

三峡库区黑沟流域 AnnAGNPS 参数空间聚合效应

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

(1. 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;

2. 河南科技大学林学院, 河南洛阳 471003; 3. 秭归县林业局, 宜昌, 湖北 443600)

摘要: 农业非点源污染物是长江三峡库区主要污染源之一, 已造成令人关注的生态、环境和健康等问题, 流域模型 (AnnAGNPS) 与 GIS 结合, 为空间数据组织和模型参数空间聚合提供技术基础, 是其预测和流域规划与管理的有效途径。三峡库区小流域条件下, 基于临界源面积 (CSA) 和最小初始沟道长度 (MSCL) 值域设定, 形成不同流域划分方案, 空间离散单元 (SDU) 水平, 即 SDU 大小及数量, 影响输入参数空间聚合效应及模型输出结果。在黑沟小流域 (144.4 hm²) 应用已校准 AnnAGNPS 模型, 设定 CSA 和 MSCL 值域为 0.5 ~ 15hm² 及 7.5 ~ 200m, 10 种 SDU 水平、流域尺度和条件下, 结果表明: 空间参数聚合程度和模型输出结果均随 SDU 尺度改变而发生变化。土地利用与土壤类型等参数具有明显的聚合效应, 径流、泥沙和养分输出具有不同的 SDU 适宜水平和范围。SDU 尺度聚合效应对径流量影响较小, 而对泥沙、总 N、总 P 模拟影响较大; 径流量、泥沙、总 N、总 P 模拟输出误差可接受 SDU 尺度范围分别为 0.5 ~ 18、2 ~ 6、0.5 ~ 6 hm²。因此, 应用 AnnAGNPS 模型, 更需要注意不同子模型所需要适宜的 SDU 尺度水平。

关键词: 三峡库区; 参数空间聚合; AnnAGNPS 模型; 流域区划; 径流; 泥沙; 总 N; 总 P

文章编号: 1000-0933(2009)12-6681-10 中图分类号: X522 文献标识码: A

Impact of parameter spatial aggregation on AnnAGNPS predictions for Heigou watershed in Three Gorges Reservoir Area conditions

HUANG Zhi-Lin^{1,*}, TIAN Yao-Wu^{1,2}, XIAO Wen-Fa¹, ZENG Li-Xiong¹, MA De-Ju³

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China

3 Forestry Bureau of Zigui County, Yichang, Hubei 443600, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6681 ~ 6690.

Abstract: Agriculture has been identified as a leading source of Nonpoint Source (NPS) pollution as a result of its intensive fertilizer applications and crop management practices, and has led to ecological and human health concerns in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA), China. Watershed models, Annualized Agricultural Nonpoint Source (AnnAGNPS), are considered a cost-effective and time-efficient approach for the assessment of pollutant loads and management practices, are coupled with GIS to facilitate watershed planning and management, which offer an unprecedented flexibility in the organization of spatial data, the spatial extent of input parameter aggregation has previously been shown to have a substantial impact on model output. However, the aggregation of spatial information in the GIS, the effects of data aggregation on model input parameters, such as land use and cover and soil type, are not well studied in watershed of TGRA condition. For the study watershed, values of critical source area (CSA) and minimum source channel length (MSCL) was set from 0.5 to 15 hm² and the MSCL from 7.5 to 200 m. The study focused on the impact of the size or the number of cells and spatial discretization unit (SDU) used to partition a watershed (10 watershed delineations) on

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAD03A13, 2006BAD03A07)

收稿日期: 2008-08-14; 修订日期: 2009-08-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hzlin66@163.com

the input parameter spatial aggregation and output of model, the results show that across levels of watershed partitioning, there are different extent of parameter spatial aggregation of land use and soil types. The results indicate that input parameter spatial aggregation had little effect on runoff yields predictions, and more effect on sediment, total nitrogen and phosphorous loads; within the range of acceptable accuracy, in this paper, the applicability and predictive capacity of AnnAGNPS model in TGRA conditions is examined. The optimal threshold values of SDU, relative to the scale of Heigou watershed and TGRA conditions, required to adequately predicting runoff, sediment yields and nitrogen, phosphorous were found to be around 0.5–18, 2–6, 0.5–6 hm^2 , respectively. The model can be applied for estimation of runoff and sediment losses with acceptable accuracy in TGRA, the CSA and MSCL values determine the hydrographic segmentation of the watershed and the cell size, especially in heterogeneous areas of the watershed, which can increase the accuracy of model results, which indicates that greater attention should be made to partition a watershed to match the underlying assumptions of sub-models within AnnAGNPS.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area; parameter spatial aggregation; AnnAGNPS model; watershed delineation; runoff; sediment; total N; total P

三峡库区沿江流域,由于化肥农药的广泛超量施用,部分区域非点源污染物(NPS)输出已造成部分主要支流出现水华和水质明显恶化等环境问题^[1,2]。农业非点源污染具有广域性、随机性和空间分异性等特性,在流域尺度,由于试验观测手段的局限,目前多采用空间模拟模型对 NPS 进行预测和评估,如 CREAMS、ANSWERS、AGNPS 和 SWAT 等,其中,SWAT 和 AGNPS 参数分布式模型应用较广泛。

