

近 25 年三峡库区土地覆被变化及驱动力分析¹

熊杰^{1, 2}, 曾源¹, 朱亮¹, 郑朝菊¹, 高文文¹, 赵新峰¹, 赵旦¹, 吴炳方¹

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

【摘要】: 基于 1990、2000、2005、2010 和 2015 年五期 30m 空间分辨率土地覆被遥感数据, 利用动态度模型和转移矩阵, 综合分析了近 25a 三峡库区土地覆被的时空格局、变化特征及驱动力。研究表明: 2015 年三峡库区土地覆被以森林和耕地为主, 分别占总面积的 41.45%和 24.58%; 1990-2015 年三峡库区人工表面、湿地、森林和其他用地的面积增长明显, 耕地、灌丛和草地的面积整体减少, 区域综合土地覆被动态度呈先增加后稳定的变化趋势, 人工表面是最为活跃的土地覆被类型, 其次是湿地和耕地; 前 10a 三峡库区人工表面占用耕地较为突出, 后 15a 土地覆被类型转换主要为森林、灌丛和耕地转为人工表面和湿地; 三峡工程建设、移民安置与迁建、经济发展与城镇化导致人工表面不断扩张, 水库蓄水导致湿地面积迅速增加, 农业结构调整促使园地面积扩张。三峡库区近 25a 来, 在退耕还林等生态保护政策影响下, 生态环境状况趋于改善, 库区森林面积显著增加, 坡耕地面积持续减少, 但人地矛盾日益突出, 研究结果可为后三峡时代库区生态环境保护与社会经济的协调发展提供数据支撑。

【关键词】: 土地覆被 三峡库区 时空变化 驱动力

【中图分类号】: F301.24 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2018)10-2368-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201810022

我国的三峡水利工程自 1994 年兴建至 2010 年成功蓄水到 175m, 在防洪、发电、航运等方面产生了巨大的经济社会效益^[1]。三峡库区是指因三峡水利工程建设而受到回水影响的区域。该地区位于我国中西部内陆, 是长江流域重要的生态屏障区。三峡工程及移民等政策的实施对库区的生态环境产生了深远影响, 例如土地淹没、水文条件变化、退耕还林、种植结构变化等^[2]。因此, 研究三峡库区长时间序列的生态环境变化, 探讨其驱动因素, 是三峡工程生态安全评价及区域可持续发展的重要基础。

遥感技术凭借其连续观测和大范围数据获取的优势, 成为研究区域尺度生态环境变化的有效途径^[3]。土地覆被是一种地理特性, 是陆地表面可被观察到的自然营造物和人工建筑物的综合体, 是自然过程与人类活动共同作用的结果, 可直接或间接影响土地资源变化, 是生态环境遥感监测的关键因子^[4]。我国学者针对三峡库区已开展了众多的土地覆被及土地利用监测研究。邵怀勇等^[5]基于 1955 年 1:5 万地形图及 1972、1986 和 2000 年遥感数据, 探讨了库区的土地利用动态变化过程, 发现林地、水域和未利用地面积减少, 耕地、草地和建设用地面积呈增加趋势。江晓波等^[6]利用空间叠加和信息融合等技术分析库区的土地覆被变化, 发现 1990-2000 年大量林地、转化为建设用地、草地及耕地。邵景安等^[7]研究指出三峡工程不同建设阶段耕地减少、水域面积持续增加, 1990~1995 年间的农业结构调整和 2000-2005 年间的退耕还林等政策导致了林地面积显著增加。国洪磊等^[8]基于动态指数模型分析发现, 三峡库区 2000~2013 年水域和建设用地的动态度较大, 而草地、林地和耕地的动态度较小。

¹收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-04-20

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0500201, 2016YFC0502102); 国家自然科学基金面上项目(41671365); 国务院三峡工程建设委员会办公室生态环境遥感监测重点站项目(JJ [2016] -032)

作者简介: 熊杰(1993~), 男, 硕士研究生, 主要从事植被遥感研究.E-mail:xiongjie@radi.ac.cn

已有研究大多集中在三峡工程建设期的某一阶段；一个时间阶段，很难开展三峡工程全过程的生态环境跟踪监测与变化分析，而库区的土地覆被空间格局及其变化趋势在大坝建设前后有显著差别。

我国自 2002 年以来，由国务院三峡工程建设委员会组织开展了三峡库区生态环境专项监测，形成了三峡工程生态与环境监测信息系统^[9]。其中的生态与环境遥感监测重点站，积累了三峡库区长时间序列的生态环境遥感监测数据，成为三峡决策部门的重要参考数据。

本文选择 1990~2015 年作为研究时段，基于中国土地覆被遥感数据产品 (ChinaCover)^[4, 10, 11]，获取了三峡库区 1990、2000、2005 和 2010 年 30m 空间分辨率土地覆被数据集，并在此基础上开展了 2015 年的土地覆被监测，该时间连续、空间一致的 5 期土地覆被数据集也是三峡生态与环境遥感监测重点站的重要成果。研究还基于动态度模型和转移矩阵方法，分析了近 25a 三峡库区土地覆被的时空格局及变化特征，结合经济、社会数据和区域政策，探讨了土地覆被变化与驱动因素间的响应关系。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

三峡库区位于长江中上游，跨越鄂中山区及川东峡谷地带，北屏大巴山，南依川鄂高原。库区面积约 $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($29^\circ 16' \text{ N} \sim 31^\circ 25' \text{ N}$, $106^\circ 00' \text{ E} \sim 111^\circ 59' \text{ E}$)，涵盖湖北、重庆两省市的 20 个区县 (图 1)。该区地形复杂，以山地丘陵为主，主要土壤类型有紫色土、石灰岩土和水稻土等。气候类型属于亚热带季风气候，四季分明，夏季炎热多雨，冬季温和湿润，年均气温为 $16^\circ\text{C} \sim 19^\circ\text{C}$ ，年降雨量 1000~1800mm。三峡库区地处中亚热带北缘，地带性植被是以栲、楠为主的常绿阔叶林，主要植被类型还有常绿针叶林、针阔混交林、灌草丛等^[12]。

