

文章编号:0559-9350(2011)04-0477-06

## 用于裂隙岩溶含水层回灌的屋面雨水径流水质特性研究

王维平<sup>1</sup>, 曲士松<sup>1</sup>, 叶新强<sup>2</sup>, 孙小滨<sup>1</sup>

(1. 济南大学 资源与环境学院, 山东 济南 250002; 2. 济南市环境保护监测站, 山东 济南 250014)

**摘要:** 以北方地区裂隙岩溶水典型城市——济南市为研究区, 监测分析了2008年2—8月降水过程的降雨量和降雨强度, 同时对研究区13次天然降水的11项指标与位于裂隙岩溶水直接补给区7次降水形成的屋面径流的28项指标进行检测, 识别出屋面径流主要污染物类型, 探讨了2008年春季和夏季各次降雨形成的屋面径流中不同污染物随降雨历时、降雨强度和季节的变化规律; 分析了径流污染物的来源, 并对屋面径流雨水通过井回灌裂隙岩溶含水层用于饮用水的处理方法及效果进行了探讨。

**关键词:** 城市屋面雨水径流; 污染特性; 含水层补给管理

**中图分类号:** X824

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

中国北方许多城市利用裂隙岩溶水作为供水水源。但一方面水资源短缺, 另一方面由于城市不透水面积的增大, 为防洪不得不将雨水产生的径流通过排水系统尽快排出, 这样既破坏了自然陆地水文循环, 减少了土壤水和地下水的补给量, 又浪费了宝贵的水资源。雨水属轻污染水, 有机污染物含量少, 溶解氧接近饱和, SS及金属离子少。屋面作为城市不透水面积的一个重要组成部分, 其面积在城市面积中占有较大的比重, 并且城市屋面雨水便于收集, 水质较道路、绿地径流好。微污染的屋面雨水径流经处理后回灌裂隙岩溶含水层, 用于饮用水供水和保护地下水环境, 是解决两方面问题的有效措施。德国、日本和澳大利亚等在屋面雨水收集利用或回灌方面的研究居于领先地位<sup>[1]</sup>; 国内也相继开展了屋面雨水利用研究, 尽管各城市的大气质量、降雨量和下垫面分布类型等不同, 但经研究发现城市屋面初期雨水污染都很严重, 随着降雨时间的延长, 污染物浓度逐渐下降且水质逐渐趋于稳定<sup>[2-6]</sup>。北京市6个雨水示范工程近5年的试验观测数据显示, 城市雨水利用具有很大的社会和经济效益, 但若利用雨水进行回灌, 则回灌前必须经过前期弃流和一定程度的预处理<sup>[7]</sup>。

屋面雨水回灌裂隙岩溶含水层用于饮用水的关键问题之一是控制屋面雨水径流的水质, 使之达到地下水质量标准。目前国内虽已发布建筑与小区雨水利用工程技术规范, 但该规范不适用于作为生活饮用水水源的雨水利用和回灌工程<sup>[8]</sup>。因此, 本文以济南市为研究对象, 对回灌前屋面雨水水质变化规律进行分析, 并对利用屋面径流雨水通过井回灌裂隙岩溶水用于饮用水的处理方法及效果进行探讨, 对于提高济南市地下水水位、保持泉水喷涌和改善生态环境等具有重要的作用<sup>[9]</sup>。

## 2 济南市降雨量及水质时空分布

济南市降雨量的时空分布和屋面雨水水质变化规律是确定利用屋面雨水回灌裂隙岩溶含水层的量和控制措施的依据。济南市历年最大降水量1160mm(1962年), 最小降水量644.9mm(1968年),

收稿日期: 2009-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972169); 山东省自然科学基金项目(Y2008E18)

作者简介: 王维平(1961-), 男, 山东滕州人, 博士, 教授, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: stu\_wangwp@ujn.edu.cn

