

DOI: 10.5846/stxb201303070366

魏冲, 宋轩, 陈杰. SWAT 模型对景观格局变化的敏感性分析——以丹江口库区老灌河流域为例. 生态学报 2014, 34(2): 517-525.

Wei C, Song X, Chen J. Sensitivity analysis of swat model on changes of landscape pattern: a case study from Lao Guanhe Watershed in Danjiangkou Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(2): 517-525.

# SWAT 模型对景观格局变化的敏感性分析

## ——以丹江口库区老灌河流域为例

魏 冲<sup>1,2</sup> 宋 轩<sup>1,2</sup> 陈 杰<sup>1,2,\*</sup>

(1. 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学自然资源与生态环境研究所, 郑州 450001)

**摘要:** 景观的空间配置与类型组成能够对流域的产流、产沙及非点源污染产生影响。在以往 SWAT 模型研究中, 往往默认水文模型考虑了该影响。为分析 SWAT 模型对不同景观格局变化的敏感性, 根据老灌河流域 2000 年土地利用在各子流域的组成, 模拟研究区更为破碎、复杂的景观空间配置, 通过设置多套试验参数, 利用 SWAT 模型生成基于不同景观格局的模拟结果。结果表明, SWAT 模型不能反映除坡度和面积变化之外的景观水平下各斑块之间因景观空间格局改变对流域产流、产沙以及非点源污染的影响; 模型通过其他参数的调整, 弥补了模型分析数据的不足, 使实测数据与模型部分结果高度吻合。这表明, 一个能够反映流域部分水文特征的 SWAT 模型, 未必是对研究区真实情形的模拟, 而是各个参数间平衡的结果。因此, 在利用 SWAT 模型分析模拟景观变化时, 不应默认模型能够模拟景观空间格局改变对流域水文过程的影响, 同时研究者可以通过划分坡度带, 提高模型对不同坡度土地利用的敏感性。

**关键词:** SWAT 模型; 非点源污染; 景观格局; 土地利用; 敏感性分析

## Sensitivity analysis of swat model on changes of landscape pattern: a case study from Lao Guanhe Watershed in Danjiangkou Reservoir Area

WEI Chong<sup>1,2</sup>, SONG Xuan<sup>1,2</sup>, CHEN Jie<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

<sup>2</sup> Institute of Natural Resource and Eco-Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** A number of studies have demonstrated effects of the landscape composition and spatial configuration on the runoff, sediment yield and non-point pollution in a watershed. The SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) was widely employed to explore the significance of land management practices on water, sediment, and agricultural chemical yields, which subdivides a watershed into sub-basins connected by a stream network and contain many Hydrologic Response Units (HRUs) characterized by unique combinations of land cover, soil and slope attributes. In a variety of the previous studies, the interaction between hydrographic features and landscape characteristics was taken for granted in the SWAT model, and calibrated model was frequently used to predict the eco-hydrological variation induced by possible land use changes without investigating sensitivity of model on changes of landscape pattern, and the results of model would be used to provide scientific foundation for decision-making in land use management. For a better understanding of SWAT model response to different landscape patterns, this study obtained a series of SWAT model outputs in Lao Guanhe watershed which is one of the head source of Danjiangkou Reservoir Area, by setting two land use scenarios with different landscape metrics, which are characterized by landscape composition and configurations, and proposed to quantify landscape pattern.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40971128); 水体污染控制与治理专项课题资助项目(2011ZX07213-001)

**收稿日期:** 2013-03-07; **修订日期:** 2013-10-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jchen@zzu.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

By comparing the results of SWAT model using the real land-use data in 2000 to that using the simulated land use data , which have exactly same mean slope and area of each land use type in each sub-basin as the real land use map. It was found that , the SWAT model could display a substantial correlation between the runoff , sediment yields , non-point source pollutants and with slope and area of land use type , but failed to demonstrate the sensitivity of the results of SWAT model to the difference in landscape metrics. Perhaps because the model calculated each HRU separately , then summarized them for the output of the watershed. That is to say , if the SWAT model was applied to evaluate the effects of planting trees in the riparian strips on water quality of a stream , only the increase of forest land area and the descent of forest land slope would be taken in account. However , the interaction between forest land and other land use types , which might be more significant in eco-hydrological dynamics , could not play a part in water quality evaluation by using SWAT model. With further analysis , it is found that the runoff outputs of SWAT model , by using land-use data with different landscape characteristics , could not only match the measured data , but perfectly match each other , just by adjusting model parameters. Therefore , an outwardly reasonable output of SWAT model could be a perfect simulation of real situations , or come from shrewd calibration of model parameters. As a result , the SWAT model is not the default one to simulate the hydrologic process changed by the change of landscape spatial configuration , the sensitivity of SWAT model on changes of landscape pattern can be enhanced by defining slopes with different gradients.

