

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

邵景安¹, 张仕超², 魏朝富²

(1. 重庆师范大学地理科学学院, 重庆 400047; 2. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716)

摘要: 使用5期TM/ETM数据, 借助动态度、综合指数和程度变化指标, 旨在对比理解不同建设阶段三峡库区土地利用变化的特征与轨迹。结果表明: ① 耕地与林草地间的转换、耕地和林地被建设占用、林草地互换和耕地、林地与草地被水体淹没是三峡工程整个建设20年来土地利用转换的主要方式; ② 不同建设阶段因驱动者出现的时序不同和作用程度的差异, 土地利用及其驱动者在总体格局框架下体现出显著的细部轨迹; ③ 整个工程建设的20年土地利用程度综合指数相对平稳, 处于中等以上水平, 而利用程度的变化总体呈降低趋势, 带有正“W”型的动态格局; ④ 主要土地利用转换方式在空间上的分布广度和集聚度具有较大差异, 主体性工程对主要土地利用转换方式的影响呈现强异质性。研究结论有助于丰富对水利工程胁迫下土地利用的理解, 为未来适应性土地利用调控政策的制定提供科学依据。

关键词: 土地利用变化; 遥感; 大型水利工程; 建设阶段; 三峡库区

DOI: 10.11821/dlyj201312002

1 引言

水利工程尤其是特大型水库的建设, 均是由淹没、安置、迁建、设施配套等主体性工程所组成, 但因工程性质的差异所诱导的土地利用变化特征会有很大不同。然而, 现有文献大多强调主体性工程对库区范围土地利用的整体性影响^[1-3], 未能将不同建设阶段的主体性工程的影响强弱辨识出来。毫无疑问, 主体性工程出现的时序、强度及对土地利用的影响程度均有很大差别, 如安置在水库建设的前期论证阶段仅属试点性质^[4], 且淹没在这一阶段根本就不会发生, 更不用说对土地利用产生何种影响; 再如, 大江截流之前, 安置和迁建仅仅涉及到截流和一期淹没线以下所可能影响到的范围, 安置和迁建的强度较二期和三期蓄水所涉及的要小得多^[5], 且对土地利用的影响也无法比拟。

因此, 理解大型水利工程所造成的土地利用影响必须考虑工程本身的阶段性, 而且要分阶段揭示单项主体工程对土地利用的影响, 只有这样, 才能制定出既符合水利工程建设阶段又有助于将工程对土地利用的影响降到最低的适应性对策。三峡工程作为世界上最大和最具影响的水电工程之一, 座落于生物多样性最丰富、生态环境较为脆弱、人口压力巨大、经济发展相对缓慢的丘陵山区^[6,7]。不同的是, 三峡工程的淹没土地、移民数量等均创

收稿日期: 2013-03-15; 修订日期: 2013-09-23

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(210181); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-003); 重庆市科委自然科学基金项目(2009BB7239)

作者简介: 邵景安(1976-), 男, 安徽亳州人, 博士, 研究员, 主要研究领域土地利用与生态过程。

E-mail: shao_ja2003@sohu.com

造了世界之最，且移民安置以就地后靠为主^[8]，使得工程对土地利用的高强度扰动不仅仅在淹没线以下的流域沿岸发生，伴随安置、迁建和设施配套将工程所诱发的扰动扩展到整个库区^[9,10]，以至于三峡工程建设对土地利用覆被及生态环境的影响为世人所瞩目。更为重要的是，工程整个建设因淹没土地之巨、移民规模之大等自身特点，而导致不同建设阶段所驱动的土地利用更具有特殊性。认识主体性工程的差异所导致的土地利用轨迹的独特性，为未来适应主体性工程驱动下土地使用政策的适时调整提供科学依据，阐明三峡工程不同建设阶段土地利用变化的影响，对了解大型工程的生态环境效应具有重要意义。

为此，基于多时相序列遥感影像数据信息及野外调查，以国务院三峡工程建设委员会（以下简称“三峡建委”）对整个三峡工程建设的阶段划分为依据，考虑多云、多雾对数据质量及可得性的影响，将工程建设细分为五个时点（4个阶段），研究工程不同建设阶段库区土地变化及类型转换问题，旨在对比理解不同建设阶段土地利用变化的特征与轨迹，丰富对水利工程胁迫下土地利用的理解和解释，尤其是为理解大型工程胁迫下土地利用变化与生态响应间的互馈积累数据基础。

2 研究区概况与研究方法

2.1 区域概况

三峡工程所涉及的范围已是一重要地理概念，覆盖175 m方案回水淹没和移民搬迁所涉及的渝鄂32区（县）市（图1），幅员达5.8万 km²。地貌上因处于三大构造交汇地带^[6]，切割褶皱频繁（相对高差2800 m），以山地（70.27%）和丘陵（25.16%）为主；水系除长江河道外，尚有嘉陵江、乌江、大宁河等流域在1000 km²以上的二级支流18条；气候属中亚热带湿润季风气候，年均温17℃-20℃，年均降水量1000-1200 mm，相对湿度60%-80%；土壤以紫色土（47.8%）、黄（棕）壤（16.3%）、水稻土和石灰（岩）土（34.1%）为主^[11]；植被有常绿针（阔）林、落叶针（阔）林、经济果林、农作物等。适宜

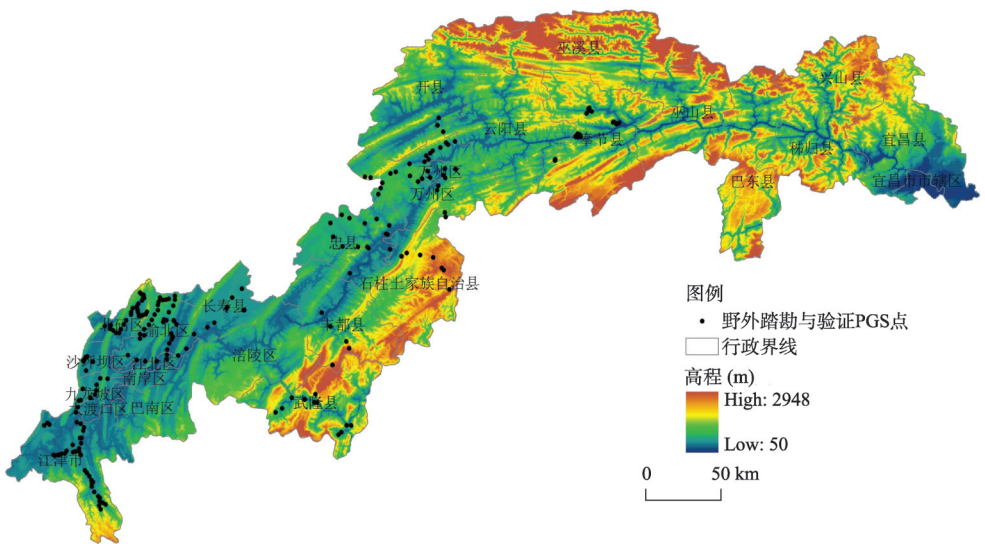


图1 三峡库区位置和地貌格局

Fig. 1 The site of Three Gorges Reservoir area and its relief patterns

的气候、起伏的地形和悬殊的高差,孕育出丰富的生物多样性和山地垂直分布格局^[12]。

目前而言,三峡工程建设的淹没、安置、迁建与设施配套给库区土地利用带来的扰动和影响将是长期的,尤其是受水位涨落的影响带有变化快、范围广、瞬间性强等特征。更为重要的是,由土地利用所诱导的生态环境问题日益凸现和严峻,例如生态环境脆弱,水土流失严重,人地矛盾尖锐,经济基础薄弱,已成为水库安全营运和库区经济发展必须面对的关键性“瓶颈”问题^[6]。

