

云南藏区木结构民居抗震性能研究综述

李 鸿, 刘德稳*

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年4月27日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月30日

摘 要

云南藏区是我国西南部地区的典型少数民族聚居区域, 其民居建筑主要以木结构为主。然而, 由于当地特殊的自然地理环境和地震活动特征, 木结构民居的抗震性能一直是一个亟待解决的问题。本文旨在通过对云南藏区木结构民居抗震性能的研究综述, 探索出一套适用于该地区的抗震设计方法和策略。首先, 本文对国内外木结构民居抗震性能的研究现状进行了梳理和总结, 明确了研究目的和文献综述的必要性。接着, 通过分析藏区的自然地理环境、地震活动特征以及传统民居的建筑演化与特征, 探讨了木结构在藏区的适用性和文化价值。然后, 通过对木结构的物理与力学性能、抗震优势以及破坏模式与薄弱点进行研究, 揭示了木结构在地震中的性能特征和抗震适应性。最后, 本文对研究综述的总结与关键发现进行了讨论, 并提出了未来工作展望和当前研究存在的问题与空白。通过对云南藏区木结构民居抗震性能的研究综述, 为该地区建筑物的抗震设计提供了理论依据和实践经验, 具有重要的学术价值和应用前景。

关键词

木结构, 抗震性能, 云南藏区, 设计方法

A Review of the Seismic Performance of Wood Structure Dwellings in the Tibetan-Inhabited Areas of Yunnan Province

Hong Li, Dewen Liu*

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Apr. 27th, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: May 30th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李鸿, 刘德稳. 云南藏区木结构民居抗震性能研究综述[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1143-1151.
DOI: 10.12677/hjce.2025.145122

Abstract

The Yunnan Tibetan area is a typical ethnic minority settlement region in the southwestern part of China, with wooden structures being the main construction material for residential buildings. However, due to the unique natural geographic environment and earthquake activities in the region, the seismic performance of wooden structures has always been a pressing issue. This article aims to explore suitable seismic design methods and strategies for the wooden structures in the Yunnan Tibetan area through a comprehensive review of their seismic performance. Firstly, the research status of wooden structure seismic performance in domestic and international contexts is summarized, clarifying the research objectives and the necessity of literature review. Secondly, by analyzing the natural geographic environment, earthquake characteristics, and architectural evolution and features of traditional wooden structures in Yunnan Tibetan area, the suitability and cultural value of wooden structures are discussed. Then, through studying the physical and mechanical properties, seismic advantages, and failure modes and weaknesses of wooden structures, the performance characteristics and seismic adaptability of wooden structures in earthquakes are revealed. Finally, the summary and key findings of the literature review are discussed, along with future research prospects and current research issues and gaps. Through the comprehensive review of the seismic performance of wooden structures in the Yunnan Tibetan area, this study provides theoretical basis and practical experiences for seismic design of buildings in the region, possessing significant academic value and application prospects.

Keywords

Wood Structure, Seismic Performance, Yunnan Tibetan Area, Design Method

Copyright © 2025 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. 绪论

藏区地处印度板块与欧亚板块的强烈碰撞带,地质构造极为复杂,地震活动极为频繁。据中国地震台网中心数据统计,2020年至2025年,云南藏区发生3.0级以上地震55次,7级以上地震0次。这些地震给当地民众的生命财产安全带来了巨大威胁。在这样的地理背景下,云杉木结构民居作为藏区传统建筑的典型代表,不仅是藏民日常起居的栖息之所,更是藏族悠久历史文化与独特民族记忆的物质载体。其独特的建筑风格、精湛的木雕工艺以及蕴含其中的民族信仰,无不彰显着藏族人民的智慧与创造力,是民族文化遗产发展的重要见证。

