

# 参数空间分布对非点源污染模拟的影响

许其功<sup>1</sup>, 刘鸿亮<sup>2</sup>, 沈珍瑶<sup>1\*</sup>, 席北斗<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:**以大宁河流域为研究区域, 应用非点源模型 SWAT(soil and water assessment tool), 模拟了参数空间分布对流域径流和营养物质流失的影响. 利用大宁河流域巫溪水文站 2000~2004 年的实测数据对模型进行了率定和验证, 将流域划分为 6 种数量不等的子流域, 利用相同的模型参数输入, 模拟了不同的流域划分方案对径流和营养物质流失的影响. 结果表明, 不同的流域划分方案, 年平均流量的最大相对误差为 19.6%, 6 种方案年平均流量的效率系数为 0.52~0.82, 月平均流量的效率系数为 0.80~0.83, 随着子流域数量的增加, 径流量出现了先下降、后上升的趋势; 有机氮和有机磷的最大相对误差分别为 16.2% 和 7.7%, 不同的流域划分方案对营养物质的流失产生了轻微的影响, 但没有明显的变化趋势和规律.

**关键词:** 划分方案; 非点源污染; 子流域; 率定

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1425-05

## Effects of Parameter Spatial Distribution on Non-point Pollution Source Model

XU Qi-gong<sup>1</sup>, LIU Hong-liang<sup>2</sup>, SHEN Zhen-yao<sup>1</sup>, XI Bei-dou<sup>2</sup>

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The SWAT model was used to simulate the effects of parameter spatial distribution on flow and nutrients loadings in the Daning river watershed. It was first calibrated and validated using the measured data for the period of 2000~2004. Then the model was used to simulate the effects of watershed delineation scenarios on flow and nutrients loadings, using six watershed delineations, each with a different number of sub-watersheds. The max relative error is 19.6% for the annual mean flow under different watershed delineation scenarios. The flow increase first and then decrease with the number of sub-watersheds. The efficiencies coefficient is 0.52~0.82 for annual mean flow and 0.80~0.83 for monthly mean flow under six delineation scenarios. Outlet nutrients simulations are slightly affected by changes in watershed delineation scenarios. The relative errors of organic nitrogen and organic phosphorous are 16.2% and 7.7% respectively and no explicit trend is observed.

**Key words:** delineation scenario; non-point pollution sources; sub-watershed; calibration

近年来, 对点源污染治理日益加强, 但河流污染的问题并未得到有效的解决, 因此, 农业非点源污染治理日益引起了人们的重视. 由于非点源污染物质排放的随机性、间歇性、滞后性和复杂性等特点, 使得对非点源的研究较为困难. 利用非点源模型进行模拟越来越成为农业非点源污染治理的重要手段<sup>[1~3]</sup>.

基于分布式参数的非点源模型是流域规划和管理的重要工具<sup>[4]</sup>, 其优越性在于能够将一系列的子流域进行整合, 模拟较为复杂的自然界系统. 模型将研究流域离散为若干个计算单元, 在每个单元内部分别进行方程的求解, 由于计算单元大于输入参数所代表的空间尺度, 因此, 每个单元参数值的计算通常要进行一定的参数整合, 在 SWAT 模型中, 每个子流域被离散化为一系列的水文响应单元(HRU), 每个 HRU 对应一定的土壤和土地利用属性数据, 研究表明, HRU 数量的增加能够有效弥补子流域数量少所带来的不利影响, 模拟的结果与子流域的大小有关, 输入数据的空间分布会对输出结果产生一定的

影响. 本研究利用分布式非点源模型 SWAT<sup>[5]</sup>, 探讨了子流域大小对农业非点源污染的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 模型概述

SWAT 模型是 1 个基于分布式、长时间序列的非点源污染模型, 用来模拟土壤、土地利用和管理措施对径流、土壤侵蚀和农田污染物迁移转化的影响. 首先选择地形单元的面积, 将流域划分为一定数量的子流域, 再根据不同的土地利用和土壤属性, 将子流域进一步划分为若干个水文响应单元(HRU). 模型运算时, 在每个 HRU 内部分别进行径流、泥沙、营养物质迁移转化的计算, 通过子流域尺度进行整合, 最后经河网连接到达流域出口.

