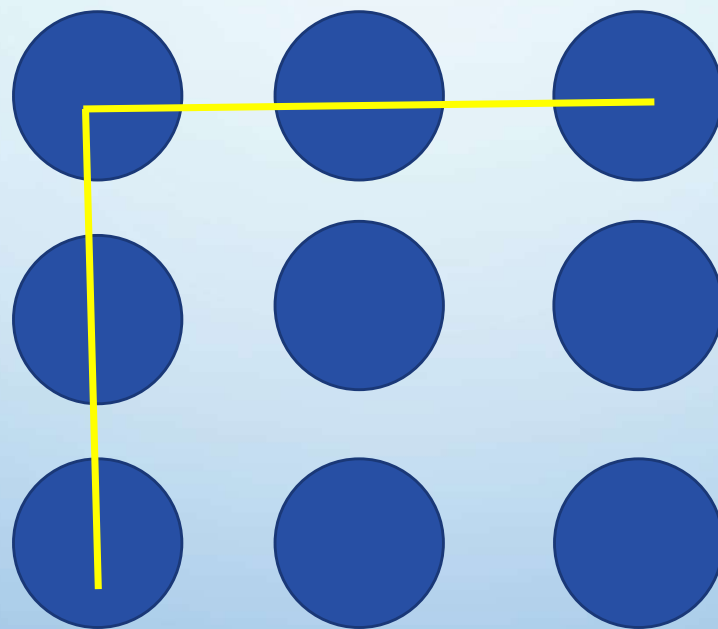


# 化工原理（下）

## 精 馏

**请大平台手势扫码**



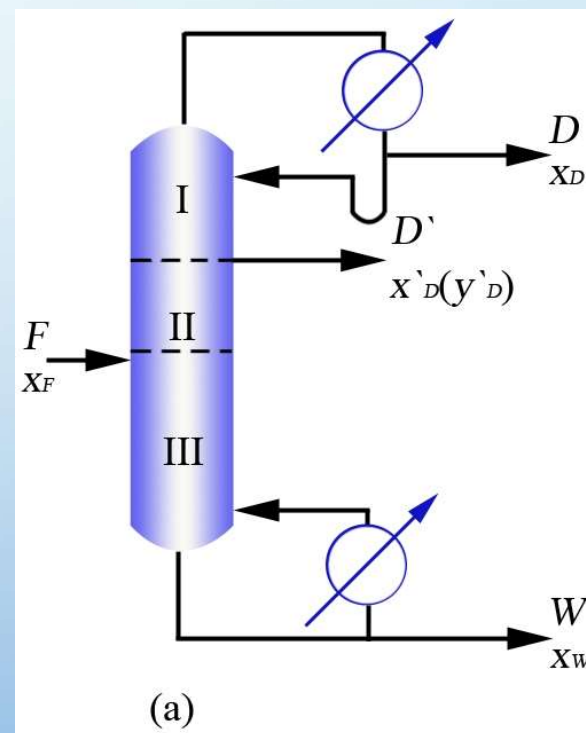
请到大平台做精馏课堂练习2

## 9.5 双组分精馏的设计型计算

### 3、侧线出料

当需要获得不同组成的两种或多种产品时，可在塔内相应组成的塔板上安装侧线以抽出产品。

侧线出料的产品可为板上的饱和液体或板间的饱和蒸汽。



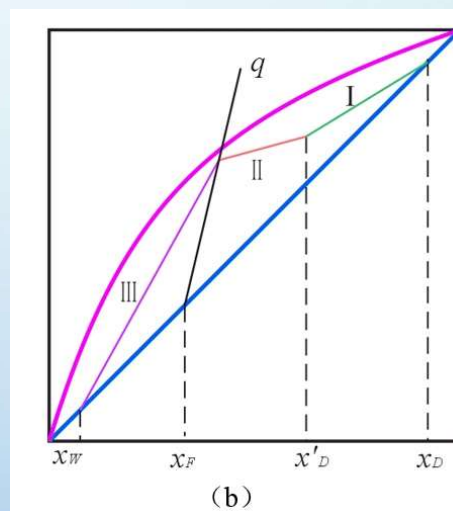
## 9.5 双组分精馏的设计型计算

### 3、侧线出料

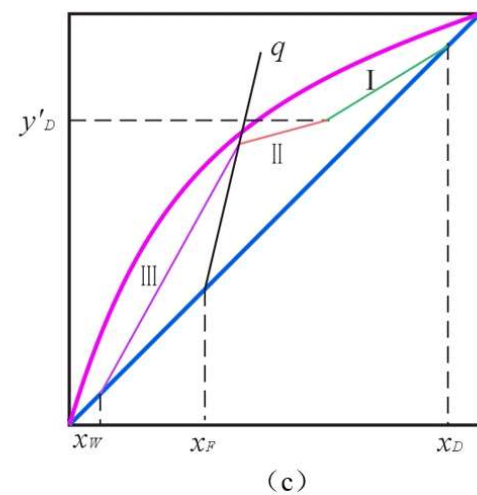
无论侧线产品为液相还是汽相，  
总有：

$$\left(\frac{L_{\text{II}}}{V_{\text{II}}}\right) < \left(\frac{L_{\text{I}}}{V_{\text{I}}}\right)$$

**请同学们课后证明一下此观点**



饱和液体



饱和蒸汽

## 第二组

回收塔有什么特点？最高馏出液浓度如何求？

## 9.5 双组分精馏的设计型计算

### 4、回收塔

**特点：**只有提馏段的精馏塔。

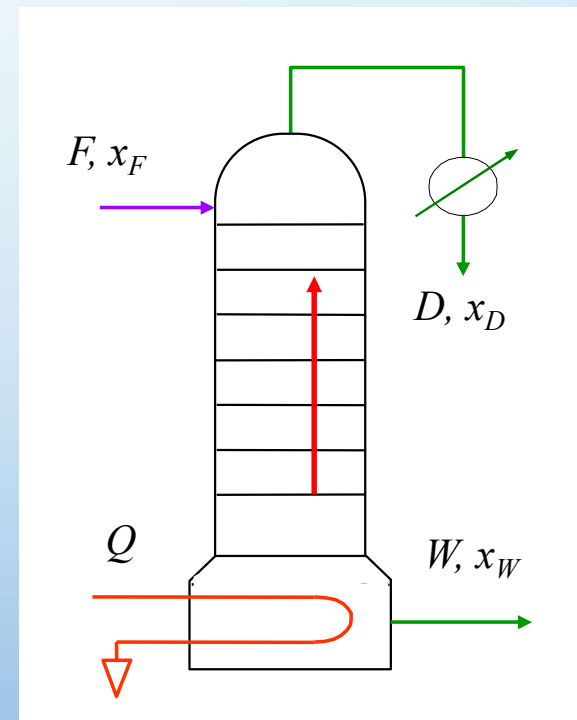
**目的：**回收稀溶液中轻组分。

**提馏段操作方程：**

$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_n - \frac{W}{\bar{V}} x_w \quad V = D$$

将  $\bar{V} = D - (1-q)F$ ,  $\bar{L} = qF$  代入上式得：

$$y_{n+1} = \frac{qF}{D - (1-q)F} x_n - \frac{Wx_w}{D - (1-q)F}$$



## 9.5 双组分精馏的设计型计算

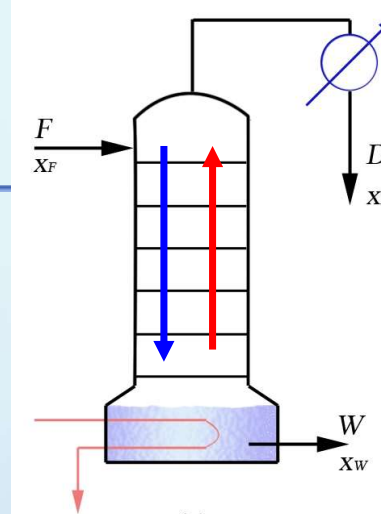
### 4、回收塔

泡点进料 $q=1$ ，提馏段操作方程：

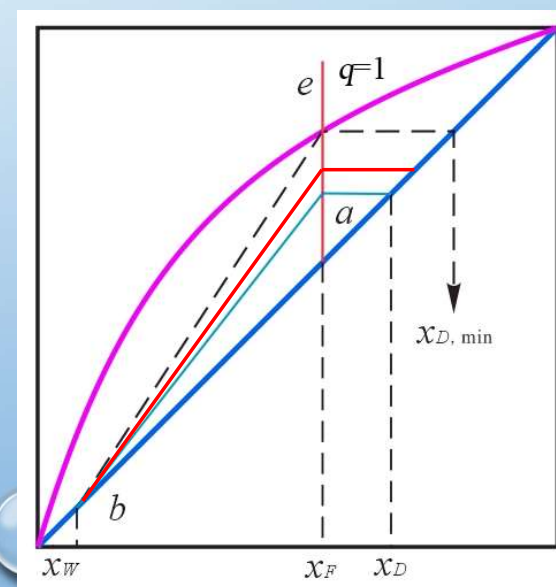
$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_n - \frac{W}{\bar{V}} x_W = \frac{F}{D} x_n - \frac{W}{D} x_W$$

恒摩尔流假定： $F = \bar{L}, D = \bar{V}$

欲使 $x_D \uparrow, \bar{V} \downarrow, D \downarrow \quad \therefore \frac{F}{D} \uparrow, N_T \uparrow$



