

4.5 抽水试验结果

把本次调查所挖掘的钻探孔作为观测井改造完成后,为了把握含水层的性能,获得地下水模拟所必需的含水层常数,进行了抽水试验。并且,根据抽水试验的结果,还对观测井的效率进行了评估。

在共计 9 口新观测井中,计划了阶段抽水试验、连续抽水试验、恢复试验共 3 种试验,但北盆地的 TW-NC-1 观测井由于地下水位极深无法进行抽水试验,因此进行了注水试验加以代替。

4.5.1 试验实施方法

抽水试验是在调查团和中方对口专家的指导监督下,委托当地实施的。各试验的实施方法如下。

a. 预备抽水试验

观测井完成后,在进行正式抽水试验之前进行了预备抽水试验。预备抽水试验的目的是,确认正式抽水试验所使用的潜水电泵的性能,同时预先把握大概的水位下降量。

预备抽水试验在比较短的时间内进行,确认地下水位恢复到静水位之后就进行了正式抽水试验。

b. 阶段抽水试验

为达到以下 3 点目的进行了阶段抽水试验。

- 分阶段改变抽水量以把握抽水量和水位下降量之间的关系
- 计算各个阶段的单位涌水量,算出井损、含水层损失、井效率等参数,对观测井的性能进行评估
- 确定连续抽水试验中的抽水量

要达到阶段试验的目的,最低需要 3 个阶段的试验,而本次调查进行了共计 9 个阶段的试验,抽水量增加时 5 个阶段,抽水量减少时 4 个阶段。各个阶段的抽水时间定为 180 分钟(=3 小时),并十分注意在各个阶段保持固定的抽水量。使用三角凹槽对抽水量进行了测量。

使用手动的地下水位测量装置,在表 4.5.1 所示的时间间隔内对地下水位进行了测量。

表 4.5.1 阶段抽水试验中各个阶段的地下水位测量时间间隔

各个阶段历经时间	测量时间间隔
0~2 分钟	每 1 分钟
2~20 分钟	每 2 分钟
20~60 分钟	每 5 分钟
60~180 分钟	每 10 分钟

所测定的地下水位数据,根据其于试验开始前预先测定的静水位之间的关系,将其变换成了每小时的水位下降量,在试验分析中使用。

c. 连续抽水试验

为达到以下目的进行了连续抽水试验。

- 获得透水量系数（渗透系数）、贮水系数等含水层参数
- 从时间 - 水位下降量曲线的形状把握含水层的种类（完全承压含水层、漏水性承压含水层等）

要达到连续抽水试验的目的，需要在尽可能长的时间内以固定的抽水量进行试验。本调查进行了 2,880 分钟（=48 小时）的连续试验。地下水位按照表 4.5.2 所示的时间间隔进行了测量，抽水量则使用三角凹槽定时进行了测量。

表 4.5.2 连续抽水试验的地下水位测量时间间隔

各个阶段历经时间	测量时间间隔
0~6 分钟	每 1 分钟
6~10 分钟	每 2 分钟
10~60 分钟	每 5 分钟
60~120 分钟	每 10 分钟
120~180 分钟	每 20 分钟
180~360 分钟	每 30 分钟
360~1440 分钟	每 60 分钟
1440~2880 分钟	每 120 分钟

所测定的地下水位数据，根据其与试验开始前预先测定的静水位之间的关系，将其变换成了每小时的水位下降量，在试验分析中使用。

d. 恢复试验

为了达到以下目的进行了恢复试验。

- 获得透水量系数（渗透系数）

恢复试验在连续抽水试验结束后（=水泵停止运转后）立即开始。本调查将恢复试验的实施时间定为 1,440 分钟（=12 小时）。地下水位按照表 4.5.3 所示的时间间隔进行了测量。

表 4.5.3 恢复试验的地下水位测量时间间隔

各个阶段历经时间	测量时间间隔
0~2 分钟	每 1 分钟
2~20 分钟	每 2 分钟
20~40 分钟	每 5 分钟
40~120 分钟	每 10 分钟
120~480 分钟	每 30 分钟
480~1440 分钟	每 60 分钟

所测定的地下水位数据, 根据其于试验开始前预先测定的静水位之间的关系, 将其变换成了每小时的残留水位下降量, 同时根据抽水开始后时间 (t) 和抽水停止后时间 (t') 之间的关系求出了时间比 (t/t'), 在试验分析中使用。

4.5.2 试验分析方法

a. 阶段抽水试验的分析方法

阶段抽水试验的结果, 首先整理成了时间 - 水位下降量关系图, 求出了各阶段的抽水量 Q 和水位下降量 s , 算出了每个阶段的单位涌水量 Sc 及其倒数。单位涌水量 Sc 用下列算式求出。

$$Sc = \frac{Q}{s} \quad (\text{式 4.5.1})$$

其此, 为了求出井损系数和含水层损失系数, 取抽水量为横轴、单位涌水量的倒数 ($1/Sc$) 为纵轴作成了坐标图。根据 Jacob (1947) 的理论, 钻孔内的总水位下降量与井损系数、含水层损失系数之间的关系可以用下列算式表示。

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad (\text{式 4.5.2})$$

其中, s_w 是总水位下降量(m), B 是含水层损失系数(day/m²), C 是井损系数(day²/m⁵), Q 是抽水量(m³/day)。

式 4.5.2) 的两边除以抽水量 Q , 则为

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ \quad (\text{式 4.5.3})$$

此处 s_w/Q 是单位涌水量 Sc 的倒数。在上述坐标图中沿所绘的各阶段抽水量 Q 和单位涌水量倒数 $1/Sc$ 各点画一条近似的直线, 便可以求出此直线的截距即含水层损失系数 B , 斜率即井损系数 C 。

利用所求得的含水层损失系数 B 和井损系数 C , 算出了各阶段的井效率和平均井效率。各阶段的井效率用下列算式定义。

$$E_w = \frac{S_w - S_L}{S_w} \quad (\text{式 4.5.4})$$

其中, E_w 是井效率, S_w 是总水位下降量, S_L 是井损造成的水位下降量。将 Jacob (1947) 所指出的关系带入 (式 4.5.4) 中, 则为

$$E_w = \frac{(BQ + CQ^2) - CQ^2}{BQ + CQ^2} \quad (\text{式 4.5.5})$$

再将此式简化, 则为

$$E_w = \frac{BQ}{S_w} = B \times Sc \times 100(\%) \quad (\text{式 4.5.6})$$

于是可以由含水层损失系数 B 和单位涌水量 Sc 很简单地求出井效率 E_w 。本调查以各阶段的井效率为基础, 进而求出了每个观测井的平均井效率。

另外，本调查将各阶段的 $Q-s_w$ 关系绘成了双对数坐标图，明确了 $Q-s_w$ 曲线的拐点、以及抽水量增加和减少时有无变化等。

b. 连续抽水试验的分析方法

取抽水开始后的时间 t 为半对数坐标的横轴（对数轴），取水位下降量 s 作纵轴（数学轴），将连续抽水试验的结果绘成了时间 - 水位下降量坐标图。

从非稳定流完全承压井抽出地下水时，其水位下降量由 Theis (1935) 用下列算式表示。

$$s = (Q/4\pi T) W(u) \quad (\text{式 4.5.7})$$

其中， s 是水位下降量， Q 是抽水量， T 是透水量系数， $W(u)$ 是井函数。井函数 $W(u)$ 用下列算式表示，

$$W(u) = \int_u^\infty e^{-u}/u \, du \quad (\text{式 4.5.8})$$

其中的 u 用下列算式表示，

$$u = r^2 S/4Tt \quad (\text{式 4.5.9})$$

其中， r 是井半径， S 是贮水系数， T 是透水量系数， t 是时间。将（式 4.5.8）加以展开，则表示为

$$W(u) = -0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (\text{式 4.5.10})$$

Cooper and Jacob (1946) 将上式（式 4.5.10）简化，把水位下降量 s 作了如下表示。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u) \quad (\text{式 4.5.11})$$

又将其变形为

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{4Tt}{r^2 S} \right) - 0.5772 \right] \quad (\text{式 4.5.12})$$

再从自然对数变换成常用对数，给出了如下算式，

$$s = \left(\frac{2.30Q}{4\pi T} \right) \log \left(\frac{2.25Tt}{r^2 S} \right) \quad (\text{式 4.5.13})$$

Cooper and Jacob 的直线分析法，是将由连续抽水试验结果所得到的上述时间-水位下降量曲线取直，把此直线的每 1 对数点的水位下降量设为 s ，用下列算式求出透水量系数 T 。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s} \quad (\text{式 4.5.14})$$

并且，贮水系数 S 是将上述直线中水位下降量 $s = 0$ 时的时间设为 t_0 ，用下列算式

求出。

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad (\text{式 4.5.15})$$

c. 恢复试验的分析方法

用时间比 t/t' 作半对数坐标的横轴(对数轴),用残留水位下降量 s' 作纵轴(数学轴),将恢复试验的结果绘成了时间比 - 残留水位下降量坐标图。

Theis (1935) 将非稳定流完全承压井的残留水位下降量用下列算式表示。

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln\left(\frac{4Tt}{r^2 S}\right) - \ln\left(\frac{4Tt'}{r^2 S'}\right) \right] \quad (\text{式 4.5.16})$$

其中, s' 是残留水位下降量, Q 是抽水量, T 是透水量系数, t 是抽水开始后时间, t' 是抽水停止后时间, r 是井半径, S 是水位下降时的贮水系数, S' 是水位回复时的贮水系数。

此处假定水位下降时和水位回复时的贮水系数相等,将(式 4.5.16)由自然对数改写为常用对数,则残留水位下降量 s' 可以如下表示。

$$s' = \left(\frac{2.30Q}{4\pi T} \right) \log\left(\frac{t}{t'}\right) \quad (\text{式 4.5.17})$$

恢复试验的直线分析法,是将上述的时间比-残留水位下降量曲线取直,把该直线的每 1 对数点的水位下降量设为 s' ,用下列算式求出透水量系数 T 。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s'} \quad (\text{式 4.5.18})$$

另外,恢复试验的分析,是假定水位下降时和水位回复时的贮水系数相等,所以无法求出贮水系数。

4.5.3 阶段抽水试验的分析结果

新观测井的阶段抽水试验的分析结果如下。另外,北盆地的 TW-NC-1 观测井,由于静水位分布在地表下 290 m 附近非常深的地方,所以未能进行阶段抽水试验。

a. TW-SE-1 观测井

TW-SE-1 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.1 所示。在 24.28 m³/day 到 193.97 m³/day 范围内分阶段改变抽水量,进行了阶段抽水试验。抽水量最大时的水位下降量为 10.50 m,单位涌水量为 18.47 m²/day。考察时间 - 水位下降量坐标图发现,抽水量越增加地下水位变稳费时越长,特别是在第 5 阶段,水位大幅下降的同时,3 小时后水位也没有充分稳定。

抽水量 - 单位涌水量倒数坐标图中,第 1 阶段和第 9 阶段的数据除外,其他曲线都接近直线形。用最小二乘法求出这些曲线的近似直线,由其截距和斜率得出了含水层损失系数 $B = 4.12\text{E-}02 \text{ day/m}^2$,井损系数 $C = 5.82\text{E-}05 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。

抽水量 - 水位下降量的双对数坐标图中, 抽水量增加时和减少时的变化曲线几乎处在同一位置, 抽水量增加时在第 2 阶段和第 4 阶段可见拐点。

b. TW-SE-2 观测井

TW-SE-2 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.2所示。在 $14.69 \text{ m}^3/\text{day}$ 到 $68.60 \text{ m}^3/\text{day}$ 范围内分阶段改变抽水量, 进行了阶段抽水试验。TW-SE-2 观测井中, 抽水试验前的静水位低至 -48.98 m , 第 5 阶段的水位下降量超出 10.20 m , 水位下降到比潜水电泵上端还低, 未能取得记录。将第 5 阶段的水位下降量假定为 10.02 m , 求出单位涌水量为 $6.85 \text{ m}^2/\text{day}$, 但实际上更小。考察时间 - 水位下降量坐标图发现, 抽水过程中的水位呈不规则变化, 由此判断试验过程中的抽水量管理有问题。

抽水量 - 单位涌水量倒数坐标图中, 各阶段的曲线几乎接近直线形, 假定水位下降量为 10.02 m 的第 5 阶段的曲线也位于该直线附近。用最小二乘法求出第 5 阶段之外曲线的近似直线, 由其截距和斜率得出了含水层损失系数 $B = 8.40\text{E-}02 \text{ day}/\text{m}^2$, 井损系数 $C = 8.52\text{E-}04 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。

抽水量 - 水位下降量的双对数坐标图中, 抽水量增加时和减少时的变化曲线几乎处在同一位置, 第 3 阶段和第 7 阶段的变化曲线有稍微的弯曲, 但基本上呈直线形。

c. TW-SC-1 观测井

TW-SC-1 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.3所示。在 $94.52 \text{ m}^3/\text{day}$ 到 $264.21 \text{ m}^3/\text{day}$ 的范围内分阶段改变抽水量, 进行了阶段抽水试验。抽水量最大时的水位下降量为 8.10 m , 单位涌水量为 $32.62 \text{ m}^2/\text{day}$ 。考察时间 - 水位下降量坐标图发现, 抽水量越增加地下水位变稳越费时, 特别是第 5 阶段, 在 3 小时过后水位也未充分稳定。

在抽水量 - 单位涌水量倒数坐标图中, 第 1 阶段和第 9 阶段及第 2 阶段和第 8 阶段的曲线, 与用最小二乘法求出的直线不一致。由该直线的截距和斜率求出含水层损失系数 $B = 2.68\text{E-}02 \text{ day}/\text{m}^2$, 井损系数 $C = 1.59\text{E-}05 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。

