

基于生态安全格局的干旱内陆河流域土地利用优化配置分区

魏 伟¹, 石培基^{1*}, 周俊菊¹, 颌斌斌², 李传华¹, 雷 莉³

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 兰州城市学院城市经济与旅游文化学院, 兰州 730070;
3. 甘肃省水利厅石羊河流域管理局, 武威 733000)

摘 要: 为提高干旱内陆地区土地利用效率, 促进土地资源可持续利用, 该文以典型干旱内陆河流域石羊河为例, 将 GIS 技术和土地利用优化空间配置模型应用到该流域土地利用优化配置研究中, 提出了一种基于生态安全格局的土地利用优化配置新方法, 并借助 1986 年、2000 年和 2014 年 3 期土地利用数据对石羊河流域生态安全格局情景、耕地保护情景和自然发展情景 3 种模式下 2030 年的土地利用结构和布局进行了优化配置研究。研究结果表明: 在生态安全情景下 2030 年耕地面积减少 314.41 km² (5.32%), 但林地和草地面积分别增加 1 424.17 km² (33.85%) 和 1 485.13 km² (12.05%), 同时未利用地也有较大幅度减少; 而耕地保护情景则以土地开发和整治及宅基地还耕为主要目标, 使得耕地到 2030 年增加 5.85% (386.53 km²), 林地和草地分别增加 7.61% (229.38 km²) 和 0.77% (84.58 km²), 而未利用地则减少 3.91% (789.92 km²); 自然发展情景下其耕地、林地和草地到 2030 年均减少, 建设用地则有较大幅度增长。通过对 3 种综合考虑石羊河流域社会经济、生态及耕地保护等多方面的因素, 研究结果认为耕地保护情景更为合理, 既能保持耕地面积不减少, 又能兼顾考虑生态恢复和城镇发展等方面的需求, 而其它 2 种可为耕地保护情景进行补充和局部修正。

关键词: 土地利用; 优化; 模型; 生态安全格局; 最小累积阻力模型; GIS; 石羊河流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.18.002

中图分类号: F301.2; P901

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-18-0009-10

魏 伟, 石培基, 周俊菊, 颌斌斌, 李传华, 雷 莉. 基于生态安全格局的干旱内陆河流域土地利用优化配置分区[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 9-18. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.18.002 http://www.tcsae.org
Wei Wei, Shi Peiji, Zhou Junju, Xie Binbin, Li Chuanhua, Lei Li. Configuration partition of land use optimization in arid inland river basin based on ecological security pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(18): 9-18. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.18.002 http://www.tcsae.org

0 引 言

近年来, 土地变化特征与过程^[1-3]、驱动因素与调控机制^[4-5]、土地结构动态演变与发展规律^[6]、土地变化与生态效应等^[7]研究领域成为土地利用/土地覆盖研究的重点领域。随着中国社会经济发展和转型, 如何提高土地资源利用效率, 促进土地资源可持续发展成为各级政府 and 科研工作者共同面临的问题。因此, 关于土地利用问题的研究正由变化过程和影响因素向结构优化、空间配置转变, 尤其对于土地资源有限, 利用程度较低的西部广大地区而言, 如何合理分配有限的土地资源和促进土地资源可持续利用变得十分迫切^[8]。

土地利用优化配置研究已经成为涉及土地资源、地理学、生态学、经济学等多个学科的综合学科。国内外学者已开展了大量研究工作, Marulla 等^[9]、Stewart 等^[10]、刘彦随^[11]、赵庚星^[12]、张云鹏^[13]等采用线性规划、灰色

预测、多目标规划等方法构建了土地利用数量结构优化配置模型, 这类模型注重土地利用数量结构及土地面积的优化; Kim 等^[14]、Gould 等^[15]、Lendering 等^[16]、吕锋^[17]、袁满等^[18]将目标规划、模拟退火算法、遗传算法构建土地利用空间优化决策模型, 并应用于不同的区域, 这类模型则注重模型算法本身, 是对现有模型的改进和试验, 但较少顾及土地利用数量结构和效益优化; Barredo^[19]、Zhao^[20]、黎夏^[21]、张丁轩等^[22]利用模糊数学、CA 模型、Markov 模型、蚁群算法、CLUE-S 模型等与当前主流的地理信息类软件相结合, 提出了许多关于土地利用数量约束和空间优化配置的新方法, 且许多方法在土地利用规划中也得以推广应用。因此, 从土地利用优化配置研究来看, 主要研究体现在以下 4 个方面: 一是土地优化的理论原则研究; 二是集中在土地优化配置系列模型构建研究; 三是各种土地优化的算法及其改进研究; 四是土地利用优化的实现方法研究。以上众多研究重点从研究模型和方法着手, 但是如何将土地优化配置模型与当前生态安全相结合, 在考虑优化之前将生态安全格局进行区划, 以此作为优化目标是未来进行土地优化重点考虑的方向。

位于河西走廊的石羊河流域, 历史时期曾是丝绸之路的交通要道, 中游的武威(古凉州), 曾是丝绸之路进入河西后的第一大城, 为河西文化的发祥地, 曾经见证了河西走廊辉煌成就。但从 2000 年以来, 随着城镇扩

收稿日期: 2016-01-23 修订日期: 2016-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41261104)、甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA129)、甘肃省高等学校科研项目(2014A-015)。

作者简介: 魏 伟, 男, 博士, 副教授, 从事生态遥感和 GIS 应用研究。兰州 西北师范大学地理与环境科学学院, 730070。Email: weiweigis2006@126.com

*通信作者: 石培基, 男, 教授, 博士生导师, 从事区域规划与流域生态问题研究。兰州 西北师范大学地理与环境科学学院, 730070。

Email: shipj@nwnu.edu.cn

展,人口增加,导致土地退化,沙漠化问题严重,威胁着整个河西走廊的社会经济发展和可持续发展,石羊河流域陷入了生存和发展的两难困境,已经成为上至中央下至百姓普遍关注的焦点地区。在此背景下,本研究紧紧围绕水土资源如何合理配置这个主要问题开展相关研究,试图在生态安全理论支持下,借助 CLUE-S 模型并结合 GIS 相关技术,对流域内土地利用资源进行格局分析和配置优化,为石羊河流域治理规划的实施提供科学参考。

1 研究方法

本研究首先基于不同时期的土地利用现状图,利用 MCR 模型计算不同时期的土地优化配置分区,在充分考虑生态安全格局和优化配置分区的基础上,用 ArcGIS 对土地利用现状布局进行调整,最后通过定性和定量计算土地利用优化配置的约束指标,再用 CLUE-S 模型提取分布规则,形成 2030 年研究区在不同情景下的土地利用优化布局。

