

太行山南缘王莽岭地区风化壳的地球化学特征与夷平面形成环境

张 蕾¹⁾, 张绪教²⁾, 武法东²⁾, 邓会娟¹⁾, 陈 康¹⁾

1) 国土资源实物地质资料中心, 河北三河 065201; 2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘 要: 通过野外考察、室内测试分析及区域对比, 对王莽岭地区风化壳的特征与夷平面的形成环境进行探讨。从地貌学、古岩溶、风化壳等方面验证了王莽岭地区存在一级夷平面(1 400~1 600 m)和一级古宽谷—山麓面(800~1 100 m)。通过对风化壳的地球化学测试分析, 认为夷平面形成于湿热的气候环境, 其上风化壳脱硅富铝化作用明显, 但仍属于中等发育程度; 古宽谷—山麓面形成于暖湿的气候环境, 其上风化壳脱硅富铝化作用不强, 发育程度为中等偏弱。最后, 通过区域综合对比, 初步推断夷平面是形成于渐新世的太行期夷平面, 古宽谷—山麓面是形成于上新世的唐县期古宽谷—山麓面。

关键词: 太行山; 王莽岭; 夷平面; 风化壳

中图分类号: P594.2; P931 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2018.070301

Characteristics of Weathering Crust and Formation of Planation Surface in Wangmangling at the Southern Edge of Taihang Mountain

ZHANG Lei¹⁾, ZHANG Xu-jiao²⁾, WU Fa-dong²⁾, DENG Hui-juan¹⁾, CHEN Kang¹⁾

1) Cores and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe, Hebei 065201;

2) School of Earth sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083

Abstract: Through field investigation, indoor test analysis and regional comparison, the characteristics of the weathering crust in the Wangmangling area and the formation environment of the plane of the surface are discussed. From the aspects of geomorphology, palaeokarst, and weathering crust, it is verified that there are planation surface (1 400~1 600 m) and paleo-valley-mountain surface (800~1 100 m) in Wangmangling. Through the geochemical test of the weathering crust, it is believed that the planation surface was formed in a hot and humid climatic environment, and the aluminiferization effect of the weathering crust on the weathering crust was obvious, but it was still moderately developed; paleo-valley-mountain surface was formed in a warm and humid climatic environment, and its weathering crust was not strong enough for desilication, and its development was moderately weak. Finally, through regional comprehensive comparisons, it is concluded that the planation surface is Taihang planation surface which was formed in Oligocene, and the paleo-valley-mountain surface is Tangxian planation surface which was formed in Pliocene.

Key words: Taihang Mountains; Wangmangling; planation surface; weathering crust

夷平面是在长期的地壳相对稳定时期, 由广泛的夷平作用形成的, 以截断面形式横切一切老地层和构造的、接近侵蚀基准面的、平缓的地表形态, 其上有风化壳或其他碎屑堆积, 常遭受后期的抬升切割和埋藏, 分布于地球各纬度带(任雪梅等, 2003)。

王莽岭国家地质公园位于山西省陵川县东南部, 其地理坐标为 113°19'53"—113°38'28"E、35°30'20"—35°44'25"N(图 1)。该区处于构造运动频繁、河流侵蚀强度大的太行山南缘, 夷平面表现为绵延数百公里的平坦山顶面和古宽谷面。本文从地貌学、地球

本文由中国地质调查局科研项目“实物地质资料信息产品开发与服务”(编号: 121201013000150002-06)资助。

收稿日期: 2018-03-19; 改回日期: 2018-06-27; 网络首发日期: 2018-07-04。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 张蕾, 女, 1988年生。工程师。主要从事地貌与新构造运动以及实物地质资料管理方面研究。

