

三峡库区重庆段人类活动强度的景观格局梯度响应¹

殷兴伟, 王金柱, 黄容, 高明

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

【摘要】: 基于三峡库区重庆段 1995、2005、2015 年土地利用图像, 利用 ArcGIS 和 FRAGSTATS 软件, 并结合夜间灯光数据构建人类活动强度带, 分析了三峡库区重庆段在不同人类活动强度带 3 个时期的景观格局变化特征, 并进一步研究了 2015 年研究区 4 种面积变化较大的景观类型格局特征随人类活动强度的梯度变化规律。研究结果表明: (1) 人类活动的空间分布差异显著, 强度由西向东逐渐递减, 长江干线流域的人类活动强度相对周边区域更强; (2) 在景观水平上, 随着人类活动强度的增加, 研究区景观斑块数大幅减少, 多样性和均匀度指数先增加后减少, 连通性有所下降; 景观聚集度先减后增, 破碎化程度有所增加, 但在 2015 年得到一定改善; (3) 在类型水平上, 建设用地、水域、草地、低密度植被覆盖林地这 4 种景观类型能较好地反映景观格局变化特征, 其中各景观类型的斑块密度、形状指数和分维数随人类活动强度的变化表现出较为明显的波动; 除建设用地外其余景观类型的最大斑块指数和面积变化幅度较小, 在人类活动强度最大时的建设用地面积占比和斑块指数分别达到 71.2%、35.72%; (4) 三峡工程、移民工程、城市化推进以及“退耕还林”等政策实施是三峡库区景观格局演变的重要驱动力。揭示了 20a 来三峡库区重庆段景观格局沿人类活动强度的梯度变化规律, 可为研究区自然资源的合理开发及区域可持续发展提供参考。

【关键词】: 人类活动强度 土地利用 夜间灯光数据 景观格局 三峡库区 重庆

【中图分类号】: P962 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2018) 12-2718-15

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201812008

随着经济发展和科技革新, 人类活动对自然生态环境影响的深度和广度不断扩大, 引起了一系列生态环境问题^[1]。作为衡量人类对自然环境作用程度的一个重要指标, 人类活动与景观格局的耦合关系始终是区域可持续发展与生态安全的研究热点^[2,3]。从人类活动的主要形式——土地利用的角度来看, 学者们主要集中在土地利用时空变化特征^[4,5]、驱动力分析^[6,7]、模型选取和模拟^[8,9]、监测和预测^[10,11]等方面的研究。此外, 国内学者们从人类活动导致的生态环境问题方面也展开了人类活动强度综合指标构建和相关评价研究。文英^[12]最早对人类活动强度的概念及量化进行了初步研究, 之后一些学者在文英的基础上进行方法改进, 并在岷江上游区^[13]、南方红壤丘陵区^[14]等区域做出实证应用研究, 取得了一定积极的进展, 但存在主观性强、普适性差和尺度小等缺陷。目前, 评价人类活动及其强度的方法主要分为 3 种: (1) 通过某种自然因子得到人类活动强度。这种模式一定程度上忽略了地表过程的复杂性, 主要应用于对自然要素更为敏感的植被、水文等方面^[15,16]; (2) 利用社会经济统计数据替代人类活动强度^[17,18]。由于统计数据方便获取因而应用更广泛, 但仅运用统计数据得出的结论仍不足以全面揭示人类活动的影响; (3) 从土地利用变化及其驱动力分析人类活动^[19,20]。该角度获得的研究结论较为可靠, 但仅从土地层面开展人类活动分析很难得到定量的人类活动强度。

¹收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-06-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0800101)

作者简介: 殷兴伟 (1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用规划和土地利用生态过程. E-mail:1047012372@qq.com

通讯作者 E-mail:gaoming@swu.edu.cn

基于此, DMS/OLS 传感器独辟蹊径, 采集夜间灯光, 探测城市及周边居民点发出的低强度灯光, 使之区别于黑暗的乡村背景, 使及时、有效地获取区域内的人类活动时空动态信息成为可能, 因而广泛应用于人类活动研究^[21]。夜间灯光数据具有以下优势: (1) 适合监测大尺度区域人类活动以及城市化进程; (2) 不受光线阴影、云雾干扰, 客观性强^[22]; (3) 综合性强, 能反映社会经济活动强度及空间分布, 涵盖交通道路、居民地与人口、城市等因子相关的信息, 使用该数据时无需再单独考虑这些因素^[23]。因此, DMS/OLS 夜间灯光数据可作为人类活动的表征, 是研究人类动态活动的优质监测数据^[24]。同时结合土地利用/土地覆被变化理论及转移矩阵, 反映区域土地利用程度综合状况, 从社会经济和土地利用两方面探讨人类活动对生态景观格局产生的影响。

作为长江流域极为重要的生态屏障和生态走廊, 三峡库区是中国重要的生物多样性保护地区之一, 也是东部经济发达地区带动西部经济开发地区发展的结合点、东西部经济融合的支撑点^[25]。同时, 三峡库区也是典型的生态脆弱区, 其地形复杂、地表破碎, 加之泥石流等自然灾害频发、人类活动的强大驱动力和长江三峡脆弱的生态环境相互作用, 使这一区域的生态系统更加独特、脆弱^[26]。重庆境内三峡库区面积约占整个库区面积的 80%, 具有重要的生态地理位置和服务功能^[27], 特别是三峡大坝建成以后三峡库区的生态问题得到了越来越多的重视^[28]。目前, 对三峡库区生态系统的研究多集中于消落区的环境状况、生态响应和资源开发利用等方面^[29-31], 缺乏库区整体生态系统的影响研究; 关于景观格局变化机制的研究多集中在短时序高强度人类活动干扰^[32]、森林植被覆盖变化^[33-35]等自然因素以及移民工程^[36]等单一人类活动方式对三峡库区景观的影响研究, 不足以揭示库区复杂的人类活动对生态系统的影响, 不同干扰强度下的各类景观特征的变化分析还有所欠缺。

因此, 本文以三峡库区重庆段为研究区域, 从研究区景观人手, 涵盖三峡工程建设前后时段, 借助于 ArcGIS 和 FRAGSTATS 工具, 通过夜间灯光数据进行量化从而划分人类活动强度带, 在分析研究区景观总体特征的基础上, 分析 1995-2015 年三峡库区重庆段景观格局在不同人类活动强度影响下的梯度响应, 以期服务于库区生态系统的管理与保护, 为资源合理分配与区域可持续发展提供科学决策支持。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区概况

三峡库区重庆段位于长江中上游, 地理范围介于 28°~32° N, 105°~111° E 之间, 东南、东北与鄂西交界, 西南与川黔接壤, 西北与川陕相邻, 包括巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开州区、万州区、忠县、涪陵区、丰都县、武隆县、石柱县、长寿区、渝北区、巴南区、江津区及重庆核心城区(渝中区、北碚区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区、大渡口区 and 江北区) 22 个区县, 如图 1 所示。该区域地处亚热带季风气候区, 降雨充沛, 地貌以山地、丘陵为主, 植被类型丰富, 地带性植被以亚热带常绿阔叶林、暖性针叶林为主, 森林覆盖率为 22.3%, 地形环境复杂, 自然环境恶劣, 生态系统的稳定性较差^[37]。

1.2 数据来源

本研究基础数据以中国科学院提供的 1995 年、2005 年 Landsat-TM 遥感图像以及 2015 年 Landsat-8OLI 遥感数据(其空间分辨率均为 30m)为主要数据源, 结合重庆市地形图、土地利用现状图等辅助数据, 利用人机交互土地利用/覆被类型判读解译的方法获得单幅土地利用图。全部图幅解译完成后用 ARCINFOWorkstation 模块和 SHAPEARC 模块生成分区 coverage 文件。然后, 利用 ARCINFO 的 ARCDIT 模块编辑图形, 检查、修改错误并整理汇总, 修改无误后, 完成相邻分区数据的接边, 生成研究区土地利用/覆被解译成果数据。利用总体精度作为检验指标对分类图进行验证, 结果表明解译总体精度均在 80%以上, 具有较好的表征性, 能够满足本次研究需要。

夜间灯光数据(DMS/OLS)来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的极轨卫星计划(DMS)中的线性扫描业务系统(OLS)。OLS 传感器有可见光和热红外两个通道, 其中可见光波范围为 0.4~1 μm, 光谱分辨率为 6bit, 灰度值范围是 0~63。OLS 传感器

