

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.013

岸滤系统对典型污染物的去除机制及影响因素

郑晓笛^{1,2}, 滕彦国^{1,2}, 宋柳霆^{1,2}, 胡 斌^{1,2}, 翟远征^{1,2},
左 锐^{1,2}, 杨 洁^{1,2}, 张波涛^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要:系统总结了岸滤系统内的污染物, 阐明岸滤系统对典型污染物的去除效能, 综述岸滤系统对不同种类污染物的去除机制(降解去除有机污染物机制、迁移转化去除无机污染物机制以及自然过滤去除微生物病原体机制)、影响因素及去除技术, 展望未来岸滤系统典型污染物的研究方向。
关键词:岸滤系统; 典型污染物; 去除机制; 影响因素
中图分类号:X523 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)06-0082-08

Removal of typical pollutants with riverbank filtration system and influence factors

ZHENG Xiaodi^{1,2}, TENG Yanguo^{1,2}, SONG Liuting^{1,2}, HU Bin^{1,2}, ZHAI Yuanzheng^{1,2},
ZUO Rui^{1,2}, YANG Jie^{1,2}, ZHANG Botao^{1,2}
(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: In this paper we summarize the pollutants in the riverbank filtration system, describe the efficiency of the riverbank filtration system in removing typical pollutants, present the removal mechanisms (organic pollutant degradation, inorganic pollutant transformation, and microbial pathogens natural-filtration), the influence factors, and removal technologies for various kinds of pollutants, and discuss related research direction for the future.
Key words: riverbank filtration system; typical pollutants; removal mechanism; influence factor

岸滤取水也称傍河取水(riverbank filtration, 简称 RBF), 是指在距河流或者湖泊一定的距离内, 利用河岸或者湖岸天然的净化能力, 采用抽水井开采饮用水的一种取水方式。在岸滤系统运行的过程中, 水体中的污染物通过水力作用、机械作用、生物作用以及物理化学作用等其他天然衰减作用可以得到较好的去除(图 1)^[1]。因此, 岸滤取水作为一种高效率、低成本的饮用水预处理方式, 在世界范围内受到普遍关注^[2]。

岸滤取水始于 1810 年的欧洲莱茵河、易北河、多瑙河和塞纳河的沿岸国家^[3]。二战后, 随着欧洲

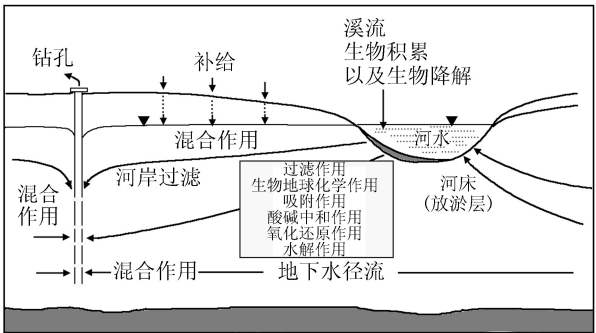


图 1 岸滤取水过程示意图^[1]

经济和人口数量的增长, 市政生活污水和工业废水

基金项目: 水体污染控制与治理国家科技重大专项课题(2014ZX07201-010); 国家自然科学基金(41473086)
作者简介: 郑晓笛(1991—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学。E-mail: zhengxiaodi@163.com
通信作者: 滕彦国, 教授。E-mail: teng1974@163.com

的排放等,使河流受到严重污染,水资源短缺问题日益严重。欧洲国家利用其部分城市距河流较近的优势,采用岸滤取水的方式解决其工业化进程中饮用水不足的问题。在柏林、斯洛伐克共和国、匈牙利、德国以及荷兰,岸滤取水分别占其饮用水总需求的70%、50%、45%、16%以及5%,逐渐成为这些地区的饮用水来源之一^[1,4-5]。另外,在美国岸滤取水已有50多年历史,尤其是在北美地区,岸滤取水是获取饮用水的重要方式之一^[6-7]。随着全球工业化发展,河流湖泊水体污染日趋严重,地下水开采超支造成地面沉降、地面塌陷等问题,中国、印度、韩国、埃及以及约旦等许多国家也开始采用岸滤取水方式来获取饮用水。中国的黄河“九五”滩地和“北郊”两个傍河开采地下水源地已投产运行多年,缓解了河南地区水处理成本高、饮水紧张等问题^[8-10]。经过多年的发展,岸滤取水的相关研究已逐渐从水量研究转向水量和水质相结合的研究,并取得了一定的研究成果。本文主要对近年来岸滤系统内的典型污染物、不同类型污染物的去除机制及其影响因素以及典型污染物的环境行为及去除技术等,进行概括、总结和展望。

1 岸滤系统内的典型污染物

近年来,随着土地利用类型的多样化,岸滤系统内污染物含量及种类逐渐增加(表1)^[11]。本文基于岸滤系统内污染物的文献报道频率以及危害性,筛选出氨氮、铁锰、微量有机污染物等典型污染物,综述其在岸滤系统内的来源、存在形式及去除作用。

表 1 岸滤系统内典型污染物^[11]

