

基于 CLUE-S 模型和生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置

魏伟^{1,2} 颜耀文¹ 魏晓旭³ 颜斌斌⁴ 张强² 郝媛媛¹

1 兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州,730000

2 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州,730070

3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州,730000

4 兰州城市学院城市经济与旅游文化学院,甘肃 兰州,730070

摘要:以典型干旱内陆河流域石羊河为例,将 GIS 技术、最小累积阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型和 CLUE-S(conversion of land use and its effects at small regional extent)模型应用到该流域土地利用优化配置研究中。通过景观安全格局理论构建土地利用生态安全格局,基于土地利用空间分布和驱动因子的定量关系,提出一种基于生态安全格局的土地利用情景模拟方法,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,并对优化配置结果进行比较分析。结果表明,在生态安全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和宏观政策指导下各土地利用类型的数量及空间结构发展情况。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,其它两种情景可为耕地保护情景进行补充和局部修正。该结果可为石羊河流域土地利用总体规划和生态保护提供参考。

关键词:土地利用优化;CLUE-S 模型;MCR 模型;生态安全格局;石羊河流域

中图法分类号:P231; P208

文献标志码:A

土地资源可持续利用是实现可持续发展的重要环节,受到世界各国的共同关注^[1]。近年来,关于土地利用变化过程^[2-3]、驱动机制^[4-5]、动态规律^[6]、生态效应^[7]等的研究已经很多。我国目前对水土资源的利用处于粗放、低效状态,造成了土地资源的大量浪费,引起了诸如水土流失、生态环境恶化、水土资源生态风险显著提高等一系列社会和环境问题。探索并深入研究土地利用的优化配置,不仅是土地利用领域的重要课题,而且是合理分配有限土地资源和促进土地资源可持续利用的一项十分迫切的任务^[8]。

土地利用优化配置研究涉及土地资源、地理学、生态学、经济学等多个学科的综合学科。国内外学者对土地利用优化配置问题开展了大量研究工作,一些学者采用线性规划、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^[9-13];另有学者利用模糊数学、CA 模型、Markov 模型、蚁群算法、CLUE-S(conversion of land use and its effects at small regional extent)模型等与世界上主流的地理信息类软件的空间分析功能相结合,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已得到推广应用^[14-18]。

将传统的数量约束研究与空间配置研究相结合是目前土地利用优化配置研究的重点领域,但是在进行土地优化配置的同时,如何将维护生态安全、以及各种不同生态安全格局情景融入到土地利用优化过程和结果中,对干旱地区内陆河流域的水资源、土地资源等资源进行优化配置,是推

收稿日期:2016-09-06

项目资助:国家自然科学基金(41261104, 71263045, 41471163);甘肃省自然科学基金(1506RJZA129);甘肃省高等学校科研项目(2014A-015)。

第一作者:魏伟,博士,副教授,主要从事生态遥感和 GIS 应用研究。weiweigis2006@126.com

通讯作者:颜耀文,博士,教授。xieyw@lzu.edu.cn

进干旱地区水土资源高效、可持续利用的关键所在,也是本文的出发点。

1 石羊河流域概况与数据来源

1.1 石羊河流域概况

石羊河流域位于 $101^{\circ} 41' E \sim 104^{\circ} 16' E$, $36^{\circ} 29' N \sim 39^{\circ} 27' N$, 地处甘肃河西走廊东段, 乌鞘岭以西, 祁连山北麓, 可分为南部祁连山区、中部平原区、北部荒漠区三大地貌单元。石羊河流域深居大陆腹地, 属大陆性温带干旱气候, 太阳辐射强、日照充足, 温差大、降水少、蒸发强烈、空气干燥。

1.2 数据源及处理

本文以 1986 年 9 月、2000 年 8 月的 Landsat/ETM 数据和 2014 年的 Landsat/OLI 为数据源, 利用 ENVI5.5 软件进行几何精校正, 将误差控制在 0.5 个像元之内。在 ArcGIS 平台上对其进行目视解译, 将土地利用分成耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地 6 大类(图 1), 并利用土地变更数据对 1986 年和 2000 年源数据精度进行评定和修正, 利用 2010 年第二次全国土地调查数据对 2014 年的解译结果进行验证。利用 ArcGIS10.2 软件将解译的矢量数据转成 $30 m \times 30 m$ 栅格数据, 由于研究区面积较大, 为避免模型运行计算过程中出现耗时过多和死机问题, 将该栅格重采样为 $500 m \times 500 m$ 。其他数据有: ① 水系数据、道路数据、城镇及农村居民点数据和 DEM 数据($30 m \times 30 m$); ② 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; ③ 自然环境因子, 包括地形、土壤、降雨量、气温等。为了和土地数据在尺度上保持一致, 统计数据以乡镇为单元进行统计, 人口、人均收入和粮食产量等利用克里金插值法进行空间化, 并利用 ArcGIS10.2 软件进行重分类。将该区域城市总体规划图、水资源保护与利用规划、石羊河流域治理规划等文本和相关图件作为土地重新配置的参考依据。

