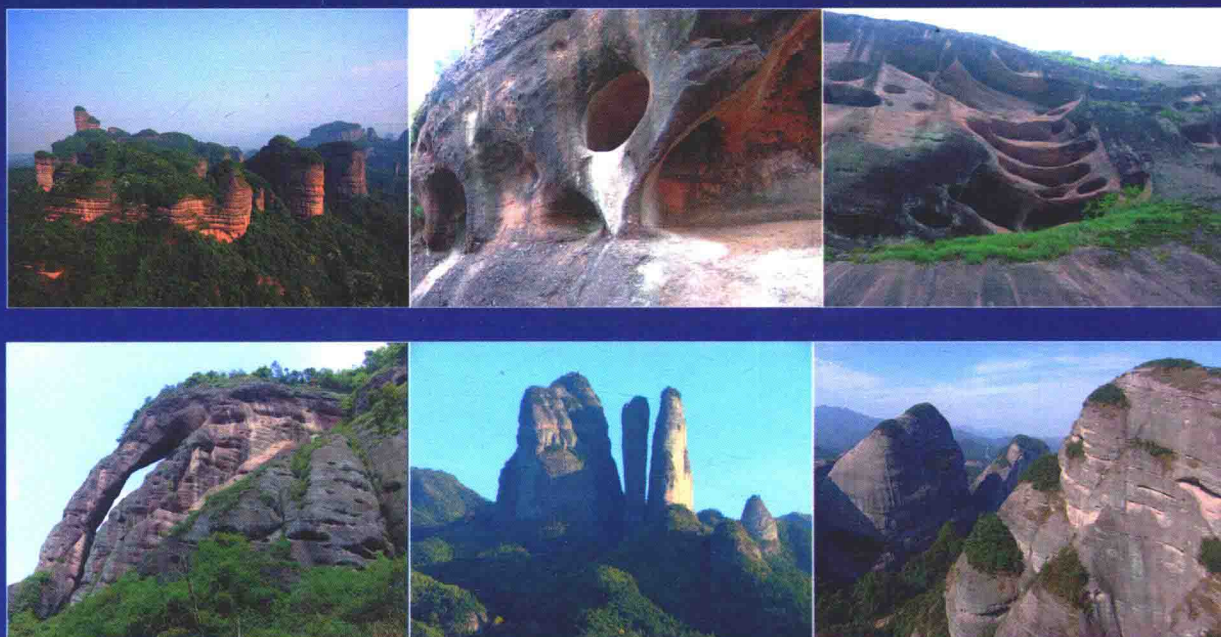


中国典型丹霞地貌成因研究

Development Mechanisms of Typical Danxia Landforms in China

朱 诚 马春梅 张广胜 等 著



科学出版社

中国典型丹霞地貌成因研究

朱 诚 马春梅 张广胜 等 著

国家科技基础性工作专项重点项目 (2013FY111900) 资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍中国典型丹霞地貌研究的历史背景、研究过程与研究意义,国内外研究进展及研究内容与方法。本书以广东丹霞山、浙江江郎山、福建泰宁、湖南崀山、江西龙虎山这五处世界自然遗产地和浙江方岩、安徽齐云山、福建冠豸山等丹霞地貌区为例,讨论这些研究区的自然地理特征、地质构造、地貌特征、地层与岩性特征,介绍对各研究区的野外调查和采样过程,在此基础上论述对丹霞地貌各类砂砾岩干抗压与湿抗压强度、酸蚀抗压强度、冻融抗压强度、蜂窝状洞穴样品X荧光分析、岩性在偏光显微镜下样品的鉴定分析过程。在上述实验数据分析基础上讨论丹霞地貌中造景地貌如扁平状洞穴、风车岩、天生桥、蜂窝状洞穴及各类型穿洞、崩积石与围谷、峡谷与三月石等的地貌成因,为今后开展丹霞地貌成因研究提出新思路 and 科学依据。

本书除可供自然地理学、地貌与地质学教学科研参考外,对当前“中国丹霞”世界自然遗产地和各类丹霞地貌的地质地貌成因调查具有较高参考价值,也可供地质学界、地貌学界、旅游界相关工作人员、高等院校师生和丹霞地貌风景区管理人员参考。

封面照片说明(照片均由朱诚拍摄)

上左:丹霞山僧帽峰;上中:丹霞山梦觉关小型穿洞;上右:泰宁香蕉岩叠层状凹槽;下左:龙虎山象鼻岩;下中:江郎山三月石;下右:崀山丹霞地貌山峰

图书在版编目(CIP)数据

中国典型丹霞地貌成因研究/朱诚等著. —北京:科学出版社, 2015. 11
ISBN 978—7—03—046192—6

I. ①中… II. ①朱… III. ①丹霞地貌—研究—中国 IV. ①P942. 207. 6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第260628号

责任编辑:胡 凯 周 丹 / 责任校对:李 影

责任印制:赵 博 / 封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年12月第一次印刷 印张:22 3/4

字数:534 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

丹霞地貌因“色如渥丹，灿若明霞”而闻名于世，是一种具有很高科学价值和美学价值的地貌类型，是一个与其他风景地貌颇为不同而更富于造景功能的自然地理实体和人文地理实体。2010年8月，在第34届世界遗产大会上，由中国6个著名的丹霞地貌风景区构成的“中国丹霞”系列——广东丹霞山、贵州赤水、福建泰宁、湖南崀山、江西龙虎山、浙江江郎山被列入世界遗产名录，标志着中国丹霞地貌的研究走出国门，走向国际。但中国丹霞地貌理论和成因研究滞后于应用研究，定性研究多、定量研究少。《中国典型丹霞地貌成因研究》一书通过对中国典型丹霞地貌区的实验地貌学研究来分析岩性差异对丹霞地貌发育的影响，对揭示丹霞地貌区凹槽及穿洞和蜂窝状洞穴等发育的成因，以及了解我国白垩纪以来丹霞地貌地质构造演化及成因和旅游开发具有十分重要的意义。

