

## 三峡库区黑沟小流域非点源污染物输出的动态变化

田耀武<sup>1,2</sup>, 黄志霖<sup>2</sup>, 肖文发<sup>2\*</sup>

(1. 河南科技大学林学院, 洛阳 471003; 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)

**摘要:** 农业施肥水平和耕作方式等流域管理措施影响非点源污染物的输出. 选择三峡库区黑沟小流域 60 种管理措施组合, 即 5 种化肥施用水平 (FL1-现用量、FL2-70% 现用量、FL3-推荐用量、FL4-70% 推荐用量、FL5-30% 推荐用量)、4 类耕作方式 (CT-传统耕作、NT-免中耕、CS-等高种植、RC-留茬覆盖) 和 3 种年降雨模式 (干旱年、平水年、丰水年), 基于 GIS 和 Annualized Agricultural Nonpoint Source (AnnAGNPS) 模型进行流域尺度下的年际非点源污染物模拟输出. 结果表明, 化肥施用水平对径流和泥沙输出没有影响, 对总氮和总磷输出呈强正相关; NT、CS 和 RC 等保护性耕作方式虽然降低了泥沙输出量, 但增加了养分的输出量; 泥沙输出量随年降雨量的增加而急剧增加, 氮输出量几乎不随年际降雨量的增加而增加, 磷输出量随年际降雨量的增加而缓慢增加, 达到一定输出量时, 输出增量迅速降低; FL3 可削减 40% 的养分输出, NT 削减 45% 泥沙输出, FL3 + NT 管理措施是三峡库区流域降低非点源污染输出最为经济有效的模式之一.

**关键词:** AnnAGNPS 模型; 非点源污染; 三峡库区; 管理措施

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0423-05

## Dynamic Change of Non-point Source Pollution Exported from Heigou Watershed in Three Gorges Reservoir Area

TIAN Yao-wu<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi-lin<sup>2</sup>, XIAO Wen-fa<sup>2</sup>

(1. Forestry College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration China, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Sediment and its associated pollutants entering a water body can be very destructive to the ecological health of that system. Based on GIS and AnnAGNPS model, A total of 60 combinations of various management treatments including five fertilizer levels (FL1-existing, FL2-70% of existing, FL3-recommended, FL4-70% of recommended, FL5-30% of recommended), four tillage practices (CT-conventional tillage, NT-no tillage, CS-contour strip cropping, RC-residue cover) and three kinds of annual rainfall (deficit, normal, abundant) have been evaluated. Results from model simulations indicate that runoff and sediment yield were not affected due to change in fertilizer doses, but there was a significant positive correlation between nutrient losses and fertilizer application rates; Conservation tillage practices such as NT, CS and RC would reduce sediment and sediment-bound nutrient losses significantly, they have very little benefit on soluble nitrogen and phosphorus losses. This is primarily because the increased infiltration rates resulting from those practices leads to greater losses of subsurface and return flow in the watershed. In view of feasibility and efficiency, the combination of FL3 + NT was found to be the best scenario as the reductions of nutrient losses and sediment yield were about 40% and 45%, respectively.

**Key words:** AnnAGNPS model; non-point source pollution; Three Gorges Reservoir area; management practices

保护性耕作措施、保护性工程措施<sup>[1-3]</sup>和我国推广的退耕还林<sup>[4]</sup>等农业流域管理措施均能影响非点源污染(NSP)物的输出,其中保护性耕作方式主要有垄耕、免耕、等高种植、休闲耕作、免收割耕作等.以上措施对 NSP 输出影响研究上,国内多注重实地监测<sup>[5,6]</sup>,国外注重从流域尺度利用数学模型方法进行模拟.如 Santhi 等<sup>[3]</sup>使用 SWAT 模型评估水质管理措施对 Texas 流域的影响, Schmitt 等<sup>[7]</sup>研究了不同植物、不同宽度过滤带的作用效果, Walker 等<sup>[8]</sup>监测了 Wisconsin 2 个流域内实行等高种植、土地最优化耕作、轮作等方案后非点源污染输出的变化, Inamdar 等<sup>[9]</sup>研究了 Virginia 州 Nomini Creek 流

