

水文模型研究

李健

单位名称

日期（大写）

◆ 小标题

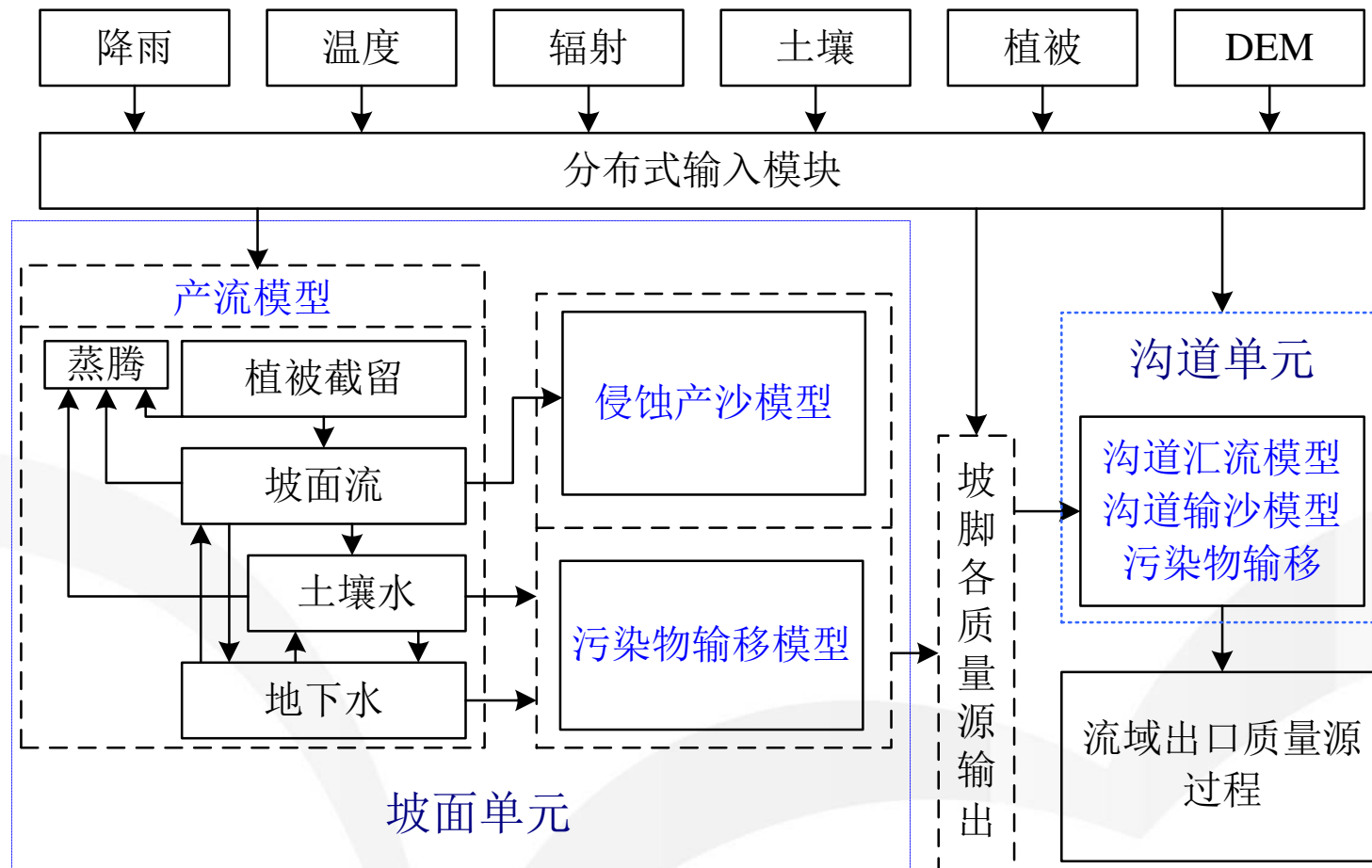
● 内容

基于物理过程的分布式水文模型

SWAT, HMS, HPSF, VIC, WEP-L, GBHM,
DTVGM, BPCC

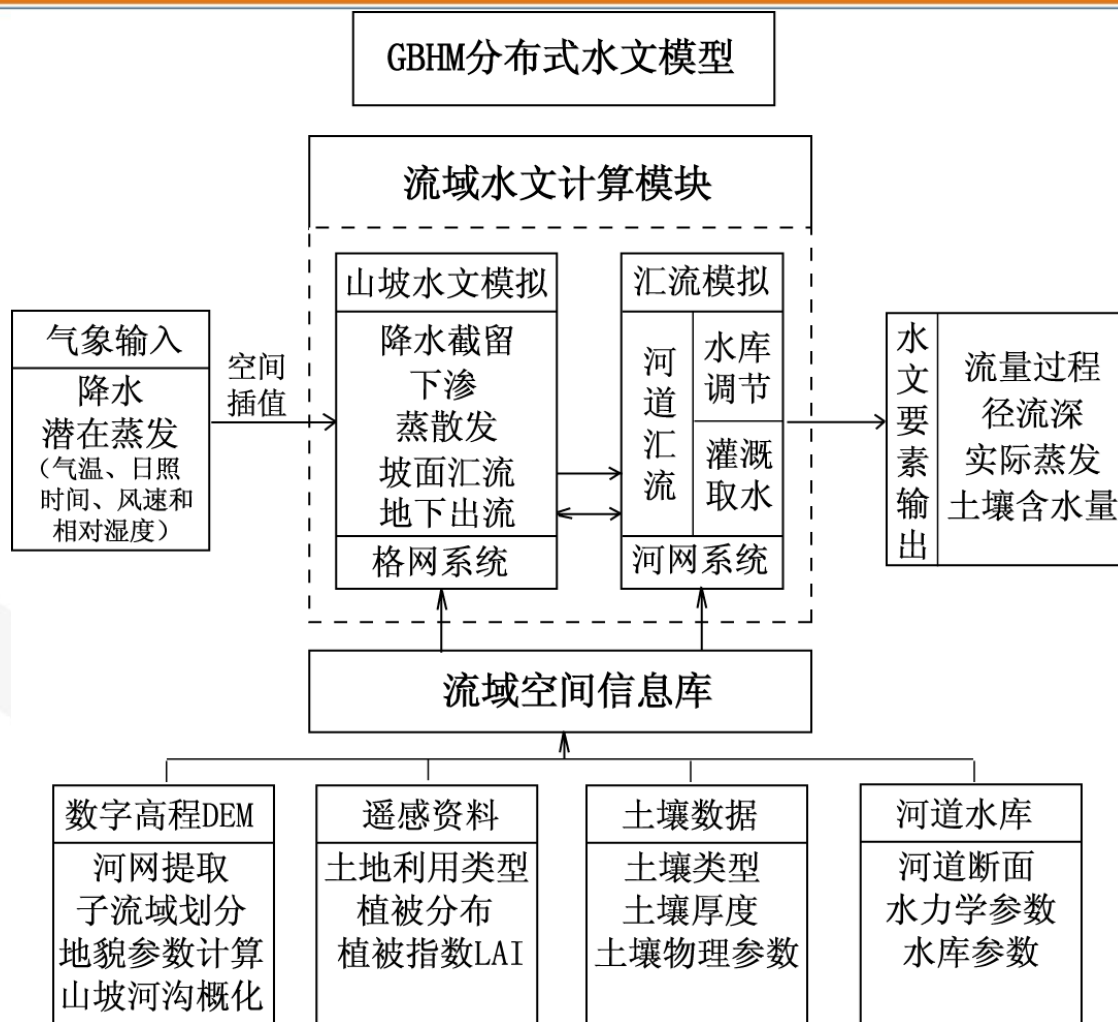
- (1) 美国加州理工学院戴维斯分校) 提供的流域模型列表<http://cwam.ucdavis.edu/models.htm>)
- (2) 得克萨斯农工大学提供的“水文建模清单”
(<http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>)
- (3) 美国地质调查局“水资源应用类”软件
(<http://water.usgs.gov/software/>)
- (4) “美国戈达德空间飞行中心全球变化主目录”网站提供的水文与陆地水循环模型