该书作者及其科研团队自2000年以来，在国家科技基础性工作专项重点项目资助下，对中国典型丹霞地貌进行了较系统的野外调研和实验地貌学研究，该书学术贡献主要体现在如下几个方面。

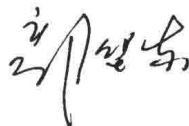
(1) 通过野外实地考察，在宏观总结地理位置、地质构造、岩性特征等的基础上，分别对八个地点（广东丹霞山、浙江方岩、浙江江郎山、福建冠豸山、福建泰宁、湖南崀山、江西龙虎山、安徽齐云山）的丹霞地貌区进行了详细的论述，对砂岩和砾岩等岩石标本进行了实验地貌学研究，归纳出丹霞地貌发育变化的规律。

(2) 对丹霞地貌的研究除要了解地质构造特征和地貌现状外，还需要对岩性特征、成分、颜色、结构、构造、胶结物、胶结类型、特殊矿物等开展研究。探索丹霞地貌成因的实验地貌学主要包括：对丹霞地貌砂岩和砾岩的钻孔取样、丹霞地貌岩性中火山岩的取样及其K-Ar法测年、丹霞地貌岩性偏光显微镜鉴定、与造景地貌成因有关的干抗压与湿抗压强度对比分析、酸蚀抗压强度对比分析、冻融抗压强度对比分析、X荧光光谱元素分析等。上述研究结果对揭示丹霞地貌成因具有重要的指导意义。

(3) 在从微观角度研究各地区丹霞地貌发育过程的基础上，对比分析不同地区岩体差异与丹霞地貌发育形态的关系，为科学解释岩体差异对丹霞地貌发育机制的影响提供了可靠的科学依据，并对丹霞地貌发育特征进行了系统分析和总结。

该书是作者及其科研团队15年来坚持不懈对丹霞地貌研究的结晶，其中很多成果已在国内外高水平杂志上发表，并得到学术界的高度认可，是难得的专业性科学专著。笔者有幸先睹为快，相信读者们会从中汲取丰富的丹霞地貌科学知识，并相信该书的出版会推动我国丹霞地貌研究及其旅游资源的开发。

中国科学院院士
发展中国家科学院院士
国际欧亚科学院院士



2015年11月30日

前 言

丹霞地貌研究起始于 1928 年,中国地质学家冯景兰和朱翔声在广东曲江、仁化、始兴、南雄地质考察时命名形成丹霞地貌的红色砂砾岩层为“丹霞层”。1938 年,地质学家陈国达考察丹霞山,提出“丹霞山地形”这一术语,1939 年,他接着提出“丹霞地形”这一地貌学术语。此后,地貌学家曾昭璇、陈传康等长期从事对丹霞地貌的研究。20 世纪 90 年代以来,彭华等也逐渐投入了对丹霞地貌及其申报世界自然遗产的研究。2010 年 8 月,在第 34 届世界遗产大会上,由中国 6 个著名的丹霞地貌风景区构成的“中国丹霞”系列——广东丹霞山、贵州赤水、福建泰宁、湖南崀山、江西龙虎山、浙江江郎山被列入世界遗产名录,本书作者与中山大学及“中国丹霞”世界自然遗产地风景区管理委员会等单位也首次在 *Geomorphology* 杂志上联合发表了“中国丹霞”实验地貌学研究的科研成果,深入开展了对丹霞山等造景地貌成因的系统研究,丹霞地貌更加引起世人的瞩目。

从国外研究进展看,与丹霞地貌有关的研究,国际上一般称为砂岩或砾岩地貌研究。Robert Young 等(1992, 2009)、Turkington 等(2005)做过相关研究。Robert Young 等对世界各地的砂岩地貌(包括红色砂岩地貌)做过比较全面的介绍,在其 2009 年的新版中,增加了对中国丹霞地貌的介绍。2002 年 9 月和 2005 年 5 月,在捷克和卢森堡曾先后召开两届砂岩景观国际学术讨论会,出版了论文集,其中有一部分属于红色砂砾岩地貌。但 Robert Young(2009)认为,从地貌学各分支学科发展看,国际上对红色砂砾岩地貌的研究仍然十分薄弱。由于国际上将丹霞地貌分别归于砂岩地貌、砾岩地貌、假喀斯特、石英喀斯特和干旱区地貌等,但均不十分准确,因此,目前国际上的分类系统尚不能给丹霞地貌一个合适的确定位置。但目前国外对丹霞地貌的研究侧重于旅游开发或宗教,如美国犹他州阿切斯(Arches)国家公园的丹霞石拱、埃及的阿布·辛拜勒(Abu Simbel)神庙、阿富汗巴米扬大佛(Bamyan)及其丹霞地貌山谷、巴西的卡皮瓦拉山(Capiyara)国家公园、阿根廷北部卡法亚特(Cafayate)红层山地等,而实验地貌学研究还不足。

