

机制砂特性对自密实混凝土力学与工作性能影响的研究进展

苏浩

西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2026年2月24日; 录用日期: 2026年3月16日; 发布日期: 2026年3月30日

摘要

天然砂资源的匮乏与环保政策的收紧, 推动了机制砂在混凝土行业的全面应用。自密实混凝土(SCC)凭借其卓越的填充性与施工性能, 在复杂工程结构中极具应用前景。将机制砂引入SCC配制(MS-SCC), 是实现资源可持续化与工程高性能化的关键路径。然而, 机制砂在颗粒形貌、级配断档、石粉含量及母岩岩性等方面与天然砂存在本质差异, 深刻影响着MS-SCC的流变特性与硬化性能。本文基于国内外最新研究进展, 系统综述了机制砂特性(形貌、级配、石粉)及配合比关键参数(水胶比、砂率、外加剂)对MS-SCC工作性能(流动性、间隙通过性)与力学性能(强度、模量、抗裂性)的影响规律及作用机理。结论表明, 通过优选机制砂品质、精准调控石粉含量、优化浆骨比例并协同高效外加剂, 可制备出满足高标准工程要求的MS-SCC。本文旨在为该领域的配合比设计优化与工程应用提供理论依据。

关键词

机制砂, 自密实混凝土, 工作性能, 力学性能, 石粉, 配合比设计

Research Progress on the Effects of Manufactured Sand Characteristics on the Mechanical Properties and Workability of Self-Compacting Concrete

Hao Su

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structure, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: February 24, 2026; accepted: March 16, 2026; published: March 30, 2026

Abstract

The increasing shortage of natural sand resources and the tightening of environmental protection

policies have made the application of manufactured sand (MS) in concrete an inevitable choice for the green development of the industry. Self-compacting concrete (SCC) demonstrates significant advantages in modern complex engineering structures due to its excellent construction performance and compactness. The application of manufactured sand in the preparation of SCC (MS-SCC) is a key technical path to balance resource sustainability with high performance. However, manufactured sand differs fundamentally from natural sand in terms of particle morphology, gradation characteristics, stone powder content, and parent rock lithology. These characteristics profoundly affect the comprehensive performance of MS-SCC. Based on current research progress, this paper systematically reviews the influence laws and mechanisms of MS characteristics (particle morphology, gradation, stone powder content) and key mix proportion design parameters (water-binder ratio, sand ratio, cementitious material system, admixtures) on the workability (flowability, filling ability, passing ability) and mechanical properties (compressive strength, elastic modulus, crack resistance) of MS-SCC. The conclusions indicate that MS-SCC meeting high-standard engineering requirements can be successfully prepared by selecting high-quality MS raw materials, scientifically controlling stone powder content, optimizing mix proportion design (especially water-binder ratio and sand ratio), and synergistically using high-efficiency admixtures and mineral admixtures. This article aims to provide a systematic theoretical reference for in-depth research and engineering applications in this field.

Keywords

Manufactured Sand, Self-Compacting Concrete, Workability, Mechanical Properties, Stone Powder, Mix Proportion Design

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国基础设施建设的持续高速发展, 建筑骨料, 尤其是天然砂的需求量巨大。长期大规模开采导致天然砂资源日趋枯竭, 生态环境问题凸显, 限采政策不断收紧[1]。在此背景下, 寻找可持续的天然砂替代品成为混凝土行业的紧迫课题。机制砂由石灰岩、花岗岩等母岩经机械破碎、筛分而成, 具有原料来源广泛、质量稳定可控等优势, 是实现混凝土产业绿色、低碳发展的重要途径[2]。

与此同时, 现代工程结构日益复杂, 对混凝土的施工质量和结构性能提出了更高要求。自密实混凝土能够在无需机械振捣的情况下, 仅依靠自重流动并密实填充模板, 显著提高了配筋密集、结构复杂部位的施工效率与构件质量[3]。将机制砂与自密实混凝土技术结合, 制备机制砂自密实混凝土, 是推动行业技术进步与资源化利用的必然方向。

