



第五章 土壤水

www.cau.edu.cn

土壤养分循环

1 主要内容 (重点):

1. 土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定
2. 土壤水的能态 (重点)
3. 土壤水的运动 (重点)
4. 土壤中的溶质运移

2 教学目标与要求:

掌握土壤水的各种概念；弄清土水势的定义及其各分势的计算；重点掌握土壤水分运动的定量描述，弄清饱和流和非饱和流的区别，掌握土壤水平衡模型及其应用。

3 教学方式与手段:

幻灯，动画演示；计算分析；
土壤水分实验；

4 课时安排与进度:

课时数：4课时



土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定



土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

■ 土壤水的重要性：

- 所有的水只有进入土壤转化为土壤水，才能被植物吸收利用。土壤水是作物吸水的最主要来源。
- 土壤水是土壤的最重要组成部分之一。
- 土壤水是土壤形成发育的催化剂；
 - n 土壤水并非纯水、而是稀薄的溶液。土壤水实际上是指在105℃温度下从土壤中驱逐出来的水。

土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

■ 土壤水分类型及有效性

— 1、土壤水分类型**

n 吸湿水

n 膜状水

n 毛管水

n 重力水

土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

土壤吸湿水**

干土从空气中吸着水汽所保持的水称为吸湿水。

最大吸湿量：干土在近于水汽饱和的大气中吸附水汽，并在土粒表面凝结成液态水的数量。

土壤膜状水**

土壤颗粒表面上吸附的水分形成水膜，这部分水称为土壤膜状水。

土壤膜状水达到最大值时的土壤含水量称为土壤最大分子持水量。

土壤毛管水**

存在于土壤毛管孔隙中的水分，称为毛管水。包括毛管悬着水和毛管上升水。

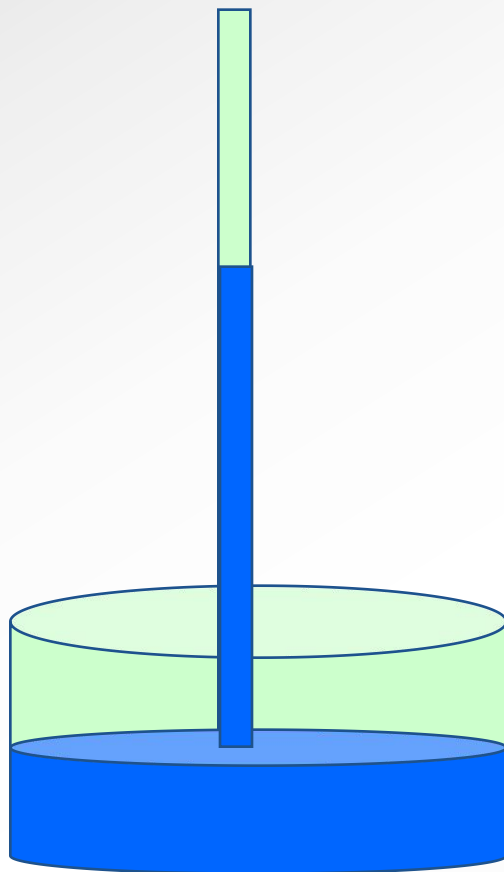
土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定