域实行最佳管理措施后 NSP 变化等,这些成果确认了流域尺度模型模拟研究方法的可行性,同时也指出施肥是农业流域地表径流中氮、磷污染物的主要来源,进行科学的施肥管理既是保持作物高产,又是有效减少径流氮磷污染输出的重要措施之一.但基于现实流域不同管理措施组合,利用模型模拟的方

收稿日期: 2010-03-24; 修订日期: 2010-06-03

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A13, 2006BAD03A07); 河南科技大学博士科研基金项目(09001445)

作者简介: 田耀武(1975~), 男, 博士, 主要研究方向为林业遥感与污染生态学, E-mail: tianyaowu@126.com  
\* 通讯联系人

法来研究不同年降雨模式(平水年、丰水年、干旱年)下非点源污染输出较为鲜见.本研究选择模拟精度较高的连续非点源污染模型 Annualized Agricultural Nonpoint Source (AnnAGNPS) 4.0<sup>[10,11]</sup>,定量评估5种化肥施用水平、4种耕作方式和3种年降雨模式下60种流域管理组合条件下非点源污染输出,以期为三峡库区NSP治理提供理论和技术支撑.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究地区概况

黑沟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",属兰陵溪上游之小流域,面积 144.4 hm<sup>2</sup>,毗邻三峡库区.流域地处中纬度,属亚热带大陆性季风区,多年平均降雨量 1 439 mm,年际差异大,年内降雨分布为单峰型(5~8月占全年 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,植被覆盖率为 72.5%.流域西高东低,西部最高海拔 1 400.0 m,植被覆盖低,荒草出露岩石分布;中部低山区为柑桔、板栗、毛竹、马尾松等人工次生林带,农林、农茶间作带;东部缓坡台地以植茶为主,间作水稻、玉米、花生等.农地面积 45.8 hm<sup>2</sup>、林地 56.1 hm<sup>2</sup>、草地 6.9 hm<sup>2</sup>、荒山荒坡 20.8 hm<sup>2</sup>,农地、林果地农药及化肥施用量较大<sup>[10]</sup>.

### 1.2 AnnAGNPS 模型在研究地区的应用

AnnAGNPS 模型是 USDA-ARS 与 NRCS 联合开发的参数分布式、基于物理过程、连续模拟、流域尺度的高级流域评价工具,最新版本为 AnnAGNPS4.0 (2007),其详细介绍可参考文献[12~14].据田耀武<sup>[10]</sup>和黄志霖<sup>[15]</sup>等有关研究,AnnAGNPS 模型对三峡库区黑沟流域径流量模拟误差在可接受的范围内,模型 Nash-Sutcliffe 预测效率系数、百分误差、决定系数校准期为 0.87、5.0%、0.93,验证期为 0.79、5.3%、0.90;模型对泥沙模拟效果较径流低,校准期内 Nash-Sutcliffe 预测效率系数、百分误差、决定系数为 0.77、-15.1%、0.63,验证期为 0.69、-13.5%、0.66<sup>[15]</sup>;模型对径流、泥沙、总氮总磷的模拟均存在一定的不确定性,但模拟误差呈现一定的变化趋势,有关研究表明 AnnAGNPS 模型在黑沟流域模拟输出精度达到研究要求,可以在本流域及三峡库区相似流域条件下推广使用<sup>[16]</sup>.

