国内外红层与丹霞地貌研究述评

彭 华, 潘志新, 闫罗彬, Scott SIMONSON
(中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要：在中国丹霞地貌走向世界，开始一个新的发展阶段的时候，回顾并评述国内外红层和丹霞地貌的研究进展十分必要。国内在该领域的研究长期集中在红层特性、工程地质、丹霞地貌特征及发育的基本问题等方面，但对红层的地质和地貌融合研究不足，对不同红层的岩性差异及其在外动力条件下的地貌表现和地貌发育过程缺乏深度研究；国外还没有红层地貌和丹霞地貌的专门研究，学者们主要关注红层形成的地质背景，有关红层地貌的研究多分散在砂岩地貌中，但其在微观、定量、实验研究方面值得借鉴。本文认为当前有关红层和丹霞地貌的研究大多为单因子研究，缺乏系统的思想方法，各学科研究存在多张皮的问题。提出应明确红层和丹霞地貌的学科归属，深化基础研究，加强各学科之间的融合，并推动国际交流和对比研究。

关键词：红层；红层地貌；丹霞地貌；砂岩地貌；国际对比研究
DOI: 10.11821/dlxb201309002

1 引言

2009年是冯景兰把“丹霞”二字引入地球科学，命名粤北红层为“丹霞层”81年[1]；也是陈国达正式使用“丹霞地形”术语70年[2]。这一年5月，在丹霞层和丹霞地形的命名地广东丹霞山召开了第一届丹霞地貌国际学术讨论会，引起了国际同行的高度关注。同年7月，在澳大利亚墨尔本召开的第七届国际地貌学大会上，国际地貌学家协会(International Association of Geomorphologists, IAG) 批准设立“IAG丹霞地貌工作组 (IAG Danxia Geomorphology Working Group)”，标志着丹霞地貌研究真正走上国际学术舞台。紧接着，2010年8月第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”系列自然遗产项目以一种特殊的景观类型列入世界遗产名录，更引起世人的瞩目。2011年10月，在丹霞山召开了IAG丹霞地貌工作组第一次会议暨第二届丹霞地貌国际学术讨论会。2012年4月，第三届欧洲砂岩景观学术讨论会在波兰召开，特邀了中国丹霞地貌学者并安排红层与丹霞地貌专题报告，开展了丹霞与砂岩地貌对比讨论。因此，在国内研究了八十年的丹霞地貌，这几年轰轰烈烈地走上了世界，开辟了丹霞地貌研究的一个新时代。鉴于国内外对红层和丹霞研究的广泛关注，2011年中国地理学会第十届四次常务理事会批准设立“中国地理学会红层与丹霞研究工作组”，也标志着国内丹霞地貌研究进入一个新的历史时期。

2009年在第七届国际地貌学大会上，明确提出了丹霞地貌工作组的工作目标：给予适用于全球的丹霞地貌科学定义；研究其发育条件和形成过程；建立科学的分类系统；弄清丹霞地貌在全球的分布规律，开展国际对比研究。2011年IAG丹霞地貌工作组第一次会议上，讨论通过了IAG丹霞地貌工作组工作计划，发表了《IAG丹霞地貌工作组第一次

收稿日期：2013-04-20; **修订日期：**2013-05-27
基金项目：国家自然科学基金项目 (41171013) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41171013]
作者简介：彭华 (1956-), 男, 安徽省砀山县人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员 (S110001362M)。主要研究方向为丹霞地貌、旅游地理与旅游规划。E-mail: eesph@mail.sysu.edu.cn

会议宣言》和《丹霞地貌全球研究倡议书》[3]，提出“以中国的研究为基础，启动全球丹霞地貌研究，并逐步完善丹霞地貌的理论体系”作为工作组近期工作重点。客观上也对中国丹霞地貌的研究提出了新的要求。

鉴于红层作为丹霞地貌发育的物质基础，是丹霞研究不可回避的一个问题，近年来丹霞地貌的研究有向着红层及红层地貌拓展的趋势[4]。随着国内外地学界对红层和丹霞研究日益重视，有必要对中国八十年的研究和国际上相关的研究进行一个系统梳理，分析其面临的问题，并探讨其未来的发展方向，以供同行参考。

2　国内红层和丹霞地貌的研究

2.1　红层与红层地貌的研究

2.1.1　红层的基本特征　　红层是指各个地质历史时期沉积的红色岩系的总称[4]。根据目前的研究，我国的红层基本上为典型的红色陆相沉积，多形成于中生代至新生代，又特别集中在白垩纪[5-7]。这种陆相红层的岩性较为复杂，涵盖了砾岩到泥岩各个粒级的岩石，并可能夹有淡水灰岩、石膏及岩盐层等[4]。

从物质组成上看，粗碎屑的砾石成分与物源区岩石组合一致，砂质成分主要是石英和长石，胶结物有泥质、钙质、硅质和铁质。一般来说，大型红层盆地边缘堆积是冲-洪积相的砾岩和砂砾岩，泥沙或硅质、铁质胶结，岩层比较坚硬；而往盆地中心，沉积物的粒度逐渐变细，渐变为河湖相的砂岩、粉砂岩和泥质岩，在盆地中心或河间洼地，一般沉积粉砂岩或泥质岩夹淡水灰岩或膏盐层，泥质或钙质胶结，粘土矿物含量较高，吸水性强，岩性较软弱。

从颜色上看，红层的红色主要是胶结物中的高价铁离子所致。但由于沉积环境的差异和后期地质作用的改造，各地红层的颜色在色度和纯度上有较大差别，红层的颜色可能变化于棕黄、褐黄、棕红、砖红、紫红、褐红和灰紫等各种偏红色调[8]，也可能有其他颜色的沉积夹层。

2.1.2　红层的分布　　目前所知我国红层出露面积超过80万km^2，全国各地均发现有红层分布[7]。彭华将我国红层分布划分为东部、中部、西北部和青藏高原四个区域。其中，东部地区以白垩纪和古近纪红层为主，多为北东向的中小型红层盆地；中部地区以白垩纪和侏罗纪红层为主，主要沉积在四川盆地和陕甘宁盆地等大型构造盆地中；西北部主要指新疆，白垩纪至新近纪红层均有分布，主要分布在塔里木盆地和准格尔盆地周边；青藏高原以白垩纪红层为主，还广布古近纪和新近纪陆相沉积地层，但大多呈灰黄或棕灰色[4]。