从国内研究进展看,中山大学黄进教授先后对我国 28 个省区约 1000 处丹霞地貌进行过实地考察,并自 1990 年以来,提出并改进了计算丹霞地貌区地壳上升和侵蚀速率的计算公式。20 世纪 90 年代国内学者开始把丹霞地貌的研究视角投向了世界。彭华和蔡辉(1998)、杨禄华(1999)、尹德涛(2002)、张忍顺(2004)、刘尚仁(2003, 2004)等分别对美国、澳大利亚、英国、印度、阿富汗等国家的丹霞地貌进行了介绍。朱诚、俞锦标、彭华、马春梅、张广胜、李中轩、欧阳杰、李兰、吴立、朱光耀、侯荣丰、唐云松、谭艳、陈姝、吕文、孙伟、王晓翠等(2000~2015)分别对福建冠豸山、安徽齐云山、浙江江郎山、浙江方岩、广东丹霞山等地进行了研究,并发表了有关丹霞地貌成因等方面的新

成果,引起学术界的广泛关注。南京大学团队在我国丹霞地貌申报世界自然遗产过程中,主要承担并完成了浙江省江郎山和方岩两个地点风景名胜区丹霞地貌综合科学研究报告、风景名胜区地质地貌特征要素图片集、丹霞地貌综合科学研究成果电子文件汇编以及对丹霞山、泰宁、龙虎山和崑山申报世界自然遗产期间的丹霞地貌成因调研等工作,目前已培养两名博士和三名硕士学位获得者,已发表 21 篇论文(其中 SCI 论文 7 篇、一级学报 9 篇)。

在研究中我们发现以下科学问题值得重视:为什么中国是丹霞地貌发育最多的国家?为什么中国丹霞地貌被评为世界自然遗产?最有特色的丹霞地貌除了六处入选地点外还有别的地方吗?为何中国的丹霞地貌构成其物质基础的岩石层位大多数是晚白垩世(K_2)时期的?中国东西部的丹霞地貌有何区别?浙江又有何特色?广东、湖南、福建、江西、贵州以及安徽和江苏等省又有什么区别?中国的丹霞地貌发育特征、数量及其与海洋板块和大陆板块碰撞有关吗?晚白垩世 K_2 等时期天体撞击、火山喷发、构造运动和海陆板块碰撞之间有何密切联系?今后应如何进一步开展研究和进行旅游开发?对上述科学问题的探索,将有助于我们对丹霞地貌科学成因的深刻了解和认识。

从发育特征看,我国丹霞地貌主要分布于晚白垩世(K_2)地层。受太平洋板块对大陆板块碰撞挤压的影响,我国东部地块白垩纪多发育有山间盆地和粗大的砾岩(如浙江方岩等地),往西逐渐形成断陷盆地和面积较大的丹霞地貌分布区(如湖南与广西交界处的崑山地区)。从岩性分布看,东部地区如浙江省具有较多火山岩,向西逐渐过渡为较多的砾岩、砂砾岩和砂岩以及与碳酸岩类岩性相交的特点。从丹霞地貌调查看,我国丹霞地貌的发育可能与天体撞击引起的恐龙灭绝和火山岩喷发事件、以及第四纪冰期-间冰期冻融崩塌和构造隆升等地质作用密切相关。因此,解决以上科学问题以及作者在 *Geomorphology* 等杂志上发表的对列入世界自然遗产的“中国丹霞”系列广东丹霞山、浙江江郎山、福建泰宁、江西龙虎山、湖南崑山以及典型丹霞地貌区的福建冠豸山、安徽齐云山、浙江方岩等地的地质构造和岩性的抗压、抗侵蚀、抗冻融实验和偏光显微镜等鉴定,对揭示丹霞地貌区凹槽及穿洞和蜂窝状洞穴等发育的成因,以及对了解我国白垩纪以来丹霞地貌地质构造历史及成因和旅游开发具有十分重要的意义。

本书是课题组多年合作研究的综合成果。朱诚参与所有章节的撰写,课题组以下成员参与部分章节的撰写:马春梅(第 1 章、第 2 章、第 10 章、第 11 章)、张广胜(第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 11 章)、欧阳杰(第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 11 章)、吕文(第 5 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章)、陈姝(第 7 章、第 8 章、第 9 章)、吴立(第 3 章)、唐云松(第 10 章)、谭艳(第 3 章)、李兰(第 4 章、第 5 章)、李中轩(第 4 章、第 5 章)、俞锦标(第 6 章)、李刚(第 6 章)、吴承照(第 6 章)、朱光耀(第 4 章、第 5 章)、朱青(第 4 章、第 5 章)、郑朝贵(第 5 章)。采样和实验中还得到了彭华、孙伟、王晓翠、贾天骄、钟宜顺、侯荣丰、胡智农、周日良、胡永起、吕振荣、胡昶、武弘麟、周书勤、李东、朱雨鸣等的支持与协助。全文的统稿由马春梅、张广胜完成,三位硕士生张娜、蔡天赦、杨昊坤协助,朱诚最后审阅校对定稿。

本研究得到国家科技基础性工作专项重点项目（2013FY111900）的资助，野外调研和采样中得到了“中国丹霞”世界自然遗产地风景区管理委员会（广东丹霞山、浙江江郎山、福建泰宁、湖南崀山、江西龙虎山）、浙江方岩风景名胜区、福建冠豸山风景名胜区和安徽齐云山风景名胜区等管理部门的大力协助，研究中得到了黄进、彭华、俞锦标、崔之久、许世远等地貌学专家的支持，郭华东院士在百忙之中抽空审阅全书并作序，作者在此一并深表感谢！