E-mail: 594588113@qq.com。

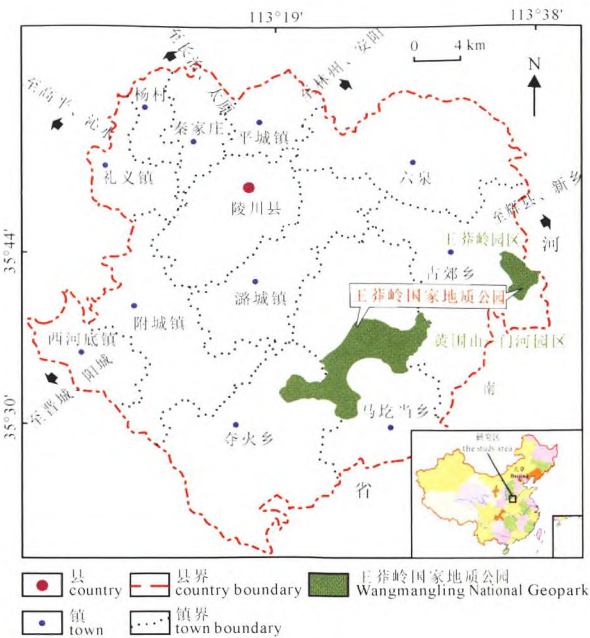


图 1 王莽岭国家地质公园地理位置图
Fig. 1 Location of Wangmangling National Geopark

化学等方面结合区域对比情况，分析了王莽岭地区风化壳地球化学特征，探讨了夷平面形成时代和古气候环境。

1 研究区概况及研究方法

王莽岭地区位于中生代形成的太行山复背斜西翼，构造线呈北东向，出露地层由老到新依次为新太古界、中元古界长城系、下古生界寒武系—奥陶系及新生界第四系，区内广泛出露岩性以灰岩、白云岩为主的寒武系、奥陶系和以亚砂土、亚黏土为主的第四系。王莽岭园区和园区以外西南方向广泛分布了一级夷平面，其上多处发育风化壳、古岩溶等残留地貌。除此之外，结合区域 DEM 地形剖面图可以看出，夷平面外围的山麓地带存在一个古宽谷面，古宽谷内部发育大面积红土、古岩溶等残留地貌。

本文结合 1:5 万地质图、DEM 地形剖面图、卫星遥感影像图，野外对地貌特征的改为实地考察和风化壳样品的系统采集以及室内采用常规化学分析方法对样品进行主量元素含量的测试分析，通过区域夷平面的综合对比，揭示王莽岭地区风化壳的地球化学特征及夷平面形成环境。

2 夷平面的形态与风化壳的特征

根据野外观察，初步认定王莽岭地区存在一级夷平面和一级古宽谷—山麓面，夷平面海拔高度为 1 400~1 600 m，古宽谷—山麓面海拔高度为 800~1 100 m。研究区夷平面、古宽谷—山麓面可以从地貌形态、古岩溶和风化壳等方面加以识别。

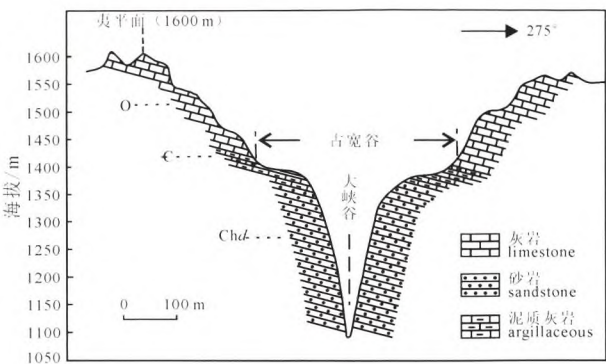


图 2 王莽岭园区地貌剖面示意图
Fig. 2 Schematic profile of landscapes in Wangmangling
O-奥陶纪; C-寒武纪; Chd-长城系大河组
O-Ordovician; C-Cambrian;
Chd-Dahe Formation of Changcheng System

2.1 地貌形态

(1)夷平面地貌形态

王莽岭园区信号塔处是夷平面较好的观察点(图 2): 夷平面海拔高度约为 1 600 m，总体倾向西，倾角为 3°左右，发育于奥陶系马家沟组二段灰岩中。夷平面延伸范围较大且坡度较缓，其上发育大面积峰丛地貌。夷平面之下发育一个古宽谷，谷坡上部以岩性较硬的白云岩、白云质灰岩、灰岩为主，坡度较陡，谷坡下部以岩性较软的泥灰岩为主，加之上部由重力垮塌下来的崩积物覆盖其上，坡度较缓; 古宽谷之下发育深约 3 00 m 的深切峡谷。古宽谷及深切峡谷的存在反映了夷平面形成后，地壳抬升导致河流发生下切，直至地壳趋于稳定，河流以侧向侵蚀为主，形成宽谷，之后经历多次构造抬升，河流强烈下切至元古代褐红色石英砂岩中，形成了深切峡谷。

另外，园区以外西南方向，海拔高度降至 1 400 m 附近，仍可观察到大面积展布的该级夷平面。

(2)古宽谷面地貌形态

室内结合王莽岭地区 DEM 地形剖面图，可以发现夷平面外围山麓地带约 1 100 m 附近存在一个古宽谷面，同时，野外陵川—晋城高速公路一带海拔高度 800~1 100 m 附近可见大面积的红土(图 3)。

2.2 古岩溶地貌

(1)夷平面古岩溶地貌

夷平面上发育大规模形态各异的峰丛地貌，它们高差约 700~800 m，下部尚有未完全分离的基座相连。同时，可见到岩溶作用初期形成的小型溶沟、石芽，还可见到溶蚀作用达一定程度形成的平面上呈圆形的落水洞，高数十米至上百米。园区之外西南方向海拔高度降至 1 400 m 附近，可观察到岩石表面的古岩溶裂隙。