相差 839.3mm，市区年平均降水量 671.1mm，7、8 月份占全年降水量的 57%，6—9 月降水约占全年的 85%，形成明显的夏汛期。

济南市区降雨水质在时间和空间上分布不均匀。济南市环境监测站共设有 3 个雨水水质监测站，分别是长清区、天桥区和市中区监测站，监测指标有 pH、电导率、钠离子、钾离子、钙离子、镁离子、氟化物、硝酸根离子、氯离子、硫酸根离子和氨离子等。根据 2008 年 13 次降雨水质资料分析，主要污染物有硝酸根离子、硫酸根离子、氨离子以及电导率。其中市区氨离子最大值 6.52mg/L，最小值 1.18mg/L，这表明各次天然降雨中氨氮均超过地表水环境质量 III 类标准 0.2mg/L，而其它指标没有超标。天桥区和长清区监测站检测的离子浓度见图 1(数据不全)。从已知数据可发现，从空间角度分析，位于市区中心的天桥区监测站检测的离子浓度普遍高于远郊的长清区，由于天然雨水的水质主要受到大气质量的影响，所以侧面反映出长清区的大气质量要好于天桥区。从时间角度分析，2008 年 2 月的雨水污染物浓度最高(2 月的雨水电导率最高)，降水进入汛期后，长清区雨水中污染物浓度变化不大，但天桥区变化幅度较大，尤其是硫酸盐、硝酸盐和氨离子浓度。