膜状水示意图

土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

水沿着毛管上升



0.1–1mm

有明显的毛管作用

0.05–0.1mm

毛管作用较强

0.05–0.005mm

毛管作用最强

$< 0.001\text{mm}$

毛管作用消失

土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

毛管悬着水**

借助于毛管力保持在上层土壤的毛管孔隙中的水分，它与来自地下水上升的毛管水并不相连，好像悬挂在上层土壤中一样，故称之为毛管悬着水。

毛管水断裂量

当土壤含水量降低到一定程度时，较粗毛管中悬着水的连续状态出现断裂，蒸发速率明显降低，此时土壤含水量称为毛管水断裂量。

大约相当于该土壤田间持水量的75%左右。

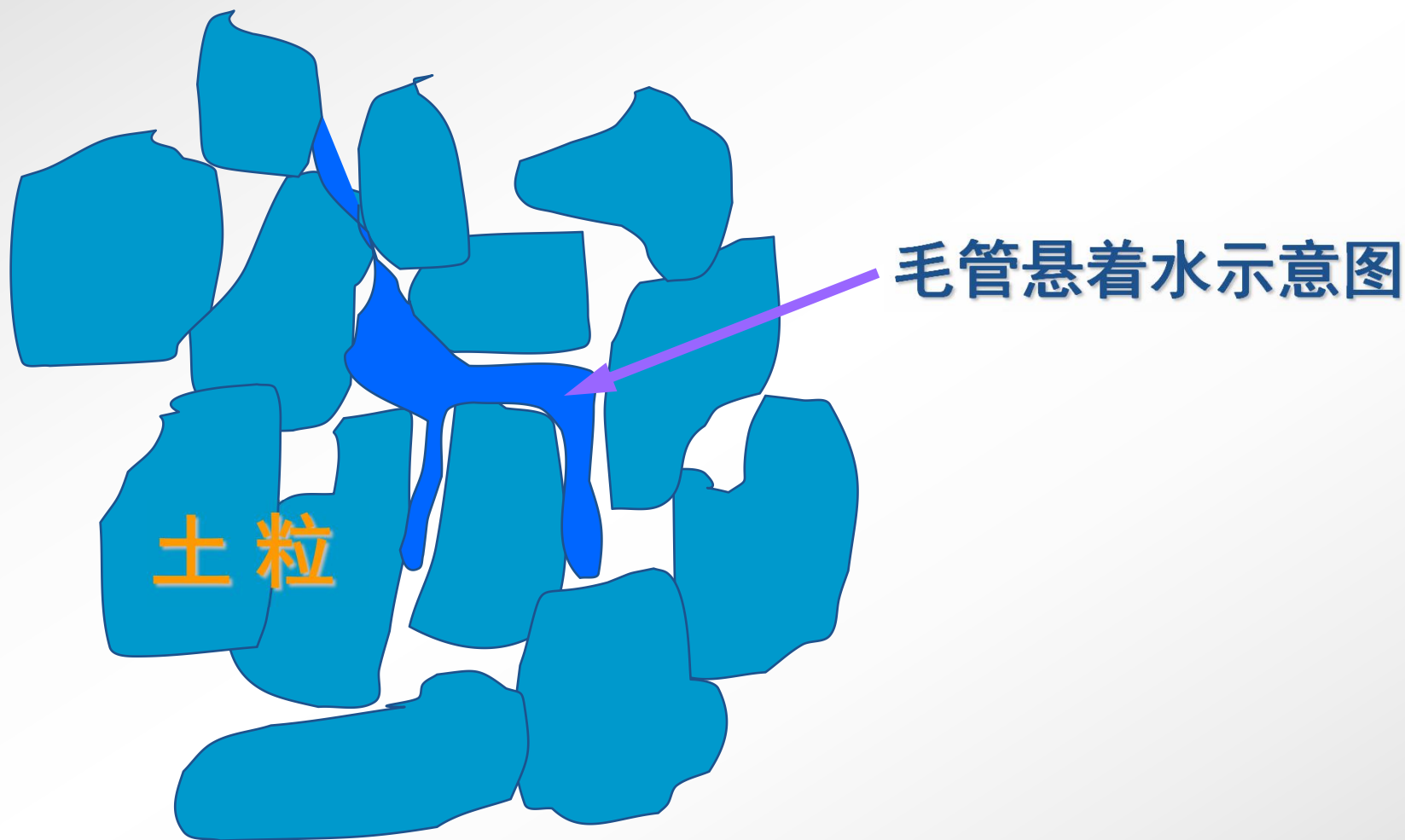
田间持水量

毛管悬着水达到最大值时的土壤含水量称为田间持水量，通常作为灌溉水量定额的最高指标。

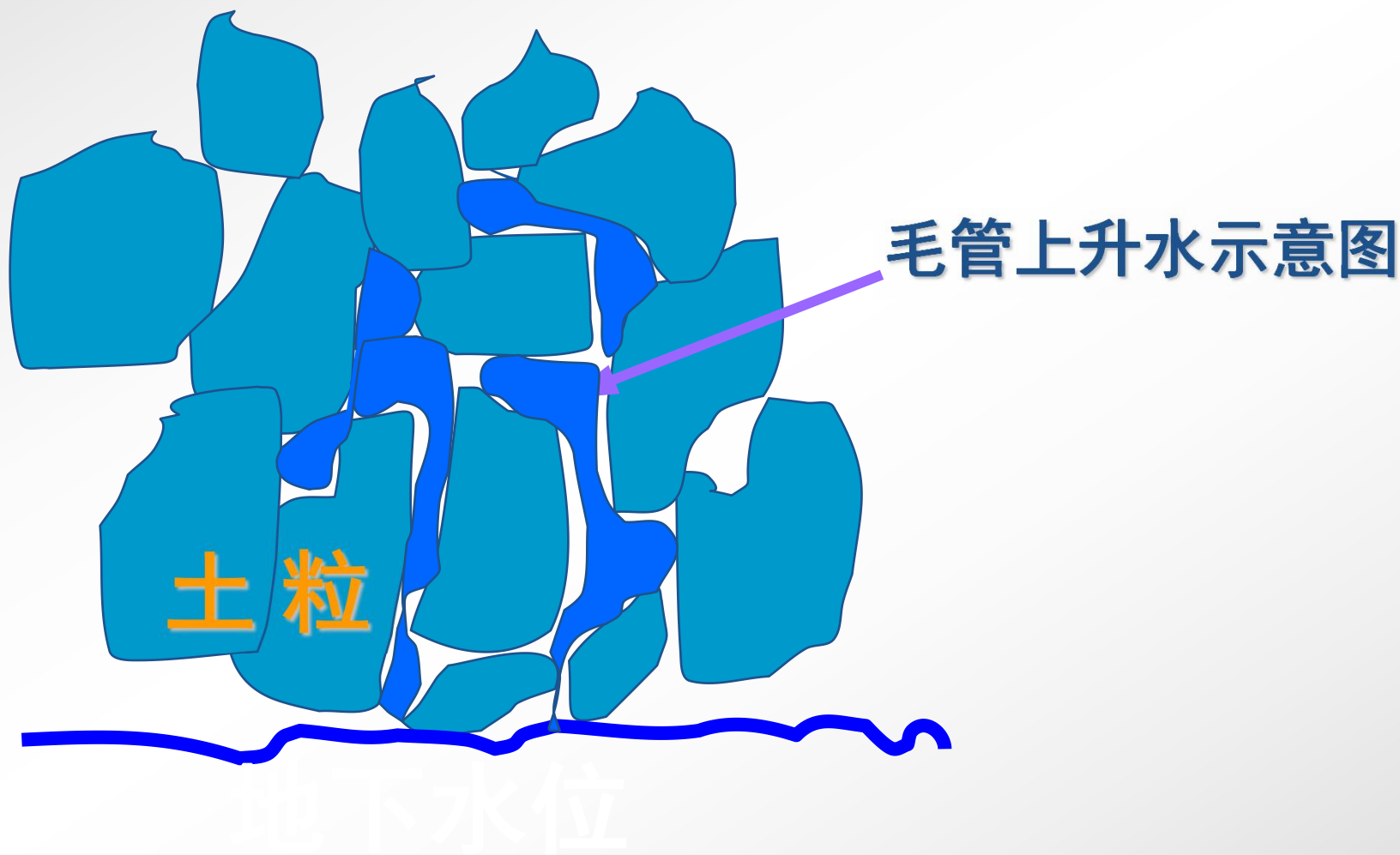
在数量上它包括吸湿水、膜状水和毛管悬着水。

田间持水量的大小，主要受质地、有机质含量、结构、松紧状况等的影响。

土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定



土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定



土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

毛管持水量**

毛管上升水达到最大量的土壤含水量。

重力水**

临时存在于土壤大孔隙（通气孔隙）中的水分，与土壤养分的淋失有关。

毛管水上升高度

从地下水水面到毛管上升谁所能达到的相对高度，叫毛管水上升高度。

$$h = \frac{3}{d}$$

h水柱高度 (cm)

d孔隙直径 (mm)

土壤饱和含水量

土壤所有孔隙都充满水时的含水量，也称为土壤全持水量。

注意：

对于不同质地的土壤上述各种不同形态水的数值是不等的。请认真比较它们的大小。

土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

■ 土壤水分含量的表示方法

– 1、质量含水量 (θ_m)

$$\theta_n = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100$$

– 2、容积含水量 (θ_v)

$$\theta_v = \theta_m \cdot \rho$$

– 3、相对含水量 (%)

$$\text{土壤相对含水量} = \frac{\text{土壤含水量}}{\text{田间持水量}}$$

土壤水的类型划分及土壤水分含量的测定

■ 土壤贮水量

- 1、水深（DW）

$$D_w = \theta_v \cdot h \quad \text{或} \quad D_{w,100} = \sum_{i=1}^n \theta_{v,i} \cdot h_i$$

mm

- 2、水方（m³）

$$\theta_v = \theta_m \cdot \rho$$

- 3、相对含水量（%）

$$V_{\text{方/亩}} = 2/3 D_w \quad V_{\text{方/公顷}} = 10 D_w$$

■ 土水势及其分势

水流向何方？

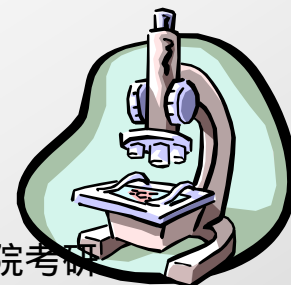
土壤A砂土10%



土壤B粘土15%

标注土水势的优点

完整版，请访问www.kaoyancas.net 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研



■ 土水势及其分势

– 基质势 (ψ_m) ***

n 负值，当土壤饱和时最大=0.

