

第五章 地下水

地下水是地壳中重要的天然资源，也是岩土三相组成的重要组成部分，其对工程建设影响很大。地下水是工程地质分析、评价和地质灾害防治的重要影响因素。

5.1 自然界中的水

分布于大气圈、水圈和岩石圈中，称为大气水、地表水和地下水。

大循环：整个地球范围内的循环；

小循环：指陆地或海洋本身范围内的循环。

■ 岩土中的空隙：孔隙、裂隙及溶隙

将岩土空隙的大小、多少、形状、连通程度及分布状况等性质称为岩土的空隙性。

- 孔隙：指松散岩石（如粘土、砂土、砾石等）中颗粒或颗粒集合体之间存在的空隙。孔隙发育程度用孔隙度（ n ）表示。

孔隙度指孔隙体积（ V_n ）与包括孔隙在内的岩石总体积（ V ）的比值，用小数或百分数表示。

孔隙度的大小主要取决于岩石的密实程度及分选性，另颗粒形状和胶结程度对孔隙度也有影响。

$$n = \frac{V_n}{V} \quad \text{或} \quad n = \frac{V_n}{V} \times 100\%$$

■ 裂隙

指坚硬岩石受地壳运动及其它内外地质营力作用的影响产生的空隙，裂隙发育程度用裂隙率（ n_f ）表示。

裂隙率是裂隙体积（ V_f ）与包括裂隙体积在内的岩石总体积（ V ）的比值，用小数或百分数表示。

■ $n_T = V_T / V * 100\%$

■ 溶隙

指可溶岩（石灰岩、白云岩等）中的裂隙经地下水流长期溶蚀而形成的空隙，溶隙的发育程度用溶隙率（ n_k ）表示。

溶隙率是溶隙的体积（ V_k ）与包括溶隙在内的岩石总体积（ V ）的比值，用小数或百分数表示。

$$■ K_k = V_k / V * 100\%$$

水在岩石中存在的形式：地下水指存在于地壳表面以下岩土空隙中的水，其有有气态、液态和固态三种形式。

根据岩土中水的物理力学性质可将地下水分为：

- 气态水：

- 液态水：

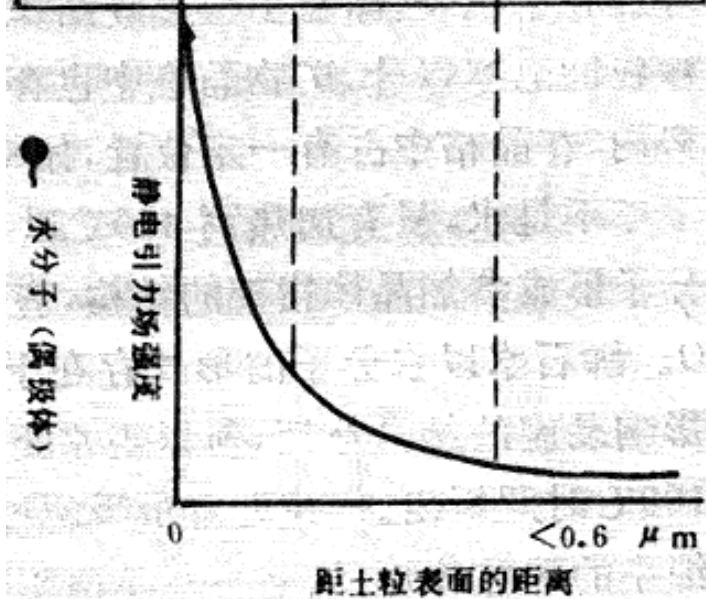
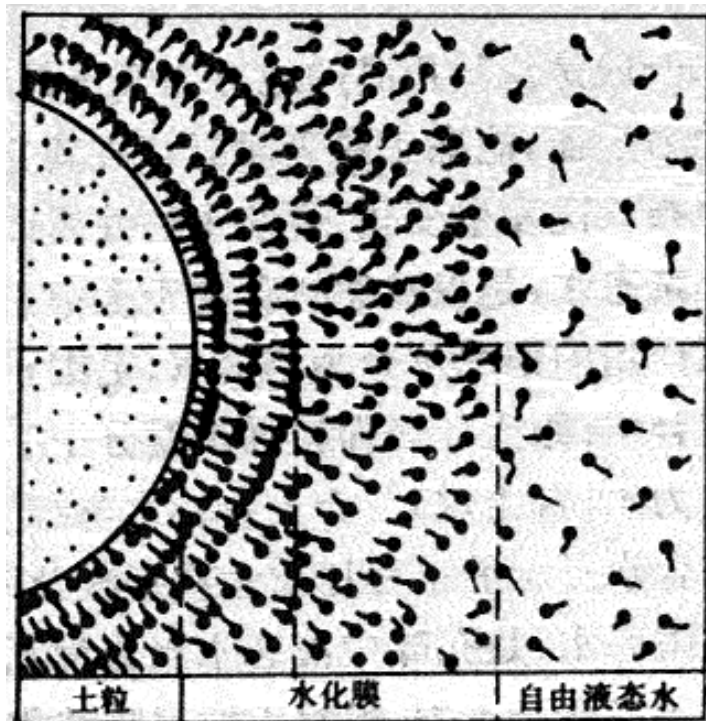
吸着水：强结合水。

薄膜水：弱结合水。

毛细水：

重力水：固态水：

- 矿物水：存在于矿物结晶内部及其间的水。



毛细水指在岩土细小的孔隙和裂隙中，在毛细作用下运动的水，它是岩土中三相界面上毛细力作用的结果。岩石颗粒表面和空隙壁面在静电吸引作用下，会吸附水分子。这类水束缚于颗粒表面及空隙壁面，不能在自身重力作用下运动，而且还可逆重力而运动（毛细运动）。

毛细水对建筑工程的意义主要有：

- A. 产生毛细压力，使砂土（主要是细砂、粉砂）具有一定的粘聚力（假粘聚力）；
- B. 毛细水会影响土中气体的分布与流通，常常会导致产生封闭气体；
- C. 当地下水位埋深变浅时，由于毛细水上升，可助长地基土的冰冻现象；使地下室潮湿；危害房屋基础及公路路面，促使土的沼泽化、盐渍化。

重力水：指存在于岩石颗粒之间，结合水层之外，不受颗粒静电引力的影响，可在重力作用下运动的水。

具有液态水的一般特征，可传递静水压力；
重力水能产生浮托力、孔隙水压力；流动的重力水在运动过程中会产生动水压力；
重力水具有溶解能力，对岩石产生化学潜蚀，导致岩石的成分及结构破坏。

岩土的水理性质：与水分的贮存和运移有关的岩土性质。

含水性：指岩土含水的性质，通常用容水度或持水度来表示。

■ **容水性：**岩土能容纳一定水量的性能。

容水度指岩土空隙完全被水充满时的含水量，即岩土空隙中所能容纳的最大的水的体积与岩土体积之比，以小数或百分数表示。容水度在数值上与孔隙度、裂隙率或岩溶率相等。但是，对于具有膨胀性的粘土来说，充水后体积扩大，容水度可以大于孔隙度。

$$W_n = V_n / V * 100\%$$

- **持水性**：岩土在重力作用下仍能保持一定水量的性能。
- **持水度**（最大分子含水量）指岩土颗粒的结合水达到最大数值时的含水量。饱水岩土在重力作用下释水时，一部分水从空隙中流出，另一部分水仍保持于空隙之中。故**持水度就是指受重力作用时岩土仍能保持的水的体积与岩土体积之比**。在重力作用下，岩土空隙中所保持的主要是结合水。

