

基于 SWAT 东北黑土区乌裕尔河流域径流模型模拟

郭敏^{1,2}, 方海燕¹, 李致颖^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:黑土区是我国的粮食主产区之一,在该区研究径流特征,对东北水资源调控、侵蚀产沙治理和粮食安全,都有非常重要的意义。以乌裕尔河流域为研究对象,利用 SWAT 模型对乌裕尔河流域水文过程进行模拟,通过 SWAT-CUP 程序的 SUFI-2 算法进行模型参数敏感性和不确定性分析,结合手动参数调整,得到了较为理想的模拟结果。结果表明:年径流及月径流在校准期和验证期的相关系数 R^2 均达到 0.8, Nash Sutcliffe 效率系数大于 0.75, 相对误差小于 15%。SWAT 模型可较准确地模拟流域径流过程,该模型在东北地区的水文模拟具有一定的适用性。研究发现,模型对某些降雨突增月份径流模拟较差,并且对春汛和夏汛双峰型径流模拟效果也不尽人意,春季径流量模拟普遍偏低,夏季径流量普遍偏高。因此,尽管东北地区产流结构较为复杂,一些地方如模型土壤属性数据库建设、融雪过程还需要深入研究。就目前研究来看,SWAT 模型对于该地区的径流模拟总体效果可以接受,这可为该地及类似地区径流乃至侵蚀产沙模拟,为水资源的开发利用与流域的综合管理提供科学依据。

关键词:SWAT 模型; 东北黑土区; 乌裕尔河流域; 径流模拟

中图分类号:P331

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0043-05

SWAT Model-Based Runoff Simulation of Wuyuer River Basin in the Black Soil Region of Northeast China

GUO Min^{1,2}, FANG Haiyan¹, LI Zhiying^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The black soil region is the major grain production areas. Runoff modeling for this region is meaningful to support the studies of water resources and sediment yield. In this study, the hydrological processes at monthly and annual scales were simulated using the SWAT (Soil and Water Assessment Tools) model in the Wuyuer River Basin, northeast China, and some results were obtained. The monthly recorded and simulated discharges match well for calibration period and the validation period. Nash-Sutcliffe coefficients as well as correlation coefficients between recorded and simulated discharge for both calibration period and the validation period are all above 0.75 while relative errors are less than 15%. But model simulating runoff under some increasing rainfall processes is poorer, and the spring and summer flood peak runoff simulation results are also unsatisfactory. The runoff of northeast China is relatively complex, which requires to further improve the adaptability of the SWAT model, so as to provide a scientific basis for the development of water resources.

Keywords: SWAT model; northeast China; Wuyuer river basin; runoff simulation

土壤侵蚀是人类面临的重要环境问题之一。土壤侵蚀在破坏土地资源、淤塞河道和湖泊,加剧洪涝灾害的同时,可引发面源污染破坏水资源,加剧缺水地区的水危机,影响生态和人类生存环境。探究中小尺度流域径流特征及模拟流域水资源变化是土壤侵

蚀产沙、水土保持措施管理的基础工作^[1]。SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部开发的分布式流域尺度模型,它集成了遥感和地理信息系统技术,将土地利用和流域水文过程联系起来,可对流域管理各种决策的适用性进行评估,在世

界得到了广泛的应用^[2-3]。

从已有研究来看, SWAT 模型在国外已大量应用于流域径流^[4]、泥沙^[5]、非点源污染的模拟^[6-7]; 此外, 现阶段该模型就流域内农药^[8]、病原体(细菌)的运输^[6]和水质的预测模拟^[9]方面也取得了很好的成果。在我国, SWAT 模型在半湿润和湿润地区应用较多, 开展研究最多的区域是长江流域等南方地区^[10], 其次是在黄河上中游地区^[11]和高原冻土区如天山、西藏高原地区^[12], 海河和东北松辽流域等研究较少。在东北地区, SWAT 模型主要应用于非点源污染研究。韩博等^[13]在辽宁蒲河流域对氮素形态、氮污染负荷贡献率、污染关键区以及流域污染时空分布等进行了模拟研究。李颖等^[14]利用该模型揭示了东北水稻灌区的水文及面源污染过程。董李勤和章光新^[15]还将嫩江流域降水、径流信息与湿地退化遥感信息作对比, 对全流域湿地面积作分析, 发现气候变化和人类活动是流域内湿地生态系统平衡产生负面影响的重要原因。

