

雷社平, 樊艳翔, 解建仓. 中国西部水土流失风险评价及其与农林牧渔业发展的关联性研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 25–29, 52. [LEI ShePing, FAN YanXiang, XIE JianCang. Soil Erosion Risk Assessment in Western China and Its Correlation With the Development of Agriculture, Forestry, Animal Husbandry And Fisheries[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 25–29, 52. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.004.]

中国西部水土流失风险评价及其与 农林牧渔业发展的关联性研究^{*}

雷社平¹, 樊艳翔¹, 解建仓²

(1. 西北工业大学 公共政策与管理学院, 陕西 西安 710072; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 中国西部为我国水土流失的重灾区, 水土流失问题已对当地经济社会发展产生了一定的阻碍作用, 探究中国西部水土流失风险及其与农林牧渔业发展的关联性具有研究意义。该文以中国西部地区为研究对象, 采用熵权法、变异系数法、博弈论组合赋权法等方法对水土流失风险进行评估。并在此基础上使用灰色关联分析法探究水土流失风险与农林牧渔业发展的关联性。研究表明: ①中国西部省域水土流失风险整体较高, 其中内蒙古与新疆地区水土流失风险最高, 而西南区域水土流失风险整体高于西北地区。②水土流失风险与农林牧渔业发展密切相关、相辅相成、相互影响, 关联度由大到小依次是牧业、农业、林业、渔业。③西北省域粗放型的生产发展模式衍生了一定的环境问题, 由此也表现出其与农林牧渔业发展的关联性要整体强于西南区域。因此, 各地区要格外重视水土流失治理, 谨防人为活动过度破坏水土环境。

关键词: 中国西部; 水土流失风险; 农林牧渔业; 博弈论组合赋权法; 灰色关联分析法

中图分类号: X321; F12; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)03–0025–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.004

水土流失是当今世界普遍存在的问题^[1]。中国西部地区长期以来存在着较为严重的水土流失问题, 且自东向西水土流失问题逐渐加剧, 2020年西部地区水土流失面积为225.92万km², 中部地区水土流失面积为29.24万km², 东部地区水土流失面积为14.11万km², 总体看西部地区水土流失面积分布广, 存在较大的风险, 这也是西部地区水土流失治理备受关注的因素。而造成中国西部地区水土流失较为严重的因素有很多, 值得深入探索和研究。

关于水土流失风险测算的方法, 不同学者所采用的方法存在一定的差异, 主要有CSLE模型^[2]、RF–RUSLE模型^[3]、RUSLE模型^[4–6]、GIS模型^[7–11]、USLE方程^[12]。对于水土流失风险评估体系构建方面的研究, 学者们从造成水土流失的原因进行探析与构建, 多集中于自然性因素^[13–20], 且主要围绕降水、地形、植被、土壤等自然性因子, 人为性因素涉及相对较少。本文将全面考量自然与社会双重影响, 从多个维度入手并引入新的风险因素构建更加全面的水土流失风

险评价指标体系。此外关于水土流失与渔农林牧渔业发展的关联性研究, 以往研究多集中在质性分析方面, 且多从水土流失的危害入手进行分析。而就研究领域来看, 多集中于农业领域的关联性分析方面, 且成果均肯定了水土流失风险对农业生产的极大负面影响性^[21–26]。

综上所述, 在以往研究中, 学者们的研究主要集中在致险层面, 是不够全面的, 故本文综合前人工作基础上又引进致险因子和污染性致险因子, 这在以往的研究中是很少涉及到的。而加大水土流失风险的因素是较多的, 水土流失受气象、地形、土壤、植被和人为活动等多种风险因素影响和制约^[26], 因此构建一个更加全面的水土流失风险评估体系显得尤为重要, 也会大大提升水土流失风险评估的准确性。因此本文将使用新研究方法来构建更加全面的水土流失风险指标评价体系并且选用博弈论组合赋权法来对水土流失风险进行评估, 在此基础上探究水土流失风险与农林牧渔业发展的关系的理论分析扩充到实证分析。其中图1为本文研究框架图。

^{*} 收稿日期: 2022–10–13 修回日期: 2023–01–30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679188)