分布式水文模型结构



BPCC分布式水文模型结构（张超，2008）

分布式水文模型结构



GBHM分布式水文模型结构（许继军，2007）

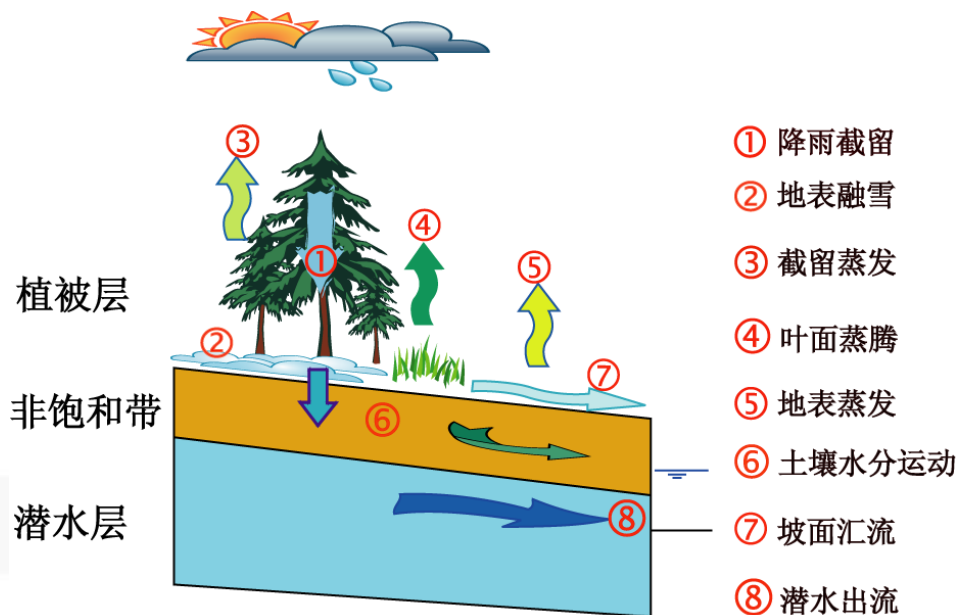
流域离散方法

流域离散方法有：

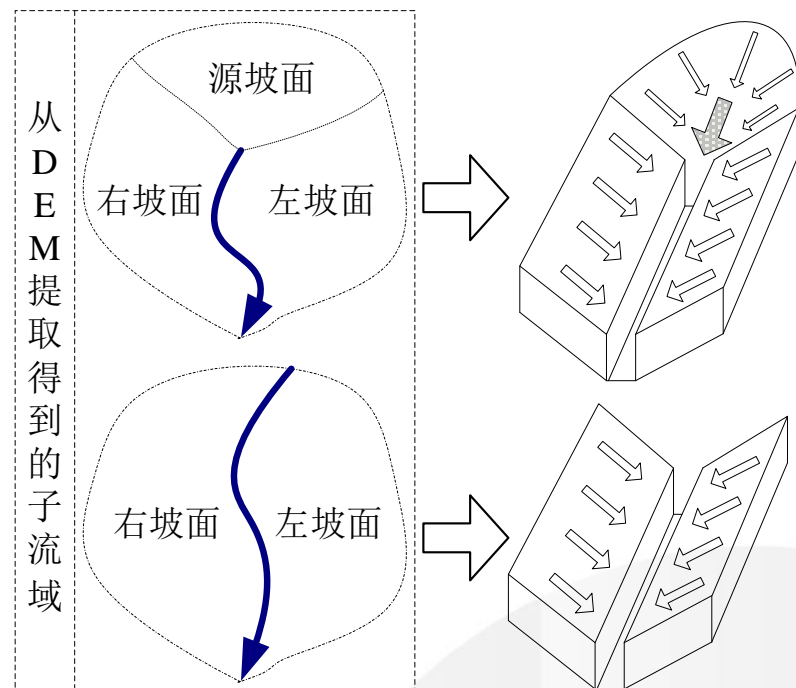
- 子流域 (subbasin)
- 山坡 (hillslope)
- 网格 (grid)
- 水文响应单元HRU (Hydrological Response Unit)
- 典型单元面积REA (Representative Elemental Area)
- 分组响应单元GRU (Grouped Response Unit)