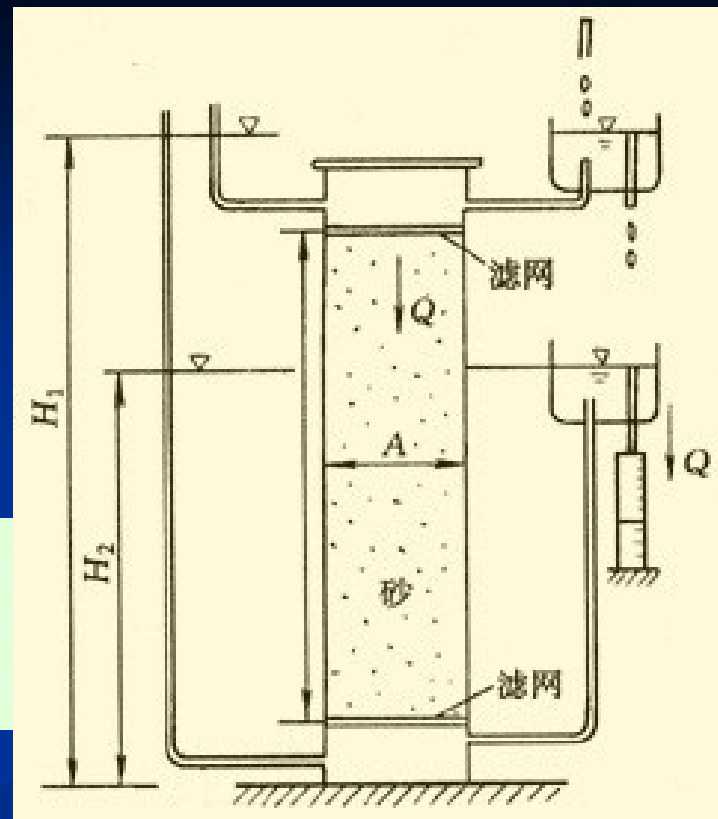
$$W_m = V_m / V * 100\%$$

- **给水性**：岩土体在重力作用下能给出部分水的性质。

给水度：指饱水岩土在重力作用下排出水的体积与岩土体积之比，在数值上等于容水度减去持水度。岩土给水度的大小与有效孔隙度有关，不同的岩土其给水度相差很大。给水度可用野外抽水试验确定，无试验资料时，可参照有关经验确定。

- **透水性：** 岩土能被水或其他液体透过的性能。常用渗透系数K表示。渗透系数K可用野外抽水试验或室内渗透试验来测定。

$$Q = KA \frac{H_1 - H_2}{L} = KAI \quad \text{或} \quad v = \frac{Q}{A} = KI$$



水力坡度 I 为沿渗流途径的水头损失与相应渗透途径长度的比值。地下水在空隙中运动时，受到空隙壁以及水质点自身的摩阻力，克服这些阻力保持一定流速，就要消耗能量，从而出现水头损失。

达西定律

- 1856年法国学者达西(H.Darcy)根据均质砂滤床实验提出，在层流状态下，土中水的渗透速度与水位差成正比，与渗流长度成反比。

$$v = \kappa \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

式中 Δh 为渗流起点和渗流终点（上游测压管和下游测压管）间的水位差； L 为渗流起点到渗流终点的距离； k 为土的渗透系数（cm / s）； v 为渗透速度（cm / s）。若令 $i = \frac{\Delta h}{L}$ ，并定义为水力坡降，则达西定律可表示为：

$$v = \kappa \cdot i$$

- 若以渗透流量表示时则有

$$q = \kappa \cdot i \cdot A$$

式中 q 为单位时间的渗流量或简称渗流量（cm³ / s）； A 为垂直于渗流方向土的截面积（cm²）。

- 土的渗透速度是指在一定的水力坡降下，单位时间内透过垂直于渗流方向的单位横截面面积土体的渗流量。

■ 含水层与隔水层

岩土体中含有各种状态的地下水，由于各类岩土体的水理性质不同，可将各类岩土层划分为含水层和隔水层。

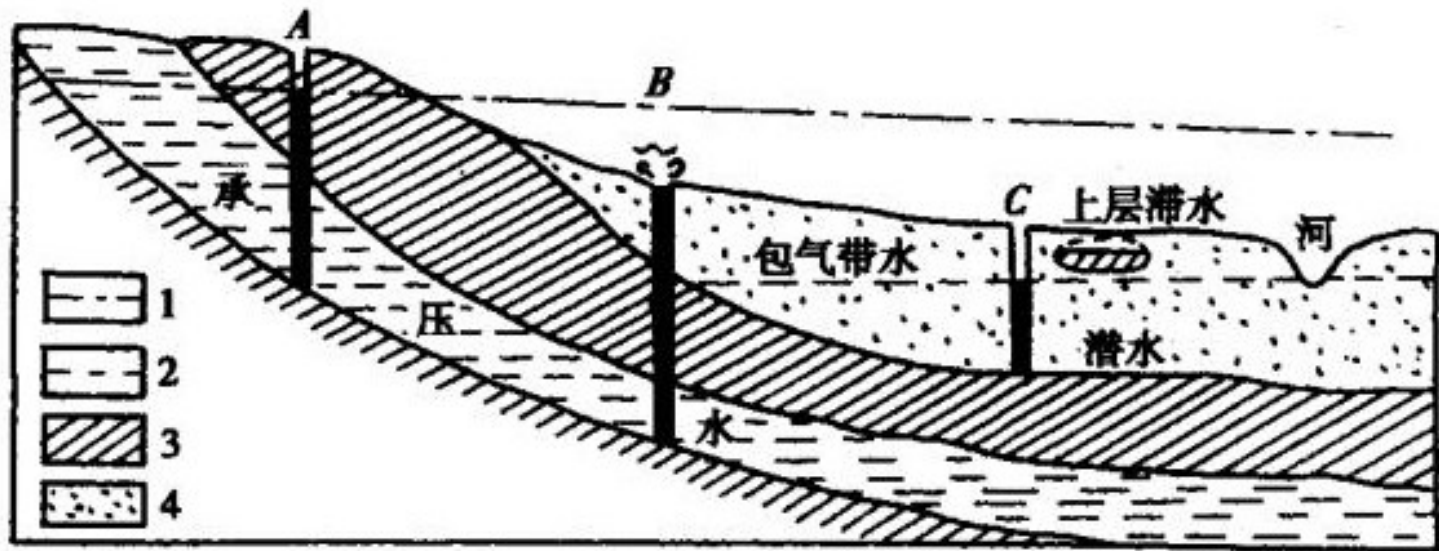
含水层指能够给出并透过相当数量重力水的岩层或土层。构成含水层的条件，一是岩土体中要有空隙存在，并充满足够数量的重力水；二是这些重力水能够在岩土空隙中自由运动。

