



study area, identify needs of technologies, and analyze the site suitability and socio-economic feasibility of the SWCT with indicator system. The results showed that farmers mainly applied 3 types of 12 technologies. Engineering and biological technologies were widely used, and there were few applications of vegetation covered ridge and agricultural technology. The overall effect of the SWCT was good. Experts from research institutions evaluated the SWCT in five dimensions of readiness, suitability, application barriers, effectiveness, and transfer potential. The comprehensive scores from experts of terrace, check dam, and vegetation covered ridge were higher than other technologies. Effectiveness scores from farmers of terrace, horizontal ditch, and fish scale pit were higher than those from experts. While scores from farmers of check dam, water cellar, and conversation tillage were lower, because farmers were concerned about the economic benefits of technology. Problems of application of the SWCT included few supporting measures of terrace and gully land, few repair and maintenance of check dam and water cellar. Technology needs were divided into 3 categories, namely new technology, improved technology and supporting technology. The site condition with slope, geomorphologic types, and land use of two villages in Zhifanggou basin was suitable for planting trees and grass, while two villages in Nangou basin was suitable for natural recovery. Shiyaoxian village needed more terrace to plant apple trees. Zhifanggou village needed more terrace to plant crop or build green house. Danangou village needed more supporting technologies for gully lands. Xingshuyao village needed new gully lands and supporting infrastructure. We also conducted the social-economic condition analysis of labor force, accessibility, and farmers' willingness. This research was an important attempt to assessment and needs analysis on the SWCT in the Loess Plateau for ecological governance decision-making.

**Key Words:** soil and water conversation technology; technology assessment; needs analysis; ecological restoration; the Loess Plateau, China

黄土高原水土流失严重,为了防治土壤侵蚀、保护生态环境,自 20 世纪 70 年代以来,实施自上而下的大规模水土流失治理和以退耕还林(草)为代表的一系列生态建设工程,黄土高原水土流失治理已取得一定成效,总体生态恢复成效显著<sup>[1]</sup>,土壤侵蚀量和产沙量减少<sup>[2-4]</sup>,植被恢复明显,NDVI 和 NPP 显著提高<sup>[5-8]</sup>,固碳能力提升<sup>[9]</sup>,收入的多元化以及非农收入增加带来家庭总收入的提高<sup>[10]</sup>。生态治理和恢复技术(即生态技术)在生态工程实施和带动区域社会经济发展中起到了至关重要的作用<sup>[11]</sup>。生态技术的应用能够促使生态原真性得到恢复、节约资源和能源、避免或减少环境污染、区域经济得到发展、居民收入水平和社会参与意识与技能提高<sup>[12]</sup>。自生态工程实施以来,多种类多项生态技术已经在黄土高原研发并应用,包括治坡、治沟和小型水利工程等工程类技术 18 项,水土保持造林、种草、天然封育等生物类技术 11 项,以及水土保持耕作、栽培和土壤培肥等农业类技术 13 项<sup>[13-16]</sup>。同时,研发应用了一系列具有国际影响力的生态技术,干旱条件下造林技术、生物篱技术、工程-生物措施相结合的治理模式等处于国际领先地位,90% 以上已经得到广泛应用<sup>[17]</sup>。

尽管生态技术的应用给黄土高原带来了显著的生态、经济和社会效益,但局部地区尤其是陡坡耕地水土流失问题仍然严重,治理形势依然严峻<sup>[7]</sup>。已有研究表明,黄土高原几十年的人工林草建设也缺乏合理性,主要表现在追求人工林草的高生长量、高经济效益而引进种植外来高耗水植物种,如刺槐、柠条等大面积种植出现了土壤干层<sup>[18-19]</sup>和小老树<sup>[20]</sup>现象;人工造林导致生物多样性缺失<sup>[21]</sup>;生态需水亏缺、水资源平衡问题等屡见报道<sup>[22-25]</sup>;淤地坝作为人为干扰可能存在安全隐患<sup>[4]</sup>;生态工程需要投入大量人力和财力,人工造林存活率低<sup>[4,26]</sup>。针对生态技术应用存在的问题,科技部在 2016 年启动了国家重点研发计划项目“生态技术评价方法、指标体系与全球生态治理技术评价”,其中重要的任务之一是评估已有生态技术、提出技术需求清单<sup>[27]</sup>,以系统梳理和评价水土保持技术类型和不同治理阶段采取的不同技术。现有技术表现如何,应用中存在什么问题,今后需要何种技术或技术组合,这些问题亟待解决。目前尚缺少生态技术评估、基于指标体系进行技术需求分析等实证研究。针对黄土高原丘陵沟壑区立地条件和社会经济发展水平,本文通过实地调研和

问卷调查,旨在辨识并评估现有水土保持技术,并识别技术需求,构建指标体系分析其立地适宜性和社会-经济可行性,为生态治理提供依据。

## 1 研究区概况

延安市安塞区位于陕北黄土高原丘陵沟壑区,中温带大陆性半干旱季风气候,年均气温 9.1℃,年均降水量 506mm,全年降雨量的 60%集中在 7—9 月份。总面积 2950km<sup>2</sup>,海拔 964—1640m。梁峁旱作农业,坡耕地面积大,1999 年前,15°以上的坡耕地占农用地面积的 71.9%,25°以上坡耕地占 34.4%。2015 年农业人口 14.65 万人,占比 75.0%,第一产业占比 7.8%,农业总产值中种植业占 83.9%,林业占 3.1%,牧业占 10.3%,农村居民年人均纯收入 1.04 万元/年。2015 年水土流失面积 2832 km<sup>2</sup>,占土地总面积的 96%,是典型受人类活动影响的生态环境脆弱区。