其中子流域是模型所采用的最主要划分方法 (SWAT, GBHM, BPCC……)。

水文过程

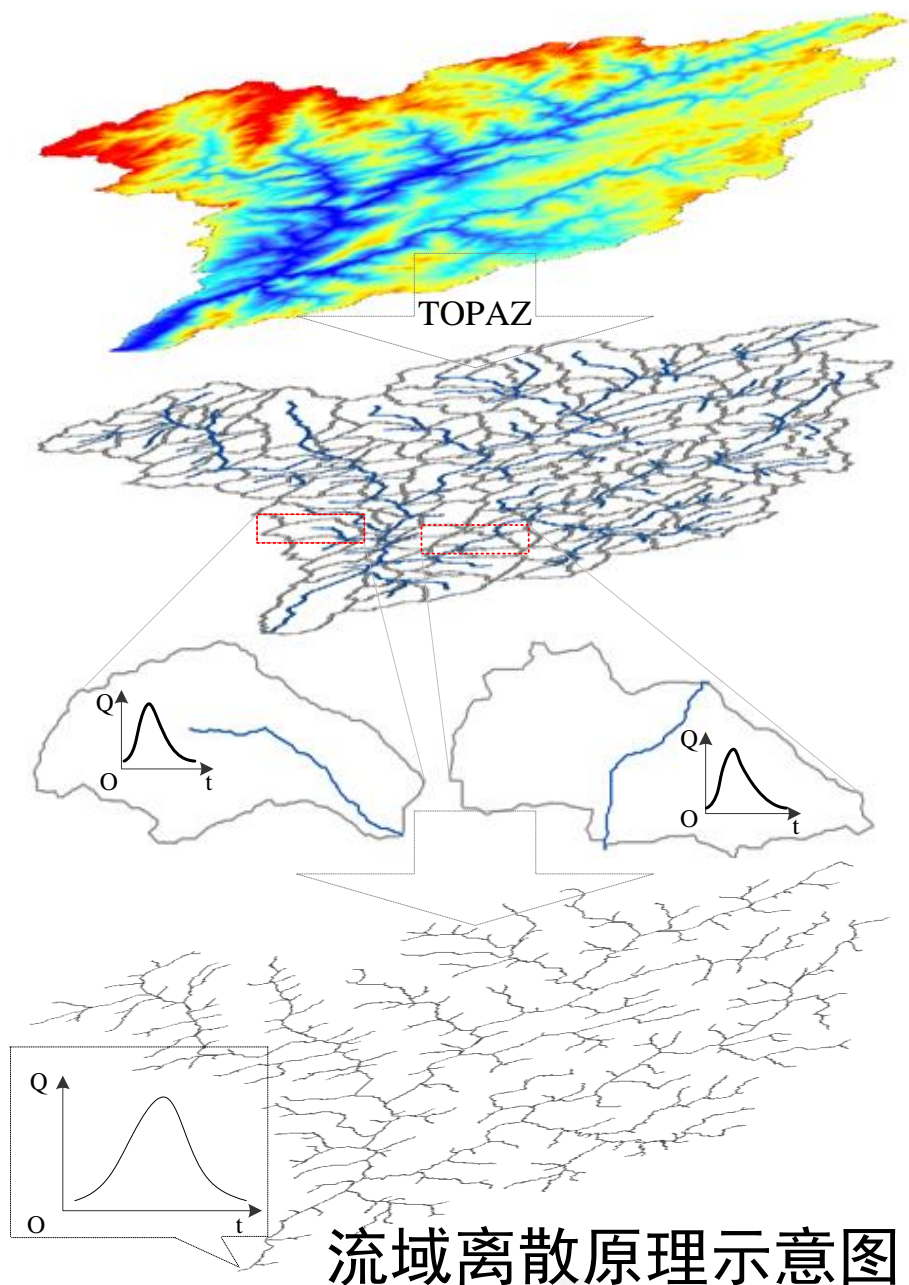


山坡单元水文过程（许继军，2007）

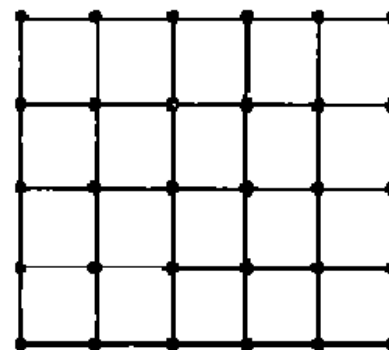


坡面单元概化（张超，2008）

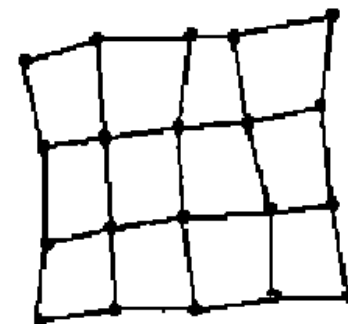
采用TOPAZ软件所划分DEM得到子流域，每个子流域内有唯一河段与其对应，且子流域进一步被划分为三个坡面：源（Source）、左（Left）和右（Right）作为基本水文单元，每个河段+坡面单元作为一个“元流域”（Meta Basin）进行产流模拟（[刘家宏，2005](#)）。



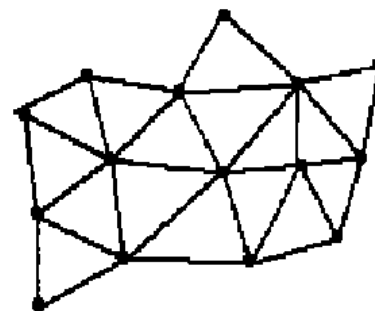
流域离散原理示意图



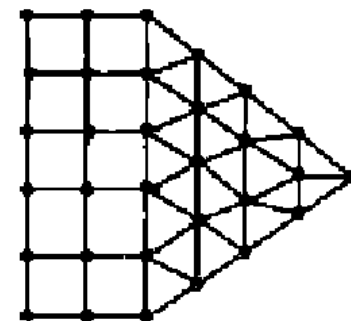
(a)



(b)



(c)



(d)

