

# 黄土塬地区集雨窖水水源地优选<sup>\*</sup>

张国珍<sup>1</sup> 赵伟娜<sup>1</sup> 何春生<sup>1\*\*</sup> 武福平<sup>1</sup> 米宗敏<sup>1</sup> 刘玲花<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; <sup>2</sup> 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

**摘要** 为提高黄土塬地区窖水水质, 保证窖水饮用安全, 集雨水源地的选择势在必行。本文通过应用主成分分析法, 研究了优质集雨水源地和决定水质的控制指标。结果表明, 在不同类型集雨水源地中, 水泥地面和瓦屋面的综合主成分得分分别为-3.350和-1.945, 污染程度分级结果为轻度, 是集雨的最佳场地; COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、SS和粪大肠菌群在主成分中具有高荷载值; 集雨水受有机物质、地表尘土、人畜粪便污染明显, 与人为活动密切相关。最后, 就集雨水源地在政策法规、水质保护技术体系、水质检测和保护等方面提出了改善措施和建议。

**关键词** 集雨窖; 水源地; 优选; 主成分分析

**中图分类号** X821 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)4-0749-05

**Optimization of water sources for harvesting rainwater in Loess Plateau.** ZHANG Guo-zhen<sup>1</sup>, ZHAO Wei-na<sup>1</sup>, HE Chun-sheng<sup>1</sup>, WU Fu-ping<sup>1</sup>, MI Zong-min<sup>1</sup>, LIU Ling-hua<sup>2</sup> (<sup>1</sup>*School of Environment Science and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*; <sup>2</sup>*The Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 749–753.

**Abstract:** To improve the water quality and make sure the drinking safety of cellar water in Loess Plateau, the selection of the water sources for harvesting rainwater is imperative. By the method of principal component analysis (PCA), this paper determined the high-quality rainwater sources and the related control indices. Among the different types of test water sources, cement ground and tile roof were the better fields for harvesting rainwater, with their integrated principal component scores being -3.350 and -1.945, respectively. The indices COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, SS, and fecal coliform had high load values in the main components. The harvested rainwater was mainly polluted by organic matter, surface dust, and animal and/or human excreta, which obviously related to human activities. Some improvement measures and recommendations for the source rainwater were also proposed from the aspects of policies and regulations, water quality protection technology systems, and water quality testing and protection.

**Key words:** harvesting rainwater pit; water source; optimization; principal component analysis.

雨水蓄积利用可以有效缓解缺水国家和地区水资源短缺的问题, 并且经济上可行, 具有较大的开发潜力和实际意义 (Mikkelsen *et al.*, 1999; Peters, 2006)。尤其在发展中国家农村缺水地区, 雨水收集利用更具有深远的意义, 但这一地区经济发展落后, 基础设施缺乏, 需要政府提供资金与技术援助, 帮助农村缺水地区缓解缺水压力 (Kahinda *et al.*,

2006)。目前, 屋面集雨已可以提供可靠稳定的生活用水 (Ashworth, 2005; Meera & Ahammed, 2006)。然而, 研究表明, 微生物和有机化合物超标, 集雨水质不能达到饮用水标准 (Meera & Ahammed, 2006; Hart & White, 2006; Sazakli *et al.*, 2007)。我国甘肃黄土高原丘陵沟壑地区多年平均降雨量偏低, 地表水资源匮乏, 长期受干旱威胁, 严重影响了这一地区的人畜饮水, 所以近年来甘肃开展了“121”工程、“雨水集流节灌”等工程, 并且已解决人畜饮水困难的问题 (李莉, 2007)。但是, 目前我国集雨工程的

<sup>\*</sup> 国家科技支撑计划项目 (2006BAJ08B08-03) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目 (2008ZX07425-005)。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: he\_chunsheng@126.com

