

基于SWAT模型的济南南部山区土地利用优化研究

冯宝平, 梁行*, 曾灼

(河海大学, 南京 210098)

摘要:【目的】维护南部山区水源补给区良好的水循环条件和功能并建设济南水生态文明城市。【方法】应用SWAT分布式水文模型,选择 Re 、 Ens 和 R^2 三项指标进行模型率定分析,再以 20 km^2 为步长模拟土地利用变化与径流和泥沙的关系,在此基础上建立以水文、水保和经济为目标的多目标土地利用结构优化模型。【结果】SWAT模型3项率定指标均满足要求,模型对研究区的径流和泥沙模拟具有较好的适用性;年径流变化量和年泥沙变化量与土地利用转化面积关系可以用二次函数式表示,单位面积林地转变为建设用地时,径流和泥沙流失量增加最大,草地转变为建设用地和耕地对径流影响最小,耕地转变为建设用地对泥沙流失影响最小;现状年和规划年的土地利用结构还应该进一步优化,林地、草地、耕地和建设用地面积分别为 370.70 、 158.35 、 375.92 和 45.21 km^2 ,为最优土地利用结构。【结论】模型在济南南部山区适用性良好,能为南部山区合理利用土地资源、保护生态环境,保证济南水生态文明建设提供决策依据。

关键词:南部山区; SWAT模拟; 土地利用结构; 多目标优化

中图分类号:F301.2

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0546

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.

0 引言

随着社会经济的快速发展,土地资源正面临着发展与保护的双重任务、供给与需求的双重矛盾、资源利用与生态保护的双重压力^[1],粗放型的土地利用方式造成了土地资源浪费、农用地大量流失、生态环境恶化等诸多社会和环境问题^[2]。土地资源利用优化是一种复杂的多目标优化问题,需要根据区域土地的自然属性及社会经济状况,解决各类用地的数量分配和空间布局,这也是提高土地利用效率、促进土地资源可持续利用的一项十分迫切的任务。众多学者采用灰色理论、遗传算法、神经网络、系统动力学等多种数学方法开展了土地利用结构数量优化研究^[1,3],以及应用GIS、RS等空间分析技术进行土地利用空间优化布局的研究^[4]。这类研究综合考虑了土地利用数量、空间、效益的优化配置,但没有考虑土地利用对水文循环过程的影响,尤其对于生态环境脆弱地区得到的土地利用方案不尽合理。土地利用变化引起流域下垫面条件改变,从而影响流域水文循环过程,这也是人类活动作用于自然与环境的一种直接表现形式^[5]。SWAT(Soil Water Assessment Tool)目前已被国内外学者广泛应用于流域水文过程模拟,大量研究表明SWAT在模拟复杂流域产流、产沙方面具有较高的精度^[6-8]。

济南南部山区是济南市泉水主要的直接补给区和重要的生态、水源涵养区^[9]。随着城镇化进程的加快,城市空间迅速拓展,呈现出向南部山区逐步扩张的趋势。南部山区地下水渗漏区不断受到侵占,据统计南部山区地下水直接补给区面积已经减少15%以上^[10]。此外,南部山区还面临水土流失严重、环境污染、生物多样性减少等问题,严重影响了当地生态环境状况。为了有效保护和合理利用济南南部山区土地资源,应用SWAT模型,根据近年土地利用方式变化情况,模拟南部山区土地利用变化对流域水文过程的影响规律,建立水文、水保和经济效益多目标土地利用优化模型,采用评价函数方法进行求解,提出合理的土地利用结构,为南部山区合理利用土地资源、保护生态环境以及济南水生态文明城市建设提供决策依据。

收稿日期:2017-09-04

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201401003)

