

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 12 期 Vol.32 No.12 2012

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第32卷 第12期 2012年6月 (半月刊)

## 目 次

河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例 .....	孙永光, 赵冬至, 吴 涛, 等 (3645)
鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征 .....	张全军, 于秀波, 钱建鑫, 等 (3656)
青岛市湿地生态网络评价与构建 .....	傅 强, 宋 军, 毛 锋, 等 (3670)
大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子——以太湖为例 .....	叶 春, 李春华, 王秋光, 等 (3681)
绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态 .....	王书敏, 何 强, 张峻华, 等 (3691)
坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响 .....	何先进, 吴鹏飞, 崔丽巍, 等 (3701)
枣园桃蛀果蛾寄生蜂种类及其与寄主的关系 .....	姚艳霞, 赵文霞, 常聚普, 等 (3714)
基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价 .....	邹丽丽, 陈晓翔, 何 莹, 等 (3722)
温度、盐度和 pH 对马氏珠母贝稚贝清滤率的联合效应 .....	朱晓闻, 王 辉, 刘 进, 等 (3729)
鸡桑药共生模式库区土壤养分变化及流失风险 .....	赵丽平, 杨贵明, 赵同科, 等 (3737)
黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系 .....	张俊华, 李国栋, 南忠仁 (3745)
DEM 棚格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响 .....	邱临静, 郑粉莉, Yin Runsheng (3754)
粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响 .....	郭冠华, 陈颖彪, 魏建兵, 等 (3764)
基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例 .....	陈 杰, 梁国付, 丁圣彦 (3773)
城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例 .....	林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 等 (3782)
高寒牧区村域生态足迹——以甘南州合作市为例 .....	王录仓, 高 静 (3795)
太湖湖滨带生态系统健康评价 .....	李春华, 叶 春, 赵晓峰, 等 (3806)
秦岭大熊猫栖息地巴山木竹生物量 .....	党坤良, 陈俊娴, 孙飞翔, 等 (3816)
盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响 .....	尤 佳, 王文瑞, 卢 金, 等 (3825)
海南霸王岭山地原始林与伐后林中木质藤本对支持木的选择 .....	刘晋仙, 陶建平, 何 泽, 等 (3834)
闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应 .....	王振兴, 朱锦懋, 王 健, 等 (3841)
基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究 .....	金则新, 顾婧婧, 李钧敏 (3849)
不同径级油松径向生长对气候的响应 .....	姜庆彪, 赵秀海, 高露双, 等 (3859)
珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布 .....	袁春明, 孟广涛, 方向京, 等 (3866)
巨桉与 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较 .....	胡红玲, 张 健, 万雪琴, 等 (3873)
银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响 .....	黄激激, 胡庭兴, 张念念, 等 (3883)
基于氘示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究 .....	孙守家, 孟 平, 张劲松, 等 (3892)
石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性 .....	张显强, 曾建军, 谌金吾, 等 (3902)
含铜有机肥对土壤酶活性和微生物群落代谢的影响 .....	陈 琳, 谷 洁, 高 华, 等 (3912)
钝叶柃不同性别花的花部形态与传粉特征比较 .....	王 苗, 邓洪平, 丁 博, 等 (3921)
我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性 .....	何奇瑾, 周广胜 (3931)
烯效唑干拌种对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质品质的影响 .....	樊高琼, 杨恩年, 郑 亭, 等 (3940)
<b>专论与综述</b>	
中国产业共生发展模式的国际比较及对策 .....	石 磊, 刘果果, 郭思平 (3950)
<b>研究简报</b>	
吉林省镇赉县近 10 年景观格局变化 .....	张国坤, 卢京花, 宋开山, 等 (3958)
杨树人工林生态系统通量贡献区分析 .....	金 莹, 张志强, 方显瑞, 等 (3966)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 330 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 35 \* 2012-06



封面图说: 鸳鸯——在分类上属雁形目, 鸭科。英文名为 Mandarin Duck(即“中国官鸭”)。鸳指雄鸟, 鸯指雌鸟, 故鸳鸯属合成词。常常栖息于山地河谷、溪流、湖泊、水田等处, 雌雄偶居, 以植物性食物为主, 也食昆虫等小动物。繁殖期 4—9 月间, 雌雄配对后迁至营巢区。巢往往置于树洞中, 用干草和绒羽铺垫, 每窝产卵 7—12 枚。江西省婺源鸳鸯湖是亚洲最大的野生鸳鸯越冬栖息地。鸳鸯是一种美丽的禽鸟, 中国传统文化又赋予它很多美好的寓意, 因此, 在许多文学艺术作品中经常用以表达爱情。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112011841

邱临静, 郑粉莉, Yin Runsheng. DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响. 生态学报, 2012, 32(12): 3754-3763.  
Qiu L J, Zheng F L, Yin R S. Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3754-3763.

## DEM 栅格分辨率和子流域划分对 杏子河流域水文模拟的影响

邱临静<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2,\*</sup>, Yin Runsheng<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

3. Department of Forestry, Michigan State University, East Lansing 48824, USA)

**摘要:**以黄土丘陵沟壑区杏子河流域为研究区,采用数字滤波法分割了杏子河招安水文站 1958—1974 年的基流量,评价了 SWAT 模型在该流域水文模拟的适用性,并分析了 DEM 栅格分辨率和子流域划分对 SWAT 水文模拟的影响。结果表明,SWAT 模型适用于该流域年河川径流、地表径流、基流及产沙量的模拟。当 DEM 栅格分辨率在 20—150 m 之间时,SWAT 能有效地模拟年河川径流、地表径流、基流及产沙量,各水文要素模拟结果的  $R^2$  和 NSE 分别在 0.93 和 0.51 以上,RSR 在 0.43 以下;而当栅格分辨率大于 150 m 时,各水文要素的模拟效果存在差异。子流域划分对流域产流模拟影响较小,而对产沙模拟影响较大。当子流域提取阈值在 12—100 km<sup>2</sup> 之间时,不同的子流域划分对产沙量几乎没有影响,若超出该阈值范围,模型会低估产沙量。因此,可针对不同的水文要素选择合适的 DEM 和子流域提取阈值,以提高模拟精度和运行效率。

**关键词:**杏子河流域; DEM 栅格分辨率; 子流域划分; 水文模拟; SWAT 模型

## Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed

QIU Linjing<sup>1,2</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,2,\*</sup>, YIN Runsheng<sup>3</sup>

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Department of Forestry, Michigan State University, East Lansing 48824, USA

