

珊瑚岛礁淡水透镜体的生物修复研究

周从直,赵素丽, 譙 华

(后勤工程学院 营房管理与环境工程系,重庆 400016)

摘要: 运用半模理论,研制了高 1.2 m、直径 1.5 m 的半圆柱体实验平台,对受到有机污染的珊瑚岛礁淡水透镜体进行原位曝气生物修复研究。研究了溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)在地下水中的分布规律及脱色和化学耗氧量(Chemical oxygen demand, COD)的去除效果。结果表明:(1)径向上,在主流区半径 R 为 0.2~0.5 m 的范围内,DO 的质量浓度随 R 的增大而增大。 $R > 0.5$ m, DO 的质量浓度随 R 的增大而降低。垂向上,DO 的质量浓度随高度的增大而迅速增大。(2)地下水色度和 COD 均随曝气时间的增加而降低,色度为 40 度、COD 为 96 mg/L 的原水,曝气 18 d 后,色度均不超过 15 度,曝气 30 d 后,色度不超过 10 度, COD 为 21~36 mg/L。以色度不超过 15 度作为修复的标准,修复区半径 R 达 0.7 m,修复区高度 H 为 0.9 m。(3)修复 1 m³ 的上述原水和 1.3 m³ 土壤所需的空气量约为 211 m³。

关键词: 珊瑚岛礁;淡水透镜体;生物修复
中图分类号: X523 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2008)04-0068-05

珊瑚岛礁是由珊瑚和其他造礁生物在长期地质年代中营造而成的海底隆起构造,集中分布在热带海域和有暖流经过的洋面,雨量充沛,植被繁茂。以中国西沙永兴岛为例,年均降雨量达 1 600 mm,岛上遍布麻风桐、羊角树。由于特殊的珊瑚地质条件,岛上没有可供饮用的地表淡水,仅有雨水通过地表枯枝落叶和碎屑砂砾渗入地下形成的淡水水体,其存在形态为中央厚,边缘薄,宛如一枚透镜^[1],称为淡水透镜体,是珊瑚岛上十分重要的淡水资源,它的开发应用具有重大的经济、军事和社会效益。但是,淡水透镜体受到严重的有机污染,色度高,达到 40 多度,有异味,不经处理不能饮用^[2]。传统的方法是把水抽到地面处理,这种异位处理技术,效果好,但是操作麻烦,沉淀污泥和用过的废料堆积到岛上易造成淡水透镜体的二次污染。地下水原位生物修复技术可根据现场条件,在不破坏地下水自然环境的条件下,将受污染的地下水进行修复,处理效果好、费用低、操作方便,而且不会造成二次污染^[3],是一项极有价值的珊瑚岛礁淡水透镜体有机污染修复技术。

1 透镜体的水质特征

中国的珊瑚岛主要分布在南海海域,最大的主岛西沙永兴岛,面积约 2 km²,岛上没有大规模的工业,也无现代农业,常住居民为海防军人和渔民。因此,珊瑚岛礁淡水透镜体受到的污染来自自然污染和生活污染。岛上井水水质分析表明:(1)色度严重超标。所有井水均有深浅不同的黄色。色度一般在 30~50 度之间,最高达 72 度。形成色度的原因主要是水中存在腐殖质类致色有机物,是由雨水通过地表腐烂的枯枝落叶渗入地下时带入的。(2)大多数井水有臭和异味。透镜体中有机物的分解、水中酚类物质会产生某些具有臭和异味的挥发性气体。

(3)部分水井总硬度超标。部分井水的总硬度超标,最高达 621 mg/L。硬度由钙、镁离子物质组成,珊瑚礁的主要成分是碳酸钙,在与水接触的过程中必然有大量的钙离子溶入透镜体中。(4)部分水井氯化物超标。部分井水的氯化物超标,最高达到 779.6 mg/L。氯化物来自海水在珊瑚砂砾空隙中的机械弥散作用。