作者简介:冯宝平(1976-),女,副教授,主要从事农业水土资源规划与管理研究。E-mail: fengbaoping@hhu.edu.cn

通信作者:梁行(1993-),女,硕士研究生,主要从事农业水土资源规划与管理研究。E-mail: liangxing@hhu.edu.cn

1 研究区概况

研究区位于济南市南部山区(36°14′—36°36′N, 116°49′—117°21′E),北至济南市中心城南边界,南至泰安界,西至历城、长清区界,东至章丘界,总面积 959.28 km²。研究区属暖温带大陆性季风气候,多年平均气温 13.7℃,年平均蒸发量 2 393 mm。多年平均降雨量 644.4 mm,降水年际、年内分布不均,多年平均降水量为 302.8~1 051.1 mm,6—9 月降水占全年的 76%。研究区位于泰山背斜的北翼,南依泰山,北临黄河,是济南泉水的重要补给区,如图 1 所示。沟谷、河道和洼地等地段灰岩裸露,溶隙、溶洞或落水洞等喀斯特地貌发育,形成了强地下水渗漏带,成为济南市泉水主要的直接补给区和重要的生态、水源涵养区。区内经流玉符河和北大沙河,其中玉符河发源于锦绣、锦阳、锦云三川,从南向北进入党家庄镇开始强烈渗漏;北大沙河发源于武家庄乡摩天岭,上游变质岩山区常年有水,中游为石灰岩丘陵,河床渗漏较大。

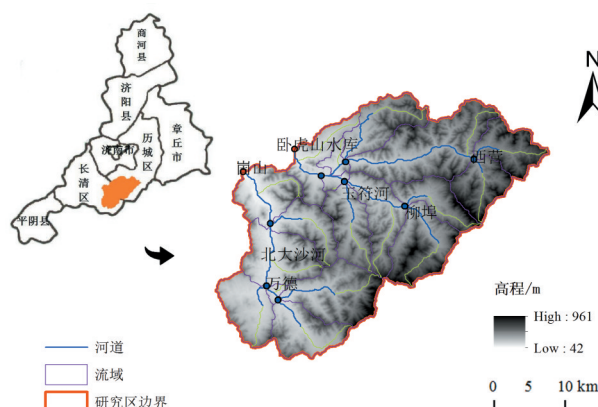


图 1 研究区概况

根据南部山区土地利用现状及各类土地对水文过程的影响特点,结合《土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2007)》,将南部山区分为耕地(含园地)、林地、草地、水域(即水域及水利设施用地)和建设用地(含其他用地)5 种类型。20 世纪 80 年代以来,研究区耕地面积逐年减少,草地和建设用地面积不断增加,林地呈现减少到 2000 年后持续增加的趋势,水域面积基本稳定。目前,耕地、林地和草地是优势土地利用类型,分别占全部土地的 38.18%、37.77%和 17.85%,水域和建设用地分别占 0.95%和 5.25%。2003 年山东省委常委扩大会议提出了“严格控制城市向南发展,将南部山区作为城市重点生态保护区”的“南控”方针。2010 年为贯彻落实科学发展观,积极实施“南控”战略,有效保护和合理利用南部山区资源,济南市政府正式批复实施《济南市南部山区保护与发展规划 2010—2020》(以下简称《规划》)。2012 年济南被确定为全国首个水生态文明试点市,积极开展南部山区水源涵养工作,维护地下水补给区良好的水循环条件与功能成为济南市水生态文明城市建设的重点工作内容之一^[1]。根据《规划》,南部山区基本农田保护区、地下水重点渗漏区、河湖水域等禁止一切与水源保护、生态保护无关的建设活动,总面积为 299.4 km²,规划到 2020 年建设用地不超过 5.30%,耕地达到 39.10%。

2 基于 SWAT 的土地利用结构优化模型建立

土地利用结构优化模型广泛应用于土地利用总体规划中,黄海^[12]以重庆市为例基于改进粒子群算法对土地利用配置进行优化,余德贵等^[13]基于碳排放约束对土地利用结构进行优化。通过合理分配土地资源使土地利用效率最大化,主要的研究方法分为:数学模型法、综合平衡法和土宜法。兹采用数学模型法,结合水文、水保和经济效益目标,通过 SWAT 模型模拟径流和泥沙状况,以期对济南南部山区土地利用结构优化提供决策依据。

2.1 SWAT 模型模拟分析

2.1.1 数据来源

SWAT 模型输入数据包括数字高程(DEM)、土壤、土地利用、水文以及气象数据。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台,比例尺为 1:250 000。土地利用类型数据来源于国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>),包括土地利用类型和植被类型与状态数据。参照《山东土种志》^[14]和土壤参数数据,通过 SPAW 软件得到研究区土壤物理属性数据。径流、泥沙数据取自《黄河流域水文资料》崮山站和卧虎山水库站 2007—2013 年观测数据。气象数据采用长清、崮山、柳埠和西营 4 个气象站 2007—2013 年实测数据,包括降雨量、最高与最低气温、风速、相对湿度和太阳辐射。

