

石化废水稳定塘系统下渗对地下水的影响

刘巍, 刘翔, 徐康宁, 汪诚文

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 稳定塘是一种古老而又不断发展的污水生物处理系统,目前在污水资源化方面有着广泛的应用,但是如果稳定塘系统防渗处理不当,会导致地下水污染。在中石化西北某市石化公司稳定塘中试工程一年多运行过程中,研究了3种稳定塘工程不同防渗层的防渗效果,连续对取样井中下渗后污水的水质变化情况进行监测,进而判断稳定塘系统对地下水的影响。结果表明,防渗效果优劣顺序是:红粘土机械压实>灰混土压实。污水下渗后水中TDS明显增大,平均浓度由 $1.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增大到 $4.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;包气带对COD、氨氮、石油烃、挥发酚、硫化物均有一定的净化效果,各污染物浓度分别减少了7.8%、24.1%、19.9%、35.3%、37.5%;氰化物浓度几乎不变。由于污水是经过二级生化处理的石化废水出水,其中的有机物大部分是难生物降解的有机物,进入含水层中将更难以去除,所以下渗对地下水污染风险最大的是污水中的有机物。此外,下渗使地下水水位上升而造成土壤次生盐渍化。

关键词: 稳定塘;地下水;防渗层;土壤次生盐渍化

中图分类号: X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)07-1478-06

The Impact of the Petrochemical Wastewater Stabilization Pond System on Groundwater

LIU Wei, LIU Xiang, XU Kang-ning, WANG Cheng-wen

(Department of Environment Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The wastewater stabilization pond is an ecotypic wastewater treatment system, which is widely used in wastewater reclamation. However, wastewater stabilization pond system (WSPS) may bring groundwater pollution if the waterproof layer is not operated properly. A pilot test on WSPS in the northwest branch of SINOPEC CORP lasted more than one year, in which the anti-seepage capacities of three different waterproof layers of WSPS were measured and the impact of WSPS on the underlying aquifer was evaluated. The results indicated that the anti-seepage capacities of the different waterproof layers follow the order: red clay mechanical compaction > ash-soil compaction > red clay compaction. The TDS in the percolate increased from $1.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ to $4.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. COD, ammonia nitrogen, petroleum hydrocarbon, volatile phenol and sulfide were partly removed by unsaturated zone, with their concentrations decreased by 7.8%, 24.1%, 19.9%, 35.3%, 37.5%, respectively. The concentration of cyanide was almost unchanged. Most residual organic contaminants which survived the secondary biochemical treatment in the petrochemical wastewater were immune to the biodegradation, especially in the aquifer. So the organic contaminants from seepage flows brought the greatest risk for groundwater pollution. In addition, the groundwater level rise caused by seepage would result in the secondary salinization of soil.

Keywords: stabilization pond system; groundwater; waterproof layer; secondary salinization of soil

稳定塘由于具有投资少、运行简单、处理效果稳定、能实现污水资源化等优点,在污水处理领域应用广泛。据统计,目前全世界已有近50个国家上万座稳定塘系统化在运行。但稳定塘存在污水停留时间长、占地面积大和可能造成二次环境污染等缺点。在发展中国家,稳定塘数量多,水质差,防渗措施不完善,而

且难以支付高额防渗费用,对地下水系统的污染相当严重^[1-3],因此研究稳定塘系统对地下水的污染及治理显得十分重要。

1 材料与方法

1.1 石化污水治理改排方案

中石化西北某市石化分公司生产过程中产生的工业废水及十余家地方企业排放的生产、生活废水,通过终端污水处理厂处理达标后,经市政工业排污干管排往黄河该市段下游,生产区域内的清净下水和部

收稿日期:2008-10-20

作者简介:刘巍(1983—),男,湖北赤壁人,硕士,主要研究方向为土壤与地下水环境保护。E-mail:wliu06@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:刘翔 E-mail:x.liu@tsinghua.edu.cn