(2)古宽谷岩溶地貌

古宽谷内部以岩溶丘陵与岩溶洼地相间组合

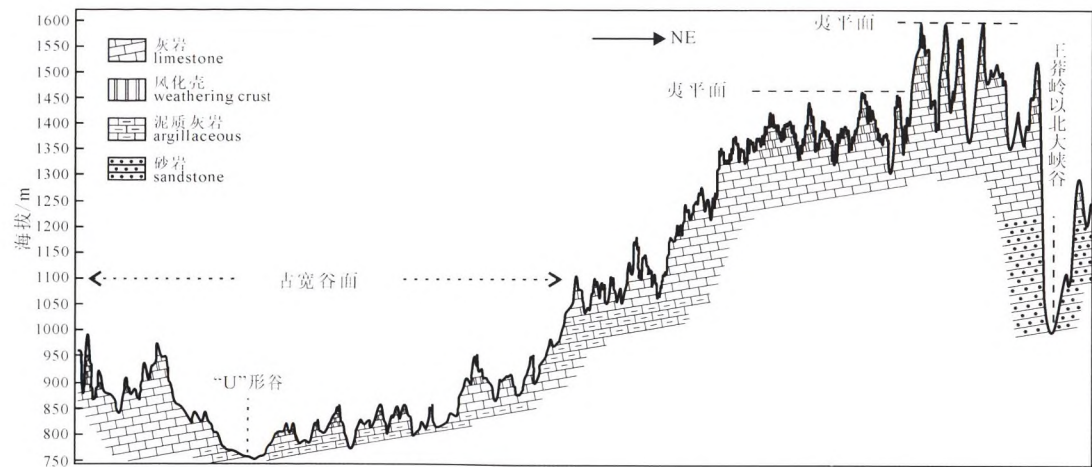


图 3 王莽岭地区 DEM 剖面图
Fig. 3 DEM profile in Wangmangling area



图 4 夷平面及其红土风化壳
Fig. 4 The planation surface and weathering crust

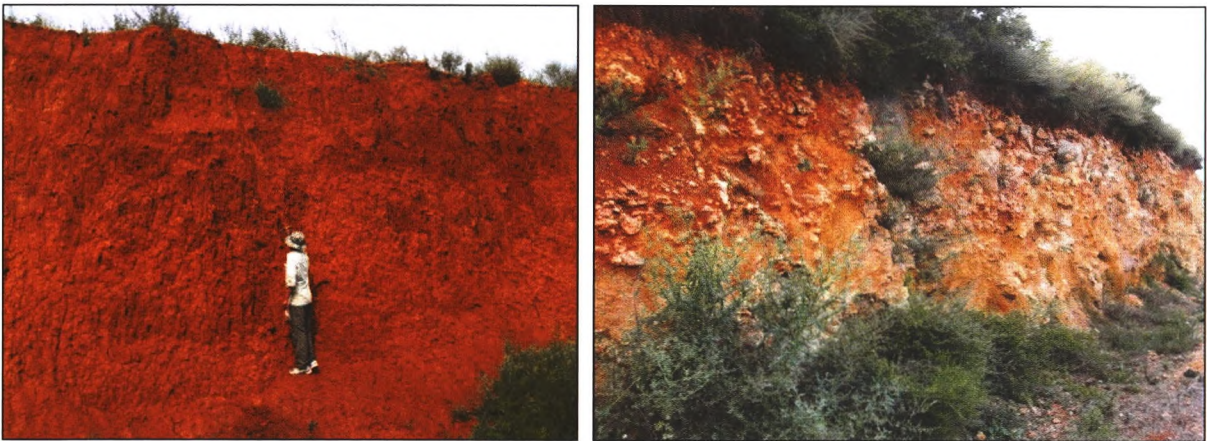


图 5 古宽谷内发育的红土
Fig. 5 The weathering crust developed in the ancient wide valley

的形式出现，且残留一个“U”形谷(图 3)。

2.3 风化壳特征

风化壳作为夷平面的组成部分，是夷平面识别和重建的重要依据，也是夷平面环境信息的重要载体(李德文和崔之久，2004)。它经常与夷平面伴生，通过夷平面的这种相关残余堆积来间接研究和重建夷平面的发育环境。地貌特征(冯金良等，2002)

(1)夷平面风化壳特征

王莽岭园区索道下栈约 1 640 m 处(35°40′22.55″N、113°36′43.15″E)，可见成分以黏土为主的残积红土充填于灰岩的纵向裂隙中，裂隙上部宽 10~40 cm，向下可达 1 m 左右；1 520 m 的山顶部位(35°39′42.71″N、113°34′44.3″E)，分布较大面积的成分以黏土为主的褐红色残积红土，其下部是岩

性以白云质灰岩夹泥质灰岩为主的基岩,伴有一定程度的风化;园区以外西南方向海拔 1 400 m 附近,仍分布有大面积的褐红色残积红土,红土之下为岩性以白云岩、白云质灰岩为主的基岩,已强烈风化(图 4)。

(2)古宽谷风化壳特征

古宽谷发育大面积红土,有些红土下部未见到基岩,有些红土分布于基岩裂隙中,基岩的风化程度较强(图 5)。

3 样品的采集与测试

地表岩石中元素抗风化能力存在较大差异,Ca、Mg、K、Na 等活动性元素极易随流体发生迁移,而 Si、Al、Fe、Mn、Ti 等惰性元素易残留在风化壳中且相对富集,随风化淋滤作用的进行,在红土风化壳发育的不同阶段,活动性元素与惰性元素间的比值会逐渐发生变化,对揭示红土的风化阶段、化学风化强度及重建古气候环境有着重要的指示作用(高柳青和袁宝印, 1996; 朱丽东等, 2007; 张建新等, 2007; 叶玮等, 2008)。

