

第十届全国地理信息科学博士生学术论坛，
2022年12月17日-18日

基于坡位单元的流域优先控制区识别

吴彤

中国科学院地理科学与资源研究所
资源与环境信息系统国家重点实验室

2022年12月17日



目录

CONTENTS

- 01 研究背景与科学问题
- 02 基本思路
- 03 方法设计
- 04 案例研究
- 05 结论与展望

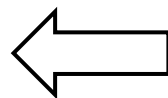
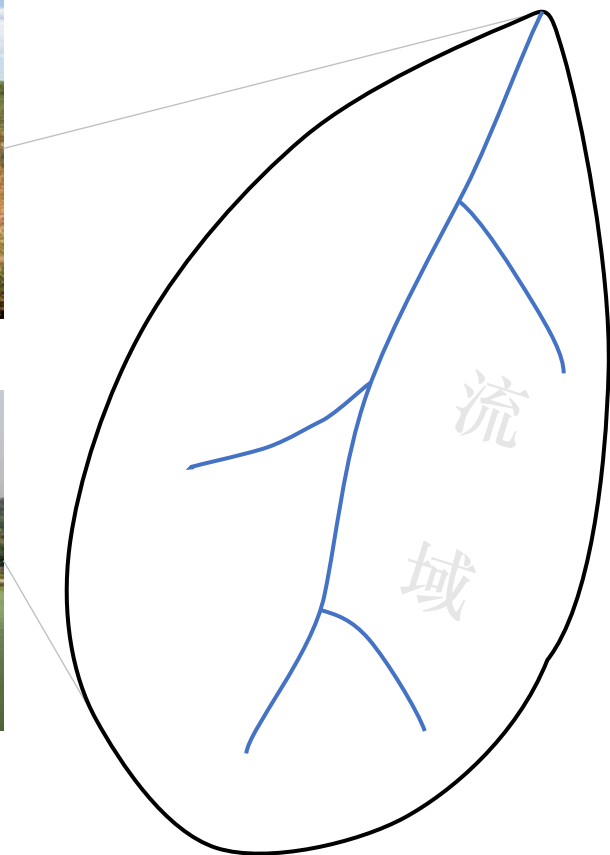
流域最佳管理措施

(Best / Beneficial Management Practices, BMPs)

有效控制流域土壤侵蚀、非点源污染等生态环境问题的一系列措施，包括工程措施和管理措施。



.....



优先控制区

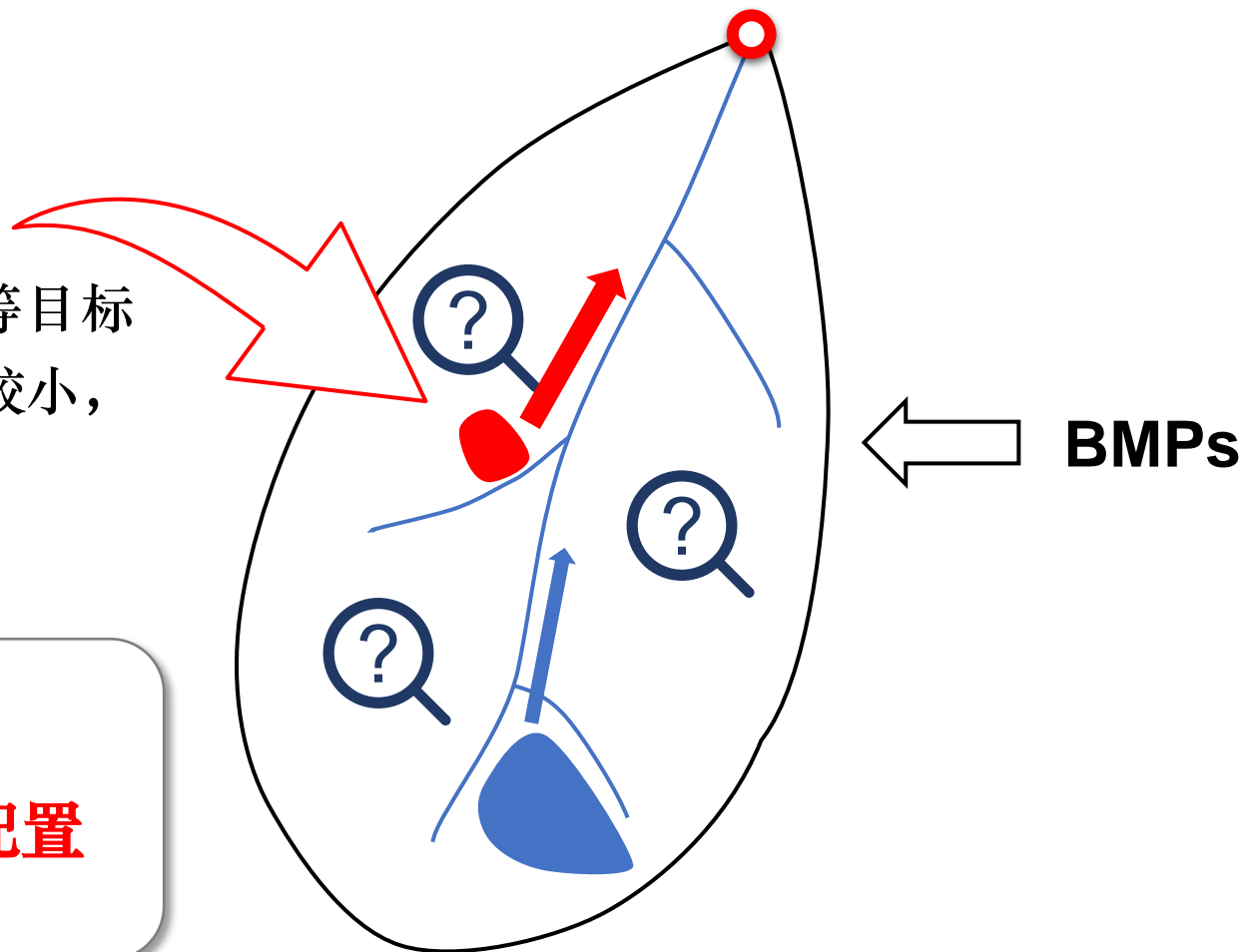
(Priority Management Areas, PMAs)

