

SKK 工法的土壤 VOCs 污染净化效果研究

孟昭¹, 杨云¹, 高橋茂吉², 松本晴彦²

(1. 西安科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. ASAHI TECHNO 株式会社, 日本 岩手县 0240322)

摘要: SWP 工法是日本近年来成功发明的一种土木挖掘施工的高效扬水新工艺. 采用这种工艺可获得比目前工艺高数倍~数十倍以上的扬水效率. 通过对该工艺的技术解析和试验数据对比, 阐述了该工艺独特的优异性能. 在 SWP 工法的基础上, 通过一些技术改进发展而成的 SKK 工法, 可有效净化地层中受到 VOCs 和油类污染的土壤和地下水, 解决了目前土壤气提法所遇到的无法净化饱和含水层污染土壤的技术难题. 实地净化测试结果表明, 经过 SKK 工法处理后的地下土壤和地下水, 短期内即可完全达到国家要求的环境标准.

关键词: 土壤; VOCs; 污染治理; 土壤气提法; SKK 工法; SWP 工法

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)04-0541-07

土壤是由矿物质、有机物质(主要是有机物质和土壤微生物)及充满其间隙的水和空气的集合体, 是一切污染废弃物的最终载体. 近年来, 由于人口剧增及高速工业化的发展, 导致固体废弃物及其工业废水不断地向土壤表面堆放和倾倒, 有害废水不断向土壤中渗透以及大气中的有害气体及飘尘也不断地随着雨水降落到土壤中, 再加上农业面源污染等问题, 导致了严重的土壤污染.

土壤污染主要指的是有机物污染和重金属污染, 大面积区域的污染主要以有机物污染为主, 有机污染主要指农药和其他化学品的污染. 我国的污染耕地面积已高达约 6000 万 hm^2 ^[1]. 我国每年施用的农药量高达 $50 \sim 60 \times 10^4 \text{ t}$, 其中约 80% 的农药直接进入了环境. 另外, 石油污染、化学品污染以及工业“三废”排放物也进入到土壤中, 如硝基芳香烃、氯代芳香烃等的污染已相当严重, 这些有机物污染我们统称为 VOCs 污染. 被 VOCs 污染的土壤通过对地表水和地下水形成二次污染, 再经土壤~植物系统由食物链进入人体, 直接危害人体健康^[2].

在目前高速城市化发展的背景下, 国内高污染、劳动密集型企业大量从东部沿海城市迁移到西部内陆城市, 导致污染工业企业留下的土地成为“毒地”, 这些“毒地”如果不加处理直接转化为住宅用地而建成居民小区后, 就会变成埋在人们身边的“地雷”. 因此, 在没有进行污染状况调查和必要修复的情况下, 把工业遗留场地开发成住宅用地是非常危险的. 最近

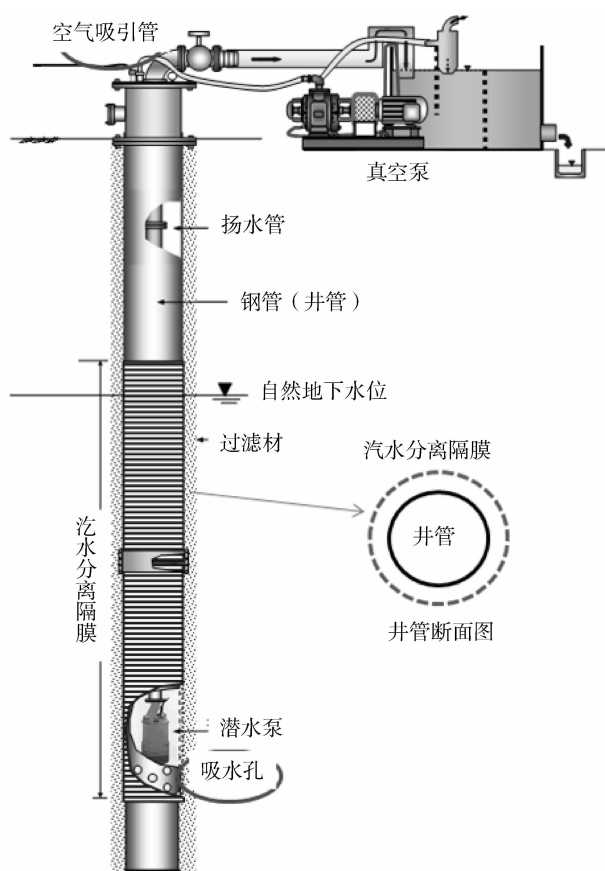


图1 SWP井筒的构造示意图

Fig. 1 Sketch of SWP method

国内武汉的一起著名“毒地”事件及近期中央电视台新闻频道【新闻1+1】的专题报道为我们敲响了警钟^[3,4,5].

