

国内外红层分布及其地貌发育的对比研究

潘志新, 彭 华

(中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 为了解全球红层的时空分布规律及其地貌发育的差异, 对国内外红层的分布、形成年代、地质构造背景、古地理环境、岩性和地貌特征等进行了对比研究。结果表明: 国内红层主要分布于东南、西南、西北等地区, 形成年代主要为中生代, 尤以白垩纪为主, 构造环境主要为古陆块活化时形成的断陷/物陷盆地; 沉积环境几乎全部为陆相, 形成于干旱或半干旱古气候条件; 岩性复杂, 兼具砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩, 发育了丹霞地貌、红层高原、红层山地和红层丘陵等多种地貌类型。国外红层的形成年代跨度很大, 从前寒武纪到新近纪均有发育, 呈现出从老陆块向新陆块扩展的趋势; 构造环境分为山前/山间拗陷堆积、地台拗陷堆积、裂谷盆地堆积和弧后盆地堆积; 沉积环境以陆相为主, 兼具滨-浅海相和海陆过渡相, 也形成于干旱、半干旱气候; 岩性以砂岩、粉砂岩和泥岩为主, 砾岩较少; 发育的地貌类型相对单一。

关键词: 红层; 时空分布; 地貌发育; 国际对比

中图分类号: P931 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2015)12-1575-10

红层是形成丹霞地貌的物质基础^[1]。但长期以来, 国内外对红层及其地貌发育的研究一直比较薄弱。现有研究中, 地质学界大多围绕某个区域红层中的岩石矿物、古地磁、古生物来展开, 推演红层颜色的成因及其沉积时的地质构造背景和古地理环境特征; 地貌学界则多集中在红色砾岩或砂砾岩形成的丹霞地貌, 对其它岩性红层的地貌发育过程缺乏关注^[2]。而在红层分布方面, 虽然有部分国内学者对中国的红层分布特征及其地貌发育类型进行了总结, 如: 20世纪70年代, 曾昭璇等总结了我国东南部的红层分布及其地貌发育条件^[3]; 李廷勇等划分了中国红层主要分布区域及其发育的地貌类型^[4], 但是国外红层却很少有人提及。更鲜有人从全球的角度出发, 对国外红层的分布、形成年代、沉积环境、岩性特征和地貌发育等进行系统梳理, 并与中国的红层进行对比。

近年来, 由于“中国丹霞”申遗成功和“国际地貌学协会红层和丹霞地貌工作组 (IAG Red Beds and Danxia Geomorphology Working Group)”的推动, 启动全球红层和丹霞地貌调查, 开展国际

对比研究开始被提上议程。在对相关研究成果进行整理的基础上, 本文从红层的分布、形成年代、地质构造背景、古地理环境、岩性和地貌特征等方面对国内外红层及其地貌发育进行初步对比分析, 总结全球红层的时空分布规律及其地貌发育的差异。一方面为国内同行了解国外红层提供参考; 另一方面也为接下来开展国内外典型红层分布区红层地貌发育的对比研究提供理论依据。

1 中国红层及其地貌发育

1.1 中国红层的分布和形成年代

国内研究表明, 中国红层主要为红色陆相碎屑沉积^[3,4]。据郭永春等统计, 全国红层总面积约 $8.26 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占陆地总面积的 8.61%^[5], 广泛分布于大陆各省 (自治区、直辖市), 但集中在东南、西南和西北^[1]。形成年代上, 中国红层多不早于中生代, 尤以白垩纪为主^[4,6]。不过, 在塔里木盆地南缘、甘肃和山西等地区也发现有少量泥盆纪和二叠纪的老红层出露^[6]。

收稿日期: 2014-11-16; **修订日期:** 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41171013) 和国家留学基金委公派留学联合培养博士生项目资助。

作者简介: 潘志新 (1986-), 男, 江西省婺源县人, 博士研究生, 研究方向为丹霞地貌及资源环境管理。E-mail: panzhix@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 彭 华, 教授。E-mail: eesph@mail.sysu.edu.cn

具体而言,东南地区的红层多散布于北东-北北东向的中小型山间盆地,形成年代多为白垩纪,局部为古近纪,以河湖相和冲积扇相为主。西南地区的红层主要分布在四川盆地和滇中、滇西地区,形成年代以侏罗纪和白垩纪为主,多为古川滇湖区的河湖相沉积^[6]。西北地区的红层主要出露在鄂尔多斯、塔里木、准噶尔等盆地的边缘,形成年代跨度较大,从晚古生代至新近纪均有。此外,青藏高原亦有大量白垩纪-新近纪红层分布,以冈底斯山脉北侧及青海东部最为集中;东北和华北平原也有白垩纪红层分布,但除了盆地边缘外,这里的红层多被第四纪沉积物所覆盖^[1]。

1.2 中国红层形成的地质构造背景和古地理环境

中生代的印支运动和燕山运动,以及新生代的喜马拉雅运动对中国构造格局的形成和气候环境的演变影响巨大,是红层形成的主要阶段。

中生代以前,中国范围内的古陆尚未拼接完成,陆地面积较小且分散。出露面积较大的华北古陆处于中纬度湿润气候区,很少有红层堆积;而南方大部分地区此时为海洋环境,缺少陆相沉积。到三叠纪中、晚期,印支运动使南方许多地区隆起成陆,并与北方古陆连为一体,陆地面积扩大。侏罗纪时,中国基本结束了“南海北陆”的格局,形成了宽广的大陆沉积环境^[4]。中、晚侏罗世时,受古秦岭-古祁连山-古昆仑山脉和川黔贵高地的影响,中国内陆地区由温暖湿润气候转向亚热带干旱-半干旱气候^[7],许多内陆盆地开始接受红色碎屑堆积,如四川盆地和鄂尔多斯盆地。

