

EasySensor DGT 产品介绍

1、薄膜扩散梯度（DGT）技术原理

DGT 技术主要基于自由扩散原理（Fick 第一定律），通过在定义扩散层的梯度扩散及其关联过程研究，获得目标离子在土壤、水体和沉积物等环境介质中的扩散通量、（生物）有效态含量和固-液交换动力学的信息^[1,2]。DGT 装置由固定层（即固定膜）和扩散层（扩散膜和滤膜）叠加组成，目标离子以扩散方式穿过扩散层，随即被固定膜捕获，并在扩散层形成线性梯度分布（图 1）。目标离子在 DGT 装置放置时间段的扩散通量（ F_{DGT} ）可用公式（1）和（2）计算：

$$F_{DGT} = \frac{M}{At} \quad (1)$$

$$F_{DGT} = \frac{DC_{DGT}}{\Delta g} \quad (2)$$

其中 t 为 DGT 装置放置时间， M 为 DGT 装置放置时间段固定膜对目标离子的积累量（ μg ）， A 为 DGT 装置暴露窗口面积（ cm^2 ）， Δg 表示扩散层厚度（ cm ）， D 为目标离子在扩散层中的扩散系数（ cm^2s^{-1} ）， C_{DGT} 为扩散层线性梯度靠近环境介质一端的浓度（ mg L^{-1} ）。

将公式（1）和（2）结合，得到 C_{DGT} 的计算公式（3）：
$$C_{DGT} = \frac{M \Delta g}{DA t}$$

上式中， C_e 为提取液浓度， V_e 为提取剂体积， V_g 为固定膜体积（土壤圆片一般记为 0.2mL，切片固定膜体积忽略不计）， f_e 为提取剂对固定膜上目标离子的提取率。

固定膜中目标离子积累量（ M ）一般采用溶剂提取的方法，根据公式（4）计算得到：

$$M = \frac{C_e(V_e + V_g)}{f_e} \quad (4)$$

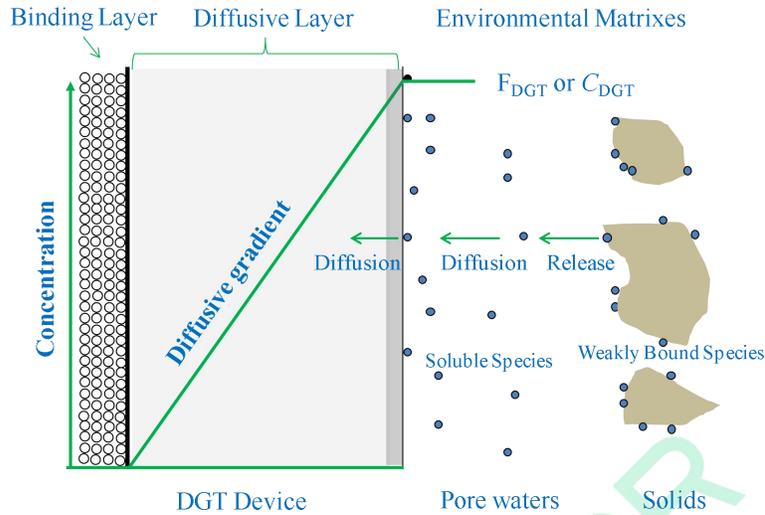


图1 薄膜扩散梯度原理示意图

当DGT装置测定水体时，DGT吸收自由态离子，会促使弱结合态络合物的解离，因此 F_{DGT}/C_{DGT} 反映水体自由态目标离子的含量及络合物对该形态的动力学解离和缓冲能力（图2）。当DGT装置测定土壤、沉积物时，DGT吸收造成孔隙水中溶解态离子的减少，导致固相弱结合态离子通过解吸或溶解对溶解态离子进行缓冲，因此 F_{DGT}/C_{DGT} 反映土壤、沉积物中溶解态离子的含量及固相对其动力学的缓冲能力（图2）。

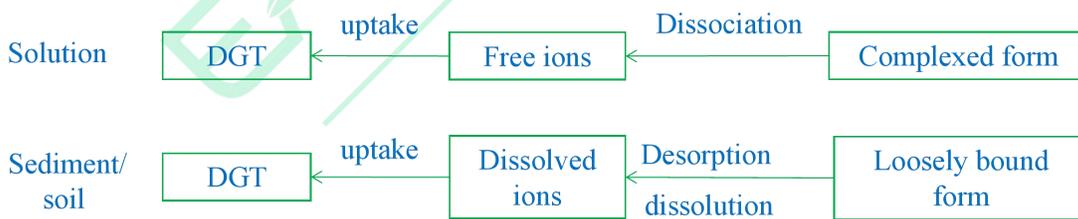


图2 DGT测定通量或浓度 (F_{DGT}/C_{DGT}) 的含义

与传统的破坏性测定技术相比，DGT 技术能够在原位状态下比较真实地反映环境介质中目标物的可移动性和生物可利用性，从而更好地反映环境介质的营养或污染水平。DGT 的富集过程可以模拟目标离子在环境中的迁移和生物吸收过程，分析结果更加科学可靠，而这一特点正是传统有效态测定方法所欠缺的，因此 DGT 是

