

# 河龙区间坝库参数与减沙效益关系研究<sup>①</sup>

冉大川<sup>1,2</sup>, 上官周平<sup>2</sup>, 刘斌<sup>3</sup>, 白志刚<sup>4</sup>

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 3. 黄河水利委员会 西峰水土保持科学试验站, 甘肃 庆阳 745000; 4. 黄河水利委员会 绥德水土保持科学试验站, 陕西 绥德 718000)

**摘要:** 对黄河中游河龙区间晋西北片、陕北片坝库控制面积占比、坝库单位面积库容等参数与水利水土保持措施减沙效益关系进行了研究, 结果表明: (1) 晋西北片若没有坝库工程, 仅靠水土保持坡面治理措施只能取得14%的减沙效益; 每增加100 km<sup>2</sup>的坝库控制面积, 即可提高2%的减沙效益; 每增加400万 m<sup>3</sup>的库容, 即可提高1%的减沙效益; 坝库单位面积库容每提高1万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, 减沙效益即可提高约10%。(2) 陕北片减沙效益主要由坝库工程产生。减沙效益提高10%, 坝库单位面积库容需要提高5万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>。要使流域水土保持综合治理减沙效益达到20%以上, 坝库单位面积库容应在6万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>以上。(3) 在黄河中游多沙粗沙区, 要实现40%左右的减沙效益, 坝库单位面积库容应达到16万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>以上。

**关键词:** 坝库参数; 减沙效益; 晋西北片; 陕北片

中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2007) 02-0044-05

## Study on Relationship Between Parameters of Dam and Reservoir and Sediment Reduction Effect in Reaches from Hekouzhen to Longmen of Yellow River

RAN Da-chuan<sup>1,2</sup>, SHANGGUAN Zhou-ping<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>3</sup>, BAI Zhi-gang<sup>4</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research of YRCC, Zhengzhou 450003; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Xifeng Soil and Water Conservation Experimental Station of YRCC, Qingyang, Gansu 745000; 4. SuiDe Soil and Water Conservation Experimental Station of YRCC, SuiDe, Shaanxi 718000)

**Abstract:** It studied the relationship between the dam and reservoir control area ratio to the total area, the dam and reservoir capacity unit area (DRCA), the critical DRCA and sediment reduction effect in the northwest of Shanxi and north of Shaanxi in the Hekouzhen-Longmen area of middle reaches of the Yellow River. The results show that: (1) In the northwest of Shanxi, without the dam and reservoir engineering, the control measure of the slopland accounted for 14% in sediment reduction. The sediment reduction effect increases with the increase of the dam and reservoir control area, reservoir capacity and DRCA: the increase of 100 km<sup>2</sup> in dam and reservoir control area can increase 2% in sediment reduction effect; the increase of 4 000 000 m<sup>3</sup> in the reservoir capacity can increase 1%; and the increase of 10 000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> in the DRCA can increase 10%. (2) In the north of Shaanxi, the sediment reduction is mainly attributed to the dam and reservoir engineering, the DRCA of 50 000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> can increase 10% in trap efficiency; the DRCA should be more than 60 000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> if the sediment reduction effect of the comprehensive watershed control of soil and water conservation achieves 20%. (3) In the areas with high and coarse sediment yield of middle reaches of Yellow River, if the sediment reduction effect reaches 40%, the DRCA should excess 160 000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>.

