

DOI: 10.5846/stxb202001020008

袁和第, 信忠保, 侯健, 李宗善, 杨磊. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式. 生态学报, 2021, 41(16): 6398-6416.

Yuan H D, Xin Z B, Hou J, Li Z S, Yang L. Models of soil and water conservation in the loess hilly region of China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6398-6416.

黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式

袁和第¹, 信忠保^{1,*}, 侯健¹, 李宗善², 杨磊²

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:黄土高原是我国水土流失最为严重的区域, 几十年的水土流失治理工作成果显著。当前生态文明建设已是我国国家战略之一, 对黄土高原水土流失治理模式现状进行系统总结十分必要。对水土流失治理措施体系和流域土地利用情况系统分析, 整理和总结了黄土高原 6 个典型流域的治理模式, 包括治沟造地、防蚀固沙、生态农业发展、三大体系、梯田开发和水资源高效利用等 6 种模式。对比各治理模式发现, 小流域综合治理模式是以环境治理为手段, 从而达到改善人类生存和发展空间的终极目的, 措施技术体系构建上体现了从坡面到沟道、工程措施植物措施相结合的特征; 但不同的生态环境现状和社会经济条件下, 治理模式有不同的表现形式。基于小流域水土流失治理模式的相似性和差异性, 从自然地理条件和社会经济发展需求两方面探讨了流域水土流失治理模式, 提出黄土高原水土流失治理模式形成机制框架, 以期对当前黄土高原水土流失治理、黄河流域生态保护与高质量发展提供参考。

关键词:黄土高原; 水土保持; 措施体系; 治理模式

Models of soil and water conservation in the loess hilly region of China

YUAN Hedi¹, XIN Zhongbao^{1,*}, HOU Jian¹, LI Zongshan², YANG Lei²

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China

Abstract: The Loess Plateau is the region with the most serious soil and water loss in China, and decades of soil and water conservation have remarkable achievements. As our country has put the construction of ecological civilization at the height of national strategy, it is necessary to systematically summarize the current situation of soil and water conservation models of the Loess Plateau. Based on the systematic analysis of soil and water conservation measures system and watersheds' land use conditions, we sorted out and summarized the management models of 6 typical watersheds in the Loess Plateau, including 6 models which were gully control and land reclamation, erosion control and sand fixation, ecological agriculture development, three major systems, terrace development and efficient use of water resources, respectively. Through the comparison of each soil and water conservation model, we found that the comprehensive management models of small watersheds mainly used environmental management to make the space for human being surviving and developing better. The construction of the technical system of soil and water conservation measures reflected the characteristics of the regulation from slope to gully areas and the combination of engineering and biological measurements. However, management models had different manifestations under different ecological environment status and socio-economic conditions. Based on the similarities and differences of soil and water conservation models of different small watersheds, the soil and water loss

基金项目: 十三五国家重点研发计划(2016YFC0501602); 国家自然科学基金项目(41390462, 41571503); 中国科学院科技网络服务计划(STS)项目(KFJ-STZ-ZDTP-036)

收稿日期: 2020-01-02; 修订日期: 2021-02-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinzhongbao@126.com

management models of watersheds were discussed from the aspects of natural geographical conditions and needs of social and economic development, and the mechanism framework of how the soil and water conservation models of the Loess Plateau form were put forward to provide references for soil and water loss management of the Loess Plateau, and ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin.

Key Words: the Loess Plateau; soil and water conservation; system of measures; models

模式是指从不断重复出现的事件中发现和抽象出的规律,是一个事物的标准样式^[1]。模式描述了在环境中不断出现的问题,并将其解决方法归纳到理论高度。小流域水土流失治理模式即是运用多学科理论,以区域水土流失治理目标和社会经济发展方向为指导^[2],对治理措施组成、措施空间布置、措施之间功能搭配与镶嵌组装情况进行总结^[3],详细描述了该区域解决生态环境、社会经济问题的核心,是在治理思想的经验积累和实践后,对流域水土流失治理的真实反映和高度概括^[4]。例如蒋定生等^[3]论述了黄土高原长城沿线风沙滩地丘陵生态脆弱带综合治理模式、黄土丘陵沟壑区综合治理模式和黄土高原沟壑区综合治理模式;李生宝等人^[5]认为在半干旱黄土丘陵区应以自然植被恢复、重点发展农业农村经济为核心,并总结出庭院高效生态农业模式、坡面乔灌草空间配置模式和农林复合经营技术模式。

