



# 稳定同位素在生态系统 水循环研究中的应用及展望

徐 庆

中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所  
xuqing@caf.ac.cn

2017年10月 南京

# 汇报提纲

1. 川西亚高山森林生态系统
2. 鼎湖山森林生态系统
3. 西鄂尔多斯荒漠生态系统

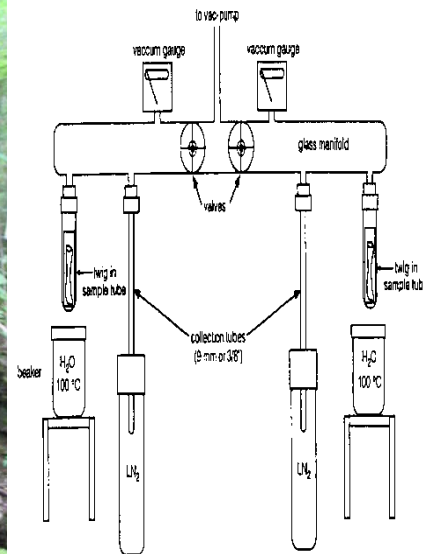
# 1. 川西亚高山森林生态系统



# 1.1 研究进展

- 稳定同位素技术在20世纪50年代初开始被用于生命科学研究(Craig,1953)。
- 大范围有组织的取样工作始于1961年(Craig,1961)。
- 20世纪70年代后期和80年代初,稳定同位素技术在生态学领域受到重视,并取得了一些可喜的成果(Ehleringer,1989; Wright,1980)。
- 近几十年来, **稳定同位素技术**在生态学研究领域迅速发展,并与**遥感技术**和**数学模型**一起被认为是**生态学的三大现代技术** (林光辉等, 1995, 2013; 徐庆等, 2008; Xu *et al.*, 2011, 2012; Wen *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2016) 。

随着科学技术发展和质谱仪的不断改进，稳定同位素技术已被广泛应用于研究自然界水循环过程（石辉, 2003；林光辉, 2013）。它使水循环的研究方法从水的**分子结构层次**（物理学方法）和**原子结构层次**（化学方法）深入到**原子核结构层次**（同位素方法），它能解决许多利用传统技术无法解决的难题（Hayes, 1978；徐庆等, 2008；Xu *et al.*, 2011, 2012）。

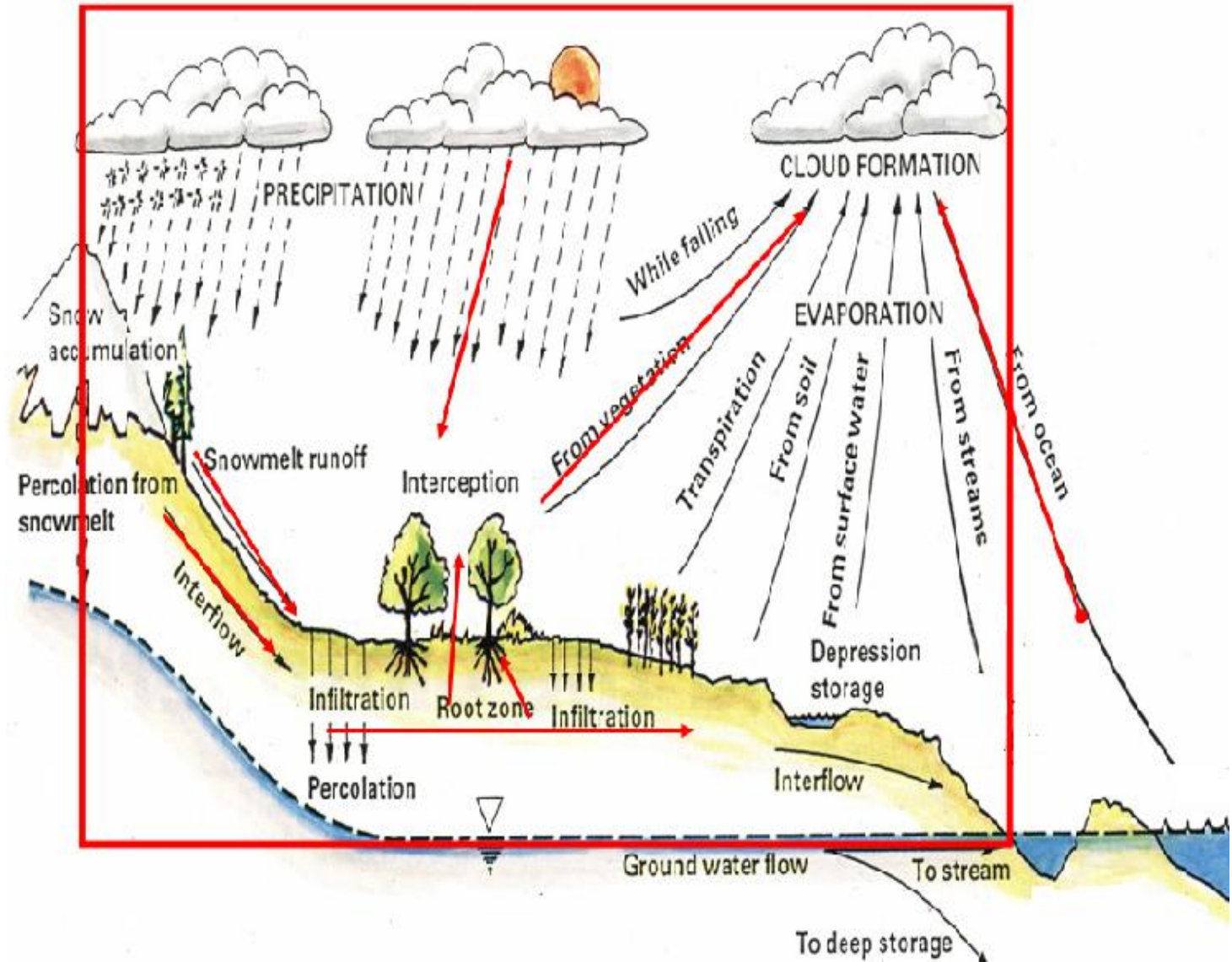


## 1.2 研究背景

- 1. 卧龙地区为气候变化敏感区，如：干旱频率增加，降水的减少；
- 2. 川西卧龙亚高山森林对保持水土、涵养水源、维持长江上游水系的生态平衡等方面起着重要作用。

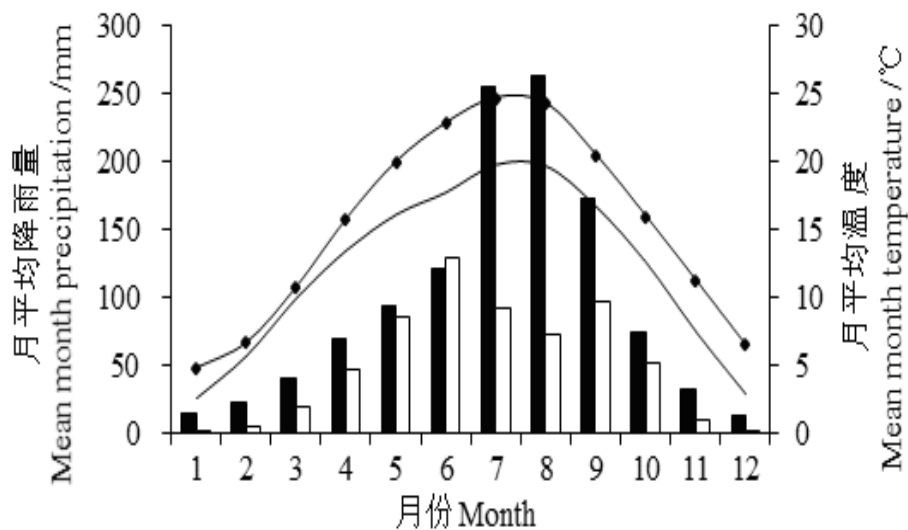
## 1.3 科学问题

1. 不同功能型植物，因其根系分布不同，吸收土壤水的深度不同？
2. 这种不同资源生态位的确定有助于我们理解不同功能型植物共存的机理何在？
3. 川西亚高山暗针叶林和高山灌丛对不同强度降水截留时间有何不同？

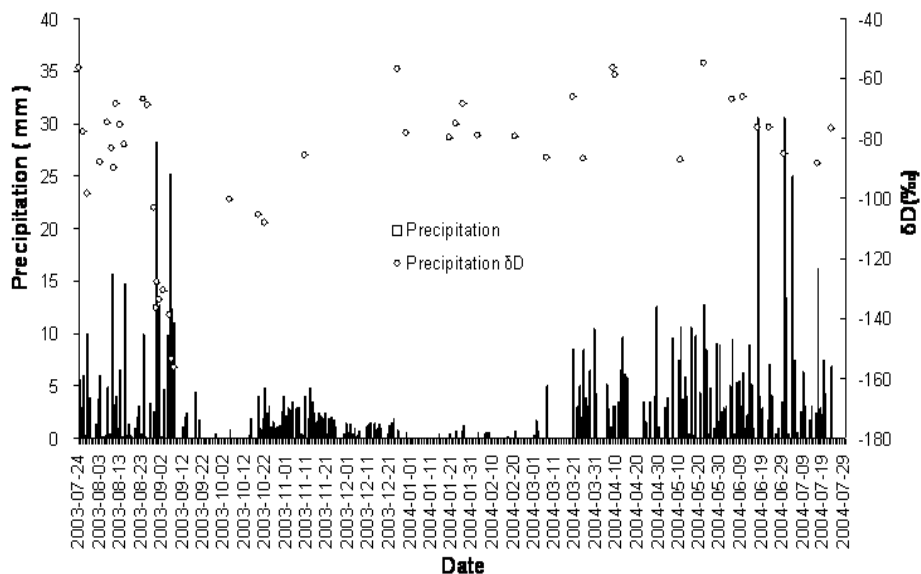




# 1.4 研究区概况

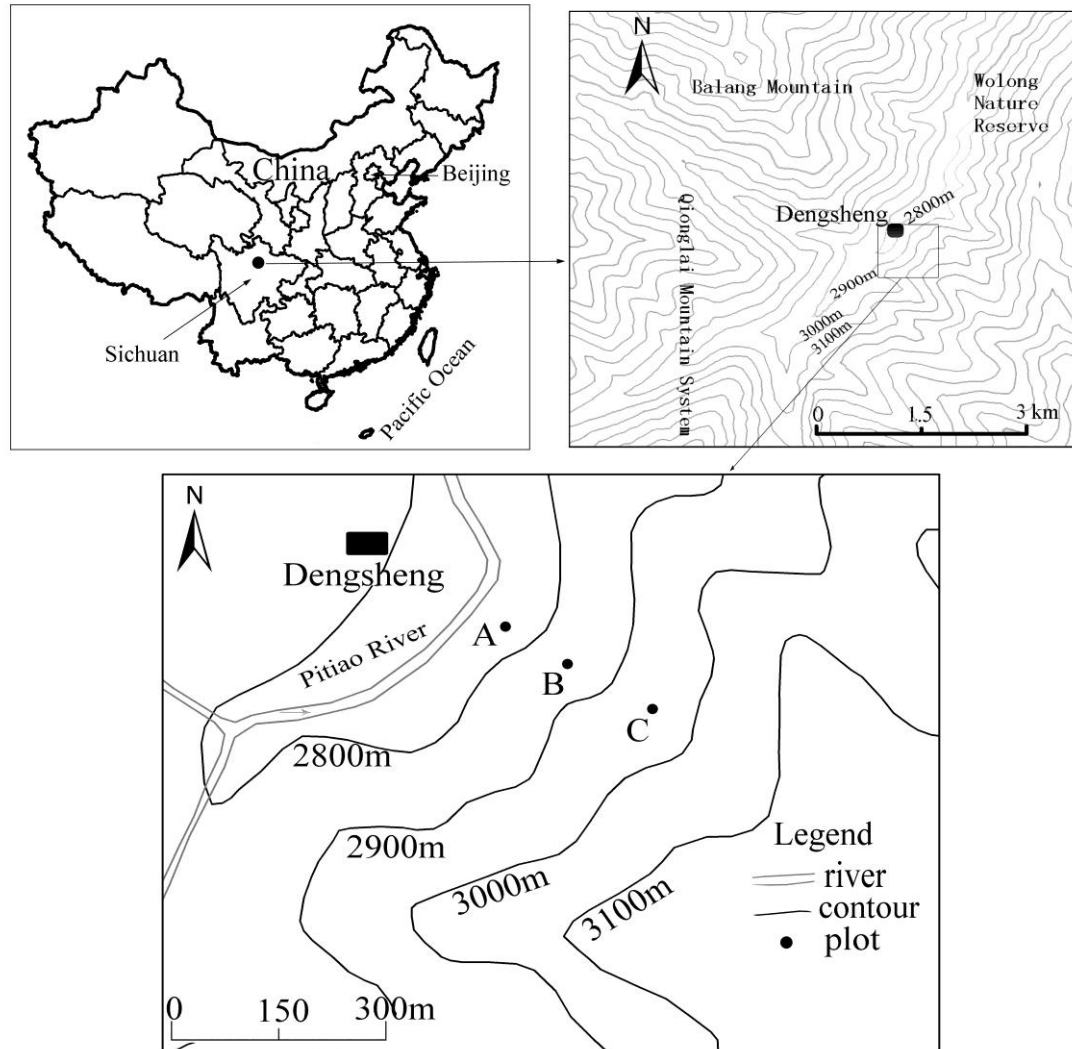


Dpaver    
  Xpaver    
  Dtaver    
  Xtaver



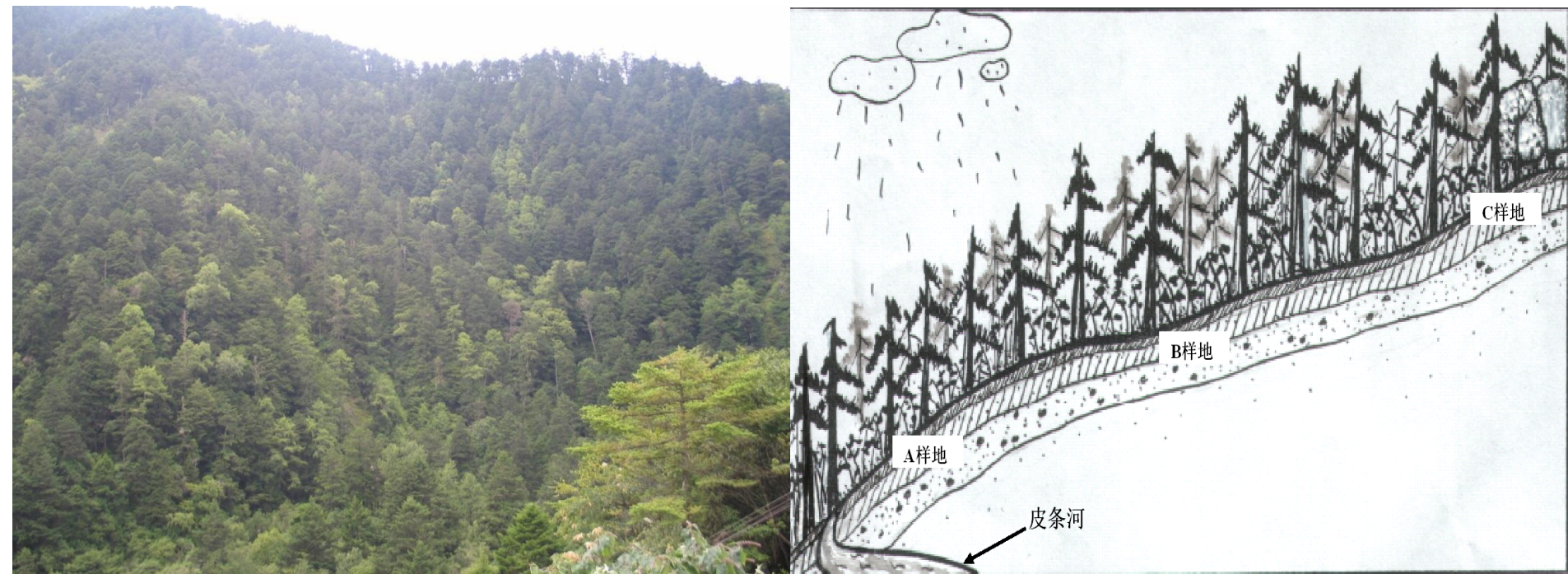
## 气候特点

- 卧龙自然保护区属青藏高原气候区的范围。
- **冬半年**（11月至翌年4月）天气晴朗干燥，云量少，降雨少。
- **夏半年**（5月至10月）降水量大，雨日多。
- **干、湿季明显**，为亚热带季风气候向大陆性高原气候过渡地区。