第一作者简介: 雷社平(1963–), 男, 汉族, 陕西西安人, 副教授, 主要从事环境资源与经济研究。

E-mail: 2848323256@qq.com

通信作者: 樊艳翔(1999–), 男, 傈僳族, 云南保山人, 硕士研究生, 主要从事环境资源与经济研究。

E-mail: 1094657837@qq.com

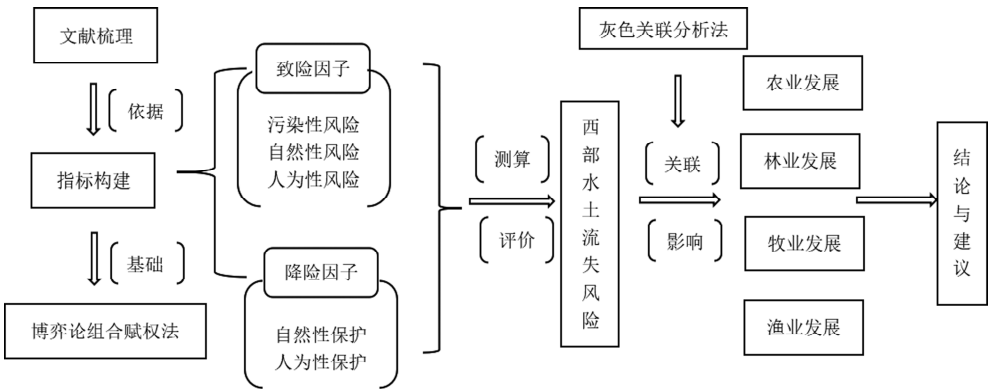


图1 研究框架图

1 研究设计

1.1 研究区域与数据来源

研究区域为中国西部 12 个省区，主要包括西北五省：新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西；西南五省：西藏、四川、云南、贵州、重庆；以及内蒙古和广西。基于数据一致性与可得性考虑，本文数据均来自《中国环境统计年鉴 2021》与《中国水利统计年鉴 2021》的 24 种数据。

1.2 中国西部水土流失风险评价指标体系构建

基于前人的研究成果，构建了中国西部水土流失风险评价指标体系，最终提取两个风险因子，正向风险因子为致险因子，负向风险因子为降险因子，并细分为 5 种风险类型，选取 24 个指标来对中国西部水土流失风险进行评估。由此可得中国西部水土流失评价指标体系如表 1 所示。

1.3 水土流失风险与农林牧渔业发展关联分析理论机理

地区水土流失风险与农林牧渔业发展相辅相成，相互影响，相互制约。从与农业发展的关联性来看，水土流失风险的加剧会产生诸如土层变薄，土壤肥力降低等生态问题，进而降低农田利用效率，影响粮食安全^[15-19]，而随着农业的发展，促使对农药、薄膜等化学制品的使用，进而又对水土环境造成破坏。就与林业发展的关联性来看，水土流失风险加剧会威胁到林木存活，但林业的发展一定程度会提升森林覆盖率，优化水土环境。就与牧业发展的关联性来看，牧业发展一定程度上会加大对草类食物生产，而各地区放牧的开展一定程度上也会对森林草场造成损害，破坏水土环境，而水土流失风险的加剧一定程度上对牧业发展提出了更高的要求甚至可能会产生阻抑效应。对于与渔业发展的关联性来看，一般情况下水土流失风险较大的地区其发展渔业整体难度较大，而渔业发展如果不注意可能会造成水体污染、水生态破坏等环境问题，进而加剧水土流失风险。

表 1 中国西部水土流失风险评价指标体系

风险因子	风险类型	指标层	单位
致险因子 A1	污染性风险 B1	工业污水排放量 a1	t
		农业污水排放量 a2	t
		生活污水排放量 a3	t
		一般工业固体废弃物排放量 a4	wt
	自然性风险 B2	沙化土地面积 a5	hm ²
		降水量 a6	mm
		洪灾面积 a7	khm ²
	人为性风险 B3	耕地面积 a8	khm ²
		城镇村及工矿用地面积 a9	khm ²
		交通运输用地面积 a10	khm ²
		现存采矿损毁土地面积 a11	hm ²
降险因子 A2	自然性保护 B4	森林覆盖面积 a12	whm ²
		森林覆盖率 a13	%
		园地面积 a14	khm ²
		林地面积 a15	khm ²
		草地面积 a16	khm ²
		湿地面积 a17	khm ²
	人为性保护 B5	水域及水利设施用地 a18	khm ²
		造林总面积 a19	whm ²
		污染治理项目本年完成投资 a20	万元
		林业草原投资完成额 a21	万元
		水土流失治理面积 a22	khm ²
		水土保持设施验收报备数量 a23	个
		水利建设完成投资额 a24	万元

