



Arabic Translation Work:

Yunhui Zhang & Logan Swaren & Wenbing Wang (Authors)

Water Decontamination by Reactive High-Valent Iron Species^{*}

Mohamed Kmel Abdel-Daem (Translator)

Port Said University, Port Said, Egypt

Email : mabdeldaem999@gmail.com

Orcid  : [0009-0007-0386-1454](https://orcid.org/0009-0007-0386-1454)

Received	Accepted	Published
16/8/2024	29/10/2024	31/10/2024

doi : 10.5281/zenodo.14031455

Cite this article as : Zhang, Y., Swaren, L., & Wang, W. (2024). Water Decontamination by Reactive High-Valent Iron Species (M. Abdel-Daem, Arabic Trans.). *Arabic Journal for Translation Studies*, 3(9), 254-262.

Abstract

The occurrence of emerging organic contaminants (EOCs) in water bodies has received increasing attention worldwide. EOCs, such as pharmaceuticals and pesticides, when present in trace concentrations, cannot be effectively removed by conventionally designed treatment processes in most wastewater treatment plants. Therefore, advanced oxidation processes (AOPs) have been developed as promising alternatives for trace-level EOC elimination using radicals (e.g., hydroxyl radicals and sulfate radicals) and non-radical pathways. However, these reactive species are generally nonselective and also exhibit excellent reactivity with background water constituents, leading to excess consumption of oxidants and the possible generation of toxic secondary pollutants. Accordingly, selective oxidants have recently become a subject of considerable interest, mainly including singlet oxygen and high-valent metal species. They could preferentially attack electron-rich moieties, resulting in selective degradation of EOCs. Reactive high-valent iron species include ferrate [Fe(VI)], Fe(IV), and Fe(V), and are often referred to as active ferrate species. They possess attractive chemical properties and have raised renewed interest in iron-based catalytic AOPs to remove EOCs in practical water decontamination.

Keywords: Oxidants, EOCs, Water Decontamination, High-valent species

© 2024, Abdel-Daem, licensee Democratic Arab Center. This Translated Paper is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0), which permits non-commercial use of the material, appropriate credit, and indication if changes in the material were made. You can copy and redistribute the material in any medium or format as well as remix, transform, and build upon the material, provided the original work is properly cited.

^{*} Zhang, Y., Swaren, L., & Wang, W. (2024). Water decontamination by reactive high-valent iron species. *Eco-Environment & Health*, 3(1), 55-58.

عمل مترجم:

يونهوي تشانج ولوكان سوارن ووينين وانغ (المؤلفون)

تنقية المياه باستخدام أيونات الحديد النشطة عالية التأكسد

محمد كامل عبد الدايم السيد (المترجم)

جامعة بورسعيد، بورسعيد، مصر

الايمل: mabdeldaem999@gmail.com

أوركيد ID: 0009-0007-0386-1454

تاريخ النشر	تاريخ القبول	تاريخ الاستلام
2024/10/31	2024/10/30	2024/8/16

doi : 10.5281/zenodo.14031455

للاقتباس: تشانج، ي؛ سوارن، ل؛ ووينين و. (2024). تنقية المياه باستخدام أيونات الحديد النشطة عالية التأكسد (ترجمة محمد عبد الدايم). *المجلة العربية لعلم الترجمة*, 3(9)، 254-262.

ملخص

لقد حظيت قضية تلوث المسطحات المائية بالملوثات العضوية الطارئة باهتمام كبير عالمياً. وتمثل النفايات الكيميائية والمبيدات أبرز أشكال هذه الملوثات العضوية الطارئة، والتي لا يمكن إزالتها بصورة فعالة - حتى وإن تواجدت في المياه بتركيزات ضئيلة - عن طريق عمليات المعالجة التقليدية المستعملة في معظم محطات معالجة مياه الصرف الصحي. لذا تم تطوير عمليات أكسدة أكثر تطوراً باعتبارها من البدائل الواعدة وذلك عن طريق استخدام الجذور الكيميائية (مثل الجذور الهيدروكسيلية والجذور الكبريتيكية)، ودون الاعتماد على الجذور أيضاً. ولكن ما ينقص هذه العناصر النشطة هو الخاصية الانتقائية لذا فإنها تتفاعل بصورة كبيرة مع المكونات الأساسية للماء مما يؤدي إلى الاستهلاك المفرط للمؤكسدات وإمكانية نشوء الملوثات الثانوية السامة. ومن ثم تزايد الاهتمام مؤخراً بدراسة المؤكسدات الانتقائية بما في ذلك الأكسجين الأحادي وأيونات الفلزات عالية التأكسد، حيث تقوم تلك المؤكسدات بمهاجمة الجزيئات المشبعة بالالكترولونات وينتج عن ذلك التفكيك الانتقائي للملوثات العضوية الطارئة. وتعد الفيرات من أيونات الحديد النشطة عالية التأكسد، ومنها (الحديد السداسي والحديد الرباعي والحديد الخماسي) وغالباً ما تعرف بعناصر الحديد النشطة، كما أنها تتمتع بخصائص كيميائية مميزة مما أدى إلى تزايد الاهتمام باستعمالها في عمليات الأكسدة المتقدمة كوسائط محفزة معتمدة على الحديد لإزالة الملوثات العضوية الطارئة أثناء عملية تنقية المياه.

