

附表 各类土地利用类型面积统计

| 类 型 | 面积 km <sup>2</sup> | 占嫩江流域研究区 % | 类 型    | 面积 km <sup>2</sup> | 占嫩江流域研究区 % | 类 型   | 面积 km <sup>2</sup> | 占嫩江流域研究区 % |
|-----|--------------------|------------|--------|--------------------|------------|-------|--------------------|------------|
| 湿 地 | 26,500             | 14.4       | 城 区    | 165                | 0.1        | 粗放耕地  | 66,500             | 36.0       |
| 牧 场 | 25,200             | 13.7       | 新农田    | 15,300             | 8.3        | 总面积   | 184,505            | 100.0      |
| 森 林 | 46,400             | 25.1       | 伐净/烧荒地 | 2,325              | 1.3        | 农田总面积 | 82,585             | 44.8       |
| 水 体 | 1,330              | 0.7        | 精耕农田   | 785                | 0.4        |       |                    |            |

200~400米, 规则的田块形状和相对大的田块面积表明这里采用了机械化设备。

王长耀译自《Photogrammetric Engineering And Remote Sensing》, 1979, Vol.45, No.9

张 莉校

## 降雨——径流模拟的问题和方法<sup>①</sup>

J.C.I. 杜 格

(爱尔兰都柏林大学土木工程系)

### 一、水文过程的概念性模型

#### 水文模拟的途径

模型是原型的相似体, 模型模拟原型的某些主要特性, 但不是全部特性。因此, 只有考虑模拟的目的和所要求的精度, 描述或讨论模型才有意义。在物理系统的任何模型中, 一般要求是使模型尽量简化, 但又要保证预报精度。

水文学家研究大范围水的特性, 并用不同途径来探讨其所关心的问题。例如, 采用连续力学途径就可导出不稳定流的圣维南方程组, 但是, 这必须包括: (1) 大量的、复杂的地形勘察; (2) 极其复杂的、特长系列的计算。因此, 在水文学中又出现另外两种途径, 即作为本文主题的概念性模型和黑箱分析。

三种途径(水力学、概念性模型和黑箱分析)在应用水文学中都有一定的位置, 每种途径都有其特定的实用范围, 主要依问题

的复杂程度、研究目的和所要求的精度而定。

#### 概念性模型的性质

研究降雨—径流问题的“概念性模型途径”是以连续力学为基础的“水力学途径”和以黑箱分析为基础的“单位线途径”之间的媒介物。所谓概念性模型是由少量要素的简单组合并用公式表示的模型, 其中每一种要素本身又表示一种简单的物理关系。在降雨—径流模型中, 最广泛应用的概念性要素是线性水库和线性渠道, 这些要素分别表示明渠不稳定流洪水波的展平和推移过程。

不难证明, 有些概念性模型实际上是简化的圣维南方程组的变形(例如, 两参数的扩散模型就是佛汝德数趋近于零的圣维南方程组的线性化变形), 而其他概念性模型则

①由于译文篇幅的限制(原文约28000字), 本文采用摘译形式, 因此, 译文中章节、公式、图表的编号均有变动, 特此说明。——译者

是黑箱分析系统输出表达的近似。

虽然降雨输入（和相应的径流输出）可以作为“确定时间系列”，亦可作为“随机时间系列”，但是，本文只限于讨论“确定概念性模型”这种情况。

#### 线性和时不变

在分析降雨—径流关系时，无论采用上述三种途径中的哪一种，只要可以假定降雨—径流关系为线性和时不变，则其理论和计算都大为简化。因此，有必要了解水文系统的线性和时不变特性。

如果系统对一组线性组合输入（ $x$ ）的响应是由系统的相同线性组合输出（ $y$ ）给出的话，则该系统是线性的；若系统对任何输入要素的响应仅取决于自输入该要素起所经历的时间，而与该要素输入时刻无关，则该系统为时不变系统。

线性和非线性之间、时不变和时变之间的差别是显著的，这一点很重要，可以作为水文过程数学模型分类的基础。若把这种分类和前述按模拟途径的分类结合起来，则可以得到如图 1 所示的水文数学模型的二维分类。

|        | 连续力学 | 概念性模型 | 黑箱 |
|--------|------|-------|----|
| 线性时不变  |      |       |    |
| 非线性时不变 |      |       |    |
| 线性时变   |      |       |    |
| 非线性时变  |      |       |    |