指为了达到流域环境治理和经济投入等目标要求**优先配置BMPs**的区域，一般面积较小，而对**流域出口的泥沙或污染物贡献较高**。

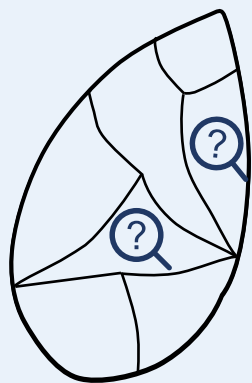
(Chen等, 2014; Dong等, 2018)

**PMAs的识别可促进
BMPs在流域中合理、高效的配置**

(Shen et al., 2015; Tian et al., 2020; Guo et al., 2022)



识别优先控制区通常基于流域过程模拟进行，其首要步骤是**确定适宜的空间单元（识别单元）**，以非点源污染为例，用于计算污染负荷的产生及其对流域出口的污染贡献



子流域（以及子流域组合）

(Chen等, 2014; Shang等, 2012)

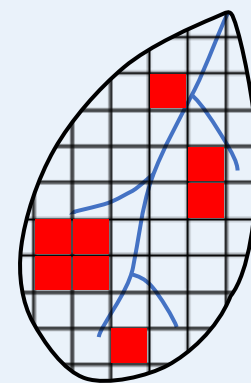
- ✓ 最常用、易获得
- ✗ 过于粗略，难以准确识别，可能遗漏一些污染严重的区域



人为地理实体（如圩区）

(Tian等, 2020)

- ✓ 可准确识别特定区域的PMA，如应用在平原湖网地区的圩区
- ✗ 缺乏通用性，难以推广



栅格

(Kovacs等, 2012)

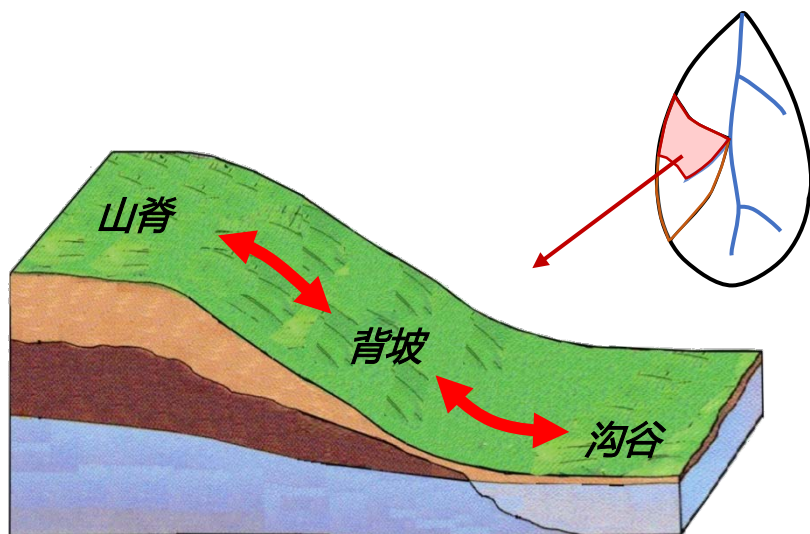
- ✓ 具有通用性，可提高识别准确性
- ✗ 过于破碎的识别结果将导致应用受限

**现有识别单元尚不能兼顾空间详略程度和通用性，
难以更有效地识别优先控制区**

以 **坡位单元** 作为识别单元

坡位是对坡面地形的综合体现，能够表达子流域内部坡面上的自然过程（Volk等，2007；Arnold 等，2010；Miller和Schaetzi，2015）。

坡位单元（如山脊、背坡、沟谷）是一种比子流域更加精细、且具备地形特征的离散化单元。



☑ 3个特点

- 1) 通过少量坡位单元即可体现子流域内部的空间异质性（Qin等，2018；Rathjens等，2016）
- 2) 坡位单元之间存在汇流关系（Arnold等，2010；Bieger等，2019；Rathjens等，2015）
- 3) 坡位单元具有通用性，适用于大多数地理环境（Wolock等，2004）

以 **坡位单元** 作为识别单元

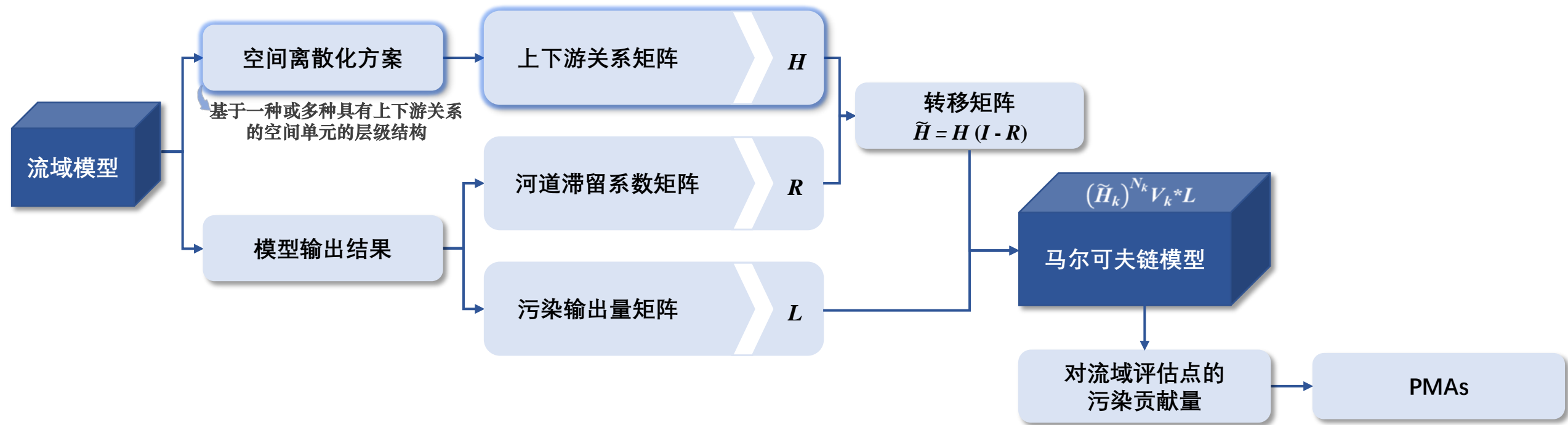
⊕ 2个关键问题

1) 如何量化坡位单元上排放的污染?