然而, 机制砂的工业化生产使其具有颗粒棱角尖锐、表面粗糙、级配可能出现“两头大、中间小”的断档现象, 以及含有一定量石粉(粒径 $< 75 \mu\text{m}$)等固有特征[4]。这些特性与天然砂的光滑粒形和连续级配形成鲜明对比, 使得 MS-SCC 的性能表现成为机制砂复杂特性与混凝土配合比参数相互作用的结果。因此, 系统梳理机制砂关键特性及相关配合比参数对 MS-SCC 性能的影响机理, 对于其科学配制与成功应用至关重要。

2. 机制砂自身特性对机制砂自密实混凝土的影响

机制砂的物理化学特性是决定 MS-SCC 性能的底层因素, 主要包括颗粒形貌与级配、石粉含量以及母岩岩性。

2.1. 机制砂颗粒形貌与级配

机制砂颗粒多棱角、表面粗糙，显著增大了骨料间的内摩擦力和比表面积。研究表明，这种不规则粒形会降低新拌混凝土的流动性。从力学性能看，粗糙的表面增强了骨料与水泥浆体的机械咬合力，有利于提高混凝土的强度与抗裂性[5]。严永春的研究指出，相对于天然砂，机制砂颗粒形状不规整、表面较粗糙，这会增大混凝土的内摩擦力并减小流动性，但会增大混凝土内部骨料和水泥浆体之间的粘结力以提高强度[6]。

颗粒级配是影响工作性的核心因素。连续且合理的级配对于保证混凝土的流动性和抗离析性至关重要。江恩茂的研究表明，采用细度模数适中且级配连续的机制砂，在 43%~50% 的砂率下可以配置出性能良好的 MS-SCC。若级配不良，粗颗粒过多会导致骨料间啮合效应增强，降低填充能力并易引发离析；反之，细颗粒过多则会因骨料总表面积过大而增加需水量，使拌合物粘稠，间隙通过性变差[7]。

2.2. 石粉含量的影响

石粉是机制砂生产中的副产物，其含量是影响 MS-SCC 性能最敏感的因素之一。适量石粉可发挥微集料效应填充孔隙，改善浆体粘聚性并提升强度；但过量石粉会因巨大的比表面积导致需水量激增，显著降低流动性并劣化混凝土综合性能。

对工作性能的影响：适量的石粉(通常在合理范围内)能发挥微集料填充效应，优化细骨料级配，增加浆体稠度，从而提高拌合物的粘聚性和抗离析性。但石粉含量过高，会显著增加粉体比表面积，强烈吸附水分与减水剂分子，导致混凝土流动性下降、粘度增加[8]。何世钦的研究表明，高石粉含量机制砂中的石粉对流动性和黏度贡献较小，易导致拌合物流动性和黏度不足[8]。

对力学与耐久性能的影响：适量石粉能填充水泥石与骨料界面的微孔隙，提高混凝土密实度，从而对强度产生积极贡献。薛汇林的研究表明，机制砂中石粉含量对混凝土抗压与劈裂抗拉强度的影响呈先增后减趋势，最优含量范围为 16%~19% [9]。张淑云等在研究自密实轻骨料混凝土梁时发现，随着机制砂(及石粉)掺量增加至 80%，梁的极限承载力提高 6.62% [10]。在耐久性方面，适量石粉能改善抗渗性，但可能对抗冻性产生负面影响。刘全升的研究指出，石粉含量为 3% 的 MS-SCC 抗冻性最好，超过 9% 则对长期抗压强度不利[11]。石粉含量对混凝土性能的大致影响如图 1。

