

脱氮沟对农业面源污染中地下水硝酸盐的去除效果

孔繁鑫^{1,3}, 朱端卫¹, 范修远², 陈洪斌³

(1.华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 2.湖北省农业生态环境保护站, 湖北 武汉 430070; 3.同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要:脱氮沟是去除地下水硝酸盐的一种有效方法。通过对不同外加基质(松木屑与香菇袋料)与土壤混合前后可利用碳和微生物量碳等参数的变化以及水样硝酸盐氮、氨氮、几种多环芳烃(茚、萘、联苯、茚、菲)的分析,对构建在湖北省十堰市张湾区石桥村蔬菜基地上的脱氮沟去除农业面源污染中的地下水硝酸盐效果进行了研究。结果发现,两种填料对微生物生长的影响差别不是很大。数据表明,供试脱氮沟发生了一定程度的短流,在此情况下,对于不同宽度的脱氮墙,松木屑填料比香菇袋料平均处理效果好;松木屑 1.5 m 宽度的处理和香菇袋料 1 m 宽度处理效果较好,地下水中的硝酸盐得到有效去除,出水的氨氮和多环芳烃没有显著增加。

关键词:脱氮墙;可利用碳;微生物碳量;硝酸盐

中图分类号:X523 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1519-06

Effect of Denitrification Trench for Removing Groundwater Nitrate of Non-point Source Pollutant in Rural Areas

KONG Fan-xin^{1,3}, ZHU Duan-wei¹, FAN Xiu-yuan², CHEN Hong-bin³

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Agricultural Eco-Environmental Protection Station of Hubei Province, Wuhan 430070, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Denitrification trench is an effective approach for removing nitrate from shallow groundwater in the region of agricultural farming. An organic carbon source can be mixed with soil as a permeable wall which is perpendicular to the groundwater flow. The added carbon source stimulates nitrate reduction to nitrogen gases by denitrification and can reduce nitrate inputs to groundwater. Two different substrates, pine sawdust and mushroom culture wood chip, were added into soil collected from the region of Zhangwan, Shiyan City of Hubei Province as carbon source in the trench to determine if the types of substrates have close relationship with nitrogen removal. The total carbon, available carbon and other soil parameters were monitored. The removal of nitrate and concentration of ammonia nitrogen in groundwater were also monitored. Data show that microbial biomass almost has no difference, though total carbon and available carbon vary widely. The analytic result showed that a part of groundwater passed underneath the denitrification wall. In this case, the average removal efficiency of nitrate in different wide wall containing the pine sawdust was higher than that containing the mushroom culture wood chip. The wall constructed by the pine sawdust in 1.5 m width and by the mushroom culture wood chip in 1 m width performed successfully to remove nitrate from groundwater. It was found despite the increase of ammonia nitrogen in middle of the wall, concentration of ammonia nitrogen in the outlet water did not apparently increase. At the same time, some polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the outlet water were also monitored and they did not result in secondary pollution.

Keywords: denitrification wall; available carbon; microbial biomass; nitrate

近年来,硝酸盐已成为世界范围内地下水污染的重要指标,且污染程度不断增加^[1]。地下水去除硝酸盐

的方法可分为物化法和生化法。生化法由于具有高效低耗的特点而广泛应用^[2]。脱氮沟是采用生化法去除地下水中硝酸盐的新技术,其核心是脱氮墙。在地下水位较浅的地区以锯末或其他天然有机物料和土壤混合能构建一堵松散多孔的混合土墙即脱氮墙,墙体与地下水的水流方向垂直,锯末等含碳物料不断分解,为脱氮细菌生长提供持久的碳源,地下水中的

收稿日期:2008-02-19

基金项目:湖北省重点科技攻关项目(2006AA201B15)

作者简介:孔繁鑫(1985—),男,河南洛阳人,在读硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: fxxkong.1985@163.com

通讯作者:朱端卫 E-mail: zhudw@mail.hzau.edu.cn

$\text{NO}_3\text{-N}$ 流经脱氮墙时被反硝化细菌作为缺氧呼吸的电子受体而还原为 N_2 逸出,从而降低 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向受纳水体的排放量^[3]。据研究,澳大利亚 Busselton 地区构建的脱氮沟的有效运行寿命可超过 20 a^[4]。

