

黄河中游流域系统水沙过程变异研究

陈 浩¹, 陆中臣²

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院生态研究中心)

摘要: 目前, 黄河中游地区流域水沙变化的研究主要以水文法和水保法分析为主。由于黄河中游具有明显的自然地带性分布特征, 流域系统的水沙过程受到环境要素的综合影响。根据黄河中游河口镇至龙门区间已控一级支流的测站资料, 采用地理环境要素法分析水沙变异及成因。研究表明, 河龙区间流域径流量和输沙量与地理环境因子的影响密切相关。20 世纪 70 年代以来, 降雨减水减沙作用不断减小, 随着水土保持措施的提高, 人类活动减水减沙所占比重不断增大。70 年代与 80 年代气候波动和人类活动影响的平均减水减沙作用分别为 53.4%、28.6% 和 46.6%、71.4%。

关键词: 黄河中游; 流域系统; 环境要素法; 水沙变异成因

中图分类号: P512.31

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2001) 04-0046-07

Study on Runoff and Sediment Process Variation in the Basins System of the Middle Reaches of the Yellow River

CHEN Hao¹, LU Zhong-chen²

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Ecological Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)

Abstract: River sediment yield is the reaction of various natural factors and human action factor comprehensive role in basin, wash with sedimentation of river course to change, is related closely. Since 1970's, the Yellow River mainstream discharge and sediment yield load to occurred variation, which discharge of water and sediment yield load decrease apparently, the new condition of the river course of lower reaches occurs dwindlingly and break to flow. The cause of runoff and sediment yield process variation is studied according to used analysis method of the geography environmental factor and data from the Hekou town to Longmen area of the middle reaches of the Yellow River. The result shows that runoff and sediment yield load of basins from the Hekou town to Longmen area of the middle reaches of the Yellow River is related closely with geography environmental factor, the climate fluctuation with human activities influence reduce runoff and sediment in average to 53.4%, 28.6% and 46.6% and 71.4% respectively from 1970's to 1980's.

Key words: the middle reaches of the Yellow River; basin system; environmental factor; cause of runoff and sediment variation

河流泥沙是流域内各种自然因素和人为因素综合作用的反应, 与河道本身冲淤变化密切相关。目前国际上广泛关注环境与发展的问題, Walling 等人根据长期产沙通量的增减变化研究了环境变化及地

表剥蚀过程中人类活动和气候变化的作用^[1]。Wolfgang 等人研究了世界范围不同气候带降水-地形-岩性因素影响流域产沙量变化的预报模型及侵蚀和产沙的地带性问题。人们也不断重视大流域降水、

* 收稿日期: 2001-08-25

国家重点基础研究发展规划项目(G1999043604); 地理所知识创新工程领域前沿项目(CX10G-A00-05-02); 国家自然科学基金委和水利部联合资助重大基金(59890200)。

作者简介: 陈浩(1954-), 副研究员。主要从事土壤侵蚀、流水地貌的研究。出版专(编)著二部, 发表论文 60 多篇。

径流和地貌演化的动力机制研究^[2~3]。

近几十年来,尤其是 80 年代以来,黄河干支流 水沙发生变异,水沙来量显著减少,下游河道发生萎 缩和断流及小水大灾的新情况。为了认识这些新情 况将会给黄河治理和水资源开发利用带来一系列新 问题,以及探讨气候和人类活动对水沙变异的影响, 我国开展了大量地针对黄河中游流域系统水沙变化 特征及成因的研究^[4~5]。

目前,黄河中游地区流域水沙变化的研究是以 60 年代以前降雨-水沙资料为标准,主要采用水文 法和水土保持法计算一定下垫面不同阶段的水沙变化 量,并与标准期相比确定降雨或人类活动影响量,估 算不同发展阶段气候变化和人类活动对黄河干支流 水沙变异的影响。由于黄河中游具有明显的自然地 带性分布特征,流域系统的水沙过程受到环境要素 的综合影响。为了反应黄河中游粗沙来源区近几十 年来水沙变化过程中自然(气候、降雨)、地理环境要 素)和人类活动的综合影响及空间变化特征,本文根 据黄河中游河口镇至龙门区间已控一级支流的测站 资料,采用地理环境要素法分析水沙变异及成因。

1 研究区概况与方法

黄河中游河口镇至龙门区间位于黄土高原半干 旱和半湿润地区,总面积约 11.16 万 km²。本区的自 然环境特点是:丘陵起伏、沟壑纵横,降水从西北向 东南逐渐增大,降雨主要集中在夏季,并常以暴雨的 方式为主,水土流失严重。