基于TIN离散的分布式水文模型

基于网格的流域离散方法有：

➤ 栅格法（GRID）

简单方便、不能很好反映流域水文过程的边界特征、难以实现流域水文过程的多尺度模拟

➤ 等高线法

可直接利用人工绘制的等高线图、数据结构复杂、存储量大、难以实施有效的数值算法

➤ 不规则三角形网格法（TIN）

高精度描述流域地形、广泛应用于偏微分方程的有限单元法和有限体积法求解、尚处于起步阶段

基于TIN离散的水文模型

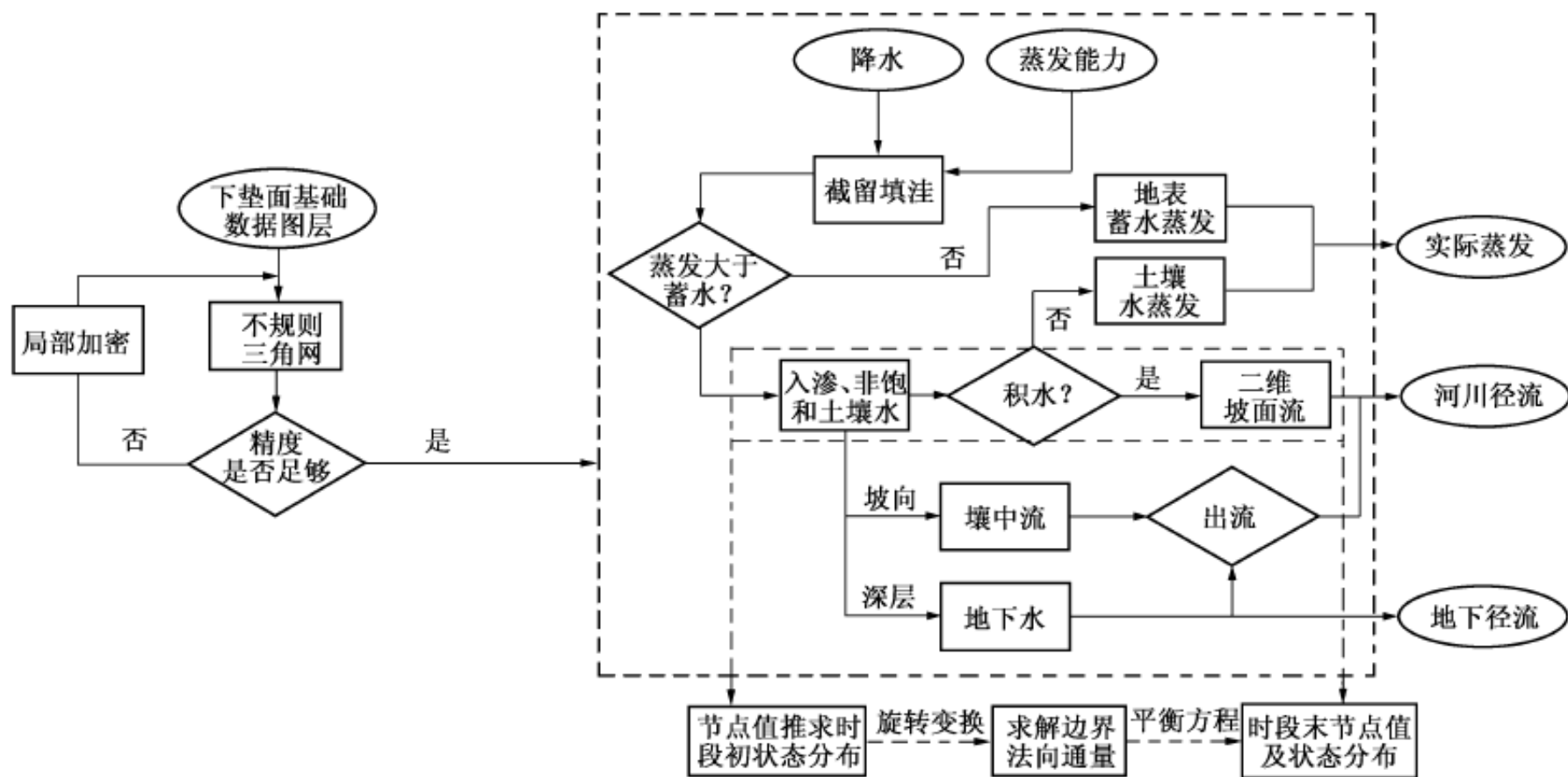
- BGIS (Tachikawa et al., 1996) 概念式水文模型
- tRIBS (Vivonier et al., 2005) 分布式水文模型

TIN-based Real-time Integrated Basin Simulator (tRIBS)
object-oriented C++ programs from the CHILD modeling
framework (Tucker et. al, 1999) Version 3.0

- PIHM (Qu and Duffy, 2007) 分布式水文模型

- ① Penn State Integrated Hydrologic Model ([PIHM](#))
- ② Multi-process, multi-scale hydrologic model
- ③ fully coupled using the semi-discrete finite volume method
- ④ "tightly-coupled" with QuantumGIS leads to [PIHMgis](#)
- ⑤ Domain discretization using an unstructured triangular mesh generated by [TRIANGLE](#)
- ⑥ Stiff ODE system solved by [CVODE](#) developed at the Lawrence- Livermore National Laboratory

