

Sino-German Centre for  
**Water and Health Research**  
- **WATCH** -  
中德水环境与健康研究中心



<http://www.water-health-research.de>



Sino-German Centre for Water and Health Research

德国污水污泥磷资源回收  
技术与法规的最新发展

亚琛工业大学环境工程研究所 (ISA)  
中德水环境与健康研究中心 (WATCH)  
Dr.-Ing. David Montag  
Dr.-Ing. Gang Yao 姚刚  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp

四川大学  
刘敏 教授

中国水环境集团  
庞洪涛 博士





中德水环境与健康研究中心



Sino-German Centre for Water and Health Research

### 背景--德国的情况



- ▶ 磷回收的必要性
  - 磷对于许多生物/生物化学过程是必不可少的，并且不可替代; 包含例如在细胞壁中，DNA，ATP，骨格中
  - 90%用作肥料，饲料或食品工业
  - 目前可开采的磷酸盐矿产枯竭耗尽
  - 德国依靠进口原磷资源
- ▶ 污水和污水污泥处置
  - 德国污水深度处理（除磷、脱氮）的措施全面完成
  - 在污水深度处理过程中，营养物质磷和氮从污水中去除，其中90%-P转移到污泥中
  - 德国污泥土地利用（约占1/3）实现磷的循环过程中，污泥中的有害物质产生环境污染
  - 德国有关污水污泥进行农业利用的讨论：“污泥条例”中引入更严格的限制标准
  - **污泥处置途径的根本转变：从1991年到2016年，污泥热处理（焚烧）的比例从10%增加到65%。**

 四川大学  
SICHUAN UNIVERSITY
中德水环境与健康研究中心
 RWTH AACHEN  
UNIVERSITY

Sino-German Centre for Water and Health Research

### 背景—中国的情况

- ▶ 据国土资源部统计，截至2011年底，全国磷矿资源储量193.6亿吨，其中工业储量10.4亿吨，基础储量37亿吨，占世界磷矿资源总量的5.7%。
- ▶ 全国磷矿矿石品位大于30%的富矿储量仅占探明总储量的7%，而 $P_2O_5$ 品位<18%的贫磷矿储量约占全国探明总资源储量的50%，全国磷矿平均品位( $P_2O_5$ )仅17%左右。
- ▶ 据美国地质调查局(USGS)，中国已知的磷矿储量静态利用年限为37年。
- ▶ 利用平均品位为23%以上的矿，也只能利用到2032年。一些预测也表明，中、高品位磷矿石仅能支持中国国内需求30年左右，磷矿石资源稀缺性将不断提升。
- ▶ 磷矿在开发利用过程中对矿山及其周围环境的污染（废水、废气和噪声）。
- ▶ 建成污水处理厂4063座，污水处理能力达1.78亿立方米/日，年产生含水量80%的污泥5000多万吨。

 四川大学  
SICHUAN UNIVERSITY
中德水环境与健康研究中心
 RWTH AACHEN  
UNIVERSITY

**德国联邦政府的战略**

Sino-German Centre for Water and Health Research

- ▶ **2002:** 德国环境专家委员会（SRU）建议“开发和进一步开发从废水和污泥中回收磷酸盐的热工艺”。
- ▶ **2010** 年环境部长会议（UMK）委托联邦/州废物工作组（LAGA）评估可持续利用二次磷储备的行动建议。
- ▶ 开展该领域研究、规划、建造和工艺运作技术知识的交流和传播。
- ▶ **2013年3月7日:** 在布鲁塞尔举行的欧洲可持续磷资源会议期间正式成立欧洲磷资源平台。

```

graph TD
    A[法律要求] <--> B[磷的含量]
    A <--> C[工艺技术]
    B <--> C
  
```

中德水环境与健康研究中心

RWTH AACHEN UNIVERSITY

**科学界的努力**

Sino-German Centre for Water and Health Research

- ▶ 德国大学和工业界在磷回收领域几十年的联合研究：
  - 联邦和各个州资助的研究项目
  - 调研
  - 磷回收示范工程
- ▶ **2004-2011:** 启动联邦教育、研究部（BMBF）/联邦环境不（BMU）资助计划“植物营养物循环利用，特别是磷资源”。
- ▶ **2010:** 联邦教育、研究部（BMBF）将磷资源纳入资源效率计划 (ProgRess)。
- ▶ **2018:** 新的联邦教育、研究部（BMBF）资助计划“磷资源循环利用”。