收稿日期: 2009-09-11 接受日期: 2009-12-18

水质问题还不容乐观,特别是窖水的污染问题较为突出。蓝俊康和蓝艳红(2002)总结了国外集雨工程的水质污染和保护方面的研究成果并对我国的水窖和水柜水质进行了调查,结果表明,我国集雨工程的水质较差,水中 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、微生物等多项指标超标。杨瑞强等(2001)对甘肃省榆中和定西两地的窖水水质进行调查后发现,一般土窖及普通庭院水窖水的水质基本符合国家饮用水水质的要求,但大肠杆菌数量超标。马永林等(2000)对甘肃省定西县部分乡镇的水窖进行抽样调查分析,发现降水在集流入窖过程中受到二次污染较为严重,尤其是地面杂质、细菌等增多,严重影响了进窖水质。鉴于此,为解决窖水水质不良的问题,有必要开展集雨窖水水源地类型的优选,提高进窖水质,改善集雨水源地集雨环境。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于庆阳西峰区董志镇崔沟村和温泉乡巨塬村,其中崔沟村 425 户,1838 人,巨塬村 408 户,1679 人。该地区处于半干旱区,多年平均降雨量 545 mm,水资源总量为 1.4 亿 m<sup>3</sup>,人均不足 440 m<sup>3</sup>,是一个严重缺水的地区。这一地区的集雨窖水水源地类型多为土路面、砖地面、水泥地面、瓦屋面、沥青路面(表 1)。

表 1 集雨水源地类型与特征

Tab.1 Types and characteristics of source rainwater

集雨地点	水源地类型	水源地材质	水源地外加污染源情况	特征
农家庭院	土路面	黄土	有旱厕、家禽,种植蔬菜	表面有浮土和少量家禽粪便
农家庭院	砖地面	普通红砖	有旱厕、家禽、秸秆	村民主要生活场所
学校	砖地面	普通红砖	有厕所	公共场所,人员频繁流动
农家庭院	水泥地面	普通硅酸盐水泥砂浆	无	多年修、表面光滑
农家庭院	瓦屋面	青瓦	无	多年修
公路	沥青路面	石油沥青	机动车	新铺设,车辆穿行

表 2 某地集雨水源地水质情况 (mg · L<sup>-1</sup>)

Tab.2 Water quality of source rainwater in a place

水源地	SS	浊度 (NTU)	UV254	COD <sub>Mn</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	Hg	Cr <sup>6+</sup>	粪大肠菌群 (CFU · 100 ml <sup>-1</sup> )
土路面	163	61.560	0.120	4.351	0.860	0.234	0.00019	0.148	310
学校砖地面	61	45.600	0.110	3.977	0.780	0.169	0.00028	0.137	450
庭院砖地面	53	43.400	0.256	12.304	1.113	0.364	0.00029	0.055	330
水泥路面	42	15.000	0.117	4.426	0.290	0.195	0.00006	0.012	124
瓦屋面	59	37.500	0.193	4.491	0.420	0.168	0.00011	0.040	230
沥青路面	70	87.150	0.237	9.029	0.760	0.291	0.00041	0.094	70
标准差	47	24.256	0.065	3.446	0.300	0.078	0.00013	0.055	140

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与检测分析 通过对研究区窖水水质现状进行调研分析,发现该地区窖水水质以 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、微生物学指标超标为特点,同时为反映水质的全面性,综合考虑选取 SS、浊度、UV254、高锰酸盐指数、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、Hg、Cr<sup>6+</sup>和粪大肠菌群 9 项指标进行取样分析。取样在 7—9 月丰水期进行。取样点按各集雨水源地坡面水流方向,设置在雨水汇流处,每一集雨水源地设置一个样点,雨水只从取样点流出,同时采样弃去初期径流,以提高集雨质量。表 2 为研究区某地各类型水源地的 3 次雨水水质检测结果平均值和标准差。

1.2.2 优选评价 根据窖水水质特点,并结合实际的检测结果,确定了 9 项对窖水水质有影响的水质指标。考虑到上述 9 项水质指标可能对窖水水质情况都有一定的贡献,但为避免分散的影响变量降低模型的显著性水平,使因变量与影响变量的相关性失去其统计意义,保证原始数据信息损失最小,故引入主成分分析法进行优选评价。目前主成分分析法已成为地表水质量评价、水质时空变化等研究方面的重要方法之一(Bengraïne & Marhaba,2003;Singh *et al.*,2005;Ouyang,2006)。除此之外,还广泛应用于社会学、教育学、医学等领域,并且在解决实际问题时已取得了良好的效果(谢剑和彭立军,1986;李祚泳等,1990;梁邦助,2003)。

