

The Measurement of Iodine in Marine Sediments Using Spectrophotometric Method

Lihong Ji, Guangshan Liu

College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen Fujian
Email: lgshan@xmu.edu.cn

Received: May. 4th, 2016; accepted: May. 22nd, 2016; published: May. 27th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Spectrophotometric method of measuring iodine in marine sediment has been established in this paper. We have studied the iodine in marine sediment cores collected from East Pacific, East China Sea, Jiaozhou Bay, and coastal sea areas of Fujian. For marine sediment sample, iodine was leached with water from sample after it was treated by mixing it with KOH and combusted. Under the acid addition, the iodide in leachant was oxidized into iodate by adding saturated bromine solution. IO_3^- reacted with I^- to form I_2 after starch-KI mixing solution, as the color reagent, was added with excess I^- . The measurement was performed by ultraviolet and visible spectrophotometer. It has been shown when igniting sample, the ratio range of 1:3 to 1:5 for sediment to KOH and keeping the combusting temperature at 500°C - 800°C for 1 - 4 h are suitable. The most absorbance of light is at wavelength of 580 nm. For the sediment sample of iodine content in the range of 2 - 100 mg/kg, when the 2 g of sample was treated, 6 - 12 drops of mixing solution of the 20 g/dm^3 starch and 10 g/dm^3 KI, as the color reagent, would be added when leachant was made up to 100 cm^3 . The measurement would be conducted at pH of 1.8 - 2.4 for test solution. The comparison of iodine content levels in marine sediment we measured with data of literatures was done.

Keywords

Iodine, Spectrophotometry, Marine Sediment Core

分光光度法测量海洋沉积物的碘含量

纪丽红, 刘广山

厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门
Email: lgshan@xmu.edu.cn

收稿日期: 2016年5月4日; 录用日期: 2016年5月22日; 发布日期: 2016年5月27日

摘要

本文建立了分光光度法测量海洋沉积物碘的方法。对采集自东太平洋、东海、胶州湾, 和福建沿海沉积物岩芯的碘进行了研究。处理样品时, 将沉积物样品与KOH混合灼烧, 之后用水沥取样品中的碘, 在酸性条件下, 用饱和溴水将I⁻氧化成IO³⁻, 加入淀粉和KI混合溶液显色剂, IO³⁻与显色剂中过量的I⁻反应生成I₂, 最后用紫外可见分光光度计进行测量。研究发现用KOH作为溶剂处理样品, 沉积物与KOH的质量比以1:3至1:5为宜, 灼烧温度和灼烧时间分别为500℃~800℃和1~4 h为佳。测量时最大光吸收波长为580 nm。对碘含量为2~100 mg/kg的沉积物样品, 以2 g样品为例, 沥取后定容100 cm³, 加入6~12滴20 g/dm³淀粉和10 g/dm³ KI混合溶液显色剂较为合适; 上机测量的样品溶液pH值在1.8~2.4之间较为适宜。最后我们对测定得海洋沉积物岩芯中的碘含量水平与文献结果进行了比较。

关键词

碘, 分光光度法, 海洋沉积物岩芯

1. 引言

碘是具有重要生物效应的微量元素之一, 关于碘与人类健康的关系已经引起高度重视, 所以, 人们对环境各种介质和食品等中的碘进行了广泛研究[1]。

全球碘分布主要受海洋系统控制。海洋沉积物是自然界中碘含量最高的地质体[2], 其碘储量占地壳总碘储量的70% [3]。碘在沉积物中的分布受到物源及各种物理化学过程及生物过程的制约, 同时通过各种生物与地球化学过程, 海洋沉积物中的碘又影响海水, 从而影响全球碘的输运与分布。也有报道表明海洋边界层的碘影响对对流层臭氧的浓度[4] [5]。所以海洋沉积物碘研究除具有重要的生物地球化学意义外, 对全球变暖等目前极为关注的气候变化研究也具有重要的意义。但是人们对海洋沉积物中碘的地球化学研究并不多, 国内这方面的研究就更少[6]。

