

基于主成分分析的德阳土地生态安全格局解析

张蕊^{1,2}, 杨海镇^{1,2*}, 陈广全³

1. 青海民族大学政治与公共管理学院, 西宁 810007;
2. 青海省土地资源勘测与规划重点实验室, 西宁 810007;
3. 青海鼎世地矿有限公司, 西宁 810007)

摘要:随着科技飞速发展、经济稳步增长以及频繁的人类生产生活活动的开展,给许多地方的生态环境造成了越发严重的压力。本研究聚焦四川省德阳市,采用主成分分析法,对土地生态安全评价所涵盖的3个维度对应的13项评价指标进行降维处理与深度解析。通过构建科学合理的评价指标体系,系统采集相关数据并进行标准化处理,精准提取主成分,最后计算综合评分。研究表明,德阳市的各区县土地生态安全呈现明显区域分化特征,生态安全稳定性排序为:旌阳区>广汉市>什邡市>中江县>绵竹市>罗江区。除旌阳区和广汉市两个研究单元外,其余区县的综合得分均处于负值状态,这个结果反映出了德阳市土地生态安全整体水平亟待提升。

关键词:土地生态安全;主成分分析;德阳市;可持续发展

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)11-0054-7

0 引言

土地是人类赖以生存的一种重要的自然资源。在经济快速发展的背景下,城市城镇化和工业化进程加快,城镇人口和建设用地增长迅速^[1]。现下由于许多土地资源没有节制的开发和利用导致生态问题不断加重,土地生态安全目前成为抑制地区可持续发展的重要因素之一。土地生态安全评价是协调“人”与“地”的关系、保障区域可持续发展的可靠工具,其核心内涵在于揭示土地利用过程中自然系统与社会经济系统的动态协调机制。土地生态安全评价是土地生态安全管理和建设的基础^[2],开展土地生态安全评价是目前土地生态研究的主要方向^[3]。德阳市作为成渝经济圈的重要工业城市,开发过度与生态保护的矛盾日益加深,这种快速城镇化与生态脆弱交织的特征使其成为探究过渡带土地生态安全驱动机制的理想研究区域。因此,开展德阳市土地生态安全评价研究,对于促进土地资源合理利用、维护区域生态安全

以及推动经济社会可持续发展具有重要意义。

1 研究区域概况

德阳市,又名“旌城”,地处龙门山脉与四川盆地地质构造交汇区域。区域气候特征呈现显著空间分异性:西北部呈现山地垂直气候特征,东南部属于亚热带季风湿润气候区,年均降水量梯度变化介于900-1300mm。该市行政辖区总面积5911km²,2023年末户籍人口登记数量为345.3万,行政建制包含2个市辖区、1个县级行政单位及3个代管县级市。德阳市是成渝经济圈的重要城市之一,是成渝地区双城经济圈中衔接山地生态屏障与平原城市群的重要节点城市。其复杂的地貌与频繁的人类活动叠加特征,为解析土地生态安全演变机制提供了典型空间案例。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究以德阳市2个区、3个县级市和1个县为研究对象,并从《德阳统计年鉴2023》《四川

表 1 德阳市土地生态安全评价指标体系

目标层	指标类型	指标名称	指标性质
土地生态安全评价	自然因素	A1 人均耕地面积($\text{hm}^2/\text{人}$)	+
		A2 人均粮食产量(吨/人)	+
		A3 人均公共绿地面积($\text{m}^2/\text{人}$)	+
		A4 森林覆盖率(%)	+
		A5 城镇化率(%)	+
		A6 人口密度($\text{人}/\text{km}^2$)	-
	社会因素	A7 人口自然增长率(%)	-
		A8 污水排放量(万吨)	-
		A9 城市污水治理率(%)	+
	经济因素	A10 单位农用化肥施用量(kg/hm^2)	-
		A11 第三产业增加值占 GDP 比重(%)	+
		A12 人均 GDP(元/人)	+
		A13 第二产业增加值占 GDP 比重(%)	-

注：“+”代表正向指标，“-”代表负向指标。

统计年鉴 2023》中收集了有用的信息。根据土地生态安全评价指标体系,指标的选取充分体现了科学性、可操作性、有用性的原则,该体系包括目标层、准则层和指标层^[4],从“自然-社会-经济”三个维度确定评价指标,对这些信息进行了标准化,并对 13 个指标(包括人口密度、人口自然增长率、人均 GDP、人均耕地面积、第三产业占比、污水排放量、农用化肥施用量、城镇化率、人均粮食产量、人均公共绿地面积、城市污水治理率、第二产业占比和森林覆盖率)的结果做出了统一的分析,最终得出了有效的结论(表 1)。

