

乌江流域水资源、水质变化与水库建设关系分析

刘鸿雁,刘 奇,毛健全

(贵州大学资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550003)

摘要 对乌江流域 2001—2005 年水资源与水环境质量的多项指标进行统计分析,并结合乌江流域梯级水电站建设,采用聚类分析的方法探究水库建设与水资源及水质变化的内在联系。结果表明:乌江流域降雨量、地表水资源量、年平均含沙量等指标年际变化很大,流域水质有逐渐恶化的趋势,主要污染区域在乌江上、中游地区的支流河段,各级水库的年末蓄水量与降雨量有关,与工农业用水量呈显著负相关。水库建设对流域的影响具有累积效应和滞后效应。

关键词 水资源;水质;聚类分析;梯级水电站;乌江流域

中图分类号 X522 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2010)03-0018-05

Study on relationship between water resources, water quality changes and reservoir construction in Wujiang Basin

LIU Hong-yan, LIU Qi, MAO Jian-quan

(College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract Statistical analysis was carried out for several indexes of water environmental quality from 2001 to 2005 for Wujiang Basin. The intrinsic relation of reservoir construction with water resources and water quality was explored using the cluster analysis method. The results showed that rainfall, surface water resources quantity, and annual average sediment concentration in the Wujiang Basin displayed significant changes between years; water quality tended to worsen in the basin; the main polluted areas were in the upstream and middle reaches of the Wujiang River; annual water storage in all reservoirs had a positive correlation with rainfall and a negative correlation with industrial and agricultural water consumption; and reservoir construction had accumulation and lag effects on the river basin.

Key words water resources; water quality; cluster analysis; cascade hydroelectric station; Wujiang Basin

水库建设改变了河流的生态系统,其环境影响引起世界范围的关注^[1]。乌江流域面积广,年径流量大,近年来已相继建成投产了 7 座大型水电站。水电站建设对生态环境的影响研究一般关注工程建设对生态环境的破坏^[2]、大坝的建立对水生生物生活环境及生活习性的改变、水库水温和水质的变化等方面。水电站建设改变了流域下垫面等的条件,对流域水文、水资源和水环境质量等都会有相应的影响。笔者收集了 2001—2005 年乌江流域水资源状况的相关资料,通过数理统计分析,结合乌江流域梯级水电站建设,对水资源及水环境的关系进行初

步的探讨。

1 流域概况与梯级水库的建设

贵州省水能资源十分丰富。普查资料表明:全省水能蕴藏量 1 874.5 万 kW,居全国第 6 位,经济可开发水能资源 1 633 万 kW,居全国第 4 位。乌江发源于贵州省威宁县香炉山,横穿贵州省中部,在东北部出境,是长江上游南岸的最大支流,是贵州第一大河,全长 1 037 km,流域面积 8.79 万 km²,天然落差 2 123.5 m,多年平均水量 534 亿 m³,与黄河水量相当,占贵州省地表径流的 36.33%^[3]。贵州省境内

乌江的主要支流有六冲河、野济河、清水江、湘江、六池河、印江河、洪渡河等一级支流 70 多条, 沿岸地区是我国南方水能、煤炭、磷、铝、锰等资源富集的地区, 综合开发条件较好。

1990 年国务院发布《乌江干流沿岸地区国土规划综合报告》, 对乌江干流梯级开发提出了按普定、引子渡、洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林、沙沱、彭水等 10 个梯级考虑的方案, 除彭水外其余 9 个梯级水电站都布置在贵州省境内。从 1985 年起, 相继建成普定、乌江渡、东风、引子渡、洪家渡、索风营、构皮滩等共 7 座大型水电站, 思林水电站目前正在建设中, 沙沱水电站已完成可行性研究报告并通过审查。各级水电站分布及正常蓄水位见图 1。

