

DEM 分辨率对产流产沙模拟影响研究

任希岩, 张雪松, 郝芳华, 程红光, 杨志峰

(北京师范大学环境科学研究所, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘 要: 地形状况决定流域基本特征, 因此在进行流域水文过程模拟时, DEM 分辨率会影响流域特征参数的提取, 进而影响模拟结果。在研究流域模拟过程中 DEM 分辨率对流域参数提取及产流产沙模拟的影响, 选择黄河下游支流洛河卢氏水文站以上流域为研究区, 采用 Resize cell 技术对 1:25 万 DEM 图进行单元栅格处理, 分别生成 100 m × 100 m、200 m × 200 m、300 m × 300 m 和 400 m × 400 m 四种不同分辨率的 DEM 图; 分别模拟四种情况下 1997 ~ 1999 年流域的产流量与产沙量, 进而分析 DEM 分辨率对模拟结果的影响。研究表明: DEM 分辨率对流域的面积或个数的提取影响不大, 但对坡度值的提取影响较大。其中, 400 m × 400 m 的 DEM 与 100 m × 100 m 的 DEM 相比, 1997 ~ 1999 年产流模拟结果分别相差 9.12%、9.71%、19.52%, 产沙量模拟结果分别相差 42.25%、43.56%、49.70%。因此, 在进行流域产流、产沙模拟时, 应进行坡度订正。

关键词: DEM; 分辨率; SWAT 模型; 坡度; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)01-0001-04

Effects of DEM Resolutions on Simulated Runoff and Sediment Yields

REN Xi-yan, ZHANG Xue-song, HAO Fang-hua, CHENG Hong-guang, YANG Zhi-feng

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Institute of
Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Hydrological model simulations are affected by parameters derived from DEM with different resolutions, which describes the watershed features. The upper range of Luohe River was selected to simulate runoff and sediment yields using the GIS-based SWAT model with four DEM resolutions. The results showed no differences among derived watershed parameters under varying resolutions of DEM, but greater differences for derived slopes. It is important to modify slopes for simulations of runoff and sediment yields. Compared with the lowest resolution of DEM, the changes for the runoff of the highest resolution of DEM was 9.12% ~ 19.52% during 1997 ~ 1999, and the changes for the simulated sediment yields of the highest resolution of DEM was 42.25% ~ 49.70% during 1997 ~ 1999. In addition, seasonal rainfall distribution and intensity had effects on the simulations.

Key words: DEM; resolution; SWAT model; slope; soil erosion

1 引言

数字高程模型(Digital Elevation Models, DEMs)是由美国麻省理工学院的 Miller 于 1965 年提出的^[1], 其目的是用摄影测量或其它技术手段获得地形数据, 在满足一定精度的条件下, 用离散数字的形式在计算机中进行表示, 并用数字计算的方式进行各种分析。DEM 主要提供三个信息: (1) 代表空间高程信息栅格的二维数字阵列; (2) 不规则散点网中空间 x 、 y 、 z 坐标; (3) 等高线沿程每一点的 x 、 y 坐标^[2]。DEM 作为地理信息系统的基础数据, 已在测绘、地质、土木工程、水利、建筑等许多领域得到广泛应用^[3,4]。

随着“数字水土保持”概念的提出^[5], 基于 DEM 的流域产流产沙研究日益广泛。流域产流产沙模拟的准确度依赖于

输入模型的流域特征参数^[6,7], 而 DEM 分辨率影响了诸如坡度、坡向、水沙运移方向、汇流网络、流域界线等流域特征参数的提取^[8,9]。目前, 国内外学者对 DEM 分辨率对流域特征参数的影响进行了研究^[10~13], 但对产流、产沙的影响研究相对较少^[14]。因此本文着重研究 DEM 分辨率对流域产流和产沙的影响, 以及 DEM 分辨率影响的主要因子与影响方式。

2 数据和方法

2.1 研究区简介

本文选择黄河下游支流洛河上游卢氏水文站以上流域为研究区域, 其地理位置和水系如图 1 所示。洛河是黄河三门峡以下最大支流, 发源于陕西省华山南麓蓝田县境内, 在

收稿日期: 2003-08-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043605); 教育部博士点基金资助项目(20010027013)

作者简介: 任希岩(1978-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事水资源与水环境、环境模拟等方向研究。