**Location of the study site in the Wolong Nature Reserve of Sichuan, Southwest China**

# 1.5 研究样地



卧龙亚高山暗针叶林研究样地示意图

- A 样地 (海拔2750m, 东经102° 58'19", 北纬30° 51'21")
- B 样地 (海拔2850m, 东经102° 58'20", 北纬30° 51'16")
- C 样地 (海拔2950m, 东经102° 58'22", 北纬30° 51'20")

## 1.5.1 群落类型和生境特点

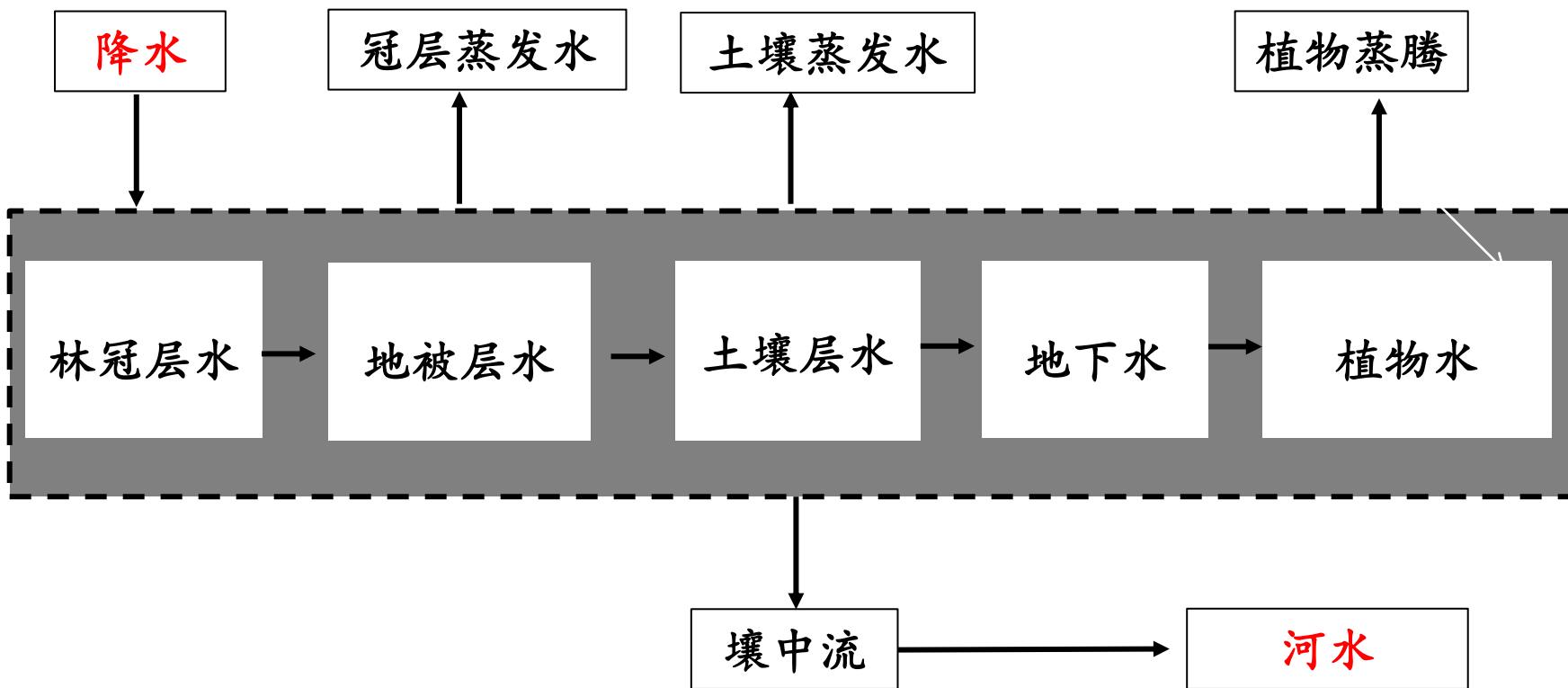
样地 Plots	群落类型 Community types	海拔 Elevation (m)	地理位置 Location	坡度 Slope (°)	土壤特性 Soilcharacteri stics	叶面积 指数 Leafareai ndex	郁闭度 Canopyc overage (%)
A	岷江冷杉 -箭竹群落	2750	N30° 51'21" E102° 58'19"	50	山地暗棕壤	3.15	75
B	岷江冷杉 -箭竹群落	2850	N30° 51'16" E102° 58'20"	35	山地棕色暗 针叶林土	4.56	85
C	岷江冷杉 -杜鹃群落	2950	N30° 51'20" E102° 58'22"	40	山地棕色暗 针叶林土	3.93	90

## 1.5.2 暗针叶林土壤结构特征

土壤深度 (cm)	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	总孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	非毛管孔隙度 (%)	田间含水量	饱和含水量
0-10	1.07±0.30	58.49±9.90	42.89±4.55	15.59±6.85	0.54±0.21	0.71±0.24
10-20	1.35±0.42	51.71±9.95	39.91±8.08	12.40±2.21	0.56±0.24	0.73±0.34
20-30	1.21±0.18	53.11±4.44	41.24±3.13	11.86±1.41	0.47±0.11	0.50±0.10
30-40	1.20±0.14	57.32±3.66	42.41±6.40	14.91±6.28	0.44±0.18	0.62±0.08
40-50	1.19±1.10	54.47±3.45	41.97±2.79	12.45±5.39	0.52±0.06	0.62±0.03
50-60	1.18±0.07	54.50±2.20	41.51±2.38	12.99±0.37	0.60±0.06	0.61±0.05

- 卧龙亚高山暗针叶林土壤剖面明显分为腐殖质层、淀积层和母质层。腐殖质、淀积层和母质层分别位于土壤剖面厚度的4~10cm、10~40cm和40~80cm处，植物根系主要分布在0~60cm处。
- 土壤容重密度范围是1.1~1.4g/cm<sup>3</sup>。土壤总孔隙度平均为54.9%，毛管孔隙度占土壤总孔隙的75.6%。土壤田间含水量和最大持水量平均分别为52%和63%。岩石分布在距土壤表面60~80cm深处或者是更深处。

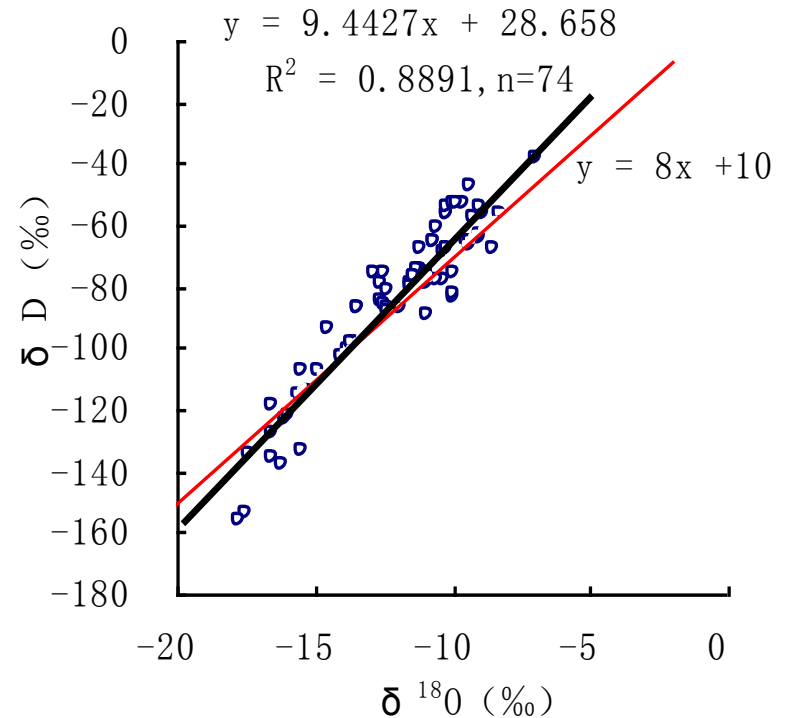
# 森林（黑箱）



# 1.6 主要研究结果

## 1.6.1 卧龙地区大气降水氢氧稳定同位素特征

a. 全年降水线

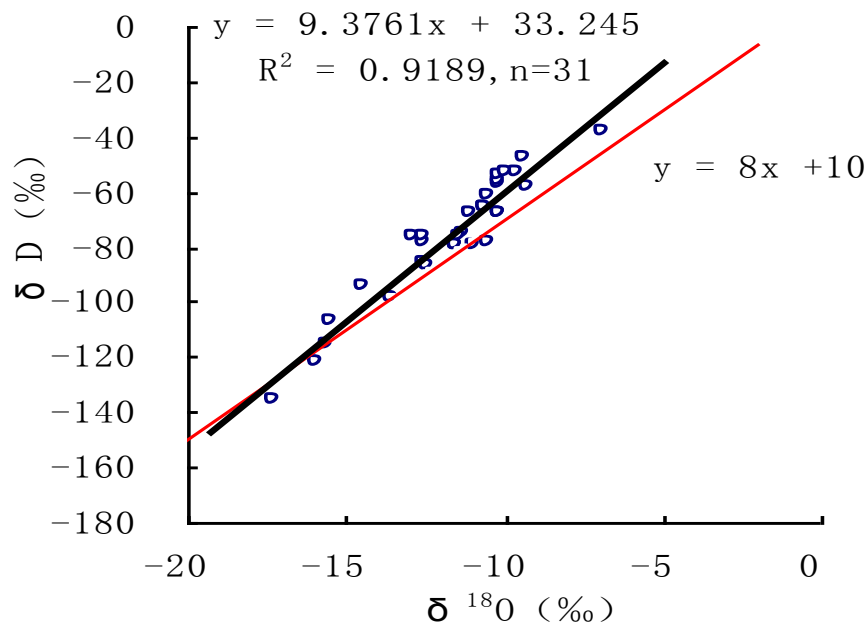


根据四川卧龙自然保护区2003年7月~2005年6月**2个水文年**大气降水的 $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 的实测值, 得出卧龙地区大气降水线方程:

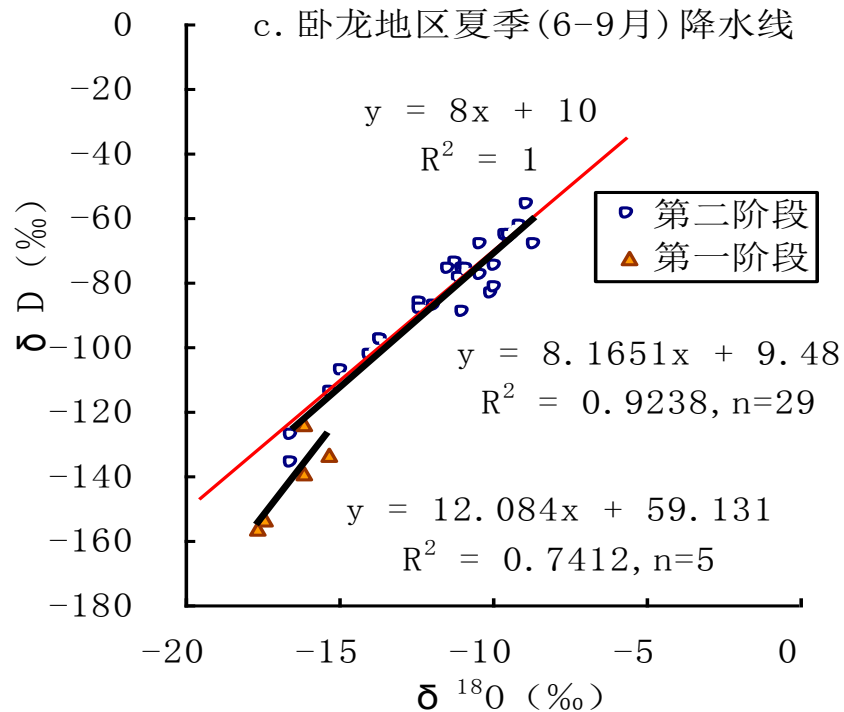
$$\delta D = 9.443\delta^{18}O + 28.658$$

$$(R^2=0.8891, n=74, p<0.05)$$

b. 卧龙地区雪水线



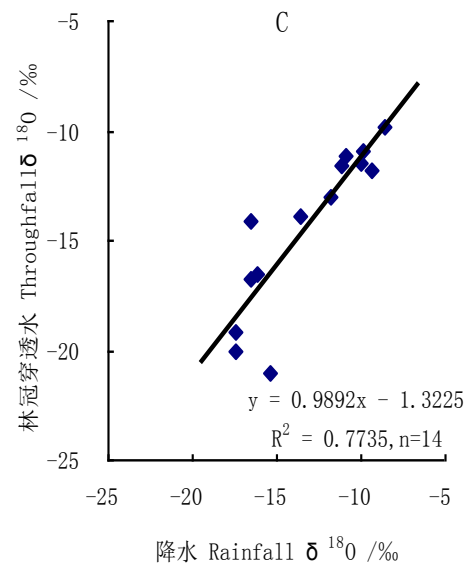
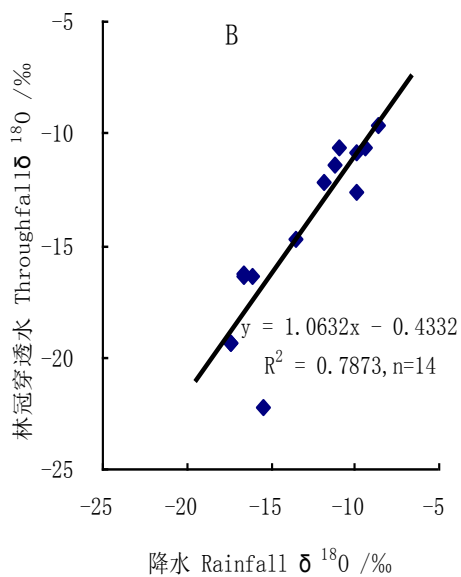
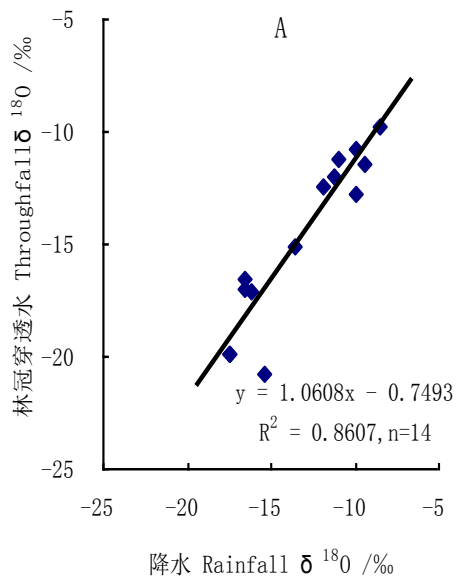
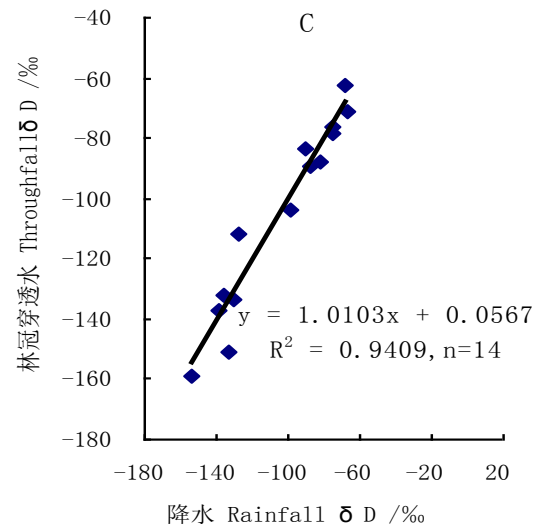
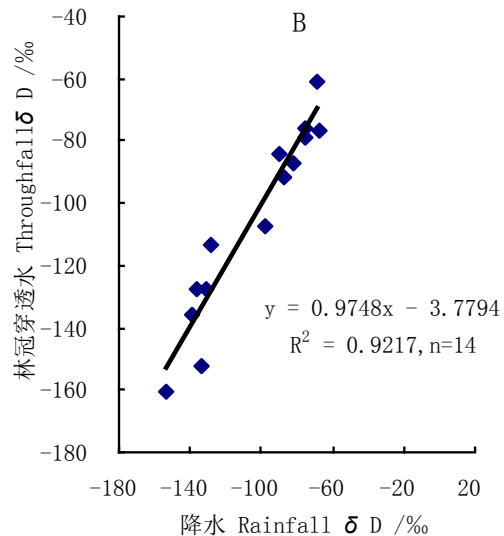
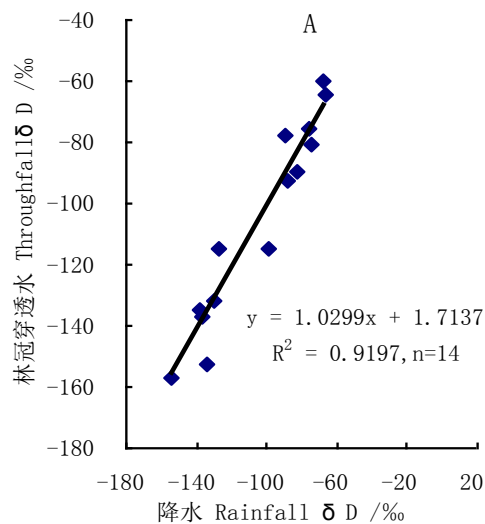
c. 卧龙地区夏季(6-9月)降水线