中德水环境与健康研究中心

RWTH AACHEN UNIVERSITY

## 德国“污泥条例”的颁布与修订

- ▶ 一九七二年六月七日联邦立法机构颁布了在联邦范围内适用的第一部废物处置法（AbfG1972）。
- ▶ 联邦政府于1982年1月15日在废物处置法下通过了一项关于在农业、林业及园艺用地上施用污泥的法律条例“污泥条例”（AbfKlaerV）。
- ▶ 1992年4月15日联邦立法机构又根据污泥条例的实施经验和欧共体的污泥法规对本条例进行了修订。除了对重金属含量提出更严格规定，出于预防的目的，德国新污泥条例中首次给出了污泥中的有机有害物质含量的限定值，有机有害物质主要是指聚氯二苯基（PCBs）和聚氯二苯二恶烯/呋喃（PCDD/PCDF）。
- ▶ 1997年在联邦德国“肥料条例”（DüMV）中将污泥归类于“二次原肥料”（有机N-P-肥料）。一方面利用其中的肥效，另一方面利用其中的有机质改良土壤。
- ▶ 2012年联邦德国对“肥料条例”（DüMV）进行修订，要求从2015年起，在农业、林业及园艺用地上施用的污泥必须遵守该条例的规定。
- ▶ 为了更进一步加强可持续的环境与资源保护，德国2010年提出“污泥条例”修订草案，经过长达七年的讨论和论证，2017年9月27日“污泥条例”修订版通过联邦议会审查后正式生效。



中德水环境与健康研究中心



## 德国“污泥条例”2017年9月27日的最新修订重要规定

- ▶ 从2029/2032 全面禁止污泥的农用
- ▶ 污水污泥的生产单位（污水处理厂）有义务进行磷回收
  - 污水处理厂规模在 100.000 设计人口值（E）（等级 5）或 50.000设计人口值（E）（等级4b 和等级5）
  - 污泥中磷-含量 至少为20 g P/kg 干固体
- ▶ 污泥中磷回收至
  - 污泥中磷-含量少于 20 g P/kg 干固体 或
  - 磷回收率至少为 50% (效率可低，如果污泥中磷-含量高于 40 g P/kg 干固体，效率可低)
- ▶ 或:承诺污泥进行单独-焚烧或 协同-焚烧，并从灰分/残余物中回收磷
  - 至少回收其中80 %的磷 或
  - 对含磷灰分/碳质残余物进行物质性利用 或
  - 根据废物填埋条例§23 DepV: 对含磷灰分/碳质残余物进行长期存放，以便进行后续的磷回收，存放期限最长5年，经过主管部门审批，原则上可以无期限延长。

从此，德国污水污泥的利用开启了新篇章。在今后十年中从污泥中回收磷的技术必将达到商业应用的水平。



中德水环境与健康研究中心



## 德国其他相关法规

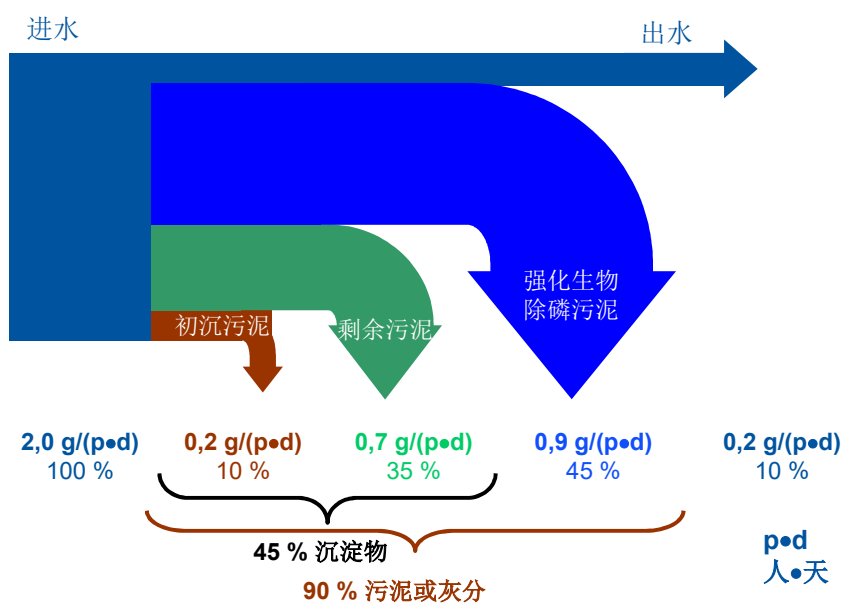
- ▶ 2013年4月15日对“垃圾填埋条例”（BGBl. I S. 814）的修订，要求垃圾填埋场存放合格的污泥灰分。
- ▶ 研发中间储存方案，对德国污泥单独焚烧灰分进行临时储存，目的是为了以后能够对其中的磷进行回收。
- ▶ 自2015年起：污泥的利用必须遵守德国肥料条例（DüMV）的限值，将导致
  - 在农业、林业及园艺用地上利用污泥的比例下降
  - 将不能在土壤中使用的污泥进行协同焚烧或单独焚烧。



