

再现中国地史期化石夷平面

冯金良^{①②} 崔之久^{①*}

(^①北京大学城市与环境学系, 北京 100871; ^②河北省科学院地理研究所, 石家庄 050011.* 联系人, E-mail: czj_pku@263.net)

摘要 依据侵蚀不整合面性质、古风化壳及风化残余型矿床的发育、古岩溶及不整合面下古岩溶充填富集型矿床的发育以及不整合面盖层沉积特征及环境等特征信息, 确认并恢复了华北古陆与扬子古陆在地史期发育的两期化石夷平面, 其发育时间分别为中奥陶世至早石炭世期间和早、晚二叠世期间. 化石夷平面的古坡降一般在 0.31‰~1.32‰之间, 大多小于 1.0‰. 根据古岩溶的发育深度, 初步确认, 华北古陆化石夷平面苏桥潜山地区古海拔高度约为 300 m 左右.

关键词 化石夷平面 特征信息 古地貌重建

19 世纪末, 在有关“地理循环”及“准平原”理论的讨论中, Davis 提出了化石准平原(fossil peneplain)这一概念, 并依据地层中存在的化石夷平面来验证其准平原理论的正确性^[1,2]. 20 世纪中期前苏联学者依据当时文献, 对化石夷平面的时空分布规律进行了统计分析^[3]. 20 世纪中后期, 矿床地质(经济地质)学家在对古岩溶及残积型矿床的形成环境及富集规律研究的基础上, 提出了铝土矿均与古准平原(old peneplains)或侵蚀面(erosion surface)有关的理论^[4,5]. 近期, Regine 等人^[6]和 Bardossy^[7]开展了对古地面(palaeosurface)、古风化(palaeoweathering)特征及相关堆积的研究, 并期望能对了解大陆演化和古环境重建等有所益处. Johansson^[8]利用 DEM 及 GIS 来识别古地面(palaeosurface)并对其进行分期. Coltorti 等人^[9]和 Peulvast 等人^[10]对意大利半岛上新世夷平面和加拿大东部古地貌的研究表明, 通过古夷平面及古地貌变形的研究, 可以揭示新构造运动特点和了解古地貌的演化过程. 对非洲古夷平面地貌特征、相关残余矿床堆积及现今侵蚀过程的研究亦构成当今研究的一个方面^[11~13]. 近期德国学者对东阿尔卑斯山古夷平面变形、古残留红土等问题做了大量的研究工作; 其中 Frisch 等人^[14]对北阿尔卑斯山中东部抬升的岩溶高原的研究表明, 不同高度断块山地的顶面是早渐新世甚至晚中新世单一、缓丘古地面的组成部分, 其原始发育环境为低陆地环境; Kuhlemann 等人^[15]对东阿尔卑斯山东部古地面及第三纪盆地残留红黏土堆积的研究表明, 残留红土不是现代或更新世气候条件下的产物, 而是更新世之前古土壤的残留, 残留红土与古地面是相互对应的; Szekely 等人^[16]基于 DEM 和数理统计分析方法, 对东阿尔卑斯山早

第三纪夷平面变形与构造的关系进行了研究. 国内, 近期诸多学者基于夷平面的发育时代及原始高度来探讨青藏高原的隆升幅度及其过程^[17~20], 并对夷平面及其相关堆积和古岩溶开展了大量研究^[21,22]. 总之, 夷平面及其相关堆积的发育环境和相互关系、通过化石或古夷平面重建古环境及构造演化过程等问题已成为目前夷平面研究的核心. 本文旨在前人、尤其是矿床地质、石油勘探及岩相古地理等研究基础上, 从地貌学角度探讨中国地史期夷平面的特征信息、研究方法以及化石夷平面地貌特征等问题; 并期望能对古夷平面的识别和恢复、青藏高原隆升过程的研究有所益处. 同时, 对化石夷平面的研究还可为古环境的重建、古大陆的漂移及演化、风化残积型矿床的形成与分布、油气的储集及勘探等提供理论基础.

