

清华大学优秀博士学位论文丛书

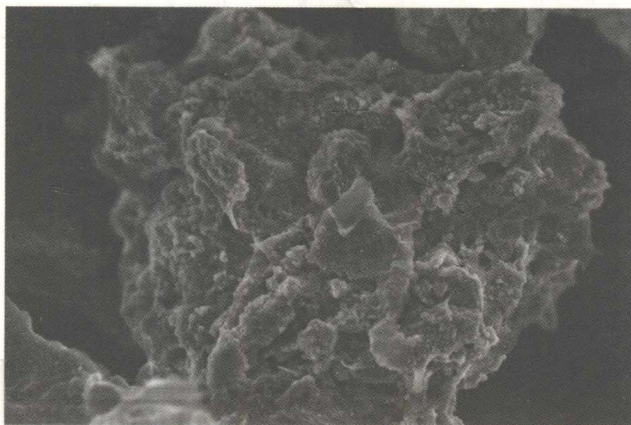


Tsinghua
theses

污泥基生物炭的表征、 改性及对重金属的 吸附性能

陈坦 著 Chen Tan

Study on the Characteristics and Modification of
Sludge-derived Biochar and
Its Adsorption Performance of Heavy Metals



清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

污泥基生物炭的表征、 改性及对重金属的 吸附性能

陈坦 著 Chen Tan

Study on the Characteristics and Modification of
Sludge-derived Biochar and
Its Adsorption Performance of Heavy Metals



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书通过系统表征生物-物理干化污泥快速热解制备的生物炭的物理化学性质和重金属吸附性能,解析了污泥基生物炭对重金属的吸附机理。同时针对含钙溶液体系中重金属吸附效率低的问题,应用生物-物理干化污泥与含过渡金属物质共热解的改性生物炭制备方法,显著改善了污泥基生物炭在含钙溶液体系中对重金属的吸附效果,并揭示了改性生物炭在含钙溶液体系中对重金属吸附性能提高的机理。

本书适合环境功能材料及场地污染修复领域的科学研究人员和工程技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

污泥基生物炭的表征、改性及对重金属的吸附性能/陈坦著. —北京:清华大学出版社,2018

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-47883-6

I. ①污… II. ①陈… III. ①活性污泥处理—研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 186037 号

责任编辑:魏贺佳

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

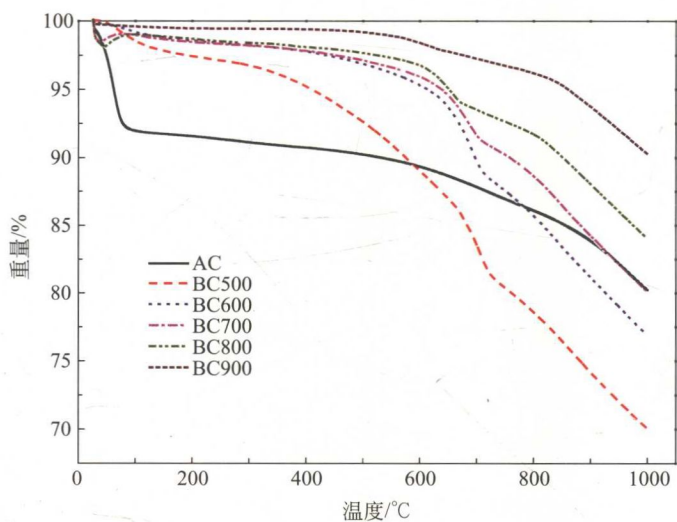
经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:9.5 插 页:1 字 数:159千字