中德水环境与健康研究中心

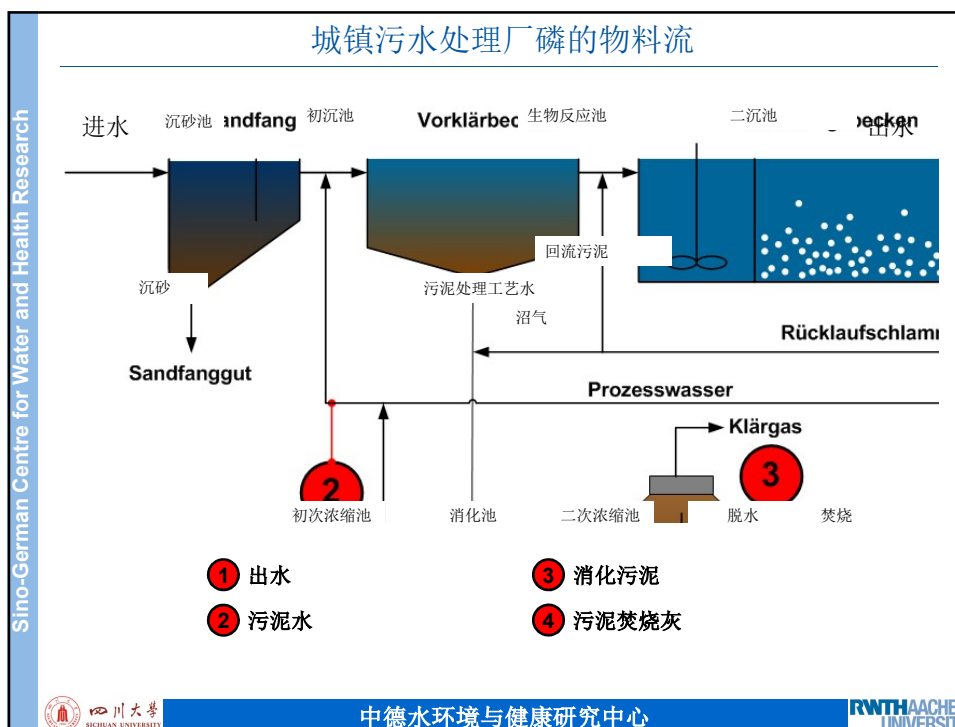


## 德国城市污水处理厂的磷平衡



中德水环境与健康研究中心





### 根据德国“污泥条例”最新修订规定进行磷回收的可能方法

1 在污泥协同**焚烧**之前从污水污泥中回收磷（整合在污水处理厂内）

- 磷-去除 和 磷-回收发生在污水处理厂出水点
- 放弃在污水处理过程中去除磷
- 花费高，可能无法满足废水排放要求
- → 城市污水处理厂很难实现的措施

- 强化的生物除磷工艺 (Bio-P) 3 2
  - 从污泥处理工艺水中回收磷
- 化学除磷工艺 3
  - 从污泥中回收磷(如果必要的话 „分散式“)

4 **单独焚烧污泥**

- 从污泥灰分中回收磷(后续方法)
- 含磷灰分进行长期存放

Sino-German Centre for Water and Health Research  
 四川大学 SICHUAN UNIVERSITY  
 中德水环境与健康研究中心  
 RWTH AACHEN UNIVERSITY