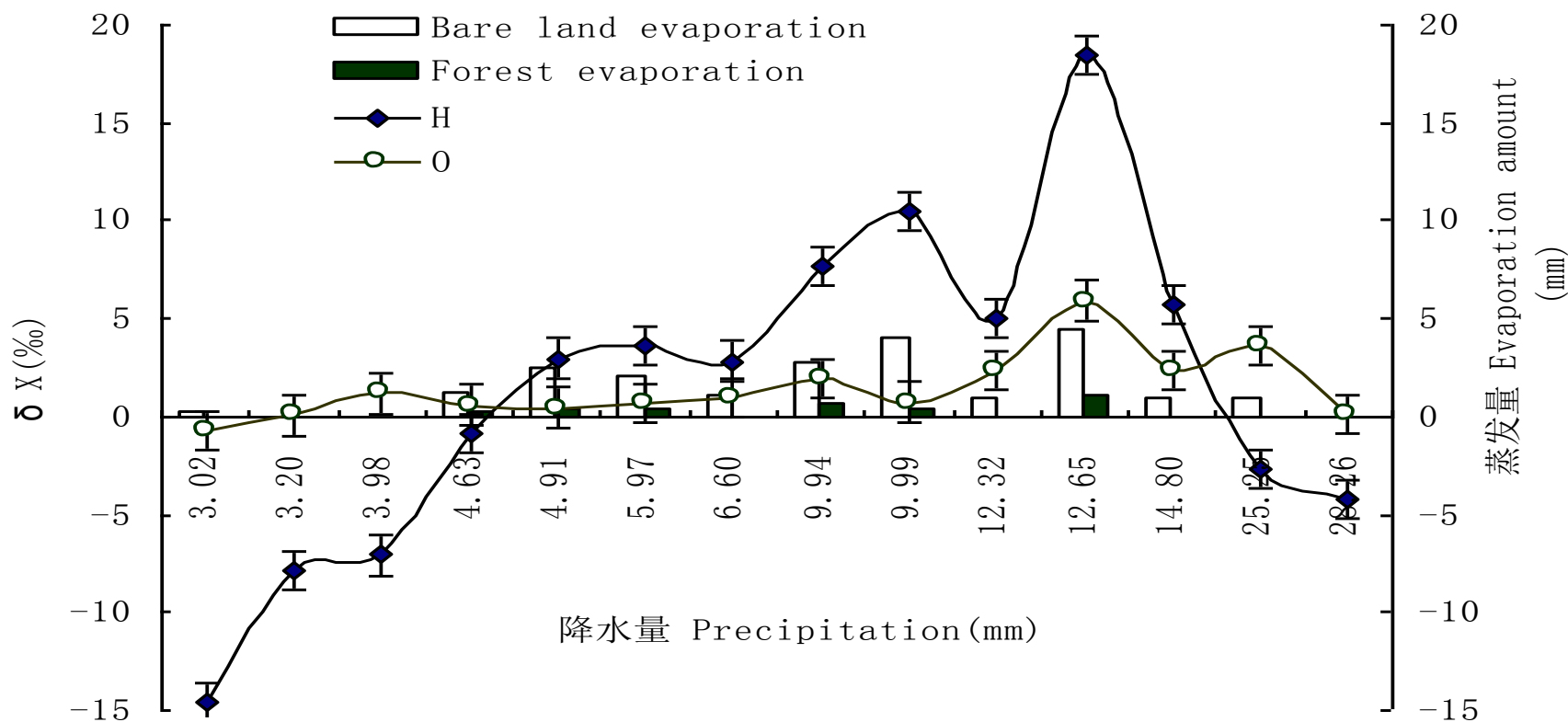




## 1.6.2 林冠穿透水氢氧稳定同位素特征

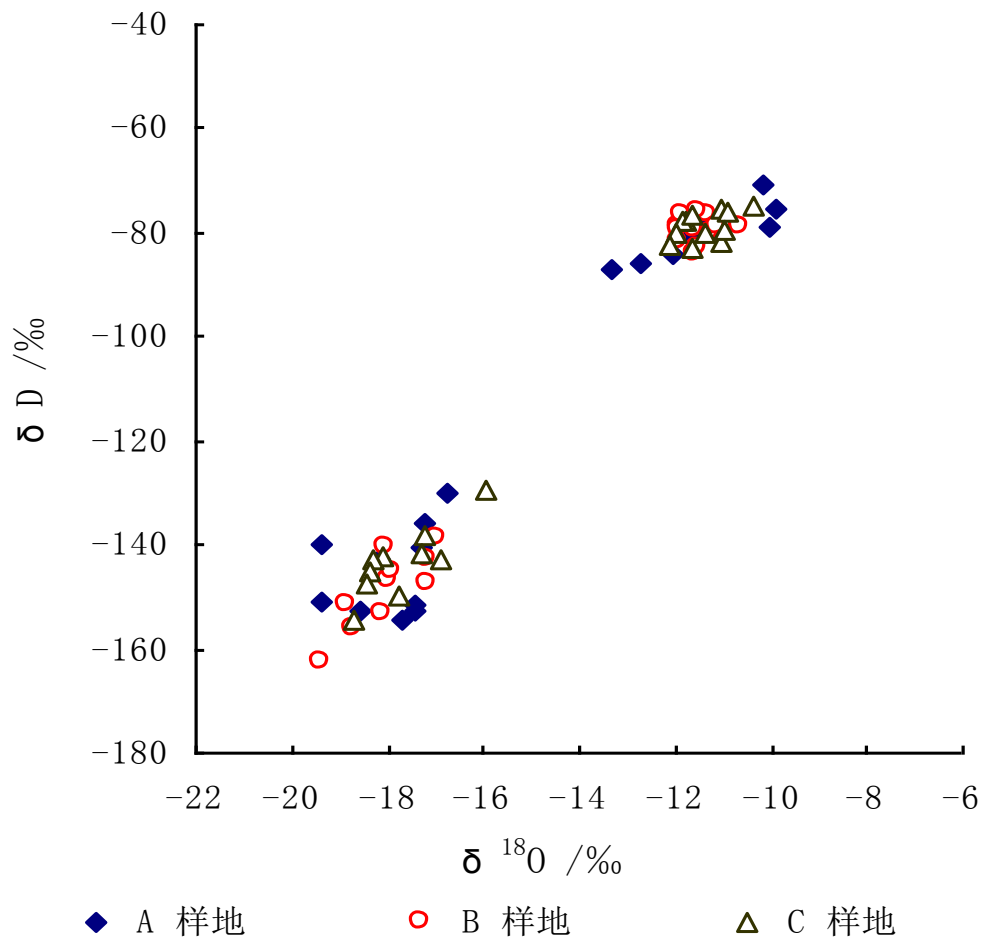


# 降水 $\delta D(\delta^{18}O)$ 与穿透水 $\delta D(\delta^{18}O)$ 的差值



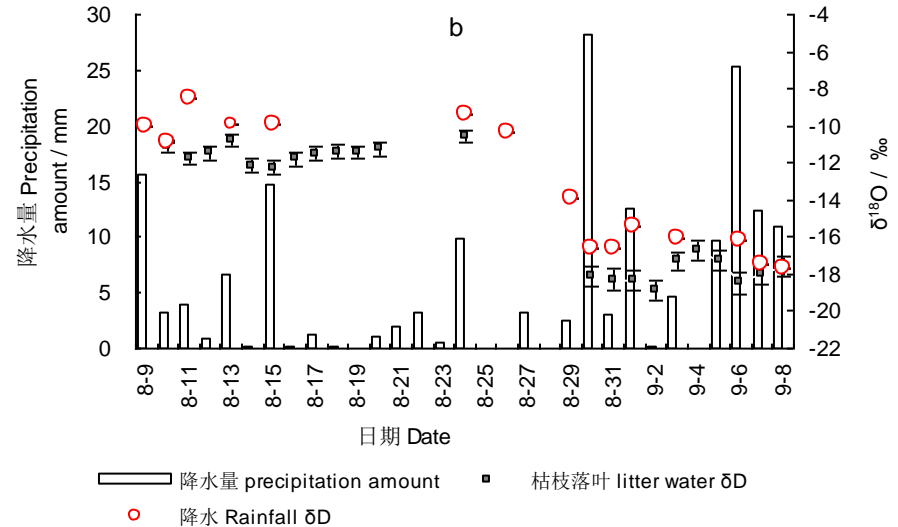
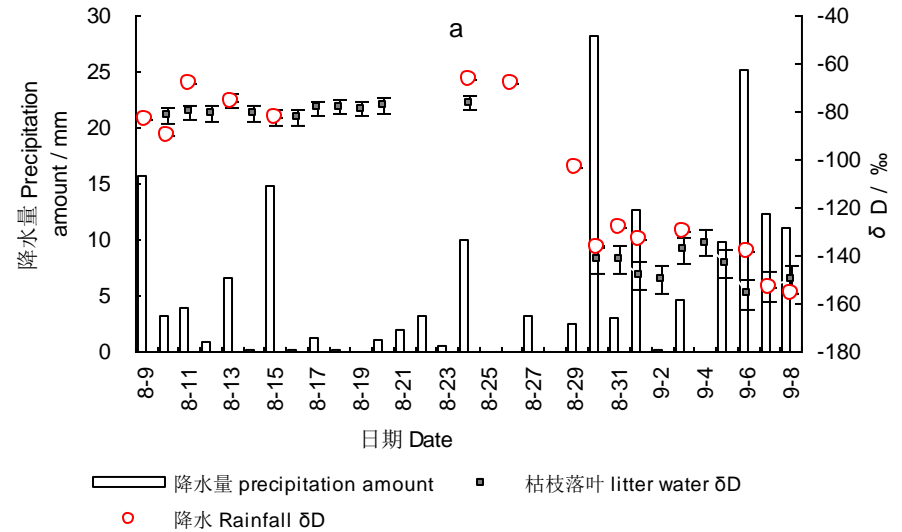
- 降水 $\delta D(\delta^{18}O)$ 与穿透水 $\delta D(\delta^{18}O)$ 的差值 ( $\Delta\delta D$ ,  $\Delta\delta^{18}O$ ) 随着降雨量的增大呈现偏正态结构。
- 当降水量=12.65mm时,  $\Delta\delta^{18}O(\Delta\delta D)$ 值最大, 蒸发量为最大, 林内蒸发量最大(1.1mm), 林外蒸发量为最大(4.4mm), 温度也最高13℃。

### 1.6.3 地被层水氢氧稳定同位素特征



# 枯枝落叶水主要来源于降水

在暗针叶林中，枯枝落叶层水 $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 变化表现出与降水 $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 的变化一致的趋势，表明暗针叶林中枯枝落叶水 $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 受降水 $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 控制，**枯枝落叶水来源于降水。**



# 枯枝落叶水来源于穿透水

- 枯枝落叶水  $\delta D(y)$  与穿透水  $\delta D(x)$  线性相关性极显著。

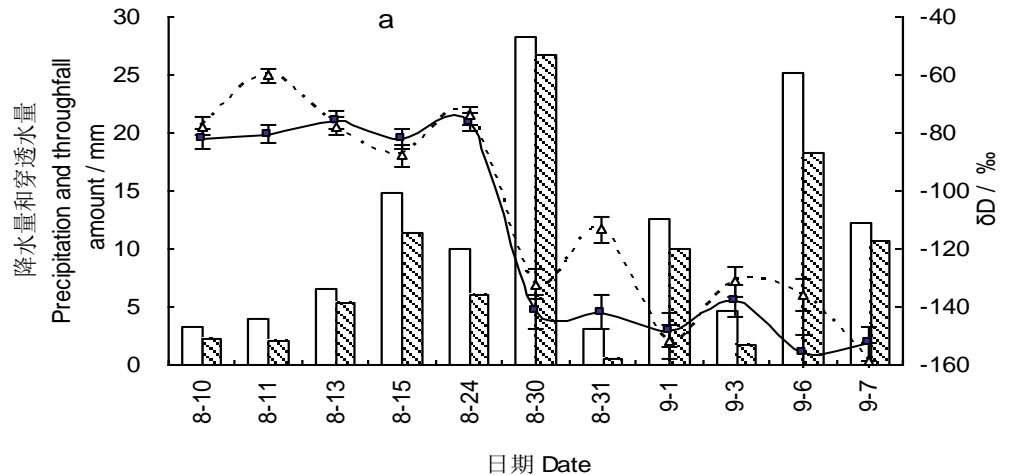
$$y=0.962x-10.92$$

$$(R^2=0.892, p<0.01)$$

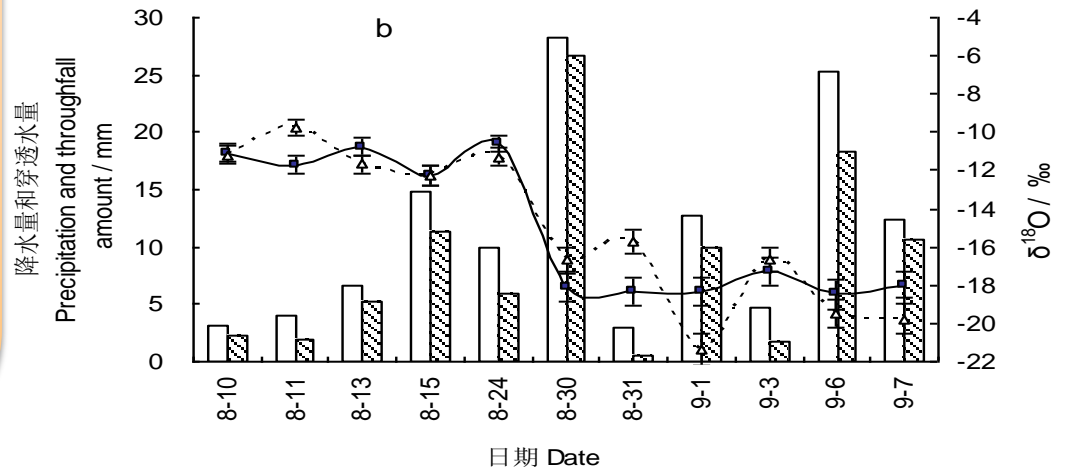
- 枯枝落叶水  $\delta^{18}O(y)$  与穿透水  $\delta^{18}O(x)$  线性相关性极显著。

$$y=0.809x-2.799$$

$$(R^2=0.831, p<0.01)$$

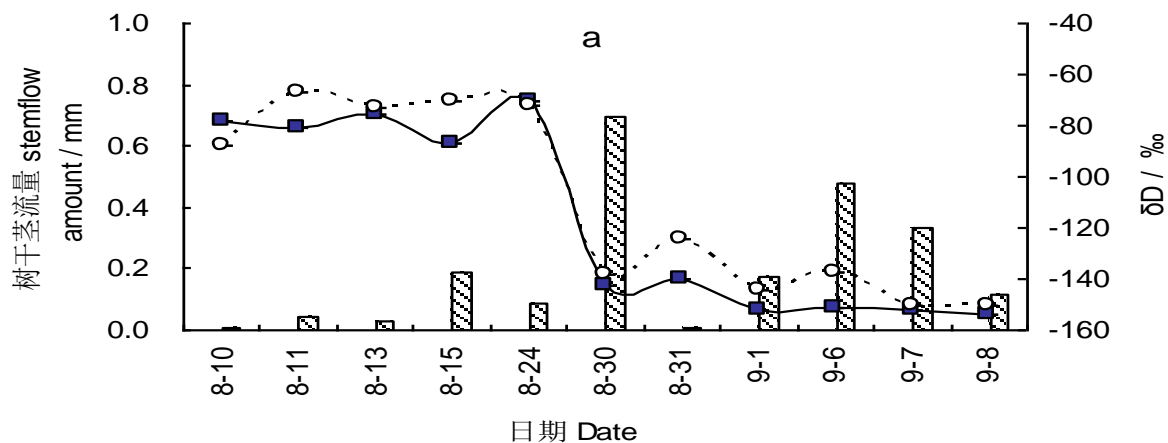




降水量 precipitation amount     
  穿透水量 throughfall amount  
■ 枯枝落叶 Litter water  $\delta D$      
 ▲ 穿透水 throughfall  $\delta D$