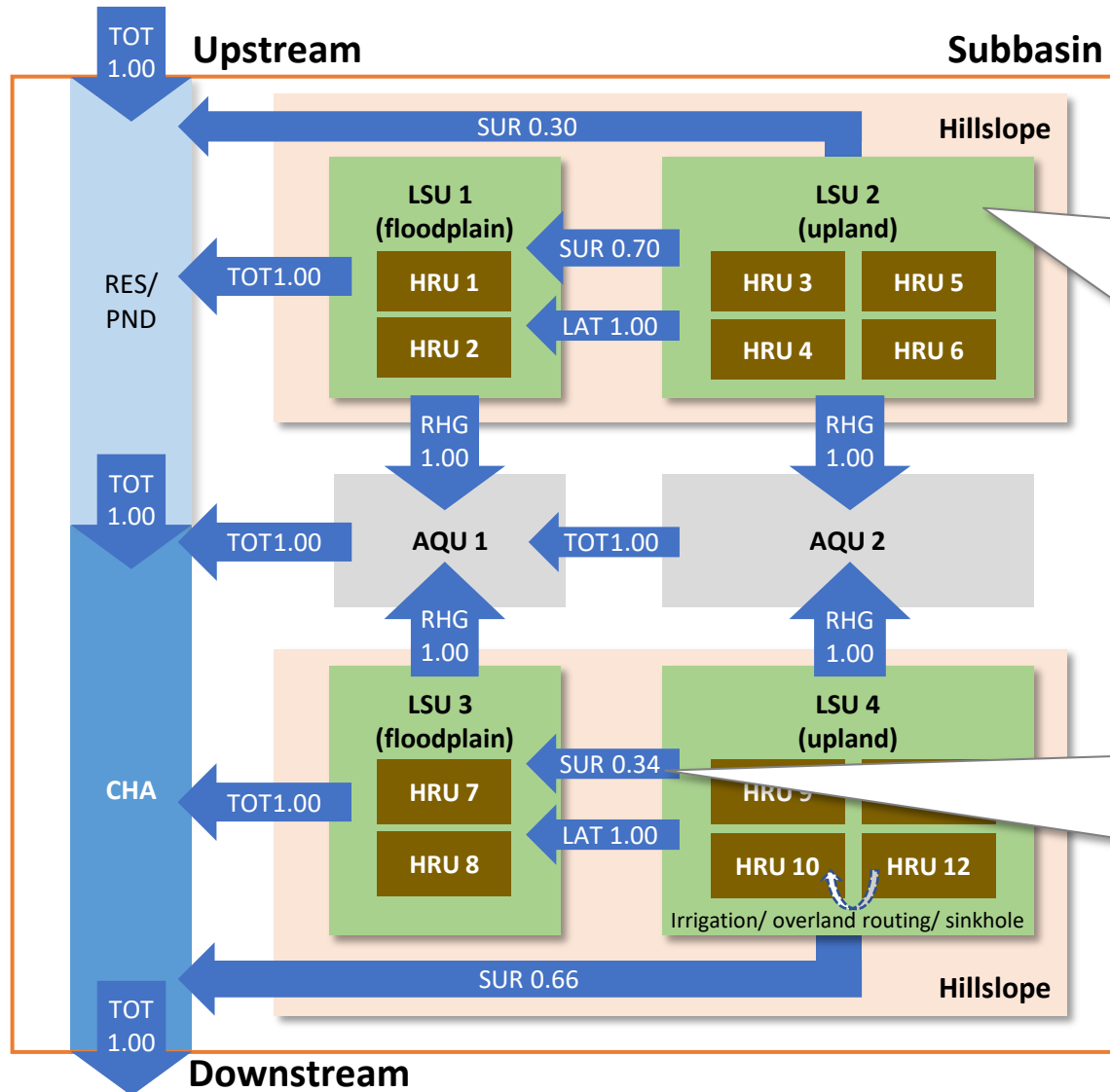
- 选择支持坡位单元作为模拟单元/集总单元的流域模型
- 大多数流域模型并不能直接输出污染贡献量

2) 如何确定坡位单元对流域出口的污染贡献?

- 基于马尔科夫链的替代模型能够以统计的方式模拟污染物从上游到流域出口的迁移过程，从而推导出对出口的污染贡献，但目前方法仅在子流域层次上进行应用(Grimvall和Stålnacke, 1996; Chen等, 2014; Rankinen等, 2016)，需要在坡位单元层次上进行改进



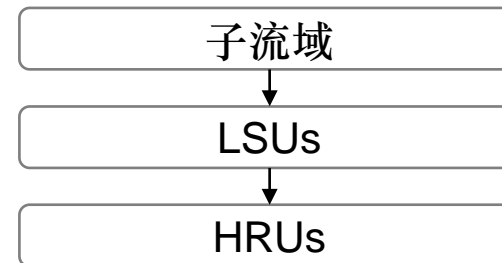
该方法框架支持子流域、坡位单元等具有水文连通性（即上下游关系）的空间单元作为PMA的识别单元



SWAT+模型空间离散化方案及空间单元间水文连通关系示意图

地表径流=SUR 壤中流=LAT 地下水=RHG 所有产流=TOT

1、坡位单元的划分

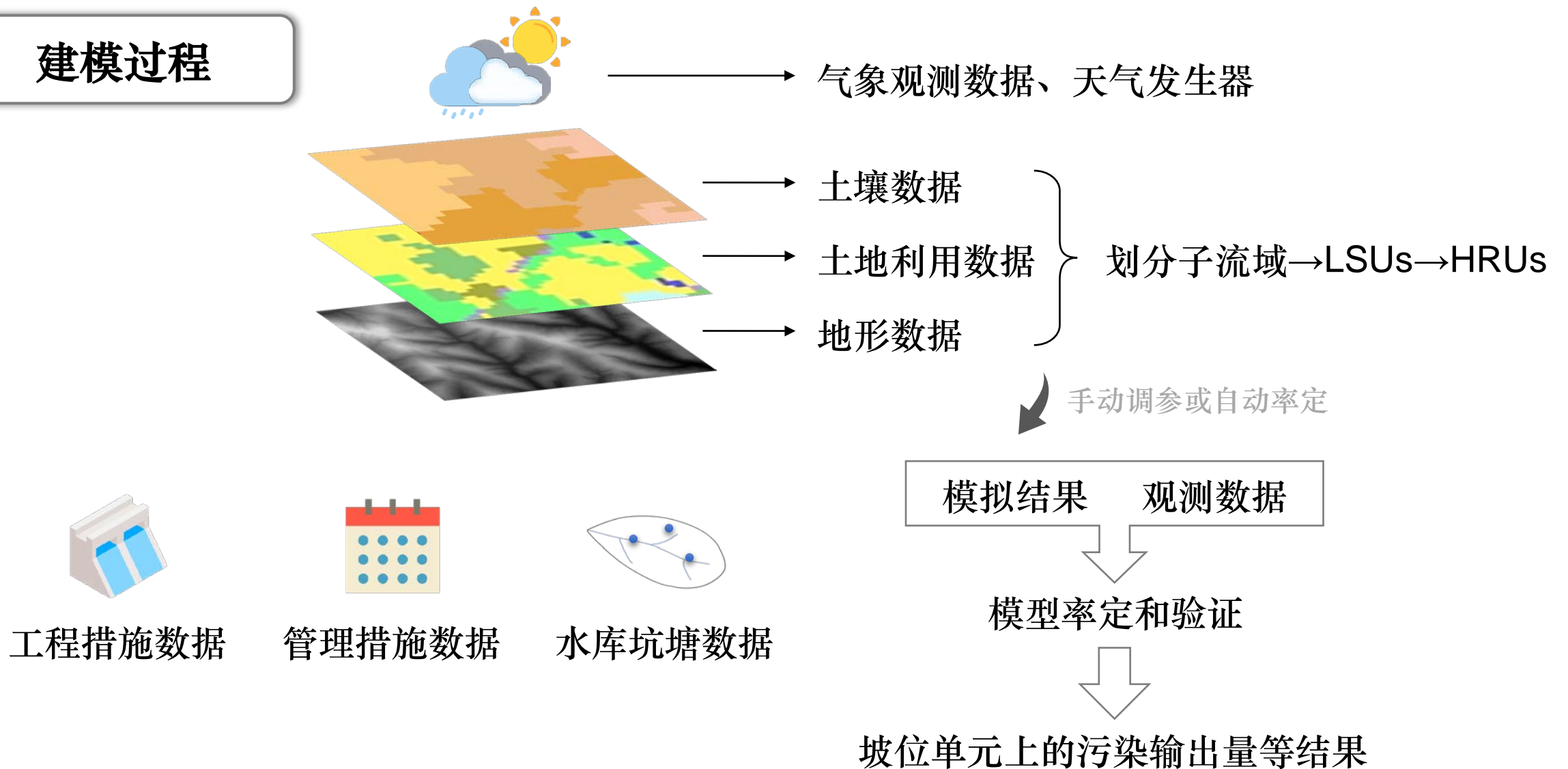


LSUs包括坡地 (Upslope) 和洪泛区 (Floodplain) , 即坡位单元

2、上下游关系的表达

- 1) LSU产生的地表径流依据分配比例流向下游LSU、河道或水库等对象
- 2) LSU产生的壤中流、地下水完全流向下游LSU、河道或水库等对象

建模过程



基于马尔科夫链模型计算污染贡献量

(Grimvall和Stalnacke, 1996; Chen等, 2014)

马尔科夫链是一种具有**马尔科夫性质**的离散空间（时间）的随机过程

马尔科夫性质：某一过程的未来状态只取决于当前状态，而与其历史状态无关。



流域非点源污染在具有上下游关系的汇水单元之间
迁移扩散的过程

基于马尔科夫链模型计算污染贡献量

(1) 构建流域上下游关系矩阵

(2) 计算污染物在汇流网络中的转移矩阵

(3) 计算污染贡献量

假设 n 为汇水单元的个数, W_1, W_2, \dots, W_n 分别代表第1、2、...、 n 个汇水单元:

$$H(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{当 } W_j \text{ 和 } W_i \text{ 直接相连, 且 } W_i \text{ 为 } W_j \text{ 紧邻上游汇水单元} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

令 $H^N = 0$ 的最小整数 N 是整个流域的汇流层数, 即 **汇流网络** 中从源头到流域出口的**最多汇流次数**。



基于马尔科夫链模型计算污染贡献量

- (1) 构建流域上下游关系矩阵
- (2) 计算污染物在汇流网络中的转移矩阵
- (3) 计算污染贡献量

计算污染物在汇流网络中的转移矩阵为：

$$Y = H (I - R)$$

根据流域过程模型输出的河道及汇水单元相关数据，可得到：

① 污染物输出量矩阵： $E = (e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n)^T$

式中 e_i 代表汇水单元 i 的污染物输出量。

② 滞留系数矩阵： $R = \begin{pmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_n \end{pmatrix}$

式中 r_i 代表滞留系数，量化了汇水单元对流入污染物的滞留效应。

$$r_i = (\text{Load}_{\text{in}} - \text{Load}_{\text{out}}) / \text{Load}_{\text{in}}$$

式中 Load_{out} 为汇水单元 i 的河道出口断面污染负荷量； Load_{in} 为汇水单元 i 的河道入口断面污染负荷量。

基于马尔科夫链模型计算污染贡献量

(1) 构建流域上下游关系矩阵

(2) 计算污染物在汇流网络中的转移矩阵

(3) 计算污染贡献量

假设流域共有 m 个评估点， k 表示评估点所在汇水单元的编号，则评估点矩阵可表示为：

$$K = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m)$$

根据下述公式，可计算出各汇水单元对不同评估点的污染贡献量 Z ：

$$Y_k(i, j) = \begin{cases} Y_k(i, j), & \text{if } i \neq k \\ 1, & \text{if } i = j = k \\ 0, & \text{if } i = k \text{ 和 } j \neq k \end{cases} \quad V_k(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } i = k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Z = (Y_k)^N V_k \cdot E$$

基于马尔科夫链模型计算污染贡献量



```
graph TD; A[基于马尔科夫链模型计算污染贡献量] --> B[基于污染贡献量识别PMAs]
```

基于污染贡献量识别PMAs

使用统计方法对污染贡献量进行分级，如自然断点法、均值-均方差法等，最后根据分级结果划分出PMAs。

➤ **有效性评估：坡位单元 vs 子流域单元的对比实验**

使用经过率定的同一个SWAT+模型，在坡位单元尺度和子流域尺度下识别总氮污染的优先控制区

➤ **适用性评估：在两个地理特征条件不同的流域进行应用**

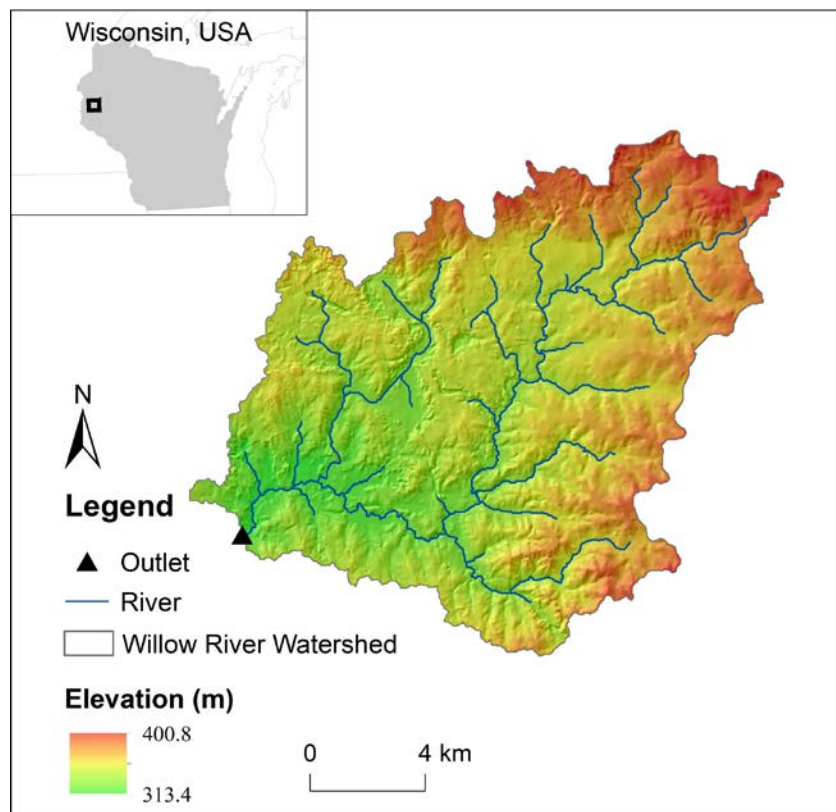
中田舍流域 (~42 km²) 和柳河流域 (~212 km²)

不同的地形、气候、水文和生态条件，导致污染物产生、迁移和转化过程具有差异性

江苏省溧阳市中田舍流域

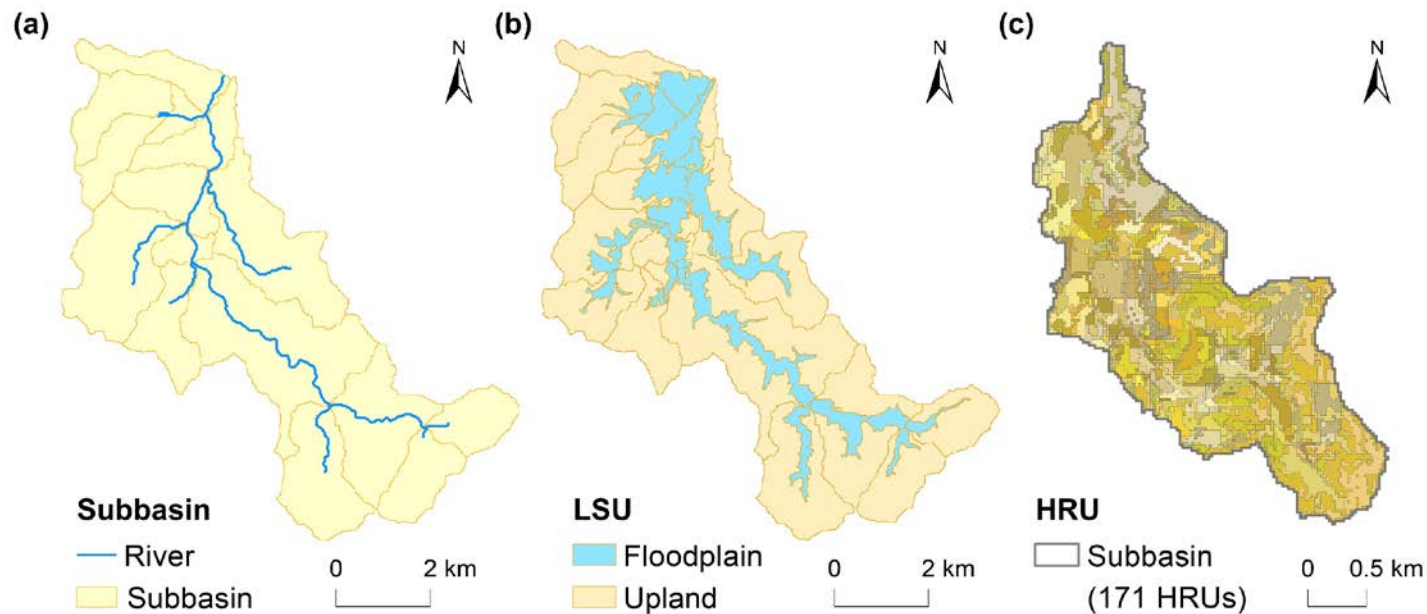
- 位于太湖流域上游的低山丘陵小流域
- 溧阳市天目湖饮用水水源地上游
- 流域总面积：**42 km²**
- 亚热带季风气候
 - 年平均温度：15.5 °C
 - 年平均降水量：1160 mm
- 土地利用类型主要是：林地(77%)、农田(10%)
- 当地居民主要从事农业生产，农作物以水稻、小麦、油菜为主