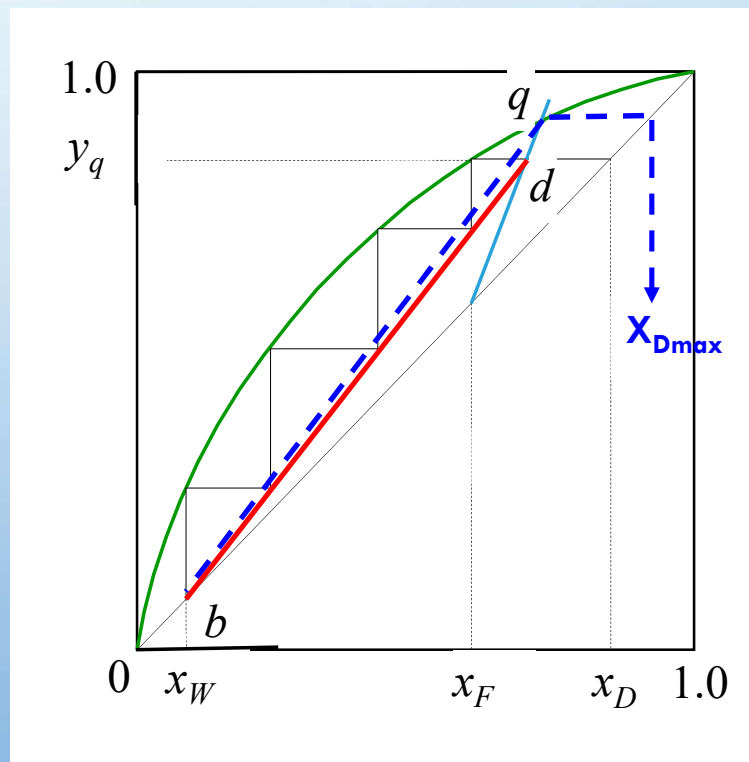
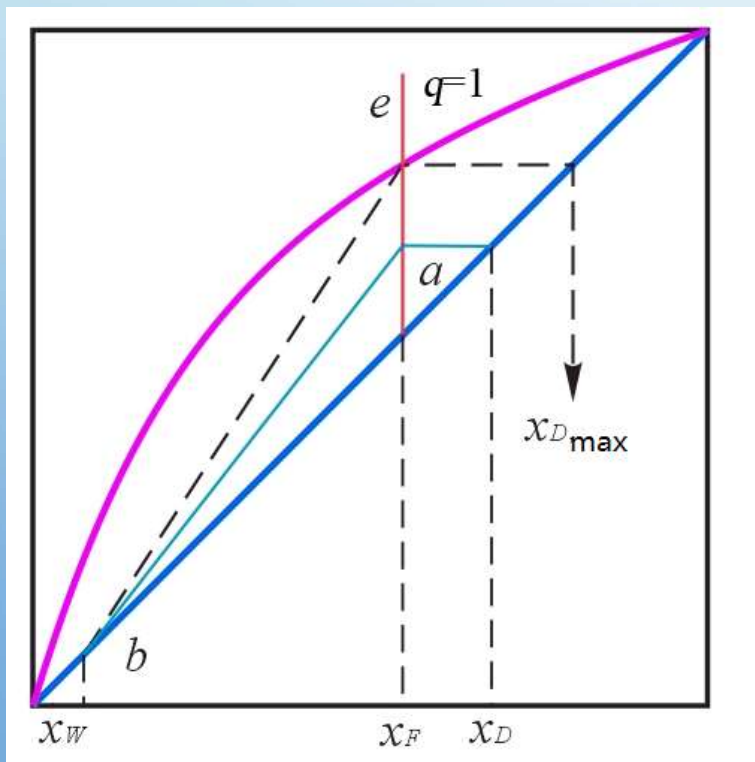
(a)  
无回流的回收塔



## 9.5 双组分精馏的设计型计算

当操作线上端移至 $e$ 点，与 $x_F$ 成平衡的汽相组成为 $x_{D,max}$

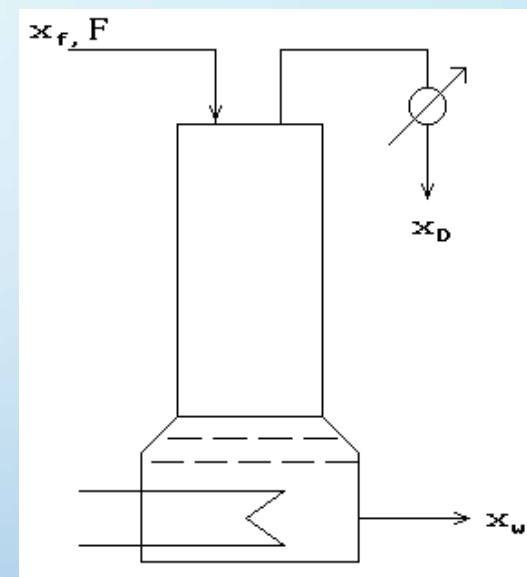
当冷液进料 ( $q>1$ ) 时，可与完全的精馏塔一样先作出 $q$ 线， $q$ 线与 $y=x_D$ 的交点 $d$ 为操作线上端。最大浓度 $x_{D,max}$





**例**如图所示的回收塔。 $F=100\text{kmol/h}$ ,  $x_f=0.4$  (摩尔分率, 下同), 泡点进料, 要求塔顶轻组分回收率为0.955,  $x_w=0.05$ , 系统的 $\alpha=3$ 。试求:

- (1) 馏出液组成 $x_D$ , 塔顶、塔底产物流率;
- (2) 操作线方程;
- (3) 在加料流率及塔釜蒸发量不变时, 可能获得最高馏出液浓度。



解： 1、  $F=100\text{kmol/h}$ ,  $x_f=0.4$

$$\eta=0.955, \quad x_w=0.05$$

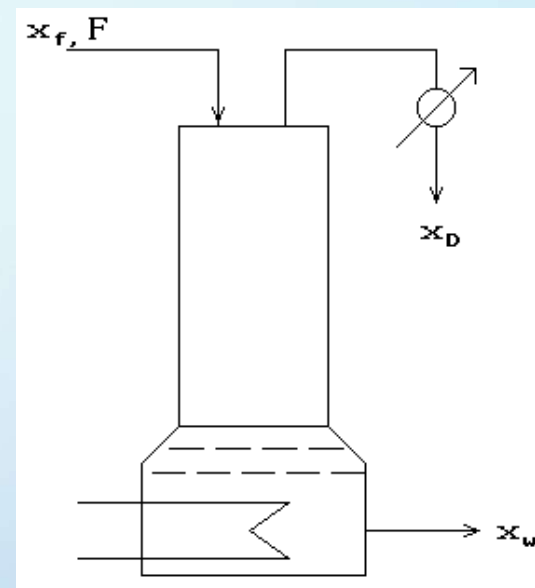
$$\frac{Wx_w}{Fx_f} = 1 - \eta = 0.045$$

$$\frac{W}{F} = \frac{0.045 \times 0.4}{0.05} = 0.36$$

$$W = 0.36F = 36\text{kmol/h}$$

$$D = 0.64F = 64\text{kmol/h}$$

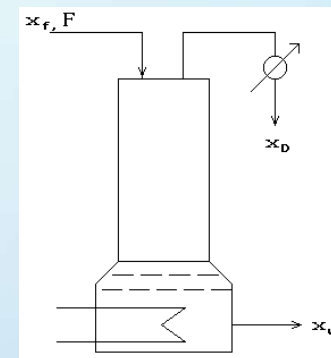
$$x_D = \eta \frac{x_f}{D/F} = 0.955 \times \frac{0.4}{0.64} = 0.597$$



(2) 该塔只有提馏段，且饱和液体加料， $q=1$ ，故

$$\bar{L} = F, \bar{V} = D \quad \therefore \frac{\bar{L}}{\bar{V}} = \frac{F}{D}$$

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x - \frac{W}{\bar{V}}x_W = \frac{F}{D}x - \frac{W}{D}x_W = 1.56x - 0.028$$



(3)  $\because q=1$ ， $q$ 线是垂线交平衡线上点 $(x_e, y_e)$ ，

$$x_e = x_f = 0.4 \quad y_e = \frac{\alpha x_e}{1 + (\alpha - 1)x_e} = \frac{3 \times 0.4}{1 + 2 \times 0.4} = 0.667 \quad x_D = 0.667$$

?

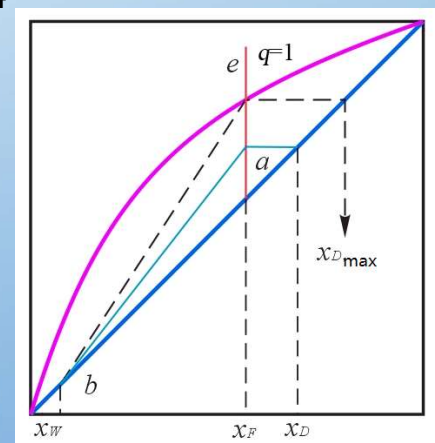
$$\text{设 } x_D = y_e = 0.667$$

$$\therefore Dx_D + Wx_W = Fx_f$$

$$\therefore x_W = -0.0747 < 0 (\times)$$

$$\therefore x_W = 0$$

$$x_D = \frac{Fx_f}{D} = 0.6282$$



请到大平台做精馏课堂练习**3**

### 第三组

精馏塔的灵敏板温度有什么用途

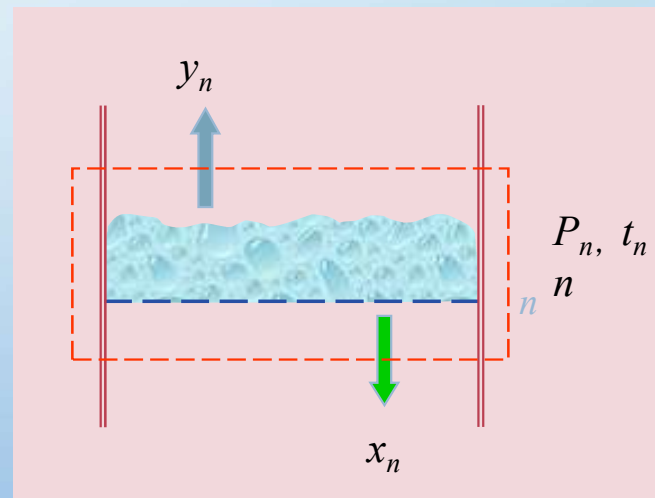
## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### 1、精馏塔的温度分布和灵敏板