晚侏罗世至白垩纪期间,受燕山运动影响,中国大部分古陆块强烈活化,构造格局由原来的南北分异转为东西分异。西部地区构造继承性突出,四川盆地、鄂尔多斯、塔里木等大型稳定的内陆盆地继续接受河、湖相沉积;东部地区因受到太平洋板块的俯冲挤压,形成一系列北东或北北东向斜列的褶皱断裂山地和大量中小型断陷盆地^[8]。白垩纪时,受东部隆起带的影响,来自海洋的水汽难以进入,华北、华南和中南等广大地区均处于干旱气候环境^[9],成为红层最为发育的阶段。

进入新生代后,受喜马拉雅运动的影响,特提斯古海槽逐渐闭合,青藏高原开始隆起。同时,中国中东部干湿交替的季风气候特征逐步形成,由此前的干旱环境转为湿润环境。到古近纪末,该地区的红层沉积基本结束,而西北地区在此期间

气候变得更为干旱^[10,11],几个大型内陆盆地及青藏高原地区继续接受红色碎屑堆积,发育了大量古近纪和新近纪红层^[1]。

1.3 中国红层的岩性特征及其地貌发育

中国红层几乎全部为陆相碎屑沉积,岩性构成复杂,既有砾岩,也有砂岩、粉砂岩和泥岩,有些还含淡水灰岩、石膏等蒸发岩夹层^[12]。从矿物组成上看,红层的主要碎屑物质为石英和长石,胶结物为铁质、钙质、硅质或泥质。一般来说,大型红层盆地的沉积分异现象明显,盆地边缘多为洪积相的砾岩和角砾岩,它们往往为硅质、铁质胶结,岩石比较坚硬;而往盆地中心,沉积物粒度逐渐变小,多为河流相和湖泊相的细砂、粉砂和泥岩,为粘土或铁、钙质胶结,岩性比较软弱。

由于各地红层岩性的差异,在不同的地质构造和气候条件影响下,中国红层区广泛发育了高原、丘陵、台地、山地等多种地貌类型。其中,最为典型的是以红色陡崖坡为特征的丹霞地貌。丹霞地貌在中国广泛分布,并且由于内、外动力作用的差异,呈现出明显的地域分异^[13,14]。东南地区气候湿润,流水对丹霞地貌形态的塑造作用显著,多发育丹霞峰林、峰丛景观;西南地区受新构造运动影响强烈,红层盆地抬升量较大,多形成高原-峡谷型或高原-山地型丹霞景观。相比之下,西北地区的丹霞地貌特征较为复杂。一方面,西北地区构造运动强烈,许多红层产状为陡倾斜甚至直立状态,形成尖顶的丹霞地貌;另一方面,西北地区气候干旱,流水侵蚀作用相对较弱,泥质和粉砂质红层也可形成丹霞陡坡。

作为红层区重要的地貌类型,丹霞地貌因其突出的景观价值而备受国内地貌学界的关注。不过,丹霞地貌只是红层区发育的一种地貌类型,有红层的地区不一定都发育丹霞地貌。通常形成丹霞地貌的都是岩性较坚硬的砾岩和砂岩,多集中在断裂抬升强烈的盆地边缘区;而在大型红层盆地内部,由于构造运动影响较小,加之软弱的泥岩易被风化侵蚀,一般只形成和缓的红层丘陵。

2 国外红层及地貌发育

2.1 国外红层的分布和形成时代

根据目前掌握的资料,红层遍布全球各大洲。国外主要红层分布区及特征介绍如下(图1):

