



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.006

董晓华, 方燕琴, 李英海, 等. 基于 SWAT 模型的淮河上游土地利用变化情景的水文响应[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 32-40. DONG Xiaohua, FANG Yanqin, LI Yinghai, et al. Hydrological response under land use change scenarios for the upper Huaihe watershed based on SWAT model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 32-40. (in Chinese)

# 基于 SWAT 模型的淮河上游 土地利用变化情景的水文响应

董晓华<sup>1,2</sup>, 方燕琴<sup>1,2</sup>, 李英海<sup>1,2</sup>, 喻丹<sup>1,2</sup>, 苏欢<sup>1,2</sup>, 李璐<sup>1,2</sup>, 姚着喜<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

**摘要:** 淮河流域不合理的土地利用是导致水土流失的重要因素之一, 探究土地利用变化下的水文响应规律是开展水土保持工作的重要前提。以淮河王家坝水文站以上流域为研究区域构建 SWAT 模型, 并验证模型的适用性; 对研究区耕地进行适宜性评价, 结合 2000 年土地利用现状构造最佳土地利用情景; 利用验证好的 SWAT 模型分析最佳土地利用情景、生态保护情景、土地利用现状情景的水文响应。结果表明, 相比 2000 年土地利用, 生态保护情景水文响应变幅较小, 而最佳土地利用情景下 41.29% 的耕地转化为林地, 年、月均地表径流和年、月均泥沙量减小, 年、月均地下径流增加, 年、月均蒸发量变化不大。说明最佳土地利用状态有助于提高研究区域涵养水源、保持水土的能力, 且在汛期效果较为明显

**关键词:** 淮河流域; 土地利用情景; SWAT 模型; 适宜性评价; 水文响应

中图分类号: P339; P343.9 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)05-0032-09

## Hydrological response under land use change scenarios for the upper Huaihe watershed based on SWAT model

DONG Xiaohua<sup>1,2</sup>, FANG Yanqin<sup>1,2</sup>, LI Yinghai<sup>1,2</sup>, YU Dan<sup>1,2</sup>, SU Huan<sup>1,2</sup>, LI Lu<sup>1,2</sup>, YAO Zhuoxi<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Water Resources Security Collaborative Innovation Center in Hubei Province, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In the Huaihe watershed, unreasonable land use is one of the important factors that lead to soil erosion. It's the important premise to explore the? land use change under the hydrological response in terms of carrying out the work of soil and water conservation. In this study, the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was established with the upper Huaihe River basin upstream of the Wangjiaba hydrologic controlling station as the study area. Firstly, the applicability of the model was verified. Then the optimal land use scenario was constructed by farmland suitability evaluation. Finally, the hydrological responses to the optimal land use scenario, ecological protection situation and the land use in 2000 were analyzed using the SWAT model. The results showed that hydrological response changes of ecological protection situation were very small. Based on the optimal land use scenario of land suitability evaluation, 41.29% of the farmland was turned into forest land. As a result, compared with the land use in 2000, the annual surface runoff and sediment yield were decreased, ground water was increased. Monthly surface runoff and sediment yield were decreased, and monthly ground water was increased. However annual and monthly evaporation changed slightly. The study revealed that in the condition of optimal land use, the ability of soil and water conservation was stronger, and it was more obvious in flood season.

**Key words:** Huaihe watershed; land use scenarios; SWAT model; land suitability evaluation; hydrological response

收稿日期: 2015-12-09 修回日期: 2016-06-07 网络出版时间: 2016-08-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.2128.010.html>

基金项目: 水利部“十二五”公益性行业专项经费项目(201301066); 国家自然科学基金项目(51409152)

**Fund:** The Ministry of Water Resources "12th Five Year" Public Welfare Industry Special Funds Project(201301066); National Natural Science Foundation of China(51409152)

作者简介: 董晓华(1972-), 男, 湖北宜昌人, 教授, 博士, 主要从事生态水文、水文预报等领域研究。E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

通讯作者: 李英海(1981-), 男, 湖北宜昌人, 副教授, 博士, 主要从事流域复杂水电能源系统优化等领域研究。E-mail: liyinghai@ctgu.edu.cn

全球气候变化及人类活动造成了环境变化的影响<sup>[1]</sup>。在长时期尺度上,气候变化是造成环境变化的主要因素<sup>[2]</sup>,但在短期尺度上,人类活动造成的土地利用方式的变化对水文的影响更加明显<sup>[3,4]</sup>。土地利用/覆被变化(LUCC)通过改变地表蒸发、地表径流、土壤水分的入渗能力等因素,影响了流域的水文循环及水量平衡,进而对生态环境产生影响<sup>[1]</sup>。目前,水文模型方法被广泛应用于LUCC水文响应研究中,这一研究多以历史土地利用或现状土地利用为基准,建立多种土地利用情景,如全耕地、全林地的极端土地利用方式<sup>[4]</sup>以及根据地区工农业发展设置不同比例的土地利用<sup>[5]</sup>、根据水土保持政策优化土地利用空间分布<sup>[6]</sup>等情景,进而分析不同土地利用情景对水文过程的影响。然而这种假设的情景并不能充分代表实际情况下土地利用的演变结果。

SWAT模型作为一种发展和应用都相对较为成熟的水文模型<sup>[7,10]</sup>,以水量平衡为驱动力,能够定量描述不同土地利用/覆被以及气候条件下水文循环各组分的过程,具有较强的物理机制。本文以淮河流域王家坝以上部分流域为研究对象,结合研究区土地利用变化驱动因子进行耕地适宜性评价,对研究区土地利用现状中耕地不适宜的区域进行退耕还林,以此得到符合研究区土地利用发展方向的最优土地利用状态。并以SWAT模型作为研究工具,比较最佳土地利用、现状土地利用以及生态保护情景下土地利用的水文响应,为土地管理及规划提供了有效依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