1 化石夷平面及其研究方法

化石夷平面主要指新生代之前地史期形成的夷平面, 在其形成之后为上覆盖层掩埋乃至被后期构造运动解体 and 变形. 局地化石夷平面甚至又被重新抬升至地表, 但是已经很难从地貌特征上研究该类型夷平面. 惟有借助一些与夷平面相关的特征信息, 通过地层学和岩相古地理的方法确认化石夷平面存在, 进而恢复其古地貌.

1.1 化石夷平面的确认

根据有关夷平面的形成条件、发育规律及其地貌特征等, 作者认为如下地质特征可以作为确认化石夷平面的特征信息:

(i) 侵蚀不整合面. 化石夷平面在地层层序中表现为一个“侵蚀面”、“不整合面”及“间断面”, 或称为“时间凝缩面”^[23,24]. 总之, 夷平面代表着风化、剥

蚀、夷平过程和沉积的非连续性。

(ii) 古风化壳及残余型矿床。风化残积型铝土矿、铁矿、高岭土矿及耐火黏土等大都是在长期风化淋滤、地壳相对稳定及湿热气候条件下的产物^[25]。该类矿床总体表现出风化淋滤型或风化残余型矿床特征,同时它们的陆生富集过程与夷平面的发育过程可以说是同步的。但是,在上覆沉积物覆盖前,夷平面上古风化壳堆积一般并未成岩,海侵或河流可能将其广泛的改造或局地转移,从而表现出一些沉积岩特征。但无论如何,夷平面上古风化壳及其相关堆积可以作为夷平面地貌体的物质组成部分之一,也可以作为鉴别化石夷平面的重要证据。

(iii) 古岩溶。存在于地层间的古岩溶在化石夷平面的恢复过程中扮演着特殊的角色。发育在碳酸盐岩等可溶性岩石上的夷平面,古岩溶不仅可以作为它的一个组成部分和鉴别标志(如青藏高原及其东延部分夷平面研究之结果^[21,22]),同时又成为成矿物质富集或储集的空间:如扬子古陆化石夷平面上古岩溶负地形间充填富集的铅锌矿、锑矿、汞矿等;华北地块鄂尔多斯盆地、华北拗陷中古潜山洞穴、溶隙中储集的油气等^[26~28]。对这些矿产的勘探与开发又为了解化石夷平面奠定了良好的基础。

(iv) 盖层沉积特征及环境。不整合面盖层沉积岩相古地理的分析有助于了解基底的古地形地貌特征。据前人对川滇黔二叠世煤田的研究,成煤区基底地形为平坦、宽缓的斜坡,如康滇古陆向东依次为曲流河-沼泽、潮坪-泻湖-三角洲及开阔台地或局限台地。此外,欧洲许多煤田地质工作者,采用计算机模拟试验以恢复其成煤环境,并获得了惊人一致的结果:即欧洲各时代具有工业价值的煤田,成煤区的地形坡度小于 1° ,且大部分在 0.5° 以下^[29]。

通过上述特征信息,可以确认化石夷平面的存在、圈定化石夷平面的分布范围,进而恢复化石夷平面的古地形地貌特征。但上述特征信息与夷平面也许并非是一一对应的,故而要求在化石夷平面的确认及恢复过程中,各类特征信息的应用应该相互结合、互相印证。

1.2 化石夷平面古地貌的恢复方法

化石夷平面作为某一时期的沉积基底被后期海相或陆相沉积超覆过程中,夷平面地貌特征对上覆盖层沉积厚度起着控制作用。上覆沉积盖层的厚度与夷平面起伏高度呈“镜像关系”^[30]。为了恢复化石

夷平面的古地形地貌,必须选择一个作图的基准面。理想的基准面应该为一个时间界面和沉积界面的统一体,同时也要具备区域对比程度高、地层单元沉积时的基本水准面平行于古海平面这些假定条件^[31]。在实际工作中理想的基准面很难寻得,所以不得不采用一些近似或概化的基准面,如同一期水平沉积层面或火山灰沉积层面。然后利用钻孔资料(化石夷平面埋藏区)及地层剖面(化石夷平面露头区),通过地层学方法,记录上覆地层厚度并将厚度数据展放到同一基准面上,再用内插等高线的方法勾绘出化石夷平面的古地形图。也可利用化石夷平面发育地层的残余厚度来重塑古地形图,但亦应尽量满足基准面水平和等时原则。在古地形图基础上,夷平面的相对高差、坡度及海拔高度等有关信息即可确定。但有一点必须指出,盖层成岩作用的差异压实对地层厚度的影响应该消除。

