

基于SWAT和CLUE-S模型的不同土地利用方式对排涝模数的影响

李娜^{1,2}, 王修贵^{1*}, 罗强¹, 王述海³, 柯志刚³

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 江西农业大学, 南昌 330045; 3. 荆州市水利局, 湖北 荆州 434020)

摘要:【目的】研究土地利用方式变化对排涝模数的影响, 优化区域排涝管理。【方法】选取湖北四湖流域螺山排区为研究区域, 将流域水文模型SWAT和土地利用变化模型CLUE-S联合应用, 设置了6种水旱比、5种水面率及5种城市化率的单因素变化(即其他2个因素不发生变化)条件下不同土地利用情景, 应用CLUE-S模型模拟生成各情景下的土地利用空间分布图, 建立了SWAT模型模拟不同土地利用情景的降雨径流过程, 分析了不同土地利用方式对排涝模数的影响。【结果】在相同的设计暴雨、其他因素维持现状条件下: 当水旱比由0增加到1时, 排涝模数减小了 $0.117 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$; 当水面率由0增加到20%时, 排涝模数减小了 $0.111 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$; 当城市化率由0增加到10%时, 排涝模数增加了 $0.104 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。排涝模数随着水旱比和水面率的增大均呈减小趋势, 随着城市化率的增大呈增大趋势。在相同设计暴雨、其他因素维持现状条件下: 当水旱比由0增加到0.2时, 排涝模数只减小了3.06%; 当水面率由0增加到10%时, 排涝模数减小了14.03%; 当城市化率由0增大到10%时, 排涝模数增大了16.67%。3种引起土地利用方式变化的因素中, 排涝模数对水面率和城市化率变化的敏感程度相当, 对二者的敏感程度明显大于水旱比。【结论】在未来区域规划中, 可以通过增大水旱比、增大水面面积和限制城市扩张来减轻排涝压力, 其中适当增大水面面积和限制城市扩张更加有效。

关键词: SWAT模型; CLUE-S模型; 排涝模数; 土地利用方式

中图分类号: S276.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20180259

李娜, 王修贵, 罗强, 等. 基于SWAT和CLUE-S模型的不同土地利用方式对排涝模数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 76-83.

0 引言

排涝模数是确定排涝工程的重要指标, 国内外学者对其计算方法做了很多研究。希腊、西班牙、意大利和法国等国家采用连续法、运动法和综合流量过程线法(SCS)等计算排涝模数^[1], 均取得了很好的效果。国内计算排涝模数有平均排除法^[2]、经验公式法^[3]、水量平衡法^[4]、单位线法^[5]、推理公式法^[6]等。也有很多学者用模型模拟降雨径流过程, 计算排涝模数。其中, SWAT是1994年由美国农业部(USDA)农业研究中心Jeff Arnold博士开发的分布式水文模型^[7]。SWAT模型结构简单、操作方便、模拟精度较高, 故在世界范围内得到了广泛应用。吕乐婷等^[8]、王苗等^[9]分别将SWAT模型应用于东江流域、洪湖流域分析其径流过程, 取得了较好的模拟效果。吴迪等^[10]、宋兰兰等^[11]应用SWAT模型分别研究未来气候变化、土地利用类型变化对非点源污染的影响。王修贵等^[12]将SWAT模型应用于模拟湖北四湖地区旱地改水田、渔作养种以及暗管排水3种措施综合利用和涝渍地的治理不同方式的组合对排涝模数的影响, 并比较了不同措施对排涝模数影响的大小, 为该地涝渍地治理方式和涝渍灾害治理提供了依据。SWAT模型是针对自然流域所开发的模型, 随着人类活动的影响加剧, 下垫面及产汇流特性发生变化, SWAT模型的应用受到一定的限制。目前, 有很多学者对SWAT模型进行了改进并取得了较好的模拟效果。桑学锋等^[13]针对中国人类活动强烈的流域水循环特

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2018YFC1508301); 国家自然科学基金项目(51379153, 50979074)

作者简介: 李娜(1992-), 女, 江西赣州人。助教, 硕士, 主要从事农田排水方面研究。E-mail: lina@jxau.edu.cn

通信作者: 王修贵(1962-), 男, 湖北广水人。教授, 博士, 主要从事农田排水及水管理方面研究。E-mail: wangxg@whu.edu.cn

点,对SWAT模型进行了灌溉和人工耗、用水模块的开发和改进,结果表明改进后的SWAT模型模拟精度明显高于原模型的。罗运祥等^[14]在将SWAT应用于江西省赣江下游典型平原圩区蒋巷联圩时,提出了改进SWAT模型子流域概化方法,使模型水量模拟相关系数和效率系数均达到了0.8以上。李硕等^[15]将SWAT模型应用于太湖流域湖西区(平原河网区)时采用概化、打断的方式将交叉、环状河网处理成单一的枝状河网,采用添加“虚拟水库”的方式来模拟人工圩区内外的水量交换,对SWAT模型加以改进,取得了很好的模拟效果。

CLUE-S模型是荷兰瓦赫宁根大学由Verburg等组成的“土地利用变化和影响”研究小组在CLUE模型的基础上开发的,最初是针对大尺度区域的模拟土地利用变化空间分布模型^[16]。CLUE-S模型自推出以来,在土地利用规划、管理和不同土地利用方式对流域经济社会的影响预测等方面得到广泛应用。国内外学者多应用CLUE-S模型模拟不同土地利用情景,模拟未来土地利用变化情景^[17-20]。

国内外有少部分学者将SWAT模型和CLUE-S模型结合起来解决一些在土地利用方式发生变化的基础上的水文问题。LIU等^[21]、Zhang等^[22]和孙丽娜等^[23]分别将耦合的SWAT模型和CLUE-S模型应用到辽宁省、北京市和吉林省的流域,分析了不同土地利用情景下非点源污染程度的变化情况,并得出了土地利用方式改变会对非点源污染有一定影响的结论。张凌等^[24]和韩洁春等^[25]耦合了SWAT模型和CLUE-S模型,分别分析了不同土地利用情景下黑河的河川径流量变化和未来土地利用预测下的水文响应,认为土地利用方式会对径流量有影响。

目前,大部分的专家学者单独运用SWAT模型和CLUE-S模型来分析研究水文问题和土地利用方式变化问题,而将二者联合应用来研究土地利用方式变化下的水文响应的较少。兹以湖北省四湖流域螺山排区为研究对象,将SWAT模型和CLUE-S模型耦合应用,模拟假设未来不同土地利用变化情景下流域的排涝模数变化情况,为排涝工程设计提供一定的建议。

1 研究区域概况及基础数据

1.1 研究区域概况

湖北四湖流域属亚热带季风湿润区,年平均降雨约1 200 mm,汛期一般在5—9月,在汛期极易发生洪涝灾害,给涝区的居民带来严重的损失。螺山排区是该流域的一个子排区,位于监利县东南部洪湖之滨地势最低的地区,自西北向东南方向倾斜,地面高程23.00~28.00 m。螺山排区东抵螺山电排渠,西部和南部抵长江干堤,北部以四湖总干渠和洪排主隔堤为界,排水区面积935 km²。主要排水干沟有螺山干沟和杨林山干沟2条,干沟出口通过泵站提排至长江,杨林山泵站装机容量10×800 kW,流量80 m³/s,螺山泵站装机容量6×2 200 kW,流量150 m³/s。主要支级排水沟渠11条。

1.2 基础数据

SWAT模型数据主要包括DEM数据、土地利用数据、土壤数据、气象数据。

DEM数据来自于覆盖江汉平原的Landsat-TM5影像,采用30 m×30 m ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)GDEM(Global DEM)数据。螺山排区的DEM见图1,其中DEM高程单位为m。

研究区域土壤基础数据来源于中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>)。研究区域土壤类型共有2种:水稻土(SDT)和潮土(CT),水稻土剖面为Aa—Ap—W—C型,Aa为耕作层、Ap为犁底层、W为潜育层、C为母质层。潮土剖面为A₁₁—Cu型,A₁₁为旱耕层、Cu为母质层。

气象数据在中国气象数据共享服务网下载(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),选取荆州、监利、洪湖3个国家站作为天气发生器中的气象站站点。降水量除使用以上3个国家站的降水之外,在四湖流域的34个雨量站中选取研究区域周围的沙市、习口、福田寺、螺山的逐日降水数据。

现状土地利用数据采用2011年的Landsat-TM5影像,用ENVI对TM影像进行土地利用类型重分类和分类后处理后生成螺山排区的土地利用类型图,如图2所示;土地利用类型面积统计见表1。根据未来土地利用的可能,在现状的基础上设置6种不同水旱比、5种不同水面率和5种不同城市化率,并利用CLUE-S模型预测其土地利用的空间分布图数据。其中,水旱比定义为水田面积与耕地总面积之比,现状为0.69,模拟设置的水旱比为0、0.2、0.4、0.6、0.8和1.0;水面率为区域水面面积与区域国土总面积之比,现状为1.74%,考虑到正在实施的退田还湖计划和养殖面积的扩大,模拟设置为0、5%、10%、15%和20%;城市化率为公路、城镇等建设用地面积占区域国土总面积之比,现状为5.27%,模拟设置为0、2.5%、5%、7.5%和10%。模拟时采用

单因素变化,其他因素维持现状。

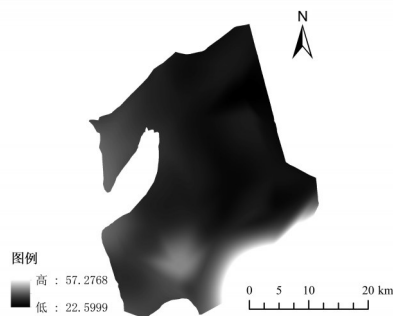


图1 螺山排区DEM图

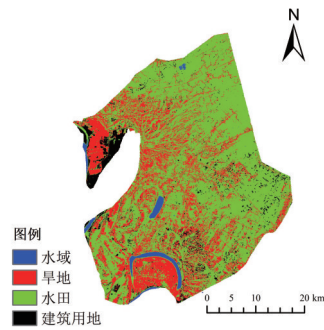


图2 螺山排区土地利用类型图

表1 现状土地利用类型面积

km²

现状年份	水域	旱地	水田	建设用地	合计
2011	16.28	267.64	601.82	49.26	935

2 建立CLUE-S模型模拟土地利用空间分布

2.1 CLUE-S模型结构

CLUE-S模型分为独立于模型的非空间分析模块和空间分析模块2部分。非空间模块通过分析人口、自然、经济等土地利用变化驱动因子,应用统计工具SPSS计算各个土地利用驱动因子的驱动力回归系数。空间分析模块利用导入的土地利用栅格图、土地转换弹性及预测的土地利用需求等参数分配土地栅格单元。然后根据土地利用需求和各制约因素的共同作用,生成土地利用空间分配图。

2.2 CLUE-S模型的空间分析

在CLUE模型中,依据所选的能够引起土地利用景观格局发生变化的驱动力因子,测算某一种土地利用类型空间适宜性概率,其计算式为:

$$\log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_iX_i, \tag{1}$$

式中: P_i 为每个栅格单元出现某一土地利用类型*i*的概率; X_i 为各个驱动因子; β_i 为各驱动因子的回归系数,其中 β_0 是常量。

采用Pontius提出的ROC(relative operating characteristics)方法^[26]评价式(1)回归结果的检验。在本研究中,每种地类ROC均大于0.7,表明所选取的驱动因子具有较好的解释能力,回归模型效果较好。

2.3 CLUE-S模型的动态模拟

空间变化动态模拟预测以初期土地利用格局图和各土地利用需求预测数量为基础,根据土地利用转换规则、转换弹性和土地利用空间分布适宜概率^[27]计算土地利用类型转变总概率,通过多次迭代计算依据对总概率的高低对土地利用类型进行空间分配。限于篇幅,土地利用的相关参数(转换规则矩阵、土地利用弹性系数^[27]等)从略,土地利用转换规则的迭代过程如图3所示。第*i*个栅格单元分配予土地利用类型*u*的总概率为:

$$TPORP_{i,u}=P_{i,u}+ELAS_u+ITER_u, \tag{2}$$

式中: $P_{i,u}$ 为根据式(1)得到的第*i*个栅格单元上为土地利用类型*u*的概率。 $ELAS_u$ 为根据土地利用类型转化规则设置的土地利用类型弹性系数, $ITER_u$ 是土地利用类型*u*的迭代变量。

2.4 CLUE-S模型检验

采用Kappa指数系列方法分析CLUE-S模型的模拟精度^[28-29],计算式为:

$$Kappa=\frac{(P_0-P_c)}{(P_p-P_c)}, \tag{3}$$

式中: P_0 表示正确模拟得到的比例; P_c 代表随机情况下所期望得出的正确模拟比例; P_p 为在理想分类情况下出现正确模拟的比例;数值越靠近1代表模拟结果精度越高^[30]。

选取2001年的土地利用图作为基准期土地利用图,用ArcGIS中的空间分析模块,将2011年的模拟图和2011年解译得到的土地利用空间分布图进行相减运算,计算正确模拟的栅格个数。进而可得 $Kappa$ 指数为0.78,模拟效果较为良好,证明使用CLUE-S模型可以较好地模拟螺山排区土地利用情景变化。

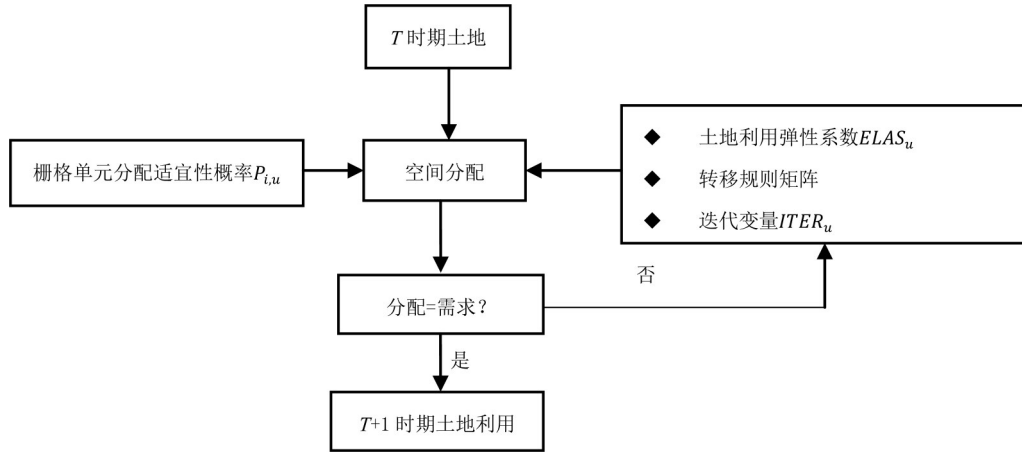


图3 土地利用类型变化动态模拟流程

2.5 不同方案下土地利用情景图的生成

将设置的不同水旱比、水面率和城市化率土地利用方案的需求文件输入CLUE-S模型中,运行之后便可得到ASCII格式的结果文件,将其转化成栅格文件,便可得到不同方案下的土地利用图,因篇幅所限,现给出水旱比为0.6、水面率为0.15和城市化率为0.075的土地利用图如图5—图7所示。将生成的土地利用图作为运行SWAT模型的输入资料,便可得出每种土地利用方案下的排涝模数。

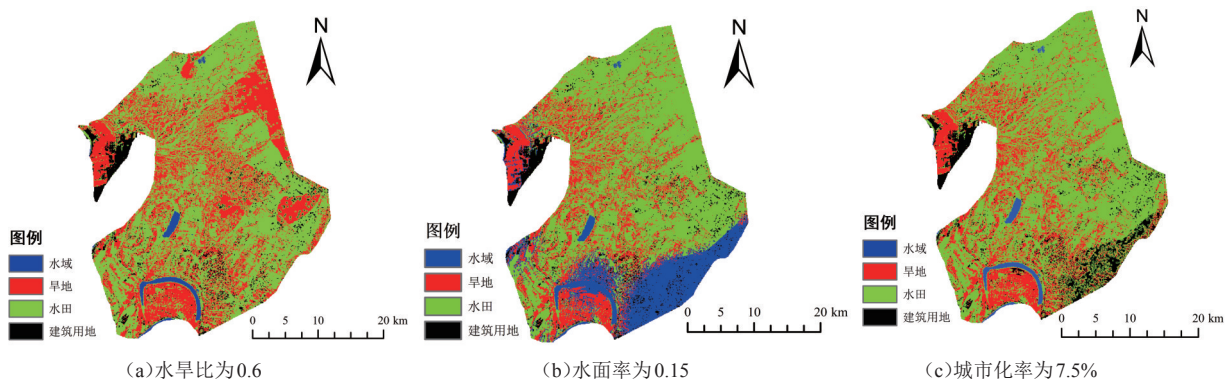


图4 不同方案下的土地利用分布图

3 建立SWAT模型模拟降雨径流过程

3.1 SWAT模型简介及原理

SWAT模型是在SWRRB模型的基础上逐步发展起来的^[7],将SWRRB模型与ROTO模型(河道演算模型)整合成了SWAT模型。水文循环基于水量平衡方程^[31]进行计算式为:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}), \quad (4)$$

式中: SW_t 为土壤最终含水率(mm); SW_0 为第 i 天的土壤初始含水量(mm); t 为时间(d); R_{day} 为第 i 天降水量(mm); Q_{surf} 为第 i 天地表径流量(mm); E_a 为第 i 天蒸散发量(mm); W_{seep} 为第 i 天从土壤剖面进入包气带的水量(mm); Q_{gw} 为第 i 天回归流的水量(mm)。

SWAT模型具有分布运算特征,首先通过最小给水面积阈值和最陡坡度原则对研究区域进行子流域划分^[32]。每个子流域进行独立的汇流演算,出口断面流量即为出口处所在子流域的出流量。再对土壤类型、土地利用类型和坡度等级进行重分类和叠加分析,根据不同下垫面情况在不同子流域里的分布,将空间结构划分出的子流域进一步划分成更小的地块单位水文响应单元^[32](HRU),计算每个HRUs尺度上的水循环特

