

流域“三水”统筹管理会议，生态环境部，2021-12-30，北京

# 水资源-生态水文-环境水文-科技协同发展： 水循环的理念与应用问题的若干探讨

刘昌明  
中国科学院地理资源所  
北京师范大学水科学院

# 提纲:

- 1、概论：生态水与水生态的理念/重要性
- 2、水循环系统：生态环境水研究的基础理论与思想方法
- 3、生态环境水系统的协同：综合调控
- 4、若干讨论与简结

**国内认知:**生态文明是实现人与自然和谐发展的必然要求，生态文明建设是关系中华民族永续发展的根本大计。

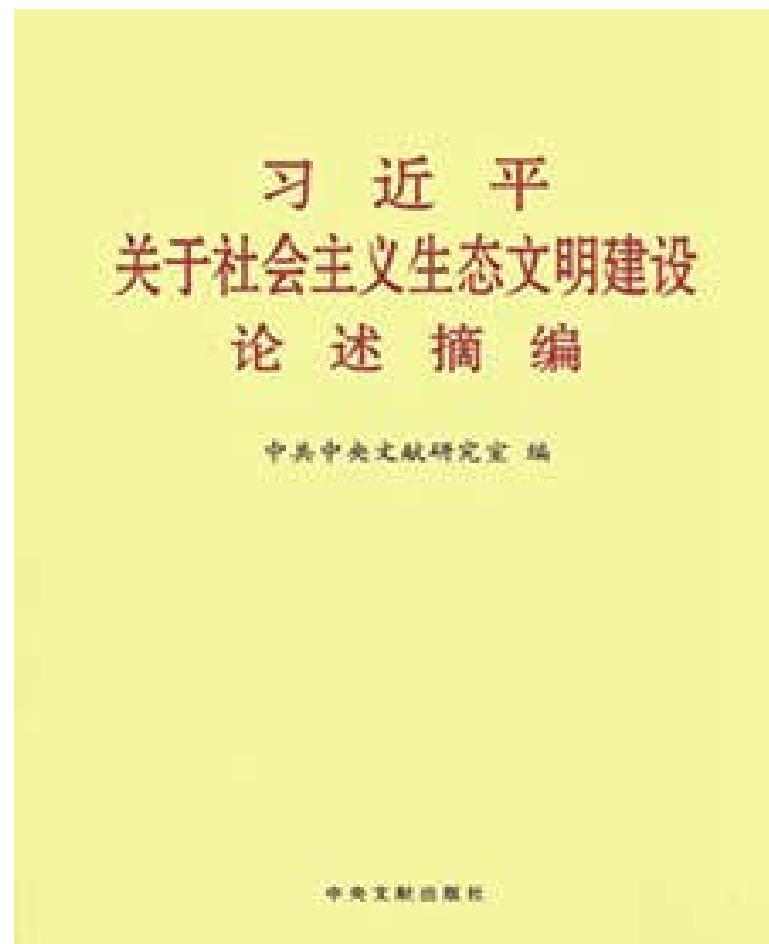
## 生态水文研究重要性

生命、生产、生态的“三生共享”

生态之源；

生产之要；

生态之基。



# 联合国教科文国际水文计划—IHP 2018年7月最新文件的新定义：

生态水文：  
从分子到流域尺度的整体科学

国际动向 IHP

Application of Ecohydrology in problem solving

水，可用性与水质

WATER

(availability and quality)

水文学

生态水文与  
水生态研究

生物多样性，取决于  
区域环境条件的栖息品种

BIODIVERSITY

(specific habitats and species  
depending on local environ-  
mental conditions)

生物群

BIOTA

双向控制

DUAL  
REGULATION

双向控制

生态系统服务

食物生产、生物多样性等

ECOSYSTEM SERVICES

(food production, bioenergy,  
etc)

自适应

富营养化与对气候变化适应

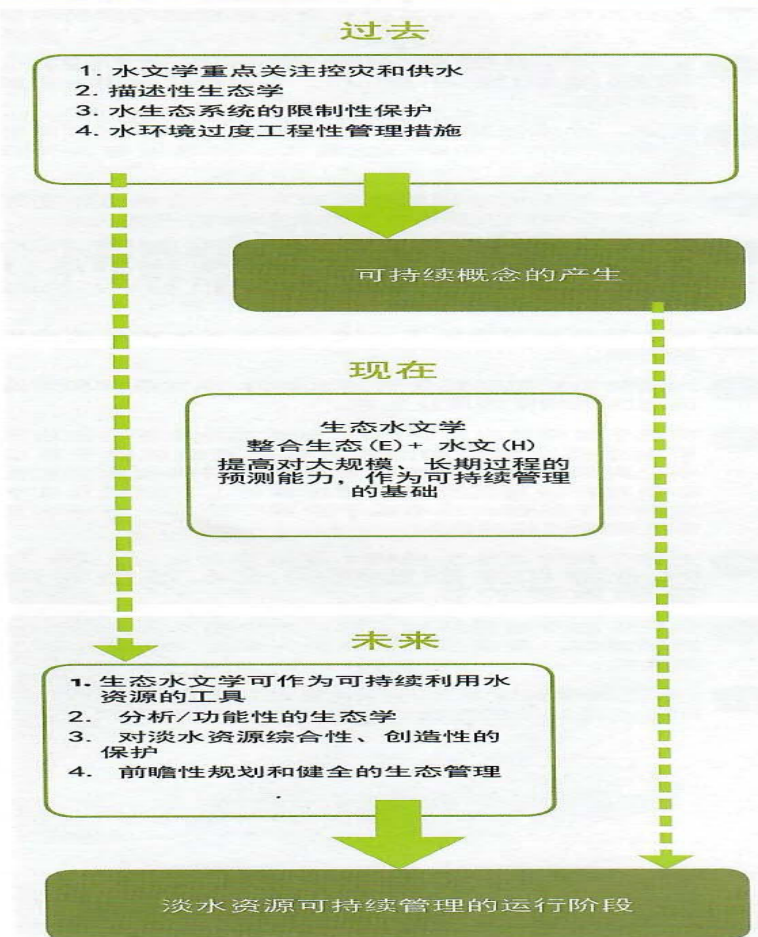
RESILIENCE

(eutrophication and adaption  
to climate change)

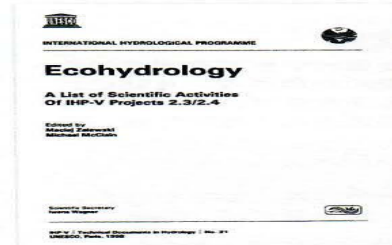
根据：国际水文计划（IHP），2019）

# 早期、里程碑、现在、未来

图3. 生态水文学加速了从描述性生态学、水生态系统的限制性保护和过度管理过渡到强调分析/功能性的生态学，以及对淡水的创新管理和保护。



## 1998 年 联合国教科文组织国际水文计划水文技术文件



题目：  
生态水文学：国际水文计划第五阶段的科学活动清单

作者：  
扎莱夫斯基，麦克莱恩（编辑）  
Zalewski M. & McClain M. (Eds.)

摘要：  
本文汇编了与联合国教科文组织国际水文计划生态水文项目

相关的若干活动，并通过案例研究诠释生态水文概念的实施

本书其它目标包括：

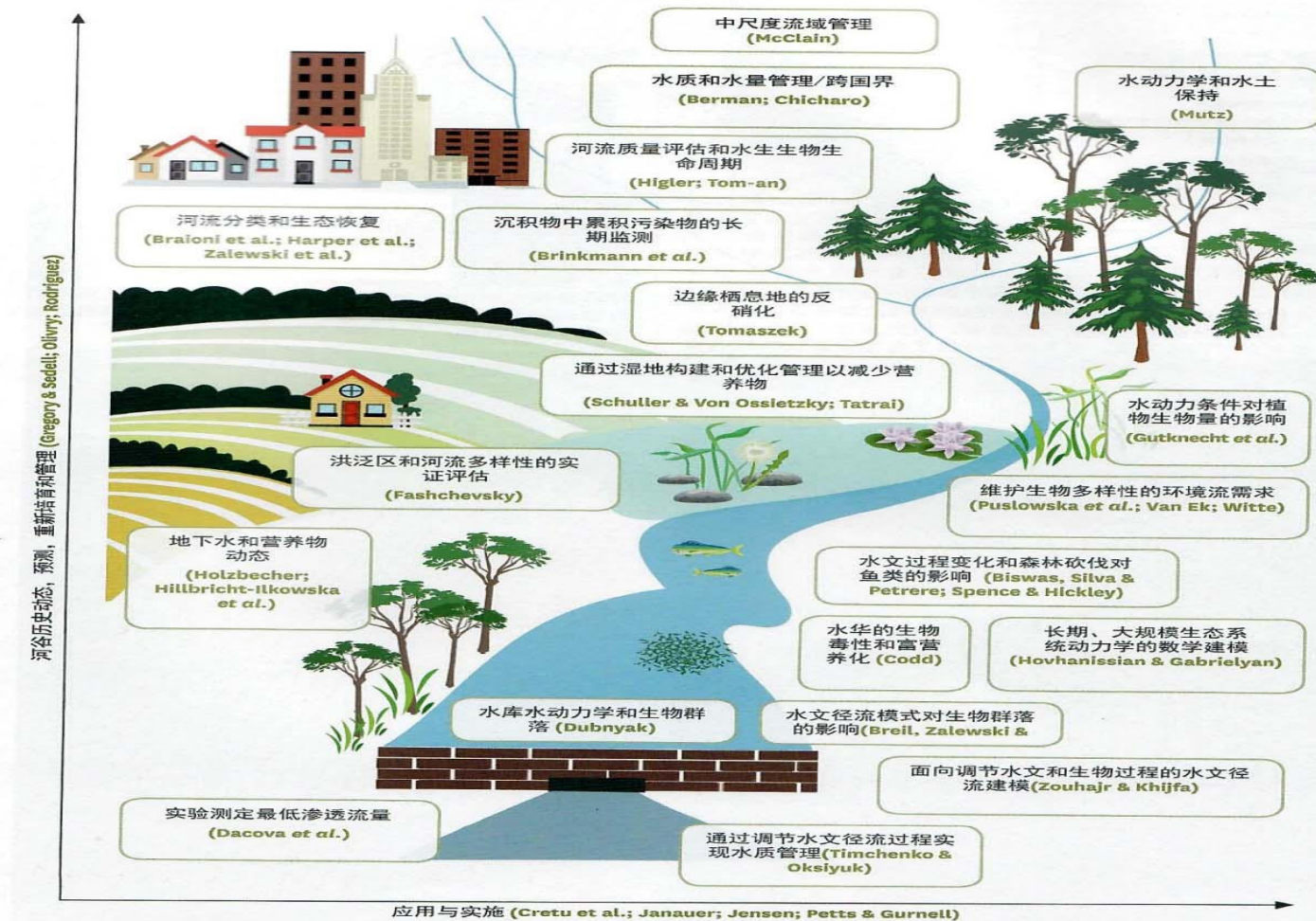
- 1- 展现了在解决既有问题方面取得的进展。
- 2- 进一步普及生态水文学概念，强调了河流生态系统是水文过程调控的“超有机体”。河流生态系统在很大程度上受到生物群落对水文过程的响应或群落间相互作用的影响。

