

田耀武, 黄志霖, 曾立雄, 等. 2009 DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响 [J]. 环境科学学报, 29(4): 846–853
Tian Y W, Huang Z L, Zeng L X, *et al*. 2009. Impact of DEM mesh size on AnnAGNPS runoff and sediment predictions for a small-scale hilly watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(4): 846–853

DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响

田耀武^{1, 2}, 黄志霖², 曾立雄², 肖文发^{2*}, 马德举³

1 中山大学生命科学院, 广州 510275
2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091
3 秭归县林业局, 宜昌 443600

收稿日期: 2008-05-23 修回日期: 2008-10-04 录用日期: 2009-02-06

摘要: 为了解流域地形空间参数和其它参数的精度对农业非点源污染模型 AnnAGNPS 预测准确性的影响, 利用三峡库区黑河小流域观测资料校准了 AnnAGNPS 模型, 分析了 1.5~12.5m 格网尺度 DEM 对地形参数和模型负载输出的影响。结果表明, 1.5~12.5m 格网尺度 DEM 对流域径流量、洪峰流量、总 N 输出影响不显著, 但对泥沙、总 P 有机碳输出影响显著。三峡库区类似小流域宜采用 5m 格网尺度 DEM, AnnAGNPS 模型较不适合于尺度较小、坡度较大的小流域泥沙负载预测。
关键词: 格网尺度; AnnAGNPS 模型; 小尺度流域; 地形参数; 泥沙输出; 径流

文章编号: 0253-2468 (2009) 04-846-08 中图分类号: X522 文献标识码: A

Impact of DEM mesh size on AnnAGNPS runoff and sediment predictions for a small-scale hilly watershed

TIAN Yaowu^{1, 2}, HUANG Zhilin², ZENG Lixiong², XIAO Wenfa^{2*}, MA Deju³

1 School of Life Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275
2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration China, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091
3 Forestry Bureau of Zigui County, Yichang 443600

Received 23 May 2008 received in revised form 4 October 2008 accepted 6 February 2009

Abstract The input of nutrients from agricultural non-point sources (AGNPSs), sediment delivery and worsening of water quality have become challenging issues threatening water security, human health and natural ecosystems in the Three Gorges Reservoir area. The agricultural non-point source (AGNPS) model is a useful tool for analysis of agricultural watershed management scenarios. The accuracy of agricultural nonpoint source pollution models depends to a great extent on how well model input spatial parameters describe the relevant characteristics at the watershed scale. The objectives of this study were to define appropriate model input parameters and to define a protocol for model validation at the sub-watershed and watershed scale in the Three-Gorges Reservoir area. The precision of spatial input parameters affects the simulation results of runoff and sediment yield from the watershed. This study integrated AnnAGNPS and digital databases to simulate the impact of DEM mesh size change (from 1.5 to 12.5 m) on runoff, sediment and nutrient yields based on available datasets at the outlet of a small-scale agricultural watershed (144.4 km²). For tested mesh sizes, the simulation results showed that the computed runoff flux, peak flow and total nitrogen export were not likely to be significantly affected, while estimates of sediment yields, total phosphorus and total organic carbon export in runoff water were significantly affected. These results indicated that DEM of 5 m mesh size was well suited to applications for model simulation in the small watershed; however, AnnAGNPS was less reliable for sediment loading prediction in a similar-sized hilly watershed in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords DEM mesh size; AnnAGNPS model; small-scale watershed; topographic parameter; sediment transport; runoff

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (No. 2006BAD03A13, 2006BAD03A07)
Supported by the 11th Five-year Scientific support (No. 2006BAD03A13 & 2006BAD03A07)
作者简介: 田耀武 (1975—), 男, E-mail: tianyaowu@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xiaowen@caf.ac.cn
Biography: TIAN Yaowu (1975—), male, E-mail: tianyaowu@126.com; * Corresponding author, E-mail: xiaowen@caf.ac.cn

1 引言 (Introduction)