SWAT 模型在世界各地得到了广泛的应用,

收稿日期: 2006-08-09; 修订日期: 2006-10-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415204); 博士点专项基金项目(20050027011)

作者简介: 许其功(1972~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域水污染防治, E-mail: xuqigong@tom.com

\* 通讯联系人, E-mail: z. y. shen@163.com

Franco 等在芬兰南部 Kerava 流域的农业区<sup>[6]</sup>、Fohrer 等在 Dietholze 流域<sup>[7]</sup>、Arnold 等在 Texas 州 Gulf 盆地的水资源管理与评价中<sup>[8]</sup>都成功地应用了该模型,取得了较好的模拟结果. Heuvelmans 等<sup>[9]</sup>和 Chaplot 等<sup>[10]</sup>探讨了 SWAT 模型中主要参数的变化对模拟结果的影响. Fontaine 等为了提高 SWAT 模型在多山地区的适用性,在模型中加入了融雪模块,使其能够很好地应用于多山地区的水文模拟,并在 Rocky 盆地验证了模型的运行情况<sup>[11]</sup>. 近年来,我国的研究人员也对该模型的应用进行了一些有益的探索和创新<sup>[12~14]</sup>.

模型的水文模块以水平衡方程为基础,模拟过程包括降雨、渗透、表面径流、土壤蒸发和侧向流,其中,表面径流利用美国土壤保持局的曲线数方程(CN)进行计算,见式(1)和式(2).

$$Q_{surf} = (R_{day} - I_a)^2 / (R_{day} - I_a + S) \quad (1)$$
式中,  $Q_{surf}$  为地表径流量, mm;  $R_{day}$  为日降雨量, mm;  $I_a$  为初损, mm, 包括降雨在产流前的地表储存、中途拦截和下渗;  $S$  为可能最大持水量, 可根据以下公式求得:

$$S = 25\,400 / CN - 254 \quad (2)$$
式中, CN 为曲线数.

污染物迁移转化模块用于模拟流域内氮、磷的迁移转化,基本过程包括矿化、反硝化、挥发、固氮和植物对氮、磷的吸收. 植物对氮、磷的吸收量是根据氮、磷供应量和需求量来确定的,作物每一个生长阶段的最佳需求浓度决定了需求量. SWAT 模型提供了作物数据库的默认值. 有机氮和有机磷在河道中随地表径流迁移的量见式(3)、(4).

$$N_{surf} = 0.001 \times c_N \times M \times e_N / A_{hnu} \quad (3)$$
式中,  $N_{surf}$  为表面径流中有机氮流失量, kg/hm<sup>2</sup>;  $c_N$  为

有机氮在表层土壤中的浓度, kg/t;  $M$  为土壤流失量, t;  $A_{hnu}$  为水文响应单元的面积, hm<sup>2</sup>;  $e_N$  为氮富集率.

$$P_{surf} = 0.001 \times c_P \times M \times e_P / A_{hnu} \quad (4)$$
式中,  $P_{surf}$  为有机磷流失量, kg/hm<sup>2</sup>;  $c_P$  为有机磷在表层土壤中的浓度, kg/t;  $M$  为土壤流失量, t;  $A_{hnu}$  为水文响应单元的面积, hm<sup>2</sup>;  $e_P$  为磷富集系数. 本研究中使用 2003 版本的 SWAT 是非点源模型 BASINS 的一部分,模型利用 Arcview 软件从 GIS 图层中读取输入文件,利用数字地形分析工具划分子流域和提取河网.

### 1.2 研究区域

大宁河流域位于重庆市巫山县和巫溪县境内,见图 1. 流域面积 4 426 km<sup>2</sup>, 最低高程 100 m, 最高 2 768 m. 流域内气候湿润, 年平均降雨量 1 059 mm, 年平均温度为 17~19℃. 根据大宁河流域的数字等高模型(DEM), 可将流域内的土地坡度分为 4 级, 极陡坡地(坡度 > 55%)、陡坡地(坡度 25%~55%)、中等坡地(坡度 15%~25%)、平地或中等坡地(坡度 0~15%), 其面积分别占流域总面积的 0.2%、43.2%、27% 和 29.6%. 流域内的主要作物有玉米、小麦、水稻和马铃薯等, 土地利用类型主要为耕地、草地、林地和其它类型, 其面积分别占土地利用总面积的 26%、14%、59% 和 1%.

大宁河流域的水文站设在巫溪县境内, 模拟运算在巫溪水文站控制流域内进行, 见图 1(右, 灰色区域), 该站控制流域面积 2 017 km<sup>2</sup>, 境内主要有东溪河、西溪河与后溪河, 土地利用类型与主要作物与大宁河相似. 在本研究中, 共利用了大宁河流域内 8 个雨量站的日平均降雨量、日平均流量和来自气象部门的日最高、最低温、平均风速、相对湿度和日照时数等数据.