一项革命性的技术。DGT 测定流程简单，操作环境要求低，具备很强的推广性，未来可替代传统分析方法，其应用前景非常广阔。

2、EasySensor DGT 产品发展

EasySensor DGT 技术产品自 2010 年开始发展，至 2017 年形成完备的产品体系。自 2010 年以来，该技术已在国际著名期刊 Environmental Science & Technology、Analytical Chemistry 和 Water research 等发表论文 60 余篇，申请中国发明专利 15 件，授权 8 件，实用新型与外观专利 17 件。EasySensor DGT 产品已被成功用于水体、沉积物、土壤等环境基质中多种元素单一或同步测定，应用对象可拓展到高污染、高营养、高 pH 的复杂环境介质，满足绝大多数土壤、水体和沉积物的测定要求，有力地推动了该技术在环境监测和农业肥力评价等领域的应用。

3、EasySensor DGT 产品基本构成

DGT 装置主要由固定膜、琼脂糖扩散膜和 PVDF 滤膜组成（图 3）。Zr-Oxide 系列固定膜对待测离子具有很高的吸收容量和优异的物理性能，同时操作简易方便（具体规格见下文第四部分介绍）^[5-9]。EasySensor DGT 产品采用琼脂糖凝胶膜为扩散膜，标准组装厚度为 0.80 mm，水体监测时需要配合厚度 0.40 mm 和 1.20 mm 的扩散膜使用；琼脂糖扩散膜的厚度非常稳定，耐受的环境条件宽，可测定的目标物多^[4]。EasySensor DGT 产品最外层采用聚偏氟乙烯（PVDF）滤膜，其厚度稳定，孔径分布均匀，化学惰性强^[4]。

