

603793

356

1152

关于地上悬河地质理论问题

关于结合水动力学问题

张 忠 胤 著

地 质 出 版 社

6
52

关于地上悬河地质理论问题

关于枯水床动力学问题

李 志 远 著



地质出版社

地质出版社

地质出版社

关于地上悬河地质理论问题

关于结合水动力学问题

张 忠 胤 著

内 容 简 介

本书由两篇论文组成。它们均系原北京地质学院张忠胤副教授生前所著。“关于地上悬河地质理论问题”一文，以黄河下游段为例，论述了地上悬河形成的基本条件、发育规律及其地质地貌特征，并提出了治理地上悬河的根本方法。“关于结合水动力学问题”一文，论述了水文地质学和工程地质学的基本理论问题之一——结合水运动的基本规律，提出了粘性土中渗流带、含水带、毛细带等概念，并对它们的宽度、边界提出了理论计算及图解方法。

本书可供工程地质、水文地质、第四纪地质、水利水电、建筑工程等工作及有关专业师生、科研人员参考。

关于地上悬河地质理论问题

关于结合水动力学问题

张忠胤 著

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张: $3^{5/16}$ · 字数: 84,000

1980年10月北京第一版·1980年10月北京第一次印刷

印数1—2,127册·定价0.70元

统一书号: 15038·新589

代 序

张忠胤同志(1922—1973)曾任北京地质学院副教授、水文地质及工程地质教研室主任。六十年代初期,他曾几度在黄河下游地区从事工程地质工作,搜集了大量地质资料。“关于地上悬河地质理论问题”和“关于结合水动力学问题”等论文就是在此基础上写成的。1964年和1965年,作者曾先后在我系学术讨论会及北京市地质年会上宣讲过上述论文的要点。但是,当时未能全文出版。之后,部分论文手稿散失。

1973年2月,作者不幸病逝。工程地质教研室搜集了作者亲属和教研室同志们所保存的遗稿,并于去年初开始整理作者遗著,现选择其中两篇比较完整的论文出版,除了作必要的技术核对外,基本按目前保存的作者手稿付印。

“关于地上悬河地质理论问题”一文,着重阐述了我国黄河下游是如何发展成为一条闻名于世的地上悬河的。作者用泥沙运移理论计算结果和实际观测资料论证了形成地上悬河的三个基本条件,指出了黄河下游段“敏感土粒”和“敏感流速”的数值界限。正是这个本质原因使地上悬河河床具有易变的性状,从而在广阔的平原中发育着地上悬河的三大地质地貌单元,即“蛇曲带”、“自然堤”、“泛滥洼地”。作者生动、细致地描述了它们的岩性结构和形态特征,并揭示了它们内在发展的相互关系,提出了地上悬河发展的基本规律,即由大改道使“蛇曲带”和“泛滥洼地”相互转化的规律。在这个理论基础上,作者指出了治河害、兴水利和改造地上悬河为地面河的设想和措施。

“关于结合水动力学问题”一文,作者阐述了经典水文地质学中尚未深入研究的范畴——粘性土孔隙中结合水运动的规律,并对结合水的渗透定律表达式进行了理论推导和微观分析。作者认为粘性土中含水带及其渗流特点不同于潜水及承压水含水层,

并认为粘性土的毛细带和毛细现象是结合水运动的形式，指出不应混淆粘性土中毛细带高度和弯液面力这两个概念，并用理论公式表示了它们之间的关系。作者推荐用计算法和作图法来求解复杂地质结构条件下含水带和毛细带高度及其边界形状。“结合水动力学”是水文地质学和工程地质学基本理论之一，对于探讨粘性土地区地面沉降、地基沉陷、地下水浸没及土壤中水份运移等问题的机理将提供独特的理论依据和研究方法。

