

宁夏清水河流域水库拦沙量分析

杨吉山¹, 张晓华¹, 宋天华², 肖培青¹, 焦鹏¹

(1.黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2.宁夏大柳树水利枢纽工程前期工作办公室, 银川 750001)

摘要: 为了解宁夏清水河流域水库的拦沙作用, 研究根据泥沙淤积总量来计算逐年拦沙量的方法。根据实测资料统计分析清水河流域水库的基本情况, 估算了水库的总拦沙量, 并引入水库控制面积、土壤侵蚀强度、拦沙率 3 个因素建立了水库逐年拦沙量的分配计算模型。结果表明, 至 2012 年, 清水河流域共有具拦沙功能的水库 100 座, 控制面积 9 184.70 km², 总库容 12.23 亿 m³, 可淤积库容 6.86 亿 m³, 拦沙总量 5.71 亿 m³, 为同期泉眼山输沙量的 78.25%。对模型计算结果的验证表明, 在当水库数量比较多、分布比较均匀的条件下模型计算结果精度较好。根据计算结果, 1979 年以前时段水库拦沙量比较大, 1980 年以后由于水库建设速度减慢, 水库的拦沙能力逐渐变小。自 1960 年以后水库的剩余可淤积库容一直处于下降的状态, 2000 年以后水库的淤积比处于 83.00% 左右, 水库的拦沙能力已经十分有限。

关键词: 清水河流域; 水库; 计算模型; 淤积比

中图分类号: TV145+.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0170-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.024

Analysis of Sediment-Retaining Amount by Reservoirs in Qingshuihe Watershed of Ningxia

YANG Jishan¹, ZHANG Xiaohua¹, SONG Tianhua², XIAO Peiqing¹, JIAO Peng¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003;

2. Ningxia Daliushu Project Preparatory Work Office, Yinchuan 750001)

Abstract: The reservoirs of Qingshuihe basin in Ningxia have important role on sediment-retaining effect, which is also an important factor to be considered in the revert calculation of sediment yield. However, how to calculate the annual sediment-retaining amount based on the total amount of sedimentation has ever been rarely reported. Based on the measured data, the basic situation was analyzed and the total sediment-retaining volume of the Qingshui River Basin reservoirs was estimated in this paper. Three factors of control area, average erosion intensity and sediment-retaining rate were introduced to establish the calculation formula for the annual sediment retention by reservoirs. Analysis based on statistics showed that there were 100 reservoirs in the Qingshuihe basin, the total capacity was 12.23×10^8 m³, the controlled drainage area was 9 184.70 km², the total storage capacity was 1.235 billion m³, the sediment-retaining capacity was 686 million m³, and the sediment-retaining volume was 571 million m³, which accounted for 78.25% of sediment transported at Quanyanshan Hydrological Station in 1957 to 2012. The verification of the calculation results showed that the model had good calculation accuracy when the number of reservoirs was large and the distribution was relatively uniform. According to the calculation results, the sediment retaining volume of the reservoir was relatively large before 1979. Since 1960, the remaining sediment-retaining capacity of the reservoir declined. After 2000, the sediment-retaining ratio of the reservoirs remained about 83.00%, it showed that the reservoirs showed a limited capacity in the sediment-retaining.

Keywords: Qingshuihe watershed; reservoir; calculation model; sediment retaining ratio

黄河的泥沙主要来自黄土高原地区, 水库是黄土高原地区拦沙的主要工程措施之一, 对减少入黄沙量有着重要的作用^[1]。根据刘晓燕^[2]的计算, 2007—

2014 年黄河青铜峡以上干支流水库年均拦沙量可达 5 780 万 t, 中游河口镇至潼关干支流水库年均拦沙量可达 12 308 万 t。因此, 我国学者对于水库泥沙淤

