

冲积平原区包气带中污染物自净规律研究

王现国¹ 彭 涛²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院 ,四川 成都 610059 ; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所 ,湖北 武汉 430074)

摘要 :以洛阳市区洛河河床岩性(以砂砾石为主)以及由亚黏土、亚砂土、中细砂等介质构成的包气带为研究对象 ,分析河床和包气带对污染物的自净能力 ,并对其天然的自净机制进行简要分析 ,结果表明 :洛河河床岩性对各种污染物(NO₃⁻ 除外)的净化能力均达到 90% 以上 ;亚黏土、亚砂土、中细砂等包气带介质层对重金属(Cu²⁺ , Pb²⁺ 等)有很强的净化能力 ,而对 Cl⁻ , Cr⁶⁺ 净化能力则较弱 ,在短时间内介质中就达到饱和而失去净化能力 ,在环境条件相近及水文地质条件基本相同的条件下 ,包气带厚度与地下水的污染程度呈负相关关系 ;污水经过包气带 ,能有效地去除污水中的有害物质 ,防止地下水污染。

关键词 :包气带 ;自净能力 ;地下水污染 ;冲积平原区

中图分类号 :X26 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2009)S1-0021-03

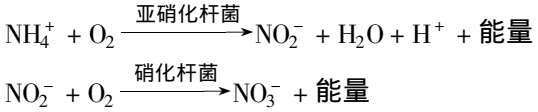
1 试验概况

为了分析研究洛阳市区洛河河床岩性及其他包气带岩性对污染物的自净能力 ,分别设计了 3 组实验 ①以污染的洛河水作为入渗水 ,并在洛河垂直渗漏段岸边打井采取地下水作为河水下渗经过净化后的水 ,将洛河水质与地下水水质进行对比分析 ,研究洛河河床岩性的自净能力。②通过野外实地取样 ,选取亚黏土、亚砂土以及中细砂 3 组土样 ,在室内分别制成土柱 ,土柱为有机玻璃柱加工而成 ,内径 6 cm ,壁厚 5 mm ,管内壁用凿子刻成粗糙面 ,从而最大程度地防止优先流对淋滤试验的影响。土柱表面和底部用直径 5 mm 孔的塑料板和尼龙网作反冲、反滤层 ,过滤板上装有高 4 cm 的砾石 ,用作过滤层并保持柱内外气流的畅通。上部用马氏瓶原理自动提供渗滤液 ,并采用定水头连续供水 ,不定时地采取经土柱净化后的水 ,与原水水质进行对比分析来研究包气带土壤对污染物的自净能力。③包气带厚度控制影响地下水补给及污染物迁移的快慢 ,从而影响包气带对污染物的自净能力。为此选择洛阳市区 9 个供水井水质化验资料来分析研究包气带厚度对污染物的自净能力。

2 洛河河床岩性自净能力

钻孔资料表明^[1] :洛河河床岩性均由砂砾石组

成 ,其中夹有薄层黏性土和泥质粉细砂层。根据试验设计分别对洛河水及在洛河垂直渗漏段岸边打井采取地下水进行水质分析 ,对比水质分析结果(表 1)可知 :以砂砾石为主的洛河河床对各种污染物的净化能力均达到 90% 以上 ,在 pH 值大于 7 的条件下 ,重金属 Cu²⁺ 在渗透过程中可完全被净化 ,NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 的净化能力在 95% 以上 ,而 NO₃⁻ 的含量却升高 ,正是水质净化后的产物。其原因可能为浅层孔隙含水层中 ,在自营养微生物的参与下 ,将 NH₄⁺ 转化为 NO₃⁻ ,从而使地下水中的 NO₃⁻ 含量增加。该作用过程分为 2 个阶段^[2] :第 1 阶段是 NH₄⁺ 在亚硝酸杆菌的作用下氧化成 NO₂⁻ ;第 2 阶段是 NO₂⁻ 在硝化杆菌的作用下氧化成 NO₃⁻ 。即



