

## 黄土高原小流域分布式水蚀预报模型

贾媛媛<sup>1,2,3</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 杨勤科<sup>2</sup>

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;  
2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 本文基于黄土高原丘陵沟壑区小流域地形复杂、径流与侵蚀产沙具有明显垂直分带性的特点, 以栅格DEM(Digital Elevation Model)为基础, 提出由水文模块和侵蚀模块两部分组成的黄土高原小流域分布式水蚀预报模型。水文模块包括降雨、截留、微地形表面存储、入渗、地表径流和沟道流过程, 采用运动波方程实现汇流演算; 侵蚀模块考虑雨滴击溅分离、坡面薄层水流、细沟水流、浅沟水流和沟道流剥离与沉积等基本过程, 运用泥沙物质平衡原理完成泥沙输移计算。应用模型对次降雨事件模拟的初步结果表明, 模型对中度以上侵蚀性降雨事件的模拟精度在85%以上。

**关键词:** 水蚀过程; 预报模型; 分布式; 地理信息系统; 小流域; 黄土高原

**中图分类号:** S157 **文献标识码:** A

小流域作为完整的径流形成、汇集和侵蚀、产沙、输沙系统, 是进行水土流失综合治理的基本单元。近50年来小流域土壤侵蚀预报模型研发一直是世界土壤侵蚀研究的前沿领域, 也是水土保持工作者关注的焦点之一。随着对土壤侵蚀过程及其机理认识的不断深入, 国内外学者进行了大量研究, 并建立了具有一定物理基础的小流域土壤侵蚀预报模型。目前国际上较成熟的小流域侵蚀预报模型主要有水蚀预报模型(WEPP)(流域版)<sup>[1]</sup>、欧洲土壤侵蚀模型(EUROSEM)<sup>[2]</sup>和荷兰侵蚀模型(LISEM)<sup>[3]</sup>等。

黄土高原地面切割破碎, 地形陡峻, 大部分地区坡度在15°以上, 沟蚀和重力侵蚀活跃并对河流泥沙贡献大, 是我国也是全球土壤侵蚀最强烈地区之一。同时该地区小流域产流产沙具有汇流时间短、径流含沙量高及侵蚀产沙量大的特点。而国外模型对侵蚀物理过程描述相对简单, 如侵蚀过程仅涉及细沟间侵蚀和细沟侵蚀, 尚未考虑沟蚀和重力侵蚀对流域侵蚀产沙的贡献; 再者, 国外模型仅适用于缓坡(坡度<10°)地形。因此, 这些模型在我国黄土高原地区应用具有很大局限性。另一方面, 在我国, 由于小流域水蚀过程定量研究的不足和流域水沙汇集传递关系分析技术和方法的缺乏, 导致至今尚未建立能模拟小流域水土流失时空分布的预报模型。因此, 立足我国黄土高原地区侵蚀环境特点, 建立适用于该地区的小流域分布式水蚀预报模型具有重要理论和实践意义。

## 1 建立黄土高原小流域分布式水蚀预报模型基本思路

黄土高原小流域分布式水蚀预报模型在空间尺度上以栅格数字高程模型(DEM)为基础, 将流域划分为若干单元, 各单元以一组参数表示该单元各种特殊地表下垫面状况, 并以此作为流域侵蚀产沙基本计算单元。在时间尺度上则将整个降雨过程分时段加以描述, 对每个单元以时间步长为单位分过程分别进行模拟。

收稿日期: 2003-12-15

资助项目: 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-422); 国家自然科学基金重点项目(40335050); 农业部948项目(2003-Z57)

作者简介: 贾媛媛(1979-), 女, 河南人, 硕士生, 研究方向为土壤侵蚀过程与预报。

然后,使用运动波连续方程结合水流路径图演算小流域汇流,运用泥沙量物质平衡原理模拟汇沙,从而得到不同降雨时段下各单元及流域侵蚀产沙量。模型在GIS软件支持下,基于DEM数据提取坡度、坡向、流域水沙运移路径、流域边界等模型特征参数信息,同时读取多种格式(图件、ASCII文件等)数据,通过GIS算法语言模拟黄土高原小流域土壤侵蚀过程,并以图、表等形式对预报结果进行可视化表达。对于每个模拟时间步长使用GIS动态循环算法,通过扣除侵蚀量或加上沉积量不断更新DEM,水沙运移路径随降雨及侵蚀过程动态变化,从而实现小流域侵蚀过程时空演变模拟。

## 2 黄土高原小流域分布式水蚀预报模型结构

黄土高原小流域分布式水蚀预报模型根据黄土高原小流域复杂地形和侵蚀产沙垂直分带性规律,对黄土高原小流域土壤侵蚀过程进行动态模拟。从水蚀过程来看,降雨经林冠截留落到地面,雨滴对地表打击将土壤分散,堵塞土壤孔隙,形成超渗径流或当降雨强度超过土壤入渗能力形成径流,其流路和流量由地形、蒸发蒸腾、微地形存储、入渗损失而定。一般在暴雨过程中,蒸发蒸腾量很小,可以忽略不计。地表径流形成后水流沿流路汇集并流向流域出口,在此过程中,随着径流量的增加,径流对地表土壤剥离程度发生变化,从分水岭开始沿流线方向依次产生片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀并伴随重力侵蚀。模型考虑了次降雨事件过程中小流域侵蚀产沙全过程,包括计算产汇流过程的水文模块和模拟侵蚀产沙的侵蚀模块两部分,如图1所示。

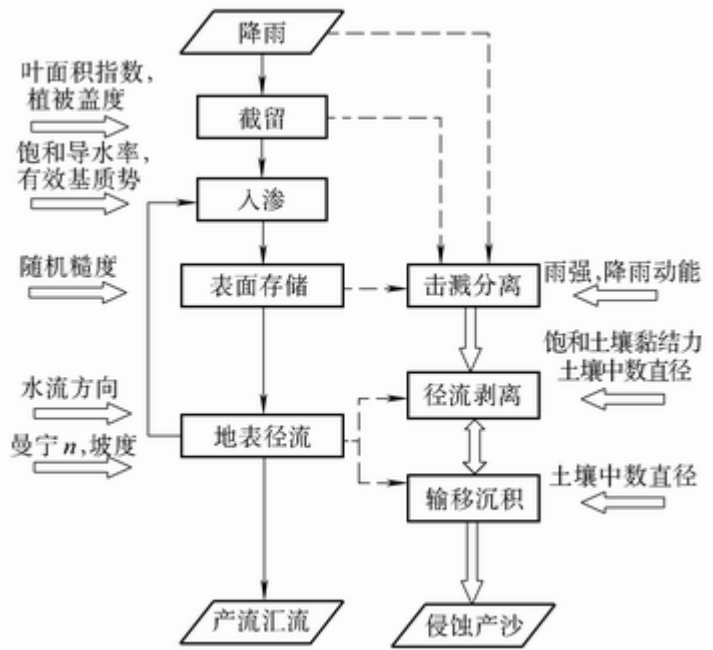


图1 黄土高原小流域分布式水蚀预报模型总体结构

### 2.1 水文模块

**2.1.1 降雨** 在小流域内布设雨量计,基于泰森多边形分析或其它地理空间分析方法生成降雨量空间分布图,根据各多边形内次降雨强度变化曲线分时段进行模拟。模型在运行前,由用户自行选择模拟时间步长;然后根据时间步长生成不同时段降雨强度图,与其它图层进行叠置分析。

**2.1.2 截留** 林冠截留是土壤—植物—大气连续体(SPAC)水循环中一个相当重要的量,直接影响降雨对地面的冲刷、土壤中水分的收支、地表径流等。为了提高模型的实用性,将林冠截留看作一种简单存储过程,采用Aston<sup>[4]</sup>建立的指数模型,根据黄土高原不同地区和林分特征对经验参数进行必要的修正,通过计算最大林冠存储力来模拟作物和植被截留。模型在保证较强实用性基础上,对林冠截持降雨现象能做出一些物理解释,可以满足侵蚀预报模型的精度需求。

**2.1.3 入渗** 国内外学者已对土壤入渗特性进行了大量研究,提出了具有不同特点和用途的入渗模型,并在水文产流计算、农田灌溉、农田排水、地下水补给等问题的研究中广泛应用。Green-Ampt模型形式简单,且具有一定的物理基础,最初仅用于干土积水入渗;后来Mei n和Larson(1973)将其进行修正用于稳定降雨

入渗。但这远不能满足实际应用需要，Chu(1978)根据水量平衡原理将修正后的模型再做推广，系统提出将Green-Ampt用于变化降雨过程的方法。最近由于在参数确定方面的提高，Green-Ampt方程在水文模拟方面得到了高度的重视；而且通常土壤水分入渗参数是在积水条件下测定。因此，本文选用变雨强条件下的Green-Ampt模型计算入渗。

**2.1.4 微地形存储** 在微观尺度上，径流是填满洼地并彼此溢出的空间过程。因此，在水位未达到平均表面存储临界值之前就产生了径流。本模型采用填充表面比例法，确定径流产生的临界值。根据LI SEM<sup>[5]</sup>研究成果，假定单元表面10%积水时，产生径流，这一临界水深称为起始微地形存储(SDS)，如果该值大于最大洼地存储(MDS)，那么取其值为MDS的0.9倍。在SDS和MDS值之间，径流以一种非线性方式渐增，当水位超出MDS之后，径流深随水深线性增加。

**2.1.5 地表径流和沟道流** 黄土高原地区坡面陡峻、沟道比降较大，洪水波传播速度快，沿程变化小，具有运动波的传播特征。因此，选用运动波方程来描述小流域地表径流和沟道流。假定单元内地表状况均一，用一维圣维南方程的运动波近似法结合曼宁公式模拟流域地表径流演进，即

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r; \quad h = \alpha q^\beta \quad (1)$$

式中：h为平均水深(m)；q为单宽流量(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>)；r为净入通量(m·s<sup>-1</sup>)；t为时间(s)；x为地表坡长(m)；α为系数，α=(n/√S<sub>0</sub>)，其中，n=0.6；n为曼宁糙率系数；S<sub>0</sub>为地表坡度。

**2.2 侵蚀模块** 根据泥沙量动态物质平衡原理，各栅格单元间净泥沙传输演算公式为

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (2)$$

式中：A是径流横截面面积(m<sup>2</sup>)；Q是径流流量(m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>)；C是径流泥沙含量(kg·m<sup>-3</sup>)；e为净侵蚀率(kg·m<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)；q<sub>s</sub>为外部输入泥沙量(kg·m<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)；x是沿坡向上的距离(m)；t是时间(s)。

根据我国黄土高原地区侵蚀垂直分带特征，综合考虑各侵蚀过程，将侵蚀、沉积过程概化，得到方程(3)中净侵蚀率计算方法

$$e = (D_s + D_i + D_r + D_{cf}) G_e G \quad (3)$$

式中：e为净侵蚀量；D<sub>s</sub>为雨滴击溅侵蚀量；D<sub>i</sub>为薄层水流侵蚀量；D<sub>r</sub>为细沟侵蚀量；D<sub>cf</sub>为沟道流侵蚀量；G<sub>e</sub>为浅沟侵蚀量；G为沟蚀(含重力侵蚀)系数。

**2.2.1 雨滴击溅分离** 溅蚀是坡面土壤侵蚀过程的重要组成部分，是细沟间侵蚀主要物理过程。对比分析多种溅蚀模型<sup>[6~8]</sup>，考虑模型参数易获取性及溅蚀量时间变异性，采用吴普特<sup>[8]</sup>建立的溅蚀模型计算降雨过程中不同时间步长内产生的雨滴击溅侵蚀量

$$D_s = 5.985(E_k p)^{0.544} S^{0.471} \quad (4)$$

式中：D<sub>s</sub>为雨滴击溅侵蚀量(kg·m<sup>-2</sup>)；E<sub>k</sub>为雨滴动能(J·m<sup>-2</sup>)；p为雨强(mm·min<sup>-1</sup>)；S是栅格单元地表坡度(°)。

**2.2.2 薄层水流、沟道流的径流分离和沉积** 根据概化侵蚀沉积理论，地表径流输移力反映侵蚀、沉积相互抗争过程之间的平衡。当径流中泥沙含量小于地表径流输移能力时，发生侵蚀，反之，则发生沉积。根据EUROSEM模型<sup>[2]</sup>算法，地表径流分离和沉积模拟方程为

$$D_i = Y(Tc - C)V_{sw} \quad (5)$$

式中:  $D_i$ 为薄层水流径流分离或沉积量( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 正值代表栅格单元内以侵蚀为主, 负表示发生沉积;  $Y$ 为有效系数, 与饱和土壤黏结力有关;  $Tc$ 是径流输移能力( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $C$ 是径流中泥沙含量( $\text{kgm}^{-3}$ );  $V_s$ 是泥沙沉降速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $w$ 是径流宽( $\text{m}$ )。

地表径流输移能力用Govers<sup>[9]</sup>提出的单元水流力方程模拟

$$Tc = \rho_s c (\tau - \tau_c)^d \quad (6)$$

式中:  $\rho_s$ 为土壤比重( $2650 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\tau$ 是水流应力, 用流速和能坡计算;  $\tau_c$ 是临界水流应力, 通常为  $0.4 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $c$ 、 $d$ 为与土壤中数直径有关的系数。

沟道是水流输送泥沙到沟口的通道。目前, 国内外还没有基于物理过程计算沟道侵蚀的成熟算法, 因此, 在忽略沟壁崩塌情况下, 本文使用式(6)概略计算沟道侵蚀。

**2.2.3 细沟、浅沟、切沟水流侵蚀** 在黄土丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀方式复杂多样, 主要侵蚀方式包括片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀, 同时重力侵蚀对小流域侵蚀产沙也具有重要贡献。对于细沟侵蚀预报, 首先判定发生临界区, 然后在满足临界条件区域内, 根据细沟发生所占面积比, 确定不同地貌部位细沟侵蚀量; 由于目前尚缺乏对浅沟、切沟及重力侵蚀的定量研究, 故采用浅沟侵蚀系数、沟蚀系数对其发生区侵蚀量加以校正。

根据Foster等<sup>[10]</sup>的研究结果, 细沟流的含沙量与径流输沙能力之间满足平衡输沙概念, 则细沟侵蚀量计算方程为

$$D_r = D_c(1 - C_s/Tc) \quad (7)$$

式中:  $D_r$ 为细沟冲刷分散率( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $D_c$ 为细沟径流侵蚀力( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $C_s$ 为细沟输沙率( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Tc$ 为细沟径流输沙能力( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

浅沟侵蚀是梁峁坡中下部坡面侵蚀的重要方式之一。江忠善等<sup>[11]</sup>研究认为, 在无植被覆盖的黄土坡面条件下, 浅沟侵蚀系数主要受降雨因素(降雨量 $R$ 、最大30min雨强 $I_{30}$ )和地面坡度 $a$ 的影响, 并建立了坡度大于 $15^\circ$  (浅沟侵蚀发生的临界坡度)的浅沟侵蚀系数估算公式

$$G_e = 1 + \left( \frac{S - 15}{30 - 15} \right) \left[ 1.003(RI_{30})^{0.103} - 1 \right] \quad (8)$$

式中:  $S$ 为地面坡度( $^\circ$ );  $R$ 为次降雨量( $\text{mm}$ );  $I_{30}$ 为次降雨最大30min雨强( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

切沟侵蚀常常伴随着重力侵蚀, 而重力侵蚀的发生具有很大的不确定性, 产沙量较难测定, 因此模型中采用沟蚀系数来反映切沟侵蚀及重力侵蚀对侵蚀产沙的贡献。江忠善等<sup>[11]</sup>以沟间地土壤侵蚀模型为基础, 加以修正来推算沟谷地(塌地除外)侵蚀量。在相同降雨条件下, 梁峁坡平均侵蚀模数与沟坡侵蚀模数相等时, 相应沟坡坡度作为沟蚀系数为1的基准坡度。据此, 采用经验推理法, 考虑坡度变化的影响, 提出黄土沟谷沟蚀系数 $G$ 的估算方法

$$G = 1 + \left( \frac{S - 20}{42 - 20} \right) \left[ 1.137 (RI_{30})^{0.140} - 1 \right] \quad (9)$$

式中: S为地面坡度(°); R为次降雨量(mm);  $l_{30}$ 为次降雨最大30min雨强( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

### 3 模型的模拟结果

基于1998年调查的土地利用图,选取陕北安塞纸坊沟流域<sup>[11]</sup>1998年6月23日和1998年8月21日的两次降雨资料进行模拟计算。模型运行前,首先根据降雨特征,确定模拟时间步长。1998年6月23日降雨量为22mm,降雨历时2h 10min,30min最大雨强为 $0.53 \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,属中度以上侵蚀性降雨事件<sup>[12]</sup>。基于该次降雨持续时间较短,雨强变化快,设定模拟时间步长为5min。1998年8月21日降雨量为16.9mm,降雨历时4h 30min,30min最大雨强为 $0.19 \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,属轻度侵蚀性降雨事件<sup>[12]</sup>。该次降雨事件历时较长,雨强变化较小,设定模拟时间步长为10min。模拟结果如表1所示。

模拟结果表明,模型可以大体反映流域侵蚀特征。模型对短历时中度以上侵蚀性降雨事件模拟结果较好,模拟精度在85%以上;对长历时轻度侵蚀性降雨事件模拟结果较差,模拟精度小于64%。此外,模型除了可以反映小流域细沟侵蚀动态变化过程外,对次降雨事件的浅沟侵蚀过程模拟也具有较高的精度。

