

DOI: 10.5846/stxb201811222537

乔梅,王继军,赵晓翠,李玥,韩晓佳.基于评价指标为潜变量背景下的纸坊沟流域水土保持技术评估.生态学报,2019,39(16):5787-5797.

Qiao M, Wang J J, Zhao X C, Li Y, Han X J. Assessment of soil and water conservation technology of Zhifanggou watershed based on evaluation indices. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5787-5797.

基于评价指标为潜变量背景下的纸坊沟流域水土保持技术评估

乔梅¹, 王继军^{1,2,*}, 赵晓翠¹, 李玥¹, 韩晓佳²

¹ 西北农林科技大学, 杨凌 712100

² 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 基于生态技术属性、应用、实施效果以及其特征表现为潜变量的现实,以潜变量为背景,构建了两种情境下的指标体系,在纸坊沟流域对两种情境下的指标体系进行验证,两种情境下的评估结果与均现实相符。水土保持技术选择、应用过程以及技术体系之间的互动关系直接涉及到的是潜变量,为了精确揭示水土保持技术的本质、明确纸坊沟流域水土保持技术应用过程及水土保持技术体系,基于课题“生态技术评价方法、指标与评价模型开发”的相关研究成果以及 2018 年 5 月农户调研资料,构建了包括技术成熟度、技术应用难度、技术相宜性、技术效益以及技术推广潜力在内的 5 个一级指标、技术完整性等在内的 14 个二级指标的水土保持技术评价指标体系,并对各指标进行解释,得到评判标准。采取一二级指标相互印证的方法对安塞县纸坊沟流域水土保持技术进行评估,结果表明:纸坊沟流域 3 个阶段水土保持技术综合得分分别为:0.5399(0.5191)、0.6724(0.6628)、0.7866(0.7748)(括号内为基于二级指标的测算结果)。流域内水土保持技术及其应用综合效果不断提升,动因为:水土保持技术体系不断优化,水土保持技术选择与应用的要素的耦合度不断提升,并与农户理念趋近。

关键词: 水土保持技术; 潜变量; 评价指标; 评估; 纸坊沟流域

Assessment of soil and water conservation technology of Zhifanggou watershed based on evaluation indices

QIAO Mei¹, WANG Jijun^{1,2,*}, ZHAO Xiaocui¹, LI Yue¹, HAN Xiaojia²

¹ Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

² Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Based on ecological technological attributes, application, implementation effects, and the characteristics of their latent variables, an index system in two scenarios was generated with the latent variables as the background, and the index system in two scenarios was verified in the Zhifanggou watershed. The evaluation results in both scenarios are consistent with the actual conditions. The interaction between soil and water conservation technology, their application, and technical systems are directly associated with latent variables. To accurately elucidate the nature of soil and water conservation technology, to clarify the application process of soil and water conservation technology in the Zhifanggou watershed and the technical system of soil and water conservation, based on the data regarding "Eco-technical evaluation methods, indicators and evaluation model development" and the survey data of farmers in May 2018, the technology maturity, technical application difficulty, technical suitability, technical benefits, and technology promotion potential were assessed. The soil and water conservation technology evaluation index system includes five first-level indicators and 14 second-level indicators.

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016 YFC0503702); 国家自然科学基金项目(41571515); 国家重点研发计划课题(2016 YFC0501707)

收稿日期: 2018-11-22; 修订日期: 2019-04-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jjwang@ms.iswc.ac.cn

The indicators are interpreted, and the criteria are judged. The soil and water conservation technology of the Ansai Zhifanggou watershed was evaluated via mutual verification of the first and second indicators. The comprehensive assessment scores of soil and water conservation technology in stages of the Zhifanggou watershed are 0.5399 (0.5191), 0.6724 (0.6628) and 0.7866 (0.7748) (the values in parentheses are the secondary indicators). The comprehensive effect of soil and water conservation technology and its application in the basin has continuously improved because the water and soil conservation technology system is continuously optimized, and the coupling degree of soil and water conservation technology selection and application elements is continuously improved.

Key Words: Soil and water conservation technology; latent variables; evaluation indicators; evaluation; Zhifanggou watershed

水土流失治理取得了重要进展,尤其十八大以来,共实施水土流失治理 31.6 万 km²,改造坡耕地 2000 万 km²,实施生态修复 11.4 万 km²,新建生态清洁小流域 2000 多条,林草覆盖率增加 10%—30%以上,平均每年减少土壤侵蚀量近 4 亿 t^[1]。这一显著成果离不开先进、成熟的水土保持技术。对各水土保持技术的综合评估,有利于分析水土流失治理与经济耦合机制,实现政策协同性。因此,典型流域水土保持技术的评估对进一步优化水土保持技术体系以及合理配置水土保持措施具有重要的现实意义。目前相关研究主要是对水土保持技术应用效果的评估^[2-3],也有部分对水土保持技术适宜性的评价^[4-6],而对于水土保持技术本身及其与应用过程、应用效果相融合的评价鲜有报道。已有研究主要集中在技术效益以及适宜性等显变量的评估,但水土保持技术的选择、应用过程以及应用效果之间的互动关系是无法直接测量的,对“水土保持技术体系”表征涉及到的是无法直接测量的潜变量,一个潜变量对应若干个显变量,潜变量可看做显变量的抽象和概括,显变量视为特定潜变量的反映指标^[7]。潜变量的准确描述必须通过显变量来实现,为了精确揭示水土保持技术本身、应用过程以及应用效果之间的互动关系,有必要对显变量进行测量,但对于大部分区域而言,短期内无法获得所需的显变量值,例如土壤侵蚀模数、人均纯收入等需要长期观测反映某段时期的侵蚀程度以及农户的经济收入变化,因此,要结合经验与理论,通过验证性分析对潜变量本身来评估,既减少了显变量的长期测算误差,又快速对特定潜变量进行了评估,揭示被评估对象的本质。作为本课题的科学问题是:如何保证潜变量指标评估结果与显变量评估结果相一致,并较精确的揭示被评估对象水土保持技术的本质,则要将潜变量指标与显变量指标评估过程进行对比分析,确定二者的一致性。因此,首先要完成潜变量指标的评估,这是本文的重点。