除上述几个指标超标外,其余指标均满足生活饮用水水质标准。因此,处理受有机污染的珊瑚岛礁淡水透镜体应以脱色、除臭、除味为主,适合用生物修复技术处理。

2 生物修复技术

上个世纪 80 年代,美国为治理渗入地下的石油,提出了地下水生物修复技术^[4],基本原理是将氧输送到修复区,在有氧条件下,微生物将有机物摄入体内,作为营养源以两种途径进行代谢。一合成,部分有机物被微生物利用,合成新的细胞物质;二分解,部分有机物被分解成 CO₂ 和 H₂O 等稳定物质,并产生能量,用于合成代谢。同时,微生物的细胞物质也进行自身的氧化分解,即内源呼吸,最终使有机物浓度降低。实践证明,这种生物修复方法最为有效^[4,5]。中国 20 世纪 90 年代,也开始运用生物修复技术去除重金属、N、P 和可生物降解聚合物及固体废物,近年转向氯代有机物、石油污染物的生物降解和固体废弃物的生物处理等^[6]。

受污染地下水和土壤的生物修复技术,按供氧方

收稿日期:2006-09-18;修回日期:2008-01-14

基金项目:总后勤部基金项目(总后[2004]后司字第 56 号)

作者简介:周从直(1940-),男,四川洪雅人,教授,主要从事水处理、水污染控制理论及技术研究,电话:023-68597268, E-mail: zhi4012@163.com

式可分为井内曝气和层内曝气两类。井内曝气是在修复区凿井,将空气导入井内曝气,向地下水供氧^[7];层内曝气是在较高的压力下,把空气注入到地下含水层中,注入的空气与含水层介质中吸附态和水中游离态的污染物质直接接触,污染物通过生物降解去除^[8]。层内曝气可以利用空气和水的密度差,促使地下水循环,其作用范围不限于井筒内,而是在较大范围的含水层内,这种方法适合从沙土到黏土的一系列土壤^[9]。

3 实验装置与方法

3.1 实验装置的研制

层内曝气形成的地下水循环流,是以井轴为对

称轴的轴对称流。根据半模理论,实验研究可用半模型进行。装置设计成高度 1.2 m,半径 0.75 m 的半圆桶,在半圆桶的平面中央,竖向布置曝气井,两侧同高程上等间距交叉布置取样孔,编号 1~36。曝气井为直径 10 cm 的半圆管,中央设通气管,直径 3 cm,亦为半圆管。两个半圆管与半圆桶平面连接处用胶密封,通气管由连接管与空压机相连。曝气井顶部和底部各有一段筛网,顶部筛网长 0.38 m,底部筛网长 0.28 m,网眼直径为 3 mm,间距也为 3 mm,为防止沙子堵塞网孔,筛网段用 1 μ m 的滤布覆盖。在曝气井与通气管之间,分层填充砾石和黏土。曝气井外填充与珊瑚砂土级配相同的石英砂土。整个装置如图 1 所示。