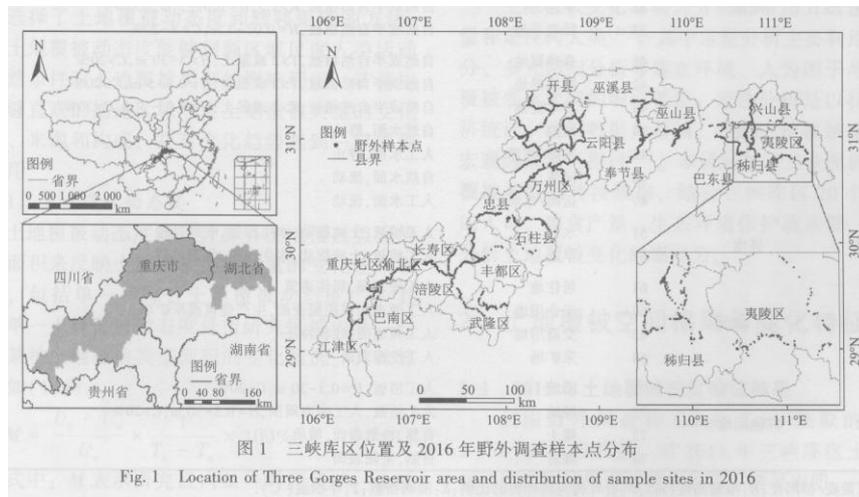


图 1 三峡库区位置及 2016 年野外调查样点分布
Fig. 1 Location of Three Gorges Reservoir area and distribution of sample sites in 2016

1.2 数据准备

研究中所用的 4 期 (1990、2000、2005 和 2010 年) 30m 分辨率三峡库区土地覆被数据来自于 ChinaCover 数据集。2015 年的土地覆被遥感监测选用了 7~10 月共 9 景 Landsat8OLI 影像 (<http://glovis.usgs.gov/>)。OLI 较以往的 Landsat 系列数据 (TM 和 ETM+) 在空间特征和结构纹理方面进行了改善，更有利于对土地覆被类型的识别^[13]。基于 ERDASATCOR3 模型，对 9 景 Landsat8OLI 遥感影像进行了辐射校正，同时利用 ASTER 遥感立体像对生产的 30m 分辨率 DEM 数据对影像进行了几何校正，影像的投影坐标统一转换为 UTM-WGS84 坐标系。

2016年9月在三峡库区开展了为期30天的野外调查。根据研究区的公路分布情况,以及样本点的代表性与分布的均质性,确定野外样本点的采样路线。样本点是基于GVG农情采样系统进行采集的^[14],GVG综合集成了全球定位系统(GPS)、视频(VIDEO)与地理信息系统(GIS)技术,实现了采集数据与云平台的实时交互,以及不受网络信号和通达条件限制的野外观测数据快速高效采集^[15],最终获得了1281个土地覆被野外调查样本点(图1)。此外,结合GoogleEarth软件选取了70个样本点作为土地覆被补充验证点。

表1 三峡库区土地覆被分类系统

Tab. 1 Land cover classification system for Three Gorges Reservoir Area

I级代码	I级分类	II级代码	II级分类	指标
1	森林	11	常绿阔叶林	自然或半自然植被, H= 3-30 m, C>20%, 不落叶, 阔叶
		12	落叶阔叶林	自然或半自然植被, H =3-30 m, C>20%, 落叶, 阔叶
		13	常绿针叶林	自然或半自然植被, H =3-30 m, C>20%, 不落叶, 针叶
		14	落叶针叶林	自然或半自然植被, H =3-30 m, C>20%, 落叶, 针叶
		15	针阔混交林	自然或半自然植被, H = 3-30 m, C>20%, 25%<F<75%
		16	稀疏林	自然或半自然植被, H =0.03-30 m, C = 4-20%
2	灌丛	21	常绿阔叶灌丛	自然或半自然植被, H =0.3-5 m, C>20%, 不落叶, 阔叶
		22	落叶阔叶灌丛	自然或半自然植被, H =0.3-5 m, C>20%, 落叶, 阔叶
		23	常绿针叶灌丛	自然或半自然植被, H = 0.3-5 m, C>20%, 不落叶, 针叶
		24	稀疏灌丛	自然或半自然植被, H =0.3-5 m, C = 4-20%
3	草地	31	草甸	自然或半自然植被, K>1.5, 土壤水饱和, H= 0.03-3 m, C>20%
		32	草丛	自然或半自然植被, K>1.5, 好=0.03-3 m, C>20%
		33	稀疏草地	自然或半自然植被, H =0.03-3 m, C = 4-20%
4	湿地	41	森林湿地	自然或半自然植被, T>2 或湿土, H= 3-30 m, C>20%
		42	灌丛湿地	自然或半自然植被, T>2 或湿土, H=0.3-5 m, C>20%
		43	草本湿地	自然或半自然植被, T>2 或湿土, H= 0.03-3 m, C>20%
		44	湖泊	自然水面, 静止
		45	水库/坑塘	人工水面, 静止
		46	河流	自然水面, 流动
5	耕地	47	运河/水渠	人工水面, 流动
		51	水田	人工植被, 土地扰动, 水生作物, 收割过程
		52	旱地	人工植被, 土地扰动, 水生作物, 收割过程
6	人工表面	61	居住地	人工硬表面, 居住建筑
		62	工业用地	人工硬表面或挖掘表面, 生产建筑或采矿场
		63	交通用地	人工硬表面, 线状特征
		64	采矿场	久工挖掘表面
7	其他用地	71	园地	人工植被, H=0.3-30 m, C>20%
		72	绿地	人工植被, 人工表面周围, H=0.3-30 m, C> 20%
		73	裸土	自然, 松散表面, 壤质
		74	裸岩	自然, 坚硬表面

