

渠系泥沙与渠道设计

泥沙研究汇编第一集

西北水利科学研究所編著
陕西省

陕西人民出版社

前 言

在国民經济建設方面，如灌溉引水、人工河道、工业引水、卫生引水等工程，都要开挖渠道，用以輸水。目前，我国工农业生产发展空前高漲，渠道建設数量越来越多，迫切需要对渠道設計工作做出專門研究，才能达到既經濟合理，又安全可靠。

通常渠道容易发生下列事故：（1）渠道水流速度过大，以致渠床遭到剧烈的冲刷下降，不能保証用水高程；（2）渠道来水含泥量过大，現有水流流速难以完全挟运泥水安全通过，致使渠道发生淤积現象，甚或堵塞渠道，不能保証輸送足夠水量；（3）渠道两岸边坡过陡，时常发生滑塌，断面橫向繼續扩大，影响堤身安全，甚或发生决口。

上述事故的发生，主要是渠道的技术設計工作沒有作好，要避免此类事故的发生，必須解决三項技术关键問題：（1）明渠水流挟沙能力；（2）渠床的耐冲流速；（3）渠岸边坡稳定。目前这三項技术关，尙处于科学研究阶段。在这本小冊子里所收集的文章，是我們几年来对这方面的工作研究成果的一部分。必須指出，这些成果的水平还很低，解决实际工程問題难免有不到之处，仅供渠道設計工作者作为参考，藉以交流經驗，并希予以指正。

1959年6月

目 录

前 言

一	明渠水流挟沙能力	(1)
	甲、利用能量平衡原理推求明渠水流的挟沙能力	(1)
	乙、挟沙能力公式比較研究	(23)
二	渠床的耐冲流速	(36)
	——浑水渠槽的耐冲流速	
三	渠道設計	(45)
	甲、陕西关中泾、洛、渭灌区稳性渠	
	道調查与耐冲流速分析	(45)
	乙、黄土渠道断面設計方法	(55)
附:	印度式渠首的改善	(66)
	——消惠渠渠首取水防沙試驗研究	
	参考文献	(78)

一 明渠水流挟沙能力

甲、利用能量平衡原理推求明渠水流的挟沙能力

(一) 引言

当我国计划在黄河流域大规模兴修水库及开挖渠道的今天，推求适合于黄河流域的高含沙量的挟沙能力公式，是有重要意义的。

过去国内外学者对明渠水流挟沙能力进行了大量研究工作，得出了许多公式，但适合于我国黄河流域的则占少数。

本文根据能量平衡原理，推出明渠水流挟沙能力公式的一般形式，然后分析许多水槽试验资料及渠道实测资料，推出一个可适用于高含沙量的半理论半经验公式，供黄河流域计算水库淤积及渠道挟沙能力的参考。

本文由張灝同志编写，参加计算绘图工作者，有本所泥沙室曹如軒、張存誠、于大字、馬慕鐸、周德春等同志。

(二) 过去学者对挟沙水流能量平衡条件的看法

1933年茹彼 (Rubey) [1]*曾提出挟沙水流能量平衡方程式，他认为，浑水流动一段距离后，其势能损失与原有动能之和，等于其阻力损失和水流对泥沙的悬浮功以及其行经这一段距离后尚保有的动能。

* [1] 为参考文献编号，下皆同。

1938年剎乃普 (Knapp) [2] 認為，悬浮于水中的泥沙，一方面因本身比重大增加了水流的能量，另一方面則因水流須对它作功而消耗水流的能量。

1944年費里堪諾夫 (Велиханов) [3] 发表了有名的挟沙水流的重力理論，后經過了許多苏联学者的討論，于1955年他又得出了他的修正理論 [4]，他認為挟沙水流中存在着以下各項能量：

ε_0 = 挟沙水流中，水从高处流向低处所放出的能。

ε_1 = 挟沙水流中，泥沙从高处流到低处所放出的能。

ε_2 = 水在运行过程中的掺混能。

ε_3 = 泥沙运行过程中的掺混能。

ε_4 = 泥沙在横断面中下落时放出的能。

ε_5 = 水托起泥沙所提供的能，即“悬浮功”。

ε_6 = 泥沙在横断面中下落时因阻力作用所消耗的能。

費里堪諾夫把挟沙水流，人为的分成液体相及固体相来研究。液体相的能量平衡条件为：

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_2 + \varepsilon_5 \quad \dots\dots\dots (1)$$