PIHM模型在国内的应用

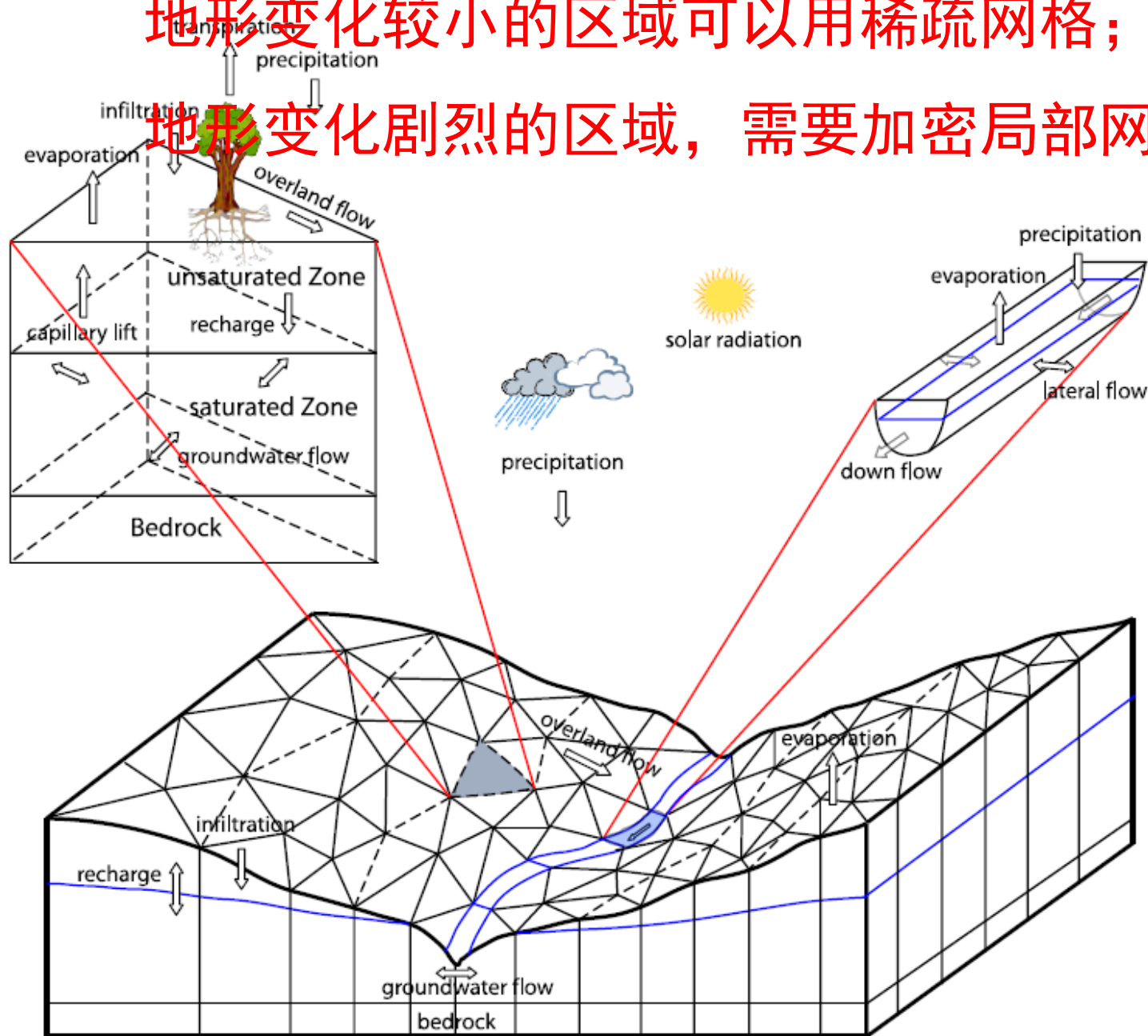


PIHM模型计算流程（王蕾，2010）

沁河流域孔家坡水文站以上流域，流域面积1352km²
 海拔高程1100~2000m SRTM DEM (90m)