2 研究方法

CLUE-S 模型已经广泛应用于土地优化配置中, 是目前比较成熟且得到认可的高效土地利用配置优化模型, 最小累积阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型主要应用于生态安全格局评价和生态布局优化中。将二者相结合, 借助 GIS 技术实现优化配置结果的直观可视化空间表达, 是生态文明建设、土地高效利用研究领域

中的技术方法。

2.1 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, 判别对生态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^[19]。

2.1.1 目标源的确定

按照景观生态学的观点, 将对景观过程和生态安全格局起关键作用的景观要素, 如较大面积的林地、水域等景观组分, 称为生态“源地”。本文中土地利用的优化配置以保护生态用地为目的, 尤其是连片的林地和水系等。在石羊河流域, 林地主要集中分布在上游祁连山区, 此地是国家重要的水源涵养林保护区和国家级自然保护区的核心区, 将林地作为生态保护的重点。水域是干旱内陆地区维系生态系统的“生命线”, 作为土地利用优化配置时考虑的重点。“目标源”构成高安全水平的生态用地, 是保障自然生态系统的最小土地底线, 原则上任何城市扩张行为不得侵占这类生态用地。

2.1.2 最小累积阻力模型

为反映“目标源”和土地利用资源的空间运行态势, 借助 GIS 中的表面扩散技术, 构建最小累积耗费阻力模型(MCR)来表达土地利用资源的空间跨越特点, 此模型可反映生态源运动的空间趋势^[20], 强调资源阻力在一定空间距离上的累积效应。主要考虑目标源、距离、生态源运行时的空间单元阻力及土地利用景观类型等因子, 模型为:

$$C_L = \min \sum_{i=1}^n (D_k R_k), \\ i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, C_L 为第 L 个单元到源地的最小耗费; n 为土地利用资源基本单元的总个数; m 为目标源地到第 L 个单元所经过单元的个数; D_k 为第 k 个单元与目标源地的距离, R_k 为第 k 个单元的阻力值^[21]。

该模型中需要确定不同土地资源经过各个空间单元的阻力, 建立不同单元的阻力表面模型:

$$R_k = \sum_{i=1}^n (W_i Y_{ij}) \\ i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中, R_k 为第 k 类资源单元的累积阻力; W_i 为 i 指标的权重; Y_{ij} 为第 j 类单元由指标 i 确定的相对阻力^[21]。

借助 ArcGIS10.2 平台, 根据石羊河流域土地利用特征, 选取与土地利用资源生态安全格局

密切相关的水域和林地景观单元,利用累积阻力表面模型进行计算,结果以栅格值进行显示,再用最大值归一化,使水域和林地景观类型的累积阻力表面值在0~1区间。为便于后续叠置计算,其结果在ArcGIS中输出(图2),并作为土地利用资源最小累积阻力模型的栅格单元的阻力表面。

2.1.3 累积耗费距离模型及其栅格表达

累积耗费距离模型可以采用图论中的节点/链接(node/link)方式表示。利用网格图解法分析资源类型空间格局的性质,用节点/链的像元表示法表示某一代价表面^[21,22]。基于节点/链的像元表示方法可以计算通过某一代价表面到最近源的累积耗费距离(图2),在这种节点/链的像元模式下,以节点值表示景观单元耗费距离,节点方向表示生态流运行方向。因此,以链表示的耗费距离之和,要综合考虑单个节点耗费距离和节点方向。计算式为:

$$D_{k1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (C_i + C_{i+1}) \quad (3)$$

$$D_{k2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sum_{i=1}^n (C_i + C_{i+1}) \quad (4)$$

式中, C_i 为第 i 个像元的耗费值; C_{i+1} 指沿运动方向上第 $i+1$ 个像元的耗费值; n 为像元总数; D_k 是指通过某一代价表面到源的累积耗费距离,过某一代价表面沿像元的垂直或者水平方向运动时采用(3)式,当通过某一代价表面沿像元的对角线方向运动时采用(4)式。

2.2 土地利用优化配置情景模拟

2.2.1 CLUE-S模型

CLUE-S模型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。基本原理是利用Logistic回归在现状图中提取不同用地类型的分布规则,再利用该规则推演未来一定数量结构约束下的土地利用布局状况。

该模型可分为非空间土地需求模块和空间分配模块两部分。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,本文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^[23],具体过程为:

$$\log \left\{ \frac{p_i}{1-p_i} \right\} = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \cdots + \beta_m x_{m,i} \quad (5)$$

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。

2.2.2 优化配置模拟

1) 驱动力因子筛选

直接或间接的土地利用变化驱动因子都有可能成为土地利用类型变化不稳定的根源,尤其是对生态环境脆弱的干旱内陆河流域。本文主要依据CLUE-S模型的因子需求、国内外土地利用变化驱动力研究成果^[1,8,23],并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(表1)。

2) 空间驱动因子 Logistic 回归及结果检验

CLUE-S模型运用二值Logistic逐步回归计算每一种地类在区域内每个像元处出现的概率,通过比较同一位置各种地类出现概率的大小进行空间分配^[23]。将影响因素空间化以计算不同影响因子的作用大小,对高程、坡度、植被覆盖度等栅格数据,空间化文件中的属性体现了作用大小;对降雨量、温度、人均收入、国内生产总值等,对117个乡镇点采用ArcGIS10.2软件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,以计算其作用大小;其他距离因子,利用空间分析工具栏中的欧氏距离工具,不同栅格的属性定义为栅格到点、线、面的距离,表示其影响作用大小。把影响因素的空间化文件及不同土地利用类型的空间化文件转为ASCII格式,放至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SPSS 15.0,设置好因变量、自变量,并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常数项,即各用地类型的分布规则,计算结果见表1。

Logistic回归结果的检验可以采用目前较为成熟的ROC(relative operating characteristics)方法评价。ROC曲线是一种评价和检验回归模型结果的有效方法。通常,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;但若 $ROC < 0.5$,则认为驱动因子对此地类的解释能力减弱。不同地类的ROC检验值如表1所示,除草地回归 ROC 值大于0.5外,其余土地利用 ROC 值均大于0.7,检验结果表明所选的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 2014 年不同土地利用类型的 Logistic 回归系数分布

Tab. 1 The Logistic Regression Coefficient Distribution of Different Land Use Types in 2014

土地利用变化驱动因子	耕地	林地	草地	建设用地	未利用地	因子说明
ROC 值	0.773	0.790	0.687	0.844	0.890	—
常数	2.091	-0.102	0.196	1.434	-4.069	—
生态功能分区/km ²	-0.002	0.003	0.001	-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/km ²	0.358	0.023	0.003	0.000	-0.001	土地利用(三大类)现状图转为栅格
林地面积/km ²	-0.024	-0.001	0.385	-0.015	—	生态功能区划图提取结果
高程/m	-0.082	0.010	0.004	-0.003	0.030	采用 DEM 数据
坡度/(°)	0.015	0.028	0.016	-2.089	-1.023	利用 DEM 计算得到
年平均降雨量/mm	0.030 6	0.044 1	0.032 0	—	-0.026 7	气象站点数据插值为栅格数据
年平均温度/(℃)	-0.010	0.054 2	-0.005 6	—	-0.000 8	插值为栅格数据
植被覆盖度/%	0.038	0.224 5	1.886	0.024	-0.003	利用 NDVI 计算得到
人口密度/(人·km ²)	0.443	0.103	0.042 0	0.067	-0.066	以乡为统计单元, 插值为栅格数据
人均收入/(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/104 元	0.003	0.002	0.001	1.234	-1.888	以乡为统计单元, 插值为栅格数据
从业总人数/人	0.007	0.003	0.003 5	0.359 1	-0.003	以镇为统计单元, 插值为栅格数据
粮食产量/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/km ²	0.013	0.001	0.001	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/m	0.005	-0.001	—	-0.004	-0.001	量算每个像元的中心距村、镇距离
距河流距离/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
距铁路和高速公路距离/m	0.001	-0.004	0.003	-0.008	-0.009	量算每个像元的中心距 等级公路距离
距省道和县乡道的距离/m	0.007	-0.001	0.002	-0.001	-0.003	量算每个像元的中心距 较低等级公路距离

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。首先, 将 Logistic 回归结果中的各土地利用代码、回归的常数项、变量个数、各变量的系数等信息写入 alloc. reg 文件, 然后把 18 个因子栅格数据转换成 ASCII 编码文件(.txt), 以 Sclgr 文件写入; region. fil 文件是指不参与空间配置的区域(区域约束文件), 本文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, 本文重点考虑了生态和经济效益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, 部分参数的具体设置详见文献[18, 23]。本文以 2014 年数据为基础对 2030 年进行土地利用空间优化配置, 最终空间配置结果在 cov_all. 0 和 cov_all. 1 中。

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合理:

$$Kappa = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (6)$$

式中, P_o 为正确模拟的比例; 本文 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。本文中模拟正确栅格 138 302 个, 占总栅格数(162 326 个)的 85.2 %, 因此 $P_o = 0.852$, 对其中的 5 类土地利用进行优化, 认为每类土地利用的栅格在随机模拟状况下的正确模拟比 $P_c = 1/5$, 而理想情况下正确模拟比例为 100 %, 因此 " $P_p = 1$ ", 由此计算出 Kappa 指数为 0.815(>0.6), 说明对 2014 年的土地利用空间分布模拟效果较好。

3 结果与分析

3.1 石羊河流域生态安全格局构建

3.1.1 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, 分别以水域和林地为对象, 计算了二者不同年份的累积耗费距离表面值, 如图 1 所示。由图 1 可知, 水域累积耗费距离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。高值区和低值区中间的过渡地带是生态和植被变化的敏感区, 因此在土地优化配置时也应予以高度重视。从空间变化来看, 水域累积耗费距离在 1986~2014 年间

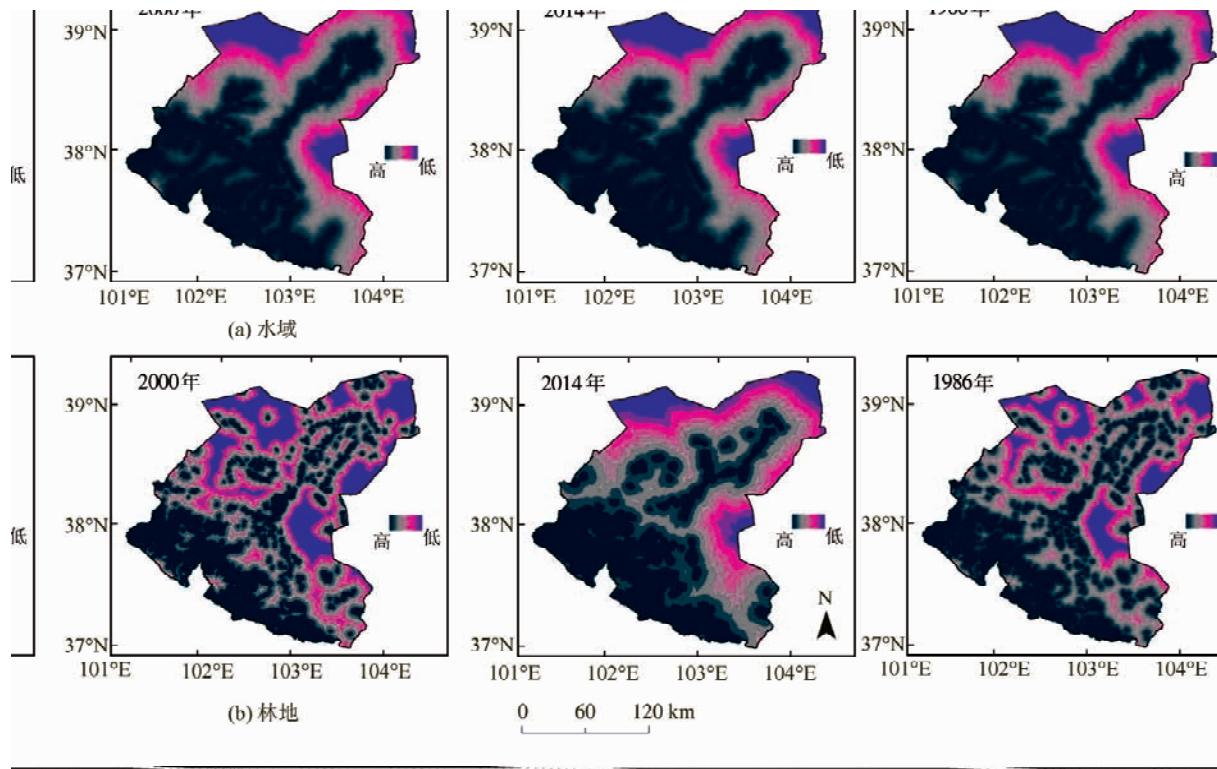


图1 石羊河流域 1986 年、2000 年和 2014 年核心源累积耗费距离表面

Fig. 1 Accumulative Cost Distance Surfaces of Core Source of Shiyang River Basin in 1986, 2000 and 2014

变化不大,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。

林地累积耗费距离,表现出南低北高、分布零散的特点。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。在石羊河流域,水域作为支撑流域发展和生存的生命线,对生态流的运输和投送能力最强,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。

3.1.2 流域核心生态源地耗费阻力分区

将水域和林地计算得到的累积阻力表面和累积耗费距离导入 ArcGIS 中做基于栅格数据的叠置分析,将高阻力值与高累积耗费距离值叠置,则叠置结果为高耗费阻力区。并结合石羊河流域土地利用分布特点,将石羊河流域土地利用优化配置的区域划分为源点、核心区、联通区、轻度耗费阻力区、低度耗费阻力区、中度耗费阻力区、高度耗费阻力区和极度耗费阻力区 8 类。通过比较 3 个不同时期 8 大耗费阻力分区的分布特征发现(图 2(a)),水域源点面积分布最广,分布也最为集中。

林地阻力分区中高度和极度耗费阻力区主要

分布于古浪县北部、永昌县大部分地区和民勤县北部的沙漠地区,该区域仅有的人工种植成活林零星分布,彼此间生态流交换所受生态阻力较大(图 2(b))。从空间变化来看,1986 年和 2000 年间各类耗费阻力区较为相似,但在 2014 年不同分区间空间分异明显增强,聚集程度愈加明显,这种分布结果与生态源累积耗费距离表面的空间分布有关。从面积变化来看,对生态安全格局起重要影响的中度、高度和极度阻力耗费区在 2000 年三者面积比 1986 年减少 335.07 km²,2014 年比 2000 年又减少 1 219.39 km²。由此可见,对生态安全格局有显著影响的两大核心源中水域的高耗费阻力面积大,分布相对集中,而林地分布较为分散。对干旱区内陆河而言,其土地利用的优化配置,关键在于如何协调和平衡生态耗费阻力,合理利用和保护水域及林地的分布空间应成为该流域关注的焦点。

为了给全流域土地利用优化配置提供基础生态安全格局,将水域和林地两大核心源的累积耗费距离表面和耗费阻力空间分区进行栅格综合,计算其交集(即,若某像元在单一核心源中为核心区,则在最终综合安全格局中为生态保护核心区),据此建立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,分为生态保护核心区、重

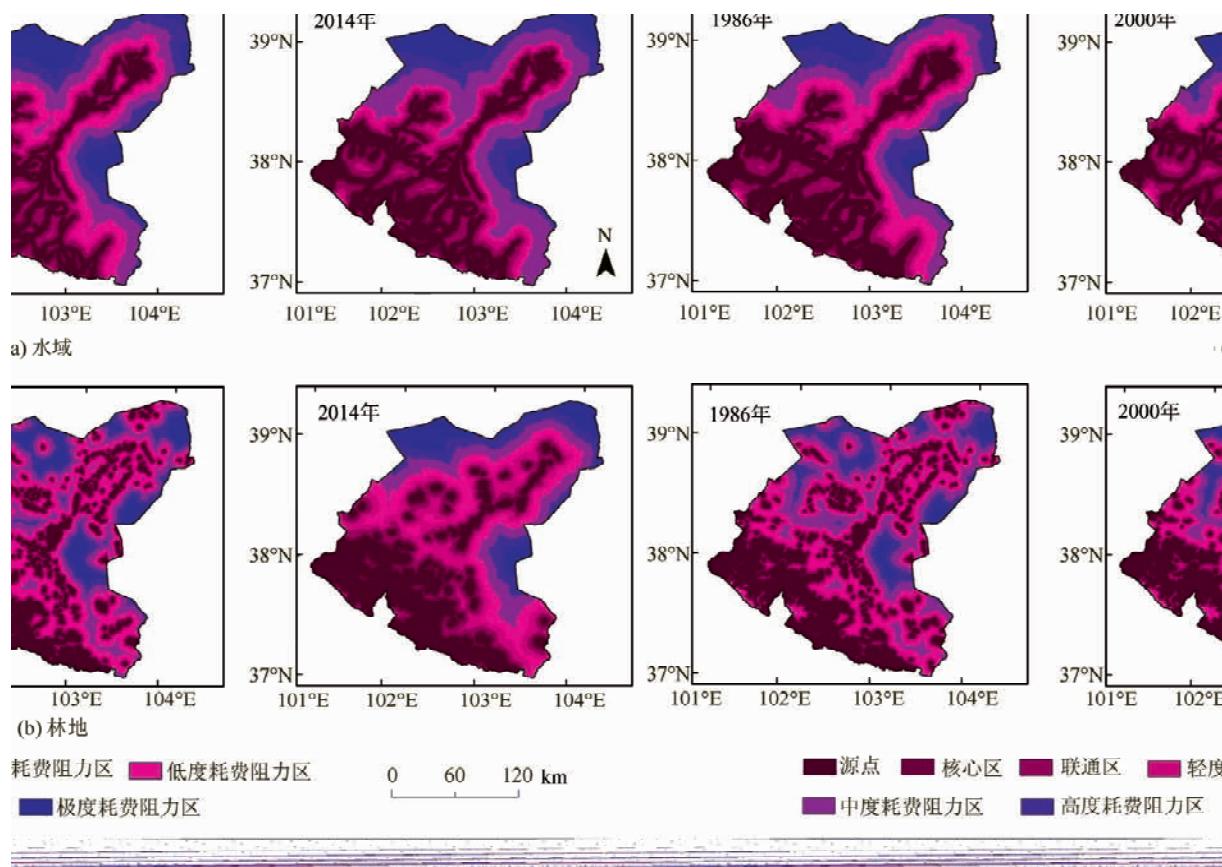


图 2 石羊河流域 1986 年、2000 年和 2014 年生态源耗费阻力分区

Fig. 2 Cost Resistance Partitions of Ecological Resource of Shiyang River Basin in 1986, 2000 and 2014

点优化配置区、潜在优化配置区、生态保护区、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, 流域内部的重点优化配置区主要分布在武威绿洲、民勤绿洲和昌宁绿洲的大部分地区。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, 这些地方是目前及未来很长一段时间内急需优化和利用的地区。不同优化配置分布的面积及主要分布区域见表 2。

3.2 不同情景方案预测结果

3.2.1 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, 在 1986 ~ 2014 年间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, 将土地利用变化的驱动因子作为土地利用优化配置的依据, 结合定量分析和定性分析适度调整土地利用发展趋势, 借助 CLUE-S 模型分别预测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与前两种情景相叠置, 生成基于生态安全格局情景下的 2030 年土地

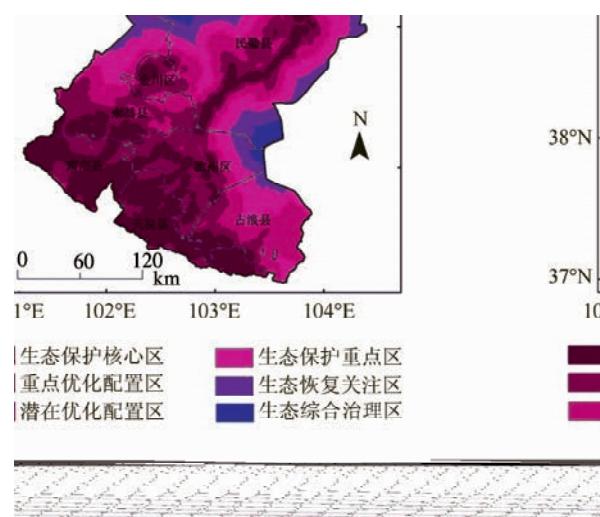


图 3 基于生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置分区

Fig. 3 Landuse Optimization Configuration Partitions of Shiyang River Basin Based on Ecological Security Pattern

利用优化配置结果。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保护区, 以便有效提高生态安全保障的屏障范围; 耕地保护情景为了有效保护耕地资源, 严格实施耕地保护政策, 根据新农村建设发展趋势, 将

居民点整理后的老、旧宅基地退为耕地,目的是尽量维持一定的耕地面积。自然发展情景仅考虑了目前自然发展情况下和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。从表3中生态安全格局优化模拟结果可以看出,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%,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见表3。

表2 土地利用优化配置分区统计表

Tab. 2 Zonal Statistic Table of Landuse Optimization Configuration

优化分区	面积/km ²	百分比/%	主要分布区域
生态保护核心区	10 033.76	24.12	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	9 357.42	22.49	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	7 664.19	18.42	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	6 895.50	16.58	民勤县沙漠与绿洲交汇地带、沿民勤县城周边大部分地区古浪县北部、凉州区东部和金川区北部部分乡镇。
生态恢复关注区	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	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。

表3 2030年不同情景方案土地利用结构变化与比较/km²Tab. 3 Landuse Structure Change and Comparisons Based on Different Simulations in 2030/km²

土地利用类型	生态安全情景	耕地保护情景	自然发展情景	2014年现实情景	与生态安全比较的变化值	变化率
耕地	5 911.48	6 612.42	6 050.25	6 225.89	-314.41	-5.32
林地	4 207.64	3 012.85	2 212.68	2 783.47	1 424.17	33.85
草地	12 325.72	10 925.17	10 323.90	10 840.59	1 485.13	12.05
城乡居民点用地	543.74	522.80	566.95	516.35	27.40	5.04
水体	310.61	299.76	280.53	216.79	93.82	30.21
未利用地	18 301.18	20 227.37	22 166.06	21 017.29	-2 716.11	-14.84

3.2.2 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,以2014年为基准年模拟了3种情景方案。

1) 生态安全情景方案。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,图4(a)中2030年土地利用优化配置结果显示,林地增加趋势明显,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,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,防止沙漠的进一步扩张。水域的保护主要沿主干河道实施,防止人为更改河道,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。建设用地在原有城镇建设用地的基础上向周边扩展,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) 耕地保护情景方案。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,图4(b)中2030年土地利用优化配置结果显示,古浪县东北、肃南县、永昌县北部和民勤县沙漠边缘的大部分乡镇应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,可缓解用地矛盾,改善流域内人居环境。

3) 自然发展情景。图4(c)中2030年土地利用优化配置结果显示,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土地也有增加。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。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,原因在于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。

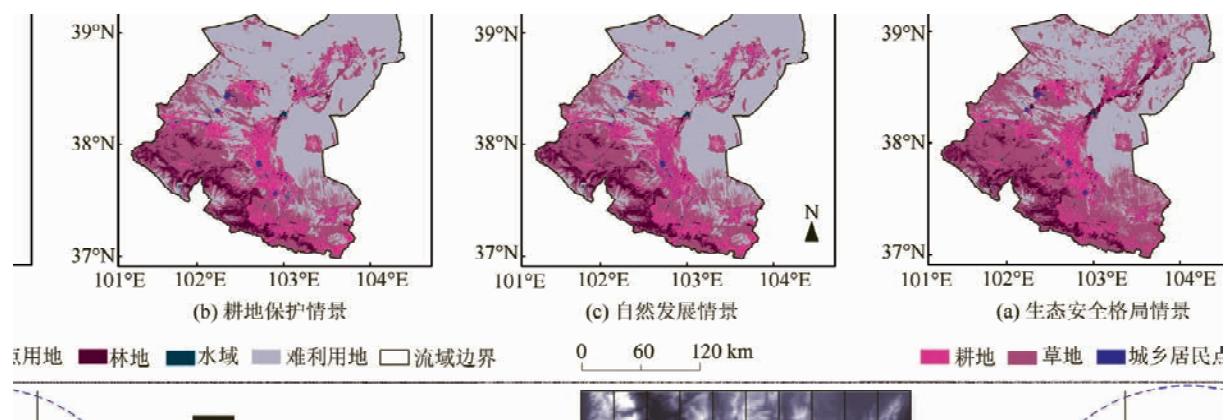


图4 2030年石羊河流域不同情景方案土地利用优化配置结果

Fig. 4 Landuse Optimization Results Under Different Scenarios of Shiyang River Basin in 2030

4 结语

本研究将最小累积阻力模型与土地利用优化配置相结合,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,为基于生态安全格局的土地利用优化配置提供了空间参考。同时构建了基于生态安全格局的土地利用优化配置方法,模拟出了生态安全情景、耕地保护情况和自然发展情景下的石羊河流域土地利用空间分布格局,为今后开展流域生态治理和土地规划提供了参考。