纸坊沟流域和南沟流域是安塞境内的两个主要流域,分别位于沿河湾镇和高桥镇,流域面积为 8.27km<sup>2</sup>和 24.61km<sup>2</sup>,两个流域所属延河流域是延安重要的水源地,同时也是水土流失重点区域,平均土壤侵蚀模数为 5000—6000 t/km<sup>2</sup>·a,土地利用类型以耕地、林地和草地为主,3 类土地占比 96%—99%;15°以上土地占比超过 60%。水土保持技术应用历史久,种类多样,具有黄土高原水土保持与生态治理科学研究和试验示范的典型代表性。纸坊沟流域包括 3 个自然村,国家“七五”计划期间成为黄土高原综合治理试验示范区,流域内农户先于流域外开展水平沟种植作物,经过水土保持规划和治理,特别是 1999 年退耕还林(草)以来,林草面积比例逐步增加。目前,沟口川地以种植水果和蔬菜大棚为主,沟头坡地以果业为主,种植业和养殖业为辅,外出务工人员占比达 80%以上。南沟流域包括 7 个自然村,2015 年以来完成治沟造地和削崩造田超过 260hm<sup>2</sup>,新建蓄水坝 7 座,完成植树造林和林分改造超过 800hm<sup>2</sup>,建成陕西省水土保持示范园,以果业和旅游业为主,外出务工人员陆续返乡就业创业。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 技术识别和评估方法

于 2018 年 4—6 月开展黄土高原水土保持技术评估与需求分析机构问卷调查,内容涉及现有技术应用情况和需求技术,回收有效问卷 22 份,分别来自中国科学院水利部水土保持研究所、西北农林科技大学、水利部水土保持监测中心、北京林业大学、西安理工大学、陕西师范大学、陕西省土地工程建设集团有限责任公司、陕西省地建土地工程技术研究院、中国科学院地理科学与资源研究所等 15 家科研机构、决策部门和工程设计与施工企业,专业背景涵盖水土保持与荒漠化防治、水利工程、水文学与水资源、土壤学、生态学、地理学、生态经济等,从事水土保持相关工作的平均工作年限为 14 年。于 2018 年 6 月在两个流域内分别选取纸坊沟、峙峪岭、大南沟和杏树窑 4 个自然村开展实地调研和农户问卷调查,4 个村回收有效问卷 86 份,题项包括受访农户家庭基本信息、土地利用情况、水土保持技术及效果和技术需求等。专家和农户问卷数据用于评估黄土高原主要水土保持技术、识别技术需求、确定技术适宜性和可行性分析指标。

2017 年 1 月—2018 年 4 月,经过 5 轮专家讨论和文献分析确定 5 个评估维度,对黄土高原 12 项水土保持技术进行专家评分<sup>[27-28]</sup>:应用难度指技术应用过程中对使用者技能素质的要求及技术应用的成本;成熟度指技术体系完整性、稳定性和先进性;适宜性指技术与应用区域发展目标、立地条件、经济需求、政策法律配套的一致程度;技术效益指技术应用后对生态、经济和社会带来的促进作用;推广潜力指在未来发展过程中该项技术持续使用的优势。采用 Likert 5 点量表打分,1 分别代表难应用、成熟度低、适宜性差、效益差、推广潜力小,5 分别代表易应用、成熟度高、适宜性好、效益好、推广潜力大。农户对水土保持技术效益评估中,1—5 分别表示效果差、效果较差、效果一般、效果较好和效果好。