2.2 数据来源

据“三峡委”对三峡工程建设的阶段部署,考虑到建设节点驱动土地利用变化的滞后性,划分为:1993年前论证阶段(记1990年)、1993年至初期移民阶段(记1995年)、1997年大江截流至一期移民结束(记2000年)、2003年正式蓄水至二期移民结束(记2005年)和工程全面建成(记2010年)五个时期。1990-1995年记为工程论证和准备阶段,1995-2000年记为大江截流和一期移民阶段,2000-2005年记为正式蓄水和二期移民阶段,2005-2010年记为工程全面建成阶段。每期覆盖三峡库区的遥感影像(TM/ETM)10景(5期共45景),数据全部来源于国际科学数据服务平台(表1)。并且,在缺少1995年影像的区域使用由区(县)市国土局提供的1994-1996年土地利用现状图作为补充。

表1 三峡库区5期TM/ETM影像的具体信息

Tab. 1 Detail information of image data of TM/ETM used in this study

行	列	覆盖范围	1990时点		1995时点		2000时点		2005时点		2010时点	
			时间	时相	时间	时相	时间	时相	时间	时相	时间	时相
127	39	万州、丰都、开县、忠县、 长寿、武隆、涪陵、巴南	1988	6.4	1995	5.7	2000	7.31	2005	6.27	2009	8.22
128	40	江津、九龙坡、大渡口	1988	9.15	1995	9.19	2001	5.22	2004	9.11	2010	4.29
126	39	云阳、奉节、巫山、石柱	1989	7.18	1994-1996年土 地利用现状图		2000	5.5	2005	5.27	2008	6.28
126	38	云阳、奉节、巫山、巫溪	1990	5.18			1999	9.24	2005	5.12	2010	10.8
125	38	兴山、宜昌、巴东、秭归	1991	6.20			1999	9.1	2006	7.10	2008	6.5
128	38	北碚	1988	6.27	1995	9.19	2000	6.25	2005	9.20	2010	10.22
128	39	南岸、长寿、江北、 渝北、沙坪坝	1988	9.15	1993	5.24	2001	5.22	2007	9.20	2010	9.20
127	40	南川、武隆、涪陵、巴南	1988	6.4	1995	5.7	2000	7.31	2005	6.27	2011	9.21
125	39	宜昌、巴东、秭归	1990	5.30	1994-1996年土	地利用现状图	1999	12.22	2006	9.12	2009	8.24
127	38	开县	1988	6.4	2000		5.12	2004	1.24	2008	6.3	

数据基础如下(图2):重庆库区2005年分县土地利用数据和1:10万地形图来源于重庆市国土局;重庆库区部分区(县)2010年国土资源二调数据(1:1万)和底图SPOT-5影像(2.5 m分辨率)来源于区(县)国土局;重庆库区部分区(县)2012年林业资源二调数据(1:1万)和底图SPOT-5(1 m分辨率)来源于区(县)林业局;90 m分辨率DEM来源于中国西部数据中心;道路、水系和1:100万植被图来源于中科院地理资源所资源数据中心。库区矢量边界依据“三峡委”对所囊括重庆和湖北区、县(市)的行政边界自行制作。为便于解译标志库的建立,曾连续8次累计55天对库区展开野外踏勘,尤其是2010年7月24日-8月16日对重庆库区段和2010年12月5-6日分两组对湖北库区段沿预先设计好的典型线路予以集中踏勘,共记录390个GPS点,拍摄1950张景观照片。

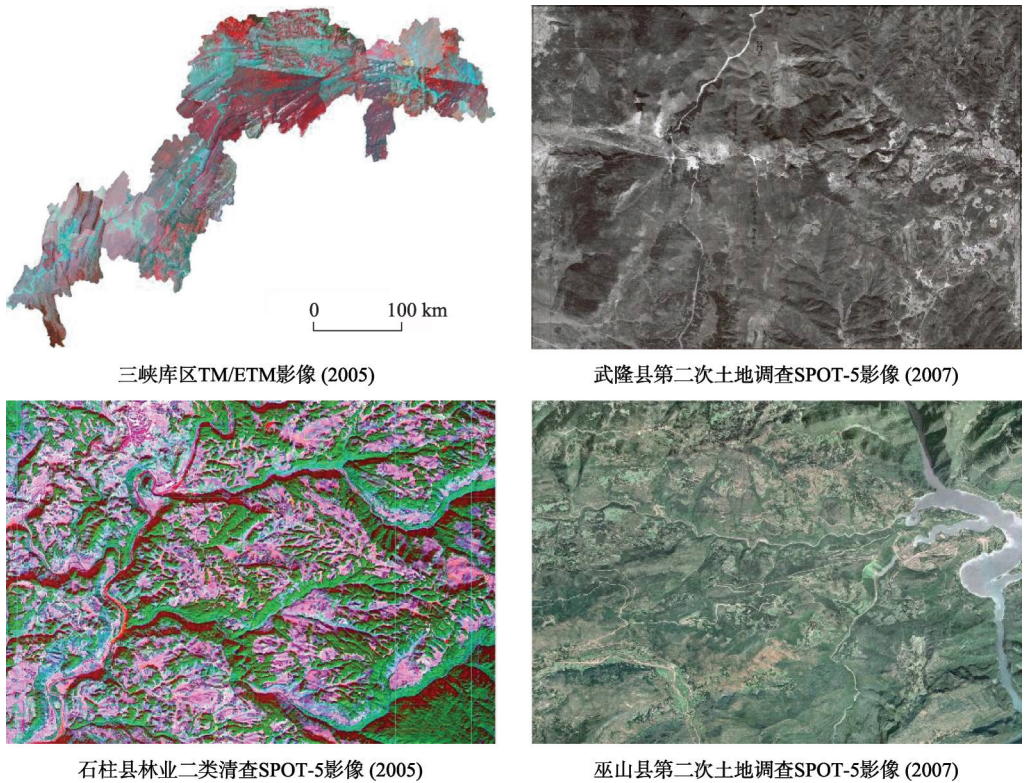


图2 TM/ETM和SPOT-5影像数据

Fig. 2 Image data of TM/ETM and SPOT-5 used by this study

2.3 数据处理

以1:10万地形图为参照,对五期全波段TM/ETM影像校准预处理,基于所要提取的不同地物和TM/ETM影像各波段对地物识别的特征指示,选择波段组合和多波段加减复合。以中国资源环境数据库中的土地利用分类方法为参考,考虑到库区特殊地形和水气环境使得部分土地利用方式难以从TM/ETM上识别,文中对其作部分调整将土地利用细分为:耕地、林地、草地、水域和建设用地五类。依据所要提取的典型地物,将野外踏勘的GPS坐标连同景观照片导入ARCGIS,参考照片所展示的地物与不同波段合成的色调,建立针对特定地物特征的解译标志库。将已收集到的矢量化土地利用、交通、水系、植被、国土和林业二调、DEM等校正到已预处理好的影像图上。

因已有2005年各区、县(市)矢量化土地利用图,解译以此为突破口,参考国土和林业二调成果,用非监督分类和目视判别将2005年土地利用图解译出来,再将相邻时段影像与2005年的进行对比找出动态图斑,即得到五期土地利用数据和四期动态图斑。处理的技术路线如下:在ERDAS9.2环境下对已处理好的TM/ETM影像施行非监督分类,依据影像分辨率的大小对已划分的图斑进行统计,对较小的做融合处理。再将栅格数据转成矢量后,在ARCVIEW 3.2中使用非编辑状态下的EDIT菜单,按照栅格影像的色调、文理、位置等,结合辅助解译数据进行人机交互判别解译。