## 从水液相中或灰粉中进行磷回收的比较

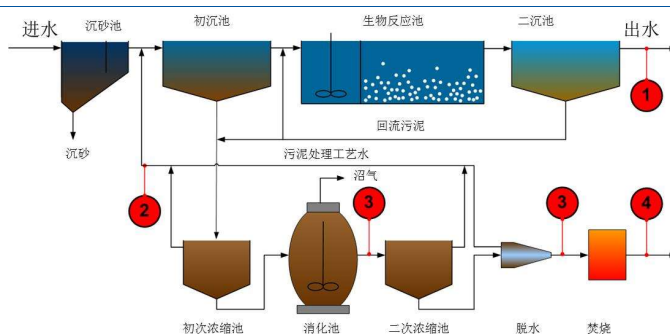
### ▶ 从污水处理厂出水中进行磷回收的工艺:

- - 由于污水处理厂出水中的磷酸盐浓度低, 所以这种回收方式大不经济
- - 发生系统故障时, 有水体污染的风险
- 对城市污水处理厂磷回收而言, 仅具有理论上的意义

### ▶ 从灰分中进行磷回收的工艺:

- + 磷的浓度高(10 - 20%  $P_2O_5$ )
- + 待处理的流量小于所有其他方法
- + 永久性破坏有机物质
- + 灰分可以很容易地存储
- - 在农业中直接利用灰分是没有意义的: 对土壤结构没有改良作用, 没有植物可吸收利用的磷 (通常是铁盐或铝盐)
- - 必要的灰分析花费较高 (酸解析)

## 各个物料流与其潜在可能性特点



回收点	体积/质量流	磷浓度	形态	回收率 (参照污水厂进磷复合)
1. 污水厂出水	200 l/(E·d)	< 5 mg/l	溶解态	最大55% <sup>1)</sup>
2. 污泥水	1 - 10 l/(E·d)	20 - 100 mg/l	溶解态	最大50% <sup>2)</sup>
3. 消化污泥	0.2 - 0.8 l/(E·d)	30 - 40 g P/kg TR	溶解态、生物/化学结合态	最大90%
4. 污泥焚烧灰	0.03 kg/(E·d)	60 - 80 g/kg	化学结合态	最大90%

