

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.255>



浙赣三山地区早-中奥陶世斑脱岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 精确定年

唐增才^{1,2}, 刘凤龙¹, 董学发¹, 余盛强¹, 赵旭东¹, 胡开明¹, 陈忠大¹, 吴小勇¹

1. 浙江省地质调查院, 浙江杭州 311203

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 目前浙赣三山地区“金钉子”尚无精确的同位素年龄数据。基于钾质斑脱岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测试, 三山地区早-中奥陶世宁国组 *Azygograptus suecicus* 带中部、*Exigraptus clavus* 带底部、*Acrograptus ellesae* 带中部的同位素年龄分别为 482.9 ± 6.1 Ma、 477.6 ± 8.3 Ma 和 467.0 ± 4.4 Ma, 为华南地区中奥陶世大坪阶和达瑞威尔阶底界的全球界线层型(GSSP)开展地层对比提供了精确的同位素年代学依据。结合生物带对比, 大致将浙西地区早-中奥陶世普遍存在的地层缺失事件的发生时限界定于 $482.9 \sim 477.6$ Ma 之间, 即杭州-嘉兴台地缺失牙形刺 *Oepikodus evae* 带-*Lenodus anticariabilis* 带(或笔石 *Azygograptus suecicus* 带-*Acrograptus ellesae* 带)地层, 其代表了郁南运动在浙西地区的具体表现, 拉开了华南地区早古生代构造运动的序幕, 也可能是欧洲加里东造山过程中亨伯运动和塔康运动的远程响应。

关键词: 年代学; 地球化学; 斑脱岩; 奥陶纪; 区域构造运动; 三山地区。

中图分类号: P534.42; P542; P597.3

文章编号: 1000-2383(2019)09-2963-15

收稿日期: 2017-05-27

SHRIMP U-Pb Zircon Dating for the Early-Middle Ordovician K-Bentonites in Jiangshan-Changshan-Yushan, Zhejiang-Jiangxi Border Area

Tang Zengcai^{1,2}, Liu Fenglong¹, Dong Xuefa¹, Yu Shengqiang¹, Zhao Xudong¹, Hu Kaiming¹,
Chen Zhongda¹, Wu Xiaoyong¹

1. Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: There are no exact isotopic age data for “Golden Spike” in Jiangshan- Changshan-Yushan, Zhejiang-Jiangxi border area. The analysis of SHRIMP U-Pb zircons from the Ningkuo Formation K-bentonites in Jiangshan- Changshan-Yushan, yielded the age of middle *Azygograptus suecicus* Zone as 482.9 ± 6.1 Ma, bottom *Exigraptus clavus* Zone as 477.6 ± 8.3 Ma, and the middle *Acrograptus ellesae* Zone as 467.0 ± 4.4 Ma, which provides the basis for exact correlation from the GSSP of Dapingian and Darriwilian strata in South China to other areas. Combined with contrast of biozones, the general strata-lost events occurred from 482.9 Ma to 477.6 Ma in West Zhejiang, which equated to the lacuna of the *Oepikodus evae* Zone to the *Lenodus anticariabilis* Zone, or *Azygograptus suecicus* Zone to *Acrograptus ellesae* Zone in Hangzhou-Jiaxing platform. We consider that it embodied the Yunan Movement in West Zhejiang, and heralded the start of the Early Paleozoic tectonic movement in South China, while responding to the Humberian Movement and Tactonic Movement in the European Caledonian Orogeny.

Key words: chronology; geochemistry; K-bentonites; Ordovician; regional tectonic movement; Jiangshan-Changshan-Yushan area.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(Nos.1212011120834, 12120114068901); 浙江省国土资源厅项目(Nos.2014004, 2010001)。

作者简介: 唐增才(1980-), 男, 高级工程师, 长期从事区域地质调查研究工作。ORCID:0000-0001-6160-2054。E-mail: zjgstzc@163.com

引用格式: 唐增才, 刘凤龙, 董学发, 等, 2019. 浙赣三山地区早-中奥陶世斑脱岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 精确定年. 地球科学, 44(9):2963-2977.

浙赣三山地区(浙江江山、常山和江西玉山)是我国早古生代地层研究的经典地区之一.众多国内外地质学家先后对该区早古生代地层、古生物等方面进行了系统深入的研究,取得了丰硕的成果.20世纪90年代开始,陈旭团队和彭善池团队在“三山地区”开展了旨在建立全球界线层型的研究工作(Chen and Bergström, 1995; Peng *et al.*, 2009).最终,国际地科联分别于1997年和2011年正式批准在浙江常山黄泥塘剖面确立奥陶系达瑞威尔阶(Darriwilian)底界和江山碓边剖面确立寒武系江山阶(Jiangshanian)底界的全球界线层型(GSSP),即“金钉子”(陈旭等, 1997, 1998; Mitchell *et al.*, 1997; 彭善池, 2011).

目前,三山地区“金钉子”尚无精确的同位素年龄数据.江山碓边江山阶金钉子因缺少可用于精确定年的载体,无法获取精准的年龄数据.浙江省地质调查院于2004年在常山黄泥塘达瑞威尔阶金钉子剖面下部化石层AEP179和AEP238分别发现斑脱岩层;张元动于1993年在江山横塘水库剖面*Azygograptus suecicus*带中部地层中发现两层斑脱岩,其中一层被确证为K型斑脱岩(Huff and Bergström, 1995),两者均为锆石良好的载体,为年代学研究提供了支撑.笔者团队于2003年在常山黄泥塘金钉子剖面AEP238层采集斑脱岩样品开展锆石 U-Pb SHRIMP定年,由

于取得的理想数据较少,难以对其地质时代进行精准限定.2014年和2015年,笔者分两次在常山黄泥塘金钉子剖面AEP238层和江山横塘水库剖面采集斑脱岩样品,再次开展锆石 U-Pb SHRIMP精确定年,以期填补浙江常山黄泥塘达瑞威尔阶(Darriwilian)金钉子同位素年龄的空白,进而为区域乃至全球早、中奥陶世地层对比提供确切的年代学依据.

1 地质背景

黄泥塘剖面地处常山县城南约5 km的金钉子园区内,横塘水库剖面位于江山市西北约4 km的横塘村水库附近(图1).两条剖面地层自下而上分别为印渚埠组、宁国组、胡乐组、硯瓦山组、黄泥岗组和长坞组,其中印渚埠组顶部至胡乐组中部地层产有大量的笔石化石,可划分为*Azygograptus suecicus*带、*Exigraptus clavus*带、*Undulograptus austroden-tatus*带(*Arienigraptus zhejiangensis*亚带和*Undulograptus sinicus*亚带)和*Acrograptus ellesae*带.

2 样品采集与测试方法

笔者用于全岩主量、微量测试和挑选锆石单矿

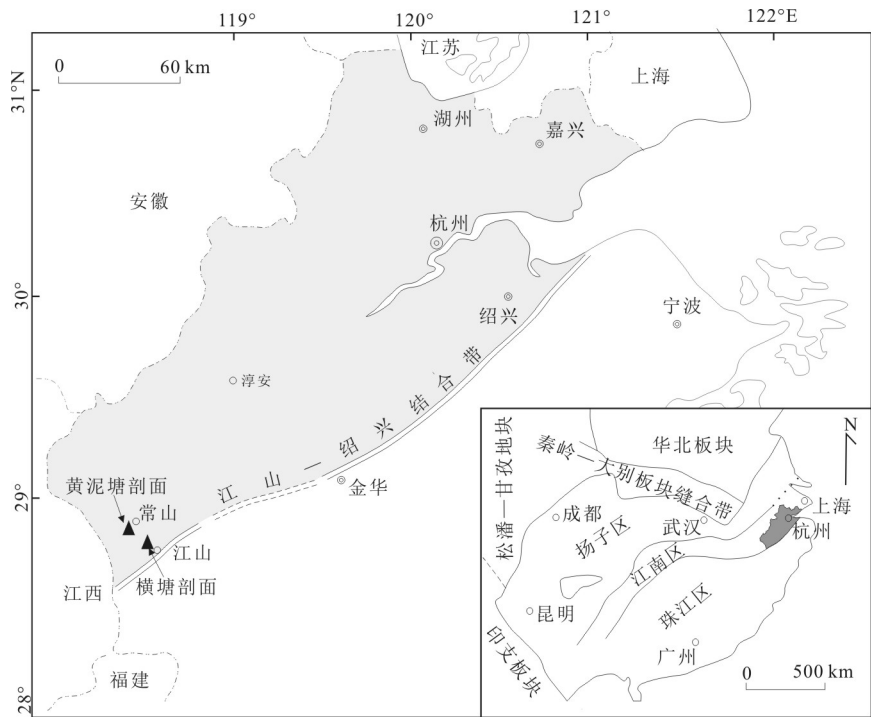


图1 三山地区横塘水库和黄泥塘剖面位置

Fig.1 Location of Huangnitang and Hengtang sections in Jiangshan-Changshan-Yushan area

