

基于景观生态安全格局的成都平原与龙门山脉 过渡带土地资源开发利用

彭文甫^{1,2}, 周介铭^{1,2}, 徐新良³, 赵景峰^{1,2}

(1. 四川师范大学 地理与资源科学学院, 四川 成都 610068; 2. 四川师范大学 西南土地资源评价与
监测教育部重点实验室, 四川 成都 610068; 3. 中国科学院 资源环境科学数据中心, 北京 100101)

摘要: [目的] 基于景观生态安全格局的土地利用研究, 为缓解人地矛盾、经济发展与生态保护提供科学依据。[方法] 以成都平原与龙门山脉过渡带的四川省绵竹市为例, 基于遥感和 GIS 技术, 在提取和分析 20 a 来土地利用变化及其地形因子响应基础上, 以生态用地保护为目标, 选取地形和土地覆盖类型为阻力因子, 应用最小累计阻力模型构建景观生态安全格局。通过与土地资源现状的叠加, 对不同景观安全水平的土地资源进行划分。[结果] 研究区土地资源分为优先开发、适度开发、限制开发、禁止开发等 4 种类型, 其面积分别达 7 218. 39, 17 974. 75, 21 545. 39, 77 791. 46 hm², 并分析各类型土地利用特征, 提出了相应的土地资源开发利用规划。[结论] 基于景观生态格局理论与方法, 提出的不同生态安全水平的土地用地规划, 有利于区域生态安全保护和土地资源持续性利用。

关键词: 景观安全格局; 最小阻力模型; 土地资源开发; GIS

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0065-10

中图分类号: F301. 23

文献参数: 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 等. 基于景观生态安全格局的成都平原与龙门山脉过渡带土地资源开发利用[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 65-74. DOI:10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 010; Peng Wenfu, Zhou Jieming, Xu Xinliang, et al. Land Utilization of the Transition Zone from Chengdu Plain and Longmen Mountains Based on Landscape Ecological Security Pattern[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 65-74. DOI:10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 010

Land Utilization of Transition Zone from Chengdu Plain and Longmen Mountains Based on Landscape Ecological Security Pattern

PENG Wenfu^{1,2}, ZHOU Jieming^{1,2}, XU Xinliang³, ZHAO Jingfeng^{1,2}

(1. The Institute of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University,

Chengdu, Sichuan 610068, China; 2. Key Lab of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610068, China;

3. Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] Land use was studied based on landscape ecological security pattern to provide a scientific basis for relieving the contradiction between the increasing population and limited land, and for economic development and ecological protection. [Methods] Mianzhu City of Sichuan Province which located in the transition zone from Chengdu plain and Longmen mountain was took as a case study, where the land use change and its terrain factors response were extracted and analyzed from 1995 to 2015, based on remote sensing imagery, technology of remote sensing and GIS. To achieve the goal of ecological land protection, terrain and land cover types were selected as resistance factors, the minimum cumulative resistance model was applied to landscape ecological security pattern based on GIS spatial analysis method. Upon the spatial overlay analysis of land use status and landscape ecology security patterns in Mianzhu City by GIS, land resources in different levels of landscape security were divided. [Results] Land resources of landscape security included

收稿日期: 2016-08-10

修回日期: 2016-09-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于 LUCC 扰动影响的成都平原土地生态安全维持机理”(41371125)

第一作者: 彭文甫(1964—), 汉族(男), 四川省乐山市人, 博士, 副教授, 主要从事土地生态安全方面的研究。E-mail: pwfzh@126.com。

通讯作者: 周介铭(1956—), 汉族(男), 四川省成都市人, 教授, 博士生导师, 主要从事国土规划方面的研究。E-mail: zjm@sicnu.edu.cn。

priority, appropriate, limited, prohibited development, having acreages of 7 218.39, 17 974.75, 21 545.39, 77 791.46 hm^2 , respectively. The corresponding planning of land resources development and utilization was put forward based on the analysis of characteristics of each type land use in study area. The results can provide effective methods and means for regional ecological safety and reasonable development and utilization of land resources. [Conclusion] The land use planning whereon proposed by different ecological security level based on the theory of landscape ecological pattern and the corresponding method are conducive to regional ecological security protection and sustainable utilization of land resources.

Keywords: landscape security pattern; minimum cumulative resistance model; land resources development; GIS

土地利用与覆被在全球和区域尺度上发生了显著的变化,对人类生存、发展有重大影响的全球性问题日益激化,土地生态系统面临着日益严重的威胁^[1-2]。有限的土地资源保障程度和脆弱的环境承载能力面临着前所未有的压力^[3],导致土地利用中的生物多样性降低、生态服务功能退化等生态问题日益突出^[4],对生态环境带来巨大压力^[5],成为制约中国经济、社会可持续发展的瓶颈^[6],也影响到中国对资源、环境和经济等一系列问题的国家决策。目前,土地利用研究多集中在土地覆被的分类、动态监测和环境影响评价^[7],但在建立土地利用变化模型时,对社会、经济因子的驱动作用的贡献难以量化与模拟;国内研究主要集中在“热点地区”和“脆弱区”^[8],通过实例、应用定量研究方法、构建土地利用变化模型研究驱动力,但国内系统研究土地利用及其对全球变化响应、驱动力问题仍处于初级阶段,大多数研究只是关注某种或某几种驱动力对土地利用变化的影响,忽略了各驱动力之间的相互作用以及土地利用变化对驱动力的反馈作用^[9-11]。针对区域生态环境问题,优先识别与保护对维持区域生态安全具有至关重要作用的生态屏障,通过干扰排除以及空间格局规划和管理,构建生态安全格局,能够保护和恢复生物多样性,维持生态系统结构、功能和过程的完整性,实现对区域生态环境问题的有效控制和持续改善,从而促进区域可持续发展^[12]。在快速城市化和城市生态安全面临巨大挑战的时代背景下,构建生态安全格局是实现区域和城市生态安全的基本保障和重要途径。目前生态安全格局的研究受到相关学者高度关注^[13-15]。何玲等^[16]以河北省黄骅市为研究区,利用遥感、气象数据和外业调查数据,采用植被净第一生产力核算生态系统服务价值,构建生态安全格局,以生态安全格局为影响因素,利用元胞自动机和马尔科夫模型进行不同情境土地利用格局模拟。王旭熙等^[17]以泸县为研究区域,利用 GIS 空间分析技术和景观安全格局理论方法,提出了不同生态安全水平的低丘缓坡土地资源用地规划。杨姗姗等^[18]以江西省为研究区域,通过生态系统服务重要性和生态敏感性评价,以生态红线