AGNPS 模型已广泛应用于农业流域非点源污染和管理措施研究方面。数字高程模型 (DEM) 是地理模型空间地形参数产生的基础。理论上, DEM 格网值越小地形模拟的精度越高。但是, DEM 只是对地形特征的一个近似表示, 具有一定程度的不确定性, DEM 对所提取地形信息精度的影响是 DEM 不确定性研究的核心内容之一 (汤国安等, 2003)。DEM 的不确定性使得基于 DEM 的地形空间参数与真实地形之间产生了一定程度的偏离 (Thompson *et al.*, 2001; 刘学军等, 2006), 这种偏离将影响模型对研究流域输出预测的精度。已有文献对 DEM 格网尺度对空间地形参数误差的传播、空间地形参数误差对模型预测精度的影响 (Quinn *et al.*, 1991; Farajall *et al.*, 1995; Brasington *et al.*, 1998; Thompson *et al.*, 2001)、地理模型对 DEM 尺度的敏感性等方面作了研究。如 Vieux (1993) 报道, 对于 AGNPS 模型, 当 DEM 格网尺度从 100 增加到 200 m 时泥沙输出预测值随之减少; Brown 等 (1993) 使用尺度大于 120 m 的 DEM, 其 ANSWER 模型的泥沙年输出预测值开始发生剧烈变化; Zhang 和 Montgomery (1994) 建议, 在利用 TOPMODEL 模型 (Beven *et al.*, 1979) 模拟水文过程时使用 10m 格网的 DEM; Kalin (2003) 等在爱荷华州某流域内使用 KINEROS 模型模拟流域洪峰流量, 结果显示, 随着 DEM 格网的增加流域洪峰流量也随之增加; 郝芳华等 (2006) 提出了大尺度流域非点源污染负荷估算方法研究的方法。以上研究均是基于中、大尺度格网尺度 DEM 和农业流域的输出预测, 但在中国三峡库区条件下, 利用 AnnAGNPS 模型和小尺度山地农林复合流域径流和物质输出的影响还鲜有报道。因此, 本研究中利用三峡库区黑河小流域 (144.4 km²) 和 AnnAGNPS 模型, 探讨 DEM 尺度对模型径流和物质输出的影响, 期望解决小流域尺度和 DEM 尺度的匹配问题; 并分析 AnnAGNPS 在本地区条件下的适用性, 旨在为三峡库区农林复合小流域非点源污染提供预测和防治理论基础。

2 研究地区概况 (Description of study area)

黑河流域位于湖北省秭归县中东部, 东经 110°53'27"~110°54'50", 北纬 30°51'21"~30°51'34", 属兰陵溪支流, 面积 144.4 km², 测流堰距三峡库区

3.5 km (地理位置见图 1)。该流域地处中纬度, 属亚热带大陆性季风区, 多年平均降雨量 1439 mm, 年际差异大, 年内降雨分布为单峰型 (5~8 月占全年的 68%)。土壤为花岗岩母质出露发育的石英砂土, 植被覆盖率为 72.5%。流域东低西高, 西部山高坡陡, 最高海拔为 1400.0 m, 植被覆盖低, 以荒草岩石间隔分布为主; 中部低山区为马尾松、毛竹、柑桔、板栗等人工次生林带, 农林、农茶间作带; 东部低山区缓坡台地以植茶为主, 间作水稻、玉米、花生等农作物。流域内植茶农地面积为 45.8 km², 林地 56.1 km², 草地 6.9 km², 荒山荒坡 20.8 km²。农地、林果地农药及化肥施用量较大, 氮肥、磷肥施用比为 20:3。

国家林业局三峡库区秭归森林生态定位站在兰陵溪小流域建立了茶园地、马尾松林地、典型农地等 30 多个永久性土壤径流观测场, 同时还对兰陵溪黑河小流域长年进行生态变化监控。黑河小流域降雨径流发生的特点为西部荒山陡坡地易发生地表径流, 马尾松等林地水土保持生态效益显著, 农林地水土流失和非点源污染物输出严重。如柑桔地土壤侵蚀模数为 124 t km⁻² a⁻¹, 茶园地土壤侵蚀模数为 98 t km⁻² a⁻¹。全流域年泥沙负载输出为 150~650 t, 总 N 年负载输出为 4~6 t, 总 P 年负载输出为 400~800 kg。

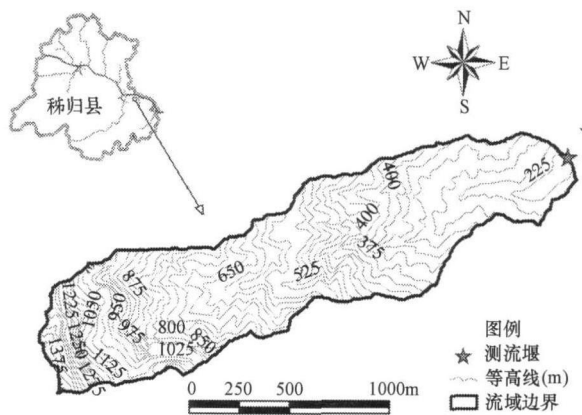


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location of the study area

3 材料与方法 (Materials and methods)

3.1 流域 DEM 生产与地形参数值提取

国家测绘部门航测 1:10000 地形图 (5m 等高距) 作为地形信息源, 按照国家测绘局《1:10000 数字高程模型生产技术规定》(2001) 对地形图件进行

等高线矢量化(杨晓云等, 2006), 生成 1.0 m 格网尺度的 DEM(以 DEM_{1.0}示). 利用 ArcView GIS 双线性内插法 DEM 重采样(Wu et al., 2005), 生成 1.5 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 m 格网 DEM(以 DEM_{1.5}、DEM_{2.5}、DEM_{5.0}、DEM_{7.5}、DEM_{10.5}、DEM_{12.5}、DEM_{15.0}示). 在地形图件上选择 50 个点作为高程检测点, 其高程值作为准值, 检验对应 DEM 栅格点的高程采样精度; 在流域内随机布设 300 个点, GPS 定位并量测地面实际坡度, 计算不同分辨率 DEM 提取地面坡度的中误差(汤国安等, 2003). 统计 DEM 最小、最大、平均高程值和标准偏差, 提取统计 DEM 坡度的最小、最大、平均值和标准偏差, 以 0~8°、8~15°、15~25°、25~35°、35~45°、45~60°、>60°等 7 个坡度分级进行坡度面积统计(汤国安等, 2003; 陈楠等, 2006)(注: 地形图件及以下气象、土壤、植被、土地利用资料均来自国家林业局三峡库区秭归森林生态定位站).