2.1.2 SWAT 参数敏感性分析和验证

采用崮山站和卧虎山水库站 2 个水文站径流和泥沙监测数据,将 2007—2010 年作为率定期,2011—

2013 年作为验证期,对月径流和月泥沙过程进行模拟。采用参数敏感性分析程序 SWAT-CUP,进行 SWAT 模型参数敏感性分析和率定。根据敏感性排名,选取 SCS 曲线径流系数(CN2)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、挟沙能力线性指数(SPCON)和 USLE 水土保持措施因子(USLE_P)5 个参数进行模拟,见表 1。

表 1 SWAT 模型参数敏感性分析结果

排序	参数名称	含义	值域	参数取值
1	CN2	曲线径流系数	35~98	56.47
2	SOL_AWC	土壤可利用水量	0~1	0.48
3	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.97
4	SPCON	挟沙能力线性指数	0.000 1~0.01	0.036 57
5	USLE_P	USLE 水土保持措施因子	0~1	0.64

崮山站和卧虎山水库站模拟结果见图 2、图 3。选取相对误差 Re 、Nash-Sutcliffe 系数 Ens 和决定系数 R^2 作为评价指标,检验模型的适用情况。 Re 越接近 0,表示模拟径流、泥沙总值与实测总值越接近; Ens 越接近 1,表明模拟径流、泥沙过程线与实测过程线越吻合; R^2 越接近 1,表明模拟值在时间序列上变异越小。相关研究表明,当 $Re<20\%$ 、 $R^2>0.6$ 、 $Ens>0.5$ 时,模型在研究区内适用。校准期和验证期 3 项评价指标见表 2。由表 2 可知,3 项指标均满足要求,说明模型对研究区的径流和泥沙模拟具有较好的适用性。从水文过程线与降雨量分布来看,模拟结果能够很好地体现降水与径流和泥沙的年内分布情况。