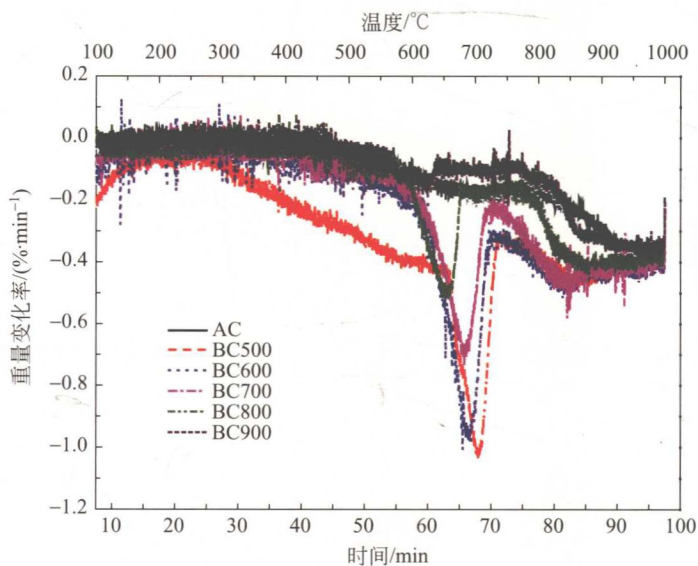
版 次:2018年6月第1版 印 次:2018年6月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:071117-01



(a)



(b)

图 2.3 生物炭和活性炭的热重和差分热重曲线

— (a) 热重曲线; (b) 差分热重曲线

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。

邱勇

清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。



清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

污染治理与环境保护,是末端治理的问题,更是全过程管理的问题;是技术的问题,更是管理的问题;是政府的问题,更是全社会的问题;是当下的问题,更是未来的问题。污染后治理,成本要远远高于预防。

近年来,我国对环境保护的重视和投入力度逐渐加大,同时,居民对环境质量的要求也越来越高。广为建设的污水处理厂为防止水体污染做出了重要贡献,但是富集污染物的市政污泥又成为需要面对的新挑战。市政污泥产生量大,约占市政污水质量的1.5%;含水率高,原污泥含水率达98%以上,脱水污泥含水率在80%左右,造成处理和外运的高成本和高难度。

在市政污泥的处理处置与资源化过程中,低能耗干化是解决问题的前提,高效高品质利用是解决问题的关键。生物-物理干化利用微生物代谢消耗易降解有机物所产生的超高温,蒸发水分并形成绕核颗粒,配合强制通风,可以低能耗地将污泥干化至含水率在50%以下。生物-物理干化污泥热解产氢,可以提高能量品位,是实现污泥资源化的可能途径。污泥热解后的残渣如能作为生物炭加以利用,则可实现污泥的全物料资源化。本书是陈坦同学的博士学位论文,重点开展了市政污泥基生物炭对重金属的吸附性能研究。本书无论在理论分析上还是在实际应用上均具有很高的参考价值。

关于本书,我还想强调两点:第一,污泥可以是资源,但它首先是污染物,因此污泥的资源化必须优先考虑其安全性。污泥中的有机污染物可在热解中转化降解,但大部分重金属会积累在残渣生物炭中。因此,以此生物炭为吸附材料应关注内源重金属的溶出问题。陈坦博士应用危险废物鉴别的浸出毒性测试方法对其开展研究,发现热解过程可以固化重金属物质,这是值得肯定的,但在大面积应用前还应进行更为系统的安全性评价。第二,书中的大部分成果均是基于实验室规模的研究,在大规模工程应用之前,仍需在试中试规模乃至工业规模上进行检验,不可过急。

博士生的培养,第一重要的是兴趣,第二重要的是能力。博士生取得了

多少科研成果、发表了多少学术论文,不能作为学生培养是否成功的主要指标。如果博士生在导师的压力下发表了很多论文,但毕业后却对科研工作失去了兴趣,这样的培养也是不成功的。本书的作者陈坦,是我指导的研究生,在清华大学本科毕业后直接攻读环境工程专业的博士学位。我非常高兴他在毕业后能够在大学继续从事科研和教学工作。

陈坦是个积极向上的学生,思路敏捷,善于抓住科研过程中的关键科学问题开展研究。同时,陈坦也算得上是个刻苦的学生。每一个可靠数据的获得,每一个实验的完成,每一个现象的分析、结论的论证,都不仅仅凝结了汗水,还有心志上的不断锤炼。成长总是要经历磨炼的,每一个博士的产生都是一个风雨过后终见彩虹的童话。看着他由稚嫩的大学生,变成戴着博士帽、眼神透着坚毅的意气风发青年,成为具有“坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识”、能够“独立从事科学研究工作”的初出茅庐的学者,我由衷地为他高兴。学生的成长、成功、成才,正是老师最大的幸福。

