文史哲论丛
Literature, History and Philosophy
ISSN Print: 3079-5400
ISSN Online: 3079-5419
https://doi.org/10.63313/LHP.8062

北京地区汉白玉岩石学溯源研究的可行性分析与方法陈述

程逸仙

考古学专业，北京联合大学，北京

发布日期：2026年10月16日

摘　要

汉白玉是我国古代高等级建筑重要碳酸盐石材，元明清北京皇家建筑所用汉白玉史料多记载采自房山大石窝，但长期缺乏实物多维度科学比对实证。本文围绕北京地区汉白玉岩石学溯源开展可行性分析，梳理相关地质与营建史料，论证溯源工作的现实条件与技术路径。房山大石窝汉白玉为白云石型大理岩，具备白云石含量超98%、高镁低杂质、0.05-0.3mm细粒花岗变晶结构的标志性特征，可与曲阳、宝兴等产地石材有效区分，为溯源提供物质基础。研究拟采集大石窝原石及故宫、天坛等古建筑构件样品，依托偏光显微镜、SEM-EDS、XRF、XRD成熟测试技术，构建矿物-结构-地球化学三维判别指标，结合统计分析完成产地判别，并与历史文献交叉校验。现有地质研究基础、成熟的科技考古手段与可获取的文物样品共同支撑该溯源研究具备较强可行性，可填补“有文献无实证”的研究空白，为石质文物保护、古代营建制度研究提供可复制的科学范式。

关键词

汉白玉；房山大石窝；岩石学特征；产地溯源；科技考古

Research on the Petrological Provenance Tracing of White Marble in the Beijing Area

Yixian Cheng

Major in Archaeology, Beijing Union University, Beijing, China

Abstract

White marble was a key carbonate stone used in high-grade ancient Chinese architecture. Historical records indicate that the white marble used in imperial Beijing buildings during the Yuan, Ming, and Qing dynasties was primarily sourced from Dashiwo in Fangshan.White marble was a key carbonate stone used in high-grade ancient Chinese architecture. Historical records indicate that the white marble used in imperial Beijing buildings during the Yuan, Ming, and Qing dynasties was primarily sourced from Dashiwo in Fangshan. However, long-term

文章引用：程逸仙．(2026)．北京地区汉白玉岩石学溯源研究的可行性分析与方法陈述．文史哲论丛，2(3)，57－71.
ISSN Print: 3079-5400, ISSN Online: 3079-5419.
DOI: 10.63313/LHP.8062

multidimensional scientific comparisons and empirical evidence have been lacking. This study conducts a feasibility analysis on the petrological provenance tracing of white marble in the Beijing region, systematically reviews relevant geological and construction historical materials, and discusses the practical conditions and technical approaches for such tracing. The Dashiwo white marble from Fangshan is a dolomitic marble characterized by over 98% dolomite content, high magnesium levels, low impurities, and a fine-grained (0.05 – 0.3 mm) granular recrystallized texture—distinctive features that clearly differentiate it from marbles produced in other regions such as Quyang and Baoxing, thus providing a solid material basis for provenance identification. The study plans to collect samples of raw stones from Dashiwo and architectural components from historic sites including the Forbidden City and the Temple of Heaven. Using established analytical techniques such as polarizing microscopy, SEM-EDS, XRF, and XRD, we aim to establish a three-dimensional discrimination system based on mineralogy, texture, and geochemistry, perform statistical analysis for source identification, and cross-validate findings with historical documents. Supported by existing geological research, advanced scientific archaeological methods, and accessible cultural heritage samples, this provenance study demonstrates strong feasibility. However, long-term multidimensional scientific comparisons and empirical evidence have been lacking. This study conducts a feasibility analysis on the petrological provenance tracing of white marble in the Beijing region, systematically reviews relevant geological and construction historical materials, and discusses the practical conditions and technical approaches for such tracing. The Dashiwo white marble from Fangshan is a dolomitic marble characterized by over 98% dolomite content, high magnesium levels, low impurities, and a fine-grained (0.05 – 0.3 mm) granular recrystallized texture—distinctive features that clearly differentiate it from marbles produced in other regions such as Quyang and Baoxing, thus providing a solid material basis for provenance identification. The study plans to collect samples of raw stones from Dashiwo and architectural components from historic sites including the Forbidden City and the Temple of Heaven. Using established analytical techniques such as polarizing microscopy, SEM-EDS, XRF, and XRD, we aim to establish a three-dimensional discrimination system based on mineralogy, texture, and geochemistry, perform statistical analysis for source identification, and cross-validate findings with historical documents. Supported by existing geological research, advanced scientific archaeological methods, and accessible cultural heritage samples, this provenance study demonstrates strong feasibility. It can fill the gap between documented records and empirical verification, offering a replicable scientific framework for stone conservation and research into ancient construction systems. It can fill the gap between documented records and empirical verification, offering a replicable scientific framework for stone conservation and research into ancient construction systems.

Keywords

White Marble; Dashiwo of Fangshan; Petrological Characteristics; Provenance Tracing; Scientific Archaeology

Copyright © 2026 by author(s) and Erytis Publishing Limited.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

1.1. 选题背景

1.1.1. 汉白玉概述

汉白玉是中国特有的优质碳酸盐石材，属于大理岩的一种，是由石灰岩或白云岩经区域变质或热接触变质作用形成的变质岩，具有高镁低杂质的纯净特性。

汉白玉的名称来源于中国古代对洁白如玉的石材的雅称，其质地坚硬洁白，石体中泛出淡淡的水印，即人们常说的"汗迹线"。汉白玉白如雪，坚如玉，面如霜，清润素雅，雕刻出的艺术作品庄重伟岸，富贵高雅，是中国最早被国际市场认可的一种优质白色大理石。因其优良的物理性能，被广泛用于宫殿、坛庙、陵寝、园林等高级别建筑的关键结构部位与装饰构件，有着区分礼制等级、展现艺术审美、承担文化象征的作用。

根据其主要矿物成分的不同，汉白玉可分为白云石型汉白玉和方解石型汉白玉两类。白云石型汉白玉主要矿物为白云石，含量通常在 92%以上，质地纯净，硬度较高（摩氏硬度 4.0~4.6），耐酸碱腐蚀性能较好。北京房山产的汉白玉即属此类。方解石型汉白玉主要矿物为方解石，硬度较低（摩氏硬度 3.3~3.5），遇酸剧烈起泡。四川雅安、湖北宜昌等地出产的汉白玉多属此类。

北京作为元、明、清三朝古都及当代中国首都，集中体现了汉白玉应用的巅峰成就，形成了无可比拟的“汉白玉使用中心”地位。北京房山区大石窝镇拥有得天独厚的汉白玉矿源。据统计，全国 83 种优质石材中，北京有 4 种，其中房山区 3 种，而大石窝镇占 2 种，分别被命名为国标 M1101 的"汉白玉"和 M1102 的"艾叶青"房山大石窝汉白玉被命名为 M1101，称之为"中国一号"，并以抗压强度 156.4Mpa，抗弯强度 19.12Mpa，肖氏硬度 42.4 度，抛光度 102 度而名列"中国名特石材品种"之首[2] 。自古至今在中国建筑史、艺术史与文化遗产中占据着无可替代的核心地位[1]。地质学研究证实，大石窝的汉白玉属含叠层石硅质条带白云岩经燕山期岩浆热力变质而成的大理岩，质地均匀，储量丰富，品质上乘。该地的开采历史可追溯至隋唐时期，至元明清三代因都城建设而达到鼎盛。明代永乐年间修建故宫的台基与石构件主要取材于此。这种“就地取材”或“近畿供应”的模式，为北京大规模、持续性的汉白玉应用提供了稳定且高品质的物质基础。 北京的古建筑体系中，汉白玉的应用达到了前所未有的广度与深度，形成了强烈的视觉符号与空间语言。