#### 精馏塔的温度分布

**温度分布原因：**溶液的泡点与总压及组成有关。精馏塔内各块塔板上物料的组成及总压并不相同，因而从塔顶至塔底形成某种温度分布。

**精馏塔塔顶温度高还是塔底温度高？**

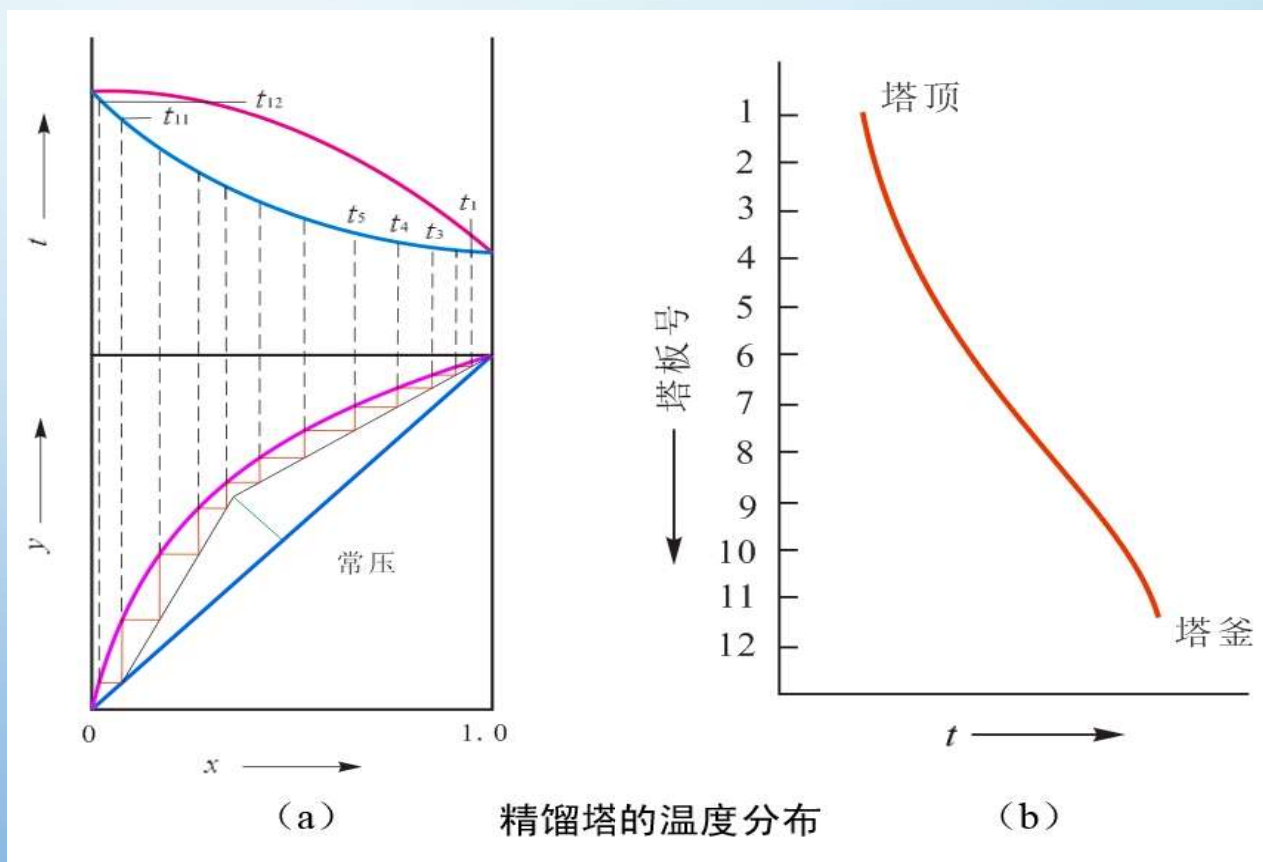


## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### 精馏塔的温度分布

**温度分布曲线**：图a为各板组成与温度的对应关系；将各板的温度标绘在图 (b)中，即得全塔温度分布曲线。操作中通过监测**塔顶**和**塔底温度**来反映**馏出液组成**和**釜残液组成**。

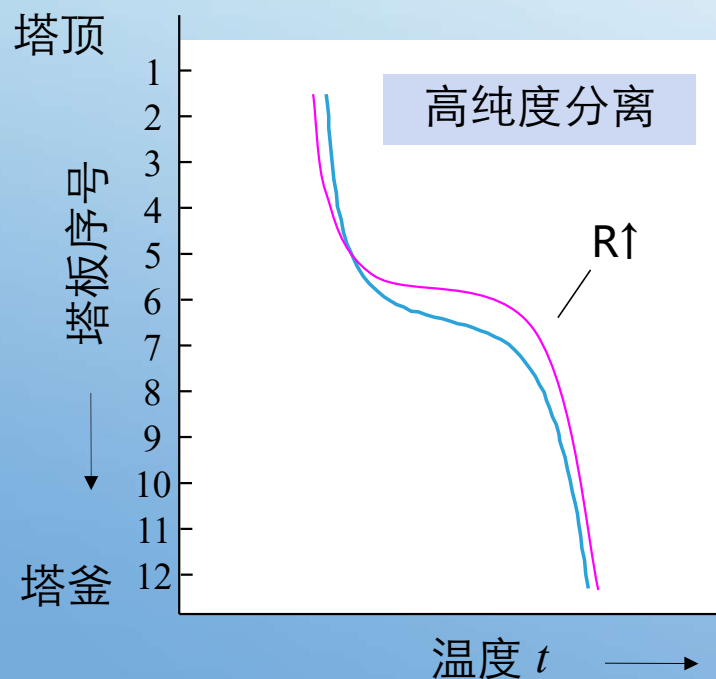
组成越高温度越低



## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### 精馏塔的温度分布

**精馏塔内温度分布特点：**温度由塔顶至塔底**逐渐升高**。温度在塔顶及塔底相当一段塔板范围内**变化较小**。

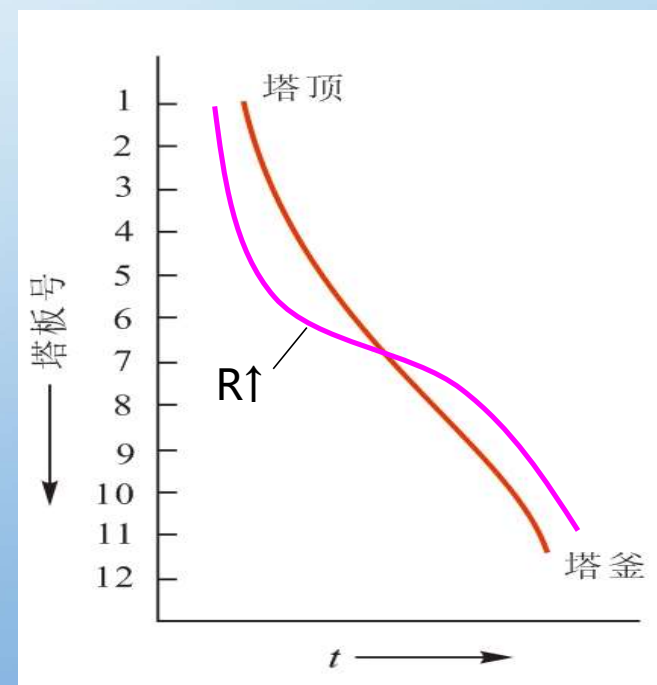


塔顶或塔底温度变化极小，当**塔顶温度变化可察觉**时，塔顶**馏出液变化也超出允许范围**。

乙苯-苯乙烯减压精馏， $x_D=0.999$ 变为 $x_D=0.9$ ，塔顶温度上升 $0.7^\circ\text{C}$ 。

### 灵敏板

**灵敏板：**温度改变最显著的塔板，灵敏板通常**靠近进料口**。



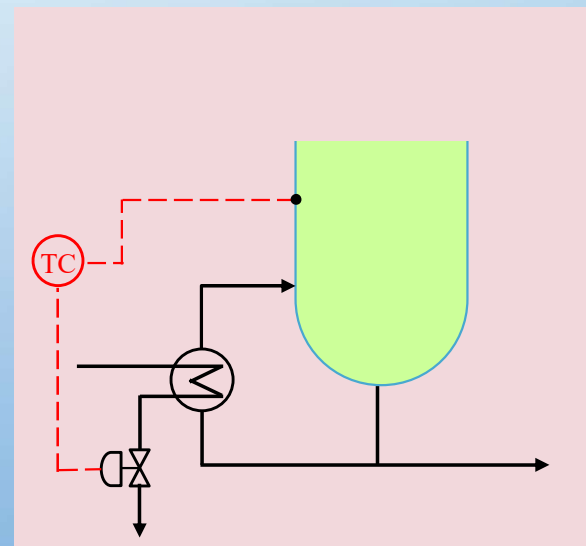
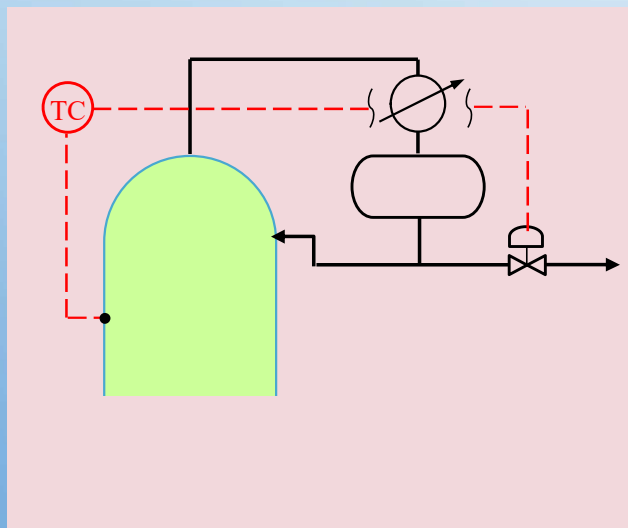


## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### 灵敏板

测量灵敏板温度的方法预示塔内组成尤其是塔顶馏出液组成的变化。

**工程应用：**常常将灵敏板温度和塔釜蒸汽加热量或塔顶回流量进行联锁，保证塔顶和塔底产品达标，生产连续稳定运行。



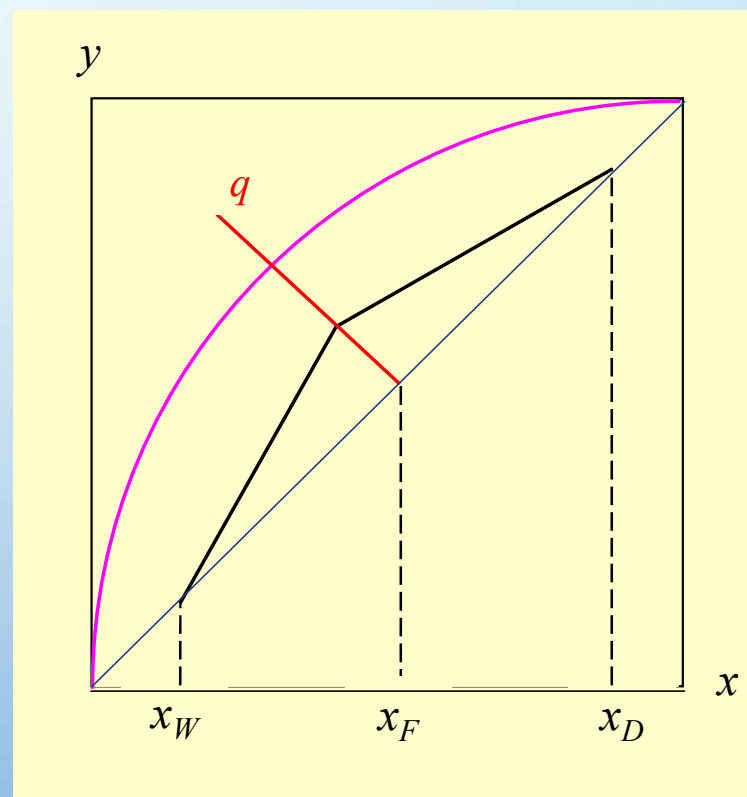
## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### 2、操作型问题的定性分析

#### ① 回流比对精馏结果的影响

原工况：操作线如图中黑线

新工况：保持 $F$ 、 $x_F$ 、 $q$ 、 $D$ 及相平衡关系（或相对挥发度 $\alpha$ ）均不变，**现 $R \downarrow$** ，问 $x_D$ 、 $x_W$ 如何变化？



## 第四组

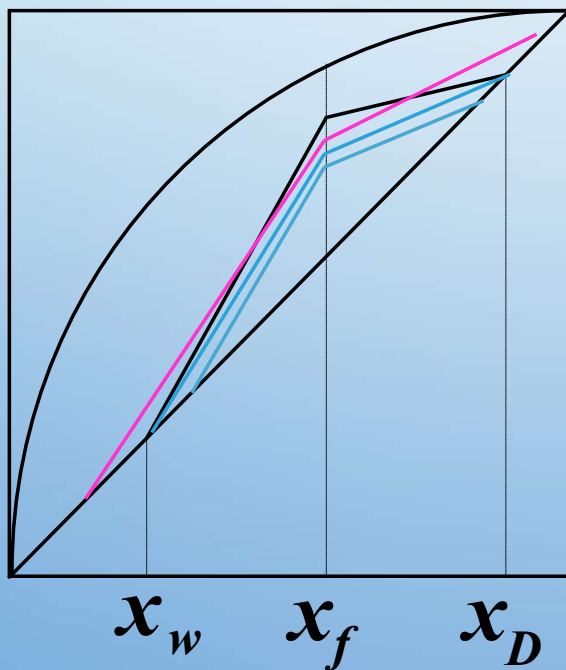
精馏塔操作时，回流比对精馏结果的影响

## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ① 回流比对精馏结果的影响

调节 $R$ ， $D/F$   $q$  不变

$R \uparrow$  操作线向对角线靠拢



当 $N$ 一定时  $x_D \uparrow$   $x_w \downarrow$

若 $x_D$ 不变， $x_w$ 不变 $N_T \downarrow$

若 $x_D \downarrow$ ， $x_w \uparrow$   $N_T \downarrow$

## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ① 回流比对精馏结果的影响

**分析：** 设  $x_D$  不变，因为  $F$ ,  $D$  不变，所以  $W$  不变，则  $x_W$  也不变

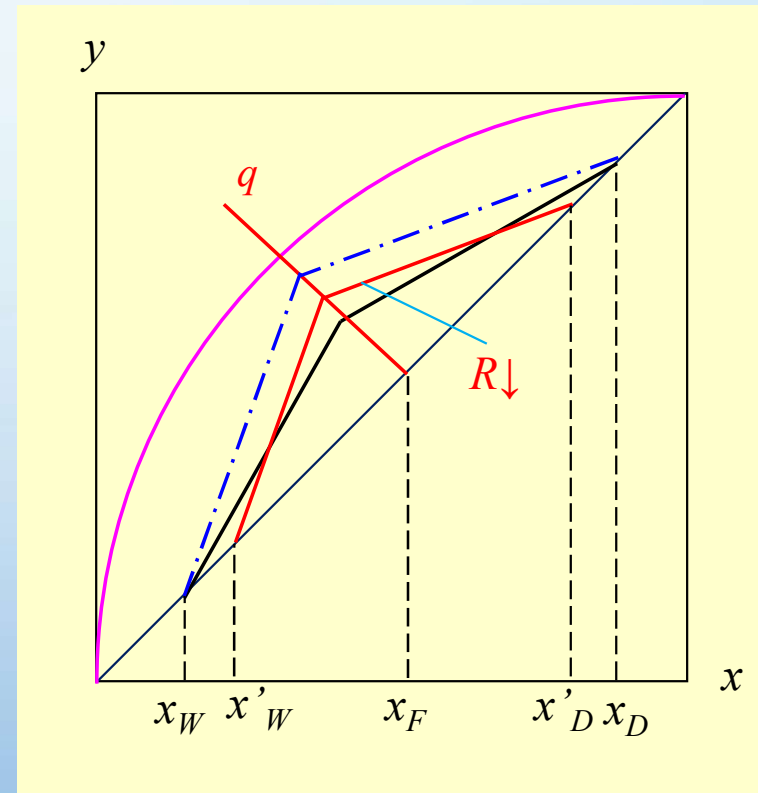
$$\text{现 } R \downarrow \longrightarrow \frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} \downarrow$$

连精馏段操作线与  $q$  线交点和点  $(x_W, x_W)$  得提馏段操作线。

此时  $N'_T > N_T$  操作线需**向下**平移。

这时， $x_D$  必 $\downarrow$ ， $x_W$  必 $\uparrow$ 。

**结论：**  $R \downarrow$ ,  $x_D \downarrow$ ,  $x_W \uparrow$

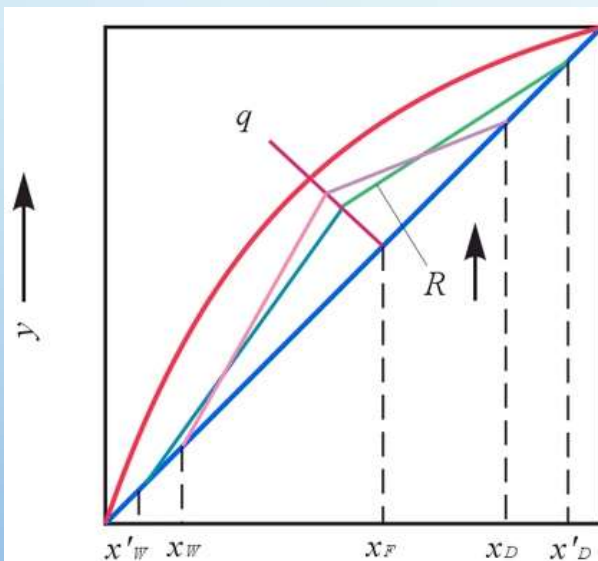


## 9.6 双组分精馏的操作型计算

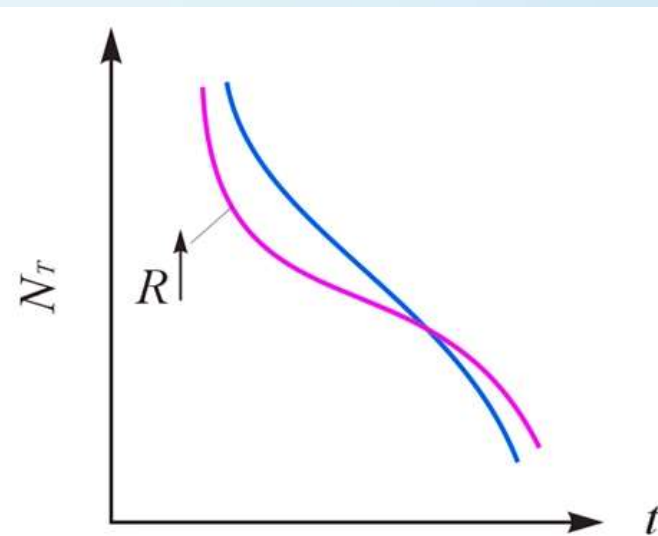
### ① 回流比对精馏结果的影响

$$R \uparrow \rightarrow x_D \uparrow, t_D \downarrow, x_W \downarrow, t_W \uparrow$$