由于洛河河床岩性以砂砾石为主 ,透水性好 ,具备硝化作用进行的条件。因此 ,河水渗入补给地下水后 ,NO₃⁻ 浓度升高是否由此作用引起 ,有待进一步做专题研究。

3 包气带自净能力

3.1 包气带岩性对自净能力的影响

根据试验设计分别将所选取的土样亚黏土、亚

表 1 砂砾石垂直净化分析成果

mg/L

水样	pH	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{MnO}_4^-)$	$\rho(\text{BOD})$	$\rho(\text{NO}_2^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{Cu}^{2+})$	$\rho(\text{NH}_4^+)$	挥发酚	石油类	总硬度
洛河水	7.95	66.4	21.86	11.44	0.790	0.43	0.11	20.60	0.055	3.89	153.1
地下水	7.69	6.4	0.89	1.11	0.036	5.78	0	0.51	0.002	0.08	254.2

注 洛河水和地下水的 pH 值分别为 7.95 和 7.69 COD 、 MnO_4^- 、 BOD 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 Cu^{2+} 、 NH_4^+ 以及挥发酚和石油类的净化能力分别为 90.4% , 96% ,90.3% ,95.4% ,100% ,97.6% ,96.4% ,97.8%。

砂土以及中细砂制成高度为 1 m、1 m、0.5 m 的土柱 , 采用被污染的洛河水作为定水头连续供水 ,并不定时地采集经土柱净化过的水做水质分析 ,选取 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Cl^- 等污染物离子来分析包气带岩性对污染物的自净能力。

实验结果(表 2~4)表明 :包气带介质层对重金属有很强的净化能力 ,尤其是对 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的净化能力最强 ,降低量基本达 100% ;中细砂对 COD 有较强的去除能力 ,试验初期降低量在 70% ~ 80% ;包气带介质层对 Cl^- 和 Cr^{6+} 入净化能力较弱 ,在短时间内介质中就达到饱和而失去净化能力(图 1、图 2) ;天然介质层的吸附能力因性质不同而异 ,黏性土的吸附能力大于砂性土的吸附能力^[2]。

表 2 亚黏土水质净化试验结果

时间/h	$\rho(\text{Cr}^{6+})$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{Cu}^{2+})$
0	$\alpha(0.404)$	$\alpha(5801)$	$\alpha(10)$
36	0.005	2002	0.03
48	0.007	2949	0.01
72	0.011	5162	0
96	0.01	5875	0.06
120	0.23	6274	0.03
144	0.36	6274	0.03
168	0.39	6274	0.01
720	0.4	6274	0

注 括号中的数值为注入质量浓度 ,下同。

表 3 亚砂土水质净化试验结果

时间/h	$\rho(\text{Cr}^{6+})$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{Cu}^{2+})$
0	$\alpha(0.397)$	$\alpha(5895)$	$\alpha(10)$
24	0.008	2669	0.02
48	0.045	6000	0.01
72	0.251	6217	0
96	0.32	6297	0
120	0.41	6274	0
720	0.38	6004	0

表 4 中细砂水质净化试验结果

时间/h	$\rho(\text{Cu}^{2+})$	$\rho(\text{Pb}^{2+})$	$\rho(\text{Cr}^{6+})$	$\rho(\text{COD})$
0	$\alpha(1.45)$	$\alpha(0.87)$	$\alpha(0.34)$	$\alpha(195.93)$
16	0	0	0.0031	59.5
47	0	0	0.0022	65.01
70	0	0	0.0013	-
93	0	0	-	43.01
119	0	0	0.0005	-
141	0	0	0.0045	26.55

3.2 包气带厚度对自净能力的影响

包气带厚度的大小对地下水化学环境演化的控

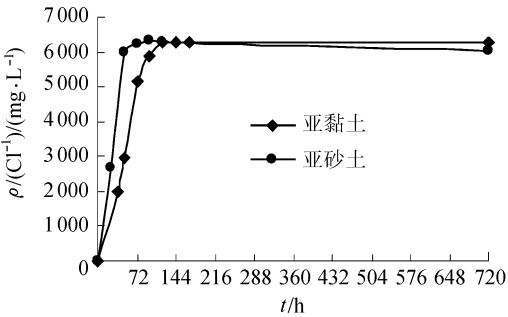


图 1 Cl^- 净化过程曲线

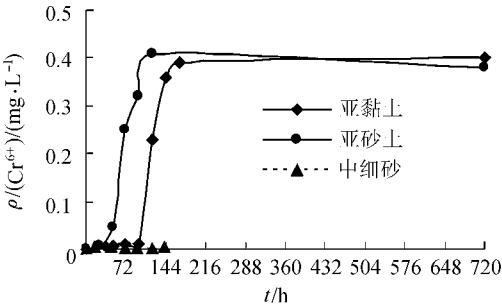


图 2 Cr^{6+} 净化过程曲线(注 :试验土柱高度相同)