在集雨窖水水源地系统中,影响窖水水质变化的因素繁多,有些因素起到主要作用,而有些起次要作用。设每个水源地类型检测有  $i$  个指标变量,共有  $j$  种类型的集雨水源地,则构成了一个  $i \times j$  的矩阵,主成分分析法是把这些作为  $i$  个相关变量的因素通过线性变换成为另一组不相关的变量,且这些新变量按照方差递减的顺序排列。最大方差的变量为第 1 主成分,依次为第 2 主成分等。当前  $p$  个主成分的方差占总方差的 85% 以上时,就可以代替原来的变量,并且基本上保留了原来变量所包含的信息(叶义成,2006)。这个主成分称为公共因子。主成分分析法的步骤如下(冯利华,2003):1)为排除量纲和数量级的不同,首先要对原始数据进行标准化处理;2)由标准化数据计算相关系数矩阵;3)计算相关矩阵  $R$  的特征值、方差贡献率、累积贡献率、因子荷载矩阵和主成分。以上所有计算过程均在 Matlab 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 监测指标及其标准化处理

选取 SS ( $X_1$ )、浊度 ( $X_2$ )、UV254 ( $X_3$ )、COD<sub>Mn</sub> ( $X_4$ )、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ( $X_5$ )、TP ( $X_6$ )、Hg ( $X_7$ )、Cr<sup>6+</sup> ( $X_8$ ) 和粪大肠菌群 ( $X_9$ ) 作为监测分析项目,这 9 个监测指标值在各个集雨场的浓度差别较大,经过标准化处

理表征其离散程度,标准化公式为, $x_{ij}^* = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_i, i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 6$ 。式中, $x_{ij}$  为第  $i$  个指标第  $j$  个集雨水源地的原始数据, $\bar{x}_i$  和  $\sigma_i$  分别为第  $i$  个指标的样本均值和标准差。标准化结果见表 3。

2.2 相关系数矩阵及其特征值、特征向量、贡献率和累计贡献率

将标准化数据转换为相关系数矩阵(表 4)。用 Matlab 软件分别进行特征值、特征向量的计算,并以此计算特征值贡献率和累计贡献率(表 5)。根据表 5,第 1、2、3 主成分方差累计贡献率达到了 90.5%,已超过 85%,它们基本上包含了 9 个指标所有的信息,所以用这 3 个主成分代替原有变量。其中,第 1 主成分所包含信息最丰富,对水质影响最大。

2.3 主成分荷载分析

由表 6 可以看出,Prin1 在浊度 ( $X_2$ )、UV254 ( $X_3$ )、COD<sub>Mn</sub> ( $X_4$ )、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ( $X_5$ )、P ( $X_6$ ) 和 Hg ( $X_7$ ) 上有高载荷值,说明 Prin1 反映了有机污染状况。UV254 作为溶解性有机碳 (DOC) 的替代参数,说明水中可溶性营养盐含量较高,异养型微生物具有一定生长潜力(王占生和刘文君,1999);NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 主成分荷载体现的是生活污水及施用化肥所携带的有机污染物;Hg 作为重金属指标在第 1 主成分也有较高荷载量,说明 Hg 含量的变化对水质的影响较大。与 Prin2 密切相关的是 SS 和 Cr<sup>6+</sup>,这些污染物