纸坊沟流域在水土流失治理和水土保持技术应用中具有典型的代表性,因此,以纸坊沟流域为例,对其水土保持技术本身属性及应用过程进行评估,以期系统揭示水土保持技术与应用区域区位特征、农业系统耦合关系提供参考,为纸坊沟流域未来水土保持技术选择提供参考。

1 研究思路与方法

科学合理的评价指标以及评价方法能够精确揭示水土保持技术的本质,为同类型区水土保持技术选择提供参考。由于水土保持技术是一项综合性技术,技术的选择与实施过程无法直接测量,并且大多数研究集中在显变量的直接评估,为了精确揭示水土保持技术本身、应用过程以及应用效果之间的互动关系,减少显变量误差以及显变量在其他潜变量上的负荷,对潜变量与显变量的评估过程进行对比分析。因此,本文主要以潜变量的直接评估为主。首先,通过资料分析、调研对纸坊沟流域水土保持技术演变过程中的技术体系进行归类,为构建科学合理的评价指标体系以及指标评判标度提供帮助;其次,对指标数据进行处理、计算、分析,精确揭示水土保持技术的本质。

按照上述研究思路,采取专家咨询法以及层次分析等方法对纸坊沟流域水土保持技术进行评估。

2 指标体系构建及指标界定

2.1 指标体系构建

水土保持技术是指在水土流失地区,运用水土保持学原理及生态经济等相关学科理论,以水土保持为目的,同时优化水土资源配置、协调发展农业生态资源与产业而采取的一系列技术的总称,包括水土保持工程技术、水土保持耕作技术和水土保持生物技术^[8]。水土保持技术是一项涉及多学科的综合技术,具有社会、生态以及经济三大属性。考虑到水土保持技术是一项综合技术的独特性,借鉴课题“生态技术评价方法、指标与评价模型开发”研究成果,水土保持技术评价指标体系构建除遵循科学性、可操作性、系统性以及可比性等一般性原则之外,还应遵循以下原则:

主观与客观相结合。水土保持技术通常由政府主导实施,农民采用,农民的水土保持意识以及当地的社会、生态、经济背景对水土保持技术的采用有正面或负面的影响,因此,构建水土保持技术评价指标时应有机结合主、客观指标,使其内外统一。

内部与外在相结合。水土保持技术与作为一项相对成熟的生态技术,既有技术的本质属性又包括所技术使用的条件以及后期产生的各项效益。因此,要合理结合其本身属性、限制条件以及技术效益。

自然与经济社会属性相结合。水土保持技术使用有自然、社会以及经济条件的限制,同时,既要防止水土流失,又要促进区域经济社会发展。自然指标和经济社会指标之间存在相互联系、相互作用的关系,总体来说,揭示自然的指标与经济社会的指标共同构成水土保持技术评价指标体系的整体。

综上所述,水土保持技术的核心是技术本身特点,涉及到技术的适宜性、技术实施过程产生的各项费用、农户的生产经营理念以及各利益体之间的利益关系等。因此,水土保持技术评估体系构建从技术属性、适宜性和效益三个方面推进(图 1)。

技术属性主要是水土保持技术本身的特点以及性质,包括技术构成要素、结构及配置等,以及是否能稳定发挥作用,在应用过程中是否易于被应用者接受等,这是技术能否发挥作用的基础。所以,技术属性包括技术成熟度及技术应用难度。

关于水土保持技术适宜性,国内外近年来取得了一些研究成果^[9],为技术相宜性的表征提供了相应的参考。刘刚才等人提出包括区域自然适宜性、区域社会条件适宜性等指标的“求-供”指标体系^[10],技术相宜性是其使用的前提,除社会生态经济相宜性之外,还包括目标以及政策法规的相宜性^[11],因此,技术相宜性包括立地相宜性、目标相宜性、经济发展相宜性以及政策法规相宜性。

关于水土保持技术效益评价方面的研究到目前为止相对比较成熟,主要包括社会效益、生态效益以及经济效益三方面^[12-13]。同时,根据国家区域发展战略需求以及新时期社会经济条件,技术在本区域未来发挥效益的持续性相对重要。因此,效益评价指标考虑社会、生态以及经济的同时,还要包括技术在未来使用的持续性。

综上,结合课题“生态技术评价方法、指标与评价模型开发”的相关研究结果,选取技术成熟度、技术应用难度、技术适宜性、技术效益以及技术推广潜力等五个指标作为水土保持技术评估的一级指标,选择技术完整性、应用成本等 14 个水土保持技术评估的二级指标(表 1)。这些指标可较为全面的反映出水土保持技术的属性、适宜性以及效益等本质规定。