以上两篇论文，观点清晰明确，论证严谨，连系实际，虽系十多年前所写，今天仍不失其应有的价值。

张忠胤同志的一生，勤奋好学，博学多才。他不但有坚实的数学、力学基础知识，而且通晓地质领域中许多学科的理论。更可贵的是，他十分重视深入实际，认真观察野外地质现象和注重实验研究。他善于从宏观的地质现象中发现问题，从微观的分析入手，揭示其中本质的原因，从而将两者巧妙地结合起来，提出独到的见解。他所阐明的粘性土中结合水运动的规律就是突出一例。这项出色的研究成果不但奠定了结合水动力学的理论基础，同时也开辟了这一领域的研究方向。他在第四纪地质学、地下水动力学、土质学、土力学、动力工程地质学及专门工程地质学等领域留下了许多宝贵著作，作出了重要贡献。

这两篇论文是作者最后的著作。他在生前最后几年遭受“四人帮”迫害的情况下，仍坚持从事研究活动，不断地修改和补充其著作；甚至在他生命垂危时刻，他仍不忘怀改造祖国山河的伟大事业。

张忠胤同志也是一位好教师。他指导年轻教员、研究生、大学生时，总是循循善诱，毫无保留地传授自己的学识。他的教学态度如同治学精神一样，认真严肃，一丝不苟，值得我们很好学习。

现出版这两篇遗作以志纪念。深信著作中阐明的观点和方法必将在今后水文地质及工程地质实践中不断丰富和发展。

王大纯

一九七九年

目 录

代序.....	III
一、关于地上悬河地质理论问题.....	1
(一) 形成地上悬河的基本条件.....	2
(二) 地上悬河河床的易变性.....	12
(三) 地上悬河地区的三大地质、地貌单元的特征.....	19
1. 蛇曲带的地质地貌特征.....	19
2. 自然堤的地质地貌特征.....	26
3. 泛滥洼地的地质地貌特征.....	28
(四) 地上悬河的基本规律.....	31
1. 地上悬河的“大改道”.....	31
2. 沉积物的空间分布规律.....	33
结束语.....	36
参考文献.....	39
二、关于结合水动力学问题.....	40
(一) 结合水的基本运动规律问题.....	40
1. 土中水的类型问题.....	40
2. 不同类型水的基本运动规律.....	42
3. 结合水基本运动规律的微观分析.....	43
4. 结合水基本运动规律近似表述方法问题.....	56
(二) 粘性土中的渗流带.....	58
1. 渗流带的概念.....	58
2. 平均起始水头梯度和平均渗透系数.....	59
3. 渗流带的确定方法问题.....	62
4. 渗流量的确定方法问题.....	64
(三) 粘性土中的含水带.....	65
1. 含水带的概念.....	65
2. 直线形渗流线上含水带宽度的确定方法.....	74

3. 确定复杂地质结构中含水带的包络线法.....	77
4. 确定复杂地质结构中含水带的等值线法.....	79
（四）粘性土中的毛细带	80
1. 弯液面力的水动力学意义.....	80
2. 直线形渗流线上毛细带宽度的确定方法.....	94
3. 复杂地质结构中毛细带的确定方法.....	98
结束语	100
参考文献	100

一、关于地上悬河地质理论问题

黄河的下游段是一条巨大的“地上悬河”。

“地上悬河”(简称“地上河”或“悬河”)与一般河流的区别,是泛滥前的河中最高水位在没有人工堤防的条件下,已高出两岸将被泛滥的地面。河床底低于两岸地面的河流是否为地上悬河,必须根据泛滥前河中最高水位在没有人工堤防的条件下,是否已高出两岸而定。

与地上悬河相对应的一般河流,可称为“地面河”,而不称为“地下河”,以免与喀斯特“地下暗河”的概念相混淆。地面河在泛滥前的河中最高水位,在没有人工堤防的条件下,必低于两岸。但是在沿岸有人工堤防时,也可以高于两岸。

地上悬河和地面河同属于河流,因而具有共同性,但又各具独特的性质。地上悬河的上游往往为地面河。地上悬河往往又与相邻的地面河发生相互作用。从地质发展上来看,地上悬河又往往是从地面河发展而成的。所以对于地上悬河的地质理论的研究必须建立在一般河流的地质理论的共同基础上。

