

无定河流域产沙量变化的淤地坝效应分析

王随继¹, 冉立山^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 无定河流域 1971~1989 年的年均流量、悬移质含沙量及输沙率比 1954~1970 年的明显变小, 而月均水沙过程曲线也发生了明显变化。上述水沙过程的变化受到 1970 年以来人类活动的强烈影响, 而淤地坝建设是主因。为探讨淤地坝的减沙效应, 提出淤地坝有效减沙面积这一概念, 并拟合了动态变化的淤地坝有效减沙面积与年份之间的关系, 发现该关系曲线与无定河流域各年代产沙量的变化情况相符。自 1990 年以来无定河流域淤地坝有效减沙面积呈明显递减趋势, 导致了自上世纪 90 年代以来该流域的产沙量出现增大现象。为了抑制该流域的产沙量, 势必需要加大淤地坝建设的力度。如果想使该流域的产沙量逐渐减少, 则至少要使流域内年淤地坝有效减沙面积逐年增加。

关键词: 水沙变化; 淤地坝; 效应; 有效减沙; 无定河

文章编号: 1000-0585(2008)04-0811-08

黄河下游河道中以及河口区大量沉积的泥沙主要来自于黄河中游地区^[1~3], 尤其是处于干旱一半干旱地区的黄土高原风沙黄土转换带, 这已经为研究者所公认。无定河作为黄河中游的大型支流之一, 正好位于该地带, 它由河源梁涧区、风沙区、黄土丘陵沟壑区组成(图 1), 平均年降水量为 398.4 mm/a, 近年来年降水量略有减小的趋势。但是, 其输沙量则在不同时段表现出极大的差异, 上世纪 80 年代输沙量达到最小。1970 年以前时段, 该区的输沙过程受到人类活动的影响比较有限, 其上述三类地貌区的产水产沙现象已经有比较深入的分析^[4]。但 1970 以后, 上述各个地貌区的产沙现象则有明显的变化, 最明显的是流量和输沙量发生明显减小的趋势, 这与人类活动引起的偏离于天然产水产沙的状况密切相关; 而 1990 年以来, 其输沙现象又有了新的变化。人为活动对黄河中游河流的产水产沙的影响再次引起研究者的关注^[5~8], 而人为影响强度也得到大家的肯定。

如同黄河中游其他大型一级支流流域一样, 无定河流域的人类活动主要表现在以蓄水淤地为目的的淤地坝的大量修建以及以减蚀增产为目的的水平梯田的建设。而研究区沟道是产沙的主要单元, 其产沙量占流域产沙量的 70% 左右^[9~11], 淤地坝是减少沟道产沙的关键设施。以往的研究成果都表明, 在各项水土保持措施中, 对减少入黄泥沙量贡献最大的是淤地坝^[5,6,12]。无论如何, 上述研究对于研究区人类活动对水沙过程的影响还没有完全揭示出来, 还存在一系列问题需要进一步去解决, 例如, 人类活动尤其是淤地坝的建设对研究区的水沙过程产生了什么影响? 淤地坝拦截泥沙的能力随着年份有何变化并有何规律可循? 现阶段每年新增的淤地坝能否达到有效减沙的目的?

收稿日期: 2008-02-19; 修订日期: 2008-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771031)和中国科学院地理科学与资源研究所知识创新项目资助。

作者简介: 王随继(1966-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 副研究员。从事沉积学、地貌学、水土保持等方面的研究工作。E-mail: wangsj@igsnr.ac.cn。

为了回答上述相关问题并探求淤地坝的减沙效应及其可持续性, 本研究选取无定河流域具有代表性的水文站的多年泥沙资料, 分析了人类活动影响相对较弱的 1954~ 1970 年和人类活动急剧增强的 1971~ 1989 年两个时段的月均水沙过程, 揭示了其水沙过程模式发生了一定的变化, 并对淤地坝有效减沙面积随着年份的变化关系进行了拟合, 据此提出维持淤地坝持续减沙的能力需要采取的措施。该项研究在揭示出无定河流域淤地坝的减沙效应的同时, 有助于指导无定河流域甚至黄河中游地区的水土保持工作的努力方向。