### 事实与数据：

- 将生物调控机制与水文过程相结合，并研究其在流域尺度下对水动力和水质的潜在影响，是联合国教科文组织国际水文计划第五阶段重点领域2.3 / 2.4生态水文学活动的隐性目标。
  - 介绍了2项核心试点活动，14项核心活动和8项相关活动。
- 提出了五个概念性考量：
- 1- 生态与水文参数相关性优化模型（罗马尼亚）
  - 2- 浅层热带湖泊和泻湖的可持续管理（热带地区）。
  - 3- 生态水文学：融合概念和尺度（欧洲）
  - 4- 部分水文学家对“生态水文学”新范例的观点。
  - 5- 计划开展活动以评估赤道沿海地区由“厄尔尼诺现象”引起的地表生态水文过程（赤道地区）。计划开展活动以评估赤道沿海地区由“厄尔尼诺现象”引起的地表生态水文过程（赤道地区）。

# 流（区）域水生态水、水生态的水过程示意图

图4. 表明：更有效的方法必须基于对流域尺度水动力的时空分布特征的理解。这些时空特征由四个基本要素决定：气候、地貌、植物覆盖/生物群落动态和人为影响。



# 提纲：

- 1、概论：生态水与水生态的理念/重要性
- 2、水循环系统：生态环境水研究的基础理论与思想方法
- 3、生态环境水系统的协同：综合调控管理
- 4、若干讨论与简结

# 水系统与水循环： 生态水系统研究的基础理论

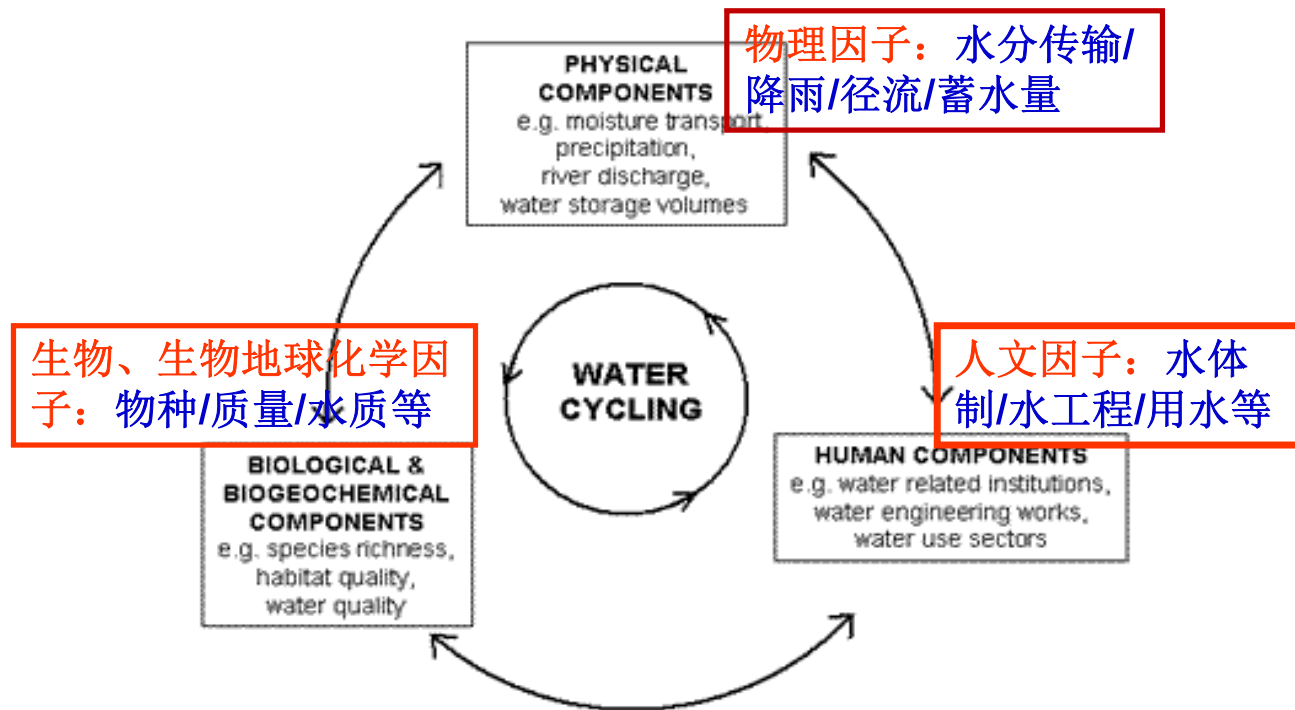


全球水系统（GWSP） / 地球系统科学伙伴计划ESSP定义 2003

[www.essp.org](http://www.essp.org)



- 水循环动力过程贯穿三元系统
- 宏微观的知识是研究生态水与水生态核心的基础，必须掌握
- 水循环是地球圈层最为活跃的过程之一，其变化牵一发而动全身，涉及人类未来生态/环境或全球变化的应对