1) 没有其它除磷工艺

2) 生物除磷和污泥裂解的情况下

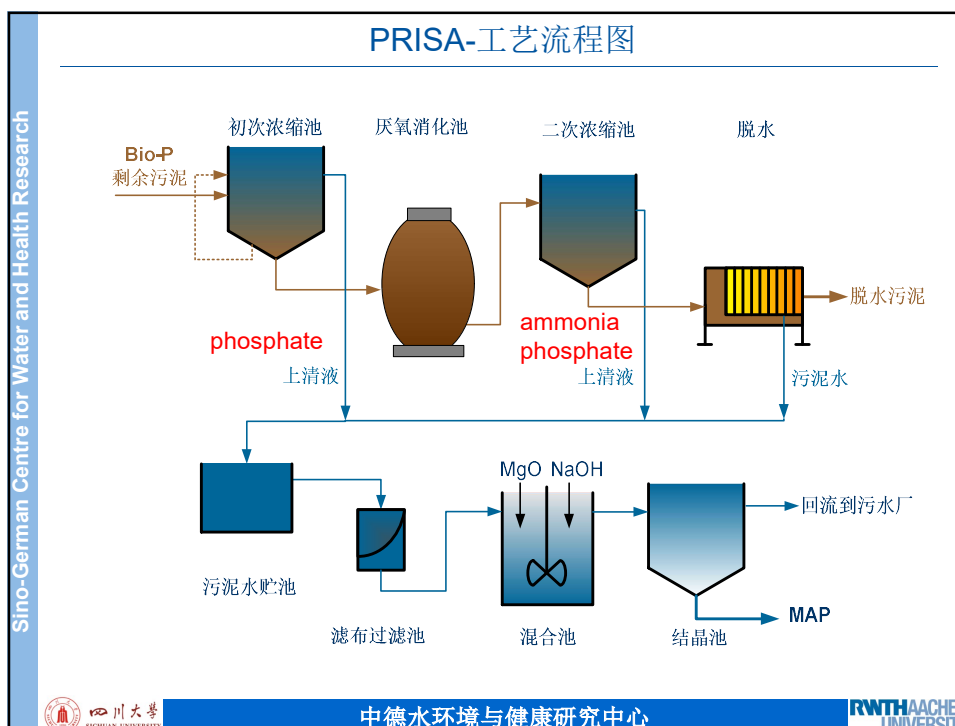
文献: DWA KEK-1.1

### 主要的磷回收工艺技术

原料 -污水和工艺过程水	原料 污泥	原料 污泥灰分
<b>结晶和沉淀工艺</b> Phostrip DHV Crystalactor Ostara PEARL Unitika Phosnix, Nishihara NuReBas NuReSys Kurita Festbettreaktor Ebara MAP Kristallisation Treviso CSIR Wirbelschichtreaktor REPHOS P-RoC Sydney Waterboard Reaktor ePhos PhosphoGreen (SUEZ) Struvia (Veolia)	<b>结晶工艺</b> AirPrex-MAP-工艺 PECO-工艺 (mikrobielle Oxid.) <b>PRISA-工艺</b> <b>吸附工艺</b> FIX Phos <b>酸解</b> ExtraPhos (Budenheim 工艺) Stuttgarier 工艺 Gifhomer 工艺 (Seaborne) SEWAPHOS Terra Nova Ultra/ AVA cleanphos (nach HTC) <b>水水解工艺 / 氧化工艺</b> Cambi-Prozess (mit MAP) Kemira KREPRO® LOPROX-工艺 (mit NF) Aqua-Reci <b>热(焚烧)工艺</b> Mephrec ATZ-Eisenbadreaktor RecoPhos (thermo-chemisch) EuPhoRe	<b>湿化学工艺</b> EcoPhos REMONDIS TETRA-PHOS <b>PASCH-工艺</b> (erweitertes) SEPHOS-工艺 SESAL-PHOS BioCon LEACHPHOS Eberhard 工艺 Phos4Life <b>热化学工艺 / 冶金工艺</b> AshDec-工艺 Mephrec ATZ-Eisenbadreaktor RecoPhos (thermo-chemische fraktionierte Extraktion) <b>EPHOS-工艺</b> <b>生物浸出</b> Inocre P-Bac
<b>离子交换工艺</b> REM NUT PHOSIEDI		
<b>组合工艺和特殊工艺</b> RECYPHOS Magnetseparator		



中德水环境与健康研究中心



中德水环境与健康研究中心





## PRISA 工艺特点

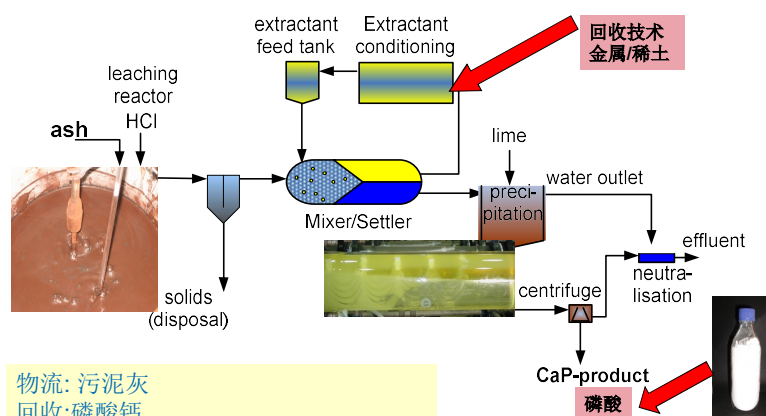
- ➔ **PRISA: Phosphorus Recovery developed by the ISA**
- ➔ **PRISA: 亚琛工业大学环境工程研究所开发的磷回收工艺**
- ➔ process bases upon the existing technology and causes only few modifications at the WWTP
- ➔ 工艺流程基于现有的技术，仅需要在污水处理厂进行一些技术改进
- ➔ can become integrated in existing sludge treatment
- ➔ 可与现有的污泥处理工艺整合
- ➔ required: enhanced biological phosphorus removal and anaerobic digestion
- ➔ 要求：强化生物除磷和厌氧消化
- ➔ enhanced "natural" acidification of surplus sludge in the pre-thickener in order to **release phosphate** systematically
- ➔ 强化剩余污泥在初次浓缩池的“自然”酸化，以促进**磷酸盐释放**
- ➔ digested sludge is thickened and dewatered (filter press, centrifuge) ⇒ process water and filtrate rich in **ammonia**
- ➔ 消化污泥经浓缩、脱水（压滤、离心脱水）⇒ 过程水和滤液富集**氨**
- ➔ mixing of the different process waters and addition of magnesium oxide ⇒ **struvite (MAP) crystallisation**
- ➔ 混合不同的过程水，添加氧化镁 ⇒ **鸟粪石 (MAP) 结晶**