作 者

2015 年 11 月 30 日

目 录

序言

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景与研究意义	1
1.2	国内外研究进展	2
1.2.1	丹霞地貌的国内研究现状分析	2
1.2.2	丹霞地貌的国外研究现状分析	7
1.2.3	丹霞地貌的实验地貌学研究现状分析	9
1.3	研究目标、内容与总体思路	11
1.3.1	研究目标	11
1.3.2	研究内容	11
1.3.3	总体思路	11
第 2 章	实验过程与实验方法原理	13
2.1	野外样品采集与加工	13
2.2	实验科学依据和实验过程	15
2.2.1	单轴抗压实验	15
2.2.2	干抗压试验	17
2.2.3	湿抗压试验	17
2.2.4	冻融实验	17
2.2.5	酸蚀后抗压试验	18
2.2.6	冻融后抗压试验	18
2.2.7	X 射线荧光光谱分析	19
2.2.8	电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 分析	20
2.2.9	偏光显微镜分析	21
第 3 章	广东丹霞山丹霞地貌研究	22
3.1	研究区概况	22
3.1.1	自然地理特征	22
3.1.2	地质构造	24
3.1.3	地层与岩性特征	26
3.2	野外调查和采样过程	31
3.2.1	阳元山-巴塞地貌区	31
3.2.2	风车岩穿洞	31
3.2.3	阳元石石柱下方	33

3.2.4	锦石岩-长老峰	34
3.2.5	锦石岩凹槽	36
3.2.6	玉女拦江洞蜂窝状洞穴	37
3.2.7	通泰桥	39
3.2.8	混元洞	41
3.3	实验数据分析	50
3.3.1	干抗压与湿抗压强度对比分析	50
3.3.2	酸蚀抗压强度对比分析	61
3.3.3	冻融抗压强度对比分析	64
3.3.4	蜂窝状洞穴样品 XRF 分析	66
3.3.5	白斑样品成分和成因分析	67
3.3.6	偏光显微镜下样品的鉴定分析	70
3.4	造景地貌成因分析	71
3.4.1	风车岩穿洞成因分析	71
3.4.2	阳元石成因分析	72
3.4.3	锦石岩凹槽成因分析	73
3.4.4	丹霞山大型密集水平凹槽成因	75
3.4.5	通泰桥成因分析	78
3.4.6	丹霞洞穴内蜂窝状洞穴及结皮风化物成因分析	78
3.5	研究结论	84
第4章	浙江方岩丹霞地貌研究	87
4.1	研究区概况	87
4.1.1	自然地理特征	87
4.1.2	地质构造	90
4.1.3	地层与岩性特征	91
4.2	野外调查和采样过程	97
4.3	实验研究过程	99
4.4	实验数据分析	128
4.5	造景地貌成因分析	132
4.5.1	方岩丹霞地貌的剖面组合	132
4.5.2	方岩丹霞地貌类型及空间组合	133
4.5.3	方岩丹霞地貌发育的地层特征	135
4.5.4	方岩丹霞地貌发育过程探讨	136
4.6	研究结论	159
第5章	浙江江郎山丹霞地貌研究	161
5.1	研究区概况	161
5.1.1	自然地理特征	161
5.1.2	区域地质构造	163

5.1.3 地层与岩性特征	164
5.2 野外调查和采样过程	172
5.3 实验研究过程	174
5.4 实验数据分析	200
5.5 造景地貌成因分析	200
5.5.1 断层和节理	201
5.5.2 崩塌过程	204
5.5.3 岩性差异风化和扁平状洞穴的形成过程	208
5.5.4 构造隆升与三级山顶面的关系	214
5.6 江郎山丹霞地貌成功被列入世界自然遗产地的原因	215
5.6.1 科学价值	216
5.6.2 江郎山具有独特的景观美学价值	219
5.6.3 江郎山与其他丹霞地貌区的分析对比	230
5.7 研究结论	234
第6章 福建冠豸山丹霞地貌研究	236
6.1 研究区概况	236
6.1.1 自然地理特征	236
6.1.2 区域地质构造	236
6.1.3 地层与岩性特征	238
6.2 野外调查和采样过程	238
6.3 实验研究过程	239
6.4 实验数据分析	239
6.5 造景地貌成因分析	240
6.6 研究结论	243
6.6.1 分水岭型丹霞地貌特征	243
6.6.2 砾岩型丹霞地貌的发育	243
6.6.3 壮年早期阶段丹霞地貌的发育	244
6.6.4 无喀斯特丹霞地貌类型的发育	244
6.6.5 单面山型丹霞地貌的发育	244
第7章 福建泰宁丹霞地貌研究	245
7.1 研究区概况	245
7.1.1 自然地理特征 (含地理位置概况、气候与水文特征)	245
7.1.2 地质构造	247
7.1.3 地层与岩性特征	247
7.2 野外调查和采样过程	249
7.3 实验研究过程	250
7.4 实验数据分析	252
7.5 造景地貌成因分析	255

7.6	研究结论	255
第8章	湖南崑山丹霞地貌研究	257
8.1	研究区概况	257
8.1.1	自然地理特征	257
8.1.2	崑山丹霞地貌概况	257
8.1.3	地质构造	257
8.1.4	地层与岩性特征	259
8.2	野外调查和采样过程	263
8.3	实验研究过程	265
8.4	实验数据分析	265
8.5	造景地貌成因分析	270
8.6	研究结论	270
第9章	江西龙虎山丹霞地貌研究	274
9.1	研究区概况	274
9.1.1	自然地理特征	274
9.1.2	龙虎山丹霞地貌概况	274
9.1.3	地质构造	275
9.1.4	地层与岩性特征	277
9.2	野外调查和采样过程	280
9.3	实验研究过程	280
9.4	实验数据分析	281
9.4.1	抗压实验数据分析	281
9.4.2	抗冻融实验数据分析	282
9.5	造景地貌成因分析	284
9.6	研究结论	288
第10章	安徽齐云山丹霞地貌研究	289
10.1	研究区概况	289
10.1.1	自然地理特征	289
10.1.2	地质构造	290
10.1.3	地层与岩性特征	292
10.2	实验研究过程	294
10.2.1	齐云山丹霞地貌岩石标本的实验分析	294
10.2.2	齐云山丹霞地貌实验研究结果	296
10.3	齐云山丹霞地貌发育过程	297
10.3.1	齐云山丹霞地貌发育的三个阶段	297
10.3.2	构造隆升与三级剥蚀面的关系	299
10.4	齐云山造景地貌成因分析	300
10.5	齐云山与其他地区丹霞地貌成因比较研究	301

