

# 喀斯特高原城市化对贵阳城区河流 水质安全状态的影响分析

焦树林<sup>1,2</sup>, 张婷<sup>1</sup>, 易旭敏<sup>1</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳550001;

2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳550002)

**摘要:** 为了评价贵阳城市化河流南明河水质安全的演变规律, 实现城区河段水环境质量的监测与管理工作, 在实测黔中喀斯特地区南明河流经贵阳市区前后的花溪、水口寺、普渡桥3个断面2008年3月~2010年12月9个河流水环境参数的基础上, 采用模糊数学方法对南明河市区段的水质安全进行综合评价分析。结果表明: 城区及其下游的普渡桥和水口寺两个断面全年处于极不安全状态, 花溪断面在平水期和枯水期为非常安全级别状态, 但丰水期稍差, 处于安全状态。南明河经过贵阳城区的过程中水体受到污染而处于极不安全状态, 甚至经过长距离的河段净化也没能使得水质恢复到安全状态, 这表明流域水文情势及城区社会经济行为对城市河流的水质安全具有显著的影响。

**关键词:** 南明河; 城市化; 模糊数学; 水质; 安全评价

**中图分类号:** X824      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-7852(2012)01-0001-06

模糊数学方法<sup>[1]</sup>在水质评价中具有较好的应用前景, 是水质评价中常用的有效方法之一, 取得了一系列的研究成果<sup>[2-7]</sup>。随着城市化的快速推进, 城市水资源及水质安全状况已经严重影响了居民的生存环境, 制约了区域社会经济的可持续发展, 引起广大学者的高度关注<sup>[8-11]</sup>。在上述研究成果中大多关注水资源安全状况及其评价方面<sup>[8-11]</sup>, 近期特别关注城市供水系统和饮用水源地的水质安全状况<sup>[12-14]</sup>, 对城区河流的水质安全评价方面相对较少。在水环境质量安全评价中, 由于水污染而导致城市河段水质的安全状态就是一个很模糊的概念, 利用模糊数学综合评价方法来评价水质安全具有其

特有的优势。以快速城市化的黔中喀斯特高原城市贵阳城区河流为例, 利用水质因子加权的模糊数学评价方法, 计算各个断面的安全隶属度以评价判定其水质安全级别, 并根据贵阳城区上下游河段的南明河水质安全状况的影响因子进行评价分析, 探讨城区对河段水质安全的影响机制, 为城市环境质量安全调控和区域可持续发展决策提供参考。

## 1 研究区概况

南明河是乌江右岸的一级支流清水河的上游河段, 发源于苗岭山脉北麓平坝县玉龙乡, 是流经黔

收稿日期: 2011-11-13; 修订日期: 2011-12-19.

基金项目: 贵州省科学技术基金项目: “乌江源区流域溶解无机碳侵蚀性质” [黔科合(2009)2251]; 贵州省高层次人才特助基金(TZJF(2009)25); 教育部科学技术研究重点项目: “喀斯特地下水地表汇流的溶解无机碳行为研究”(210201); 贵州师范大学博士科研启动项目.

作者简介: 焦树林(1969-), 男, 湖南省邵阳人, 副教授, 博士, 主要研究流域地表过程和环境变化.

中经济区核心城市贵阳的河流。研究选取流经贵阳城区前后3个断面作为水质评价的观测点,3个监测断面分别是花溪断面(E106°39'27", N26°26'55")、水口寺断面(E106°43'55", N26°34'34") and 普渡桥断面(E106°53'51", N26°40'18"), 分别位于贵阳城区上、下游河段(图1)。