参考文献

- [1] Liu Yansui, Zheng Weiyuan. Sustainable Land Use of China[M]. Beijing: Science Press, 2008. (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] Xu Xibao, Yang Guishan, Zhang Jianming. Urban Land Use Optimization in Lanzhou, China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(7): 878-881(徐昔保,杨桂山,张建明.兰州市城市土地利用优化研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2009, 34(7): 878-881)
- [3] Tan Yongzhong. Land Use Driving and Spatial Temporal Change of Simulation Based on Country Level[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004(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)
- [4] He Qiuhua. Coastal Land Use/Land Cover Change and Its Ecological Environment Effect Research in Jiangsu[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011(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)
- [5] 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(郭碧云,张广军.基于GIS和Markov模型的内蒙古农牧交错带土地利用变化[J].农业工程学报,2009,25(12):291-298)
- [6] 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(刘彦随,陈百明.中国可持续发展问题与土地利用/覆盖变化研究[J].地理研究,2002, 21(3): 324-330)
- [7] Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang, et al. Analysis on the Spatial Pattern of Recent Land Use Changes in China[J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2002, 32(12): 1 031-1 040(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:地球科学,2002, 32(12): 1 031-1 040)
- [8] Liu Yaolin, Zhao Xiang, Liu Dianfeng. A Parallel Decision Support System for Land-Use Allocation Optimization Based on Artificial Immune System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 166-171(刘耀林,赵翔,刘殿锋.土地利用优化配置人工免疫并行决策支持

- 系统[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(2): 166-171)
- [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(2): 497-510
- [10] Stewart T J, Janssen R, Herwijnen M V. A Genetic Algorithm Approach to Multi-objective Land Use Planning[J]. *Computers and Operations Research*, 2004, 31(14): 2 293-2 313
- [11] 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(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)
- [12] Wang Hanhua, Liu Yanfang. Optimal Allocation of Land Resources Based on MOP-CA[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 174-177(王汉花, 刘艳芳. 基于MOP-CA整合模型的土地利用优化研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(2): 174-177)
- [13] 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(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)
- [14] Barredo J I, Kasanko M, McCormick N, et al. Modeling Dynamic Spatial Processes: Simulation of Urban Future Scenarios Through Cellular Automata [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64(3): 145-160
- [15] 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): 1 070-1 078
- [16] Li Xia, Wu Shaokun. An Object-Oriented Geographical Cellular Automata[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 45(3): 90-94(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)
- [17] Liu Dianfeng, Liu Yaolin, Liu Yanfang, et al. A Rural Land Use Spatial Allocation Model Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 751-755(刘殿锋, 刘耀林, 刘艳芳, 等. 多目标微粒群算法用于土地利用空间优化配置[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(6): 751-755)
- [18] 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(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)
- [19] 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): 1 189-1 204(俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长预景[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1 189-1 204)
- [20] Hargrove W W, Hoffman F M, Efroymson R A. A Practical Map-Analysis Tool for Detecting Potential Dispersal Corridors[J]. *Landscape Ecology*, 2005, 20(4): 361-373
- [21] Adriaensen F, Chardon J P, Blust G D, et al. The Application of Least-Cost Modeling as a Functional Landscape Model[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64(4): 233-247
- [22] 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(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)
- [23] 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(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)

Land Use Optimization Based on CLUE-S Model and Ecological Security Scenario in Shiyang River Basin

WEI Wei^{1,2} XIE Yaowen¹ WEI Xiaoxu³ XIE Binbin⁴ ZHANG Qiang² HAO Yuanyuan¹

1 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China

4 School of Urban Economics and Tourism Culture, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China

Abstract: In this paper, GIS spatial analysis technologies, the minimum cumulative resistance model and CLUE-S model were applied to optimize the land use structure and the allocation in the Shiyang River Basin. Ecological security patterns were constructed to maintain the basic ecosystem services of Shiyang River Basin based on the theory of landscape security patterns and land use data collected in 1986, 2000, and 2014. Moreover, we set the land use change and spatial optimization allocation of the basin for the year 2030 under three 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. The results showed that the farmland decreased but woodland, grassland, and water body increased under an ecological security pattern scenario. Land use exploitation and renovation and homestead consolidation were the main objectives. The urban and residential landuse were controlled scientifically and effectively under a farmland protection scenario. In a free development scenario, the current free development situation and the government macro policy guidance were comprehensively considered and the quantity and spatial development were also taken into consideration. Comprehensive consideration of sustainable development in Shiyang river basin from the perspective of social, economic, ecological development, and farmland protection suggests that the free development scenario is relatively reasonable, and the other two scenarios can be a supplement for regional land optimal allocation.

Key words: land use optimization; CLUE-S model; MCR model; ecological security pattern; Shiyang river basin

First author: WEI Wei, PhD, associate professor, specializes in ecological remote sensing and GIS. E-mail: weiweigis2006@126.com

Corresponding author: XIE Yaowen, PhD, professor. E-mail: xieyw@lzu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41261104, 71263045, 41471163; the Natural Science Foundation of Gansu Province, No. 1506RJZA129; the University Scientific Research Project of Gansu Province, No. 2014A-015.