

基于 DEM 的丹霞地貌演化阶段划分*

章桂芳^{1,2}, 陈凯伦¹, 张浩然¹, 张慧³

- (1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275;
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 基于 ASTER DEM 数据, 运用面积高程积分理论, 探索丹霞地貌发展阶段的定量划分。研究表明随着丹霞地貌从年轻到成熟的发育, 面积高程积分曲线形态从凸形转为凹形, 且凹形特征逐步加强, 而 HI 值则越来越小, 基本符合地貌演化的规律。同一地区不同区域的面积高程积分对比研究也表明其可以敏锐地反映丹霞地貌发育的多期性, 另外, 同一地区的对比研究表明丹霞地貌演化阶段存在普遍的尺度效应, 在进行面积高程积分的计算中需要充分考虑。

关键词: 丹霞地貌; DEM; 面积高程积分; 演化阶段; 定量研究

中图分类号: P931.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)02-0012-10

The evolution stage decision of Danxia landform based on digital elevation model (DEM)

ZHANG Guifang^{1,2}, CHEN Kailun¹, ZHANG Haoran¹, ZHANG Hui⁴

- (1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Based on the ASTER DEM data, this paper adopted hypsometric theory to study the quantitative representation of the evolution stages of Danxia landform. The result indicates that the hypsometric curve is changed from convex to concave with the development of Danxia landform from young to mature, and the concave features are gradually strengthened, while the HI value is getting smaller and smaller, which is consistent with the law of Danxia landform evolution. Based on the comparative study of different sub-zones in the same Danxia landform region, hypsometric curve and index can reflect the multi-stage evolution in the same Danxia landform region. In addition, the comparative study of the same area shows that there is a general scale effect in the evolution phase of Danxia landform, which needs to be fully considered in the calculation of hypsometric curve and index.

Key words: Danxia landform; DEM; hypsometry; evolution stage; quantitative research

* 收稿日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(41402297); 广东省自然科学基金(2014A030313116); 广州市科技计划项目(201707010209); 高校基本科研业务费青年教师培育基金(17lgpy49)

作者简介: 章桂芳(1981年生), 女; 研究方向: 地表过程的RS和GIS综合研究; E-mail: zhgfang@mail.sysu.edu.cn

丹霞地貌是指以陡崖坡为特征的红层地貌^[1]，目前中国已发现丹霞地貌共有 1 000 余处^[2]。自 20 世纪 30 年代末，陈国达提出“丹霞地形”以来^[3]，丹霞地貌的研究已经经历了初创、成型和发展 3 个阶段之后，2009 年开始了国际化研究阶段^[4]。虽然丹霞地貌研究已经取得不少成果^[4-5]，并且随着现代技术手段的发展，出现了一些涉及定量研究、微观实验和现代测试手段的精细研究实例^[6-16]。但是，从总体上来说，丹霞地貌基础研究仍然十分薄弱，多数研究偏重于宏观、定性的描述和推论，缺乏系统、定量和对比研究^[1]。

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 是地表形态的数字表达和模拟，蕴含着丰富的地形信息^[17]。高分辨率 DEM 数据的获取以及分析技术的不断突破使得 DEM 成为地形地貌研究领域不可或缺的重要技术手段^[18-26]，通过对 DEM 地貌参数的提取与分析来解决构造运动、阶地提取以及地貌发育阶段的确定等问题已被多数学者所接受^[20,27-39]。在 DEM 数据集中，航天飞机雷达地形测绘项目 (Shuttle Radar Topography Mission — SRTM) 提供的 DEM 数据覆盖了北纬 60° 至南纬 56° 范围内 80% 面积的区域^[40]，原始数据经处理后平面精度能够达到 ± 20 m，高程精度达到 ± 16 m^[41]，是目前使用广泛的全球地形数据^[42-43]。相对其在黄土地貌和喀斯特地貌等方面的大量应用^[44-49]，使用 DEM 进行丹霞地貌的相关研究则非常缺乏。

从本质上说，地表形态来源于地球内外力对地壳的综合作用^[50-51]，作为红层侵蚀地貌，丹霞地貌的发育和演化也受控于内动力和外动力两大动力系统^[1]，它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。黄进将其演化过程定性划

分为幼年期、壮年期、老年期 3 个阶段及“回春期”^[52]；彭华在“中国丹霞”申报世界自然遗产过程中，基于侵蚀量和保留量的对比关系，将“中国丹霞”6 个世界自然遗产提名地组成青年早期、青年晚期、壮年早期、壮年晚期、老年早期和老年晚期六个阶段的演化系列^[1]。

本次研究拟采用 DEM 数据，对贵州赤水、福建泰宁、湖南崀山、广东丹霞山、江西龙虎山和浙江江郎山等 6 个丹霞地貌遗产地计算面积高程积分曲线及积分值，以期对丹霞地貌的不同发展阶段提供定量划分依据，促进丹霞地貌演化模式的定量研究进程。

1 数据与方法

1.1 基础数据

本次研究选取的是中国丹霞 6 个遗产地提名序列，分别为贵州赤水、福建泰宁、湖南崀山、广东丹霞山、江西龙虎山和浙江江郎山，他们代表了丹霞地貌从青年到老年的演化序列，均分布在中国南方 (图 1a)。需要说明的是：赤水的东西部和泰宁的南北部的地貌发育存在较大的区域差异，因此对这两个地区分别进行分区研究。

