

伏牛山区陶湾流域径流泥沙模拟误差分析

田耀武, 王宁, 刘晶

(河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要:以豫西伏牛山区陶湾流域为研究对象,利用该流域 2006—2007 年 22 次径流、泥沙数据对分布式 AnnAGNPS (Annualized AGricultural NonPoint Source)模型进行校准,2008—2009 年 31 次径流、泥沙数据对模型进行验证。选取 R^2 (决定系数)、 E (效率系数)、 VE (误差比)等统计参量评估流域径流、泥沙、氮、磷物质输出的模拟精度。结果表明:(1) SCS-CN 值是径流模拟精度的主要影响因素,校准期内径流 $VE=-7.7\%$ ($R^2=0.95, p<0.05$),验证期内 $VE=-6.1\%$ ($R^2=0.90, p<0.05$),误差值位于可接受的范围之内, $<\pm 15\%$ 。径流误差相对较低,径流模拟精度也影响泥沙和氮、磷的模拟精度;(2) 泥沙模拟误差影响因素较为复杂,植被覆盖率、曼宁粗糙系数等因素最为敏感,还受流域 DEM、土壤、土地利用等空间参数精度的影响。校准期内 $VE=15.1\%$ ($R^2=0.55, p<0.05$),验证期内 $VE=17.0\%$ ($R^2=0.60, p<0.05$),泥沙模拟误差较径流要大。泥沙和径流模拟误差趋势相同,对小型降雨事件,模拟值偏高,大型降雨事件模拟值偏低。(3) 氮、磷模拟值具有更大的不确定性,氮 $VE=22.0\%$ ($R^2=0.69, p<0.05$),磷 $VE=24.0\%$ ($R^2=0.48, p<0.05$)。AnnAGNPS 模型对径流、泥沙、氮、磷模拟均存在有一定的不确定性,模拟误差呈现一定的变化趋势。校准后的 AnnAGNPS 模型可以用于伏牛山区流域。

关键词: AnnAGNPS 模型; 径流; 泥沙; 伏牛山区; 模拟

中图分类号: S157; P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)05-0056-07

Analysis of Simulation Error of Runoff and Sediment for Taowan Watershed in Funiushan Mountain Area

TIAN Yaowu, WANG Ning, LIU Jing

(College of Forestry, He'nan University of Science and Technology, Luoyang, He'nan 471003, China)

Abstract: A typical watershed, Taowan, was selected as the study site, and the main goal was to evaluate the performance of AnnAGNPS Model in simulating runoff, sediment loading and nutrient loadings under the conditions of Funiushan Mountain area, and analyze the influencing factors of the simulation error. The data of 22 events of runoff and sediment in the watershed during the period from 2006 to 2007 were used to calibrate the model and the data of 31 events during the period from 2008 to 2009 were used for validation purposes. The whole evaluation consisted of determining the coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (E), and the percentage volume error (VE). Most of model input parameters were sourced from Luoyang Forestry Bureau field observations and experiments. Results showed that: (1) runoff was undersimulated by -7.7% with R^2 of 0.95 ($p<0.05$) during calibration period (2006—2007) and undersimulated by -6.1% with R^2 of 0.90 ($p<0.05$) during validation period (2008—2009), factors affecting runoff simulation errors were accuracy of values for the SCS-CN, the results of runoff simulation also affected the other objects, which may be the reason of relatively low error of runoffs, the model simulated runoff within the range of acceptable accuracy ($<\pm 15\%$); (2) the model oversimulated the event-based sediments by 15.1% with R^2 of 0.55 ($p<0.05$) during calibration period (2006—2007) and 17.0% oversimulated with R^2 of 0.60 ($p<0.05$) during validation (2008—2009), factors affecting sediment simulation error are more complex. Vegetation coverage and Manning roughness coefficient were most sensitive to the sediment simulation errors. And it was also affected by the scales of spatial parameter accuracy such as watershed DEM, soil and land uses. The trend of sediment simulation errors was similar to runoff. For the events of small magnitude, the model generally oversimulated them, while the opposite was true for larger events. Nitrogen was oversimulated by 22.0% with $R^2=0.69$ ($p<0.05$), and phosphorus was oversimulated by 24.0% with $R^2=$

0.48 ($p < 0.05$). In general, the model performs well in simulating runoff compared to sediment and nutrients. As a watershed management tool, it can be used under the conditions of Funiushan Mountain area after proper calibration.