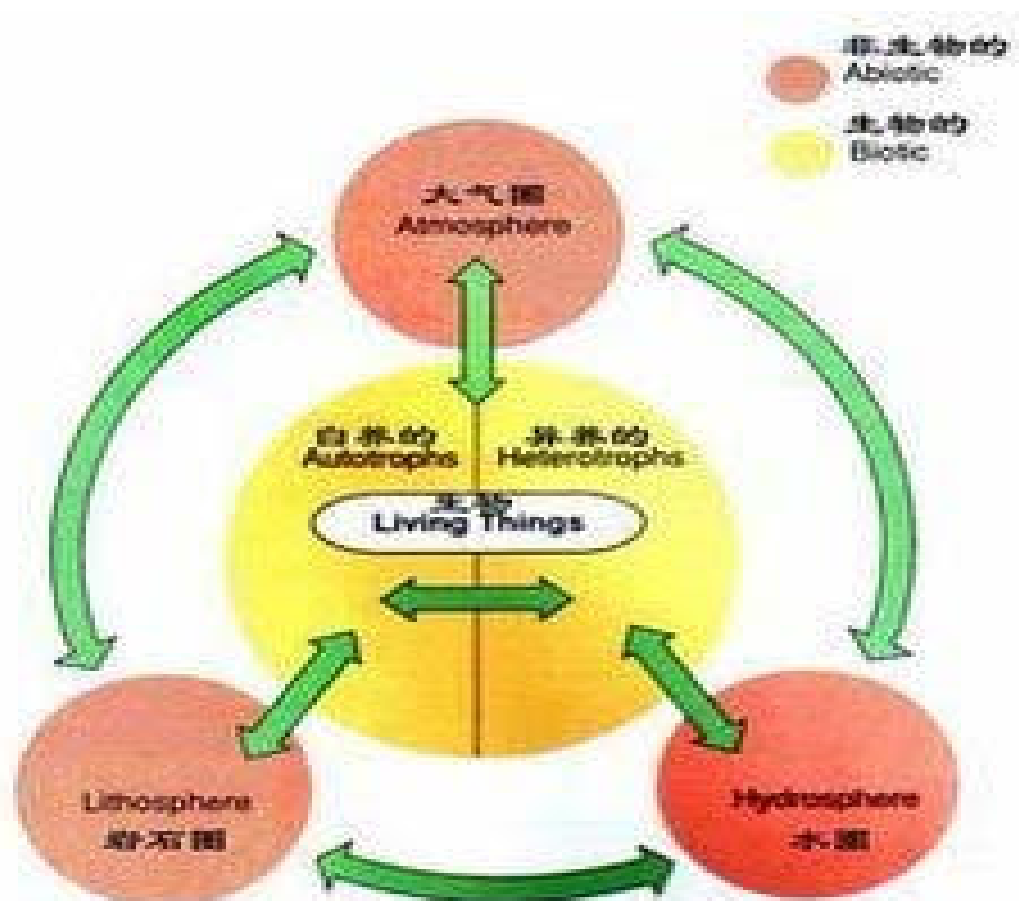
# 生物地球化学循环

贯穿地球表层系统

- 非生物与生物之间
- 自养与异养的区分
- 水圈-气圈-岩土圈

重点研究

- 全球变化下的碳、氮、硫、磷等生物地球化学循环。

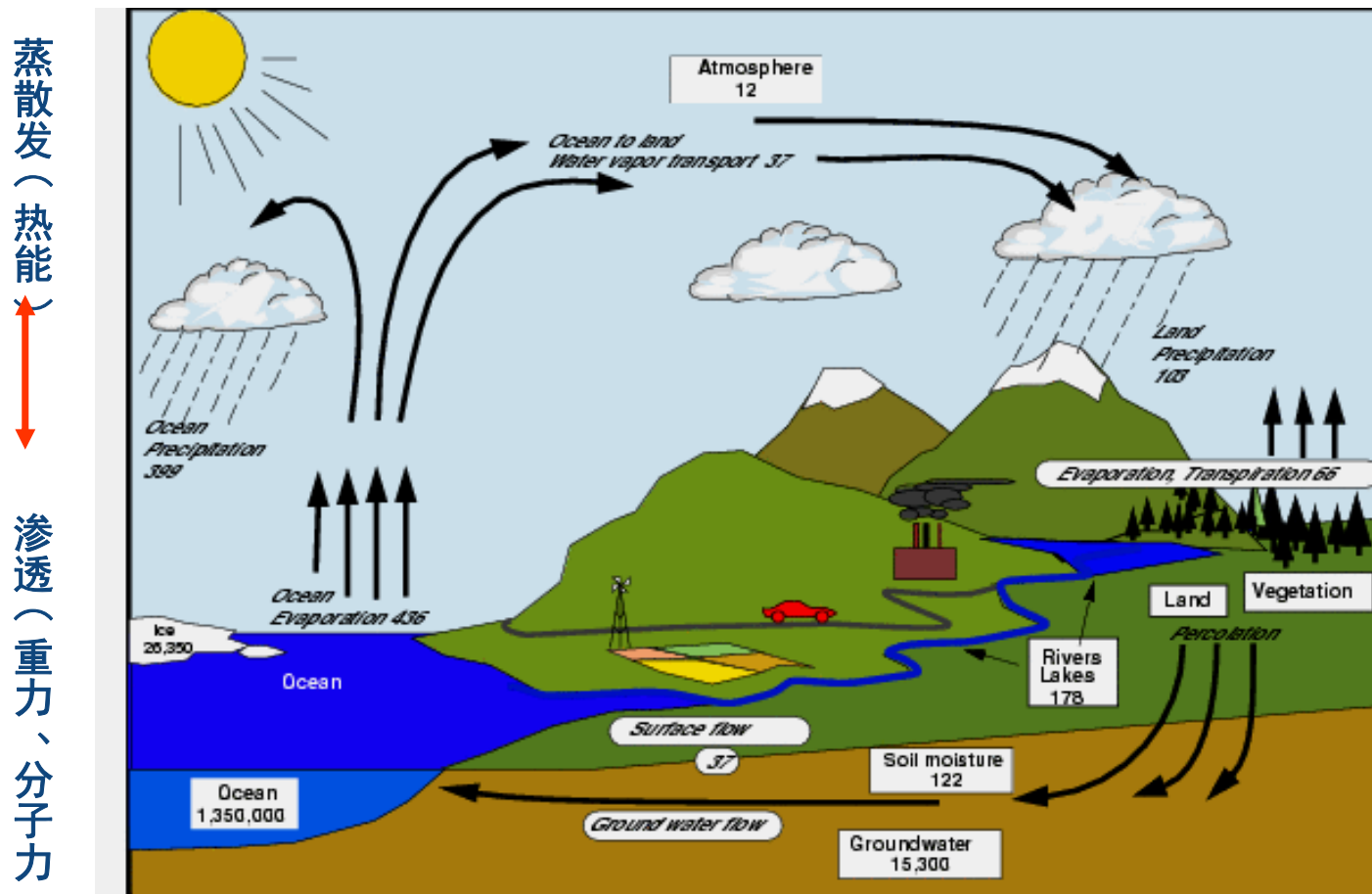


生物地球化学的总模式图

The general pattern of  
biogeochemical cycle

# 周而复始的水循环过程的图示：全球与中国

(图中数字的单位为万Km<sup>3</sup>)

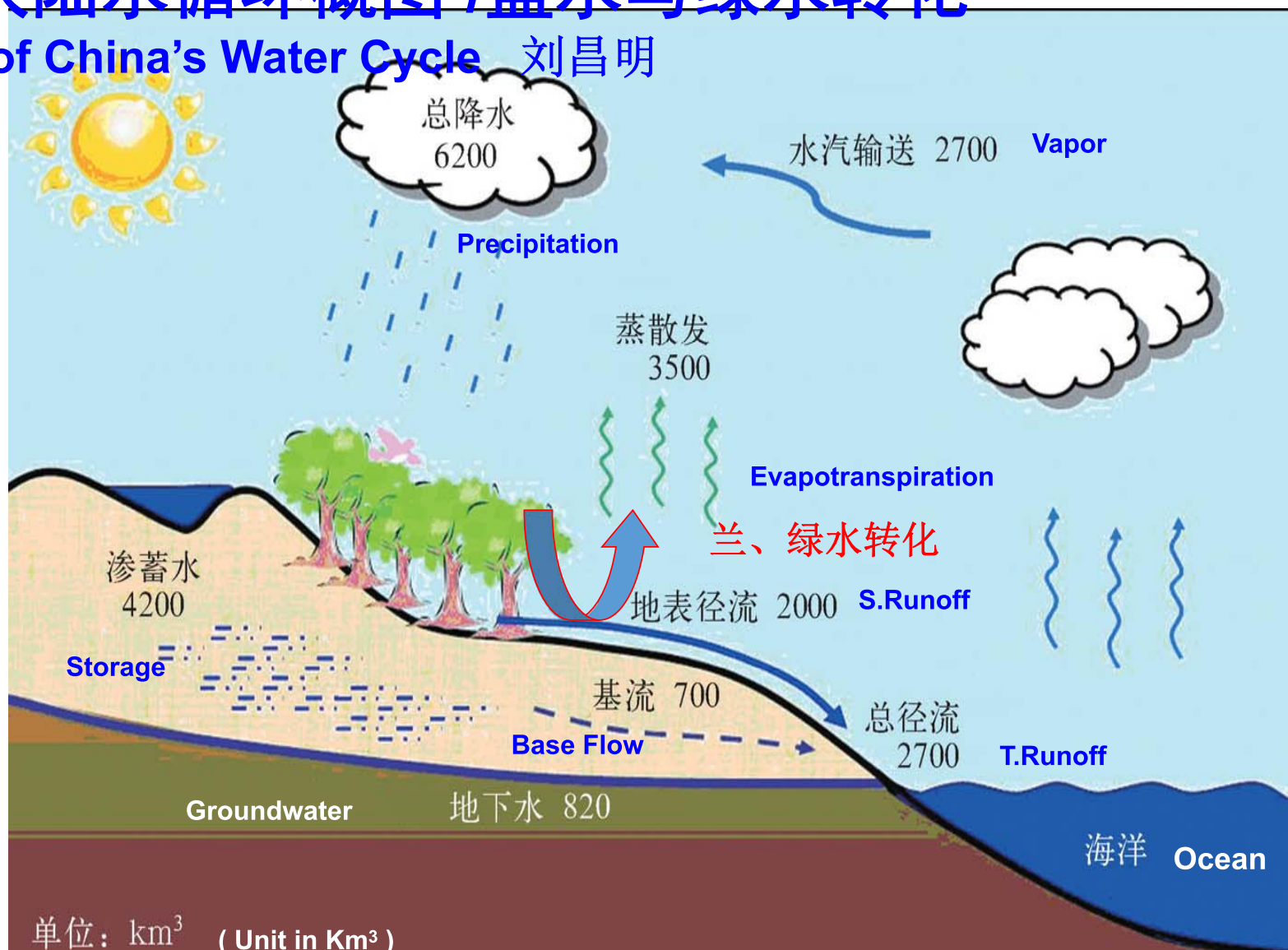


蒸散发(热能) ↑  
↓  
渗透(重力、分子力)

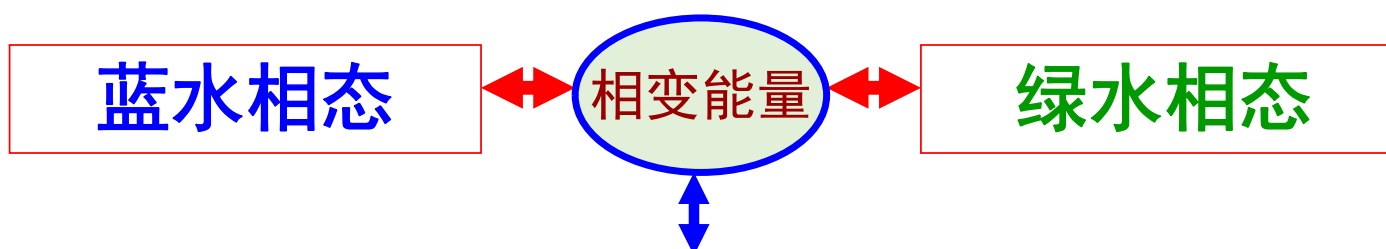
蓄存(重力、分子力) ◆ 地表与地下径流(重力)