研究采用 ASTER DEM 数据 (V2 版)，来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)，空间分辨率为 30 m。根据世界自然遗产保护区划定范围裁剪研究区域 DEM (图 1b-i)，并对其面积和高程信息统计如下 (表 1)：赤水东部、丹霞山和龙虎山的面积最大，而江郎山的面积最小，为 13.05 km²；赤水地区因地处云贵高原边缘，高程最低值、最高值和平均值均为所有地区的最大值，而泰宁地区的高程差最小 (北部为 384 m，南部为 403 m)，说明其地势起伏是所有地区中最小的。

表 1 各个丹霞地貌区域面积和高程信息统计

Table 1 Area and elevation statistics of the Danxia sites

地区	面积/km ²	高程/m			高程差/m	均方差
		最低值	最高值	平均值		
赤水西部	111.02	508	1 288	1 020	780	132
赤水东部	188.63	403	1 708	1 098	1 305	206
泰宁北部	98.50	256	558	302	384	41
泰宁南部	52.41	250	653	395	403	57
崀山	69.47	243	807	449	564	90
丹霞山	183.84	33	589	182	556	80
龙虎山	183.15	5	1 112	177	1 107	204
江郎山	13.05	160	994	446	834	196

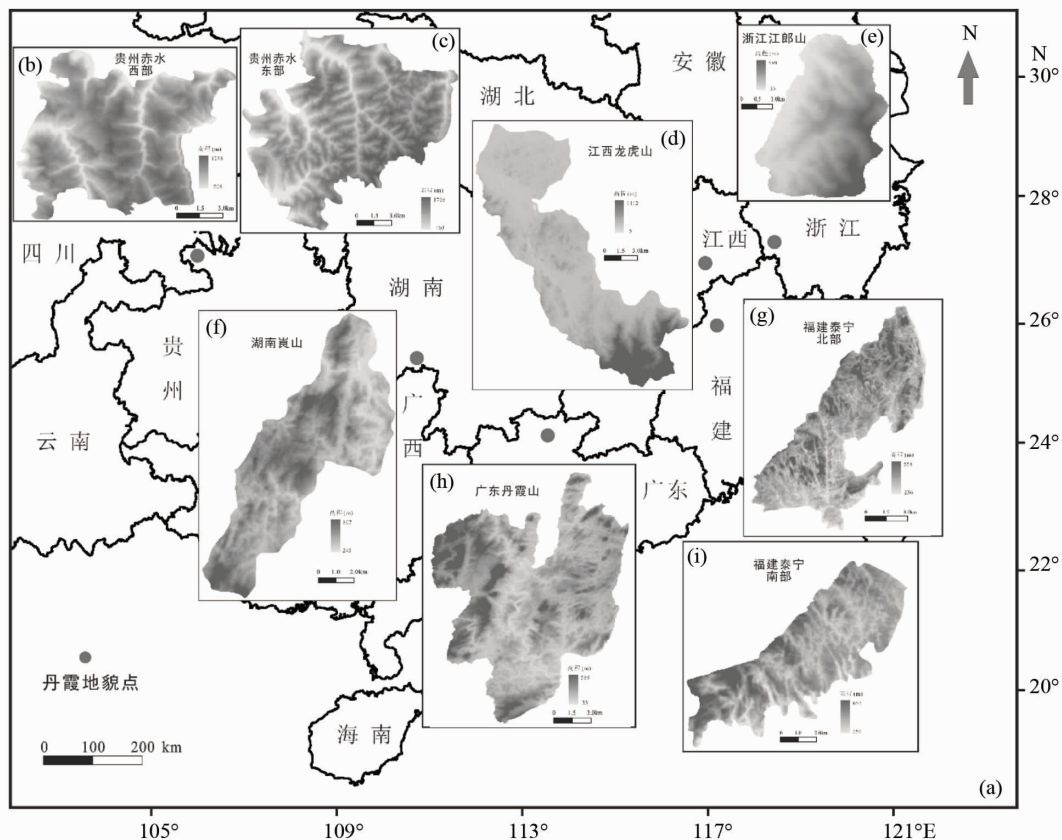


图 1 各丹霞地貌研究区域的位置及 DEM

Fig. 1 Location of Danxia sites and DEM in this study

1.2 研究方法

本次研究主要采用 Strahler 提出的面积高程积分 (Hypsometric Integral, 简称 HI)^[53], 该方法通过面积高程积分将 Davies 的地貌发育模式量化, 分为 3 个阶段: 幼年阶段 ($HI > 0.6$), 壮年阶段 ($0.4 < HI < 0.6$), 老年阶段 ($HI < 0.4$)^[53]。面积高程积分主要依据区域水平断面面积与其高程关系来描述地貌的发育状态, 其表现形式有积分值和积分曲线两种: 如果某一区域内的地形演化处于较为年轻的阶段, 侵蚀作用相对较弱, 则其面积高程曲线呈现凸形, 积分值 HI 较高; 如果地形演化时间较长, 侵蚀程度较高, 则其面积高程曲线呈现凹形, 面积高程积分值 HI 较低; 如果积分曲线呈现 S 形, 则表示该区域地形发育接近成熟^[54]。目前, 面积高程积分已经成为地貌定量分析的重要方法^[21, 26, 55-59]。

面积高程积分值的计算方法有积分曲线法、体积比例法和起伏比法等^[60], 本次研究采用积分曲线法, 计算过程如下:

① 将流域的高差无限细分, 分别求取大于每一细分单元高程值的流域面积, 并将其均一化后,

作为 x 值, 即 $x_i = a_i/A$ (x_i 为大于第 i 分级高程的面积百分比, a_i 为大于第 i 分级高程的面积, A 为流域总面积);