**Key Words:** SWAT model; non-point source pollution; landscape pattern; land use; sensitivity analysis

土地利用空间格局和类型组成不仅对坡面水文过程具有直接的控制作用<sup>[1]</sup> , 而且也是影响流域内水分循环和水质的重要因素<sup>[2]</sup>。因此水土流失与非点源污染负荷不仅与流域土地面积结构有关 , 同时与土地利用格局密切相关<sup>[3]</sup>。土地利用中植被空间分布格局能够改变径流和泥沙运移路径的连通性 , 在流域的不同坡度设立植被条带 , 控制水土流失的效率有所不同<sup>[4]</sup>。如林地、耕地等自然与半自然斑块破碎度越低、面积比越大 , 对流域内非点源污染的缓冲与抑制作用越强<sup>[5-6]</sup>。

水文模型模拟是研究水土流失和非点源污染的重要手段 , SWAT 模型是美国农业部 ( United States Department of Agriculture , USDA ) 农业研究署 ( Agricultural Research Service , ARS ) 开发的基于 GIS 平台的流域分布式水文模型 , 能够模拟较长时段内复杂大面积流域的水文过程 , 广泛应用于分析和预测因土地利用变化等引起的径流、泥沙及非点源污染的变化。Mahesh Sahu 等通过对 Walnut Creek 流域设置情景模拟 , 假设研究区某坡度带土地利用类型发生改变 , 利用 SWAT 模型分析和预测景观格局变化下的水文变化过程<sup>[7]</sup>。在国内外相关研究中 , 往往默认 SWAT 模型能够模拟不同土地利用空间分布变化对水文过程的影响<sup>[8-12]</sup> , 在此基础上分析不同坡度种植植被条带对水土流失和非点源污染的控

制效率 , 从而为流域土地利用管理决策提供重要支持。但是 , 由于 SWAT 模型在一定空间尺度上概化了土地利用空间差异<sup>[13]</sup> , 因此有必要了解模型对土地利用景观格局变化的敏感性 , 从而判断模型模拟各种情景假设的精度。

本文以丹江口库区的老灌河流域为例 , 模拟两幅土地利用图 , 利用 Fragstats 3.3 计算和分析两者在景观格局指数方面的差异 ; 并分别将其代入 SWAT 模型 , 通过对比结果和相关关系分析模型对不同景观空间配置的敏感性 ; 对比基于真实与模拟土地利用图的 SWAT 模型校准过程与参数变化 , 分析模型精度 , 针对模拟土地利用情景假设提出建议 , 增加模型对不同坡度土地利用景观空间变化的敏感性 , 从而提高模型精度。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 研究区概况

老灌河流域位于东经 110°49′ — 111°50′ , 北纬 33°18′ — 33°59′ 之间 , 总面积 2612 km<sup>2</sup> ( 图 1 ) , 是河南境内一支重要的丹江口水库源头 ; 河流落差大 , 水力资源丰富。年平均气温 12.1 ℃ , 年日照 2103 h , 年均降水量 862.8 mm , 无霜期 198 d。该区地形复杂 , 北部是海拔高、坡度大的中低山地 , 南部是灌河谷地 , 两侧为低山丘陵区。

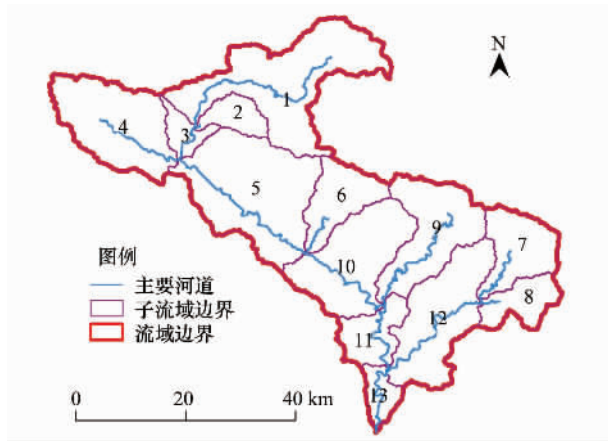


图1 老灌河流域示意图

Fig.1 Map of Lao Guanhe watershed

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 SWAT 模型产流、产沙原理

SWAT 作为分布式模型,通过设定阈值将研究区划分为多个具有一定拓扑关系的子流域,每个子流域包含至少一个以上的水文响应单元(HRU)<sup>[14]</sup>,每个水文响应单元包含唯一的土地利用类型、土壤类型和坡度等级且假定有统一的水文过程<sup>[15]</sup>。因此,景观格局变化在 SWAT 模型中主要表现为 HRU 在形状、面积、分布等方面的变化;通过对每个 HRU 的负荷进行计算,汇总在一起确定子流域的负荷。

SWAT 模型中主要包含有水文过程子模型和土壤侵蚀子模型。其中对于水文循环的陆地阶段,模型中采用水量平衡表达式进行模拟<sup>[14]</sup>:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} + Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中  $SW_t$  为土壤最终含水量(mm);  $SW_0$  为土壤初期含水量(mm);  $t$  为时间步长(d);  $R_{day}$  为第  $i$  天的降水量(mm);  $Q_{surf}$  为第  $i$  天地表径流量(mm),与流域各土地利用类型面积和平均坡度直接相关;  $E_a$  为第  $i$  天蒸散发量(mm);  $W_{seep}$  为第  $i$  天透过土壤层的渗透量和侧流量(mm);  $Q_{gw}$  为第  $i$  天的地下水含量,mm。

SWAT 模型采用修正的通用土壤流失方程来分别计算每个 HRU 的土壤侵蚀量<sup>[14]</sup>,公式如下:

$$m_{sed} = 11.8 \times (Q \times q_{feng} \times A_{HRU})^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times CFRG \quad (2)$$