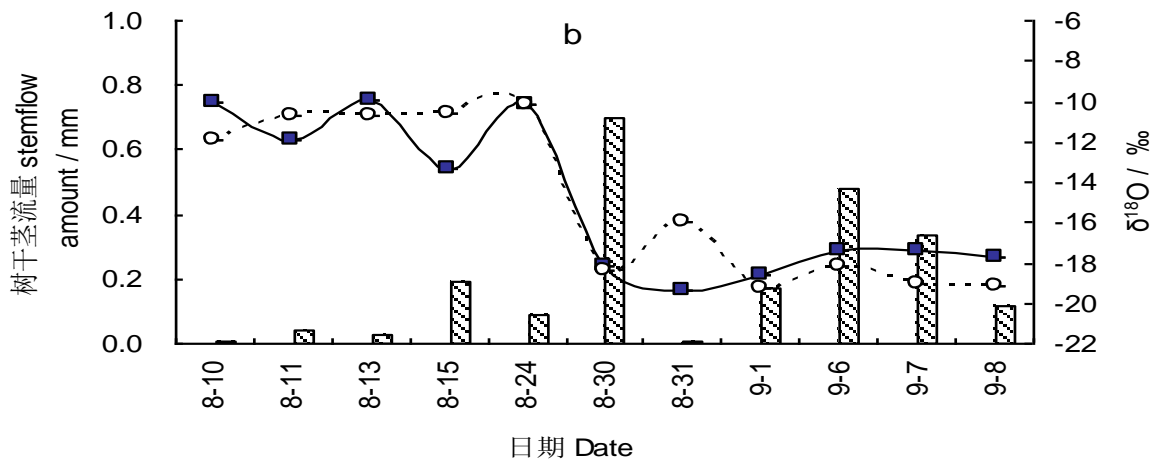




降水量 precipitation amount     
  穿透水量 throughfall amount  
■ 枯枝落叶 Litter water  $\delta^{18}O$      
 ▲ 穿透水 throughfall  $\delta^{18}O$

# 枯枝落叶水来源于树干茎流

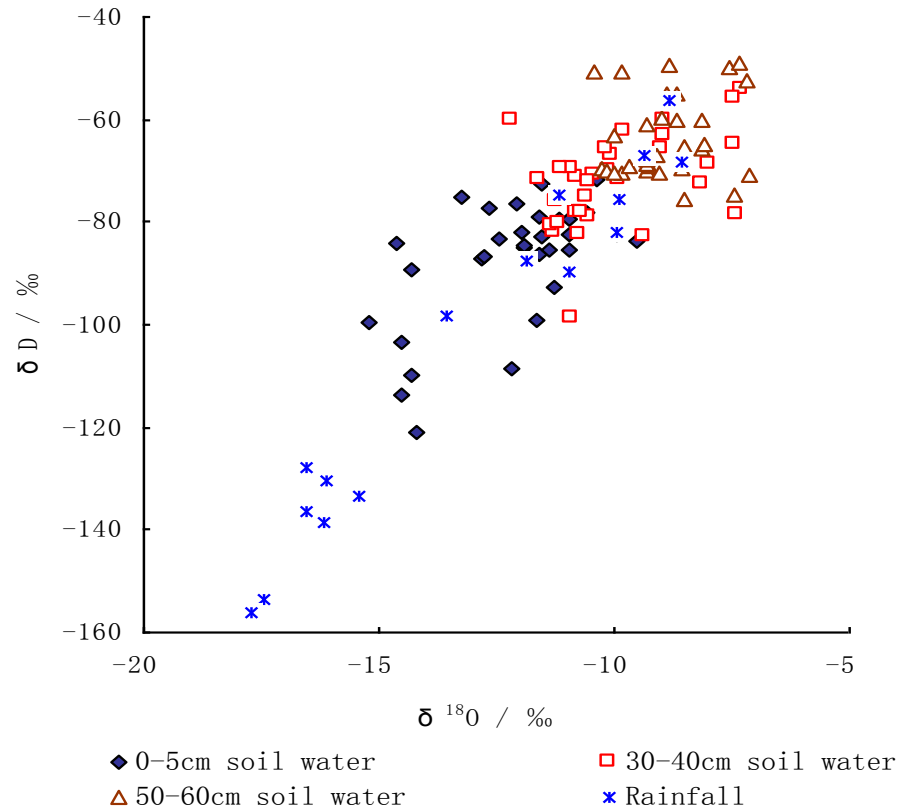


 树干茎流量 Stemflow amount     
  枯枝落叶 Litter water δD  
 - - - ○ - - - 树干茎流 Stemflow δD



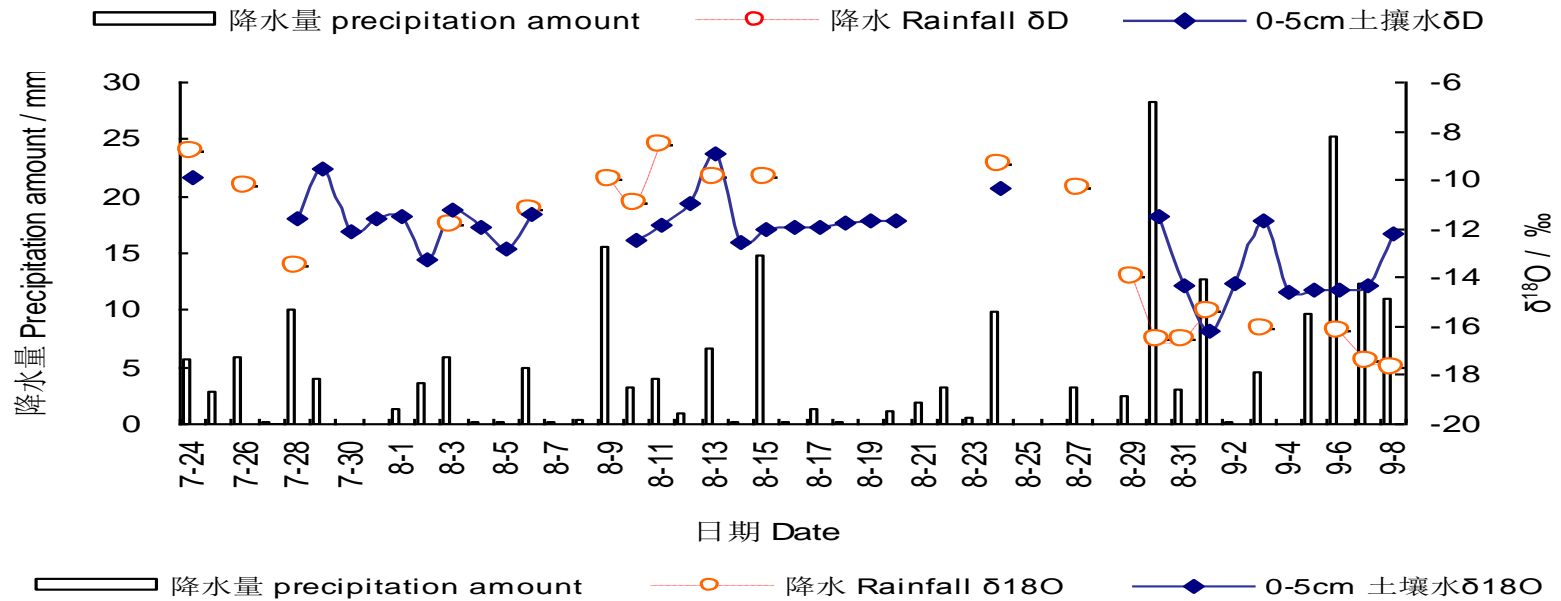
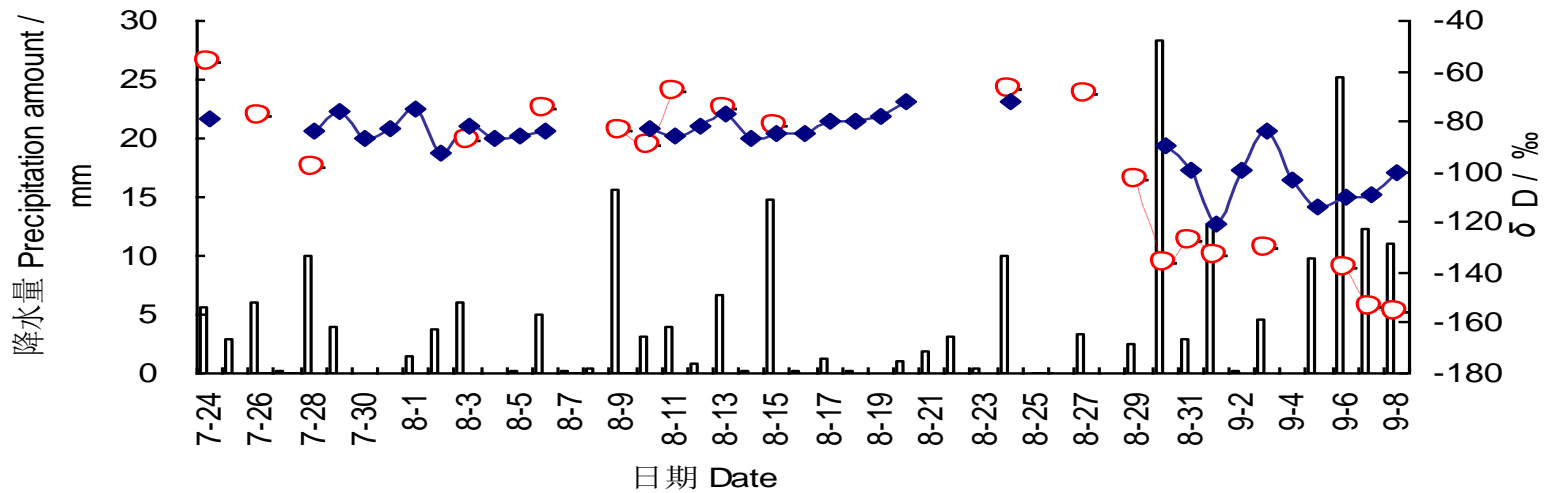
 树干茎流量 Stemflow amount     
  枯枝落叶 Litter water δ<sup>18</sup>O  
 - - - ○ - - - 树干茎流 Stemflow δ<sup>18</sup>O

## 1.6.4 土壤水氫氧穩定同位素特征



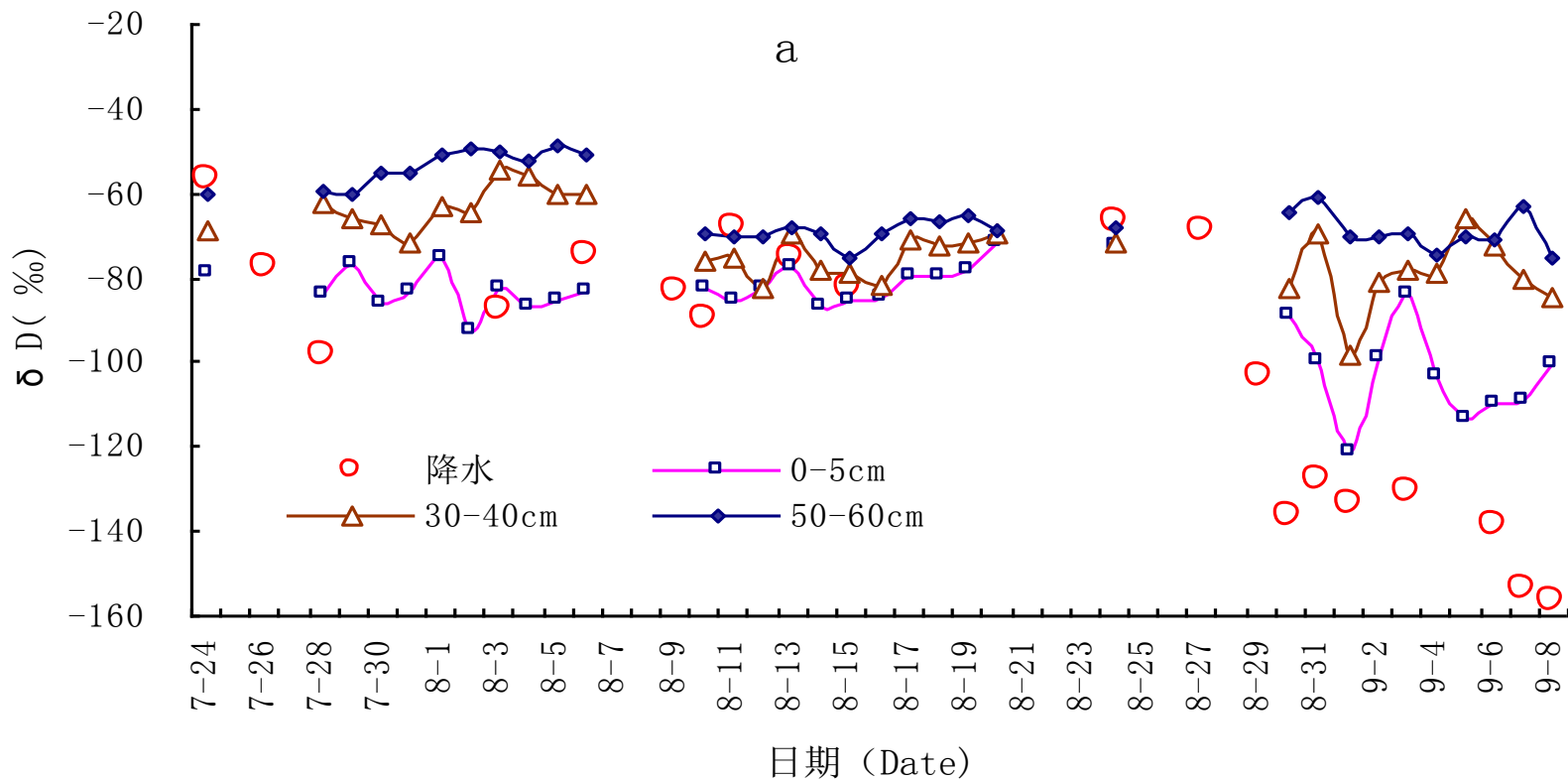
暗针叶林各层土壤水 $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  有极好的线性相关性