黄土高原位于亚洲大陆季风区,其独特的气候和土壤条件,加上人类长时间不合理开发,导致黄土高原成为世界上水土流失最为严重的地区之一^[6]。水土流失问题不仅是严峻的生态环境问题,更深刻的影响了该地区的经济社会发展^[7]。近 60 年水土流失治理后,黄土高原植被覆盖率已经上升到了 2013 年的 59.6%^[8],工程措施面积快速增长^[9];黄土高原地区径流和输沙量均明显减少,黄河含沙量从 1919—1959 年之间的 1.6×10^9 t 减少到小于 0.1×10^9 t,下降约 90%^[10-11]。地区社会经济也取得长足发展,同时形成了大量成熟有效的水土流失治理模式。近 30 年以来,黄土高原不同类型区治理模式的构成内涵和服务目标方面已有大量总结工作^[3,5,11-13],皆表明流域内水土保持措施的合理配置,能有效改善区域生态经济条件,建立适合的水土流失治理模式,是小流域治理建设成功的保证。

黄土高原水土流失治理已经取得巨大成就,但水土流失仍是黄土高原最严重、最具代表性的环境问题,同时该区水资源承载力达到上限,为进一步开展生态修复及高质量发展工作^[6-7],治理模式必将迎来调整^[8,10,14]。现有黄土高原水土流失治理模式研究多以单流域、区域研究为主^[3-5],缺乏整体上的黄土高原水土流失治理模式集成与总结,尤其在典型小流域水土流失治理模式野外调查基础上的定量分析和治理模式总结。在黄土高原水土流失治理进入新时代背景下,迫切需要以多流域野外调查为基础,开展黄土高原水土流失治理模式研究。本研究以黄土高原 6 个具有鲜明区域代表性的小流域,以野外实地调查为主,探究不同流域水土流失治理措施体系和治理现状。以此基础对治理模式进行梳理,从研究对象上比较不同区域水土流失治理模式的相似性、差异性,在自然条件和社会经济需求等核心问题下探讨流域水土流失治理模式的形成框架^[15-16]。研究是对黄土高原水土流失治理模式的系统研究,可为新时代黄土高原水土流失治理新模式提出和黄河流域高质量发展提供依据。

1 研究区流域概况

调查的 6 个流域位于甘肃、陕西两省,从东北到西南呈弧状分布($34^{\circ}38'N-38^{\circ}47'N$, $104^{\circ}29'E-110^{\circ}22'E$)(图 1),依次为神木六道沟、延安羊圈沟、安塞纸坊沟、庆阳南小河沟、天水罗玉沟、定西龙滩沟。研究区地处黄土高原水土流失最为严重的黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区。气候类型主要是干旱半干旱季风气候,年均降水量在 400—550 mm(表 1)。水力侵蚀是研究区主要的侵蚀类型,治理前水土流失严重,流域内沟壑纵横,水土流失速率可达 $5000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上。土壤以黄绵土为主,土壤黏性较差,渗透性强,保水性差。多年来水利部、中国科学院等科研院所对这些流域开展了大规模的水土保持与生态修复研究,旨在进一步探索不

