



中国地质调查成果
7-085

山西宁武地区第四纪环境 变迁及地质生态演化

◎ 余 佳 韩建恩 孟庆伟 等著



地质出版社

大调查项目“山西宁武冰洞形成机制及其环境意义”
(511903)、“青藏高原东南缘晚新生代年代地层及旋
程的古地磁学限定”(12120114002301)资助

山西宁武地区第四纪环境变迁 及地质生态演化

余 佳 韩建恩 孟庆伟 吕荣平 张雪峰
邵兆刚 王 津 孟宪刚 朱大岗 钱 方 著
孙立蓓 韩同林 王建平 马天林



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系国土资源大调查项目的研究成果。作者以翔实的地质构造、岩石地层、冰川堆积物、湖相沉积、新活动构造资料为依据,综合应用区域自然地理、第四纪地质地貌、地质构造及演化、高频电磁法测量、冰体实验研究、第四纪冰川作用与冰期划分、易溶盐、磁化率、粒度、碳酸盐、同位素年代学与古生物化石鉴定、微体古生物学分析等方法,将山西宁武地区第四纪环境变迁及地质生态演化与区域构造、新构造、沉积建造、年代地层的定性分析与定量分析相结合,对宁武地区自然地理、第四纪地质与地貌单元划分、岩石地层特征、构造特征、区域地质演化及发展史、新构造运动、高山湖泊与全新世湖相沉积地层划分及干海组的建立、冰洞的形成条件、冰洞的基本特征、冰体长期保存机制的实验研究、冰洞形成机制、冰洞地区第四纪冰川作用与冰期划分、沉积环境分析、沉积地层的孢粉分析等,进行了系统的分析与探讨,并对已获国土资源部批准的山西宁武冰洞国家地质公园作了简单介绍。

本书全面、系统地介绍了山西省宁武地区的地质构造与环境演化,汇集了作者多年的研究成果,可供从事第四纪地质与地貌、地质构造与新构造、环境演变和全球变化方面学习与研究的地质或地理院校师生、科研人员和相关人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

山西宁武地区第四纪环境变迁及地质生态演化 / 余佳等著. —北京:地质出版社, 2017. 11

ISBN 978 - 7 - 116 - 10673 - 4

I. ①山… II. ①余… III. ①第四纪地质—地质演化—研究—宁武县 IV. ①P534. 63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 281905 号

责任编辑:叶 丹 孙亚芸

责任校对:王洪强

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 66554528 (邮购部); (010) 66554633 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787mm × 1092mm^{1/16}

印 张:16.5

字 数:400 千字

版 次:2017 年 11 月北京第 1 版

印 次:2017 年 11 月北京第 1 次印刷

定 价:68.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 10673 - 4

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

工作区行政区划隶属山西省宁武、神池、五寨、岢岚等县。地理坐标：北纬 $38^{\circ}50'$ ~ $39^{\circ}10'$ ，东经 $111^{\circ}20'$ ~ $112^{\circ}30'$ ，总面积约 10000 km^2 （图 0-1）。

地理上，工作区位于山西省吕梁山区，地势高于华北平原约 1000 m ，为黄土高原东缘，区内为著名的汾河、桑干河发源地，最高峰为荷叶坪，海拔 2783.8 m 。本区属大陆性季风气候，比邻近的华北平原气温低、降水少，无霜期 $4\sim7$ 个月，年降水量 $400\sim700\text{ mm}$ ，地表水资源严重不足。

