水土保持政策与农业生态效率耦合协调关系及其驱动因素

李文颜[1,2], 李良鑫[1,3], 邵景安[1,4]

(1.重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2.广安市教育科学研究所, 四川 广安 638550; 3.鲁甸县第一中学, 云南 昭通 657100; 4.三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘　要: [目的] 探究水土保持政策与农业生态效率耦合协调关系及其驱动要素,为深入理解水土保持政策与农业生态效率之间的协调关系提供新的视角和思路。[方法] 以三峡库区(重庆段)作为研究区,建立水土保持政策强度与农业生态效率评价指标体系,运用耦合协调度模型、地理探测器模型以及最小二乘法(OLS)回归分析 2015—2022 年区域内水土保持政策与农业生态效率耦合关系及其驱动机制。[结果] ①三峡库区(重庆段)内部各区域在政策强度与生态效率方面存在显著差异,方山丘陵和平行岭谷保土人居环境维护区在政策实施上表现出较强的增长势头,而其余区域则相对平稳;都市山水人居环境维护区农业生态效率表现优异,武陵山山地水源涵养保土区则相对较低,呈现出明显的两极分化趋势。②水土保持政策与农业生态效率之间的耦合协调度整体呈现上升趋势,都市山水人居环境维护区和方山丘陵保土人居环境维护区的协调程度尤为突出。然而,渝中平行岭谷保土人居环境维护区中的开州区则存在显著的失调现象。③农田水利设施投入有助于提升两者协调水平,合理控制播种面积也可以更积极地影响水土保持政策与农业生态效率之间的协调关系,经过反事实检验也进一步证实其回归结果的稳健性。[结论] 三峡库区(重庆段)为有效维护水土资源和农业生态安全,应坚持因地治理、区域联动的原则,积极引导社会各方参与形成治理合力,共同推动扶贫、保土、助农相结合的多元化帮扶模式发展。

关键词: 水土保持政策; 农业生态效率; 耦合协调度; 驱动力; 三峡库区(重庆段)

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2025)01-0393-12　　**中图分类号:** S157.1, S171.4

文献参数: 李文颜, 李良鑫, 邵景安.水土保持政策与农业生态效率耦合协调关系及其驱动因素[J].水土保持通报,2025,45(1):393-404. Li Wenyan, Li Liangxin, Shao Jingan. Coupling coordination relationship between soil and water conservation policy, agricultural eco-efficiency, and its driving factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):393-404. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.040; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.040.

Coupling coordination relationship between soil and water conservation policy, agricultural eco-efficiency, and its driving factors

Li Wenyan[1,2], Li Liangxin[1,3], Shao Jingan[1,4]

(1.*College of Geography and Tourism*, *Chongqing Normal University*, *Chongqing* 401331, *China*; 2.*Guang'an Institute of Educational Science*, *Guang'an*, *Sichuan* 638550, *China*; 3.*Ludian No.1 Middle School*, *Zhaotong*, *Yunnan* 657100, *China*; 4.*Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in Three Gorges Reservoir Area*, *Chongqing* 401331, *China*)

Abstract: [Objective] The coupling and coordination relationship between soil and water conservation policy and agricultural eco-efficiency, and its driving factors were analyzed to provide a new perspective and thinking for further understanding of the coordination relationship between soil and water conservation policy and agricultural eco-efficiency. [Methods] An evaluation index system for soil and water conservation policy intensity and agricultural eco-efficiency was established using the Three Gorges reservoir (Chongqing

收稿日期: 2024-10-13　　**修回日期:** 2024-10-27　　**采用日期:** 2024-10-28

资助项目: 国家社会科学基金重大项目"长江上游生态大保护政策可持续性与机制构建研究"(20&ZD096)

第一作者: 李文颜(1997—),男(汉族),四川省泸州市人,硕士研究生,研究方向为土地利用与生态过程。Email:2948413623@qq.com。

通信作者: 邵景安(1976—),男(汉族),安徽省亳州市人,博士,研究员,主要从事土地利用与生态过程方面的研究。Email:shao_ja2003@sohu.com。

section) as the research area. The coupling coordination degree model, geographical detector model, and ordinary least squares (OLS) regression were used to analyze the coupling relationship between the soil and water conservation policy and agricultural eco-efficiency, and its driving mechanism in the region from 2015 to 2022. [Results] ① There were significant differences in policy intensity and ecological efficiency among regions in the Three Gorges reservoir area (Chongqing section). The maintenance area of soil-conserving human settlements in the Fangshan Hills and parallel ridges and valleys showed strong growth momentum during policy implementation, whereas the rest of the region was relatively stable. The agricultural ecological efficiency of the urban landscape living environment maintenance area was excellent, whereas that of the Wuling Mountain water and soil conservation areas was relatively low, showing an obvious polarization trend. ② The degree of coupling coordination between soil and water conservation policies and agricultural ecological efficiency showed an overall upward trend, and the coordination degree of the urban landscape human settlement environment maintenance area and the Fangshan hilly soil conservation human settlement environment maintenance area was particularly prominent. However, there was a significant imbalance of that in Kaizhou District in the areas of soil conservation and human settlement in the parallel ridge valley of Yuzhong. ③ The input of farmland water conservation facilities was helpful in improving the coordination level, and reasonable control of the planting area could also more positively affect the coordination relationship between the soil and water conservation policy and agricultural ecological efficiency. The robustness of the regression results is confirmed using a counterfactual test. [Conclusion] To effectively maintain soil and water resources and agricultural ecological security, the Three Gorges reservoir area (Chongqing section) should adhere to the principles of local governance and regional linkages, actively guide all parties in society to participate in the formation of governance synergy, and jointly promote the development of a diversified support model combining poverty alleviation, soil conservation, and agricultural assistance.

Keywords: soil and water conservation policy; agricultural ecological efficiency; coupling coordination degree; driving force; Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

水土流失作为威胁国家粮食安全与生态安全的关键因素,其治理举措及成效对于农业可持续发展的引领作用不可忽视。近年来,中国政府针对水土流失问题,并基于农业高质量发展、可持续发展以及生态文明建设的核心理念,已制定并出台了一系列水土保持政策,作为行动准则与干预手段。然而,政策的制定与执行在不同行政区域内存在差异,影响了政策效果的发挥与区域间水土治理的协调性。因此,实现区域间水土治理的协同发展与政策优化,对于提升农业生态效率整体水平,缩小区域间差距尤为重要[1]。在此背景下,深入研究水土保持政策与农业生态效率之间的耦合协调关系,从农业生态效率视角优化水土保持政策设计,不仅有助于揭示政策执行中的问题与挑战,更对于完善政策体系、提升执行效率、推动农业可持续发展及维护国家粮食安全与生态安全具有重要的理论与现实意义。

