

砂柱对济南城市屋面雨水径流净化效果的试验*

王维平** 何茂强 张沛沛 朱平

(济南大学资源与环境学院, 济南, 250022)

摘要 针对屋面雨水回灌裂隙岩溶含水层要求快速量大和水质要求高的特点,设计了相适宜的砂滤柱.采用室内砂滤试验研究了济南市屋面雨水径流回灌裂隙岩溶含水层之前的雨水净化效果.结果表明,砂柱对屋面雨水径流污染物有明显的去除效果,浊度的平均去除率达到87%,悬浮物的平均去除率达到70%以上,对色度、挥发酚、Pb和Zn也有一定的去除效果,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除效果较差.浊度、色度和悬浮物等大部分污染物的去除主要集中在上层完成,因此,砂柱的上层需要定期更换.

关键词 屋面雨水径流, 砂滤柱, 裂隙岩溶含水层补给管理.

随着济南城区面积不断扩大,不透水面积逐年增大,一方面汛期雨水白白流走,造成缺水 and 洪涝等灾害,另一方面,由于城市不透水面积不断的增大,雨水的入渗量减少,直接影响到泉水喷涌和地下水环境,因此,城市雨洪水回灌岩溶含水层是济南市水资源管理的重要措施之一.然而,已有研究表明,城市地表径流含有相当数量的悬浮颗粒物、营养盐、重金属和有机污染物^[1],如未经处理回灌地下岩溶含水层,会污染地下水.城市屋面雨水便于收集且水质相对城市地面雨洪水较好,具有一定的开发利用潜力,成为城市雨水利用的重点对象^[2].同时,济南市区域内的巨厚裂隙岩溶含水层为回灌提供了天然的储水空间.因此,掌握屋面雨水水质和对去除屋面雨水径流污染物方法的研究是有效利用雨水资源和回灌裂隙岩溶含水层的基础.

何江涛、陈鸿汉等提出的人工快速渗滤系统(Constructed Rapid Infiltration)^[3],其渗滤池为人工填充的天然介质,主要由河流冲积砂颗粒组成,砂粒直径小、比表面积大、介质孔隙度小,并掺入一定量的特殊填料,通过渗滤介质和微生物的物理、化学、生物吸附,过滤与净化作用和自我调控功能,使污水得以净化.田景宏等人提出的利用砂滤人工湿地系统处理污染河水^[4],取得了一定的处理效果,创造了良好的生态景观效果.Taylor Eighmy提出的利用砂滤和活性炭相结合的方法处理雨水^[5],Adin A提出的用细砂组成的渗滤系统过滤后的微污染水来进行回用^[6].雷鹏举等人利用微絮凝直接过滤系统处理低浊地表水效果明显^[7].

本文通过室内砂柱过滤试验,研究探讨了整个砂滤柱和不同粒径砂层对济南市屋面雨水径流在回灌裂隙岩溶含水层之前的净化效果,目的是预处理设施既满足岩溶含水层渗透性好的特征又满足汛期屋面雨水处理后达到回灌水质的要求.

1 实验部分

1.1 试验装置

本试验主要采用石英砂滤柱,整个砂滤系统见图1.石英砂滤柱是内径为13 cm的有机玻璃柱,高230 cm,柱底有承托层,高为10 cm.滤料高130 cm,砂层上端铺有鹅卵石防止水流过大冲散上层砂粒,下端装以直径为1—2 mm、高为8 cm的砂层,以防止细沙漏过滤网.砂柱上部设有溢流口用于控制水头,为保证渗流符合达西定律留下15 cm作为淹水水头空间.沿砂柱高每隔15 cm设置取样口,通过打开阀门收集水样.根据试验需要选择取样口布设5个测压管,测定各砂层的渗透系数.

2010年11月21日收稿.

* 国家自然科学基金项目(40972169)资助.

** 通讯联系人, Tel:13953162318; E-mail:stu_wangwp@ujn.edu.cn

1.2 试验砂柱参数的确定

该研究是将处理后达到水质要求的屋面雨水利用并直接回灌裂隙岩溶含水层,因此砂柱处理设施的滤速不仅要小于 $120 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,且同时考虑到一年内降水主要集中在 6—9 月份而且岩溶含水层渗透系数较大、单井回灌水量大的特点.经实地勘测,济南市裂隙岩溶地区的渗透系数大于 $10 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$.试验材料选用标准石英砂,对不同粒径砂层进行达西试验,测得砂层的渗透系数如表 1.

