

磷危机下的磷回收策略与立法*

郝晓地 郭小媛 刘杰 江瀚

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室,中-荷未来污水处理技术研发中心,北京 100044)

摘要 磷是动植物生长必不可少的营养元素,也是不可再生的有限资源。磷在自然界中主要以磷矿形式贮藏,磷矿因化学磷肥的生产而被大量消耗,现有储量最多只够维持人类 100 年的开采。磷最终的归宿是海洋,很难通过自然循环回归陆地。因此,以人工循环回收方式最大限度遏制磷的消耗速度已变得刻不容缓。为此,一方面建议维持或恢复粪尿返田习惯,使排泄物中的磷等营养物质回归土地;另一方面,建议对污水中的磷在污水/污泥处理处置过程中进行回收和利用。污水处理过程中回收鸟粪石、蓝铁矿虽可回收磷酸盐,但它们的高纯度回收/分离并非易事,而从污泥焚烧灰分中回收磷可能是最为现实和有效的。目前,磷回收技术上不存在太多限制,关键需要从管理上出台行之有效的鼓励政策和强制法律法规,欧洲国家的一些经验可供参考。

关键词 磷危机 磷回收 粪尿返田 鸟粪石 蓝铁矿 污泥焚烧灰分

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.09.020

Strategy and legislation of phosphorus recovery under the phosphorus crisis HAO Xiaodi, GUO Xiaoyuan, LIU Jie, JIANG Han, (Sino-Dutch R&D Centre for Future Wastewater Treatment Technology, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment (Ministry of Education), Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract: Phosphorus is an essential nutrient element for animals and plants, and it is also a non-renewable limited resource. Phosphorus is mainly stored in the form of phosphate rock in nature. Due to the production of chemical-phosphate fertilizers consuming, existing phosphate rocks might maintain only for shorter than 100 years. Phosphorus eventually flows into the ocean and is difficult to return to continents via natural cycles. Therefore, it is imperative for us to recover and recycle phosphorus for saving limited phosphorus resource to the largest extent. On the one hand, attention should be paid to maintaining or restoring the habit of returning excreta to farmlands; on the other hand, phosphorus contained in municipal wastewater needs to be recovered and recycled during wastewater treatment and sludge disposal. Although struvite and vivianite are appreciated for recovering phosphate during wastewater treatment and sludge disposal, high-purity recovery/separation of them is not so easy. Phosphorus recovery from the incinerated sludge ashes might be the most realistic and effective approach. Actually, little restrictions on technology exist for phosphorus recovery, but a crux should be depended on effective policies and regulations. European countries have better management measures for reference.

Keywords: phosphorus crisis; phosphorus recovery; returning excreta to farmlands; struvite; vivianite; incinerated sludge ashes

磷是动植物体内一种必不可少的营养元素。磷是植物体内细胞原生质的主要组成部分,参与植物的能量转换、代谢调节、蛋白质激活等多种细胞代谢活动^[1]。磷对动物骨骼矿化、核酸代谢、能量代谢、脂质代谢、酶激活以及体液酸碱平衡调节等都具有重要生化作用^[2]。人体内磷大约占体重的 1/10,其中 80% 与钙结合成磷酸钙盐形式组成人的骨骼和牙齿;其余磷则与蛋白质、脂肪、糖等结合形成有机物,几乎参与到所有的生化反应;同时,磷也会通过

促进脂肪与脂肪酸分解从而调节人体酸碱平衡^[3]。

磷在自然界主要以地壳中的磷矿形式存在,被人类开采后大多(超过 80%)用于化肥(磷肥)生产,以满足人口增长对粮食生产的需要。然而,施入土壤的磷肥被作物吸收率很低(5%~20%),绝大部分残留于土壤中,在雨水冲刷和地表径流的作用下进入河湖等水体,最终进入海洋^{[4]36}。然而,要想从海洋中回收磷并非易事,因此可以说,磷在自然界中的流向呈从陆地向海洋的直线流动形式,属于不可再