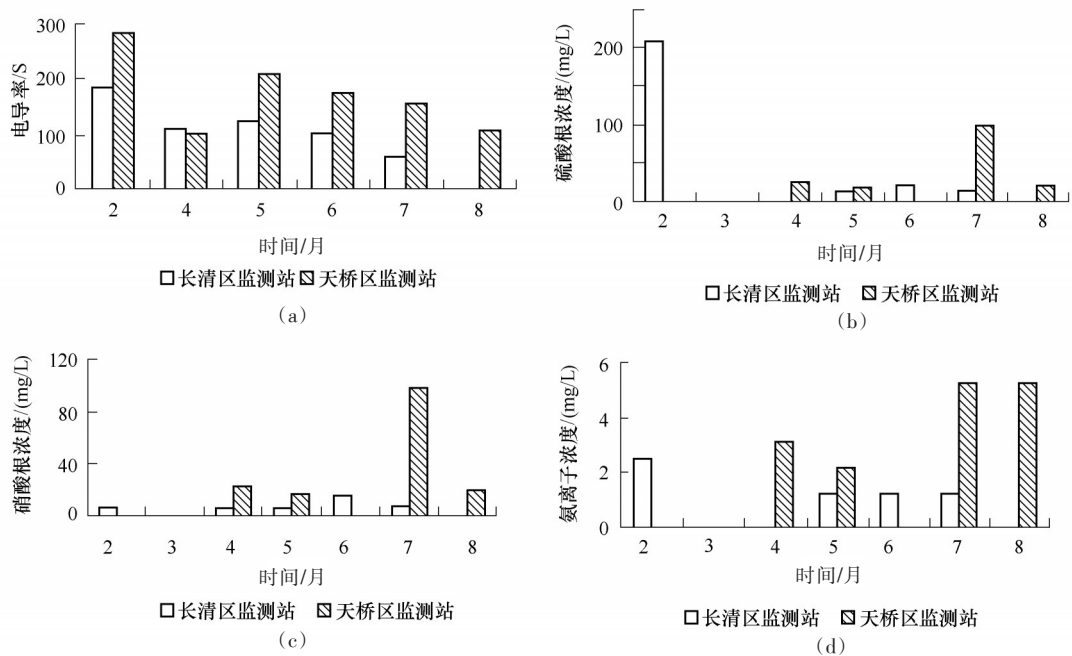


图 1 2008 年长清区和天桥区监测站部分污染物浓度

### 3 济南市屋面雨水水质特征

**3.1 取样及分析项目** 以 2008 年春季第一次降雨，以及夏季 6 场典型降雨形成的屋面径流为研究对象，通过取样检测屋面径流过程中不同时间段污染物浓度变化，分析出济南市屋面雨水水质变化规律及主要影响因素。

采样点选在济南市济南大学西校区 17 号教工楼，其屋顶类型是平台防水材料的瓦屋面。取样方法为人工从连接屋顶的落水管出口取样，一般径流采样时间间隔为 10、15 和 30min 不等。为了详细了解径流过程水质的变化，也采用取样间隔时间与降雨量观测联动取样。雨量计安装在济南大学西校区，为虹吸式自记雨量计。对 2008 年 3—8 月的 7 场雨进行了人工取样，取样总数共 35 个。水样送至山东省分析测试中心化验。检测项目有 pH、COD、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、P、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、Fe、Mn、Hg、Cu、Ni、总硬度、SS、可溶性固体总量、As、Hg、Pb、Cr<sup>6+</sup>、Cd、Zn、色度、浊度、挥发酚、氰化物和总有机碳。

**3.2 主要污染物及来源** 济南市区屋面雨水径流中的主要污染物见表 1。

表1 济南市屋面径流主要污染物浓度

检测项目	NH <sub>3</sub> -N /(mg/L)	NO <sub>3</sub> -N /(mg/L)	NO <sub>2</sub> -N /(mg/L)	色度 /度	浊度 /NTU	挥发酚 /(mg/L)	SS /(mg/L)	Pb /(mg/L)	Zn /(mg/L)	氟化物 /(mg/L)
非汛期屋面径流水质	29.5	56.9	6	300	3500	0.17	726	0.6	5.67	4.7
汛期屋面径流水质	0.78~ 13.00	0.08~8.54	0.002~ 1.500	5~70	3~160	0.002~0.050	41~254	0.010~0.041	0.04~0.18	0.05~ 1.00
地表水水质Ⅲ类标准 (GB 3838-2002)	≤1.0	≤10	-	-	-	≤0.005	-	≤0.05	≤1.0	1

注释：-表示无规定值

检测结果显示，非汛期即春季第一次降雨(2008年3月12日，降雨量2.6mm)初期屋顶雨水径流中主要污染物浓度均超出地表水水质Ⅲ类标准数倍。汛期屋面径流主要污染物有NH<sub>3</sub>-N、亚硝酸盐氮、色度、浊度、挥发酚和SS，各次径流浓度变化较大。

为探求屋面径流污染物的来源，将天然雨水与屋面径流水质进行对比，以汛期7月1日降雨资料进行分析，检测结果见表2。

表2 天然雨水与屋面径流水质检测结果

检测项目	pH	COD /(mg/L)	NH <sub>3</sub> -N /(mg/L)	NO <sub>3</sub> -N /(mg/L)	NO <sub>2</sub> -N /(mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg/L)	Cl <sup>-</sup> /(mg/L)	F <sup>-</sup> /(mg/L)	Fe /(mg/L)	Mn /(mg/L)	总硬度 /(mg/L)
天然雨水	8.2	1.82	1.24	<0.08	0.08	28	6.7	0.2	0.13	0.04	16.8
屋面径流	7.5	13.59	0.93	<0.08	0.04	60	10.05	1	0.13	0.09	116

检测项目	SS /(mg/L)	TDS /(mg/L)	As /(mg/L)	Hg /(ug/L)	Pb /(mg/L)	Cr <sup>6+</sup> /(mg/L)	Cd /(mg/L)	色度 /度	浊度 /NTU	挥发酚 /(mg/L)	氟化物 /(mg/L)
天然雨水	40	89	<0.2	0.02	<0.02	<0.004	<0.004	<5	<3	<0.002	<0.002
屋面径流	288	189	<0.2	0.21	<0.02	<0.004	<0.004	35	4	<0.002	0.010

通常，屋面雨水水质的决定性因素，一是不同城市不同季节降雨本身的质量，二是屋顶降尘和屋顶材质。对表2天然雨水检测数据分析，可得出济南城市大气污染物对人体及环境危害最大的成分是粉尘、氮氧化物等，尤其以NO<sub>2</sub>、粉尘最为突出；对于屋面径流污染物，NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N及NO<sub>2</sub>-N主要来自大气；硫酸盐、氟化物、挥发酚来自化石燃料燃烧；Pb、Zn来自汽车尾气；色度和SS来自空气的降尘<sup>[10]</sup>。降水中的污染物主要是由雨滴在降落过程中冲刷大气气溶胶和吸收大气污染物并溶解了其中的可溶性组分而形成的。王艳等对泰山降水检测分析认为，氨主要来自生物过程和氮肥的挥发，Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>主要来自地面降尘，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与燃料燃烧特征和农业氮肥使用有关<sup>[11]</sup>。