2.1.3　红层地貌　　国内与红层有关的地貌研究有很长的历史，从20世纪初开始，冯景兰[1]、陈国达[9]、曾昭璇[10]、吴尚时等[11-12]曾对广东和华南红层及所发育的地貌进行了研究。20世纪70年代末，曾昭璇等对中国东南部红层地貌的地理分布、岩石学特征和地貌发育等作了系统论述[5]。但此后30多年里，国内鲜有红层地貌的专门文章。涉及红层的地貌研究基本上是讨论丹霞地貌，而没有将红层地貌作为一种类型的专门研究，直到近年来才有学者将红层地貌作为一种类型予以关注。红层地貌被定义为发育在红层基础上的侵蚀地貌。根据其特征，红层地貌被分为丹霞地貌、红层山地、红层丘陵、红层高原或台地等类型；在我国红层的岩性构成中，占很大比重的是软弱的粘土岩和泥质粉砂岩，它们一般形成低缓的红层丘陵；而真正形成丹霞地貌的通常是那些由坚硬的砾岩、砂砾岩和砂岩构成，并受新构造运动强烈抬升的红层[4]。据吴志才等统计，在广东108个红层盆地中，只有21个发育了丹霞地貌，丹霞地貌的总面积仅占全省红层分布面积的1.27%[13]。

2.1.4　红层风化特性研究　　根据目前的研究，陆相红层岩性在垂直方向变化巨大，多为软硬相间的互层结构。粉砂质和泥质岩比较软弱，尤其是坚硬的砂砾岩中的泥质软弱夹

层，是红层岩体中力学强度较差的结构面，在很大程度上影响了红层边坡的稳定性[14]。在长期的地下水渗透、溶蚀、风化及人工开挖坡脚等作用下，容易诱发崩塌、滑坡等地质灾害。因此，在工程地质学领域，红层软岩的风化特性是学者们关注的一个热点问题。如钟凯等通过对广通—大理铁路沿线红层泥岩边坡剥蚀过程的调查和试验，描述了红层泥岩风化剥蚀的过程，认为夏季高温的曝晒与突发性降雨的冷却是加剧红层泥岩风化剥落的主要因素[15]；杨宗才等通过红层泥岩边坡快速风化的原位监测试验，发现红层泥岩边坡的快速风化集中在表层10 cm的深度内，同时还通过泥岩岩块温度变化试验和有限元分析方法，揭示了红层表层处于高温状态时的降雨是导致其快速风化剥落的主要外因[16]。需要说明的是，虽然工程地质学者并不关注红层的地貌学意义，但其关于红层软岩风化机理的研究对揭示丹霞地貌边坡发育机制具有重要借鉴意义。因为红层软岩抗风化侵蚀能力弱，砂砾岩中的软岩夹层暴露后往往成为丹霞地貌边坡快速风化的“先锋层”，与节理贯通后往往会导致丹霞地貌边坡的崩塌后退。

2.2 丹霞地貌的研究

丹霞地貌是红层地貌的一种类型，因其特殊的地貌形态和景观美学价值而备受国内外学者的关注。经历初创 (1928-1949)、成型 (1950-1990) 和大发展 (1991年以来) 三个阶段之后[17]，丹霞地貌研究在2009年开始走向世界。目前，关于丹霞地貌研究形成的主要认识可概括为以下几个方面：

2.2.1 丹霞地貌的定义　自陈国达1939年首次提出“丹霞地形”这一地貌名词以来，学者们多关注其岩石特征、地质构造、地貌形态等方面的研究，长期没有讨论其定义问题[17]。直至1961年黄进才首次提出丹霞地貌的定义：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[18]。1990年代以后，随着人们对丹霞地貌日益关注，对其概念和定义的讨论逐步增多，在判别标准上也存在一定的分歧。

总体上，这些意见可归为三大类：宽口径定义，主张凡是具有赤壁丹崖的地貌，不管由什么岩石组成，都可称为丹霞地貌[19]；窄口径定义，主张比照丹霞山，只有发育在白垩纪河湖相红色砂砾岩之上的地貌才能称为丹霞地貌[20]；折中定义，即以陆相为主 (可能包含非陆相夹层) 的红层 (不限制红层年代) 发育的具有陡崖坡的地貌。目前学者们大多倾向于折中的定义，表述为“以陡崖坡为特征的红层地貌”①。近年的几次国际会议上，有学者认为在国际推广过程中，丹霞地貌的定义不宜限制太窄，可扩大到红层地貌 (P. Migon)②。

2.2.2 丹霞地貌的形态特征　裸露的红色陡崖坡是丹霞地貌最重要的识别要素。1982年，黄进将近水平构造的丹霞地貌坡面特征概括为“顶平、身陡、麓缓”[21]。此后，刘尚仁等对丹霞地貌有关的形态要素提出了一些量化标准，认为陡崖坡高度应大于10m，坡度大于55°[22]，以此作为判断丹霞地貌的参考依据。但目前学者们对这一标准还存在着较大的争议。此外，高善坤等运用King的坡地发育理论对浙江新昌丹霞地貌的坡地形态和演化方式进行研究，在形态组成上将其分为凸型面、自由面、搬运坡和凹型面4个部分，在演化方式上则以平行后退和坡地替代两种方式为主[23]。

不过，与上述基本坡面形态特征相比，现实中丹霞地貌的坡面形态则复杂得多。由于岩层产状不同，丹霞地貌顶面形态有“斜顶、圆顶、尖顶”等多种类型；由于直接作用于陡崖坡的动力类型差异，可以分为崩塌后壁型、流水侵蚀型、风化改造型、多动力综合型

① 彭华. 丹霞地貌基本理论问题回顾与探讨. "世界的丹霞", 第二届丹霞地貌国际学术讨论会论文集. 2011: 125-133.

② P. Migon. 第二届丹霞地貌国际会议发言. 第二届丹霞地貌国际学术讨论会. 广东, 韶关, 2011.

等；由于红层岩性和外力作用的差异，丹霞陡崖坡常有各种洞穴、凹槽、竖向沟槽分布；此外，受间歇性构造隆升的影响，陡崖坡还表现出多层次的坡面组合[17, 24]，更体现了丹霞坡面形态的复杂性。

2.2.3 丹霞地貌的分布　丹霞地貌在我国广泛分布，截至2013年3月，黄进统计的丹霞地貌已达995处③，分布在全国28个省 (自治区、直辖市、特别行政区)。在热带、亚热带湿润区，温带湿润—半湿润、半干旱—干旱区和青藏高原高寒区均有分布；最低海拔可以形成于东部的海岸带，最高海拔可以出现在4000 m以上的青藏高原上。但相对集中分布在东南、西南和西北三个地区。