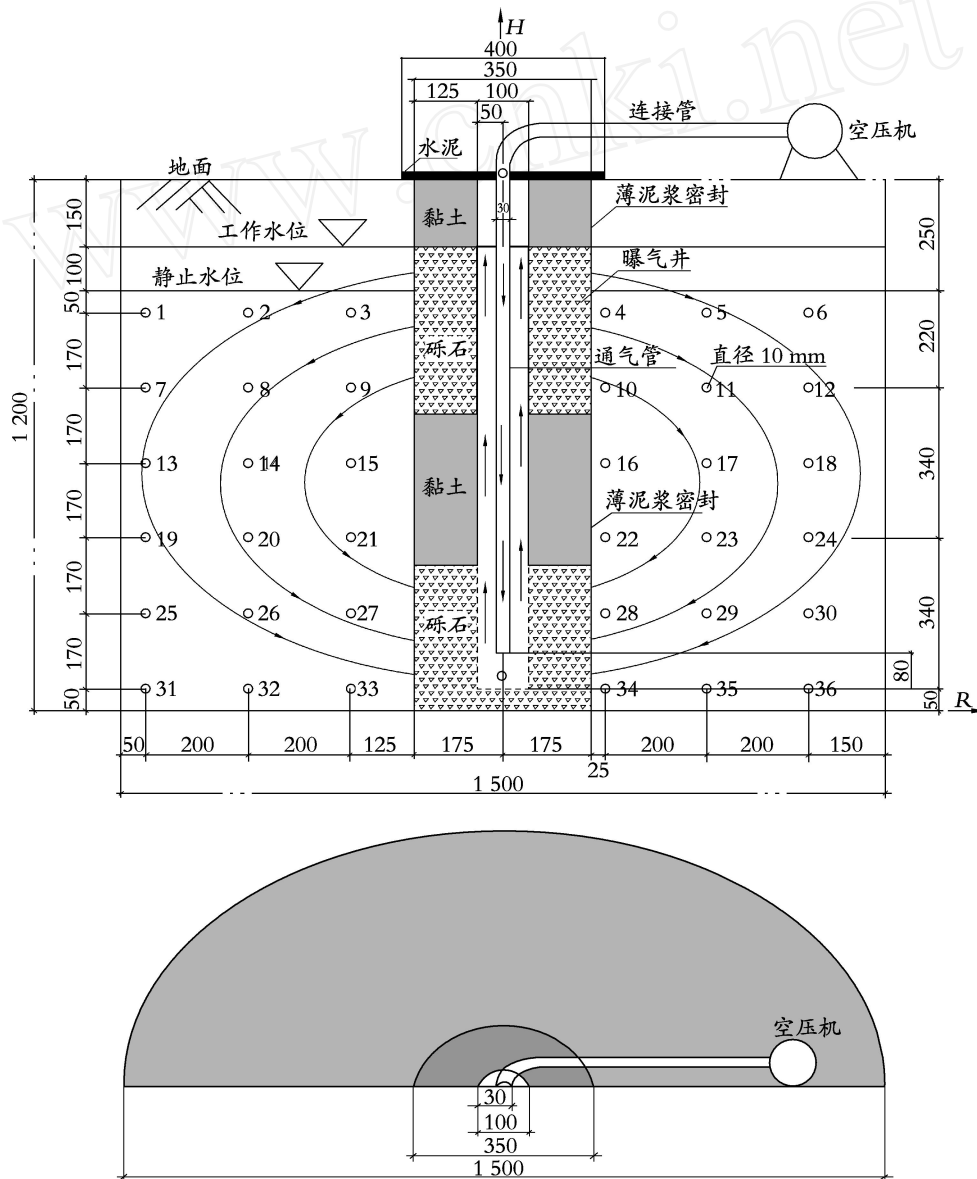


图 1 半模实验装置

Fig. 1 semi-module experiment equipment

这一装置的优点是:(1) 利用流动的轴对称特性,可真实地模拟地下水在井筒周围的循环。(2) 同一半径上,各点水力特性相同,为取样点的布置带来了方便。(3) 圆柱面上受力均匀,避免了大的结构变形。(4) 半模与全模比较,减少了体积、节省了材料、减轻了质量、节约了实验空间。(5) 通气管、曝气井采用半管,降低了曝气量,节约了动力费用和实验成本,并且安装方便。

运行原理:空气经空压机注入到曝气井的底部释放,以气泡形式向上运动,形成气水混合物,密度小于水的密度。曝气井下部筛网附近含水层中的地下水在压差的作用下进入曝气井,沿井筒上升。井上部有黏土层密封,富含氧的地下水携带气泡从上部的筛网返回含水层,井内和井外的地下水形成循环流动。在这一过程中,地下水和空气接触,传质作用不断发生,饱和层内有机污染物在在有氧条件下得到生物降解,同时,气提作用也使挥发性有机污染物不断从饱和层内去除。从井上部进入含水层的气水混合物,再将包含挥发性有机污染物的空气释放到不饱和层,其中剩余的氧气被土著微生物利用,从而使气提出的污染物和存在于不饱和层的污染物一起得到降解。

3.2 实验方法

3.2.1 实验用水

实验用水为污染特征和色度与珊瑚岛礁淡水透视镜体相一致的池塘水,其主要污染物为腐殖质,有明显的臭味,色度为 40 度,COD 为 96 mg/L。

3.2.2 实验方法

设定饱和含水层的高度为 0.9 m,非饱和层的高度为 0.3 m,将池塘水注入实验装置,启动空压机,将空气输入井底。实验持续运行 30 d,前 15 天曝气压力为 0.06 MPa,曝气量为 0.25 m³/h;后 15 天曝气压力为 0.07 MPa,曝气量为 0.3 m³/h。实验期间,每 3 天从取样孔抽取水样,检测 DO、色度、COD。DO 采用美国 YSI 公司的 YSF-5000 型溶解氧仪测定;色度采用铂-钴比色法和 S-53 可见分光光度计测定;COD 采用美国 HACH 公司的 DR-2010 型 COD 仪测定。实验期间水温 23~26 °C。

4 实验结果与讨论

4.1 DO 的变化

从第 18 取样孔取样,测量 DO 随时间的变化,结果见图 2;曝气 3 h,取第 13~18 和第 5,11,17,23,29,35 取样孔,分别取水样测量 DO 质量浓度随半径和高度的变化,结果见图 2。

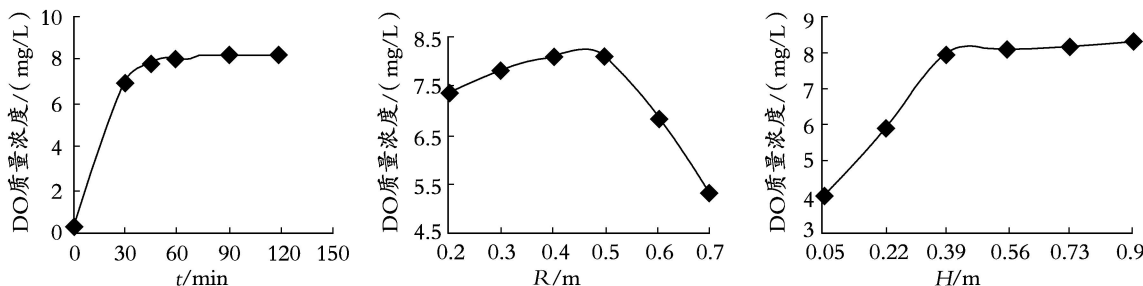


图 2 DO 质量浓度随时间、半径和高度的变化

Fig. 2 Variation of DO with aeration time, radiuses and height

图 2 表明,曝气使地下水中 DO 质量浓度迅速上升,曝气 30 min,DO 从 0.4 mg/L 上升到 7.0 mg/L,曝气 1 h 后达到稳定状态,为 8.02 mg/L,接近该温度条件下的饱和溶解氧。丰富的 DO 保证了生物降解的顺利进行。在半径 R 为 0.2~0.5 m 的范围内,DO 质量浓度随 R 的增大而增大,最大值为 8.12 mg/L;在 0.5~0.7 m 的半径范围内,DO 随 R 的增大迅速降低,最低值出现在半径最大处,为 5.27 mg/L。这表明地下水中存在 DO 较高的区域,这一区域是循环水流量较大的区域,称为主流区。

从图 2 还可看出,在装置的上、下部,DO 质量浓

度差异明显,最上端为 8.37 mg/L,最下端为 4.12 mg/L,相差 4.25 mg/L。下部 DO 低,原因是富含 DO 的地下水从曝气井的上部流出,在向下迁移的过程中,一部分 DO 被微生物利用而减少,同时扩散和弥散又使 DO 向径向方向输移。

根据测试数据,实验装置的主流区在 $R \leq 0.6$ m, H 为 0.2~0.9 m 范围内。但有效作用范围更大。

4.2 色度和 COD 的变化

和研究 DO 空间分布的方法相同,仍取第 13~18 和第 5,11,17,23,29,35 取样孔,取水样测量色度、COD 质量浓度随半径和高度的变化,结果见图 3~6。

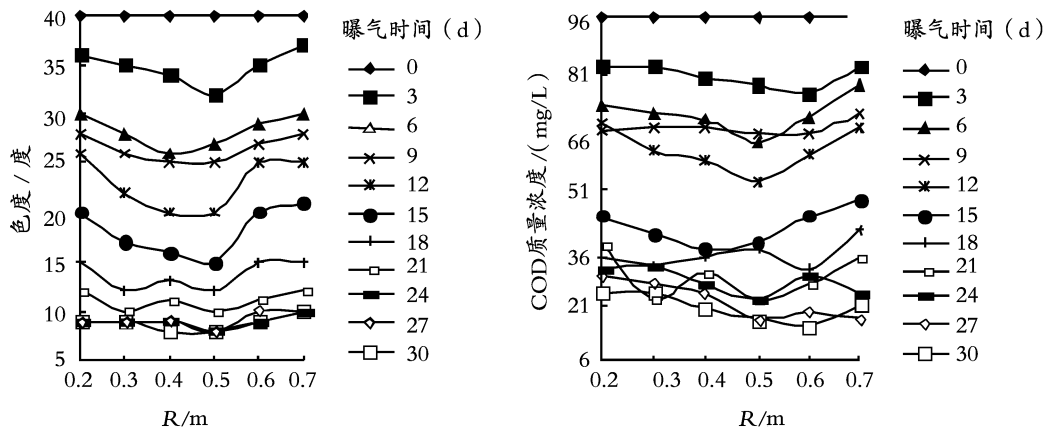


图3 色度和 COD 随半径的变化

Fig.3 Color and COD at different radiuses

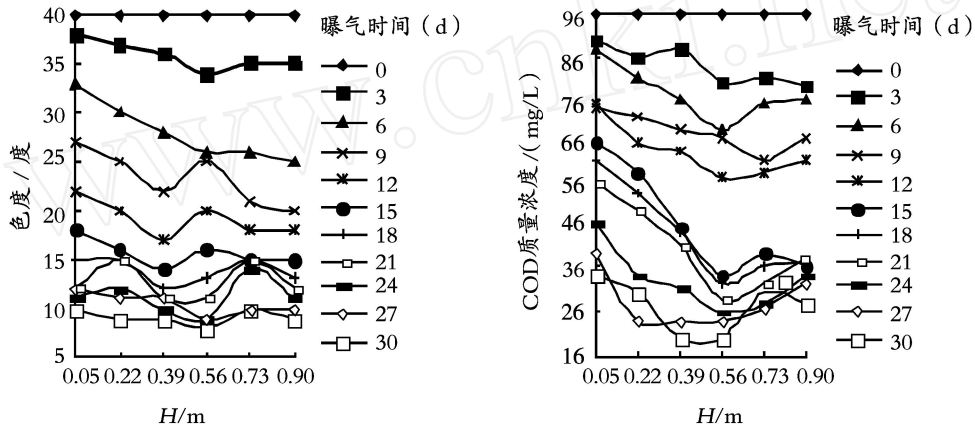


图4 色度和 COD 随高度的变化

Fig.4 Color and COD at different heights

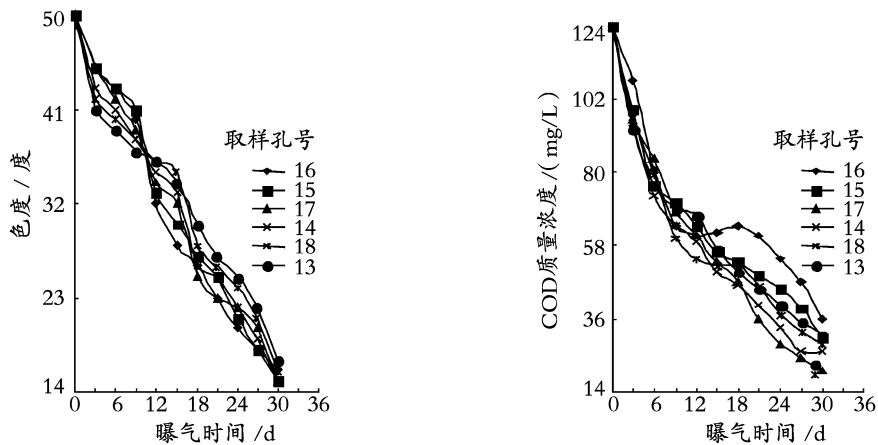


图5 径向色度和 COD 随时间的变化

Fig.5 Variations of color and COD with aeration time in radius direction

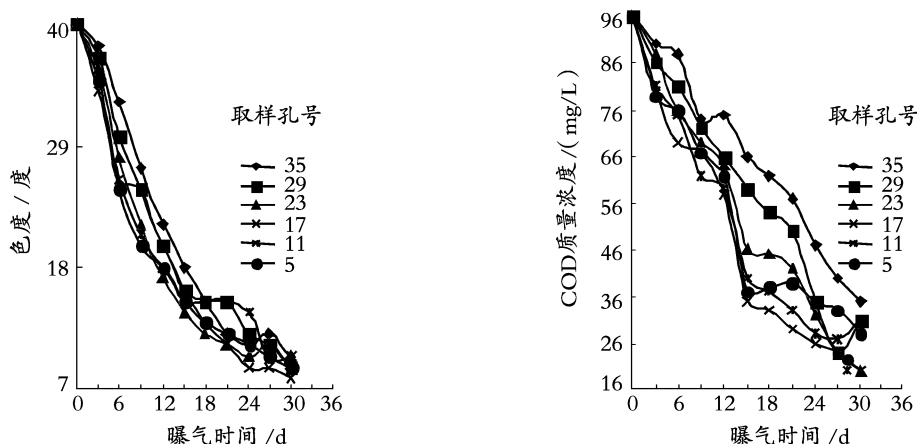


图6 垂向色度和 COD 随时间的变化

Fig. 6 Variations of color and COD with aeration time in vertical direction

由图 3 可见,径向上,色度和 COD 总体是先随 R 的增大而降低,而后随 R 的增大而上升,最低点出现在大约 $R=0.5\text{ m}$ 的位置上。这一变化趋势正好对应了地下水 DO 的分布规律,由图 2 可知,在主流区的 $R=0.2\sim 0.5\text{ m}$ 范围内,随 R 的增加,DO 逐渐增高, $R=0.5\text{ m}$ 时 DO 最高;之后,虽然 DO 随 R 的增大而降低,但在 $R<0.6\text{ m}$ 时,仍保持了较高的水平,充裕的溶解氧为微生物的代谢作用提供了良好的条件,所以,这一区域色度和 COD 质量浓度都较低。此区域外,循环水流量小,DO 质量浓度低,微生物降解污染物的效果比主流区差,色度和 COD 质量浓度偏高。