研究北京古建筑中的汉白玉，是切入中国物质文化遗产保护与研究关键路径，对于全国范围内的汉白玉研究都有着重要的意义。本研究正是立足于这一背景，选取北京地区古建筑所使用的汉白玉构件作为研究对象。

1.1.2. 房山大石窝汉白玉使用历史

史料记载"汉白玉"的开发利用在战国时期就有出现，如北齐云居寺石经雕刻[3]，在建筑工程中的开采运用历史可以追溯到汉代，同时代，汉白玉也多用于诸侯王陵墓玉器，如大葆台汉墓中就有出土汉白玉器[9]。从隋朝静琬法师为避免佛经遭法难被毁而开启的千年石经雕刻开始，隋唐时期汉白玉在各方面的运用已十分普遍，例如唐开元年间建造金仙公主塔，就是使用汉白玉砌筑。但早在公元 560 年的北齐时代，汉白玉就是雕刻石经的主要材料，北齐云居寺石经雕刻就是使用了汉白玉[8]。辽、金特别是明清时期广泛应用于浩大的宫廷陵墓乃至皇家园林，文献记载，金代朝廷下令工匠至大石窝采石，开采加工初具规模，金代陵寝、元代大都建设均有汉白玉的使用[5][6][7]。

目前学界与历史文献对北京古代建筑所用汉白玉的产地已有较为一致的认识。历代官修史籍、方志及工程档案均明确记载，元、明、清时期北京皇家建筑所使用的汉白玉（古称白玉石）主要取自房山大石窝。

早在北魏时期，《水经注》中已提及今房山一带产“珉玉、燕石”，“圣水东径玉石山，谓之玉石口。山多珉玉、燕石，故以玉石名之。”为该地区石材利用的早期记录。元代《元史·百官志·将作院》记载，“大都采石局，秩从五品，大使、副使各一员，掌采炼石等物。汉白玉专采于房山大石窝。”，

可见建都大都后，朝廷专设采石机构，汉白玉石料已定点采自大石窝，并确立形成了皇家专供制度。

明成祖朱棣永乐四年(1406)下诏书，筹建宫殿，分遣大臣采集木材。北京临时政权从两江、山东、山西等全国各地招募大批工匠和差役，从事采石加工，在元大都宫殿废墟上筹建宫殿、皇城，用了十余年时间，到永乐十八年(1420)主要建筑建造完成，营建北京宫殿、坛庙与陵寝过程中，大量使用了房山大石窝的汉白玉和工匠，1421 年永乐皇帝朱棣迁都北京紫禁城，清 •朱彝尊等的《日下旧闻考 •卷一百五十 •物产》中记载：“白玉石产大石窝，青砂石产马鞍山、牛栏山、石径山……大石窝至京城一百四十里……产白石如玉，专供大内及陵寝阶砌栏楯之用”，明确了大石窝白玉石专供皇宫、陵寝的营建。《明实录》《大明会典》等官方文献多次记载遣官赴大石窝开采白玉石，用于殿陛、栏楯、台基等关键建筑构件：“凡宫殿、陵寝、坛庙、城垣、桥梁等项工程，需用白玉石者，俱于房山大石窝开采，由工部营缮司估料、派夫、运解。”《帝京景物略》中，“紫禁城阶陛栏楯，皆白玉石，莹彻无瑕，采自房山大石窝。去京百四十里，石工数千，凿山取石，累岁不绝。”等文献亦直接指出，紫禁城所用汉白玉均来自大石窝产地。故宫建筑群用了大量的房山大石窝汉白玉做须弥基座及各种装饰，充分体现了我国古代建筑艺术的独特风格，在世界建筑史上也具有十分重要的地位。故宫最大的石雕是嵌于保和殿丹墀上的云龙阶石，原为明代雕制，清乾隆二十六年(1761)凿去旧纹饰重雕。这块雕着流云游龙的阶石，长 16.75 米，宽 3.07 米，厚 1.70 米，是用一整块汉白玉石料雕刻而成。据估算，这块汉白玉阶石重约 250 吨。此外，基础上的条石、须弥基座、柱础、台阶、石栏等汉白玉石料，也都采自房山大石窝。

清代沿袭明制，李鸿章等修著的《光绪顺天府志 • 卷三十七 • 地理志 • 山川》中提到： 大石窝，在房山县西南四十里，石产其间，质良而色白，名白玉石。宫殿、坛庙、陵寝阶砌栏楯，咸取给焉。可见其作为官方总志，权威地确认大石窝为皇家白玉石唯一来源。而康熙版《房山县志》则作为一手地方官修资料，明确了“大石窝在县西南六十里黄龙山下，前产青白石，后产白玉石，小者数丈，大者数十丈，宫殿、陵寝、坛庙、桥梁建筑多采于此。” 中国第一历史档案馆藏的《内务府奏销档》中的乾隆档提到：“乾隆二十五年，重修太和殿、保和殿，需用白玉石陛石、栏板若干，俱派官赴房山大石窝开采，由工部会同内务府监运。”可见乾隆二十五年；乾隆重修故宫，汉白玉仍采自大石窝。

综合上述文献可见，汉白玉是北京古建筑中最具代表性的石料之一，其使用贯穿了北京地区近两千年的营建史。房山大石窝是北京地区古代皇家建筑汉白玉材料的核心产地，其开采、运输与使用贯穿元明清三代北京城市营建史，相关史料链条完整、记载明确，可为古建筑石材溯源、材质分析及历史营造研究提供坚实依据。在完备的历史文献记载的基础上，进行科技考古的溯源研究，是对历史文献的印证和补全，对于深入研究北京地区的汉白玉使用史有着重要的意义。

1.1.3. 北京周边地区汉白玉应用史

我国比较著名的汉白玉产地有北京房山、河北曲阳、云南大理、四川宝兴等。

云南大理位于云南省中部偏西，大理石主要产在城西的点苍山,为变质型大理石，储量丰富，品种众多。大理石主要品种有“苍白玉”、“雪花白”、“墨玉”等。云南大理石开采使用历史也早，大约始于唐代，明李元阳《嘉靖大理府志》记载：“点苍山……唐李德裕平泉庄醒酒石即此产也”。《新纂云南通志 • 工业考》记载：“大理石特美,……神宗熙宁九年,大理遣吏贡金装碧研山”。就是说，唐朝云南大理石已被用于建筑材料，宋时大理石制品被确定为云南地区贡品。

四川宝兴县隶属于四川雅安市，位于四川的西部。宝兴县盛产的大理石，主要以白色大理石为主，称之为“宝兴白”或“蜀白玉”。“宝兴白”开采于 20 世纪 80 年代，目前已发展成为国内外名贵石材，并与北京“汉白玉”相媲美。

地处北京周边的河北曲阳汉白玉，是重点的讨论对象。明清时期皇家营建文献明确区分曲阳与房山

汉白玉的功能边界，形成体系化用材制度。

清英廉等奉敕编《日下旧闻考》记载：“白玉石产大石窝……专供大内及陵寝阶砌栏楯之用”，明确房山汉白玉的主体承重地位；而曲阳汉白玉则以“雕刻专用”为核心，适配故宫精细装饰场景。明申时行等修《明会典》卷一百一记载，明代北京营建石材采办中，“白石（即汉白玉）分置产地，以雕刻、承重分用”，直接确立曲阳汉白玉在故宫建筑中的装饰应用定位。

