

DEM空间插值方法对土壤侵蚀模拟的影响研究 ——以USPED分析干热河谷典型冲沟为例

徐亚莉, 罗明良*, 梁倍瑜, 昌小莉, 向卫, 张斌

(西华师范大学国土资源学院, 四川南充 637009)

摘要:为探索不同空间插值方法得到的DEM如何影响土壤侵蚀模拟效果,本文选择金沙江干热河谷区典型冲沟为研究对象,利用野外测量高程数据,采用反距离加权(IDW)、析取克里格(DK)、局部多项式(LPI)和张力样条函数(ST)4种方法构建高精度DEM。基于USPED模型模拟冲沟的土壤侵蚀,对比不同空间插值方法的精度、土壤侵蚀的空间分布,采用相对差系数对比不同插值在土壤侵蚀研究中的相似性。结果表明:DEM空间插值的精度排序为ST<IDW<LPI<DK。基于USPED模拟的土壤侵蚀结果显示,DK模拟了主要的侵蚀、沉积分布,IDW突出了局部细节,LPI和ST则介于其间。相对差系数结果显示,IDW得到的DEM侵蚀模拟结果与其他插值方法有较高的相似性。在实测数据布局合理、密度较高的前提下,IDW更适合应用于土壤侵蚀模拟研究。

关键词:土壤侵蚀;空间插值;USPED;相对差系数;冲沟

1 引言

土壤侵蚀直接影响着水土资源的开发、利用和保护(张洪江, 2008),已成为全球关注的主要环境问题之一。Ewald Wollny定量研究了土壤侵蚀(引自Cook, 1937);Wischmeier等基于观测资料和人工模拟降雨实验,构建土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)(Wischmeier et al, 1965);美国农业研究局研究了细沟侵蚀和挟沙力,提出修正土壤流失方程(Reversed Universal Soil Loss Equation, RUSLE)(Renard et al, 1997);Moore和Wilson提出了USPED模型用于土壤侵蚀和沉积的预测研究(引自Neteler et al, 2008)。国内自1953年刘善建提出坡面侵蚀量以来(刘善建, 1953),相继提出了坡面侵

蚀产沙经验模型、中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)、流域侵蚀产沙经验模型等(郑粉莉等, 2001;蔡强国等, 2003;郑粉莉等, 2008)。随着研究的深入开展和相关地理信息系统(GIS)新技术的进步,GIS技术以及数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM)广泛应用于土壤侵蚀和水土流失的研究。Kim(2014)结合GIS技术和RUSLE模型评估了流域尺度的土壤侵蚀潜力;Pistocchi等(2002)利用USPED模型提出了合理的水土流失保护措施;张岩等(2012)利用CSLE估算土壤侵蚀模数与遥感数据的水蚀分级对比分析,评估了CSLE在土壤侵蚀普查中的适用性;黄金良等(2004)将GIS和USLE相结合,预测了中国南方中等尺度流域土壤侵蚀量。

收稿日期:2016-01;修订日期:2016-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(41101348,41101360);四川省教育厅自然科学重点项目(2016ZA0168);西华师范大学基本科研业务费专项资金资助项目(15C002) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41101348, No.41101360; Key Project of Natural Science Research of Sichuan Provincial Department of Education, No.2016ZA0168; Basic Research Projects Financed from the Special Fund of China West Normal University, No.15C002]。

作者简介:徐亚莉(1991-),女,四川绵竹人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究,E-mail: 1573955072@qq.com。

通讯作者:罗明良(1978-),男,河南信阳人,教授,博士,主要从事GIS空间分析及DEM数字地形分析等方面研究,
E-mail: lolean586@163.com。

引用格式:徐亚莉,罗明良,梁倍瑜,等. 2016. DEM空间插值方法对土壤侵蚀模拟的影响研究:以USPED分析干热河谷典型冲沟为例[J]. 地理科学进展, 35(7): 870-877. [Xu Y L, Luo M L, Liang B Y, et al. 2016. Effects of different DEM spatial interpolation methods on soil erosion simulation: A case study of a typical gully of dry-hot valley based on USPED[J]. Progress in Geography, 35(7): 870-877.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.07.008

中国是世界土壤侵蚀最严重的国家之一,土壤侵蚀总面积达356.92万km²(张洪江, 2008)。在西南地区,金沙江干热河谷等区域水土流失较为严重。杨子生(2002)利用重力侵蚀量的测算方法计算该区域的土壤侵蚀量;杨子生等(2004)基于航空象片和1:5万的地形图数据,研究近40年来金沙江南岸干热河谷区的土地利用变化和土壤侵蚀治理状况;何毓蓉等(2002)通过对金沙江干热河谷典型区的土壤侵蚀程度、土壤退化分布研究,探讨了土壤侵蚀对土壤退化的影响和作用机制。上述金沙江干热河谷土壤侵蚀的研究,侧重从较大的空间范围进行研究,但依赖高精度DEM的冲沟尺度土壤侵蚀研究尚有待深入。

