

E-mail: zhaoxuan@inet.tsinghua.edu.cn

实验室模拟土壤柱的工艺研究。色质联机水质(GC/MS)分析表明,活性炭吸附可降低有机物含量,模拟土壤柱可去除大部分的有机物及优先控制的污染物。

1 实验

1.1 回灌场地特征分析

本研究选择北京市高碑店污水处理厂厂内空地作为回灌示范场。该地区表层为1 m深的填土,非饱和带厚度9.6 m(满足美国加州有关地下回灌的规定中非饱和带至少应为3 m的要求^[9])。非饱和带主要由粘质粉土构成,质地比较均匀。第1含水层的厚度为7.9 m,上层为中细砂,下层为圆砾。第2含水层的厚度为14.6 m。两个含水层之间的隔水层厚度为7.3 m。

1.2 试验方法

实验采用地表回灌方式回灌第1含水层,研究城市污水地下回灌对地下水水质的影响。由于第1含水层与第2含水层之间有厚度为7.3 m的隔水层,这样可以保护第2含水层在试验失败的情况下

不被污染。在北京市高碑店污水处理厂建造3个地表回灌池,面积分别为100 m²、100 m²、200 m²,池深1.5 m,回灌池底铺有厚度为30 cm的工程砂。回灌池回灌能力为100~200 m³·d⁻¹。在回灌池内设监测井,井深10 m,对第1含水层水质进行监测。北京市高碑店污水处理厂二级出水在进入回灌池前的预处理工艺如图1所示,处理能力为400 m³·d⁻¹,处理效果见表1。其中 $\rho[\cdot]$ 为浓度,UV-254为吸光度。其目的是去除悬浮物及部分溶解性有机物,减轻了土壤含水层的有机物负荷,并防止回灌池的物理堵塞。

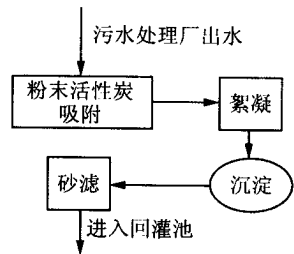


图1 高碑店回灌现场预处理工艺

表1 高碑店回灌现场预处理工艺进出水水质

	$\rho[\text{DOC}]$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho[\text{COD}]$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho[\text{AOX}]$ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho[\text{SS}]$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	UV-254 m^{-1}
污水处理厂出水	9.0~18.0	25.0~45.0	43.91	6.0~8.0	0.10~0.14
预处理后水质	6.0~10.0	10.0~20.0	12.31	0.2~0.6	0.02~0.09

2 试验结果与讨论

试验中,保持回灌池内回灌水的深度为60 cm,回灌池的渗滤速度为1.0 cm·h⁻¹,回灌池的运行采用干湿交替运行。湿期维持在14 d左右,干期3~4 d。

回灌开始时在回灌水中加入示踪剂氯化锂,在第1含水层中很快可以监测到浓度高于背景值的锂,如图2所示。回灌期间第2含水层中锂未检出。由此可以看出,回灌水到达第1含水层并与该层地下水混合,而未与第2含水层混合。

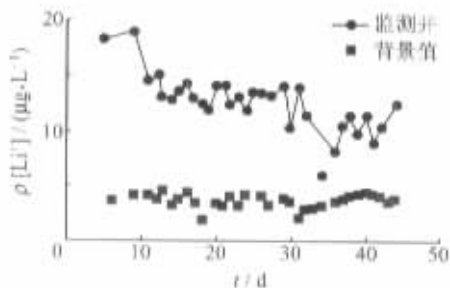


图2 含水层中Li的浓度变化

图3、图4分别是回灌过程中第1含水层的DOC与氨氮的变化情况,回灌水 $\rho[\text{DOC}]$ 保持在6.0~12.0 mg·L⁻¹,经过60 d的地表回灌,第1含水层水中有机物含量未见升高,保持在2.0~5.0 mg·L⁻¹,与背景值大体相当。回灌水氨氮的浓度为0.25 mg·L⁻¹,回灌初期地下水氨氮浓度明显高于背景值,随着回灌进行,地下水中氨氮逐渐降低,乃至低于背景值。回灌过程中地下水的其他组分变化情况见表2。回灌水的某些组分,例如SO₄²⁻、NO₃⁻