解译结果的实地验证,共随意抽取图斑143个,其中:正确图斑116个,占81.12%;错误图斑22个,占15.38%;混合图斑5个,占3.50%(图3)。从抽中的图斑类型看,耕地

72个, 正确率84.72%; 林地47个, 正确率80.85%; 草地13个, 正确率69.23%; 建设用地11个, 正确率72.73%。分析发现, 错误或混合可能性较大的图斑主要涉及草地和建设用地, 草地的难辨之处在于它常和边际化的耕地和逐渐恢复为林地的灌丛相混淆, 而建设用地的模糊则基本上源于分布的独特性常常与裸岩或裸土相融合。但是, 就图斑面积看, 错误的斑块常常较小, 相对较大的草地和建设用地均未发生错误。因此, 解译结果能够达到精度要求, 可作为土地利用变化特征分析的基础数据源。

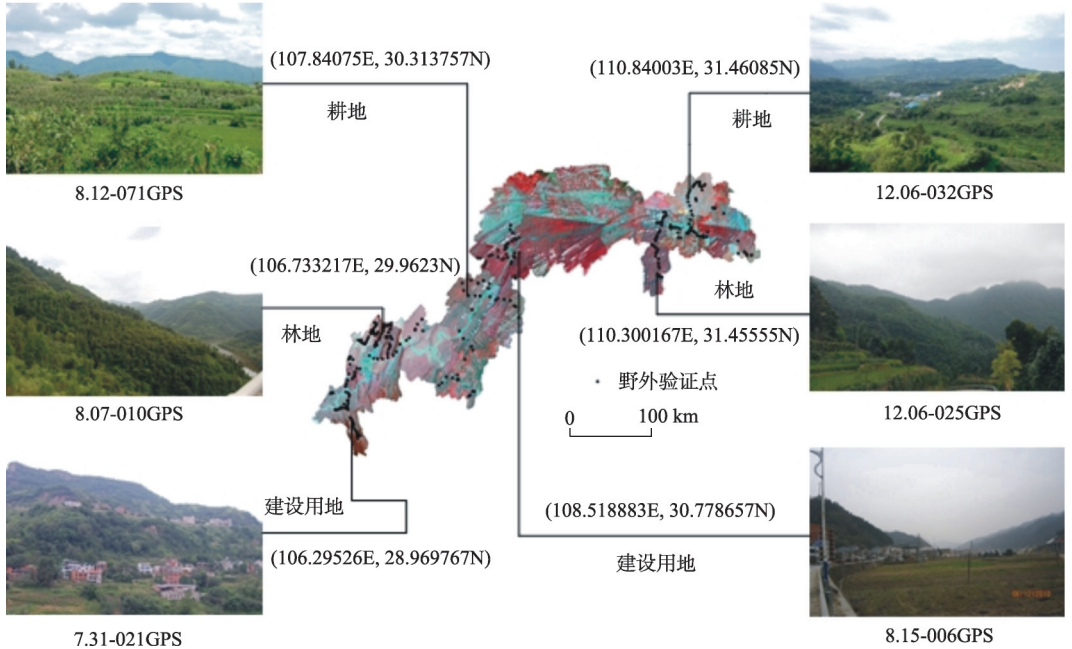


图3 解译结果验证GPS点分布和景观照片

Fig. 3 The spatial distribution of GPS coordination for interpretation result validation, with its landscape picture

2.4 数据分析

由表2可见, 对不同建设阶段解译结果的分析, 使用土地利用的面积变化, 如公式(1), 分析利用的总量变化和年均变率; 借助王秀兰等^[13]提出的利用动态度模型, 如公式(2), 分析土地利用在两时点上的变化幅度和速度; 使用刘纪远等^[14,15]提出的利用程度综合指数, 分析土地利用的综合变化程度, 如公式(3)和公式(4); 对相邻两时点土地利用给予空间叠加, 得出利用变化转移矩阵, 具体分析土地利用的变化在空间上到底发生在哪些区域或哪几种主要的土地利用类型之间。

3 结果分析

3.1 主要类型与空间分布

三峡工程在整个建设的20年间库区土地利用方式均以林地、耕地和草地为主。由表3可看出, 工程建设20年间, 林地、耕地和草地之和分解库区总面积的96.85%-98.03%, 尤其是1993年前的论证阶段工程扰动尚未开始, 土地利用方式也未受工程的胁迫而发生转换, 三者总占比更是高达98.03%。到2010年的工程全面建成和水库安全运营时, 因淹

表 2 土地利用转换的数据分析方法

Tab. 2 Data analysis methods of land use change

公式	变量	备注
$S_1 = U_{ib} - U_{ia}$	S_1 为两时点土地利用的面积变化量, U_{ia} 、 U_{ib} 分别为前后两时点第 i 类土地利用类型的面积, $i=1,2,3,4,5,6$	(1)
$S_2 = S_1/T$	S_2 为两时点土地利用的年均变率, T 为两时点间隔长度, 单位为年	
$k = \frac{U_{ib} - U_{ia}}{U_{ia}} \times \frac{1}{T} \times 100\%$	k 为两时点土地利用的单一利用动态度, 其他变量含义与公式(1)相同	(2)
$L_i = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i$	L_i 为土地利用程度综合指数, $L_i \in [100,400]$; A_i 为第 i 级程度分级指数; C_i 为第 i 级利用程度面积百分比, $i=1,2,3,4$; n 为利用分级数	(3)
$\Delta L_{b-a} = L_b - L_a = 100 \times (\sum_{i=1}^n A_i \times C_{ib} - \sum_{i=1}^n A_i \times C_{ia})$	ΔL_{b-a} 为程度变化量, R 为程度变化率, L_a 、 L_b 为 a 和 b 时点利用综合指数, C_{ia} 、 C_{ib} 为 a 和 b 时点第 i 级利用程度面积比, $i=1,2,3,4$	(4)
$R = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times C_{ib} - \sum_{i=1}^n A_i \times C_{ia}}{\sum_{i=1}^n A_i \times C_{ia}}$		

表 3 三峡库区 1990-2010 年间的主要土地利用分类 (hm²、%)

Tab. 3 Major land use types in Three Gorges Reservoir area during 1990-2010

时间	耕地		林地		草地		水域		建设用地	
	面积	比率	面积	比率	面积	比率	面积	比率	面积	比率
1990	2215231.00	38.09	2738057.00	47.08	748048.00	12.86	7934.00	1.36	34444.00	0.59
1995	2171064.00	37.33	2762383.00	47.50	76295.00	13.12	79279.00	1.36	39453.00	0.68
2000	2215807.00	38.10	2728403.00	46.91	739107.00	12.71	97284.00	1.67	52131.00	0.90
2005	2185700.00	37.58	2752706.00	47.33	726955.00	12.50	88400.00	1.52	61674.00	1.06
2010	2147128.38	36.92	2762098.58	47.49	723787.17	12.44	100047.45	1.72	82389.05	1.42

没、安置、迁建、设施配套等主体性工程的胁迫, 大量耕地和林草地转换为水域或建设用地, 三者占比略有下降, 为 96.85%。而在工程建设的中间时点, 尽管主体性工程出现的时序、胁迫的程度会有较大差异, 作用到利用方式的变化上会有所不同, 但体现在三者总占比上的差异却并不显著。即便是特大型水库工程, 也仅在局地对土地利用的方式产生破坏、改造和重塑, 而不可能从根本上改变土地覆被的本底格局。