**Abstract:** The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a watershed-based, semi-distributed hydrologic model that has become one of the most powerful tools for simulating hydrological processes at different spatial scales. The SWAT model utilizes geographic information systems and digital elevation model (DEM) to delineate watersheds and extract the stream network. The simulation accuracy depends on how well the model inputs describe the watershed. High resolution DEM generates more accurate topographic estimations, but such information is costly to obtain, especially in the hilly and gully region of China's Loess Plateau. In addition, the size of the extracted subwatersheds strongly depends on the pre-selected threshold value of the watershed subdivision. The size and number of subwatersheds can also affect the watershed modeling process and subsequent results; however, there are no accepted guidelines for selecting the threshold value, making the extraction of subwatersheds a subjective process. Therefore, the objective of this study was to investigate the effect of DEM

基金项目:国家自然科学基金项目(40871137); 农业部“948”项目(2010-S16)

收稿日期:2011-12-01; 修订日期:2012-05-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: flzh@ms. iswc. ac. cn

resolution and watershed subdivision on the simulation of hydrological processes at the outlet of the Xingzihe watershed in the hilly and gully region of the Loess Plateau. In our study, the digital filter method was used to separate base flow from the measured streamflow data at the Zhao'an hydrological station from 1958 to 1974. The applicability of the SWAT model in the Xingzihe watershed was assessed on an annual basis. The impacts of DEM resolution and watershed subdivision on the simulation of annual streamflow, surface runoff, base flow, and sediment yield were evaluated by running the model with ten DEMs (20, 30, 60, 90, 150, 300, 500, 1000, 1500 and 2000 m) and seven threshold values (10, 12, 15, 30, 50, 100 and 200 km<sup>2</sup>) for the watershed subdivision. The results showed that the SWAT model accurately simulated annual streamflow, surface runoff, base flow, and sediment yield in the Xingzihe watershed. DEMs with fine resolution (i.e., 20 to 150 m) were required to simultaneously simulate annual streamflow, surface runoff, base flow and sediment yield with a high degree of accuracy ( $R^2 > 0.93$ , NSE > 0.51, RSR < 0.43). For DEM resolutions greater than 150 m, the accuracy of the simulation varied among the hydrologic elements. The threshold values of the watershed subdivision had little effect on streamflow, surface runoff and base flow. However, the threshold values had a large effect on sediment yield. Watershed subdivision threshold values of 12 to 100 km<sup>2</sup> were required to adequately predict sediment yield. Threshold values less than 12 km<sup>2</sup> or greater than 100 km<sup>2</sup> led to the underestimation of sediment yield. These findings indicated that choices regarding the DEM resolution and threshold value of the watershed subdivision should be based on the hydrological element of interest. The SWAT model was limited in its ability to simultaneously simulate all of the hydrologic elements in the Xingzihe watershed at short time scales (i.e., daily and monthly); therefore, this paper did not discuss the effects of DEM resolution and watershed subdivision threshold values under different time scales. Additional research is needed to ascertain if the results will change when running the model at different time scales.

**Key Words:** The Xingzihe watershed; DEM resolution; watershed subdivision; hydrological simulation; SWAT model

量化水沙变化特征对水资源管理及深入认识流域的水土流失规律具有重要的意义。基于数字高程模型(Digital Elevation Model)的数字流域技术现已成为揭示河流运动变化规律和预测河流特定行为的有力工具<sup>[1]</sup>。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型在水文水资源<sup>[2-3]</sup>及非点源污染<sup>[4-6]</sup>等研究领域得到了广泛的应用,其模拟的精度很大程度上依赖于空间数据对流域特征的描述。尽管高精度的空间数据有利于准确描述流域特征,但这会增加数据收集的难度。为了兼顾准确性和计算效率,很多学者探讨了不同分辨率的DEM<sup>[7]</sup>、土壤数据<sup>[8]</sup>及土地利用数据<sup>[9]</sup>对SWAT水文模拟的影响,但这些研究只是在地形较为单一的流域开展的,未涉及黄土丘陵沟壑区地形复杂、沟谷密集的区域。此外,很多SWAT模型使用者通常采用默认的子流域提取阈值来划分子流域,并没有考虑不同阈值对模拟结果的影响<sup>[10]</sup>。Kim等<sup>[10]</sup>认为,子流域划分对模拟结果的影响大于参数调节对结果的影响,而且在地形复杂、坡度较大的流域,不同子流域数量使模拟精度存在不确定性。由于模拟目标的不同,SWAT模型对初始设置以及输入数据的要求有所不同,如何选择合适的DEM和子流域划分初始值来提高SWAT模型在黄土丘陵沟壑区的应用效果是一个值得探讨的问题。

基流作为水资源的重要组成部分,它不仅在流域产流研究中有重要意义,而且在水资源供给和非点源污染评价中起重要作用<sup>[11]</sup>。但目前应用SWAT模型对基流的研究较少。本研究以黄土丘陵沟壑区杏子河流域为研究区域,运用数字滤波技术估算了基流;在此基础上,评价了SWAT模型在杏子河流域的适用性,并重点分析了不同DEM分辨率和子流域提取阈值对年河川径流、地表径流、基流以及产沙量的影响,以期为SWAT模型在黄土高原水土流失及环境污染评价中的应用提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

杏子河地处黄土高原中部( $108^{\circ}41'—109^{\circ}21'E$ ,  $36^{\circ}46'—37^{\circ}12'N$ ),为延河的一级支流,发源于陕西省白云山的南坡,自西北向东南流经靖边、安塞和志丹三县,全长106 km,流域面积1486 km<sup>2</sup>。流域属暖温带半干

旱气候区,年平均气温8.2℃,多年平均降水量为513 mm,年内降水分配极不均匀,70%以上多集中在6—9月<sup>[12]</sup>。黄绵土占流域面积的77%左右,另有黑垆土、红胶土和淤积土分布。流域属黄土丘陵沟壑区第二副区,沟谷密集,地形起伏较大,水土流失严重,年侵蚀模数高达 $1.52 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ <sup>[12]</sup>。

## 1.2 数据来源及处理

本文所用气象水文数据的观测站分布见图1。数据来源于靖边、志丹和安塞县气象站和《黄河流域水文资料》,包括1958—1974年各气象站的降水、最高温度、最低温度、相对湿度、平均风速逐日数据和招安雨量站降水逐日数据,太阳辐射数据及各观测站点所缺的历史资料由模型内嵌的天气生成器根据月值资料模拟得到;径流泥沙数据来自招安水文站,其控制面积为1275 km<sup>2</sup>,1975年起该站仅观测降水,因此,本研究采用1958—1974年数据序列比较完整的径流和泥沙数据进行模型的率定与验证。建模所需的流域数字化资料均来自中国科学院水利部水土保持研究所,包括空间分辨率为20m×20 m的DEM和土壤数据,以及由1975年MSS遥感影像的解译获得的土地利用数据。根据本文的研究需要,将土地利用类型合并为6种土地利用类型:耕地、林地、草地、水体、建设用地以及未利用地。

