

丹江口库区生态系统服务价值与 人类活动时空关联分析

王庭辉¹ 王喜¹ 秦耀辰^{1, 2} 高攀¹ 王海楠¹¹

(1. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004;

2. 河南大学 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475004)

【摘要】: 良好的生态系统和协调的人地关系对丹江口库区水质的保证以及南水北调中线的顺利运行具有重要意义。以中国南水北调中线工程水源地丹江口库区为研究对象, 以 1991、2000、2010、2018 年四期遥感影像为数据源, 利用基于样本的面向对象分类方法解译获得四期土地利用数据, 基于土地利用数据构建生态系统服务价值评估模型、生态系统服务价值流向损益模型、人类活动强度指数评估模型, 并利用双变量空间自相关方法分析生态系统服务价值和人类活动强度的时空关联特征。研究结果表明: 1991~2018 年间, 丹江口库区建设用地、水库河流和林地总体呈增长趋势, 耕地、灌草地、内陆坑塘、湿地和未利用地总体呈减少趋势。生态系统服务价值呈现波动变化趋势, 总体增加了 43.93×10^8 元, 价值量的亏损主要来自于林地转化为耕地和建设用地, 灌草地转化为耕地, 价值量的增益主要来自于耕地转化为林地和水库河流。人类活动以低影响强度为主, 中高影响强度在库区东部成片式分布, 高影响强度区域呈零星块状分布且一直呈增加趋势。丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度存在显著的负相关关系, 且呈现先增强后减弱的变化趋势。

【关键词】: 土地利用变化 双变量空间自相关 丹江口库区

【中图分类号】: X24 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)02-0330-12

生态系统服务为人类提供着生存和发展所必须的各项服务, 包括调节服务、供给服务、支持服务、文化服务^[1,2], 其价值量的评估可作为生态环境保护、生态功能区划、环境经济核算和生态补偿的重要依据和基础^[3]。过去人类对生态系统服务知之甚少, 随着城镇化进程的不断加快, 农业、工业和日常生活中污染物的大量排放等无序的人类活动对生态系统造成了极大的影响^[4,5], 据千年生态系统评估(MA)结果显示: 人类活动是造成全球 60% 生态系统变化的主要原因^[6]。

随着生态环境问题的显现, 生态系统服务价值受到越来越多学者的关注, 许多学者对不同区域的生态系统服务价值进行了评估, 研究方法主要包括两种, 一种是基于单位面积的当量因子法^[9~13, 17~23], 另一种是基于单位服务功能的功能价值法^[7, 8, 14~16], 当量因子法较功能价值法更为直观易用, 因此受到了广泛使用^[3]。在研究区域上, 大多数研究聚焦于生态敏感性较强或生态环境较为脆弱的地区, 在研究内容上, 多数只涉及研究区域内生态系统服务价值的估算与时空演变, 结合人类活动因素分析研究其关联性及时空演变规律的较少。

作者简介: 王庭辉(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地资源与区域规划、土地生态. E-mail: wthwz163@163.com
王喜, E-mail: wangxi@henu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671536; 41501588); 河南省国际科技合作计划项目(152102410024)

丹江口库区作为中国南水北调中线工程的水源地，在生态环境保护方面具有重要的战略意义。近年来大量的人类活动导致了土地利用的改变，其引起的生态系统服务价值的变化不容忽视，以丹江口库区为例进行生态系统服务价值与人类活动的时空关联规律的探究，在理论与实践方面都能为相关研究提供一定的借鉴意义。本文基于 1991、2000、2010、2018 年 4 期土地利用数据，综合利用遥感和 GIS 技术分析丹江口库区生态系统服务价值以及人类活动强度的时空分异规律，并运用 GeoDa 空间分析工具探究两者之间的时空关联性，试图揭示丹江口库区人类活动对生态系统服务价值空间异质性的影响机制，以为生态环境保护和人地关系的协调发展提供参考借鉴。

1 研究区概况

丹江口库区位于 $110^{\circ}10'E \sim 111^{\circ}52'E$ 、 $32^{\circ}14'N \sim 33^{\circ}22'N$ ，地处豫鄂两省交界处，主要位于河南南阳市淅川县、湖北省丹江口市以及十堰市的张湾区、茅箭区和郧阳区，土地面积 10966.07km^2 。丹江口水库位于长江中游支流汉江的中上游，汉江为其主要水源，库区内水系发达、支流众多，均由南向北汇入丹江口水库。大部分河流水流湍急，坡度变化较为明显，部分小河流随季节变化明显，春冬季容易枯水断流。该区域位于北亚热带向暖温带过渡地带，四季分明，是典型的季风型大陆性半湿润气候，年均气温 $14.4^{\circ}\text{C} \sim 15.7^{\circ}\text{C}$ ，年均降雨量 $800 \sim 1000\text{mm}$ 。丹江口库区地势复杂，呈西北高东南低的地势，西、北部被秦岭、大巴山所环绕，东部由北向南主要以丘陵和平原为主，地势较为平缓，是主要的耕作区域。

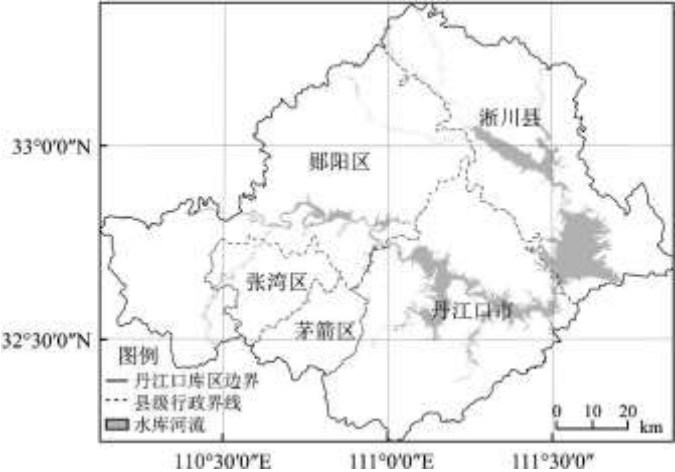


图 1 丹江口库区行政区划

2 数据来源与处理

研究所需遥感数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)，其中 1991、2000、2010 年遥感数据源为 LandsatTM 影像，2018 年为 Landsat8OLI_TIRS 影像，所选时相均为 5~9 月植被生长较为茂盛的时期，所选影像云量均小于 5%。经过辐射定标、大气校正、几何校正以及裁剪拼接等预处理得到四期遥感影像。