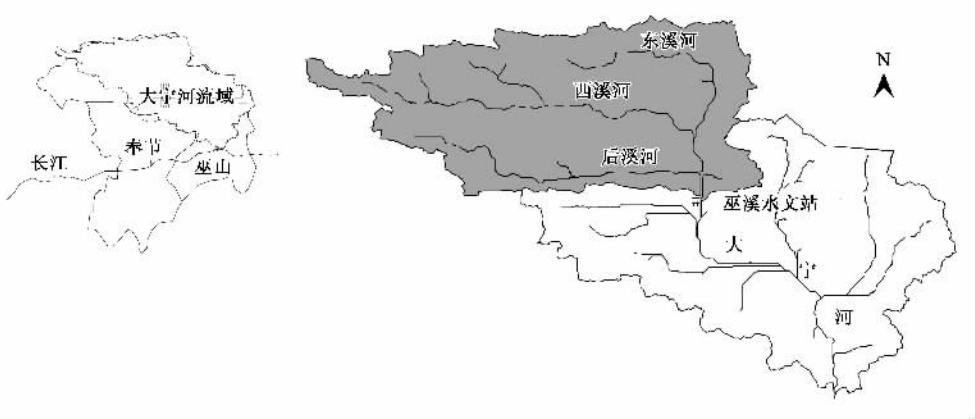


图 1 大宁河流域与模拟区域(右, 灰色)

Fig.1 Daning river watershed and area for simulation (right, grey colored)

1.3 流域划分

2000 年, Fitzhugh 等将 Pheasant Branch watershed 划分为 8 种数量不等的子流域<sup>[15]</sup>, 模拟不同划分方案对径流和土壤流失的影响. 本研究对流域采用了 6 种划分方案, 每一种方案将流域划分为一定数量的子流域, 利用 2000 ~ 2004 年的降雨量等气象数据输入, 运行模型对 6 种方案分别进行计算, 从而得出不同的模拟结果. 每种方案的划分概况见表 1, 子流域划分及平均面积见图 2. 在 SWAT 模型中, 子流域可以进一步划分为 HRU, 每 1 个 HRU 代表子流域内不同的土壤和土地利用组合, 在一个给定的子流域内, 所有的 HRUs 都具有相同的地形参数. 每个子流

域 HRUs 的数量和面积根据用户指定的土壤和土地利用面积的临界值计算得出, 本研究中采用的临界值均为 4%, 这就意味着组成 HRUs 的土壤和土地利用面积在其所属的子流域内均超过了 4%.

表 1 流域划分概况  
Table 1 Description of watershed delineations

| 划分方案                      | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 子流域数量/个                   | 5   | 11  | 25  | 53  | 89  | 177 |
| HRUs 数量/个                 | 49  | 85  | 182 | 321 | 530 | 841 |
| HRUs 平均面积/km <sup>2</sup> | 41  | 24  | 11  | 6.3 | 3.8 | 2.4 |
| 子流域平均面积/km <sup>2</sup>   | 403 | 183 | 81  | 38  | 23  | 11  |