**Key words:** parameters of dam and reservoir; sediment reduction effect; northwest of Shanxi; north of Shaanxi

从1988年至今,黄河中游水沙变化研究已进行了18年,取得了丰硕的研究成果。主要开展了水利部第一期黄河水沙变化研究基金、黄河流域水土保持科研基金、国家自然科学基金(统称“三大基金”)、国家“八五”重点科技攻关项目、黄河水利委员会黄河上中游管理局“八五”重点课题、水利部第二期黄河水沙变化研究基金项目

① 收稿日期: 2006-10-12

基金项目: 黄河河情年度咨询及跟踪研究

作者简介: 冉大川,男,生于1964年,高级工程师,客座研究员。黄河水利委员会黄河水利科学研究院水土保持研究所总工程师。长期从事黄河中游水沙变化和水土保持科学研究。

等6大研究项目, 硕果累累。在黄河中游河口镇至龙门区间(简称河龙区间)水土保持措施减水减沙作用以往研究中, 侧重于各单项水土保持措施减沙效果的分析和计算成果的综合评价, 对坝库参数与水利水土保持措施减沙效益关系的研究很少涉及。本文根据长期从事黄河中游水沙变化研究工作积累的资料, 对以上问题进行了研究, 以期对黄河中游水土保持生态建设有所裨益。

## 1 研究区域水文泥沙概况

河龙区间晋西北片系指山西省吕梁山脊以西、河龙区间以东的广大地区, 其中包括绝大部分属于内蒙古的浑河流域。该区总面积约2.93万 km<sup>2</sup>, 其中水土流失面积1.774万 km<sup>2</sup>。除浑河、偏关河、县川河、朱家川、岚漪河、蔚汾河、湫水河和三川河等8条支流控制的2.17万 km<sup>2</sup>区域以外, 还有7 577 km<sup>2</sup>的未控区。晋西北片多年平均(1956~1996年)径流量7.7亿 m<sup>3</sup>, 多年平均输沙量1.132亿 t, 分别占河龙区间对应的多年平均径流量和多年平均输沙量的13.7%和15.5%。

晋西北片大部分属于黄土丘陵沟壑区, 另有部分缓坡风沙区及少量的土石山区。黄土丘陵沟壑区北起山西省偏关县, 自北向南涉及河曲、保德、兴县、临县、离石、中阳等县(市), 包括偏关河、县川河、朱家川、蔚汾河、湫水河和三川河。该类型区丘陵起伏, 沟壑纵横, 地形支离破碎, 土质疏松, 植被稀少; 年降雨量460 mm左右, 主要集中在汛期, 汛期降雨量占全年降雨量的75%, 降雨在年内、年际的分配都极不均匀。水土流失十分严重, 侵蚀模数约8 000~12 000 t/(km<sup>2</sup>·a), 每年向黄河输送大量的泥沙。缓坡风沙区主要分布在右玉、平鲁、神池、五寨及岢岚等县(区), 水蚀和风蚀均较严重, 植被稀少, 气候干旱, 属西北沙漠区的边缘地区, 年降雨量400 mm左右, 侵蚀模数2 000~4 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。

土石山区主要分布在吕梁山较高的山脊周围地区, 山势陡峭, 石厚土薄, 植被较好, 雨量在520~680 mm左右, 夏季降水多以暴雨形式出现, 易引起山洪形成泥石流。土壤多属壤质或沙壤质, 侵蚀模数约为2 500~4 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。截至1996年, 晋西北片(含未控区)水土保持治理措施保存面积81.8万 hm<sup>2</sup>, 其中梯田15.3万 hm<sup>2</sup>, 林地61.6万 hm<sup>2</sup>, 草地3.15万 hm<sup>2</sup>, 坝地1.75万 hm<sup>2</sup>, 水土流失治理度为47%。

河龙区间陕北片包括黄河北干流右岸的清涧河、无定河、佳芦河、秃尾河、窟野河、孤山川、皇甫川等7条较大的入黄一级支流, 流域总面积约5.2万 km<sup>2</sup>, 其中水文站控制面积约5.06万 km<sup>2</sup>, 未控区面积8 700 km<sup>2</sup>, 研究区域面积合计6.07万 km<sup>2</sup>; 水土流失面积5.051万 km<sup>2</sup>。