### 2.2 技术需求分析方法

#### 2.2.1 确定指标体系

根据实地调研和文献资料分析,结合需求调查专家和农户问卷,考虑研究区水土保持技术应用情况与数

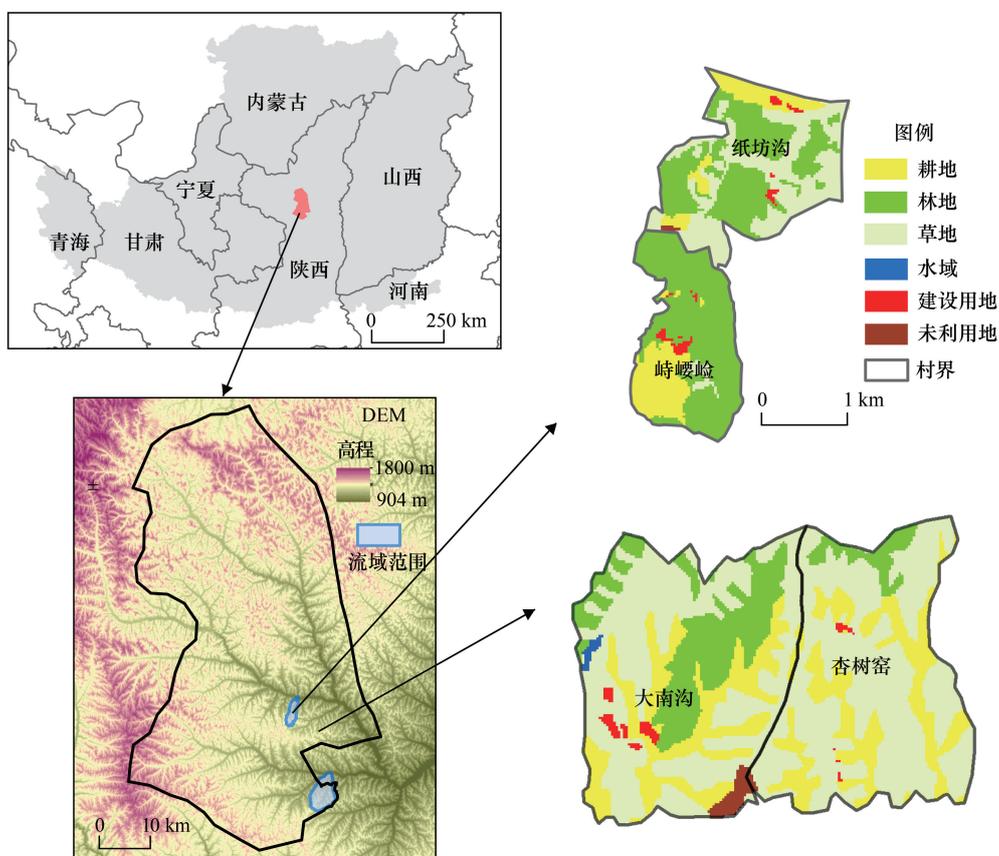


图1 研究区位置、数字高程和土地利用图

Fig.1 Location, DEM and land use of study area

据的可获得性,确定技术需求优先级指标包括立地适宜性和社会经济可行性两个维度。立地适宜性方面选择坡度、地貌类型和土地利用类型3个指标:坡度作为是否退耕还林(草)的主要自然判断因子,将其划分为4级,2°—5°可发生轻度土壤侵蚀,需注意水土保持;5°—15°可发生中度水土流失,应采取修筑梯田、等高种植等措施,加强水土保持;15°—25°水土流失严重,必须采取工程、生物等综合措施防治水土流失;>25°为开荒限制坡度,即不准开荒种植农作物,已经开垦为耕地的,要逐步退耕还林还草。地貌分为梁峁、坡面和沟谷,分别适用不同的坡面治理(如梯田)和沟道治理(如淤地坝)措施。土地利用分为耕地、林地、草地和未利用地,分别适用对应的工程、生物和农业措施。社会经济可行性方面选择家庭劳动力、可进入性和农户意愿3个指标:劳动力的多寡制约水土保持,如家庭劳动力仅1人很难从事果树种植,更适合选择机械化程度高的作物种植;可进入性指技术实施的便利性和产品的市场可达性,包括到道路的距离和道路质量,决定了技术实施的难度和农产品贸易成本的高低,如距离道路远或道路条件差,不利于修建机整梯田的机械作业和材料运输,也不利于果品销售和采摘;农户对水土保持的认知和意愿很大程度可以反映技术需求的优先级,农户会统筹考虑自家的土地利用情况、技术普适性和投资回报率等,其意愿会影响水土保持技术的可持续实施。

### 2.2.2 指标因子赋值和权重

在技术需求清单中选择与坡度、地貌类型和土地利用类型以及农户生产生活密切相关的7项技术,其中梯田分为水平梯田和隔坡梯田。将各评估指标的技术立地适宜性和社会-经济可行性划分为4个等级:高适宜/可行、中等适宜/可行、勉强适宜/可行、不适宜/可行,分别对应4、3、2、1(表1)。适宜性和可行性赋值原则:降水就地入渗拦蓄、充分利用光温水肥资源、合理配置基本农田和经济林<sup>[29]</sup>;梁峁配置人工和天然林草、坡面依据坡度从高到低依次配置林草、梯田,沟谷优先配置造地、梯田;经果林尽可能不改变现状,保障经济合理;其他条件相同的情况下,尽可能将梯田修建在坡度小的地方;改造重点在坡面和沟底,优先安排梯田,其余

安排人工林草和天然林草。

表 1 水土保持技术需求评估指标因子分级赋值

Table 1 Assignment of indicators of soil and water conversation technologies

评估维度 Dimension	评估指标 Indicator	指标因子分级 Classification of indicator	工程 Engineering				生物 Biological		农业 Agricultural
			A1 水平梯田 Level terrace	A2 隔坡梯田 Slope- separated terrace	A3 治沟造地 Gully reclamation	A4 鱼鳞 坑整地 Fish scale pit	B1 人工造 林/种草 Plant trees and grass	B2 天然封育 Natural recovery	C1 保护性耕作 Conservation tillage
立地适宜性 Site suitability	坡度	2°—5°	4	1	3	2	3	2	2
		5°—15°	4	2	2	2	3	3	3
		15°—25°	2	3	2	4	4	3	3
		>25°	1	1	2	3	3	4	1
	地貌类型	梁峁	2	2	1	3	3	4	2
		坡面	3	3	1	3	3	4	2
		沟谷	1	1	4	2	3	4	1
	土地利用类型	耕地	4	4	2	2	2	2	4
		林地	1	1	2	4	3	4	1
		草地	1	1	2	3	4	3	1
未利用地		1	1	4	3	3	4	2	
社会-经济可行性 Socio-economic feasibility	劳动力	户均<2人	3	3	3	2	2	3	3
		户均≥2人	4	4	4	3	3	3	4
可进入性	<2km(硬化路面)	≥2km(土路)	4	4	4	4	4	4	4
		≥2km(土路)	2	2	2	2	2	4	2
	意愿	0%—25%	1	1	1	1	1	1	1
		25%—50%	2	2	2	2	2	2	2
		50%—75%	3	3	3	3	3	3	3
75%—100%	4	4	4	4	4	4	4		