图1 水文数学模型的分类

#### 总响应和分响应

在流域响应的模拟中，可以应用如图 2 所示的简化模型。该模型可把直接暴雨响应和基流分开，亦可分清非饱和层中土壤水分和饱和层中地下水的演算。由此可见，该模型可分为三部分：（1）直接暴雨响应部分（即  $P_s$  变为  $Q_s$ ）；（2）地下水响应部分（即  $R$  变为  $Q_b$ ）；（3）非饱和层部分，该部分必须考虑由蒸发、蒸腾（ $E$ 、 $T$ ）引起的土壤水分消耗和渗透量（ $F$ ）对土壤水分状态的影响。降雨—径流过程的所有概念性模型几乎都可以用图 2 所示的一般形式来描述。

如前所述，在任何特定情况下的最佳模型主要取决于研究的目的。降雨—径流过程数学模型的选择、标定和应用的框图如图 3 所示。该程序不仅包括选择模型，而且包括确定最优的模型参数。

图 3 中最后一步是把该模型组装成更一

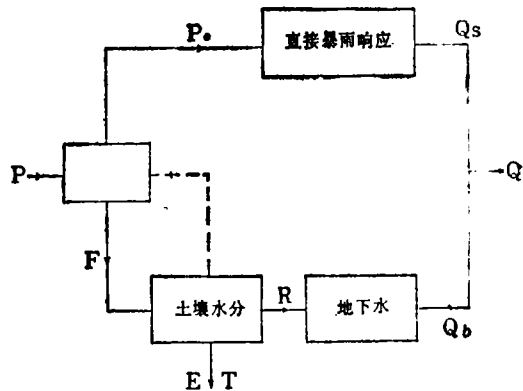


图2 简化的流域模型

般的模型。该图式可以把有效的分量模型组装成“流域总响应模型”，同样，在认识的更高级阶段，也可以把有效的流域总响应模型组装成“判定要素模型”，以便用于复杂的水资源系统的设计或计算。

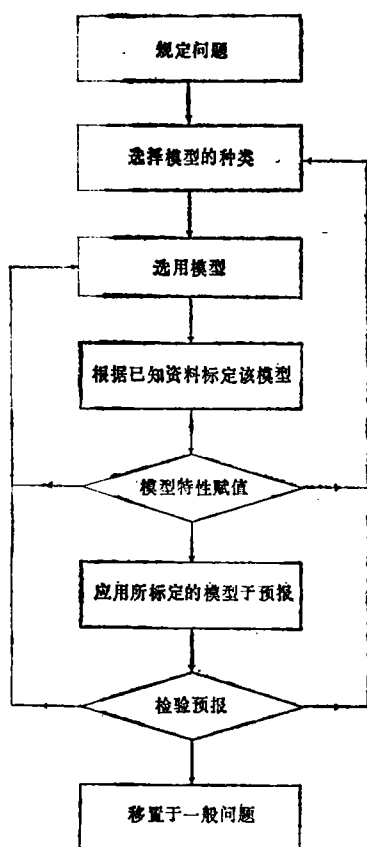


图3 数学模型的选择、标定和应用

## 二、净雨和地表径流

### 推 理 法

120 多年前,为了预报洪峰流量,采用推理法模拟降雨—径流过程。最初的推理公式为

$$Q_{\max} = C \cdot i_{\max}(t_c) \cdot A \quad (1)$$

式中  $Q_{\max}$ ——洪峰流量;  $C$ ——径流系数;  $i_{\max}(t_c)$ ——在汇流时间  $t_c$  内的最大降雨强度;  $A$ ——流域面积。

本世纪二十年代,为了考虑暴雨期间降雨强度的不均匀性和流域形状的不规则性,对推理法作了重要改进,先后提出了时间—面积累积曲线和时间—面积—汇流曲线,前者系根据汇流时间和(汇流时间小于或等于某特定值的)流域面积点绘而成,后者是前者的导数,其底长等于汇流时间。