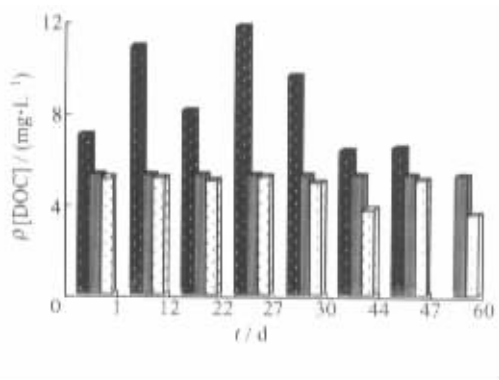


图3 第1含水层中DOC浓度变化情况

与 Cl^- , 在回灌过程中很难被土壤含水层降解, 尽管回灌水被地下水稀释, 监测井中这些组分仍能表现出相应的变化。

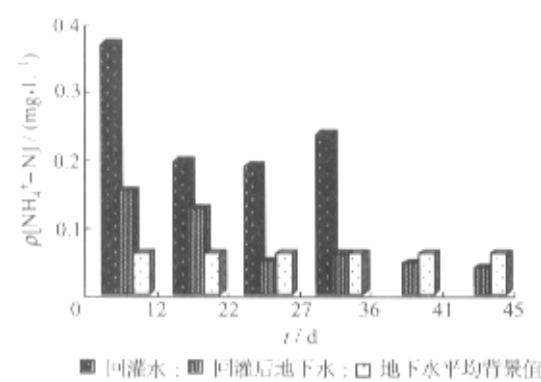


图4 第1含水层中氨氮浓度变化情况

经过再生处理的城市污水流经地下时, 水中所含的以 DOC 表征的有机物会进一步降解。这表现为尽管回灌水的 DOC 与地下水背景值有明显差异, 而回灌过程中地下水 DOC 值未见明显变化, 保持在较低的浓度水平, 这一点与不能被土壤基质降解的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 不同(回灌后地下水中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的浓度变化主要是由于回灌水对原地下水的稀释作用)。UV-254 表征的是不饱和烃及芳香族化合物, 土壤非饱和带的好氧微生物可以利用腐殖质和芳香族化合物作为一级基质, 降解水中微量的有机物。在此过程中, 腐殖质和芳香族化合物可作为微生物生长繁殖所需要的碳源被代谢分解。AOX 表征的是可吸附性的有机卤化物, 由于参与生物氧化还原反

应的脱氢酶辅酶具有亲电性, AOX 含有吸电子基团的卤原子, 所以可生化降解性能较差。微生物只有在得不到其他碳源的情况下, 才会利用 AOX, 因此 AOX 的去除率很低。土壤非饱和带对氨氮有很好的去除效果, 好氧、缺氧状态下, 氨氮是自养细菌繁殖的电子供体, 被硝化细菌先氧化成亚硝酸根再氧化成硝酸根。

土壤的物理性质对回灌水中交换性离子的类型非常敏感。土壤碱化过程常是回灌水中钠离子与土壤胶体表面其它阳离子如钙、镁离子进行交换的过程。钙、镁离子可以使土壤通气透水, 导水性能改善, 回灌水中钠离子过高可以引起土壤分散和膨胀, 导致表层土壤板结与土壤碱化。土壤碱化使土壤微粒高度分散和膨胀, 物理性质恶化, 干时板结, 湿时重胀, 导水性能变差^[10,11]。本研究引入钠吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)衡量回灌水引起土壤碱化程度。其表达式为

$$\gamma[\text{SAR}] = \frac{\rho[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{\rho[\text{Mg}^{2+}] + \rho[\text{Ca}^{2+}]}{2}}}$$

如表 2 所示, 含水层水质背景值的 $\gamma[\text{SAR}]$ 范围为 4.31~7.42, 在土壤学上属于灌溉性能较好的土壤, 回灌水中 $\gamma[\text{SAR}]$ 的范围为 3.39~9.65, 在回灌过程中地下含水层 $\gamma[\text{SAR}]$ 保持在 4.56~6.10。根据文[10]所列出的灌溉水的碱化危害程度分级, 本项目所采用的城市污水人工地下回灌对土壤的碱化危害程度较低。

表2 含水层水质分析结果

	pH	$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$				$\frac{\rho[\text{AOX}]}{\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}}$	$\frac{\sigma[\text{UV-254}]}{\text{cm}^{-1}}$	$\gamma[\text{SAR}]$
		DOC	NO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}			
含水层背景值	7.05~7.08	3.0~7.0	21.6	184.1	250.5	1.11	4.85	4.31~7.42
回灌水		6.0~10.0	101.0	231.3	82.6	13.69	10.14~12.74	3.39~9.65
回灌后地下含水层	7.14~7.42	2.0~5.0	72.2	215.8	215.5	13.13	3.15~4.5	4.56~6.1

3 结 论

本文根据可供回灌的土壤的土质条件、物理化学特性, 含水层的水质条件, 研究了土壤基质对回灌水的净化效果: 土壤非饱和带可以进一步降解回灌水中的有机物, 去除氨氮, 对 UV254 有良好的去除效果, 对回灌水的水质有明显改善作用。在达到地下含水层之前, 土壤非饱和带对 AOX 的去除率很低。

钠吸附比作为指示回灌水或土壤溶液中钠含量的重要参数, 可以表征在渗滤过程中回灌水对土壤结构影响。本项目所采用的城市污水人工地下回灌技术对回灌场地土壤的碱化危害程度较低。

参考文献 (References)

[1] Drewes J, Fox P. Fate of natural organic matter (NOM) during groundwater recharge using reclaimed water [J]. *Water Sci & Tech*, 1999, **40** (9): 241-248.

[2] Bouwer H. Role of groundwater recharge in treatment and storage of wastewater for reuse [J]. *Water Sci & Tech*, 1991, **24** (9): 295-302.