② 高差细分的高程均一化值作为 y 值, 即 $y_i = h_i/H$ (y_i 为第 i 分级相对高差百分比, h_i 为第 i 分级高程与流域最低点的相对高差, H 为流域内高差);

③ 将各点展布到直角坐标系中, 形成一条直线, 即 $y = f(x)$;

④ 求取 0~1 范围内的积分值 $s = \int_0^1 f(x) ds$, 则得到面积高程积分值 (值域区间 0~1), 而在坐标系中绘制的曲线则是面积高程积分曲线^[53]。

2 结果与讨论

2.1 面积高程积分结果

采用积分曲线法对各个丹霞区域的 DEM 数据计算获得的面积高程积分曲线如图 2 所示, 面积高程积分则如表 2 所示, 考虑到图件的清晰表达, 图 2 中仅显示赤水西部和泰宁北部的面积高程积分曲线, 赤水东部和泰宁南部的曲线将在后面的讨论中呈现。由图 2 可知, 赤水西部地区的曲线呈现凸

形特征，结合其面积高程积分值为 0.65，表明该地区处于较年轻的演化阶段；泰宁北部、崑山和丹霞山的曲线呈现 S 状，表明该区域地貌已经演化至较为成熟的阶段，且从泰宁北部到崑山到丹霞山的曲线的凹形特征逐步加强，则表明这 3 个区域的地貌演化越来越成熟；龙虎山的曲线在相对高程较高的部分（相对高程 h/H 在 0.3 ~ 1.0 左右）斜率很大，在相对高程较低的部分（相对高程 h/H 在 0 ~ 0.3 左右）则趋于平缓，这说明龙虎山地区地势较高的区域面积占比较小，而地势较低的区域占了很大比例。

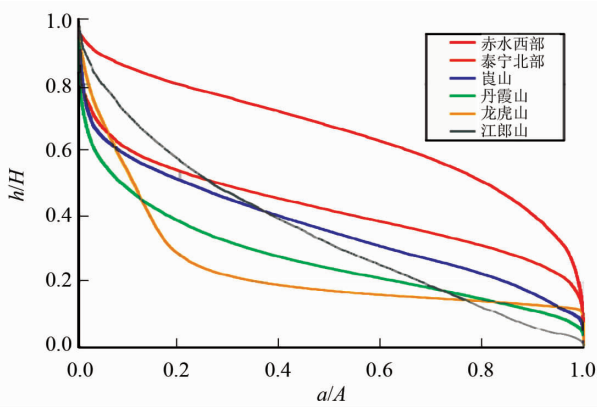


图 2 各丹霞地貌区面积高程积分曲线汇总表
Fig. 2 Hypsometric curves of the Danxia sites

从总体特征来看，从赤水西部到龙虎山，随着丹霞地貌的发育程度逐渐成熟，面积高程积分曲线形态从凸形转为凹形，且凹形特征逐步加强，说明随着丹霞地貌的发育，地层侵蚀量在不断增加，符合发育过程中侵蚀量的变化特征。分析表 2 中各个丹霞区域的面积高程积分值可以发现赤水东西部和泰宁南北部的面积高程积分均具有较大的差异；与 Strahler 划分的地貌发展阶段标准进行对比，丹霞地貌的 HI 值整体偏小，即向老年期偏移。需要指出的是，龙虎山（老年早期）和丹霞山（壮年晚期）在丹霞地貌世界遗产提名地序列中的发育阶段比江郎山（老年晚期）年轻，但是它们的曲线形态与此并不相符（图 2），而且龙虎山和丹霞山的面积高程积分值均低于江郎山（表 2），似乎违背规律，其原因与龙虎山和丹霞山地貌发育的区域差异关系密切，即与研究区的范围密切相关，接下来作详细分析。

2.2 区域差异性对比

丹霞地貌的发育受控于内动力和外动力 2 大因素^[1]，即使在同一地区，影响丹霞地貌发育的因素及其强度也不尽相同，因此在同一地区保留了不同演化阶段的地貌形态，呈现出区域的差异性。下面选取赤水、泰宁、丹霞山和龙虎山进行同一区域的差异性对比研究。

表 2 各个丹霞地貌区域面积高程积分值
Table 2 Hypsometric indexes of the Danxia sites

项目	赤水西部	赤水东部	泰宁北部	泰宁南部	崑山	丹霞山	龙虎山	江郎山
面积高程积分值	0.65	0.53	0.43	0.36	0.37	0.27	0.24	0.35
已定义发育阶段	青年早期	青年晚期	青年晚期	壮年早期	壮年早期	壮年晚期	老年早期	老年晚期

2.2.1 赤水西部和东部 “赤水丹霞”是发育于亚热带巨型红层盆地南缘的高原——峡谷型和山岭型丹霞景观，是侏罗系、白垩系的红层经过第三纪长期剥蚀夷平后在第四纪强烈抬升过程中因流水的快速切割而形成的^[61-62]。贵州赤水的东部和西部地区由赤水河自然分割（图 3a），东部以流水深度侵蚀切割形成山原峡谷地貌，西部河流切割程度小，呈高原峡谷地貌，显示其发育中的区域差异，因此将赤水分为东西两片区域进行差异性对比研究。计算获得东西两区面积高程积分曲线及 HI 值如图 3b 所示：赤水东区和西区的曲线均呈现凸形特征，HI 值均大于 0.5，说明两区发育程度都较为年轻，但是西区的凸形特征比东区更为显著，HI 值也较东区大得较多，表明西区地貌侵蚀程度比东区低，