1.1 生态安全格局识别

生态安全格局是以景观生态学理论和方法为基础,基于生态过程和格局的关系,来判别对这些过程的健康与安全具有关键意义的景观元素、空间位置及空间联系^[23]。根据生态安全格局的景观元素和生态系统得以维持的主要功能,结合干旱内陆河流域生态系统整体脆弱度较低的实际,本研究对于生态安全格局构建的基本思路如下:1)“目标源”的识别。对土地利用优化配置起直接和间接影响的生态因子的识别和确定。2)建立生态安全格局空间联系。通过景观过程的分析和模拟,对流域生态健康和具有关键意义的景观格局进行计算,主要包括累积阻力表面的建立和累积耗费距离表面的表达;3)生态安全格局安全等级的划分。根据计算出的不同景观因子的分值,对其生态安全水平进行等级划分。本次生态安全格局识别及生态安全格局区划分级采用最小累积阻力(MCR)模型,关于 MCR 模型基本理论和方法请参考文献^[24]。限于篇幅,本文不再一一赘述。

1.2 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型是目前研究土地利用空间布局与优化配置的主要模型之一,适合中小尺度的土地利用情景模拟,尤其对于小流域土地优化配置效果较为明显。该模型从总体上可分为 2 部分,一是非空间土地需求模块,二是空间分配模块。非空间模块是指根据流域土地利用变化的综合驱动因素来预测土地类型面积与数量的变化,本研究中非空间分析方法主要以生态安全格局法为主要约束条件,将预测期处于生态安全格局的各类用地面积作为约束条件。空间配置模块则是通过寻找不同用地类型空间分布的影响因素,用 Logistic 回归提取其分布规则,采用不断迭代运算,找到不同栅格单元的最适宜的空间布局^[25],具体过程可用下式表示

$$\text{Log} \left\{ \frac{P_i}{1-P_i} \right\} = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_m x_{m,i} \quad (1)$$

式中 P_i 为 i 地类在区域内每个像元中出现的概率; x_1, x_2, \dots, x_m 为驱动因子; β 为回归方程解释变量系数; $x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{m,i}$ 为各驱动因子在 i 地类上的值。

2 实证研究

2.1 研究区概况

研究区地理坐标为 101°41'E—104°16'E, 36°29'N—39°27'N。地处甘肃河西走廊东段,乌鞘岭以西,祁连山北麓。行政区划包括武威市的古浪县、凉州区、民勤县全部及天祝县部分,金昌市的永昌县及金川区全部,以及张掖市肃南裕固族自治县,流域共涉及 3 市 7 县(区),总面积 4.16 万 km²。2014 年流域内总人口约 226.6 万人,人口密度为 55 人/km²。石羊河流域深居大陆腹地,属大陆性温带干旱气候,气候特点是:太阳辐射强、日照充足,温差大、降水少、蒸发强烈、空气干燥。流域内现状可利用水资源量为 17.6 亿 m³,按现有总人口和耕地计,人均 755 m³,耕地亩均 270 m³,均低于全省人均 1 114 m³ 和耕地亩均 389 m³ 水平,分别为全国平均水平的 1/3 和 1/6,属典型的缺水地区。

2.2 数据来源及处理

本研究所有数据为:1)遥感数据:以 1986 年 9 月、2000 年 8 月的 Landsat/ETM 数据和 2014 年的 Landsat/OLI 为基础(数据均来自于美国 USGS 官网 http://landsat.usgs.gov/)。数据下载后利用 ENVI5.5 软件进行几何精校正,使得误差在 0.5 个像元之内,然后载入 ArcGIS10.2 软件,在此平台上对其进行人工目视解译,将其分成耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地 6 大类,并利用武威市政府提供的土地变更数据对 1986 和 2000 年数据精度进行了评定和修正,并利用 2010 年二调数据对 2014 年的解译结果进行了验证。2)河网和水系数据(.shp)、道路数据,包括国道、省道及县乡道等(.shp)、城镇及农村居民点数据(.shp)和 DEM(digital elevation model)数据(30 m×30 m),该数据来源于寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/),在 ArcGIS10.2 软件中经过拓扑处理后可直接应用;3)社会经济因素,包括人口数、国内生产总值、人均收入、粮食产量等,均来源于 1987、2001 和 2015 年的《甘肃省统计年鉴》。4)自然环境因子,包括地形、土壤、降雨量,温度等。根据模型所需数据,石羊河流域土地优化的实际情况和数据可获得性,本文所收集的其它数据中统计数据主要在 1987、2001 和 2014 年,河流和道路数据主要集中在 80—90 年代,2000 年和 2013 年,由于矢量数据误差在 2~3 年之间,变化不大,因此认为可用性较强。人口、人均收入和粮食产量等利用克里金(Kriging)插值法进行空间化,ArcGIS10.2 里进行重分类。

2.3 石羊河流域生态安全格局构建

2.3.1 生态源地累积阻力表面

从累积阻力变化来看(图 1),水域生态源的累积阻力表面低值区从 1986 年至 2014 年范围逐年扩大,扩展区域主要集中在中下游地区的金川区、永昌县和民勤县

大部分地区；从累积阻力值空间分布看，阻力高值区也逐年下降，主要表现在上游高海拔地区和流域东部地区。一方面由于中下游地区对水资源需求日趋强烈，人工坑塘和水库等增加，加之人为改变河道，使得水域到达和供给范围扩展；另一方面自退耕还林还草、关井压田等工程的实施，使得地下水位有所上升，水域生态源本身有所扩张，因此其阻力低值区逐年增加，累积阻力高值也逐年下降。林地累积阻力低值区呈现斑块状、零星状分布，且低值区主要分布在南部山区，中下游地区也有分布，但分布面积较小，分布较为分散；高值区主要分

布在海拔较高，地形陡峭的山区；此外，中下游荒漠、戈壁和裸地等区域也有高值区；从时空变化来看，1986年至2000年生态源累积阻力表面空间分布变化不大，但2000年以后至2014年，其阻力表面低值区范围有显著扩大，面积显著增加，扩大的范围主要集中在下游的民勤县北部，永昌县和金川区全境，以上研究结果表明对石羊河流域生态安全格局起关键作用的水域和林地两大生态源地的累积阻力逐年降低，低值范围进一步扩大，说明在政府主导、政策扶持和全民生态保护意识逐年提高的情况下，流域生态向好的方向发展。