AnnAGNPS 与 ArcView 紧密集成,把流域区分为任意形状、离散化的分室,由沟道连接各分室,连续模拟各分室及流域出口处的径流、泥沙、养分和农药负荷量。空间离散单元(SDU, spatial discretization unit)大小是由定义临界源面积(critical source area, CSA)和最小初始沟道长度(minimum source channel length, MSCL)确定,并直接影响各项模拟结果的准确性。在流域尺度,SDU 水平大于数据空间分辨率,而流域某种特性数据仅能以较大尺度表示。空间参数异质性和聚合程度影响着模型模拟结果^[3],探索包括地形、土壤、土地利用等输入参数的空间聚合及其聚合效应,也是有助于选择适宜的单元参数聚合值^[4]。

模型的准确性部分地依赖于输入参数如何更好地描述流域相关特征,输入参数聚合的空间范围对模型的输出有重要影响^[4,5],国内外有对 SWAT 等模型的亚流域、水文响应单元尺度水平、模型精度和适用性有较多的研究,也有必要探索 SDU 水平对 AnnAGNPS^[6]模型预测结果的影响。本研究选择 10 组 CSA 和 MSCL 取值,不同 SDU 尺度水平的流域划分,研究在保证模型的输出精度的条件下,确定 AnnAGNPS 模型适宜 SDU 尺度范围,为三峡库区非点源污染物的预测与管理提供技术参数支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究流域位于湖北省秭归县兰陵溪流域,东经 $110^{\circ}53'27'' \sim 110^{\circ}54'50''$,北纬 $30^{\circ}51'21'' \sim 30^{\circ}51'34''$,面积 144.4 km^2 ,与三峡水库相通连(图 1)。属亚热带大陆性季风区,多年平均降雨量 1439 mm ,年际变化大,年降雨分布为单峰型(5~8 月份占全年 68%)。土壤为花岗岩母质出露发育的石英砂土,保水保肥性较差;流域西高东低,西部最高海拔 1400.0 m ,植被盖度低,岩石出露;中部低山区为经济林、农林复合和人工林带等,如柑桔、板栗、毛竹、马尾松等以及农林、农茶间作带;东部缓坡台地以茶园地为主,与农作物间作。土地利用中,主要以农地和林地为主,农地面积 45.8 km^2 、林地 56.1 km^2 、草地 6.9 km^2 、荒山荒坡 20.8 km^2 。农地、林果地农药及化肥施用量较大,氮、磷肥比为 20:3。

1.2 数据来源

该模型所要求的输入数据图层包括:地形图、土壤类型和土地覆被图,这些也是准备模型的输入参数。使用流域出口观测数据模型准确性评估和校正。

土壤类型:根据中国科学院南京土壤研究所对三峡库区范围 1:25 万土壤类型分布图、土壤类型分布矢量图和土壤类型代码,结合流域土壤类型调查,确定土壤类型。

土地覆被与利用类型:利用该流域 2002 年 7 月和 2007 年 9 月 Quickbird 高分辨率卫星遥感影像数据,以内业判读为主,外业调查为辅,获得该流域土地覆被与利用现状等数据,该流域一级地类包括:耕地、园地、林地、草地、水域及其他土地,二级类按经营特点、利用方式和覆盖特征进行续分。