Keywords: AnnAGNPS model; runoff; sediment; Funiushan Mountain area; simulation

农业流域泥沙、氮磷等物质的输出是地表水质下降的主要因素。受研究手段的限制,最有效和直接的方法是利用空间分布模型对流域输出物质进行时间和空间上的模拟。目前较为常用的模型有 CRE-AMS^[1]、AGNPS^[2]、SWAT^[3] 和 AnnAGNPS^[4] 等,其中连续分布式模型——AnnAGNPS (Annualized AGricultural NonPoint Source)模型与 ArcView GIS 3. x 紧密集成,得到了较为广泛的应用^[5-9]。

河南省西部伏牛山区属以林为主的林农复合流域,平均坡度较高,已产生了水质、地表径流、土壤流失等一系列的环境生态问题,成为制约山区经济社会发展的因素之一。流域内农地分散,耕作、施肥(农药)方式不一,数据不易获取且不确定性高。AnnAGNPS 模型在豫西山区条件下的应用方法、应用误差评价与分析尤为迫切。本文选择豫西山区伊河上游陶湾流域为研究对象,依托洛阳市和栾川县气象、水利水文局和河南科技大学对该流域的长期监测数据,利用 GIS 平台构建该流域模型文件,使用流域径流、泥沙数据对 AnnAGNPS 模型进行校准和验证,分析径流、泥沙、氮磷等物质输出的误差及原因,评定 AnnAGNPS 模型在陶湾流域的适用性,以期对伏牛山区相似流域的面源污染研究与农业管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陶湾流域位于河南省西部伏牛山区、伊河上游源头,包括河南省栾川县陶湾镇、石庙乡和栾川乡的西半部,东经 111°20′0″—111°35′55″,北纬 33°43′0″—33°55′0″,ArcGIS-AGNPS 集成模块提取的流域面积为 329.92 km²。该流域属暖温带大陆性季风气候,年均气温 12.4℃,年日照 2 103 h,无霜期 198 d,年均降水量 872.6 mm。流域内分布有褐土性土、棕壤性土、棕壤和淋溶褐土等土壤类型。棕壤主要分布于阔叶及混交林下的山坡、丘陵地势较高地带,地表植被以次生落叶阔叶混交林为主,间有草灌丛,褐土主要分布于较平缓的中低山地丘陵、山前平原及河谷阶地。褐土植被以夏绿阔叶林为主,伴有旱生森林、灌木、草本植物,具有疏林密灌的特点。流域林地占 75.5%,灌木地占 4.7%,草地占 2.4%,农地占 13.7%,水域 0.3%,建设用地占 3.4%。

1.2 AnnAGNPS 模型

AnnAGNPS 模型是美国 ARS 与 NRCS 联合开发

的基于物理过程、连续模拟、流域尺度的高级流域参数分布式评价工具,最新版本为 AnnAGNPS 5.4 (2012 年)。AnnAGNPS 模型实现了与 ArcView 3. x 界面的耦合。模型包括水文、土壤侵蚀、化学物质输移等模块。水文计算法则为土壤水分平衡方程与地表径流模型(SCS-CN)^[10],泥沙输出计算法为修订的通用水土流失方程 RUSLE,氮的矿化平衡计算法则为 EPIC 模型^[11],逐日计算氮磷等的吸收、降解,并按可溶态和颗粒吸附态计算并输出。模型的详细介绍见模型使用文件及相关文献^[5-10]。

1.3 模型文件及数据库的构建

AnnAGNPS 模型污染负荷模块运行前要导入 AnnAGNPS.inp 和 Dayclim.inp 文件。AnnAGNPS.inp 文件由 AnnAGNPS-ArcView 耦合界面产生,AnnAGNPS.inp 文件包含流域地形、土壤、土地利用、耕作管理信息和沟道信息。

Dayclim.inp 气象文件,包括降雨量、最高和最低温度、露点温度、云量和风速 6 类参数的逐日气象数据。本研究使用 AGNPS-ArcView 耦合界面,逐日输入以上 6 类气象参数,建立该流域 2006 年、2007 年、2008 年、2009 年 4 个年份的 Dayclim.inp 文件。文件所使用气象数据均由洛阳市气象部门提供。本文所用数据及来源见表 1。

流域数字高程模型(DEM)来源为中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)提供的 30 m 水平格网尺度 DEM。在流域地形图上随机选择 100 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 200 个点,GPS 定位并量测地面实际坡度,计算 DEM 提取地面坡度的中误差^[12]。