同生态经济发展需求下的水土流失治理与生态恢复模式。

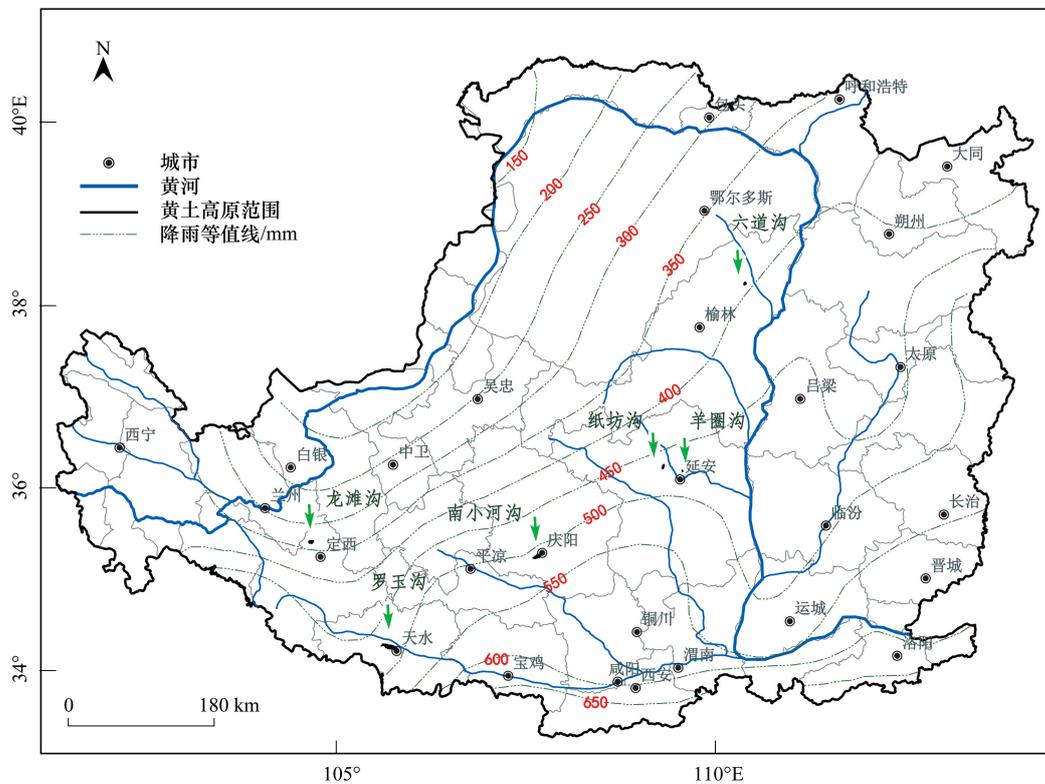


图1 黄土高原水土流失治理模式调查流域空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of soil and water conservation model survey on the Loess Plateau

(1) 陕西神木六道沟流域

小流域地处黄土高原的水蚀风蚀交错区域,该区域是黄土高原侵蚀模数最大和含沙量最高的区域。脆弱的生态环境使流域形成了典型的盖沙黄土丘陵景观,为黄河下游河床提供了大量的粗沙。该流域是一个农矿业共同开发的特殊小流域,丰富的煤矿资源给流域带来发展红利的同时也带来了环境上的损害,其治理模式包含着荒漠化和工矿业开发流域的治理精髓。

(2) 陕西延安羊圈沟流域

流域属于退耕还林示范市的延安,是生态恢复力度大,植被造林面积占比高的典型流域。同时流域内积极开展治沟造地工程,是土地可持续利用示范流域,其治理模式对需要进行大面积植被建设和生态修复的流域提供治理启示,对流域增加可利用地的需求提供治理办法。

(3) 陕西延安纸坊沟流域

20世纪40年代该小流域迎来人口爆发,当地居民为了满足增长的粮食需求大量开垦,致使当地生态系统遭到破坏,水力侵蚀严重,洪涝灾害频繁发生,阻碍了当地经济发展^[17]。其治理模式提供了一种以构建水土保持型生态农业为核心、优化流域产业结构的方法,治理上很好的兼顾了流域经济发展和环境建设,构建了两两者之间相互促进的关系。

(4) 甘肃西峰南小河沟流域

流域是黄土高原沟壑区最具代表性的小流域,其最主要的特征是拥有面积宽广而平坦的塬面,同时该流域有最长时间水土流失监测资料^[18]。该流域治理模式是黄土高原沟壑区中治理核心思想的体现,即积极协调塬面、沟坡治理关系,保证生态系统安全和区域经济健康发展,也给需要发展旅游、科技示范园等产业的流域提供了治理思路。

(5) 甘肃天水罗玉沟流域

流域沟深坡陡,地貌上属于典型的黄土梁状地貌。流域自 1986 年对降水、径流和泥沙进行观测^[19]。流域内人口密度较大,对经济发展有强烈需求,剧烈的水蚀和人为破坏使得流域治理难度大。该流域的治理模式较为注重经济发展,积极利用当地优势条件协调发展与生态建设的关系,缓解当地人地冲突的矛盾。