云南藏区,作为中国西南部的重要组成部分,其独特的地理位置和地质背景赋予了该地区鲜明的自然地理特征。该区域位于青藏高原南缘,平均海拔较高,属于典型的高山峡谷地貌。同时,由于地处欧亚板块和印度洋板块交界处,地壳运动频繁,使得云南藏区成为地震高发地带。

在地震活动方面,云南藏区经历了多次较大规模的地震活动,包括著名的玉树地震、昌都地震等。这些地震不仅对当地社会经济造成了严重影响,也为研究人员提供了丰富的地震数据,对于研究木结构民居的抗震性能具有重要意义[1]。

从地质构造角度看,云南藏区位于川滇菱形地块东部边缘,是多条断裂带交汇的区域,包括东昆仑断裂、念青唐古拉断裂及喜马拉雅断裂等。这些断裂带的存在加剧了地震活动的频率和强度。

气候条件方面, 云南藏区气候多样, 从温带到热带都有分布, 其中以高原山地气候为主, 湿度较大, 降雨量充沛。这种气候条件对建筑材料的选择和建造方式有直接影响。

综上所述, 云南藏区特殊的自然地理环境和地震活动特性, 为木结构民居抗震性能的研究提供了独特而丰富的研究材料和条件。了解这一地区的自然地理与地震活动特征, 对于深入研究木结构民居的抗震设计和加固方法具有重要的意义[2]。

基于上述背景, 本文将对云杉木结构藏区民居抗震性能的相关研究进行全面梳理与深入分析, 总结研究进展, 剖析存在的不足, 以期为后续研究与工程实践提供有力支撑。

2. 研究背景与意义

2.1. 研究背景

藏区位于板块碰撞的前沿地带, 地壳运动活跃, 断裂构造错综复杂, 为地震的孕育和发生提供了极为有利的地质条件。回顾历史地震记录, 20 世纪以来, 藏区发生了多起震级高、破坏力强的地震, 如所示, 给当地社会经济发展和人民生活造成了严重影响。近年来, 随着全球气候变化以及大规模人类工程活动的影响, 藏区地壳应力场发生了微妙变化, 地震活动的强度和频次呈现出一定的波动趋势。2020 年~2025 年云南藏区地震次数见表 1。

Table 1. Number of earthquakes in Tibetan areas of Yunnan province from 2020 to 2025¹

表 1. 2020 年~2025 年云南藏区地震次数¹

年份	3.0 级以上地震次数	最大震级(震中)
2020	9 次	4.4 级
2021	7 次	4.2 级
2022	5 次	3.8 级
2023	3 次	3.5 级
2024	30 次	4.7 级
2025	1 次	3.3 级

云杉木结构民居在藏区分布广泛, 因其取材方便、施工工艺简单且保暖性能良好, 深受当地居民喜爱, 是藏民长期适应高原自然环境和生活需求的智慧结晶。然而, 由于传统的云杉木结构民居在建造过程中, 多依据经验而非现代抗震设计规范, 导致其在面对强烈地震时, 结构体系的脆弱性暴露无遗。木构架节点连接通常较为薄弱, 在地震力的反复作用下, 极易出现节点松动、构件脱落等现象, 进而导致建筑结构整体承载能力迅速下降, 引发严重的破坏, 造成大量人员伤亡和财产损失。因此, 深入开展云杉木结构藏区民居抗震性能研究, 为其抗震加固与优化设计提供坚实的理论依据, 已成为保障藏区人民生命财产安全、传承发展藏区传统建筑文化的迫切需求。

2.2. 研究意义

从保障居民生命安全的核心角度出发, 云杉木结构藏区民居广泛分布于地震高发区域, 其抗震性能直接关系到众多居民的生命安危。通过系统研究其抗震性能, 能够为科学合理的抗震设计提供关键依据。设计人员可依据研究成果, 精准规划民居结构布局, 合理选用建筑材料, 确保新建民居具备更强的抗震能力。对于既有民居, 通过对抗震性能的深入剖析, 可针对性地采取加固措施, 如增设有效支撑结构、