目前,关于水土保持政策与农业生态效率相互关系的研究仍处于宏观层面的探讨阶段,即政策与效率之间的相互关系拓展出来的环境政策与生态效率之间的相互关系,尽管已有研究从整体上分析了环境政策对生态效率的影响趋势及作用机制,但在微观层面的深入剖析、具体政策措施的效应评估以及政策执行过程中的动态调整等方面仍存在较大研究空间。具体可以分为几个方面:①环境政策对生态效率的影响,高瑜玲等[2]研究认为环境规制与生态效率的影响呈现先抑制后促进的U形曲线关系,不同环境规制的影响存在异质性,包健等[3]运用超效率SBM模型实证分析了30个省份生态效率得出的结果与上述的一致。王瑶等[4]运用动态SDM模型测算生态效率加入了能源禀赋条件,认为在不同的能源禀赋条件下的影响存在差异。②环境政策对具体产业形态生态效率的影响,包括环境规制对工业[5]、旅游[6]、城市建设[7]、投资等[8]的影响研究。③针对环境政策对农业生态效率的影响研究,曹俐[9]和黄玛兰等[10]研究认为环境规制有利于促进农业生态效率提升,与之不同的是谢芳宇等[11]具体针对农业中畜禽养殖提出了具体的绿色认知,姜微等[12]也从林业视角探讨了环境规制的影响下林业生态效率与生态文明建设的意义,展进涛等[13]则从粮食安全的角度出发探讨了两者的关系。由此可见,从具体的环境政策视角切入探究农

业生态效率问题关系到粮食安全、农业可持续发展[14]和生态文明建设等,具有重要的研究价值。重庆市 2023 年发布的《重庆市水土保持公报》显示,农业领域水土流失面积占总的水土流失面积的 95%,而其中直接由农业生产活动造成的水土流失面积则占 31%,所占比例接近 1/3。基于此,本文以全国水土保持规划的起始年份 2015 年为时间节点,选取国家级水土流失防治重点区和特殊农业生态功能区——三峡库区(重庆段)作为具体研究区域,通过科学的方法测算该区域的水土保持政策强度与农业生态效率。在此基础上,本文深入开展两者之间的耦合协调分析,并运用驱动力探测,揭示水土保持政策与农业生态效率相互作用中的关键驱动因素。研究不仅聚焦于耦合协调过程中存在的问题,还深入探讨其背后的驱动机理,为深入理解水土保持政策与农业生态效率之间的协调关系提供了新的视角和思路。同时,也丰富了相关领域的理论体系,也为后续制定更加精准有效的水土保持政策、促进农业生态效率的持续提升提供有力的实证支持与实践指导。

1　研究数据与方法

1.1　指标体系构建

1.1.1　耦合机理　水土保持政策措施作为政府针对农业生产中环境损害行为采取的核心干预手段,其运作机制涉及物质资源与信息数据的持续交互流通,该过程主要围绕两个核心维度展开。①以农业生产主体为中介的维度;②以环境状况为直接表现的维度。在以农业生产主体为中介的维度中,合理的水土保持政策通过提供技术支持、资金补贴以及实施法律约束等手段,有效激发农业生产主体的积极性,并规范其生产行为,这促使农户采纳更为环保且高效的耕作方式并减少对环境的破坏,进而推动农业生态效率的提升。当农业生态效率提高,生产主体的收益随之增加,从而更加积极地执行和支持水土保持政策,并反馈更为详尽的生产与环境信息,为政府制定更加科学、全面的水土保持政策提供了重要依据,该过程即为正向的激励与反馈。相反,若水土保持政策制定不合理,则无法充分制约农业生产主体行为,进而产生负向的推动与反馈效应;在以环境状况为直接表现的维度中,当水土保持政策的制定科学且执行有力时,其能够显著提升水土流失治理的效能,增强土壤肥力,有效遏制面源污染,并通过土壤生产力的提升间接促进农业生态效率的优化,即为正向推动。当农业生态效率得以提升时,正面的物质与信息反馈将激励政府维持并加强水土保持政策的执行力度,确保政策的长期有效性和稳定性,即为正反馈。反之,若水土保持政策的制定存在缺陷或执行效率低下,非但不能促进农业生态效率的提升,反而可能引发“环境悖论”现象,即环境保护措施在特定条件下可能产生意料之外的环境负面效应[15],从而制约农业的可持续发展,即出现负推动。同时,若农业生态效率的提升受阻,负向的物质与信息反馈将促使政府审视现有政策的不足,也会推动政策的完善或调整,以适应农业发展的新需求。两个维度均充分表明水土保持政策与农业生态效率具有较强的耦合关系,此过程也形成了一个良性循环,即水土保持政策与农业生态效率之间的耦合互动(图 1),通过持续的反馈与调整,不断优化政策导向与农业实践,实现环境保护与农业发展的和谐共生。

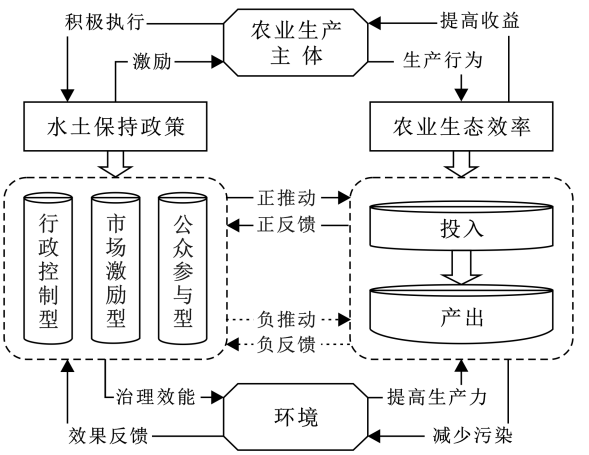

图 1　水土保持政策与农业生态效率耦合机理框架

Fig.1　Frame of coupling mechanism between soil and water conservation policy and agricultural ecological efficiency

1.1.2　水土保持政策强度　水土保持政策是政府为保护水土资源而采取的一系列行为规则,反映了政府解决环境问题的态度和决心。政策工具是实现水土保持政策目标的手段,根据目前政策目标实现手段的主流划分,本文将政策工具划分为行政控制型政策工具[16]、市场激励型政策工具[17]和公众参与型政策工具[18],以此表示水土保持政策强度。基于前人的研究基础和数据的全面性,本文在 3 个维度的基础上选取了水土保持执法检查次数、水土保持方案审批数量和水土流失执法检查项目数量表征行政控制型政策工具,指标选取的依据主要基于政府对水土保持工作的直接监管和管理能力,三者共同构成了评估政府行政控制力度的综合体系,不仅反映了政府在水土保持方面的执法效率和监管水平,还体现了政府对水土保持项目审批和违法行为查处的严格程度;用水土保持投资、水土保持补偿费和农林水支出表征市场激励型政策工具,该指标侧重于政府通过经济手段引导和支持水土保持工作的能力,有助于评估政府市场激励政

策效果;用平均受教育年限、水土流失面积比例和地表水环境质量排名得分表征公众参与型政策工具,即公众参与水土保持工作效果的综合体系反映了公众对水土保持工作的认识和重视程度,并且直接体现了公众在水土保持方面的实际参与和贡献。理论上,平均受教育年限越高,公众对环境保护的认识和重视程度通常也越高。同样,水土流失面积比例作为政府环境宣传教育的重要内容,可以直观展示其在环境保护和水土保持方面的努力和成效,激励公众对政府环保政策的支持和配合。基于此,本文对 9 项指标进行标准化处理并根据熵值法计算得出权重(表 1),进而计算得出水土保持政策强度。

表 1 水土保持政策强度评价指标体系及权重

Table 1 Evaluation index system and weight of soil and water conservation policy intensity

准则层	指标层	指标阐释	权重
行政控制型	水土保持执法检查次数/次	重庆市水土保持专项执法检查的次数	0.184
	水土流失执法检查项目数量/个	重庆市水土保持监督检查行动中检查项目数量	0.168
	水土保持方案审批数量/个	含水利部、市水利局以及区县级水行政主管部门审批水土保持方案	0.133
市场激励型	水土保持投资/万元	水土流失防治责任范围内所投入的水土流失防治资金	0.134
	水土保持补偿费/万元	水土保持生态补偿制度下向全市征收的水土保持补偿资金	0.180
	农林水支出/万元	政府在农业、林业和水利事业方面的公共预算支出	0.068
公众参与型	平均受教育年限/a	将各种受教育程度折算成受教育年限计算平均数得出的,具体的折算标准是:小学=6 a,初中=9 a,高中=12 a,大专及以上=16 a	0.045
	水土流失面积比例/%	(水土流失面积/土地总面积比例)×100%	0.030
	地表水环境质量排名得分	全市地表水按照城市水质指数进行排名计算得分,计算公式为:100-(排名×满分/排名总个数)	0.056

1.1.3 *农业生态效率* 农业生态效率是指以最少的资源投入和最小的环境代价获取最大的农业经济产出,它从资源与环境两个视角综合分析投入与产出的状况,能够客观反映出农业的可持续发展能力[19]。基于此,从两个视角综合分析投入与产出的状况,选取了劳动力投入使用乡村从业人员表示、土地投入使用农作物播种面积表示、水资源投入使用有效灌溉面积表示、动力投入使用农业机械总动力表示以及化肥投入、农药投入和农膜投入等作为投入指标,农业总产值作为期望产出指标,碳排放和污染排放综合指数作为非期望产出指标构建农业生态效率测算指标体系(表 2),客观地反映农业的可持续发展能力,旨在找到农业发展中经济效益与环境效益之间的平衡点,更好地协调水土保持政策与农业生态效率之间的耦合关系。

表 2 农业生态效率评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of agricultural eco-efficiency

目标层	准则层	指标层	指标说明
生态效率	投入指标	劳动力投入	乡村从业人员/万人
		土地投入	农作物播种面积/hm^2
		化肥投入	农用化肥施用量/t
		农药投入	农药使用量/t
		农膜投入	农膜投入/t
		机械投入	农业机械总动力/(10^4 kW)
		用水投入	有效灌溉面积/hm^2
	期望产出	农业产出	农林牧渔业总产值/万元
	非期望产出	污染排放	碳排放/t
			污染排放综合指数

选取化肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉、农业耕作 6 项指标估算农业碳排放量,采取的方法是相应指标乘以排放系数。采用化肥氮(磷)流失量、农药无效利用量、农膜残留量来表征污染水平,即污染排放综合指数[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 *超效率 SBM 模型* 将环境污染等非期望产出纳入目标函数,能够进一步区分有效率 DMU 之间的差异,解决考虑非期望产出的 SBM 模型的缺点[21]。基于此,Tone 在 SBM 模型的基础上构建了超效率的 SBM 模型,较之前的模型计算结果更精确。具体模型构建为:

$$\min\rho=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m}(\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{r_1+r_2}\left(\sum_{s=1}^{r_i}\overline{y^d}/y_{sk}^d+\sum_{q=1}^{r_2}\overline{y^u}/y_{uk}^d\right)} \tag{1}$$

$$\left(\bar{x}\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}x_{ij}\lambda_j;\ \overline{y^d}\leqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y_{sj}^d\lambda_j;\ \overline{y^d}\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y_{qj}^d\lambda_j\right.$$

$$\bar{x}\geqslant x_k;\ \overline{y^d}\leqslant y_{sj}^d;\ \overline{y^d}\geqslant y_{uk}^u$$

$$\lambda_j\geqslant 0, i=1,2\cdots m;\ j=1,2\cdots n;$$

$$\left.j\neq 0;\ s=1,2\cdots r_1;\ q=1,2\cdots r_2\right)$$

式中:n 为 DMU 的个数;j 为第 j 个 DMU;k 为当前效率计算的第 k 个 DMU;x 为投入指标;m 为投入指标的数量;i 表示第 i 个投入指标;y^d,y^u 分别为期望产出和非期望产出指标;r_1,r_2 分别表示期望产出和非期望产出指标的数量;s,q 分别表示第 s,

q 个期望产出、非期望产出指标；ρ 为生态效率值；λ 表示权重。

1.2.2　耦合协调度模型　该模型是用来评价系统之间相互影响程度的方法，显然，耦合协调度越高，则表示两个系统之间的协调状况越好[22]。本文将该模型运用于评价水土保持政策强度与农业生态效率之间的耦合协调程度，计算公式为：

$$C=2\times\left[\frac{(u_1\cdot u_2)}{(u_1+u_2)^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
$$T=\alpha u_1+\beta u_2 \tag{2}$$
$$D=(C\cdot T)^{\frac{1}{2}}$$

式中：C 为耦合度；D 为耦合协调度，范围为[0，1]，D 越大，表示水土保持政策强度与农业生态效率之间的耦合协调水平越好；D 越小，表示耦合协调水平越差；u_1，u_2分别表示水土保持政策强度和农业生态效率值。T 是两者之间的综合评价指数，在耦合协调度研究中，通常认为两者重要性一致，即 $\alpha=\beta=1/2$。根据相关研究，本文将水土保持政策强度与农业生态效率耦合协调度划分为 6 种类型，0～0.2 为极度失调，0.2～0.4 为一般失调，0.4～0.5 为勉强耦合协调，0.5～0.6 为初级耦合协调，0.6～0.8 为良好耦合协调，0.8～1 为优质耦合协调。

1.2.3　地理探测器　由王劲峰研究团队[23]研发的探测自变量对地理现象空间分异影响的一种模型，由分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测 4 个部分构成。因子探测用 q 值来度量，值域为[0，1]，q 值越大说明自变量对因变量的解释力越强。交互作用探测则是识别两个自变量的交互作用时是否会增强或减弱对因变量的解释度。本文利用模型中的因子探测和交互作用探测，定量研究了 2015—2022 年三峡库区（重庆段）水土保持政策与农业生态效率耦合空间分异驱动力。具体计算方式参考郭健斌等[24]的研究结果。

1.2.4　基准回归模型　为了进一步检验驱动因子对水土保持政策与农业生态效率耦合协调度的影响，构建基准回归模型，模型设定如下：

$$D_{it}=\alpha+\beta\mathrm{Cev}_{it}+\delta X_{it}+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \tag{3}$$

式中：下标 i 和 t 分别表示区县和年份；D 为被解释变量，表示水土保持政策与农业生态效率耦合协调度；Cev 表示核心解释变量；X 为控制变量集合；u 表示地区固定效应；v 表示时间固定效应；α，β，δ 为待估参数；ε 为随机扰动项。

1.3　数据来源及处理

水土保持政策强度指标数据来源于重庆市水利局历年发布的水土保持公报，其中平均受教育年限来源于重庆市第七次全国人口普查公报。生态效率指标数据和驱动力指标数据来源于《重庆市统计年鉴（2016—2022 年）》，缺失的部分数据由各区县统计年鉴或第二次农业普查公报补齐，部分指标根据 FORECAST 函数预测得到。矢量数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。由于渝中区城市化率已达 100%，农业产值为零，为了保持数据的一致性，渝中区未列入分析。水土保持数据运用熵值法计算得出权重。为了消除各指标量纲异质性的影响，首先把负向化指标全部正向化，然后将指标数据 min-max 标准化映射成在区间[0，1]中的值，最后根据标准化处理数据与各指标权重计算得出水土保持政策的最终强度。数据包络分析法无需对指标进行标准化处理。

2　实证结果与分析

2.1　水土保持政策强度分析

在国务院批复的《全国水土保持区划》三级分区基础上，重庆市结合水土流失现状与分布，进一步将全市划分为 6 个 4 级区，而三峡库区（重庆段）涉及渝东北大巴山山地保土生态维护区、渝东南武陵山山地水源涵养保土区、渝中平行岭谷保土人居环境维护区、都市山水人居环境维护区和渝西方山丘陵保土人居环境维护区 5 个 4 级区（图 2）。

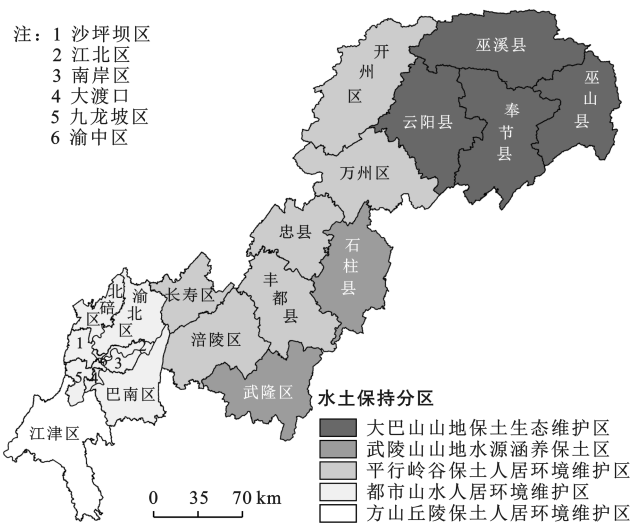

图 2　三峡库区（重庆段）水土保持规划分区

Fig.2　Zoning of soil and water conservation planning in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

根据上述公式，首先求得各水土保持区历年环境政策强度均值（图 3），可以看出，2015—2022 年水土

保持政策强度总体呈增长趋势，得益于生态文明理念下重庆市各级政府加大了对水土流失的治理力度，尤其是 2016 年出台的《重庆市水土保持规划(2016—2030 年)》加快了三峡库区等重点生态功能区水土流失综合整治的步伐。

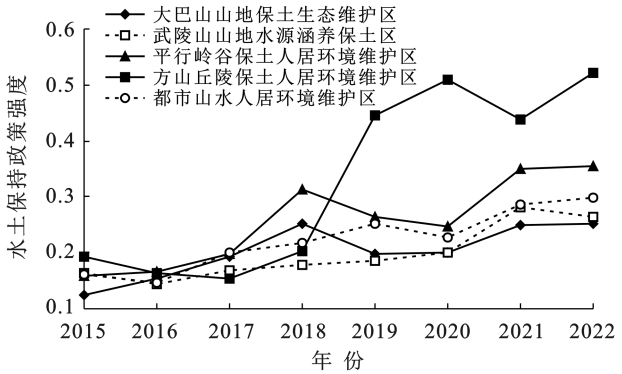

图 3 三峡库区(重庆段)各分区水土保持政策强度

Fig.3 Intensity of soil and water conservation policy in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

为了更细致分析各区域差异，将水土保持政策强度在空间上可视化，限于篇幅，选取 2016，2018，2020 和 2022 年作图(图 4)。图中显示，大巴山山地保土生态维护区(含巫山、云阳等地)水土流失广泛且重力侵蚀严重，敏感度较高，故环境政策增幅平缓连续。方山丘陵与平行岭谷保土人居环境维护区(如万州、涪陵等)作为生态功能区与农产品主产区，水土流失受农业活动影响显著，政策响应随农业活动破坏程度而异，呈现较大增幅。渝北、巴南、江津等地虽非平行岭谷区，但坡耕地与农业人口比例大，为农产品果蔬主要供应区，环境政策响应亦呈现相似增幅。都市山水人居环境维护区(如江北、大渡口、沙坪坝等)政策增幅平稳，因区域面积小、水土流失集中且主要由城市开发所致，政策响应连续集中。自 2015 年国家水土保持规划发布以来，各区域环境政策强度均呈增长趋势，但空间异质性明显。政策强度受自然环境复杂性和农业生产状况双重影响，自然环境越复杂，政策执行越困难；不同耕作方式与强度亦导致政策响应不规则变化。

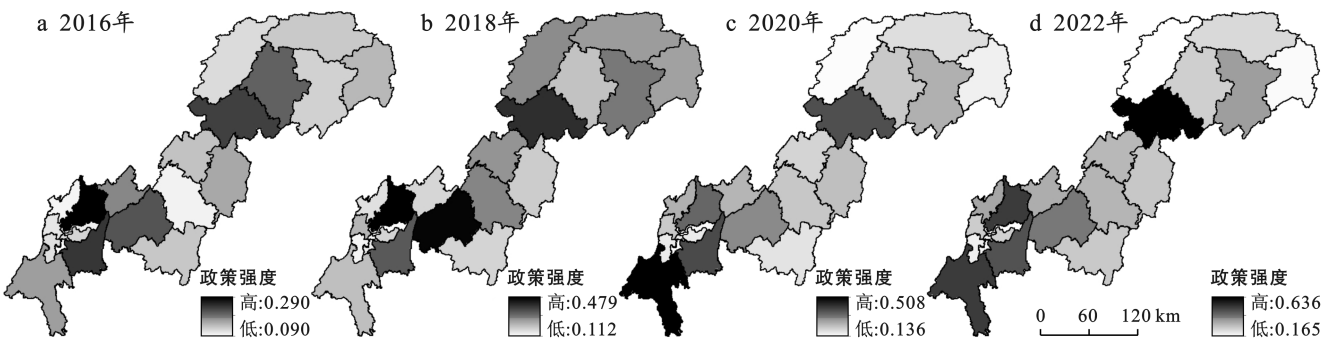

图 4 三峡库区(重庆段)各区县水土保持政策强度

Fig.4 Intensity of soil and water conservation policy in each district and county of Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

2.2 农业生态效率分析

通过 max DEA 软件并运用超效率 SBM 模型计算三峡库区(重庆段)农业生态效率并根据水土保持分区将其表示(图 5)。整体上，区域间生态效率虽在个别年份有所波动，但总体呈现增长趋势，归因于重庆市在水土流失及坡耕地治理方面的强化措施，以及农业综合开发、石漠化及土地治理范围的扩大，为农业生态效率提升奠定了坚实基础。

空间分布上(图 6)，都市山水人居环境维护区(如南岸、江北)展现出较高生态效率，得益于其山水田林路村综合治理策略及水土保持型休闲观光农业的发展。大巴山山地保土生态维护区(如巫溪、巫山)生态效率增幅显著且波动大，一方面因预防为主的水土保持政策导致资源转化效益滞后，另一方面因坡耕地水土流失整治及高标准基本农田建设周期长，治理完成后效率显著提升。武陵山山地水源涵养保土区(如武隆)生态效率较低，主要受地形复杂、耕地稀缺及土壤贫瘠限制。

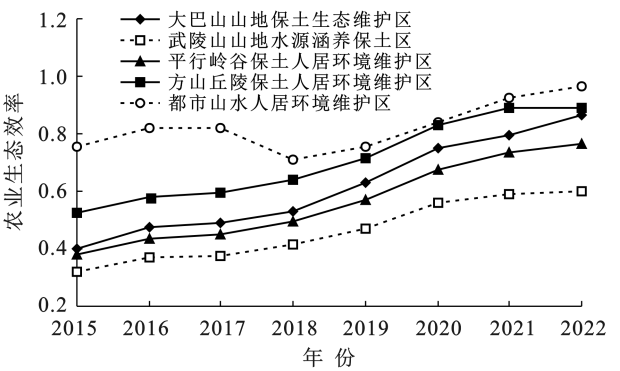

图 5 三峡库区(重庆段)各分区农业生态效率

Fig.5 Agricultural eco-efficiency at sub-areas in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

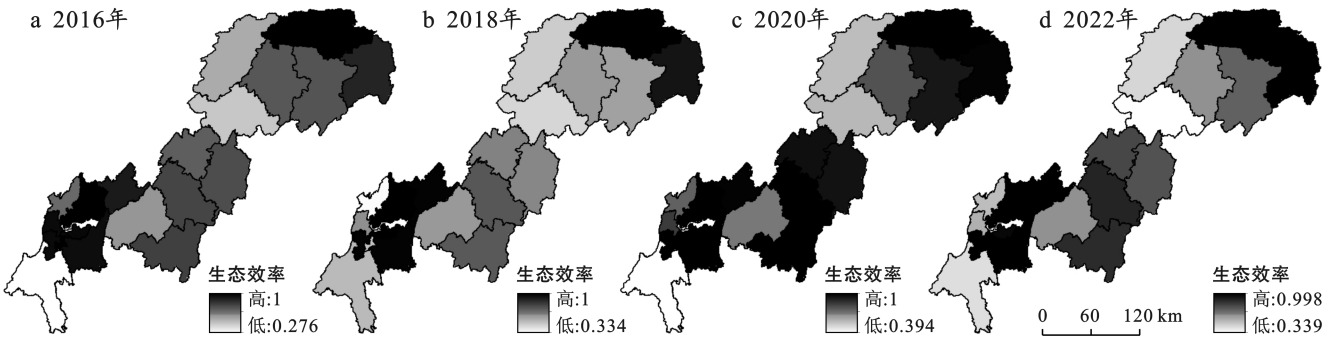

图 6　三峡库区(重庆段)各区县农业生态效率

Fig.6　Agro-ecological efficiency of each district and county in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

2.3　水土保持政策与农业生态效率之间的耦合协调分析

两者之间耦合协调度整体呈上升趋势(图 7),都市山水与方山丘陵人居环境维护区协调度较高,或归因于区域经济发达、农业比例低,水土流失治理与农业综合开发成效显著。渝中平行岭谷区失调严重,因水土流失集中区和谷地农业集中区地形分异导致水土流失与农业发展关联度弱。江北等都市区域因农业比例低且重视不足而失衡。大巴山与武陵山山地区因地势复杂,治理难度大,耦合协调度居中。整体而言,良好耦合协调占主导,但部分区县如巫山县 2021 年转为一般失调,反映各区县在自然与社会经济条件上的异质性导致政策执行差异,耦合协调度变化不规则。至 2022 年,良好与优质耦合协调区县比例超 60%,表明水土保持政策有效推动农业生态效率进入新阶段。水土保持政策与农业生态效率的耦合协调程度受多重因素影响,可划分为 3 种关系类型:①双滞后型。出现在大巴山与武陵山地区(如巫山、巫溪、武隆),受喀斯特地貌、山高坡陡、土壤贫瘠及经济社会发展滞后影响,导致水土保持政策执行难、农业生态效率低;②双并进型。表现于都市山水与方山丘陵区(如江津、渝北、巴南),得益于经济发达、水土治理投资充足及市场导向型农业的高效生产;③矛盾型。出现在平行岭谷区(如开州、石柱、丰都),源于水保区与农业区的地形分离,但随着土地整治工作的推进,矛盾将减少,协调关系将进一步得到优化。

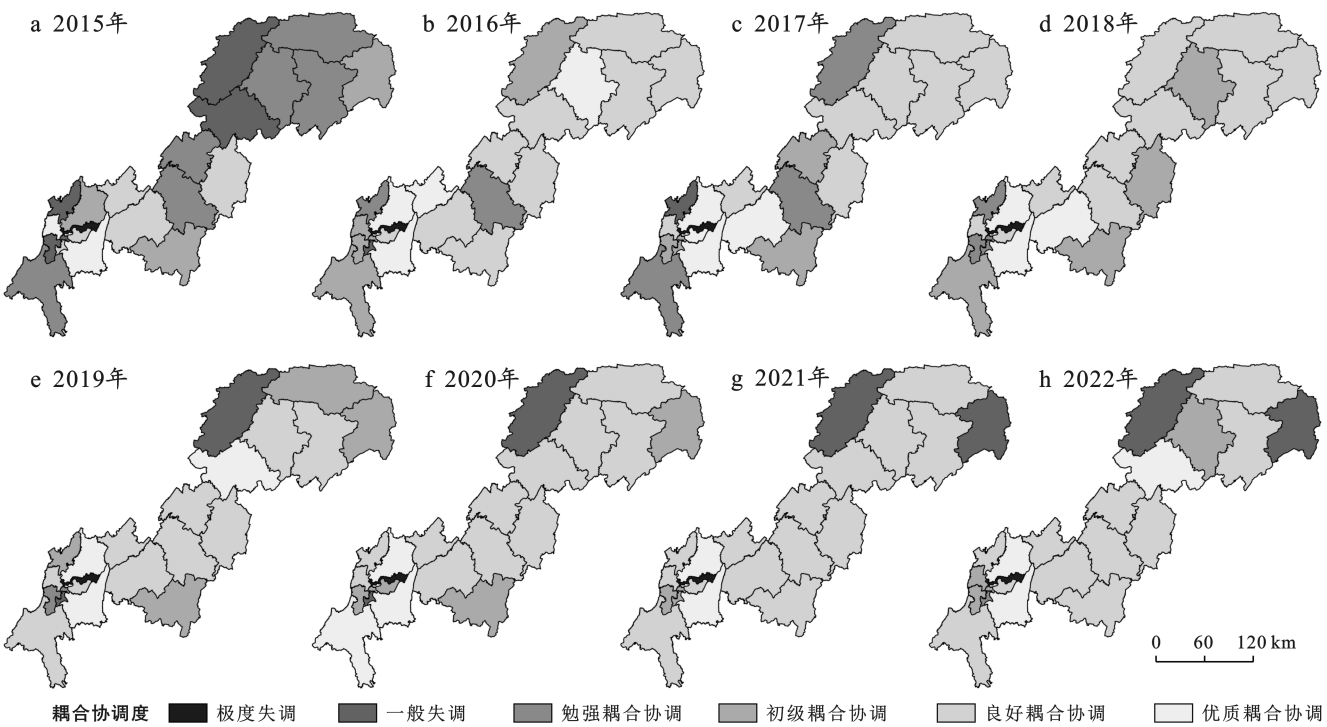

图 7　三峡库区(重庆段)各区县 2015—2022 年耦合协调度分布

Fig.7　Distribution of coupling coordination degree of each district and county in Three Gorges reservoir area (Chongqing section) from 2015 to 2022

3 水土保持政策与农业生态效率耦合协调度影响因素分析

3.1 变量选取

为了进一步探究水土保持政策与农业生态效率耦合协调影响因素，推动水土保持政策与农业生态效率之间的耦合协调发展。鉴于此，以耦合协调度作为因变量，从社会经济条件和农业生产状况两个方面选取自变量，选取了城镇化率(X_1)、第一产业比重(X_2)、农田水利设施投入(X_3)、区县级地方财政支出(X_4)农村居民人均可支配收入(X_5)、全员劳动生产率(X_6)、粮食单产量(X_7)、乡村人均农作物播种面积(X_8)等 8 个要素对水土保持政策与农业生态效率耦合协调度进行驱动力探测。为了满足地理探测器要求的类型变量，故在 Arc GIS 中使用自然段点法对自变量划分为 5 级(表 3)。

表 3 耦合协调度影响因素及分类

Table 3 Influencing factors and classification of coupling coordination degree

表征类型	驱动因子	变量说明	符号表示	类别数量
社会经济条件	城镇化率/%	城镇人口/常住人口	X_1	5
	第一产业比重/%	第一产业生产总值/总产值	X_2	5
	农田水利设施投入/万元	农业生产中基础设施投资	X_3	5
	区县级地方财政支出/万元	区县级地方财政支出金额	X_4	5
农业生产状况	农村居民人均可支配收入/元	农村居民人均可支配收入	X_5	5
	全员劳动生产率/(元·a^{-1})	劳动生产总值/全部从业人员平均人数	X_6	5
	粮食单产量/(kg·hm^{-2})	粮食产量/粮食播种面积	X_7	5
	乡村人均农作物播种面积/(hm^2/人)	农作物播种面积/乡村从业人员	X_8	5

3.2 主导因素识别

因子探测分析结果(表 4)揭示了社会经济条件与农业生产状况两大维度在水土保持政策与农业生态效率耦合协调度上的影响存在显著差异性。具体而言，城镇化率、农田水利设施投入、农村居民人均可支配收入以及乡村人均农作物播种面积等 4 个因子展现出较为突出的影响力，其 q 值均值均大于 0.3。其中，农田水利设施投入与乡村人均农作物播种面积的解释力度尤为显著，被视为影响耦合协调度的主导因子。第一产业比重等其余 4 个因子解释能力相对较弱，q 值均值介于 0.1～0.3，其中，第一产业比重、区县级地方财政支出和粮食单产量 q 值均值介于 0.2～0.3，是未来影响耦合协调的潜在因素。全员劳动生产率解释能力最为薄弱，除 2016 年与 2018 年外，其余时间段 q 值均小于 0.2。基于时间演变视角，不同驱动因子随年份波动。主导因子农田水利设施投入与乡村人均农作物播种面积的解释力均呈增强趋势。农田水利设施投入的 q 值由 2015 年的 0.306 显著提升至 2022 年的 0.751(2017 年略有下降)，乡村人均播种面积的解释力从 0.017 增至 0.32，虽有波动但整体增强。这表明农田水利基础设施的完善有助于水土保持政策与农业生态效率的耦合协调发展，而合理控制播种面积对两者关系的协调至关重要。同时，城镇化率与农村居民人均可支配收入的解释力上升，反映收入提升与人口城镇化减少了对农业生产的依赖，降低了环境破坏风险。其他因子解释力相对较弱，全员劳动生产率解释力基本稳定，表明其对耦合协调影响有限。

表 4 三峡库区(重庆段)水土保持政策与农业生态效率的耦合驱动影响分析(q 值)

Table 4 Analysis on coupling driving effects of soil and water conservation policy and agricultural eco-efficiency in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

变量	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	均值
X_1	0.064	0.337	0.106	0.358	0.395	0.513	0.358	0.473	0.325
X_2	0.138	0.436	0.237	0.338	0.209	0.318	0.211	0.395	0.285
X_3	0.306	0.313	0.227	0.316	0.363	0.411	0.737	0.751	0.428
X_4	0.215	0.223	0.156	0.091	0.393	0.353	0.157	0.243	0.229
X_5	0.378	0.287	0.072	0.359	0.346	0.482	0.269	0.399	0.324
X_6	0.167	0.201	0.065	0.252	0.164	0.093	0.149	0.045	0.142
X_7	0.049	0.260	0.155	0.224	0.277	0.232	0.316	0.383	0.237
X_8	0.017	0.493	0.188	0.348	0.549	0.419	0.272	0.320	0.326

3.3　交互作用探测

为深入探究驱动因子交互作用对水土保持政策与农业生态效率耦合驱动解释力的影响，对 10 个因子进行了交互探测。结果显示，双因子交互作用解释力均超越单因子，且以双因子增强和非线性增强为主（超 71%为非线性增强）。

选取 2016，2018，2020 和 2022 年探测结果排序（表 5），发现不同年份主导交互作用有所不同。2016 年为农田水利设施投入与粮食单产量，主要受 2016 年《重庆市水土保持规划（2016—2030 年）》全面开展的推动；2018 年为区县级地方财政支出与粮食单产量；2020 年转为农田水利设施投入与乡村人均农作物播种面积；2022 年为全员劳动生产率和粮食单产量，均呈非线性增强。此外，城镇化率与粮食单产量、农田水利设施投入与区县级地方财政支出等交互作用亦显著，但变化不稳定，凸显政府支出与农户关联的重要性。因此，建立与经济社会发展水平相适的水土保持投入机制，统筹水土流失治理，提高粮食单产与农户收益，对推进水土保持生态文明建设至关重要。

表 5　三峡库区（重庆段）影响因子交互探测结果

Table 5　Interactive detection results of impact factors in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

2016 年			2018 年			2020 年			2022 年		
交互因子	q 值	TP	交互因子	q 值	TP	交互因子	q 值	TP	交互因子	q 值	TP
$X_3 \cap X_7$	0.908	NE	$X_4 \cap X_7$	0.775	NE	$X_3 \cap X_8$	0.960	NE	$X_6 \cap X_7$	0.925	NE
$X_2 \cap X_8$	0.891	BE	$X_5 \cap X_7$	0.772	NE	$X_1 \cap X_7$	0.912	NE	$X_3 \cap X_4$	0.922	BE
$X_4 \cap X_8$	0.875	NE	$X_4 \cap X_5$	0.764	NE	$X_2 \cap X_7$	0.888	NE	$X_4 \cap X_7$	0.917	NE
$X_7 \cap X_8$	0.857	NE	$X_1 \cap X_7$	0.758	NE	$X_1 \cap X_6$	0.850	NE	$X_2 \cap X_3$	0.905	BE
$X_1 \cap X_8$	0.853	BE	$X_4 \cap X_8$	0.752	NE	$X_5 \cap X_7$	0.839	NE	$X_3 \cap X_6$	0.902	NE
$X_4 \cap X_5$	0.848	NE	$X_2 \cap X_7$	0.723	NE	$X_6 \cap X_7$	0.832	NE	$X_3 \cap X_7$	0.893	BE
$X_2 \cap X_7$	0.834	NE	$X_2 \cap X_4$	0.721	NE	$X_3 \cap X_5$	0.782	BE	$X_3 \cap X_8$	0.889	BE
$X_3 \cap X_8$	0.814	BE	$X_7 \cap X_8$	0.719	NE	$X_1 \cap X_3$	0.769	BE	$X_3 \cap X_5$	0.888	BE

注：TP 为类型；BE 为双因子增强型；NE 为非线性增强型。

3.4　实证检验

3.4.1　基准回归　为了进一步检验影响因子对耦合协调度的影响，以耦合协调度作为被解释变量，影响因子作为解释变量构建面板回归模型进行检验，借助 Stata 15 软件，通过经 Hausman 检验后选取固定效应模型进行回归。自变量的方差膨胀因子（VIF）低于 10，说明不存在多重共线性。由表 6 回归结果可知，农田水利设施投入和乡村人均农作物播种面积对变量的影响是正向且显著的，进一步验证了上述主导因子的结论，结论再次表明经济上驱动和合理的耕作布局是两者耦合协调发展的主导动力，加大对农田水利设施的投入、提高治理单位面积水土流失投资标准、规范农作物播种范围能够推动水土保持政策与农业生产之间的协调发展。

表 6　三峡库区（重庆段）影响因子回归结果

Table 6　Influence factor regression results in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)

变　量	OLS 回归	提前 1 a	提前 2 a	提前 3 a
X_1	0.002(0.003)	0.016(0.011)	0.018(0.012)	0.014(0.012)
X_2	0.999(0.701)	0.008(0.011)	0.005(0.008)	0.002(0.006)
X_3	0.000***(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)
X_4	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)
X_5	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)
X_6	−0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)
X_7	0.002(0.018)	0.032(0.053)	0.051(0.047)	0.053(0.043)
X_8	0.674***(0.256)	1.715*(0.858)	1.527*(0.752)	1.076(0.655)
_cons	0.051(0.265)	−0.871(0.946)	−0.637(0.855)	−0.336(0.801)
年份固定/地区固定	是	是	是	是
R^2	0.354	0.349	0.354	0.324

注：括号内为标准误；*，**，*** 分别表示在 10%，5%和 1%的显著性水平上显著。

3.4.2 反事实检验 考虑到可能存在除解释变量以外的其他潜在因素对水土保持政策与农业生态效率耦合协调性的影响，本文进一步采用反事实检验方法来验证上述回归结果的准确性。将解释变量的时间分别提前至 2014，2013 和 2012 年后再进行回归，假若核心解释变量的系数仍然显著，那么则意味着驱动水土保持政策与农业生态效率耦合协调性的因素是源于其他的潜在因素。由表 6 反事实检验结果可以得出，核心解释变量农田水利设施投入均未通过显著性检验，乡村人均农作物播种面积在 2014 和 2013 年只通过了 10%的显著性检验，表明乡村人均农作物播种面积对于两者耦合协调性的作用存在被高估的现象，但是并不影响基准回归结论。再次表明农田水利设施投入和乡村人均农作物播种面积对变量的影响结果的结论是稳健的。

4 结论与建议

2015—2022 年，三峡库区（重庆段）的水土保持政策强度呈现出总体增长的趋势。政策强度的增长在空间上表现出明显的异质性，主要受自然环境复杂性和农业生产状况的双重影响，显然，在复杂自然环境下执行难度增加，而在农业生产活跃区域，政策响应则随农业活动破坏程度而异，显示出较大的变化；农业生态效率变化趋势与本区域在水土流失及坡耕地治理方面的强化措施息息相关，同时，不同区域在自然资源、生态环境、农业生产方式和经济发展水平等方面的差异以及农业综合开发、石漠化与土地治理范围的扩大都将进一步影响农业生态效率的变化；水土保持政策与农业生态效率的耦合协调度整体呈现上升趋势。都市山水与方山丘陵人居环境维护区表现出较高的耦合协调度，这与该区域的经济发达、农业比例低以及水土流失治理与农业综合开发的显著成效有关。然而，水土流失集中区和谷地农业集中区的地形分异也会导致其耦合协调出现分异。此外，各区县在自然与社会经济条件上的异质性对政策执行和耦合协调度也会产生影响。

驱动力分析揭示，政府经济投入与合理的农作物播种范围是促进水土保持政策与农业生态效率耦合协调的关键因素，具体体现在农田水利设施的投资建设与乡村人均农作物播种面积的合理调控上。深入探究发现，相较于单一因素的作用，多因素间的交互效应更为显著，其中，2016 年农田水利设施投入与粮食单产量的交互作用最为强烈，而至 2022 年，则转变为全员劳动生产率与粮食单产量的交互作用占据主导地位。此外，城镇化率与粮食单产量、农田水利设施投入与区县级财政支出以及区县级财政支出与粮食单产量之间的交互作用亦不容忽视，尽管交互作用呈现出一定的不稳定性。

综上所述，为增强政策强度并应对空间异质性，建议在“共抓大保护，不搞大开发”的理念指导下，持续加大水土保持政策的宣传，定期评估并优化政策执行效果，鼓励各级政府及部门合作。同时，根据区域特点制定差异化政策，加强区域交流，对执行困难区域提供必要的支持和帮助，如技术援助、资金补贴等，以减轻政策实施的阻力；为提升农业生态效率，需加大水土流失和坡耕地治理力度，提高土地质量和利用效率。推广先进农业技术和管理模式，加强农业综合开发推广，提高农业生产效率和生态效益。不断巩固提升高效区域成果，分析低效或波动区域原因并采取改进措施，加强区域间的联动和互补，形成优势互补、协同发展的格局；此外，要加强水土流失治理与农业开发的协调，对耦合协调度低的区域深入分析原因并加强政策引导，促进水土保持与农业政策衔接，形成政策合力，推动农业生态效率的持续提升。针对不同关系类型区域，需加大政策扶持，继续发挥优势并创新升级，加强土地整治，优化布局结构，实现水土保持与农业发展的深度融合与协调。总的来说，三峡库区（重庆段）为有效维护水土资源和农业生态安全，应坚持因地治理、区域联动的原则，积极引导社会各方参与形成治理合力，共同推动扶贫、保土、助农相结合的多元化帮扶模式发展，为三峡库区（重庆段）乃至全国的生态文明建设与农业高质量发展提供有力支撑。

参考文献(References)

[1] 侯孟阳，姚顺波.1978—2016 年中国农业生态效率时空演变及趋势预测[J].地理学报，2018，73(11)：2168-2183.
Hou Mengyang, Yao Shunbo. Spatial-temporal evolution and trend prediction of agricultural eco-efficiency in China: 1978—2016 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(11): 2168-2183.

[2] 高瑜玲，林翊.环境规制对区域生态效率的影响：基于中国省际面板数据的检验[J].福建农林大学学报(哲学社会科学版)，2018，21(3)：44-50.
Gao Yuling, Lin Yi. The impact of environmental regulation on the regional eco-efficiency: Based on the verification of provincial panel data in China [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Philosophy and Social Sciences), 2018, 21(3): 44-50.

[3] 包健，郭宝棋.异质性环境规制对区域生态效率的影响研究[J].干旱区资源与环境，2022，36(2)：25-30.
Bao Jian, Guo Baoqi. Influence of heterogeneous environmental regulation on regional ecological efficiency [J].

Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(2):25-30.

[4] 王瑶,陈怀超.能源禀赋、环境规制强度与区域生态效率[J].生态经济,2021,37(9):161-168.
Wang Yao, Chen Huaichao. Energy endowment, environmental regulation intensity and regional eco-efficiency [J]. Ecological Economy, 2021,37(9):161-168.

[5] 董会忠,闫梓昱,辛佼.环境规制对工业生态效率的影响机理研究:人力资本与科技研发的双重调节[J].华东经济管理,2022,36(3):1-11.
Dong Huizhong, Yan Ziyu, Xin Jiao. Study on the influence mechanism of environmental regulation on industrial ecological efficiency: Dual regulation of human capital and scientific and technological R & D [J]. East China Economic Management, 2022,36(3):1-11.

[6] 王梓瑛,王兆峰.环境规制对旅游生态效率影响的时空异质性研究:以长江三角洲城市群为例[J].长江流域资源与环境,2022,31(4):750-758.
Wang Ziying, Wang Zhaofeng. A study on spatial-temporal heterogeneity of environmental regulation on tourism eco-efficiency: Taking Yangtze River delta urban agglomeration as an example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(4):750-758.