1 1970 年前后水沙情况对比

在无定河主河道中, 1971~ 1989 年时段内的年均流量比 1954~ 1970 年时段减小非常明显 (图 2a 中赵石窑站、丁家沟站和川口站), 减小率介于 32.07%~ 28.52%; 韩家砭站以上的风沙区减小 20.83%, 是研究区减流最小的区域; 而在绥德站以上的黄土丘陵沟壑区的减小率为 32.79%, 是研究区减流最大的地区。区内年均降水量的减小比较小, 减小率在 11.8%~ 3.3% 之间, 其中代表无定河全流域降水量的川口站最小, 而以赵石窑站以上区域的最大 (图 2b)。年均悬移质输沙率和年均悬移质含沙量的减小率分别介于 80%~ 59.25% 和 69.71%~ 38.94% 之间, 且都以绥德站以上的黄土丘陵沟壑区的最小 (图 2c, d 和表 1), 但是, 平均悬移质含沙量的减小幅度在绥德站以上的黄土丘陵沟壑区的最大 (图 2d)。

表 1 无定河流域不同站点 1971~ 1989 时段比 1954~ 1970 时段的水沙减小率

Tab 1 The decrease ratio of the mean water discharge and suspended sediment load contrasted between the periods of 1971-1989 and 1954-1970 for the different hydrographic stations

站名	减流率 (%)	输沙率减小 (%)	含沙量减小 (%)	降水量减小 (%)
赵石窑站	32.07	80.00	69.71	11.82
丁家沟站	31.52	73.45	57.54	7.82
川口站	28.52	64.49	51.50	3.27
韩家砭站	20.83	68.42	55.02	10.33
绥德站	32.79	59.25	38.94	11.33

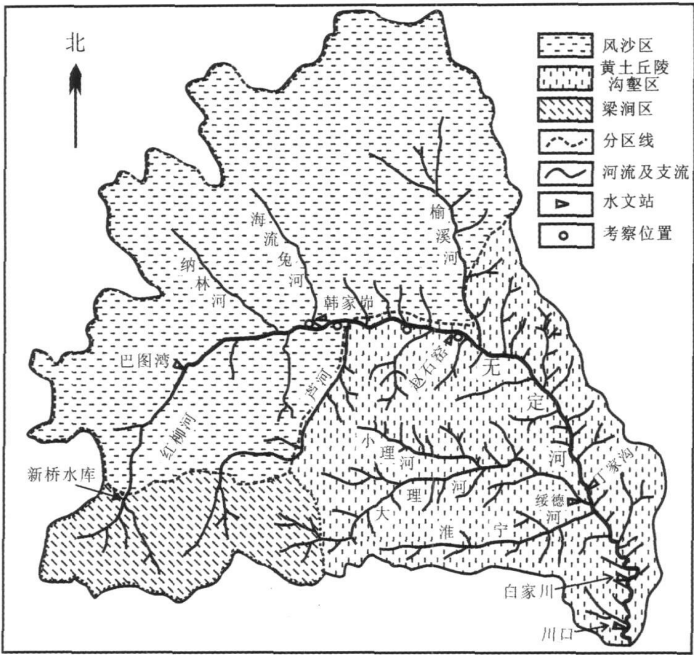


图 1 无定河流域地貌分区及相关站点位置

Fig 1 The landform subarea and location of related hydrographic stations in the Wudinghe River basin