الكلمات المفتاحية: أيونات الحديد عالية التأكسد، تنقية المياه، اللوثات العضوية الطارئة، عمليات الأكسدة

© 2024، عبد الدايم، الجهة المرخص لها: المركز الديمقراطي العربي.

نشر هذا النص المترجم وفقاً لشروط (CC BY-NC 4.0) International (Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0).

تسمح هذه الرخصة بالاستخدام غير التجاري، وينبغي نسبة العمل إلى صاحبه، مع بيان أي تعديلات عليه. كما تتيح حرية نسخ، وتوزيع، ونقل العمل بأي شكل من الأشكال، أو بآية وسيلة، ومزجه وتحويله والبناء عليه، طالما يُنسب العمل الأصلي إلى المؤلف.

لقد حظيت قضية تلوث المسطحات المائية بالملوثات العضوية الطارئة باهتمام كبير عالميا . وتمثل النفايات الكيميائية والمبيدات أبرز أشكال هذه الملوثات العضوية الطارئة، والتي لا يمكن إزالتها بصورة فعالة - حتى وإن تواجدت في المياه بتركيزات ضئيلة - عن طريق عمليات المعالجة التقليدية المستعملة في معظم محطات معالجة مياه الصرف الصحي. لذا تم تطوير عمليات أكسدة أكثر تطورا باعتبارها من البدائل الواعدة وذلك عن طريق استخدام الجذور الكيميائية (مثل الجذور الهيدروكسيلية و الجذور الكبريتيكية)، ودون الاعتماد على الجذور أيضا. ولكن ما ينقص هذه العناصر النشطة هو الخاصية الانتقائية لذا فإنها تتفاعل بصورة كبيرة مع المكونات الأساسية للماء مما يؤدي إلى الاستهلاك المفرط للمؤكسدات وإمكانية نشوء الملوثات الثانوية السامة. و من ثم تزايد الاهتمام مؤخرا بدراسة المؤكسدات الانتقائية بما في ذلك الأكسجين الأحادي و أيونات الفلزات عالية التأكسد، حيث تقوم تلك المؤكسدات بمهاجمة الجزيئات المشبعة بالالكترونات وينتج عن ذلك التفكيك الانتقائي للملوثات العضوية الطارئة. وتعد الفيرات من أيونات الحديد النشطة عالية التأكسد، ومنها (الحديد السداسي والحديد الرباعي والحديد الخماسي) وغالبا ما تعرف بعناصر الحديدات النشطة، كما أنها تتمتع بخصائص كيميائية مميزة مما أدى إلى تزايد الاهتمام باستعمالها في عمليات الأكسدة المتقدمة كوسائط محفزة معتمدة على الحديد لإزالة الملوثات العضوية الطارئة أثناء عملية تنقية المياه. وتتواجد أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي بشكل أساسي في صورة $(Fe^5O^{3-}_4)$ أو $(Fe^4O^{4-}_4)$ أو في صورة $(Fe^4O^{2-}_3)$ ، كما يمكن الحصول عليها من الحديد السداسي (الحديدات $Fe^6O^{2-}_4$). و يتم الاستفادة من الحديد السداسي في تنقية المياه لما له من قدرة على تحفيز عمليات التآكل والامتزاز والأكسدة والتطهير في آن واحد. ويمكن توضيح هذه الخصائص الفريدة من خلال الحقيقة التالية: (1) عند أكسدة الملوثات العضوية الطارئة يتم اختزال الحديد السداسي إلى أكسيدات/هيدروكسيدات الحديد والتي تستعمل كمخثرات، (2) المركبات المتكونة مثل هيدروكسيد الحديد الثنائي وأكسيد الحديد يمكنها ومن خلال تركيبها الداخلي القيام بعملية امتصاص الشوائب العضوية الطارئة في الماء. (3) يتم تكون الحديد الرباعي و الحديد الخماسي ولهذه الأيونات درجة أعلى من التفاعلية والانتقائية مقارنة بالحديد السداسي مما يعمل على تعزيز عملية أكسدة الشوائب العضوية الطارئة بصورة كبيرة. (4) يساعد الحديد السداسي على تثبيط كثير من الطفيليات الضارة أو القضاء عليها تماما، ومنها ايشيريشيا كولاي و النوروفيروس الفأري و المكورات العنقودية الذهبية المقاومة للميثيسيلين، دون الحاجة لاستعمال منتجات ثانوية للتطهير.