### 1.3 化肥施用水平、耕作方式和年降雨模式

基于流域现有的化肥使用量和化肥用量实践经

验,与当地农民、农业专家、政府农林部门沟通,并根据有关文献研究成果<sup>[1]</sup>,设计花生(*Archis hypogaea*)、玉米(*Zea mays*)、绿豆(*Phaseolus aureus*)、高粱(*Sorghum bicolor*)、大豆(*Glycine max*)、红薯(*Ipomoea babatas*)和茶树(*Melaleuca alternifolia*)现有用量(FL1)、70%现有施肥量(FL2)、推荐用量(FL3)、70%推荐用量(FL4)、30%推荐用量(FL5)等5种施肥水平(表1).耕作方式上选择传统耕作方式(CT)和切合当地实际较为推广使用的免中耕(NT)、等高种植(CS)、留茬覆盖(RC)等4种耕作方式,其农耕要求及技术特点见有关文献<sup>[1,17,18]</sup>.根据秭归县气象部门多年气象资料,设定干旱年(降雨量 750 mm,相当于平水年之一半)、平水年(降雨量 1 400 mm,长年平均降雨量)、丰水年(降雨量 2 850 mm,相当于平水年之 2 倍)3种年降雨模式.

表 1 黑沟流域作物种类及氮磷肥施用水平设计/kg·hm<sup>-2</sup>

Table 1 Crops, nitrogen and phosphorus application rates for Heigou Watershed/kg·hm<sup>-2</sup>

作物	现有	70% 现	推荐	70% 推	30% 推
	用量 FL1	用量 FL2	用量 FL3	荐用量 FL4	荐用量 FL5
花生	190:130	150:90	105:63	75:45	45:27
玉米	220:120	180:90	130:65	90:45	45:27
绿豆	150:95	120:75	90:42	60:36	30:18
高粱	230:150	180:120	135:90	90:60	45:30
大豆	150:95	120:75	90:55	60:38	30:19
红薯	280:240	230:180	172:135	115:90	56:45
茶树	300:130	240:100	180:70	120:50	60:25

### 1.4 AnnAGNPS 数据库建构及模型和气候文件的产生

流域模型数据库主要包括数字高程模型(DEM)、土壤属性、土地利用和流域管理等. DEM 采用国家测绘部门 5.0 m 等高距 1:10 000 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矢量化等高线,利用 ArcView GIS 3.2 双线性内插重采样<sup>[15]</sup>方法生成 5.0 m 水平格网尺度 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 DEM 提取地面坡度的中误差.

矢量化土壤、土地利用资料数据,形成 soils. shp 和 fields. shp 输入文件;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来确定,以上流域管理资料由模

型编辑模块 InpEdit 输入. 基于选择的 4 种耕作方式, 5 种化肥施用水平产生 20 个 AnnAGNPS. inp 模型文件.

UNIX 操作系统下启动 GEM 模块生成天气文件 Dayclim. inp. 使用模型 GEM 模块模拟产生干旱年、平水年、丰水年等 3 个 Dayclim. inp 气候文件. 对产生的降雨量气候文件与实地监测降雨资料对比, 使之符合当地 3 类年份降雨特性.

### 1.5 非点源污染物的输出

启动集成界面 AGNPS/ArvView Interface, 输入 20 个流域管理的模型文件 AnnAGNPS. inp (4 种耕作方式, 5 种化肥施用水平) 和 3 个气候文件 Dayclim. inp (干旱年、平水年和丰水年), 利用模型污染负荷模块模拟 60 类流域管理组合条件下径流、泥沙、总氮和总磷输出量.