高精度DEM对土壤侵蚀研究具有重大意义(杨勤科等, 2009)。王春等(2014)对比了双线性、三次卷积、规则样条函数等插值对DEM地形重构的精度影响;陈娟等基于大比例尺的野外测量数据,对比研究了多种径向基函数、反距离加权插值参数对构建DEM的影响(陈娟等, 2015; 青亚兰等, 2015)。宋向阳等(2010)基于不同耕作措施,对比多种插值方法对微地表高精度DEM构建的影响效果。上述研究尚未对DEM构建方式的差异如何影响土壤侵蚀模拟展开系统性研究。基于此,本文选择金沙江干热河谷典型冲沟为研究区域,基于高精度的野外测量数据,采用反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)、析取克里格(Disjunctive Kriging, DK)、局部多项式(Local Polynomial Interpolation, LPI)和张力样条函数(Spline with Tension, ST)4种插值方法构建高精度DEM,运用USPED模型(Unit Stream Power-based Erosion Deposition)模拟土壤侵蚀和沉积,在此基础上,结合相对差系数对比不同插值方法对冲沟沟底和坡面土壤侵蚀的影响,期望为大比例尺DEM构建和土壤侵蚀研究提供借鉴。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究样区位于云南楚雄彝族自治州元谋沙地

村干热河谷区(25°41'31"N, 101°52'18"E),隶属于金沙江流域,土壤流失情况十分严重。区域多年平均气温为21.9℃,多年平均降雨量为613.8 mm。地层分布自上而下为砂、粉砂、粘土、亚粘土及砂砾互层,岩性松散,易被侵蚀(张斌等, 2009)。土壤侵蚀加速冲沟的形成,使冲沟侵蚀成为水土保持研究的重点。本文研究的冲沟平均坡度为35°、最大坡度86°、切割深度为7~12 m。野外观测中发现该冲沟沟壁近似直立,土壤侵蚀强烈,是该区域冲沟的典型代表(陈娟等, 2015)。

2011年7月,在云南元谋进行的科学考察中,对干热河谷的典型冲沟进行野外实地测量,通过使用徕卡TCR802、RTK、GPS和全站仪等高精度的测量仪器,按照1:5000的大比例尺测绘标准并利用随机采样和选择性采样相结合的混合采样方法采集高程点。通过对冲沟的特征点、坡度突变点和坡向突变点等进行测量,以期尽可能体现出地表细部特征。选取了8000余个高程采样点,获取了一条形态完整的冲沟(表1)。

2.2 研究方法

2.2.1 空间插值方法

本文采用了IDW、DK、LPI和ST等4种不同的空间插值方法构建DEM。

(1) 反距离加权插值

IDW以插值点与样本点间的距离作为权重因子进行加权平均,离插值点越近的样本点,赋予的权重越大,即权重系数与距离成反比(汤国安等, 2006)。IDW的一般公式表达为(汤国安等, 2006):

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \tag{1}$$

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \tag{2}$$

式中: $\hat{Z}(S_0)$ 为 S_0 处的预测值; N 为预测计算中的样点数量; λ_i 为预测计算过程中样本 i 的权重; $Z(S_i)$ 为在 S_i 处获得的测量值; p 为距离指数,用于控制权重值的高低,IDW中参数 p 的值通常为2; d_{i0} 为预测点 S_0 与各已知样点 S_i 之间的距离(汤国安等, 2006)。

表1 实验数据基本信息
Tab.1 Basic information about the data

样本总数/个	训练数据集/个	检验数据集/个	最高高程/m	最低高程/m	平均高程/m	点密度/(个/m ²)
8064	6855	1209	1152	1101	1133	0.7

(2) 析取克里格

克里格插值又称为局部空间插值(韩富江等, 2007), 是利用原始数据和半方差函数的结构性, 对未知采样点进行无偏估值(汤国安等, 2006)。DK是克里格插值中的一种, 可提供非线性估值方法(汤国安等, 2006)。它是基于一个二阶平稳随机变量 $Z(x)$, 对每个 $Z(x_i)$ 作高斯变换产生标准正态随机变量 $Y(x_i)$, 则析取克里格($Z_{DK}(x_0)$)公式为(秦耀东等, 1998):

$$Z_{DK}(x_0) = \sum_{i=1}^n f_i[Y(x_i)] \quad (3)$$

式中: n 为采样点点数; $f_i[Y(x_i)]$ 为确定的函数表达。

(3) 张力样条函数

ST是径向基函数插值中一种, 被用来消除三次样条插值函数的多余拐点(迟文学等, 2007)。插值过程中, 整个区域借助张力使之保持平滑, 张力系数直接影响插值结果(王树良等, 2003)。借助直线插值和双曲函数组合进行分段插值, 得到张力样条函数公式为(迟文学等, 2007):

$$f(x) = c_1 + c_2x + c_3sh\sigma x + c_4ch\sigma x \quad (4)$$

式中: $sh\sigma x$ 和 $ch\sigma x$ 是2个双曲函数; σ 用于控制拐点的位置和曲线的形态(迟文学等, 2007)。

(4) 局部多项式插值

LPI根据采样点数据, 采用多个多项式来拟合, 得到一个平滑的表面(汤国安等, 2006)。LPI对每个已知采样点建立一个多项式, 通过最小二乘法求解多个多项式组成的方程组来得到拟合曲面(宋向阳等, 2010)。