各指标权重参考课题“生态技术评价方法、指标与评价模型开发”中生态技术评价指标权重的计算方法,邀请长期从事水土保持工作的专家、具有丰富水土保持意识和有水土保持措施实施经验的农民参加问卷调查,对指标重要程度进行打分。最后,通过层次分析法计算得到各指标的相对权重(表 1)。

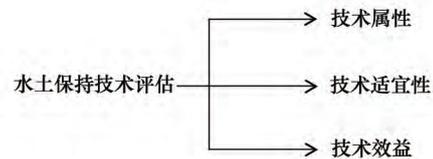


图 1 水土保持技术评估体系基本构成

Fig.1 Basic composition of soil and water conservation technology assessment system

表 1 水土保持技术评价指标体系及权重

Table 1 Soil and water conservation technology evaluation index system and weight

目标层 y Target layer y	一级指标 x_{1-5} Primary indicator x_{1-5}	x_{1-5} 相对 y 的权重 The weight of x_{1-5} relative to y	二级指标 $x_{11}-x_{52}$ Secondary indicators $x_{11}-x_{52}$	$x_{11}-x_{52}$ 相对 x_{1-5} 的权重 $x_{11}-x_{52}$ weight relative to x_{1-5}
水土保持技术评估 Soil and water conservation technology assessment	x_1 技术成熟度	0.2241	x_{11} 技术完整性	0.3665
			x_{12} 技术稳定性	0.3944
			x_{13} 技术先进性	0.2391
	x_2 应用难度	0.1499	x_{21} 技能水平需求层次	0.4818
			x_{22} 技术应用成本	0.5182
			x_{31} 目标相宜性	0.2821
	x_3 相宜性	0.2983	x_{32} 立地相宜性	0.3649
			x_{33} 经济发展相宜性	0.1847
			x_{34} 政策、法规相宜性	0.1683
	x_4 技术效益	0.2292	x_{41} 生态效益	0.4232
			x_{42} 经济效益	0.3591
			x_{43} 社会效益	0.2177
	x_5 推广潜力	0.0985	x_{51} 技术与未来发展关联度	0.6578
			x_{52} 技术可替代性	0.3422

2.2 指标解释与评判标准

经过多次专家讨论以及 2016 年、2017 年农户调研过程的感性认识 ,对各指标进行如下解释 ,并给出相应的评判标准(表 2)。

表 2 水土保持技术评价指标解释与评判标准

Table 2 Interpretation and evaluation criteria for soil and water conservation technology evaluation indicators

一级指标 Primary indicator	自定义方法 Custom method	二级指标 Secondary indicators	自定义方法 Custom method
x_1 技术成熟度 x_1 Technology maturity	技术组成各要素完整 ,技术稳定发挥作用-5; 技术组成各要素基本合理 ,技术能够有效发挥作用-4; 较为简单技术集成 ,要素组成完整 ,稳定发挥作用-3; 较为简单技术集成 ,要素组成完整 ,不稳定-2; 较为简单技术集成 ,要素组成不完整 ,不稳定-1	x_{11} 技术完整性	技术要素完整 ,配置合理 ,能够有效发挥作用-5; 技术要素组成完整 ,配置较为合理 ,能够长期稳定发挥作用-4; 技术要素较为完整 ,能够有效发挥作用-3; 技术要素较为完整 ,能有效发挥作用-2; 技术要素不完整 ,不能有效发挥作用-1
		x_{12} 技术稳定性	技术稳定的长期发挥作用-5; 技术比较稳定的长期发挥作用-4; 技术长期稳定发挥作用一般-3; 技术能稳定发挥作用-2; 技术不能长期发挥作用-1
		x_{13} 技术先进性	区域所应用技术处于国际领先-5; 区域所应用技术处于国际先进-4; 区域所应用技术处于国内领先、先进-3; 区域所应用技术处于区域先进、领先-2; 区域所应用技术为集成技术-1
x_2 技术应用难度 x_2 Technical application difficulty	技能要求高、成本高-5; 技能要求高、成本适中-4; 技能要求适中、成本适中-3; 技能要求适中、成本低-2; 技能要求低、成本低-1	x_{21} 技能水平需求层次	技术应用过程中对劳动力文化程度与能力的要求为大学-1; 技术应用过程中对劳动力文化程度与能力的要求为高中-2; 技术应用过程中对劳动力文化程度与能力的要求为初中-3; 技术应用过程中对劳动力文化程度与能力的要求为小学-4; 技术应用过程中对劳动力文化程度与能力为文盲即可-5
		x_{22} 技术应用成本	技术研发与购置以及应用过程中的费用对于农户不是问题-5; 技术研发与购置以及应用过程中的费用农户能接受-4; 技术研发与购置以及应用过程中的费用农户不完全接受-3; 技术研发与购置以及应用过程中的费用农户可考虑-2; 技术研发与购置以及应用过程中的费用农户有条件接受-1