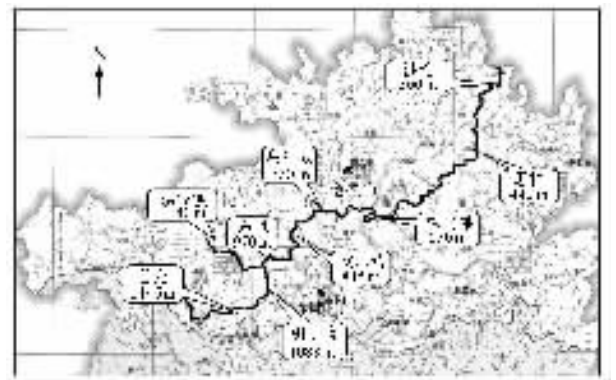


图 1 贵州省内乌江流域梯级水电站分布及正常蓄水位

按照水资源利用分区, 乌江流域是长江流域的 2 级分区, 自 2003 年以来, 水资源调查均按 3 级分区进行统计, 即乌江流域以思南为界, 分思南以上流域及思南以下流域, 面积分别为 50 592 km² 和 16 215 km²。

表 2 乌江流域水资源状况各项指标相关系数

指标 序号	降水 量	地表水 资源量	地下 水资源量	人均 水资源量	地表水水质类型			年平 均含 沙量	年输 沙量	输沙 模数	总供 水量	农业 用水量	工业 用水量	生活 用水量	废污 水排 放量	大型 水库	中型 水库	年末 蓄水 量
					Ⅱ、Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类											
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
(1)	1	0.9962**	0.8332*	0.6500	-0.0688	0.1383	-0.1091	0.7958	0.5498	0.8637*	-0.6956	-0.5660	-0.6827	0.0126	-0.0479	-0.3533	-0.6775	0.3571
(2)		1	0.8693*	0.7010	0.0005	0.0720	-0.1827	0.7967	0.5521	0.8722*	-0.6575	-0.5202	-0.6419	-0.0405	0.0228	-0.3052	-0.6300	0.3061
(3)			1	0.8114*	0.4706	-0.3956	-0.6360	0.8356*	0.6991	0.9135*	-0.2209	-0.1362	-0.1958	-0.2093	0.4558	0.1772	-0.2180	-0.0475
(4)				1	0.2986	-0.1992	-0.5338	0.3680	0.1586	0.5226	-0.1087	0.1845	-0.0914	-0.7162	0.6453	-0.0365	0.0422	-0.4211
(5)					1	-0.9945**	-0.9648**	0.3439	0.5070	0.3434	0.5962	0.4569	0.6267	-0.1666	0.7406	0.9110*	0.5337	-0.4237
(6)						1	0.9321**	-0.3128	-0.5002	-0.2958	-0.6134	-0.4390	-0.6433	0.0911	-0.6844	-0.9339**	-0.5348	0.3799
(7)							1	-0.4054	-0.4991	-0.4462	-0.5238	-0.4796	-0.5542	0.3482	-0.8455*	-0.8090	-0.5047	0.5133
(8)								1	0.9426**	0.9846**	-0.3633	-0.4757	-0.3428	0.3530	0.0354	0.1844	-0.4917	0.3857
(9)									1	0.8856*	-0.1029	-0.3244	-0.0827	0.4658	0.0901	0.4512	-0.2910	0.3130
(10)										1	-0.3786	-0.4219	-0.3571	0.1954	0.1311	0.1332	-0.4660	0.2922
(11)											1	0.9124*	0.9992**	-0.3432	0.6828	0.7929	0.9641**	-0.7886
(12)												1	0.9087*	-0.6877	0.8067	0.5621	0.9786**	-0.9654**
(13)													1	-0.3444	0.6983	0.8117*	0.9632**	-0.7868
(14)														1	-0.7487	0.0007	-0.5608	0.8375*
(15)															1	0.6304	0.7568	-0.8788*
(16)																1	0.6667	-0.4426
(17)																	1	-0.7573
(18)																		1

注：* 为显著相关水平, ** 为极显著相关水平 括号内为指标序号。

为了便于统计, 笔者全部采用 2 级分区。

2 水资源总量、河流含沙量等指标的变化

水资源状况的统计指标有流域降水量、地表水资源量、地下水资源量和人均水资源占有量(表 1), 各指标相关系数见表 2。

表 1 乌江流域水资源总量及人均水资源占有量

年份	降水量/ 亿 m ³	地表 水资源量/ 亿 m ³	地下 水资源量/ 亿 m ³	人均水资源 占有量/ m ³
2001	717.1	360.4	95.0	2 113
2002	793.4	421.7	105.1	2 447
2003	683.2	346.4	98.7	2 471
2004	729.3	374.6	101.6	2 546
2005	630.6	301.5	94.5	1 888