河北曲阳以黄山为核心的汉白玉矿区，产出方解石-白云石型汉白玉，质地温润、晶粒细腻、易雕琢，虽白度与硬度稍逊于北京房山汉白玉，却成为中国古代魏晋至明清时期，石雕造像、建筑精细雕刻构件的核心用材，同时为部分皇家建筑、佛教建筑提供辅助汉白玉料，是晚清以前汉白玉用材中“雕刻专用”的代表性产地，相关记载多见于地方县志、佛教典籍与考古发掘报告。

曲阳汉白玉的应用历史可追溯至北魏，其核心应用场景为佛教造像，北魏至唐代营建的曲阳修德寺佛造像群，两千余件佛造像本体、底座、背光均采用曲阳黄山产汉白玉，韩爱营《曲阳县志》中记载“黄山自古出白石，可为碑志诸物，环山诸村多石工”，明确了曲阳黄山汉白玉的开采与雕刻应用传统，罗福颐《河北曲阳县出土石像清理工作简报》亦通过考古发掘证实，修德寺佛造像的材质均为曲阳黄山本地产汉白玉，成为魏晋南北朝佛教造像用材的经典范例。唐代曲阳汉白玉的应用范围拓展至西南地区佛教建筑，唐天宝十一载营建的五台山佛光寺释迦佛坐像，其造像本体与台座均为曲阳黄山汉白玉雕琢，《古清凉传》卷下记载“梵僧请智才和尚从曲阳黄山造玉石舍利函，运往五台山安置，同期佛造像亦用此石”，佛座现存铭文“大唐天宝十一载……为国敬造台山佛光寺无垢净光塔玉石释迦牟尼佛”，与典籍记载相互印证，且曲阳石匠同期参与该造像雕琢，成为曲阳汉白玉跨区域应用的实证。

至明代，曲阳黄山汉白玉成为皇家建筑精细雕刻构件的专用材，故宫断虹桥的桥面浮雕、栏板纹饰等精细雕刻部分，均采用曲阳黄山汉白玉，《曲阳汉白玉石雕艺术及其文化传承研究》中明确“故宫断虹桥为曲阳石雕代表作，所用汉白玉产自曲阳黄山”，因该产地石材易雕琢的特质，适配复杂纹饰的雕刻需求，与北京房山汉白玉的“主体构件专用”形成功能互补。清代曲阳黄山汉白玉的应用集中于皇家陵寝的精细雕刻，清雍正八年至道光年间营建的清西陵，其泰陵、昌陵的丹陛石浮雕、石牌坊纹饰、陵寝栏板精细雕刻等，均采用曲阳黄山汉白玉，韩爱营《曲阳县志》载“清西陵石雕多用曲阳黄山白石，环山石工参与营建”，《曲阳汉白玉石雕艺术及其文化传承研究》亦佐证“明清皇家陵墓精细雕刻构件多选用曲阳汉白玉，清西陵丹陛石为曲阳黄山所产”，形成“房山汉白玉做主体、曲阳汉白玉做雕刻”的清代皇家建筑用材格局。

1.2. 研究目的及意义

本研究以北京房山汉白玉及区域内典型汉白玉古建筑为对象，探讨能否通过岩石学与地球化学分析，系统揭示房山汉白玉的元素质和矿物质特征，以科技考古方法开展古建筑石材产地比对与溯源研究，科学判定建筑石料与房山大石窝产地的对应关系；结合历史文献与方志资料，厘清元明清时期北京皇家建筑中汉白玉的来源、选材与使用规律，最终为北京地区汉白玉文物建筑的科学认知、历史阐释与学术研究提供系统、严谨的科学依据。

汉白玉作为中国传统文化与建筑的瑰宝，其科学研究是文物保护工作的基石。探究北京房山汉白玉的岩石学特征，具有重要的科学价值与学术意义。通过系统分析北京房山大石窝汉白玉的矿物组成、化学成分、结构构造、质地差异与成因类型，能够系统揭示汉白玉成为古代皇家高等级建筑专用石材的物质基础，完善中国古代都城营建中重要建筑材料的科学认知体系，从岩石学本质上阐明房山汉白玉成为历代皇家建筑首选石材的内在依据，揭示其独特材质与都城高等级建筑之间的内在联系，完善中国古代都城营建中重要建筑材料的科学认知体系。同时，在考古学研究方面，以科技考古手段对北京地区汉白

玉文物建筑进行精准石材溯源，能够借助现代科学技术印证并补充历史文献记载，以客观数据明确文物建筑所用汉白玉与房山大石窝产地之间的对应关系，还原元明清时期北京皇家建筑的石料来源、开采格局、选材标准与物料调配制度，为都城营建史、建筑史、手工业史与区域资源利用史提供坚实的科学支撑。将岩石学特征研究与科技考古溯源相结合，不仅可以深化对汉白玉文物建筑历史价值、艺术价值与文化象征意义的理解，还能推动建筑考古与文物科技的交叉融合，为北京地区古代皇家建筑的价值阐释、历史复原与学术研究提供更加系统、严谨、全面的理论与方法支撑。

使用现代科技完成的不可移动的大型文物溯源工作，是一种可以与文献资料进行相互补正、对比研究的可信资料。汉白玉的产地溯源研究，不仅为文物鉴定提供科学依据，也对现代汉白玉资源的合理利用与保护具有指导意义。本文的研究深入了过往汉白玉的研究，给未来的研究工作提供了新的样本。

1.3. 研究内容

本研究以北京地区古代建筑中使用的汉白玉石材为核心研究对象，聚焦于房山大石窝汉白玉的岩石学特征及其与古建筑汉白玉构件的产地溯源关系的研究探讨。研究内容涵盖汉白玉岩石学特征分析、古建筑样品对比、科技考古溯源三个方面。通过多学科交叉的研究方法，旨在模拟一套系统、科学、可验证的汉白玉石材溯源体系，为北京地区古建筑材料的科学研究、文物保护与历史阐释提供基础数据和理论支撑。

首先，对于北京房山大石窝汉白玉进行岩石学特征系统分析

本研究首先对房山大石窝产出的汉白玉进行系统的岩石学特征分析，明确其作为中国建筑史上重要石材的物质基础。该部分研究内容包括以下几个方面：

矿物组成与物相分析，即通过偏光显微镜观察，系统鉴定房山汉白玉的主要矿物组成。，明确房山汉白玉以白云石为主，含微量石英、云母等次要矿物的矿物组合特征。

化学成分与地球化学特征，即，采用 X 射线荧光光谱仪对房山汉白玉的主量元素（如 CaO、MgO、SiO□、Al□O□等）和微量元素（如 Sr、Ba、Mn、Fe 等）进行定量分析。重点探讨 Ca/Mg 比值、Sr 元素含量、稀土元素配分模式等地球化学指标，揭示其“高镁低杂质”的化学本质，确立房山汉白玉的地球化学“指纹”特征。