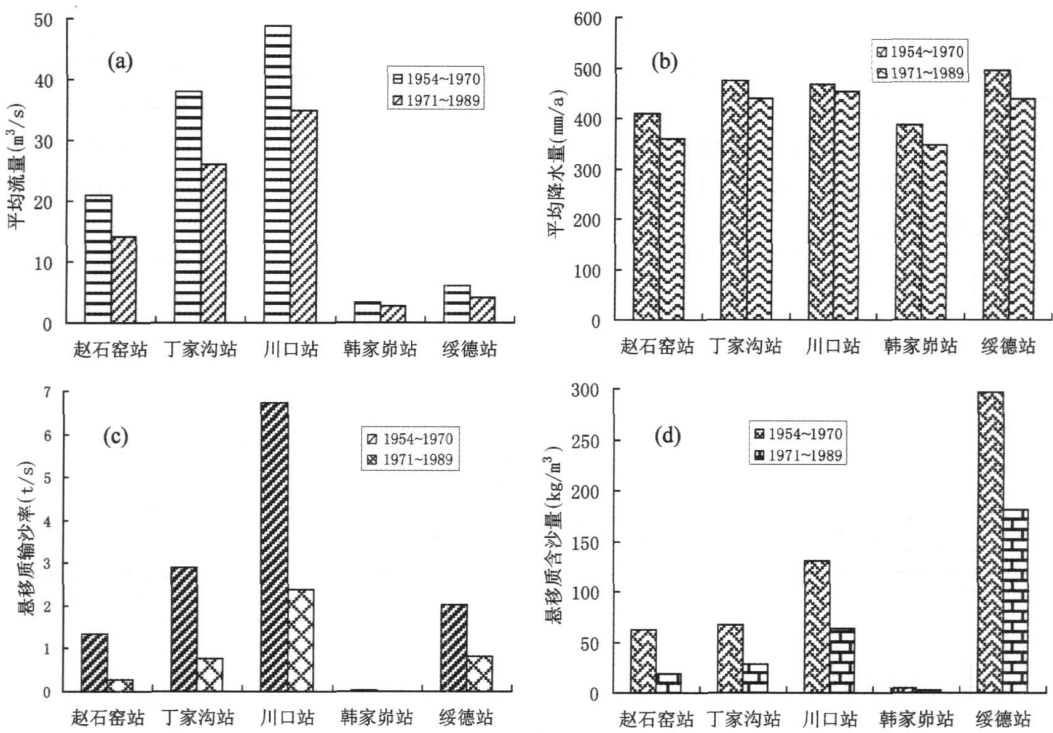


图2 不同时段有关站点(a)平均流量、(b)平均年降水量、(c)平均悬移质输沙率、(d)平均含沙量对比
Fig 2 Comparison of annual mean(a) discharge, (b) precipitation, (c) suspended sediment delivery rate and (d) sediment concentration between two periods of 1954-1970 and 1971-1989 for the different stations

2 1970 年前后月均水沙过程对比

在一个流域中，一次洪水过程中含沙量 (C_s) 与流量 (Q) 的相互关系可能具有以下 5 种模式。模式 I：当 C_s 和 Q 具有同时相的峰、伸展和偏斜趋势，为直线型，可分三类：当 $C_s/Q_r = C_s/Q_f$ 时（下标 r 和 f 分别表示洪水过程中的上升和下降阶段），斜率 = 1； $C_s > Q$ ，斜率 > 1 ； $C_s < Q$ ，斜率 < 1 。模式 II：当 $C_s/Q_r > C_s/Q_f$ ，含沙量的峰值早于流量的峰值，含沙量与流量的过程曲线为顺时针环形。模式 III 当 $C_s/Q_r < C_s/Q_f$ ，含沙量的峰值晚于流量的峰值，含沙量与流量的过程曲线为逆时针环形。模式 IV：单一的线—环关系，是上述模式 I、II 或模式 I、II 的联合作用。模式 V：数字“8”形关系，是上述模式 II、III 的联合作用。

无定河月均含沙量与月均流量的关系点绘如图 3，显然，二者之间的过程曲线具有典型的数字“8”形关系。这是一种复杂的水沙过程关系，是由逆时针环形和顺时针环形两类模式构成的复合模式。因为，在顺时针环形模式中， $C_s/Q_r > C_s/Q_f$ ，泥沙浓度峰值比流量峰值出现早。在河流水位上升过程中，泥沙浓度主要由河道以外的流域泥沙供给起决定作用，河床上抵抗冲刷能力较强的护层开始发育。在河流水位下降过程中，泥沙浓度由流量和河床及河岸来沙所控制。而在逆时针环形模式中， $C_s/Q_r < C_s/Q_f$ ，泥沙浓度峰值晚于流量峰值，水波的传播比水体运动快，在洪峰过后，河床上的护层被破坏，表明洪水具有高侵蚀能力，并且这种侵蚀能力具有延续效应。图 3 显示，上世纪 80 年代，无定河

