

基于 AnnAGNPS 模型的罗李村子流域水文模拟与评价

赵串串, 高瑞梅, 章青青

(陕西科技大学 环境科学与工程学院, 西安 710021)

摘要:以灞河上游罗李村子流域为研究区,基于子流域 2001—2010 年日尺度气象水文数据和流域地形、土壤和土地利用数据,构建了 AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-point Source Pollution model)模型数据库,确定了最优子流域划分方案,模拟了流域年、月、日尺度径流变化。结果表明:(1)当临界源面积(CSA)取 100 hm²,最小初始沟道长度(MSCL)取 70 m 时,模型将流域划分为 1 030 个分室,420 个沟道,能较好地概化流域下垫面特征。(2)模型对年、月、日尺度径流模拟 Ens 均大于 0.51, R² 均大于 0.55, Re 小于 10%,模型能够较好地反映罗李村子流域的径流过程,对流域水资源的合理利用具有指导作用。

关键词:AnnAGNPS; 径流模拟; 日尺度; 罗李村子流域

中图分类号:S157;P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0137-05

Simulation and Evaluation of the Hydrologic Process Based on AnnAGNPS Model in Luolicun Subwatershed

ZHAO Chuanchuan, GAO Ruimei, ZHANG Qingqing

(College of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Distributed hydrological model has become effective approach to simulate hydrologic process and soil erosion. The Luolicun subwatershed was located in the upper reaches of Bahe River in the northwest of China, and was selected as study area. Based on the daily meteorological hydrological data, topography, soil and land use data, the Annualized Agricultural Non-point Source Pollution model (AnnAGNPS) database was built. The best cell was analyzed, and the yearly-monthly-daily runoff of Luolicun subwatershed was simulated. The results showed that: (1) when the critical source area and minimum source channel length were 100 hm² and 70 m, respectively, the subwatershed was divided into 1030 cells and 420 gullies, and the model can well describe the underlying surface in the watershed; (2) AnnAGNPS model can simulate the runoff process in the study area. The relative error of runoff is less than 10% (Ens=0.51, R²=0.55).

Keywords: AnnAGNPS; runoff simulation; daily scale; Luolicun subwatershed

流域水文循环过程受气候、下垫面等多种因素的影响,在空间上表现出相当大的差异性^[1],有效模拟流域水文过程对揭示流域径流变化规律、评价流域水文环境及管理区域水资源具有重要意义。AnnAGNPS 是美国农业部开发的适用于模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失的连续时段分布式水文模型,模型与 GIS 集成应用,揭示的水文循环物理过程更接近客观实际,更能真实地模拟流域水文循环过程,已被国内外广泛应用于不同尺度流域的产流、产沙及非点源污染过程模拟^[2]。

国外学者 Yuan 等^[3]采用未校正的 AnnAGNPS

模型对美国密西西比河的 Deep Hollow Lake 流域进行年、月尺度的径流、泥沙模拟,径流模拟结果决定系数 R² 为 0.9。Licciardello 等^[4]基于月尺度和独立事件运用 AnnAGNPS 模型模拟意大利西西里岛的 Cannata 流域径流变化,取得良好效果。此外,该模型在马来西亚^[5]、悉尼^[6]等地区也有应用。国内学者李家科等^[7]分析了 AnnAGNPS 模型在西北半干旱地区黑河流域的适用性,模拟误差在 20% 以内。闫胜军等^[8]分析了 AnnAGNPS 模型在黄土丘陵沟壑区小流域的适用性,结果相对误差为 -21.46%~2.26%。AnnAGNPS 在三峡库区大宁河流域^[9],大沽河典型小流域^[10]等地区

也开展了相关研究并取得较理想的模拟效果。综合近年来研究,AnnAGNPS 模型在不同流域的径流模拟均能取得较好的模拟效果,并且主要集中于年、月和局部降水事件模拟,而对日尺度的连续模拟相对较少^[11]。

本文以灞河上游罗李村子流域为研究区,优化最优计算单元离散参数,构建流域 AnnAGNPS 日尺度径流模型数据库,模拟流域年、月、日尺度径流过程并评价其模拟效果,为流域水资源的规划管理提供参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