积的规律性^[3-5]、淤积量的计算^[6-7]和影响因素^[8]等方面都进行了大量的研究。宁夏清水河流域大部分处于干旱、半干旱气候区,流域内地形破碎、植被稀疏,水土流失严重,是黄河泥沙的重要源地^[9]。清水河流域建设水库的作用除了蓄水灌溉外,一个重要的目的是拦挡入黄泥沙。尤其在世纪 80 年代,按照水土保持治沟工程“全拦全蓄”的指导思想,清水河流域建设了一批拦泥库,既有蓄水供水功能,又有拦蓄泥沙的水土保持功能^[10]。包淑萍等^[9]对清水河流域泥沙关系的分析表明,由于水库的拦沙作用,清水河输沙量的变化形成了明显的突变点。为了解水库的淤积情况,宁夏有关管理部门对部分水库的泥沙淤积量进行了不定期的测量,据此可以采用合理的方法估算全流域水库的泥沙淤积总量^[11-12]。但是,我们在实际科研工作中经常需要对全流域逐年侵蚀产沙量进行还原计算,如何根据泥沙淤积总量来计算逐年拦沙量还很少见到有研究成果报道。冉大川等^[13]在研究黄河中游流域水库逐年拦沙量时,根据当年输沙量占时段内总输沙量的比对总拦沙量进行逐年分配,但这种方法没有考虑水库拦沙本身对输沙量的影响,也没有考虑水库拦沙能力随时间的变化,显然这种计算方法是粗略的估算。本文在更全面地考虑影响因素的基础上提出计算水库逐年拦沙量的方法,并在此基础上对清水河水库拦沙情况做出初步的分析。

1 清水河流域概况

1.1 清水河流域

清水河是黄河的一级支流,流域面积 14 481 km²,河道长 320 km,河道比降平均为 1.49‰^[14],由上至下设有固原、韩府湾、泉眼山 3 个水文站(图 1)。

清水河流域位于黄土高原的西北边缘,大部分属于黄土高原丘陵沟壑区第五副区,海拔一般为 1 500~2 000 m,南高北低,地貌以黄土丘陵为主,中上游为洪积、冲积平原区,中游西侧为黄土丘陵、盆、塬区,中游东侧为黄土丘陵区,下游为河谷平原区^[15]。清水河流域多年平均降水量 349 mm,大部分降雨集中在 7—9 月^[16]。清水河多年平均年径流量 2.16 亿 m³,年平均悬移质含沙量 229 kg/m³,多年平均输沙量 4 940 万 t,侵蚀产沙模数 3 410 t/(km²·a),呈现出水少、沙多、水土流失严重的特点。

1.2 水库建设情况

清水河流域水库建设始于 1956 年,至 1960 年先后建成芄麻河、沈家河、寺口子、石峡口、长山头 5 座中型水库以及海子峡等 3 座小型水库,这一时期是修建中型水库数量比较集中的时期,水库库容和水库集水面积快速增大。1961—2012 年期间呈相对稳定的速度发展,期间修建小型水库 84 座,中型水库 8 座

(图 2)。根据 2012 年资料统计,清水河流域保有拦沙功能的水库 100 座,其中包括中型水库 13 座,小型水库 87 座,广泛分布在清水河流域内(图 1)。水库控制流域面积 7 223.2 km²(不计位于清水河干流下游的长山头水库,已经完全淤满)(图 2),占全流域面积的 49.88%,总库容 12.35 亿 m³,可淤积库容 6.64 亿 m³(图 3)。其中 13 座中型水库总库容为 9.25 亿 m³,占全部水库库容的 75%;小型水库总库容 3.1 亿 m³,占全部水库库容的 25%。