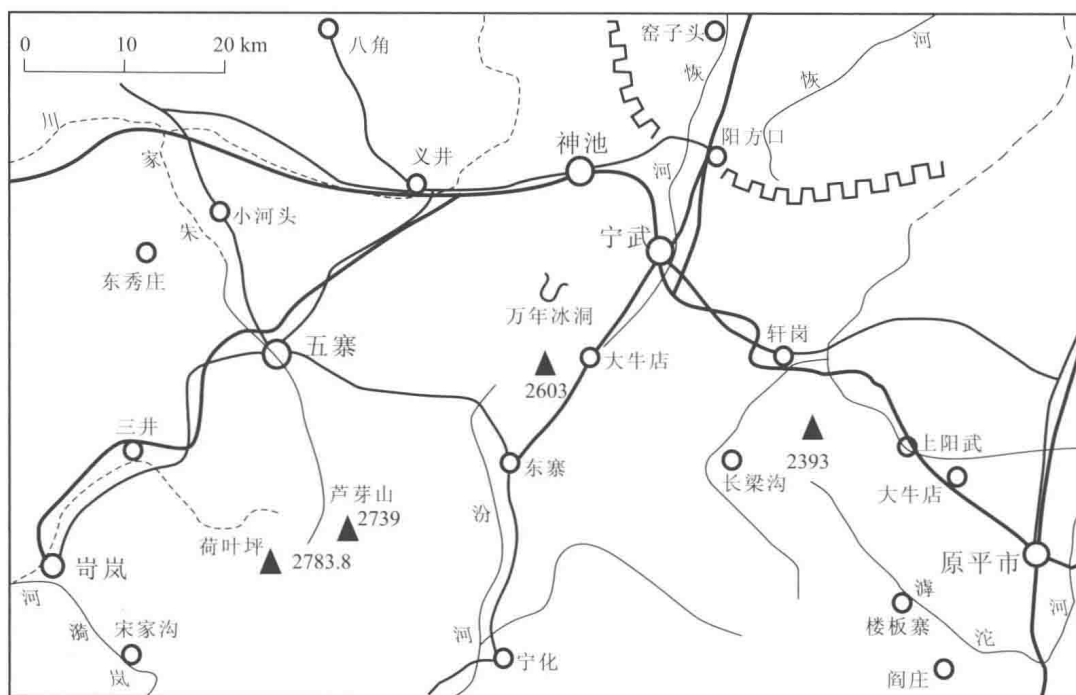


图 0-1 研究区位置图

Fig. 0-1 The location of the study area

工作地区海拔在 2000 m 左右，气候适宜，铁路、公路交通条件便利，每年野外地质工作时间可达 10 个月，具备了本项调查研究的基本自然地理条件。

本书以 $1:25$ 万区域地质调查为基础，将国土资源大调查与前缘性重大科学问题的研究紧密结合起来，系统调查山西宁武冰洞所在区域的地质环境与冰洞形成的联系，深入研究山西宁武第四纪以来的环境变迁过程与地质生态演化规律，探讨华北地区第四纪冰川发育及其环境变化的动力学机理，分析全球气候变化在华北地区的响应。

一、研究目的与内容

1. 总体目标

在前人工作基础上，建立山西宁武冰洞形成与保存机制，深入研究冰洞的古环境演化过程与动力学机理，系统测定冰洞中的冰及其周缘冰碛物与相关的沉积地层、生态学系统的古环境、古气候参数，确定宁武冰洞演变序列和环境意义。通过对现今地表地貌特征－构造活动性－深部过程相互耦合关系的研究，探讨晚新生代以来我国华北环境变迁规律，并将其形成演变机制与青藏高原新生代湖泊环境演变相应时间段的气候与环境变化进行对比，探讨二者的形成演变关系，分析全球气候变化在中国的响应。

2. 拟解决的关键问题

- 1) 通过物探方法确定山西宁武冰洞的形态和分布范围。
- 2) 系统测定冰洞中的冰及其周缘冰碛物与相关的沉积地层、生态学系统的古环境、古气候参数。
- 3) 研究现今地表地貌特征－构造活动性－深部过程的相互耦合关系。
- 4) 确定宁武冰洞演变序列和环境变化过程。
- 5) 建立山西宁武冰洞形成与保存的机制。

3. 研究内容

(1) 山西宁武冰洞形成机制调查

系统调查、鉴别宁武冰洞产出的岩性条件、地质构造环境、形成过程和保存机制，包括冰洞的形成时代、空间分布，以及相关的古岩溶、古沉积、古地貌、古地理等方面的研究，测定不同事件的发生时期及其古环境、古气候与古生态信息。

(2) 山西宁武冰洞中冰的古环境参数测定

对宁武冰洞中冰及其周缘的第四纪冰碛物与相关沉积地层进行系统取样，按照国内外最新、最科学的方法取样和保存，高精度地测定样品的同位素年龄，开展 ^{14}C 法、ESR法测年，C、O同位素测定，沉积学分析，微体古生物和古植物种属鉴定，微量元素和地球化学分析，对冰芯进行精确古环境参数的初步测定，提供高精度的实测数据资料。

(3) 山西宁武冰洞环境演变研究

研究山西宁武冰洞的环境变迁过程，建立山西宁武冰洞的环境演变序列，剖析冰洞的环境演化机制和第四纪冰川发育及其与全球变化的关系。

(4) 第四纪冰川、冰缘与古气候环境的演变研究

寻找和发现本区第四纪冰川、冰缘遗迹，对黄土、湖泊、河流堆积等进行研究，测定其年代，并与晚更新世以来华北地区冰川及冰缘地貌的发育和气候变化的研究相对比，探讨研究区及周边地区气候与环境变化的规律，找出本区古气候演变与生态环境恶化的原因。

(5) 与青藏高原晚新生代湖泊环境演变相应时段对比研究

通过对宁武冰洞古气候、古环境的演变序列和宁武地区海拔1885 m的天池群封闭湖泊晚新生代以来环境变迁的研究，并将其形成演变机制与青藏高原纳木错等晚新生代以来湖泊环境演变相应时间段的气候与环境变化进行对比，探讨二者的形成演变关系，分析二

者的耦合性与气候变化的内在联系。

二、技术路线与工作方法

1. 技术路线

为了提交具有国际先进水平、在国际上将产生较大影响、高质量的地质调查成果，并在若干前缘性领域取得突破性进展，项目组将地表地质调查与遥感地质资料的综合解译紧密结合在一起，将地质调查与重大地质问题的研究紧密结合在一起，将野外观测与室内测试分析有机地配合在一起，将点上深入研究、重要剖面 and 重要路线的系统观测与面上区域性分析有机地结合在一起，将建造与改造、定性与定量、历史与现今、过程与机制有机地联系在一起，深入地开展了山西宁武冰洞冰层与冰碛物分布区的地质调查研究工作。

选择区内冰洞冰层与冰碛物分布区，在完成野外踏勘后，集中不同专业的技术骨干，联合攻关，开展全方位系统、深入的地质调查与研究，选定并实测大比例尺的相关第四纪地层剖面，对比解决冰洞冰层与冰碛物分布区的地层划分、不同规模地质地貌单元特征与不同沉积物时代关系厘定等关键性基础地质问题。