征,并通过河网将若干个HRUs构成的子流域进行有机连接。SWAT 计算的流域水文过程可以分为水循环的陆面部分(坡面产流和汇流部分)和水循环的水面部分(河道汇流部分),前者控制着每个子流域内主河道的径流、泥沙、污染物等的输入量,后者决定着这些物质从河网向流域出口的输移过程。平原区的地形地貌和气候特征与山丘区不同。螺山排区,属于典型的平原湖区地形。流域内河网密布,排水沟和人工渠道等水利工程比较发达,频繁的人类活动导致产汇流的机制与自然流域有很大的差距。而在平原湖区采用模型默认的根据高程提取河网的方法相对实际情况误差很大。因此,在对平原湖区的空间结构划分上,采用“burn-in”算法对DEM进行凹陷化处理^[33],使生成的河流水系更加符合实际情况。

3.2 模型参数率定与验证

SWAT 模型参数率定有很多方法,本研究区域螺山排区的出口处径流量为泵站抽排流量,与天然流量存在很大差距。先利用模型自带的参数敏感性分析模块进行参数敏感性分析,选取对径流模拟影响较大的几个参数进行率定。采用模型自带的率定工具 SCE(Shuffled Complex Evolution)优化算法进行参数率定。

螺山排区自然的径流过程经过产回流后在排水区下游经过排水沟的调蓄,通过泵站抽排的方式进入长江,分别采用观测系列较长的 2012 年和 2013 年的泵站流量数据来进行模型率定和验证,采用一定时间单元(连续若干天抽排划分为 1 个时间单元。2012 年共有 38 d 抽排,划分为 6 个时间单元。2013 年共有 37 d 抽排,划分为 9 个时间单元。以内泵站实际的抽排总水量和以 SWAT 模型模拟的排区出口的自由排水总量误差最小的原则进行参数的率定和验证。率定的参数包括浅层地下水回流系数($GWQMN$)、基流系数($ALPHA_BF$)、SCS 径流曲线系数($CN2$),土壤蒸发补偿系数($ESCO$)、有效田间持水量(SOL_AWC),其中 SCS 径流曲线数对模型模拟结果影响最大,是敏感性最高的参数,在不同土地利用类型采用不同的参数值,其他参数则进行统一的率定,率定结果如表 2、表 3 所示。

表 2 螺山排区 $CN2$ 率定结果

土地利用类型	水田	旱地	建筑用地	水域	林地
$CN2$	82	69	88	94	55

表 3 螺山排区其他参数率定结果

模型参数	$ALPHA_BF$	$ESCO$	SOL_AWC/mm	$GWQMN$
率定值	0.6	0.5	0.17	450

模型率定和验证的评价指标选取相关系数(R^2)、Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{NS})和相对误差(Re)。其计算式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}, \tag{5}$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2}, \tag{6}$$

$$Re = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_m)}{\sum_{i=1}^n Q_m}, \tag{7}$$

式中: Q_m 为观测值; Q_s 为模拟值; $\bar{Q}_m$ 为观测值的平均流量; $\bar{Q}_s$ 为模拟值的平均流量; n 为时间长度。根据这 3 个评价指标的综合效果,一般认为 $R^2>0.7$, $E_{NS}>0.6$, $|Re|<20\%$ 时模型的拟合精度令人满意。

螺山排区率定和验证期的相关系数(R^2)、Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{NS})和相对误差(Re)见表 4。

由表 4 可知,率定期的相关系数 R^2 为 0.84, Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NS} 为 0.95, 相对误差 Re 为 12%, 表明率定期的流量模拟效果较好。

表 4 螺山排区模拟与实测数据

指标	R^2	E_{NS}	Re
率定期(2012 年)	0.84	0.95	0.12
验证期(2013 年)	0.79	0.74	0.15

4 结果与分析

将每种方案下生成的土地利用图加载到SWAT模型里面,分别建立SWAT模型,模拟流域的降雨径流过程,将其径流结果输出,流域出口处径流量除以排区面积即得到排涝模数。各方案计算得到的排涝模数结果如表5—表7所示。

表5 各水旱比方案的排涝模数

水旱比	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
排涝模数/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	0.495	0.465	0.450	0.443	0.419	0.378

表6 各水面率方案的排涝模数

水面率/%	0	5	10	15	20
排涝模数/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	0.442	0.411	0.380	0.351	0.331

表7 各城市化率方案的排涝模数

城市化率	0	2.5	5.0	7.5	10
排涝模数/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	0.384	0.411	0.424	0.448	0.488

4.1 水旱比、水面率和城市化率单因素变化对排涝模数的影响

由表5可知,其他因素维持现状条件下,水旱比以0.2为1个阶梯,由0增大到1的过程中,排涝模数由 $0.495 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 递减到 $0.378 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,排涝模数减小了 $0.117 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,排涝模数随水旱比的增大呈减小趋势。其原因可能是水田的滞蓄水深大,能够容蓄更多的降雨,因而产流量减小,排涝模数降低。因此,湖区应利用水资源相对丰富的优势,发展水稻种植、水产养殖。由表6可知,其他因素维持现状条件下,水面率以5%为一个阶梯,由0增大到20%的过程中,排涝模数由 $0.442 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 递减到 $0.331 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,排涝模数减小了 $0.111 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,排涝模数随水面率的增大呈减小趋势。其原因可能是区域内水面面积增加则蓄水能力增加,有利于减轻排涝压力。随着社会经济发展,研究区域水面率有减小的趋势,应倡导退田还湖,既保护生态环境又减轻排涝压力。由表7可知,在其他因素维持现状条件下,城市化率以2.5%为一个阶梯,由0增大到10%的过程中,排涝模数由 $0.384 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 递增至 $0.488 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,排涝模数增加了 $0.104 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,排涝模数随城市化率的增大呈增大趋势。研究区域城市化进程加快,地面硬化率增大,产流能力增加,排涝模数增大,增大排涝压力。基于此现实情况,应合理控制研究区域的城镇面积,以此来减轻排涝压力。

4.2 水旱比、水面率和城市化率对排涝模数影响程度大小分析

分析螺山排区水旱比、水面率和城市化率对排涝模数影响程度大小可知,当水旱比由0增加到0.2时,排涝模数由 $0.495 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 减小到 $0.465 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,只减小了3.06%;当水面率由0增加到10%时,排涝模数由 $0.442 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 减小到 $0.380 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,减小了14.03%;当城市化率由0增大到10%时,排涝模数由 $0.384 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 增大到 $0.448 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,增大了16.67%。水旱比增加幅度是水面率和城市化率的2倍,但相应的排涝模数的变动幅度却只是水面率和城市化率变化条件下排涝模数变化幅度的20%左右。由此可知,排涝模数对水面率和城市化率的敏感程度相当,明显大于水旱比。水田占耕地面积的多少会引起排涝模数的变化,但是其变化范围不大,如果要减轻区域排涝压力,相对于增大水旱比来说更为有效的办法是适当增大水域面积或者是限制城市的扩张、保留天然下垫面条件。

5 讨论

研究发现排涝模数均随水旱比和水面率的增大而减小,随城市化率的增大而增大,水面率和城市化率对排涝模数的影响大于水旱比。郑雄伟等^[4]用水量平衡法研究了平原地区城镇圩区的排涝模数,建立了排涝模数与水面率和地面硬化率的定量关系式,得出水面率增加排涝流量减少,地面硬化率增加排涝模数增加的结论,这与本研究得出的规律相同。其原因可能是本研究区域和郑雄伟等^[4]研究区域都是平原地区,虽然用了不同的排涝模数计算方法,但是排涝模数随水面率和地面硬化率的变化具有相同的规律。冯宝平等^[34]建立SWAT模型来研究土地利用方式对径流和泥沙的影响,得出了林地转化为建设用地时对径流和泥沙流失量加大的结论。当林地转化为建设用地时本质上是增大了地面硬化率,因此径流量增大,排涝模数增大。这与本文研究得出的规律相同。罗文兵等^[35]在研究下垫面变化对排涝模数影响时得出了2条结论:

一是排涝模数随水旱比和水面率的增大而减小,而随地面硬化率的增大而增大。这与本研究结果相同。其原因可能是本文研究区域与罗文兵研究区域均为湖北省四湖流域,虽然采用的排涝模数计算方法不一样,但是各自在同一种计算方法之下排涝模数随水旱比、水面率和地面硬化率之间的整体规律相同;二是水面率对排涝模数的影响大于水旱比和地面硬化率。这与本文结论存在一些差异,本文研究得出水面率和城市化率对排涝模数的影响大于水旱比,而罗文兵等^[35]得出水面率对排涝模数的影响大于水旱比和地面硬化率。这可能与排涝模数计算方法之间存在偏差有关系,罗文兵等^[35]采用的是经验公式法计算排涝模数,而本文采用的是建立 SWAT 模型模拟降雨径流过程计算排涝模数。不同排涝模数计算方法之间在研究同一因素对排涝模数的影响规律时是相同的,但是在比较不同因素对排涝模数的影响程度对比时就有了微小差异。