表层土壤中 $\delta D$ ( $\delta^{18}O$ )受降水中 $\delta D$ ( $\delta^{18}O$ )控制

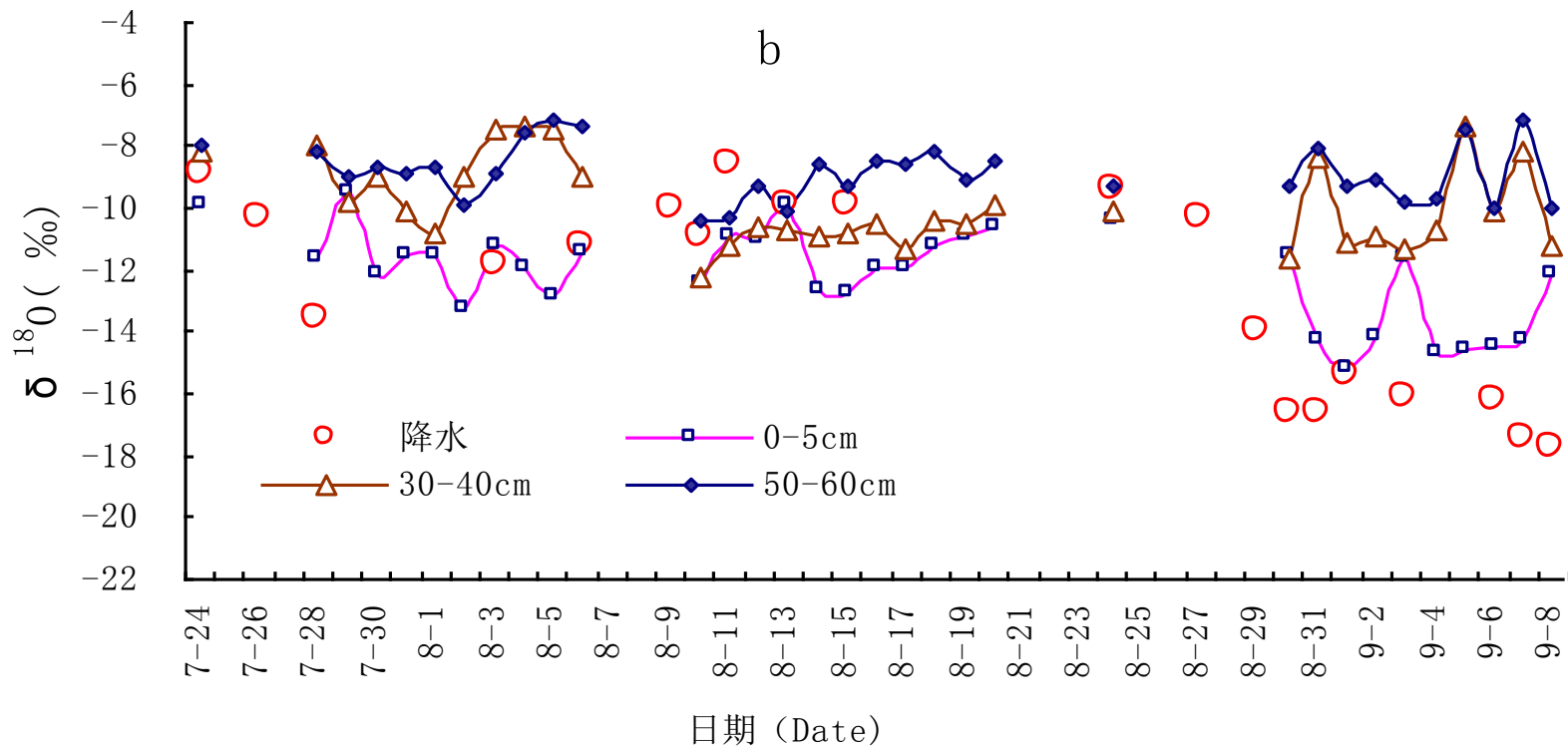
# 不同深度土壤水的氢稳定同位素变化



表层土壤水中 $\delta D$ 受降水 $\delta D$ 控制。

深层土壤水中 $\delta D$ 的变化幅度小,较稳定。

# 不同深度土壤水的氧稳定同位素变化

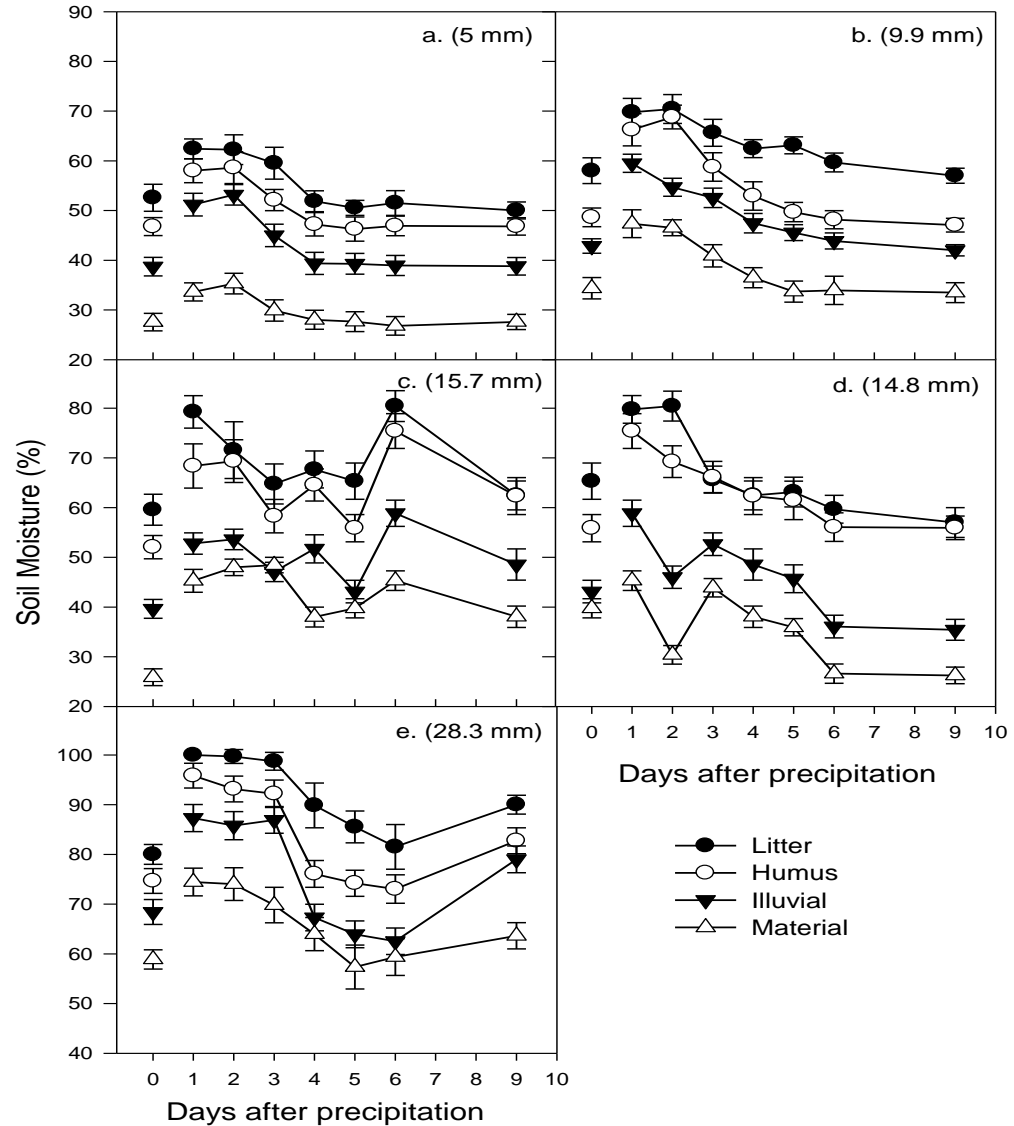


表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水 $\delta^{18}\text{O}$ 控制。

深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度小,较稳定。

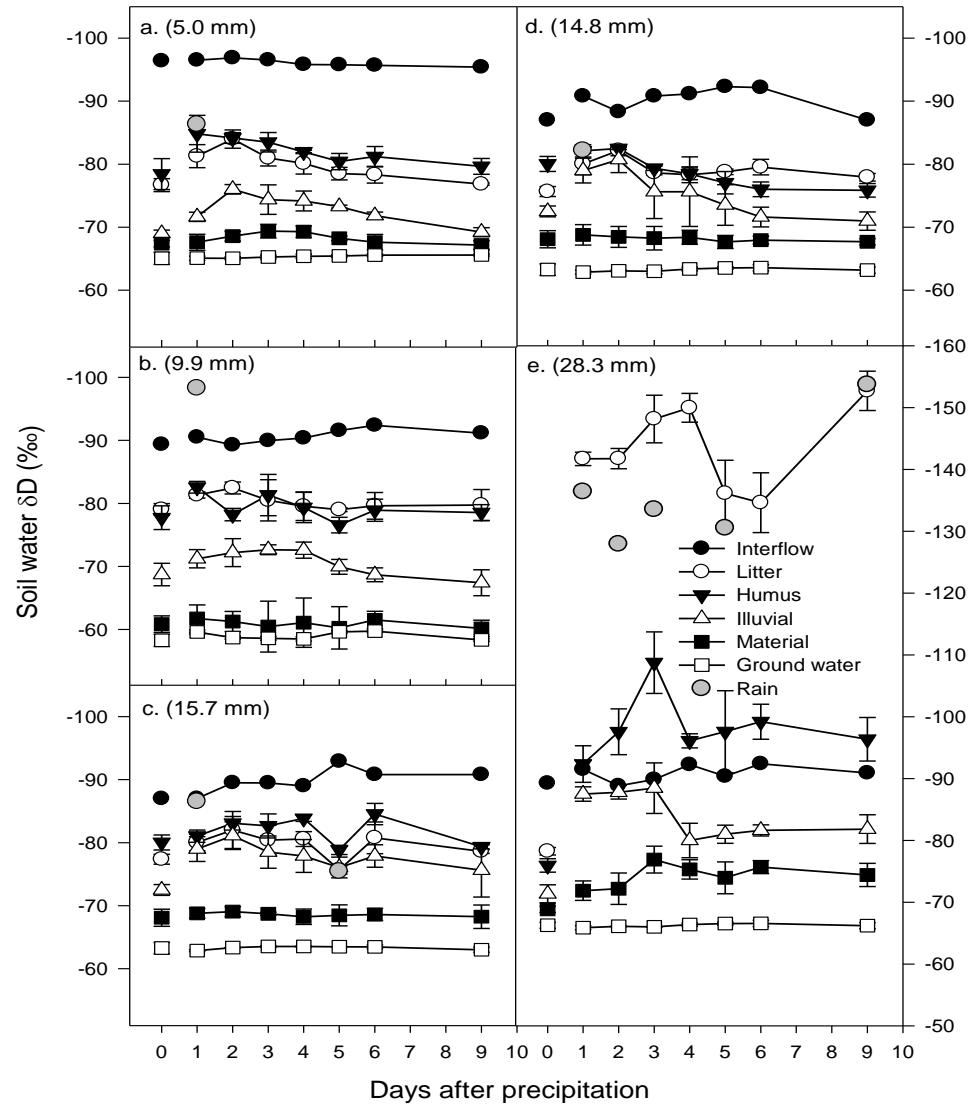
# 土壤含水量的时空动态变化

5次降水事件

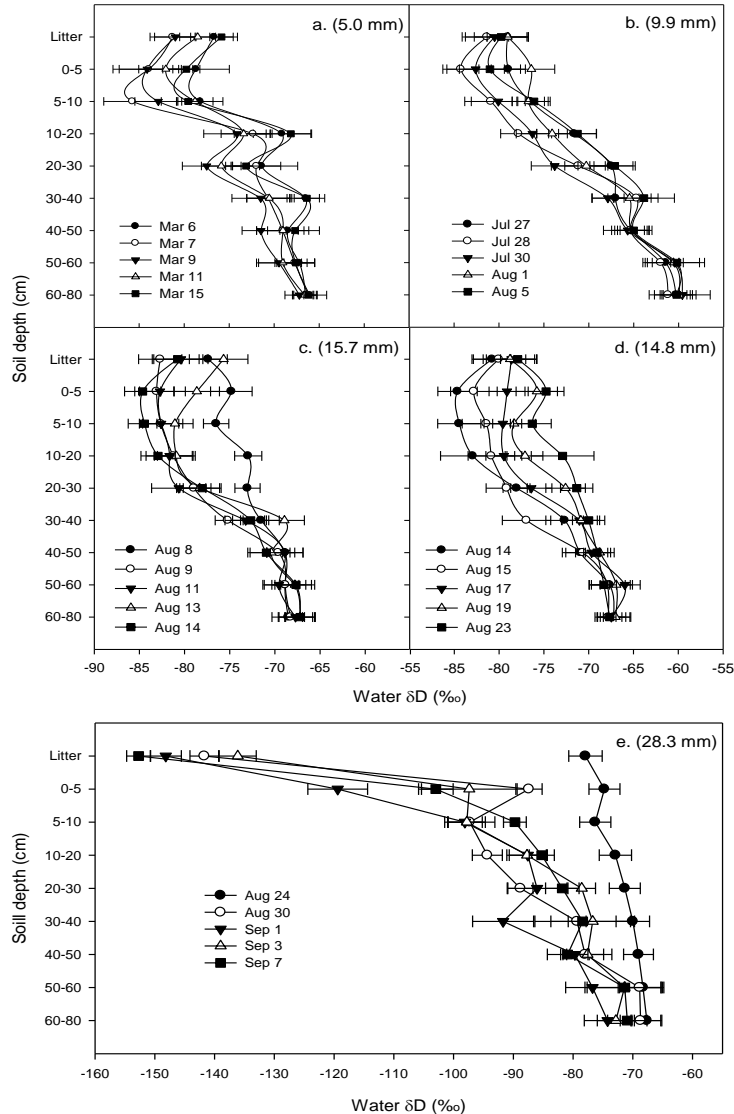


# 土壤水 $\delta D$ 的时空动态变化

5次降水事件



# 土壤水 $\delta D$ 垂直迁移运动



雨季（8月）发生2次类似强度降雨事件（15.7mm和14.8mm），对0~40cm土壤水 $\delta D$ 分布影响较大，但对土壤剖面的50~80cm深层土壤水 $\delta D$ 影响很小，表明亚高山暗针叶林土壤层结构对土壤水的向下运移具有显著调控作用。

## 1.6.5 植物水分来源

卧龙暗针叶林大气降水、林冠穿透水、浅层地下水、枯枝落叶水、土壤水和植物水的 $\delta D$  (‰) 均值

Water source description	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)
Precipitation	<b><math>-82.47 \pm 4.84</math></b>	<b><math>-10.26 \pm 0.45</math></b>
Throughfall	$82.45 \pm 3.62$	$-11.37 \pm 0.59$
Shallow ground water	<b><math>-63.44 \pm 0.23</math></b>	<b><math>-8.25 \pm 0.11</math></b>
Litter water	$79.69 \pm 1.50$	$-11.52 \pm 0.51$
0-10cms soil	$-80.95 \pm 2.61$	$-11.74 \pm 0.41$
10-40cm soil	$-77.01 \pm 2.39$	$-11.12 \pm 0.41$
40-60cm soil	$-68.86 \pm 0.41$	$-9.83 \pm 0.28$
<i>Abiesfaxonianastem</i>	$-67.70 \pm 2.89$	$-9.14 \pm 0.40$
<i>Betulautilisstem</i>	$-76.64 \pm 2.83$	$-10.68 \pm 0.49$
<i>Bashaniafangianastem</i>	$-79.46 \pm 4.06$	$-11.08 \pm 0.51$

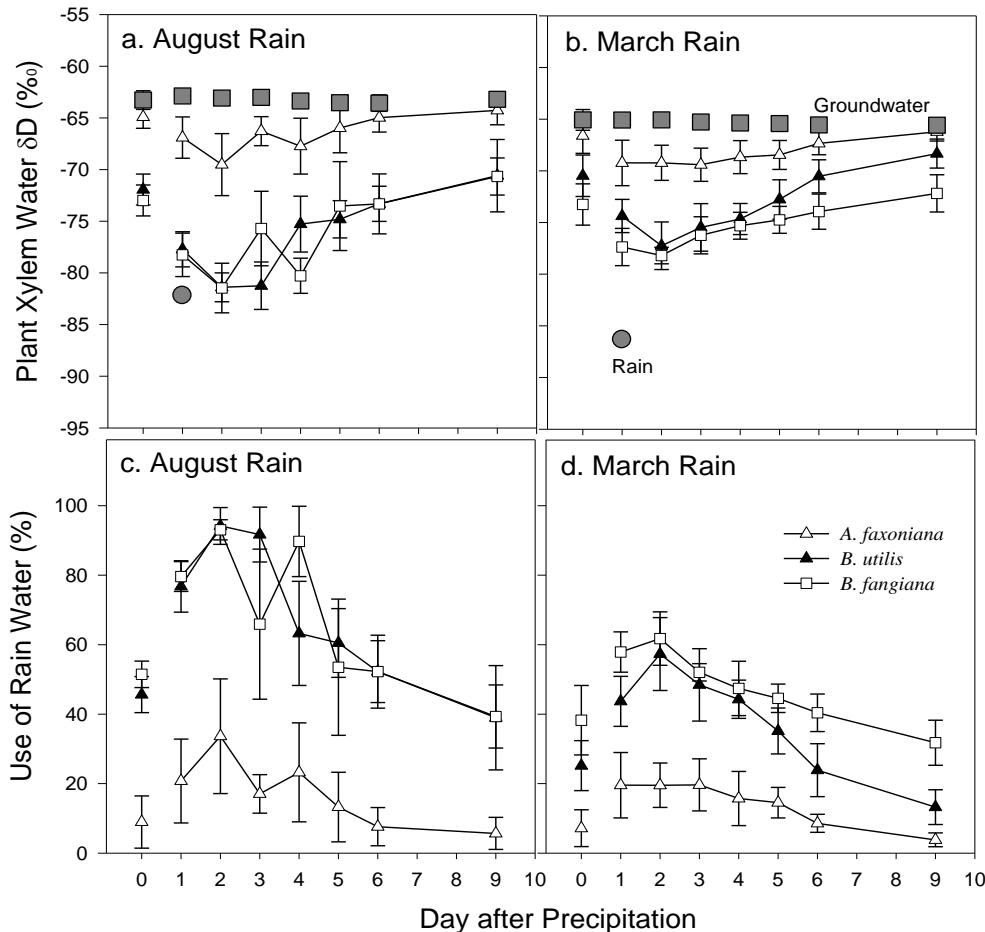
# 植物水分利用格局

三种植物水中 $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 与不同深度土壤水中 $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 的方差分析

	Species	Soil layers								
		Litter	0-5cm	5-10cm	5-10cm	10-20cm	20-30cm	30-40cm	40-50cm	50-60cm
$\delta D$	<i>Abiesfaxoniana</i>	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.05	0.898	1
	<i>Betulautilis</i>	0.278	0.114	0.04	0.071	0.998	0.1	0.000**	0.000**	0.000**
	<i>Bashaniafangiana</i>	1.000	0.996	0.791	0.998	0.901	0.901	0.000**	0.000**	0.000**
$\delta^{18}O$	<i>Abiesfaxoniana</i>	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.18	0.184
	<i>Betulautilis</i>	0.04	0.02	0.01	0.04	0.429	1	0.34	0.02	0.000**
	<i>Bashaniafangiana</i>	0.454	0.366	0.024	0.465	1	0.53	0.000**	0.000**	0.000**