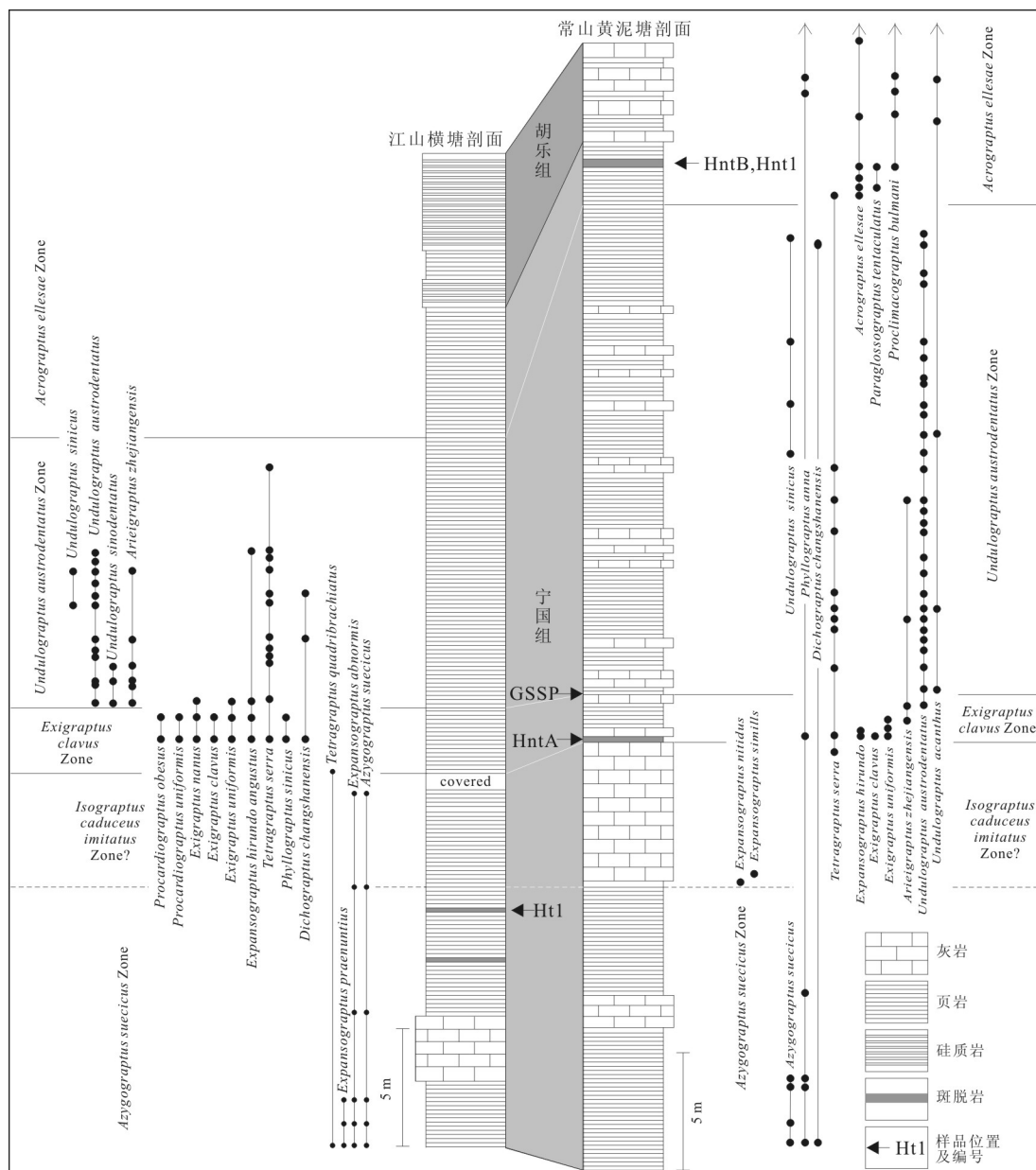


图 2 三山地区宁国组斑脱岩样品采集层位

Fig.2 Stratigraphic position of the K-bentonites from Ningkuo Formation in Jiangshan-Changshan-Yushan area

物进行 SHRIMP U-Pb 定年的宁国组斑脱岩样品分别采自常山黄泥塘剖面 *Exigraptus clavus* 带 (HntA 的坐标为 $118^{\circ}29'49.2''\text{E}$ 、 $28^{\circ}52'5.0''\text{N}$)、*Acrograptus ellesae* 带 (HntB 和 Hnt1 的坐标为 $118^{\circ}29'49.1''\text{E}$ 、 $28^{\circ}52'4.6''\text{N}$) 和江山横塘水库剖面 *Azygograptus suecicus* 带 (Ht1 的坐标为 $118^{\circ}35'41.3''\text{E}$ 、 $28^{\circ}45'12.5''\text{N}$) 地表新鲜露头, 具体层位见图 2。

样品 HntA 和 HntB 锆石挑选在江西地矿测试中心 (2003 年) 完成; 样品 Ht1 和 Hnt1 锆石分选在廊坊市诚信地质服务有限公司 (2014 年和 2015 年) 完成。

测试之前, 在北京离子探针中心按常规方法分选出晶形完好、无裂纹和包体少的锆石与标准锆石样品 (91500) 一起制靶, 并对待测样品进行透射光、反射光和阴极发光分析, 选定本次所测锆石微区分析靶位。锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析测试采用宋彪等 (2002) 和简平等 (2003) 所报道的实验流程。锆石微区原位 U-Pb 同位素定年在中国地质科学院北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成, 对测定结果数据用 SHRIMP 定年标准物质对 U、Th 和 Pb 含量及年龄作了有效校正。普通铅根据实测 ^{204}Pb 校正。

全岩主量、微量元素在中国地质大学 (武汉) 地

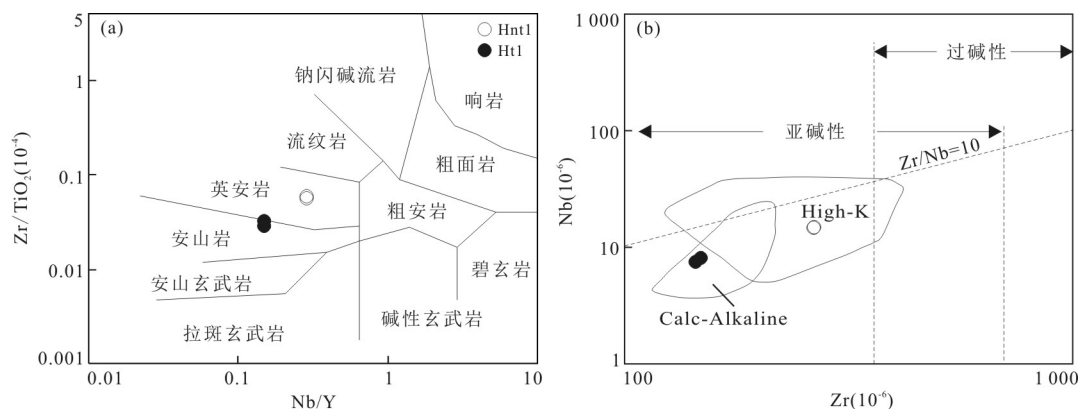


图 3 宁国组斑脱岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(a)和 Nb-Zr 图解(b)

Fig.3 Zr/TiO₂ vs. Nb/Y diagram (a) and Nb vs. Zr diagram (b) for the K-bentonites in Ningkuo Formation

图 a 据 Winchester and Floyd (1977), 图 b 据 Leat *et al.* (1986)

质过程与矿产资源国家重点实验室完成. 主要元素含量利用原子吸收分光光度计日立 ZA3000、紫外分光光度计 TU-1901 测试; 微量元素含量利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析, 具体样品处理过程、分析精密度和准确度参见 Govindaraju (1994) 和 Liu *et al.* (2008).

3 样品测试结果

3.1 钾质斑脱岩地球化学特征

三山地区宁国组斑脱岩(Ht1-1、Ht1-2 和 Hnt1-1、Hnt1-2)岩石化学成分见表 1. 斑脱岩样品 SiO₂ 含量为 51.48%~60.82%, TiO₂ 含量为 0.45%~0.50%, Al₂O₃ 含量为 21.61%~25.68%, K₂O+Na₂O 含量为 4.48%~7.29%, MgO 含量为 1.74%~2.55%, P₂O₅ 含量为 0.03%~0.12%, K₂O 含量为 4.44%~7.21%, 与钾质斑脱岩(大于 3.50%)的特征相符(周明忠等, 2007). K₂O/Na₂O 值为 94.3~125.7, 也显示富钾质的属性. Al₂O₃/TiO₂ 值为 46.98~57.07(均大于 40), 指示其火山灰物源属性(张超等, 2005). 在 Zr/TiO₂×10⁻⁴-Nb/Y 图解(图 3a)和 Nb-Zr 图解(图 3b)中, 样品分别落入安山岩和英安岩范围, 显示钙碱性和高钾钙碱性特征. 综上所述, 宁国组斑脱岩原始岩浆为钙碱性安山岩和高钾钙碱性英安岩.

在稀土元素组成(表 1)方面, 斑脱岩 ΣREE=225.52×10⁻⁶~279.98×10⁻⁶, 平均值为 253.66×10⁻⁶; 轻重稀土分异明显, LREE/HREE=6.10~8.18, La_N/Yb_N=4.54~10.74, δEu 为 0.47~0.61, 显示弱至中等程度的负铕异常, 球粒陨石标准化图解

中稀土配分曲线具有向右微倾的特征(图 4a).

在微量元素组成(表 1)方面, 斑脱岩 Zr/Hf 比值为 24.2~29.4, 平均为 27.1, 与火—沉粘土岩区间(27~36.5)接近(冯宝华和董茹丽, 1993); Ti/Th 值为 62.4~99.9, 平均为 78.5, 与酸性火山灰物源的粘土岩区间(30~400)耦合(冯宝华, 1989). 在蛛网图(图 4b)上显示富集 Rb、K 和亏损 Sr、Ba 等大离子亲石元素, 富集 Th、U, 相对亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素, 表现出类似岛弧岩浆岩的特征.