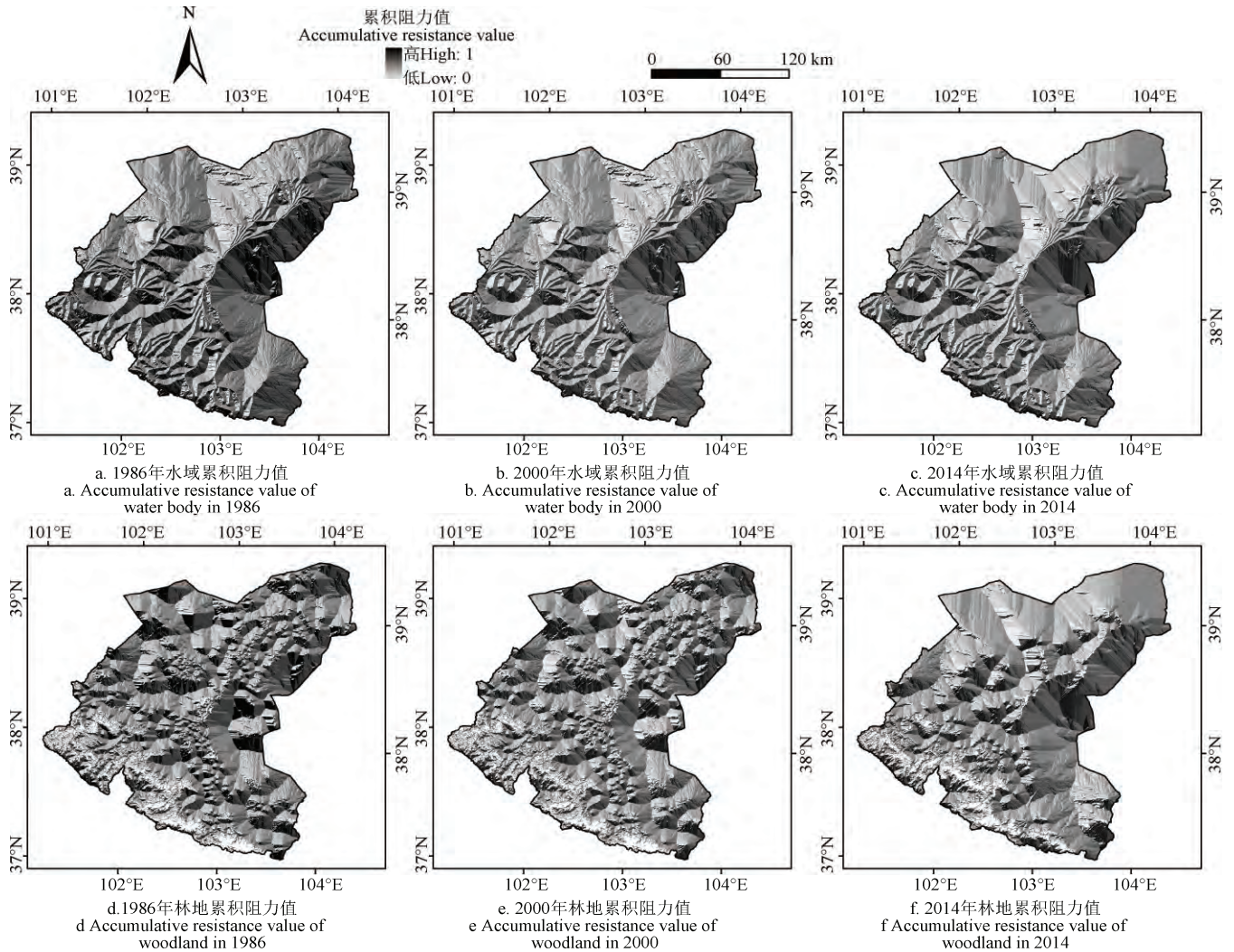


图 1 生态源地 1986 年、2000 年和 2014 年累积阻力值
Fig.1 Accumulative resistance value of ecological sources in 1986, 2000 and 2014

2.3.2 累积耗费距离表面

为分析石羊河流域生态安全格局现状，以便为未来模拟提供输入端支持，分别以水域和林地对象，计算了二者不同年份的累积耗费距离表面值，并绘制其空间分布图（图 2）。可以发现，水域累积耗费距离空间分布特征差异十分明显，绝大部分区域处于低值区，且主要分布在上游祁连山区和中游绿洲农业区，而在下游广大沙漠分布区，其值很高，且分布密集。从图可以看出，高值区和低值区中间的过渡地带也十分清晰，这些过渡地带时生态和植被变化的敏感区，因此在土地优化配置

时也应高度重视。从空间变化来看，水域累积耗费距离从 1986 年至 2014 年变化不大，除民勤北部高值区稍有增加外，其余地区则在水域内部有细微变化。通过进一步分析发现，累积耗费距离值从 1986 年的 327 799 km 增加到 2014 年的 340 723 km，29 年间年均增加 445.65 km。与水域相比，林地累积耗费距离表面空间分布差异也十分明显，表现出南低北高、分布分散的特点，具体表现为：南部的天祝县、肃南县、武威凉州区、民勤县处于低值区，古浪县北部沙地区和民勤县北部、永昌县北部的广大沙漠地区处于高值区；在中下游地区高低值相互

镶嵌、彼此分离。从空间分布变化看, 1986—2000年变化十分微小, 但到2014年低值区范围显著增加, 低值区和高值区聚集程度也显著提升。可见, 在石羊河流域, 水域作为支撑流域发展和生存的生命线, 对生态流的运

送和投送能力最强, 但由于水域从南部到北部流经冰川、山地、平原、丘陵和沙漠等景观, 较林地累积耗费距离大。相反, 林地分布较为集中, 且呈块状分布, 其内部生态流等信息交流受阻程度相对较小。