1. تحضير أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي

يمكن تشكيل أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي عن طريق التحضير المباشر لأملح الحديد الرباعي أو أملاح الحديد الخماسي، ثم تفكيك أو اختزال فيرات الحديد السداسي، ثم أكسدة الحديدوز أو الحديد. فخلال حقبة الخمسينات بالقرن العشرين تم تحضير أملاح الحديد الرباعي وأملاح الحديد الخماسي (مثل، حديدات البوتاسيوم أو حديدات الصوديوم) باستعمال الطريقة الحرارية، ولكن منذ ذلك الحين لم تتم سوى محاولات قليلة لإنجاز هذه التجربة نظرا لارتفاع استهلاك الطاقة وأيضا لافتقار المنتجات للصلاية الكافية. لذا فإنه سرعان ما يتم تحليل أملاح الحديد الرباعي وأملاح الحديد الخماسي و يتشكل الحديد من عملية إنتاج وتخزين ونقل أملاح الحديد الرباعي و الحديد الخماسي، مما يزيد من تقويض التطبيقات العملية لتلك التجربة.

خلال العقود الأخيرة يتم تحضير أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي عن طريق تفكيك أو اختزال الحديد السداسي وذلك بإضافة كل من الأيونات الفلزية (مثل أيونات الحديدك و أيونات الكالسيوم) و الأحماض (مثل كلوريد الهيدروجين) و المواد الغنية بالكربون (مثل الأنابيب النانوية الكربونية) وعوامل الاختزال (مثل ثالث أكسيد الكبريت). ولإيضاح ذلك بالتفصيل، فإنه بإضافة الأحماض يتم تحفيز تكون المركبات المحتوية على الحديد السداسي والمحملة بالبروتونات (مثل HFe^6O^-_4) والذي يتفكك بتكون $(\text{Fe}^6\text{O}^{2-}_7)$ ويلي ذلك ازدواج ذرتي أكسجين ليتشكل $(\text{Fe}^4_2\text{O}_6)$. كما تساعد إضافة الأحماض النذرة على تكوين المزيد من العناصر الوسيطة النشطة كالحديد الرباعي و الحديد الخماسي، ويفيد ذلك في عملية تفكيك ما استعصى من الملوثات العضوية الطارئة. إلا أن نجاح هذه العملية يعتمد على معدلات التفاعلات التنافسية بين أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي من جهة و الملوثات العضوية الطارئة من جهة أخرى، كما يعتمد ذلك أيضا على التحلل الذاتي لهذه الملوثات العضوية والذي يرتبط ارتباطا وثيقا بجزيئات تلك الملوثات. كما يمكن اختزال الحديد السداسي باستخدام بعض الجذور (مثل الالكترونات المذابة و الميثانول) لينتج الحديد الخماسي، و باستعمال المواد الغنية بالكربون كعامل حفاز يتم تكوين أيونات الحديد الرباعي و الحديد الخماسي مما يعزز من عملية أكسدة الملوثات العضوية الطارئة.

كما يمكن تحضير أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي عن طريق أكسدة الحديدوز أو الحديدك. فعلى سبيل المثال، بإجراء عملية أكسدة الحديدك بواسطة الجذور الهيدروكسيلية داخل وسط من محاليل الكربونات و البيروفسفات والفوسفات بدرجة حموضة (10.4) يمكن أن يتشكل الحديد الرباعي في صورة ربيطات الحديد الرباعي، وتتنوع فترة بقاء تلك الربيطات طبقا لتساندها مع الذرة المركزية لفلز الحديد. كما يمكن تكوين الحديد الرباعي عن طريق أكسدة الحديدوز بواسطة المواد المانحة لذرة أكسجين (مثل الأوزون و حمض الهيبوكلوروز و ثيوكبريتات الصوديوم، وذلك في ظروف قوية الحمضية. وفي الآونة الأخيرة، تم استهداف أكسدة الملوثات العضوية الطارئة من خلال عملية توليد كهربائي لأيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي وذلك عن طريق الأكسدة الكهروكيميائية والاعتماد على الحديدك كعامل مساعد، أو عن طريق الكلورة الكهربائية للحديدوز المعدل.