本次研究共选取 13 个红土风化壳样品,其中, H1-H4、H6、H8-H9 等 7 个样品分布于 1 400~1 600 m, 所取红土样品周围岩性以灰岩为主。H12、H15-H16、H18、H22-H23 等 6 个样品分布于 800~1 100 m, 所取红土样品位于下部未见基岩的厚度

较大的红土剖面的中上部,或位于已强烈风化的灰岩裂隙中(表 1)。采用硅铝比($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)、硅铁比($\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$)、铝铁比($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$)、化学蚀变指数(CIA)及风化淋溶系数(BA)作为分析红土风化壳地球化学特征的指标。测试于中国地质大学(北京)地质实验中心完成。

3.1 夷平面风化壳地球化学特征

(1)主量元素特征

如上所示(表 2), 各样品的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 三者之和占样品总量的 80.29%~85.67%, 是风化壳较强红土化作用的重要指标。从易溶组分来看, MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 的含量之和为 5.65%~8.17%, 表明易迁移元素大量淋滤消失, 风化壳经历了较强的风化淋溶过程; 从惰性组分来看, SiO_2 的含量为 45.86%~62.10%、 Al_2O_3 的含量为 16.65%~26.52%、 Fe_2O_3 的含量为 6.15%~10.77%, Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的含量低于 SiO_2 , 表明风化壳的发育还未进入后期, 属中等发育。

此外, 从 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 三种主量元素的线性拟合来看, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与 SiO_2 含量间具有很好的负线性关系(图 6), 说明这种元素组合特征符合亚热带地区脱硅富铝或脱硅富铝铁的基本成土过程。

(2)风化特征

如上所示(表 3), 各样品化学蚀变指数(CIA)变化于 73.80~85.59 之间, 平均值为 81.87, 反映湿热

表 1 研究区风化壳采样位置表
Table 1 The weathering crust sampling location in the study area

样品编号	采样位置	海拔高度/m	基岩岩性描述
H1	35°40'22.55"N, 113°36'43.15"E	1 640	厚层灰岩
H2	35°48'18.58"N, 113°24'07.30"E	1 552	厚层灰岩
H3	35°48'31.09"N, 113°25'16.25"E	1 581	厚层灰岩夹薄层钙质板岩
H4	35°48'41.37"N, 113°25'44.48"E	1 628	中厚层灰岩
H6	35°44'55.19"N, 113°25'45.42"E	1 468	中薄层灰岩
H8	35°39'42.71"N, 113°34'44.33"E	1 520	白云质灰岩夹泥质灰岩
H9	35°43'58.47"N, 113°14'47.06"E	1 300	厚层灰岩
H12	35°39'48.30"N, 113°09'38.70"E	1 127	未见基岩
H15	35°37'33.82"N, 113°05'35.91"E	1 046	中薄层灰岩
H16	35°36'20.90"N, 113°04'25.93"E	1 013	未见基岩
H18	35°34'56.37"N, 113°00'51.00"E	966	角砾灰岩
H22	35°35'57.87"N, 113°02'46.14"E	1 049	厚层灰岩
H23	35°36'18.17"N, 113°03'11.25"E	1 028	角砾灰岩

表 2 风化壳主量元素化学分析表
Table 2 Chemical analyses of constituent elements of weathering crust

样品编号	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$	$\text{TiO}_2/\%$	$\text{MnO}/\%$	$\text{MgO}/\%$	$\text{CaO}/\%$	$\text{Na}_2\text{O}/\%$	$\text{K}_2\text{O}/\%$
H1	62.10	16.65	6.15	0.77	0.14	2.26	0.93	0.81	4.17
H2	46.98	23.37	9.94	0.47	1.47	1.50	1.44	0.16	2.55
H3	47.59	26.52	9.11	0.61	0.12	1.50	1.51	0.22	2.74
H4	58.68	18.98	8.01	0.65	0.11	1.79	1.13	0.39	2.51
H6	48.67	22.21	10.06	0.59	0.13	2.36	2.80	0.13	3.24
H8	55.71	18.76	8.97	0.63	0.14	2.19	0.78	0.29	2.76
H9	45.86	24.69	10.77	0.53	0.07	1.79	1.63	0.14	2.59