有各种碘的测量方法。包括容量法、分光光度法、色谱法、原子光谱法、电化学方法和 ICP-MS 法等[7]-[9]。这些方法尽管都有着自身的优点, 但也存在着不足之处, 其中有的仪器设备昂贵, 不易普及推广; 有的则灵敏度较低, 耗时长, 在海洋沉积物中碘的分析测量中难以广泛开展, 这也是至今海洋沉积物碘研究报道较少的原因之一。

用分光光度法测量环境样品中的碘, 仪器费用低, 数千元价格的分光光度计就可用于多种样品中碘的测量, 而且样品前处理方法并不比其他方法复杂。本文建立了分光光度法测量沉积物中碘的方法。研究了测量过程和实验条件, 并用所建立的方法测量了多个海域沉积物岩心中的碘含量, 研究了碘在海洋沉积物中的分布[10]-[13]。

2. 方法

2.1. 方法步骤

处理样品时将试样与固体溶剂混合, 在高温下加热, 利用试样与溶剂的复分解反应, 使样品中的碘

易于被沥取。之后用水沥取样品中的碘。在酸性条件下, 用饱和溴水将沥取液中的 I^- 氧化成 IO_3^- , 加入淀粉-KI 显色剂, IO_3^- 与显色剂中过量的 I^- 反应生成 I_2 。最后用紫外可见分光光度计进行测量。实验中所用化学试剂均为分析纯。样品的处理和测量步骤如下:

- 1) 将样品凉干、磨细。称量约 2 g 样品, 烘干称重, 加入铺有约 2 g KOH 的瓷坩埚中, 上面再覆盖约 4 g 的 KOH。
- 2) 将坩埚放入马弗炉灼烧, 慢慢升温至 300℃ 保温 0.5 h。然后升温至 600℃, 保温 2 h。
- 3) 冷却后将样品取出加水, 在电热板上加热分散, 如果溶液呈蓝绿色, 加入数滴乙醇还原 Mn^{6+} 。
- 4) 冷却后, 将分散物用去离子水转入 100 cm^3 离心管中, 离心分离。取上清液转入 100 cm^3 容量瓶定容。
- 5) 取 10 cm^3 上清液于 25 cm^3 比色管中, 加入 0.2 cm^3 4.7 mol/L H_3PO_4 , 摇匀后, 加入过量饱和溴水, 静置 2 min; 然后加入 2 滴碱性酚钠溶液使溴水的黄色刚好褪去; 最后加入 6 滴 20 g/dm^3 淀粉和 10 g/dm^3 KI 混合溶液显色剂, 摇匀。
- 6) 15 min 后在 580 nm 波长处测量试样溶液的吸光度, 根据标准曲线计算沉积物中碘含量。
- 7) 同时以同样操作的试剂空白作参比。

2.2. 条件实验

对所建立方法的实验条件进行了研究, 测量参数包括测量时所选最大吸收波长、显色剂用量、显色时间、酸度的影响、灼烧样品的 KOH 用量、灼烧温度、灼烧时间等几方面。实验结果随条件的变化如图 1 所示。其中, 最大吸收波长、显色剂用量、显色时间和酸度的影响用 KI 标准溶液进行检验, 灼烧样品的 KOH 用量、灼烧温度和灼烧时间用沉积物样品进行。另外还进行了回收率测量。KI 标准溶液由分析纯 KI 试剂制备, 制备时将 KI 105℃ 烘干, 准确称量 0.13080 g, 溶于水, 加入 2 ml 0.1 mol/l NaOH 溶液, 纯净水 100 ml 定容, 用时稀释至浓度为 5 mg/dm^3 。

2.2.1. 最大吸收波长

用 KI 标准溶液作为测量样品, 按 2.1 节方法(5、6)步制样, 在 550~610 nm 范围内的选择 10 个波长, 测量吸光值, 结果如图 1(a)所示, 最大吸收波长为 580 nm。