不同工程建设阶段, 土地利用方式在空间上分布具有很大趋同性。由图 4 可看出, 林地主要分布在万州以下至湖北段和万州以上至库尾涪陵、武隆的喀斯特山地及江津南部区, 但湖北段秦巴山地(巴东、兴山、秭归和宜昌)的林地在空间上的展布连续性大, 而重庆段大巴山区(巫山、巫溪和奉节)、武隆和涪陵的喀斯特山地、江津南部的林地常因耕地的镶嵌被切断; 耕地集中分布于万州以上至库尾平行岭谷区, 且坡度多在 15°以下, 尤以重庆“一小时经济圈”巴南、江北、长寿、江津等地最为典型。坡度在 15°-25°的主要分布在以低山丘陵为主的库中(万州、忠县和丰都), 坡度在 25°以上的以开县和巫山较多; 草地大多位于重庆段的涪陵、武隆、石柱、万州、云阳、奉节等地; 水域集中于长江主河道和主要支流流域; 建设用地(尤其城镇)因受地形影响重点分布在库尾重庆“一小时经济圈”、库首宜昌和库中万州及呈串珠状展布于沿江的区(县)级以上城镇。

3.2 总体变化与趋势特征

整个工程建设的 20 年间三峡库区的耕地、草地大幅度减少, 而水域、林地和建设用地

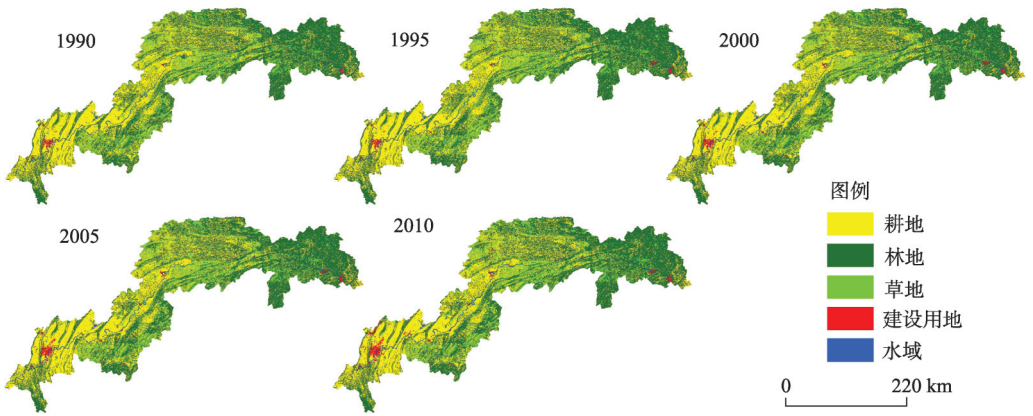


图4 三峡库区1990-2010年主要土地利用类型的空间分布

Fig. 4 The spatial distributions of major land use types in Three Gorges Reservoir area during 1990-2009

地增加势头强劲。由表4可看出, 1990-2010的20年间, 变化最为显著的是水域, 增加为1990年的11.61倍; 其次是建设用地增加47945.05 hm^2 , 是1990年的1.39倍。然而, 因耕地和林草地本身基数较大, 且三者间又具有很强的互补性, 致使三者的增减量占1990年的比重均在3.50%以下, 特别是林地的增幅仅为0.88%。但是, 不同阶段的累积变化呈单一增加或减少对应多重增加或减少的格局, 即利用方式的转换具有累积效应的总体格局: 耕地、草地“一增加, 三减少”, 林地、水域“一减少, 三增加”, 建设用地“三增加”。具体而言, 耕地的增加出现在1995-2000年间, 草地的增加发生于1990-1995年间, 水域的减少表现在2000-2005年间, 上述利用方式在剩余三阶段与该阶段均呈现相反变化趋势。建设用地在整个工程建设的20年间均是增加的, 林地的变化与耕地正好相反。

表4 三峡库区1990-2010年主要土地利用类型的变化量 (hm^2 、 hm^2/a)

Tab. 4 The change quantity of major land use types in Three Gorges Reservoir area during 1990-2010

主要地类	1990-1995		1995-2000		2000-2005		2005-2010	
	总变量	年变量	总变量	年变量	总变量	年变量	总变量	年变量
耕地	-44167.00	-8833.40	44743.00	8948.60	-30107.00	-6021.40	-38572.00	-7714.40
林地	24326.00	4865.20	-33980.00	-6796.00	24303.00	4860.60	9393.00	1878.60
草地	14902.00	2980.40	-23843.00	-4768.60	-12152.00	-2430.40	-3168.00	-633.60
水域	5009.00	1001.80	18005.00	3601.00	-8884.00	-1776.80	11647.00	2329.40
建设用地	5009.00	1001.80	12678.00	2535.60	9543.00	1908.60	20715.00	4143.00

不同建设阶段, 因驱动者出现的时序不同和作用程度的差异, 土地利用展现出较大的阶段性特征。由表4可看出, 1990-1995年间除耕地(减少8833.40 hm^2/a)以外的主要利用方式均呈增加趋势, 1995-2000年间耕地、水域和建设用地大幅度增加(尤以耕地达8948.60 hm^2/a), 林草地快速减少, 分别为6796.00 hm^2/a 和4768.60 hm^2/a 。2000-2005年间耕地、草地和水域不同程度地降低(特别耕地达6021.40 hm^2/a), 林地和建设用地增加显著, 依次为4860.60 hm^2/a 和1908.60 hm^2/a 。2005-2010年间耕地继续大幅度减少(7714.32 hm^2/a), 建设用地增加量4143.01 hm^2 , 远高出前三期对应数值。

伴随工程建设阶段的深入, 耕地和林草地减少与增加涉及斑块都呈减少趋势, 水域和

建设用地的增加则相反。由图 5a 可看出, 1990-2010 的 20 年间, 耕地的减少和增加由 (6076 块和 4304 块) 降到 (1609 块和 20 块), 林地由 (3472 块和 5231 块) 减少到 (419 块和 379 块), 而建设用地和水域的增加分别由 (649 块和 212 块) 提升到 (1009 块和 526 块)。但是, 从图 5b 可发现, 耕地和建设用地的块均减少和增加规模均呈上升趋势, 分别由 (11.34 $\text{hm}^2/\text{块}$ 和 2.31 $\text{hm}^2/\text{块}$) 和 (5.83 $\text{hm}^2/\text{块}$ 和 9.47 $\text{hm}^2/\text{块}$) 增加到 (24.29 $\text{hm}^2/\text{块}$ 和 17.48 $\text{hm}^2/\text{块}$) 和 (25.18 $\text{hm}^2/\text{块}$ 和 21.24 $\text{hm}^2/\text{块}$), 林地和水域的块均减少规模相对平稳而增加则呈上升趋势。工程扰动的强度和广度随建设推进逐渐剧烈, 且大多以以往的转换为 中心向外延伸或因干扰强度的增大波及面更广。