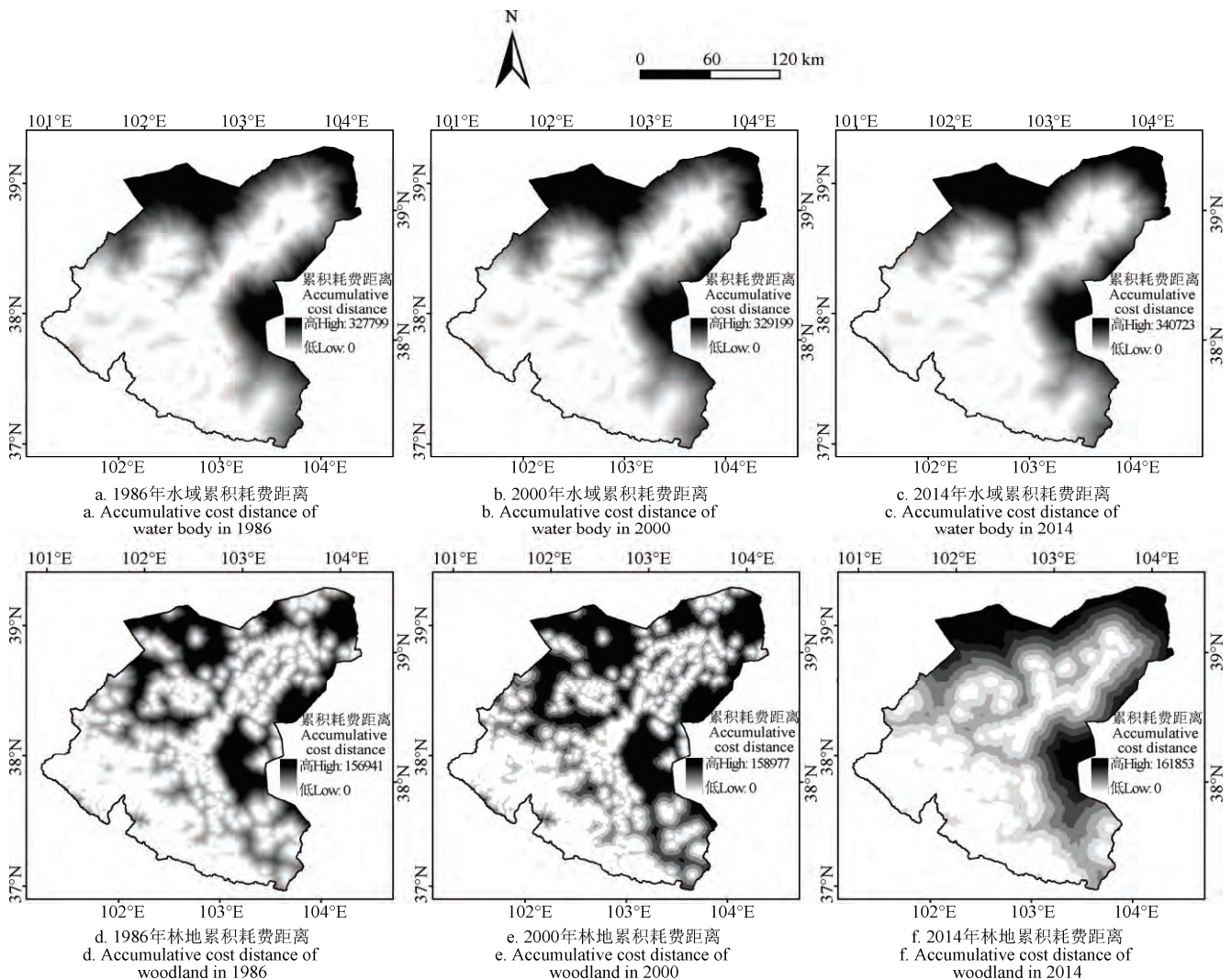


图2 石羊河流域1986年、2000年和2014年核心源累积耗费距离表面

Fig.2 Accumulative cost distance of core source of Shiyang river basin in 1986, 2000 and 2014

2.3.3 基于生态安全格局的土地利用优化配置分区

为了给全流域土地利用优化配置提供底线生态安全格局, 研究将水域和林地两大核心源的累积阻力表面和累积耗费距离表面进行栅格综合, 利用 ArcGIS 计算其交集 (低值与低值叠置, 高值区相叠置), 据此建立了石羊河流域综合生态安全格局下的土地利用优化配置分区, 将其分为生态保护核心区、重点优化配置区、潜在优化配置区、生态保护重点区、生态恢复关注区和生态综合治理区 6 大分区, 如图 3 所示。结果显示, 流域内部需要重点优化配置区主要集中分布在武威绿洲、民勤绿洲和昌宁绿洲的大部分地区, 这些地区主要为灌溉农业开发地区, 当地土地资源开发力度最大, 对水资源依赖度也最强, 但由于地形、气候、历史和人为因素的综合影响, 这里的土地利用优化配置相对滞后, 仍属粗放耕作方式, 造成天然植被面积退化, 人工绿洲面积扩张,

林地不断萎缩。潜在优化区主要分布在中下游沙漠与绿洲的过渡地带, 涉及凉州区、古浪县、永昌县和民勤县的部分乡镇, 这些区域对于流域内部绿洲和水域的变化反应较为敏感, 可能会因绿洲和沙漠的推移而发生变化, 且地类转化较为频繁, 因此这些地方是目前及未来很长时间内值得优化和利用的地区。不同优化配置分布的面积及主要分布区域如表 1 所示。

2.4 CLUE-S 模型优化配置结果

本研究综合考虑生态安全格局及 CLUE-S 模型的土地利用空间优化配置模拟步骤如下。

2.4.1 土地利用驱动力因子筛选

土地利用类型都有相对稳定的趋势, 对生态环境脆弱的干旱内陆河流域而言, 自然环境变化和人为因素都有可能破坏这种趋势, 因此在进行土地利用优化配置时, 综合考虑影响土地利用变化的关键驱动因子是非常重要的环

节。本文主要依据 CLUE-S 模型的输入端特点和要求，并综合参考国内外土地利用变化驱动力研究成果^[1,8,21-25]，的基础上结合干旱内陆地区土地利用变化的特点和主要驱动力筛选了 18 个驱动因子。

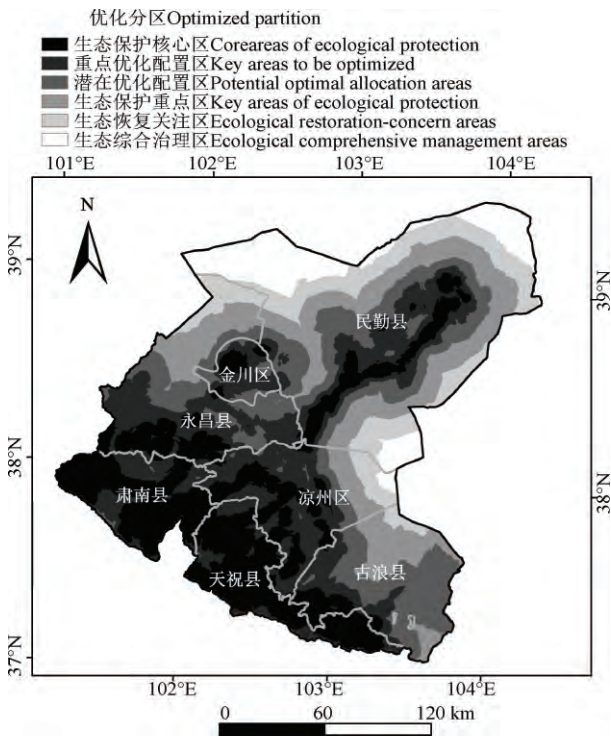


图 3 基于生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置分区
Fig.3 Land use optimization configuration partitions based on ecological security pattern

2.4.2 空间驱动因子 Logistic 回归及结果检验

CLUE-S 模型对驱动因子的重要性采用二值法逐步回归计算每一种地类在区域内每个像元出现的概率^[25]。本研究具体实现时将影响因素借助 GIS 进行空间化表达，对于高程、坡度、植被覆盖度等直接可用的栅格成果，空间化文件中的属性便是其作用大小；对于降雨量、温度、人均收入、国内生产总值等结果，可利用全流域 117 个乡镇点采用 ArcGIS10.2 提供的普通克里金空间插值方法进行空间化处理，形成栅格数据成果；其它求算距离的因子，可利用 GIS 中的欧式距离工具 (euclidean distance) 则可产生相应空间化文件，其中不同栅格的属性便是栅格到点、线、面的距离。把上述不同驱动因素的栅格数据利用 ArcGIS10.2 转为 ASCII 格式，放至 CLUE-S 模型的 dyna_clue 文件夹后用 File Converter 工具生成 stat.txt 文件，随即把 stat.txt 文件导入 SPSS15.0，设置好因变量、自变量，选择逐步回归法进行 Logistic 回归以求取不同土地利用类型相对于各驱动因子的回归系数及回归常数项，具体计算结果见表 2 所示。

