

文章编号: 1000-0585(2002)02-0171-08

黄河中游流域地貌形态对流域产沙量的影响

卢金发

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 在黄河中游地区, 选择了 50 多个面积约 500~2500 平方公里的水文测站流域, 分别代表 6 种不同自然地理类型, 在流域沟壑密度、沟间地坡度小于 15° 面积百分比等地貌形态指标量计的基础上, 进行了流域产沙量与地貌形态指标相关分析。结果表明, 对于不同类型流域, 流域产沙量随流域地貌的变化遵循不同的响应规律, 而且视流域其它下垫面环境条件的均一程度, 其相关程度和响应速率各不相同。受地面物质、植被、地貌发育阶段等流域其它下垫面环境条件的制约, 除沟壑密度外, 流域产沙量与流域地貌形态的关系都没有人们以前所预期的好。

关键词: 黄河中游; 地貌形态; 产沙量

中图分类号: P931.1; P333.4 **文献标识码:** A

流域地貌形态既是现代地表侵蚀切割状况的指征, 又是影响流域侵蚀产沙的重要因素之一, 因而从 Horton 1942 年的经典研究开始^[1], 流域地貌形态及其对流域水文泥沙的影响, 一直是国内外流域系统研究的重要内容之一^[2~10]。

在自然界, 地貌形态特征严格地受流域气候、岩性、植被、地貌发育阶段等流域特性的控制。黄河中游地区, 由于黄土物质松散, 极易侵蚀, 地貌发育过程十分迅速, 在世界上具有独特性, 因而一直被认为是研究流域产沙与流域地貌关系的理想地区。然而, 由于其南北纵跨不同自然地带, 同时受地貌格局的控制, 无论地带性或地域性分异都十分明显, 因而位于不同地带和地域的流域, 其流域环境特性复杂多样。因此, 黄河中游地区流域产沙量与流域地貌之间究竟遵循什么样的变化规律, 始终是人们关注的科学问题之一。本文在黄河中游不同自然地理类型区, 选择了 50 多个面积约 500~2500 km² 里的水文测站流域或流域区间, 试图在这方面作一初步探讨。

1 研究方法

首先, 利用遥感方法, 结合野外实地调查, 进行流域基本土地单元的解译, 进而采集其岩性、植被、地貌形态等环境特性数据, 在数据库的支持下, 按图斑面积加权平均, 从而得到全流域的平均值。

收稿日期: 2001-07-02; 修订日期: 2001-12-20

基金项目: 中国科学院地理科学与资源研究所创新项目 (CXIO-G-A00-05-02); 国家自然科学基金委员会和水利部联合资助重大项目 (59890200)

作者简介: 卢金发 (1944), 男, 上海市人, 研究员。长期从事流域侵蚀产沙及其所引起土地退化和荒漠化研究与制图, 曾主编黄土高原 1:50 万侵蚀图, 参与主编黄土高原资源与环境遥感系列图, 发表论文 30 余篇, 合作专著 4 本。E-mail: lujf@mx.cei.gov.cn

在遥感解译和数据采集的基础上，依据流域所处的地理位置及黄土物质在流域中所占面积的比例，结合流域的植被和地貌发育特点，将研究流域定性地划分出 6 种不同的类型流域：黄土丘陵流域，黄土丘陵+ 基岩山地流域，黄土塬流域，基岩山地+ 黄土丘陵流域和基岩山地流域。此外，皇甫川、孤山川、佳芦河、无定河等流域，位于半干旱与干旱区，鄂尔多斯高原与黄土丘陵的过渡地带，气候干旱，多暴雨和大风，植被稀疏，沙黄土、披砂岩分布广泛，风、水两相侵蚀都十分强烈，是本地区高产沙集中区，因而单独划分出一类。

本研究的流域输沙资料主要采集自黄河流域水文年鉴，在各流域或流域区间历年输沙资料采集的基础上，求其多年平均输沙模数值，用以代表各流域多年平均产沙量。流域输沙资料的系列都是自建站时起，至少有连续 10 年以上记录。资料系列最长的达 32 年。