总体来看, SWAT 模型在东北地区研究较少, 尤其是对径流过程模拟研究仍需深入。本文选取乌裕尔河流域为研究区, 基于 ArcGIS-SWAT 模型, 对该流域产流过程进行研究, 并就该模型在东北地区的适

用性进行分析。该研究有助于深入理解乌裕尔河流域降水—径流机制, 对该区水资源研究和土壤侵蚀产沙的治理具有重要意义, 对 SWAT 模型的推广及改进具有一定的价值。

1 研究区概况

乌裕尔河属我国东北地区嫩江水系一级支流, 水系顺应地势自东北流向西南, 是黑龙江省唯一一条内陆河。河流流经富裕县之后, 尾间逐渐消失在齐齐哈尔以东、林甸县西北烟筒屯的大片苇甸、湿地之中, 形成广阔的沼泽地。乌裕尔河依安水文站(125°29'E, 47°46'N)控制流域面积为 8 224 km², 流域内丘陵漫岗起伏, 坡度较缓; 行政区划涉及北安市、依安市、克东县、克山县、德都县和拜泉县等。乌裕尔河流域属中温带半干旱大陆性季风气候, 多年平均气温 2.1℃, 降水量为 496.7 mm。径流年内丰枯规律明显, 降雨和径流曲线具有双峰型特征。该地冬季气温极低, 径流量呈全年最低值; 随着春季气温升高, 径流迅速增大, 产生春汛; 夏季受季风气候的影响, 降水增多, 产生夏汛(图 1); 而年际径流量呈逐年减少的趋势(图 2)。流域内水土流失严重, 水土流失面积占流域总面积的 63.7%, 其中耕地侵蚀面积占耕地总面积的 74.2%^[16]。

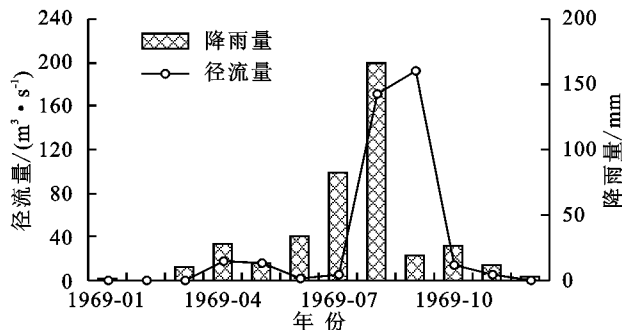


图 1 月降雨量、径流量分布

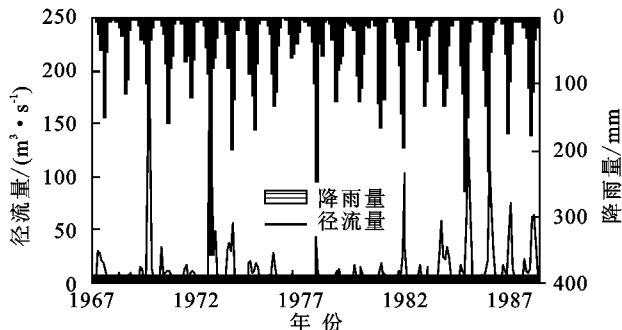


图 2 年降雨量、径流量分布

2 构建 SWAT 模型数据库

乌裕尔河流域 SWAT 模型模拟所需资料包括: 数字高程模型(DEM)、土地利用和土壤类型数据、气象数据(包括降水、温度、风速、太阳辐射、相对湿度)和实测径流资料等(表 1)。

表 1 SWAT 模型所需数据及来源

数据名称	数据描述	来源
DEM	20 m 分辨率	1:5 万地形图数字化得到
土地利用	1:100 万	中国科学院地理科学与资源研究所数据中心
土壤	1:100 万	中国西部环境与生态科学数据中心
气象数据	逐日数据	中国气象科学数据共享服务网
实测径流	月、日数据	中华人民共和国水文年鉴

DEM 是由 1991 年 1:5 万地形图通过数字化、

插值得到, 分辨率为 20 m×20 m。利用 DEM 数据可得到流域的坡度、坡长和河网等参数。

与现有径流数据记录相对应, 本文选取了 1980 年的土地利用数据。它是根据 LANDSAT TM 遥感影像资料通过监督分类获取, 并经实地调查和地形图土地利用信息比对, 能够代表研究阶段土地利用特征。研究区土地利用类型较多, 对照 SWAT 模型土地利用数据库, 结合产流模拟的要求, 对土地利用进行了重新分类, 以减少模型生成的 HRU 数量。

土壤数据是 SWAT 模型的主要输入参数之一。土壤数据库主要包括土壤类型分布图、土壤类型索引表以及土壤属性数据库。本文重在模拟流域径流量, 只构建了土壤物理属性数据库, 并根据 SWAT 模型要求对土壤数据进行重分类。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>),选取乌裕尔河流域10个气象站1966—1987年的逐日降水、气温、相对湿度、太阳辐射数据作为模型输入数据。

乌裕尔河依安站实测径流数据来自中华人民共和国水文年鉴,选取1966—1987年的逐年、逐月径流量,将实测水文数据生成模型所要求的格式,用于模型参数敏感性分析、模型率定和验证等。

3 SWAT 模型敏感性分析及率定、验证

3.1 模型参数率定与验证标准

评定模型效率的标准很多,本文采用普遍接受的相对误差(Re)、决定系数(R^2)以及 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数(E_{ns})3种方法作为衡量模型效率的标准。

相对误差计算公式为:

$$Re = \frac{Q_{sim} - Q_{obs}}{Q_{obs}} \times 100\%$$

式中: Q_{obs} 为观测值(m^3/s); Q_{sim} 为模拟值(m^3/s)。Re=0,说明模型模拟结果与实测值吻合;若Re为正值,说明模型模拟值偏大;若Re为负值,模型模拟值偏小。

决定系数(R^2)计算公式为:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2$$

式中: Q_{obs} 为观测值(m^3/s); Q_{sim} 为模拟值(m^3/s); Q_{avg} 为观测值平均值(m^3/s); n 为观测次数。 R^2 体现了模拟值与实测值变化趋势的一致性程度, $R^2=1$ 表示非常吻合;当 $R^2<1$ 时,其值越小,反映数据吻合程度越低。

Nash-Sutcliffe 模拟效率系数(E_{ns})计算公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2}$$

式中: Q_{obs} 为观测值(m^3/s); Q_{sim} 为模拟值(m^3/s); Q_{avg} 为观测值平均值(m^3/s); n 为观测次数。 E_{ns} 值越接近1,模拟效率越高;若 E_{ns} 接近0,则模型预测的结果不可接受;如果 E_{ns} 为负值,说明模型模拟平均值可信度较低。根据以往经验,当 $E_{ns}>0.75$ 时,可以认为模拟效果好; $0.36 \leq E_{ns} \leq 0.75$ 时,模拟效果令人满意; $E_{ns}<0.36$ 时,模拟效果较差。

3.2 SWAT-CUP 和 SUFI-2 算法

本文选择瑞士联邦水科学与技术研究所研发的 SWAT 率定与不确定性分析工具 SWAT-CUP(Calibration and Uncertainty Programs)以及连续不确定性匹配算法 SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting,

ver. 2)对模型参数进行率定及验证。

SWAT-CUP 是一种专门为 SWAT 模型提供敏感性分析、校准、验证和不确定性分析的计算机程序,模型内部镶嵌了连续不确定性匹配算法(SUFI-2)等多种算法。其优点为:(1)能实现并行处理,提高运行效率;(2)输出结果具有可视化;(3)通过提取河道、水文响应单元和子流域文件中的参数实现多目标函数公式化;(4)考虑了温度和降水数据的不确定性分析,在 SUFI-2 算法中还可获得目标函数极值^[17]。

SUFI-2 算法是水文模型不确定性研究的常用方法之一,它考虑了模型结构、输入数据、参数等因素的不确定性,并将率定后的参数范围通过 95 PPU 图使数据可视化,使模型精度和运算效率大大提高。SUFI-2 算法通过 P-factor(用 95 PPU 表示,即输出变量基于拉丁超立方随机抽样中分别在 2.5%和 97.5%置信水平下的累积分布,剔除了小于 2.5%和大于 97.5%模拟效果极不理想的情况,取值范围为 0 到 1)和 R-factor(表示 95 PPU 的上下限的平均距离与观测数据标准偏差的比值,取值范围为 0 到无穷大)两个指标来判断模型校准和不确定性分析结果。在 SUFI-2 算法中,先假设一个较大的不确定性范围,通过多次迭代运算并关注 P 和 R 因子变化,进而逐步缩小模型参数范围^[18],以 P-factor 和 R-factor 是否接近 1,0 来判断校准结果是否精确^[19]。

3.3 模型参数敏感性分析及取值

模型运行之后,输出的结果并不一定是最优值,还需要进行参数敏感性分析。模型径流模拟涉及的参数较多(26个),它们对径流模拟的影响程度各不相同,有些参数对径流量并不敏感。参数敏感性分析可去掉对模拟结果影响较小的参数,提高模型率定效率、减小模拟不确定性。敏感性分析时采用 t 值和 p 值检验其敏感度, t 值绝对值越大、 p 值越接近于 0,参数敏感性越强。

本研究基于 ArcGIS 10.2 平台,用 SWAT2012 构建乌裕尔河流域模型,将流域出口处依安水文站 1966—1987 年的径流数据分为三个部分,其中 1966 年,1967 年作为模型预热期,1968—1977 年为模型率定期,1978—1987 年为模型验证期。参数敏感性分析发现,径流模拟结果较为敏感的参数有 SCS 径流曲线系数 Cn2,基流 α 系数 ALPHA_BF、最大冠层蓄水量 CANMX 和土壤蒸发补偿系数 ESCO 等 12 个参数。因而,选取对模型径流有较大影响的 12 个参数进行自动率定,寻找能使模拟值与观测值最一致的参数;模型自动率定后,根据模拟与实测水文过程线的比较对部分参数进行了手动率定,率定参数最终结果见表 2。

4 结果与分析

4.1 年径流模拟

采用 1968—1987 年径流实测数据模拟发现,率定期年径流的相关系数 R^2 和模型效率系数 E_{ns} 都为 0.77;验证期年径流相关系数 R^2 为 0.83,模型效率系数 E_{ns} 为 0.75(表 3);年径流 R^2 和 E_{ns} 均大于 0.75,相对误差均小于 15%。根据以往研究结果认为, $Re < 30\%$ 、 $R^2 > 0.6$ 、 $E_{ns} > 0.5$ 时,模型的拟合精度令人满意^[20],当 R^2 和 E_{ns} 都大于 0.7,则表明模型精度较高^[21]。研究结果充分说明乌裕尔河流域率定期和验证期流域年径流模拟值与实测值拟合效果较好,模拟结果准确(图 3)。率定期 P 因子和 R 因子分别为 0.50,0.51,验证期 P 因子和 R 因子分别为 0.45,0.69,验证期相比率定期不确定性增大,原因可能是验证期降雨量较大的年份较多,姚海芳^[22]、Abbaspour^[23]

等研究表明,为了使模型达到较好的效果,率定期和验证期最好是丰水年和枯水年均匀分布。

表 2 模型参数最终值

参数名称	初始范围	最终范围
v_ALPHA_BF.gw	0~1	0.2~0.8
v_CH_K2.rte	0~150	50~150
v_CH_N2.rte	0~1	0.4~1
v_CANMX.hru	0~100	10~70
v_SMFMN.bsn	0~10	3~10
r_CN2.mgt	-0.2~0.2	-0.03~0.2
r_SOL_K(1).sol	-0.8~0.8	-0.5~0.3
r_SOL_Z(1).sol	-0.5~0.6	-0.4~0.3
v_ESCO.hru	0~1	0.3~1
a_REVAPMN.gw	-100~100	-50~60
v_SMTMP.bsn	-25~25	-19~10
v_SFTMP.bsn	0~5	2~5

注:(1) $r_{\text{}}$ 表示参数值乘以(1+给定值); $v_{\text{}}$ 表示参数值由给定值替代; $a_{\text{}}$ 表示参数值加上给定值。