陕北片多年平均(1954~1996年)径流量27.64亿 m<sup>3</sup>, 多年平均输沙量3.994 5亿 t, 占河龙区间对应的多年平均径流量的49.2%, 多年平均输沙量的54.7%。陕北片涉及内蒙古自治区的鄂尔多斯市、陕西省的榆林市和延安市, 共计21个县(旗、区), 是黄河中游水土流失最为严重、治理难度最大的地区, 也是黄河粗泥沙的集中来源区, 多年平均侵蚀模数在10 000 t/(km<sup>2</sup>·a)左右。侵蚀地貌类型复杂, 从宏观上看, 水力侵蚀、重力侵蚀和风力侵蚀是主要的水土流失类型。侵蚀强度大, 尤其是皇甫川、孤山川及窟野河、佳芦河、无定河下游一带, 侵蚀模数达15 000 t/(km<sup>2</sup>·a)以上; 窟野河下游(面积1 347 km<sup>2</sup>)流域高达37 500 t/(km<sup>2</sup>·a); 佳芦河(水文站控制面积1 121 km<sup>2</sup>)的年输沙模数达68 700 t/km<sup>2</sup>(1970年)。强烈的土壤侵蚀使河流含沙量普遍较高, 皇甫川、孤山川、窟野河、佳芦河、无定河、清涧河等6条支流多年平均(1954~1996年)含沙量分别为317, 254, 169.5, 225, 109, 253 kg/m<sup>3</sup>, 皇甫川曾有含沙量1 570 kg/m<sup>3</sup>的记录。截至1996年, 陕北片(含未控区)水土保持治理措施保存面积191.88万 hm<sup>2</sup>, 其中梯田21.14万 hm<sup>2</sup>, 林地151.7万 hm<sup>2</sup>, 草地15.26万 hm<sup>2</sup>, 坝地3.78万 hm<sup>2</sup>, 水土流失治理度为38%。

## 2 晋西北片坝库参数与减沙效益关系

根据黄河水利委员会黄河上中游管理局“八五”重点课题“黄河中游河口镇至龙门区间水土保持措施减洪减沙效益研究”和水利部第二期黄河水沙变化研究基金项目“河龙区间水土保持措施减水减沙作用分析”收集的基本资料, 整理得到河龙区间晋西北片8条支流截至1989年坝库工程基本参数和1970~1989年水利水土保持措施年均减沙效益等数据(表1)。

表1 晋西北片8条支流截至1989年坝库工程基本参数与减沙效益

河流	流域面积 (km <sup>2</sup> )	坝库库容 (万 m <sup>3</sup> )	单位面积库容 (万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	控制面积 (km <sup>2</sup> )	控制面积比例 (%)	减沙效益 (%)
浑河	5530	11310	2.04	1538	27.8	45.8
偏关河	2040	318	0.16	89	4.4	16.2
县川河	1587	2780	1.75	235	14.8	22.6
朱家川	2915	2400	0.82	266	9.1	18.3
岚漪河	2167	988	0.46	320	14.8	19.5
蔚汾河	1478	2310	1.56	341	23.1	24.6
湫水河	1989	3370	1.69	456	22.9	25.0
三川河	4161	4070	0.98	740	17.7	30.0

## 2.1 坝库控制面积占比与减沙效益关系

根据表1数据绘出晋西北片坝库控制面积占比与减沙效益关系见图1。由图1看出,晋西北片8条支流坝库控制面积占比与减沙效益关系为指数函数关系,其关系式为:

$$y = 13.05e^{0.0362x} \quad (1)$$

式中:  $y$  ——水利水土保持措施减沙效益(%);  $x$  ——坝库控制面积占比(%),即坝库控制面积占流域面积的百分比;  $e$  为自然对数的底。