2.2.2 插值精度评价

空间插值是创建DEM的一种常用方法。本文采用交叉检验来评价插值的精度, 利用ArcGIS中的地统计分析模块, 抽取20%高程采样点作为验证数据集, 80%数据作为训练数据集(插值样本数据)。均值误差(Mean Error, ME)和中误差(Root Mean Square Error, RMSE)是评价插值精度的常用标准。ME是指预测值与实测值的定量偏差, 而RMSE从整体意义上描述了地形参数与真值的离散程度, 提供了真值可能存在的范围。两者的值越趋近于0, 插值的精度越高(易湘生等, 2012)。ME和RMSE的表达方法如下:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i) - \hat{z}(x_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2}{n}} \quad (6)$$

式中: $z(x_i)$ 为 x_i 点的观测值; $\hat{z}(x_i)$ 为 x_i 的预测值; n 为采样点点数。

2.2.3 USPED模型

USPED是一个在降雨量稳定、挟沙力有限的状态下, 预测地表径流侵蚀过程中侵蚀和沉积速率和空间分布状况模型(Mitasova et al, 1996; Mitas et al, 1998)。USPED是基于USLE和RUSLE模型改进而得(Pistocchi et al, 2002; Bek et al, 2011), 但又不同于USLE和RUSLE, 它是一个二维的土壤侵蚀模型, 是对每个栅格土壤侵蚀与沉积能力的模拟。对于土壤侵蚀模型而言, USLE仅适用于坡度平缓地区, RUSLE则更偏向于大范围研究, 体现区域内影响因子的多样性(陈云明等, 2004); 而USPED则适用于高精度的地形数据(Pistocchi et al, 2002), 当分辨率为2 m以内时, 能成功模拟该区域的土壤侵蚀。该模型可以用来预测净侵蚀和沉积量, 其公式表达为(Mitas et al, 1998):

$$D = \frac{d(T \cos \alpha)}{dx} + \frac{d(T \sin \alpha)}{dy} \quad (7)$$

式中: D 表示土壤侵蚀和沉积量; x, y 表示平面坐标; α 表示坡向。USPED模型也可以结合USLE和RUSLE定义为挟沙力函数(T), 表达式为(Neteler et al, 2008):

$$T \approx RKCPU^m (\sin \beta)^n \quad (8)$$

上述 T 包含了RUSLE中的4个影响因子(R, K, C, P)(Bek et al, 2011), 其中 R (Rainfall Erosivity)代表降雨和径流侵蚀因子; K (Soil Erodibility)代表土壤可蚀性因子; C (Cover and Management)代表植被覆盖与管理因子; P (Conservation Practice)代表水土保持措施因子(怡凯等, 2015); U 代表集水区汇水面积; β 代表斜坡的倾斜坡度; m, n 这2个参数控制着河流和坡度的关系, 一般取决于河流类型、土壤和环境等方面(Bek et al, 2011)。USPED模型中的 m, n 可参考如下标准: 当 $m=1.6, n=1.3$ 时, USPED模拟细沟的侵蚀(Rill Erosion); 当 $m=1, n=1$ 时, USPED模拟面状的侵蚀(Sheet Erosion)(Bek et al, 2011)。

本文研究区域为干热河谷的典型冲沟, 对高程采样点采用不同插值方法得到DEM地形表面, 以USPED模型对其表面侵蚀进行模拟。研究区的范围小, 地表植被覆盖相似, 降雨量等其他因子差异

也较小,因此,USPED模型中的 R 、 K 、 C 、 P 各个影响因子在冲沟中并无明显差异。为更加直观地对比不同插值方法对USPED土壤侵蚀模拟的影响,假设各个因子的取值为1(Bek et al, 2011),USPED模型可表示为:

$$T' = U \sin \beta \quad (9)$$

用 T' 近似的替代 T 来研究该地区侵蚀和沉积的地形潜力。

2.2.4 相对差系数

为定量地对比分析不同插值方法对土壤侵蚀的影响,引用相对差系数(刘学军等, 2008),即:将任意2种插值方法进行交互对比,选择其中一种作为参照算法,而其他的作为比较算法;不同插值方法对应生成了土壤侵蚀/沉积图,每个单元格都对应了土壤侵蚀/沉积量 A ,将参照算法在单元格产生土壤侵蚀/沉积量表示为 A_{base} ,比较算法对应的可表示为 A_{comp} ;相对差系数可表示为 a ,其计算公式为:

$$a = 1 - \frac{\sum_i^n (A_{\text{comp}}^i - A_{\text{base}}^i)^2}{\sum_i^n (A_{\text{comp}}^i - \overline{A_{\text{comp}}})^2} \quad (10)$$

