

土壤无机磷酸盐中氧同位素分析方法的研究及应用

张 晗 王佳妮 朱永官 张 娴*

(中国科学院城市环境研究所 环境与健康重点实验室 分析测试中心, 厦门 361021)

摘 要 土壤磷酸盐氧同位素在生物地球化学研究领域中具有重要的作用, 土壤成分复杂, 氧同位素来源多样, 可靠的样品富集和纯化技术是磷酸盐氧同位素研究的前提保障。本研究以土壤无机磷酸盐氧同位素为研究对象, 采用多步沉淀法对土壤中无机磷酸盐进行提取, 并转化成 Ag_3PO_4 沉淀分离, 用于磷酸盐氧同位素测试。以氨水重结晶方法对 Ag_3PO_4 进行纯化, 通过 XRD 和元素分析验证了产品纯度。结果表明, 通过 H_2O_2 漂洗去除有机质后, 辅助氨水重结晶可有效去除 Ag_3PO_4 中夹杂的 Ag_2O 和 Ag 单质等无机杂质, 未产生同位素分馏, 采用标准 KH_2PO_4 对方法全流程安全性进行验证。对 3 种不同利用类型的土壤中磷酸盐进行分析, 结果表明, 方法的平行性良好, 不同类型土壤磷酸盐氧同位素差异显著, $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值在 15.2‰ ~ 19.5‰ 之间, 可用于土壤磷溯源研究。

关键词 土壤; 无机磷酸盐; 磷酸银; 氧同位素

1 引 言

磷酸盐氧同位素组成的研究为认识磷源的贡献^[1~3], 示踪磷酸盐生物化学循环途径^[4,5]、反应微生物或酶反应活性^[6]、磷酸盐所处周边环境温度变化^[7], 以及海洋生态系统磷循环研究发挥了重要作用。近年来, 土壤中磷酸盐氧同位素在生物地球化学研究中备受关注。在地表自然条件下, 单纯无机过程对磷酸盐氧同位素没有影响, 而生物或酶作用却可使磷酸盐与周边环境中的氧发生交换, 使磷酸盐中 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 发生变化。磷酸盐氧同位素组成的变化一定程度反应了土壤生态系统的活动性。由于不同的土壤磷源具有不同的反应活力, 其给予植物和土壤微生物的养分的能力不同, 磷酸盐氧同位素与微生物的关联使人们有可能阐明有机磷源和无机磷源在土壤中对植物及微生物的作用过程, 以及在不同动植物物种之间的差异。因此磷酸盐氧同位素有望成为土壤生态系统磷循环研究的重要途径和手段, 以及新型研究土壤磷生物化学反应过程的有力工具。

目前, 土壤中 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 的报道仍十分有限^[8~11], 土壤中含有丰富的有机质和其它复杂底质, 氧元素的多种来源使得土壤中磷元素的提取过程异常复杂, 不仅要避免处理过程中激烈酸碱条件或高温带来焦磷酸盐或有机磷酸盐水解或氧交换产生的氧同位素偏移, 更需彻底去除磷酸盐沉淀过程其它氧元素附着的干扰。可靠的样品富集和纯化技术是磷酸盐氧同位素研究的前提保障, 也是目前土壤磷酸盐氧同位素研究的重点和难点。文献^[8~10]开展了系列土壤磷酸盐的富集、纯化方法的研究。Tamburini 等^[8]介绍了提取以 HCl 可溶解的土壤磷酸盐方法, 先后采用磷酸钼胺和磷酸铵镁使磷酸盐在相对温和的条件下通过多次沉淀与其它杂质分离, 并最终转化为 Ag_3PO_4 进行测试; Weiner 等^[9]介绍了提取土壤表面易被植物吸收的无机磷源的方法, 以阳离子交换树脂和土壤在去离子水中振荡吸附磷酸盐, 用酸将磷酸盐从膜中洗脱, 转为 CePO_4 沉淀, 再通过阳离子树脂去除 Ce^{3+} , 并转为 Ag_3PO_4 沉淀; 而 Zohar 等^[10]则先后以 H_2O 、弱碱 NaHCO_3 、强碱 NaOH 和强酸 HCl 对土壤中磷酸盐逐级进行提取, 并将每步提取的磷酸盐分别沉淀为 Ag_3PO_4 单独测试, 发现不同形态的磷酸盐氧同位素存在差异。