美国威斯康星州柳河流域



- 柳河州立公园的水源地
- 相对平坦，位于 Central Wisconsin Undulating Till Plain (EPA, 2020)
- 流域总面积：**212 km²**
- 大陆性气候
年平均温度：11.8 °C
年平均降水量：788 mm
- 土地利用类型主要是：草地(45%)、林地(27%)、农田(18%)
- 农作物以青贮玉米、大豆、苜蓿为主

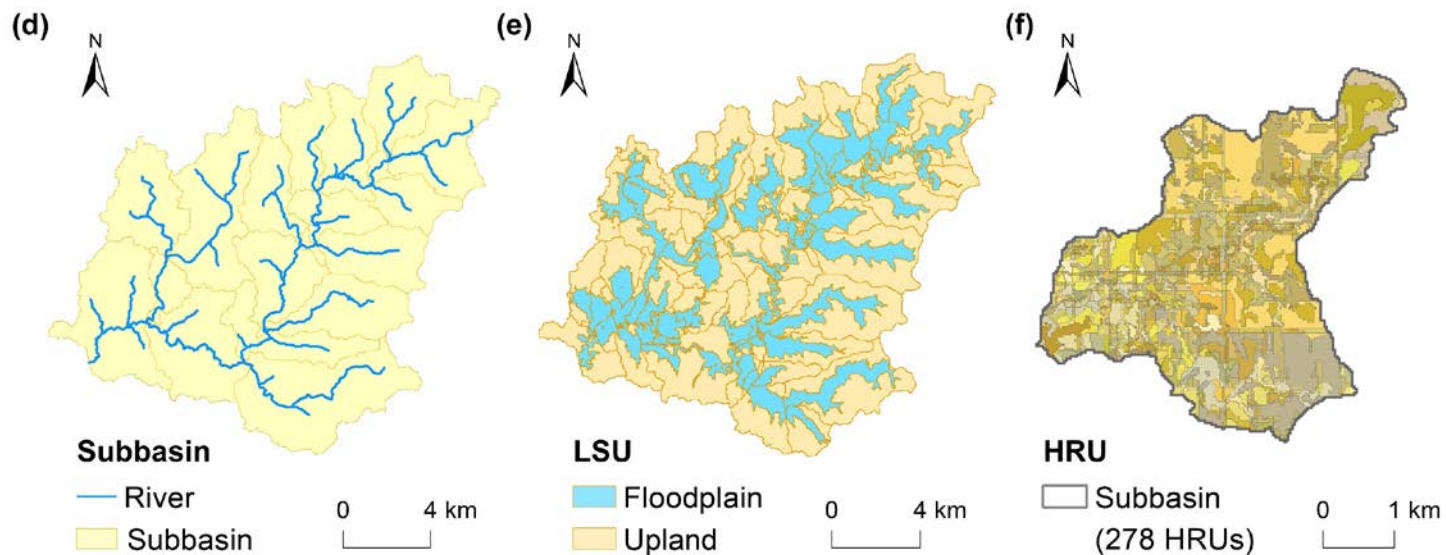
	中田舍流域	柳河流域
DEM	25 m (江苏省基础地理信息中心)	30 m (USGS)
土地利用	25 m (2015年Google Earth遥感影像目视解译)	30 m (NLCD, 2011 Edition)
土壤	土壤类型图及理化性质 (中国土壤科学数据库)	土壤类型图及理化性质 (SSURGO)
气象数据	2011-2015年逐日降水、气温、太阳辐射、风速等数据 (溧阳气象站、中国气象数据网)	2008-2014年逐日降水、气温、太阳辐射、风速等数据 (CFSR)
农业管理数据	实地调查作物种类、耕种时间、施肥方式等	作物轮作方式、耕种措施、施肥方式等 (Almendinger and Murphy, 2007)
水文观测数据	2011-2015年逐日径流观测数据 2014-2015年时间间隔5d的总氮观测数据	2010年10月1日-2014年7月31日逐日径流、氨氮、有机氮观测数据 (USGS)

**中田舍流域**

15个子流域

41个坡位单元

1260个HRUs

**柳河流域**

19个子流域

131个坡位单元

7245个HRUs

			NSE	PBIAS	RSR	R ²
中田舍流域	率定期	径流	0.48	13.36%	0.72	0.52
		氮	0.27	-16.57%	0.86	0.40
	验证期	径流	0.52	12.55%	0.69	0.59
		氮	—	—	—	—
柳河流域	率定期	径流	0.48	-28.82%	0.72	0.51
		氮	0.37	3.97%	0.79	0.39
	验证期	径流	0.34	-58.16%	0.81	0.47
		氮	0.25	-128.73%	0.87	0.54

NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency **PBIAS**: Percent BIAS
RSR: root mean square error-standard deviation ratio