2.2.2. 显色剂用量

用 KI 标准溶液按 2.1 节方法(5、6)步制样, 依次加入 3、6、9、12、15、18、21 滴淀粉和 KI 混合溶液显色剂, 用分光光度法于波长 580 nm 测量吸光值, 吸光值随显色剂用量变化测量结果如图 1(b)所示。当显色剂为 6~12 滴时, 吸光值最大, 且变化平稳。

2.2.3. 显色时间

用标准溶液按 2.1 节方法(5、6)步制样。加显色剂后, 放置 0~85 min 测量吸光度, 见图 1(c)。结果表明, 吸光度在 0~15 min 内随时间延长而增加, 在 15 min 后基本保持不变, 到 60 min 后有下降趋势。因此显色 15 min 后是测量的最佳时间段, 且测量最好在 60 min 内完成。

2.2.4. 酸度实验

分别移取 4 cm^3 KI 标准溶液置于 8 只 25 cm^3 比色管中依次加入 4.7 mol/L H_3PO_4 1、2、4、6、8、10、12、14 滴, 其余按 2.1 节方法(5、6)步进行操作。结果见图 1(d)。4.7 mol/L H_3PO_4 用量在 4~14 滴(对应 pH 值范围约为 1.80~2.40)之间吸光度变化不大。故测量溶液 pH 值在 1.8~2.4 之间(即加入 4~14 滴 4.7 mol/L 的 H_3PO_4)较为适宜。

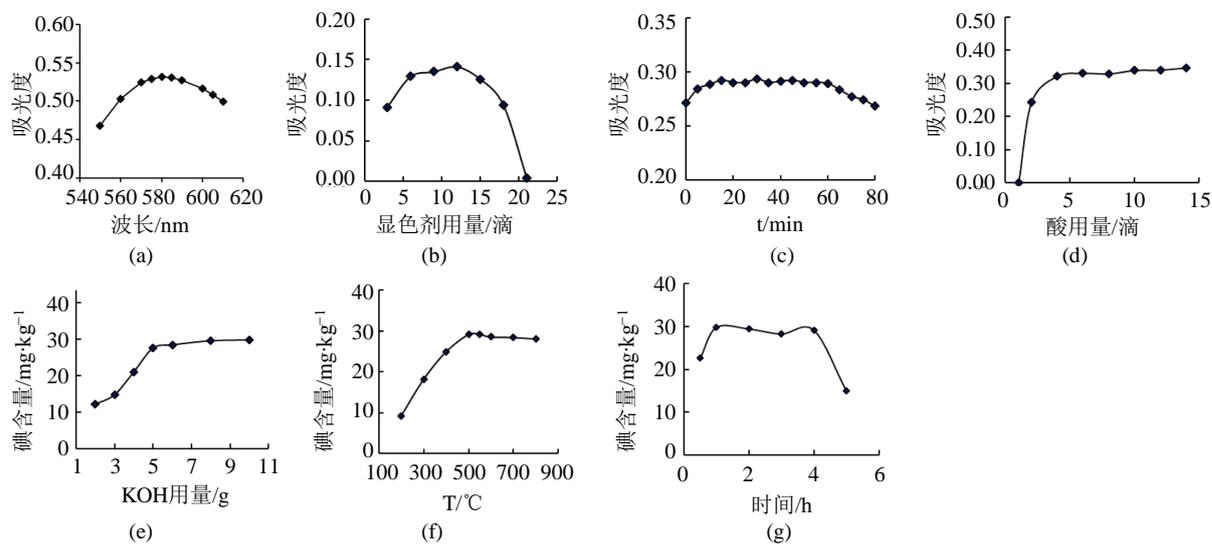


Figure 1. Curves of experimental conditions for seven impact factors measuring iodine in sediment by spectrophotometry. (a) Maximum absorption wavelength, (b) Selecting dosage of color agent, (c) Absorbance variation with color developing time, (d) Effect of pH of sample solution, (e) Selection of dosage of KOH, (f) The selection of temperature for sample ignition, (g) The selection of the span time of sample ignition