3.2 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

3.2.1 三山地区宁国组 *Azygograptus suecicus* 带和 *Exigiraptus clavus* 带斑脱岩锆石年龄 图 5 为笔者团队 2003 年在常山黄泥塘剖面宁国组 *Exigiraptus clavus* 带底部斑脱岩样品(HntA)和笔者 2014 年在江山横塘剖面 *Azygograptus suecicus* 带上部、接近 *Isograptus caduceusimitatus* 带(?)底部斑脱岩样品(Hnt1)中挑选的锆石的阴极发光(CL)图像, 并将 SHRIMP 定年测试点位和相应的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 视年龄数据标注于其上. 在阴极发光图像中, 两次所测试的锆石基本呈半透明柱状自形—半自形晶, 长 150~200 μm, 长宽比值约为 2, 少数可达 6~7. 锆石晶体柱面平直发育, 且绝大多数内部见有可辨别的韵律环带和平行条带结构, 显示岩浆结晶锆石特征.

表 2 列出了常山黄泥塘剖面 *Exigiraptus clavus* 带底部和江山横塘水库剖面 *Azygograptus suecicus* 带上部采集的斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定数据. 所测锆石的 ²⁰⁶Pb_c 含量范围为 0.01%~23.08%; 35 个测点放射成因铅(²⁰⁶Pb*)含量变化范围为 3.32×10⁻⁶~52.8×10⁻⁶, U 含量范围在 51×

表 1 宁国组斑脱岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})组成Table 1 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) of the K-bentonites in Ningkuo Formation

样号	Ht1-1	Ht1-2	Hnt1-1	Hnt1-2
SiO ₂	56.83	60.82	51.69	51.48
TiO ₂	0.50	0.46	0.46	0.45
Al ₂ O ₃	23.67	21.61	25.57	25.68
TFe ₂ O ₃	2.50	2.46	3.05	3.07
MnO	0.01	0.01	0.02	0.03
MgO	1.99	1.74	2.53	2.55
CaO	0.013	0.091	0.630	0.640
Na ₂ O	0.04	0.04	0.08	0.08
K ₂ O	5.53	4.44	7.17	7.21
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.12	0.10
LOI	8.68	7.92	8.68	8.78
Total	99.80	99.62	100.00	100.06
K ₂ O/Na ₂ O	125.7	120.0	94.3	96.1
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	47.34	46.98	55.59	57.07
AR	1.62	1.52	1.76	1.77
Rb	241	276	343	330
Sr	15	16	19	18
Ba	216	253	483	481
Th	30	32	42	43
Zr	144	148	265	264
Hf	5.57	6.11	9.00	9.09
Nb	7.59	8.22	15.10	14.90
Ta	1.47	1.60	2.57	2.54
V	66.4	76.1	53.2	52.2
Cr	32.6	37.6	22.1	22.4
Co	11.00	7.47	8.87	9.27
Ni	30.2	28.2	21.2	21.4
Y	51.3	55.3	51.8	50.6
Zr/Hf	25.9	24.2	29.4	29.0
Ti/Th	99.9	86.2	65.3	62.4
La	52.1	56.6	36.0	39.5
Ce	94.7	97.4	101.4	113.2
Pr	14.4	15.6	9.3	10.2
Nd	59.03	63.20	37.82	41.61
Sm	11.85	12.66	8.07	8.62
Eu	2.14	2.32	1.14	1.21
Gd	9.77	10.98	6.88	7.25
Tb	1.42	1.52	1.22	1.22
Dy	7.47	8.45	8.49	8.35
Ho	1.46	1.64	1.82	1.83
Er	3.96	4.47	5.92	5.88
Tm	0.57	0.64	0.89	0.92
Yb	3.48	3.93	5.70	5.63
Lu	0.51	0.59	0.84	0.82
ΣREE	262.86	279.98	225.52	246.26
LREE/HREE	8.18	7.69	6.10	6.72
La _N /Yb _N	10.74	10.33	4.54	5.04
δEu	0.61	0.60	0.47	0.47

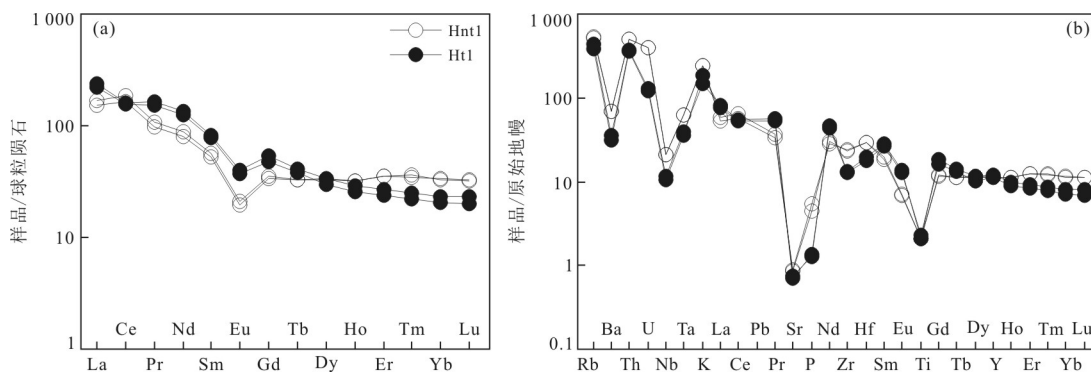


图4 宁国组斑脱岩稀土元素球粒陨石标准化曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.4 Chondrite-normalized REE pattern (a) and trace element spider diagram(b) for the K-bentonites in Ningkuo Formation
标准值据 Sun and McDonough (1989)

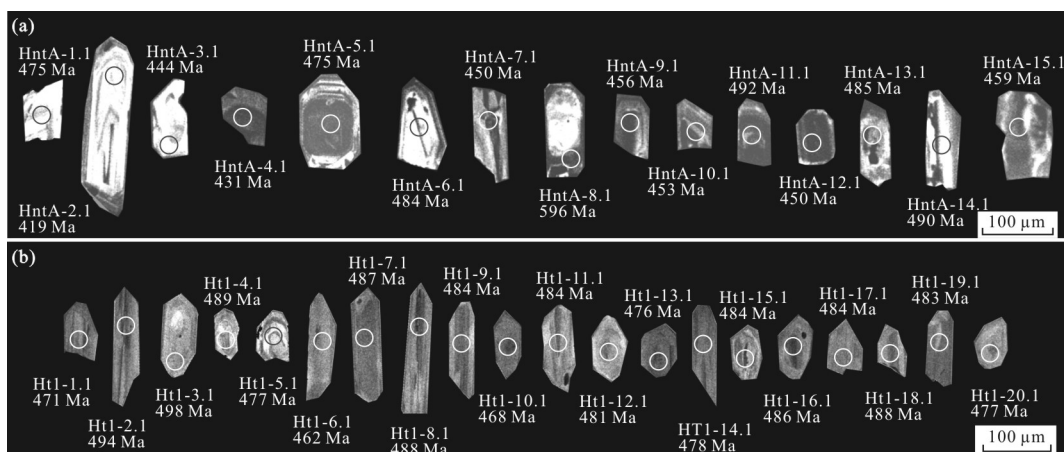


图5 宁国组 *Azygograptus suecicus* 带和 *Exigraptus clavus* 带斑脱岩锆石的阴极发光图像及分析点位和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄
Fig.5 CL photomicrographs, measured points and age data ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) of zircons for the K-bentonites of *Azygograptus suecicus* Zone and *Exigraptus clavus* Zone in Ningkuo Formation

图 a、b 分别为常山黄泥塘金钉子剖面宁国组斑脱岩 HntA、江山横塘剖面宁国组斑脱岩 Hnt1

$10^{-6} \sim 739 \times 10^{-6}$ 之间, Th 含量变化范围为 $21 \times 10^{-6} \sim 1020 \times 10^{-6}$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 为 $0.26 \sim 1.76$. 较高的 U、Th 含量和 Th/U 值与典型岩浆岩中锆石的特征是一致的.

常山黄泥塘剖面宁国组 *Exigraptus clavus* 带底部斑脱岩(HntA)15个锆石测点年龄数据多集中于 $450 \sim 492$ Ma, 但 HntA-2.1、3.1、4.1、8.1、12.1 测点的锆石发育较多裂纹, 而测点 HntA-7.1、9.1、10.1、14.1 等的测试数据谐和性较差, 导致所测年龄可信度较差. 剩余 6 个测点落在谐和曲线上(图 6a), 谐和年龄为 476.4 ± 8.9 Ma (95% 可信度), $\text{MSWD} = 1.50$; $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 比值年龄的加权平均值为 477.6 ± 8.3 Ma (95% 可信度), $\text{MSWD} = 1.40$ (图 6a), 两者较为一致, 显示年龄具有较高的可信度.

江山横塘水库剖面宁国组 *Azygograptus sue-*

cicus 带中部斑脱岩(Ht1)20个锆石测点年龄数据集中于 $470 \sim 498$ Ma 之间, 除测点 Ht1-5.1、6.1、8.1、12.1、14.1、15.1、16.1、17.1、18.1 数据谐和性比较差外, 其余 11 个测点均落在谐和线上(图 6b), 谐和年龄为 483.3 ± 6.5 Ma (95% 可信度), $\text{MSWD} = 0.73$; $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 比值年龄的加权平均值为 482.9 ± 6.1 Ma (95% 可信度), $\text{MSWD} = 0.78$ (图 6b), 两者较为一致, 说明宁国组 *Azygograptus suecicus* 带中部斑脱岩锆石 U-Pb 年龄在 482.9 Ma 左右基本可信.