表 3 年、月径流模拟结果评价

模拟变量		年均值		Re (100%)	R^2	E_{ns}	P -factor	R -factor
		实测值	模拟值					
年径流	率定期(1968—1977)	11.82	11.70	-1.02%	0.77	0.77	0.50	0.51
	验证期(1978—1987)	13.54	12.34	-10.12%	0.82	0.75	0.45	0.69
月径流	率定期(1968—1977)	11.76	12.40	2.9%	0.86	0.85	0.63	0.59
	验证期(1978—1987)	13.50	12.07	-10.6%	0.83	0.81	0.63	0.84

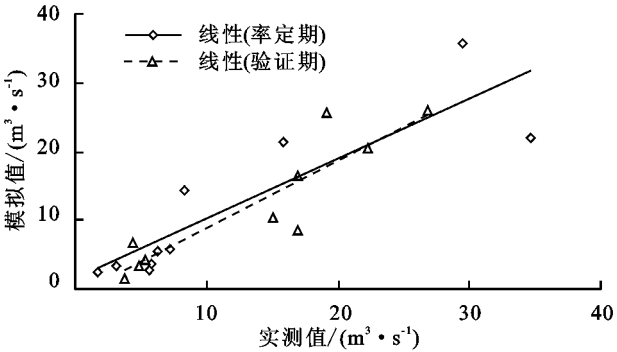
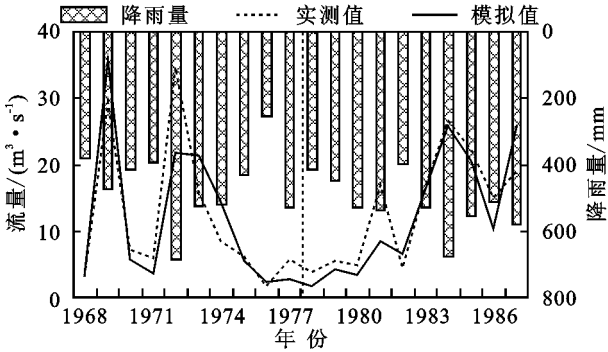


图 3 年径流量模拟值与实测值关系

4.2 月径流模拟

模型月径流模拟结果表明,率定期和验证期径流模拟值与实测值 Re 较小,均在 10% 左右,且模拟值与实测值的变化趋势基本相同。1968—1977 年率定期月径流的相关系数 R^2 和模型效率系数 E_{ns} 都为 0.85 以上, P 因子和 R 因子分别为 0.63,0.59。验证期(1978—1987)相关系数 R^2 为 0.83,模型效率系数 E_{ns} 为 0.81, P 因子和 R 因子分别为 0.63,0.84。流域在率定期和验证期相关系数和模型效率系数都高于 0.8,表明 SWAT 模型在乌裕尔河流域的径流模拟具有很好的适用性。但是验证期不确定性明显高于率定期(P 因子相同, R 因子率定期更接近于 0),

原因可能是验证期雨季降雨突增值较多,影响了模拟的精度。而且模拟过程中发现,随着 P 因子减小, R 因子也同时减小,观测值落在不确定性区间的数量减少,径流模拟的实际不确定性越来越大,这可能与周围塘坝、淤地坝、水库运行以及农业用水的影响有关。总体来说,SWAT 模型对乌裕尔河流域的月径流模拟效果较好,基本可以反映径流量的实际变化趋势,能够满足水资源管理的需要。

然而,模型对部分年内多个洪峰模拟效果不理想(图 4)。春季径流量模拟普遍偏低,夏季径流量普遍偏高,这可能是因为春季径流受融雪的影响,模拟时对蒸发、融雪等物理过程把握不清晰,导致模拟值偏

低;而夏季降雨量大,但模拟结果偏低,原因较多,仍需进一步分析。同样,验证期降雨突增的月份模拟值均偏低,如1977年、1981年、1984年和1986年雨季时期,降雨量分别为274,197,261,173 mm,雨季降雨骤增,模拟径流量明显低于实际径流量,SWAT模型对降水异常年份的模拟精度较差,这与宋艳华^[24]等人的研究结论相似,这也是许多模型的共性。