地貌形态指标数据是在不同地貌类型划分的基础上，利用 1: 5 万地形图取样方量计而得。样方的图上面积为 $8 \times 10\text{cm}^2$ （实际面积 20km^2 ）。为了使所量得的数据具有较好的代表性，每一种地貌类型至少量计 1 个样方，随着图斑面积的增大，样方数目也相应地增加。为了更好地反映现代侵蚀特征，其中沟谷密度的量计精度要求为：凡图上沟长大于 3mm 的沟壑，包括坡面上等高线呈锐角弯曲及地形图上用棕线表示的小冲沟，均量计在内^[11]。

2 流域产沙量与流域沟壑密度

沟壑密度 (Dd) 是单位流域面积中沟壑的总长度。沟壑密度既是流域侵蚀切割程度的重要指征，又是影响流域汇流和沟道泥沙输移过程的重要因素。在相近的流域地貌条件下，沟壑密度越大，地面切割越破碎，沟间地地面坡度越陡峻，侵蚀越强烈。因而，沟壑密度对流域产沙量起着十分重要的影响。

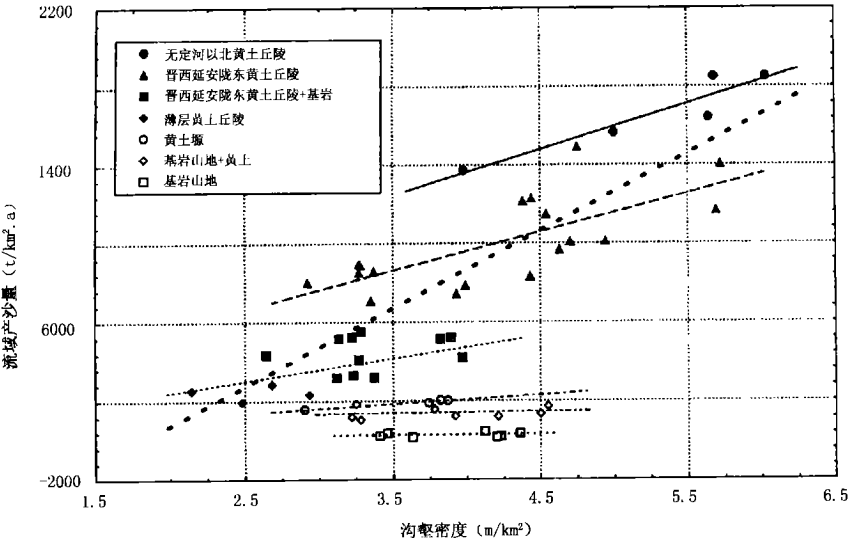


图 1 黄河中游不同类型流域产沙量与沟壑密度的关系

Fig. 1 Relation between sediment yield and drainage density for different types of river basins in the Middle Yellow River

图 1 是黄河中游地区不同自然地理类型流域产沙量与沟壑密度的关系。由图可见, 取决于不同的流域类型, 图中的点子可以明显地分成两组, 一组是黄土丘陵沟壑流域, 如粗虚线所示; 另一组是非黄土丘陵沟壑流域, 各自遵循着不同的变化规律。

其中, 黄土丘陵沟壑流域曲线的斜率远远大于非黄土丘陵沟壑流域, 清楚地说明在相同的沟壑密度条件下, 前者的产沙量远远大于后者, 而且随着流域沟壑密度的增大, 前者产沙量的增加速率大大高于后者。