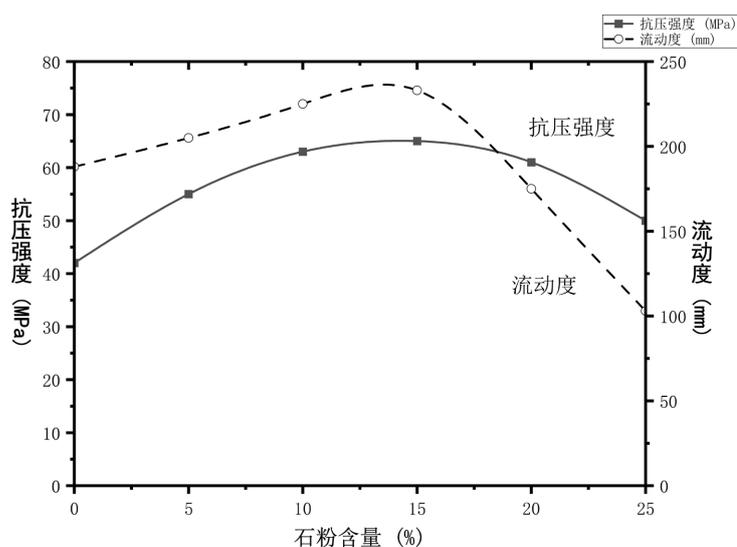


Figure 1. Effect of stone powder content on properties of concrete

图 1. 石粉含量对混凝土性能的影响

2.3. 母岩岩性的影响

机制砂的母岩岩性(如石灰岩、花岗岩等)影响着骨料的表面性质和石粉的矿物组成。不同岩性的石粉对减水剂的吸附能力存在差异。研究表明,硅质岩(如花岗岩)机制砂由于其层状硅酸盐矿物可能降低减水剂的吸附效率,导致达到相同工作性时所需减水剂掺量更高[4]。相较之下,石灰岩机制砂配制的混凝土通常表现出更好的流变性能。但对比研究时,必须严格控制机制砂的级配、颗粒形貌和石粉含量,否则结论的参考价值将受限。

3. 配合比设计关键参数的优化调控

在给定制砂特性的前提下,科学的配合比设计是直接调控 MS-SCC 性能的手段。

3.1. 机制砂自密实混凝土配合比设计方法论

针对 MS-SCC 的高流动性与高填充性需求,主流设计方法均致力于在骨料骨架稳定性与浆体流变性之间取得平衡。基于全算法的体积平衡设计首先依据绝对体积法则确定满足强度与耐久性要求的水胶比及浆体用量,随后计算骨料体积。对于 MS-SCC,需特别引入“浆体包裹层厚度”概念,通过测定机制砂的堆积密度与空隙率,计算填满骨料空隙所需的最小浆体量,在此基础上增加富余浆体以形成润滑膜。众多专家提出的多目标优化设计方法指出,通过最大化骨料堆积密度来降低空隙率,可有效减少浆体用量并控制收缩。具体的设计流程通常遵循富余浆体理论[6],首先测试不同比例粗细骨料的混合堆积密度,确定空隙率最低的最佳砂率(通常在 45%~52%之间),构建稳固的骨架结构;随后计算填充骨料空隙所需的临界浆体体积,并根据目标坍落扩展度确定所需的富余浆体厚度。最后,利用韦耀文提到的骨料间距模型验证计算出的浆体量是否足以保证骨料间不发生接触摩擦,从而避免堵管风险。

3.2. 水胶比与胶凝材料相关因素的影响

水胶比是控制混凝土强度与耐久性的决定性因素。对于 MS-SCC,其水胶比范围通常需审慎选择。较低的水胶比利于获得高强,但可能导致浆体不足,流动性差;较高的水胶比能改善流动性,但会牺牲强度并增加收缩风险。陈固年的正交试验表明,水胶比对混凝土坍落扩展度有显著正向影响,但随着水胶比增加,混凝土早期强度下降[12]。

由于机制砂需浆量较大,MS-SCC 通常需要较高的胶凝材料总量,并掺入矿物掺合料以保障工作性并降低水化热。粉煤灰的“滚珠效应”能有效改善流动性,其火山灰反应贡献于后期强度,并能降低水化热[13][14]。周涛在研究 MS-SCC 热力学性能时发现,粉煤灰掺量为 30%时,混凝土的工作性和抗压强度表现较优[14]。硅灰能大幅提高强度并改善界面过渡区,但会显著增加拌合物粘度[12]。