[3] 皮运正. 污水处理厂出水用于人工地下回灌的水质研究及风险评价 [D]. 北京: 清华大学, 2002.

PI Yunzheng. Study of water quality and risk assessment of wastewater treatment plant effluent for artificial groundwater recharge [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)

值的均方根值很小。表 1 为最大流速 18.8 m/s 时各加速度的均方幅值。

由表 1 可以看出,总体的数量上看,加速度的均方根值很小,所以可以认为在实验过程中,外壳不振动,是稳定的。

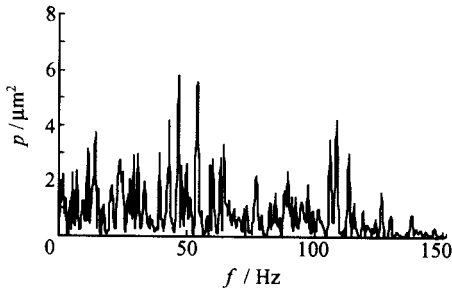


图 8 中间板在 18.8 m/s 流速下的功率谱

表 1 各加速度的均方幅值

方向	$a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
东西	0.21
南北	0.09
上下	0.01

4 结 论

- 1) 燃料组件(包含燃料板)在流体冲刷下的振动频率包含各种频段,几乎没有主频。
- 2) 在流体冲刷下,组件的行为包含振动和偏移两个方面,偏移量占主要部分,振动量占次要部分。随着流速的增加,燃料组件的振动和偏移不断增加。
- 3) 在整个 0~18.8 m/s 流速范围没有出现流体弹性不稳定的大振幅振动。流弹不稳定的临界流速不在试验工况覆盖的流速范围内。

参考文献 (References)

[1] 陈俊杰, 郭长青, 邹长川. 叠层板状元件的动力特性测量与分析 [J]. 核科学与工程, 1997, 17(3): 235-241.
CHEN Junjie, GUO Changqing, ZOU Changchuan. Measurement and analysis on dynamic behavior of parallel-plate assembly in nuclear reactors [J]. *Chin J Nucl Sci and Eng*, 1997, 17(3): 235-241. (in Chinese)

[2] Davis D C, Scarton H A. Flow-induced plastic collapse of stacked fuel plates [J]. *Nucl Eng and Design*, 1985, 85: 193-200

[3] 薄涵亮, 迟宗波, 李德重, 等. 200MW 低温核供热堆水力驱动控制棒系统综合性能实验与寿命考验 [R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1998.
BO Hanliang, CHI Zongbo, LI Dezhong, et al. The Performance and the Durability Test on Hydraulic Control Rod Drive System for 200MW Heating Reactor [R]. Institute of Nuclear Energy Technology Tsinghua University, 1998. (in Chinese)

[4] 闵刚, 薄涵亮, 姜胜耀, 等. 用软测量方法测定板型燃料组件的固有特性参数 [J]. 实验技术与管理, 2003, 20(3): 43-47.
MIN Gang, BO Hanliang, JIANG Shengyao, et al. Measurement on eigenfrequency of plate type fuel assembly by the soft measurement method [J]. *J Exper Tech and Admi*, 2003, 20(3): 43-47. (in Chinese)

[5] 庄表中. 随机振动入门 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
ZHUANG BiaoZhong. Introduction on Random Vibration [M]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)

[6] 戴诗亮. 随机振动实验技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
DAI Shiliang. Experimental Technology on Random Vibration [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984. (in Chinese)

groundwater recharge [J]. *Tsinghua Sci and Tech*, 2000, 5(3): 333-337.

[9] Shelef G. Wastewater reclamation and water resources management [J]. *Water Sci & Tech*, 1991, 24 (9): 251-265.

[10] 宋新山, 邓伟, 章光新, 等. 钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用 [J]. 水利学报, 2002, 7: 70-76.
SONG Xinshan, DENG Wei, ZHANG Guangxin, et al. Sodium adsorption ratio and its application to appraisalment of alkali characteristics of water [J]. *J Hydraulic Eng*, 2002, 7: 70-76. (in Chinese)

[11] 肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响 [J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 359-367.
XIAO Zhenhua, WAN Hongfu. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties [J]. *Acta Pedologica*, 1998, 35 (3): 359-367. (in Chinese)

(上接第 349 页)

[4] Heinzmann B, Sarfert F. An integrated water management concept to ensure a safe water supply and high drinking water quality on an ecologically sound basis [J]. *Water Sci & Tech*, 1995, 31 (8): 281-291.

[5] Kanarek A, Michail M. Groundwater recharge with municipal effluent; Dan region reclamation project in Israel [J]. *Water Sci & Tech*, 1996, 34 (11): 227-233.

[6] Singer C, Pyne D. Examining the impact of aquifer storage and recovery on DBP's [J]. *J of Amer Water & Works Association*, 1993, 85(11): 85-94.

[7] Azov Y, Juanico M. Monitoring the quality of secondary effluents reused for unrestricted irrigation after underground storage [J]. *Water Sci & Tech*, 1991, 24(9): 267-275.

[8] YUN Guichun, CHENG Xuzhou, JIAN Xingchao. Removal of organic pollutants in municipal wastewater for artificial