需要指出的是,SWAT 模型适用于天然流域,模拟的是天然径流过程,而螺山排区的出口流量是依靠泵站抽排得到的,在模型率定过程中采用的是水量平衡原则。因此,在往后的研究中可以考虑对 SWAT 模型进行改进,添加泵站到模型中可能会使得模型模拟的精度更高;运用 CLUE-S 土地利用模型时驱动因子因为资料有限并没有考虑到社会因子,在往后的研究中考虑社会因子会使得模型的模拟可能精度更高。

6 结 论

1)利用 CLUE-S 模型模拟土地利用空间分布得出 $Kappa$ 指数为 0.78,模拟效果较为良好,证明使用 CLUE-S 模型可以较好地模拟螺山排区土地利用情景变化。建立 SWAT 模型模拟不同土地利用情景下降雨径流过程,得出率定期(2012 年)和验证期(2013 年)的 R^2 和 E_{ns} 均大于 0.7,说明利用 SWAT 模型模拟螺山排区的降雨径流过程有良好的适用性。

2)排涝模数随水旱比增大而减小,随水面率增大而减小,随城市化率增大而增大;水面率和城市化率对排涝模数的影响大于水旱比。

3)通过适当增大水田面积、发展水产养殖来增大区域水旱比,减轻排涝压力;适当增大区域水面面积、限制城市扩张来减轻区域排涝压力。相对于增大水田面积来说,更为有效的方法是增大区域水面面积和限制城市扩张面积。

参考文献:

- [1] 许迪. 平原地区明渠排涝流量的两种计算方法[J]. 水利水电技术, 1994(11):52-55.
- [2] 王燕. 安徽省沿江圩区农田排涝模计算[J]. 水利经济, 2000(4):40-45.
- [3] 王国安, 贺顺德, 崔鹏, 等. 排涝模数法的基本原理和适用条件[J]. 人民黄河, 2011, 33(2):21-24, 26.
- [4] 郑雄伟, 周芬, 侯云青, 等. 城镇圩区排涝模数与合理水面率研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(9):90-94.
- [5] 张建新, 惠士博, 谢森传. 利用降雨入渗产流分析原理和 Nash 单位线汇流方法进行排涝模数计算的研究[J]. 水文, 2002(3):1-4, 21.
- [6] 王国安, 贺顺德, 李荣容, 等. 论推理公式的基本原理和适用条件[J]. 人民黄河, 2010, 32(12):1-4.
- [7] ARNOLD J G, WILLIAMS J R, MAIDMENT D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171-183.
- [8] 吕乐婷, 彭秋志, 郭媛媛, 等. 基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10):1 746-1 757.
- [9] 王苗, 刘敏, 夏智宏. 基于 SWAT 模型的洪湖流域供水资源模拟研究[J]. 气象科学, 2014, 34(5):515-521.
- [10] 吴迪, 崔远来. 塘堰调控对未来气候变化下典型灌区氮负荷排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2):20-24.
- [11] 宋兰兰, 郝庆庆, 王文海. 基于 SWAT 模型的复新河流域非点源污染研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4):94-98.
- [12] 王修贵, 张华彬, 罗文兵, 等. 湖北四湖流域涝渍地综合利用与治理对排涝模数的影响[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(4):1-7.
- [13] 桑学锋, 周祖昊, 秦大庸, 等. 改进的 SWAT 模型在强人类活动地区的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(12):1 377-1 383, 1 389.
- [14] 罗运祥, 苏保林, 张倩, 等. 基于 SWAT 的平原圩区受控水文过程识别和模拟[J]. 资源科学, 2013, 35(3):594-600.
- [15] 李硕, 赖正清, 王桥, 等. 基于 SWAT 模型的平原河网区水文过程分布式模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6):106-112.
- [16] 任梅芳. 基于 CLUE-S 模型的南宁市土地利用景观格局时空动态变化模拟研究[D]. 南宁:广西师范学院, 2012.
- [17] ZHANG Liping, ZHANG Shiwen, ZHOU Zhiming, et al. Spatial distribution prediction and benefits assessment of green manure in the Pinggu District, Beijing, based on the CLUE-S model[J]. 农业科学学报(英文版), 2016(2):465-474.
- [18] 戴声佩, 张勃. 基于 CLUE-S 模型的黑河中游土地利用情景模拟研究:以张掖市甘州区为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(2):336-348.
- [19] LIU Junhong, GONG Jun, CHEN Jianhong. Spatial pattern simulation on land use change in Nanchang based on CLUE-S model[J]. Mechanics and Materials, 2013(295/298):2 523-2 527.
- [20] 冯仕超, 高小红, 顾娟, 等. 基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟[J]. 生态学报, 2013, 33(3):985-997.
- [21] LIU Miao, LI Chunlin, HU Yuanman, et al. Combining CLUE-S and SWAT Models to forecast land use change and non-point source pollution impact at a watershed scale in Liaoning province, China[J]. 中国地理科学(英文版), 2014(5):540-550.