河龙区间两岸有 27 条支流汇入,其中,有水文 站控制的支流 23 条,面积约 8.84 万 km²。由于本区 20 世纪 60 年代以前水土保持治理程度较低,接近 于自然情况,将建站至 60 年代作为标准期。70 年代 以后年均降雨量逐年减少,水土保持治理程度逐年 提高。为了揭示气候变化与人类活动在流域水沙变 异中的作用,采用环境要素综合分析法研究 70、80 年代、1990~1993 年降雨量和流域下垫面发生改变 时的水沙变异特征及成因。

黄河中游河口镇至龙门区间标准期(建站至 60 年代)、非标准期自然条件及水沙变异模型,具有以 下特点:(1)在空间上,以黄河中游 23 个已控一级支 流测站所控制的流域为单元,其中,黄河干流左岸有 8 条,右岸有 15 条;(2)在时间上,降雨量、水沙量为 相应时段多年平均值;(3)模型的时间尺度为年。

2 地理环境要素对水沙变异特征的影响

影响流域产流产沙的环境因素主要可以归纳为 气候和流域下垫面两个方面。气候因子包括降雨及 降雨特性(雨量、雨强、时空分布等)的变化,流域下 垫面包括地质地貌特征、植被和人类活动等。流域水 沙的变化特征受地理环境因素的综合影响。

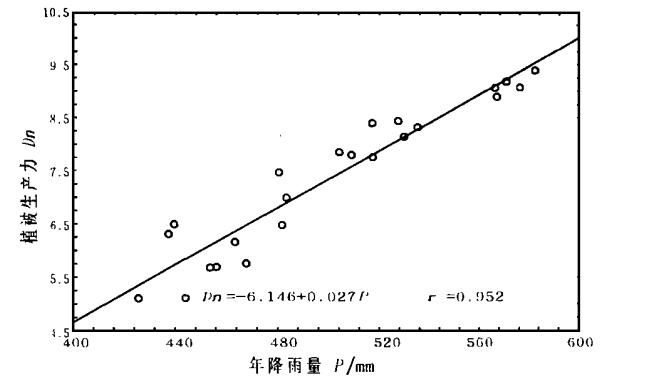


图 1 年降雨量(P)与自然植被生产力(Dn)的关系

2.1 地理环境要素间的关系及对流域产流产沙的影响

2.1.1 降雨量与自然植被分布及流域产流产沙的关系 黄河中游河口镇至龙门区间 23 个一级支流 位于半湿润和半干旱地区,在自然条件下,降雨量 的大小与下垫面的植被类型、盖度有着密切的关系, 反应了气候变化及与之相适应的植被结构和生长状 况。朱志辉等人根据生态学、气候学等方法估算了黄 土高原地区自然植被净初级生产力指标(Dn),利用 Dn 的大小作为黄土高原各县自然植被的空间分布 状况的分析指标。所谓净初级生产力 Dn 是指从总 初级生产力中扣除呼吸消耗后的剩余部分,而总初 级生产力是指生产者生物(主要指绿色植物)在单位 时间和单位面积上通过光合作用所转化的有机质重 量(包括地上和地下部分)¹。其结果显示:黄土高原 Dn 的空间分布与自然地带性具有较明显的一致性^[7]。根据文献[7]划定的黄河中游河龙区间地带性 界线,以一级支流出口站为准,黄河干流右岸为延长 以南、左岸以大宁以南为半湿润区;以北为半干旱 区。在 23 个一级支流中半湿润区占 6 条;半干旱区 占 17 条。

根据实测资料,黄河中游河龙区间 23 个一级支 流流域在标准期(建站至 60 年代)年降雨量(P)与 流域自然植物生产力指标(Dn)呈密切的线性正相 关(图 1)。南部半湿润区流域的降雨量和植物生产 力水平明显大于北部半干旱区(图 2)。由图 2 所示,

¹ 朱志辉等. 黄土高原自然植被分布的模式研究, 1990.