中田舍流域

- 模型预热期为1年
- 率定期：2012-2013年
- 验证期：2014-2015年
- 由于总氮观测值较少，不设置验证期

柳河流域

- 模型预热期为2年
- 率定期：2012年1月1日至2014年7月31日
- 验证期：2010年10月1日至2011年12月31日
- 由于氮的观测数据仅有氨氮和有机氮，因此使用这两项进行氮的率定和验证

(1) 基于马尔科夫链模型计算总氮贡献量

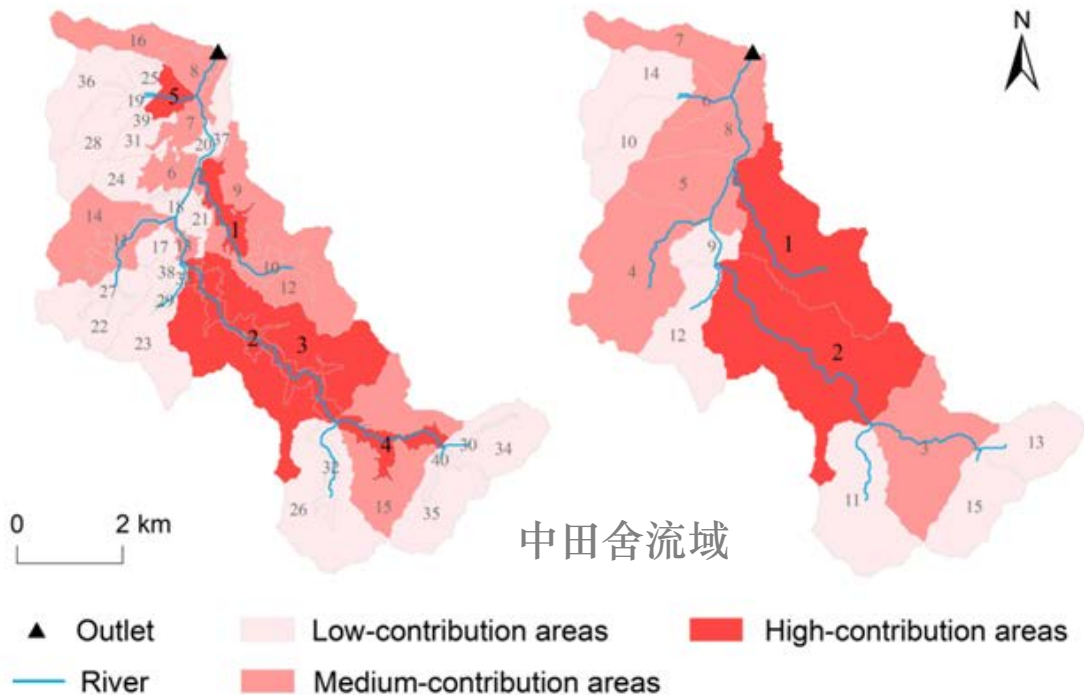
- 根据SWAT+中水流分配的对象关系及比例，分别构建子流域单元（由河道体现）上下游关系矩阵和坡位单元上下游关系矩阵；
- 采用率定期的年平均总氮输出结果进行计算，获得两个层次上的总氮输出量矩阵和河道滞留系数矩阵；
- 将流域出口设置为评估点，计算两个层次上各单元经过河道作用后最终贡献给流域出口的量。