3.3. 砂率的合理选取

MS-SCC 的砂率设定需突破普通混凝土的限制。由于机制砂颗粒粗糙,需要更厚的砂浆层来包裹粗骨料以实现自流平,研究推荐的适宜砂率范围集中在 45%~52% [6]。若砂率过低,砂浆体积不足以填充粗骨料空隙,会导致骨料直接接触产生“互锁效应”,从而丧失自密实能力;若砂率过高,细骨料比表面积剧增会吸附大量自由水,导致拌合物粘稠板结。在实际工程中,应结合 J 环试验,以钢筋间隙通过性为指标反向微调砂率,确保混凝土在密集配筋条件下仍能顺利填充。混凝土微观结构及浆体分布如图 2。

3.4. 针对机制砂 MB 值的外加剂调控策略

机制砂中的泥粉(主要为粘土矿物)通过亚甲蓝值(MB 值)表征,其对聚羧酸减水剂(PCE)具有强烈的

层间吸附作用,是导致 MS-SCC 性能波动的核心因素,因此需针对不同 MB 值等级采取差异化的调控策略。对于 MB 值小于 1.4 的低含泥机制砂,可使用标准型 PCE,利用石粉的填充效应重点关注浆体粘度,并适量复配引气剂以改善流动性。当 MB 值处于 1.4 至 2.5 之间时,粘土吸附性增强,建议采取物理屏蔽策略,即增加 PCE 掺量或复配六偏磷酸钠等“牺牲剂”,使其优先与粘土反应占据吸附位点,从而保障 PCE 发挥药效。对于 MB 值大于 2.5 的高含泥机制砂,必须采用化学改性策略,选用具有长侧链或疏水基团的抗泥型减水剂以减弱粘土层的插层吸附;同时,由于高 MB 值砂坍落度损失极快,需复配缓释型保坍剂(VMA)以维持长时间的施工性能。王恒惠[15]的研究强调,单一组分的外加剂难以应对高 MB 值机制砂的复杂性,建立“减水-保坍-抗泥”协同的复合外加剂体系是解决工程难题的关键。

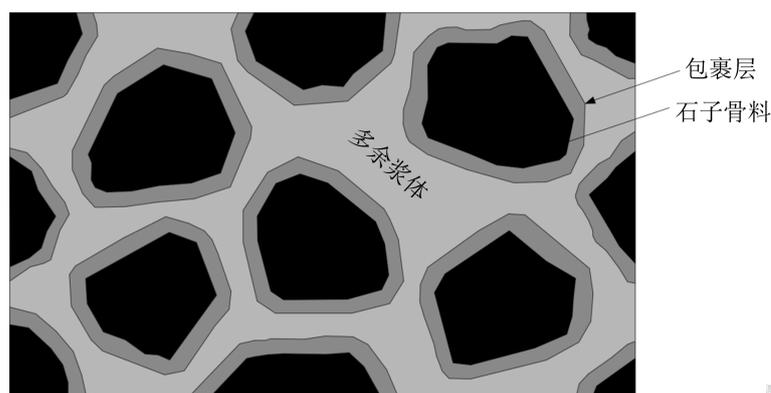


Figure 2. Schematic diagram of mesostructure and paste distribution of concrete
图 2. 混凝土细观结构及浆体分布示意图

4. 机制砂对自密实混凝土宏观性能的综合影响规律

4.1. 机制砂对自密实混凝土工作性能的影响

机制砂自密实混凝土(MS-SCC)的工作性能本质上是其流变参数(屈服应力与塑性粘度)在宏观上的体现。由于机制砂特殊的颗粒形态,其性能调控较天然砂混凝土更为敏感。

(1) 流动性与流变阈值

流动性主要受浆体润滑作用与骨料内摩擦阻力的竞争机制控制。机制砂尖锐的棱角和粗糙表面显著增加了骨料间的机械咬合力,提高了体系的屈服应力。这意味着需要更多的浆体包裹层来“悬浮”骨料,以克服初始流动阻力[6]。石粉在流动性调节中扮演着关键角色,适量石粉(通常<15%)能起到类似滚珠的润滑作用,并填充细骨料空隙释放自由水;但过量石粉则会因比表面积效应剧增而产生极强的吸水性,导致混合料迅速变粘、流动度损失加快[8]。因此,在设计中需根据石粉的亲水性(受母岩岩性影响)寻找最佳掺量平衡点。间隙通过性与抗阻塞能力是 SCC 穿越密集钢筋的关键指标。与天然砂相比,机制砂颗粒的“架桥风险”更高。棱角分明的粗骨料在通过狭窄间隙时更容易相互卡锁,除保证足够的流动性外,必须优化砂率和浆骨比。粉煤灰的玻璃微珠效应和适量石粉的微集料效应,能够构建致密的浆体网络,承托粗骨料防止下沉[12][14]。