符合东西两区的现有的地貌特征。

2.2.2 泰宁北部和南部 泰宁盆地是在华夏古板块武夷山隆起带背景上发育的白垩纪红色断陷盆地，由朱口和梅口两个北东向红色盆地构成，构成了泰宁丹霞的北部和南部（图 4a）。泰宁盆地的丹霞地貌是由白垩纪红层经过第三纪以来多次抬升和长期剥蚀夷平，以流水切割、侵蚀为主因而形成的。与赤水类似，泰宁的两个盆地中的丹霞地貌也具有区域的差异性。

图 4b 为计算获得的泰宁北部和南部的面积高程积分曲线及 HI 值，两者的曲线均呈现凹形特征且 HI 值小于 0.5（分别为北部 0.43，南部 0.36），显示两者均处于侵蚀量大于保存量的阶段，北部地区的曲线在南部之上且相距较远，显示其发育程度

比南部地区年轻且差距较大。据已有研究,北部的朱口盆地红层地壳抬升相对较晚,地貌发育时间较短,所以呈现以深切峡谷曲流等为特征的典型的青年期丹霞特征,而其南部的梅口盆地则以发展到壮年期的丹霞地貌为主,呈现丹霞峰丛景观。所以本研究获得的面积高程积分曲线及 HI 值印证了泰宁盆地的丹霞发育由于地壳抬升时间、抬升幅度和抬

升速度的差异而存在较大的区域差异。

2.2.3 丹霞山东部和西部 丹霞山发育在南岭褶皱带的白垩纪构造盆地丹霞盆地中,锦江由北到南穿越而过(图 5a),将丹霞山分为东西两个部分。丹霞山主要由近水平岩层构成,总体上处于地貌发育的壮年期阶段,表现出疏密相间,组合有序的簇群式丹霞峰丛——峰林景观。