由表 1 可知, 2001—2005 年, 降水量最少的是 2005 年, 仅 630.6 亿 m³, 较多年平均值偏少 15.3%, 属偏枯水年份; 降水量最大的是 2002 年, 达到 793.4 亿 m³。相应的, 2002 年地表水资源量达到 421.7 亿 m³, 地下水资源量达到 105.1 亿 m³, 而 2005 年这两项指标只有 301.5 亿 m³ 和 94.5 亿 m³。人均水资源占有量最大的年份是 2004 年, 为 2 546 m³/人, 最小的是 2005 年, 仅 1 888 m³/人。

从表 2 可见, 降水量与地表水资源量、地下水资源量和人均水资源占有量的相关系数分别是 0.996 2(极显著相关)、0.833 2(显著相关)和 0.650 0。

由表 3 可见, 贵州省河流含沙量主要来自流域面上的泥沙侵蚀, 它与暴雨强度、地形、土壤、植被、地质以及土地利用情况有关, 每年的第一、二场暴雨

洪水或久旱后的暴雨洪水河流含沙量较大,年内含沙量在5—9月较大,1—4月和10—12月较小。

表3 乌江流域河流含沙量及已建成水库数量统计

年份	年平均含沙量/ (kg·m ⁻³)	年输沙量/ 万 t	输沙模数/ (t·km ⁻²)	大型水库/座	中型水库/座	年末蓄水量/ 亿 m ³
2001	0.61	2 183	327	4	19	28.87
2002	0.83	2 991	448	6	19	28.90
2003	0.59	2 180	326	6	21	24.96
2004	0.68	2 506	375	6	21	23.98
2005	0.63	2 544	325	7	21	26.72

与含沙量相关的参数还有年输沙量及输沙模数。河流含沙量与年输沙量及输沙模数之间的相关系数分别是0.9425和0.9846,达极显著水平。河流含沙量的3个参数与降雨量、地表水资源量、地下水资源量和人均水资源占有量都呈正相关关系,其中,输沙模数与降雨量、地表水资源量、地下水资源量的相关系数分别达到0.8637,0.8722和0.9135,都达到了显著水平。因此,由表3可见含沙量、年输沙量和输沙模数变化趋势与降雨量一样,2002年最高,分别达到0.83 kg/m³,2 991 万 t和448 t/km²,2005年分别是0.63 kg/m³,2 544 万 t和325 t/km²。

3 供用水量、废污水排放量的变化

乌江流域供用水量的变化趋势见图2。图2显示随着经济的发展,从2001—2005年,工业和农业用水量呈现逐年增加的趋势,与总供水量的相关系数分别为0.9992和0.9124,达到极显著相关和显著相关水平,可见,总供水量由工业用水量和农业用水量决定,至2005年,乌江流域总供水量已达49.90亿m³。在用水量中,生活用水量变化趋势不明显。

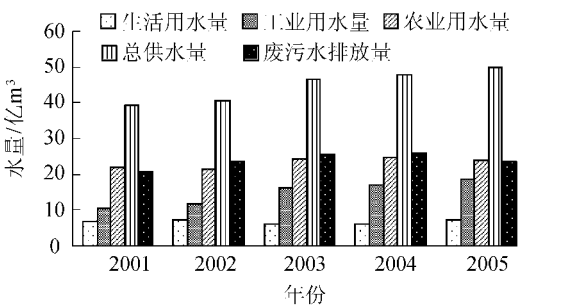


图2 乌江流域供用水变化趋势

图2还显示了贵州省废污水排放量变化趋势。从图2可看出,贵州省废污水排放量从2001—2004年呈上升趋势,2005年有所下降。据贵州省水资源公报统计资料,2004年贵州省工业、城镇生活废污水总排放量为25.98亿t,其中城镇生活污水排放量为3.23亿t,第二产业(含工业、建筑业)废污水排放量为22.54亿t,第三产业(不完全统计)为0.21亿t。2005年有所下降,全省工业、城镇生活废污水总排