河南省巩县境内汇入黄河,河道长 447 km,流域面积 18 881 km²,流域形状狭长,流域地势西南高东北低,河流走向大致与黄河干流平行。卢氏水文站以上流域河道长 196.3 km,流域面积 4 623 km²,该区为土石山区,植被较好,并有大片森林覆盖,水源涵养条件较好,具有多种不同的土地利用和土壤类型。

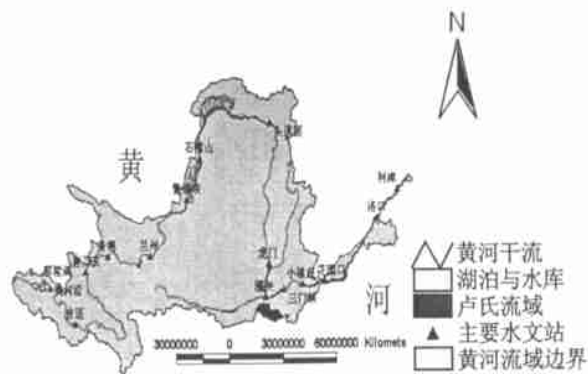


图 1 卢氏流域地理位置与水系图

2.2 基础数据

本文采用的 DEM 数据是由国家基础地理信息中心提供的 1:25 万 DEM 图,其图像如图 2 所示。分别采用 ArcView 中的 Resize cell 技术对 DEM 分辨率进行重新调整,得到单元栅格分别为 100 m × 100 m、200 m × 200 m、300 m × 300 m 和 400 m × 400 m 的研究区的 DEM 图,图中深色代表高程较高处,浅色代表高程较低处。采用 1:100 万的土壤类型图与 1:100 万的土地利用图,应用 1997~1999 年的日降水数据及气象资料,分别模拟四种不同 DEM 分辨率的流域产流量与产沙量。



图 2 卢氏流域 1:25 万 DEM 图像

2.3 研究方法

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是美国农业部 (USDA) 与农业研究局 (ARS) 开发的流域尺度模型,用于模拟地表水与地下水的水量和水质,预测土地管理措施对具有多种土壤类型,土地利用方式的大面积复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质的影响^[15]。与众多的分布式水文模拟模型一样,模型中产流计算采用的是 SCS 曲线系数法,产沙计算采用的是修正土壤流失方程,因此采用该模型研究 DEM 分辨率对产流产沙模拟计算的影响具有很强的推广

性。

2.3.1 产流计算

降水径流计算是模拟土壤侵蚀的基础,当无降水过程资料而只有降水总量资料时,可以采用 SCS 曲线系数法来进行降水径流模拟。SCS 曲线方程在 20 世纪 50 年代逐渐得到广泛应用,属于经验模型,用于计算不同土壤类型和土地利用条件下的径流量^[16]。SCS 曲线系数方程如式(1):

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - I_a)^2}{(R_{\text{day}} - I_a + S)} \quad (1)$$

式中: Q_{surf} ——产流量 (mm); R_{day} ——日降水深 (mm); I_a ——初始吸收量 (mm), 包括雨量在产流前的地表储存、中途拦截和下渗; S ——持水系数。持水系数 S 在空间上与土壤类型、土地利用、管理和坡度有关,在时间上和土壤含水量有关。 S 可根据以下公式求得:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

式中: CN ——曲线系数。

2.3.2 产沙计算

美国通用土壤流失方程是 1962 年由 Wischmeier 建立的。该方程可靠性大,通用性强,精度高,区域限制比较少,因而在世界范围内得到广泛应用^[17]。修正后的土壤流失方程如式(3)

$$sed = 11.8 (Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot area_{\text{hru}})^{0.56} \cdot K_{\text{USLE}} \cdot D_{\text{USLE}} \cdot P_{\text{USLE}} \cdot L_{\text{USLE}} \cdot C_{\text{FRG}} \quad (3)$$

式中: sed ——土壤侵蚀量 (t); Q_{surf} ——地表径流 (mm/hm²); q_{peak} ——洪峰径流 (m³/s); $area_{\text{hru}}$ ——水文响应单元 (HRU) 的面积 (hm²); K_{USLE} ——土壤侵蚀因子; C_{USLE} ——植被覆盖和管理因子; P_{USLE} ——保持措施因子; L_{USLE} ——地形因子; C_{FRG} ——粗碎屑因子。