分市政污水经雨排系统直排黄河。市政工业排污干管穿越该市的最繁华地区且年久失修,一旦发生泄漏,石化公司污水将无处可排,有可能造成灾难性后果,因此依靠市政工业排污干管排放污水存在着重大安全隐患。

为消除工业排污干管隐患对石化公司安全生产带来的威胁,不再依托市政工业排污干管输送污水,经工艺论证后作为自然处理工艺的的稳定塘系统就成为本项工程首选方案。首先稳定塘工艺运行费用低,若采用常规人工处理建设,每年运转费用需上千万元。其次该市市郊有廉价土地可供氧化塘建设之用,这是选择稳定塘工艺的的必要条件;此外,稳定塘污水处理工程若设计得当,不仅能实现对黄河的零排放,处理出水还可用于工业、荒山绿化等回用,有很好的生态环境效益和经济效益^[4]。

根据中试的需要,在该市 A 区和 B 区一带分别建设一个稳定塘试验基地和贮存塘/人工湿地系统试验基地,通过现场试验研究,了解稳定塘和人工湿地对石化公司排放污水的净化效果,初步评价系统建成后对周边环境的影响,选择优化系统设计参数,摸索总结系统的运行管理经验,为下一步稳定塘项目的技术决策、工程总体设计以及技术可行性分析提供参考和依据。本文重点考察稳定塘中石化废水深度处理出水下渗后的水质变化及其对地下水的影响。

1.2 稳定塘中试系统设计

1.2.1 水量与水质

稳定塘进水是兰州石化污水处理厂的二级生化处理后的出水,试验设计水量共计为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,进水水质见表 1。

1.2.2 工艺流程

污水厂二级出水进入自然型稳定塘和人工型稳定塘两个系列,均采用多级阶梯式跌水曝气方式

进水。

自然型稳定塘主要是模拟纯自然条件下,稳定塘对尾水的处理效果,它由兼性塘(3 级)和好氧塘(3 级)串联组成。人工型稳定塘则是模拟增加人工强化措施之后,稳定塘对尾水的处理效果,由兼性塘(3 级)、好氧曝气塘(1 级)、好氧塘(2 级,栽植水生植物并养鱼)构成。好氧塘出水进入人工湿地进一步净化,再进入贮存塘用于回用。工艺流程如图 1。

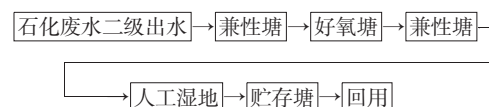


图 1 稳定塘工艺流程图

Figure 1 Process flow diagram of stabilization pond system

1.2.3 防渗措施

稳定塘的防渗面层采用原土夯实加 0.5 m 红粘土机械压实。

贮存塘系列分为东西两格,两格塘内分别作不同的自然加强防渗方法,一种为原土夯实加 0.5 m 填土压实,最后加 0.3 m 灰混凝土压实。其中灰混凝土为原土掺白灰,灰土比例为 3:7。另一种为原土夯实加 0.5 m 填土压实,最后加 0.3 m 红粘土压实。

1.3 水文地质条件

根据地下水的分布、赋存条件和含水介质性质,将区内地下水分为碎屑岩类孔隙裂隙水和松散岩类孔隙水两类。研究区域水文地质示意图如图 2 所示。

1.3.1 碎屑岩类孔隙裂隙水

该类型地下水主要赋存于第三系泥岩表层孔隙裂隙中,以潜水为主,主要接受大气降水补给,渗透性弱,水量贫乏,地下水矿化度高,水质差。大多地段基本上不含水。

1.3.2 松散岩类孔隙水

可细分为第四系黄土孔隙裂隙潜水和沟谷潜水两类。

黄土孔隙裂隙潜水分布于丘陵区,赋存于黄土孔隙裂隙中,地下水主要接受大气降水补给,水量贫乏。

沟谷潜水分布于各沟谷中,富水性与透水性均差。含水层为沟谷第四系洪积粉土,主要受大气降水补给,向沟谷下游缓慢径流。根据水质分析,矿化度多大于 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,水化学类型以 $\text{Cl}-\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^{+}-\text{Mg}^{2+}$ 型为主,水质差。

