DOI: 10.15898/j. cnki. 11 - 2131/td. 2016. 01. 012

真空 抽 提 结 合 同 位 素 分 析 技 术 研 究 风 化 剖 面 中 水 的 氢氧同位素组成特征

杨承帆1,杨守业1,2*

(1. 同济大学海洋与地球科学学院,上海 200092;

2. 同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092)

摘要: 沉积物不同赋存态水作为地球表生过程水岩相互作用的产物, 其氢氧同位素组成对于探讨古气候、古环境演变有重要的意义。本文 采用热重-真空抽提-液态水同位素测试三者联立技术,提取湖南风 化剖面样品不同赋存态水,并测试其氢氧同位素组成。热重分析确立 4 段抽提温度区间:0~120℃、120~300℃、300~600℃和600~ 900℃;除120~300℃及300~600℃抽提出的赋存态水性质无法确定



外,其余2个温度段赋存态水分别对应吸附水和结构水;0~120℃提取的吸附水主要为现代大气降水的蒸发 残余水。由于同位素平衡分馏的原因,赋存态水与矿物晶格结合越紧密,其氢同位素值越偏负,氧同位素值 越偏正。本研究方法可为地球表生过程和水循环研究提供依据。

关键词:热重分析;真空抽提;水的赋存状态;氢氧同位素;沉积物;风化剖面

中图分类号: 0628 文献标识码: A

地表是地球系统中岩石圈、水圈、大气圈和生物 圈相互作用的关键地带,各圈层间相互作用维持着 地球生态系统的正常运转。水岩相互作用是地球表 层最广泛、最活跃的化学作用,且与人类生存活动关 系密切,成为近几十年地球系统科学研究的热 点^[1-5]。作为水岩相互作用的产物,矿物中不同赋 存态水不但保留了沉积成岩作用信息,还蕴含表生 过程中的主要环境信息,是记录古气候、古环境演变 的重要载体^[6-7],因而对于反演成岩/成矿作 用^[8-9]、恢复古温度^[10]、重建古水文地质条件^[11-12] 有重要的研究意义。

沉积物赋存态水的研究主要集中在氢氧同位素 组成的精确测试和分馏机制,传统方法是先将沉积 物赋存态水转换成气体,然后与质谱仪联立测试氢 氧同位素组成^[13]。其中,氧同位素测试方法经历了 多次变革,初期测试方法为 CO₂ – H₂O 平衡法^[14]以 及 Boyer 等(1961)^[15]提出并经 Dugan 等^[16]和 Viglino 等^[17]改进的盐酸胍还原法;为避免在提取赋 存态水的过程中出现同位素分馏, Clayton 等 (1963)^[18]提出了五氟化溴还原法,后来 Brand 等 (1994)^[19]又提出了高温碳还原法。氢同位素测试 方法包括:Bigeleisen 等(1952)^[20]提出的铀还原法 及 Coleman 等(1982)^[21]建立的锌还原法等。以上 技术手段各有优缺点,例如盐酸胍还原法和五氟化 溴还原法对化学试剂依赖性较大,而高温碳还原法 的实验过程中部分矿物可能在高温下分解产生杂质 气体干扰质谱测定。而且以上技术均不能区分沉积 物中不同赋存态的水,只是简单地去除吸附水后测 试剩余水体的氢氧同位素组成,进而提取古温度、化 学风化信息^[10,22]。

本文在前人研究基础上,针对沉积物中不同赋 存态水的氢氧同位素测试难题,创造性地采用热重

收稿日期: 2015-06-02; 修回日期: 2015-12-17; 接受日期: 2016-01-10

基金项目:国家自然科学杰出青年科学基金资助项目(41225020);国家自然科学基金资助项目(41376049);"全球变化与海气相互作用"专项国际合作项目(GASI-GEOGE-03)

作者简介:杨承帆,博士研究生,主要从事海洋地质学研究。E-mail: cfyang@ tongji.edu.cn。

通讯作者:杨守业,博士,教授,主要从事沉积地球化学和海洋地质学研究。E-mail: syyang@ tongji.edu.cn。

- 真空抽提 - 液态水氢氧同位素测试三者联立技术 对湖南风化剖面样品进行研究,实验过程中首先利 用热重分析确定样品主要失重温度区间,进而通过 真空抽提技术提取不同赋存态水,最终测试其氢氧 同位素组成,探讨风化剖面样品不同赋存态水的氢 氧同位素变化特征及可能控制机制。