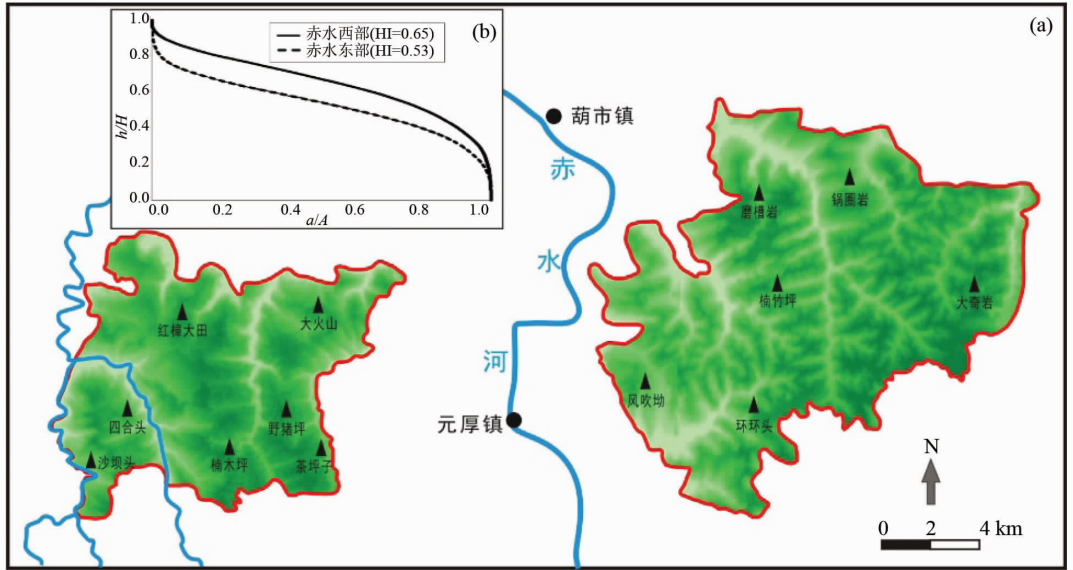


图 3 赤水东西两区面积高程积分对比

Fig. 3 Hypsometric curves of the eastern and western parts of Chishui

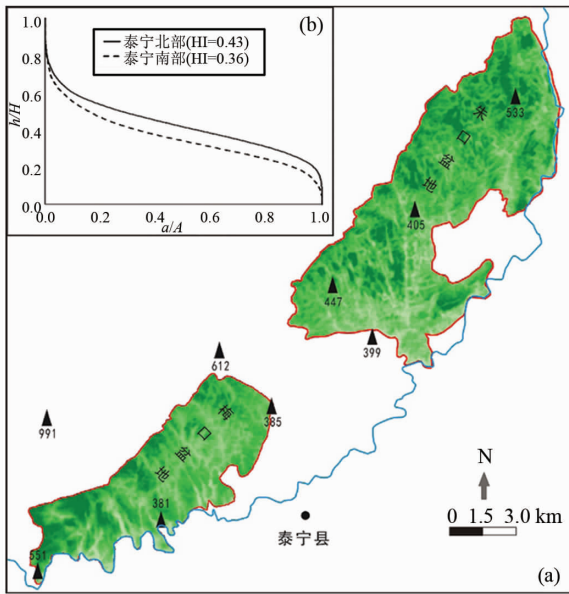


图 4 泰宁南北两区面积高程积分对比

Fig. 4 Hypsometric curves of the northern and southern parts of Taining

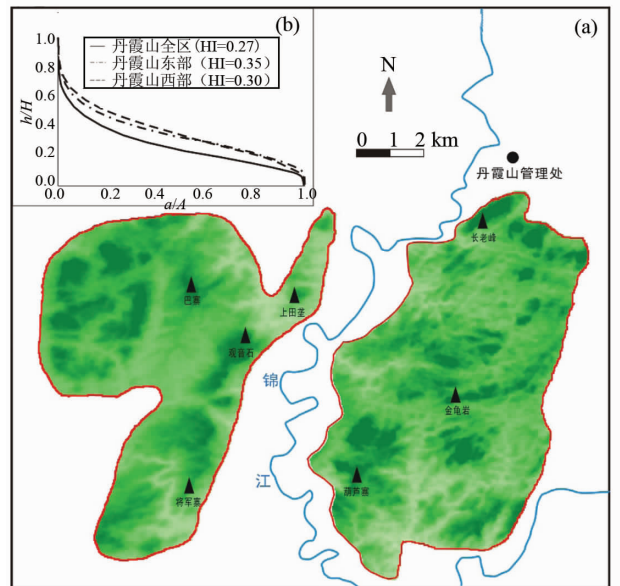


图 5 丹霞山东西两区面积高程积分对比

Fig. 5 Hypsometric curves of the eastern and western parts of Danxiashan

以丹霞山为整体计算获得的面积高程积分曲线呈现强烈凹形特征（图 2），HI 值为 0.27（表 2），比发育阶段为老年晚期的江郎山的 HI 值更小，似乎并不合理。因此，本研究尝试以锦江为界，分别计算东西两区的面积积分曲线及 HI 值（图 5b），结果表明丹霞山东西两区的 HI 值非常相近，分别为 0.35 和 0.36，说明广东丹霞山东西两侧丹霞地貌的总体发育程度较为相近。而两者的积分值与包含锦江的整个区域计算获得的 0.27 有明显差距，说明锦江两岸区域的地貌形态极大地影响了整个丹霞山区域的地貌发育程度。分析原因可能与区域内的锦江密切相关，因为锦江流经丹霞山地区的主河道多为宽谷，造成两岸区域地势平缓，在面积高程积分中则表现为强烈的侵蚀。丹霞山的分析结果进一步表明不同的区域尺度内获得的 HI 值具有很大的差距，同时表明面积高程积分可以敏锐地指示丹霞地貌发育的多期性。

2.2.4 龙虎山全区和核心区 龙虎山发育在中生代陆相盆地——信江盆地边缘，泸溪河穿区而过，是由晚白垩纪红色碎屑岩组成的疏散峰林宽谷型丹霞地貌区，而龙虎山地质公园则为龙虎山丹霞地貌区域的核心（图 6a）。

研究尝试只计算龙虎山的核心区域（龙虎山地质公园）的面积高程积分，结果显示其 HI 值达到了 0.47，几乎达到是龙虎山全区的 2 倍。究其原因，应该与泸溪河谷密切相关，泸溪河谷两侧主要为准平原化的低丘岗地，龙虎山和龟峰等地保存的峰丛、峰林、孤峰、残丘等为该区仅存的高地势区域。龙虎山准平原化代表了地貌发育的老年阶段，因此对于龙虎山地区的面积高程积分计算受到区域尺度的巨大影响，这也印证了面积高程积分在丹霞地貌演化定量研究中具有很好的指示作用。

3 结 论

本次研究尝试将面积高程积分方法用于丹霞地貌演化阶段的定量划分，主要取得以下几点认识：

1) 不同丹霞区域的面积高程积分研究结果表明面积高程积分可以较好地指示丹霞地貌的不同演化阶段：随着丹霞地貌从年轻到成熟的发育，面积高程积分曲线形态从凸形转为凹形，且凹形特征逐步加强，HI 值也越来越小，符合不同发育阶段所代表的侵蚀量的变化。

2) 将各个丹霞区域的面积高程积分值与 Strahler 划分的地貌发展阶段标准进行对比，发现丹霞地貌的 HI 值整体往老年期偏移，这与中国丹霞演化系列是建立在几个代表小区的基础上有关，这提示我们丹霞地貌发育阶段的量化研究与研究区的划定密切相关。

3) 同一地区不同区域的面积高程积分对比研究表明其可以敏锐地反映丹霞地貌发育的多期性，对于定量研究丹霞地貌具有重要作用。丹霞地貌发育的区域差异是进行丹霞演化阶段确定中极其重要的影响因素，在进行面积高程积分的计算中需要充分考虑。

致谢：感谢中山大学地理科学与规划学院彭华教授在本次研究和论文撰写中给予的指导和帮助。

参考文献：

[1] 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, 64(9): 1170 - 1181.
 PENG H, PAN Z X, YAN L B, et al. A review of the research on red beds and Danxia landform [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 64(9): 1170 - 1181.