基于《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017)并结合实际，将丹江口库区土地利用类型分为八大类：耕地、灌草地、建设用地、林地、内陆坑塘、湿地、水库河流、未利用地。在 ENVI5.1 软件的支持下，采用基于样本的面向对象分类方法对四期影像进行分类，并结合 GoogleEarth 历史影像、野外调查以及局部高分影像对解译的成果进行人工修正，得到丹江口库区 1991、2000、2010、2018 年土地利用分类数据。经检验，Kappa 系数超过 0.76，土地利用分类总体精度均高于 82%，满足后续工作要求。

计算单位面积生态系统服务价值所用粮食产量、CPI 指数以及粮食价格数据均来源于中国经济社会大数据研究平台

(<http://data.cnki.net/>)和国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn/>)。

3 研究方法

3.1 生态系统服务价值评估模型

研究利用生态系统服务价值 (ESV) 计算公式^[2]来计算丹江口库区生态系统服务价值。其中, 耕地、林地、灌草地、湿地、未利用地的价值当量分别对应谢高地分类系统^[3]中的农田、森林、灌草丛、湿地和裸地, 水库河流和内陆坑塘对应其分类系统中的水域, 建设用地参考已有研究^[17]与荒漠相对应。

$$ESV = \sum (VC_k \times A_k) \tag{1}$$

式中: VC_k 为第 k 类土地单位面积生态系统服务价值 (元 $\cdot$ hm^2); A_k 为第 k 类土地的面积 (hm^2)。

3.2 单位面积生态系统服务价值计算与修正

当量因子法的基础是基于专家知识的当量因子表, 谢高地等^[3]对之前的当量因子表进行修正, 得到应用性更好的单位面积生态系统服务价值的基础当量表。基于谢高地的研究确定丹江口库区生态系统服务基础当量表 (表 1), 通过基础当量表进行单位面积各项生态系统服务价值的计算。

基于粮食产量比值的修正, 可以反映出区域与全国平均状态总体生态服务价值的差异^[19, 20]。故先利用粮食产量比值确定修正系数 α ; 全国生态系统服务基础当量主要借助粮食单产市场价格的 1/7 确定^[21], 同时针对研究区进行地域与年期的修正^[22, 23], 得到丹江口库区生态系统服务基础当量; 各生态系统服务单位面积价值基于基础当量通过基础当量表进行确定, 并利用修正系数进行修正。修正公式如公式 2 所示, 修正结果如表 2 所示。

需要具体说明的是, 目前对于粮食单产市场价格的确定大多采用某一年份或几个年份的均值, 忽视了物价上涨因素带来的影响, 会影响生态系统服务价值演变规律分析的准确性和可比性。故在此通过粮食类居民消费价格指数 (CPI) 把各年份粮食单产市场价格修正到同一时期物价水平下。在此基础上, 采用各个时期丹江口库区与全国的粮食单产比值逐期确定修正系数。

$$\begin{aligned} VC_k &= VC_k' \times \alpha \times \lambda \\ VC_k' &= \frac{1}{7} \times P_i \times Q_i \\ \alpha &= \frac{Q}{Q_i} \quad \lambda = \frac{a_n}{a_0} \end{aligned} \tag{2}$$

式中: P_i 为全国平均粮食单产市场价格 (元/kg); Q_i 为全国粮食单位面积产量 (kg/ hm^2); Q 为研究区粮食单位面积产量; a_n 为现期 CPI; a_0 为定基 CPI。

表 1 丹江口库区生态系统服务价值基础当量表

地类	供给服务	调节服务	支持服务	文化服务
----	------	------	------	------

	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
耕地	0.85	0.40	0.02	0.67	0.36	0.10	0.27	1.03	0.12	0.13	0.06
林地	0.31	0.71	0.37	2.35	7.03	1.99	3.51	2.86	0.22	2.60	1.14
灌草地	0.38	0.56	0.31	1.97	5.21	1.72	3.82	2.40	0.18	2.18	0.96
内陆坑塘	0.80	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89
湖泊河流	0.80	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89
湿地	0.51	0.50	2.59	1.90	3.60	3.60	24.23	2.31	0.18	7.87	4.73
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.10	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01
建设用地	0.01	0.03	0.02	0.11	0.10	0.31	0.21	0.13	0.01	0.12	0.05

表 2 丹江口库区生态系统服务基础当量修正表

年期	全国粮食价格 (元/kg)	单位粮食产量 (kg/hm ²)	单位产值 (元/hm ²)	基础当量 (元/hm ²)	全国粮食 CPI (1991 年=100)	全国基础当量 (元/hm ²)	地区修正 系数	丹江口库区 基础当量 (元/hm ²)
1991	0.55	3876	2131.80	304.54	100	1873.82	0.81	1517.79
2000	0.97	4261	4133.17	590.45	264.13	1375.46	0.80	1100.37
2010	2.08	5006	10412.48	1487.50	466.19	1963.24	0.96	1884.71
2018	2.25	5621	12647.25	1806.75	615.29	1806.75	0.81	1463.47