2 化石夷平面的地貌特征

2.1 化石夷平面的坡降(相对高差)

(i) 华北古陆化石夷平面。华北地块在中奥陶世碳酸盐岩沉积之后,在加里东运动(有的学者称其为“晋冀鲁豫”运动)作用下整体隆起,从而结束了早古生代海侵,进入长期的风化、剥蚀及夷平期,这一过程一直持续到晚古生代早石炭世末方结束。根据化石夷平面发育地层及盖层的地质年代,推断华北夷平面的发育期约 150 Ma。事实上真正的间断时间应该小于这一时间,因为有相当厚度的底岩已经被剥蚀,但是剥蚀部分的确定是相当困难和不准确的,所以,只能以缺失的地层时间来概略代表。

地质勘探及矿产开发均已证明,华北古陆在石炭系中统本溪组下部、中奥陶统夷平面之上发育了“山西式”铁矿、“G 层铝土矿”、高岭土矿等化石夷平面标志性地层;而本溪组上部及石炭系上统太原组煤系地层的广泛发育,又从侧面证实基底地形开阔、平缓的古地貌形态。此外,在夷平面下发育的古岩溶又成为华北和长庆(鄂尔多斯盆地)等油田的主力储集层^[27,28]。以这些标志性特征信息为基础结合前人有关岩相古地理的研究成果^[32~34],可拟绘出华北古陆中奥陶世至中石炭世初夷平面分布图(图 1)。

