

# 基于CLUE-S模型的黄土台塬区土地利用变化模拟 ——以陕西省咸阳台塬区为例

田义超,任志远

(陕西师范大学旅游与环境学院,西安 710062)

**摘要:**本文以2000年的TM遥感影像解译数据以及水文水资源数据为基础,综合运用Binary Logistic、CLUE-S模型以及SPSS19.0统计分析软件,测评了咸阳台塬区水土资源在数量和空间上的配置,并在此基础上模拟了咸阳台塬区未来土地利用变化的图谱。分析发现:①从水土数量优化配置的结果可知,耕地、草地、水域及未利用地面积减少,而林地和建设用地面积则有增加的趋势;②从面向生态的角度出发,黄土台塬区的水土优化配置结果反映了台塬区土地生态系统的生态价值和经济效益,台塬区的生态效益由2000年的1.5313亿元增加到2020年的1.5445亿元;而台塬区的土地经济收益则由2000年的68.4901亿元增加到2020年的71.9021亿元;③从水土空间优化配置的结果可以看出,咸阳台塬区建设用地的过去10年以及未来10年变化极为明显,建设用地主要在原有建设用地周边进行拓展,其中,建设用地变化最为明显的区域主要集中在咸阳市的秦都区以及三原县。

**关键词:**黄土台塬区;水土优化配置;CLUE-S模型;空间模拟;咸阳

## 1 引言

土地资源可持续利用是实现可持续发展的重要环节,并受到世界各国的共同关注<sup>[1-4]</sup>,而水土资源是农业生产的核心<sup>[5]</sup>,两者在空间上的匹配程度直接影响着区域农业的可持续发展与资源的可持续利用<sup>[6]</sup>。进入20世纪,人类对水土资源的利用广度和深度在不断加强,从而导致全球性的资源短缺和生态破坏,很大程度上削弱了自然环境的承载能力。因此,优化配置水土资源,提高其综合利用率已经成为区域发展中亟待解决的重大课题之一<sup>[7]</sup>。

目前,国内外相关学者从不同方面开展了大量的研究工作,取得了比较显著的成就<sup>[8-12]</sup>。国际上水土优化配置的实践研究,源于20世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题,而真正意义上致力于水土资源优化配置的研究则始于20世纪60年代初期,科罗拉多的几所学校对计划蓄水量的估算以及满足未来需水量的途径的探讨。国内对水土资源优化配置的研究主要集中在对水土资源优化配置的模型方面的研究,采用的优化配置的数学方

法主要是线性规划模型、灰色线性规划模型、多目标线性规划模型、动态规划模型以及SD模型<sup>[13]</sup>。张正栋根据系统工程原理和线性规划方法,从节水角度出发,以研究区最大经济效益为目标建立了农业内部结果优化配置模型<sup>[14]</sup>;王昕等以区域净效益和资金投入最少为目标,以可耕地面积、分区可供水量、总可利用水量、资金及作物种植面积等为约束条件,采用多目标线性规划方法对区域水土资源进行优化配置<sup>[15]</sup>;许新宜等提出了基于宏观经济的水资源合理配置理论与方法<sup>[16]</sup>。王劲峰等针对中国水资源供需平衡在空间上的差异性,提出了水资源在时间、部门和空间上的三维优化分配理论模型体系<sup>[17]</sup>。孙自永等以水资源与生态环境的耦合研究为基础,提出了中国西北地区内陆河流域面向生态环境的水资源开发模式<sup>[18]</sup>。

目前在水土资源优化配置研究方面存在的主要问题是,研究的相关模型和理论都相当的复杂,且模型的操作也不太方便,没有普遍的实用性,无法进行推广。在优化水土配置方面,几乎大多数的研究只是将水土资源在数量上进行了优化配置,

收稿日期:2011-10;修订日期:2012-02。

基金项目:国家自然科学基金项目(41071057);教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(2009JJD770025);陕西师范大学中央高校基本科研专项基金项目(GK201101002)。

作者简介:田义超(1986-),男,陕西西安市人,硕士研究生,主要从事资源环境遥感与GIS的相关研究。

E-mail: tianyichao1314@yeah.net

通信作者:任志远(1953-),男,教授,博士研究生导师。E-mail: renzhy@snnu.edu.cn

且得到了一定的优化配置方案,但是如何将水土资源在数量和空间上进行优化配置始终是个难点。鉴于此,本研究以2000年的TM遥感影像解译数据以及水文水资源数据为基础,综合运用Binary Logistic回归、CLUE-S模型以及SPSS 19.0统计分析软件,对咸阳黄土台塬区水土资源在数量和空间上进行了空间优化配置,并在此基础上模拟了该区未来土地利用变化的图谱。

## 2 研究区概况

黄土塬又称黄土平台、黄土桌状高地。黄土台塬是被黄土覆盖的台状地,主要分布在关中平原的周边,黄土台塬区范围的界定主要是对陕西省各个地区的地理志中的地貌类型图进行矢量化,得到黄土台塬区范围,范围的界定主要是根据地貌单元进行划分的。研究区位于关中平原中部(图1),地处 $34^{\circ}2' \sim 35^{\circ}52' N$ ,  $107^{\circ}1' \sim 110^{\circ}36' E$ 之间,西起宝鸡市、东至东北韩城县、北至铜川、南至蓝田县,辖区面积 $29\,788.49\text{ km}^2$ ,东西长约 $320.21\text{ km}$ ,南北长约 $210.70\text{ km}$ 。主要分布在铜川、宝鸡、咸阳、西安以及渭南5个市的34个市、县区、336个乡镇。具体包括铜川的南部川塬区、宝鸡的渭河黄土台塬亚区、秦岭北麓梁状破碎台塬亚区、咸阳黄土台塬亚区、西安的青化翠峰原、铜人原、代王-马额原、八里原、少陵原、神禾原、荆山原、白鹿原、乐游原以及渭南的黄土台塬。

咸阳地区的黄土台塬分布在咸阳市南部,渭河冲积平原的外围,处于渭河地堑谷北岸的段阶部位,基底为块断式的端凸,从北向南逐级陷落,上被厚层黄土覆盖,形态呈阶状台面。台源地势较高,

塬面平缓开阔,上有洼地,塬梁分布,间有河谷切割。海拔 $450 \sim 1000\text{ m}$ 之间,高出平原 $100 \sim 300\text{ m}$ ,北部塬梁较高,可达 $300 \sim 500\text{ m}$ ,各级台塬以陡坎相接,局部地段呈缓坡过度,相对高差 $50 \sim 150\text{ m}$ 。本地区气候属暖温带大陆性季风气候,其总特点是温暖湿润、四季分明。平均气温为 $12.3 \sim 13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,多年平均日较差在 $10 \sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。7月平均气温在 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,1月平均气温为 $-0.5 \sim -1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $4500 \sim 4700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这种气候利于农作物的生长发育,为该地区经济的发展也提供了有利的条件;寒暖适宜,更有利于人类生存。

## 3 数据来源与数据预处理

### 3.1 数据来源

本研究所选用的数据包括遥感数据和非遥感数据,遥感数据主要选取了2000年TM遥感影像。TM数据来源于国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn>)网站。非遥感数据主要包括咸阳地理志、各种图件、土地利用调查数据、水文水资源数据、各种统计报表以及野外调查数据。图件包括各个县的黄土台塬分布图(电子扫描版.tif格式)、数字地形图(陕西省测绘局,1:10万)、行政区划图(陕西省测绘局,2004,1:25万)、土壤类型图(陕西省土地资源,1987,1:25万)、数字高程模型(美国SRTM, <http://strm.csi.cgiar.org>, 1:5万)、植被类型图(中国科学院资源环境数据中心,1990,1:100万)、水文水资源数据主要包括咸阳市水资源公报(2002-2009年),咸阳市江河水库大典(1980-2000年),咸阳市各县区水文分区数据,咸阳市水文手册,1990-2009居

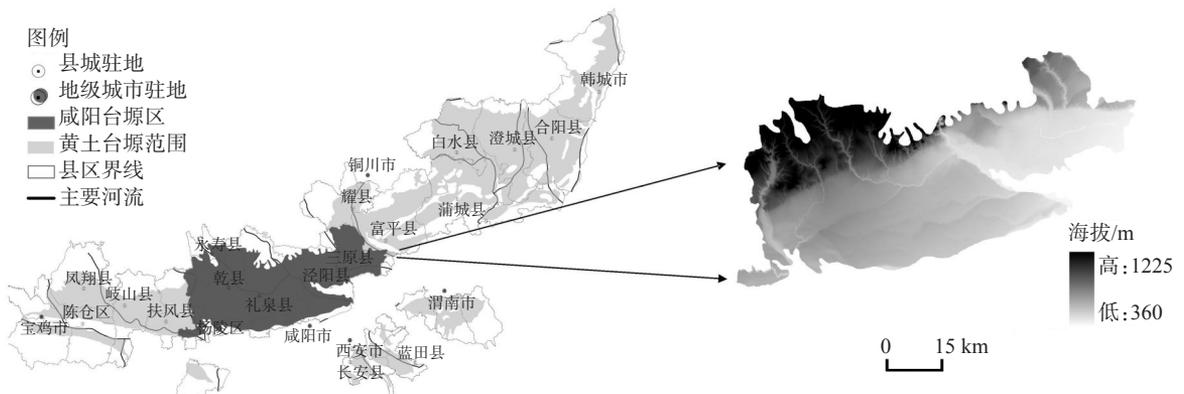


图1 黄土台塬区地理位置图

Fig.1 Location of loess tableland areas

民用水、工业生产用水和农业生产用水以及各种统计报表数据。

### 3.2 数据预处理

本研究在进行几何校正的过程中,选用 1:25 万比例尺的矢量图,在上面选取 20~30 个左右的控制点,如道路和河流的交叉点,以此控制点为基础,对 2000 年的 TM 影像进行精校正。由于 TM 遥感影像带有少量的云雾,必须对其进行去云雾处理,去云雾处理主要是在 ENVI 4.7 的 Landsat FLAASH 快速大气校正模块下完成的。之后,对 2000 年的 TM 遥感影像进行拼接、裁剪,最后应用美国克拉克大学克拉克实验室开发的 IDRISI 15.0 软分类中的 BAYCLASS 对黄土台塬区的 TM 遥感影像进行监督分类。根据研究的需要,将咸阳黄土台塬区的 TM 遥感影像分为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地 6 大地类(图 2)。

## 4 研究方法

### 4.1 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型是荷兰瓦赫宁根大学 P.H. Verburg 等在 CLUE 模型基础上发展的高分辨率的 LUCC 模型<sup>[19-21]</sup>。CLUE-S 模型包括非空间模块和空间模块两部分。非空间模块通过对人口、社会经济以及政策法规等土地利用变化驱动因素的分析,计算每年研究区域的土地利用需求变化;空间模块是以栅格空间数据库为基础、利用栅格土地利用类型适应性概率、各种土地利用类型的稳定性及土地利用转换规则,将逐年的区域土地需求变化在基于栅格系统的空间模块各候选单元进行空间分配。

### 4.2 Binary Logistic 回归模型

土地利用模拟的方法是由 Binary Logistic 回归

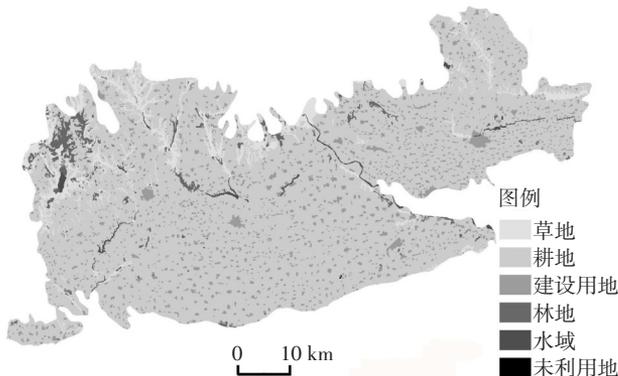


图 2 2000 年咸阳台塬区土地利用类型分布图

Fig.2 Spatial distribution of landuse types of Xianyang loess tableland areas in 2000

方程构建的,模型的目标变量是由土地利用格局的二分类变量的栅格图层构成的,此栅格图层分为 0 和 1 变量,0 表示此种土地利用类型不出现,1 表示此种土地利用类型出现。影响因素称为自变量或解释变量,可以是距道路的距离、距河流的距离、距城镇居民点的距离等。表达式为:

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \cdots + \beta_m x_m)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \cdots + \beta_m x_m)} \quad (1)$$

式中:  $p$  为每个栅格出现此种土地利用类型的概率;  $x$  为驱动因子;  $\beta_0$  为常数项;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \cdots, \beta_m$  为回归方程的回归系数。对回归方程的检验解释情况采用 Pontius<sup>[22]</sup>的 ROC(Relative Operating Characteristics)进行检验。该值介于 0.5~1 之间,一般认为,当 ROC 的值大于 0.7 时,所确定的驱动因子具有较好的解释能力,地类的概率分布和真实的地类分布之间具有较好的一致性;若该值等于 0.5,则说明回归方程对地类分布的解释没有任何意义<sup>[23]</sup>。

### 4.3 水土数量优化配置

水土资源系统中存在着很多不确定性的因素,配置结果最终要实现经济效益、社会效益和生态环境效益目标的协调和统一<sup>[24]</sup>。本研究首先运用线性规划方法将咸阳台塬区 2000 年的土地利用数据以及 2000 年的水资源数据进行求解,得到台塬区未来 20 年在此水资源情景假设下每年的各种土地利用类型的需求数量。之后将数量优化配置的结果运用 CLUE-S 在空间上实现水土地资源耦合及其配置。线性规划的具体方法为:

#### 4.3.1 目标函数的设置

本研究在目标函数的设置方面,采用的方法是多目标决策方法,该方法是采用线性加权方法,将多个单目标函数进行组合,生成一个新的目标函数的过程。该模型的表达式如下:

$$\max h(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x) + \sum_{j=1}^m \omega_j f_j(x) \quad (2)$$

式中:  $\omega_i$  和  $\omega_j$  分别为目标函数  $f_i(x)$  和目标函数  $f_j(x)$  在整体系统中的权重,并且满足  $0 \leq \omega_j \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^n \omega_i + \sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ , 其值可根据目标的重要程度进行确定。由于研究遵循的是生态和经济可持续发展的原则,所以取生态和经济分别为 0.5<sup>[25]</sup>。模型的表达式可变为:

$$\max h(x) = \sum_{i=1}^6 0.5a_i x_i + \sum_{i=1}^6 0.5b_i x_i \quad (3)$$

式中:  $h(x)$  为水土资源系统最大化的生态效益和经济效益;  $a_i$  和  $b_i$  分别为各类型土地资源单位面积

的生态效益和经济效益;  $i$  代表6种土地利用类型(表1)。其中,  $a_i$  主要参考中国陆地生态系统生态

表1 台塬区土地资源生态效益与经济收益

Tab.1 The ecosystem service value and economic income of land resources in Xianyang loess tableland areas

生态、经济价值	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
单位面积土地资源的生态效益/(万元/a.km <sup>2</sup> )	1.06	2.17	1.29	0.59	0.71	0.03
单位面积土地资源的经济收益/(万元/a.km <sup>2</sup> )	28.13	33.68	31.2	261.19	1.36	0.59

资产<sup>[26]</sup>,  $b_i$  来源于各市县的统计年鉴。

#### 4.3.2 决策变量的设置

决策变量的设置是根据台塬区的土地利用类型特点,设置耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,分别用  $X_0$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  表示。

#### 4.3.3 约束函数的设置

(1) 土地资源约束。各种土地利用类型的面积之和应等于台塬区的总面积之和,即:

$$\sum_{i=1}^6 X_i = A_1 \quad (4)$$

式中:  $A_1$  为个土地利用类型的面积之和。

(2) 人口总量约束。农用地和建设用地承载的人口应控制在规划人口之内。

$$M_1 \sum x_i + M_2 \sum x_k \leq P_m \quad (5)$$

式中:  $M_1$  为建设用地的平均密度;  $M_2$  为建设用地的平均密度;  $x_i$  为农业用地;  $x_k$  为建设用地;  $P$  为规划总人口。

(3) 林地面积约束。  $A_{2,m}$  为台塬区水土流失治理目标下有林地的规划发展面积。在干旱半干旱地区,尤其是在台塬地区,有林地蒸腾作用会加剧缺水程度,有必要限制其面积。

$$X_1 \geq A_{2,m}$$

(4) 草地面积约束。草地具有防风、防沙、抵御水土流失的功效,所以应适当发展台塬区的草地面积,  $A_{3,m}$  为台塬区草地规划年的面积。

$$X_2 \geq A_{3,m}$$

(5) 水域用地约束。黄土台塬地区水资源比较短缺,水资源的开发潜力很小,为了保证水土资源的优化配置,水域面积约束如下:  $A_{4,m}$  为台塬区水域面积约束。

$$X_3 \geq A_{4,m}$$

(6) 建设用地约束。根据咸阳市的土地利用总体规划 and 土地利用年度总计划,对黄土台塬区的土地面积实行限制政策。  $A_{5,m}$  为台塬区建设用地面积约束。

$$X_4 \geq A_{5,m}$$

(7) 水资源总量约束。即各类用地的总需水量不能超过台塬区总的用水量。

$$\sum B_i X_i \leq W$$

式中:  $X_i$  为各类用地面积;  $B_i$  为单位面积需水量;  $W$  为研究区域可用水资源总量(本研究区2000年的水资源总量为  $2.3 \times 10^8 \text{m}^3$ )。

(8) 数学模型要求约束。

满足  $X_i \geq 0$  ( $i=0,1,2,3,4,5$ )。

## 5 结果与分析

### 5.1 Binary Logistic 空间统计回归结果

#### 5.1.1 驱动因子的选择

土地利用变化模拟中,驱动因子的选择对土地利用模拟的结果起着至关重要的作用,本文在进行咸阳台塬区的水土资源空间配置时,选取了10个驱动因素对台塬区的土地利用/土地覆被进行分析;这10种驱动因素如表2所示。

#### 5.1.2 Binary Logistic 回归系数及其检验

将以上10种驱动因子和2000年的每一种土地

表2 土地利用变化驱动因子

Tab.2 Driving factors of land use change

变量	驱动因子	驱动因子描述
$X_0$	距铁路的距离	量算每一象元中心距铁路的距离
$X_1$	降水量	降水量插值图
$X_2$	距地级市中心距离	量算每一象元中心距地级市中心的距离
$X_3$	气温	气象站点数据插值
$X_4$	距道路距离	量算每一象元中心距道路的距离
$X_5$	距城镇中心的距离	量算每一象元中心距城镇中心的距离
$X_6$	人均GDP	人均国内生产总值,元/人
$X_7$	坡度	DEM衍生数据
$X_8$	距河流的距离	量算每一象元中心距河流的距离
$X_9$	高程	DEM数据

利用类型分别导入到 ArcMap 中,转化成栅格文件之后,在 ArcToolbox 中应用 Raster To ASCII 将各个栅格文件转换成二进制文件,通过 CLUE-S 的 File convert 模块将上述文件转换成单列文本文件,最后在 SPSS 19.0 中的二元逻辑斯蒂回归模块 Binary logistic,对每一种土地利用类型和各个驱动因子进行回归分析并将回归结果在 SPSS 中的 ROC 检验菜单下进行检验。得出咸阳台塬区的二元逻辑斯

蒂回归系数和 ROC 检验值如表 3。

逻辑回归结果中的  $\beta$  系数是由逻辑斯蒂回归方程所诊断出来的关系系数,  $\exp(\beta)$  是  $\beta$  系数的以  $e$  为底的自然幂指数,其值等于事件的发生比率 (Odds Ratio)<sup>[27]</sup>。研究中发生比率表示解释变量(驱动因子)每增加或减少一个单位,各地类分布概率的情况 ( $\exp(\beta) < 1$ , 发生比减少;  $\exp(\beta) = 1$ , 发生比不变;  $\exp(\beta) > 1$ , 发生比增加)。从影响耕地的主要

表 3 逻辑回归分析结果

Tab.3 The results of binary logistic regression

		$\beta$	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp( $\beta$ )	ROC
耕地	地级市 ( $X_2$ )	0.00003	0.00000	54.58371	1	0	1.00003	0.708
	气温 ( $X_3$ )	0.78693	0.06330	154.57405	1	0	2.19665	
	公路 ( $X_4$ )	0.00014	0.00004	9.83485	1	0.002	1.00014	
	城镇 ( $X_5$ )	-0.00005	0.00001	14.30595	1	0	0.99995	
	坡度 ( $X_7$ )	-0.23676	0.00808	858.02453	1	0	0.78918	
	高程 ( $X_9$ )	0.00275	0.00025	123.46920	1	0	1.00276	
	常量	-9.68462	0.93898	106.37845	1	0	0.00006	
	铁路 ( $X_6$ )	-0.00005	0.00001	25.64764	1	0	0.99995	
	降雨量 ( $X_1$ )	-0.01794	0.00779	5.29976	1	0.021	0.98222	
	气温 ( $X_3$ )	-1.66620	0.26417	39.78330	1	0	0.18896	
林地	城镇 ( $X_5$ )	0.00021	0.00003	64.83631	1	0	1.00021	0.833
	GDP ( $X_8$ )	-0.09494	0.01851	26.30804	1	0	0.90943	
	坡度 ( $X_7$ )	0.11116	0.01285	74.80780	1	0	1.11757	
	常量	27.69403	7.25272	14.58042	1	0	10652174.55	
	铁路 ( $X_6$ )	0.00003	0.00000	78.63470	1	0	1.00003	
	公路 ( $X_4$ )	0.00046	0.00007	46.59125	1	0	1.00046	
	城镇 ( $X_5$ )	0.00013	0.00002	57.80916	1	0	1.00013	
草地	坡度 ( $X_7$ )	0.31434	0.01009	970.26807	1	0	1.36936	0.899
	河流 ( $X_8$ )	-0.00010	0.00004	8.14061	1	0.004	0.99990	
	常量	-5.25831	0.11393	2130.29151	1	0	0.00520	
	地级市 ( $X_2$ )	-0.00002	0.00001	16.28720	1	0	0.99998	
	公路 ( $X_4$ )	-0.00065	0.00007	96.24402	1	0	0.99935	
	城镇 ( $X_5$ )	-0.00016	0.00002	72.52201	1	0	0.99984	
建设用地	坡度 ( $X_7$ )	-0.08337	0.01747	22.77347	1	0	0.92001	0.746
	高程 ( $X_9$ )	-0.00123	0.00036	11.49231	1	0.001	0.99877	
	常量	2.50162	1.41329	3.13313	1	0.077	12.20227	
	铁路 ( $X_6$ )	0.00012	0.00001	88.70943	1	0	1.00012	
	地级市 ( $X_2$ )	-0.00004	0.00002	4.56520	1	0.033	0.99996	
	公路 ( $X_4$ )	0.00034	0.00014	5.70010	1	0.017	1.00034	
	城镇 ( $X_5$ )	0.00025	0.00005	22.79566	1	0	1.00025	
水域	GDP ( $X_8$ )	-0.15527	0.03179	23.85441	1	0	0.85618	0.934
	河流 ( $X_8$ )	-0.00718	0.00071	103.33003	1	0	0.99284	
	高程 ( $X_9$ )	-0.01839	0.00189	94.63752	1	0	0.98177	
	常量	6.24309	1.29089	23.38937	1	0	514.44419	
	地级市 ( $X_2$ )	0.00298	0.00204	2.13566	1	0.144	1.00298	
	GDP ( $X_8$ )	4.46413	3.18881	1.95982	1	0.162	86.84580	
	河流 ( $X_8$ )	0.00744	0.00548	1.84211	1	0.175	1.00747	
未利用地	常量	-240.369	148.0736	2.63514	1	0.105	0.00000	0.996

注:  $\beta$  为回归方程系数, SE 为标准差, Wald 为 Wald 统计量, df 为自由度, Sig. 为拟合优度检验, Exp( $\beta$ ) 为发生比率。

驱动因子中,地级市、气温、公路、城镇、坡度和高程驱动因子对耕地的空间分布具有重要的解释作用。其中,坡度因子对耕地的负相关程度最大,达到-0.23676,说明坡度因子的值每增加一个单位,耕地的发生比率则减少0.23676倍,这主要是因为随着坡度的增加,地形起伏对耕地的发生和发展起着至关重要的因素。咸阳台塬区的林地主要分布在海拔450~1000m北部塬梁地区,从影响林地的空间分布驱动因子中可以看出,坡度和城镇因子对林地的 $\beta$ 指数为正,分别达到0.11116和0.00021,表明坡度和城镇驱动因子的值每增加一个单位,林地的发生比率则增加0.11116和0.00021倍,说明制约台塬地区林地发展的主要因素是坡度和距离城镇的距离两个影响因子。而限制台塬区林地发展的主要驱动因子则是铁路、降雨量、气温、城镇以及人均GDP因子。对草地发展具有影响作用的驱动因子主要是铁路、公路、城镇、坡度以及河流。其中,河流驱动因子对草地的影响因子为-0.00010,说明距离河流越近,草地的分布概率则增加0.00010倍,而坡度因子对草地的影响作用则达到最大值0.31434,表明咸阳台塬地区随着坡度的增加,草地分布格局呈大幅度增加的态势。限于篇幅,建设用地、水域以及未利用地的分析结果分析见表3。

从ROC的回归结果可以看出,所选驱动力因子能较好的解释土地利用格局的分布情况,其中水域和未利用地所选的驱动力的解释能力最强,ROC指分别达到了0.934和0.996;而林地和草地的解释能力较强,分别达到0.833和0.899;耕地和建设用地的ROC值在0.7附近,说明所选驱动力因子对其解释能力较差,但是不影响模型的正常运行。从各大地类ROC的总体趋势上可以看出,ROC值均高于0.7,表明各地类的概率分布和真实的地类分布之间具有较好的一致性,回归方程能较好的解释地类的空间分布。

## 5.2 CLUE-S模型非空间模块构建

本文在非空间模块的构建中,主要是对黄土台塬区的水资源和土地资源数据以及2020年的水资源数据运用线性规划方法进行求解,得到台塬区未来20年在此水资源情景假设下的每年的各种土地利用类型的需求数量。根据3.3方法中的目标函数和约束函数的设置,代入相应的数值,借助于Mathematics软件,求出咸阳台塬区水资源总量控制下的各种土地利用需求约束文件,并根据台塬区土地资源生态效益与经济效益标准求出各个年份以及未来年份咸阳台塬区的土地生态效益和经济效益,结果如表4。

表4 土地利用需求文件参数( $\text{hm}^2$ )

Tab.4 The parameters of demand file for land use ( $\text{hm}^2$ )

年份	耕地 $X_0$	林地 $X_1$	草地 $X_2$	水域 $X_3$	建设用地 $X_4$	未利用地 $X_5$	合计	生态效益/亿元	经济效益/亿元
2001	1192176	31056	94864	11152	118432	80.00	1447760	1.5313	68.4901
2002	1190627	31943.79	94846.95	11122.95	119139.8	79.05	1447760	1.5319	68.6607
2003	1189079	32831.48	94829.84	11093.66	119847.3	78.81	1447760	1.5326	68.8313
2004	1187531	33719.45	94812.85	11064.34	120555	78.05	1447760	1.5332	69.0019
2005	1185981	34607.76	94795.87	11035.25	121262.8	77.45	1447760	1.5339	69.1725
2006	1184433	35495.55	94778.75	11006.01	121970.3	76.75	1447760	1.5346	69.3431
2007	1182884	36383.34	94761.75	10976.82	122678	76.16	1447760	1.5352	69.5137
2008	1181335	37271.36	94744.65	10947.64	123385.6	75.25	1447760	1.5359	69.6843
2009	1179787	38159.25	94727.64	10918.41	124093.3	74.56	1447760	1.5365	69.8549
2010	1178238	39047.17	94710.55	10889.24	124800.9	74.15	1447760	1.5372	70.0255
2011	1176690	39935.14	94693.15	10860.21	125508.5	73.46	1447760	1.5379	70.1961
2012	1175141	40822.94	94676.45	10830.84	126216.2	72.85	1447760	1.5385	70.3667
2013	1173592	41710.87	94659.47	10801.61	126923.8	72.17	1447760	1.5392	70.5373
2014	1172044	42598.76	94642.35	10772.44	127631.5	71.55	1447760	1.5398	70.7079
2015	1170494	43486.64	94625.23	10743.28	128339.2	70.88	1447760	1.5405	70.8785
2016	1168946	44374.57	94608.25	10714.06	129046.8	70.25	1447760	1.5412	71.0491
2017	1167397	45262.48	94591.32	10684.88	129754.4	69.54	1447760	1.5418	71.2197
2018	1165849	46150.39	94574.15	10655.63	130462.1	68.95	1447760	1.5425	71.3903
2019	1164300	47038.21	94557.41	10626.42	131169.8	68.58	1447760	1.5431	71.5609
2020	1162752	47926.15	94540.05	10597.27	131877.4	67.65	1447760	1.5438	71.7315
2020	1161203	48814	94523	10568	132585	67.00	1447760	1.5445	71.9021

从水土数量优化配置的结果可以看出:①在面积减少的地类中,耕地由2000年的1192176 hm<sup>2</sup>调整到2020年的1161203 hm<sup>2</sup>,减少了30973 hm<sup>2</sup>,减少率为2.30%;草地由2000年的94864 hm<sup>2</sup>调整到2020年的94523 hm<sup>2</sup>,减少了341 hm<sup>2</sup>,减少率为0.36%;水域由2000年的11152 hm<sup>2</sup>调整到2020年的10568 hm<sup>2</sup>,减少了584 hm<sup>2</sup>,减少率为5.24%;未利用地由2000年的80 hm<sup>2</sup>调整到2020年的67 hm<sup>2</sup>,减少了13 hm<sup>2</sup>,减少率为16.25%;②在面积增加的地类中,由于植树造林政策的作用,林地面积由2000年的31056 hm<sup>2</sup>调整到2020年的48816 hm<sup>2</sup>,增加了17758 hm<sup>2</sup>,增加率为57.18%;由于城市化过程的加快,建设用地面积由2000年的118432 hm<sup>2</sup>调整到2020年的132585 hm<sup>2</sup>,增加了14153hm<sup>2</sup>,增加率为11.95%。

从面向生态的角度出发,黄土台塬区的水土优化配置结果反映了台塬区土地生态系统的生态价值和经济效益。从配置及计算结果中可以看出,台塬区的生态效益由2000年的1.5313亿元增加到2020年的1.5445亿元,增加了0.0132亿元;而台塬区的土地经济收益则由2000年的68.4901亿元增加到71.9021亿元,增加了3.4120亿元。

### 5.3 台塬区土地利用转换规则和稳定性设置

不同土地利用类型之间发生转换的可能性不同,由此构成一组土地利用转换系数。转换系数值介于0到1之间。1表示几乎不会发生的转换,0意味着该类型可任意转换。介于0~1之间的值表明转换的可能性,值越大越不可能。越接近1,说明其转移的可能性就越小,反之越大。根据黄土台塬区的土地利用的转换规律和各个地类之间转化的难易程度,本研究设置了台塬区不同土地利用类型的转换规则如表5所示。

CLUE-S模型中的ELAS是对土地利用系统中不同土地利用类型的稳定程度进行设置。参数ELAS的值介于0和1之间,参数值越大,土地利用就越稳定,对应的土地利用类型发生转变的概率就越小。根据研究区各种土地利用类型的特点,分别给各种土地利用类型赋予不同的ELAS参数值,如表6所示。

### 5.4 CLUE-S模型运行结果及其图谱预测

#### 5.4.1 模型结果检验

CLUE-S模型的动态模拟是在综合分析土地利用的空间分布概率适宜图、土地利用变化规则和研

究初期土地利用分布现状图的基础上,根据总概率TPROP大小对土地利用需求进行空间分配的过程。土地利用需求预测是根据与各类用地有关的当前或以往的资料和数据,通过科学方法进行逻辑推理,对一定地区、一定时期内未来各类用地规模的数量动态变化作出科学估计和测算。本研究的土地利用需求文件是根据线性规划方法求出来的,然后以2000年的土地利用数据为基础,模拟未来20年的土地利用变化趋势,在模拟的过程中,首先必须对模拟的精度进行检验。检验方法主要是对2000年实际土地利用类型图像和模拟图像进行Kappa指数分析,检验及结果如图3。

经过CLUE-S模型进行空间模拟,得到了2000年研究期初的土地利用类型图,对模拟的效果可以通过Kappa指数<sup>[28-30]</sup>进行模型精度的检验。经过计算可知,Kappa指数为75.39。说明该模型具有模拟区域土地利用变化的能力,基本上能满足研究与土地利用预测的能力。

#### 5.4.2 土地利用模拟及未来土地利用变化图谱预测

在上述研究的基础上,将各个参数输入到CLUE-S模型中,模拟并预测了咸阳台塬区2002-2020年的土地利用变化过程。

从模拟的变化中可以看出,研究区的建设用地

表5 台塬区不同土地利用类型转换规则  
Tab.5 Transformational rules among various land use types in loess tableland areas

	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
耕地	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
建设用地	0	0	0	1	0	0
水域	1	1	1	1	1	1
未利用地	1	1	1	1	1	1

表6 台塬区各土地利用类型的稳定性参数  
Tab.6 Stability parameters of land use types in loess tableland areas

各种土地利用类型转化的稳定性	
土地利用类型	稳定性
耕地	0.8
林地	0.7
草地	0.5
建设用地	0.9
水域	0.8
未利用地	0.4

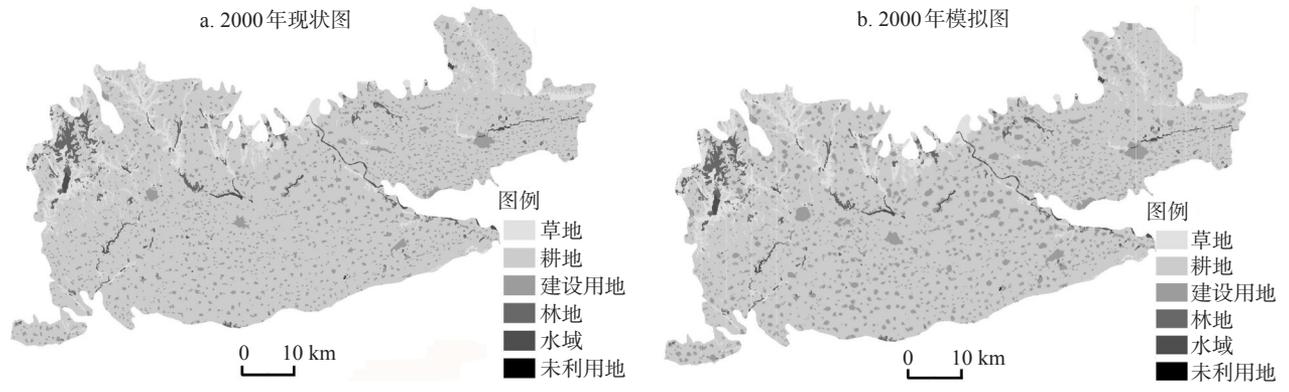
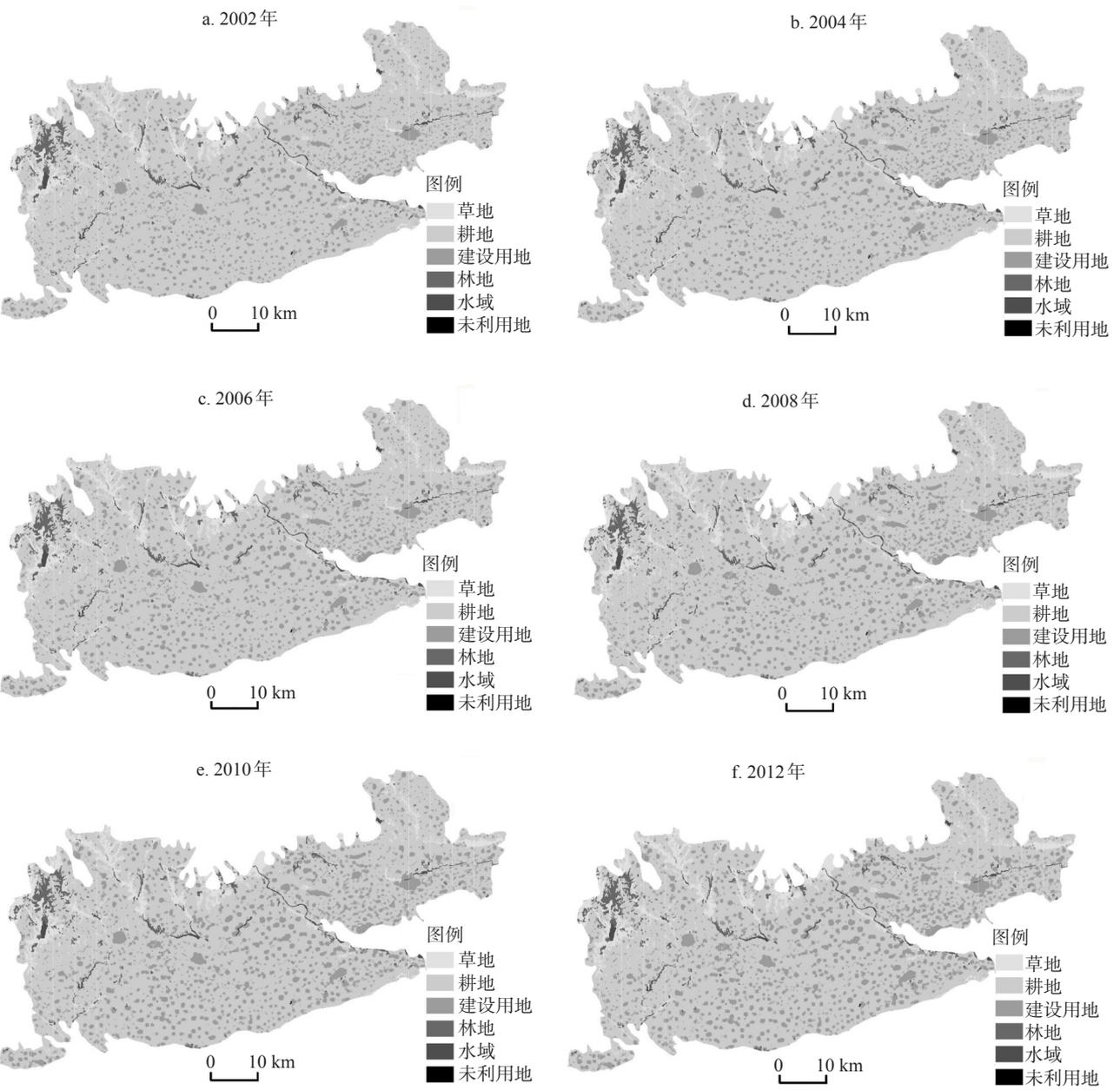


图3 2000年现状图与模拟对比图  
 Fig.3 The contrast of simulated and actual diagrams



续图4

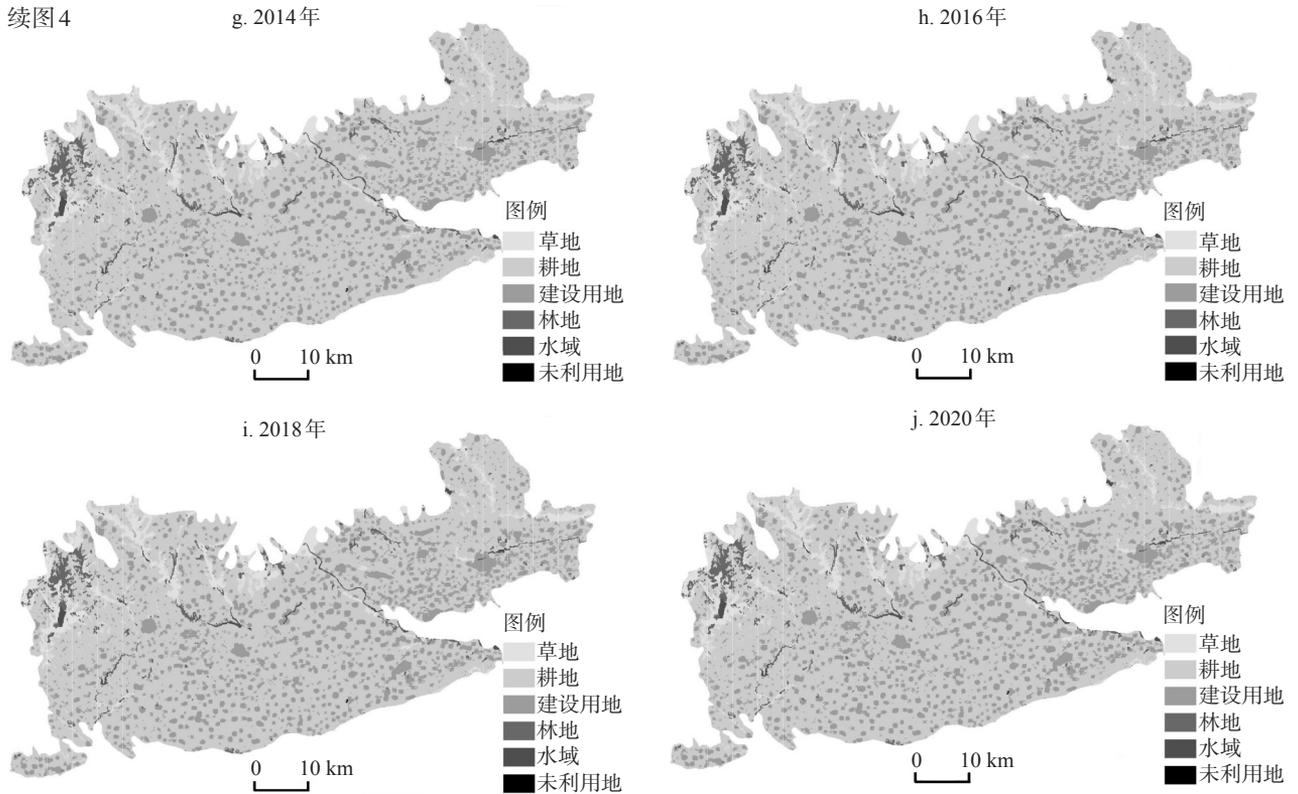


图4 咸阳台塬区各年份土地利用模拟图

Fig.4 Modeling land use of Xianyang loess tableland areas in each year

急剧增加,其中,增加的区域主要集中在原有建设用地周边进行拓展,建设用地变化最为明显的区域主要集中在咸阳市的秦都区以及三原县。研究期内,耕地大量减少,这与长期以来咸阳地区建设用地大量占用耕地是密切相关的;水域面积几乎没有多大的变化;林地面积和草地面积呈现微量增加的趋势,主要是由于咸阳市自1997年以来在部分地区实行植树造林、封林育草的政策发挥了明显作用,并导致生态环境得到改善;研究期间未利用地也呈少量减少趋势,这是由于其他用地不断拓展的结果。图4为研究期间的土地利用模拟图。

## 6 结论与讨论

本文以2000年的TM遥感影像解译数据以及水文水资源数据为基础,综合运用Binary Logistic逻辑斯蒂回归、CLUE-S模型以及SPSS19.0统计分析软件,测评了咸阳黄土台塬区水土资源在数量上的配置以及空间上的配置,并模拟了咸阳台塬区未来土地利用变化的图谱。通过分析发现:

(1) 从水土数量优化配置的结果可以看出:当咸阳黄土台塬区可用水资源总量在 $2.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时,耕地、草地、水域及未利用地面积减少,而林地和建设用地面积则有增加的趋势。

(2) 从面向生态的角度出发,黄土台塬区的水土优化配置导致了土地生态系统的生态价值和经济效益的提高。其中生态效益由2000年的1.5313亿元增加到2020年的1.5445亿元,土地经济收益则由2000年的68.4901亿元增加到71.9021亿元。

(3) CLUE-S能较好的模拟台塬区未来的土地利用变化过程,借助Kappa指数对CLUE-S模型进行验证,得出Kappa指数为75.39,基本上可以满足研究的需要。所以运用此模型进行台塬区的土地利用和土地变化是可行的。

(4) 从水土空间优化配置的结果可以看出,建设用地的过去10年以及未来10年变化极为明显,主要集中在原有建设用地周边进行拓展。其中变化最明显的区域主要集中在咸阳市的秦都区以及三原县。