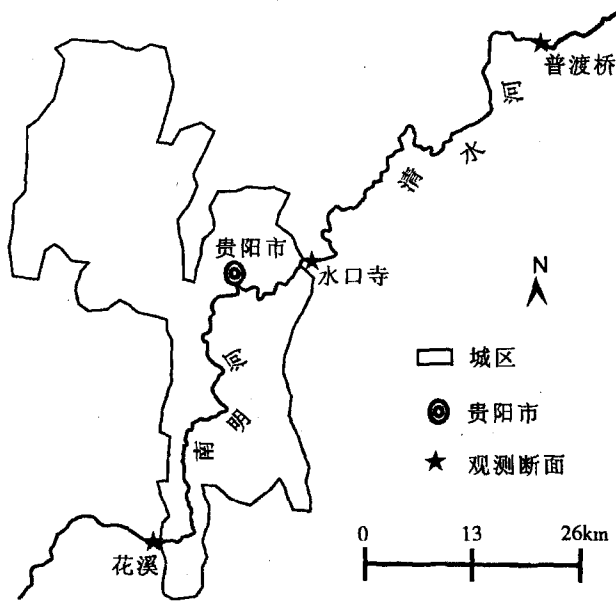


图1 采样观测断面沿南明河分布示意图

Fig.1 The map of the sampling sites along the Nanminghe River

## 2 模糊数学综合评价方法的建立

### 2.1 构建因素集和评价集

水质安全评价的因素集是南明河水质安全评价系统中影响评判的各个因素所组成的集合,通常用  $U$  表示,即:  $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$ , 其中  $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$  为参与评价的  $n$  个评价因子。在本研究选取水质安全监测中的河道水体中的溶解氧、高锰酸盐指数、生化需氧量、氨氮、汞、总铅、氰化物、挥发酚、石油类共9项评价因子组成因素集,即  $U = \{\text{溶解氧, 高锰酸盐指数, 生化需氧量, 氨氮, 汞, 总铅, 氰化物, 挥发酚, 石油类}\}$ 。

评价集为对评判对象可能作出的各种评判结果所组成的集合,用  $V$  表示,即:  $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_m\}$ 。在水质安全评价中一般采用5个评价等级,即  $V = \{I, II, III, IV, V\}$ 。

### 2.2 确定隶属函数

模糊数学的隶属函数有很多种类,如线性函

数,梯形函数,降半梯形函数等。在本研究中采用的是降半梯形分布函数:

$$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1 & a_2 < x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & a_3 < x \leq a_4 \\ 0 & x > a_4 \end{cases}$$

式中:  $A(x)$  为某种元素的隶属度;  $x$  为样本中的评价因子的实测值;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  为相邻两水质安全等级的标准值。

### 2.3 建立模糊矩阵

通过隶属函数,利用因子实测值,求出  $i$  个单项指标对  $j$  级安全水质的隶属程度,得出  $i, j$  矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} \end{bmatrix}$$

式中:  $r_{ij}$  表示第  $i$  个评价因子对第  $j$  级评价等级的隶属度。考虑每个参与评价的因子对水质安全影响的贡献率不同,相应有不同的侧重,需要对每个参与评价的因子赋予不同的权重,组成参与评价因子的权数矩阵如下:

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_i]$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个评价因子的权重数,对于数值越大污染越重的指标权重采用  $W_i = C_i/S_i$  计算,对于数值越大污染越轻的指标权重采用  $W_i = 1 - C_i/S_i$  计算,其中,  $C_i$  为第  $i$  种污染物实测浓度;  $S_i$  为第  $i$  种污染物各级标准值的算术平均值。

最后,对  $W_i$  进行归一化处理,由  $a_i = \frac{W_i}{\sum W_i}$ ,

得到归一化处理后的权数矩阵如下:

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$$

## 2.4 计算综合评价向量

应用模糊综合运算对矩阵  $A$ 、 $R$  进行运算, 按照模糊矩阵的运算法则, 得出综合评价结果。将矩阵与矩阵  $R$  进行复合运算:

$$B = A \otimes R = [Y_1, Y_2, \dots, Y_i]$$

式中:  $y$  为模糊综合评价结果, 此结果对应于各级水质安全的隶属度;  $\otimes$  为模糊矩阵的复合运算, 一般取算子“ $\vee$ ”和“ $\wedge$ ”。这样可得出总体对于各级水质安全的隶属度。一般采用隶属度最大的原则, 如果在模糊矩阵复合运算结果中出现两个最大值, 则考虑与次大值贴近的那个结果所在的水质安

全级别<sup>[1]</sup>。

## 3 南明河河段水质安全等级的模糊数学评价分析

### 3.1 南明河河段水质安全隶属度矩阵

根据贵阳市南明河河段 2008 年 3 个断面的水质监测数据\* (表 1) 和《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB3838-2002)<sup>[15]</sup> (表 2), 利用模糊数学的降半梯形分布函数分别计算出 3 个断面的 3 个时期的单因子隶属度, 并建立了相应的隶属度矩阵, 具体矩阵见表 3。

表 1 南明河监测断面枯、丰、平水期水质状态参数均值表

Tab. 1 The water quality parameters of the sampling section in the Nanminghe water channel during the lowflow, high-flow and middle-flow period, respectively