华北古陆总体轮廓呈现出向东南倾没和敞开的“箕型”地貌。夷平面南北两侧分别为秦岭-大别山和阴山古山地所包围,东部为环太平洋长期发育的古

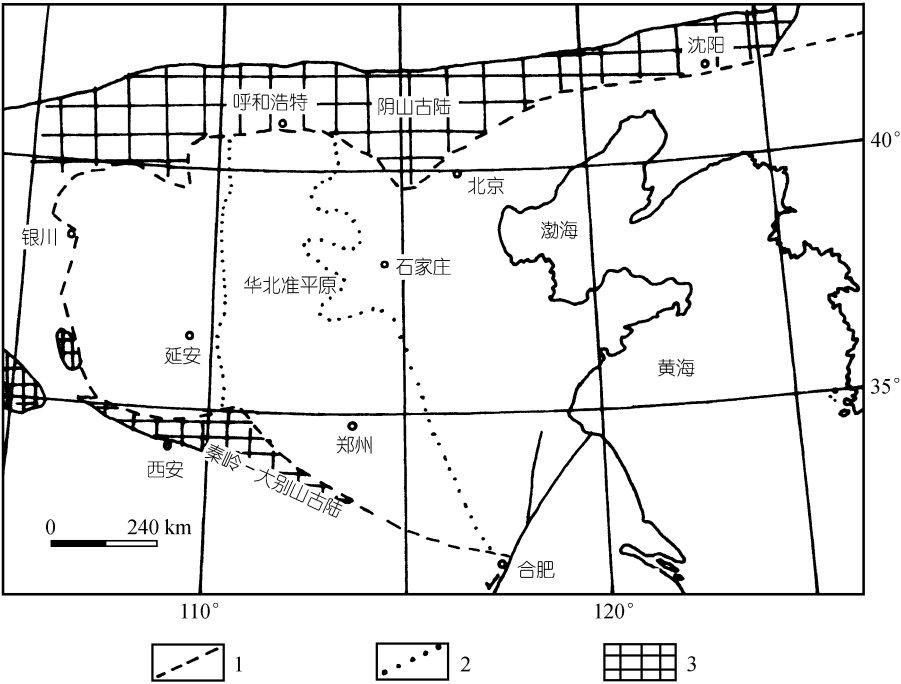


图 1 华北古陆中奥陶世末至早石炭世末夷平面分布图
1. 夷平面分布界线; 2. 地貌单元界线; 3. 古山地

生代海洋, 西部通过一个“鞍型”台阶状夷平面(“乌兰格尔-平凉”隆起)与祁连浅海相连. 根据夷平面沉积盖层的岩相组合特征^[32~35], 可以发现华北化石夷平面主要由 3 个沉积地貌单元组成: 西部单元的东界分布于 110.5°E 附近, 西界大致为银川-固原一线(即华北夷平面的西界), 该地貌单元在本溪组主要表现为剥蚀, 有的学者称此剥蚀地貌单元为“乌兰格尔-平凉”隆起; 110.5°E 至太原-合肥一线为中部沉积地貌单元, 夷平面上本溪组盖层主要为陆相堆积; 太原-合肥一线以东为东部沉积地貌单元, 夷平面的盖层主要为海陆交互相沉积, 部分区域为浅海相. 夷平面盖层的岩相古地理特征表明, 华北古陆化石夷平面呈现西高东低的态势, 并且古水系方向与地形是一致的.

夷平面上覆中、上石炭统沉积盖层(如“山西式”铁矿、“G 层铝土矿”及煤系地层)以分布广泛、厚度薄而稳定为特征. 其沉积环境为潮坪, 其宽度在晚石炭世的高潮期可推进 100 km^[28], 这一现象从侧面反映出沉积基底——华北夷平面的准平原地貌特征, 同时亦反映夷平面向海洋过渡的地貌特点. 此外, 在大量石油勘探钻孔资料基础上, 一些学者对局部华北

化石夷平面的古地形地貌进行了恢复(图 2)^[30,36~38]. 依图 2 古地形图可以量测出, 鄂尔多斯盆地华北化石夷平面的最大高差约为 100 m, 坡降变化在 0.375‰~0.520‰之间.

(ii) 扬子古陆化石夷平面. 二叠纪时, 中国南方是一个位于古特提斯大洋中、四周被深水包围的巨型台地, 在其四周有一系列的水下隆起和古陆. 该巨型台地位于赤道附近的低纬度区, 属热带、亚热带的湿热气候区^[39]. 早、晚二叠世之交的东吴运动使中国南方大部分地区上升隆起成陆. 在风化、剥蚀及夷平作用下, 形成了面积宽广的夷平面, 尤其以川、滇、黔交界为核心的周边地区发育最为典型. 此外, 扬子地块南部在古生代晚期的一个重要特点就是出现了一些孤立的碳酸盐岩台地^[40], 如广西平果、合川等. 东吴运动同样使这些台地抬升, 遭受风化剥蚀、夷平而形成岛状分布的夷平面.

该期夷平面的基底以下二叠统茅口灰岩为主, 滇东、川南等地为峨眉山期玄武岩. 峨眉山玄武岩主喷发期限于早二叠世茅口期晚期和晚二叠世龙潭期, 大约在 261.5~259 MaBP, 先兆与延续期为 280~200 MaBP. 峨眉山玄武岩具有多期喷发的特性, 因而造

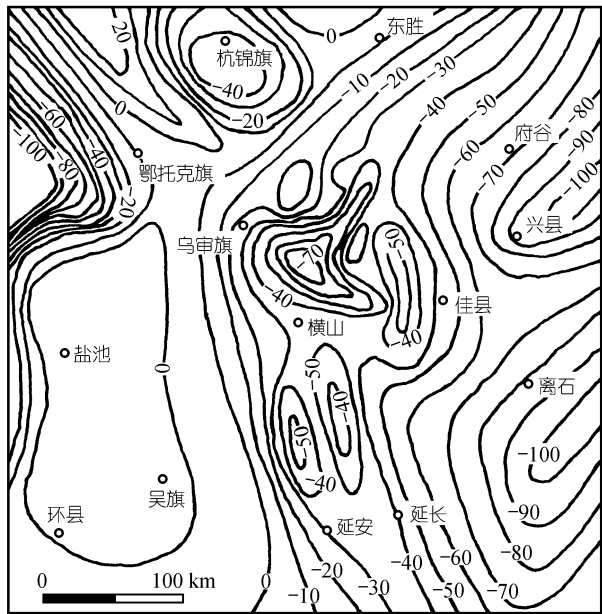


图2 华北古陆化石夷平面局部地形图
(据文献[36]略加修改; 图内数字为夷平面发育期的相对高度)