淮河流域地处我国东部,介于长江和黄河两流域之间,位于东经 $111^{\circ}55'$ — $121^{\circ}25'$ ,北纬 $30^{\circ}55'$ — $36^{\circ}36'$ ,面积约为27万 $\text{km}^2$ 。淮河干流发源于桐柏山太白顶北麓,依次流经河南、湖北、安徽、江苏。淮河流域地处我国南北气候过渡带,淮河以北属暖温带区,淮河以南属北亚热带区,气候温和,年平均气温为 $11^{\circ}\text{C}$ ~ $16^{\circ}\text{C}$ 。气温变化由北向南,由沿海向内陆递增。极端最高气温达 $44.5^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温达 $-24.1^{\circ}\text{C}$ 。淮河流域的气候特点是冬春干旱少雨,夏秋闷热多雨,冷暖和旱涝转变急剧。流域多年平均降水量约为920 mm,其分布状况大致是由南向北递减,山区多于平原,沿海大于内陆。流域西部、西南部及东北部为山区、丘陵区,其余为广阔的平原。山丘区面积约占总面积的三分之一,平原面积约占总面积的三分之二。随着人类社会经济的高速发展与生态环

境问题的日益突出,淮河流域的生态脆弱问题逐渐受到重视<sup>[11]</sup>,尤其是淮河流域水土流失的形势更加不容乐观。究其原因,淮河流域土地利用方式单一、林地的掠夺式开发以及城市用地的扩张等不合理的土地利用情况是导致水土流失的重要因素之一。

研究区位于淮河流域上游,总面积约30 630  $\text{km}^2$ ,研究区内分布着138个雨量站,4个流量站(图1),本文不考虑蓄、滞洪区设施的应用对水文的影响。对研究区有影响的水库有6个,分别是南湾水库、石山口水库、五岳水库、浍河水库、板桥水库、宿鸭湖水库。由于宿鸭湖水库有桂庄和夏屯两个出流点,因此流域中水库共有7个出流点。

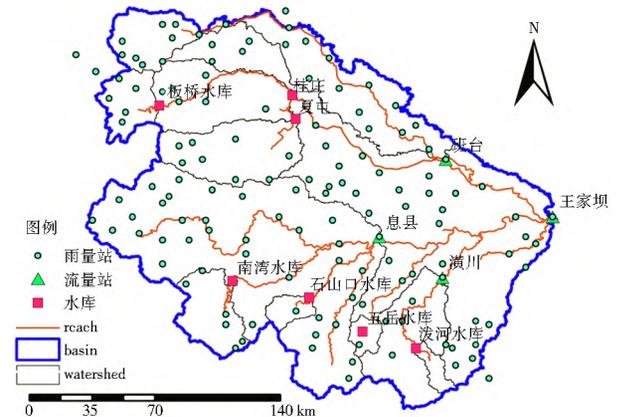


图1 研究区概况

Fig. 1 Location map of the study area

### 1.2 数据来源

本文所需要的主要数据包括地形、土壤、气象和水文、土地利用数据等,具体数据类型及来源见表1。其中,坡度数据是利用ArcGIS中的slope工具从DEM中提取得到;降雨数据是根据研究区内138个雨量站的日实测数据算术平均处理得到;由于无研

表1 数据类型及来源

Tab. 1 The data type and source

数据类型	主要参数	数据来源	分辨率
地形数据	DEM、坡度、河网水系	美国地质勘探局	90 m
	地貌	地球系统科学数据共享平台	1:400万
土壤数据	土壤类型、土壤有机质、土壤质地、土壤pH等	世界协调土壤数据库	1:100万
	日降雨数据	淮河水利委员会	/
水文数据	多年平均降雨量	地球系统科学数据共享平台	1 000 m
	$\geq 10^{\circ}$ 积温	地球系统科学数据共享平台	500 m
水库数据	日径流量	淮河水利委员会	/
土地利用数据	水库日出流及工程特性	淮河水利委员会	/
	土地利用类型分布	淮河水利委员会	30 m

究区气象站点的相关资料数据,因此通过建立气象数据库来模拟研究区的气候特征;径流数据采用研究区内 4 个水文站(息县站、潢川站、班台站、王家坝站)的日径流数据。

## 2 淮河上游流域 SWAT 模型构建

### 2.1 模型基本原理

SWAT( Soil and Water Assessment Tool)<sup>[12-14]</sup>模型是由美国农业部(USDA)开发的一个基于物理机制的、连续性的流域尺度水文模型。该模型是基于 GIS 的分布式水文模型,可模拟流域中多种不同的水文物理化学过程,并可模拟和预测下垫面因素及气候因素变化下流域水文循环的影响<sup>[15]</sup>。模型采用的水量平衡公式为

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

式中:  $SW_t$  表示土壤最终含水量;  $SW_0$  表示土壤初始含水量;  $R_{day}$  表示第  $i$  天的降水量;  $Q_{surf}$  表示第  $i$  天的地表径流;  $E_a$  表示第  $i$  天的蒸发量;  $W_{exp}$  表示第  $i$  天透过土壤剖面底部的渗透量和测流量;  $Q_{gw}$  表示第  $i$  天的地下水流量; 单位均为 mm。  $t$  表示时间步长(d)。

模型在模拟过程中,基于 DEM 数据,确定流域总出口位置为王家坝水文站。考虑到水文站点及水库,共将流域划分为 11 个子流域(图 1),并设置土地利用类型、土壤类型、坡度的阈值,将子流域划分

多个水文响应单元(HRU)。由于本文研究的是土地利用变化对水文过程的影响,设土地利用类型的阈值会导致面积的重新分配,最终无法确定土地利用变化的水文响应是重新分配产生还是真实变化的结果,因此土地利用类型、土壤类型、坡度的阈值分别设置为 0%、10%、20%,将 11 个子流域划分为 221 个水文响应单元(HRUs)。

由于研究区内有 6 个水库,因此需修改模型的水库特性。SWAT 模型中计算水库出流量有四种方法:实测日出流量、实测月出流量、无控制水库的年均泄流量、控制水库的目标泄流量。其中南湾水库、石山口水库、五岳水库、泼河水库数据较全,采用实测日出流量方法计算,而板桥水库、宿鸭湖水库缺乏实测日出流数据,因此采用控制水库的目标泄流量计算。通过对水库数据的准确输入,使 SWAT 模型在该流域的模拟更有准确性。

### 2.2 参数敏感性分析

模型中关于径流模拟的参数有 26 个,但是只有少数几个参数对模拟结果起决定性作用。为了使模型更好的反应研究区特征,提高模型运行效率,需对模型进行敏感性分析。本文选取研究区 2000 年-2010 年的数据,采用 SWAT 2005 模型自带的 LH-OAT<sup>[16]</sup> 参数敏感性分析方法对参数进行敏感性分析,选取敏感度排在前 10 位的参数,结果见表 2。

表 2 SWAT 模型的率定参数及取值范围

Tab. 2 Calibration parameters of SWAT model and value range

参数	默认值	定义	排序	取值范围	变化方法	最优值
Cn2	31~ 92	SCS 径流曲线系数	1	- 25~ 25	3	* 1.057
Alpha_Bf	0.048	基流系数	2	0~ 1	1	0.31
Esco	0.95	土壤蒸发补偿系数	3	0~ 1	1	0.95
Gwqmn	0	浅层地下水径流系数	4	- 1000~ 1000	2	- 528.81
SoL_Z	0~ 300	土壤深度	6	- 25~ 25	3	* 0.75
Revapmin	1	浅层地下水再蒸发系数	7	- 100~ 100	2	96.51
Blai	0~ 0.5	最大潜在叶面积指数	9	0~ 1	1	0.98
SoL_Awc	0.01~ 0.55	土壤可利用水量	8	- 25~ 25	3	* 1.22
Canmx	0	最大覆盖度	10	0~ 10	1	0.28
Ch_K2	0	河道有效水导电率	5	0~ 150	1	148.66

注: \* 表示默认值乘以后面的数。

### 2.3 模型的率定和验证

采用 SWAT 自带的参数率定模块,使用 SCE-UA<sup>[17]</sup> 算法对以上选取的 10 个敏感参数进行率定。选取 2000 年为模型预热期,2001-2005 年为率定期,2006-2010 年为验证期对研究区进行月径流模拟,并以流域出口王家坝水文站流量数据为观测流量,采用 Nash-Sutcliffe( $E_{ns}$ )和  $R^2$  决定系数对模型

模拟精度进行评价,计算公式如下:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\alpha} - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\alpha} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\alpha} - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{\alpha} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中:  $Q_{\alpha}$  表示观测流量值;  $Q_s$  表示模拟流量值;  $\overline{Q}_o$  表示观测流量平均值;  $\overline{Q}_s$  表示模拟流量平均值;  $i$  表示时间序列  $i$  天;  $n$  表示时间序列长度。

### 3 淮河上游流域土地适宜性评价方法

土地适宜性评价是对于某种土地用途和利用方式的适宜性程度进行评估<sup>[18]</sup>, 以获得适用于研究目的的最佳土地利用类型<sup>[19]</sup>。由于流域水土流失主要原因是耕地的不合理利用, 因此本次适宜性评价的对象为耕地。

#### 3.1 评价因子及评价单元的确定

评价因子的合理选择对评价起主导限制作用, 选择比较稳定且可度量的因素作为评价因子, 是评价工作的关键<sup>[20]</sup>。考虑研究区的实际情况以及资料的完备程度, 本次研究从地形条件、土壤条件、气象条件和水源条件四大方面分别选取高程、坡度、地貌、土壤有机质含量、土壤质地、土壤 pH 值、多年平均降雨量、 $\geq 10^{\circ}$  积温、距水源的距离等因子为研究区耕地适宜性评价因子。

评价单元是土地适宜性评价的基本单位, 常采用叠置法、网格法、地块法、多边形法等方法进行划分。本次研究采用网格法划分, 每一个栅格网格即为一个评价单元。确定合适的网格大小是网格法划分评价单元的关键<sup>[21]</sup>。因所选研究区的评价因子中网格单元最小的是  $90 \times 90$  m 高程因子图, 因此以该网格大小为标准, 使用 ArcGIS 的 Resample 工

具将所有的因子重采样成  $90 \times 90$  m 的栅格大小。

#### 3.2 评价因子权重

权重表示评价因子对评价对象影响程度的贡献率。结合德尔菲法(专家打分法)和层次分析法确定各评价因子的权重。首先将所选取的因子分成几个层次(见图 2), 判断出各层次两两指标的重要程度, 并建立判断矩阵, 其中阶数大于 2 的矩阵需进行一致性检验, 一致性比率  $CR$  需小于 0.1, 否则重新构建判断矩阵进行计算。经计算得出耕地权重值, 见表 3。

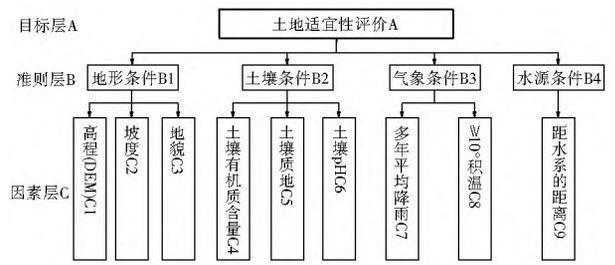


图 2 层次结构

Fig. 2 Hierarchical chart

#### 3.3 评价因子的分级量化

采用等级赋分法<sup>[22]</sup>将研究区各因子依据不同的适宜范围进行分级划分, 然后对每级赋予相应的分值(0~100 分), 并分成 5 个等级, 分值越大, 则其适宜程度越高。根据国家农用地分等规程<sup>[23]</sup>及研究区域的特征, 并参考文献[24-26]及专家意见, 评价因子分级及其作用分值见表 4。

表 3 评价因子权重

Tab. 3 Weights of evaluation factors

项目	高程 DEM	坡度	坡向	土壤有机质	土壤质地	土壤 pH	年均降雨量	$\geq 10^{\circ}$ 积温	距水源距离
耕地	0.070 8	0.185 4	0.040 5	0.261 4	0.143 9	0.079 0	0.072 9	0.036 5	0.109 4

表 4 耕地适宜性评价因子分级及其作用分值

Tab. 4 The level of evaluation factors and score for farmland suitability

评价因子	分级	得分	评价因子	分级	得分	评价因子	分级	得分	评价因子	分级	得分
高程 DEM /m	< 100	100	地貌	平原	100	土壤排水条件	很好	90	$\geq 10^{\circ}$ 积温 (°C)	> 4600	100
	100~ 300	80		台地	80		良好	70		4400~ 4600	80
	300~ 600	60		丘陵	40		较差	50		4000~ 4400	60
	600~ 900	40		山地	20		很差	20		3600~ 4000	40
	> 900	20		湖泊	0		水域	0		< 3600	20
坡度 (°)	< 3	100	土壤有机质含量 (%)	> 4	100	多年平均降雨量/mm	> 1300	100	距水源距离/km	< 1	100
	3~ 5	90		3~ 4	80		1200~ 1300	80		1~ 3	80
	5~ 15	70		2~ 3	60		1100~ 1200	60		3~ 5	60
	15~ 25	30		1~ 2	40		950~ 1100	40		5~ 8	40
	> 25	0		< 1	20		< 950	20		> 8	20

### 3.4 土地适宜性评价模型

根据所选因子及计算的权重值, 建立研究区土地适宜性评价模型——加权指数和模型如下:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i W_i \quad (4)$$

式中:  $P$  为评价单元的适宜度分值;  $P_i$  为第  $i$  个评价因子的分值;  $W_i$  为第  $i$  个评价因子的权重值;  $n$  为评价因子数。

采用 ArcGIS 中的 Raster Calculator 工具, 根据式计算研究区各评价单元的适宜性总分值, 并自动生成评价等级图。运用 ArcGIS 重分类中的“自然间断分类方法<sup>[22]</sup>”划分研究区耕地土地适宜性级别, 依据 FAO《土地评价纲要》中的评价原则, 将耕地适宜性总分值划分为高度适宜(S1)、中等适宜(S2)、勉强适宜(S3)、不适宜(S4)四个级别。其中高度适宜是指土地对该种土地利用方式没有限制或限制性很小, 经济效益好, 能持续利用; 中等适宜类指土地对该种土地利用方式的持续利用有中等程度的限制; 勉强适宜类指土地对该种土地利用方式的持续利用有较大的限制, 经济效益较差, 利用不当会导致水土流失; 不适宜类是指在当前的条件下, 这类土地对所特定用途不能利用或不能持续利用, 否则会加快水土流失的速度。经计算, 土地适宜性划分级别见表 5。

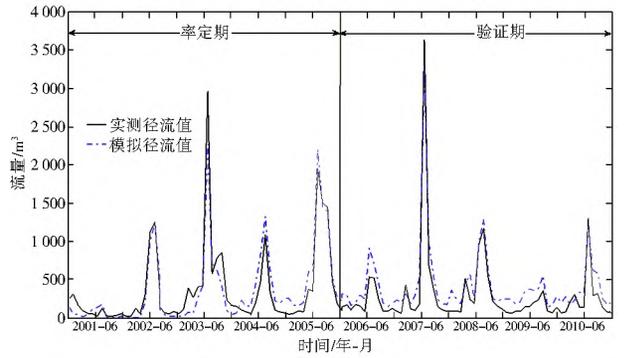


图 3 月径流模拟结果

Fig. 3 Simulation result of monthly runoff

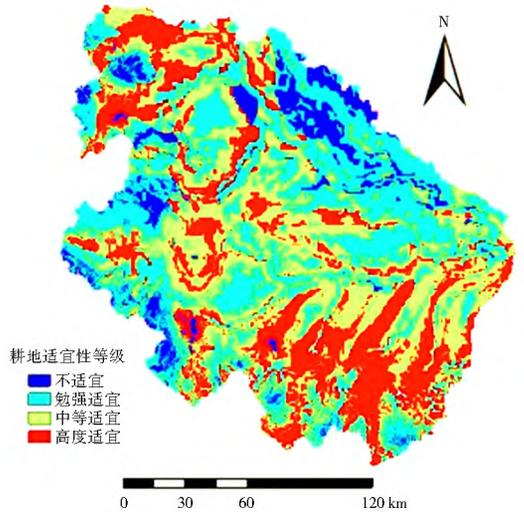


图 4 耕地适宜性评价等级图

Fig. 4 Farmland suitability map

表 5 研究区土地适宜性级别与总分值区间对照

Tab. 5 Land suitability classes and suitability scores

适宜类	不适宜 (S4)	勉强适宜 (S3)	中等适宜 (S2)	高度适宜 (S1)
宜耕	< 54.49	54.49~ 63.26	63.26~ 70.10	> 70.10

表 6 耕地适宜性等级

Tab. 6 Farmland suitability table

项目	不适宜	勉强适宜	中等适宜	高度适宜	合计
栅格数目 / 个	267 106	1 268 288	1 257 842	876 527	3 669 763
面积 / km <sup>2</sup>	2 163.56	10 273.13	10 188.52	7 099.87	29 725.08
占总面积比例 (%)	7.28	34.56	34.28	23.89	100

## 4 计算结果与分析

### 4.1 SWAT 模型模拟结果分析

SWAT 模型月径流模拟结果见图 3, 由图 3 可以看出模拟的流量过程线与实测较为吻合。经计算, 率定  $E_n$  和  $R^2$  分别为 0.89、0.89, 验证期  $E_n$  和  $R^2$  分别为 0.89、0.95。  $E_n$  和  $R^2$  均在 0.8 以上, 说明 SWAT 模型能比较准确的模拟该流域的径流, 具有较好的适用性, 可用于研究区土地利用变化水文响应的相关研究。

### 4.2 淮河上游流域耕地适宜性评价

通过对研究区耕地适宜性评价得到耕地适宜性评价等级图(见图 4), 评价结果统计见表 6。

由图 4 可知, 研究区耕地适宜性等级整体较高, 其中: (1) 高度适宜的面积为 7 099.87 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 23.89%, 主要分布在光山、罗山、遂平、

潢川、西平、泌阳东部, 这些地方地势平坦, 土壤有机质含量比较高且土壤质地很好, 降雨充足, 距水源距离很近, 能满足作物生长, 最适宜农业耕作。(2) 中等适宜型耕地面积为 10 188.52 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 34.28%, 这些地方地势稍微平坦, 土壤、气象条件比较好, 但是距水源不是很近, 对作物灌溉有一定影响;(3) 勉强适宜区面积为 10 273.13 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 34.56%, 虽然地势较平坦, 但是受到土壤性质、距水源较远等限制, 所以适宜性等级较低, 不是很适合耕作;(4) 不适宜区面积为 2 163.56 km<sup>2</sup>, 占流域总面积比例较小, 只有 7.28%, 主要分布在随州、桐柏、平舆、项城、临泉等地区。此区域地形较高、坡度

大且周围水系较少,因此该区域不适宜耕作。

### 4.3 最佳土地利用状态

将淮河上游流域耕地适宜性评价结果栅格图(图4)与2000年土地利用现状图(图5)叠加,即可得到基于土地利用现状的耕地适宜性等级图(图6)。具体做法是:利用 ArcGIS 的选择功能分别从现状图的属性表中评价选取耕地、林地数据并导出,然后用 raster calculator 分别与耕地适宜性评价结果进行栅格叠加,即可得到基于土地利用现状耕地适宜性等级图。

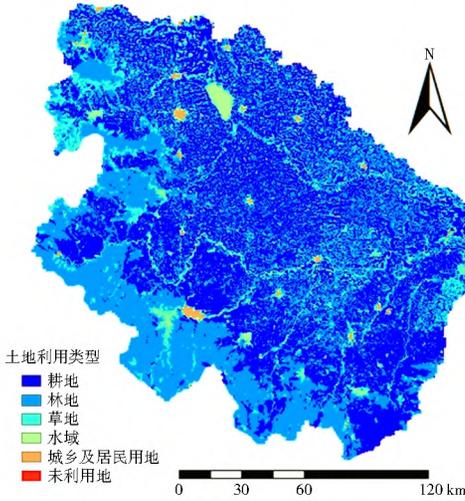


图5 2000年土地利用

Fig. 5 Land use in 2000

由表7可知,2000年现状的耕地以中等适宜和勉强适宜为主,高度适宜区所占总面积为25.18%,勉强适宜和不适宜区占38.14%。

在土地利用现状基础上,耕地适宜性高的地区则保留耕地,适宜性低的地区则退耕还林<sup>[27]</sup>。对耕地不适宜的地区如果不进行适当整改,可能会加快水土流失的速度,从而逐步破坏到适宜类区域。根据图6结果,将评价单元中S1(高度适宜类)、S2(中等适宜类)的区域予以保留,S3(勉强适宜类)、S4(不适宜类)的区域进行退耕还林,这些不适宜区域主要是淮河以北地区,如平舆、新蔡、项城、临泉、新县东部县城的部分区域,将这些区域进行退耕还林,即可得到研究区最佳土地利用图,如图7。

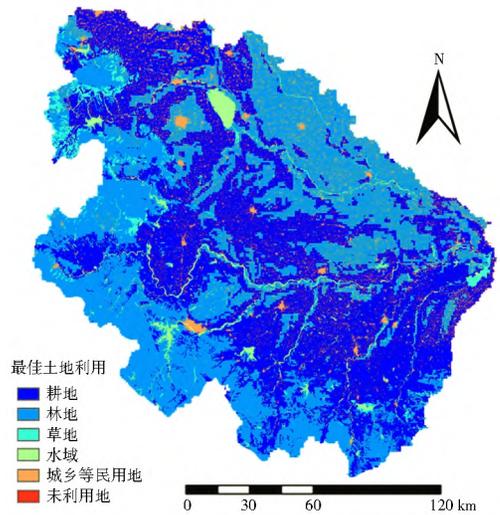


图7 最佳土地利用

Fig. 7 The optimal land use

### 4.4 水文响应分析

为分析不同土地利用状态对水文过程的影响,设置三种情景:一是基准情景,即2000年土地利用图;二是按照国家相关政策设定的生态保护情景,即坡度 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 退耕还草,坡度 $> 25^{\circ}$ 的退耕还林;三是最佳土地利用状态。各情景下土地利用变化情况见表8。

利用已经率定好的模型,分别输入三种情景的土地利用,保持其他变量和参数不变(固定参数最优值,如表2所示,除了HRU级别以外参数,其他参数均不变),模拟各情景下地表、地下径流深、蒸发量及泥沙量的变化情况。部分参数值会因为HRU内要素的变化而变化,如从CN2和SoilAwc,土地利用变化导致HRU的重新分配,则每个子流域内的各个HRU的参数值会发生相应的变化。土地利用变化实质导致的是HRU的重新分配以及HRU级别的部分参数(如产流参数CN2)的变化,从而导致最终的产流变化<sup>[28]</sup>,这是模型原理所决定的。最终模拟结果见图8。

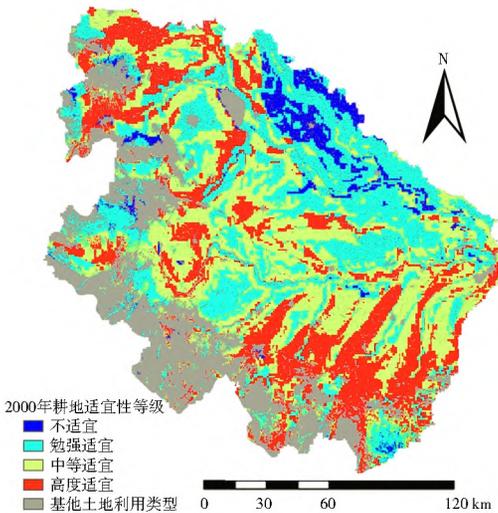


图6 2000年现状耕地适宜性等级

Fig. 6 Farmland suitability level of land use in 2000

表7 2000年土地利用现状适宜性统计

Tab. 7 Suitability of statistics of land use in 2000

项目	不适宜	勉强适宜	中等适宜	高度适宜	合计
栅格数目/个	127 717	837 704	928 358	637 318	2 531 097
面积/km <sup>2</sup>	1 034.51	6 785.40	7 519.70	5 162.28	20 501.89
占总面积比例 (%)	5.04	33.10	36.68	25.18	100

表 8 不同情景土地利用变化

Tab. 8 Land use change under different scenarios

土地利用类型	情景 1		情景 2			情景 3		
	面积/km <sup>2</sup>	比例(%)	面积/km <sup>2</sup>	比例(%)	变化率(%)	面积/km <sup>2</sup>	比例(%)	变化率(%)
耕地	20 615.56	68.84	20 474.78	68.37	- 0.68	12 103.00	40.66	- 41.29
林地	5 323.41	17.78	5 334.88	17.81	0.22	13 653.00	45.87	156.47
草地	509.99	1.70	640.96	2.14	25.68	509.99	1.71	0.00
水域	893.61	2.98	893.61	2.98	0.00	893.61	3.00	0.00
城乡等民用地	2 603.08	8.69	2 603.08	8.69	0.00	2 603.08	8.75	0.00
未利用地	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00

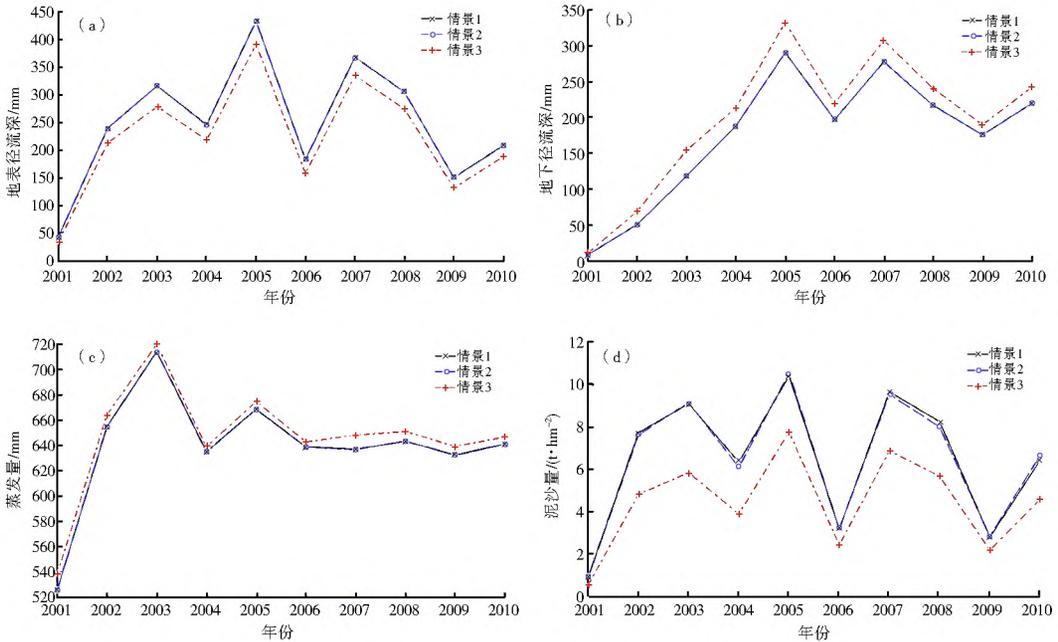


图 8 (a) 年地表径流深结果 (b) 年地下径流深结果 (c) 年蒸发量结果 (d) 年泥沙量结果

Fig. 8 (a) The annual surface runoff depth results (b) The annual ground water depth results (c) The annual evaporation capacity results (d) The annual sediment results

由图 8 可知, 由于 2001 年为枯水年, 变化均较小。而其他年份为丰水年或平水年, 变化较明显。图 8(a) 中, 相对于土地利用现状(情景 1), 情景 3 年地表径流深减少了 269.31 mm, 变化率为 - 10.54%, 但是对于情景 2 来说, 年地表径流深总体变化不大, 变化率为 - 0.05%, 只在丰水年时, 径流减少稍明显; 图 8(b) 中, 情景 3 地下径流深增加了 235.89 mm, 变化幅度为 14.1%, 而情景 2 基本无变化; 从图 8(c) 可看出, 情景 2 蒸发量基本无变化, 而情景 3 变化较小, 仅为 1.35%; 图 8(d) 中, 泥沙量变化较大, 相对于 2000 年土地利用现状, 情景 3 年泥沙量减少了 20.2 t/hm<sup>2</sup>, 变化幅度为 - 28.73%, 情景 2 年泥沙量值减少了 0.34 t/hm<sup>2</sup>, 变化幅度为 0.52%。

由此可知, 退耕还林后, 林地对径流、蒸发量、泥沙量的影响在枯水年表现的不明显, 而在丰水年或平水年, 影响较大。当土地朝着最佳利用方向发展

时, 耕地减少, 林地增加, 冠层截留及林地枯落物截留使得地表径流减少; 林地的土壤孔隙度较大, 增大了下渗率<sup>[29]</sup>, 耕地的土壤较为密实, 下渗率较低, 因此林地地下水的补给较耕地多; 林地涵养水源作用较强, 且林地增加, 植被覆盖度增大, 所以最佳土地利用状态下泥沙量减少, 蒸发量增加。由于研究区耕地基本在平原区, 坡度大于 15° 的面积较小, 因此在生态保护情景下, 面积变化较小, 耕地、林地、草地面积变化率分别为 - 0.68%、0.22%、25.68%, 所以对水文响应影响不大。