固体相的能量平衡条件为：

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_4 = \varepsilon_3 + \varepsilon_6 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{他認為 } \varepsilon_4 = \varepsilon_6 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{故 } \varepsilon_1 = \varepsilon_3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

(1) + (4)，得挟沙水流的能量平衡条件

$$\varepsilon_0 + \varepsilon_1 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_5 \quad \dots\dots\dots (5)$$

在明渠等速流中，由于

$$\varepsilon_0 = g\rho(1-\bar{s})\bar{u}i \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\varepsilon_2 = \rho \bar{u} \frac{d}{dy} \left\{ \overline{(1-\bar{s}) uv} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\varepsilon_5 = g(\rho_s - \rho) \omega \bar{s} (1 - \bar{s}) \dots\dots\dots (8)$$

將(6)、(7)、(8)三式代入(1)式，得

$$g\rho(1-\bar{s})\bar{u}i = \rho\bar{u}\frac{d}{dy}\left\{\overline{(1-\bar{s})uv}\right\} \\ + g(\rho_s - \rho)\omega\bar{s}(1-\bar{s})$$

$$\text{或 } g(1-\bar{s})\bar{u}i = \bar{u}\frac{d}{dy}\left\{\overline{(1-\bar{s})uv}\right\} \\ + a g \omega \bar{s} (1 - \bar{s}) \dots\dots\dots (9)$$

式中： g = 重力加速度。

ρ = 水的密度。

ρ_s = 泥沙的密度。

$$a = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

S = 密实容积含沙量。

u = 某点水流的方向速度。

v = 某点与水流垂直方向的速度。

i = 水面比降。

y = 自槽底向上量的距离。

ω = 泥沙的水力粗度。

在含沙量較小的情况下 $1 - \bar{s} \doteq 1$ 。

$$(9) \text{式变为 } g\bar{u}i = \bar{u}\frac{d}{dy}\bar{uv} + ag\omega\bar{s} \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{沿水深积分 } gi \int_0^h \bar{u} dy = \int_0^h \bar{u} \frac{d}{dy} \bar{uv} dy + ag\omega \int_0^h \bar{s} dy$$

$$\text{則} \quad ghiu_m = bu_m^3 + a\omega hs_m \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中: u_m = 全水深平均流速。

s_m = 全水深平均含沙量。

b = 常数。

引入无因次的阻力系数 $\lambda = \frac{ghi}{u_m^2}$ 于 (11) 式,

$$\text{則} \quad 1 = \frac{b}{\lambda} - \frac{a\omega}{u_m i} s_m \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{當} \quad s_m = 0 \text{ 時, } b = \left(\frac{ghi}{u_m^2} \right)_{s=0} = \lambda_0 \quad \dots\dots (13)$$

$$\text{則} \quad \frac{a\omega}{u_m i} s_m = 1 - \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (14)$$

費里堪諾夫認為挾沙水流的 λ 值, 大于同一边界条件下的清水水流的值; 而在饱和平衡条件下, λ_0 应达到一个常量的边界值 λ_{kp} , 故

$$\frac{a\omega}{u_m i} s_m = 1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_{kp}} = A \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{或} \quad s_m = A \frac{u_m i}{a\omega} \quad \dots\dots\dots (16)$$

由于他認為 $\lambda_{kp} > \lambda_0$, 故式中 A 为正值, 將 $\lambda = \frac{ghi}{u_m^2}$ 代入上式得

$$s_m = \frac{\lambda A}{a} \frac{u_m^3}{gh\omega} = A* \frac{u_m^3}{gh\omega} \quad \dots\dots\dots (17)$$