3.3 生态系统服务价值流向损益模型

为反映生态系统服务价值在空间上的转移流动情况，揭示生态系统服务价值内部损益^[23]。本文基于土地利用转移矩阵建立生态系统服务价值流向损益矩阵，计算方法如下：

$$P_{ij} = (VC_i - VC_j) \times A_{ij}$$
 (3)

式中：P_{ij}为*由 i 地类转为 j 地类时生态系统服务价值的损益*；VC_i为*i 地类生态系统服务价值系数*；VC_j为*j 地类生态系统服务价值系数*；A_{ij}为*i 地类转为 j 地类的面积*。

3.4 人类活动强度指数评估模型

人类活动导致了土地利用的变化，改变了生态系统服务的原始特性，而不同的土地利用类型代表着不同的人类开发利用强度^[11,23,24]。因此，本文采用人类活动强度指数(HAI)来描述生态系统服务价值受人类活动影响的强度，具体公式为：

$$HAI = \sum_{i=1}^N A_i P_i / TA \tag{4}$$

式中：HAI 为人类活动强度指数；N 为土地利用类型数量； A_i 为第 i 种土地利用类型面积； P_i 为第 i 种地类所反映的人类活动强度系数；TA 为土地利用总面积。参考已有研究^[11, 23, 24]，本文取 Lohani 清单法、Leopold 矩阵法和 Delphi 法 3 种方法的平均值作为系数(表 3)。

表 3 不同土地利用类型人类活动强度系数

计算方法	土地利用类型							
	耕地	灌草地	建设用地	林地	内陆坑塘	湿地	水库河流	未利用地
Lohani	0.57	0.09	0.96	0.12	0.33	0.17	0.11	0.09
Leopold	0.61	0.07	0.94	0.14	0.34	0.15	0.09	0.05
Delphi	0.65	0.08	0.95	0.11	0.42	0.16	0.06	0.04
平均值	0.61	0.08	0.95	0.12	0.36	0.16	0.09	0.06

3.5 双变量空间自相关模型

地理要素的空间分布特征和相关程度可用 Moran’ sI 指数来描述^[25]。基于 Moran’ sI 指数建立的双变量全局自相关和局部自相关可用来描述不同要素空间分布的相关程度^[13, 23, 26]。计算公式为：

$$I_{lm}^p = z_l^p \cdot \sum_{q=1}^n W_{pq} \cdot z_m^q \tag{5}$$

式中： $z_l^p = \frac{X_l^p - \overline{X_l}}{e_l}$ ； $z_m^q = \frac{X_m^q - \overline{X_m}}{e_m}$ ； X_l^p 是空间单元 p 的属性 l 的值； X_{qmm}^q 是空间单元 q 的属性 m 的值； $\overline{X_l}$ 和 $\overline{X_m}$ 分别是属性 l 和属性 m 的平均值； e_l 和 e_m 分别是属性 l 和属性 m 的方差。

为了便于分析各项指标的空间分异特征及其相关性，本文以格网为单位对各项指标进行分析，常用的格网单元有 500m×500m、1km×1km、5km×5km、10km×10km 等^[19]。研究比较了不同格网尺度下 ESV 和 HAI 时空格局特征及其差异，发现 500m×500m 格网尺度下的可视化效果较好，能够表达出丹江口库区 ESV 和 HAI 的分布特征，故在满足研究需要的前提下，利用 ArcGIS10.2 将研究区土地利用数据划分为 500m×500m 的格网，ESV 和 HAI 的分类方法采用自然断点法。

4 结果与分析

4.1 土地利用变化分析

由表 4 可以看出, 1991~2018 年间, 丹江口库区建设用地、林地所占比例持续上升, 其中建设用地年均增长率达到了 6.06%, 林地各种土地利用类型中所占比例最高, 各时期面积占比均超过 60%。耕地呈现出先增长后减少的变化趋势, 结合图 2 发现, 库区东北部以及水库周边区域耕地面积变化较大, 这是由于 2000 年前当地居民在地势较为平缓的区域大量开垦灌草地和林地进行耕作, 2000 年后耕地面积减少与退耕还林还草以及建设丹江口大坝有关, 减少速率在 2010~2018 年间达到最高, 这主要是因为在此期间丹江口水利枢纽二期工程完工, 大坝加高完成, 水库开始大量蓄水, 导致水库河流两岸大量的耕地和湿地被淹没。水库河流在 1991~2000 年间以年均 3.57% 的速率减少, 后由于南水北调中线工程正式开工建设, 水库河流的面积逐年增长, 2010~2018 年间年均增长速率达到了 8.44%。总体来看, 灌草地和湿地分别以年均 2.32% 和 2.68% 的速率减少。由于内陆坑塘和未利用地本身基数小, 微小的数量和价值变化都会导致自身较大的比重变化, 实际相较其他地类并未发生较大变化。

表 4 1991~2018 年丹江口库区土地利用类型构成及年均变化率

土地利用类型	土地利用类型构成 (%)				年均变化率 (%)			
	1991	2000	2010	2018	1991~2000	2000~2010	2010~2018	1991~2018
耕地	23.47	28.19	23.70	18.94	2.24	-1.59	-2.51	-0.71
灌草地	8.14	4.31	5.26	3.05	-5.23	2.22	-5.26	-2.32
建设用地	1.23	1.73	2.26	3.25	4.47	3.03	5.54	6.06
林地	60.93	61.22	63.19	65.96	0.05	0.32	0.55	0.31
内陆坑塘	0.11	0.05	0.07	0.07	-6.01	3.64	0.72	-1.25
湿地	0.71	0.83	0.39	0.19	1.90	-5.25	-6.31	-2.68
水库河流	5.36	3.64	5.07	8.49	-3.57	3.92	8.44	2.16
未利用地	0.05	0.03	0.06	0.04	-3.28	8.59	-3.92	-0.37