والجدير بالملاحظة هو أن درجة الحموضة تعد عاملا حاسما ومؤثرا في تكوين أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي، وذلك إما عن طريق اختزال الحديد السداسي أو عن طريق أكسدة الحديدوز أو الحديدك. ومع ذلك تتنوع تأثيرات درجة الحموضة حسب اختلاف العمليات الكيميائية، كما أن هذه التأثيرات تختلف عن تلك التي يتم ملاحظتها في تفاعل فنتون التقليدي. وعموما، فإنه كلما زادت نسبة المحلول الحمضي كلما انخفض أثر الحديد الرباعي كثيرا. وتحديدا، تتوفر نسبة 82% تقريبا من أيون الحديد الرباعي المتكون لأجل المساهمة في عملية تفكيك الملوثات العضوية الطارئة عند درجة حموضة (1.0)، ولكن تتضاءل تلك المساهمة عند درجة حموضة (7.5). ويمكن تشكيل أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي عن طريق اختزال الحديد السداسي في ظروف قلبية، بينما يتم تشكيل هذين العنصرين عن طريق تأكسد الحديدوز عند رقم هيدروجيني حمضي أو شبه متعادل. وعلاوة على ذلك، يتم تسريع عملية تكون أيونات الفلزات عالية التأكسد عن طريق المحفزات الانتقالية المعتمدة على المعادن أو الحديد و المستخدمة في عمليات الأكسدة المتقدمة. فعلى سبيل المثال يمكن تعزيز عملية تكوين الحديد الرباعي والحديد الخماسي عن طريق استعمال أملاح فلزية انتقالية (مثل، هيبتهيدرات كبريتات الكوبالت

الثنائي و أملاح البرمنجنات)، وكذلك باستخدام أكاسيد الفلزات الانتقالية (مثل، ألفا أكسيد الحديد الثلاثي)، وأيضا باستخدام المركبات الفلزية الانتقالية (مثل، كلوريد الحديد الثنائي، عن طريق الإزاحة لكل ذرة)، أو باستخدام العوامل الحفازة أحادية الذرة (مثل، الحديد- النيتروجين- الكربون).

وبالرغم من تنوع وسائل تحضير الحديد الرباعي والحديد الخماسي، إلا أن الطرق المستخدمة حاليا تفتقد لسهولة إجراء التجارب الخاصة بذلك، كما تتسم بصعوبة الظروف التشغيلية، كما تفتقد للاستغلال الأمثل لعناصر الحديدات النشطة، ويرجع ذلك لإضافة عوامل الاختزال والأكسدة مما يؤدي إلى تكون عناصر ثانوية غير مرغوبة. وتمثل تلك العقبات قيودا على التطبيقات العملية لأيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي النشطين. لذا يتحتم على الباحثين مستقبلا إيجاد وسائل لتحضير أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي تتسم بسهولة التجارب وكفاءتها ومباشرتها كما تتميز بعدم ارتفاع التكلفة الاقتصادية ومراعاة شروط الاستدامة.

2. الكشف عن أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي

يعد سلفوكسيد فينيل الميثيل من المركبات الاستقصائية المعروفة والذي يستعمل للكشف عن الحديد الرباعي السائل والحديد الخماسي السائل وقياسهما حيث إنه يتأكسد بفعل كل من الحديد الرباعي والحديد الخماسي ويتشكل سلفون فينيل الميثيل. ويتم التحقق من وجود أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي عن طريق قياس كل من سلفوكسيد فينيل الميثيل و سلفون فينيل الميثيل من خلال تقنية استشراب سائل عالية الأداء بطول 194 نم. ويتم استعمال سلفوكسيد فينيل الميثيل وسلفون فينيل الميثيل للتأكد من وجود الحديد الرباعي والحديد الخماسي ولكن لا يمكن لهذه الطريقة تحديد أي من العنصرين متواجدا.