3 DEM 分辨率影响分析

3.1 DEM 分辨率对流域特征参数的影响

由于确定基于 GIS 的模型输入参数依赖于 DEM 中提取的流域特征参数,因此明确 DEM 分辨率对诸如流域范围、河网形状、河网密度、河段长度、亚流域面积与个数和坡度这些流域特征参数的影响是十分必要的,图 3、图 4 为两种 DEM 分辨率提取的河网。

对由不同 DEM 分辨率计算出来的流域特征参数比较见表 1。主要计算公式如下:

$$W_i = \frac{A_i}{A} \quad (4)$$

$$W_{CN2} = \sum_{i=1}^{37} W_i \cdot CN_{2i} \quad (5)$$

$$W_{SL} = \sum_{i=1}^{37} W_i \cdot SL_{Pi} \quad (6)$$

$$W_{CN2s} = \frac{(CN_{2s} - CN_{2c})}{3} \times [1 - 2 \times \exp(-13.68 \times W_{SL})] + CN_{2c} \quad (7)$$

$$CN_{2\%} = \frac{W_{CN2s} - CN_{2c}}{CN_{2c}} \quad (8)$$

式中: A_i ——亚流域面积; A ——流域面积; W_i ——面积权重值; CN_2 ——湿润条件 II 下的 SCS 曲线系数; CN_3 ——湿润条件 III 下的 SCS 曲线系数; WCN_2 ——面积权重修正 CN_2 值; CN_{2i} ——第 i 个亚流域 CN_2 值; W_{SL} ——面积权重修正坡度值; SLP_i ——亚流域坡度; WCN_{2s} ——经过坡度修正后的面积权重 CN_2 值; $CN_2\%$ ——采用坡度修正以后得到 CN_2 变化率。

表 1 不同DEM 分辨率流域特征参数表

DEM	WCN_2	W_{SL}	WCN_{2s}	$CN_2\%$	$AREA/km^2$
100 m × 100 m	70	0.202	74.5	6.57	4 430
200 m × 200 m	70	0.168	73.4	6.19	4 430
300 m × 300 m	70	0.139	74.0	5.23	4 390
400 m × 400 m	70	0.118	73.1	4.55	4 380

由四种分辨率的DEM 模拟计算得到的流域范围基本无变化,但略有差别。说明这四种DEM 分辨率提取的流域范围是一致的,即流域范围对DEM 分辨率变化的响应关系不明显;存在差别的主要原因是提取流域范围时对边界的单元栅格处理略有不同。图 3、图 4 说明在相同的单元阈值面积(3 600 hm^2)条件下划分出的河网形状、河网密度基本相同,但是低分辨率DEM (如 400 m × 400 m)划分的河网河道的曲度变的比较平



图 3 100 m × 100 m 模拟河网图

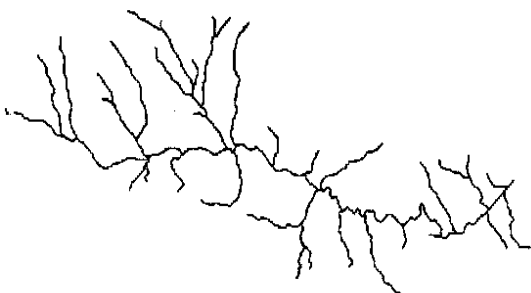


图 4 400 m × 400 m 模拟河网图

表 2 不同DEM 分辨率模拟产流量变化总表

DEM 年份	100 m × 100 m			200 m × 200 m			300 m × 300 m			400 m × 400 m		
	产流量	修正产流量	变化率/%	产流量	修正产流量	变化率/%	产流量	修正产流量	变化率/%	产流量	修正产流量	变化率/%
1997	76.9	107.4	40	77.0	105.5	37	77.3	101.2	31	77.3	97.6	26
1998	151.5	218.2	44	152.7	214.6	41	153.0	204.9	34	153.0	196.9	29
1999	16.2	34.2	112	15.9	32.4	103	16.1	29.8	85	16.1	27.6	71

表 3 不同DEM 分辨率模拟产流量变化表

DEM	100 m × 100 m	200 m × 200 m		300 m × 300 m		400 m × 400 m	
年份	产流量	产流量变化率/%		产流量变化率/%		产流量变化率/%	
1997	76.7	77.0	0.47	77.3	0.74	77.3	0.74
1998	151.5	152.7	0.78	153.0	1.00	153.0	1.00
1999	16.2	15.9	- 1.10	16.1	- 0.50	16.1	- 0.50