污染物分类	污染物质	去除率/%	污染物分类	污染物质	去除率/%
SS	SS	100	微量有机物类(OMPs)	四氯乙烯	15~20
COD	COD	70~80		阿特拉津	15~20
无机盐类	铵盐	70~80		西玛津	20~30
	亚硝酸盐	85~95		2,4—D	80~90
	硝酸盐	45~50		西维因	80~90
重金属类	铁(Fe)	90~100		林丹	40~45
	锰(Mn)	65~75		MCPA	70~80
	铜(Cu)	60~70		特布他林	80~90
	镉(Cd)	40~45		氟乐灵	50~60
	铬(Cr)	55~60	螯合剂	次氨基三乙酸	60~70
	镍(Ni)	50~60		大肠型细菌	100
	铅(Pb)	35~40	细菌类	绿脓杆菌	100
	砷(As)	60~65		粪便链球菌	100
微量有机物类(OMPs)	阴离子表面活性剂	30~40		大肠杆菌	100
	石油烃类	75~80		梭菌	100
	苯	20~30		噬菌体	100
	三氯乙烯	20~30			

1.1 氨氮

氮化合物尤其三氮的污染和治理已成为地下水

污染研究的热点问题。地下水环境中主要的氮化合物为氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)和硝酸盐氮(NO₃⁻-N),即所谓的“三氮”^[15]。有机氮、氨氮、硝氮等各种形态的氮会通过矿化过程、离子吸附过程、固化过程、硝化过程以及反硝化过程进行循环转化^[12]。实验证明,三氮污染物在地下水系统中的运移经历了硝化、反硝化、交换吸附以及矿化作用,最终氮类化合物在包气带主要以氨根和硝酸盐的形式存在^[13-14]。同时,氨氮在地下水中会不断累积,主要有两方面原因:首先,由于氮类化合物溶解度大,三氮(NH₄⁺、NO₃⁻和NO₂⁻)进入地下水系统后,通常不会通过沉淀等形式进入固相;另一方面,农业氮肥的过度使用、污水灌溉、粪污排放和垃圾非正规填埋等人类活动导致氮类化合物的过量累积。同时,氨氮会通过包气带入渗、灌溉入渗以及地表水侧向入渗等方式进入地下水体,导致地下水水质恶化,引起地下水化学特征的改变,并且一旦排泄进入地表,容易造成地表水体富营养化,破坏生态平衡^[13-14]。Groeschke等^[15]的研究显示,岸滤取水过程中NH₄⁺会通过非饱和带的固定作用和生物降解作用变为N₂O或者N₂,但是由于岸滤取水过程中NH₄⁺的阳离子交换作用,使得其对NH₄⁺的去除效果较差。王含婧等^[16]的研究显示,岸滤取水过程中氨氮的去除率与管井与河水之间的距离有关。因此,傍河水源地建设中对高效去除氨氮的方案尚需进一步研究。

1.2 铁和锰

工业发展速度的加快,使水体中重金属污染越来越严重^[17]。其中,铁锰含量的超标现象最为普遍。在我国,含铁锰是北方地下水水质的主要特点之一,尤其是在陕西、青海、甘肃的中北部及东北松花江流域等地区铁锰含量较高^[18-19]。因此,地下水除铁、除锰技术一直受到专家学者和工程技术人员广泛的重视^[20]。研究表明,岸滤系统对水体中重金属的去除效果较好,其中对铁的去除率高达90%以上,对锰的去除率也在60%以上^[21]。同时,岸滤系统对铁锰的去除作用在一定程度上会影响系统内其他重金属污染物的归趋。Grischek等^[22]指出,存在于水井周围所谓的“交互带”(即岸滤系统)对Fe(II)具有较高的吸附能力,水体pH值、自催化作用和微生物调解作用会使锰发生氧化反应,而铵和砷会在这种氧化和沉淀作用过程中被去除。当地下水抽出时,岸滤系统会通过富氧水体的过滤而再生^[23]。

1.3 微量有机污染物(OMPs)

地下水中常见的微量有机污染物(OMPs)主要包括石油烃(BTEX)、多环芳烃(PAHs)和氯代烃

(CAHs)等有机污染物,以及杀虫剂、防腐剂等其他污染物^[24]。岸滤系统可以通过含水层本身的特性及生物活动去除这些微量有机污染物。研究表明,岸滤取水依靠岸滤系统本身的吸附作用以及生物降解作用对 BTEX 的去除率在 65% 以上,并且去除率随着苯、甲苯、乙苯、二甲苯依次增高。岸滤系统虽然可以通过去除一定浓度的 BTEX 混合物来保护地下水,但其净化率会随着时间的延长和污染物浓度的增加而降低^[25-26]。而对于已受 PAHs 污染的傍河沉积物来说,PAHs 的浓度受控于细菌菌落的组成^[27-28]。Gloria 等^[29]的研究显示,PAHs 的浓度主要受控于细菌菌落中的 δ -变形细菌、壁菌门、类杆菌等菌群,并且在这一过程中 PAHs 中大量的种系列可与还原性硫酸盐菌相结合,促进 PAHs 的降解。另外,有机磷酸酯类(OPs)和醚类物质作为岸滤取水和地下水流动过程中的一种有机示踪剂,已有研究证实岸滤系统对 OPs 的去除效果优于醚类物质,并且其去除率可达 72% ~ 99%^[30]。