注:C:覆盖度/郁闭度;H:植被高度(m);F:针叶树与阔叶树的比例;K:湿润指数;T:年积温(°C)。

1.3 土地覆被监测

1.3.1 分类系统构建

三峡库区的土地覆被分类系统（表 1）是在 ChinaCover 分类系统的基础上，根据库区生态环境评价需求和数据可比性等因素构建的，包括 7 个一级类和 30 个二级类。一级类参考了联合国政府间气候变化框架（IPCC）的土地覆被类型，二级类主要基于联合国粮农组织的 FAO/LCCS 工具进行划分^[16]。

1.3.2 土地覆被分类方法

2015 年三峡库区土地覆被遥感监测采用基于面向对象的向量相似性变化检测方法。该方法综合利用遥感数据光谱信息、纹理特征、拓扑关系和专题信息对影像进行多尺度分割，并基于光谱直接比较法对分割对象进行比较，辅以先验知识库，确定土地覆被发生变化的区域和类型^[17-19]。

将基准时期 2010 年和检测时期 2015 年的遥感影像与 2010 年土地覆被矢量数据套合，根据多尺度分割算法确定分割参数，其中尺度参数为 20，紧实度指数的权重系数为 0.5，形状异质性指数的权重系数为 0.1。对两期影像进行尺度分割获取影像斑块，利用特征提取算法获取每一斑块的特征，构成斑块的光谱特征向量^[20, 21]。计算斑块基准时期和检测时期的光谱特征向量相似度，根据不同区域特点确定的变化检测阈值来识别可能的变化区域和未变化区域。对于未变化区域，直接将 2010 年矢量数据中的类型信息赋予斑块；对于变化区域，根据 ChinaCover 分类规则集对“伪变化”斑块进行排除后，确定真实变化斑块的土地覆被类型。以上方法均通过 eCognitionDeveloper8.0 软件实现。

1.3.3 精度验证方法

分类精度的验证作为土地覆被分类中不可或缺的部分，是对影像对象正确识别程度和数据可信度的评估。本文采用误差混淆矩阵和 Kappa 分析方法对 2015 年三峡库区土地覆被分类结果进行精度验证。根据野外调查数据和分类结果计算误差混淆矩阵，获得土地覆被各类型的错分误差和漏分误差，统计得到整体的 Kappa 系数和分类精度，其中 Kappa 系数是 Kappa 分析生成的度量分类结果与验证数据之间一致性的指标，值的大小表明分类结果总体精度的高低^[22]。

1.4 变化分析方法

为了更加深入地定量分析不同土地覆被类型在三峡工程建设各阶段的变化幅度和转移途径，本文选择了土地覆被动态度和转移矩阵的方法。其中土地覆被动态度能够刻画区域尺度人类活动和自然条件对土地覆被类型的影响程度；转移矩阵能够直观的描述区域尺度土地覆被类型的变化方向、来源和构成，并对变化趋势起到一定的预测作用^[23]。

1.4.1 土地覆被动态度

土地覆被动态度通过计算各土地覆被类型的变化面积来反映土地覆被类型数量的变化速率和幅度，包括单一和综合土地覆被动态度^[24]。其中，单一土地覆被动态度是指研究区域内某一时间段某种土地覆被类型面积的变化情况。其计算公式如（1）所示：

$$M = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T_b - T_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中：M 表示研究区内某一时间段单一土地覆被类型的变化速率； U_a 、 U_b 分别为研究始末某一土地覆被类型的面积； T_a 、 T_b ；分别为数据的起止时间，当 T 的单位为年时，K 表示该土地覆被类型的年变化率。

综合土地覆被动态度是指研究区域内某一时间段土地覆被类型总的变化速率和幅度^[25]。其计算公式如(2)所示:

$$N = \left\{ \sum_{i=1}^n (\Delta S / S_i) \right\} \times \frac{1}{T_b - T_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S_i 表示监测开始时的土地覆被类型总面积; ΔS 表示 i 类土地覆被类型在监测始末期转为其它类型面积的总和; n 代表一级土地覆被类型数; T_b 、 T_a 分别代表研究始末时间, 当 T 的单位为年时, N 表示整个土地覆被类型的年变化速率。

1.4.2 转移矩阵

土地覆被转移矩阵反映了研究区某一时段始末各土地覆被类型的结构。其表达形式如公式(3)所示^[26]:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

S 表示面积; n 表示土地覆被类型数; S_{ij} 表示 i 类转换为 j 类的面积 ($i, j=1, 2, 3, \dots, n$)。

1.5 驱动力分析方法

土地覆被变化驱动力分析的常用方法包括定量和定性两大类^[27]。其中定量分析主要利用主成分、多元回归分析等建立环境、人为因子与土地覆被变化之间的响应关系; 定性分析是以社会经济统计、政策数据为基础, 针对土地覆被变化的宏观因素进行探讨^[28]。本研究基于三峡库区土地覆被类型的转换数据, 结合三峡库区 20 个区县的人口、粮食产量、生态环境保护政策等, 综合分析土地覆被变化的驱动力。