如果将黄土丘陵沟壑流域进一步划分为无定河及其以北黄土丘陵流域, 陕北、晋西、陇东黄土丘陵流域及陕北、晋西、陇东黄土丘陵+ 基岩山地流域, 而将非黄土丘陵沟壑流域划分为黄土塬流域、黄土丘陵+ 基岩山地流域和基岩山地流域, 由图 1 可见, 对于每一组流域, 流域产沙量与沟壑密度之间就都有着相当好的正相关关系。然而, 不同类型流域在图中各自所处的位置明显不同, 由上而下依次为无定河及其以北黄土丘陵流域, 陕北、晋西、陇东黄土丘陵流域和陕北、晋西、陇东黄土丘陵+ 基岩山地流域, 以及黄土塬流域、基岩山地+ 黄土丘陵流域和基岩山地流域, 而且不同类型流域曲线的斜率和截距也有所不同。

此外, 受流域下垫面环境特性的控制, 不同类型流域点子的分散程度也有所不同。复合流域, 如黄土丘陵+ 基岩山地流域, 其点子的分散程度与较均一的无定河及其以北黄土丘陵流域相比, 明显偏大。

流域产沙量随沟壑密度变化的上述特点说明, 流域下垫面环境特性对流域产沙量与沟壑密度关系起着重要的控制作用。在同样的沟壑密度条件下, 流域的类型不同, 产沙量截然不同, 而且随着沟壑密度增加, 由于流域产沙量的增加速率不同, 这一差异越明显, 如黄土丘陵沟壑流域产沙量的增加速率远远大于土石山地流域和基岩山地流域。因此, 在研究流域产沙量与流域沟壑密度的关系时, 有必要首先区分不同类型的流域; 在进行流域产沙量预报时, 对于不同类型流域, 所采用的沟壑密度参数应有所不同。否则, 不仅不能客观地揭示其规律, 有时甚至会导致错误的结论。

3 流域产沙量与沟间地坡度小于 15° 面积的关系

黄河中游地区的流域泥沙重要来自两个方面, 沟谷地的线状侵蚀和沟间地的面状侵蚀。虽然, 就单位面积侵蚀产沙强度而言, 沟谷侵蚀强度往往大于沟间地侵蚀。但是, 由于沟间地的面积较大, 因而其总侵蚀产沙量在流域产沙量中占有重要的位置, 尤其是在沟间地面积大于沟谷地的情况下。

在黄河中游地区, 坡耕地面蚀是沟间地主要侵蚀方式, 尤其是黄土丘陵区。坡度对坡耕地面蚀起着重要的影响。在其它条件相近的情况下, 坡度越大, 侵蚀越强烈。一般地说, 当坡度超过 15° 以后, 侵蚀急剧增加。据调查, 黄土丘陵区 $> 15^{\circ}$ 坡耕地面积占 50% 以上, 近年来新开垦坡耕地也多数是 $> 15^{\circ}$ 的坡面^[12]。同时, 考虑到黄土高原的实际情况, 黄土物质较其它类型岩性更易被侵蚀。因此, 本文选择沟间地坡度小于 15° 面积占流域总面积的百分比 (S_i), 作为反映沟间地侵蚀产沙强度的地貌形态指标。 S_i 越大, 沟间地地形越平缓, 沟间地侵蚀越弱; 反之, 沟间地地形越陡峻, 沟间地侵蚀越强烈。

黄河中游地区流域产沙量与 S_i 之间关系, 如图 2 所示。图 2 表明, 除陇东地区黄土+ 基岩山地流域外, 不同类型流域产沙量与 S_i 之间都有着明显的负相关关系, 但是相关

程度远不如沟壑密度好。这主要是受流域其它下垫面环境特性控制的结果。例如，同为无定河以北的纳林川流域（图 2 中 1）和小理河流域（图 2 中 2），尽管两者的 Si 值相近，但前者为中生代砂页岩和泥岩（俗称披砂岩和羊肝石）主要分布区，物质极易侵蚀切割，加之暴雨强度大，风力强盛，沟蚀、重力侵蚀和风蚀都十分强烈，因而流域产沙强度大，成为黄河中游地区最强烈的侵蚀产沙中心；而後者的上游部分，沟谷下切到红色砂岩地层，流域内分布着大范围黄土 地和覆沙黄土斜梁丘陵，侵蚀切割较弱，因而流域产沙量明显减少。类似的现象可见于孤山川（图 2 中 3）与佳芦河（图 2 中 4）之间，后者第三纪红土地层广泛出露，河源区深入鄂尔多斯高原和沙区，因而尽管其 Si 值与前者接近，但侵蚀产沙量明显小于前者。