式中: A_{base}^i 表示参照算法在第 i 单元处的土壤侵蚀/沉积值; $\overline{A_{\text{base}}}$ 为结果图上土壤侵蚀/沉积均值; A_{comp}^i 为比较算法在对应位置的土壤侵蚀/沉积值。

以一条斜率为1的直线去拟合参照算法和比较算法,用 a 来刻画2种算法间的偏离程度。若 $a=1$,则表示2种算法下的土壤侵蚀/沉积结果没有差别;若 $0 < a < 1$,则表示结果有部分相同,也有部分不同, a 越小,表示差异越大;若 $a < 0$,则表示结果完全不同,没有可比性(刘学军等, 2008)。

3 结果与分析

3.1 不同插值误差对比

以空间插值的方法实现整个区域的地形表达,与实际表面相比会存在一定的误差。不同的空间插值方法对应的误差也不同。样区采样点通过IDW、DK、LPI、ST等4种不同的插值方法得到的DEM,基于 ME 和 $RMSE$ 的标准,可得到不同插值方法误差(表2)。

通过表2可以看出:样本数据集的 ME 的绝对值排序为 $DK < LPI < ST < IDW$,而 $RMSE$ 排序为 $DK < LPI < IDW < ST$;验证数据集 ME 绝对值排序为 $LPI < IDW < DK < ST$,而 $RMSE$ 排序为 $DK < LPI < IDW < ST$ 。

通过对 ME 和 $RMSE$ 进行标准化(青亚兰等, 2015),将上述排序进行综合评价,得到不同插值误差表现为: $DK < LPI < IDW < ST$ 。这一结果与朱会义等(2004)关于空间插值精度研究的结论一致。

3.2 基于空间形态对比空间插值对土壤侵蚀的影响

本文基于USPED模型,研究不同的插值方法对土壤侵蚀的影响。从空间形态上,4种插值方法产生的土壤侵蚀、沉积有所区别,如图1所示。图1中土壤侵蚀的空间形态差异表现为:IDW对应的侵

表2 不同插值误差特征值/m

Tab.2 The error associated with different interpolation methods/m

数据集	误差项	插值方法			
		IDW	DK	LPI	ST
样本数据集	ME	0.0143	0.0030	0.0048	0.0061
	$RMSE$	0.5252	0.3896	0.4199	0.7487
验证数据集	ME	-0.0030	-0.0059	0.0024	-0.0071
	$RMSE$	0.5115	0.2758	0.4155	0.5157

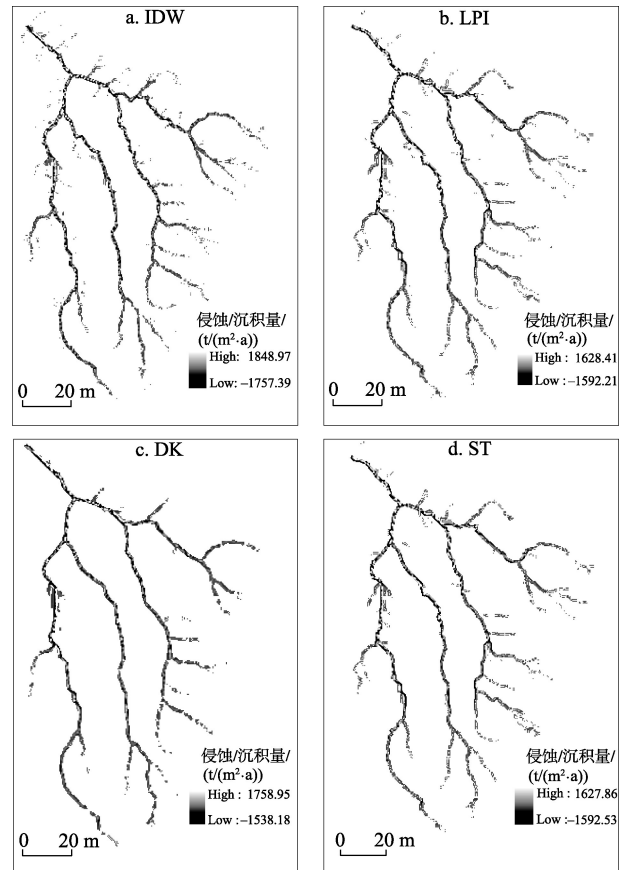


图1 不同插值方法的冲沟侵蚀/沉积量

Fig.1 Gully erosion/deposition amount estimated by different interpolation methods

蚀形态最为复杂,而DK最为简单,LPI和ST所对应的土壤侵蚀形态则位于其间。

通过对不同插值方法对应的侵蚀和沉积量梳理(表3)。从表3可见,IDW对应的最大沉积量和侵蚀量的特征值都是最大的,表明IDW得到的DEM在土壤侵蚀、沉积研究中表现出空间分布的差异性;DK呈现的侵蚀模拟均值最大,为5.99,表明DK使冲沟沟底表现为土壤沉积严重于土壤侵蚀;LPI和ST体现出土壤沉积和土壤侵蚀在量上相当。其中LPI与ST 2种插值方法除了在空间形态上的相似性高,从上述特征值的对比发现它们在量上也极为接近。