地形:根据 1:1 万标准地形图,手动跟踪的方法对等高线地图进行矢量化,提取地图的高程信息,再经过网格插值形成数字高程模型(DEM)数据。

气象:气象数据来源于秭归县气象站、流域内自动气象站和小流域雨量点。

土壤、植被和土地利用数据的矢量化形成模型输入文件;作物参数由模型手册和现场调查确定;施肥量、比例和深度数据来自于调查统计。

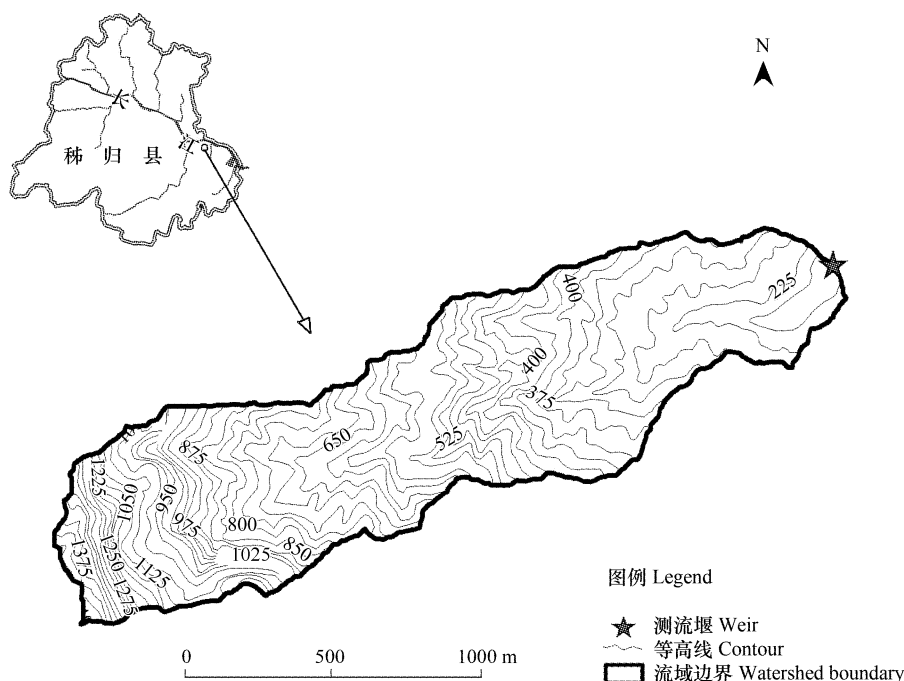


图1 黑沟流域地理位置

Fig. 1 Location of the Heigou watershed

1.3 AnnAGNPS 简介

AnnAGNPS 模型是由美国农业部农业研究署(USDA-ARS)和土壤保护署(NRCS)联合开发,可以对来自农业流域的径流、侵蚀和养分载荷长期、连续模拟。作为降雨场次模型 AGNPS 的替代,AnnAGNPS 是基于降水的连续分布式参数模型,实现与 ArcView 3. x 高度集成。其水文计算基于土壤水分平衡方程(式 1)与地表径流模型(SCS-CN)^[7](式 2,3),利用修正的通用水土流失方程 RUSLE 预测泥沙载荷(式 4);N 矿化平衡为 EPIC 模型,逐日计算 N、P 等化学物质的吸收、降解:

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

式中, SM_t 、 SM_{t+1} 分别为土层某时间步长起始、终止时土壤水分含量(%), WI_t 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_{tile} 为管道流(mm), Z 为土层厚度(mm), t 为步长时间(d)。

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

$$s = 3254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3)$$

式中, 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。

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

式中, A 为土壤年侵蚀量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$), 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。

1.4 空间数据

该研究区的数字高程模型(DEM)采用国家测绘部门航测 1:1 万 5m 等高距地形图件作为基本地形信息源,按照国家地形图数字化技术规范标准进行等高线矢量化,利用 ArcView GIS 双线性内插重采样^[8]方法生成 5.0m 格网 DEM。在地形图上随机选择 50 个点作为高程控制点,视其高程值作为准值,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^[9]。

1.5 流域划分与模型 SDU 产生

以流域地形图数据源,建立数字高程模型(DEM),利用 AnnAGNPS Arcview 集成界面,运行地形参数模块自动划分集水单元、地表排水沟道,生成包括各集水单元和沟道等参数。

本研究基于研究区地形、土地覆被的差异,设定流域系列划分方案,表 1 显示各流域划分的特征,图 2 表示的是这些划分结果图。临界源面积(critical source area, CSA)和最小初始沟道长度(minimum source channel length, MSCL)分别控制集水单元的数量、尺寸和沟道网络范围。

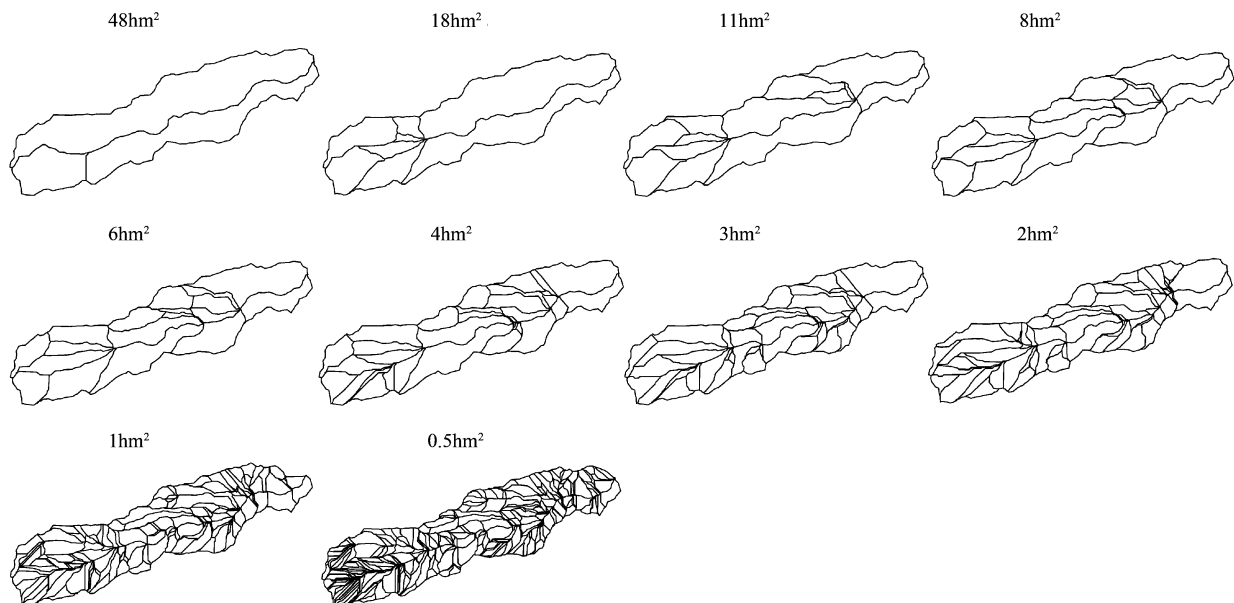


图2 黑沟流域区划

Fig.2 Hegou watershed delineations

线段表示 SDU 边界和主要沟道 The lines represent divides between SDUs and main channel segment of each SDUs