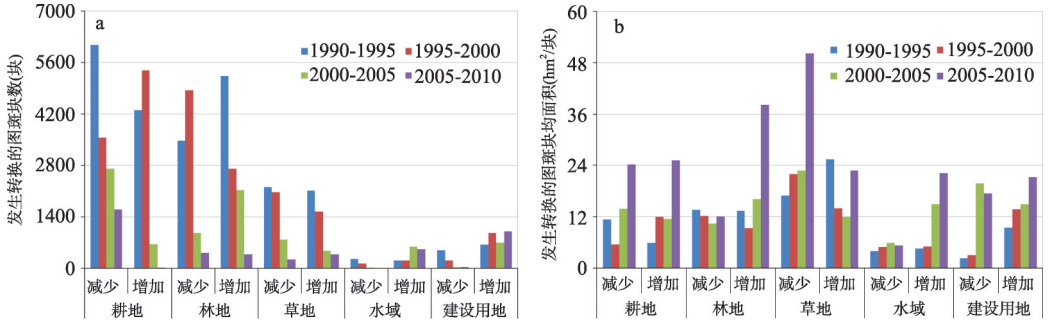


图 5 三峡库区 1990-2010 年主要土地利用方式发生转换的斑块数 (a) 和块均面积 (b)

Fig. 5 Patch number and area per patch of major land use transformations in Three Gorges Reservoir area during 1990-2010

3.3 变化速度与程度变化

三峡库区不同建设阶段土地利用动态表现出与土地利用变化量和年变化量相同的趋势。由表 5 可看出, 在呈增加趋势的三大类中, 建设用地增速最大, 达 9.28%; 其次是水域, 增速为 1.74%; 而林地增速最小, 仅为 0.06%。在减少的两大类中, 耕地和草地的减速基本相当。在绝对值上, 建设用地最大, 林地最小, 而耕地和草地则处于中间位置, 说明整个工程建设的 20 年建设用地的变速最快, 变幅最强, 林地变速最小, 基本处于稳定状态, 但仍扮演景观基底的控制地位。

不同建设阶段建设用地增幅均是最大的, 尤其 2005-2010 年 (6.72%) 与 1995-2000 年 (6.43%) 两个阶段。其次是水域增速在 1.20% 以上, 特别是 1995-2000 年间达 4.54%。林地增速相对较小且平缓, 说明林地的基底作用很难因一定程度的增减从相对变化上显现出来。耕地减速呈正“U”型格局, 最低发生于 2000-2005 年间, 为 0.27%, 最高处于 1990-1995 年间, 为 0.40%。草地减速呈降低趋势, 最高是在 1995-2000 年间, 为 0.63%。工程建设胁迫下的人为干扰对库区土地利用的影响逐渐显现, 成为改造土地利用格局的主

表 5 三峡库区 1990-2010 年主要土地利用变化动态度 (%)

Tab. 5 The dynamic degree of major land use change in Three Gorges Reservoir area during 1990-2010

主要地类	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	1990-2010
耕地	-0.40	0.41	-0.27	-0.35	-0.20
林地	0.11	-0.25	0.18	0.07	0.06
草地	0.40	-0.63	-0.33	-0.09	-0.22
水域	1.26	4.54	-1.83	2.64	1.74
建设用地	2.91	6.43	3.66	6.72	9.28

要动力。

三峡库区整个工程建设的20年间土地利用程度综合指数相对平稳,处于中等以上利用水平,而利用程度的变化总体呈降低趋势,带有正“W”型的动态格局。由表6可看出,不同阶段土地利用程度综合指数均在240以上,处于中等(上限400)并略高于全国平均水平(231.92^[6])。但相对平稳的波动又表明利用的集聚程度较高,主要方式的优势度明显,即在强大工程的扰动下,代表基质性利用方式的林地、耕地等仅在局地发生利用斑块的破碎或转换。整个工程建设的20年间土地利用程度的变化为-0.0789,表明在工程作用下的库区人为活动对土地利用的影响正在发生频繁的调整。

1990-1995年间,因农业结构调整促使耕地转为经济林果导致分级指数为3的耕地大大降低,指数为2的林草地和水域不同程度的增加,而尽管指数为4的建设用地也呈增加趋势,但增幅要小于耕地的减少和林草地与水体的增加,从而导致利用程度的变化为负(-0.604)。1995-2000年间,耕地大增,水域和建设用地均增1倍,但林草地减少量远低于耕地、水域和建设用地增加和,利用程度的变化最大,为1.8071,变率也最大(0.0075)。2000-2005年间,耕地大幅降低,草地进一步减少,水域因影像替代减少明显,尽管林地迅速恢复、建设用地小幅增加,但仍未平衡耕地和草地的减少势头,利用程度的变化急剧降低,为-1.3052,变化率为-0.0054。2005-2010年间,尽管水域大幅增加、建设用地进一步扩展,利用程度的变化也转变为增加趋势,但基本接近于0。

表6 三峡库区1990-2010年土地利用综合指数与程度变化

Tab. 6 The integrated index and degree changes of the land use in Three Gorges Reservoir area during 1990-2010

年份阶段	1990	1990-1995	1995	1995-2000	2000	2000-2005	2005	2005-2010	2010	1990-2010
L_t	241.01		240.41		242.22		240.91		240.93	
ΔL_{b-a}		-0.604		1.8071		-1.3052		0.0232		-0.0789
R		-0.0025		0.0075		-0.0054		0.0001		-0.0003

3.4 增加来源与减少去向

耕地与林草地间的转换、耕地和林地的建设占用、林草地间的互换和耕地、林地与草地的水体淹没是整个工程建设的20年间库区土地利用转换的主要方式。1990-2010年的20年间,转换集中于耕地、林地、草地、建设用地和水域五大类,且累积发生规模在30000 hm²以上的有耕地退为林地、草地开发为林地、林地转换为耕地、林地转换为草地、耕地被建设占用、草地开垦为耕地和耕地退为草地等7种方式(表1)。林地增加最大,达142983.20 hm²,主要来源于生态退耕(76404.11 hm²)和草地被开发为林地(66579.10 hm²);其次是耕地增加96235.30 hm²,分别为林草地开垦为耕地所分解(54324.99 hm²和40168.30 hm²);再次是草地增加89437.66 hm²,主要体现为林地转换为草地和耕地退为草地;第四是建设用地增加50395.18 hm²,耕地的建设占用占总增加的81.04%。

伴随建设阶段的深入,主要转换方式缺失呈增加趋势,说明转换方式逐渐集中于少数几种类型之间。由表7可看出,1990-1995年间主要方式涉及14种(覆盖155346.46 hm²),到1995-2000年间降为11种(覆盖124076.53 hm²),再降到2005-2010年间的10种(覆盖55944.48 hm²)。而且,相同阶段不同转换方式和不同阶段同类转换方式,在规模上均呈较大差异性,且累积发生转换的面积逐渐降低。1990-1995年间主要以耕地、林地和草地间的转换为主,尤以耕地用为林地(43774.75 hm²)和林地转换为草地(31813.50

表7 三峡库区1990-2010年主要土地利用转换方式(面积>400 hm²)Tab. 7 The types of major land use transformation in Three Gorges Reservoir area during 1990-2010
(Their area was above 400 hm²)

转换方式	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	转换方式	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010
耕地林地	43774.75	3899.67	22012.83	6716.86	草地耕地	11375.76	23753.74	5038.80	
耕地草地	21923.83	4158.55	4227.54	8430.96	草地林地	25699.20	21027.86	12158.98	7693.06
耕地水域	406.69	588.29	2593.99	5406.45	草地水域			452.21	2804.82
耕地建设用地	2772.77	10754.86	8791.39	18520.38	草地建设用地	508.07	443.85		1162.97
林地耕地	12323.08	39642.35	2359.56		水域耕地	486.09	413.12		
林地草地	31813.50	17379.22	1504.06		水域建设用地	416.15			
林地水域	553.73		4847.55	2809.00	建设用地耕地	842.8			
林地建设用地	2450.04	2015.02	1245.23	1730.60	建设用地水域			730.69	669.38

hm²)最为显著;1995-2000年间耕地、林草地和建设用地间的转换最为明显,特别是林草地被开发为耕地,分别达39642.35 hm²和23753.74 hm²;而且,比较1990-1995年间,耕地被建设用地占用达10754.86 hm²,较前一阶段增加7982.09 hm²。