Sherman 提出的原始单位线是在单位时段内,由均匀降雨所形成的连续径流过程线。在继后的研究中,把S-过程线(即S-曲线)定义为由均匀强度的连续净雨产生的地表径流过程线。一旦从某一单位时段的单位线中导出S-曲线以后,则新的时段(D)单位线亦可导出,其公式为

$$h_D(t) = \frac{S(t) - S(t-D)}{D} \quad (2)$$

当  $D \rightarrow 0$ , 则式(2)变为

$$h_0(t) = -\frac{d}{dt} [S(t)] \quad (3)$$

由式(3)所定义的过程线称为瞬时单位线(IUH)。

### 综合单位线

对于应用水文学家来说,仅仅从有降雨径流资料的流域导出单位线还不够,尚需进行地区综合导出综合单位线,以用于无测站流域。综合单位线的推导过程为:(1)推求该地区有测站流域的单位线;(2)探讨单位线参数与流域特征值的关系。如果这两者之间的相关关系是满意的话,则可根据无测站流域的特征值导出其综合单位线的参数。

关于综合单位线发展过程的两种途径如图4所示。

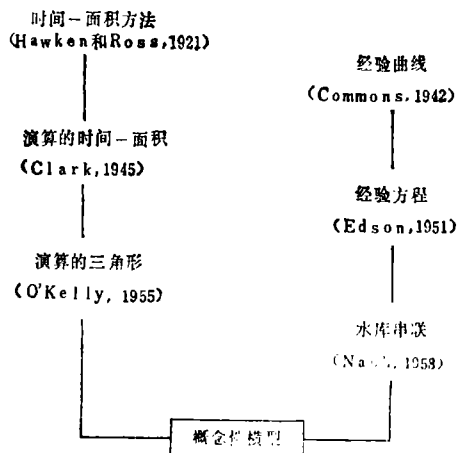


图4 综合单位线的发展过程

## 系统表达

按照系统观点, Johnstone 和 Cross 论文中提出的单位线的基本假定, 实质上是假定净雨径流过程是线性、时不变的。一旦作出这样的假定以后, 则单位线的推导和综合问题就可以用黑箱分析或综合来解决。

如果以直方图表示净雨资料, 则可用下式定义的脉冲函数  $P_D$  表示每一输入要素:

$$P_D(t - SD) = \frac{1}{D} \quad SD < t < (S+1)D \quad (4a)$$

$$P_D(t - SD) = 0 \quad t \text{ 在上述区间以外} \quad (4b)$$

式中  $D$ ——标准时段;  $S$ ——研究时段开始以前所经历的时段数。若每个时段中净雨的面积按  $X(SD)$  给定, 则输入的直方图可表示为

$$x(t) = \sum_{s=0}^{\infty} X(SD) \cdot P_D(t - SD) \quad (5)$$

时段单位线  $h_D(t)$  定义为系统对单位时段  $D$  内均匀降落的单位体积净雨的响应, 即相应于输入  $P_D(t)$  的输出。

若按线性和时不变的假定, 则式(5)所定义的输入、输出之间的关系可以写成

$$y(t) = \sum_{s=0}^{\infty} X(SD) \cdot h_D(t - SD) \quad (6)$$

在上述推导中, 输出  $y(t)$  和脉冲响应  $h_D(t)$  均作为连续函数。对于离散情况, 式(6)可写成

$$y(rD) = \sum_{s=0}^{\infty} X(SD) \cdot h_D(rD - SD) \quad (7)$$

或

$$y = X \cdot h \quad (8)$$

式中  $y$ ——输出矢量;  $h$ ——未知的单位线纵标矢量;  $X$ ——输入矢量列组成的矩阵。

对于瞬时单位线, 亦可类似地推得

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (9)$$

应用概念性模型表示单位线有如下两个优点, 其一, 概念性模型对所导出的单位线的形状有一定的约束, 而这些约束可以剔除单位线求导中增大误差的影响; 其二, 由于应用的概念性模型的参数较少, 因此, 可以把资料的信息容量集中于这少量的参数上, 这就可能获得参数与流域特征值之间可靠的相关关系。

## 三、拟合线性概念性模型

### 矩和累积量

如果应用概念性模型来描述流域对净雨的作用, 则不仅必须选择概念性模型, 而且必须确定模型的参数值。

如果借用统计上的矩或累积量来描述参数, 则所应用的参数数目可以大大减少。Nash 证明了在没有导出完整的单位线以前, 可以根据相应的净雨矩和地表径流矩确定瞬时单位线的统计矩。矩不仅可以用来确定概念性模型参数的最优值, 而且可以作为模型比较的基础。系统水文学中所应用的矩是关于时间的各种函数的矩。关于时间的原点矩定义为

$$U'_R(f) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot t^R dt \quad (10)$$

面积中心矩定义为

$$U_R(f) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot (t - U'_1)^R dt \quad (11)$$