从表 2 与表 3 中可以看出:产流量对DEM 的分辨率变化没有响应,原因是模型中对产流量的模拟计算采用了均一的坡度值 0.05。但是在经过坡度修正以后的模拟中,产流量对DEM 分辨率变化的响应关系明显,DEM 分辨率对产流量的影响基本在 30% 以上,而且在产流量较小时,DEM 分辨率的影响更为显著。

将 100 m × 100 mDEM 模拟结果作为基准,采用不同分辨率DEM 的模拟结果与其进行比较(见表 4),可以看出:随

直,高程较高的源头地区的小支流有划分消失的现象,这主要是由于分辨率降低使高程变化趋于不明显,影响了流向的计算。由表 1 可以看出,不同DEM 分辨率计算出来的流域面积变化微小,最大误差率仅为 1.1%。不同分辨率的DEM 对面积权重 CN_2 的值基本没有影响,但是对面积权重坡度的影响明显,分辨率高的DEM 计算出来的坡度大,分辨率低的DEM 计算出来的坡度偏小。200 m × 200 m, 300 m × 300 m, 400 m × 400 m DEM 提取的坡度分别比 100 m × 100 m DEM 提取的坡度减少了 16.8%、31.2% 和 41.6%。由此引起了坡度修正后的 CN_2 值的不同,四种分辨率的DEM 的影响分别引起 CN_2 增加了 6.57%、6.19%、5.23% 与 4.55%。

3.2 DEM 分辨率对模拟产流量的影响

本文中所采用的基础数据只有DEM 的分辨率是不同的,所以模型的模拟结果反映了DEM 分辨率对流域产流量的影响。文中采用模型默认的参数值进行模拟,应用 1997~1999 年的水文气象数据模拟了流域 3 年的产流量,表 2 中列出了通过不同分辨率的DEM 计算出的流域产流量(以下称产流量)与经过坡度修正的流域产流量(以下称修正产流量)。

随着分辨率降低,产流量随之减少,与坡度减少趋势相一致;并且当产流量较小时,DEM 分辨率的影响更加显著。由此可以说明:DEM 分辨率对模拟产流量的影响主要集中在其对坡度的提取上,并且对于干旱地区或者是降水保证率较低的地区DEM 分辨率对模型模拟精度起着更加重要的作用。

表 4 不同DEM 分辨率坡度修正模拟产流量变化表

mm							
DEM	100 m × 100 m	200 m × 200 m	300 m × 300 m	400 m × 400 m			
年份	修正产	修正产	修正产	修正产	修正产	修正产	
	流量	流量	变化率/%	流量	变化率/%	流量	变化率/%
1997	107.4	105.5	-1.76	101.2	-5.76	97.6	-9.12
1998	218.2	214.6	-1.62	204.9	-6.06	196.9	-9.71
1999	34.2	32.4	-5.26	29.8	-12.97	27.6	-19.52

3.3 DEM 分辨率对模拟产沙量的影响

在 SWAT 模型中影响产沙量主要有两个因素- 产流量和坡度。表 5、表 6 对不同 DEM 分辨率模拟的产沙量(以下

称产沙量)和经过坡度修正后的产沙量(以下称修正产沙量)进行了对比。

表 5 不同DEM 分辨率模拟产沙量变化总表

kg/hm²

DEM	100 m × 100 m			200 m × 200 m			300 m × 300 m			400 m × 400 m		
年份	产沙量	修正产沙量	变化率/%	产沙量	修正产沙量	变化率/%	产沙量	修正产沙量	变化率/%	产沙量	修正产沙量	变化率/%
1997	116.8	165.9	42	107.9	149.9	39	104.1	138.0	33	75.1	95.9	29
1998	232.2	339.6	46	214.2	305.4	43	205.1	278.3	36	147.2	191.7	30
1999	21.9	47.0	115	19.8	40.9	107	18.9	35.8	89	13.6	23.7	74

表 6 不同DEM 分辨率模拟产沙量变化表 kg/hm²

DEM	100 m × 100 m		200 m × 200 m		300 m × 300 m		400 m × 400 m	
年份	产沙量	变化率/%	产沙量	变化率/%	产沙量	变化率/%	产沙量	变化率/%
1997	116.8	107.9 - 7.56	104.1	10.87	75.1	- 35.71		
1998	232.2	214.1 - 9.70	205.1	- 16.85	147.2	- 42.25		
1999	21.9	19.7 - 10.08	18.9	- 18.06	13.6	- 43.56		