利用 Arcview 界面将集水单元与流域土地利用图、土壤图分别进行空间叠加运算,确定各集水单元的主要土地利用类型和土壤类型。在给定的集水单元范围内,所有空间离散单元的地形参数是相同的,沟道长度参数则例外,随着空间离散单元的大小而异。

表 1 流域区划参数取值与 SDU 特性

Table 1 Key property for the watershed delineations and spatial discretization unit characteristics

	临界源面积 CSA (hm ²)	最小初始沟道长度 MSCL (m)	空间离散单元 SDU 面积 (hm ²)	空间离散单元 SDU 数量 (No.)	沟长 Reach (m)
SDU 0.5	0.5	7.5	0.5	264	12071
SDU 1	1	15	1	140	8908
SDU 2	2	30	2	66	6581
SDU 3	3	50	3	48	5829
SDU 4	4	60	4	33	5140
SDU 6	6	90	6	24	4424
SDU 8	8	120	8	18	3823
SDU 11	10	150	11	13	3195
SDU 18	12	120	18	8	2930
SDU 48	15	200	48	3	2475

1.6 模型校准与验证

使用黑沟流域 2003 年观测数据对 AnnAGNPS 模型进行校准, CSA、MSCL 值均为系统默认。RCN 值设定在 -4% ~ 4% 之间, 划分为 9 组, 每次调整 2% RCN 值, 使用试错法和图示法调整径流量, 观测值与模拟值基本吻合时按 1% 调整 RCN, 使观测值和模拟值拟合最大^[10]; 利用非线性参数评估软件 PEST 优化输入参数值, 运行 AGNPS 污染负载模型, 确定并调整泥沙、N、P 输出敏感因子-表面糙度, 使用试错法和图示法校准泥沙、N、P 输出^[6], 模型输出偏差控制在 ±20% 之间^[11]。

2004 年土地覆被、气候和流域管理等输入文件, 其他参数均不改变, 运行模型, 输出泥沙与养分数据, 作为基准实际数据^[4]。改变 CSA 和 MSCL 取值(表 1), 产生不同平均尺度 SDU(图 2)。统计 0.5 ~ 48hm² SDU 土壤、土地覆被等空间聚合分布值。运行 AnnAGNPS 污染负荷模块, 输出 0.5 ~ 48hm² SDU 径流量、泥沙、总 N、总 P 年输出数据。

2 结果

2.1 输入参数的空间聚合效应

随 SDU 尺寸的渐次增加, 与实际值对比, 各土壤类型聚合面积变化表现出不同的趋势和聚合效应(图 3)。SDU 值在 0.5 ~ 18 hm² 范围内, 黄壤聚合面积变化较为平稳, 较为接近实际值。增加到 48 hm² 时, 其聚合面积为 19.7hm², 是实际值 43%; 山地草甸土聚合效应, 随着 SDU 尺寸从 0.5 增加到 4 hm², 其聚合面积值降低远低于

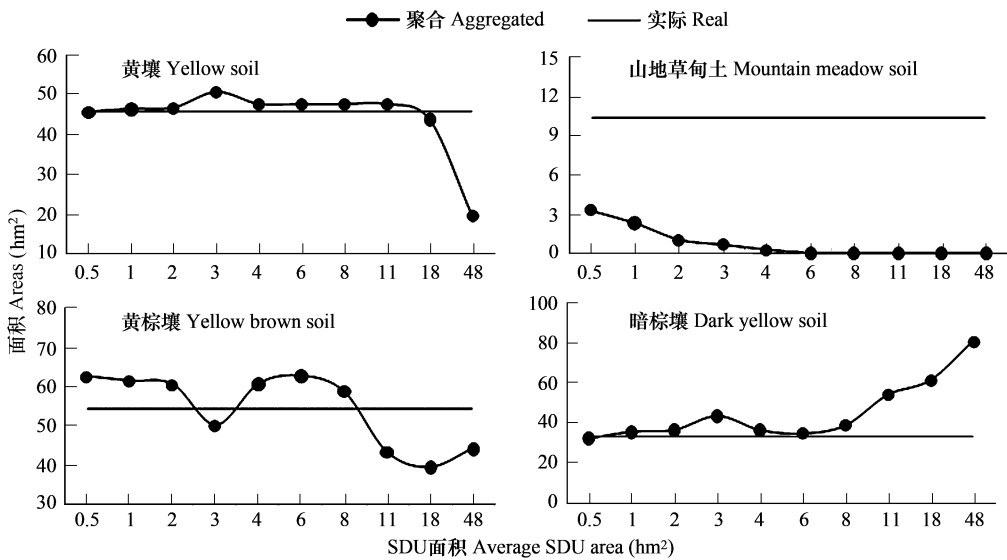


图 3 黑沟流域 4 类土壤聚合空间分布

Fig. 3 Heigou watershed soil types spatial aggregation distribution

实际值。从 SDU6 ~48, 呈平缓下降趋势, 聚合值缩减为 0; 黄棕壤呈波状变化, SDU3 聚合为 62.6 hm^2 , 接近实际值分布, 在 SDU18 时, 聚合为实际值的 79.7%; 随着 SDU 尺度增加, 暗棕壤单锯齿状上升, SDU0.5 聚合为 31.8 hm^2 , 与实际值 33.3 hm^2 最接近, SDU48 最大聚合为 80.4 hm^2 , 为实际值的 2.4 倍。