具有蓄水空间、存水的地质结构和充足的补给来源三个条件。

隔水层指不能给出并透过水的岩层、土层，也包括那些给出与透过水的数量微不足道的岩层、土层，如粘土层。

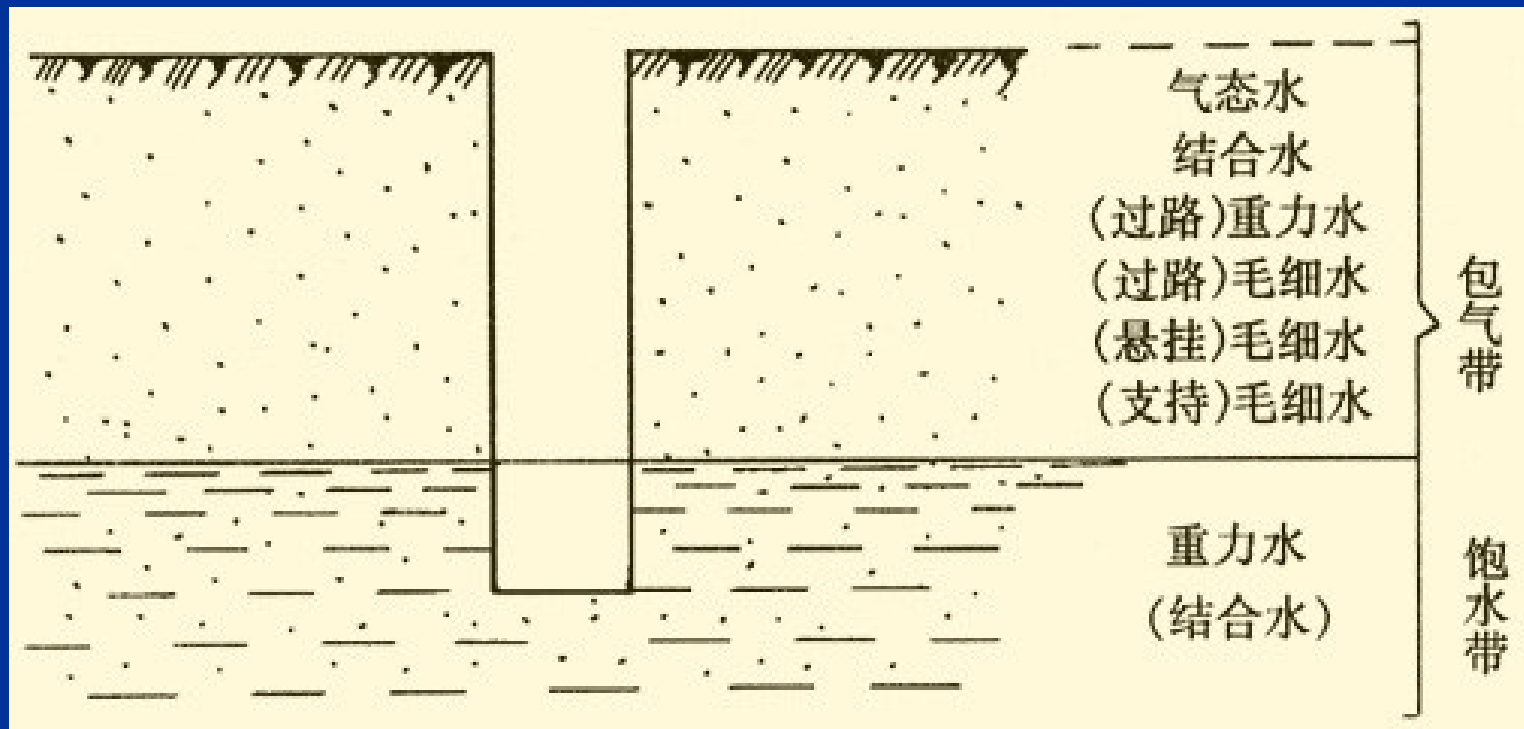
5.2 地下水分类

- 地下水按埋藏条件可分为包气带水、潜水、承压水；
- 根据含水层的空隙性质可分为孔隙水、裂隙水、岩溶水。



1. 包气带水:

指处于地表面以下潜水位以上的包气带岩土层中，包括土壤水、沼泽水、上层滞水以及基岩风化壳（粘土裂隙）中季节性存在的水。



- 土壤水：埋藏在包气带土层中的水。以结合水和毛管水形式存在。

靠大气降水的渗入、水汽的凝结及潜水由下而上的毛细作用的补给。

- 上层滞水：存在于包气带中，局部隔水层之上的重力水。

接近地表，补给区与分布区一致。接受当地大气降水或地表水的补给，以蒸发的形式排泄。

包气带水的主要特征是受气候控制，季节性明显，变化大，雨季水量多，旱季水量少，甚至干涸。包气带水对农业有很大意义，对工程建设有一定影响。

- **特征：**接近地表，接受大气降水补给，以蒸发形式或向隔水底板边缘排泄。动态变化很不稳定。

工程意义：常始料不及涌入基坑。

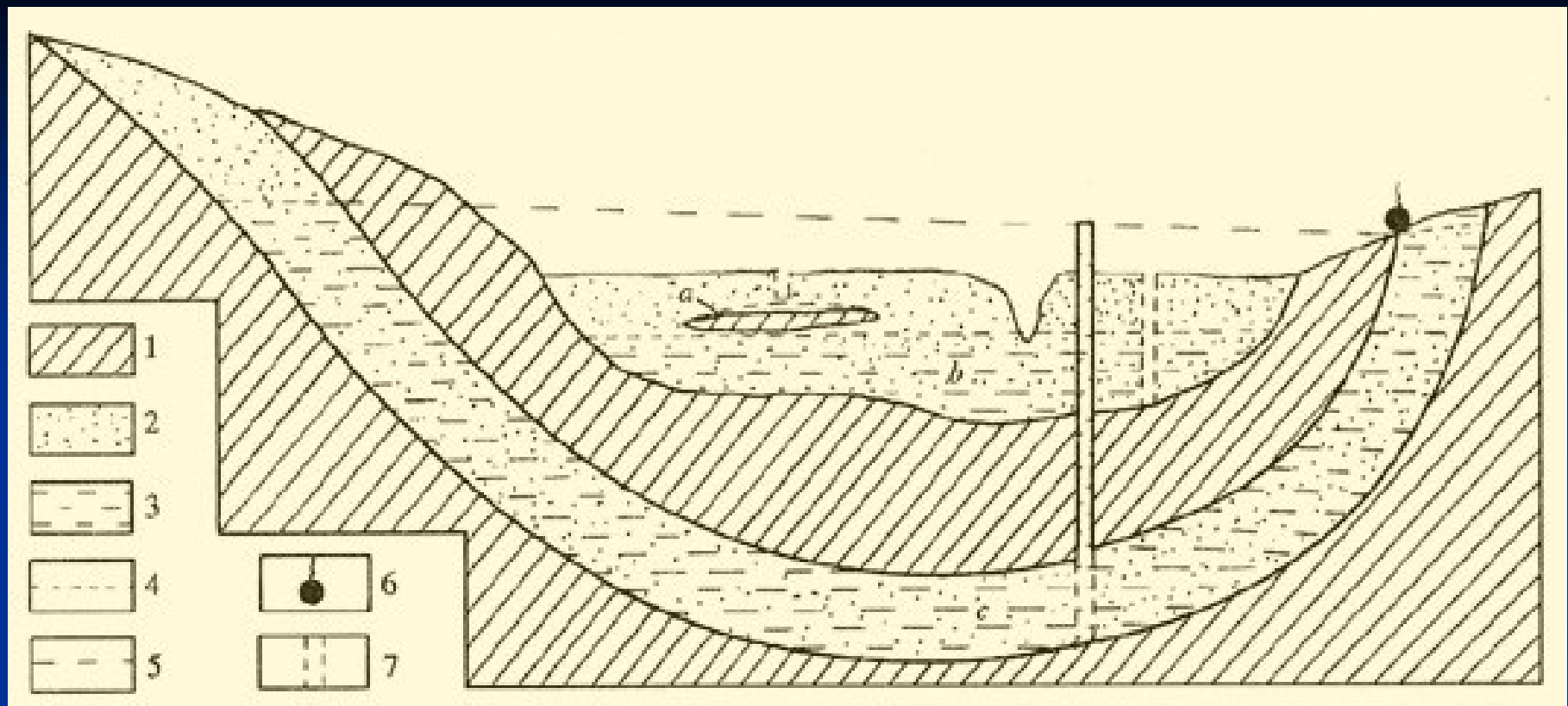
供水意义不大。

在寒冷地区易引起道路冻胀和翻浆。

2. 潜水：

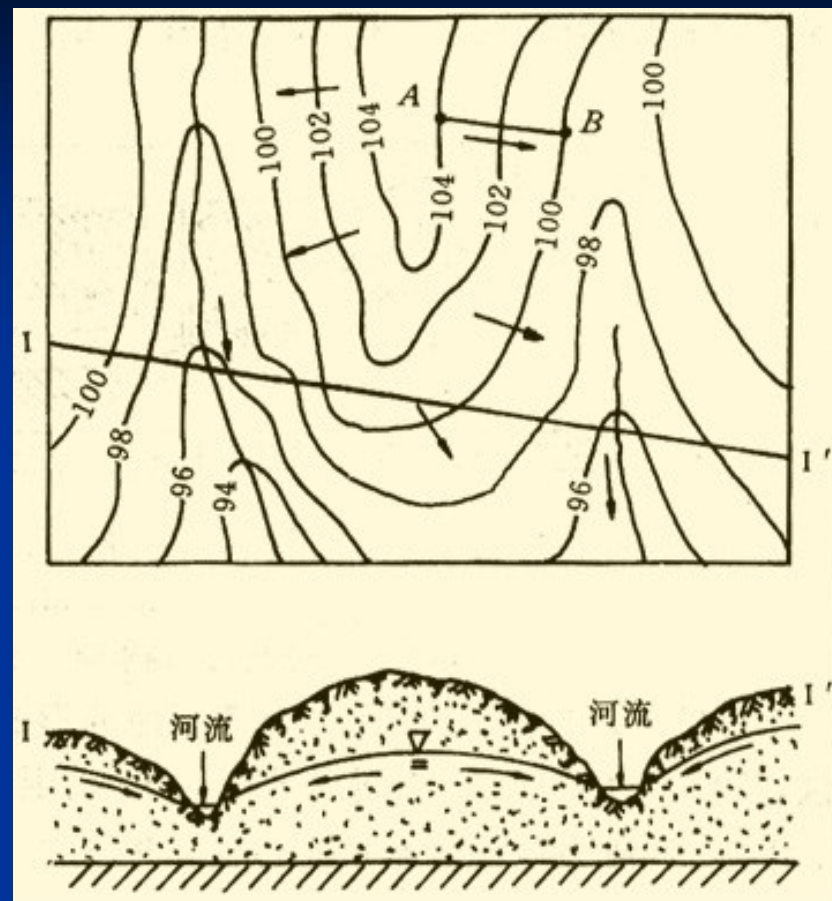
指埋藏在地表以下第一层较稳定的隔水层以上具有自由水面的重力水。

特征：与大气相通，具自由水面，补给区与分布区一致，动态受气候影响较大。潜水面形状受地形影响。



1-隔水层； 2-透水层； 3-饱水部分； 4-潜水位；
5-承压水测压水位； 6-泉(上升泉)； 7-水井；
a-上层滞水； b-潜水； c-承压水(自流水)

潜水的自由表面，承受大气压力，受气候条件影响，季节性变化明显，春、夏季多雨，水位上升，冬季少雨，水位下降，水温随季节而有规律的变化，水质易受污染。潜水面随时间而变化，其形状则随地形的不同而异，也和含水层的透水性及隔水层底板形状有关。



潜水等水位线图的作用：

- A. 确定潜水流向：在等水位线图上，垂直于等水位线的方向，即为潜水的流向；
- B. 计算潜水的水力坡度；
- C. 确定潜水与地表水之间的关系：如果潜水流向指向河流，则潜水补给河水；如果潜水流向背向河流，则潜水接受河水补给；
- D. 确定潜水的埋藏深度：某一点的地形等高线标高与潜水等水位线标高之差即为该点潜水的埋藏深度；
- E. 确定泉或沼泽的位置：在潜水等水位线与地形等高线高程相等处，潜水出露，即是泉或沼泽的位置。
- F. 推断给水层的岩性或厚度的变化：在地形坡度变化不大的情况下，若等水位线由密变疏，表明含水层透水性变好或含水层变厚；相反，则说明含水层透水性变差或厚度变小；
- G. 确定给水和排水工程的位置：水井应布置在地下水流汇集的地方，排水沟（截水沟）应布置在垂直水流的方向上。

潜水的补给来源主要有：大气降水、地表水、深层地下水及凝结水。

潜水对建筑物的稳定性和施工均有影响。建筑物的地基最好选在潜水位深的地带或使基础浅埋，尽量避免水下施工。若潜水对施工有危害，宜用排水、降低水位、隔离(包括冻结法等)等措施处理。