基流是干旱或半干旱地区枯水季节河川径流的主要补给源。国际上将河川径流分为地表径流和地下径流(基流),主要通过自动分割法来实现。豆林等<sup>[13]</sup>在黄土区比较了多种分割方法后发现,数字滤波法<sup>[14]</sup>分割的基流与实际基流更为相符。因此,本研究采用该法对招安站的日河川径流量进行分割,将地表径流(高频信号)和基流(低频信号)划分出来。其滤波方程为:

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

式中,  $q_t$  为  $t$  时刻内过滤出的快速响应信号,即地表径流;  $\beta$  为滤波参数,Nathan 和 McMahon<sup>[14]</sup>认为  $\beta$  值为0.925时能得到较好的分割结果;  $Q_t$  为实测河川径流量;  $b_t$  为基流。本文采用 SWAT 模型官方网站推荐使用的数字滤波基流分割程序来分割基流。程序计算时总径流通过3道滤波,分别按式(1)和式(2)反复计算以摈除前一次计算中的失真数据,主要步骤为:滤波1,从起始至末时刻顺序,按式(1)从总径流中过滤出地表径流,再据式(2)从总径流中减去地表径流得到初次基流量;滤波2,从末时刻至起始时刻,按式(1)和式(2)再次计算获得一组基流数据;滤波3,再按起始时刻至末时刻顺序,按式(1)和式(2)计算获得最终基流数据。

## 1.3 SWAT模型的构建及评价方法

本研究选用ArcSWAT 2.3.4版本,模型原理参见SWAT2005理论文档<sup>[15]</sup>,其对产流的模拟采用径流曲线数法(SCS-CN)<sup>[16]</sup>,对产沙的模拟采用改进的通用土壤流失方程(MUSLE-Modified Universal Soil Loss Equation)<sup>[17]</sup>。建模时,首先导入20 m的DEM,将子流域提取阈值设为28 km<sup>2</sup>,并添加招安站为子流域出口,由此产生33个子流域;此后将土地利用类型、土壤类型及坡度分级的阈值分别设为10%,10%和10%,共产生219个水文响应单元(HRU-Hydrological Response Unit);最后输入气象数据文件进行模拟。将1956—1957年作为模型的预热阶段,并利用招安站日径流和泥沙数据对模型相关参数进行敏感性分析。率定模型时,先手动调节相关参数,使模拟的河川径流、地表径流及基流量最大可能的接近招安站1958—1967年的实测数据;然后运行自动率定程序,得出最优参数组合;最后,利用1968—1974年招安站实测径流资料对建立的模型



图1 杏子河流域位置及气象、水文站点分布

Fig. 1 Location of the Xingzihe watershed and its meteorological and hydrological stations

进行验证。当径流结果达到满意后,再利用招安站 1958—1967 年的泥沙数据率定产沙量,并用 1968—1974 年的泥沙数据对模型进行验证。本研究采用决定系数( $R^2$ )、Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)<sup>[18]</sup>、均方根差与标准偏差的比值(RSR)<sup>[19]</sup>来评判模拟结果的好坏。通常认为,当  $R^2 > 0.50$ ,  $NSE > 0.50$ ,  $0 < RSR < 0.70$  时,模拟结果达到满意<sup>[19-20]</sup>。

#### 1.4 DEM 棚格分辨率和子流域划分对 SWAT 水文模拟的影响评价

分析 DEM 分辨率对 SWAT 水文模拟的影响时,先利用前期率定好的参数模拟 1958—1974 年杏子河流域出口的逐年河川径流、地表径流、基流及产沙量,作为参照(假定为实测值);然后,将栅格分辨率为 20 m 的 DEM 在 Arcgis 9.3 平台下重采样得到分辨率为 30、60、90、150、300、500、1000、1500 和 2000 m 的 DEM;最后,在保证气象、土地利用和土壤数据不变的情况下,分别导入不同栅格分辨率的 DEM,并模拟各水文要素在 1958—1974 年期间的逐年河川径流、地表径流、基流及产沙量,再与实测值进行对比,计算统计指标  $R^2$ 、NSE 和 RSR,并将各要素的多年平均值绘图。在此过程中,不对模型参数进行率定,因为模型的率定会掩盖不同输入数据对模拟结果的影响。分析子流域划分对 SWAT 模型的影响时,分别将子流域提取阈值设为 10、12、15、30、50、100 和 200 km<sup>2</sup> 并运行模型,其余步骤和原理与分析 DEM 棚格分辨率对 SWAT 水文模拟的影响相同。

## 2 结果与分析

### 2.1 SWAT 模型在杏子河流域的适用性评价

#### 2.1.1 基流分割结果

将流域招安水文站 1958—1974 年的逐日径流量分割后得出径流通过 3 个滤波通道后的基流参数及基流占河川径流的比例(表 1)。本文将频率最低的滤波 3 分割出的最终基流值作为与 SWAT 模拟结果对比的参考值。

表 1 基流分割程序运行结果

Table 1 Output of the base flow filter program

基流占河川径流的比例 Fraction of streamflow contributed by base flow that is estimated in different filter/%			退水个数 Number of individual base flow recessions	基流退水常数 $\alpha$ Base flow recession alpha factor	基流天数 Base flow days
滤波 1 Filter 1	滤波 2 Filter 2	滤波 3 Filter 3			
51	40	34	3	0.013	177

退水个数:用来推算主退水曲线时所使用的单个基流退水事件的个数;基流退水常数:基流对地下水补给变化的响应,表征基流消退的速度;基流天数:在一个循环中基流消退的天数

#### 2.1.2 SWAT 模型在招安站的率定与验证

通过敏感性分析得到用于率定模型的参数,包括:影响地表径流的 SCS 径流曲线数(CN2)和最大植被冠层截留量(CANMX),控制蒸发的土壤蒸发补偿系数(ESCO)和植物蒸腾补偿系数(EPCO),控制壤中流的土壤饱和导水率(SOL\_K)和土壤可利用有效水量(SOL\_AWC),影响基流的基流回归系数(ALPHA\_BF)、浅层地下水再蒸发阈值深度(REVAPMN)和浅层地下水阈值深度(GWQMN),影响河道传输的河道水力传导率(CH\_K2);对产沙模拟比较敏感的参数有挟沙能力线性指数(SPCON),挟沙能力幂指数(SPEXP),USLE 方程土壤可蚀性因子(USLE\_K),沟道侵蚀因子(CH\_EROD)和沟道覆被因子(CH\_COV)。