抽水量 - 水位下降量的双对数坐标图中, 抽水量增加时和减少时的变化曲线几乎处在同一位置, 但第 2 阶段和第 8 阶段的变化曲线有微小的弯曲。

d. TW-SC-2 观测井

TW-SC-2 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.4所示。在 $61.95 \text{ m}^3/\text{day}$ 到 $256.61 \text{ m}^3/\text{day}$ 的范围内分阶段改变抽水量, 进行了阶段抽水试验。TW-SC-2 观测井中, 抽水试验前的静水位低至 -20.40 m , 但抽水量最大时的水位下降量仅有 1.05 m , 单位涌水量很大, 为 $244.4 \text{ m}^2/\text{day}$ 。考察时间 - 水位下降量坐标图发现, 抽水过程中的水位呈不规则变化, 由此判断试验过程中的抽水量管理存在问题。

抽水量 - 单位涌水量倒数坐标图中, 各阶段的变化曲线稍有弯曲。因此, 用最小二乘法求出抽水量增加时曲线的近似直线, 由其截距和斜率得出了含水层损失系数 $B = 3.67\text{E-}03 \text{ day}/\text{m}^2$, 井损系数 $C = 1.73\text{E-}06 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。

抽水量 - 水位下降量的双对数坐标图中, 在抽水量比较少的阶段, 与抽水量增加时相比减少时的变化曲线位于上侧, 显示抽水量减少时的水位下降量更大。

e. TW-SS-1 观测井

TW-SS-1 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.5所示。在 $71.54 \text{ m}^3/\text{day}$ 到 271.99

m^3/day 的范围内分阶段改变抽水量,进行了阶段抽水试验。抽水量最大时的水位下降量为 28.63 m, 单位涌水量为 $9.50 \text{ m}^2/\text{day}$ 。考察时间 - 水位下降量坐标图发现, 抽水量越增加地下水位下降比例越大, 水位变稳的时间也越长。

抽水量 - 单位涌水量倒数坐标图中, 抽水量增加时的变化曲线大致分布在直线上, 但抽水量减少时的曲线稍有弯曲。因此, 用最小二乘法求出抽水量增加时曲线的近似直线, 由其截距和斜率得出了含水层损失系数 $B = 9.93\text{E-}02 \text{ day}/\text{m}^2$, 井损系数 $C = 2.98\text{E-}05 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。

抽水量 - 水位下降量的双对数坐标图中, 在抽水量比较少的阶段, 与抽水量增加时相比减少时的变化曲线位于上侧, 显示抽水量减少时的水位下降量更大。

f. TW-SS-2 观测井

TW-SS-2 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.6所示。在 $58.75 \text{ m}^3/\text{day}$ 到 $287.88 \text{ m}^3/\text{day}$ 的范围内分阶段改变抽水量, 进行了阶段抽水试验。抽水量最大时的水位下降量为 10.22 m, 单位涌水量为 $28.17 \text{ m}^2/\text{day}$ 。考察时间 - 水位下降量坐标图发现, 即使抽水量增加水位也较早稳定。

抽水量 - 单位涌水量倒数坐标图中, 抽水量增加时的变化曲线大致分布在直线上, 抽水量减少时的曲线在第 7 阶段到第 9 阶段分布在增加时曲线的上侧。因此, 用最小二乘法求出抽水量增加时曲线的近似直线, 由其截距和斜率得出了含水层损失系数 $B = 1.98\text{E-}02 \text{ day}/\text{m}^2$, 井损系数 $C = 5.46\text{E-}05 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。

抽水量 - 水位下降量的双对数坐标图中, 在抽水量比较少的阶段, 与抽水量增加时相比减少时的变化曲线位于很上侧, 显示抽水量减少时的水位下降量更大。

g. TW-SW-1 观测井

TW-SW-1 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.7所示。在这个观测井, 由于其静水位在 2005 年 1 月 8 日时位于比地表高出 6.97 m 的位置, 所以不可能将套管延长到比它更高, 从那么高的位置插入水泵进行抽水。因此, 在地表附近塞入套管的管头, 从此处布 2 根管, 并分别安装了流量调节阀。一根管用来代替抽水泵作流出用管, 另一根装上水银压力计作为水压观测用管。水压观测用管连接到照片 4.5.1 所示 U 字型水银式压力计的左侧, 以便可以用水银柱的高度读出承压地下水的压力, 最后将所读取的水银柱高的变化换算成了水位变化。



照片 4.5.1 在 TW-SW-1 观测井设制的 U 字型水银管式压力计

在 $149.76 \text{ m}^3/\text{day}$ 到 $270.0 \text{ m}^3/\text{day}$ 的范围内分 4 个阶段改变流出用管的流出量，进行了阶段抽水试验。流出量最大时的水位下降量为 2.71 m ，流出率为 $99.73 \text{ m}^2/\text{day}$ 。考察时间 - 水位下降量坐标图发现，即使抽水量增加水位也较早稳定。

流出量 - 流出率倒数坐标图中，流出量增加时的曲线大致分布在直线上。用最小二乘法求出其变化曲线的近似直线，由该直线的截距和斜率得出了含水层损失系数 $B = -9.63\text{E-}04 \text{ day}/\text{m}^2$ ，井损系数 $C = 4.40\text{E-}05 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。如上所示含水层损失系数 B 显示负值，估计原因在于本观测井属于具有较高压力的自喷井。

流出量 - 水位下降量的双对数坐标图中，在流出量比较少的阶段，流出量增加则水位下降量变大，而在流出量大的时期，水位下降量增加的比例减少。

h. TW-SW-2 观测井

TW-SW-2 观测井的阶段抽水试验的分析结果如图 4.5.8 所示。在 $86.40 \text{ m}^3/\text{day}$ 到 $287.88 \text{ m}^3/\text{day}$ 的范围内分阶段改变抽水量，进行了阶段抽水试验。抽水量最大时的水位下降量为 1.83 m ，单位涌水量为 $157.3 \text{ m}^2/\text{day}$ 。考察时间 - 水位下降量坐标图发现，即使抽水量增加水位也较早稳定，但第 5 阶段的水位下降量较大。

抽水量 - 单位涌水量倒数坐标图中，抽水量增加时的变化曲线除第 4 阶段外大致分布在直线上，但抽水量减少时的变化曲线中第 6、8、9 阶段曲线有弯曲。因此，用最小二乘法求出抽水量增加时曲线的近似直线，由该直线的截距和斜率得出了含水层损失系数 $B = 5.80\text{E-}03 \text{ day}/\text{m}^2$ ，井损系数 $C = 1.17\text{E-}06 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 。

抽水量 - 水位下降量的双对数坐标图中，在抽水量比较少的阶段，与抽水量增加时相比减少时的变化曲线位于很上侧，显示抽水量减少时的水位下降量更大。并且，在第 4 阶段和第 6 阶段变化曲线弯曲。

i. 井效率

本调查所设的 JICA 地下水观测井的阶段抽水试验结果总结在表 4.5.3 中。在此表中，还给出各个观测井的每个阶段的井效率和平均井效率。

本调查所设的地下水观测井中，除去不能进行试验的 TW-NC-1 观测井和具有很高承压水头、含水层损失系数显示负值的 TW-SW-1 观测井以外，进行了阶段抽水试验的 7 口井的平均井效率的平均值为 85.46% ，最高值为 TW-SS-1 观测井的 97.12% ，最低值为 TW-SS-2 观测井的 67.60% 。平均井效率超出 90% 的观测井是 TW-SC-1、TW-SC-2、TW-SS-1、和 TW-SW-2 四口井，可以认为这些井的井效率很高。

一般认为，地下水生产井的井效率 $70\sim 90\%$ 是平均值，平均井效率在此范围内的观测井是 TW-SE-1、TW-SE-2，这 2 口井的井效率被认为属于一般。TW-SS-2 观测井的井效率为 67.60% ，被认为井效率稍低。

4.5.4 连续抽水试验·恢复试验的分析结果

新观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如下。另外，北盆地的 TW-NC-1 观测井中，由于静水位分布在地表下 290 m 附近非常深的地方，因而未能进行连续试验和恢复试验，代而进行了注水试验和回复试验。

a. TW-SE-1 观测井

TW-SE-1 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.9所示。在连续试验中,以固定抽水量 $194.0 \text{ m}^3/\text{day}$ 进行了 48 小时的抽水。在半对数坐标图上进行时间 - 水位下降量关系的绘图发现,在抽水开始后 6 分钟之前水位直线下降约 9 m,之后到 600 分钟之间水位稍稍变动着缓缓地直线下降。600 分钟以后水位基本不下降比较稳定,2,880 分钟后的最终水位下降量为 10.50 m。从而算出连续抽水试验的单位涌水量为 $18.47 \text{ m}^2/\text{day}$ 。由时间 - 水位下降量曲线的形状判断, TW-SE-1 井观测的深层含水层属于漏水性含水层。

连续试验的时间 - 水位下降量半对数曲线中,用最小二乘法在 6~600 分钟后的直线部分画一条直线,即求出它的每 1 对数点的水位下降量为 0.712 m。从而算出透水量系数为 $49.83 \text{ m}^2/\text{day}$ 。由于直线的斜率较小,水位下降量变为 0 的时间 t_0 也较小为 $4.44\text{E-}16\text{day}$,井半径为 0.075 m,因此贮水系数为 $8.84\text{E-}12$ 。

恢复试验方面,在半对数坐标图上所绘的时间比 - 残留水位下降量曲线中,直线部分出现在时间比 t/t' 为 20~1,000 的范围。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线,其每 1 对数点的残留水位下降量为 0.281 m,因此透水量系数为 $126.4 \text{ m}^2/\text{day}$ 。另外,恢复试验结果在水位曲线上也出现变动,由此推断它受到了周围已有钻孔的地下水抽水的影响。

TW-SE-1 观测井中,恢复试验得到的透水量系数是连续试验的大约 2.5 倍,但考虑到恢复试验的水位曲线受到了周围抽水的影响,所以透水量系数还是采用连续试验中的 $49.83 \text{ m}^2/\text{day}$ 较为妥当。

b. TW-SE-2 观测井

TW-SE-2 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.10所示。连续试验以固定抽水量 $68.60 \text{ m}^3/\text{day}$ 进行了 48 小时的抽水,抽水开始后第 2 分钟水位下降量达 10 m 以上,由于下降到了水泵布设深度,所以无法进行分析。

恢复试验方面,在半对数坐标图上所绘的时间比 - 残留水位下降量曲线中,直线部分出现在时间比 t/t' 为 5~500 的范围内。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线,求出其每 1 对数点的残留水位下降量为 1.06 m,因此透水量系数为 $11.81 \text{ m}^2/\text{day}$ 。

TW-SE-2 观测井中,连续试验的透水量系数未能直接得出,但阶段抽水试验中第 5 阶段以外的单位涌水量平均值为 $8.99 \text{ m}^2/\text{day}$,所以采用 Logan (1964)由单位涌水量推算透水量系数的方法计算,推算透水量系数为 $10.97 \text{ m}^2/\text{day}$ 。因此, TW-SE-2 观测井的透水量系数还是采用恢复试验中的 $11.81 \text{ m}^2/\text{day}$ 较为妥当。

c. TW-SC-1 观测井

TW-SC-1 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.11所示。连续试验中,以固定抽水量 $272.0 \text{ m}^3/\text{day}$ 进行了 48 小时的抽水。将时间 - 水位下降量关系绘成半对数坐标图发现,抽水开始后 70 分钟之前水位直线下降大约 9.5 m,但之后水位缓缓上升,200 分钟后为大约 8.8 m。200 分钟以后的水位基本稳定,2,880 分钟后的最终水位下降量为 8.71 m。从而算出连续抽水试验的单位涌水量为 $31.23 \text{ m}^2/\text{day}$ 。由时间 - 水位下降量曲线的形状判断, TW-SC-1 井观测的深层含水层属于漏水性含水层。

连续试验的时间 - 水位下降量半对数曲线中,用最小二乘法在 1~70 分钟后的直线部分画一条直线,则它的每 1 对数点的水位下降量为 1.27 m,从而求出透水量系数为 $39.14 \text{ m}^2/\text{day}$ 。将近似直线延长,求出水位下降量变为 0 的时间 t_0 是 $1.33\text{E-}09 \text{ day}$,井半径为 0.075 m,因此贮水系数为 $2.08\text{E-}05$ 。

恢复试验方面,在半对数坐标图上绘出的时间比 - 残留水位下降量曲线中,直线部分出现在时间比 t/t' 为 3~1,000 的范围内。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线,求出每 1 对数点的残留水位下降量为 1.13 m,因此透水量系数为 43.95 m^2/day 。另外,恢复试验中在水位曲线上也未发现不规则变动,由此推断是由于连续试验中间的水位上升存在抽水量管理问题。

TW-SC-1 观测井中,连续试验和恢复试验得出的透水量系数为大致相同的数值,因此透水量系数的数值取二者的对数平均定为 41.48 m^2/day 较为妥当。

d. TW-SC-2 观测井

TW-SC-2 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.12所示。连续试验中,以固定抽水量 256.6 m^3/day 进行了 48 小时的抽水。将时间 - 水位下降量关系绘成半对数坐标图发现,抽水开始后 1 分钟到 60 分钟之间水位从约 0.5 m 到 0.6 m 缓缓下降,但在 100~200 分钟之间水位由 0.6 m 快速下降到 0.95 m,下降 0.35 m,之后水位反复地上下变动,但整体上徐徐下降,2,880 分钟后的最终水位下降量为 1.01 m,从而算出连续抽水试验的单位涌水量为 254.1 m^2/day 。另外,水位变动曲线的上下变动有约半天的周期,估计是观测井近傍已有钻孔的抽水的影响。由时间 - 水位下降量曲线的形状判断,TW-SC-2 井观测的含水层属于漏水少的含水层。

连续试验的时间 - 水位下降量半对数曲线由于受到了已有钻孔抽水的影响,所以用最小二乘法在连续试验整个期间的 1~2,880 分钟曲线上画一条直线,则算出它的每 1 对数点的水位下降量为 0.137 m,因此求出透水量系数为 341.9 m^2/day 。将近似直线延长,求出水位下降量变为 0 的时间 t_0 是 6.31E-08 day,井半径为 0.075 m,从而算出贮水系数为 8.63E-03。