3.2 AnnAGNPS简介

AnnAGNPS模型是 USDA-ARS 与 NRCS 联合开发的参数分布式的、基于物理过程的、连续模拟的、流域尺度的高级流域评价工具, 最新版为 AnnAGNPS 4.0 该模型直接替代了场次模型 AGNPS, 实现了与 ArcView 3.x 界面的集成. 模型包括径流、土壤侵蚀、化学物质输移等子模型. 水文模型计算法则为土壤水分平衡方程(式(1))与地表径流模型(SCS-CN)(Bingner et al., 2005)(式(2)、(3)). 泥沙负载量计算法则为修订的通用水土流失方程 RUSLE(式(4)); N 的矿化平衡为 EPIC 模型(Sharpley et al., 1990), 逐日计算 N、P 等化学物质的吸收、降解, 按可溶态和颗粒吸附态计算并输出.

$$SM_{t+1} = SM_t + \frac{WI_t + Q_t + PERC_t + ET_t + Q_{lat} + Q_{tik}}{Z}$$
 (1)

$$Q = \frac{(WI - 0.2S)^2}{WI + 0.8S}$$
 (2)

$$S = 254 \left[\frac{100}{CN} - 1 \right]$$
 (3)

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$
 (4)

式中, SM_t 为土层某时间步长起始水分百分含量, SM_{t+1} 为土层某时间步长终止时水分百分含量, WI 为水分输入量 (mm), Q_t 为表面径流量 (mm), PERC_t 为水分渗出量 (mm), ET_t 为蒸发量 (mm), Q_{lat} 为侧流量 (mm), Q_{tik} 为管道流 (mm), Z 为土层厚度 (mm), t 为步长时间 (d), Q 为地表径流量

(mm), WI 为土壤中输入水量 (mm), S 为水土保持无量纲滞留系数, CN 为径流曲线数, A 为土壤年侵蚀量 ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$), R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为覆盖管理因子, P 为水土保持工程措施因子.

3.3 模型校准

在模型中加载 DEM_{1.5} 土壤、土地管理、气象等空间参数文件, 调试校准模型. 首先设定 -4%~4% 之间的 9 组 CN 值, 每次调整 2% CN 值, 使用试错法(trial and error)和图示法, 当径流观测值与模拟值基本吻合时按 1% CN 调整, 使径流量观测值和模拟值最大程度的拟合(图 2); 其次, 利用非线性参数评估软件 PEST 优化输入参数值, 执行 AGNPS 污染负载模型, 确定出泥沙、N、P 负载输出敏感因子表面粗糙度(surface roughness), 调整该值, 使用试错法(trial and error)和图示法校准泥沙(图 3)、N、P 负载的输出(Baginska et al., 2003). 使校准后模型的负载输出偏差位于观测值的 ±20% 之间(Shrestha et al., 2006).

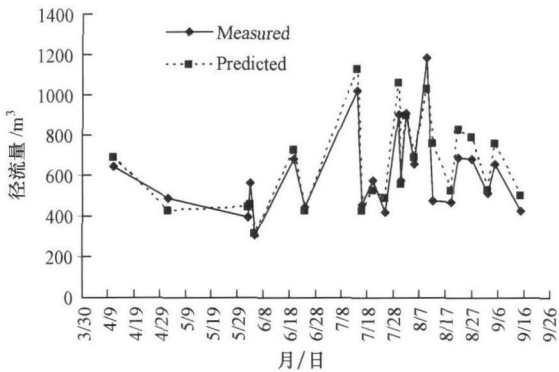


图 2 黑河小流域径流观测值与模拟值校准图示

Fig 2 Measured and predicted daily amounts of runoff from the H he watershed during the calibration period

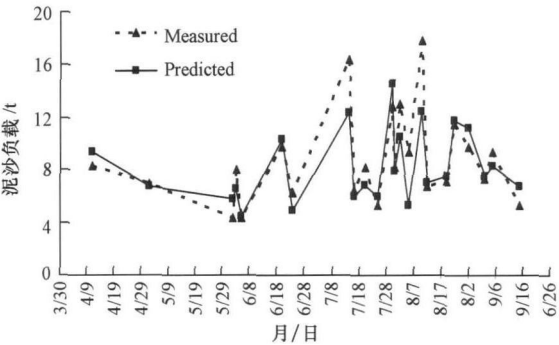


图 3 黑河小流域泥沙负载观测值与模拟值校准图

Fig 3 Measured and predicted daily sediment export from the H he watershed during the calibration period

3 4 模型输出与数据分析

在 AGNPS-ArcView 3.2 集成界面加载 1.5~12.5mDEM 和校正调整后的参数值组,输出流域 10a内产生的径流量、洪峰流量、泥沙、总 N、总 P、有机碳负载.统计模型负载输出过程中模拟产生的流域面积、河道长度、河网长度、流域周长、子单元 (cell)数目等.