要研究地上悬河地区的工程地质条件和水文地质条件,必须首先研究地上悬河地区的地质条件。如果对地上悬河地区的地质条件没有足够认识,那么对于该地区的工程地质条件和水文地质条件的认识也将有很大局限性。要研究地上悬河的地质条件,必须要有相应的地质理论为指导。但是仅依赖于与一般河流的共同的地质理论来作指导,随着地质、工程地质、水文地质工作的日益深入,已渐感不足。因而必须研究地上悬河所特有的地质理论,才能适应我们祖国在地上悬河地区蓬勃开展着的社会主义建设工作的迫切要求。

地上悬河出现于我国广大的华北平原上。其中黄河是举世无

双的最大的一条。也正是这条巨大的地上悬河给我们祖国的悠久灿烂文化的发展创造了有利的条件。但是，五千年来，这条巨大的地上悬河给我国人民带来的灾害也是频繁的。我们的祖先不断地与这条巨大的地上悬河搏斗着，取得了丰富的经验。没有一个国家的人民会象我国人民这样关心着和了解着地上悬河。也正是由于上述缘故，我们没有可能去依赖外国学者或外国文献来研究地上悬河。当然，我们可以从外国文献中找到一些关于河流的共同理论作为参考，但研究地上悬河特殊的地质理论的任务义不容辞地应该落在我们祖国的地质工作者肩上。在中国共产党和毛主席的英明领导下，我们祖国的地质工作者必然能自力更生地通过辛勤的实际工作总结出关于地上悬河的理论。

本文是根据作者近两年来在黄河下游实际工作中所获得的有限经验总结而成。这仅仅是大胆的尝试，只能被看作是引玉之砖，只有在集体智慧的灌溉下，地上悬河的地质理论才能在我们祖国的大地上茁壮地成长起来。

(一) 形成地上悬河的基本条件

形成地上悬河的基本条件是指形成地上悬河的必要而又充分的条件。一条河流如同时满足了这些条件，则必为地上悬河。如果一条河流不能同时满足这些条件，那么它一定是地面河。

形成地上悬河的基本条件有三：①河水中必须携带大量的直径为 $0.25-0.01$ 毫米的土粒；②河水中必须有相当大的、部分是具有小于 0.7 米/秒平均流速的水流；③河流必须具有足够广阔的可能被泛滥的面积。同时具备这三个条件的河流或河段才一定是地上悬河。如果我们要使地上悬河变为地面河，我们只要设法使该河流不能满足其中一条或数条就行。

对于直径为一定值 d 的土粒，要使它在水流中悬浮，必须要使该水流的“瞬时流速” V 大于一定值 V_{KP} 才行。这 V_{KP} 称为该土粒的“悬浮临界流速”，与 d 有关。如果 $V < V_{KP}$ ，则该土粒从

悬浮状态下沉到河底。如果 V 虽小于 V_{KP}'' ,但仍大于另一个与 d 有关的定值 V_{KP}' ,则该土粒在河底推移。如果 $V < V_{KP}'$,则该土粒在河底沉积不动。此定值 V_{KP}' 称为该土粒的“推移临界流速”。

关于 d 与 V_{KP}' 和 V_{KP}'' 的关系,国内外尚缺少系统的资料。为了满足地质工作的迫切要求,我们曾根据阿波洛夫著作中关于“推移临界流速”的若干经验数据^[1],导出了相应的公式,从而推得各粒径的推移临界流速 $V_{KP}'^{[5]}$ 。我们又根据冈却洛夫关于土粒在紊流中的沉速公式^[1,4,7],并运用维利坎诺夫和法莱西斯关于紊流速与其垂直分速成一定比例关系的经验规律^[1],推导出各粒径的悬浮临界流速 $V_{KP}''^{[5]}$ 。兹将我们推得的数据列表于下(表1),并将其中对阐明地上悬河形成条件特别有意义的一部分,示

