

文章编号: 0375-5444 (2000) 02-0228-07

# 中国黄土分布区多沙曲流发育规律

师长兴, 章 典

(香港大学地理与地质系, 香港)

**摘要:** 依据中国黄土分布区多沙曲流的水沙资料、河床平面形态和河床大断面测量资料分析认为: 多沙河流来水变率影响河床断面形态和曲流发育; 由于窄深的河槽是高含沙水流输沙的必要条件和结果, 因此随着含沙量的增加, 多沙河流河床断面形态首先出现变窄深的趋势, 随着含沙量的进一步增加, 水流造床能力增大, 河槽会向宽浅方向调整; 一定的河床冲淤强度有利于曲流的发育, 随着含沙量的增加, 多沙河流河床曲率存在先增加后减小的规律。

**关键词:** 黄土高原; 高含沙水流; 弯曲河床; 河槽形态; 河型

**中图分类号:** P931.1 **文献标识码:** A

高含沙水流具有与少沙水流不同的物理、动力和输沙特性。通过实验和实际观测资料分析, 对于高含沙水流这些特性已作过比较深入的研究<sup>[1,2]</sup>。并且, 很长时期以来, 利用高含沙水流对解决黄河下游淤积的可能性做过比较广泛的分析研究, 目前在此问题上还存在不同的观点。近年来, 高含沙水流在地貌发育上的作用也引起了人们的注意, 特别是对高含沙曲流河床作了比较深入的研究<sup>[3,4]</sup>。

概括的说, 由于输沙力学性质的变化, 高含沙水流具有更大的输沙能力, 在一定的比降和水流条件下, 河流输沙需要通过减小比降以达到减小单位距离的能量消耗和输沙平衡, 河流就可能向曲流发展。黄河中游黄土高原绝大部分高含沙河流就发育了典型的曲流。研究高含沙水流变化对曲流发育的影响不仅可丰富河流地貌研究内容, 还可为今后更有效地进行河道治理和利用高含沙水流提供理论基础。本文以黄土高原部分宽谷河床为例, 对多沙曲流发育规律作初步研究。

## 1 资料来源

主要采用黄土高原上 13 条曲流以及含沙量较高的我国东北辽河支流羊肠子河的水沙资料, 这些河流处于宽谷或平原段的河床和有水文站河床大断面测量资料。其中, 水沙资料采用的是这些河流上水文站 1976 年至 1980 年逐日流量和含沙量, 考虑到高含沙水流较大的造床能力, 5 年的水沙系列的代表性应该能反映这些河流的水沙特征。河流的平面形态特征直接从地形图上量取, 地形图比例尺为 1:5 万或 1:10 万。河床断面资料也是采用

收稿日期: 1999-07-16; 修订日期: 1999-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49671011) [ **Foundation Item:** the National Natural Science Foundation of China, No. 49671011 ]

作者简介: 师长兴 (1963-) 男, 河北正定人, 副研究员, E-mail: chixshi@hkust.hk.hkights reserved. <http://www.klu.ac.cn/>

1976 年至 1980 年期间水文站大断面测量资料, 断面测量一般每年 2 期, 分别在汛前和汛后, 有的断面在汛期还测 1 次。

### 2 多沙曲流的水沙特征

从北到南散布在黄土高原上的 13 条多沙曲流是黄河和其支流渭河的一些主要支流。包括羊肠子河, 这些河流平均流量界于  $1.30 \sim 165 \text{ m}^3/\text{s}$ , 平均含沙量界于  $19.0 \sim 306 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。由各条河流 5 年间的日均流量和含沙量观测值可得到各条河流流量和含沙量的变化指标。其中日均流量变差系数  $C_{vq}$  界于  $0.60 \sim 6.04$  之间。日均输沙率变差系数  $C_{vs}$  界于  $3.96 \sim 16.69$ 。这些河流的平均含沙量与日均流量变差系数间呈现很好的正相关关系 (图 1)。这是黄土高原流域产沙的一般规律: 产沙主要集中在汛期几场暴雨洪水中, 洪水越大流量变差越大, 产沙也就越多。