2000-2005年间,耕地转为林地、草地用作林地、耕地被建设占用是主要的转换方式,但耕地向林地的转换较第一阶段少21761.92 hm²,较第二阶段多18113.16 hm²,耕地被建设占用较第二阶段少1963.47 hm²,较第一阶段多6018.62 hm²,草地被开垦为耕地和林地均较前两阶段少。相比前两阶段,水域获得大幅增加,主要由林地(4847.55 hm²)和耕地(2593.99 hm²)的工程淹没所分解;2005-2010年间,以耕地的建设占用、耕地退为林草地和草地被用作林地为主,其中耕地转换为建设用地是四阶段中最多的,达18520.38 hm²,而且耕地退为林地(6716.86 hm²)和草地用作为林地(7693.06 hm²)也是四个阶段中最多的,耕地被退为草地较第二、三阶段多,较第一阶段少。另外,因水库建成或高水位运行,使得耕地转换为水域是四阶段中最为突出的,达5406.45 hm²。

3.5 转换空间特征与表现

整个工程建设的20年间,主要转换方式在空间上的分布广度和集聚度具有较大差异。由图6可看出,耕地在20年间的增加,主要分布在库首秦巴山地的兴山中南部、秭归北部、宜昌东西边缘和巴东中北部,库中大巴山褶皱区的云阳中西部与万州东北部交界处,库尾平行岭谷的丰都中北部、忠县南部和涪陵西部。林地的增加以库尾平行岭谷、武陵山地和喀斯特山地较为集中,库中万州至库首宜昌段分布次之,但库中和库首的分布较均匀。草地的增加在库尾的平行岭谷、武陵山地和喀斯特山地与库中的万州一巫山段,在分布广度和集中程度上与林地的增加分布具有很好一致性。建设占用耕地,主要集中于重庆主城区,在万州和宜昌形成次中心,沿长江水道向下游延伸。水域的扩张基本浓缩于库首坝址的秭归至库尾重庆主城区的长江主干及支流沿岸。

1990-1995年间,耕地转换为林地主要发生于库首秦巴山地的兴山和巴东南部,库尾平行岭谷的丰都北部和喀斯特山地的武隆南部。林地转换为草地以库尾武陵山地的石柱中南部和丰都东南部为主,库中云阳中部沿江段也较为集中。草地用作林地以库中秦巴山地的巫山中西部、巫溪西北部和奉节东部与大巴山褶皱区的云阳中部和开县中西部,库尾喀斯特山地的丰都东南部和武隆南部。耕地转换为草地集中分布于库尾平行岭谷的丰都北部和忠县东南一石柱东北接合部,库中大巴山褶皱区的云阳中部沿江段。林地用为耕地主要出现在库尾平行岭谷的北碚和渝北。

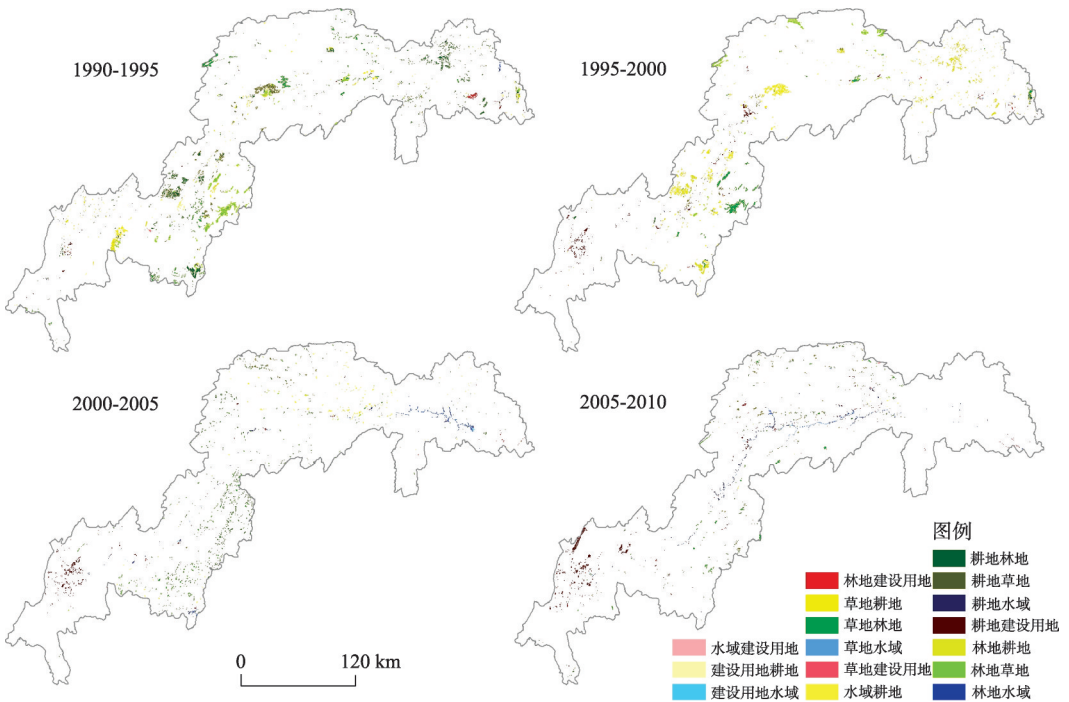


图6 三峡库区1990-2010年主要土地利用转换方式的空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of major land use transformation in Three Gorges Reservoir Area during 1990-2000 (Their area was above 400 hm²)

1995-2000年间, 林地开垦为耕地以库首秦巴山地的兴山中南部、秭归和巴东北部、宜昌西部为主。草地开发为耕地大多发生在库中大巴山褶皱区的云阳中西部沿江段, 库尾平行岭谷的忠县南部沿江段和丰都中西部。草地转换为林地以库尾喀斯特山地的石柱中南部最为集中。耕地的建设占用呈以重庆主城和万州为中心和重庆主城—万州江段的沿江城镇为主轴的格局。

2000-2005年间, 耕地退为林地主要分布在武陵山地的石柱境内和喀斯特山地的武隆南部与丰都东南部。草地开发为林地大多出现在武陵山地的石柱中北部、喀斯特山地的武隆中北部和涪陵南部。耕地被建设占用集中发生在重庆主城区范围。草地被开垦为耕地以库中大巴山褶皱区的巫山中北部、巫溪东南部和奉节中北部为主, 云阳北部和开县中北部仅有零星出现。耕地的水体淹没基本上集中于坝址所在地的秭归境内且沿长江主干和主要支流沿岸向外延伸。

2005-2010年间, 耕地的建设占用形成“一极核, 三中心, 多节点”的总体格局, 库尾的重庆主城属被城镇扩张占用的重心, 受主城辐射的长寿、库中的万州—云阳和库尾的宜昌是三大被占用的中心, 沿江县城和场镇则属串珠状城镇占用的节点。耕地退为草地大部分出现在库中大巴山褶皱区的云阳、巫山、巫溪和开县境内。耕地退为林草地有类似的分布格局, 不同的是, 耕地退为林地在库尾的重庆主城也有部分发生。耕地和林地的水体淹没仍发生于长江主干及支流沿岸, 但前者较前一阶段朝上游沿江移动到忠县—巫山段, 后者则沿江朝上游移动到万州—巫山段。