降雨量约在 530 mm 是黄河中游河龙区间半湿润区与半干旱区植物生产力发生转换的临界降雨量。

降雨是地表发生土壤侵蚀的基本条件, 研究表明, 在小的时空范围内 (如坡面、沟道小流域等) 侵蚀产沙量与降雨量的关系不大, 主要与降雨强度的变化密切相关, 但在较大的空间范围和长的时段内, 侵蚀量与降雨量的变化有关。顾弼生曾分析黄土高原不同地貌类型区降雨量与产沙的关系, 可以看出二者呈向上凸的不对称 S 型的曲线关系^[8]。这一结果与 Langbein 等人在美国半干旱地区的研究结果相近似, 可用侵蚀能量和植物密度的相互作用来解释^[9]。

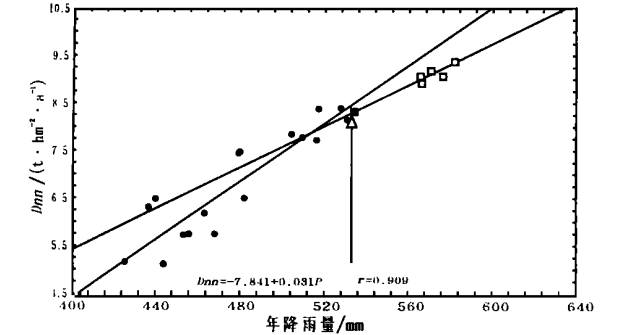


图 2 地带性年降雨量(P)与自然植被生产力(Dn)的关系

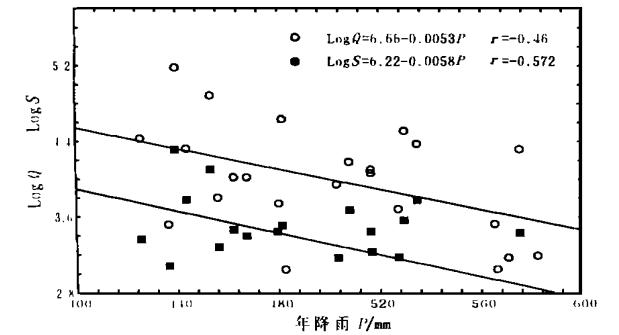


图 3 年降雨量 P 与流域径流量 Q 和输沙量 S 的关系

由图 3~4 可以看出, 河龙区间流域年均径流量、年均输沙量与年均降雨量和自然植被生产力呈明显下降的趋势, 侵蚀产沙强度随着降雨量及植被密度的增大而减小, 反应了地带性植被特征对地表降雨径流消能的作用。

2.1.2 年降雨量与地质地貌特征及流域产流产沙的关系 黄河干流从河口镇到龙门全长 725 km, 区间流域面积 111 586 km²。从宏观上看, 流域内地表物质组成可主要分成三类: 黄土、风沙土、基岩。黄土覆盖区约占河龙区间总面积的 62%; 风沙区约占 24%, 基岩出露区约占 14%^[5]。其中黄土丘陵沟壑