分布式 AnnAGNPS 模型通过改变 CSA (Critical Source Area) 和 MSCL (Minimum Source Channel Length)值来描述流域微地形空间变异性。陶湾流域 CSA 和 MSCL 取值为 8 hm², 131 m,划分为 366 个空间离散子流域单元。本文所用土壤类型数据由南京土壤研究所提供,流域土壤属性差异较大,为了提高模型模拟精度,在模型完成子流域区划后,对同一土壤类型内、地形条件差异大(主要指坡度),及不同的土地利用方式的 366 个子流域单元的地理特性,重新布设 258 个土壤样点,测定了土壤主要属性值。

表 1 陶湾流域资料源

种类	来源	比例尺	内容
地理数据、图件	中科院地信所、洛阳市林业局、栾川县林业局、GIS	1 : 10000	1 : 10000 地形图、DEM、水库、河道、路网、坡度
土壤	南京土壤所、洛阳市林业局、GIS、取样测定	1 : 10000	土壤类型、水文学壤组、反射率、比重、孔隙度、饱和导水率、田间系数、凋萎系数、pH 值、有机质率、有机氮率、无机氮率、有机磷率、无机磷率
土地利用	洛阳市林业局、现场调查、GIS	1 : 10000	农地、林地、草地、居民地、湿地
气象	洛阳市气象局	—	降雨量、最高和最低温度、露点温度、云量和风速
流域管理	模型参考文件、现场调查	—	耕作措施、轮作制度、灌溉制度

土地利用文件由流域 2008 年 SPOT 5 影像数据解译、监督分类所得。模型要求建立数字化土地利用文件(shp 格式)和相关管理信息,包括地表覆被状况、作物耕作措施、轮作制度等。在农地经营管理中,各种作物都有播种、除草、施肥、收获等具体耕作措施,按照它们的逻辑顺序输入管理时间表。作物参数由模型手册和现场调查确定;化肥施肥量、无机有机肥比重、施肥深度等由现场调查统计、走访等方式确定。以上流域管理资料由模型编辑模块 InpEdit 输入。

1.4 模型校准

启动模型污染负荷模块,导入 AnnAGNPS. inp 和 2006—2007 年 Dayclim. inp 文件,输出陶湾流域 2006 年、2007 年径流、泥沙、氮、磷等数据。从 2006 年起,在陶湾流域出口处测定出口断面面积和流速,计算次降雨径流流量。依《河流悬移质泥沙测验规范》(GB5019—92)和《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91—2002)提取水样,送至河南科技大学生态学实验室测定泥沙、氮磷量。使用同时期径流、泥沙

数据对模型进行校准。
AnnAGNPS 模型的校准分为 2 步,第 1 步为径流事件的校准,方法为调整 SCS 中的 CN 值。设定 -4%~4% 的 9 组 CN 值,输入 AnnAGNPS. inp 与 Dayclim. inp 文件,启动非点源污染输出负荷模块 PLModel,输出径流模拟值。本文校准期为 2006—2007 年的 22 次径流事件,方式为试错法与图示法相结合。每次调整 2%CN 值,当径流观测值与模拟值基本吻合时按 1%CN 值进行调整(图 1),径流误差 $VE<\pm 15.0\%$ 。

第 2 步为泥沙事件的校准。任一子单元中的植被覆盖率、曼宁粗糙系数、根系重量及田间操作和管理等参数均影响泥沙输出,在模型校准中某些参数还具有与理论上的相反结果。校准时,利用非线性参数评定软件 PEST 优化输入参数,确定最敏感因子为曼宁粗糙系数和植被覆盖率。方式仍为试错法和图示法,调整敏感参数,实现泥沙模拟值与观测值的最大拟合(图 1)。

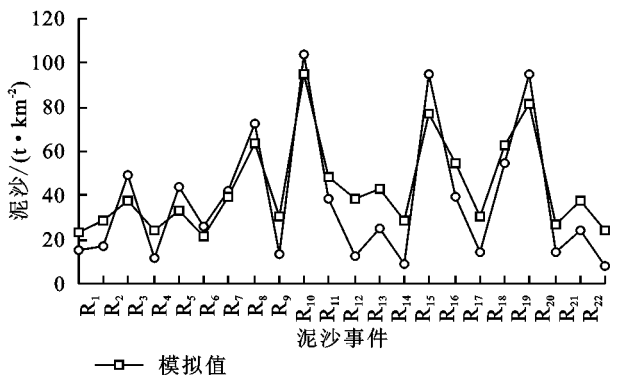
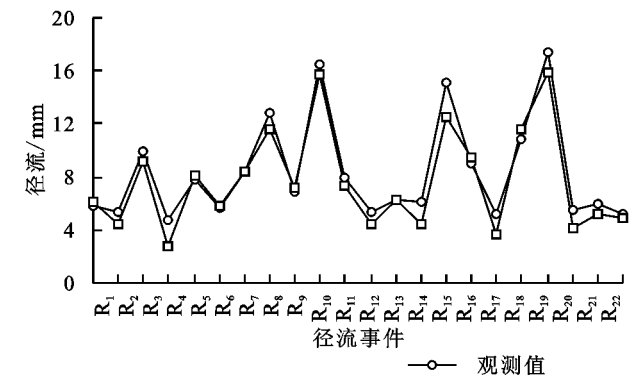