式中  $m_{sed}$  为单个 HRU 的总土壤侵蚀量(t);  $Q$  为地表径流(mm/h);  $q_{feng}$  为洪峰径流( $m^3/s$ );  $A_{HRU}$  为 HRU 面

积( $hm^2$ );  $K$  为土壤可蚀性因子;  $C$  为植被覆盖与管理因子;  $P$  为水土保持措施因子;  $LS$  为地形因子,与 HRU 平均坡度直接相关;  $CFRG$  为粗糙度因子。

### 1.2.2 景观格局指数

景观格局指数是度量景观格局的指标,是对景观格局信息的高度浓缩,主要包括类型组成和空间配置两个方面。景观类型组成不涉及空间因素,主要包括土地利用类型的面积与比例;景观的空间配置则主要对土地利用类型的分布情况、空间排列以及各斑块的形状和相对位置等进行刻画。本文选取土地利用类型组成指数包括流域面积(TA)和最大斑块面积(LP),空间配置指数包括斑块密度(PD)、景观丰度(PR)、边缘密度(ED)、总边缘长度(TE)和最大形状指数(LSI)<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2.3 SWAT 模型输入数据

SWAT 模型的输入数据包括数字高程图(DEM)、土壤数据、土地利用数据和气象数据。

DEM 是对地形地貌的一种离散的数学表达,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台,精度为 30 m(图 2)。

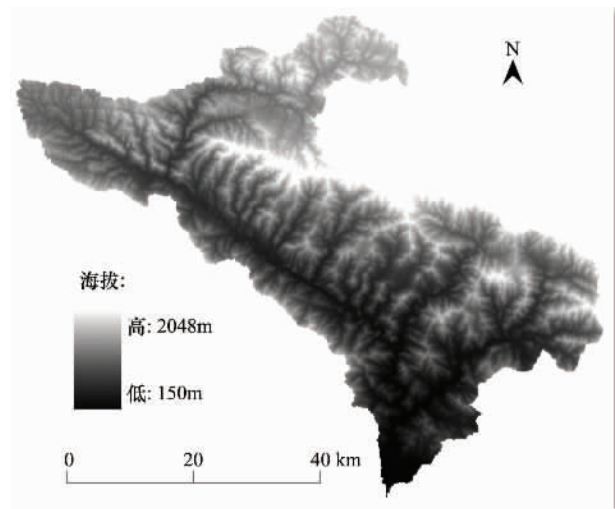


图2 研究区 DEM

Fig.2 DEM of study area

土壤数据是生成水文响应单元 HRU 的重要基础,通过栾川、西峡、卢氏 3 县的 1:5 万土壤图的数字化得到 78 种土壤类型,最后根据河南省土壤分类标准合并生成 65 种土壤类型(图 3),其中编号 42 的中砾质薄层淡岩黄砂土面积占流域 23.56%,为研究区主导土壤类型。各类土壤的物理属性数据通过查阅上述 3 县的土壤普查报告得到。

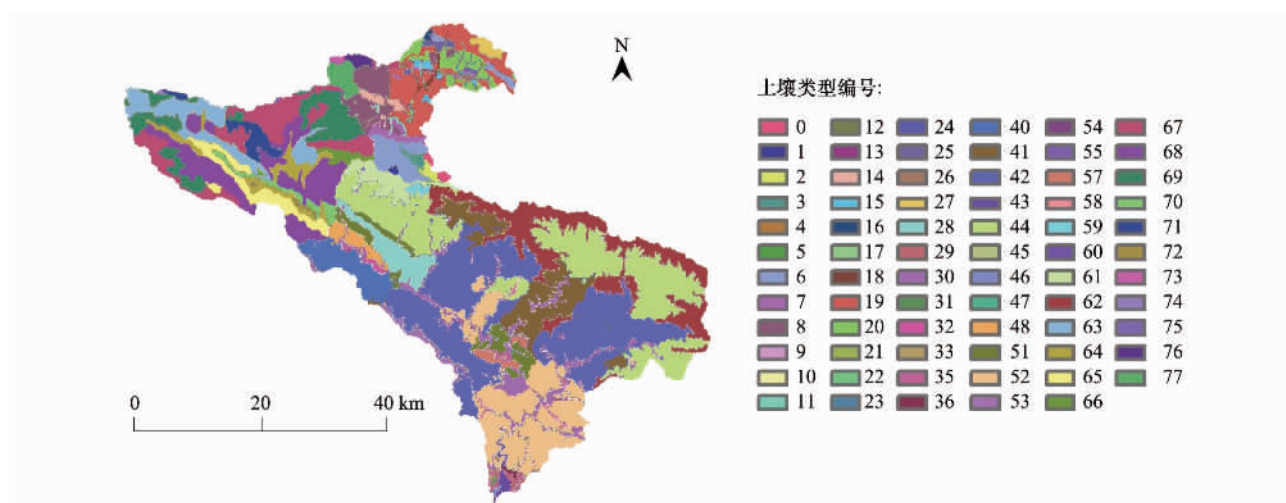


图3 土壤分布图

Fig.3 The distribution of soil map

实际土地利用数据(Land Use/ Land Cover data, LUC)通过对2000年Landsat-TM影像监督分类(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台,精度30 m,日期:2000年4月12日,条带号:125,行编号:37)并结合国土资源部门土地利用现状图生成,得到10种土地利用类型(图4)。