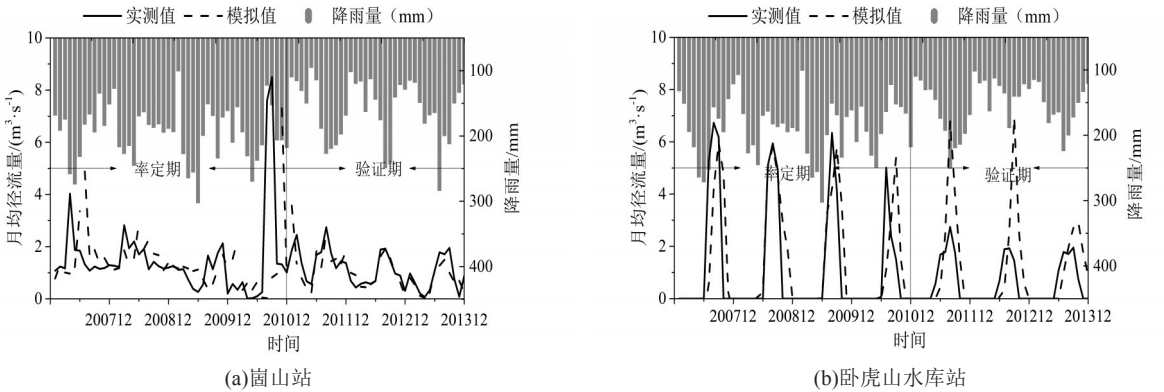


图 2 崮山站和卧虎山水库站实测与模拟月径流过程线

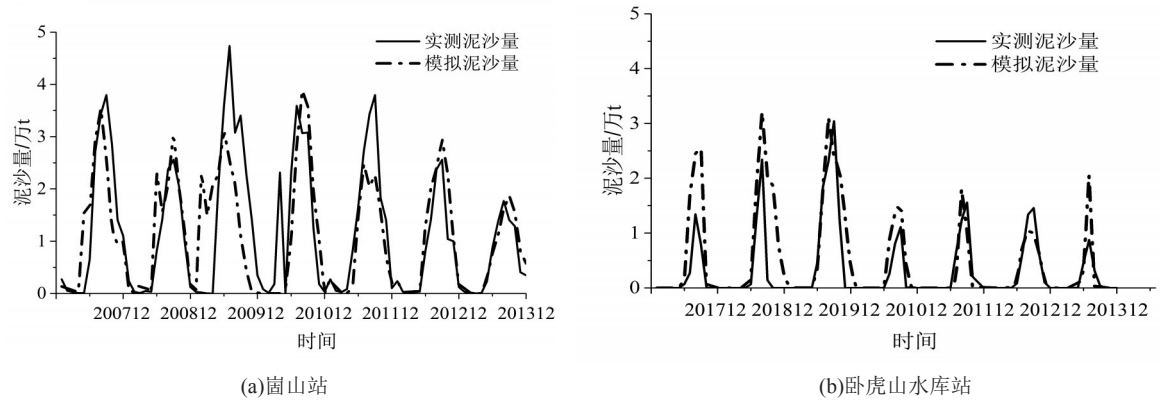


图 3 崮山站和卧虎山水库站实测与模拟月泥沙过程线

表 2 径流和泥沙率定和验证结果评价

模拟期	站点	拟合项	$Re/\%$	Ens	R^2
率定期	崮山	径流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	5.7	0.81	0.77
	卧虎山水库	泥沙量/t	9.6	0.85	0.80
验证期	崮山	径流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	4.8	0.83	0.79
	卧虎山水库	泥沙量/t	12.4	0.75	0.74

2.2 土地利用结构优化模型的建立

2.2.1 目标函数

近年来,研究区土地利用变化主要发生在受人类活动影响较大的区域,主要由耕地转变为建筑用地,同时受退耕还林政策影响,部分耕地转变为林地,草地转变为耕地和建筑用地。在现状土地利用结构和气候条件基础上,根据近年土地利用方式空间变化规律和《规划》要求,设置林地、草地、耕地和建设用地间一定的转化面积,采用SWAT模型模拟转换面积与径流、泥沙的关系,建立以下目标函数。经过试算,转化面积以20 km²为步长,能够较好地模拟其与径流、泥沙的函数关系。

1)水文效益:指通过转变土地利用方式,达到就地拦蓄径流、减少下泄径流量、水源涵养和保护生态的目的,目标函数 f_1 计算式为:

$$\min f_1 = \sum_{j=i+1}^5 \sum_{i=1}^4 y_{\text{径}}(\Delta ij), \quad (1)$$

式中: i,j 为土地利用类型编号, $i,j=1,2,3,4,5$ 分别代表林地、草地、耕地、建设用地和水域; Δij 为 i 类土地转为 j 类土地的面积(km²); $\Delta ij < 0$ 表示 j 类土地转为 i 类土地的面积,由于当地水域面积变化很小,没有考虑水域与其他地型的转化,主要考虑林地、草地、耕地和建设用地间的转化关系; $y_{\text{径}}(\Delta ij)$ 为由于土地利用类型变化产生的年径流量变化值(万 m³)。

土地利用类型转变影响研究区的下垫面状况、植被腾发、用水结构等,从而影响流域径流过程,一般林地和草地较其他地类蓄水能力强,水文效益较好。通过SWAT模型模拟,得到年径流变化量 $y_{\text{径}}(\Delta ij)$ 与转化面积 Δij 的二次函数关系,详见图4。由图4可知,土地利用类型转变均增加年径流量,其中单位面积林地转变为建设用地时,径流增加最大,其次为草地转变为建设用地,草地转变为耕地对径流影响最小。

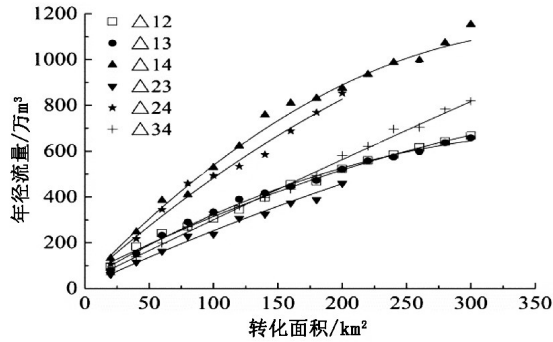


图4 年径流变化量与转换面积的关系

$$y_{\text{径}}(\Delta 12) = 0.0026 \Delta 12^2 + 2.7987 \Delta 12 + 59.973, \quad R^2 = 0.932$$

$$y_{\text{径}}(\Delta 13) = 0.0042 \Delta 13^2 + 3.2979 \Delta 13 + 25.831, \quad R^2 = 0.875$$

$$y_{\text{径}}(\Delta 14) = 0.0078 \Delta 14^2 + 5.8588 \Delta 14 + 30.891, \quad R^2 = 0.893$$

$$y_{\text{径}}(\Delta 23) = 0.0018 \Delta 23^2 + 2.5842 \Delta 23 + 11.981, \quad R^2 = 0.934$$

$$y_{\text{径}}(\Delta 24) = 0.0051 \Delta 24^2 + 4.9703 \Delta 24 + 36.090, \quad R^2 = 0.873$$

$$y_{\text{径}}(\Delta 34) = 0.0004 \Delta 34^2 + 2.7554 \Delta 34 + 29.290, \quad R^2 = 0.906$$