[2] 黄进, 陈致均, 齐德利. 中国丹霞地貌分布(下)[J]. 山地学报, 2015, 33(4): 649 - 673.
 HUANG J, CHEN Z J, QI D L. The distribution of Danxia landform in China [J]. Mountain Research,

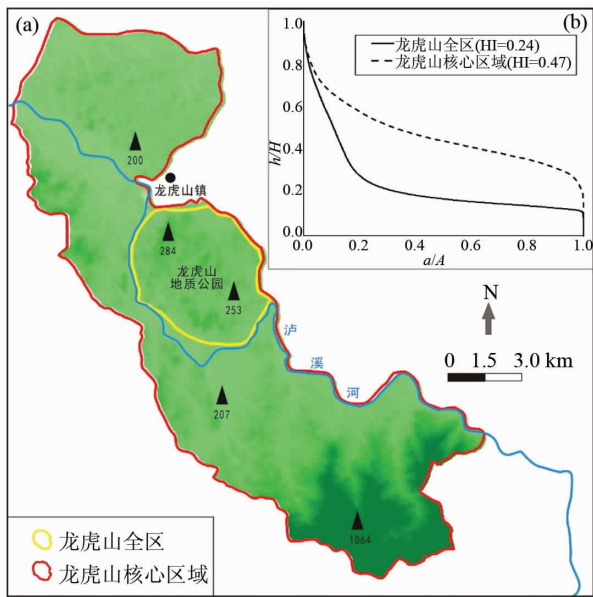


图 6 龙虎山全区和核心区域面积高程积分对比

Fig. 6 Hypsometric curves of the whole area and center part of Longhushan

与丹霞山类似，以龙虎山全区为整体计算获得的面积高程积分值为 0.24（表 2），比发育阶段为老年晚期的江郎山的 HI 值（0.35）更小，因此本

- 2015, 33(4): 649–673.
- [3] 陈国达, 刘辉泗. 江西贡水流域地质[J]. 江西地质汇刊, 1939(2): 164.
CHEN G D, LIU H S. Geology of Gongshui valley, Jiangxi[J]. Geological Transactions of Jiangxi, 1939(2): 1–64.
- [4] 彭华. 中国丹霞地貌研究进展[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 203–211.
PENG H. A survey of the Danxia Landform research in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(3): 203–211.
- [5] 朱诚, 马春梅, 张广胜, 等. 中国典型丹霞地貌成因研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHU C, MA C M, ZHANG G S, et al. Development mechanisms of the typical Danxia landforms in China [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [6] 郭国林, 郭福生, 刘晓东, 等. 丹霞地貌砂岩的微观化学风化作用电子探针研究[J]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 172–176.
GUO G L, GUO F S, LIU X D, et al. Study by Epma on microcosmic chemical weathering to sandstone in Danxia landform [J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(2): 172–176.
- [7] 姜勇彪, 郭福生, 刘林清, 等. 龙虎山丹霞地貌区河流阶地地貌面的热释光测年研究[J]. 东华理工大学学报, 2006, 29(3): 225–228.
JIANG Y B, GUO F S, LIU L Q, et al. TL dating research of geomorphic surface on lower terraces of rives in Longhushang Danxia landform areas [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006, 29(3): 225–228.
- [8] 黄进. 丹霞地貌区地壳上升速率公式改进及其意义[J]. 经济地理, 2006, 26(增刊): 8–13.
HUANG J. Improvement on the formula used to calculate tectonic uplift rates in Danxia landforms areas and its significance [J]. Economic Geography, 2006, 26(Suppl): 8–13.
- [9] 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 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 170–174.
CHEN S, ZHU C, PENG H, et al. Anti-Pressure experimental study on rocks in level cave of Jinshiyuan of Danxiashan in Guangdong province [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2010, 33(2): 170–174.
- [10] 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[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 21–32.
ZHU C, PENG H, LI Z X, et al. Age and genesis of the Danxia Landform on Jianglang mountains, Zhejiang Province [J]. Journal of Geographical Science, 2009, 64(1): 21–32.
- [11] 朱诚, 彭华, 欧阳杰, 等. 浙江方岩丹霞地貌发育的年代、成因与特色研究[J]. 地理科学, 2009b, 29(2): 229–237.
ZHU C, PENG H, OUYANG J, et al. Age genesis and characteristics of Danxia landform of Fangyan in Zhejiang province, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009b, 29(2): 229–237.
- [12] ZHU C, PENG H, OUYANG J, et al. Rock resistance and the development of horizontal grooves on Danxia slopes [J]. Geomorphology, 2010, 123(1): 84–96.
- [13] 欧阳杰, 朱诚, 彭华, 等. 湖南崑山丹霞地貌岩体抗酸侵蚀脆弱性的实验研究[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 965–970.
OUYANG J, ZHU C, PENG H, et al. Experimental research on vulnerability of Danxia rocks to resistance against acid erosion in Langshan, Hunan Province [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 965–970.
- [14] 彭华, 邱卓炜, 潘志新. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究[J]. 地理科学, 2014, 34(4): 454–463.
PENG H, QIU Z W, PAN Z X. Experimental study on the weathering features of bedding caves at Mt Danxiashan [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(4): 454–463.
- [15] 齐德利, 陈致均, 王随继, 等. 崑山丹霞地貌地层归属演化及地貌年龄[J]. 山地学报, 2015, 33(4): 408–415.
QI D L, CHEN Z J, WANG S J, et al. Stratigraphic classification, evolution stage and geomorphologic age of Kongtongshan Danxia landform in Pingliang, Gansu, China [J]. Mountain Research, 2015, 33(4): 408–415.
- [16] 陈智, 彭华, GREIF V 等. 红层软岩夹层的物质组成与结构特征对其力学性质影响的定量研究——以崑山世界自然遗产地雷劈石为例[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(4): 139–150.
CHEN Z, PENG H, GREIF V, et al. Analysis of mineralogical composition and texture to quantify the mechanical properties of red bed soft rock: a case study of Leipi Rock at world heritage site, Mt Langshan in Hunan province [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(4): 139–150.
- [17] SUMMERFIELD M A. Geomorphology and global tectonics [M]. London: John Wiley & Sons Ltd Press, 2000.
- [18] PHILIP T G. Geomorphologic signatures: Classification of aggregated slope unit objects from digital elevation and remote sensing data [J]. Earth Surface Processes and