2.2 研究方法

2.2.1 主成分分析

本研究运用主成分分析法对德阳市的土地生态安全开展评价工作。主成分分析法作为经典的多元统计手段,是通过线性组合运算,将多组原始变量重新整合成彼此独立的主成分,在实现大量数据降维的同时,有效地解决了变量之间的多重共线性问题。

主成分分析法的研究步骤包括:

a. 构建涵盖多维度的土地生态安全评价指

标体系;

b. 系统采集相关数据并进行标准化处理;

c. 通过计算变量间的相关系数矩阵,探析数据的内在关联;

d. 运用特征值与累计贡献率标准提取关键主成分;

e. 基于主成分权重计算各样本得分及综合评价指数,完成量化评价。

2.2.2 指标选取

为了确保评价结果的可靠性与适用性,本研究在构建评价指标体系时,严格遵循指标构建的科学性、系统性、可操作性以及区域性四大原则。在指标选取方面,从其自然因素、社会因素以及经济因素三个维度展开,选取了 13 项指标,其中涵盖体现土地资源丰富度的人均耕地面积、体现生态环境优劣程度的森林覆盖率、反映经济发展水平的人均 GDP 以及衡量环境压力的污水排放量等,确保能够客观、全面地表现德阳市土地生态安全的实际状况。

2.3 主成分分析法分析步骤

(1) 设有 m 个研究单元(区域)、 n 个指标,

表 2 德阳市各县区土地生态安全指标标准化值

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
旌阳区	0.01	0.01	1.00	0.18	1.00	1.00	0.06	1.00	0.49	0.01	1.00	0.96	0.48
罗江区	0.86	0.89	0.15	0.39	0.37	0.12	0.67	0.01	0.10	0.01	0.01	0.60	1.00
广汉市	0.29	0.74	0.77	0.01	0.66	0.85	0.01	0.29	0.54	0.19	0.57	0.57	0.75
什邡市	0.29	0.48	0.24	1.00	0.44	0.16	1.00	0.18	0.29	0.14	0.55	1.00	0.73
绵竹市	0.57	0.93	0.01	0.82	0.51	0.01	0.61	0.12	0.01	0.16	0.43	0.77	0.88
中江县	1.00	1.00	0.10	0.70	0.01	0.09	0.30	0.09	1.00	1.00	0.47	0.01	0.01

初始样本矩阵如下：

$$X = [X_{ij}]_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) 计算指标间相关系数矩阵 R 的特征值和特征向量 e_j , 得到主成分 F_j :

$$F_j = X e_j \quad (2)$$

(3) 当第 j 个主要因素的累计方差贡献率超过 90%, 我们可以选择第 z 个因素, 它包括 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_z , 从而使得第 z 个因素能够更好地反映出最初的 z 项评估的结果。公式表明, 累计方差贡献率可以通过以下方式计算如下:

$$a = \sum_{i=1}^n a_j \quad (3)$$

(4) 根据研究单元的土地生态安全综合得分(PC)的评估, 我们可以使用这个方法来进行计算, 即以方差贡献率作为权重, 得到土地生态安全评价综合得分 PC 的表达式^[5]:

$$PC = aF_1 + bF_2 + \dots + nFn \quad (4)$$

此式中, a, b, \dots, n 代表各个主成分的方差贡献率, F 代表各个主成分的相应得分。

3 过程处理以及结果分析

3.1 数据标准化处理

由于评价指标之间存在量化差异, 其原始值域相差较大, 为确保多维指标数据的可比性, 本次评价采用了极差法, 对各项原始数据进行标准化处理^[6], 依据指标属性构建差异化转换模型: 对正向指标(积极)实施上限标准化, 对逆向指标(消极)实施下限标准化。具体如下:

(1) 正向指标采用上限测度公式:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

(2) 逆向指标采用下限测度公式:

$$X'_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个样本第 j 项指标的原始观测值; X_{\max} 、 X_{\min} 分别代表该指标时序数据集的最大值与最小值; $X'_{ij} \in [0, 1]$ 为标准化处理后的无量纲值。

最终得出标准化后的数据(表 2)。

3.2 主成分分析

对表 1 的原始数据进行标准化处理后通过主成分提取, 得到了 3 个主成分, 并且 3 个主成分累计方差贡献率达到 96.536%, 能够很好地反映原始变量的信息(表 3)。