通过对比各水文要素在率定期的模拟值与实测值发现,SWAT 能较好地模拟年河川径流、地表径流、基流及产沙量的年际变化趋势(图 2),且各水文要素的  $R^2$ 、NSE 和 RSR 分别在 0.74—0.86、0.55—0.80 和 0.28—0.34 之间(表 2),均达到满意的模拟效果。从模拟的水文要素在验证期的表现可以看出,模拟值基本与实测值相吻合(图 3),其  $R^2$ 、NSE 和 RSR 分别在 0.73—0.80、0.56—0.74 和 0.21—0.39 之间,表明率定后的模型对杏子河流域年际水文特征的模拟适用性较好,将各参数用于研究 DEM 棚格分辨率和子流域划分对 SWAT 水文模拟的影响是可行的。

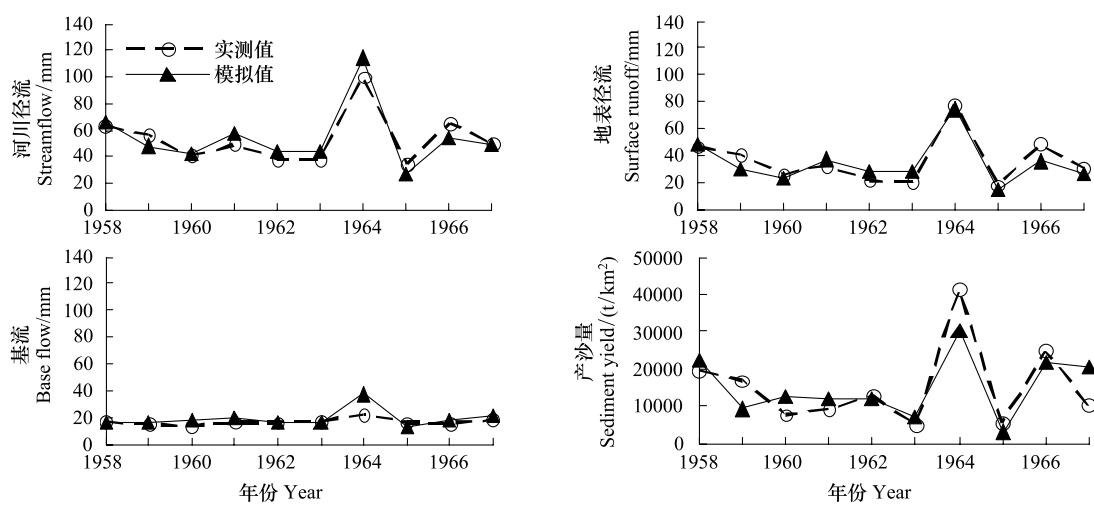


图2 率定期各水文要素模拟值与实测值的年际变化对比

Fig. 2 Observed and simulated yearly hydrological characteristics for the Xingzihe watershed during the calibration period

表2 SWAT模型在杏子河流域的适用性评价

Table 2 Assessment of SWAT performance in the Xingzihe watershed

时期 Period	河川径流 Streamflow			地表径流 Surface runoff			基流 Base flow			产沙量 Sediment yield		
	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR
率定期	0.86	0.80	0.28	0.83	0.80	0.29	0.78	0.55	0.34	0.74	0.65	0.32
验证期	0.73	0.74	0.21	0.79	0.61	0.39	0.80	0.56	0.25	0.75	0.71	0.21

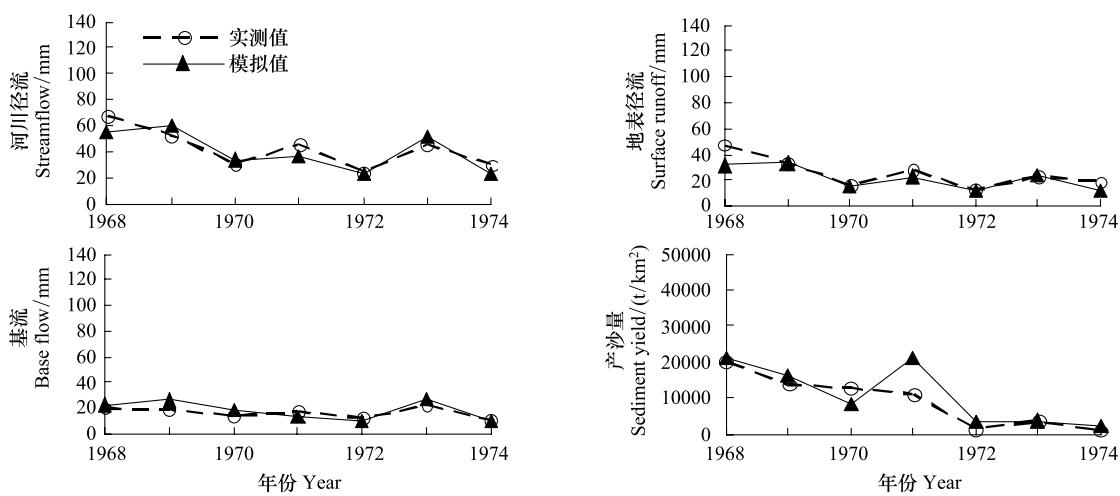


图3 验证期各水文要素模拟值与实测值的年际变化对比

Fig. 3 Observed and simulated yearly hydrological characteristics for the Xingzihe watershed during the validation period

## 2.2 不同DEM栅格分辨率对SWAT模型水文模拟的影响

随DEM栅格分辨率的变化,DEM表征的流域属性也随之发生变化。当DEM栅格分辨率在20—300 m之间时,SWAT提取的子流域个数均为33,子流域的平均面积在43.9—44.5 km<sup>2</sup>之间(表3);当栅格分辨率大于300 m时,SWAT描绘的子流域个数随分辨率的增大而降低,而子流域的平均面积却相应增大。对高程而言,DEM栅格分辨率对其的影响不大,当栅格分辨率在20—2000 m之间时,其最小值、最大值、平均值和标准偏差仅在一定范围内微小变动(表3)。但是,DEM栅格分辨率对坡度影响较大,随栅格分辨率的增大,流

域的最大坡度、平均坡度相应降低。总体来看,不同 DEM 棚格分辨率对流域坡度、子流域数量及面积影响较大,而对高程影响较小,这与 Chaplot 的研究结果一致<sup>[21]</sup>。