地形变化较小的区域可以用稀疏网格；

地形变化剧烈的区域，需要加密局部网格



多物理过程分布式水文模拟系统

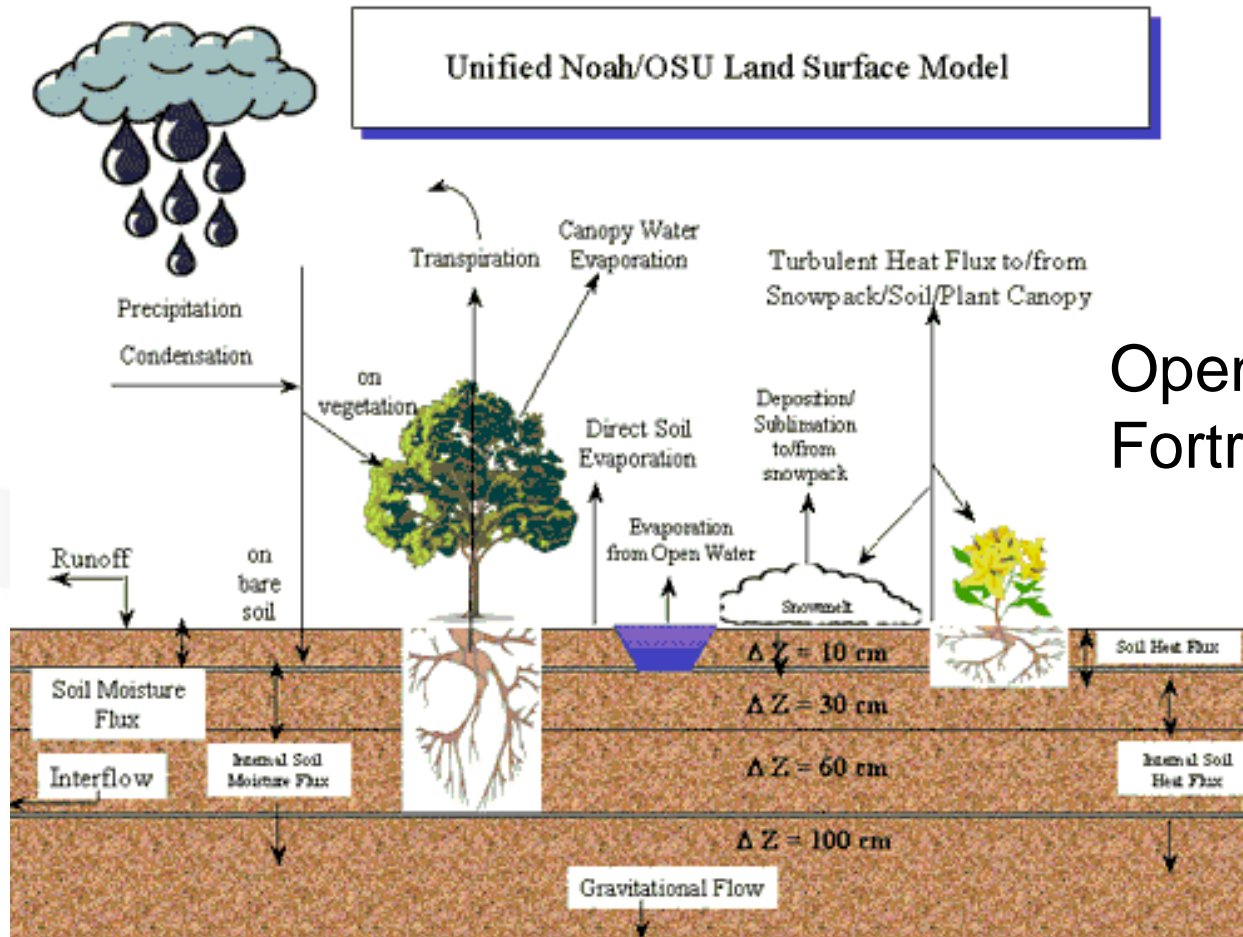
Process	Governing equation/model	Original governing equations	Semi-discrete form ODEs
Channel Routing	St. Venant Equation	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(wh)}{\partial x} = q$	$\left(\frac{dh}{dt} = P_c - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{\Delta x} + \left(\sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{\Delta x} - E_c \right) \right)_i$
Overland Flow	St. Venant Equation	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(wh)}{\partial x} + \frac{\partial(wh)}{\partial y} = q$	$\left(\frac{\partial h}{\partial t} = P_o - I - E_o - Q_{oc} + \sum_{j=1}^N Q_{ij} \right)_i$
Unsaturated Flow	Richard Equation	$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\psi) \nabla(\psi + Z))$	$\left(\frac{d\psi}{dt} = I - q^s - ET_s \right)_i$
Groundwater Flow	Richard Equation	$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\psi) \nabla(\psi + Z))$	$\left(\frac{d\psi}{dt} = q^s + \sum_{j=1}^N Q_{ij}^s - Q_i + Q_{sp} \right)_i$
Interception	Bucket Model	$\frac{dS_I}{dt} = P - E_I - P_o$	$\left(\frac{dS_I}{dt} = P - E_I - P_o \right)_i$
Snow melt	ISNOBAL	$\frac{dS_{snow}}{dt} = P - E_{snow} - \Delta w$	$\left(\frac{dS_{snow}}{dt} = P - E_{snow} - \Delta w \right)_i$
Evapotranspiration	Pennman-Monteith Method	$ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$	$\left(ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \right)_i$