表 3 水质指标标准化处理结果  
Tab.3 Standardized processing data of water quality

水源地	SS $X_1$	浊度 $X_2$	UV254 $X_3$	COD <sub>Mn</sub> $X_4$	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N $X_5$	TP $X_6$	Hg $X_7$	Cr <sup>6+</sup> $X_8$	粪大肠菌群 $X_9$
土路面	1.996	0.544	-0.799	-0.603	0.519	-0.036	-0.256	1.227	0.411
学校砖地面	-0.309	-0.114	-0.953	-0.712	0.253	-0.873	0.442	1.025	1.407
庭院砖地面	-0.490	-0.205	1.285	1.705	1.360	1.636	0.519	-0.476	0.553
水泥路面	-0.738	-1.376	-0.845	-0.581	-1.376	-0.538	-1.264	-1.263	-0.914
瓦屋面	-0.354	-0.448	0.319	-0.563	-0.943	-0.886	-0.876	-0.751	-0.159
沥青路面	-0.105	1.599	0.993	0.754	0.187	0.697	1.450	0.238	-1.298

表 4 相关系数矩阵  
Tab.4 Matrix of the correlation coefficients

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
$X_1$	1								
$X_2$	0.445	1							
$X_3$	-0.305	0.404	1						
$X_4$	-0.254	0.332	0.882	1					
$X_5$	0.324	0.518	0.428	0.659	1				
$X_6$	0.007	0.399	0.765	0.954	0.738	1			
$X_7$	0.038	0.831	0.536	0.609	0.704	0.588	1		
$X_8$	0.708	0.621	-0.301	-0.189	0.548	-0.042	0.498	1	
$X_9$	0.196	-0.160	-0.305	-0.133	0.497	-0.122	0.043	0.530	1

表 5 特征值、贡献率及累积贡献率  
Tab. 5 Eigenvalues, contribution rates and accumulated contribution rates

主成分	特征值	贡献率(%)	累积贡献率(%)
Prin1	4. 217	46. 9	46. 9
Prin2	2. 730	30. 3	77. 2
Prin3	1. 203	13. 4	90. 5
Prin4	0. 656	7. 3	97. 8
Prin5	0. 195	2. 2	1

多为面源上的尘埃等所致;Prin3 代表由粪大肠菌群( $X_8$ )等病原体微生物所致,它体现的是人畜粪便所造成的污染。从方差贡献率可以看出,第 1 主成分方差贡献率 46. 9%,远大于其他主成分贡献率。所以,集雨水质是由 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 来控制。其次受控于 SS 和细菌学指标。

2.4 水质综合评价结果

根据 Prin1、Prin2、Prin3 和对应的方差贡献率的积之和计算得出各面源的综合主成分值,给予水质污染程度的定量化描述,得分越大,综合主成分数值越大,表明受污染程度越严重。由此可对样点的污染程度进行分级(王晓鹏,2000),结果见表 7。

由表 7 可见,水泥地面、瓦屋面、学校砖地面可作为黄土塬地区集雨窖水水源地优选集雨场地,6 个集雨场集雨水质较好的占 50%,其中水泥地面和瓦屋面受污染最小,综合评价结果为轻度污染,且水质各单项指标值均达到或优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类基本限值,应大量作为人工集雨水源地开发。但根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)对农村小型集中式供水和分散式供水部分水质指标及限值的要求,水泥地面检测指标中,浊度超出限值 3 倍,粪大肠菌群超出限值 12. 4 倍。在瓦屋面检测指标中,浊度超出 7 倍,粪

表 6 主成分荷载矩阵  
Tab. 6 Matrix of loading values of the principal components

监测指标	Prin1	Prin2	Prin3
$X_1$	0. 136	0. 774	-0. 267
$X_2$	0. 735	0. 353	-0. 551
$X_3$	0. 747	-0. 573	-0. 045
$X_4$	0. 851	-0. 478	0. 189
$X_5$	0. 859	0. 325	0. 380
$X_6$	0. 873	-0. 306	0. 130
$X_7$	0. 876	0. 152	-0. 148
$X_8$	0. 328	0. 932	-0. 063
$X_9$	0. 031	0. 597	0. 776

表 7 集雨水源地水质综合评价  
Tab. 7 Comprehensive evaluation of water quality in source rainwater