立地适宜性,1:不适宜,技术难以克服立地条件的限制性;2:勉强适宜,技术受立地条件的严重限制;3:中等适宜,技术受立地条件中等程度限制;4:高度适宜,技术不受立地条件限制  
社会-经济可行性,1:不可行,技术应用无法适应区域社会经济发展需求;2:勉强可行,技术应用勉强适应社会经济发展需求;3:中等可行,技术应用中等程度适应社会经济发展需求;4:高度可行,技术应用高度适应社会经济发展需求

利用层次分析法,通过专家打分构建各评估指标和技术的两两判断矩阵,计算得到各个指标的优先级权重,最后经检验,其 CR 值均小于 0.1,满足一致性要求(表 2)。

表 2 水土保持技术需求评估指标优先级权重赋值

Table 2 Assignment of weight of soil and water conversation technologies needs

评估维度 Dimension	评估指标 Indicators	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1
立地适宜性 Site suitability(0.5)	坡度	0.26	0.26	0.08	0.28	0.23	0.15	0.26
	地貌	0.10	0.10	0.73	0.07	0.12	0.07	0.10
	土地利用类型	0.64	0.64	0.19	0.65	0.65	0.79	0.64
	CR<0.1	0.04	0.04	0.07	0.07	0.00	0.08	0.04
社会经济可行性 Socio-economic feasibility(0.5)	劳动力	0.29	0.29	0.23	0.33	0.25	0.09	0.41
	可进入性	0.05	0.05	0.12	0.14	0.25	0.09	0.11
	农户意愿	0.66	0.66	0.65	0.53	0.50	0.82	0.48
	CR<0.1	0.08	0.08	0.00	0.06	0.00	0.00	0.03

### 2.2.3 技术需求的空问分析

通过 ArcGIS 软件分析处理得到各评估指标的矢量或栅格图层,利用栅格计算将各个图层进行加权叠加,

得到水土保持需求技术空间分布。其中,优先级 3—4 分为高需求、2—3 分为中需求、1—2 分为低需求。坡度图层直接从 DEM 中提取,地貌类型图层通过提取 DEM 中的山脊线和山谷线得到梁峁和沟谷。DEM 栅格数据(30m)来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn>)。2015 年中国土地利用现状遥感监测矢量数据(30m)来源于中国科学院资源环境科学数据中心,包括耕地、林地、草地、水域、居民地 6 个一级类型。卫星影像数据来自 Google Earth(10m),道路图层根据谷歌影像数字化得到。

### 3 结果与分析

#### 3.1 水土保持技术应用现状与特征

目前农户应用的主要水土保持技术有 3 类 12 项:(1)工程类:梯田、水平沟和鱼鳞坑整地、淤地坝、谷坊、治沟造地、集雨水窖;(2)生物类:人工造林种草、天然封育和地埂植物带;(3)农业类:等高沟垄和保护性耕作。应用最普遍的是人工造林种草,92.6%以上的农户都在自家退耕地植树种草或天然封育,造林前均采用鱼鳞坑或水平沟整地,主要树种为刺槐、山杏、山桃、柠条。其次是梯田,除纸坊沟部分农户在川地种植大棚外,其他 3 个村受访农户采用梯田种植农作物和果树的比例较高,占 88.9%—95.8%,主要种植玉米和苹果。再次是等高沟垄,峙峪岭超过 50%的受访农户仍在坡耕地使用等高沟垄种植少量玉米和豆类,其他 3 个村占比较低(12.5%—25.9%)。目前应用地埂植物带和保护性耕作的农户极少,不足 1%。淤地坝、谷坊和治沟造地工程由政府或企业实施。梯田和等高沟垄自 20 世纪 70 年代开始逐步应用,80 年代开始建设淤地坝和谷坊,1999 年退耕还林(草)以来进行大规模造林种草,自 2005 年政府逐步在果园中修筑集雨水窖,2010—2013 年地埂植物带曾在峙峪岭短暂应用,南沟自 2015 年开始实施治沟造地。4 个村的受访农户中,纸坊沟有川地大棚,未种植果树,大南沟和杏树窑有少量治沟造地;南沟流域的两个村农户在坡耕地种植果树(表 3)。纸坊沟小流域宽幅梯田的田宽 10—20m,人工梯田田宽 3—5m;南沟小流域自 2013 年起新修宽幅梯田,平均田宽 40—50m。产量方面,两个小流域农户梯田种植玉米的产量为 6000—7500kg/hm<sup>2</sup>,苹果产量约为 6000kg/hm<sup>2</sup>(乔化)和 22500kg/hm<sup>2</sup>(矮化);等高沟垄种植玉米产量为 3000—3750kg/hm<sup>2</sup>,使用等高沟垄种植前坡耕地种植玉米的产量约为 2250kg/hm<sup>2</sup>。

表 3 调研农户基本特征

Table 3 Characteristics of household, application situation of soil and water conservation technology