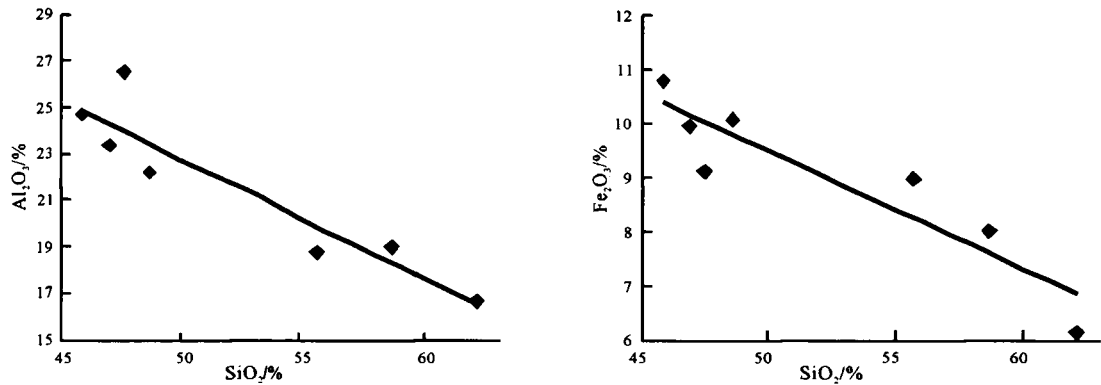


图 6 风化壳主量元素相关性分析图
Fig. 6 Correlation analyses of major elements of weathering crust

表 3 风化系数表				
Table 3 Weathering coefficients of weathering crust				
样品编号	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	CIA	BA
H1	3.73	10.11	73.80	0.49
H2	2.01	4.73	84.92	0.24
H3	1.79	5.22	85.59	0.23
H4	3.09	7.32	82.49	0.31
H6	2.19	4.84	78.26	0.38
H8	2.97	6.21	83.05	0.32

气候条件下较强的化学风化程度；风化淋溶系数(BA)变化于0.23~0.49之间，平均值为0.32，这种低BA值的特征表明本批样品中Ca、Na、K、Mg等活动组分相对于Al、Fe等惰性组分强烈淋失，从风化程度等级来看，属强烈风化。

综上所述，夷平面风化壳形成于湿热的气候环境下，其经历较强的风化作用后，易溶组分严重流失，脱硅富铝化作用明显，但红土风化壳的发育未进入后期，属中等发育程度。

3.2 古宽谷风化壳地球化学特征

(1)主量元素特征

如表 4 所示，从惰性组分来看，各样品 SiO_2 含量为 61.18%~63.98%、 Al_2O_3 含量为 15.05%~17.31%、 Fe_2O_3 含量为 5.90%~7.28%。相比于夷平面风化壳，古宽谷风化壳的 SiO_2 含量较高，而 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量较低，说明古宽谷风化壳的发育程度属中等偏弱；从易溶组分来看，MgO、CaO、Na₂O、K₂O 的含量之和为 5.80%~8.29%，表明风化壳经历了较强的风化淋溶作用，总体反映了风化壳

表 4 风化壳主量元素化学分析表									
Table 4 Chemical analysis of constituent elements of weathering crust									
样品编号	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	TiO ₂ /%	MnO/%	MgO/%	CaO/%	Na ₂ O/%	K ₂ O/%
H12	63.43	17.07	7.06	0.87	0.10	1.55	0.96	0.47	3.01
H15	61.18	17.31	7.28	0.83	0.10	1.74	1.67	0.57	2.36
H16	63.98	16.35	6.37	0.85	0.10	1.61	0.93	0.49	2.77
H18	62.38	15.05	5.90	0.81	0.10	1.78	3.13	1.05	2.33
H22	63.58	16.69	6.81	0.83	0.10	1.84	1.10	0.62	2.63
H23	62.96	16.28	6.61	0.80	0.12	2.05	1.21	0.75	2.78

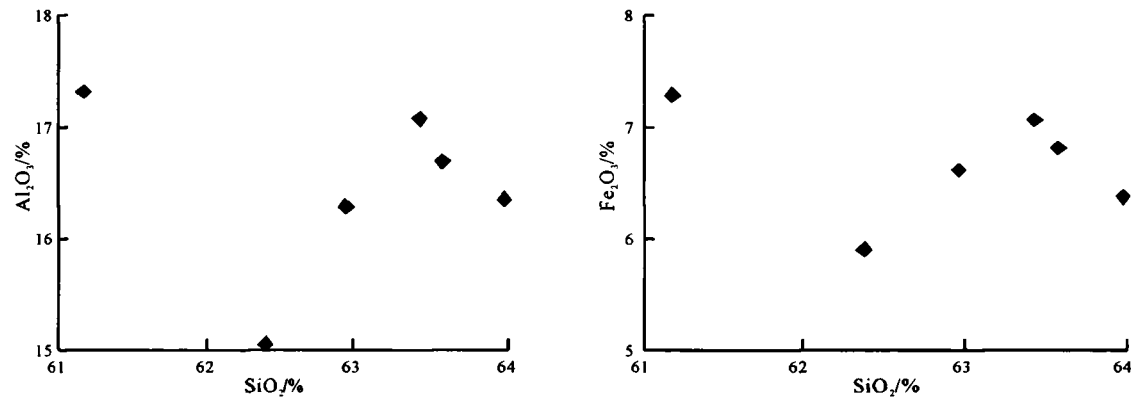


图 7 古宽谷风化壳的主量元素相关性分析图
Fig. 7 Correlation analyses of major elements of weathering crust in in the ancient wide valley