表 1 进水水质($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 1 Influent quality($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

水质指标	平均浓度
COD_{Cr}	87.3
氨氮	14.8
pH	7.86
悬浮物	48.8
含盐量	1 262.4
石油烃	5.09
硫化物	0.059
挥发酚	0.033
氰化物	0.02

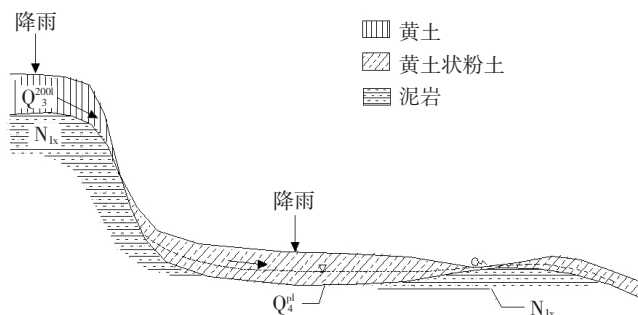


图 2 水文地质示意图

Figure 2 Hydrological geological map

1.4 试验方法

1.4.1 渗透系数的测定

稳定塘中的渗流速率可以由单环试验测量。即在稳定塘中选择多个监测点,安装圆环。将环打入,同时保证圆环的侧壁与地面垂直。根据环内水位变化可以测量出渗流速率,由 Darcy 定律计算各点的渗透系数,取平均值为稳定塘塘底的渗透系数。

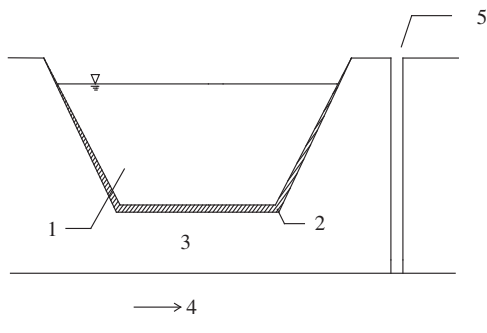
贮存塘中只有进水没有出水,根据监测的水位变化和蒸发降雨数据,可以计算每个月出的渗透量,由 Darcy 定律计算各月相应的贮存塘塘底渗透系数,取平均值为贮存塘塘底的渗透系数。

1.4.2 下渗对地下水的影响

为了考察稳定塘系统对地下水的影响,选取工程拟选场址的贮存塘为研究对象。在贮存塘顺着地下水流向的一侧 2 m 处设有监测井(如图 3),连续监测井中的水质变化情况,考察测定贮存塘中的水下渗后的水质变化,进而判断下渗对地下水的影响。

1.4.3 分析方法

水质监测项目有 pH、DO、TDS、COD_{Cr}、氨氮、石油烃、挥发酚、硫化物、氰化物和一些阴、阳离子等。其中 pH、DO、TDS 采用便携式多参数水质检测仪测定;



1:贮存塘 2:防渗层 3:包气带 4:含水层 5:取样井

图 3 贮存塘与取样井示意图

Figure 3 Schematic diagram of storage pond and sampling well

COD 采用重铬酸钾法;氨氮采用纳氏试剂光度法;石油烃采用重量法;挥发酚采用溴化滴定法;硫化物采用碘量法;氰化物采用硝酸银滴定;Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、F⁻和 Br⁻等阴离子浓度用离子色谱测定;Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等阳离子浓度利用 ICP-AES 法测定。

2 结果与讨论

2.1 防渗措施及其效果

在稳定塘中选择 4 个代表点进行单环渗透试验,分别计算渗透系数,取其平均值作为稳定塘塘底的渗透系数,结果见表 2。

表 2 稳定塘渗透系数

Table 2 The permeability coefficient of stabilization pond

试验参数	选取点			
	1#	2#	3#	4#
渗流速度/m·s ⁻¹	2.63E-08	1.58 E-08	6.52 E-08	5.79 E-08
水头/m	2.81	3.03	2.75	2.7
渗透层厚度/m	2	2	2	2
渗透系数/m·s ⁻¹	1.87 E-08	1.04 E-08	4.74 E-08	4.29 E-08
平均渗透系数/m·s ⁻¹	2.99 E-08			