放量为23.44亿t,其中城镇生活污水排放量为5.92亿t,第二产业(含工业、建筑业)废污水排放量为17.52亿t,第三产业没有统计。乌江流域涵盖了乌江上游的六盘水市和毕节地区,中游的贵阳市和遵义市、安顺市、黔南州、毕节地区部分县,下游的遵义市和铜仁地区部分县,因此,其经济发展水平能够代表贵州省的发展状况,废污水变化趋势也与全省的变化趋势基本相同。由表2可知,废污水排放量与农业用水量和工业用水量的相关系数分别为0.8067和0.6983,呈明显的正相关。

4 水环境质量的

表4显示了2001—2007年乌江流域水环境质量状况。从数据上看,除2001年外,Ⅱ、Ⅲ类水体比例呈逐年下降的趋势,轻度污染和重度污染的水域面积相对增加。影响地表水水质的因素很多,由于降雨量、径流量、废污水排放量、水体自净能力等因素的综合影响,水环境质量状况与水资源等各项指标之间没有表现出显著的相关关系。整个流域典型污染区域主要是乌江支流城市下游河段。如六盘水市三岔河部分河段,全年劣Ⅴ类水占21.6%;贵阳市清水河部分河段全年劣Ⅴ类水占28.2%,是乌江流域污染最严重的河段。

表4 乌江流域水环境质量状况

年份	水质类别百分率/%				主要污染物	主要污染河段
	I类	Ⅱ、Ⅲ类	Ⅳ类	V类		
2001	0	31.9	41.9	26.2	NH ₃ -N	六盘水市三岔河段
2002	0	88.8	1.7	9.5	COD、Pb	六盘水三岔河汪家寨段
2003	0	88.9	1.6	9.5	COD	六盘水三岔河汪家寨段
2004	0	76.9	12.0	11.1	Pb、COD	贵阳清水江普渡桥河段
2005	0	86.5	0.0	13.5	NH ₃ -N	贵阳清水江普渡桥河段
2006	0	51.6	23.8	24.6	Pb、TP	贵阳清水江普渡桥河段
2007	0	54.7	34.2	11.1	Pb、TP	贵阳清水江普渡桥河段

图3为2005年乌江流域污染水域示意图。乌江流域下游河段在2005年均为Ⅱ类和Ⅲ类水质,图3中所圈区域水质为Ⅳ类、V类或劣V类,水质污染呈现出明显的地域特征,污染较严重的区域是上游的六盘水市、毕节地区,中游的贵阳市和遵义市^[4]。主要污染物有COD、NH₃-N、TP、Pb等,表明水体污染源主要是生活污水和工业废水。图3还显示了乌江干流上的乌江水库水质污染严重,主要污染指标是TP,这主要是由于水库蓄水形成湖相沉积,内源

污染增加,水流速度减缓,水体自净能力差等因素造成的。

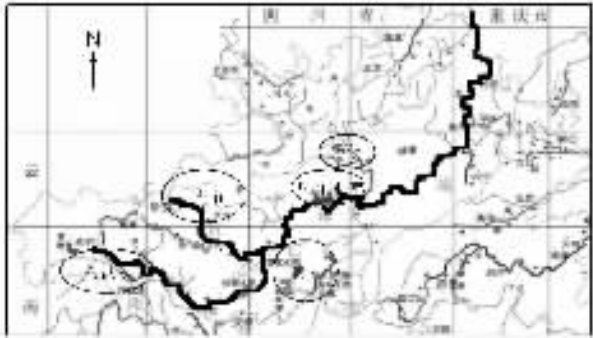


图3 2005年乌江流域污染水域示意图

5 水电站建设与水资源、水环境质量变化的聚类分析

2001年乌江流域已建成大型水电站4座,中型电站19座,至2005年已增加到7座和21座。为了研究水库建设对水资源与水环境质量变化的影响,利用SPSS 11.0软件对各项指标之间的相关关系进行统计,结果见表2。

表2结果表明:随着大型电站的建成使用和蓄水调水功能的提高,工业和农业用水量也同步增长。水库年末蓄水量与降雨量和地表水资源量呈正相关关系,但相关系数较小,年末蓄水量与工业、农业用水量和废污水排放量的相关系数分别达到-0.9654, -0.7868和-0.8788,表明水库的蓄水量随着降雨量的增加而增加,但随着工业和农业用水量的增加而显著减少。乌江流域梯级电站以发电功能为主,很多电站都只有日调节功能,其蓄水功能并不明显。