恢复试验方面,在半对数坐标图上绘出的时间比 - 残留水位下降量曲线上也可见已有钻孔抽水的影响,但在时间比 t/t' 为 3~1,000 的范围内大体上呈直线形。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线,求出它的每 1 对数点的残留水位下降量为 8.81E-2 m,因此透水量系数为 533.3 m^2/day 。

TW-SC-2 观测井中,恢复试验得出的透水量系数为连续试验的大约 1.5 倍,但由于二者都受到了已有钻孔抽水的影响,所以透水量系数的数值取二者的对数平均定为 427.0 m^2/day 较为妥当。

e. TW-SS-1 观测井

TW-SS-1 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.13所示。连续试验中,以固定抽水量 272.0 m^3/day 进行了 48 小时的抽水。将时间 - 水位下降量关系绘成半对数坐标图发现,抽水开始后 1 分钟到 400 分钟的区间水位下降大致呈直线形,下降量达约 28 m,400 分钟以后的水位基本稳定,2,880 分钟后的最终水位下降量为 28.18 m,从而算出连续抽水试验的单位涌水量为 9.65 m^2/day 。另外,由时间 - 水位下降量曲线的形状判断,TW-SS-1 井观测的深层含水层属于漏水性含水层。

连续试验的时间 - 水位下降量半对数曲线中,用最小二乘法在水位呈直线下降的 1~400 分钟曲线上画一条直线,则求出其每 1 对数点的水位下降量为 7.11 m,从而算出透水量系数为 7.002 m^2/day 。将近似直线延长,求出水位下降量变为 0 的时间 t_0 是 1.89E-05 day,井半径为 0.075 m,因此贮水系数为 5.30E-03。

恢复试验方面,半对数坐标图上绘出的时间比 - 残留水位下降量曲线,在时间比 t/t' 为 9~2,881 的整个区间呈完美的直线形。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线,求出其每 1 对数点的残留水位下降量为 6.95 m,因此透水量系数为 7.163 m^2/day 。

TW-SS-1 观测井中,连续试验和恢复试验得出的透水量系数大致为相同的数值,因此透水量系数的数值取二者的对数平均定为 $7.082 \text{ m}^2/\text{day}$ 较为妥当。

f. TW-SS-2 观测井

TW-SS-2 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.14所示。连续试验中,以固定抽水量 $287.9 \text{ m}^3/\text{day}$ 进行了 48 小时的抽水。将时间 - 水位下降量关系绘成半对数坐标图发现,抽水开始后 2 分钟到 500 分钟区间水位下降基本呈直线形,下降量达约 10.3 m,500 分钟以后的水位尽管呈现小规模的不规则变动但基本稳定,2,880 分钟后的最终水位下降量为 10.36 m,从而算出连续抽水试验的单位涌水量为 $26.25 \text{ m}^2/\text{day}$ 。另外,由时间 - 水位下降量曲线的形状判断,TW-SS-2 井观测的浅层含水层属于漏水性含水层。

连续试验的时间 - 水位下降量半对数曲线中,用最小二乘法在水位呈直线形下降的 1 ~ 500 分钟曲线上画一条直线,则求出其每 1 对数点的水位下降量为 1.28 m,从而算出透水量系数为 $41.02 \text{ m}^2/\text{day}$ 。将近似直线延长,求出水位下降量变为 0 的时间 t_0 是 $2.80\text{E}-09 \text{ day}$,井半径为 0.075 m,因此贮水系数为 $4.60\text{E}-05$ 。

恢复试验方面,半对数坐标图上绘出的时间比 - 残留水位下降量曲线,在时间比 t/t' 为 3~2,881 的整个区间大致呈直线形。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线,求出其每 1 对数点的残留水位下降量为 1.04 m,因此透水量系数为 $50.65 \text{ m}^2/\text{day}$ 。

TW-SS-2 观测井中,连续试验和恢复试验得出的透水量系数大致为相同的数值,因此透水量系数的数值取二者的对数平均定为 $45.58 \text{ m}^2/\text{day}$ 较为妥当。

g. TW-SW-1 观测井

TW-SW-1 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.15所示。连续试验中,以固定流出量 $270.0 \text{ m}^3/\text{day}$ 进行了 600 分钟的试验,这是由于本观测井是具有高承压水头的自喷井,测量水压的水银式压力计的测定范围受到了限制。将时间 - 水位下降量关系绘成半对数坐标图发现,水位下降大致呈直线形,从抽水开始到开始后 600 分钟的最终水位下降量为 0.45 m。

用最小二乘法在连续试验的时间 - 水位下降量半对数曲线上画一条直线,求出其每 1 对数点的水位下降量为 4.27 m,从而算出透水量系数为 $1157.1 \text{ m}^2/\text{day}$ 。将近似直线延长,求出水位下降量变为 0 的时间 t_0 是 $8.76\text{E}-12 \text{ day}$,井半径为 0.075 m,因此贮水系数为 $4.05\text{E}-05$ 。

恢复试验方面,半对数坐标图上绘出的时间比 - 残留水位下降量曲线,在时间比 t/t' 为 3~961 的整个区间基本呈直线形。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线,求出其每 1 对数点的残留水位下降量为 0.486 m,因此透水量系数为 $101.7 \text{ m}^2/\text{day}$ 。

TW-SW-1 观测井中,由于要使用水银压力计进行测定,所以不得不于阶段试验之后立即进行连续实验,因此连续试验的分析结果可信性较低。另一方面,由最大流出量与最终水位下降量之间的关系求出单位涌水量为 $98.83 \text{ m}^2/\text{day}$,这一数值与恢复试验得到的透水量系数大致相同,因此透水量系数的数值定为恢复试验的 $101.7 \text{ m}^2/\text{day}$ 较为妥当。

h. TW-SW-2 观测井

TW-SW-2 观测井的连续抽水试验和恢复试验的分析结果如图 4.5.16所示。连续试验中,以固定抽水量 $287.9 \text{ m}^3/\text{day}$ 进行了 48 小时的抽水。将时间 - 水位下降量关系绘成半对数坐标图发现,抽水开始后 2 分钟到 500 分钟区间,水位尽管出现小规模不规则变动但大致呈直线形下降,500 分钟以后尽管出现小规模不规则变动但基本稳定,2,880

分钟后的最终水位下降量为 1.99 m，从而算出连续抽水试验的单位涌水量为 144.7 m²/day。另外，由时间 - 水位下降量曲线的形状判断，TW-SW-2 井观测的浅层含水层属于漏水性含水层。

连续试验的时间 - 水位下降量半对数曲线中，用最小二乘法在水位呈直线下降的 1~500 分钟曲线上画一条直线，即求出其每 1 对数点的水位下降量为 0.205 m，从而算出透水量系数为 257.4 m²/day。将近似直线延长，求出水位下降量变为 0 的时间 t_0 是 4.23E-11 day，井半径为 0.075 m，因此贮水系数为 4.35E-06。

恢复试验方面，半对数坐标图上绘出的时间比 - 残留水位下降量曲线，在时间比 t/t' 为 4 ~ 2,881 的区间虽出现缓缓变动但基本为直线形。用最小二乘法在这一区间画一条近似直线，求出其每 1 对数点的残留水位下降量为 0.214 m，从而算出透水量系数为 246.7 m²/day。

TW-SW-2 观测井中，连续试验和恢复试验得到的透水量系数大致为相同的数值，因此透水量系数的数值取二者的对数平均定为 262.0 m²/day 较为妥当。

i. TW-NC-1 观测井

TW-NC-1 观测井中，由于地下水位（静水位）位于地表下 289.82 m（2004 年 11 月 3 日）的极深处，无法搞到可以确保满足此扬程抽水量水泵，所以未能进行连续抽水试验和恢复试验，代而进行了注水试验和回复试验。

注水试验是以固定注水量向井内注水，按照所定的时间间隔测定钻孔内地下水的上升。本调查中，在钻孔挖掘后用庖斗汲水法对钻孔进行了充分的冲洗，然后采集了水质分析用样本，在水位充分稳定确认了静水位之后，用电动水泵向孔内注入了流经 TW-NC 观测点附近的引水渠的水。

注水试验和回复试验的结果如图 4.5.17 所示。在注水试验中，用流量计观测流入量的同时，以 231.9 m³/day 的固定流量进行了 90 分钟的试验。在半对数坐标图上绘出时间 - 水位上升量关系发现，注水开始后 2 分钟到 15 分钟之间水位基本呈直线上升 6.38 m，15 分钟以后水位不再上升，上升量一直保持在 6.38 m 持续到 90 分钟。

注水试验的时间 - 水位上升量半对数曲线中，根据最小二乘法在水位呈直线上升的 1~15 分钟曲线上画一条直线，即求出其每 1 对数点的水位下降量为 5.69 m。在理论上，从钻孔抽出地下水的抽水试验和向钻孔内注入水的注水试验，以相同大小形成上下方向不同的地下水位下降圆锥或地下水位上升圆锥，由注水试验时的注水量 Q' 和水位上升量 s' 可以求出透水量系数。用这一方法求出的透水量系数为 7.463 m²/day。另外，贮水系数用本调查所实施的注水试验无法求出。

回复试验测定了在注水停止后 90 分钟内的水位回复状况。水位回复试验的结果如图 4.5.17 的下图所示，但注水停止 4 分钟后孔内水位下降到了静水位。估计这是由于 90 分钟的注水时间太短，回复试验的透水量系数无法求出。

图 4.5.18 中给出将注水试验作为单井透水试验进行分析的结果。本调查所实施的注水试验如该图上部所示，无法进行模式化表示。单井透水试验中大致分为非定常法解析式和定常法解析式，将该图右上方所示的注水试验结果参数代入两个解析式，求出了试验区间（=滤筛装置布设区间）的渗透系数和透水量系数。结果显示，用非定常法求出的渗透系数为 0.325 m/day，透水量系数为 7.80 m²/day。另一方面，用定常法求出的渗透系数为 1.223 m/day，透水量系数为 29.36 m²/day。另外，作为参考值由注水试验中的注水量 Q' 和水位上升量 s' 计算出单位涌水量为 36.35 m²/day，从而使用 Logan(1964)方法算出透水量系数的概算值为 44.34 m²/day。而且，一般都知道通过注水试验得到的渗透系数、透水量系数比抽水试验得到的数值要小，由此判断，TW-NC-1 观测井的透水量系数，还是采用单井透水试验的定常法解析式求出的 29.36 m²/day 较为妥当。