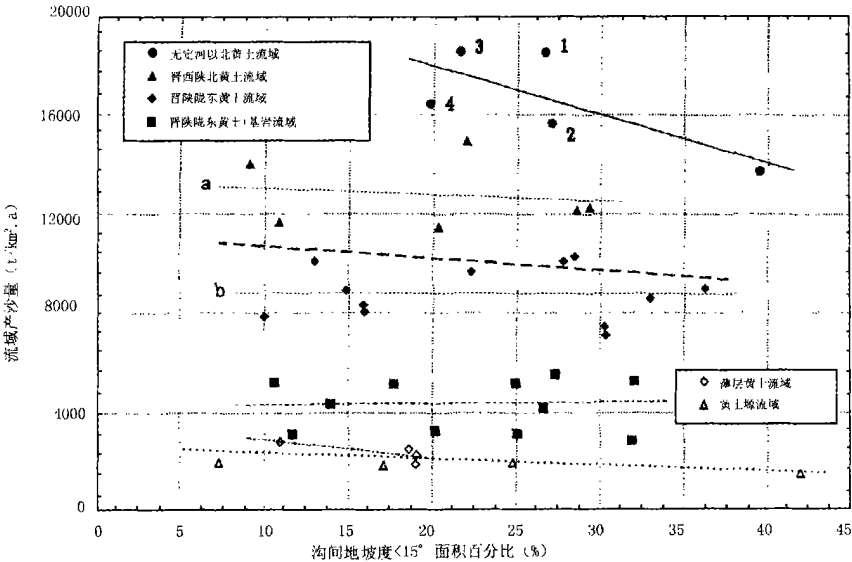


图 2 黄河中游地区不同类型流域产沙量与沟间地坡度小于 15° 面积百分比的关系

Fig. 2 Relation between sediment yield and percentage of inter-gully area with slope steepness less than 15° for different types of river basins in the Middle Yellow River

同样的理由可以解释陇东黄土丘陵+基岩山地流域产沙量与 Si 之间关系的异常。例如，位于曲线左端的牛头河及葫芦河上游流域，前者基岩山地所占比例较大，后者以薄层黄土覆盖的山地丘陵为主，黄土厚度较小，现代沟蚀不活跃；而位于曲线右端的茹河、黑河、达溪河等流域，地貌形态以黄土丘陵沟壑或黄土残塬沟壑为主，黄土厚度较大，现代沟壑侵蚀较强烈，因而导致随着 Si 值的增大流域总产沙量反而增加的反相关关系。

上述不同类型流域产沙量与 Si 之间关系的差异，进一步说明了流域下垫面环境特性对流域产沙量与流域地貌关系的控制作用。只有在流域地面物质、植被等其它下垫面环境特性比较均一的情况下，流域地貌才会对流域产沙量产生重要影响。图 2 中的线 a 和 b，是按流域的地面物质（黄土与基岩出露比例）和植被覆盖将晋西、陕北和陇东黄土丘陵流域进一步划分为二组。显然，分别就每一组流域而言，其相关关系都明显改善。

4 流域产沙量与流域平均坡降

在一定的气候条件下，流域系统泥沙产生与搬运取决于流域的能量。20 世纪 60 年代，美国著名河流地貌学家 S. A. Schumm 提出了流域平均坡降指标^[13,14]。流域平均坡降 (Rf) 定义为沿主河方向的流域长度与流域最高点和最低点的高差之比，并认为在其他条件相近的情况下，流域平均坡度决定着流域沿坡方向的重力分量大小和流域势能的大小，因而流域平均坡降越大，流域径流侵蚀剥蚀越强烈。此外，流域平均坡降还决定流域洪峰的陡峻度。由于泥沙主要由洪峰携带，所以洪峰流量越大，携带的泥沙越多。因此，流域的坡降一直被认为是影响流域侵蚀产沙的重要因子，并为世界各国学者广泛引用。