土地利用类型面积和平均坡度直接影响模型各子流域的产流、产沙结果,因此分析SWAT模型对不同景观空间配置的敏感性应首先排除上述因素对模型结果的影响。研究利用ArcGIS 9.3的Create

Random Raster(整型随机分布)功能随机生成两幅土地利用图LUC-A和LUC-B,设置LUC-A和LUC-B各子流域各土地利用类型面积与2000年实际土地利用一致,并保持两幅模拟图之间各子流域中每种土地利用类型的平均坡度对应相同。LUC-A和LUC-B最小象元分别为90 m和30 m,保证两幅模拟图在景观空间配置上存在较大差别。LUC-A和LUC-B在研究区相同区域的局部放大图如图4所示,分辨率均为30 m,可以直观清晰地看出二者在景观格局上存在较大差别。

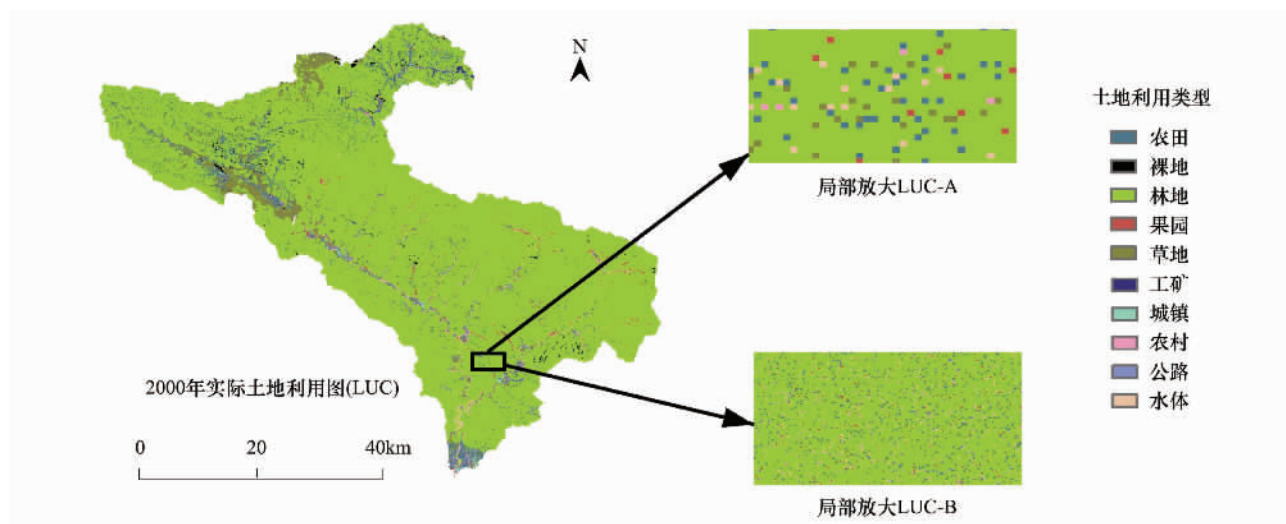


图4 实际土地利用图和模拟土地利用局部放大图

Fig.4 Land use map and locally enlarged simulated land use map

LUC: Land Use/ Land Cover data

气象数据来自栾川、西峡、卢氏三县气象站,时段为1971年—2000年,主要包括:逐日降雨量、最高

气温、最低气温、太阳辐射强度、相对湿度和风速数据,逐日太阳辐射强度通过日照时间计算<sup>[18]</sup>得到。

水文数据来自河南省西峡站 1993—2000 年逐日观测数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟土地利用图景观格局指数对比与分析

表 1 为 LUC-A 和 LUC-B 各子流域景观格局指数。从表中看出,在两幅模拟生成的土地利用图中,景观类型组成指数的流域面积(TA)和最大斑块面积(LP)在各子流域中都是相同的;空间配置指数的斑块密度(PD),景观丰度(PR),边缘密度(ED),总边缘长度(TE)和最大形状指数(LSI)在各子流域中差别明显,符合研究对两幅模拟土地利用图的要求。其中,在相同子流域中,LUC-B 的 PR 值与 PD 值更

大,反映出模拟的土地利用破碎度更高,说明在该模拟图中各土地利用类型分布更加破碎;LUC-B 的 ED 值较 LUC-A 更大,表明异质景观斑块之间单位面积的边缘长度更长;由于除 13 号子流域,各子流域占主导地位的景观类型均为林地,更容易截留泥沙与氮磷,从而降低污染物汇入河道的风险。LUC-B 中较大的景观类型指数 LSI 值不仅表明景观的斑块分布更加破碎,同时景观的类型分布也较为破碎。由于在景观设计中剔除了坡度影响,根据以往研究<sup>[1-6,19]</sup>,在其他因素相同的情况下,基于不同的土地利用景观类型,流域产流、产沙和非点源污染的结果应该有所差别。