土壤 VOCs 污染的人工净化治理是一个世界性难题. 国内外专家提出过许多处理方法, 相关研究者分别提出了铁粉、氧化剂或微生物净化法, 以及利用污染物质的挥发性而采取的各种原位曝气法等进行处理. 原位净化法中还有土壤气提法和空气喷射法(Air Sparging)两种. 但是这些方法都由于成本高、处理手段复杂或修复效果不佳等原因而无法大规模实施. 目前国内一般采用整体搬移焚烧法来进行处理或干脆放置不进行处理.

最近由日本高桥茂吉等人发明的 SKK 工法, 以其施工简单、成本低、效果确实可靠而获得了日本产业界的高度重视^[6,7,8], 并在日本各大专业报纸和杂志获得了广泛报道^[9,10,11].

SKK 工法是先进的地下水扬水工艺 SWP 工法的一项具体应用技术, 采用 SKK 工法可以对地下污染水和地下污染空气进行有效的回收, 借此技术可以有效地达到“地层改良”和“土壤有机物污染净化”的目的.

1 SWP 工法

SWP 工法是利用真空泵和潜水泵来降低地下水位的一种专利施工方法^[12]. 该工法采用对扬水井井筒构造的特殊设计, 使得真空泵和潜水泵的扬水能力获得了极大的提高. 该工法主要应用于挖掘工程中的扬水工程.

1.1 SWP 井筒的设计构造

SWP 工法的井筒工艺设计如图 1 所示. 井筒上下完全封闭, 顶部设置有扬水孔和空气吸引孔, 底部只有吸水孔. 汽水分离隔膜一直延伸到吸水孔的底部并环绕井筒. 井筒根据施工要求采取数米长的钢管熔接制成. 具体规格如表 1 所示. 井管设置后, 周围填充沙砾.

1.2 SWP 工法的工作原理^[12,13]

SWP 工法的工作原理图如图 2 所示.

简单地说, SWP 工法就是通过真空泵将井筒内的空气抽掉, 形成井筒内负压来造成地下水的聚集, 再利用潜水泵将从吸水孔进入井筒内的地下水抽取出来的工艺方法.

通过真空泵的吸引, 井筒内的空气成为负压, 导致吸水孔附近的地下水也成为负压. 而目前通常采用的深井工法(Deep Well 工法, 简称 DW 工法)的井筒内的水面为大气压(压力=0). 因此, 与 DW 工法相比, SWP 工法会导致更多的地下水流入井内. 所以, SWP 工法的抽取地下扬水量要比

DW 工法大得多. 在 SWP 工法中, 真空泵承担施加负压和集水作用, 而潜水泵则承担扬水作用.

利用汽水分离隔膜将土壤中的水分和空气隔开, 并将水面上的空气吸入井内而导致井内负压减弱. 但是, 因其空气量位于 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 范围内, 对应的负压为 $-0.08 \sim -0.06 \text{ MPa}$, 因此, 不会导致

表 1 SWP 井筒规格

Tab. 1 The specification of SWP well

种类	项目	内容
挖掘	挖掘机械	φ550mm(冲钻)
	泥水	粘土水
构造材料	井筒	φ400mm, t=7.9mm 钢管
	汽水分离隔膜	φ450mm(分离型)
	扬水管	φ100mm
(井管底部)	吸水孔	φ100mm, 4 段 4 孔 H=45cm
(上盖)	空气吸引孔	φ25mm
	扬水孔	φ100mm
装置	真空泵	380V, 11kW
	潜水泵	380V, 11kW
(SKK 工法)	气泵	380V, 3.7kW

