δ13C come marker per i materiali costituenti un ordigno esplosivo

Caratterizzare i materiali esplosivi prodotti da attentati o detonazioni accidentali e trovare marcatori distintivi chimicamente identificabili è fondamentale per le forze dell'ordine. Questa analisi forense è essenziale non solo per chiarire la natura e la portata della minaccia, ma anche per gestire efficacemente la successiva risposta di emergenza e l'indagine. L'impegno si concentra sulla progettazione e sull'implementazione di una nuova piattaforma analitica pensata per eventi CBRN (Chimici, Biologici, Radiologici, Nucleari). Questo sistema analizza il rapporto isotopico del carbonio (δ13C) nei prodotti di esplosione utilizzando uno spettrometro laser portatile (CRDS). Questo approccio innovativo sfrutta i rapporti isotopici stabili per determinare con precisione l'origine e il processo di produzione dell'esplosivo, fornendo informazioni forensi rapide, accurate e direttamente sulla scena dell'incidente per una valutazione immediata della minaccia.

Laboratorio	TRACCIABILITÀ
Area di specializzazione	Meccatronica e Materiali
Referenti	Antonietta Rizzo, Chiara Telloli
Keyword	Esplosivi plastici, δ13C, Rapporto isotopico

"Analisi forense oltre la Spettrometria di Massa"



Fig. 1: Esplosione provocata dalla detonazione di una bomba



Descrizione

Questo servizio offre un'analisi avanzata, rapida e sul campo dei residui gassosi e solidi recuperati in seguito ad attentati o detonazioni accidentali, grazie all'impiego della tecnologia Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS). L'obiettivo principale è ottenere l'impronta digitale isotopica del carbonio (δ13C) presente nei prodotti dell'esplosivo, una firma unica e non replicabile che riveste un ruolo cruciale nelle attività di intelligence e investigazione forense. A differenza dei metodi tradizionali, questo approccio si distingue per la sua portabilità, tempestività e precisione operativa. Il team specializzato del Laboratorio ENEA Tracciabilità è in grado di intervenire direttamente sulla scena dell'incidente con uno spettrometro CRDS portatile. I campioni di gas e/o residui di combustione vengono prelevati e analizzati immediatamente, consentendo misurazioni ad alta frequenza e con elevata accuratezza del rapporto isotopico $\delta^{13}C$, direttamente sul campo. I risultati ottenuti hanno un valore probatorio e operativo estremamente elevato: la firma isotopica del carbonio è strettamente correlata alle materie prime utilizzate e al processo di sintesi dell'esplosivo. Questo consente di: determinare i precursori chimici impiegati nella sua produzione; sospettare o escludere il coinvolgimento di specifici produttori o reti criminali (provenienza geografica); supportare le indagini con dati scientifici oggettivi e immediatamente disponibili.

Fig. 2: Esempio di applicazione per tracciare l'origine di un materiale costituente un ordigno esposivo

Aspetti innovativi

Lo spettrometro laser portatile CRDS rappresenta una svolta fondamentale per l'analisi forense dei materiali esplosivi. La sua importanza deriva dalla capacità di fornire un'analisi isotopica (δ13C) avanzata, superando i limiti di tempo e logistica imposti dai metodi tradizionali. Il vantaggio primario del CRDS è la sua portabilità, che permette di effettuare le analisi direttamente sul campo. Questo elimina la necessità di trasferimenti lunghi e complessi dei campioni verso laboratori esterni, garantendo una risposta immediata che consente alle forze dell'ordine e agli operatori di emergenza di valutare rapidamente la minaccia e prendere decisioni operative tempestive. Inoltre, la tecnologia CRDS, altamente sensibile e precisa, sfruttando l'amplificazione del cammino ottico all'interno della cavità risonante rileva variazioni minime ma significative nelle abbondanze isotopiche, generando una "firma isotopica" unica dell'esplosivo, direttamente legata alle materie prime (C3 o C4) e al processo produttivo. Questa firma consente di identificare con accuratezza i precursori chimici e, potenzialmente, il produttore del materiale esplosivo.

Applicazioni

Tracciamento dell'origine: se un agente chimico, biologico o radiologico viene disperso tramite un ordigno esplosivo improvvisato, il CRDS analizza la firma isotopica (δ13C) dei gas residui della detonazione. Questa analisi può identificare il tipo, la fonte e il processo di produzione dell'esplosivo veicolante, fornendo informazioni cruciali sul network terroristico o sul gruppo responsabile.
Analisi dei materiali ausiliari in caso di "bombe sporche"
Caratterizzazione rapida dei residui di combustione non radioattivi sul sito contaminato
Riduzione della Chain of Custody