表 1 LUC-A 和 LUC-B 各子流域景观格局指数

Table 1 The landscape metrics of LUC-A and LUC-B in each sub-basin

子流域 Sub-basin	相同指数 Same value of landscape metrics		土地利用模拟图-A LUC-A					土地利用模拟图-B LUC-B				
	流域面积 TA	最大斑块面积 LP	景观丰度 PR	斑块密度 PD	边缘长度 TE	边缘密度 ED	最大形状指数 LSI	景观丰度 PR	斑块密度 PD	边缘长度 TE	边缘密度 ED	最大形状指数 LSI
1	41882	32688	8073	19	3462938	83	43	72655	173	10388813	248	129
2	6375	5733	661	10	263043	41	9	5945	93	789128	124	27
3	4978	3209	1119	22	585208	117	21	10074	202	1755625	352	64
4	28557	22549	5029	18	2264950	79	34	45259	159	6794850	238	102
5	41369	34799	6547	16	2605545	63	33	58919	143	7816634	189	98
6	13754	13249	604	4	218288	16	5	5435	40	654864	48	15
7	15257	14508	890	6	321705	21	7	8012	52	965115	64	21
8	9492	9043	536	6	193388	20	5	4820	51	580163	61	16
9	24243	22978	1488	6	541789	22	9	13393	55	1625366	67	28
10	28272	25643	2950	10	1097169	39	17	26549	94	3291508	117	50
11	10514	9365	1266	12	472450	45	12	11392	108	1417350	135	36
12	28581	25907	3009	11	1116230	39	17	27082	95	3348690	117	51
13	7914	5293	1995	25	899892	114	26	17959	227	2699676	341	78

LUC: Land Use/ Land Cover data; TA: Total Area; LP: Largest Patch; PR: Patch Richness; PD: Patch Density; TE: Total Edge; ED: Edge Density; LSI: Landscape Shape Index

由于真实的土地利用图与模拟图相比,各景观类型的平均坡度不同,SWAT 模型结果受其他参数影响较大,不能直接对比,因此首先对比模型未校准前模拟土地利用图的结果。

### 2.2 模型的设置与运行

利用土地利用模拟图 LUC-A 和 LUC-B 分别建立 SWAT 模型。根据数字高程模型,研究区被划分为 13 个子流域(图 1)。然后通过在各子流域内部分别叠加模拟土地利用图(LUC-A、LUC-B)和土壤

类型图生成 HRU,最后输入气象数据对每个 HRU 分别模拟,经河网汇集得到整个流域 2000 年的产流、产沙和非点源污染(有机氮)结果。为保证模拟土地利用图的每个斑块都参与运算,设置该阈值为 0%,同时选择主导土壤类型代表整个流域,以排除土壤因子对 HRU 划分的影响。采用平均精度和 Nash-Stucliffe( $E_{ms}$ )确定性系数对两个模型模拟结果的吻合度进行评价,平均精度和  $E_{ms}$  越接近 1,两个模型模拟结果越接近,当  $E_{ms} > 0.75$ ,可以认为模型模拟效果

好。模型运行结果分别如下(表 2)。

表 2 基于 LUC-A 和 LUC-B 的各子流域 SWAT 模型结果  
Table 2 Results of SWAT model based on LUC-A and LUC-B in each sub-basin

子流域 Sub-basin	土地利用模拟图-A LUC-A					土地利用模拟图-B LUC-B					相对误差 Relative error			
	HRU 划分 个数 HRU	林地平 均坡度 Slp/(°)	产出径流 Flow /(m <sup>3</sup> /s)	泥沙 SED /kg	有机氮 产量值 ORGN /kg	HRU 划分 个数 HRU	林地平 均坡度 Slp/(°)	产出 径流 Flow /(m <sup>3</sup> /s)	泥沙 SED /kg	有机氮 产量值 ORGN /kg	林地平 均坡度 Slp/%	产出 径流 Flow/%	泥沙 SED /%	有机氮 产量值 ORGN/%
1	9	37.6	7.9	60.6	31.6	9	37.8	7.9	61.4	31.7	0.53	0.00	1.30	0.32
2	6	43.4	0.7	0.9	0.8	6	43.3	0.7	0.9	0.8	-0.23	0.00	0.00	0.00
3	7	46.2	0.5	1	1.4	7	46	0.5	1	1.4	-0.43	0.00	0.00	0.00
4	10	37.6	3	7.7	5.1	10	37.7	3	7.7	5.1	0.27	0.00	0.00	0.00
5	9	41.1	7.8	39	19.7	9	41.2	7.8	39.3	19.7	0.24	0.00	0.76	0.00
6	9	39.5	2.6	5.1	3.4	9	38.6	2.6	4.9	3.3	-2.33	0.00	-4.08	-3.03
7	9	42.6	2.9	9.4	4.2	9	42.8	2.9	9.5	4.3	0.47	0.00	1.05	2.33
8	9	40.5	2.1	11.2	6.9	9	40.5	2.1	11.3	7	0.00	0.00	0.88	1.43
9	8	41.5	4.6	12.3	6.6	8	41	4.6	12	6.5	-1.22	0.00	-2.50	-1.54
10	9	39.7	5.3	27.6	13.8	9	39.7	5.3	27.6	13.8	0.00	0.00	0.00	0.00
11	7	40.3	2.3	11.2	11.2	7	41.7	2.3	12	11.8	3.36	0.00	6.67	5.08
12	10	36.8	6.4	31.2	33.3	10	35.7	6.4	29.4	32.9	-3.08	0.00	-6.12	-1.22
13	10	24.6	1.7	5.3	21.8	10	25.1	1.7	5.6	22.3	1.99	0.00	5.36	2.24
平均精度 Average precision												1	0.97	0.98
效率系数 E <sub>ns</sub>												1	0.99	0.99