提供 3 种类型的数字灯光产品，由于数据获取的可行性，本研究使用的是从美国国家地理数据中心下载的近研究时限最近的、分辨率为 1km 的 2013 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光均值数据，因其具有相当程度的稳定性，可作为 2015 年人类活动强度的表征数据。稳定夜间灯光均值数据已经滤除闪电、天然气燃烧、火光和渔船等偶然灯光，灰度值范围在 0~63 之间，0 为黑暗背景区域，大于 0 的区域为灯光区域，即人类活动区域。

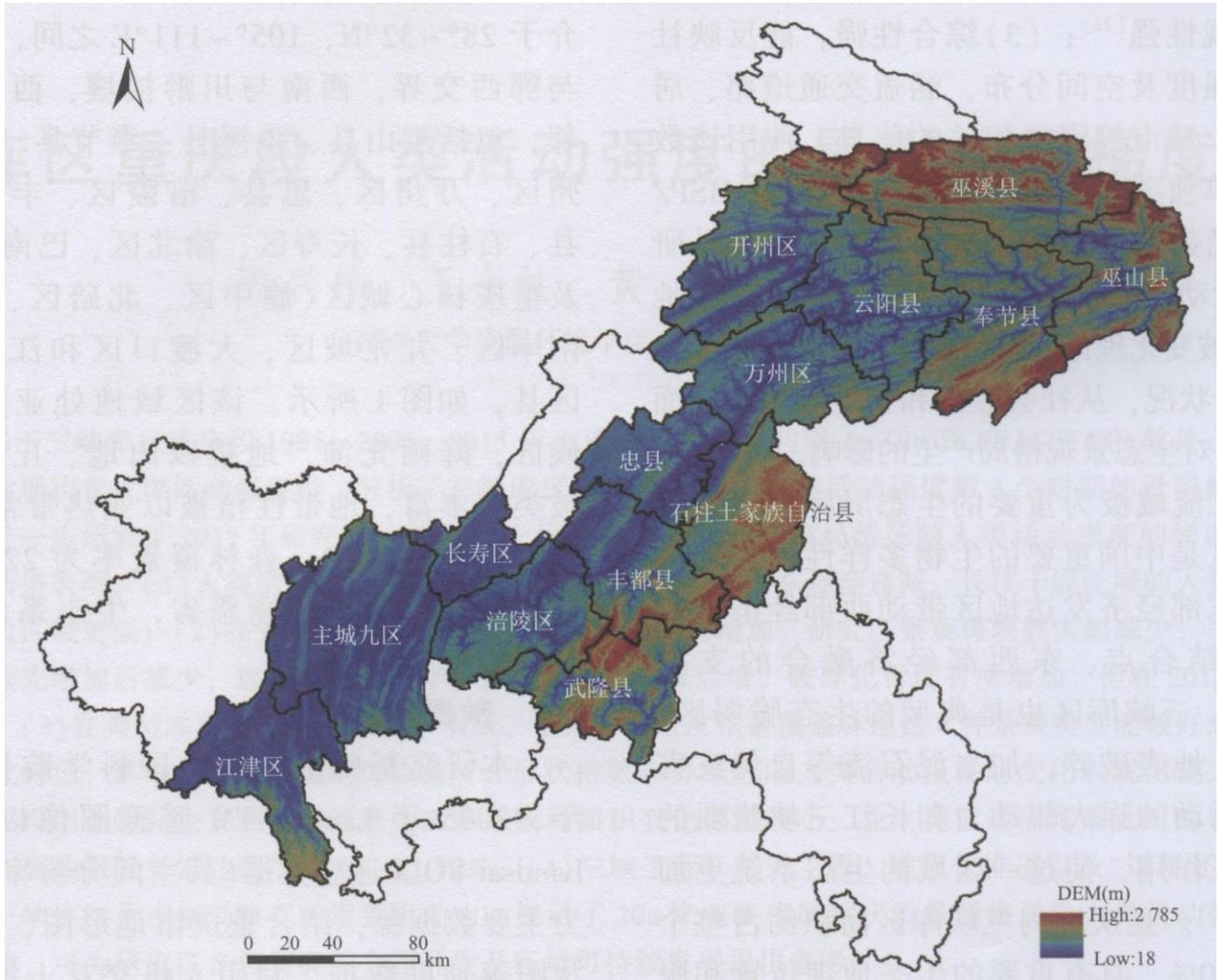


图 1 三峡库区重庆段区图和数字高程

Fig. 1 Location and digital elevation of the Three Gorges Reservoir area of Chongqing

1.3 研究方法

1.3.1 景观分类

景观生态分类既是景观结构与功能的研究基础，也是进行规划管理的前提^[38]。本研究根据三峡库区景观特点及结构，参照现有研究的分类方法^[39,40]，将三峡库区（重庆段）景观类型划分为水域、高密度植被覆盖林地、中密度植被覆盖林地、低密度植被覆盖林地、水田、旱地、草地、建设用地、未利用地 9 种类型（表 1）。

1.3.2 景观格局指标及其生态意义

景观格局分析包括对景观个体单元性质、景观组分空间构型和景观整体多样性三方面特征的度量^[41]。由于表征景观格局统一特征属性的不同景观指数相互冗余，部分景观指数即能代表该类景观指数生态意义。结合研究区景观类型特征，以景观生态学中的景观面积度量指标、景观形状度量指标、景观聚集度量指标和景观多样性度量指标为主要研究指标，为了能够较好反映景观组分信息，本研究从景观和类型水平上共选取 12 项指标进行分析，其中景观水平指数包括：香农多样性指数（SHDI）、香农均匀度指数（SHEJ）、斑块聚力指数（COHESION）、景观蔓延度（CONTAG）、景观聚合度（AI）、景观斑块数（NP）、斑块密度（PD）；类型水平指标包括：景观类型百分比（PLAND）、景观形状指数（LSI）、最大斑块指数（LPI）、平均斑块分维数（MPFD）、斑块密度（PD）。具体公式及生态学意义见表 2, 通过 Fragstats4.2 进行辅助计算。

表 1 景观类型分类及说明

Tab. 1 Classification and description of landscape types

景观类型	分类说明
水田	指有水源保证和灌溉设施，在一般年景能正常灌溉，用以种植水稻，莲藕等水生农作物的耕地，包括实行水稻和旱地作物轮种的耕地
旱地	指无灌溉水源及设施，靠天然降水生长作物的耕地；有水源和浇灌设施，在一般年景下能正常灌溉的旱作物耕地；以种菜为主的耕地；正常轮作的休闲地和轮歇地
高密度植被覆盖林地	林地植被覆盖情况较好，主要是生长良好、郁闭度>30%的有林地
中密度植被覆盖林地	林地植被覆盖情况一般，郁闭度处于中等，主要包括疏林地以及灌木林地
低密度植被覆盖林地	林地植被覆盖情况较差，郁闭度较低，主要是指其他林地
建设用地	包括城镇用地、农村居民点、其他建设用地
草地	包括覆盖度>5%的天然草地、改良草地和割草地
水域	指天然陆地水域和水利设施用地，包括湖泊、河渠、滩地、水库、坑塘
未利用地	指地表为岩石或石砾，其覆盖面积>5%的土地，主要指裸岩石质地

1.3.3 人类活动强度指标的选取

考虑到研究区的特殊地形情况，水田和旱地占据了研究区 43%的面积，并且地形坡度起伏较大，河流水域贯穿库区，不适宜采用地形坡度、耕地因子等指标运用加权综合指数法、反距离权重插值法来构建人类活动强度模型 [42, 43]。考虑到 DMSP/OLS 夜间稳定灯光数据的优势和应用领域，本研究利用 DMSP/OLS 稳定夜间灯光均值数据构建人类活动强度模型，该模型能较好的替代表征人类活动强度。基于夜间灯光数据的优势，在美国国家地理数据中心官网下载离研究时限最近最新的 2013 年 DMSP/OLS 夜间灯光数据，作为人类活动强度数据源。

