

长株潭城市群县域生态安全评估研究

赵文力^{1, 2} 刘湘辉^{2, 3} 鲍丙飞⁴ 向平安^{3, 51}

(1. 湖南农业大学 生物科学技术学院, 中国湖南 长沙 410128;

2. 湖南农业大学 东方科技学院, 中国湖南 长沙 410128;

3. 湖南农业大学 商学院, 中国湖南 长沙 410128;

4. 江西财经大学 经济学院, 中国江西 南昌 330013;

5. 湖南农业大学 洞庭湖区农村生态系统健康湖南省重点实验室, 中国湖南 长沙 410128)

【摘要】: 为客观分析长株潭城市群生态安全状况, 结合长株潭城市群的区域特征, 从区域产业发展、水资源状况和生态效益等层面构建长株潭县域层次生态安全评价指标体系, 采用主观赋权法和客观赋权法相结合的方法确定各评价指标的权重, 并利用改进的 DPSIR 模型对长株潭城市群生态安全展开定量评估和趋势预测。研究认为, 长株潭城市群县域生态安全状况整体好转, 但存在区域不均衡问题。并从指标体系和政策因素等对造成这种不均衡的因素进行初步分析。

【关键词】: 长株潭城市群 生态安全 DPSIR 模型 指标权重

【中图分类号】: F301 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2019) 08-0200-07

改革开放以来, 我国经济不断增长。伴随着能源消费持续增长导致过量废弃物排放, 从而引发大气污染和温室效应等环境问题^[1], 这不仅影响生态系统的自身完整性和生态服务功能, 还会危及生态系统安全^[2]。在此背景下, “生态安全”概念应运而生^[3], Norton 等将“生态安全”定义为人类的生存环境能维持自身正常的生存及发展状态, 不受外界条件、状态的变化而变化^[4]。对生态安全进行客观评价, 有利于及时掌握生态环境状况, 从而为生态环境管理和决策提供科学依据, 对制定区域科学发展战略和建设生态文明有重要意义。长株潭城市群是湖南省城镇化发展水平最高的区域^[5], 2007 年 12 月, 长株潭城市群成为国家“两型社会”建设综合改革的配套试验区^[6]。因此, 以长株潭城市群县域单元相关数据为样本, 对长株潭城市群生态安全状况进行评估, 对提高该区域乃至全国生态安全具有重要意义。

生态安全问题是近年来国内外研究的热点。国外学者通过研究 DPSIR 概念模型^[7-9]、网络 DEA 模型^[10]等生态安全模型, 对生态安全话语权的争夺^[11]、生态安全与经济福祉^[12]、生态环境保护^[13]等进行了深入研究, 从而将生态安全的研究领域拓展到经济福祉、环境保护等方面, 使生态安全研究更具现实意义。国内学者对生态安全的研究涉及农业^[14]、土地^[15]、森林^[16]、湿地^[17]、草原^[18]、水资源^[19]等诸多领域, 取得了丰硕的研究成果。

综上所述, 许多学者采用不同方法、从不同视角对生态安全问题进行了研究, 为本文奠定了坚实基础。但大多数学者所研究的区域主要集中在特定省市以及京津冀等较大城市群, 对长株潭城市群等小型城市群研究较少, 尤其缺少研究以县域为单位对生态安全进行评估。本文从区域产业发展、水资源状况和生态效益等层面构建长株潭县域层次生态安全评价指标体系, 并利

作者简介: 赵文力 (1984-), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生。主要研究方向为生态学。E-mail: 171924579@qq.com。向平安 (1972-), 男, 湖南怀化人, 教授, 博士生导师。主要研究方向为生态学。E-mail: Xiangpa@hunau.edu.cn。

用改进的 DPSIR 模型对长株潭城市群生态安全展开定量评估和趋势预测。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

长株潭城市群位于中国湖南省中东部,包括长沙、株洲、湘潭 3 个城市(111° 58′ 38″ E~114° 13′ 20″ E,26° 18′ 19″ N~28° 41′ 72″ N),属亚热带季风湿润气候区,年平均气温 16~19℃,降雨量 1230~1700mm。长沙、株洲、湘潭三市沿湘江呈“品”字形分布,两两相距不足 20km,结构紧凑。该区域是长江中游城市群重要组成部分,同时也是全国“两型社会”建设综合配套改革实验区。2018 年三市常住人口数为 1504.05 万人,GDP 达 15796.31 亿元。随着经济的快速发展,生态环境压力日益加大,生态系统平衡被打破,长株潭城市群的生态安全遭受巨大威胁,亟待解决。