水源地	第 1 主成分得分	第 2 主成分得分	第 3 主成分得分	水质综合得分	污染综合排名	污染程度分级结果
土路面	0. 167	4. 239	-0. 439	1. 306	3	重
学校砖地面	-1. 222	2. 785	0. 997	0. 406	4	中
庭院砖地面	5. 105	-2. 151	1. 622	1. 956	1	重
水泥地面	-5. 439	-2. 578	-0. 153	-3. 350	6	轻
瓦屋面	-3. 220	-1. 350	-0. 199	-1. 945	5	轻
沥青路面	4. 622	-0. 944	-1. 830	1. 635	2	重

大肠菌群超出 23 倍之多。所以上述 2 种集雨水源地集雨水不能作为饮用水直接饮用,必须对集雨水经过进一步处理,达到《生活饮用水卫生标准》要求后才能饮用。

土路面作为集雨饮用水源地,因降雨冲刷造成其表面土粒随水流汇入水窖,且因为旱厕、家禽、种植等外加污染源影响,导致窖水浊度、SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、粪大肠菌群的明显升高,故建议不采用土路面作为集雨饮用水源地;庭院砖地面类型的水源地集雨水质较差,有机物指标普遍不符合国家饮用水标准,是由于居民不合理的生活方式,圈养的家禽活动不受约束等造成;沥青路面集雨水质有机物含量较高是与石油沥青含有性质及分子量不同的烃和烃的衍生物组成的混合物直接相关(慈捷元,2001)。

与国外相比,我国水源地保护日益受到重视,但其技术手段、管理水平均存在差距(沈晓鲤和张荫华,1999;罗岳平等,2001;万劲波和周艳芳,2002);与城市集中式饮用水水源地相比,黄土塬地区村镇集雨水源分布分散,工程配套设施缺乏,面临的安全隐患因素多样,防护措施相对薄弱。故应充分利用土地资源,进一步改善集雨环境,提高各类型水源地集雨质量。

3 建议

3.1 政策法规的健全

确保集雨水源有效、合理地运行,为保证干旱半干旱地区广大群众饮水安全,需要提出组织管理、建设管理、资金管理、运行维护等相关配套政策并上升的法律法规层面。目前,村镇饮用水水源地保护方面的专门法律法规仅有 1989 年国家相关部门联合颁布的《饮用水水源保护区污染防治管理规定》(杨峰等,2009),且存在目标不明确,权责不明晰,可操作性不强等问题,故需进一步建立和完善目标明确、权责明晰和可操作性强的村镇饮用水水源地地方性



保护法规,做到有法可依。

### 3.2 集雨水源地水质保护技术体系的建立

针对西北黄土塬地区集雨饮用水源地在集雨过程中携带了各种面源污染物,集雨饮用水 SS、微生物、有机物等污染物较多,集雨水源地水量漏失严重等问题,应研究和进一步完善农村各种分散式集雨水源地水质保护技术,形成集雨水源地构建、集雨水源地污染保护、集雨水源地饮用水处理 3 个技术体系,研发系列化小型化装置及配套设施,研究相应技术规范,以保护农村分散式集雨水源地和保障饮水安全。

### 3.3 加强集雨水源地水质检测

国家和当地相关部门要进一步健全和完善分散式供水设施及供水设备的建设,按规定进行抽样分析化验,及时报告化验结果。市县疾病预防控制中心要依据《地表水环境质量标准》GB 3838—2002 和《生活饮用水卫生标准》GB 5749—2006 行使好卫生监督职权,定期检测报告,预防毒害和污染事故的发生并为分散式集雨水源地水质保护技术改进和完善提供重要依据。

### 3.4 提高群众保护水源地意识

农村地区在雨水的收集和使用过程中,应引导农民养成积极的环境友好型生活方式,尽量避免家禽和人类粪便的影响,避免生活污水的随地排放,以便提供更清洁的集雨水源地。厕所、禽畜饲养场、渗水坑及其他影响水源卫生的设施应远离集雨水源地,并在影响水源卫生的设施和集雨水源地之间设置缓冲带;不要在集雨水源地内或边缘堆放垃圾、粪便、废渣,不要种植农作物;降雨前及时清扫各集雨面和水源地构建设备及其附属设施,并弃去前 5 分钟初期径流;新建水窖设置在阴暗处,定期对水窖和底泥进行清理。