Williams and Harper (1994) 在澳大利亚和纽芬兰获得特码豆克 (Tremadocian) 晚期 *Aorograptus victoriae* 笔石带年龄为 $485.15 \sim 483.7$ Ma; 爱尔兰西部南梅奥特马豆克阶 Finny 组的锆石 U-Pb 年龄为 489.9 ± 3.1 Ma 和 487.8 ± 2.3 Ma (Chew *et al.*, 2007). 英国加利恩内山下伏于弗洛阶上部或大坪

表 2 宁国组 *Azyograpthus suecicus* 带和 *Exigrapthus clavus* 带斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果

Table 2 SHRIMP U-Pb data of zircons for the K-bentonites of *Azyograpthus suecicus* and *Exigrapthus clavus* zones in Ningkuo Formation

点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* (10 ⁻⁶)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	±1σ (%)	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	±1σ (%)	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	±1σ (%)	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±1σ (%)
HntA-1.1	6.51	133	74	0.57	9.36	475	10	0.046 1	8.9	0.486 1	8.8	0.076 5	2.3
HntA-2.1	3.91	112	54	0.50	6.72	419	9.1	0.050 7	6.6	0.469 3	6.6	0.067 2	2.2
HntA-3.1	9.70	134	93	0.72	9.11	444	10	0.047 0	21	0.470 7	20	0.071 4	2.4
HntA-4.1	3.63	689	417	0.63	42.5	431	9.2	0.056 8	2.6	0.541 2	3.3	0.069 1	2.1
HntA-5.1	1.31	739	638	0.89	49.2	475	9.6	0.057 6	1.3	0.607 0	2.5	0.076 5	2.1
HntA-6.1	8.92	141	97	0.71	10.4	484	11	0.060 0	8.6	0.650 6	8.7	0.078 0	2.3
HntA-7.1	23.08	296	262	0.92	23.9	450	10	0.056 0	14	0.560 4	14	0.072 3	2.3
HntA-8.1	12.17	202	151	0.78	19.1	596	13	0.096 0	5.6	1.290 3	6.2	0.096 8	2.2
HntA-9.1	4.82	375	441	1.22	24.8	456	9.4	0.059 8	4.8	0.605 1	4.8	0.073 4	2.1
HntA-10.1	14.88	598	1020	1.76	43.9	453	9.5	0.054 0	9.9	0.540 3	9.8	0.072 8	2.2
HntA-11.1	5.55	501	298	0.61	36.1	492	10	0.062 8	3.2	0.687 4	3.9	0.079 3	2.2
HntA-12.1	14.46	727	425	0.60	52.8	450	9.3	0.070 0	8.2	0.700 6	8.1	0.072 3	2.3
HntA-13.1	13.24	235	162	0.71	18.2	485	11	0.078 5	6.1	0.850 2	6.3	0.078 1	2.3
HntA-14.1	19.43	216	167	0.80	18.2	490	11	0.090 0	11	0.980 7	11.2	0.079 1	2.4
HntA-15.1	2.01	318	179	0.58	20.5	459	9.6	0.061 0	3.6	0.620 1	4.2	0.073 8	2.2
Ht1-1.1	--	185	87	0.48	12	471	9.9	0.055 7	3.6	0.581 4	4.2	0.075 8	2.2
Ht1- 2.1	--	360	173	0.50	24.6	494	10	0.059 2	1.7	0.650 0	2.7	0.079 7	2.1
Ht1- 3.1	--	183	59	0.33	12.6	498	10	0.056 1	2.3	0.620 9	3.1	0.080 3	2.2
Ht1- 4.1	0.02	202	62	0.32	13.6	489	14	0.057 9	2.4	0.628 5	3.7	0.078 7	2.9
Ht1- 5.1	0.09	211	57	0.28	13.9	477	10	0.053 7	3.4	0.568 5	4.1	0.076 8	2.2
Ht1- 6.1	0.60	210	219	1.08	13.5	462	9.9	0.053 6	4.2	0.548 9	4.8	0.074 3	2.2
Ht1- 7.1	0.10	217	175	0.84	14.6	487	10	0.054 7	4.0	0.591 1	4.6	0.078 4	2.2
Ht1- 8.1	0.12	231	154	0.69	15.6	488	10	0.053 7	2.8	0.581 7	3.6	0.078 6	2.2
Ht1- 9.1	--	298	351	1.22	19.9	484	9.9	0.059 6	2.0	0.640 9	2.9	0.077 9	2.1
Ht1- 10.1	0.01	51	21	0.42	3.32	468	12	0.056 2	5.1	0.584 4	5.7	0.075 4	2.6
Ht1- 11.1	--	302	226	0.77	20.2	484	9.8	0.057 2	2.3	0.614 6	3.1	0.078 0	2.1
Ht1- 12.1	0.42	194	55	0.29	13	481	10	0.052 2	2.9	0.557 8	3.6	0.077 5	2.2
Ht1- 13.1	0.26	258	96	0.39	17	476	9.8	0.054 9	2.6	0.580 6	3.3	0.076 7	2.1
Ht1- 14.1	0.29	157	70	0.46	10.4	478	10	0.052 9	5.9	0.561 4	6.3	0.077 0	2.2
Ht1- 15.1	0.35	215	177	0.85	14.5	484	10	0.052 2	2.1	0.560 8	3.0	0.077 9	2.1
Ht1- 16.1	0.43	264	166	0.65	17.8	486	9.9	0.054 2	2.1	0.584 8	3.0	0.078 3	2.1
Ht1- 17.1	0.25	184	50	0.28	12.4	484	10	0.054 4	2.4	0.584 3	3.2	0.077 9	2.2
Ht1- 18.1	0.18	316	145	0.48	21.3	488	9.9	0.053 4	2.3	0.578 1	3.1	0.078 6	2.1
Ht1- 19.1	0.15	247	233	0.97	16.6	483	9.9	0.054 7	2.3	0.587 1	3.1	0.077 9	2.1
Ht1- 20.1	--	179	106	0.61	11.8	477	10	0.054 5	2.2	0.577 9	3.1	0.076 9	2.2

注:Pb_c和 Pb*分别代表普通铅和放射性成因铅,标准校正值的误差为 0.40%。应用实测 ²⁰⁴Pb 校正普通铅。

阶(Dapingian) *Isograptus victoriaelunatus* 笔石带地层流纹岩的锆石 U-Pb 年龄为 473±0.8 Ma(Cooper *et al.*, 2008)。

阿根廷前科迪勒拉(Cerro Viejo)剖面达瑞威尔阶 *Undulograptus austrodentatus* 笔石带的斑脱岩年龄为 464±2 Ma(Huff *et al.*, 1997)。Mitchell *et al.*

(1997)根据上述年龄采用内插法获得达瑞威尔阶底界年龄为 467.5±3 Ma;Cooper and Sadler(2004)利用计算机图形对比方法计算获得达瑞威尔阶底界年龄为 468.1±1.6 Ma;Sadler *et al.*(2009)将 *U. austrodentatus* 笔石带底部和 *U.intersitus* 笔石带顶部同位素年龄分别限定为 470.54 Ma 和 467.94 Ma。

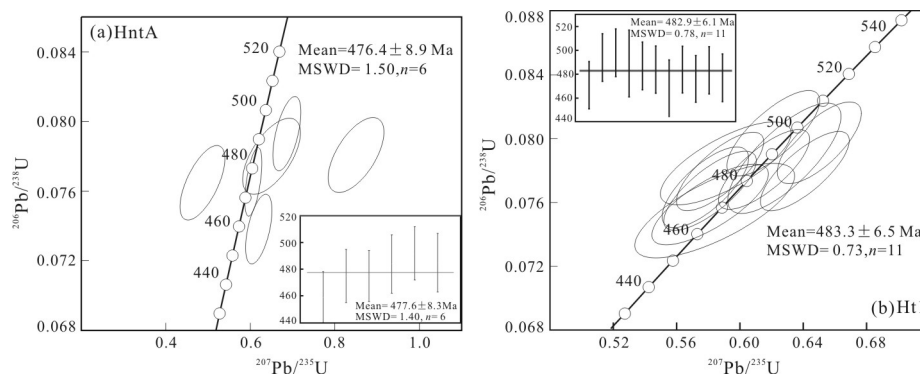


图 6 宁国组 *Azygograptus suecicus* 带和 *Exigraptus clavus* 带斑脱岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.6 SHRIMP U-Pb concordia ages of zircons for the K-bentonites of *Azygograptus suecicus* Zone and *Exigraptus clavus* Zone in Ningkuo Formation

Harper *et al.* (2010) 在爱尔兰南梅奥地区 Mweelrea 组获得达瑞威尔阶中上部 *Didymograptellus murchisoni* 笔石带年龄为 467.94~460.86 Ma; Sell *et al.* (2011) 在加拿大纽芬兰地区获得 Mainland 剖面 West Bay Centre 采石场达瑞威尔阶内部锆石 U-Pb 年龄分别为 464.5 ± 0.4 Ma 和 464.57 ± 0.95 Ma.

综上所述,全球弗洛阶和大坪阶的同位素年龄数据相对较少,弗洛阶地质时代在 483.7~473 Ma 之间,达瑞威尔阶底界年龄也被限定在 470.54~467.5 Ma 之间.本次获得弗洛阶 *Azygograptus suecicus* 带中部斑脱岩锆石 U-Pb 年龄为 482.9 ± 6.1 Ma,大坪阶 *Exigraptus clavus* 带底部年龄为 477.6 ± 8.3 Ma,为华南弗洛阶和大坪阶提供了新的年龄数据,也为常山黄泥塘达瑞威尔阶金钉子剖面全球对比提供了确切依据.