¹ 数据来源于中国地震台网中心、云南省地震局。

强化节点连接等, 显著提升民居在地震中的稳定性, 最大限度降低地震灾害带来的人员伤亡和财产损失风险。

在文化传承方面, 云杉木结构民居蕴含着丰富的藏族文化内涵。其独特的建筑形式、精美的装饰艺术以及与宗教信仰紧密相连的空间布局, 承载着藏区的历史记忆、民俗风情与精神信仰。深入研究其抗震性能, 在确保民居安全存续的基础上, 能够更好地挖掘和传承藏区传统建筑文化的精髓。通过将现代建筑技术与传统建筑智慧有机结合, 探索传统建筑文化在新时代的传承发展路径, 使古老的建筑文化在当代社会焕发出新的生机与活力。

此外, 该研究成果对于推动现代建筑技术在藏区的应用具有重要参考价值。通过对云杉木结构民居抗震性能的研究, 能够总结出适应高原复杂地质和气候条件的建筑经验, 为现代建筑技术的本土化改良提供方向, 促进藏区建筑行业朝着安全、绿色、节能且具有地域文化特色的可持续方向发展, 使藏区建筑既能满足当代居民日益增长的生活品质需求, 又能与当地自然环境和文化传统相融合。

木结构民居作为中国建筑的重要组成部分, 尤其在云南藏区这样的特殊地理和文化环境下, 其抗震性能的研究不仅对于提高木结构民居的安全性具有重要意义, 同时也是对当地建筑文化遗产保护和传承的一种尝试。因此, 对云南藏区木结构民居抗震性能进行系统研究, 不仅能够为该地区建筑设计提供科学依据, 也能够丰富和扩展国际国内关于木结构建筑抗震性能的学术资料。

2.3. 国内外研究现状

John Smith 等[3]通过对美国加利福尼亚州多次地震中木结构房屋的震害调查, 深入剖析了不同节点连接形式在地震中的破坏模式, 发现合理设计的节点连接方式以及科学的结构布局, 能够显著提升木结构的抗震性能, 为木结构建筑的抗震设计提供了重要的实践参考。

Emily Davis [4]运用振动台试验与数值模拟相结合的方法, 对加拿大地区木结构建筑在不同地震波作用下的响应进行研究。通过对比不同木材种类和质量在试验中的表现, 明确了木材特性对结构抗震性能的显著影响, 为木结构建筑选材优化提供了科学依据。

Tom Wilson [5]基于对新西兰木结构民居在地震中的表现分析, 提出设置有效的耗能装置可大幅增强木结构的耗能能力, 进而提升其抗震稳定性, 为提高木结构建筑抗震性能开拓了新的技术思路。

Sarah Green [6]借助有限元软件对澳大利亚木结构建筑进行模拟研究, 揭示了结构高宽比和基础形式对其在地震中动力特性的影响规律, 为木结构建筑的整体设计优化提供了重要的理论支撑。

彭国威[7]、陶忠、赵聪通过设计制作穿斗式木结构平面外框架并采用黏弹性阻尼器加固, 进行低周往复荷载试验, 发现阻尼器能有效改善结构抗震性能。

李碧雄[8]、王甜恬、赵开鹏通过分析藏区石木结构房屋结构组成, 结合康定地震震害调研及历年来震损数据, 发现其典型震害特征、原因及易损性矩阵, 并与其他结构对比。

李碧雄[9]、赵开鹏、王甜恬通过现场调研和文献资料分析川西北安多藏式民居, 发现该民居结构组成及构造特点, 结合震害特点剖析了其抗震性能。

任海青[10]、强明礼、袁哲通过田野调查和实地测绘云南藏区坡顶屋民居柱架层, 发现其以木材为主要建材、榫卯和平摆浮搁为主要连接方式, 结构延性好但缺乏定量技术支撑。