1 实验部分

1.1 样品来源及前处理

风化剖面样品于 2014 年 4 月采自湖南攸县 (113°21.799′E,27°11.233′N)。剖面高度约 15 m, 采样间隔为 10~30 cm。共采集样品 30 个,野外置 于密封袋内除空气保存,后续于实验室冷库低温保 存。风化剖面上层约 50 cm 为表土层,含有植物根 系,向下出现砖红色结块,含有大量黏土,下部逐渐 过渡为半风化、未风化基岩(玄武岩)。室内称取约 100 g 样品于 40℃低温烘干至恒重,并取 10 mg 研 磨至 200 目以下,均置于密封袋内除空气保存备用。

1.2 热重分析

为了确定样品主要失重温度区间,以便真空抽 提赋存态水,本研究采用瑞士 Mettler Toledo 公司生 产的 TGA/DSC 1 分析仪对样品进行热重分析。仪 器热天平灵敏度为 0.1 μg, 控温分辨率为 0.1℃。 称量约 10 mg 粉末样品置于坩埚内压实、上机测试, 升温速率采用 10℃/min,升温区间为 30~1000℃。

1.3 矿物中不同赋存态水的真空抽提

采用本研究自行设计的矿物赋存态水真空抽提 装置(专利号: ZL 201520491077.3),即加热蒸发再 冷凝回收的方法抽提风化剖面样品中不同赋存态的 水。技术流程为:将低温烘干的粉末样品置于坩埚 内,密封抽提装置,抽真空后对样品分温度梯度进行 加热(加热温度区间参考热重分析结果),每个温度 段恒温1h;抽提出来的水利用液氮进行冷凝收集, 密封保存,在收集水处理阶段利用阀门开合保证反 应室内真空。对于该方法前人已作了较多研究^[13], 可保证无分馏地提取样品中不同赋存态的水。

1.4 液态水氢氧同位素测试

氢氧同位素测试采用美国 LGR (Los Gatos Research)公司生产的液态水同位素分析仪(IWA - 45EP),型号912-0032,仪器精度:δD < 0.5‰,δ¹⁸O < 0.1‰。测试方法如下:对于收集的水样利用针头过滤器过滤后注入微量瓶中,随后上机测试。标样采用 LGR 公司提供的依据 VSMOW 配置的工作标样(LGR3B、LGR4B、LGR5B)。仪器工作原理是通

过加热将液态汽化,汽化后的水分子输送至内部反 应腔;采用离轴积分腔输出光谱技术对汽化水分子 吸收光谱强度及波长进行实时测量,并将这些光谱 信息转化为氢氧同位素组成。

2 结果与讨论

2.1 风化剖面样品的不同赋存态水抽提温度区间

湖南风化剖面代表性样品的热重(TG)及微商 热重(DTG)分析结果见图1,采用数据为所有30个 样品的平均值。TG曲线较为平滑,随着温度的不断 升高样品失重不断加大;温度升高到1000℃,平均 失重约5%,而样品失重范围为2.3%~9.9%。此 外,DTG曲线揭示出几个明显的失重温度区间:80 ~90℃、120~150℃、270~300℃、440~460℃及800 ~820℃,说明在这5个温度区间样品失重速率较 快。其中,80~90℃、440~460℃、800~820℃为 3个主要的失重区;80~90℃区间的峰值、峰面积最 大,样品失重量最大;440~460℃和800~820℃再 次之;而120~150℃、270~300℃两个区间的峰值 并不明显,峰面积也较小,样品失重不明显。

根据矿物中水的存在形式以及它们在晶格结构 中的作用,可以把矿物赋存态水分为几种:吸附水、 层间水、结晶水、结构水、沸石水等。其中,吸附水不 进入矿物晶格,大多吸附于矿物表面以中性水分子 形式存在,失水温度较低(100℃);层间水与沸石水 为特定矿物具有,较为少见;结晶水与结构水参与矿 物晶格构造,但前者以水分子存在,后者以(OH)⁻⁻、 H⁺、(H₃O)⁺离子形式存在,与矿物晶格结合更加 紧密^[23],同时,一般情况下结构水只有在 600℃以 上的高温下才会失去。