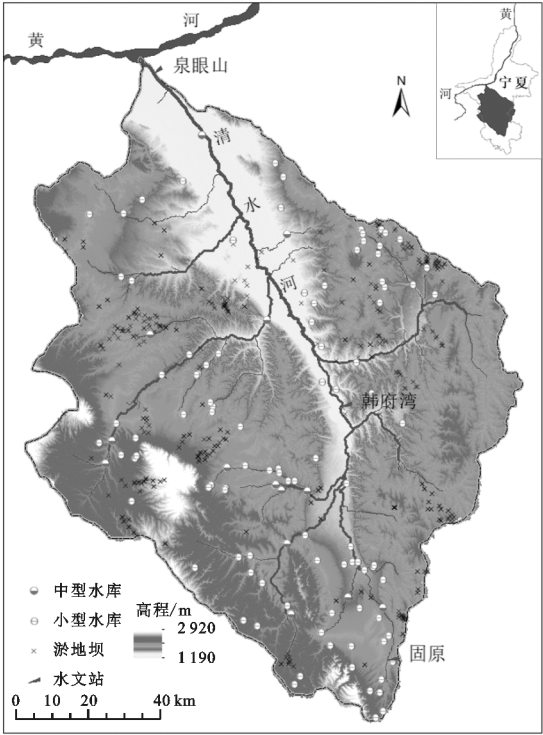


图 1 清水河流域地貌及水库分布

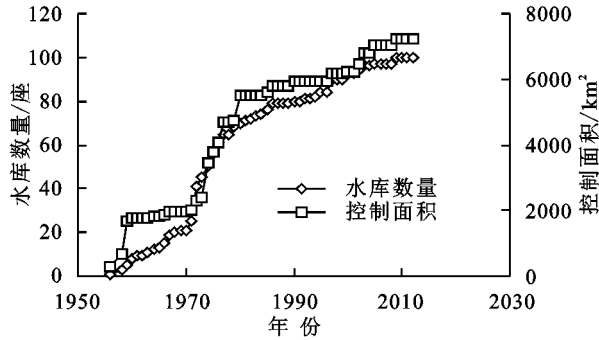


图 2 水库数量及库容随时间的变化

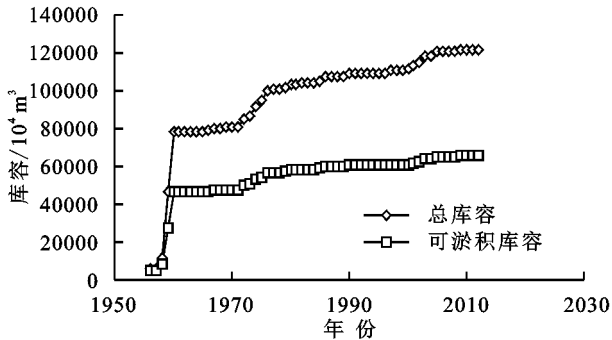


图 3 水库集水面积随时间的变化

2 水库总拦沙量的估算

根据 2012 年资料,清水河流域 100 座水库中 31 座水库有实测淤积量的数据,其他 69 座水库没有实测数据。31 座水库的总淤积量为 3.17 亿 m³,集水面积为 5 616.6 km²,占全部水库集水面积的 63.2%,总库容约 6.6 亿方,占全部水库总库容的 51.3%。把所有水库按照建成年份点绘在图上(图 4)可以看到,有实测泥沙淤积量数据的 31 座水库都建成于 1990 年前,而没有淤积测量数据的 69 座水库中有 47 座水库建成于 1990 年之前,有 22 座建成于 1991 年以后。对于没有实测数据水库的泥沙淤积量,一般借用规模和建库年代相似、位置临近的水库的淤积资料进行估算^[2,11]。建成年代在 1991 年之前的 47 座水库的总淤积量可参考 31 座有测量数据水库的淤积指标进行估算。水库中泥沙淤积体积占可淤积库容的比例称为水库的淤积比。至 2012 年,31 座有测量数据水库的淤积比为 87.57%,按照 87.57%的淤积比计算,47 座建成于 1991 年前没有测量数据的水库,其泥沙淤

积量为 2.13 亿 m³。
1992 年以后建成的 22 座小型水库总体上运用时间较短,通过实地调查及咨询宁夏水利、水保专家,综合估计这部分水库总体淤积比约为 50%,其泥沙淤积量约为 0.41 亿 m³。根据这样的估算方法,清水河流域水库总的拦沙量为 5.71 亿 m³(表 1),为同期泉眼山水文站测量输沙量的 61.63%。至 2012 年清水河流域水库的剩余可淤积库容总量约为 1.15 亿 m³,总淤积比为 83.24%。