续表

一级指标 Primary indicator	自定义方法 Custom method	二级指标 Secondary indicators	自定义方法 Custom method
x_3 技术相宜性 x_3 Technical suitability	完全合适-5; 比较合适-4; 适合-3; 不完全合适-2; 不合适-1	x_{31} 目标相宜性	完全达到满足技术设定的自然、经济、社会目标-5; 基本达到满足技术设定的自然、经济、社会目标-4; 部分达到满足技术设定的自然、经济、社会目标-3; 少数达到满足技术设定的自然、经济、社会目标 2; 仅少量达到技术设定的自然、经济、社会目标-1
		x_{32} 立地相宜性	技术应用需要的立地条件与实施区域立地条件完全合适-5; 技术应用需要的立地条件与实施区域立地条件比较合适-4; 技术应用需要的立地条件与实施区域立地条件适合-3; 技术应用需要的立地条件与实施区域立地条件不完全合适-2; 技术应用需要的立地条件及少量合适-1
		x_{33} 经济发展相宜性	技术应用可能带来的经济变化条件与实施区域经济发展需求完全合适-5; 技术应用可能带来的经济变化条件与实施区域经济发展需求比较合适-4; 技术应用可能带来的经济变化条件与实施区域经济发展需求适合-3; 技术应用可能带来的经济变化条件与实施区域经济发展需求不完全合适-2; 技术应用可能带来的经济变化条件与实施区域经济发展需求仅少量合适-1
		x_{34} 政策、法规相宜性	技术应用需要的政策、法律条件与实施区域政策法律完全配套-5; 技术应用需要的政策、法律条件与实施区域政策法律基本配套-4; 技术应用需要的政策、法律条件与实施区域政策法律大部分配套-3; 技术应用需要的政策、法律条件与实施区域政策法律部分配套-2; 技术应用需要的政策、法律条件与实施区域政策法律少数配套-1
x_4 技术效益 x_4 Technical benefit	效果非常好-5; 效果良好-4; 效果较好-3; 效果一般-2; 效果不明显-1	x_{41} 生态效益	技术实施对生态环境改善效果非常好-5; 技术实施对生态环境改善效果良好-4; 技术实施对生态环境改善效果较好-3; 技术实施对生态环境改善效果一般-2; 技术实施对生态环境改善效果不明显-1
		x_{42} 经济效益	技术实施对经济增长的贡献效果非常好-5; 技术实施对经济增长的贡献效果良好-4; 技术实施对经济增长的贡献效果较好-3; 技术实施对经济增长的贡献效果一般-2; 技术实施对经济增长的贡献效果不明显-1
		x_{43} 社会效益	技术实施对社会公共利益和社会发展的贡献效果非常好-5; 技术实施对社会公共利益和社会发展的贡献效果良好-4; 技术实施对社会公共利益和社会发展的贡献效果较好-3; 技术实施对社会公共利益和社会发展的贡献效果一般-2; 技术实施对社会公共利益和社会发展的贡献效果不明显-1
x_5 技术推广潜力 x_5 Technology promotion potential	大-5; 较大-4; 中等-3; 较小-2; 小-1	x_{51} 技术与未来发展关联度	技术与未来发展趋势的关联程度大-5; 技术与未来发展趋势的关联程度较大-4; 技术与未来发展趋势的关联程度中等-3; 技术与未来发展趋势的关联程度较小-2; 技术与未来发展趋势的关联程度小-1

续表

一级指标 Primary indicator	自定义方法 Custom method	二级指标 Secondary indicators	自定义方法 Custom method
		α_{52} 技术可替代性	现使用技术非常容易被其他同等效果技术替代-5; 现使用技术比较容易被其他同等效果技术替代-4; 现使用技术容易被其他同等效果技术替代-3; 现使用技术不易被其他同等效果技术替代-2; 现使用技术不能被其他同等效果技术替代-1

3 纸坊沟流域水土保持技术评估

3.1 研究区概况

纸坊沟流域位于黄土高原丘陵沟壑区第二副区,属暖温带半干旱气候区,年平均降雨量 483 mm,降雨主要集中在 6—9 月,以暴雨为主;降雨量占全年的 73.6%,尤其是集中于 7—8 月,占全年降雨量的 46.3%。流域内梁峁起伏,地形破碎,沟壑密度达 8.06 km/km²,海拔 1100—1400 m。相关资料显示:1938 年纸坊沟流域林草茂盛,林草覆盖率 76.5%,粮食单产 724.5 kg/hm²,生态系统处于自然平衡状态。从 1940 年开始,随着农耕地不断扩大,耕垦指数高达 51.5%,植被破坏殆尽,到 1958 年水土流失极为严重,就仅存果树和灌木 0.35 km²,土壤侵蚀模数高达 14000 t/(km²·a),生态系统极度恶化,陷于“越穷越垦,越垦越穷”的状态^[14]。

该流域总面积 8.27 km²,有 3 个自然村,以农业种植为主,其中,农耕地有 64 hm²(2015 年),主要种植粮食作物有玉米、洋芋以及谷子等,以苹果为主导产业,2015 年果园面积 49.53 hm²。据统计,2015 年全流域共有 124 户,598 人,从事农业劳动有 209 人,全流域人均纯收入 7102.17 元,其中农业纯收入占人均纯收入 16.9%。

自 20 世纪 70 年代以来,纸坊沟流域实施了“山水田林路综合治理”、“小流域综合治理”、“退耕还林工程”等水土保持措施,其中,梯田、淤地坝、退耕还林(草)等较典型^[15]。经过 40 多年的综合治理,截止到 2015 年,流域内林草地面积达 385.67 hm²,水土流失治理度 77.64%,生态系统逐渐恢复,并步入良性循环的轨道。

3.2 数据处理及评价过程

3.2.1 主要水土保持技术体系集成

水土流失治理是水土保持综合技术的应用过程,水土保持技术及配置体系直接决定了水土流失的治理效果,对水土保持技术体系评估,可为本区域未来水土保持技术选择提供依据。参考王继军^[16-17]等人的研究结果,明确纸坊沟流域不同时期水土保持技术体系的异同,形成不同的水土保持技术体系,根据其演变过程,重点评估纸坊沟流域 1973—1983 年(阶段 I)、1984—1998 年(阶段 II)、1999 年之后(阶段 III)三个时期的水土保持技术体系。

1973—1983(阶段 I)处于生态系统不稳定恢复阶段,水土流失治理以水土保持耕作技术为主,辅以工程技术+少量生物技术,形成了“整地+轮作”(<5°)、(人工)窄条梯田+轮作”(5°—15°)、(人工)窄条梯田+轮作”(15°—25°)、‘鱼鳞坑/反坡梯田+生态林’(大于 25°)、‘沟沿线植柳树+淤地坝’(沟道)”防治技术体系。

1984—1998(阶段 II)处于生态系统稳定恢复时期,水土流失治理以水土保持工程技术和生物技术为主,辅以耕作技术,形成了“‘川地+垄沟种植+地膜覆盖+轮作’、(人工)窄条梯田/(机修)宽幅梯田+垄沟种植+地膜覆盖+轮作’、(人工)窄条梯田+果树’、‘坡地+水平沟种植、(人工)窄梯田+生态林(5°—15°)’、(人工)窄条梯田+苹果’、(人工)窄条梯田/(机修)宽幅梯田+轮作+套种’、‘鱼鳞坑/水平沟/反坡梯田+生态林’、‘人工种草’、‘草粮带状间轮作’、‘草灌带状间作’(15°—25°)、‘鱼鳞坑+造林’、‘草灌带状间轮作’(>25°)、‘造林’、‘淤地坝’、‘柳谷坊’(沟道)”防治技术体系。

1999—(阶段 III)处于生态系统稳定恢复与功能提升期,水土流失治理与防治以水土保持生物技术为主,

以工程和耕作技术作为补充与配套技术体系,形成了“‘垄沟种植+地膜覆盖+轮作’($<5^\circ$), (机修)宽幅梯田+果树’、‘鱼鳞坑/反坡梯田/窄梯田+生态林’($5^\circ-15^\circ$), ‘鱼鳞坑/窄条梯田/反坡梯田+生态林’、‘封育’、‘封禁’($15^\circ-25^\circ$), ‘封育’($>25^\circ$)”的水土保持技术体系。

3.2.2 数据来源与标准化处理

于2018年5月在纸坊沟流域展开农户调查,采取典型随机抽样的方法获取第一手资料,调查涉及流域内纸坊沟、寺岷岷以及瓦树塌3个自然村,重点调查对农户水土保持技术实施过程的感性认识、对技术实施效果的评价以及政府在水土保持技术与实施过程中的扶持状况。调查持续10天,选取农户中主要从事农业生产的成员,每户大约持续1—1.5h,共调查35户,其中有效问卷30户。调研基本信息如(表3)。

表3 调研表基本信息

Table 3 Basic information of the survey table

类别 Category	具体内容 Specific contents
家庭基本情况 Basic family situation	年龄、人口数量、特殊经历等
技术使用情况 Use of technology	农户水土保持技术使用情况、技术属性了解情况、技术适宜性了解情况、技术效益、技术发展过程等
退耕还林情况 Returning farmland to forests	退耕还林时间、退耕还林面积、退耕还林实施过程、农户对退耕还林的认知等

3.2.3 数据标准化处理

本文指标数据均为调研获得的第一手数据,不同指标单位、量级不同,存在不可度量性。因此,对各指标数值进行无量纲处理,转化为标准数值,再进行分析。本文采用阈值法无量纲处理。

阈值也称临界值,阈值法是直线型无量纲化方法之一,即用指标实际值与阈值相比得到指标的无量纲化值。

为了保证综合评价结果的可靠性,采用阈值法消除各指标数据数量级和量纲差异,使之处于[0,1]区间上。无量纲化处理结果如(表4)。

表4 纸坊沟流域水土保持技术评价各指标数据的无量纲化

Table 4 Dimensionalization of data of various indicators in the evaluation of soil and water conservation in the Zhifanggou watershed

指标名称 Indicator name	阶段 I Stage I (1973—1983)	阶段 II Stage II (1984—1998)	阶段 III Stage III (1999—)
x_1 技术成熟度 x_1 Technology maturity	0.5360	0.6200	0.7780
x_{11} 技术完整性 x_{11} Technical integrity	0.3840	0.5540	0.7060
x_{12} 技术稳定性 x_{12} Technical stability	0.5800	0.6400	0.8300
x_{13} 技术先进性 x_{13} Technological advancement	0.3880	0.4360	0.4840
x_2 技术应用难度 x_2 Technical application difficulty	0.6960	0.7120	0.7480
x_{21} 技能水平需求层次 x_{21} Skill level requirement level	0.8009	0.8384	0.7320
x_{22} 技术应用成本 x_{22} Technology application cost	0.7920	0.8640	0.8880
x_3 技术相宜性 x_3 Technical suitability	0.6020	0.6420	0.7900
x_{31} 目标相宜性 x_{31} Target suitability	0.3560	0.5940	0.7840
x_{32} 立地相宜性 x_{32} Site suitability	0.7020	0.7560	0.8340