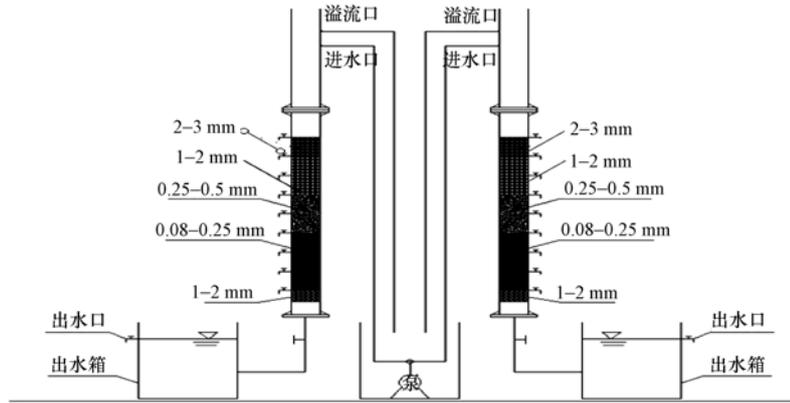


图 1 砂滤系统

Fig.1 Sand filtration system

表 1 不同粒径石英砂砂层的渗透系数

Table 1 Permeability coefficient of quartz sand layers of different sizes

粒径/mm	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	粒径/mm	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	粒径/mm	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
0.08—0.25	14.8	0.25—0.5	141.5	1—2	983.6

为了探讨不同粒径砂对污染物的去除效果,将滤层设计为 3 层,粒径级配、砂层厚度、砂层厚度与加权粒径比以及砂柱实测综合渗透系数如表 2 所示.

表 2 石英砂滤柱参数

Table 2 Parameters of quartz sand filtration column

砂层	粒径级配/mm	砂层厚度/cm	厚度与平均粒径比	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
上	1—2	45	300	37.21
中	0.25—0.5	30	800	
下	0.08—0.25	45	2727	

1.3 试验水样

试验水样取自济南大学西校区 17 号教工楼平台防水材料的瓦屋面,共采集 2008 年汛期 7、8 月份 6 场降雨形成的屋面径流,以 3 mm 雨量为界线取 3 mm 后屋面雨水径流进行过滤试验.

1.4 水样分析项目

水样送至山东省分析测试中心化验,分析项目有 pH、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、P、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、Fe、Mn、Hg、Cu、Ni、总硬度、悬浮物、可溶性固体总量、As、Hg、Pb、 Cr^{6+} 、Cd、Zn、色度、浊度、挥发酚、氰化物、总有机碳,共计 28 个指标.其中,各指标的最大值和最小值为 6 场降雨弃除前 3 mm 屋面径流后的屋面雨水各超标污染组分的最大和最小值.其中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 2008 年 7 月 17 日降雨形成的屋面径流中浓度达到最大值 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在 2008 年 7 月 1 日降雨形成的屋面径流中浓度达到最小值 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可以看出,各次降雨径流水质变化起伏较大,主要是因为受空气质量、气温、降雨历时、降雨强度及相邻两次降雨的间隔等诸多因素的影响^[8].

1.5 试验方法

本试验在实验室中进行,试验时间是 2008 年 7 月 1 日到 2008 年 8 月 24 日,室内温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ — $25 \text{ }^\circ\text{C}$.试验过程中采用定水头法,将收集的屋面雨水混合后倒入水箱中,用抽水泵向砂柱中注水,保持

定水头 50 cm. 雨水从进水口经砂柱处理后由底部流出,每隔 30 min 在每砂层底部(砂体表面以下 55 cm、85 cm、130 cm)分别取水样 600 mL,并在进水口取原混合水样 600 mL,送至山东省分析测试中心化验水样中各污染物的含量.

2 结果与讨论

2.1 雨水水质检测结果

初期雨水弃流后,超过地下水质量标准Ⅲ类的有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、色度、浊度、悬浮物、挥发酚,具体水质检测结果见表 3.