图 1. 分光光度法测量沉积物中的碘的 7 种影响因素的条件实验曲线。(a) 最大吸收波长, (b) 显色剂用量, (c) 吸光度随显色时间变化, (d) 试液酸度影响, (e) KOH 用量, (f) 灼烧温度影响, (g) 灼烧时间影响

2.2.5. KOH 用量

样品量和溶剂量的比例及灼烧温度是样品能否达到良好分解的关键。同一个样品, 取 6 份, 每份 2 g, 分别与 2、3、4、6、8、10 g KOH 混合。KOH 用量为 2、3 g 时, KOH 直接覆盖在样品上面; 其他量的 KOH, 先将约 2 g KOH 平铺在坩埚中, 然后加入沉积物样品, 再将其余的 KOH 覆盖在样品上。按 2.1 节方法(2~6)步进行样品处理和测量。结果表明(图 1(e)), KOH 用量在 2~6 g 范围内, 随 KOH 用量的增加样品碘含量增加; 在 6~10 g 内碘含量基本保持不变。这表明沉积物与溶剂量的重量比在 1:3 至 1:5 之间可达到全分解效果。在能达到样品全分解的前提下, 应该使用较小的溶剂量, 这样可减少浸取液中盐分量及试剂空白[9]。

2.2.6. 灼烧温度

同一个沉积物样品分别取 9 份按 2.1 节步骤(1)分别与 6 g KOH 混合, 在 200℃、300℃、400℃、450℃、500℃、550℃、600℃、650℃、700℃ 温度下灼烧样品。之后按测量步骤(3~6)测量样品碘含量, 结果如图 1(f)所示。在 200℃~500℃ 内碘含量随灼烧温度升高而增加; 在 500℃~800℃ 内基本保持不变。这表明在 500℃~800℃ 温度范围内, 沉积物中的碘已完全释放被 KOH 吸收。Muramatsu 等人采用高温分解方法处理样品时, 发现当灼烧温度在 700° 时, 大部分碘已释放出来[14]。

2.2.7. 灼烧时间

分别称量 2 g 同一沉积物样品 6 份, 按 2.1 节步骤(1)与 6 g KOH 混合后置于坩埚中, 在 600℃ 下分别加热 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 h 后, 测量碘含量。结果表明(图 1(g)), 灼烧 0.5~1 h 测量得到的碘含量随灼烧时间增加; 当灼烧时间为 1~4 h 时, 得到的碘含量基本保持不变; 当灼烧时间大于 4 h 后, 得到的碘含量随时间逐渐降低。

2.2.8. 回收率

向沉积物样品中加入一定量 KI 试剂后按分析步骤测量, 得到样品回收率为 70.8%~83.2%, 平均回收

率为 75.2%。Aumann 等人(1981)报道在 600℃下用碱熔融法处理沉积物时, 其回收率 80%左右[15]。本实验方法回收率稍低于 Aumann 等的回收率。

2.3. 样品测量与数据处理

每一批样品在测量前和测量后做标准工作曲线, 测量样品时按以上方法步骤和条件实验选定的参数进行。样品碘含量误差由各测量量的误差按误差传递关系计算得到[16]。

2.4. 方法精密度和检出限

同一沉积物样品取 7 份, 按测量方法测量其中的碘含量。得到的结果平均值相对标准偏差为 3.6%。根据国际理论和应用化学联合会(IUPAC)规定, 检测限的计算公式为:

$$L = \frac{3S}{K} \quad (1)$$

式(1)中, L 是检测限, S 是空白样品碘含量的标准偏差, 空白样品的处理方法同样品分析一样。 K 为标准曲线的斜率。通过对 8 个空白样品的分析结果计算标准偏差, 得到本文方法的最低检测限为 0.006 mg/dm³。

3. 海洋沉积物岩芯中碘分布研究

本实验室从东太平洋、东海、胶州湾和福建近海采集沉积物岩心, 测量了其中的碘含量, 研究了岩芯中的碘分布。

3.1. 研究海域与岩芯情况介绍

东太平洋岩芯(8°45'0"N, 145°22'30"W), 站位水深 5148 m, 岩心长 32 cm, 表层和底层样品厚度为 1 cm, 其余样品厚度为 2 cm, 共 17 个样品。

东海岩心(26°22'34"N, 121°18'17"E), 站位水深 79 m, 岩心长度为 157.4 cm, 按 1 cm 厚度分割样品, 共 157 个样品。

在胶州湾采集了两个岩心, 一个长岩心, 长 271 cm, 上层 36 cm 按 1 cm 间隔分割, 其余按 2 cm 间隔分割, 共 155 个子样; 一个短岩心, 长 48 cm, 按 4 cm 间隔分割, 共 12 个样品; 另外还测定了 6 个采集自胶州湾海域的表层沉积物和 10 个采集自胶州湾周边陆地的沉积物样品。

在福建近海三个海域采集了沉积物岩芯。在兴化湾一个岩心, 采自湾顶部潮间带, 岩心长 93 cm, 按 4 cm 间隔分割成 23 个样品。在东山湾一个岩心, 采自西海岸潮间带, 岩心长 76 cm, 按 4 cm 间隔分割为 19 个样品。在厦门海域采集了 5 个岩芯, 一个采集自厦门西港海域, 岩芯长 50 cm, 按 2 cm 间隔分样; 一个采集于九龙江口鸡屿附近海域, 岩芯长 44 cm, 按 2 cm 间隔分样; 另外三个在潮间带采集, 一个位于九龙江口的北港口, 岩心长 86 cm, 按 4 cm 间隔分割为 22 个样品, 另外两个采自九龙江口南港海区浮宫附近红树林保护区外的潮间带, 岩芯长分别为 54 cm 和 44 cm, 按 2 cm 间隔分样。

3.2. 沉积物岩芯中的碘含量水平及其与其他环境介质碘含量水平的比较

表 1 给出了海水、岩石、海洋沉积物、海藻、福建土壤和中国海沉积物的碘含量水平。比较表 1 给出的数据可以看出, 海藻的碘含量最高, 在 100~1000 mg/kg 量级; 海洋沉积物在 1~100 mg/kg 量级; 海湾和河流沉积物的碘含量低于海洋沉积物; 而土壤的碘含量水平更低一些。火成岩碘含量最低。沉积岩碘含量水平也低于海洋沉积物。本研究测定得全部样品碘含量为 2.5~105.6 mg/kg, 按岩芯平均为 15.2~82.4 mg/kg。以东太平洋岩芯碘含量最高, 胶州湾次之, 福建沿海沉积物中的碘含量总体低于东太平洋、东海和胶州湾, 稍高于福建土壤的碘含量。我们的结果总体在文献报道的海洋沉积物碘含量水平范围内。

Table 1. The iodine contents in some environment materials
表 1. 一些环境介质中的碘含量

介质	碘含量(mg/kg)		文献
	含量范围	平均值	
大气	10~20 ng/m ³		Whitehead, 1984 [17]
海水		0.06	Wong, 1991 [2]
火成岩	0.7~1.0		Whitehead, 1984 [17]
沉积岩	0.2~10.0		
海洋沉积物	3~400		
近代海洋沉积物	5~200		Fuge and Johnson, 1986 [18]
浅海富氧沉积物	20~220		Harvey, 1980 [19]
波罗的海沉积物	42~76		Aldahan <i>et al.</i> , 2007 [20]
密西西比河沉积物岩心	3~34		Oktay <i>et al.</i> , 2000 [21]
白令海沉积物	50.0~105.0	73.8	高爱国等, 2003 [22]
楚可奇海沉积物	42.5~139.5	46.4	
海藻	90~2500		Whitehead, 1984 [17]
渤海黄海东海南海沉积物		14~22	赵一阳等, 1994 [6]
冲绳海槽沉积物		64	
东太平洋	68.2~105.6	82.4	纪丽红, 2011 [10]
东海	35.2~77.8	50.6	
胶州湾	51.6~94.3	70.8	
环胶州湾陆地沉积物	36.5~50.3	42.0	
厦门西港	14.5~26.1	17.2	王荣元, 2013 [11]
九龙江口鸡屿附近海域	13.8~25.7	16.9	
九龙江口潮间带沉积物	17.3~39.6	23.8	纪丽红, 2013 [12]; 王荣元, 2013 [11]
兴化湾潮间带沉积物	2.5~43.7	15.2	纪丽红, 2011 [12]
东山湾潮间带沉积物	11.3~29.1	19.5	
福建土壤	0.9~14.0		魏复盛等, 1990 [23]