丹江口水库是南水北调中线工程水源地,直接担负为京、津、冀等地区的供水任务,其水质状况倍受关注。该库区属我国中部的欠发达山区,农业生产过度依赖于化肥和农药。据统计,2004 年该地区的化肥平均施用量(折纯)达 $393 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中氮肥占 50.4%,农业面源污染约占丹江口库区环境污染总负荷的 70%^[5]。本研究目的在于考察农业生产条件下采用脱氮沟技术降低丹江口水库水源地地下水硝酸盐浓度的可行性,寻求保障汇入丹江口水库水体水质的有效措施,也为其他农村地区去除面源污染中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 提供参考依据和经验。

1 材料与方法

1.1 脱氮沟设计及其地下水采样

脱氮沟构建于湖北省十堰市张湾区石桥村蔬菜基地上。该地区属汉江水系神定河的源头区,海拔 500~800 m 左右,种植面积 50 余 hm^2 ,年使用化肥 150 t,耕地多属潮土,土壤质地偏砂,土质均匀,地质构造无断层,地下水朝一个方向匀速流动。脱氮沟建在已改造 30 多年的河床上(现为耕地),沟槽全长 36 m,深 1.8 m(地下水位 1.5 m),沿长度方向分 3 段设置不同墙体厚度处理,分别为 2、1.5、1 m,相应标识为 I、II 和 III,每个处理裂为 2 小区段,分别填充锯屑拌土和香菇袋料拌土(简称物料),相应标识为 S、T,即 2 m 宽的脱氮墙锯屑拌土区段的进水监测井、墙中监测井和出水监测井的代号分别为 S I-1、S I-2 和 S I-3;2 m 宽香菇袋料拌土区段进水监测井、墙中监测井和出水监测井代号分别为 T I-1、T I-2 和 T I-3;1.5 m 和 1 m 处理相应代号分别为 S II-1、S II-2、S II-3、T II-1、T II-2、T II-3 和 S III-1、S III-2、S III-3、T III-1、

T III-2、T III-3。

脱氮墙构建时,先按设计开挖沟槽,然后从沟底往上,以 3 份土壤和 1 份锯屑或香菇袋料混匀后回填,不同处理相距 6 m,回填至离地面 0.5~0.6 m 时,然后在表层填入土壤,以便农户在脱氮沟上继续种植农作物。根据设计,每个处理的 3 个监测井分别位于脱氮沟的上游 1 m 处、脱氮墙中心断面及下游 1 m 处,计 18 个监测井(图 1)。每个监测井深度 1.6~1.8 m,气候正常时,井内水深为 0.35~0.45 m 左右。

1.2 土壤和水样的取样与监测

2007 年 4 月 21 日用土壤取样器在墙中地下水水位线 0.3 m 处采取土壤样品。土样放在塑料袋中带回实验室,于 4℃ 下保存,在 2 周内分析。每月取 1 次水样,于每月 1~3 日取样,舀取井内水样清洗盛装水样器皿(塑料瓶)两次,然后再取 500 mL 作为分析样,2 h 内冷冻储存备用。

土壤的监测项目与方法如下:土壤含水率为重量法;土壤有机碳含量为浓硫酸外稀释热法;土壤可利用碳量为 25℃ 下静态培养 7 d,红外线 CO_2 气体分析仪分析法;土壤微生物碳量:氯仿熏蒸浸提法。水样硝酸盐分析方法为 HJ/T346—2007 紫外分光光度法;氨氮为纳氏试剂比色法测定;多环芳烃(茚、萘、联苯、芴、菲)为固相微萃取-气相色谱法联用。

2 结果与讨论

2.1 土壤含水率变化

分别测定了脱氮沟不同处理的土壤含水率,以反映土壤、填料的持水能力或亲和力大小(见表 1)。

由表 1 可以看出,加入松木屑填料的混合土壤含水率的增加值高于加入香菇袋料填料的土壤含水率。这说明松木屑填料的饱和持水量较香菇袋料填料的饱和持水量高。同时,未加入填料之前的不同采样点的土壤含水率之间,以及与填料混合之后的不同采样点的土壤含水率之间,也有较大的差异,这可能是由