表 3 2008 年汛期济南市屋面雨水径流初期弃流后的水质指标

Table 3 Quality indices of roof rainwater runoff after discarding initial rainwater in flood season of 2008

指标	$\text{NH}_3\text{-N}$ /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_2\text{-N}$ /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	色度	浊度/NTU	挥发酚 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SS /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Pb /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Zn /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
最大值	13.0	1.5	70	160	0.05	254	0.04	1
最小值	0.01	0.002	0	1	0.002	33	0.006	0.016
地下水水质Ⅲ类标准 (GB/T14848—93)	≤ 0.2	≤ 0.02	≤ 15	≤ 3	0.002	—	≤ 0.05	≤ 1.0

注:—表示无规定值.

2.2 砂柱对污染物的总体去除效果

前 3 mm 雨水弃流后,各次超标污染物组分为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、色度、浊度、悬浮物、挥发酚,将其进水浓度、出水浓度与地下水水质Ⅲ类标准对比,观察经砂柱处理后的水质变化情况,结果如图 2 所示.从图 2 可以看出,砂柱对屋面雨水径流中的色度、浊度、悬浮物、挥发酚、Pb 和 Zn 有一定的去除效果,其中浊度达到 GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准中的分散式供水标准^[9]. 浊度的平均去除率大于 80%,出水浓度值均在 3 NTU 以下,砂滤系统对浊度大于 60 NTU 的水样平均去除效果是 97.18%,小于 60 NTU 的去除率低于 85%;色度的平均去除率为 54.13%,出水色度基本达到地下水水质Ⅲ类标准^[10],但存在个别进出水色度不变的情况;SS 的平均去除率约为 77.24%,个别情况下出水浓度仍然较高,且发现砂滤系统对 SS 的去除不稳定;挥发酚的去除率达到 87.5%,有较好的去除效果,达到了地下水水质Ⅲ类标准;在汛期,屋面雨水径流中 Pb 和 Zn 的浓度基本上低于地下水水质Ⅲ类标准值,砂滤对其有一定的去除效果; $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除效果不理想,甚至出现出水浓度值高于进水浓度值,该试验现象与 Blinda E Hatt 与 Tim D Fletcher 等人利用碎石进行试验的结果一致^[11],可能是由于滤料促使其它各种形式的氮转化为氨氮.

2.3 不同砂层对污染物的去除效果

石英砂层的粒径、厚度不同,对污染物的去除效果也不同.为了检验各层对初始进水污染物总的去除效果,各层去除率计算公式中分母均以最初进水污染物浓度为标准.从污染物在各层的去除率可以看出,污染物中的大部分主要在砂柱的上层去除.下面以某 5 次水样的浊度与悬浮物浓度为例进行分析(其它污染物指标也符合此规律),见表 4 和表 5.

由表 4 可知,上层粗砂对各种浊度去除效果较好,平均去除率达 83.61%,尤其对浊度大于 60 NTU 的水样去除效果显著.下层细砂对低浊度即浊度小于 10 NTU 左右的去除效果较好,平均去除率达 9.16%,中层中砂去除效果最差,为 1.54%.当浊度较低的雨水径流经上层和中层过滤后,出水浊度反而大于进水浊度.

由表 5 可知,上层粗砂对 SS 的去除效果较好,平均去除率达 79.27%,中层对 SS 的去除率达 12.59%,则上面两砂层对 SS 的总去除率达到 91.86%,因此,砂柱对 SS 的去除作用主要发生在上层和中层.随着砂滤系统的运行,当中砂层的出水浓度很低时,由于原水会把细砂吸附的悬浮颗粒冲刷下来,下砂层的出水浓度甚至更高.