(1)式相关系数  $R = 0.86$ ,说明二者关系较好。随着坝库控制面积占比的增大,减沙效益呈增大趋势,二者为正相关关系,但减沙效益的增幅低于坝库控制面积占比的增幅。坝库控制面积占比增大10%,减沙效益增大约8%,同比偏低2个百分点。由(1)式求出当坝库控制面积占比  $x = 10\%$  时,减沙效益  $y = 18.7\%$ 。当  $x = 0$  时,  $y$  为13.0%,说明晋西北片若没有坝库工程,仅靠水土保持坡面治理措施只能取得13%的减沙效益。因此,要迅速提高流域减沙效益,必须实施水土保持综合治理,坡面治理措施和沟道坝库工程相结合才能取得较好的减沙效果。

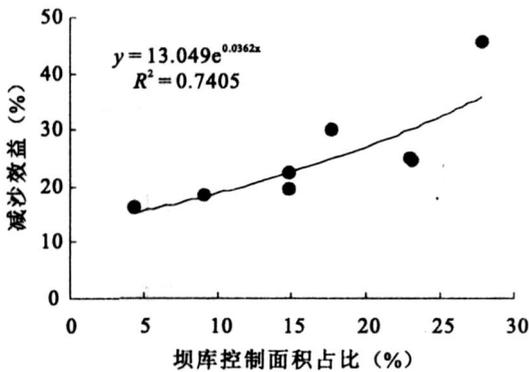


图1 晋西北片坝库控制面积占比与减沙效益关系

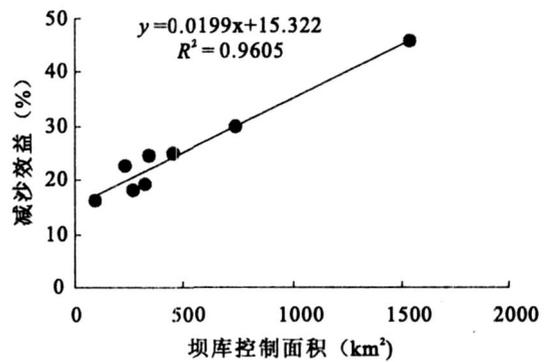


图2 晋西北片坝库控制面积与减沙效益关系

## 2.2 坝库控制面积与减沙效益关系

晋西北片坝库控制面积与减沙效益关系见图2,晋西北片坝库控制面积与减沙效益关系非常好,其线性关系式为:

$$y = 0.0199x + 15.322 \quad (2)$$

式中:  $y$  ——水利水土保持措施减沙效益(%);  $x$  ——坝库控制面积( $\text{km}^2$ )。

(2)式相关系数  $R$  值为0.98。坝库控制面积  $x$  增加100  $\text{km}^2$ ,减沙效益  $y$  可以提高2%。因此,提高流域减沙效益不能单靠坝库工程,实施水土保持综合治理才是最为有效的途径。当  $x = 0$  时,  $y$  为15.3%,说明晋西北片若没有坝库工程,仅靠水土保持坡面治理措施只能取得约15%的减沙效益,这与前述坝库控制面积占比与减沙效益关系的研究结论基本一致。取其平均值,则晋西北片在现状治理水平下若没有坝库工程,仅靠水土保持坡面治理措施只能平均取得14%的减沙效益。

## 2.3 坝库库容与减沙效益关系

晋西北片坝库库容与减沙效益关系见图3,可以看出二者关系很好。随着坝库库容的增大,减沙效益提高,呈明显的正相关关系。其线性关系式为:

$$y = 0.0027x + 16.022 \quad (3)$$

式中:  $y$  ——水利水土保持措施减沙效益(%);  $x$  ——坝库库容( $\text{万 m}^3$ )。相关系数  $R = 0.97$ 。

由(3)式直线关系式斜率的倒数可以求出单位减沙效益的库容约为400  $\text{万 m}^3$ 。说明在晋西北片,每增加400  $\text{万 m}^3$ 的库容,即可提高1%的减沙效益;每增加1 000  $\text{万 m}^3$ 的库容,即可提高减沙效益约3%。