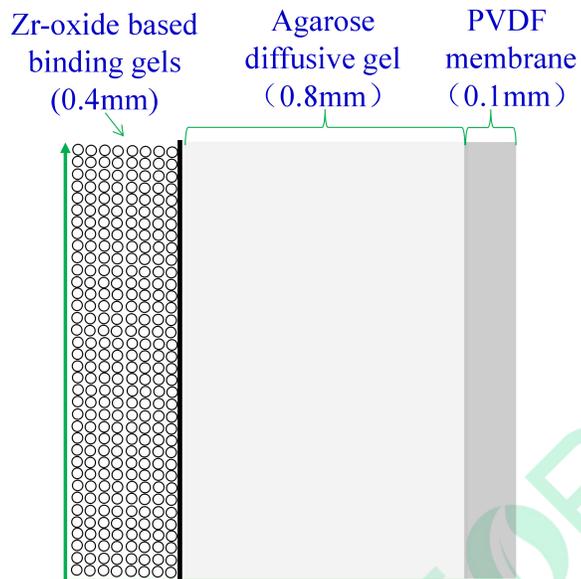


图 3 EasySensor DGT 产品基本组成

EasySensor DGT 产品外壳分为两种形式，分别是圆形双模式和平板式^[3]。

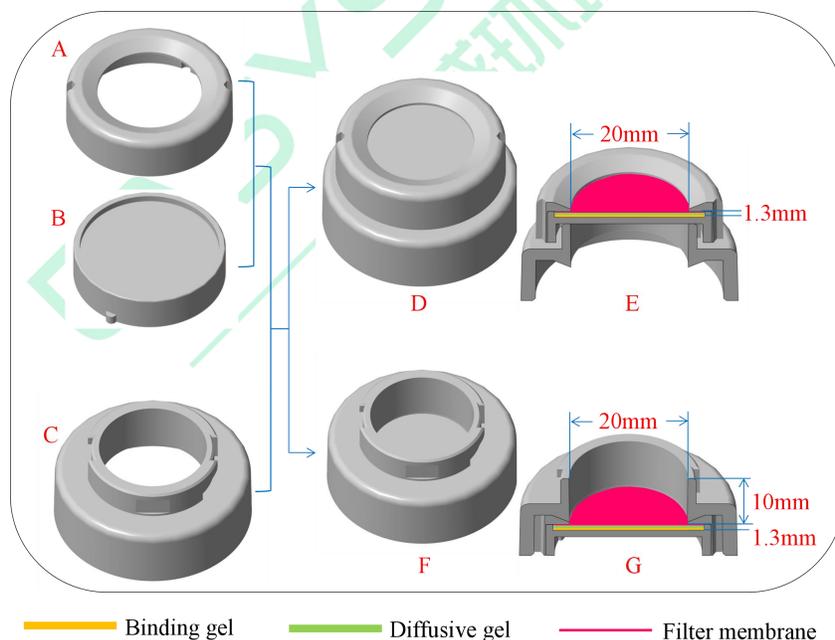


图 4 EasySensor DGT 双模式外壳结构

圆形双模式见图 4。图中 A、B、C 为双模式结构的三个基础组件，B 凹槽用于放置三层膜（Zr-Oxide 系列固定膜、琼脂糖扩散膜和 PVDF 滤膜），其高度为三层

膜的总厚度；A 为盖帽，作用是将装好的三层膜固定在 B 凹槽内，固定后的 A、B 构成膜心部分，膜心外缘密封，膜心暴露窗口直接与环境介质接触，目标离子通过该窗口进入扩散层。

C 为支撑膜心的底座，与膜心有两种组装形式：D 组装形式是将膜心置于底座之上，形成传统的活塞形状（Piston type），适用于水体和溶液的测定；E 是 D 的横切面，暴露窗口直径为 20 mm，三层膜的总厚度为 1.30 mm。F 是将膜心镶嵌到底座下方的凹槽内，膜心朝上，形成内腔形式（Open cavity type），适用于土壤测试。测试时，土壤装入内腔，直至装满铺平。G 即 F 的横切面，土层厚度为 10 mm。使用内腔方式放置土壤时，土壤依靠重力与膜心暴露窗口接触，避免人为改变土壤密度。在内腔方式出现之前，均采用活塞形式测定土壤，需将 DGT 暴露窗口按压到土层表面，容易造成土层密度变化，影响目标离子向 DGT 的扩散，从而造成分析误差。

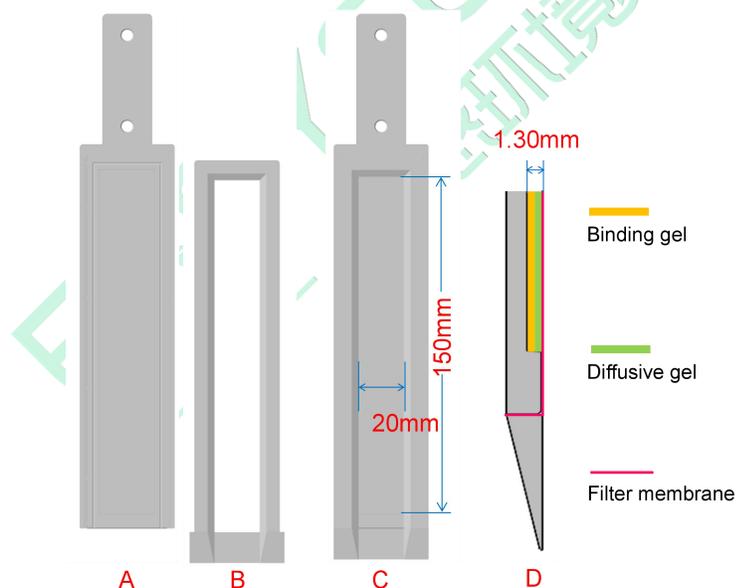


图 5 EasySensor DGT 平板式外壳结构

平板式外壳见图 5。图中 A、B 为平板式结构的两个基础组件，A 为放置膜的底板，内部凹槽高度 1.30mm（Zr-Oxide 系列固定膜、琼脂糖扩散膜和 PVDF 滤膜

三层膜的总厚度)，B 为盖板，起到固定三层膜、密封底板外缘的作用，固定后的 A、B 构成平板装置 C，暴露窗口的长度 150mm、宽度 20mm，目标离子通过暴露窗口进入 DGT 扩散层。D 为装置底部的纵向结构，装置暴露面至底部完全处在一个平面上，背面呈 30 度角楔形，这种结构可以最大程度的减小装置插入对沉积物界面的破坏作用，同时 DGT 暴露面与沉积物贴合，减少上覆水下灌对测定的干扰。因此，与现有的平板装置相比，该装置可以显著减小分析误差。