由于贮存塘在工程拟选场址,距离稳定塘还有一段距离,所以贮存塘中的水由水车运输补给,没有外流,由水量平衡计算渗透量,再计算贮存塘的渗透系数,见表 3。

3 种防渗措施的工程施工方案及其实测渗透系数如表 4 所示。

通过施工方案和渗透系数比较,3 种防渗措施均具有较好的防渗效果。防渗效果最好的是稳定塘,采用防渗措施是原土夯实再加上红粘土机械压实;最差的是西侧贮存塘,采用的是原土夯实加填土压实,再加上红粘土压实;东侧贮存塘介于两者之间,采用的是原土压实加填土夯实,再加上灰混土压实。

2.2 下渗水水质

取样井距离贮存塘很近,且该区地下水体系相对封闭,几乎不流动,所以取样井中的水大部分是贮存塘中下渗的水,观测取样井中的水质可以知道贮存塘中水经过下渗后的水质变化情况,从而可以判断下渗对地下水的影响。试验中连续监测 TDS、COD、氨氮、石油烃、挥发酚、硫化物和氰化物等污染物指标的变化,以西侧贮存塘与取样井水质变化为例,如图 4。

污水中所含污染物受重力作用下渗,依次穿透塘体底泥层、防渗层和包气带,最后进入地下水含水层而对地下水造成污染,污染物在穿透各土层时有可能

表 3 贮存塘渗透系数

Table 3 The permeability coefficient of storage pond

项目	西侧贮存塘				东侧贮存塘			
	5 月	6 月	7 月	8 月	5 月	6 月	7 月	8 月
渗透量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.025	0.023	0.072	0.031	0.019	—	0.033	0.044
水头/m	0.430	0.483	0.285	0.339	0.323	—	0.319	0.421
包气带厚度/m	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	—	1.000	1.000
过水断面/ m^2	88.92	88.92	88.92	88.92	88.92	—	88.92	88.92
渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.84E-07	1.42E-07	7.88E-07	2.90E-07	1.85E-07	—	3.21E-07	3.24E-07
平均渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3.51 E-07				2.76 E-07			

表 4 不同防渗措施施工方案及渗透系数比较

Table 4 Contrast of different anti-seepage measures and permeability coefficients

项目	稳定塘	东侧贮存塘	西侧贮存塘
防渗施工方案	原土夯实,加 50 cm 红粘土并机械碾压	原土夯实,加 50 cm 填土压实,最后加 30 cm 灰混土(3:7)压实	原土夯实,加 50 cm 填土压实,再加 30 cm 红粘土压实
渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.99 E-08	2.76 E-07	3.51 E-07

会被不同程度地降解或截留。土层对各种污染物的净化机理包括慢速渗滤、生物降解、吸附、化学反应、离子交换和沉淀等^[5-6]。可以看出贮存塘的水下渗后, TDS 明显增大, 平均浓度由 $1.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增大到 $4.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 这是由于淋滤作用也会使得土层中盐分进入水中; 同时由于土层的净化作用会使 COD_Cr 、氨氮、石油烃、挥发酚、硫化物的浓度降低, COD_Cr 由 $95.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小为 $88.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮由 $3.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小为 $2.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 石油烃浓度由 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减少为 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 挥发酚浓度由 $0.068 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减少为 $0.044 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硫化物浓度由 $0.032 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减少为 $0.020 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD_Cr 、氨氮、石油烃、挥发酚、硫化物浓度分别减少了 7.8%、24.1%、19.9%、35.3%、37.5%; 氰化物浓度几乎不变。参照地下水质量标准(GB/T 14848—1993), 下渗后水中的 TDS、氨氮、挥发性酚浓度均属于 V 类标准($\text{TDS} > 2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、氨氮 $> 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、挥发性酚 $> 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 氰化物浓度属于 III 类标准(氰化物 $< 0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