明显地, 综合图 4 所列的 12 种土地覆被及利用类型, 随着 SDU 面积渐次增加, 所对应的土地覆被类型聚合面积逐步下降, 各类型的空间聚合效应不同。选择合适 SDU 面积是模型精度和模型输入数据空间聚合度之间的平衡。

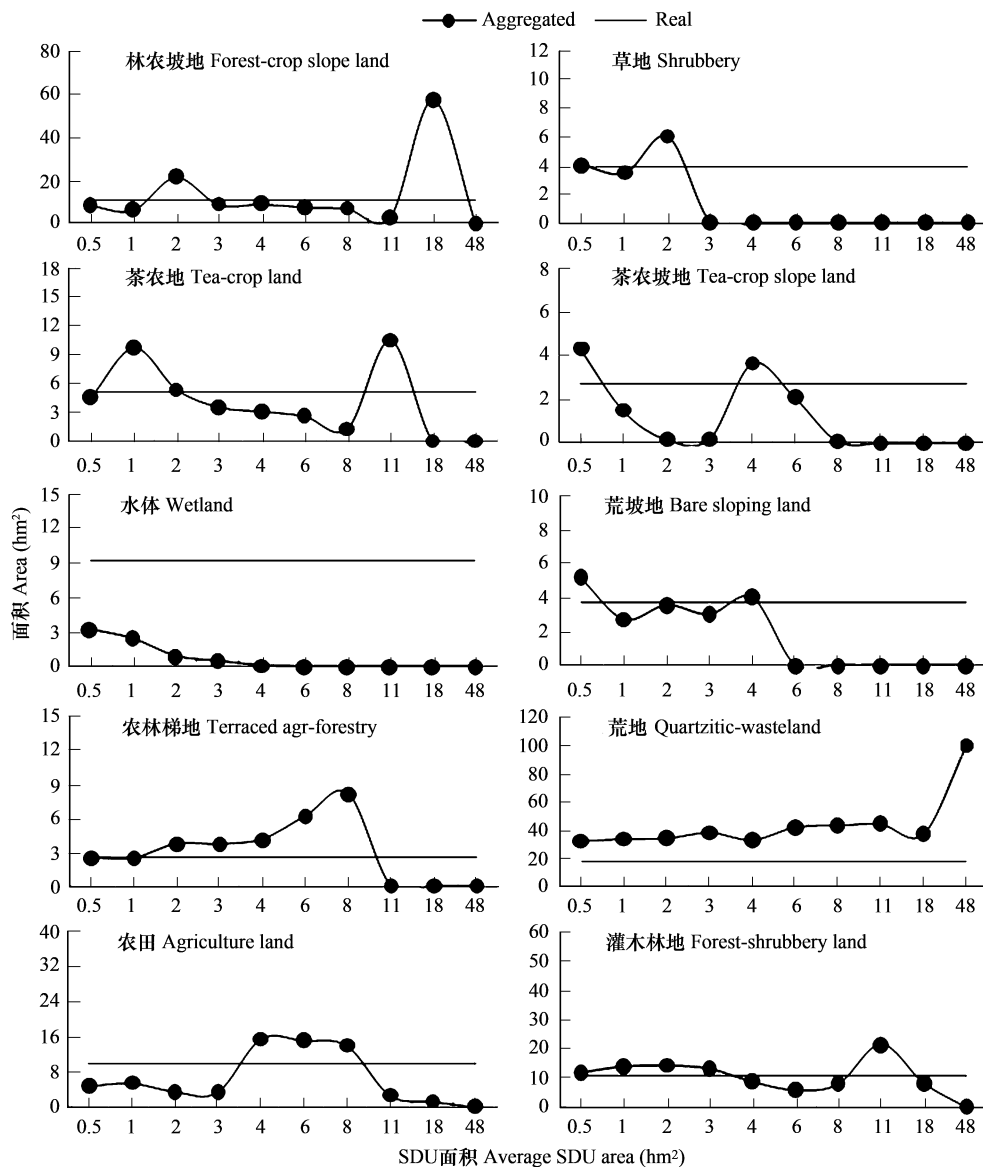


图 4 黑沟流域土地利用空间聚合分布

Fig. 4 Heigou watershed land uses spatial aggregation distribution

当 SDU 取值为 48 时, 土地覆被及利用类型发生聚合程度最大, 12 类仅聚减为荒地和梯田茶地 2 类, 其中荒地 100.1 hm^2 , 为实值的 5.4 倍, 梯田茶地为 44.2 hm^2 , 为实值的 1.1 倍。随着 SDU 尺度增加, 梯田茶树和林农坡地类空间分布变化平缓, 但林农坡地 SDU18 聚合为实际值的 5.2 倍; 林类、灌木林地、林农坡地类均呈锯齿状波动。