在完成上述观测与解决关键性基础地质问题的基础上，在冰洞冰层与冰碛物分布区开展大范围的地质调查与研究，探讨华北地区第四纪冰川发育及环境变化的动力学机理，分析全球气候变化在华北地区的响应。

2. 主要工作方法

(1) 野外地质调查与遥感综合解译

利用高精度的遥感资料和当代先进的遥感图像处理技术，结合野外观测资料，分析山西宁武冰洞、岩溶地貌、第四纪冰碛物、黄土、河流堆积、湖相沉积等第四纪地质记录的分布范围及其组合特征。

(2) 物探测量及系统地质观测取样

应用先进的高频电磁法等物探手段，精确测定山西宁武冰洞及其中冰的空间形态和分布范围；对冰洞中的冰、第四纪地层、冰碛地层、冰碛物等进行系统的地质调查、测量和取样。

(3) 第四纪地质测年

运用包括¹⁴C 测年、ESR 法测年等方法，测定山西宁武冰洞中的冰层、冰洞周缘第四纪堆积物与古地质事件的时代。

(4) 古环境参数测定

包括沉积相分析、粒度分析、磁化率测定、扫描电镜、X 光衍射、矿物成分、碳酸盐测定、碳氧同位素分析、微量元素与环境地球化学分析等方法，测定山西宁武冰洞中的冰及其周缘第四纪冰碛物、黄土、湖相沉积等的古环境参数。

(5) 古生态环境分析

包括微体古生物组合、孢粉组合分析，恢复山西宁武冰洞中的冰及其周边第四纪堆积物的古生态环境。

(6) 古今生态环境对比分析

对宁武冰洞中的现代冰水和汾河水源、桑干河源头水及周边的生态环境气候条件进行研究和资料收集, 并和冰洞中的古冰层生态环境各种参数进行对比研究。

(7) 古气候对比

包括山西宁武冰洞的古气候、古环境与山西周缘地区、青藏高原冰芯研究及全球古气候对比分析。

三、工作区地质地貌特征

实地考察了研究区内特征的地质地貌现象, 主要有 6 类。

1) 地下冰洞: 位于宁武县春景洼乡麻地沟村东北, 洞口海拔 2234m (地理坐标: N38°56'50"; E112°09'41")。它的奇特在于以当地洞外的气候条件而论, 根本构不成结冰的环境, 而洞内一年四季冰层不化, 愈往深处冰层愈厚。特别是夏天, 洞外碧草如茵, 鲜花开放, 而洞内寒气逼人, 冰笋玉立。该洞系我国目前最大的冰洞, 也是世界上迄今为止在永久冻土层以外发现的罕见的大冰洞。其永久冰层中层理发育, 目前冰洞已开发的深度从地表向下约 50 m, 深部情况有待进一步调查。从我们掌握的资料分析, 该冰洞可能为晚更新世以来末次冰期的遗留物。

2) 芦芽山奇峰: 芦芽山位于宁武、五寨、岢岚三县交界处, 是国家级自然保护区, 这里群山起伏, 林海苍茫, 松涛澎湃, 奇观异景随处可见。主峰海拔 2742 m (地理坐标: N38°44'19"; E111°55'38")。芦芽山由花岗伟晶岩、似斑状紫苏石英二长闪长岩等组成, 正长石斑晶达 2~5 cm, 可见辉绿岩捕虏体。发育有 SN、EW、近水平三组节理和裂隙, 前两者产状近于直立, 岩石被它们切割得支离破碎。

3) 冰川遗迹: 在芦芽山脉分布有多处冰川遗迹, 在山顶太子殿旁可见岩体中发育的冰臼, 其直径在 0.5~1.0 m 之间; 在山脉的两侧可见古冰斗、冰川 U 形谷、冰缘石海、冰缘石垄等古冰川、古冰缘遗迹。在芦芽山南侧梅洞村附近, 冰川 U 形谷中有大片分布的冰碛物, 组成高度不等的冰碛物台地, 冰碛物台地可明显分为两级, 每级厚为 20~50 m, 高位冰碛层上还发育有一层黄土。

4) 天池群: 在宁武县西南 30 km 处的高山上, 分布有串珠状的高山湖泊, 其中的公海, 海拔 1885 m (地理坐标: N38°54'36"; E112°13'55"), 面积 540 亩^①, 水深 15 m。这里水面如镜, 湖水清澈见底, 天旱不涸, 阴霖不溢, 虽不外流, 却为淡水。经我们初步观察, 该湖属构造湖, 形成于高山之巅的向斜盆地中。马营海(天池) 面积 1200 亩, 水深 12 m, 湖边建有隋炀帝避暑行宫(遗址)。湖相沉积中含有古气候、古环境、古生态变化的大量信息。

5) 亚高山草甸: 当地称为马仑草原, 又名黄草梁, 地貌上为夷平面, 它与芦芽山遥相对应, 相距 2 km, 海拔 2655~2721.7 m, 顶部广阔平坦, 是由冰缘石海组成的地貌景观, 分前梁和后梁, 为万亩高山草甸。草原顶部有北齐长城, 自西向东从山梁穿过。草甸土层很薄, 发育在冰缘石海之上, 生态脆弱。