川口站的月均水沙数字“8”形过程中逆时针环形段发生在 1 月至 6 月，而顺时针环形发生在 6 月至 12 月，但在上世纪 90 年代，其水沙过程中的逆时针环发生在 1 月至 5 月，而顺时针环发生在 5 月至 12 月。这表明泥沙浓度峰值晚于流量峰值从 60 年代的 6 月提前到 80 年代的 5 月，也即流域来沙控制阶段由 1970 年以前的 1~ 6 月变成了 1970 年以后的 1~ 5 月。该现象表明 1970 年以后流域的来沙在一定程度上被拦截，这显然与沟道中的淤地坝关系密切。

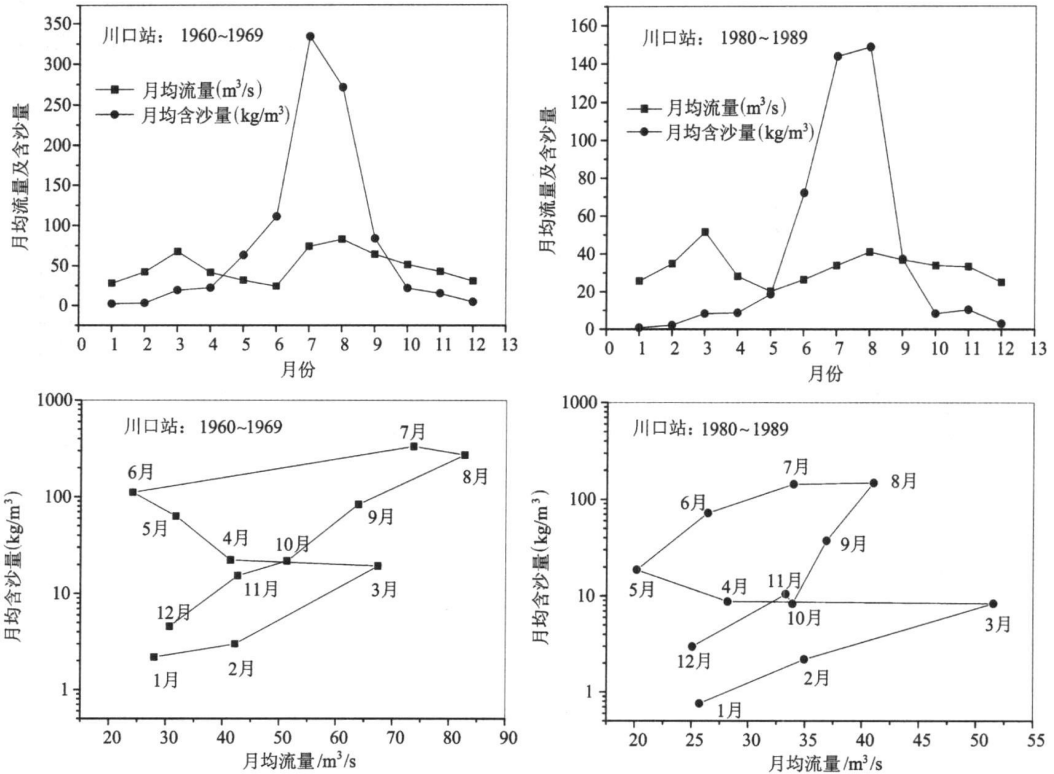


图3 1960~ 1969和 1980~ 1989 两个时段月均水沙过程对比

Fig. 3 Comparison of relations of monthly mean discharge to sediment concentration between periods of 1960-1969 and 1980-1989