与SELF水动力模型耦合

与NOAH_LSM模型耦合

与相对应的模块实现更复杂的模型耦合，但这需要更多的数据支持。

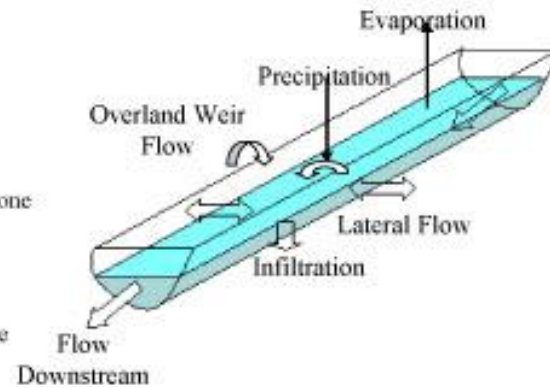
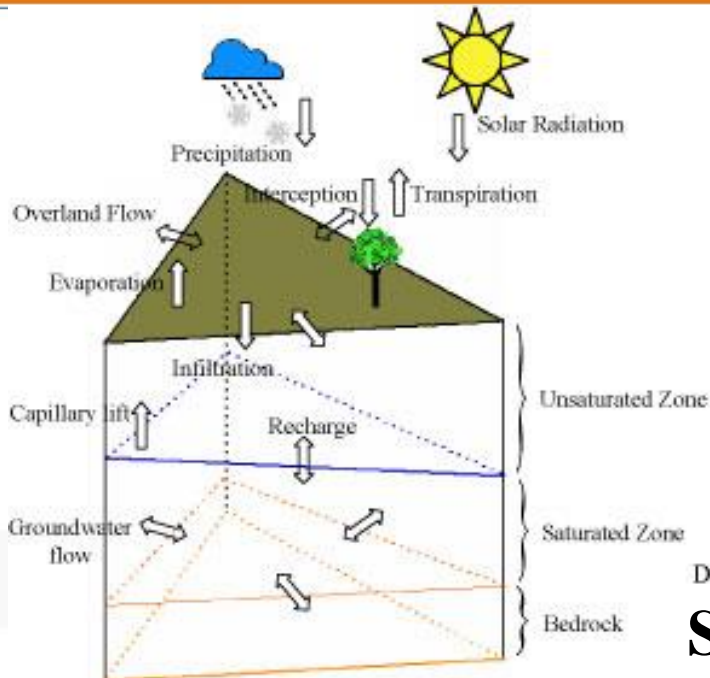
陆地表面模型 (Land Surface Model)



Open Source
Fortran code

NOAH_LSM模型示意图

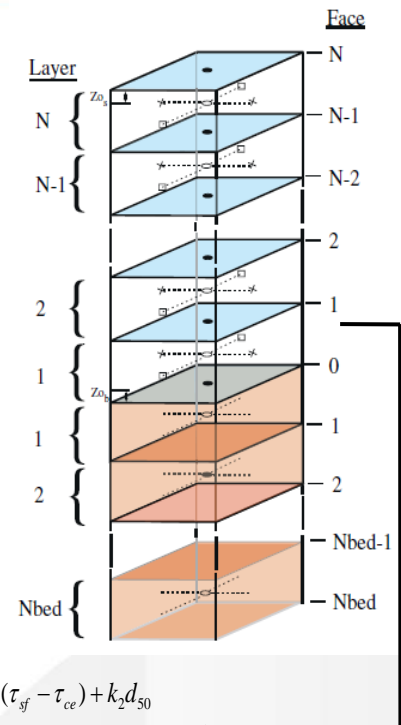
水文模型与水动力学模型的相似与不同



Saint Venant Equation

SELFE

CSTM



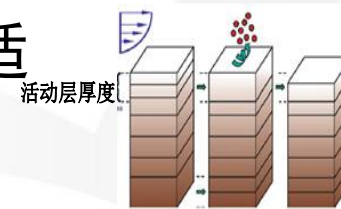
共同点:

三角网网格离散；有限体积法；质量守恒，适用于各种物理尺度

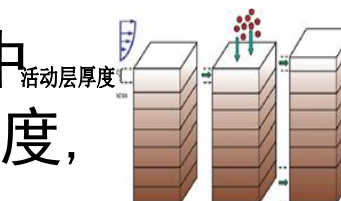
不同点:

单元边界水流通量项则体现了不同水流介质中的“本构关系”，是“尺度依赖”的，有限精度，理论上是模型结构误差的主要来源之一。

$$\text{活动层厚度 } z_a = k_1(\tau_{sf} - \tau_{ce}) + k_2 d_{s0}$$



冲刷 $\tau_{sf} > \tau_{ce}$
底层泥沙向上层移动，保持表层厚度至少为活动层厚度。底层泥沙进一步分层。冲刷只在表层发生。



淤积 $\tau_{sf} < \tau_{ce}$
如果淤积厚度大于用户定义的厚度，创建新的泥沙层。混合层至少为活动层厚度。

Thinking.....

三峡库区淹没，导致下垫面条件发生变化。

是否是：陆地表面与大气的热交换过程发生变化。

PIHM模型已经采用FORTRAN重新编写了，下一步的计划是与更复杂的NOAH_LSM（一个陆地表面模型，FORTRAN code）耦合。

是否可以用来研究三峡水库导致的局部陆地热量的变化？

PIHM模型的可扩展性很强，只要有常微分方程或经验公式，就能添加入模型的相应模块。

另外，整个模型都是在三角形网格上离散的，跟水动力学模型很相似，可以搜索最近位置等，把水系矢量化后，都可以在模型中计算，对航运的经济优化可能也有用？

参考文献

王蕾, 田富强, 胡和平. 基于不规则三角形网格和有限体积法的物理性流域水文模型. 水科学进展, 2011, 21(6): 733-741.

Development of a Coupled Land Surface Hydrologic Model and Evaluation at a Critical Zone Observatory

RT-Flux-PIHM: A Hydrogeochemical Model at the Watershed Scale

Resolving the High Resolution Soil Moisture Pattern at the Shale Hills Watershed Using a Land Surface Hydrologic Model