4、EasySensor DGT 产品规格

目前，EasySensor 产品由 6 种类型固定膜、3 种厚度的琼脂糖扩散膜和 PVDF 滤膜组成，基本信息如下表：

类型	种类	目标物	优势	文献
	Zr-Oxide	氧化型阴离子 (P, As, Cr, Mo, Sb, Se, V, W)	吸附容量高，抗干扰能力强，可做到 mm-亚 mm 空间分辨、多目标物同步测定	[5,6]
	Chelex	金属阳离子 (Fe, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) 稀土元素 (La, Pr, Eu, Tb, Ho, Tm, Lu, Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb, Y)	物理性能好，固定剂分布均匀，可做到毫米高分辨、多种目标物同步测定	[4,7,12]
	AgI	硫 (S(-II))	与电脑成像技术结合，二维、亚毫米收集信息	[8]
	ZrO-AgI	磷砷硫同步 (P, As, S(-II))	同步获取，二维高分辨	[8,9]
固定膜	ZrO-Chelex	阴阳离子同步 (P, As, Cr, Mo, Sb, Se, V, W, Fe, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn)	物理性能好，固定剂分布均匀，可做到毫米高分辨、16 种目标物同步测定	[10]
	ZrO-Chelex-AgI	硫和阴阳离子同步 S(-II), P(V), As(V), As(III), Cr(VI), Mo(VI), Sb(V), Se(VI), V(V), W(VI), Fe(II), Cd(II), Co(II), Cu(II), Mn(II), Ni(II), Pb(II), Zn(II)	物理性能好，固定剂分布均匀，可做到毫米高分辨、17 种目标物同步测定	[13]

	Tulsion® CH-95	无机汞与甲基汞同步 (CH_3Hg^+ , Hg^{2+})	无机有机汞同步测定, 可区分形态, 提取率稳定高效	[11]
扩散膜	0.4mm	标准厚度为 0.80mm, 水体测试需 三种厚度扩散膜同时使用	厚度非常稳定, 制作过程无毒性, 耐受条件广, 测试目标物多	[4]
	0.8mm			
	1.2mm			
滤膜	PVDF	厚度为 0.10mm	物理化学惰性强, 孔径分布均匀, 厚度稳定	[4]

参考文献:

1. Davison W, Zhang H. In-situ speciation measurements of trace components in natural waters using thin film gels, *Nature*, 1994, 367: 546-548.
2. Zhang CS, Ding SM, Xu D, et al. Bioavailability assessment of phosphorus and metals in soils and sediments: a review of diffusive gradients in thin films (DGT). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(11): 7367-7378.
3. Ding SM, Wang Y, Zhang LP, et al. New holder configurations for use in the diffusive gradients in thin films (DGT) technique. *RSC Advances*, 2016, 6(91): 88143-88156.
4. Wang Y, Ding SM, Gong MD, et al. Diffusion characteristics of agarose hydrogel used in diffusive gradients in thin films for measurements of cations and anions. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 945: 47-56.
5. Ding SM, Xu D, Sun Q, et al. Measurement of dissolved reactive phosphorus using the diffusive gradients in thin films technique with a high-capacity binding phase. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(21): 8169-8174.
6. Ding SM, Xu D, Wang YP, et al. Simultaneous measurements of eight oxyanions using high-capacity diffusive gradients in thin films (Zr-oxide DGT) with a high-efficiency elution procedure. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(14): 7572-7580.
7. Xu D, Chen YF, Ding SM, et al. Diffusive gradients in thin films technique equipped with a mixed binding gel for simultaneous measurements of dissolved reactive phosphorus and dissolved iron. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(18): 10477-10484.
8. Ding SM, Sun Q, Xu D, et al. High-resolution simultaneous measurements of dissolved reactive

-
- phosphorus and dissolved sulfide: the first observation of their simultaneous release in sediments. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8297-8304.
9. Sun Q, Zhang LP, Ding SM, et al. Evaluation of the diffusive gradients in thin films technique using a mixed binding gel for measuring iron, phosphorus and arsenic in the environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, 17, 570-577.
 10. Wang Y, Ding SM, Shi L, et al. Simultaneous measurements of cations and anions using diffusive gradients in thin films with a ZrO-Chelex mixed binding layer. *Analytica Chimica Acta* 2017,972: 1-11 (Featured article).
 11. Ren MY, Wang Y, Ding SM, et al. Development of a new diffusive gradient in the thin film (DGT) method for the simultaneous measurement of CH_3Hg^+ and Hg^{2+} . *New Journal of Chemistry*, 2018, 42(10), 7976-7983.
 12. Yuan YM, Ding SM, Wang Y, et al. Simultaneous measurement of fifteen rare earth elements using diffusive gradients in thin films. *Analytica Chimica Acta*, 2018.
 13. Wang Y, Ding SM, Ren MY, et al. Enhanced DGT capability for measurements of multiple types of analytes using synergistic effects among different binding agents. *Science of the total environment*, under review.