## 2 结果与分析

### 2.1 化肥施用水平对非点源污染输出的影响

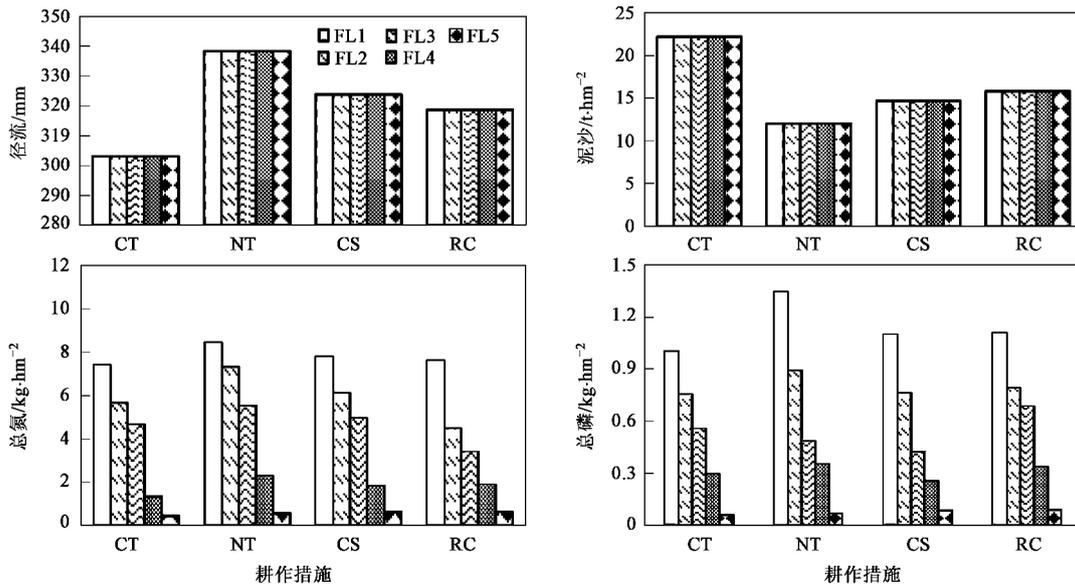


图 1 平水年不同化肥施用水平对污染物输出的影响

Fig. 1 Effect of fertilizer treatment on NSP export in rainfall-normal year

### 2.2 耕作措施对非点源污染物输出的影响

图 1 还表明在 4 类耕作方式下流域径流、泥沙、总氮和总磷发生的变化. 在 FL1 化肥施用水平下, 实施 NT、CS、RC 等保护性耕作方式后, 泥沙流失量减少到 CT 的 54.2%、66.1% 和 71.2%, 但径流量分别增加了 1.12、1.07 和 1.05 倍, 总氮流失量增加了 1.14、1.05 和 1.04 倍, 总磷流失量增加了 1.34、1.10 和 1.11 倍. 说明 NT、CS、RC 等保护性耕

图 1 所示为平水年 FL1 ~ FL5 类化肥施用水平对径流、泥沙、总氮、总磷输出的影响. 化肥施用水平对径流和泥沙输出量没有影响, 但对总氮和总磷输出影响差异极为显著, 此结论与 Pandey 等<sup>[1]</sup> 研究相同. 在 CT 耕作方式和 FL1 水平下, 模型模拟氮磷输出量分别为 7.4 kg/hm<sup>2</sup> 和 1.0 kg/hm<sup>2</sup>, 模拟结果与国家林业局三峡库区秭归生态定位站平水年现场监测资料相符合. 与 FL1 相比, 流域实施 FL2 ~ FL5 水平后, 总氮输出量分别下降了 77.2%、63.5%、18.1%、0.60%, 总 P 输出分别下降了 76.2%、56.5%、30.1%、0.68%. 氮磷输出量随着化肥施用量的降低而迅速降低, FL5 氮磷输出量极小, 完全达到国家有关流域水质要求, 但 FL5 导致农作物产量显著降低, 农业效益下降. FL3 水平时, 总氮、总磷输出量均下降了 40% 左右, 农作物产量(品质)没有明显下降. 所以在不降低农业产量和保证农业可持续生产的基础上, 推荐 FL3 作为流域施肥量.

作方式仅能降低泥沙的流失, 相反却增加了径流和养分输出量, 这个结果与 Pandey<sup>[1]</sup>、McDowell<sup>[19]</sup>、Alberts<sup>[20]</sup> 和 Tripathi<sup>[21]</sup> 等研究结论相一致.