# 中国大陆水循环概图 / 蓝水与绿水转化

Sketch of China's Water Cycle 刘昌明



# “气固液”三态相态变化 蓝、绿水转化/循环

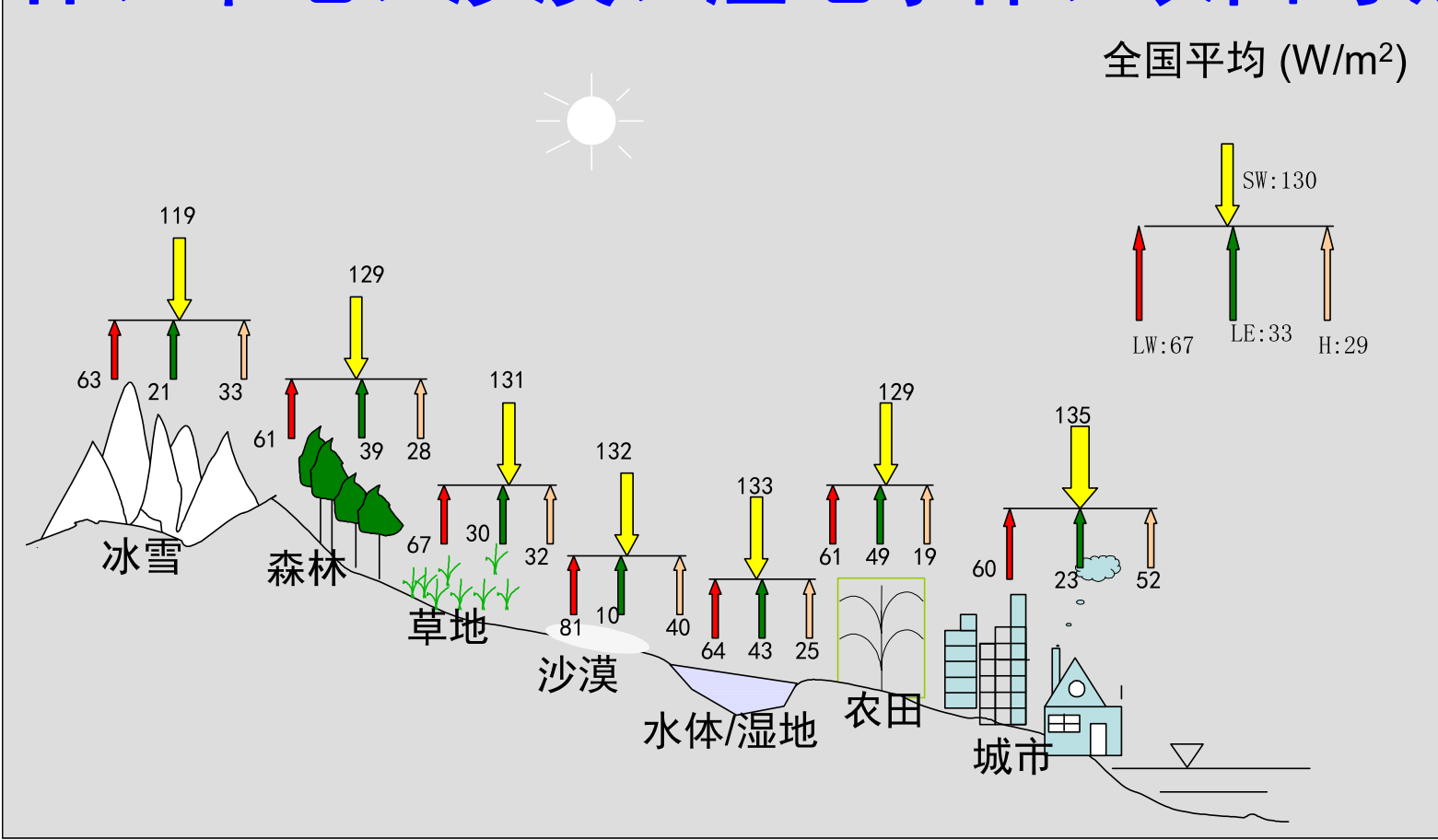


前述的水相态变化“三态六变”

- ◆ 固态→液态，吸热熔化
- ◆ 液态→固态，凝固放热
- ◆ 液态→气态，沸腾和蒸发，气化吸热
- ◆ 气态→液态：压缩体积和降低温度，放热
- ◆ 固态→气态升华，吸热
- ◆ 气态→固态凝华，放热

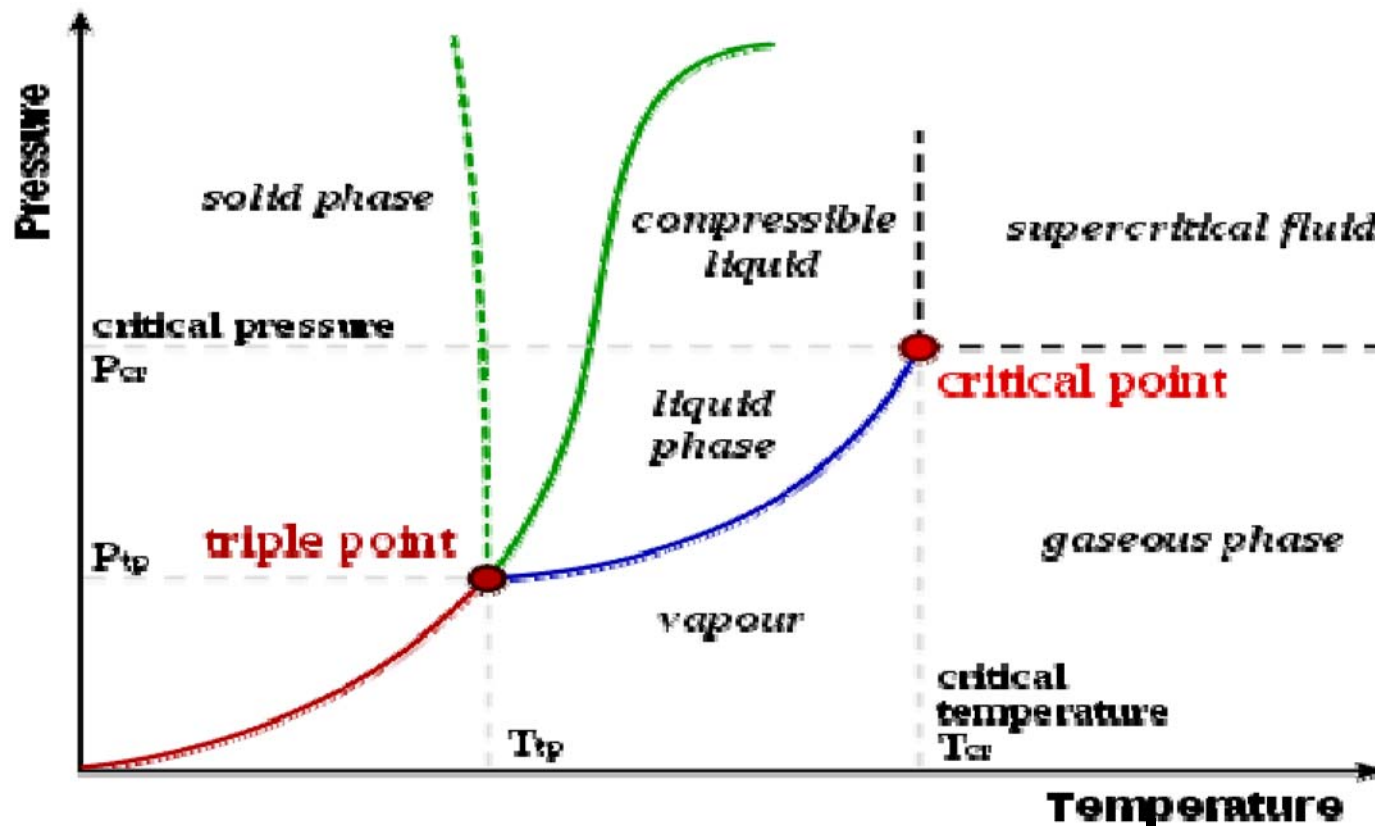
基本定理：1) 克拉伯龙方程 2) 水-热平衡  
3) 质量守恒定律，指导水循环的理论研究

# 能量估算：中国大陆生态地带的能量平衡驱动。冰川、森林、草地、沙漠、湿地水体、农田与城镇



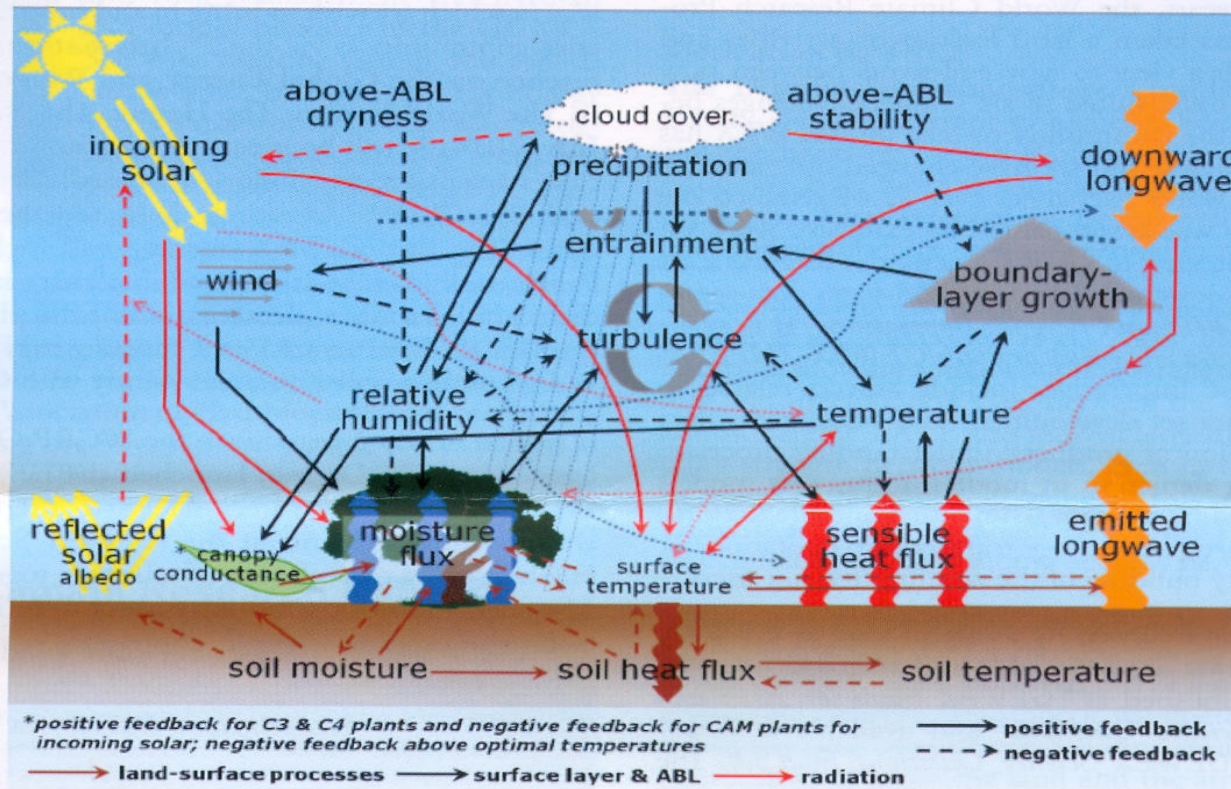
刘昌明 2015

Clausius-Clapeyron定理：大气持水水汽容量温度每上升 $1^{\circ}$ 时会增加约7%左右。而蒸发悖论是观测的水面蒸发则与之相反。故称之悖论