成玄武岩的顶、底不等时性. 这一特点体现在夷平面基底的变化上. 黔东、川北、广西大部及一些孤立碳酸盐岩台地的夷平面基底由茅口组灰岩构成. 在滇东、川南玄武岩组成夷平面的基底, 如四川乐山新华铝土矿区等. 而在二者的过渡区, 玄武岩有时覆盖在茅口灰岩之上, 接触面上可见到高低起伏的覆盖型石林、古岩溶风化壳和“底黏土”(茅口灰岩古风化壳)^[41]. 夷平面的盖层为上二叠统吴家坪组(其他地区又称龙潭组、合山组、宣威组)的煤系地层. 此外, 这一古老的夷平面迄今还局部保存在云南石林地区(出露剖面见于石林县大、小石林周边地区), 并继承性演化为该区第三纪夷平面的一部分. 作者在前人岩相古地理研究基础上^[32,33,42], 结合夷平面特征信息初拟出扬子古陆化石夷平面分布图(图3)^[29,34,35,41].

四川煤田地质研究所曾对川南晚二叠系龙潭组煤系地层沉积时古海平面位置及相关沉积厚度进行了研究, 并计算出川南地区晚二叠世地形相当平缓, 但不同区域坡度还是有一定变化. 古坡降变化在0.52‰~1.32‰之间. 这一坡度值可大致反映此期夷平面的地形起伏情况. 此外, 在康滇古陆(古山地)的东缘地带, 尚未发现粗碎屑构成的冲洪积扇, 而主要是河流、沼泽沉积和少量的湖泊相、湖沼相沉积^[43]. 从这一现象可以说明康滇古陆(古山地)与其东部夷平面的高度差异不大, 是一个相对较高的剥蚀山地.

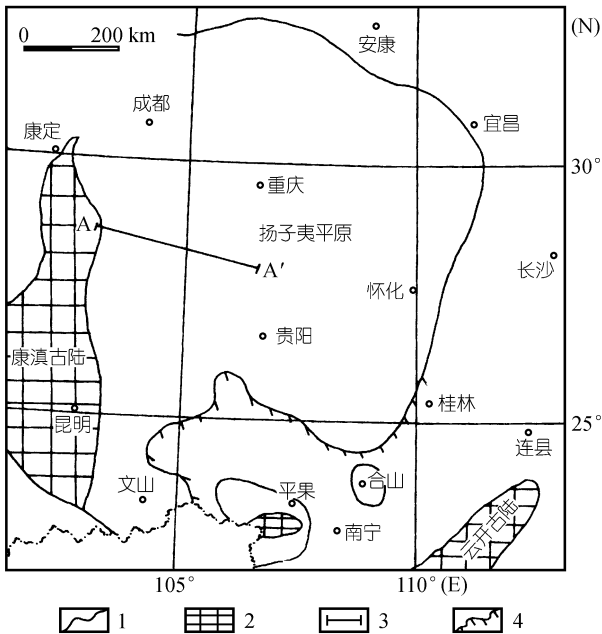


图3 扬子古陆早、晚二叠世期间夷平面分布图
1. 夷平面分布界线; 2. 古山地; 3. 剖面线; 4. 古海岸线

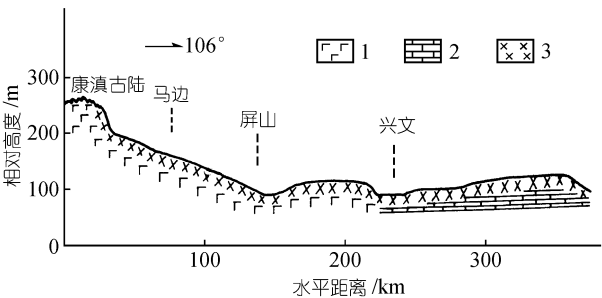


图4 扬子古陆夷平面局部古地貌剖面(剖面位置见图3 A-A')
1. 玄武岩; 2. 灰岩; 3. 风化壳

作者以川南化石夷平面上龙潭组早期沉积厚度为基准, 对夷平面古地形剖面进行了恢复(图4). 研究结果表明, 川南夷平面总体坡降约为0.31‰, 康滇古陆(古山地)东麓最大坡降也仅有1.0‰左右.