第一作者:郝晓地,男,1960年生,博士,教授,研究方向为可持续污水处理技术与管理。

* 国家自然科学基金资助项目(No.51878022);北京“未来城市设计高精尖中心”项目(No.30059920632)。

生、不可替代的有限资源。如果没有了磷,人类将面临食物短缺。然而,磷在地球上现已探明的储量不足以维持人类使用 100 年^{[4]36},意味着地球磷危机的来临。

基于可持续发展的需要,国际上愈来愈重视对磷资源的保护与回收利用。除农业上尽可能做到磷的闭路循环以及提高磷肥利用率外,从点源入手回收磷则是另一种可持续发展目标,这就使得从动物粪尿、污水/污泥中回收磷成为研究的热点和应用方向。目前,已有不少国家颁布法律强制要求从动物粪尿和污水/污泥中回收磷。瑞士是欧洲第一个强制从污水/污泥、动物粪尿中回收磷的国家,已经建立起磷元素封闭循环的管理体系,从而大大减少了对磷矿石进口的依赖。本研究从全球磷危机入手,对磷回收方法、国外磷回收案例与法规进行了归纳总结,以此来促进我国制定相应的磷回收政策与法律。

1 地球磷危机

1.1 磷矿资源分布不均、品位差异大

世界磷矿资源主要分布在北半球,在摩洛哥、西撒哈拉、中国、美国、俄罗斯、南非等比较集中。据美国地质调查局(USGS)统计,截至 2017 年底,全球已探明磷储量为 700 亿 t,其中摩洛哥和西撒哈拉的储量达到 500 亿 t,且均为优质富磷矿(P_2O_5 质量分数 $\geq 34\%$),且埋藏浅、易于露天开采^[5]。我国的磷储量虽然也有 34 亿 t,但富磷矿(P_2O_5 质量分数 $\geq 30\%$)不多,大约只有一半,很多是中低品位磷矿;而且我国 80% 的磷矿属于较难选矿的胶磷矿,选矿成本极高^{[4]37,[6-7]}。

1.2 磷难以再生

磷在生物圈中的循环方式相比于氮而言范围极小。动物粪尿返田虽属原生态的营养物质循环方式,但严格意义上说也并非自然循环,而是一种模拟生态循环的“人工”循环。因此,相对于人类对磷矿的大尺度开挖利用,磷的自然循环比例几乎可以忽略不计,形成了一种从陆地向海洋直线流动的沉积过程。

自然界中的磷矿主要以天然磷酸盐矿石和鸟粪石等形式存在。经天然侵蚀作用,磷酸盐会进入地表水体,这也是湖泊会从贫营养向富营养演变直至变为沼泽甚至沙漠的自然原因。绝大多数磷酸盐矿石已被人工开采用于化肥生产,但被作物吸收而进入食物链的磷比例只有 5%~20%^{[4]36},大部分磷聚

积在了土壤中,通过水循环最终流入大海而沉积于海底。沉积在海底的磷只有极少部分会通过人类捕食海洋生物重新被带回陆地,绝大部分只有经过数以亿年计的地质演变方有可能回到陆地。

1.3 磷危机应对之策

磷矿资源储量有限、分布不均、不可再生以及人类过度开发所导致的全球磷危机实际已经出现。对我国来说,磷矿资源将在更短时间内被消耗殆尽^[8]。

由于磷直接关系到人类的食物来源,若陆地上缺了磷,人类在不久的将来便可能会面临食物短缺的危机,因此人类应该尽早、尽快去保护磷矿资源。

冲水马桶、下水道、污水处理厂等现代文明产物早已使人类排泄物中的磷难以回归土地;动物粪尿也在被化肥广泛替代的情况下失去了回归土地的机会。为最大限度遏制磷的消耗速度,建议尽可能恢复粪尿返田的原生态循环方式,或通过技术和工程手段从动物粪尿和污水/污泥中最大程度地回收磷。