上式即有名的費里堪諾夫的重力理論饱和挾沙量公式。

1957年張瑞謹教授在其发表的“关于費里堪諾夫的明渠挾沙水流的重力理論”〔5〕一文中, 对費里堪諾夫教授主張

的 $\lambda_{kp} > \lambda_0$ ，曾加以批判，并根据南京水利实验处及維·阿·范諾尼的試驗資料証明 $\lambda_{kp} < \lambda_0$ ，如此，則(15)式的A及(17)式的A* 变为負值，而代表費里堪諾夫的重力理論的公式就不能成立了。張教授認為水流对泥沙的悬浮功系由消耗紊动能得来，紊动能消耗了不但不能从势能中得到补給，反而因紊动能的削弱，随着动能傳播也削弱了，則消耗于水流紊动的势能也比清水时小了，如此，泥沙的存在对水流起了制动作用，而减少了势能的損耗。据此張教授列其挟沙水流能量平衡基本关系为“整个挟沙水流在某一渠段所失去的有效势能 = 輸送与渾水質量相等的清水水流的阻力功减制动功”。他認為制动功与費氏所提出的悬浮功成比例，这样就糾正了費氏重力理論(17)式中A* 为負值的缺点。

同年謝鑑衡等同志在“論挟沙水流的能量平衡問題”〔6〕一文中提出其挟沙水流的能量平衡方程式，他們認為挟沙水流的势能損失等于表面阻力損失及起動功之和减去悬浮功，与張教授的論点主要不同之处在于引进了起動功一項。

(三) 对于挟沙水流能量平衡关系的討論

綜观以上各家对于悬浮質在水中的作用，有三种不同的看法：(1) 認為水流挟运泥沙时，水流的势能損失中除一部分克服阻力損失外，尚有一部分直接供給悬运泥沙的悬浮功，故泥沙的存在就加大了水流的势能損失。茹彼及費里堪諾夫的論点就是建立在这种基础上。(2) 認為水流中悬浮沙的存在削弱了水流的紊动程度，因之就减少了水流的势能損失。張瑞瑾教授的观点就是这样的。(3) 認為在清水水流中加入泥沙，也可能增加水流的能量，也可能消耗水流的能量，以挟沙水流与同一边界条件

下清水水流比較起来，挟沙水流的有效势能損失，有时大于同一边界条件下清水水流的有效势能損失，有时則相反。剡乃普及謝鑑衡等就是这种看法。此外大家尚有共同的观点：即大家都把飽和挟沙水流的阻力損失与同一边界条件下的清水水流的阻力損失对比，認為两者成一定比例。

現在我們重点的对費里堪諾夫的重力理論加以分析討論，費氏人为的將挟沙水流分为液体相及固体相两部分，他在固体相的能量平衡方程式（2）中，首先認為泥沙在横断面中下落时放出的能量与当时其受阻力作用而消耗的能相等，因而得出公式（4），即挟沙水流中泥沙从高处流到低处所放出的能正好补給泥沙本身在运行过程中的掺混能。因此他的重力理論實質上只是根据液体相的能量平衡方程式（1）推求而得。这似乎有些勉强，因到目前为止，还无实际資料証明（4）式的正确性，这是疑問之一。

其次在（13）式中

$$1 = \frac{b}{\lambda} + \frac{a \omega}{u_{mi}} s_m$$

他把 $\lambda = \frac{gih}{u_m^2}$ 認為是挟沙水流的阻力系数，在飽和条件下 $\lambda = \lambda_{kp}$ ，并在 $s_m = 0$ 时，令 $b = \lambda_0$ 做为同一边界条件下，清水水流的阻力系数，得出（14）式。他認為 $\lambda_{kp} > \lambda_0$ ，这是与事实不符的，張瑞瑾教授曾利用南京水利实验处及范諾尼的資料証明 $\lambda_{kp} < \lambda_0$ 。如此則（16）式之 A 及（17）式之 A_* 就成了負值，費氏的重力理論公式就不能成立了。

我們認為以上缺点的发生主要由于費氏以液体相的能量平衡条件代替了挟沙水流的能量平衡条件的关系。实际上水流呈稳定状态时，其本身各种能量間会自行調整达到相互平衡，如果說清

水水流的位能損失正好補給其阻力功，則當加沙于此水流中，水流的各項因子自會改變，當水流挾沙量及粒徑不變時，水流也達到穩定狀態，則挾沙水流的各種能量間也會達到新的平衡，這個新的能量平衡條件與清水的截然不同。因為加入了泥沙，一方面使水流紊動程度改變了，也就改變了阻力損失；另一方面增添了維持泥沙運動的能量損失，不管加入泥沙後水流的位能損失是大于或小于同一邊界條件下清水水流的位能損失，也不管懸浮泥沙所消耗的能量是直接或間接由位能損失補給，對於充分懸浮的挾沙水流本身來說，歸根結底總可以寫出其能量平衡條件如下：