表 3 不同 DEM 棚格分辨率下的流域特征

Table 3 Topography characteristics under different DEM resolution

DEM 分辨率/m DEM resolution	子流域个数 No. of subbasin	子流域平均面积 Mean area of subbasin/km <sup>2</sup>	高程 Elevation/m				坡度 Slope/(°)			
			Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
20	33	44.5	904	1760	1367	129.8	0.0	83.4	18.1	9.9
30	33	44.5	904	1760	1367	129.6	0.0	81.8	17.4	9.2
60	33	44.4	906	1760	1367	129.5	0.0	75.0	15.5	7.7
90	33	44.4	975	1760	1366	129.2	0.0	63.6	13.8	6.6
150	33	44.2	1040	1760	1366	128.7	0.0	42.0	11.0	5.1
300	33	43.9	1040	1754	1364	127.5	0.0	19.6	6.7	3.2
500	31	45.8	1040	1760	1365	128.2	0.1	13.0	4.1	2.1
1000	25	56.1	1040	1720	1349	125.1	0.1	6.3	2.2	1.1
1500	19	69.8	1046	1720	1360	123.4	0.1	3.8	1.6	0.8
2000	1	1264.0	1040	1720	1375	130.3	0.1	3.2	1.2	0.6

Min: 最小值; Max: 最大值; Mean: 平均值; SD: 标准偏差

随栅格分辨率的增大,河川径流、地表径流及基流呈现 3 个阶段(图 4):当其从 20 m 增大至 300 m 时,河川径流和基流呈微弱的下降趋势,而地表径流却呈上升趋势;当其大于 300 m 而小于 1500 m 时,河川径流和地表径流先上升,然后变得比较平缓,而此阶段基流基本保持不变;当其大于 1500 m 时,河川径流量、地表径流量及基流量均急剧下降,这与 DEM 棚格分辨率过大导致模型低估了径流产生和传输的驱动因子——平均坡度有关<sup>[22]</sup>。对产沙量来说,DEM 棚格分辨率小于 150 m 时,模拟的产沙量相差不大(图 5);而当其大于 300 m 时,产沙量差异增大,总体上随栅格分辨率的增大呈明显的下降趋势。由于 SWAT 依据 MUSLE 方程来估计产沙量,而坡度是该方程的重要因子之一,随 DEM 棚格分辨率的增大,流域坡度变缓,导致了模拟偏差<sup>[21]</sup>。从各水文要素模拟效果的统计值来看(表 4),DEM 棚格分辨率在 20—150 m 时,SWAT 模拟的河川径流、地表径流、基流及产沙量均能达到满意,但当其大于 150 m 时,各水文要素的模拟效果存在差异。对河川径流和地表径流而言,当其在 20—1500 m 之间时,二者的  $R^2$ 、NSE 和 RSR 分别在 0.93—1.00、0.81—1.00 和 0.00—0.24 之间,模拟结果均在可接受范围内;但分辨率大于 1500 m 时,二者的  $R^2$ 、NSE 和 RSR 分别在 0.62—0.70、-1.22—-0.15 和 1.69—1.99 之间,模拟结果均不能被接受。对基流而言,DEM 棚格分辨率大于 150 m 时,NSE 和 RSR 分别在 -3.03—0.08 和 0.74—310.15 之间变动,说明 DEM 棚格分辨率大于 150 m 时,基流模拟值与实测值相差很大。对产沙量来说,DEM 棚格分辨率在 20—500 m 时,产沙量的多年平均值在 17850.9—20861.3 t/km<sup>2</sup> 之间,  $R^2$ 、NSE 和 RSR 均显示出满意的模拟效果;而棚格分辨率在 1000—2000 m 之间时,产沙量明显降低,多年平均值在 12.5—11627 t/km<sup>2</sup> 之间,NSE 和 RSR 显示模拟结果不能被接受。

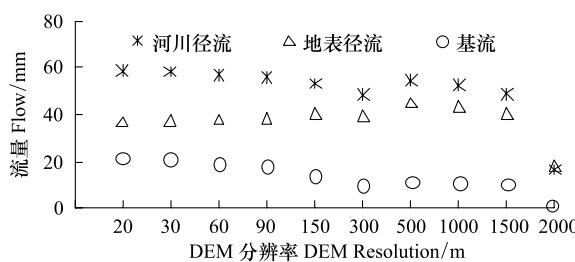


图 4 不同 DEM 棚格分辨率对杏子河流域年际产流模拟的影响

Fig. 4 Effects of different DEM resolution on annual flow simulation in the Xingzihe watershed

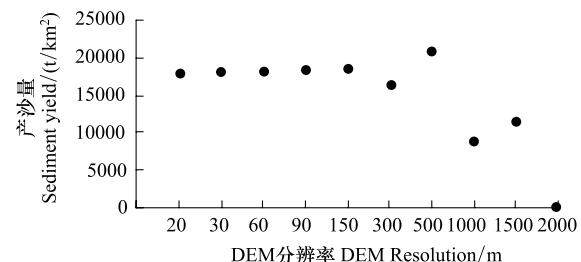


图 5 不同 DEM 棚格分辨率对杏子河流域年际产沙模拟的影响

Fig. 5 Effects of different DEM resolution on annual sediment yield simulation in the Xingzihe watershed

表4 不同DEM栅格分辨率下SWAT年际水文特征模拟的统计特征

Table 4 Statistical evaluation of yearly hydrological simulation under different DEM resolution

DEM 分辨率 DEM resolution/m	河川径流 Streamflow			地表径流 Surface runoff			基流 Base flow			产沙量 Sediment yield		
	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR
20	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
30	1.00	0.99	0.01	1.00	0.99	0.02	1.00	0.99	0.04	1.00	0.99	0.01
60	0.99	0.99	0.04	0.99	0.99	0.04	0.99	0.94	0.14	0.99	0.99	0.03
90	0.99	0.99	0.08	0.99	0.98	0.07	0.98	0.89	0.23	0.99	0.99	0.05
150	0.99	0.95	0.16	0.99	0.96	0.16	0.93	0.51	0.43	0.99	0.98	0.08
300	0.98	0.87	0.23	0.99	0.94	0.21	0.91	0.08	0.74	0.98	0.94	0.17
500	0.97	0.91	0.17	0.98	0.81	0.15	0.89	0.10	0.51	0.98	0.86	0.21
1000	0.97	0.91	0.16	0.98	0.86	0.16	0.89	0.07	0.60	0.89	0.29	1.22
1500	0.93	0.86	0.24	0.95	0.91	0.19	0.90	0.05	0.66	0.98	0.17	1.19
2000	0.62	-1.22	1.99	0.70	-0.15	1.69	0.09	-3.03	310.15	0.12	-2.92	1319.34