对冲沟侵蚀和沉积的面积进行统计,结果如表4所示。由表4可直观地看出各种插值方法在侵蚀/沉积面积上的对比:DK所对应的土壤侵蚀和沉积面积最小,其冲沟侵蚀和沉积面积占冲沟面积的14.59%;IDW所对应的土壤侵蚀和沉积面积最大,其冲沟侵蚀和沉积面积占冲沟面积的17.42%;而LPI和ST对应的侵蚀面积相近。此外,从表4还可看出,冲沟的土壤侵蚀和土壤沉积面积是相近的,都在50%左右。

3.3 基于相对差系数对比空间插值对土壤侵蚀影响

为更好地对比基于USPED模型,不同空间插值给土壤侵蚀研究带来的具体影响,本文将研究区域划分为沟底侵蚀和坡面侵蚀,运用相对差系数对4种插值方法进行交互对比,其对比结果如表5-6所示。

由表5可以看出,IDW和ST对于沟底沉积的相似性是最大的,高达0.82;ST和LPI对于沟底侵蚀、沉积的相对差系数数组为(0.78,0.81),也表明了较高的相似性。表5和表6的对比分析结果如下:

(1) 冲沟沟底的土壤侵蚀对比。以DK为参照时,ST与之相对差系数值最大,为0.65;以IDW为参照时,ST与之相对差系数值最大,为0.82;以LPI

为参照时,ST与之相对差系数值最大,为0.71;以ST为参照时,LPI与之相对差系数值最大,为0.78。这表明:在冲沟沟底侵蚀模拟中,4种插值的交互对比,IDW与ST的相似性最高,ST与LPI在相对差系数比较时,都互为最大值。

(2) 冲沟沟底的土壤沉积对比。以DK为参照时,ST与之相对差系数值最大,为0.75;以IDW为参照时,LPI与之相对差系数值最大,为0.69;以LPI为参照时,ST与之相对差系数值最大,为0.74;以

表4 冲沟侵蚀模拟的侵蚀/沉积面积统计表
Tab.4 Areas of erosion and deposition estimated by gully erosion simulations

	IDW	LPI	DK	ST
A/m ²	4573.00	4573.00	4573.00	4573.00
S/m ²	796.65	746.50	667.29	784.99
SE/m ²	426.38	383.10	324.39	372.60
SD/m ²	370.27	363.40	342.90	412.39
SE/S	0.5352	0.5132	0.4861	0.4747
SD/S	0.4648	0.4868	0.5139	0.5253
S/A	0.1742	0.1632	0.1459	0.1717

注:A表示冲沟总面积;S代表冲沟侵蚀和沉积总面积;SE代表冲沟侵蚀面积;SD代表冲沟沉积面积;SE/S代表冲沟侵蚀所占面积比;SD/S代表冲沟沉积所占面积比;S/A代表冲沟侵蚀和沉积总面积所占冲沟面积比。

表5 沟底侵蚀模拟的插值方法相对差系数
Tab.5 Coefficient of relative difference estimated by different interpolation methods of gully bottom erosion simulation

插值方法	DK	IDW	LPI	ST
DK	—	(0.55,0.65)	(0.59,0.68)	(0.65,0.75)
IDW	(0.41,0.56)	—	(0.56,0.69)	(0.82,0.66)
LPI	(0.52,0.61)	(0.52,0.59)	—	(0.71,0.74)
ST	(0.59,0.70)	(0.51,0.69)	(0.78,0.81)	—

注:表中数据由不同的二元组(a,b)组成,其中a代表土壤沉积的相对差系数;b代表土壤侵蚀的相对差系数。表6同。

表6 坡面侵蚀模拟的插值方法相对差系数
Tab.6 Coefficient of relative difference estimated by different interpolation methods of hillslope erosion simulation

插值方法	DK	IDW	LPI	ST
DK	—	(0.55,0.33)	(0.50,0.42)	(0.57,0.44)
IDW	(0.65,0.06)	—	(0.51,0.07)	(0.47,0.06)
LPI	(0.41,0.46)	(0.51,0.38)	—	(0.41,0.26)
ST	(0.49,0.33)	(0.57,0.20)	(0.42,0.37)	—

表3 4种插值方法的土壤侵蚀/沉积量的特征值/(t/(m²·a))
Tab.3 Characteristic values of soil erosion and deposition estimated by different interpolation methods/(t/(m²·a))

插值方法	土壤侵蚀/沉积量				
	最大沉积量	最大侵蚀量	沉积均值	侵蚀均值	侵蚀模拟均值
IDW	1848.97	1757.39	181.57	-159.05	4.37
LPI	1628.41	1592.21	170.25	-161.23	0.57
DK	1758.95	1538.18	161.49	-145.85	5.99
ST	1627.86	1592.53	169.94	-157.01	0.85

ST为参照时,LPI与之相对差系数值最大,为0.81。这表明:在冲沟沟底沉积模拟中,4种插值的交互对比,LPI与ST的相似性最高,而ST与LPI仍互为最大值。该结果与空间形态对比的结果具有一致性。