以校准后的 DEM_{1.5}输出数据为基准值,使用平均差 MD (Mean Difference) (式 (5)), 平均绝对差 MAD (Mean Absolute Difference) (式 (6)), 平均绝对差之标准差 (q) (式 (7)) 3 个统计参量进行统计分析和差异显著性检验.当 MD、MAD 值增加时,模型准确度降低;q 值表示模型预测值误差偏离零值程度 (Chapman 2005).

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Var)^* - Val_{5m}] \tag{5}$$

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Var^* - Val_{5m}| \tag{6}$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Var)^* - Val_{5m} - MAD]^2} \tag{7}$$

4 结果 (Results)

4.1 DEM 尺度对地形和流域参数的影响

表 1 为不同尺度 DEM 产生的流域周长、面积、坡度等特征参数.由表 1 可知,1.5~12.5mDEM 均可表达出黑河小流域地势西高东低的空间特征,其所描述流域最小、最大、平均高程值和标准差值在统计上均无显著差异(表 1).但是,最小高程值、平均高程值和标准差值均随格网尺度的增大而降低,最大高程值没有发生变化;最小坡度值均为 0,最大坡度值、坡度均值和标准差值随格网尺度的增大而降低,如 DEM_{1.5}坡度最大值为 81.59°,DEM_{12.5}坡度最大值下降为 74.74°.流域周长也呈下降趋势,DEM_{12.5}比 DEM_{1.5}下降了 290.2 m;流域面积、子流域数目 (cell)、沟道 (reach)长度均有小幅度变化.

表 1 不同尺度 DEM 描述的小流域参数
Table 1 The watershed characteristics estimated for each DEM mesh size

DEM 尺度 /m	高程 /m				坡度 / (°)				周长 /10 ² m	面积 /km ²	沟道数 /个	沟道长度 /10 ² m	子流域 /个
	最小	最大	平均	标准差	最小	最大	平均	标准差					
1.5	200.0	1400.0	607.1	301.6	0	81.6	33.7	15.2	69.8	144.2	14	50.2	33
2.5	200.0	1400.0	608.6	299.9	0	79.8	33.8	15.0	68.9	141.7	14	50.7	33
5.0	200.0	1400.0	607.7	301.6	0	77.0	33.8	14.5	68.1	142.6	14	50.6	33
7.5	200.0	1400.0	606.2	301.3	0	75.2	33.6	14.2	67.4	142.9	12	48.7	37
10.0	196.7	1400.0	605.8	301.1	0	74.9	33.4	13.9	67.0	143.3	12	49.4	38
12.5	195.0	1400.0	604.7	300.8	0	74.7	33.1	13.8	66.9	144.4	12	49.7	33

表 2 为不同尺度 DEM 在不同坡度等级中产生的面积及占总面积比率.由表 2 知,0~8°、45~60°、>60°的坡度面积比率随 DEM 格网值的增加而减少.如坡度为 0~8°的 DEM_{12.5}比 DEM_{1.5}减少了

43%,坡度>60°的 DEM_{12.5}比 DEM_{1.5}减少了 24%;8~15°、15~25°、25~35°、35~45°的面积比率均随着 DEM 格网值的上升而上升,如 15~25°中 DEM_{12.5}坡度面积较 DEM_{1.5}增加了 10%.

表 2 不同尺度 DEM 下的坡度分级面积统计
Table 2 Classification statistics for slope area extracted from DEMs of different mesh size

DEM 尺度 /m	不同坡度分级的面积 /km ²							
	0~8°		8°~15°		15°~25°		25°~35°	
1.5	5.4	(3.8%)	8.0	(5.5%)	28.2	(19.7%)	37.7	(26.3%)
2.5	4.8	(3.3%)	8.4	(5.8%)	27.8	(19.4%)	37.5	(26.1%)
5.0	4.1	(2.8%)	8.8	(6.1%)	27.7	(19.2%)	38.2	(26.5%)
7.5	3.6	(2.5%)	8.6	(6.0%)	28.5	(19.7%)	39.1	(27.1%)
10.0	3.1	(2.1%)	8.7	(6.0%)	29.9	(20.7%)	39.8	(27.6%)
12.5	3.1	(2.1%)	9.1	(6.3%)	31.1	(21.5%)	40.0	(27.7%)

注:括号内数据为 DEM 在某坡度分级条件下产生的面积与全流域面积的百分比.

图 4 为河道产生阈值 (stream threshold) 为 10000 时, 模拟河道 (stream) 长度的变化. 在研究流域尺度范围内随 DEM 格网值的增加模拟河道长度急剧下降, 如 DEM_{1.5} 为 9854km, 而 DEM_{12.5} 仅为 5.0m. 当使用大于 12.5m 格网尺度 DEM 时, 黑河小流域不能产生河道和河道联结 (Stream link), 不能利用 AnnAGNPS 模型进行模拟输出.