1) 亚洲。中国之外的其它亚洲国家也有很多红层分布,它们绝大多数为陆相沉积,且形成年

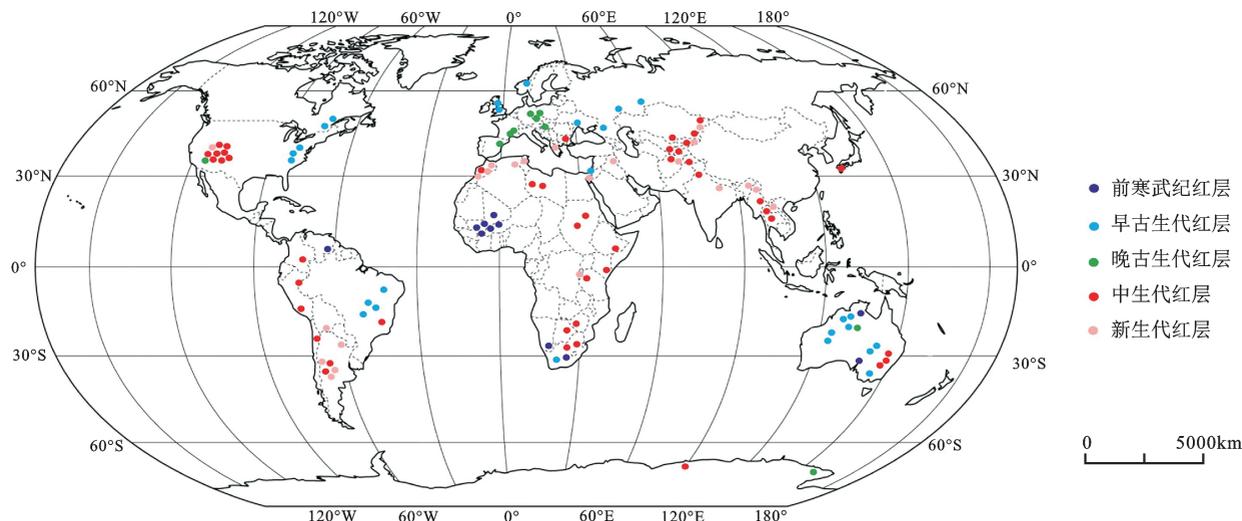


图1 国外红层分布

Fig.1 The location of red beds outside China

代较新,以白垩纪和古近纪为主。东亚地区的红层有日本九州岛中西部Goshonoura盆地的Goshonoura群,该红层为河口-浅海相,形成于白垩纪中期,岩性兼具砾岩、砂岩和泥岩^[15]。东南亚泰国半岛Trang盆地出露有中、晚侏罗世到晚白垩世的红层-Trang群,岩性以砂岩为主^[16]。南亚地区,巴基斯坦北部东兴都库什山脉的Shishi谷地有白垩纪红层Purit组出露,由河流相砾岩和砂岩组成,含钙质夹层^[17];印度西北部的Kangra和Subathu地区等喜马拉雅山山前盆地中堆积有古近纪的Dagshai组红层,它由河流相砂岩、粉砂岩和泥岩组成,也含钙质夹层^[18]。中亚地区,阿富汗著名的巴米扬大佛所在地——巴米扬谷地还出露有中新世红层,以砾岩和粉砂岩为主^[19]。西亚地区的红层有伊拉克东北部的Gercus组,埃及西奈半岛Abu Zenima地区的Taybi组,它们都为古近纪红色陆相粗碎屑沉积,局部地区过渡到海相的红色粉砂岩^[20]。此外,约旦西南部的佩特拉(Petra)是亚洲少有的老红层代表,其沉积于寒武纪,辫状河流相沉积的Umm Ishrin组厚度约500 m,是形成佩特拉古城红色砂岩崖壁的地层^[21, 22]。

2) 欧洲。欧洲大陆的红层主要分布在比利牛斯山、阿尔卑斯山、喀尔巴阡山等山脉两侧的山前盆地,沉积年代以古生代和中生代为主。如西班牙东北部比利牛斯山南侧中部Erill Castell盆地的Lower Red组^[23];和东南部阿尔卑斯山西侧Dôme de Barrot盆地的Daluis组和Léouvé组^[24];以及奥地

利境内阿尔卑斯山北侧Tyrol东部的Gröden组^[25]。这些红层都形成于二叠纪,以河流相沉积为主,含火山碎屑岩和钙质夹层。东喀尔巴阡山脉南段罗马尼亚境内还堆积了大量晚白垩世红层,以浅海相的红色页岩、粘土岩为主,如GuraBeliei组^[26]。

此外,在英国苏格兰地区的Midland谷地和威尔士地区的Anglo-Welsh盆地^[27];挪威西部的Hornelen地区^[28];乌克兰西部的Podolia地区^[29]等还广泛分布着志留纪-泥盆纪的老红砂岩(Old Red Sandstone)。这些老红砂岩多为洪积相和河流相沉积,属加里东造山期的磨拉石建造。

3) 北美洲。北美红层主要分布于美国西部的科罗拉多高原,形成年代为石炭纪-古近纪,但以三叠-侏罗纪为主,沉积环境多为陆相,兼有少数滨-浅海相。如出露于大峡谷国家公园的石炭纪Supai群^[30]和早二叠世的Hermit组^[31],它们沉积于宽广的滨海平原环境,岩性为红色粉砂岩、泥岩和页岩,上下都有与石灰岩层的不整合面。三叠-侏罗纪的红层主要有早三叠世的Moenkopi组^[32],晚三叠世的Chinle组^[33],早侏罗世的Moenave组^[34]、Wingate Sandstone组^[35]和Kayenta组^[36],早-中侏罗世的Navajo Sandstone组^[37],以及中侏罗世晚期的Entrada Sandstone组^[38]。古近纪的红层主要是布莱斯峡谷国家公园出露的Claron组,形成于始新世^[39]。这些红层形成于河流、湖泊或沙漠环境,岩性多为红色细砂岩、粉砂岩、泥岩。其中,特别值得一提的是Navajo Sandstone组,它保存有世界上

最大规模的风成交错层理,最大厚度达670 m^[40]。

除科罗拉多高原外,北美东北部沿阿巴拉契亚山脉到纽芬兰岛和拉布拉多半岛地区还有老红砂岩分布,如晚志留世的Bloomsburg组^[41]和中-晚泥盆世的Catskill组^[42],它们和西欧的老红砂岩相对应,都为加里东运动时形成的红色碎屑堆积,以河流相砂岩和页岩为主。

4) 南美洲。南美洲的红层主要分布于安第斯山脉两侧的山前盆地和稳定的内陆克拉通盆地。如智利Salar de Atacama盆地堆积的Purilactis群,它沉积于白垩纪至古近纪,由红色砂岩、泥岩、砾岩和蒸发岩组成,夹少量火山岩,总厚度约6 000 m^[43];玻利维亚的Altiplano高原和东科迪勒拉地区堆积有大量古新世红层,如Santa Lucia组,它为河流相和湖泊相沉积,以砂岩、粉砂岩为主,夹砾岩透镜体^[44]。阿根廷的Cafayate国家公园和Talpaya国家公园也有红层出露,前者主要是Salta群,形成于白垩纪至古近纪,主要为红色砾岩、砂岩和页岩,最大厚度约4 000 m^[45];后者为早三叠世的Paganzo III群,以红色砂岩为主^[46]。

稳定克拉通盆地的红层堆积主要有巴西南部Bauru盆地的Rio Paraná组,该组红层形成于晚白垩世,由红色、棕红色细粒-中粒石英砂岩组成,具风沙沉积特征,板状斜层理非常发育,平均厚度为45 m,最大可达300 m^[47];巴西东北部Piauí州的Serra da Capivara国家公园沉积了志留纪-泥盆纪的红层Serra Grande群和Canindé群,它们形成于河流和三角洲环境,以褐色砂岩为主^[48]。此外,委内瑞拉东南部Bolívar州的Canaima国家公园还沉积有前寒武纪的红层-Roraima超群。该地区为冈瓦纳古陆圭亚那地盾的一部分,红层最大厚度约3000m,主要为河流相和湖泊相,形成了世界上最为壮观的桌状山^[49]。

5) 非洲。非洲的红层主要分布在东非大裂谷、北非阿特拉斯山脉的裂谷盆地及稳定的内陆克拉通盆地。其中,坦桑尼亚西南部和马拉维北部的Rukwa和Malawi裂陷盆地出露的红层有Red Sandstone群,它为中粒红色砂岩,夹砾石或泥岩透镜体,形成于白垩纪至古近纪^[50];北非摩洛哥的高阿特拉斯山(High Altas)西部的Argana谷地沉积了厚达2 500~5 000 m的红层,代表了三叠纪至早侏罗世期间北美大陆和非洲板块分离时的裂谷沉积^[51, 52];非洲稳定的内陆盆地地区还堆积了前

