

砒砂岩区小流域土地利用格局变化与优化研究

盛艳, 秦富仓, 张艳杰

(内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010019)

摘要: 土地利用格局优化有利于实现土地资源高效利用, 以砒砂岩区西黑岱流域为研究对象, 以侵蚀防控为目标, 基于不同时期的土地利用现状图和地形图等数据, 采用线性规划法和元胞自动机(CA)模型, 在 GIS 技术的支持下, 对西黑岱流域的土地利用格局变化与优化进行了研究, 结果表明: 研究期内耕地、林地不断地增加, 其中林地面积的增加最大, 草地面积的减少幅度很大, 水域面积有所减少, 建设用地略有所增加。优化后耕地总面积增加了 20.67 hm², 林地面积明显增加至 1 501.89 hm², 所占比重超过了草地; 而草地面积减少了 157.68 hm², 此次优化使得西黑岱流域土地利用结构发生明显的变化, 其中林地面积在大幅度的提高, 耕地、草地向高质量方向发展, 通过土地优化将减少土壤侵蚀, 保护当地脆弱的生态环境, 提高综合生产力, 同时为砒砂岩区进行土地利用格局优化调控提供依据。

关键词: 土地利用; 格局优化; 元胞自动机; 砒砂岩区

中图分类号: P901

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0076-06

Study on Land-use Change and Pattern Optimization of Small Watershed in Soft Rock Region

SHENG Yan, QIN Fu-cang, ZHANG Yan-jie

(College of Ecological and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China)

Abstract: The land use pattern optimization can achieve efficient use of land resources. The land use pattern change and optimization of Xiheidaigou Watershed were studied in area of Soft Rock Region based on the land use status in different periods of map and topographic map data, through using linear programming method and cellular automata model, with the support of GIS technology. The results show that cultivated land and forest land increased to different extent, the forest land increased the most, the reduction magnitude of grassland area was larger, water body and construction land area had a different degree of reduction in the study period. The total area of cultivated land increased 20.67 hm², forest area significantly increased to 1 501.89 hm², grassland area decreased 157.68 hm² after land use pattern optimization. The optimization makes the structural changes in land use significantly. So, in order to achieve the purpose of watershed land use pattern, it is necessary to reduce soil erosion and to improve the comprehensive land productivity, which provides the basis for optimizing the regulation of land use pattern in arsenic sandstone areas.

Key words: land use; pattern optimization; cellular automata model; soft rock region

土地利用格局优化实质是土地资源合理配置和土地生态合理规划, 同时协调生态效益、经济效益和社会效益之间的关系, 其研究已成为土地利用/覆盖变化研究的主要内容之一^[1-2]。砒砂岩区地处鄂尔多斯高原, 广泛分布于黄河流域以晋陕蒙接壤区为中心的区域, 由于气候干旱, 降雨量较少, 植被覆盖度低, 地形支离破碎, 风沙较多, 暴雨集中及其特殊的地

形和地表组成物质, 不合理的土地开发利用, 使得这一区域水土流失、土壤盐渍化、自然灾害频繁, 通过以侵蚀防控和土地利用综合效益最大化为目的的土地利用格局优化, 实现该区域内土地资源的合理高效利用。地理信息系统(GIS)技术的空间分析功能和元胞自动机模型的发展和完善为土地利用空间格局的生态优化提供了一个全新的视角^[3-4], 使土地利用格

收稿日期: 2013-08-19

修回日期: 2013-09-21

资助项目: 国家自然科学基金(41061028); 内蒙古高等学校科研项目(NJZY13070)

作者简介: 盛艳(1979—), 女, 内蒙古呼和浩特市人, 在读博士, 讲师, 主要研究方向为土地利用与水土保持。E-mail: shengyan315@126.com

通信作者: 秦富仓(1966—), 男, 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: qinfu@126.com

局演变规律能够定量并精确描述成为可能。GIS 作为一种空间分析的手段和工具,在 CA 模型的实现和显示方面发挥巨大作用,现有的 GIS 软件空间分析功能不足,而 CA 模型具有模拟二维空间演化过程的强大能力,它和 GIS 的结合可以有效地克服 GIS 在模型功能方面的局限性^[5]。因此,将 CA 模型和 GIS 的结合来研究土地利用格局优化是切实可行的。

本文以内蒙古准格尔旗西黑岱流域为研究区,该区地处砒砂岩区,在该流域,土壤侵蚀是破坏生态环境的主要因素之一。研究区土地利用结构比较单一,由于受特殊的地形地貌条件的影响,研究区内沟壑纵横,耕地主要分布于坝地上,西黑岱流域土壤母质主要为砒砂岩,极易导致土壤侵蚀,通过对西黑岱小流域的土地利用结构和空间格局变化和优化进行研究,使生态环境状况良性发展,可以为西黑岱流域坝地农业持续高产提供科学依据,为研究区生态环境治理具有重要的参考和借鉴意义,同时可以在不同程度上提高当地的经济、社会、生态等效益^[6-7],为当地土地利用的可持续发展提供有力依据。

1 研究区概况

西黑岱小流域位于黄土高原北部内蒙古自治区西南部和鄂尔多斯高原东端,属黄土丘陵沟壑区第一副区的砒砂岩区,是皇甫川支流十里长川上游右岸的一条支流,流域总面积 32 km²。西黑岱流域属半干旱大陆性气候,流域年平均气温 6~8℃,无霜期 130~180 d,平均日照时数约 3 000 h,流域平均降水量约 400 mm,降雨集中在 6—9 月,占全年降雨量的 78.40%。冬春季节干旱且多大风,年平均风速 2.60 m/s。该流域日照充足,有效积温高,水热同期,有利于作物生长。该区土壤主要由黄土、砒砂岩和风沙土组成,土层厚度 5~20 cm。该区土质松脆贫瘠,有机质含量低,整个区域植被稀疏,乔灌木种类主要有杨、柳、油松、沙棘等。该区土壤侵蚀方式有水力侵蚀、风力侵蚀和重力侵蚀,其中水力侵蚀占主导地位,水力侵蚀中面蚀的面积约占 65%,沟蚀占 35%,多年平均侵蚀模数为 1.40 万 t/(km²·a),是国家重点治理的小流域。西黑岱沟流域属薛家湾镇管辖,涉及两个行政村,现有农户 230 户,人口 886 人,劳力 376 个,人口密度 27.70 人/km²。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究数据来源于 1990 年、2000 年和 2010 年研究区的 TM 遥感影像和等高距为 10 m 的 1:50 000

的地形图。利用 ERDAS 9.2 软件对 TM 影像进行 4,3,2 波段的假彩色合成,使影像中的地物特征显示更加清晰,通过目视解译对 5 种典型地类进行训练样区选取,最后运用最大似然法对 TM 影像进行监督分类^[8-9]。通过实地抽样调查对分类结果进行精度验证,总体精度达到 91%,Kappa 系数为 0.90。运用 ArcGIS 9.2 软件对分类结果中的 5 种土地利用类型进行面积提取。在土地利用分类中参照的是 2001 年全国土地利用分类体系(征求意见稿)^[10],根据研究区土地类型特征,将土地利用划分为耕地、林地、牧草地、建设用地、水域共 5 个地类,同时收集了 1990—2010 年西黑岱流域的历史统计社会经济数据及相关文献资料等。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化动态度 土地利用的变化包括数量变化、变化速度、类型转化等几个方面。数量变化为研究期始、末的面积数量差值。变化速度可以利用动态度进行定量描述,包括单一和综合土地利用动态度^[11-12],计算公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{\sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: i, j ——土地利用类型; n ——土地利用类型的数量; T ——研究时段长度; K, LC —— T 时段内的单一和综合土地利用动态度; U_b, U_a ——研究期末和期初某种土地利用类型的面积; LU_i ——研究期初 i 类土地的面积; ΔLU_{i-j} —— T 时段内 i 类土地变为 j 类 ($i \neq j$) 土地的面积。

2.2.2 土地利用类型转化概率 土地利用类型转移矩阵主要用于分析一定时期内各种土地利用类型的转移面积;还可作为土地利用的状态转移概率指数预测未来时刻的土地利用变化,土地利用类型转移矩阵可以具体地描述区域土地利用变化的结构特征与各用地类型变化的方向^[13-14],其一般数学形式为:

$$P = P_{ij} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

如果某种地类某一时刻处于状态 A_i ,则在下一时刻,它可能由状态 A_i 转换为 A_1, A_2, \dots, A_n 中的任何一个状态,故 P_{ij} 满足下述条件:

$$(1) 0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$(2) \sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

通过计算地类转移概率矩阵,可求得每个状态转移到其他任何一个状态的状态转移概率 P_{ij} ,其计算方程为^[10]:

$$p_{ij}^n = \sum_{k=1}^N p_{ik} P_{kj}^{n-1} \quad (6)$$

2.2.3 线性规划法 采用线性规划法及结合流域土地利用的实际情况^[15-16],以侵蚀防控为目的,利用此方法合理调整土地利用方式,以期获得最大的效益。线性规划法模型的构建如下:

(1) 决策变量设置。为了土地利用优化更好地服务于当地土地管理者,根据西黑岱流域土地利用特点,共设耕地、林地、草地、水域和建设用 5 个变量,分别用 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 来表示。

(2) 目标函数。西黑岱流域土地利用优化以侵蚀防控为目的,在资源与生态容量内和国家区域政策引导下,满足人口社会经济需求,追求经济效益最大。

$$\min f(x) = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (7)$$

式中: $f(x)$ ——西黑岱流域在目标年(2025年)的土壤侵蚀量(t); c_j ——第 j 种土地利用类型的土壤侵蚀模数,它的其中一组解 $\{x_j\}$ 称为最优解^[17],即为目标年该流域最优土地利用格局。

(3) 约束方程:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m a_j &\leq (=, \geq) b_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ X_i &\geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: X_i ——各类土地面积,应为非负值; a_i ——变量约束系数; b_i ——资源限制量约束常数。

2.2.4 元胞自动机(CA)模型 元胞自动机(简称CA)是按照一定局部规则,在一个由具有离散、有限

状态的元胞组成的元胞空间上,具有时空计算特征的动力学模型,具有模拟复杂系统时空动态演化能力^[18]。通过定义局部的细胞邻近关系以及使用比较简单的作用于细胞领域上局部的转换规则,可以模拟和表示整个系统中复杂现象的时空动态变化,它适用于模拟和显示具有自组织特征系统的时空动态行为和过程。CA 系统是一个由细胞(cells),状态(states),邻域(neighbors)和规则(rules)构成的四元组,CA 模型可以表示为:

$$s(t+1) = f[s(t), N] \quad (9)$$

式中: s ——元胞有限、离散的状态集合; $t, t+1$ ——不同时刻; N ——元胞的邻域; f ——局部空间的元胞转化规则。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 土地利用变化的数量分析 研究区 1990—2010 年 20 a 间土地利用类型的面积变化见表 1,耕地的面积明显增加,耕地由 1990 年的 160.3 hm² 增加到 2010 年的 196.74 hm²,20 a 内耕地面积增加了 36.41 hm²;林地面积增加最快,增加面积为 628.41 hm²,林地所占比重由 1990 年的 23.03% 增加到 2010 年的 42.67%,呈稳定增加趋势;牧草地的面积有明显减少的趋势,牧草地由 1990 年的 2 190.92 hm² 减少到 2010 年的 1 548.23 hm²,20 a 间减少了 20.09%;水域面积在研究期内不同程度的减少,由 1990 年的 81.19 hm² 减少到 2010 年的 55.31 hm²,20 a 间减少了 25.88 hm²;建设用地在研究期内变化不明显,略有增加。

表 1 西黑岱流域不同时期的土地利用现状分类

土地利用类型	1990 年		2000 年		2010 年	
	面积/hm ²	所占比重/%	面积/hm ²	所占比重/%	面积/hm ²	所占比重/%
耕地	160.33	5.01	189.59	5.92	196.74	6.15
林地	737.04	23.03	940.27	29.38	1365.45	42.67
牧草地	2190.92	68.47	1975.32	61.73	1548.23	48.38
水域	81.19	2.54	61.3	1.92	55.31	1.73
建设用地	30.52	0.95	33.52	1.05	34.27	1.07

3.1.2 土地利用变化速度分析 土地利用的变化速度能够反映某一区域土地利用类型的变化程度,区域内各种土地利用类型的数量在不同研究时段变化幅度和速度有所不同,对土地利用类型变化速度分析,能够了解研究区土地利用变化的剧烈程度。基于研究区三期的土地利用现状数据,用公式(1),(2)计算出研究区的耕地、林地、牧草地、建设用地、水域的单一和综合土地利用类型动态度(见表 2—3)。

表 2 西黑岱流域土地利用变化单一动态度 %

土地利用类型	1990—2000 年	2000—2010 年	1990—2010 年
耕地	1.83	0.38	1.14
林地	2.76	4.52	4.26
牧草地	-0.98	-2.16	-1.47
水域	-2.45	-0.98	-1.59
建设用地	0.98	0.22	0.61

表 3 西黑岱流域土地利用变化综合动态度

不同阶段	1990—2000 年	2000—2010 年	1990—2010 年
综合动态度/%	1.47	2.71	2.09

从研究区单一土地利用动态度看,耕地在 1990—2010 年 20 a 期间耕地年均变化率为 1.14%;林地 4.26%;牧草地-1.47%;水域-1.59%;建设用地为 0.61%,其中各类土地单一动态度变化最大的是林地,其次是水域、牧草地和耕地,变化最小的为建设用地。

从研究期不同阶段的动态度分析,耕地在 1990—2000 年的动态度高出 2000—2010 年的动态度 1.45%,说明 1990—2000 年的变化幅度较大,主要源于在 1990—2000 年期间加强了对淤地坝的建设,期间西黑岱流域共建设淤地坝 11 座,其中骨干坝 6 座,中型淤地坝 5 座,均匀布设于各沟道中,主要为减轻洪水危害,缓洪拦泥淤地,稳定沟床,因此,在坝系可淤积年限内,西黑岱流域坝系淤积面积将不断增加,从而增加当地的可利用肥沃土地的数量,所以坝

地内耕地面积随之增加。林地面积增加主要在 2000—2010 年,主要是由于退耕还林政策的实施和近些年对西黑岱流域水土保持的综合治理,加大了造林植树面积,同时牧草地在这一阶段减少幅度较大,由于对该流域实施生态建设,部分草地转化为林地,不仅增加了植被覆盖度,还起到了很好的水土保持作用。由表 3 可知,整个流域 2000—2010 年土地利用变化速度比 1990—2000 年的变化速度大,主要是由于该流域列入了国家重点治理的小流域。

3.1.3 土地利用类型转化概率分析 基于 ArcGIS 软件的空间分析功能,将 1990 年和 2010 年两期土地利用类型图进行空间叠加分析,得到土地利用类型相互转化定量关系的转移矩阵(见表 4),再通过公式(5),(6)计算出土地利用类型转化概率(见表 5),提取土地利用动态变化信息。

表 4 1990—2010 年西黑岱流域土地利用转移矩阵

土地利用类型	2010 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	合计/hm ²
1990 年 耕地	98.21	0.84	78.24	19.45	—	196.74
林地	60.86	721.25	578.23	5.11	—	1365.45
牧草地	—	14.95	1531.96	1.32	—	1548.23
水域	—	—	—	55.31	—	55.31
建设用地	1.26	—	2.49	—	30.52	34.27
合计/hm ²	160.33	737.04	2190.92	81.19	30.52	3200

表 5 1990—2010 年西黑岱流域土地利用转移概率矩阵

土地利用类型	2010 年				
	耕地	林地	草地	水域	建设用地
1990 年 耕地	0.50	0.00	0.40	0.10	—
林地	0.05	0.53	0.42	0.00	—
牧草地	—	0.01	0.99	0.00	—
水域	—	—	—	1.00	—
建设用地	0.04	—	0.07	—	0.89

由表 4—5 可知,在研究期内转入转出过程主要发生在耕地、林地和草地之间,有 60.86 hm² 的耕地转化为林地,有 1.26 hm² 的耕地转化为建设用地,有 0.84 hm² 的林地转化为耕地;有 14.95 hm² 的林地转化为草地,有 78.24 hm² 的草地转化为耕地,有 578.23 hm² 的草地转化为林地;有 19.45 hm² 的水域用地转化为耕地,有 5.11 hm² 的水域用地转化为林地,20 a 间建设用地均未向其他土地进行转化。同时可以看出不同土地利用类型之间转化的可能性大小,草地向林地转化的概率最大,其次是草地转化为耕地,建设用地转化为其他类型的概率最小。

3.2 土地利用数量结构优化

3.2.1 约束条件 以侵蚀防控为目标,根据综合效益最大原则,提出 6 个约束条件来进行其土地利用数

量结构优化模拟,具体论述如下:

(1) 土地总面积约束。各类土地利用类型面积之和等于土地总面积,即 $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 3200 \text{ hm}^2$

(2) 耕地约束。根据国家耕地保护政策和西黑岱流域坝系淤积情况,结合当地土地利用规划,耕地总量在规划年将增加。即: $x_1 \geq 196.74 \text{ hm}^2$

(3) 生态保护约束。许多研究表明,森林覆盖度的增加将会减少土壤侵蚀,以保证生态安全,即: $x_2 \geq 1365.47 \text{ hm}^2$

(4) 草地约束。根据生态效益、经济效益增大的要求,草地在规划年将减少,即: $x_3 \leq 1548.23 \text{ hm}^2$

(5) 水域用地及建设用地约束。西黑岱流域水源不充足,主要靠降雨补给和坝系拦蓄,同时其由于地理位置较为偏僻,研究中假设水域和建设用地面积将保持不变,即: $x_4 = 55.31 \text{ hm}^2$; $x_5 = 34.27 \text{ hm}^2$

(6) 数学模型要求约束:满足 $x_j > 0, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ 。

3.2.2 确定目标函数 依照行业标准《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96),结合流域实际情况,对西黑岱流域土壤侵蚀中的水力侵蚀强度进行分级^[19-20]。

微度侵蚀:平均侵蚀模数小于 1 000 t/(km²·a);轻

度侵蚀:平均侵蚀模数为1 000~2 500 t/(km²·a);中度侵蚀:平均侵蚀模数为2 500~5 000 t/(km²·a);强度侵蚀:平均侵蚀模数为5 000~8 000 t/(km²·a);极强度侵蚀:平均侵蚀模数为8 000~15 000 t/(km²·a);剧烈侵蚀:平均侵蚀模数大于15 000 t/(km²·a)。

在规划年优化目标将耕地侵蚀控制在微度侵蚀范围,林地控制在轻度及微度侵蚀范围,草地控制在强度侵蚀以下。确定西黑岱流域防控侵蚀在(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)的目标函数系数分别为(700, 1400, 2500, 70, 300)。

因此可以得出如下目标函数: $F_{\min}(x) = 700x_1 + 1400x_2 + 2500x_3 + 70x_4 + 300x_5$

3.2.3 模型求解 运用 DPS 数据处理软件,运用单纯性法求解,得出同时满足约束方程和目标函数的最大值,从而对土地利用数量结构进行优化,结果见表 6。

表 6 西黑岱流域土地利用数量结构优化结果

土地利用类型	优化后面积/hm ²	比重/%
耕地	217.41	6.79
林地	1501.89	46.93
牧草地	1390.55	43.45
水域	52.54	1.64
建设用地	37.61	1.18