6) 黄土堆积: 属于黄土高原的东缘地带, 在一些低矮丘岗上覆盖有厚 10~20 m 的黄

① 1 亩 = 666. 6 m²。

土层，在黄土剖面中见有 1~3 条古土壤带。黄土可能为马兰黄土。在黄土及其中的古土壤层中保存有丰富的古气候、古环境及构造-气候旋回与冰芯、冰川、河流阶地、湖泊耦合作用信息。

这些奇特的地质、地貌景观表明，在地质历史时期，特别是晚更新世以来构造运动对本区影响巨大。通过对地下冰洞的形成与演变、串珠状排列的湖泊群及湖相沉积、古冰川发育、黄土堆积、构造夷平面分布等的研究，可以论证京津外围地区的地质演化对京津地区环境与气候的影响。

四、主要成果

通过对山西宁武地区几条总计长达 6000 多千米的路线野外地质调查，全面了解了宁武冰洞地区的地质构造、地质地貌、冰川遗迹（冰碛物、冰水沉积物等）、高山湖相沉积、湖成地貌、河流沉积、第四纪地质与地貌、现代河流湖泊等方面的基本特征，并开展了室内的综合研究，取得了以下几方面成果：

1. 第四纪地质方面

依据本区第四纪堆积物形成年代及相互切割关系，第四纪地质发展大致可划分为 4 个大的阶段，即上新世末高剥蚀面形成阶段、早更新世古冰川发育阶段、中晚更新世风成黄土及河湖相堆积形成阶段和全新世流水作用阶段。

区内划分出第四纪沉积物类型 10 种、侵蚀地貌类型 12 种、堆积地貌类型 6 种，为区域第四纪地质发展历史重建提供了依据。

(1) 黄土堆积的调查研究

本区为黄土高原的东缘地带，在一些低矮丘岗上覆盖有厚 10~20 m 的黄土层，在黄土剖面中见有 1~3 条古土壤带，黄土时代初步可定为马兰黄土、离石黄土（在阳方口采集的样品其 ESR 年龄为 22.5 万和 27.3 万年）；在黄土及其古土壤层中含有丰富的古气候、古环境、构造-气候旋回及其与冰芯、冰川、河流阶地、湖泊相互耦合作用的信息。

(2) 冰川遗迹研究取得重要进展

1) 首次发现了梅洞沟的冰川遗迹，在小芦芽山东南边的梅洞沟发育有典型的冰川 U 形谷，后期径流下切，在河流 V 形谷中遗留有大量花岗岩巨大冰川漂砾，堆积在五台群老变质岩之上，是冰川退缩到山谷、山麓时作用的产物。

2) 在梅洞一带分布的冰碛层中，首次找到了大小为 5~10 cm 的冰碛砾石，其表面有许多被挤压形成的小坑（称之为压坑石）和被摩擦后形成的长条状痕迹。有的压坑形态似古代的油灯，故谓之“灯盏石”。带条痕的砾石，称为冰川条痕石，简称条痕石。灯盏石、压坑石和条痕石，是古冰川存在的重要证据之一。

3) 确定了芦芽山顶上的花岗岩洞穴为冰川作用形成的山顶冰臼；而分布于芦芽山“情人谷”中的花岗岩洞穴，为流水作用阶段形成的河谷壶穴。

4) 通过几次野外实地调查，可以确定宁武地区曾有大规模冰川活动，并在区内遗留下大量的冰川遗迹。如分布于梅洞沟和疙洞沟的终碛、侧碛、冰川泥砾堆积、冰川漂砾堆积、冰水砂砾堆积；分布于马营海一带的冰湖相淤泥沉积、冰碛、冰碛砾石堆积等；分布于五寨神路沟山顶面上的冰川砂砾及漂砾堆积和黄草梁、荷叶坪及其他夷平面上的冰川漂

砾堆积、冰碛等。这些野外证据表明,冰川作用的存在与本区冰洞形成有着密切的联系。

(3) 高山湖泊成因调查研究

初步确定宁武冰洞地区的马营海、鸭子海、老师傅海、琵琶海、公海、干海、岭干海等高山湖泊,为冰川作用形成的冰蚀湖。

1) 马营海(天池):位于宁武县南西约 20 km 处,面积约 1 km²,水深 5 ~ 15 m,湖面海拔为 1768 m (GPS 测定),现为一内陆湖,过去是汾河一个支流的源头。在该湖北面的海瀛寺庙边湖畔实测一条湖相剖面。剖面厚 1.08m (已见地下水),为棕红色砂和青灰、浅黄、褐色黏土互层。湖相沉积中含有古气候、古环境、古生态变化的大量信息。

2) 公海:海拔 1885 m,面积 0.255 km²,水深 15 m。该湖属冰蚀湖,产于高山之巅的向斜核部中。

3) 琵琶海:位于天池东南约 1.5 km 的沟谷中,因湖面状似琵琶而得名。琵琶海水面积 0.1 km²,平均水深 4 m,面积位居天池诸湖泊中第三位。琵琶海南面有水沟与汾水源头支流相通,湖中沉积物较薄,堆积物上部主要为红色粉砂和亚黏土,下部有淤泥,在东北边湖边上厚约 3 m。