挾沙水流的位能損失 = 挾沙水流的阻力功 + 挾沙水流的懸浮功。即把新的平衡條件下的挾沙水流的位能損失分配給阻力功及懸浮功，而我們只研究兩者分配的百分數，這樣與清水水流就可以不會混淆了。

(四) 利用能量平衡原理推求明渠水流的挾沙能力公式

今以二元水流為對象，如果把水流中充分懸浮的泥沙的顆粒的縱向速度與所在點的水粒縱向流速看成是相等的，就可以在挾沙水流中對流速沿水深積分求其平均值；其次，由於含沙量沿水深的分布是連續的，則也可以沿水深積分求其平均含沙量。

根據挾沙水流的能量平衡條件，我們可以寫出以下關係式：

$$g\rho_m\bar{u}i = \rho_m\bar{u}\frac{d}{dy}\bar{u}v + g(\rho_s - \rho)\omega\bar{s}(1 - \bar{s}) \dots\dots\dots(18)$$

式中： ρ_m = 渾水密度。

其他符號同前。

將(18)式沿水深積分

$$gi\int_0^h\bar{u}dy = \int_0^h\bar{u}\frac{d}{dy}\bar{u}vdy + a_mg\omega\int_0^h[\bar{s} - (\bar{s})^2]dy$$

$$\text{則} \quad gihu_m = Ku_m^3 + a_m g \omega h [s_m - (\bar{s}^2)_m] \dots\dots (19)$$

式中 $(\bar{s}^2)_m$ 为含沙量平方值沿水深变化的全水深平均值，由于 $\bar{S}$ 数值一般远小于1，则 $\bar{s}^2$ 的数值很小，如此则以 $(s_m)^2$ 来代替 $(\bar{s}^2)_m$ 不会引起很大误差，则(19)式变为

$$gihu_m = Ku_m^3 + a_m g \omega h (1 - s_m) s_m \dots\dots\dots(20)$$

$$\text{式中: } a_m = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_m}$$

$K = \text{常数}$ 。

$u_m = \text{渾水全水深的平均流速}$ 。

如果仍以希蔡公式来表示挟沙水流的水力因子间的关系，则

$$u_m = C \sqrt{hi} \dots\dots\dots(21)$$

式中 C 与同一水力条件下清水的数值稍有不同。

将(21)式代入(20)式，并经过转换，

$$\text{則} \quad 1 = \frac{KC^2}{g} + a_m \frac{\omega}{u_{mi}} (1 - s_m) s_m \dots\dots\dots(22)$$

上式左端项相当于挟沙水流的位能损失，即可认为此一条件下挟沙水流的位能损失为1或百分之百。右端第一项相当于挟沙水流的阻力功所占位能损失的百分数，第二项相当于挟沙水流的悬浮功所占的百分数，由于我们只研究挟沙水流中位能损失分配于阻力及悬浮功的百分比，则阻力功项应小于1，即

$$\frac{KC^2}{g} < 1$$

$$\text{令} \quad \frac{KC^2}{g} = k, \text{ 即 } k < 1 \dots\dots\dots(23)$$

将(23)式代入(22)式，

$$\text{則} \quad a_m \omega (1 - s_m) s_m = (1 - k) u_{mi} \dots\dots\dots(24)$$

• § •

上式中 u_{mi} 相当单位重量的渾水于单位時間內的位能損失， ku_{mi} 相当于此位能損失消耗于阻力功的数值， $(1-k)u_{mi}$ 或 $a_m(1-s_m)s_m\omega$ 相当于此位能損失消耗于悬浮功的数值。