3.3 基于 CA 的土地利用格局空间优化

结合研究区域的实际情况和土地利用优化目标,制定了 CA 元胞状态为 30 m×30 m,共有耕地、林地、草地、水域、建设用地 5 种元胞类型,采用 Moore 型邻域结构^[21],以任一栅格为中心,周围分布 8 个代表特定土地覆被类型的相邻栅格,邻域是细胞周围按一定形状划定的细胞集合,它们影响中心细胞下一个时刻的状态;

CA 模型的局域转化规则:(1) 建设用地不能转化的规则,如果是建设用地,那么维持原用途不变。(2) 土地利用类型的转化概率和侵蚀最小原则,如果 $N_i > N_j$,那么 $S_{t+1} = U_i$;(3) CA 模型自有的转化规则。以上规则中, S_{t+1} 为 $t+1$ 时刻土地利用类型; S_t 为 t 时刻土地利用类型; U_i 为土地利用类型 i 。然后以 2010 年的土地利用格局为初始状态,模拟目标年 2025 年的土地利用格局。

由表 6 可知,对西黑岱流域土地利用格局空间优化配置后,耕地总面积增加了 20.67 hm²,所占比重由优化前的 6.15% 提高至优化后的 6.79%,确保在坝系淤积的过程中,充分利用已淤土地作为农业生产;林地面积明显增加至 1 501.89 hm²,所占比重超过了草地;而草地面积减少了 157.68 hm²,比重降至

43.45%;此次优化使得该流域土地利用结构变化明显,其中林地面积有大幅度的提高,耕地和草地向优质、高效方向发展,通过土地优化将减少土壤侵蚀,保护当地脆弱的生态环境,提高综合生产力,同时为砒砂岩区进行土地利用格局优化调控提供依据。因此,在未来发展过程中,应对土地利用方式和规模进行适当调整,并进行土地整理、分区利用等政策或措施,使土地利用配置朝着最优化结构发展^[22],从而提高土地利用的可持续能力。

4 结论

(1) 研究期内,西黑岱流域土地利用类型发生明显变化,研究期内耕地、林地在不断地增加,其中林地面积增加最多,草地面积的减少幅度很大,水域面积有所减少,建设用地略有所增加。在研究期内土地利用类型的转化主要发生在耕地、林地和草地之间,草地向林地转化的概率最大,其次是草地转化为耕地,建设用地转化为其他类型的概率最小,主要是由于退耕还林政策的实施和近些年对西黑岱流域水土保持的综合治理。

(2) 通过对研究区进行土地利用结构和空间优化,耕地面积有所增加,林地面积有大幅度的提高,同时耕地和草地向优质、高效方向发展,该结果符合生态安全、因地制宜和科学规划的原则,达到小流域土地利用格局优化的目的,使生态环境状况良性发展,可以为西黑岱流域坝地农业持续高产提供科学依据,为研究区生态环境治理具有重要的参考和借鉴意义。

(3) 土地利用格局优化包括时间尺度上的数量结构优化和空间尺度上的空间布局优化两部分内容,本文借助线性规划法的长期预测优势和 CA 模型与 GIS 技术相结合模拟复杂系统空间动态演化能力,有效地解决了上述问题,同时对于揭示土地利用格局演变机制具有一定意义,并且能够结合 GIS 技术完成和实现,为地理信息系统的发展开辟了新方向,为砒砂岩区土地利用格局的优化调控提供了一种可行的科学研究方法。

(4) 由于土地利用格局变化是十分复杂的,受到多种因素的影响,在制定 CA 模型转化规则和参数设定的时候,虽然尽可能多地考虑土地利用类型转化的可能性,但是仍然是比较主观性的,可能会使模型预测精度方面受到一定的影响。

参考文献:

- [1] 鄢铁平,廖伟,李璐.丹江口库区土地利用结构与格局优化[J].水土保持研究,2012,19(1):11-16.