展开式(11)中的  $(t - U'_1)^R$  项可以得到原点矩和中心矩之间的关系。

线性时不变系统输入矩、脉冲响应矩和输出矩之间有一特定关系, 即

$$U'_R(y) = \sum_{k=0}^R \left( -\frac{R}{k} \right) U'_k(x) U'_{R-k}(h) \quad (12)$$

按式(12), 一阶原点矩的关系为

$$U'_1(y) = U'_1(x) + U'_1(h) \quad (13)$$

二阶原点矩的关系为

$$U_2'(y) = U_2'(x) + 2U_1'(x)U_1'(h) + U_2'(h) \quad (14)$$

式(14)可变换为二阶中心矩的关系, 即

$$U_2(y) = U_2(x) + U_2(h) \quad (15)$$

除了矩以外, 在统计上应用的另一组参数是累积量(即半不变量)。累积量定义为其付里叶变换的对数为该生成函数。除了一阶累积量以外, 虽原点变化, 但所有累积量都不变。对于线性时不变系统来说, 可以证明

$$k_R(y) = k_R(x) + k_R(h) \quad (16)$$

并可证明, 一阶累积量等于一阶原点矩, 二阶累积量等于二阶中心矩, 三阶累积量等于三阶中心矩, 四阶累积量等于四阶中心矩减去三倍二阶中心矩的平方。

至于离散资料亦存在相应的定义和关系。

#### 模型参数最优化

所谓模型参数最优化就是使概念性模型的矩等于(从降雨和径流资料中导出的)单位线的计算矩。

现将相等线性水库串联的概念性模型矩的推导过程叙述如下。时滞为  $K$  的单一线性水库的脉冲响应为

$$h(t) = \frac{1}{K} \exp\left(-\frac{t}{K}\right) \quad (17)$$

可以证明  $h(t)$  的第  $R$  阶原点矩为

$$U_R' = R! K^R \quad (18)$$

第  $R$  阶累积量为

$$k_R = (R-1)! K^R \quad (19)$$

$n$  个相等线性水库串联的第  $R$  阶累积量为

$$k_R = n(R-1)! K^R \quad (20)$$

即

$$k_1 = U_1' = nK \quad (21a)$$

$$k_2 = U_2' = nK^2 \quad (21b)$$

$$k_3 = U_3' = 2nK^3 \quad (21c)$$

$$k_4 = U_4' - 3(U_2')^2 = 6nK^3 \quad (21d)$$

为了确定模型参数  $n$  和  $K$ , 仅需应用上述式(21a)、(21b), 至于式(21c)、(21d)可用来检验模型的适用范围。

#### 资料误差的影响

由综合输入和综合单位线可以生成综合输出, 有了综合输出, 则可进行反演计算。在从经过干扰的输入和输出资料反求该已知单位线之前, 把已知数量的误差(综合的或随机的)加到输入和输出中去, 这就可以系统地研究资料误差对单位线推导的影响。

#### 形状因子图的应用

所谓形状因子图就是以无因次三阶矩( $S_3$ )为纵坐标、无因次二阶矩( $S_2$ )为横坐标绘制的图。无因次矩(即形状因子)定义为

$$S_R = \frac{U_R'}{(U_1')^R} \quad (22)$$

式中  $U_R'$ —— $R$  阶中心矩;  $U_1'$ ——一阶原点矩。在形状因子图上, 以一点表示一参数模型, 以一条线表示两参数模型, 以一个区域或一簇线表示三参数模型。

对于所导出的各条单位线, 可以计算其形状因子, 并点绘在形状因子图上, 若所有点都聚集在形状因子图上一单点的周围, 则暗示该点的一参数模型将足以表示所有的单位线; 若这些点沿着一条线分布, 则在该图上其特征线穿过所有点的那种概念性模型即为所求; 若所有点分布于图上一个区域, 则只有可囊括该区域的三参数模型是适当的。