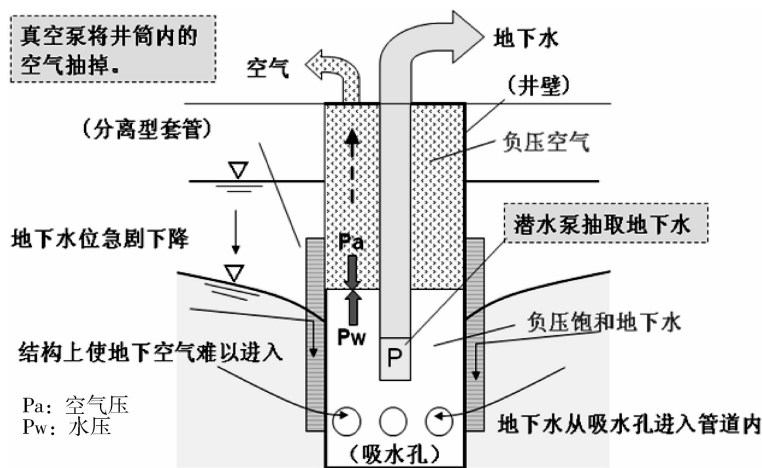


图 2 SWP 工法的工作原理图

Fig. 2 The fundamental diagram of SWP method

地下水的集水能力大幅下降,而由于地下空气被抽掉,使得土壤中的间隙水减压蒸发并成为水蒸气被抽走,因此,最终可产生地层中土壤的含水量下降的效果,这对地下土壤的挖掘和搬运带来了极大的方便.表 2 为实验测定的在不同土质条件下的 SWP 法与 DW 法除水能力的对比.由表 2 对比数据可知,SWP 工法具有比 DW 工法高得多的扬水能力,而且土壤的透水系数越小,则其扬水能力差距越大.

图 3 为 SWP 工法与 DW 工法扬水量的对比照片.从图中可以看出,在相同的地质条件下,SWP 工法的扬水量达到 500 l/min,而 DW 的扬水量只有 15~50 l/min. SWP 工法的扬水量是 DW 工法的 10 倍以上.

地下水不论是饱和带水还是非饱和带水都是按照达西定律进行流动.因此,一般将地下水位以下的饱和带水用正压,地下水位以上的非饱和带水用负压表示.通过数值解析和试验验证表明,SWP 工法给井筒内的饱和带地下水施加了负压.

SWP 工法的另一大特点是如果将施工范围用隔水板(如钢板等)封堵后,其扬水过程可以极大地降低内部的地下水位,而对其外部地下水位不会产生太大的影响.这一点也通过数值分析和实际现场工程予以了验证. DW 工法因扬水能力过小,会对隔水壁外部的

表 2 不同土质的 SWP 工法与 DW 工法的扬水能力比较

Tab. 2 SWP and DW in different soil compared		
土质名	透水系数 /(K/cm·sec ⁻¹)	SWP/DW/%
粗砂	1.1~3.6×10 ⁻¹	120~250
中粒砂	2.2~7.5×10 ⁻²	150~300
细沙	2.6×10 ⁻³ ~1.4×10 ⁻²	200~500
极细砂	4.6×10 ⁻⁴ ~1.8×10 ⁻³	300~1 000
淤泥	1×10 ⁻⁵ ~2.8×10 ⁻⁴	500~2 000
粘土	<3×10 ⁻⁶	500~2 000



图 3 SWP 工法与 DW 工法的扬水量对照

Fig. 3 The pumping comparison between SWP and DW

水位产生较大的影响.而 SWP 却没有这个缺点.

SWP 工法运行前需要对井筒及其周围地基予以清洗,这是一项非常重要的操作,清洗结果会直接影响其扬水能力. SWP 工法因为可以同时地下水对地下空气进行强力回收,因此容易导致周围地层的粘土和淤泥的移动,导致汽水分离隔膜被堵塞.因此,还需要采用洁净水和压缩空气不断地打入地下进行反清洗.通过以上的循环往复过程来保持周围地层内部良好的透水性.