n 土壤含水量越高，基质势也越高。

– 压力势 (ψ_p) ***

n 正值。只有当土壤水分饱和时才有压力势在不饱和土壤中压力势为0. 饱和土层越深，压力势越高。

n $\psi_p = \rho_w g h$

■ 土水势及其分势

– 溶质势 (ψ_s) ***

- n 负值。土壤溶质浓度越高，溶质势越低。
- n 溶质势只有对半透膜的水分运动起作用。

– 重力势 (ψ_g) ***

- n 重力势 (ψ_g) 是指由重力作用而引起的土水势变化。任何时后重力势都存在。高于参比面时为正，反之为负，参比面处重力势为0。

土壤水能态

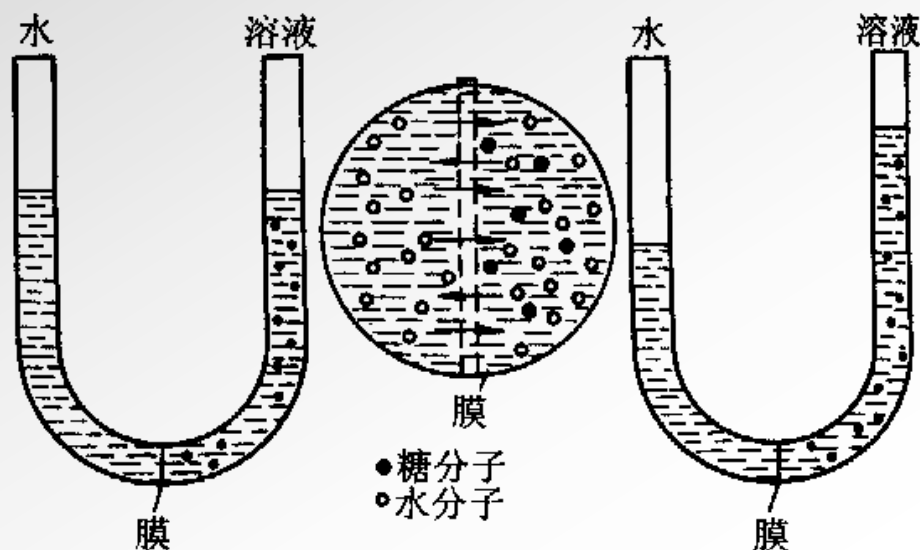


图 5-4 渗透作用和渗透压示意图

请注意：在不同的情况下，土壤总水势的各分势组成是不同的。见P106下端。切记

$$\text{总水势: } \psi_t = \psi_m + \psi_p + \psi_s + \psi_g$$

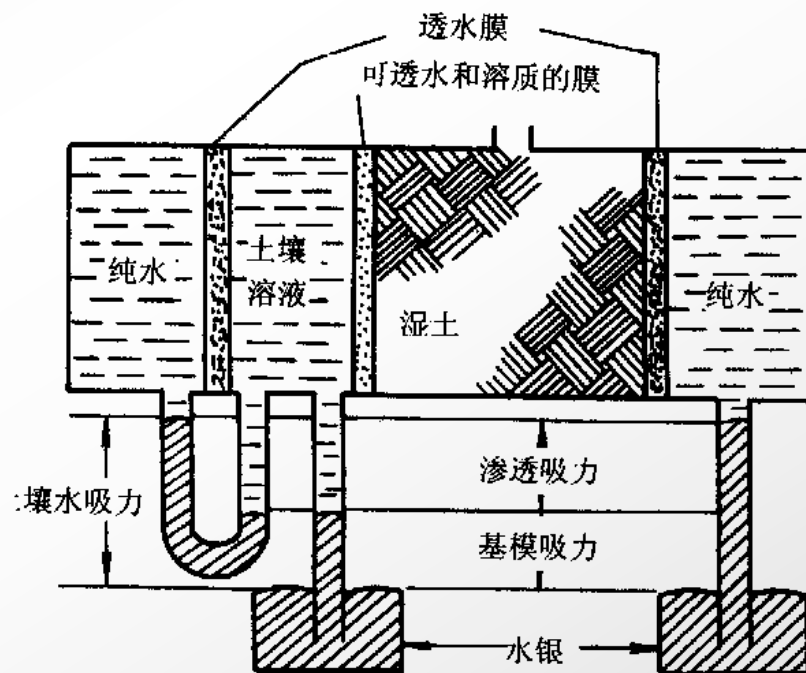


图 5-5 渗透势和土壤总水势之间的关系示意图

■ 土壤水吸力*** 绝对正值

- 土壤水吸力是指土壤水在承受一定吸力的情况下所处的能态，简称吸力，但并不是指土壤对水的吸力。

$$T = |-\phi_m|$$

- n 一般谈及的吸力是指基质吸力，其值与 ψ_m 相等，但符号相反。

如何用水吸力和水势判断水分运动的方向？请回答。

■ 土壤水势的定量测定

— 土水势的标准单位：帕（Pa）

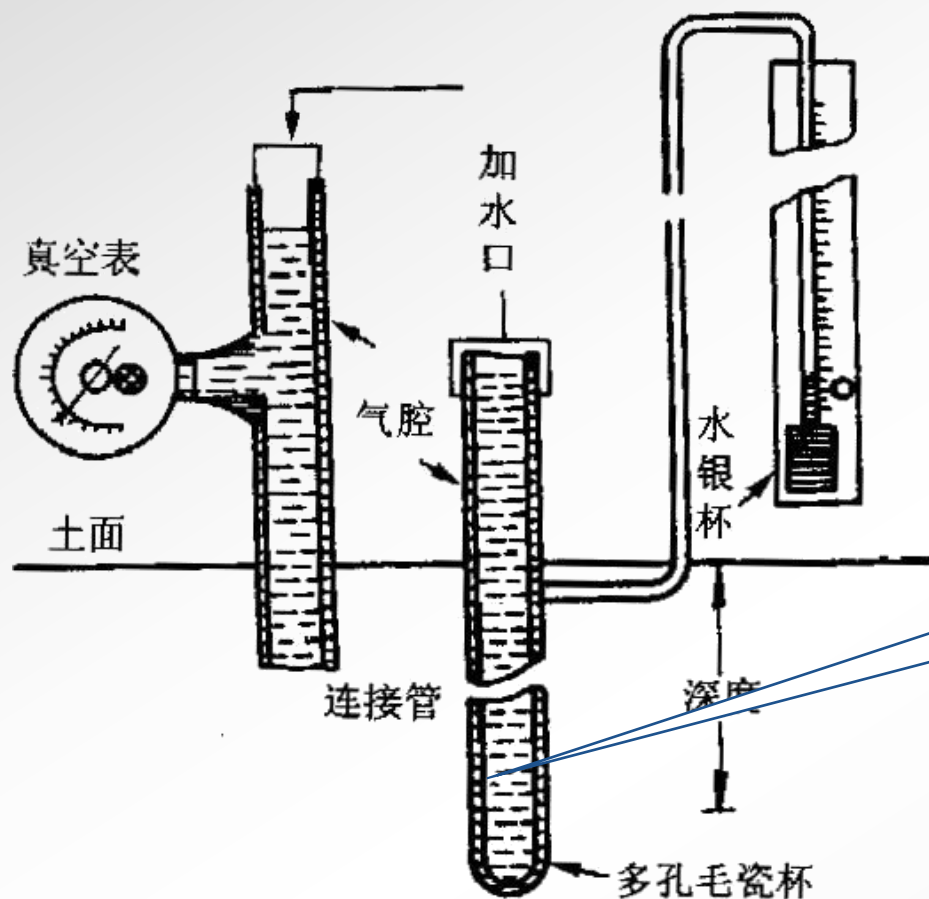
n 1 Pa=0.0102 cm 水柱

n 1 atm=1033 cm 水柱=1.0133 bar

n 1 bar=0.9896 atm =1020 cm 水柱

n 1 bar=100000 Pa

土壤水能态



一般只能测定8万帕
以下的土壤水吸力。

图 5-6 张力计结构示意图

完整版，请访问www.kaoyancas.net 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

■ 土壤水分特征曲线***：

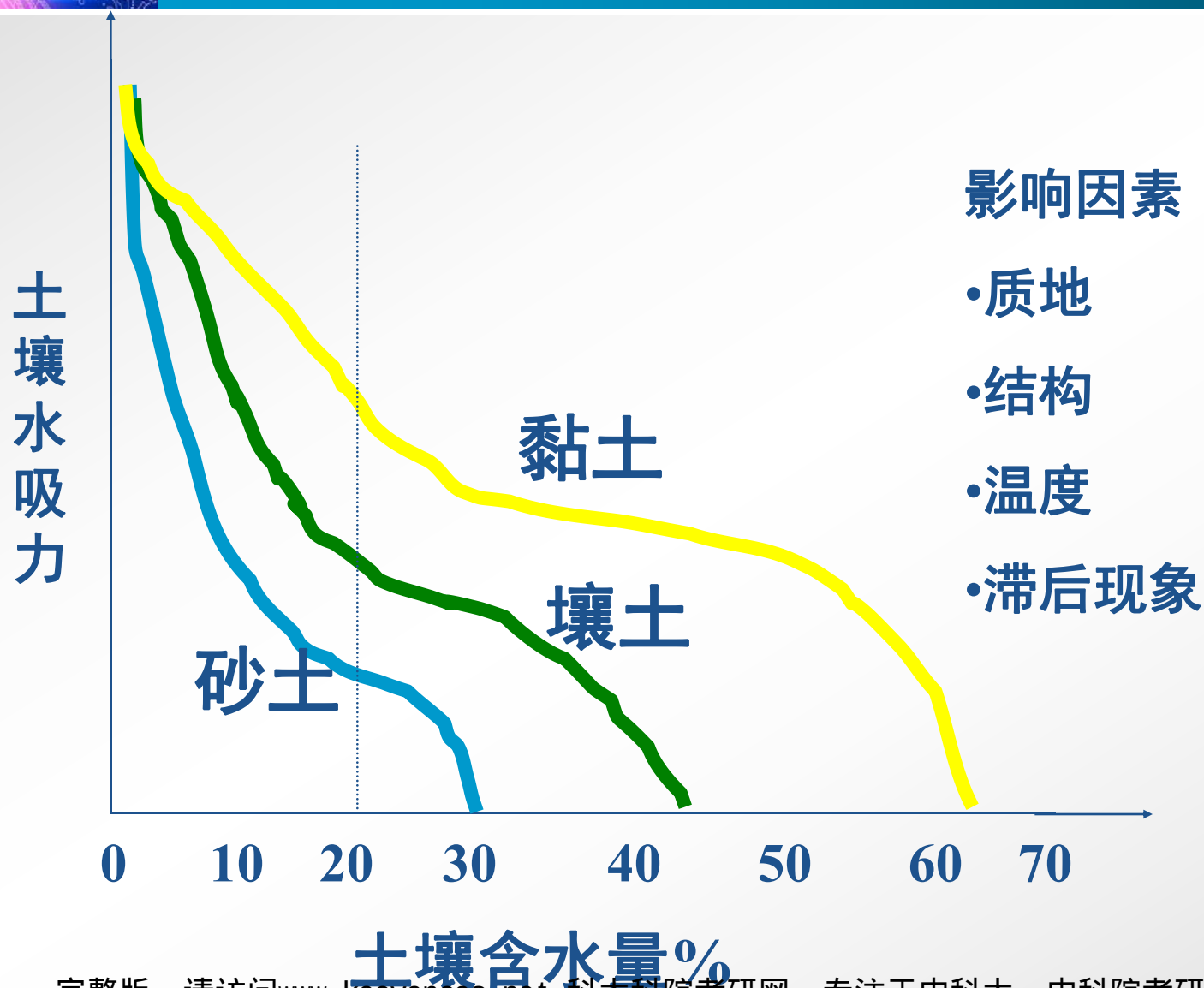
- 指土壤水分含量与土壤水吸力的关系曲线。
- 目前尚无法从理论上推导出土壤含水率与土壤水吸力或基质势之间小关系，只能用实验方法获得水分特征曲线。