温度的影响



$R$ 增加对 $x_D$ 、 $x_W$ 的影响



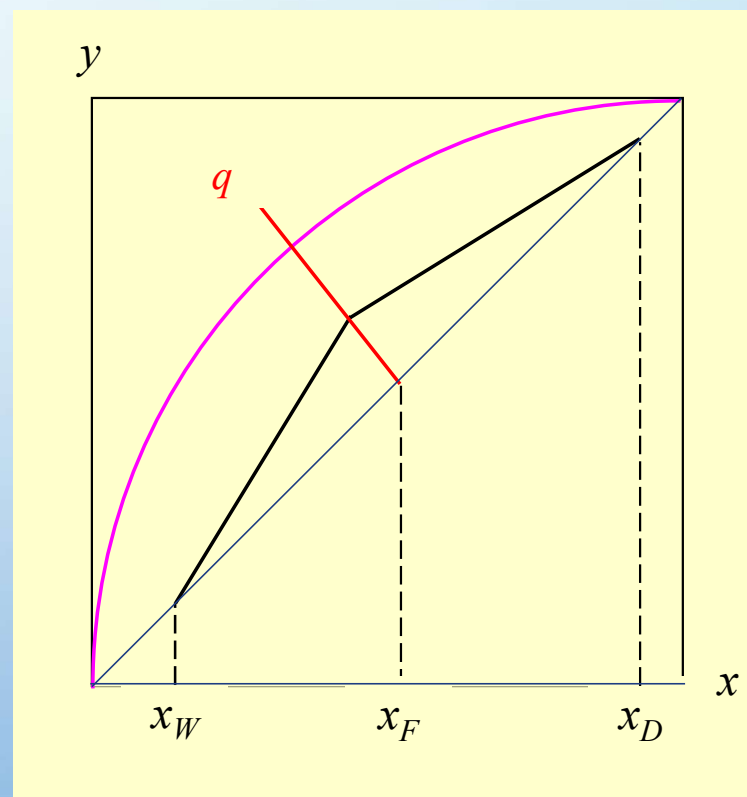
两种 $R$ 时的温度分布

## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ② 进料状态对精馏结果的影响

原工况：操作线如图中黑线

新工况：保持 $F$ 、 $x_F$ 、 $Q_h$  (或 $\bar{V}$ )、 $D$ 及相平衡关系 (或相对挥发度 $\alpha$ ) 均不变，现 $q \uparrow$ ，问 $x_D$ 、 $x_W$ 如何变化？



## 第五组

精馏塔操作时，进料状态对精馏结果的影响



## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ② 进料状态对精馏结果的影响

**分析：** 设  $x_D$  不变，因为  $F$ ， $D$  不变，所以  $W$  不变，则  $x_W$  不变

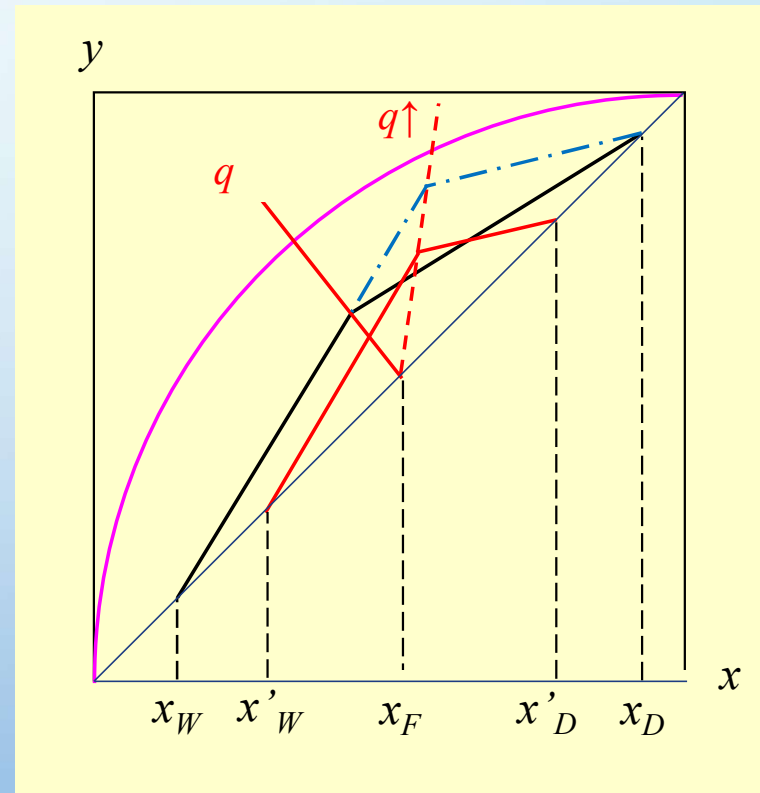
$$\frac{\bar{L}}{\bar{V}} = \frac{\bar{V} + W}{\bar{V}} \text{ 不变}$$
$$q \uparrow \longrightarrow \frac{q}{q-1} \uparrow$$

提馏段操作线与新 $q$ 线的交点与点  $(x_W, x_W)$  连线得精馏段操作线。

为使  $N'_T = N_T$ ，操作线须**向下**平移

**结论：** 当  $\bar{V}$  一定， $q \uparrow$ ，则  $R \downarrow$ ， $x_D \downarrow$ ， $x_W \uparrow$

**原因：** 当塔釜加热量一定，对原料预冷，实际塔顶冷量下降， $R$  下降，塔顶塔底产品质量下降。

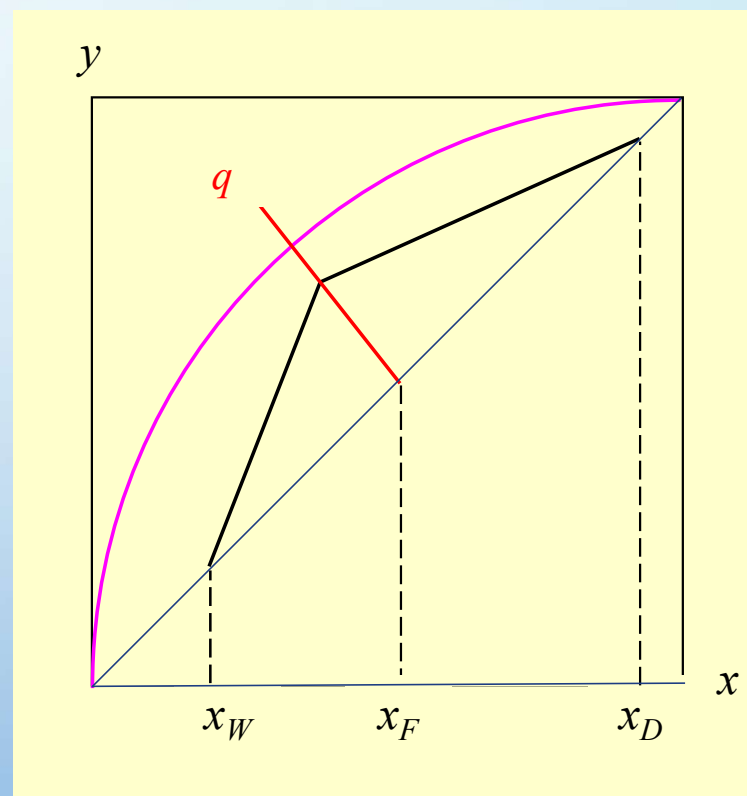


## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ③ 采出率对精馏结果的影响

原工况：操作线如图中黑线

新工况：保持 $F$ 、 $x_F$ 、 $q$ 、 $R$ 及相平衡关系（或相对挥发度 $\alpha$ ）均不变，现塔顶产量 $D\uparrow$ ，问 $x_D$ 、 $x_W$ 如何变化？



## 第六组

精馏塔操作时，采出率对精馏结果的影响

## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ③ 采出率对精馏结果的影响

**分析：** 设  $x_D$  不变，已知  $D \uparrow$

$$\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} \text{ 不变,}$$

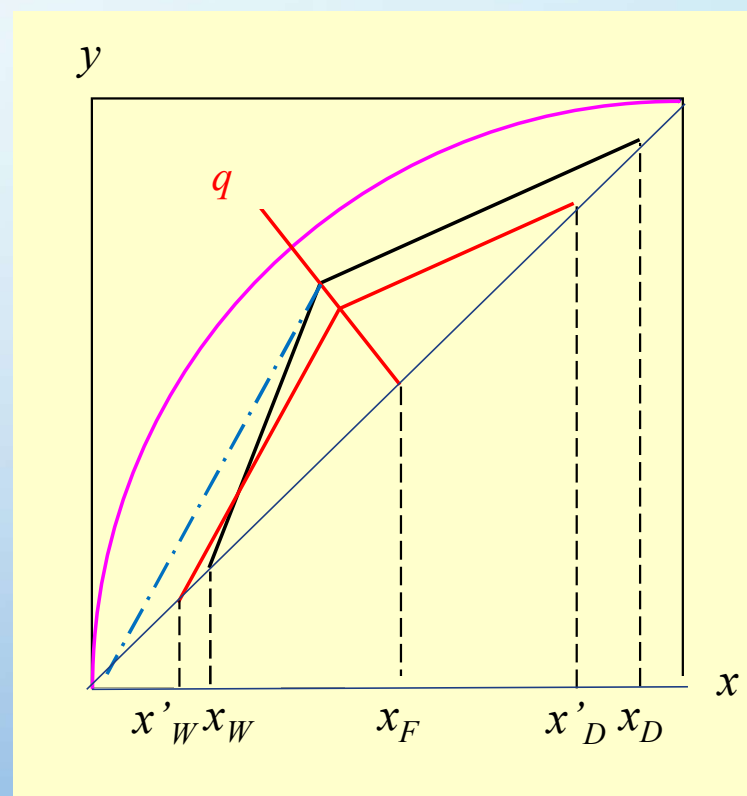
$$\frac{\bar{L}}{\bar{V}} = \left(1 + \frac{W}{V}\right) = \left[1 + \frac{F-D}{(R+1)D - (1-q)F}\right] \downarrow$$