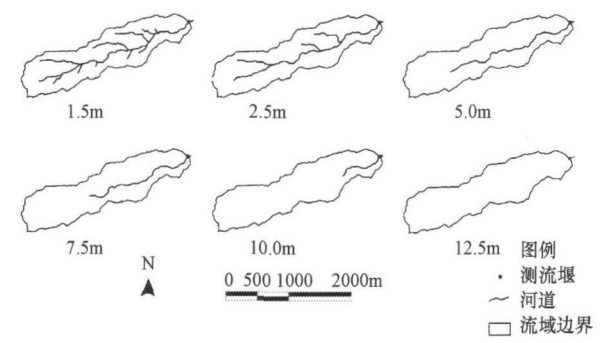


图 4 河道产生阈值为 10000 时, 不同格网 DEM 产生的河道图
Fig 4 Streams initiated from DEMs of different mesh sizes with stream threshold 10000

4.2 DEM 格网尺度对模型预测结果的影响

为量化研究 DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 模

型负载输出的影响, 假定 DEM_{1.5} 输出值为基准值 (Chapbl et al., 2005). 尺度为 1.5~12.5m 的 DEM 输出结果见表 3. 由表可知, 2.5~12.5m 尺度 DEM 下径流量、洪峰流量、总 N 负载输出在统计上与基准值差异不显著; 5.0~7.5~10.0~12.5m DEM 泥沙负载和有机碳输出与基准值差异显著, 10.0~12.5m DEM 总 P 负载与基准值差异显著.

DEM_{2.5} 径流量输出值与基准值最为接近, 二者 q 值仅相差 0.01, MD、MAD 数值也最小, 模型准确度最高. DEM_{7.5} 之 MD、MAD、 q 最大, 也即 DEM_{7.5} 对径流的模拟准确度最低, 偏离距离最远; DEM_{5.0} 洪峰流量的 MD、MAD、 q 值最小, 输出值与基准值最为接近. DEM_{10.0} 之 MD、MAD、 q 最大, 对洪峰流量的模拟误差最大, 距基准值距离最远; 泥沙输出年均值、MD、MAD、 q 值均随 DEM 格网值的增加而增加, DEM_{2.5} 模型精确度最高, DEM_{12.5} 模型精确度最低; DEM_{2.5} 总 N 的 MD、MAD、 q 值最小, DEM_{12.5} MD、MAD、 q 值最大; 总 P 输出值均随 DEM 格网的增加而增加, DEM_{12.5} 为基准值的 1.89 倍; DEM_{2.5} 有机碳输出值与基准值差异不显著, 12.5m 的 DEM 与基准值距离最远, 为基准值的 4.27 倍.

表 3 DEM 格网尺度对径流量、总氮、总磷及泥沙负载输出的影响												
Table 3 Impact of the size of the DEM mesh on the estimation of runoff, nitrogen and sediment loads at the outlet of the watershed												
DEM 尺度 /m	径流量 /(10 ² m ³ ·a ⁻¹)				洪峰流量 /(m ³ ·s ⁻¹)				泥沙输出 /(10 ² t·a ⁻¹)			
	均值	MD	MAD	q	均值	MD	MAD	q	均值	MD	MAD	q
1.5	40.1			29.4	0.99			0.80	2.04			1.18
2.5	39.9	-0.10	0.13	29.4	0.95	-0.037	0.038	0.79	2.88	0.84	0.84	1.72
5.0	40.2	0.13	0.21	29.6	0.98	-0.004	0.004	0.80	4.47 ^b	2.42	2.42	2.72
7.5	39.3	-0.73	0.73	28.9	1.00	-0.007	0.065	0.85	4.67 ^b	2.63	2.63	2.91
10.0	39.5	-0.52	0.52	29.0	1.12	-0.133	0.135	0.90	6.32 ^b	4.27	4.27	3.92
12.5	39.6	-0.42	0.42	29.3	1.12	0.132	0.134	0.91	6.91 ^b	4.86	4.86	4.30
DEM 尺度 /m	总氮 /(10 ² kg·a ⁻¹)				总磷 /(10 ² kg·a ⁻¹)				有机碳 /(10 ² t·a ⁻¹)			
	均值	MD	MAD	q	均值	MD	MAD	q	均值	MD	MAD	q
1.5	56.41			49.42	5.39			2.76	5.11			2.61
2.5	57.17	0.75	0.79	49.71	6.09	0.69	0.69	3.05	7.71	2.59	2.59	3.96
5.0	58.94	2.52	2.52	50.77	7.61	2.21	2.21	3.81	12.81 ^b	7.75	7.75	6.61
7.5	58.2	1.78	1.78	49.41	8.45	3.05	3.05	4.39	16.02 ^b	10.91	10.91	16.02
10.0	59.28	2.86	2.86	49.49	9.58 ^b	4.18	4.18	4.80	19.66 ^b	14.54	14.54	10.18
12.5	60.88	4.46	4.46	51.28	10.22 ^b	4.82	4.82	5.09	21.88 ^b	16.76	16.76	11.26

注: 同列后字母 b 表示该值与参考值 DEM_{1.5} 差异显著 ($p < 0.05$).