灞河属黄河支流渭河的一级支流,位于渭河南侧,发源于秦岭北坡蓝田县灞源镇麻家坡以北,全长 109 km,流域面积 2 581 km²。本文选取灞河罗李村水文站(109°22'E,34°8'N)为流域出口,提取水文站上游子流域作为研究区,以下简称罗李村子流域,流域面积 743.8 km²。流域内多年年均气温 13.47℃(2001—2010 年),年均降雨量 702.65 mm(2001—2010 年),各年最大 20 次降雨能占全年降雨量的 70%,主要集中于 6 月,7 月,8 月,9 月,10 月份;流域内土地利用类型以林地为主,

约占流域总面积的 72.89%,其次是耕地和建设用地;土壤类型有棕壤、褐土和湿潮土,棕壤面积最大,约占流域总面积 77.29%,其次是褐土(16.68%)。流域地形为山地,海拔在 514~2 416 m。

1.2 AnnAGNPS 模型简介

AnnAGNPS 模型是基于独立降雨事件的 AGNPS 模型发展而来的,能够连续地以日为步长模拟流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失的分布式模型,适用于几 hm² 到 3 000 km² 流域^[12]。模型依据流域的水文特征将流域划分为一定的分室(Cell),即按集水区来划分单元,使模型更符合实际^[13],同时也实现了流域的空间离散。叠置土地利用数据和土壤数据到每一个分室,分室中的类型属性呈现均一性,各分室的径流、泥沙和化学物质通过沟道流入河网系统,并通过沟道演算到流域出口,实现对流域水文的模拟。

1.3 数据来源

本文构建 AnnAGNPS 水文模型需要地形、土地利用类型、土壤类型和气象空间数据和气象、水文属性数据。具体数据及其来源见表 1。

表 1 模型数据库数据及其来源

数据名称	来源	内容
地形	中国科学院数据云(http://www.gscloud.cn)	2009 年分辨率 30 m×30 m DEM
土地利用空间数据	陕西省森林资源调查	土地利用类型、分布和面积
土壤类型空间数据	陕西省森林资源调查	土壤类型、分布和面积
土壤属性数据	《陕西土壤》 ^[14]	土层厚度、机械组成、pH 值、饱和导水率、容重、凋萎系数和有机质含量
气象数据	2001—2010 年蓝田县气象站 (西安市气象局)	逐日最高温、最低温、日均温、降水量、云量、风速和风向
水文数据	2001—2010 年罗李村水文站 (西安市水文水资源勘测局)	逐日流量

1.4 模型精度检验

本文选用 Nash-Sutcliffe 效率系数(Ens)、决定系数(R^2)和相对误差(Re)三个指标评价模型模拟精度^[15]。其中 Ens, R^2 取值在 0~1 范围内,数值越大,说明模拟值与实测值越接近;普遍认为 Ens 大于 0.5 模拟效果较好,大于 0.65 表示模型模拟精度很高^[12];Re 为正值,则模拟值大于实测值,Re 为负值,则模拟值小于实测值,Re 为零,则说明模拟值与实测值正好吻合。

2 模型模拟应用

2.1 流域离散化

流域离散程度是由临界源面积(CSA)和最小初始沟道长度(MSCL)共同决定的,CSA,MSCL 取值越小,河网越密集,划分的分室(Cell)数量越多,对地

表特征概化程度越详细,但是过小的分室划分会造成虚假沟道和分室数量的增加,导致模型运行出错。根据罗李村子流域实际地形情况,经过反复试验,发现当 CSA=100 hm² 时模型运行已经达到上限,此时,MSCL 取值 70 m,继续将 MSCL 减小,模型可运行,但分室和沟道数量保持不变。为此,本流域的最优离散化参数为 CSA=100 hm²,MSCL=70 m,将流域划分为 1 030 个集水单元和 420 个沟道(图 1)。