在农耕区,农药、化肥等的使用是威胁区域地下水质量的主要因素。据报道,Platter 河利用岸滤系统降低除草剂三嗪和乙酰胺等的浓度时,除草剂的代谢物浓度会升高^[31]。Sung 等^[32]和 Kuster 等^[33]研究时间和空间尺度上药物活性化合物(PhACs)、环境内分泌干扰物(EDCs)、个人护理用品(PCPs)等有机微量污染物(OMP)s 以及农药类物质在 RBF 过程中的去除情况,结果表明,岸滤系统可以使污染物的浓度降到很低。同时,针对生物降解作用对岸滤系统中抗生素的高效去除作用,文献[34]对岸滤系统中 3 种土壤典型抗生素四环素、红霉素和磺胺噻唑进行研究,结果表明,土壤颗粒和混合物之间的电子吸引力对红霉素的去除具有重要影响,而生物活动和土壤吸附作用是磺胺噻唑去除的主要控制因素。

1.4 细菌类

地下水中的细菌类污染物大多来源于粪便污染,并且水环境中的病原微生物具有浓度低、难检测等特点^[34]。研究表明,岸滤系统利用自身天然过滤作用,可以将河水或者河床沉积物中的固体悬浮物(以浊度为指标)、病原微生物和指示性细菌(*E. coli*)、溶解的化学物质以及天然有机质去除^[2,35]。Prakash 等^[36]研究了印度赫尔德地区 RBF 系统对于浊度、有机质和粪便性污染的净化效果,揭示隐孢子虫(*Cryptosporidium*)和鞭毛虫(*Giardia*)在某些河水中出现,却从未出现在与河水有任何水力联系的傍河开采井中。张威娜等^[37]对郑州“九五”滩地傍河取水工程进行现场取样,测定水中微囊藻毒素和藻

毒素的含量,发现岸滤系统对两类微生物的去除效果良好,去除率在 90% 以上。

2 岸滤系统对典型污染物的去除机制

岸滤系统对典型污染物的去除主要发生在地表水和地下水之间的过渡带冲积平原。此区域内的生物地球化学作用相比于地表水和地下水区域更加强,污染物受光、温度、pH、氧化还原电位、DO 以及有机质等动态混合作用的影响,通过微生物降解、吸附以及钝化等作用得以去除。在此过程中,伴随着有机质与有机污染物降解的生物活动所造成的氧的快速消耗,形成岸滤系统内的厌氧区。同时,此厌氧条件会增加反硝化细菌和还原性硫酸盐细菌的活性,形成有利于铁锰氧化物溶解的高还原性区域(图 2)^[38]。

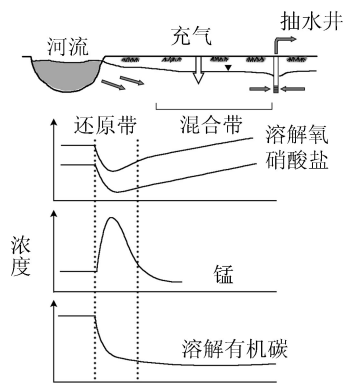


图 2 交互区水化学变化示意图^[38]

随着与河道距离的增大、生物活性的降低和非饱和带中氧含量的增加,岸滤系统由还原区域过渡到氧化区域。在此区域中,经过氧化还原作用,地下水中铁锰及其沉淀物会吸附在多孔介质颗粒的表面,进而被去除。此外,介质颗粒表面会在生物地球化学作用的影响下,形成具有吸附性的生物膜。随着河水滞留时间的增加,生物膜面积随之增加,使含水层介质空隙减少,导致含水层渗透性下降。同时,岸滤系统内含水层的堵塞会引起细粒沉积物(小于 2 mm)的滞留,尤其是硫化物和氧化物的沉淀^[39],使含水层的渗透性进一步降低。岸滤系统对污染物的去除存在不同的机制,主要包括降解去除有机污染物机制、迁移转化去除无机污染物机制,以及自然过滤去除微生物病原体机制等。

2.1 对有机污染物的去除机制

岸滤系统作为一种以生物降解作用为主的去除有机污染物的前处理方法而被广泛应用^[32-33]。其去除效果主要受控于特定污染物的性质、生物化学降解潜力、含水层中有机质的含量、生物活性、过滤速率以及生物降解率等^[40]。而含水层氧化还原条

件和流经时间共同作用则会影响特定有机污染物的去除(如抗菌药物的残留)^[25-26]。尽管已经证实岸滤系统作为一种前处理手段,对大量有机污染物具有良好去除效果,然而对某些特定的有机污染物,如杀虫剂、药物以及卤代烃类污染物,去除效率相对较差^[34]。