10.5.1 齐云山与广东丹霞山地貌的比较研究	301
10.5.2 齐云山与湖南崑山丹霞地貌的比较研究	305
10.5.3 齐云山与福建冠豸山丹霞地貌的比较研究	308
10.5.4 齐云山与国外丹霞地貌的比较研究	309
10.6 研究结论	310
第 11 章 中国典型丹霞地貌的成因总结与对比研究	312
11.1 中国典型丹霞地貌发育过程总结	312
11.1.1 广东丹霞山丹霞地貌发育的规律总结	312
11.1.2 浙江江郎山、方岩丹霞地貌发育规律	315
11.1.3 福建泰宁、冠豸山丹霞地貌发育的规律总结	318
11.1.4 湖南崑山丹霞地貌发育的规律总结	320
11.1.5 江西龙虎山丹霞地貌发育的规律总结	323
11.1.6 安徽齐云山丹霞地貌发育的规律总结	326
11.2 中国典型丹霞地貌成因研究的技术与方法总结	327
11.2.1 丹霞地貌研究的技术手段方面	327
11.2.2 丹霞地貌的微观实验定量分析	327
11.3 中国典型丹霞地貌成因规律总结与对比研究	328
11.3.1 丹霞地貌的形成条件	328
11.3.2 丹霞地貌的发育规律	328
11.3.3 丹霞地貌空间分异和空间展布	330
11.3.4 丹霞地貌发育与特征对比研究	330
参考文献	334
附录 1 国际年代地层表	340
附录 2 丹霞地貌研究专业术语中外文对照	341
附录 3 索引	346
附录 4 南京大学团队丹霞地貌成因研究成果目录	347

第1章 绪 论

1.1 研究背景与研究意义

丹霞地貌是在中国被命名的一种独特地貌类型,其研究历史可以追溯到20世纪20年代。晚白垩世(K_2)的地球可能遭遇过天体撞击,是恐龙灭绝最突出的生物事件时期(宋春青,张振春,1996),也是我国蕴育丹霞地貌的重要时期。丹霞地貌主要是发育在晚白垩世(K_2)红色陆相砂砾岩地层之中,以赤壁丹崖为特征的地貌类型,包括石峰、石堡、石墙、洞穴等一系列造型景观。我国是丹霞地貌分布较广、数量较多、研究较早且较深入的国家。根据黄进(1999, 2009a, 2009b)等多年来的野外调查研究和统计,截至2015年,在我国发育的丹霞地貌约1000处,其中大多数集中在我国东南部、西南部以及西北部,而东南部丹霞地貌发育尤为典型。广东丹霞山、福建泰宁和江西龙虎山分别在2004、2005和2007年以“丹霞地貌类”入选世界地质公园。2010年8月1日18时(北京时间2010年8月2日5时),在巴西利亚召开的联合国教科文组织世界遗产委员会第34届大会上,中国六处丹霞地貌景区(广东丹霞山、湖南崀山、福建泰宁、贵州赤水、江西龙虎山、浙江江郎山)组成的“中国丹霞”顺利通过评审,列为世界自然遗产,标志着中国丹霞地貌的研究走出国门走向国际。

丹霞地貌因“色泽渥丹,灿若明霞”而闻名于世,是一种具有很高美学价值和科学价值的地貌类型,是一个与其他风景地貌颇为不同而更富于造景功能的自然地理实体和人文地理实体。随着生活水平的逐步提高,人们更多地选择旅游活动作为娱乐方式,而集“雄、奇、险、秀、幽、旷”之大成,美若仙境的丹霞地貌景观也逐渐为大众所喜爱。陈传康1977年^①对承德丹霞地貌形成的地质基础、地貌演化、地貌特征与类型组合、地貌景观的开发利用等展开研究,实现并指导了我国丹霞地貌的构景效果及旅游开发的研究方向。由于丹霞地貌学科发展迅猛,加上近年来以丹霞地貌为特色的风景名胜、地质公园甚至世界遗产不断增加,因此不仅游客想了解丹霞地貌的来龙去脉,而且景区管理人员也应当详细了解丹霞地貌的科学成因,需要有关人员尽快掌握丹霞地貌成因的科学理论来指导游客游览及宣传工作。在研究中我们发现以下科学问题值得重视:为什么中国是丹霞地貌发育最多的国家?为什么中国丹霞地貌被评为世界自然遗产?最有特色的丹霞地貌除了6处入选地点外还有别的地方吗?为何中国的丹霞地貌构成其物质基础的岩石层位大多数是白垩世(K_2)时期的?中国东西部丹霞地貌有何区别?浙江又有何特色?福建和江西的丹霞地貌以及安徽和江苏的丹霞地貌又有什么区别?中国的丹霞地貌发育数量及特征与海洋板块和大陆板块碰撞有关吗?今后应如何进一步开展