# 解释：边界层水热要素互馈机制的正负增益

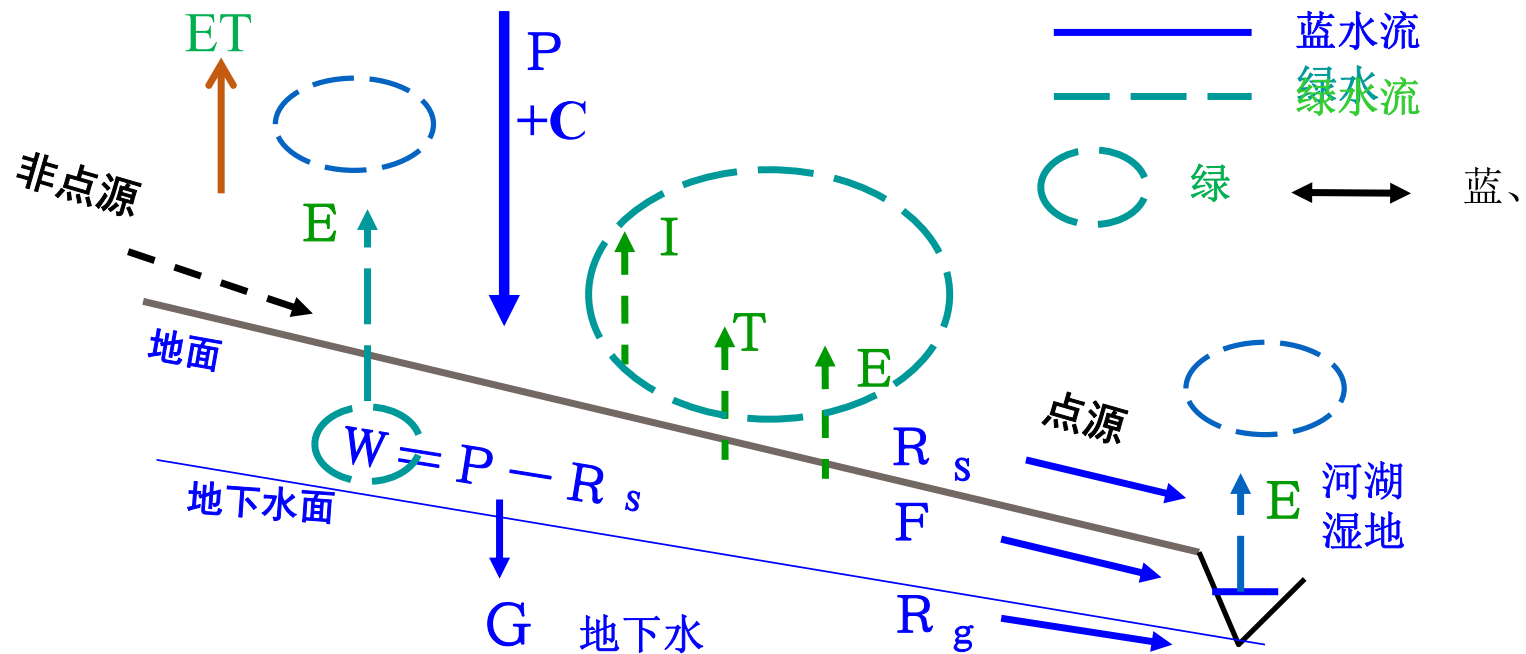
## Diurnal Land-Atmosphere Coupling Experiment (DICE): A First Attempt to Identify These Complex Interactions (see page 3)



ematic of the complex interactions between the land surface, atmospheric boundary layer, and radiation via many variables. These interactions well understood, in general, and are often poorly represented in numerical models. See article by Martin Best, et al. on page 3. Figure adapted from

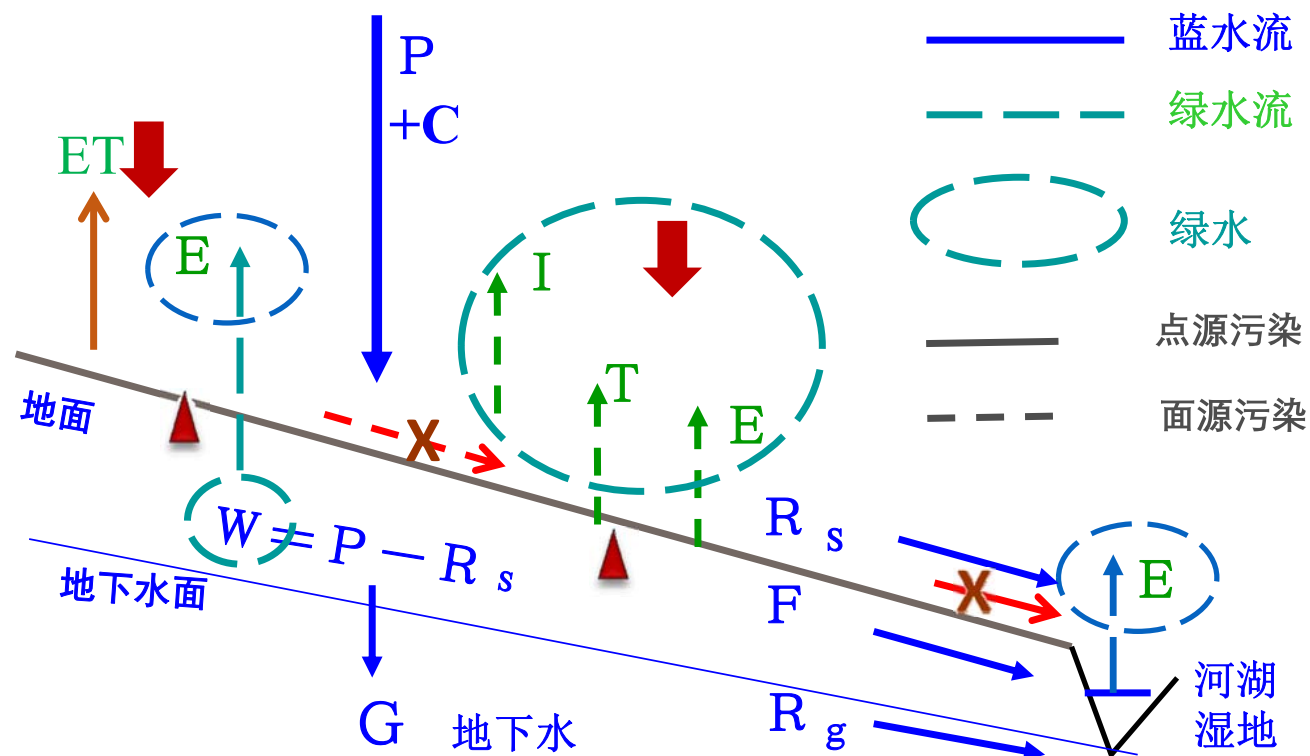
# 水循环的自然过程与水量交换：

1、降水量 $P+C$ （凝结）是陆地淡水来源总量；2、蓝水与绿水为降水派生，并相互转化；3、城镇化所有建筑改变了水循环的自然过程，主要是下渗、积存与自净过程；4、城镇化问题有洪涝、面源污染与缺水；4、强化雨水管理与低影响发展的理念



如：灌溉地为 $P+C+I$ (灌溉量)

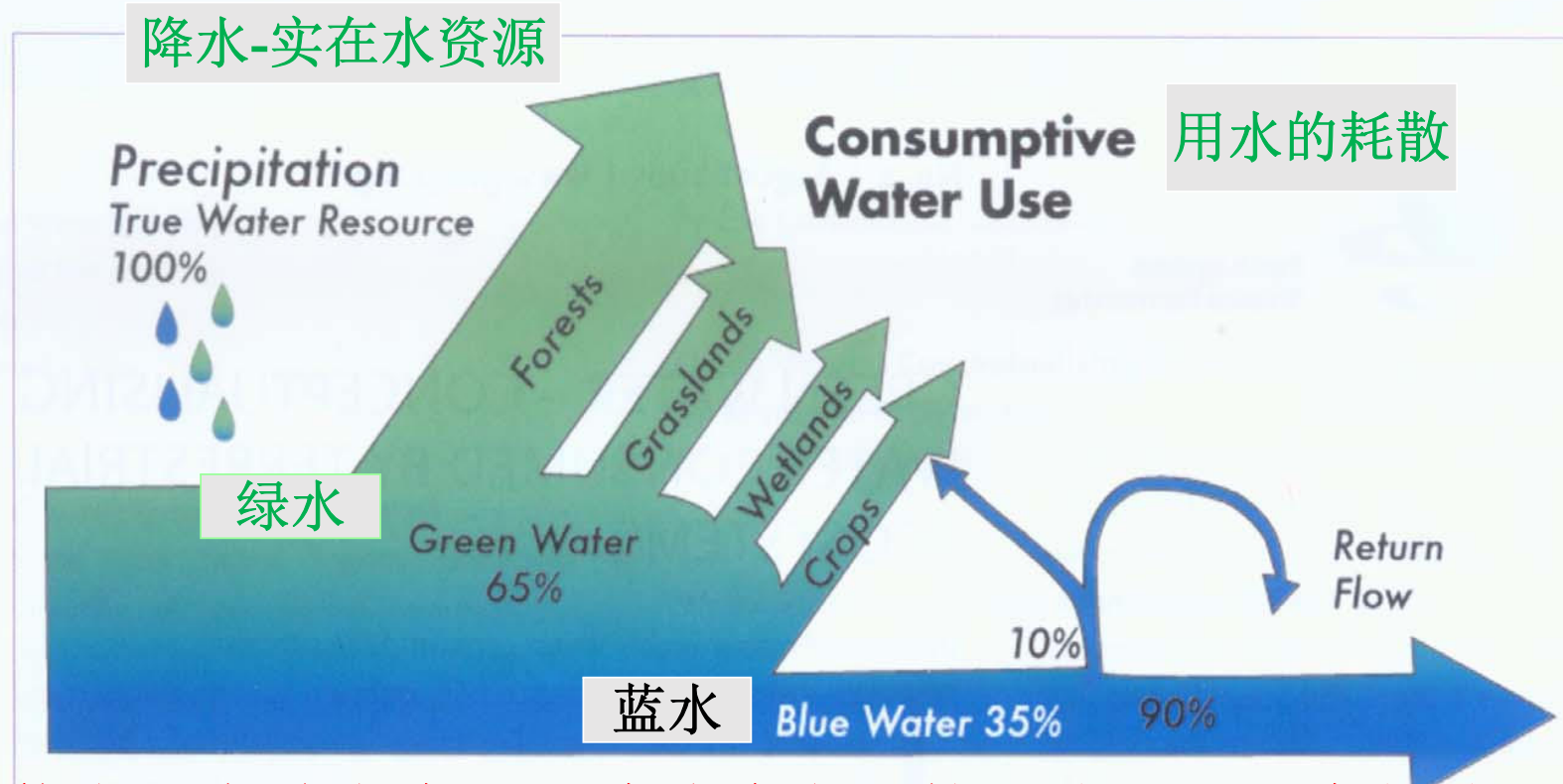
# 治理/管理措施：减少 (↓) 去除 (X) 调治 (▲)