3 人类活动影响的分析

研究区的人类活动对水沙影响最大的当属淤地坝和梯田的建设，其中前者主要具有沉沙的作用，后者具有减水的作用。研究区沟道是产沙的主要单元，其中的产沙量占流域产沙量的 70% 左右^[9~ 11]，相对来说，梯田一般建设在原有的坡面上，因此梯田的减沙基本是减少沟道以外产沙的一部分，而梯田对于沟道的产沙的抑制无能为力，而淤地坝则是减少沟道产沙的关键设施。以往的研究成果都表明，在各项水土保持措施中，对减少入黄泥沙量贡献最大的是淤地坝^[5, 6, 12]，至于造林种草等水保措施起到的减水减沙作用相对来说仍然较小，因为已有的研究表明，在黄土高原区尤其是黄河中游的丘陵沟壑区，当植被达到一定的覆盖度时才能够达到明显减沙的作用^[13]，而在研究区许多地区还远未达到。例如，无定河一级支流大理河流域淤地坝的减沙贡献率在上世纪 60、70、80 年代分别高达

97. 14%、95. 19%、97. 13%，90 年代有所下降，但还远远高于修梯田、造林、种草等其他水土保持措施的贡献率^[14]。黄河中游河龙区间淤地坝的减沙贡献率在 70、80、90 年代分别占 80%、63. 3%、47. 6%，都是各类水土保持措施中最大的^[6]。

无定河自新桥水库以上的红柳河，是梁峁状黄土丘陵沟壑区，年侵蚀模数达 1. 46 万 t/km²，是无定河流域产粗沙比例最高的地区。新桥水库是该区首座水库，于 1961 年建成，控制流域面积 1332km²，库容 2. 0 亿 m³。自 70 年代至 1981 年，红柳河流域建成 28 座水库，230 座淤地坝。1994 年，红柳河流域发生了 50 年一遇的洪水，有 11 座中小型水库溃决。截至 2002 年，流域内还有水库 13 座，其中大中型水库 7 座，总库容 5. 6 亿 m³，已淤积近 4. 0 亿 m³^[15]。在不到 30 年的时段内，这些大中型水库的库容损失大多数已经超过了其设计库容的 2/3（表 2）。从图 4a 可见，新桥水库已基本难以蓄水了，因为水库中的泥沙已经几乎占据了所有的库容。而常见的淤地坝其设计年限往往比水库的设计年限小得多，大多为 20 年左右，因此，在超过 20 年后，许多淤地坝已经失去了蓄水沉沙的作用。图 4b 展现的一淤地坝虽然完好无损，但已被泥沙淤满而成为田地了。上述现象说明水库及淤地坝在沟道减沙中起着非常重要的作用，同时也说明一旦水库或淤地坝库容大量损失，其减沙的作用则会完全消失。

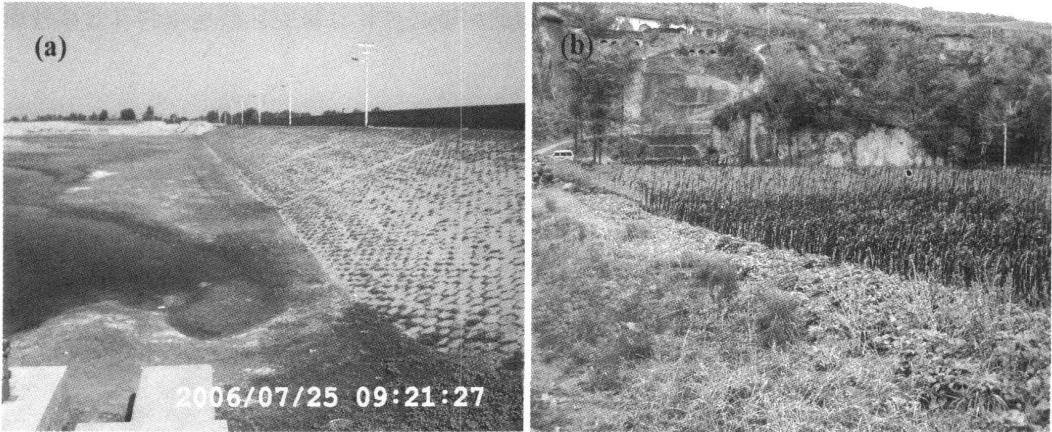


图 4 无定河上游新桥水库 (a) 和大理河支沟淤地坝 (b) 的强烈淤积

Fig. 4 Intense filling in the Xinqiao reservoir of the upper Wudinghe River and a dam in a tributary of the Dalihe River