1.4 研究方法

采用博弈论组合赋权法对中国西部各省区水土流失风险进行评估, 博弈论组合赋权法已被广泛运用到风险评估领域^[27-33]。该方法首先通过变异系数法求得各指标相关权重^[28], 接着使用熵值法求得各指标权重, 最后结合变异系数法与熵值法所求得的权重, 使用博弈论组合赋权法^[27]求得各指标组合权重。在计算完各方法下的权重结果后, 使用组内相关系数法^[33]检验三种方法下所测得的各指标权重是否具备一致性, 若具备一致性可根据线性加权的方式, 计算中国西部各省区的水土流失风险。在计算得到各区域水土流失风险评价后采用灰色关联分析法^[26,34]来分析水土流失风险与农林牧渔业的关联性。

2 结果与分析

2.1 水土流失风险各指标权重结果

表 2 为水土流失风险指标权重计算结果汇总表。针对三种不同方法而言, 三种测算方法下, 排

序第一的均为 a_5 , 而权重较高多集中在: a_5 、 a_{11} 、 a_1 、 a_3 、 a_6 、 a_7 。而权重较低的是 a_{19} 、 a_{24} 、 a_{14} 。而熵权法下计算结果与组合赋权法下计算的结果相似性较高, 很多指标权重在熵权法与组合赋权法下计算结果排序上基本保持一致。而变异系数法下, 总体上对各个标测算权重结果排序与其他两种大体一致, 个别指标存在出入, 比如 a_6 、 a_8 、 a_3 、 a_{18} 。而博弈论组合赋权法计算后, 恰恰能够把熵权法与变异系数法计算的权重结果排序进行了综合与调整, 结果更加地贴合实际情况。

2.2 一致性检验

依据组内相关系数法对熵值法、变异系数法、博弈论组合赋权法下所求得的三个权重进行一致性检验。表 3 为组内相关系数分析表, 针对单个测量的组内相关系数结果显示, 显著性 P 值为 0.000, 水平上呈现显著性, 说明信度具有一致性, 且相关系数为 0.625, 说明该数据的信度比较强。针对平均测量的组内相关系数结果信度也呈现出一致性。因此能够通过一致性检验, 可用来进行水土流失风险评估。

表 2 水土流失风险指标权重计算结果汇总表

风险因子	风险类型	指标层	熵权法权重	变异系数法权重	组合权重	各风险类型下最高组合权重
致险因子 A1	污染性风险 B1	a_1	0.067	0.049	0.061	√
		a_2	0.030	0.027	0.030	
		a_3	0.070	0.040	0.056	
		a_4	0.058	0.037	0.049	
	自然性风险 B2	a_5	0.170	0.082	0.125	
		a_6	0.045	0.029	0.038	
		a_7	0.058	0.041	0.052	√
		a_8	0.048	0.032	0.041	
	人为性风险 B3	a_9	0.043	0.030	0.038	
		a_{10}	0.043	0.025	0.035	
		a_{11}	0.096	0.052	0.075	√
降险因子 A2	自然性保护 B4	a_{12}	0.022	0.036	0.030	
		a_{13}	0.030	0.031	0.032	
		a_{14}	0.017	0.043	0.029	
		a_{15}	0.039	0.031	0.037	
		a_{16}	0.019	0.065	0.037	
		a_{17}	0.023	0.064	0.041	√
	人为性保护 B5	a_{18}	0.020	0.060	0.037	√
		a_{19}	0.015	0.023	0.020	
		a_{20}	0.015	0.047	0.028	
		a_{21}	0.013	0.047	0.026	
		a_{22}	0.022	0.031	0.028	
		a_{23}	0.023	0.043	0.033	
		a_{24}	0.014	0.037	0.024	

表 3 组内相关系数分析表

类型	组内相关性	95% 置信区间		使用真值 0 的 F 检验	
		下限	上限	值	P
单个测量 $ICC(1, 1)$	0.625	0.395	0.792	5.793	0.000***
平均测量 $ICC(1, k)$	0.833	0.662	0.919	5.793	0.000***