1.2 研究方法

1.2.1 层次分析法

层次分析法由美国运筹家 T.L.Saaty 教授提出^[20],是将决策问题的相关元素分解成若干层次,构建一个有序的层次结构模型,以此进行定性和定量分析相结合的一种决策方法。这为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供了简便的决策方法,所需定量数据信息比较少,具体步骤如图 1。

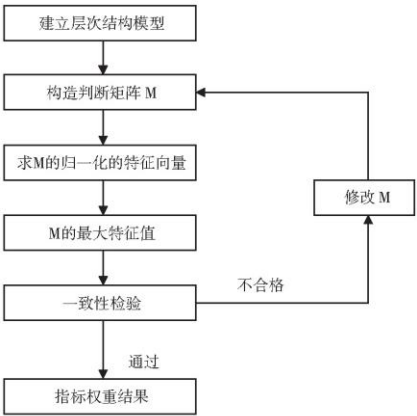


图 1 层次分析法步骤

- (1)建立层次结构模型,将决策问题层次化,如基于 DPSIR(驱动力—压力—状态—影响—响应)模型的评价指标体系中的排序。
- (2)构建判断矩阵 M。采用 1~9 标度法(表 1),标度两两指标的相对重要程度,构建判断矩阵 M。

表 1 判断矩阵 1~9 标度法

Mi j 取值	意义
1	i 指标与 j 指标相比,同等重要

3	i 指标与 j 指标相比, i 指标稍微重要
5	i 指标与 j 指标相比, 指标明显重要
7	i 指标与 j 指标相比, 指标强烈重要
9	i 指标与 j 指标相比, 指标极端重要
2、4、6、8	上述相邻标度结果的中间程度

(3) 计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和特征向量, 并将其归一化。

(4) 通过判断矩阵的最大特征值, 计算矩阵的一致性指标 CI:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

(5) 一致性检验: 判断矩阵的一致性比例 CR 通过公式 (2) 计算得出:

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

式中: RI 是平均随机一致性指标, 依矩阵阶数的变化而变, 查表得出对应值。当 $CR < 0.1$ 时, 才认为通过一致性检验, 才是可靠的, 说明权重分配合理。

1.2.2 熵权法

熵是热力学中表征物质状态的参量, C. E. Shannon 将熵改造为信息熵, 表征不确定性的度量^[21]。如指标的信息熵越小, 则提供的信息量越大, 权重就应该越高; 信息熵越大, 权重则越小。对此, 可通过计算指标的熵值以判断其信息量, 从而得出该指标的权重。具体步骤方法如下:

(1) 数据无量纲化。为了消除不同量纲的影响, 需对指标进行无量纲化的处理。采用 Z-score 标准化对原始数据无量纲化, 因为 Z-score 标准化在计算过程中应用了所有的数据信息, 既消除了量纲和数量级的影响, 也消除了各指标变异程度上的差异^[22], 计算公式如下:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S} \quad (3)$$

式中: y_{ij} 为处理后的指标值; x_{ij} 为指标的原始数据; $\bar{x}_j$ 为该项指标的平均值; S 为标准差。如经 Z-Score 标准化处理的数据产生负值, 则需进行坐标平移, 方法如下:

$$y_{ij} = y'_{ij} + Z \quad (4)$$

式中: y'_{ij} 为经坐标平移处理后的标准化值, 依 y_{ij} 的最小值确定 Z 的数值, 取整数。

(2) 计算指标比重。第 j 项指标在第 i 年的值 y_{ij} 在所有统计年份中的比重 R_{ij} ，计算方法如下：

$$R_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (5)$$

(3) 计算指标熵值。第 j 项指标的熵值 e_j ，计算方法如下：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m R_{ij} \times \ln R_{ij} \quad (6)$$

式中： $k=1/\ln m$; m 是统计年份。

(4) 计算差异性系数。给定的指标的差异性系数越小，则说明该指标越不重要，当 x_{ij} 相等时， $e_j=1$ ，对综合评价的效用值是 0；反之，差异性系数越大，说明指标越重要^[13]。差异性系数 g_j 计算如下：