图 1 陶湾流域 2006—2007 年径流、泥沙输出观测值与预测值试错法校准示意图

1.5 模型验证

使用参数率定后的 AnnAGNPS 模型,导入 2008—2009 年 Dayclim. inp 文件,输出流域 2008—2009 年径流、泥沙和氮磷数据,对径流、泥沙和氮磷数据进行验证并进行精度评定。

1.6 模型精度评定

本文使用 E (效率系数)^[13]、 VE (误差比)、 R^2 (决定系数)3 个统计参量评定模型校准期和验证期内径流、泥沙、氮、磷的模拟精度。

$$E=1.0-\frac{\sum_{i=1}^N(M_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^N(M_i-\overline{M})^2}$$
(1)

$$VE=\frac{\sum_{i=1}^N(M_i-P_i)}{\sum_{i=1}^NM_i}$$
(2)

$$R^2=\left\{\frac{\sum_{i=1}^N(M_i-\overline{M})(M_i-P_i)}{[\sum_{i=1}^N(M_i-\overline{M})^2]^{0.5}[\sum_{i=1}^N(P_i-\overline{P})^2]^{0.5}}\right\}^2$$
(3)

式中: N 为降雨发生事件数(天数), M_i 为观测值, \bar{M} 为平均观测值, P_i 为模拟值, \bar{P} 为平均模拟值。 E 值统计意义为观测值与模拟值回归线与1:1线的符合程度^[14], $E > 0.6$ 表示可以接受^[15-16]。 VE 值表示模拟值的误差百分比, $VE < \pm 15\%$ 的误差可以接受^[15]。 R^2 为观测值与模拟值之间可以相互以直线关系说明部分所占的比率。

2 结果与分析

2.1 径流模拟误差

图2A为校准期内AnnAGNPS模型输出的22次

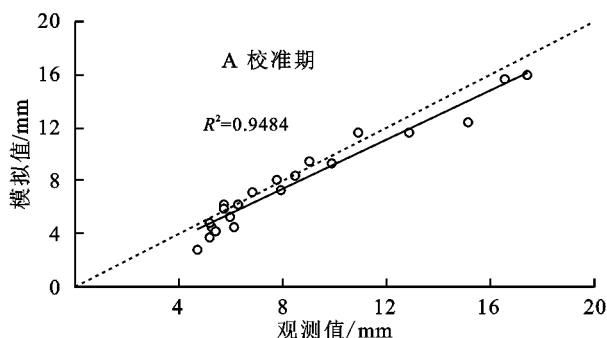


图2 校准期(2006—2007年)、验证期(2008—2009年)陶湾流域径流量观测值与模拟值比较

图2B为验证期内陶湾流域2008—2009年31次径流模拟值与观测值的对比结果。径流模拟总量为515.4 mm,观测总量为548.4 mm, $VE = -6.1\%$ 。事件性径流量模拟值与观测值相关性较高, $R^2 = 0.90$ ($p < 0.05$),模拟误差规律与校正期内相似。回归线接近1:1线, $E = 0.78$,模拟效果较好。

2.2 泥沙模拟误差

图3A为校准期内,AnnAGNPS模型参数优化调整后,输出的22次泥沙模拟值与观测值的对比结果。回归线位于1:1线的下方, VE 为15.1%。由于有偏差较大数据的存在,决定系数 $R^2 = 0.55$ ($p <$