希望陈坦不忘初衷,更加努力,在人生的道路上取得事业和生活的双丰收,善建者不拔,善抱者不脱。愿市政污泥的处理处置更加安全、更加高效,愿我们的环境更美,天更蓝,水更清! 环境人的梦想就是公众阳光下的笑容。

王洪涛

清华大学环境学院

2016年7月

摘 要

市政污泥经生物-物理干化结合快速热解处理后,可回收能量,但固体产物——生物炭——仍需进一步处理处置或资源化。生物炭可用于环境保护,将其作为吸附材料用于地下水重金属污染的修复就是一种可能的选择。本文的主要内容是:(1)在 500~900℃ 下快速热解制备污泥基生物炭,并掺杂过渡金属物质与生物-物理干化污泥共热解,制备适合于地下水环境中吸附重金属的改性生物炭;(2)表征生物炭和改性生物炭的性质,解析热解条件对生物炭和改性生物炭性质的影响;(3)揭示污泥基生物炭和改性生物炭吸附重金属的影响因素和吸附机理,并检验制备的吸附材料在地下水体系中对重金属的吸附性能。

随着热解温度的升高(500~900℃),污泥基生物炭的灰分含量升高,孔隙更为发达,主要为孔径约 3.80nm 的介孔,挥发分流失增多。生物-物理干化污泥中的灰分和重金属基本全部保留在污泥基生物炭中。污泥基生物炭具有良好的热稳定性,重金属的浸出毒性在安全范围内。污泥基生物炭对典型重金属 Cd 的吸附效果显著优于市售活性炭(AC)。综合考虑能量回收和重金属去除效果,确定 900℃ 为最优热解温度。

900℃ 热解制备的污泥基生物炭(BC900)对 Pb、Zn、Cu、Cd 四种重金属具有很好的吸附效果,最大吸附量分别达到 (104.15 ± 1.60) mg/g、 (36.05 ± 0.87) mg/g、 (41.30 ± 1.38) mg/g 和 (37.17 ± 2.59) mg/g,去除容量比 AC 高数倍,甚至十数倍。BC900 对重金属的吸附机理主要为表面沉淀和离子交换。

针对地下水中 Ca^{2+} 抑制污泥基生物炭对重金属吸附效果的问题,使用过渡金属物质改性生物炭。在改性剂(Fe_2O_3 、 MnO_2 和 ZnO)中铁氧化物的改性效果最好;不同铁基物质(还原铁粉、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、 Fe_2O_3)中还原铁粉改性效果最好,最优投加剂量为 3%。

改性生物炭(BC900@1FeP)在 Cd^{2+} 溶液中的最优投加剂量为 0.2%,对重金属 Cd 的吸附符合两段式拟二级反应动力学方程,属于化学吸附过

程。吸附等温线符合 Langmiur 模型,为单层吸附。负载到生物炭上的还原铁粉以硅铁矿(FeSi)形式存在,在溶液体系中 Fe 生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 与 Cd 发生内层配位吸附,削弱了 Ca 在外层配位中的竞争。

在地下水配制的含镉溶液体系中,BC900 和 BC900@1FeP 对 Cd^{2+} 的吸附效果显著优于 AC, Cd^{2+} 初始浓度为 185.49mg/L 时吸附容量分别比 AC 高 2.90 倍和 3.32 倍。BC900@1FeP 的抗钙竞争能力更强,在 Cd^{2+} 初始浓度为 0~200mg/L 的范围内都比 BC900 的吸附容量高。

关键词: 市政污泥;快速热解;生物炭;重金属吸附;地下水

Abstract

Energy can be recovered after bio-physical drying and fast pyrolysis of municipal sewage sludge, however the solid residue-biochar still needs to be disposed or utilized. Biochar has environmental function, therefore a potential way of its utilization is to remediate heavy metal contaminated groundwater as adsorbent material. In this work, sludge-derived biochar was synthesized by fast pyrolysis at 500 ~ 900°C, and to adsorb heavy metals in groundwater, modified biochar was prepared by co-pyrolysis of bio-physical dried sludge mixed with transition metal materials. The properties of biochar and modified biochar were characterized, and the influence of pyrolysis conditions on the properties of biochar and modified biochar was analyzed; the impact factors and mechanism of heavy metal adsorption by biochar and modified biochar were analyzed, and the heavy metal adsorption performance of the prepared adsorbent materials was detected.