由于土壤中的无机磷一般占土壤全磷的 50% ~ 80%^[11], 本研究选择土壤无机磷酸盐作为研究对象, 选取了不同利用类型的土壤, 采用多步沉淀法^[8]对土壤中无机磷酸盐进行提取, 并探讨了 Ag_3PO_4 的纯化方法、纯化效果及方法对同位素分馏影响, 为土壤中无机磷酸盐的氧同位素研究奠定基础。

2014-07-26 收稿; 2014-10-12 接受

本文系中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(No. IUEQN-2012-02)、国家自然科学基金(No. 21207126)、福建省自然科学基金(No. 2011J05033) 资助

* E-mail: xzhang@iue.ac.cn

2 实验部分

2.1 仪器、试剂与材料

Sterifil 卫生过滤系统(Millipore 公司); CR22GII 高速离心机、Universal 320R 低速离心机(Hettich 公司); ZHWY-211B 摇床(上海智诚公司); X'Pert PRO X 射线衍射仪、AxiosmAX X 射线荧光光谱仪(PAN-alytical 公司); Delta V advantage 元素分析仪-稳定同位素质谱仪(Thermo Fisher 公司)。

DAX-8 树脂(40 ~ 60 目, Sigma-Aldrich 公司); AG 50W-X8 树脂(H + 型, 100 ~ 200 目, BioRad 公司); Millipore 聚碳酸酯滤膜(0.22 μm); 钼酸铵、 NH_4NO_3 、柠檬酸、氨水、 MgCl_2 (分析纯, 上海国药集团); AgNO_3 (分析纯, 上海申博化工), Ag_3PO_4 (99%, Alfa Aesar 公司)。

土壤样品自然晾干, 过 200 目分子筛后备用。

2.2 实验方法

2.2.1 土壤中 PO_4^{3-} 的提取和富集方法 (1) 提取无机磷酸盐 称取 30 g 土壤于聚丙烯瓶, 向其中加入 120 mL 新配 1 mol/L HCl, 室温摇荡过夜。离心, 收集褐色滤液 A。(2) 去除有机质 向溶液 A 中加入 25 mL DAX-8 树脂浆, 摇床振荡过夜, 收集滤液 B。(3) 第一次沉淀分离(形成磷钼酸铵沉淀) 将 B 中加入 30 mL 4.2 mol/L NH_4NO_3 溶液, 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴搅拌中缓慢加入 50 mL 0.5 mol/L 钼酸铵溶液, 逐渐析出亮黄色磷钼酸铵沉淀, 转移至摇床 50 $^{\circ}\text{C}$ 摇荡 18 h。冷却, 过滤, 以 0.6 mol/L NH_4NO_3 淋洗。将沉淀转移至锥形瓶中, 加入柠檬酸溶液至沉淀全部溶解, 得到溶液 C。(4) 第二次沉淀分离(形成磷酸铵镁沉淀) 室温搅拌, 向溶液 C 中加入镁溶液 30 mL (5 g MgCl_2 和 10 g NH_4Cl 溶解于 50 mL H_2O , 用 12 mol/L HCl 调至 pH 1.0), 逐渐有白色沉淀析出, 搅拌过夜。过滤, 以氨水-去离子水(1: 1, V/V) 淋洗, 沉淀用 0.5 mol/L HNO_3 溶解, 得到溶液 D。(5) 去除阳离子 将活化后的树脂浆(BioRad AG50W-X8) 10 mL 倒入 D 中, 室温摇荡 18 h 后取出, 过滤, 以少量去离子水淋洗, 收集滤液 E 至锥形瓶中。(6) 形成 Ag_3PO_4 沉淀 滤液 E 为强酸性, 用 1.5 mol/L NH_4NO_3 -3 mol/L NH_4OH 混合液 9 mL 调至 pH 中性。向溶液 E 中加入 AgNO_3 溶液(8 g, 16 mL 去离子水) 2 mL, 立即析出黄色沉淀; 滴入 AgNO_3 至无黄色沉淀生成即可。用 0.2 μm 滤膜过滤, 去离子水多次洗涤。(7) Ag_3PO_4 纯化 以 H_2O_2 漂洗去除 Ag_3PO_4 中残余有机质, 以氨水重结晶方法去除 Ag_3PO_4 中微量无机杂质。(a) H_2O_2 提纯法: 以 15% H_2O_2 浸泡过夜, 其间多次搅拌。过滤, 以去离子水洗涤, 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘干。(b) 氨水提纯法: 取 100 mg 样品溶于 5 ~ 10 mL 氨水, 滤掉少量深色杂质, 收集无色清亮滤液置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中, 让 NH_3 缓慢挥发。每 0.5 h 添加少量去离子水, 保持体积。至溶液 pH < 7.5, 冷却至室温, 过滤, 去离子水清洗, 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘干。