2)水土保持效益:指出通过转变土地利用方式,达到减少泥沙流失,蓄水保土的目的,目标函数 f_2 计算式为:

$$\min f_2 = \sum_{j=i+1}^5 \sum_{i=1}^4 y_{\text{泥}}(\Delta ij), \quad (2)$$

式中: $y_{\text{泥}}(\Delta ij)$ 为土地利用类型变化产生的泥沙量变化值(万 t)。

一般地,流域减沙效果随林地和草地覆被率的增加而增加^[14]。通过SWAT模型模拟,得到年泥沙变化量 $y_{\text{泥}}(\Delta ij)$ 与转化面积 Δij 的关系,详见图5。由图5可知,土地利用类型转变均增加年泥沙流失量,单位面积林地转变为建设用地时泥沙流失量增加最大,耕地转变为建设用地对泥沙流失量影响最小。这是由于各类土地中,林地水土保持效果最好,建设用地则显著加剧水土流失,耕地水土流失状况略好于建设用地。

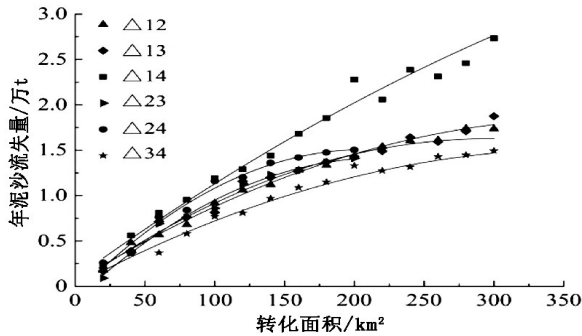


图5 年泥沙变化量与转换面积关系

$$y_{\text{泥}}(\Delta 12) = -0.00001 \Delta 12^2 + 0.0097 \Delta 12 + 0.0395, \quad R^2 = 0.935$$

$$y_{\text{泥}}(\Delta 13) = -0.00002 \Delta 13^2 + 0.0109 \Delta 13 + 0.0087, \quad R^2 = 0.926$$

$$y_{\text{泥}}(\Delta 14) = -0.000007 \Delta 14^2 + 0.0111 \Delta 14 + 0.0904, \quad R^2 = 0.872$$

$$y_{\text{泥}}(\Delta 23) = -0.00003 \Delta 23^2 + 0.0142 \Delta 23 + 0.1481, \quad R^2 = 0.932$$

$$y_{\text{泥}}(\Delta 24) = -0.00004 \Delta 24^2 + 0.0154 \Delta 24 + 0.0884, \quad R^2 = 0.985$$

$$y_{\text{泥}}(\Delta 34) = -0.00001 \Delta 34^2 + 0.0154 \Delta 34 + 0.0121, \quad R^2 = 0.897$$

3)经济效益:指土地利用方式转变前、后经济效益之差,目标函数 f_3 计算式为:

$$\max f_3 = \sum_{i=1}^5 (S_i - S'_i) \cdot o_i, \quad (3)$$

式中: o_i 为第 i 类土地单位面积产值(万元/ km^2),参考现状年济南年鉴、济南市水资源公报以及土地利用状况综合确定, $o_1=105.81$ 万元/ km^2 , $o_2=270.06$ 万元/ km^2 , $o_3=4\,488.17$ 万元/ km^2 , $o_4=5\,255.04$ 万元/ km^2 , $o_5=206.48$ 万元/ km^2 ; S'_i 、 S_i 分别为第 i 类土地利用方式转变前、后的面积(km^2), $S_i = S'_i - \sum_{j=1, j \neq i}^5 \Delta ij$ 。