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

(5) 计算指标权重。第 j 项指标的指标权重 a_j ：

$$a_j = \frac{g_j}{\sum g_j} \quad (8)$$

1.2.3 改进的 DPSIR 模型

DPSIR 概念模型是对以往概念模型的扩展和改进，能更细化地描述生态安全系统的运行过程，并通过 5 个维度间的因果关系构建复合的系统框架。本文将 DPSIR 概念模型作为生态安全系统的基本形态，并依据欧洲环境署（EEA）的相关概念，结合国内外相关研究^[23]，总结和整理出一般性的 DPSIR 框架结构，如图 2。

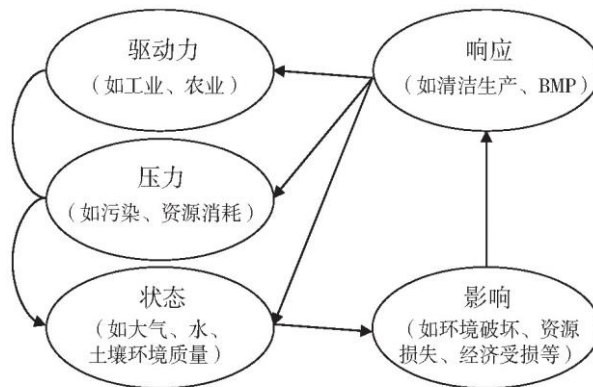


图 2 DPSIR 概念模型

本研究根据长株潭城市群区域特点，对 DPSIR 模型进行改进，并对其驱动力（D）、压力（P）、状态（S）、影响（I）和响应（R）五类指标因子进行区域化修正，加强了概念模型中的过程链研究。一般性的 DPSIR 模型中的驱动力因子，更多偏重于非环境因素，忽略生态因子，大多指向造成生态环境变化的潜在原因。改进的 DPSIR 模型能有效地反映生态系统的因果关系，是评价城市群生态环境安全的适宜方法。

本研究将改进后的 DPSIR 模型应用到长株潭城市群尺度上，五类指标完整地体现了长株潭城市群县域生态环境安全变化的综合情况，更能揭示潜在的社会经济“驱动力”给城市群生态环境安全造成“压力”，引起城市生态、资源环境的“状态”改变，进而“影响”城市的活动，促使一系列“响应”措施，保护生态环境（图 3）。

2 实证研究

2.1 研究对象选取及指标体系构建

本研究以长株潭城市群县域划分作为基本单位，依据区域产业发展、水资源状况和生态效益等对长株潭城市群生态安全状况进行综合考量，选取长株潭所有县、区作为研究对象，具体包含长沙市区、长沙县、望城区、宁乡县、浏阳市、株洲市区、株洲县、攸县、茶陵县、炎陵县、醴陵县、湘潭市区、湘潭县、湘乡市、韶山市。

同时，本研究基于“驱动力（driving）—压力（pressure）—状态（state）—影响（impact）—响应（response）”（DPSIR）模型，建立长株潭城市群县域生态环境安全指标体系见表 2，该指标体系包括 1 个目标层、5 个准则层、15 个具体评价指标。