5 讨论 (Discussion)

5.1 DEM 对地形参数的影响

DEM 是地学模型地形空间参数提取的基础, 对地形参数有着直接的影响. 格网值作用效果可从高程统计值和坡度统计数值改变上反应出来. Wolock 等 (1994) 认为, 随着格网值的增大, 地形参数中高程最小值、均值、标准差值均随之增大. Chaplot 等

(2004)使用 20~500 m DEM 和面积为 2180 km²流域进行模拟,结果显示,随着格网值的增大,最小高程值增大、最大高程值降低、平均高程值没有变化. 本研究结果显示,小尺度流域 DEM 的变化规律与大尺度 DEM 变化结论相反,最小高程值、平均高程值与标准差均随格网值的增大而降低;其原因可能与流域尺度和 DEM 尺度不同以及 DEM 最值差的差异有关,黑河小流域 DEM 最值差为 Chaplot 研究流域的 25.7 倍,面积仅为其 1/15.

大尺度流域和小尺度流域 DEM 坡度最值变化是一致的,最小坡度值不随 DEM 尺度的变化而变化,坡度最大值、平均值、标准差值均随 DEM 尺度的增加而降低. 可能的原因为 DEM 不能对高程采样栅格定义为无穷小,DEM 模拟的平面对实际地面总具有一定的平滑作用,这种作用随 DEM 格网值增加而增加,二者具有较强的线性关系. 陈楠等 (2006)提出,坡度分级统计规律为中等坡度面积增加,陡坡区域缩小,平缓坡区域先减少后增加,在 DEM 格网值为 45 m 时缓坡区面积值达到最小,这与本研究的结果是一致的.

5.2 DEM 对模型输出结果的影响

在研究流域尺度和坡度条件下,DEM 格网尺度变化使地形参数发生了聚合,参数空间聚合效应影响着模型负载输出结果. DEM 格网尺度与泥沙、总 N、总 P、有机碳负载相关性强 (Pearson 相关系数 ($p < 0.05$) 分别为: 0.978、0.893、0.991、0.991),与径流量无相关性. 径流量和洪峰流量不随 DEM 格网尺度的变化而变化,主要原因为水文模型径流量预测仅决定于 RCN 的取值,基于此的非点源污染模型 (BSHM, SWAT, AnnAGNPS) 径流量和洪峰流量输出结果均无显著差异 (Chaplot *et al.*, 2004; Yu *et al.*, 1997). 在 DEM 尺度选择上, Yu 等 (1997) 利用 37~1097 m 格网 DEM 和 BSHM 模型在 143700 km² 的流域进行模拟,结果表明,小于 91 m 的 DEM 水文发生时间和洪峰流量频数分布模拟结果几乎相同,从水文模拟质量和所需要的计算时间上他建议使用格网为 183 m 的 DEM. Kalin 等 (2003) 使用 NRCS 曲线法预测径流时,径流量和洪峰流量发生了较大的变化,他认为大尺度 DEM 的不精确导致坡度的错误模拟,从而使径流量和洪峰流量发生变化; Chaplot (2004) 认为,即使是 90 m 格网的 DEM,虽然对地形描述不太准确,但仍然较准确地预测了流域径流产生流量值. 上述不同结论的原

因可能是采用了不同计算法则的水文模型.

泥沙负载输出的影响因素比较多,坡度是影响泥沙输出的主要因素之一. DEM 通过改变流域坡度而使泥沙负载发生变化. Wu 等 (2005) 在 15200 km² 尺度流域范围内使用 DEM₁₀、DEM₃₀、DEM₆₀、DEM₁₀₀、DEM₁₅₀、DEM₂₀₀、DEM₂₅₀ 和通用水土流失方程进行模拟,结果表明,水土流失量受 DEM 描述的坡度特征所控制,当 DEM 格网值增加时,坡度均值下降,土壤侵蚀量随之下降. Chaplot 等 (2004) 采用 DEM_{20~500} 在 2180 km² 流域上进行了模拟研究,他认为 DEM₁₅₀ 条件下泥沙输出和 NO₃⁻-N 输出值最大,DEM₅₀₀ 条件下输出值最小,DEM_{20~90} 条件下泥沙输出和 NO₃⁻-N 输出差异不显著. 上述研究的结论是水土流失方程中坡度和坡长是一个综合的地形因素,坡度对土壤流失预测的敏感性要高于坡长,平均坡度降低则土壤流失量减少. 本研究结果显示,随着 DEM 格网值增加,泥沙输出量成倍地增加,与上述研究结论相反. 这主要是因为本研究中选择的流域尺度较小,高程极差值大,平均坡度大 (33.7°),平均坡度远高于水力侵蚀临界坡度的 24~29° (靳长兴等, 1995). 随着 DEM 格网值的增加,平均坡度虽然下降,但土壤流失量却增加了. 如上述 Chaplot 等 (2004) 选择的流域最大坡度为 16.59°,平均坡度仅 1.51°,远小于水力侵蚀临界坡度.