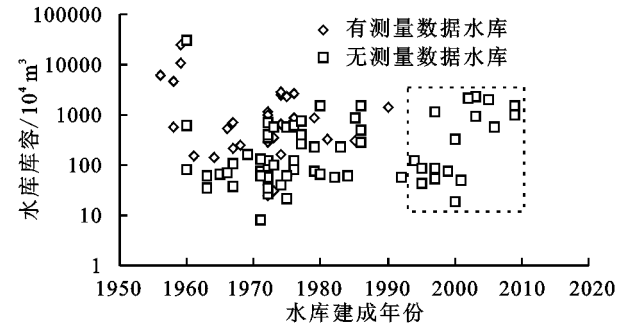


图 4 清水河流域水库建成年份和库容分布

表 1 清水河流域水库淤积量估算

项目	数量/ 座	控制 面积/km ²	库容/ 10 ⁸ m ³	可淤积 库容/10 ⁸ m ³	淤积量/ 10 ⁸ m ³	淤积比/ %
有淤积量实测数据水库	31	5616.60	6.60	3.62	3.17	87.57
淤积量估算						
1991 年前建成水库	47	2215.05	4.35	2.43	2.13	87.57
1992 年后建成水库	22	1353.05	1.28	0.81	0.41	50.00
总计	100	9184.70	12.23	6.86	5.71	83.24

3 水库逐年拦沙量分配方法

水库控制的流域面积占清水河流域面积的 1/2 以上,100 座水库比较均匀地分布在清水河流域全境(图 1),从总体上看,全部水库控制流域的平均侵蚀强度与清水河全流域平均侵蚀强度接近;另一方面,随着运用时间的延长有部分水库逐渐失去拦沙作用,但是由于不断地又有新的水库建成,因此如果把全部水库看成一个整体,可以认为仍然具有拦沙能力。水库某一年的拦沙量可以表示为:

$$S_i = A_i \times E_i \times \xi_i \tag{1}$$

式中: S_i 为水库第 i 年总的拦沙量(t); A_i 为第 i 年水库的集水面积(km²); E_i 为第 i 年水库控制流域面上的平均侵蚀强度(t/km²); ξ_i 为第 i 年水库平均的拦沙率(%)。

在水库某一时段内总拦沙量已知的条件下,水库某一年的拦沙量可以表示为:

$$S_i = S_t \times \frac{A_i \times E_i \times \xi_i}{\sum_{i=1}^n (A_i \times E_i \times \xi_i)} \tag{2}$$

式中: S_t 为水库自建成至实测年份的总淤积量(t)。

公式(2)可表示为:

$$S_i = S_t \times \frac{A_i}{A_t} \times \frac{E_i}{E} \times \frac{\xi_i}{\xi} \tag{3}$$

式中: A_t 为计算时段内水库逐年集水面积的累计值(km²); $\bar{E}$ 为水库控制流域全时段的加权平均侵蚀强度(t/km²); $\bar{\xi}$ 为水库全时段平均的拦沙率(%)。

在全流域侵蚀产沙量=当年输沙量+当年拦沙量条件下有:

$$E_i = \frac{D_i + S_i}{A} \tag{4}$$

在水库控制流域的平均侵蚀强度与全流域平均侵蚀强度相同的条件下有:

$$\bar{E} = \frac{D_t + S_t}{n \times A} \tag{5}$$

式中: n 为计算年数; A 为清水河流域面积(km²); D_i 为第 i 年泉眼山站输沙量(t/a); D_t 为泉眼山站全时段输沙总量(t); S_t 为水库全时段拦沙总量(t)。

根据公式(3)~公式(5),可得:

$$S_i = \frac{n \times A_i \times S_t \times D_i \times \frac{\xi_i}{\bar{\xi}}}{A_t (D_t + S_t) - n \times A_i \times S_t \times \frac{\xi_i}{\bar{\xi}}} \tag{6}$$

定义某一时间水库剩余可淤积库容与建成初期可淤积库容的比例称为剩余可淤积库容率。水库拦沙

率与剩余淤积库容率关系密切,水库建成初期可淤积库容大,拦沙率高,后期随着可淤积库容减小,拦沙率逐渐减小^[17]。可淤积库容率的变化与侵蚀强度的变化相关,因此,剩余可淤积库容率是折线。根据有关研究^[18-19],水库的拦沙率变化基本符合指数型规律(图 5)。