区域作为生态安全格局构建的生态源地,构建了江西省生态安全格局,确定了生态安全格局组分的空间分布。张家其等^[19]依据武陵山区遥感调查数据及社会经济统计数据,运用灰色关联度模型计算 2000、2010 年生态安全综合指数,并对生态安全综合指数的时空演变特征进行分析。周朕等^[20]对近年来国内对生态用地的内涵、分类、识别及规划等研究进展进行了系统的归纳总结,认为土地数量结构与空间布局的协同优化是生态用地格局优化的关键等。以上研究,促进了土地资源的开发和利用,但学界对处于成都平原与龙门山脉过渡带、生态敏感性和生态脆弱性土地资源,没有引起足够的关注,研究也亟待进行一步深入;而基于景观安全格局、功能和过程之间的耦合关系,空间上构建维护区域生态环境安全的景观组分,实施不同类型的生态安全功能区划分,成为保障生态系统服务功能,缓解土地资源利用与生态环境保护之间矛盾的关键问题^[12]。

绵竹市位于成都平原与龙门山脉的过渡带,山区和平原分别占市域土地面积的 50% 和 30% 以上。绵竹市是《四川省主体功能区规划》(川府发[2013]16 号)确定的重点开发区域—成都平原地区的节点城市,应壮大城市人口和经济规模,增强先进制造业和现代服务业的集聚功能,加强产业互补和城市功能对接,发展现代农业,加强生态环境保护,形成本区域新的增长点。随着区域工业化、城镇化和农业现代化快速推进,建设用地和耕地面积分别呈现持续增加和减少趋势,建设用地面积不能满足需求,亟需合理开发利用土地资源,缓解用地矛盾。因此,本研究以绵竹市为研究区域,利用遥感、GIS 空间分析技术和景观安全格局理论方法,提出不同生态安全水平的土地资源用地规划,为土地资源的合理开发提供理论依据,促进区域土地资源持续性利用。

1 研究区概况

绵竹市位于四川盆地西北部,地处 $103^{\circ}54' - 104^{\circ}20'E, 30^{\circ}09' - 31^{\circ}42'N$,面积约 $1\,245.3\text{ km}^2$ 。西北部属为龙门山脉,东南部为成都平原的一部分;地

势西北高,东南低,高差悬殊。绵竹市属四川盆地中亚热带湿润气候区,气候温和,降水充沛,四季分明,大陆季风性气候特点显著,年平均气温 15.7℃,多年平均降水量 1 053.2 mm。因地势、气候影响,植物垂直性带谱明显。绵竹市 GDP 值达 212 亿元,人口 53.66 万人。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

研究数据主要包括遥感数据和辅助数据。遥感数据包括 1995,2005 年 Landsat-5 TM 和 2015 年 Landsat-8 OLI_TIRS 遥感影像,轨道号为 129/038。遥感数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。辅助数据包括 1:5 万地形图、DEM 数据和研究区矢量边界数据,均来源于地理与资源科

学学院,野外调查利用 GPS 定位和属性采集。

遥感数据均以高斯—克吕格投影和 WGS-84 坐标系为基准,以 1:5 万地形图对 1995 年的遥感影像进行几何校正,以此为基准影像,选取控制点对 2005,2015 年的影像进行几何校正。为消除大气散射引起的辐射误差,采用 QUAC 快速大气校正工具对研究区影像进行大气校正;在 ENVI 5.1 中对研究区影像进行裁剪。

2.2 土地资源分类系统

土地资源分类参考中国科学院在“八五”重大应用项目“国家资源环境遥感宏观调查与动态分析”中提出的基于空间分辨率为 30 m 的 TM 遥感数据的 2 级土地分类系统^[21],结合研究区实际自然和人文状况,将绵竹市土地利用与土地覆被分为 6 类,包括耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地(表 1)。

表 1 土地利用分类系统

1 级分类		2 级分类
编码	类型	
1	耕地	11 水田,12 旱地
2	林地	21 有林地,22 灌木林,23 疏林地,24 其他林地
3	草地	31 高覆盖度草地,32 中覆盖度草地,33 低覆盖度草地
4	水域	41 河渠,42 湖泊,43 水库,44 永久性冰川雪地,45 滩涂,46 滩地
5	建设用地	51 城镇用地,52 农村居民点,53 其他建设用地
6	未利用地	61 沙地,62 戈壁,63 盐碱地,64 沼泽地,65 裸土地,66 裸岩,67 其他

2.3 遥感数据分类

基于 ENVI5.1 和 GIS 平台,采用人机交互解译方法,结合 GPS 野外实地考察数据,分别对 1995—2015 年遥感数据进行分类,获取耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地等景观信息。总体分类精度大于 90%以上,Kappa 系数均大于 0.856 以上。

2.4 土地利用变化

(1) 土地利用动态度,其表达式为:

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

式中: U_a, U_b ——时间段 a 与 b 之间的某一种土地类型的数量; T ——时间段 $b - a$ 当 T 设定为年时; R_d ——研究时段内某一土地类型的年变化率。

(2) 土地利用可见转移转移,其表达式为:

$$C_{ij} = A_{ij}^k \times 10 + A_{ij}^{k+1} \quad (2)$$

式中: C_{ij} ——不同时期的土地利用变化图; A_{ij}^k —— K 时期的土地利用类型图; A_{ij}^{k+1} —— $K+1$ 时期的土地利用类型图。

2.5 地形因子分级

应用 ArcGIS 10.0 空间分析功能,由 DEM 数据

生成研究区坡度、坡向和地表起伏度数据,然后对各地形因子进行等级划分。因此,以地形因子和土地覆被类型作为阻力因子,各因子相对阻力分值的赋予通过专家打分获得(表 3)。

(1) 高程分级。由于研究区的高程变化范围在 497~4 337 m,通过对比发现,以高程等间距划分方式和过大的高程差划分使土地利用类型的高程梯度性差异不明显,不能很好体现土地利用的高程梯度性。为能较好体现土地利用分布随高程变化的特征,应用 ArcGIS 10.0 中 Natural Breaks (Jenks)划分方法,将研究区高程划分为 6 个级别:497~884 m,884~1 405 m,1 405~1 936 m,1 936~2 534 m,2 534~3 202 m 和 3 202~4 337 m。

(2) 坡度划分。在《第二次全国土地调查技术规范》对坡度分级的标准基础上,结合研究区实际情况,基于 ArcGIS 对研究区的坡度进行重分类后将坡度等级分为 5 个等级,即等级 1 为 $0^\circ \sim 6^\circ$,等级 2 为 $6^\circ \sim 15^\circ$,等级 3 为 $15^\circ \sim 25^\circ$,等级 4 为 $25^\circ \sim 35^\circ$,等级 5 为 $>35^\circ$ 。

(3) 地形起伏度划分。由于研究区的地形起伏度在 0~433 m,参考中国 1:100 万数字地貌制图规范中的分级标准和已有研究^[22-23],依次将研究区地形起伏度划分为 4 个级别:0~30 m,30~70 m,70~200 m 及 200 m 以上。

2.6 景观生态安全格局分析

2.6.1 源地识别 源地是物质能量流通和物种扩散的原点,是距离分析中的目标和目的地,具有内部同质性或集聚性和外部扩张性的特点^[24-25]。生态用地是指除了用于生产建设的土地,能提供各种生态服务价值,促进地区生态可持续发展的土地类型。本研究中绵竹市景观安全格局的功能划分是以保护生态用地为目的,尤其是对大片连块的林地和水源的保护。因此,绵竹市生态安全源地识别,在借鉴相关的研究结果和结合绵竹市森林和水域资源分布特征,筛选出面积>20 hm²,空间上具有连续性的核心林地和水域作为生态保护源。

2.6.2 阻力面构建 阻力面是景观要素的地理位置、方向及其对源地扩展的阻力系数,可以引入地形(高程、坡度、起伏度等)、社会经济状况(人口密度、经济指数等)、土地利用/覆被变化等要素^[26]。生态用地间的联系是通过克服阻力来实现空间水平方向的竞争性控制和覆盖过程,其阻力面反映了生态用地空间连通的趋势^[25]。本研究采用最小累计阻力模型来构建阻力面。最小累计阻力模型为:

$$MCR = f_{\min} \sum (D_{ij} \cdot R_j) \quad (3)$$

式中:MCR——最小累积阻力值; f ——某个待定的正函数; D_{ij} ——以源地 i 为圆心,以其中心到达空间栅格 j 点的外辐射半径; R_j ——空间栅格对生态流的阻力; i ——生态源地的数目; j ——阻力面栅格的个数。

2.6.3 景观组分识别 首先,据不同阻力等级的发展阈值,本研究将研究区的景观生态阻力面进行重分类,划分出不同安全水平的景观生态区;其次,基于 GIS 空间分析模块,将图层与提取的土地资源斑块图层叠加,划分土地资源景观安全格局;最后,了解土地资源开发现状与提出未来土地利用发展方向。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

土地利用以林地和耕地为主,占研究区面积的 82% 以上(附图 1,表 1)。

土地利用变化趋势是面积和所占比例均发生不同程度的变化。林地面积增加,由 1995 年 58 484.1 hm²,46.96% 增加到 2015 年的 61 906.06 hm²,49.71%,面积分别增加 3 431.96 hm²,2.76%;耕地面积持续减少,由 1995 年的 52 405.9 hm²,42.08% 减少到 2015 年的 40 458.48 hm²,32.49%,耕地分别减少 11 947.42 hm²,9.59%;研究区内建设用地面积显著增加,由 1995 年的 6 951.05 hm²,5.58% 增加到 2015 年 9 232.63 hm²,10.75%,分别增加了 6 438.22 hm²,5.17%;未利用地面积增加较多,由 1995 年的 4 298.43 hm²,3.45% 增加到 2015 年 6 998.44 hm²,5.62%,汶川地震对绵竹市地表植被和生态环境等造成的破坏比较严重,石灰岩质岩石裸露,且次生灾害增加引起地表裸露,未利用地增加显著;水体和草地面积变化不大。

这 2 类土地利用类型在绵竹市土地类组中所占比例少,面积变化相对其他类型小,水体由 1995 年的 1 661.28 hm² 减少至 2015 年的 1 474.45 hm²,减少 186.83 hm²;草地面积减少了 436.24 hm²。