- [2] 曹月娥, 塔西甫拉提·特依拜, 王新军, 等. 县级土地利用结构优化研究[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(7): 1339-1346.
- [3] 胡雪丽, 徐凌, 张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1652-1660.
- [4] Doyen É, Vannièrè B, Berger J F, et al. Land-use changes and environmental dynamics in the upper Rhone valley since Neolithic times inferred from sediments in Lac Moras[J]. The Holocene, 2013, 23(7): 961-973.
- [5] 汤洁, 汪雪格, 李昭阳, 等. 基于 CA-Markov 模型的吉林省西部土地利用景观格局变化趋势预测[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(2): 405-411.
- [6] Iacono M, Levinson D, El-Geneidy A. Models of transportation and land use change: a guide to the territory [J]. Journal of Planning Literature, 2008, 22(4): 323-340.
- [7] 唐嘉琪, 石培基. 民勤土地利用格局时空变化研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 928-936.
- [8] 陈颖彪, 李雁, 千庆兰, 等. 基于 TM 数据的广州市番禺区土地覆被格局分析[J]. 地理科学, 2012, 32(4): 458-463.
- [9] 段峥, 宋现锋, 石敏俊. 密云县土地利用景观格局时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 55-59.
- [10] 刘家福, 王平, 李京, 等. 基于 Markov 模型的长岭县土地利用时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 16-19.
- [11] Holzkamper A, Seppelt R. A generic tool for optimizing land-use patterns and landscape structures [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(12): 1801-1804.
- [12] 庞莎, 刘康. 基于 GIS 的延安市城郊区土地利用格局优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 230-234.
- [13] 贾科利, 姚玉玲, 郭占军, 等. 生态脆弱区土地利用格局变化及其环境效应: 以宁夏回族自治区中部干旱带为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 218-222.
- [14] 梁焯, 刘学录, 汪丽. 基于灰色多目标线性规划的庄浪县土地利用结构优化研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(3): 93-98.
- [15] 张鸿辉, 曾永年, 刘慧敏. 多目标土地利用空间优化配置模型及其应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(4): 1056-1065.
- [16] 赵东娟, 齐伟, 赵胜亭, 等. 基于 GIS 的山区县域土地利用格局优化研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 101-106.
- [17] 张旭. 基于 CA-MARKOV 模型的甘南州土地利用预测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [18] 黎夏, 杨青生, 刘小平. 基于 CA 的城市演变的知识挖掘及规划情景模拟[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(9): 1242-1251.
- [19] 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.
- [20] 李娜, 董立国, 刘长宁, 等. 黄土丘陵区土地利用格局与生态系统服务价值分析: 以中庄流域为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 144-147.
- [21] 王丽萍, 金晓斌, 杜心栋, 等. 基于灰色模型一元胞自动机模型的佛山市土地利用情景模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 237-242.
- [22] 缪丽娟, 刘强, 何斌, 等. 库尔勒城市化进程对土地利用格局变化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 162-168.

(上接第 75 页)

- [2] 焦居仁. 开发建设项目水土保持[M]. 北京: 中国法制出版社, 1998.
- [3] 甘枝茂, 孙虎, 甘锐. 黄土高原地区城市化对侵蚀环境的负面影响及防治对策[J]. 西北大学学报, 1999, 29(4): 348-352.
- [4] Lei T, Nearing M A, Haghghi K, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model[J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157-3168.
- [5] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 476-481.
- [6] 付艳红, 时铁彬, 徐岩. 含沙量测量方法及比较分析[J]. 东北水利水电, 2010(9): 35-36, 45.
- [7] 张欧阳, 马怀宝, 张红武等. 不同含沙量水流对河床形态调整影响的实验研究[J]. 2005, 16(1): 1-5.
- [8] 雷廷武, 张晴雯, 赵军. 陡坡细沟含沙水流冲刷率的试验研究及其计算方法[J]. 2001, 17(5): 24-27.
- [9] Abrahams A D, Atkinson J F. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow[J]. Water Resources Research, 1993, 29(9): 3021-3028.
- [10] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含沙量得关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-77.