注: ***、**、* 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平。

2.3 区域水土流失风险评估

图2为中国西部地区水土流失风险综合得分评估图。水土流失风险由高到低依次是内蒙古、新疆、四川、云南、广西、西藏、贵州、陕西、甘肃、青海、重庆、宁夏。就西南地区来看,水土流失风险排序依次是:四川、云南、西藏、贵州、重庆。就西北地区来看,水土流失风险从高到低进行排序依次是:新疆、陕西、甘肃、青海、宁夏。总体来看内蒙古与新疆地区水土流失风险最高,而中国西南区域水土流失风险整体高于西北地区,而西南省份中重庆风险最低,西北省份中宁夏风险最低。西南地区水土流失风险整体较高,分析其原因主要在于西南地区多喀斯特地貌,地质灾害频发且降水量充足,对水土的冲刷作用较强。而内蒙古地区最高主要原因在于该地多草场,放牧业等较为发达,对植被破坏力度较大,植被覆盖率低。新疆水土流失风险较高主要因为自然环境本就恶劣,拥有大面积的沙漠地区,土质极其脆弱,且早期该地农业发展多为粗放型,对生态造成了较大的破坏。陕西大部分地区位于黄土高原上,黄土高原乃是中国水土流失风险最多的地区^[27],因此除新疆以外其水土流失风险最高也是与现实情况相贴合的。各个区域之间水土流失风险存在着明显的区域异质性,这主要于区域分布存在很大关系,西北地区各省份较为相似,西南各省份较为相似,这主要与各区域所处地理位置以及自然环境条件存在一定的关联,自然条件相似的地区在水土流失风险方面也表现得较为接近。

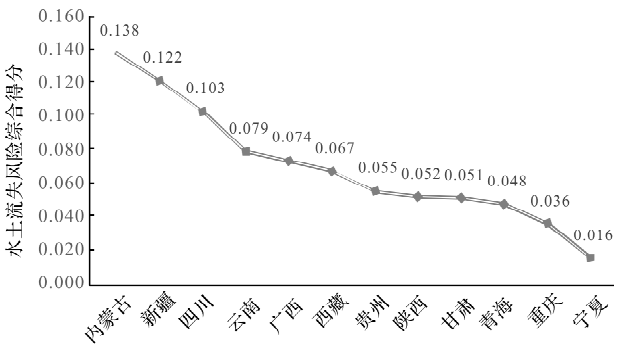


图2 中国西部地区水土流失风险综合得分评估图

2.4 水土流失与农林牧渔业关联性分析

由表4可知,整体来看农林牧渔业与水土流失风险存在较高的关联度。而分别来看,牧业与水土流失风险的关联度最高,其次是农业与林业,渔业与水土流失风险的关联度最低。基于现实来看,粗放型牧业与农业的发展在很大程度上会对水土造成破坏,因此近年多地提倡发展集约型牧业与农业并一定程度上限制放牧,而林业一定程度上会对水土涵养产生一定的积极作用。但粗放型牧业、农业则会对生态造成破坏,即使大力发展林业也可能弥补不了这些伤害。因此必须要提升农业生产技术水平,合理发展牧业,避免大面积放牧造成草场退化,促进林业发展。而渔业测算结果表现为关联度最低,这是符合现实逻辑的,与现实情况相吻合。

表4 水土流失风险与农林牧渔业关联度分析表

评价项	关联度	排名
牧业	0.963	1
农林牧渔业	0.935	2
农业	0.919	3
林业	0.877	4
渔业	0.82	5

由表5可知,内蒙古、新疆、西藏、甘肃、青海、宁夏六地区整体关联系数较高。其中,西北地区农林牧渔业与水土流失风险的关联性整体要强于西南地区,说明了西北地区在农林牧渔业开展的水土环境优势与西南地区相比不足,且这些地区在开展农林牧渔业的过程中需要格外注意由此衍生的对水土流失造成破坏环境问题。结合现实情况来看,中国西北一些地区发展仍主要依靠基础性第一产业,且部分地区生产技术水平也较为落后,存在一定范围的粗放型发展,这必然会在一定程度上加大水土流失风险,而这也警示这些地区须格外注意农林牧渔业发展模式,避免粗放型生产,优化产业结构,提升专业化技术生产水平,更新发展理念,以尽可能降低对生态的破坏程度。进一步水土流失又会阻碍产业发展,如此恶性循环。就农林牧渔业整体与水土流失风险的关联性来看,除四川、云南、广西等地关联性相对较低以外,其他地区关联性均较高。而农业与水土流失风险关联性由强到弱依次是:内蒙古、宁夏、青海、西藏、甘肃、重庆、新疆、云南、贵州、陕西、广西、四川。而渔业中关联性较高的有内蒙古、新疆、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏,这说明了水土流失的加剧增加了这些地区的渔业开展的难度,因此呈现高关联性,而西南地区渔业与它的关联性整体较低也反映了水土流失与渔业开展的相互制约作用相较不明显。林业中关联性较高的有内蒙古、新疆、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏。牧业中除了四川关联性较低以外,其他地区关联性都呈现相对较高状态。而就行业来看,除了内蒙古、新疆、西藏、甘肃、青海、宁夏地区水土流失与各行业关联性普遍较高外,四川、云南、广西、贵州、陕西、重庆水土流失风险与农业牧渔关联性相对较高的均出现在农业、牧业上。