中德水环境与健康研究中心



## PASCH 工艺



物流: 污泥灰  
回收: 磷酸钙  
 $\eta_{P, \text{污泥灰}} \sim 80-90\%$   
 $\eta_{P, \text{污水厂进水}} \sim 81\%$



中德水环境与健康研究中心



## PASCH工艺特点

- ➔ PASCH工艺可以回收污泥灰分中**90%**以上的磷（回收率大于90%）。
- ➔ 该产品只含有少量无机杂质（ISA研究所以及Fraunhofer IME的研究结果）
- ➔ 污泥焚烧过程中有机污染物已经被破坏
- ➔ 该产品具有良好的植物可利用性（根据Gießen大学的研究结果）。
- ➔ 与其他回收工艺相比（例如协同焚烧，农业利用），该工艺的生态评估具有优势（IFEU研究所的研究结果）。
- ➔ 在试范项目运行中，该工艺具有较低的成本。

## 总结和展望

- ▶ 德国政界、科学和经济超过**15年**的共同努力，德国达到如下状况：
  - 已经奠定磷回收的法律基础
  - 已经研发出一些从污泥水中和焚烧污泥灰分中回收磷（有害物比例很低）的技术，这些技术已完全投入运用
  - 回收的产品质量和施肥效果都得到了证明
  - 单焚烧和后续磷回收可能是未来最常用的处置方式
  - 为此，污泥焚烧厂的扩建和污水污泥灰烬的中间储存是必要的
  - 目前尚不可能达到回收设施系统的经济运行水平 (2 – 12 €/kg P)
- ▶ 现在中国是时候需要考虑，是否应该借鉴德国的经验，引进在污水处理中和污泥处理、处置中进行磷回收的策略。

Sino-German Centre for Water and Health Research

---

**Thank you very much!**  
谢谢大家关注!

Sino-German Centre for  
**Water and Health Research**



<http://www.water-health-research.de>


中德水环境与健康研究中心


**Literature**

---

[1] 严炜. 湖北省磷矿资源产业发展战略研究[D]. 中国地质大学, 2014.

[2] 孙小虹, 陈春琳, 王高尚, 等. 中国磷矿资源需求预测[J]. 地球学报, 2015(02):213-219.

[3] 张苏江, 易锦俊, 孔令湖, 等. 中国磷矿资源现状及磷矿国家级实物地质资料筛选[J]. 无机盐工业, 2016(02):1-5.

[4] 郝庆. 中国磷矿资源开发利用现状及建议[J]. 科学, 2014(05):51-55.

[5] 张卫峰. 中国磷矿资源开发利用及其对磷肥产业竞争力的影响[D]. 中国农业大学, 2005.

[6] 温婧. 中国磷矿资源类型和潜力分析[D]. 中国地质大学(北京), 2011.

[7] 王邵东, 张红映. 中国磷矿资源和磷肥生产与消费[J]. 化工矿物与加工, 2007(09):30-32.


Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Jahresbericht der Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), 2011

Johannes Pinnekamp: Phosphor Recycling in der Abwasserreinigung Strategie und Zukunftschancen in der Nährstoffrückgewinnung in Deutschland, 632 (07.11.2014)

Johannes Pinnekamp et al : P-Rückgewinnung: Technisch möglich - wirtschaftlich sinnvoll? , BMU/UBA-Tagung, Bonn 09. Oktober 2013

David Montag et al: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche mittels des nasschemischen PASCH-Verfahrens, GEWÄSSERSCHUTZ – WASSER - ABWASSER, Aachen 2011, ISBN 978-3-938996-34-8

David Montag: Phosphorstrategie für Deutschland, 8. DWA Klärschlammstage, 05.06.2013, Fulda


中德水环境与健康研究中心