(3) 冲沟坡面的土壤侵蚀对比。以DK为参照时,ST与之相对差系数值最大,为0.57;以IDW为参照时,DK与之相对差系数值最大,为0.65;以LPI为参照时,IDW与之相对差系数值最大,为0.51;以ST为参照时,IDW与之相对差系数值最大,为0.57。这表明:在冲沟坡面的土壤侵蚀在相对差系数的比较中,交互对比的相似性普遍低于冲沟沟底侵蚀模拟;IDW与DK在坡面侵蚀的对比中的相似性最大。

(4) 冲沟坡面的土壤沉积对比。以DK为参照时,ST与之相对差系数值最大,为0.44;以IDW为参照时,LPI与之相对差系数值最大,为0.07;以LPI为参照时,DK与之相对差系数值最大,为0.46;以ST为参照时,LPI与之相对差系数值最大,为0.37。这表明:在冲沟坡面沉积的对比中,相对差系数的值普遍偏小,沉积量在空间分布的差异较大;LPI与DK的相似性相对高于其他插值。

通过表5-6看出冲沟沟底侵蚀、沉积的相对差系数明显大于坡面区域,冲沟沟底的相对差系数普遍大于0.50,最大为0.82,说明2种插值在冲沟沟底土壤侵蚀研究中相似性高;而坡面区域的相对差系数均小于0.50,最小为0.06,该值近似接近于0,对应的2种插值在坡面土壤侵蚀研究中没有相似性。由此说明不同插值方法对坡面土壤侵蚀研究的影响大于冲沟沟底。

4 结论与讨论

本文基于野外实测数据,构建了高精度DEM,利用USPED模型模拟了潜在土壤侵蚀、沉积及其空间分布特征。研究结果发现:从插值精度来讲,ST<IDW<LPI<DK,但RMSE和ME均小于1;通过USPED模型研究土壤侵蚀模拟,发现IDW得到的DEM体现了冲沟沟底潜在侵蚀的细节特征,而DK展现了沟底侵蚀存在的主要区域;LPI和ST插值得到的DEM模拟的土壤侵蚀相似性最大。从潜在侵蚀发生的不同部位看,4种方法得到的DEM刻画的沟底侵蚀相似度高,但坡面侵蚀差距较大。

利用野外实测的典型冲沟高程数据,综合分析几种插值方法得到的DEM精度及其土壤侵蚀模拟

差异性,并结合相对差系数比较,推荐在实测数据布局合理、密度较高的前提下,使用IDW插值方法。其原因为:①虽然其ME、RMSE虽不是最小的,但是精度与之差异并不大,能较好表达地表的真实形态。对于IDW来说,采样点越多就越能真实地反映局部特征;②对比其他插值产生的DEM模拟沟底土壤侵蚀和沉积的空间形态,IDW的侵蚀、沉积面积最大,具有最大侵蚀量、沉积量的特征值,能较好地反映土壤侵蚀分布的差异性和局部特征;③根据相对差系数分析,IDW与ST、LPI、DK对土壤侵蚀模拟的结果都有较高的相对差系数值,表明IDW插值在土壤侵蚀模拟中更加接近于其他插值方法。因此,IDW是本文土壤侵蚀研究中最合适的插值方法,正如易湘生等(2012)在空间插值的研究中指出的:IDW适用于密集分布的采样点数据并能体现局部特征差异。

本文基于USPED模型,初步对比了空间插值对土壤侵蚀研究的影响,但USPED模型也尚待完善,如结合USPED模型中的土壤侵蚀度、降雨量、植被覆盖度等多方面因素,有利于更加全面、合理地评价地区的土壤侵蚀程度与潜力。此外,尽管不同插值方法得到的DEM精度存在差异,但这种差异如何具体影响基于USPED模拟的土壤侵蚀分布格局也有待进一步研究。

参考文献(References)

- 蔡强国,刘纪根. 2003. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展, 22(3): 242-250. [Cai Q G, Liu J G. 2003. Evolution of soil erosion models in China[J]. Progress in Geography, 22(3): 242-250.]
- 陈娟,罗明良,张斌,等. 2015. 反距离加权插值参数变化对元谋冲沟DEM构建的影响[J]. 中国水土保持科学, 13(1): 29-34. [Chen J, Luo M L, Zhang B, et al. 2015. Effects of interpolation parameters in Inverse Distance Weighted method on DEM accuracy in dry-hot valleys of Yuanmou[J]. Science of Soil and Water Conservation, 13(1): 29-34.]
- 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. 2004. RUSLE侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究, 11(4): 80-83. [Chen Y M, Liu G B, Zheng F L, et al. 2004. Proceeding and application on soil erosion model of RUSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 11(4): 80-83.]
- 迟文学,吴信才,于海洋,等. 2007. 张力样条函数在雨量等值线光滑中的应用研究[J]. 水文, 27(1): 22-25. [Chi W X, Wu X C, Yu H Y, et al. 2007. Application of the tension spline function in rainfall isoline smoothing[J]. Jour-