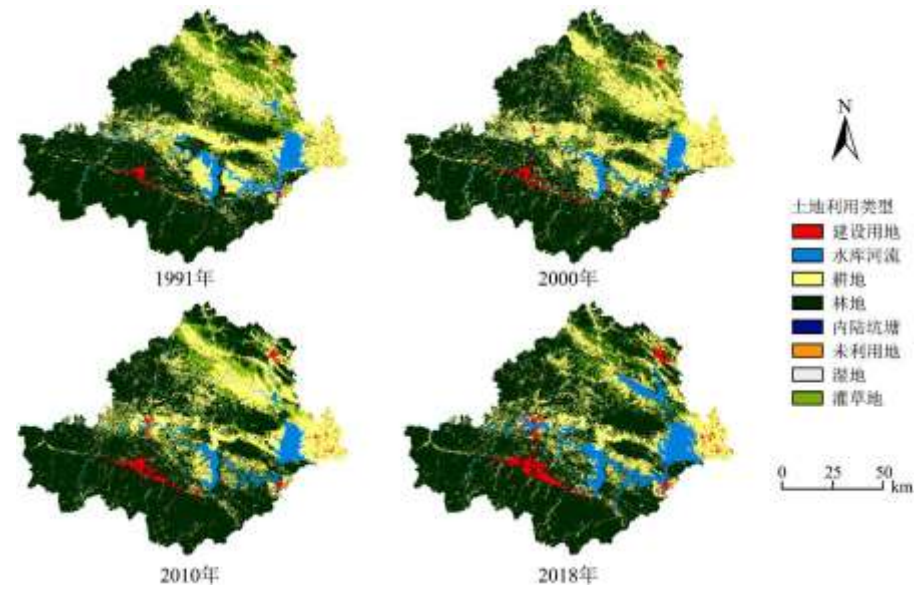


图 2 丹江口库区土地利用类型分布图

从各地类相互转化的角度来看(表 5), 1991 至 2018 年间, 丹江口库区耕地与林地、林地与灌草地以及耕地与水库河流之间的转化较多。建设用地主要由耕地和林地转化而来, 包括 118.63km²的耕地和 121.64km²的林地, 这说明丹江口水库周边城市扩张侵占了大量的耕地与林地。耕地与林地以及灌草地之间相互转化与 2000 年前大量开垦种田而后实行退耕还林还草的政策有关。

另外，589.73km²的灌草地转化为林地，灌木自然生长为乔木，234.12km²的耕地被水库河流淹没。

表 5 1991~2018 年丹江口库区土地利用转移矩阵 (km²)

2018 年	1991 年								2018 年合计
	耕地	灌草地	建设用地	林地	内陆坑塘	湿地	水库河流	未利用地	
耕地	1294.68	131.63	9.13	624.07	0.87	7.14	7.64	2.09	2077.24
灌草地	111.99	143.44	0.57	77.41	0.00	0.22	0.44	0.00	334.07
建设用地	118.63	9.53	104.28	121.64	0.45	1.24	0.83	0.26	356.86
林地	795.47	589.73	16.38	5796.72	2.24	21.65	8.38	2.46	7233.02
内陆坑塘	1.34	0.74	0.25	2.35	3.34	0.00	0.00	0.07	8.08
湿地	14.56	1.46	0.14	3.60	0.00	1.17	0.43	0.00	21.36
水库河流	234.12	15.50	4.55	54.31	5.30	46.11	570.46	0.37	930.72
未利用地	2.75	0.14	0.00	1.84	0.00	0.00	0.00	0.00	4.72
1991 年合计	2573.54	892.16	135.30	6681.93	12.20	77.51	588.18	5.25	10966.07

4.2 生态系统服务价值变化分析

4.2.1 生态系统服务价值时空变化

由表 6 可知，丹江口库区生态系统服务价值 1991 年为 396.29×10^8 元，2000 年为 254.92×10^8 元，2010 年为 479.40×10^8 元，2018 年为 440.22×10^8 元，呈现出先减少后增加再减少的变化趋势。1991~2000 年间生态系统服务价值年均减少率最高，为 3.96%，2000~2010 年间价值量年均增长率最高，达到了 8.81%。各地类中林地对生态系统服务价值贡献最大，价值量最高时达到了 301.55×10^8 元，占价值总量的 66.91%，其次是水库河流、灌草地和耕地，其他地类贡献率偏低。

总体来看，水库河流、林地和建设用地生态系统服务价值总体呈现增加趋势，其中水库河流价值量增加了 58.96×10^8 元；灌草地、湿地、耕地和内陆坑塘生态系统服务价值总体呈现减少的趋势，灌草地生态系统服务价值减少量最多，为 17.04×10^8 元。丹江口库区生态系统服务价值整体呈小幅度的增加趋势，增加了 43.93×10^8 元。

利用 GIS 技术将 ESV 量化到每一个土地利用网格，并采用自然断点法分为五类，得到图 3。可以看出，生态系统服务价值高的区域主要集中于成片的林地以及库区东部的水库河流，价值量偏低的情况出现在中东部和北部的耕地以及建设用地集中的区域。结合表 4、表 5 发现，在库区人民生产建设过程中，特别是 1991~2000 年间库区北部的淅川县，大量的灌草地和部分林地被开垦，水资源急剧减少，导致了丹江口库区生态系统服务价值的急剧下降，在 2000 年后，由于推行退耕还林以及水库蓄水，灌草地、林地和水库河流的生态系统服务价值有所回升，库区总体生态系统服务价值也有所提高，由此可见，林地、灌草地和水库河流对库区生态系统服务具有重要意义。