1.3.4 自然间断分类法

由于夜间灯光数据具有明显的聚类特征，本研究采用自然间断分类法（NaturalBreaks）对分类间隔加以识别，同时对相似值进行最恰当地分组，使各组之间的差异最大化。夜间灯光数据的分组数量将直接影响景观指标在不同人类活动强度梯度下的分布特征，本研究将研究区的夜间灯光数据由弱到强分为 1~10 个样带以表征人类活动强度样带（如图 2）。基于 ArcGIS10.4 软件的空间分析功能，将 1995、2005 和 2015 年三期景观图同 10 个人类活动强度样带叠加运算截取 3 个时段各强度带的景观类型图，导入 Fragstats4.2 软件中计算各景观格局指数。

表 2 景观指数及其生态学意义

Tab. 2 Landscape indices and its ecological significance

景观指数	公式	生态学意义
景观斑块数 (NP)	$NP = n$	用来衡量目标景观的复杂程度, 斑块越多说明越复杂
斑块密度 (PD)	$PD = \frac{N}{A} \times 10000 \times 100$	在类型水平上是某类景观斑块与某类景观面积数量的比值, 在景观水平上是整体景观斑块数量与总面积的比值. 用于描述整个景观的异质性, 可以表征人类干扰下的景观破碎化程度. 式中 A 为整个景观面积
香农多样性指数 (SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (p_i \times \ln p_i)$	反映景观异质性, 特别是对景观中各斑块类型非均衡分布状况较为敏感. 式中为景观类型 i 的面积占比
香农均匀度指数 (SHEI)	$SHEI = - \sum_{i=1}^m (p_i) \times \ln p_i / \ln m$	描述不同类型斑块的分布, m 为景观类型总数
景观聚合度 (AI)	$AI = \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{g_{ii}}{\max g_{ii}} \right) p_i \right] \times 100$	反映景观中不同景观要素的团聚程度, 反映一定数量的要素在景观中的相互分散性, AI 值随斑块类型的聚集程度而增加. 式中 g_{ii} 是基于单倍法的斑块类型 i 像元之间的节点数
蔓延度 (CONTAG)	$CONTAG = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[p_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \times \left[\ln p_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln m} \right\} \times 100$	描述的是景观里不同拼块类型的团聚程度或延展趋势. 一般来说, 其值越高说明景观中的某种优势拼块类型形成了良好的连接性; 反之则表明景观是具有多种要素的密集格局, 景观的破碎化程度较高. 式中 P_{ik} 为斑块类型 i 和 k 之间相邻的格网单元数, $0 < CONTAG \leq 100$
斑块聚力指数 (COHESION)	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right] - 1 \times 100$	表示景观连通性的一类指标, 其值越大表示聚集连通周围相同斑块的能力越大, 破碎化程度越低. 式中 P_{ij} 为斑块 ij 的周长, a_{ij} 为斑块 ij 的面积
景观类型百分比 (PLAND)	$PLAND = p_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	指某类斑块所占的景观总面积的百分比, 是确定景观中的基质或优势景观类型的依据, 也是决定景观中的生物多样性、优势种和数量等生态系统指标的重要因素. 式中 a_{ij} 为斑块 ij 的面积, m^2
景观形状指数 (LSI)	$LSI = \frac{e_i}{\text{mine}_i}$	研究景观生态功能与生态过程的重要参数, 斑块形状对保持区域景观的功能具有十分重要作用, 比如防止水土流失等. 式中 e_i 是景观类型 i 的边缘总长, m; mine_i 表示 e_i 的可能最小值, m; $LSI \geq 1$

最大斑块指数 (LPI)

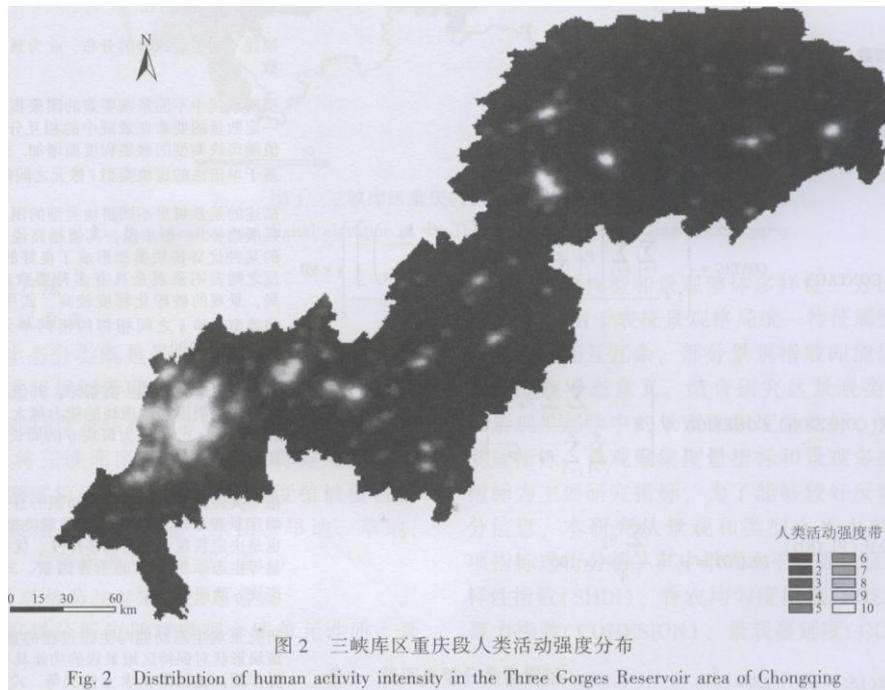
$$LPI = \frac{\max_{j=1} (a_{ij})}{A} \times 100$$

平均斑块分维数 (MPFD)

$$MPFD = \frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln a_{ij} n_i}$$

指在景观类型中,该类型斑块中最大斑块占该类斑块面积的百分比,是组成景观优势度的度量,反映生态系统中人类活动的方向与强度,最大斑块指数值越小,景观破碎化程度越高。式中 $\max_{j=1} (a_{ij})$ 表示某种斑块类型中的最大斑块面积, m^2 ;取值范围 $0 < LPI \leq 100$

$1 \leq MPFD \leq 2$,数值越小代表斑块形状简单,反之趋于复杂



2 结果与分析

2.1 研究区景观总体特征

由人类活动强度分布图(图2)可以看出,人类活动的空间分布差异显著,分布极不均匀,强度由西向东逐渐递减。同时可以看出,人类活动以长江与嘉陵江交汇处的渝中区为核心,依次向外呈圆周状辐射的其余主城区构成人类活动强度第二圈层,该圈层区县间差异不大;随着重庆市城镇建设的推进,更外围的长寿、江津等区县也处于第8、9强度带中。相比较而言,长江干线流域的人类活动强度相对周边区域更强。

依据前文的景观分类标准,对遥感影像进行解译判读生成研究区的景观类型图(图3),并从属性中获取各景观类型面积生成相应表格(表3)。20a间景观覆盖类型变化十分显著,其中草地、水域和建设用地变化最为明显。由于人类改造自然的的活动能力增强,社会经济发展较好,建设用地扩展迅速,主城9区一带的建设用地增长最为明显;主城区、长寿区、涪陵区、丰都

县和忠县的耕地面积减少幅度较大，三峡库区重庆段以丘陵山地为主，并不合适机械化耕作，且大量劳动力外出，使得大多数耕地荒废，退耕还林等政策的推行使这些地区大部分耕地转为林地。有学者研究发现水域、建设用地的增加是由于耕林草相互转换以及有方向性转换的结果^[44]。

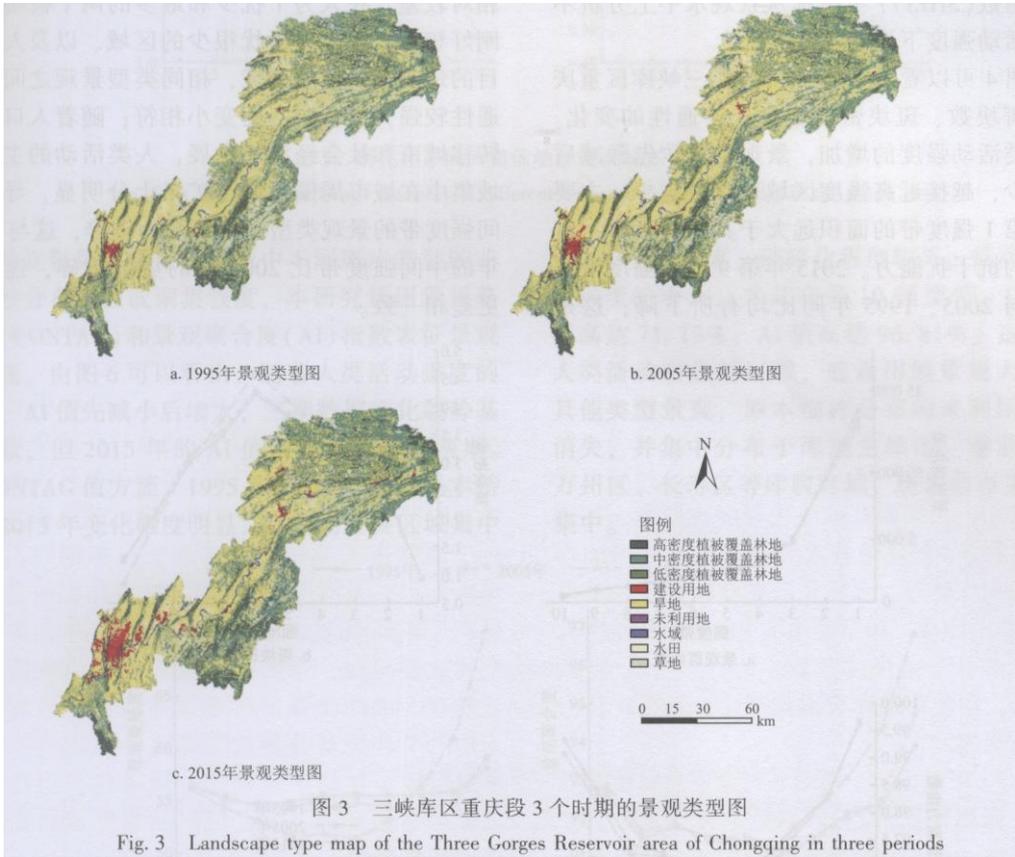


图3 三峡库区重庆段3个时期的景观类型图
Fig. 3 Landscape type map of the Three Gorges Reservoir area of Chongqing in three periods

表3 各年份研究区景观类型面积 (10⁴hm²)

Tab. 3 Landscape type area during 1995-2015 in the study area

年份	1995年	2005年	2015年	1995-2015年各景观面积变化率 (%)
景观类型				
草地	67.40	64.06	53.38	-20.8
高密度植被覆盖林地	51.49	50.60	54.03	4.93
中密度植被覆盖林地	122.87	124.62	125.27	1.95
低密度植被覆盖林地	3.83	3.99	4.93	28.74
旱地	146.88	146.63	144.66	-1.52
水田	55.92	56.06	52.92	-5.78
水域	6.76	7.12	9.23	36.61
建设用地	3.05	5.16	14.06	361.52
未利用地	0.10	0.07	0.05	-47.84

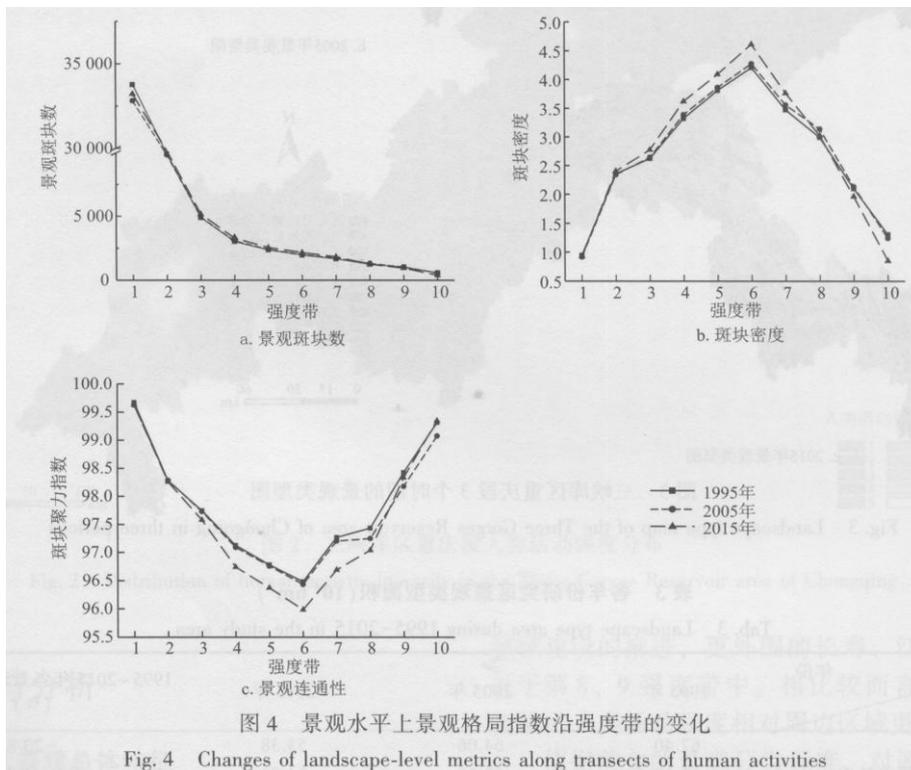
2015年研究区整个景观的平均斑块面积为114.49hm²,1995年的117.36hm²减少了2.44%,而斑块密度值由1995年的0.8521块/km²上升到2015年的0.8734块/km²,涨幅为2.5%,表明景观总体是趋于破碎化。这主要是由于三峡工程的兴建,导致部分区

县实施移民政策，加上人口增加和城市化的发展，导致建设用地不断吞噬耕地、未利用地，人类活动对景观的干扰加大，致使景观总体趋于破碎化。同时，库区的多样性指数由 1995 年的 1.64 上升到 2015 年的 1.71，香农均匀度指数由 1995 年的 0.746 上升到 2015 年的 0.776，而景观丰富度却保持不变，这说明景观多样性的增加是各种景观类型日趋分布均匀的结果^[45]。

2.2 景观水平的梯度分析

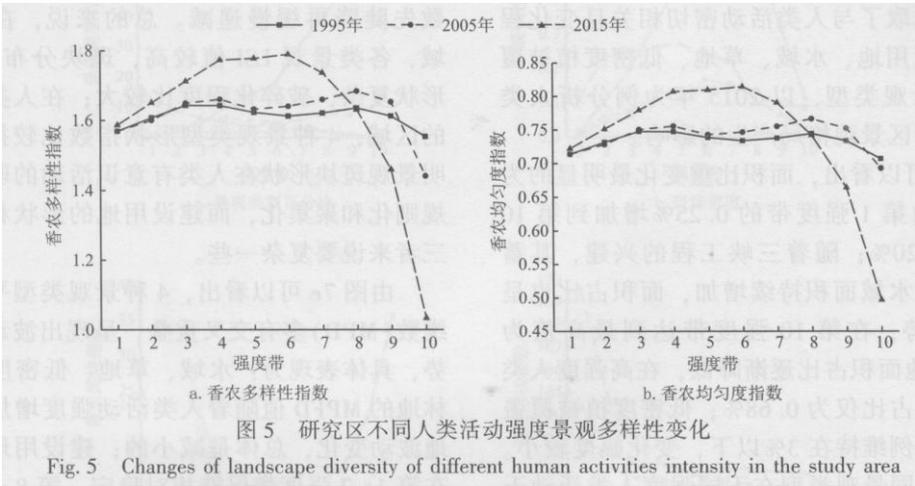
一般来说，在人为干扰下，景观都是由单一、连续、均匀的整体向复杂、不连续、不规则的斑块破碎状发展。本研究选用与人类活动相关的景观斑块数 (NP)、斑块密度 (PD)、斑块聚力指数 (COHESION)、景观蔓延度 (CONTAG)、景观聚合度 (AI)、香农多样性指数 (SHDI)、香农均匀度指数 (SHEI) 7 个指标从景观水平上分析不同人类活动强度下景观梯度的变化。

由图 4 可以看出 1995~2015 年三峡库区重庆段景观斑块数、斑块密度和景观连通性的变化。随着人类活动强度的增加，景观斑块数先骤减后缓慢减少，越接近高强度区域斑块数越少，主要原因是第 1 强度带的面积远大于其他强度带，具有较强的抗干扰能力。2015 年第 9、10 强度带斑块密度与 2005、1995 年同比均有所下降，这是因为城市化高度推进下，在人口高密度地区人类定向选择的干扰活动造成该强度带未利用地景观的消失，居民点、商服、工矿用地等建设用地及耕地面积比重及平均斑块面积增大，从而降低了斑块密度^[46]；斑块聚力指数值均保持在 95.98% 以上，三期数据均在第 6 强度带处出现转折达到最低值。总的来说，斑块密度和景观连通性的变化趋势相反，在中间人类活动强度带，由于处于人为干扰的过渡区域，景观破碎化程度和连通性相对较差，在人为干扰少和最多的两个极端情况刚好相反，在人为干扰很少的区域、以及人类有目的地改造景观的区域，相同类型景观之间的连通性较强，与斑块密度变小相符；随着人口定向转移城市和社会经济的发展，人类活动的主要区域集中在城市周围，城市扩张十分明显，导致中间强度带的景观类型由完整变为破碎，这与 2015 年的中间强度带比 2005 年的更加破碎，连通性更差相一致。

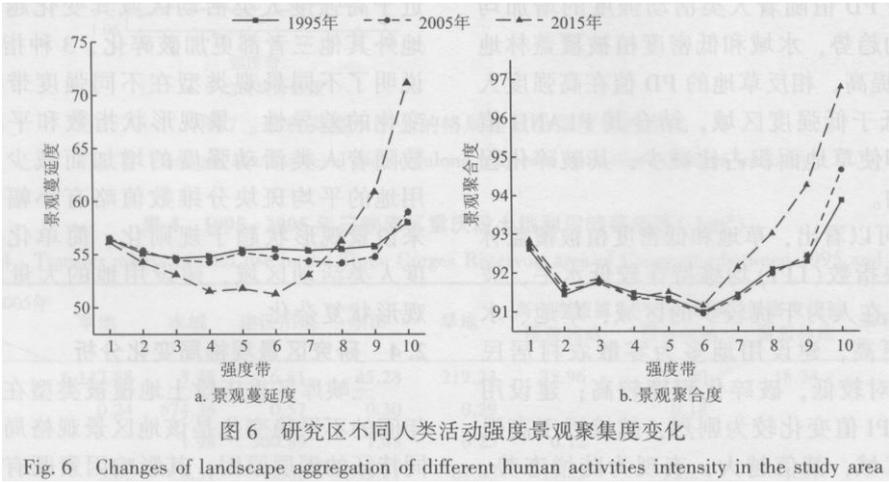


景观多样性指标主要受到多样性和均匀度两个方面的影响，本研究利用香农多样性指数 (SHDI) 和香农均匀度指数 (SHEI) 来表征。由图 5 可知，SHDI 值和 SHEI 值呈现出相似的变化规律，即景观的多样性分布和均匀度分布基本一致，均随人类活动强

度的增加而先缓慢增加再减小。SHDI 和 SHEI 在第 1~6 强度带均呈现缓慢增加的趋势，1995 和 2005 年在第 6~8 强度带也有所增加，而 2015 年 SHDI 和 SHEI 值在第 6 强度带之后开始逐渐减少，在人类活动强度剧烈的第 9 和 10 强度带加速减小。由此可知，在建设用地、耕地等与人类活动联系密切的高强度带中，景观类型减少，多样性指数偏低；人类活动强度的增加会造成多样性和均匀度指数的降低，而在中等干扰下，景观多样性能达到最佳值。



景观聚集度能反映景观中不同斑块类型的非随机性分布特征或聚集程度，本研究选用景观蔓延度 (CONTAG) 和景观聚合度 (AI) 指数表征景观聚集度。由图 6 可以看出，随着人类活动强度的增大，AI 值先减小后增大，三期数据变化趋势基本一致，但 2015 年的 AI 值明显高于其他两期。在 CONTAG 值方面，1995 和 2005 年数据基本持平，2015 年变化幅度明显，在中间过渡区域集中了多种景观要素，破碎化程度较高，随着人类活动强度的增大，尤其在第 10 强度带，CONTAG 值高达 71.13%，AI 值高达 96.81%。这表明在人类活动密集的区域，建设用地景观大量吞并其他类型景观，原本细碎分布的未利用地景观消失，并集中分布于库尾主城区，零散分布于万州区、长寿区等库腹区域，斑块分布更加趋于集中。



综上所述，随着库区人类活动强度的递增，研究区景观多样性和均匀度指数呈现先增加后减少的变化趋势；景观斑块数大幅减少，斑块数越接近人类活动高强度区域数值越低；景观斑块的聚集程度先减小后增大，总体上斑块分布趋于集中；景观整体的连通性有所下降；1995 和 2005 年斑块密度先增加后减少，总体略有增大，景观破碎化程度有所增大，2015 年破碎化程度有所改善。

2.3 类型水平的梯度分析

人为活动作用的结果使景观类型的原始自然特性不断降低,不同的景观类型代表着不同的人类开发利用强度^[47],同时由于未利用地占库区比例太小,在第10强度带被其它景观类型完全取代,虽面积变化较大但数值过小,不利于分析,因此本研究选取了与人类活动密切相关且变化程度最大的建设用地、水域、草地、低密度植被覆盖林地四种景观类型,以2015年为例分析人类活动强度对库区景观格局产生的影响。

由图7a可以看出,面积比重变化最明显的为建设用地,由第1强度带的0.25%增加到第10强度带的71.20%;随着三峡工程的兴建,其蓄水量增加导致水域面积持续增加,面积占比也呈现递增的趋势,在第10强度带达到最高值为11.02%;草地面积占比逐渐降低,在高强度人类活动区域面积占比仅为0.68%;低密度植被覆盖林地的面积比例维持在3%以下,变化幅度较小。由此可见,不同景观类型在不同强度人类活动干扰下表现出一定的空间分布差异性。

由图7b可以看出,各景观斑块密度(PD)值随着人类活动强度的增加,总体维持在0.7块/km²以下,变化幅度在第1~3强度带表现为草地>建设用地>低密度植被覆盖林地>水域。整体来看,建设用地斑块密度平均值最大,表现为先增加后减少的趋势,并在第6强度带达到最大值为0.6块/hm²,同时其破碎化程度也最高。其他3种景观类型PD值随着人类活动强度的增加均呈先增后减的趋势,水域和低密度植被覆盖林地PD值都有所提高,相反草地的PD值在高强度人类干扰区却低于低强度区域,结合其PLAND值可以看出,即使草地面积占比减少,其破碎化程度是在降低的。

由图7c可以看出,草地和低密度植被覆盖林地的最大斑块指数(LPI)均维持在较低水平,波动幅度较小,在人为干扰较少的区域,草地、水域的LPI值更高,建设用地多为零散农村居民点,LPI值相对较低,破碎化程度较高;建设用地和水域的LPI值变化较为剧烈,越接近于高强度人类活动区域,其值越大,表现为陡增态势。这是由于城市化发展和三峡库区所引起的大规模移民安置和拆迁,特别是1997年重庆直辖市设立后,建设用地和水域景观大量占用周边耕地、草地和未利用地等,以建设用地为代表的景观类型发生剧烈变化,在第10强度带LPI值高达35.73,可以认为建设用地是人类活动频繁区域的优势代表景观。

由图7d可以看出,4种景观类型的形状指数LSI值的变化具有较强的规律性,建设用地、水域、低密度植被覆盖林地缓慢减少,草地形状指数先陡降再缓慢递减。总的来说,在低干扰区域,各类景观LSI值较高,斑块分布比较分散,形状复杂,破碎化程度比较大;在人类活动强烈的区域,4种景观类型形状指数比较接近,这说明景观斑块形状在人类有意识活动的驱动下趋于规则化和聚集化,而建设用地的形状相对于另外三者来说要复杂一些。