在垂向上, $H=0.05\sim 0.4\text{ m}$ 的范围内,色度和 COD 随 H 值的增加迅速降低,在 $H=0.4\sim 0.9\text{ m}$ 的范围内,随 H 增加色度和 COD 降低缓慢,并有小幅振荡。但总的趋势是随 H 的增大,色度和 COD 质量浓度逐渐降低,如图 4 所示。这一现象也和 DO 在垂向上的分布规律有关,地下水在向下循环的过程中,氧不断被微生物利用、消耗, H 值越小,DO 质量浓度越低,反之 DO 质量浓度越高,微生物的降解作用与 DO 的质量浓度正相关,所以 H 值小的点位微生物对污染物的降解效果差,色度和 COD 质量浓度大。 H 值大的点位,色度和 COD 质量浓度小。

由图 5 和图 6 可见,色度和 COD 在径向和垂向上均随曝气时间的增加而降低,色度为 40 度、COD 质量浓度为 96 mg/L 的原水,曝气 18 d 后,所有测试点的色度均不超过 15 度,就这一点而言,水质已达到国家生活饮用水水质标准^[10]。曝气 30 d 后,在所有测试点,色度不超过 10 度,COD 质量浓度在 $21\sim 36\text{ mg/L}$ 之间。若以色度不超过 15 度作为修复的标准,则曝气 18 d,修复区半径 R 达 0.7 m ,修复区高度 $H=0.9\text{ m}$ 。

可见,曝气技术可以用来修复高色度的珊瑚岛礁淡水透镜体。

4.3 修复 1 m^3 淡水透镜体所需空气量估算

实验用水的体积 $V=0.53\text{ m}^3$

修复的土壤体积 $V_{\pm}=R^2\pi h/2$

$$=0.70^2\times 3.14\times 0.9\div 2$$

$$=0.69\text{ m}^3$$

$$\text{所需空气量 } V_{\text{气}}=0.25\times 15\times 24+0.3\times 3\times 24=112\text{ m}^3$$

则修复 1 m^3 珊瑚岛礁淡水透镜体所需空气量 $V=112\div 0.53=211\text{ m}^3$

0.53 m^3 的水存在于 0.69 m^3 的土壤中, 1 m^3 体积的水存在的土体积则是 $0.69/0.53=1.3\text{ m}^3$ 。修复 1 m^3 色度是 40 度的岛水,同时修复体积为 1.3 m^3 的土壤需要的空气量大约是 211 m^3 。