特征 Characteristics	纸坊沟	峙峪岭	大南沟	杏树窑
农户 Farmer				
户数 No. of household	N=16	N=19	N=27	N=24
平均年龄 Average age	54.2	55.8	57.7	56.5
户均人口 Persons per household	5.5	4.3	5.1	6.1
户均劳动力 Labor force per household	1.5	1.5	2.0	2.4
受教育年限 Years of schooling	5.3	3.5	4.0	6.0
户均拥有耕地(hm <sup>2</sup> ) Farmland per household				
梯田(农作物)数量 No. of terrace (crop)	0.19 (N=5)	0.50 (N=15)	0.39 (N=18)	0.61 (N=13)
梯田(果树)数量 No. of terrace (fruit)	-	0.58 (N=17)	0.68 (N=23)	0.90 (N=21)
退耕地(生态林)数量 No. of abandoned lands	1.53 (N=16)	1.21 (N=19)	0.96 (N=25)	1.29 (N=23)
坡耕地(果树)数量 No. of cultivated slopes	-	-	0.62 (N=6)	0.73 (N=3)
治沟造地(苜蓿/农作物)数量 No. of gully lands	-	-	0.20(N=3)	0.46 (N=9)
川地(大棚)数量 No. of valley lands	0.18 (N=7)	-	-	-

#### 3.2 水土保持技术评估

12 项技术中工程类的梯田和淤地坝、生物类的地埂植物带综合表现最好。12 项技术应用难度差异明显,

治沟造地较难应用(2.08),天然封育较易应用(4.78),工程类技术比农业类技术难度高,受投资成本和地形条件限制影响,工程类技术中水窖应用难度较低(4.25);各项技术在成熟度和效益方面的差异不大,成熟度较高的技术为天然封育(4.97),成熟度相对较低的技术为治沟造地(4.25),效益较高的技术为保护性耕作(4.75)和淤地坝(4.67),效益相对较低的技术为人工造林种草(4.00)和梯田(4.08),专家认为人工造林种草仍有更大的经济收益潜力,目前水土保持林占比大;保护性耕作的适宜性较高(5.00)和推广潜力较大(5.00),水平沟整地适宜性较低(4.08)和推广潜力较小(3.85),随着宽幅梯田建设和机械化操作,等高沟垄优势已不明显(图 2a)。

工程类的梯田、水平沟和鱼鳞坑整地,与 20 世纪 70 年代以前的黄土高原坡耕地种植相比,农户对应用梯田种植作物和经果林、水平沟种植作物、水平沟和鱼鳞坑整地造林的产量和水土保持效果的满意程度高于专家,为农户带来直接的增产、增收;淤地坝、治沟造地和谷坊 3 项沟道治理技术,农户满意度低于专家(图 2b)。技术应用中存在的问题主要表现在(表 4):2000 年以前修建的人工梯田(旧梯田)需要机整改造,2000 年以后修建的部分机整梯田(新梯田)缺少排水设施;缺少对 2000 年以前修建的淤地坝(旧坝)进行监测和风险评价,2015 年以来修建的淤地坝(新坝)还未形成可生产的坝地,部分治沟造地配套措施不到位,如耕作层未覆足够熟土;小型集雨水窖,农户满意度低于专家,目前水窖数量和质量不能满足种植果树的农户对喷施农药和灌溉的更大需求,超过 50%的水窖漏水或废弃;农户对生物类技术的满意度高于专家,从植被覆盖率提高和退耕还林补贴角度,农户对水土流失灾害减少和生态环境变好有一致的感知,技术中存在的问题主要表现在(表 4):缺少林草管理措施、地埂植物与作物争水争肥;农户对农业类技术的效益评分低于专家,机械化程度低和轮作休耕影响短期收益是农户反馈的主要问题。农户对技术效益的评估,除了关注减少水土流失等生态效益外,更加关注产量提高和收入增加等经济效益。如农户曾种植沙柳和紫絮槐保护梯田地埂,沙柳作为编织用材还可以收割出售,尽管与农作物争水争肥影响产量,但 80%以上的农户表示如果有收购需求,还会重新种植。

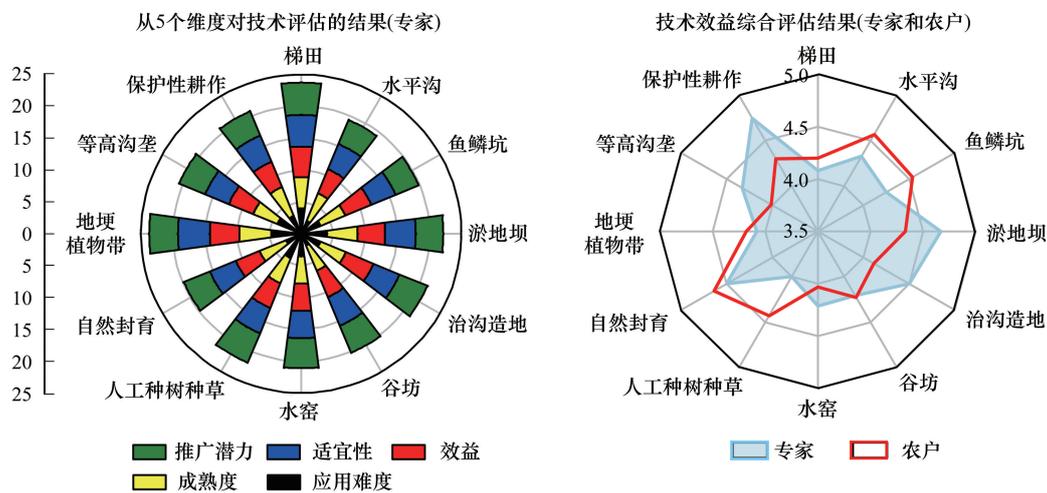


图 2 水土保持技术评估

Fig.2 Assessment of soil and water conservation technologies

### 3.3 水土保持技术需求识别

针对研究区现有水土保持技术应用中存在的问题,识别需求及其对应的技术(表 4),根据其已有技术的关系分为 3 类,即新技术、改良技术和配套技术。新技术,如人工干预封育、植物护坡、植被缓冲带、新材料水窖、土壤快速熟化;改良技术,如梯田加固、水窖修缮、谷坊修复、林分改良、补播补植、水保林树种筛选;配套技术,治理工程必须严格遵照相应的设计和施工的标准规范,如治沟造地配套排水沟渠和覆熟土、宽幅梯田配套地埂植物、梯田果树配套防雷网。