在黄河中游地区淤地坝建设中,骨干坝(又称为治沟骨干工程)一般控制流域面积3~5  $\text{km}^2$ ,库容在50  $\text{万 m}^3$ 以上。根据以上研究结论推算,在晋西北片每新建20座骨干坝,即可增加流域坝库控制面积约100  $\text{km}^2$ ,相应至少增加坝库库容1 000  $\text{万 m}^3$ ,提高流域减沙效益3%左右。

## 2.4 坝库单位面积库容与减沙效益关系

晋西北片坝库单位面积库容与减沙效益关系见图4,二者也为指数函数关系,其关系式为:

$$y = 15.662e^{0.3613x} \quad (4)$$

式中:  $y$  —— 水利水土保持措施减沙效益(%);  $x$  —— 坝库单位面积库容(万  $m^3/km^2$ )。单位面积指单位流域面积。

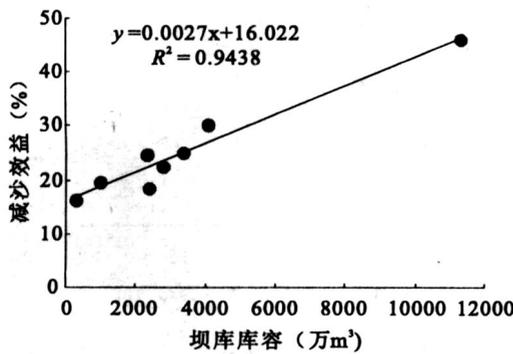


图3 晋西北片坝库库容与减沙效益关系

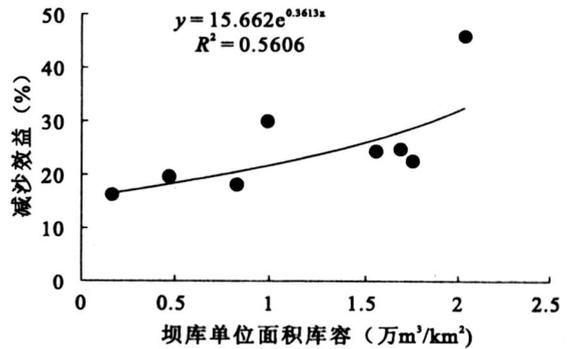


图4 晋西北片坝库单位面积库容与减沙效益关系

(4) 式相关系数  $R = 0.75$ , 说明二者关系较差。随着坝库单位面积库容的增大, 减沙效益也呈增大趋势, 二者仍为正相关关系。由(4) 式求出当坝库单位面积库容  $x = 1$  万  $m^3/km^2$  时, 减沙效益  $y = 22.5\%$ ; 当  $x = 2$  万  $m^3/km^2$  时,  $y$  为  $32.3\%$ 。说明晋西北片坝库单位面积库容每提高 1 万  $m^3/km^2$ , 减沙效益即可提高约  $10\%$ 。

### 3 陕北片坝库参数与减沙效益关系

根据水利部第二期黄河水沙变化研究基金项目“河龙区间水土保持措施减水减沙作用分析”收集的基本资料和补充的最新资料, 计算得到河龙区间陕北片 7 条支流截至 2004 年坝库工程基本参数和 1970 ~ 2004 年水利水土保持措施年均减沙效益等数据(表 2)。表 2 中括号内数字为流域面积。各支流按粗泥沙集中来源区面积(括号外数字) 计算坝库工程基本参数; 清涧河按流域面积(括号内数字) 计算坝库参数。

#### 3.1 坝库控制面积占比与减沙效益关系

陕北片坝库控制面积占比与减沙效益关系见图 5 示, 陕北片 7 条支流坝库控制面积占比与减沙效益关系同晋西北片一样, 也为指数函数关系, 其关系式为:

$$y = 10.303e^{0.0187x} \quad (5)$$

式中:  $y$  —— 水利水土保持措施减沙效益(%);  $x$  —— 坝库控制面积占比(%);  $e$  为自然对数的底。相关系数  $R = 0.98$ 。