3.2.2 三山地区宁国组 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩锆石年龄 图 7 为常山黄泥塘剖面宁国组 *Acrograptus ellesae* 带采集斑脱岩中挑选的锆石的阴极发光 (CL) 图像,测定点位和相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄标注于其上.在阴极发光图像 (图 7) 中,所测锆石基本呈半透明柱状自形一半自形晶,长 150~200 μm ,长宽比值多为 2,少数可达 6~7.锆石晶体柱面平直发育,且多数锆石存在清晰可辨的韵律环带和平行条带结构,显示岩浆结晶锆石特征.

表 3 列出了宁国组 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩样品的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测试数据.所测锆石的 ^{206}Pb 含量范围为 0.02%~20.59%;43 个测点放射成因铅 ($^{206}\text{Pb}^*$) 含量变化不大,范围为 3.88×10^{-6} ~ 40.3×10^{-6} ,U 含量范围在 54×10^{-6} ~ 823×10^{-6} 之间,Th 含量变化范围为 33×10^{-6} ~ 499×10^{-6} , $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 为 0.26~1.40.较高的 U、Th 含量和

Th/U 值表明其为典型岩浆岩锆石.

2003 年常山黄泥塘剖面宁国组 *Azygograptus ellesae* 带斑脱岩 (HntB) 13 个锆石测点年龄数据多集中于 450~480 Ma,除测点 HntB-3.1、7.1、9.1、13.1 数据谐和性较差外,其他测点均落在谐和线上,谐和年龄为 463.1 ± 8.3 Ma (95% 可信度),MSWD=0.82; $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 比值年龄的加权平均值为 467.5 ± 6.4 Ma (95% 可信度),MSWD=1.01 (图 8a).

2014 年,常山黄泥塘剖面宁国组 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩 (Hnt1) 30 个锆石测点年龄数据多集中于 450~487 Ma,其中测点 Hnt1-2.1、3.1、8.1、10.1、17.1、22.1、24.1、26.1 年龄数据谐和性较差,除测点 Hnt1-29.1 给出了可能与印支期构造热事件相关的 240.3 ± 5.1 Ma 年龄外,其他 21 个测点年龄数据大致可分为两个年龄区间.第一年龄区间分布于 479~515 Ma,10 个测点均落在谐和线上,谐和年龄为 493.0 ± 6.1 Ma (95% 可信度),MSWD=0.94; $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 比值年龄的加权平均值为 490.3 ± 6.6 Ma (95% 可信度),MSWD=0.92 (图 8b);这一组年龄数据老于 *Azygograptus ellesae* 带斑脱岩年龄,可信度较低,不能准确代表 *Acrograptus ellesae* 带的地质时代.第二年龄区间分布于 450~475 Ma,11 个测点均落在谐和线上,谐和年龄为 466.9 ± 6.6 Ma (95% 可信度),MSWD=0.91; $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 比值年龄的加权平均值为 466.6 ± 6.2 Ma (95% 可信度),MSWD=0.97 (图 8c).

此外,将常山黄泥塘金钉子剖面宁国组 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩 HntB 和 Hnt1 (第二年龄区间) 的年龄测试数据合在一起进行计算,得到的谐和年龄为 466.4 ± 4.7 Ma (95% 可信度),

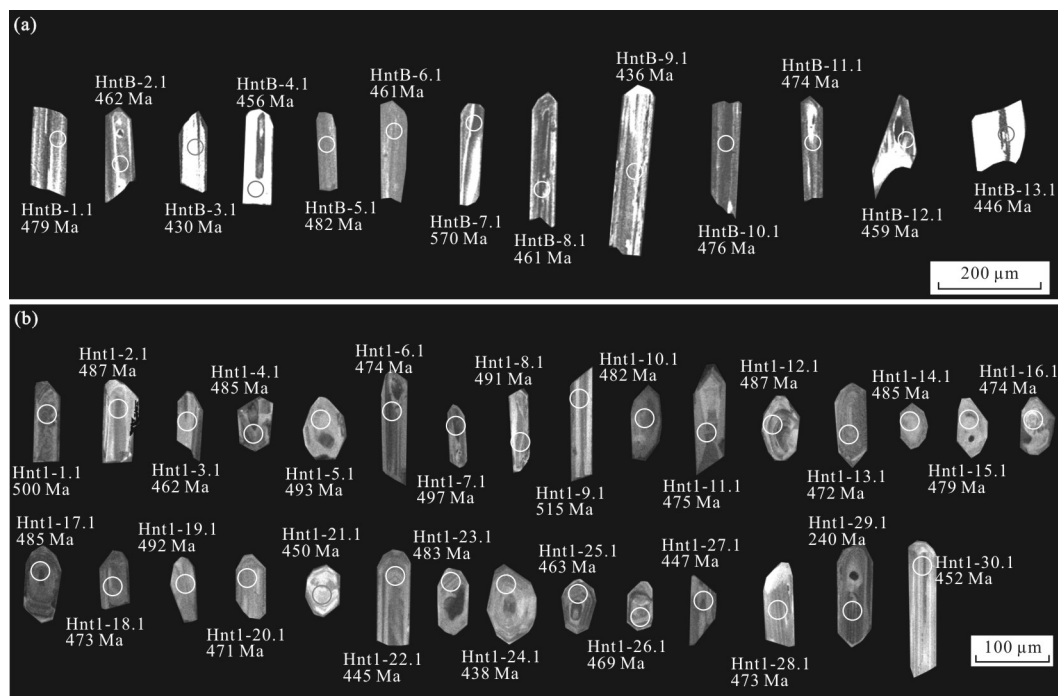


图 7 宁国组 *Azygograptus ellesae* 带斑脱岩锆石的阴极发光图像及分析点位和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄

Fig.7 CL photomicrographs, measured points and age data ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) of zircons for the K-bentonites of *Acrograptus ellesae* Zone in Ningkuo Formation

图 a、b 分别为常山黄泥塘金钉子剖面宁国组斑脱岩 HntB、Hnt1

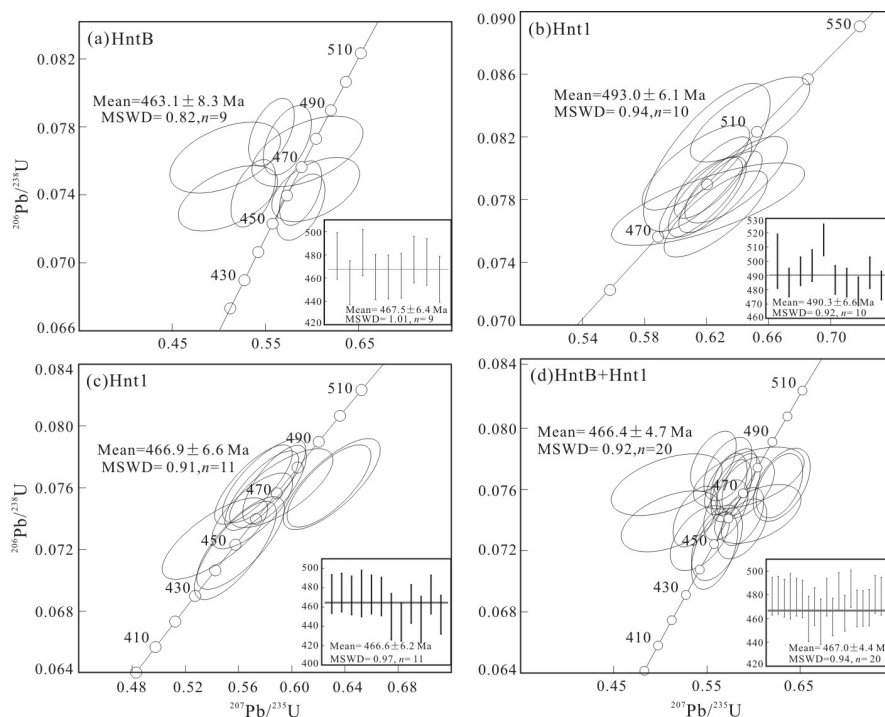


图 8 宁国组 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谱和图

Fig.8 SHRIMP U-Pb concordia ages of zircons for the K-bentonites of *Acrograptus ellesae* Zone in Ningkuo Formation

MSWD=0.92 (图 8d), $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 比值加权平均年龄为 467.0 ± 4.4 Ma (95% 可信度), MSWD=0.94 (图 8d)。

Tucker and McKerrow (1995) 获取 Deicke 和斯堪的纳维亚欣纳山钾质斑脱岩年龄分别为 454.5 ± 0.5 Ma 和 456.9 ± 1.8 Ma; Bauert *et al.* (2014) 重新取

表 3 宁国组 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果

Table 3 SHRIMP U-Pb data of zircons for the K-bentonites of *Acrograptus ellesae* Zone in Ningkuo Formation