HRU: Hydrologic Response Unit; Slp: Average slope of forest; Flow: Stream flow; SED: Sediment; ORGN: Organic nitrogen

从表 2 发现,未校准前,基于两幅模拟土地利用方式的 SWAT 模型模拟结果差别很小,对各子流域径流、泥沙及非点源污染的平均精度分别为 1、0.97 和 0.98, E<sub>ns</sub> 均为 1。两个模型模拟的结果几乎是相同的。两个模型各子流域间产沙、有机氮的微小相对误差与研究区主要土地利用类型林地的平均坡度差别呈现显著的正相关性。因此可以发现,当输入

的土地利用方式只有景观空间配置差异时, SWAT 模型模拟结果几乎不发生改变。

2.3 景观格局指数与模型模拟结果的相关性分析

分别将两个模型各子流域模拟结果与对应的子流域景观格局指数进行 spearman 相关性分析,结果如表 3。

表 3 SWAT 模型主要结果与景观格局指数相关性分析

Table 3 Results of correlation analysis on landscape metrics and main results of SWAT model

	土地利用模拟图-A LUC-A						土地利用模拟图-B LUC-B					
	流域 面积 TA	景观 丰度 PR	斑块 密度 PD	最大斑 块面积 LP	边缘 密度 ED	最大形 状指数 LSI	流域 面积 TA	景观 丰度 PR	斑块 密度 PD	最大斑 块面积 LP	边缘 密度 ED	最大形 状指数 LSI
径流 FLOW	0.981**	0.375	0.009	0.898**	-0.081	0.283	0.982**	0.373	0.01	0.896**	-0.082	0.287
泥沙 SED	0.848**	0.293	-0.013	0.882**	-0.093	0.211	0.848**	0.29	-0.016	0.87**	-0.096	0.216
总氮 N	0.61**	0.335	0.177	0.53**	0.127	0.337	0.611**	0.337	0.181	0.537**	0.126	0.337
总磷 P	0.644**	0.346	0.174	0.616**	0.116	0.339	0.646**	0.348	0.177	0.614**	0.114	0.336
硝酸盐 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.892**	0.379	0.11	0.817**	0.075	0.326	0.89**	0.381	0.119	0.819**	0.078	0.326

\*\* 在 0.01 水平上显著相关

可以看出,同一景观格局指数与基于不同土地利用模拟图的 SWAT 模拟结果间的关系值几乎是相

同的。景观类型组成的子流域面积 TA 和子流域最主要景观所占面积 LP 与 SWAT 模拟结果之间有着



较为显著的相关性,但在景观水平下,景观空间配置的主要参数与 SWAT 模拟结果之间没有显著的相关关系。SWAT 模型不能很好地反映景观空间变化对产流、产沙和非点源污染的影响。

进一步对比 LUC-A、LUC-B 模型 HRU 划分可以看出,各子流域基于不同景观格局类型生成的 HRU 个数都是相等的(表 2)。虽然土地利用类型都是由一个或多个空间上不连续的斑块组成,但每个斑块在 SWAT 模型中并没有形成独立的 HRU,模型通过聚集相同的土地利用类型和土壤类型构成唯一的水文响应单元,从而模糊了土地利用类型下各斑块的形状、地理位置等空间配置。以利用 SWAT 模型模拟土地利用情景模拟为例,当增加某坡度带如河流岸边带林地面积时,HRU 数量不会改变,模型更多是反映代表林地的 HRU 因面积增加,平均坡度降低而减少非点源污染的结果,忽视了林地不同的景观空间位置对非点源污染的调节作用,从而使模拟的结果很难真实反映不同坡度带林地的实际作用。

因此,当研究者基于不同坡度假设土地利用情景模拟时,应利用 SWAT 模型 HRU 划分中 Multiple Slope 选项,将流域划分为多个坡度类,从而增加子流域 HRU 的数量,缩小每个土地利用类型斑块的坡度与所属坡度带平均坡度差值,当增大或减小不同

坡度的土地利用面积,能够显著地修改 HRU 平均坡度,增加了模型对不同坡度土地利用的敏感性,从而有利于对岸边带等特殊坡度的模拟。

#### 2.4 SWAT 模型径流模拟与校准对比

利用 SWAT 模型,分别对 LUC 和 LUC-A 进行模拟,在生成 HRU 时,定义所有阈值为 0,保证所有的土地利用类型和土壤类型参与运算。经模型敏感性分析,SWAT 校准需要调整 6 个与径流模拟有关的参数,分别为  $CN_2$ (径流曲线数), $SOL\_AWC$ (土壤有效水容量), $ESCO$ (土壤蒸发补偿系数), $GW\_REVAP$ (地下水 revap 系数), $REVAPMN$ (发生 revap 的浅层含水层水位阈值)和  $GWQMN$ (发生回归流所需的浅层含水层水位阈值)。利用西峡水文站 1993—1996 年实测径流数据校准两个 SWAT 模型,1997—2000 年实测径流数据用于模型验证。结果表明,当两个模型的 6 个校准参数都相等时,基于 LUC 和 LUC-A 的 SWAT 模型径流模拟在校准期分别为 0.88 和 0.86,验证期分别为 0.90 和 0.87,2 个模型模拟的径流结果与观测值的拟合度都很高(图 5)。即便是不符合真实流域景观特征的 LUC-A,SWAT 模型也能够验证期内较为准确地模拟老灌河流域的径流状况。