精馏段操作线与  $q$  线均不变，提馏段操作线斜率下降。

为使  $N'_T = N_T$ ，操作线需向下平移

**结论：**  $D/F \uparrow$ ，则  $x_D \downarrow$ ， $x_W \downarrow$

**原因：** 随着  $D$  增加，轻组分易于从塔顶溜出，同时易将重组分从塔顶带出，使塔顶产品浓度下降，而塔釜的浓度下降。

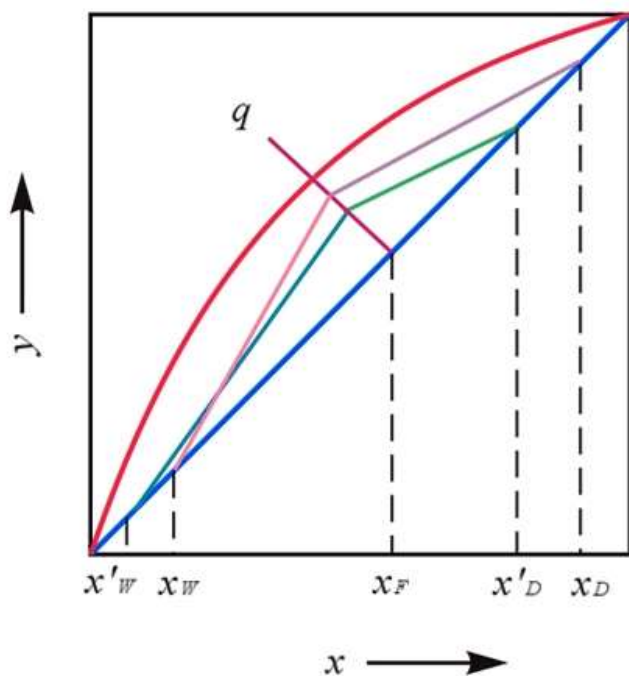


## 9.6 双组分精馏的操作型计算

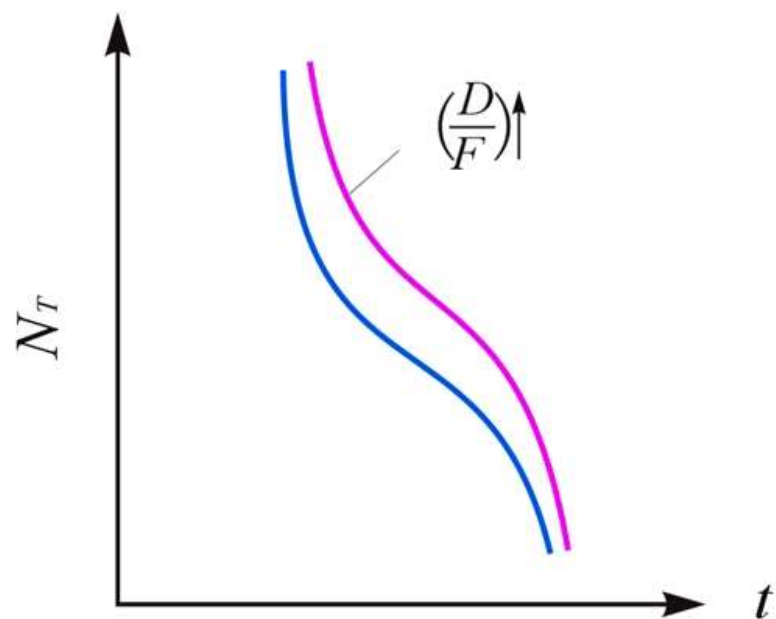
### ③ 采出率对精馏结果的影响

$$D/F \uparrow \rightarrow x_D \downarrow, t_D \uparrow, x_W \downarrow, t_W \uparrow$$

温度的  
影响



$D/F$ 增加对 $x_D$ 、 $x_W$ 的影响



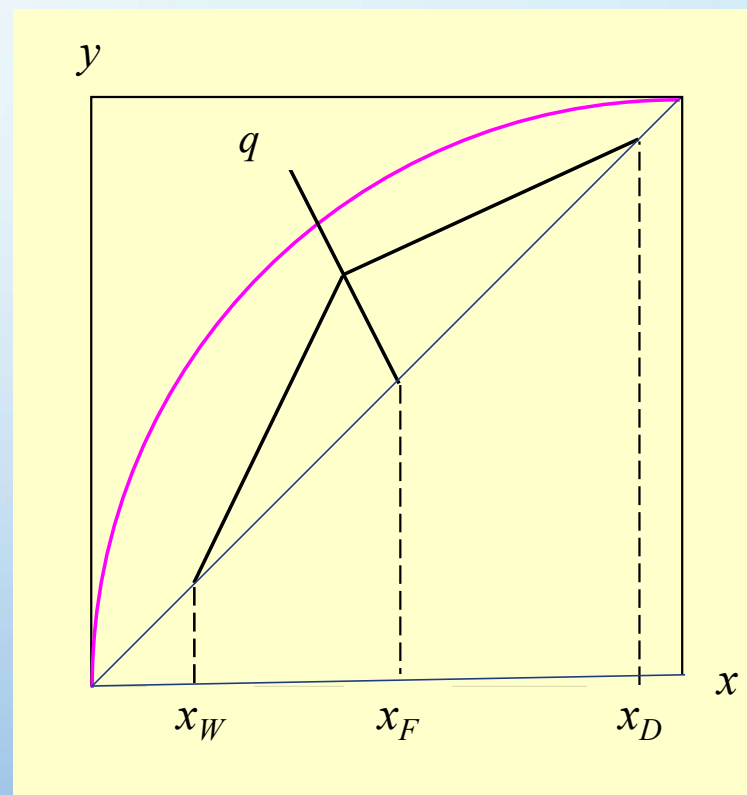
两种 $D/F$ 时的温度分布

## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ④ 进料组成对精馏结果的影响

原工况：操作线如图中黑线

新工况：保持 $F$ 、 $q$ 、 $D$ 、 $R$ 及相平衡关系（或相对挥发度 $\alpha$ ）均不变，现 $x_F \downarrow$ ，问 $x_D$ 、 $x_W$ 如何变化？



## 第七组

精馏塔操作时，进料组成对精馏结果的影响

## 9.6 双组分精馏的操作型计算

### ④ 进料组成对精馏结果的影响

分析：设  $x_D$  不变

$F$ 、 $D$  不变，则  $W$  不变

$R$  不变，则  $\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1}$  不变

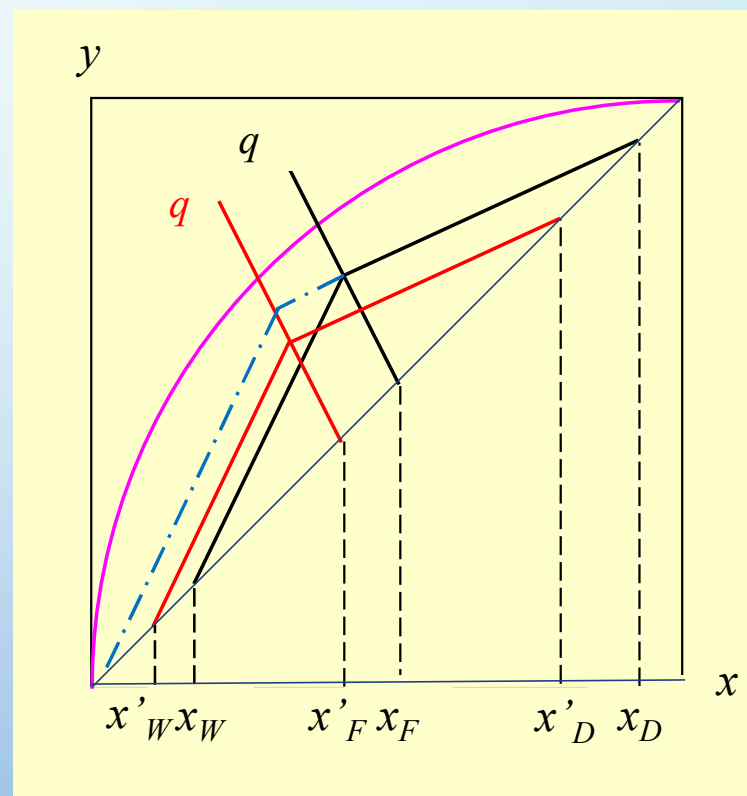
$x_F \downarrow \Rightarrow x_W = \frac{Fx_f - Dx_D}{W} \downarrow$

精馏段操作线与  $q$  线斜率均不变， $x_F \downarrow$ ，  
 $x_W \downarrow$ ，由两点确定提馏段操作线如图中虚线。

为使  $N'_T = N_T$  操作线须向下平移

结论： $x_D \downarrow$ ， $x_W \downarrow$

原因：精馏轻组分向塔顶富集，重组分向塔釜富集。 $R$  一定，原料中  $x_F$  下降，塔顶塔底轻组分浓度均下降，从而有塔顶产品纯度变差，塔釜产品纯度变好的趋势。





## 操作型定性分析举例

**例** 一操作中的常压连续精馏塔分离某混合液。现保持回流液量和进料状况 ( $F$ 、 $x_F$ 、 $q$ ) 不变，而减小塔釜加热蒸汽量，试分析  $x_D$ 、 $x_W$  如何变化？

解

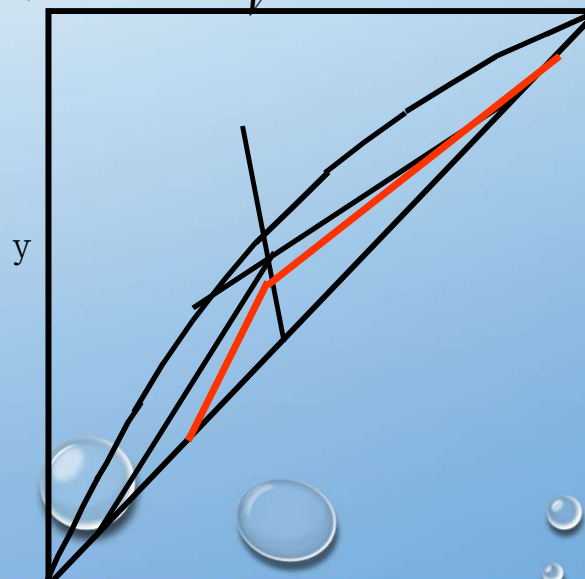
$\bar{V} = V - (1-q)F$ ， $F$ 、 $q$  不变  $\Rightarrow V \downarrow$  而  $L$  不变  $\Rightarrow \frac{L}{\bar{V}} \uparrow \Rightarrow x_D$  变大

$\bar{L} = L + qF$ ， $F$ 、 $q$ 、 $L$  不变， $\rightarrow \bar{L}$  不变，而  $\bar{V} \downarrow \Rightarrow \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \uparrow \Rightarrow x_W$  变大