- Landforms, 1998, 23(7): 581 - 594.
- [19] 张会平, 杨农, 张岳桥, 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 126 - 135.
ZHANG H P, YANG N, ZHANG Y Q, et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26 (1): 126 - 135.
- [20] DEMOULIN A. An automated method to extract fluvial terraces from digital elevation models: The Vesdre valley, a case study in eastern Belgium [J]. Geomorphology, 2007, 91(1/2): 51 - 64.
- [21] 李利波, 徐刚, 胡健民, 等. 基于 DEM 渭河上游流域的活动构造量化分析 [J]. 第四纪研究, 2012, 32(5): 866 - 879.
LI L B, XU G, HU J M, et al. Quantitative analysis of relative active tectonics of the upstream region of Weihe River based on DEM [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32 (5): 866 - 879.
- [22] TAROLLI P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges [J]. Geomorphology, 2014, 216(1): 295 - 312.
- [23] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(09): 1305 - 1325.
TANG G A. Progress of DEM and digital terrain analysis in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69 (09): 1305 - 1325.
- [24] TAUFIK M, PUTRA Y S, HAYATI N. The utilization of global digital elevation model for watershed management: A case study: Bungbuntu sub watershed, pamekasan [J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 24: 297 - 302.
- [25] TARQUINI S, NANPIERI L. The 10 m-resolution TINALLY DEM as a trans-disciplinary basis for the analysis of the Italian territory: Current trends and new perspectives [J]. Geomorphology, 2017, 281: 108 - 115.
- [26] 谢超, 周本刚, 李正芳. 东喜马拉雅构造结地貌形态及其构造指示意义[J]. 地震地质, 2017, 39(2): 276 - 286.
XIE C, ZHOU B G, LI Z F. Geomorphic features of Eastern Himalayan syntaxis and its tectonic implications [J]. Seismology and Geology, 2017, 39 (2): 276 - 286.
- [27] 施炜. 黄河中游晋陕峡谷的 DEM 流域特征分析及其新构造意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 288 - 298.
SHI W. DEM drainage analysis of the Shanxi-Shaanxi Gorge in the middle reaches of the Huanghe River and its neotectonic implications [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28 (2): 288 - 298.
- [28] FONT M, AMORESE D, LAGARDE J L. DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: the Normandy intraplate area (NW France) [J]. Geomorphology, 2010, 119(3): 172 - 180.
- [29] 张会平, 张培震, 郑德文, 等. 祁连山构造地貌特征: 青藏高原东北缘晚新生代构造变形和地貌演化过程的启示[J]. 第四纪研究, 2012, 32(5): 907 - 920.
ZHANG H P, ZHANG P Z, ZHENG D W, et al. Tectonic geomorphology of the Qilian Shan: insights into the Late Cenozoic landscape evolution and deformation in the north eastern Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32 (5): 907 - 917.
- [30] 宋效东, 刘学军, 汤国安, 等. DEM 与地形分析的并行计算[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(4): 1 - 7.
SONG X D, LIU X J, TANG G A, et al. Parallel computing of the digital elevation model and digital terrain analysis [J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(4): 1 - 7.
- [31] 王岩, 刘少峰, 高明星, 等. 洮河水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 43 - 49.
WANG Y, LIU S F, GAO M X, et al. Geomorphology of the Taohe River drainage system and its structural implications [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (4): 43 - 49.
- [32] 胡小飞, 潘保田, KIRBY E, 等. 河道陡峭指数所反映的祁连山北翼抬升速率的东西差异[J]. 科学通报, 2010, 55(23): 2329 - 2338.
HU X F, PAN B T, KIRBY E, et al. Spatial differences in rock uplift rates inferred from channel steepness indices along the northern flank of the Qilian Mountain, northeast Tibetan Plateau [J]. Science China Press, 2010, 55(23): 2329 - 2338.
- [33] 宋卓沁. 青藏高原东缘典型河流地貌及其活动构造指示[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2014.
- [34] MAZZOLI S, ASCIONE A, BUSCHER J T, et al. Low-angle normal faulting and focused exhumation associated with late Pliocene change in tectonic style in the southern Apennines (Italy) [J]. Tectonics, 2014, 33(9): 1802 - 1818.
- [35] ROBERTS G P, MESCHIS M, HOUGHTON S, et al. The implications of revised Quaternary palaeoshoreline chronologies for the rates of active extension and uplift in the upper plate of subduction zones [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 78 (11): 169 - 187.