#### 四、概念性模型的例子

##### 一参数模型(表1)

表1 一参数概念性模型

| 模 型 | 要 素  | 人 流 类 型      | 形 状 因 子  |          |
|-----|------|--------------|----------|----------|
|     |      |              | $S_1$    | $S_2$    |
| 1   | 线性渠道 | 上 游          | 0        | 0        |
| 2   | 线性渠道 | 侧向, 均匀       | 1/3      | 0        |
| 3   | 线性渠道 | 侧向, 三角形(1:2) | 1/6      | 0        |
| 4   | 线性渠道 | 侧向, 三角形(1:3) | 7/32     | 1/32     |
| 5   | 线性水库 | 上游/侧向        | 1        | 2        |
| 6   | 2个水库 | 上 游          | 1/2      | 1/2      |
| 7   | 2个水库 | 侧向, 均匀       | 7/9      | 10/9     |
| 8   | 3个水库 | 上 游          | 1/3      | 2/9      |
| 9   | 扩散河段 | 上 游          | $\infty$ | $\infty$ |
| 10  | 扩散河段 | 侧向, 均匀       | 7/5      | 124/35   |

两参数模型 (表2)

表2 两参数概念性模型

| 模 型 | 要 素     | 人 流 类 型      |
|-----|---------|--------------|
| 11  | 渠 道     | 侧向, 三角形(a:1) |
| 12  | 渠道+水库   | 上 游          |
| 13  | 渠道+水库   | 侧向, 均匀       |
| 14  | 渠道+水库   | 侧向, 三角形(1:2) |
| 15  | 渠道+水库   | 侧向, 三角形(1:3) |
| 16  | n个相等的水库 | 上 游          |
| 17  | 2个不相等水库 | 上 游          |
| 18  | n个相等水库  | 侧向, 均匀       |
| 19  | 2个相等水库  | 侧向, 非均匀      |
| 20  | 对流扩散    | 上 游          |

三参数模型 (表3)

表3 三参数概念性模型

| 模 型 | 要 素        | 人 流 类 型      |
|-----|------------|--------------|
| 21  | 渠道, 水库     | 侧向, 三角形(a:1) |
| 22  | 渠道, n个相等水库 | 上 游          |
| 23  | 3个不相等水库    | 上 游          |
| 24  | 2个不相等水库    | 侧向, 非均匀      |

## 五、概念性模型的发展

### 非线性概念性模型

上面讨论的都是线性概念性模型。可是，特别是小流域，流域响应的非线性是很显著的，因此，已有的线性理论将不再适用。

研究非线性问题的一种方法是先把流域演算当作是线性的，分析每个流域线性化模型的参数，然后，再研究其参数与暴雨强度、其它特征之间的关系。

另一种途径是建立简单非线性模型来模拟非线性水文系统，而简单非线性模型是由简单的非线性概念性要素组成的。若该要素是非线性水库，则其输出和蓄量之间的关系为

$$S = K \cdot Q^n \quad (23)$$

式中  $S$ ——水库蓄量； $Q$ ——该水库的出流； $K$  和  $n$  表示该水库特性的参数。若该要素是非线性渠道，则有

$$Q(t+t_0) = I(t) \quad (24)$$

式中推移时间( $t_0$ )是流量的函数。

坡面水流的非线性影响是相当显著的，坡面水流的研究有两种简化方法，就其实质来说，Horton-Izzard 方法应用了单一非线性水库，而运动波途径则等于应用极多的、非常小的相等非线性水库的串联。

笔者研制了具有侧向入流的相等非线性水库串联的模型，并断定：对于这一系统来说，可就任一组相似的入流导出一条不变的无因次响应曲线。所谓相似的入流可定义为形状相似，并且两入流的时间之比与强度之比的关系为

$$\frac{t_2}{t_1} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{\frac{c-1}{c}} \quad (25)$$

式中  $c$ ——非线性程度。这种概念性模型称为均匀非线性模型，其出流过程为

$$\frac{q}{q_c} = \phi \left[ \frac{t}{t_0}, \frac{D}{t_0} \right] \quad (26)$$

式中  $q$ ——出流； $q_c$ ——平均出流（等于均

匀入流）； $t$ ——从入流开始所经历的时间； $D$ ——均匀入流历时； $t_0$ ——按式(25)随入流强度而变的特征时间。

### 地下水模型

如果假定地下水响应可以用单一线性水库来描述，则以均匀入渗率  $R$  补给的出流为

$$Q = R \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{K} \right) \right] + Q_0 \exp \left( -\frac{t}{K} \right) \quad (27)$$

式中时间原点取补给开始时刻。

Kraijenhoff 指出，在补给停止以后，地下水位衰退的 Glover 解等于把地下水库的脉冲响应取作

$$h(t) = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{j} \sum_{n=1,3,\dots} \exp \left( -n^2 \frac{t}{j} \right) \quad (28a)$$