2.3 对地下水的影响

贮存塘下渗水进入含水层后与地下水直接作用。该区域地下水水量少, 主要接受大气降水补给, 水质见表 5。

可见该区地下水水质较差, 尤其是盐度和硬度很高, 既不适合饮用, 也不适合农业灌溉。贮存塘中的水下渗后水中盐度会增大, 但相对于地下水来说仍比较低, 所以下渗水与地下水混合后会对地下水的盐度有

稀释作用。另一方面, 下渗水 pH 较高, 可以使地下水中一些钙、镁等阳离子沉淀而使得地下水中盐度降低。Jinzhu Ma 等研究也表明, 地表水受污染后进入地下水, 引起了地下水 TDS 发生较大变化^[7]。值得指出的是, 下渗可以补充一部分该地匮乏的地下水, 但是由于西北内陆地区土壤母质普遍含有不同程度的盐碱, 抬高了地下水位后, 大量底土中的盐分和地下水中的盐分会随潜水蒸发积聚到土壤上层和地表, 造成二次污染, 即土壤次生盐渍化, 危害作物生长甚至使耕地荒废^[8]。

下渗对地下水影响最大的是有机污染物, 是关注的热点。Hua Jianmin 等用土柱试验考察下渗过程中包气带对生活污水中的污染物的净化, 其中 COD 的去除在 67%~79%^[9]; Raja Jarboui 等试验模拟橄榄油废水稳定塘下渗过程, 发现经包气带净化后 COD 能去除 60%^[10]; 相比之下, 本研究中 COD 去除率要低得多, 不到 8%。这是因为贮存塘中的水是经过了污水处理厂的二级生化处理的石化废水, 大部分可降解有机物已经再生化处理阶段去除, 剩余的大部分都是难降解有机物, 进入稳定塘系统后去除效果也不佳, 最后下渗过程中包气带只能起到一定的拦截吸附作用, 绝大部分难降解有机污染物还是进入地下水系统中。此外, 包气带物化性质的不同也可能是造成这种净化效果有很大差异的原因。难降解有机污染物进入含水层后, 造成地下水污染, 而且极难修复^[11-12]。

2.4 进入地下水系统的污染物质量估算

已知稳定塘工程的下渗量, 各污染物的浓度(见表 1), 假设稳定塘中的水在下渗过程中污染物不被降解或者截留, 从而可以保守地估算稳定塘通过下渗进入含水层中的污染物的最大负荷(见表 6)。

可以看出, 在系统运行 6 个月中, 稳定塘下渗水量为 $5\,770 \text{ m}^3$, 由于下渗进入含水层较多的污染物为 TDS、有机物和氨氮, 总量分别是 4.5 t、378.6 kg 和