**3.3 屋面雨水与地下水比较** 屋面径流作为回灌地下水的水源之一，由于水质差别，屋面径流雨水与原裂隙岩溶含水层中的地下水混合，加上与碳酸盐岩含水层发生水-岩-气作用，从而使地下水的物理、化学性质发生变化及孔隙演化。因此，回灌源水与当地地下水水质的对比分析，对下一步济南市利用屋面径流进行裂隙岩溶回灌项目具有重要的科学意义。汛期采样点屋面径流与附近地下水离子浓度见表3(屋面径流离子浓度取汛期各次检测浓度的均值)。

表3 屋面径流与地下水离子浓度

(单位：mg/L)

项目	Ca <sup>2+</sup>	总硬度	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	F <sup>-</sup>	Cr <sup>6+</sup>	Hg	Pb	Zn	挥发酚
屋面径流	17.30	72.03	2.44	4.45	43.01	2.86	0.660	0.37	<0.004	0.087	<0.020	<0.020	0.027
地下水	70.25	234.55	14.42	18.14	25.57	11.25	<0.005	0.30	<0.005	<0.001	<0.005	0.006	<0.002
地下水质量 Ⅲ类标准		≤450		≤250	≤250	≤20	≤0.02	≤1	≤0.05	≤1	≤0.05	≤1	≤0.002

从表3数据看出，屋面径流中NO<sub>2</sub>-N、F<sup>-</sup>、挥发酚浓度等均高于地下水离子浓度，侧面反映了人

类活动对大气环境的影响作用；而地下水化学成分中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 的浓度较高则反映了岩溶水的主要特征。除了 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和挥发酚外，其它离子均达到地下水质量标准Ⅲ类，可见汛期内，济南市屋面雨水水质较好。

#### 4 屋面径流水质变化规律

与自然降水不同，屋面雨水径流不仅受大气质量影响，而且还受作为外力的降雨对屋面降尘的冲刷和降尘中可溶物质的溶解影响，即受降雨历时和降雨强度的影响。研究径流水质及其变化规律，对合理确定初期雨水弃流量、预处理措施和回灌岩溶水具有关键作用。

**4.1 屋面雨水径流水质与降雨历时的变化关系** 经多次径流监测得出结论：在降雨初期各污染物浓度较高，随着降雨历时的延长，浓度呈下降趋势，并最终趋于稳定<sup>[9]</sup>。以2008年的第一次降雨形成的屋面径流水质资料为例，初期屋面雨水径流的浊度、色度和SS浓度分别高达3500NTU、300度和726mg/L，而到末期出水浓度分别稳定在30NTU、80度和500mg/L(春季第一次降雨量为2.6mm，降雨历时200min)。降雨历时与色度、浊度变化曲线见图2。在7月1日的屋面雨水径流中，初期屋面雨水径流中浊度、SS和COD浓度分别为35NTU、288mg/L和13.6mg/L，降雨量达到3mm后出水浓度分别稳定在小于5NTU、40mg/L和1.8mg/L。

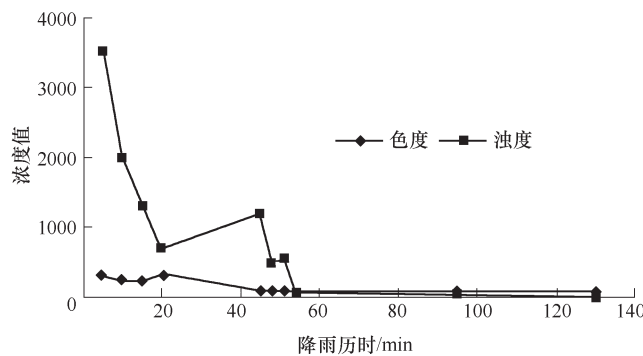


图2 3月12日降雨历时与色度、浊度变化曲线

总体来说，随着降雨历时的增加，降雨对屋面降尘的冲刷量愈多，屋面雨水径流水质趋于变好，但污染物初始浓度的高低及达到的稳定值浓度取决于屋面材料、降雨量、降雨强度、大气污染的状况及两次降雨间隔的时间等多种因素。