假设  $x_D$  不变、假设  $x_D$  变小

$N \downarrow$ ，与  $N$  不变这个前提相矛盾。  
故假设不成立。

故  $x_D$  只能变大



## 讨论

操作中精馏塔，保持  $F$ ， $x_F$ ， $q$ ， $\bar{V}$  不变，减少  $D$ ，则塔顶易挥发组分回收率  $\eta$  变化为

(A) 变大

(B) 变小

(C) 不变

(D) 不确定

## 讨论

操作中精馏塔，保持  $F$ ， $x_F$ ， $q$ ， $\bar{V}$  不变，减少  $D$ ，则塔顶易挥发组分回收率  $\eta$  变化为

(A) 变大

(B) 变小

(C) 不变

(D) 不确定

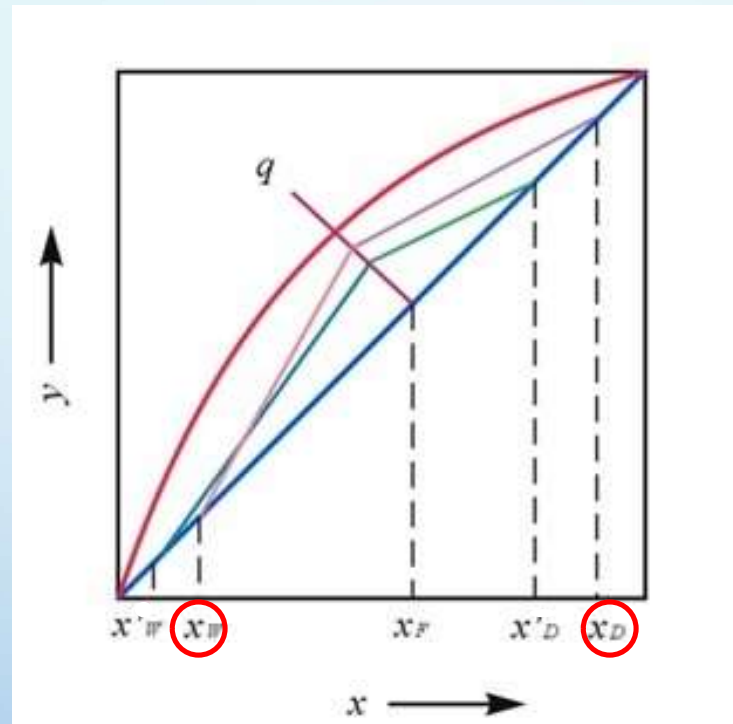
分析：

$$\bar{V} = V - (1-q)F = (R+1)D - (1-q)F, \quad F = D + W$$

$\bar{V}$  不变， $D \downarrow$ ， $R \uparrow$ ， $W \uparrow$

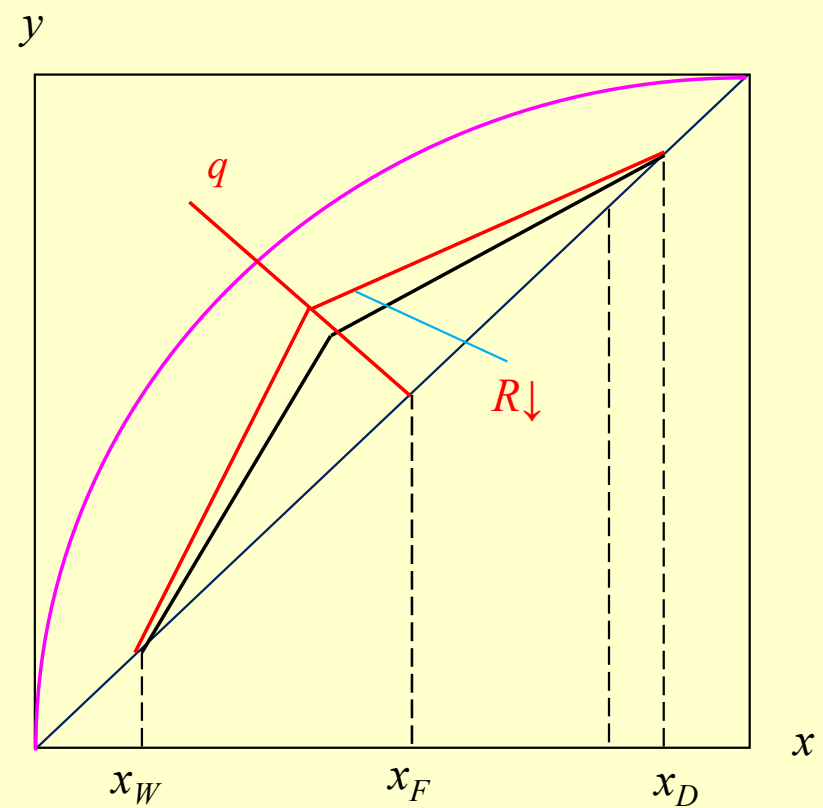
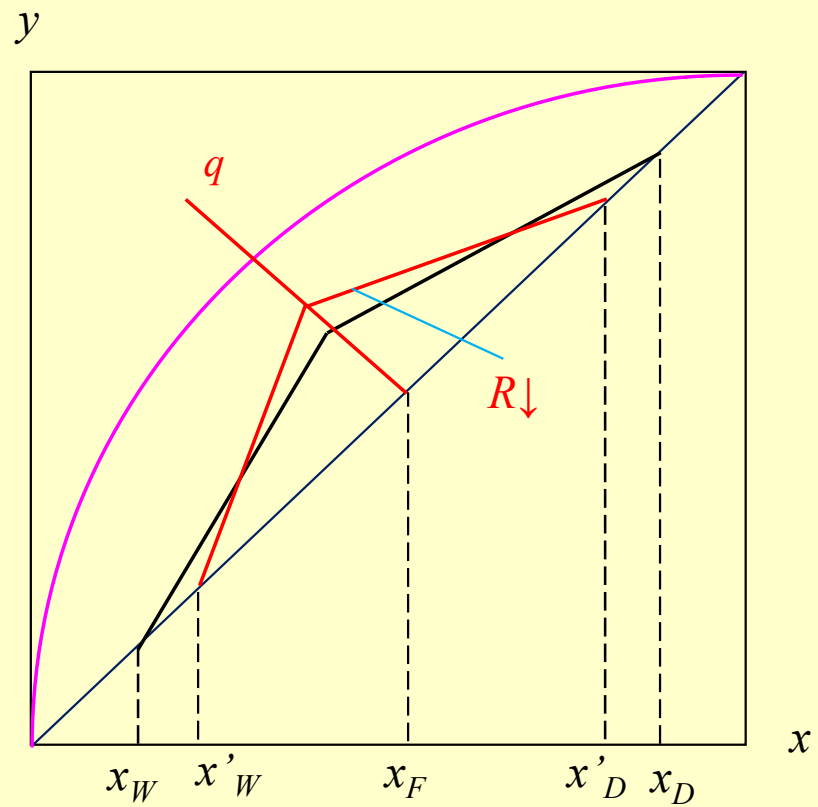
精馏段  $R \uparrow$ ，塔板分离能力  $\uparrow$ ， $x_D \uparrow$

$$\frac{\bar{L}}{\bar{V}} = \frac{\bar{V} + W}{\bar{V}} = 1 + \frac{W}{\bar{V}} \uparrow, \quad x_w \uparrow$$

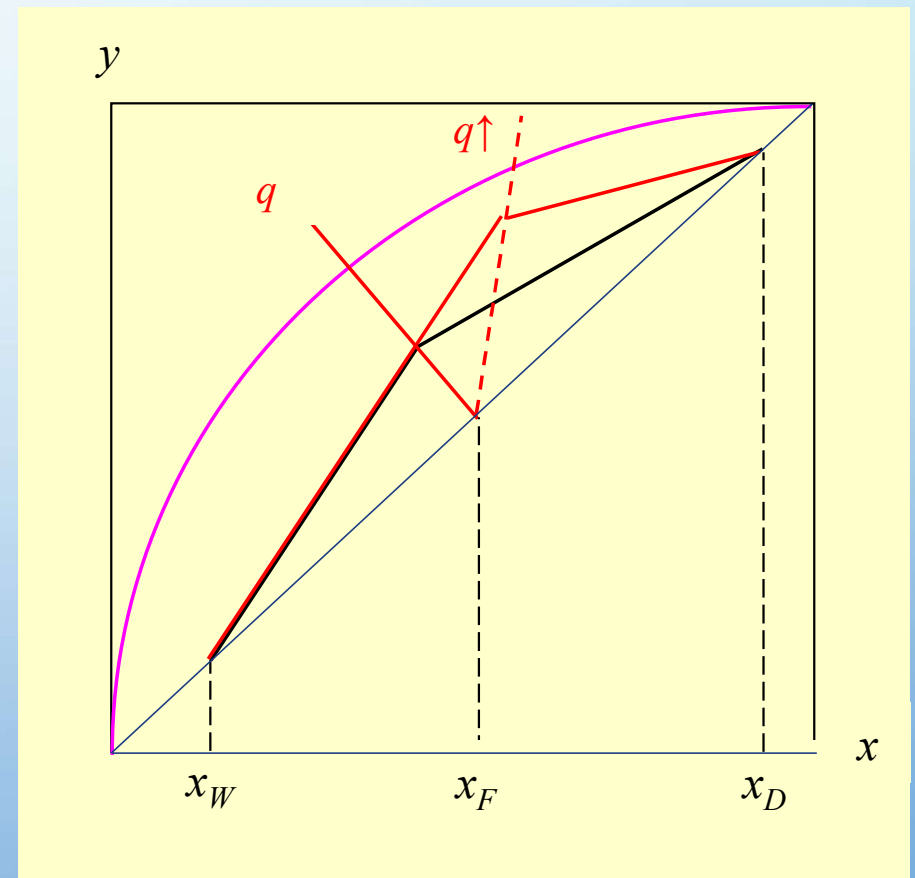
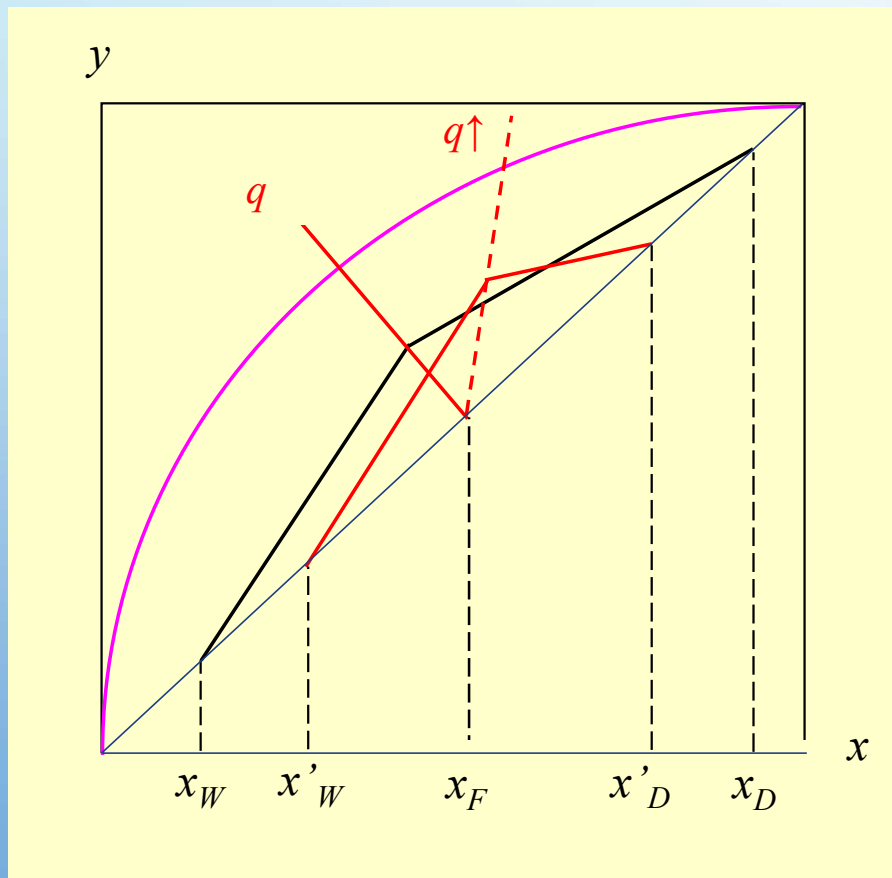