2.2 对无机污染物的去除机制

工矿污水排放、生活垃圾堆放以及农业施肥等人为活动是地表水体受污染的重要来源,而重金属、“三氮”以及硫酸盐等污染物对人类和生物体的危害极大。因此,水环境中无机污染物的迁移转化问题受到普遍关注^[23,41-42]。岸滤系统通过吸附、共沉淀、氧化还原、与有机质相互作用、有机质降解以及地下水与地表水混合等过程,控制无机污染物的迁移转化^[7]。其中,氧化还原作用、有机质的生物降解作用以及地下水与地表水混合作用,是岸滤系统内控制无机污染物去除的主要因素^[23],具体表现在3方面:一是铁和锰在还原环境中会还原溶解并迁移,而在氧化环境会产生吸附作用、沉淀作用以及共沉淀作用。岸滤系统内Fe(II)的浓度较高,且溶解态的Fe(II)氧化成固态铁氧化物的过程中,水体中重金属Cu、Hg、Pb以及As等会与铁氧化物共沉淀^[43]。二是岸滤系统内地球化学条件的变化,促使有机质产生生物降解作用,影响重金属污染物与天然有机质(NOM)的结合,如岸滤系统内的锌和钙等重金属,在有机质降解的过程中会与岸滤系统内的电子受体相结合而迁移转化^[40,44]。三是高浓度的无机离子,如氨氮,在地下水和地表水混合作用过程中会降低到饮用水标准^[45]。李圣品等^[46]针对沈阳市傍河型水源地的氨氮污染问题,通过野外水文地质调查以及室内批试验、柱实验和数值模拟,筛选出去除NH₄⁺-N的最佳方案,其主要技术原理是利用微生物硝化作用结合沸石的吸附作用,构建有一定弧度的渗透反应格栅(PRB),并在PRB构建过程中利用高压旋喷技术和旋挖技术解决大深度(大于30m)PRB构建的问题。结果显示,对氨氮的去除率高达99%,出水氨氮质量浓度低于0.5 mg/L,硝酸盐氮和亚硝酸盐出水浓度符合地下水III类标准。因此,岸滤系统作为一种水处理中的前处理方式,通常与相关去除技术联用来进行水质净化。其中常用的原位去除技术主要包括渗透反应格栅(PRB)技术和地下水人工回灌技术等。

2.3 对微生物病原体的去除机制

地下水中微生物病原体的迁移转化受控于对流-弥散、过滤、滤除、钝化、溶解以及沉降等作用,其中,钝化和过滤作用是岸滤系统内微生物的主要去

除作用^[36,47]。随着时间的推移,钝化作用会造成细菌外层蛋白破坏、核酸生物降解,致使病原体失活后影响其宿主细胞的活性。这一过程主要受控于温度、颗粒物和土壤的吸附作用以及微生物的活性^[36,48]。岸滤系统对微生物病原体的去除表现为微生物粒子的物理去除过程,此过程中微生物病原体污染物被自身颗粒大小和含水介质本身的孔隙大小所控制。McDowell-Boyer等^[49]的研究表明,含水介质直径/颗粒直径>20 mm,过滤作用非常明显;10 mm<含水介质直径/颗粒直径<20 mm,去除颗粒的作用明显;含水介质直径/颗粒直径<10 mm,则没有颗粒可通过多孔介质。有关岸滤系统中溶解的、颗粒的以及微生物的污染物的去除机制尚不清晰,需要对污染物的迁移转化机制进行更深入的研究,以利于与后续处理程序相连接的岸滤系统设计、运行及其优化方案的提出。

3 岸滤系统中典型污染物去除的影响因素

研究表明,利用岸滤系统本身特性,通过水力调控来提高抽水井出水水质,主要取决于3方面因素:区域水文地质条件、取水构筑物的选择以及取水过程中的生物地球化学作用^[38]。

3.1 区域水文地质条件

源水水质、温度、含水层的氧化还原特性、土著生物群落的生态能力是影响岸滤系统内区域水文地质条件的主要因素^[32,50]。另外,区域水文地质条件尤其是岸滤取水水源地河床和河岸水力渗透系数的变化,会对存储于含水层表层的水和释放到河水中的化学物质产生影响^[51]。Dash等^[5]模拟岸滤系统内温度、含氧量以及有机质对6种PhAcs不同的去除效果,指出傍河取水过程中必须调查清楚区域水文地质条件(如水温、溶解氧含量等),因为区域水文地质条件是影响PhAcs去除过程中生物降解和吸附作用的主要影响因素。Regnery等^[50]对科罗拉多河附近的岸滤系统在不同时间及水质参数(源水水质、温度等)条件下运行的稳定性进行了长达7年的研究,通过检测统计岸滤系统对有机痕量物质(TOrC)、溶解有机碳(DOC)以及营养物质去除效率的季节性差别,指出岸滤系统可以作为一个环境单元稳定地运行;同时,利用研究区内特殊的地形条件,增加取水过程中的水力停留时间等,同样可以使岸滤系统内污染物浓度降低,提升污染物去除效果。有研究者^[52]利用埃及尼罗河的河床地带覆盖有浅层黏土的特殊地形条件,采取对RBF生产井中添加砂滤柱,诱导水流优先流过黏土层的方式,增加傍河取水过程中的产氧量,阻止铁和锰迁移转化,建立了一种岸滤取