为进一步分析水库建设与水资源、水环境质量各项指标之间的关系,利用SPSS 11.0软件对各组数据进行聚类分析,结果见图4。图4中各组变量的

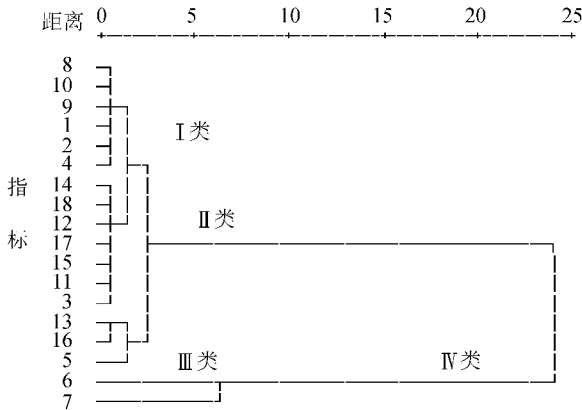


图4 乌江流域水资源、水环境质量及水库建设各项指标的聚类分析

序号见表2。从图4可清晰地看出各组变量之间的分级。第1类聚类指标总共可分为4组:第1组包括降雨量(1)、地表水资源量(2)、人均水资源量(4)、年平均含沙量(8)、输沙量(9)和输沙模数(10),反映乌江流域基本水文条件及水土流失的基本状况;第2组包括总供水量(11)、农业用水量(12)、生活用水量(14)、废污水排放量(15)、中型水库数量(17)、年末蓄水量(18),代表乌江流域供用水状况及水库蓄水情况的变化;第3组是工业用水量(13)、大型水库数量(16)和Ⅱ、Ⅲ类水占地表水质的比例,表明地表水水质的变化与大型水库数量及工业用水量表现出相同的变化趋势;第4组是Ⅳ类水和Ⅴ类水所占比例,代表地表水水质恶化的趋势。从第2类聚类指标可看出,第1组数据与第2组数据之间的距离最短,反映了流域水资源总量及水资源利用之间的相关关系,而流域水资源及水资源利用状况与工业用水量、大型水库数量和Ⅱ类Ⅲ类水占地表水质的比例属于第3类聚类指标体系,Ⅳ类水和Ⅴ类水的变化趋势与上述指标的距离跨度大,表明乌江流域水质的恶化是各种因素共同作用的结果。

6 影响机理分析

上述统计分析结果表明乌江流域近年来水资源与水环境质量变化的趋势,及其与水电站建设的内在联系。但水电站的建设对生态环境的影响具有累积效应和滞后效应,即其影响的因子很多,并且对各因子的影响具有空间上的叠加性、时间上的连续性和作用效果上的滞后性。其作用机制主要表现在以下两个方面。

6.1 对水文特征的影响

水库拦断江河后,对天然河流的水文情势产生了一定影响。这种水文变化主要表现在河流流量、河流水位、地下水水位等方面。影响最大的是多年调节型水库,影响相对较小的是日调节型水库。水库水位的变化与天然江河大不相同,这取决于不同类型的调节方式,以防洪为主要目的的水库,其水位的变化在季节上与天然河流是相反的,水位变幅较大,汛期水库处于低水位运行,在汛末蓄水,水库处于高水位运行。与天然情况相比,增加了江河枯水期流量,减少了丰水期流量,尤其对洪峰流量有明显的削减作用,提高了下游防洪标准^[5]。

另外,由于水库极大地增加了水域面积和蓄水量,使得区域的蒸发量和热容量发生变化,直接引起局域气压的变化而间接影响区域气候条件。

6.2 对水环境质量的影响

水库水温具有稳定分层特性,从水库深处泄出

的水,其水温夏天比河水的水温低,冬天比河水的水温高,而从水库顶部附近出口放出的水,其水温全年都比河水的高。上游水库水温严重地影响到下游河道、水库的多年平均水温。水温的变化直接影响到水生生物的生长环境,如藻类、鱼类及其他生物的繁殖周期,间接地影响水体自净能力,使水质产生异常变化。