(2) 粘度平衡

通过复配增稠剂(VMA)或调节胶凝材料组分,使浆体达到“剪切变稀”的理想流变状态——静置时保持悬浮,流动时阻力降低。机制砂级配中常见的“中间档缺失”容易导致浆骨分离,粉煤灰的玻璃微珠效应和适量石粉的微集料效应,能够构建致密的浆体网络,承托粗骨料防止下沉[12][14]。方鹏程[16]

系统探讨了高石粉机制砂对混凝土工作性能(流动性、粘聚性)及力学性能的综合影响,旨在通过配合比设计提升高石粉含量 MS-SCC 的工程适用性。宁严庆[17]的研究表明,通过 J 型环测试可以量化评估这种阻塞风险。MS-SCC 的配合比设计应适当提高砂浆富余系数,利用粘度适中的砂浆“携带”粗骨料顺利通过钢筋网,而非单纯依靠重力流动。

(3) 抗压与抗拉强度

主要由水胶比决定。蒋正武等[18]发现机制砂的粗糙表面和合理石粉含量通过增强机械咬合与填充密实效应,对强度产生积极贡献。通过掺加粉煤灰降低水化热、控制石粉含量与砂率,可有效减少收缩,提高抗裂性[6][14]。黄昌华的研究表明,砂岩机制砂中的石粉能提升劈裂抗拉强度[19]。机制砂混凝土因骨料咬合作用强,其弹性模量可能更具优势。王辉的数值模拟分析显示,石粉含量、混凝土强度等级和环境温湿度对徐变有显著影响,5%石粉含量能有效改善徐变变形[17]-[19]。

4.2. 机制砂对自密实混凝土力学性能增强机制的影响

机制砂的引入改变了混凝土内部的界面过渡区(ITZ)结构和骨架堆积模式,对其力学响应和耐久性产生了深远影响。强度提升的“机械咬合”效应研究普遍发现,在水胶比相同时,MS-SCC 的强度往往优于天然砂 SCC。机制砂粗糙的表面纹理增强了骨料与水泥石之间的物理粘结力,这种“齿合效应”有效抑制了微裂纹沿界面的扩展[6]。机制砂中的石粉不仅填充了孔隙,部分活性石粉(如石灰岩粉)还可能参与水化反应生成碳铝酸盐,进一步致密化 ITZ 结构。黄昌华的研究证实,这种界面强化作用对劈裂抗拉强度的提升尤为显著,有助于改善混凝土的脆性特征[13]。弹性模量与刚度特征 MS-SCC 通常表现出更高的弹性模量。这主要归因于机制砂母岩的高强特性以及骨料间紧密的互锁结构,使得混凝土在受力时变形较小。这一特性对于高层建筑控制结构侧移有利,但也可能导致材料延性略有降低,需在结构设计中予以考量。体积稳定性与抗裂风险收缩与抗裂:尽管高粉体用量可能增加收缩风险,但粉煤灰的掺入有效降低了水化热峰值,延缓了早期温升收缩[14]。同时,石粉的填充作用细化了毛细孔径,在一定程度上抑制了水分蒸发引起的干燥收缩。长期荷载作用下的变形(徐变)受孔结构影响巨大。王辉的研究指出,5%左右的适量石粉能优化孔隙结构,减少徐变变形[20]。这说明通过精细化设计,MS-SCC 完全能够满足桥梁等大跨径结构对长期变形控制的严苛要求。