2 磷回收方法

2.1 动物粪尿无害化返田

动物粪尿直接返田利用早已贯穿中华民族几千年的农业发展过程,动物粪尿中的磷可作为农作物主要营养来源和很好的土壤改良剂^[9]。人类正面临磷危机,动物粪尿作为天然磷肥返田利用不仅可将动物粪尿“变废为宝”,而且可减少对化学磷肥的广泛依赖,从而有效减缓磷的消耗速度,是实现磷回收的有效方法。然而,现代社会畜牧养殖业已朝着集约化、规模化方向发展。为追求家禽、家畜的高产量和高品质,会使用各种饲料添加剂,导致动物粪尿中存在着金属和抗生素等可能危害生态环境和人类健康的物质。

虽然饲料中添加某些金属可促进家禽、家畜的生长,抗生素能抑制有害微生物对家禽、家畜的危害,但也会因饲养动物的低消化吸收率导致金属与抗生素随粪尿排出。含金属和抗生素的动物粪尿一旦进入农田,一方面可能造成农田面源污染,另一方面可能会随粮食/蔬菜或被污染的饮用水源而进入人体,对人体健康造成威胁。动物粪尿中的抗生素随食物链进入人体,会给人类肝、肾及神经系统、消化系统带来潜在副作用;金属中的重金属经食物链进入人体,则会在人体中累积,导致慢性中毒效应^[10]。

因此,科学使用饲料添加剂,从源头上控制畜牧养殖业动物体内的重金属与抗生素摄入量便是“防

患于未然”的有效措施,可显著降低动物粪尿中的重金属与抗生素含量,提高动物粪尿返田的安全性。事实上,从确保长期粮食安全和磷的可持续利用角度看,畜牧养殖业中广泛使用饲料添加剂本身就并非长久之计,因此政府部门应严格制定饲料添加剂的相关标准,严禁在饲料生产过程中过量、违规使用金属或抗生素。早在1999年欧盟就宣布,饲料中仅允许使用4种抗生素,而从2006年开始更是在法律上全面禁止了饲料生产中使用抗生素^[11],制定了饲料中允许使用的重金属添加剂限量标准,涵盖了铅、汞、镉、铬、砷等重金属,比我国现行的《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)还要严格^[12]。荷兰从2011年9月开始,也不再允许饲料企业为养殖场定制加药饲料^[13]。

金属及抗生素使用限制了动物粪尿返田利用的安全性,因此饲料添加剂源头控制是动物粪尿返田利用的安全保障。唯有科学使用饲料添加剂,严格控制金属及抗生素的添加量,方能安全恢复动物粪尿返田利用,最大限度减少化肥使用量,有效遏制对磷矿资源的过度、无序攫取。

2.2 农村污水源分离粪尿利用

所谓生态农业其实就是循环农业,而对人和动物粪尿循环利用则是最基本的原生态方式。粪尿返田目前之所以不再受农民青睐以至于被撇弃的主要原因是化肥的竞争,当然也有对粪尿中病原菌、寄生虫卵等危害健康的过分担忧。在磷危机四伏的情况下,全球磷矿石价格已经开始飙升,必将导致今后化肥成本的再次提高,因此建议农民再次主动使用农家肥。政府也应主动以磷矿资源税或化肥税方式主动提高化肥价格,尽早通过经济杠杆作用来推动农民积极回归采用粪尿返田的习惯。至于粪尿中病原菌等微生物灭活问题,采用传统粪尿收集、集中沤肥方式就可以在很大程度上达到灭活的效果,辅以现代多种灭菌技术,就更加安全了。

按农村常住人口5.7亿计算,农村人口1年的全部粪尿返田能够满足836万 hm^2 小麦、玉米轮作种植地对磷的需求^[14]。需要指出的是,使用安全的农家肥种出的粮食、蔬菜事实上更是绿色农产品,更有利于人体健康。