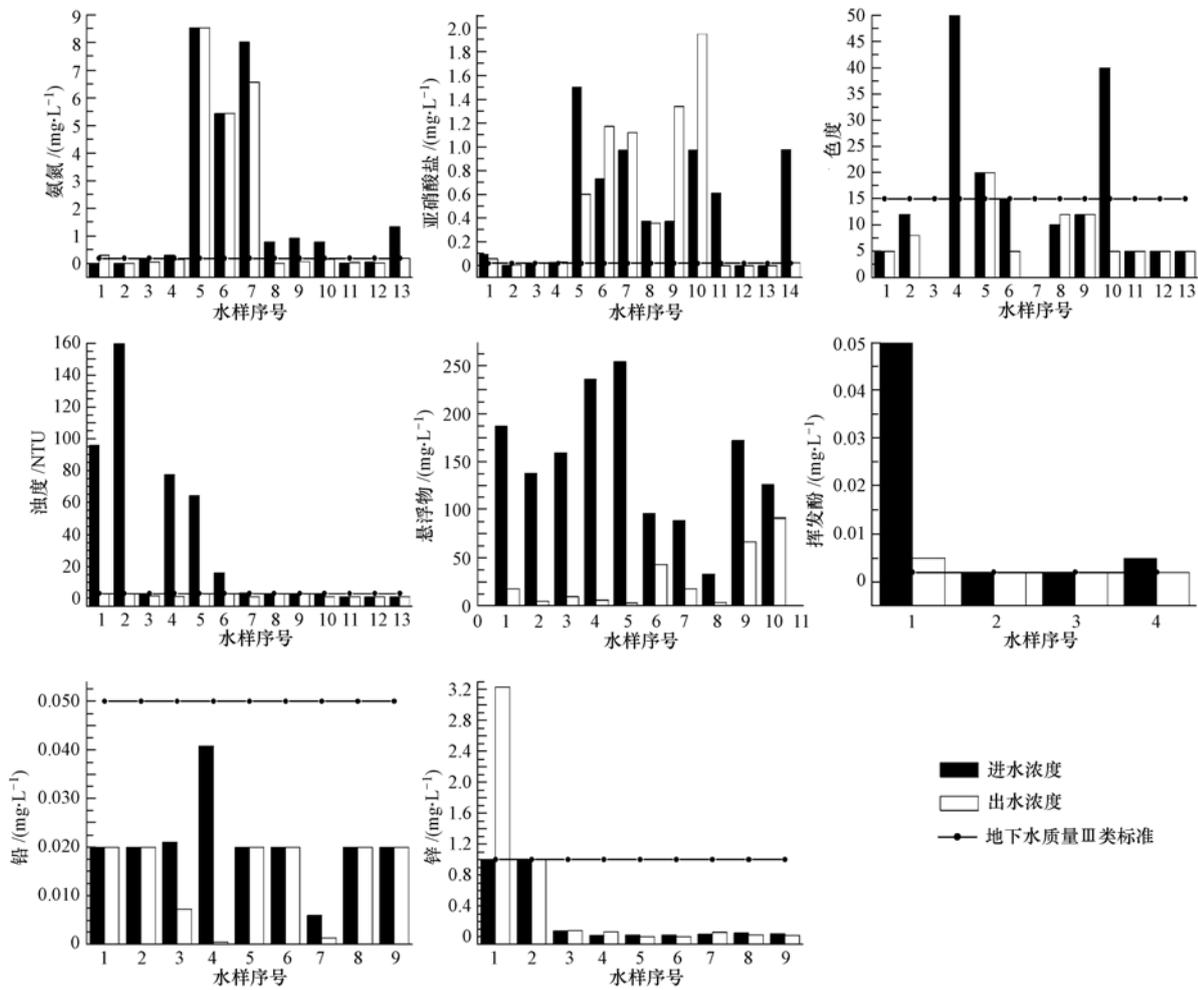


图 2 砂柱对汛期 6 场降雨形成的屋面雨水径流超标污染物的去除效果

Fig. 2 Removal of pollutants in roof rainwater runoff from six rainfall events in flood season by sand filtration column

表 4 某 5 次过滤试验各滤层对浊度的去除效果

Table 4 Turbidity removal after every sand layer in 5 filtration experiments

水样序号	进水浊度 (NTU)	滤层 1 的出水浊度 (NTU)	滤层 1 的去除率/%	滤层 2 的出水浊度 (NTU)	滤层 2 的去除率/%	滤层 3 的出水浊度 (NTU)	滤层 3 的去除率/%
1	96	8	91.67	5	3.13	3	2.08
2	160	7	95.63	4	1.88	3	0.63
3	64	5	92.18	6	0	3	4.69
4	16	9	43.75	9	0	3	37.5
5	77.4	4.01	94.82	1.91	2.71	1.23	0.88

表 5 某 5 次过滤试验各滤层对悬浮物的去除效果

Table 5 Removed of suspended solids after every sand layer in 5 filtration experiments

水样序号	进水 SS / (mg·L ⁻¹)	滤层 1 的出水 SS / (mg·L ⁻¹)	滤层 1 的去除率 / %	滤层 2 的出水 SS / (mg·L ⁻¹)	滤层 2 的去除率 / %	滤层 3 的出水 SS / (mg·L ⁻¹)	滤层 3 的去除率 / %
1	187	94	49.73	31	33.69	18	6.95
2	138	47	65.94	14	23.91	5	6.52
3	159	12.5	92.12	10.6	1.21	9.6	0.63
4	236	5.4	97.71	4.4	0.42	6.2	0
5	33	3	90.85	1.8	3.7	3.8	0