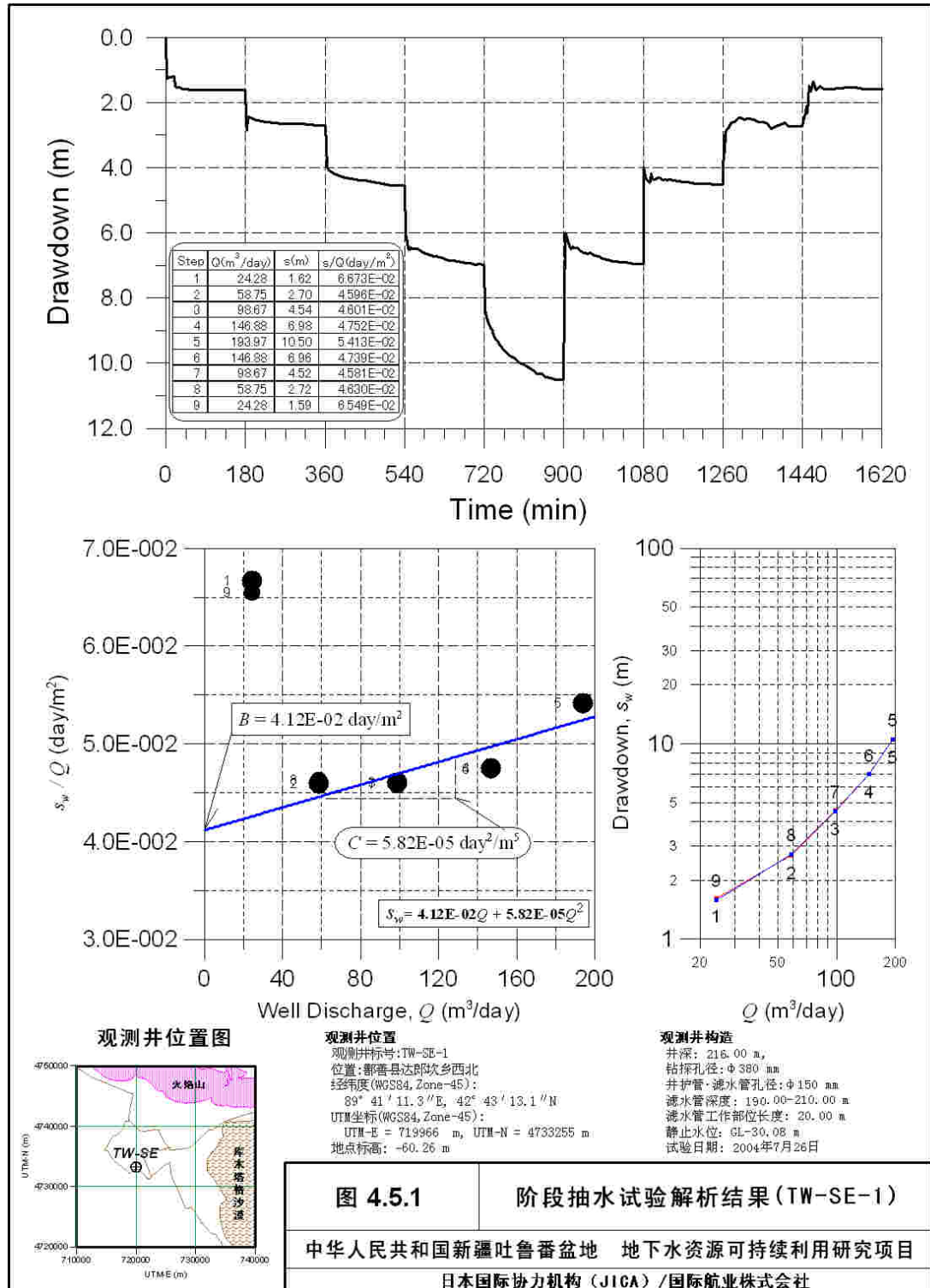
4.5.5 新观测井的含水层系数

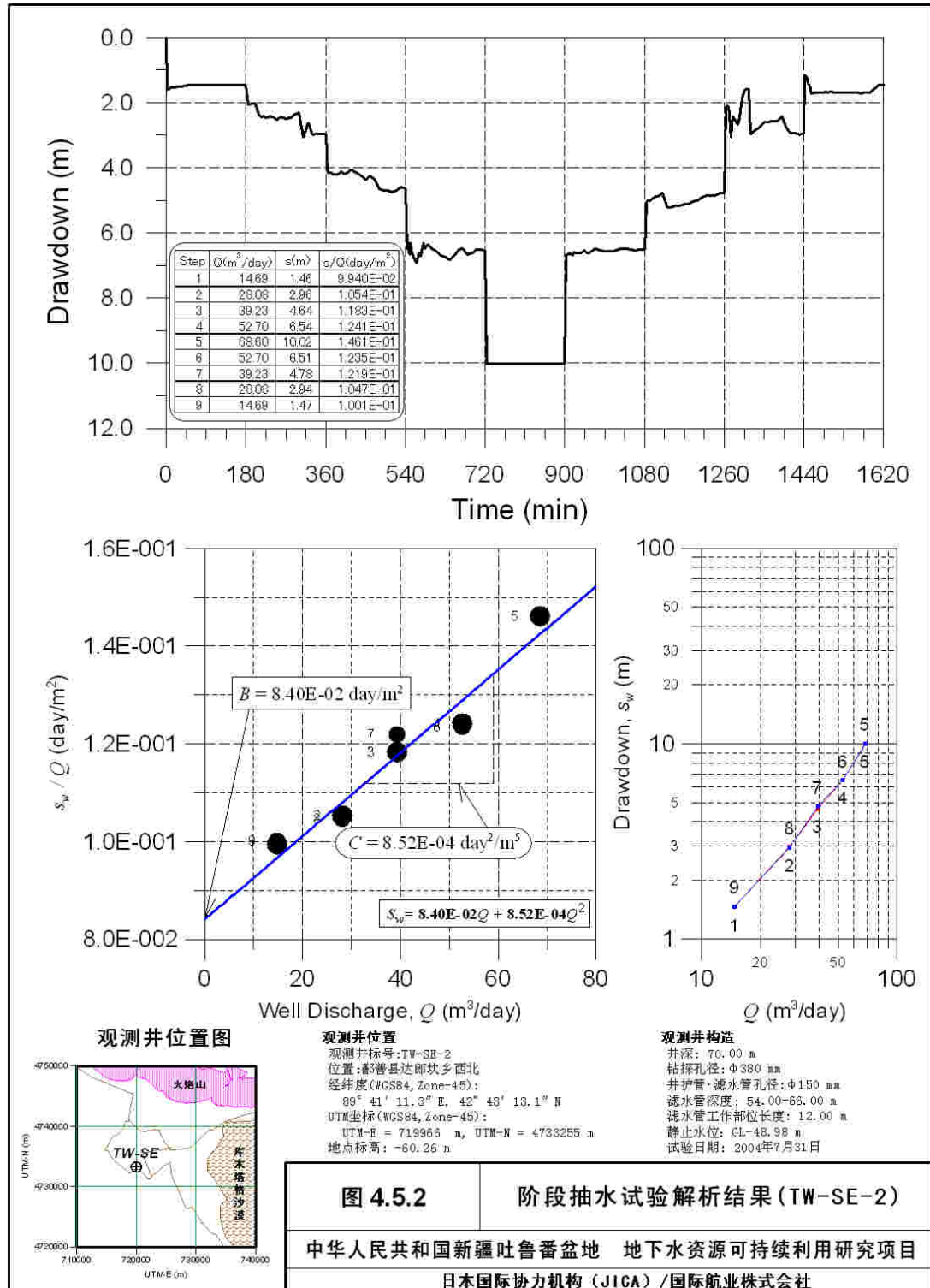
在新观测井进行的抽水试验得到的含水层系数归纳在表 4.5.4中。其中，透水量系数根据各试验的情况采用了某一数值，作为“透水量系数采用值”。并且，筛管部分的透水量系数，是透水量系数采用值除以筛管总长度算出的。因此，这一透水量系数不是整个含水层的透水量系数，而是表示各钻孔中筛管布置部分的含水层的透水量系数。

透水量系数的最大值为 $427.0 \text{ m}^2/\text{day}$ ，是在吐鲁番市西街的用于观测浅层含水层的 TW-SC-2 观测井得到的。另一方面，9 口观测井中最小透水量系数为 $7.082 \text{ m}^2/\text{day}$ ，得自于挖掘在南盆地南部深层含水层的 TW-SS-1 观测井。在南盆地，在共计 4 个观测点分别布置了 2 口观测井，但其中深层含水层的透水量系数比浅层含水层大的只有 TW-SE 观测点，其余观测点都是浅层含水层的透水量系数更大。

渗透系数在 $0.295 \sim 30.50 \text{ m/day}$ 范围内，与透水量系数相同，在南盆地除 TW-SE 观测点外都是浅层含水层显示更大数值。另外，北盆地只在 TW-NC-1 观测井得到了含水层系数，由于这一观测井在深度为 $360 \sim 384 \text{ m}$ 的北盆地中也是以较深部分为观测对象，所以以往调查所未探知的北盆地中部深处的含水层系数也通过本调查首次获得。所得的透水量系数和渗透系数，与南盆地的深层含水层相比决不算大，反而偏低。另外，北盆地的中部到北部由于地下水位分布得非常深，所以比地下水面还浅的不饱和带的渗透系数无法通过抽水试验求出。

在上面的表 4.5.4中，由所采用的透水量系数和单位涌水量之间的关系给出了 Shibasaki(1996)提出的 T/Sc 系数。作为承压含水层的一般 T/Sc 系数，Logan (1964) 指出是 1.22，Driscoll (1986) 指出是 1.39，但这一系数根据含水层的状态、钻孔构造、井损程度的不同变化很大 (Shibasaki, 1996)。本调查所布置的观测井，其 T/Sc 系数多数比一般 T/Sc 值要高。





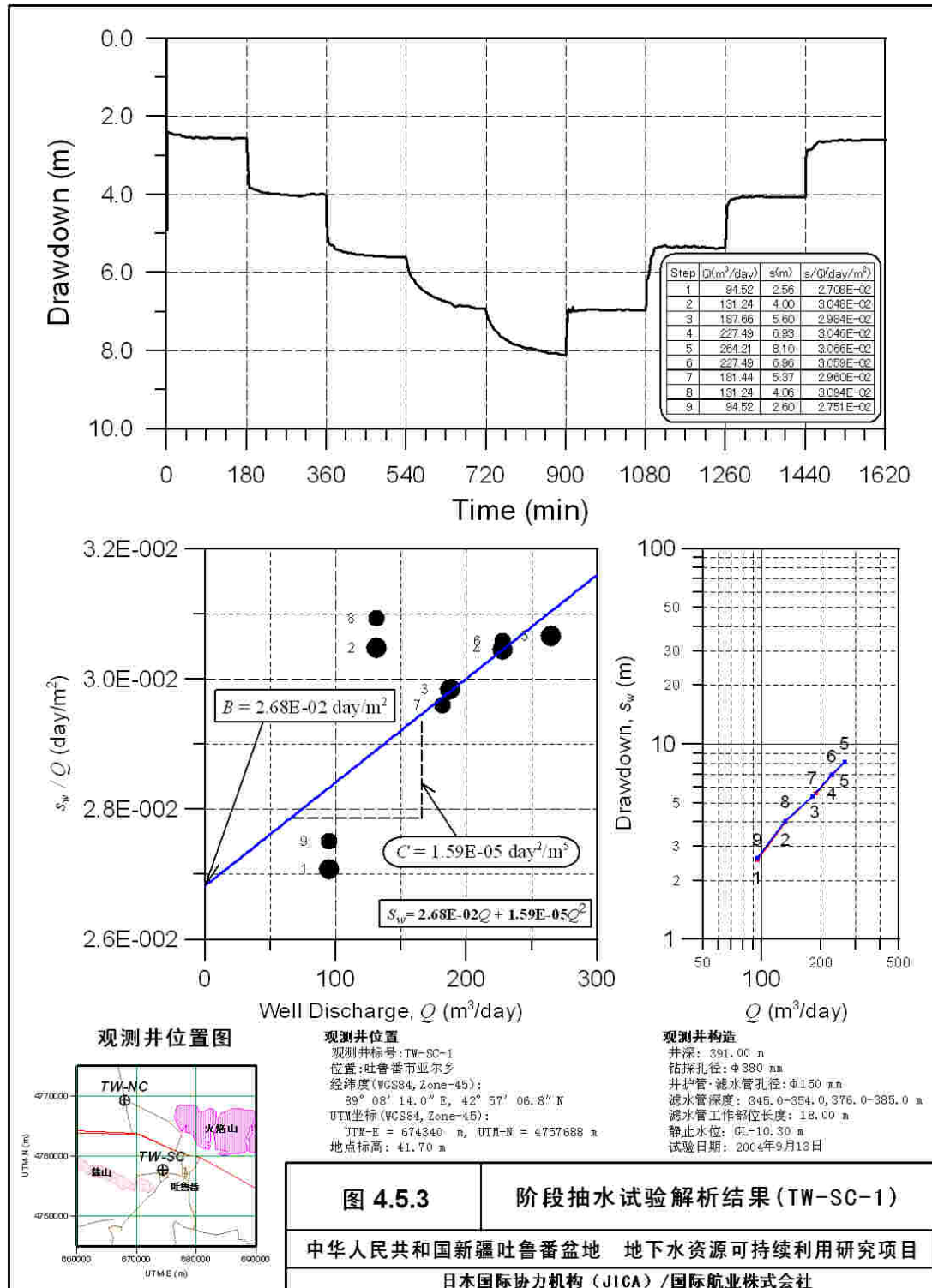
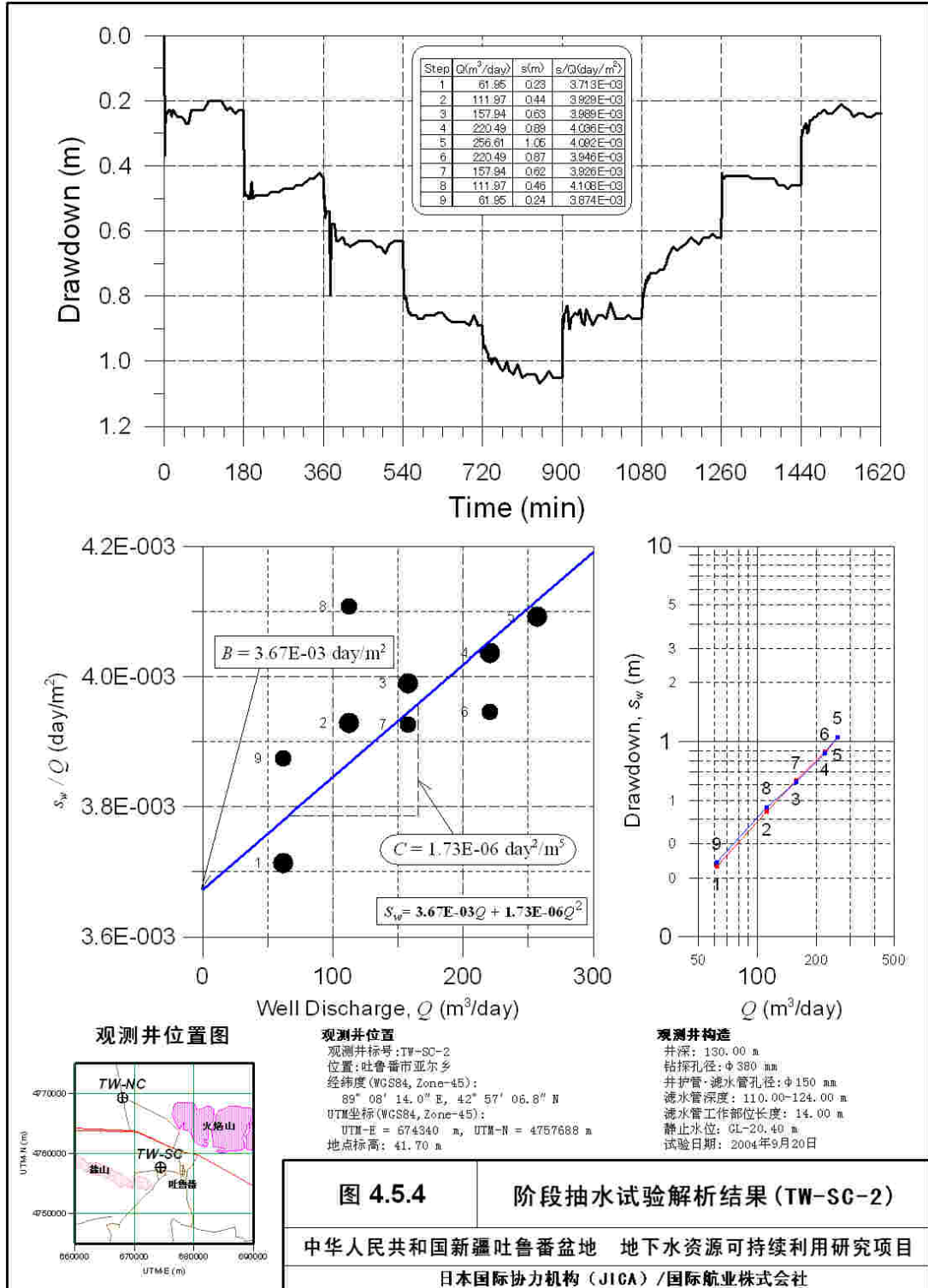