图 1 湖南风化剖面沉积物样品的 TG 和 DTG 分析图

Fig. 1 Thermogravimetric and differential thermogravimetric curves of the samples from Hunan weathering profile

结合矿物中不同赋存状态水的性质以及矿物的 失水温度进行分析,可推测 120℃以下失水主要为 吸附水^[22,24],600℃以上失水主要为结构水,300~ 600℃之间失水可能为结晶水,而 120~300℃之间 失水可能为层间水或结晶水^[23]。层间水属于部分 层状硅酸盐矿物所特有的水,如蒙脱石族矿物。本 文研究样品中的层间水可能不存在或含量极少,同 时由于结晶水分子与矿物晶格结合紧密程度的不 同,在较低温度下可能会有部分结晶水脱出,导致 120~300℃之间失水情况难以区分。因此,本文确 定以下抽提温度划分方案:0~120℃、120~ 300℃^[25-26]、300~600℃及 600~900℃。其中,0~ 120℃区间提取吸附水,600~900℃区间提取结构 水;对于 120~300℃以及 300~600℃区间提取水的 性质需进一步研究。

2.2 不同结合态水的氢氧同位素组成特征及可能 控制机制

湖南风化剖面沉积物样品在不同温度区间下提 取的赋存态水氢氧同位素组成如图 2 所示。从 δD $-\delta^{18}O$ 二元关系图中可以看出,0~120°C提取的吸 附水氢氧同位素值大部分落在地区蒸发线(δD = 3.9 $\delta^{18}O$ - 24.5)^[27] 与地区大气降水线(δD = 8.5 $\delta^{18}O$ + 18.37)^[28] 之间,且数据更为靠近地区蒸发 线;随着提取温度的升高,赋存态水的氧同位素值逐 渐偏正,而氢同位素值逐渐偏负;另外,同一温度区 间提取出水(吸附水除外)的氧同位素组成的变异 系数大于氢同位素变化,即相对于氧同位素而言,氢 同位素组成的离散程度更小。



图 2 湖南风化剖面样品不同赋存态水的氢氧同位素组成 (LMWL—地区大气降水线^[28])

Fig. 2 The hydrogen and oxygen isotopic compositions of sediment-bound water extracted from weathering profile samples in Hunan Province. LMWL represents local meteoric water line (from Reference [28])

本研究还发现,蓝色数据点拟合线($\delta D = 4.3$ δ^{18} O – 20. 67) 与湖南地区蒸发线接近,说明 O ~ 120℃区间提取的吸附水主要为现代大气降水的蒸 发残余水;并目数据点位置主要为蒸发线上侧,反映 出蒸发是在潮湿气候条件下进行的^[29],与现代湖南 气候条件相一致。赋存态水与矿物晶格间的结合越 紧密,所需失水温度越高,因此随着抽提温度的升 高,氧同位素值逐渐偏正,氢同位素值逐渐偏负,可 能与赋存态水形成过程中氢氧同位素分馏程度和赋 存机制的不同有关。自然界岩石中含氢矿物很少, 且 δD 值较低,但氧同位素值却偏正^[30]。水岩相互 作用使溶液中的 H⁺ 被消耗, 进入矿物中形成新生 的含水或羟基的矿物;在进入矿物的过程中伴随着 同位素平衡分馏,平衡分馏的结果使矿物晶格中水 的氢氧同位素值与矿物的氢氧同位素值保持一 致^[31]。对于较高温度下提取的赋存态水的氢同位 素组成较为集中而氧同位素组成较为离散的现象, 可能同样与稳定同位素的平衡分馏有关。结晶水与 结构水基本保存了原始大气降水的氢同位素组成而 不会与外界交换,除非矿物形成后经历了高温或一 些大的地质事件^[25,32]。同时,由于岩石中不含氢或 含氢很少,进入矿物晶格中的氢同位素与矿物内部 交换微弱,造成结合态水的氢同位素组成变化较小, 而结合态水的氧同位素与矿物内部容易发生同位素 交换以达到平衡,导致氧同位素值变化相对较大。