点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* (10 ⁻⁶)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	±1σ (%)	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	±1σ (%)	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	±1σ (%)	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±1σ (%)
HntB-1.1	1.95	347	258	0.77	23.5	479	10	0.053 9	2.4	0.573 2	3.8	0.077 2	2.2
HntB-2.1	3.88	249	144	0.60	16.6	462	9.6	0.058 9	6.1	0.604 1	6.4	0.074 3	2.1
HntB-3.1	16.78	138	72	0.54	9.81	430	11	0.059 0	18	0.560 6	17	0.069 0	2.5
HntB-4.1	2.24	224	157	0.72	14.4	456	9.5	0.058 2	3.1	0.588 3	3.7	0.073 3	2.2
HntB-5.1	2.41	432	298	0.71	29.5	482	9.9	0.052 0	2.9	0.557 0	3.6	0.077 7	2.1
HntB-6.1	1.99	386	265	0.71	25.0	461	9.7	0.052 6	2.8	0.537 4	3.6	0.074 1	2.2
HntB-7.1	20.59	253	167	0.68	25.3	570	13	0.061 0	13	0.770 5	13	0.092 4	2.4
HntB-8.1	2.22	413	319	0.80	26.9	461	9.4	0.057 5	2.4	0.588 2	3.2	0.074 1	2.1
HntB-9.1	9.52	175	190	1.12	11.7	436	9.7	0.036 4	13	0.351 6	13	0.070 1	2.2
HntB-10.1	5.81	372	270	0.75	26.0	476	10	0.056 4	7.4	0.595 2	8.2	0.076 6	2.2
HntB-11.1	8.16	297	401	1.40	21.2	474	10	0.048 2	9.7	0.507 0	9.6	0.076 2	2.2
HntB-12.1	6.08	149	66	0.46	10.1	459	9.9	0.050 1	8.4	0.510 8	8.6	0.073 8	2.2
HntB-13.1	13.90	54	33	0.62	3.88	446	11	0.040 0	23	0.390 5	23	0.071 6	2.6
Hnt1-1.1	0.09	423	499	1.22	29.3	500	19	0.055 7	2.0	0.620 1	4.3	0.080 7	3.9
Hnt1-2.1	0.82	150	121	0.83	10.2	487	11	0.051 8	5.4	0.559 9	5.9	0.078 5	2.3
Hnt1-3.1	1.86	213	110	0.53	13.9	462	11	0.041 0	2.6	0.419 7	2.6	0.074 3	2.6
Hnt1-4.1	--	410	163	0.41	27.5	485	10	0.057 5	1.6	0.619 9	2.7	0.078 2	2.2
Hnt1-5.1	0.05	423	232	0.57	28.9	493	10	0.057 0	1.6	0.624 1	2.7	0.079 4	2.2
Hnt1-6.1	0.02	361	249	0.71	23.6	474	10	0.055 8	1.7	0.586 5	2.7	0.076 2	2.2
Hnt1-7.1	0.31	218	134	0.63	15.0	497	11	0.055 4	2.9	0.612 7	3.7	0.080 1	2.2
Hnt1-8.1	1.55	169	153	0.94	11.7	491	11	0.052 1	9.9	0.568 7	10	0.079 2	2.3
Hnt1-9.1	0.22	223	112	0.52	16.0	515	11	0.056 5	3.2	0.647 7	3.9	0.083 1	2.2
Hnt1-10.1	0.21	188	118	0.64	12.6	482	11	0.053 5	3.9	0.572 9	4.5	0.077 6	2.3
Hnt1-11.1	0.31	167	70	0.44	11.0	475	10	0.055 0	2.6	0.579 1	3.5	0.076 4	2.3
Hnt1-12.1	--	426	176	0.43	28.7	487	10	0.058 1	1.7	0.629 3	2.8	0.078 5	2.2
Hnt1-13.1	0.09	299	183	0.63	19.5	472	10	0.056 5	3.6	0.591 8	4.3	0.076 0	2.2
Hnt1-14.1	0.02	320	99	0.32	21.5	485	10	0.057 1	1.8	0.615 6	2.9	0.078 1	2.2
Hnt1-15.1	0.14	169	43	0.26	11.2	479	10	0.058 9	2.7	0.625 9	3.5	0.077 1	2.3
Hnt1-16.1	--	124	86	0.72	8.09	474	12	0.059 9	2.7	0.629 6	3.8	0.076 2	2.6
Hnt1-17.1	0.32	467	263	0.58	31.4	485	10	0.053 8	2.8	0.578 8	3.5	0.078 1	2.2
Hnt1-18.1	0.26	267	175	0.68	17.5	473	10	0.054 3	2.4	0.570 8	3.3	0.076 2	2.2
Hnt1-19.1	0.00	146	49	0.34	9.96	492	11	0.058 5	2.5	0.639 1	3.4	0.079 3	2.3
Hnt1-20.1	0.15	459	417	0.94	29.9	471	9.9	0.055 2	2.1	0.576 9	3.1	0.075 8	2.2
Hnt1-21.1	--	132	84	0.66	8.21	450	12	0.056 2	2.7	0.560 7	3.9	0.072 4	2.8
Hnt1-22.1	--	172	151	0.91	10.5	445	9.9	0.058 9	3.6	0.579 8	4.2	0.071 4	2.3
Hnt1-23.1	3.71	581	316	0.56	40.3	483	10	0.058 0	6.3	0.621 3	6.6	0.077 7	2.2
Hnt1-24.1	0.69	180	98	0.56	10.9	438	10	0.052 8	5.4	0.511 4	5.9	0.070 2	2.5
Hnt1-25.1	0.15	303	194	0.66	19.4	463	10	0.055 5	2.7	0.570 0	3.5	0.074 5	2.2
Hnt1-26.1	0.40	290	157	0.56	18.9	469	10	0.053 9	3.2	0.561 5	3.9	0.075 5	2.2
Hnt1-27.1	0.02	294	161	0.56	18.2	447	12	0.056 3	2.2	0.557 5	3.6	0.071 9	2.9
Hnt1-28.1	--	182	127	0.72	11.9	473	10	0.059 9	2.4	0.628 3	3.3	0.076 1	2.3
Hnt1-29.1	0.03	823	233	0.29	26.8	240	5.1	0.050 7	1.9	0.265 5	2.9	0.037 9	2.2
Hnt1-30.1	0.56	186	207	1.15	11.7	452	10	0.054 1	4.1	0.542 3	4.8	0.072 7	2.4

注: Pb_c和 Pb*分别代表普通铅和放射性成因铅, 标准校正值的误差为 0.40%. 应用实测 ²⁰⁴Pb 校正普通铅.

得瑞典欣讷山地区桑比阶斑脱岩锆石 U-Pb(加权平均)年龄为 453.4 ± 6.6 Ma, 爱沙尼亚 paaskiila 地区锆石 U-Pb(加权平均)年龄为 454.9 ± 4.9 Ma; Harper *et al.* (2010) 获得 Mweelrea 组桑比阶年龄为 $460.86 \sim 456.0$ Ma; 陈诚等(2012)获取鄂尔多斯盆地南缘金粟山组达瑞威尔阶晚期年龄为 465.8 ± 8.3 Ma. 上述数据与常山黄泥塘剖面宁国组 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩年龄 (467.0 ± 4.4 Ma) 大致相当, 也与达瑞威尔阶地质时代 ($470.54 \sim 460.86$ Ma) 相切合 (Sadler *et al.*, 2009).

4 讨论

4.1 对中奥陶世大坪阶和达瑞威尔阶底界的年龄限定

鉴于浙赣“三山地区”*Azygograptus suecicus* 带和 *Exigraptus clavus* 带之间的地层一直缺少关键性的特征笔石分子, 其下奥陶统一中奥陶统界线一直未能准确划定, 也导致华南地区台地相与斜坡相地层难以精确对比 (张元动等, 2009). 王传尚等 (2009) 通过图形对比研究, 认为湖北宜昌黄花场剖面中奥陶统大坪阶底界界线生物标志牙形石 *Baltoniodus triangularis* 与笔石 *Azygograptus ellesi* 的首现基本一致, 后者为 *Azygograptus suecicus* 笔石带上组合的重要分子, 进一步说明大坪阶底界位于 *Azygograptus suecicus* 带内部, 并与上、下笔石组合界线位置接近 (汪啸风等, 2005).

“三山地区”宁国组 *Azygograptus suecicus* 带中部年龄 (482.9 ± 6.1 Ma)、*Exigraptus clavus* 带底部年龄 (477.6 ± 8.3 Ma) 和 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩年龄 (467.0 ± 4.4 Ma) 的精确测定, 填补了华南地区早中奥陶世同位素年龄的空白, 进一步将中奥陶统大坪阶底界地质时代限定于 $482.9 \sim 477.6$ Ma 之间, 达瑞威尔阶底界地质时代限定于 $477.6 \sim 467.0$ Ma 之间, 对华南地区乃至全球地层对比具有积极意义.

4.2 对华南早、中奥陶世构造运动的约束

Ting (1929) 提出以广西运动 (Kwanghsian Movement) 代表在华南普遍存在的泥盆系与其下伏地层之间不整合所指示的一次构造运动. Huang (1945) 认为广西运动不仅在广西发育得好, 在湖南、广东和江西等地也均有发育, 认为可以暂时将欧洲的名称“加里东运动 (Caledonian Movement)”用于中国. Chen *et al.* (2010) 认为加里东运动与广西

运动发生在不同的古板块上, 且在时限、过程和性质上均大不相同, 并依据赣南地区陇溪组黑色含笔石地层与上覆韩江组巨厚碎屑岩系之间的生物相和岩相的剧变可能是广西运动在赣南的表现, 提出广西运动可以代表发生在奥陶纪和志留纪期间的构造运动. 刘宝珺和许效松 (1994) 根据地层间的不整合和地层缺失, 以郁南运动、崇余运动和广西运动等分别发生于寒武纪—奥陶纪之交、中奥陶世晚期及志留纪末期三期幕式运动来解释华南早古生代造山过程. McKerrow *et al.* (2000) 将加里东造山重新定义为: 从寒武纪一直持续到泥盆纪, 在 Iapetus 洋关闭过程中, 由劳伦、波罗的和阿瓦隆 3 个块体的碰撞拼贴形成的造山带, 包括佩诺布斯科特运动 (Penobscotian)、格拉姆运动 (Grampian)、亨伯运动 (Humberian)、塔康运动 (Taconic)、芬马克运动 (Finnmarkian)、斯堪的纳维亚运动 (Scandian) 和阿卡迪亚造山运动 (Acadian) 等多期造山事件. 也就是说, 不论是华南, 抑或是欧洲、北美等地, 早古生代的造山运动均可能由造山带不同时间、不同部位的构造、变质和岩浆作用等运动组成, 只是不同位置的构造表现形式可能不同.