وللكشف عن أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي في حالتهما الصلبة فإنه عادة ما يتم استخدام أطياف موسباور لتحليل تكافؤ حالات تأكسد الحديد، بما فيها الحديد السداسي والحديد الخماسي والحديد الرباعي والحديدك والحديدوز (انظر شكل 1.أ). و باستخدام مطياف الامتصاص الموضعي و المتكون من مصباح تنجستن قوي الإضاءة وكاشف عالي الحساسية (مطياف الكتلة)، يمكن تسجيل التغيرات الطارئة في أيونات الحديد. وعلاوة على ذلك، فإن الخطوات الحسابية لنظرية الكثافة الوظيفية تساعد على تحديد أولى الخطوات المطلوبة في التفاعل بين الحديد السداسي وعوامل الاختزال عن طريق حساب طاقة التنشيط وطاقة جيبس الحرة لتحديد تكون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي. (انظر شكل 1.ب و شكل 1.ج). وإيجازا، يمكن القول بأن ثمة طفرة في عمليات الكشف عن العناصر وذلك بفضل التطورات التي طرأت على علوم المواد وأساليب التوصيف الكيميائي. ومع ذلك لاتزال عملية الكشف عن أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي يشوبها الغموض، ناهيك عن صعوبة إمكانية تحديد كمية التركيز الخاص بكل عنصر، ويتطلب ذلك إجراء المزيد من التجارب والبحوث.

3. دور كل من الحديد الرباعي والحديد الخماسي في عملية تنقية المياه

يعد أيون الحديد الخماسي من المؤكسدات الانتقائية – رغم عدم توافر البيانات البحثية الكافية بهذا الخصوص - و يتميز بدرجة تفاعل أعلى من الحديد الرباعي. فعلى سبيل المثال، عند تأكسد الأحماض الأمينية يقوم الحديد الخماسي

بمهاجمة السلسلة الجانبية عن طريق انتقال ثنائي الإلكترون، بينما يتفاعل أيون الهيدروكسيد عن طريق الإضافة داخل حلقة الجزيء العضوية، ويعد أيون الهيدروكسيد من العناصر الأكسجينية النشطة والأساسية في عمليات الأكسدة المتقدمة. وتعتمد كل من حركة التنقية وفعالية الحديد الخماسي على درجة الحموضة و طبيعة الجزيئات المكونة للملوثات العضوية الطارئة (مثل التركيب والتوازن البروتوني)، كما تتأثر فعالية الحديد الرباعي بدرجة الحموضة والأيونات الفلزية المتواجدة. ولقد وجد نيو و آخرون عدم حدوث تغييرات في آليات الأكسدة للملوثات العضوية الطارئة بواسطة أيونات الحديد الرباعي والحديد الخماسي، ولكن لوحظ أن لهما أثرا في زيادة معدل تفكيك الملوثات العضوية الطارئة. ويرى تشينغ وآخرون أن أيون الحديد الرباعي المرتبط برابطة ثنائية مع الأكسجين يمكنه تحسين قدرة الأكسدة واحتمالية معدل الحموضة، كما يمكنه تعزيز ثبات طريقة الأكسدة النشطة باستخدام فوق أكسي أحادي الكبريتات (المحتوي على ذرة واحدة من كل من الحديد والنيتروجين والكربون) والمستخدمة في إزالة التلوث من المياه. وعموما، لاتزال تجارب تنقية المياه باستعمال أيونات الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي محدودة في الوقت الراهن، وتركز البحوث القليلة التي أجريت على الدور الملحوظ للحديد الرباعي أو الحديد الخماسي في عملية تأكسد الملوثات العضوية الطارئة دون استكشاف آليات التأكسد. ومن المأمول أن تقوم الدراسات المستقبلية بإجراء التجارب لفحص عملية تفاعل أيونات الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي مع الملوثات العضوية الطارئة.