结构构造与微观形貌

利用偏光显微镜和扫描电子显微镜对房山汉白玉的晶体结构、晶粒大小、晶界形态、裂隙发育情况等进行系统观察‘探讨其与石材加工性能、风化抗性之间的内在联系。

第二，进行北京地区典型古建筑汉白玉构件的样品采集与岩石学测试

为开展产地溯源研究，本研究选取北京地区元、明、清时期具有代表性的皇家建筑，采集其汉白玉构件样品进行岩石学与地球化学测试。具体内容包括：

样品采集与记录，即拟定选取故宫（如太和殿、保和殿、云龙阶石）、天坛（祈年殿、圜丘）、颐和园（排云殿、石舫）、十三陵（长陵、定陵）等典型古建筑，采集其汉白玉构件的残片或允许取样的非核心部位样品。所有样品均进行详细记录，包括采集地点、构件类型、历史年代、外观特征、取样位置等，确保样本地质背景与历史背景清晰可考。

而后，进行岩相学与矿物学分析。采用薄片岩石学方法，对古建筑样品进行偏光显微镜观察，鉴定其矿物组成、晶粒结构、包裹体特征、蚀变现象等，建立古建筑样品的岩相学特征数据库。重点对比其与房山大石窝样品在矿物类型、晶粒大小、结构类型等方面的异同。利用扫描电子显微镜-能谱分析（SEM-EDS）对古建筑样品进行微观形貌观察与微区成分测定，获取其晶体形态、晶界特征、微裂隙发育情况及 Ca、Mg、Sr、Mn 等元素的微区分布规律，为后续溯源比对提供微观层面的数据支持。采用

XRF 对古建筑样品进行主量元素与微量元素的全岩分析，建立古建筑样品的化学组成数据库。重点关注 Ca/Mg 比值、Sr/Ba 比值、稀土元素配分模式等地球化学指标，为与房山样品的对比提供定量依据。

最后，进行基于科技考古的汉白玉古建筑石材产地溯源研究

在前两部分研究基础上，本研究开展汉白玉古建筑石材的产地溯源研究。

首先，将古建筑样品的矿物学、岩相学、地球化学特征与房山大石窝样品进行系统对比，建立“矿物组合—元素组成—结构构造”三维对比模型。通过聚类分析、主成分分析等统计方法，定量评估古建筑样品与房山样品的相似性与差异性，判定其是否来源于大石窝矿区。

其次，构建产地判别指标数据。

结合已有研究成果与本实验数据，提炼可用于汉白玉产地判别的关键指标，如白云石含量、Ca/Mg 比值、Sr 元素丰度、晶粒尺寸分布、稀土元素配分模式等，构建一套适用于北京地区汉白玉溯源的判别指标数据。

最后，将溯源结果与历史文献记载（如《元史·百官志》《明实录》《大明会典》《光绪顺天府志》等）进行对比验证，探讨科学数据与文献记载的吻合度与差异性。对于文献未记载或记载模糊的建筑构件，通过科技手段补充其来源信息，填补历史空白。

本模拟研究在以下几个方面具有明显的创新性与学术贡献：尽管已有大量文献记载和岩石学特征研究指出北京古建筑所用汉白玉主要来自房山大石窝，但尚未有研究系统性地将大石窝原产石材与古建筑中实际使用的汉白玉构件进行直接的、多维度科学对比。本研究首次通过系统的实验分析，首次系统开展房山大石窝汉白玉与北京古建筑汉白玉构件的多维对比研究，填补了此前研究中“有文献无实证”的关键空白。本研究将传统岩石学、矿物学、地球化学方法应用于不可移动文物的溯源研究，采用薄片岩石学、SEM-EDS、XRF、XRD 等多种现代科技手段，从矿物组成、元素成分、结构构造三个维度进行交叉验证，构建了一个多维、互补的科学溯源框架，不仅依赖文献记载，更通过实验数据与历史采石记录、古建筑使用背景相结合，实现了文献考证与科学实证的有机融合，为古代建筑材料溯源研究提供了可复制的研究范式。

综上所述，本研究在方法论集成、实证对比、学科交叉等方面均体现出明显的创新性，为汉白玉及相关文化遗产的科学研究提供了新的思路和技术路径。

1.4. 研究方法

为系统探究北京房山汉白玉的岩石学特征并揭示北京地区古建筑汉白玉石材的材料来源，本研究对研究过程进行系统的模拟。首先选取北京房山大石窝开采的汉白玉原石样品与北京地区典型古建筑（如故宫、天坛、颐和园等）所采用的汉白玉构件样品，综合运用岩石学、矿物学及地球化学等多学科分析方法，开展系统对比研究。研究旨在通过科学手段获取两类样品在矿物组成、结构构造、元素成分等方面的特征数据，进而探讨北京地区古建筑汉白玉构件与大石窝汉白玉之间的物质关联，为古建筑材料的溯源研究提供科学依据。

1.4.1. 样品采集

在样品采集阶段，要严格遵循地质采样规范，分别于大石窝地区典型开采点采集原生汉白玉岩石样品，同时在北京地区若干处代表性古建筑中采集具有明确历史背景的汉白玉构件残片或允许取样的非核心部位样品。所有样品均进行详细记录、编号、拍照，并标注采集地点、层位及外观特征等信息，确保样本地质背景和历史背景清晰可考。样品制备与分析阶段，首先采用薄片岩石学方法对样品进行基础性研究。该方法的核心是将岩石磨成约 0.03 毫米厚的标准薄片，在偏光显微镜下进行观察，从而研究岩石

的矿物组成、结构、构造及成因。

1.4.2. 偏光显微镜

具体操作时，将汉白玉样品切割并磨制成标准厚度的薄片，随后利用偏光显微镜进行系统观察。偏光显微镜是一种载物台下装有起偏器、物镜与目镜之间装有检偏器的特殊显微镜，能够检测物质的各向同性和各向异性双折射性质。其基本原理基于单折射性与双折射性：光线通过各向同性物质时，光的性质和进路不因照射方向而改变；而光线通过各向异性物质时，光的速度、折射率、吸收性等因照射方向而呈现差异。汉白玉中的方解石、白云石等矿物具有典型的双折射特性，因此在偏光显微镜下能够清晰分辨。此外，光的偏振现象是偏光显微镜工作的核心，光的振动面只限于某一固定方向时称为平面偏振光，通过起偏器和检偏器的配合，可对矿物进行单偏光观察、正交偏光观察和锥光观察。在观察过程中，依据矿物光学特性，如颜色、解理、干涉色等，准确鉴定方解石、白云石等矿物；通过观察矿物的结晶程度、颗粒大小及形状，分析岩石的结构类型，如细晶结构或粗晶结构；同时通过矿物间的包裹关系、蚀变特征等，推断岩石经历的变质作用或后期交代历史。薄片岩石学作为将野外采集的岩石通过显微镜进行精细分析的手段，是获取岩石形成与演化密码的关键技术，为后续微区成分分析和物相鉴定提供了重要的矿物学背景支撑。

1.4.3. 扫描电子显微镜-能谱分析（SEM-EDS）研究

在微观形貌与元素成分分析方面，研究采用扫描电子显微镜结合能谱分析技术。扫描电子显微镜通过电子束轰击样品表面，采集经电子和物质的相互作用所产生的二次电子、背散射电子、吸收电子、透射电子等多种信号，从而得到待测物质微观形貌的信息。具体操作时将样品制备为自然面、块状或粉末状，对不导电样品蒸镀一层厚约 20 纳米的导电膜，然后置于电镜中观察。扫描电镜具有放大倍率连续可调、高分辨率可达 1 纳米、图像景深大立体感强、样品制备简单等优点，能够清晰呈现汉白玉样品表面的微观形貌特征，如矿物颗粒的边界形态、裂隙发育情况、蚀变现象及次生矿物的分布状态。同时，能谱分析作为扫描电镜的专用附件，能够对样品中特定微区进行元素成分测定，获取钙、镁、硅、铝、铁等主要元素及微量元素的分布信息。通过对比大石窝样品与古建筑样品在微观结构和元素组成上的异同，为溯源研究提供重要的地球化学依据。