Logistic 回归结果可信度的检验一般采用 Pontius 等^[26]提出的 ROC (relative operating characteristics) 方法评价。通常认为，当 ROC>0.7 时，可认为所选取的驱动因子具有较好的解释能力，利用 SPSS15.0 做 Logistic 回归，回归结果和 ROC 检验结果如表 2 所示，除草地回归 ROC 值略<0.7 之外，其余土地利用类型 ROC 值均>0.7，结果表明所选的 18 个驱动因子可以较好地解释土地利用空间分布情况。

表 1 土地利用优化配置分区统计表

Table 1 Landuse optimization configuration statistic table

优化分区 Optimized partition	面积 Area/km ²	百分比 Percent/%	主要分布区域 Main distribution area
生态保护核心区 Core areas of ecological protection	10 033.76	24.12	主要分布在天祝县西北部，凉州区南部和肃南县东部；金川区中心城区周边及民勤县城周边乡镇。
重点优化配置区 Key areas to be optimized	9 357.42	22.49	主要分布在凉州区大部分乡镇、古浪县西部、永昌县中北部、金川区城区周边和民勤县城周边大部分乡镇。
潜在优化配置区 Potential optimal allocation areas	7 664.19	18.42	主要分布在古浪县中部和东部大部分地区、永昌县北部部分乡镇和民勤县靠近沙漠边缘的少部分乡镇。
生态保护重点区 Key areas of ecological protection	6 895.50	16.58	主要分布在民勤县沙漠与绿洲交汇地带、沿民勤县城周边大部分地区及古浪县北部、凉州区东部和金川区北部部分乡镇。
生态恢复关注区 Ecological restoration-concern areas	4 248.09	10.21	绝大部分分布在民勤沙漠与裸地边缘地带，凉州区和金川区靠近沙漠去也有少量分布。
生态综合治理区 Ecological comprehensive management areas	3 401.04	8.18	民勤县北部的沙漠腹地和凉州区东部有少量分布。

2.4.3 模型运行

在模型运行前，需要对相关文件和部分参数进行设置和配置。本研究把水域等不参与空间配置的用地范围设置成 region.fil；demand.in 文件指不同情景下的土地需求文件，本研究重点考虑了生态安全格局和耕地保护情景下的不同土地利用需求，并通过 demand.in 输入模型中；最后在 main.1 文件中设置 CLUE-S 模型其他参数，部分参数根据的设置详见参考文献^[22,25]。本文是以 2014 年为基础对 2030 年进行空间优化配置。因此，最终空间配置

结果保存在 cov_all.0 和 cov_all.1 中。

2.4.4 模型检验

以 2000 年的土地利用栅格数据作为基期数据，2014 年的土地利用栅格数据作为模拟的需求数据。通过运行 CLUE-S 模型，并与 2014 年实际土地利用图进行对照。运用 Kappa 指数对 CLUE-S 模型模拟结果进行定量检验，以评价模拟的效果是否理想。

$$Kappa = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (2)$$

式中 P_o 为正确模拟的比例; P_c 为随机情况下期望的正确模拟比例; P_p 为理想分类情况下正确模拟的比例。本研究中模拟正确栅格 138302 个, 占总栅格数 162 326 个的 85.2%, 因此 $P_o=0.852$, 本研究对其中的 5 类土地利用进行优化, 每类土地利用的栅格在随机模拟状况

下的正确模拟比可认为 $P_c=1/5$, P_p 为理想状态下正确模拟比, 因此可认为其值为 1, 根据公式 (2) 计算出 Kappa 指数为 0.815, 说明对 2014 年的土地利用空间分布模拟效果较好, 可以根据此方法进行其它年份的模拟和预测。

表 2 2014 年不同土地利用类型的 Logistic 回归系数分布
Table 2 Regression coefficient of different land use in CLUE-S model in 2014

土地利用类型 Land use types	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	建设用地 Urban and residential land	未利用地 Unused land	因子说明 Factor description
ROC 值 Relative operating characteristics	0.773	0.790	0.687	0.844	0.890	-
Logistic 回归常数 Logistic regression constant	2.091	-0.102	0.196	1.434	-4.069	-
生态功能分区 Ecological function regionalization/km ²	-0.002	0.003	0.0004	-0.003	-0.403	生态功能区划图数字化后转栅格
土地利用功能分区 Land use function regionalization /km ²	0.358	0.023	-0.003	0.0002	-0.0004	土地利用 (3 大类) 现状图转为栅格
功能分区范围内林地面积 Woodland area within land use function regionalization/km ²	-0.024	-0.001	0.385	-0.015	-	生态功能区划图提取结果
高程 Elevation/m	-0.082	0.010	0.004	-0.003	0.030	采用 DEM 数据
坡度 Slope/(°)	0.015	0.028	0.016	-2.089	-1.023	利用 DEM 计算得到
年平均降雨量 Mean annual precipitation/mm	0.030	0.044	0.032	-	-0.026	气象站点数据插值为栅格数据
年平均温度 Mean annual temperature/°C	-0.010	0.054	-0.005	-	-0.0008	插值为栅格数据
植被覆盖度 Vegetation coverage/%	0.038	0.224	1.886	0.024	-0.003	利用 NDVI 计算得到
人口密度 Population density/(人·km ²)	0.443	0.103	0.042	0.067	-0.066	以乡为统计单元, 插值为栅格数据
人均收入 Per capita income/(人·元)	0.098	0.012	-0.010	0.033	-2.333	以乡为统计单元, 插值为栅格数据
国内生产总值 Gross domestic product/10 ⁴ 元	0.003	0.002	0.0007	1.234	-1.888	以乡为统计单元, 插值为栅格数据
从业总人数 Employment population(人)	0.007	0.003	0.003	0.359	-0.003	以镇为统计单元, 插值为栅格数据
粮食产量 Grain output/t	2.391	-0.337	-0.022	-0.004	0.003	以乡为统计单元, 插值为栅格数据
人均耕地占有量 Per capita cultivated land/ km ²	0.013	0.0002	0.0004	0.003	-0.009	以乡为统计单元, 插值为栅格数据
距城镇和农村居民点距离 Distance from urban and residential points /m	0.005	-0.0007	-	-0.004	-0.001	量算每个像元的中心距村、镇距离
距河流距离 Distance from rivers/m	-0.003	-0.001	-0.004	-0.024	-1.334	量算每个像元的中心距河流距离
距铁路和高速道路距离 Distance from railway and highway /m	0.0005	-0.004	0.003	-0.008	-0.009	量算每个像元的中心距高等级公路距离
距省道和县乡道的距离 Distance from provincial road and township road/m	0.007	-0.0001	0.001	-0.0006	-0.003	量算每个像元的中心距较低等级公路距离

3 结果与分析

3.1 不同情景方案用地结构预测

利用 CLUE-S 模型模拟分析不同情景下土地利用空间分布及数量分布特征。首先, 利用 1986 年至 2014 年土地利用数量及空间变化的基础上, 建立了 2030 年土地利用各类型和结构的变化数据, 并以土地利用变化的驱动因子作为土地利用优化配置的依据, 并结合定量分析和定性分析适度调整土地利用发展变化的趋势, 借助 CLUE-S 模型分别预测了自然发展情景下和耕地保护情景下 2030 年土地利用变化情况, 并重点借助生态安全格局土地利用优化分区结果, 并与前 2 种情景相叠置, 生成基于生态安全格局情景下的 2030 年土地利用优化配置结果。其中生态安全情景为重点保护水域及林地周边区

域, 防止破坏水源地周边环境和林地防护区, 以便有效提高生态安全保障的屏障范围; 耕地保护情景为有效保护耕地资源, 严格实施耕地保护政策, 且根据新农村建设发展趋势, 将居民点整理合并后的老旧宅基地退还为耕地, 目的是尽量保持耕地面积比例。而自然发展情景则只考虑了目前自然发展情况下和政府宏观政策指导下土地利用各类型的数量及空间结构发展情况。从生态安全格局优化模拟结果看 (表 3), 对林地、草地的种植成为关键, 与目前土地利用现状相比, 林地将在未来 15 年间增加 33.85%, 水域增加 30.21%, 草地增加 12.05%, 而增加的面积除了退耕、宅基地复垦外, 对绿洲和沙漠边缘的未利用开发改造也成为生态构建的重点地区。2030 年石羊河流域土地利用不同情景的优化配置结果与现状比较结果如表 3 所示。

表 3 2030 年不同情景方案下各土地利用类型面积变化与比较

Table 3 Land requirements ratios of area and comparisons of land use types based on different simulation in 2030

土地利用类型 Land use types	生态安全情景 Ecological protection scenario/km ²	耕地保护情景 Farmland protection scenario/km ²	自然发展情景 Free development scenario/km ²	2014 年现实情景 True scenario in 2014/km ²	2014 年现实情景与生态安全比 较的变化值 Changed value compare with ecological protection scenario in 2014/km ²	变化率 Changed percentage/%
耕地 Farmland	5 911.48	6 612.42	6 050.25	6 225.89	-314.41	-5.32
林地 Woodland	4 207.64	3 012.85	2 212.68	2 783.47	1 424.17	33.85
草地 Grassland	12 325.72	10 925.17	10 323.90	10 840.59	1 485.13	12.05
城乡与农村居民点 Urban and residentialland	543.74	522.80	566.95	516.35	27.40	5.04
水体 Water body	310.61	299.76	280.53	216.79	93.82	30.21
未利用地 Unused land	18 301.18	20 227.37	22 166.06	21 017.29	-2 716.11	-14.84

3.2 不同情景方案用地空间分布预测

基于土地利用结构变化数据、土地利用变化显著驱动因子和生态安全格局优化分区等计算结果，模拟了 3 种不同的情景方案，并以 2014 年为基准年，对其空间分布进行了模拟和分析，结果显示：1) 生态安全情景：红崖山水库是保证下游用水和农业灌溉的核心区域，根据优化结果，应在水库周边大力植树造林，建设保护水源和生态的天然屏障，2030 年土地利用优化配置结果显示（图 4a），林地增加趋势增加，增加的部分主要集中在中游凉州区北部耕地与未利用地的边缘地带、红崖山水库周边及下游民勤县东部，这些地方地形相对平缓，有较好的供水设施，且处于生态退化与恢复的极度敏感地区，因此种植林地可以有效改善生态环境，防止沙漠进一步扩张。水域的保护主要沿主干河道实施，防止人为更改河道边缘，在沿河周边禁止开发和居住，防止破坏水源地和人为污染河流。同时，建设用地在原有城镇建设用地的基础上向周边扩展，且可利用的土地资源主要向未利用地转移，以便进一步加强对未利用的开发，减少占用耕地。2) 耕地保护情景：受国家基本农田保护政策的影响，基本农田保护对保障国家粮食安全、促进社会经

济全面、协调、可持续发展具有十分重要的意义，严格控制区域内基本农田和其它农用地的占用，2030 年土地利用优化配置结果显示（图 4b），古浪县东北部、肃南县、永昌县北部和民勤县沙漠边缘的大部分乡镇纳入新农村建设和生态移民建设，以便减少边远山区、交通落后区、居民点分散区的建设用地面积，部分不适宜居住的居民点宜整体搬迁，适当压缩农村居民点用地规模，将腾空出的老旧宅基地整理为耕地，另外，以土地整治项目为平台，开展农村土地综合整治，提高耕地质量，大力整治“空心村”，通过整治村庄，增加耕地面积，缓解用地矛盾，改善流域内人居环境。3) 自然发展情景：2030 年土地利用优化配置结果显示（图 4c），凉州区、金川区、永昌县和民勤县建设用地有扩张趋势，且农村居民点亦有少量增加，耕地、林地和草地减少趋势明显，而在凉州区和民勤县结合部的未利用也有增加，从全流域来看，自然发展情景以减少耕地和生态用地为前提换取建设用地规模，未利用虽然在国家宏观政策引导下有所改善，但整体还是以增加为主。但从自然发展优化结果看，各类建设用地有集约节约用地趋势，原因是在优化配置时适当考虑了政策因素和全民生态保护意识逐步提高等因素。

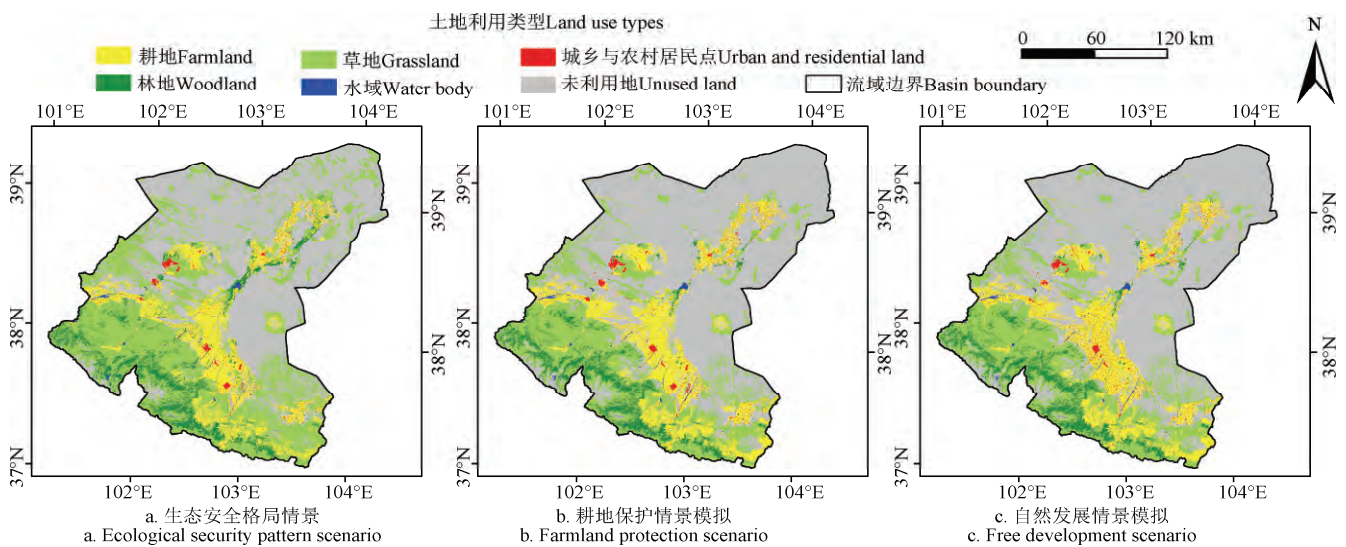


图 4 2030 年石羊河流域不同情景方案土地利用优化配置结果

Fig.4 Land use optimization result under different scenario in Shiyang river basin in 2030

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究利用 MCR 和 CLUE-S 模型, 将基于最小累积阻力模型的生态安全格局与土地利用优化配置相结合, 提出了一种基于生态安全格局保护的土地利用优化配置方法, 对流域 2030 年的土地利用结构和布局进行了预测和模拟, 并对 3 种情景的土地利用模拟结果进行了对比分析, 结果表明:

1) 石羊河流域受林地、草地和水域等生态核心源的影响较明显, 其中水域和林地 2 大生态源的累积阻力表面空间分布差异较为明显, 水域沿河流走向呈带状分布, 从上游祁连山区一直延伸至下游民勤绿洲盆地, 林地呈斑块状分散镶嵌在上游水源涵养区和中、下游绿洲中。

2) 利用 MCR 模型计算构建了全流域生态阻力空间分区, 并将水域和林地 2 大核心源阻力空间相综合, 据此建立了石羊河流域综合生态安全格局下的土地利用优化配置分区, 将其分为生态保护核心区、重点优化配置区、潜在优化配置区、生态保护重点区、生态恢复关注区和生态综合治理区六大分区, 各分区在空间分布、结构特征等方面差异较为明显。

3) 借助 3 期土地利用数据对石羊河流域生态安全格局情景、耕地保护情景和自然发展情景 3 种模式下 2030 年的土地利用结构和布局进行了优化配置。结果显示, 在生态安情景下耕地有所减少, 林地、草地和水域有较明显增加, 耕地保护情景则以土地开发和整治及宅基地还耕为主要目标, 科学有效控制了建设用地规模, 大力开发未利用地潜力; 自然发展情景综合考虑了目前发展情况下和政府宏观政策指导下土地利用各类型的数量及空间结构发展情况。通过对 3 种综合考虑石羊河流域社会经济、生态及耕地保护等多方面的因素, 研究结果认为耕地保护情景更为合理, 既能保持耕地面积不减少, 又能兼顾考虑生态恢复和城镇发展等方面的需求, 而其它两种可为耕地保护情景进行补充和局部修正。

4.2 讨论

本研究对研究区中对景观过程和生态安全格局起关键作用的林地和水域作为生态源地, 并以此为石羊河流域构建基于生态安全情景的累积阻力表面和耗费距离, 明确了流域生态保护区、生态关注区和生态治理区的空间位置和边界范围。对于干旱地区来说, 水资源是维系整个社会经济发展和人口、城镇扩展的“生命线”, 随着人口数量与城镇规模的不断扩大, 用水量逐年加大, 蓄水、引水、提水工程也相继投入运行, 从而改变了流域的水文地质循环过程, 使得流域地表与地下水资源日益减少, 水资源供需矛盾日益尖锐, 因此水资源是土地利用优化配置和生态安全的关键生态景观因子之一。此外, 研究区林地从低海拔到高海拔区都有分布, 对于保持生态系统平衡和发挥生态系统服务具有重要意义, 且高海拔地区林地资源分布广泛, 为研究区主要的生态水源涵养区, 是当地各级政府生态保护的主要目标区, 因

此本研究将其纳入到生态源中。然而, 流域内部草地也有较多分布, 从低海拔区到高海拔去也有分布, 研究中尚未考虑作为生态源地, 这是因为: 第一, 草地虽然分布面积较多, 但由于生长在干旱地区, 分布密度较小(分布稀疏), 生长个体较为矮小, 因此随着生长周期容易凋谢或死亡。第二, 草地分布主要集中在石羊河上游地区, 这里海拔较高, 年均气温在 2.0~1.5 °C 之间, 因此受人类活动影响较小, 其生态格局较为稳定; 第三, 考虑到 MCR 模型的计算效率, 如果生态源较多, 会造成计算速度降低, 且因子之间出现相互干扰的情况。

[参 考 文 献]

- [1] 刘彦随, 郑伟元. 中国土地可持续利用论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 叶红梅. 面向流域生态安全的景观格局演变研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
Ye Hongmei. Research on Landscape's Dynamic Evolution for Watershed's Ecological Security[D]. Wuhan: Hongzhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谭永忠. 县级尺度土地利用变化驱动机制及空间格局变化模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Tan Yongzhong. Land Use Driving and Spatial temporal Change of Simulation Based on Country Level[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [4] 贺秋华. 江苏滨海土地利用/覆盖变化及其生态环境效应研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
He Qiuhua. Coastal Land Use/Land Cover Change and Its Ecological Environment Effect Research in Jiangsu[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郭碧云, 张广军. 基于 GIS 和 Markov 模型的内蒙农牧交错带土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 291-298.
Guo Biyun, Zhang Guangjun. Land use change in farming pastoral region of Inner Mongolia based on GIS and Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 291-298. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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[J]. 地理研究, 2002, 21(3): 324-330.
Liu Yansui, Chen Baiming. The study framework of land use/cover change based on sustainable development in China[J]. Geographical Research, 2002, 21(3): 324-330. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(12): 1031-1040.
Liu Jiuyan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang et al. Analysis on the spatial pattern of recent land use changes in China[J]. Science in China: Series D, 2002, 32(12): 1031-1040. (in Chinese with English abstract)

- [8] 罗格平, 张百平. 干旱区可持续土地利用模式分析: 以天山北坡为例[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1160—170.
Luo Geping, Zhang Baiping. Sustainable land use models for arid lands: A case study of the northern Tianshan mountain areas[J]. Acta Geographical Sinica, 2006, 61(11): 1160—170. (in Chinese with English abstract)
- [9] Marulla J, Pinob J, Tello E et al. Social metabolism, landscape change and landuse planning in the Barcelona Metropolitan Region[J]. Land Use Policy, 2010, 27: 497—510.
- [10] Stewart T J, Janssen R, Herwijnen M V. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning[J]. Computers and Operations Research, 2004, 31(14): 2293—2313.
- [11] 刘彦随, 方创琳. 区域土地利用类型的胁迫转换与优化配置: 以三峡库区为例[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 334—340.
Liu Yansui, Fang Chuanglin. A study on regional forced land use conversion and optimal allocation: Taking the Three Gorges Reservoir Area as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(4): 334—340. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵庚星, 王人潮, 尚建业. 黄河三角洲垦利县土地利用的系统动力学仿真模拟研究[J]. 浙江农业大学学报, 1998, 24(2): 141—147.
Zhao Gengxing, Wang Renchao, Shang Jianye. Study on land use system dynamics simulation of Kenli County, Yellow River Delta[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1998, 24(2): 141—147. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张云鹏, 孙燕, 陈振杰. 基于多智能体的土地利用变化模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 255—265.
Zhang Yunpeng, Sun Yan, Chen Zhenjie. Simulation of land use change using multi-agent model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(4): 255—265. (in Chinese with English abstract)
- [14] Kim D S, Chung H W. Spatial diffusion modeling of new residential area for land use planning of rural villages[J]. Journal of Urban planning and Development, 2005, 131(3): 181—194.
- [15] Gould S F. Comparison of postmining rehabilitation with reference ecosystems in Monsoonal Eucalypt Woodlands, Northern Australia[J]. Restoration Ecology, 2012, 20(2): 250—259.
- [16] Lendering K T, Jonkman S N, Gelder P H A J M et al. Risk-based optimization of land reclamation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 144: 193—203.
- [17] 吕锋, 崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 103—107.
Lü Feng, Cui Xiaohui. Multi criteria decision grey relation projection method and its application[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2002, 22(1): 103—107. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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.
Yuan Man, Liu Yaolin. Land use optimization allocation on multi-agent genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 191—199. (in Chinese with English abstract)
- [19] Barredo J, Kasanko M, McCormick M, et al. Modeling dynamic spatial processes: Simulation of urban future scenarios through cellular automata[J]. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(3): 145—160.
- [20] Zhao B, Guo C X, Cao Y J. A multi-agent based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1070—1078.
- [21] 黎夏, 伍少坤. 面向对象的地理元胞自动机[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 45(3): 90—94.
Li Xia, Wu Shaokun. An object-oriented geographical cellular automata[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 45(3): 90—94. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张丁轩, 付梅臣, 陶金, 等. 基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 246—256.
Zhang Dingxuan, Fu Meichen, Tao Jin, et al. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 246—256. (in Chinese with English abstract)
- [23] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长前景[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1189—1204.
Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1189—1204. (in Chinese with English abstract)
- [24] 魏伟, 雷莉, 范雯, 等. 基于累积耗费距离理论的石羊河流域水土资源优化配置[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 532—540.
Wei Wei, Lei Li, Fan Wen, et al. Water-soil resources optimization based on accumulative cost resistance model in Shiyang River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 532—540. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李鑫, 马晓冬, 肖长江, 等. 基于 CLUE-S 模型的区域土地利用布局优化[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 162—167.
Li Xin, Ma Xiaodong, Xiao Changjiang, et al. The regional land use layout optimization based on the CLUE-S Model[J]. Economic Geography, 2015, 35(1): 162—167. (in Chinese with English abstract)
- [26] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2001, 85(1/2/3): 239—248.

Configuration partition of land use optimization in arid inland river basin based on ecological security pattern

Wei Wei¹, Shi Peiji^{1*}, Zhou Junju¹, Xie Binbin², Li Chuanhua¹, Lei Li³

(1. College of Geographical and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Urban Economics and Tourism Culture, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 3. Management Bureau of Shiyang River Basin, Gansu Provincial Department of Water Resources, Wuwei 733000, China)

Abstract: To solve the increasingly serious ecological problem and shortage of water and soil resource during the development of social and economy and urbanization process, the reasonable determination of the land use structure and layout in future is the key. In this paper, the GIS (geographic information system) technology and the MCR (minimum cumulative resistance) model as well as the CLUE-S (conversion of land use and its effects at small regional extent) model were applied to optimize the land use structure and its allocation in Shiyang river basin. First, the correct driving factors were selected to make prediction map. In this paper, 18 driving factors of land use were selected for logistic regression. Besides, ecological security patterns were constructed to maintain the basic ecosystem services of Shiyang river basin based on the theory of landscape security pattern. Second, we set the corresponding land use change and spatial optimizing allocation of the basin in 2030 under 3 development modes by MCR model and CLUE-S model, and then predicted the land use distribution under an ecological security pattern scenario, a farmland protection scenario, and a free development scenario. Third, taking the optimization of land use resources as an objective, the spatial distributions of energy exchange and transfer resistance and cost resistance of the land use resources in Shiyang river basin were analyzed according to the minimum accumulative resistance surface, the accumulative cost resistance model and the surface dissipative technology. The result showed that Shiyang river basin could be divided into 6 types which were core area of ecological protection, key area to be optimized, potential optimal allocation area, key area of ecological protection, ecological restoration-concern area and ecological comprehensive management area according to the configuration methods. Besides, The results showed that the farmland area decreased by 314.41 km² (about 5.32%), but the woodland and grassland increased evidently by the area of 1 424.17 km² (about 33.85%) and 1485.13 km² (about 12.05%) respectively and unused land also had a great reduction under an ecological security pattern scenario. In contrast, the farmland area increased by 5.85% in 2030 (about 386.53 km²), woodland and grassland also increased by 7.61% (229.38 km²) and 0.77% (84.58 km²) respectively, and unused land reduced by 3.91%, about 789.92 km² under a farmland protection scenario. This scenario took the land use exploitation and renovation as well as homestead consolidation as the main objectives, and controlled the urban and residential land expansion scientifically and effectively. In a free development scenario, the current free development situation and the government macro policy guidance were comprehensively considered and the quantity and spatial structure development were also taken into consideration. Comprehensively considering the sustainable development in Shiyang river basin from the perspective of social, economic, ecological development and farmland protection, the free development scenario is relatively reasonable, and it can not only maintain the farmland increase, but also consider the demand of the ecological restoration and urban development. The other 2 scenarios can be a supplement for regional land optimal allocation.

Keywords: land use; optimization; models; ecological security pattern; MCR model; GIS; Shiyang river basin