潜水与地表水的关系

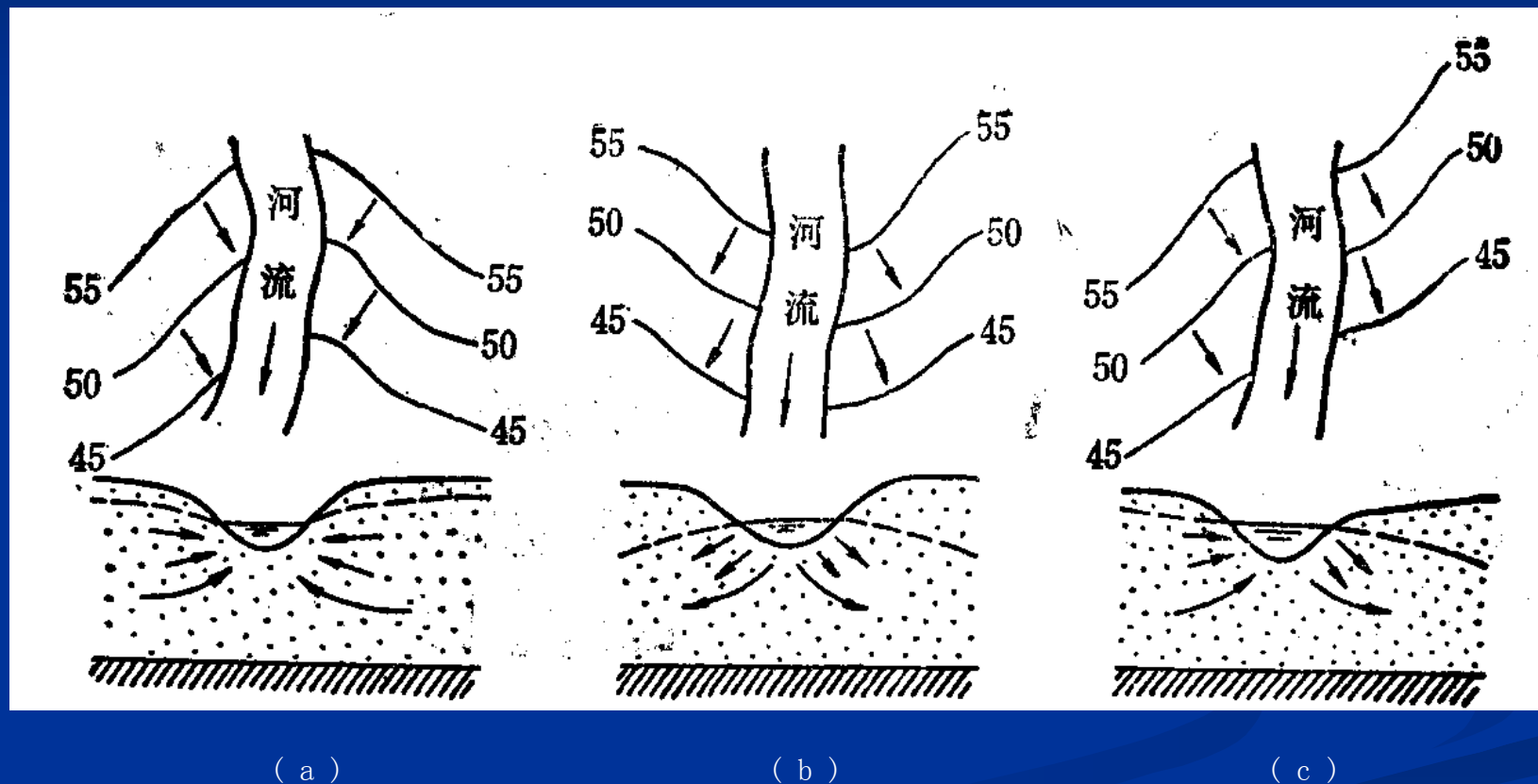


图 6-6 潜水与地表水之间的关系

潜水补给河流

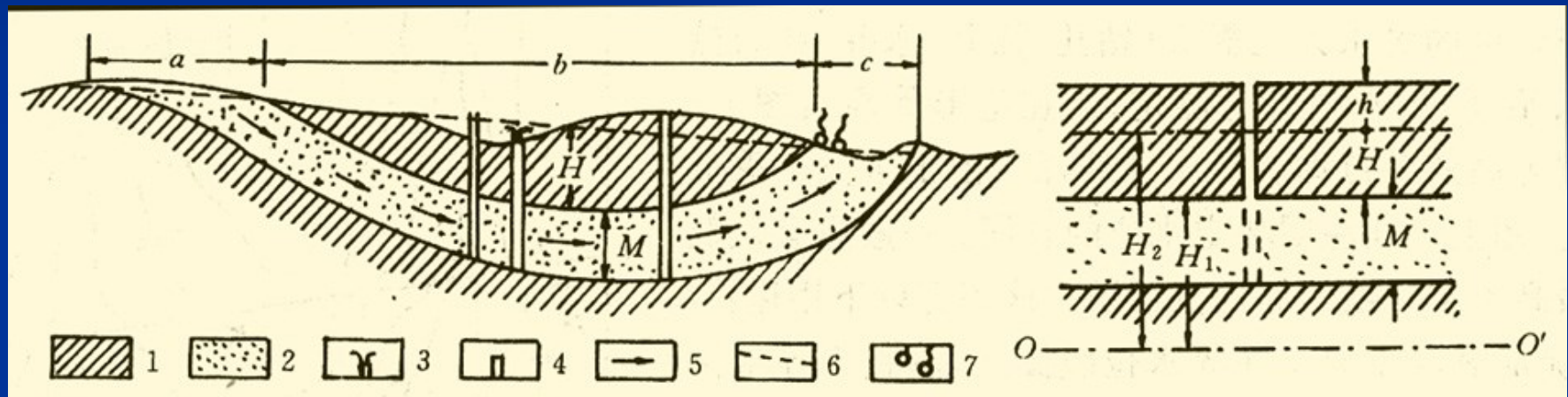
河流补给潜水

单侧补给

3. 承压水:

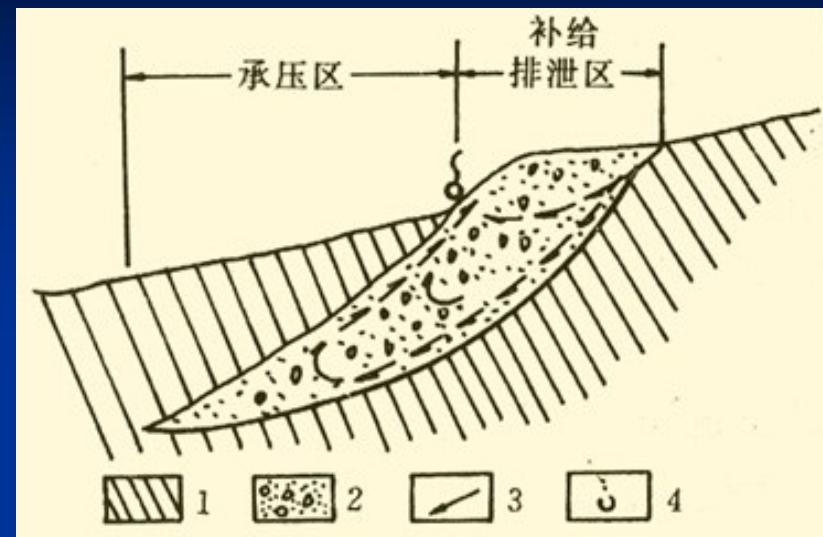
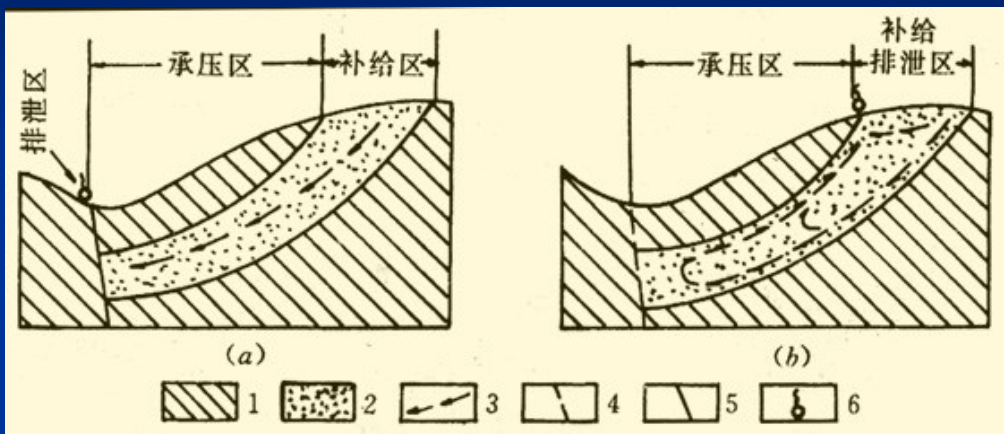
指地表以下充满两个稳定隔水层之间的重力水。

承压水的形成与所在地区的地质构造及沉积条件有密切关系，适宜形成承压水的地质构造大致有向斜构造盆地（自流盆地）和单斜构造（自流斜地）两种。



自流盆地构造图

1-隔水层 2-含水层 3-喷水钻孔 4-不自喷水钻孔
5-地下水流向 6-测压水位 7-泉



断裂构造形成的自流斜地

1-隔水层；2-含水层；
3-地下水流向；4-泉水；

由岩性变化形成的自流斜地

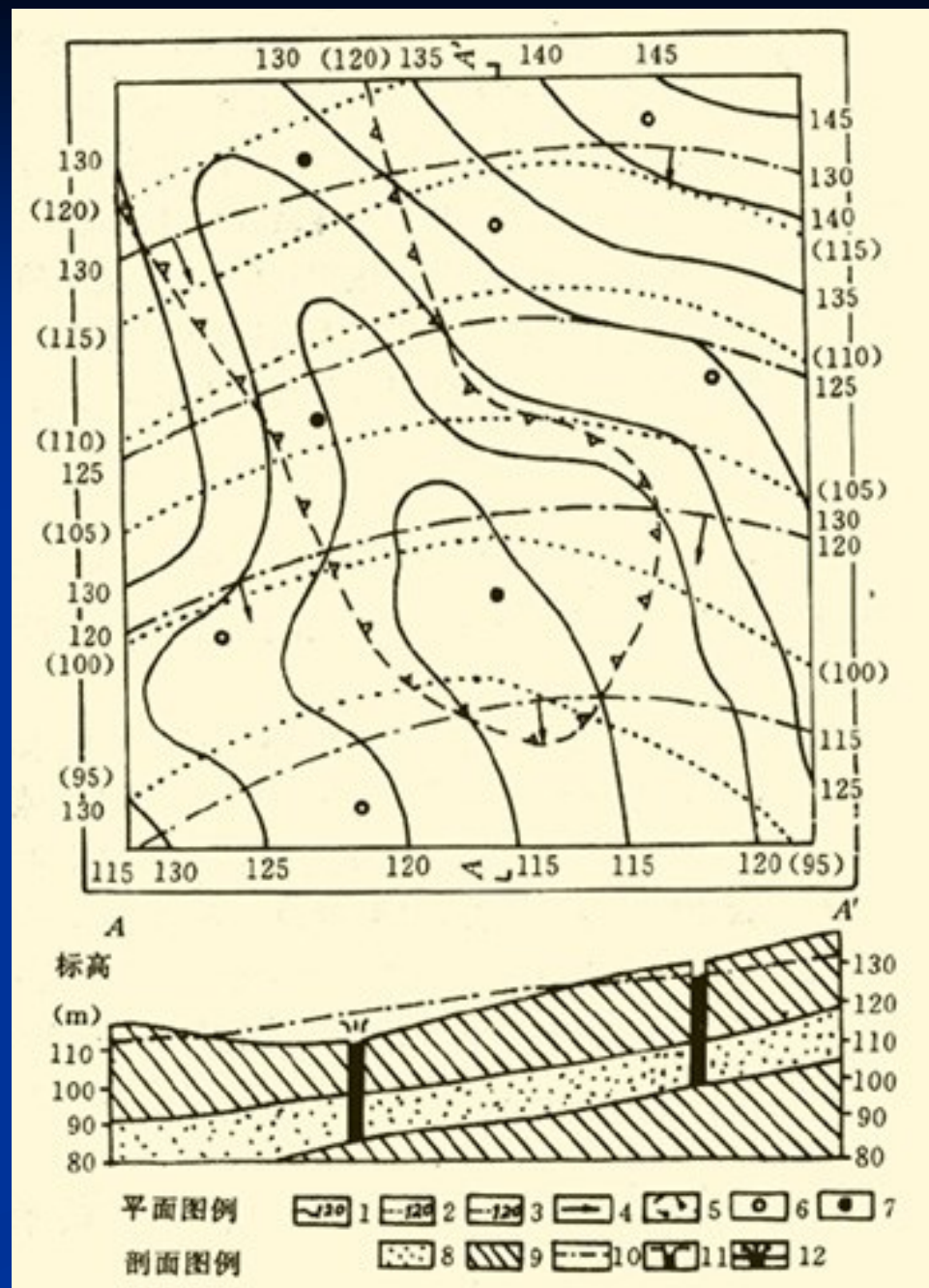
1-隔水层；2-含水层；
3-地下水流向；4-泉水

自流斜地

特征:

- 承压水不具自由水面，并承受一定的静水压力。
- 承压含水层的分布区与补给区不一致，常常是补给区远小于分布区，一般只通过补给区接受补给。
- 承压水的动态比较稳定，受气候影响较小。水质不易受地面污染。

承压水面在平面图上用承压水等水压线图表示，等水压线图指承压水面上高程相等点的连线图。等水压线图上必须附有地形等高线和顶板等高线，其可以判断承压水的流向及计算水力坡度，确定初见水位、承压水位的埋深及承压水头的大小等。



承压水等水位线图可确定 下列重要指标：

- 承压水位埋深
- 承压水头大小
- 含水层埋深（初见水位）

如图中A点：

地形标高103m，承压水位91m，含水层顶板标高83m。

则承压水位埋深为： $103 - 91 = 12\text{m}$

承压水头为： $91 - 83 = 8\text{m}$

含水层埋深为： $103 - 83 = 20\text{m}$



5.3 地下水的循环

- 1 地下水的补给：含水层自外界获得水量的作用称为补给。分大气降水入渗补给;地表水入渗补给;水汽凝结补给;人工补给。
- 2 地下水的排泄：含水层失去水量的过程称为排泄。分泉水排泄、向地表水排泄、蒸发排泄。
- 3 地下水的径流：地下水由补给区流向排泄区的过程称为径流。

5.4. 地下水的物理性质和化学成分

•地下水的物理性质

包括温度、颜色、透明度、气味、味道、导电性及放射性等。

•地下水的化学成分

(1) 气体成分

(2) 离子成分：阳离子与阴离子

(3) 胶体成分与有机质

地下水的主要化学性质：

- 地下水的酸碱性：pH值
- 地下水的总矿化度：地下水中所含各种离子、分子与化合物的总量。以105-110度将水烘干所得的干涸残余物总量表示。
- 地下水硬度：水中所含钙镁离子的总量为总硬度。

分总硬度、暂时硬度、永久硬度。

- 水质分析:
 - 简分析
 - 全分析
 - 专门分析

6 地下水运动与动态

6.1 重力水运动

水在压力坡降作用下穿过土中连通孔隙发生缓慢流动的现象称为水的渗透。土体被水透过的难易程度称为土的渗透性(土体被水透过的性能称为土的渗透性)。

- 土的渗透在工程中具有重要的意义。在水利工程中，水的渗透会引起两方面的问题：一是**渗漏问题**；二是**渗透稳定性问题**。前者是研究因渗透引起的水量损失。而后者则是研究受渗流影响时的土体稳定性问题。在建筑工程中，深基坑开挖中的边坡及地基的稳定性、降水设计和外力作用下饱和土的固结等都和土的渗透问题有关。

渗流分类

均匀流：渗流速度沿流程不变。

非均匀流：渗流速度沿流程变化。

层流：水质点有秩序地呈相互平行而互不干扰的运动。

紊流：水质点相互干扰而呈无秩序的运动。

稳定流：渗流要素不随时间变化的运动。

非稳定流：渗流要素随时间变化的运动。

- 地下水按流线形态划分的流动状态有**层流**和**紊流**两种状态。若水流流动过程中每一水质点都沿一固定的途径流动，其流线互不相交，则称其为层流状态，简称层流。水流流动时，水质点的流动途径是不规则的，其流线在流动过程中相交再相交，并在流动过程中产生漩涡，则称其为紊流状态或紊流。

🔴 渗流

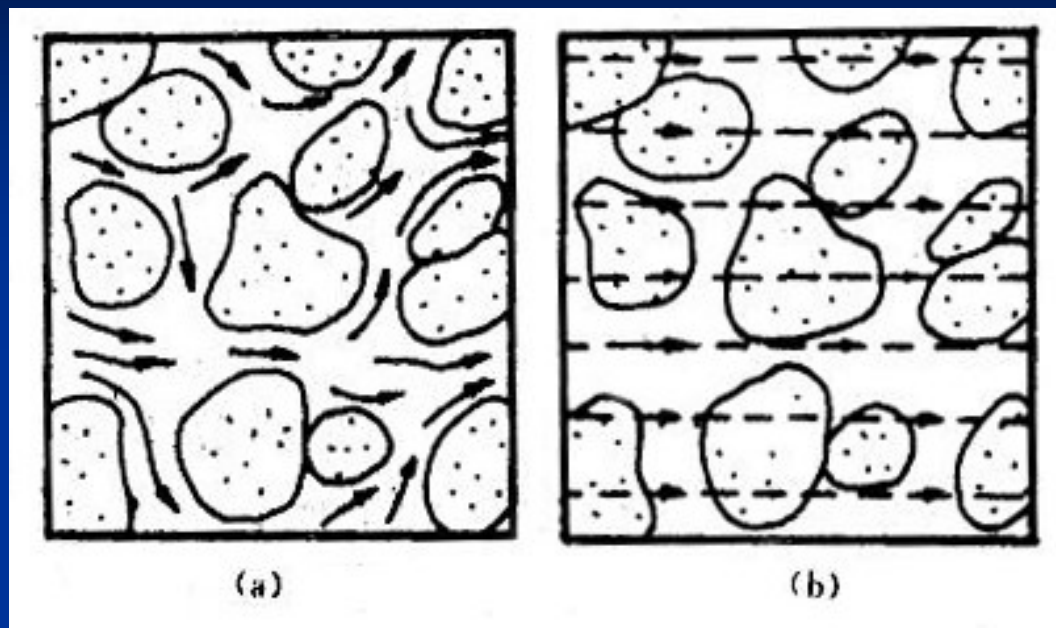
🔴 过水断面 A

🔴 渗透流速 $V=Q/A$
实际流速 $u=Q/A'$

$$A' = n * A$$

$$n < 1$$

$$V < u$$



渗透系数的确定：

1. 室内测定
2. 现场测定
 - 1) 压水试验
 - 2) 抽水试验

现场抽水试验

$$Q = 2\pi xyk \frac{dy}{dx}$$

$$Q \int_r^R \frac{dx}{x} = 2\pi k \int_h^H y dy$$

$$k = \frac{Q \ln \frac{R}{r}}{\pi(H^2 - h^2)} = \frac{0.732Q \lg \frac{R}{r}}{(H^2 - h^2)}$$