- nal of China Hydrology, 27(1): 22-25.]
- 韩富江, 刘学军, 潘胜玲. 2007. DEM内插方法与可视性分析结果的相似性研究[J]. 地理与地理信息科学, 23(1): 31-35. [Han F J, Liu X J, Pan S L. 2007. Research on DEM interpolation methods and similarity of results of visibility analysis[J]. Geography and Geo-Information Science, 23(1): 31-35.]
- 何毓蓉, 周红艺, 张保华, 等. 2002. 金沙江干热河谷典型区土壤退化机理研究: 土壤侵蚀对土壤退化的作用[J]. 水土保持学报, 16(3): 24-27. [He Y R, Zhou H Y, Zhang B H, et al. 2002. Mechanism of soil degradation in dry and hot valley of Jinshajiang River area: Effect of soil erosion on soil degradation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 16(3): 24-27.]
- 黄金良, 洪华生, 张珞平, 等. 2004. 基于GIS和USLE的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 18(5): 75-79. [Huang J L, Hong H S, Zhang L P, et al. 2004. Study on predicting soil erosion in Jiulong River watershed based on GIS and USLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 18(5): 75-79.]
- 刘善建. 1953. 天水水土流失测验的初步分析[J]. 科学通报, (12): 59-65, 54. [Liu S J. 1953. Tianshan shuitu liushi ceyan de chubu fenxi[J]. Chinese Science Bulletin, (12): 59-65, 54.]
- 刘学军, 晋蓓, 王彦芳. 2008. DEM流径算法的相似性分析[J]. 地理研究, 27(6): 1347-1357. [Liu X J, Jin B, Wang Y F. 2008. Similarity analysis of flow route algorithms for extracting drainage network from grid-based terrain model[J]. Geographical Research, 27(6): 1347-1357.]
- 秦耀东, 李保国. 1998. 应用析取克里格方法估计区域地下水埋深分布[J]. 水利学报, 29(8): 28-33. [Qin Y D, Li B G. 1998. Estimation of ground water depth distribution by disjunctive Kriging[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 29(8): 28-33.]
- 青亚兰, 罗明良, 张斌, 等. 2015. 径向基函数对干热河谷冲沟DEM构建的影响[J]. 测绘科学, 40(7): 113-117. [Qing Y L, Luo M L, Zhang B, et al. 2015. Effects of interpolation parameters in radial basis function on DEM accuracy in dry-hot valleys[J]. Science of Surveying and Mapping, 40(7): 113-117.]
- 宋向阳, 吴发启. 2010. 几种插值方法在微DEM构建中的应用[J]. 水土保持研究, 17(5): 45-50. [Song X Y, Wu F Q. 2010. Application of the spatial interpolation methods to the study on Micro-DEM[J]. Research of Soil and Water Conservation, 17(5): 45-50.]
- 汤国安, 杨昕. 2006. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社. [Tang G A, Yang X. 2006. ArcGIS dili xinxi xitong kongjian fenxi shiyan jiaocheng [M]. Beijing, China: Science Press.]
- 王春, 江岭, 徐静, 等. 2014. DEM地面形态重构方法的精度差异特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 30(4): 18-21, 26. [Wang C, Jiang L, Xu J, et al. 2014. Accuracy differences among approaches of DEM surface morphology reconstruction[J]. Geography and Geo-Information Science, 30(4): 18-21, 26.]
- 王树良, 史文中, 李德毅, 等. 2003. 基于张力样条插值函数的土地数据挖掘[J]. 计算机工程与应用, 39(25): 5-7. [Wang S L, Shi W Z, Li D Y, et al. 2003. Land data mining based on tension spline interpolation function[J]. Computer Engineering and Applications, 39(25): 5-7.]
- 杨勤科, 赵牡丹, 刘咏梅, 等. 2009. DEM与区域土壤侵蚀地形因子研究[J]. 地理信息世界, 7(1): 25-31, 45. [Yang Q K, Zhao M D, Liu Y M, et al. 2009. Application of DEMs in regional soil erosion modeling[J]. Geomatics World, 7(1): 25-31, 45.]
- 杨子生. 2002. 云南金沙江流域重力侵蚀量分析[J]. 水土保持学报, 16(6): 4-8, 35. [Yang Z S. 2002. Analysis on amount of gravitational erosion in Jinsha River Basin of Yunnan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 16(6): 4-8, 35.]
- 杨子生, 贺一梅, 李云辉, 等. 2004. 近40年来金沙江南岸干热河谷区的土地利用变化及其土壤侵蚀治理研究: 以云南宾川县为例[J]. 地理科学进展, 23(2): 16-26. [Yang Z S, He Y M, Li Y H, et al. 2004. Land use change and soil erosion control in dry-hot valley zone in the middle reaches of Jinsha River during 1960-2000: A case study in Binchuan County, Yunnan Province[J]. Progress in Geography, 23(2): 16-26.]
- 怡凯, 王诗阳, 王雪, 等. 2015. 基于RUSLE模型的土壤侵蚀时空分异特征分析: 以辽宁省朝阳市为例[J]. 地理科学, 35(3): 365-372. [Yi K, Wang S Y, Wang X, et al. 2015. The characteristics of spatial-temporal differentiation of soil erosion based on RUSLE model: A case study of Chaoyang City, Liaoning Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(3): 365-372.]
- 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 2012. 土壤厚度的空间插值方法比较: 以青海三江源地区为例[J]. 地理研究, 31(10): 1793-1805. [Yi X S, Li G S, Yin Y Y, et al. 2012. Comparison on soil depth prediction among different spatial interpolation methods: A case study in the Three-River Headwaters region of Qinghai Province[J]. Geographical Research, 31(10): 1793-1805.]
- 张斌, 史凯, 刘春琼, 等. 2009. 元谋干热河谷近50年分季节降水变化的DFA分析[J]. 地理科学, 29(4): 561-566. [Zhang B, Shi K, Liu C Q, et al. 2009. Changes of seasonal precipitation of Yuanmou dry-hot valley in recent 50 years based on method of DFA[J]. Scientia Geographica Sinica, 29(4): 561-566.]
- 张洪江. 2008. 土壤侵蚀原理[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社. [Zhang H J. 2008. Principle of soil erosion[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Forestry Press.]
- 张岩, 刘宪春, 李智广, 等. 2012. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J]. 农业工程学报, 28(10): 165-171. [Zhang Y, Liu X C, Li Z G, et al. 2012. Surveying soil erosion condition in Loess Plateau using soil erosion model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 28(10): 165-171.]
- 郑粉莉, 刘峰, 杨勤科, 等. 2001. 土壤侵蚀预报模型研究进