由此可见,污染物去除主要集中在砂柱的上层 30 cm,用肉眼也可观察出上层约 30 cm 污染最为严重.这与 Hatt B E 等人^[12]进行卵石过滤试验时得出的结论相符.因此需要定期更换上部砂层,因为堵塞程度直接影响到砂滤系统运行的寿命^[13],试验测得,滤前砂柱平均渗透系数为 $37.21 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,滤后渗透系数减小到 $26.63 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$.

3 结论

(1)济南市屋面雨水经初期弃流后属于轻污染源,主要污染物以悬浮物、浊度、色度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、挥发酚.

(2)石英砂滤柱对浊度、色度、SS 的去除效果较好.其中 SS 的平均去除率达 70% 以上,浊度的平均去除率大于 80%,色度的平均去除率超过 50%,对挥发酚、Pb、Zn 也有一定去除效果,但对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 去除效果差,这主要是由于降雨集中并且不连续,没有形成生物膜去除含氮污染物.

(3)石英砂层的粒径、厚度不同,对污染物的去除效果也不同.浊度、色度和悬浮物等大部分污染物的去除主要集中在上层完成,因此砂柱上层堵塞最为严重,渗透系数逐渐减小,为保证砂滤系统高效运行,在砂柱上端设计可管理层,去除初期雨水中颗粒较大的悬浮物及其它污染物,在实际中可定期换洗.

(4)弃流后的屋面雨水经砂柱过滤后,效果较好,可作为回灌裂隙雨水的预处理措施之一,但是对来自大气降水而不是屋面降尘的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 需要活性炭、沸石或其它方法进一步去除并达到要求.

参 考 文 献

- [1] 冯绍元,侯立柱,丁跃元,等.多层渗滤介质系统去除城市雨水径流有机污染物[J].环境科学学报,2008,28(6):1123-1130
- [2] 纪桂霞,王平香,邱卫国.上海市屋面雨水水质监测与处理利用方法研究[J].上海理工大学学报,2008,28(6):594-598
- [3] 张国臣,陈鸿汉,何江涛.人工快速渗滤系统在城市雨水资源化中的应用[J].工程技术,2008,390:76-78
- [4] 田景宏,黄柄彬.砂滤人工湿地处理污染河水运行研究[J].水处理技术,2008,34(8):49-51
- [5] Eighmy Taylor, Collins M Robin, Spanos S K, et al. Microbial Populations, activities and carbon metabolism in slow sand filters[J]. Water Research, 1992, 26(10): 1319-1328
- [6] Adin A. Slow granular filtration for water reuse[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2003, 42: 123-130
- [7] 雷鹏举,曲久辉,杨日光.微絮凝直接纤维过滤处理低浊水试验研究[J].环境化学,1999,18(6):561-565
- [8] 车武,汪慧珍,任超.北京城区屋面雨水污染及利用研究[J].中国给水排水,2001,17(6):57-61
- [9] 中华人民共和国国家标准生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006)[S].2006
- [10] 中华人民共和国国家标准地下水质量标准(GB/T14848—93)[S].1993
- [11] Hatt B E, Fletch T D, Deletic A. Treat performance of gravel filter media: Implications for design and application of stormwater infiltration systems[J]. Water Research, 2007,41: 2513-2524
- [12] Hatt B E, Siriwardene N, Deletic A, et al. Filter media for stormwater treatment and recycling: the influence of hydraulic properties of flow on pollutant removal//10th International Conference on Urban Drainage[C]. Copenhagen, Denmark, 2005: 1-6
- [13] Siriwardene N R, Deletic A, Fletcher T D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study [J]. Water Research, 2007, 41:1433-1440

Purification of roof rainwater in Jinan by sand filtration column

WANG Weiping* HE Maoqiang ZHANG Peipei ZHU Ping

(School of Resource and Environment, University of Jinan, 250022, China)

ABSTRACT

To fulfill the requirements of high speed, large volume and high water quality for roof rainwater recharging fracture-karst aquifer, sand filtration column was designed. Sand filtration test in the laboratory was conducted to investigate the effect of roof rainwater purification in Jinan as pretreatment for fracture-karst aquifer recharge. The results show that the sand filtration column is effective in removing pollutants in roof rainwater.