### 2.3 子流域划分对SWAT模型水文模拟的影响

通过设置不同的子流域提取阈值,得到7种子流域划分结果,随阈值的增大,子流域和水文响应单元的数量逐渐降低,而二者的平均面积逐渐增大(表5)。不同阈值下模拟的多年平均基流基本保持不变(图6),说明基流不受子流域划分的影响。当子流域提取阈值从10 km<sup>2</sup>变至100 km<sup>2</sup>时,子流域的数量逐渐从77降低至7,而SWAT模拟的多年平均河川径流和地表径流量没有发生明显变化,这与前人的研究结果基本一致<sup>[23-24]</sup>;但当子流域提取阈值为200 km<sup>2</sup>时,多年平均河川径流和地表径流量均有所减少,这说明当子流域提取阈值超过某一范围,模拟的地表径流量有所降低,从而低估了流域出口的河川径流量。张雪松等<sup>[25]</sup>将子流域划分影响产流的原因归结为子流域划分数量改变了径流曲线数CN值的空间集总程度。从评价各水文要素模拟效果的统计值来看(表6),7种子流域划分方式模拟的年平均河川径流、地表径流及基流均可达到满意的效果,说明产流模拟对子流域划分的敏感性不强<sup>[26]</sup>。

表5 子流域划分对子流域特征的影响

Table 5 Effects of watershed subdivision on subbasin features

子流域提取阈值/km <sup>2</sup> Threshold of watershed subdivision	子流域 Subbasin			水文响应单元 HRU		
	个数 No.	平均面积 Mean area/km <sup>2</sup>	个数 No.	平均面积 Mean area/km <sup>2</sup>	个数 No.	平均面积 Mean area/km <sup>2</sup>
10	77	19.09	543	2.71		
12	65	22.62	456	3.22		
15	43	34.19	287	5.12		
30	29	50.70	193	7.62		
50	15	101.00	94	15.64		
100	7	216.41	42	34.99		
200	3	504.95	18	81.67		

不同子流域划分对产沙模拟的影响见图7。当阈值在12—100 km<sup>2</sup>之间变化时,其对产沙量的影响较小,模拟的多年平均产沙量基本保持在17851—19216 t/km<sup>2</sup>之间,且R<sup>2</sup>、NSE和RSR均显示出满意的模拟效果(表6)。当阈值为10 km<sup>2</sup>时,多年平均值降低为9721 t/km<sup>2</sup>,且统计指标NSE和RSR表明模拟结果不能被接受,这主要是MUSLE方程( $Sed = 11.8 \times (Q_{surf} \times area_{HRU} \times q_{peak})^{0.56} \times K \times LS \times P \times C$ )低估了影响产沙量的K(土壤可蚀性)和q<sub>peak</sub>(峰值径流量)因子<sup>[15]</sup>。阈值设置过小时,HRU面积变得非常小,使流域内分布较少的土壤(黑垆土、红胶土和淤积土)也被用于计算流域平均参数的范围内,而这些土壤的K值均小于占流域面积绝大多数的黄绵土的K值,使流域平均K值降低,进而低估了产沙量;此外,q<sub>peak</sub>与HRU面积的变化成正比<sup>[15]</sup>,HRU

面积减小,也会低估产沙量。当子流域提取阈值为  $200 \text{ km}^2$  时,产沙量的多年平均值为  $11671 \text{ t/km}^2$ ,这与该阈值下径流量的降低有关。以上分析表明,子流域划分对流域产沙的影响存在上限下限两个阈值,且在阈值范围内模拟结果相对稳定。

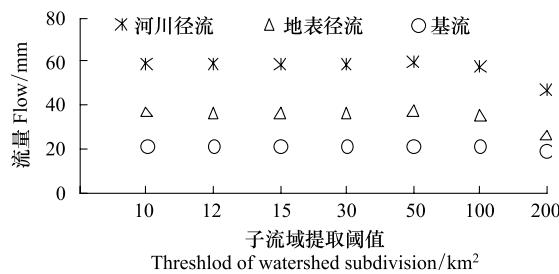


图 6 子流域划分对杏子河流域年际产流模拟的影响

Fig. 6 Effects of different watershed subdivision on annual flow simulation in the Xingzihe watershed

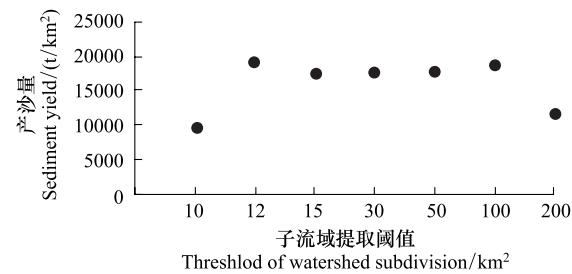


图 7 子流域划分对杏子河流域年际产沙模拟的影响

Fig. 7 Effects of different watershed subdivision on annual sediment yield simulation in the Xingzihe watershed

表 6 不同子流域提取阈值下 SWAT 年际水文特征模拟的统计特征

Table 6 Statistical evaluation of yearly hydrological simulation under different threshold of watershed subdivision

子流域提取阈值 Threshold of watershed subdivision/km <sup>2</sup>	径流 Streamflow			地表径流 Surface runoff			基流 Base flow			产沙量 Sediment yield		
	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR	R <sup>2</sup>	NSE	RSR
10	1.00	1.00	0.01	1.00	1.00	0.01	1.00	1.00	0.01	0.93	0.19	1.36
12	1.00	1.00	0.01	1.00	1.00	0.01	1.00	1.00	0.01	1.00	0.90	0.10
15	1.00	1.00	0.01	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.02	1.00	1.00	0.01
30	1.00	1.00	0.01	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.01
50	1.00	0.99	0.03	1.00	0.99	0.03	1.00	1.00	0.02	1.00	1.00	0.02
100	1.00	0.99	0.03	1.00	0.99	0.04	1.00	1.00	0.02	1.00	1.00	0.04
200	0.91	0.73	0.40	0.87	0.69	0.59	0.98	0.91	0.25	0.76	0.41	0.73