$$n \quad S = a \theta b$$

$$n \quad S = a (\theta/\theta_s) b$$

$$n \quad S = A (\theta_s - \theta)^{n/\theta_m}$$

土壤水能态



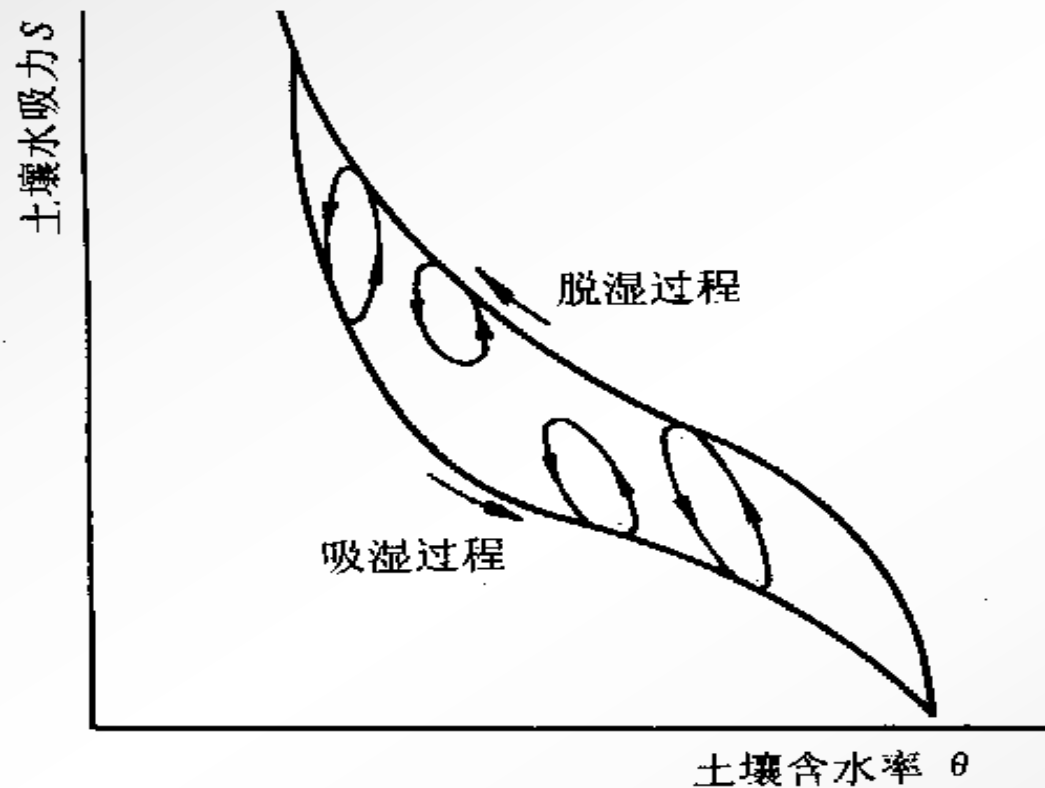


图 5-9 土壤水分特征曲线的滞后现象

机理：墨水瓶效应沙土比粘土明显

■ 水分特征曲线的用途：

- **首先**，可利用它进行土壤水吸力 S 和含水率 θ 之间的换算(图3.7)。
- **其次**，土壤水分特征曲线可以间接地反映出土壤孔隙大小的分布。
- **第三**，水分特征曲线可用来分析不同质地土壤的持水性和土壤水分的有效性。
- **第四**，应用数学物理方法对土壤中的水运动进行定量分析时，水分特征曲线是必不可少的重要参数。

■ 课堂速测

- 1. 只要多施有机肥，土壤有机质就会相应的不断提高（ ）
- 2. 腐殖质是一种高分子的有机化合物（ ）
- 3. 增加有机肥的投入是提高土壤肥力的重要途径。（ ）
- 4. 秸秆还田时，配施适量的N肥可促进有机物质的转化过程（ ）
- 5. 腐殖质常与矿物质结合成有机无机复合体（ ）
- 6. 容重和孔隙度只表明土壤的松紧状况，而不表明孔隙分布（ ）
- 7. 砂土松散容重小，粘土紧实容重大（ ）
- 8. 毛管水上升高度一般是粘土>壤土>砂土（ ）
- 9. 土壤水分特征曲线是一条单值曲线（ ）
- 10. 土壤水分运动方向是从吸水力小处向吸水力大处流动（ ）



- 土壤水流动
- 水分蒸发
- 水分入渗
- 水分再分配

■ 饱和流 (Saturated Soil Water Flow)

- 饱和流的推动力主要是重力势梯度和压力势梯度，基本上服从饱和状态下多孔介质的达西定律 (Darcy's law)
- 单位时间内通过单位面积土壤的水量，土壤水通量与土水势梯度成正比。

$$q = -K_s \frac{\Delta H}{L}$$

土壤水分运动

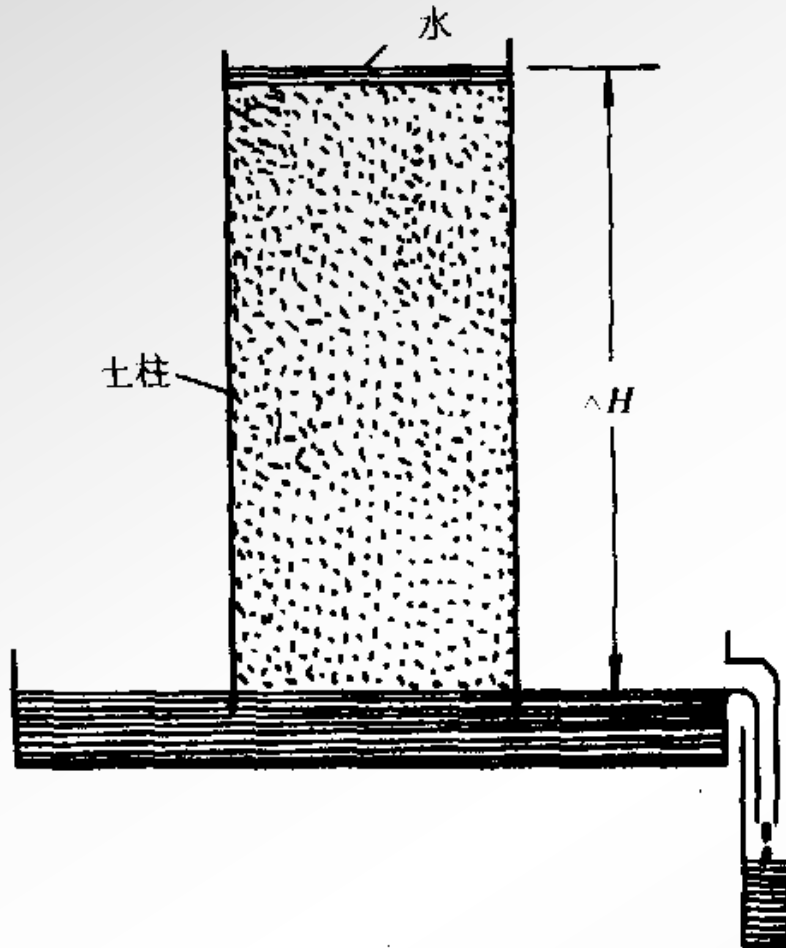


图 5-10 土柱里的一维垂直向饱和流

■ 饱和流导水率(Saturated hydraulic conductivity)

