

大渡河龚咀水库泥沙特性与淤积

林承坤

(南京大学大地海洋科学系, 南京 210008)

提要 龚咀水库库容 $3.1 \times 10^8 \text{m}^3$, 是大渡河上最大的水库, 从 1971 年蓄水以来的 15 年间, 淤积量达 $2.2096 \times 10^8 \text{m}^3$, 占库容的 71.3%。淤积可分蓄水初期, 三角洲发展和淤积接近平衡三个时期, 其淤积率分别为 83.5%, 53% 和 2.9%。淤积物的平均粒径从 1.82mm 增加为 3.38mm, 卵砾推移质移动至坝前。淤积量变化过程即为输沙能力调整恢复过程。

关键词 泥沙淤积 龚咀水库

一、水库概况及其水文特性

龚咀水库位于大渡河下游, 距河口 87km, 是目前大渡河上兴建的第一座大型水库。由于成昆铁路沿金口至龚咀水库河段的高程为 530m 左右, 所以限制了水库的蓄水高程。为了确保建库后泥沙淤积 15 年时百年一遇的洪水(流量为 $11400 \text{m}^3/\text{s}$)不淹没成昆铁路, 经国家批准定为高坝设计(正常高水位 590m)、低坝施工(正常高水位 525—530m)方案, 并于 1967 年 2 月截流, 1971 年 10 月第一台机组发电, 1979 年按初步设计水位运用。

水库选用砼重力坝, 坝长 447m, 坝顶高程 530.5m, 坝高 85.5m。最高运行水位 528m 时, 总库容为 $3.10 \times 10^8 \text{m}^3$, 其中死库容(水位 520m)为 $2.14 \times 10^8 \text{m}^3$, 调节库容(兴利库容)为 $0.96 \times 10^8 \text{m}^3$ 。最高水头 51.2m, 最低水头 39.7m, 平均水头 50.1m。7 台机组, 装机容量 $75 \times 10^4 \text{kW}$, 其中 2 台为 $10 \times 10^4 \text{kW}$, 5 台为 $11 \times 10^4 \text{kW}$ 。

龚咀水库属河谷型水库, 当水位为 525 m 时, 库容 $3.046 \times 10^8 \text{m}^3$, 水面面积为 12.97km^2 , 平均宽度为 210m; 当水位为 530m 时, 库容 $3.737 \times 10^8 \text{m}^3$, 水面面积为 14.68km^2 , 平均宽度为 235m, 壅水长度为 42km。可见随着水位的增加, 库区水面面积与平均宽度均增加不大(图 1)。

水库所控制的流域面积为 76130km^2 , 占大渡河流域面积的 98.4%, 以坝址上游 36.1km 的沙坪(二)站和位于坝址下游 30km 处的铜街子站作为入库、出库水文站, 沙坪与铜街子区间没有大支流汇入, 其汇水面积只增长了 1.8%, 因此两站的水文资料均可代表龚咀水库的水文情况。多年(1956—1986)平均流量为 $1500 \text{m}^3/\text{s}$, 最大、最小平均流量分别为 $1720 \text{m}^3/\text{s}$ (1965 年)和 $1150 \text{m}^3/\text{s}$ (1980 年)^①。汛期(5—10 月)流量占全年流量的 79%, 而在金沙江(屏山)、岷江(高场)、长江上游(宜昌)汛期流量分别占全年流量的

① 1956—1965 年采用铜街子站资料, 1966 年后采用沙坪站资料。

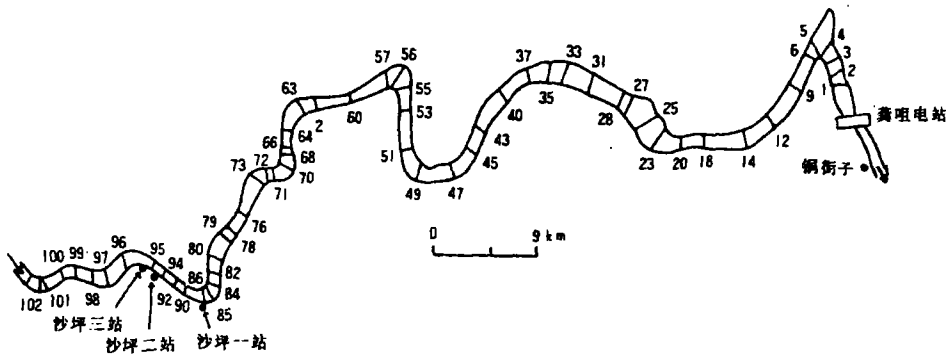


图1 龚咀水库断面位置图

Fig. 1 Sites of section in Gongzui Reservoir

75.6%、74.5%和72.1%^[1]。说明大渡河流量更集中在汛期。

沙坪站年径流总量为 $474 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年径流深度为 635.9mm，而长江上游及其主要支流的年径流深度长江上游(宜昌)为 452mm，金沙江(屏山)为 302mm，岷江(高场)为 662mm，沱江(李家湾)为 576mm，嘉陵江(北碚)为 426mm，乌江(武隆)为 604mm^[1]。显然，大渡河的年径流深度只小于岷江，表明其径流量是比较充沛的。

二、泥沙特性分析

1. 悬移质泥沙特性

(1) 粒配特性 悬移质泥沙(以下简称悬沙)粒配,以沙坪站实测值为代表,为消除水库回水的影响,选用蓄水前的测验资料(见表1)。由表1可以看出,悬沙的中沙含量占51%,其中0.10—0.25mm的细沙为最多,占悬沙含量的40.4%。为同长江上游及其主要支流进行比较,将这些河流的悬沙粒配特征值列于表2^[2]。表2知沙坪站悬沙的中值粒径(d_{50})与平均粒径(d_{cp})均比其他为大,这对加速水库的淤积起了重要作用。

表1 大渡河沙坪水文站悬沙的粒配

Tab. 1 Grading of suspended sediments in Shaping Gaging Station of the Daduhe River

粒 径(mm)	0.007	0.01	0.025	0.05	0.10	0.25	0.5	1.0	2.0	d_{50}	d_{cp}	d_{max}
某粒径沙重(%)	12.1	4.9	13.8	18.2	17.9	22.5	9.8	0.7	0.1	0.0607	0.110	1.66
小于某粒径沙重(%)	12.1	17.0	30.8	49.0	66.9	87.4	97.2	99.9	100.0			

(2) 悬沙输沙量 根据沙坪和铜街子两站 1956—1985 年实测资料,龚咀水库多年平均输沙量为 $3.151 \times 10^7 \text{ t/a}$,其最大、最小值分别为 $5.410 \times 10^7 \text{ t/a}$ (1981)和 $1.910 \times 10^7 \text{ t/a}$ (1969年)。沙坪站多年平均含沙量为 0.567 kg/m^3 (1966—1979年),最大含沙量为 27.6 kg/m^3 ,最小含沙量为 0.0015 kg/m^3 。大渡河下游输沙量年内分配,汛期占全年的98.1%,而流量的年内分配只有79%,说明了输沙量比流量更集中于汛期。在长江上游及其主要支流,汛期悬沙输量占年输沙量的情况是:长江干流朱沱占96.4%,寸滩占34.6%,万县占92.4%,宜昌占89%。主要支流金沙江屏山占96.4%,岷江高场占97%,

沱江李家湾占 99.1%,嘉陵江北培占 93.5%,乌江武隆占 91.4%^[2],由此可见,大渡河汛期悬沙占年输沙量的百分数仅次于沱江,表明大渡河悬沙比较集中在汛期。

表 2 大渡河与长江上游干流及其主要支流泥沙粒配的比较

Tab. 2 Comparison of grading of suspended sediments in the Daduhe River with the upper Changjiang River and its main tributaries

河流	测站	小于某粒径(mm)沙重(%)									d ₅₀ (mm)	d _{cp} (mm)	d _{max} (mm)
		0.007	0.01	0.025	0.05	0.10	0.25	0.5	1.0	2.0			
大渡河	沙坪	12.1	17.0	13.8	49.0	66.9	87.4	97.2	99.9	100.0	0.060	0.110	1.66
长江干游	朱沱	14.4	19.8	37.6	60.0	83.5	95.2	99.8	100.0		0.037	0.068	1.0
	寸滩	14.2	20.0	38.8	63.4	85.2	95.6	99.9	100.0		0.034	0.063	1.0
	万县	15.6	21.5	40.6	66.4	86.4	95.7	99.8	100.0		0.031	0.061	1.55
	宜昌	14.5	22.2	42.0	67.3	88.1	97.2	99.9	100.0		0.031	0.055	2.95
金沙江	屏山	18.4	11.4	24.6	52.1	77.0	91.0	98.8	100.0		0.047	0.092	1.09
岷江	高场	10.4	15.6	32.2	48.9	75.3	92.3	99.5	100.0		0.051	0.088	0.80
沱江	李家湾	16.2	23.0	44.3	68.4	89.1	97.1	99.8	100.0		0.029	0.054	0.92
嘉陵江	武胜、罗家湾 小河三站 (加权平均)	16.0	22.3	44.4	70.9	91.9	98.1	99.9	100.0		0.028	0.048	0.97
乌江	武隆	18.0	23.8	43.0	69.1	92.4	98.2	99.6	100.0		0.030	0.049	1.65

2. 推移质泥沙特性

(1)推移质粒径及输沙量 据 1987 年龚咀水库的野外调查^①与龚咀水力发电厂提供的 1977—1986 年龚咀水库沉积物颗粒级配资料的统计,对该水库的卵石推移质($d > 10\text{mm}$)进行了计算,结果表明,卵石推移质输沙量为 $9.24 \times 10^5\text{t/a}$,其中粒径 10—20mm 的为 $2.47 \times 10^5\text{t/a}$, $> 20\text{mm}$ 的为 $6.77 \times 10^5\text{t/a}$ 。与钱宁等人的计算 $8.8 \times 10^5\text{t/a}$ 极为接近^[3]。龚咀水库的卵石推移质占全沙(包括悬沙与推移质)输沙量的 2.85%,而在长江上游的葛洲坝坝区,卵石推移质的输沙量仅占全沙输沙量的 0.134%^[4],但龚咀水库的集水面积只有葛洲坝的 7.5%,卵石推移质占全沙的百分数却是葛洲坝的 21.3 倍,说明了龚咀水库的卵石推移质是比较突出的。

(2)推移质岩类组成、硬度与磨圆度 推移质对水轮机与水工建筑的磨损主要决定于推移质的数量、硬度与磨圆度。龚咀水库距推移质的补给区较远,推移质经长距离的搬运,卵石与砾石的棱角与棱边已被磨平。据大渡河下游峨边与魏坝两站推移质磨圆度实测资料,采用拉塞尔与泰勒的磨圆度公式^[4],计算出卵石与砾石推移质磨圆度为 3 级,属圆状颗粒,故磨圆度因素对龚咀电厂磨损的影响不大。而硬度决定于颗粒的岩类组成。据库尾段峨边站卵石与砾石推移质岩类的鉴定,统计出各种岩类所占的百分数,同时按摩氏硬度计测出各种岩类推移质的硬度(表 3)。从表 3 可以看出,推移质主要为火成岩,硬度较大。7 级硬度的推移质,占 50.3%;6 级硬度占 37.7%; < 5 级硬度占 22%;大于 6 级硬度的推移质占 88%。而在葛洲坝 7 级与 6 级硬度的推移质,分别占 37.9%与 33.4%,大于 6 级的

① 参加 1987 年野外调查还有南京大学地理系吴国平老师和地貌与第四纪地质专业 1988 届学生王景璐、刘新江、黄艳。王景璐还参加部分推移质泥沙的计算。

推移质只占 71.3%^[4], 均比龚咀水库为小。由此可见龚咀推移质的硬度也是比较突出的。上文研究表明, 龚咀的卵石与砾石推移质的输沙量较大, 建坝后若有大量推移质通过电厂的水轮机与泄水建筑物, 将会使其受到较严重的磨损。

表 3 龚咀水库卵石与砾石推移质的硬度

Tab. 3 The hardness of pebble and gravel bed load in Gongzui Reservoir

岩 类	砂	岩	石	英	岩	玄	武	岩	辉	绿	岩	混	合	岩	花	岗	岩	闪	长	岩	变	质	岩	凝	灰	岩	灰	岩	合	计
岩类百分数(%)	20.9	1.4	12.7	15.0	1.1	32.7	5.0	1.7	6.8	2.7	100																			
硬 度	7	7	7	7	7	6	6	5	5	3																				

三、水库的淤积

1. 水库淤积概况

1971—1986 年的实测资料表明, 淤积量为 $2.2096 \times 10^6 \text{m}^3$ 占总库容量的 71.3%, 平均每年为 $1.460 \times 10^7 \text{m}^3$, 年均库容损失率为 4.71%。其中最大淤积量为 $1.91 \times 10^7 \text{m}^3/\text{a}$ (1980 年), 最小淤积量为 $1.8 \times 10^6 \text{m}^3/\text{a}$ (1986 年), 库容损失率分别为 6.2% 与 0.58%。表 4 给出了龚咀水库和其它一些水库的淤积量与库容损失率^[5]。显见, 在库容 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上的 16 座水库中, 龚咀水库的淤积量为位第 6, 均比我国北方多数河流为小, 但库容损失却占第 3 位, 均比北方多数河流为大, 且超过了三门峡水库在改建后的库容损失, 说明龚咀水库淤积较为迅速, 库容损失较大。其主要原因是该水库库容较小、泥沙粒径较粗和泥沙较易淤积, 因而成为我国南方 6 座水库中年均淤积量最大的一个。

表 4 龚咀水库与中国一些水库淤积的比较

Tab. 4 Comparison of deposition in Gongzui Reservoir with some other reservoirs in China

水 库	河 流	控制流域 面 积 (km^2)	总库容 (10^6m^3)	淤积总量		每年淤积量		统 计 年 数 (起讫年份)
				数 量 (10^6m^3)	占 总 库 容 %	数 量 (10^6m^3)	占 总 库 容 %	
龚 咀	大渡河(川)	77400	3.1	2.2096	71.3	0.147	4.75	15(1971—1986)
三门峡	黄 河(豫)	688421	77.0	33.910	44.0	4.520	5.87	改建前 7.5(1958—1966)
				11.640	15.0	1.650	2.14	改建后 7(1867—1973)
青铜峡	黄 河(宁)	285000	6.07	5.270	86.9	1.055	17.4	5(1967—1971)
岗 南	沱 河(冀)	15900	15.58	1.850	11.9	0.109	0.7	17
汾 河	汾 河(晋)	5268	7.00	2.39	34.2	0.141	2.01	17(1960—1976)
治 源	汾 河(鲁)	786	1.68	0.122	7.5	0.0094	0.558	13(1959—1972)
新 桥	红柳河(陕)	1327	2.00	1.56	75.0	0.110	5.5	14(1960—1973)
巴家咀	满 河(甘)	3020	2.57	1.578	61.0	0.121	4.72	13(1960—1972)
红 山	老哈河(辽)	24486	25.60	4.40	17.2	0.293	1.15	15(1961—1975)
丰 满	第二松花江(吉)	42500	107.8	1.42	1.32	0.053	0.049	27
丹江口	汉 水(鄂)	95217	160.0	6.25	3.91	0.417	0.26	15
柘 溪	资 水(湘)		27.30	0.781	2.83	0.065	0.235	12
上犹江	上犹江(赣)	2750	7.04	0.0414	0.588	0.00318	0.0451	13
新安江	新安江(浙)		178.0	0.197	0.110	0.0123	0.0069	16
西 津	郁 江(桂)		14.20	0.00165	0.0116	0.00015	0.00106	11
长 岗	汝 水(赣)		2.51	0.0424	1.69	0.01445	0.56	3

2. 水库淤积量的变化

根据电厂水库测验站历年实测资料, 绘出输沙量过程线与淤积量过程线(图 2)以及

水库三角洲沉积过程图(图 3 所示)^①。从图中看出,1971 年蓄水以来,发生了严重淤积,三角洲快速发展,沉积环境也迅速发生变化。可分为三个时期:

(1)蓄水初期(1971—1977 年)

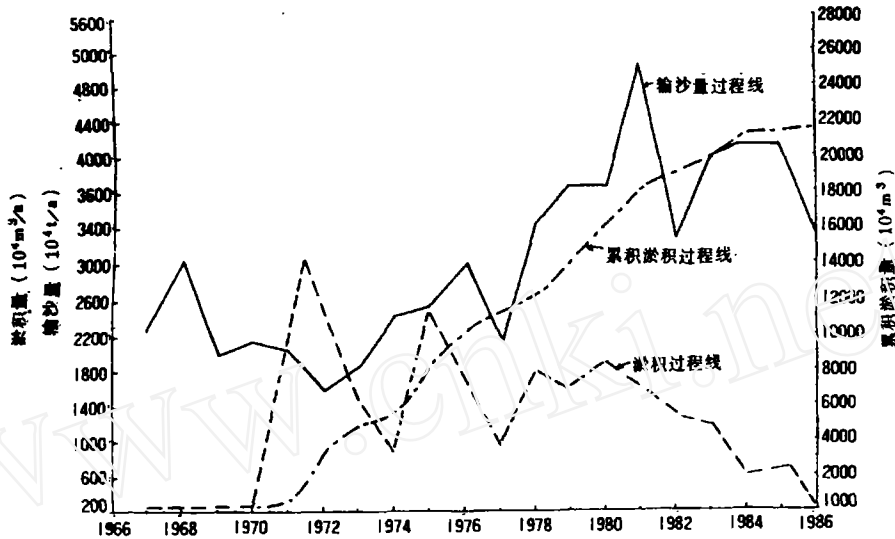


图 2 龚咀水库的淤积过程线

Fig. 2 Curve of sedimentation process in Gongzui Reservoir

1971 年 10 月蓄水运行,坝前平均水位为 521.27m,相应的库容为 $2.3 \times 10^8 \text{m}^3$,水库面积 11.25km^2 ,平均宽度 204.4m。从图 3 可知,该时期水库是少沙期,平均输沙量为 $2.235 \times 10^7 \text{t/a}$,只占多年平均量的 71%,但累淤积量达 $1.0890 \times 10^8 \text{m}^3$ 或 $1.3068 \times 10^8 \text{t}$,占本期库容的 43.6%,平均淤积量为 $2.179 \times 10^7 \text{t}$,年均库容损失为 6.2%。若以水库淤积量与入库沙量的百分比称为水库的淤积率,那么本时期平均每年淤积率达 13.9%。同表 4 列举的其它水库相比较,仅次于黄河青铜峡水库;若同我国淤积最为严重的淡水湖——洞庭湖相比较,则大 17.2%^[6]。主要原因是入库泥沙的粒径较粗,又处于蓄水初期,库容较大,使入库水流流速骤减,导致大量泥沙淤积。

这时在库尾形成了水库三角洲,形态与河口三角洲相同。其纵剖面可分三角洲洲面段(顶坡段)与三角洲前坡段,在顶坡段与前坡段交汇处称三角洲顶点。随着三角洲的发展顶点逐渐向坝前推移。流速测验资料表明^②,库尾段 66 号断面最大垂线平均流速为 1.7m/s,洲面段 47 号断面流速为 1.34m/s;在离三角洲顶端 5.5km 的 28—25 号断面处流速减至

① 水电部成都勘测设计院、龚咀水力发电厂。大渡河龚咀水电站工程泥沙初步总结。全国水电站泥沙总结会议资料,1981。

② 龚咀电厂,水电部成都勘测设计院。龚咀水库汛期泥沙运动观测及初步研究。1979。

减少,与洞庭湖洪道淤积较为接近,但略少4.5%^[7]。本时期的水库累积淤积量,加上第一时期的淤积量和围堰时的淤积量($2.10 \times 10^6 \text{m}^3$),水库累积淤积量为 $2.1197 \times 10^6 \text{m}^3$,占该水库总库容的68.4%。

本期沉积物 $d_{50}=0.33\text{mm}$, $d_{cp}=3.38\text{mm}$,同第一时期相比粒径增大。值得注意的是,本时期的 d_{cp} 已属砾推移质的范畴。1984年淤积物的粒配实测资料表明,9号断面(距大坝4.4km) $\leq 5\text{mm}$ 的砾推移质占0.2%,51号断面(距大坝20.8km)20~50mm的卵石推移质占19.9%。说明本时期后期砾石与卵石推移质已在库区三角洲洲面上输移与沉积。流速实测资料表明,三角洲洲面上的最大垂线的平均流速是尚未被三角洲沉积的库区流速的4.5倍。至本时期末,三角洲推移至坝前,库区已被洲面段所占据,使水库过水断面减小,流速增大,导致输沙量增加,淤积量随之减少,沉积物的 d_{50} 与 d_{cp} 均有所增大。

3. 淤积接近平衡时期(1985年以后)

至1984年底死库容已被淤满,这时在水库正常高水位时,水库平均水深只有3.5m,坝前水深也不超过14.5m,同该水库未修建前平均水深较为接近。说明本时期已失去水库沉积的环境,转变为河流沉积环境。

本时期累积淤积量为 $8.89 \times 10^6 \text{m}^3$ (图3),即 $10.668 \times 10^6 \text{t}$,年平均淤积量为 $4.445 \times 10^6 \text{m}^3$,即 $5.334 \times 10^6 \text{t}$ 。入库累积沙量为 $7.820 \times 10^7 \text{t}$,淤积率为13.6%,只有第一时期的16.3%,与虎渡河汇入洞庭湖时淤积率属同一数量级^[7]。本时期后期,淤积率只有2.9%。平均每年库容损失为1.5%,淤积接近平衡。至1986年累计淤积量,占总库容的71.3%,死库容已全部淤满,调节库容淤积了7.3%,但仍比我国南方水库的库容损失率为大。说明龚咀水库调节库容的损失仍然较为迅速。

本时期淤积物的 $d_{50}=0.39\text{mm}$, $d_{cp}=4.0\text{mm}$,均比第二时期有所增加。1986年5号断面(距大坝2km)的淤积物中,5mm粒径的砾石推移质占0.5%,在洲面段51号断面(距大坝20.6km) $> 10\text{mm}$ 的卵石推移质占淤积物的23%。说明水库淤积达到平衡时,卵砾石推移质迅速地向坝前推移。该水库上游的大渡河上,目前尚无水库拦沙,推移质问题又较突出,淤积速度比预计要快,硬度又较大,因此今后应加强坝区推移质的观测与研究,不失时机地进行水库水力冲沙,以保持现有的调节库容,最大限度地减少推移质通过水轮机。

四、结 语

我国南方与长江上游主要河流中,大渡河的沙量并不大,但因大渡河泥沙的粒径较粗,所以龚咀水库的淤积率较大。随着水库淤积,库容减小,淤积率也随之减小,输沙率增大。最后淤积接近平衡,这时卵砾推移质逐渐向坝前输移。

龚咀水力发电厂提供了水库泥沙观测资料,在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院地理研究所、长江水利水电科学院、长江航道局规划设计研究所。长江中下游河道特性及其演变。北京,科学出版社,1985。
- [2] 唐日长。葛洲坝工程丛书 2。泥沙研究,北京,水利电力出版社,1990。
- [3] 钱宁、戴定忠。中国河流泥沙问题及其研究概况。河流泥沙国际学术讨论会论文集,第一卷,北京,光华出版社,1980。
- [4] 林承坤。长江三峡与葛洲坝泥沙及环境。南京,南京大学出版社,1989。
- [5] 陕西省水利科学研究所河渠研究室、清华大学水利工程系泥沙研究室。水库泥沙,北京,水利出版社,1979。
- [6] 林承坤。洞庭湖水沙特性与湖泊沉积。地理科学,1987,8(2):14。
- [7] 林承坤。洞庭湖的演变与治理(上)。地理学与国土研究,1985,1(4):33-34。

CHARACTERISTICS AND SEDIMENT DEPOSITION IN GONGZHUI RESERVOIR OF THE DADUHE RIVER

Lin Chengkun

(Department of Geo and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract

The total storage capacity of Gongzhui Reservoir, the largest one in the Daduhe River, was $3.1 \times 10^6 \text{m}^3$. The average annual runoff of the Daduhe River is $4.74 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{a}$, while the amount of sediments is $3.249 \times 10^7 \text{t}/\text{a}$, of which pebble bed load is $9.24 \times 10^6 \text{t}/\text{a}$, making up 2.85% of the total. At Gongzhui Reservoir there is about 88% of pebble and gravel bed load with hardness being more than 6 (measured by Mo-hardness metre). Gongzhui Reservoir began to impound water in October 1971. During fifteen years of operation, up to the end of 1986, the total sediments reached to an amount of $2.2096 \times 10^6 \text{m}^3$, making up about 71.3% of storage capacity. About $2.14 \times 10^6 \text{m}^3$ of sediments depositing in the dead capacity were silted up. Meanwhile the loss of effective capacity was 7.3%. According to the deposition processes, the depositional development in Gongzhui Reservoir can be considered as three stages, namely, reservoir impounding water in initial stage, delta development, and equilibrium transport and deposition. Fig. 2 shows the change of the accumulated deposits with time. It can be seen that in this figure the cumulative deposition increased rapidly in the first stage and the depositional rate reached up to 83.5%. In the second stage, the reservoir delta develops rapidly, moving toward the dam while the deposition amount reduced gradually with the deposition rate 53%. After sedimentation, the sediments became much coarser with an average grain size (d_p) increasing from 1.82mm to 3.38mm. However, in the third stage, the depositional rate was only 2.9%, approaching to equilibrium. At the same time gravel and pebble bed loads moved toward the dam and then settled down to it. In conclusion, deposition process can be regarded as sediment transportation process.

Key words sediment deposition, Gongzhui Reservoir