$$W \uparrow, x_w \uparrow \quad \eta = \frac{Dx_D}{Fx_F} = 1 - \frac{Wx_w}{Fx_F} \downarrow \quad \text{选 B}$$

辨析 R减小, 下列二个图的意义



# 辨析 加热状态变化，下列二个图的意义



## 加料热状态变化

$\bar{V}$ 一定（塔釜加热量固定）

$q \uparrow$ （预冷原料）

$\bar{V}$ 一定(加热量一定)

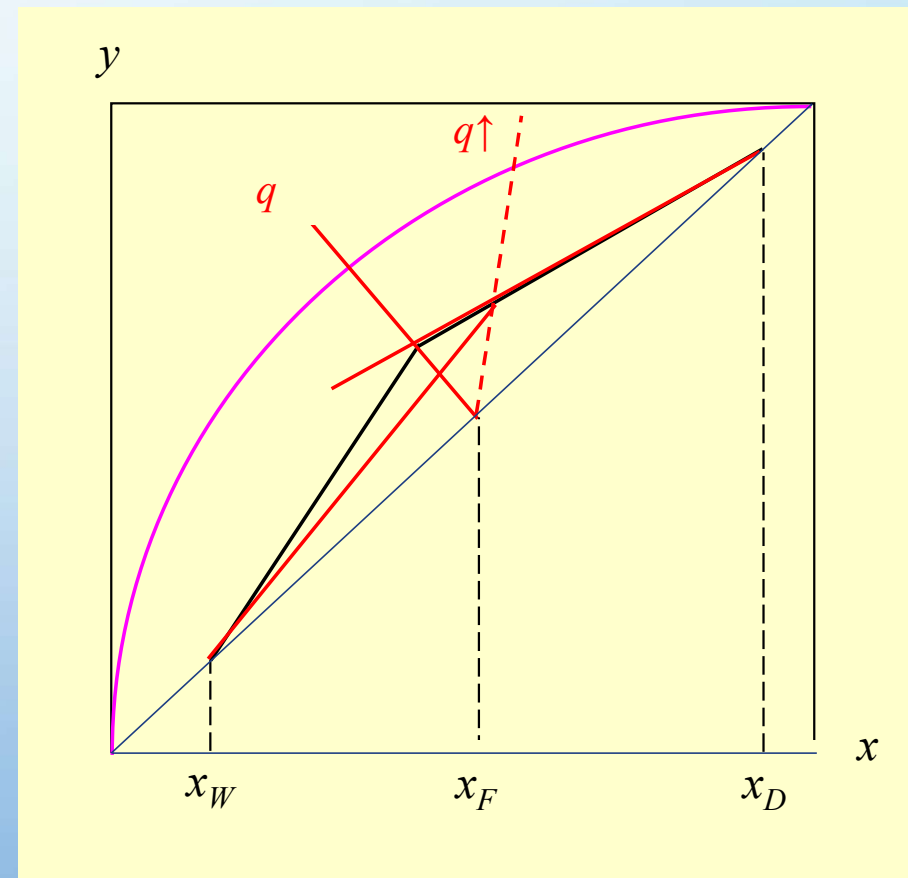
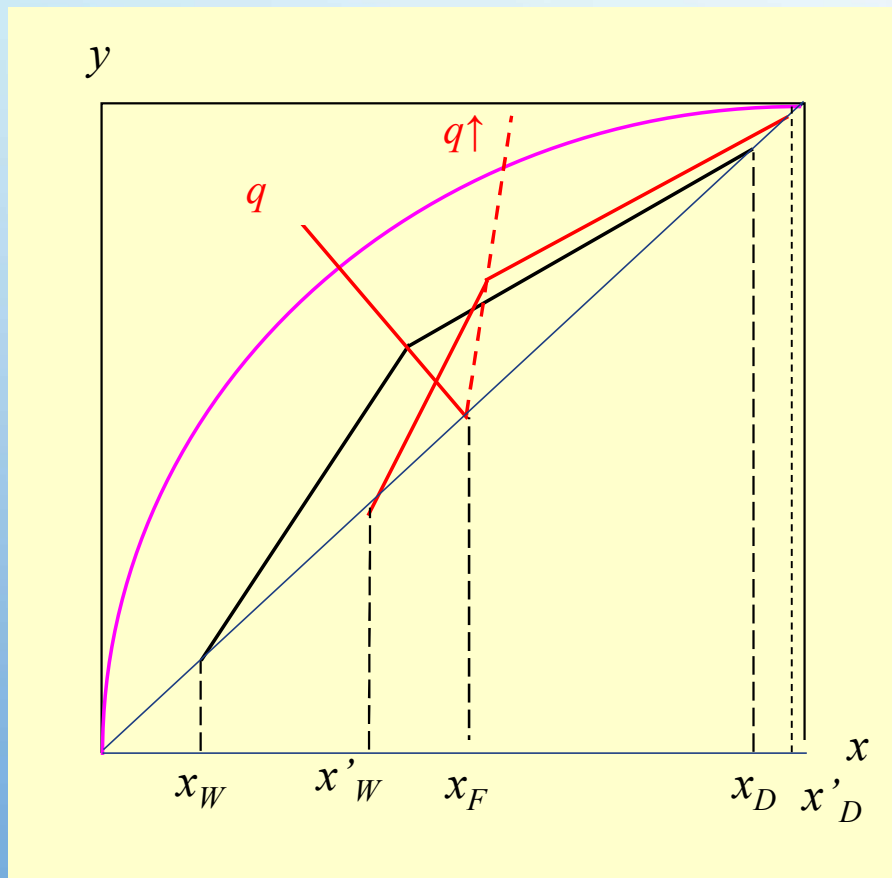
$q \uparrow$ (预冷原料),  $q$ 从汽液两相到饱和液体

$R \downarrow$

$$\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} = \frac{1}{1+1/R} \downarrow$$

$$\left(\frac{L}{V}\right) \downarrow$$

# 辨析 加热状态变化，下列二个图的意义





## 加料热状态变化

**$R$ 一定（冷却量固定）**

**$q$**  值不影响精馏操作线位置，  
改变了提馏段操作线的位置。

**$q \downarrow$ （预热原料）， $\bar{V} \downarrow, \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \uparrow$**

请做大平台精馏课堂练习4

## 计算练习

用精馏塔分离某双组分混合物，塔顶采用全凝器，泡点回流，塔釜间接蒸汽加热，汽液混合进料（汽：液=1:1），进料中易挥发组分含量为 0.4（摩尔分率），塔顶易挥发组分的回收率为 0.98，塔顶采出率  $D/F$  为 0.45（摩尔流量比），物系相对挥发度为 2.5，操作回流比取 2.01，试求：

- (1) 塔顶、塔底产物的浓度  $x_D$ 、 $x_W$
- (2) 写出精馏段和提馏段操作线方程
- (3) 若塔内为实际板，离开第一块板（自塔顶向下数）的液体的组成为 0.76。求塔顶第一块板的默弗里板效率  $E_{mv}$ 。
- (4) 若为饱和蒸汽进料，其他条件不变，且保持回流比  $R$  不变，需要多少块塔板才能满足上述分离要求？

## 视频学习

9.7 间歇精馏

9.8 恒沸精馏和萃取精馏

9.10 多组分精馏基础

## 作业

### 简述题

- 1、特殊精馏在什么时候使用？比较恒沸精馏和萃取精馏，并举例。
- 2、间歇精馏过程的特点？间歇精馏过程中保持 $x_d$ 不变和保持 $R$ 不变各自的计算特点。
- 3、如何选择多组分精馏的方案。

书上习题 16、18, 20、21、23, 周六交精馏作业。

## 其他

- 1、完成精馏章节的自测练习，周日晚上讲解。
- 2、完成精馏一章的思维导图/知识图谱。提交邮件 [jieh@ecust.edu.cn](mailto:jieh@ecust.edu.cn)