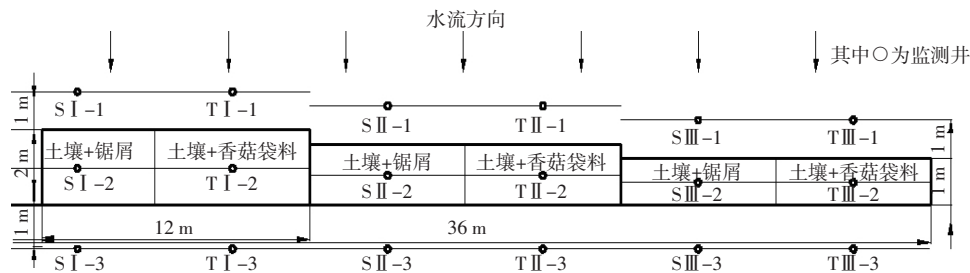


图 1 脱氮沟平面设计图

Figure 1 Plan view of denitrification wall and surrounding well sites

土壤的透水性能与空隙率的不同所引起。

表 1 土壤与填料混合前后含水率的变化

Table 1 The change of water contents in soil before and after mixing it with organic carbon substrates

未加填料的土壤	SI-1	TI-1	SII-1	TII-1	SIII-1	TIII-1
含水率/%	15.4	22.7	14.0	24.5	22.8	25.3
加入填料混合后土壤	SI-2	TI-2	SII-2	TII-2	SIII-2	TIII-2
含水率/%	24.8	25.7	21.1	28.5	34.0	35.9
含水率增量/%	61.4	13.2	51.3	16.4	49.5	41.9

2.2 土壤碳的活性变化

土壤存在的不同形态碳可以反映其中微生物可利用物质的状态。根据测定方法的不同,其可分为土壤有机碳、土壤微生物可利用碳和土壤微生物量碳。土壤有机碳长期的监测结果,可反映出有机碳的变化情况以及含有机碳填料的使用年限。本研究中脱氮沟填料及其相应土壤中的有机碳、可利用碳和微生物量碳监测结果见表 2、图 2。

表 2 土壤与填料混合前后的有机碳的变化

Table 2 The change of organic carbon in soil before and after mixing it with organic carbon substrates

未加填料的土壤	SI-1	TI-1	SII-1	TII-1	SIII-1	TIII-1
土壤有机碳/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.3	0.92	0.84	4.1	6.5	4.7
加入填料混合后土壤	SI-2	TI-2	SII-2	TII-2	SIII-2	TIII-2
土壤有机碳/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	25.6	22.2	15.0	14.6	36.0	29.4
土壤有机碳增加倍数	84.3	23.1	16.9	2.6	4.5	5.3

从表 2 可以看出,土壤与松木屑混合后的有机碳含量比土壤与香菇袋料混合后的总有机碳含量高。土壤与香菇袋料混合后的可利用碳量比土壤与松木屑混合后的高,这说明香菇袋料中可被微生物利用的小分子有机碳比松木屑多,香菇袋料所含的有机碳化合物更易被微生物利用(图 2)。土壤微生物生物量碳是指小于 $5 \sim 10 \mu\text{m}^3$ 的、活的微生物以碳的形式表示的数量,是土壤有机质中最活跃的和最易变化的部分,可以间接地反映出土壤中微生物的含量与活性。从图 2 可以看出,土壤与松木屑或香菇袋料混合后物料的微生物碳量差别不大,说明这两种填料对微生物生长影响的差别不显著。

2.3 脱氮墙进出水的硝酸盐浓度变化

通过分析 2007 年 1~5 月份的脱氮墙进水、墙体中间和出水的硝酸盐含量变化发现,进水的硝酸盐浓度为 $3.0 \sim 28.5 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{L}^{-1}$,脱氮墙中间的硝酸盐浓度 $0.29 \sim 2.8 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{L}^{-1}$ (只有 4 月份的一数据较