2.2.2 Ag_3PO_4 稳定同位素的测量 氧同位素测量采用元素分析仪-稳定同位素质谱仪分析。EA 方法: 关闭注氧, 将 Ag_3PO_4 包入银舟压实, 在 1380 $^{\circ}\text{C}$ 高温下与裂解炉内石墨反应生成 CO。CO 在 He 载气(流速 100 mL/min) 吹扫下进入色谱柱, 在 85 $^{\circ}\text{C}$ 条件下与载气中痕量 N_2 分离, 进入稳定同位素质谱分析。IRMS 条件: 高压 3.017 kV, 磁场 9172 steps, 电流 1.5 mA, 采用纯 Ag_3PO_4 (Strem Chemicals, Ag_3PO_4 , >99%) 作为实验室工作标准, 质谱 CO 参考气校准采用国际原子能机构提供的 IAEA601 校准($\delta^{18}\text{O} = 23.3\text{‰}$)。

3 结果与讨论

3.1 提取方法的改进

3.1.1 调节 pH 值 在文献 [8] 中, Ag_3PO_4 沉淀步骤为直接向溶液 E 加入银氨混合溶液。实验发现, 以该方法得到的 Ag_3PO_4 产物中含有少量 Ag_2O 杂质, 影响 Ag_3PO_4 纯度, 本研究对该步骤做了改进: 先以 NH_4NO_3 和氨水混合溶液调节溶液 E(强酸性) pH 至中性, 然后再滴加 Ag_3PO_4 溶液, 使 Ag_3PO_4 在中性条件下析出, 可有效避免 Ag_2O 产生。

3.1.2 氨水重结晶 部分样品经过文献 [8 ~ 12] 方法以 H_2O_2 处理后, Ag_3PO_4 仍呈现墨绿色。由于 Ag_3PO_4 溶于氨水, 采用氨水重结晶方法对样品进一步纯化。为验证方法的可靠性, 本研究同时采用两家公司 Ag_3PO_4 标样(Ag_3PO_4 -1: 99%, Alfa Aesar 公司; Ag_3PO_4 -2: 99%, Strem Chemicals 公司) 和土壤中

提取样品 F 进行氨水重结晶测试(表 1), 实验表明, 氨水重结晶方法安全可靠, 未产生同位素分馏, 经过氨水重结晶的磷酸银样品形成良好的晶体形态, 可有效排除杂质干扰。

表 1 氨水重结晶对标样物质和样品 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 结果影响比较

Table 1 Comparison of $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ in standard Ag_3PO_4 and sample purified by NH_4OH method

净化方法 Purification	Ag_3PO_4 -1			Ag_3PO_4 -2			土壤 F Soil F		
	$\delta^{18}\text{O}_\text{p}$	<i>n</i>	σ	$\delta^{18}\text{O}_\text{p}$	<i>n</i>	σ	$\delta^{18}\text{O}_\text{p}$	<i>n</i>	σ
未处理 Untreated	15.3	8	0.3	8.9	8	0.1	15.2	5	0.08
Treated with NH_4OH	15.3	6	0.1	8.6	3	0.07	15.0	2	0.06

3.2 纯化结果

3.2.1 XRD 检测 采用 X 射线衍射仪对纯化前后的样品进行测定, 并与标准做比较。以土壤样品 S1 为例, 图 1a 为 S1 的提取产物, 通过与数据库比较发现含有 AgCl 和 Ag 杂质, 该杂质可通过氨水重结晶有效去除(尽管 AgCl 和 Ag 亦可形成银氨络合物溶于氨水, 由于量少, 随着 NH_3 的挥发, 其结晶速度低于 Ag_3PO_4 , 及时过滤出 Ag_3PO_4 沉淀即可去除), 图 1c 为标准 Ag_3PO_4 样品, 样品纯化结果见图 1b。

3.2.2 元素分析 采用文献 [8] 的方法, 称取不同样品量, 通过元素分析, 以样品量与裂解产生的 CO 的量作图, 并与标准物质做比较, 进一步考察样品的纯度。选取土壤 F 样品和土壤 S3 样品与标准 Ag_3PO_4 -2 作比较, 结果见图 2。实验表明, 本方法提取的土壤磷酸盐所得到的磷酸银样品与标准物质纯度相当, 其纯度甚至优于文献 [8]。部分样品(如土壤 F) 尽管颜色偏深, 但经过 H_2O_2 纯化或氨水重结晶均可有效改善。