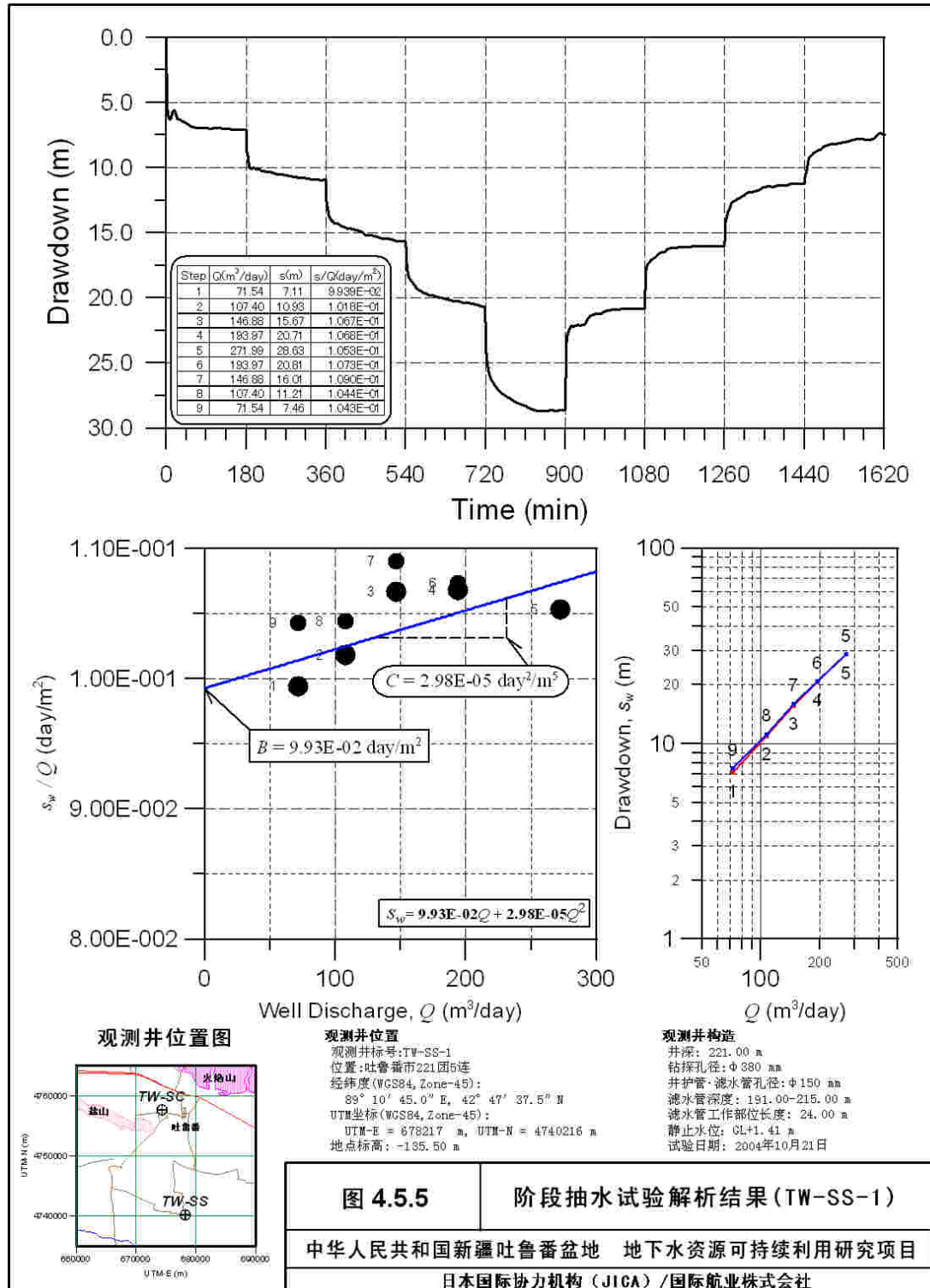
图 4.5.3

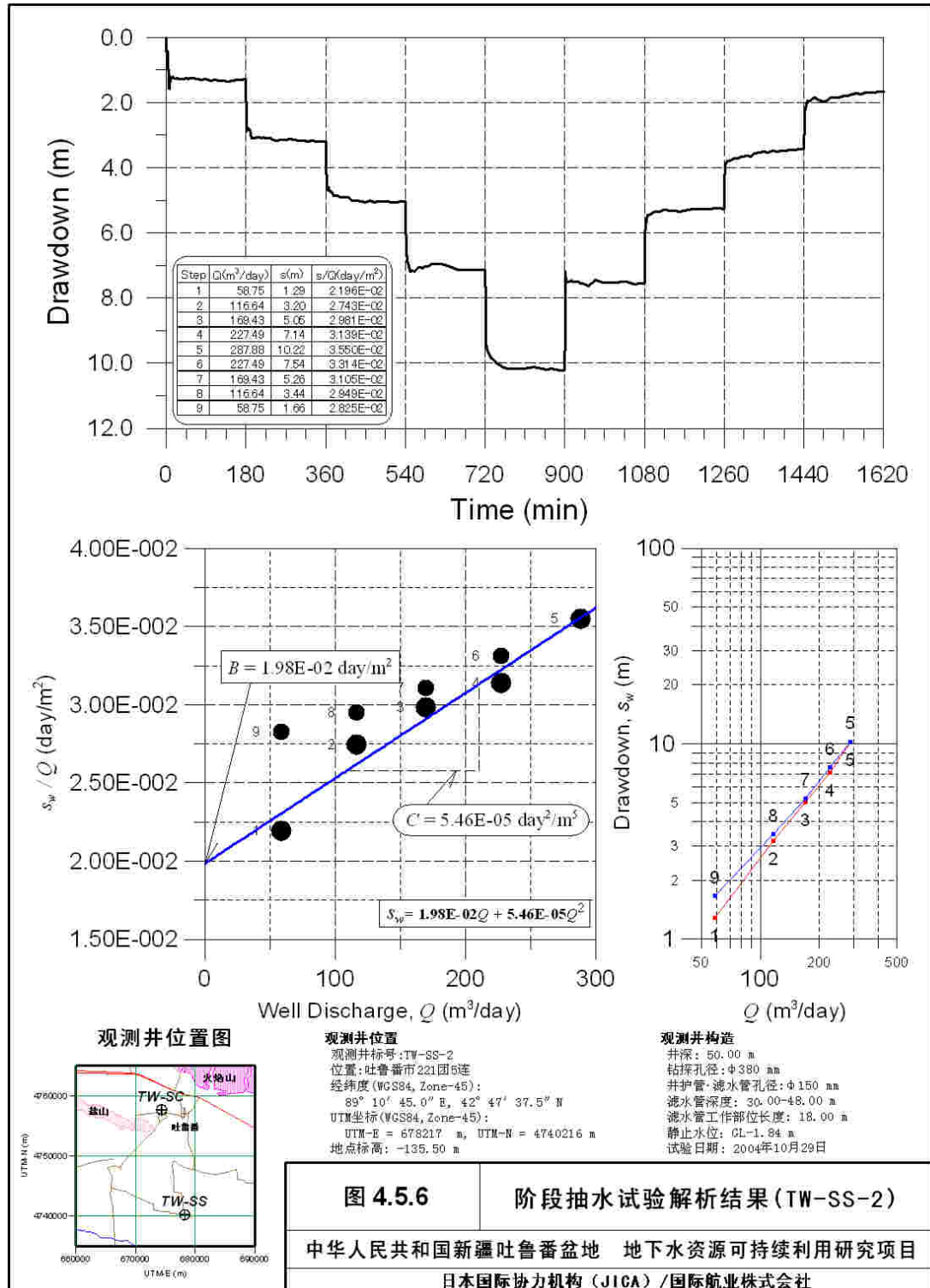
阶段抽水试验解析结果 (TW-SC-1)

中华人民共和国新疆吐鲁番盆地 地下水资源可持续利用研究项目

日本国际协力机构 (JICA) / 国际航业株式会社







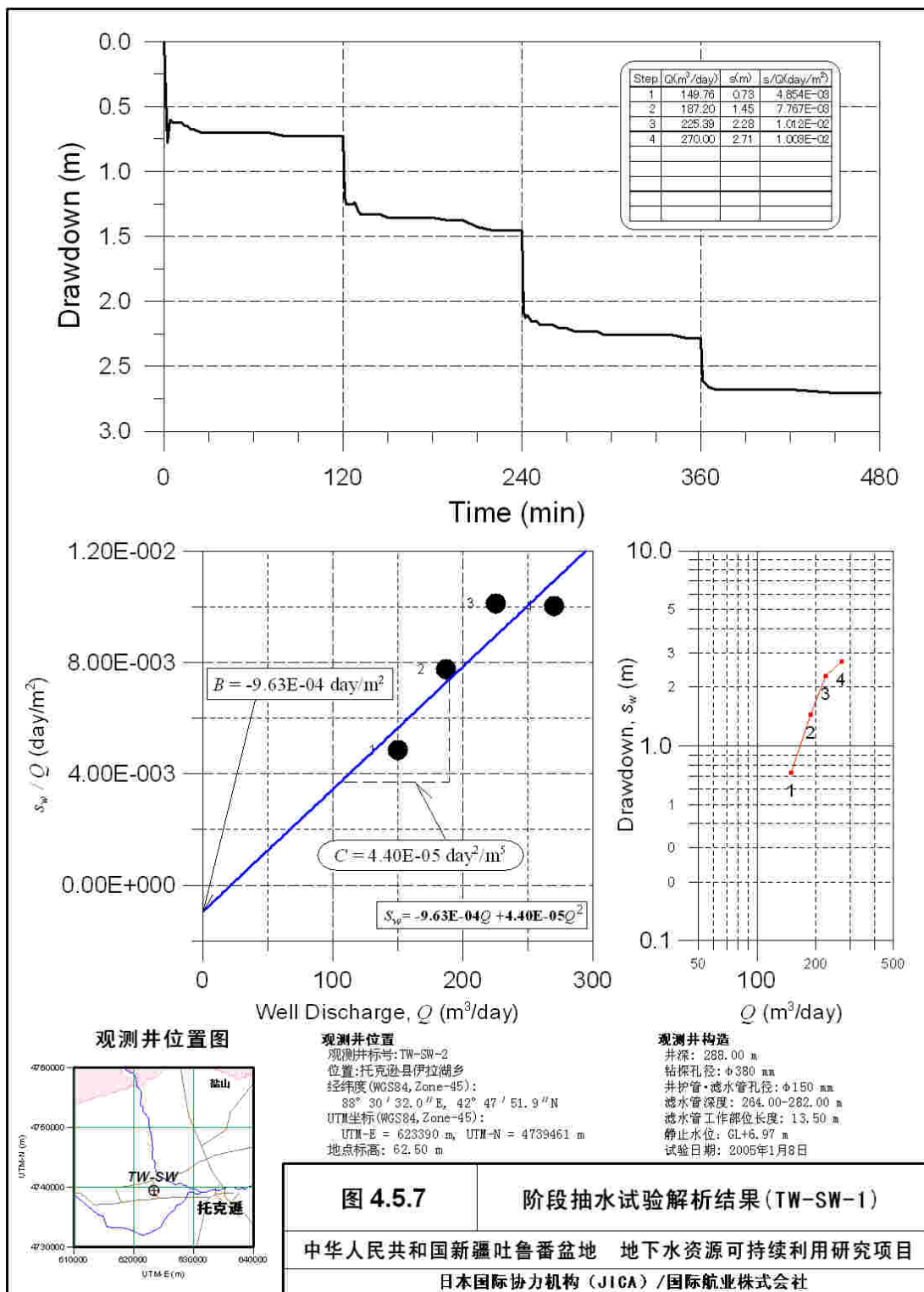
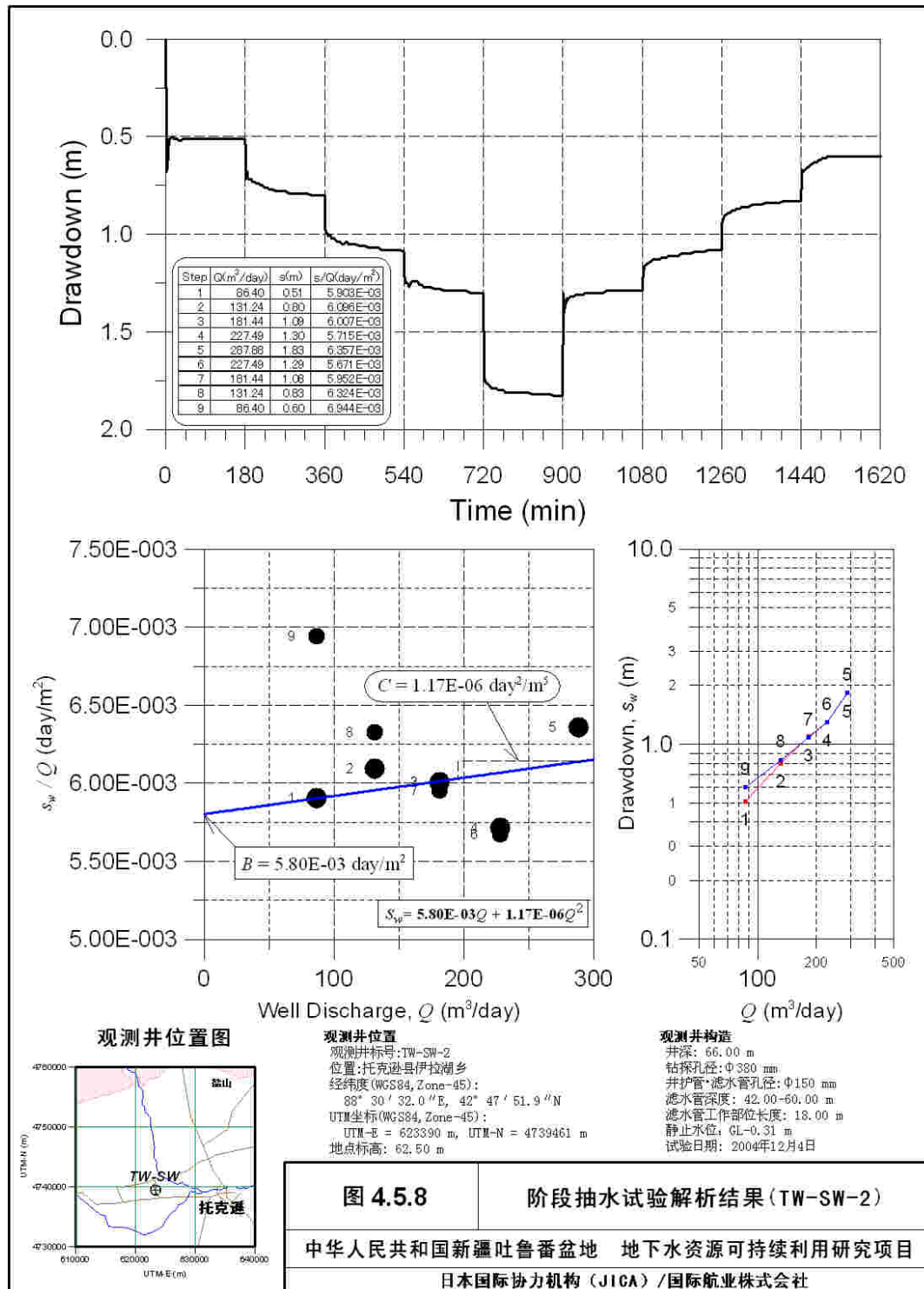