灌草类、茶农间作类、茶树坡地、河流、荒草坡地、林农间作类空间分布均低于 10 hm^2 , 但都发生了聚合效应。河流在 SDU0.5 聚减为 3.26 hm^2 , 为实际值的 35%, 之后缓慢下降, SDU4 ~48 聚减为 0; 茶农间作类呈双

峰形变化,其他茶树坡地、林农间梯田类则呈单峰形变化。

2.2 模型预测结果

图 5 所示为 2004 年流域径流量、泥沙、总 N、P 输出年预测值与观测值比较。SDU 0.5 ~ 18 hm² 预测值误差均在 $\pm 20\%$ 之间,SDU48 径流量预测值聚增到 $5.24 \times 10^4 \text{ m}^3$,为观测值的 1.29 倍。泥沙输出预测值 SDU 8, 18, 48 聚增为 333、350 t 和 440 t,为观测值的 1.6、1.7 倍和 2.2 倍,SDU 0.5、1 预测值聚减为 1.1 t 和 1.3 t,分别为观测值的 55% 和 66%,预测误差均在可接受范围之外;总 N 和总 P 输出预测值变化规律相似,均呈锯齿状上升,SDU2、SDU > 6 预测误差均在可接受范围之外。SDU48 时 N、P 预测值为 4.6 t 和 560 kg,为观测值 1.6 倍和 1.7 倍。

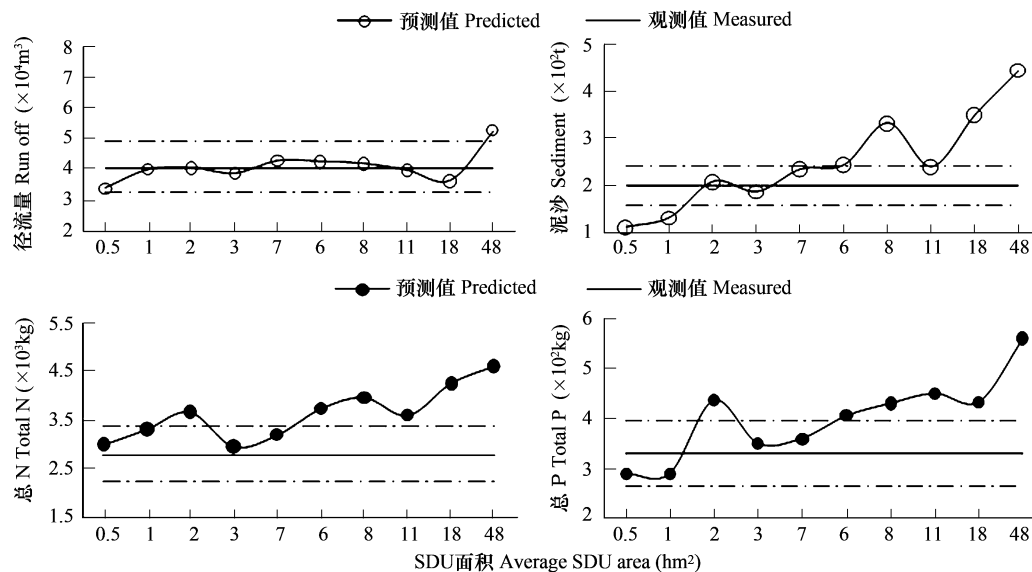


图 5 AnnAGNPS 模型 2004 年预测值与观测值比较

Fig. 5 Comparison of measured and predicted AnnAGNPS exports from Heigou watershed during 2004

3 讨论

3.1 参数空间聚合

AnnAGNPS 基于 DEM 数据创建 SDU,但各 SDU 内包含不同量值的地形空间参数(坡度、坡长、坡向)和流域管理参数(土壤、土地管理、耕作等),模型对地理空间参数应用平均值法进行聚合,对流域管理参数使用优势参数值法进行聚合^[10],简化空间数据,便于模型的计算机运行处理。

流域的参数空间聚合效应程度与 SDU 面积大小及数量多少有关。一般地,SDU 面积越大,其数量越少,空间聚合效应程度相对较强。SDU48 时,黑沟流域仅产生 3 个 SDU,流域 12 类土地利用聚缩为 2 种类型;然而,即使基于最小 SDU 尺度进行流域区划,所产生的参数空间分布数据与真实值间的差值并不一定最小,图 3 显示黄棕壤 SDU 尺度为 3hm² 和 48hm² 时与真实值最接近,这可能与 SDU 尺度和参数空间分布尺度匹配及参数空间分布破碎程度、DEM 复杂程度有关。

与模型的空间离散单元的理想假设条件不同,黑沟流域地形破碎,土地覆被和管理措施的分散性、分异性和复杂性,形成高度异质性区域,也存在以下问题:水文响应与流域特征非线性相关,平均值不能如实地代表输入变量影响,只使用优势分类,当亚单元大小增加时,水文重要的分类可能从数据库中被删除。空间参数聚合效应相关研究报道较少,Band 等^[12]认为使用地貌测量法来确定 SDU,参数聚合效应可以降低,超过特定尺度,空间聚合效应仍较显著。