2 土地覆被空间格局与变化特征

2.1 2015 年土地覆被精度验证结果

利用野外调查和 Google Earth 获取的共计 1351 个样本点数据, 对 2015 年三峡库区土地覆被遥感监测结果进行精度验证。结果表明, 一级类总体精度为 92.97%, 二级类总体精度为 72.13%, Kappa 系数为 90.83。不同一级类的分类精度具有明显差别(表 2)。其中, 人工表面的分类精度最高, 为 96.02%; 耕地、湿地和森林次之, 分别为 94.60%、94.44%和 93.57%; 由于这 4 类对应的影像特征较为明显, 分类精度相对较高。草地、其他用地和灌丛的分类精度相对偏低, 分别为 82.76%、81.08%和 80.77%。由于森林与灌丛、灌丛与草地、草地与耕地都存在类型混淆问题, 其他用地中的园地和绿地也较难区分, 导致分类精度受到影响。

表 2 2015 年土地覆被分类精度

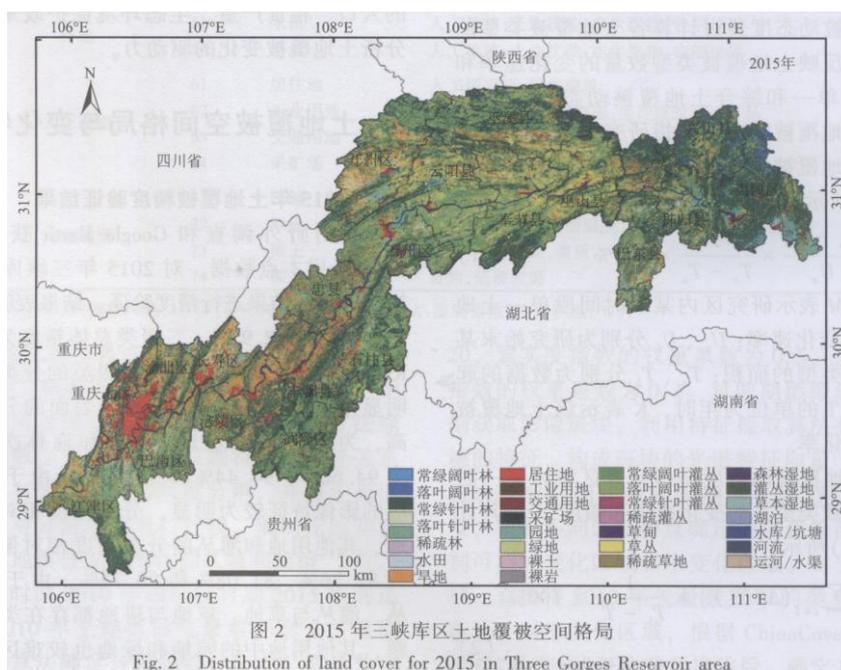
Tab. 2 Kappa matrix for validation of image interpreting precision of 2015

类型	森林	灌丛	草地	湿地	耕地	人工表面	其他用地	合计	用户精度 (多分误差) (%)
森林	262	2	1	1	7	5	2	280	93.57
灌丛	1	42	2	1	2	1	3	52	80.77
草地	2	0	48	0	6	1	1	58	82.76
湿地	3	0	0	68	1	0	0	72	94.44
耕地	8	1	2	0	438	10	4	463	94.60
人工表面	2	0	0	2	9	338	1	352	96.02
其他用地	2	1	2	1	4	4	60	74	81.08
合计	280	46	55	73	467	359	71	1351	
生产者精度 (漏分误差)	93.57%	91.30%	87.27%	93.15%	93.79%	94.15%	84.51%	总体精度	k = 90.83
								92.97%	

2.2 2015 年土地覆被空间格局

2015 年三峡库区土地覆被类型以森林和耕地为主，森林面积为 23949.59km²，占总面积的 41.45%；耕地 14200.58km²，占总面积的 24.58%。其次，灌丛面积为 10325.23km²，占总面积的 17.87%；草地面积为 4234.35km²，占总面积的 7.33%；人工表面 (1974.78km²)、其他用地 (1474km²) 和湿地 (297km²) 共占库区总面积的 8.78%。

受自然条件和人类活动的影响，三峡库区土地覆被的空间格局呈现明显的区域性分布特征 (图 2)。自然植被较丰富的地区主要在三峡库区的东部，处于山前宽谷地带的夷陵区 and 兴山县北部保存有大量原始阔叶林和针阔混交林，秭归新城和夷陵区南部分布着较大面积的湿地。云阳至秭归之间的山地地带，土地覆被类型以森林、耕地和灌丛为主，其中森林主要为常绿针叶林、阔叶林，耕地以旱地为主，灌丛以常绿/落叶阔叶灌丛为主。云阳县以西的城乡结合地带，人工表面面积较大，以城市为中心的产业特征明显，耕地、园地在城乡周围大面积分布。



2.3 25年土地覆被变化特征

2.3.1 面积变化分析

1990~2015年间,三峡库区人工表面、湿地、森林和其他用地的面积增长明显,分别增加了1549.49、651.01、522.34和425.25km²,其中人工表面的增幅最大(364.34%),其次为湿地(79.18%)和其他用地(35.68%),而森林的增幅只有2.23%。耕地、灌丛和草地的面积整体减少,分别减少了2843.98、260.21和44.94km²,减少幅度分别为16.69%、2.46%和1.05%(表3)。

表3 三峡库区不同年份土地覆被结构

Tab. 3 Land cover structure of Three Gorges Reservoir area in different years

土地覆被 类型	1990年		2000年		2005年		2010年		2015年	
	面积(km ²)	比例(%)								
森林	23 427.25	40.55	23 408.40	40.51	24 033.07	41.60	24 026.53	41.58	23 949.59	41.45
灌丛	10 585.43	18.32	10 579.89	18.31	10 379.80	17.96	10 384.85	17.97	10 325.23	17.87
草地	4 279.29	7.41	4 277.28	7.40	4 269.95	7.39	4 232.72	7.33	4 234.35	7.33
湿地	822.35	1.42	828.09	1.43	1 216.69	2.11	1 453.60	2.52	1 473.49	2.55
耕地	17 044.56	29.50	16 864.17	29.19	15 477.34	26.79	14 300.00	24.75	14 200.58	24.58
人工表面	425.29	0.74	576.79	1.00	1 008.28	1.75	1 720.52	2.98	1 974.78	3.42
其他用地	1 194.61	2.07	1 244.15	2.15	1 393.59	2.41	1 660.50	2.87	1 620.86	2.81