^① 陈传康,1977,承德——奇峰异景的由来。引自陈传康教授在全国地理学大会上的报告,北京大学印刷厂印刷

研究和进行旅游开发?对上述科学问题的探索,将有助于我们对丹霞地貌成因的科学认识。另外,尽管丹霞地貌景观令人叹为观止,但也存在着崩塌、滑坡、泥石流等潜在地质安全问题,因此对丹霞地貌开展深入地质调查十分重要,不仅对了解丹霞地貌成因、探讨崩塌与断层和节理的关系是地质灾害防治的重要措施,而且对丹霞地貌景区在暴风雨和积雪等气候环境下的保护和预防有重要意义。同时,了解丹霞地貌景区地质构造和地貌成因,有利于游客对丹霞造景地貌成因的了解,也有利于社会公众和丹霞地貌景区管理部门对世界自然遗产中国丹霞地貌的旅游业开发和保护。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 丹霞地貌的国内研究现状分析

黄进 1961 年首次对丹霞地貌提出定义:“丹霞地貌是由水平或变动很轻微的厚层红色砂岩、砾岩所构成,因岩层呈块状结构和富有易于透水的垂直节理,经流水向下侵蚀及重力崩塌作用形成陡峭的峰林或方山地形”(李见贤,1961)。黄进、陈致均、黄可光、彭华、张林源、周定一等先后对丹霞地貌的定义做过多次探讨与陈述。1992 年黄进、陈致均和黄可光把丹霞地貌的定义简化为“由红色砂砾岩和红色碎屑岩形成的丹崖赤壁及其有关地貌称为丹霞地貌”。彭华 1993 年^①提出对红色碎屑岩应加上“陆相”的限制,定义为“发育在红色陆相碎屑岩基础上,以赤壁丹崖为特征的一类地貌”,并在 1994 年再次撰文讨论丹霞地貌的定义;还提出丹霞地貌的“丹崖”高度应大于 10m;陡崖坡应在 60°以上。刘尚仁(1994)认为,“丹崖赤壁群”的陡崖坡必须高于 10m,对丹霞地貌形态进行了尺度上的限定,这些尺度虽然是人为给出的,但有助于为调查实践提供参考。黄进(1995)将定义改为“有丹崖的红色陆相碎屑岩地貌称为丹霞地貌”。黄可光(1996)定义为“由红色陆相碎屑岩组成的、具有陡峻坡面的各种地貌形态”。俞锦标等(1996)分析了我国构造盆地与丹霞地貌发育的联系性。刘尚仁和刘瑞华(1999)又提出丹霞地貌和类丹霞地貌的概念。经过反复讨论,意见逐步趋于统一,“陆相碎屑岩”作为丹霞地貌的物质基础和“赤壁丹崖”或“陡峻坡面”作为形态限定为大部分学者所接受。随着丹霞地貌内涵的不断改进,反映了人们对丹霞地貌概念的认识是在实践中不断完善和升华的。从 1983 年到 2006 年,不同的辞书、专家对丹霞地貌的定义有 20 种以上,仅黄进教授从 1988 年到 2004 年就提出了四种。他在 1988 年的定义:“发育于侏罗纪至第三纪的水平或缓倾斜的厚层紫红色砂砾岩层之上,沿岩层的垂直节理由水流侵蚀及风化剥落和崩塌后退,形成顶平、身陡、麓缓的方山、石墙、石峰、石柱等奇险的丹崖赤壁地貌称为丹霞地貌。”他在 1991 年的定义:“有陡崖的以砂砾岩为主的红色碎屑岩地貌称为丹霞地貌”,该时期的定义删除了地层的时代、岩层的特征、成因及地貌形态等的限制。而在 1992 年的定义:“由红色碎屑岩形成的丹崖赤壁及其有关地貌称丹霞地貌”。此定义与 1991 年的定义基本相同,但强调了与丹崖赤壁相关的地

^① 彭华,1993.关于召开丹霞地貌旅游开发国际学术讨论会的建议,首届全国旅游地貌学术讨论会(丹霞山)

貌类型。此后,也是在1992年,黄进第四次定义:“有陡崖的陆相红层地貌称为丹霞地貌”。第四种定义更加简单,强调了地层的沉积相,并将丹霞地貌的物质基础——碎屑岩扩大到了整个陆相红层,当然也包括了化学沉积岩如灰岩、盐岩等。黄进认为丹霞地貌是指红层在地壳运动中被抬升并受断裂切割后,以流水侵蚀为主,在风化、溶蚀、重力等外动力共同作用下,塑造成的以陡崖坡为特征的地貌。综上所述,丹霞地貌是一种岩石地貌类型,隶属于红层地貌,它有两个本质属性,即:①由红色陆相碎屑岩(简称红层)组成,这是丹霞地貌的本质属性。红层地貌与其他岩石地貌,如花岗岩地貌、石英岩地貌、石灰岩等地貌有所不同,丹霞地貌的这一本质属性则由红层地貌继承而来;②具有陡直坡面(悬崖)。这是丹霞地貌本身具有的属性,丹霞地貌据此而与红层地貌的另一所属类型红色缓坡丘陵不同。