2.2.2 约束条件

根据土地总面积和《规划》,各类用地面积满足以下约束:土地面积总量为 959.28 km^2 ,耕地面积 $S_3 \geq 375.08 \text{ km}^2$,建设用地面积 $S_4 \leq 50.84 \text{ km}^2$,河道径流量 $y \geq$ 河道生态基流量($y \geq y_{\text{生}}$), $y_{\text{生}}$ 采用多年平均径流量的10%^[15]。

2.3 模型求解

1)构造评价函数。将3个目标函数转化为极小化问题,分别求出3个目标函数的极小值 $f_q^*(q=1,2,3)$ 和极大值 $f_q^{**}(q=1,2,3)$,构建多目标综合评价函数 φF ,将多目标优化问题转化为单目标问题 φF 计算式为:

$$\min \varphi F = \sqrt{\sum_{q=1}^3 w_q \left(\frac{f_q - f_q^*}{f_q^{**} - f_q^*} \right)^2}, \quad (4)$$

式中: w_q 为分目标的权重系数。

2)采用变异系数法确定权重系数。将分目标的最优解 $f_q^*(q=1,2,3)$ 依次代入分目标函数 $f_p(p=1,2,3)$,得到次优解 r_{pq}^* ,对 r_{pq}^* 进行标准化处理得到 r_{pq} ,组成次优解矩阵 R ,计算式为:

$$r_{pq} = \frac{\max_{1 \leq q \leq 3} \{r_{pq}^*\} - r_{pq}^*}{\max_{1 \leq q \leq 3} \{r_{pq}^*\} - \min_{1 \leq q \leq 3} \{r_{pq}^*\}}, \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $\max\{r_{pq}^*\}$ 、 $\min\{r_{pq}^*\}$ 分别为分目标函数 f_p 的最大值和最小值。

构造变异系数 $v_p = s_p / \bar{r}_p$,其中 $\bar{r}_p$ 、 s_p 分别为分目标函数 f_p 的均值和标准差, $\bar{r}_p = \sum_{q=1}^3 r_{pq} / 3$,

$s_p = \sqrt{\sum_{q=1}^3 (r_{pq} - \bar{r}_p)^2 / 3}$,则分目标函数 f_p 的权重系数计算式为:

$$w_p = v_p / \sum_{p=1}^3 v_p. \quad (7)$$

将 w_p 带入式(4),求解单目标最优化问题,即可得到模型的解。

3 结果与分析

通过土地利用结构优化模型结合变异系数法,得到水文、水保和经济效益三目标的权重系数分别为0.37、0.34和0.29。采用动态规划法求解单目标最优化问题,在现状年(2014年)土地利用结构基础上得到各类土地最优转化面积并且一一相应转化,如表3和表4所示;相应土地利用结构及目标值分别如表5和表6所示。

表3 土地利用最优转化面积

转化类型	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 14$	$\Delta 23$	$\Delta 24$	$\Delta 34$
最优转化面积/ km^2	0.944	1.888	-11.252	2.32	11.6	-5.5

表4 土地利用类型转化矩阵

优化年土地利用类型/km ²	现状年土地利用类型/km ²				
	林地	草地	耕地	建设用地	水域
林地	-	0	0	11.252	0
草地	0.944	-	0	0	0
耕地	1.888	2.32	-	5.5	0
建设用地	0	11.6	0	-	0
水域	0	0	0	0	-

表5 优化前后各种土地利用结构

土地利用类型	2005年		现状年(2014年)		规划年(2020年)		优化年	
	面积/km ²	面积占比/%	面积/km ²	面积占比/%	面积/km ²	面积占比/%	面积/km ²	面积占比/%
林地	318.42	33.19	362.28	37.77	390.31	40.69	370.70	38.64
草地	200.42	20.89	171.33	17.86	133.95	13.96	158.35	16.51
耕地	388.75	40.53	366.21	38.18	375.08	39.10	375.92	39.19
建设用地	42.59	4.44	50.36	5.25	50.84	5.30	45.21	4.71

注 水域面积为9.10 km², 占总面积的0.95%, 且保持稳定。

表6 不同土地利用结构的目标值

目标值	2005年	现状年(2014年)	规划年(2020年)	优化年
年径流量/万 m ³	8 358.74	8 413.26	8 375.52	8 270.60
年泥沙量/万 t	76.38	66.80	68.35	53.59
经济产值/亿元	205.83	199.47	202.99	200.86
综合评价函数 F	0.568 6	0.857 1	0.621 6	0.226 6