2 SKK 工法

SWP 工法的一个最大的特点是能在大量抽取地下水的同时,还可将地下水位上部的土壤空气抽取出来.图 4 是建立在 SWP 工法基础上的地下 VOCs 污染土壤净化的一种全新施工方法示意简图,我们简称为 SKK 工法.针对土壤污染净化的特殊要求,本研究对 SWP 工法作了如下改进措施.

- (1) 沿着井筒壁增加了吸引管,通过气泵(鼓风机)吸引;
- (2) 将处理区域用钢制隔水板隔离封闭;
- (3) 地表采用空气阻断隔膜与外气隔断.

通过以上这些改进措施即能有效地在除去地下 VOCs 污染水和吸引地下空气的同时,减压蒸发抽

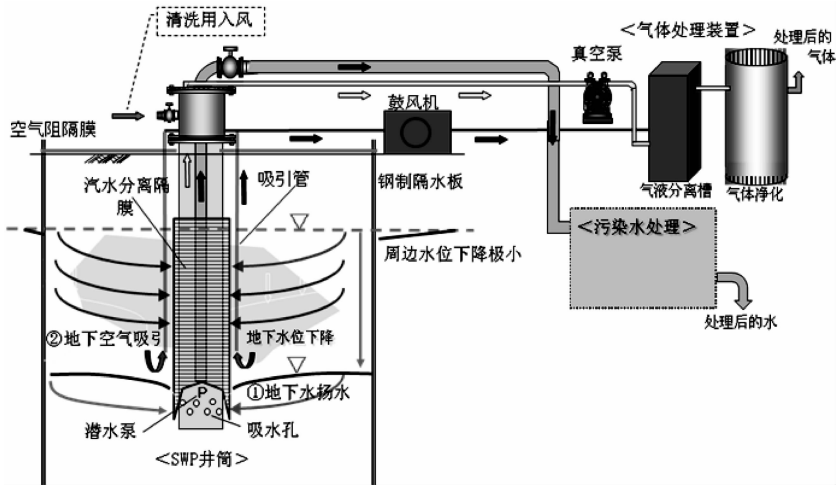


图 4 SKK 工法示意简图

Fig. 4 Sketch of SKK method

取地层中的间隙水和挥发性物质(VOCs和苯等)。

改进措施(1)是为了补充采用真空泵吸引地下空气的能力,使二者效果相加提高负压和回收效果。改进措施(2)是为了使地下水位降低到比污染区域更低的位置,同时减少对区域外水位的影响以及防止区域外地下空气的进入。改进措施(3)是为了防止地表外的空气进入地层土壤中,其与改进措施(2)均可增加地层内的负压效果。

韩国釜山铁路某隧道工程的地层因是粘性土壤(粘土、淤泥),因含有大量水分,导致大型机械挖掘作业极为困难。利用SKK工法对其地层土壤进行了改良后,其结果大大降低了地层土壤的含水率,导致大型机械施工能够顺利进行。施工现场采用SKK工法抽出的地下空气现场照片如图5所示。



图5 地下空气抽取的现场照片

Fig. 5 Photo of underground gas

3 土壤 VOCs 污染净化治理试验

以下是采用SKK工法对受到苯等物质污染的土壤和地下水进行净化治理的实例。

3.1 污染现场概要

本次需要处理的污染土壤面积约 930 m^2 , 其中受到苯等有机物污染的面积约为 185 m^2 , 高浓度含油土壤约 225 m^2 。另外, 地下水污染面积约为 680 m^2 。从地表至 $\text{GL}-2\text{m}$ 为埋土, 至 $\text{GL}-8\text{m}$ 为沙层, 然后为淤泥层。自然地下水位约在 $\text{GL}-1.6\text{m}$ 附近。

3.2 污染范围及对策

污染区域采用钢制隔板隔离, 隔板深度为 $(\text{GL}-9\text{m})$ 。在土壤污染浓度较高的地方设置1个SWP井筒 $(\text{GL}-9\text{m})$ 。由于实际污染深度在 $\text{GL}-1\text{m} \sim \text{GL}-4\text{m}$ 的范围内, 因此, 本施工将地下水位降低的目标值确定为 $\text{GL}-5\text{m}$ 以下。汽水分离隔膜的设置区间为 $\text{GL}-2\text{m} \sim \text{GL}-7\text{m}$ 。污水及废气处理设施置于钢制隔板之外, 通过管道连接。排放水的标准按照日本下水道排放标准执行。