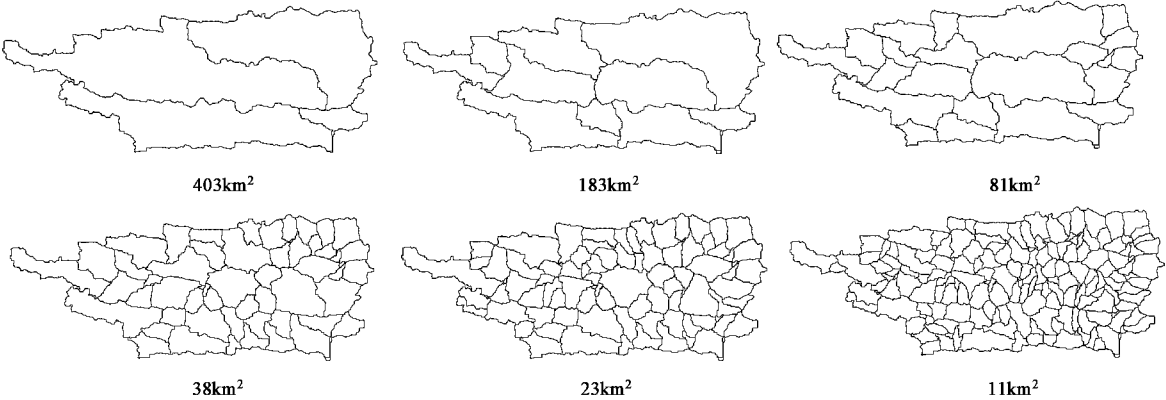


图 2 流域划分方案  
Fig.2 Watershed delineation scenarios

1.4 模拟结果评价

选用效率系数 ( $R^2$ ) 来衡量模拟值与观测值之间的拟合度. 效率系数是 Nash 和 Sutcliffe 于 1970 年提出的, 可用来评价模型模拟的精度, 该系数的区间为  $(-\infty, 1]$ , 当系数为 1 时, 说明模拟值和实测值完全吻合, 其表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{mea,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{mea,i} - \bar{Q}_{mea})^2} \tag{5}$$

式中,  $Q_{sim,i}$  和  $Q_{mea,i}$  为模拟值和实测值;  $\bar{Q}_{mea}$  为实测平均值;  $n$  为模拟次数. 当模拟值和实测值相等时,  $R^2 = 1$  表示非常吻合, 当  $R^2 < 1$  时, 其值越小表明吻合程度越低.

2 结果与讨论

2.1 率定和验证

水文模拟的准确性是模拟营养物质排放的基本

前提, 本研究首先利用 2000 年和 2001 年巫溪水文站的实测数据对水文过程进行率定. 分别调整曲线数、土壤可提供水量和基流衰减系数、影响氮、磷的 NPERCO 系数. 年、月平均流量的率定和验证见图 3. 率定前、后 Nash-Sutcliffe 系数分别为 0.88 和 0.96, 利用 2002 ~ 2004 年的水文数据进行验证, 月、年平均流量的 Nash-Sutcliffe 系数分别为 0.68 和 0.76, 由于水质监测数据较少, 利用 2000 ~ 2004 年的部分氮、磷实测数据进行模型的验证, 经验证, 总氮、总磷的 Nash-Sutcliffe 系数分别为 0.54 和 0.74, 率定与验证结果见图 3.

2.2 径流量

图 4 表示了流量的实测值、模拟值在以年和月为时间尺度上的对比情况. 由图 4(A) 可知, 除第 1 种方案年平均流量的模拟值大于实测值外, 其余 5 种方案的模拟值均小于实测值. 模拟值与实测值的相对误差范围为 1.3% ~ 19.6% 之间, 其中, 方案 1 的相对误差最小, 方案 4 最大, 6 种模拟方案的