续表

指标名称 Indicator name	阶段 I Stage I (1973—1983)	阶段 II Stage II (1984—1998)	阶段 III Stage III (1999—)
x_{33} 经济发展相宜性 x_{33} Economic development	0.4960	0.6200	0.7600
x_{34} 政策、法规相宜性 x_{34} Policy and regulatory suitability	0.6160	0.6720	0.7960
x_4 技术效益 x_4 Technical benefit	0.4123	0.7240	0.8400
x_{41} 生态效益 x_{41} Ecological Benefits	0.4240	0.7000	0.8400
x_{42} 经济效益 x_{42} Economic benefit	0.3600	0.6640	0.7960
x_{43} 社会效益 x_{43} Social benefit	0.3440	0.5360	0.7800
x_5 技术推广潜力 x_5 Technology promotion potential	0.4200	0.6120	0.7304
x_{51} 技术与未来发展关联度 x_{51} Technology and future development	0.3920	0.6080	0.7560
x_{52} 技术可替代性 x_{52} Technical alternative	0.5400	0.6200	0.6600

3.2.4 结果与分析

依据上述水土保持技术演变过程中形成的技术体系 对纸坊沟流域水土保持技术进行综合评价。按照线性加权求和法(Linear Weighted Sxm Method) 对各阶段得分进行计算。

$$R = \sum_{j=1}^n W_j X_j$$

式中: R 为综合评价得分, W_j 为第 j 个指标的权重。 X_j 为 j 项指标的标准化数值。

采取两种计算方式, 第一种: 将一级指标各指标无量纲化数值与其对应权重相乘再累加, 得出纸坊沟流域三个阶段水土保持技术评价体系 5 个一级指标得分以及综合得分(表 4); 第二种: 用二级指标各指标的无量纲化数值与其对应权重相乘再相加再乘以对应的一级指标权重, 得出 5 个一级指标得分以及综合得分(表 5)。

表 5 纸坊沟流域各阶段水土保持技术评价结果

Table 5 Evaluation results of soil and water conservation technology at various stages of the Zhifanggou watershed

	技术成熟度 Technology maturity		技术应用难度 Technical application difficulty		技术相宜性 Technical suitability		技术效益 Technical benefit		技术推广潜力 Technology promotion potential		综合得分 Overall ratings	
	一级 指标	二级 指标	一级 指标	二级 指标	一级 指标	二级 指标	一级 指标	二级 指标	一级 指标	二级 指标	一级 指标	二级 指标
第 I 阶段 Phase I	0.1201	0.1036	0.1043	0.1194	0.1796	0.1646	0.0945	0.0879	0.0414	0.0436	0.5399	0.5191
第 II 阶段 Phase II	0.1389	0.1254	0.1067	0.1277	0.1915	0.2002	0.1660	0.1493	0.0603	0.0603	0.6724	0.6628
第 III 阶段 Phase III	0.1743	0.1573	0.1121	0.1218	0.2357	0.2386	0.1926	0.1859	0.0719	0.0712	0.7866	0.7748

“各指标下对应的一级指标数值”即基于一级指标下的计算结果, “各指标下对应的二级指标数值”即基于二级指标下的计算结果

为了便于分析, 参照已有研究结果^[18], 并根据 y 值高低, 将纸坊沟流域水土保持技术综合评价结果划分为 5 个标度 { 0, 0.2] 为极差 { 0.2, 0.4] 为较差 { 0.4, 0.6] 为一般 { 0.6, 0.8] 为较好 { 0.8, 1] 为最好。

如表 4 所示, 无论一级指标计算结果, 或二级指标计算结果, 从第一阶段到第三阶段得分依次增加, 即水土保持技术体系在不断完善、效果在不断提升。并且, 基于一级指标和二级指标的测算结果基本一致, 通过与

当地部分农民交流, 评判结果与现实相符。

近 40 余年来, 纸坊沟流域水土保持技术及其应用综合效果不断提升, 主要动因是水土保持技术体系不断优化, 技术选择与应用的要害耦合度不断提升, 并与农户理念趋近。如表 3 所示, 三个阶段水土保持技术相宜性指标始终排在第一位, 尤其是立地相宜性较高, 即所选用的水土保持技术总体上适合于区位特征, 特别是适宜于当地地貌、气候等自然条件, 同时, 水土保持技术选择主要服务于区域生态条件和国家战略目标, 相对来说考虑经济发展和社会需求较少, 因此, 在今后水土保持技术研发与选择时, 如果能够综合考虑区域生态修复、经济发展以及国家战略定位等需求, 技术可用性则更强。就水土保持技术本身而言, 其核心要素已具备, 能够稳定发挥作用, 并容易被掌握和采纳。水土保持技术应用后, 生态效应大于经济效应, 社会效应最低, 这与初始选择水土保持技术时力求改变“越垦越穷, 越穷越垦”的恶性循环理念相一致; 由于水土保持技术核心是水土流失治理, 同一背景下的水土保持技术变动弹性较小, 可持续性较强, 这就提示我们在水土保持技术选择时, 一定要注意其技术适宜性和技术效益。