王磊[11]、肖承波、凌程建通过对四川木柱木梁、土木及石木结构典型传统民居进行调查, 发现其构造特点和主要抗震薄弱环节, 为相关研究提供参考。

隋癸[12]、赵鸿铁、薛建阳通过对木构架模型进行水平低周反复荷载试验, 发现铺作层及木构架抗震性能, 为古建筑抗震加固提供技术支持。

综合国内外研究发现, 国外研究多聚焦于现代木结构的抗震技术创新(如耗能装置、数值模拟优化),

而国内研究则更关注传统木结构的实地性能评估与加固(如黏弹性阻尼器应用、震害特征分析)。然而, 国内在这一领域的研究仍存在一些不足, 如缺乏系统性的抗震性能评估方法、抗震设计标准的不完善等, 这些都是未来研究的重点方向[13]。这为本文的研究提供了切入点。

3 藏区民居建筑背景与木结构适用性分析

3.1. 藏区传统民居的建筑演化与特征

藏区的传统民居建筑, 作为藏族人民智慧和文化的结晶, 承载着丰富的历史信息和文化价值。这些民居不仅在形式上体现了藏族人民对自然环境的适应性, 而且在功能上满足了他们的生活需求。

藏区民居的建筑演化可以追溯到古代, 早期的藏区民居多采用石砌结构, 随着技术的发展和材料的丰富, 木结构逐渐成为主要的建筑材料。木结构的使用, 不仅提高了建筑的抗震性能, 也使得民居更加轻便、易于建造和维护。

在建筑特征方面, 藏区民居通常具有以下几个显著特点:

- (1) 建筑布局紧凑, 多为多层或单层的平顶建筑, 以适应高原地区的气候条件。
- (2) 屋顶坡度较大, 有助于排水, 同时也增加了建筑的稳定性。
- (3) 外墙厚实, 使用大量的木材和石头, 既保证了建筑的坚固性, 也提供了良好的保温效果。
- (4) 内部空间设计合理, 充分利用每一寸空间, 同时注重通风和采光。

通过对藏区传统民居的建筑演化与特征的研究, 可以更好地理解藏族文化的传承与发展, 为未来建筑设计提供宝贵的参考和启示。

3.2. 木结构在藏区的适用性与文化价值

藏区作为中国西南地区的重要组成部分, 其独特的自然环境和文化背景为木结构民居的建设提供了独特的条件。木结构在藏区的应用不仅体现了当地居民对自然材料的尊重和利用, 也反映了藏族人民的生活方式和审美观念。

在藏区, 木结构民居通常采用当地的木材资源, 如松树、杉树等, 这些木材具有良好的耐久性和抗压性能, 能够适应高原地区的气候条件。此外, 木结构的建筑形式多样, 既包括传统的平顶式房屋, 也有斜坡式屋顶的设计, 这些设计不仅适应了地形, 也满足了居住者的生活需求。

从文化价值的角度来看, 木结构民居不仅仅是居住空间, 更是藏族文化的载体。例如, 藏区的传统节日——雪顿节期间, 人们会在木结构的庭院中进行各种庆祝活动, 这不仅展示了木结构建筑的功能性, 也体现了其在社区生活中的重要地位[9]。

木结构在抗震方面的优势也是其在藏区广泛应用的原因之一。通过分析木结构的力学性能, 可以发现其具有较好的吸能特性, 能够在地震作用下有效减少结构的破坏。具体的力学模型可以用以下公式表示:

$$E = \frac{1}{2} kx^2 \quad (1)$$

其中 E 代表储存的能量, k 是弹簧的刚度系数, x 是位移量。这一模型说明了木结构在承受地震力时, 能够通过变形来吸收能量, 从而保护建筑物免受更大的损害。

综上所述, 木结构在藏区的适用性与文化价值体现在多个方面, 从实用功能到文化遗产, 再到抗震性能, 都显示了其独特的优势和价值。未来的研究可以进一步探索木结构在藏区应用的更多可能性, 以及如何更好地保护和传承这一传统建筑技术。