表 2 红柳河流域现有 7 座水库至 2001 年的淤积比率^[15]

Tab 2 Filling ratio of the 7 reservoirs in the Hongliuhe River basin until 2001^[15]

水库	总库容(万 m ³)	已经淤积(万 m ³)	淤积比(%)	运用年限(a)
新桥	20000	18960	95	42
金鸡沙	7544	2654	35.2	29
水路畔	6010	3340	55.6	25
边墙渠	6280	3190	50.8	30
周湾	6350	3960	62.4	30
营盘山	4720	3536	74.9	28
杨伏井	2240	1950	87.1	28

冉大川等^[7]的研究表明, 1970~1996 年期间无定河流域的淤地坝减沙量占水土保持各类措施减沙总量的 62.11%。由前几节的相关分析可以看出, 黄土丘陵区 1970 年以后的减沙幅度比风沙区的明显, 这也是因为前者的产沙严重、所修筑的淤地坝数量相对更多, 从而有效拦截相对比例的泥沙。因此, 黄河中游地区包括无定河流域, 淤地坝是拦减黄河中游泥沙的关键措施, 也在减少产沙的过程中起着举足轻重的作用。

4 淤地坝减沙的有效水保面积

图 5a 表明, 无定河川口站的平均含沙量从上世纪 50 年代至 80 年代起持续减小, 至 80 年代达到最小, 90 年代又出现增大的趋势, 而无定河流域的输沙量也有类似的变化趋势 (图 5b)。这些现象表明, 在地貌及地表环境因素没有明显改变、降水量略微下降的情况下, 无定河流域的人为减沙作用从 50 年代至 80 年代持续增强, 90 年代又趋向减弱, 而作为无定河流域沟道拦沙的主力建筑淤地坝的减沙效应非常明显, 其拦沙作用在 80 年代达到顶点, 此后开始减弱。图 6 显示, 无定河流域从上世纪 50 年代起每年都修筑一定数量的淤地坝, 各淤地坝坝区的总面积也在持续增加, 但是为何 90 年代的减沙能力比 80 年代明显减小? 这是由于前期所修筑的部分淤地坝已经达到了它们的运用时限, 库容被泥沙完全占有而失效。显然, 淤地坝坝区的面积不能简单地用来反映其减沙能力, 而淤地坝的有效水保面积才与其减沙能力密切相关。为此, 有必要计算研究区淤地坝的有效减沙面积及其随不同年份的变化情况。

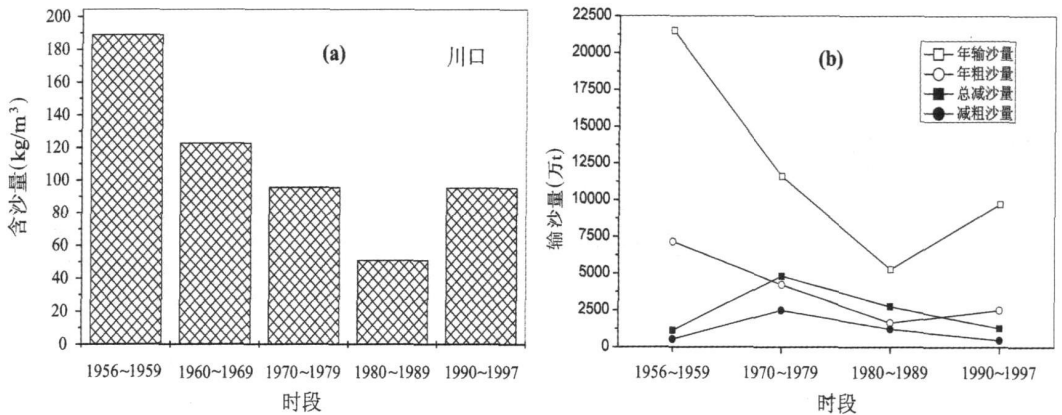


图 5 无定河流域不同年代的沙量变化: (a) 平均含沙量 (数据资料来自文献 [8]) 的年代分布趋势; (b) 年均输沙量的年代分布 (数据资料来自文献 [7])