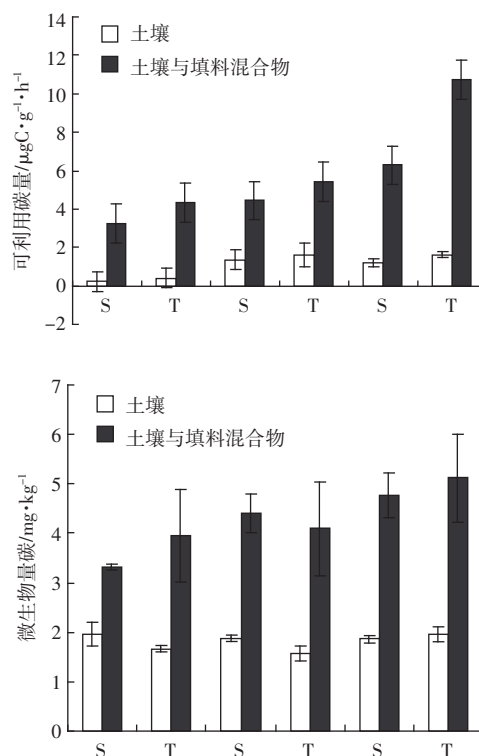


图 2 土壤与填料混合后可利用碳和微生物碳量的变化

Figure 2 The change of available carbon and microbial biomass carbon in soil before and after mixing it with organic carbon substrates

高,为 $5.4 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{L}^{-1}$),出水中硝酸盐浓度为 $0.29 \sim 26.7 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从进水到墙体中段,硝酸盐降低幅度很大,去除率达到 $58.6\% \sim 92.3\%$ 。试验发现,一部分墙体出水的硝酸盐比墙体中段低,去除效果较好,去除率达到了 $60\% \sim 90\%$;但有相当部分的墙体出水的硝酸盐浓度比墙体中段高,可能发生了短流(水流从墙体下部或者从其他阻力小的地方流过)现象或生物硝化现象。2007 年 1 月至 5 月的脱氮墙的总体运行结果见表 3。

表 4 进一步分析了 2 月份和 4 月份不同处理脱氮墙中段和整体的运行效果差异性。

表 3 两种填料硝酸盐氮去除率(%)

Table 3 Nitrate removal of two different substrates during trait

月份	1月		2月		3月		4月		5月	
编号	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T
I	15.4	24.7	32	33.7	19.7	-32	43.1	25.8	-10.3	58
II	55.8	-20.8	53.9	31.3	30.3	15	65.8	9.1	79.5	-16.6
III	37.6	55.3	94.9	93.9	-18.2	28.6	6.3	45.5	-9.8	45.5
平均	36.3	1.95	60.3	53	10.6	3.9	38.4	26.8	19.8*	29

注:(1)编号栏中 I 表示脱氮墙 2 m 厚度的处理,II 表示 1.5 m 处理,III 表示 1 m 的处理;(2)* 可能发生了较严重的短流现象。

表 4 监测期间脱氮墙的脱氮效果

Table 4 Efficiency of nitrate removal in denitrification wall during trial

2007年 2 月				2007年 4 月			
编号	NO ₃ -N 浓度/mg·L ⁻¹	中段去除率/%	总体去除率/%	编号	NO ₃ -N 浓度/mg·L ⁻¹	中段去除率/%	总体去除率/%
S I -1	5.5	—	—	S I -1	11.5	—	—
S I -2	0.6	89.6	—	S I -2	2.1	81.5	—
S I -3	3.7	—	32.0	S I -3	6.5	—	43.1
T I -1	5.0	—	—	T I -1	10.7	—	—
T I -2	1.1	78.2	—	T I -2	4.4	58.5	—
T I -3	3.3	—	33.7	T I -3	7.9	—	25.8
S II -1	6.0	—	—	S II -1	10.1	—	—
S II -2	0.3	95.3	—	S II -2	1.9	81.3	—
S II -3	2.8	—	53.9	S II -3	3.5	—	65.8
T II -1	5.3	—	—	T II -1	7.1	—	—
T II -2	0.3	94.1	—	T II -2	2.3	67.7	—
T II -3	3.6	—	31.3	T II -3	6.4	—	9.1
S III -1	5.6	—	—	S III -1	28.5	—	—
S III -2	1.7	70.0	—	S III -2	2.8	90.1	—
S III -3	0.3	—	94.9	S III -3	26.7	—	6.3
T III -1	5.2	—	—	T III -1	13.1	—	—
T III -2	0.5	89.5	—	T III -2	5.4	58.6	—
T III -3	0.3	—	93.9	T III -3	7.1	—	45.5