表 4 水土流失治理的技术需求清单  
Table 4 Needs technology list of soil and water conversation

技术类型 SWCT type	技术名称 SWCT name	技术作用 Function	存在的问题 Problem of SWCT	技术需求 Needs of SWCT	
工程类 Engineering	梯田(坡面)	防止坡面水土流失,就地拦蓄,增产	旧梯田不便于机械操作,遇暴雨易被冲毁 缺少护坎措施 缺少排水设施	梯田加固维护 隔坡梯田 植被缓冲带  梯田改造 机整宽幅梯田及配套 设施	
	水平沟整地(坡面)	蓄水保墒能力较强	生土,通风条件差,作物或苗木生长慢	表土保存回填	
	鱼鳞坑整地(坡面)	受地形限制小,土方量小	蓄水量有限 经果林管理不便	干旱陡坡地造林	
	淤地坝(沟道)	滞洪、拦泥、蓄水、建设农田,坝地产量高	旧坝:缺少监测评价  新坝:坡面植被恢复好,坝地形成速度慢	淤地坝风险评价和预警  治沟造地	
	治沟造地(沟道)	建成高标准农田,促进粮食增产,巩固退耕还林(草)成果	缺少配套措施或施工未达设计标准  成本高	生土快速熟化	
	谷坊(沟道)	防止沟床下切,形成坝阶地	土谷坊抗冲蚀能力差,易被冲毁  浆砌石谷坊投资大,排水孔布设不便	谷坊修复  石柳谷坊	
	集雨水窖(小型水利工程)	高效利用自然降水,解决人畜用水	干砌石和浆砌石水窖体积小(2—6 m <sup>3</sup> ),仅够果树施药用,无法灌溉 受地质条件影响大,成本高,易干裂,渗漏水,水质差	旧水窖修缮 新材料水窖	
	生物类 Biological	人工造林/种草	增加植被覆盖率	树种单一(病虫害) 高耗水树种引起土壤干层 高陡边坡无法恢复植被 道路边坡绿化耗水量大	水土保持树种筛选 径流林业技术  林分改良、密度调控、补植补播 植物护坡
		天然封育	增加植被覆盖率	缺少管理措施,自然演替 3—5 年后重新退化	人工干预封育
		地埂植物带	加强梯田地埂的稳固性和抗侵蚀能力,增加林草覆盖	与梯田作物争水争肥,经济效益小	经济灌木或草种筛选
农业类 Agricultural	等高沟垄	拦蓄地表径流,增加土壤水分入渗率,增产	机械化程度低	机整宽幅梯田高效农业	
	保护性耕作	增加植物被覆,蓄水保墒	为追求短期收益,较少轮作,较多病虫害,影响产量 大部分果树未行间种草 缺少配套措施	轮作休耕 草种筛选 滴灌、防雹网、地膜	

### 3.4 技术需求的空间分布

高需求技术中,水平梯田分布在 2°—15°坡面,隔坡梯田分布在 15°—25°破面,治沟造地分布在沟谷林地

或草地,鱼鳞坑整地和人工造林种草分布在 $15^{\circ}$ — $25^{\circ}$ 坡面的林地、草地,天然封育分布在 $25^{\circ}$ 以上坡面以及梁峁、沟谷,保护性耕作分布在梯田、坡耕地和需要轮作的川地上(图3)。户均劳动力越多、距离道路越近、农户意愿越高的村落和地块,梯田、治沟造地、人工造林种草的需求越高。

纸坊沟流域两个村的立地条件更适宜通过人工造林种草进行植被恢复,尤其是峙峪岭超过70%的土地坡度为 $5^{\circ}$ — $25^{\circ}$ ,基于农户意愿,68.4%的峙峪岭农户需要更多梯田种植果树及其配套技术,56.3%的纸坊沟农户需要更多梯田种植作物或蔬菜瓜果,同时需要休耕轮作等保护性耕作,对天然封育的需求体现为继续领取退耕补贴的意愿。南沟流域两个村 $25^{\circ}$ 以上的土地面积占比均超过25%,更适宜通过天然封育或人工适度干预的天然封育进行植被恢复,其中大南沟43.7%的土地无技术需求,经过2015年以来的削崩造田和治沟造地,农户没有更多梯田或造地需求,对技术需求主要体现在技术改良和配套技术的应用,如造地后覆熟土、配套排水设施;35%的杏树窑农户需要造地技术,其户均劳动力为2.4人,是4个村中劳动力最多的,其对造地的需求面积占比为2.6%,对新修梯田和造地后种植果树有配套防雹网的需求。峙峪岭和杏树窑多处需要梯田加固、旧梯田合并为宽幅梯田等。可进入性对技术需求的影响更大,如杏树窑为土路,影响工程类措施机械化作业和果品销售,其配套措施还包括道路等基础设施的完善。