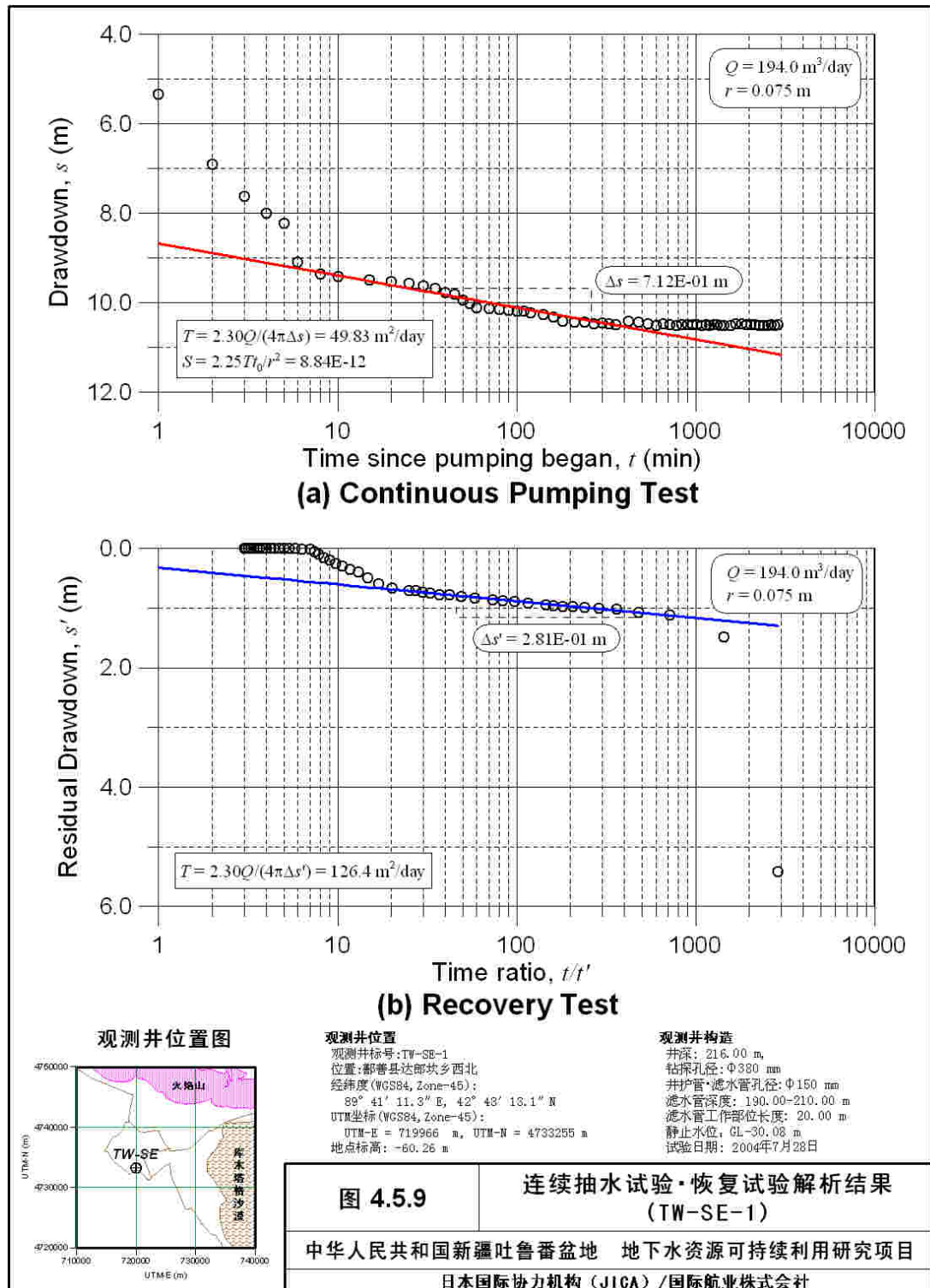
图 4.5.7

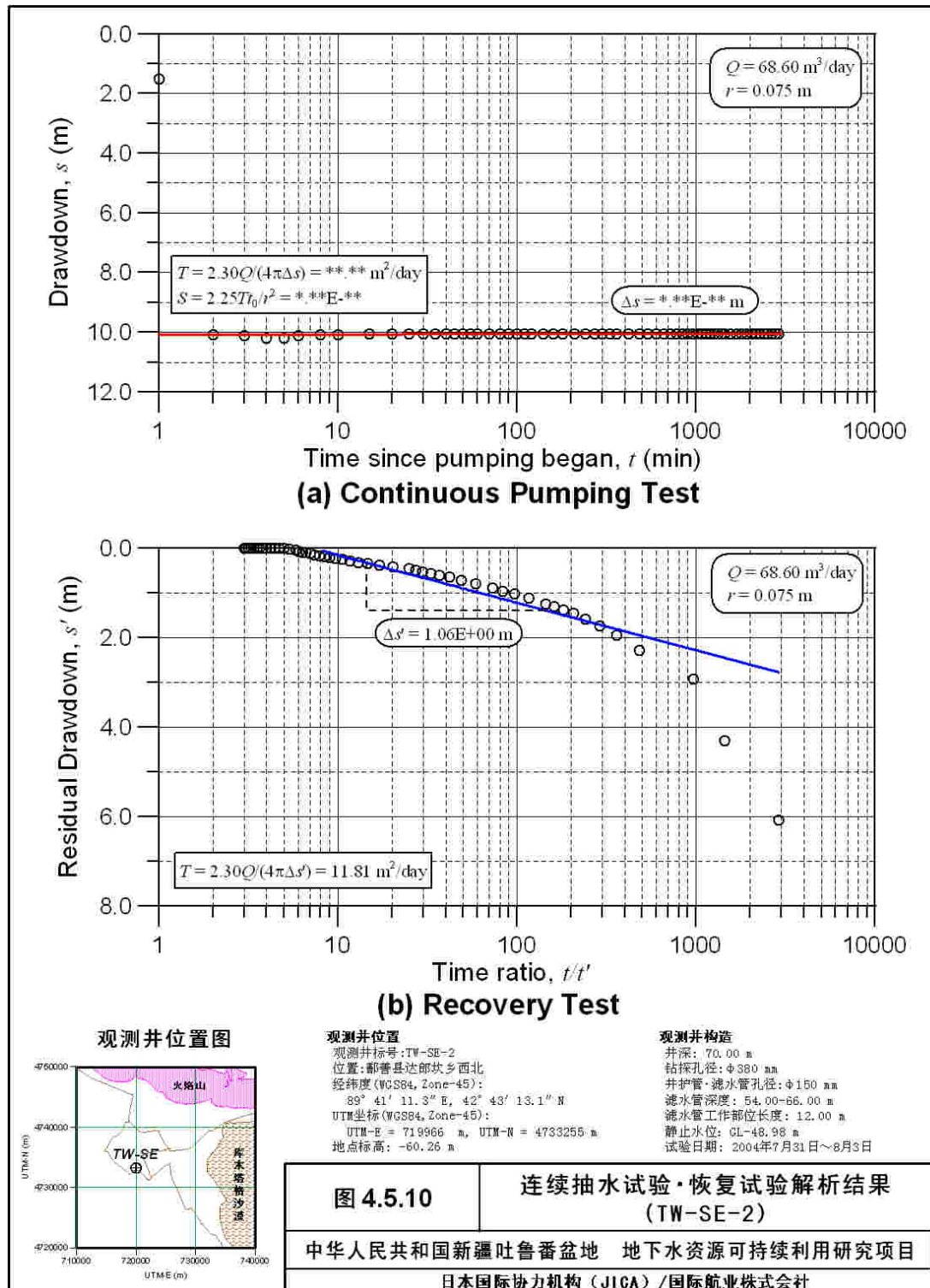
阶段抽水试验解析结果(TW-SW-1)