三峡库区土地覆被类型的变化具有显著的时间尺度特征。森林在1990~2000年,面积变化不大(-18.85km²),但在2000~2005的5a间显著增加了624.67km²,2005~2015后10a的面积变化又趋于平缓,有小幅减少(-83.48km²)。湿地面积在25a间大幅增加(+651.14km²),其中2000~2005和2005~2010年的两个时间段分别增加了388.60km²和236.91km²。该时段的湿地面积显著增加是由于大江截流、水库蓄水等工程的相继实施和竣工,与邵景安等[7]关于水域面积增加的研究结果相符。耕地是所有土地覆被类型中近25a面积变化最大的(-2843.98km²),其中1990~2000面积减少了180.39km²,2000~2005和2005~2010的两个时间段,耕地面积减少最为明显,分别达到1386.83km²和1177.34km²,后5a2010~2015有小幅减少(-99.42km²)。人工表面在近25a的4个时间段,面积变化均较大,处于持续扩张的状态,其中2000~2005和2005~2010的两个时间段面积增加最为剧烈,分别增加了431.48和712.25km²。

表4 三峡库区1990-2015年各土地覆被类型面积变化及动态度

Tab. 4 Area change of different land cover types in Three Gorges Reservoir area during 1990-2015

土地覆被 类型	1990~2000年		2000-2005年		2005~2010年		2010~2015年	
	变化面积(km ²)	动态度(%)						
森林	-18.85	-0.01	624.67	0.13	-6.54	0.00	-76.94	-0.02
灌丛	-5.54	-0.01	-200.09	-0.09	5.05	0.00	-59.63	-0.03
草地	-2.01	0.00	-7.33	-0.01	-37.23	-0.04	1.63	0.00
湿地	5.74	0.07	388.60	2.35	236.91	0.97	19.89	0.07
耕地	-180.39	-0.11	-1386.83	-0.41	-1177.34	-0.38	-99.42	-0.03
人工表面	151.51	3.56	431.48	3.74	712.25	3.53	254.25	0.74
其他用地	49.54	0.41	149.44	0.60	266.91	0.96	-39.64	-0.12
合计	0	0.07	0	0.28	0	0.21	0	0.05

2.3.2 动态度分析

从表4可以看出,1990~2000年,三峡库区综合土地覆被动态度为0.07%,土地覆被变化速度较为平缓。其中人工表面的

年动态绝对值最大，为 3.56%，湿地和其他用地的年动态绝对值居中，森林、灌丛和草地的年动态绝对值最小。

2000-2005 年和 2005~2010 年，土地覆被类型变化速率明显增加，综合土地覆被动态度分别为 0.28%和 0.21%。其中，前 5a 人工表面和湿地的年动态绝对值较大，分别为 3.74%和 2.35%，其次为其他用地、耕地和森林，而灌丛和草地的年动态绝对值仅为 0.09%和 0.01%。后 5a 人工表面的年动态绝对值为 3.53%，湿地、其他用地和耕地的年动态绝对值居中，森林、灌丛和草地年动态绝对值几乎为零。该结果与国洪磊等^[8]研究中得出的 2000~2013 年建设用地和水域动态度较大，草地、耕地和林地动态度较小的结果一致。

2010-2015 年，土地覆被变化速度又趋于平缓，综合动态度为 0.05%。人工表面的年动态绝对值最大(0.74%)，其次是森林、灌丛、湿地、耕地和其他用地，草地几乎为零。

从动态度分析可以看出，各个时段三峡库区的人工表面是最为活跃的土地覆被类型，其次是湿地和耕地，森林、灌丛、草地等自然植被较为稳定。

2.3.3 转移矩阵分析

表 5 三峡库区 1990~2015 年 主要土地覆被类型转换方式 (km²)

Tab. 5 Types of major land cover transformation in Three Gorges Reservoir area during 1990-2015

转换方式	1990- 2000 年	2000 ~ 2005 年	2005 - 2010 年	2010- 2015 年
森林转为人工表面		52.96	95.69	
灌丛转为人工表面		126.69	83.94	
耕地转为人工表面	110.94	264.35	509.79	207.16
森林转为湿地		125.36		
灌丛转为湿地		62.04		
耕地转为湿地		151.59	133.91	
森林转为灌丛			130.25	503.09
灌丛转为森林				512.83
森林转为草地				186.32
草地转为森林		58.74		166.51
耕地转为森林		727.38	232.75	502.42
耕地转为草地		79.69		136.28
耕地转为其他用地		173.02	296.24	

基于三峡库区 25a 的土地覆被转移矩阵结果，选取各研究阶段中面积变化大于 50km²的转换方式进行分析，如表 5 所示。前 10a 土地覆被各类型的转换面积相对较小，只有人工表面占用耕地较为突出(110.94km²)，与江晓波等^[6]的研究结果相同。后 15a 间的土地覆被类型转换十分活跃，主要形式包括森林、灌丛和耕地转为人工表面和湿地；森林和灌丛、草地之间相互转换；耕地转为森林、草地和其他用地，与邵景安^[7]等研究中发现的三峡库区 2000~2010 年间主要的土地覆被转换方式为耕地被建设用地占用，耕地转为林草地等研究结果相符。人工表面占用森林和灌丛主要集中在 2000-2005 年和 2005~2010 年，耕地在 4 个时期都有较大面积转换为人工表面。森林、灌丛和耕地转为湿地主要在 2000~2005 年，此外在 2005~2010 年还有 133.91km²的耕地转为湿地。森林和灌丛、草地之间的相互转换集中在 2010~2015 年，其中灌丛和草地转为森林的面积分别为 512.83km²和 166.51km²。耕地转为森林、草地和其他用地主要集中在 2000~2005 年，其中耕地从 2000~2015 年持续有较大面积转换为森林，耕地转换为其他用地的面积也较为明显，主要体现在园地扩张。