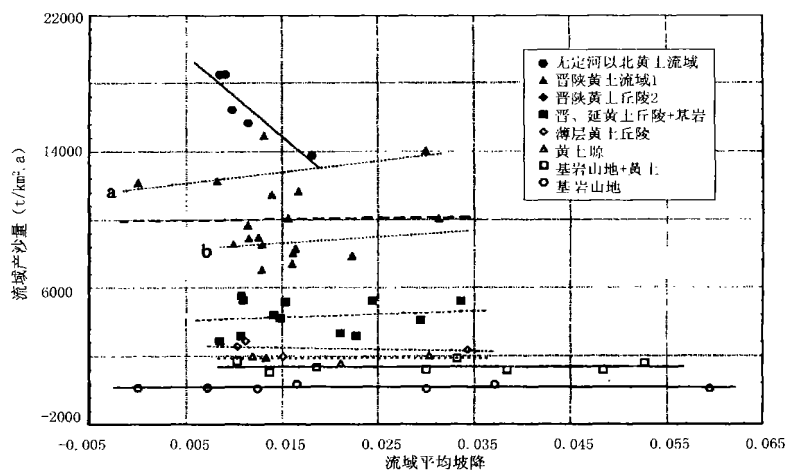


图 3 黄河中游不同类型流域产沙量与流域平均坡降的关系

Fig. 3 Relation between sediment yield and relief ratio for different types of river basins in the Middle Yellow River

图 3 是黄河中游地区不同类型流域产沙量与流域平均坡降的关系。图 3 表明，黄河中游地区流域产沙量与流域平均坡降的关系不如人们想象的好。尽管对于大多数流域，随着流域平均坡降的增大，流域产沙量呈现出增加的趋势，但不明显，有的甚至出现相反的变化趋势。例如，陇东地区的洪河流域和黑河流域，黄土覆盖广泛，植被覆盖差，地表侵蚀切割强烈；相反，蒲河和柔远川流域以及渭河上游的秦祁河流域和散渡河流域，分布有大范围原生黄土地貌类型，流域的大部分地区现代沟蚀不活跃，加之植被覆盖较好，因而尽管后者的流域平均坡降较大，但流域产沙量反而小。

此外，从流域产沙量与地面裂度 (D_s)、流域圆度 (C) 和地面崎岖度 $Dd \cdot H$ 的关系来看，一般认为，地面裂度 (指流域中沟谷地面积占流域总面积的百分比) 越大，沟谷地所占面积越大，沟谷侵蚀越强烈，因而流域侵蚀产沙就越强；反之，流域侵蚀产沙则越弱。流域圆度 (C) 定义为流域的长度与宽度之比，在一定程度上影响着流域的径流过程线特征；而切割深度 (H) 和沟壑密度的乘积反映一个流域的地面崎岖度，因而流域圆度越大，地形越崎岖，流域产沙量也就越大。然而，对黄河中游各流域资料的点绘结果表

明, 流域产沙量与上述三项指标的关系都不好, 而且相互之间不存在单一的相关关系。

5 流域产沙量与流域地貌特征的复合分析

表 1 是黄河中游不同类型流域产沙量与各地貌形态指标的相关关系表。由表可见, 除沟壑密度外, 流域产沙量与其它地貌形态指标的关系都不好, 其相关系数远远小于流域产沙量与沟壑密度之间关系, 有的甚至出现反相关关系。

表 1 黄河中游不同类型流域产沙量与地貌形态的相关关系

Tab 1 Correlation between sediment yield and basin morphological characteristics for different types of river basins in the Middle Yellow River

