一的标准方法和法规指南。

(5) 治疗性能和环境性能的平衡考量:在某些实际情况里,最优的体内性能设计可能会与最契合的环境降解设计相矛盾,要进行创新的“智能切换”设计以化解矛盾。

## 6 未来展望

多肽修饰药物载体的发展将超出单一治疗工具的角色范畴,朝着“治疗—环境”协同体系演进。

色范畴,朝着“治疗—环境”协同体系演进。

(1) 智能化环境响应:载体不只能对疾病的信号做出反应,还能在觉察到已进入环境处理系统之际,启动最终实现无害化的降解程序。

(2) 闭环材料设计:查找载体主要成分全部出自可再生资源,且该降解产物可安全回归到自然循环中,或者作为原料回收。

(3) 主动环境修复功能:增大多肽载体的应用边界,凭借它靶向及载带的能力,设计可特异性吸附或降解环境中污染物(像重金属、有机农药)的修复材料,实现从“疾病治疗”到“环境治疗”的跨越突破。

## 7 结论

多肽修饰的药物载体凭借自身分子层面的可编程能力,为创建高效、精准的药物递送体系提供了强大支撑,把环境可持续性理念系统、前瞻性地融入其设计、优化及评价的全步骤,不仅是应对全球生态方面挑战的必然要求,更是带动该领域达成范式创新、提高其长期社会价值的战略机缘。通过促进绿色合成工艺进步、提升对载体环境行为的科学理解、构建包含生态终点的全链条评估体系,多肽修饰药物载体技术有望引导医药递送系统进入新的发展阶段,即在更精确、更高效地守护人类健康时,为地球生态系统的健康状况积极添砖加瓦,最终实现人类健康与行星健康的融合。

## 参考文献

- [1] 黄燕妮,王艳,王晓波,等.智能递送系统在基因药物治疗中的应用[J].沈阳药科大学学报,2024,41(4).
- [2] 周子晗,唐龙光.中性粒细胞药物递送系统研究进展[J].浙江大学学报(医学版),2025,54(4):479.
- [3] 郑珊珊,蔡悦,龚瑜贝,等.纳米载体用于包载生物活性多肽的研究进展[J].中国生物医学工程学报,2023,42(2):242-251.
- [4] 李怡静,龚雪峰,王冬,等.基于多肽的药物递送系统研究进展[J].高分子学报,2022,53(5):445-456.
- [5] 金丽霞.纳米药物载体的研究及临床应用[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(8).
- [6] 吕焯,赵雅惠,林佳.EGFR在肿瘤发生发展及治疗中的作用研究进展[J].临床医学进展,2024,14(12):796.
- [7] 陈月如,毋梦茜,胡倩,等.细胞穿膜肽的研究概况[J].海洋科学进展,2018,5(2):9.
- [8] 蒙然,林彦彤,姚炜钦,等.用于药物靶向递送与免疫激活的智能多肽的研究[J].高分子学报,

- 2025, 56 (8): 1333-1344.
- [9] 尹梓沣, 苏小凌, 王中灵, 等. 活体细菌在药物载体中的表面修饰策略 [J]. 自然科学研究, 2024, 1 (3): 79-83.
- [10] 汪宁, 杨欢, 徐楠楠, 等. 细胞治疗药物非临床药代动力学研究 [J]. 中国药物评价, 2024, 41 (6): 439.
- [11] 孙伟红, 闫道, 杨少坤, 等. 基于可激活细胞穿透肽修饰的纳米载体系统的研究概况 [J]. 中国药理学杂志, 2015, 50 (23).

## Research on Green Design, Environmental Optimization and Risk Regulation of Peptide-modified Drug Carriers from a Sustainable Perspective

Fang Bao Zhou Guangxu Liu Min Yi Xudong

*Taiji Group Chongqing Fuling Pharmaceutical Factory Co., Ltd. Fuling District, Chongqing*

**Abstract:** Peptide-modified drug carriers represent not only a cutting-edge drug delivery platform but also, due to their molecular-level programmability, a key technology for achieving green pharmaceuticals and sustainable healthcare. Building on the investigation of their traditional advantages—such as enhanced drug targeting, biocompatibility, and controlled release—this study emphasizes the integration of environmental science and sustainability perspectives. We systematically elaborate on how rational peptide sequence design can simultaneously optimize the therapeutic performance and environmental friendliness of carriers. This includes utilizing renewable raw materials, designing predictable environmental degradation pathways, and reducing the environmental footprint of synthesis processes. The paper provides an in-depth analysis of the potential environmental fate and ecological risks faced by peptide-modified carriers after emission and proposes a life-cycle environmental impact assessment framework. By integrating data on therapeutic efficacy, in vivo safety, and ecotoxicology, a multidimensional evaluation system is constructed. Finally, addressing a series of challenges from synthesis to environmental fate, this paper envisions the broad prospects of peptide-based carriers at the intersection of precision therapy and environmental sustainability, highlighting their future potential in reducing the overall ecological burden of healthcare systems and advancing the circular economy.

**Key words:** Peptide; Drug carrier; Green synthesis; Sustainability