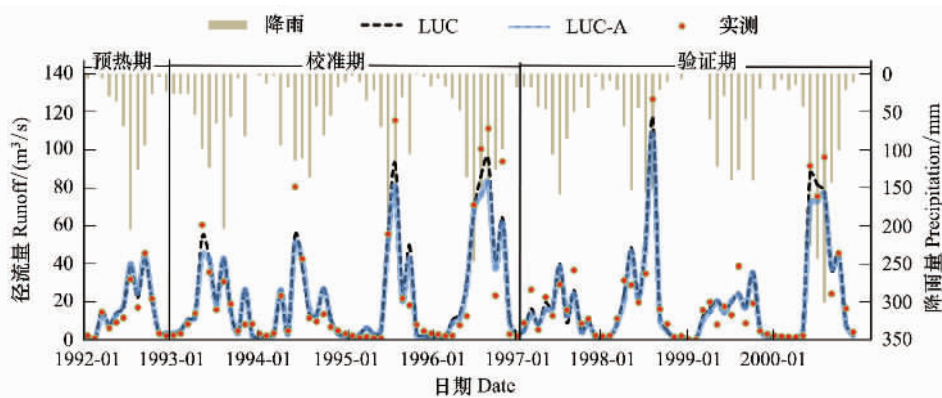


图 5 西峡站点月平均模拟值与实测值的比较(校准期:1993—1996,验证期:1997—2000)

Fig. 5 Simulated and observed runoff on a monthly step at Xixia station (Calibration stage: 1993—1996, validation stage: 1997—2000)

#### 2.5 模型产沙模拟与校准对比

由于缺少实测泥沙数据,研究设置基于实际土地利用(LUC)的 SWAT 模型产沙数据为校准数据,对基于 LUC-A 的 SWAT 模型进行校准,经敏感性分析确认,需要对以下参数进行调整,结果如表 4。

从表 4 可以看出,在基于 LUC-A 的模型中,河道

的单位降雨侵蚀力造成的土壤侵蚀量( $Ch\_erod$ )和河道水流冲蚀之比( $Ch\_cov$ )以及 USLE 方程中的覆盖和管理因子( $USLE\_C$ )和河道挟沙能力计算的待定幂指数相比目标模型都有不同程度的降低。即,模型通过其他方面的弥补来缩小因景观格局指数变化造成的产沙差别,从而造成上述因子可能与实际

的进一步背离。

表 4 基于 LUC 和 LUC-A 的 SWAT 模型参数率定最终值及结果对比

Table 4 Final values of SWAT model parameters based on LUC-A and LUC-B after calibration

参数 Parameters	LUC 最终值 LUC value	LUC-A 最终值 LUC-A value	参数差 D-value	效率系数 $E_{ns}$
土壤侵蚀量 Ch_erod	0.28	0.13	0.15	0.93
河道水流冲蚀比 Ch_cov	0.23	0.11	0.12	
USLE 方程覆盖和管理因子 USLE_C	耕地: 0.21 林地: 0.0015 果园: 0.003	耕地: 0.2 林地: 0.0012 果园: 0.002	0.01 林地: 0.0003 果园: 0.001	
河道挟沙能力待定幂指数 Spexp	1.023	1	0.023	

参数差: 指 SWAT 模型基于 LUC 参数值减去基于 LUC-A 的参数最终值; D-value: Difference value

同时还可以发现, 基于 LUC-A 的模型对 LUC 的产沙结果拟合度很高:  $E_{ns}$  达到 0.93。如果后者能够通过调整泥沙参数反映真实的产沙情况, 那么前者也能够经参数率定使模型反映该流域同时期的产沙状况; 但两个模型在河道挟沙能力和水土保持因子等参数上的差别, 会影响模型对其他指标的计算, 从而产生误差。

### 3 结论

本研究表明, 由于模型采用每个 HRU 负荷单独计算, 汇总确定流域总负荷的方式, 使 SWAT 模型能够反映每种景观类型因平均坡度改变, 引起产流、产沙等指标的变化, 但无法反映除坡度和面积变化外, 各类型斑块之间因景观空间格局改变对流域非点源污染的影响。因此, 在利用 SWAT 模型分析模拟景观变化时, 不应默认模型能够模拟景观空间格局改变对流域水文过程的影响。研究者可以通过划分坡度带, 增加子流域 HRU 的数量, 缩小每个土地利用类型斑块的坡度与所属坡度带平均坡度差值, 提高模型对不同坡度土地利用的敏感性。