Fig 5 Distribution in different decades of (a) mean sediment concentration and (b) mean annual sediment load of the Wudinghe River basin

从 1956 至 1996 年 41 年来每年新增加的淤地坝面积的年际分布如图 6 圆点所示, 这些数据是水土保持部门的年度统计数据。可以看到 70 年代前半段的新增面积最大, 但这时其减沙效益还没有达到最大。虽然一些大型淤地坝的设计使用年限一般达到 30 年以上, 但是, 这类淤地坝比较少, 同时其占有淤地坝总面积的比例很小, 几乎可以忽略, 而对于减沙中坚的大量中小型淤地坝来说, 其设计使用年限大多为 20 年左右, 在对这些地区的淤地坝的调查来看, 大部分淤地坝的容量在 20 年左右就被泥沙充填。因此, 可以大致

以 20 年使用时限来计算研究区内的累积有效淤地坝面积，方法是将某年以前没有达到使用 20 年的淤地坝面积进行累加，而超过 20 年的淤地坝其面积不再计入，由此而得到当年的淤地坝有效减沙的面积（图 6 三角点）。将有效淤地坝减沙面积和年份之间进行拟合，可以得到有效淤地坝减沙面积和所讨论年份之间的关系曲线（图 6）和关系式（1）

$$y = -17.06 + \frac{4732.7}{24.12 \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-1982.56)^2}{290.89}}$$

(1)

公式（1）中， x 代表所讨论的年份， y 代表每年能够有效减沙的淤地坝面积。图 6 中的关系曲线及公式（1）表明，淤地坝有效减沙面积从 1956 年起至 1983 年一直处于增加阶段，自 1983 年开始出现减小趋势。总体来说，上世纪 80 年代是淤地坝减沙能力最强的年代。显然，进入 90 年代以来，虽然每年有新增的淤地坝，但达到运用年限的淤地坝反而更多，两相抵消，淤地坝的净有效水保面积实际上在减少，这与含沙量及输沙量的年代变化非常吻合。这从另一方面揭示了无定河流域淤地坝是减沙的主力设施，但同时表明，依现有的淤地坝面积年增速率，其总体减沙能力只能是逐年降低。已有的研究指出，单个淤地坝的拦沙效益是不可持续地^[5]，确切地说，每个淤地坝的减沙能力只在其设计时限内才能持续地发挥作用，而当超出该时限，其减沙能力几乎趋于零。因此，为了达到较大的减沙能力，淤地坝的建设应该加快速度，使其有效减沙的总面积逐年增加。

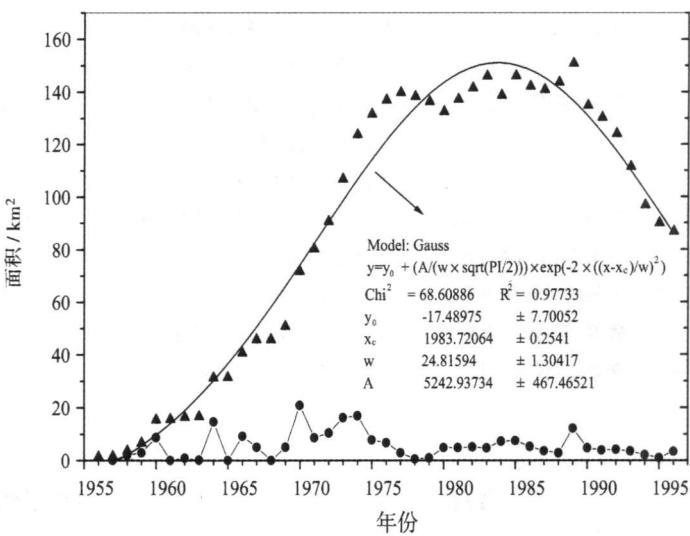


图 6 无定河流域淤地坝有效水保面积
（三角形点）和新增面积（圆点）年际分布

Fig 6 Yearly distribution of the efficient area (triangle points)
of silt arrested dams and the increased area (dots)
of the dams in the Wudinghe River basin