水过程中原位去除 Fe 和 Mn 的方法(图 3)。

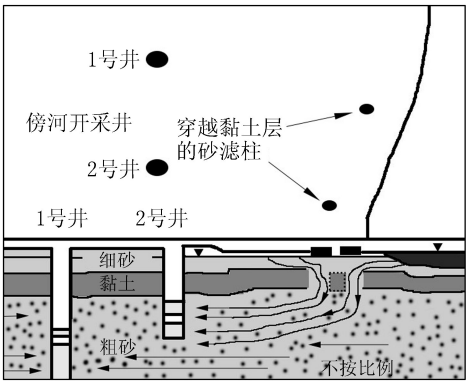


图 3 利用 RBF 区域黏土地形布置开采井示意图^[52]

另外,Rashid 等^[53]则在马来西亚利用人工屏障技术(即 artifical barrier,简称 AB)对岸滤取水过程中的固体颗粒以及重金属铁进行预处理。人工屏障技术是一种利用人工竖直柱对 RBF 过程中抽取的水进行净化的手段,具体是利用当地土壤(主要包括黏土、砂质黏壤土以及沙壤土)与颗粒活性炭和沸石以 5 : 2 : 3 的比例混合,使浊度和铁的去除率分别由当地土壤处理的 59% ~ 88% 和 74% ~ 87%,上升到 76% ~ 98.8% 和 73% ~ 92%(图 4)。因此,选取适宜的傍河水源地,首先需要调查清楚傍河水源地的区域水文地质条件;其次是针对不同的区域水文地质条件,设计不同的取水方案,降低污染物的出水浓度。

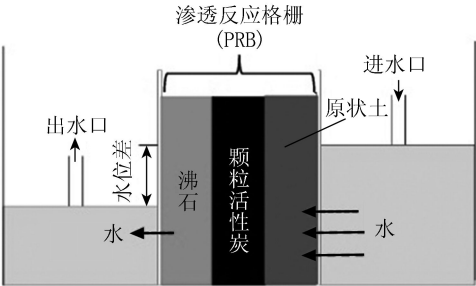


图 4 AB 技术中 PRB 技术装置示意图^[53]

3.2 取水构筑物的选择

合理选择利用取水构筑物是利用研究区的自然、地质及水文地质条件、污染物的性质和分布情况等,以及适当的抽注水量,形成最佳的地下水人工流场,有效截取地下水中污染物的必要条件^[54]。当前开采地下水常用的取水构筑物主要有 2 类,分别是垂直取水构筑物,如管井、大口井等,以及水平取水构筑物,如渗渠(集水廊道)、通河井等(图 5)^[55-56]。岸滤取水过程中影响水平井和竖井选择的因素有很多,其中抽水速率以及含水层厚度是两个最重要的因素,其次是土壤质地。同时,抽水时长以及抽水速率也是评价傍河取水污染物浓度的重要参数^[57]。王含婧等^[16]对管井分布距离与污染物去除率之间

是否存在相关性进行了探讨,对 6 口管井出水进行水质监测。以总磷、氨氮、高锰酸盐指数以及 UV254 (表示含有苯环结构和共轭双键结构有机物的含量)的去除率进行统计分析,发现在距黄河 1500m 的 21 号管井,各污染物的去除率最高,分别是 84.07%、94.67%、91.39% 以及 81.52%,加大或降低管井分布距离都会使污染物的去除率降低。另外,傍河取水过程中可采用辐射井傍河取水工艺,因为相比于普通取水工艺,辐射井技术具有成本低、出水质量好等优点^[54]。

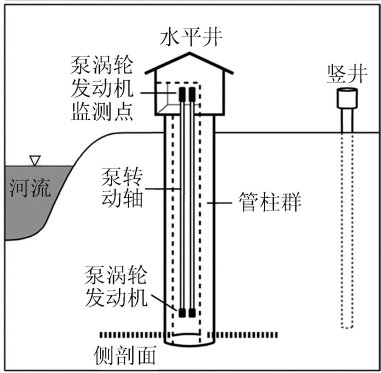


图 5 傍河取水过程中监测井示意图^[57]

3.3 生物地球化学作用

岸滤取水过程中的生物地球化学作用十分复杂,包括氧化还原环境的变化、生物降解作用以及 CaCO₃ 的溶解作用等^[22]。目前,已有的研究多采用室内模拟实验和小范围现场实验来观察生物地球化学作用对污染物的去除效果。Grischek 等^[22]对岸滤取水距离与生物活性之间的关系进行了研究,结果表明,随着取水距离的增加,生物活性逐渐降低(图 6)。Grischek 等^[22]还在稳定流的假设条件下模拟反硝化作用,模型估算的反硝化速率为每天 0.04 mg/L;而室内试验的反硝化速率为每天 0.1 ~ 3.2 mg/L,导致结果不同的主要原因是河水的物理化学作用。Laszlo 等^[11]针对匈牙利多瑙河岸滤取水地区拥有大面积较好的水力传导系数的冲积砂砾石进行了室内和室外实验,开展基于污染物质和多孔介质特征的吸附作用研究,并对污染物质的去除率进行统计。其室内模拟实验主要采用批试验和柱子试验,实验结果表明,有机微量污染物在溶解相和固相的分配受过滤介质中有机碳含量的影响很大,重金属的离子交换作用或者吸附作用则主要受控于过滤介质的比表面积(图 6)。由于变化的物理和地球化学作用,很难在有限的的数据下清楚地解释岸滤取水过程对微生物的运移作用,进而对取水过程中由物理和地球化学作用造成的非均质多孔介质的堵塞现象机理也不清楚。笔者认为,后续应采用室内模拟