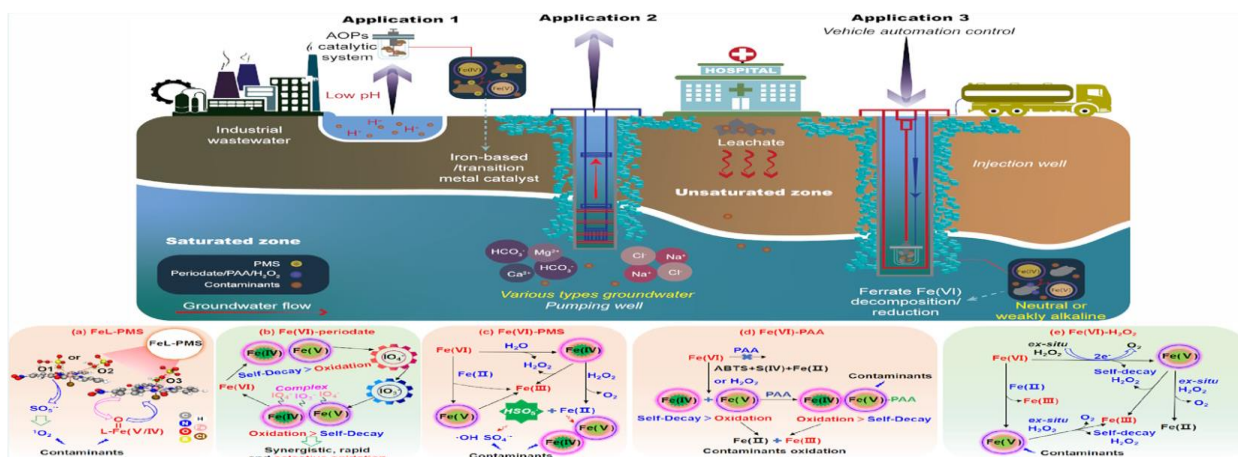


Fig. 1. Generation mechanisms of Fe(IV) and Fe(V) species in transition metal-based catalyst-induced AOPs system (a) ; and in typical Fe(VI) decomposition reduction systems: Fe(VI)-periodate system (b) , Fe(VI)-PMS system (c) , Fe(VI)-PAA system (d) , and Fe(VI)-H₂O₂ system (e)].

4 . عملية التأكسد التآزري باستخدام أيونات الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي بالاتحاد مع عمليات

أخرى

إن عملية التأكسد التآزري المتضمنة لأيونات الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي والمدمجة مع عمليات أخرى عادة ما تتم باستخدام عمليات الأكسدة المتقدمة القائمة على أيون الحديد السداسي، ومنها: طريقة الأكسدة بالحديد السداسي مع

بيروكسيد الهيدروجين، وطريقة الأكسدة بالحديد السداسي مع فوق أكسي أحادي الكبريتات، وطريقة الأكسدة بالحديد السداسي مع فوق اليودات، وطريقة الأكسدة بالحديد السداسي مع حمض فوق الأسيتيك، حيث يتم تفاعل أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي مع المركبات الأخرى ومع عوامل التأكسد من أجل إزالة الملوثات العضوية الطارئة. ومن الجدير بالملاحظة أن عوامل الأكسدة تلعب أدواراً مختلفة في طرق الأكسدة القائمة على الحديد السداسي. فمثلاً يقوم كل من بيروكسيد الهيدروجين و فوق أكسي أحادي الكبريتات بتنشيط الحديد السداسي، بينما يساعد حمض فوق الأسيتيك على تثبيت أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي. ويعد نيو وآخرون أول من قام بإثبات قدرة التأكسد التآزري والسريع والانتقائي لدى أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي المعالج بمحلول فوق اليودات أو اليودات والمستعملة كوسائط لتنقية الملوثات العضوية الطارئة (انظر شكل 1.ب). حيث تم استنتاج أن أيونات الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي هي عوامل الأكسدة الرئيسية. وليست المركبات المختلفة أو الأكسجين الأحادي، كما ثبت عدم جدوى فوق اليودات أو اليودات في عملية تنشيط التفاعل نظراً لانخفاض القدرة التفاعلية لهما مع الحديد السداسي (فقط 082% م-1 ث-1) رغم قيامهما بدور الربيطات لأيون الحديد الرباعي أو الخماسي. ويتم أكسدة وتنشيط الحديد السداسي بصورة فعالة من خلال فوق أكسي أحادي الكبريتات. وقد أثبتت طريقة الأكسدة بالحديد السداسي مع فوق أكسي أحادي الكبريتات كفاءة عالية في عملية تفكيك كبريتات أوكزازول الميثيلين، وقد ساهم أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي بنسبة 49.7% في عملية التفكيك (انظر شكل 1.ج). وقد لوحظ تسريع انجاز عملية تفكيك الملوثات العضوية الطارئة باستخدام طريقة الأكسدة بالحديد السداسي مع حمض فوق الأسيتيك وذلك مقارنة باستخدام الحديد السداسي أو حمض فوق الأسيتيك كعوامل أكسدة كل على حدا. وقد أظهر كل من الحديد الرباعي والحديد الخماسي نشاطاً تفاعلياً هائلاً عند استخدامهما كعوامل وسيطة، بينما تضاءلت مساهمة الجذور العضوية (مثل أيون الخليك وأيون الخلات) (انظر شكل 1.د). و يلاحظ مؤخراً أن هناك اهتمام بدراسة أثر بيروكسيد الهيدروجين في تعزيز عملية تأكسد الملوثات العضوية الطارئة. وقد تسارعت عملية التأكسد بشكل فائق بالاعتماد على طريقة استخدام الحديد السداسي مع بيروكسيد الهيدروجين، وذلك مقارنة باستخدام الحديد السداسي فقط، وذلك نظراً لدور بيروكسيد الهيدروجين كعامل حفاز (مشتركاً أو مستقلاً)، مما يساعد على إنتاج أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي. علاوة على ذلك، فإنه أثناء إجراء طريقة الأكسدة باستخدام الحديد السداسي وطريقة الأكسدة بالحديد السداسي مع بيروكسيد الهيدروجين، لم يتم الاعتماد على الأكسجين أو الجذور الهيدروكسيلية رغم أنه عادة ما يتم استعمالهما في عملية تفكيك الملوثات العضوية الطارئة (انظر شكل 1.هـ). وقد لوحظ تنوع مساهمة نواتج التفاعل من استخدام أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي وذلك تبعاً لاختلاف طرق الأكسدة، كما أنها تتأثر ببضعة عوامل مثل طبيعة الملوثات العضوية الطارئة وعملية الأكسدة وظروف التفاعل. وفي المرحلة الحالية من التجارب لا تتضح القواعد العامة أو العوامل المؤثرة الأولية.