地表用塑料薄膜覆盖并灌水, 隔断地表与外气的接触。

3.3 观测孔设置

在钢制隔板内设置4个观测孔(MW), SWP井筒旁设置1个, 钢制隔板外设置1个。另外, 在钢制隔板内还设置用于测定地下空气压的观测孔(AW)4个。井筒(孔)布置平面图如图6所示, 断面图由图7所示。该区域的污染浓度和净化目标如表3所示。

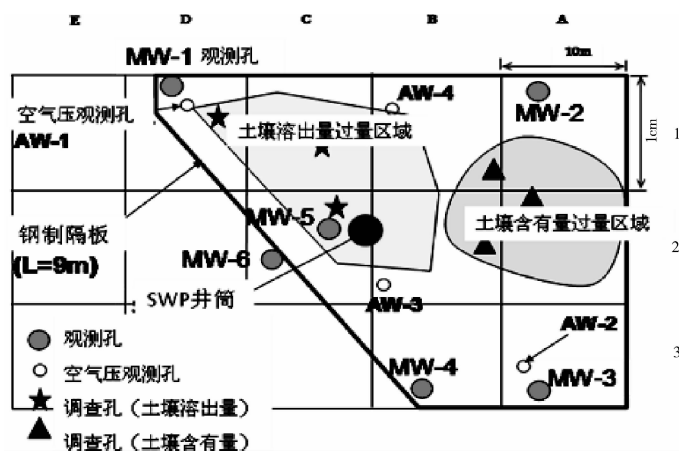


图6 井筒(孔)布置平面图

Fig. 6 Layout plan for purification treatment

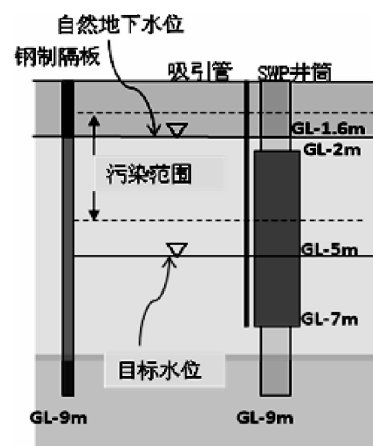


图7 井筒(孔)布置断面图

Fig. 7 Sectional drawing for purification treatment

3.4 净化状况及结果分析

SWP 井筒设置开始至净化施工结束共计 95 d,其中净化施工 59 d. 去除准备时间和洗净时间,实际施工时间为 46d. 施工为 24h 昼夜不停,但施工结束前夕改为只在白天进行.

施工期间的地下水位的变化如图 8 所示.

从图 8 可以看出,施工前隔板内外的地下水位均为约 GL-1.6m,净化施工开始后,其内部水位(MW1~MW5)下降到 GL-5m~GL-6m,而此时隔板外部的地下水位最大值只下降了 0.5m 左右.

图 9 是从地下空气观测孔所获得的不同施工日数时的地下空气压测定值. 从该图中可以看出,地下空气压随距井筒的距离增加而下降,井筒内显示-1 000 cmH₂O 的负压时,在距井筒 4m 处的地下空气压为-100 cmH₂O,而位于隔板附近距井筒 15m 处的地下也显示出-10~-30 cmH₂O 的负压. 其负压值远远高于其他土壤气提法的负压值.

地下水的苯浓度、苯的土壤溶出量和土壤油含油量的净化结果如图 10、图 11 和图 12 所示.

图 10 是从 5 个地下水观察孔中获得的数据,从图 10 中可以看出,施工后 50d 地下水的苯含量均降到了标准值以下. 到施工结束时,所有观察孔中的地下水再未检测出苯含量.