区和砒沙岩出露区是单位面积上侵蚀强度最大的地区。

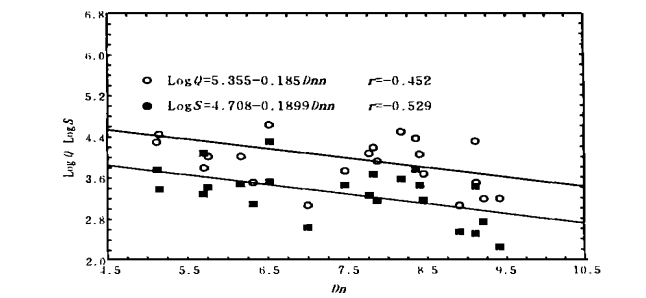


图 4 植被生产力 Dn 与流域径流量 Q 和输沙量 S 的关系

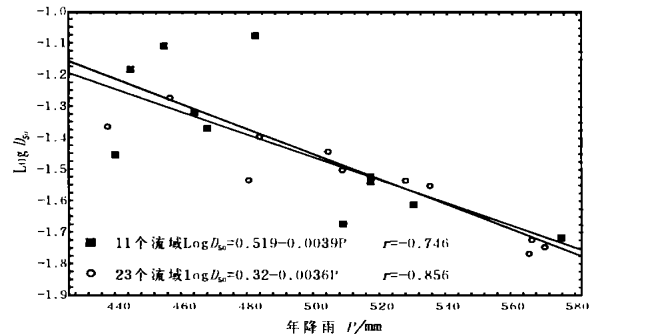


图 5 年降雨量(P)与泥沙中值粒径(D50)的关系

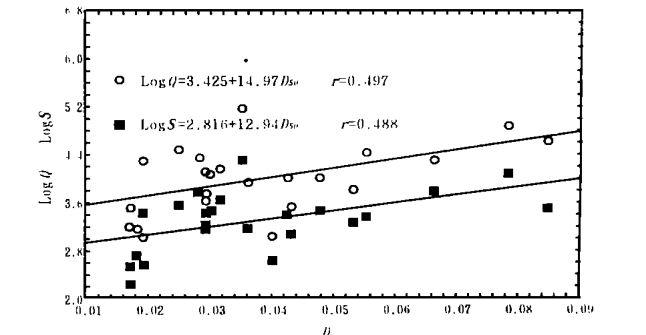


图 6 D50与流域年径流量 P 和年输沙量 S 的关系

黄河中游地区风成黄土的中值粒径沿西北风向从西北向东南呈现越来越细的分带特征。根据熊贵枢等人黄河中游河龙区间已控流域泥沙中值粒径 D₅₀与年均降雨量 P 的资料^④, 实测的 11 个一级支流测控站 D₅₀与降雨量 P 的关系达到 1% 密切相关水平, 在此基础上, 缺测流域由修正的等值线图插补得到, 可以看出二者关系呈较明显的负半对数线性关系 (图 5)。在降雨量大的半湿润地区, 由于地表植被较好, 土壤有机质较高, 细颗粒物成分多。反之,

④清华大学水电工程系, 拦减粗泥沙对黄沙道冲淤度变化的影响, 1995。

在降雨量较小的半干旱地区, 除受水蚀的影响外, 还遭受风蚀的作用。地表植被较差, 土壤有机质较低, 粗颗粒物成分多。因此, 在河龙区间年降雨量较小、植被较差、地表物质组成较粗的半干旱地区与半湿润地区相比, 流域产流产沙能力较强(图 6)。

河流输沙量是流域系统(从坡面至各级沟道)降雨径流分离、搬运、沉积综合作用的结果, 在现代侵蚀环境中流域系统的每个地貌部位都因各自所处的特定条件(坡度、侵蚀方式等), 在体现整个流域系统侵蚀、输移和沉积的主要功能方面起着不同的作用。一般上游(坡面、现代发育沟道)是以侵蚀为主, 下游

道密度随年均降雨量的增大有明显增大的趋势。反应出在黄河中游地区地质时期东南部的地表切割强度要大于西北部地区。

虽然, 河龙区间流域的河道密度在地质时期南部要大于北部, 但在现代气候和地貌条件下, 本区河流系统作为过水与输沙的通道, 仍可表征区间内不同自然地带性流域的侵蚀产沙能力, 由图 8 可以看出, 流域年径流量和年输沙量随河道密度的增大而减小。

2.1.3 流域面积与径流量和输沙量的关系 流域面积是区域地理环境要素中的地貌特征指标。由于流域面积直接代表了一个自然地理环境区间内某个河流汇水面积在平面上的分布范围, 一个流域的汇水面积实际涵盖了一个流域在特定自然地理环境区间内所处的空间位置和地理环境要素及三维空间地貌特征的综合情况, 因此, 流域面积不仅代表了许多水文因素, 而且其本身又密切地与其它形态参数有关。所以, 在国际上常被作为研究不同尺度流域产沙、泥沙输移模型的重要参数。从图 9 可以看出, 黄河中游地区流域面积与河流年均径流量(Q)和年均输沙量(S)呈十分密切的幂函数关系。这表明从长时段上看尽管在黄河中游粗沙多沙地区单位面积上侵蚀强度最大地区是北部的皇甫川、窟野河等砒沙岩出露区, 但由于黄土丘陵沟壑区占有比较大的区域空间及相当大的侵蚀强度, 因此, 在黄河中游河龙

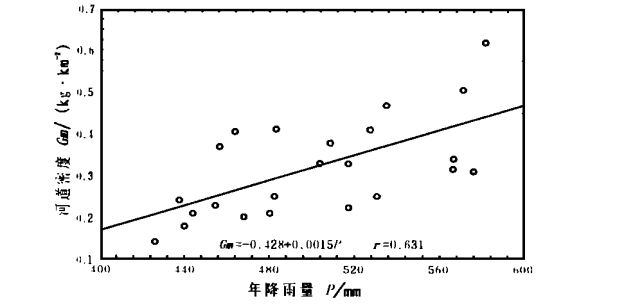
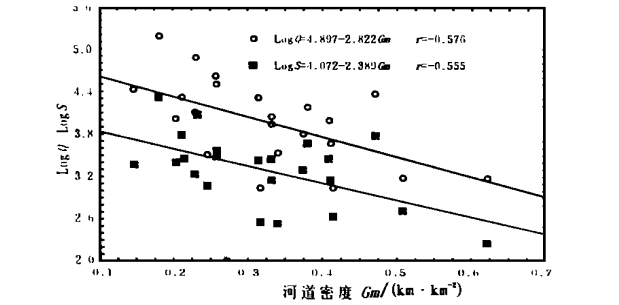