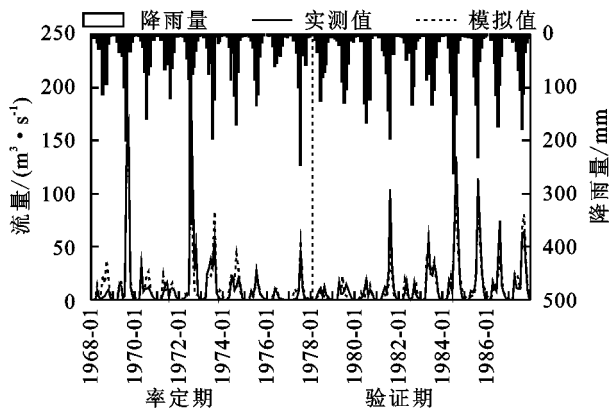


图4 1968—1987年19a间月径流模拟值与实测值比较曲线

5 结论

东北黑土区是我国的粮食主产区,但水土流失现象严重,流域产流模型模拟研究基础薄弱,严重影响了黑土区土壤侵蚀模型模拟研究。SWAT模型具有很强的物理基础,能比较准确地模拟流域径流过程的时空变化,目前在世界上许多地区都到了广泛的应用。为此,本文在乌裕尔河流域,构建了该区SWAT模型径流模拟数据库,采用SWAT-CUP和SUFI-2算法,结合手动参数调整,得到了模型参数最终值。

研究发现,SWAT模型对降水量大、产流量多的年份模拟效率高,但对于某些降雨突增的月份模拟较差,并且对具有双峰型径流时段的径流模拟效果不够理想。主要原因是对研究区融雪过程把握不清晰,今后在类似研究区开展工作时需要进一步考虑积雪的融化特性和极端降雨对径流乃至产沙的影响。

总体来看,SWAT模型模拟较为理想,模拟年径流和月径流时,率定期和验证期 R^2 值都大于0.8, E_{ns} 值也高达0.75,多年平均相对误差 $<15\%$ 。总之,该模型在东北黑土区的总体模拟效果还是令人满意的,该研究可为土地利用变化及其作用下的流域产沙研究提供很好的研究基础。

参考文献:

- [1] 姚苏红,朱仲元,张圣微,等.基于SWAT模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(1):175-180.
- [2] 李凤欢,罗澈葱,翟海涛,等. SWAT 对大沙河水库流域

径流模拟研究[J].水土保持研究,2014,21(2):87-93.

- [3] 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[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2010,10(2):191-199.
- [4] Ghoraba S M. Hydrological modeling of the simly dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model[J]. Alexandria Engineering Journal, 2015,54(3):583-594.
- [5] Wellen C, Arhonditsis G B, Long T, et al. Quantifying the uncertainty of nonpoint source attribution in distributed water quality models: A Bayesian assessment of SWAT's sediment export predictions[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:3353-3368.
- [6] Niazi M, Obropta C, Miskewitz R. Pathogen transport and fate modeling in the Upper Salem River Watershed using SWAT model[J]. Journal of environmental management, 2015,151:167-177.
- [7] Napoli M, Orlandini S. Evaluating the Arc-SWAT2009 in predicting runoff, sediment, and nutrient yields from a vineyard and an olive orchard in Central Italy[J]. Agricultural Water Management, 2015,153:51-62.
- [8] Bannwarth M A, Sangchan W, Hugenschmidt C, et al. Pesticide transport simulation in a tropical catchment by SWAT[J]. Environmental Pollution, 2014,191:70-79.
- [9] Wellen C, Arhonditsis G B, Long T, et al. Quantifying the uncertainty of nonpoint source attribution in distributed water quality models: A Bayesian assessment of SWAT's sediment export predictions[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:3353-3368.
- [10] 夏智宏,周月华,许红梅.基于SWAT模型的汉江流域径流模拟[J].气象,2009,35(9):59-68.
- [11] 庞俊,白晓华,张富,等.基于SWAT模型的黄土高原典型区月径流模拟分析[J].水土保持研究,2015,22(3):111-115.
- [12] 白淑英,王莉,史建桥,等.基于SWAT模型的开都河流域径流模拟[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):79-84.
- [13] 韩博,周丽丽,范昊明,等.蒲河流域氮污染负荷模拟及时空分布[J].中国水土保持科学,2013,11(2):90-96.
- [14] 李颖,王康,周祖昊.基于SWAT模型的东北水稻灌区水文及面源污染过程模拟[J].农业工程学报,2014,30(7):42-53.
- [15] 董李勤,章光新.嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J].水科学进展,2013,24(2):177-183.
- [16] 方海燕,蔡强国,李秋艳.东北典型黑土区乌裕尔河中游泥沙输移月年时间尺度特征[J].泥沙研究,2009(2):16-21.
- [17] 张余庆,陈昌春,杨绪红,等.基于SUFI-2算法的SWAT模型在修水流域径流模拟中的应用[J].水电能源科学,2013,31(9):24-28.