表1 纸坊沟流域侵蚀量模拟结果\*

时间	实测值/ $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$	计算值/ $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$	差值/ $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$	相对误差(%)
1998年6月23日	589.2	508.5	-80.7	-13.4
1998年8月21日	25.7	34.8	9.1	35.4

\*实测值为纸坊沟流域把口站观测资料(江忠善研究员、刘国彬研究员提供)。

### 4 结语

本文提出的模型集成了国内外已有研究成果,从水文过程入手,按照侵蚀物理过程对黄土高原地区小流域土壤侵蚀进行描述,与国际上较成熟的模型WEPP、EUROSEM等相比,具有以下特点:(1)算法简单,物理过程明晰。该模型包括降雨、截留、微地形表面存储、入渗、地表径流、沟道流等基本水文过程及雨滴击溅分离、坡面薄层水流剥离与沉积及集中股流剥离与沉积等基本侵蚀过程,其计算方法大多建立在机理研究基础上,所需参数相对较少且易于获得。入渗对径流形成和流动过程影响很大,本文采用变雨条件下土壤入渗方程,更符合实际应用情况,提高了径流模拟精度。(2)更加适用于黄土高原地区。从黄土高原小流域土壤侵蚀垂直分带性规律出发,模型较全面考虑了不同侵蚀方式对小流域侵蚀产沙的贡献。针对片蚀、细沟侵蚀过程,提出了薄层片流、细沟股流输移能力方程,以修正系数的方式考虑了浅沟、切沟及重力侵蚀对侵蚀产沙的贡献,同时模型还包括雨滴击溅侵蚀以及沟道泥沙输移。(3)与地理信息系统(GIS)技术集成。该模型以GIS软件ArcGIS为软件平台,具有更强的空间数据管理及处理能力,能够有效地完成流域侵蚀过程时空变化模拟。

关于模型参数敏感性分析及模型的进一步检验与应用,将在后续工作中完成。模型的不足是将浅沟、切沟和重力侵蚀对流域产沙的贡献以修正系数的方式进行处理。今后应加强浅沟和切沟侵蚀过程定量研究,建立浅沟水流和切沟水流侵蚀剥离方程,同时还应加强坡沟系统水沙传递关系的研究。

致谢:本研究得到中国科学院安塞生态站的大力支持,在此表示感谢!

## 参考文献：

- [1] Harmon R S, Doe W W. Landscape Erosion and Evolution Modelling[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2001.
- [2] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide[R]. Bedford, United Kingdom: Silsoe College, Cranfield University, 1998.
- [3] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A Single-Event Physically Based Hydrological and soil Erosion Model for Drainage Basins. I: Theory, Input and Output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107-1118.
- [4] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42: 383-396.
- [5] Jetten V. LISEM: Limburg Soil Erosion Model user manual, version 2. x[R]. Netherlands: Utrecht University, 2002.
- [6] 江忠善, 刘志. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究[J]. 水土保持学报, 1989, 3(2): 29-35.
- [7] 王贵平, 贾志军, 蔡强国, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区坡面径流预报模型研究[J]. 中国水土保持, 1992, 3: 16-20.
- [8] 吴普特. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响. 水土保持通报[J]. 1991, 11(3): 8-13, 28.
- [9] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow[J]. IAHS publication, 1990, 189: 45-73.
- [10] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. velocity relationship[J]. Transfo ASAE, 1984, 27(3): 790-796.
- [11] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.
- [12] 王万中, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀与黄河泥沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

**Distributed water erosion prediction model for small watershed in loess plateau**JIA Yuan-yuan<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>, YANG Qin-ke<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Yangling, Yangling 712100, China;

2. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;

3. Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on the grid digital elevation model (DEM), a distributed water erosion prediction model for small watershed in loess plateau is established. The model is composed of hydrological component and erosion component. In the hydrological component, the processes of rainfall, interception, surface storage formed by micro-depression, infiltration, overland flow and channel flow are taken into account, and the implementation of runoff confluence calculation is carried out on the basis of kinetic wave theory. The erosion component includes the splash detachment, detachment rate formed by interrill flow, rill flow, ephemeral gully flow and channel flow, and the calculation of sediment yield is realized according to the principle of dynamic balance of mass. The simulation result of single rainfall event with rainfall intensity higher than medium grade shows that the accuracy of the prediction is acceptable.

**Key words:** process of water erosion; prediction model; distributed model; GIS; small watershed; loess plateau