1.4.4. 使用 X 射线荧光光谱仪（XRF）

为进一步获取样品的全岩化学成分，研究使用 X 射线荧光光谱仪对汉白玉样品进行主量元素和微量元素分析。X 射线荧光光谱分析是一种非破坏性的仪器分析方法，其基本原理是利用 X 射线管产生的一次 X 射线照射样品，使样品中各元素产生特征 X 射线荧光光谱，通过分辨和测量这些特征光谱的波长和强度，从而测定各元素的含量。研究中采用台式 X 射线荧光光谱仪，按照分辨特征光谱的方式可分为波长色散型和能量色散型。波长色散型荧光光谱仪利用分光晶体的衍射来分离样品中的多色辐射，由光源、样品室、分光晶体和检测系统等组成，分光晶体安装于精密测角仪上，通过精确测量衍射光束与入射光束的夹角来分析特征 X 射线，由于晶体衍射造成强度损失，需要较大功率的 X 射线管并配备专门冷却装置。能量色散型荧光光谱仪则借助高分辨率半导体检测器与多道分析器，将未色散的 X 射线荧光按光子能量分离光谱线，由光源、样品室和检测系统组成，无需分光晶体。两种方法均可准确获取样品中氧化钙、氧化镁、二氧化硅、三氧化二铝等主量元素以及锶、钡、锰等微量元素的含量数据。通过对比大石窝样品与古建筑样品在化学组成上的差异与相似性，为探讨二者的物质关联提供量化依据。

在矿物物相鉴定方面，研究辅以 X 射线衍射分析技术进行补充辅助研究。X 射线衍射仪通过测定样

品中矿物晶体的衍射图谱，根据衍射峰的位置和强度，能够准确识别方解石、白云石、石英等矿物的存在及其相对含量。该技术作为薄片岩石学和扫描电镜分析的重要补充，有助于进一步确认样品的矿物组合特征，验证显微镜观察结果，并为岩石分类和成因探讨提供晶体学层面的支持。

综合以上多种分析方法，本研究拟定获取了大石窝汉白玉样品与北京地区古建筑汉白玉样品在矿物组成、结构构造、元素成分及物相特征等方面的多维度数据。薄片岩石学奠定了矿物鉴定的基础，扫描电镜-能谱分析揭示了微观形貌与微区元素分布，X 射线荧光光谱提供了全岩化学成分的量化数据，X 射线衍射验证并补充了矿物物相信息。通过对比分析两类样品在矿物类型、颗粒形态、主量元素和微量元素含量等方面的异同，结合地质背景和历史文献资料，综合判断北京地区古建筑汉白玉构件与大石窝汉白玉的物质关联性。研究结果不仅为揭示古建筑材料的来源提供了科学依据，也为汉白玉资源的开发利用、文物保护及历史研究提供了重要的基础数据支持。

尽管已有大量文献记载和岩石学特征研究指出北京古建筑所用汉白玉主要来自房山大石窝，但尚未有研究系统性地将大石窝原产石材与古建筑中实际使用的汉白玉构件进行直接的、多维度科学对比。本研究首次通过系统的实验分析，填补了这一关键环节的实证空白。本研究将传统岩石学、矿物学、地球化学方法应用于不可移动文物的溯源研究，采用薄片岩石学、SEM-EDS、XRF、XRD 等多种现代科技手段，从矿物组成、元素成分、结构构造三个维度进行交叉验证，构建了一个多维、互补的科学溯源框架，不仅依赖文献记载，更通过实验数据与历史采石记录、古建筑使用背景相结合，实现了文献考证与科学实证的有机融合，为古代建筑材料溯源研究提供了可复制的研究范式[19][20][21]。

综上所述，研究方法的模拟，在方法论集成、实证对比、学科交叉等方面均体现出明显的创新性，为汉白玉及相关文化遗产的科学研究提供了新的思路和技术路径。

2. 文献综述

王建刚等的《砂岩副矿物的物源区分析新进展》指出，长期以来，岩石产地判别经历了从宏观肉眼观察到微观结构分析、从定性描述到定量地球化学表征的发展过程。相较于传统依靠外观颜色、质地等宏观特征的判别方式，基于矿物组成与元素地球化学的溯源方法具有稳定性强、辨识度高、受后期改造影响小等优势，已成为当前石材产地研究的主流技术体系。目前已广泛应用于岩石与文物产地溯源的矿物学方法、地球化学元素示踪方法、结构构造分析方法等，在国内外考古与地质研究中已形成较为成熟的技术体系。例如，在渤海湾盆地东营凹陷物源研究中，通过碎屑组分与重矿物组合分析成功揭示了物源方向；在四川茂县新石器遗址陶器溯源中，利用主微量元素地球化学“指纹”成功区分了本地与外来陶器。这些案例表明，基于元素成分、矿物类型与结构构造的对比分析，是进行产地溯源的有效科学路径。本研究从矿物学与岩相学方法、元素地球化学方法、多技术综合溯源等方面，系统梳理国内外岩石产地溯源研究成果，总结各类技术的原理、应用场景与研究进展，为北京地区汉白玉等古建筑石材的产地溯源研究提供方法参考与支撑。

2.1. 产地溯源的方法

岩石学与矿物学方法从岩石的矿物质成分入手，对岩石碎屑成分和重矿物组合进行统计分析。例如，在渤海湾盆地东营凹陷的研究中，通过系统统计砂岩的碎屑组分，发现其主要为岩屑质长石砂岩，岩屑以变质岩和岩浆岩为主；重矿物组合则包括锆石、石榴石、钛铁矿等。这种特定的矿物组合是指示母岩类型和物源方向的直接证据[10]。

地球化学元素示踪是利用了岩石和矿石中主量、微量及稀土元素的分布模式，这些分布模式是独特

的化学特征。上述同一研究中对泥岩的地球化学测试显示，其具有高硅、高铝、富碱的特征，以及轻稀土富集、铕负异常的稀土配分模式。这些特征可与潜在源区岩石进行对比，从而约束物源。在矿床学中，特定微量元素（如 Sb、Se、As、Ni）常作为找矿的“探途元素”（geochemical pathfinders）。崔剑锋等的《四川茂县新石器遗址陶器的成分分析及来源初探》的研究方法，与岩石产地溯源的研究范式高度一致。研究通过地球化学元素示踪，分析陶器胎体的主量、微量元素成功区分了本地生产与外来输入的陶器。其中，营盘山遗址的彩陶在化学成分上高钙、贫钠与甘青地区马家窑文化彩陶及黄土高原物源特征相符，而本地素面陶则呈现不同的地球化学特征。这表明，在陶器这种人工制品的溯源研究中，系统应用岩石地球化学的“指纹”对比方法，是判定其原料来源乃至判断文化贸易交流的有效科学途径[12]。

结构构造辅助溯源方法，是基于岩石矿石的结构构造是记录搬运历史与沉积环境的物理档案，虽不直接指示源区岩石类型，但能约束物源的距离和沉积过程，是溯源分析中不可或缺的环节。

通过观察岩石内部的碎屑结构，能通过碎屑的粒度、磨圆度、分选性及支撑类型，复原搬运介质的能量和距离。短距离、快速堆积的沉积物通常表现为成分成熟度低、分选差、棱角分明的特点。东营凹陷的砂岩被鉴定为岩屑质长石砂岩且成分成熟度低，正是近源沉积体系的标志。