2.2 数据库构建

AnnAGNPS 模型输入参数数量庞大,包括 31 种类型,约 500 多个,目前有 33 个参数没被利用。参数分别用来描述流域的地形特征、土地利用状况、土壤特征、气候特征和农作物管理等。需要创建的两大模型数据库文件为 AnnAGNPS.inp 和 DayClim.inp。

本文基于数字高程模型(DEM),由模型地形处

理模块 TopAGNPS 自动提取流域河网、划分汇水区计算单元和地表沟道, 生成 ann_cell. csv 和 ann_reach. csv 文件, 以此构建地形数据库。

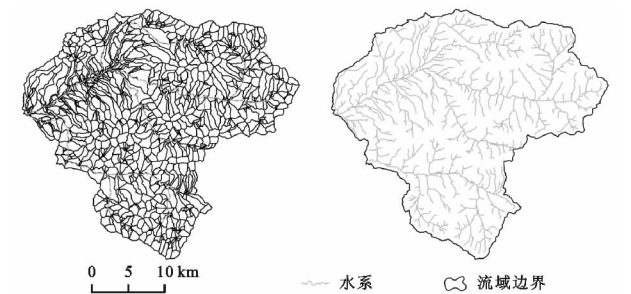


图 1 罗李村子流域最优分室划分及流域河网

基于 2010 年度陕西省森林资源调查提供的灞河流域数字化土壤数据作为模型土壤数据库输入数据。按照指数函数拟合法^[16]将国际制土壤质地转换为模型要求的美国制土壤质地, 参考美国农业手册 AH-703^[17]和《陕西土壤》确定研究区土壤水文组, 棕壤为 B 类, 湿潮土和褐土为 C 类。模型水文模块采用径流曲线方程 (SCS-CN)^[18], 参照模型自带资料 TR55^[18]和相关研究结果^[19-21], 确定流域土地利用类型的初始 CN 值, 参数校验确定最优化 CN 值(表 2)。

表 2 罗李村子流域土地利用类型 CN 值

土地利用类型	土壤水文组 CN 值			
	棕壤		湿潮土和褐土	
乔木林	55*	63**	70*	74**
耕地	78*	82**	82*	86**
灌木林	60*	63**	73*	77**
未成林	66*	69**	77*	81**
建设用地	89*	91**	92*	94**
未利用地	82*	84**	88*	90**
水域	98*	98**	98*	98**