制和影响也很显著。洛阳市区是盆地区地下水污染最严重的地区 ,地貌类型为洛河、涧河冲积阶地区 ,具有“二元结构” ,上部以亚砂土为主 ,厚度为 0 ~ 20 m 不等 ,含水介质以细砂、粗砂、砂砾石为主 ,厚度为 30 ~ 60 m。选择环境条件相近且地下水径流相对缓慢 ,分布在洛河、涧河平原区 9 个供水井水质化验资料对包气带厚度与离子污染指数(污染组分实测值与背景值之比)及增加值的相关性进行分析研究(见表 5)。包气带的岩性均以亚砂土为主。

表 5 及图 3、图 4 分析结果表明 :在环境条件相近及水文地质条件基本相同的条件下 ,包气带厚度控制了地下水的污染程度 ,在包气带厚度为 3 ~ 5 m 的范围内 ,TDS、总硬度及 Cl^- 的污染指数与增加量下降明显 ;在包气带厚度为 5 ~ 11 m 的范围内 ,下降趋于平缓 ,随着包气带厚度的增加($> 11 \text{ m}$) ,TDS 和总硬度的污染指数及增加量下降趋势有所增加 ,而 Cl^- 却呈现上升的趋势 ,总体上 TDS、总硬度及 Cl^- 的污染指数及增加量与包气带的厚度呈负相关关系。包气带厚度小 ,其吸附、溶解、沉淀等水文地球化学作用过程短 ,包气带的净化程度低 ,防污性能差 ,地下水水质差 ;反之则包气带的净化程度高 ,防污性能好 ,地下水水质好。

表 5 包气带厚度与化学组分污染指数及增加量关系

mg/L

位置	包气带厚度/m	TDS				总硬度				Cl ⁻			
		评价值	对照值	污染指数	增加值	评价值	对照值	污染指数	增加值	评价值	对照值	污染指数	增加值
白马寺	3.42	1840	488	3.77	1352	1456.7	351.39	4.15	1105.31	394	47.0	8.38	347.0
缠河	4.22	756	377	2.01	379	520.6	304.38	1.71	216.22	96	20.0	4.80	76.0
老城	5.45	726	305	2.38	421	425.4	249.56	1.72	175.84	53	19.0	2.79	34.0
西工	11.34	854	486	1.76	368	580.5	369.35	1.57	211.15	88	42.0	2.10	86.0
涧西	11.58	710	441	1.61	269	510.0	334.46	1.48	175.54	69	45.6	1.51	23.4
洛南	12.67	958	689	1.39	269	620.0	474.19	1.31	145.81	98	71.2	1.38	26.8
李楼	13.89	622	518	1.20	104	420.4	371.31	1.13	49.09	97	29.6	3.28	67.4

注 对照值为 1984 年实测值 ,评价值为 2004 年实测值。包气带的岩性均以亚砂土为主。

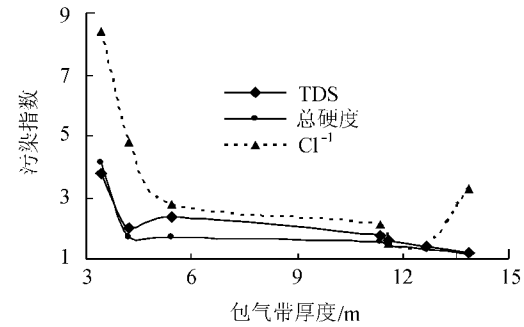


图 3 污染指数与包气带厚度的变化关系

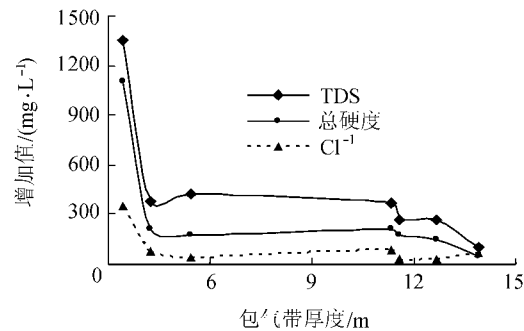


图 4 污染物增加量与包气带厚度变化关系

4 包气带的天然自净机制初步分析

4.1 过滤作用

包气带是由不同尺寸孔隙构成的孔隙网络 ,是天然的过滤层 ,对入渗水中的悬浮物有很好的过滤作用。洛河水经包气带入渗时 ,首先经过滤将直径较大的悬浮物滞留在表层 ,一般悬浮物质量浓度为 30 ~ 350 mg/L 的水通过中细砂层后 ,出水悬浮物质量浓度小于 10 mg/L^[3]。