### 2.3 非点源污染输出的年动态变化

在 3 种年降雨量模式下, 流域 4 类耕作方式 (FL1 水平) 之径流、泥沙、总氮和总磷的输出均发生了变化(图 2). 与干旱年相比, CT 使流域平水年之径流、泥沙、总氮、总磷输出量增加了 1.69、1.85、

1.19 和 1.42 倍,丰水年增加了 2.87、6.10、1.17 和 2.57 倍;NT 使平水年径流、泥沙、总氮、总磷输出增加了 1.66、1.54、1.20 和 1.22 倍,丰水年增加了 2.83、5.08、1.07 和 2.02 倍;CS 使平水年径流、泥沙、总氮、总磷输出增加了 1.52、1.74、1.03 和 1.42 倍,丰水年增加了 2.52、5.76、1.01 和 2.85 倍;RC 使平水年径流、泥沙、总氮、总磷输出增加了 1.43、1.66、1.06 和 2.22 倍,丰水年增加了 2.79、5.50、1.09 和 3.63 倍.很明显,年降雨量的增加导

致泥沙输出剧增,而对径流影响次之,总磷再次,对总氮输出影响最小.可能原因为流域中氮素流失一般以溶解态输出,与径流量有较强的相关关系;磷的流失以溶解态和颗粒态两部分形态输出,与径流和泥沙输出均相关联.在氮磷施用量一定的情况下,氮的输出几乎不随降雨量的增加而增加,磷的输出量随降雨量的增加而增加,但达到一定输出量时,磷输出增量迅速降低,这与定位站对养分实地观测结果一致.

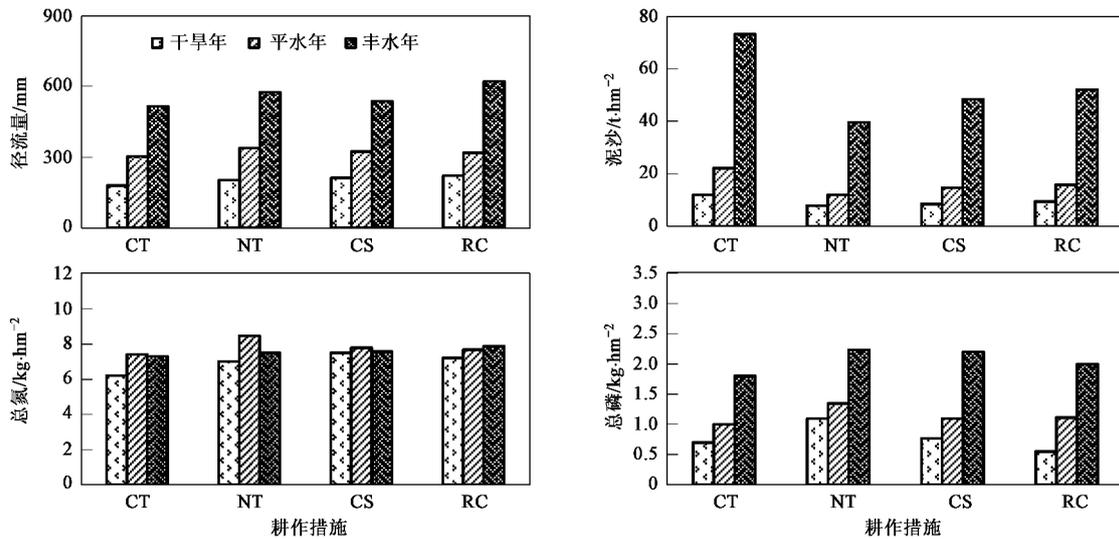


图 2 非点源污染输出年动态变化

Fig. 2 Dynamic change of NSP exports in three different years

从削减非点源污染的目地上看,适宜流域管理方式的目标是在不降低作物产量与收益的基础上,最大限度地减少泥沙、养分及其他元素的流失.本研究和相关研究表明,保护性耕作措施、保护性工程措施和我国推广的退耕还林措施等均可削减非点源污染的输出,但保护性工程措施和退耕还林均要占用农地面积,降低农业效益,而保护性耕作方式不额外占用农地,如果再结合合理地降低化肥施用量,就可以达到既降低泥沙又降低养分输出的目的<sup>[1,4,7,10,18]</sup>.就削减非点源污染的可行性和有效性而言,FL3 可削减 40% 的养分输出,NT 削减 45% 泥沙输出,FL3 + NT 的耕作管理模式为三峡库区流域降低非点源污染输出最为经济有效的方式之一.所以流域管理首先应从作物调整<sup>[1]</sup>和化肥施用管理入手,推广免耕、留茬耕作和雨季覆盖等易为农民接受的保护性耕作方式,同时充分合理使用国家专项资金,逐步实施坡改梯、植草过滤带等工程措施,达到控制 NSP 污染输出之目的.