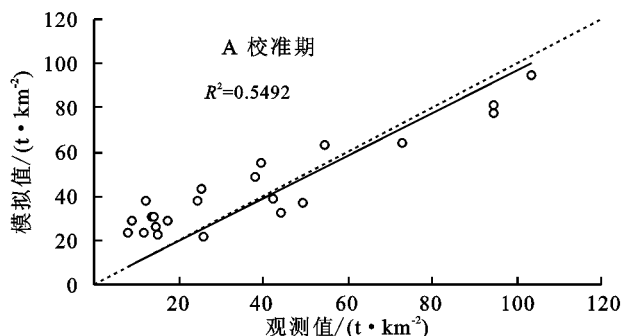


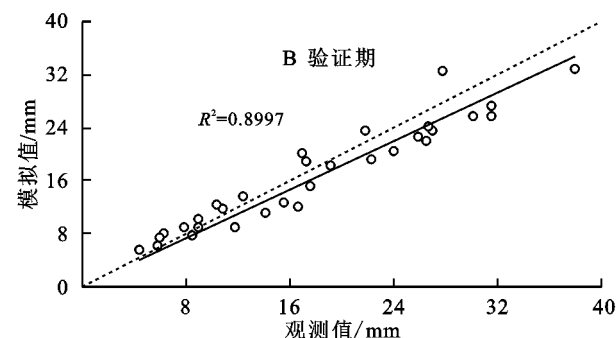
图3 校准期(2006—2007年)、验证期(2008—2009年)陶湾流域泥沙观测值与模拟值比较

2.3 氮、磷模拟误差

AnnAGNPS模型氮、磷等营养物质模拟机理是质量守恒原则,无法进行调试。利用径流和泥沙输出校正好的模型,输出4年内氮、磷模拟数据。选取其中的49次(缺失4次数据)模拟值进行分析,氮、磷与径流和泥沙输出均有关联性。

次径流模拟值与观测值的对比结果。由图2A可知,校准期径流模拟值与观测值吻合较好,回归线位于1:1线下方。22次降雨产生的径流总量为183.5 mm,模型模拟的径流总量为169.3 mm,模拟偏差为 -7.7% ($R^2 = 0.95$, $p < 0.05$),低于 $\pm 15\%$ 误差界; $E = 0.81$,高于可接受的临界值0.6。

径流模拟误差还表现出一定的规律性,即对于小型径流事件,数据点多位于1:1线的上方,模型模拟值偏高;对于大型暴雨径流事件,数据点多位于1:1线的下方,模型模拟值偏低。



0.05), $E = 0.61 > 0.6$ 。与径流模型结果相类似,泥沙模型值也表现出一定的规律性,即对于小型泥沙流失事件,模型模拟值偏高,对于大型暴雨径流事件,模型模拟值偏低。这也说明该流域径流和泥沙事件有着强烈的相关性。

图3B为验证期内,AnnAGNPS模型在31次径流事件中,泥沙模拟值与观测值的对比结果。回归线高于1:1线,表明泥沙模拟值高于观测值,模拟偏差 $VE = 17.0\%$ 。模拟值与观测值相关性一般($R^2 = 0.60$, $p < 0.05$), E 值为0.62,略高于可接受效率界限值0.6。模型对泥沙模拟偏差趋势与校准期类似。

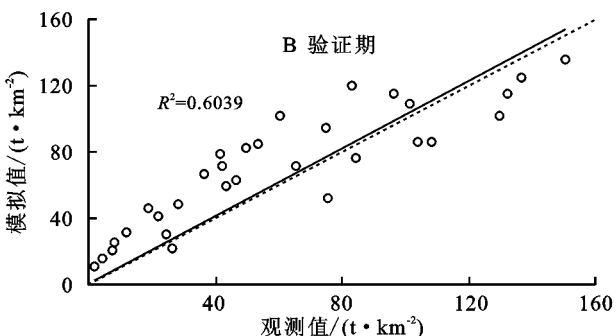
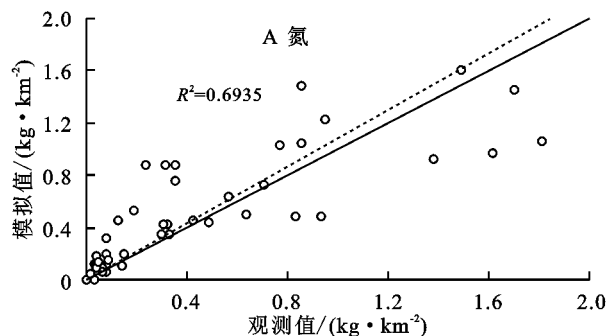


图4A为氮的模拟值与观测值的对比图。49次事件中,氮的输出总量为24.90 kg/km²,模型模拟值为30.35 kg/km²,回归线($R^2 = 0.69$, $p < 0.05$)接近但高于1:1线,对氮的模拟值偏高。 $VE = 22.0\%$,误差在可接受范围之外,模拟精度一般;模拟效率系数 $E = 0.65$,略高于0.6的下限。