表 2 陕北片 7 条支流截至 2004 年坝库工程基本参数与减沙效益

河流	粗泥沙集中来源区面积( $km^2$ )	库容(万 $m^3$ )	单位面积库容(万 $m^3/km^2$ )	控制面积( $km^2$ )	控制面积比例(%)	减沙效益(%)
皇甫川	3 195(3 246)	23 324	7.3	1 521	47.6	24.6
孤山川	1 268(1 272)	9 890	7.8	586	46.2	22.5
窟野河	4 001(8 706)	30 010	7.5	1 632	40.8	21.8
秃尾河	1 088(3 294)	10 336	9.5	462	42.5	25.2
佳芦河	932(1 134)	16 124	17.3	674	72.3	40.5
无定河	5 253(30 261)	94 554	18.0	3 976	75.7	45.2
清涧河	0(4 080)	60 300	14.8	3 050	74.8	38.7

显然, 陕北片各支流的坝库控制面积占比与减沙效益关系要比晋西北片好得多。随着坝库控制面积占比的增大, 减沙效益也明显增大, 二者为正相关关系。坝库控制面积占比增大  $10\%$ , 减沙效益增大  $5.4\%$ , 同比偏低  $4.6$  个百分点。因此, 陕北片相同坝库控制面积占比增幅对应的减沙效益增幅低于晋西北片 1 倍多, 治理难度明显大于晋西北片。但由于陕北片各支流坝库控制面积占比与减沙效益的关系非常密切, 相关系数接近  $1.0$ , 说明流域减沙效益对坝库控制面积占比的响应非常敏感; 只要提高流域坝库控制面积占比, 减沙效益立即增大。认识陕北片各支流坝库控制面积占比与减沙效益关系的这一重要特点, 对该区域大规模开展淤地坝建设具有重要的指导意义。

此外, 由(5) 式可以求出当坝库控制面积占比  $x = 10\%$  时, 减沙效益  $y = 12.4\%$ ; 当坝库控制面积占比  $x = 30\%$  时, 减沙效益  $y = 18.1\%$ 。与晋西北片相比, 陕北片各支流取得相同减沙效益所需要的坝库控制面积占比要大得多。当坝库控制面积占比  $x = 0$  (即没有坝库工程) 时, 减沙效益  $y$  只有  $10.3\%$ , 此即水土保持坡面措施的减沙效益。根据表 2 计算结果, 7 条支流平均减沙效益为  $31.2\%$ 。因此, 陕北片的减沙效益主要是由坝库工程产生的; 坝库工程对水利水土保持措施减沙效益的贡献率最大。实施水土保持生态建设, 坝库工程应当先行。

#### 3.2 坝库单位面积库容与减沙效益关系

陕北片坝库单位面积库容与减沙效益关系见图 6。二者呈很好的线性正相关关系, 其关系式为:

$$y = 2.0275x + 7.4061 \quad (6)$$

式中:  $y$  ——水利水土保持措施减沙效益(%);  $x$  ——坝库单位面积库容(万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ )。相关系数  $R = 0.99$ 。