# 不同功能型植物水分利用策略



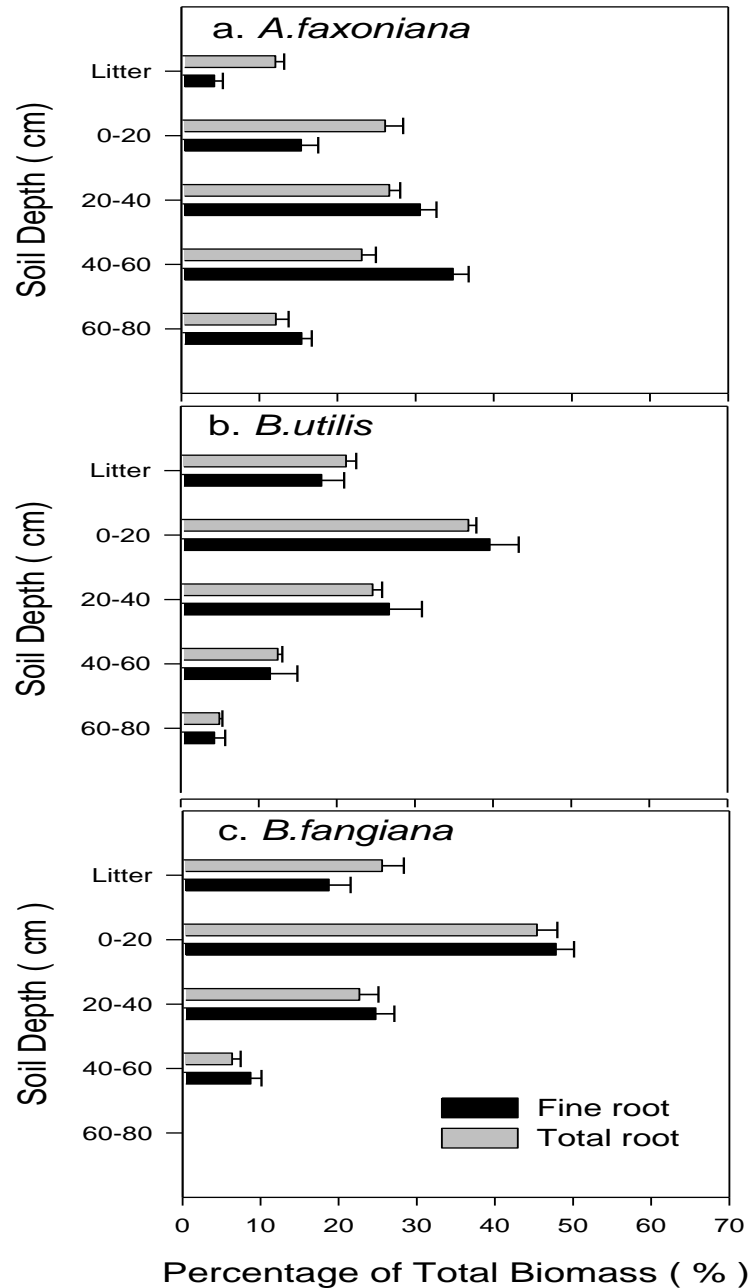
➤ 上层岷江冷杉主要利用浅层地下水 (66~96%)；中层糙皮桦和下层冷箭竹在雨季主要利用雨水 (分别为13%~94%和32%~93%)，在旱季转为利用浅层地下水。

➤ 不同功能型植物水分利用策略不同,在全球气候变暖的条件下,林中建群种岷江冷杉对雨水的依赖很小,促进了物种共存并维持了该群落的稳定性。

Temporal changes in  $\delta D$  values of and in rainfall contributions to plant xylem water of three dominant species over a 9-day study period after two rain events. With the vertical bars representing  $\pm 1$  standard deviation of the mean (n=9).

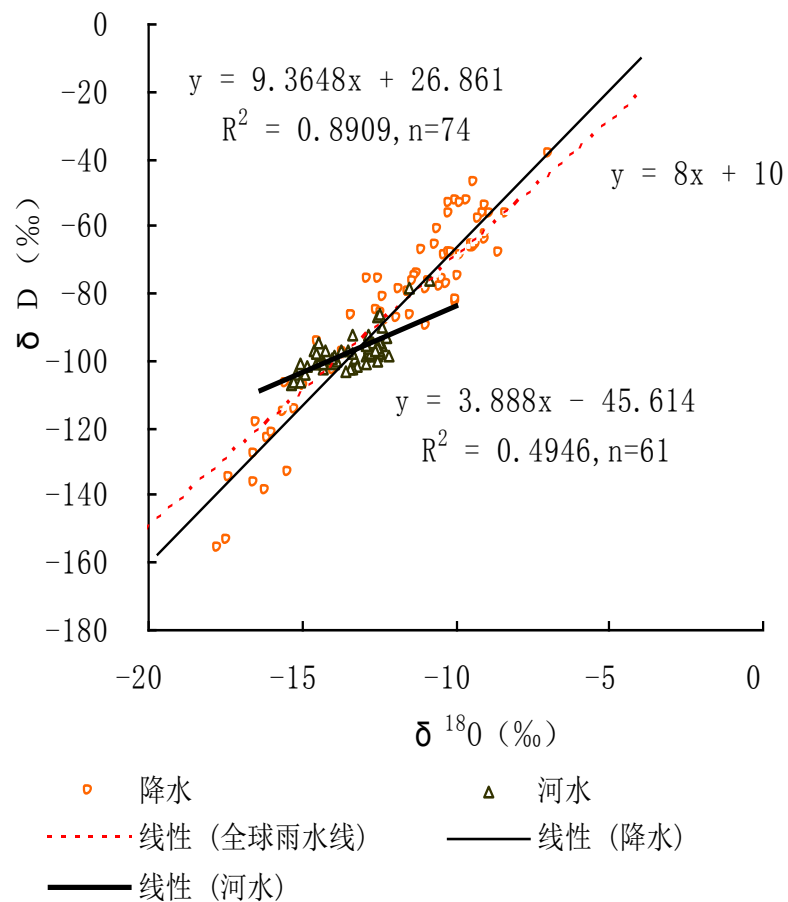
Xu Qing *et al.*, 2011. Ecohydrology.

## 不同功能型植物水分利用 与其细根分布相关



- 岷江冷杉有50%的细根 ( $\leq 2\text{mm}$ ) 分布在40~80cm土层中，这一层次的土壤水超过三分之二为地下水。可见，深根植物岷江冷杉可以吸收利用深层水源浅层地下水。
- 糙皮桦和冷箭竹为浅根系植物，其细根的84%和91%都分布在上层0~40cm土壤中，该层的土壤水40%或以上都来自于降水补给。
- 植物根系分布是不同功能型植物对水分利用的反应。

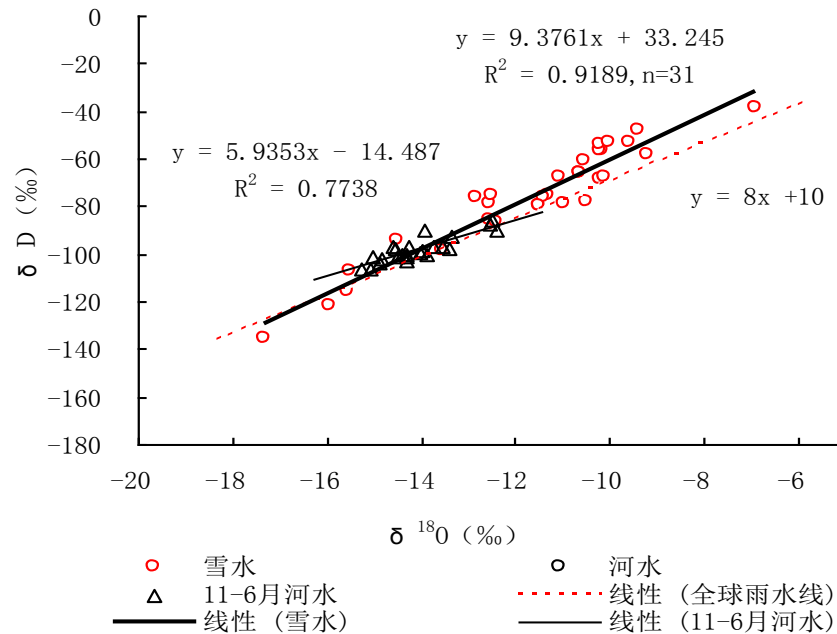
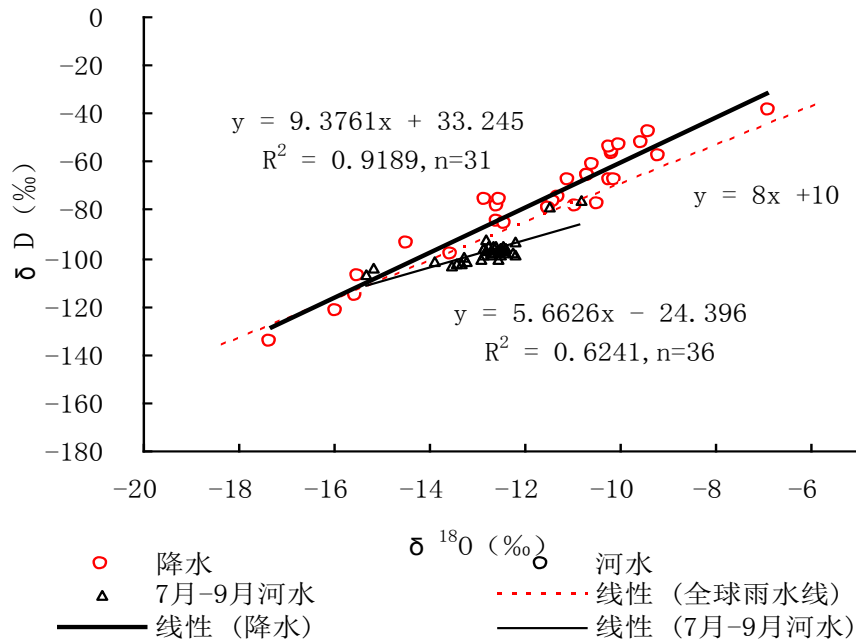
## 1.6.6 高山雪水和冰雪融水对河水补给时间



➤ 降水是河水的主要补给来源。

➤ 河水除了降水的补给外，与其它水体之间也存在着一定的联系。

# 1.6.6 高山雪水和冰雪融水对河水补给时间



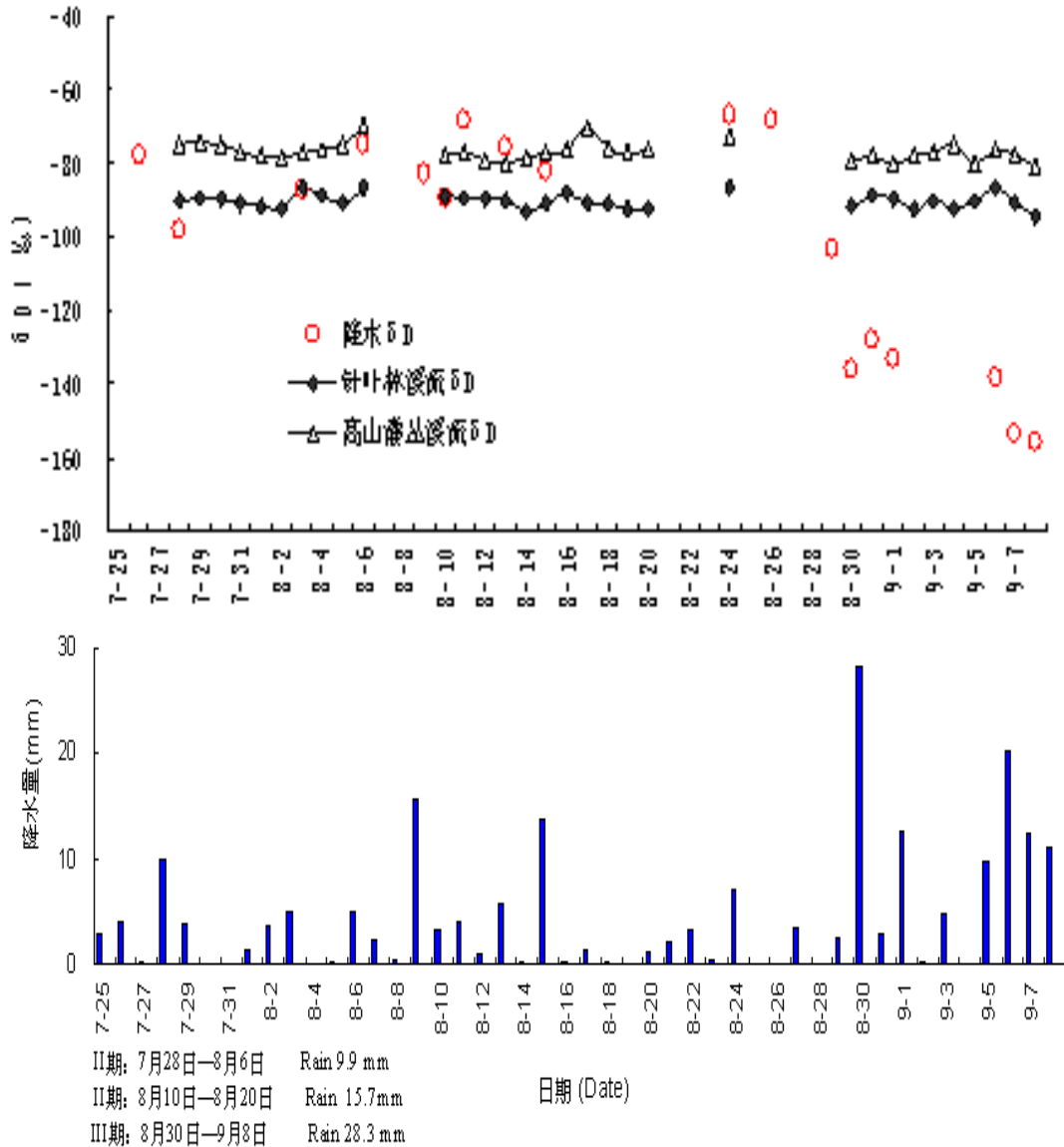
➤ 7~9月，雪水和冰雪融水补给河水较少。

➤ 雪水和冰雪融水补给河水主要发生在**11月至翌年6月**。

(徐庆等, 2007, 林业科学研究)