表5 中国西部区域水土流失风险与农林牧渔业关联系数结果汇总表

地区	农业	农林牧渔业	渔业	林业	牧业
内蒙古	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
新疆	0.913	0.961	0.989	0.984	0.974
四川	0.815	0.823	0.481	0.718	0.855
云南	0.887	0.887	0.737	0.678	0.911
广西	0.865	0.884	0.333	0.672	0.962
西藏	0.954	0.955	0.948	0.952	0.956
贵州	0.878	0.912	0.832	0.756	0.974
陕西	0.874	0.918	0.927	0.906	0.980
甘肃	0.950	0.974	0.967	0.998	0.993
青海	0.974	0.978	0.977	0.976	0.982
重庆	0.929	0.944	0.712	0.886	0.969
宁夏	0.987	0.990	0.940	0.999	0.995

3 研究结论与建议

水土流失风险的加剧将会对区域的社会、经济、生态等方面产生不利的影响^[35-37], 深入探究我国西部水土流失风险及其与农业牧渔业发展的关联性具有研究意义。

通过前文研究得到: ①博弈论组合赋权法所计算水土流失风险各指标权重能够综合考虑熵权法与变异系数法下所求得的权重, 是一种较为客观全面且与现实情况相贴合的权重计算方法, 也极大程度上增加了文章的科学性, 且三种方法下计算的结果通过了一致性检验。②就水土流失风险评价结果来看, 水土流失风险由高到低依次是内蒙古、新疆、四川、云南、广西、西藏、贵州、陕西、甘肃、青海、重庆、宁夏。总体来看内蒙古与新疆地区水土流失风险最高, 而中国西南地区水土流失风险整体高于西北地区。③整体来看农林牧渔业与水土流失风险存在较高的关联度。从行业来看, 关联度由大到小依次是牧业、农业、林业、渔业。就地区来看, 内蒙古、新疆、西藏、甘肃、青海、宁夏六地区水土流失风险与农林牧渔业以及各细分行业整体关联系数较高。且整体而言西北地区农林牧渔业与水土流失风险的关联性要强于西南地区。

通过前文分析, 对水土流失风险治理与保持也有一定的启发, 为此提出以下几点建议:

(1) 给予内蒙古、新疆及西南区域水土流失风险治理的更多重视力度。内蒙古新疆、西藏等地原本生态表现为极大脆弱性, 因此当外界冲击, 对水土环境破坏的力度更大, 需要格外对此区域的生态环境保护与水土流失治理。这些地区应该更加注意水土流失治理问题, 坚持保护与治理相结合, 以免造成生态环境的进一步破坏。

(2) 加大对沙土治理以及矿地的恢复, 注重保护与防治密切结合。沙土化面积以及现存矿产土地破坏面积在水土流失风险评价中所占权重较高, 也体现了其的较大影响力, 需要加大对沙土化面积治理与矿地修复工作的重视。

(3) 加大水域以及湿地保护及水利设施建设力度, 提升水利建设效率, 并积极预防与降低洪水风险。前文分析中可以发现湿地、水域与水利建设对水土流失风险具有很大的促进作用, 且洪水导致水土流失风险影响极大, 而两者联系又非常紧密, 因此建议要加大对两者协调建设、预防治理的工作。

(4) 减少污染物排放, 加大水土污染治理力度。污染性风险一方面会加大对水资源、土地资源的破坏、另一方面又提升了水土流失治理难度, 因此要从源头入手, 既要减少污水、污染物的排放量又要提升水土污染治理效率。

(5) 提高农林牧渔业生产效率, 优化产业结构, 鼓励发展高产林业, 减少衍生环境问题发生。鼓励高产林业的发展, 一方面增加农民收入, 一方面保护生态环境。

参考文献:

[1] MENG L. Quantitative evaluation of soil erosion of land subsided by coal mining using RUSLE[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(1): 7-11.