寒武纪老红层,如南非Kaarvaal克拉通的Wilgerivier组^[53],它以砂岩为主,夹少量砾岩和泥岩。此外,马里的Taoudeni盆地还出露有前寒武纪-奥陶纪的红色砂岩——Bandiagara组,其产状水平,经抬升侵蚀后形成了大面积的红层高原、桌状山及绵延数百千米的崖壁^[54, 55]。

6) 澳大利亚。澳大利亚大陆是南方冈瓦纳古陆的一部分,沉积的红层年代古老,多为元古代和古生代,主要分布在北领地和西澳大利亚州。其中,北领地北部Kakadu国家公园出露有前寒武纪红层-Kombolgie子群,它由多组砂岩组成,兼具河流相和浅海相^[56];北领地南部Uluru-Kata Tjuta国家公园的Ayers Rock和Mount Olga,它们分别由寒武纪早期冲积扇相的长石砂岩Mutitjulu Arkose组和Mount Currie砾岩组成^[57]。西澳大利亚州的红层主要分布在Kimberley地区,如Purnululu国家公园的Bungle Bungle Range,该处红层为泥盆纪的Grass Hill组,形成了密集的锥状砂岩峰丛景观^[58]。

7) 南极洲。据文献显示,南极洲亦有红层分布,如维多利亚地南部的晚泥盆世Aztec组和查尔斯王子山北部的Beaver湖区附近早-中三叠世的Flagstone Bench组。前者形成于河漫滩平原环境,主要由粉砂岩和泥岩组成^[59];后者也为粉砂岩和泥岩,且具龟裂填充构造,反映了由湿润向半干旱转换的沉积环境^[60]。总体上,由于南极洲绝大部分地区被冰川覆盖,目前对南极洲红层的研究还很有限,难以确切说明其分布及特点。

2.2 国外红层形成的构造环境

从构造环境来看,国外红层堆积可归为以下4种类型:

1) 造山运动同时或之后的山前/山间拗陷堆积:如美国阿巴拉契亚山地区、西欧和北欧的志留纪-泥盆纪的老红砂岩形成于加里东运动期间;欧洲西南部的红层堆积于老阿尔卑斯运动期间;南美的智利、阿根廷、玻利维亚等地的红层形成于新阿尔卑斯运动期间;中亚和南亚的红层则属于喜马拉雅运动时印度板块和欧亚板块碰撞的缝合线前缘堆积。

2) 地台拗陷堆积:一般是在成陆较早的克拉通盆地。如委内瑞拉东南部、南非、马里和澳大利亚中北部地区的前寒武纪-寒武纪红层等都形成于冈瓦纳古陆内部稳定的克拉通盆地。

3) 裂谷盆地堆积:这类红层堆积与大陆裂解

分离过程中局部地壳下沉有关,如东非的坦桑尼亚和马拉维,埃及西奈半岛的红层等都是东非大裂谷形成时的堆积;北非的摩洛哥和巴西南部的红层则代表了冈瓦纳古陆分离时的裂谷沉积。

4) 弧后盆地堆积:指由于大洋板块向大陆板块俯冲,弧后大陆岩石圈地幔物质上拱和陆壳微型扩张而形成的拉张型盆地,在下部岩浆源减少或冷却过程中盆地下沉接受堆积。如美国科罗拉多高原堆积的中生代红层。

总体而言,除地台拗陷沉积外,国外红层多形成于构造运动比较活跃的时期。一方面构造活跃期是地壳升降运动强烈的时期,有盆地沉积空间和山地物源;另一方面构造活跃期的地温梯度较大,有利于铁的氧化^[61]。此外,板块的移动将一些陆块推移到热带或亚热带地区,也有利于沉积物中铁的氧化和红层发育。

2.3 国外红层形成的古地理环境

沉积环境方面,国外红层大多数为陆相沉积,兼有部分滨-浅海相和海陆过渡相。其中,滨-浅海相和海陆过渡相的红层主要分布在古大陆板块的边缘地区。如晚古生代时,美国西部处于北美大陆架边缘海区,经常受海侵和海退的影响,在此期间沉积的 Supai 群和 Hermit 组,以及 Moenkopi 组都含有石灰岩夹层,且其红色粉砂岩和页岩段表面具有波痕和泥裂构造,表明其沉积于潮滩或滨海平原环境^[30-32]。陆相红层方面,有河流、湖泊、风沙等多种沉积相,特别是风沙沉积,它们的典型特征是具有大规模的交错层理(图 2A)。如前述美国科罗拉多高原地区早-中侏罗世的 Navajo Sandstone 组,规模的形成于宽广的沙漠环境^[40]。

气候环境方面,国外红层也基本形成于干旱、半干旱气候。晚古生代和中生代期间,全球大陆板块经历拼合与分离两大过程,气候也相应地产生变化。晚古生代末期,全球大陆板块汇聚形成泛大陆,北方的劳亚古陆西部(北美-欧洲古陆)位于南北纬 30°之间,大陆性气候很强,有利于红层的发育。此时的东亚地区古陆块尚未拼接完成,且处于中纬度湿润地区,而南方的冈瓦纳古陆处于第二次大冰期,不具备红层发育的条件。进入中生代后,泛大陆开始解体分离,并伴有强烈的陆缘造山运动。侏罗纪和白垩纪期间,许多大陆边缘褶皱带相继隆起,阻止海洋湿润气流进入,在内陆山间盆地形成干旱、半干旱气候,使北美西部、欧