5 结论

无定河流域的人类活动在很大程度上影响到流域的输沙活动，而淤地坝建设在流域的减沙方面具有决定性的贡献，但在不同年代其减沙能力不同。

在上世纪 80 年代时，淤地坝的减沙能力达到了最大，这是因为淤地坝的有效减沙总面积在此之前持续增加，新增的淤地坝坝区的总面积仍然大于行将废弃的淤地坝总面积。

在上世纪进入 90 年代后，研究区年废弃的淤地坝总面积超过了年新增的总面积，导致研究区淤地坝有效减沙面积呈现逐年减小的状况，从而导致该流域的产沙量重新增加，进入黄河主河道的泥沙又开始增多。

为了有效截留无定河流域的泥沙，必须加快淤地坝的建设速度，使其每年的有效减沙总面积保持持续增加，才可能使该流域产沙量逐年减少。

参考文献:

- [1] 叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律. 济南: 山东科技出版社, 1994
- [2] 王随继. 黄河下游河型的特性及成因探讨. 地球学报, 2003, 24(1): 73~ 78
- [3] Wang Suji, Hassan Marwan A, Xie Xiaoping Relationship between suspended sediment load, channel geometry and land area increment in the Yellow River delta. Catena, 2006, 65(3): 302~ 314
- [4] 王随继. 无定河流域不同地貌区水沙过程对比. 地理研究, 2007, 26(3): 508~ 517.
- [5] 许炯心, 孙季. 无定河淤地坝拦沙措施时间变化的分析与对策. 水土保持学报, 2006, 20(2): 26~ 30
- [6] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究. 资源科学, 2006, 28(1): 93~ 100
- [7] 冉大川, 左仲国, 上官周平. 黄河中游多沙粗沙区淤地坝拦减粗泥沙分析. 水利学报, 2006, 37(4): 443~ 450
- [8] 杨新, 延军平, 刘宝元. 无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析. 地球科学进展, 2005, 20(6): 637~ 642
- [9] 韩学士, 宋日升. 伊克昭盟砒沙岩侵蚀特征及治理对策. 人民黄河, 1996, 31~ 33.
- [10] 毕慈芬. 黄土高原基岩产沙区治理对策探讨. 泥沙研究, 2001, (4): 1~ 6.
- [11] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估. 水土保持通报, 2004, (6): 1~ 5
- [12] 冉大川, 罗全华, 刘斌, 等. 黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究. 水利学报, 2004, 35(5): 7~ 13
- [13] 王随继. 黄河中游多沙粗沙区侵蚀产沙与植被相互作用的临界现象. 水土保持学报, 2004, 18(4): 20~ 23, 28
- [14] 魏霞, 李占斌, 李勋贵, 沈冰. 大理河流域水土保持减沙趋势分析及其成因. 水土保持学报, 2007, 21(4): 67~ 71
- [15] 李景宗, 张玫. 浅谈加快红柳河坝库群综合治理的必要性. 中国水土保持, 2002, (6): 6~ 7.

Analysis of dam effect on sediment yield in the Wudinghe River Basin

WANG Suji, RAN Lishan

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic
Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The mean annual discharge, sediment concentration and sediment delivery ratio in the period from 1970 to 1989 are evidently smaller than that in the period from 1954 to 1970. The relations between monthly mean discharge and sediment concentration are different comparing the two periods of time. These phenomena have been influenced by human activities in which the dam building has been the dominant factor since 1970. To discuss the dam effect on decrease of sediment yield a concept of efficient area of dams was advanced. The relation between the annual efficient area of dams and years was fitted. The results show that the varying trend of the relation curve is coincident with the variation of the sediment yield in the decade's distribution. Since 1990 the increase of the sediment yield has resulted in evident decrease of the efficient area of the dams in the Wudinghe River basin. It is necessary to build dam largely and rapidly for restraining the increase of sediment yield in the river basin. If we want the annual sediment yield in the river basin gradually decrease, the annual efficient area of dams must be gradually increased year by year.

Key words: variety of discharge and sediment load; silt arrested dam; effect; efficient decrease of sediment yield; Wudinghe River