# 1.6.7 定量地和动态地阐明亚高山森林对水文过程的调控作用

--- 以地表径流为例



## 水分调蓄

(1)  $5\text{mm} < \text{降水} \leq 10\text{mm}$

亚高山针叶林: 4d

亚高山灌丛: 3d

(2)  $10\text{mm} < \text{降水} \leq 20\text{mm}$

亚高山针叶林: 2~3d

亚高山灌丛: 1~2d

(3) 降水 28.8 mm

亚高山针叶林: 1d

亚高山灌丛: 1d

## 第四届中国科协期刊优秀学术论文奖

# 获奖情况



该论文,在我国首次运用稳定同位素技术,定量阐明亚高山森林植被对水文过程的调控作用。

# 获奖情况



2015年10月荣获第六届梁希林业科学技术奖一等奖。

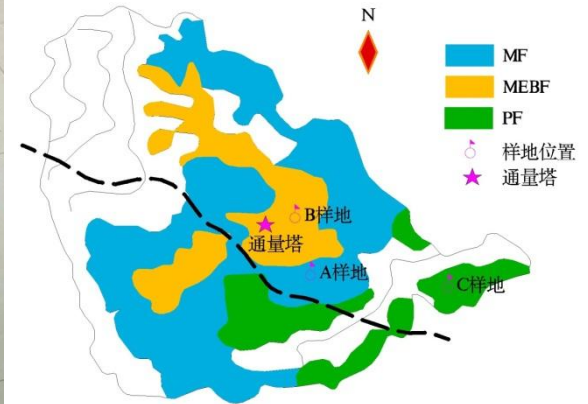
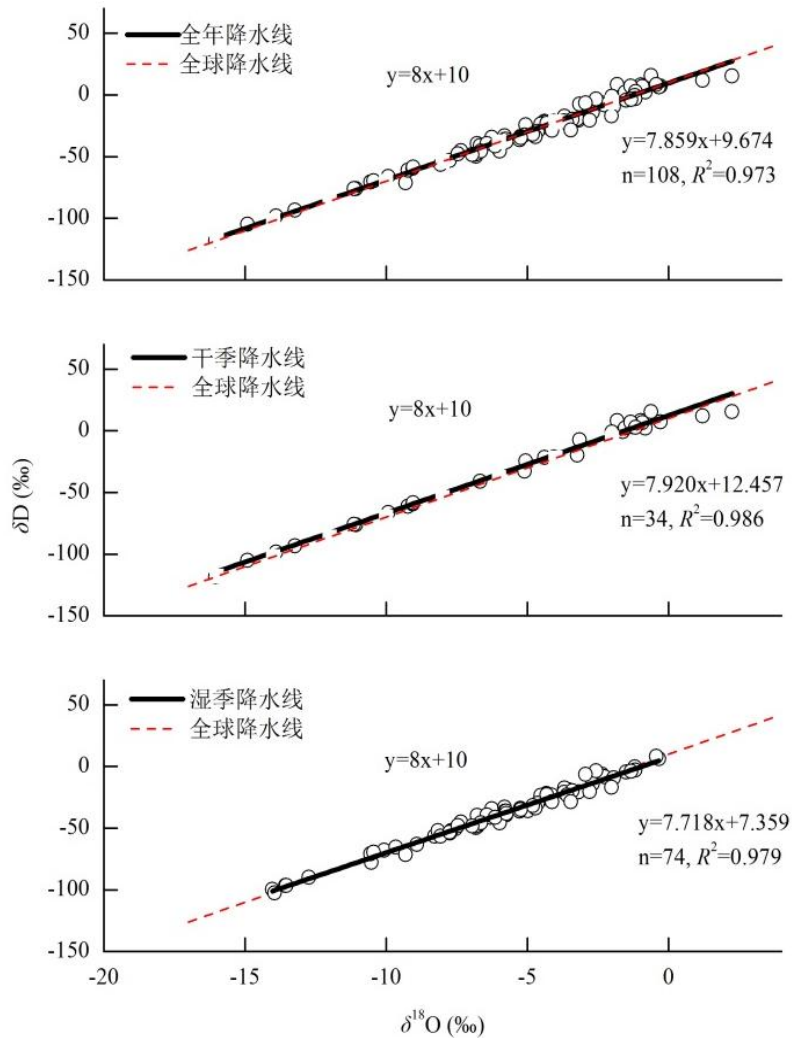
## 2. 鼎湖山森林生态系统



大气降水 (输入端) → 地表水 → 土壤水 → 植物水 → 地下水 → 溪流 → 蒸发水 (输出端)



## 2.1 鼎湖山大气降水水汽来源



**干季:**

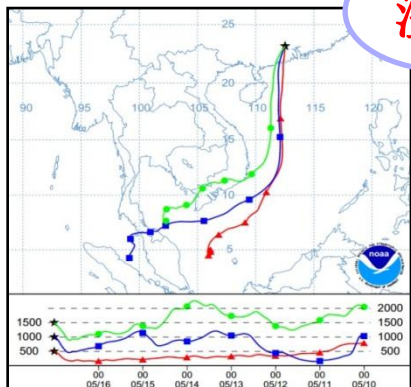
与全球大气降水线相比，斜率偏小，截距偏大。

**湿季:**

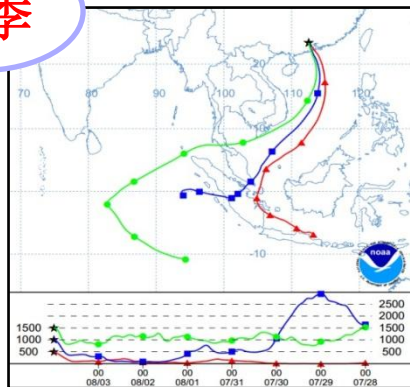
与全球大气降水线相比，斜率截距均偏小。

## 2.1 鼎湖山大气降水水汽来源

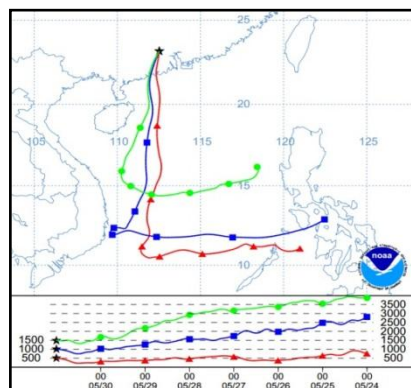
湿季



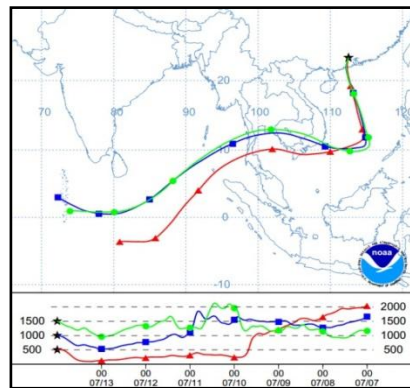
(a) 9.8 mm



(b) 16.4 mm

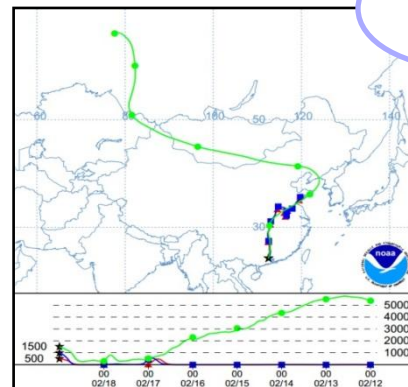


(c) 28.1 mm

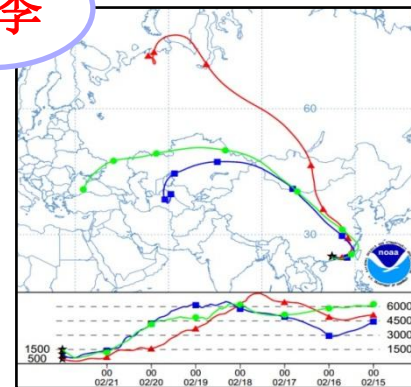


(d) 43.5 mm

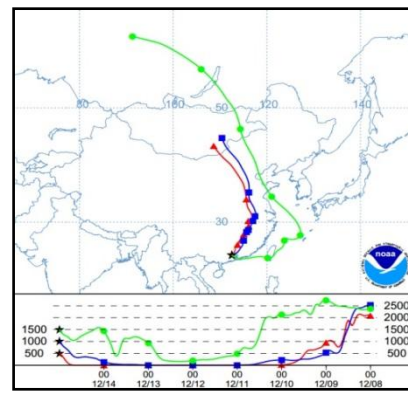
干季



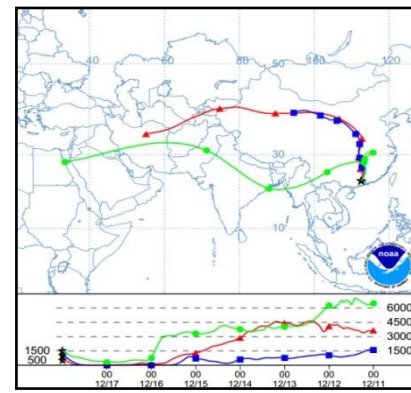
(e) 6.8 mm



(f) 11.2 mm



(g) 20.6 mm



(h) 45.8 mm

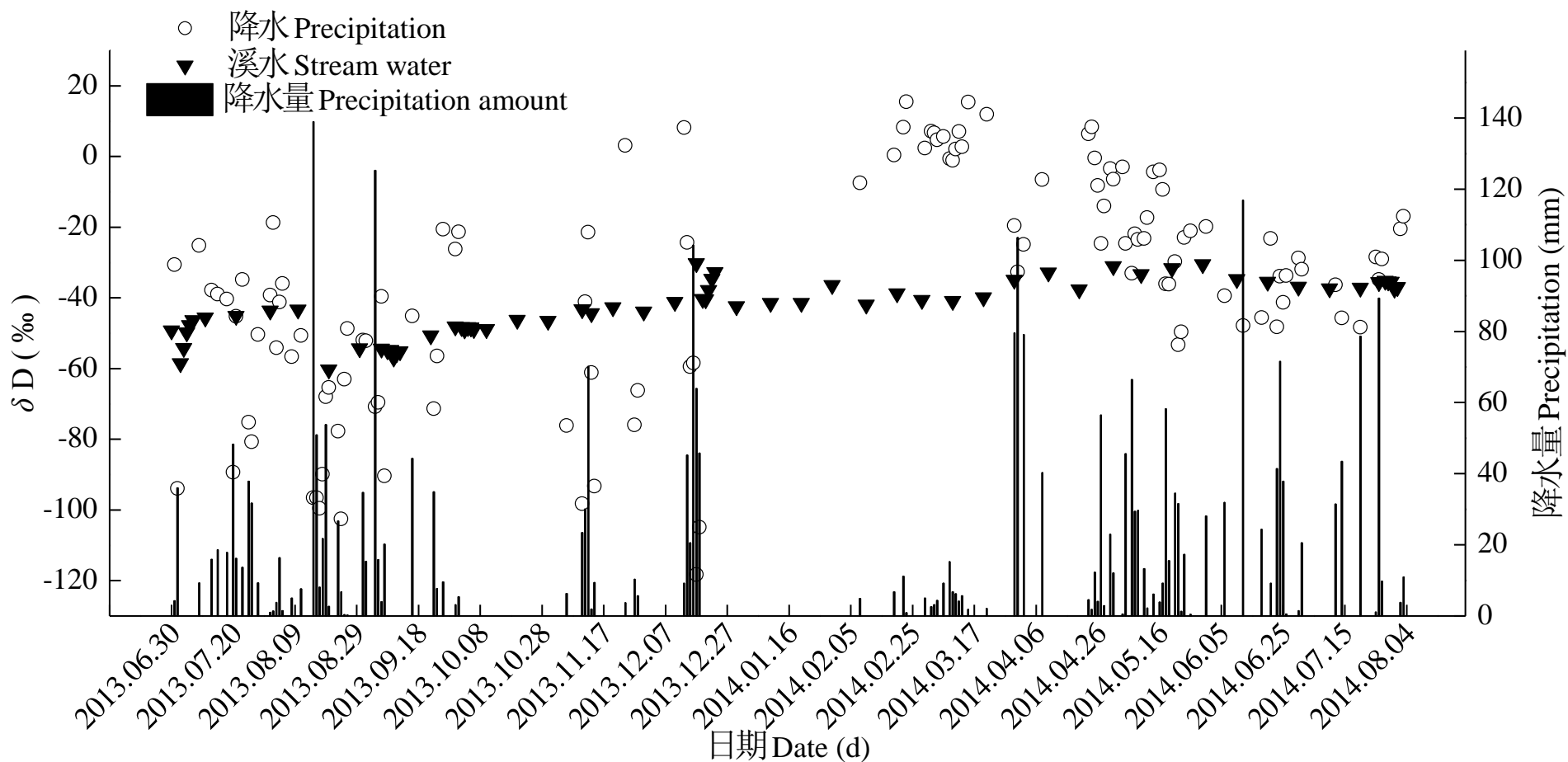
- 干季

水汽主要来源于局地蒸发及寒冷干燥的亚欧大陆。

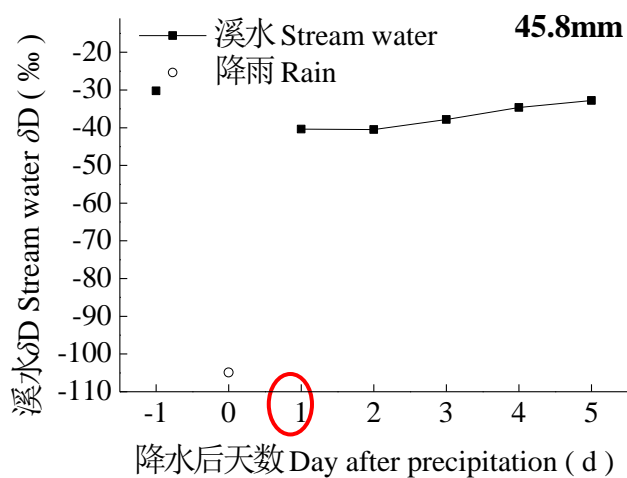
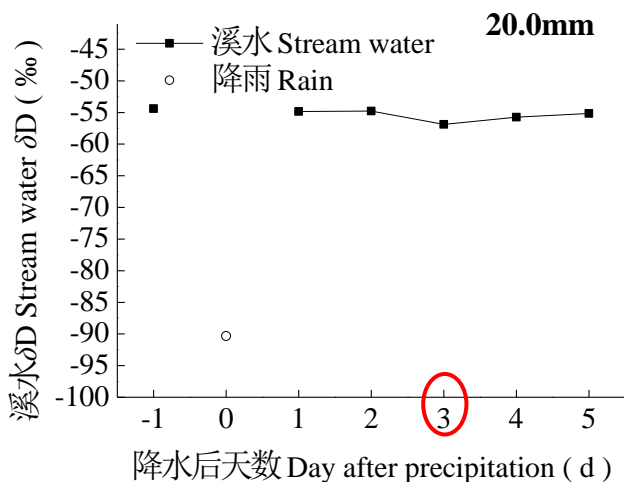
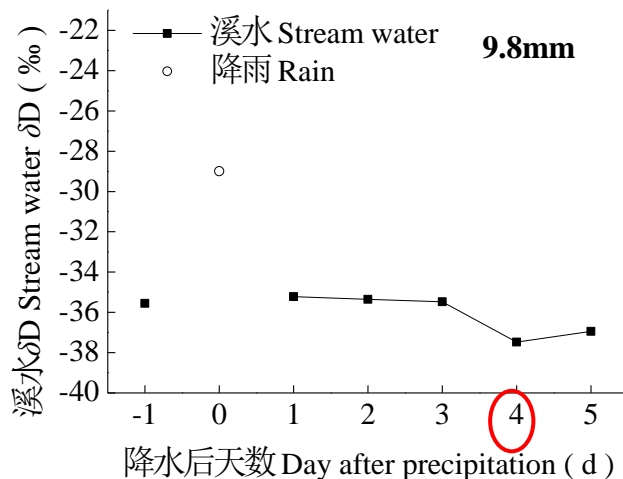
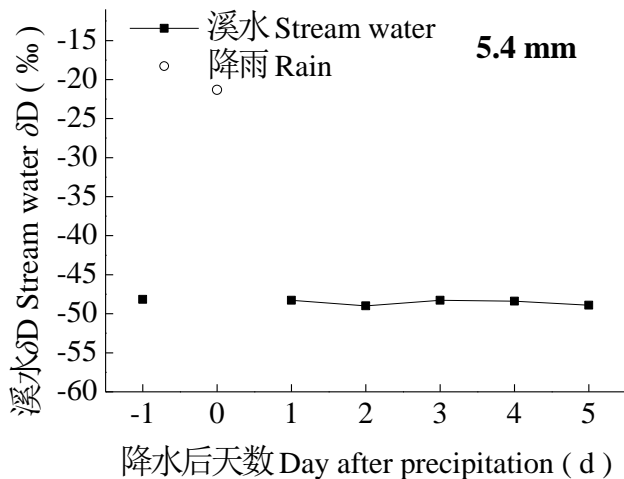
- 湿季

鼎湖山水汽来自太平洋的东南季风以及印度洋的西南季风。

# 鼎湖山森林对地表径流具有调控作用



# 鼎湖山森林对地表径流具有调控作用



表明鼎湖山森林对地表径流（溪水）具有一定的调控作用。

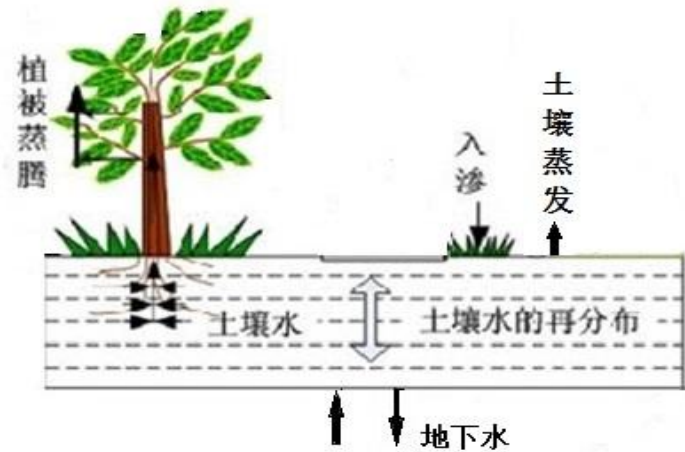
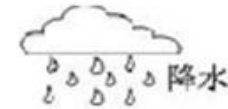
### 3. 西鄂尔多斯荒漠生态系统