5 结论

研制的半模实验装置可用于珊瑚岛礁淡水透镜体和受污染地下水及土壤的层内曝气生物修复研究;同一半径上,各点水力特性相同,为取样点的布置带来了方便;用半模型进行研究,更加经济。

径向上,在主流区半径 R 为 $0.2\sim 0.5\text{ m}$ 内,DO 的质量浓度随 R 的增大而增大。 $R>0.5\text{ m}$,DO 随 R 的增大而降低。垂向上,DO 的质量浓度随高度的增大而迅速增大。

层内曝气,地下水中存在 DO 质量浓度较高的主流区,这一区域是循环水流量较大的区域。实验装置的主流区在 $R\leq 0.6\text{ m}$ 、 $H=0.2\sim 0.9\text{ m}$ 时地下水色度和 COD 均随曝气时间的增加而降低,色度为 40 度、COD 质量浓度为 96 mg/L 的原水,曝气 18 d 后,色度均不超过 15 度;曝气 30 d 后,色度不超过 10 度,COD 质量浓度为 $21\sim 36\text{ mg/L}$ 。以色度不超过 15 度作为

修复的标准,修复区半径 R 达 0.7 m,修复区高度 $H = 0.9$ m。

修复 1 m^3 色度为 40 度、COD 为 96 mg/L 的原水,同时修复体积为 1.3 m^3 的土壤需要的空气量大约是 211 m^3 。

参考文献:

- [1] 周从直,方振东,梁恒国,等. 珊瑚岛礁淡水透镜体的数值模拟[J]. 海洋科学, 2004, 28(11): 77-80.
- [2] 马颖. 珊瑚岛礁地下淡水透镜体有机物去除技术研究[J]. 后勤工程学院学报, 2000, 16(3): 1-5.
- [3] 陈秀成,曹瑞钰. 地下水污染治理技术的进展[J]. 中国给水排水, 2001, 17(4): 23-26.
- [4] Zhu kun, Chen hui, Li Guanghe, *et al.* In-situ remediation of petroleum compounds in groundwater aquifer with chlorine dioxide [J]. **Water Research**, 1998, 32(5): 1471-1480.
- [5] 王东海,李广贺,刘翔. 包气带中残留油动态释放实验研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 145-150.
- [6] 陈燕珠. 环境生物技术发展的现状研究[J]. 化工纵横, 2002, 16(11): 28-31.
- [7] James F P, Richard L J, John A C. Air sparging ingate wells in cutoff walls and trenches for control of plume of volatile organic compounds(VOCs) [J]. **Ground Water**, 1993, 31(4): 654-663.
- [8] Benner M L, Stanford S M, Lee L S, *et al.* Field and numerical analysis of in-situ air sparging: a case study [J]. **Hazardous Materials**, 2000, 72: 217-236.
- [9] Todd W S. In-situ groundwater bioremediation using dual-density convection (DDC) wells[J]. **Environment Protection**, 1998, 13(7):
- [10] GB5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].

Bioremediation research of freshwater lens in a coral island

ZHOU Cong-zhi, ZHAO Su-li, QIAO-Hua

(Department of Military Estate Management & Environmental Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 400041, China)

Received: Sep. 18, 2006

Key words: coral island; freshwater lens; bioremediation

Abstract: Semi-cylinder experiment platform of 1.2 m high and 1.5 m diameter was developed by applying semi-module theory and bio-restore of freshwater lens contaminated by organic pollutant was conducted in-situ in a coral island. DO(Dissolved Oxygen) distribution character in underground water and de-colorization, COD(Chemical oxygen demand) removal effect were studied. The results showed: (1) On the radial direction, DO increased with radius R between 0.2 m and 0.5 m of R in the main current area, but reduced with R increasing in the $R > 0.5$ m area. On the vertical direction, DO increased rapidly with height H . (2) Both color and COD of the water reduced with aeration time increasing, the color didn't exceed 15 after 18-day aeration, and the color didn't exceed 10 and COD was between 21~36 mg/L after 30-day aeration for the raw water with color 40 and COD 96 mg/L. Taking color ≤ 15 as a bioremediation standard, the radius and the height of bioremediation area were 0.7 m and 0.9 m respectively. (3) The gas volume needed was about 211 m^3 to bio-restore the raw water of 1 m^3 and soil polluted of 1.3 m^3 .

(本文编辑:刘珊珊)