- [22] ZHANG Ping, LIU Yunhui, PAN Ying. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013(58):588-595.
- [23] 孙丽娜, 卢文喜, 杨青春, 等. 东辽河流域土地利用变化对非点源污染的影响研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8):1 459-1 467.
- [24] 张凌, 南卓铜, 余文君. 基于模型耦合的土地利用变化和水文响应多情景分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(6):829-839.
- [25] 韩洁春. 罗玉沟流域土地利用变化的水文响应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [26] PONTIUS R G, SCHNEIDER L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001(85):239-248.
- [27] 丁庆龙. 基于CLUE-S模型土地利用变化情景模拟研究[D]. 河北: 河北农业大学, 2014.
- [28] JOCOB Cohen. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales[J]. Educational and Psychological Measurement, 1960(1):37-46.
- [29] 布仁仓, 常禹, 胡远满, 等. 基于Kappa系数的景观变化测度: 以辽宁省中部城市群为例[J]. 生态学报, 2005, 25(4):778-784, 945.
- [30] 刘淼, 胡远满, 常禹, 等. 土地利用模型时间尺度预测能力分析: 以CLUE-S模型为例[J]. 生态学报, 2009, 29(11):6 110-6 119.
- [31] 陈军锋, 陈秀万. SWAT模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004(2):265-270.
- [32] 王学. 基于SWAT模型的白马河流域土地利用/覆被变化的水文效应研究[D]. 山东: 山东师范大学, 2012.
- [33] 项瑛, 张余庆, 程婷. 基于SWAT模型的里下河平原区水文模拟[J]. 资源科学, 2015, 37(6):1 181-1 189.
- [34] 冯宝平, 梁行, 曾灼. 基于SWAT模型的济南南部山区土地利用优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5):121-128.
- [35] 罗文兵, 王修贵, 罗强, 等. 四湖流域下垫面改变对排涝模数的影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(2):275-281.

Using SWAT and CLUE-S Models to Evaluate the Effect of Land Use on Drainage Modules

LI Na^{1,2}, WANG Xiugui^{1*}, LUO Qiang¹, WANG Shuhai³, KE Zhigang³

(1. National Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science of Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Jingzhou Water Conservancy Bureau, Jingzhou 434020, China)

Abstract: 【Objective】Change in land use could alert water movement in a catchment and this paper studies its impact on drainage modules using the SWAT and CLUE-S models in order to optimize catchment management. 【Method】The study focused on Luoshan drainage area in the Four-lake Watershed in Hubei province. The watershed hydrologic model SWAT was combined with the land use change model CLUE-S to analyze the effect of different land uses on drainage modules in this area. We considered six ratios of paddy-field area to dryland area, five water surface ratios and five urbanization ratios, and studied how the drainage modules respond to change in one single factor by keeping other factors unchanged. We used the CLUE-S model to simulate the land use variation under each scenario, and the SWAT model to simulate the associated runoff and the effect of land use on drainage modules. 【Result】Under the same rainstorm with other factors remaining the same, when the ratio of paddy field area to dryland area increased from 0 to 1 the drainage modulus decreased by $0.117 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, while when the water surface ratio increased from 0 to 20% the drainage modulus decreased by $0.111 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$. Increasing the urbanization ratio from 0 to 10% reduced the drainage modulus by $0.104 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$. The drainage modulus decreased as the ratio of paddy field area to dryland area or water surface ratio increased, but increased with urbanization ratio. Under the same rainstorm with other factors remaining the same as they are, ① increasing the ratio of paddy field area to dryland area from 0 to 0.2 decreased the drainage modulus by 3.06%; ② increasing the water surface ratio from 0 to 10% decreased the drainage modulus by 14.03%; ③ increasing the urbanization ratio from 0 to 10% increased the drainage modulus by 16.67%. Among all three land use changes, the drainage module is more sensitive to change in water surface ratio and urbanization ratio. 【Conclusion】The drainage pressure could be alleviated by increasing paddy field area or water surface area or limiting urban expansion, with increasing water surface area and limiting urban expansion being more effective.

Key words: SWAT model; CLUE-S model; drainage modulus; land use

责任编辑: 陆红飞