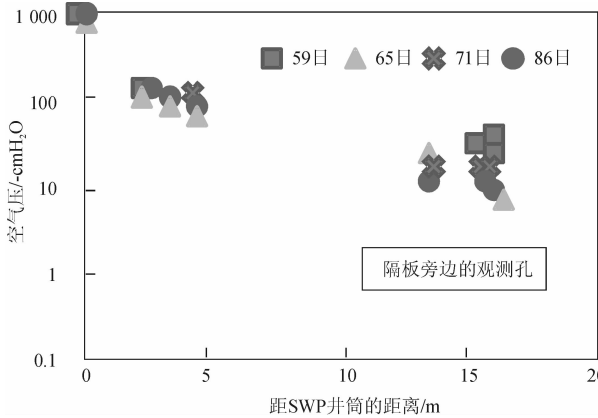


图 9 地下空气压的变化
Fig. 9 Changes of underground air pressure

表 3 污染浓度和净化目标				
Tab. 3 Pollution concentration and purification target				
污染物质	污染项目	最大值	标准(净化目标)	污染深度 / (GL·m ⁻¹)
苯	土壤溶出量	0.58 mg/L	0.01 mg/L 以下	-1~-3
苯	地下水	5.1 mg/L	0.01 mg/L 以下	
油类	土壤含有量	8 000 mg/kg	1 000 mg/kg 以下	-1~-4

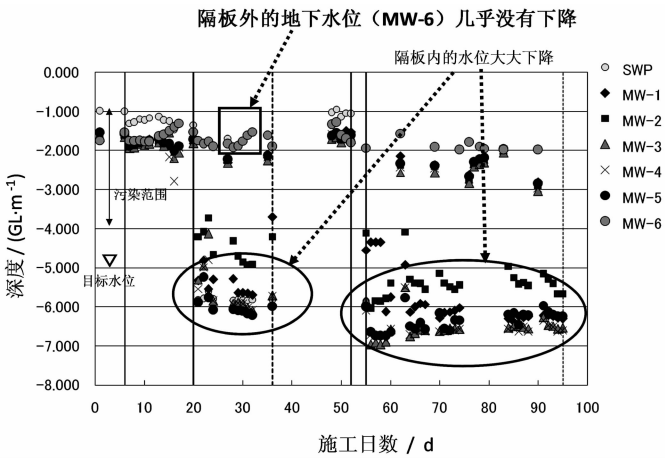


图 8 地下水位的变化

Fig. 8 Changes of groundwater

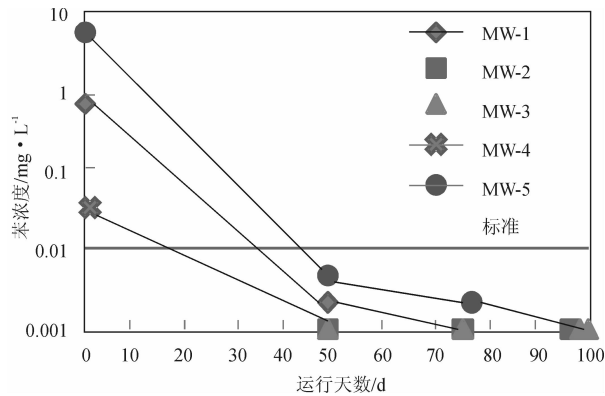


图 10 地下水苯含量的变化
Fig. 10 Changes of benzene content in groundwater

图 11 是从苯的土壤溶出量超标的区域(C2)中的 3 个不同位置所采取的测定值. 从图中可以看出,各深度均出现先上升然后再下降的现象. 这是由于地下水和地下空气均向井筒方向流动,导致在净化施工初期井筒周围苯的浓度增加,但随着施工时间的增加,大部分的污染物被回收,而导致苯浓度再次下降. 本次处理中,在 1m 深度处未达到标准值以下,我们认为这是由于塑料薄膜上的水渗入地下的缘故.

图 12 是从含油量高的 3 个区域(A2、B1、B2)中,在不同时间和不同深度采取的土壤含油量测定值. 从图中可以看出,3 处均与处理时间呈单调减少. 最终全部达到预定目标值 1 000 mg/kg 以下.

SKK 工法彻底克服了目前原位曝气法所面临的技术困难. 它可以使地下的饱和层变为非饱和层,

因此使得曝气可以充分进行,同时处理的性价比极高.据测算处理1亩土地的大致处理费用约在50万元左右,是目前为止性价比最高的土壤VOCs处理技术.