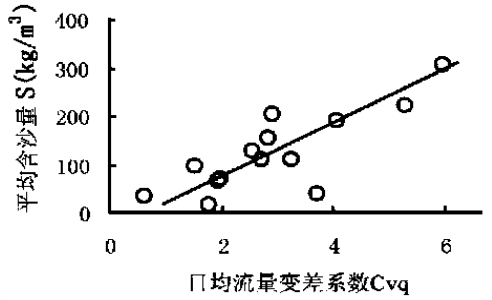


图 1 多沙河流平均含沙量 (S) 与日均流量变差系数 ( $C_{vq}$ ) 间关系

Fig. 1 Relation between coefficient of variation of mean daily discharge (ratio of mean square root of variation to the mean  $C_{vq}$ ) and mean sediment concentration (S) of hyperconcentrated flow dominated rivers

从黄河及其支流不同含沙量条件下流速、含沙量沿水深分布情况和不淤流量的变化情况来, 含沙量  $200 \sim 300 \text{ kg}/\text{m}^3$  是水流泥沙输移性质发生变化的过渡区, 含沙量  $300 \text{ kg}/\text{m}^3$  以上的水流可作为高含沙水流对待<sup>[5]</sup>。不过, 高含沙水流只有其流态处于紊流区才能顺利输送<sup>[1]</sup>。含沙量过高, 水流处于层流状态, 泥沙可能发生大量淤积 (图 2)。上述各支流不同含沙量的实测流速绝大多数比紊流和层流转化的临界流速要大, 即都处于紊流流态。图中临界流速是在水流挟沙组成  $d_{50} = 0.036 \text{ mm}$  和  $d < 0.01 \text{ mm}$  占 21% 条件下的临界流速<sup>[6]</sup>。况且, 很高的水流含沙量主要出现在黄河以西黄土高原的中北部, 而这些支流的来沙组成, 比计算上述临界流速时的水流挟沙组成粗。根据高含沙水流宾汉极限剪切力与水流挟沙组

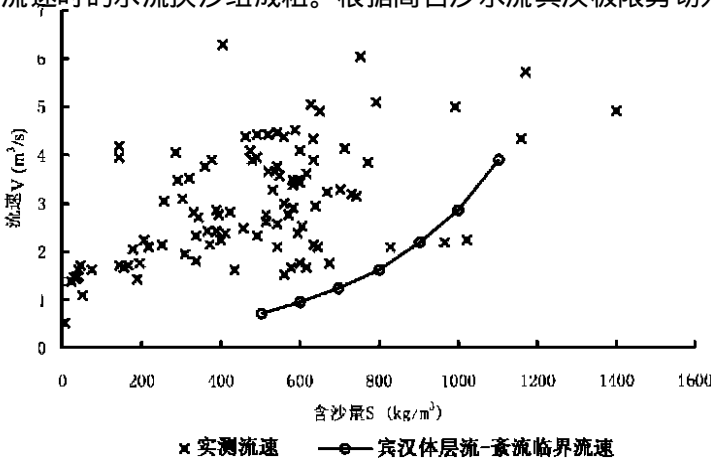


图 2 不同含沙量下的实测流速与紊流和层流转化的临界流速对比

Fig. 2 Comparison between measured velocity of flow with various sediment concentration

成的关系和层紊流临界流速计算公式<sup>[6,7]</sup>，水流挟沙组成粗，临界流速就大。因此，本文所选的河流中出现的高含沙水流基本上都能顺利输送。

除汾河和羊肠子河没有日均含沙量大于 300 kg/m<sup>3</sup> 的高含沙水流，其余河流的平均日均含沙量大于 300 kg/m<sup>3</sup> 的天数只有 2.0%，但其输沙量占总输沙量的 45.8% 以上，最高达 90.2%，平均 66.7%。

### 3 多沙曲流水沙条件对曲流发育的影响

#### 3.1 河床断面形态与水沙条件的关系

河床断面形态是河流适应来水来沙条件的一个重要调节要素，是河流发育状态的一个主要标志。一般来说，窄深断面的河床比宽浅的断面有更大的输沙能力。但是在自然界，从少沙河流到多沙河流，河床断面并不是变得窄深，而是变得更宽浅，少沙河流往往形成窄深的曲流，多沙河流则发育为宽浅的游荡河型。象黄河这样不断淤积的河流，无论是在几十年还是在年内的时间尺度上，也没有形成窄深的输沙平衡横剖面调整的趋向<sup>[8]</sup>。其中原因是多方面的，例如黄河来水来沙变率较大，不同的流量和含沙量适应不同的断面形态，往往在小水期淤槽，大水期淤滩刷槽，年内河槽淤积大于冲刷，持续的淤积使河槽保持宽浅的形态。其次，除河槽形态外，河床质组成、床面形态以及纵比降也是河流适应来水来沙条件的调节要素。通过增大纵比降和减小河槽糙率，而不必调整河槽形态，也可达到平衡输沙。如果河流纵比降大，河流侵蚀力就大，松散的河流堆积物构成的河岸容易被侵蚀，从而形成宽浅的河床断面。