[7] 钟成林,胡雪萍.异质性环境规制、制度协同与城市建设用地生态效率[J].深圳大学学报(人文社会科学版),2019,36(6):70-81.
Zhong Chenglin, Hu Xueping. Incentive and non-incentive environmental regulation, institutional coordination and ecological efficiency of urban construction land use [J]. Journal of Shenzhen University (Humanities & Social Sciences), 2019,36(6):70-81.

[8] Leiter A M, Parolini A, Winner H. Environmental regulation and investment: Evidence from European industry data [J]. Ecological Economics, 2011,70(4):759-770.

[9] 曹俐,范黎明,雷岁江.财政分权、环境规制与农业生态效率[J].统计与决策,2021,37(19):138-143.
Cao Li, Fan Liming, Lei Suijiang. Fiscal decentralization, environmental regulation and agricultural eco-efficiency [J]. Statistics & Decision, 2021,37(19):138-143.

[10] 黄玛兰,曾琳琳,李晓云.LCA 和 DEA 法相结合的农业生态效率研究:兼顾绿色认知和环境规制的影响[J].华中农业大学学报(社会科学版),2022(1):94-104.
Huang Malan, Zeng Linlin, Li Xiaoyun. Joint life cycle assessment and data envelopment analysis for assessing agriculture eco-efficiency: Considering the impacts of green cognition and government regulations [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2022(1):94-104.

[11] 谢芳宇,刘灵芝,赵佳佳.环境规制对肉鸭养殖生态效率的影响研究:兼论绿色认知的中介作用[J].中国农业资源与区划,2023,44(8):179-188.
Xie Fangyu, Liu Lingzhi, Zhao Jiajia. Influence of environmental regulation on the ecological efficiency of meat duck breeding: Considering the mediating role of green cognition [J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(8):179-188.

[12] 姜微,刘俊昌,胡皓.我国林业生态效率时空演变及环境规制门槛效应研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(6):166-174.
Jiang Wei, Liu Junchang, Hu Hao. Study on the temporal and spatial evolution of forestry ecological efficiency and threshold effect of environmental regulation in China [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020,40(6):166-174.

[13] 展进涛,徐钰娇.环境规制、农业绿色生产率与粮食安全[J].中国人口·资源与环境,2019,29(3):167-176.
Zhan Jintao, Xu Yujiao. Environmental regulation, agricultural green TFP and grain security [J]. China Population, Resources and Environment, 2019,29(3):167-176.

[14] Murty M N, Kumar S, Paul M. Environmental regulation, productive efficiency and cost of pollution abatement: A case study of the sugar industry in India [J]. Journal of Environmental Management, 2006,79(1):1-9.

[15] 李南洁,肖新成,曹国勇,等.面源污染下三峡库区农业生态环境效率及影子价格测算[J].农业工程学报,2017,33(11):203-210.
Li Nanjie, Xiao Xincheng, Cao Guoyong, et al. Agricultural eco-environment efficiency and shadow price measurement in Three Gorges reservoir area under non-point source pollution constraints [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11):203-210.

[16] 李冬琴.环境政策工具组合、环境技术创新与绩效[J].科学学研究,2018,36(12):2270-2279.
Li Dongqin. The interaction of regulation policy instruments, environmental technological innovation and performance [J]. Studies in Science of Science, 2018,36(12):2270-2279.

[17] 王红梅,王振杰.环境治理政策工具比较和选择:以北京 $PM_{2.5}$ 治理为例[J].中国行政管理,2016(8):126-131.
Wang Hongmei, Wang Zhenjie. The comparison and selection of policy instrument of environmental governance: In case of gorernance of beijing's $PM_{2.5}$ [J]. Chinese Public Administration, 2016(8):126-131.

[18] 陈宇科,刘蓝天,董景荣.环境规制工具、区域差异与企

业绿色技术创新：基于系统GMM和动态门槛的中国省级数据分析[J].科研管理，2022，43(4)：111-118.
Chen Yuke, Liu Lantian, Dong Jingrong. Environmental regulation tools, regional differences and green technology innovation of enterprises: An analysis of China's provincial panel data based on the system GMM and dynamic threshold [J]. Science Research Management, 2022, 43(4): 111-118.

[19] 王国峰，钱子玉，石瑞.中国农业生态效率研究热点和趋势分析[J].中国农业资源与区划，2023，44(10)：20-31.
Wang Guofeng, Qian Ziyu, Shi Rui. Research hotspots and trends of agriculture eco-efficiency in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(10): 20-31.

[19] 郑德凤，郝帅，孙才志.基于DEA-ESDA的农业生态效率评价及时空分异研究[J].地理科学，2018，38(3)：419-427.
Zheng Defeng, Hao Shuai, Sun Caizhi. Evaluation of agricultural ecological efficiency and its spatial-temporal differentiation based on DEA-ESDA [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 419-427.

[20] 王宝义，张卫国.中国农业生态效率的省际差异和影响因素：基于1996—2015年31个省份的面板数据分析[J].中国农村经济，2018(1)：46-62.
Wang Baoyi, Zhang Weiguo. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: An analysis based on panel data from 31 provinces in 1996-2015 [J]. Chinese Rural Economy, 2018 (1): 46-62.

[21] 汪亚琴，姚顺波，侯孟阳，等.基于地理探测器的中国农业生态效率时空分异及其影响因素[J].应用生态学报，2021，32(11)：4039-4049.
Wang Yaqin, Yao Shunbo, Hou Mengyang, et al. Spatial-temporal differentiation and its influencing factors of agricultural eco-efficiency in China based on geographic detector [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 4039-4049.

[22] 陈莹，杨芳玲.中国城镇化与土地财政耦合协调关系研究：基于省级面板数据的分析[J].南京农业大学学报(社会科学版)，2018，18(1)：106-114.
Chen Ying, Yang Fangling. Study on the coupling coordination between urbanization and land finance in China: An empirical analysis based on provincial panel data [J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018, 18(1): 106-114.

[23] 王劲峰，徐成东.地理探测器：原理与展望[J].地理学报，2017，72(1)：116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116-134.

[24] 郭健斌，张英，张志伟，等.基于地理探测器的藏东南高山峡谷区土地利用变化及其驱动机制：以西藏林芝市为例[J].中国农业大学学报，2023，28(4)：210-226.
Guo Jianbin, Zhang Ying, Zhang Zhiwei, et al. Land use change and its driving mechanism in the alpine gorge of southeast Tibet based on geodetector: A case study of Nyingchi City [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(4): 210-226.

(上接第113页)

[28] 兰泽凡，田小靖，牛祎凡，等.基于RUSLE模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价[J].水土保持研究，2024，31(3)：20-29.
Lan Zefan, Tian Xiaojing, Niu Yifan, et al. Evaluation on soil erosion based on RUSLE model in the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 20-29.

[29] 刘晓婉，彭定志，徐宗学.雅鲁藏布江流域NDVI对高程与降水的相依性研究[J].高原气象，2018，37(2)：349-357.
Liu Xiaowan, Peng Dingzhi, Xu Zongxue. Variability of NDVI with elevation and precipitation in Yarlung Zangbo River basin [J]. Plateau Meteorology, 2018, 37 (2): 349-357.

[30] 赵健，李蓉.雅鲁藏布江流域土壤侵蚀区域特征初步研究[J].长江科学院院报，2008，25(3)：42-45.
Zhao Jian, Li Rong. Soil erosion and subarea characteristics in Yarlung Tsangpo River basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25 (3): 42-45.