5. الأهمية البيئية للدراسة

بفضل ما تتمتع به أيونات الحديد النشطة عالية التأكسد – وخصوصاً الحديد الرباعي والحديد الخماسي - من قدرة على الأكسدة والانتقائية لإزالة الرواسب المتحجرة من الملوثات العضوية الطارئة، فإن لهذه العناصر تطبيقات عملية واعدة في طرق إزالة المياه، مثل معالجة مياه الصرف و تنقية المياه و معالجة المياه الجوفية. حيث يتم توظيف تلك العناصر بعمليات

أكسدة متقدمة أحادية أو متعددة و تضمينها داخل التقنيات المستخدمة لمعالجة المياه مثل الحواجز النفاذية النشطة والأكسدة الكيميائية المكانية بغرض معالجة المياه الجوفية. وقد تم إجراء بعض الدراسات على عمليات الأكسدة المتقدمة الأحادية و لكن لم يحالفها الحظ للخروج من مستوى التجارب المعملية، و لا تزال نتائجها بعيدة عن التطبيقات العملية. ومن العوامل الحاسمة التي تعيق التطبيقات العملية لاستخدام أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي هي التعقيدات التي تشوب طرق التحضير. وبالتالي فإن من الأولويات البحثية المستقبلية وضع ضوابط لطرق التحضير في عمليات الأكسدة المتقدمة و ذلك من أجل إيجاد حل قابل للتطبيق. ولا يزال هناك بعض القصور لإثبات طرق تكوين ومساهمة أيون الحديد الرباعي أو الحديد الخماسي، رغمًا من قيام بضعة دراسات بإثبات القدرة الفائقة لأيون الحديد الرباعي أو الخماسي على الأكسدة باعتبارهما عوامل وسيطة في إزالة الملوثات العضوية الطارئة ومقاومتها للتركيب الجزيئي المعقد للماء. وترجع هذه التناقضات إلى القصور في كل من أجهزة التحليل الكيميائي والحسابات النظرية و عملية التصميم. ولذلك فإن تطوير وتطبيق أساليب تحليل و وسائل حساب جديدة تعد من الأولويات القصوى من أجل ضبط التفاعلية الكيميائية للحديدات و دراسة الآليات من أجل إزالة تلوث المياه. كما أنه لم تتم ملاحظة تكون نواتج ثانوية غير مرغوبة أو ظهور مخاطر بعد عملية المعالجة، ويتعين تقييم ذلك أثناء التطبيقات العملية.

الإحالة البيبليوغرافية على المرجع الأصلي الذي تمت ترجمته

Zhang, Y., Swaren, L., & Wang, W. (2024). Water decontamination by reactive high-valent iron species. *Eco-Environment & Health*, 3(1), 55-58.