### 3 结论

(1) 化肥施用水平对径流和泥沙输出没有影响,但对总氮和总磷输出差异影响极为显著.

(2) 农业保护性耕作方式虽然降低了泥沙输出量,但却增加了氮磷等养分的输出.

(3) 在氮磷施用量一定的情况下,流域尺度泥沙输出量随着降雨量的增加而急剧增加,氮输出几乎不随降雨量的增加而增加,磷输出随降雨量的增加而较缓增加,达到一定量时,增量迅速降低.

(4) FL3 可削减 40% 的养分输出,NT 削减 45% 泥沙输出,就削减非点源污染的可行性和有效性而言,FL3 + NT 的耕作管理模式为三峡库区流域降低非点源污染输出最经济有效的方式之一.

#### 参考文献:

- [1] Pandey V K, Panda S N, Pandey A, *et al.* Evaluation of effective management plan for an agricultural watershed using

- AVSWAT model, remote sensing and GIS [J]. *Environmental Geology*, 2008, **56**(5): 993-1008.
- [ 2 ] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, **18**(8): 801-808.
- [ 3 ] Santhi C, Srinivasan R, Arnold J G, *et al.* A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, **21**(8): 1141-1157.
- [ 4 ] Ouyang W, Hao F H, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution responses simulation for conversion cropland to forest in mountains by SWAT in China [J]. *Environmental Management*, 2008, **41**(1): 79-89.
- [ 5 ] 陈欣,王兆骞,杨武德,等. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响 [J]. *生态学报*, 2000, **20**(3): 374-377.
- [ 6 ] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(2): 326-331.
- [ 7 ] Schmitt T J, Dosskey M G, Hoagland K D. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths and contaminants [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, **28**(9): 1479-1489.
- [ 8 ] Walker J F, Graczyk D J. Preliminary evaluation of effects of BMPs in the Black Earth Creek, Wisconsin, Priority Watershed [J]. *Water Science Technology*, 1993, **28**(4): 539-548.
- [ 9 ] Inamdar S P, Mostaghimi S, McClellan P W, *et al.* BMP impacts on sediment and nutrient yields from an agricultural watershed in the coastal plain region [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 2001, **44**(5): 1191-1200.
- [ 10 ] 田耀武,黄志霖,曾立雄,等. 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.
- [ 11 ] 黄志霖,田耀武,肖文发. AGNPS 模型机理与预测偏差影响因素 [J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(10): 1806-1813.
- [ 12 ] Bingner R L, Theurer F D. AnnAGNPS Technical Processes [R]. Documentation Version 2. 2001.
- [ 13 ] Santhia C, Srinivasana R, Arnold J G, *et al.* A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas [J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 2006, **21**(8): 1141-1157.
- [ 14 ] Soil Conservation Service. Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds [M]. USDA, Washington, DC: 1986.
- [ 15 ] 黄志霖,田耀武,曾立雄,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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Tripathi M P, Panda R K, Raghuvanshi N S. Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(3): 809-826.
- [ 18 ] Mostaghimi S, Park S W, Cooke R A, *et al.* Assessment of management alternatives on a small agricultural watershed [J]. *Water Research*, 1997, **31**(8): 1867-1878.
- [ 19 ] McDowell L L, McGregor K C. Plant nutrient losses in runoff from conservation tillage on corn [J]. *Soil & Tillage Research*, 1984, **4**(1): 79-91.
- [ 20 ] Alberts E E, Spomer R G. Dissolved nitrogen and phosphorus in runoff from watersheds in conservation and conventional tillage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1985, **40**(1): 153-157.
- [ 21 ] Tripathi M P. Hydrological modeling of effective management of a small watershed [D]. Agricultural and Food Engineering Department, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India. 1999