3.6 主要动因与驱动轨迹

结合整个工程建设的20年间, 认为诱发库区主要利用方式发生转换的动因有(图

7): 水库建设本身不可或缺的主体性工程, 如淹没、安置、迁建、设施配套等; 确保主体性工程顺利进行或建成后安全营运的外施人为活动, 如退耕还林、土地整治、城镇化、农业结构转型等。

安置、迁建和设施配套贯穿于工程建设的20年土地利用的始终, 而淹没对土地利用的影响仅在大江截流后至建成不同水位调蓄时才开始作用; 退耕还林仅在政策时效范围内(2002-2006年)才扮演重要驱动者作用, 而土地整治、城镇化、农业结构调整等在整个建设的20年以及建成一段时间内均会对土地利用产生较大影响。但不同建设阶段因主体工程及配套活动出现的时序差异、扰动强度的演进、响应结果的滞后等, 驱动主要利用方式发生转换的动因也具有很强的异质性。

1990-1995年间, 耕地减少主要是城镇化的快速跃进, 使得大量透水的绿色耕地转换为不透水的灰色城镇用地; 再者就是旨在提高农民收入的农业结构调整, 将部分耕地用于经济林果、牧草或水产养殖用途, 移民、迁建、设施配套等对耕地减少的驱动力度相对较小。

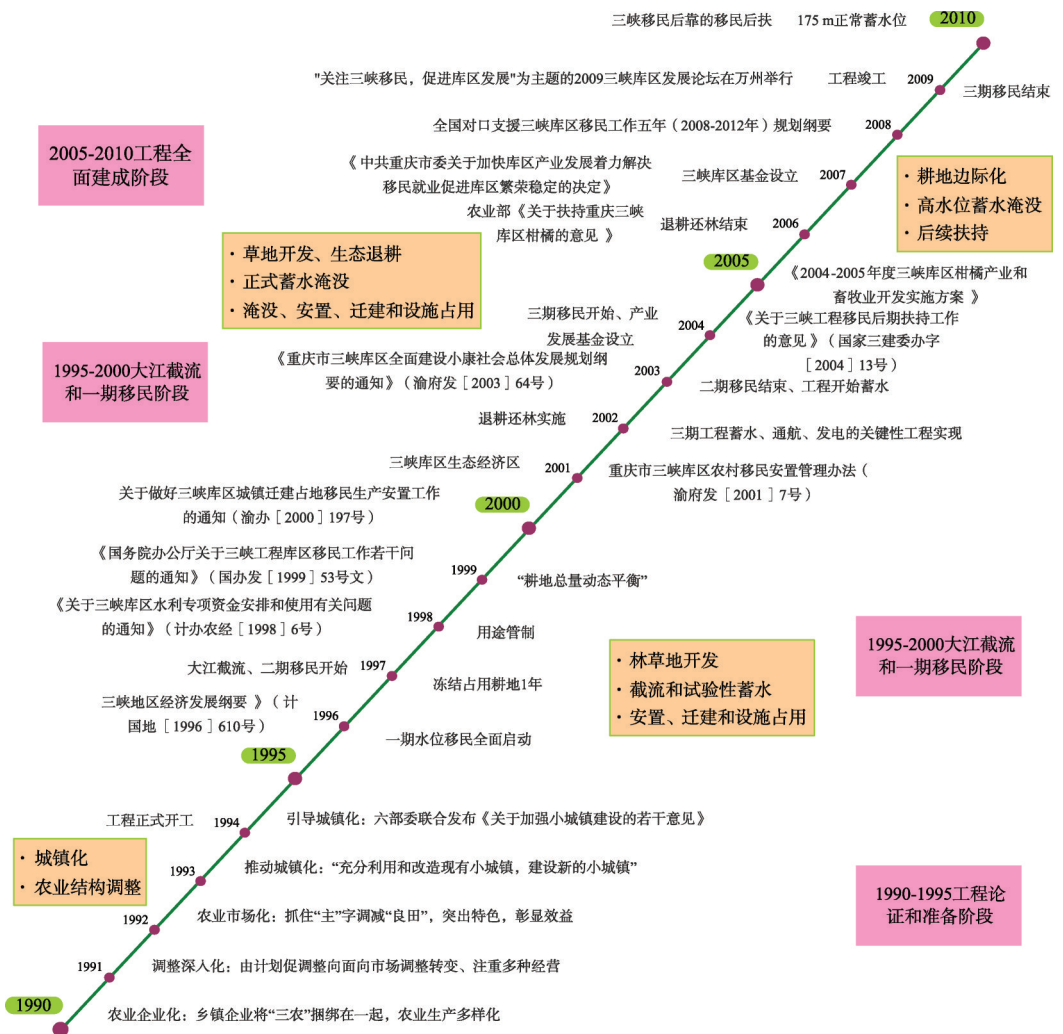


图7 三峡库区1990-2010年土地利用变化主要驱动因素

Fig. 7 Major driving factors of land use change in Three Gorges Reservoir area during during 1990-2010

1995-2000年间,耕地地源来自于国家严格保护耕地政策的实施,如1997年冻结建设占用耕地一年、1998年实施用途管制、1999年提出“总量动态平衡”等都促使大量林草地中的灌丛和荒草地被开垦为耕地。水域增加主要源于大江截流和试验性蓄水导致的耕地、林草地和城镇村被淹没,而建设用地增加归功于安置、迁建和设施配套用地增加使得耕地、林草地等被占用。

2000-2005年间,耕地减少离不开淹没、安置、迁建和设施配套对耕地的占用和生态退耕,但因后备资源的匮乏使得土地整治带来的耕地增加不足以弥补占用和退耕导致的减少,草地减少主要受为弥补耕地减少开展的土地开发所驱动。林地增加基本来源于陡坡耕地的退耕,建设用地增加更多地归功于城镇化和经济转型胁迫下的安置、迁建、设施配套等的扩张。

2005-2010年间,耕地减少除与2000-2005时期一样外,因大量农业人口从农业“析出”,耕地尤其是机械难于替代的陡坡耕地大量被边缘化,在影像上表征为林草地的色调和纹理。草地略微减少主要是在前一阶段能开发补充耕地的均已被开发,剩余的大多存在不同程度的限制因素。林地增加在2006年前退耕还林的贡献较大,而之后则重点由森林工程、农业结构调整所驱动,水域增加更是由建成后水库的高水位蓄水所造成,建设用地扩张的原因与前一阶段一致。

比较发现,初期移民阶段,因要为开工后的移民、迁建、设施配套等提供经验和样板,安置和迁建试点促使大量耕地和林草地转换为建设用地,当然,这一时点为弥补耕地减少,部分林草地又被开垦为耕地。而在1997年大江成功截流至2000年二期移民中期,除淹没以外的主体性工程开展得如火如荼,安置、迁建、设施配套等主体性工程占用耕地和林草地较初期移民阶段更高。二期移民结束的实验性蓄水至三期蓄水准备阶段,主体性工程均已涉及且扰动的力度均较之前任何阶段都大,当然,不仅部分耕地和林草地被淹没,且也会被安置、迁建、实施配套等所占用。不同阶段土地利用驱动轨迹符合水库建设主体性工程出现的次序及对土地的扰动和需求规律。