2.2 化石夷平面的海拔高度

化石夷平面海拔高度的推算对研究青藏高原夷平面的抬升有着重要的借鉴作用, 同时夷平面原始海拔高度的确定也是一个棘手的问题. 对这一问题的研究必须明确两个前提条件: 一是海平面的变化规律是明确的, 具体到青藏高原夷平面抬升的研究, 就需要满足古(夷平面发育期)今海平面一致或期间海平面变化过程已知这一条件; 二是夷平面的海拔

高度是研究区与海岸线间距离的一个函数,因而研究区夷平面在发育期的海陆空间地理位置应该明确.

华北地块的化石夷平面发育在碳酸盐岩上.在夷平面的形成过程中,随着风化、剥蚀及夷平,岩溶侵蚀基准面逐渐与河流侵蚀基准面合为一体,并与夷平面趋于一致^[44].但是,在此夷平面(侵蚀基准面)下仍然有岩溶的发育,一般认为此类岩溶受溶蚀基准面(可溶岩层的底版)的控制^[45].但是在夷平状态下,地貌条件决定了地下水水力坡度极小、水循环极弱等水动力条件.在此条件下,作者认为低于海平面的深部岩溶发育极弱,而岩溶发育深度主要受海平面的控制.如果这一假定条件成立,我们就可以通过夷平面下古岩溶的主发育深度推算夷平面的海拔高度.以冀中凹陷的苏桥潜山为例,苏桥潜山中奥陶统夷平面被中石炭统覆盖,之后夷平面一直处于深埋环境,也就是说古岩溶基本未受后期岩溶改造.据陈霞对华北地区下古生界 700 多口石油钻井资料统计:夷平面下 0~350 m 以内钻具放空及泥浆漏失井数,占钻遇该深度总井数的 22.79%;而 350~700 m 内则为 8.33%.该统计数据表明,泥浆漏失量及深度所指示的古岩溶主要发育在夷平面下 350 m 的深度内,并在 300 m 附近泥浆漏失量最大(图 5)^[46].据此,300 m 深度可作为当时夷平面下受海平面控制的岩溶基准面.由此,作者初步估计华北夷平面发育时,苏桥潜山区域夷平面海拔高度约 300 m 左右.

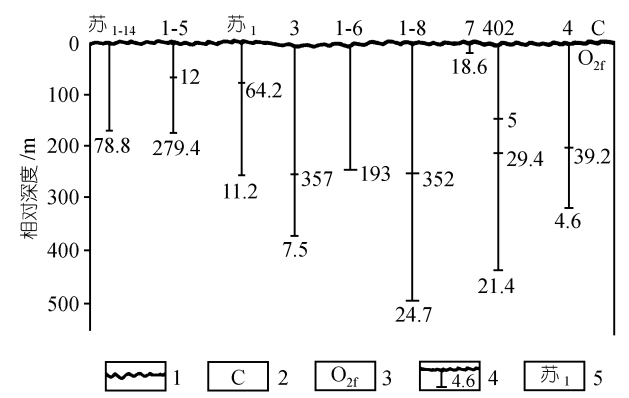


图 5 苏桥地区钻孔泥浆漏失深度及漏失量
(据文献[46]修改)

1. 化石夷平面; 2. 石炭系盖层; 3. 中奥陶统峰组灰岩, 4. 泥浆漏失量(m^3); 5. 钻孔编号

3 结语

(i) 化石夷平面主要指中生代及其之前地史期形成的夷平面.夷平面性质的确定主要依据以下特

征信息: (1) 侵蚀不整合面性质; (2) 古风化壳及风化残余型矿床发育; (3) 古岩溶及不整合面下古岩溶充填富集型矿床发育; (4) 不整合面盖层沉积特征及环境,如不整合面煤系盖层广泛发育.