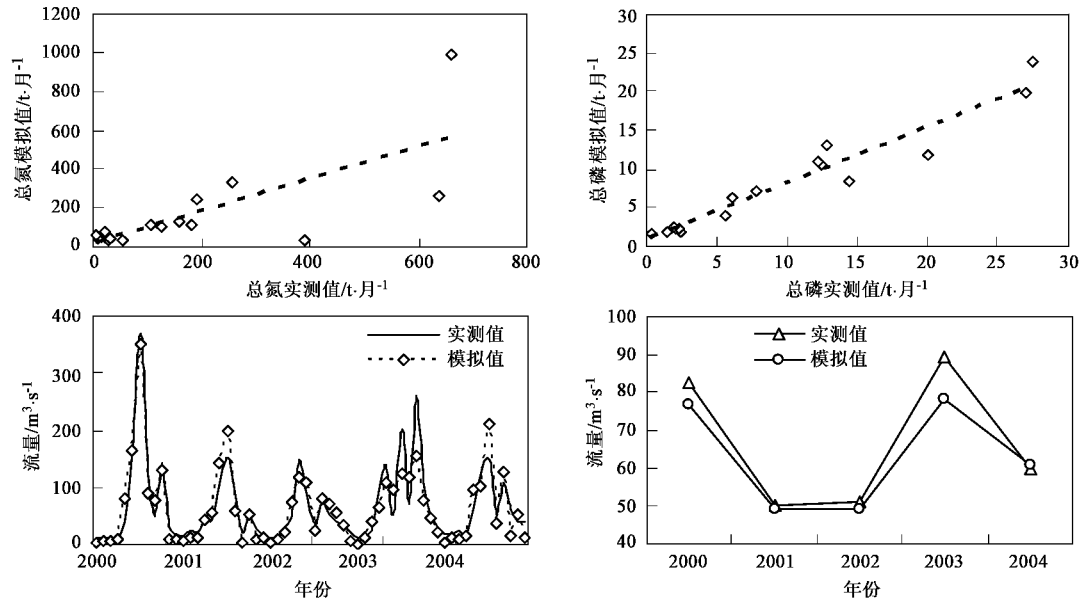


图 3 流量、营养物质的实测值和模拟值

Fig.3 Measured and simulated values of flow and nutrients loadings

Nash-Sutcliffe系数分别为 0.82、0.74、0.65、0.52、0.57 和 0.64。模拟结果表明，径流量与子流域的数量有关，从方案 1~4，子流域数量由 5 个增加至 53 个，5 a 平均径流量由 71.6 m<sup>3</sup>/s 下降至 57.6 m<sup>3</sup>/s，从方案 4~6，随着子流域数量由 53 个增加至 177 个，5 a 平均径流量由 57.6 m<sup>3</sup>/s 增加至 59.2 m<sup>3</sup>/s。

Nash-Sutcliffe 为 0.83，其中，方案 1 的月平均模拟值大于实测值，方案 2~6 的模拟值均低于实测值。与年平均流量的模拟结果相同，从方案 1~4，月平均流量逐渐下降，从方案 4~6，随着子流域数量的进一步增加，月平均流量呈现出上升的趋势。

由模拟结果可知，6 种方案年平均流量的 Nash-Sutcliffe 为 0.52~0.82，月平均流量的 Nash-Sutcliffe 为 0.80~0.83，径流量随着子流域数量的增加，呈现出了先降低后上升的趋势，说明了模拟径流量不仅取决于模拟的时间尺度，而且与流域的划分方案有关，在不同流域的非点源污染模拟中，模拟的时间尺度和合理的流域划分方式是模拟结果准确性的重要前提。

2.3 营养物质

流域出口处的有机氮和有机磷排放负荷见图 5。在不同的方案中，有机氮和有机磷的年平均最大相对误差分别为 16.2% 和 7.7%，模拟结果受流域划分方案的影响，但影响甚微，从方案 1~6，随着子流域数量的增加，模拟结果无特定的变化趋势与变化规律。在非点源污染模拟中，营养物质的流失量不仅与径流量有关，而且与土壤侵蚀量有关，研究表明<sup>[16]</sup>，径流量和土壤侵蚀量都随着流域划分方案的不同而产生一定的变化，且变化趋势和变化幅度不尽相同，受此影响，营养物质的流失量虽然随着流域划分方案的不同产生了一定的变化，但无明显的变化趋势和规律。

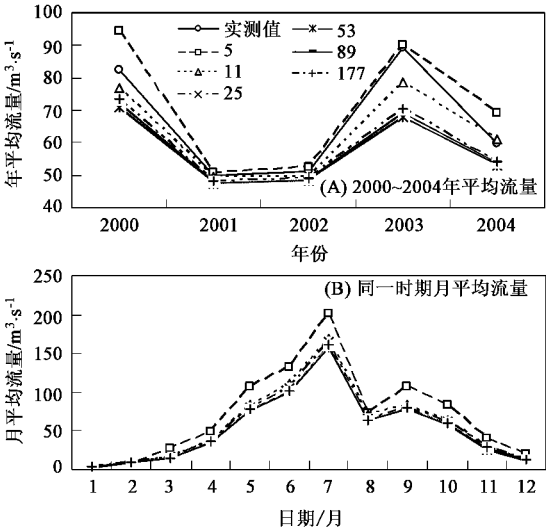


图 4 不同方案的实测与模拟流量

Fig.4 Measured and predicted flow for different delineation scenarios

月平均流量的模拟结果表明，见图 4(B)，在 6 种方案中，Nash-Sutcliffe 系数位于 0.80~0.83 之间，其中，第 6 种方案的模拟值与实测值最接近，其