主要土地利用方式在不同阶段的转换动因差异较大。1990-2000年间城镇化迅猛推进驱使耕地减少甚至较安置和迁建试点占用的还多,而2000年以后的放缓归功于土地整治一定程度上消减耕地减少的势头。但2000-2005年耕地减少的势头弱于2005-2010年,主要源于2005-2010年间耕地淹没较2000-2005年间大,且因后备资源匮乏土地整治补充的耕地逐年降低。1990-1995年间为转变增长方式的农业结构调整,促使相当于2000-2010年间退耕还林减去林地被淹所增加数量的耕地用作经济林果,且伴随退耕政策的终止,2005-2010年间林地增加仅相当于2000-2005年间的38.65%。建设用地的强增加趋势,可由从安置和迁建试点经一期、二期乃至三期移民,安置和迁建占用规模不断提升与设施的配套和完善对土地的需求更是随工程的建设日趋攀升来解释。

4 结论与讨论

大型水利工程建设阶段性及其主体工程出现的先后和作用强度,使得影响或辐射区的土地利用也展现出较强的时序变化特征,而且,不同建设阶段为弥补或降低工程对影响或辐射区扰动的人为活动又将对影响或辐射区的土地利用产生更为深刻的影响,从而形成不仅工程胁迫是影响或辐射区土地利用的诱导性力量,此基础上的外施调控措施也是影响或辐射区土地利用变化的潜在动力。对比大型水利工程不同建设阶段土地利用变化的特征

与轨迹, 阐明驱动主要土地利用变化的关键动因, 可以帮助理解和解释水利工程胁迫下土地利用所产生的影响, 为区域土地利用政策的调整提供依据。

通过对三峡工程整个建设20年的研究发现: ① 耕地减少主要出现在由退耕驱动的2000-2005年间与由安置、迁建、设施配套等主体性工程逐渐增强的1995-2010年间。林地增加来源于1990-1995年间的农业结构调整与2000-2005年间的退耕还林。草地减少离不开从1990-2000年间为增加安置容量和补充因退耕和占用减少的开发。水域增加以1995-2010年间沿主干和主要支流流域的耕地、建设用地等的淹没所致。② 主体性工程对主要土地利用转换方式的影响呈现强异质性。淹没在除1990-1995年外的其他阶段均对长江沿岸及主要支流流域的土地利用产生影响, 且随阶段的深入淹没程度和范围大大提升。安置和迁建随工程建设的推进呈先增强后减弱趋势, 在土地利用方式转换上体现为耕地与建设用地的消长和耕地面积的增加。设施配套则自1995年至工程全面建成后的相当时期内, 均会诱发建设用地的增加和农用地面积的减少, 尤其是地势低缓区的耕地。

本研究的最大不足是未能得出主要驱动因素的具体贡献程度的大小, 而仅仅给出不同建设阶段主体工程及为降低工程扰动的人为适应性调控措施对土地利用的驱动过程, 即研究未实现由遥感影像获得的空间格局、过程数据与由统计、调查得到动因信息的有效结合。当然, 因本研究旨在分析不同建设阶段三峡库区土地利用变化的主要格局与过程, 而关于这些变化所可能导致的后效应则涉及较少。而且, 三峡库区的多云、多雾的自然条件导致遥感影像的时相跨度大, 即同一时间阶段的影像基本遍布整个年度, 这对解译结果的准确性可能会有一定程度的影响。为此, 未来将进一步增加三峡库区主要地段的踏勘密度, 增强土地利用的遥感解译精度, 更为重要的是要补充收集不同阶段主要驱动因素的统计数据、参与式农户访谈信息等, 查明它们对土地利用变化的贡献程度。

参考文献(References)

- [1] Jackson S, Sleight A. Resettlement for China's Three Gorges Dam: Socio-economic impact and institutional tensions. *Communist and Post-Communist Studies*, 2000, 33(2): 223-241.
- [2] Zhang Jixian, Liu Zhengjun, Sun Xiaoxia. Changing landscape in the Three Gorges Reservoir area of Yangtze River from 1977 to 2005: Land use/land cover, vegetation cover changes estimated using multi-source satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(6): 403-412.
- [3] Zhang Quanfa, Lou Zhiping. The environmental changes and mitigation actions in the Three Gorges Reservoir region, China. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(8): 1132-1138.
- [4] 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. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 453-458.
- [5] 曾凡海, 张勇, 张晟, 等. 基于RS与GIS的三峡库区万州区近22年土地利用变化. *三峡生态与环境*, 2011, 33(3): 43-46.
- [6] 毛汉英, 高群, 冯仁国. 三峡库区生态环境约束下的支柱产业选择. *地理学报*, 2002, 57(5): 553-560.
- [7] 刘彦随, 冯德显. 三峡库区土地持续利用潜力与途径模式. *地理研究*, 2001, 20(2): 139-145.
- [8] Morgan T K K B, Sardelic D N, Waretini A F. The Three Gorges Project: How sustainable? *Journal of Hydrology*, 2012, 460/461(16): 1-12.
- [9] 张仕超, 尚慧, 余端, 等. 三峡库区优质柑橘产业带建设土地整理模式. *地理研究*, 2011, 30(11): 2099-2108.
- [10] 邵景安, 魏朝富, 谢德体. 家庭承包制下土地流转的农户解释: 对重庆不同经济类型区七个村的调查分析. *地理研究*, 2007, 26(2): 275-286.
- [11] 许其功, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 三峡库区土地利用与景观格局变化研究. *环境科学与技术*, 2007, 30(12): 83-86.
- [12] 肖文发, 雷静品. 三峡库区森林植被恢复与可持续经营研究. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(2): 138-144.
- [13] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨. *地理科学进展*, 1998, 10(5): 51-54.
- [14] 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. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(12): 1031-1040.

[15] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.

[16] 于兴修, 高华中. 城市及其边缘地带土地利用/覆被变化研究: 以临沂市为例. 地域研究与开发, 2003, 22(2): 47-51.

Remote sensing analysis of land use change in the Three Gorges Reservoir area, based on the construction phase of large-scale water conservancy project

SHAO Jing'an¹, ZHANG Shichao², WEI Chaofu²

(1. College of Geographical Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: There is a the strong correlation of major land use transformation patterns with the timing and strength of subjectivity projects and their hysteresis effects when large-scale water conservancy projects (especially extra-large reservoir) constructed. The construction phase of Three Gorges Project in this paper was divided into five time points, considering the impacts of strong cloudy and foggy on image quality and its availability. The objectives of this paper was to comparatively understand the characteristics and trajectories of land use change the different project construction stages in the Three Gorges Reservoir Area through single land use dynamic degree, land use composite index, land use degree change, using five-term TM/ETM image data. The results showed: (1) The transformation of cultivation land and forest-grass land, building land occupied cultivation land and forest land, interchange between forest and grassland, and cultivation land, forest land and grassland water flooded by water body were the main ways of land use conversion throughout the construction phase of the Three Gorges Reservoir Area. (2) Land use change and its drivers presented significant detailed trajectory with the stage under the framework of the overall pattern, due to the drivers occurring at different times, and the differences of their role strengthen degree during various construction stages. (3) The composite index of land use degree was relatively stable, and it was more than in the middle level throughout the construction phase. However, the change in land use composite index took overall on decreasing tendency with a "W"-type dynamic pattern. (4) The distribution breadth and concentration degree of major land use conversion patterns possessed larger differences at spatial scale. Moreover, the effects of subjectivity projects on major land use conversion patterns showed strong heterogeneity with the deepening of project construction phase. The results of this paper will contribute to rich the people's understanding to land use under the stress of water conservancy, and provide a scientific basis and reliable support to arrange adaptive land use regulation policy in the future.

Key words: land use change; remote sensing; large water conservancy projects; construction phase; Three Gorges Reservoir area