4) 干海:位于天池之东北约 1 km 处,水面面积 0.04 km²,水深小于 2 m,主要由降雨积水造成,属季节性湖泊。干海一带草甸发育。从发掘出的 4 m 多厚的剖面看,其泥炭层厚达 2.5 m,是华北西部和黄土高原东部全新世最好的剖面之一,是研究中—晚更新世理想的湖相地层剖面之一。

(4) 建立了高山湖泊的湖相沉积全新统地层剖面

对分布于高山湖盆区内湖相地层进行了剖面实测,系统采集和测试了各种样品,¹⁴C 法、ESR 法年龄测定结果表明,高山湖盆内湖相沉积的形成时代为全新世。根据沉积相、岩相组合等特征,并结合同位素测年、孢粉分析、微体古生物鉴定等资料,首次建立了山西宁武地区高山湖泊的湖相沉积全新统地层剖面。

2. 冰洞及溶洞地质调查方面

通过野外地质调查和地球物理测量,确定了山西宁武冰洞的形态、延伸及其展布方向,对宁武冰洞的成因、发育及演化过程进行了探讨。

(1) 冰洞形态调查

采用美国 EM 公司和 Geometrics 公司联合生产的 Stratagem EH4 电导率成像系统,对山西宁武冰洞进行了高频大地电磁仪测量。高频电磁法物探测量的初步结果表明:冰洞主体异常深度范围为 50 ~ 85 m;冰洞形态总体上呈柱状体;冰洞中的冰层与洞的形态展布相一致;物探测量总体上反映出冰洞空间分布范围:南北长约 25 m,东西宽约 20 m,局部小范围向北东延伸,总体上呈柱状。

(2) 冰洞成因地质调查

冰洞的研究已取得新认识:通过对冰洞洞穴的地质构造、冰川地貌的野外调查,了解到冰洞的洞穴至少有上、中、下 3 层,是在奥陶系灰岩的近水平层理和两对直立共轭节理共同控制下,自中新世以来形成的岩溶系统。上洞是一个向上敞口的落水洞,一种意见认为它形成于距今约 2 Ma 的第四纪早期,可能是由冰川融水沿巨厚冰层的裂隙自上向下对基岩(灰岩)进行强烈冲击和溶蚀作用产生的。

该洞赋存于中奥陶统马家沟组第五段 (O_2m^5) 灰岩、泥质灰岩及白云质灰岩之中, 这些富含 CaO 、 MnO 的岩石, 均属可溶蚀岩类。岩石构造破碎, 在洞口灰岩中走向 $NNE-NE$ 向和 $NWW-NW$ 向, 基本垂直的两组剪性节理非常发育, 而且规模较大, 上下可贯穿整个奥陶系灰岩。

另外, 在层间发育有走向 NNE 向和 NWW 向、基本垂直的两组张性节理。几组节理将灰岩切割成大小不等的柱状体。这些近于垂直的节理裂隙, 为地表水和地下水的流通提供了通道。在漫长的地质历程中, 大量的地表水和地下水, 流向那些垂直节理裂隙发育的地段。到深部有一定水势后, 又会沿一些层间滑动面向四周流动, 形成自地表到地下潜水面的循环水。这也是冰洞始终未被地表水充满的原因。冰洞本身就是一个垂直溶洞和近水平溶洞相错接的洞穴。本区的植被繁茂, 水中的 CO_2 浓度大, 也加快了水对灰岩的溶蚀作用。

(3) 岩溶与古人类活动遗迹

新生代以来, 本区的地壳运动为间歇式隆升断块运动, 在广泛分布的寒武系、奥陶系灰岩中, 地下潜水面造成的岩溶近水平成层状发育, 并随地壳抬升而向下产生多达 8 层的岩溶系统, 其中发育溶洞, 推测存在古人类活动的遗迹。

3. 区域地质构造、新构造运动研究方面

(1) 区域地质构造研究取得的认识

本区位于大兴安岭、太行山、雪峰山隆起带—新华夏系第三隆起带之上; 本区的山脉、水系、盆地、隆起、断陷均呈 NNE 向展布的格局。区域地质构造序次划分表明, 本区位于华北地台中部, 宁武地区构造事件的历史和特点, 可以作为整个华北地台区的代表。进入新生代以来, 本区进入伸展体制下的陆内后造山期。以挤压体制为主的造山作用之后, 东亚地区新生代岩石圈动力学转变为伸展机制, 形成了大陆裂谷构造地貌。冰洞旁侧汾河与桑干河源区分水岭狭窄的宁武—化北屯裂谷, 以及芦芽山腹地劈开崇山峻岭的锯齿状周家沟—沅泥湾的长机沟裂谷, 都是晚近时期新生的, 呈狭长线状, 是华北研究喜马拉雅造山运动的典型地区之一。

(2) 汾渭裂谷系

燕山期和喜马拉雅期陆内造山运动对本区的地质构造和地形、地貌形成起着决定性的作用。喜马拉雅晚期新构造运动时期, 汾渭裂谷系在它的腰部被贯通, 形成梵王寺—宁武—井务沟—头马营—化北屯断陷谷, 它不服从燕山期宁武—西马房断褶束的约束, 以更偏向北的 NNE 方向穿过本区。其断陷谷的破裂向西扩展, 向芦芽山体延伸, 在宽缓背斜枢纽上造成追踪张性断层开裂。