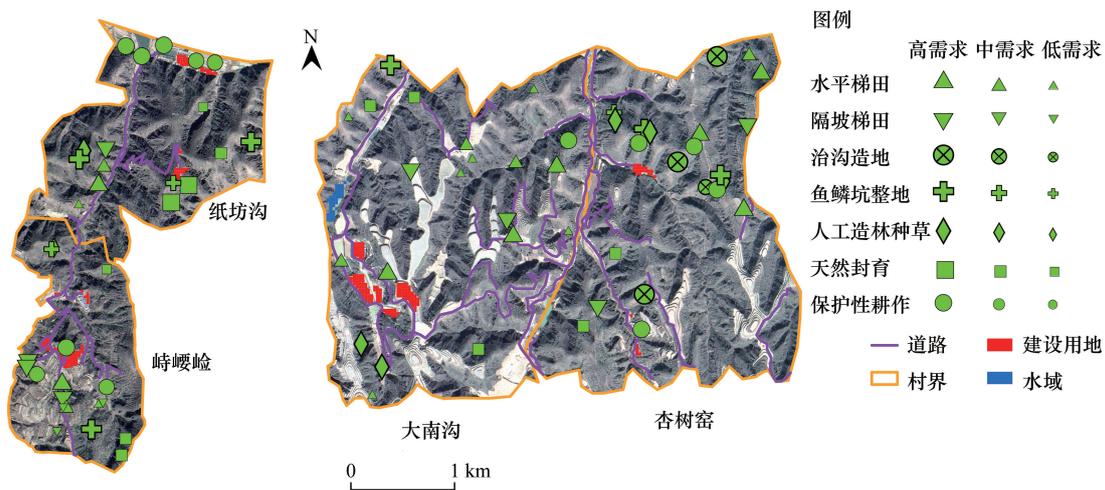


图3 调研村落水土保持技术空间分布示意

Fig.3 Spatial identification of needs for soil and water conservation technology

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

通过实地调研和问卷调查识别了水土保持技术,研究区主要应用3类12项技术;工程类包括,生物类包括人工造林种草、天然封育和地埂植物带,农业类包括等高耕作和保护性耕作。从专家和农户视角综合评估了现有技术,目前应用的水土保持技术整体效果较好,得到专家和农户的一致较高评价,针对现有技术应用中存在的问题,分别需要新技术、改良技术或配套技术。选择7项需求技术分析其立地适宜性和社会-经济可行性,纸坊沟和峙峪岭对人工造林种草有较高需求,峙峪岭对梯田种植果树及其配套技术需求更多;大南沟和杏树窑对天然封育有较高需求,此外,杏树窑对造地需求更多。

### 4.2 讨论

由于受到地貌和土壤类型、降雨特征、植被生长状况以及人类活动的影响<sup>[30-31]</sup>,水土流失仍是黄土高原丘陵沟壑区主要的生态环境问题<sup>[32]</sup>,生态环境依然较脆弱,需要持续综合治理,持续增加林草植被覆盖率和提升其质量,提升人工植被稳定性,强化水土保持功能<sup>[7]</sup>。从专家的角度,需要科学评估生态工程实施或生态技术应用生态效益、社会效益、生态服务功能价值<sup>[3,33]</sup>,深入研究生态退化机理,精准识别技术需

求<sup>[11]</sup>,从而为生态治理提供科学支撑。从农户的角度,除了少数极端天气、特大灾害情况外,水土流失已经不是影响日常生活和生计的最主要问题,农户更关心退耕后增加新的可机械化耕作的优质耕地(如沟沟造地),如何稳定增产(如防雹、果树抚育、品种改良),富余劳动力如何就近就地就业(发展第三产业)。这说明要结合气候变化适应和社会经济发展,综合考量水土保持技术的应用和生态工程的实施,从而提出切实可行的技术方案。

为了及时掌握生态-经济-社会系统的发展变化过程、水土保持治理成效及亟待解决的问题,必须在研究区开展有针对性的生态诊断<sup>[34]</sup>、技术需求调查和需求分析。纸坊沟流域作为早期示范区,纸坊沟村位于沟口,有一定数量的川地可种植大棚,水土流失风险和农民生计问题不突出;而位于沟头的峙崾崾大量青壮劳动力放弃种植和养殖外出务工,2000年以前已发生过大面积撂荒的现象,之后政府推广梯田种植果树,因果树需要精细抚育管理,加之冰雹导致的连续减产,收入不稳定,农户种植积极性并不高,但乔化苹果尚未老化仍在产果,从成本方面考虑很难放弃现有果树种植其他作物,因此需要政府协助建设防雹网等配套设施,或补贴品种改良,用便于操作的矮化品种逐步替代乔化品种,提高农户收入和积极性,防止梯田撂荒可能引起的水土流失。南沟流域作为新型示范区,目前在大南沟村新修了大量宽幅梯田,并通过土地流转进行规模化种植矮化苹果,配套防雹网,林间套种油菜返田,沟沟造地种植黑枸杞和苜蓿,通过果树种植和旅游业吸引劳动力返乡务工,农户有稳定的收入来源;相邻的杏树窑村也有政府实施的沟沟造地,虽然部分农户有意愿种植玉米做饲料,但因耕作层浅薄、质量差,大部分已撂荒,加之道路等基础设施条件差,果树产量低,农户对梯田或坡耕地种植仍持消极态度。因此,尊重地方差异和农户意愿,在不同地区采取因地制宜的差异性策略,可以减少生态修复的盲目性,降低修复成本,达到事半功倍的效果<sup>[35]</sup>。本文尝试性对村落尺度的水土保持技术进行需求分析,为建立生态技术需求评估框架奠定基础,为可持续生态治理提供依据。