As the pyrolysis temperature rises from 500°C to 900°C, the ash content of sludge-derived biochar rises, micropore structure develops mainly as mesopore with a pore size of approximately 3.80 nm, and more volatile matter loses. Almost all of the ash and heavy metals in bio-physical dried sludge leave in sludge-derived biochar. The thermal stability of sludge-derived biochar is strong, and the leaching toxicity of heavy metals in biochar is within the safe level. The adsorption of cadmium, a typical heavy metal, by sludge-derived biochar is significantly better than that of commercial activated carbon (AC). 900°C is the optimal temperature to both recover energy and adsorb heavy metal.

The biochar derived from sludge pyrolysis at 900°C (BC900) has high adsorption efficiency on adsorption of heavy metals, such as Pb, Zn, Cu and Cd. The maximum removal capacities of Pb, Zn, Cu and Cd by BC900

is (104.15 ± 1.60) mg/g, (36.05 ± 0.87) mg/g, (41.30 ± 1.38) mg/g and (37.17 ± 2.59) mg/g, respectively. The removal capacity of heavy metals on BC900 is several times even tenfold higher than that of AC. The mechanism of heavy metal adsorption by sludge-derived biochar mainly involves surface precipitation and cation exchange.

To enhance heavy metal adsorption performance with Ca^{2+} competition in groundwater, sludge-derived biochar was modified with transition metal materials. Among modifying materials (Fe_2O_3 , MnO_2 and ZnO), modification effect of Fe_2O_3 is the best; among Fe based materials (reduced iron powder, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ and Fe_2O_3), modification effect of reduced iron powder is the best, and the best mixing dosage is 3%.

The optimal input dosage of the modified biochar (BC900@1FeP) in Cd^{2+} solutions is 0.2%. The Cd adsorption process of BC900@1FeP complies with two-stage pseudo second-order kinetic formula, indicating chemical adsorption. The adsorption isotherme of BC900@1FeP meets Langmuir model, which suggests monolayer adsorption. Reduced iron powder loaded onto biochar exists as fersilicite (FeSi). In aqueous, Fe transforms into $\text{Fe}(\text{OH})_3$, which coordinates Cd as inner-sphere complexation, therefore weakening Ca competition of outer-sphere complexation.

In synthesized Cd^{2+} -bearing aqueous system with groundwater, the Cd^{2+} adsorption performance of BC900 and BC900@1FeP is significantly better than that of AC. At Cd^{2+} initial concentration of 185.49 mg/L, the removal capacity of BC900 and BC900@1FeP is 2.90 times and 3.32 times higher than that of AC, respectively. The anti-calcium performance of BC900@1FeP enhances, the removal capacity of BC900@1FeP being higher than that of BC900 at the Cd^{2+} initial concentration range of 0~200 mg/L.

Key words: Municipal sewage sludge; Fast pyrolysis; Biochar; Heavy metal adsorption; Groundwater

缩 写 词

AC	活性炭	activated carbon
AR	分析纯级	analytical reagent
CEC	阳离子交换容量	cation exchange capacity
DNAPL	重非水相液体	dense non-aqueous phase liquid
DO	溶解氧	dissolved oxygen
DW	去离子水	deionized water
DTG	差分热重	differential thermal gravity
EXAFS	远边 X 射线吸收 精细结构分析	extended X-ray absorption fine structure
FT-IR	傅里叶变换红外光谱	Fourier transform infrared spectro- scopy
HMO	水合二氧化锰	hydrous manganese dioxide
ICP-OES	电感耦合等离子体 发射光谱	inductively coupled plasma optical emission spectrometry
IUPAC	国际纯粹与应用 化学联合会	International Union of Pure and Applied Chemistry
LNAPL	轻非水相液体	light non-aqueous phase liquid
P&T	抽出-处理法	pump and treatment
PAM	聚丙烯酰胺	polyacrylamide
pH _{PZC}	零电荷点	point of zero charge
PRB	渗透性反应墙	permeable reactive barrier
SEM	扫描电子显微镜	scanning electron microscope
SOGs	表面含氧基团	surface oxygen groups
TG	热重分析	thermogravimetric analysis