图 7 年降雨量(P)与河道密度(G_m)的关系
河道以输移和沉积为主。流域内沟谷密度(在大比



例尺时)、河道密度(在小比例尺时)反应了不同时间尺度上地表切割程度的变化。黄河中游的一级支流在 200 万年前就已形成。龚时 等人根据黄土高原大规模开展水土保持之前(60 年代)实测资料的分析结果, 认为在黄土丘陵沟壑区不论大中小流域多年平均泥沙输移比约等于 1。支流河道在年际内有冲淤变化, 而从长时段来看则基本是冲淤平衡的。所以, 黄河中游的各级支流都是输送泥沙的通道。我们根据 60 年代出版的 1:100 万地形图, 量计得到黄河中游 23 个一级支流流域的河道密度($G_m/\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$), 量计的河道长度下限为 5 km, 相当于 3~4 级支流(支沟)级别以上的河道。据陈永宗的研究, 黄土丘陵沟壑区河沟(支沟)发育年代约在 25 万年以前。由于比例尺的限制, 现代侵蚀沟(切沟、发育中的冲沟)在图上得不到反应。由图 7 所示, 23 个流域河

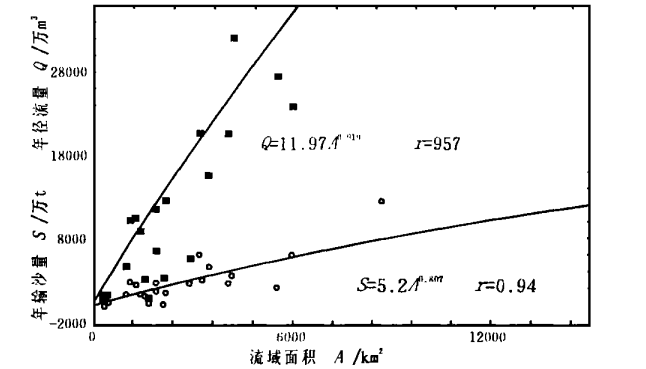
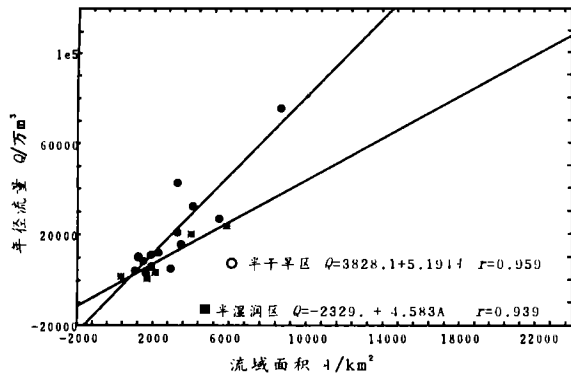
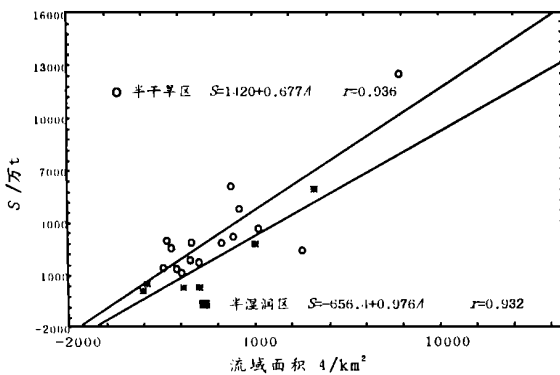


图 9 年输沙量(S)和年均径流量(Q)与流域面积(A)的关系

区间汇水面积越大流域的产流产沙的总量越大。由图(10~11)所示, 虽然, 半干旱区的降雨量要小于半湿润区, 但当流域面积相同时, 半干旱区的径流量、输沙量却大于半湿润区, 可见地表植被状况在流域产流产沙及蓄水保土中的作用。

2.1.4 地理环境要素对流域产流产沙及水沙变异的综合影响 以往有不少关于黄土高原地理环境要

图 10 地带性年径流量(Q)与流域面积(A)的关系图 11 地带性年输沙量(P)与流域面积(A)的关系

素对流域产沙综合影响的定量研究^[4], 但主要限于中小流域尺度, 而且缺乏地理环境要素对径流量影响的研究内容。上面我们分析了黄河中游河龙区间在相同的时间尺度内(标准期)环境要素之间的关系及环境要素对流域产流产沙的影响。由于影响流域产流产沙特征的决不是某一个因素的作用, 而是环境因子综合作用的结果。这是造成某些单一环境要素与流域产流产沙关系未达到十分密切程度的主要原因, 相关系数仅在 5% 水平上显著。虽然流域面积与流域产流产沙关系十分密切, 并涵盖了地理环境要素及水文、地貌特征的综合情况, 但是, 实际上流域面积仅代表的是流域空间汇水面积的大小, 并不能直接体现其它环境因子所起的作用。