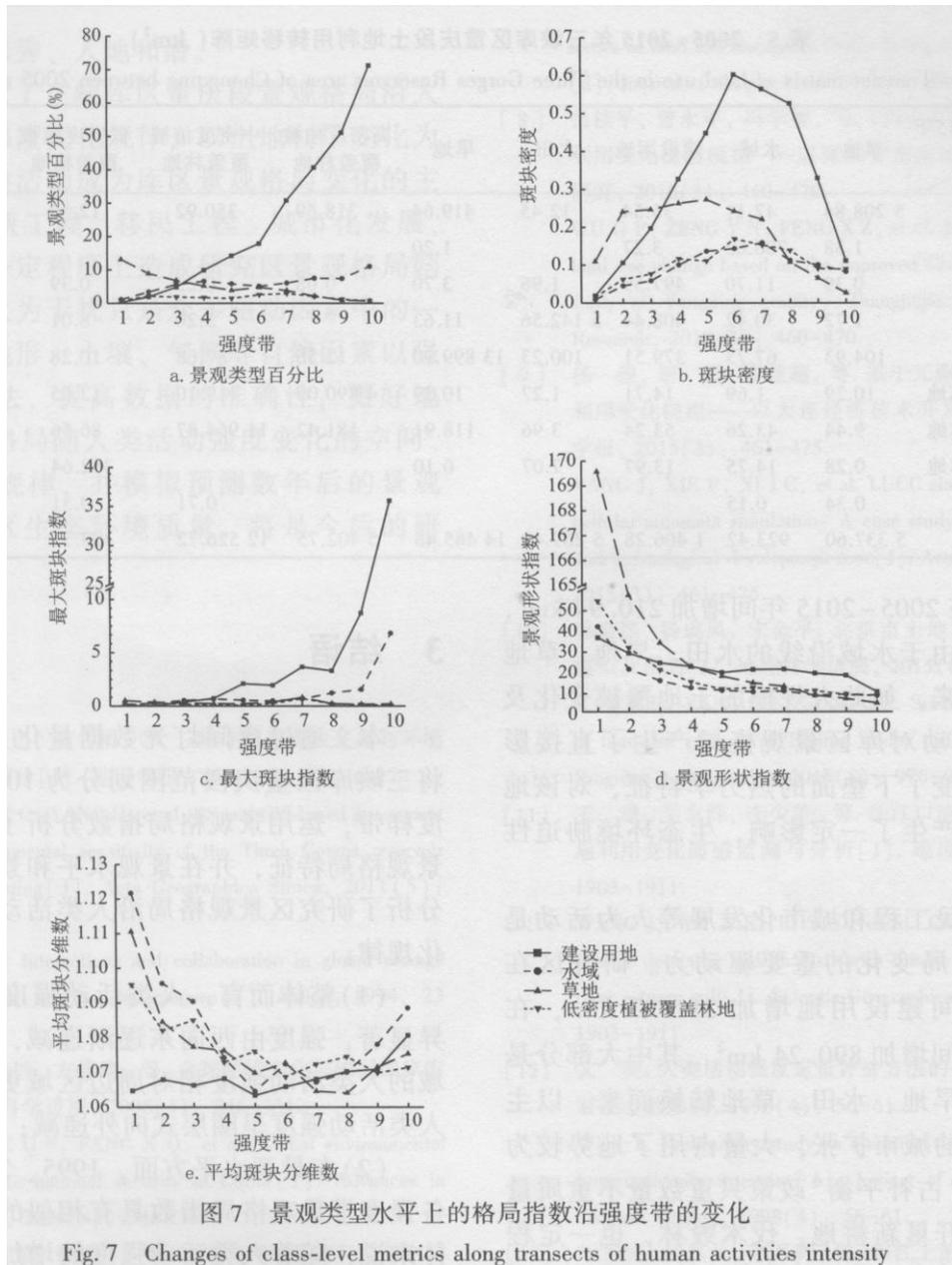
由图7e可以看出,4种景观类型平均斑块分维数(MPD)多有交叉重叠,呈现出波动变化的趋势,具体表现为:水域、草地、低密度植被覆盖林地的MPFD值随着人类活动强度增加略有起伏地波动变化,总体是减小的;建设用地MPFD值在第1~7强度带保持相对稳定,第8~10强度带有所增加,说明建设用地在人类活动强烈区域,景观形状趋于复杂,与斑块形状指数结果保持一致,而其他三类景观随着人类活动强度增加,人为干扰下反而趋于一种规则化的状态。

综上所述,在类型水平上,建设用地、水域、草地、低密度植被覆盖林地的各景观格局特征与人类活动强度梯度变化具有相似性。各景观类型面积百分比、斑块密度、最大斑块指数越接近于高强度人类活动区域其变化越剧烈,除草地外其他三者都更加破碎化,3种指标的变化也说明了不同景观类型在不同强度带存在着空间变化的差异性。景观形状指数和平均斑块分维数随着人类活动强度的增加而减少,只有建设用地的平均斑块分维数值略有小幅上升。总体来说景观形状趋于规则化、简单化,而在高强度人类活动区域,建设用地的大量增加导致景观形状复杂化。

2.4 研究区景观格局变化分析

三峡库区重庆段土地覆被类型在1995-2015年间的平稳变化是该地区景观格局变化表现不同特征的深层原因,其影响因

素既有自然因素也有人为干扰，但后者影响更大。本研究基于 1995、2005、2015 年三峡库区重庆段土地利用/覆被变化及转移矩阵（表 4、表 5）来探讨景观梯度响应。



首先，三峡工程兴建是研究区景观格局变化的基本原因。由表 3、表 4 可以看出，由于三峡水库蓄水，水域面积在 1995~2005 年间增加 36.53km²，在 2005~2015 年间增加 210.94km²，其中大部分是由于水域沿线的水田、旱地、草地及林地转换而来，如此大规模的土地覆被变化及高强度人类活动对库区景观格局产生了直接影响，同时也改变了下垫面的热力学特征，对该地区局地小气候产生了一定影响，生态环境胁迫性增强。

其次，移民工程和城市化发展等人为活动是研究区景观格局变化的重要驱动力。研究区在 1995~2005 年间建设用地增加 211.33km²，在 2005~2015 年间增加 890.24km²，其中大部分是由城市周围的旱地、水田、草地转换而来。以主城九区为代表的城市扩张，大量占用了地势较为平缓的耕地，“占补平衡”政策只重数量不重质量的前期推行，开垦新耕地，伐木毁林，也一定程

度上增加了区域水土流失隐患等生态问题。

表 4 1995~2005 年三峡库区重庆段土地利用转移矩阵 (km²)

Tab. 4 Transfer matrix of land use in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing between 1995 and 2005

1995 年	2005 年	草地	水域	建设用地	水田	旱地	高密度植被覆盖林地	中密度植被覆盖林地	低密度植被覆盖林地	未利用地	合计
草地		6147.88	3.38	6.81	45.28	219.23	75.96	222.90	18.34		6739.79
水域		0.24	674.36	0.57	0.30	0.29		0.18			675.95
建设用地			1.98	300.89	1.48	0.25	0.12				304.71
水田		5.32	6.57	72.86	5395.17	68.43	10.82	32.29	1.01		5592.47
旱地		74.16	14.65	115.92	74.10	14228.04	53.87	121.87	5.73		14688.35
高密度植被覆盖林地		104.87	1.68	4.30	2.09	13.04	4911.31	109.36	2.20		5148.85
中密度植被覆盖林地		71.78	6.48	11.03	86.40	123.66	8.13	11975.09	4.36		12286.92
低密度植被覆盖林地		1.34	0.88	3.67	1.15	9.02			367.16		383.22
未利用地			2.50			0.88				6.85	10.23
合计		6405.59	712.48	516.04	5605.97	14662.84	5060.21	12461.70	398.80	6.85	45830.48

表 5 2005~2015 年三峡库区重庆段土地利用转移矩阵 (km²)

Tab. 5 Transfer matrix of land use in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing between 2005 and 2015

2005 年	2015 年	草地	水坝	建设用地	水田	旱地	高密度植被覆盖林地	中密度植被覆盖林地	低密度植被覆盖林地	未利用地	合计
草地		5208.84	47.11	35.54	12.45	419.64	318.59	350.92	12.50		6405.58
水域		1.38	706.62	3.27		1.20					712.48
建设用地		0.39	11.70	497.59	1.96	3.70	0.08	0.23	0.39		516.04
水田		1.72	30.42	408.44	5142.56	11.63		3.20	8.01		5605.98
旱地		104.93	67.73	379.51	100.23	13899.90	12.56	87.68	10.28		14662.82
高密度植被覆盖林地		10.29	1.69	14.71	1.27	10.39	4890.09	119.10	12.65		5060.20
中密度植被覆盖林地		9.44	43.26	53.24	3.96	118.91	181.42	11964.87	86.56		12461.68
低密度植被覆盖林地		0.28	14.75	13.97	7.07	0.10			362.64		398.81
未利用地		0.34	0.15					0.71	0.31	5.34	6.85
合计		5337.60	923.42	1406.28	5269.49	14465.48	5402.75	12526.72	493.35	5.34	45830.43

最后，政策推行是研究区景观格局变化的直接原因。研究区在 1995~2005 年间高密度植被覆盖林地减少 88.64km²，在 2005-2015 年间三种类型林地景观面积均大幅增加，据《2016 年长江三峡工程生态与环境监测公报》显示，2015 年库区森林覆盖率为 48.06%，这是由于国家前后实施的长江上游天然林保护工程、长江上游水源涵养林工程和退耕还林工程，2000 年以后国家对三峡库区生态环境特别重视，生态防护林、库周造林绿化等生态工程相继实施，同时大力推进义务植树造林活动，加强群众环境保护意识，大量非林地转为林地，使得土地利用结构发生较大变化，因此人为因素仍是影响库区生态环境的重要驱动力。

3 结语

本文通过夜间灯光数据量化人类活动强度,将三峡库区重庆段范围划分为10个人类活动强度样带,运用景观格局指数分析了研究区的整体景观格局特征,并在景观水平和景观类型层次上分析了研究区景观格局沿人类活动强度的梯度变化规律。

(1) 整体而言,人类活动强度的空间分布差异显著,强度由西向东逐渐递减,且长江干线流域的人类活动强度相对周边区域更强,城市中心人类活动强度呈圈层式向外递减;

(2) 在景观水平方面,1995、2005和2015年各强度带景观格局指数具有相似的变化规律。总体来说,随着人类活动强度的增加,景观斑块数减少,景观连通性有所下降,聚集度有所增大,破碎化程度得到一定控制,景观多样性和均匀度呈先增后减的态势,且在中等干扰强度下能达到最佳值;

(3) 在景观类型水平上,4种景观类型的景观类型面积百分比、斑块密度、最大斑块指数变化明显,并随着人类活动强度的增加而总体上涨;平均斑块分维数随人类活动强度梯度波动明显,变化复杂;景观形状趋于规则化、简单化,而建设用地在高强度人类活动区域形状相对复杂;

(4) 研究发现,人为因素仍是研究区景观格局演变的重要驱动力,三峡工程、移民工程、城市化发展以及政策实施等因素均在一定程度上对库区景观格局演变起重要作用,库区相关工作人员应积极采取错误减弱人为干扰的不良影响,保证库区的山清水秀、人地和谐。

本研究揭示了三峡库区重庆段景观格局沿人类活动强度的梯度变化规律,以土地利用变化为:主要形式的人类活动成为库区景观格局变化的主要驱动力,三峡工程、移民工程、城市化发展、政策实施均在一定程度上造成研究区景观格局剧烈变化。然而人为干扰只是众多驱动因素中的一种,如能结合地形、土壤、气候等自然因素以强化模型构建方法,提高数据的准确性,更好地揭示库区景观格局随人类活动强度变化的空间、时间上的变化规律,并模拟预测数年后的景观特征,提高库区生态环境质量,将是今后的研究重点。

参考文献:

[1]刘春霞,李月臣,杨华,等.三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J].地理学报,2011(5):631-642.

LIU C X, LI Y C, YANG H, et al. RS and GIS-based assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorges reservoir area of Chongqing [J]. Acta Geographica Sinica, 2011(5): 631-642.

[2] MILLER R B. Interactions and collaboration in global change across the social and natural-sciences [J]. Ambio, 1994, 23(1) : 19-24.

[3]刘燕华,葛全胜,方修琦,等.全球环境变化与中国国家安全[J].地球科学进展,2006(4):346-351.

LIU Y H, GE Q S, FANG X Q, et al. Global environmental change and the national security of China [J]. Advances in Earth Science, 2006(4) : 346-351.

[4]刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].地理学报,2014(1):3-14.

LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014 (1): 3-14.

-
- [5] 国洪磊, 周启刚, 焦欢, 等. 三峡库区土地利用变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2016(2): 313-317.
- GUO H L, ZHOU Q G, JIAO H, et al. Research on the characteristics of land use changes in Three Gorges reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016(2): 313 - 317.
- [6] 李平, 李秀彬, 刘学军. 我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J]. 地理研究, 2001(2): 129-138.
- LI P, LI X B, LIU X J. Macro-analysis on the driving forces of the land-use change in China [J]. Geographical Research, 2001(2) : 129-138.
- [7] LIU J, ZHANG Z, XU X, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010(4) : 483-494.
- [8] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S 模型的改进与土地利用变化动态模拟——以张家界市永定区为例[J]. 地理研究, 2010(3) : 460-470.
- WU G P, ZENG Y N, FENG XZ, et al. Dynamic simulation of land use change based on the improved CLUE-S model: A case study of Yongding county, Zhangjiajie [J]. Geographical Research, 2010(3) : 460-470.
- [9] 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例[J]. 地理学报, 2015(3) : 461-475.
- YANG J, XIE P, XI J C, et al. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: A case study of Dalian economic and technological development zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2015(3) : 461-475.
- [10] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. 地理科学进展, 2015(8): 976-986.
- HAN H R, YANG C F, SONG J P. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios [J]. Progress in Geography, 2015(8) : 976-986.
- [11] 王璿, 吴志峰, 李少英, 等. 珠江口湾区海岸线及沿岸土地利用变化遥感监测与分析[J]. 地理科学, 2016(12): 1903-1911.
- WANG J, WU Z F, LI S Y, et al. Coastline and land use change detection and analysis with remote sensing in the Pearl river estuary gulf[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016(12): 1903-1911.
- [12] 文英. 人类活动强度定量评价方法的初步探讨[J]. 科学对社会的影响, 1998(4) : 56-61.
- WEN Y. Preliminary study on quantitative evaluation method of human activity intensity [J]. Impact of Science on Society: Chinese Version, 1998(4) : 56-61.
- [13] 胡志斌, 何兴元, 李月辉, 等. 岷江上游地区人类活动强度及其特征[J]. 生态学杂志, 2007(4): 539-543.
- HUZH, HEXY, LIYH, et al. Human activity intensity and its spatial distribution pattern in upper reach of Minjiang

river [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007(4) : 539-543.

[14] 郑文武, 田亚平, 邹君, 等. 南方红壤丘陵区人类活动强度的空间模拟与特征分析——以衡阳盆地为例[J]. 地球信息科学学报, 2010(5): 628-633.

ZHENG W W, TIAN Y P, ZOU J, et al. Spatial simulation of human activity intensity in hilly red soil region of southern China: A case study in Hengyang basin, Hunan province [J]. Journal of Geo-information Science, 2010(5) : 628-633.

[15] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012(1): 62-70.

HU S S, ZHENG H X, LIU C M, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake [J]. Acta Geographica Sinica, 2012(1) : 62-70.

[16] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系[J]. 自然资源学报, 2010(3): 407-414.

SUN Y L, GUO P, YAN X D, et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia [J] • Journal of Natural Resources, 2010(3): 407-414.

[17] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河干流径流损耗及其人类活动影响强度变化[J]. 地理学报, 2011(1): 89-98. CHEN Z S, CHEN Y N, LI W H, et al. Changes of runoff consumption and its human influence intensity in the mainstream of Tarim river [J] . Acta Geographica Sinica, 2011(1): 89-98.

[18] 刘明, 范德江. 近60年来长江水下三角洲沉积地球化学记录及其对人类活动的响应[J]. 科学通报, 2010(36): 3506-3515.

LIU M, FAN D J. Geochemical records in the subaqueous Yangtze river delta and their responses to human activities in the past 60 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2010(36) : 3506-3515.

[19] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报, 2014(1) : 54-63.

WU L N, YANG S T, LIU X Y, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo river basin since 1976 [J]. Acta Geographica Sinica, 2014 (1): 54-63.

[20] 宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县2000-2012年植被变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2015(22): 7377-7386.

SONG N P, DU L T, WANG L. Vegetation dynamics over 2000-2012 and its driving factors in Yanchi county, Ningxia province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015(22) : 7377-7386.

[21] 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据和统计数据的中国大陆20世纪90年代城市化空间过程重建研究[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 856-861.

HE C Y, SHI P J, LI J G, et al. Spatial reconstruction of urbanization in Chinese mainland in 1990s using DMSP/OLS nightlight data and statistical data [J] • Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7) : 856-861.