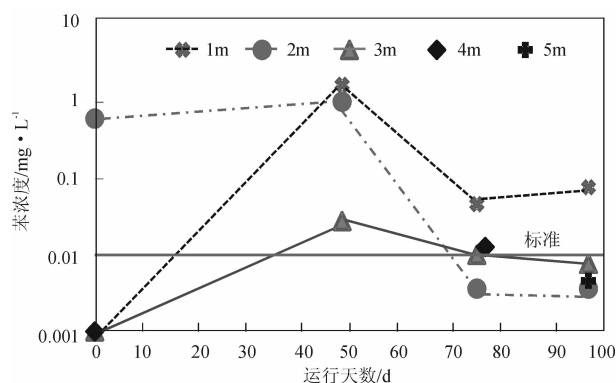


图 11 土壤中苯含量的变化

Fig. 11 Changes of benzene content in soil

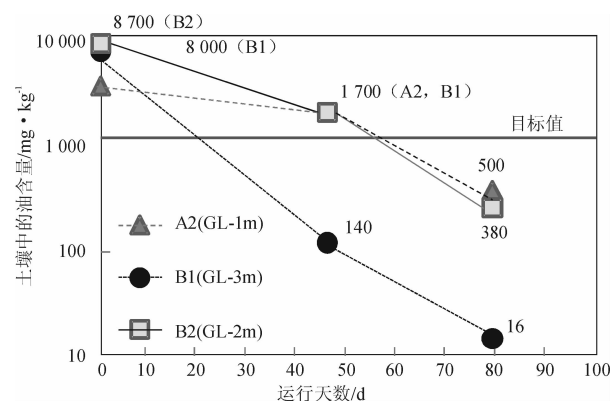


图 12 土壤中油份含量的变化

Fig. 12 Changes of oil content in soil

4 结 论

(1)采用真空泵吸气和潜水泵扬水相结合的 SWP 工法,具有比目前为止的扬水工艺更强的扬水能力.与其他工艺相比,对于不同的地层土质,其扬水能力在120~2 000%以上.因此可以在短时间内迅速地降低需处理地层内的地下水位.

(2)针对地层土壤 VOCs 净化治理的特殊要求,在 SWP 工法的基础上,通过增加吸引管、设置钢制隔水板和土壤表面空气阻断隔膜,最终达到了快速有效地去除地下 VOCs 污染水和吸引地下空气的同时,通过减压蒸发抽取地层土壤中的间隙水和挥发性物质(VOCs 和苯等)的效果.

(3)实地土壤净化工程及测试表明,当地下水位达到目标值 GL-5m 以下,净化区域内的地下空气负压均达到-10 cmH₂O 以上.

(4)处理后的受到苯污染的地下水均达到环境标准以下,同时,土壤油份含油量达到目标值 1 000 mg/kg 以下.而苯的土壤溶出量虽然在较浅深度未达标,但其他深度的土壤溶出量均达到环境标准以下.

SKK 工法是目前为止性价比极高土壤 VOCs 工程处理技术.可有效地解决目前在国内广泛存在的有机物污染的工程治理难题.

参考文献 References

- [1] 马放,冯玉杰,任南琪.环境科学技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
MA Fang, FENG Yu-jie, REN Nan-qi. Environmental science and technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [2] 国家环保局.中国环境保护21世纪议程[M].北京:中国环境科学出版社,1995.
Ministry of Enviro. Prot. of the PRC. Agenda 21 of environmental protection in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [3] 傅宇凡.城市化与毒地困境[J/OL]. <http://house.focus.cn/news/2010-06-02/950742.html>, 2010.06.
FU Yu-fan. Urbanization and the dilemma of the toxic land[J/OL]. <http://house.focus.cn/news/2010-06-02/950742.html>, 2010.06.
- [4] 中国环境修复网.长三角土壤遭罕见污染物 专家推测与洋垃圾有关[J/OL]. http://www.hjxf.net/special/2008/0806/article_34.html, 2008.08.
China's Environmental Restoration Network. Rare Pollutants in soil were found in Yangtze River Delta and the experts speculated that related to the imported garbage[J/OL]. http://www.hjxf.net/special/2008/0806/article_34.html, 2008.08.
- [5] 中央电视台新闻频道,[新闻1+1],“中毒的”土地[J/OL]. <http://news.cntv.cn/China/20101203/112046.shtml>,