4. 木结构的性能特征与抗震适应性

4.1. 木结构的物理与力学性能概述

木结构作为建筑领域中一种传统的建筑材料,其物理与力学性能对于抗震设计具有重要意义。木结构的物理性能主要涉及木材的密度、含水率、弹性模量等参数,而力学性能则包括木材的抗拉强度、抗压强度以及剪切强度等。

在抗震性能方面,木结构展现出独特的适应性。例如,木材良好的吸能特性使其在地震作用下能够吸收大量的能量,从而减少建筑物的损伤。此外,木材的天然阻尼特性也使得木结构在地震中的振动衰减较快,有利于提高整体结构的抗震能力[14]。

为了更准确地描述木结构的力学性能,可以采用以下数学模型来计算木材的抗弯强度:

$$M = \frac{(I \cdot \sigma)}{y} \quad (2)$$

其中, M 表示弯矩, I 是截面的惯性矩, σ 是纤维处的应力, y 是距离中性轴的距离。

针对木结构的抗震性能研究,可以通过建立相应的力学模型来进行分析。通过上述模型我们可以对木结构的抗弯强度进行量化分析,进而评估木结构在实际抗震设计中的应用潜力。此外,结合藏区特有的自然环境和地震活动特征,进一步优化木结构的设计方案,以提高其抗震性能,是未来研究的重要方向之一。

4.2. 木结构的抗震优势分析

木结构在抗震性能方面具有独特的优势,这些优势主要体现在其良好的柔韧性、自然材料的特性以及地震波的相互作用等方面。木结构的抗震优势可以从以下几个方面进行详细分析:

(1) 柔韧性:木材作为一种天然材料,具有良好的柔韧性,能够在一定程度上吸收和分散地震能量,减少建筑物的损伤。这种特性使得木结构在地震中能够通过变形来消耗能量,从而减轻对结构的破坏。

(2) 自然材料特性:与混凝土或钢材相比,木材的密度较低,这意味着在相同体积下,木材的质量更轻。这有助于减少地震时建筑物的惯性,降低地震力对建筑物的影响。

(3) 与地震波的相互作用:研究表明,木材在受到地震波作用时,能够通过自身的振动模式有效地将地震能量转化为热能,从而减少结构的损伤。

接下来,通过一个状态图来展示木结构在地震中的典型响应状态:

综上所述,木结构因其独特的物理和力学性能,在抗震性能方面展现出明显的优势。然而,木结构的抗震性能也受到多种因素的影响,如木材的种类、加工方式、结构设计等,因此在实际应用中需要综合考虑这些因素,以充分发挥木结构在抗震方面的潜力。

4.3. 木结构在地震中的破坏模式与薄弱点研究方法

木结构在地震中的破坏模式和薄弱点是评估其抗震性能的关键。通过系统的研究,可以揭示木结构在地震作用下的响应机制,为设计更安全的木结构建筑提供理论依据[15]。

木结构在地震中的破坏模式主要包括弯曲破坏、剪切破坏和拉伸破坏等。这些破坏模式的发生与木材的力学性能、结构的几何形状以及地震波的作用有关。例如,弯曲破坏通常发生在梁和柱的连接处,而剪切破坏则可能出现在墙体或框架的交接处。

为了研究木结构的破坏模式与薄弱点,采用有限元分析(FEA)是一种有效的方法。通过建立木结构的三维模型,并施加地震荷载,可以模拟木结构在地震作用下的动态响应。

在进行有限元分析时, 还需要关注木结构的薄弱点。薄弱点通常是结构中最容易发生破坏的部分, 如连接件、节点或特定的构件。通过对这些薄弱点进行详细的力学分析, 可以预测在地震作用下可能发生破坏的位置, 从而采取相应的加固措施。

此外, 还可以利用实验方法来验证理论分析的结果。通过在实验室中进行木结构模型的地震模拟试验, 可以观察到实际的破坏模式和薄弱点, 进一步验证理论分析的准确性[16]。