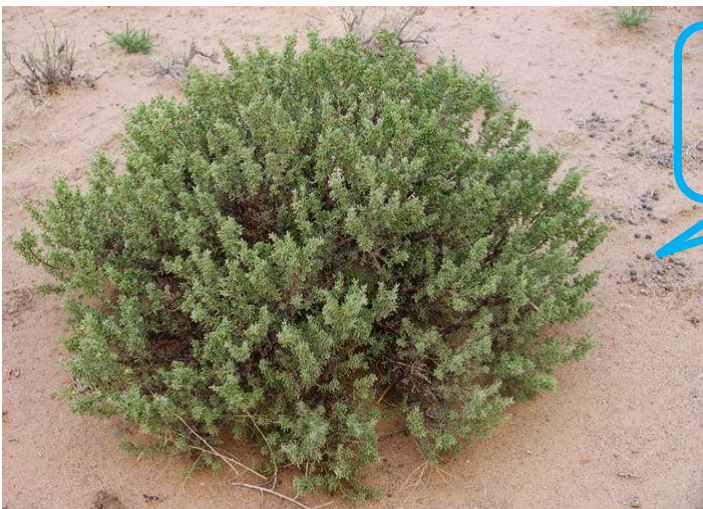
# 3.1 研究背景



降水是干旱地区主要的水分来源



水，是干旱和半干旱生态系统过程和功能最重要的限制因子，对植物的生长、发育和分布起极其关键的作用。



四合木 (*Tetraena mongolica*)

植物界的  
“活化石”



绵刺 (*Potania mongolica*)

古地中海  
孑遗植物



常绿阔  
叶灌木

沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*)



霸王 (*Sarcozygium xanthoxylum*)

## 3.2 科学问题

1. 在不同降水条件下，降水对各层土壤水的贡献率是多少？植物对该次降水的利用率是多少？
2. 假设濒危植物与非濒危植物具有不同的水分利用策略，那么它们的差异何在？制定珍稀濒危植物保护措施的理论依据何在？



### 3.3 研究区概况

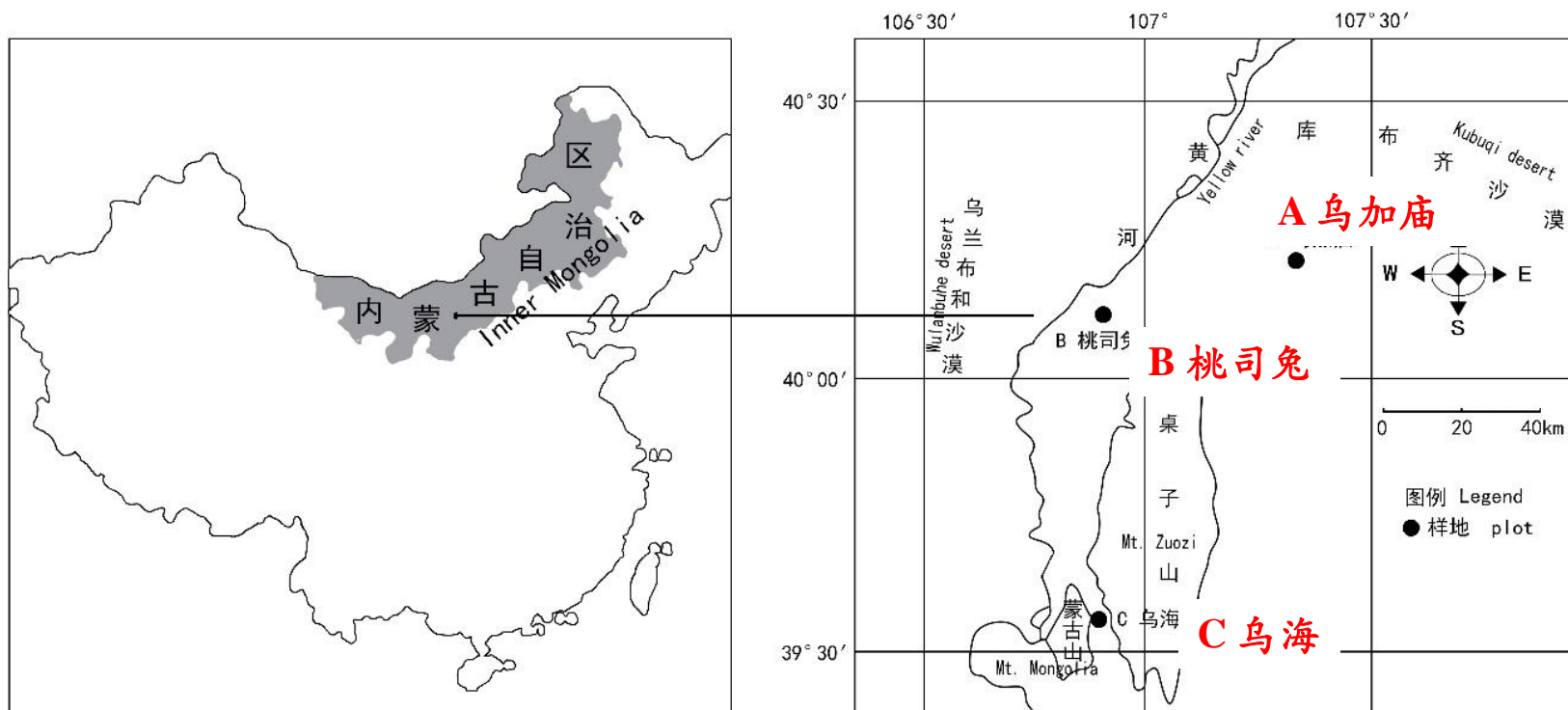
试验地：内蒙古西鄂尔多斯荒漠 A 样地（乌加庙,  $107^{\circ} 09' E, 40^{\circ} 14' N$ ）  
B 样地（桃司兔,  $106^{\circ} 52' E, 40^{\circ} 07' N$ ）  
C 样地（乌海,  $106^{\circ} 53' E, 39^{\circ} 32' N$ ）

气候类型：温带大陆性气候。年平均气温为 $7.6\sim 9.8^{\circ} C$ ，**年平均降水量为**  
 **$144.5\sim 200\text{ mm}$** ，**年均蒸发量为** **$2397.6\sim 3481.0\text{ mm}$** 。



## 3.4 研究方法

### 试验地设置



西鄂尔多斯荒漠研究样地示意图

# 3.5 主要研究结果

## 3.5.1 西鄂尔多斯荒漠夏季大气降水氢氧稳定同位素特征

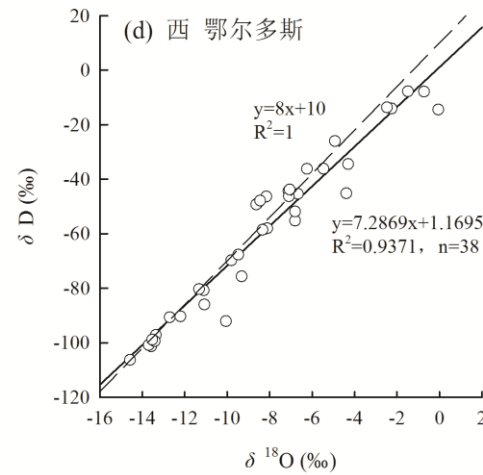
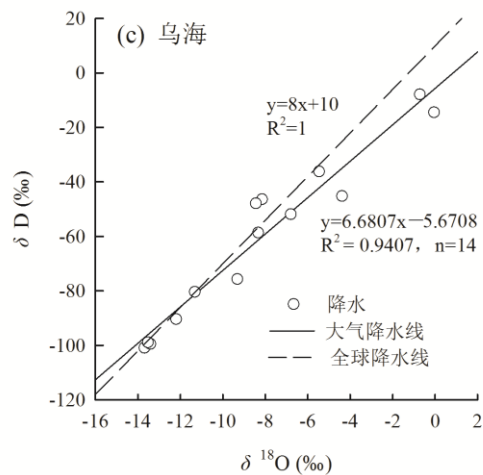
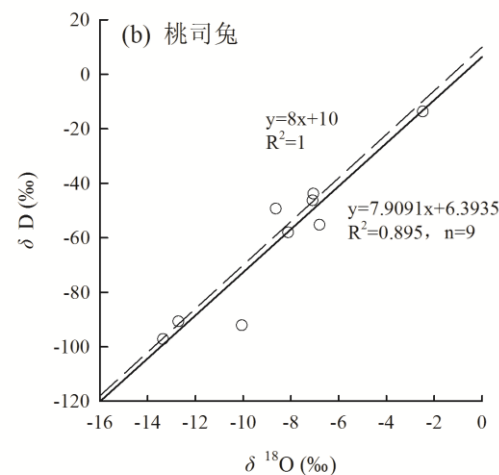
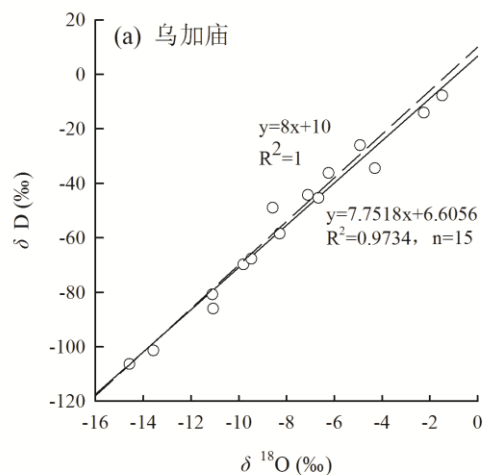
### 大气降水线

•西鄂尔多斯地区夏季大气降水线方程 (LMWL) 为:

$$\delta D = 7.2869\delta^{18}O + 1.1695$$

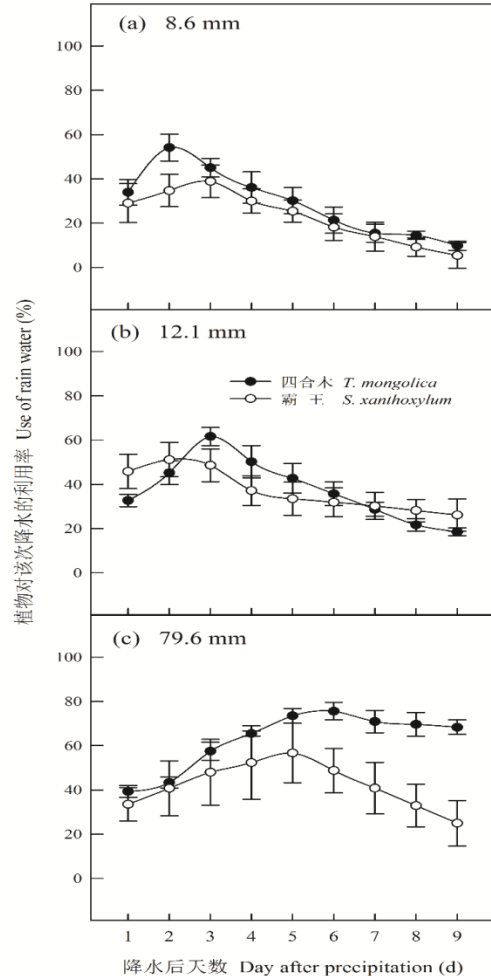
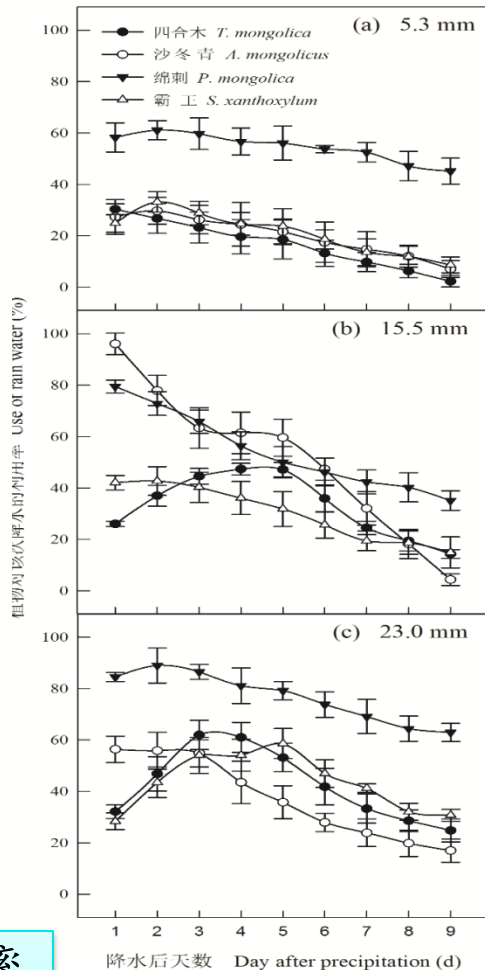
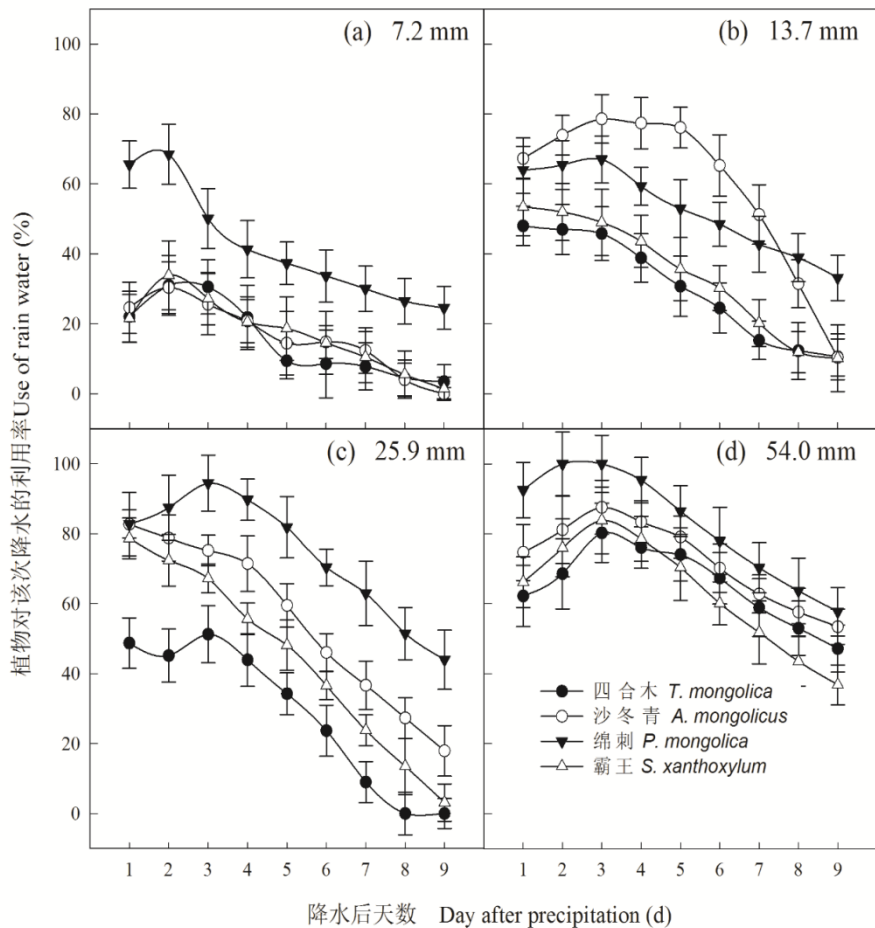
( $R^2 = 0.9371, n=38$ )。

•斜率低, 表明二次蒸发较强。



乌加庙、桃司兔、乌海及西鄂尔多斯荒漠夏季大气降水线  
注: (a) 乌加庙; (b) 桃司兔; (c) 乌海; (d) 西鄂尔多斯

### 3.5.3 定量阐明不同降水条件下植物对该次降水的利用率



- 降水后的1-3天内对该次降水的利用率达到峰值，之后逐渐下降。
- 随降水量增加，四合木与霸王对该次降水的利用率明显增大，且**霸王的利用率高于四合木**。

A、B、C样地中植物对降水的利用率随采样天数的变化

# 展 望

## 1. 人工林生态系统研究

目前，诸多研究关于天然林生态系统水文过程研究，对人工林研究较少，为了总结森林、湿地、荒漠三大生态系统水循环过程定量研究的普遍规律，需进一步加强人工林水文过程碳氢氧同位素研究，包括人工湿地森林。

# 展望

## 2. 尺度推绎研究

目前对生态系统水循环的研究大多在局部区域，小范围尺度（坡面和小流域）上的结论难以推绎到大流域，这对生态水文学的发展具有很大制约。

在今后的研究中，借助遥感和地理信息系统技术、系统分析和模型模拟的方法，加强较大的时空尺度上相关信息收集和處理问题，为解决尺度问题提供了重要的技术手段和方向。

# 研究方向--稳定同位素生态学

硕士生 5 名，博士生 5 名





中国林业科学研究院  
森林生态环境与保护研究所

*Thanks for your attention !*



徐 庆

Tel: 13681521828

E-mail: [xuqing@caf.ac.cn](mailto:xuqing@caf.ac.cn)