注: * 模型系统预置的 CN 值, ** 参数校正优化后的 CN 值。

构建模型气象数据库涉及的参数有逐日最高温、最低温、降水量、露点温度、太阳辐射量、风速, 其中, 露点温度由相对湿度和日均温计算而得^[22], 太阳辐

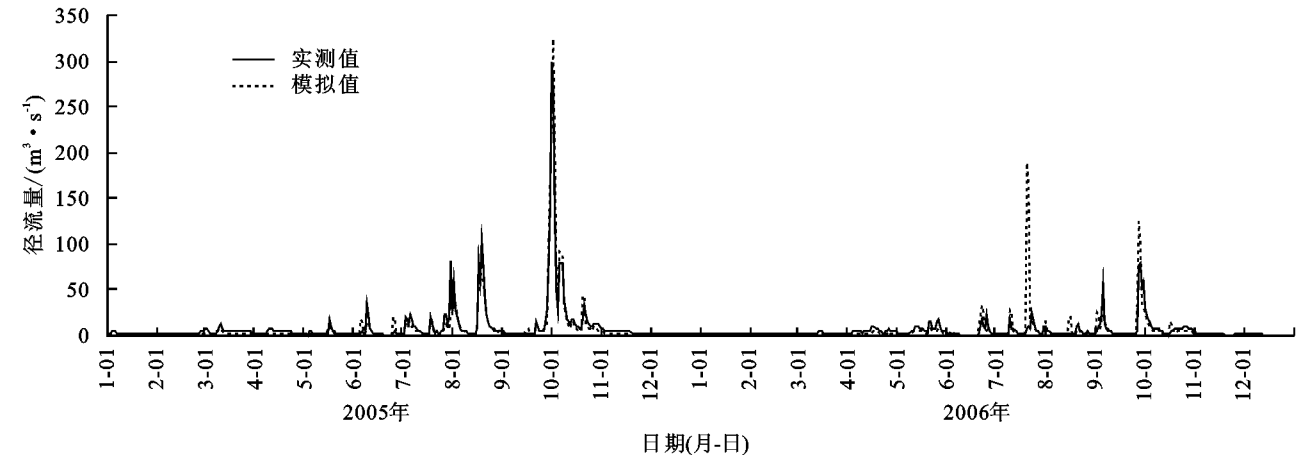


图 2 2005—2006 年日径流实测值与模拟值对比

射量采用 Box-Jenkins 模型计算^[23], 其他均为罗李村水文站 2001—2010 年实测数据。严格按照模型输入文件的格式要求, 在输入编辑器中手动编辑气象数据生成 DayClim. inp 文件。

2.3 参数率定和验证

钟科元等^[24]采用 DSA (Differential Sensitivity Analysis) 参数敏感性分析发现 AnnAGNPS 模型径流敏感性参数主要有 CN 值和沟道曼宁系数, 其中, CN 值主要影响径流量, 沟道曼宁系数主要影响径流过程。Sarangi^[25]也得出相似结论。因此本文选取 CN 值和沟道曼宁系数作为模型率定参数。在模型率定过程中, 首先使用试错法和图示法调整 CN 值^[26], 保证流量总量平衡, 然后调整沟道曼宁系数, 使径流过程与实际相吻合。

本文参数率定选取 2001—2005 年日径流数据, 模型精度验证选取 2006—2010 年日径流数据, 模拟结果见表 3。由表 3 可知模型对月、日尺度在率定期和验证期模拟结果 Ens 和 R² 分别大于 0.51, 0.55, 平均相对误差 Re 均小于 10%。率定期模拟结果好于验证期。

表 3 罗李村子流域不同时间尺度径流模拟结果

时间尺度	模拟阶段	Ens	R ²	Re
月	率定期	0.84	0.87	-6.81
	验证期	0.78	0.82	-9.64
日	率定期	0.57	0.72	-6.94
	验证期	0.51	0.55	-9.45

3 结果与分析

3.1 日尺度径流模拟

选取率定期 2005 年和验证期 2006 年的日径流模拟值与实测值进行制图, 由图 2 可知, 模拟值与实测值变化趋势一致。在率定期和验证期, 决定系数 R² 分别为 0.72, 0.55, Ens 大于 0.51(表 3), 表明模型对流域日尺度径流有良好的模拟效果。

3.2 月尺度径流模拟结果

选取 2007—2010 年丰水期(6—10 月)月径流实测值和模拟值进行对比分析(表 4),由表 4 可知,各月径流模拟值和实测值变化一致,且月径流量和降雨量极值出现时期一致,决定系数 R^2 大于 0.69,模型能够较好地反映丰水期径流过程,可为预估流域丰水期水情变化提供参考。

表 4 2007—2010 年丰水期月均径流实测值与模拟值

年份	月份	降雨量/ mm	月径流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		R^2
			实测值	模拟值	
2007	6	70.2	2.78	2.66	0.95
	7	231.7	26.64	32.53	
	8	131.7	14.22	18.72	
	9	46.6	3.86	3.78	
	10	96.3	12.54	8.98	
2008	6	98.6	3.54	3.31	0.69
	7	125.3	8.76	13.28	
	8	80.1	5.23	4.60	
	9	78.8	4.86	4.55	
	10	65.7	7.90	5.83	
2009	6	94.2	7.94	11.72	0.79
	7	116	5.26	7.46	
	8	188.2	17.56	23.24	
	9	94.8	22.70	17.89	
	10	36.1	1.71	1.28	
2010	6	37.1	7.18	3.78	0.92
	7	132.2	14.81	12.11	
	8	148.1	17.42	17.60	
	9	141.9	18.99	23.58	
	10	59	4.82	4.02	