当然,农村粪尿返田并不意味着让农民继续维持简陋的旱厕习惯,可以通过源分离便器实现对粪尿与污水的有效分离^[15-16]。虽然源分离概念源于欧洲,但其实对发展中国家的农村最适合。当粪尿与农村生活污水实现分离并被卫生返田利用后,也有

利于农村生活污水的处理。

2.3 城市污水/污泥磷回收

2.3.1 从污水中回收鸟粪石

污水脱氮除磷工艺的厌氧上清液侧流可以回收磷^[17]。磷一般以磷酸盐沉淀的形式予以回收,其中鸟粪石因 P_2O_5 含量高(质量分数28.98%)而受到广泛青睐,它既可以直接作为缓释肥使用,也可用于磷肥生产^[18]。鸟粪石生成条件应为中性或者偏弱酸性,而在碱性条件下很难生成比较纯的鸟粪石,多为磷酸盐混合物^[19-20]。因此,从污水中回收鸟粪石控制好pH非常关键。

2.3.2 从污泥中回收蓝铁矿

在污泥厌氧消化过程中可以形成另外一种高 P_2O_5 含量(28.3%)的磷酸盐矿物,即蓝铁矿,可用作化肥原料,也可用于锂离子电池的合成材料^{[21]4225}。蓝铁矿的形成除与 Fe^{3+} 含量有关外,还与一种厌氧条件下的异养金属还原菌(DMRB)有关,它们可将 Fe^{3+} 生物还原为 Fe^{2+} 后与污泥细胞裂解产生的 PO_4^{3-} 反应生成蓝铁矿。蓝铁矿的生成过程非常复杂,受限因素较多,导致产物不易形成,且形成后与污泥分离也很困难^{[21]4225}。因此,从污泥中回收蓝铁矿的实际应用还存在很多困难。

2.3.3 污泥焚烧灰分磷回收

污水处理后的污泥处理处置因填埋无地、农用无路(肥效低)而逐渐转向了焚烧^[22]。其实,污水中90%的磷最后都进入了污泥^{[23]1150}。当实施污泥焚烧后,磷则残留在了灰分之中。因此,从污泥焚烧灰分中回收磷实际上转变成了一种选矿或化工过程,相对来说对磷的提取并不困难,难点在于需要去除重金属^{[23]1150}。很多欧洲国家以及日本大都对污泥实施焚烧处置,我国也已开始对部分污泥进行焚烧处置。

污泥焚烧的好处是可最大限度回收所含有机能量(发电)、杀灭全部病原菌、最大程度实现污泥减量,形成的灰分实施磷回收的可持续意义亦不可小觑。目前,对于污泥焚烧除需要考虑投资问题外,还需要考虑二噁英、 NO_x 和重金属的排放对人类健康的影响^{[24]9}。不过,已有研究和实践证明,这些污染物可以通过控制焚烧温度在800℃以上来抑制,后续也可以通过尾气净化装置进行去除^{[24]11}。

以鸟粪石和蓝铁矿的形式回收磷适用于分散式磷的回收,回收效率仅为20%~25%;而从污泥焚烧灰分中回收磷适用于大规模集中式磷回收,回收

效率可达 70%~90%^[25]。污泥焚烧灰分磷回收不仅具有磷回收效率高的优点,而且方便在工艺设计中把重金属去除考虑进去,其回收的磷一般生物可利用程度也比较高^[26]。同时,污泥焚烧灰分磷回收成本仅为从污水中回收鸟粪石和从污泥中回收蓝铁矿的 80% 和 24%^[27]。可见,从污泥焚烧灰分提取磷是未来污水/污泥中磷回收的主要发展方向。