表 1 各粒径的临界流速

土 粒 直 径 d (毫米)	悬浮临界流速 V_{KP}'' (米/秒)	推移临界流速 V_{KP}' (米/秒)
0.01	0.0014—0.0005	0.02
0.025	0.0083—0.0033	0.03
0.05	0.034—0.013	0.04
0.1	0.13—0.05	0.06
0.25	0.5—0.25	0.1
0.5	1.08—0.59	0.14
1	2.2—1.3	0.2
2	3.8—2.3	0.28
5	6.0—3.6	0.45
10	8.5—5.1	0.63
15	10—6	0.8
20	12—7	0.9
30	15—9	1.1
50	19—12	1.4
100	25—16	2.0
150	33—20	2.4
200	38—23	2.8
300	47—28	3.5
500	60—36	4.4
1000	85—51	6.3
2000	120—72	8.9

于图1。表1中的数值是根据水中悬浮的泥沙量不很大的情况推定的。象黄河这样平均含沙量达34公斤/米³,最大含沙量可达580公斤/米³的河流^[3],表1中的数值就偏大了。我们暂假定表1中的数值对于地上悬河尚属正确,以便我们能继续探讨下去。但是实际上,悬浮临界流速和推移临界流速在具体含沙量的条件下应具有准确的数值,不论就理论上或实际意义上言,都是极重要的,应该进行专门的测定和研究。

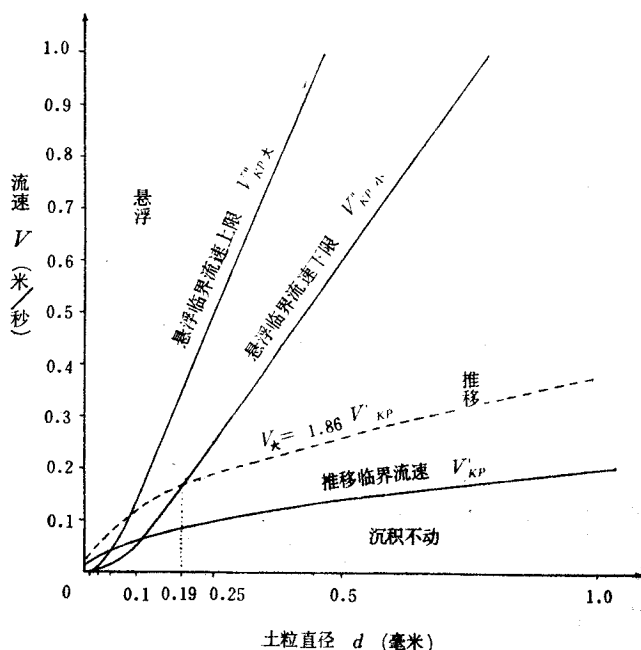


图1 粒径与临界流速关系曲线

河水一般是处于紊流状态的。在紊流中任一点上的“瞬时流速” V 的大小和方向是随着时间的变化而脉动着的。图2是瞬时流速 V 的脉动情况示意图。在一足够长的时间间距中,瞬时流速的平均值称为“时间平均流速”,用 $\bar{V}$ 表之。实验证明:瞬时流速 V 在足够长的时间间距中偏离它的时间平均流速 $\bar{V}$ 的“均方差”