基于以上总体评价的基础, 对二级指标下的水土保持技术进一步详细评价、分析。根据评价模型与所获得的数据, 纸坊沟流域不同阶段水土保持技术基于二级指标的具体评价结果如图 2 所示。

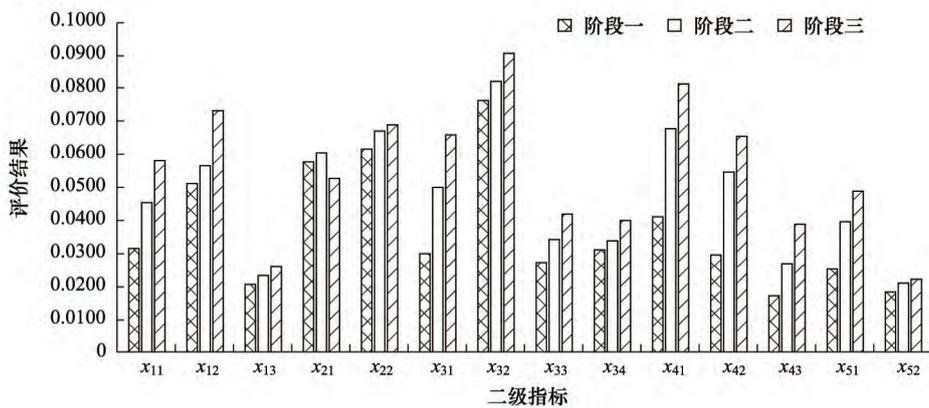


图 2 纸坊沟流域水土保持技术综合评价结果

Fig.2 Comprehensive evaluation results of soil and water conservation technology in the Zhifangou watershed

如图 2 所示, 第一阶段纸坊沟流域水土保持技术评价结果为 0.5191, 得分在 (0.4, 0.6] 之间, 处于一般。水土流失治理在这一阶段处于不稳定恢复期。以基本农田建设为中心, 实行山水田林路综合治理, 控制 25° 以上坡地水土流失, 减轻水土流失灾害, 提升流域内粮食产量。由于大多数水土保持技术由政府投资并组织实施, 在新中国成立初期, 国家部分政策不够完善, 为了改善极其严重的水土流失现象, 技术相宜性对水土保持技术实施的影响相对较大, 社会效益、技术可替代性以及技术先进性短时间内相对考虑程度较低, 这一结果与此时的社会生态经济背景有密切关系。因此, 主要实施水土保持耕作技术为主, 辅以工程与生物技术。

第二阶段纸坊沟流域水土保持技术评价结果为 0.6628, 得分在 (0.6, 0.8] 之间, 处于较好。流域内水土流失治理也处于稳定恢复期, 实行小流域综合治理。形成以村庄为中心的平面圈状配置以及坡面立体梯层配置, 水土流失治理的同时兼顾区域经济发展, 到 1990 年人均纯收入增长至 591.01 元^[19]。由于各技术实施逐步见效, 水土流失状况以及其他生态环境都稳步恢复, 并且大多数使用技术为类似区域试验推广的能够稳定发挥作用并且相对成熟的技术, 容易被掌握和采纳。总体上, 主要采取了工程技术和生物技术, 辅以耕作技术, 在稳定粮食产量的同时稳固退耕还林、还草的初期成果。

第三阶段纸坊沟流域水土保持技术评价结果为 0.7748, 得分在 (0.6, 0.8] 之间, 处于较好。流域内生态系统处于稳定恢复与功能提升期, 随着 1999 年国家开始全国范围内实施退耕还林, 并颁布相应政策法规, 综合效益得以提高。2015 年流域内人均纯收入达 7102.17 元/人, 林草覆盖率达 46.7%, 粮食单产达 268.75 kg/hm²。各技术在适宜流域地形、气候以及经济等条件的前提下, 为了响应国家可持续发展战略、生态文明建设

等方针,逐步注重流域内产业结构调整以及农业基础设施建设。

水土保持技术的合理配置是提升水土保持效益的有效方法,从纸坊沟流域发展过程来看,水土保持技术体系不断完善,从单一的工程、耕作技术实施到小流域综合治理,再到目前的生态文明建设,既实现了土地资源的合理利用,又改善区域生态环境,提升了经济发展水平;但在生态文明的时代背景下,依据“两山”理论以及生态文明共生的需求,在水土保持技术选择、应用过程及应用效果之间的耦合系统尚需进一步优化。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究以安塞县纸坊沟流域为研究区,针对对水土保持技术选择、应用过程及应用效果之间互动过程评估的空白以及潜变量、显变量评估的优缺点,构建 2 种情境下水土保持技术评价指标体系,指标体系包括技术成熟度、技术应用难度、技术相宜性、技术效益、技术推广潜力 5 个一级指标,技术完整性等在内的 14 个二级指标,各指标评估标准划分 5 标度。通过对纸坊沟流域不同阶段水土保持技术的综合评估验证了 2 种情境下水土保持技术评估指标的合理性和可行性。