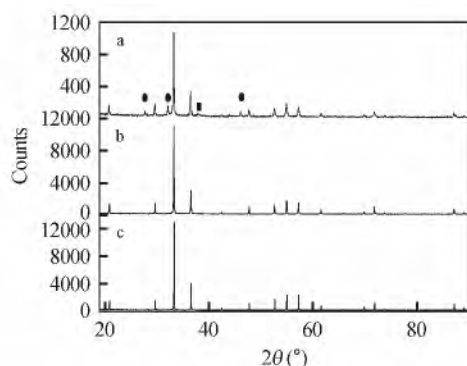


图 1 Ag_3PO_4 的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD spectrum of Ag_3PO_4

(a) 未经处理的样品 S1, ●— AgCl ; ■— Ag , (b) 经过氨水重结晶后的 S1, (c) 标准 Ag_3PO_4 。

(a) Untreated Sample S1, ●— AgCl ; ■— Ag , (b) Sample S1 after NH_4OH purification, (c) Standard Ag_3PO_4

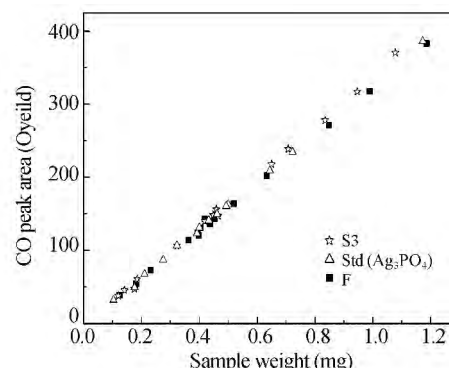


图 2 Ag_3PO_4 标准与本方法提取样品的样品量与其裂解产生的 CO 量线性图

Fig. 2 Weight of analyte plotted against the area of the CO peak for Ag_3PO_4 standard and sample treated with this method

3.3 判断全流程氧同位素分馏

Tamburini 等 [9] 通过向样品提取液中添加 ^{18}O 标记的水来全程跟踪是否发生同位素分馏, 结果证实方法安全可靠。本实验借鉴海水溶解磷酸盐氧同位素提取方法 [13], 以 KH_2PO_4 在中性条件下与 AgNO_3 反应直接生成 Ag_3PO_4 沉淀和 KH_2PO_4 以 1 mol/L HCl 溶解, 经过本方法全部流程后形成 Ag_3PO_4 沉淀, 比较以上两种结果可知, 直接反映得到的 Ag_3PO_4 沉淀 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值为 6.5‰ ($n=3, \sigma=0.14\text{‰}$), 经过全部流程后的 Ag_3PO_4 沉淀 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值为 6.9‰ ($n=3, \sigma=0.11\text{‰}$), 在方法可接受范围 ($\sigma < 0.5\text{‰}$), 表明本方法全程未产生同位素分馏。

3.4 样品量对 Ag_3PO_4 稳定同位素测量结果的影响

由于氧同位素测试精度与进入质谱 CO 的量密切相关, 样品量过低, 裂解产生的 CO 不足以使质谱获得稳定的统计信号, 影响测量准确度; 而样品量过高, 裂解不完全则有可能产生同位素分馏, 同样无法反映真实值。由于不同类型的样品高温裂解效率存在差异, 而 Ag_3PO_4 为含金属元素的无机盐, 性质稳

定,难于裂解,本研究考察了 3 种不同丰度样品(标准样(Ag_3PO_4 -2)、土壤 F 和土壤 S3) 的样品量对测试结果的影响。

由图 3 可见,当 Ag_3PO_4 样品量在 0.3 mg 以下时, $\delta^{18}\text{O}_p$ 值波动较大,标准偏差在 0.5‰~1.5‰之间,而当样品量增至 1 mg 以上时,部分样品 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值出现贫化现象,而 0.3~1.0 mg 间 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值相对平稳。密集考察了 0.4~0.5 mg 样品量的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值稳定情况,3 种丰度样品的标准偏差均在 0.1‰左右($n=4\sim 8$),质谱信号约为 8000 mV,结果精准可靠,后续测试样品量均采用此范围。