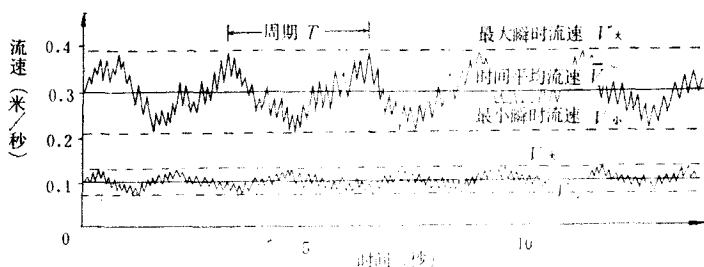


图 2 紊流中某一点瞬时流速的脉动示意图

σ 与时间平均流速 $\bar{V}$ 成正比^[2]。比例常数 $K = \frac{\sigma}{\bar{V}}$ ，根据 E. M. 明斯基的研究，是随着紊流的雷诺数 Re 而改变着的，如图 3 所示^[2]。根据概率论和数理统计学的原理，可以认为瞬时流速 V 偏离它的时间平均流速 $\bar{V}$ 达三倍于均方差 σ 以上的情况仅有千分之三的概率，实际上可以看作是不可能发生的情况。因而我们可以把 $(\bar{V} + 3\sigma)$ 看作为该点的“最大瞬时流速” V_* (图 2)，而把 $(\bar{V} - 3\sigma)$ 看作为该点的“最小瞬时流速” V_0 。即：

$$V_0 = \bar{V} - 3\sigma = \bar{V} - 3K\bar{V} = (1 - 3K)\bar{V} \quad (1)$$

$$V_* = \bar{V} + 3\sigma = \bar{V} + 3K\bar{V} = (1 + 3K)\bar{V} \quad (2)$$

从 (1) 式可得：
$$\bar{V} = \frac{V_0}{1 - 3K} \quad (3)$$

根据 (2)，(3) 式可得：
$$V_* = \frac{1 + 3K}{1 - 3K} V_0 \quad (4)$$

从图 3 可以看到，比例常数 K 是介于 0.1 与 0.05 之间的。因而 (1) — (4) 式也是介于与 K 值变化数字相应的算式之间，如表 2 所示。

当 V_0 等于某土粒的推移临界流速 V_{Kp} 时，其相应的

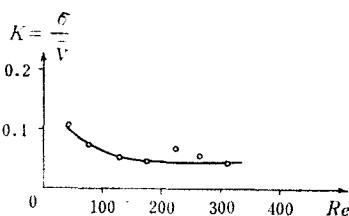


图 3 K 与 Re 的关系曲线
(根据 E. M. 明斯基)

表 2

$K = \frac{\sigma}{V}$	$K = 0.1$	$K = 0.05$
$V_{\text{小}} = (1 - 3K) \bar{V} \quad (1)$	$V_{\text{小}} = 0.7 \bar{V} \quad (1a)$	$V_{\text{小}} = 0.85 \bar{V} \quad (1b)$
$V_{\text{大}} = (1 + 3K) \bar{V} \quad (2)$	$V_{\text{大}} = 1.3 \bar{V} \quad (2a)$	$V_{\text{大}} = 1.15 \bar{V} \quad (2b)$
$\bar{V} = \frac{V_{\text{小}}}{1 - 3K} \quad (3)$	$\bar{V} = 1.43 V_{\text{小}} \quad (3a)$	$\bar{V} = 1.18 V_{\text{小}} \quad (3b)$
$V_{\text{大}} = \frac{1 + 3K}{1 - 3K} V_{\text{小}} \quad (4)$	$V_{\text{大}} = 1.86 V_{\text{小}} \quad (4a)$	$V_{\text{大}} = 1.35 V_{\text{小}} \quad (4b)$

$\bar{V}$ 和 $V_{\text{大}}$ 可以根据(3a)和(4a)式求得,如表3中所示。并且还可以把 $V_{\text{大}}$ 与 d 的关系投于图1中,联成曲线。这样我们就可以在图1中看到“最大瞬时流速”曲线与悬浮临界流速的下限曲线相交于 $d=0.19$ 毫米处。这就是说 d 大于0.19毫米的土粒在紊流中是不会由于瞬时流速的脉动而处于悬浮、推移、沉积不动等三种状态的。它们只可能处于一种或两种状态。但是 d 小于0.19毫米的土粒在紊流中随着瞬时流速 V 的脉动,就时而悬浮、时而推移、时而沉积不动、时而再悬浮、再推移,等等,是处于对流速的改变反应极敏感的状态。我们把在紊流中可能具有这种敏感状态的土粒称为“敏感土粒”。所以,从理论上言,0.19毫米应该是“敏感土粒”的上限。但我们所采用的悬浮临界流速 V_{KP}'' 的数值对于浑水言是偏大的,所以交点的 d 值应略大于0.19毫米。另一方面,这0.19毫米虽具有理论意义,但并不是在土质学中和水文测量学中常用的划分粒组的界限值。比0.19毫米略大一些的界限值是0.25毫米,即细砂粒组的上限。为了兼顾理论上的准确性和实用上的方便,我们以0.25毫米作为“敏感土粒”的粒径上限。