(6) 甘肃定西龙滩沟流域

流域属典型半干旱黄土丘陵沟壑区,海拔高达 1900 m,其最主要的特征是降雨稀少、气候干旱、水土流失严重。脆弱的生态环境严重限制了当地的经济。20 世纪 50 年代流域便开始水土流失综合治理,治理上强调调和当地生态脆弱和经济发展落后的矛盾,主要通过对稀缺的水资源拦蓄利用,大力发展水土保持型农业。

表 1 研究区基本信息

Table 1 Basic information of the research area

序号 Number	流域名 Watersheds	面积 Area/km ²	地貌类型 Geomorphie type	主要土壤类型 Major soil types	海拔 Elevation/m	年均温度 Average temperature/°C	年平均降雨量 Mean rainfall/mm	年平均蒸发量 Average evaporation/mm
1	六道沟流域	6.9	盖沙黄土丘陵沟壑	新黄土、红胶土	1094—1274	8.3	437.4	1400
2	羊圈沟流域	2.1	典型黄土丘陵沟壑	黄绵土	1000—1500	8.5	535	1067.8
3	纸坊沟流域	8.3	典型黄土丘陵沟壑	黄绵土	1040—1425	8.8	548.7	1463.2
4	南小河沟流域	27.3	黄土高塬沟壑	黄绵土、红胶土	1050—1423	9.3	523	1474.6
5	罗玉沟流域	74.4	黄土丘陵沟壑区第三副区	黄绵土、黑垆土、灰褐土	1165—1895	10.7	531.1	1293.3
6	龙滩沟流域	16.1	半干旱黄土高原丘陵沟壑	黄绵土	1850—2200	6.8	386.3	1649

2 研究方法

2.1 流域信息调查

本研究采用野外实地踏查法搜集各流域当地气候情况、水土流失类型、水土流失现状、经济支柱产业等基本信息,对整个小流域进行全面考察记录。

2.2 土地利用及水保措施识别

于 2018 年 7—10 月,以流域土地利用和水土保持情况的实地调查为基础,根据分类体系简化和合并^[20],将 6 个调查流域的土地利用类型划分为 6 个一级分类和 17 个二级分类;水保措施分类为植物措施、工程措施和耕作措施进行调查。以实地步行调查为基础,在措施布设地详细辨识了土地利用和水保措施类型。文中土地利用和水土保持措施数据皆是现场调查所记录信息。

2.3 面积计算

利用基于 Google API 和 Sogou API 的跨平台地图浏览器,根据软件系统的定位导航功能,以野外实地调查为基础,在详细考察整个流域时,利用卫星遥感地图记录考察路径,在地图上标记实地调查的土地利用类型和水保措施位置。在地图浏览器实时的卫星影像上配合标记进行目视解译,生成并导出 KML 格式文件,利用 ArcGIS 10.2,计算出每个流域的各土地利用面积以及各水土流失治理措施面积和分布和措施平均高程、坡度。

3 小流域土地利用现状及水保措施体系

3.1 流域土地利用组成情况

土地利用,是指人类通过土地的某些属性来进行生产性或非生产性活动所采用的方式、利用的过程以及产生的结果^[21-22]。一般来说,影响土地利用变化最主要的驱动因子是人类活动、生态建设、社会经济发展等

人为因素,而自然因素的影响作用次之。对流域土地利用情况的解析可以反映出人与土地的交互模式和结果。流域内的土地利用方式、分布情况和比例大小,是经过治理后流域内生态环境、社会经济和治理技术的综合体现^[23-24]。

如表 2 所示,总体上 6 个典型调查流域的主要土地利用类型为:林地(灌木林、有林地、疏林地,三者占调查流域总面积的 46.7%,其中灌木林占 11.6%)、草地(25.9%)和农地(17.7%)。林、灌、草、农四种土地利用的组成比例在 6 个研究流域中存在差异,各流域面积最大的都是林地和草地,都显著高于农地面积占比(图 2);每个流域 50% 以上的面积都是林地和草地,但不同流域中林草组成结构存在差异,例如 6 个流域中林地占总面积比最大为 72.24%,最小才 17.16%,而草地面积占比最大的为 38.72%,最小为 12.32%。