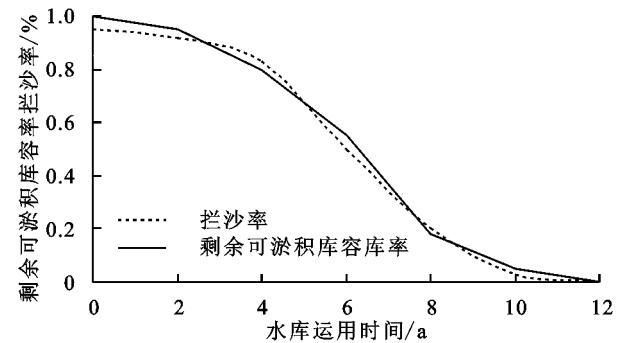


图 5 水库剩余可淤积库容率与拦沙率随时间的变化

用 ψ_i 表示水库第*i*年剩余可淤积库容率, $\bar{\psi}$ 表示计算时段内多年平均剩余可淤积库容率的平均值。由于拦沙率与剩余库容率随时间的变化率都受来沙量的影响,或者说都受控制流域面上的侵蚀强度影响,在正常来水来沙条件下,由 $\xi_i/\bar{\xi}$ 构成的数列与由 $\psi_i/\bar{\psi}$ 构成的数列高度正相关,并且它们的值是接近的(图 5)。即:

$$\frac{\xi_i}{\bar{\xi}} \approx \frac{\psi_i}{\bar{\psi}}$$

(7)

因此,可以用 $\psi_i/\bar{\psi}$ 代替 $\xi_i/\bar{\xi}$ 参与计算。
 $\bar{\psi}$ 的理论值为:

$$\bar{\psi} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{si}}{C_{ki}} \times \frac{A_i \times E_i}{A_t \times E_t} \right)$$

(8)

式中: C_{ki} 为第*i*年可淤积库容(%); C_{si} 为第*i*年剩余可淤积库容(%)。

由于公式(8)中含有 E_i 不容易计算,计算时可以将全部水库按照建成的年份分为不同的系列,对每一个系列来说,计算公式为:

$$\bar{\psi} \approx \frac{\psi_1 + \psi_n}{2}$$

(9)

式中: ψ_1 为淤地坝建成第 1 年可淤积库容率(%); ψ_n 为计算时段最后 1 年可淤积库容率(%)。

清水河流域的拦沙工程除了水库还有淤地坝,因此必须将淤地坝也纳入拦沙量的计算。清水河流域淤地坝建设始于 1971 年,其后大多数年份都有新的淤地坝建成。至 2012 年清水河流域共有淤地坝 302 座,控制面积为 1 090.15 km²,总库容为 1.22 亿 m³,可淤积库容为 0.53 亿 m³,淤积量为 0.17 亿 m³,剩余可淤积库容 0.36 亿 m³。计算时,首先根据公式(6)、公式(7)和公式(9)计算出水库和淤地坝逐年总的拦沙量,根据全流域侵蚀产沙量=当年输沙量+当年拦沙量的关系,可还原计算出清水河流域当年侵蚀强度,然后根据公式(3)计算出水库逐年的拦沙量。

实际计算的结果显示,由于公式(5)及公式(9)所引入的误差,造成一般不能将总淤积量全部分配到计算时段内的各年,剩余量为淤积总量的 10%左右。将剩余量作为总拦沙量再次进行计算,反复计算直到把总淤积量分完,然后对计算得到的各年的分配量求和。

4 结果与分析

4.1 逐年拦沙量计算结果

表 2 为在已知清水河流域淤地坝水库淤积总量为 5.71 亿 m³的条件下,根据建立的计算方法得到的结果,为了便于对比按照 1.4 g/cm³的干容重将逐年拦沙量计算结果以 m³为单位表示。

