الملخص العربي

High-altitude-acclimated activated sludge exhibits reduced resistance to mercury stress: Insights from nitrogen conversion, oxidative stress and multi-omics analysis

الحمأة المنشطة المتأقلمة مع الارتفاعات العالية تُظهر مقاومة منخفضة لإجهاد الزئبق: رؤى من تحويل النيتروجين والإجهاد التأكسدي وتحليل متعدد الأوميكس

Lei Gao [a] , Yue Chen [a,b,c,d], Yongze Lu [a,c,e], Shuping Li [b,c,d], Zhonglian Yang [a,d], Guangcan Zhu [a,c,d,e], **Eid S. Gaballah [a,f]**

a *School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China*
b *College of Information Engineer, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China*
c *Key Laboratory of Water Safety and Aquatic Ecosystem Health of Xizang, Xianyang 712082, China*
d *Key Laboratory of Water Pollution Control and Ecological Restoration of Xizang, National Ethnic Affairs Commission, Xianyang 712082, China*
e *State Key Laboratory of Environmental Medicine Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China*
f *Agricultural Engineering Department, Faculty of Agriculture, Fayoum University, Fayoum 63514, Egypt*

الملخص

يُقلل أرتفاع محتوى الزئبق (Hg) في أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي في المرتفعات من كفاءة المعالجة. تُظهر الحمأة المنشطة المُتأقلمة في هذه الظروف خصائص ميكروبية مميزة مقارنةً بتلك الموجودة في ظروف الارتفاعات المنخفضة، مما قد يؤثر على استجابتها لضغط الزئبق. في هذه الدراسة، تم التحقيق في تحويل النيتروجين واستجابات الإجهاد التأكسدي للحمأة المنشطة المتأقلمة مع الضغط المنخفض (65 و 72 كيلو باسكال) تحت ضغط الزئبق الثنائي قصير المدى باستخدام التسلسل الميتاجينومي واختبارات نشاط الإنزيم والتحليل الأيضي. أظهرت النتائج أن عمليتي النترجة وإزالة النترجة في الحمأة المنخفضة الضغط كانتا أكثر تثبيطاً بشكل ملحوظ تحت إجهاد الزئبق الثنائي Hg(II)، مع انخفاض أكبر في التعبير الجيني الوظيفي وأنشطة الإنزيمات الرئيسية مقارنةً بالحمأة المتأقلمة تحت الضغط الطبيعي (100 كيلوباسكال). وقد عُزيت هذه الظاهرة إلى اضطراب عملية التمثيل الغذائي للكربون، واختلال وظيفة سلسلة نقل الإلكترون (ETC)، وضعف نظام الدفاع المضاد للأكسدة. ساهمت ظروف الضغط المنخفض في تسهيل عملية أيض الأسيتات وتغيير وفرة الجينات المرتبطة بسلسلة نقل الإلكترون. أثر هذا التغيير على تدفق الإلكترونات وزاد من احتمالية تسربها تحت ضغط الزئبق الثنائي، مما أدى في النهاية إلى زيادة إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية وتفاقم الإجهاد التأكسدي في الحمأة. وكشف التحليل الأيضي أيضًا أن الحمأة منخفضة الضغط أظهرت بيروكسيدًا دهنيًا أكثر وضوحًا، واضطرابات في دورة حمض ثلاثي الكربوكسيل، واختلالًا في أيض البيورين بعد التعرض للزئبق الثنائي. أدت هذه التغييرات إلى تكثيف الإجهاد التأكسدي وخفض مقاومة الميكروبات للإجهاد الناتج عن الملوثات. بالإضافة إلى ذلك، أظهر تحليل التعبير الجيني انخفاضًا في التعبير الجيني لاختزال الزئبق (merA) وزيادة في التعبير الجيني لمثيلة الزئبق (hgcA). تكشف هذه النتائج عن الحساسية العالية للحمأة المنشطة المتأقلمة في ظل ظروف الضغط المنخفض لإجهاد الزئبق الثنائي، مما يسلط الضوء على خصائص مقاومة الملوثات المختلفة لأنظمة معالجة مياه الصرف الصحي في المناطق المرتفعة.

Gao, L., Chen, Y., Lu, Y., Li, S., Yang, Z., Zhu, G., & **Gaballah, E. S. (2025)**. High-altitude-acclimated activated sludge exhibits reduced resistance to mercury stress: Insights from nitrogen conversion, oxidative stress and multi-omics analysis. *Chemical Engineering Journal*, 164228. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164228