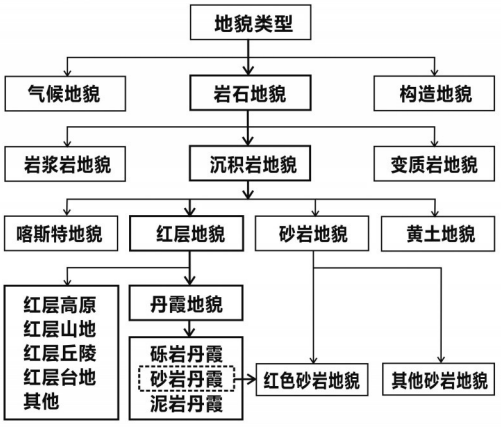


图1 丹霞地貌的学科归属

Fig. 1 The subject category of Danxia landform

2.2.4 丹霞地貌的学科归属　丹霞地貌的学科归属问题是目前中国丹霞走向世界必须给予说明的问题。国外学者把类似于丹霞的地貌长期归入砂岩地貌。但在沉积岩粒级分类中，砂岩是指粒级在0.05~2 mm的砂粒含量超过50%的岩石。而中国发育丹霞地貌的岩石大多是砾岩红层，干旱区的泥岩红层也可以发育丹霞地貌，说明丹霞地貌和砂岩地貌并不是等同的关系，也不是包含与被包含的关系。因此，彭华给出了一个阐述这种关系的模型，将丹霞地貌归属于红层地貌，其按照岩性划分的“砂岩丹霞”才相当于砂岩地貌中的“红色砂岩地貌”(图1)[4]。但需要说明的是，关于海相红色砂岩发育的地貌能否归入丹霞地貌还是一个没有确定的问题。

关于丹霞地貌本身的分类，黄进在1992年根据岩层倾角、红层之上有无盖层、所处气候区、发育程度、有无喀斯特化、地貌形态等6个方面作了分类[25]。此后，相继又有学者从各自的研究角度出发，提出一些专项分类[26-27]。

在上述研究的基础上，彭华于2000年对丹霞地貌分类系统进行了整合与优化，将形成丹霞地貌的物质基础、地层产状、主导动力、地貌形态和发育阶段作为一级分类依据，再根据次级依据划分次级类型，形成了44个基本类型，并就其分类依据提出了相应的定量指标[28]。

2.2.5 丹霞地貌的发育机理　影响丹霞地貌发育的因素不外乎内动力和外动力两大动力系统。其中，内动力主要是地质构造因素的控制作用，如区域地质构造控制了红层盆地的形成和展布，盆地内部的构造线控制了山块格局和基本形态，岩层产状控制丹霞地貌的坡面特征，而后期的地壳抬升作用则制约丹霞地貌的发育进程，并为后期的外力持续侵蚀提供条件[17, 24]。

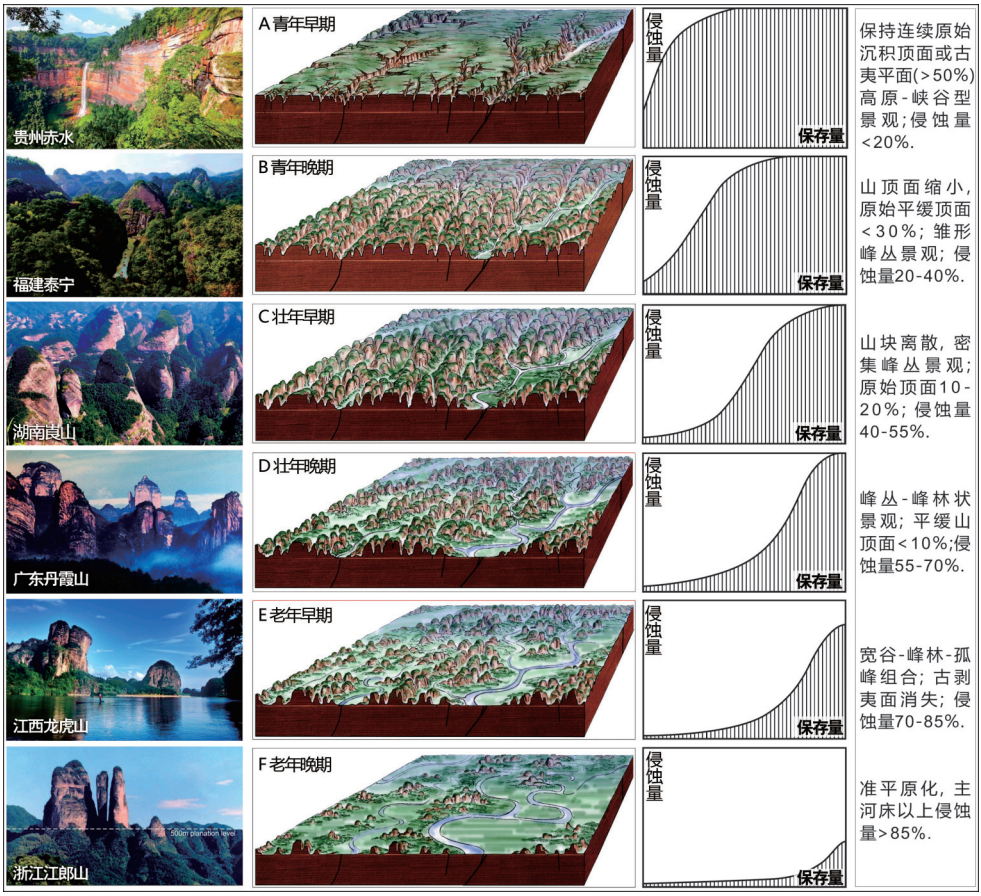
丹霞地貌被认为是红层侵蚀地貌，其外动力作用主要包括流水侵蚀与溶蚀、风化、重力和生物等作用[29]。其中，流水是塑造丹霞地貌的主动力，其主要通过下蚀和侧蚀作用对红层进行破坏，形成侵蚀景观；同时，雨水打击和坡面径流对裸露山石的表面破坏改造作用也不可忽视；此外，地表和地下水对红层中可溶盐的溶蚀往往形成具有喀斯特特征的地貌，在含可溶性成分较高的红层中表现突出，被称之为红层岩溶或丹霞喀斯特[30-32]。风化作用主要是对暴露的红层岩体表面进行破坏，罗炳生认为周期性温度变化在岩体内产生的温度应力是造成红层片状风化的主要原因[33]；在湿润区的红层化学风化则可以深入到岩体内部。重力作用突出表现在被流水侵蚀和软岩风化形成的临空谷坡上，悬空岩体沿原生构

③ 黄进. 中国丹霞地貌简表. 2013.03.15 (最近更新的研究报告, 中山大学地理科学与规划学院)

造节理或卸荷节理产生崩塌，是丹霞陡崖坡形成的直接因素。罗炳生在研究粤北金鸡岭丹霞地貌成因时，曾以岩石力学数值方法和模拟实验为手段，论述了丹霞地貌发育与岩体卸荷效应的关系[34]。关于生物对丹霞地貌发育的影响，目前国内还鲜有学者关注。黄进将覆盖在岩石表面的苔藓、藻类等低等植物对丹霞地貌发育的影响，概括为温差风化、结皮风化和对丹霞崖壁色彩的改变三个方面[29]，但其作用机理，尤其是微观作用过程还不清楚。