قائمة البيبليوغرافيا

- Luo, C., Feng, M. B., Sharma, V. K., & Huang, C. H. (2020). Revelation of ferrate(VI) unimolecular decay under alkaline conditions: Investigation of involvement of Fe(IV) and Fe(V) species. *Chemical Engineering Journal*, 388, 1-24.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138589472030125X>
- Marbaniang, C. V., Sathiyar, K., McDonald, T. J., Lichtfouse, E., Mukherjee, P., & Sharma, V. K. (2023). Metal ion-induced enhanced oxidation of organic contaminants by ferrate: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1729–1743.
<https://doi.org/10.1007/s10311-023-00598-9>
- Farinelli, G., Minella, M., Pazzi, M., Giannakis, S., Pulgarin, C., Vione, D., & others. (2020). Natural iron ligands promote a metal-based oxidation mechanism for the Fenton reaction in water environments. *Journal of Hazardous Materials*, 393.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122413>
- Bielski, H. J., & B. (1990). Generation of iron(IV) and iron(V) complexes in aqueous solutions. *Methods in Enzymology*, 186, 108–113.
[https://doi.org/10.1016/0076-6879\(90\)86012-O](https://doi.org/10.1016/0076-6879(90)86012-O)
- Wang, J., Kim, J., Ashley, D. C., Sharma, V. K., & Huang, C. H. (2022). Peracetic acid enhances micropollutant degradation by ferrate(VI) through promotion of electron transfer efficiency. *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11683–11693.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01779>



- Wahl, K., Klemm, W., & Wehrmeyer, G. (1956). Über einige Oxokomplexe von Übergangselementen. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 285(3-6), 322-336.
<https://doi.org/10.1002/zaac.19562850305>
- Lin, L., Wang, J., Zhao, Z., Zhu, J., Zhamaerding, A., Feng, L., & others. (2023). Multi-dimensional micro-nano scale manganese oxide catalysts induced chemical-based advanced oxidation processes (AOPs) in environmental applications: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 474.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145600>
- Wu, Q. Y., Yang, Z. W., Wang, Z. W., & Wang, W. L. (2023). Oxygen doping of cobalt-single-atom coordination enhances peroxymonosulfate activation and high-valent cobalt-oxo species formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(16).
<https://doi.org/10.1073/pnas.2219923120>
- Liang, S., Zhu, L. Y., Hua, J., Duan, W. J., Yang, P. T., Wang, S. L., & others. (2020). Fe²⁺/HClO reaction produces (FeO₂⁺)-O⁴: An enhanced advanced oxidation process. *Environmental Science & Technology*, 54(10), 6406–6414.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00142>
- Wang, S., Shao, B., Qiao, J., & Guan, X. (2021). Application of Fe(VI) in abating contaminants in water: State of art and knowledge gaps. *Frontiers in Environmental Science and Engineering*, 15(5), 80.
<https://doi.org/10.1007/s11783-021-1416-5>
- Wang, S., Lin, Y., Shao, B., Dong, H., Ma, J., & Guan, X. (2023). Selective removal of emerging organic contaminants from water using electrogenerated Fe(IV) and Fe(V) under near-neutral conditions. *Environmental Science & Technology*, 57(25), 9332–9341.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04212>
- Sharma, V. K., Feng, M. B., Dionysiou, D. D., Zhou, H. C., Jinadatha, C., Manoli, K., & others. (2022). Reactive high-valent iron intermediates in enhancing treatment of water by ferrate. *Environmental Science & Technology*, 56(1), 30–47.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05051>
- Bao, Y., Lian, C., Huang, K., Yu, H., Liu, W., Zhang, J., & others. (2022). Generating high-valent iron-oxo (FeIV=O) complexes in neutral microenvironments through peroxymonosulfate activation by Zn-Fe layered double hydroxides. *Angewandte Chemie International Edition*, 61(42).
<https://doi.org/10.1002/anie.202209542>
- Wang, Z., Qiu, W., Pang, S. Y., Guo, Q., Guan, C., & Jiang, J. (2022). Aqueous iron(IV)-oxo complex: An emerging powerful reactive oxidant formed by iron(II)-based advanced oxidation processes for oxidative water treatment. *Environmental Science & Technology*, 56(3), 1492-1509.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05772>
- Wu, Z., Liu, A., Yang, B., Hu, X., Repo, E., Xiao, K., & others. (2023). Cost-effective FeIVO₂⁺ generation for antibiotics removal in electrochlorination of mariculture wastewater. *ACS ES&T Water*, 3(8), 2512–2521.
<https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00154>