3 结论

本文采用热重 - 真空抽提 - 液态水氢氧同位素 测试三者联立技术,对湖南风化剖面样品不同赋存 态水进行区分,并测试其氢氧同位素组成。从实验 结果看出,热重分析可以判断样品的主要失重温度 区间,为确立真空抽提的温度区间以及提取不同赋 存态水提供可靠依据。对于湖南风化剖面样品,在 0~120℃区间提取吸附水,在600~900℃区间提取 结构水,对于120~300℃及300~600℃温度范围内 提取水的性质需进一步进行区分。

不同赋存态水的氢氧同位素组成分析表明,在 0~120℃区间提取的吸附水主要为现代大气降水的 蒸发残余水;随着抽提温度的升高,氧同位素值逐渐 偏正,氢同位素值逐渐偏负;结晶水与结构水能够较 好地保存原始大气降水的信息,用于追溯古气候、古 环境的演变。本文研究方法是对前人研究技术的改 进,如不同赋存态水区分、真空抽提去除化学试剂依 赖等,且结合最新的液态水同位素分析新技术,可以

— 71 —

快速检测矿物中不同赋存态水的氢氧同位素组成。 但本研究方法也存在着样品用量较大的问题,需在 今后深化研究中加以改进。

致谢:在抽提装置设计过程中得到河海大学茅昌 平、苏治国两位老师的帮助,在此表示衷心的感谢。

4 参考文献

- [1] 戚国庆,黄润秋,彭汉兴.水岩相互作用下结晶岩的矿物演化[J].矿物岩石,2004,24(1):43-47.
 Qi G Q, Huang R Q, Peng H X. Evolution of Mineral under Interaction of Water and Crystalline Rock [J]. Journal of Mineralogy and Petrology,2004,24(1):43-
 - 47.
- [2] 沈照理,王焰新,郭华明.水-岩相互作用研究的机遇
 与挑战[J].地球科学——中国地质大学学报,2012,
 37(2):207-219.

Shen Z L, Wang Y X, Guo H M. Opportunities and Challenges of Water-Rock Interaction Studies [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2012,37(2):207-219.

[3] 刘四兵,黄思静,沈忠民,等.砂岩中碳酸盐胶结物成 岩流体演化和水岩作用模式——以川西孝泉一丰谷 地区上三叠统须四段致密砂岩为例[J].中国科学 (地球科学),2014,44(7):1403-1417.

> Liu S B, Huang S J, Shen Z M, et al. Diagenetic Fluid Evolution and Water-Rock Interaction Model of Carbonate Cements in Sandstone: An Example from the Reservoir Sandstone of the Fourth Member of the Xujiahe Formation of the Xiaoquan-Fenggu Area, Sichuan Province, China [J]. Science China (Earth Sciences), 2014,57:1077 – 1092.

- [4] Cenki-Tok B, Chabaux F, Lemarchand D, et al. The Impact of Water-Rock Interaction and Vegetation on Calcium Isotope Fractionation in Soil- and Stream Waters of a Small, Forested Catchment (the Strengbach Case)
 [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(8): 2215 – 2228.
- [5] Yamaoka K, Matsukura S, Ishikawa T, et al. Boron Isotope Systematics of a Fossil Hydrothermal System from the Troodos Ophiolite, Cyprus: Water-Rock Interactions in the Oceanic Crust and Subseafloor Ore Deposits [J]. Chemical Geology, 2015, 396:61-73.
- [6] Rosenau N A, Tabor N J. Oxygen and Hydrogen Isotope Compositions of Paleosol Phyllosilicates: Differential Burial Histories and Determination of Middle-Late Pennsylvanian Low-latitude Terrestrial Paleotemperatures

[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 392:382 - 397.