2.2.6 丹霞地貌的演化过程　丹霞地貌的演化过程始于红层盆地的抬升，在流水、风化、重力等外动力作用下，沟谷不断展宽，崖壁崩塌后退，山顶面积不断缩小，原来的山体逐步退缩成“堡状残峰”或孤立石柱。参考戴维斯 (W.M.Davis) 的侵蚀循环理论，黄进在论述丹霞地貌坡面发育规律时将这一演化过程划分为幼年期、壮年期、老年期3个阶段及“回春期”[21]。在此基础上，彭华参考斯特拉勒 (A.N.Strahler) 的“面积—高度比曲线法”，将“中国丹霞”6个世界自然遗产提名地按照其侵蚀量组成一个演化系列，划分为青年早期、青年晚期、壮年早期、壮年晚期、老年早期和老年晚期6个阶段，描述了各阶段丹霞地貌特征并提出了相应的定量指标依据，进一步完善了丹霞地貌演化模式 (图2)。

2.2.7 丹霞地貌的定量测算和实验研究　长期以来，我国学者对丹霞地貌的研究大多集中在对形态特征、发育条件、演化过程等的定性描述和推论上，利用现代科技手段的研究不足。近年来，有关丹霞地貌发育演化时间尺度的定量测算及地貌成因的实验研究开始受到关注。



注：江郎山属于老年晚期再抬升的高位孤峰。

图2 中国丹霞系列世界自然遗产地景观特征及其地貌演化阶段

Fig. 2 The landscape features and geomorphic evolution stages of China Danxia series World Heritage sites

黄进坚持了十多年对丹霞地貌侵蚀速率进行定量测算，他通过丹霞地貌区河流阶地沉积样品的释光年龄测算，来研究丹霞地貌区地壳上升速率，进而推算丹霞地貌年龄、崖壁后退速度以及侵蚀速度等[35-36]；朱诚等根据对浙江江郎山垂直贯穿于永康群红层中辉绿岩脉标本K-Ar法测年，认为当地红层盆地抬升的时代为晚白垩世77.89±2.6Ma B.P. (K_2)[37]。

在实验地貌学研究方面，学者们主要关注丹霞地貌的岩石特性及其对地貌发育的影响。近年来,朱诚、彭华等在广东丹霞山、浙江江郎山、福建泰宁、湖南崀山等多个丹霞地貌区采集红层岩样，进行了实验地貌学系列研究，测定了岩样的化学成分和含量，并进行抗压、抗冻融、抗酸实验，获取相关数据，进而分析红层岩体在不同条件下的抗侵蚀能力及其对丹霞地貌发育的影响[38-40]。不过，从揭示丹霞地貌坡面发育机制的角度出发，上述实验研究还存在一些不足，主要是因为红层中软弱夹层是关键层，其成分、胶结、强度、含水性及其风化过程对丹霞地貌坡面稳定性具有控制作用，但软岩的采样和检测样本制作比较困难，是今后必须给予特别关注的问题。

3　国外红层和砂岩地貌研究

形成丹霞地貌的物质基础—红层在全球各大洲均有分布，并且形成了很多与中国丹霞地貌相类似的地貌景观。与国内研究不同的是，国外的研究比较分散，大部分在砂岩地貌中涉及，并未将其作为一个独立的地貌类型进行研究。

3.1 国外红层的研究

国外对红层的研究始于19世纪初的地质调查，研究内容涉及红层的岩石矿物、古地磁、古气候和古生物等方面，为解释红层的成因和古地理环境演变提供理论依据，但对红层地貌缺乏关注。

在红层的岩石矿物学研究方面，学者们主要关注矿物在红层成岩过程中的地球化学作用。如Turner等通过对苏格兰北部泥盆纪红色砂岩的岩矿薄片和扫描电镜分析黑云母在成岩过程中的作用，认为在冲积平原再沉积过程中的机械崩解作用可以使黑云母变成赤铁矿，并使岩层颜色变红[41]；Walker等研究了美国科罗拉多高原三叠纪红层Moenkopi组岩层中赤铁矿的特征，将其归为6种形式，并认为这些赤铁矿由于粒径极细，低于顺磁体的阈值，可能对该组红层岩体残余磁性的形成影响不大[42]；Parcerisa等以西班牙东北部Catalan地区Ebro盆地的古新世—始新世红层为例，探讨了氧化—还原条件下红层岩体方解石胶结物中Fe、Mn元素含量的变化，解释了红层的成岩演化过程[43]。

在红层的古地磁研究方面，学者们则通过对红层岩体残余磁性的测定，试图重建构造演化史。如Kent 等分析了纽约东南部Catskill地区红层的古地磁数据，认为加拿大东南部至美国东部沿海地区直至晚石炭世时才成为北美克拉通的一部分[44]；Yamashita等对泰国半岛Trang地区侏罗纪—白垩纪红层的古地磁特征进行研究，认为该地区自侏罗纪后发生了两次方向相反的构造旋转[45]。

在红层的古气候研究方面，大多数学者认为红层的红色是由赤铁矿氧化淋溶富集形成的，而且红层中大多含有蒸发盐夹层，反映了干旱或干湿交替的古气候条件。因此，地史学中一般把红层作为指示热带—亚热带干旱—半干旱气候的标志。如Miki对东亚地区的白垩纪红层进行沉积和气候分类，认为温和湿润、炎热干燥的交替气候条件有利于赤铁矿在岩体基质中均匀分布，使岩体变成红色[46]；Hofmann等研究了摩洛哥Argana峡谷的三叠统至下侏罗统陆相红层的沉积旋回，认为其总体上反应了从半干旱到干旱的古气候变化特征[47]。与这些观点不同的是，也有学者认为红层并不具备气候指示意义，红层中的赤铁矿可能是成岩过程中含铁矿物脱水氧化形成的[48-49]。

在红层的古生物研究方面，学者们通过研究红层中的古生物化石来推演地质历史时期

的古环境特征及其变化。Gijón等在西班牙比利牛斯山脉中南部上白垩统滨浅海相红层中发现了鲨鱼和电鳐的化石，而这种化石在印度也曾被发现，说明在白垩纪末期欧亚大陆和印度次大陆在古地理环境上存在密切联系[50]；Marriott等通过研究英国威尔士西南部地区上志留统老红层中的动物群遗迹化石，分析了该地区在古生代中期的生物多样性状况[51]。

3.2 砂岩地貌的研究

国外红层地貌一般被归入砂岩地貌。如Young等在其著作Sandstone Landforms中，对世界各地的砂岩地貌 (包括红色砂岩地貌) 做了较全面的介绍。他们把澳大利亚的老红砂岩 (Old Red Sandstone) 形成的奥尔加山 (Mount Olga)和艾尔斯岩 (Ayers Rock)，以及美国西部科罗拉多高原上的中生代红色砂岩形成的陡崖地貌均归入砂岩地貌[52]。在其2009年版中，还增加了对中国丹霞地貌的介绍并大量引用了中国丹霞地貌的研究成果[53]。不过应注意的是，在地貌分类上，砂岩地貌并不等同于丹霞地貌，但两者存在交集，即砂岩地貌中的“红色砂岩地貌”才相当于丹霞地貌中的“砂岩丹霞”(图1)。因而，从总体上看，目前国际上对红层和砂岩地貌的分类与学科归属还不清晰，Young认为砂岩地貌的研究相比其他地貌还十分薄弱[52-53]。