表 5 风化系数表
Table 5 Weathering coefficients of weathering crust

样品编号	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	CIA	BA
H12	3.72	8.99	79.35	0.35
H15	3.53	8.40	79.01	0.37
H16	3.91	10.04	79.60	0.35
H18	4.14	10.57	69.81	0.55
H22	3.81	9.34	79.33	0.37
H23	3.87	9.53	77.45	0.42

发育于温暖、湿润的气候环境。

此外,从 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 三种主量元素的线性拟合来看(图 7),数据分布比较离散,三者线性关系很不明显,这种样品元素组合特征可能表明古宽谷风化壳的脱硅富铝或脱硅富铝铁作用程度并不高。

(2)风化特征

如表 5 所示,各样品 SiO₂/Al₂O₃ 值介于 3.53~4.14 之间,属硅铝型风化壳, SiO₂/Fe₂O₃ 值介于 8.40~10.57 之间,较夷平面风化壳的硅铝比和硅铁比值都要高,指示了古宽谷风化壳的风化程度要弱于夷平面风化壳;各样品化学蚀变指数(CIA)变化于 69.81~79.60 之间,较夷平面风化壳的 CIA 值要低些,反映了其中等偏弱的化学风化程度;风化淋溶系数(BA)变化于 0.35~0.55 之间,这种低 BA 值的特征虽指示 Ca、Na、K、Mg 等活动组分相对于 Al、Fe 等惰性组分强烈淋失,但要高于夷平面风化壳的 BA 值,同样指示了风化作用强度较夷平面要弱。

综上所述,古宽谷风化壳形成于温暖、湿润的气候环境下,其经历的风化作用强度弱于夷平面,虽风化壳中易溶组分强烈淋滤流失,但脱硅富铝作用并不强,风化壳的发育程度属中等偏弱。

4 夷平面的区域对比

4.1 与华北地区对比

较多学者认为太行山南段存在三期夷平面,分别是北台期夷平面、太行期夷平面、唐县期宽谷—山麓面。其中,北台期夷平面形成于白垩纪末,主要分布在海拔 1 800~2 200 m 之间;太行期夷平面形成于渐新世,分布于北台期夷平面的外围,海拔 1 500~1 600 m;唐县期夷平面形成于上新世,分布于山麓地带,海拔高度范围较广(吴忱等, 1996, 1999a, b, 2000; 吴忱, 2001, 2008a, b; 马寅生等, 2007; 龚明权, 2010)。

太行山南缘王莽岭地区海拔 1 400~1 600 m 的山塬面及海拔约 1 100 m 的古宽谷面与华北地区海拔 1 000~2 200 m 的太行面及海拔分布范围较广的

唐县面,海拔高度的可比性,推断本区海拔 1 400~1 600 m 的山塬面是形成于渐新世的太行期夷平面,而海拔约 1 100 m 的古宽谷面是形成于上新世的唐县期宽谷—山麓面。

4.2 与长江三峡地区对比

谢世友等认为长江三峡地区存在三期夷平面,高夷平面主要分布在远离河谷的分水岭地区,山塬形态保存较好,岩溶台面特征明显,通过相关沉积和构造事件推断其形成于渐新世末;低夷平面围绕高夷平面广泛分布,地面多表现为高大的岩溶丘陵与大型洼地相组合的岩溶台面,两者高差可达 300~400 m,推断该级夷平面形成于气候温暖湿润的上新世末(谢世友等, 2006)。

王莽岭地区的高夷平面在河流上游表现为形态保存较好的山塬面,河流中游表现为高差较小的波状起伏或等高山峰密集排列的峰顶面,其海拔高度及地貌形态可与三峡地区相对比,因此,推断研究区高夷平面即是形成于渐新世的太行期夷平面;王莽岭地区 DEM 剖面图可见古宽谷中岩溶丘陵与洼地相间组合,两者高差在 250~350 m,且分布有大面积的红土风化壳,其海拔高度、地貌形态等均可与三峡地区低夷平面相对比,故推断研究区分布于太行期夷平面山麓地带的古宽谷面即是形成于上新世末的唐县期宽谷—山麓面。

4.3 与滇西地区对比

上新世以来滇西地区发育一期夷平面,上新世末至第四纪初,该区由于受到印度板块的挤压而整体抬升,除此之外,还受到断裂活动影响,使夷平面解体而形成分布于海拔 650~2 500 m 的多级台地、高山或断陷盆地(李光涛等, 2008)。在印度板块挤压作用下,华北地区同样大面积抬升,只是不如青藏高原隆升强烈,准平原被抬升的幅度小于滇西地区,但通过两地夷平面海拔高度的对比,仍可推断王莽岭地区海拔约 1 100 m 的古宽谷面应发育于上新世。

4.4 与张家界地区对比

倪志云等认为张家界地区发育一级海拔 1 100~1 300 m 形成于晚第三纪湿热环境的夷平面,夷平面上红土风化壳为硅铝型风化壳,风化壳经历了较强的风化淋溶过程,但脱硅富铝作用较弱,属中等发育程度(倪志云等, 2011)。