从基于转移矩阵获得的 25a 来三峡库区土地覆被类型变化的空间分布图可以看出（图 3），变化最明显的类型为人工表面，主要分布于重庆七区及长江干流周边，城市扩张、建设及交通用地占用特征显著。森林面积增加在秭归、巫山、巫溪、奉节、云阳等区县的山区最为明显。湿地增加大多分布在长江主要干流和支流，基本来源于水体淹没的草地和耕地。

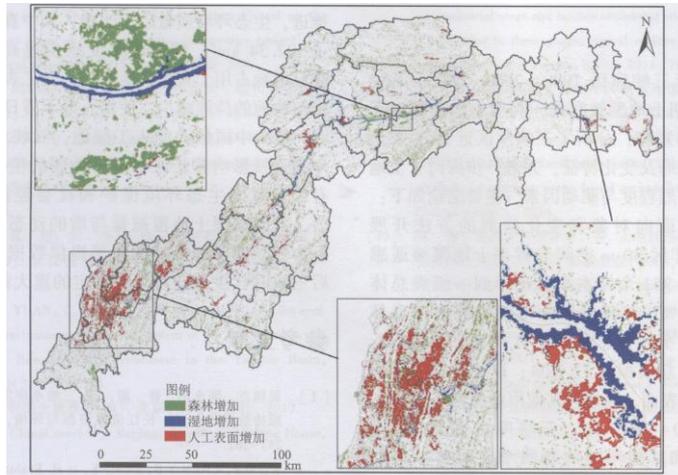


图 3 三峡库区 1990~2015 年土地覆被类型变化的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of land cover change in Three Gorges Reservoir area during 1990~2015

3 土地覆被变化驱动力分析

三峡工程 1994 年正式开工建设，2003 年开始蓄水，2009 年工程竣工，2011 年进入后三峡时代，土地覆被由于工程建设的阶段性呈现较强的时序变化特征^[7]。为探讨三峡库区土地覆被类型变化的驱动力，将贯穿三峡工程建设前后的 25a 划分为 3 个阶段：建设前期（1990~2000 年）、建设中期（2000~2010 年）和建设后期（2010~2015 年），并针对各时期土地覆被类型转换情况（图 4）及宏观影响因素进行分析。

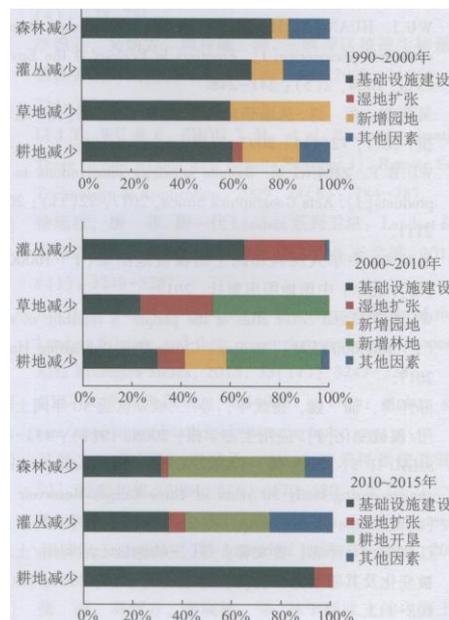


图 4 三峡库区土地覆被类型变化的驱动力分析
Fig. 4 Main proximate drivers for land cover change in Three Gorges Reservoir area during 1990~2015

建设前期的 10a 间, 三峡库区土地覆被变化的总面积为 240km²。其中, 基础设施建设占用了森林、灌丛、草地和耕地, 是这四类土地覆被类型减少面积的 60%以上。1996 年以来, 三峡库区一、二期移民工程先后启动, 移民数量达到 31.2 万人, 安置、迁建及配套设施用地是导致耕地和自然植被减少的主要原因, 与张磊等^[29] 研究中指出的移民安置造成耕地和林地面积大幅减少的结论一致。农业结构的调整将大量坡耕地和草地用于经济林果种植^[7], 促使园地面积大量扩张, 也对森林、灌丛、草地和耕地面积的减少起到直接的影响作用。同期的大江截流和试验性蓄水, 淹没了沿江部分耕地和自然植被, 导致湿地面积小幅增加。

建设中期的土地覆被面积变化最为剧烈 (3460km²)。由于三峡工程的正式蓄水导致湿地面积迅速增加, 对灌丛、草地和耕地减少的直接影响分别达到了 32%、29%和 n%。此外, 受天保工程和退耕还林等政策影响, 库区的生态环境有显著改善, 森林面积显著增加, 坡耕地面积持续减少^[30], 新增林地是草地 (48%) 和耕地 (38%) 面积减少的另一主要因素。在这 10a 间, 三峡库区移民工程所涉及的区域和人数较初期阶段更加广泛, 导致人工表面面积显著增加, 基础设施建设仍是耕地和自然植被减少的原因。