- 土壤所有的孔隙都充满了水时，水分向土壤下层或横向运动的速度。

■ 影响饱和导水率的因素

质地 水通量与孔隙半径4次方呈正比。

结构 土壤结皮对土壤饱和导水率有显著的影响。

有机质含量。

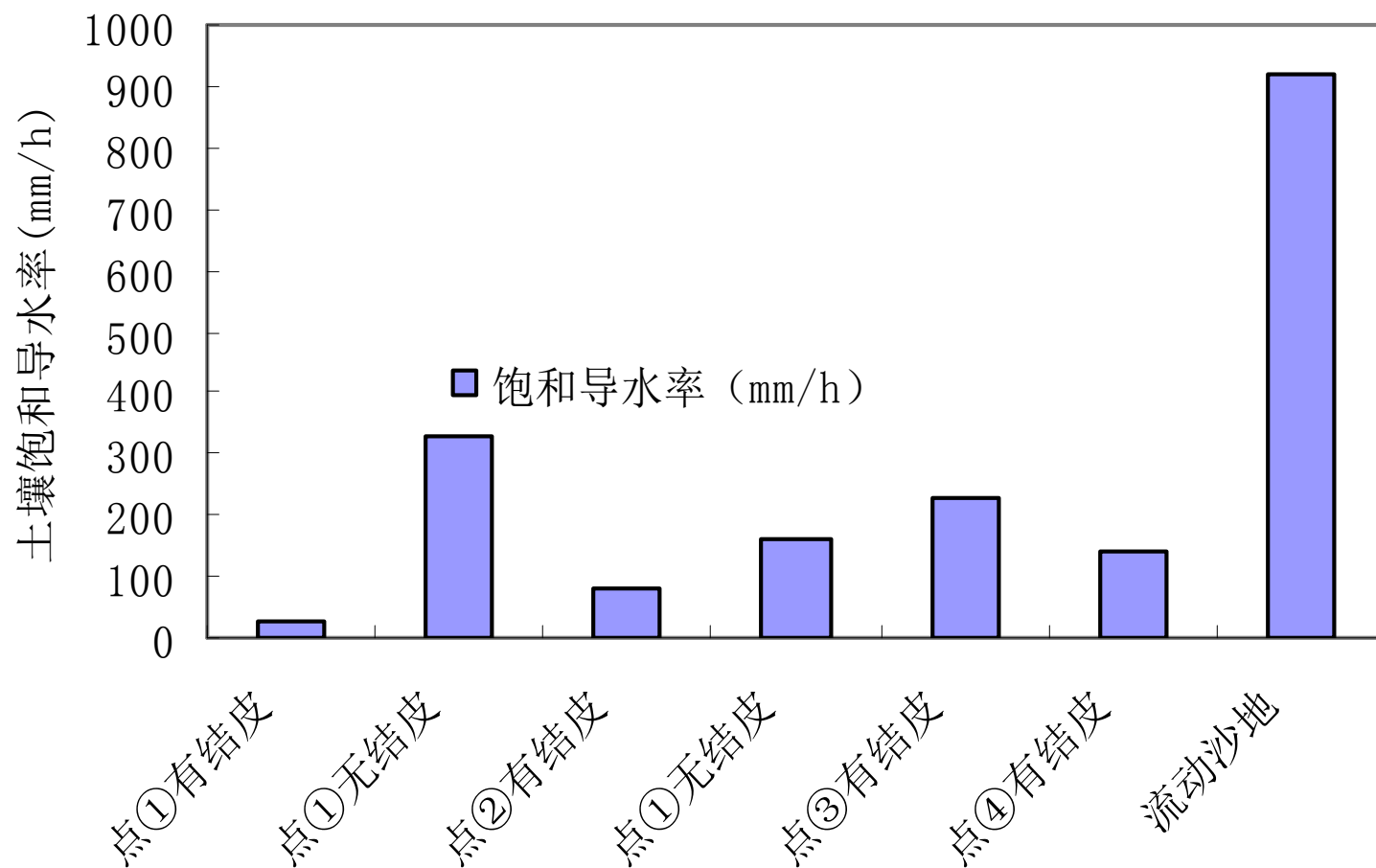
粘土矿物种类。

饱和导水率的特点

- ① 饱和率是常数
- ② 是土壤导水率的MAX
- ③ 主要取决于土壤的质地和结构。

沙质土 > 壤质土 > 粘质土

③结皮对饱和和导水率的影响



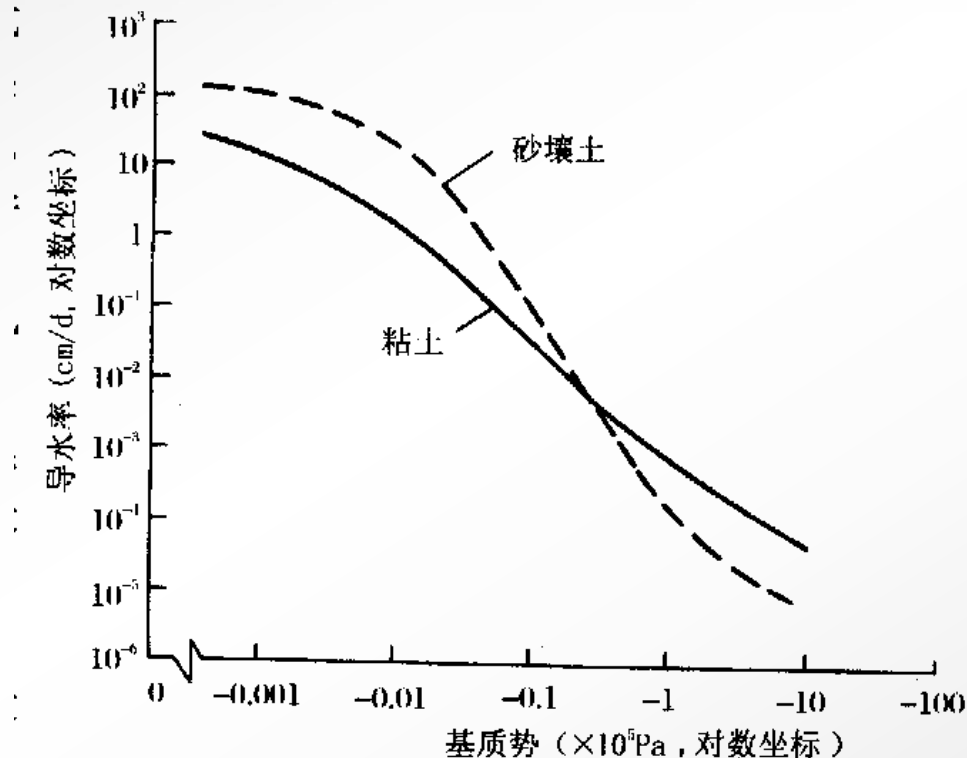
有结皮和去结皮对比

- 土壤非饱和流*** (unsaturated soil water flow)
 - 土壤非饱和流的推动力主要是基质势梯度和重力势梯度。它也可用达西定律来描述，对一维垂向非饱和流，其表达式为：

$$q = -K(\varphi_m) \frac{d\varphi}{dx}$$

■ 非饱和和流导水率(unsaturated hydrolic conductivity)

土壤水吸力和导水率之间的关系



- 饱 $K(\psi_m)$ 为非饱和导水率，
 - $d\psi/dx$ 为总水势梯度.(water potential gradient)非饱和导水率是土壤基质势的函数。
- 非饱和条件下土壤水流的数学表达式与饱和条件下的类似，二者的区别在于：
 - 饱和条件下的总水势梯度可用差分形式，而非饱和条件下则用微分形式：
 - 饱和条件下的土壤导水率 K_s 对特定土壤为一常数，而非饱和导水率是土壤含水量或基质势（ ψ_m ）的函数。



■ 土壤水气运动

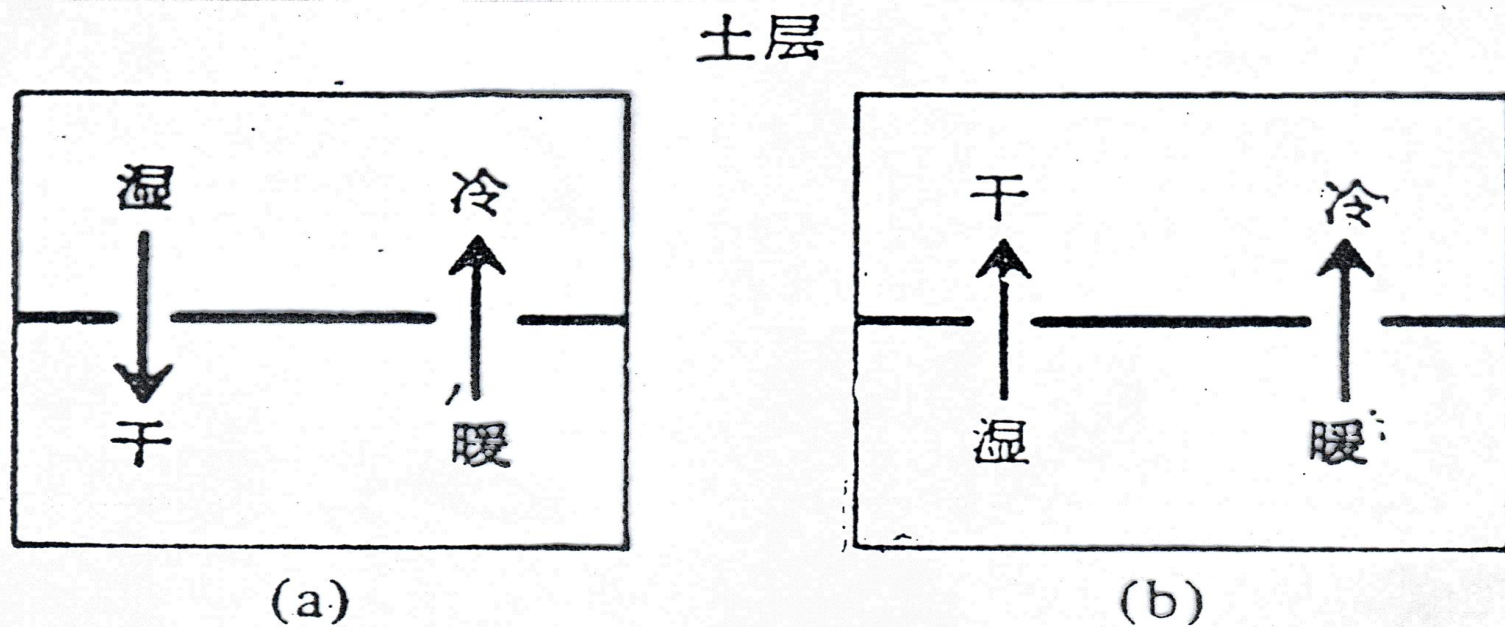
土壤气态水的运动表现为

水汽扩散和水汽凝结两种现象.

水汽扩散运动的推动力是水汽压梯度.