从表1中还可以看到,当 $d < 0.05$ 毫米时,推移临界流速 V_{KP}' 可大于悬浮临界流速 V_{KP}'' 。这就是说,在水层较厚的情况下, $d < 0.05$ 毫米的土粒只可能处于悬浮或沉积不动两种状态,推移

表 3

土粒直径 d (毫米)	推移临界流速 V_{KP}' (米/秒)	$\bar{V} = 1.43 V_{KP}'$ (米/秒)	$V_* = 1.86 V_{KP}'$ (米/秒)	悬浮临界流速下限 V_{KP}'' (米/秒)
0.01	0.02	0.0286	0.0372	0.0005
0.05	0.04	0.0572	0.0744	0.013
0.1	0.06	0.0858	0.1115	0.05
0.25	0.1	0.143	0.186	0.25
0.5	0.14	0.200	0.26	0.59
1.0	0.2	0.286	0.372	1.3

是不可能的。只有在极薄的水层中才有推移的可能。所以在水层较厚时, $d < 0.05$ 毫米的土粒的敏感状态应该是时而悬浮、时而沉积不动、时而再悬浮。土粒愈细, 沉速愈小, 如表 4 所示。虽然表 4 中的沉速是指在静水中的, 但从表 1 可见, $d < 0.05$ 毫米的土粒的悬浮临界流速 V_{KP}'' 已小于 0.034 米/秒, 接近于静水。所以表 4 中的数据还是可以用来作为讨论的依据。如果土粒太细、沉速很小, 那么随着瞬时流速 V 的脉动而产生时而悬浮、时而沉积不动的现象是不可能的。因为瞬时流速 V 在脉动中小于该土粒的悬浮临界流速 V_{KP}'' 的时间是短暂的, 不能使土粒沉到河底沉积不动。当土粒还没有沉到河底前, 瞬时流速 V 的脉动已使土粒处于悬浮状态了。即使有一部分靠近河底的土粒, 在瞬时流速 V 脉动变小时来得及沉到河底不动, 但是要它再悬浮就困难了。因土粒细, 当土粒沉到河底后, 就与其它土粒之间产生了公共水化膜^[6], 产生了内聚力。因而要使这土粒再悬浮的“起动流速”就远大于悬浮临界流速了。土粒愈细, 起动流速愈大, 瞬时流速 V 在脉动中超过起动流速的可能性愈小。所以土粒愈细, 愈不易处于时而悬浮、时而沉积不动, 时而再悬浮的敏感状态。由此可见, 敏感土粒的粒径应该有一个下限。粒径愈小则愈不敏感。0.05毫米作为下限固然很合适, 但 $d < 0.05$ 毫米的土粒还是相当敏感的。如以 0.025 毫米为下限也相当合适, 虽然 $d = 0.025$ 毫米的土粒下沉 1 米需时 41 分 10 秒已不太敏感了(表 4)。地上悬河的河床相沉积物的粒度分析证明, 含量大于 90% 的土粒直径是

表 4

土粒直径 d (毫米)	静水中土粒的沉速 (厘米/秒)	土粒下沉 1 厘米的时间	土粒下沉 1 米的时间
0.05	0.196	5.1秒	8分30秒
0.025	0.04	25秒	41分10秒
0.01	0.00785	2分7秒	3时31分40秒
0.005	0.00196	8分30秒	14时10分
0.001	0.0000785	3时31分40秒	14日16时46分40秒