图4B为磷的模拟值与观测值的对比图。49次磷输出事件中,磷的输出总量为 5.02 kg/km^2 ,模型模拟值为 6.27 kg/km^2 ,回归线($R^2=0.48$, $p<0.05$)接近但高于1:1线,这说明模型48%的模拟结果是由于观测资料可变性引起的。模型对磷模拟偏差 $VE=24.0\%$,超出了可接受范围,模拟精度一般,效



率系数 $E=0.55$ 。虽然模型并不能完全正确地模拟磷的输出,但仍能代表部分观测资料。模型对氮、磷输出预测具有很大的不确定性,但仍表现有一定的预测趋势:对较小磷输出事件,模型有过高模拟趋势,对较大的输出事件,模型有过低模拟趋势;模型对磷模拟趋势与氮相反。

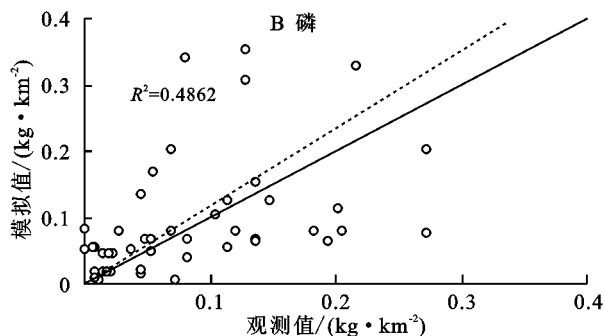


图4 2006—2009年陶湾流域氮、磷输出的观测值与模拟值

3 讨论与结论

3.1 径流模拟误差

AnnAGNPS模型对径流模拟结果,有关文献^[5-9]均认为模拟精度较高。AnnAGNPS径流模拟误差具有一定的规律性。Shamshad等^[17]按径流事件大小,分段评定了模拟效果。发现对于 $>15 \text{ mm}$ 降雨事件,径流模拟 $R^2=0.96$, $E=0.81$,对于 $<15 \text{ mm}$ 的降雨事件, $R^2=0.52$, $E=0.70$ 。他认为降雨量越小, E 值越低,模拟效果越差。有文献^[18-20]认为AnnAGNPS模型对小径流事件,模拟值低于观测值,对暴雨径流事件模拟值偏高。本文AnnAGNPS径流模拟误差也有规律性,但结论与上述相反,即对小型径流事件,模拟值偏高,对大型暴雨径流事件,模型模拟值偏低,模型对小径流事件产生的百分偏差要大,这可能与模型对大径流事件的敏感性高于小径流事件有关。本研究的结论与Polyakov^[21]、黄志霖^[9]等的径流误差结论相一致。上述相反结论的原因可能是流域不同的地形地貌特征。本文所选流域特征与黄志霖^[9]、Polyakov^[21]、Shrestha^[22]和Haregeweyn^[23]等相似,均为山地流域,平均坡度大,土壤含砂量大,保水性差。小降雨事件发生时,土壤的渗透性相对较大,产生地表径流值偏低,暴雨径流发生时,土壤保水能力差,产生较大的地表和地中径流(AnnAGNPS模型默认土壤不产生地中径流)在出口处能迅速产生较大径流和洪峰。这类流域特征与Shamshad等^[17]的研究流域特征是不相同的。

AnnAGNPS模型对多次径流总量的模拟结果偏低。原因如下:一是模型的模拟机制。模型对于 $<5 \text{ mm}$ 的降雨事件,均假定为不产生径流。AnnAGNPS模型使用TR-55综合降雨分布方法来模拟径流,并假定降雨均匀分布。但研究流域山高坡陡,降雨类型差异巨大,迎

风坡面降雨量大且多为间歇性降雨,这种条件下产生的单一雨量图并不能代表整个流域降雨实际分布,特别是研究流域面积偏大,流域出口处监测到的降雨量偏小,即模型文件中的气象文件降雨量偏小,导致模拟的径流值偏小;二是模型本身的一些假设条件。如对日(次)降雨量的定义上,模型认为某日降雨事件之前日和之后日产生的降雨均是独立的,三者间没有关联,这与流域连续降雨产生径流的实际情况是不相符的;三是研究者自身因素。如对径流事件时间界定上,不同监测者往往有不同的监测结果,这种时间界定误差在间断性降雨事件发生时更为突出;四是模型中的径流量直接取决于CN值。Grunwald^[24]等认为模型对径流的模拟误差主要是由于CN取值的不精确,精确的CN取值可以明显地减小径流量模拟偏差。在模型径流调试中发现,如果调整CN值,使校准期误差最小,那么预测效率系数 E 和误差百分数 VE 就会减小。CN对径流产生的物理过程的描述并不充分,径流的产生是基于CN法,模型用这种方法在流域出口处来描述整个流域,对流域内河道产生途径、实际产流面积均没有加以考虑。