断面	时间	DO	高锰酸盐	BOD <sub>5</sub>	氨氮	总汞	总铅	氰化物	挥发酚	石油类
普渡桥	枯水期	4.4	5.85	42	4.27	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.01
	丰水期	6.65	3.15	3.5	4.55	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.1
	平水期	2.75	4.5	4	2.45	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.01
水口寺	枯水期	4.45	9.4	34.5	4.445	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.105
	丰水期	8.3	6.75	24.5	4.95	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.03
	平水期	2.65	7.65	26	2.715	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.01
花溪	枯水期	8.9	1.25	1	0.033	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.01
	丰水期	6.25	2.5	4	0.04	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.01
	平水期	6.85	2.65	2.5	0.06	0.00001	0.005	0.002	0.001	0.01

表 2 南明河水质安全评价指标分级及标准

Tab. 2 Index grade and standard for water quality security assessment of Nanminghe river

编号	项目	很安全	安全	基本安全	不安全	极不安全
1	溶解氧	7.5	6	5	3	2
2	高锰酸盐指数	2	4	6	10	15
3	生化需氧量	2	3	4	6	10
4	氨氮	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
5	总汞	0.00005	0.00005	0.0001	0.001	0.001
6	总铅	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1
7	氰化物	0.005	0.05	0.2	0.2	0.2
8	挥发酚	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1
9	石油类	0.05	0.05	0.05	0.5	1.0

\* 贵州省环境监测中心站, 贵州省 2008 年环境质量报告书, 2009.

表3 南明河3断面不同水文期各监测指标的隶属度矩阵R  
 Tab.3 Values of membership degree to each index of the three sampling section  
 in differntal hydrological periods in the Nanminghe River

时期	普渡桥					水口寺					花溪				
枯水期	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0.275	0.725	0	1	0	0	0	0
	0	0.925	0.075	0	0	0	0	0.85	0.15	0	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
丰水期	0.567	0.433	0	0	0	0	0	0.1	0.9	0	0.167	0.833	0	0	0
	0.575	0.425		0	0	1	0				0.25	0.75	0	0	0
	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0.188	0.812	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
平水期	0	0	0	0.111	0.889	0	0	0	0.35	0.65	0.433	0.567	0	0	0
	0	0.25	0.75	0	0	0	0	0	0.413	0.587	0.325	0.675	0	0	0
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

注: 其中,  $R_{枯1}$  为普渡桥断面枯水时期的隶属度矩阵;  $R_{丰1}$  为普渡桥断面丰水时期的隶属度矩阵;  $R_{平1}$  为普渡桥断面平水时期的隶属度矩阵;  $R_{枯2}$  为水口寺断面枯水时期的隶属度矩阵;  $R_{丰2}$  为水口寺断面丰水时期的隶属度矩阵;  $R_{平2}$  为水口寺断面平水时期的隶属度矩阵;  $R_{枯3}$  为花溪断面枯水时期的隶属度矩阵;  $R_{丰3}$  为花溪断面丰水时期的隶属度矩阵;  $R_{平3}$  为花溪断面平水时期的隶属度矩阵。

### 3.2 计算3个断面各个水文期的因子权重集

按前述的权重计算方法, 分别计算了上述3个断面枯水期、丰水期和平水期的权重集, 经过标准

化处理后得到标准化权重矩阵A。通过计算得到研究河段3个断面的权重集分别是:

普渡桥断面:

$$\begin{aligned}
 A_{枯1} &= \{0.057, 0.054, 0.581, 0.295, 0.0014, 0.0069, 0.0014, 0.0014, 0.0014\} \\
 A_{丰1} &= \{0.0362, 0.0671, 0.1119, 0.7272, 0.0032, 0.0016, 0.0032, 0.0032, 0.032\} \\
 A_{平1} &= \{0.3796, 0.1798, 0.2398, 0.1469, 0.006, 0.03, 0.006, 0.006, 0.006\}
 \end{aligned}$$

水口寺断面:

$$\begin{aligned}
 A_{枯2} &= \{0.059, 0.0909, 0.5007, 0.3225, 0.0015, 0.0073, 0.0015, 0.0015, 0.0152\} \\
 A_{丰2} &= \{0.0191, 0.0805, 0.4382, 0.4426, 0.0018, 0.0089, 0.0018, 0.0018, 0.0054\} \\
 A_{平2} &= \{0.157, 0.1238, 0.6313, 0.0659, 0.0024, 0.0121, 0.0024, 0.0024, 0.0024\}
 \end{aligned}$$

花溪断面:

$$\begin{aligned}
 A_{枯3} &= \{0.3917, 0.1749, 0.2099, 0.0346, 0.021, 0.1049, 0.021, 0.021, 0.021\} \\
 A_{丰3} &= \{0.1976, 0.1976, 0.4743, 0.0237, 0.0119, 0.0593, 0.0119, 0.0119, 0.0119\} \\
 A_{平3} &= \{0.2015, 0.2015, 0.4835, 0.0048, 0.0121, 0.0604, 0.0121, 0.0121, 0.0121\}
 \end{aligned}$$