实验对多孔介质中控制微生物运移的基础过程进行机理研究,为后期关于堵塞现象的研究提供理论基础。

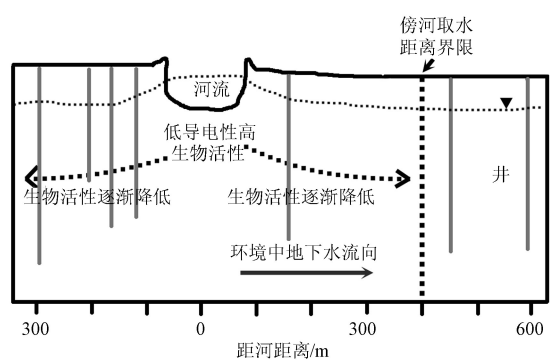


图6 岸滤取水距离与生物活性之间关系示意图^[22]

4 结 语

尽管国内外在岸滤系统内污染物的去除机制及影响因素研究方面已经取得了一定成果,但已有的研究主要着眼于岸滤系统与工程措施联用对水体的净化,而对岸滤系统内部不同类型污染物迁移转化机理的研究仍然较为薄弱;同时,岸滤系统的长时间运行可能会导致污染物的积累,进而导致系统出现堵塞现象,甚至在一定条件下造成二次污染。笔者认为,深化认识岸滤系统内部典型污染物的迁移转化行为及其制约因素,可为今后岸滤取水相关工程措施的改良提供科学依据,进而推进岸滤取水方式的发展,有效缓解地下水资源短缺问题。

参考文献:

[1] MARCELA J. Riverbank filtration: an efficient and economical drinking-water treatment technology [J]. Dyna, 2012, 171(79):148-157.

[2] RAY C, ZHENG W, D' AIESSIO M, et al. Potential of riverbank filtration to remove explosive chemicals [C]// Riverbank filtration for water security in desert countries. Berlin: Springer, 2011:129-135.

[3] HUNCHEOL I, INSEOL Y, HEECHUI C. Fate of veterinary antibiotics in riverine soils: evaluation of applicability in riverbank filtration [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 11: 1-7. DOI: 10.1080/19443994.2015.1112979.

[4] ECKERT P, IRMSCHER R. Over 130 years experience with riverbank filtration in Dusseldorf, Germany [J]. Water Supply Resource, 2006, 55(4):283-291.

[5] DASH R R, MEHROTRA I, KUMAR P, et al. Lake bank filtration at Nainital, India: water-quality evaluation [J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(6): 1089-1099.

[6] D' AIESSIO M, YONEYAMAB B, RAY C. Fate of selected pharmaceutically active compounds during

simulated riverbank filtration [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 615-622.

[7] TUFENHJI N, RYNAN J N, ELIMELECH M. The promise of bank filtration [J]. Environ Sci Technol, 2002, 36 (21): 422-428.

[8] 马英杰,石钦周,顾孝同. 郑州黄河“九五”滩地傍河取水试验综述[J]. 人民黄河, 1994(9):24-26. (MA Yingjie, SHI Qinzhou, GU Xiaotong. Test of riverbank filtration on the Yellow River of Zhengzhou: a case study of Jiuwu beach [J]. Yellow River, 1994(9):24-26. (in Chinese))

[9] 廖资生,林学钰,石钦周,等. 黄河下游傍河开采地下水的试验研究:以郑州北郊黄河滩地为例[J]. 中国科学,2004,34(A01):13-22. (LIAO Zisheng, LIN Xueyu, SHI Qinzhou, et al. Test of riverbank filtration on the down-Yellow River: a case study of Yellow River beach on the north suburb of Zhengzhou [J]. Journal of China Urban Water Association, 2004,34(A01): 13-22. (in Chinese))

[10] 张丽华,傍河开采条件下河床沉积带孔隙水水化学演化规律研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.

[11] LASZLO F, LITERATHY P. Laboratory and field studies of pollutant removal [C]//Riverbank filtration: understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal. Berlin:Springer, 2002:229-233.

[12] 罗泽娇,靳孟贵. 地下水三氮污染的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(4):65-69. (LUO Zejiao, JIN Menggui. Research progress of ammonia, nitrite and nitrate pollution in groundwater [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(4): 65-69. (in Chinese))

[13] 刘静,张永祥. 三氮在地下水中的运移模拟研究[J]. 山西建筑,2008, 34(14): 28-29. (LIU Jing, ZHANG Yongxiang. Research on the model of nitrogen pollutants transferring in underground water [J]. Shanxi Architecture, 2002, 29(4): 65-69. (in Chinese))

[14] 杨维,郭毓,王晓华,等. 氮素在包气带与饱水层迁移转化的实验研究[J]. 环境科学研究, 2008,21(3):69-75. (YANG Wei, GUO Yu, WANG Xiaohua, et al. Study on nitrogen migration and transformation in the zone of aeration and the zone of saturation by sand column experiments [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(3):69-75. (in Chinese))

[15] GROESCHKE M, KUMAR P, WINKLER A, et al. The role of agricultural activity for ammonium contamination at a riverbank filtration site in central Delhi (India) [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2):1-14.