3 国内外磷回收案例与立法现状

有关磷回收的实际应用案例在国外较多,特别是欧洲,因为欧洲基本没有磷矿,更需未雨绸缪。欧洲在磷回收案例与立法方面的一些成果可供我国借鉴与参考。表 1 列举了一些典型磷回收案例。可以发现,磷回收在技术层面没有太多难点,需要的是政府立法支持、鼓励和补贴,否则磷回收市场很难被驱动。欧盟及其成员国不仅在磷回收技术方面走在了世界前列,而且也及时出台了磷回收政策与法律法规。欧盟 2019 年最新出台的《肥料产品法规》更是为磷回收产品自由进入市场流通打破了贸易壁垒。欧盟及其成员国也纷纷相继出台各种落实政策与法律法规,引导各类磷回收计划实施。表 2 列举了欧洲部分国家的磷回收政策与法律法规,可供我国参考。荷兰与瑞士主要关注营养物的回收与循环,以

减少对矿物磷肥的使用;德国、法国建立起了磷回收法律框架或网络系统,促进了磷回收产业的发展;丹麦重点在于污泥焚烧灰分磷回收,而且丹麦还准备依托渔业发展实现囊括水产养殖业的磷循环。

目前,我国对磷回收还没有出台相关政策与法律法规,甚至一些污泥焚烧实践也没有把磷回收考虑进去,例如《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》中虽确立了污泥焚烧的市场地位,但在水泥窑中混烧被列为推荐工艺,混合污泥灰分建议直接用作水泥原料,结果就把灰分中的磷固定到了水泥中,使其无法再回收利用。其实,磷回收的概念目前我国已不陌生,但基本都局限在学术界,几乎还没有真正的实践案例,更谈不上磷回收市场的建立。究其原因,主要是还没有相应的政策与法律法规支撑。

4 结 语

磷是动植物生长所必需的营养元素,直接关系到人类的粮食问题。化肥的发明使农业生产获得较高收成,但同时也导致了磷矿过快消耗。现已探明且可挖掘的磷矿资源只够人类使用不到 100 年。磷属于不可再生资源,城市化后的现代卫生排水设施使其更加难以回归土地,导致其呈直线流动形式从陆地流入海洋。磷危机已经出现,其后果相当严

表 1 国外典型磷回收案例

Table 1 Cases of phosphorus recovery at abroad

磷回收方式	实际案例	工艺特点	参考文献
动物粪尿磷 无害化返田	美国某养猪场	对猪粪尿进行固/液分离,在含磷量较高的废液中回收磷,磷回收效率可达 94% 以上	[28]
	荷兰某养殖场	先将收集的动物粪尿进行脱氮处理,剩余的富 PO_4^{3-} 废液再投加 MgO ,以鸟粪石形式回收磷	[27]
农村污水源 分离粪尿回收	欧洲某分散式家庭污水处理装置	将农村粪尿与其他生活污水分类收集处理,实现水资源和营养物质的回收	[15]
城市污水/污泥磷回收	美国 Stickney 污水处理厂	可以实现污水中高达 85% 的磷回收效率,还能减少污泥脱水消化液中 40% 的氮氮负荷	[29]
	德国 Lingen 污水处理厂	除回收磷外,还可提高脱水污泥含固率,防止消化池管道结垢,减少药剂使用量	[30]
	瑞士苏黎世德霍兹利污泥焚烧厂	可实现高纯含磷化合物回收	[31]

表 2 部分欧洲国家磷回收政策与法律法规

Table 2 Policies and regulations of phosphorus recovery in some European countries

国家	政策与法律法规的主要关注点	参考文献
荷兰	主要关注营养物回收技术,提出“2050 荷兰循环计划”,计划在 2050 年荷兰全境实现“循环经济”	[32]
瑞士	建立磷元素封闭循环系统;农业中以作物形式收获的磷通过食物链入污水/污泥以及动物粪尿中后应予以回收循环回用于农业	[33]
德国	磷回收法律框架;建设大量工业规模磷回收装置,并要求从含有营养物质的污泥中进行磷回收	[33]
法国	磷回收网络系统;不仅提供资源共享,还可促进国内外磷回收合作项目	[33]
丹麦	除约 50% 污泥直接用于农业生产外,其余污泥均采用焚烧处理,灰分进行磷回收	[33]