注:编号栏中的 1 表示脱氮墙进水,2 表示墙体中间水、3 表示脱氮墙出水。

2.3.1 不同脱氮沟处理硝酸盐去除率分析

由表 3 可知,虽然可能有短流现象的发生,但从 1 月份到 4 月份不同处理宽度两种填料处理对硝酸盐去除率的平均值可以看出,S 处理即松木锯屑填料的处理效果优于 T 处理即香菇袋料的处理效果,可能是松木屑填料与水亲和性较好,填料的颗粒也较小,具有较大的比表面,有利于微生物的附着生长,同时锯屑填料与土壤混合后地下水的渗透率也可能较香菇袋料处理要高,一定程度上减轻了污泥及微生物生长所引起的空隙堵塞,减轻短流现象^[6]。

2.3.2 不同宽度脱氮沟处理对硝酸盐去除率的影响

在发生短流的情况下,由表 3 可看出,S II 处理即 1.5 m 宽度的松木锯屑填料处理均取得了 30%以上的处理效果,T III 处理即 1 m 宽度的香菇袋料处理也取得了较好的处理效果,硝酸盐去除率都达到了 50%以上。这可能与本底土壤的性质、填料与土壤的混合均匀程度、地下水水文状况有关。

由表 4 可以看出,2 月份的和 4 月份 S I、T I、S II、T III 处理区的硝酸盐氮的去除效率都在 25%以上,取得了一定的效果;2 月份的 S III、T III 处理可能是没有发生短流,硝酸盐去除率分别达到了 94.9%、93.9%,这也在一定程度上说明脱氮沟能够有效去除地下水

中的硝酸盐。其余处理过程的硝酸盐去除效率不高,甚至 3 月份的一些出水的硝酸盐浓度比进水还要高,处理效果不很理想。脱氮墙出水的硝酸盐浓度比墙体中间的浓度要高很多,可能是部分地下水是从墙下面通过,绕过了脱氮区域。Schipper 等^[7]研究表明,脱氮墙内部的导水率比周围蓄水层中的导水率小了很多,这可解释相当部分地下水从墙下面通过而不是从墙中通过。对于墙中导水率的降低,可能的原因有,加入的锯屑堵塞了沙土颗粒之间的孔隙,降低了地下水流可利用的孔隙连通性。另一个原因可能是,脱氮墙内部微生物生长后形成生物膜,降低了墙体的过水性能。Soares 等^[8]用泵抽含有硝酸盐的水,使其通过经过甲酸盐处理过的沙土柱,观测到导水率有所下降,他们把这归因于在沙土柱上部泡沫形成和微生物的堆积。同样地,我们在采样过程中也曾经发现有污泥进入墙体中央监测井的现象。

2.4 脱氮沟处理的地下水中氨氮的变化

图 3 反映了地下水经过脱氮墙前后的氨氮变化情况,可以看出脱氮墙中的氨氮比进水中的氨氮有明显增高的趋势,而出水的氨氮浓度比墙体中段大幅降低,有的区域比进水还低。

这可能是由于以下的原因引起的:

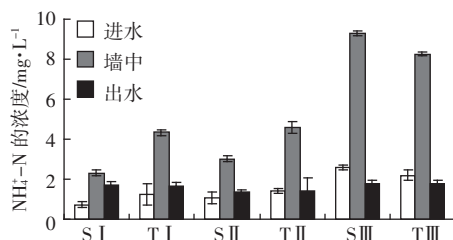


图 3 2007 年 4 月份脱氮沟中氨氮的变化

Figure 3 The change of ammonia nitrogen in denitrification trench in April of 2007

(1) 氨化作用

土壤与填料中的有机氮化合物在微生物的作用下发生氨化作用^[9]。

(2) 硝酸盐异化还原作用

在厌氧环境条件下,硝酸盐异化还原作用与反硝化作用均可作为细胞合成与生命活动提供能量^[10]。硝酸盐异化还原为 NH_4^+-N 也是脱氮墙中的硝酸盐减少的一种机制,不过这种作用一般发生的程度不大^[11]。