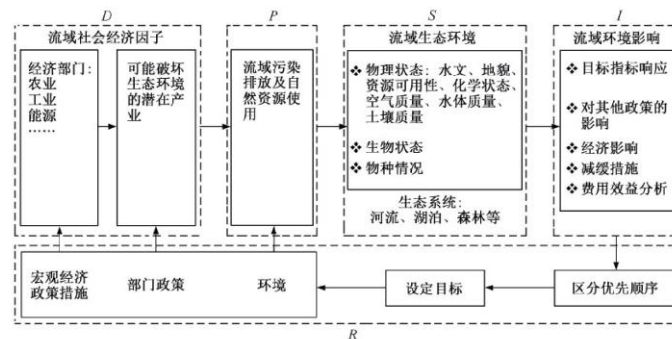


图 3 改进的 DPSIR 模型

表 2 长株潭城市群县域生态安全评价指标体系构建

准则层（C）	分目标层（S）	指标层（I）	指标意义
驱动力（D）	经济发展	GDP（亿元）C1	表征城市的经济发展水平，发展的整体实力
	社会活动	城镇化率（%）C2	表征城市工业发展水平及竞争力，工业化（城镇化）水平
		人口自然增长率（%）C3	指数 表征人口增长的情况与劳动力发展后劲
压力（P）	开发压力	乡村人口数（万人）C4	长株潭一体化越充分，开发越大，乡村人口数越多 工业生
	资源需求压力	工业增加值（亿元）C5	产对水资源造成的压力
	生态压力	规模能源消耗量（10 ⁴ t 标准煤）C6	经济发展对环境资源的压力

状态 (S)	供给能力	需求状态	水库容量 (10 ⁸ m ³) C7	城市水资源调节供给能力 需求的主要用途 生态服务功能
	态	服务效果	有效灌溉面积 (10 ³ hm ²) C8	
			农作物总播种面积 (10 ³ hm ²) C9	
影响 (I)	环境综合影响	生态环境影响	农林牧渔产值 (亿元) C10	表征整体的环境质量对农业生产的影响
		社会影响指数	粮食产量 (万 t) C11	表征城市灾害、开发、挖掘和水土流失对农业生产的影响
			人均 GDP (万元) C12	表征对人们生活状态、水平的影响
响应 (R)	社会经济		森林覆盖率 (%) C13	对生态环境安全的重视程度 表征产业转型和经济质量水平 区域环境污染治理强度和管理水平
	污染控制		第三产业增加值 (亿元) C14	
			工业废水排放达标率 (%) C15	

2.2 指标权重计算与属性确定

采用主观赋权法和客观赋权法相结合的方法确定各评价指标的权重，即分别通过层次分析法和熵权法确定指标权重，最后将两者的计算结果优化组合，得出长株潭县域生态安全评价指标体系的综合权重。

2.2.1 主观权重的计算

选用层次分析法对研究区域生态安全评价指标的主观权重进行计算，并综合各位专家对指标两两比较的结果，得出各指标主观权重见表 3。

2.2.2 客观权重的计算

研究选用熵权法对研究区域生态安全评价指标的客观权重进行计算，并综合各位专家对指标两两比较的结果，得出各指标客观权重见表 4。

2.2.3 综合权重计算与指标属性确定

层次分析法主要通过专家和当地居民的经验等确定主观权重，能够反映研究区的实际情况，但容易受主观因素影响；而熵权法主要考虑指标数据的信息量及各指标的内在联系程度，但需大量的历史数据做支撑，得到的权重可能与实际情况不符。因此，本研究将基于以上两种赋权方法的优劣，对两两结果进行优化组合，得到综合指标权重见表 5，计算方法如下：

$$W = (1 - t)\omega_j + ta_j$$

(9)

式中：ω_j是主观权重；a_j是客观权重；一般 t=0.5。

得出综合权重之后，对其指标属性进行确定，即正面效应还是负面效应，是影响评价结果的关键因素^[24]。不同研究的观点差异比较大，结合长株潭城市群的实际和前期相关研究，与专家、团队成员商议，确定指标属性。

表 3 长株潭城市群县域生态环境安全评价指标的主观权重

因子层	权重	指标层	权重
-----	----	-----	----

驱动力	0.1698	城镇化率	0.0386
		人口自然增长率	0.0687
		GDP	0.0625
压力	0.2145	规模能源消费量	0.0668
		工业增加值	0.0752
		乡村人口数	0.0725
状态	0.2243	农作物播种面积	0.0784
		有效灌溉面积	0.0746
		水库容量	0.0713
影响	0.2316	粮食产量	0.0839
		农林牧渔产值	0.0819
		人均 GDP	0.0658
响应	0.1598	森林覆盖率	0.0581
		第三产业增加值	0.0522
		工业废水排放达标率	0.0495

表 4 长株潭城市群县域生态安全评价指标的客观权重

因子层	权重	指标层	权重
驱动力	0.1640	城镇化率	0.0438
		人口自然增长率	0.0737
		GDP	0.0465
压力	0.2143	规模能源消费量	0.0646
		工业增加值	0.0626
		乡村人口数	0.0871
状态	0.2375	农作物播种面积	0.0826
		有效灌溉面积	0.0762
		水库容量	0.0787
影响	0.2332	粮食产量	0.0815
		农林牧渔产值	0.0805
		人均 GDP	0.0712
响应	0.1510	森林覆盖率	0.0565
		第三产业增加值	0.0420
		工业废水排放达标率	0.0525