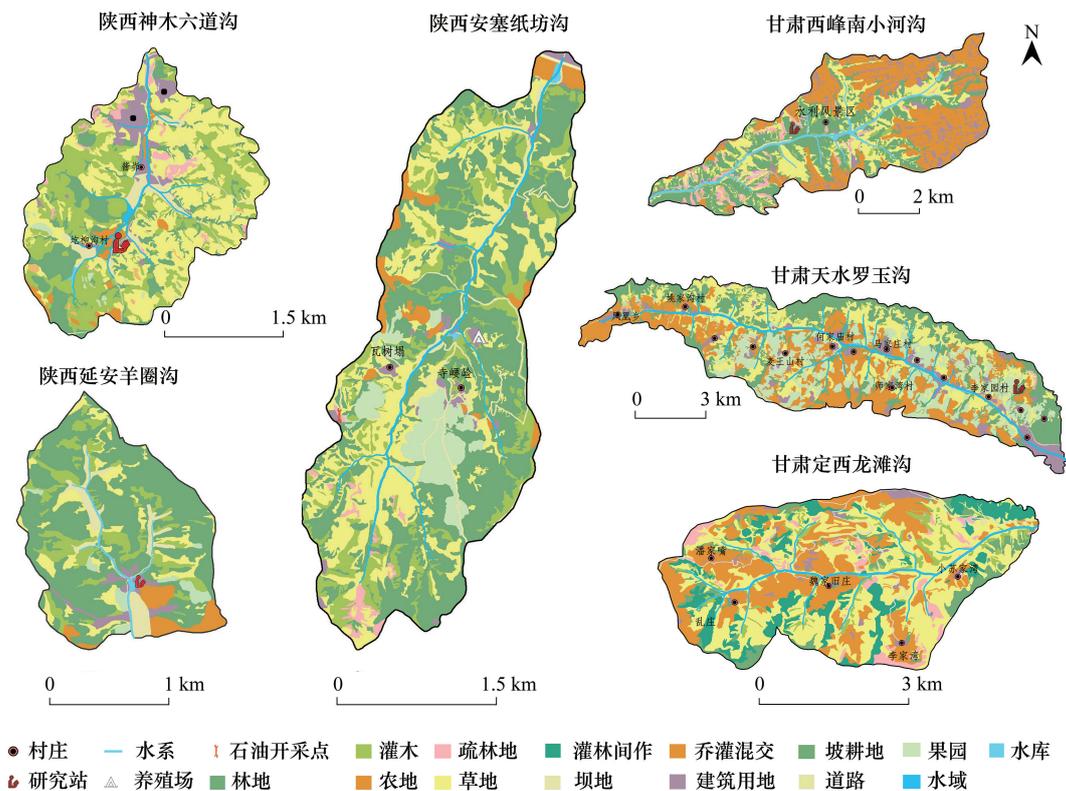


图 2 黄土高原典型流域的土地利用分类图

Fig. 2 Land use classification map of typical small watersheds on the Loess Plateau

流域的林灌草面积比例反映了流域的治理侧重,各不相同(图 3)。随着降雨量的减少,林灌草面积组成结构表现为草地面积增多、林地面积减少,这是由于植被建设面积及组成取决于植物需水与流域供给的平衡。以水分条件最好和最差的两个流域为例:(1)羊圈沟是典型的生态治理型流域,年均降雨量为 535 mm,流域内植被建设面积占流域总面积的 85.56%,农地面积仅占 11.57%。羊圈沟有林地面积 1.53 km²,占流域总面积的 72.24%,是林地占比最大的流域,而草地面积为 0.26 km²,仅为林地面积的 1/6,是 6 个流域中草地占比最小的。(2)龙滩沟年均降雨量为 386.3 mm,水分稀缺。草地面积为 6.21 km²,占流域总面积的 38.72%,是林地的 1.5 倍,是草地面积最大的流域。虽然乔木有更好的水土保持能力,但较草地相比有更高的需水量^[25],在水分如此稀缺的环境下,大面积的种植乔木会导致水分供需失衡^[8],致使流域干旱,因此草地和灌木是当地水土保持的主要植物措施。从 6 个流域的林灌草组成结构可以看出,在不同环境下“适地适树”,灵活发挥各植被特性是植被建设的核心思想,在治理上应避免盲目种植大面积的乔木林。通过构建健康的生态系统,维持好植物用水与土壤水分之间平衡,从而获得最好的水土保持效益。