尽管如此，国外在砂岩地貌的研究方法和技术手段上比较先进，尤其是在砂岩地貌发育过程和砂岩风化机理的微观、定量、实验研究等方面较深入，这些对深化中国丹霞地貌发育机制的研究具有重要借鉴意义，因而有必要予以概括和总结。

3.2.1 砂岩地貌发育过程研究　国外学者对砂岩地貌发育过程的研究大多关注中小尺度地貌单元，如山体坡面、岩柱、洞穴等的形成过程及其主要控制因素。如Migoń等探讨了约旦西南部寒武纪—奥陶纪红色砂岩陡崖下部山麓缓坡面的形成和演化过程，认为这些缓坡面的物质来源于陡崖的崩塌，其后崩积物受到风化作用和外力侵蚀而形成缓坡面，主要受岩性和干旱气候环境的影响[54]。Netoff等研究了美国犹他州东南部Glen峡谷国家公园的圆锥状红色砂岩地貌景观，对它的形态特征、分类和成因等进行了描述和探讨，并总结了影响其发育的五个控制性因素[55]。关于砂岩地貌中常见的蜂窝状洞穴的形成机制，学者们多认为盐风化是其形成的主要原因[56]，不过Huinink等通过一系列干湿循环实验模拟蜂窝状洞穴的形成过程后认为，在干湿循环中干燥的持续时间及蒸发率的影响更为显著[57]。

此外，学者们还对有关砂岩地貌发育过程理论进行了探讨，主要是通过建立概念模型或数值模型来解释砂岩地貌景观的成因和动力机制。如Turkington等根据砂岩风化过程多重变量的分析和综合，建立了风化洞穴、溶蚀盆地和砂岩坡面形成过程的概念模型[58]；Sunamura基于风化时间和岩体强度衰减的关系，建立了数学模型以解释砂岩海岸风化洞穴的形成过程[59]。

3.2.2 砂岩风化机理研究　风化是塑造地貌特征的重要营力，砂岩风化机理的研究是国外砂岩地貌研究的重要组成部分。早期，国外学者对砂岩风化的研究侧重于对砂岩风化特征的定性描述和成因的推理；后期逐步转向对各种风化过程的微观、定量研究，目前这仍是砂岩地貌研究的重点。

砂岩风化研究通常首先关注岩体表面的物理破坏过程，如温度应力、湿度变化等。McGreevy认为岩体具有特定的热力学特征，太阳辐射在岩体表面会形成温度梯度，可能会使岩体碎屑颗粒和基质相分离，促使岩体发生崩解破坏[60]；Sancho等在对西班牙东北部Ebro盆地砂岩风化洞穴的统计分析时发现，朝向西南方的砂岩洞穴数量和尺寸比其他方向都有所增加，认为这是西南方向午后接受太阳辐射更多的缘故[61]；Paradise研究了约旦Petra地区古代采石场砂岩陡坡的风化特征，发现东、西坡的风化比南、北坡更明显，认为这可能与东、西坡向滞留水汽更多有关[62]。

在砂岩的化学风化研究方面，相关研究主要针对岩体内的盐类物质成分、含量的变化与岩体强度之间的关系进行。如Young分析了氯化物对岩体中石英颗粒的分解能力，认为

它对砂岩岩体的崩解具有重要作用[63]；Budel等在研究南非的砂岩风化机制时发现，砂岩颗粒间生长的蓝藻细菌在进行光合作用时产生的生物碱与岩体内的硅酸发生反应，使岩屑变得松散容易风化[64]。另外，还有学者对石英砂岩的溶蚀风化作用进行了研究。与传统的岩溶作用只存在于碳酸岩的观点不同，石英砂岩地区也能形成很多类似喀斯特地貌的溶沟、溶洞、溶蚀柱和溶蚀盆地等景观，这种地貌被称为“假喀斯特”(pseudokarst) 或“石英喀斯特”(quartzose karst)[65]。

除了物理、化学风化作用，附着在砂岩表面的生物对其风化过程也能产生影响。以往很多研究都认为低等生物对砂岩表面风化起促进作用，如Wessels等对南非的Clare组砂岩的风化机制和速率进行研究，认为附着在砂岩表面的地衣的作用可以穿透岩体表面，使岩体碎屑分离，从而使风化过程加快[66]；Papida等发现细菌生物膜的形成也可以加剧盐风化对砂岩表面造成的破坏[67]。但也有学者认为岩体表面的苔藓、地衣等低等植物实际上对岩体起保护作用，抑制风化的进程。如Kurtz等对美国科罗拉多高原干旱气候环境下的砂岩风蚀凹槽进行研究发现，微生物和低等植物可以在岩体表面形成一层减缓流水和风力破坏作用的硬壳，使岩体表面得以暂时稳定，并且还计算出这些岩体表面的微生物群落抵抗外力侵蚀的能力达到526 dynes/cm^2[68]。

不过应注意的是，砂岩的风化机制并不是单因子决定的，往往是岩体表面的热循环、湿度变化、盐结晶、水合、氧化和生物等共同作用的过程，但各因素之间的相互关联还有待深入探讨。

4　研究现状述评

4.1　存在的问题

(1) 基础研究仍然十分薄弱　虽然丹霞地貌在我国已有80多年的研究历史，研究内容涉及定义、形态特征、分类系统、分布规律、发育条件、演化过程等诸多方面。但从建立丹霞地貌学科体系和开展国际对比研究的需要来看，依然存在基础研究薄弱的问题。大多数研究方法比较传统，现代技术手段运用较少，多数研究偏重于宏观、定性的描述和推论，从岩石学、矿物学、外动力作用等多因子深入探讨丹霞地貌发育机制的文章不多。一些关于丹霞地貌的实验研究也主要是基于红层岩体本身的理化特性来分析其抗风化能力，尚不足以揭示不同自然条件下红层的风化特征及其对丹霞地貌发育的影响。

(2) 各学科研究融合程度低，缺乏系统研究　从研究内容上看，目前国内外各学科对红层及其地貌的研究往往只关注其本专业问题，彼此之间缺乏联系和融合，存在“多张皮”的现象[4]。地质学界多关注红层本身的地质问题，对红层的岩性特征与地貌发育的关系及过程很少涉及；在地貌学界，国内学者大多只关注红层中坚硬的砂砾岩发育的赤壁丹崖景观及其外动力影响，忽视红层软岩的岩石学特性及其对地貌发育的影响；国内外学者大多侧重于单因子研究，缺少多因子关联的系统研究。总体来看，学科间的藩篱导致现有的研究缺乏融合，使红层区地貌演化和丹霞地貌发育机制等问题缺乏系统深入的阐述。