从多沙河流向高含沙河流过渡，水流的挟沙能力逐渐增加。不过，高含沙水流稳定输沙必须有一个窄深的断面，如果断面宽浅，高含沙水流就会在水浅的地方首先变的不稳定，淤积大量泥沙，最后形成窄深的河槽，满足高含沙水流稳定输沙。利用这些河流瞬时水沙实测资料，点绘流量大于 500 m<sup>3</sup>/s 时含沙量和河床断面形态的关系 (图 3)，显示出河槽形态的转折点大约在含沙量为 400 kg/m<sup>3</sup> 左右。

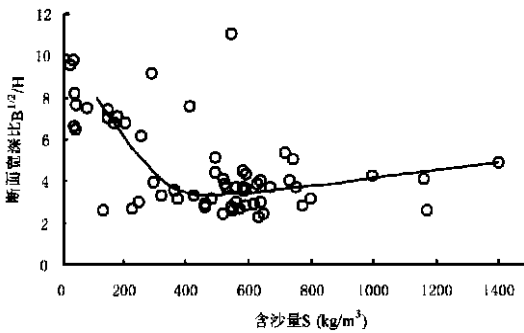


图 3 流量大于 500 m<sup>3</sup>/s 时含沙量(S)与断面形态(B<sup>1/2</sup>/H)关系

Fig. 3 Relations between index of channel cross sectional geometry (ratio of square root of width to depth B<sup>1/2</sup>/H) and sediment concentration of discharge over 500 m<sup>3</sup>/s

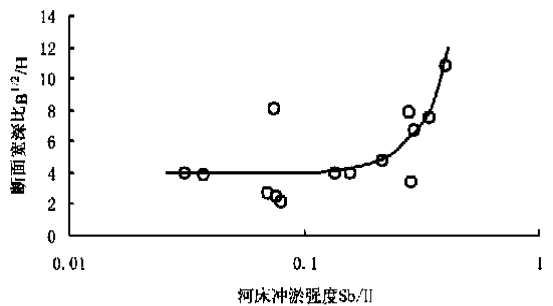


图 4 河床冲淤强度(S<sub>b</sub>/H)与断面形态(B<sup>1/2</sup>/H)关系

Fig. 4 Relations between intensity of sedimentation in channel (ratio of mean square deviation of channel bed height to channel depth S<sub>b</sub>/H) and index of channel cross sectional geometry (ratio of square root of width to depth B<sup>1/2</sup>/H)

至于随着含沙量的进一步增加, 河槽又会逐渐变得宽浅, 应该是高含沙水流随着含沙量增加输沙能力增加, 河岸遭受更强烈侵蚀, 加宽河槽, 维持输沙平衡的结果。随含沙量的增加河流的冲淤强度先减小, 然后又逐渐增大。河床冲淤强度越大河床也越宽浅(图4), 因此高含沙水流随着含沙量增加, 河床断面又会逐渐变得宽浅。

### 3.2 曲流曲率与水沙条件的关系

因为有利于泥沙输移, 高含沙水流导致曲流的发生。同时, 可以设想在高含沙范畴, 由于水沙条件的不同曲流发育的程度也会有所变化。曲率是曲流发育程度的另一个重要指标。

**3.2.1 曲率与来水变化的关系** 一定流量条件下塑造的河床平面形态往往不适应其它流量的来水。因此, 来水流量变幅大、变化频繁对于曲流的发育不利。流量变幅大是游荡型河床形成的一个有利条件<sup>[9]</sup>。这一规律在多沙河流同样表现的比较明显, 即日均流量变差系数与曲率之间呈负相关(图5)。可见, 不同流量不仅需要不同的河床断面形态, 同时也有各自适应的平面形态。