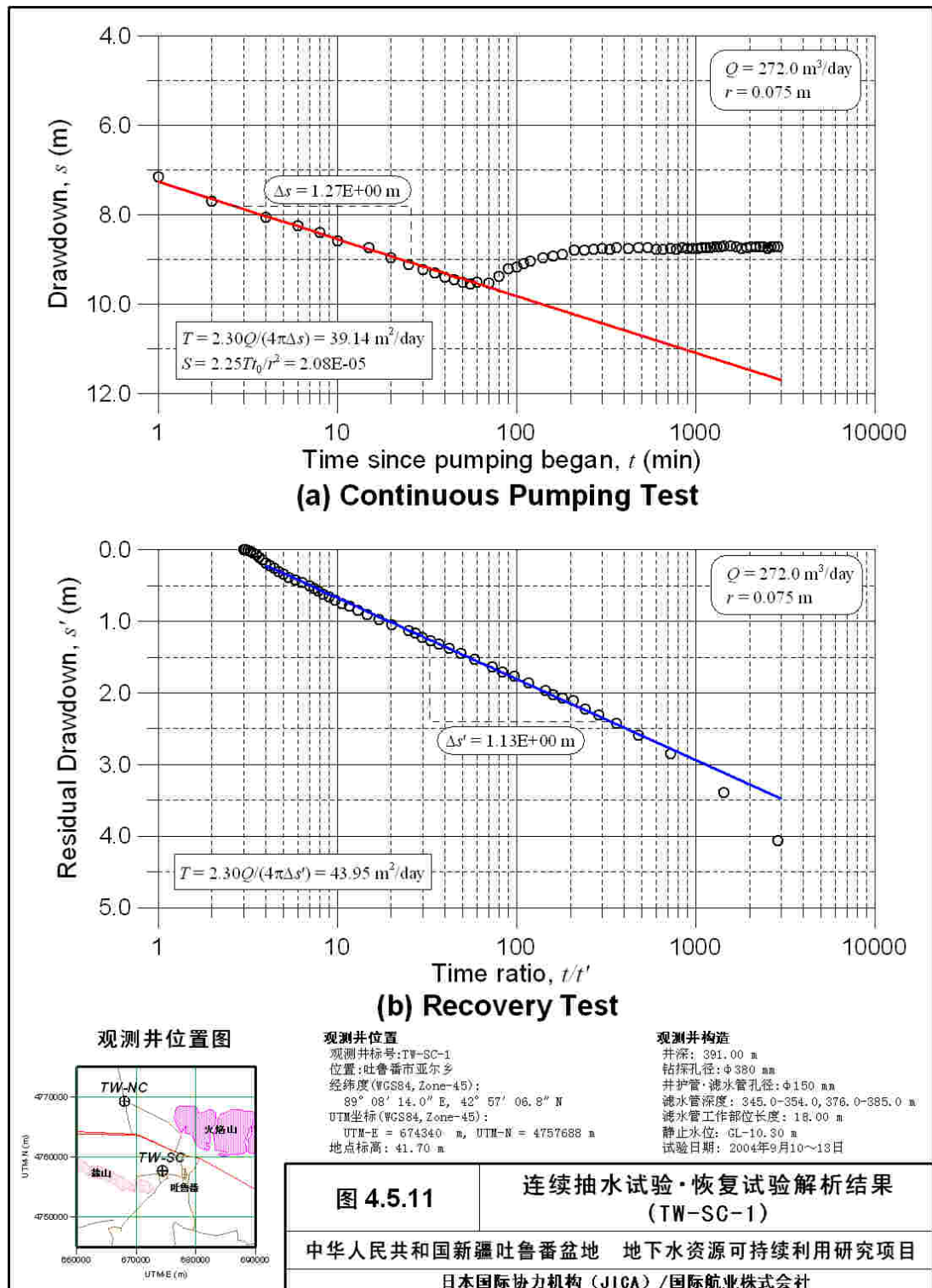
中华人民共和国新疆吐鲁番盆地 地下水资源可持续利用研究项目

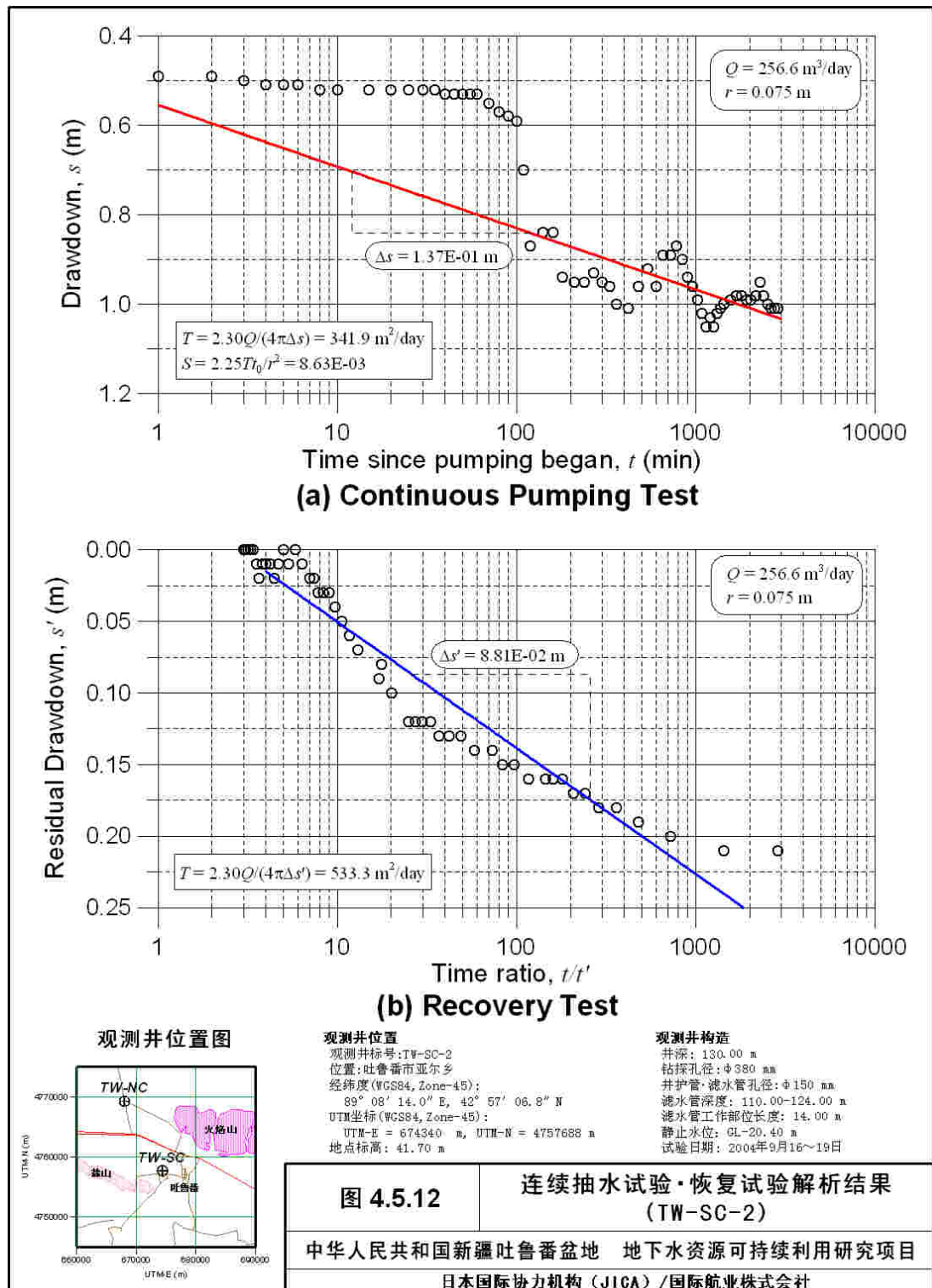
日本国际协力机构 (JICA) / 国际航业株式会社

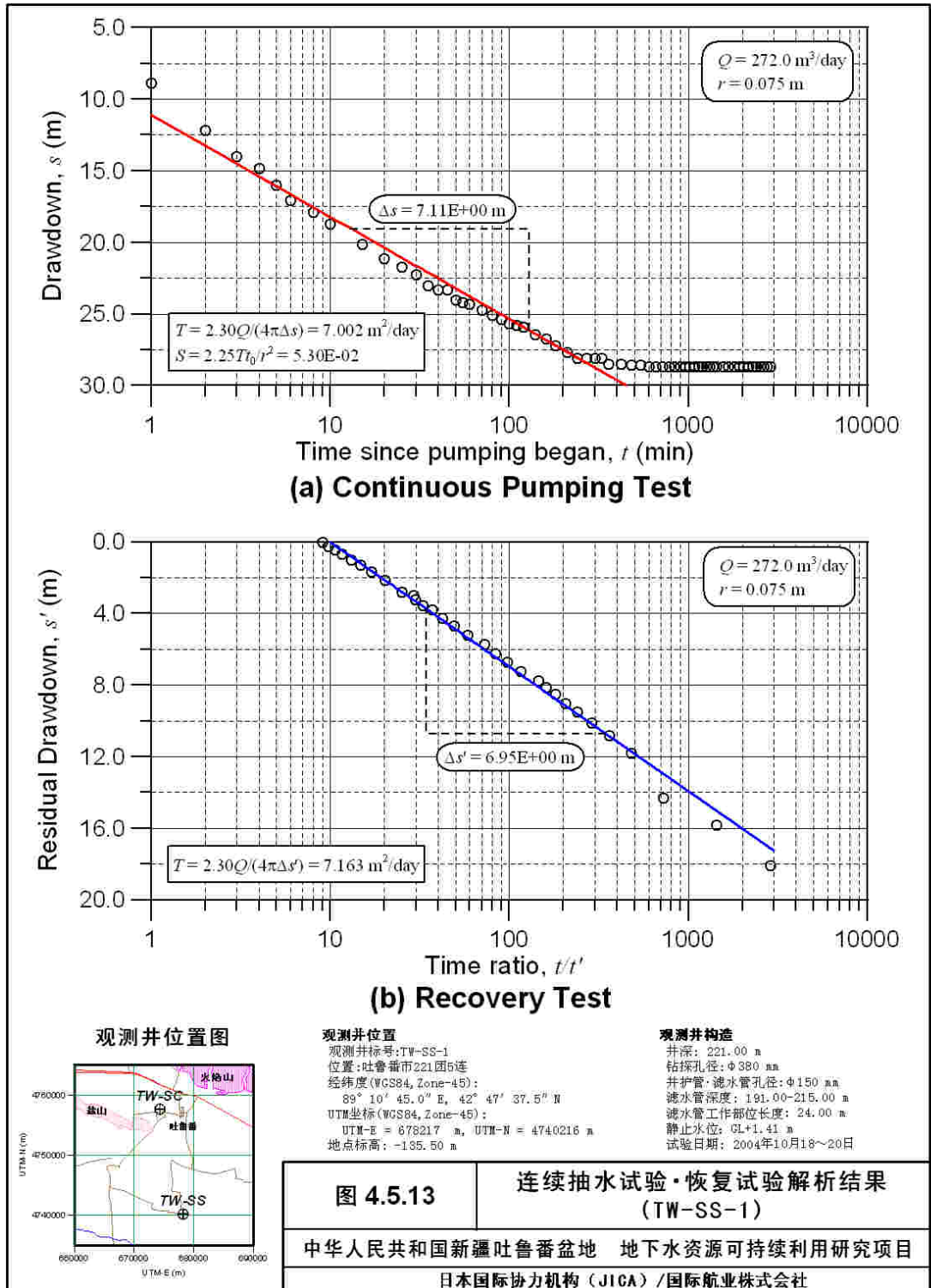


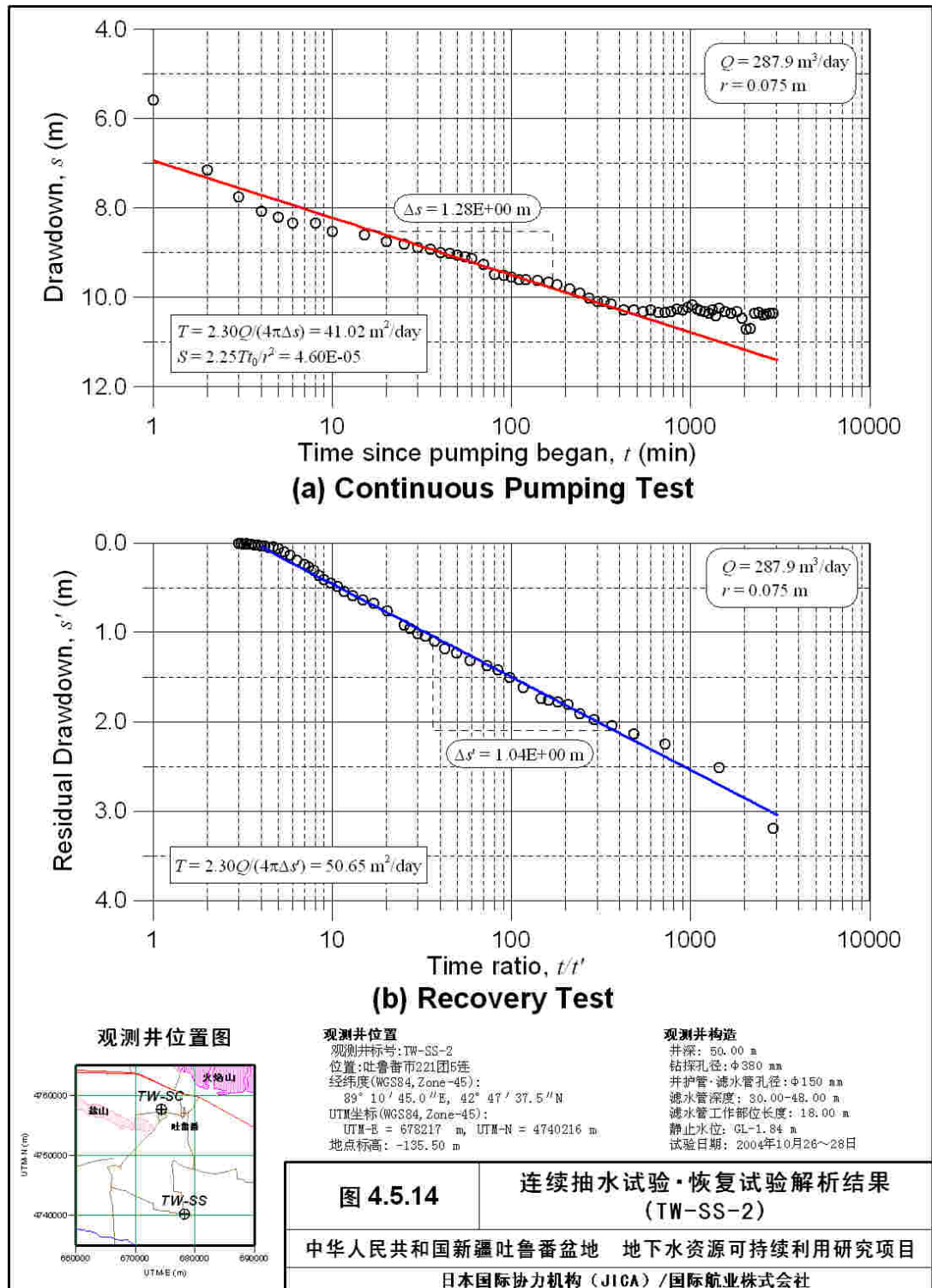


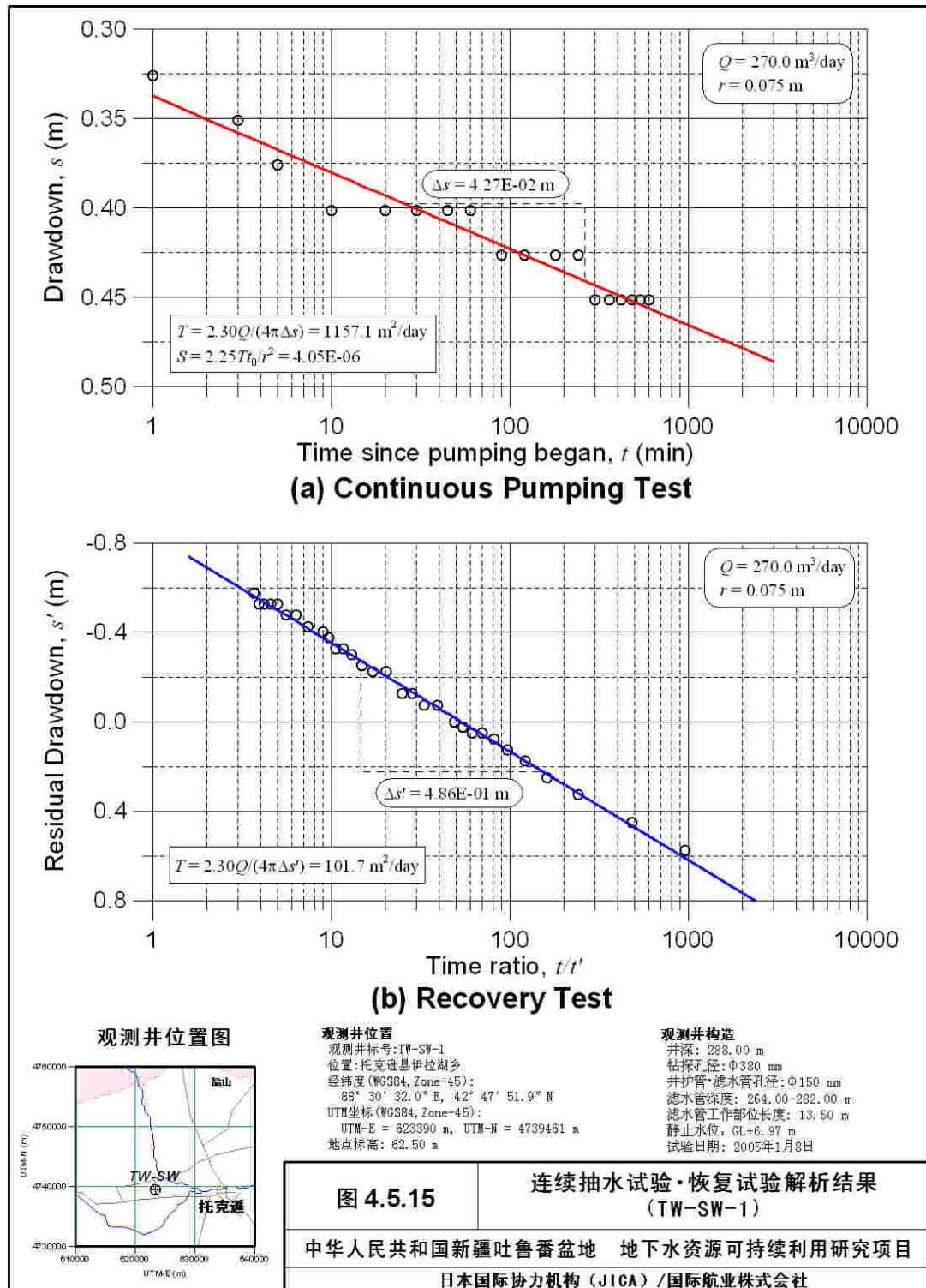


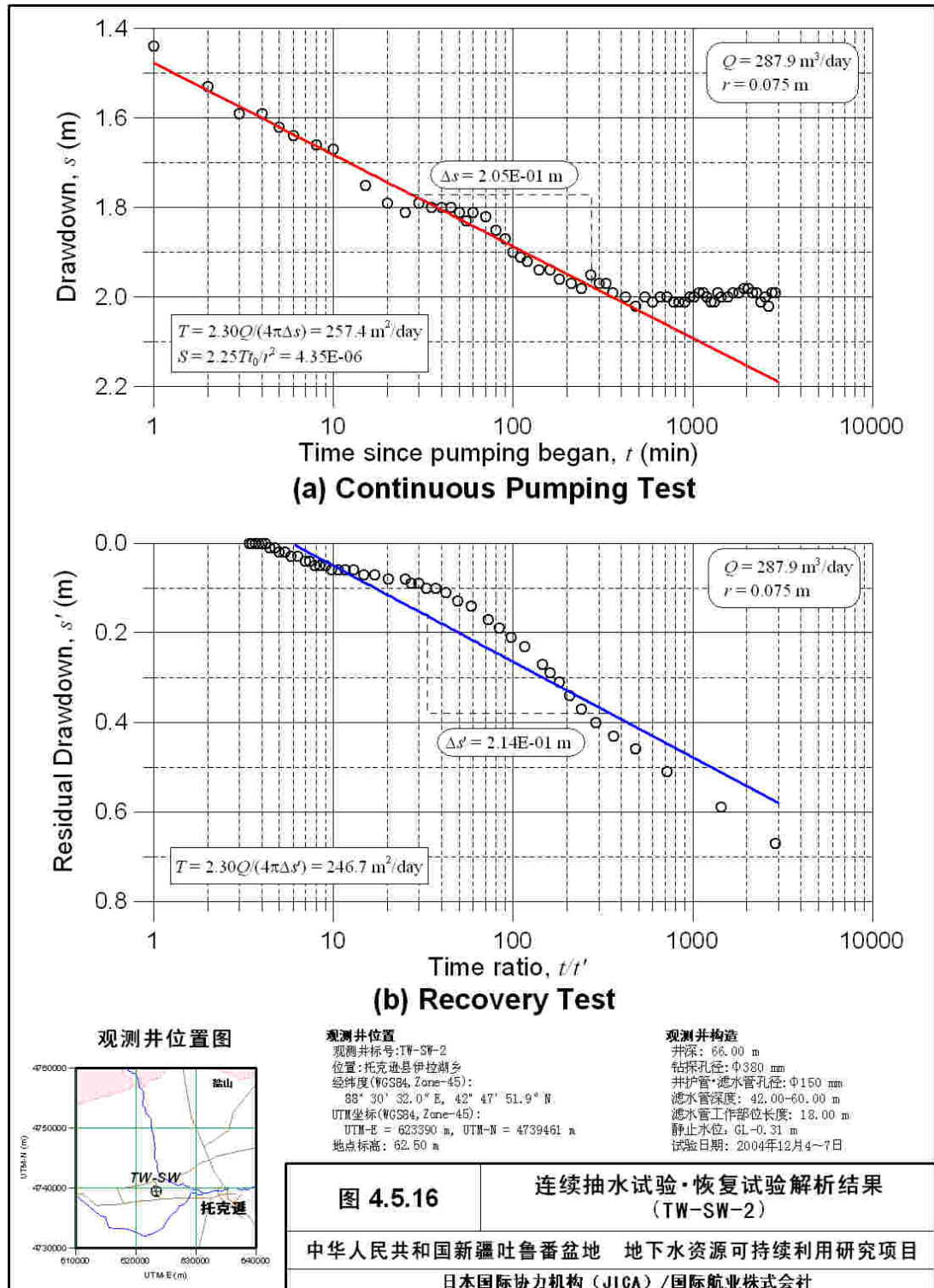


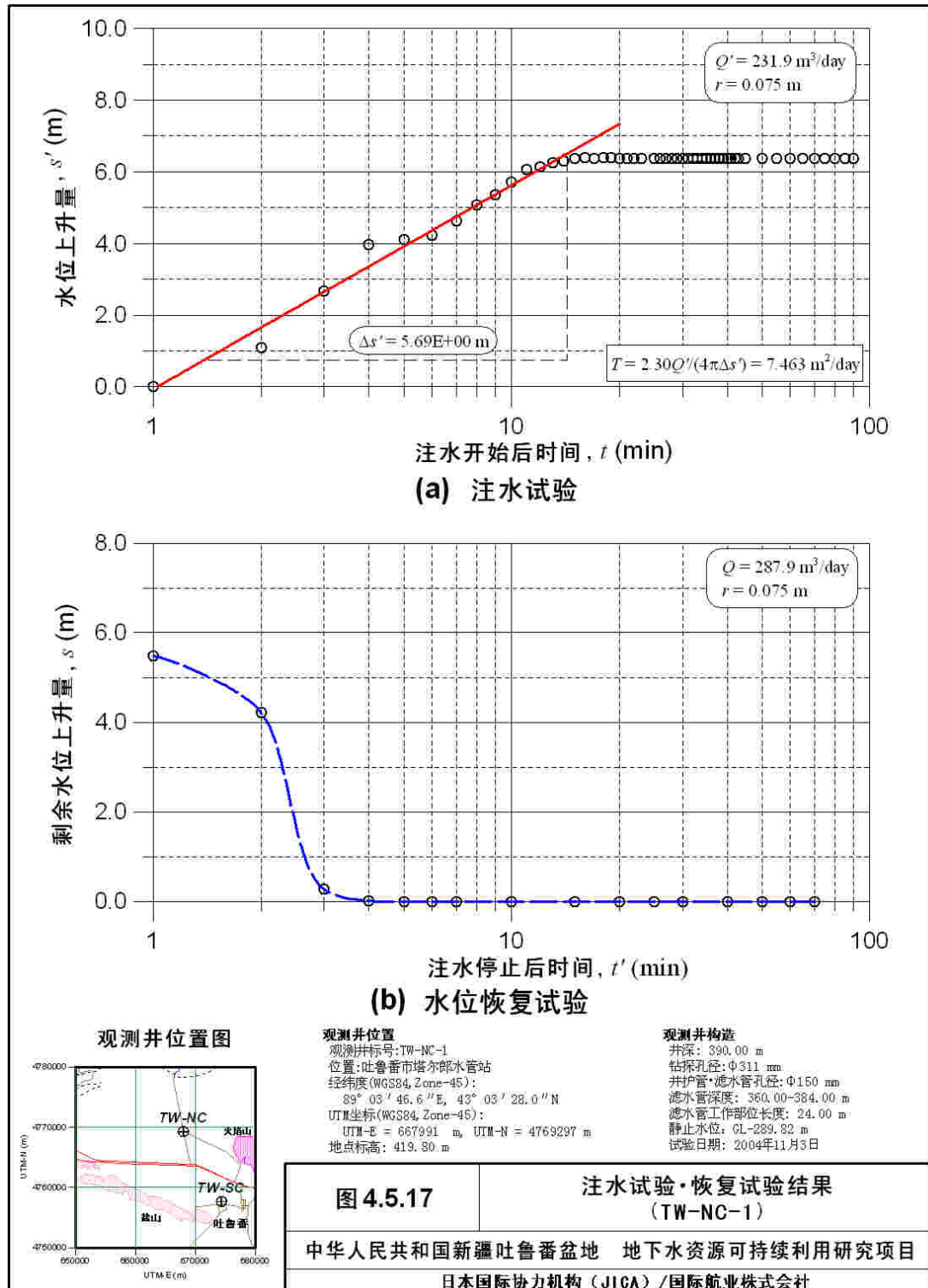












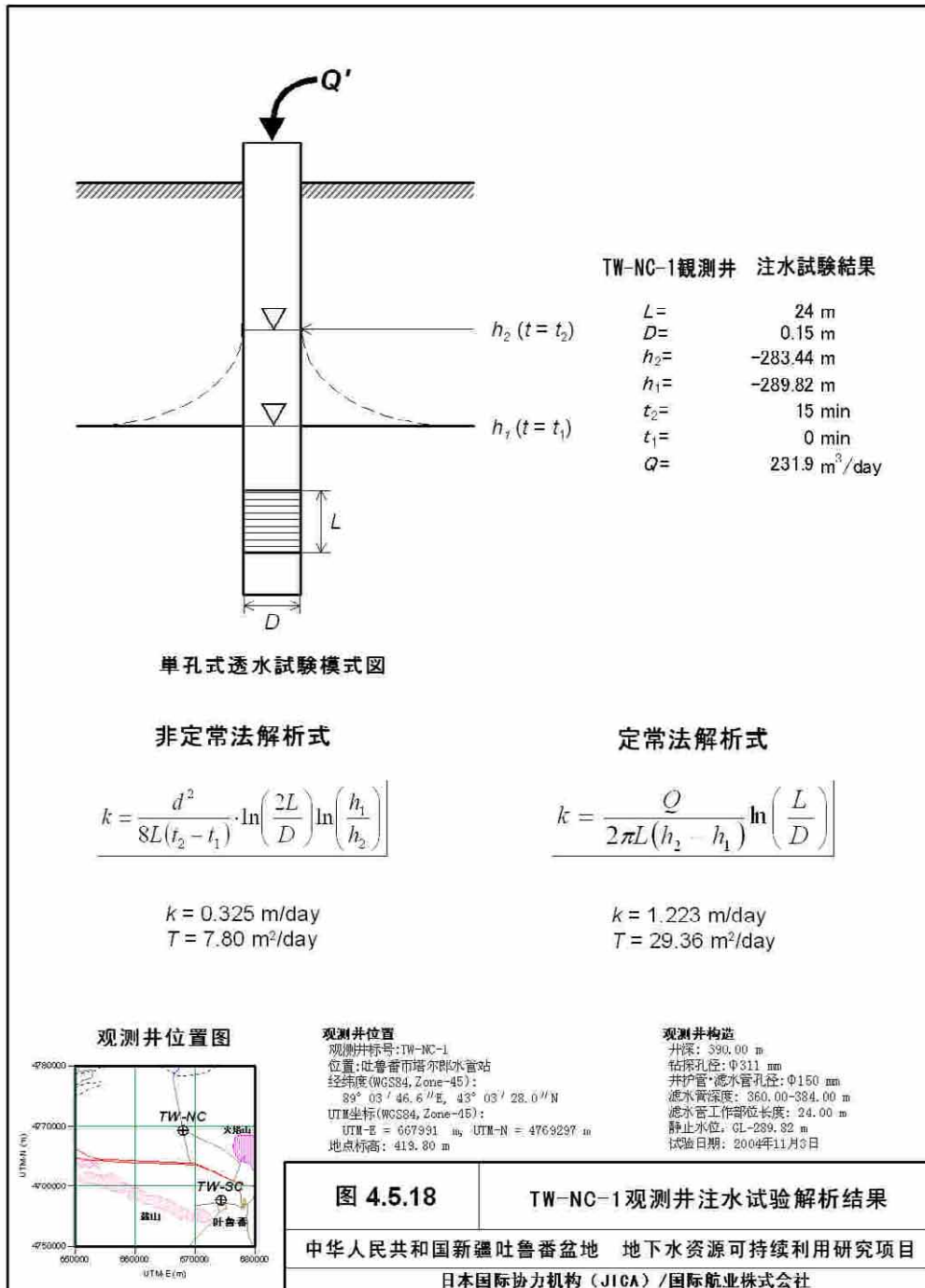


表 4.5.5 JICA 地下水观测井连续抽水试验·恢复试验结果汇总表

钻探 地点名	观测井 标号	钻探深度 (m)	井深度 (m)	滤水管深度 (m)	滤水管 工作部位 长度 (m)	试验日期 (Y/M/D)	静止水位 (m)	连续抽水试验			恢复试验			综合评价			备 考
								抽水量 (m ³ /day)	最后水位 下降量 (m)	比涌水量 (m ² /day)	导水系数 (m ² /day)	贮水系数	导水系数 (m ² /day)	贮水系数	导水系数 (m ² /day)	导水系数 (m ² /day)	
				Q	s	Sc	T	K									
TW-SE	TW-SE-1	245.9	216.0	190.0-210.0	20.0	2004/7/28	-30.08	194.0	10.50	18.48	49.83	8.84E-12	126.4	49.83	2.492	2.70	
	TW-SE-2	70.0	70.0	54.0-66.0	12.0	2004/7/31	-48.98	68.60	<10.06	8.99	-	-	11.81	11.81	0.984	1.31	水位異常底下のため 連続試験解析不能