(3) 国际接轨程度低，对比研究不足　虽然国内学者一直把丹霞地貌作为一个独立的地貌类型来研究，并且已建立了相对完善的学科体系，但长期以来，丹霞地貌的研究一直局限于国内，与国际上相关领域的交流非常缺乏，国外学者对此知之甚少。与其他地貌相比，国际地学界对红层地貌和砂岩地貌的研究显得非常薄弱。由于缺乏国际交流，加之国内外对于红层和丹霞地貌的学科归属存在较大认知差异，在丹霞地貌研究走向国际舞台的时候，存在着难以对接的问题，在一定程度上影响了丹霞地貌研究的国际化进程。

4.2　研究趋势与展望

(1) 深化基础研究　从揭示红层和丹霞地貌的科学本质出发，在现有的基础上，未来

红层和丹霞地貌的研究首先应继续深化红层与地貌的地质学基础研究，如红层的形成和分布与大地构造演化、区域地质构造的关系，新构造运动对丹霞地貌发育的影响等问题；其次，在丹霞地貌发育的外动力机制方面，要更加注重在研究方法和手段上的创新，加强对不同环境条件下、不同岩性红层风化侵蚀过程的研究，并探究其对地貌发育的影响。

(2) 加强各学科研究的融合　自然地理过程是一个多因子综合作用的过程，许多问题都是互为因果的系统问题。要弄清丹霞地貌的形成机制和演化过程，必须改变当前这种各学科研究互不关联的状况，从系统科学的视角出发，将各学科对红层和丹霞地貌单因子的研究联系起来，加以整合，实现传统方法与现代技术、地质学与地理学、宏观与微观、单因子研究与多因子集成的结合，从而推动红层和丹霞地貌科学问题全面深入的研究。

(3) 推动国际交流和对比研究　鉴于当前国际地学界对红层和丹霞地貌学科归属不明确、分类体系混乱、研究分散、系统性不强等问题，加强国际交流与合作是正确的路径。目前相关的沟通渠道和交流平台已经建立，中国红层和丹霞地貌研究与国外研究对接的条件已经成熟。但从长远来看，要真正确立红层和丹霞地貌在国际地貌学界的地位，必须尽快把中国红层和丹霞地貌的研究成果介绍到国际上，利用国际地貌学家协会丹霞地貌工作组的平台，推动丹霞地貌的全球研究，厘清学科归属，建立科学统一的分类系统和理论体系，从而为在全球范围内开展红层和丹霞地貌的对比研究提供科学范式。

参考文献 (References)

[1] Feng Jinlan, Zhu Huisheng. Geology and mineral resources of Qujiang, Renhua, Shixing and Nanxiong, Guangdong Province. Annals of Guangdong and Guangxi Geological Survey, 1928, (1): 38-42. [冯景兰, 朱翊声. 广东曲江仁化始兴南雄地质矿产. 两广地质调查所年报, 1928, (1): 38-42.]

[2] Chen Guoda, Liu Huisi. Geology of Gongshui valley, Jiangxi. Geological Transactions of Jiangxi, 1939, (2): 1-64. [陈国达, 刘辉泗. 江西贡水流域地质. 江西地质汇刊, 1939, (2): 1-64.]

[3] Peng Hua, Hou Rongfeng, Pan Zhixin et al. A grand meeting of Danxia Geomorphology go to the world stage: Minutes of the First Conference of Danxia Geomorphology Working Group of IAG & the Second International Symposium on Danxia Landform. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 134-139. [彭华, 侯荣丰, 潘志新 等. 走向世界的丹霞地貌学术盛会: 国际地貌学家协会丹霞地貌工作组第一次会议暨第二届丹霞地貌国际学术讨论会在韶关成功召开. 地理学报, 2012, 67(1): 134-139.]

[4] Peng Hua. Perspectives on the red beds landforms in humid area of southern China and some related problems. Geographical Research, 2011, 30(10): 1739-1752. [彭华. 中国南方湿润区红层地貌及相关问题探讨. 地理研究, 2011, 30(10): 1739-1752.]

[5] Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. Red bed landform in Southeast China. Journal of South China Normal College: Natural Science, 1978, (1): 56-73. [曾昭璇, 黄少敏. 中国东南部红层地貌. 华南师范学院学报: 自然科学版, 1978, (1): 56-73.]

[6] Ju Huiyang, Gu Renjie. Geological characteristics and engineering geological problem of red beds in South China. Shanghai Geology, 1983, (3): 1-16. [居恢扬, 顾仁杰. 我国南方红层的地质特征及其工程地质问题. 上海地质, 1983, (3): 1-16.]

[7] Guo Yongchun, Xie Qiang, Wen Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, (6): 67-71. [郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题. 水文地质工程地质, 2007, (6): 67-71.]

[8] Peng Hua, Wu Zhicai. A priliminary study on the characteristics and the distribution of red beds. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sun Yatseni, 2003, 42(5): 109-113. [彭华, 吴志才. 关于红层特点及分布规律的初步探讨. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(5): 109-113.]

[9] Chen Guoda. Red rock series in Guangdong. Quarterly Journal of Science of National Sun Yat-sen University, 1935, 6 (4): 783-784. [陈国达. 广东之红色岩系. 国立中山大学理学季刊, 1935, 6(4): 783-784.]

[10] Zeng Zhaoxuan. A preliminary discussion on the topography in the region of thick-layer red sandstone in south Renhua. Geographic Collected Papers of National Sun Yat-sen University, 1943, (12): 19-24. [曾昭璇. 仁化南部厚层红色砂岩区域地形之初步探讨. 国立中山大学地理集刊, 1943, (12): 19-24.]

[11] Wu Shangshi, Zeng Zhaoxuan. The red beds in north Kwang-tung. Special Issue of Lingnan Journal, 1946: 12-20. [吴尚时, 曾昭璇. 粤北之红层. 岭南学报专号, 1946: 12-20.]

[12] Wu Shangshi, Zeng Zhaoxuan. Geology and topography of red rock series in north Guangdong. Collected Papers of Geoseicece, 1948, (6): 13-45. [吴尚时, 曾昭璇. 粤北红色岩系之地质与地形. 地学集刊, 1948, (6): 13-45.]

[13] Wu Zhicai, Peng Hua. A study on the formation and development rules of the red beds in Guangdong Province. Tropical Geography, 2006, 26(3): 207-210. [吴志才, 彭华. 广东红层形成及其发育规律研究. 热带地理, 2006, 26(3): 207-210.]

[14] Tan Chao, Pan Guoyao, Liu Zongxiang et al. Engineering geological characteristic of weak seam in red bed hills, East Sichuan. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(2): 212-214. [谭超, 潘国耀, 刘宗祥 等. 川东红层丘陵区软弱夹层工程特性. 四川地质学报, 2011, 31(2): 212-214.]

[15] Zhong Kai, Liu Aiping, Xie Qiang. Survey and Experimental study on the weathering and flaking process of red bed slope. Subgrade Engineering, 2000, (4): 53-56. [钟凯, 刘爱萍, 谢强. 红层边坡风化剥落过程的调查与试验研究. 路基工程, 2000, (4): 53-56.]

[16] Yang Zongcai, Zhang Junyun, Zhou Depei. Study on fast weathering characteristics of red bed mudstone slope. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 275-283. [杨宗才, 张俊云, 周德培. 红层泥岩边坡快速风化特性研究. 岩石力学与过程学报, 2006, 25(2): 275-283.]

[17] Peng Hua. A survey of the Danxia landform research in China. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(3): 203-211. [彭华. 中国丹霞地貌研究进展. 地理科学, 2000, 20(3): 203-211.]

[18] Li Jianxian (Huang Jin). Geomorphic types in Guangdong Province. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni, 1961, (4): 70-81. [李见贤 (黄进). 广东省的地貌类型. 中山大学学报, 1961, (4): 70-81.]

[19] Yang Yingyu. Study on the definition of Danxia landform and Danxia tourism landform. Tourism Tribune, 1993, (5): 48-51. [杨颖瑜. 关于丹霞地貌与丹霞旅游地貌定义的研究. 旅游学刊, 1993, (5): 48-51.]

[20] Chen Anze. Discussion of some problems of Danxia landform. Economic Geography, 2007, 27(Suppl.): 10-15. [陈安泽. 丹霞地貌若干问题讨论. 经济地理, 2007, 27(增刊): 10-15.]

[21] Huang Jin. A basic model of the slope development of Danxia landform. Tropical Geography, 1982, 3(2): 107-134. [黄进. 丹霞地貌坡面发育的一种基本方式. 热带地理, 1982, 3(2): 107-134.]

[22] Liu Shangren, Liu Ruihua. On the conception of Danxia landfrom. Journal of Mountain Science, 2003, 21(6): 669-674. [刘尚仁, 刘瑞华. 丹霞地貌概念探讨. 山地学报, 2003, 21(6): 669-674.]

[23] Gao Shankun, Zhu Guoqiang, Dong Chuanwan et al. The morphological development of Danxia hillslope: A case study of Xinchang Danxia landform. Tropical Geography, 2004, 24(2): 131-135. [高善坤, 竺国强, 董传万 等. 丹霞地貌的坡地形态演化: 以浙江新昌丹霞地貌为例. 热带地理, 2004, 24(2): 131-135.]

[24] Peng Hua. The Red Stone Park of China Danxiashan. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 51-54. [彭华. 中国红石公园丹霞山. 北京: 地质出版社, 2004: 51-54.]

[25] Huang Jin, Chen Zhijun, Huang Keguang. The definition and classification of Danxia landform. Tropical Geomorphology, 1992(Suppl.): 37-39. [黄进, 陈致均, 黄可光. 丹霞地貌的定义及分类. 热带地貌, 1992(增刊): 37-39.]

[26] Luo Chengde. The tourism resource of Danxia landform in the western part of Sichuang Basin. Econonic Geography, 1994, 14(Suppl.): 152-158. [罗成德. 四川盆地西部的丹霞地貌旅游资源. 经济地理, 1994, 14(增刊): 152-158.]

[27] Chen Zhijun, Huang Keguang, Dai Wenzhao. The distribution of Danxia landform in Gansu Province. Economic Geography, 1994, 14(Suppl.): 159-166. [陈致均, 黄可光, 戴文昭. 甘肃丹霞地貌的分布. 经济地理, 1994, 14(增刊): 159-166.]

[28] Peng Hua. The research on classification system of Danxia landform. Economic Geography, 2002, 22(Suppl.): 28-35. [彭华. 丹霞地貌分类系统研究. 经济地理, 2002, 22(增刊): 28-35.]

[29] Huang Jin. Geomorphology of Mountain Danxiashan. Beijing: Science Press, 2010: 17-76. [黄进. 丹霞山地貌. 北京: 科学出版社, 2010: 17-76.]

[30] Liu Shangren, Huang Ruihong. Red bed karst landform and the Danxia landform in Guangdong Province. Carsologica Sinica, 1991, 10(3): 183-189. [刘尚仁, 黄瑞红. 广东红层岩溶地貌与丹霞地貌. 中国岩溶, 1991, 10(3): 183-189.]

[31] Liu Shangren. Red beds karst of Guangdong and its mechanism. Carsologica Sinica, 1994, 13(4): 395-403. [刘尚仁. 广东的红层岩溶及其机制. 中国岩溶, 1994, 13(4): 395-403.]

[32] Yang Mingde. On characterstics of Danxia-karst landform and its dynamic process for geomorphological evolution. Economic Geography, 2003, 23(Suppl.): 39-45. [杨明德. 丹霞喀斯特地貌特性及其演化驱动力研究. 经济地理, 2003, 23(增刊): 39-45.]

[33] Luo Bingsheng. Temperature stress effect of the rock mass in the formation procedure of Danxia landform. Journal of Guangdong Institute of Technology, 1994, 11(4): 1-7. [罗炳生. 丹霞地貌形成过程的岩体温度应力效应. 广东工学院学报, 1994, 11(4): 1-7.]

[34] Luo Bingsheng. The development of Danxia landform in Jinjiling District and its relationship to unloading effect. Journal of Guangdong Institute of Technology, 1993, 10(1): 83-90. [罗炳生. 金鸡岭丹霞地貌发育与卸荷效应关系. 广