从地域上来看，淅川县、丹江口市和鄢阳区中部的生态系统服务价值变化较大，特别是在 1991~2000 年间。这些区域的耕

地都较为集中且连接成片，人类活动较为频繁，这些地区应注意控制耕地面积，减少对林地、灌草地的开垦，保护水资源，杜绝危害库区生态系统的的人类活动。张湾区和茅箭区的生态系统服务价值变化相对较小，从土地利用变化上来看，建设用地的增加和城市的扩张较为明显，特别是在 2000 年后，因此，这些地区需要注意建设用地上对林地的侵占所造成的生态系统服务价值的下降。

表 6 1991~2018 年丹江口库区生态系统服务价值

土地利用 类型	价值量(10 ⁸ 元)与贡献率(%)								年均变化率(%)			
	1991 年 价值量	贡献率	2000 年 价值量	贡献率	2010 年 价值量	贡献率	2018 年 价值量	贡献率	1991~ 2000	2000~ 2010	2010~ 2018	1991~ 2018
耕地	14.65	3.70	12.76	5.00	18.37	3.83	11.40	2.59	-1.43	4.40	-4.74	-0.82
灌草地	26.66	6.73	10.23	4.01	21.42	4.47	9.63	2.19	-6.85	10.94	-6.88	-2.37
建设用地	0.23	0.06	0.23	0.09	0.51	0.11	0.57	0.13	0.19	12.32	1.50	5.72
林地	234.17	59.09	170.57	66.91	301.55	62.90	244.41	55.52	-3.02	7.68	-2.37	0.16
内陆坑塘	2.33	0.59	0.77	0.30	1.81	0.38	1.49	0.34	-7.41	13.37	-2.23	-1.34
湿地	6.12	1.54	5.20	2.04	4.22	0.88	1.63	0.37	-1.68	-1.87	-7.69	-2.72
水库河流	112.13	28.30	55.16	21.64	131.51	27.43	171.09	38.87	-5.65	13.84	3.76	1.95
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.43	21.85	-5.84	-0.49
汇总	396.29	100.00	254.92	100.00	479.40	100.00	440.22	100.00	-3.96	8.81	-1.02	0.41

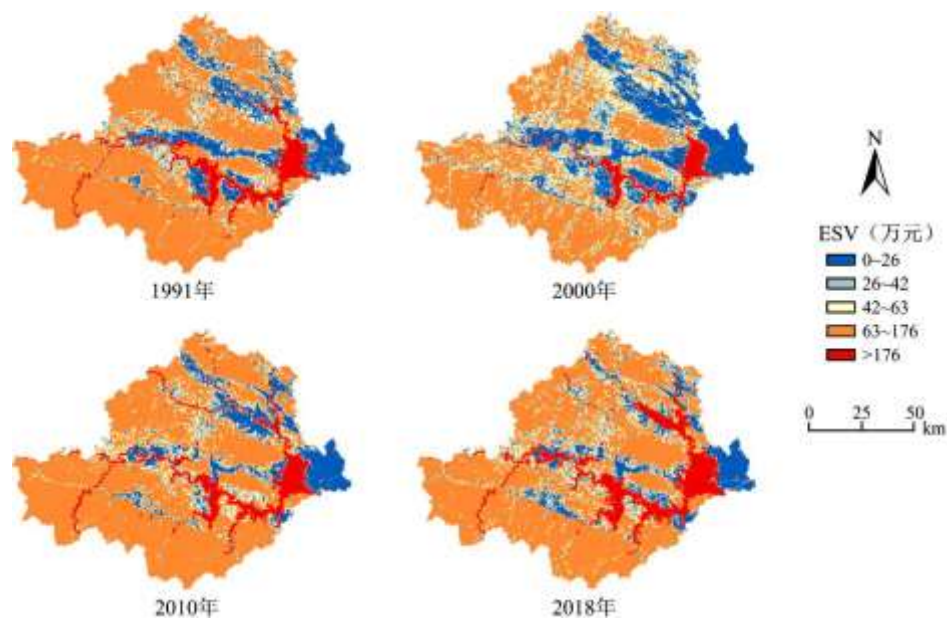


图 3 丹江口库区生态系统服务价值空间分布图

4.2.2 各项生态系统服务价值变化

基于各地类的面积，通过基础当量表(表 1)计算丹江口库区各项生态系统服务价值，如表 7 所示。从一级服务价值来看，调节服务最强，支持服务要强于供给服务，文化服务最低。在所有二级服务里，水文调节服务价值最高，维持养分循环服务价值

最低。虽然丹江口库区 1991~2018 年间生态系统服务价值整体增加了,但在各项生态系统服务里,只有水文调节、水资源供给、净化环境和美学景观价值总体呈现增加趋势,其他服务价值均呈现递减趋势,这是丹江口库区各项生态系统服务不均衡变化的表现。

从各个时期来看,1991~2000 年间,各项生态系统服务的价值都有所下降,在这一时期,库区内城市经济的发展以及人口的增加导致土地利用状况发生变化,对生态系统服务的不合理与过度消费使得生态系统不断退化,导致生态系统服务降低。2000~2010 年间,由于各项政策和保护措施的实施,生态系统服务有明显好转,但 2010~2018 年间,由于大坝加高,蓄水量剧增,虽然水文调节和水资源供给服务的价值增加了,但由于大量土地被淹没,直接影响了其他生态系统服务的价值。