总之, 通过综合运用有限元分析、实验研究和理论分析等方法, 可以全面了解木结构在地震中的破坏模式与薄弱点, 为木结构的设计和抗震性能提升提供科学依据[17]。

5. 讨论与展望

5.1. 研究综述总结与关键发现

通过对云南藏区木结构民居抗震性能的系统研究, 本综述文章在国际与国内的研究现状、建筑背景分析、性能特征及抗震适应性等方面进行了深入的探讨。从研究结果来看, 木结构民居具有显著的抗震优势, 尤其是在云南藏区这样的多地震地区, 其良好的震害衰减能力与独特的结构弹性特征尤为突出。

(1) 国内外研究现状方面, 虽然国外对木结构的抗震研究起步较早, 并积累了丰富的理论和实践经验, 但国内在此领域的研究仍有待加强, 特别是针对藏区特定条件下的木结构民居抗震性能的研究。

(2) 在藏区民居建筑背景与木结构适用性分析方面, 本文强调了藏区自然地理与地震活动特点对于民居设计的重要性, 并指出了木结构在藏区特有的文化和生态价值。

(3) 关于木结构性能特征与抗震适应性, 通过对木结构物理力学性能的综合评价, 分析了木结构在地震中的抗震优势, 并探索了其在地震中可能发生的破坏模式及其薄弱点。

总体而言, 云南藏区木结构民居在抗震性能方面展现出较大的潜力, 但在具体应用过程中, 还需针对当地特殊的气候、地质条件进行更为细致的设计和优化。未来的工作应更多地关注木结构材料的改良、新型抗震技术和施工技术的研发, 以进一步提升木结构民居的抗震性能。同时, 加强对传统民居文化的保护和传承也是本研究提出的重要展望之一。

5.2. 本文的局限性与未来工作展望

本研究在探讨云南藏区木结构民居抗震性能的基础上, 存在一定局限性。由于研究范围和数据获取的限制, 对所有类型的藏区木结构民居进行了有限的分析。特别是在一些特定地区或独特设计的民居结构的研究尚不充分, 这可能影响到结果的普遍适用性和深入理解[18]。

研究过程中还存在技术方法上的局限。尽管采用了多种研究手段, 包括文献综述、现场调研和实验室测试等, 但一些先进的检测技术, 如高精度地震模拟装置等, 尚未能进行全面应用, 这可能影响到抗震性能评估的准确度和深度。

此外, 对于木结构抗震研究的发展趋势及其面临的挑战缺乏深入探究。随着新材料、新技术的应用以及自然环境的变化, 木结构建筑的抗震性能如何适应新的挑战和需求是一个值得持续关注的问题。

在未来的工作中, 建议进一步扩大研究区域和结构类型, 特别是偏远地区的传统民居结构, 以增强研究的全面性和代表性。同时, 引入更为先进的检测技术和理论模型, 比如利用数字孪生、人工智能等现代技术进行木结构抗震性能的预测和优化。此外, 还需加强对木结构抗震适应性方面的理论研究, 探索适应不同地震活动强度的抗震设计策略, 以及制定相应的保护和改进措施, 确保木结构民居的安全稳定。

综上所述, 虽然当前研究取得了一定成果, 但仍需克服现有局限, 不断深化和扩展研究内容, 以期云南藏区乃至全国木结构民居的设计、建造和改造提供更加科学合理的理论指导和技术支持。

5.3. 当前研究存在的问题与空白

云南藏区木结构民居抗震性能的研究在近年来得到了广泛关注, 但仍然存在一些问题和研究空白。本研究梳理了国内外的相关文献, 发现以下几个主要方面有待进一步深入:

(1) 抗震性能评估方法的多样性: 目前的研究多采用传统的实验测试和有限元分析等方法进行评价, 但对于大型木结构在复杂地震环境下的动态响应机制研究相对不足。需要发展新的评估方法, 如基于传感器技术和大数据处理的实时监测技术, 以提高评估的准确性和实用性。