## 4 结果与讨论

根据上述模糊数学综合评价方法,把上述南明河3个断面的观测数据通过计算与分析,讨论南明河段水质安全变化规律及其影响机制,从而提出调控管理水质安全级别的主要措施。

### 4.1 模糊综合评判计算的结果

根据模糊运算法则  $B = A \otimes R$  分别计算出各断面水质安全的模糊综合评价向量  $B$ 。

普渡桥断面:

$$\begin{aligned} B_{\#1} &= A_{\#1} \otimes R_{\#1} = \{0.012 \quad 0.05 \quad 0.021 \quad 0.04 \quad 0.876\} \\ B_{\#1} &= A_{\#1} \otimes R_{\#1} = \{0.113 \quad 0.1 \quad 0.056 \quad 0 \quad 0.73\} \\ B_{\#1} &= A_{\#1} \otimes R_{\#1} = \{0.054 \quad 0.045 \quad 0.135 \quad 0.282 \quad 0.484\} \end{aligned}$$

水口寺断面:

$$\begin{aligned} B_{\#2} &= A_{\#2} \otimes R_{\#2} = \{0.027 \quad 0 \quad 0.094 \quad 0.056 \quad 0.823\} \\ B_{\#2} &= A_{\#2} \otimes R_{\#2} = \{0.098 \quad 0 \quad 0.084 \quad 0.446 \quad 0.444\} \\ B_{\#2} &= A_{\#2} \otimes R_{\#2} = \{0.022 \quad 0 \quad 0 \quad 0.106 \quad 0.872\} \end{aligned}$$

花溪断面:

$$\begin{aligned} B_{\#3} &= A_{\#3} \otimes R_{\#3} = \{1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \\ B_{\#3} &= A_{\#3} \otimes R_{\#3} = \{0.213 \quad 0.313 \quad 0.474 \quad 0 \quad 0\} \\ B_{\#3} &= A_{\#3} \otimes R_{\#3} = \{0.75 \quad 0.25 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \end{aligned}$$

### 4.2 讨论与分析

从上面3个断面安全级别判定的模糊综合评价向量来看,处于上游的花溪断面的水质枯水期和平水期都处于非常安全状态,其非常安全的概率分别达到100%和75%,丰水期也处于基本安全状态级别以上,这说明南明河在贵阳城区以上水质常年处于安全级别以上。处于城市下游河段的水口寺断面枯水期和平水期都处于极不安全状态,其极不安全概率分别达到了82.3%和87.2%,而丰水期处于极不安全状态的概率只有44.4%,但处于不安全以下级别的概率达到了89%以上,这说明尽管丰水期大流量的水流冲淡稀释作用也没有使得城区出口段面的水质达到安全状态。

由上游花溪断面和城市出口水口寺断面水质安全变化可以看出,上游花溪断面的河流水体在流经贵阳城区河段的过程中城区污水的汇入使得其出口水口寺断面水质枯水期和平水期处于极不安全状

态,即使在水流量较大的丰水期水质也处于不安全状态级别以下,城区社会经济活动是水质安全级别下降的主要原因。

处于城市下游32 km河段的普渡桥断面枯水期和平水期都处于极不安全状态,其概率分别达到了87.6%和73%,而平水期处于极不安全状态的概率只有48.8%,但处于不安全级别以下的概率达到了76%以上,这表明枯水期的小流量限制了河流水体的自净能力使得水体经过长距离的净化作用安全级别并没有得到提高,同时尽管丰水期河流的大流量提升了水体的自净能力但河流的汇流冲刷效应加剧了水体污染从而不利于水体安全级别的提高,结果使得平水期的安全级别反而没有枯水期的高。对比城市出口断面的水口寺断面,河段经过32 km的净化作用,普渡桥断面的水质安全状况并没有得到显著改善,全年仍然处于不安全状态。

综合上述分析,从花溪断面的很安全水体流经贵阳城区后变为极不安全,说明贵阳城区社会经济活动是南明河水质安全级别下降的重要影响因素;同时,河流丰水期水质安全级别低于枯水期和平水期表明河段流量、水流速度以及流域面上的产汇流等河流水文情势对河段水质安全也具有一定的影响。