— “夜潮”现象

n 多出现于地下水埋深度较浅的“夜潮地”。

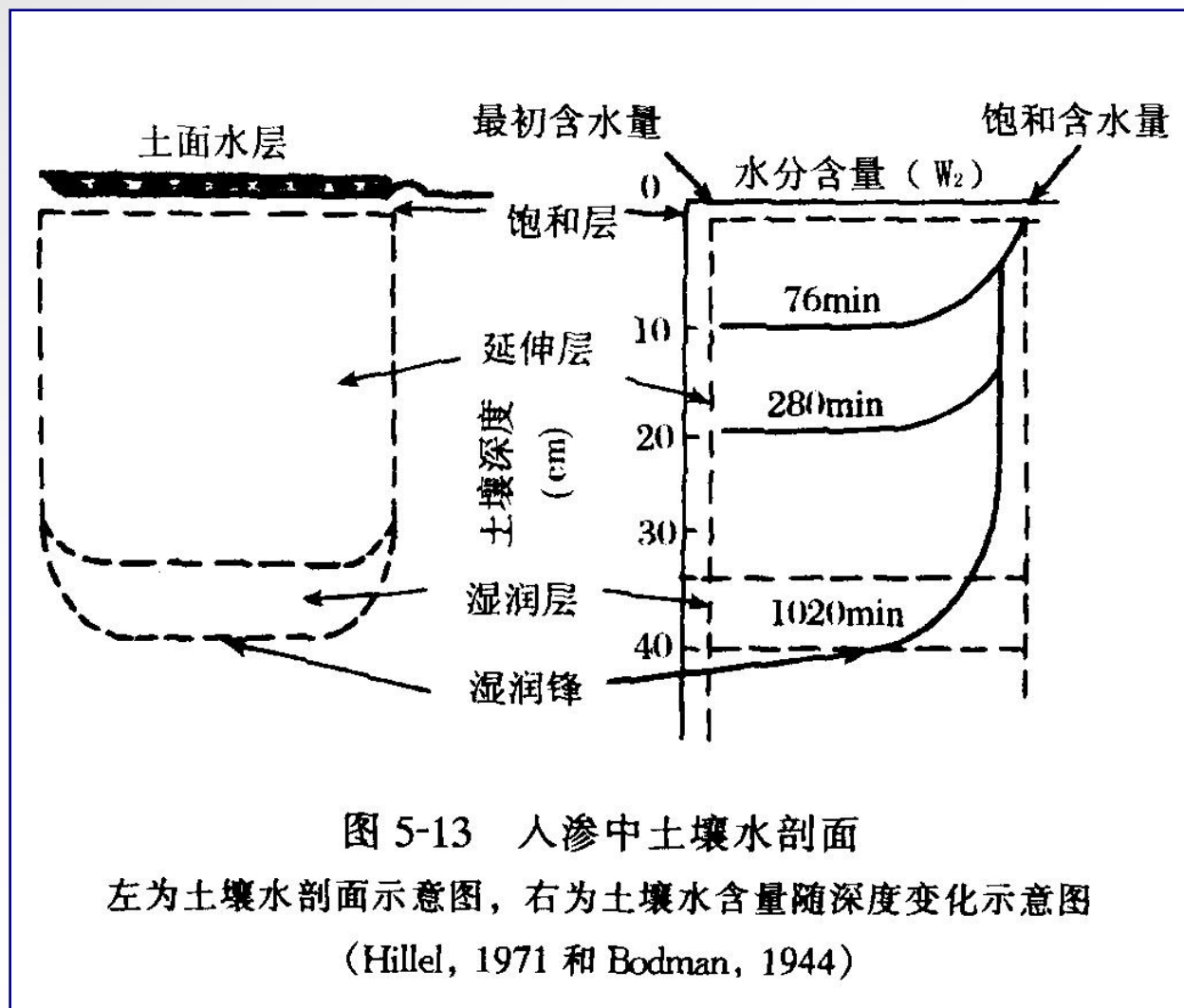


– 2、“冻后聚墒”现象***

- n 冬季表土冻结，水汽压降低，而冻层以下土层的水汽压较高，于是下层水汽不断向冻层集聚、冻结、使冻层不断加厚，其含水量有所增加，这就是“冻后聚墒”现象。
- n “冻后聚墒”的多少，主要决定于该土壤的含水量和冻结的强度。含水量高冻结强度大，“冻后聚墒”就比较明显。一般对土壤上层增水作用为2—4%左右。

.. 大

土壤水分运动



- 最初入渗速率：Initial infiltration rate
- 稳定入渗速率：stable infiltration rate

几种不同质地土壤的最后稳定入渗速率(毫米/小时)

土壤	砂	砂质和粉质土壤	壤土	粘质土壤	碱化粘质土壤
最后入渗速率	>20	10-20	5-10	1-5	<1

所以无论表土下是砂土层还是细土层，在不断入渗中最初能使上层土壤先积蓄水，以后才下渗。

■ 土壤水的再分布(soil water redistribution)

- **概念：**土壤水入渗过程结束后，水在重力和吸力梯度影响下在土壤中向下移动重新分布的过程。

土壤水的再分布
是土壤水的不饱和流。

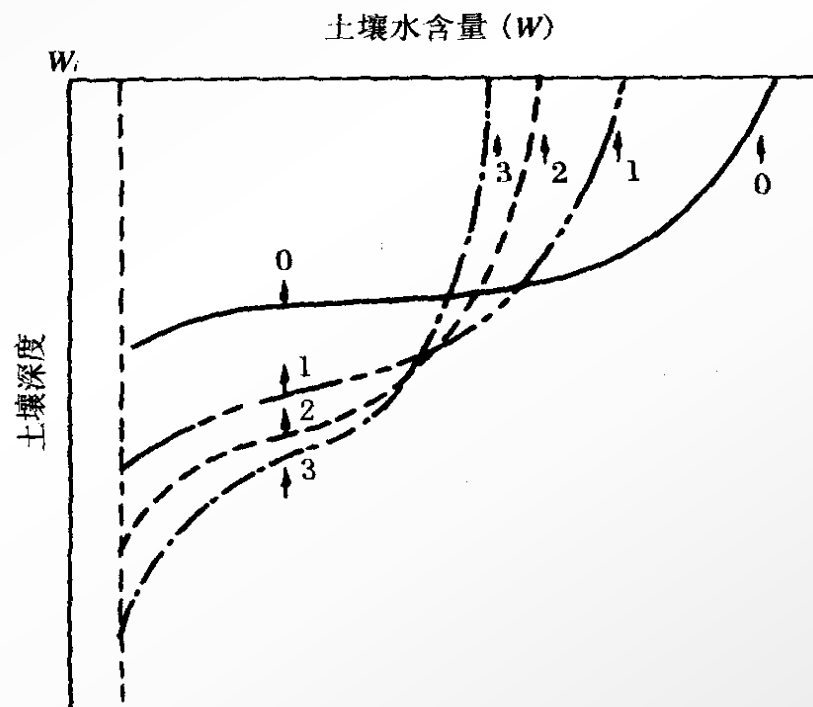


图 5-14 中等质地土壤灌水后再分布期间的水分割面变化

W 是灌前土壤湿度，0、1、2、3 代表灌后

及 1、4 和 14d 后的土壤水分割面

■ 土面蒸发

- **概念：**土壤水汽进入大气的过程。当土壤供水充分时，由大气蒸发能力决定的最大可能蒸发强称为潜在蒸发强度。(Soil potential evaporation)

n 土面蒸发过程区分为三个阶段。

- **1、表土蒸发强度保持稳定的阶段**
- 稳定蒸发阶段蒸发强度的大小主要由大气蒸发能力决定，可近似为水面蒸发强度 E_0 。此阶段含水率的下限，一般认为该值相当于毛管水断裂量的含水率，或田间持水量的50-70%

- **2、表土蒸发强度随含水率变化的阶段**
- 蒸发速率急剧降低，有利于土壤墒情的保持
- **3、水汽扩散阶段**
- 土壤输水能力极弱，不能补充表土蒸发损失的水分，土壤表面形成干土层。在此阶段，蒸发面不是在地表，而是在土壤内部，蒸发强度的大小主要由干土层内水汽扩散的能力控制，并取决于干土层厚度，一般来说，其变化速率十分缓慢而且稳定。