DEM格网尺度也可能影响模型径流的模拟精度,Kalin等^[25]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^[26]提出了大尺度流域非点源污染负荷估算方法研究的方法。但受DEM数据源和文章篇幅限制,本文仅选用了30 m尺度的DEM进行模拟,DEM尺度对径流精度的影响有待于进一步研究。

黄志霖等^[9]采用了与本文相似的AnnAGNPS调试方法,评价了模型在三峡库区黑沟流域的径流模拟能力,黑沟流域面积只有 1.44 km^2 ,本文流域面积

为 329.92 km²,黑沟流域与陶湾流域土壤类型、土地利用方式并不相同,但对径流模拟评价结论相似。所以在 AnnAGNPS 模拟面积范围(<3 000 km²)内,调整 SCS-CN 的方法是可以满足径流模拟精度的,也说明 CN 是模型径流精度的主要影响因素。

3.2 泥沙模拟误差

模型对泥沙模拟精度低于径流,径流与泥沙输出相关性较强,但泥沙事件与径流事件还是有相对的独立性。黄志霖等^[9]认为较低精度的泥沙模拟,可能与模型的自身设计缺陷、流域地理位置、流域管理条件、获取资料数据的准确性以及与模型评定方法的选择有关^[5]。如 AnnAGNPS 模型没有考虑基流产生的泥沙输出,而实际中,基流对河岸造成的泥沙量并不能忽视。同时模型进行模拟时,均是假设输入数据的真实可靠,但任何数据总存在误差甚至错误。如受监测手段的限制,用于校准与验证的径流、泥沙数据可能会存在较大的误差或错误。

DEM 对泥沙模拟精度影响较大。田耀武^[27]和黄志霖^[28]等认为 1.5~12.5 m 格网尺度 DEM 对三峡库区 1.44 km² 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 5 m 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。受文章篇幅限制,本文所选 30 m 尺度 DEM 虽然实现了流域泥沙的模拟,但没有对不同格网 DEM 对泥沙精度影响进行研究,也没有确定出本流域最佳 DEM 的尺度。

土壤类型和土地利用文件比例尺精度也会影响泥沙的模拟精度。模型在数据输出前,首先要把全流域分割成众多的空间离散单元(SDU, spatial discretization unit)。SDU 是通过重力作用使地表径流汇集于一个出口点的子区域。模型先在 SDU 内计算径流、泥沙、化学物质负载,后计算河网沟道输移,最后在流域出口处汇总结果。输入土壤类型和土地利用等空间参数后,SDU 对该参数进行空间聚合^[29],改变其空间分布,产生聚合效应。土壤、土地利用等空间参数的精度影响聚合程度,进而影响模型模拟结果。限于文章篇幅,本文也没对土壤和土地利用比例尺精度对泥沙模拟的影响作深入研究。

基于本文所选用的 DEM、土壤和土地利用等空间参数,模型对泥沙模拟偏差趋势与径流相同。即,大型泥沙流失事件,模型有偏低的模拟趋势,对小型泥沙流失事件,模型有偏高的模型趋势。Rode 等^[29]认为模型对泥沙模拟偏差趋势与径流相同的原因是泥沙输出量与径流量有正比线性关系,径流量大时沟道对泥沙的输移能力就高。有文献认为模型对较小泥沙输出事件有偏低模拟趋势,对暴雨泥沙输出事件

有偏高模拟趋势^[30]。Polyakov^[20]、黄志霖等^[9]与本研究结论与上述观点相反。其主要原因是流域的地形和土壤地质条件。如本研究流域土壤含砂量高,质地松散,易于崩塌,河床冲蚀,这种地质现象在暴雨过程中更容易发生,而模型对强降雨产生泥石流没有考虑。特别是持续性小降雨事件也易产生土体崩塌事件,使泥沙输出变大。在伏牛山区土质松散平均坡度较大的条件下,使用 RUSLE 方程来预测泥沙输出进行流域管理有待于进一步论证。

AnnAGNPS 在地形较为平坦、主要发生细沟侵蚀,不考虑重力侵蚀的流域内,模型对较小降雨泥沙事件估计偏低,对暴雨泥沙事件估计偏高;在地质松散,平均坡度较大的流域内,模型对较小泥沙模拟偏高,对暴雨事件泥沙模拟偏低。