**4.2 屋面雨水径流水质与降雨强度的变化关系** 屋面雨水径流污染物的浓度不仅与降雨历时有关，而且还受降雨强度大小的影响，降雨强度愈大，降雨对屋顶降尘的冲刷作用愈大。在一次降雨过程中，在降雨的前期，屋面雨水径流污染物浓度是随着降雨强度的增加而增大；而到后期降雨强度增大，屋面雨水的污染物浓度反而减少。

以7月1日的SS与降雨强度进行分析。通过雨量、雨强的检测与计算，3mm之前雨强约为3.6mm/h，此时悬浮物浓度大于200mg/L；而在降雨量为8mm时，雨强为30mm/h，悬浮物浓度低于50mg/L，但仍有粗粒沉淀物(墙皮、砂子等)，说明不同的雨强冲刷的悬浮物类型不同。初期雨强一定时，冲刷的悬浮物是一种类型，当雨强突然增大时，会冲刷屋顶粒径大的颗粒物质，从而导致出水浓度突然升高，持续一段时间将逐渐降低，8mm后水中颗粒物质很少。

**4.3 屋面雨水径流水质与季节的变化关系** 屋面雨水径流污染物在年内变化很大。年内春季到夏季各次降雨形成的屋面径流污染物浓度呈降低趋势，春季第一场降水，屋面雨水径流各污染因子浓度最高，主要原因是屋面经历一个冬季，尽管有降雪，但屋面降尘积累的较多，特别是锅炉燃煤降尘居首。夏季浓度较小且稳定，尤其是两次降雨间隔时间较短的时候。年内屋面雨水径流主要污染物浓度变化情况详见图3。

除挥发酚外，其他污染物指标——浊度、色度、SS、氨氮和亚硝酸盐氮等浓度的峰值均出现在春季，可见春季降水形成的屋面径流污染最严重；而进入夏季后，屋面径流污染物浓度较低，相对春季而言，在降雨达到3mm后，屋面雨水径流污染物浓度较小，SS稳定在300 mg/L以下，NH<sub>3</sub>-N浓度在10mg/L以下，浊度浓度基本在100 NTU以下。亚硝酸盐氮低于1mg/L，水质较好。这主要由于汛期7、8月份相邻降雨时间间隔不长，屋面降尘相对少。