表 2 典型小流域土地利用面积占比表
Table 2 Proportion of land use area in typical small watersheds

覆盖类型 Land-use type	面积 Area/ km ²	%										
耕地 Cultivated land	0.115	5.43	0.184	2.64	0.294	3.53	0.098	0.36	4.400	27.42	18.513	24.89
坡耕地	0	0	0.040	0.58	0.004	0.05	0	0	0.072	0.45	0.483	0.65
塬面	0	0	0	0	0	0	7.882	28.82	0	0	0	0
果园 Orchard	0	0	0.065	0.94	0.603	7.24	1.107	4.05	0	0	13.759	18.50
林地 Forest land	1.126	53.30	1.170	16.79	3.563	42.81	7.727	28.26	1.078	6.72	17.130	23.03
疏林地	0.059	2.81	0.192	2.76	0.116	1.39	1.054	3.85	0.717	4.47	0.108	0.14
灌木林地	0.341	16.13	2.010	28.85	1.274	15.30	0.798	2.92	0.960	5.98	0.336	0.45
乔灌混交林地	0	0	0	0	0	0	0.463	1.69	0	0	0	0
灌草间作地	0	0	0	0	0	0	0	0	2.136	13.31	0	0
草地 Grassland	0.260	12.32	2.566	36.84	2.130	25.59	5.446	19.91	6.214	38.72	16.565	22.27
建设用地 Construction land	0.069	3.25	0.404	5.80	0.161	1.94	2.290	8.38	0.361	2.25	5.775	7.76
道路	0.009	0.43	0.061	0.88	0.116	1.39	0.084	0.31	0.112	0.70	0.920	1.24
水域及水力措施用地	0	0	0.014	0.21	0.014	0.16	0.053	0.19	0	0	0	0
塘坝	0.004	0.19	0.013	0.18	0.005	0.06	0	0	0	0	0	0
坝地	0.130	6.14	0.246	3.54	0.045	0.54	0.151	0.55	0	0	0.048	0.06
水库	0	0	0	0	0	0	0.192	0.70	0	0	0	0
河道	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.747	1.00
总计	2.113	100	6.966	100	8.324	100	27.346	100	16.050	100	74.384	100

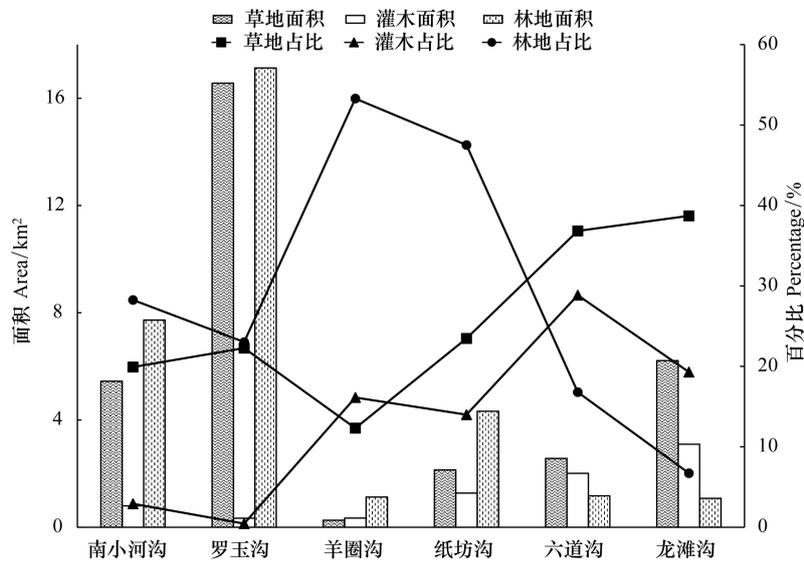


图3 林灌草组成结构

Fig.3 The structure of forest and grass

农地主要分布区域为梯田和坝地。农地面积占比最大的罗玉沟流域,农业用地面积为 32.27 km^2 , 占流域总面积的 43.3%。罗玉沟南面大面积的缓坡长坡,保水能力强的土壤,良好的地貌条件为农业的发展提供了基础;同时罗玉沟充沛的降雨量,日照充足、积温较高,都为当地的果树种植提供了良好的气候条件;经济上,罗玉沟人地矛盾、脱贫发展压力大,因此农地面积所占比重最大,其中农田面积 18.51 km^2 、果园面积 13.76 km^2 。相反,经济发展以工矿业为主的六道沟是农地面积占比最小的流域,农地面积为 0.47 km^2 , 占总面积的 6.75%。