表 7 1991~2018 年丹江口库区各项生态系统服务变化

一级服务	二级服务	各年份 ESV(10 ⁸ 元)							
		1991	2000	2010	2018	1991~2000	2000~2010	2010~2018	1991~2018
供给服务	食物生产	8.79	6.67	10.79	7.96	-2.11	4.12	-2.83	-0.82
	原料生产	9.21	6.54	11.40	8.90	-2.67	4.86	-2.51	-0.31
	水资源供给	6.92	2.39	7.77	11.57	-4.53	5.38	3.80	4.65
调节服务	气体调节	30.93	21.97	38.22	29.72	-8.96	16.25	-8.50	-1.21
	气候调节	82.72	57.64	102.55	81.70	-25.08	44.91	-20.85	-1.02
	净化环境	28.60	18.97	34.87	30.23	-9.64	15.91	-4.64	1.63
	水文调节	141.79	80.23	166.80	184.22	-61.56	86.57	17.42	42.43
支持服务	土壤保持	35.43	24.82	43.74	34.45	-10.62	18.93	-9.30	-0.99
	维持养分循环	3.19	2.31	3.95	3.01	-0.87	1.63	-0.94	-0.18
	生物多样性	33.26	22.86	40.56	32.92	-10.39	17.70	-7.64	-0.34
文化服务	美学景观	15.46	10.52	18.74	15.55	-4.95	8.22	-3.19	0.09

4.2.3 生态系统服务价值流向损益分析

在 1991~2018 年丹江口库区土地利用转移矩阵(表 5)的基础上,利用式 3 进行生态系统服务价值损益计算得到表 8。由表 8 可知,1991~2018 年丹江口库区生态系统服务价值的亏损主要来自于林地转化为耕地、建设用地,灌草地转化为耕地,与上文分析较为一致。林地转化为耕地导致了库区 18.45×10^8 元价值量的减少;林地转化为建设用地导致了库区 4.07×10^8 元价值量的减少;灌草地转化为耕地导致了 3.21×10^8 元价值量的减少。同时,由于林地和水库河流在不同时期的单位面积价值量出现了较大起伏,导致了自身价值的亏损。价值量的增益主要来自于耕地转化为林地和水库河流,这使得价值量增加了 64.05×10^8 元。

由此可知,城市扩张和开垦种田等人类活动侵占了大量的林地和灌草地,导致了丹江口库区生态系统服务价值的降低,但退耕还林还草和蓄水量的增加弥补了这些人类活动所带来价值量的降低。

4.3 人类活动强度变化分析

利用公式 4 计算人类活动强度指数(HAI), 利用 ArcGIS10.2 对每个网格进行赋值并绘制人类活动强度空间分布图(图 4)。参考已有研究^[9, 18]将 HAI 分为五类: 高($HAI > 0.80$)、较高($0.60 < HAI \leq 0.80$)、中($0.40 < HAI \leq 0.60$)、较低($0.20 < HAI \leq 0.40$)和低($0 < HAI \leq 0.20$), 以此为基础分析 1991~2018 年丹江口库区人类活动强度空间变化。

表 8 1991~2018 年丹江口库区生态系统服务价值损益矩阵(10^8 元)

土地利用类型	耕地	灌草地	建设用地	林地	内陆坑塘	湿地	水库河流	未利用地
耕地	-0.26	-3.21	0.03	-18.45	-0.16	-0.52	-1.41	0.01
灌草地	2.59	-0.15	0.02	-0.48	0.00	-0.01	-0.07	0.00
建设用地	-0.48	-0.27	-0.01	-4.07	-0.08	-0.10	-0.16	0.00
林地	22.35	2.30	0.53	-7.27	-0.35	-0.98	-1.31	0.08
内陆坑塘	0.24	0.11	0.05	0.35	-0.02	0.00	0.00	0.01
湿地	1.03	0.07	0.01	0.15	0.00	0.00	-0.05	0.00
水库河流	41.70	2.39	0.83	8.08	-0.04	4.84	-3.89	0.07
未利用地	-0.01	0.00	0.00	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00

观察图 4 可知, 丹江口库区人类活动强度空间分布特征为: 以低影响强度为主; 中高影响强度在库区东部成片分布; 中影响强度区域部分在中高影响强度区域周围分布, 另部分与低影响强度区域呈交叉蔓延分布; 高影响强度区域呈零星块状分布且主要位于建设用地集中的区域。从人类活动强度随时间变化趋势上来看: 2000 年前, 低影响强度区域呈现减少的变化趋势, 中高影响强度区域和中影响强度区域呈现大幅增加的变化趋势。2000 年后, 低影响强度区域不断扩张, 中高影响强度区域和中影响强度区域不断缩减。高影响强度区域面积一直在扩张。总体来看, 丹江口库区人类活动强度呈先增加再减弱的趋势, 特别在库区东部的淅川县与丹江口市这种变化最为明显, 主要和当地居民为了支持丹江口大坝加高进行的大规模移民有关。结合图 3、图 4 分析发现人类活动强度与生态系统服务价值在空间上的分布有一定的关联性。

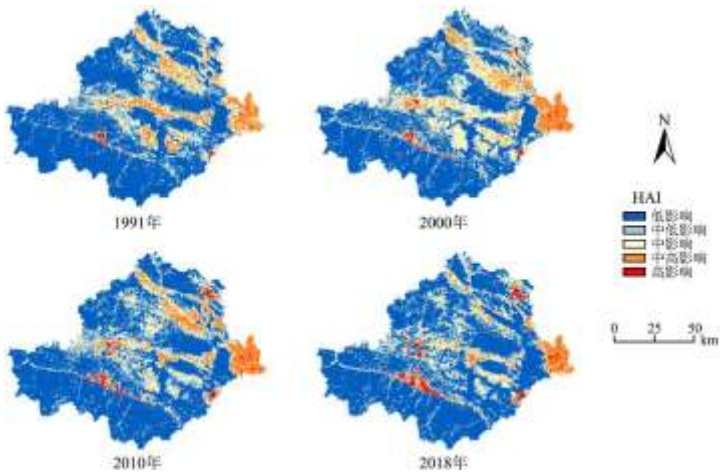


图 4 丹江口库区人类活动强度空间分布图

4.4 生态系统服务价值与人类活动强度的双变量空间自相关分析

为进一步验证丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度的相关性, 本文依托双变量空间自相关模型, 利用 GeoDa 空间分析工具, 建立空间权重矩阵, 计算 1991、2000、2010 和 2018 年丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度的空间自相关指数 Moran' sI。1991、2000、2010 和 2018 年 Moran' sI 指数分别为-0.3379、-0.4176、-0.3702 和-0.3228, 在 99.9%的置信度下四期 P 值均等于 0.001, 均通过显著性检验。可以看出, 四期 Moran' sI 指数均小于 0, 说明丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度存在显著的负相关关系, 且这种负相关关系呈现先增强后减弱的变化趋势。