(3) 土壤吸附和厌氧氨氧化现象

当粘土矿物晶层之间发生膨胀作用时,土壤胶体吸附的 NH_4^+ 取代层间的阳离子,发生铵的固定^[12]。同时微生物在厌氧条件下可能会发生氨的厌氧氧化,以 NH_4^+-N 为电子供体, NO_2^--N 为电子受体,将氨氮和硝态氮转变成 N_2 排入大气中^[13]。

由于本研究构建的脱氮沟运行时间较短,脱氮墙出水的氨氮浓度比墙体中段降低的现象目前无法作出定论。虽然香菇袋料所能提供的可利用碳比松木屑多,但微生物量碳没有显著的差异,究竟是可利用的碳还是脱氮沟中低浓度的硝酸盐含量是反硝化作用的限制因子,还是两种填料对微生物的亲合力都不强,还需进一步研究。

脱氮墙运行过程中导致脱氮墙透水性能下降的原因可能是污泥和微生物生长或降解有机物过程中产生的不溶性金属氧化物、氢氧化物颗粒堵塞土壤和填料的空隙,增大水流阻力,使部分地下水从脱氮墙的下部绕流。脱氮墙已经在一些领域成功应用,但是本研究中使用脱氮墙尚需解决地下水绕流问题。可行的解决方法有:墙体建设过程中加深墙体深度,或者加入通透性强的物质(例如砂砾)与土壤以及外加有机碳源混合。这些措施对提高脱氮效率有促进作用,不过可能会增加脱氮墙的建设费用,在农村地区失去一些吸引力^[14,15]。采用更大的颗粒有机碳填料也是解决此问题的可行方法之一^[16]。

2.5 多环芳烃的初步测定

为了了解不同的填料是否会对地下水造成二次污染,对 4 月份地下水中的多环芳烃进行了监测分析,见图 4、图 5。从图 4、图 5 可以看出,地下水中的多环芳烃类物质的浓度是很低的,经过脱氮墙后个别种类有机物浓度虽有所上升,但同时多数其他种类有机物浓度得到降低。总体来看,并没有出现投加的有机碳填料对地下水产生二次污染的情况。

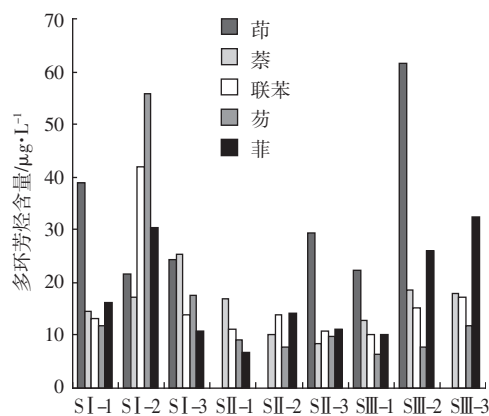


图 4 锯木屑填料脱氮墙区域多环芳烃变化

Figure 4 Change of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of groundwater in the wall containing the pine sawdust

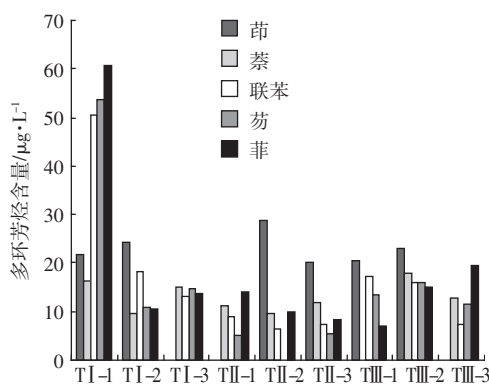


图 5 香菇袋料填料区域脱氮墙区域多环芳烃变化

Figure 5 Change of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of groundwater in the wall containing the mushroom culture wood chip

3 小结

(1) 脱氮沟是一种能够有效去除地下水中硝酸盐的方法。

(2) 两种填料松木屑和香菇袋料虽然有机碳和可利用碳有一定的差别,但是其对微生物的生长影响差别不大;数月的运行结果初步表明,松木屑比香菇袋料填料的平均处理效果要好, S II 处理即松木屑 1.5 m 宽度的处理和 T III 处理即香菇袋料 1 m 处理取得