**3.2.2 含沙量与曲率的关系** 河流含沙量与河床曲率间不是单值关系。其它条件相同, 随着水流含沙量的增加, 从少沙水流向多沙水流, 水流的挟沙会从不饱和或饱和变的超饱和, 挟沙超饱和水流在河槽中造成持续淤积显然不利于曲流河床的维持。河床曲率因此逐渐变小。随着水流含沙量的进一步增加, 挟沙水流物理性质逐渐发生变化, 水流挟沙能力逐渐增加, 水流挟沙又变得不饱和, 河床又会通过减小比降来维持水流输沙平衡。河床曲率因此逐渐增大(图6)。但是随着水流含沙量的进一步增加, 河床曲率又转而减小。其中原因在下节进行剖析。

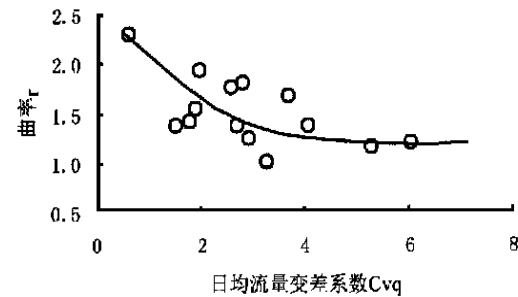


图5 日均流量变差系数( $C_{vq}$ )与曲率( $r$ )关系

Fig. 5 Relations between channel sinuosity and coefficient of variation of mean daily discharge (ratio of mean square root of variation to the mean  $C_{vq}$ )

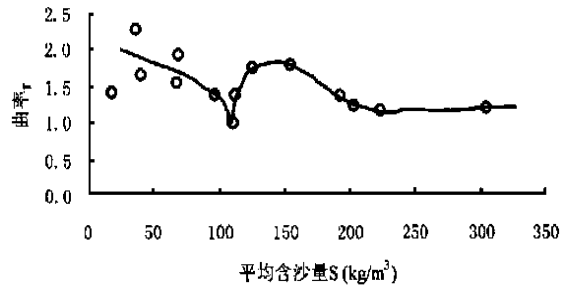


图6 河流平均含沙量与河床曲率间关系

Fig. 6 Relation between the channel sinuosity and mean sediment concentration

**3.2.3 多沙河流含沙量影响曲率的机理** 对于少沙河流来说, 随着河谷比降和流量的增大, 河型从弯曲河型转变成顺直或游荡河型<sup>[10]</sup>。Schumm 用来沙只有河床质和流量定常的河型演变试验揭示出随着河谷比降的增大, 河流从顺直转变成流路弯曲的顺直河型再演变到游荡河型<sup>[11]</sup>。可见, 无论是自然河流从弯曲河型到顺直或游荡河型的转变, 还是试验河流从流路顺直到流路弯曲的顺直河型再到游荡的河型, 水流能耗都是逐渐增加, 水流对河床的侵蚀力逐渐增强, 冲淤强度增加。另一方面, 河床组成物质抗冲性的不同也同样影响到河型的变化。如我国北方一些河流出口后的河型变化历程是从分汊游荡到弯曲又变成比较顺直。其原因之一是沿程河床边界条件的变化。近山口边界物质疏松, 抗冲性小, 发

育分叉游荡河型；向下游粘土成分逐渐增加，河床抗冲性相应增强，弯曲河型出现；随着粘土成分的进一步增加，河床抗冲性进一步增加，河岸不易受到侵蚀时，河床就变成微弯顺直型<sup>[12]</sup>。

上述情况说明河床冲淤的强弱决定于河流侵蚀力和边界抗冲力的对比，而河床冲淤的强弱在很大程度上决定着河床最终呈现的河型。冲淤过强过弱都不利于曲流的发育。过弱不能造成凹岸的冲刷和凸岸的淤积，因此曲流不能形成。过强，弯道环流不稳定，凹岸的冲刷位置变化大，凸岸边滩不能持续增长，弯道不能维持。

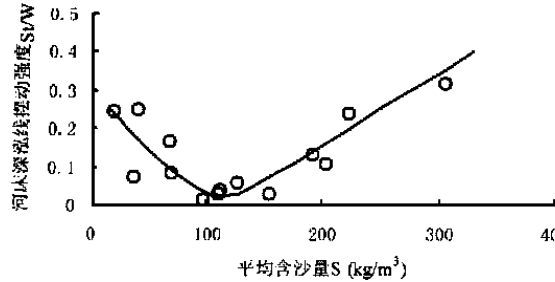


图 7 河床深泓线摆动强度与河流平均含沙量之间的关系

Fig. 7 Relations between the intensity of thalweg migration ( $S_i/W$ ) and mean sediment concentration ( $S$ )