TW-SC	TW-SC-1	409.3	391.0	345.0-354.0 376.0-385.0	18.0	2004/9/10	-10.30	272.0	8.71	31.23	39.14	2.08E-05	43.95	41.48	2.304	1.33	
	TW-SC-2	130.0	130.0	110.0-124.0	14.0	2004/9/16	-20.40	256.6	1.01	254.1	341.90	8.63E-03	533.3	427.0	30.50	1.68	
TW-SS	TW-SS-1	253.4	221.0	191.0-215.0	24.0	2004/10/18	+1.41	272.0	28.18	9.65	7.002	5.30E-02	7.163	7.082	0.295	0.73	
	TW-SS-2	50.0	50.0	30.0-48.0	18.0	2004/10/26	-1.84	287.9	10.36	27.79	41.07	4.60E-05	50.65	45.58	2.532	1.64	
TW-SW	TW-SW-1	301.4	288.0	268.5-282.0	13.5	2005/1/8	+6.97	270.0	2.73	98.83	1157.10	4.05E-06	101.70	101.70	7.53	1.03	高い被圧水頭を有する 自噴井であり連続試験 に問題あり
	TW-SW-2	66.0	66.0	42.0-60.0	18.0	2004/12/4	-0.31	287.9	1.99	144.7	257.4	4.35E-06	246.7	262.0	14.56	1.81	
TW-NC	TW-NC-1	400.4	390.0	360.0-384.0	24.0	2004/11/3	-289.82	231.9	6.38	36.35	7.463	-	29.36	29.36	1.223	0.81	注水試験と実施