目前学术界将丹霞地貌的研究历程概括为三个阶段(彭华,2000),初创阶段(20世纪20年代至新中国成立前):1928年,冯景兰、朱翔声在考察广东曲江、仁化、始兴、南雄的地质矿产时,将形成丹霞地貌的红色砂、砾岩层命名为“丹霞层”,并对丹霞山红色砂、砾岩所形成奇险雄伟的丹霞赤壁地貌做了极为生动的描述;陈国达(Chan Kouta, 1938)在考察丹霞山时指出丹霞山有明显平直的天线,是一个抬升的准平原面,提出“丹霞山地形”这一术语;陈国达和刘辉泗(1939)在《江西贡水流域地质》一文中正式提出了“丹霞地形”这一地貌学学术名词;曾昭璇(1943)对丹霞山地貌作了较全面的研究,提出准平原面及垂直节理对丹霞地貌的发育有重要影响;吴尚时和曾昭璇(1946, 1948a, 1948b)对粤北红色岩系的地质与地形作了全面系统的论述。成型阶段(新中国成立后至20世纪70年代末):1954年,中国把“地形学”改称为“地貌学”,“丹霞地形”因此改名为“丹霞地貌”,但直到曾昭璇和黄少敏(1978)在《中国东南部红层地貌》一文的后半部分,才开始用“丹霞地貌”一词,开始了丹霞地貌作为一种地貌类型的研究历程。发展阶段(20世纪80年代以来):1981年,黄进在山西大同召开的第一次构造地貌会议上宣读了《丹霞地貌坡面发育的一种基本方式》,放映了丹霞地貌彩色图片,受到与会者的高度关注(黄进,1982)。至此,“丹霞地貌”这一学术名词开始在全国范围内广泛流传和使用。20世纪80年代随着我国旅游发展对资源深层次开发的要求日益强烈,许多丹霞地貌风景区逐步开发,对丹霞地貌的基础研究和旅游开发研究产生了有力推动,出现前所未有的发展局面。朱诚等(Zhu Cheng, et al., 2010)在 *Geomorphology* 上发表了第一篇具有国际影响力的丹霞地貌理论研究成果,标志着丹霞地貌的理论研究走进了国际视野。此阶段的丹霞地貌的研究学者主要为陈传康、黄进、彭华、朱诚、刘尚仁、郭福生等,丹霞地貌从基础研究迈向旅游开发研究,从定性研究迈向了定量研究。

国内丹霞地貌基础研究已向纵深发展。截至2015年,丹霞地貌旅游开发研究会已召开了14届学术研讨会,在各类刊物上发表论文400多篇,出版了3部丹霞地貌研究著作,研究内容涉及基本理论、研究方法、开发利用和科普教育等多个方面。2006年1月,丹霞地貌作为一个独立类型第一次以专章的分量被写入“十五”规划教材《现代地貌学》。丹霞地貌作为地貌学的一个分支,成为当代地貌学的一个重要生长点,作为一个独立学科的基本框架已经形成。2013年学术界重新编写的《中国自然地理系列专著》,丹霞地貌也作为一节成为《中国地貌》当中的新修订内容。

国内丹霞地貌的研究,在丹霞地貌演化的定量测算、辉绿岩脉测年、丹霞地貌类型和空间组合以及国际对比研究等方面成果突出。

中山大学黄进教授先后对我国 23 个省区近 1000 处丹霞地貌进行了实地考察,各地学者也长期致力于扩大对丹霞地貌的研究区域,对其开展深入研究。在对丹霞地貌的定量研究方面,黄进教授从 1990 年以来,提出并逐步改进地壳上升速率、地貌年龄、崖壁后退速率及侵蚀速率等地貌发育的定量公式。其中,地壳上升速率计算公式为

$$D_{\text{v升}} = h / (t_{\text{安}} + t_{\text{升}}) \quad (1-1)$$

式中, $D_{\text{v升}}$ 为地壳上升速率 ($\text{m}/10^4 \text{a}$); $t_{\text{安}}$ 为采样那一级阶地的地壳安定历时 (10^4a); $t_{\text{升}}$ 为地壳上升历时 (10^4a); h 为地壳上升幅度 (m)。

地貌年龄计算公式为

$$D_{\text{龄}} = H / D_{\text{v升}} \quad (1-2)$$

式中, $D_{\text{龄}}$ 为地貌年龄 (万年 (10^4a)); H 为地貌相对高度 (m); $D_{\text{v升}}$ 为地壳上升速率 ($\text{m}/10^4 \text{a}$)。

根据这一公式,可以计算出丹霞山巴塞的年龄为 5.816Ma,同理还可以计算出丹霞山许多山峰及地点的年龄,如阴元石为 0.505Ma、阳元石为 1.117Ma、天柱石(马卵石、蜡烛石)为 1.234Ma 等。

崖壁后退速率计算公式为

$$D_{\text{v退}} = (B/2) / (H / D_{\text{v升}}) \quad (1-3)$$

式中, $D_{\text{v退}}$ 为丹霞地貌崖壁后退速率 ($\text{m}/10^4 \text{a}$); B 为谷地两侧岩壁上缘之间的宽度; H 为岩壁上缘至谷底河流平水期水面的相对高度 (m); $D_{\text{v升}}$ 为地壳上升速率 ($\text{m}/10^4 \text{a}$)。

侵蚀速率计算公式为

$$D_{\text{v蚀}} = V / (H / D_{\text{v升}}) \quad (1-4)$$

式中, $D_{\text{v蚀}}$ 为丹霞地貌区的侵蚀速率 ($\text{m}^3/10^4 \text{a}$), V 为丹霞地貌区被侵蚀的体积 (m^3); H 为测算区内的相对高度 (m); $D_{\text{v升}}$ 为当地地壳上升速率 ($\text{m}/10^4 \text{a}$)。根据这一公式计算,丹霞山 180km^2 的丹霞地貌每年被蚀去的物质有 9997.2 m^3 (黄进和陈致均, 2003; 黄进, 2009a, 2009b)。