4.2 阳离子交替吸附作用

渗入包气带中的洛河水经过滤作用将直径较大的悬浮物滞留在表层 ,溶解于水中的某些有害离子则被吸附在颗粒表面 ,阳离子交替吸附作用的强弱取决于岩土的广告能力。黏性土由细小的片状黏土矿物组成 ,具有很大的比表面积 ,片状黏土矿物边缘带有较强的负电荷 ,具有很强的吸附能力。因此在含有较多黏土矿物的黏土岩类中交替吸附作用最强 ,而颗粒较大、比表面积较小的砾石层交替吸附能

力较弱小。不同的阳离子吸附在岩石表面的能力不同 ,离子价位越高 ,离子半径越大 ,水化离子半径越小 ,吸附能力越强。按吸附能力排序 ,自大而小为 H⁺ > Fe³⁺ > Al³⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Na⁺ ,三价离子的吸附能力大于二价离子 ,由于 H⁺ 半径很小 ,因此吸附能力最强^[4-5]。当水中某种离子浓度增大 ,会增强该种离子的吸附能力。

包气带具有持水功能、吸附功能、透气和透水功能 ,且位于变温带内 ,为各类细菌繁衍提供了必要的水、热、气条件^[6-7]。研究区包气带岩性以中细砂、粉砂、亚砂土、黏性土层为主 ,比表面积大 ,小孔隙多 ,过滤、吸附作用强 ,可形成细菌总量很大的生化层 ,生物化学降解作用较强。包气带对污水中 COD 的降解是一个复杂的生物化学过程 ,包气带上部透气性较好 ,形成以好氧菌群落为主的生物氧化带 ,以生物氧化作用为主 ,包气带下部透气性较差 ,由于上部生物氧化带形成后 ,将氧基本耗尽 ,有利于形成以厌氧菌群落为主体的生物还原带 ,以生物还原作用为主。当生物氧化带和生物还原带形成后 ,细菌群落将渗入水带入的污染物质分解为气体和无机盐 ,从而将渗入污水净化 ,COD 值明显下降。本次试验在此方面没有进行专门的研究 ,有待进行专题研究。

5 结论和建议

污染物在包气带内 ,通常会发生吸附、过滤、离子交换以及生物化学等多种作用 ,能有效地去除污水中的有害物质。笔者以洛阳市区洛河河床岩性 (以砂砾石为主)以及由亚黏土、亚砂土、中细砂等介质构成的包气带为研究对象 ,分析河床岩性和包气带对污染物的自净能力 ,并对其天然的自净机制进行简要的分析 ,结论如下 :

a. 以砂砾石为主的洛河河床对各种污染物的净化能力均达到 90% 以上 ,在 pH 值大于 7 的条件下 ,重金属在渗透过程中可完全被净化 ,NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 的净化能力在 95% 以上 ,而 NO₃⁻ 含量的升高正是水质净化后的产物 ,其原因有待进一步研究。

(下转第 32 页)

度 网河区上段比口门区的水位高 1 ~ 2 m ,而 2001 年枯季整个网河区的水位都在潮汐动力控制下 ,从 马口三水到口门的水位差只有 0.5 m 左右。由此可见 ,由于几十年的地形变化 ,河床下切 ,口门延伸 ,网 河区的潮汐动力显著增强 ,在枯季尤为明显。