2.3 长株潭城市群县域水平生态安全评价

2.3.1 定量评估与安全等级

选用加权平均法进行评价，该方法基于线性模型，简单有效，所得结果科学可靠，能够计算评价体系中每项指标的评价值，有利于每项评价指标分析^[25]。依托我国的五年计划发展规划，“十五”计划因为数据收集问题采用 4 年时间（2002—2005），也

基本上能说明期间状态趋势，2006—2010 年是“十一五”，2011—2015 年是“十二五”，2016 年是“十三五”的开局之年，分析跨 4 个“五年计划”。除 2016 年数据作为预估判断以外，我们将“十五”、“十一五”、“十二五”三个五年计划的长株潭生态安全指数依照前面方面做出定量评估，结果见表 6。需要说明的是，三市的传统市区，作为一个县域地理单元，例如长沙市五区，难以单独评价，但望城区、长沙县（包括星沙区）又基本上是独立单元，故单独评价。

表 5 湘江流域县域生态环境安全评价指标的属性与综合权重

因子层	指标层	属性	权重
驱动力	城镇化率	正	0.0412
	人口自然增长率	负	0.0712
	GDP	负	0.0545
压力	规模能源消费量	负	0.0657
	工业增加值	负	0.0689
	乡村人口数	负	0.0798
状态	农作物播种面积	正	0.0805
	有效灌溉面积	正	0.0754
	水库容量	正	0.0750
影响	粮食产量	正	0.0827
	农林牧渔产值	正	0.0812
	人均 GDP	正	0.0685
响应	森林覆盖率	正	0.0573
	第三产业增加值	正	0.0471
	工业废水排放达标率	正	0.0510

表 6 长株潭城市群生态安全指数定量评估和评价等级

地区	2002-2005 年		2006-2010 年		2011-2015 年	
	评估值	评价等级	评估值	评价等级	评估值	评价等级
长沙市区	0.5145	安全	0.5490	安全	0.5181	安全
长沙县	0.5588	安全	0.5936	安全	0.5008	安全
望城区	0.4971	轻度预警	0.5094	安全	0.4699	轻度预警
宁乡县	0.4995	轻度预警	0.5717	安全	0.5359	安全
浏阳市	0.4484	轻度预警	0.5452	安全	0.5383	安全
株洲市区	0.4455	轻度预警	0.4486	轻度预警	0.5162	安全
株洲县	0.6746	非常安全	0.5921	安全	0.3623	中度预警
攸县	0.4343	轻度预警	0.5257	安全	0.5683	安全
茶陵县	0.3809	中度预警	0.5689	安全	0.6041	较安全
炎陵县	0.4308	轻度预警	0.4751	轻度预警	0.5561	安全
醴陵县	0.4404	轻度预警	0.5382	安全	0.5847	安全
湘潭市区	0.4321	轻度预警	0.4771	轻度预警	0.5316	安全
湘潭县	0.5147	安全	0.5805	安全	0.5069	安全
湘乡市	0.4892	轻度预警	0.5789	安全	0.5423	安全

2.3.2 结果分析

依据表 6，从定性而言，长株潭城市群生态安全整体走向安全，说明该区域生态治理取得了一定的效果。但逐个指标定量分析，又显示出长株潭城市群治理过程中还有不少问题存在。如 15 年来一直处于安全状态区间的长沙市区、长沙县、湘潭县，其安全指数是波动的，而且总体上这 3 个单元都体现下降趋势。生态环境安全指标出现频率是基于某一等级生态指标超出阈值的次数与生态灾难系列年数的比值^[26]，这不仅反映不同等级的生态环境安全指标在时间序列上的稀密程度，也反映了各个阶段的生态环境安全变化程度^[27]。为揭示不同等级的生态环境安全指标在不同时期的变化，根据各时期 DPSIR 指标，将长株潭城市群近 15 年的生态环境安全指标状况进行周期性分析，结论如下：