尽可能使所划分的单元具有相同的地形、土地覆被等特征,反映实际的地表状况,从而保证模拟的精度。在美国,研究流域地形和土地利用的差异小,一般为坡度平缓的平原农业区。

3.2 参数空间聚合对地表径流输出的影响

模型径流预测值进行单样本 T 检验,模型预测值在 95% 水平上与观测值并无显著差异,在 99% 水平上与观测值有显著差异。SDU48 使模型径流预测值最高,超出 $\pm 20\%$ 误差可接受范围。SDU0.5 产生的径流预测值最低,这可能因为精细流域区划产生 12071m 沟道长度,径流损失在沟道中增加^[5],以上结果说明较粗和较细流域区划,对黑沟流域径流量预测均不适合。

AnnAGNPS 和 SWAT 径流量预测较为稳定,其计算法则仅与 RCN 值有关^[3]。SWAT 模型是基于 SDU 内 HRUs 计算径流输出,Jha 等^[5]认为 SDU 面积与流域总面积比为 3:100 时,SWAT 模型对径流量有最优的预测。较大尺度 SDU 改变 SCS-CN 参数分布,模型准确性下降。Bingner 等^[13]选择 2130 hm^2 流域,没有使用 HRUs,也得出较为稳定径流量预测。

用输入参数的概率分布来确定模型参数,或使用较大尺度 SDU,以补偿参数聚合不利影响,减少空间参数聚合效应,其理论基础是“表征单元面积(REA, representative elementary area)”^[14]。存在一个径流尺度,可从输入参数概率分布来预测径流,而不必考虑参数真实空间分布。张雪松等^[15]对 SWAT 模型流域划分研究,随着亚流域数量的增加,产流量随之增大,变化幅度较小。并且,存在一个亚流域划分水平,当超过此水平时,亚流域数量(SDU)的变化对产流量没有影响。本研究结果表明,黑沟流域 SDU 尺度为 2、11 hm^2 时,流域径流预测值与真实值较为接近,2~11 hm^2 之间径流预测波动较小,说明“表征单元面积”理论在本流域尺度和三峡库区条件下也是适用的。

3.3 参数空间聚合对泥沙预测的影响

不同流域区划方式下,SDU 内 RUSLE 方程 K、C 和 LS 参数取值和空间分布随之改变^[5],导致 SDU 泥沙产生量变化;另外,流域模拟沟道长度、坡度的变化也改变了沟道泥沙输移能力。Brown 等^[16]使用大于 120 m^2 网格时 ANSWERS 模型泥沙输出开始变化,认为这些变化是网格内土壤、土地利用、地形参数发生了聚合效应;Vieux 等^[17]认为 AGNPS 模型网格从 1 增加到 4 hm^2 时,沟道侵蚀量下降,总泥沙输出也开始下降。但网格值超过 4 hm^2 时沟道侵蚀消失,泥沙输出能力增强,泥沙输出反而增加。模型泥沙输出是由 SDU 泥沙产生量和沟道泥沙输移量(能力)共同决定。

SWAT 模型 SDU 尺度分异可能导致泥沙输出变化,其原因是 SDU 坡度及农田面积改变^[13]。SWAT 产沙量随亚流域数量的增加而减小,变化幅度较大。存在一个亚流域划分水平,当超过此水平时,亚流域数量变化对泥沙输出量几乎没有影响^[15];Najim 等^[18]认为泥沙、总 N、总 P 输出随子单元尺度降低而减少;模型模拟输出平稳点在于:亚流域尺寸逐步减小,不再造成坡耕地坡度和面积的较大改变。

Chen 等^[19]研究认为,对于流域划分的不同水平,HRU 不能使沉积物产生量稳定,反而引入其变率的一半。其原因在于子模型 MUSLE 定义泥沙产生与 HRU 面积之间的非线性关系,但沉积物载荷是从 HRU 尺度水平到亚流域尺度线性外推。因此,要求输入数据的空间表征必须与子模型假设相匹配。

黑沟流域泥沙预测值进行单样本 T 检验,模型预测值与观测值差异显著(95% 水平),尺度较大 SDU18 和 48 hm^2 预测结果偏高,尺度较小 SDU0.5 和 1 hm^2 预测结果偏低,均超出误差可接受范围,大尺度 SDU 预测结果偏高原因可能为参数的聚合 SDU 泥沙产量增加,沟道长度缩短泥沙输出能力变大,小尺度 SDU 结果偏低,MSULE 并不适应在面积较小的区域内预测,这与 Bingner、Najim 等研究结果是一致的。

3.4 参数空间聚合对总 N 和总 P 输出的影响

径流量和泥沙输出均影响 N、P 输出^[6,20],模型对径流和泥沙输出预测基于不同的计算法则,具有相对的独立性,这使 N、P 输出形式不同于径流和泥沙。总 N 输出形态为吸附态和溶解态,总 P 的输出形态为吸附态无机 P、吸附态有机 P、溶解态的无机 P 等 3 种形态。吸附态、溶解态 N、P 分别与泥沙输出、径流输出相关。黑沟流域吸附态 N 为溶解态的 6.9 倍,吸附态 P 为溶解态的 4.14 倍,N、P 输出没有随泥沙输出的剧增而剧增,也没有随泥沙量的剧减而剧减,而呈锯齿状下降趋势输出,N、P 输出具有一定的独立性。模型对 N、P 预测具有较大的不确定性,预测结果偏高,预测均值分别为观测值的 1.29、1.21 倍。