3 结 语

a. 利用一维水动力数学模型对珠江网河范围 的水动力进行建模和验证。从水位验证的结果可以 看出 ,分布在网河的 19 个固定水位站水位的计算值 和实测值吻合较好 ,表明数学模型可用于该网河水 动力特征的分析。

b. 由于 50 年来河道地形的剧烈变化 ,西北江 网河的主要汉点的分流比发生了较大改变 ,总体 上来看 ,处于北江干流及周边的节点分流比变化程度 大于西江干流节点 ,水面线对地形的变化非常敏感 , 河道地形变化 ,水面线随之而调整 ,20 世纪 90 年代 的西江干流沿程水面线普遍比 50 年代降低 ,其中西 江干流上段下降更明显 ,通过 50 年代和 90 年代西 北江网河区等水位线分析表明 ,90 年代网河区潮汐 动力明显增强 ,夏季时高压区与低压区水位差减小 , 枯季时潮汐动力控制范围增大。

c. 50 年来人类活动驱动的河道地形变化是导 致西北江网河区水动力变化的主要原因 ,但由于目 前地形资料的限制 ,从 50 年代到 90 年代的跨度较 大 ,其中对 50 年期间人类活动对水动力变化的时序 阶段性不能直接反映 ,所以在今后的研究中有必要进 一步讨论不同阶段人类活动对水动力变化的影响。

参考文献 :

[1] LUO Xian-lin , ZENG Y E , JI Rong-yao. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River Delta , China[J]. Journal of Hydrology , 2007 , 34(3) 230-239 .
[2] 杨清书 , 沈焕庭 . 西北江三角洲来水来沙的非线性分形特征[J]. 泥沙研究 2002(6) :15-18 .
[3] 陈晓宏 , 张蕾 , 钟时 . 珠江三角洲河网区水位特征空间变异性研究[J]. 水利学报 2004(10) 36-42 .
[4] 张二骏 , 张东生 , 李挺 . 河网非恒定流的三级联合解法 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 1982(1) :1-13 .
[5] 张蔚 , 严以新 , 诸裕良 , 等 . 人工采沙及航道整治对珠江三角洲水流动力条件的影响[J]. 2008 , 39(9) 99-104 .
[6] 刘秋海 , 吴超羽 . 东江博罗浅段航道整治工程数值模拟 [J]. 水运工程 2004(4) 57-59 .
[7] 李春初 . 中国南方河口过程与演变规律[M]. 北京 : 科技出版社 2004 32-40 .

(收稿日期 2008 -07 -07 编辑 : 高建群)

(上接第 23 页)

b. 亚黏土、亚砂土、中细砂等包气带介质对重 金属有很强的净化能力 ,尤其是对 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的净 化能力最强 ;中细砂对 COD 有较强的去除能力 ,试 验初期 COD 降低量在 70% ~ 80% ;亚黏土、亚砂土 等包气带介质层对 Cl^{-} 和 Cr^{6+} 净化能力较弱 ,在短 时间内其在介质中就达到饱和而失去净化能力。

c. 天然介质层的吸附降解能力因性质不同而 异 ,黏性土吸附能力大于砂性土的吸附能力。

d. 在环境条件相近及水文地质条件基本相同 的情况下 ,包气带厚度控制了地下水的污染程度 ,包 气带厚度小则其吸附、溶解等水文地球化学作用过 程短 ,包气带的净化程度低 ,防污性能差 ,地下水水 质差 ;反之 ,包气带的净化程度高 ,防污性能好 ,地下 水水质好。

参考文献 :

[1] 河南省水利厅水政水资源处 ,郑州市地质工程勘察院 . 河南省洛阳市城市地下水超采区评价成果报告[R]. 郑 州 :郑州市地质工程勘察院 2005 .
[2] 王现国 . 河南洛阳盆地孔隙地下水系统演化及调控[D]. 中国地质大学 (武汉) 博士学位论文 2006 .

[3] 汪民 , 吴永峰 . 污水快速渗滤土地处理[M]. 北京 : 地质出 版社 , 1993 .
[4] 沈照理 , 朱宛华 , 钟左晃 , 等 . 水文地球化学基础[M]. 北 京 : 地质出版社 , 1993 .
[5] 王大纯 , 张人权 , 史毅虹 , 等 . 水文地质学基础[M]. 北京 : 地质出版社 , 1995 .
[6] 李广贺 , 张旭 , 黄巍 . 石油污染包气带中降解微生物的分 布特性[J]. 环境科学 2000 , 21(4) 61-64 .
[7] 王雪莲 , 席彩杰 , 杨琦 , 等 . 包气带中污染物的天然降解 作用[J]. 新疆环境保护 2005 , 27(3) 40-43 .

(收稿日期 2008 -12 -17 编辑 : 高建群)