### 4.3 南明河水质安全管理的主要措施

根据上述城市化对河段水质安全的影响规律,控制城区经济活动过程中的污水排放量是管理调控城市水质安全级别的关键环节。控制污水的排放量的主要措施是合理规划布局城市化速度和规模、适当控制城市社会经济规模、转变经济发展方式走循环经济道路。

水文情势对水质安全级别的影响不容忽视,合理调控河流流量和产汇流规律也很有必要。可以在雨季,沿各个排水管网布设截污池,用以净化沉淀城市雨洪,处理以后再排入河道,调控城市暴雨的洪峰流量和污水入河量,改变河道水文情势。同时,根据河流水体的自净规律,可以利用上游水库的调蓄作用在枯水期适当加大河道流量,以满足城区河道的生态需水量,提高河道水体的自净能力。

防止城市丰水期的雨洪冲刷效应也是河道水质安全级别提升的重要措施之一,为此,建立城市雨洪拦蓄、收集、净化体系切实防止污染物直接汇入河道是城市水质安全管理的重要环节之一。

## 参考文献:

- [1] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006, 8: 143 - 157.
- [2] CHANG NI - BIN, CHEN HW, NING S K. Identification of River Water Quality Using the Fuzzy Synthetic Evaluation Approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2001, 63 (1): 293 - 305.
- [3] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的嫡权法赋权及其在水质评价中的应用 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25 (4): 552 - 556.
- [4] 邹海明, 李粉茹. 基于实例的水质模糊综合评价 [J]. *安徽农学通报*, 2005, 11 (4): 154 - 155.
- [5] 张智, 杨骏骅. 城市内湖综合治理及效果评价 [J]. *安全与环境工程*, 2006, 13 (1): 23 - 25.
- [6] 尹翠琴, 金腊华. 模糊数学评价法在广州花都区地表水质现状评价中的应用 [J]. *生态科学*, 2007, 26 (6): 559 - 563.
- [7] 周贵忠, 张金恒. 利用模糊数学评价大沽河干流水质的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (2): 191 - 195.
- [8] 方红松, 刘云旭. 关于中国的水安全问题及其对策探讨 [J]. *中国安全科学学报*, 2002, 12 (1): 38 - 41.
- [9] 张巧显, 欧阳志云, 王如松, 等. 中国水安全系统模拟及对策比较研究 [J]. *水科学进展*, 2002, 13 (5): 569 - 577.
- [10] 张华侨, 龛明, 赵辉, 等. 郑州市水安全模糊综合评价 [J]. *水资源保护*, 2010 (6): 42 - 46.
- [11] 姜文谦, 衣俊国. 建立河流水质污染预警体系保护河流水质安全 [J]. *环境科学与管理*, 2011, 36 (2): 10 - 12.
- [12] 郑丙辉, 付青. 落实水源地保护规划、保障水源地水质安全 [J]. *环境保护*, 2010 (12): 14 - 16.
- [13] 姚颖. 长江口地区饮用水水质安全存在的问题及保障措施 [J]. *环境研究与监测*, 2011, 24 (1): 62 - 65.
- [14] 张韵, 李崇明, 封丽, 等. 重庆市水库型饮用水源地水质安全评价 [J]. *长江科学院院报*, 2010, 27 (10): 19 - 22.
- [15] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准 GB3838 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

## THE IMPACT ASSESSMENT ON THE URBANIZATION TO THE WATER QUALITY SECURITY OF THE URBAN RIVER IN KARST PLATEAU GUIYANG CITY AREA

JIAO Shu-lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>, YI Xu-min<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou, China;

2. The State Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

**Abstract:** In order to assess the impact of water quality security that the Guiyang city urbanization acted to the riverine water of Nanminghe River for the water environmental quality monitoring and management work, the security of the urban riverine quality along the Nanminghe River were assessed using the fuzzy mathematics according to the 9 water environmental parameters of the site in Huaxi, Shuikousi and Puduqiao those were monthly surveyed along the Nanminghe River waterway throuthing out the Guiyang city area in the Central Guizhou province during the period from March 2008 to December 2010. As a result, the water quality security have been in the most unsafe degree around the years in the both sites of the Puduqiao and the Shuikousi riverine water downing the Guiyang urban area, while the water quality security were the best safe degree during the lowflow and normal waterflow season, as well as were safe degree in the highwater season. It was suggested that the urban economical-social activities and hydr-circumstances have strikingly impacted the degree of the urban riverine water quality security, for which the water quality security were the most unsafe degree either in the site of the down urban or in the site which water had been carried out a long-distance depuration and too late to refresh because of the polluted water flowing into waterway for urban activities.

**Key words:** Nanminghe River; urbanization; fuzzy mathematics; water quality; assessment of the security