3.3. 沉积物岩心中碘分布

我们测定的 9 个沉积物岩芯, 其中 5 个岩芯的碘含量分布如图 2 所示。东太平洋岩芯用 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 和 $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ 方法测年, 其余岩芯用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 方法测年[24]。岩芯中的碘含量分布分两种情况。在开阔海域采集的岩芯, 东太平洋、东海和胶州湾, 其中的碘含量随深度变化起伏较大, 但总体变化趋势不明显, 细分析可能发现存在分段随深度呈增加趋势。福建近海的 5 个岩芯, 均呈现出碘含量随深度降低趋势, 而且在某些深度出现极大值。

4. 结语

本文建立了分光光度法测量海湾潮间带沉积物碘的方法, 并对实验条件进行了研究。用碱熔法处理样品, 将试样与固体溶剂 KOH 混合, 在高温下灼烧, 使样品中的碘易于被沥取。之后用水沥取样品中的

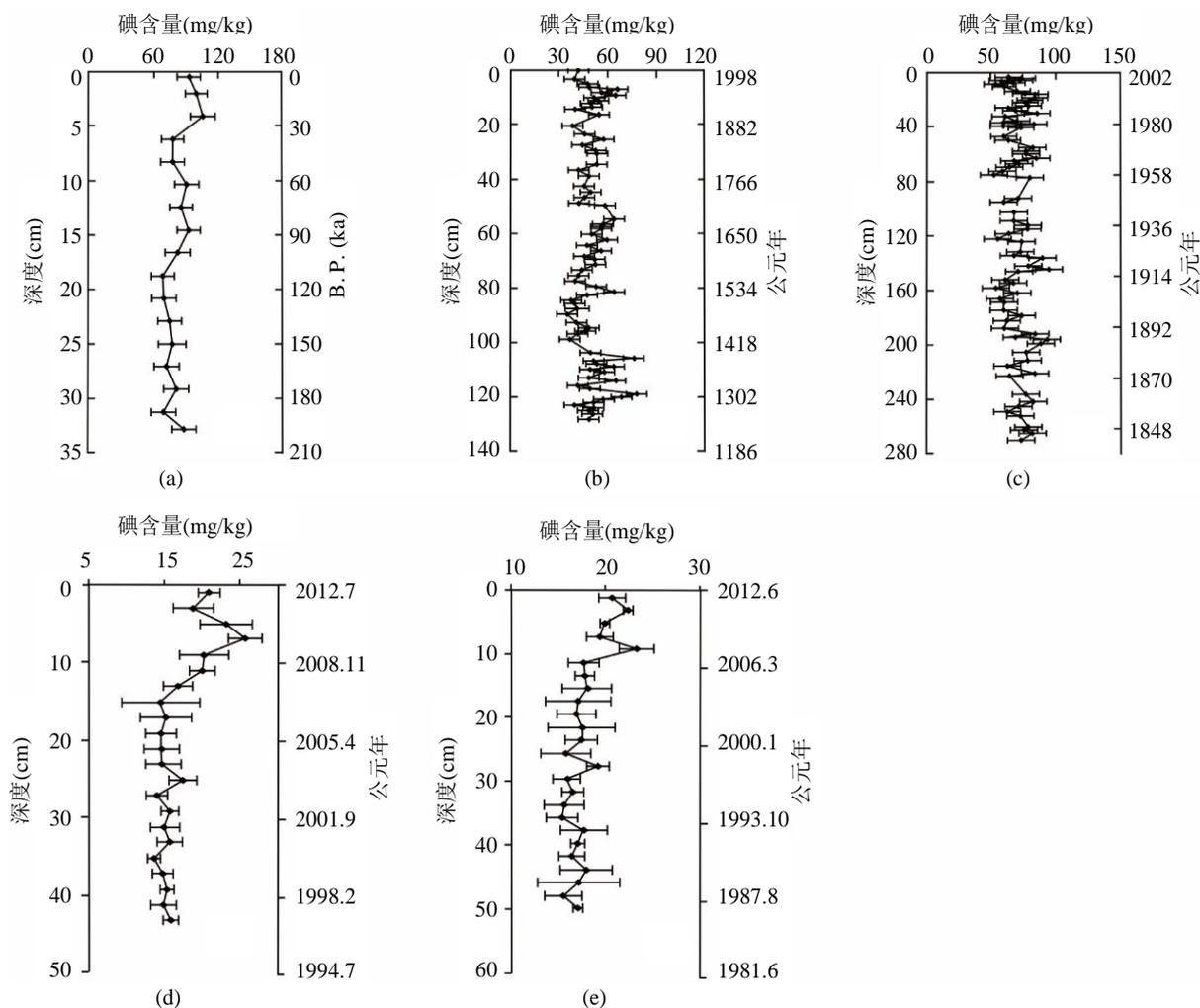


Figure 2. Iodine distributions in sediment cores collected from five sea areas. (a) East Pacific, (b) East China Sea, (c) Jiaozhou Bay, (d) Sea area near Jiyu of Xiamen, (e) Intertidal zone of South Port of Jiulongjiang Estuary