洲中南部、印度北部、非洲北部、南美等地都广泛发育红层,中生代成为全球红层最为发育的时期。

2.4 国外红层地貌发育

红层地貌的发育受岩性、构造和气候等因素的影响。从岩性因素看,国外目前保存和出露的红层总体以砂岩、粉砂岩和泥岩为主,砾岩等粗碎屑岩较少,只在盆地边缘或小型的山前和山间盆地偶有出露,或只是作为夹层的短期堆积。由于古沉积环境的变化,很多红层的上覆、下伏或夹层为石灰岩、灰绿色泥岩、甚至是火山岩。在红层地貌发育过程中,强度较低的泥岩容易被风化侵蚀,多形成缓丘或缓坡,而强度较大的砂岩则形成崖壁或陡坎。在同一红层剖面,如果多个软硬程度不一的岩层组交替出现,则往往形成多级层位的侵蚀面,如美国犹他州 Zion 国家公园的 Zion 峡谷两侧,风成相的 Navajo Sandstone 组厚度最大,形成大崖壁,其顶部的 Temple Cap 组 White Throne 段、下部 Kayenta 组的 Lamb Point Tongue 段和 Springdale 段由细砂-粉砂岩组成,但因厚度较小,只发育成陡坎;而含泥岩层的 Temple Cap 组 Sinawava 段、Kayenta 组 Tenney Canyon Tongue 段和 Main body 段、以及 Moenave 组则形成侵蚀缓坡(图 2B)。

从构造因素看,红层盆地在抬升过程中形成的断层等对其地貌坡面具有控制作用。如美国犹他州 Capitol Reef 国家公园受南北走向,向东倾斜的 Water pocket 断层控制,形成了单斜构造,断层西侧的红层岩性组被抬升了 2 100 m,发育了连续的陡崖,而东侧沿断层走向只形成了缓坡^[62]。

从气候因素看,国外红层分布区大多为干旱、半干旱气候,降水量少且季节分配不均。一方面,干旱的气候有利于红层景观的保持,使很多岩性并不那么坚硬的红层也能形成陡崖坡;另一方面,短期的暴雨洪流沿节理裂隙对红层进行切割侵蚀,形成了众多的峡谷、巷谷和悬谷等景观。

总体而言,国外稳定陆块上的红层发育的地貌类型相对单一,以红层高原、峡谷、侵蚀台地为主;但部分构造复杂的山前/山间盆地发育的红层地貌形态相对复杂多样,既有块状山崖、峰林、峰丛、单面山;也有孤峰、石柱、岛山等。

3 国内外红层及其地貌发育的对比

3.1 国内外红层分布的时空差异

从上述介绍可看出,国外红层的形成年代跨



注:①为 Temple Cap 组,包括 a-White Throne 段和 b-Sinawava 段;②为 Navajo Sandstone 组,包括 c-白色段、d-粉红色段、e-褐色段;③为 Kayenta 组,包括 f-Tenney Canyon Tongue 段、g-Lamb Point Tongue 段、h-Main body 段、i-Springdale 段;④为 Moenave 组。

图2 美国犹他州 Zion 国家公园 Navajo 砂岩的风成交错层理(A)和出露的不同岩性红层剖面(B)

Fig.2 Cross beddings of Navajo Sandstone in Zion Nation Park, Utah, USA (A) and exposed stratigraphic profile of different red bed strata (B)

度很大,从前寒武纪到新近纪均有发育。大体上可分为前寒武纪、早古生代、晚古生代、中-新生代4阶段。其中,前寒武纪红层主要分布在古老陆块的克拉通盆地,如委内瑞拉东南部、西非的马里和澳大利亚西北部;早古生代红层主要分布在北美-欧洲古陆缝合带的山前(山间)拗陷盆地,如美国东北部、北欧、东欧及英国的苏格兰、威尔士等地,以老红砂岩为代表;晚古生代红层主要分布在美国西部和欧洲西南部;中生代红层分布最广,各大洲均有分布(见图1)。

相比之下,中国的红层较年轻,大规模的红层堆积集中在中生代,尤其是白垩纪。这是因为中国大陆板块是由许多小板块逐步拼接而成的。中生代以前,中国板块大部分地区处于海面以下,缺乏大型的古陆或内陆盆地,以及红层发育所需的相对干热的气候条件。直到侏罗纪,中国境内的古陆块大部分拼接完成后,形成足够大的陆地面积并在后期的地壳运动中活化,形成众多中小型山间盆地。白垩纪期间,中国大部分地区处于热带和亚热带的干旱、半干旱气候环境,也为大规模的红层堆积创造了条件。

据此,可将全球红层的时空分布规律总结如下:一,全球红层的沉积呈现出从老陆块向新陆块

扩展的趋势,即从古老的冈瓦纳古陆向北美-欧洲古陆和中国古陆扩展;二,红层分布范围逐步扩大,即随着地球陆地面积的扩大,新红层的分布范围大于老红层;三,在全球地壳演化和红层发育的大序列中,中国板块大规模的红层堆积出现最晚,反映了中国作为亚欧大陆的一部分最晚拼合成完整大陆块的地壳演化历史。

3.2 国内外红层形成的地质构造背景对比

构造环境上,国外红层可归为山前/山间拗陷/断陷堆积、地台拗陷堆积、裂谷盆地堆积和弧后盆地堆积4种类型。除地台拗陷堆积,国外红层多形成于构造运动活跃的造山期和板块分裂期。相比之下,中国红层堆积的构造环境存在一定特殊性,即以内陆中小型断陷/拗陷盆地为主。中生代晚期,中国大陆板块拼接完成后,受到亚欧板块、太平洋板块和印度板块的3面挤压,再次变得异常活跃,很多古陆块纷纷“活化”,在东部地区形成3条隆起带和3条沉降带相间分布的格局,形成大量中小型山间盆地并广泛发育红层。

3.3 国内外红层形成的古地理环境对比

国外红层以陆相沉积为主,兼具少量的滨-浅海相和海陆过渡相沉积。大多数红层分布区至今仍继承了红层形成时的干旱、半干旱气候环境,并

且很多红层还具有风沙沉积特征。中国红层几乎全为陆相,缺少海相。另外,中国中东部地区现今的气候与红层形成时的古气候差别很大。该地区在红层形成时为干旱、半干旱气候,但新近纪时随着东亚季风的加强发生了气候转换,逐渐形成了今天的季风性湿润气候。