- [7] Mix H T, Chamberlain C P. Stable Isotope Records of Hydrologic Change and Paleotemperature from Smectite in Cenozoic Western North America [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 141:532 – 546.
- [8] 顾雪祥,刘丽,董树义,等.山东沂南金铜铁矿床中的 液态不混溶作用与成矿:流体包裹体和氢氧同位素证 据[J].矿床地质,2010,29(1):43-57.
 Gu X X, Liu L, Dong S Y, et al. Immiscibility during Mineralization of Yinan Au-Cu-Fe Deposit, Shandong Province: Evidence from Fluid Inclusions and H-O Isotopes[J]. Mineral Deposits,2010,29(1):43-57.
- [9] 侯明兰,蒋少涌,沈昆,等. 胶东蓬莱金矿区流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报,2007,23(9):2241-2256.
 Hou M L, Jiang S Y, Shen K, et al. Fluid Inclusion and H-O Isotope Study of Gold Mineralization in the Penglai Gold Field, Eastern Shandong [J]. Acta Petrological Sinica,2007,23(9):2241-2256.
- [10] Tabor N J, Montañez I P. Oxygen and Hydrogen Isotope Compositions of Permian Pedogenic Phyllosilicates: Development of Modern Surface Domain Arrays and Implications for Paleotemperature Reconstructions [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005,223(1):127-146.
- [11] Vitali F, Longstaffe F J, McCarthy P J, et al. Stable Isotopic Investigation of Clay Minerals and Pedogenesis in an Interfluve Paleosol from the Cenomanian Dunvegan Formation, NE British Columbia, Canada [J]. Chemical Geology, 2002, 192(3):269 – 287.
- [12] Hodell D A, Turchyn A V, Wiseman C J, et al. Late Glacial Temperature and Precipitation Changes in the Lowland Neotropics by Tandem Measurement of δ¹⁸ O in Biogenic Carbonate and Gypsum Hydration Water [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 77:352 - 368.
- [13] 谭红兵,孔娜,张文杰,等. 盐类矿物结晶水 H 和 O 同 位素研究的科学意义与测定方法[J]. 河海大学学报 (自然科学版),2013,41(4):307-314.
 Tan H B, Kong N, Zhang W J, et al. Scientific Significance of Study of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Hydration Water of Salt Minerals and Determination Methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(4):307-314.
- [14] Epstein S, Mayeda T. Variation of ¹⁸O Content of Waters from Natural Sources [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1953, 4(5):213-224.
- [15] Boyer P D, Graves D J, Suelter C H, et al. Simple

-72 -

Procedure for Conversion of Oxygen of Orthophosphate or Water to Carbon Dioxide for Oxygen-18 Determination [J]. Analytical Chemistry, 1961, 33(13): 1906 – 1909.

- [16] Dugan Jr J P, Borthwick J, Harmon R S, et al. Guanidine Hydrochloride Method for Determination of Water Oxygen Isotope Ratios and the Oxygen-18 Fractionation between Carbon Dioxide and Water at 25 Degree [J]. Analytical Chemistry, 1985, 57(8):1734 - 1736.
- [17] Viglino J A, Harmon R S, Borthwick J, et al. Stableisotope Evidence for a Magmatic Component in Fumarole Condensates from Augustine Volcano, Cook Inlet, Alaska, USA[J]. Chemical Geology, 1985, 49(1):141-157.
- [18] Clayton R N, Mayeda T K. The Use of Bromine Pentafluoride in the Extraction of Oxygen from Oxides and Silicates for Isotopic Analysis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1963, 27(1):43 - 52.
- [19] Brand W A, Tegtmeyer A R, Hilkert A. Compound-specific Isotope Analysis: Extending toward 15 N/14 N and 18 O/16 O [J]. Organic Geochemistry, 1994, 21(6):585 - 594.
- [20] Bigeleisen J, Perlman M L, Prosser H C. Conversion of Hydrogenic Materials to Hydrogen for Isotopic Analysis [J]. Analytical Chemistry, 1952, 24(8):1356-1357.
- [21] Coleman M L, Shepherd T J, Durham J J, et al. Reduction of Water with Zinc for Hydrogen Isotope Analysis [J]. Analytical Chemistry, 1982, 54(6):993 -995.
- Lupker M, France-Lanord C, Galy V, et al. Predominant [22] Floodplain over Mountain Weathering of Himalayan Sediments (Ganga Basin) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 84:410-432.
- [23] 潘兆橹编著.结晶学与矿物学[M].北京:地质出版 社.1985.