重,关系到人类的粮食问题。为此,建议通过一切可能且必要的手段恢复人与动物粪尿的无害化返田,最大限度遏制磷的消耗速度。难以返田的城市粪尿,可从污水/污泥处理处置过程中回收磷,充当“第二磷矿”的角色。实现磷回收技术不是限制因素,最重要的是及时地从管理层面建立相应的政策与法律法规来推动磷回收。

参考文献:

- [1] 梁思明.低磷胁迫下植物的形态响应研究进展[J].现代农业,2019(8):28-30.
- [2] 刘松柏.肉仔鸡对饲料标准磷利用率、可利用磷需要量及小肠磷吸收机制研究[D].北京:中国农业科学院,2012.
- [3] 王春霞.低磷血症与慢性肺源性心脏病关系[J].中华临床医药杂志,2002(15):47.
- [4] 杨建浩,韩晓日,刘勇涛,等.我国磷资源和磷肥施用中存在的问题及对策[J].辽宁农业科学,2011(6).
- [5] 刘艳飞,张艳,于汝加,等.资源与环境约束下的中国磷矿资源需求形势[J].中国矿业,2014,23(9):1-4,8.
- [6] 崔荣国,张艳飞,郭娟,等.资源全球配置下的中国磷矿发展策略[J].中国工程科学,2019,21(1):128-132.
- [7] 李维,高辉,罗英杰,等.国内外磷矿资源利用现状、趋势分析及对策建议[J].中国矿业,2015,24(6):6-10.
- [8] 郝晓地,王崇臣,金文标.磷危机概观与磷回收技术[M].北京:高等教育出版社,2011.
- [9] ELLIS E C, WANG S M. Sustainable traditional agriculture in the Tai Lake Region of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1997, 61(2/3):177-193.
- [10] 符世雄,孙新明.绿色饲料添加剂在家禽生产中的应用[J].云南畜牧兽医,2020(4):36-38.
- [11] 王黎文,杜伟.欧盟饲料法规体系概述[J].中国畜牧业,2013(13):60-63.
- [12] 欧盟加强对中国部分饲料添加剂的重金属监控[EB/OL]. [2020-05-07]. <http://www.feedtrade.com.cn/additive/news00/2010/0220/566237.html>.
- [13] 邵彩梅,朱秋凤.欧洲饲料禁抗十年,中国该学什么?[J].饲料广角,2016(13):30-33.
- [14] 郝晓地,于品伦,付昆明,等.农村污水处理莫轻视“肥水”资源[J].中国给水排水,2019,35(20):5-12.
- [15] 郝晓地,衣兰凯,仇付国.源分离技术的国内外研发进展及应用现状[J].中国给水排水,2010,26(12):1-7.
- [16] 郝晓地,周健,张健.源分离生态效应及其资源化技术[J].中国给水排水,2016,32(24):20-27.
- [17] 郝晓地,衣兰凯,付昆明.侧流磷回收强化低碳源污水脱氮除磷效果的模拟与实验研究[J].环境工程学报,2013,7(1):231-236.
- [18] 郝晓地,衣兰凯,王崇臣,等.磷回收技术的研发现状及发展趋势[J].环境科学学报,2010,30(5):897-907.
- [19] WANG C C, HAO X D, GUO G S, et al. Formation of pure struvite at neutral pH by electrochemical deposition[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 159(1/2/3):280-283.
- [20] HAO X D, WANG C C, LAN L, et al. Struvite formation, analytical methods and effects of pH and Ca^{2+} [J]. Water Science & Technology, 2008, 58(8):1687-1692.
- [21] 郝晓地,周健,王崇臣,等.污水磷回收新产物——蓝铁矿[J].环境科学学报,2018,38(11).
- [22] 郝晓地,陈奇,李季,等.污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J].中国给水排水,2019,35(4):35-42.
- [23] 郝晓地,于品伦,刘然彬,等.剩余污泥焚烧灰分磷回收及其技术进展[J].环境科学学报,2020,40(4).
- [24] 郝晓地,陈奇,李季,等.污泥焚烧无须顾虑尾气污染物[J].中国给水排水,2019,35(10).
- [25] 纪莎莎,黄瑾.磷回收在污泥资源化方面的研究进展与应用分析[J].中国市政工程,2018(3):45-47.
- [26] LI R D, TENG W C, LI Y L, et al. Potential recovery of phosphorus during the fluidized bed incineration of sewage sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140:964-970.
- [27] 郝晓地,宋鑫.从污水/污泥、动物粪尿中回收磷:技术与政策[J].北京建筑大学学报,2016,32(3):101-106,115.
- [28] VANOTTI M B, SZOGI A A. Technology for recovery of phosphorus from animal wastewater through calcium phosphate precipitation[C]//ASHLEY K, MAVINIC D, KOCH F. Nutrient recovery from wastewater streams. London: IWA Publishing, 2009:459-468.
- [29] 张婧怡.深度污水资源化带动可持续发展模式[EB/OL]. [2020-05-12]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20170512/825068.shtml>.
- [30] 胡维杰,赵由才,甄广印.德国污水污泥处理处置政策及磷回收技术解析与启示[J].给水排水,2020,56(6):15-20.
- [31] 程彩云.奥泰图的“环保之路”:不仅焚烧污泥,还能将污泥资源化[EB/OL]. [2020-05-07]. <https://www.h2o-china.com/news/262880.html>.
- [32] Nutrient Platform NL. Nederland circular in 2050[EB/OL]. [2020-05-07]. <https://www.nutria-ntplatform.org/wp-content/uploads/2016/09/bijlage-1-nederland-circular-in-2050.pdf>2016-09-01.
- [33] 郝晓地,宋鑫, VAN LOOSDRECHT M C M, 等.政策驱动欧洲磷回收与再利用[J].中国给水排水,2017,33(8):35-42.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2020-09-27)