The average removal rate of turbidity reached 87%, and the average removal rate of suspended solids was above 70%; The sand column was also effective in removing color, volatile phenol, lead and zinc to a certain degree. However, it had a poor effect in removing ammonia nitrogen and nitrite nitrogen. In addition, the removal of most pollutants such as turbidity, color and suspended solids mainly occurred in the upper layer, which needs to be replaced regularly.

Keywords: roof rainwater runoff, sand filtration column, managed fracture-karst aquifer recharge.

沃特世超高效合相色谱 (UltraPerformance Convergence Chromatography) 再次重新定义色谱分离科学

UPC² 技术使用压缩 CO₂, 搭建了 LC 和 GC 技术之间桥梁, 为实验室应对难分离的和复杂化合物分析提供了新选择。

2012 年 3 月 12 日, 沃特世公司 Waters® ACQUITY UPC²™ 系统的上市. 该技术拓展了反相色谱 (LC) 技术和气相色谱 (GC) 技术的局限, 能完全替代正相色谱技术. 沃特世新型 ACQUITY UPC²™ 系统采用超高效合相色谱 (UltraPerformance Convergence Chromatography™, 简称 UPC²) 原理, 为分析实验室解决不同类型的分析难题包括如疏水化合物、手性化合物、脂类、热不稳定样品以及聚合物等提供了强有力的不可缺少的工具。

压缩二氧化碳 (CO₂) 是 UPC² 的主要流动相, 它比 LC 所使用的液体流动相以及 GC 所使用的载气有更多突出的优点. 其中一个优点是, CO₂ 单独使用或与少量共溶剂共同使用作为流动相, 流体粘度小, 比 HPLC 中所使用的液体流动相扩散率更高、更有利于传质. 另一个优点是, 与 GC 相比, CO₂ 单独作流动相可在更低的温度下实现分离. 科学家们可以利用 UPC² 技术分析 LC 或 GC 难以分析的化合物, 如样品中含有的化合物极性差别很大的应用等。

沃特世 ACQUITY UPC² 系统, 加上亚 2 μm 色谱柱, 科学家们能够精确地调节流动相强度、压力和温度获得所需要的系统分辨率和选择性, 对待测物的保留和分离进行有效调控. 非常适合结构类似物、异构体以及对映体和非对映体的分离、检测和定量——而这类分析任务是其它方法不能或很难实现的. 沃特世 ACQUITY UPC² 系统的一个重要优点是它以成本低且无毒的压缩 CO₂ 为主要流动相, 将挥发性有毒溶剂的使用和废液处理降到最低水平, 极大地节省了成本, 同时保护了环境和实验人员健康。

ACQUITY UPC² 系统是沃特世长期以来设计和开发的高品质分析仪器产品之一, 它也同样带有沃特世的品牌特性: 耐用、可靠并且容易使用. 这套系统有以下重要特征:

- 10 μL 固定进样环, 进样体积范围 0.5—10 μL, 节省样品且不需更换进样环.
- 系统体积小, 有利于缩短运行时间, 优化梯度性能, 减少谱带展宽, 最大程度发挥小粒径色谱柱的性能.
- 共溶剂选择和柱切换技术, 流动相和色谱柱筛选过程更加快捷, 方法开发更方便.
- 梯度准确性和精密性保证了保留时间的重现性.
- 同时兼容光学检测器和 MS 检测器, 是定性和定量分析的理想选择.

沃特世 ACQUITY UPC² 系统溶剂加载量小、超高分离度、窄峰以及快速分离, 因此是接入 MS 的最佳选择. 无论是分析天然产物、中药、药品、食品添加剂或污染物, 还是分析农药、表面活性剂、聚合物添加剂或者生物燃料等, 沃特世 ACQUITY UPC² 系统都能实现无法比拟的分离与峰形效果. 像所有沃特世 ACQUITY 产品一样, 沃特世 ACQUITY UPC² 系统的卓越性能也包括充分发挥了如新型的 ACQUITY UPC² 色谱柱以及行业领先的信息学软件和应用支持. 作为 LC 和 GC 强有力的互补技术, 沃特世 ACQUITY UPC² 系统必将成为色谱分离科学领域的重要成员, 帮助众多实验室迎接越来越多的挑战。