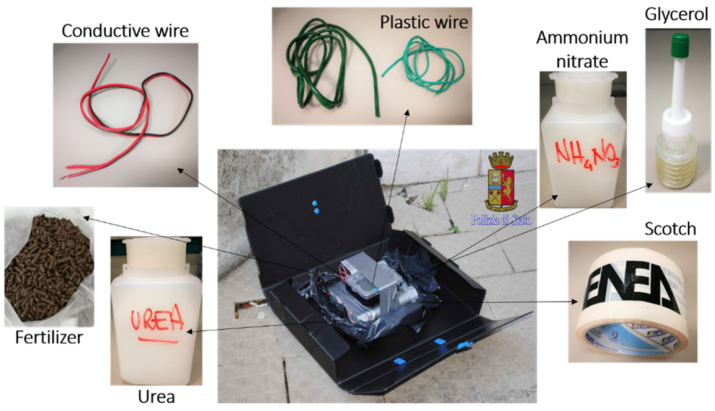


Fig. 3: Esempio di studio effettuato dal Laboratorio ENEA Tracciabilità per la caratterizzazione di materiali che possono essere utilizzati per la costruzione di ordigni esplisivi

Partner coinvolti	Servizi di Intelligence, Forze dell'odine, Operatori di emergenza Enti di ricerca, università
Tempi di realizzazione	Pronto all'uso, salvo analisi preliminari
Livello di maturità tecnologica	TRL 9 - sistema reale testato in ambiente operativo
Valorizzazione applicazione	**Valore dell'applicazione CRDS per l'analisi isotopica degli esplosivi:** Sistema trasportabile e utilizzabile direttamente in campo; Discriminazione isotopica avanzata tra materiali di origine naturale e sintetica, anche quando la composizione chimica è simile Riconoscimneto dei precursori Supporto alle indagini forensi Affidabilità e sensibilità: preparazione del campione semplice e risposta rapida

Esempio di applicazione

In caso di esplosione, l'analisi del rapporto isotopico stabile (δ13C) sui residui del dispositivo e dell'esplosivo è cruciale per l'identificazione. Sebbene composti chimici identici abbiano la stessa composizione chimica, i componenti additivi (leganti e plastificanti) o i precursori usati nella fabbricazione possono rivelare differenze nel loro rapporto isotopico, permettono di risalire all'origine e al processo produttivo dell'esplosivo.

Campioni Analizzati: Sono stati analizzati diversi tipi di campioni che contengono precursori di costituenti esplosivi, come acido urico, fertilizzante con deiezioni equine e due tipi di detergenti a base di nitrato.
Discriminazione: L'analisi delle concentrazioni di azoto e carbonio permette di distinguere campioni con basse concentrazioni da quelli con alte concentrazioni. In particolare, la combinazione del contenuto di carbonio totale con la concentrazione di **δ**13C aiuta a discriminare l'origine di produzione del componente.
Risultati: Il fertilizzante è caratterizzato da un più alto contenuto di C e un valore di δ13C tipico della produzione primaria; i detergenti e l'acido urico mostrano una concentrazione di δ13C molto bassa, non basata su un processo metabolico, ma si differenziano per il contenuto di C.
Screening Rapido: L'uso di un grafico bidimensionale che confronta il contenuto di carbonio con la δ13C può essere utilizzato come strumento di screening rapido per distinguere i materiali derivati dalla produzione primaria da quelli sintetici.
Conclusioni: I contenuti distintivi di C totale e δ13C possono essere marcatori per i precursori di esplosivi improvvisati e fatti in casa, che possono essere rilevati sulla scena dell'attentato. La presenza di queste specifiche caratteristiche in aree sospette può innalzare l'attenzione e innescare un'indagine più mirata.

TRACCIABILITÀ

Laboratorio ENEA per la TRACCIABILITA' di ALIMENTI e SICUREZZA dell'ARIA



Le attività del Laboratorio Tracciabilità, che afferisce funzionalmente al Dipartimento Nucleare di ENEA, derivano dalla tradizione di ricerca sperimentale in ambito nucleare che viene in questo caso applicata in modo assolutamente innovativo ai temi della qualità e sicurezza ambientale ed alimentare, focalizzandosi sulla rilevazione di elementi ed isotopi in traccia. In parallelo, queste competenze vengono ulteriormente valorizzate ed applicate in un ambito più ampio come la mitigazione dei rischi chimici, biologici, radiologici e nucleari (rischio CBRN), la verifica dei trattati di non proliferazione nucleare di disarmo, la tracciabilità analitica nel settore alimentare e biobased.
Le tecniche a cui il laboratorio fa riferimento sono la spettrometria di massa, le spettrometrie radiometriche, la spettroscopia laser e Raman. Il Laboratorio Tracciabilità gestisce due aree sperimentali sul territorio regionale: presso il Centro di Bologna (spettrometria beta, analisi elementare, analisi isotopiche del carbonio) e presso il centro del Brasimone (spettrometria di massa e radioecologia). Settori di riferimento: industria agro-alimentare, sicurezza chimica e nucleare, radioecologia.

Sito web	http://www.tracciabilita.enea.it
Direttore	Antonietta Rizzo
Data pubblicazione	04/08/2026