表 3 中的结果说明, 前 3 项的累计方差贡献率总值超过了 95%^[7], 所以选定这 3 个主成分, 其累计方差贡献率为 96.536%。

在主成分分析方法中, 如果主成分权系数的绝对值越大, 则表明其相对应的指标对这一主成分的影响就越大。其中, 主成分 F1 是最重要的影响因素, 其方差贡献率最大, 为 54.655%。依

表 3 指标特征值及贡献率

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
F1	7.105	54.655	54.655
F2	3.908	30.064	84.718
F3	1.536	11.817	96.536

表 4 主成分载荷矩阵

指标	F1	F2	F3
A1	-0.914	0.219	-0.225
A2	-0.886	0.070	-0.374
A3	0.945	0.245	-0.153
A4	-0.619	-0.288	0.723
A5	0.948	-0.270	-0.075
A6	0.925	0.278	-0.225
A7	-0.543	-0.68	0.432
A8	0.924	0.192	0.198
A9	-0.013	0.966	0.143
A10	-0.555	0.799	0.210
A11	0.791	0.345	0.457
A12	0.606	-0.742	0.283
A13	0.070	-0.906	-0.404

据表 4 可以看出,第 1 主成分(F1)主要在人口密度、人均耕地面积、第三产业增加值占 GDP 比重、污水排放量、城镇化率、人均粮食产量、人均公共绿地面积这些因子上有较高的载荷,反映了各个地区的城市化驱动的社会经济综合发展。其中,该主成分在人口密度、城镇化率、第三产业增加值占比等因子上呈现强正载荷,而在人均耕地面积、人均粮食产量等指标上呈负载荷,揭示了德阳市“平原-丘陵”梯度发展模式下城市化进程与土地资源利用的深层矛盾。

第 2 主成分(F2)作为次主导影响因子,其方差贡献率达 30.064%。通过对表 4 的深入分析可知,F2 在人口自然增长率、人均 GDP、单位农用化肥施用量等五项指标上具有显著载荷,这些变量集中体现了区域经济发展水平与环境治理效能。值得注意的是,F2 在第二产业增加值占 GDP 比重、人均 GDP、城市污水治理率等指标上呈现负向,而与单位农用化肥施用量呈正向,这深刻反映出德阳市“产业结构调整与生态环境改善”的动态演变特征。该主成分的载荷分布情况表明,德阳市作为成渝地区典型的工业城市在土地生态安全维护过程中采取了以产业升级驱动环境治理的发展路径。然而,这种发展模

式由于生产方式革新滞后,可能会引发生态系统退化与经济发展失衡的双重风险,亟须在产业发展与生态保护之间寻求更平衡的解决方案。

最后第 3 主成分(F3),其方差贡献率相较于前两个主成分较低,为 11.817%,主要在森林覆盖率这一因子上有较高的载荷,反映了这些地区的生态本底条件,森林覆盖度越高的城市,得分越高,相应的土地状态也会越安全。F3 的独立贡献表明,尽管社会经济活动可短期改变土地状况,但区域生态安全格局仍然会受生态本底条件的刚性约束。

将各个主成分的最终得分与其方差贡献率加权求和得出德阳市各个区、县的土地生态安全评价综合得分,最后根据德阳市各区、县的土地生态安全评价综合得分得出排名(表 5)。

结合德阳市的土地资源状况,划定了德阳市土地生态安全的等级标准,土地生态安全标准评判阈值(表 6)。

表 5 德阳市土地生态安全评价综合得分及排名

	F1	F2	F3	PC	排名
旌阳区	4.9718	0.0369	0.5048	2.8830	1
罗江区	-1.1326	-1.5869	-0.2427	-1.1640	6
广汉市	2.2165	0.1725	-0.3945	1.2581	2
什邡市	0.1179	-1.6684	1.1529	-0.3118	3
绵竹市	-0.7824	-1.6526	0.4525	-0.9014	5
中江县	-2.3137	1.8567	0.5842	-0.6578	4

表 6 土地生态安全标准评判阈值

等级	安全区间	状态
I	>2	安全
II	1~2	较安全
III	0~1	临界安全
IV	-1~0	较不安全
V	<-1	极不安全

3.3 评价结果

本研究基于主成分分析法对德阳市各个区县的生态安全状况进行了系统评估,揭示了

显著的区域分异特征。生态安全稳定性排序为：旌阳区>广汉市>什邡市>中江县>绵竹市>罗江区。

以旌阳区、广汉市为代表的优势与风险并存的核心区。其核心驱动力(高载荷的 F1)源于高度城市化和社会经济发展活力。然而,该模式伴随显著负效应,即耕地资源挤压以及污染压力加剧,凸显了“平原-丘陵”梯度发展下城市化扩张与土地资源保护的深层矛盾。旌阳区的综合得分虽然领先,但其环境治理效能(F2)相对滞后,主要依赖第三产业及公共绿地缓冲生态压力。广汉市治理能力相对突出,但生态本底(F3)薄弱是其潜在短板。