流域类型	Dd	Si	Rf	Ds	Dd•H	C
无定河以北黄土丘陵流域	0.94	- 0.56	- 0.90	- 0.85	- 0.67	- 0.14
晋陕陇东黄土丘陵流域	0.70	- 0.21	0.05	0.18	0.29	- 0.32
晋陕陇东黄土丘陵+ 基岩山地流域	0.53	0.12	0.07	- 0.35	0.57	- 0.14
基岩山地+ 黄土丘陵流域	0.53	0.02	0.60	- 0.02		

表 2 黄河中游不同类型流域产沙量与地貌形态指标的多元回归方程

Tab 2 Multiple correlation between sediment yield and basin morphological characteristics for different types of river basins in the Middle Yellow River

流域类型	回归方程	相关系数	显著性水平
无定河以北黄土丘陵流域	$Q_s = -3224.26 + 1.25Dd + 0.40Si$	0.97	0.0121
晋陕陇东黄土丘陵流域	$Q_s = 1845.08 + 0.76Dd + 0.14Si$	0.71	0.0075
晋陕陇东黄土丘陵+ 基岩山地流域	$Q_s = 442.87 + 0.68Dd \cdot H + 0.35Si$	0.65	0.0354
基岩山地+ 黄土丘陵流域	$Q_s = 391.47 + 0.59Dd \cdot H$	0.59	0.0704

表 3 流域产沙量与地貌形态指标逐步回归过程中相关系数的变化

Tab 3 Correlation coefficient of Step Multiple Regression between sediment yield and basin morphological characteristics for different types of river basins in the Middle Yellow River

流域类型	1 个变量		2 个变量	
	相关系数	显著性水平	相关系数	显著性水平
无定河以北黄土丘陵流域	0.94	0.0121	0.97	0.1480
晋陕陇东黄土丘陵流域	0.70	0.0020	0.71	0.5294
晋陕陇东黄土丘陵+ 基岩山地流域	0.57	0.0294	0.65	0.1595
基岩山地+ 黄土丘陵流域	0.59	0.0704		

表 1 还显示, 不同类型流域影响流域产沙量的主导地貌形态指标有所不同。对于黄土丘陵流域, 影响流域产沙量的最重要的地貌形态指标是沟壑密度, 其次是沟间地小坡度于 15°面积百分比; 而对于黄土丘陵+ 基岩山地流域和基岩山地+ 黄土丘陵流域, 影响流域产沙量的主要地貌形态指标是流域的地面崎岖度, 其中既包含了沟壑密度的作用, 又反映了地表切割深度的影响。这是因为黄土丘陵流域其地面主要为厚层黄土覆盖, 地形起伏均匀, 物质松散, 极易侵蚀, 无论沟蚀和面蚀都十分强烈, 其中沟蚀强度远远大于面蚀; 而

随着流域内基岩山地及基岩出露比例的增加，流域地形起伏更趋崎岖，这不仅增加流域的侵蚀强度，也提高了流域的泥沙输移能力，因而对流域产沙的影响相应增大。

基于上述研究，对不同类型流域进行了流域产沙量与流域地貌形态的多元回归分析，结果列于表 2。由表可见，回归方程的相关程度和显著性水平都较充分，但随着流域内基岩山地及基岩出露比例的增加，相关程度和显著性水平都明显降低，清楚地反映了均一流域地貌形态对流域产沙量的影响明显大于非均一流域。

对不同地貌形态指标的逐步回归分析结果表明，第二个因子进入方程对相关系数的改善均不明显，尤其是黄土丘陵流域；对于基岩山地+黄土丘陵流域，甚至只有 $D \cdot H$ 一个因子才能进入方程（表 3）。这也说明，流域沟壑密度对流域产沙量的影响是首位的。

综上所述，对于不同类型流域，影响流域产沙量的主导地貌形态指标可能不同。其中，沟壑密度始终是影响流域产沙量的重要指标。流域产沙量与沟壑密度关系之所以明显优于其它地貌形态指标，在很大程度上是由于沟壑密度本身严格地受流域降雨、地面物质和植被等其它下垫面环境特性的控制。只有在流域下垫面环境特性比较均一的情况下，流域地貌形态才会对流域产沙量产生显著影响。

参考文献：

[1] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basin, hydrological approach to quantitative morphology. Geol. Soc. Amer. Bull., 1954, 56, . 286~ 295.