从2005年到2014年,受城镇化和退耕还林政策的影响,建设用地和林地面积呈增加趋势,建筑用地面积占比由4.44%增加到5.25%,受城镇化和退耕还林政策的影响,建设用地和林地面积呈增加趋势,建筑用地面积占比由4.44%增加到5.25%,林地面积占比从33.19%上升至37.77%,耕地和草地面积分别由40.53%、20.89%下降至38.18%、17.85%。土地利用方式转变对流域径流、泥沙以及当地社会经济产生较大影响,年径流量增加54.52万 m³,年泥沙量减少了9.58万 t,经济产值减少6.36亿元。这是由于在各类用地中林地可以有效减少泥沙流失,水保效益最好;同时建设用地增加、草地下降,导致下泄径流量增大,水文效益下降。三目标综合评价函数 F 由0.568 6增加为0.857 1,说明近年来土地利用结构越来越不合理,急需调整土地利用结构。

从表5可以看出,优化年的评价函数 F 最低,说明优化的土地利用配置较其他年型更优。规划年与现状年相比,林地、耕地和建设用地面积在现状基础上分别增加28.0、8.87和0.48 km²,草地减少37.38 km²,相应年径流量减少37.74万 m³,年泥沙量增加1.55万 t,经济效益增加3.52亿元,水文和经济效益优于现状年,水保效益次于现状年,规划年综合评价函数 F 优于现状年,说明规划年土地利用结构较现状年更趋于合理。但规划年的土地利用结构也不尽合理,林地和建设用地面积应分别减小19.61 km²和5.63 km²,草地和耕地面积应分别增加24.40 km²和0.84 km²,年径流量、年泥沙量可分别减少104.92万 m³和14.76万 t,经济效益下降2.13亿元,但综合评价函数为由0.621 6变为0.226 6,说明综合效益有较大幅度提高。

现状年土地利用结构需要进一步优化,在遵循优先保护耕地的基础上严格控制建设用地总规模,应该考虑林地向草地和耕地、草地向耕地和建设用地、建设用地向林地和耕地的转变。由表3可知,在现状基础上,各类土地面积增减相抵后得到优化的土地利用结构。其中林地覆盖面积提高到370.70 km²,面积占比达38.64%,低于规划年的40.69%,可以有效保证区域生态可持续发展;草地面积下降至158.35 km²,面积占比为16.51%,高于规划年的13.96%;耕地面积增加为375.92 km²,面积占比为39.19%,略大于规划年耕地面积红线375.08 km²;建设用地下降至45.21 km²,面积占比为4.71%。最优土地利用结构下年径流量、年泥沙量较现状年可以分别减少142.66万 m³和13.21万 t,经济效益增加1.39亿元,综合评价函数为0.226 6,极大地优于现状值。

4 讨论

研究表明, SWAT 模型能够很好地对济南南部山区的水文和泥沙状况进行反映, 且研究区径流和泥沙状况对土地利用变化比较敏感。研究区传统的土地利用配置方式存在诸多改进空间, 结合济南南部山区发展政策对研究区土地利用进行多目标优化配置, 这样不仅保证了区域土地利用可持续发展, 也提高了土地利用综合效益。研究方法与黄海^[12]探讨的基于改进粒子群算法对研究区进行多目标土地利用优化配置方法相似, 为实现区域可持续发展和经济发展等多目标对土地利用结构进行优化配置。随着土地利用类型配置的变化, 对研究区域径流、泥沙和经济状况呈现不同程度的影响。单位面积林地转变为建设用地时, 径流和泥沙流失量增加最大, 草地转变为建设用地和耕地对径流影响最小, 耕地转变为建设用地对泥沙流失影响最小。袁宇志等^[15]提出的林地具有一定截留能力, 耕地转变为城市用地后的地表径流较大幅度增加, 与本研究结果相近。另外, SWAT 模型中划分水文响应单元中坡度的阈值设定也会对研究区流域的水文和泥沙模拟精度有影响, 因此下一步可以考虑从坡度阈值的设定细化来对土地利用优化配置进行研究。

5 结论与建议

1) 采用 SWAT 模型模拟崮山站和卧虎山水库站水文过程, 在校准期和验证期, Re 、 Ens 和 R^2 平均分别为 8.12%、0.81 和 0.78, 均满足要求, 说明模型对研究区的径流和泥沙模拟具有较好的适用性。