3.5 方法的回收率

为了研究本提取方法的回收率,以农田土壤为例(每个样品平行测定 2 次),采用钼锑抗分光光度法对第 1 步中 1 mol/L HCl 土壤提取液中磷酸盐进行测定,测得浓度以 P 计,记为 P_{HCl} 溶液,每 30 g 土壤提取实际得到 Ag_3PO_4 的质量 $M_{\text{Ag}_3\text{PO}_4}$ 和以 P 计质量 $P_{\text{Ag}_3\text{PO}_4}$ 同列于表 2。

由表 2 可见,由于经过多步沉淀和过滤,在样品转移过程中不可避免造成损失,方法的回收率在 56.4%~72.2% 之间,然而对于经过施肥富含磷酸盐的农田土壤,30 g 土壤可得到 452~512 mg Ag_3PO_4 ,而稳定同位素测试仅需要约 0.4 mg,即可满足实验需求。

3.6 不同类型土壤样品测定结果

本实验选取了森林、公园和农田 3 种不同利用类型的土壤样品进行考察。森林土壤 F 取自厦门集美后溪坂头水库深处,土层表面林木自然生长,不受人为磷源干扰,通过 X 射线荧光光谱仪测得其总磷含量为 0.21 mg/g。公园土壤 G1~G3 取自厦门集美杏东公园,土层表面人工栽种观赏植物,总磷含量为 0.41~0.59 mg/g,随机取 3 处表层土壤,平行测试。农田土壤取自厦门集美后溪农田,多年耕种,广泛施肥,总磷含量高达 2.38~2.68 mg/g,为了消除采样的误差,进一步验证方法的准确度,对富含磷酸盐的农田 3 组样品均进行了方法的平行实验,结果如表 3 所示。

表 2 土壤提取无机磷酸盐方法的回收率

Table 2 Recovery of inorganic phosphate extracted from soil

样品名称 Sample	P_{HCl} (P) (mg/g)	$M_{\text{Ag}_3\text{PO}_4}$ (mg in 30 g)	$P_{\text{Ag}_3\text{PO}_4}$ (mg/g)	回收率 Yield of extraction (%)
S1	1.98	452	1.11	56.4
		465	1.15	58.0
S2	1.75	485	1.20	68.4
		512	1.26	72.2
S3	1.88	496	1.22	65.0
		467	1.15	61.2

由表 3 可见,本土壤中无机磷酸盐的提取方法的平行性和精度均非常好,高度证实了方法的可靠性,10 组样品氧同位素测量标准偏差均在 0.2 以下。3 种不同利用类型的土壤磷酸盐氧同位素表

现出较为显著的差异,无人磷源干扰的森林土壤磷酸盐氧同位素值最为贫化,为 15.2‰,在 Tamburini 等^[8]对瑞士和以色列两地未施肥或施以有机肥或矿物磷肥土壤变化无机磷酸盐氧同位素研究范围为 13.5‰~17.6‰;而农田土壤的磷酸盐 ^{18}O 同位素最为富集,为 19‰左右,与 Young 等^[4]研究的以色列化学肥料中磷酸盐氧同位素比值范围(18.2‰~21.3‰),Gruau 等^[3]研究的法国农用化学肥料

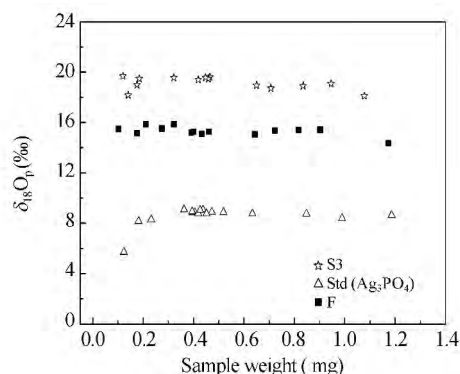


图 3 不同进样量对测定结果的影响

Fig. 3 Effect of different weight of sample on $\delta^{18}\text{O}_p$

表 3 不同类型土壤的磷含量和氧同位素结果

Table 3 Total phosphorous and $\delta^{18}\text{O}_p$ of phosphate in different type of soils

样品名称 Sample	土壤类型 Type	P (mg/g)	$\delta^{18}\text{O}_p$ (‰ _{VSMOW})	σ ($n=3$)
F	森林土壤 Forest soil	0.21	15.2	0.06
G1	公园土壤 Park soil	0.41	17.2	0.2
G2		0.59	17.6	0.08
G3		0.57	17.1	0.1
S1	农田土壤 Farmland soil	2.68	19.3	0.1
			19.1	0.04
S2		2.38	19.0	0.2
			19.1	0.1
S3		2.54	19.5	0.1
			19.5	0.07