分布于海拔 800~1 100 m 古宽谷的风化壳也属硅铝型风化壳,通过对 Al₂O₃、Fe₂O₃ 与 SiO₂ 的线性拟合以及对化学蚀变指数和风化淋溶系数的分析,表明红土风化壳的脱硅富铝作用并不强,其风化程度属中等。本区红土风化壳主量元素及相关风化系

数与张家界地区具有很好的一致性,可能也指示本区古宽谷面是形成于上新世暖湿气候环境下的唐县期夷平面。

5 结论与展望

5.1 结论

通过对太行山南缘王莽岭地区风化壳的性质与夷平面的形成环境进行深入研究,得到以下几点认识:

(1)研究区发育一级夷平面和一级古宽谷—山麓面:夷平面分布在海拔高度 1 400~1 600 m 附近,由山顶面及其邻区海拔相近的山岭顶部组成,其上发育风化壳和古岩溶等残留地貌;古宽谷—山麓面分布在海拔高度 800~1 100 m 附近,宽缓的谷底发育大量红土风化壳和古岩溶等残留地貌。

(2)研究区夷平面形成于湿热的气候环境下,其经历较强的风化作用后,易溶组分严重流失,脱硅富铝化作用明显,但红土风化壳的发育未进入后期,属中等发育程度;古宽谷—山麓面形成于温暖、湿润的气候环境下,其经历的风化作用强度弱于夷平面,虽风化壳中易溶组分强烈淋滤流失,但脱硅富铝作用并不强,风化壳的发育程度属中等偏弱。

(3)研究区夷平面可能是形成于渐新世的太行期夷平面,而古宽谷面可能是形成于上新世的唐县期宽谷—山麓面。

5.2 展望

由于此次研究仅是通过区域综合对比研究,初步判断了夷平面和古宽谷风化壳的形成年代,因此,下一步工作重点是对夷平面和古宽谷风化壳进行详细测年分析,为太行山南缘夷平面的形成和演化提供年代学依据。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. 121201013000150002-06).

参考文献:

- 冯金良,崔之久,朱立平. 2002. 高海拔山地碳酸盐岩风化壳的发育特征及其地貌意义[J]. 中国岩溶, 21(4): 239-244.
- 高柳青,袁宝印. 1996. 南宁、百色盆地红土风化壳的地球化学特征及其环境意义[J]. 地理研究, 15(1): 82-90.
- 龚明权. 2010. 新生代太行山南段隆升过程研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 李德文,崔之久. 2004. 岩溶夷平面演化与青藏高原隆升[J]. 第四纪研究, 24(1): 58-66, 134.
- 李光涛,陈国星,苏刚,杨攀新. 2008. 滇西地区怒江河流阶地、夷平面变形反映的第四纪构造运动[J]. 地震, (3): 125-132.
- 马寅生,赵逊,赵希涛,吴中海,高林志,张岳桥,赵汀,吴珍

- 汉,扬守政. 2007. 太行山南缘新生代的隆升与断陷过程[J]. 地球学报, 28(3): 219-233.
- 倪志云,杨桂芳,张绪教,田明中,平亚敏,杨振. 2011. 张家界地区风化壳的性质与夷平面形成环境[J]. 现代地质, 25(4): 789-795.
- 任雪梅,陈忠,罗丽霞,周心琴,王建力. 2003. 夷平面研究综述[J]. 地理科学, 23(1): 107-111.
- 吴忱,马永红,张秀清,吴金祥,赵明轩. 1999a. 华北山地地形面地文期与地貌发育史[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社.
- 吴忱,张秀清,马永红. 1996. 华北山地地貌面与新生代构造运动[J]. 华北地震科学, 14(4): 40-50.
- 吴忱,张秀清,马永红. 1999b. 太行山燕山主要隆起于第四纪[J]. 华北地震科学, 17(3): 1-7.
- 吴忱,张秀清,赵英魁. 2000. 中国华北山地的层状地貌与喜马拉雅构造运动[J]. 地理学与国土研究, 16(3): 82-86.
- 吴忱. 2001. 论太行山地区旅游风景地貌资源[J]. 地理学与国土研究, 17(4): 6-10.
- 吴忱. 2008a. 地貌面、地文期与地貌演化——从华北地貌演化研究看地貌学的一些基本理论[J]. 地理与地理信息科学, 24(3): 75-78.
- 吴忱. 2008b. 华北地貌环境极其形成演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 谢世友,袁道先,王建力,况明生. 2006. 长江三峡地区夷平面分布特征及其形成年代[J]. 中国岩溶, 25(1): 40-45.
- 叶玮,朱丽东,李凤全,杨立辉,SHINJI KANAYAMA, SADAYO YABUKI. 2008. 中国中亚热带网纹红土的地球化学特征与沉积环境[J]. 土壤学报, 45(3): 385-391.
- 张建新,鲁江,邢旭东,申志军,吕焕哲,张国梁. 2007. 湖南洞庭湖地区红土的元素地球化学特征及其指示意义[J]. 地质通报, 26(11): 1435-1444.
- 朱丽东,周尚哲,李凤全,叶玮,王天阳,姜永见,李建武. 2007. 南方更新世红土氧化物地球化学特征[J]. 地球化学, 36(3): 295-302.