对于早古生代华南的地理位置, 通常以古生物地理分区和古地磁数据进行恢复. 在古生物方面, 穆恩之通过全球笔石对比研究, 认为包括浙赣“三山”地区的华南扬子区奥陶纪笔石 (Mu, 1974; 穆恩之, 1980) 与 Skevington (1974) 建立的西欧的“大西洋笔石动物群”相似; 古地磁方面, 四川盆地志留纪样品的古地磁数据和古生物资料显示, 华南在志留纪时期可能是一个处于低纬度地区的孤立块体 (Opdyke *et al.*, 1987), 贵州石阡地区志留纪样品测定同样得出古纬度为 $8.3^\circ \pm 4.0^\circ$ 的结果 (Huang *et al.*, 2000); 此外, Wu *et al.* (2010) 依据物源分析, 同样得出华南古生代与劳伦大陆具有亲缘性的结论. 因此, 笔者认为早、中奥陶世的华南区位可能与西欧相邻.

浙西常山、江山、龙游、桐庐等地区普遍存在早中奥陶世沉积地层缺失事件 (Zhang *et al.*, 2007); 张元动等 (2010) 认为临安板桥地区胡乐组底界比浙赣交界“三山地区”的胡乐组底界高 2 个笔石带; 唐增才等 (2014) 通过对早、中奥陶世牙形刺的研究, 印证了浙西临安板桥和余杭留下地区早、中奥陶世缺失弗洛晚期 *Prioniodus elegans* 或 *Oepikodus communis* 牙形刺带之上至达瑞威尔中期 *Lenodus*

variabilis 牙形刺带或 *Pterograptus elegans* 笔石带以下之间的沉积,亦即缺失牙形刺 *Oepikodus evae* 带-*Lenodus anticariabilis* 带或笔石 *Azygograptus suecicus* 带-*Acrograptus ellesae* 带地层(李志宏等, 2004). 这一地层缺失可能是华南郁南运动在浙西地区的表现(刘宝珺和许效松, 1994), 也与全球北欧、加拿大纽芬兰、英国等地广泛出现的地层缺失事件相耦合(McKerrow *et al.*, 2000). 本次获得 *Azygograptus suecicus* 带中部斑脱岩锆石 U-Pb 年龄为 482.9 ± 6.1 Ma 和 *Acrograptus ellesae* 带斑脱岩年龄为 467.0 ± 4.4 Ma, 大致能够代表郁南运动(或广西运动序幕)在浙西地区地层缺失事件的时限, 也与加里东造山亨伯运动和塔康运动的时限($480 \sim 455$ Ma)基本一致(Bird and Dewey, 1970; van Staal *et al.*, 1998; McKerrow *et al.*, 2000), 可能是对两期构造运动的远程响应, 也标志着华南地区早古生代造山运动的首幕大致发生于 $482.9 \sim 467.0$ Ma.

5 结论

(1) 浙赣“三山地区”*Azygograptus suecicus* 带中部斑脱岩锆石 U-Pb 年龄为 482.9 ± 6.1 Ma, *Exigraptus clavus* 带底部年龄为 477.6 ± 8.3 Ma, *Acrograptus ellesae* 带中部年龄为 467.0 ± 4.4 Ma, 进一步将华南地区中奥陶统大坪阶底界地质时代限定于 $482.9 \sim 477.6$ Ma 之间, 达瑞威尔阶底界地质时代限定于 $477.6 \sim 467.0$ Ma 之间, 为全球地层对比提供了精确的同位素年代学依据.

(2) 华南地区郁南运动事件在浙西地区表现为沉积地层的普遍缺失, 临安地区则缺失牙形刺 *Oepikodus evae* 带-*Lenodus anticariabilis* 带或笔石 *Azygograptus suecicus* 带-*Acrograptus ellesae* 带地层, 表明华南地区早古生代造山运动首幕发生于 $482.9 \sim 467.0$ Ma 之间, 可能是加里东造山过程中亨伯运动和塔康运动的远程效应.

致谢: 锆石 U-Pb 年龄测试与数据处理得到北京离子探针中心颜强博士的指导与帮助, 全岩主量、微量元素分析由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室肖红艳、陈海红老师完成, 此处一并感谢; 审稿专家和编委提出的修改意见对改进文章质量起了重要作用, 谨表谢意!

References

- Bauert, H., Isozaki, Y., Holmer, L. E., *et al.*, 2014. New U-Pb Zircon Ages of the Sandbian (Upper Ordovician) “Big K-Bentonite” in Baltoscandia (Estonia and Sweden) by LA-ICPMS. *GFF*, 136(1): 30–33. <https://doi.org/10.1080/11035897.2013.862854>
- Bird, J. M., Dewey, J. F., 1970. Lithosphere Plate-Continental Margin Tectonics and the Evolution of the Appalachian Orogen. *Geological Society of America Bulletin*, 81(4): 1031–1060. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[1031:lpmtat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1031:lpmtat]2.0.co;2)
- Chen, C., Shi, X. Y., Pei, Y. P., *et al.*, 2012. K-Bentonites from the Jinsushan Formation of Late Ordovician, Southern Ordos Basin: SHRIMP Dating and Tectonic Environment. *Geoscience*, 26(2): 205–219 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X., Bergström, S. M., 1995. The Base of the Austro-dentatus Zone as a Level for Global Subdivision of the Ordovician. *Palaeoworld*, (5): 1–117.
- Chen, X., Mitchell, C. E., Zhang, Y. D., *et al.*, 1997. GSSP of Darriwilian (Middle Ordovician) in China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(4): 423–431 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X., Wang, Z. H., Zhang, Y. D., *et al.*, 1998. The First GSSP (Golden Spike) in China. *Journal of Stratigraphy*, 22(1): 1–9 (in Chinese with English abstracts).
- Chen, X., Zhang, Y. D., Fan, J. X., *et al.*, 2010. Ordovician Graptolite-Bearing Strata in Southern Jiangxi with a Special Reference to the Kwangsian Orogeny. *Science China Earth Sciences*, 53(11): 1602–1610. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4117-6>
- Chew, D. M., Graham, J. R., Whitehouse, M. J., 2007. U-Pb Zircon Geochronology of Plagiogranites from the Lough Nafoeey (=Midland Valley) Arc in Western Ireland: Constraints on the Onset of the Grampian Orogeny. *Journal of the Geological Society*, 164(4): 747–750. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-025>
- Cooper, M. R., Crowley, Q. G., Rushton, A. W. A., 2008. New Age Constraints for the Ordovician Tyrone Volcanic Group, Northern Ireland. *Journal of the Geological Society*, 165(1): 333–339. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-057>
- Cooper, R. A., Sadler, P. M., 2004. The Ordovician Period. In: Gradstein, F., Ogg, J., Smith, A., eds., *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge University Press, Cambridge, 165–187.
- Feng, B. H., 1989. Carboniferous-Permian Tonsteins Formed by Hydrolytic Reformation of Volcanic Ash Sediments in Northern China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(1): 101–108 (in Chinese with English abstract).