羊圈沟坝地的面积为 0.13 km^2 , 占总面积的 6.14%, 是坝地面积占比最大的流域。羊圈沟农业发展的空间受到大面积的林草措施挤压,同时严重的水力侵蚀导致沟道下切,选择修建淤地坝来保护沟道、稳固沟坡,增加可利用地同时能发挥出最好的生态效益。

3.2 主导治理措施类型

水土保持措施通过增加地表覆盖、减缓地表径流的产生,固水保土、改善土壤质量来提高生态系统服务功能^[26],相比自然侵蚀条件下,水土保持措施的应用能改善植被生长状况,极大程度的减少水土资源流失,提高流域生态系统服务功能^[26-27],是遏制区域水土流失和土地退化态势主要手段^[7]。

在生产实践中,将水土保持措施一级类型分为 3 类,即植物措施、工程措施和耕作措施^[28]。凡是用种植和培育生物,增加地表覆盖的措施称为植物措施;必须用推土机、挖掘机、或人工修筑建造,而无法用一般耕作工具在耕作过程中完成的措施称为工程措施,如梯田、谷坊等;凡是用犁地、中耕等耕作工具在耕作过程中完成的措施称为耕作措施。6 个典型小流域根据自身流域特点,将水土保持措施进行了适宜的搭配应用(图 4)。

调查发现,黄土高原的植物措施以退耕还林、封山育林和荒山造林为主,植被措施虽然有更好的水土保持效益,但在黄土高原气候条件下要维持高植被盖度是非常困难,因此与工程措施的搭配至关重要^[29]。在流域进行生态恢复的前期,工程措施能为植物的生长提供先行的水保功能,创造植物生长的环境,保障其正常发挥水土保持作用^[26, 30]。黄土高原坡面水土流失治理主要工程措施包括梯田、水平阶、水平沟(表 3)。

梯田是最为常见的工程措施(图 5),6 个流域梯田面积占总流域面积的 20.7%。梯田的修建为发展农业提供了优质的耕作环境,是调节区域生态压力和发展压力的重要措施^[29, 31]。罗玉沟是 6 流域中梯田面积占比最大的流域,占流域总面积的 58.35%,其梯田一般用作农地和果园地,各占 18.5 km^2 和 13.8 km^2 。梯田占