灌溉地为  $P+C+I$  (灌溉量)

# 绿水与蓝水的全球分配

根据 Malin Falkenmark 2005



蓝水只占总水资源（陆地降水）的三分之一，大部分雨水以绿水（例如被植物消耗的水）的形式返回到大气中



北京师范大学

# 荷兰GWC基金会关于“绿水”的全球估计

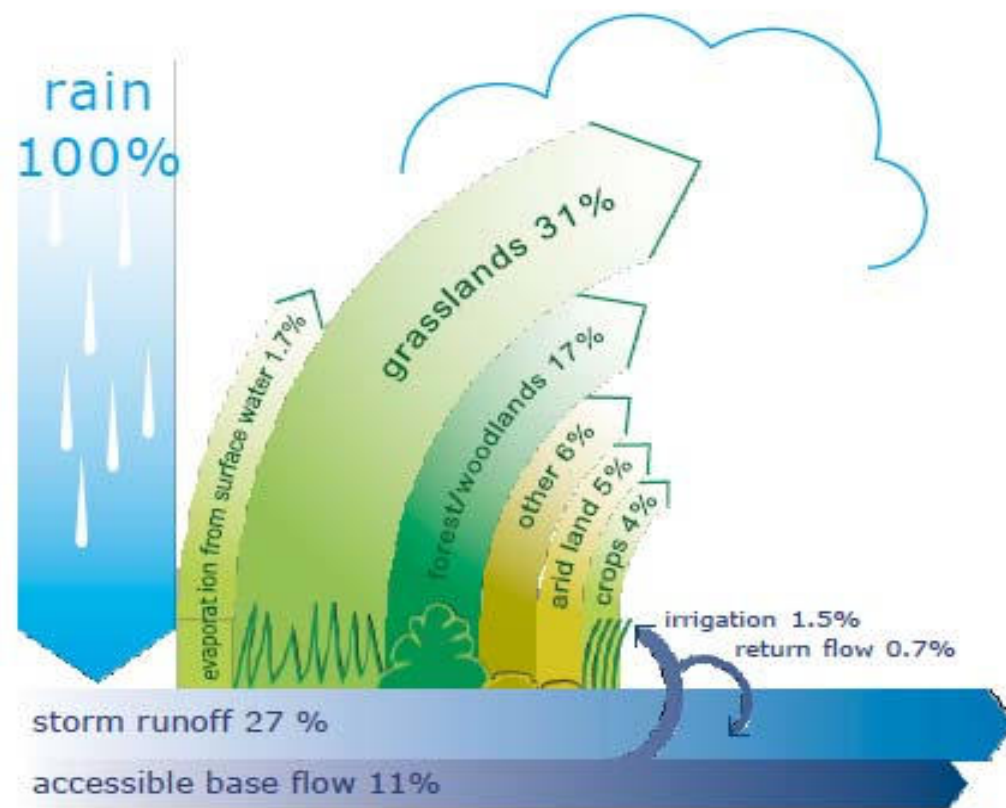


Figure 1 Green and blue water, global flows

| 绿水:来自年降水的64.7% | 分别占年降水比例 % |
|----------------|------------|
| 水面的蒸发          | 1.7        |
| 草地生态系统         | 31.0       |
| 森林生态系统         | 17.0       |
| 其他生态系统         | 6.0        |
| 干旱区            | 5.0        |
| 农业作物           | 4.0        |

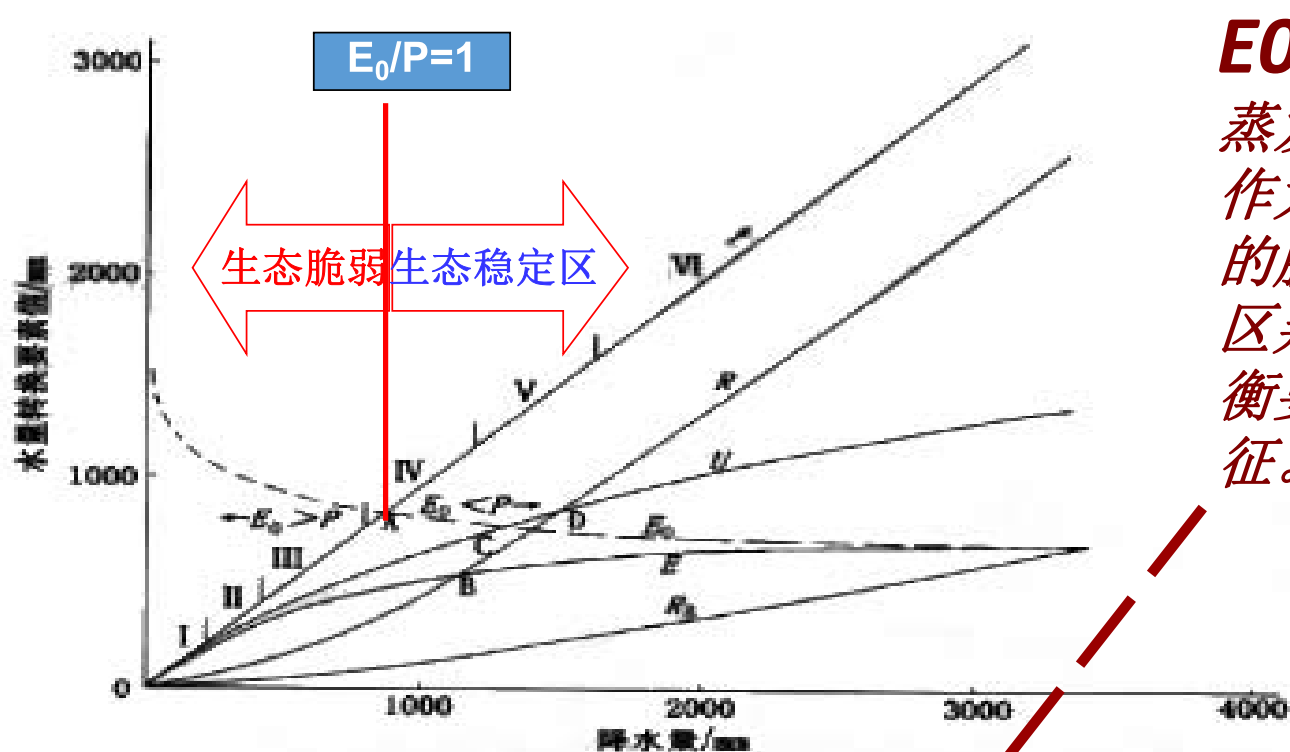


# 提纲：

- 1、概论：生态水与水生态的理念/重要性
- 2、水循环系统：生态环境水研究的基础理论与思想方法
- 3、生态环境水系统的协同：综合调控管理
- 4、若干讨论与简结

# 水分条件与生态脆弱区、生态稳定区的划分

指标：干燥指数  $E_0/P=1$



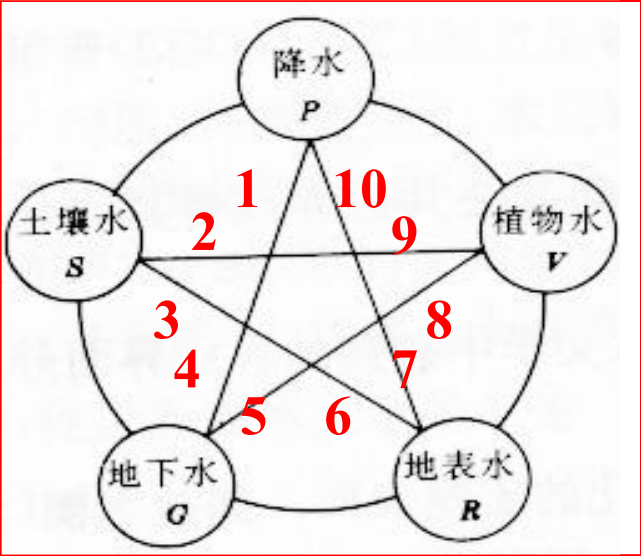
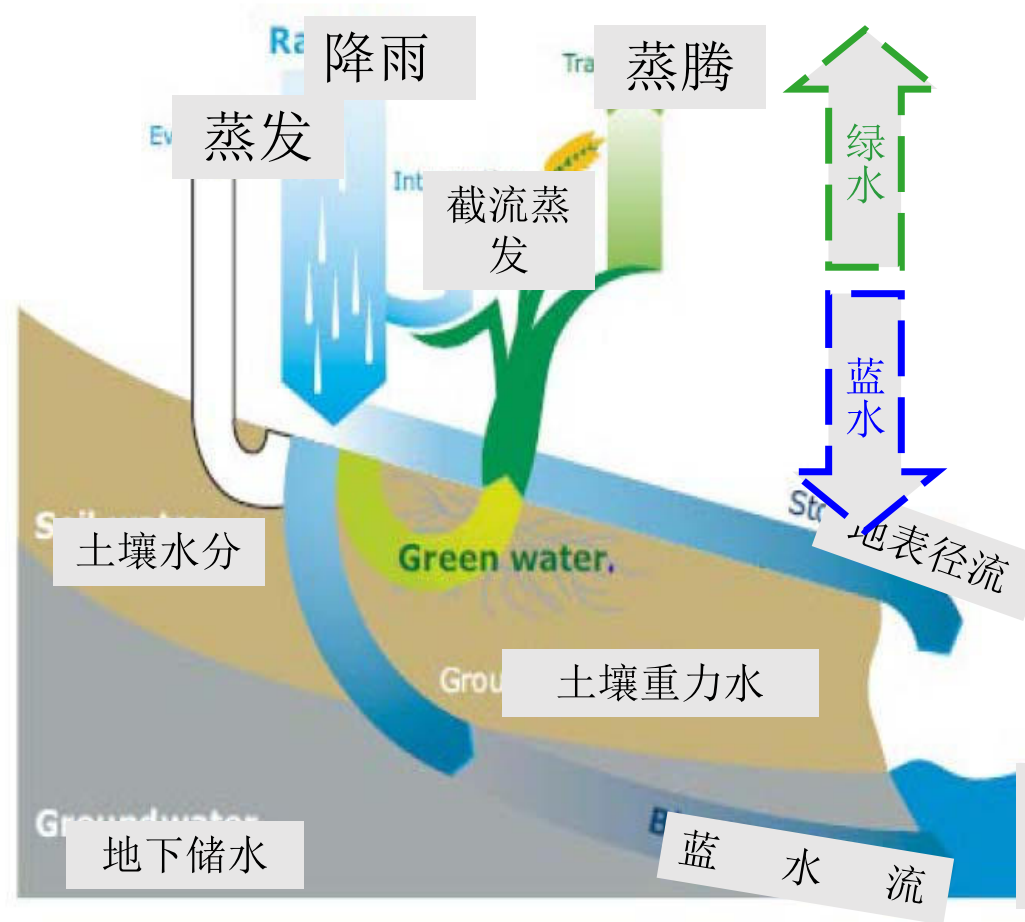
$E_0/P=1$