表 2 清水河流域水库逐年拦沙量计算结果

单位:10⁴ m³

年份	拦沙量	年份	拦沙量	年份	拦沙量	年份	拦沙量
1957	40.25	1971	1649.57	1985	503.74	1999	477.54
1958	569.81	1972	1068.21	1986	207.53	2000	473.85
1959	2272.61	1973	1708.16	1987	118.51	2001	288.38
1960	19.78	1974	1683.51	1988	654.29	2002	684.66
1961	490.76	1975	691.08	1989	493.31	2003	728.82
1962	826.08	1976	1169.06	1990	581.59	2004	374.72
1963	816.34	1977	2050.99	1991	366.89	2005	96.74
1964	8611.31	1978	2561.98	1992	126.93	2006	576.80
1965	1445.10	1979	1597.18	1993	299.28	2007	543.81
1966	2609.20	1980	223.11	1994	947.65	2008	5.70
1967	3387.66	1981	383.29	1995	1080.21	2009	193.70
1968	3185.00	1982	174.22	1996	1195.81	2010	180.82
1969	1339.08	1983	133.18	1997	474.80	2011	117.76
1970	3906.58	1984	259.91	1998	173.42	2012	266.13

4.2 对计算结果的验证分析

宁夏回族自治区水文总站曾经根据部分水库的

实测资料对 1959—1979 年时段清水河流域水库的泥沙淤积量进行了计算^[20]。这次还原计算是根据沈

家河、寺口子、苋麻河、石峡口、张家湾等几座水库的实测资料为基础进行的推算。表 3 为宁夏水文总

站对清水河流域 1959—1979 年水库拦沙总量的计算结果。

表 3 宁夏回族自治区水文总站对清水河流域水库逐年拦沙量的计算结果 单位:10⁴ m³

年份	拦沙量	年份	拦沙量	年份	拦沙量	年份	拦沙量
1959	5170	1965	526	1971	1030	1977	1470
1960	1750	1966	3730	1972	607	1978	2160
1961	3030	1967	715	1973	1480	1979	1890
1962	1490	1968	1700	1974	1050		
1963	1120	1969	583	1975	809		
1964	8240	1970	1610	1976	1350		

把这 2 次计算结果点绘为图 6,可知 1959—1970 年时段 2 次计算之间的差值较大,1971 年以后 2 次计算之间的差值逐渐变小。计算误差主要来自 3 个方面:(1)计算的模型是建立在水库控制流域平均的侵蚀强度与全流域平均侵蚀强度相差不多的前提条件下进行的,1970 年前水库数量较少,分布均匀性偏差较大,会导致这一时段的计算误差较大;(2)清水河流域水库建设初期运用方式处于探索阶段,淤积量受水库运用方式变化的影响较大;(3)除了剩余可淤积库容因素外,水库的拦沙率还会受到来水来沙情况、水库淤积体上延等因素的影响^[21],如果把这些因素考虑进去才能得到更高的计算精度。但是从比较结果来看,当水库数量较多、分布较均匀的条件下,总体上运用建立的模型计算结果是接近于实际情况的。

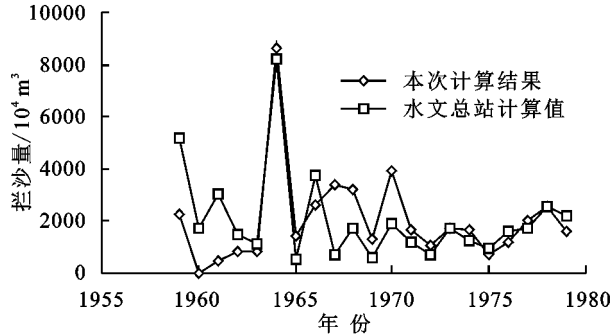


图 6 水库逐年拦沙量计算值与宁夏水文总站计算结果对比

4.3 水库拦沙情况分析

根据分析,认为 1959—1979 年时段清水河流域水库拦沙量数据采用宁夏水文总站的计算结果更好,而 1980—2012 时段可以采用本次计算的结果。比较清水河流域水库逐年拦沙量与泉眼山水文站逐年输沙量的变化,可知二者变化趋势比较一致,但不同时段水库拦沙量的变化特点有显著的差异(图 7)。1979 年以前的时段水库拦沙量比较大,其中 1957—1960 年时段由于 5 座中型水库已经建成,水库运行初期运用方式为“蓄水拦沙”,泥沙淤积量很大;1960 年位于清水河干流下游的长山头水库建成,几乎拦截了清水河输送的全部泥沙,当年泉眼山站输沙量只有 8.40 万 t;1964 年为丰水年来沙量大,水库淤积量达