(ii) 根据化石夷平面的特征信息,确认华北古陆在中奥陶世至早石炭世期间、扬子古陆在早、晚二叠世期间发育了面积宽广的夷平面.

(iii) 对华北古陆及扬子古陆化石夷平面古地形地貌的研究表明,化石夷平面的坡降一般在 0.31‰ ~ 1.32‰ 之间,大多小于 1.0‰ .

(iv) 化石夷平面下古岩溶发育深度应该主要受海平面控制.对冀中凹陷苏桥潜山古岩溶研究表明,华北古陆夷平面发育时,苏桥潜山地区化石夷平面海拔高度约为 300 m 左右.

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划(G199804800)资助.

参 考 文 献

- 1 任美镔编译. 台维斯地貌学论文选. 北京: 科学出版社, 1958. 37~62
- 2 Davis W M. The peneplain. *American Geologist*, 1899, 22(B): 207~239
- 3 季莫菲也夫 Д. А. 地球上夷平面对比的经验. 地理译丛, 1965, (1): 21~25
- 4 Jensen M L, Bateman A M. *Economic Mineral Deposits*. New York: John Wiley and Sons, 1981. 213~222
- 5 Dorokhin I V, Bogacheva E N, Druzhinin A V, et al. *Economic Mineral Deposits*. Moscow: Higher School Publishing House, 1969. 107~112
- 6 Regine S C, Medard T, Michel S J. Variety and relationship of weathering features along the early Tertiary palaeosurface in the southwestern French Massif Central and the nearby Aquitaine Basin. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1997, 129 (1-2): 51~79
- 7 Bardossy G Y. Palaeoenvironments of laterites and lateritic bauxites effect of global tectonism on bauxite formation. In: *Lateritization Processes*. Rotterdam: A A Balkema, 1981. 287~294
- 8 Johansson M. Analysis of digital elevation data for palaeosurfaces in south-western Sweden. *Geomorphology*, 1999, 26: 279~295
- 9 Coltorti M, Pieruccini P. A late lower pliocene planation surface across the Italian Peninsula: A key tool in neotectonic study. *Journal of Geodynamics*, 2000, 29: 323~328
- 10 Peulvast J P, Bouchard M, Jolicoeur S, et al. Plaeolandforms and morphotectonic evolution around the Baie des Chaleurs (Eastern Canada). *Geomorphology*, 1996, 16(1): 5~32
- 11 Kaseba M K, Paepe R, Boski T, et al. Genese et evolution des profiles bauxitiques lateritiques sur des surfaces d'aplanissement post-eocene au Bas-Zaire (Zaire). In: Charlet Jean Marie, ed. *centenaire des premieres etudes sur la geologie shabienne*. Brussels: Belgium, 1994. 409~442
- 12 Roessner S, Strecker M R. Late Cenozoic tectonics and denudation in the central Kenya Rift: Quantification of long-term