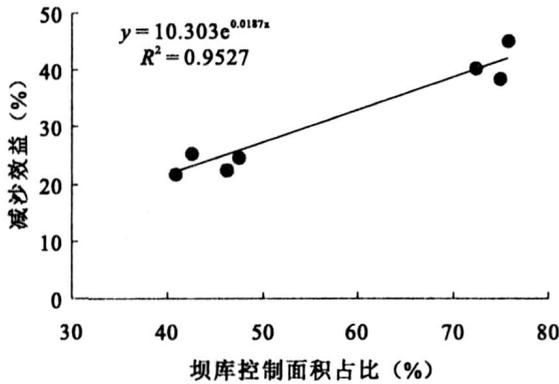


图5 陕北片坝库控制面积占比与减沙效益关系

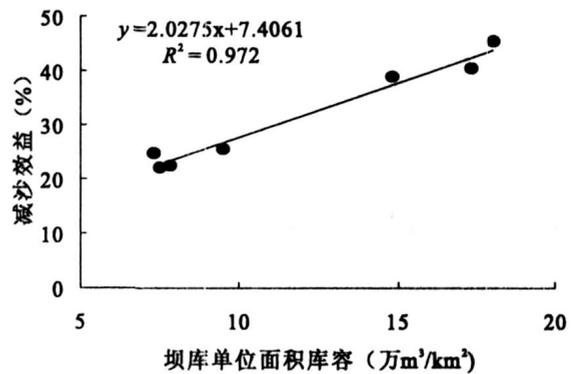


图6 陕北片坝库单位面积库容与减沙效益关系

由(6)式不难推出: ①减沙效益  $y$  提高10%, 坝库单位面积库容  $x$  需要提高5万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ 。②当减沙效益为15%时, 对应的坝库单位面积库容为3.75万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ; 当减沙效益为20%时, 对应的坝库单位面积库容为6.2万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ; 当减沙效益为40%时, 对应的坝库单位面积库容为16万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ 。因此, 在水土流失特别严重的陕北片, 要使流域水土保持综合治理减沙效益达到20%以上, 除了配置相应的坡面治理措施外, 坝库单位面积库容应在6万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ 以上。

陕北片由北向南, 坝库单位面积库容增大, 水利水土保持措施减沙效益也随之明显提高(表2)。北部的“两川两河”(即皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河), 由于坝库单位面积库容只有7~10万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ , 减沙效益为21%~25%; 南部的佳芦河、无定河和清涧河, 由于坝库单位面积库容达到了15~18万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ , 比北部增大了8万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ , 减沙效益高达40%左右, 由此形成点据两头分布。由以上研究可以推断, 在黄河中游粗泥沙集中来源区, 要实现40%左右的减沙效益, 坝库单位面积库容应达到16万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ 以上。因此, 加强陕北片“两川两河”的坝库工程建设势在必行。

## 4 结论

(1) 在河龙区间晋西北片, 当坝库控制面积占比为10%时, 减沙效益为18.7%; 若没有坝库工程, 仅靠水土保持坡面治理措施只能取得14%的减沙效益; 每增加100  $\text{km}^2$ 的坝库控制面积, 即可提高2%的减沙效益; 每增加400万  $\text{m}^3$ 的库容, 即可提高1%的减沙效益; 坝库单位面积库容每提高1万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ , 减沙效益即可提高约10%。

(2) 在河龙区间陕北片, 当坝库控制面积占比为10%时, 减沙效益为12.4%。当坝库控制面积占比为0时, 减沙效益只有10.3%。减沙效益主要由坝库工程产生。减沙效益提高10%, 坝库单位面积库容需要提高5万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ 。要使流域水土保持综合治理减沙效益达到20%以上, 坝库单位面积库容应在6万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ 以上。在黄河中游粗泥沙集中来源区, 要实现40%左右的减沙效益, 坝库单位面积库容应达到16万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ 以上。

(3) 就河龙区间而言, 地处东部的晋西北片其坝库控制面积占比小于减沙效益, 地处西部的陕北片其坝库控制面积占比大于减沙效益, 说明陕北片取得相同减沙效益的坝库控制面积占比大于晋西北片。虽然晋西北片和陕北片的坝库单位面积库容均小于其减沙效益, 但陕北片取得相同减沙效益的坝库单位面积库容也大于晋西北片。因此, 在陕北片修建大型拦泥库很有必要。单从淤地坝工程建设来看, 陕北片治理难度比晋西北片大。

### 参考文献:

- [1] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
- [2] 徐建华, 吕光圻, 张胜利, 等. 黄河中游多沙粗沙区区域界定及产沙输沙规律研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.