介于 0.25—0.025 毫米的。所以，以 0.025 毫米作为敏感土粒的下限是比较合理的。0.025 毫米在水文测量学中已是一个划分粒组的界限值。遗憾的是，在目前土质学中还没有把 0.025 毫米作为界限值^[6]。我们建议在未来的土质学中能采纳这个界限值，而把粉粒 (0.05—0.005 毫米)划分为三个粒组：粗粉粒 (0.05—0.025毫米)，中粉粒 (0.025—0.01毫米)，细粉粒 (0.01—0.005毫米)。但是在这个建议没有获得公认之前，我们只能迁就目前土质学中划分粉粒组的标准，而把界限值 0.01 毫米作为敏感土粒的下限了。目前在土质学中，粉粒只分为粗、细两组，以 0.01 毫米为界，即以 0.05—0.01 毫米为粗粉粒，以 0.01—0.005 毫米为细粉粒^[6]。

根据上述的论证可见，敏感土粒实际上是细砂粒 (0.25—0.1毫米)、极细砂粒 (0.1—0.05毫米)、粗粉粒 (0.05—0.01毫米)的总称，其中以细砂粒和极细砂粒最为敏感。

这样，我们可以把形成地上悬河的基本条件的第一条作另一种形式的表达，即河水中必需携带着大量的敏感土粒。这个条件最初是从地上悬河的河床相沉积物的粒度分析中获得的模糊认识，因为不论地上悬河的规模大小，它们的河床相沉积物都具有这样的共同特点。后来，从水文测量学家所提供的地上悬河的河水悬浮质的粒度分析资料中发现，含量为 60% 以上，有时甚至是 90% 以上的悬浮土粒的直径是介于 0.25—0.025 毫米之间。这使我们

能有把握地以实际资料为基础对第一个基本形成条件下结论。但是，从理论上来下结论还是最近的事。

一条河流虽然含有大量的悬浮着的泥砂，但如果它们并不是敏感土粒，那么这条河流就一定不是地上悬河。悬浮着大量粘粒的洪流，或者是成为泥流在山前堆积，或者是把粘粒一直送到海中才沉积，就不能在沿程大量沉积而形成地上悬河。所以携带大量的敏感土粒才是地上悬河的本质的特征。

敏感土粒只有在一定的流速条件下才能处于时而悬浮、时而推移、时而沉积不动、时而再悬浮的敏感状态。具有这种流速条件的水流，可以称为“敏感水流”。敏感水流的时间平均流速称为“敏感流速”。时间平均流速大于敏感流速的水流并不能使它所携带的敏感土粒处于敏感状态。时间平均流速 $\bar{V}$ 太小的水流根本不可能携带敏感土粒。所以能携带敏感土粒的敏感水流的时间平均流速也应有一定的上限和下限。

在表3中曾列举了 $\bar{V}=1.43V_{KF}$ 的数据。敏感土粒的粒径上限为0.25毫米，其相应的 $\bar{V}=1.43V_{KF}$ 的数值为0.143米/秒。这好象应该是敏感流速的上限了。但是一股水流在它底部靠近河底处的时间平均流速 $\bar{V}$ 往往小于它在中、上部的时间平均流速 $\bar{V}$ 。而某一水流的时间平均流速是指整个水流各部分的时间平均流速 $\bar{V}$ 的平均值，如“断面平均流速”、“垂线平均流速”等。敏感流速应该是指促使敏感土粒处于敏感状态的那一部分水流的断面平均流速，所以要比该水流在底部的时间平均流速大得多。如果敏感水流上、中部的时间平均流速略大于敏感土粒的悬浮临界流速，只要它的最小瞬时流速 $V_{\text{小}}$ 都小于悬浮临界流速，那么这些悬浮于水流上、中部的敏感土粒，都会下沉到水流的底部。如果底部的时间平均流速小于0.143米/秒，那么这些土粒就会处于敏感状态。在地上悬河的河水中悬浮着的敏感土粒是大量的。当一个土粒处于敏感状态，暂时沉于河底不动时，别的土粒也会继续下沉，压在它的上面，使它不能再悬浮、再推移。所以具有大量敏感土粒的水流具有敏感流速时，从总的效果来说，是使敏感