[2] 苏新宇, 吴镇宇, 刘霞, 等. 基于 CSLE 模型的区域水土流失风险分析[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(5): 27-36.

[3] 牟凤云, 杨猛, 余情, 等. 基于 RF-RUSLE 模型的水土流失性公路自然灾害风险评估: 以重庆市巴南区为例[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(11): 114-121, 127.

[4] 梁娟珠, 张青, 傅水龙. 应用 RUSLE 模型的长汀县水土流失风险空间分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 836-841.

[5] GANASRI B P, RAMESH H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin[J]. Geoscience Frontiers, 2016, 7(6): 953-961.

[6] PRASANNAKUMAR V, SHINY R, GEETHA N, et al. Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani River watershed in Attappady valley, Kerala, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(4): 965-972.

[7] 刘文龙, 王坚, 赵小平. 利用 GIS 进行忻州窑矿区水土流失评估[J]. 测绘通报, 2014(5): 107-109, 129.

[8] 汤丽洁, 舒畅. 基于 GIS 和 RS 的巢湖流域水土流失评估[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 305-308, 312.

[9] 张志国, 李锐, 王国梁. 基于 GIS 的区域水土流失生态风险评估[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 98-101.

[10] 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的山地环境水土流失空间特征定量分析: 以四川泸定县为例[J]. 地球与环境, 2013, 41(6): 669-679.

[11] 闵健, 杨华, 赵纯勇. GIS 支持下的土壤侵蚀潜在危险度分级方法研究及应用[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 61-64.

[12] JIANG Z L, SU S L, JING C W, et al. Spatiotemporal dynamics of soil erosion risk for Anji County, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26(6): 751-763.

[13] 林腾. 上杭县上坊小流域水土流失分析及综合治理效果评估[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(2): 258-266.

[14] 史东梅, 蒋光毅, 郭宏忠, 等. 生产建设项目人为水土流失的生态环境损害评估[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(2): 71-79.

[15] 江振蓝. 基于 Mann-Kendall 方法的水土流失时空格局变化[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 60-65, 72.

[16] 时宇, 史明昌. 基于 GIS 的北京市水土流失生态风险评估[J]. 生态科学, 2014, 33(6): 1100-1105.

[17] 蔡文博, 蔡永立. 基于 GIS 方法的泸沽湖流域水土流失敏感性评价[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 79-83, 2.

[18] 谢余初, 巩杰, 赵彩霞. 甘肃白龙江流域水土流失的景观生态风险评估[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 702-708.

[19] ZHANG Q, XU C Y, TAO H, et al. Climate changes and their impacts on water resources in the arid regions: a case study of the Tarim River Basin, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(3): 349-358.

[20] 廖春芳, 周羿霖, 储诚诚, 等. 郴宁高速公路建设项目水土流失风险评估[J]. 公路工程, 2013, 38(1): 17-19, 27.

[21] 李永红, 高照良. 黄土高原地区水土流失的特点、危害及治理[J]. 生态经济, 2011, 27(8): 148-153.

[22] 张喜荣, 蔡艳蓉, 赵晶, 等. 黄土高原水土流失造成的危害及其综合治理措施[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(28): 15776-15781.

[23] 秦天枝. 我国水土流失的原因、危害及对策[J]. 生态经济, 2009, 25(10): 163-169.

[24] 苏风环, 王玉宽. 长江上游及西南诸河水土流失的危害[J]. 中国水土保持, 2009(1): 42-43.

[25] 张显双, 李秋梅, 李红蕊, 等. 二龙河流域水土流失危害及防治措施[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 369-370, 379.

[26] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 32-36.

[27] 苏广全, 吕海深, 朱永华, 等. 基于博弈论组合赋权的洪水风险评估: 以武威地区为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 801-809.

[28] 徐冬梅, 邵莉, 徐梦臣, 等. 基于博弈论的可变模糊评价模型在水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2019(10): 60-63.

[29] 阳雨平, 陈国国, 杨田杰, 等. 基于博弈论组合赋权的湘南某矿净化库防洪风险评估评价云模型研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(2): 546-553.

[30] 鞠伟轶, 吴洁, 周思宇, 等. 基于博弈论组合赋权的森林火灾风险评估[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(2): 252-256.

[31] Y LIU, Y HU, Y H, et al. Water quality characteristics and assessment of Yongding New River by improved comprehensive water quality identification index based on game theory[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 104(6): 40-52.