建设后期土地覆被面积变化有所减缓 (378km²)。自 2009 年来, 三期移民工程结束, 三峡水利工程竣工, 建筑用地、交通用地等人工表面面积增加速度逐渐平稳, 但随着经济发展及城市扩张, 基础设施建设成为导致耕地面积减少的最大因素 (93%), 与谭少军等^[31] 得出的城镇化和经济发展在三峡工程建成后对土地覆被变化的影响占主导因素的结论相同。另一方面, 耕地开垦占用了部分森林 (55%) 和灌丛 (34%), 在该时期三峡库区的粮食产量增加约 3 万 t, 耕地开垦是主要原因。此外, 2008 年“森林重庆”、“绿地行动”和 2014 年国务院印发的《全国对口支援三峡库区合作规划 (2014-2020 年)》相继实施, 为三峡库区在后三峡时代的生态环境改善和生态安全保障提供了有利支持。

4 结论

本文基于三峡库区 1990、2000、2005、2010 和 2015 年 5 期土地覆被数据, 利用土地覆被动态模型和转移矩阵, 分析了三峡库区近 25a 来土地覆被时空格局及变化特征, 并进一步探讨了土地覆被变化的剧烈程度与驱动因素, 主要结论如下:

(1) 采用面向对象和变化检测的方法开展 2015 年三峡库区 30m 空间分辨率土地覆被遥感监测, 基于 1351 个样本点验证得到一级类总体精度为 92.97%。三峡库区土地覆被类型以森林和耕地为主, 分别占总面积的 41.45%和 24.58%; 其次, 灌丛占总面积的 17.87%; 草地占总面积的 7.33%; 人工表面、湿地和其他用地共占 8.78%。

(2) 1990~2015 年, 三峡库区人工表面、湿地、森林和其他用地的面积增长明显, 其中人工表面的增幅最大 (364.34%), 其次为湿地 (79.18%); 耕地、灌丛和草地的面积整体减少, 耕地面积减少的幅度达到 16.69%; 从时间尺度来看, 森林在 2000-2005 这 5a 间面积增加最为显著; 2000-2010 年湿地增加和耕地减少最为突出; 人工表面在近 25a 的 4 个时间段, 面积变化均较大, 处于持续扩张的状态。从动态度分析可以看出, 区域综合土地覆被动态度呈先增加后稳定的变化趋势, 人工表面是最为活跃的土地覆被类型, 其次是湿地和耕地。

(3) 1990~2000 年三峡库区土地覆被各类型的转换面积相对较小, 只有人工表面占用耕地较为突出, 而后 15a 间的土地覆被类型转换十分活跃, 主要形式为森林、灌丛和耕地转为人工表面和湿地, 耕地转换为其他用地的面积也较为明显, 主要体现在园地扩张, 森林和灌丛、草地之间相互转换主要集中在 2010~2015 年。

(4) 三峡库区土地覆被变化的驱动因子十分复杂, 与气候和地形等自然要素相比, 人文与政策因素起到了主导作用。其中, 三峡工程建设、移民安置与迁建、经济发展与城镇化导致人工表面不断扩张; 大江截流和水库蓄水, 淹没了沿江部分耕地和自然植被, 导致湿地面积迅速增加; 农业结构调整将大量坡耕地和草地用于经济林果种植, 促使园地面积扩张; 在退耕还林等生态保护政策影响下, 库区森林面积显著增加, 坡耕地面积持续减少。

三峡库区近 25a 来,生态保护政策持续深入推进,生态环境质量趋于改善,其中森林面积增加了 522.34km²,植被覆盖度稳步提高^[32]。然而,建设用地占用了大量耕地面积,人工表面的急剧扩张与耕地的持续减少,使得人地矛盾日益突出。同时,作为中国最大的人工湿地,三峡水库的生态环境直接影响着长江中下游地区的生态安全。只有综合考虑生态环境保护和社会经济的协调发展,及时掌握土地覆被量与质的动态变化,不仅可为三峡库区的可持续发展提供数据支撑,也是后三峡时代生态建设策略制定的重大需求。

参考文献:

[1] 吴炳方,陈永柏,曾源,等.三峡水库发电和航运的碳减排效果评价[J].长江流域资源与环境,2011,20(3):257-261.

WU B F, CHEN Y B, ZENG Y, et al. Evaluation on effectiveness of carbon emission reduction of the power generation and shipping functions of the Three Gorges Reservoir [J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3): 257 - 261.

[2] WU J, HUANG J, HAN X, et al. The Three Gorges Dam: an ecological perspective [J] • Frontiers in Ecology & the Environment, 2004, 2(5) : 241-248.

[3] 吴炳方,张森.从遥感观测数据到数据产品[J].地理学报,2017,72(11):2093-2111.

WU B F, ZHANG M. Remote sensing: observations to data products[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2093-2111.

[4] 吴炳方.中华人民共和国土地覆被地图集(1:1000000)[M].北京:中国地图出版社,2017.

WU B F. Land cover atlas of the people ' s republic of china (1 : 1000000) [M]. Beijing: China Map Publishing House, 2017.

[5] 邵怀勇,仙巍,杨武年,等.三峡库区近 50 年间土地利用/覆被变化[J].应用生态学报,2008,19(2):453-458.

SHAO H Y, XIAN W, YANG W N, et al. Land use/cover change during lately 50 years in Three Gorges Reservoir Area [J] . Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2) : 453.

[6] 江晓波,马泽忠,曾文蓉,等.三峡地区土地利用/土地覆被变化及其驱动力分析[J].水土保持学报,2004,18(4):108-112.

JIANG X B, MA Z Z, ZENG W R, et al. Land-use/cover change process and driving force analysis in Three Gorges area [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(4) : 108- 112.

[7] 邵景安,张仕超,魏朝富.基于大型水利工程建设阶段的三峡库区土地利用变化遥感分析[J].地理研究,2013,32(12):2189-2203.

SHAO J, ZHANG S, WEI C. Remote sensing analysis of land use change in the Three Gorges Reservoir area, based on the construction phase of large-scale water conservancy project [J]. Geographical Research, 2013, 34(4) : 496-504.