- [36] SCHELLEKENS J, BROLSMA R J, DAHM R J, et al. Rapid setup of hydrological and hydraulic models using OpenStreetMap and the SRTM derived digital elevation model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 61(C): 98–105.
- [37] ZHANG H P, ZHANG P Z, ZHENG D W, et al. Transforming the Miocene Altyn Tagh fault slip into shortening of the northeastern Qilian Shan: Insights from the drainage basin geometry [J]. *Terra Nova*, 2014, 26(3): 216–221.
- [38] DOMENEGHETTI A, CARISI F, CASTELLARIN A, et al. Evolution of flood risk over large areas: quantitative assessment for the Po river [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 809–823.
- [39] 苏琦, 袁道阳, 谢虹. 祁连山东段石羊河流域及邻区地貌特征及其构造意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(1): 7–20.
SU Q, YUAN D Y, XIE H. Geomorphic features of the Shiyang river drainage basin and adjacent area in Eastern Qilian Mountains and its insight into tectonic implications [J]. *Geological Review*, 2017, 63(1): 7–20.
- [40] FARR T G, KOBRICK M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data [J]. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 2000, 81(48): 583–585.
- [41] BERNHARD R, MICHAEL E, ACHIM R, RICHARD B. The Shuttle Radar Topography Mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, 57(4): 241–262.
- [42] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission [J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 1–34.
- [43] O'LOUGHLIN F E, PAIVA R C D, DURAND M, et al. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 182: 49–59.
- [44] 周毅, 汤国安, 王春, 等. 基于高分辨率 DEM 的黄土地貌正负地形自动分割技术研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 261–266.
ZHOU Y, TANG G AN, WANG C, et al. Automatic segmentation of Loess positive and negative terrains based on high resolution grid DEMs [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 261–266.
- [45] 罗伟, 鄢志武, 薛重生. 基于 DEM 的岩溶地区地形地貌特征提取与分析[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 47(3): 436–439.
LUO W, YAN Z W, XUE C S. Extraction and analysis of the topography in Karst area based on DEM [J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences)*, 2013, 47(3): 436–439.
- [46] 祝世杰, 汤国安, 李发源, 等. 基于 DEM 的黄土高原面积高程积分研究[J]. *地理学报*, 2013, 68(71): 921–932.
ZHU S J, TANG G AN, LI F Y, XIONG L Y, et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(71): 921–932.
- [47] 熊礼阳, 汤国安, 袁宝印, 等. 基于 DEM 的黄土高原(重点流失区)地貌演化的继承性研究[J]. *中国科学(地球科学)*, 2014, 57(2): 313–321.
XIONG L Y, TANG G A, YUAN B Y, et al. Geomorphological inheritance for loess landform evolution in a severe soil erosion region of Loess Plateau of China based on digital elevation models [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2014, 57(2): 313–321.
- [48] 李飞, 杨小平, 郝红科. 基于 DEM 对喀斯特地貌山地及水系信息的提取——以桂林阳朔县为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(8): 73–76.
LI F, YANG X P, HAO H K. Based on the DEM of Karst landform mountain and water system of information extraction: with Yangshuo County as an example [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(8): 73–76.
- [49] 杨先武, 钱叶青, 郑春霞. 喀斯特峰林峰丛地貌形态表达研究综述[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(4): 22–27.
YANG X W, QIAN Y Q, ZHENG C X. Research review on the morphology of Karst fenglin and fengcong landforms [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(4): 22–27.
- [50] HENGL T, REUTER H I. *Geomorphometry: concepts, software, applications-developments in soil science*, Vol 33 [M]. Hungary: Elsevier, 2009.
- [51] HENGL T, REUTER H I. *Geomorphometry: concepts, software, applications-developments in soil science*, Vol 33 [M]. Hungary: Elsevier, 2009.
- [52] 黄进. 丹霞地貌坡面发育的一种基本方式[J]. *热带地理*, 1982, 3(2): 107–134.
HUANG J. A basic model of the slope development of Danxia landform [J]. *Tropical Geography*, 1982, 3(2): 107–134.
- [53] STRAHLER A N. Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1952, 63: 1117–1142.
- [54] PÉREZ-PEÑA V J, AZOR A, AZAÑÓN J M, et al. Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage

- pattern analysis [J]. *Geomorphology*, 2010, 119 (1/2): 74 – 87.
- [55] BROCKLEHUST S H, WHIPPLE K X. Hypsometry of glaciated landscapes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(7): 907 – 926.
- [56] ANSAN V, MANGOLD N. New observations of Warrego Valleys, Mars: evidence for precipitation and surface runoff [J]. *Planetary and Space Science*, 2006 (54): 219 – 242.
- [57] 张敬春, 李川川, 张梅, 等. 格尔木河流域面积 – 高程积分值的地貌学分析[J]. *山地学报*, 2011, 29 (3): 257 – 268.
ZHANG J C, LI C C, ZHANG M, et al. Geomorphologic analysis of the Golmud River drainage basin based on hypsometric integral value [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(3): 257 – 268.
- [58] 祝世杰, 汤国安, 李发源, 等. 基于 DEM 的黄土高原面积高程积分研究[J]. *地理学报*, 2013, 68 (71): 921 – 932.
ZHU S J, TANG G A, LI F Y, et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68 (71): 921 – 932.
- [59] 高明星, 陈桂华, 徐锡伟. 地貌参数指示的临潭 – 宕昌断裂带最新构造隆升差异与地震活动[J]. *地震地质*, 2015, 37(3): 709 – 718.
- GAO M X, CHEN G H, XU X W. Geomorphic indices indicated recent differential tectonic uplift of the Lintan-Dangchang Fault and the Minxian-Zhangxian earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(3): 709 – 718.
- [60] 苏琦, 袁道阳, 谢虹. 祁连山 – 河西走廊黑河流域地貌特征及其构造意义[J]. *地震地质*, 2016, 38(3): 560 – 581.
SU Q, YUAN D Y, XIE H. Geomorphic features of the Heihe river drainage basin in western Qilian shan-hexi corridor and its tectonic implications [J]. *Seismology and Geology*, 2016, 38(3): 560 – 581.
- [61] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 面积高程积分值计算方法的比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 171 – 175.
CHANG Z Y, WANG J, BAI S B, et al. Comparison of hypsometric integral methods [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29 (3): 171 – 175.
- [62] 熊康宁, 肖时珍. 世界遗产与赤水丹霞奇观[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
XIONG K N, XIAO S Z. World heritage and Chishui Danxia landscape [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.