由于该流域土地利用/覆被类型较多,各类型之间面积差异较大,且流域景观空间分布复杂,各参数空间聚合值容易背离实际值,因此不宜选取模型默认的 SDU 水平进行流域划分。本文以 SDU 水平分级对土地利用/覆被类型的影响,聚合值图直观的表现 SDU 水平对不同输入参数的影响。选取满足模型模拟精度要求的适宜 SDU 水平,也是模型应用分析的热点。但是,如何量化 SDU 水平与土地利用类型等空间输入参数之间的关系,这些问题尚有待进一步的分析研究。

4 结论

本文以三峡库区黑沟流域为研究对象,通过不同尺度水平的 SDU 流域划分,重点研究 SDU 水平对输入参数如土地利用类型、土壤类型空间聚合的影响,基于该流域土地利用/覆被、土壤及地形的特点,并依据模型模拟精度要求,选择应用适宜的 SDU 尺度水平,对模型在三峡库区的应用和农业非点源污染的流域管理具有重要意义。

(1) SDU 不同尺度水平,输入参数所产生的空间聚合与实际值进行对比,在 SDU 较大水平,各参数值有被低估的趋势。土地利用/覆被和土壤类型随 SDU 水平变化的聚合效应不同。

(2) 输入参数空间聚合对该流域径流量预测没有显著影响。主要原因为径流量仅决定于 RCN 取值,SDU 尺度与 RCN 值没有直接相关关系,SDU48 径流预测值偏高,超出误差可接受范围,不适于黑沟流域径流的预测,径流预测 SDU 尺度应小于 18hm^2 。

(3) 输入参数空间聚合对该流域泥沙输出产生显著性影响。SDU 尺度大于 11hm^2 泥沙输出结果偏高,SDU 尺度小于 2hm^2 泥沙输出结果偏低, $2\sim 6\text{hm}^2$ 之间泥沙预测精度较高。

(4) SDU 尺度较大,N、P 预测值较观测值高,对 N、P 预测应使用小于 6hm^2 尺度 SDU。

References:

- [1] Chen X, Wang Z Q, Yang W D, Ye X J. Effects of sloping land use pattern on phosphorus loss in micro-watershed of red soil area, Southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 374—377.
- [2] Xu Q G, Liu H L, Shen Z Y, Xi B D. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 326—331.
- [3] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment, Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34: 73—89.
- [4] FitzHugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, 2000, 236: 35—53.
- [5] Jha M, Gassman P W, Secchi S, Gu R, Arnold J G. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 811—825.
- [6] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST. *Environ Modell Softw*, 2003, 18: 801—808.
- [7] Bingner R L, Theurer F D. AnnAGNPS Technical Processes Documentation. Version USDA-ARS, 2005.
- [8] Wu S, Li J, Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. *Environmental Modeling and Assessment*, 2005, 10: 33—42.
- [9] Tang G A, Zhao M D, Li T W, Liu Y M, Xie Y L. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in loess plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 824—830.
- [10] Polyakov V, Fares A, Kubo D, Jacobi J, Smith C. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22: 1617—1627.
- [11] Shrestha S, Babel M S, Gupta A D, Kazama F. Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal. *Environmental Modelling and Software*, 2006, 21: 961—975.
- [12] Band L E. Spatial aggregation of complex terrain. *Geographical Analysis*, 1989, 21(4): 279—293.
- [13] Bingner R L, Garbrecht J, Arnold J G, Srinivasan R. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(5): 1329—1335.
- [14] Wood E F, Sivapalan M, Beven K, Band L. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling. *Journal of Hydrology*,

1988, 102: 29—47.

- [15] Zhang X X, Hao F H, Cheng H G, Yang Z F. Influence of subdivision of watershed on distributed hydrological model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (7): 1—7
- [16] Brown D G, Bian L, Walsh S J. Response of a distributed watershed erosion model to variations in input data aggregation levels. *Computers and Geosciences*, 1993, 19 (4), 499—509.
- [17] Vieux B E, Needham S. Nonpoint-pollution model sensitivity to grid-cell size. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993, 119 (2), 141—157.
- [18] Najim M M M. Effect of grid subdivision on AGNPS simulation in a tropical watershed. *Agricultural Engineering*, 2004 (8): 49—59.
- [19] Chen E, Mackay D S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, 2004, 295: 211—224.
- [20] Sarangi A, Cox C A, Madramootoo C A. Evaluation of the AnnAGNPS Model for prediction of runoff and sediment yields in St Lucia watersheds. *Biosystems Engineering*, 2007, 97: 241—256.

参考文献:

- [1] 陈欣, 王兆骞, 杨武德, 叶旭君. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响. *生态学报*, 2000, 20(3): 374~377.
- [2] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 席北斗. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征. *环境科学学报*, 2007, 27(2): 326~331.
- [9] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 刘咏梅, 谢元礼. DEM提取黄土高原地面坡度的不确定性. *地理学报*, 2003, 58(6): 824~830.
- [15] 张雪松, 郝芳华, 程红光, 杨志峰. 亚流域划分对分布式水文模型结果的影响. *水利学报*, 2004, (7): 1~7.