多沙河流河床深泓线的摆动强度同河床冲淤强度一样与多沙河流含沙量间呈双值关系，随含沙量的增加，深泓线的摆动强度先减小，然后又逐渐增大（图 7）。其中，河流深泓线的摆动强度以本文所选多沙河流水文站断面逐测次断面深泓点位置均方差比河床宽度表示。所以，高含沙河流随着含沙量进一步增加，河床曲率会逐渐减小。

由此可见，在高含沙范围，随含沙量的增加，由于水流输沙能力增加，水流造床能力增大，河床发生变形的强度增大，与少沙河流类似，河床变得相对宽浅，曲流发育程度也降低。

对比图 6 和图 7 可见，河床曲率和河床深泓线摆动强度变化的转折点都发生在平均含沙量略大于  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$  时，说明在  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$  平均含沙量附近，河流具有最弱的冲淤强度，最慢的深泓线摆动，因此河流曲流发育也就很困难。在这一含沙量范围，河流中高含沙水流在造床中的作用还不能算主角。随着含沙量的进一步增加，高含沙水流出现几率增加，在高含沙水流输沙特性和维持输沙平衡的要求下，河床断面形态出现了由减小转向增大的过程。转折点发生在多年平均含沙量约  $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，瞬时含沙量  $400 \text{ kg}/\text{m}^3$  左右。同时，河流曲率则发生由增大再减小的过程。河床断面形态与河床曲率是河床适应来水来沙条件的 2 个独立的调节因素，二者的调整即相互依存又相互独立，它们调节的机理有所不同，因此二要素在调整中可能是不同步的。

## 4 结论

通过以上对我国黄土分布地区多沙曲流发育特征的分析得到如下一些认识：

(1) 与少沙河流一致，多沙河流来水集中，变率小，断面形态相对窄深，也有利于曲流发育；相反，河床断面相对宽浅，河床曲率也较小。

(2) 随着含沙量的增加，少沙河流河床断面形态一般发生从窄深变宽浅的趋势。由于窄深的河槽是高含沙水流输沙的必要条件和结果，因此随着含沙量的增加，多沙河流河床断面形态首先出现变窄深的趋势，但是随着含沙量的进一步增加，水流输沙耗能减小，水流挟沙不饱和，水流造床能力增大，河槽会向宽浅方向调整。瞬时水文实测资料显示出这

一转折发生在含沙量  $400 \text{ kg/m}^3$  左右。

(3) 河床冲淤强度过大或过小都不利于曲流的发育。少沙河流随着比降和流量的增加, 河流单位距离能耗增加, 造床能力增大, 河床曲率发生先增后减的现象。在多沙河流, 由于高含沙水流具有随含沙量增大或高含沙水流比例的增加, 输沙耗能减小, 造床能力增加, 河床变形增大的趋势, 河床曲率也存在先增加后减小的规律。由于曲率与断面形态调节的机理有所不同, 因此二要素在调整中可能是不同步的。