我們認為在挟沙水流的位能損失分配給悬浮功的百分数是与挟帶泥沙的含量有密切关系，在其他条件变化不大的情况下，可以假定

$$(1-k) = f_1(s_m) \quad \dots\dots\dots(25)$$

而当挟沙水流中所挟帶的沙粒么重一定时， a_m 也为含沙量的函数，

$$\text{令 } a_m = f_2(s_m) \quad \dots\dots\dots(26)$$

將以上两式代入(24)式，并將含沙量的函数用一个代表形式代替，

$$\text{得 } f(s_m)\omega = u_{mi} \quad \dots\dots\dots(27)$$

上式即是按能量平衡原理推求的明渠水流挟沙能力的一般公式， $f(S_m)$ 的形式应根据試驗实测資料进行分析来推求。此式两端尺度是一致的， $f(s_m)$ 及 i 均为无尺度数， ω 及 u 均为速度。

(五) $f(S_m)$ 形式的推算

利用水利部南京水利实验处（现改为南京水利科学研究所）鋼板槽的石粉及北京水利科学研究院发表的黃土試驗資料、克諾罗茲的梯形槽試驗資料、札馬林的綜合資料、引黃渠系的实验資料、以及黄河水利科学研究所的水槽試驗資料，分析結果， $f(s_m)$ 有共同的形式，

$$\text{为 } f(s_m) = \frac{1}{C} (1 - 1.86s_m^{0.4}) s_m \quad \dots\dots\dots(28)$$

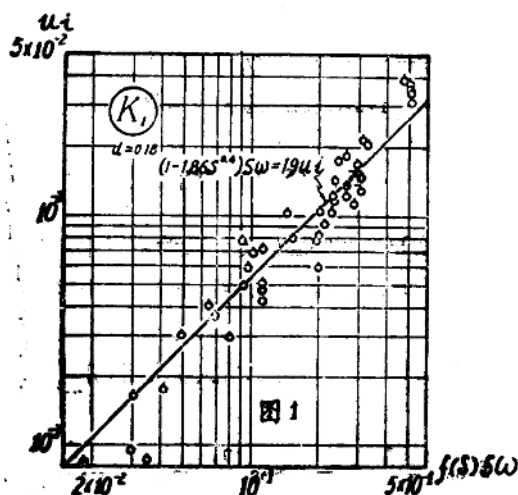
式中 C 为一常数，各組資料为一定值。茲以水力因子 u_{mi} 为縱坐标，泥沙因子 $(1 - 1.86s_m^{0.4}) s_m \omega$ 为横坐标，將各組資料分

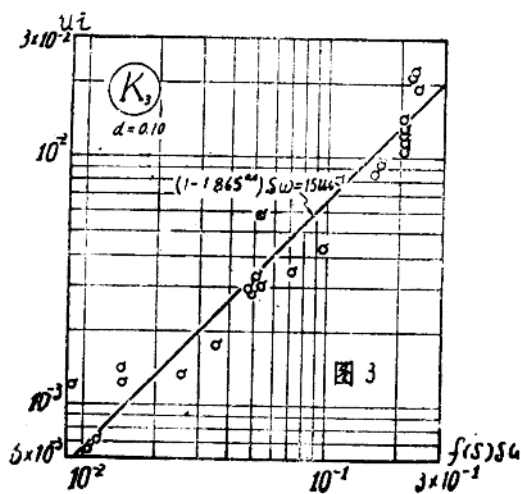
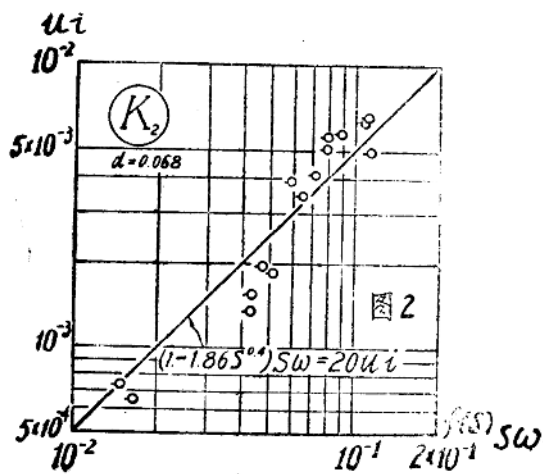
析結果繪成圖(1)至(11)，這些資料的點子基本上形成 45° 綫的方向，說明(27)及(28)式的形式是可以代表客觀情況的。將(28)式代入(27)式，並將係數C移至右端，