蒸发能量/水量=1  
作为生态水系统的  
脆弱性与稳定  
区判别和水量平  
衡要素之间的特  
征。

图4 我国四水转化结构要素图

P 为降水量；R 为径流量；U 为年土壤水总通量或区域湿润度； $E_0$  为蒸发力；  
E 为总蒸发； $R_g$  为地下径流

# 绿水转化的调控与良性水资源循环的管理研究问题



## 五水转化

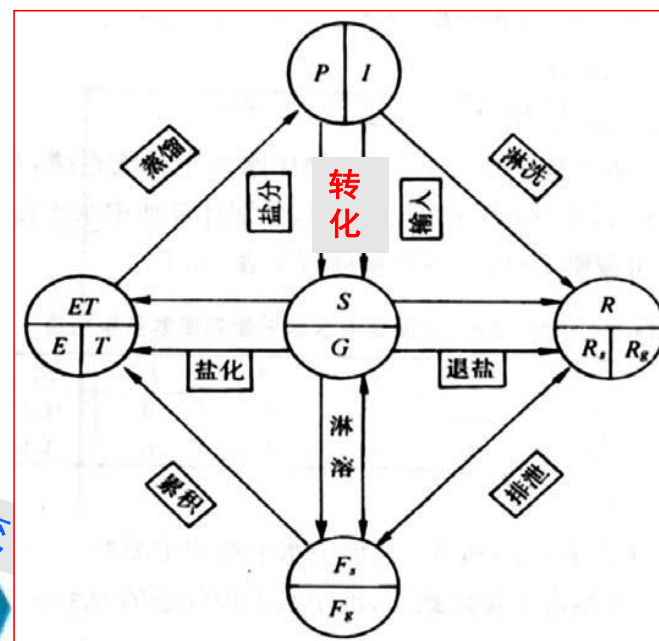
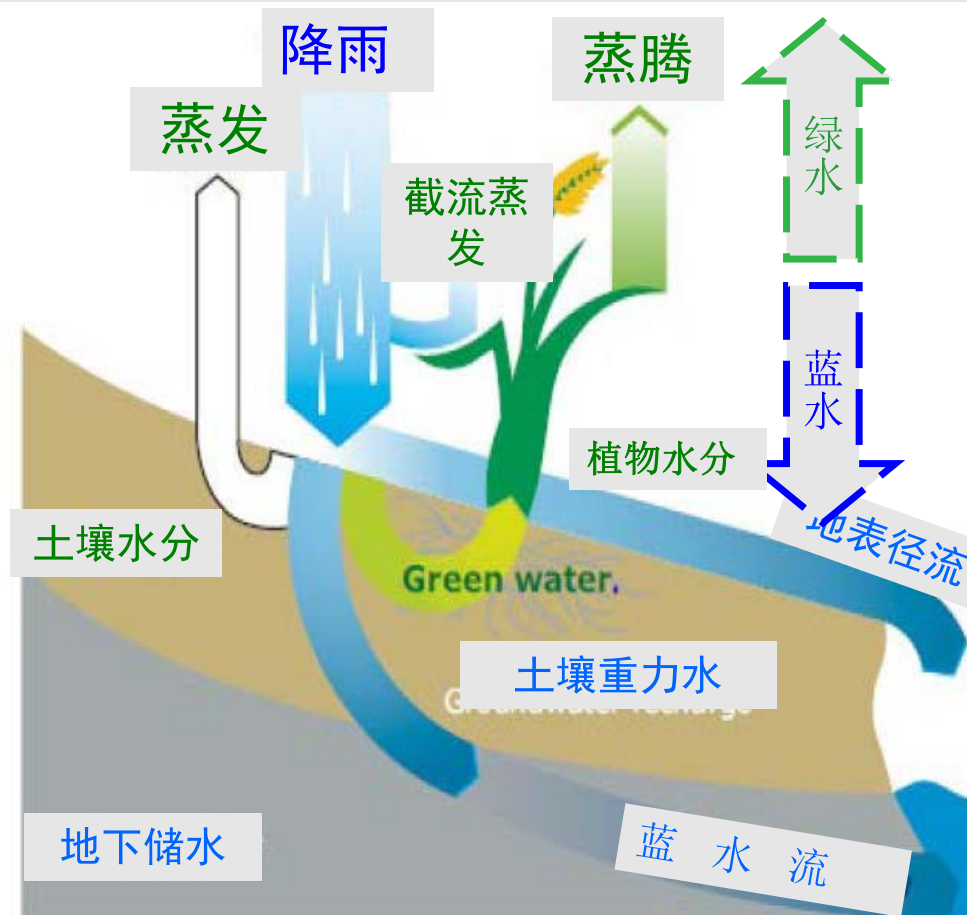
五水转化多钟组合计算方法

$$C_{m(j)}^{n(i)} = \frac{m(j)!}{n(i)!(m(j)-n(i))!}$$

Figure

五水系统过程中蓝水转化为绿水过程

水转化调控与水管理“四大平衡”：水热、水盐、水沙、供需等生态平衡问题。下面为“水盐平衡”举例。



水盐循环

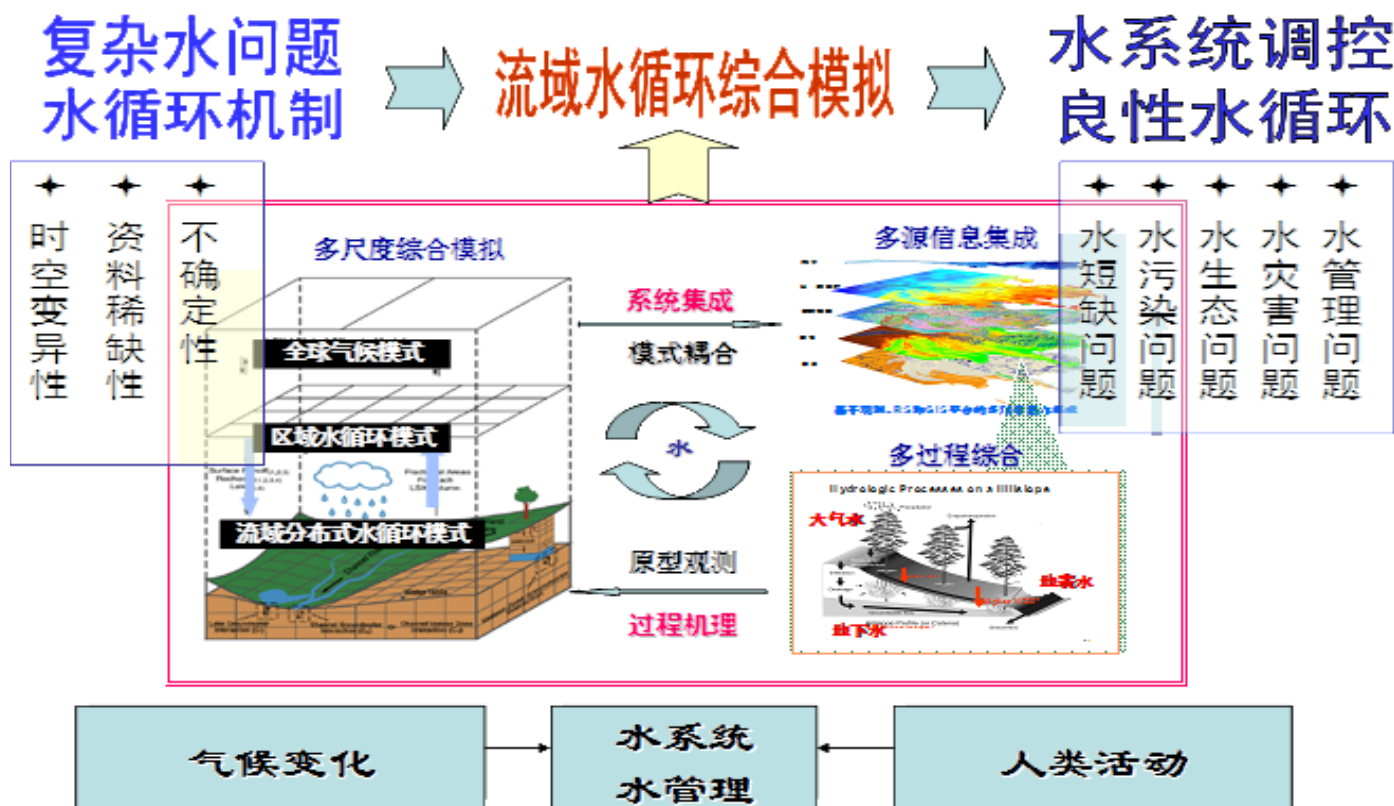
水盐平衡计算方程

$$RSB = C_1P + C_2R_i - C_3R_o - S_i + S_r + S_f + S_w$$

蓝水转化为绿水过程中与化学盐类变化

# 生态水的综合调控方法

气候（CC）与人类活动（HA）变化下的流域水循环的综合模型



# 提纲：

- 1、概论：生态水与水生态的理念/重要性
- 2、水循环系统：生态环境水研究的基础理论与思想方法
- 3、生态环境水系统的协同：综合调控管理
- 4、若干讨论与简结