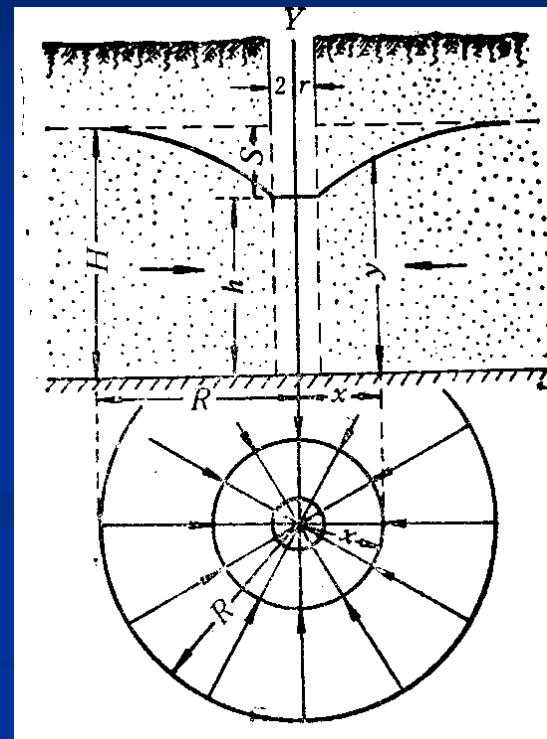


图 6—21 潜水完整井抽水试验示意图

地下水向井的稳定流动

井的类型：

按其揭露含水层的类型分：

潜水井、承压井

按进水条件分：

完整井、非完整井

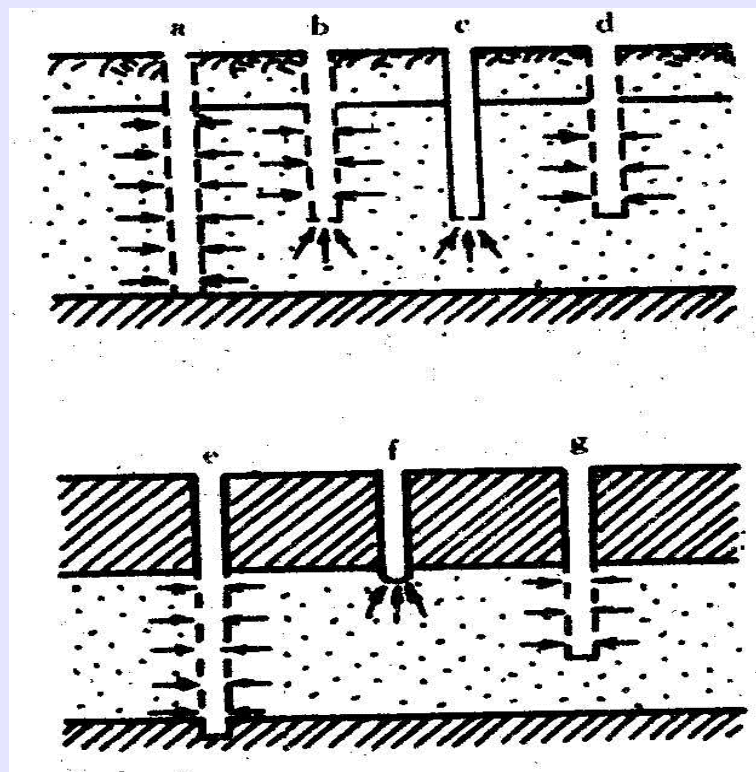
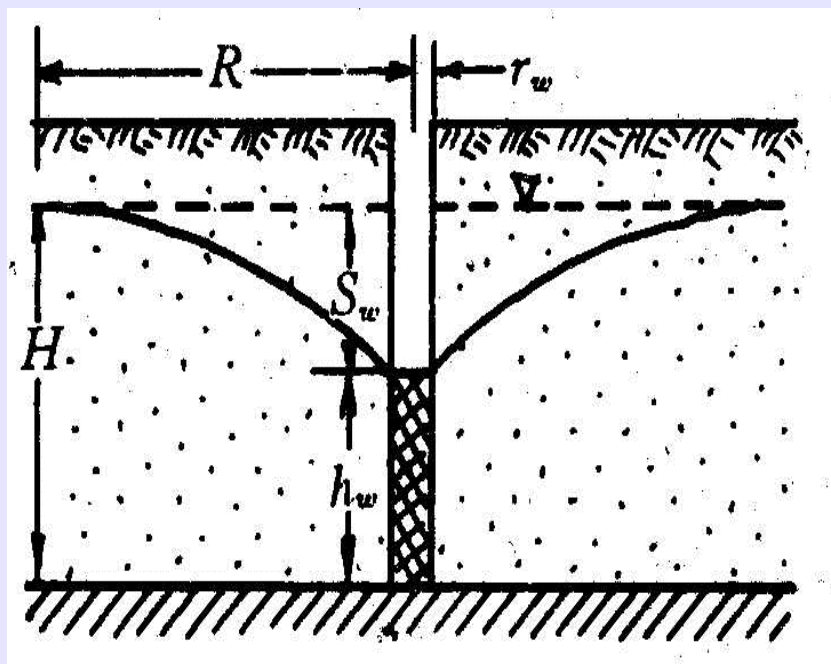


图 6—24 井的类型示意图

a—潜水完整井；b、c、d—潜水非完整井；e—承压水完整井；f、g—承压水非完整井

潜水完整井



$$Q = KAJ = 2\pi Kxy \frac{dy}{dx}$$

分离变量并积分，

x 从 r_w 至 R ， y 从 h_w 至 H ，

得：

$$Q = 1.366K \frac{H^2 - h_w^2}{\lg R - \lg r_w} =$$

$$1.366K \frac{(2H - S_w)S_w}{\lg R - \lg r_w}$$

承压水完整井

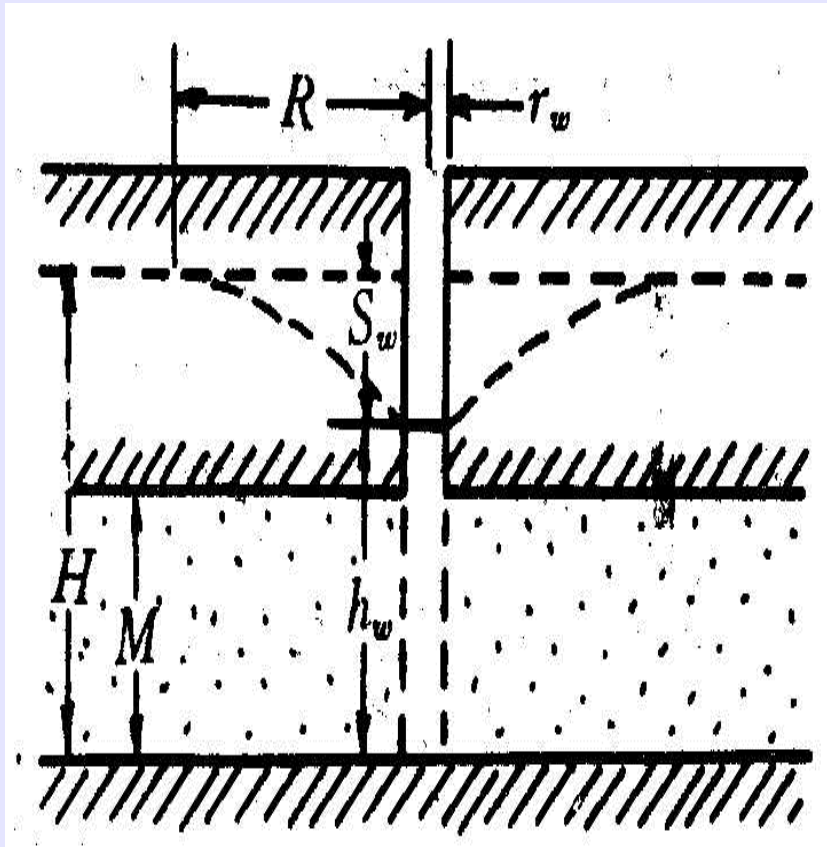


图 6—25 地下水向承压水井的流动

$$Q = KAJ = 2\pi K s_w M \frac{dy}{dx}$$

分离变量并积分后，得：

$$\begin{aligned} Q &= 2.73K \frac{M(H - h_w)}{\lg R - \lg r_w} \\ &= 2.73K \frac{MS_w}{\lg R - \lg r_w} \end{aligned}$$

基坑涌水量计算：

把基坑假想为圆形大井, 其引用半径：

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$$

F —基坑面积

6.2 地下水动态

- **地下水动态：**地下水水位、水量、水温和水化学成分在各种因素综合影响下，随时间作有规律的变化。
- **影响因素：**
 - 自然因素：气候、水文、地质、土壤、生物
 - 人为因素：疏干、充水
- **地下水动态类型：**渗入-蒸发型；渗入-径流型；渗入-蒸发、径流型。