3.3 氮、磷模拟误差

AnnAGNPS 模型在自身设计中缺乏减小氮、磷模拟误差的设计。黄志霖等^[9]与本文研究结果表明,模型对氮磷模拟精度较径流、泥沙低。这可能与氮磷的检测手段与研究方法有关,如营养物质的取样和监测在实验室中进行,而植物吸收和营养物质循环等大量的参数则靠现场调查、估计或者使用不符合本地实际的模型参考文件,这些均影响到模型的模拟精度;模型对营养物模拟基础是质量守恒,输移过程中没有考虑二次沉淀、吸附,营养物在输出与输入资料上的缺失都将对结果产生影响。其他有关文献均有营养物输出量模拟效率偏低的报道^[29]。在模型实际应用中,需要更加精准地测定氮磷敏感参数,减少模型模拟误差。

综上,AnnAGNPS 模型的模拟误差产生的原因主要有 3 个:一是模型自身的计算法则,二是模型输入参数的误差或错误,三是地理模型与地理数据的尺度匹配。如 DEM 尺度与流域尺度的匹配,DEM 尺度、流域尺度、模拟偏差之间的关系研究也是空白。

参考文献:

- [1] Silburn D M, Loch R J. Evaluation of the CREAMS model: I. Sensitivity analysis of the soil erosion sedimentation component for aggregated clay soils[J]. Soil Research, 1989, 27(3): 545-561.
- [2] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [3] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [4] Yuan Y, Locke M A, Bingner R L. Annualized agricultural non-point source model application for Mississippi Delta Beasley Lake watershed conservation practices

- assessment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(6): 542-551.
- [5] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, 18(8): 801-808.
- [6] Tsou M S. Estimation of runoff and sediment yield in the Redrock Creek watershed using AnnAGNPS and GIS[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(5): 865-867.
- [7] 王晓利, 姜德娟, 张华. 基于 AnnAGNPS 模型的胶东半岛大沽河流域非点源污染模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7): 1379-1387.
- [8] 李开明, 任秀文, 黄国如, 等. 基于 AnnAGNPS 模型泗合水流域非点源污染模拟研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(S): 54-59.
- [9] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等. 非点源污染模型 AnnAGNPS 在三峡库区林农复合小流域模拟效果评定[J]. *环境科学*, 2009, 30(10): 2872-2878.
- [10] Xiao B, Wang Q H, FAN J, et al. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 738-749.
- [11] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation, [J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1990, 4(4): 206-207.
- [12] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 824-830.
- [13] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [14] Cheng H, Ouyang W, Hao F, et al. The non-point source pollution in livestock-breeding areas of the Heihe River basin in Yellow River [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2007, 21(3): 213-221.
- [15] Chiew F H S, Stewardson M J, McMahon T A. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 147(1): 1-36.
- [16] Krause P, Boyle D P, Båse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. *Advances in Geosciences*, 2005, 5(5): 89-97.
- [17] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, et al. Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 239-252.
- [18] Haregeweyn N, Yohannes F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 99(S1/3): 201-212.
- [19] Rode M, Frede H G. Testing AGNPS for soil erosion and water quality modelling in agricultural catchments in Hesse (Germany)[J]. *Physics and Chemistry of the Earth: Part B*, 1999, 24(4): 297-301.
- [20] Lenzi M A, Di Luzio M. Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Alpone watershed using AGNPS integrated with a Geographic Information System[J]. *European Journal of Agronomy*, 1997, 6(1): 1-14.
- [21] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(11): 1617-1627.
- [22] Shrestha S, Babel M S, Gupta A D, et al. Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(7): 961-975.
- [23] Haregeweyn N, Yohannes F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 99(1): 201-212.
- [24] Grunwald S, Norton L D. Calibration and validation of a non-point source pollution model[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(1): 17-39.
- [25] Kalin L, Govindaraju R S, Hantush M M. Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 276(1): 89-111.
- [26] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 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*, 2006, 26(3): 362-365.
- [27] 田耀武, 黄志霖, 曾立雄. 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*, 2009, 29(4): 846-853.
- [28] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等. 三峡库区黑沟流域 AnnAGNPS 参数空间聚合效应[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6681-6690.
- [29] Rode M, Frede H G. Testing AGNPS for soil erosion and water quality modelling in agricultural catchments in Hesse (Germany)[J]. *Physics and Chemistry of the Earth: Part B*, 1999, 24(4): 297-301.
- [30] Haregeweyn N, Yohannes F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 99(1): 201-212.