(1) 生态安全指数呈波折上升趋势。根据图 4 可以看出，长株潭城市群县域生态环境安全指数在不同阶段的演变过程中呈现波谷、波峰相间交替规律，其中在 2008 年，长株潭城市群总体生态安全突然下降，一直波动到 2011 年才逐步回升，主要原因是 2008 年的冰灾对整个长株潭城市群植被、农作物等造成严重破坏。

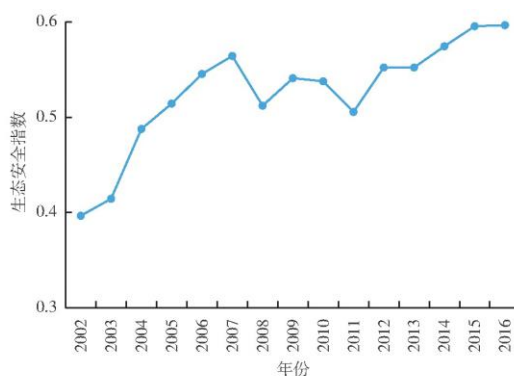


图 4 长株潭城市群县域生态安全演变趋势

(2) 生态环境安全程度的区域分异规律。为了分析长株潭城市群县域生态环境安全程度的区域分异规律，运用县域 DPSIR 指标度量各县（市）生态环境安全程度，结果如图 5 所示。由于区域生态环境安全是以人类赖以生存的环境（或生态条件）的安全为思考的主体，县域发展水平和环境状况的差异造成了生态环境安全隐患因素在各县域也存在着区别^[28]。

就整个长株潭城市群生态环境的改善而言，呈现出明显的空间差异，15 年来长株潭城市群生态环境没有明显改善，但状态与响应却得到逐步改善，这说明生态环境保护执行到位，可是影响结果却是下降的，这就意味着长株潭地区环保政策或者体制内部存在矛盾，因为响应指标与影响指标出现背离。

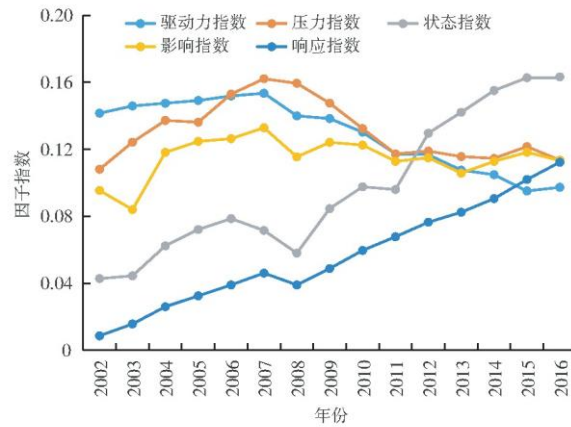


图 5 长株潭城市群生态安全指标趋势

3 结论

(1)有不少县域的生态环境安全的评价值呈波动下降趋势，如长沙县 2011 年的评价值最低，仅为 0.3967, 2006 年评价值达到最高，为 0.6433。这主要与长株潭城市群产业转移有关。

(2)驱动力是引起生态环境变化的潜在原因，驱动力因子选取 GDP、人口自然增长率、城镇化率三项指标。从权重看，GDP 为最主要的指标，呈逐年下降趋势；城镇化率和人口自然增长率都具有较大波动，这与全面开放二孩政策相关。

(3)从评价值来看，状态指标跟着压力指标在波动，且波动曲线趋势呈现相似性。如长沙县 2010 年是最糟糕的状态，2013 年有明显的改善，说明生态环境状况改善。从近 15 年的原始数据分析，2010 年水库库容量由 2009 年的 1.8196 亿 m^3 遽然下降到 2010 年 0.6644 亿 m^3 ，有效灌溉面积由 2009 年 4.80 万 hm^2 下降到 2010 年的 3.66 万 hm^2 和 2011 年 2.71 万 hm^2 ，究其原因是长沙县这两年大规模建设（2008 年国家 4 万亿投资政策见效），既破坏了水库也占用了大量耕地。

参考文献:

- [1]刘玉珂，金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 经济地理，2019, 39(1):182-191.
- [2]周彬，钟林生，陈田. 浙江省旅游生态安全的时空格局及障碍因子[J]. 地理科学，2015, 35(5):599-607.
- [3]秦晓楠，程钰. 中国旅游城市生态安全系统评估与类型划分研究——基于节点权重约束网络 DEA 模型[J]. 地理科学，2019, 39(1):156-163.
- [4]Norton S B, Rodier D J, Van der S W H, et al. A framework for ecological risk assessment at the EPA[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 11(12):1 663-1 672.
- [5]夏栗，李志华，刘大逵，等. 长株潭城市群生态足迹测算及其动态变化分析[J]. 湖南林业科技，2019, 46(2):8-13.
- [6]周国华，彭佳捷. 长株潭城市群生态足迹测算[J]. 湖南师范大学自然科学学报，2009, 32(3):95-1130.

-
- [7]Agency E E. Halting the loss of biodiversity by 2010:proposal for a first set of indicators to monitor progress in Europe[R].Eea Technical Report, 2007.
- [8]Bowen R E, Depledge M H. Rapid assessment of marine pollution(RAMP) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 53 (10-12): 631-639.
- [9]Tscherning K, Helming K, Krippner B et al. Does research applying the DPSIR framework support decision making? [J]. Land Use Policy, 2016, 29(1): 102-110.
- [10]Tone K, Tsutsui M. Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach [J]. Omega-International Journal of Management Science, 2014, 42(1): 124-131.
- [11]Larson, Jo M. Transforming power relationships: Building capacity for ecological security [J]. Gender & Development, 2002, 10(2): 92-101.
- [12]Jogo W, Hassan R. Balancing the use of wetlands for economic well-being and ecological security: The case of the Limpopo wetland in southern Africa [J]. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1569-1579.
- [13]Kevan P G, Menzel R. The plight of pollination and the interface of neurobiology, ecology and food security [J]. Environmentalist, 2012, 32(3): 300-310.
- [14]姬翠梅. 生态—经济—社会系统视角下的山西省农业生态安全评价 [J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(5): 174-179.
- [15]谢玲, 严土强, 高一薄. 基于 PSR 模型的广西石漠化地区土地生态安全动态评价 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 315-321.
- [16]李岩, 王珂, 刘巍, 等. 江苏省县域森林生态安全评价及空间计量分析 [J]. 生态学报, 2019, 39(1): 202-215.
- [17]李悦, 袁若愚, 刘洋, 等. 基于综合权重法的青岛市湿地生态安全评价 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 847-855.
- [18]徐海鹏, 焦亚鹏, 张红艳, 等. 基于物元模型的高寒草原生态安全评价——以天祝牧区为例 [J]. 草原与草坪, 2018, 38(6): 12-18, 26.
- [19]李玉平, 朱琛, 张璐璇, 等. 基于改进层次分析法的水环境生态安全评价与对策——以邢台市为例 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2019, 55(2): 310-316.
- [20]孙天晴, 杨泽慧, 程道来, 等. 温室气体减排技术评价实证研究——基于黑匣子理论与层次分析法 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018(2): 1-4.
- [21]徐志青, 刘雪瑜, 肖书虎, 等. 珠江三角洲地区水环境承载力评价及障碍因素研究 [J]. 环境工程技术学报, 2019(1): 44-52.
- [22]邓晓磊. 长江中游城市群城市竞争力研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2016.

[23]Van den Bergh E, Van Damme S, Graveland J, et al. Ecological rehabilitation of the schelde estuary(the Netherlands-Belgium;Northwest Europe):linkingecology, safety against floods, and accessibility forport development ecological rehabilitation of theschelde estuary[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(1):204-214.

[24]刘明, 刘淳, 王克林. 洞庭湖流域生态环境安全状态变化及其驱动力分析[J]. 生态学杂志, 2007(8):1 271-1 276.

[25]杨君, 何欢, 胡巧莲, 等. 基于路网密度的城市功能用地空间分布相关性研究——以益阳市中心城区为例简[J]. 经济地理, 2018, 38(12):97-103.

[26]陈晟. 基于机器学习的黑河中游作物需水量模型研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.

[27]陈燕, 罗婵, 陈星宇, 等. 长江三角洲区域生态安全时空演变[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2019(1):1-8.

[28]王明涛. 多指标综合评价中权数确定的离差、均方差决策方法[J]. 中国软科学, 1999(8):100-101, 107.