随着水库冲沙系统的开启,水库沉积的泥沙会携带污染物进入下级水库,影响下级水库的供水功能。

7 结 论

a. 2001—2005 年,乌江流域水资源量变化很大,降雨量最大的年份是 2002 年,最小的是 2005 年,相应的,区域地表水资源量、河流泥沙含量等指标也随降雨量的变化而变化。

b. 随着经济的发展,乌江流域供水量和用水量都呈逐年增长的趋势,尤其是工农业用水量的增长趋势明显,废污水的排放量也逐年递增。

c. 2001—2007 年,乌江流域水质有逐渐恶化的趋势,主要污染的区域在乌江上、中游地区的支流河段,如六盘水市三岔河及贵阳市清水河等城市下游部分河段。但影响水质的因素很多,水质变化与水资源量等各项指标之间没有显著的相关关系。

d. 聚类分析结果表明:乌江流域中型水电站的建设增大了流域的供水能力;大型水电站建设与工业用水量表现出相同的变化趋势;各级水库的年末

蓄水量与降雨量有一定关系,与工农业用水量呈显著负相关。

梯级水电站建设对环境的影响主要表现为改变区域的水文特征和水环境质量,其影响有明显的累积效应和滞后效应。笔者的统计数据仅从 2001—2005 年,时间较短,还需要增加大量的水文水资源及环境生态指标,以便全面反映梯级电站建设对环境的影响效应。

参考文献:

- [1] MICHAEL B, KLAUS J, JOHN M B. Application of a hierarchical framework for assessing environmental impacts of dam operation: changes in streamflow, bed mobility and recruitment of riparian trees in a western North American river [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90: 224-226.
- [2] KLAUS J, MICHAEL B, NICHOLAS S, et al. 23 reservoir operations, physical processes, and ecosystem losses [J]. Developments in Earth Surface Processes, 2007, 11: 607-636.
- [3] 龙笛. 贵州乌江流域的水资源开发与可持续利用 [J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 19-24.
- [4] 周智, 喻元秀, 熊际翎. 乌江流域水环境污染现状及容量与对策 [J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2004, 22(4): 42-45.
- [5] 胡宝柱, 高磊磊, 王娜. 水库建设对生态环境的影响分析 [J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2008, 20(2): 41-43.

(收稿日期 2009-01-17 编辑 徐 娟)

(上接第 7 页)

依据投影寻踪综合评价结果及当地水资源的实际情况,将瓦房店市各区县的水资源安全程度由高到低排列等级,松树库上为安全性最高区域,九龙库上、交流岛、莲花库上、大沙河、八一库上、松树—东风、九道河、大河库上、鞍子河、苇套河、浮渡河、苇套河—红沿河、九龙库下、八一库下、长兴岛、南极河—岚嵒河、东风—河口为中级区域,回头河为最差区域。这与当地的水源条件、工业发展程度及经济状况等因素有关。

虽然投影寻踪技术在水资源安全评价中还存在很多问题,计算中存在误差,但依据此技术对瓦房店市进行的水资源安全评价在瓦房店市未来的水资源发展规划中具有指导性意义。尽管只是运用投影寻踪技术对各区域安全性进行了比较,不能得出各区

域确切的评价数值,但随着研究的深入,该技术在水资源安全评价方面的应用将日臻完善。

参考文献:

- [1] 王瑞芳, 秦大庸, 张占庞. 层次分析法在山西省水资源安全评价中的应用 [J]. 人民黄河, 2008(9): 40-42.
- [2] 卞建民. 投影寻踪技术在松嫩平原西部水资源可持续利用中的应用 [J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 93-96.
- [3] 王顺久. 区域农业生态环境质量评价投影寻踪模型研究 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 173-175.
- [4] 方必和. 投影寻踪模型在国民经济综合评价中的应用 [J]. 运筹与管理, 2005, 14(5): 85-88.
- [5] 李祚泳. 投影寻踪的理论及应用进展 [J]. 大自然探索, 1998, 17(1): 47-50.
- [6] 孙才志, 迟克续. 大连市水资源安全评价模型的构建及其应用 [J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 115-118.

(收稿日期 2009-04-08 编辑 徐 娟)