-
- [22] 王鹤饶, 郑新奇, 袁涛. DMSP/OLS 数据应用研究综述[J]. 地理科学进展, 2012(1): 11-19.
- WANG H R, ZHENG X Q, YUAN T. Overview of researches based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. Progress in Geography, 2012(1) : 11-19.
- [23] 杨眉, 王世新, 周艺, 等. DMSP/OLS 夜间灯光数据应用研究综述 [U]. 遥感技术与应用, 2011(1): 45-51.
- YANG M, WANG S X, ZHOU Y, et al. Review on applications of DMSP/OLS night-time emissions data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011(1): 45-51.
- [24] ELVIDGE C D, SUTTON P C, TUTTLE B T, et al. Change detection in satellite observed nighttime lights: 1992 - 2003 [C]. Urban Remote Sensing Joint Event, 2007
- [25] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2009(2) : 788-796.
- LI Y C, LIU C X, ZHAO C Y, et al. Assessment and spatial differentiation of sensitivity of soil erosion in Three Gorges reservoir area of Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009(2) : 788-796.
- [26] 李建国, 刘金萍, 刘丽丽, 等. 基于灰色极大熵原理的三峡库区(重庆段)生态系统健康评价[J]. 环境科学学报, 2010(11) : 2344-2352.
- LI J G, LIU J P, LIU L L, et al. Ecosystem health evaluation of Three Gorges reservoir area (Chongqing) based on the theory of maximum entropy and grey system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010(11) : 2344-2352.
- [27] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征 [U]. 地理学报, 2008(5): 475-486.
- LI Y C, LIU C X, ZHAO C Y, et al. Spatiotemporal features of soil and water loss in the Three Gorges reservoir area of Chongqing [J]. Acta Geographica Sinica, 2008 (5) : 475 - 486.
- [28] 李建国, 濮励杰, 刘金萍, 等. 2001 年至 2010 年三峡库区重庆段植被活动时空特征及其影响因素[J]. 资源科学, 2012(8) : 1500-1507.
- LI J G, PU L J, LIU J P, et al. The temporal and spatial characteristics of vegetation activity in Three Gorges reservoir area (Chongqing) from 2001 to 2010 and its influencing factors[J]. Resources Science, 2012(8) : 1500-1507.
- [29] 苏维词, 杨华, 赵纯勇, 等. 三峡库区(重庆段)涨落带土地资源的开发利用模式初探[J]. 自然资源学报, 2005(3) : 326-332.
- SU W C, YANG H, ZHAO C Y, et al. A preliminary study on land exploitation and utilization models of water-level-fluctuating zone (WLFZ) in the Three Gorges reservoir area of Chongqing [J]. Journal of Natural Resources, 2005(3) : 326-332.

[30] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析[J]. 水土保持 通报, 2008(1) : 46-49.

ZHANG H. Characteristic analyses of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges reservoir[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008(1): 46-49.

[31] 周永娟, 仇江啸, 王姣, 等. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2010(24): 6726-6733.

ZHOU Y J, QIU J X, WANG J, et al. Assessment of eco- environmental vulnerability of water-level-fluctuation belt in Three Gorges reservoir area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010 (24): 6726-6733.

[32] 高群. 三峡库区景观格局变化及其影响因素——以重庆市云阳县为例[J]. 生态学报, 2005(10) : 2499-2506. GAO Q. Landscape changes and human activities in Three Gorges reservoir area: the case of Yunyang county [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(10) : 2499-2506.

[33] 张煜星, 严恩萍, 夏朝宗, 等. 基于多期遥感的三峡库区森林景观破碎化演变研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013(7): 1-7.

ZHANG Y X, YAN E P, XIA C Z, et al. Studof Three Gorges reservoir area based on multi-remote sy on evolution of forest landscape fragmentation ensing images [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013(7) : 1-7.

[34] 马骏, 马朋, 李昌晓, 等. 2000~2011年三峡库区重庆段植被覆盖景观格局变化[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014(12): 141-147.

MA J, MA P, LI C X, et al. Changes in landscape patterns of vegetation coverage in chongqing section of the Three Gorges reservoir region from 2000 to 2011 [J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition) , 2014(12) : 141 — 147.

[35] 陈雅如, 肖文发, 冯源, 等. 三峡库区 1992~2012 年森林景观格局演变研究[J]. 林业科学研究, 2017(4): 542- 550.

CHEN Y R, XIAO W F, FENG Y, et al. Evolution of forest landscape in the Three Gorges reservoir area during 1992-2012 [J]. Forest Research, 2017(4) : 542-550.

[36] 孙丹峰, 李红, 林培. 长江三峡库区移民工程土地利用和景观格局变化遥感监测研究(英文)[J]. 农业工程学报, 2003(5) : 218-224.

SUN D F, LI H, LIN P. Monitoring land use and landscape changes caused by migrant resettlement with remote sensing in region of Three Gorges of Yangtze river[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003 (5) : 218- 224.

[37] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等. 三峡库区重庆段水土保持服务时空分布格局研究 U]. 长江流域资源与环境, 2016(6) : 932-942.

LIU R, ZHOU L L, PENG Y, et al. Spatio-temporal variations of soil conservation services in Three Gorges reservoir

area of Chongqing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016(6) : 932-942.

[38] 杨久春, 张树文. 景观生态分类概念释义及研究进展[J]. 生态学杂志, 2009(11): 2387-2392.

YANG Y C, ZHANG S W. Landscape ecological classification: its concept and research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009(11) : 2387-2392.

[39] 王丽婧, 席春燕, 付青, 等. 基于景观格局的三峡库区生态脆弱性评价[J]. 环境科学研究, 2010(10): 1268-1273.

WANG L J, XI C Y, FU Q, et al. Landscape pattern-based eco-environment vulnerability assessment of Three Gorges reservoir area[J]. Research of Environmental Science, 2010(10): 1268-1273.

[40] 陈丹, 周启刚, 黄永安, 等. 基于 RS 和 GIS 的三峡库区景观格局分析——以万州区为例[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012(1): 69-75.

CHEN D, ZHOU Q G, HUANG Y A, et al. Analysis of land-scape pattern in Three Gorges reservoir area based on RS and GIS—taking Wangzhou district as an example [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition) , 2012(1) : 69-75.

[41] 张小飞, 王仰麟, 李正国, 等. 黄土高原土壤裸露与景观格局关系——以延安市宝塔区为例[J]. 第四纪研究, 2004, 24(6) : 709-715.

ZHANG XF, WANG Y L, LIZG, et al. Relationship between soil bareness and landscape pattern in the Loess Plateau: A case studies on the Baota region of Yan ' an city [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(6) : 709-715.

[42] 张笑楠, 王克林, 张明阳, 等. 人类活动影响下喀斯特区域景观格局梯度分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009(12): 1187-1192.

ZHANG X N, WANG K L, ZHANG M Y, et al. Gradient analysis of landscape pattern in karst area under effects of anthropogenic activities[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009(12) : 1187-1192.

[43] 韩美, 张翠, 路广, 等. 黄河三角洲人类活动强度的湿地景观格局梯度响应[J]. 农业工程学报, 2017(6): 265-274.

HAN M, ZHANG C, LU G, et al. Response of wetland land-scape pattern gradient to human activity intensity in Yellow river delta [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017(6) : 265-274.

[44] 王金亮, 邵景安, 李阳兵. 近 20a 三峡库区农林地利用变化图谱特征分析[J]. 自然资源学报, 2015(2): 235-247.

WANG J L, SHAO J A, LI Y B. Geo-spectrum based analysis of crop and forest land use change in the recent 20 years in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Natural Resources, 2015(2) : 235-247.

[45] 孙娟, 夏汉平, 蓝崇钰, 等. 基于缓冲带的贵港市城市景观格局梯度分析[J]. 生态学报, 2006(3): 655-662.

SUN J, XIA H P, LAN C Y, et al. A gradient analysis based on the buffer zones of urban landscape pattern of the constructed area in Guigang city, Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006(3) : 655-662.

[46] 陈康娟, 王学雷. 人类活动影响下的四湖地区湿地景观格局分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2002(3): 219-223. CHEN K J, WANG X L. Space pattern of wetland landscape of four-lake area in Jiangnan plain based on the impact of human activities [J] . *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002(3) : 219-223.

[47] 梁发超, 刘黎明. 景观格局的人类干扰强度定量分析与生态功能区优化初探——以福建省闽清县为例[J]. *资源科学*, 2011(6) : 1138-1144.

LIANG F C, LIU L M. Quantitative analysis of human disturbance intensity of landscape patterns and preliminary optimization of ecological function regions: A case of Mingqing county in Fujian province [J]. *Resources Science*, 2011(6): 1138 - 1144.