为此, 我们将流域年降雨量(P)、植被生产力(Dn)、河道密度($G_m/\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)、泥沙中值粒径(D_{50}/mm)和流域面积(km^2)作为影响流域径流量($Q/\text{万 m}^3$)、输沙量($S/\text{万 t}$)变化的地理环境特征指标, 根据回归分析得到河龙区间标准期地理环境要素对流域产流产沙影响的预报模型:

根据熊贵枢等人仅 11 个一级支流悬移质泥沙中值粒径的实测资料得到的模型:

$$Q = -66486 + 3364Dn - 11210G_m + 596084D_{50} + 5.199A + 55.56P \quad r = 0.99 \quad n = 11 \quad (1)$$

$$S = 3947 - Dn + 5395G_m + 26749D_{50} + 0.665A + 0.249P \quad r = 0.97 \quad n = 11 \quad (1)$$

将 D_{50} 缺测的流域由修正的等值线图插补, 可以得到黄河中游 23 个一级支流流域环境要素与流域产流产沙的关系模型:

$$Q = -95063 + 2021Dn - 11205G_m + 682495D_{50} + 5.388A + 117.3P \quad r = 0.989 \quad n = 23 \quad (2)$$

$$S = -5133 - 234Dn + 2718G_m + 59398D_{50} + 0.719A + 9.166P \quad r = 0.955 \quad n = 23 \quad (2)$$

复相关系数表明, 流域综合环境要素与产流产沙关系是密切相关的。模型 (2) 的建立, 不仅反应了标准期流域水沙特征与地理环境要素间的变化关系, 同时有助于河龙区间未控区间流域产流产沙量的预报。

2.2 流域环境要素与水沙变异特征

70 年代以来, 由于黄河中游多沙粗沙区气候日趋干旱, 治理水平不断提高以及水库拦沙、灌溉引沙等人类活动原因, 致使年均径流量和年均输沙量呈减少趋势(表 2)。根据实测资料经过回归分析可以得到不同年代黄河中游流域一级支流流域系统在气候和人类活动影响下环境要素与产流产沙预报模型:

$$70 \text{ 年代: } Q_n = -62550 + 895P_z + 15842G_m + 687167d_{50} + 4.41A + 61.9P \quad r = 0.957$$

$$S_n = 0.0016P_z^{-6.93} G_m^{2.12} D_{50}^{-0.348} A^{1.295} P^{3.143} \quad r = 0.916$$

$$80 \text{ 年代: } Q_n = -46021 - 1393.7P_z + 8896G_m + 438684d_{50} + 3.58A + 84.6P \quad r = 0.983 \quad (3)$$

$$S_n = -9762 - 1222.4P_z + 1189G_m + 69330d_{50} + 196185A + 35.4P \quad r = 0.902$$

$$1990 \sim 1993 \text{ 年: } Q_n = 25487 + 474.4P_z + 4674.3G_m + 254800d_{50} + 3.1A - 102110K \quad r = 0.971$$

$$S_n = 23746 - 1163.4P_z + 11476G_m - 137176d_{50} + 0.173A - 45046K \quad r = 0.972$$

式中: P_z ——不同年代降雨量变化下自然植被生产力($Dn/\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); $P_z = \alpha \times Dn$; α ——雨量变异系数, 非标准期雨量/标准期雨量; K ——(年降雨量 - 汛期降雨量)/年降雨量; d_{50} ——不同年代实测中值粒径, 缺测的流域由修正的等值线图插补得到; Q_n, S_n ——非标准期年径流量和年输沙量; 其它符号同前。

由各年代在降雨和人类活动共同影响下, 流域年径流量和年输沙量与标准期相比, 70 年代、80 年

代、1990~1993 年间, 年均降雨量、年均径流量和年均输沙量均有所减少(表 1)。

表 1 黄河中游河龙区间不同年代流域降雨、水沙变化特征值

年代	年均降雨量 /mm	年均径流量万 /m ³	年均输沙量 /万 t
建站至 1969	501.1	21613.8	3620.0
1970~1979	454.9	17508.8	2657.26
1980~1989	440.1	13395.5	1326.3
1990~1993	437.3	20035.8	2317.8