(19.6‰~23.1‰) 以及 McLaughlin 等^[14]报道的两种化学肥料(19.4‰和20.5‰)中氧同位素比值变化范围一致,磷酸盐氧同位素比值与总磷含量测定结果均表明该农田土壤经过了充分施肥,磷酸盐供给主要来源于化学肥料。公园土壤磷酸盐氧同位素为17‰左右,磷元素含量亦显示该地土壤磷含量高于天然森林土壤,表明该土地略经施磷肥,土壤磷酸盐氧同位素表现出原始磷源和化学肥料的共同贡献。

4 结 论

建立了土壤中无机磷酸盐氧同位素组成的分析方法,考察了以氨水重结晶方法的纯化效果。通过H₂O₂漂洗去除有机质后,辅助氨水重结晶可有效去除磷酸银中夹杂的氧化银和银单质等无机杂质,未产生同位素分馏。对3种不同利用类型的土壤中磷酸盐氧同位素进行分析,结果表明,本提取方法的平行性和精度高,证实了方法的可靠性。不同类型土壤的磷酸盐氧同位素存在显著差异,本方法为进一步开展磷酸盐氧同位素的溯源和循环研究提供了参考。

References

- 1 Li X, Wang Y, Stern J, Gu B H. *Appl. Geochem.*, **2011**, 26(5): 688–695
- 2 Elsbury K E, Paytan A, Ostrom N E, Kendall C, Young M B, McLaughlin K. *Environ. Sci. Technol.*, **2009**, 43(9): 3108–3114
- 3 Blake R E, Alt J C, Martini A M. *PNAS*, **2001**, 98(5): 2148–2153
- 4 Longinelli A, Bartelloni M, Cortecci G. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **1976**, 32(2): 389–392
- 5 Blake R E, O'Neil J R, Surkov A. *Am. J. Sci.*, **2005**, 305(6/8): 596–620
- 6 Blake R E, Alt J C, Martini A M. *PNAS*, **2001**, 98(5): 2148–2153
- 7 Colman A S, Blake R E, Karl D M, Fogel M L, Turekian K K. *PNAS*, **2005**, 102(37): 13023–13028
- 8 Tamburini F, Bernasconi S M, Angert A, Weiner T, Frossard E. *Eur. J. Soil Sci.*, **2010**, 61(6): 1025–1032
- 9 Weiner T, Mazeh S, Tamburini F, Frossard E, Bernasconi S M, Chiti T. *Angew. Chem. Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **2011**, 25(5): 624–628
- 10 Zohar I, Shaviv A, Klass T, Ronerts K, Paytan A. *Environ. Sci. Technol.*, **2010**, 44(19): 7583–7588
- 11 Tamburini F, Pfahler V, von Sperber C, Frossard E, Bernasconi S M. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, **2014**, 78(1): 47–53
- 12 CHEN Ying-Xu. *Agriculture Environmental Protection*. Beijing: Chemical Industry Press, **2007**: 176–177
- 13 陈英旭. 农业环境保护, 北京: 化学工业出版社, **2007**: 176–177
- 14 LU Yang-Yang, ZHENG Zhen-Zhen, YIN Xi-Jie, CHEN Zhi-Gang, Cai Yi-Hua, LIU Guang-Shan, HUANG Yi-Pu. *Acta Geoscientica Sinica*, **2012**, 33(6): 961–966
- 15 卢阳阳, 郑珍珍, 尹希杰, 陈志刚, 蔡毅华, 刘广山, 黄奕普. 地球学报, **2012**, 33(6): 961–966
- 14 Young M B, McLaughlin K, Kendall C, Stringfellow W, Rollog M, Elsbury K, Donald E, Paytan A. *Environ. Sci. Technol.*, **2009**, 43(14): 5190–5196
- 15 Gruau G, Legeas M, Riou C, Gallacrier E, Martineau F, Henin O. *Water Res.*, **2005**, 39: 232–238
- 16 McLaughlin K, Cade-Menun B J, Paytan A. *Coastal Shelf Sci.*, **2006**, 70: 499–506

Research and Application of Analytical Technique on $\delta^{18}\text{O}_p$ of Inorganic Phosphate in Soil

ZHANG Han, WANG Jia-Ni, ZHU Yong-Guan, ZHANG Xian*

(Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment,
Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract Analytical technique on oxygen isotope composition of phosphate in soil has important applications in biogeochemical research. As the composition of the soil is complex with multiple oxygen sources, a liable phosphate enrichment and purification technology is important for phosphate oxygen isotope research. Here we