5. 结论与展望

5.1. 结论

成功配制高性能 MS-SCC 的关键在于:1) 源头控制:优选级配连续、粒形相对良好、石粉含量适中的机制砂;2) 科学设计:确立以水胶比为核心强度控制参数,以砂率和胶凝材料体系为工作性调控重点的设计体系;3) 精准使用外加剂:针对机制砂特点选用适配的高效减水剂,并必要时复配其他功能组分;4) 发展先进方法:积极采用基于骨料间距模型[18]、富余浆体厚度理论[20]或正交试验-多目标优化[12][21]的现代配合比设计方法。

5.2. 展望

未来研究可重点关注:1) 机理深化:建立机制砂颗粒形貌的统一量化表征指标体系[22],并借助先进手段揭示其与宏观性能的定量关系;2) 系统认知:进一步探明石粉在复合胶凝体系中的长期水化机理及对耐久性的准确影响;3) 智能化与标准化:发展基于机器学习的性能预测与配合比智能设计平台,并推动建立更贴合 MS-SCC 特点的行业标准[1];4) 性能拓展:完善面向超高强、极端服役环境及利用固废(如尾矿砂[22])制备 MS-SCC 的技术体系。

参考文献

- [1] 宋少民, 胡幼奕. 机制砂标准化技术进展及相关问题思考[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(7): 628-634.
- [2] 方剑. 机制砂混凝土的特性及研究进展[J]. 安徽建筑, 2021, 28(10): 119-121.
- [3] 王拥军. C45 机制砂自密实混凝土的研究与应用[J]. 广东建材, 2024, 40(11): 24-26.
- [4] 朱洪洲, 杜俊池, 陈祥, 等. 机制砂特性及其对混凝土性能影响的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11): 3911-3922.
- [5] 严永春. 机制砂自密实混凝土性能研究[J]. 居舍, 2024(35): 56-58.
- [6] 江恩茂. 不同机制砂自密实混凝土的研制及应用[J]. 上海建材, 2025(6): 74-77.
- [7] 何世钦, 吕淼, 马冬哲, 等. 高石粉含量机制砂自密实混凝土配制方法试验研究[J]. 混凝土, 2019(11): 132-135+140.
- [8] 薛汇林, 陈明亮, 唐志波, 等. 机制砂中石粉对混凝土物理力学性能的宏观影响机制[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(6): 151-160.
- [9] 张淑云, 等. 机制砂掺量对自密实轻骨料混凝土梁受弯性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(3): 142-150.
- [10] 刘全胜. 石粉含量对机制砂自密实混凝土耐久性的影响[J]. 混凝土, 2023(5): 92-95.
- [11] 陈固年. 正交试验法优化机制砂自密实混凝土配合比[J]. 广东建材, 2025, 41(4): 22-25.
- [12] 殷建光, 孙浩, 严鹏飞, 等. 矿物掺合料对自密实混凝土基本性能的影响[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(2): 385-390.
- [13] 周涛. 机制砂自密实混凝土热力学性能及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2025.
- [14] 韦耀文. C35 机制砂自密实混凝土隧道二衬工程应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2025.
- [15] 王恒惠, 高文龙. 机制砂自密实混凝土配制的研究与应用[J]. 居舍, 2025(13): 52-54.
- [16] 方鹏程. 高石粉机制砂自密实混凝土配合比优化及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
- [17] 宁严庆, 邵巧希, 石建军. 用 J 型环测试自密实混凝土间隙通过性能试验研究[J]. 混凝土, 2008(12): 93-97.
- [18] 蒋正武, 徐春普, 张盛. 多目标性能需求的 C50 混凝土配合比优化设计方法[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 499-505+522.
- [19] 黄昌华, 杨海成, 盛余飞, 等. 砂岩石粉含量对机制砂混凝土劈裂抗拉强度的影响及机理研究[J]. 水运工程, 2017(9): 58-63.
- [20] 王辉, 杨海建, 何世钦, 等. 机制砂自密实混凝土徐变影响因素数值分析[J]. 北方工业大学学报, 2025, 37(5): 1-10.
- [21] 韩照, 张云升, 乔宏霞, 等. 基于 CT 扫描及图像处理技术的机制砂形貌研究[J]. 材料导报, 2023, 37(19): 86-91.
- [22] 杨普新. 掺钼尾矿砂自密实混凝土性能研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2025.