## 参考文献 (References)

- [1] Q ien Ning. Movement of Hyperconcentrated Flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989. 1~206. (In Chinese) [钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 1~206.]
- [2] Q i Pu, Zhao Wenlin, Yang Meiqing. Movement Laws and Application Prospects of Hyperconcentrated Flow in Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 1993. 1~341. (In Chinese) [齐璞, 赵文林, 杨美卿. 黄河高含沙水流运动规律及应用前景[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 1~341.]
- [3] Xu Jiongxin. Meanders caused by hyperconcentrated water flow: an example from the loess plateau, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(1): 40~48. (In Chinese) [许炯心. 高含沙型曲流河床形成机理的初步研究[J]. 地理学报, 1992, 47(1): 40~48.]
- [4] Xu Jiongxin. Response of channel pattern to spatial changes in sediment concentration and threshold phenomenon [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(6): 548~553. (In Chinese) [许炯心. 河型对含沙量空间变异的响应及其临界现象[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(6): 548~553.]
- [5] Q i Pu, Li Shiyang, Liu Yuelan et al. Changes in Flow and Sediment Load of the Yellow River and Measures of Sediment Accumulation Alleviation in the Lower Yellow River [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1997. 42~45. (In Chinese) [齐璞, 李世滢, 刘月兰等. 黄河水沙变化与下游河道减淤措施[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 42~45.]
- [6] Q i Pu, Han Qiaolan. Resistance characteristics of the hyperconcentrated flow in the Yellow River and its calculation [J]. *Huanghe River*, 1991(3): 16~22. (In Chinese) [齐璞, 韩巧兰. 黄河高含沙水流的阻力特性与计算[J]. 人民黄河, 1991(3): 16~22.]
- [7] Fei Xiangjun. A model for calculating viscosity of sediment carrying flow in the middle and lower Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 1991(2): 1~13. (In Chinese) [费祥俊. 黄河中下游含沙水流粘度的计算模型[J]. 泥沙研究, 1991(2): 1~13.]
- [8] Shi Changxing, Xu Jiongxin. A study on the regularity of adjustment of channel cross-sections and direction of channel training of the lower Yellow River [J]. *Geographical Research*, 1997, 16(2): 57~64. (In Chinese) [师长兴, 许炯心. 黄河下游河槽横断面调整规律及治理方式探讨[J]. 地理研究, 1997, 16(2): 57~64.]
- [9] Q ien Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. Study of Channel Change [M]. Beijing: Science Press, 1987. 195~196. (In Chinese) [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 195~196.]
- [10] Leopold L B, Wolman M G. River channel patterns: braided, meandering and straight [J]. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper No. 282 - B*, 1957. 39~85.
- [11] Schumm S A, Khan H R. Experimental study of channel patterns [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1972, 83(6): 1755~1770.
- [12] Shen Yuchang, Gong Guoyuan. An Outline of Fluvial Geomorphology [M]. Beijing: Science Press, 1986. 177~180. (In Chinese) [沈玉昌, 龚国元. 河流地貌学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 177~180.]

## Evolution of Meanders with Hyperconcentrated Flow in the Loess Areas

SHI Chang-xing, ZHANG Dian

(*Dept. of Geography and Geology, Hongkong University, Hongkong*)

**Abstract:** In the loess areas, especially on the Loess Plateau in China, most of the rivers discharging hyperconcentrated flows have developed a typical meandering pattern. Based on the data of thirteen meandering rivers on the Loess Plateau and the Yangchangzi River, the properties of water flow and sediment load of these rivers, the effects of variations of flow and sediment load on channel cross sectional geometry and sinuosity, are analyzed in the paper. The data include the daily flow and sediment load and the geometry of channel cross sections recorded from 1976 to 1980 as well as the plan of channel measured on the landscape maps with a scale of 1:50 000 or 1:100 000. From these data we extract parameters reflecting the characteristics of flow and sediment load, channel geometry, and sedimentation in channel and channel adjustment thereupon.

Follows are the results of analyses. 1) As the rivers with low sediment concentration, the hyperconcentrated flow dominated rivers have a narrower and more sinuous channel if the fluctuation in water discharge is low. 2) With the increase of sediment concentration, the channel cross sectional geometry is usually widened in the case of the rivers with low sediment concentration. Since a narrow channel is one of the requisite conditions as well as the result of sediment transport of hyperconcentrated flows, the channels become narrow initially as the sediment concentration of hyperconcentrated flow increases. However, if the sediment concentration is larger than a certain value, the energy consumption of sediment transport is lowered down thenceforth with the increase of sediment concentration, and the flow becomes unsaturated and has a higher channel making capacity, so the channel is widened. Revealed by the instantaneous hydrological records, the transition takes place at the sediment concentration of about  $400 \text{ kg/m}^3$ . 3) Both excessive and low intensity of sedimentation in the channel is unfavorable to development of meanders. In the case of the rivers with a low sediment concentration, the energy consumption per unit distance increases with the enlargement of slope and discharge and so the capacity of channel making of the flows; therefore, the channel sinuosity increases initially and decreases later. Regarding the hyperconcentrated flow dominated rivers, the energy consumption of sediment transport is lowered and the channel making capacity as well as magnitude of sedimentation are enlarged accompanying with the increase of sediment concentration, so an initial increase of channel sinuosity is followed by a decrease also. Due to the difference of the mechanism of channel sinuosity adjustment from that of cross section changes, the existence of the asynchronism in the adjustment of the two factors is reasonable.

**Key words:** Loess plateau, Hyperconcentrated flow, Meandering channel, Channel geometry, Channel pattern