由图 9 可知, 各情景的水文响应值在 7 月或 8 月达到最大, 这主要跟降水量分布有关。相对于土地利用现状(情景 1), 情景 3 月均地表径流、地下径流、蒸发量、泥沙量的变化率分别是 - 10.85%、23.59%、1.14%、- 30.78%, 可以看出月均地表径流、地下径流、泥沙量变化较明显, 但蒸发量变化不明显。另外, 在 10 月至来年 4 月, 情景 3 的变化较

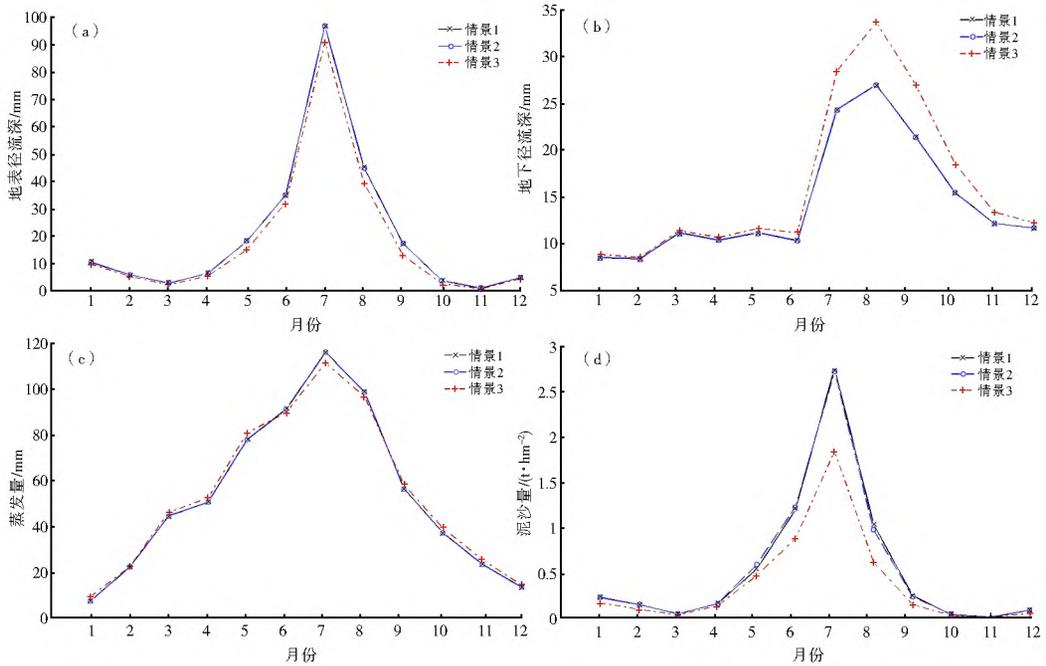


图9 (a) 月均地表径流深结果(b) 月均地下径流深结果(c) 月均蒸发量结果(d) 月均泥沙量结果

Fig. 9 (a) Monthly surface runoff depth results (b) Monthly groundwater depth results  
(c) Monthly evaporation capacity results (d) Monthly sediment results

小,而4月-10月,变化则较大,说明土地利用优化后对水文响应的影响在汛期较明显,枯期则影响较小,这是因为在汛期,当流域林地较多时,较强的发挥了其涵养水源作用及保持水土能力。由图9c可知,9月至来年6月,情景1蒸发量稍大于情景3,而6月-9月情景1蒸发量稍小于情景3,但是相对于情景1,情景3月均蒸发量总体有所增加,增加幅度为1.41%。在生态保护情景(情景2)下,相对于土地利用现状(情景1),月均地表、地下径流深、蒸发量及泥沙量的变化均较小,水文响应基本无变化。

根据上述结果可知,最佳土地利用状态下,径流、泥沙量比生态保护情景及现状少,地下径流补给增加,但蒸发量变化不明显,说明在该种状态下,土地保持水土能力较强,能明显改善该流域水土流失的现状。

## 5 结论

本文通过在淮河流域王家坝水文站以上流域建立SWAT模型,结合研究区土地利用变化驱动因子进行耕地适宜性评价,对研究区现状中耕地不适宜的区域进行退耕还林,得到土地最佳利用状态,并以此作为一种土地利用情景,对比生态保护情景及2000年土地利用现状情景,模拟不同情景下水文响应的变化。研究表明,研究区中大部分淮河以北地区的耕地不利于耕作,将不适宜的耕地退耕还林后,流域涵养水源作用、保持水土能力增强,远超

过生态保护情景下的土地利用状态,能大大改善流域内的生态问题,为土地管理及规划提供了依据。

本文目前仅对现状进行比较分析,而对未来自然发展土地利用进行预测,并与优化的土地利用进行水文响应比较,从而为流域土地合理的管理和规划提供更有针对性的依据,将是下一步研究的方向。

## 参考文献(References):

- [1] 欧春平,夏军,王中根.土地利用/覆被变化对SWAT模型水循环模拟结果的影响研究——以海河流域为例[J].水力发电学报,2009,(04):124-129.(OU Chun ping, XIA Jun, WANG Zhong gen. LUCC influence on SWAT hydrological simulation—a case study of Haihe river basin[J]. Journal Of Hydroelectric Engineering, 2009, (04): 124-129. (in Chinese))
- [2] Sanjay K Jain, Jaivir Tyagi, Vishal Singh. Simulation of runoff and sediment yield for a Himalayan watershed using SWAT model[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2010, 2 (03): 267.
- [3] Bfw Croke, Ws Merritt, Aj Jakeman. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments[J]. Journal of Hydrology, 2004, 291(1): 115-131.
- [4] 张青.基于水文效应分析的土地利用优化模式研究[D].西安:陕西师范大学,2013.(ZHANG Qing. The research on effects of land use optimization pattern based on the analysis of the hydrological[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2013. (in Chinese))
- [5] A. Montenegro, R. Ragab. Hydrological response of a Brazilian semiarid catchment to different land use and climate change