- 2010, 12.
CCTV News Channel, [News 1+1]. "Toxic" lands[J/OL]. <http://news.cntv.cn/china/20101203/112046.shtml>, 2010, 12.
- [6] 尾崎哲二, 高橋茂吉, 高橋慶吉, 等. すっからかーん工法による土壤・地下水汚染の浄化[J]. 環境浄化技術. 2010, 02, 9(2):35-40.
OZAKI Tetsuji, TAKAHASHI Shigeyoshi et al. The purification of polluted soil and groundwater by SKK method [J]. Environmental purification technology. 2010, 02, 9(2):35-40.
- [7] 高橋茂吉. 地下水位低下装置、地盤改良方法およびストレーナ装置. 日本: 2000-027170[P], 2000.
TAKAHASHI Shigeyoshi et al. Groundwater level lowering device, ground improvement method and strainer device. Japan: 2000-027170[P], 2000.
- [8] 高橋茂吉. 汚染地盤浄化装置及びその方法. 日本: 2007-296527[P], 2007.
TAKAHASHI Shigeyoshi et al. Purification apparatus for contaminated soil and its method. Japan: 2007-296527 [P], 2007.
- [9] 県建設技術振興課. 新技術等活用促進事業[N]. 日刊岩手建設工業新聞. 2007. 10. 17; 1.
County construction technology development division. Promotion of the use of new technology [N]. Nikkan Iwate Kensetsu kogyo Shinbun. 2007. 10. 17; 1.
- [10] 特別報道. 油浄化に大きな効果[N]. 環境新聞. 2008. 03. 12; 1.
Special Press. Significant effect on oil cleanup [N]. Kankyo shinbun. 2008. 03. 12; 1.
- [11] 社説. 工業事業コスト削減の契機に[N]. 日刊工業新聞. 2008. 4. 29; 2.
Editorial. An opportunity to reduce the operating costs of Industrial Construction [N]. Nikkan Kogyo Shimbun. 2008. 4. 29; 2.
- [12] 高橋茂吉. 大深度真空排水・圧密脱水工法におけるストレーナ装置及びそのストレーナ装置による施工方法. 日本: 2005-232721[P], 2005.
TAKAHASHI Shigeyoshi et al. Strainer device for use in deep vacuum draining-compaction method, and civil engineering work executing method using the strainer device. Japan: 2005-232721[P], 2005.
- [13] 尾崎哲二、高橋茂吉、中山比佐雄、神野健二. 真空ポンプを利用した新しい地下水位低下工法[J]. 日本土木学会誌. 2007. 08, 92(8):40-45.
OZAKI Tetsuji, TAKAHASHI Shigeyoshi et al. A new method for groundwater drawdown using vacuum pump [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers. 2007. 08, 2007. 08, 92(8):40-45.

Remediation of VOCs contaminated soil by SKK method

MENG Zhao¹, YANG Yun¹, TAKAHASHI Shigeyoshi², MATSUMOTO Haruhiko²

(1. College of Material Science & Technology, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. Asahi Techno Corporation, Iwate 0240322, Japan)

Abstract: SWP method invented in Japan in recent years is a successful efficient new pumping technology for excavation project, and its pumping efficiency is several times higher than the current pumping methods. The unique performance of the SWP method is described by the technical analysis and data comparison. SKK method is based on the SWP method and some technical improvements, which can effectively purify the VOCs and oil contaminated soil, groundwater and soil gas, resolved the technical problems of Soil Stripping Method which can't purify the contaminated soil under water saturation level. Purification field test shows that using SKK method, contaminated soil and groundwater by VOCs and oil can be purified in short time, and can reach the requirements of the national environmental standards within a short period of time.

Key words: soil; VOCs; pollution treatment; soil stripping method; SKK method; SWP method

Biography: MENG Zhao, Ph. D., Assistant professor, Xian 710054, P. R. China, Tel: 0086-15332306998, E-mail: moonshow1963@163.com