- 展[J]. 水土保持通报, 21(6): 16-18, 32. [Zheng F L, Liu F, Yang Q K, et al. 2001. Review of research progress in soil erosion prediction model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 21(6): 16-18, 32.]
- 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 2008. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. 自然杂志, 30(1): 12-16. [Zheng F L, Wang Z L, Yang Q K. 2008. The retrospection and prospect on soil erosion research in China[J]. Chinese Journal of Nature, 30(1): 12-16.]
- 朱会义, 刘述林, 贾绍凤. 2004. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究, 23(4): 425-432. [Zhu H Y, Liu S L, Jia S F. 2004. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements[J]. Geographical Research, 23(4): 425-432.]
- Bek S, Ježek J. 2011. Optimization of interpolation parameters when deriving DEM from contour lines[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 25(8): 1049-1055.
- Cook H L. 1937. The nature and controlling variables of the water erosion process[J]. Soil Science Society of America Journal, 1: 487-494.
- Kim Y. 2014. Soil erosion assessment using GIS and revised universal soil loss equation(RUSLE) [D]. Austen, TX: University of Texas at Austin.
- Mitas L, Mitasova H. 1998. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention[J]. Water Resources Research, 34(3): 505-516.
- Mitasova H, Hofierka J, Zlocha M, et al. 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 10(5): 629-641.
- Neteler M, Mitasova H. 2008. Open source GIS: A grass GIS approach[M]. New York: Springer.
- Pistocchi A, Cassani G, Zani O. 2002. Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices[C]//Rizzoli A E, Jakeman A J. International environmental modelling and software society, congress proceedings. Lugano, Switzerland: iEMSs: 163-168.
- Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation(RUSLE)[Z]. Washington DC: United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook, No.703.
- Wischmeier W H, Smith D D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland and east of the Rocky Mountains: A guide to conservation planning[Z]. Washington DC: United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook, No.282.

Effects of different DEM spatial interpolation methods on soil erosion simulation:

A case study of a typical gully of dry-hot valley based on USPED

XU Yali, LUO Mingliang*, LIANG Beiyu, CHANG Xiaoli, XIANG Wei, ZHANG Bin
(School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China)

Abstract: Digital elevation models (DEMs) have been widely used in soil erosion simulation, but how different interpolation methods affect the simulation results is not well researched. In this article, a typical gully in the dry-hot valley of the Jinsha River was selected as the case study area. First, field measurement of elevations of the gully was preformed. Inverse Distance Weighted (IDW), Disjunctive Kriging (DK), Spline with Tension (ST), and Local Polynomial Interpolation (LPI) methods were then used to produce high-precision DEMs of the gully. The United Stream Power- based Erosion Deposition (USPED) model was used to simulate the spatial distribution of erosion and deposition in the gully. The coefficient of relative difference was used to analyze the similarity of USPED results. The result shows that the precision of DEMs from high to low is: DK, LPI, IDW, and ST. The results of USPED simulation show that DK revealed the main distribution pattern of erosion and deposition, but IDW highlighted the details, and LPI and ST were in-between. The coefficient of relative difference shows that IDW was similar with other interpolation methods in soil erosion simulation, but when the layout of sampling points is reasonable and the density of the sampling points is sufficiently high, IDW is more suitable for soil erosion simulation using USPED.

Key words: soil erosion; spatial interpolation; USPED; coefficient of relative difference; gully