[2] Gregory K J, Walling D B. Drainage Basin Form and Process: a Geomorphological Approach. Edward Arnold, 1973. 272~ 273.

[3] Schumm S A. The Fluvial System. John Wiley & Sons, 1977. 70~ 71.

[4] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987. 37~ 45.

[5] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理. 北京: 科学出版社, 1988. 157~ 169.

[6] 齐矗华, 甘枝茂, 等. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究. 西安: 陕西人民教育出版社, 1991. 126~ 227.

[7] 尹国康. 流域地貌系统. 南京: 南京大学出版社, 1991. 116~ 127.

[8] 陈永宗. 黄土高原土壤侵蚀规律研究工作回顾. 地理研究, 1987, 6(1): 68~ 74.

[9] 张丽萍. 流域地貌演化不同阶段沟壑密度与切割深度关系研究. 地理研究, 1998, 17(3): 273~ 279.

[10] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展. 地理研究, 2001, 20(3): 274~ 281.

[11] 卢金发. 侵蚀黄土高原地区侵蚀强度与侵蚀类型遥感调查与制图. 黄土高原地区资源与环境遥感调查和系列制图研究. 北京: 地震出版社, 1992.

[12] 唐克丽主编. 黄河流域侵蚀与径流泥沙变化. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 236~ 239.

[13] Schumm S A. Evolution of drainage systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. Bulletin of Geological Society of America, 1956, 67: . 597~ 647.

[14] Hadley B P, Schumm S A. Sediment Source and Drainage Basin Characteristics in Upper Cheyenne River Basin. U. S. Geological Survey, Water- supply paper 1531- B, 1961. 169~ 177.

Effect of basin morphology on sediment yield in the middle reaches of the Yellow River

LU Jin-fa

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: More than 50 river basins with gauging stations were chosen for an analysis on relationships between sediment yield and basin morphological characteristics in the middle reaches of the Yellow River. They have drainage areas ranging from 500 to 2500 km² each and can be categorized into 6 types of basins with different physiographical backgrounds: the loess hilly basins and highly weathered mudstone & siltstone basins north to Wuding River, loess hilly basins in north Shaanxi, west Shanxi and east Gansu provinces, loess hill + bedrock mountain basins, bedrock mountain + loess hilly basins, loess *yuan* basins and bedrock mountain basins. A set of data on river basin morphology were obtained by using morphometric method, including drainage density, percentage of inter-gully area with slope steepness less than 15°, relief ratio, basin roughness, basin circularity etc. Different relationships between sediment yield and basin morphological characteristics were obtained for different types of river basins by plotting and multi-variate analyses. The results showed that the best correlation exists between sediment yield and drainage density, but the relations between sediment yield and the other morphological characteristics are not as good as expected due to heavy disturbance of surface material, vegetation coverage, morphological development from various types of river basins. If taking the basin types as parameters, different fitness, intercept and slope of correlation lines were observed between sediment yield and drainage density for different types of river basins, showing a control of other basin characteristics, such as surface material, vegetation, landform development etc., on the relationships of sediment yield and basin morphological characteristics. The intercepts and slopes of lines tend to increase from loess hilly basins through loess hill + bedrock mountain basins and bedrock mountain + loess hilly basins to bedrock mountain basins subsequently. It indicates that basin morphology is an important factor affecting sediment yield of a river basin but can exert substantial influence on sediment yield of the river basin only when the basin characteristics are more homogeneous. Therefore a classification of river basin types is necessary before a correlation between sediment yield and basin morphological characteristics is established.

Key words: the Middle Yellow River; basin morphology; sediment yields