到 1.15 亿 t;1964 年以后水库运用方式改为“滞洪蓄清、空库迎汛”,泥沙淤积量有所减少。1980 年以后水库可淤积库容增长平缓,随着剩余可淤积库容减小,水库的拦沙能力逐步降低,拦沙量也比较小。

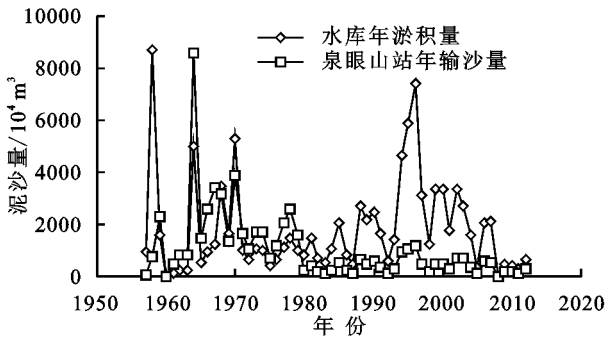


图 7 泉眼山输沙量及水库年拦沙量逐年变化

根据对逐年淤积量的结果可以计算水库逐年剩余可淤积库容以及淤积比(图 8)。从图 8 可以看出,自 1960 年水库的剩余可淤积库容一直处于下降的状态,淤积比一直处于逐渐增大的趋势中。2000 以后虽然仍有小型水库建成,但是水库的剩余可淤积库容为 1.20 亿 m³,水库的淤积比处于 83.00%,水库总体上已经处于淤满的状态,拦沙能力较小。

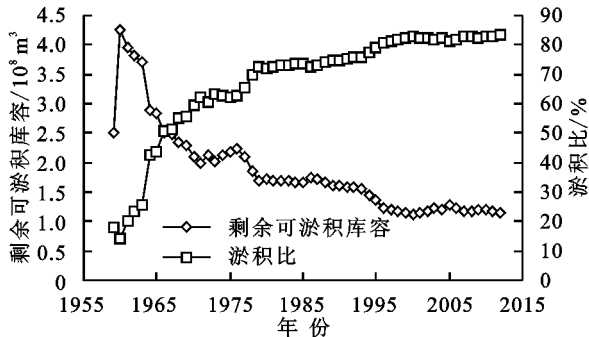


图 8 水库剩余可淤积库容及淤积比随时间的变化

5 结论

水库是清水河流域重要的拦沙水保工程。根据实测资料统计,至 2012 年清水河流域共有拦沙功能的水库 100 座,水库控制流域面积 9 184.70 km²,总库容 12.23 亿 m³,可淤积库容 6.86 亿 m³。根据部分水库的实测资料估算 1957—2012 年清水河流域水库总的拦沙量为 5.71 亿 m³,为同期泉眼山输沙量的

78.25%，至 2012 年水库的剩余可淤积库容约为 1.15 亿 m³，淤积比为 83.24%。

把全流域水库作为一个整体，在总拦沙量已知的条件下，引入水库控制面积、平均侵蚀强度、拦沙率 3 个因素建立了对水库逐年拦沙量进行分配的计算公式，计算了清水河流域 1957—2012 年水库的逐年拦沙量。把本次计算结果与宁夏水文总站对 1959—1979 年的计算成果进行了对比分析，显示 1971 年以后，在水库数量较多、控制流域平均侵蚀强度能与全流域平均侵蚀强度大致相同的条件下，本文建立的计算方法其结果与实际情况是比较接近。建议清水河流域水库逐年拦沙量在 1959—1979 年时段仍然采用宁夏水文总站的计算成果，1980—2012 年时段可以采用本次计算的结果。

对计算结果的分析表明，1979 年以前时段由于多数中型水库已经建成，水库运用方式为蓄水拦沙，加上遇到丰水大沙的年份，水库拦沙量比较大，1980 年以后水库建设速度减慢，水库受到淤积，拦沙能力逐渐变小。自 1960 年以后水库的剩余可淤积库容处于下降状态，2000 年以后水库的淤积比为 83.00%，水库的拦沙能力较小。

参考文献：

[1] 费祥俊,傅旭东.水库拦沙为下游减淤的效率(拦沙比)[J].人民黄河,2010,32(1):1-3.