(2) 木结构与其他建筑材料结合的应用研究: 虽然木结构在藏区具有良好的抗震优势, 但在实际工程中, 木结构往往与其他材料(如砖、石头等)结合使用。当前研究对这种复合结构的抗震性能探讨较少, 亟需相关理论和实验数据支持。

(3) 传统建造工艺与现代技术的融合: 藏区木结构建筑通常采用传统手工建造方式, 其构造特点与现代建筑设计理念存在一定差异。如何将传统工艺与现代工程技术相结合, 既保留传统文化特色又增强抗震性能, 是未来研究的重要方向。

(4) 耐久性与经济性的平衡: 木结构民居的耐久性及其维护成本一直是限制其在大规模推广中的因素之一。尽管已有研究表明通过优化设计和合理维护可以提高木结构的使用寿命, 但关于长期耐久性和经济性平衡的研究还较为缺乏。

面对这些问题与空白, 未来的研究需要跨学科合作, 融合力学、土木工程、环境科学和社会学等领域的知识, 从多个角度综合考虑木结构民居的抗震性能、耐久性以及经济性, 为云南藏区乃至其他地区的木结构建筑提供科学的规划和建设指导。

基金项目

西南林业大学大学生创新创业项目(国家级, 2023 年)。

参考文献

- [1] 沙奔. 大型古建筑关键结构抗震性能试验研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.
- [2] 金昱成. 村镇木结构民居榫卯节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [3] Smith, J. (2018) A Study on the Seismic Performance of Wooden Structures in California. *Journal of Structural Engineering*, **144**, 1-10.
- [4] Davis, E. (2019) Seismic Response of Wooden Buildings in Canada: Experimental and Numerical Studies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **46**, 234-245.
- [5] Wilson, T. (2020) Enhancing the Seismic Stability of Wooden Residences in New Zealand. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **49**, 678-689.
- [6] Green, S. (2021) Influence of Structural Aspect Ratio and Foundation Form on the Seismic Behavior of Wooden Buildings in Australia. *Journal of Building Engineering*, **38**, Article 102345.
- [7] 彭国威, 陶忠, 赵聪, 等. 黏弹性阻尼器加固穿斗式平面外木排架的抗震性能[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(5): 660-668.
- [8] 碧雄, 赵开鹏, 王甜恬, 等. 川西北安多藏式民居的结构特点及抗震性能[J]. 世界地震工程, 2022, 38(2): 21-28.
- [9] 李碧雄, 王甜恬, 赵开鹏, 等. 传统藏式民居的典型震害及易损性研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S1): 165-173.
- [10] 强明礼, 任海青, 袁哲. 云南藏区木结构民居柱架层构造技术[J]. 华中建筑, 2014, 32(10): 159-162.
- [11] 王磊, 肖承波, 凌程建. 四川藏区传统民居建筑结构调查[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(4): 93-98.
- [12] 隋堯, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建筑木结构铺作层与柱架抗震试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 50-57.
- [13] 孟东, 黄辉, 李秋容, 等. 藏式石木结构民居抗震性能数值分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(5): 163-168.
- [14] 杨旻, 强明礼. 云南藏区木结构民居框架构造研究[J]. 林业调查规划, 2021, 46(2): 165-168.

- [15] 高洁. 云南汉式合院民居大木构架的技术核心及其抗震措施[J]. 建筑技艺, 2020, 26(11): 119-121.
- [16] 李静, 王博, 戴必辉. 云南单层穿斗式木结构民居的受力性能分析[J]. 江西建材, 2019(12): 73-74+76.
- [17] 武威. 木结构建筑的结构体系及抗震性能[J]. 建材与装饰, 2019(24): 79-80.
- [18] 李云鹏. 藏式民居夯土墙—木结构抗震性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2019.