表 2 研究区 1995—2015 年土地利用构成及变化

年份	项目	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
1995	面积/hm ²	52 405.90	58 474.10	739.53	1 661.28	6 951.05	4 298.43
	比例/%	42.08	46.96	0.59	1.33	5.58	3.45
2005	面积/hm ²	47 341.99	60 168.76	815.12	1 563.60	9 232.63	5 407.90
	比例/%	38.02	48.32	0.65	1.26	7.41	4.34
2015	面积/hm ²	40 458.48	61 906.06	303.29	1 474.45	13 389.27	6 998.44
	比例/%	32.49	49.71	0.24	1.18	10.75	5.62
1995—2005	变化/hm ²	-5 063.91	1 694.66	75.59	-97.68	2 281.58	1 109.47
	变化/%	-4.07	1.36	0.06	-0.08	1.83	0.89
2005—2015	变化/hm ²	-6 883.51	1 737.3	-511.83	-89.15	4 156.64	1 590.54
	变化/%	-5.53	1.40	-0.41	-0.07	3.34	1.28
1995—2015	变化/hm ²	-11 947.42	3 431.96	-436.24	-186.83	6 438.22	2 700.01
	变化/%	-9.59	2.76	-0.35	-0.15	5.17	2.17

3.2 土地利用转移特征

土地利用转移转换总体趋势为建设用地和耕地之间的相互转化明显,建设用地面积大量增加、耕地面积大量减少,未利用地的转入转出也反映出了这个时段内的土地利用变化方向(表 3)。1995—2015 年耕地向建设用地转移最多,达 8 548.45 hm²,占转出面积的 56.50%,其次向林地转移也比较多,占 36.96%,耕地向这两类土地利用类型转出的量达转

出总量的 90%;林地主要向未利用地转变,共转出 3 926.66 hm²,占总转出面积的 88.41%,向其他几类用地转化的面积都较少;建设用地在这 20 a 间向耕地共转出 2 297.05 hm²,占总转出面积的 76.64%,其次向林地和水体转出较多,分别占转出面积的 13.12%和 6.77%;水体向建设用地和耕地转化的较多,分部占总转出面积的 50.08%和 33.16%。

表 3 研究区 1995—2015 年土地利用类型面积转移矩阵

土地利用类型	建设用地	林地	水体	耕地	草地	未利用地	2015
建设用地	3 953.84	103.75	486.76	8 548.45	0.09	296.69	13 389.58
林地	392.86	54 038.14	119.06	5 592.95	331.73	1 426.16	61 900.9
水体	202.85	56.71	689.39	467.83	0.33	58.03	1 475.14
耕地	2 297.05	336.46	322.24	37 270.73	0.09	237.86	40 464.43
草地	27.38	17.23	10.14	203.64	3.03	41.58	302.99
未利用地	76.77	3 926.66	32.98	316.36	404.57	2 239.61	6 996.95
1995 年面积	6 950.75	58 478.95	1 660.57	52 399.96	739.84	4 299.93	
转出面积	2 996.91	4 440.81	971.18	15 129.23	736.81	2 060.32	
变化量	6 438.83	3 421.95	-185.43	-11 935.53	-436.84	2 697.02	

耕地转化成建设用地主要在研究区东到东南方的平原地区,主要由于城市化扩展引起城市扩张和对耕地占用;耕地转化成林地主要在平原与山区的过渡地区的九龙镇、汉旺镇和武都镇等乡镇,退耕还林政策、2008 年汶川地震对生态环境造成了较大影响,山区环境的破坏增加了农作物种植的难度,耕地分布减少;林地转为未利用地主要发生在海拔较高的清平乡和金花镇的西北地区,该区域裸岩广泛分布,植被生长较少,且汶川地震对生态环境造成的破坏引起次生灾害的发生,滑坡泥石流等发生频繁,生态环境易遭受二次破坏,地表植被损毁多,未利用地增加;建设用地转化为耕地主要分布在平原地区,在城市化进程、撤县设市、改乡为镇的情况下,人口大量向城镇集中,部分乡镇随着人口迁移逐渐缩减,原有建设用地大量转变成耕地。

3.3 土地利用的地形因子响应

3.3.1 高程响应 通过土地利用图与高程的空间叠加分析和统计分析,得到研究区土地利用景观格局随高程变化数据(表 4)。1995—2015 年不同土地利用景观格局在不同高程呈现相似的变化趋势(表 4)。耕地、建设用地和水域主要集中分布于 497~884 m 的高程范围,耕地占研究区面积的比重由 1995 年的 40.28%下降到 2015 年的 32.33%,建设用地占研究区面积的比重由 1995 年的 5.52%增加到 2015 年的 10.65%,水域占研究区面积的比重由 1995 年的

1.29%下降到 2015 年的 1.08%;林地要集中分布于 884~2 534 m 的高程范围,占研究区面积的比重由 1995 年的 34.93%增加到 2015 年的 35.77%,其余高程范围的林地面积不到研究区面积的 13.94%;草地高程大于 2 534 m 的区域,占研究区面积的比重由 1995 年的 0.5%增加到 2015 年的 0.06%;未利用地集中分布于 3 202~4 337 m 的高程范围,占研究区面积的比重由 1995 年的 2.05%增加到 2015 年的 2.72%。

3.3.2 坡度响应 1995—2015 年不同土地利用景观格局在不同坡度呈现相似的变化趋势(表 5)。耕地、建设用地和水域主要集中分布于<6°的坡度范围,耕地占研究区面积的比重由 1995 年的 39.33%下降到 2015 年的 31.64%,建设用地占研究区面积的比重由 1995 年的 5.43%增加到 2015 年的 10.52%,水域占研究区面积的比重由 1995 年的 1.21%下降到 2015 年的 1.02%;林地要集中分布于<6°和>25°坡度范围,占研究区面积的比重分别由 1995 年的 7.24%和 31.15%增加和下降到 2015 年的 9.62%和 30.79%,其余坡度范围的林地面积不到研究区面积的 9.23%;草地坡度大于>35°的区域,占研究区面积的比重由 1995 年的 0.33%下降到 2015 年的 0.01%;未利用地集中分布于<6°和>35°坡度范围,占研究区面积的比重由分别 1995 年的 0.96%和 1.37%增加到 2015 年的 0.97%和 2.97%。

表 4 研究区 1995—2015 年土地利用面积占研究区面积的比重随高程变化

1995 年	不同高程带面积比重/%					
	497~884 m	884~1 405 m	1 405~1 936 m	1 936~2 534 m	2 534~3 202 m	3 202~4 337 m
建设用地	5.52	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
林地	1.27	12.43	12.32	10.17	7.51	3.24
水体	1.29	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00
耕地	40.28	1.66	0.12	0.01	0.00	0.00
草地	0.00	0.01	0.02	0.07	0.17	0.33
未利用地	0.64	0.19	0.08	0.15	0.34	2.05
2005 年	不同高程带面积比重/%					
	497~884 m	884~1 405 m	1 405~1 936 m	1 936~2 534 m	2 534~3 202 m	3 202~4 337 m
建设用地	7.39	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
林地	2.55	13.21	12.37	10.35	7.04	2.80
水体	1.19	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
耕地	36.89	1.02	0.08	0.02	0.00	0.00
草地	0.20	0.02	0.02	0.08	0.17	0.16
未利用地	0.61	0.11	0.03	0.14	0.82	2.65
2015 年	不同高程带面积比重/%					
	497~884 m	884~1 405 m	1 405~1 936 m	1 936~2 534 m	2 534~3 202 m	3 202~4 337 m
建设用地	10.65	0.09	0.01	0.01	0.00	0.00
林地	4.40	13.93	12.19	9.65	7.00	2.54
水体	1.08	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00
耕地	32.33	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
草地	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
未利用地	0.17	0.41	0.37	0.92	1.03	2.72

表 5 研究区 1995—2015 年各土地利用面积比重随坡度变化

1995 年	不同坡度带面积比重/%				
	<6°	6°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
建设用地	5.43	0.08	0.03	0.02	0.02
林地	7.24	3.51	5.06	8.14	23.01
水体	1.21	0.06	0.03	0.02	0.02
耕地	39.33	0.84	0.67	0.59	0.65
草地	0.09	0.04	0.05	0.08	0.33
未利用地	0.96	0.27	0.34	0.51	1.37
2005 年	不同坡度带面积比重/%				
	<6°	6°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
建设用地	7.29	0.09	0.02	0.01	0.01
林地	7.54	4.03	5.45	8.44	22.86
水体	1.13	0.04	0.03	0.03	0.03
耕地	36.24	0.73	0.34	0.28	0.42
草地	0.24	0.05	0.06	0.09	0.22
未利用地	1.11	0.33	0.42	0.66	1.82
2015 年	不同坡度带面积比重/%				
	<6°	6°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
建设用地	10.52	0.14	0.05	0.03	0.02
林地	9.69	4.09	5.14	8.60	22.19
水体	1.02	0.06	0.03	0.03	0.04
耕地	31.64	0.59	0.14	0.08	0.05
草地	0.19	0.01	0.02	0.01	0.01
未利用地	0.97	0.43	0.56	0.88	2.79

3.3.3 地形起伏度响应 随着形起伏度增加,建设用地、耕地和水域持续减少,林地和草地先增加后减少,未利用地持续增加或先增加后减少趋势(表 6)。随着形起伏度级别变化,土地面积占研究区总面积比

例由第 1 地形起伏度级别区向第 4 地形起伏度级别区显著减少,第 1 地形起伏度级别区的 64.94% 显著下降为 0.1%。第 1 地形起伏度级别区,耕地和林地占据大部,占研究区面积的比例合计为 51.01%~56.48%,建设用地和水域的面积比例均超过其他地形起伏度级别区;在第 2 地形起伏度级别区,分布最广的是林地,占区域内面积的比例超过 18.72%,呈现出由人工生态系统向自然生态系统的过渡趋势;在第 3 地形起伏度级别区,林地占据绝对优势,占区域内面积的比例超过 11.93%,构成了该级别区特有的自然景观;第 2~3 地形起伏度级别区为丘陵区,由半自然半人工系统逐渐向自然生态系统过渡的地带;在第 4 地形起伏度级别区,林地和未利用地比例分别达到 0.18% 以上。该级别区通常被视为山区,基本上全部属于自然生态类型,人类活动较少。

3.4 景观生态安全格局

3.4.1 源地确定 本研究结合绵竹市森林和水资源分布特征,筛选出面积较大空间上具有连续性的核心林地和水域作为生态保护源地。用 ArcGIS 10.0 提取相应图层,保护“源”的总面积为 59 965.98 hm²,占总面积的 48.15%。

3.4.2 阻力面建立 相关研究表明^[27-28],地形因子导致发生水土流失的机率变化,景观保护阻力变大;土地覆被类型与源地中景观特征越接近,其对生态流

的阻力就越小;而受人类扰动剧烈土地覆被类型,其对源地内生态流的阻力就越大。因此,本研究以地形

因子和土地覆被类型作为阻力因子,各因子相对阻力分值的赋予通过专家打分获得(表 7)。

表 6 研究区各土地利用类型在不同地形起伏度级别区的分布

1995 年	1 级区(0~30 m)		2 级区(30~70 m)		3 级区(70~200 m)		4 级区(200~433 m)	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
耕地	50 687.77	40.70	1 335.86	1.07	375.71	0.30	0.62	0.00
林地	19 652.57	15.78	23 314.08	18.72	15 406.63	12.37	105.68	0.08
草地	250.52	0.20	294.69	0.24	190.76	0.15	3.56	0.00
水域	1 598.08	1.28	45.31	0.04	17.18	0.01	0.00	0.00
建设用地	6 898.17	5.54	39.87	0.03	12.36	0.01	0.36	0.00
未利用地	1 888.19	1.52	1 476.16	1.19	926.05	0.74	9.53	0.01
合计	80 975.29	65.02	26 505.96	21.28	16 928.69	13.59	119.76	0.10
2005 年	1 级区(0~30 m)		2 级区(30~70 m)		3 级区(70~200 m)		4 级区(200~433 m)	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
耕地	46 318.63	37.19	739.57	0.59	283.70	0.23	0.09	0.00
林地	21 063.91	16.91	23 608.74	18.96	15 384.80	12.35	111.31	0.09
草地	435.65	0.35	251.53	0.20	127.23	0.10	0.71	0.00
水域	1 492.96	1.20	50.65	0.04	19.99	0.02	0.00	0.00
建设用地	9 207.12	7.39	20.80	0.02	4.36	0.00	0.36	0.00
未利用地	2 355.00	1.89	1 879.18	1.51	1 166.87	0.94	6.85	0.01
合计	80 873.27	64.94	26 550.46	21.32	16 986.95	13.64	119.32	0.10
2015 年	1 级区(0~30 m)		2 级区(30~70 m)		3 级区(70~200 m)		4 级区(200~433 m)	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
耕地	40 273.66	32.34	162.42	0.13	22.40	0.02	0.00	0.00
林地	23 245.33	18.67	23 711.85	19.04	14 860.37	11.93	88.51	0.07
草地	1 384.18	1.11	64.16	0.05	26.02	0.02	0.09	0.00
水域	263.46	0.21	30.44	0.02	9.27	0.01	0.12	0.00
建设用地	13 305.35	10.68	63.88	0.05	19.69	0.02	0.36	0.00
未利用地	2 408.40	1.93	2 527.60	2.03	2 031.95	1.63	30.49	0.02
合计	80 880.38	64.95	26 560.35	21.33	16 969.70	13.63	119.56	0.10

表 7 景观生态安全格局阻力系数及其权重

阻力因子	权重	阻力等级	相对阻力系数
坡度	0.2	<6°	1
		6~15°	2
		15~25°	4
		25~35°	7
		>35°	9
高程	0.2	<884 m	1
		884~1 405 m	2
		1 405~1 936 m	4
		1 936~2 534 m	6
		2 534~3 202 m	8
		>3 202 m	9
地形起伏度	0.2	0~30 m	1
		30~70 m	3
		70~200 m	7
		>200	9
土地利用类型	0.4	林地	1
		水域	2
		耕地	5
		草地	3
		未利用地	3
		建设用地	9

利用 ArcGIS 10.0 空间分析中的权重叠加工具,进行不同要素阻力值的叠加分析得到研究区源地扩展的生态环境阻力值(附图 2)。据附图 2 阻力表面,利用 ArcGIS 10.0 成本距离模型,得到最小累计阻力分布图(附图 3)。由附图 3 可知,离源地越近,阻力值越大;反之越小。

3.4.3 不同安全水平的景观组分识别 不同安全水平的景观生态区域划分方法,不同学者进行了研究,也取得较好的依据成果。叶玉瑶等^[29]通过阻力面中阻力等值线突变处来确定不同安全水平的阻力面的范围和边界;刘孝富等^[27]、刘艳芳等^[30]和俞孔坚^[31]采用最小累积阻力方差分类及其栅格数量的关系柱状图的突变值进行景观生态安全判别;王旭熙等^[17]根据不同阻力等级的发展阈值,对将景观生态阻力面分析图进行重分类等等。本文根据不同阻力等级的发展阈值,采用自然断点法,将研究区的景观生态阻力面分析图进行重分类,从而划分出不同安全水平的景观生态区域(附图 4)。

(1) 低安全区域。该区域阈值为 0~2 400.5,由源地组成,处于维护区域生态系统平衡的核心地带,对区域水源涵养、生物多样性保护、水土保持等起重要作用。对于该区域应加强建设和完善生态廊道、生态节点,把这些区域划分为生态保护的重点区域,禁止开发。

(2) 较低安全区域。该区域阈值为 2 400.5~7 112.5,既是景观安全格局中保护源地恢复或扩展的缓冲区地带,又是核心源地之间联系的重要通道,对于维护源地的生态稳定性具有重要作用。该区应划分为限制开发区域,加强生态环境保护,构建生态源地保护屏障。

(3) 中等安全区域。该区域阈值为 7 112.5~13 158.0,处于生态缓冲带和人类活动区的过渡地带,对人类的开发和干扰敏感度相对较低,具有一定的抗干扰能力。该区域划分为适度开发区域,在不影响源地景观稳定性的情况下,适度开发土地资源,优化土地资源配置。

(4) 高安全区域。该区阈值为 13 158.0~22 670.9,对于保护“源”的扩展相对阻力较高,对于人类的开发和干扰敏感性不高,抗外界干扰能力强。把这些区域划为优先开发区域,应协调土地利用与生态建设,形成合理的景观布局,营造人类宜居环境。

3.4.4 土地资源开发类型及用地规划 目前,土地资源开发类型划分主要依据不同区域的资源环境承载能力、现有开发强度和未来发展潜力,以是否适宜或如何进行大规模高强度工业化城镇化开发为基准。将土地资源开发类型划分为优先开发型、适度开发型、限制开发型、禁止开发型 4 种类型。本文考虑到《四川省主体功能区规划》对绵竹市发展定位和土地、环境容量轻度超载、生态重要性和脆弱性、自然灾害威胁较大等特点,基于最小累积阻力模型构建最小累积阻力面,分析景观生态安全格局,将景观安全水平与土地资源现状进行叠加,把研究区土地资源开发类型划分为优先开发型、适度开发型、限制开发型、禁止开发型 4 种类型(表 8)。

表 8 土地资源开发类型统计

土地资源开发类型	建设用地	林地	水域	耕地	未利用地	草地	合计	比例
优先开发	1 738.78	258.81	9.03	5 170.87	2.59	38.32	7 218.39	5.80
适度开发	4 306.21	776.42	151.60	12 644.73	33.58	62.21	17 974.75	14.43
限制开发	3 958.26	1 115.48	290.51	15 080.27	994.22	106.66	21 545.39	17.30
禁止开发	3 386.02	59 755.36	1 023.30	7 562.61	5 968.06	96.11	77 791.46	62.47

从表 8 可知,处于低全水平状态的土地资源面积总量最大,达 77 791.46 hm²,占区域土地总量的 62.47%,开发类型为禁止开发型;较低安全水平的土地资源面积总量为 21 545.39 hm²,占区域土地总量的 17.30%;中等安全水平土地资源面积达 17 974.75 hm²,占区域土地总量的 14.43%;高安全水平状态的土地资源面积 7 218.39 hm²,占土地资源总量的 5.80%,开发类型为优先开发型。依据上述分析,提出绵竹市各类型用地规划。

(1) 优先开发型。该类型土地资源主要分布在剑南、西南、东北、齐天、孝德等乡、镇,土地资源主要以耕地和建设用地为主,未利用地较少。区域发展有一定经济基础,资源环境承载能力较强,发展潜力较大、集聚人口和经济的条件较好。土地利用以依托中心城区、重点镇和主要交通干线,着力优化城镇发展空间,加强中心城区建设,提高集聚力和辐射力,可重点进行工业化、城镇化开发,加快重点镇建设,促进经济和人口集聚。

(2) 适度开发型。该类型主要位于龙门山自然

生态向平原人工生态过渡地带,土地资源以耕地和建设用地为主,未利用地较少;功能定位是区域重要水土保持、森林养育和水源涵养区域,土地利用应强化水土保持和水源涵养,加强水土流失和水源污染防治。

(3) 限制开发型。该类型位于成都平原,土地利用以耕地和建设用地为主,草地较少,人口产业密集,土壤肥沃,包括兴隆、富新、什地、孝德、板桥、土门、玉泉等乡、镇。土地利用应以农业为主,加强高标准农田、特色蔬菜和设施蔬菜基地建设,发展优质粮、油产业经济,实施标准化生产,重点建设优质稻、专用麦类、“双低”油菜 3 大高产优质高效粮油生产基地。

(4) 禁止开发型。该类型土地资源主要分布在清平、金花和天池等乡(镇),地处龙门山地震构造带中、南段,境内分布有多条断裂带,属国家、省地震局圈定的地震重点监视防御区之一。“5·12”汶川特大地震后,山区部分地域山体受到破坏,在降雨、余震诱发下,地质灾害发生概率较高。土地利用禁止进行工业化、城镇化开发,突出区域资源、生态环境等特色,

加强原生态保护、地震和泥石流、滑坡等山地灾害防治,以山地、森林、河流等生态系统为重点,以水源保护区、自然保护区、森林公园、地质公园和地震遗址公园为重要组成,构建以森林生态和生物多样性保护区、沿山水土保持和水源涵养功能带为主体,绵远河、石亭江和马尾河为支撑的生态空间。

4 结论

随着工业化、城镇化的快速推进,经济发展与生态环境保护之间的矛盾日益凸显,客观上要求对区域土地利用结构进行优化配置^[32]。土地利用结构优化的实质是基于经济、社会、生态等多目标的优化^[33]。优化土地利用格局,对于区域可持续发展具有重要意义。本研究以生态用地为目标,选取地形因子和土地利用覆被状况为阻力因子,应用最小累计阻力模型构建了绵竹市景观生态安全格局,为区域生态安全策略选择提供了重要参考。

土地利用变化受到气候、人口、各种政策等多因素影响,导致土地利用的不确定性增加;有效实现区域自然与人文等因素数据的空间化,将提高模型模拟精度。长期以来,利用建立数学模型的方式进行土地利用数量结构优化,对土地利用的空间配置方面研究少^[34]。近年来,国内外学者利用 GIS 技术和生态学理论对土地利用的空间配置方面研究,均取得很大进展^[35]。本研究基于 GIS 空间分析方法,将景观安全格局与土地资源现状进行叠加分析,按照不同景观安全水平来优化土地资源利用格局,将研究区土地资源分为优先开发、适度开发、限制开发、禁止开发等 4 种类型,提出各类型用地规划。

通过最小累积阻力模型构建了研究区的景观生态安全格局,从而可确定生态安全状态,为区域土地资源合理开发研究提供有效的方法和手段。但是,采用最小累积阻力模型研究景观安全格局,需要选定“源”和阻力因子并赋予其相应的权重和阻力值,而本文的指标体系和权重还存在着一定的局限性,有待于进一步研究^[30,36-37];同时,基于研究目的在景观安全格局的构建上对于其他组分的识别尚需进行进一步的探讨^[30]。因此,进一步研究中可考虑增加包括土地的经济属性在内多阻力因子和引入数学方法改进阻力系数的赋值方式,以提高计算结果的客观性;同时,以生态用地保护为目标,维持和提高土地生态服务功能为切入点,综合考虑土地利用的生态、经济等功能,结合多模型和多源空间数据进行景观安全格局划分和土地利用结构优化研究显得尤为重要。