东工学院学报, 1993, 10(1): 83-90.]
[35] Huang Jin. Quantitative survey of several important issues concerning the formation of the Danxia landforms. Tropical Geography, 2004, 24(2): 127-130. [黄进. 丹霞地貌发育几个重要问题的定量测算. 热带地理, 2004, 24(2): 127-130.]
[36] Huang Jin. Improvement on the formula used to calculate tectonic uplift rates in Danxia landforms areas and its significance. Economic Geography, 2006, 26(Suppl.):8-13. [黄进. 丹霞地貌区地壳上升速率公式改进及其意义. 经济地理, 2006, 26(增刊): 8-13.]
[37] Zhu Cheng, Peng Hua, Li Zhongxuan et al. Age and genesis of the Danxia landfom on Jianglang Mountain, Zhejiang Province. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(1): 21-32. [朱诚, 彭华, 李中轩 等. 浙江江郎山丹霞地貌发育的年代与成因. 地理学报, 2009, 64(1): 21-32.]
[38] Cheng Shu, Zhu Cheng, Peng Hua et al. Anti-pressure experimental study on rocks in level cave of Jinshiyan of Danxiashan in Guangdong Province. Journal of Anhui Normal University: Natural Science, 2010, 33(2): 170-174. [陈姝, 朱诚, 彭华 等. 广东丹霞山洞穴景观岩体稳定性的抗压试验研究. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2010, 33(2): 170-174.]
[39] Lv Wen, Zhu Cheng, Peng Hua et al. The contribution lithological characteristics to Danxia landform genesis in Jianglang Mountain, Zhejing Province. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(4): 349-355. [吕文, 朱诚, 彭华 等. 浙江江山市江郎山岩石岩性特征及其对丹霞地貌形成的影响. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(4): 349-355.]
[40] Ouyang Jie, Zhu Cheng, Peng Hua et al. Experimental research on vulnerability of Danxia rocks to resistance against acid erosion in Langshan, Hunan Province. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 965-970. [欧阳杰, 朱诚, 彭华 等. 湖南崀山丹霞地貌岩体抗酸侵蚀脆弱性的实验研究. 地球科学进展, 2011, 26(9): 965-970.]
[41] Turner P, Archer R. The role of biotite in the diagenesis of red beds from the Devonian of northern Scotland. Sedimentary Geology, 1977, 19: 241-251.
[42] Walker T.R. Nature and origin of hematite in the Moenkopi Formation (Triassic), Colorado Plateau: A contribution to the origin of magnetism in red beds. Journal of Geophysical Research, 1981, 86 (B1): 317.
[43] Parcerisa D, Gras D G, Travé A et al. Fe and Mn in calcites cementing red beds: A record of oxidation-reduction conditions: Examples from the Catalan Coastal Ranges (NE Spain). Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89 (1-3): 318-321.
[44] Kent D V, Opdyke N D. Paleomagnetism of the Devonian Catskill red beds: evidence for motion of the coastal New England-Canadian Maritime region relative to cratonic north America. Journal of Geophysical Research, 1978, 83(B9): 4441-4450.
[45] Yamashita I, Surinkum A, Wada Y et al. Paleomagnetism of the Middle-Late Jurassic to Cretaceous red beds from the Peninsular Thailand: Implications for collision tectonic. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(3): 784-796.
[46] Miki T. Sedimentologic and palaeoclimatic classification of Cretaceous red beds in East Asia: A general view. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1992, 7(2/3): 179-184.
[47] Hofmann A, Tourani A, Gaupp R. Cyclicity of Triassic to Lower Jurassic continental red beds of the ArganaValley, Morocco: Implications for palaeoclimate and basin evolution. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 161(1/2): 229-266.
[48] Van Houten F B. Iron oxides in red beds. Geological Society of America Bulletin, 1968, 79(4): 399-416.
[49] Turner P. Continental Red Beds. Elsevier Scientific Publishing Company, 1980: 323-343.
[50] Gijón R S, Martínez N L. Sharks and rays (chondrichthyes) from the Upper Cretaceous red beds of the south-central Pyrenees (Lleida, Spain): indices of an India-Eurasia connection. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1998, 141(1/2): 1-12.
[51] Marriott S B, Morrissey L B, Hillier R D. Trace fossil assemblasges in Upper Silurian tuff beds: Evidence of biodiversity in the Old Red Sandstone of southwest Wales, UK. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 274(3/4): 160-172.
[52] Young R, Young A. Sandstone Landforms. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Printed in Germany, 1992: 1-122.
[53] Young R, Young W, Young A. Sandstone Landforms. London: Cambridge University Press, 2009: 223-226.
[54] Migon P, Goudie A, Allison R et al. The origin and evolution of footslope ramps in the sandstone desert environment of south-west Jordan. Journal of Arid Environment, 2005, 60(2): 303-320.
[55] Netoff D I, Shroba R R. Conical sandstone landforms cored with clastic pipes in Glen Canyon National Recreation Area, southeastern Utah. Geomorphology, 2001, 39(3-4): 99-110.
[56] Smith B J, McAllister J J. Observation on the occurrence and origins of salt weathering phenomena near lake Magadi, southern Kenya. Zeitschrift für Geomorphologie, 1986, 30: 445-460.
[57] Huinink H P, Pel L, Kopinga K. Simulating the growth of tafoni. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29

(10): 1225-1233.
[58] Turkington A V, Paradise T R. Sandstone weathering: A century of research and innovation. Geomorphology, 2005, 67 (1/2): 229-253.
[59] Sunamura T. A physical model for the rate of coastal tafoni development. The Journal of Geology, 1996, 104(6): 741-748.
[60] Mcgreevy J P. Thermal properties as controls on rock surface temperature maxima and possible implication for rock weathering. Earth Surface Processes and Landforms, 1985, 10(2): 125-136.
[61] Sancho C, Benito G. Factors controlling tafoni weathering in the Ebro Basin (NE Spain). Zeitschrift für Geomorphologie, 1990, 34(2): 165-177.
[62] Paradise T R. Sandstone weathering and aspect in Petra, Jordan. Zeitschrift für Geomorphologie, 2002, 46(1): 1-17.
[63] Young R W. Sandstone lanforms of the tropical east Kimberley region, northwestern Australia. The Journal of Geology, 1987, 95(2): 205-218.
[64] Budel B, Weber B, Kuhl M et al. Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: Bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes. Geobiology, 2004, 2(4): 261-268.
[65] Wray R A L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. Earth-Science Reviews, 1997, 42 (3): 137-160.
[66] Wessels D C J, Schoeman P. Mechanism and rates of weathering of Clarens sandstone by an endolithiclichen. South African Journal of Science, 1988, 84(4): 274-277.
[67] Papida S, Murphy W, May E. Enhancement of physical weathering of building stones by microbial populations. International Biodeterioration & Biodegradation, 2000, 46(4): 305-317.
[68] Kurtz H D, Netoff D I. Stabilization of friable sandstone surfaces in a desiccating, wind-abraded environment of south-central Utah by rock surface microorganisms. Journal of Arid Environments, 2001, 48(1): 89-100.

A review of the research on red beds and Danxia landform

PENG Hua, PAN Zhixin, YAN Luobin, Scott SIMONSON
(*School of Geography and Planning*, *Sun Yat-sen University*, *Guangzhou* 510275, *China*)

Abstract: In the context that China Danxia landform went into the world and began the research of a new phase, it is necessary to make a review on the research progress of red beds and Danxia landform in and outside China. It is revealed that the domestic study was focused on the characteristics of red beds, engineering geology, features of Danxia landform and the basic problems of development. In general, in China there were no integrated studies of red beds concerning the field of geology and geomorphology, and the differences between lithologic characteristics of red beds and their related geomorphic development processes under the influence of exogenetic force were not well understood. However, research outside China were limited in the field of geology, and relevant studies of red beds and Danxia landform were conducted in the field of sandstone landform, with a microscopic, quantitative and experimental analysis. This paper suggests that most of the existing studies on red beds and Danxia landform were focused on single factor, and lack of subject system, and the integration of related subjects was also insufficient. Then, a new agenda for the future research was put forward, in which a clear discipline classification of red beds and Danxia landform and further basic research should be made, and the integration of related subjects, international communication and the global comparative research should also be strengthened.
Key words: red beds; red bed landform; Danxia landform; sandstone landform; global comparative research