(3) 活动构造研究的初步认识

经野外调查, 活动构造主要表现为区域大面积断块隆起、始新世开始发育的汾渭裂谷系继续活动。区域构造应力场继承了燕山期新华夏构造体系格局, 但以松弛阶段的伸展作用为主, 沿恢河—汾河河谷生成相连成线的锯齿状正断层裂谷系组合。在春景洼冰洞以下生成最新的无错断张性断层谷, 在宁化古城保存有地表断裂的古城墙遗迹, 证实区内有活动断层的存在。

(4) 新构造运动研究的初步认识

区内的新构造运动主要表现为大面积的断块隆升作用, 河谷深切, 侵蚀阶地发育, 河

谷中跌水、瀑布频频出现，崩塌和倒石锥时有发生。

4. 冰洞中冰的保存机制研究方面

在室内开展了冰洞冰体保存机制的实验研究，结合野外地质调查结果，探讨冰洞中冰体形成及为何会长年不化成为冰洞的原因。

(1) 冰洞冰体保存机制的实验研究

室内通过实验研究不同介质，尤其是不同岩石介质的热导率、热容量的差异和构成冰洞的灰岩岩石介质热导率、热容量的性质和特点，以及水冰与岩石之间的热平衡作用的关系、过程和结果。具体实验是通过冰箱中冻结的水冰冰块，在不同介质、不同容器、不同温度和不同环境条件下，测量冰块的融化量，以求得不同介质、不同容器在不同温度、不同条件下冰融化量的大小。这就是不同介质在不同容器、不同条件下的热导率和热容量的制约性和大小的反映。以此来探讨冰洞中冰体长期不化的原因，为建立冰体长期保存机制提供可供参考的资料和实验数据。

(2) 冰洞中冰体长年不化成为冰洞的原因

1) 野外调查后认为主要是因为当地海拔达 2220 m，冬季严寒，气温在 -20°C 以下，年均气温在 -2°C 以下，地表流水进入洞穴，冬季冻结成冰，同时洞穴底部堵塞封闭，不存在空气对流热交换，洞壁岩石热导率低，可以使冬季的极低温度和冻结的冰体得以保存。如此年复一年，冰体长期不化，而成为“冰洞”。

2) 对于冰洞中冰体形成层状结构的原因，经野外调查后认为是冰洞形成过程中曾一度经历“冰湖阶段”的反映。夏天地表水曾几度灌入，在冰洞中形成“冰湖”，产生“湖相沉积”，冬季冻结成冰，年复一年，成为层状结构。

3) 冰洞的地质成因：冰洞规模较大，洞体基本呈垂直筒状，直径 20 ~ 25 m，深 85 m 左右，其形成与围岩为碳酸盐岩、构造破碎及地下水密切相关，属岩溶成因洞穴群。

5. 第四纪环境演变与气候变化研究方面

室内系统测定了样品时代、古环境与古生态等参数并对微体古生物与古植物进行了鉴定，用以判断山西安武冰洞地区环境演变所反映的地质构造演化与气候变化，据此建立生态地质环境评价模型，重塑第四纪以来该区气候变迁的演化历史，及分析华北地区气候变化的响应。

(1) 宁武高山湖泊演化与华北地块隆升

在宁武县西南 30 km 处的高山上，分布有串珠状的高山湖泊，这里水面如镜，湖水清澈见底，天旱不涸，阴霖不溢，虽不外流，却为淡水。

这些湖泊属构造湖，形成于高山之巅的向斜盆地中。在湖相沉积中含有古气候、古环境、古生态变化的大量信息。湖泊演化可以反映华北地块的隆升过程。

(2) 宁武冰洞地区第四纪以来的气候环境变化

在沉积环境演变的研究中，磁化率、粒度和碳酸盐分析能够提供、重建古流态水力学参数时所必需的粒度资料，确定物质来源区变更时所需要的粒态依据，直接反映某些环境下的粒态特征。

本书从易溶盐、磁化率、粒度、碳酸盐和介形类分析入手，对宁武冰洞地区第四纪湖相沉积物的时代、古环境代用指标与古生态参数等进行了测定，并对微体古生物与古植物

进行了鉴定，可以反映出近 2.40 Ma 以来冰洞地区沉积环境的演变过程。

宁武冰洞地区的古生态分析，再现了该区第四纪以来环境气候的演化序列，其气候与环境的变化又直观反映了华北地区的古气候、古环境演化过程。

(3) 宁武冰洞地区孢粉组合分析与古植被和古气候研究

在宁武冰洞地区，我们采集和分析了梅洞剖面、黄土坡剖面、干海剖面、天池剖面、琵琶海剖面的孢粉样品，确定了古植被与古气候状况。

其中，梅洞剖面孢粉贫乏、单调，其浓度一般 < 1000 粒/g，孢粉组合中以草本为主，一般大于 90%，其他组分少见；黄土坡剖面中孢粉贫乏，草本植物花粉占绝对优势，以蒿、禾本科、藜、蓼等为多见，乔木植物花粉很少，主要为松，还有极少量的柏、桦、栗、胡桃等，反映气候干、凉的环境；琵琶海剖面 and 天池剖面中孢粉较丰富，其浓度一般 > 1000 粒/g，孢粉组合中以草本为主，草本植物花粉主要有蒿（ $> 30\%$ ），其次有藜科及禾本科；干海剖面中孢粉丰富，以乔木植物花粉为主，占 80% 以上，草本植物花粉仅占 20% ~ 30%，主要乔木有松及桦、栎等落叶阔叶成分。