在 z 检验的基础上 ($p=0.05$) 绘制双变量局部空间自相关 LISA 聚集图(图 5), 可以看出, 丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度聚集形态明显, 主要呈现高低与低高的聚集方式, 仅在零星区域有高高与低低聚集方式的分布。结合图 2 发现, 高低聚集方式主要分布于库区中部和东北部建设用地与耕地较为集中的区域, 低高聚集方式主要分布于水库河流。随着时间的推移, 高低聚集方式区域的面积先增加再减少, 主要在 2000 年后呈分散减少趋势, 低高聚集方式区域面积先减少后增加, 主要在 2000 年后呈聚集扩张的变化趋势。这反映出 2000 年前丹江口库区生态系统服务价值受人类活动负面影响的区域在不断扩张, 而 2000 年后由于退耕还林还草政策、水利设施的完善、蓄水量增加和大规模移民等原因, 生态系统服务价值受人类活动负面影响的区域面积在逐渐缩减, 但在建设用地和耕地等人类活动强度较大的地区仍存在负面影响。

在显著性水平 $P=0.05$ 的基础上对局部 Moran' sI 指数进行显著性检验, 绘制 LISA 显著性水平图(图 6), 可以看出, 大部分区域的相关性不显著, 高低聚集区与低高聚集区的显著性较高, 且低高聚集方式的显著性水平要强于高低聚集方式, 说明高人类活动强度、低生态系统服务价值的集聚方式强度有所减弱。2000 年后显著性水平呈分散减弱变化趋势, 说明 2000 年后丹江口库区人类活动对生态系统服务价值的负面影响强度在逐渐减弱。从空间上看, 这种变化在库区北部和中部较为明显。

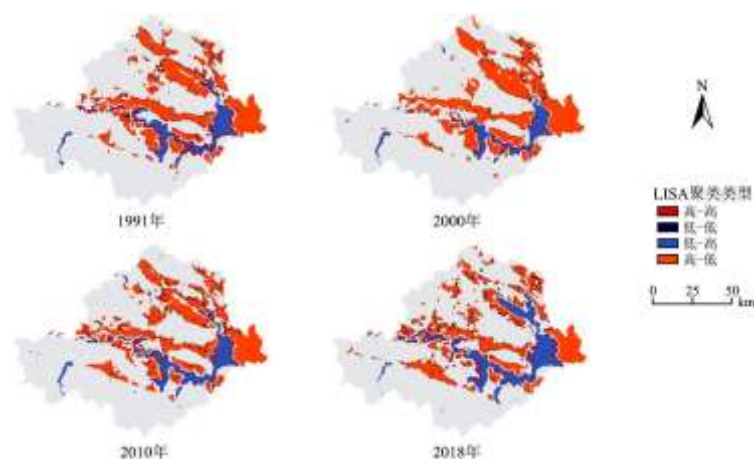


图 5 丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度 LISA 聚类图

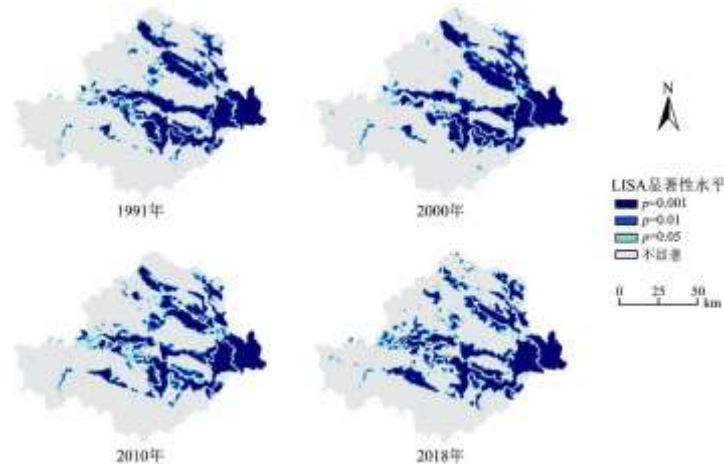


图6 丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度 LISA 显著性水平图

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 1991~2018 年间, 丹江口库区建设用地、水库河流和林地面积总体呈增长趋势, 其中建设用地增长速率最快; 耕地、灌草地、内陆坑塘、湿地和未利用地总体呈减少趋势, 灌草地和湿地减少速率较快。在各地类互相转化过程中, 以耕地与林地、林地与灌草地以及耕地与水库河流之间的转化为主。

(2) 1991~2018 年丹江口库区生态系统服务价值呈现出先减少后增加再减少的变化趋势。生态系统服务价值高的地区主要集中于水库河流以及成片的林地, 价值量偏低的区域主要出现在东部水库河流两岸的耕地以及建设用地。丹江口库区生态系统服务价值的亏损主要来自于林地转化为耕地和建设用地, 灌草地转化为耕地, 主要驱动力为开垦种田和城市扩张; 价值量的增益主要来自于耕地转化为林地和水库河流, 主要驱动力为退耕还林和蓄水量增加。