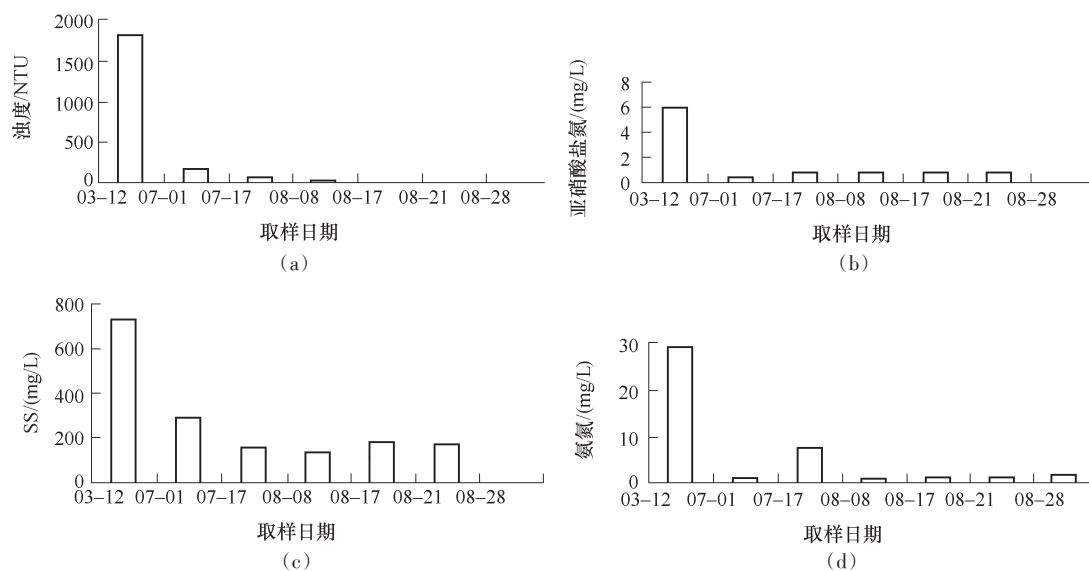


图3 2008年春季到夏季前期屋面径流污染物的浓度变化

## 5 屋面雨水处理方法和利用

城市屋面雨水的用途决定着处理方法。屋面雨水经过处理具体可用作生活饮用水、城市非饮用水(冲厕、街道清扫、消防、绿化、车辆冲洗、建筑施工)、景观环境用水、工业用水和地下环境用水(地下水回灌、地面渗透)。从使用环节不同可分为直接和间接利用。间接利用指含水层补给和土壤水的补给(对改善区域小气候非常重要)。直接利用的处理方法有物理(包括膜法)、化学和生物等；间接利用则主要采用投资省、运行费低、工艺简单的物理方法，例如采用透水砖、低洼式绿地、渗沟、渗池等设施可利用土壤包气带的净化处理作用，下渗效果要比自然地面好，不仅补充浅层地下水，而且增加土壤含水量，并能缓解城市“热岛效应”。本文利用井回灌，可节约土地但回灌水质要求高，无论是直接还是间接利用均要先经过前期雨水弃流。

降雨后期，屋面径流水质较好并趋于稳定，但径流中一些组分浓度相比于要求的标准超标，如果回灌前不对屋面径流采取处理措施，将对地下水含水层的生态环境及地下水水质产生负面影响。为了降低成本，使弃流后的雨水经处理达到所要求的水质同时又满足裂隙岩溶含水层回灌量大的特点，充分利用雨水从屋顶到地面以及回灌井的势能，过滤方法是最好措施。冯绍元等<sup>[12]</sup>研究了不同介质滤料(主要以土壤介质为主，水力负荷小)的渗滤系统对北京市雨水COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN和TP的去除效果，出水水质达到地表水Ⅱ类水质标准。另一种人工渗滤系统以不同介质的组合来处理屋面径流。研究发现，石英砂对悬浮物、浊度和重金属离子等的去除有较好的效果<sup>[13]</sup>，甚至对色度和锌等的去除能达到生活饮用水卫生标准；T.Taylor Eighmy<sup>[14]</sup>提出利用砂滤和活性炭相结合的方法处理雨水。范平等<sup>[15]</sup>提出的GAC-石英砂生物滤池处理微污染原水也取得了不错的效果。这些方法对于城市地区屋面雨水回灌裂隙岩溶含水层具有重要参考价值。目前仅砂滤不能满足要求，预处理仍有待进一步研究。