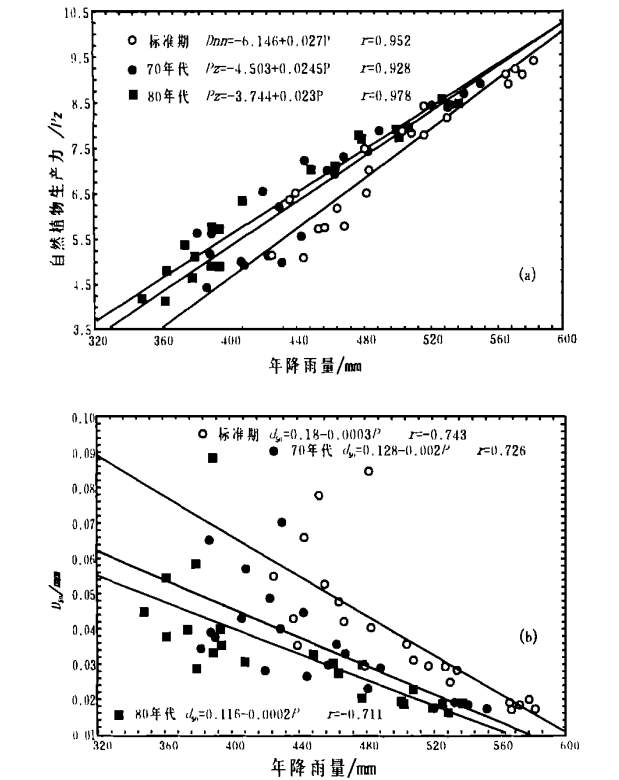


图 12 不同年代年降雨量 P 与 P_z 、 d_{50} 的关系

3 水沙变异原因分析

在自然的条件下, 现代水文测验观测期的时间尺度与地质时期以来宏观地貌演化过程相比是十分短暂的, 而且当地形图比例尺较小时, 坡面及沟道小流域所发生的局部变化在图上反应不出来。因此, 在较大的流域空间内, 在选定的地理环境要素中(式 1~2), 当不同时期降雨量发生改变时, 主要影响地表植被和地表物质组成的变化, 流域面积、河道密度可视为常量。水沙变异原因分析的关键是确定在自然条件下当降雨量发生改变时, 流域环境要素的相应变化及相应降雨期自然条件下的水沙变化的特征值。某个非标准时期的降雨及相应自然条件下水沙变异特征值确定之后, 与非标准期实测水沙量之差就是人类活动的影响量。由于植被、地表物质粒度组

成是典型自然地带性因子, 与降雨量的变化密切相关。当降雨量减小时, 植被变小, D_n 值与土壤有机质含量减小, D_{50} 增大; 反之亦然。与标准期相比, 70、80 年代、1990~1993 年年雨量变化时的自然植被生产力 P_z 、泥沙中值粒径 D_{50} 值的变化, 可由标准期的 D_n 和 D_{50} 乘以降雨变化系数(α 、 β 得到(见式 5)。由图 12 可以看出, 黄河中游河龙区间各年代年降雨量(P /mm)与降雨发生变化时的自然植被生产力($\alpha \times D_n$)和 d_{50} (βD_{50})密切相关。

当不同时期年降雨量和与之相对应的流域环境要素确定之后, 黄河中游河龙区间非标准期自然条件下流域产流产沙量由下式得到:

$$\begin{aligned} Q_z &= Q(1 + a_1) \\ S_z &= S(1 + a_2) \end{aligned} \tag{4}$$

式中: Q_z , S_z ——分别为非标准期自然条件下流域年径流量和年输沙量; Q , S ——分别为非标准期流域年径流量和年输沙量; a_1 、 a_2 ——非标准期自然条件下水沙转换系数, 由文献(3~4)水文法得到的各年代流域人类活动水沙增减量(%)。

式(4)的含义是指非标准期的流域产流产沙量是气候和人类活动综合作用的结果, 将各年代实测水沙量加上由于人类活动影响的水沙还原量, 就可得到非标准期某个年代年均降雨量变化时的自然条件下水沙特征值。

经回归分析可得到 70、80 年代当年均降雨量发生变化时, 自然条件下流域环境与水沙变异预报模型:

70 年代:

$$Q_z = -90878 + 8075\alpha D_n - 7952G_m + 894242\beta D_{50} + 4.93A + 7.64P \quad r = 0.974 \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \text{Log } S_z &= 12.88 + 1.439\text{Log} \alpha D_n + 0.36\text{Log} G_m + 0.056\text{Log} \beta D_{50} + 0.75\text{Log} A - 0.509\text{Log} P \\ r &= 0.922 \end{aligned} \tag{5}$$

80 年代:

$$Q_z = -81059 + 1946\alpha D_n + 1578G_m + 564806\beta D_{50} + 4.558A + 95.08P \quad r = 0.986 \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \text{Log } S_z &= -6.54 - 1.896\text{Log} \alpha D_n + 0.718\text{Log} G_m + 0.889\text{Log} \beta D_{50} + 0.947A + 3.587\text{Log} P \\ r &= 0.888 \end{aligned} \tag{6}$$

式中: β —标准期年降雨量/标准期非年降雨量; 其它符号同前。

在非标准期自然条件下的流域环境要素与水沙关系确定之后, 水沙变异的原因可由下式得到:

$$\begin{aligned} W &= Q - Q_n \\ W_s &= S - S_n \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_z - Q_n \\ \Delta S &= S_z - S_n \end{aligned} \tag{8}$$

式中: ΔQ 、 ΔS ——分别为人类活动影响年径流量和年输沙量; W 、 W_s ——分别为计算的降雨和人类活动综合影响的年径流量和年输沙量, 标准期与非标准期模型计算水沙之差; $\Delta Q/W$ 、 $\Delta S/W_s$ ——为人

类活动影响水沙占减少总量%; $(W - \Delta Q)/W$ 、 $(W_s - \Delta S)/W_s$ 为降雨影响年径流量(%) 和年输沙量(%)。

将不同时期年均降雨量发生变化时, 对应的黄河中游河龙区间 23 个一级支流流域环境要素及水沙变异特征值代入上述关系式, 得到与标准期相比(建站至 60 年代) 70、80 年代气候与人类活动影响的水沙变异成因(表 2)。

表 2 非标准期降雨变化和人类活动对河龙区间流域水沙变化的影响

名称			降雨影响				人类活动影响			
	W	W_s	ΔQ	%	ΔS	%	ΔQ	%	ΔS	%
70 年代	4105. 04	1248. 7	2807. 1	68. 38	642. 2	51. 43	1297. 9	31. 62	606. 5	48. 56
80 年代	8218. 32	2293. 4	3151. 2	38. 35	109. 7	5. 78	5067. 1	61. 66	2184. 2	95. 22

由表 2 所示, 70 年代后, 降雨减水减沙作用不断减小, 随着水土保持措施的提高, 人类活动减水减沙所占比重不断增大。可以看出, 70 年代治理程度不高, 水沙减少主要受降雨减少的影响, 80 年代黄土高原水库坝系工程治理措施减水减沙明显, 人类

活动影响在流域减水减沙中起主要作用, 减水减沙分别达到 61. 66% 和 95. 22%。70 年代与 80 年代气候波动和人类活动影响的平均减水减沙作用分别为 53. 4%、28. 6% 和 46. 6%、71. 4%。

参考文献:

[1] Walling, D. E. and Webb, B. W. Erosion and sediment: a global overview, Erosion and sediment yield: Global and Regional Perspectives[C]. Proceeding of the Exeter Symposium, July 1996). IAHS Publ. 1996, 236. 3 ~ 19.

[2] Wolfgang, L. etc. A global modeling of the climatic, morphological, and lithological control of river sediment discharges to the oceans, Erosion and sediment yield: Global and Regional Perspectives[C]. (Proceeding of the Exeter Symposium, July 1996). IAHS Publ. 1996, 236. 21 ~ 28.

[3] Karen, P. Etc. Spatial variations in the magnitude of the 1993 floods, Raccoon River basin[M]. Iowa: Geomorphology, 1994. 169 ~ 182.

[4] 尹国康. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因分析[J]. 地理学报, 1998(2): 174 ~ 183.

[5] 张胜利, 等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 南京: 黄河水利出版社, 1998.

[6] 尹国康. 流域地貌系统[M]. 南京: 南京大学出版社, 1991. 117 ~ 128.

[7] 1 500000 黄土高原地区 资料与环境遥感调查系列图编委会. 黄土高原地区资料与环境遥感调查数据集[Z]. 1991. 8 ~ 9.

[8] 顾弼生. 关于黄土高原植树造林的认识[Z]. 黄河水资源研究所, 1990.

[9] Langbein, W. B. and Schumm S. A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation[J]. Trans. Amer. Geophys. Union. 1958, 3910, 76 ~ 84.