土壤保墒措施在蒸发的第一阶段进行效果最佳，第二阶段次之。

土壤水分运动

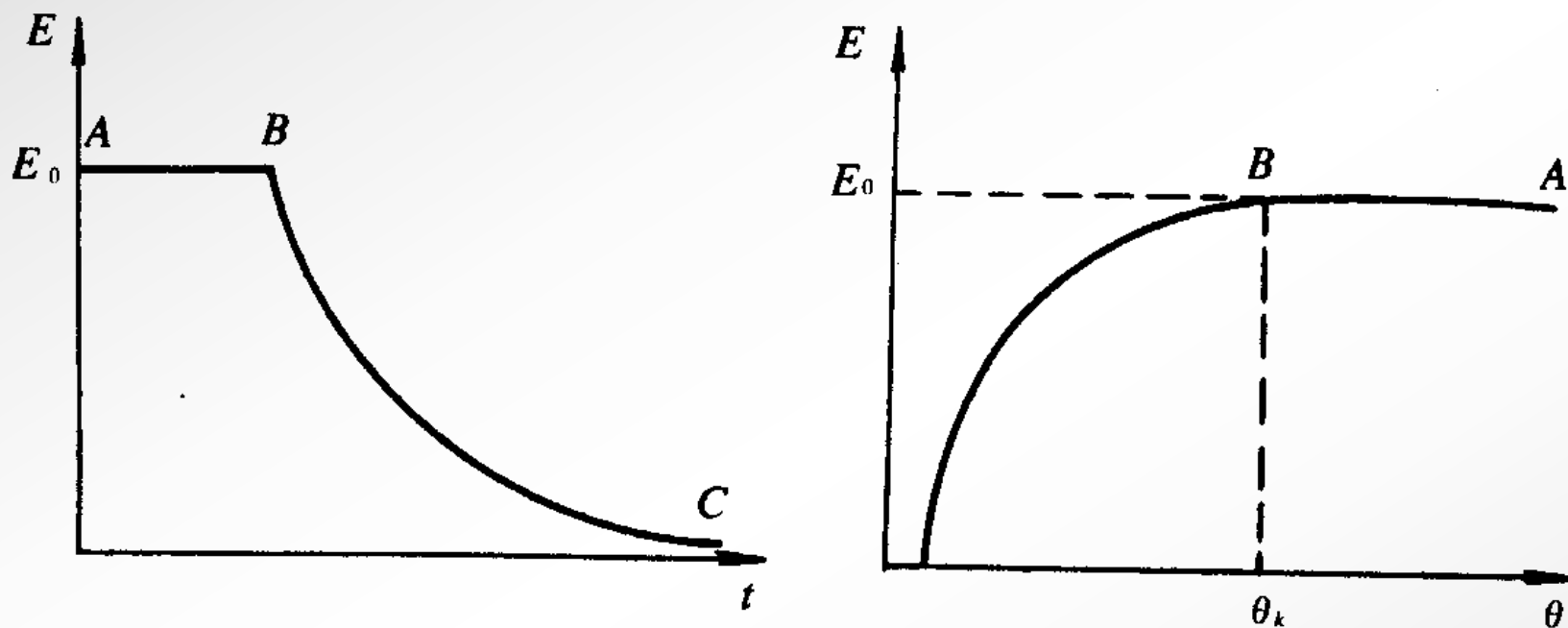


图 5-15 大气蒸发条件下变时土面蒸发过程示意图



- 盐土的水分蒸发：
 - 夏季积盐多；
 - 蒸发力弱积盐少；
 - 盐往高处走，盐斑的扩大。

■ 田间土壤水分平衡 (Soil water balance)

- 田间土壤水分平衡示意图，据此可列出其土壤水分平衡的数学表达式：

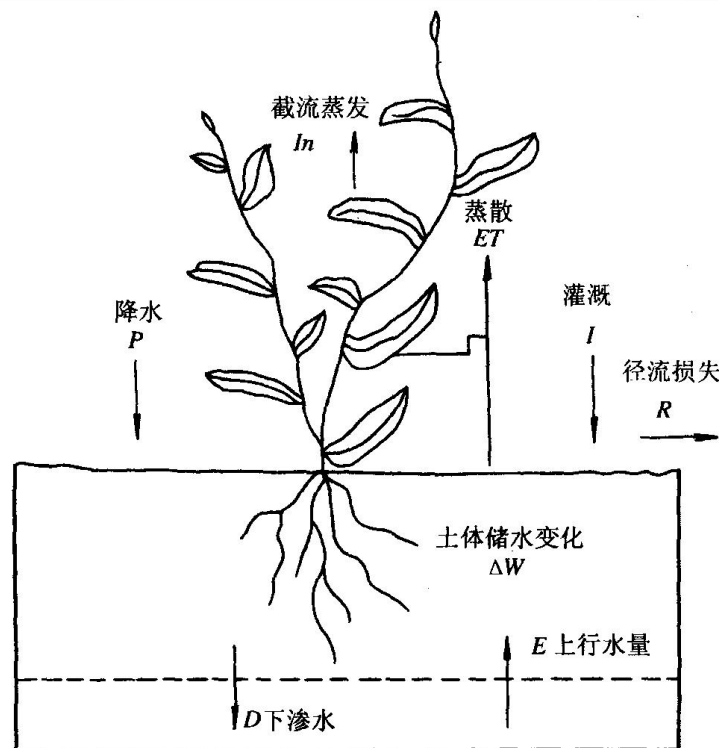
- $\Delta W = P + I + U - E - T - R - In - D$

田间蒸腾和蒸发很难截然分开，常合在一起，统称蒸散ET (evapotranspiration)——一定时间内一定面积上土壤蒸发和植物蒸腾的总和。

土壤水分平衡简化式为

$$\Delta W = P + I - ET - D$$

完整版，请访问www.kaoyancas.net 科大科院考研网，专注考研！



■ 土壤—植物—大气连续体 (SPAC)

(Soil-plant-atmosphere continuum)

由水势引起水由土壤进入植物体，再向大气扩散的体系。

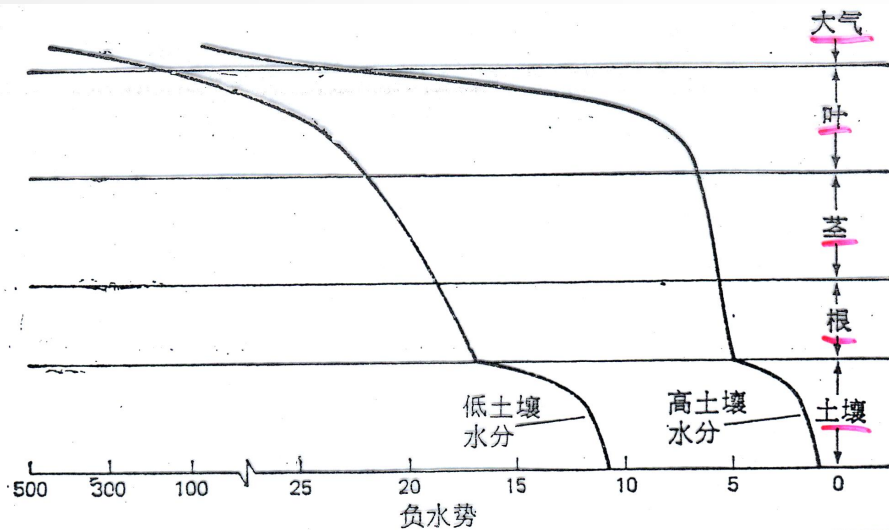
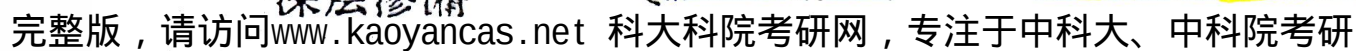


图3-23 当水分通过土壤经根、茎、叶到大气移动时的湿度势变化。注意所绘的负水势图，表示当水分通过系统运行时水势减小。完整版，请访问www.kaoyancas.net