式中  $j$ ——水库系数，其公式为

$$j = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{f S^2}{K \bar{h}} \quad (28b)$$

式(28b)表示水库系数( $j$ )是下列因子的函数：排水孔距离( $f$ )，壕沟或排水沟间隔( $S$ )，土壤饱和渗透度( $K$ )和平均地下水深( $\bar{h}$ )。

### 地区分析

一般的地区分析必须确定：(a)参数的数目（即自由度），(b)最佳模型（按形状

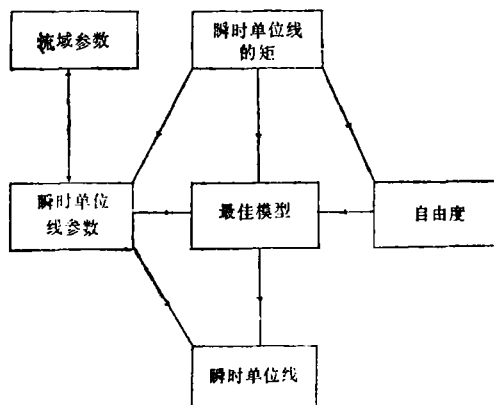


图5 一般综合方法

因子图分析)；(c)模型参数和流域参数之间的相关关系(按矩配法确定模型参数；按因子分析确定流域参数的组合)。一般综合方法如图5所示。

### 人类活动的影响

在有人类活动影响的流域，必须对单位线的推导和区域分析进行相应的修正。在某一流域中，必须确定人类活动不同影响程度时的参数值，继而探讨参数与影响程度之间的相关关系，上述过程通常需要进行区域分析。

这类研究的一个例子是 Rao, Delleur 和 Sarma 所研究的都市化对径流的影响。该项研究应用了 Indiana 和 Texas 八个都市化和四个农村的流域资料，其变化范围为：面积 13~4900 公顷，平均坡度 1/1300~1/47，不透水面积 0~35%。各流域的暴雨数不同，平均为十次。

## 资料

通过资料分析，发现流域特性是非线性的，因此，需应用线性化模型，其参数  $n$  和  $K$  按下述步骤确定：(a)使积  $nK$  等于滞时；(b)使参数  $K$  最优化，其标准是使实测和计算的径流之间相关系数最大。

流域滞时  $nK$ 、参数  $K$  与自然地理特征、暴雨特征之间的关系为

$$nK = 0.831 \frac{A^{0.453} T_R^{0.371}}{(1+U)^{1.662} P_E^{0.267}} \quad (29a)$$

$$K = 0.575 \frac{A^{0.389} T_R^{0.222}}{(1+U)^{0.622} P_E^{1.06}} \quad (29b)$$

式中  $A$ ——流域面积； $T_R$ ——降雨历时； $(1+U)$ ——都市化因子； $P_E$ ——超渗雨量。吴凯摘译自《Mathematical models for surface water hydrology》，P71~108, 1977。

王广德校

## 世界最长的熔岩岩洞

扼朝鲜海峡门户的济州岛，约有45个熔岩岩洞，其中以汉拏山西首的柄礼牟洞（译音）最长。1971年初步了解长度为7.8公里，当时未测图，几乎没有做过任何调查，该洞长期不开放。为了弄清这个岩洞的奥秘，日本洞穴学会和南朝鲜洞穴学会组织了由64人（其中日本人27人）组成的联合调查团，从1981年7月3日至10日作了八天周密而彻底的调查。结果查明，该洞全长11,749米，比肯尼亚提尔希尔的列比阿桑洞（长11,122米）还长600多米，应是世界上最长的熔岩岩洞。

柄礼牟洞，洞口狭小，多崩塌、极易使

人认为是小洞而忽略过去。洞内多泥水，行400米后便豁然开朗，测得干洞长2917米，支洞多达59个，溯其中一个主要支洞测得全长11,749米。洞内构造也极复杂，光怪陆离，十分引人入胜，例如洞内发现了7个巨大的熔岩石笋。熔岩球十分巨大，长径达7米，短径5.2米，高2.5米，这样大的熔岩球也数世界第一。硅华众多，是该洞的另一个特征，并发现了世界最长的硅柱（长28厘米）。从成因上来看，柄礼牟洞是汉拏火山初期喷出的熔岩流与别处来的熔岩流交炽而形成的。

（杨翔摘译自《科学朝日》1981, №11）