### 3 结论与讨论

利用杏子河流域 1958—1974 年气象、水文实测资料,评价了 SWAT 模型在该流域的适用性,探讨了 DEM 棚格分辨率和子流域划分对产流产沙模拟的影响,得到以下主要结论:数字滤波法能高效快捷地分割出基流,可用于 SWAT 模型的基流校准。模型在率定期和验证期的结果表明,SWAT 模拟的年河川径流、地表径流、基流及产沙量与实测值基本吻合,各水文要素的  $R^2$  和 NSE 分别在 0.73 和 0.55 以上,且 RSR 小于 0.39。当 DEM 棚格分辨率在 20—150 m 时,SWAT 能成功地模拟河川径流、地表径流、基流及产沙量;但当棚格分辨率大于 150 m 时,由于从 DEM 提取的流域特征差异较大,各水文要素的模拟效果也存在差异。产流模拟对子流域划分的敏感性不强,尤其是基流,在不同子流域划分下其模拟结果基本保持不变。子流域划分对产沙模拟的影响存在上下限,当子流域提取阈值在 12—100  $\text{km}^2$  之间时,可达到满意的模拟效果,但当阈值过小或过大,模型会低估产沙量。因此,为了获得模型最优表现,在 SWAT 模型的实际应用中,应根据流域本身的特点和应用目的选择合适的 DEM 数据和子流域提取阈值。

基于数字流域的 SWAT 模型,首先在每个水文响应单元进行水文循环的模拟,然后再计算汇流,其模拟的精度主要取决于模型读取的流域特征(坡度、坡向、集水面积、河网、流向及河道长度等)、气候条件以及各水文要素的推算方法。不同分辨率的 DEM 对坡度影响较大,而坡度作为影响径流和泥沙传输的主要影响因子,直接关系到模型的输出结果;子流域划分影响水文响应单元的划分和流域属性数据的读取,进而影响模拟结果。随着模拟尺度的增大,流域异质性增大,这就加大了获取高精度空间属性数据的难度。由于受限于输入数据的空间代表性,产流及侵蚀过程的模拟变得愈加复杂,模拟结果也存在不确定性。尽管模型的率定能弥

补输入数据的不足,但这会造成模型参数代表性的失真。本文仅以年为时间尺度探讨了流域空间属性对流域产流产沙模拟的影响,尚未分析不同数字流域特下以日或月为时间尺度的水文模拟特征。这主要是因为SWAT模型在杏子河流域的适用性评价中,在短时间尺度上不能产生合理的径流量和产沙量,特别是很难同时得到满意的河川径流、地表径流和基流,无法进一步分析多时间尺度下流域空间属性对日水文特征模拟的影响。以年为尺度的模拟只需考虑流域出口的水量平衡即可,而无需详细考虑坡面产流产沙以及坡道汇流过程,能较为容易的模拟出流域出口的产流产沙变化过程。但是,在不同时间尺度下的模拟,可能会影响不同空间分辨率模拟的好坏。因此,在今后的工作中,一方面要在改进模型的基础上分析多时间尺度下的水文模拟特征,另一方面需要探寻一种方法来评价空间数据的代表性及估计模型输入、输出不确定性的范围,以便对模型有一个全面的评判,也为选取合适的空间数据及提高模型效率提供依据。

**致谢:**感谢中国科学院水利部水土保持研究所杨勤科研究员为本研究提供了杏子河流域1975年土地利用图。

#### References:

- [1] Liu J H, Wang G Q, Wang K. Review on advancement of study on digital river basin in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(2): 240-246.
- [2] Liang L L, Wang F. Simulation of water resources evolution driven by vegetation construction and control of eco-hydrological processes in Erdos Larus Relictus Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 109-119.
- [3] Feng X Q, Zhang G X, Yin X R. Study on the Hydrological response to climate change in Wuyur River basin based on the SWAT model. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 827-832.
- [4] Wu T F, Gao G, Chao J Y, Qin B Q. Analysis on factors inducing algal bloom in reservoir based on basin eutrophication model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(4): 391-397.
- [5] Ge H F, Qin D Y, Zhou Z H, Sang X F. Analysis of key source areas and pollution type in the lower Haihe River based on pollution loading movement and transformation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1): 61-67.
- [6] Xu Q G, Xi B D, He L S, Wei Z M, Yao B, Huo S L. Research on non-point pollution sources in Daning River watershed of the Three Georges Reservoir. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(3): 299-303.
- [7] Chaubey I, Cotter A S, Costello T A, Soerens T S. Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 621-628.
- [8] Mukundan R, Radcliffe D E, Risso L M. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 65(2): 92-104.
- [9] Di Luzio M, Arnold J G, Srinivasan R. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 629-650.
- [10] Kim J G, Park Y, Yoo D, Kim N W, Engel B A, Kim S J, Kim K S, Lim K J. Development of a SWAT patch for better estimation of sediment yield in steep sloping watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(4): 963-972.
- [11] Chen L Q, Liu C M, Hao F H, Liu J Y, Dai D. Change of the baseflow and its impacting factors in the source regions of Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(2): 141-148.
- [12] Institute of Soil and Water Conservation. *Natural Resources and Soil and Water Conservation in the Xingzhihe Watershed on the Loess Plateau*. Xi'an: Shaanxi Science Press, 1986: 1-22.
- [13] Dou L, Huang M B. Applied study of baseflow separation methods in watersheds of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(3): 107-111, 133-133.
- [14] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [15] 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.
- [16] USDA-SCS. *National Engineering Handbook Section 4: Hydrology*. Washington DC: USDA-SCS, 1972: 121-144.
- [17] Williams J R. *Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor// Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Washington DC: USDA, 1975: 244-252.

- [18] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [19] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [20] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, Dugas W A, Srinivasan R, Hauck L M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(5): 1169-1188.
- [21] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO<sub>3</sub>-N loads predictions. *Journal of Hydrology*, 2005, 312(1/4): 207-222.
- [22] Kalin L, Govindaraju R S, Hantush M M. Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds. *Journal of Hydrology*, 2003, 276(1/4): 89-111.
- [23] FitzHugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, 2000, 236(1/2): 35-53.
- [24] Jha M, Gassman P W, Secchi S, Gu R, Arnold J. Effect of watershed subdivision on swat flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 811-825.
- [25] Zhang X S, Hao F H, Cheng H G, Yang Z F. Influence of subdivision of watershed on distributed hydrological model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (7): 119-125, 128-128.
- [26] Zhang Y H. Development of study on Model-SWAT and its application. *Progress in Geography*, 2005, 24(5): 121-130.