图 2. 五个不同海域沉积物岩心中的碘分布。(a) 东太平洋, (b) 东海, (c) 胶州湾, (d) 厦门鸡屿附近海域, (e) 九龙江口南港附近潮间带

碘。在酸性条件下, 用饱和溴水将沥取液中的 I^- 氧化成 IO_3^- , 加入淀粉和 KI 混合溶液显色剂, IO_3^- 与显色剂中过量的 I^- 反应生成 I_2 。最后用紫外可见分光光度计进行测量。该方法所用仪器价廉, 流程简单, 过程时间短, 易普及推广。对 9 个海洋沉积物岩芯中碘的测量, 证明了本方法的可用性。

本研究建立的方法平均回收率为 75.2%, 稍低于文献报道的结果。多次重复试验, 并未找出关键的影响因素, 推测可能是样品预处理过程中, 当碘在无机溶液中处于单质态时, 部分碘升华造成的。另外, 整个过程还是无法避免使用塑料器皿, 这可能是影响全程回收率的第二个主要因素。

我们用所建立的方法研究了多个海域包括东太平洋、东海、胶州湾、福建近海等的沉积物岩芯中的碘含量水平与分布。研究发现, 开阔海域, 沉积物岩芯中的碘含量随深度变化有起伏, 但变化趋势不明显。近岸海域, 本文中的福建近岸海域, 沉积物岩芯中的碘含量随深度呈逐渐降低趋势。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(41073044)。

参考文献 (References)