表 5 2006—2010 年年径流深实测值与模拟值

年份	验证期				
	2006	2007	2008	2009	2010
实测值/mm	210.58	250.53	211.73	337.04	325.81
模拟值/mm	209.97	259.69	168.19	315.05	272.50
Re/%	-0.29	3.65	-20.56	-6.52	-16.36
Ens	0.64				
R^2	0.81				

3.3 年尺度径流模拟结果

从 2006—2010 年流域年径流深实测值与模拟值的对比(表 5),可以看出,验证期 R^2 为 0.81,Re 平均值小于 10%。由于 2008 年、2010 年降雨量的变化导

致模拟结果较差,影响验证期整体的模拟效果,Ens 为 0.64。综合年尺度模拟结果,模型能够较好地模拟流域年径流总量。

通过分析流域分室年径流深的分布,可以进一步揭示流域径流量的空间分布特征。选取年尺度模拟结果最佳年份 2006 年的数据,按照流域年径流深不同将其划分为 5 个等级(表 6 和图 3)。(1)流域内年径流深低于 50 mm 的区域集中于流域上游的乔木林,共 567 个分室,范围最广,约占流域面积的 60.9%,土壤为棕壤,乔木林具有较好的涵养水源作用;(2)年径流深介于 50~100 mm 的区域主要分布在流域上游灌木林和未成林地区,共 178 个分室,面积 12 619.7 hm^2 ,约占流域面积的 17%,主要土壤为棕壤,产流量大于乔木林区;(3)年径流深在 100~300 mm 的区域零星分布于流域中上游,土地利用类型主要为耕地和建设用地,土壤类型主要为棕壤、湿潮土,面积约为流域面积的 4.1%;(4)流域下游的耕地地区年径流深较大,在 300~600 mm 之间,分室数 190,面积 13 255.3 hm^2 ,约占流域面积的 17.8%,褐土为区域土壤;(5)水域地区,由于降雨后雨水直接进入了水体,没有其他损耗,因此年径流深最大(大于 600 mm),但面积仅占流域面积的 0.2%,土壤为湿潮土。综上所述,流域耕地年径流深很大,产流多,而乔木林年径流深最少,产流最少。在满足城市发展的基础上,可适当退耕还林,增加林地覆盖面积,增加流域内的水源涵养,保障流域内水资源供应。

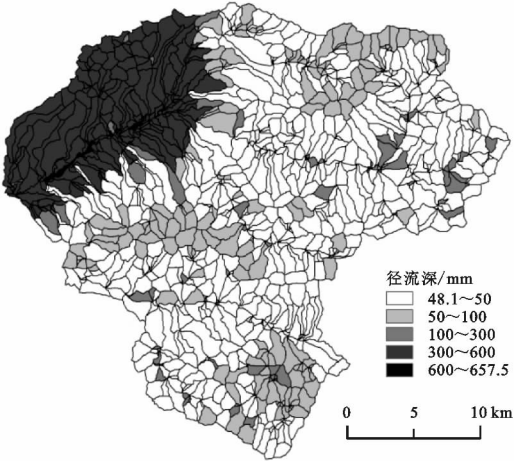


图 3 流域年径流深空间分布

表 6 流域年径流深等级划分

等级	年径流深/ mm	分室数量	总面积/ hm^2	平均径流深/ mm	土地 类型	土壤 类型	面积最大 分室 ID	最大分室 面积/ hm^2	最大分室 径流深/mm
1	<50	567	45320.9	49.2	乔木林	棕壤	1033	479.2	49.4
2	50—100	178	12619.7	72.2	灌木林、未成林	棕壤	1112	329.7	65.5
3	100—300	80	3037.4	239.4	耕地、建设用地	棕壤、湿潮土	2682	298.3	277.9
4	300—600	190	13255.3	313.9	耕地	褐土	142	603.2	311.6
5	>600	15	136.1	657.3	水域	湿潮土	153	43.7	657.5

4 结论

(1) 当临界源面积(CSA)取 100 hm²,最小初始沟道长度(MSCL)取 70 m,模型将流域划分为 1 030 个分室和 420 个沟道,能较好地概化流域下垫面特征。