总 N、总 P、有机碳负载输出受径流和泥沙流失的双重影响,但 AnnAGNPS 基于不同的计算法则来计算径流量和泥沙负载. 黑河流域 N 的输出大部分为 NO₃⁻-N,随着 DEM 格网值的增加,总 N 负载输出略呈增加趋势,总 N 与 DEM 的相关系数小于泥沙负载. 总 P 的负载输出分为可溶态和颗粒结合态 2 部分,受泥沙负载影响比较大, P 与泥沙负载呈相关关系 ($r = 0.988$). 有机碳输出全部为结合吸附态,与泥沙负载也呈正相关关系 ($r = 0.982$).

流域平均坡度是泥沙负载输出的主要影响因素之一,DEM 格网尺度的增加会导致平均坡度减小,这种变化趋势在坡度大的山地流域尤为明显. 尺度为 1.5、2.5、5.0 m DEM 的地形参数值变化幅度较小,坡度分布面积差异也不显著,但对泥沙负载进行模拟时,尺度为 5.0 m DEM 为 1.5 m 的 2.19 倍. 利用黑河流域校准模型进行非点源污染物负载验证时,发现尺度为 2.5~12.5 m DEM 的泥沙负载预测值与观测值之间的决定系数和模型性能系数均

低于校准时段对应的系数值,径流量预测值与观测值之间决定系数和模型性能系数与校准时段对应的系数值差异不明显。所以,在本流域尺度和坡度条件下不宜采用 AnnAGNPS 模型进行泥沙负载模拟。

5.3 DEM 尺度与流域尺度的匹配

研究中所选 DEM 应能够代表坡度因素的空间变化,保证模型的正确运用。地学模型中 DEM 尺度与流域尺度匹配问题并没有一致性的结论。受 DEM 数据获得途径的限制,虽然有关学者对 DEM 尺度和流域尺度进行了相关研究(Wu *et al.*, 2005; Olsen *et al.*, 1998; Fiskoglu *et al.*, 2002),并建议使用合理格网的 DEM 来尽可能地反映流域空间特征,但这些研究均没有涉及使用这些格网 DEM 的合理理由。一般认为,低尺度值的 DEM 能提供更为准确的地形参数,大尺度流域要使用大格网尺度的 DEM,小尺度流域要使用小格网尺度 DEM,对局部进行细致处理时应使用更小格网尺度的 DEM(Bloschl *et al.*, 1995)。如 Bruneau (1995)对 TOPMODEL 模型的时间和空间参数进行了敏感性分析,认为时间和空间一定相应范围内模型模拟效率较高;Zhang 等(1994)认为,DEM₁₀能对 DEM₃₀和 DEM₉₀进行细部的完善,DEM₂₀和 DEM₄₀只能对陡坡地域进行适度的补充,DEM₁₀的精度对大部分地理和水文模型已经足够了,建议流域研究时选择 DEM₁₀。DEM 与流域尺度匹配的目的是有效地降低模型负载输出的偏差,有效地利用数据资源,相关文献均没有进行深入和理论性分析。

综上所述,很难确定一个最优的栅格尺寸,使模型的各项输出均达到最佳。大尺度流域采用小格网尺度 DEM,数据量呈几何指数增加,计算机运算能力受到严重影响。如研究流域面积仅 144.4 km²,采用 1.0m DEM 进行流域地形分析时,DEM 格网行列数已超出 4000×4000(程序处理阈值),出现应用错误提示,并自动中止,模型所能处理本流域 DEM 最小尺度为 1.5m。当使用 DEM₁₅₀时,AnnAGNPS 程序在流域出口处没有产生 Stream link,不能在本流域尺度内进行模拟分析,所以 DEM 尺度范围为 1.5~12.5m。5mDEM 地形分析产生的河道长度(图 2)与实际河流长度相符,能充分反映地形特征,满足模型计算需要,从模型预测精度和计算机运算速度,选择 5m DEM 可以满足研究需要。

6 结论 (Conclusions)

1) DEM 尺度对黑河小流域高程、流域面积、沟道数、子单元数影响较小,对坡度影响较大。

2) DEM 尺度对黑河小流域地表径流量、洪峰流量、总 N 负载输出影响不显著,对泥沙、总 P 有机碳负载输出影响显著;DEM 尺度与泥沙、总 N、总 P 有机碳负载显著相关,与径流量不相关。

3) 尺度较小、坡度较大的流域不宜采用 AnnAGNPS 模拟泥沙负载输出。

4) 对小尺度流域(150km²左右)宜使用 5m 格网的 DEM。以上结论可应用于三峡库区条件下类似小流域的农业非点源污染负荷评估。

责任作者简介:肖文发(1964—),男,研究员,博导,主要从事森林可持续发展、森林生态环境及三峡库区森林生态系统评价与预警等方面的研究。现主持和参加多项国家科技支撑项目、国家林业局重点项目等。

参考文献 (Reference):