3.4 国内外红层岩性和地貌发育的对比

国外红层总体以砂岩、粉砂岩和泥岩为主,岩性比较均一,加之大多地处干旱、半干旱气候区,对红层的侵蚀相对较弱。因而,在一些构造稳定的地区其发育的红层地貌类型比较单一,多以高原、峡谷、台地、缓丘为主。但在一些构造变动比

较强烈的地区,也有峰林、峰丛景观。

相比之下,中国的红层岩性类型齐全,尤其是砾岩等粗碎屑岩比较常见,这是形成丹霞地貌陡崖坡的物质基础。另一方面,中国处于环太平洋与特提斯两个构造带的交会部位,新构造运动强烈,使众多红层盆地遭受抬升和断裂切割。加之国土辽阔,跨越不同的构造带和气候带,形成了多样化的红层地貌,包括丹霞地貌、红层高原、红层山地、红层丘陵等,但以丹霞地貌最为典型。总之,中国的红层地貌几乎包含了全球所有的红层地貌类型,是全球红层地貌发育的缩影。

国内外红层特征及地貌发育的对比总结见表1。

表1 国内外红层特征及地貌发育的对比

Table 1 Comparison of features and landform development of red beds in and outside China

对比要素	国内红层	国外红层
分布区域	主要分布在东南、西南、西北地区	各大洲均有分布
形成年代	中-新生代,尤以白垩纪为主	跨越多个地质年代,可分为前寒武纪、早古生代、晚古生代、中-新生代4阶段
地质构造背景	以古陆块活化区的断陷盆地为主,少数为拗陷盆地堆积	山前/山间拗陷/断陷堆积、地台拗陷堆积、裂谷盆地堆积和弧后盆地堆积
沉积相	全部为陆相	以陆相为主,兼具滨-浅海相和海陆过渡相
古气候环境	形成于干旱、半干旱气候,但中东部地区在新近纪时气候发生转换,形成季风性湿润气候	形成于干旱、半干旱气候,并且大多数地区继承了红层形成时的气候特征
岩性	兼具红色砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩等	以红色砂岩、粉砂岩和泥质岩为主,砾岩只在局部地区出露
地貌发育	地貌类型丰富多样,但以丹霞地貌最为典型	稳定陆块上的红层地貌类型相对单一,以红层高原、峡谷、台地、缓丘为主;但在构造复杂的山前/山间盆地,也有红层峰林/峰丛、孤峰、石柱等

4 结 论

1) 红层的分布遍布全球各大洲,国外红层从前寒武纪到新近纪均有发育,可分为前寒武纪、早古生代、晚古生代、中-新生代4大阶段;中国大规模的红层堆积形成于中-新生代,但以白垩纪为主,少有老红层堆积。总体上,全球红层发育呈现出从老陆块向新陆块扩展的趋势,分布范围不断扩大。在全球红层发育的大序列中,中国板块大规模的红层堆积出现最晚。

2) 在构造环境方面,国外红层可分为山前/山间拗陷堆积、地台拗陷堆积、裂谷盆地堆积和弧后盆地堆积。中国的红层主要形成于古陆块活化区

的断陷/拗陷盆地,充分反映了中-新生代以来中国大陆板块构造的特殊性。

3) 在古地理环境方面,国外红层以陆相为主,兼具滨-浅海相和海陆过渡相;中国红层几乎全部为陆相,缺少海相沉积。从气候环境看,全球红层基本都形成于干旱、半干旱的古气候条件,国外红层区大多继承了红层形成时的古气候,但中国中东部地区在新近纪时,气候环境发生了转换。

4) 在红层岩性和地貌发育方面,国外红层以砂岩、粉砂岩和泥岩为主,发育的地貌类型相对单一;中国的红层岩性复杂,兼具砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩,形成的地貌类型丰富多样,但以丹霞地貌最为典型,是全球红层地貌发育的缩影。

参考文献:

- [1] 彭 华.中国南方湿润区红层地貌及相关问题探讨[J].地理研究,2011,30(10):1739~1752.
- [2] 彭 华,潘志新,闫罗彬,等.国内外红层与丹霞地貌研究述评[J].地理学报,2013,68(9):1170~1181.
- [3] 曾昭璇,黄少敏.中国东南部红层地貌[J].华南师范学院学报(自然科学版),1978,(1):56~73.
- [4] 李廷勇,王建力.中国的红层及发育的地貌类型[J].四川师范大学学报(自然科学版),2002,25(4):427~431.
- [5] 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[J].水文地质工程地质,2007,(6):67~71.
- [6] 程 强,寇小兵,黄绍榕,等.中国红层的分布及地质环境特征[J].工程地质学报,2004,12(1):34~40.
- [7] 陈戴生,刘武生,贾立城.我国中新生代古气候演化及其对盆地砂岩型铀矿的控制作用[J].铀矿地质,2011,27(6): 321~326.
- [8] 吴根耀.白垩纪:中国及邻区板块构造演化的一个重要变换期[J].中国地质,2006,33(1):64~77.
- [9] 陈丕基.晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐湖化[J].地层学杂志,1997,21(3):203~213.
- [10] 陈隆勋,刘骥平,周秀骥,等.青藏高原隆起及海陆分布变化对亚洲大陆气候的影响[J].第四纪研究,1999,(4):314~329.
- [11] 李吉均,方小敏,潘保田,等.新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J].第四纪研究,2001,21(5): 381~391.
- [12] 彭 华.中国丹霞地貌研究进展[J].地理科学,2000,20(3): 203-211.
- [13] 周学军.中国丹霞地貌的南北差异及其旅游价值[J].山地学报, 2003,21(2):180~186.
- [14] 齐德利,于 蓉,张忍顺,等.中国丹霞地貌空间格局[J].地理学报,2005,60(1):41~52.
- [15] Kodama K,Takeda T.Paleomagnetism of mid-Cretaceous red beds in west-central Kyushu Island, southwest Japan paleoposition of Cretaceous sedimentary basins along the eastern margin of Asia[J].Earth and planetary Science Letters,2002,201(1): 233-246.
- [16] Yamashita I,Surinkum A,Wada Y,etal.Paleomagnetism of the Middle Late Jurassic to Cretaceous red beds from the Peninsular Thailand: Implications for collision tectonics[J].Journal of Asian Earth Sciences,2011,40(3):784-796.
- [17] Zaman H,Torill M.Paleomagnetic study of Cretaceous red beds from the eastern Hindukush ranges, northern Pakistan: paleoreconstruction of Kohistan-Karakoram composite unit before the India-Asia collision[J].Geophysical Journal International,1999,136(3):719-738.
- [18] Najman Y,Johnson K,White N,etal.Evolution of the Himalayan foreland basin, NW India[J].Basin Research,2004,16(1):1-24.
- [19] Vinnichenko G P,Kukhtikov M M.New data on Tertiary continental deposits of the southwestern Pamir[J].International Geology Review,1979,21(12):1377-1382.
- [20] Refaat A A,Imam M M.The Tayiba Red Beds: Transitional marine-continental deposits in the precursor Suez Rift, Sinai, Egypt [J].Journal of African Earth Sciences,1999,28(3):487-506.
- [21] Amireh B S,Schneider W,Abed A M.Evolving fluvial—transitional—marine deposition through the Cambrian sequence of Jordan[J].Sedimentary Geology,1994,89(1-2):65-90.
- [22] Strijker G,Bertotti G,Luthi S M.Multi-scale fracture network analysis from an outcrop analogue: A case study from the Cambro-Ordovician clastic succession in Petra, Jordan[J].Marine and Petroleum Geology,2012,38(1):104-116.
- [23] Martí J.Genesis of crystal-rich volcanoclastic facies in the Permian red beds of the Central Pyrenees (NE Spain)[J]. Sedimentary Geology,1996,106(1-2):1-19.
- [24] Kruijer P P,Dekkers M J,Langereis C G.Secular variation in Permian red beds from Dôme de Barrot, SE France[J]. Earth and Planetary Science Letters,2000,179(1):205-217.
- [25] Spötl C,Burns S J.Magnesite diagenesis in redbeds a case study from the Permian of the Northern Calcareous Alps (Tyrol, Austria)[J].Sedimentology,1994,41(3):543-565.
- [26] Melinte M C,Jipa D.Campanian-Maastrichtian marine red beds in Romania: biostratigraphic and genetic significance[J]. Cretaceous Research,2005,26(1):49-56.
- [27] Houghton P D W,Farrow C M.Compositional variation in Lower Old Red Sandstone detrital garnets from the Midland Valley of Scotland and the Anglo-Welsh Basin[J].Geological Magazine,1989,126(4):373-396.
- [28] Torsvik T H,Sturt B A,Ramsay D M,et al. Palaeomagnetism, magnetic fabrics and the structural style of the Hornelen Old Red Sandstone, Western Norway[J].Journal of the Geological Society,1988,145(3):413-430.
- [29] Uchman A,Drygant D,Paszowski M,etal.Early Devonian trace fossils in marine to non-marine redbeds in Podolia, Ukraine: palaeoenvironmental implications[J].Palaeogeography,Palaeoclimatology,Palaeoecology,2004,214(1-2): 67-83.
- [30] Morris T H,Ritter S M,Laycock D P. Geology unfolded—An Illustrated Guide to the Geology of Utah’s National Parks[M]. Provo:Brigham Young University Press,2010:1-72.
- [31] Mckee E D.The Supai Group of Grand Canyon[M].Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office,1982.
- [32] Walker T R,Larson E E,Hoblitt R P.Nature and origin of hematite in the Moenkopi Formation (Triassic), Colorado Plateau: a contribution to the origin of magnetism in red beds[J].Journal of Geophysical Research,1981,86(B1):317-333.
- [33] Blakey R C,Gubitosa R.Controls of sandstone body geometry and architecture in the Chinle Formation (Upper Triassic), Colorado Plateau[J].Sedimentary Geology,1984,38(1-4):51-86.
- [34] Tanner L H,Lucas S G.The Moenave Formation: Sedimentologic and stratigraphic context of the Triassic-Jurassic boundary in the Four Corners area, southwestern U.S.A[J].Palaeogeography,

- Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, **244**(1-4):111-125.
- [35] Jamison W R, Stearns D W. Tectonic Deformation of Wingate Sandstone, Colorado National Monument[J]. AAPG Bulletin, 1982, **66**(12):2584-2608.
- [36] Miall A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: anatomy of the Kayenta formation (lower Jurassic), Southwest Colorado[J]. Sedimentary Geology, 1988, **55**(3-4):233-240, 247-262.
- [37] Freeman W E, Visher G S. Stratigraphic analysis of the Navajo Sandstone[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1975, **45**(3):651-668.
- [38] Wright J C, Shawe D R, Lohman S W. Definition of Members of Jurassic Entrada Sandstone in East-Central Utah and West-Central Colorado[J]. AAPG Bulletin, 1962, **46**(11):2057-2070.
- [39] Bown T M, Hasiotis S T, Genise J F, et al. Trace fossils of Hymenoptera and other insects and paleoenvironments of the Claron Formation (Paleocene and Eocene), Southwestern Utah[R]. U.S. Geological Survey Bulletin, 1997, **2153**:41-58.
- [40] Biek R F, Willis G C, Hylland M D, et al. Geology of Zion National Park, Utah[A]. In: Sprinkel D A, Chidsey T C, Anderson P B (eds.). Geology of Utah's parks and Monuments[C]. Utah Geological Association Publication, 2000, **28**: 107-138.
- [41] Irving E, Opdyke N D. The Palaeomagnetism of the Bloomsburg Red Beds and its Possible Application to the Tectonic History of the Appalachians[J]. Geophysical Journal International, 1965, **9**(2-3):153-167.
- [42] 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[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, **83**(B9):4441-4450.
- [43] Mpodozis C, Arriagada C, Basso Matilde, et al. Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: Implications for the tectonic evolution of the Central Andes[J]. Tectonophysics, 2005, **399**(1-4):125-154.
- [44] Lamb S, Hoke L, Kennan L, et al. Cenozoic evolution of the Central Andes in Bolivia and northern Chile[J]. Geological Society Special Publication, 1997, **121**(1):237-264.
- [45] Mon R, Monaldi C R, Salfity J A. Curved structures and interference fold patterns associated with lateral ramps in the Eastern Cordillera, Central Andes of Argentina[J]. Tectonophysics, 2005, **399**(1-4):173-179.
- [46] Melchor R N. Trace fossil distribution in lacustrine deltas: examples from the Triassic rift lakes of the Ischigualasto-Villa Unión basin, Argentina[A]. In: McIlroy D (eds.). The application of ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis[C]. London: Geological Society Special Publication, 2004, 338-340.
- [47] Milani E J, Faccini U F, Scherer C M, et al. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná basin (Ordovician to Cretaceous), southern Brazil. Boletim IG-USP[J]. Série Científica, 1998, **29**:125-173.
- [48] Santos J C, Barreto A M F, Suguio K. Quaternary deposits in the Serra da Capivara National Park and surrounding area, Southeastern Piauí state, Brazil[J]. Geologia USP Série Científica, 2012, **12**(3):115-132.
- [49] Santos J O S, Potter P E, Reis N J, et al. Age, source, and regional stratigraphy of the Roraima Supergroup and Roraima-like outliers in northern South America based on U-Pb geochronology[J]. Geological Society of America Bulletin, 2003, **115**(3):331-348.
- [50] Roberts E M, O'Connor P M, Gottfried M D, et al. Revised stratigraphy and age of the Red Sandstone Group in the Rukwa Rift Basin, Tanzania[J]. Cretaceous Research, 2004, **25**(5):749-759.
- [51] Brown R H. Triassic Rocks of Argana Valley, Southern Morocco, and Their Regional Structural Implications[J]. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 1980, **64**(7):988-1003.
- [52] Hofmann A, Tourani A, Gaupp R. Cyclicity of Triassic to Lower Jurassic continental red beds of the Argana Valley, Morocco: implications for palaeoclimate and basin evolution[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, **161**(1-2):229-266.
- [53] Van Der Neut M, Eriksson P G, Callaghan C C. Distal alluvial fan sediments in early Proterozoic red beds of the Wilgerivier formation, Waterberg Group, South Africa[J]. Journal of African Earth Sciences (and the Middle East), 1991, **12**(4):537-547.
- [54] Petters S W. West African cratonic stratigraphic sequences[J]. Geology, 1979, **7**(11):528-531.
- [55] Villeneuve M. Paleozoic basins in West Africa and the Mauritanide thrust belt[J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, **43**(1-3):166-195.
- [56] Sweet I P, Brakel A T, Carson L. The Kombolgie Subgroup—a new look at an old 'formation' [J]. Australian Geological Survey Organization Research Newsletter, 1999, **30**:26-28.
- [57] Twidale C R, Migon P (ed.). Uluru (Ayers Rock) and Kata Tjuta (The Olgas): Inselbergs of Central Australia[M]. Geomorphological landscapes of the world, 2010:321-332.
- [58] Young R W. Sandstone landforms of the tropical East Kimberley region, northwestern Australia[J]. The Journal of Geology, 1987, **95**(2):205-218.
- [59] McPherson J. Stratigraphy and sedimentology of the Upper Devonian Aztec Siltstone, southern Victoria Land, Antarctica[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1978, **21**(6):667-683.
- [60] McLoughlin S, Drinnan A N. Fluvial sedimentology and revised stratigraphy of the Triassic Flagstone Bench Formation, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica[J]. Geological Magazine, 1997, **134**(6):781-806.
- [61] 任战利. 沉积盆地热演化史研究新进展[J]. 地球科学进展, 1992, **7**(3):43-49.
- [62] Rozovsky T A, Aydin A. Concentration of shearing deformation

related to changes in strike of monoclinial fold axes: the Water-pocket monocline, Utah[J].*Journal of Structural Geology*,2001,

23(10):1567-1579.

Comparative Study on the Global Distribution and Geomorphic Development of Red Beds

PAN Zhi-xin, PENG Hua

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: In order to advance our understanding on the temporal and spatial distribution law of red beds in the world and their differences in geomorphic development, a comparative study was conducted on the distribution, age, geological setting, paleogeographic environment, lithology, and geomorphic features of red beds in and outside China. It reveals that red beds in China are mainly distributed in southeast, southwest, and northwest China. They were mainly deposited in the Mesozoic Era, especially in Cretaceous. The major tectonic settings for the deposition of red beds in China are fault basins and depression basins in reactivated areas of paleo-landmass. Almost all red beds in China are continental deposits, which were formed in arid and semi-arid paleoclimate conditions, with a wide range of grain size, from coarse-grained conglomerates, through fine-grained sandstones and siltstones to mudstones. Various types of landform were developed on red beds in China, including Danxia landforms, red bed plateaus, red bed mountains, and red bed hills. By contrast, red beds outside China have a much wider range of age, from Precambrian to Neogene, indicating a trend of deposition from old landmass to young landmass. As for tectonic setting, it can be classified into four types: piedmont/intermountain depression deposition, platform depression deposition, rift basin deposition and back-arc basins. Most of them were continental deposits, with few littoral and transitional facies. The paleoclimate for the formation of these red beds was also arid and semi-arid climate. However, in lithology, most red beds outside China were composed of red sandstones, siltstones, and mudstones, with few coarse-grained deposits like conglomerates. Except in some piedmont/intermountain basins with complex tectonic setting, the types of red bed landforms developed in stable landmasses outside China are relatively simple.

Key words: red beds; temporal and spatial distribution; geomorphic development; global comparative research