## 6 结论

通过分析济南市降雨水质的特点、屋面径流的主要污染物及其来源, 以及与降雨历时、强度动态特征的变化关系, 为利用济南市屋面径流回灌岩溶裂隙含水层提供了依据。主要结论如下: (1) 济南市屋面雨水属于轻污染水源, 汛期屋面径流主要污染物以SS、浊度、色度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和挥发酚为主。其中个别指标超过地下水质量标准III类, 用屋面雨水作为回灌水源, 需在利用前进行预处理; (2) 初期屋面径流污染比较严重, 在降雨量达到3mm后, 屋面径流水质较好并趋于稳定; 各次降雨径流水质变化起伏较大, 主要取决于各次降雨的时间、降雨历时、降雨强度及相邻两次降雨的间隔。年内, 春季降雨形成的屋面雨水径流污染最严重, 夏季径流污染物浓度较低且相对稳定; (3) 从屋面径流污染物的来源分析可知, 济南市大气污染比较严重, 屋面雨水径流的污染物来自屋顶降尘、化石燃料燃烧和汽车尾气。在降雨过程中降雨冲刷大气气溶胶, 吸收大气污染物并溶解其中的可溶性组分。初期径流污染物主要由屋顶降尘造成, 后期污染物主要来自天然雨水, 而其中的污染物与农田使用化肥和燃烧燃料等人类活动有关。初期可通过加大前期弃流量和春雨之前清扫屋顶等措施来减少年内第一次降雨产生的屋面径流污染物。而对于天然雨水中的污染物只有采取有效的预处理措施, 才能达到回灌的要求。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Albrechtsen H-J . Microbiological investigations of rainwater and graywater collected for toilet flushing[J] . Water Sci . Technol . , 2002 46(6-7): 311-316 .
- [ 2 ] GB 50400-2006, 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 2006 .
- [ 3 ] 王维平, 孙小滨, 曲士松 . 济南市有效利用城市雨水回灌岩溶地下水探讨[J] . 水利水电技术, 2009, 40(3): 20-22 .
- [ 4 ] 曹秀芹, 车武 . 城市屋面雨水收集利用系统方案设计分析[J] . 给水排水, 2002, 28(1): 13-15 .
- [ 5 ] 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 .
- [ 6 ] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等 . 沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究[J] . 环境科学学报, 2006, 26(4): 601-606 .
- [ 7 ] 侯立柱, 丁跃元, 冯绍元, 等 . 北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较[J] . 中国给水排水, 2006, 22(23): 35-38 .
- [ 8 ] 李贺, 张秋菊, 李田 . 屋面径流污染物的出流类型与水质特性研究[J] . 中国给水排水, 2009, 25(9): 90-93 .
- [ 9 ] 张书函, 陈建刚, 丁跃元 . 城市雨水利用的基本形式与效益分析方法[J] . 水利学报, 2007, 38(增刊): 399-403 .
- [ 10 ] 刘新玲, 王晓明, 李小明 . 2000-2004年山东中西部五城市大气污染变化特征[J] . 科学技术与工程, 2008, 8(12): 3390-3396 .
- [ 11 ] 王艳, 葛福玲, 刘晓环, 等 . 泰山降水化学及大气传输的研究[J] . 环境科学学报, 2006, 26(7): 152-159 .
- [ 12 ] 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 .
- [ 13 ] Wang Weiping, Sun Xiaobin, Qu Shisong, et al . Study on Quality of Roof Rainwater and Sand Filter Column Effect[C]//中国—澳大利亚含水层补给管理新进展 . 郑州: 黄河水利出版社, 2009: 13-21 .
- [ 14 ] Taylor Eighmy, M . Robin Collins . Microbial Populations, Activities and Carbon Metabolism in Slow Sand Filters [J] . Wat . Res . , 1992, 26(10): 1319-1328 .
- [ 15 ] 范平, 吴春德, 陆少鸣, 等 . GAC-石英砂生物滤池处理微污染原水[J] . 水处理技术, 2008, 34(8): 59-62 .

(下转第489页)

(上接第 482 页)

## Quality characteristics of roof rainwater for fracture–karst aquifer recharge

WANG Wei–ping<sup>1</sup>, QU Shi–song<sup>1</sup>, YE Xin–qiang<sup>2</sup>, SUN Xiao–bin<sup>1</sup>

(1. *University of Jinan, Jinan 250022, China;*

2. *Jinan Environment Protection Monitoring Station, Jinan 250014, China*)

**Abstract:** The Jinan City, with typical fissure karst in northern China, is chosen as the research object. Rainfall amount and rainfall intensity from February to August 2008 were monitored and analyzed, while 11 water quality indexes of 13 rainfall events in the study area and 28 indexes of roof rainwater resulted from 7 rainfall events in fracture–karst water recharge area were also monitored. The main pollutants in roof rainwater were found. This paper reveals the characteristics of roof rainwater runoff and dynamic regularity of different contaminants varying with rainfall, rainfall intensity and water quality varying with season. The sources of contaminants in the roof runoff and the pre–treatment methods and the effectiveness of the roof rainwater so as to groundwater recharge through wells for drinking water supply were discussed.

**Key words:** roof rainwater runoff; contamination characteristics; managed aquifer recharge

(责任编辑: 王成丽)