2) 根据 SWAT 模型模拟, 年径流变化量和泥沙变化量与土地利用转化面积关系可以用二次函数表示。单位面积林地转变为建设用地时, 径流和泥沙流失量均增加最大, 草地转变为建设用地和耕地对径流影响最小, 耕地转变为建设用地对泥沙流失影响最小。

3) 2005 年以来, 综合评价函数 F 越来越大, 说明土地利用结构越来越不合理, 现状年(2014 年)土地利用结构综合效益最差。与现状年相比, 规划年(2020 年)的土地利用结构较优, 但仍需要进一步调整。林地、草地、耕地和建设用地面积分别为 370.70、158.35、375.92 和 45.21 km², 为最优土地利用结构。

参考文献:

- [1] 袁满, 刘耀林. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 191-199.
- [2] 张鸿辉, 曾永年, 谭荣, 等. 多智能体区域土地利用优化配置模型及其应用[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 972-984.
- [3] 李秀霞, 徐龙, 江恩赐. 基于系统动力学的土地利用结构多目标优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 247-254, 294.
- [4] 罗鼎, 月卿, 邵晓梅, 等. 土地利用空间优化配置研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2009, 28(5): 791-797.
- [5] 宋晓猛, 张建新, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790.
- [6] BINGNER R L. Runoff simulated from Goodwin Creek Watershed using SWAT[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(1): 85-89.
- [7] 孙瑞, 张雪芹. 基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文, 2010, 30(3): 28-32, 47.
- [8] ROSTAMIAN R, JALEH A, AFYUNI M, et al. Application of a Swat model for estimating runoff and sediment in two mountains watersheds in cenral Iran[J]. Hydrology Science Journal, 2008, 53(5): 977-988.
- [9] 张戈丽, 王立本, 欧阳华, 等. 近 20 年来济南泉水补给区景观格局及其功能变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2010(5): 593-601.
- [10] 熊国平, 程亚午, 徐武. 济南南部山区东片保护和发展规划探索[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 481-486.
- [11] 张曰良. 济南市水生态文明建设实践与探索[J]. 中国水利, 2013(15): 66-68.
- [12] 黄海. 基于改进粒子群算法的低碳型土地利用结构优化: 以重庆市为例[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 303-306.
- [13] 余德贵, 吴群. 基于碳排放约束的土地利用结构优化模型研究及其应用[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8): 911-917.
- [14] 山东省土壤肥料工作站. 山东土种志[M]. 北京: 农业出版社, 1993.
- [15] 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.
- [16] 张展羽, 司涵, 孔莉莉. 基于 SWAT 模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 93-100.

Optimizing Land Usage in Southern Mountain Areas of Jinan Based on the SWAT Model

FENG Baoping, LIANG Xing*, ZENG Zhuo
(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract:【Objective】The discharge of water and sediments in a catchment is impacted by its land use and the objective of this paper is to investigate the feasibility of changing land usage to improve water cycling and functions in Southern Mountain Region with a view to make the City of Jinan more ecologically sustainable. 【Method】We first simulated the response of runoff and sediment transport to land use change using the SWAT model at spatial resolution of 20 km²; the accuracy of the model was assessed by index Re , Ens and R^2 . We then developed a multi-objective optimization model for land use by minimizing the runoff and sediment discharge and maximizing economic benefit. 【Result】① The three indexes, Re , Ens and R^2 were satisfactory, indicating that SWAT was capable of simulating runoff and sediment in this region. ②The dependence of runoff and sediment discharge on change of land use within a unit area could be described by a quadratic function. While converting forest to building sites increased runoff and sediment discharge, the impact of converting grassland to building sites and cropland was limited. ③ In terms of reducing runoff and sediment discharge, the optimal areas for forest, pasture, cropland and land for buildings in this region were 370.70 km², 158.35 km², 375.92 km² and 45.21 km² respectively. 【Conclusion】The results calculated using the optimization model in this paper can help improve land usage, protect ecological environment and ensure sustainability of the City of Jinan.

Key words: southern mountain area; SWAT model; land usage; multi-objective optimization

责任编辑:赵宇龙

关于评选优秀论文的公告

为鼓励创新,本刊已开启优秀论文评选活动,每年评选优秀论文10篇,每篇奖励1000元,颁发获奖证书,届时将在期刊网站首页展示,同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部