(2) 模型对年、月、日尺度径流模拟 Ens 均大于 0.51 和 R^2 均大于 0.55,其中月尺度径流模拟效果最佳,Ens 和 R^2 均大于 0.78,Re 小于 10%。模型能够较好地反映罗李村子流域的水文过程。

(3) 分室单元中年径流深小于 100 mm 的区域占流域面积的 77.9%,主要分布在林地类,与流域实际情况非常符合。模拟结果中各分室单元径流量的空间分布规律,为后续非点源污染模拟与流域水资源的优化管理提供定量参考。

参考文献:

- [1] 郑红星,刘昌明,王中根,等. 黄河典型流域分布式水文过程模拟[J]. 地理研究,2004,23(4):447-454.
- [2] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [3] Yuan Y, Bingner R L, Rebich R A. Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi Delta MSEA watersheds[J]. Transactions of the ASAE,2001,44(5):1183-1190.
- [4] Licciardello F, Zema D A, Zimbone S M, et al. Runoff and soil erosion evaluation by the AnnAGNPS model in a small Mediterranean watershed[J]. Transactions of the ASABE,2007,50(5):1585-1593.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李家科,李怀恩,李亚娇,等. 基于 AnnAGNPS 模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J]. 水土保持学报,2008,22(6):81-88.
- [8] 闫胜军,郭青霞,闫瑞,等. AnnAGNPS 模型在黄土丘陵沟壑区小流域的适用性评价[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):13-19.
- [9] 花利忠,贺秀斌,颜昌宙,等. 三峡库区大宁河流域 AnnAGNPS 模型参数评价[J]. 水土保持学报,2008,22(4):65-69.
- [10] 邹桂红,崔建勇. 基于 AnnAGNPS 模型的农业非点源污染模拟[J]. 农业工程学报,2007,23(12):11-17.
- [11] 钟科元,陈莹,陈兴伟,等. 基于农业非点源污染模型的桃河流域日径流泥沙模拟[J]. 水土保持通报,2015,35(6):130-134.
- [12] 钟科元. AnnAGNPS 模型参数空间聚合水文效应研究[D]. 福州:福建师范大学,2015.
- [13] 张玉斌,郑粉莉. AGNPS 模型及其应用[J]. 水土保持研究,2004,11(4):124-127.
- [14] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [15] Nash J, Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models. part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [16] 高银超. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区小江流域农业面源污染负荷研究[D]. 重庆:西南大学,2011.
- [17] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington D C: US Government Printing Office, 1997.
- [18] Bingner R L, Theurer F D, Yuan Y. AnnAGNPS technical processes[M]. Washington D C: USDA-ARS,2003.
- [19] 刘贤赵,康绍忠,刘德林,等. 基于地理信息的 SCS 模型及其在黄土高原小流域降雨—径流关系中的应用[J]. 农业工程学报,2005,21(5):93-97.
- [20] 贾宁凤,李旭霖,陈焕伟,等. AnnAGNPS 模型数据库的建立:以黄土丘陵沟壑区砖窑沟流域为例[J]. 农业环境科学学报,2006,25(2):436-441.
- [21] 闫胜军,闫瑞,李晋超,等. 黄土丘陵沟壑区岔口小流域 AnnAGNPS 模型数据库建立[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2013,33(2):114-121.
- [22] 郭新波. 红壤小流域土壤侵蚀规律与模型研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.
- [23] 王敏,丁明. 太阳日总辐射量的 Box-Jenkins 模型[J]. 太阳能学报,2012,33(3):386-390.
- [24] 钟科元,陈兴伟,陈莹,等. 地形和土壤/土地利用空间聚合对径流和输沙量影响的 AnnAGNPS 模拟[J]. 农业工程学报,2016,32(8):127-135.
- [25] Sarangi A, Cox C A, Madramootoo C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St Lucia watersheds[J]. Biosystems Engineering, 2007,97(2):241-256.
- [26] 田耀武,王宁,刘晶. 伏牛山区陶湾流域径流泥沙模拟误差分析[J]. 水土保持研究,2016,23(5):56-62.