-
- [8] 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, 23(2): 313-317, 359.
- GUO H, ZHOU Q, JIAO H, et al. Research on the characteristics of land use changes in Three Gorges Reservoir area[J]. Research of Soil & Water Conservation, 2016, 23 (2): 313 - 317, 359.
- [9] 吴炳方, 袁超, 朱亮. 三峡工程生态与环境监测系统的特点[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 339- 346.
- WU B F, YUAN, C, ZHU L, et al. Characteristics of the ecology and environment monitoring system of the three gorges project [J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3) , 339-346.
- [10] 吴炳方. 中国土地覆被[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WU B F. ChinaCover[M]. Beijing: Science Publishing House, 2017.
- [11] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 723-731.
- WU B F, YUAN Q Z, YAN C Z, et al. Land cover changes of china from 2000 to 2010[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4) : 723-731.
- [12] 李锦业, 吴炳方, 周月敏, 等. 三峡库区植被生物量遥感估算方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(6): 710, 784-787.
- LI J Y, WU B F, ZHOU Y M, et al. Biomass estimation in Three Gorges Region with Remote Sensing [J]. Remote Sensing Technology & Application, 2009, 24(6) : 784-787.
- [13] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: LandSat8 遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. 生态学报, 2013, 33 (11) : 3249-3257.
- XU H Q, TANG F. Analysis of new characteristics of the first Landsat 8 image and their eco-environmental significance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11) : 3249-3257.
- [14] GVG 农情采样系统. [20160801]. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.sysapk.gvg>.
- [15] 吴炳方, 田亦陈, 李强子. GVG 农情采样系统及其应用 [J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 570-580.
- WU B F, TIAN Y C, LI Q Z. GVG, a crop type proportion sampling instrument[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8 (6) : 570-580.
- [16] 张磊, 吴炳方, 李晓松, 等. 基于碳收支的中国土地覆被分类系统[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7158-7166.
- ZHANG L, WU B F, LI X S, et al. Classification system of China land cover for carbon budget [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24) : 7158-7166.
- [17] 朱亮, 吴炳方, 张磊. 三峡典型区农村居民点格局及人居环境适宜性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3) :

325-331.

ZHU L, WU B F, ZHANG L. Research on the landscape of rural residential areas and human settlement environment suitability evaluation in three gorges typical regions [J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3) : 325-331.

[18] 宋翔, 颜长珍. 基于知识库的像元光谱向量相似度土地覆盖变化检测方法[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7175-7180.

SONG X, YAN C Z. Land cover change detection using segment similarity of spectrum vector based on knowledge base [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014.

[19] 冯春, 郭建宁, 闵祥军, 等. 土地利用/土地覆盖遥感变化检测方法新进展[J]. 遥感信息, 2006, 58(3): 81-85.

FENG C, GUO J N, MIN X J, et al. New progress in land use/ land cover change detection by remote sensing [J] • Remote Sensing Information, 2006, 58(3) : 81-85.

[20] XIAN G, HOMER C, FRY J. Updating the 2001 national land cover database land cover classification to 2006 by using landsat imagery change detection methods[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6) : 1133-1147.

[21] BEN ZU C, HOFMANN P, WILLHAUCK G, et al. Multi-resolution ,object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004, 58(3-4) : 239-258.

[22] LANDIS J R, KOCH G G. The measurement of observer agreement for categorical data. [J]. Biometrics, 1977, 33 (1): 74-159.

[23] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例 [J]. 地理研究, 2013, 32(8) : 1497-1507.

QIAO W F, SHENG Y H, FANG B, et al. Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: A case study of Suzhou, Jiangsu Province [J]. Geographical Research, 2013, 32(8) : 1497-1507.

[24] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 83-89.

WANG X L, BAO Y H. Study on the methods of land use dynamic change research [J]. Progress in Geography, 1999, 18 (1): 81-87.

[25] 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, 69(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]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2) : 195-210.

[26] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5) : 643-650.

ZHU H Y, LI X B. Discussion on the index method of regional land use change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 643-650.

[27] 吴炳方, 陈永柏, 臧小平, 等. 三峡工程建设期生态环境演变驱动力机制浅析[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(3): 262-268.

WU B F, CHEN Y B, ZANG X P, et al. Preliminary analysis on the driving force mechanisms of ecological environmental changes in three gorges project construction term [J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20 (3), 262 - 268.

[28] 史利江, 王圣云, 姚晓军, 等. 1994~2006年上海市土地利用时空变化特征及驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(12): 1468-1479.

SHI L J, WANG S Y, YAO X J, et al. Spatial and temporal variation characteristics of land use and its driving force in shanghai city from 1994 to 2006[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(12): 1468-1479.

[29] 张磊, 董立新, 吴炳方, 等. 三峡水库建设前后库区10年土地覆盖变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 107-112.

ZHANG L, DONG L X, WU B F, et al. Land cover change before and after the construction of three gorges reservoir within 10 years[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin.*, 2007. 16(1): 107-112.

[30] 陶蕴之, 吕一河, 李凤全, 等. 西南天然林保护工程区生态成效评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(5): 716-723.

TAO Y Z, LU Y H, LI F Q, et al. Assessment of ecological effect of the natural forest protection project in Southwest China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(5): 716-723.

[31] 谭少军, 邵景安, 邓华, 等. 三峡库区土地利用驱动力评价及机制分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(11): 122-129.

TAN S J, SHAO J G, DENG H, et al. Assessment of land use driving force and mechanism in Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(11): 122-129.

[32] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 近15年中国西南地区植被覆盖度动态变化[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 128-136.

ZHENG Z J, ZENG Y, ZHAO Y J, et al. Analysis of land cover changes in southwestern China since the 1990s [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7858-7869.