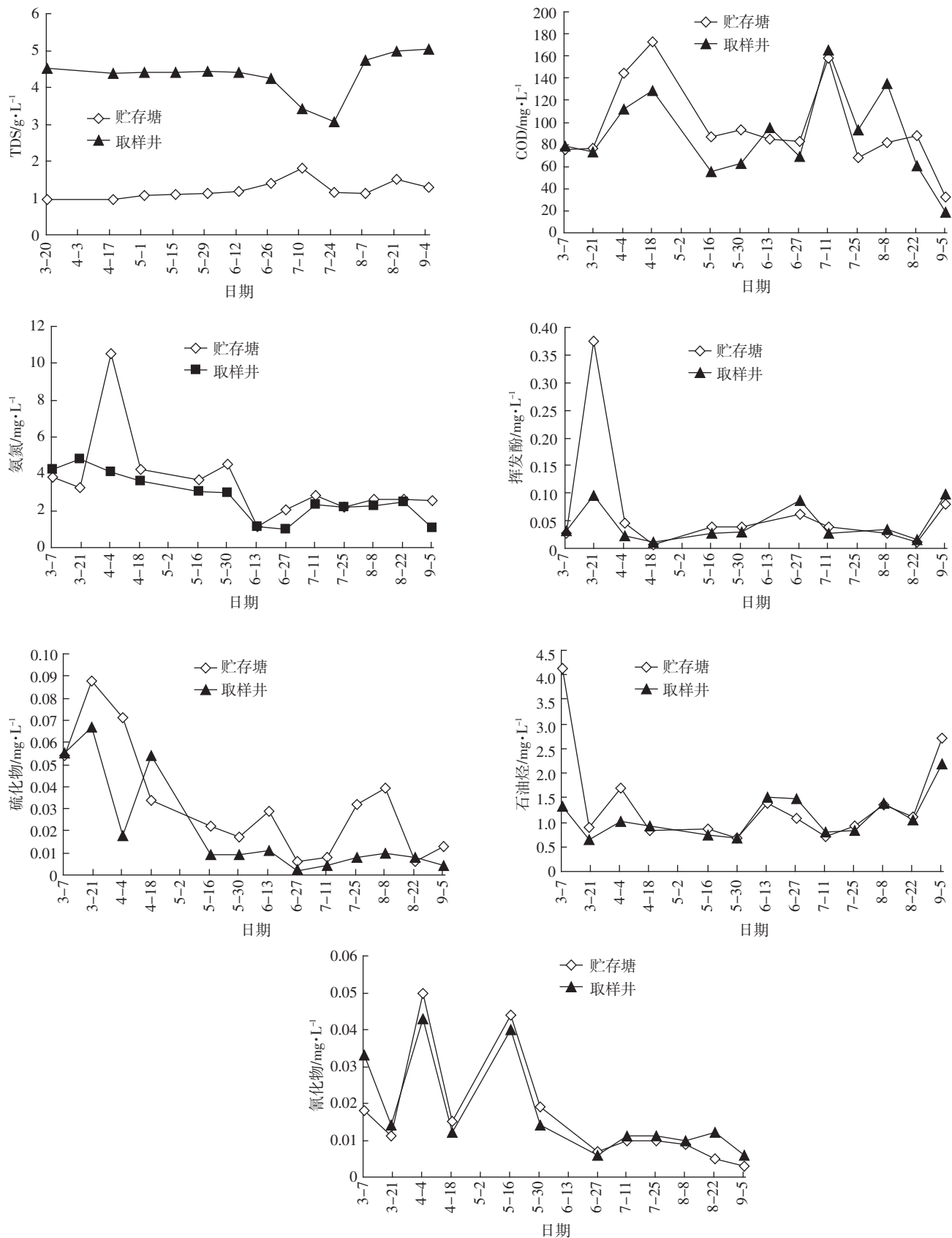


图 4 贮存塘与取样井水质比较

Figure 4 Contrast of water quantities in storage pond and monitoring well

表 5 地下水和贮存塘水水质($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 5 The water qualities of groundwater and storage pond water($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

项目	pH	COD	硬度	碱度	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}
地下水	7.8	11.4	9 571.5	197.8	2 153.3	7 418.2	9 364.5
贮存塘	8.8	86.5	314.1	101.6	104.0	210.1	296.4

注:硬度和碱度单位以 CaCO_3 计。

表 6 下渗进入含水层的污染物总量

Table 6 The total pollution loads infiltrating into the aquifer

COD/kg	氨氮/kg	油/kg	酚/g	硫化物/g	氰化物/g	TDS/t
378.6	27.1	7.0	277.3	163.9	73.8	4.5

27.1 kg。由于工程预选场址地土壤的含盐量极高,下渗水经过包气带时,通过淋溶作用有可能会淋洗出更多的土壤盐分带入地下水,所以避免盐分对地下水的影

3 结论

(1)3 种防渗措施均具有较好的防渗效果,但是上述 3 种方案都未能达到国家关于废物填埋场的防渗标准(低于 $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。对于防渗要求较低的场所,为减少工程投资可考虑选择石灰与原地粘性土(3:7)混合夯实的防渗方案,还可以采取机械碾压的方式进一步提高该方案的防渗能力;而对于防渗要求较高的场所,应该选择红粘土机械碾压的防渗方案。