- scenarios: a modelling study[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(19): 2705-2723. doi: 10.1002/hyp.7825.
- [6] 罗巧, 王克林, 王勤学. 基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011, (06): 1431-1436. (LUO Qiao, WANG Ke lin, WANG Qian xue. Using SWAT to simulate runoff under different land use scenarios in Xiangjiang River Basin[J]. *Chinese Journal of Eco Agriculture*, 2011, (06): 1431-1436. (in Chinese))
- [7] Zhixiang Lu, Songbing Zou, Zuodong Qin, et al. Hydrologic Responses to Land Use Change in the Loess Plateau: Case Study in the Upper Fenhe River Watershed[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015.
- [8] Hadi Memarian, Siva K. Balasundram, Karim C. Abbaspour, et al. SWAT-based hydrological modelling of tropical land use scenarios[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(10): 1808-1829. doi: 10.1080/02626667.2014.892598.
- [9] 刘玉明, 张静, 武鹏飞, 等. 北京市妫水河流域人类活动的水文响应[J]. *生态学报*, 2012, (23): 7549-7558. (LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Peng fei, et al. The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, (23): 7549-7558. (in Chinese))
- [10] 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, (01): 186-194. (WANG Xue, ZHANG Zulu, NING Jicai. Runoff response to land use change in Baimahe River of China based on SWAT model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, (01): 186-194. (in Chinese))
- [11] 叶正伟. 基于生态脆弱性的淮河流域水土保持策略研究[J]. *水土保持通报*, 2007, (03): 141-145, 156. (YE Zhengwei. Countermeasures for soil and water conservation in the Huaihe River Basin based on ecological vulnerability[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, (03): 141-145, 156. (in Chinese))
- [12] Jeffrey G Arnold, Peter M Allen, Gilbert Bernhardt. A comprehensive surface groundwater flow model[J]. *Journal of hydrology*, 1993, 142(1): 47-69.
- [13] Jimmy R Williams, Ad Nicks, Jeffrey G Arnold. Simulator for water resources in rural basins[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 111(6): 970-986.
- [14] Susan L Neitsch, Jeffrey G Arnold, Jim R Kiniry, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009[R]. Texas Water Resources Institute, 2011.
- [15] Jeffrey G Arnold, Raghavan Srinivasan, Ranjan S Mutiah, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development I. Wiley Online Library, 1998.
- [16] S Neitsch, Jg Arnold, Jr E A Kiniry, et al. Soil and water assessment tool user's manual version 2000[J]. GSWRL report, 2002, 202(02-06).
- [17] K Eckhardt, Jg Arnold. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. *Journal of hydrology*, 2001, 251(1): 103-109.
- [18] Yaru Sui Liu, Jie Yong Wang, Li Ying Guo. GIS Based Assessment of Land Suitability for Optimal Allocation in the Qinling Mountains, China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(5): 579-586. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60091-X.
- [19] Fazel Amiri, Abm Shariff. Application of geographic information systems in land use suitability evaluation for beekeeping: A case study of Vahregan watershed (Iran)[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2012, 7(1): 89-97.
- [20] 任小宁, 郭新成. 基于 GIS 的新疆克拉玛依市土地适宜性评价[J]. *安徽农业科学*, 2007(08): 2395-2396, 2427. (REN Xiaoning, GUO Xin cheng. Land suitability assessment of Kelamayi City based on GIS[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci*, 2007(08): 2395-2396, 2427. (in Chinese))
- [21] 王令超. 农用土地定级方法初探[J]. *国土资源科技管理*, 2001(01): 4-9. (WANG Lingchao. The research on agricultural land grading method[J]. *Science and technology of land and resources management*, 2001(01): 4-9. (in Chinese))
- [22] 马春霞. 基于 GIS 的土地适宜性评价及开发战略研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010. (Ma Chunxia. The Research on Suitability for land and the Strategy of Exploitation Based on GIS [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2010. (in Chinese))
- [23] Td/T 农用地分等规程[S]. 2003. (Td/T The Regulations of Farmland Grading[S]. 2003. (in Chinese))
- [24] David G. Rossiter. A theoretical framework for land evaluation[J]. *Geoderma*, 1996, 72(3-4): 165-190. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(96)00031-6.
- [25] Bakhtiar Feizizadeh, Thomas Blaschke. Land suitability analysis for Tabriz County, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2013, 56(1): 1-23.
- [26] Farag F. Abushnaf, Kevin J. Spence, Ian D. Rotherham. Developing a Land Evaluation Model for the Benghazi Region in Northeast Libya using a Geographic Information System and Multi-criteria Analysis[J]. *APCBEE Procedia*, 2013, 5(0): 69-75. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.013.
- [27] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. *应用生态学报*, 2004(05): 833-836. (CHEN Jun feng, LI Xiubin. Simulation of hydrological response to land cover changes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(05): 833-836. (in Chinese))
- [28] 胡彩虹, 刘丽娜, 吴泽宁. 未来气候情景下覆被变化对径流量的影响[J]. *人民黄河*, 2012(01): 19-21, 24. (HU Caohong, LIU Lina, WU Zening. Effect of land cover change to runoff under future climate scenarios[J]. *Yellow River*, 2012(01): 19-21, 24. (in Chinese))
- [29] 盛前丽. 香溪河流域土地利用变化径流效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008. (SHENG Qianli. Research on response of runoff to land use change in Xiangxi River Watershed[D]. Beijing: Beijing Forestry University. 2008. (in Chinese))