纸坊沟流域水土保持技术评价结果表明:流域内水土保持技术选择与应用的要害耦合度不断提升,采取一二级指标相互印证的方法,无论是基于一级指标的计算结果,或者二级指标的计算结果,纸坊沟流域水土保持技术各指标在三个阶段的得分依次提升 0.5399(0.5191)、0.6724(0.6628)、0.7866(0.7748)(括号内为基于二级指标的测算结果)并且技术适宜性排首位,即流域内所用水土保持技术尤其适宜于流域的气候、地形条件,评判结果与现实相符。

4.2 讨论

(1) 纸坊沟流域经历了“破坏-恢复-破坏-修复”的完整演变过程,在长期的水土流失治理过程中所形成的水土保持技术体系“‘垄沟种植+地膜覆盖+轮作’($<5^\circ$), (机修)宽幅梯田+果树’、‘鱼鳞坑/反坡梯田/窄梯田+生态林’($5^\circ-15^\circ$), ‘鱼鳞坑/窄条梯田/反坡梯田+生态林’、‘封育’、‘封禁’($15^\circ-25^\circ$), ‘封育’($>25^\circ$)”这一技术体系,对黄土丘陵区水土流失治理具有重要的应用和借鉴价值。

(2) 纸坊沟流域水土保持技术演变过程中,在第 I 阶段,以水土保持耕作技术和工程技术为主,其中耕作技术的核心技术是轮作,工程技术的核心技术是人工梯田技术,造林技术和淤地坝技术则为该阶段辅助技术;在第 II 阶段,以工程技术和生物技术为主,其中工程技术的核心技术是梯田、淤地坝,生物技术的核心技术是植树造林,轮作等技术则为该阶段的辅助技术;在第 III 阶段,以生物技术为主,其核心技术是植树造林和封育技术。对于同类型区而言,在现阶段的水土流失治理中,要以生态修复为主,将封育和封禁作为首选治理技术。

(3) “技术适宜性”在评价指标体系中占有重要地位,所以在水土保持技术选择时,首先要考虑的是技术相宜性;其次,区域经济社会的发展现状以及发展趋势对于水土保持技术的选择来说也相当重要,也要充分考虑这一点。为了满足国家生态文明建设等需求,依据“两山论”、“新农村建设”的新要求,接下来构建三级指标时,要重视水土保持技术本身、水土保持技术应用过程与应用效益之间互动关系的定量评估,进一步对潜变量的评估结果进行验证。

参考文献(References):

- [1] 水利部水土保持司. 加快水土保持建设 筑牢生态文明基础——十八大以来我国水土流失综合防治取得显著成效. 中国水土保持, 2017, (10): 1-4.
- [2] 杨子峰, 于兴修, 马骞. 水土保持生态修复效益评价探讨. 水土保持研究, 2006, 13(6): 175-177, 181-181.
- [3] 李智广, 李锐, 杨勤科, 赵永安. 小流域治理综合效益评价指标体系研究. 水土保持通报, 1998, 18(S1): 71-75.
- [4] 蒋明红. 水土保持措施适宜性评价过程构建研究. 现代物业·新建设, 2015, 14(6): 14-15.
- [5] 张玉斌, 王昱程, 郭晋. 水土保持措施适宜性评价的理论与方法初探. 水土保持研究, 2014, 21(1): 47-55.

- [6] 代富强, 刘刚才. 紫色土丘陵区典型水土保持措施的适宜性评价. 中国水土保持科学, 2011, 9(4): 23-30.
- [7] 任颢, 李田田, 陈安. 结构方程模型在科研机构评估中的应用. 实验技术与管理, 2007, 24(8): 131-135.
- [8] 乔梅, 王继军, 李玥, 成思敏, 李茂森. 纸坊沟流域水土保持技术及其产生背景分析(英文). 资源与生态学报, 2017, 8(4): 433-440.
- [9] Nyamangara J, Masvaya E N, Tirivavi R, Nyengerai K. Effect of hand-hoe based conservation agriculture on soil fertility and maize yield in selected smallholder areas in Zimbabwe. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 19-25.
- [10] 刘刚才, 张建辉, 杜树汉, 周忠浩. 关于水土保持措施适宜性的评价方法. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 108-111.
- [11] Li Q R, Amjath Babu T S, Sieber S, Zander P. Assessing divergent consequences of payments for ecosystem services on rural livelihoods: a case-study in China's Loess Hills. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3549-3570.
- [12] 马海芸, 雍雅明, 刘宗盛. 干旱半干旱区退耕还林还草工程效益综合评价——以榆中县为例. 草业科学, 2012, 29(9): 1359-1367.
- [13] 胡明. 安塞县水土保持综合效益评价分析. 中国水利, 2012, (18): 45-47.
- [14] 中国科学院, 水利部西北水土保持研究所. 黄土丘陵沟壑区水土保持型生态农业研究(上册). 杨凌: 天则出版社, 1990.
- [15] 庞国伟, 谢红霞, 李锐, 杨勤科. 70多年来纸坊沟小流域土壤侵蚀演变过程. 中国水土保持科学, 2012, 10(3): 1-8.
- [16] 王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济安全评价. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 109-113.
- [17] 王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济系统耦合过程分析. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2723-2729.
- [18] 陈智鑫, 余利红, 汪文雄. 农地整治项目农户有效参与的影响机理. 水土保持通报, 2018, 38(05): 186-194.
- [19] 牛艳利. 纸坊沟流域商品型生态农业发展模式研究[D]. 西北农林科技大学, 2010.