表 7 不同DEM 分辨率坡度修正模拟产沙量变化表

kg/hm²

DEM	100 × 100 m		200 × 200 m		300 × 300 m		400 × 400 m	
年份	修正产沙量	修正产沙量变化率/%	修正产沙量	修正产沙量变化率/%	修正产沙量	修正产沙量变化率/%	修正产沙量	修正产沙量变化率/%
1997	165.9	149.9 - 9.69	138.0	- 16.84	95.9	- 42.25		
1998	339.6	305.4 - 10.08	278.3	- 18.06	191.7	- 43.56		
1999	47.0	40.9 - 12.97	35.8	- 23.95	23.7	- 49.70		

从表 5、表 6 中可以看出: DEM 分辨率对产沙量影响比较显著, 低分辨率 DEM (400 m × 400 m) 计算出来的产沙量比高分辨率 DEM (100 m × 100 m) 计算出的产沙量减少了 35% 以上, 原因主要是在计算产沙量时考虑了 DEM 分辨率对坡度计算的影响; 经过坡度修正以后的模拟中, DEM 分辨率对产沙量的影响变大, 原因是考虑到产流量对坡度的响应关系。将其它 DEM 分辨率的模拟结果与 100 m × 100 m DEM 的模拟结果比较(见表 7), 可以看出: 随着 DEM 分辨率的降低, 产沙量随之减少, 与坡度减少的趋势相一致。

参考文献:

[1] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘大学出版社, 2000

[2] Jeffrey P Walker, Garry R. Willgoose. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology[J]. Water Resources Research, 1999, 35(7): 2 259- 2 268

[3] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430- 439

[4] Cho, S M, M W Lee. Sensitivity considerations when modeling hydrologic processes with digital elevation model[J]. Journal of American Water Resources Association, 2001, 37(4): 931- 934

[5] 韩琳, 杨勤科. “数字黄土高原”到“数字水土保持”[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 10- 13

[6] 魏文秋, 于建营. 地理信息系统在水文学和水资源管理中的应用[J]. 水科学进展, 1997, (3): 296- 300

[7] 肖培青, 郑粉莉, 史学建. 黄土坡面侵蚀垂直分带性及其侵蚀产沙研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 47- 49

[8] 唐政洪, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙的地貌分带研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 34- 38

[9] 毕华兴, 中北理. 遥感和地理信息系统与水文学整合研究进展[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 45- 49

[10] Moore, ID, R B Grayson, A R Ladson. digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological application[J]. Int. J. of Hydrological Process, 1991, 5(1): 3- 30

[11] Wolock, D M, C V Price. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model[J]. Water Resources Research, 1994, 30(11): 3 041- 3 052