了相对较好的处理效果。

(3)系统中硝酸盐得到了一定程度的去除,但是在脱氮墙中可能发生了不同程度的绕流短流现象。

(4)虽然墙中的氨氮浓度有所升高,但出水中的氨氮没有十分显著的变化。

(5)通过对多环芳烃的监测发现两种填料都没有发现明显的二次污染现象。

参考文献:

- [1] 易秀. 氮肥的渗漏性研究[J]. 农业环境保护, 1991, 10(5): 223-226.
- YI Xiu. Study on the pollution of nitrogen fertilizer leakage[J]. *Agro-environmental Protection*, 1991, (10)5: 223-226.
- [2] 沈梦蔚. 地下水硝酸盐去除方法的研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2004. 21-22.
- SHEN Meng-wei. Study on the method of nitrate removal in groundwater [D]. Master Degree Thesis of Zhejiang University, 2004. 21-22.
- [3] Schipper L A, Vojvodic-Vukovic M. Nitrate removal from groundwater and denitrification rates in a porous treatment wall amended with sawdust[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14(3): 269-278.
- [4] Fahrner S. Groundwater Nitrate Removal Using a Bioremediation Trench (D). Honours Thesis, Department of Environmental Engineering, University of Western Australia, 2002.
- [5] 耿正华, 闫仁凯, 李涛, 等. 南水北调中线十堰水源区农业面源污染现状调查与防治对策[J]. 华中农业大学学报, 2006, 25(增刊): 109-112.
- JI Zheng-hua, YAN Ren-kai, LI Tao, et al. Investigation and prevention countermeasure on agricultural non-point pollution in water source area of the middle-route project of south-to-north water transfer at Shiyan[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2006, 25(Supplement): 109-112.
- [6] 张锡辉. 水环境修复工程学原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 204-205.
- ZHANG Xi-hui. Principle and application of water environmental recovery[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. 204-205.
- [7] Schipper L A, Barkle G F, Vojvodic-Vukovic M, et al. Hydraulic constraints on the performance of a groundwater denitrification wall for nitrate removal from shallow groundwater[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 69: 263-279.
- [8] Soares M I, Braester C, Belkin S, et al. Denitrification in laboratory sand columns: carbon regime, gas accumulation and hydraulic properties[J]. *Water Res*, 1991, 25: 325-332.
- [9] 王国惠. 环境工程微生物学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 171-172.
- WANG Guo-hui. Environmental engineering microbiology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 171-172.
- [10] 吴耀国. 地下水环境中的反硝化作用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3: 28-29.
- WU Yao-guo. Denitrification in groundwater systems [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3: 28-29.
- [11] Schipper L A, Barkle G F, Vojvodic-Vukovic M. Maximum rate of nitrate removal in a denitrification wall[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 1270-1276.
- [12] 姚兆英, 陈忠明, 赵广英, 等. 环境化学教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 234-235.
- YAO Zhao-ying, CHEN Zhong-ming, ZHAO Guang-ying, et al. Environmental chemistry course[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 234-235.
- [13] Vande Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, et al. Metabolic pathway of anaerobic ammonium oxidation on the basis of ^{15}N studies in a fluidized reactor[J]. *Microbiol*, 1997, 143(7): 2415-2421.
- [14] Schipper L A, Vojvodic-Vukovic M. Five years of nitrate removal, denitrification and carbon dynamics in a denitrification wall[J]. *Water Research*, 2001, 35(14): 3473-3477.
- [15] Gregory F Barkle, Louis A Schipper, Craig P, et al. In situ mixing of organic matter decreases hydraulic conductivity of denitrification walls in sand aquifers[J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 2008, 28(1): 57-64.
- [16] Robertson W D, Ptacek C J, Brown S J. Geochemical and hydrogeological impacts of a wood particle barrier treating nitrate and perchlorate in ground water[J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 2007, 27(2): 85-95.

致谢: 本研究得到湖北省十堰市农业生态环境保护站的大力支持, 特此致谢!