(2) 根据总氮贡献量的分级结果识别优先控制区

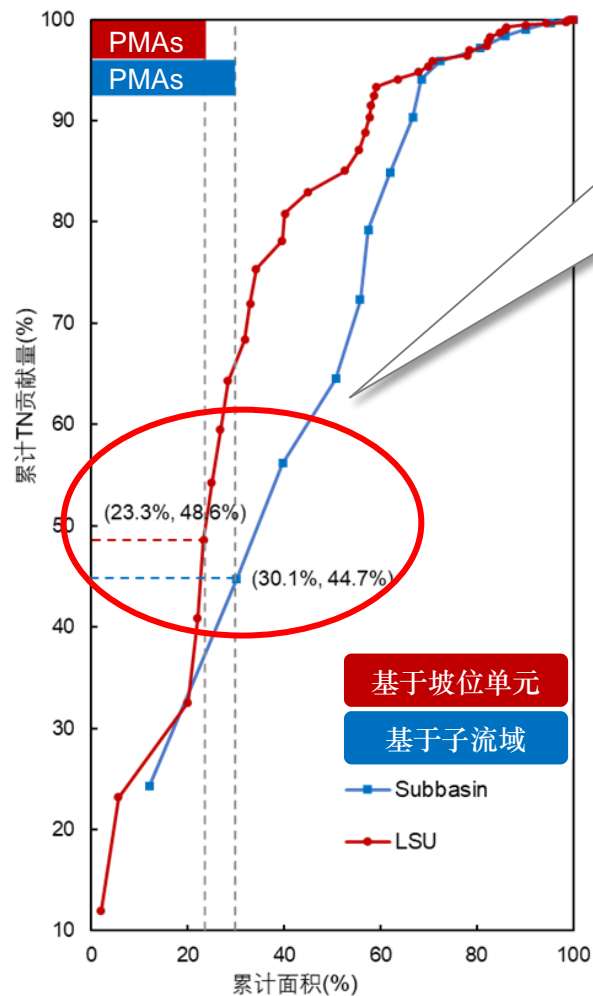
采用自然断点法划分低、中、高贡献量区，本研究中高贡献量区被识别为PMAs。

a) 基于坡位单元

b) 基于子流域



- 基于坡位单元识别的PMAs: 数量多, 面积小。
- 在空间分布上更加精细、准确, 有利于后续BMP的配置。



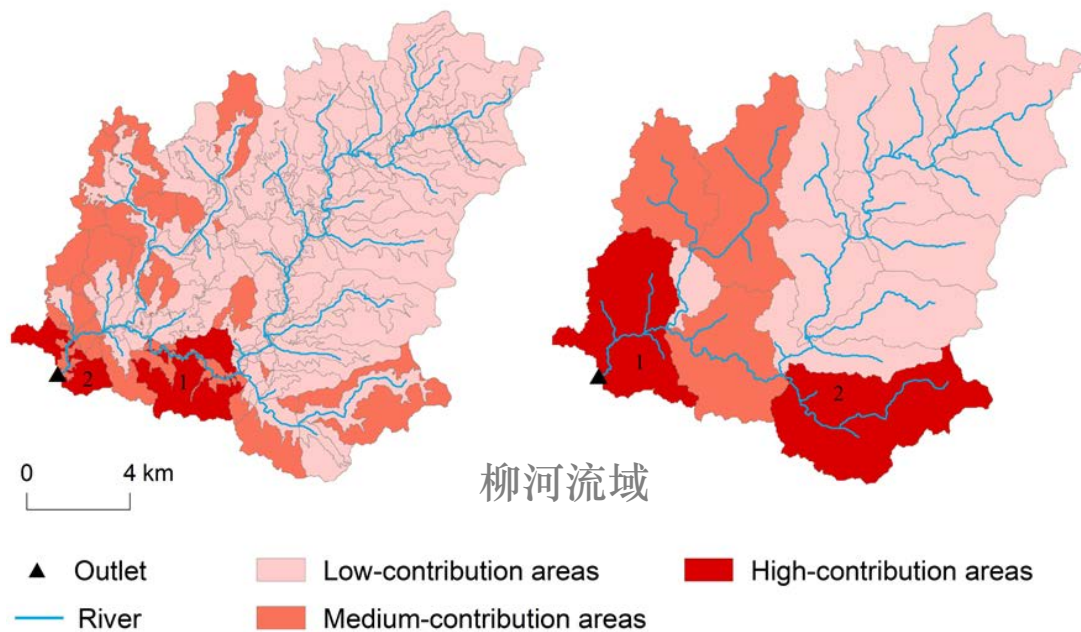
基于坡位单元识别的PMAs占流域总面积的23.3%，对流域出口贡献了48.6%的总氮负荷；

基于子流域识别的PMAs占流域总面积多达30.1%，却仅贡献了44.7%的总氮负荷。

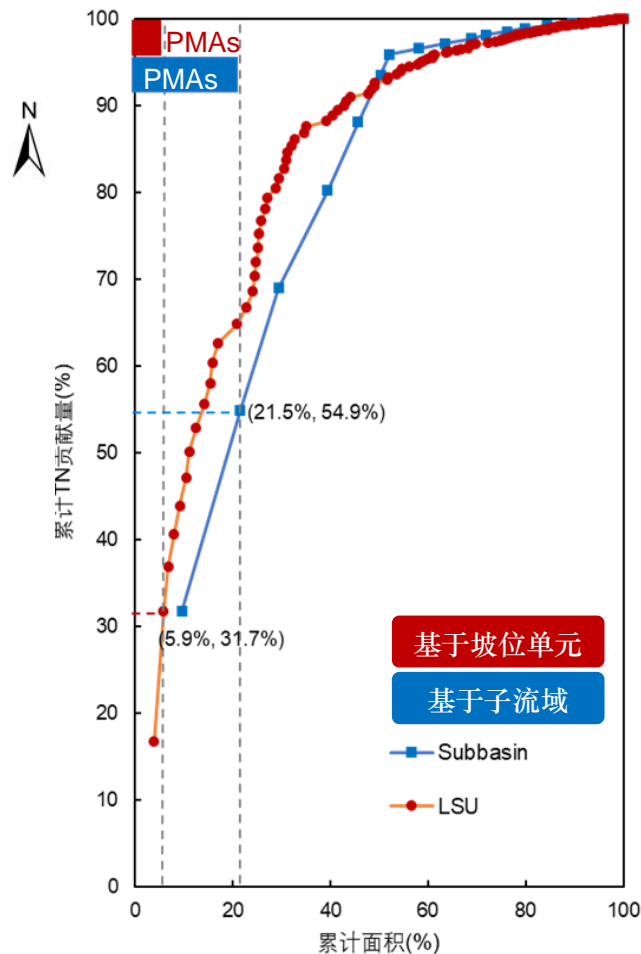
- 基于坡位单元的PMA识别结果：**总面积小，污染贡献量大**
- 坡位单元的“累计面积-贡献量”折线几乎始终高于子流域。
- 基于坡位单元的识别方法更加有效，对污染关键位置的识别能力更强，有利于提高非点源污染控制效率，降低污染治理难度。

a) 基于坡位单元

b) 基于子流域



- 基于坡位单元识别的PMAs: 数量多, 面积小。
- 在空间分布上更加精细、准确, 有利于后续BMP的配置。



- 基于坡位单元的PMA识别结果: 总面积小, 污染贡献量大
- 坡位单元的“累计面积-贡献量”折线几乎始终高于子流域。
- 基于坡位单元的识别方法更加有效, 对污染关键位置的识别能力更强, 有利于提高非点源污染控制效率, 降低污染治理难度。

现有识别单元尚不能兼顾空间详略程度和通用性，难以更有效地识别优先控制区

■ 提出将坡位单元作为流域优先控制区的识别单元

实验结果表明，基于坡位单元识别PMAs比基于子流域的识别更有效，可提供更准确的BMP配置位置，提高投资效益。

■ 归纳完善了一套支持具有上下游关系的空间单元作为识别单元的优先控制区识别方法框架，并基于SWAT+模型进行实现（亦可替换为其他满足要求的流域模型）

□ 展望：

- 1) 如何更好地量化坡位单元与河道之间的水文连通性以及其对PMA识别的影响？
- 2) 基于不同识别单元获得的PMA如何影响BMP空间配置的效果？



第十届全国地理信息科学博士生学术论坛，
2022年12月17日-18日

谢谢！ 敬请批评指正！

吴彤

wut@lreis.ac.cn