而岩石的沉积构造，即层理、波痕等原生构造，能帮助判断沉积环境，从而间接推断物源区的古地理方位。豫西济源大古石组通过识别河流-辫状河三角洲沉积序列，明确了其近源快速堆积的属性[10][11]。

除此之外，目前常用的岩石溯源方法，还有同位素年代学与示踪、河流碎屑法、人工智能与智能分选法等，因不适用于汉白玉的溯源研究，在此不多赘述。

矿物学与岩相学特征是岩石最直观、最基础的“天然指纹”。不同地质背景、形成环境、变质条件下形成的岩石，在矿物种类、含量、粒度、结构、包裹体、微观形貌等方面具有显著差异，这些特征可以直接用于产地区分。

根据列举出的常用岩石溯源法，可见岩石产地溯源是地质学、岩相学与科技考古领域的重要研究内容，其核心思路是通过分析岩石自身携带的矿物学、微观结构、元素地球化学、物相组成等特征，建立不同产地岩石的识别标志，实现未知样品与已知产地的科学匹配。在古建筑石材、考古遗物、地质物源分析等研究中，产地溯源不仅可以揭示材料的来源与流通路径，还能为古代营建制度、资源利用模式、地质演化过程提供直接依据。

2.2. 岩石学研究方法在汉白玉研究中的应用

汉白玉本质为高品质白色大理岩，以方解石或白云石为主要矿物成分，岩石结构细腻、杂质含量低，是我国北京地区古建筑的核心用材，其溯源研究需结合碳酸盐岩的岩石学特征，选择针对性强、适用性高的岩石学方法。结合国内外大理岩、碳酸盐岩溯源的研究实践，适用于汉白玉溯源的岩石学方法以岩相学、微区分析、物相分析为核心，同时可辅以元素地球化学与结构构造分析，形成贴合汉白玉特征的溯源方法体系。

薄片岩石学分析是汉白玉溯源的首要且基础方法，该方法能精准识别汉白玉的矿物组成、晶粒特征、结构构造等核心岩相学指标，而这些指标是区分不同产地汉白玉的关键依据。汉白玉作为变质碳酸盐岩，其结构构造特征受原岩沉积结构与后期变质作用共同控制，不同产地的汉白玉因变质程度、变质环境不同，在岩石的致密程度、晶粒镶嵌方式、微裂隙发育特征等方面存在差异；同时，北京地区古建筑汉白玉构件的加工工艺特征与岩石的原生结构密切相关，而原生结构又与产地特征相耦合，可通过观察汉白玉的结构构造特征，结合产地地质资料，进一步验证岩相学与地球化学分析的结果。如房山汉白玉因结晶均匀、致密度高，形成了独特的块状镶嵌结构，与其他产区汉白玉的结构特征存在明显差异，可作为产地判别的辅助标志。张中俭等在《北京房山大理岩的岩石学微观特征及风化机理讨论》中，通过偏光

显微镜系统分析了房山汉白玉的岩相学特征，证实其以白云石为主、结晶细腻、晶粒粒径均匀、石英、云母等质矿物含量极低，与其他产区汉白玉存在显著差异；不同矿区的汉白玉受沉积环境与变质程度影响，在方解石/白云石比例、晶粒大小、镶嵌结构、包裹体类型等方面形成了稳定的产地特征，通过薄片观察可快速实现汉白玉产地的初步筛选与判别，为后续精准溯源奠定基础。

SEM－EDS 是汉白玉溯源的核心微区分析方法，适配汉白玉结构细腻、需微损分析的特征，可从微观形貌与微区成分两个维度挖掘产地识别标志。在微观形貌方面，该方法可清晰呈现汉白玉的晶体形貌、晶界特征、微裂隙发育状况，不同产地汉白玉的晶体生长环境不同，其微观形貌存在独特特征；在微区成分方面，可对汉白玉中的方解石、白云石进行定点元素分析，精准测定 Ca、Mg、Sr、Mn 等特征元素的含量与分布规律，张中俭等的研究证实，房山汉白玉的 Ca/g 比值、Sr 元素含量具有显著的产地特异性，可作为区分其他产区汉白玉的重要指标。同时，该方法制样简单、测试速度快，对古建筑汉白玉构件的损伤极小，完全适配文物石材的研究要求，是汉白玉微区溯源的最优选择之一。

X 射线荧光光谱分析是利用元素地球化学分析方法对汉白玉溯源进行的重要补充，通过测定汉白玉的主量与微量元素组成，建立地球化学指纹，与岩相学特征相互印证，提升溯源结果的可靠性。汉白玉的主量元素以 CaO、MgO 为主，二者的含量与比值是区分方解石型汉白玉与白云石型汉白玉的核心指标，而 Sr、Ba、Mn、Fe 等微量元素的含量与分配模式，受汉白玉原岩沉积环境、变质作用及产地地质背景的控制，具有显著的产地特异性。马艳平等在碳酸盐岩溯源研究中，通过 XRF 测定的 Sr/Ba 比值、微量元素含量，成功区分了不同产地的碳酸盐岩；该方法应用于汉白玉溯源时，可通过对比房山汉白玉与其他产区样品的 Ca/Mg 比值、Sr 等特征微量元素含量，结合聚类分析等统计方法，建立汉白玉的地球化学产地识别模型，为产地判别提供定量地球化学依据，且便携式 XRF 可实现北京古建筑汉白玉构件的原位测试，适合野外快速筛查。

岩石产地溯源已形成以矿物学与岩相学为基础、元素地球化学为核心、多方法综合验证的成熟技术体系，王建刚、胡修棉《砂岩副矿物的物源区分析新进展》、赵振华《岩石地球化学》、周征宇《考古地质学》等国内外研究成果，为该体系的建立与完善提供了坚实的理论与实践支撑。汉白玉作为高品质白色大理岩，其溯源研究需结合碳酸盐岩的岩石学特征，选择针对性强、适配性高的岩石学方法，核心可采用薄片岩石学与偏光显微分析、SEM－EDS 微区分析、XRD 物相分析，并辅以 XRF 元素地球化学分析与结构构造分析，形成“岩相学定性+微区分析验证+物相定量+地球化学指纹”的汉白玉溯源方法体系。该体系既贴合汉白玉的岩石学特征，又充分借鉴了国内外碳酸盐岩、大理石溯源的成功经验，且张中俭等《北京房山大理岩的岩石学微观特征及风化机理讨论》的研究已证实，房山汉白玉在岩相学、微区成分、物相参数等方面具有显著的产地特异性，为北京地区古建筑汉白玉石材的产地溯源提供了可靠的方法路径与研究基础。各类方法相互补充、相互验证，可实现汉白玉产地从初步筛选到精准判别的研究目标，为北京地区古建筑汉白玉石材的来源判定、古代营建制度与资源利用研究提供科学的岩石学依据。

2.3. 北京房山大石窝汉白玉已有的岩石学研究成果

北京房山区大石窝镇是中国乃至世界著名的优质石材产地，其中房山大石窝汉白玉被命名为 M1101，称之为"中国一号"。本综述将基于已有文献，从岩石矿物学特征、矿床地质与成因、风化机理研究三个维度，系统总结房山汉白玉的科学研究成果，以期构建一个完整的、基于物质科学的文化遗产认知体系。

使用现代岩石矿物学分析技术，对房山汉白玉的矿物学特征的探讨，是将其与其他石材区分、实现科学溯源与保护的前提。

房山大石窝汉白玉的矿物组成是以白云石为主导的矿物组合，综合多项研究，房山汉白玉在矿物学

上被明确界定为白云石大理岩。这与大众乃至部分文献中常将其泛称为主要矿物为方解石的“大理石”有本质区别。X 射线衍射（XRD）分析一致证实，汉白玉的主要矿物成分为白云石（CaMg(CO□)□），其含量极高。张中俭等《北京房山大理岩的岩石学微观特征及风化机理讨论》的研究明确指出北京大理岩主要矿物成分是白云石。对比研究《北京与宝兴两地白色大理石的矿物材料学特征及其差异性机理初步研究》提供了更精确的数据，指出北京房山汉白玉中白云石含量高达 98.7%。这一矿物学属性是其最核心的鉴定特征。部分汉白玉样品中含有少量石英。上述同一对比研究指出其石英含量约为 1.3%。石英颗粒的存在，作为次要组分，也可能影响石材的加工性能和耐风化能力[15][16]。

值得注意的是，大石窝地区产出的并非单一的白色石材。在同一套地质层位中，因微量元素含量的细微差异，形成了颜色与质地略有不同的系列产品，主要包括青白石和艾叶青等。对它们进行同步研究，有助于更全面地理解该区域大理岩的成矿地球化学环境。

汉白玉具有高镁低杂质的纯净特性。全岩化学成分分析结果与矿物组成结论高度吻合，揭示了汉白玉高纯度的化学本质。

房山汉白玉以极高的 MgO 和 CaO 含量、极低的 SiO□及杂质元素为特征。在《北京与宝兴两地白色大理石的矿物材料学特征及其差异性机理初步研究》中的定量分析显示，房山汉白玉化学成分中氧化钙含量约为 29.98%，氧化镁含量高达 22.25%。极高的 MgO 含量是白云石矿物的直接化学证据，四川宝兴白，该对比研究指出方解石大理岩 MgO 含量仅 0.57%，这也成为了区分汉白玉与方解石大理岩的关键指标[17][18]。

决定白色石材颜色的关键在于染色离子，如铁、钛、锰，的含量。汉白玉的白度极高，常达 90 以上，优质料超过 95 度，直接归因于其极低的 Fe□O□和 TiO□等杂质氧化物含量。该对比研究进一步指出，汉白玉白度略优于某些方解石质大理石的原因，可能与白云石本身折射率较大，且汉白玉晶体粒径更小、表面更平整，导致光散射机制不同有关。

岩石的结构决定了其物理工艺性能和力学性质。

汉白玉具有典型的花岗变晶结构，白云石晶体呈它形-半自形粒状，紧密镶嵌。张中俭等利用图像处理软件对薄片照片进行统计分析，研究发现房山汉白玉的矿物晶体粒径主要分布在 0.05 至 0.3 毫米之间，属于细粒级。这种均匀细小的晶体粒度，是其质地细腻、易于精雕细琢且能打磨出柔和光泽的微观原因。

由于汉白玉主导矿物白云石的莫氏硬度为 3.5-4，略高于方解石，且结构致密，汉白玉表现出良好的物理性能。孟冬青等在《北京房山大石窝地区汉白玉特征及成因探讨》中依据矿床地质调查指出，其矿体节理、裂隙不发育，岩石完整，荒料率高，抗压、抗折强度均满足优质建筑石材的要求。这些特性共同保障了其在大型建筑构件中的应用可行性。

汉白玉矿床位于华北地台燕山沉降带的西山地区。该区域的地质演化，特别是中生代强烈的构造-岩浆活动，为汉白玉的形成提供了动力学背景。矿体严格赋存于中元古界蓟县系雾迷山组一段地层中。孟冬青等明确指出，该地层原岩为一套形成于古老浅海环境的厚层碳酸盐岩（白云岩），其初始沉积物的高纯度是形成优质汉白玉的物质基础。

区域构造对矿体的分布起着关键控制作用。吕金波等在《北京西山大石窝——白带山地区石门背斜构造特征与地质文化》一文中详细论证，大石窝—白带山地区存在一个以石门岩体为核部的石门背斜构造。这一构造不仅控制了地层的展布，也影响了后期热变质作用的范围。

对汉白玉的利用史也反证了其地质产出的特殊性。研究表明，汉白玉的大规模开采与应用有其时代局限性。吕金波等的研究中提及，隋唐时期云居寺雷音洞的刻经石料，经地质考古学方法鉴定，主要为青石、艾叶青和青白石类大理石，而非汉白玉。原因在于，高品质的汉白玉矿层埋藏较深，往往需开挖

五十米以上，且集中于高庄一带，在当时的技术条件下难以开采。高庄村本身，便是随着辽金以后，特别是明清时期为供应皇家建筑而进行大规模采石活动才形成的村落。这一历史事实清晰地表明，汉白玉的开采深度与品质高度依赖于特定地质层位和地理点位。

3. 结语

综上所述，可以将北京房山大石窝汉白玉的核心鉴别性岩石学特征总结归纳。北京房山大石窝汉白玉的矿物学特征为，以白云石（含量>98%）为主矿物，含微量石英，区别于以方解石为主的普通白色大理石。元素化学方面，其高 MgO、高 CaO、极低 Fe□O□/TiO□，化学成分纯净。它具有细粒（0.05-0.3 mm）花岗变晶结构，块状构造，质地均匀致密的结构构造，产自房山大石窝石门背斜南翼雾迷山组一段，为接触变质型矿床。其“青白石”、“艾叶青”等共生变种也是产地佐证。

这几个维度构成了一个多维的、可交叉验证的“特征谱系”，足以将房山汉白玉与其他种类的岩石与其他产地的汉白玉进行清晰区分，从而实现精准科学溯源。但是，有关北京房山大石窝汉白玉的研究仍有缺憾。尽管已有大量的研究指出了该地汉白玉的特征谱系，也早有文献记载的北京地区的汉白玉主要开采于北京房山区大石窝镇，大石窝汉白玉与古建筑中的汉白玉却仍然缺少了溯源研究中最重要的对比一环。本模拟研究从元素成分、矿物类型和结构构造三个方面入手，能够达成完善北京地区古建筑所用汉白玉的溯源研究的目的。

参考文献

[1] 王伍,刘鹏. 大匠之道 第 6 辑 刘鹏[M]. 石家庄:河北美术出版社,2019.09.

[2] 吴梦麟,刘精义.房山大石窝与北京明代宫殿陵寝采石——兼谈北京历朝营建用石[C]//中国紫禁城学会.中国紫禁城学会论文集（第一辑）.[出版者不详],1996:286-295.

[3] 王锋,卢嘉兵,刘慕之,等.辽金以前北京房山大理石使用历史考述[J].文化创新比较研究,2024,8(16):64-67.

[4] 袁珂.山海经校注[M].成都：巴蜀书社，1993：116.

[5] 郦道元.水经注[M].长沙：岳麓书社，1995：186.

[6] 郦道元.水经注疏[M].杨守敬，熊会贞，疏.南京：江苏古籍 出版社，1989：1099.

[7] 赵永复.水经注通检今释[M].上海：复旦大学出版社， 1985：29

[8] 管仲乐.房山石经研究[D].长春：东北师范大学，2019 王毓蔺.明北京营建石料采办地略考[J].故宫学刊,2019,(01):56-76.

[9] 中国杜会科学院考古所，北京市文物研究所琉璃河考古队.北京琉璃河 1193 号大墓发掘简报[J].考古，1990（1）：20-31.

[10] 张倩.多方法约束的复杂物源示踪——以渤海湾盆地东营凹陷古近系孔店组-沙河街组四段下亚段为例[J].石油与天然气地质,2025,46(02):599-616.

[11] Andy Yahya Al Hakim, et al. Tracing metal sources in orogenic gold deposits of the Timburu Goldfield, Meratus, Indonesia: A geochemical and statistical approach[J]. Ore Geology Reviews, 2025.

[12] 崔剑锋，吴小红，杨颖亮.四川茂县新石器遗址陶器的成分分析及来源初探[J].文物,2011,(02):79-85.DOI:10.13619/j.cnki.cn11-1532/k.2011.02.011.

[13] 魏丹峰.豫西济源地区中元古界大古石组物源示踪及其构造意义[J].能源与环保,2021,43(05):112-118+251.DOI:10.19389/j.cnki.1003-0506.2021.05.021.

[14] 王立社,张复新,侯俊富,等.秦岭山阳水沟口组黑色岩系微量元素地球化学及其沉积成矿背景的指示意义[J].中国地质,2012,39(02):311-325.

[15] 张中俭,杨曦光,叶富建,周华,等.北京房山大理岩的岩石学微观特征及风化机理讨论[J].工程地质学报,2015,23(02):279-286.DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2015.02.013.

[16] 奚旺,党陈萍,汪灵.北京与宝兴两地白色大理石的矿物材料学特征及其差异性机理初步研究[C]//中国矿物岩石地

球化学学会非金属矿物资源高效利用专业委员会,中国矿物岩石地球化学学会矿物岩石材料专业委员会,中国矿物岩石地球化学学会环境矿物学专业委员会,中国矿物岩石地球化学学会矿物物理矿物结构专业委员会,中国矿物岩石地球化学学会成因矿物学找矿矿物学专业委员会.第十届全国矿物科学与工程学术会议论文摘要集.成都理工大学;中国建筑材料工业地质勘查中心四川总队;,2024:87.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.047513.

[17] Lapuente Mercadal, María Pilar. “Archaeometric Characterization of the White Marbles from the Ancient Quarries in the Territory of Hierapolis and in the Southern Sector of the Denizli Basin, with an Appendix on the Aphrodisian Marble.” ANCIENT QUARRIES AND BUILDING SITES IN ASIA MINOR, 2016. doi:10.4475/819.

[18] 孟冬青,葛长峰,李怀永.北京房山大石窝地区汉白玉特征及成因探讨[J].中国非金属矿工业导刊,2017,(04):33-37.

[19] 吕金波,孙永华,李勇,等.北京西山大石窝—白带山地区石门背斜构造特征与地质文化[J].城市地质,2023,18(04):119-126.

[20] 甘玉雪,杨锋,吴杰,等.扫描电子显微镜在岩矿分析中的应用[J].电子显微学报,2019,38(03):284-293.

[21] 周尚文,薛华庆,郭伟.基于扫描电镜和 X 射线能谱的页岩矿物分析方法[J].中国石油勘探,2017,22(06):27-33.

[22] 杨震,李明星,滕飞. 地质勘探与探矿工程技术研究[M]. 哈尔滨:哈尔滨出版社,2023.01.

[23] 燕长海. 河南地球科学研究进展 2022[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2023.06.

[24] 姚皓骞,黄瑞,田榆杰.岩心矿物成分智能识别技术探索[J].中阿科技论坛(中英文),2024,(07):75-79.

[25] 刘海燕.岩石学方法在物源分析研究中的应用[J].地下水,2013,35(02):197-199.

[26] 薛伟锋,吴健,曹文军.煤炭产地溯源方法研究[J].质量与认证,2023,(10):63-67.DOI:10.16691/j.cnki.10-1214/t.2023.10.007.

[27] 张秉坚,胡瑜兰. 石质文物保护技术与材料[M]. 北京:中国建材工业出版社,2023.09.

[28] 肖仪武,方明山,田明君. 矿物显微图像自动分析与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2023.03.

[29] 叶真华,叶为民. 矿物与岩石光学显微镜鉴定[M]. 上海:同济大学出版社,2020.08.

[30] 王建刚,胡修棉.砂岩副矿物的物源区分析新进展[J].地质论评,2008,54(05):689-702.

[31] 曹玉璐,王欣然,李双庆.基于扫描电子显微镜的重矿物物源分析方法对比[J].地质科技情报,2023,42(04):1-8.

[32] 周征宇.宝玉石原产地溯源研究进展[J].宝石和宝石学杂志,2023,25(06):1-10.

[33] 马艳平,贺振宇,陈松.皖北灵璧磬云石的岩石学和地球化学研究[J].中国地质,2011,38(03):721-728.

[34] 王孝磊. 2017. 花岗岩研究的若干新进展与主要科学问题. 岩石学报, 33(5): 1445-1458.

[35] Walter Prochaska, Donato Attanasio,The challenge of a successful discrimination of ancient marbles (part I): A databank for the marbles from Paros,Prokonnesos,Heraklea/Miletos and Thasos,Journal of Archaeological Science: Reports,Volume 35,2021,102676,ISSN 2352-409X.

[36] Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian–Permian age, Colorado, USA[J]. Chemical Geology, 2000, 168(1-2): 115-135.

[37] Roser, R.J. Korsch,Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data,Chemical Geology,Volume 67, Issues 1–2,1988,Pages 119-139,ISSN 0009-2541.

[38] 王建刚, 胡修棉. 砂岩副矿物的物源区分析新进展[J]. 地质论评, 2008, 54(5): 689-696.

[39] 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 物源分析的研究与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(4): 104-110.

[40] 王丹,付勇.湖南铜山岭花岗闪长岩中榍石微区原位 Nd 同位素和微量元素组成及其岩石成因的指示意义[J].岩矿测试,2023,42(02):282-297.DOI:10.15898/j.cnki.11-2131/td.202202230031.

[41] 杨江海,杜远生,徐亚军,等.砂岩的主量元素特征与盆地物源分析[J].中国地质,2007,(06):1032-1044.

[42] 余晓艳,龙政宇,张艺,等.基于 LA-(MC)-ICP-MS 的宝石原位微区分析技术及其应用[J].宝石和宝石学杂志(中英文),2022,24(05):134-145.DOI:10.15964/j.cnki.027jgg.2022.05.013.

[43] 蒋少涌,陈唯,赵葵东,等.基于 LA-(MC)-ICP-MS 的矿物原位微区同位素分析技术及其应用[J].质谱学报,2021,42(05):623-640.

[44] 刘腾,陈刚,徐小刚,等.物源分析方法及其发展趋势[J].西北地质, 2016, 49(4):8.DOI:10.3969/j.issn.1009-6248.2016.04.002.

[45] Dickinson W R .Plate tectonics and sandstone compositions[J].Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol, 1979, 63(12):2164-2182.DOI:10.1306/2f9188fb-16ce-11d7-8645000102c1865d.Chang, B., Tae, G. J., & Young, J. L. (2025).

Multi-method strategies for provenance determination of coarse-grained igneous rocks: Non-destructive, portable, and quantitative approaches. PLoS One, 20(6) doi:https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324058Brilli M, Paglianti F, Liguori V. An innovative approach for provenancing ancient white marbles: the contribution of X-ray diffraction[J]. Journal of Cultural Heritage,2021,47:112-120.

[46] 中国地质图书馆.陆源碎屑岩物源分析研究进展与发展趋势[J].沉积学报,2013,31(04):721-732.