沙漠植物在
200~—800万帕
时仍能生存。

土壤水分运动

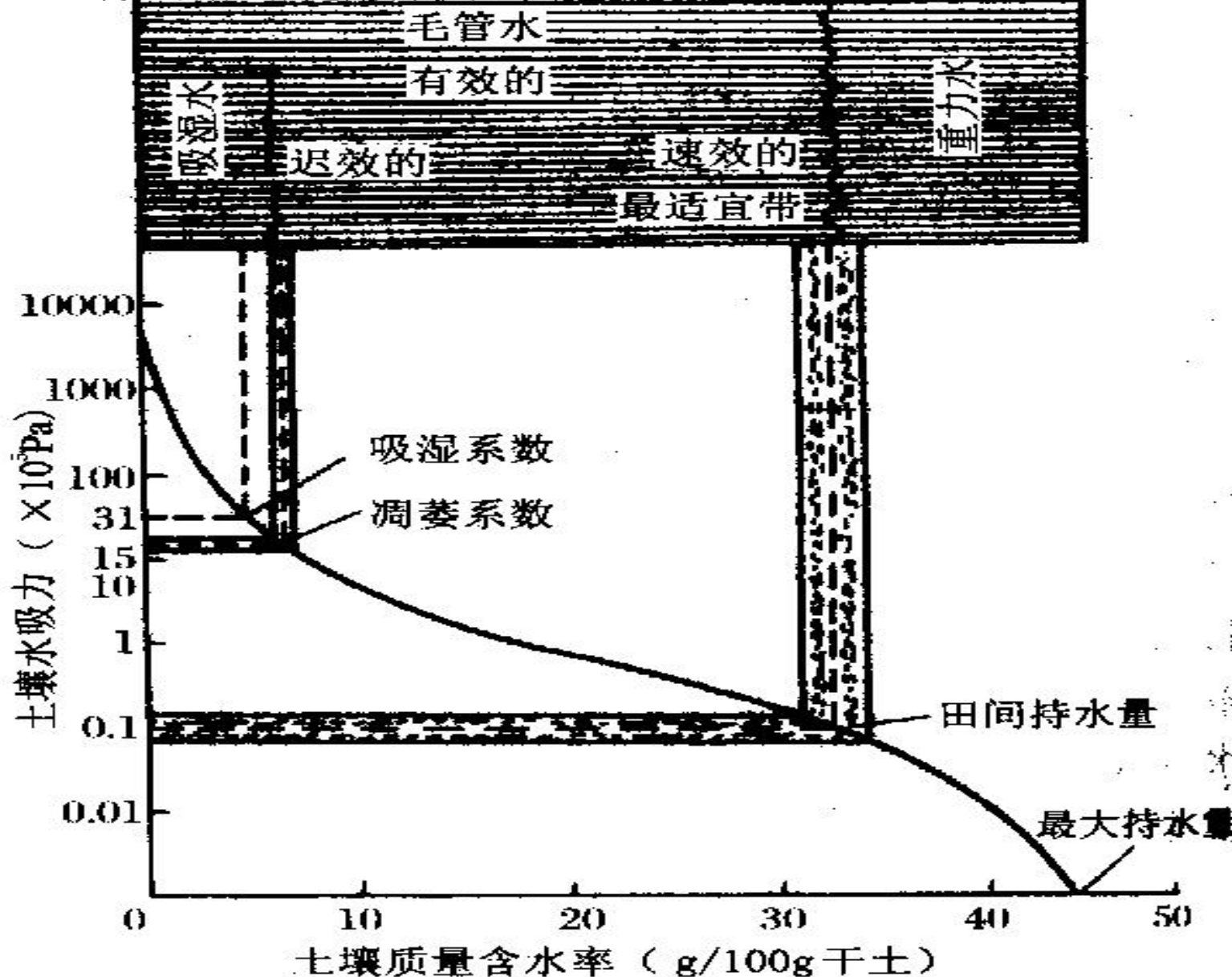


■ 土壤水的有效性

- 土壤有效水(available soil water)：在田间持水量（1-2万帕）到永久萎蔫系数（150万帕）之间保留在土壤中的水分。
- 土壤水吸力大于150万帕的土壤水对植物来说是无效水

■ 植物吸水：

- 主动吸水和被动吸水。被动吸水为主要方式，其动力是从植物叶面到茎到根到土壤的水势梯度。主动吸水一般不超过植物总水量的10%。





■ 水分高效利用的途径：

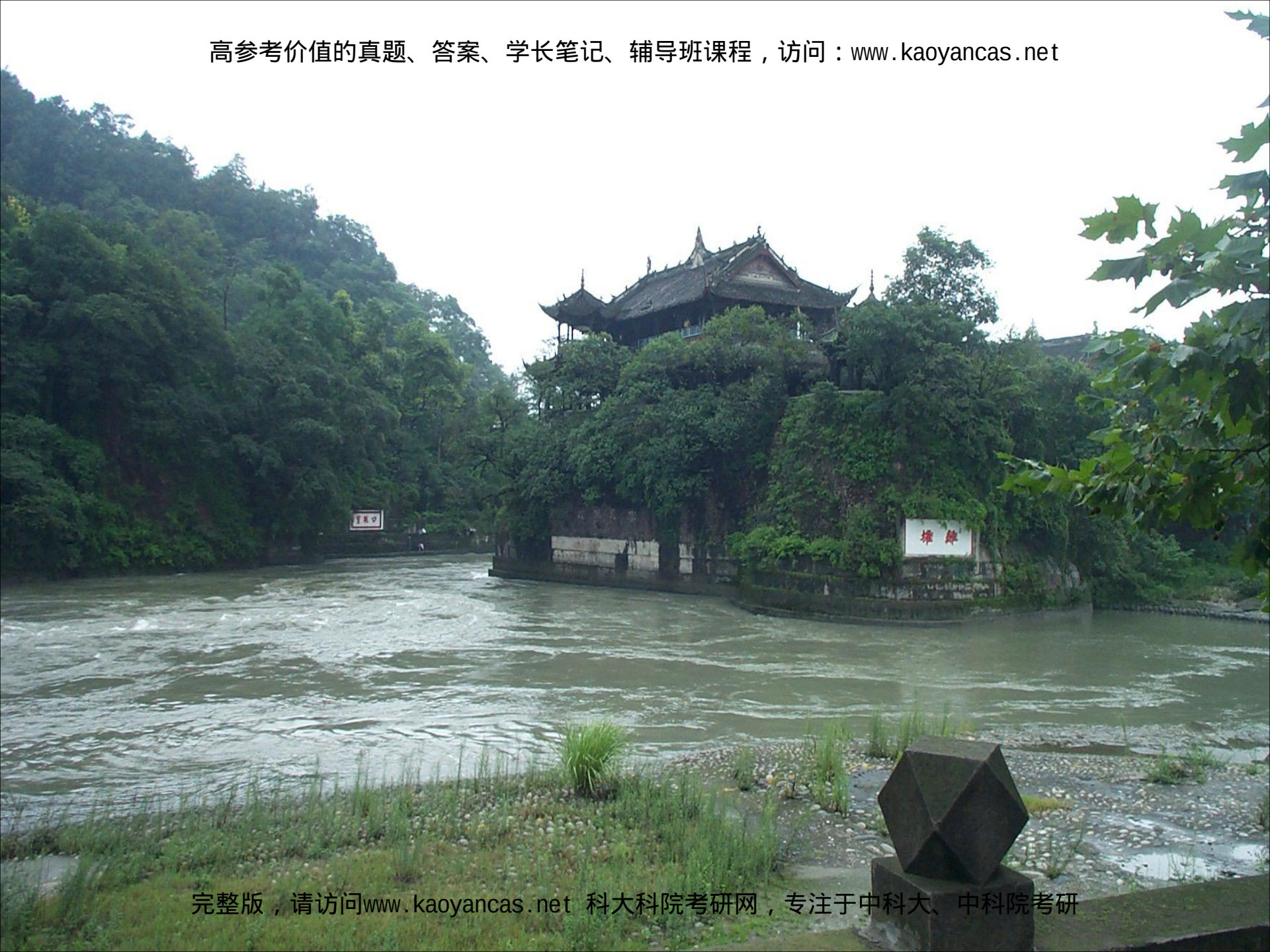
- 合理开采、
- 分配和管理；
- 减少输水损失；
- 提高灌溉效率。

■ 土壤水的调控措施

主要包括土壤水的保蓄和调节。

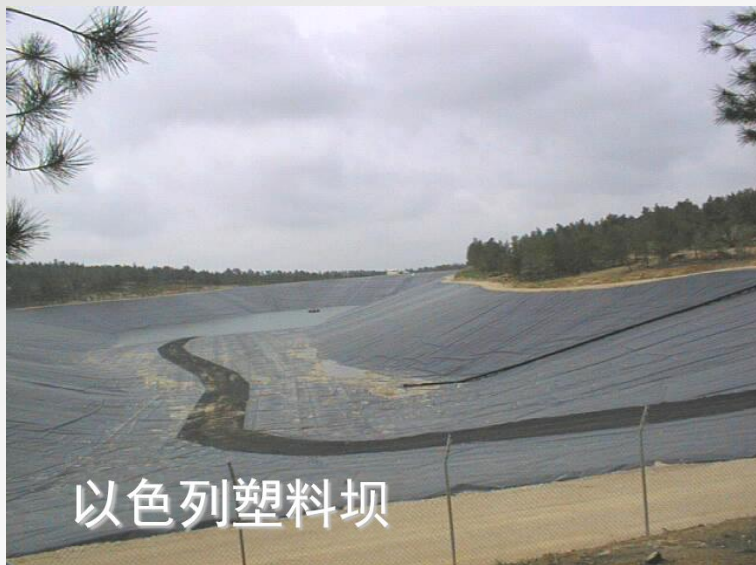
- 1、耕作措施 秋耕 中耕 镇压等
- 2、地面覆盖 薄膜覆盖 秸秆覆盖
- 3、灌溉措施 喷灌、滴灌、渗灌
- 4、生物节水

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：www.kaoyancas.net



完整版，请访问www.kaoyancas.net 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

土壤水的调控



高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：www.kaoyancas.net



完整版，请访问www.kaoyancas.net 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

以色列沙地优质土豆

■ 本章小结

(一) 名词解释

土水势	吸湿水	吸湿量
膜状水	毛管水	毛管断裂持水量
田间持水量		土壤水吸力
土壤水分特征曲线		夜潮作用
进气值	冻后聚墒	土壤蒸发
萎蔫系数	土壤水入渗	土壤水再分布

■ 问答题：

- 1、研究土壤水有何重大意义？土壤水在土壤中有何重要作用？
- 2、影响吸湿水含量的因素主要有哪些？在实际土壤分析工作中，测定土壤吸湿水含量的用途是什么？若某土壤风干土重为50克，吸湿水含量为2.5%，则干土重量为多少克？
- 3、用土水势研究土壤水的优点是什么？土壤水总是中含水多的地方向含水少地方运动，这种说法正确否？为什么？
- 4、冻后聚墒和夜潮作用的机理是什么？
- 5、在农业生产上，一次灌足比分次灌好，为什么？