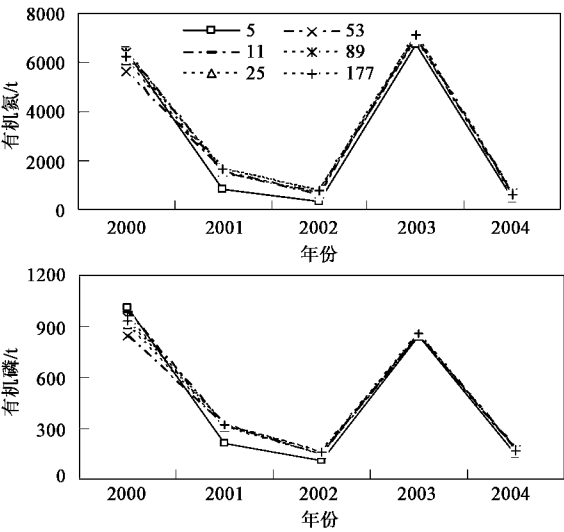


图5 不同方案流域出口营养物质排放量

Fig.5 Outlet nutrients loadings for different delineation scenarios

3 结论

(1)非点源污染模型 SWAT 能够较好地模拟大宁河流域的水文过程,在以年为尺度的模拟中,效率系数  $R^2$  位于 0.52 ~ 0.82 之间,在以月为尺度的模拟中,模拟效率系数  $R^2$  为 0.80 ~ 0.83.在不同的流域划分方案中,年平均流量的最大相对误差为 19.6%,随着子流域数量的增加,径流量出现了先下降、后上升的变化趋势,模拟的径流量不仅与模拟的时间尺度有关,而且还受流域划分方式的影响。

(2)对营养物质的模拟而言,子流域的面积对模拟结果产生了一定的影响,但影响甚微.流域出口营养物质流失量与土壤理化性质、径流量、侵蚀量等多种因素有关,在多因素的共同作用下,模拟结果随着子流域数量的增加产生了一定的变化,但无明显的变化趋势和规律可循。

(3)非点源污染模拟中,流域划分方案会对径流和营养物质流失的模拟结果产生一定的影响,在对一特定流域进行非点源污染的模拟研究时,考虑不同划分方案对径流和营养物质流失的影响是十分必要的,选择合适的流域划分方案可以提高模型的精度。

参考文献:

[ 1 ] Huisman J A, Breuer L, Frede H G. Sensitivity of simulated hydrological fluxes towards changes in soil properties in response to land use change [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth , 2004, 29

(11-12):749 ~ 758 .  
[ 2 ] Kang M S, Park S W, Lee J J, et al. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields [ J ]. Agricultural Water Management, 2006, 79 (1):72 ~ 92 .  
[ 3 ] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia) [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(8-10):497 ~ 507 .  
[ 4 ] Tripathi M P, Panda R K, Raghunwansi N S. Identification and Prioritisation of Critical Sub-watersheds for Soil Conservation Management using the SWAT Model [ J ]. Biosystems Engineering, 2003, 85(3): 365 ~ 379 .  
[ 5 ] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I : model development [ J ]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34 (1):73 ~ 89 .  
[ 6 ] Francos A, Bidoglio G, Galbiati L, et al. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized coastal basin [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth (B), 2001, 26(1): 47 ~ 52 .  
[ 7 ] Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, et al. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth (B), 2001, 26(7-8): 577 ~ 582 .  
[ 8 ] Arnold J G, Srinivasan R, Ramanarayanan T S, et al. Water sources of the Texas Gulf Basin [ J ]. Water Science and Technology, 1999, 39(3): 121 ~ 133 .  
[ 9 ] Heuvelmans G, Muys B, Feyen J. Evaluation of hydrological model parameter transferability for simulating the impact of land use on catchment hydrology [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29(11-12): 739 ~ 747 .  
[ 10 ] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and  $\text{NO}_3^-$ -N loads predictions [ J ]. Journal of Hydrology, 2005, 312(1-4):207 ~ 222 .  
[ 11 ] Fontaine T A, Cruickshank T S, Arnold J G, et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT) [ J ]. Journal of Hydrology, 2002, 262(1-4): 209 ~ 223 .  
[ 12 ] 张蕾娜,李秀彬,王兆锋,等.一种可用于表征土地利用变化水文效应的水文模型探讨 [ J ].水文,2004,24(3):4 ~ 8 .  
[ 13 ] 杨桂莲,郝芳华,刘昌明,等.基于 SWAT 模型的基流估算及评价-以洛河流域为例 [ J ].地理科学进展, 2003, 22(5):463 ~ 470 .  
[ 14 ] 胡远安,程声通,贾海峰.非点源污染模拟的空间分割优化 [ J ].清华大学学报(自然科学版),2005, 45(3):367 ~ 370 .  
[ 15 ] Fitzhugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural non-point source pollution model [ J ]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1-2):35 ~ 53 .  
[ 16 ] Chen E, Mackay D S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural non-point source pollution model [ J ]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1-4):211 ~ 224 .