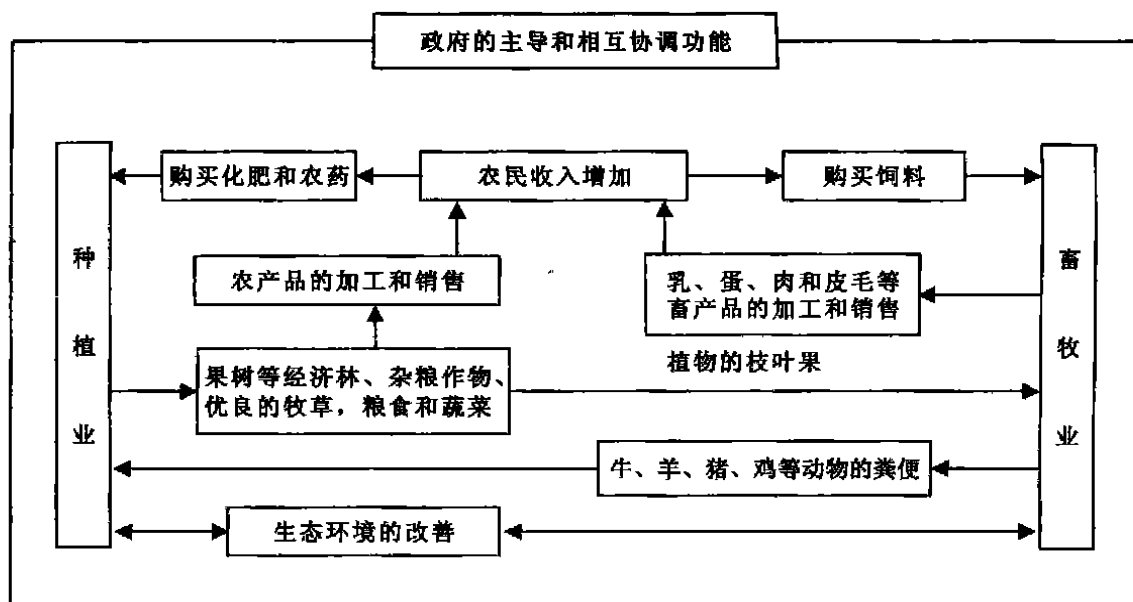


图 3 环县生态农业模式

举的良性方向发展,加快了脱贫致富的步伐(见图 3)。

该模式以农业的产业基地为基础,而形成一种良性循环:种植的粮食、蔬菜等主要供自己使用,种植业的副产品枝叶等作为养殖业的饲料,结合从外部购入的饲料来发展养殖业,动物的粪便、种植业的枯枝落叶等作为有机肥类肥田,改良土壤,增加土壤的肥力,提高产量。要不断提高桃杏等水果的品质,拓宽销售渠道,保证水果的销售通畅;同时建立水果的加工企业,生产杏干、果脯、果汁等,提高经济效益。对杂粮

和中药材进行加工,将生产、加工、流通、销售等各个环节联系起来,可以提高农民的收入,提供更多的就业岗位,为种植业和养殖业提供更多的支持,为生态环境建设提供强有力的支撑。此模式充分考虑了各个方面的因素,不但维持了生态系统内部的平衡,而且突出了市场的重要性,而政府部门为其提供资金、技术、政策等方面的支持,发挥政府的综合协调功能,使之可以健康、稳定的发展。

参考文献:

- [1] 赵跃龙. 脆弱生态环境评价方法的研究[J]. 地理科学进展, 1998, 17(1): 67- 72
- [2] 环县生态环境建设领导小组办公室. 环县 1999 年生态环境建设文件汇编[Z]. 2000. 12
- [3] 梅成瑞. 中国干旱区土地人口承载力发展的预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 1990, 4(3): 24- 27
- [4] 杨新, 延军平. 陕甘宁地区气候暖干化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2002, (3): 67- 70
- [5] 赵雪雁, 巴建军. 甘肃黄土高原区生态环境建设与可持续农业发展对策[J]. 干旱区地理, 2002, 12 (4): 346- 349
- [6] 中国科学院生物部. 黄土高原农业可持续发展的研究和政策建议[J]. 科技导报, 2000, (3): 36
- [7] 廖允成, 王立祥, 温晓霞. 黄土高原农业地域资源优势利用与产业化探讨[J]. 自然资源学报, 2000, (1): 51- 55
- [8] 王龙昌, 谢小玉, 王立祥. 宁南旱区生态农业建设与农业产业化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, (2): 99- 103
- [9] 贾文雄, 田玉军. 定西地区农业生态建设与可持续发展研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, (1): 111- 115
- [10] 李团胜, 等. 黄土高原区景观生态特征与景观生态建设[J]. 生态学杂志, 2002, 21(5): 78- 80
- [11] 唐克丽. 黄土高原丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报, 1998, 43(2): 200- 203

(上接第 4 页)

- [12] 汤国安, 杨勤科, 张勇. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究——以在黄土丘陵沟壑区的试验为例[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 53- 56
- [13] 赵牡丹, 陈正江, 晋锐. DEM 提取地面平均坡度误差的量化模拟[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 55- 57
- [14] 田磊, 戴静, 祁永刚. 流域侵蚀产沙模型述评[J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 77- 79
- [15] Arnold J R, S L Neitsch, J G Keniry, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation[M]. Texas: Grassland Soil Water Research Laboratory, 2002
- [16] M DiLuzio, R Srinivasan, J G Arnold, et al. ArcView Interface For SWAT 2000 User's Guide[M]. Texas: Grassland Soil Water Research Laboratory, 2002
- [17] S L Neitsch, J G Arnold, J R Keniry, et al. Soil and Water Assessment Tool User's Manual[M]. Texas: Grassland Soil Water Research Laboratory, 2002