通过进一步研究发现, 在保持流域景观类型组成比例不变的情况下, 基于模拟土地利用类型与真实土地利用类型的 SWAT 模型, 经过校准都能够很好地反映该流域的产流情况; 同时, 模型通过对其他参数的修改, 使两个模型的产沙数据也能够高度拟合。但二者在泥沙参数上的差异, 反映出当模型对一种数据的分析存在不足与误差时, 会通过其他参数的调整来达到新的平衡。因此, 一个能够反映当地近年产流产沙数据的 SWAT 模型, 不一定是建立在当地各种真实情况的基础上产生的, 而是各个参

数之间平衡的结果。

### References:

- [1] Gao G Y, Fu B J, Lü Y H, Liu Y, Wang S, Zhou J. The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 12-22.
- [2] Hua G X, Ji W. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(1): 111-119.
- [3] Hao F H, Chen L Q, Liu C M, Dai D. Impact of land use change on Runoff and Sediment yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 5-8.
- [4] Gumiere S J, Le Bissonnais Y, Raclot D, Cheviron B. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: a review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(1): 3-19.
- [5] Lee S W, Hwang S J, Lee S B, Hwang H S, Sung H C. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(2): 80-89.
- [6] Cao X F, Sun J H, Huang Y. The impact of landscape pattern on water quality in Lake Dianchi watershed. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(2): 364-369.
- [7] Sahu M, Gu R R. Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality. *Ecological Engineering*, 2009, 35(8): 1167-1177.
- [8] Wang X, Zhang Z L, Ning J C. Runoff response to land use change in Baimahe basin of China based on SWAT model. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1): 186-194.
- [9] Chen Y, Guo X R, Cheng S Y, Wang Z, Qin C H, Wang H Y. Research on management of non-point source pollution with land use changing in Three Gorges reservoir, Macro-scale watershed based on SWAT. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31



- (4): 798-806.
- [10] Hu Y. SWAT Model-based Non-point Source Pollution Simulation Research in Dongzhen Watershed [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2012.
- [11] Asres M T, Awulachew S B. SWAT based runoff and sediment yield modelling: a case study of the Gumera watershed in the Blue Nile basin. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2010, 10 ( 2/4 ): 191-199.
- [12] Parajuli P B, Mankin K R, Barnes P L. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT. *Agricultural Water Management*, 2008, 95 ( 10 ): 1189-1200.
- [13] Ning J C, Liu G H, Liu Q S, Xie C J. Spatial discretization of hydrological response units and improved SWAT model. *Advances in Water Science*, 2012, 23( 1 ): 14-19.
- [14] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation: Version 2005. Temple: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service( USDA) 2005: 1-476.
- [15] Winchell M, Srinivasan R, Luzio M D, Arnold J. ArcSWAT 2.0 Interface For SWAT 2005 Use's Guide. Temple: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, USDA, 2008: 1-448.
- [16] Wang J P, Yang L, Wei W, Chen L D, Huang Z L. Effects of landscape patterns on soil and water loss in the Hilly Area of Loess Plateau in China: landscape-level and comparison at multiscale. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31( 19 ): 5531-5541.
- [17] Wang Y, Zhang J F, Chen G C, Shan Q H, Li Z B, Xu Y H, Chen Y. Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32( 20 ): 6244-6430.
- [18] Pang J P. Distributed Nonpoint Source Pollution Modelling [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007.
- [19] Qin F C. Forest Pattern on Regulation of Erosion and Sediment Processes of Watershed in Loess Area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- 参考文献:**
- [ 1 ] 高光耀,傅伯杰,吕一河,刘宇,王帅,周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33( 1 ): 12-22.
- [ 3 ] 郝芳华,陈利群,刘昌明,戴东. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析. *水土保持学报*, 2004, 18( 3 ): 5-8.
- [ 6 ] 曹晓峰,孙金华,黄艺. 滇池流域土地利用景观空间格局对水质的影响. *生态环境学报*, 2012, 21( 2 ): 364-369.
- [ 8 ] 王学,张祖陆,宁吉才. 基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应. *生态学杂志*, 2013, 32( 1 ): 186-194.
- [ 9 ] 陈媛,郭秀锐,程水源,王征,秦翠红,王海燕. 基于 SWAT 模型的三峡库区大流域不同土地利用情景对非点源污染的影响研究. *农业环境科学学报*, 2012, 31( 4 ): 798-806.
- [10] 胡媛. 基于 SWAT 模型的东圳库区非点源污染模拟研究 [D]. 福州: 福建师范大学, 2012.
- [13] 宁吉才,刘高焕,刘庆生,谢传节. 水文响应单元空间离散化及 SWAT 模型改进. *水科学进展*, 2012, 23( 1 ): 14-19.
- [16] 王计平,杨磊,卫伟,陈利顶,黄志霖. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响-景观水平与多尺度比较. *生态学报*, 2011, 31( 19 ): 5531-5541.
- [17] 王瑛,张建锋,陈光才,单奇华,李泽波,徐永辉,陈云. 太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响. *生态学报*, 2012, 32( 20 ): 6244-6430.
- [18] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟 [D]. 北京: 北京师范大学, 2007.
- [19] 秦富仓. 黄土地区流域森林植被格局对侵蚀产沙过程的调控研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.