(2)污水在下渗过程中,TDS 明显增大;COD、石油烃、硫化物、挥发性酚的浓度在包气带的净化作用下会有所降低,其中 COD 浓度减少不多是因为石化废水中残留的有机物均是难降解有机物,包气带净化作用有限;氰化物浓度前后基本不变。

(3)由于该区地下水水质很差,下渗对地下水危害最大的是难降解的有机污染物,而且下渗使地下水水位上升造成土壤次生盐渍化。

参考文献:

- [1] 陈建东,刘娉慧,王惠民,等. 稳定塘对地下水影响耦合功能模型的研究进展[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(2): 101-103.
CHEN Jian-dong, LIU Ping-hui, WANG Hui-min, et al. Study on combined function model of effect on stabilization pond system on groundwater[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Paper*, 2007, 28(2): 101-103.
- [2] Bashaar Y Ammary. Wastewater reuse in Jordan: present status and future plans[J]. *Desalination*, 2007, 211(1-3): 164-176.
- [3] Agunwamba J C. Analysis of socioeconomic and environmental impacts

of waste stabilization pond and unrestricted wastewater irrigation: interface with maintenance[J]. *Environmental Management*, 2001, 27(3): 463-476.

- [4] 刘汝鹏,曲莹,于水利. 生态稳定塘在城市污水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2006, 32(11): 68-70.
LIU Ru-peng, QU Ying, YU Shui-li. Application of ecotypic stabilization pond system in municipal wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(11): 68-70.
- [5] 宋晓焱,尹国勋,谭利敏,等. 污水灌溉对地下水污染机理研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 136-138.
SONG Xiao-yan, YIN Guo-xun, TAN Li-min, et al. Study on mechanisms of groundwater pollution due to applying sewage water for irrigation condition[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(1): 136-138.
- [6] 刘长礼,张云,叶浩,等. 包气带粘性土层的防污性能试验研究及其对地下水脆弱性评价的影响[J]. 地球学报, 2006, 27(4): 349-354.
LIU Chang-li, ZHANG Yun, YE Hao, et al. Experimental studies of the filtration capability of clay soils in the vadose zone and its influence on the evaluation of groundwater vulnerability to pollution[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(4): 349-354.
- [7] Jinzhu Ma, Zhenyu Ding, Guoxiao Wei, et al. Sources of water pollution and evolution of water quality in the Wuwei basin of Shiyang River, Northwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 1168-1177.
- [8] 郭占荣,刘花台. 西北内陆灌区土壤次生盐渍化与地下水动态调控[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1): 45-48.
GUO Zhan-rong, LIU Hua-tai. Secondary salinification of soil and dynamic control of groundwater in irrigation area of inland basin, north-western China[J]. *Journal of Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(1): 45-48.
- [9] Jianmin Hua, Pinglin An, Josef Winter, et al. Elimination of COD, microorganisms and pharmaceuticals from sewage by trickling through sandy soil below leaking sewers[J]. *Water Research*, 2003, 37(18): 4395-4404.
- [10] Raja Jarbou, Fatma Sellami A, Adel Kharroubi, et al. Olive mill wastewater stabilization in open-air ponds: Impact on clay sandy soil[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(16): 7699-7608.
- [11] 赵春梅,张凤琳,魏云慧. 纳污水体周围地下水污染特征浅析[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(4): 77-79.
ZHAO Chun-mei, ZHANG Feng-lin, WEI Yun-hui. The analysis of pollution characteristics to groundwater around pollutant-holding water body[J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(4): 77-79.
- [12] 李海杰,吕斯濠,卢文喜. 含水层中有机物对地下水水质的影响[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 82-85.
LI Hai-jie, LV Si-hao, LU Wen-xi. Effect of organic material in the aquifer on groundwater quality[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(4): 82-85.
- [13] Silvia M, Diaz Cruz, Damia Barceló. Trace organic chemicals contamination in ground water recharge[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(3): 333-342.