- Baginska B, Mielke-Horne W, Cornish P S. 2003 Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. *Environmental Modelling and Software* 18(8): 801—808
- Beven K, Kirkby M J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. *Hydrological Sciences Bulletin* 24: 43—69
- Bingner R L, Theurer F D. 2005. AnnAGNPS Technical Processes Documentation [M]. Version USDA-ARS
- Bloschl G, Sivapalan M. 1995 Scale issues in hydrological modeling: a review [J]. *Hydrological Processes* 9: 251—290
- Brasington J, Richards K. 1998 Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for topmodel [J]. *Computer Geoscience* 24: 299—314
- Brown D G, Bian L, Walsh S J. 1993. Response of a distributed watershed erosion model to variations in input data aggregation levels [J]. *Computers and Geosciences* 19 (4): 499—509
- Bruneau P, Gascuel-Oudoux C, Robin P, *et al.* 1995 Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data [J]. *Hydrological Processes* 9: 69—81
- Chaplot V, Saleh A, Jaynes D B, *et al.* 2004 Predicting water sediment and NO₃-N loads under scenarios of land-use and management practices in a flat watershed [J]. *Water, Air, and Soil Pollution* 154: 271—293
- Chaplot V. 2005 Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff sediment and NO₃-N loads predictions [J]. *Journal of Hydrology* 312: 207—222
- 陈楠,王钦敏,汤国安. 2006 黄土高原 DEM 分辨率对提取坡度精度的影响 [J]. *华侨大学学报*, 27(3): 322—329

- Chen N, Wang Q M, Tang G A. 2006. The influence of DEM with different resolutions on the precision of the slope extracted in the less plateau [J]. Journal of Huaqiao University, 27(3): 322—329 (in Chinese)
- Faraj N S, Vieux B E. 1995. Capturing the essential spatial variability in distributed hydrological modeling infiltration parameters [J]. Hydrological Processes, 9: 55—68
- Fistikoglu O, Hamanoglu N B. 2002. Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion [J]. Water Resources Management, 16(6): 447—467
- 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 2006. 大尺度区域非点源污染负荷估算方法研究的意义、难点和关键技术 [J]. 环境科学学报, 26(3): 362—365
- Hao F H, Yang S T, Cheng H G, *et al*. 2006. The significance, difficulty and key technologies of large scale model applied in estimation of nonpoint source pollution [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(3): 362—365 (in Chinese)
- 靳长兴. 1995. 论坡面侵蚀的临界坡度 [J]. 地理学报, 50(3): 234—239
- Jin C X. 1995. A theoretical study on critical erosion slope gradient [J]. Acta Geographica Sinica, 50(3): 234—239 (in Chinese)
- Kalin L, Govindarajua R S, Hantush M M. 2003. Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds [J]. Journal of Hydrology, 276: 89—111
- 刘学军, 王叶飞, 曹志东, 等. 2006. 基于 DEM 的地形曲率计算模型误差分析 [J]. 测绘科学, 31(5): 50—55
- Liu X J, Wang Y F, Cao Z D, *et al*. 2006. Error analysis on DEM-based terrain curvatures models [J]. Science of Surveying and Mapping, 31(5): 50—55 (in Chinese)
- Olsen P, Kristensen P R. 1998. Using a GIS system in mapping risks of nitrate leaching and erosion on the basis of SOIL/NO₃-N and USLE simulations [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 50: 307—311
- Quinn P, Beven K, Chevallier P, *et al*. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models [J]. Hydrological Processes, 5: 59—79
- Shrestha S, Babel M S, Gupta A D, *et al*. 2006. Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal [J]. Environmental Modelling and Software, 21: 961—975
- 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. 2003. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性 [J]. 地理学报, 58(6): 824—830
- Tang G A, Zhao M D, Li T W, *et al*. 2003. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in less plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 58(6): 824—830 (in Chinese)
- Thompson J, Bell J, Butler C. 2001. Digital elevation model resolution effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling [J]. Geoderma, 100: 67—89
- Vieux B E, Needham S. 1993. Nonpoint-pollution model sensitivity to grid-cell size [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 119(2): 141—157
- Wobck D M, Price C V. 1994. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based hydrologic model [J]. Water Resources Research, 30: 3041—3052
- Wu S, Li J, Huang G. 2005. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models [J]. Environmental Modeling and Assessment, 10: 33—42
- 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 2007. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征 [J]. 环境科学学报, 27(2): 326—331
- Xu Q G, Liu H L, Shen Z Y, *et al*. 2007. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(2): 326—331 (in Chinese)
- 杨晓云, 唐咸远, 梁鑫. 2006. 基于等高线生态 DEM 的内插算法及其精度分析 [J]. 测绘工程, 15(2): 38—42
- Yang X Y, Tang X Y, Liang X. 2006. Research on contour interpolation and accuracy assessment of DEM [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 15(2): 38—42 (in Chinese)
- Yu Z. 1997. Grid-spacing effect on watershed hydrologic simulations [J]. Journal of Hydrological Science and Technology, 13(4): 75—85
- Zhang W, Montgomery D R. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations [J]. Water Resources Research, 30: 1019—1028