- denudation rates. Tectonophysics, 1997, 278(1-4): 83~94
- 13 Brown E T, Bourles D L, Colin F, et al. The development of iron crust lateritic systems in Burkina Faso, West Africa examined with in-situ-produced cosmogenic nuclides. Earth and Planetary Sciences Letters, 1994, 124(1-4): 19~33
- 14 Frisch W, Kuhlemann J, Kunkl I, et al. The pre-augenstein plaeosurface in the northern Calcareous Alps. Tuebinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe A, Geologie, Palaeontologie, Stratigraphie, 1999, 52: 42~44
- 15 Kuhlemann J, Taubald H, Dunkl I, et al. Geochemistry of red clays in the Eastern Alps: Remnantsof late Miocene soils? Tuebinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe A, Geologie, Palaeontologie, Stratigraphie, 1999, 52: 166
- 16 Szekely B, Frisch W, Dunkl I, et al. DEM-based statistical methods of surface evaluation, considerations and results for the Eastern Alps. Tuebinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe A, Geologie, Palaeontologie, Stratigraphie, 1999, 52: 41~42
- 17 李吉均, 李炳元, 文世宣, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. 中国科学, 1979, (6): 608~616
- 18 李吉均. 青藏高原隆起的三个阶段及夷平面. 见: 环境-地貌-发展. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 1~5
- 19 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 青藏高原夷平面与岩溶年代及其原始高度. 科学通报, 1996, 41(15): 1402~1406
- 20 施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广州: 广东科技出版社, 1998. 382~391
- 21 崔之久, 李德文, 伍永秋, 等. 关于夷平面. 科学通报, 1998, 43(17): 1794~1804
- 22 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升. 中国科学, D 辑, 1996, 26(4): 378~385
- 23 吴忱, 马永红, 张秀清, 等. 华北山地地形与地貌发育史. 石家庄: 河北科技出版社, 1999. 36~37
- 24 吴智平, 李守军, 周瑶琪. 地层间断面的时间结构研究进展. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(6): 119~133
- 25 冯金良, 赵泽三, 高国瑞. 试论红土化作用及红土的工程地质分类. 水文地质工程地质, 1993, 20(3): 32~35
- 26 陶维屏, 孙祁, 杨雅秀, 等. 中国高岭土矿床地质学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 103~117
- 27 华北油田石油地质志编写组. 中国石油地质志——华北石油. 北京: 石油工业出版社, 1988
- 28 张福礼, 黄舜兴, 杨昌贵, 等. 鄂尔多斯盆地天然气地质. 北京: 地质出版社, 1994
- 29 王立亭, 陆彦邦, 赵时久, 等. 中国二叠纪岩相古地理与成矿作用. 北京: 地质出版社, 1994. 72~73, 120~126
- 30 夏日元, 唐健生, 关碧珠, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 133~136
- 31 Dexter H C. 得克萨斯州西部耶茨油田圣安德列斯白云岩储集层中二叠统岩溶的溶洞及其他特征. 见: 詹姆斯 N P, 肖凯 P W. 古岩溶. 北京: 石油工业出版社, 1991. 227~248
- 32 王鸿祯, 楚旭春, 刘本培, 等. 中国古地理图集. 北京: 地质出版社, 1985
- 33 蒋志, 白万成, 董建乐, 等. 中国地壳演化与矿产分布图集. 北京: 地质出版社, 1996. 42~63
- 34 陶维屏, 马启锐, 刘绍斌, 等. 中国非金属矿床成矿地质图(1: 50 万). 北京: 地质出版社, 1995
- 35 王煦曾, 朱柳如, 王杰. 中国煤田的形成与分布. 北京: 科学出版社, 1992. 12~17, 71~78
- 36 郝蜀民, 司建平, 许万年. 鄂尔多斯盆地北部古生代岩溶及有利油气勘探区块预测. 中国岩溶, 1994, 13(3): 176~188
- 37 马振芳, 周树勋, 于忠平, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系顶部古风化壳特征及其与天然气富集的关系. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 21~24
- 38 郑聪斌, 冀小林, 贾疏源. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳岩溶发育特征. 中国岩溶, 1995, 14(1): 280~288
- 39 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1993. 133~134
- 40 沙庆安, 吴望始, 傅家谟. 黔桂地区二叠系综合研究——兼论油气性. 北京: 科学出版社, 1990. 1~13, 151~164
- 41 王竹泉. 华南晚二叠世煤田形成条件及分布规律. 北京: 煤炭工业出版社, 1980. 5~8
- 42 刘宝珺, 许效松. 中国南方岩相古地理图集(震旦~三叠纪). 北京: 科学出版社, 1994
- 43 四川煤田地质研究所. 四川南部上二叠统划分与含煤性. 重庆: 重庆出版社, 1986. 115~119
- 44 缪钟灵. 岩溶地块多基准面研究. 见: 中国北方岩溶和岩溶水. 北京: 地质出版社, 1982. 17~22
- 45 任美镔, 刘振中. 岩溶学概论. 北京: 商务印书馆, 1983. 161~170
- 46 陈霞. 华北地区下古生界碳酸盐岩的储集性. 中国岩溶, 1988(增刊): 100~109

(2001-05-21 收稿, 2001-09-11 收修改稿)