### 参考文献

慈捷元. 2001. 石油沥青的毒性及职业危害. 卫生毒理学杂志, **15**(3): 180-181.  
冯利华. 2003. 环境质量的主成分分析. 数学的实践与认识, **33**(8): 32-35.  
梁邦助. 2003. 多元统计分析在教学质量评价中的应用. 天津工业大学学报, **22**(3): 87-88.  
蓝俊康, 蓝艳红. 2002. 集雨工程的水质研究进展. 中国给水排水, **18**(8): 23-25.  
李莉. 2007. 甘肃省“121”雨水集流工程经济后评价. 中国农村水利水电, (9): 50-52.  
李祚泳, 邓新民, 洪继华. 1990. 主分量分析法用于湖泊富营养化评价的相互比较. 环境科学学报, **10**(3): 311-

316.  
罗岳平, 邱振华, 李宁. 2001. 美国的生活饮用水安全法及其评价. 净水技术, **20**(4): 5-7.  
马永林, 崔继元, 韩伟. 2000. 甘肃省定西县农村窖水水质的卫生学调查. 广西预防医学, **6**(1): 23-24.  
沈晓鲤, 张荫华. 1999. 美国及加拿大污染控制法规与标准的制订. 环境科学与技术, (2): 20-22.  
王晓鹏. 2000. 河流水质综合评价之主成分分析方法. 数理统计与管理, **31**(3): 49-52.  
王占生, 刘文君. 1999. 微污染水源饮用水处理. 北京: 中国建筑工业出版社.  
万劲波, 周艳芳. 2002. 中日水资源管理的法律比较研究. 长江流域资源与环境, **11**(1): 16-20.  
谢剑, 彭立军. 1986. 主分量分析方法在环境质量评价中的应用. 中国环境科学, **6**(2): 24-29.  
杨峰, 林坊, 田海涛. 2009. 北京市村镇饮用水水源地保护现状、问题及对策. 中国农村水利水电, (8): 41-45.  
杨瑞强, 朱琨, 金星龙, 等. 2001. 窖水的水质分析及水质特点. 甘肃环境研究与监测, **14**(1): 70-71.  
叶叶成. 2006. 系统综合评价技术及其应用. 北京: 冶金工业出版社.  
Ashworth J. 2005. Roof collection and storage of rainwater for drinking. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, **158**: 183-189.  
Bengraïne K, Marhaba TF. 2003. Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality. *Journal of Hazardous Materials*, **100**: 179-195.  
Hart C, White D. 2006. Water quality and construction materials in rainwater catchments across Alaska. *Journal of Environmental Engineering and Science*, **5**: 19-25.  
Kahinda JM, Taighenu AE, Boroto JR. 2006. Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, **32**: 1050-1057.  
Meera V, Ahammed MM. 2006. Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: A review. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, **55**: 257-268.  
Mikkelsen PS, Adeler OF, Albrechtsen HJ, et al. 1999. Collected rainfall as a water source in Danish households-what is the potential and what are the costs? *Water Science and Technology*, **39**: 49-56.  
Ouyang Y, Nkedi-Kizza P, Wu QT, et al. 2006. Assessment of seasonal variations in surface water quality. *Water Research*, **40**: 3800-3810.  
Peters EJ. 2006. Rainwater potential for domestic water supply in Grenada. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, **159**: 147-153.  
Sazakli E, Alexopoulos A, Leotsinidis M. 2007. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research*, **41**: 2039-2047.  
Singh KP, Malik A, Sinha S, et al. 2005. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti river (India) using principal component analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*, **166**: 321-341.

**作者简介** 张国珍, 1969 年生, 男, 博士, 教授。主要从事资源与环境领域的研究与教学工作, 发表论文 40 余篇。  
E-mail: zhangguozhen@mail.lzjtu.cn  
**责任编辑** 魏中青