本文从另外一个视角上对水土优化配置问题

进行了初步探索,是对传统方法进行的一次初步的改进过程。传统方法在进行土地利用优化配置时,只能对水土资源在数量上进行配置,在对其进行空间配置时,许多学者和研究人员是对其地类图斑遵循一定的原则进行手工调整,这样做的缺点是数据量大,调整的时候也不好掌握。本研究运用CLUE-S将水土资源的数量作为土地利用需求,进而预测未来水土资源的空间配置,在方法上是可行的,为水土资源空间优化配置提供了一种新的研究方法和思路。而在进行空间优化配置时,由于本文所提出的CLUE-S模型对水土资源进行优化配置模型参数较多,运行起来比较复杂,因此,还需探索其他方法对台塬区的水土资源进行优化配置,如引入CA(元胞自动机)模型,CA模型等,还有待于在实践不断总结提高。

## 参考文献

- [1] 蔡运龙,李军. 土地利用可持续性的度量: 一种显示过程的综合性方法. 地理学报, 2003, 58(2): 305-313.
- [2] 陈百明,张凤荣. 中国土地持续利用评价指标体系的理论与方法. 自然资源学报, 2001, 16(3): 197-203.
- [3] 郭欢欢,李波,侯鹰,等. 元胞自动机和多主体模型在土地利用变化模拟中的应用. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1336-1344.
- [4] 刘彦随,陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究. 地理研究, 2002, 21(3): 324-330.
- [5] 刘昌明,孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259.
- [6] 刘彦随,吴传钧. 中国水土资源态势与可持续食物安全. 自然资源学报, 2002, 17(3): 270-275.
- [7] 姚华荣,郑度,吴绍洪. 首都圈防沙治沙典型区水土资源优化配置: 以河北省怀来县为例. 地理研究, 2002, 21(5): 531-542.
- [8] 郑宇,冯德显. 城市化进程中水土资源可持续利用分析. 自然资源学报, 2002, 17(3): 270-275.
- [9] 谭永忠,吴次芳,牟永铭,等. 经济快速发展地区县级尺度土地利用空间格局变化模拟. 农业工程学报, 2006, 22(12): 74-77.
- [10] 朱利凯,蒙古军. 国际LUCC模型研究进展及趋势. 地理科学进展, 2009, 28(5): 782-790.
- [11] 刘纪远,邓祥征. LUCC时空过程研究的方法进展. 科学通报, 2009, 54(21): 3251-3258.
- [12] 蔡玉梅,刘彦随,宇振荣,等. 土地利用变化空间模拟的进展: CLUE-S模型及其应用. 地理科学进展, 2004, 23(4): 63-71.
- [13] 耿艳辉,闵庆文,成升魁. 流域水土资源优化配置几种方法比较. 资源科学, 2007, 29(2): 188-193.
- [14] 张正栋. 榆中县灌溉型水土资源利用系统模型的调控与优化. 西北师范大学: 自然科学版, 1995, 31(2): 73-79.
- [15] 王昕,刘建强,贾永政. 黄泛平原中低产田水土资源优化利用模式研究. 中国农村水利水电, 2004(6): 45-47.
- [16] 许新宜,王浩,甘泓. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [17] 王劲峰,刘昌明,于静洁,等. 区际调水时空优化配置理论模型探讨. 水利学报, 2001(4): 7-14.
- [18] 孙自永,马瑞,周爱国. 中国西北地区内陆河流域面向生态环境的水资源开发模式研究. 干旱区资源与环境, 2003, 17(1): 28-31.
- [19] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A. Land use change Environmental Management, 2002, 30(3): 391-405.
- [20] Verburg P H, Veldkamp A, Koning G H J. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. Ecological Modelling, 1999, 116(1): 45-61.
- [21] Verburg P H, Veldkamp A. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. Landscape Ecology, 2004, 19(1): 77-98.
- [22] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2004: 370-790.
- [23] 摆万奇,张永民,阎建忠,等. 大渡河上游地区土地利用动态模拟分析. 地理研究, 2005, 24(2): 206-213.
- [24] 耿艳辉,闵庆文. 西北地区水土资源优化配置问题探讨. 水土保持研究, 2004, 11(3): 100-102.
- [25] Turner II B L, Meyer W B, Skole D L. Global land use and cover change: Towards an integrated program of study. AMBIO, 1994, 23(1): 91-95.
- [26] 任志远,郭彩铃. 区域水土资源平衡与灌溉优化模型研究: 以陕西省关中灌区为例. 干旱区地理, 2000, 23(2): 164-268.
- [27] 王济川,郭志刚. Logistic 回归模型方法与应用. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [28] Congalton R, Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. New York: Lewis Publishers, 1999: 137.
- [29] Pontius J. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. Photogram Metric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(8):1011-1016.
- [30] 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. 生态学报, 2005, 25(4): 778-784.

# Land Use Change Simulations in Loess Hilly Areas Based on CLUE-S Model: A Case Study in Xianyang Loess Tableland Areas of Shaanxi Province

TIAN Yichao, REN Zhiyuan

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** Based on the remote sensing image interpretation in 2000, and combined with hydrology and water resources data, this paper evaluates optimal allocation of the soil and water resources in quantity and spatial configuration. On this basis, it simulates the land use change scenarios in Xianyang loess hilly areas through the application of binary logistic regression, CLUE-S model and SPSS 19.0 statistical analysis software. The results are shown as follows. (1) From the quantity results of optimal allocation of land and water, it is indicated that arable land, grassland, water area and unused land are decreasing, while the woodland and construction land areas are showing an increasing trend. (2) From the point of view of ecology, the results of optimal allocation of the soil and water resources in the loess hilly areas can reflect ecological value and economic benefits of land ecosystem. It is estimated that the ecological benefits would increase from 153.13 million yuan in 2000 to 154.45 million in 2020, and the land economic benefits would rise from 6.84901 billion to 7.19021 billion yuan in the 20 years. (3) From the results of spatial optimal allocation of water and land resources in the past 10 years and the next 10 years, we can come to a conclusion that the construction land has increased dramatically, and the increased area is mainly concentrated in the surrounding areas of original construction land. The areas with most significant construction land changes are mainly concentrated in the Qindu District of Xianyang city and Sanyuan county.

**Key words:** loess tableland areas; optimal allocation of water and land resources; CLUE-S model; spatial simulation; Xianyang

本文引用格式:

田义超, 任志远. 基于 CLUE-S 模型的黄土台塬区土地利用变化模拟: 以陕西省咸阳台塬区为例. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1224-1234.