[参 考 文 献]

- [1] 陈百明,张凤荣.我国土地利用研究的发展态势与重点领域[J].地理研究,2011,30(1):1-9.
- [2] 刘纪远,邓祥征.LUCC 时空过程研究的方法进展[J].科学通报,2009,54(21):3251-3258.
- [3] 于贵瑞,方华军,伏玉玲,等.区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展[J].生态学报,2011,31(19):5449-5459.
- [4] 蔡运龙,汪涌,李玉平.中国耕地供需变化规律研究[J].中国土地科学,2009,23(3):11-18.
- [5] 李文华.我国生态学研究及其对社会发展的贡献[J].生态学报,2011,31(19):5421-5428.
- [6] Wu Shaohong, Dai Erfu, Huang Mei, et al. Ecosystem vulnerability of China under climate scenario in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(10): 1379-1386.
- [7] Neigh C S R, Tucke C J, Townshend R G, North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(4):1749-1772.
- [8] 史培军,陈晋,潘耀忠.深圳市土地利用变化机制分析[J].地理学报,2000,55(2):151-160.
- [9] 黄季焜,朱莉芬,邓祥征.中国建设用地扩张的区域差异及其影响因素[J].中国科学(D):地球科学,2007,37(9):1235-1241.
- [10] 刘纪远,邓祥征.LUCC 时空过程研究的方法进展[J].科学通报,2009,54(21):3251-3258.
- [11] 刘彦随,刘玉,陈玉福.中国地域多功能性评价及其决策机制[J].地理学报,2011,66(10):1379-1389.
- [12] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.区域生态安全格局:概念与理论基础[J].生态学报,2004,24(4):761-768.
- [13] 李晖,易娜,姚文璟,等.基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J].生态学报,2011,31(20):5928-5936.
- [14] 黎晓亚,马克明,傅伯杰,牛树奎.区域生态安全格局:设计原则与方法[J].生态学报,2004,24(5):1055-1062.
- [15] 刘洋,蒙吉军,朱利凯.区域生态安全格局研究进展[J].生态学报,2010,30(24):6980-6989.
- [16] 何玲,贾启建,李超,等.基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J].农业工程学报,2016(03):275-284.
- [17] 王旭熙,彭立,苏春江,等.基于景观生态安全格局的低丘缓坡土地资源开发利用:以四川省泸县为例[J].生态学报,2016,36(12):3646-3654.
- [18] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等.基于生态红线划分的生态安全格局构建:以江西省为例[J].生态学杂志,2016,35(1):250-258.
- [19] 张家其,葛咏,吴宜进,等.武陵山区生态安全格局演变分析[J].地球信息科学学报,2016,18(3):315-324.

- [20] 周联, 蒙古军, 齐杨, 等. 中国生态用地重要性及其格局优化研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 218-225.
- [21] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1195-1203.
- [22] 王玲, 吕新. 基于 DEM 的新疆地势起伏度分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(1): 113-116.
- [23] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1: 100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724.
- [24] 张序强, 李华, 董雪旺. 旅游地阻力面理论初探: 以五大连池风景名胜区为例[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 241-244.
- [25] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 2003-2012.
- [26] 李谦, 戴靓, 朱青, 等. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究[J]. 地理科学, 2014, 34(6): 733-739.
- [27] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用: 以厦门为例[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428.
- [28] 文博, 刘友兆, 夏敏. 基于景观安全格局的农村居民点用地布局优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 181-191.
- [29] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. 地理学报, 2014, 69(4): 485-496.
- [30] 刘艳芳, 郭晓慧, 方然, 等. 基于景观生态安全格局的土地利用总体规划环境影响评价[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2015, 32(6): 120-126.
- [31] 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型[J]. 地理学报, 1998, 53(12): 11-20.
- [32] 刘彦随, 杨子生. 我国土地资源学研究新进展及其展望[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 353-360.
- [33] 喻锋, 李晓兵, 王宏. 生态安全条件下土地利用格局优化: 以皇甫川流域为例[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3198-3210.
- [34] 孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟. 中国土地利用空间格局动态变化模拟: 以规划情景为例[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6440-6451.
- [35] 陈影, 张利, 何玲, 等. 基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5391-5400.
- [36] 蒙古军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [37] 张玉虎, 李义禄, 贾海峰. 永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价[J]. 干旱区理, 2013, 36(6): 1049-1057.

(上接第 64 页)

- [11] 林纾, 李红英, 党冰, 等. 甘肃河西走廊地区气候暖湿转型后的最新事实[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1111-1121.
- [12] 韩兰英, 万信, 方峰, 等. 甘肃河西地区沙漠化遥感监测评估[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 131-138.
- [13] 陈昌毓. 祁连山区水资源及其对河西走廊生态环境的影响[J]. 自然资源学报, 1995, 10(2): 104-114.
- [14] 侯钦磊, 白红英, 任园园, 等. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1505-1512.
- [15] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1955—2012 年南北疆气温、降水及相对湿度趋势分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 269-277.
- [16] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1960—2013 年南北疆风速变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 249-259.
- [17] 徐浩杰, 杨太保, 柴绍豪. 1961—2010 年讨赖河山区径流变化特征及其驱动因素[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 878-884.
- [18] 徐浩杰, 杨太保, 张晓晓. 近 50 年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 39-45.
- [19] 张彧瑞, 赵艳萍, 马金珠. 近 50 年来讨赖河流域气候变化分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(1): 31-33.
- [20] 李宝富, 陈亚宁, 陈忠升, 等. 西北干旱区山区融雪期气候变化对径流量的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1461-1470.
- [21] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414.
- [22] Sheng Yue, Paul Pilon, Bob Phinney. Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation[J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 48(1): 51-63.