(4) 山西宁武冰洞地区未来地质环境的演变趋势

本书主要从地质环境演变及其周期性和地质环境演变的相关性等方面，开展了地质环境演变研究；从地质环境演变的条件、地质环境演变的阶段方面，分析了山西宁武冰洞地区的地质环境演变过程，探讨了该区未来地质环境的演变趋势。

山西宁武冰洞及邻区晚新生代以来的地质环境受制于以下 3 个条件：一是服从于各时期全球变化的总体态势；二是与处于中国东中部有关，主要受到东西两边青藏高原和西太平洋的影响；三是自中新世以后中国大陆地势在由东高西低转向西高东低的过程中，由于山西地块限制在天山 - 阴山和秦岭两个巨型纬向带之间，在来自帕米尔 - 青藏的地壳物质向东蠕散的运动中，产生了右旋转动，并在新近纪唐县期侵蚀以后，成为中国宏观地貌上第二台阶东边部分的山西高原。

(5) 青藏高原的地质环境及其与山西宁武冰洞地区的关联性

对全球地质和气候环境起着极其重要作用的青藏高原，是在讨论山西宁武冰洞时不可避免的，甚至是具有因果关系的参照地区。因而，在总结讨论山西宁武冰洞在未来地质环境演变中的意义的同时，将其与青藏高原进行对比就显得十分必要。

本书从地质环境演变的阶段划分、地质环境演变的特点和地质环境演变的构造运动分期等方面，对青藏高原始新世至早更新世早期的地质环境进行了分析；从早更新世晚期—中更新世初期、中更新世晚期至晚更新世时期和全新世阶段等不同时期，探讨了早更新世以来青藏高原的地质环境及其与山西宁武冰洞地区的关联性。

6. 为当地经济建设服务方面

为了贯彻执行地质调查工作基础性、公益性的要求，我们在项目进行中过山西宁武冰洞地区的经济地质开展了调查研究。

(1) 为建立山西宁武冰洞省级、国家级地质公园开展调查

应当地政府部门的要求，为地方省级、国家级地质公园的申报进行了野外地质调查与申报材料的编写。相继组织编写了山西宁武冰洞地质公园考察报告、地质公园规划、地质景点说明等 9 份申报材料。为申报成功山西宁武冰洞省级和国家级地质公园打下了坚实

基础。

(2) 对山西宁武冰洞国家地质公园地质遗迹进行了评价

根据地质遗迹分级标准,对山西宁武冰洞国家地质公园地质遗迹进行了评价,将地质遗迹景观分为世界级、国家级和省市级。对宁武冰洞国家地质公园的自然属性及地质科学价值、资源、其他地质地貌遗迹的科学价值和经济社会价值进行了评价。

(3) 对本区矿产资源概况进行了初步探讨

本区矿产资源丰富,矿种较多,主要有煤、煤成气、铜、锰、钼、铁、硫铁矿、铝土、耐火黏土、石英岩、水泥灰岩、白云岩、云母、各类石材、地下水、矿泉水等。本书根据目前所掌握的地质资料,对山西宁武冰洞地区的矿产资源及其资源潜力等,进行了初步探讨。

(4) 对冰洞地区的旅游资源进行了调查研究

冰洞地区山川秀美、人杰地灵,旅游资源非常丰富。主要包括地质遗迹资源、珍稀生物资源和人文古迹资源。其中,旅游资源类型多样、保存完好、易于开发,这些旅游资源集中分布在宁武冰洞国家地质公园的5个景区内。

(5) 对冰洞地区的人文景观进行了调查研究

在宁武的人文景观中,高山宗教文化景观、军镇关隘文化景观、湖泊游猎文化景观及汾源人文景观是主题,其中中国北方第一悬棺群、翔凤山清真庵寺庙遗址、芦芽山寺庙遗址、宁化万佛洞、宁化古城、汾源水母庙等,具有很高的旅游价值。

五、写作分工及致谢

本项目进行过程中得到了(均为时任)中国地质调查局孟宪来局长、王宝才副局长、张洪涛副局长、彭齐鸣主任、庄育勋主任、叶建良副主任、卢民杰处长、肖桂义处长、翟刚毅处长、于庆文副处长、刘凤山副处长,中国地质科学院朱立新常务副院长、董树文副院长、院长赵逊研究员等的全力支持,在此表示衷心的感谢。

室内研究工作得到了中国地质大学(北京)原校长吴淦国教授、校长邓军教授,中国地质科学院地质力学研究所原所长龙长兴研究员、原党委书记何长虹、原副所长赵越、原副所长李贵书,以及孙殿卿院士、崔盛芹教授、王小凤研究员、廖椿庭研究员、刘晓春研究员、陈正乐研究员、王连庆研究员、王平安研究员、王宗秀研究员、汪西海教授级高级工程师、白嘉启高级工程师、杨美玲教授级高级工程师等各位专家学者的帮助和指导。