References:

- FENG Jin-liang, CUI Zhi-jiu, ZHU Li-ping. 2002. The developing features and the geomorphic significance of carbonate rocks weathering crust on high mountains[J]. Carsikiguca Sinica, 21(4): 239-244(in Chinese with English abstract).
- GAO Liu-qing, YUAN Bao-yin. 1996. Geochemical characteristics and environmental significance of the weathering quaternary redearth crusts in the Nanning and Baise basins in the Zhuang Autonomous Region of Guangxi[J]. Geographical Research, 15(1): 82-90(in Chinese with English abstract).
- GONG Ming-quan. 2010. Study on uplift of Cenozoic on the Southern Margin of Taihang Mountains[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- LI De-wen, CUI Zhi-jiu. 2004. Karst planation surface and the Qinghai-Xizang Plateau uplift[J]. Quaternary Sciences, 24(1): 58-66, 134(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-tao, CHEN Guo-xing, SU Gang, YANG Pan-xin. 2008.

- Significant quaternary tectonic movement reflected by deformation of river terrace and planation surface in Western Yunnan Region[J]. *Earthquake*, (3): 125-132(in Chinese with English abstract).
- MA Yin-sheng, ZHAO Xun, ZHAO Xi-tao, WU Zhong-hai, GAO Lin-zhi, ZHANG Yue-qiao, ZHAO Ting, WU Zhen-han, YANG Shou-zheng. 2007. The Cenozoic rifting and uplifting process on the Southern Margin of Taihangshan uplift[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(3): 219-233(in Chinese with English abstract).
- NI Zhi-yun, YANG Gui-fang, ZHANG Xu-jiao, TIAN Ming-zhong, PING Ya-min, YANG Zhen. 2011. Characteristics of weathering crust and formation environment of planation surface in Zhangjiajie[J]. *Geoscience*, 25(4): 789-795(in Chinese with English abstract).
- REN Xue-mei, CHEN Zhong, LUO Li-xia, ZHOU Xin-qin, WANG Jian-li. 2003. Summary on the Study of Planation Surface[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 23(1): 107-111(in Chinese with English abstract).
- WU Chen, MA Yong-hong, ZHANG Xiu-qing, WU Jin-xiang, ZHAO Ming-xuan. 1999. Topographic surface, physiographic period and geomorphic evolution of mountain area in the north China[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press(in Chinese).
- WU Chen, ZHANG Xiu-qing, MA Yong-hong. 1996. The upland morphologic surface and Neozoic tectonic movement in North China[J]. *North China Earthquake Sciences*, 14(4): 40-50(in Chinese with English abstract).
- WU Chen, ZHANG Xiu-qing, MA Yong-hong. 1999. The Taihang and Yan mountains rose mainly in Quaternary[J]. *North China Earthquake Sciences*, 17(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WU Chen, ZHANG Xiu-qing, ZHAO Ying-kui. 2000. Stratiform geomorphology and Himalayan tectonic movement on the North China Mountains[J]. *Geography and Territorial Research*, 16(3): 82-86(in Chinese with English abstract).
- WU Chen. 2001. Geomorphologic resources of tourism landscape in Taihang Mountain Area[J]. *Geography and Territorial Research*, 17(4): 6-10(in Chinese with English abstract).
- WU Chen. 2008. Geomorphology surface, physiographics cycle and geomorphology evolution: some basic theory on geomorphology inferred from physiographics evolvement in north China[J]. *Geography and Geo-information Science*, 24(3): 75-78(in Chinese with English abstract).
- WU Chen. 2008. Landform environment and its formation in north China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- XIE Shi-you, YUAN Dao-xian, WANG Jian-li, KUANG Ming-sheng. 2006. Features of the planation surface in the surrounding area of the three gorges of Yangtze[J]. *Carologica Sinica*, 25(1): 40-45(in Chinese with English abstract).
- YE Wei, ZHU Li-dong, LI Feng-quan, YANG Li-hui, SHINJI KANAYAMA, SADAYO YABUKI. 2008. Sedimentary environment of vermicular weathering crust in mid-subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 45(3): 385-391(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jian-xin, LU Jiang, XING Xu-dong, SHEN Zhi-jun, LÜ Huan-zhe, ZHANG Guo-liang. 2007. Element geochemistry of laterite in the Dongting Lake area, Hunan, China and its indicative significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(11): 1435-1444(in Chinese with English abstract).
- ZHU Li-dong, ZHOU Shang-zhe, LI Feng-quan, YE Wei, WANG Tian-yang, JIANG Yong-jian, LI Jian-wu. 2007. Geochemical behavior of major elements of Pleistocene weathering crust in South China[J]. *Geochimica*, 36(3): 295-302(in Chinese with English abstract).