[2] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减原因[M].北京:科学出版社,2016:137-151.

[3] 韩其为.论水库的三角洲淤积(一)[J].湖泊科学,1996,7(2):107-118.

[4] 韩其为.论水库的三角洲淤积(二)[J].湖泊科学,1996,7(3):213-225.

[5] Wu B S,Wang G Q,Xia J Q.Case study: Delayed sedimentation response to inflow and operations at Sanme-

nxia Dam[J].Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2007,133(5):482-494.

[6] 张红梅,赵建虎.水库库容和淤积量测算技术研究[J].水利学报,2002(12):33-37.

[7] 李秋梅,张显双,朴富林.小型水库多年淤积量测算研究[J].中国水土保持,1999(4):13-14.

[8] 胡彩虹,吴泽宁,高宗强.汾河水库淤积驱动因子分析[J].干旱区研究,2009,26(1):109-114.

[9] 包淑萍,王生鑫.清水河流域水沙变化分析[J].人民黄河,2016,38(3):25-29.

[10] 郭文锋,雒旭升,高春河,等.宁夏黄土高原地区大型拦泥库实践与探讨[J].人民黄河,2008,30(5):63-65.

[11] 孙和平.小型水库泥沙淤积成因分析及淤积量的初步估算[J].地下水,2005,27(3):221-224.

[12] 朱旭东,张维江,李娟.好水川流域小型水库及淤地坝泥沙淤积量估算[J].水土保持通报,2012,32(4):196-199.

[13] 冉大川,刘斌,王宏,等.黄河中游典型支流水土保持措施减洪减沙作用研究[M].郑州:黄河水利出版社,2006:237.

[14] 艾成,丁环.宁夏清水河流域水文特性分析[J].宁夏农林科技,2010(3):71-72.

[15] 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J].生态学报,2017,37(4):1252-1260.

[16] 苏新礼.宁夏清水河流域干旱演变特征分析[J].宁夏农林科技,2011,52(12):266-268.

[17] 童思陈,周建军.水库淤积初步平衡问题[J].泥沙研究,2006(5):17-21.

[18] 涂苏昭.长冈水库若干泥沙淤积问题的研究[J].江西农业大学学报,1993,15(4):335-343.

[19] Dendy E E,刘玉茹.小型水库的拦沙能力[J].中国水土保持,1984(10):58-61.

[20] 宁夏回族自治区水文总站.宁夏回族自治区地表水资源(内部资料)[Z]. 宁夏,1985:155-157.

[21] 姜乃森,张启顺,黄霖恩.水库淤积上延问题的分析[J].水利学报,1997(8):67-71.

(上接第 169 页)

[30] 王则宇,蒙仲举,崔向新,等.希拉穆仁天然草地不同群落土壤入渗特征[J].水土保持学报,2017,31(3):112-117.

[31] 王珍,冯浩.秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):75-80.

[32] 唐金林,杨洁,刘窑军,等.初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J].水土保持学报,2016,30(1):122-126.

[33] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(3):597-604.

[34] 高雪梅,余冬立,房凯.利用盘式负压仪测定土壤导水

率的计算方法对比[J].排灌机械工程学报,2015,33(3):246-252.

[35] 刘建伟,陈洪松,张伟,等.盘式入渗仪法测定喀斯特洼地土壤透水性研究[J].水土保持学报,2008,22(6):202-206.

[36] 刘营营,余冬立,刘冬冬,等.土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):84-88.

[37] 侯秀丽,付登高,阎凯,等.滇中不同植被恢复策略下土壤入渗性能及其影响因素[J].山地学报,2013,31(3):273-279.