[16] 王含婧,张军峰,李建功,等. 傍河取水工程对黄河水中污染物去除效果评价[J]. 郑州大学学报:医学版, 2009, 44(1): 151-153. (WANG Hanjin, ZHANG Junfeng, LI Jiangong, et al. Study on the effect of

- removing contaminants from Yellow River water by riverbank filtration project [J]. Journal of Zhengzhou University: Medical Sciences, 2009, 44 (1): 151-153. (in Chinese))
- [17] 雷万荣, 唐春梅, 江凌云. 浅谈地下水中铁、锰质的迁移与富集规律[J]. 江西科学, 2006, 24 (1): 80-82. (LEI Wanrong, TANG Chunmei, JIANG Lingyun. Discussion on iron and manganese transport and concentrate in underground water [J]. Jiangxi Science, 2006, 24(1): 80-82. (in Chinese))
- [18] 韩贵山. 东北地区村镇地下水生物除铁锰技术的试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [19] 王娟珍, 薛长安, 王志勇, 等. 高锰酸钾应用于地下水除铁锰试验研究与探讨[J]. 城镇供水, 2013 (3): 78-80. (WANG Juanzhen, XUE Changan, WANG Zhiyong, et al. An experiment study on the application of potassium permanganate to eliminate iron and manganese from groundwater [J]. Journal of China Urban Water Association, 2013(3): 78-80. (in Chinese))
- [20] 孙中兴. 松江区饮用水中锰污染状况及影响因素分析 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [21] SONTHEIMER H. Experience with riverbank filtration along the Rhine River [J]. Journal American Water Works Association, 1980, 72 (7): 386-390.
- [22] GRISCHEK T, SCHOENHEINZ D, RAY C. Siting and design issues for riverbank filtration schemes [J]. Water Science and Technology, 2002, 43: 291-302.
- [23] GRISCHEK T, AHRNS J, KUEHNE M, et al. Coupling riverbank filtration and subsurface iron removal [C]//8th International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR8). Beijing: IAH-MAR, 2013: 1-12.
- [24] 韩宁, 魏连启, 刘久荣, 等. 地下水中常见有机污染物的原位治理技术现状[J]. 城市地质, 2009, 4 (1): 27-35. (HAN Ning, WEI Lianqi, LIU Jiurong, et al. Progresses in the in-situ groundwater treatment technologies for organic contaminants [J]. Urban Geology, 2009, 4(1): 27-35. (in Chinese))
- [25] MA Y, LI Z. Experiment simulation study on removal mechanism of BTEX in using river filtration system [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72 (11): 4511-4520.
- [26] YAN M A, ZHIPING L, LIANG K, et al. Experiment simulation study of remove mechanism of BTEX in river filtration system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21 (10): 1262-1269.
- [27] JOHNSTON G P, LINEMAN D, JOHNSTON C G, et al. Characterization, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in long-term contaminated riverbank sediments [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74 (4): 1-11.
- [28] PIES C, HOFFMANN B, PETROWSKY J, et al. Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils [J]. Chemosphere, 2008, 72 (10): 1594-1601.
- [29] GLORIA P J, LAURA G L. Bacterial community composition and biogeochemical heterogeneity in PAH-contaminated riverbank sediments [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15 (1): 225-239.
- [30] STEPIENA D K, REGNERYB J, MERZC C, et al. Behavior of organophosphates and hydrophilic ethers during bank filtration and their potential application as organic tracers: A field study from the Oderbruch, Germany [J]. Science of the Total Environment, 2013, 460 (3): 150-159.
- [31] VERSTRAETEN I M, CARR J D, STEELE G V, et al. Dormeddy Surface water/ground water interactions: herbicide transport in to municipal collector wells [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 28 (5): 396-405.
- [32] SUNG K M, EMMANUEL A, SAROJ K S, et al. Organic micropollutant removal from wastewater effluent-impacted drinking water sources during bank filtration and artificial recharge [J]. Water Research, 2010, 44 (14): 4003-4014.
- [33] KUSTER M, DÍAZ-CRUZ S, ROSELL M, et al. Fate of selected pesticides, estrogens, progestogens and volatile organic compounds during artificial aquifer recharge using surface waters [J]. Chemosphere, 2010, 79 (8): 880-886.
- [34] 陈樑. 水环境中大肠杆菌 PCR 快速检测体系的研究 [J]. 环境科技, 2010, 23 (2): 52-54. (CHEN Liang. Research on PCR-based rapid detection system of escherichia coil in water environmental [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 23 (2): 52-54. (in Chinese))
- [35] RAY C, JASPERSE J, GRISCHEK T. Bank filtration as natural filtration; in drinking water treatment [M]. Berlin: Springer, 2011: 93-158.
- [36] PRAKASH R D, BHANU P, PRADEEP K, et al. River bank filtration in Haridwar, India: removal of turbidity, organics and bacteria [J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18 (4): 973-983.
- [37] 张威娜, 段丽菊, 李博, 等. 傍河取水工程对黄河水微囊藻毒素的去除效果 [J]. 河南预防医学杂志, 2012, 23 (3): 163-165. (ZHANG Weina, DUAN Liju, LI Bo, et al. Effect of removing microcystins from Yellow River water by riverbank filtration project [J]. Henan Journal of Preventive Medicine, 2012, 23 (3): 163-165. (in Chinese))
- [38] BOURG A C, BERTIN C. Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer [J]. Environmental Science and Technology, 1993, 27:

- [39] GIBERT J, MATHIEU J, FOURNIER F. Groundwater/surface water ecotones: biological and hydrological interactions and management options [J]. *Estuaries*, 1998, 21(2): 241-243.
- [40] BOURG A C M, KEDZIOREK M A M, DARMENDRAIL D. Organic matter as the driving force in the solubilization of Fe and Mn during riverbank filtration [C]//*Riverbank filtration: understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*. Berlin:Springer, 2002:43-54.
- [41] MORGANE G B, LAURENCE V, LAURENT L, et al. Ecological engineering approaches to improve hydraulic properties of infiltration basins designed for groundwater recharge [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(16):9936-9944.
- [42] SIGLEO A C, MEANS J C. Organic and inorganic components in estuarine colloids: implications for sorption and transport of pollutants[J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 1990, 112(1):123-147.
- [43] BOURG A C M, DARMENDRAIL D, RICOUR J. Geochemical filtration of riverbank and migration of heavy metals between the Deûle River and the Anserueilles alluvion-chalk aquifer (Nord, France) [J]. *Geoderma*, 1989, 44(2/3):229-244.
- [44] BOURG A C M, BERTIN C. Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27(4):661-666.
- [45] GHODEIF K O. Removal of iron and manganese within the aquifer using enhanced riverbank filtration technique under arid conditions [C]//*Riverbank filtration for water security in desert countries*. Berlin:Springer, 2011: 235-253.
- [46] 李圣品, 刘菲, 黄国鑫, 等. 傍河型水源井氨氮阻断与去除工程设计案例分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(8): 2471-2480. (LI Shengpin, LIU Fei, HUANG Guoxin, et al. Remediation and interception of riverside water wells contaminated by ammonium-nitrogen: an engineering case study [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8): 2471-2480. (in Chinese))
- [47] BERGER P. Removal of cryptosporidium, using bank filtration [C]//*Riverbank filtration: understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*. Berlin:Springer, 2002:85-121.
- [48] RAY C. Effect of biogeochemical, hydrogeological, and well construction factors on riverbank filtrate quality [C]//*Riverbank filtration: understanding contaminant Biogeochemistry and pathogen removal*. Berlin:Springer, 2002:1-16.
- [49] MCDOWELL-BOYER L M, HUNT J R, NICHOLAS S. Particle transport through porous media [J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(13):1901-1921.
- [50] REGNERY J, BARRINGER J, WING A D, et al. Start-up performance of a full-scale riverbank filtration site regarding removal of DOC, nutrients, and trace organic chemicals[J]. *Chemosphere*, 2015, 127:136-142.
- [51] 薛晓菲. 傍河取水水源地重金属污染环境修复技术研究[D]. 太原:太原理工大学, 2006.
- [52] 廉新颖, 王鹤立, 漆静娴, 等. 突发性重金属污染地下水应急处理技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2010, 36(11):11-14. (LIAN Xinying, WANG Heli, QI Jingxian, et al. Technology progress of emergency treatment of heavy metals pollution in groundwater[J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(11):11-14. (in Chinese))
- [53] RASHID N A A, ROLSAN M H, RAHIM N A, et al. Artificial barrier for riverbank filtration as improvement of soil permeability and water quality [J]. *Journal Technology*, 2015, 74(11):51-58.
- [54] 苏荣茗, 赵振铎. 辐射井傍河取水成井工艺试验[J]. *人民黄河*, 1989(4):67-70. (SU Rongming, ZHAO Zhenduo. Test of radial well completion technology of riverbank filtration[J]. *Yellow River*, 1989(4):67-70. (in Chinese))
- [55] 高淑琴, 戴长雷. 高寒区傍河浅薄含水层集中取水工程分析及涌水量计算[J]. *节水灌溉*, 2008(3):24-30. (GAO Shuqin, DAI Changlei. Concentrated groundwater intake works analysis and water yield calculation of shallow and thin aquifer in frigid area[J]. *Water Saving Irrigation*, 2008(3):24-30. (in Chinese))
- [56] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 121-142.
- [57] MUSTAFA S, BAHAR A, AZIZ Z A, et al. Modelling contaminant transport for pumping wells in riverbank filtration systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165:159-166.

(收稿日期:2016-08-15 编辑:彭桃英)