#### 参考文献:

- [1] 刘家宏, 王光谦, 王开. 数字流域研究综述. *水利学报*, 2006, 37(2): 240-246.
- [2] 梁梨丽, 王芳. 鄂尔多斯遗鸥保护区植被-水资源模拟及其调控. *生态学报*, 2010, 30(1): 109-119.
- [3] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 827-832.
- [4] 吴挺峰, 高光, 晁建颖, 秦伯强. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策. *水利学报*, 2009, 40(4): 391-397.
- [5] 葛怀风, 秦大庸, 周祖昊, 桑学锋. 基于污染迁移转化过程的海河干流天津段污染关键源区及污染类别分析. *水利学报*, 2011, 42(1): 61-67.
- [6] 许其功, 席北斗, 何连生, 魏自民, 姚波, 霍守亮. 三峡库区大宁河流域非点源污染研究. *环境工程学报*, 2008, 2(3): 299-303.
- [11] 陈利群, 刘昌明, 郝芳华, 刘九玉, 戴东. 黄河源区基流变化及影响因子分析. *冰川冻土*, 2006, 28(2): 141-148.
- [12] 中国科学院水土保持研究所. 黄土高原杏子河流域自然资源与水土保持. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986: 1-22.
- [13] 豆林, 黄明斌. 自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究. *水土保持通报*, 2010, 30(3): 107-111, 133-133.
- [25] 张雪松, 郝芳华, 程红光, 杨志峰. 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响. *水利学报*, 2004, (7): 119-123, 128-128.
- [26] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展. *地理科学进展*, 2005, 24(5): 121-130.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32 ,No. 12 June ,2012( Semimonthly )**  
**CONTENTS**

Temporal and spatial dynamic changes and landscape pattern response of Hemeroby in Dayang estuary of Liaoning Province, China .....	SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, WU Tao, et al (3645)
Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland .....	ZHANG Quanjun, YU Xiubo, QIAN Jianxin, et al (3656)
Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City .....	FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al (3670)
Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: a case study of Lake Taihu .....	YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al (3681)
The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphor in stormwater runoff from green roofs .....	WANG Shumin, HE Qiang, ZHANG Junhua, et al (3691)
Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna .....	HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, et al (3701)
Investigation of populations of parasitic wasps parasitizing <i>Carposina sasakii</i> Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in jujube orchards in China, with respect to the wasp-host relationship .....	YAO Yanxia, ZHAO Wenxia, CHANG Jupu, et al (3714)
Assessment of ardeidae waterfowl habitat suitability based on a binary logistic regression model .....	ZOU Lili, CHEN Xiaoxiang, HE Ying, et al (3722)
Combined effects of temperature, salinity and pH on the clearance rate of juveniles of <i>Pinctada martensii</i> (Dunker) .....	ZHU Xiaowen, WANG Hui, LIU Jin, et al (3729)
Soil nutrient dynamics and loss risks in a chicken-forage mulberry-medicinal plant intercropping system .....	ZHAO Liping, YANG Guiming, ZHAO Tongke, et al (3737)
Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river .....	ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren (3745)
Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzi watershed .....	QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng (3754)
Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis .....	GUO Guanhua, CHEN Yingbiao, WEI Jianbing, et al (3764)
Landscape connectivity analysis for the forest landscape restoration; a case study of Gongyi City .....	CHEN Jie, LIANG Guofu, DING Shengyan (3773)
Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China .....	LIN Jianyi, MENG Fanxin, CUI Shenghui, et al (3782)
The ecological footprint of alpine pastures at the village-level; a case study of Hezuo in Gannan Autonomous Prefecture, China .....	WANG Lucang, GAO Jing (3795)
The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu .....	LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al (3806)
The biomass of <i>Bashania fargesii</i> in giant pandas habitat in Qinling Mountains .....	DANG Kunliang, CHEN Junxian, SUN Feixiang, et al (3816)
Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill .....	YOU Jia, WANG Wenrui, LU Jin, et al (3825)
Liana-host tree associations in the tropical montane primary forest and post-harvest forest of Bawangling, Hainan Island, China .....	LIU Jinxian, TAO Jianping, HE Zeet al (3834)
The response of photosynthetic characters and biomass allocation of <i>P. bournei</i> young trees to different light regimes .....	WANG Zhenxing, ZHU Jinmao, WANG Jian, et al (3841)
Genetic variation among populations of the endangered <i>Sinocalycanthus chinensis</i> based on morphological traits and ISSR profiles .....	JIN Zexin, GU Jingjing, LI Junmin (3849)
Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter .....	JIANG Qingbiao, ZHAO Xiupei, GAO Lushuang, et al (3859)
Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant <i>Alcimandra cathcartii</i> .....	YUAN Chunning, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, et al (3866)
The water consumption and water use efficiency of the seedlings of <i>Eucalyptus grandis</i> and other five tree species in Sichuan Province .....	HU Hongling, ZHANG Jian, WAN Xueqin, et al (3873)
Effects of leaf litter of <i>Cinnamomum septentrionale</i> on growth and resistance physiology of <i>Brassica rapa</i> in the decomposition process of litter .....	HUANG Weiwei, HU Tingxing, ZHANG Niannian, et al (3883)
Water transport velocity and efficiency in <i>Quercus variabilis</i> detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique .....	SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3892)
The saxicolous moss's features of absorbing water and its structural adaptability in the heterogeneous environment with rock desertification .....	ZHANG Xianqiang, ZENG Jianjun, CHEN Jinwu, et al (3902)
Effects of organic materials containing copper on soil enzyme activity and microbial community .....	CHEN Lin, GU Jie, GAO Hua, et al (3912)
Comparison of floral morphology and pollination characteristics between the sexes in <i>Eurya obtusifolia</i> .....	WANG Qian, DENG Hongping, DING Bo, et al (3921)
Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China .....	HE Qijin, ZHOU Guangsheng (3931)
Effects of uniconazole dry seed dressing on nitrogen accumulation and translocation and kernel protein quality in wheat .....	FAN Gaoqiong, YANG Enmian, ZHENG Ting, et al (3940)
<b>Review and Monograph</b>	
International comparison and policy recommendation on the development model of industrial symbiosis in China .....	SHI Lei, LIU Guoguo, GUO Siping (3950)
<b>Scientific Note</b>	
The Change of landscape pattern in Zhenlai Xian, Jilin Province in recent ten years .....	ZHANG Guokun, LU Jinghua, SONG Kaishan, et al (3958)
Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China .....	JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, et al (3966)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

## 生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 12 期 (2012 年 6 月)

## ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 12 (June, 2012)

编 辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010) 62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜  
主 管 中国科学技术协会  
主 办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

Editor-in-chief FENG Zong-Wei  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:1000717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 1000717, China

印 刷 行 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563

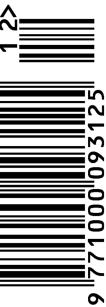
Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

订 购 国 外 发 行  
全国各 地邮局  
中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 1000717, China  
Tel: (010) 64034563  
E-mail: journal@cspg.net

广 告 经 营 许 可 证  
京海工商广字第 8013 号

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933  
12>  
  
9 771000093125

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元