6.3 地下水均衡

- 地下水均衡指在一定时间间隔内，某地段地下水的补给和排泄之间的数量关系。
- 均衡区：进行均衡计算研究的地区。
- 均衡期：进行均衡计算选定的时间段。
- 正均衡：地下水贮存量增加。
- 负均衡：地下水贮存量减少。

7 不同含水介质中的地下水

7.1 松散沉积层中的地下水

(1) 冲积层中的地下水：受控于冲积层的岩性、结构、厚度和构造变化。

上游：河床中砂砾石，是良好的含水层。

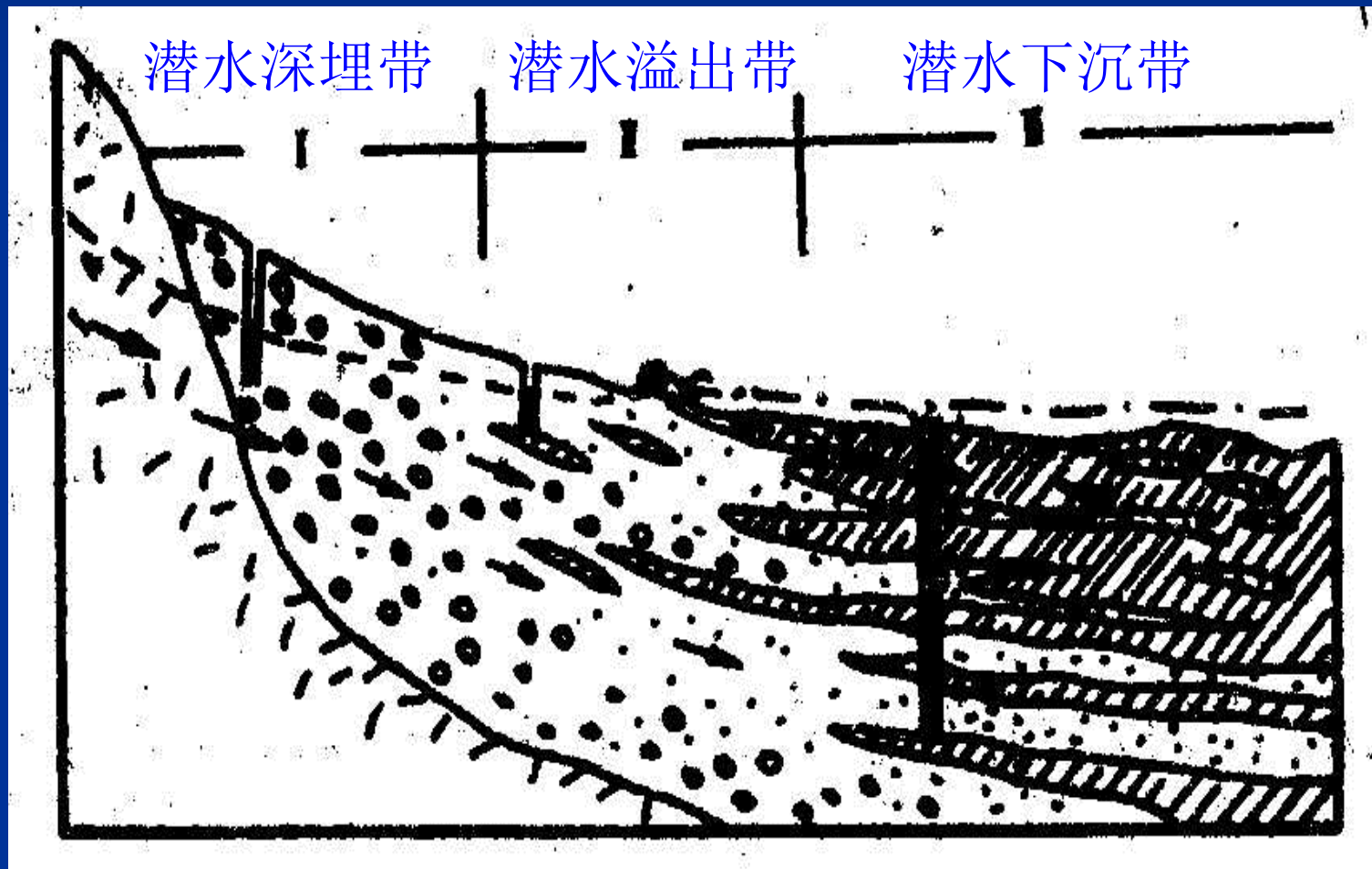
中游：河漫滩沉积有上细（粉细砂、黏性土）下粗（砂砾）的二元结构，上层构成隔水层，下层为承压含水层。

下游：滨海平原上为潜水，埋藏浅不利于工程建设，下部多层承压含水层。

(2) 洪积层中地下水

- 潜水深埋带
- 潜水溢出带：分潜水浅埋带及溢出带和承压水分布带
- 潜水位下沉带

洪积物中的孔隙水



(3) 黄土层中地下水

- 连续分布的黄土潜水
- 局部分布的黄土潜水

(4) 沙漠风砂层中地下水

7.2 非可溶性基岩中的地下水

- **基岩地下水：**埋藏在第四系以前坚硬、半坚硬岩石中的地下水。分非可溶性基岩地下水和可溶性基岩地下水。
- **特征：**埋藏与分布不均匀；含水层形态多样；地质构造因素控制明显；地下水运动状态复杂。
- **蓄水构造：**由含水层与隔水层构成能蓄积地下水的地质环境。

- 块状岩层蓄水构造中的地下水
- 风化裂隙蓄水构造
- 侵入接触蓄水构造

7.4 地下水泉

- 泉：地下水的天然露头。
- 按补给来源分：下降泉（由潜水或上层滞水补给）和上升泉（承压水补给）
- 按泉的出露原因分：侵蚀泉，接触泉，溢出泉和断层泉。

按水头性质分：

1. 上升泉
2. 下降泉

按出露原因分：

1. 侵蚀泉
2. 接触泉
3. 断层泉

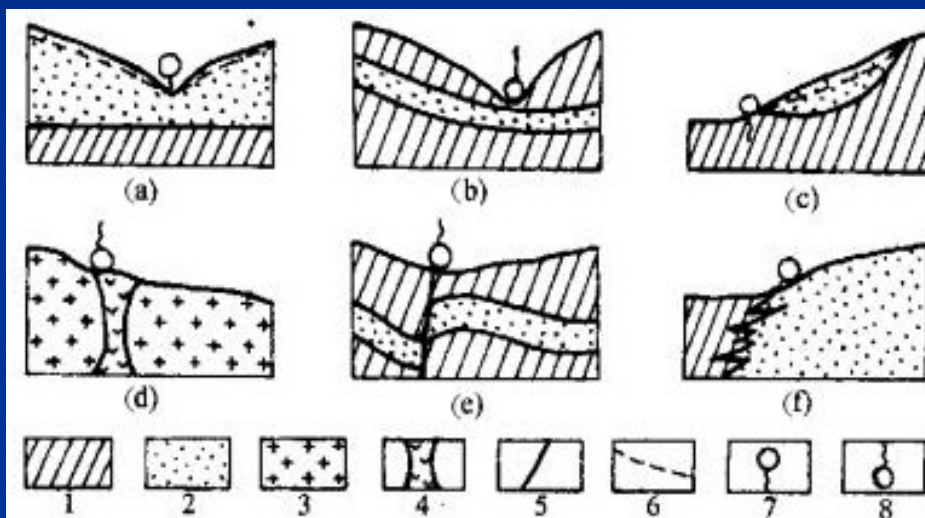


图 6-14 泉形成条件示意图

1-隔水层；2-透水层；3-坚硬岩层；4-岩脉；5-导水断层；
6-地下水位；7-下降泉；8-上升泉

8 地下水资源评价

- 水质评价
- 水量评价