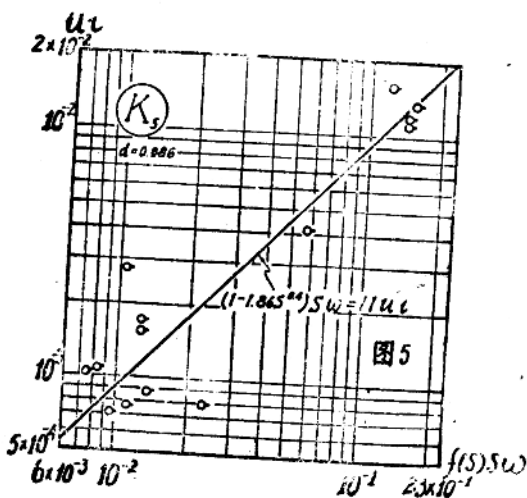
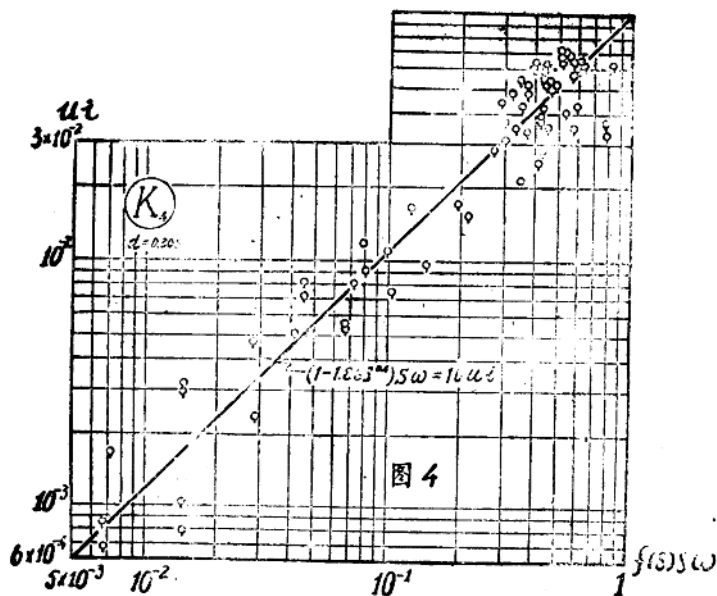
$$\text{則 } f(S_m)\omega = (1 - 1.86s_m^{0.4})S_m\omega = Cu_m i \dots\dots(29)$$

表 1 各組資料的C值

資料名稱	克 諾 羅 茲					南 突 處	北 京 院	引 黃	黃 科 所		札 馬 林
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	石 粉	黃 土	渠 系	W ₁	W ₂	
C	19	20	15	10	11	18	12	15	24	8	8







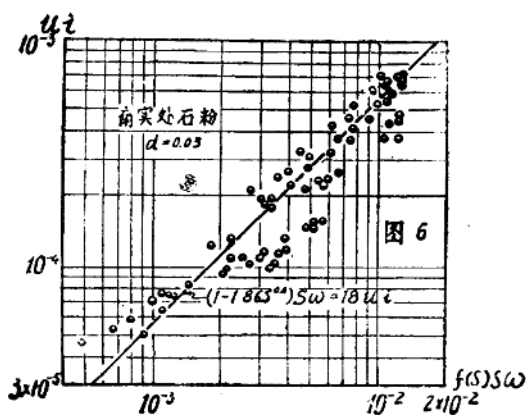


图 6

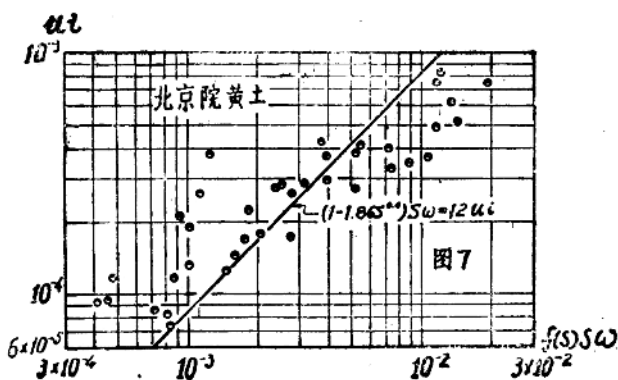


图 7