Bauert, H., Isozaki, Y., Holmer, L. E., *et al.*, 2014. New U-

- Feng, B.H., Dong, R.L., 1993. Trace Element Geochemistry of Volcanic Sedimentary Claystone and Its Source Magma Type and Chemical Differentiation Mechanism. *Regional Geology of China*, 12(4): 348—355 (in Chinese with English abstract).
- Govindaraju, K., 1994. Compilation of Working Values and Sample Description for 383 Geostandards. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 18(1): 1—158. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.1994.tb00502.x>
- Harper, D. A. T., Parkes, M. A., McConnell, B. J., 2010. Late Ordovician (Sandbian) Brachiopods from the Mweelrea Formation, South Mayo, Western Ireland: Stratigraphic and Tectonic Implications. *Geological Journal*, 45(4): 445—450. <https://doi.org/10.1002/gj.1210>
- Huang, K.N., Opdyke, N.D., Zhu, R.X., 2000. Further Paleomagnetic Results from the Silurian of the Yangtze Block and Their Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 175(3—4): 191—202. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00302-7](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00302-7)
- Huang, T. K., 1945. On Major Tectonic Forms of China. *Geol. Mem. Ser. A*, 20: 1—165.
- Huff, W.D., Bergström, S.M., 1995. Castlemainian K-Bentonite Beds in the Ningkuo Formation of the Jiangshan County—The First Lower Ordovician K-Bentonites Found in China. *Palaeoworld*, 5: 101—105.
- Huff, W.D., Davis, D.W., Bergström, S.M., et al., 1997. A Biostratigraphically Well-Constrained K-Bentonite U-Pb Zircon Age of the Lowermost Darriwilian Stage (Middle Ordovician) from the Argentine Precordillera. *Episodes*, 20: 29—33.
- Jian, P., Liu, D.Y., Sun, X.M., et al., 2003. SHRIMP Dating of Carboniferous Jinshajiang Ophiolite in Western Yunnan and Sichuan: Geochronological Constraints on the Evolution of the Paleo-Tethys Oceanic Crust. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 217—228 (in Chinese with English abstract).
- Leat, P. T., Jackson, S. E., Thorpe, R. S., et al., 1986. Geochemistry of Bimodal Basalt - Subalkaline/peralkaline Rhyolite Provinces within the Southern British Caledonides. *Journal of the Geological Society*, 143(2): 259—273. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0259>
- Li, Z. H., Wang, Z. H., Wang, X. F., et al., 2004. Conodonts Across the Lower-Middle Ordovician Boundary in the Huanghuachang Section of Yichang, Hubei. *Acta Palaeontologica Sinica*, 43(1): 14—31 (in Chinese with English abstracts).
- Liu, B. J., Xu, X. S., 1994. Atlas of Lithofacies Paleogeographic Map of South China (Sinian - Triassic). *Science Press*, Beijing (in Chinese).
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1—2): 133—153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>
- McKerrow, W. S., Mac Niocaill, C., Dewey, J. F., 2000. The Caledonian Orogeny Redefined. *Journal of the Geological Society*, 157(6): 1149—1154. <https://doi.org/10.1144/jgs.157.6.1149>
- Mitchell, C.E., Chen, X., Zhang, Y.D., et al., 1997. Definition of a Global Boundary Stratotype for the Darnwillian Stage of the Ordovician System. *Episodes*, 20(3): 158—166.
- Mu, E. Z., 1974. Evolution, Classification and Distribution of Graptoloidea and Graptodendroids. *Scientia Sinica*, 17: 227—238.
- Mu, E. Z., 1980. Researches on the Graptolithina of China. *Acta Palaeont Sinica*, 19: 143—151 (in Chinese with English abstract).
- Opdyke, N. D., Huang, K., Xu, G., et al., 1987. Paleomagnetic Results from the Silurian of the Yangtze Paraplatform. *Tectonophysics*, 139(1—2): 123—132. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90201-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90201-0)
- Peng, S. C., 2011. Jiangshanian Stage (Cambrian, Furongian) and the Gssp for the Base of the Stage Established Formally. *Journal of Stratigraphy*, 35(4): 393—396 (in Chinese with English abstracts).
- Peng, S. C., Babcock, L. E., Zuo, J. X., et al., 2009. Proposed GSSP for the Base of Cambrian Stage 9, Coinciding with the First Appearance of *Agnostotes Orientalis*, at Duibian, Zhejiang, China. *Science China: Earth Sciences*, 52(4): 434—451. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0045-8>
- Sadler, P. M., Cooper, R. A., Melchin, M., 2009. High-Resolution, Early Paleozoic (Ordovician - Silurian) Time Scales. *Geological Society of America Bulletin*, 121(5—6): 887—906. <https://doi.org/10.1130/b26357.1>
- Sell, B.K., Leslie, S.A., Maletz, J., 2011. New U-Pb Zircon data for the GSSP for the base of the Katian in Atoka, Oklahoma, USA and the Darriwilian in Newfoundland, Canada. In: Gutiérrez-Marco, J. C., Rábano, I., García-Bellido, D., eds., Ordovician of the World. *Cuadernos del Museo Geominero*, 14. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 537—546.

- Skevington, D., 1974. Controls Influencing the Composition and Distribution of Ordovician Graptolite Faunal Provinces. In: Rickards, R.B., Jackson, D.E., Hughes, C.P., eds., *Graptolite Studies in Honour of O.M.B. Bulman. Spec Papers Palaeontol*, 13: 59—73.
- Song, B., Zhang, Y.H., Wan, Y.S., et al., 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating. *Geological Review*, 48(S1): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tang, Z.C., Zhang, Y.D., Zhen, Y.Y., et al., 2014. New Material of Early Ordovician Conodonts from the Banqiao Section, Lin'an, Zhejiang and Their Biostratigraphic Significance. *Journal of Stratigraphy*, 38(4):381—389 (in Chinese with English abstracts).
- Ting, V. K., 1929. The Orogenic Movements in China (Presidential Address at the Sixth Annual Meeting). *Acta Geologica Sinica*, 8(2): 151—170. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.1929.mp8002007.x>
- Tucker, R. D., McKerrow, W. S., 1995. Early Paleozoic Chronology: A Review in Light of New U-Pb Zircon Ages from Newfoundland and Britain. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(4): 368—379. <https://doi.org/10.1139/e95-032>
- van Staal, C. R., Dewey, J. F., Mac Niocaill, C., et al., 1998. The Cambrian-Silurian Tectonic Evolution of the Northern Appalachians and British Caledonides: History of a Complex, West and Southwest Pacific-Type Segment of Iapetus. *Geological Society, London, Special Publications*, 143(1): 197—242. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1998.143.01.17>
- Wang, C.S., Wang, X.F., Chen, X.H., et al., 2009. Graphic Correlation of Graptolite Fauna near the Lower/Middle Ordovician Boundary in South China. *Geology in China*, 36(4):783—789 (in Chinese with English abstracts).
- Wang, X.F., Stouge, S., Chen, X.H., et al., 2005. Advances on the Potential GSSP for the Base of Middle Ordovician Series—Huanghuachang Section. *Journal of Stratigraphy*, 29(S1): 467—489 (in Chinese with English abstracts).
- Williams, S.H., Harper, D., 1994. Late Tremadoc Graptolites from the Lough Nafuoey Group, South Mayo, Western Ireland. *Irish Journal of Earth Science*, 13: 107—111. <https://doi.org/stable/30002213>
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325—343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wu, L., Jia, D., Li, H. B., et al., 2010. Provenance of Detrital Zircons from the Late Neoproterozoic to Ordovician Sandstones of South China: Implications for Its Continental Affinity. *Geological Magazine*, 147(6): 974—980. <https://doi.org/10.1017/s0016756810000725>
- Zhang, C., Ma, C.Q., She, Z.B., et al., 2005. Volcanic Ash in the Clay Rocks from Upper Shaximiao Formation of Middle Jurassic, Northeast of Sichuan Basin: Evidence from Petrology, Mineralogy and Geochemistry. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 415—424 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. D., Chen, X., Yu, G. H., et al., 2007. Ordovician and Silurian Rocks of Northwest Zhejiang and Northeast Jiangxi Provinces, SE China. Hefei: University of Science and Technology of China Press.
- Zhang, Y.D., Xu, H.G., Guo, W.M., et al., 2009. Biostratigraphy of the Huangnitang Reservoir Section in Changshan, Zhejiang Province. *Journal of Stratigraphy*, 33(4): 337—350 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.D., Yu, G.H., Luo, Z., et al., 2010. New Material of Graptolite from the Ordovician Hulo Formation in Banqiao Section, Lin'an, Zhejiang and Its Significance. *Journal of Stratigraphy*, 34(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M.Z., Luo, T.Y., Huang, Z.L., et al., 2007. Advances in Research on K-Bentonite. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3):351—359 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈诚, 史晓颖, 裴云鹏, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地南缘晚奥陶世钾质斑脱岩——SHRIMP 测年及其成因环境. 现代地质, 26(2):205—219.
- 陈旭, Mitchell, C. E., 张元动, 等, 1997. 中奥陶统达瑞威尔阶及其全球界线层型剖面点(GSSP)在中国的确立. 古生物学报, 36(4): 423—431.
- 陈旭, 王志浩, 张元动, 等, 1998. 中国第一个“金钉子”剖面的建立. 地层学杂志, 22(1):1—9.
- 冯宝华, 1989. 我国北方石炭—二叠纪火山灰沉积水改造而成的高岭岩. 沉积学报, 7(1):101—108.
- 冯宝华, 董茹丽, 1993. 火—沉粘土岩微量元素地球化学和物源岩浆类型及化学分异机制探讨. 中国区域地质, 12(4):348—355.
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛, 2003. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩

- SHRIMP 测年:古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约.地质学报,77(2):217—228.
- 李志宏,王志浩,汪啸风,等,2004.湖北宜昌黄花场剖面中/下奥陶统界线附近的牙形刺.古生物学报,43(1):14—31.
- 刘宝珺,许效松,1994.中国南方岩相古地理图集(震旦纪—三叠纪).北京:科学出版社.
- 穆恩之,1980.中国笔石的研究.古生物学报,19(2):143—151.
- 彭善池,2011.全球寒武系江山阶及其“金钉子”在我国正式确立.地层学杂志,35(4):393—396.
- 宋彪,张玉海,万渝生,等,2002.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论.地质论评,48(S1):26—30.
- 唐增才,张元动,甄勇毅,等,2014.浙江临安板桥早奥陶世牙形刺新材料及其意义.地层学杂志,38(4):381—389.
- 王传尚,汪啸风,陈孝红,等,2009.华南下/中奥陶统界线附近笔石动物群的图形对比研究.中国地质,36(4):783—789.
- 汪啸风,Stouge, S., 陈孝红,等,2005.全球下奥陶统一—中奥陶统界线层型候选剖面——宜昌黄花场剖面研究新进展.地层学杂志,29(S1):467—489.
- 张超,马昌前,余振兵,等,2005.四川万州中侏罗统上沙溪庙组粘土岩中火山灰的岩矿和地球化学证据.高校地质学报,11(3):415—424.
- 张元动,许红根,郭维民,等,2009.浙江常山黄泥塘水库剖面的生物地层学.地层学杂志,33(4):337—350.
- 张元动,俞国华,罗璋,等,2010.浙江临安板桥奥陶系胡乐组笔石新材料及其意义.地层学杂志,34(1):1—7.
- 周明忠,罗泰义,黄智龙,等,2007.钾质斑脱岩的研究进展.矿物学报,27(3):351—359.