4.1 水的资源、生态、环境与灾害及其调控是综合性的问题，应作为系统工程。

4.2 坚持节约资源和保护环境的基本国策，坚持坚持生态优先，绿色发展。把生态文明建设融入根据建设各方面和全过程。生态水与水生态的意义重大，其研究将是主流。

IHP称生态水文研究为：从分子到流域尺度的整体科学

4.3 中国是最大发展中国家，发展当今的第一要务。社经发展与生态环境保护是一对矛盾，具有斗争性与统一性，后者就是LID，如海绵城市。

4.4 主要的几个研究问题，包括：（1）“三生共享”陆表与河/湖内外生态保护的用水与需水量及水动力（2）CC/HA变化下的生态水/水生态的响应（3）维护自然水良性循环（4）海绵城市建设的LID的理念与应用实践。

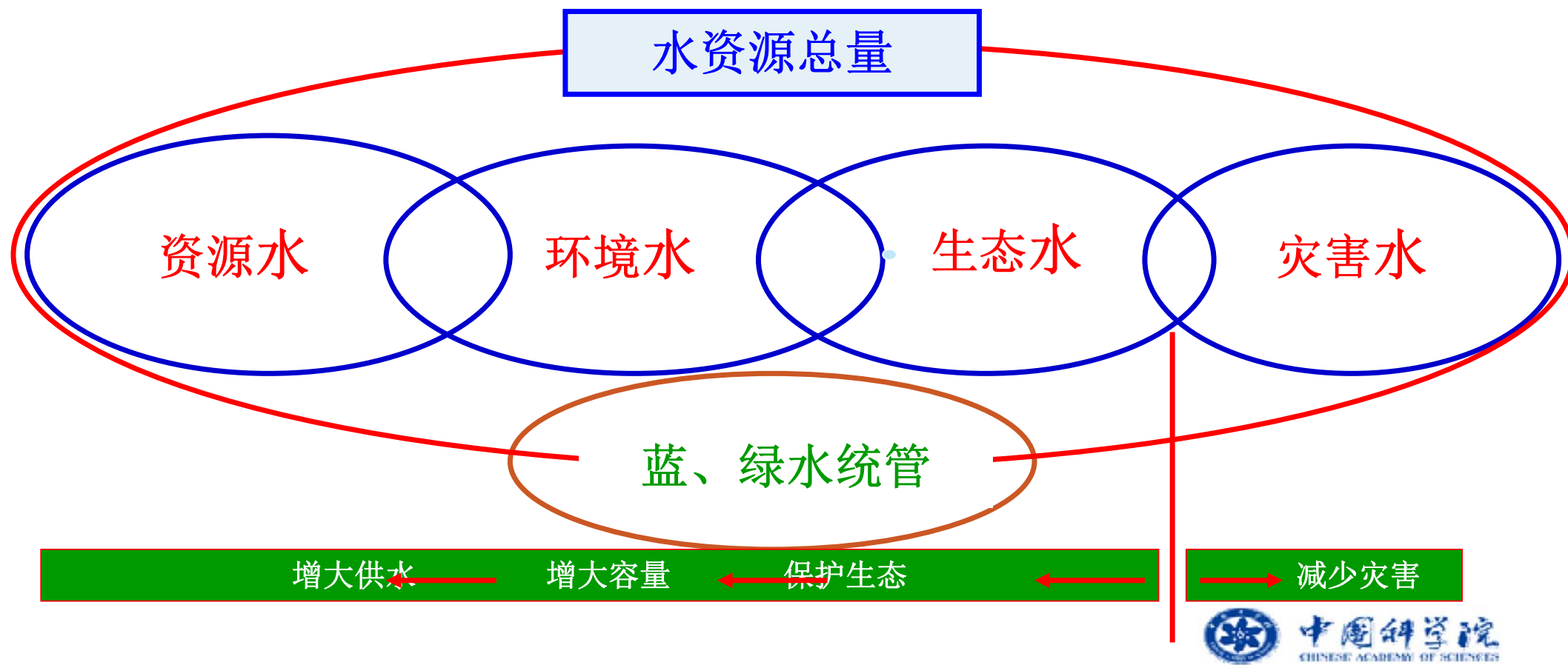
## 4.5 强调研发生态保护的用水与需水量及水动力（例如水力半径法）

- 鱼类洄游流速要求；
- 输沙需要的流速等。
- 河流污染降解需要的流速；

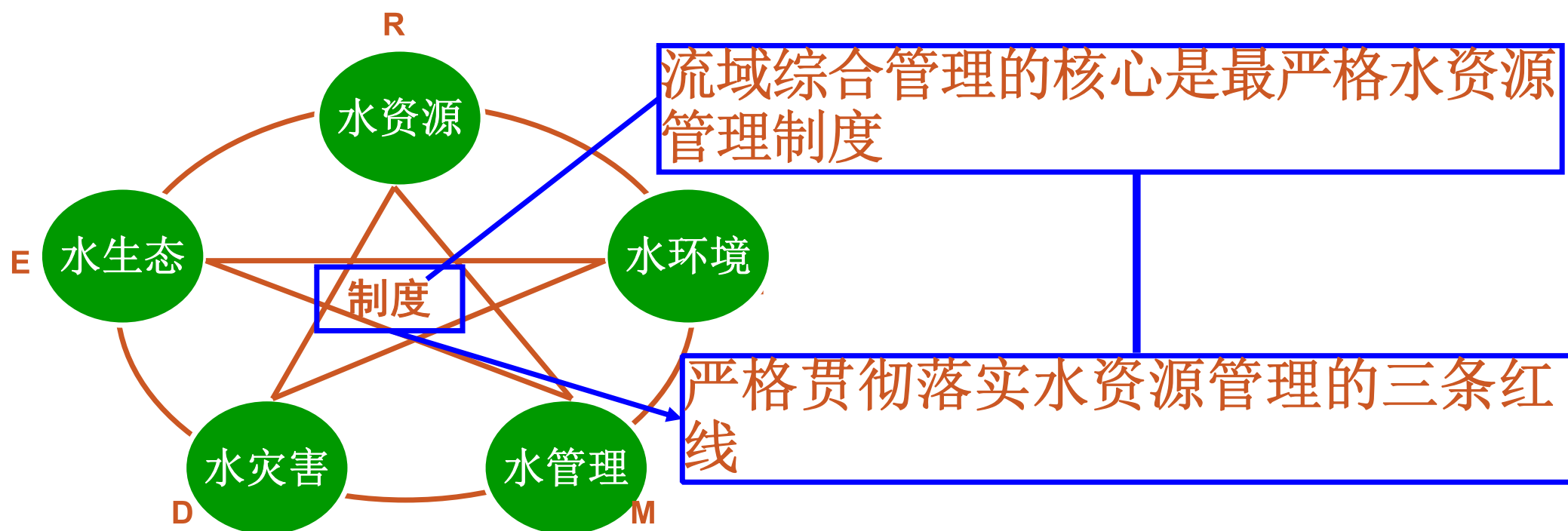
## 4.6 加强水-生态-环境（包括陆地与海洋）的监测与实验研究，发展数字流域，建立信息平台。

## 4.7 面向“三水共治”研发高性能统筹管理模拟模型。

# 综合管理：”五水功能（资源、环境、生态、灾害、管控）”的统筹



## 实现流域综合管理的核心是管理制度的改革



# 综合模拟系统三水统筹治理模拟模型

HIMS水循环综合模拟系统的研发

复杂水问题  
水循环机制

流域水循环综合模拟

水系统调控  
良性水循环

★ 时空变异性

★ 资料稀缺性

★ 不确定性

多尺度综合模拟

全球气候模式

区域水循环模式

流域分布式水循环模式

系统集成

模式耦合

水

原型观测

过程机理

多源信息集成

多过程综合

Hydrologic Processes on a Hillslope

大气水

地表水

地下水

★ 水短缺问题

★ 水污染问题

★ 水生态问题

★ 水灾害问题

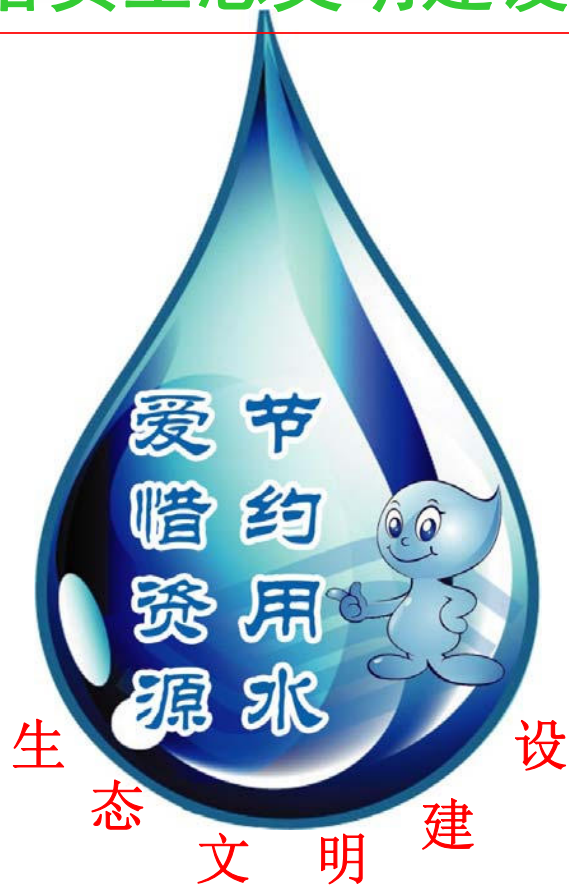
★ 水管理问题

气候变化

水系统  
水管理

人类活动

落实生态文明建设



谢谢各位!



北师大水科院



中国科学院  
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES