13

11—13

X508.2
X141

山区城市地质环境演化中包气带的二次污染机制①

王兰生② 刘 丹③ 杨立铮② 徐锡珍② 姜 云④

摘　要　污染液在包气带中的作用机制，是城市地质环境污染控制研究中的一个重要环节，是人们关注的焦点。本次研究以长江三峡工程水库库尾段重庆等山区城市为典型实例，研究了包气带地质结构特征和污染现状。在室内开展了岩柱淋滤模拟试验，揭示了污染物在包气带中的作用机制。研究证明，包气带对污染物具的净化、聚焦和变异等多种功能，并在一定条件下可造成对环境的二次污染，它在城市生态环境演化进程中，具有重要意义。

关键词　地质环境演化　包气带二次污染　污染链

环境污染

Abstract　The action mechainsm of pollutants in the aeration zone is an important link in the study of controlling over the pollution of urban geological environment and a focus of popular attention. This study, taking some mountainous cities in the tail part of the reservoir of the Three Gorges Project like Chongqing as typical examples, studied the geological structural features and pollution status of the aeration zone, conducted indoor modelling experiment on the infiltration through rock column, and revealed the action mechanism of pollutants in the aration zone. The study has shown that the aeration zone has the function to purify, gather and vary the pollutants and, under certain condition, cause a secondary pollution to the environment. It is of vital importance to the process of the urban eco-environmental evolution.

Key words　geologcail-environmental evolution, secondary pollution of aeration zone, pollution chian

1　城市环境污染系统及包气带的污染状况

1.1　城市环境污染现状

这些城市由于地处谷地，空气流通受限，工业烟尘排放尚在治理中，生活用煤尚未得到全面改善，大气污染严重。以重庆市为例，地面空气中高浓度二氧化硫多年日均浓度为0.38mg.m^3，超标2.8倍；年降尘总量为292.8t/km^2，月均降尘24t/km^{2}左右，超标2.5倍。总悬浮微粒全年在25.6%时间日均值超标。酸雨污染面积大，出现频率高，1986～1990年酸雨量占总雨量70.5%，pH平均值4.2，个别地区仅有2.85，属硫酸性酸雨。月均化学成份SO_4^{2-} 4.38～27.75mg/l；NO_3^- 3.1～20.58mg/l；NH_3^+ 2.78～4.83mg/l；F^- 1.21mg/l左右。

地表水污染，根据重庆市统计，1991年度废水排放量5.6×10^8t，最高(1987年)可达11×10^8t，其中工业废水约点67.2%，含有大量重金属和有毒成分。城市降雨迳流污染是另一重要污染源，重庆、长寿、涪陵、万县等城市年单位面积冲刷量BOD_5为18.89～1785.27t；COD为83.8～173.0t，其中石油类污物明显超标。上述污水大部分直接排入江河，造成江水污染，也有相当部分滞留于地面渗入地下。

土壤主要分布于市郊，它的污染程度也可反映城市污染的累积程度，其中金属污染物普遍超标，汞(Hg)超标达8.9倍。

这些城市均建在地下水贫乏的陆相砂泥岩红色地层上。地下水泉点的监测资料显示，均呈明显污染。水中Fe、Mn、COD、细菌、和大肠菌群总数普遍超标，Hg、Cd、Pb部分超标。污染源主要来源于生活、固体垃圾废弃物渗液、工业废水及农药化肥等。

1.2　城市包气带污染状况

山区城市卸荷风化壳和滑坡崩塌堆积物大都处于包气带之中，渗水和污染液在包气带的运移通道以卸荷风化壳裂隙为主。在土层覆盖的部位与孔隙通道组合；有硐室的部位形成裂隙-硐室组合通道。运移在包气带中渗入液可在砂岩和泥岩接触面附近间歇渗出地表，或聚积在泥岩凹腔中；或从沟谷底部渗出进入沟道，或汇积于洞穴中。这些渗水的化学成分可以反映出包气带的污染状况及污液在运移过程中的变异。为此，分别在山顶区、山坡区、近岸带具代表性的部位采集系

---

① 国家自然科学基金资助项目，参加者有李曰国、李天斌、赵其华、刘治安、亚南等

② 成都理工学院

③ 西南交通大学

④ 四川交通厅

列渗出水样或裂隙淀积物，有的采自地下洞室、洼坑，并在正在施工的地铁通道处采集了渗出水。化学分析成果表明：

(1)包气带已普遍遭受不同程度的污染。即是从山顶区砂岩裂隙中渗出的水，非离子氨含量达到 37.28mg/L，超出一般景观要求水域水质(Ⅴ级)。污水主要来源于山顶生活污水和固体垃圾渗液。

(2)包气带污染程度有由山顶区、山坡区向岸边带增重的趋势，其中非离子氨和 COD 的含量的加重尤为明显。城市下部水中 COD 明显超出Ⅴ级水的允许值。

(3)老的洞穴和凹洼中的积水已被严重污染，非离子氨可超过 100mg/L，COD 可超过 300mg/L。值得注意的是对人体健康尤为有害的亚硝酸—氮较Ⅴ级水标准超标数倍，正在兴建的地铁洞室中 NO_2^- 含量达 7.68mg/L。挥发酚普遍检出含量超标。

(4)包气带渗水污染成分与地下水的污染成分相当，但污染程度较后者更为严重，它是地下水污染的主要来源，因而地下水的污染状况也间接反映了包气带的污染状况。

2　污染系统中包气带作用功能的试验研究

2.1　岩石吸附污染物能力试验

选择了砂(质)泥岩、砂岩、白云岩和灰岩 4 种岩石。分别用生活污水、工业废水和农业污水进行试验，试验得到以下认识。

(1)各类岩石对污染物中非金属离子吸附能力比金属离子大，如对 NH_4^+ 的吸附量比 Cr^{6+} 大 2800 倍左右，说明岩石对生活污水和农业污水的吸附能力强。

(2)不同类型岩石的吸附能力差异明显，有下列顺序：

NH_4^+：砂泥岩＞砂岩＞白云岩＞灰岩；

HPO_4^{2-}：砂泥岩＞砂岩＞灰岩＞白云岩；

F^-：砂泥岩＞砂岩＞灰岩＞白云岩；

SO_4^{2-}：砂泥岩＞砂岩＞灰岩＞白云岩；

Cr^{6+}：砂岩＞白云岩＞砂泥岩＞灰岩；

Cu^{2+}：砂泥岩＞砂岩＞白云岩＞灰岩。

其中砂泥岩的吸附能力尤为显著，以 NH_4^+ 为例，大约为白云岩和灰岩的 50～100 倍。

(3)吸附达到饱和以后，裂隙或孔隙通常对污染液只起传输作用。

2.2　碎石块柱淋滤模拟试验

制作 4 个高 1m 的管柱(图 1)，分别充填砂岩和泥岩碎块，模拟滑坡崩塌堆积物包气带中污液作用机制。污液参照重庆市生活污水成分人工配制，COD220～830mg/L；HN_4^+ 15～65mg/L；Cl^- 210～280mg/L。采取连续和断续淋滤 2 种方式，历时 30d。根据试验成果(图 2)获得以下主要认识。

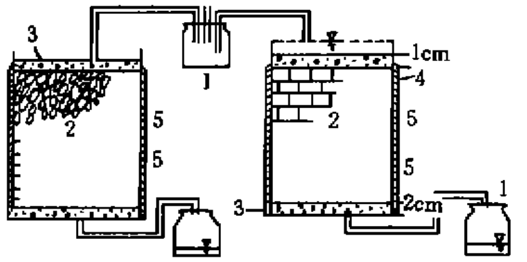

图 1　碎石和块石岩柱污染液淋滤试验装置

Fig. 1　Experimental Installiation for the infiltration of polluted liquid through a column of rock fragments and rock lumps

1—污染液；2—碎石或块石柱；3—石英砂；4—防渗材料；5—分层取样

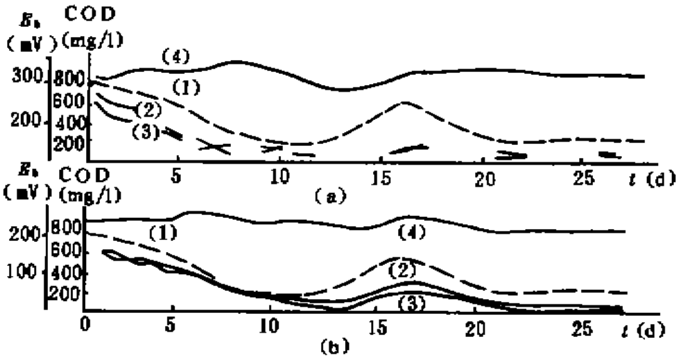

图 2　岩柱(碎块柱)污染淋滤液化学成分浓度变化曲线

Fig. 2　Curve of the variation in chemical composition of polluted infiltrating ligquid through the rock colum(rock fragments)

(1)—淋滤液浓度；(2)—砂岩输出浓度；(3)—泥岩输出浓度；(4)—Eh；(a)—断续淋滤；(b)—连续淋滤

(1)物理吸附与生物降解净化机制　排除淋入液 COD 浓度变化的影响，淋出 COD 浓度总体呈衰减趋势，但呈波状起伏，区别于通常的土柱淋滤试验，后者一般表现为先升后平或下降。

(2)氧交替条件在净化功能中的作用　试验证明，断续淋滤 COD 去除率明显高于连续淋滤。这可能与水负荷的变化导致氧交替条件差异有关。前者显然更有利于氧的交替，它的 Eh 值波动在 300～350mV 间，而后者在 200～270mV 间。试验证明氧交替条件在净化功能中的重要作用。

(3)砂岩与泥岩净化功能的对比　相似条件下，泥岩柱对有机污染物去除效果略优于砂岩柱，这可能与粘土矿物具有较强的吸附性能有关。

2.3　规则块石岩柱淋滤模拟试验

模拟基岩风化卸荷裁隙带，用5×5×5cm^3块石堆砌成4个岩柱。柱Ⅰ、Ⅱ高40cm；柱Ⅲ、Ⅳ高80cm。采用现场生活污水（COD60～10mg/L；NH_4^+ 8～40mg/L；NO_2 4～0.5mg/L；NO_3^- 1～40mg/L）。Ⅰ—Ⅲ采用断续淋滤；Ⅳ采用连续淋滤并保持柱体处于饱和状态，历时25～45d。试验获得以下主要成果。

(1)三氮转化特征

a.柱Ⅰ—Ⅲ。NH_4^+ 总体呈下降趋势，15d以后，衰减率显著增大。NO_3^- 呈累进式增长。NO_2^- 初期波动剧烈，15d以后迅速降低。NH_4^+ 转化率岩柱高者（Ⅲ）较低者（Ⅰ、Ⅱ）大；淋滤间断时间长者（Ⅱ）较短者（Ⅰ）大。

b.柱Ⅳ的情况明显区别于前三者。NH_4^+ 在12～15d以前波动下降，总的转化率低于20%，以后出现上升趋势，接近于淋入液NH_4^+ 的含量。NO_3^- 的变化较为缓。NO_2^- 的含量前期(1～4d)波动下降，随后保持低含量，但至19d左右迅速跃增，且愈靠近底部，跃增现象愈明显。

(2)COD变化特征

a.Ⅰ—Ⅲ柱，1～15d呈剧烈波动状下降趋势，值得注意的是它的波动与NO_2^- 的波动相对应。16d以后COD平稳下降，此期间NO_2^- 大量转化为NO_3^-。

b.Ⅳ柱情况迥然区别于前三者，在4d前呈波状下降后急剧波状上升，波动状况与NH_4^+ 波动几乎同步。

3　结论与建议

(1)山区城市的卸荷风化壳、斜坡变形破坏产物（崩塌、滑坡堆积等）及人工洞穴和人工堆积层所构成的包气带圈层，是一个污染物的聚焦带，它具有净化、传输和聚焦变异等功能，在城市污染系统中占有十分重要的地位；

(2)包气带特定的环境，有利于聚集于其中的污染物产生复杂的微生物化学作用，通过三氮转化，亚硝胺作用、汞污染链、PAH污染链以及沼气化作用等多种方式对环境造成二次污染；二次污染产物，不仅增加了污染的浓度，并且产生了一些毒性更大且易被人体和生物吸收的污染物，逸出地面或渗入地下水排向江河，对人体健康和水生动物的危害是显而易见的。

(3)包气带污染状况，应列为城市生态环境优劣的重要标志。被严重污染的城市，应将开展包气带净化工程列为城市环境治理保护的一个重要组成部分。

(4)对重庆等山区城市的包气带净化工程提出以下建议：

①防止工业废水和生活污水渗入岩石和堆积层中，严禁在市区堆放垃圾和设置固体废弃物堆放场，垃圾临时性收集站应采取防渗垫层。

②清理天然沟道和废弃的地下洞室，严禁用它们排放污水和堆放垃圾等固体废弃物，改善通风条件。这项工程不仅可减少污染物的来源，并且还有利提高包气带的净化功能，改善已有污染状况。

③对于已遭受严重污染的滑坡、崩塌堆积层以及历史人工堆积层，除切断地面污染物的继续侵入以外，可结合边坡治理，削坡清除部分严重污染层。

(1998年1月收稿)

本期特别推荐部分规范类新书

编号	书　名	定价(元)	邮费	订数(本)	合计金额(元)
5.1—2	测量规范	34.00	15%		
5.2—2	城市道路与桥梁设计规范	69.00	15%		
5.3—2	混凝土结构规范	68.00	15%		
5.4—2	城市公共交通规范	54.00	15%		
5.5—2	现行建筑施工规范大全	129.00	15%		
5.6—2	室外排水工程规范	79.00	15%		

订购电话：(010)62189102　**传真**：(010)62173426　**E-mail**：bjb@midwest.com.cn

详细订购办法见本期《水文地质工程地质》插页。