Pan Z L. Crystallography and Mineralogy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.

[24] Horbe A M C. Oxygen and Hydrogen Isotopes in Pedogenic Minerals-Implications for Paleoclimate Evolution in Amazonia during the Cenozoic [J]. Geoderma, 2011, 163 (3):178 - 184.

- [25] Savin S M, Epstein S. The Oxygen and Hydrogen Isotope Geochemistry of Clay Minerals [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1970, 34(1):25 - 42.
- Bauer K K, Vennemann T W. Analytical Methods for the [26] Measurement of Hydrogen Isotope Composition and Water Content in Clay Minerals by TC/EA [J]. Chemical Geology, 2014, 363; 229 - 240.
- 黄煌,章新平,李广,等.长沙地区蒸发皿水体蒸发过 [27] 程中稳定同位素的变化特征[J]. 热带地理,2014,34 (6):776 - 782.Huang H, Zhang X P, Li G, et al. Variation of Stable Isotopes in Pan Water Evaporation Process in Changsha [J]. Tropical Geography, 2014, 34(6): 776 – 782.
- 黄一民,章新平,唐方雨,等.长沙大气降水中稳定同 [28] 位素变化及过量氘指示水汽来源[J]. 自然资源学 报,2013,28(11):1945-1954. Huang Y M, Zhang X P, Tang F Y, et al. Variations of Precipitation Stable Isotope and Vapor Origins Revealed by Deuterium Excess in Changsha[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(11): 1945 - 1954.
- [29] Michener R, Lajtha K. Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science [M]. Hoboken: John Wiley & Sons,2008.
- [30] 尹观,倪师军编著.同位素地球化学[M].北京:地质 出版社,2009. Yin G, Ni S J. Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [31] Clark I D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [32] Hall A M, Gilg H A, Fallick A E, et al. Kaolins in Gravels and Saprolites in North-East Scotland: Evidence from Stable H and O Isotopes for Palaeocene Miocene Deep Weathering [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 424; 6 - 16.

Using Vacuum Extraction-Isotopic Analysis Technology to Study Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Water Extracted from Weathering Profile Sediments

YANG Cheng-fan¹, YANG Shou-ye^{1,2*}

School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;
 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Hydrogen and oxygen isotopic compositions of sediment-bound water, and the product of water-rock interaction, have an important significance to the study of palaeoclimate and palaeoenvironmental evolution. In this study, combined thermogravimetry, vacuum extraction and liquid water isotopic analysis technology are used to extract different sediment-bound water in the weathering profile sediments of hunan, and analyze their hydrogen and oxygen isotopes. Based on the thermogravimetric data, four temperature intervals are determined, $0 - 120^{\circ}$ C, $120 - 300^{\circ}$ C, $300 - 600^{\circ}$ C and $600 - 900^{\circ}$ C. The host characteristics of water at the temperature intervals of $120 - 300^{\circ}$ C and $300 - 600^{\circ}$ C cannot be constrained. The water at $0 - 120^{\circ}$ C and $600 - 900^{\circ}$ C is determined as absorbed water and structural water. The water extracted from $0 - 120^{\circ}$ C is termed as absorbed water, which is mainly sourced from atmospheric precipitation after evaporation. As a result of isotopic equilibrium fractionation, the tighter the relationship between sediment-bound water and crystal structure, the more negative the relationship for hydrogen isotopic composition, and the more positive for oxygen isotopic composition. This method can provide valuable information for the study of earth surface processes and hydrological cycles.

Key words: thermogravimetry; vacuum extracted technology; different water properties; hydrogen and oxygen isotopes; sediment; weathering profile

本文引用格式:杨承帆,杨守业.真空抽提结合同位素分析技术研究风化剖面中水的氢氧同位素组成 特征[J].岩矿测试,2016,35(1):69-74. YANG Cheng-fan, YANG Shou-ye. Using Vacuum Extraction-Isotopic Analysis Technology to Study Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Water Extracted from Weathering Profile Sediments[J]. Rock and Mineral Analysis,2016,35(1):69-74. DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td. 2016.01.012.