在形成年代方面,黄进 (2004),姜勇彪等 (2006),朱诚等 (2009a) 则采用不同方法计算并测出相关地貌年龄和形成时代。在区域丹霞地貌发育机制研究方面,朱诚等 (2009a) 还对浙江江郎山的辉绿岩脉进行了测年研究。尽管国内外学者根据野外调查结果推断江郎山属于老年期丹霞地貌类型,而且认为江郎山三爿石在海拔 500m 左右的大、小弄峡基座上再次抬升是地台活化的重要表征,但这只是定性推测。为获得确凿证据,朱诚等于 2007 年 12 月在江郎山小弄峡具有垂直贯穿永康群岩体的辉绿岩脉处采集了两块岩石标本,将此标本交由国家地震局地质研究所 K-Ar 年龄国家重点实验室用 K-Ar 法测年,采用常数: $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ (a)}$, $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10} \text{ (a)}$, $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10} \text{ (a)}$, $^{40}\text{K}/\text{K} = 1.167 \times 10^{-4} \text{ (mol/mol)}$,经反复验证,测出的年龄为 $77.89 \pm 2.6 \text{ Ma BP}$ (应属于晚白垩世 K_2)。

在丹霞地貌类型和空间组合内在的有机联系方面,朱诚等分别对福建冠豸山 (朱诚

等, 2000)、安徽齐云山(朱诚等, 2005)、浙江江郎山(朱诚等, 2009a)和方岩(欧阳杰等, 2009)等地进行了研究发现, 每一处丹霞地貌在空间分布和组合方面都存在着独特而鲜明的特征。例如, 通过实地调查发现浙江方岩突出的丹霞地貌类型有凹槽和岩穴、新鲜崩积石、围谷和峰丛以及石鼓和石柱等, 它们的空间组合沿着北西—南东方向有规律的排列。其中, 西北部五峰书院一带的凹槽和岩穴发育典型; 中部鸡鸣峰、桃花峰等处分布有大量的新鲜崩积石; 东南部石鼓寮的石鼓、石柱尤为突出, 在峰丛与平原交汇的东、南和西三侧被围谷所环绕。这种组合体现了随着构造隆升, 在以外力作用为主的不断“雕塑”下, 丹霞地貌的发育一般经历了差异风化、重力崩塌、流水侵蚀搬运。在完成地貌循环侵蚀的过程中孕育了绚丽多姿的丹霞地貌。方岩丹霞地貌主要发育于早白垩世晚期的方岩组(K_1f)冲积扇—扇前辫状河相岩层中。其中, 岩性的差异风化规律和辫状河相沉积的特点, 可以通过对三个样点的实验数据分析加以证实(欧阳杰等, 2009)。

在国际对比研究方面, 早在20世纪90年代国内学者就开始把丹霞地貌的研究目光投向了世界。彭华、蔡辉(1998)、杨禄华(1999)、尹德涛(2002)、张忍顺等(2003)、刘尚仁(2004)等对美国、澳大利亚、英国、印度、阿富汗等国家的丹霞地貌进行了介绍。欧阳杰等(2011a)定性分析对比了国内外丹霞地貌的研究发现, 国内丹霞地貌在基础研究、定量测算、区域丹霞地貌空间研究方面位于国际前沿, 而国外学者对红层、砂岩、砾岩等方面的微观、定量研究方面比较深入。彭华等(2013)综合研究评述了国内外红层与丹霞地貌研究现状, 指出存在的问题并展望了研究趋势。刘尚仁、彭华(2006a, 2006b)^{*}在25个国家找到了73处发育较好的丹霞地貌。从整理的研究资料来看, 美国、澳大利亚、英国、希腊、埃及、马里等国的丹霞地貌分布较广, 发育较典型; 他们对这些国家丹霞地貌的地理位置、地层与构造、丹霞地貌特征进行了系统的比较, 由刘尚仁收集、彭华编辑制作了国外丹霞地貌景观图片。张忍顺、齐德利(2003)研究了位于英国波伊斯(Powys)郡南端, 南威尔士布雷肯-毕肯山国家公园, 这里有大量由泥盆系红层发育的丹霞地貌, 是英国一处规模大、形态独特、发育较典型的丹霞地貌。

张珂等(2009)从全球的视角下, 讨论了红层及其发育的丹霞地貌, 发现几乎在各个地质历史时期都有红层发育, 但是主要集中在志留纪—泥盆纪、二叠纪—侏罗纪、白垩纪—第三纪, 而元古代和寒武纪的红层很少。王颖等(2009)研究了位于科罗拉多(Colorado)高原西南部 Flagstaff 和 Phoenix 之间的北美 Sedona 红层地貌。赵逊(2009)从地质学的角度, 对全球丹霞地貌的发育进行总结, 认为东亚的燕山运动、北美的内华达—拉拉米运动、南美的安第斯运动、欧洲的阿尔卑斯运动、非洲的阿特拉运动中形成的红色陆相碎屑岩建造, 经阿尔卑斯后期或喜马拉雅运动成景, 是分布相当普遍的一种特殊地貌类型。与国内的丹霞地貌发育基础相比, 欧洲、非洲、澳洲、南美洲以及南亚是成陆时间较早的地区, 大部分为老红层, 局部或底部有不同程度变质, 但均以块状构造为特征, 发育的地貌与国内丹霞地貌差别不大。例如, 欧洲的红层地貌较著名的有英国泥盆纪老红砂岩, 加里东运动之后形成的山前陆相盆地磨拉石建造, 红色砾岩、含砾砂岩分布于米德兰(Midland)谷地两侧, 夹巨厚火山熔岩、凝灰岩, 厚度大、底部和中部有角度不整合面, 被断层切出了丹霞赤壁和峡谷。总之, 欧洲红色岩层