(上接第1195页)

- [64] WANG X, LI F, YUAN C, et al. The translocation of antimony in soil-rice system with comparisons to arsenic: alleviation of their accumulation in rice by simultaneous use of $\text{Fe}(\text{II})$ and NO_3^- [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650:633-641.
- [65] QIAO J T, LIU T X, WANG X Q, et al. Simultaneous alleviation of cadmium and arsenic accumulation in rice by applying zero-valent iron and biochar to contaminated paddy soils[J]. Chemosphere, 2018, 195:260-271.
- [66] 张会民,徐明岗,吕家珑,等.pH对土壤及其组分吸附和解吸的影响研究进展[J].农业环境科学学报,2005,24(增刊1):320-324.
- [67] 龙水波,曾敏,周航,等.不同水分管理模式对水稻吸收土壤砷的影响[J].环境科学学报,2014,34(4):1003-1008.
- [68] 李园星露,叶长城,刘玉玲,等.硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J].环境科学,2018,39(2):944-952.
- [69] 陈建军,于蔚,祖艳群,等.玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J].生态环境学报,2014,23(10):1671-1676.
- [70] 谈宇荣,徐晓燕,丁永祯,等.早稻吸收砷镉的基因型差异研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1436-1443.
- [71] 吕梦婷,陈雪,易忠惠,等.砷低积累菜心品种的筛选[J].西南农业学报,2018,31(1):141-148.
- [72] 徐婧婧,赵科理,叶正钱.重金属污染土壤原位钝化修复材料的最新研究进展[J].环境污染与防治,2019,41(7):852-855.
- [73] MEYER S, GLASER B, QUICKER P. Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: a literature review[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(22):9473-9483.

编辑:丁怀 (收稿日期:2020-09-10)