由于外出务工人员占比较高,本研究农户问卷样本量较少,对农户意愿的分析仍存在局限性。水土流失和生态退化的程度不同,对不同治理目标情景下的不同技术和技术组合方案——短期快速修复对策和长期生态功能提升对策仍有待进一步探讨。未来研究还应将成本和政策机制维度纳入指标体系综合分析,完善水土保持技术适宜性和需求可行性指标体系。

**致谢:**衷心感谢中国科学院水利部水土保持研究所王继军研究员和安塞水土保持综合试验站吴瑞俊工程师等老师和同学对本研究的支持。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 23-31.
- [ 2 ] Zhao G, Mu X, Wen Z, Wang F, Gao P. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. Land Degradation & Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [ 3 ] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [ 4 ] Chen L D, Wei W, Fu B J, Lü Y H. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2007, 31(4): 389-403.
- [ 5 ] Liu Y X, Lü Y H, Fu B J, Harris P, Wu L H. Quantifying the spatio-temporal drivers of planned vegetation restoration on ecosystem services at a regional scale. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1029-1040.
- [ 6 ] Liu F, Yan H M, Gu F X, Niu Z G, Huang M. Net primary productivity increased on the Loess Plateau following implementation of the Grain to Green Program. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(4): 413-421.
- [ 7 ] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 杨勤科, 赵敏娟, 党小虎, 郭明航, 王国梁, 王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
- [ 8 ] 安文明, 韩晓阳, 李宗善, 王帅, 伍星, 吕一河, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响. 生态学报, 2018, 38(13): 4852-4860.
- [ 9 ] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China. Scientific

- Reports, 2014, 4: 7039.
- [10] Wang C, Zhen L, Du B Z. Assessment of the impact of China's Sloping Land Conservation Program on regional development in a typical hilly region of the loess plateau—A case study in Guyuan. *Environmental Development*, 2017, 21: 66-76.
- [11] 甄霖, 王继军, 姜志德, 刘孝盈, 张长印, 马建霞, 肖玉, 谢永生, 谢高地. 生态技术评价方法及全球生态治理技术研究. *生态学报*, 2016, 36(22): 7152-7157.
- [12] 甄霖, 胡云锋, 魏云洁, 罗琦, 韩月琪. 典型脆弱生态区生态退化趋势与治理技术需求分析. *资源科学*, 2019, 41(1): 63-74.
- [13] 余新晓, 毕华兴. *水土保持学(第三版)*. 北京: 中国林业出版社, 2013: 149-154.
- [14] 李生宝, 蒋齐, 赵世伟, 蔡进军. 半干旱黄土丘陵区退化生态系统恢复技术与模式. 北京: 科学出版社, 2011: 13-13.
- [15] 于洪波, 陈利顶, 蔡国军. 黄土丘陵沟壑区生态综合整治技术与模式. 北京: 科学出版社, 2011: 232-232.
- [16] 中国-全球环境基金干旱生态系统土地退化防治伙伴关系, 中国-全球干旱区土地退化评估项目. 中国干旱地区土地退化防治最佳实践. 北京: 中国林业出版社, 2008: 57-81.
- [17] 环境领域技术预测研究组. 环境领域中外技术竞争研究报告. 北京: 环境领域技术预测研究组, 2014.
- [18] 邵明安, 王云强, 贾小旭. 黄土高原生态建设与土壤干燥化. *中国科学院院刊*, 2015, 30(3): 257-264.
- [19] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, Luo Y. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [20] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰, 张孝中. 关于黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究——III: 小老树的成因及其改造途径. *水土保持学报*, 1991, 5(4): 80-86.
- [21] Wang Y Q, Shao M A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(3): 296-304.
- [22] 程国栋, 张志强, 李锐. 西部地区生态环境建设的若干问题与政策建议. *地理科学*, 2000, 20(6): 503-510.
- [23] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433-438.
- [24] 何永涛, 李文华, 李贵才, 闵庆文, 赵海珍. 黄土高原地区森林植被生态需水研究. *环境科学*, 2004, 25(3): 35-39.
- [25] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [26] 张汉雄, 邵明安. 黄土高原生态环境建设. 西安: 陕西科技出版社, 2001: 8-12.
- [27] Zhen L, Yan H M, Hu Y F, Xue Z C, Xiao Y, Xie G D, Ma J X, Wang J J. Overview of ecological restoration technologies and evaluation systems. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(4): 315-324.
- [28] 胡小宁, 谢晓振, 郭满才, 王继军. 生态技术评价方法与模型研究——理论模型设计. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1152-1164.
- [29] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 207-209.
- [30] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1): 9-20.
- [31] Yang T, Xu C Y, Chen X, Singh V P, Shao Q X, Hao Z C, Tao X. Assessing the impact of human activities on hydrological and sediment changes (1953-2000) in nine major catchments of the Loess Plateau, China. *River Research and Applications*, 2010, 26(3): 322-340.
- [32] 王兵, 张光辉, 刘国彬, 杨勤科, 杨艳芬. 黄土高原丘陵区水土流失综合治理生态环境效应评价. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 150-161.
- [33] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, Gao P, Wang F, Zhao G J. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209-210: 87-99.
- [34] 刘国彬, 杨勤科, 郑粉莉. 黄土高原小流域治理与生态建设. *中国水土保持科学*, 2004, 2(1): 11-15.
- [35] 曹世雄, 刘伟, 赵麦换, 冯飞. 延安市生态修复双赢模式实证研究. *生态学报*, 2018, 38(22): 7879-7885.