- [1] Preedy, V.R., Burrow, G.N. and Watson, R.R. (2009) Comprehensive Handbook of Iodine. Elsevier, London.
- [2] Wong, G.T.F. (1991) The Marine Geochemistry of Iodine. *Critical Reviews in Aquatic Sciences*, **4**, 45-73.
- [3] Muramatsu, Y. and Wedepohl, K.H. (1998) The Distribution of Iodine in the Earth's Crust. *Chemical Geology*, **147**, 201-216. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00013-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00013-8)
- [4] Aliche, B., Hebestreit, K., Platt, U., *et al.* (1999) Iodine Oxide in the Marine Boundary Layer. *Nature*, **397**, 572-573. <http://dx.doi.org/10.1038/17508>
- [5] Carpenter, L.J. (2003) Iodine in the Marine Boundary Layer. *Chemical Reviews*, **103**, 4953-4962. <http://dx.doi.org/10.1021/cr0206465>
- [6] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 174.
- [7] Li, H.B., Xu, X.R. and Chen, F. (2009) Determination of Iodine in Seawater: Methods and Applications. In: Preedy, V.R., Burrow, G.N. and Watson, R.R., Eds., *Comprehensive Handbook of Iodine*, Elsevier, London, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-374135-6.00001-7>
- [8] 刘巍, 杨红霞, 李冰. 碘分析方法研究进展[J]. 岩矿测试, 2008, 27(2): 127-136.
- [9] 魏复盛, 王惠琪. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [10] 纪丽红. 海洋沉积物和铁锰结壳碘的地球化学与 ^{129}I 年代学[D]: [博士论文]. 厦门: 厦门大学, 2011.
- [11] 王荣元. 大洋水和九龙江口沉积物中碘的地球化学[D]: [硕士论文]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [12] 纪丽红, 刘广山, 李超, 陈志刚, 黄奕普. 福建省兴化湾、九龙江河口和东山湾潮间带沉积物岩心碘研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(5): 177-183.
- [13] Ji, L.H., Li, G.S., Chen, Z.G. and Huang, Y.P. (2013) Iodine Study of Marine Sediment from Three Sea Areas. *Scientific Journal of Earth Science*, **3**, 41-48.
- [14] Muramatsu, Y., Takada, Y., Matsuzaki, H., *et al.* (2008) AMS Analysis of ^{129}I in Japanese Soil Samples Collected from Background Areas Far from Nuclear Facilities. *Quaternary Geochronology*, **3**, 291-297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quageo.2007.08.002>
- [15] Aumann, D.C., Faleschini, H. and Friedmann, L. (1981) Determination of ^{129}I and ^{127}I at Natural Levels by Neutron Activation Analysis. *Radiochimica Acta*, **29**, 209-215. <http://dx.doi.org/10.1524/ract.1981.29.4.209>
- [16] 詹晓青, 胡盼盼, 刘广山, 等. 南沙海域沉积物岩芯生物硅和碳酸盐研究[J]. 海洋科学前沿, 2015, 2(3): 53-63.
- [17] Whitehead, D.C. (1984) The Distribution and Transformations of Iodine in the Environment. *Environment International*, **10**, 321-339. [http://dx.doi.org/10.1016/0160-4120\(84\)90139-9](http://dx.doi.org/10.1016/0160-4120(84)90139-9)
- [18] Fuge, R. and Johnson, C.C. (1986) The Geochemistry of Iodine—A Review. *Environmental Geochemistry and Health*, **8**, 31-54. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02311063>
- [19] Harvey, G.R. (1980) A Study of the Chemistry of Iodine and Bromine in Marine Sediments. *Marine Chemistry*, **8**, 327-332. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203\(80\)90021-3](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203(80)90021-3)
- [20] Aldahan, A., Englund, E., Possnert, G., *et al.* (2007) Iodine-129 Enrichment in Sediment of the Baltic Sea. *Applied Geochemistry*, **22**, 637-647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.12.009>
- [21] Oktay, S.D., Santschi, P.H., Moran, J.E., *et al.* (2000) The ^{129}I Iodine Bomb Pulse Recorded in Mississippi River Delta Sediments: Results from Isotopes of I, Pu, Cs, Pb, and C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 989-996. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00364-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00364-6)
- [22] 高爱国, 刘焱光, 张道建, 等. 楚科奇海与白令海沉积物中碘的纬向分布[J]. 中国科学, 2003, 33(2): 155-162.
- [23] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] 刘广山. 海洋放射年代学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2016.