土地利用系统的本质相统一,这就为本研究结果和思想的推广创造了空间。并且,本文的结论表明,在这些区域,人为作用方向和强度对土地利用生态系统结构的演化尤为重要,因此,下一步以此为基础的土地利用生态系统结构的优化及区域生态安全格局的构建研究更为重要,这将对保障区域土地利用系统健康和实现区域可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 蒙古军,燕群,向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 590-596.
- [2] Haber W. Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology[J]. Ecological Research, 2004, 19(1): 99-106.
- [3] 傅伯杰,陈利顶,王军,等. 土地利用结构与生态过程[J]. 第四季研究, 2003, 23(3): 247-255.
- [4] 刘彦随. 区域土地利用系统优化调控的机理与模式[J]. 资源科学, 1999, 21(4): 60-65.
- [5] 蒙古军,赵春红,刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价:以鄂尔多斯市为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 578-590.
- [6] 林佳,宋戈,宋思铭. 景观结构动态变化及其土地利用生态安全:以建三江垦区为例[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5918-5927.
- [7] 马玉妍,马艳敏,于万辉,等. 松嫩平原土地利用生态安全评价与预测[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 262-266.
- [8] 喻锋,李晓兵,王宏,等. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价[J]. 地理学报, 2006, 61(6): 645-653.
- [9] 刘洋,蒙古军,朱利凯. 区域生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989.
- [10] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [11] 杨青生,乔纪纲,艾彬. 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析:以东莞市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1230-1239.
- [12] 游巍斌,何东进,巫丽芸,等. 武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6317-6327.
- [13] 肖笃宁,李秀珍,高峻,等. 景观生态学[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [14] 宫兆宁,张翼然,宫辉力,等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 77-86.
- [15] 王旭丽,刘学录. 基于 RS 的祁连山东段山地景观稳定性分析[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 665-669.
- [16] 肖化顺,付春风,张贵. 流溪河国家森林公园森林景观稳定性评价[J]. 中南林业科技大学学报:自然科学版, 2007, 27(1): 88-92.
- [17] 张昊,张伟华,李文忠,等. 环境水容量对黄家寨镇景观稳定性影响的研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 191-193.
- [18] 杨国安,甘国辉. 基于分形理论的北京市土地利用空间格局变化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(10): 131-137.
- [19] Fu B, Lu Y. The progress and perspectives of landscape ecology in China[J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(2): 232-244.
- [20] 杨春红,张正栋,田楠楠,等. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214.
- [21] 宋戈,林佳,孙丽娜. 黑龙江省东部垦区耕地利用效益时空分异特征[J]. 经济地理, 2010, 30(12): 2061-2066.
- [22] 孙奇奇,宋戈,齐美玲. 基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 234-238.

(上接第 47 页)

- [18] 魏丹,刘智勇,李小冰. SWAT 模型及 SUFI-2 算法在秃尾河上游流域径流模拟中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 200-206.
- [19] Rocha J, Roebeling P, Rial-Rivas M E. Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 48-58.
- [20] 袁宇志,张正栋,蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 989-998.
- [21] 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[J]. 生态学杂志, 2013, 32(1): 186-194.
- [22] 姚海芳,师长兴,邵文伟,等. 基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 139-144.
- [23] Abbaspour K C, Vejdani M, Haghighat S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT [J]. Modsim International Congress on Modelling & Simulation Land Water & Environmental Management Integrated Systems for Sustainability, 2007, 364(3): 1603-1609.
- [24] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应:以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 636-644.