罗江区、绵竹市、中江县构成的治理滞后型区域。其共性困境在于环境治理效能严重不足,表现为工业污染治理滞后与农业面源污染突出。罗江区问题尤为严峻,社会经济发展(F1)、环境治理(F2)及生态本底(F3)均处劣势,综合安全水平处于“极不安全”状态。绵竹市同时面临工业污染压力与生态基础(F3)脆弱/薄弱的制约;中江县虽环境治理能力相对较强(F2),但被落后的经济发展水平(F1)和脆弱的生态本底(F3)所抵消。

什邡市则是生态本底支撑型区域的典型案例。其突出的生态禀赋(F3)最高值,森林覆盖率是其关键的安全支撑点。然而,严重滞后的社会经济发展(F1)和相对不足的治疗效能(F2)极大制约了生态优势的转化效率,使其仍处于“较不安全”的警戒区间。

总之,德阳市土地生态安全呈现“核心区高值极化、外围区域普遍承压”的空间格局,整体水平亟待提升。城市化驱动(F1)与治理效能(F2)是主导区域分异的关键维度,生态本底(F3)则构成基础性约束条件。区域间发展失衡与结构性矛盾突出,亟需实施差异化、精准化的协同治理策略。

4 对策建议

4.1 核心区:刚性约束城市扩张,激活存量提质增效

核心区存在的根本问题是城市化扩张与耕地保护、污染加剧的矛盾(F1 主导风险)。可参考的具体路径:

(1)强化国土空间刚性管控:严格划定并严守“三区三线”,重点遏制旌阳区、广汉市建设用地无序蔓延。推行建设用地“增量递减、存量优化”机制,加大城镇低效用地、工矿废弃地再开发力度,提升土地集约利用水平和产出效益。

(2)构建城市生态缓冲体系:系统推进城市蓝绿空间网络建设(如旌阳区公共绿地拓展),增强生态韧性。严格控制高耗水、高排放产业准入,升级污水处理设施,探索污水资源化利用模式,源头削减污染负荷。

(3)创新耕地保护补偿机制:探索建立跨区域耕地占补平衡与生态补偿制度,确保核心区发展不逾越耕地保护红线。

4.2 治理滞后区:靶向攻坚污染治理,推动产业绿色转型

治理滞后区存在的核心问题则是环境治理效能严重不足,工业与农业污染突出(F2 主导风险)。因为这三个区县的差异性还是较大,针对这一问题具体分析。

(1)罗江区:实施“生态修复+产业重构”组合拳

a.生态修复工程:重点推进石亭江、凯江流域(罗江段)水环境综合治理与生态修复工程,建设滨水生态廊道和湿地净化系统。针对水土流失区域实施退耕还林还草和小流域综合治理。

b.产业转型路径:严控高污染传统产业,强制淘汰落后产能。依托本地资源禀赋,重点发展绿色食品加工、生态文化旅游、环保装备制造等低碳产业。全域推广生态农业模式,建立化肥农药减量增效示范区。

(2)绵竹市:聚焦工业污染深度治理与循环经济

a.工业清洁化改造:在白酒、磷化工等支柱

产业中强制推行清洁生产技术,如清洁能源替代、工艺升级、废水深度处理与回用。建设静脉产业园,促进工业固废资源化利用。

b. 农业面源系统防控:在重点流域(如绵远河)推广“生态沟渠+缓冲带+人工湿地”面源污染拦截系统,扩大测土配方施肥和有机肥替代覆盖面。

(3)中江县:强化农业绿色转型与生态保护协同

a. 全域推进生态农场建设:大规模推广病虫害绿色防控、有机肥替代、秸秆综合利用等核心技术。培育优质粮油、生态畜禽等绿色品牌。

b. 加强生态脆弱区保护:强化龙泉山脉(中江段)生态保育,实施森林质量精准提升工程,增强水源涵养能力。

4.3 生态本底优势区:创新价值实现机制,激活绿色内生动力

其存在的核心问题是生态优势显著但经济滞后制约其转化(F3优势未充分释放)。可以采用深化生态产品价值实现(EPV)模式:

(1)市场化路径:大力发展高品质森林康养基地、山地生态旅游和特色林下经济(如中药材、食用菌),打造区域性生态旅游目的地品牌。探索开展林业碳汇项目开发与交易。

(2)政策扶持路径:市县级财政设立生态产业发展专项基金,对有机农业、生态旅游运营等生态友好型企业给予贷款贴息、税收减免。探索建立基于GEP(生态系统生产总值)核算结果的财政转移支付和生态补偿机制。

(3)品牌赋能路径:创建“什邡生态产品”区域公用品牌,提升生态农产品附加值。

4.4 全域协同保障:完善监管体系,夯实科技与制度支撑

(1)构建智能监管网络:整合卫星遥感、物联网、大数据技术,建立覆盖主要污染源和生态敏感区的智能化在线监测预警平台。

(2)强化环境执法刚性:全面推行排污许可“一证式”管理,对超标排放、偷排漏排行为实施“红黄牌”警示与阶梯式从重处罚,落实生态环

境损害赔偿制度。

(3)推动农业生产绿色革命:在全市范围内,以生态农场为示范载体,全域推广前述农业绿色生产技术(有机肥、绿肥种植、绿色防控),建立贯穿“生产-监管-认证-营销”的绿色农业产业链。

5 展望

通过实施上述“分区施策、精准发力、全域协同”的治理策略,旨在有效破解德阳市土地生态安全面临的“城市化挤压、治理滞后、优势转化不足”等核心困境。关键在于构建“刚性约束(空间管控、污染治理)与柔性激励(价值实现、产业培育)”相辅相成的政策体系,促进土地资源利用方式向集约高效、绿色低碳、安全韧性的根本转变,最终实现区域经济社会高质量发展与生态环境高水平保护的动态平衡与协同共进。

参考文献(References):

- [1] 徐婕. 基于熵值法的德阳市城市土地集约利用综合评价[J]. 当代经济, 2018, 33(17): 62-65.
- [2] 刘娇, 张超, 孙晓莉, 等. 基于DPSIR模型的云南省土地生态安全评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(03): 113-121.
- [3] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于PSR模型的青铜峡市土地生态安全评价与预测[J]. 水土保持通报, 2018, 38(02): 148-153+159.
- [4] 李菲, 李媛. 基于PSR模型的太原市土地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 国土与自然资源研究, 2023, 44(01): 51-56.
- [5] 辛朋磊, 季晓云, 单婷婷, 等. 基于主成分分析法的江苏省水资源承载力评价[J]. 水利水电快报, 2023, 44(07): 27-32.
- [6] 赵清旭, 任亚哲, 陈敖民, 等. 基于DPSIR-TOPSIS模型的鄂尔多斯煤炭资源型城市土地生态安全评价[J]. 中国矿业, 2024, 33(S2): 56-62.
- [7] 李燕玲. 基于主成分分析的泸州市土地生态安全评价[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(09): 47-50.

作者简介:

第一作者:张蕊,2001 年生,女,四川中江人,硕士,青海民族大学政治与公共管理学院,主要研究方向为国土空间规划与用途管制。Email:2463584098@qq.com;

通讯作者:杨海镇,1973 年生,男,青海民和人,博士,青海民族大学政治与公共管理学院,教授,主要研究方向为土地资源管理、国土空间规划。Email:80433663@qq.com

Land Ecological Security Pattern in Deyang based on Principal Component Analysis

ZHANG Rui^{1,2}, YANG Haizhen^{1,2*}, CHEN Guangquan³

(1. School of Politics and Public Administration, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China;

2. Qinghai Province Key Laboratory of Land Resources Survey and Planning, Xining 810007, China;

3. Qinghai Dingshi Geological and Mineral Co., Ltd., Xining 810007, China)

Abstract: With the rapid advancement of technology, continuous economic growth, and intensified anthropogenic activities, the ecological environment in many regions is facing increasing pressure. This study focuses on Deyang City in Sichuan Province and applies Principal Component Analysis (PCA) to perform dimensionality reduction and quantitative interpretation of 13 indicators across three dimensions related to land ecological security. A scientifically structured evaluation index system was established, relevant data were systematically collected and standardized, principal components were accurately extracted, and comprehensive scores were calculated to assess ecological security performance. The findings indicate that land ecological security in Deyang exhibits pronounced spatial differentiation among its districts and counties, with the stability ranking as follows: Jingyang District > Guanghan City > Shifang City > Zhongjiang County > Mianzhu City > Luojiang District. Except for Jingyang District and Guanghan City, the comprehensive scores of all other regions are negative, suggesting that the overall level of land ecological security in Deyang urgently requires improvement.

Key words: land ecological security; principal component analysis (PCA); Deyang City; sustainable development