ESR法测年由成都理工大学梁兴中教授测定,¹⁴C测年由中国地震局地质研究所尹金辉高级工程师完成,孢粉分析鉴定由中国地质科学院水文地质环境地质研究所童国榜研究员承担,介形类化石由中国地质科学院地质力学研究所田国强副研究员鉴定,粒度、碳酸盐和磁化率由中国地质科学院地质力学研究所刘莉工程师测定,古地磁测年由中国科学院地质力学研究所赵越工程师和任小娟工程师完成,水质分析由北京市地质工程勘察院实验室测定,碳酸盐全分析由河北省地质矿产局廊坊实验室承担,光片鉴定由河北区域地质调查研究所实验室完成,岩矿鉴定由河北区域地质调查研究所实验室张江满高级工程师承担,图件由田晓娟副研究员、曲玮副研究员、赵小荣工程师协助绘制。

在此,对上述人员一并致以衷心的感谢。

本书是经过充分讨论、分工负责、集体编写而成。“前言”由邵兆刚、余佳执笔,第

一章由余佳、邵兆刚、孟宪刚执笔，第二章由孟庆伟、王津、钱方执笔，第三章由吕荣平、邵兆刚、朱大岗执笔，第四章由韩建恩、张雪峰、马天林执笔，第五章由张雪峰、朱大岗、王建平执笔，第六章由孟庆伟、孟宪刚、孙立蒨执笔，第七章由余佳、韩建恩、韩同林执笔，第八章由余佳、孟宪刚、钱方执笔，第九章由邵兆刚、王津、张雪峰执笔，第十章由韩建恩、吕荣平、王津执笔，第十一章由孟庆伟、吕荣平、张雪峰执笔，第十二章由吕荣平、朱大岗、韩同林执笔，第十三章由余佳、孟庆伟、孟宪刚执笔，第十四章由余佳、韩建恩、王津执笔，第十五章由余佳、孟宪刚、钱方执笔，第十六章由韩建恩、邵兆刚、朱大岗执笔，第十七章由韩建恩、孟宪刚、朱大岗执笔，“结语”由邵兆刚、孟宪刚、朱大岗执笔。最后由余佳、韩建恩、孟庆伟汇总、统编、定稿。

目 录

前 言

第一篇 区域地质概况	1
第一章 自然地理	3
第一节 区域自然地理特征	3
第二节 区域气候与区域土壤	8
第三节 区域植被与区域生态环境	11
第二章 第四纪地质与地貌单元划分	15
第一节 第四纪地层及沉积发育特征	15
第二节 第四纪地质演化阶段与古环境演化	20
第三节 地貌单元与地貌演化	24
第三章 岩石地层特征	31
第一节 地层岩石系统	31
第二节 变质岩	41
第三节 岩浆岩	42
第四章 构造特征	45
第一节 宏观构造特征	45
第二节 大地构造位置	46
第三节 构造形迹	47
第五章 区域地质演化及发展史	54
第一节 区域地质发展史	54
第二节 陆内造山运动与典型构造形迹	63
第六章 新构造运动	70
第一节 新构造运动性质和特征	70
第二节 岩溶地貌的发育	75
第三节 裂谷、活动断裂与地质灾害	76
第七章 高山湖泊与全新世湖相沉积	80
第一节 高山湖泊	80

第二节	高山湖泊湖相地层划分及干海组的建立	84
第三节	水文地质	93
第二篇	冰洞的形成与演化	99
第八章	冰洞的形成条件	101
第一节	地质构造条件及其对比	101
第二节	其他基本条件	105
第三节	大气、地温和地热条件	108
第九章	冰洞的基本特征	110
第一节	地表调查	110
第二节	物探测量	113
第十章	冰洞冰体长期保存机制的实验研究	122
第一节	实验目的、意义和原理	122
第二节	实验内容及过程	123
第三节	实验结果及初步认识	125
第十一章	冰洞形成机制探讨	130
第一节	冰洞洞体的形成机制	130
第二节	冰洞冰体的形成机制	132
第三节	冰洞冰体长期保存机制探讨	134
第十二章	第四纪冰川作用与冰期划分	139
第一节	第四纪冰川遗迹	139
第二节	第四纪冰期划分、时代和冰期对比	149
第三篇	冰洞的环境意义与经济地质	153
第十三章	沉积环境分析	155
第一节	第四纪沉积物易溶盐分析	155
第二节	第四纪沉积物磁化率、粒度和碳酸盐分析	159
第十四章	沉积地层的孢粉分析	165
第一节	沉积地层的孢粉与环境	165
第二节	第四纪环境变化中的几个问题	177
第十五章	宁武冰洞国家地质公园简介	180
第一节	宁武冰洞国家地质公园的建立	180
第二节	宁武冰洞国家地质公园景区划分	183
第三节	宁武冰洞国家地质公园评价	184

第十六章 地区经济地质..... 199

 第一节 矿产资源..... 199

 第二节 旅游资源..... 202

 第三节 人文景观..... 207

第十七章 未来地质环境的演变趋势..... 217

 第一节 地质环境演变研究..... 217

 第二节 区域地质环境演变..... 218

 第三节 青藏高原始新世至早更新世早期的地质环境..... 221

 第四节 早更新世以来青藏高原的地质环境及其与山西宁武冰洞地区的
 关联性..... 224

结语..... 227

参考文献..... 236