(3) 丹江口库区人类活动强度以低影响强度为主, 中高影响强度在库区东部成片分布, 高影响强度区域呈零星块状分布且一直呈增加趋势。2000 年之前, 中高和中影响强度呈增加趋势, 2000 年后呈减少趋势。总体来看, 丹江口库区人类活动强度呈现先增强再减弱的变化趋势, 特别在淅川县与丹江口市这种变化最为明显。

(4) 丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度存在显著的负相关关系, 呈现先增强后减弱的变化趋势, 主要聚集方式为高低与低高聚集方式, 高低聚集方式主要分布于库区中部和东北部建设用地与耕地集中的区域, 低高聚集方式主要分布于水库河流。2000 年前库区人类活动对生态系统服务价值造成的负面影响在不断加剧, 2000 年后这种负面影响在逐渐降低, 但在人类活动强度较大的地区仍存在负面影响。

5.2 讨论

利用当量因子法计算生态系统服务价值更能体现价值变化的动态性和空间性^[27, 28], 同时也能与 GIS 技术进行较好的结合, 但其较为依赖基础当量, 不同的计算方法可能会造成结果的差异。人类活动必然会对生态系统服务价值产生影响, 且人与生态系统的物质能量交换过程具有复杂性和异质性^[29, 30], 因此, 探究不同尺度下人类活动和生态系统服务的复杂变化过程, 以及人类活动对各项生态系统服务权衡协同关系变化的影响可作为下一步的研究方向。

作为国家南水北调工程的水源地，良好的生态系统对丹江口库区具有重要意义。通过此次研究可以发现，近年来丹江口库区生态系统服务总体变化积极向好，价值有所回升，但一些区域的生态系统服务仍然受人类活动的负面影响，主要由于人类活动改变了土地利用与覆被。因此，对于丹江口库区来说，森林、草地以及水域等一些具有多项重要生态系统服务能力的地类应受到重视与保护，同时还需减少人类活动对库区生态环境的污染与损害，继续推进生态工程的制定与实施。

此外，在研究中发现，在大坝加高后，大量耕地被淹没。从粮食安全角度来说，库区内应加强对基本农田的划定，完善农业基础设施，保障粮食的供给，也应参考生态系统服务价值对耕地淹没的区域进行合理的生态补偿。同时还应该注意保护生态系统的连通性和完整性，避免大坝加高对物种流动和生态系统造成影响。应结合各项生态系统服务的变化，对资源进行合理优化配置，促进生态系统的均衡发展。

参考文献:

- [1]DAILY G C.Nature' s Service:Societal Development on Natural Ecosystems[M].Island Press :Washington DC, USA, 1997:3-6.
- [2]COSTANZA R,D' ARGE R,DE GROOT R S,et al.The value of the world' s ecosystem services and natural capital [J].Nature, 1997, 387:253-260.
- [3]谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [4]郑华,欧阳志云,赵同谦,等.人类活动对生态系统服务功能的影响[J].自然资源学报,2003(1):118-126.
- [5]张彩霞,谢高地,杨勤科,等.人类活动对生态系统服务价值的影响——以纸坊沟流域为例[J].资源科学,2008(12):1910-1915.
- [6]MA(Millennium Ecosystem Assessment).Ecosystems and Human Well-Being[M].Island Press:Washington,DC,USA, 2005:60-69.
- [7]王兵,鲁绍伟.中国经济林生态系统服务价值评估[J].应用生态学报,2009,20(2):417-425.
- [8]许妍,高俊峰,黄佳聪.太湖湿地生态系统服务功能价值评估[J].长江流域资源与环境,2010,19(6):646-652.
- [9]谢春花,王克林,陈洪松,等.土地利用变化对洞庭湖区生态系统服务价值的影响[J].长江流域资源与环境,2006(2):191-195.
- [10]王友生,余新晓,贺康宁,等.基于土地利用变化的怀柔水库流域生态服务价值研究[J].农业工程学报,2012,28(5):246-251.
- [11]严恩萍,林辉,王广兴,等.1990-2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J].生态学报,2014,34(20):5962-5973.
- [12]刘桂林,张落成,张倩.长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2014,34(12):

3311-3319.

[13]姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 249-256.

[14]张志明, 高俊峰, 闫人华. 基于水生态功能区的巢湖环湖带生态服务功能评价[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1110-1118.

[15]付奇, 李波, 杨琳琳, 等. 西北干旱区生态系统服务重要性评价——以阿勒泰地区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 70-75.

[16]赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8411-8421.

[17]刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4609-4624.

[18]楚鑫磊, 李乐, 曾立雄, 等. 三峡库区建坝前后森林生态系统服务动态[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1977-1986.

[19]郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3482-3493.

[20]徐丽芬, 许学工, 罗涛, 等. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例[J]. 地理研究, 2012, 31(10): 1775-1784.

[21]谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003(2): 189-196.

[22]王航, 秦奋, 朱筠, 等. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1286-1296.

[23]南笛, 杨子寒, 毕旭, 等. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3531-3541.

[24]陈浮, 葛小平, 陈刚, 等. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究[J]. 地理科学, 2001(3): 210-216.

[25]谢花林, 刘黎明, 李波, 等. 土地利用变化的多尺度空间自相关分析——以内蒙古翁牛特旗为例[J]. 地理学报, 2006(4): 389-400

[26]陆汝成, 黄贤金. 基于省级和市级层次的违法占用耕地与经济空间计量分析[J]. 中国土地科学, 2012, 26(7): 60-66.

[27]黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970~2015年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. 地理学报, 2019(9): 1904-1920.

[28]李丽, 王心源, 骆磊, 等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1233-1245.

[29]张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的空间尺度特征[J]. 生态学杂志, 2007 (9):1432-1437.

[30]赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务[J]. 地理科学进展, 2018, 37 (1):139-151.