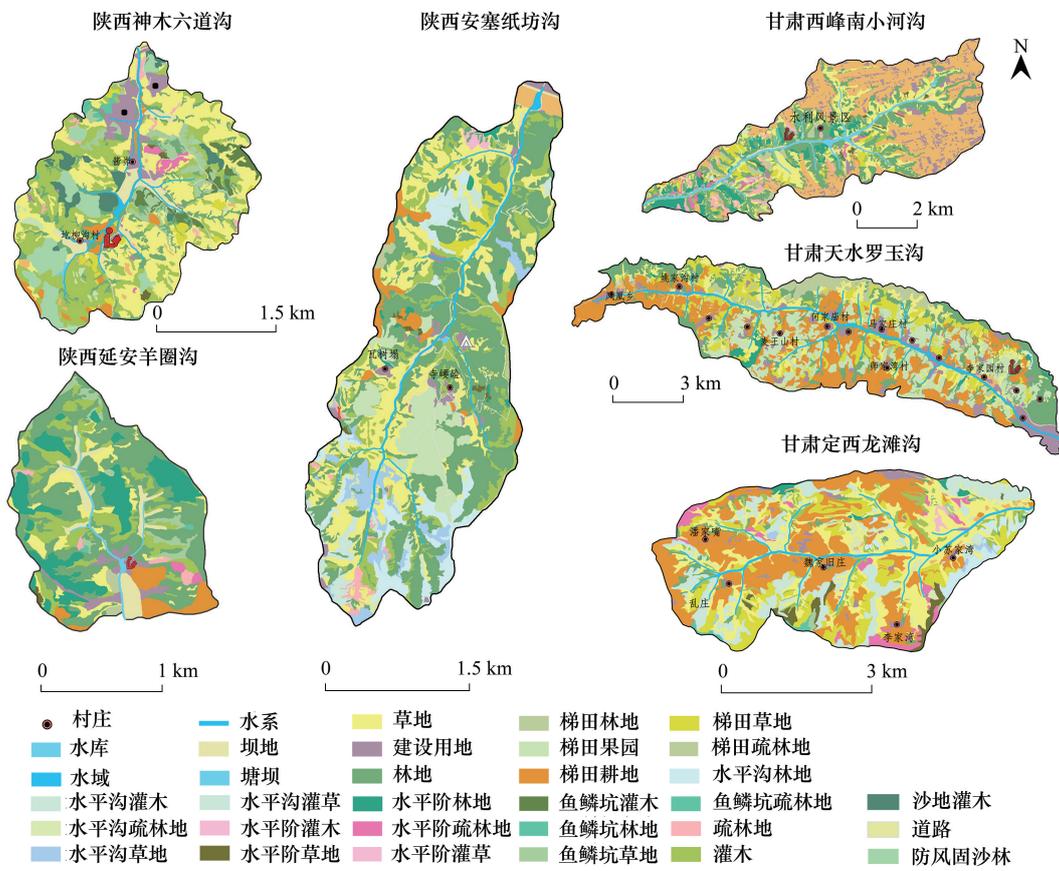


图 4 黄土高原典型小流域水土保持措施类型和分布
 Fig.4 Types and distribution of soil and water conservation measures in typical small watersheds of the Loess Plateau

比最小的是有煤矿开发的六道沟流域,面积占比仅占 4.63%。野外实地调查发现,梯田能快捷的协助小流域经营模式的调整,如用于解决因退耕还林后人均耕地减少的问题以及坡耕地水土流失导致的土地生产力下降的问题。



图 5 调查小流域中的梯田措施
 Fig.5 Terrace in small watersheds

表 3 主导措施面积表
Table 3 Major measures area

流域名称 Watersheds 措施类型 Measures type	羊圈沟		六道沟		纸坊沟		南小河沟		龙滩沟		罗玉沟	
	面积/km ²	%										
主导植物措施												
Major plant measures												
植草	0.18	8.68	2.03	29.20	1.66	19.91	4.50	11.73	4.07	25.36	8.72	11.73
灌木林	0.34	16.13	1.79	25.67	0.96	11.59	0.78	2.87	0.91	5.65	0.34	0.45
乔木林	0.79	37.50	0.64	9.20	2.95	35.39	6.27	22.96	0.36	2.27	12.86	17.29
疏林地	0.02	1.02	0.07	1.07	0.08	0.98	0.64	2.36	0	0	0	0
果园	0	0	0.06	0.91	0	0	1.11	4.05	0	0	0	0
坝地	0.13	6.14	0.25	3.54	0.05	0.54	0.15	0.55	0	0	0.05	0.06
主导工程措施												
Major engineering measures												
塘坝	0	0.19	0.01	0.18	0.00	0.06	0	0	0	0	0	0
水平阶	0.35	16.63	0.09	1.31	0.10	1.26	1.84	6.74	1.01	6.31	0.92	1.23
梯田	0.14	6.39	0.32	4.63	0.96	11.53	1.34	4.92	6.18	38.49	43.40	58.35
鱼鳞坑	0.08	3.64	0.64	9.24	0	0	0.11	0.39	0.16	0.97	0.09	0.11
水平沟	0	0	0	0	1.19	14.28	0.04	0.15	2.82	17.56	0.09	0.12
水库	0	0	0	0	0	0	0.19	0.70	0	0	0	0
总计	2.04	96.32	5.92	84.95	7.95	95.53	16.99	57.42	15.50	96.60	66.46	89.35

3.3 治理措施的布设位置

生产实践中流域治理措施的布设与地形地势关系密切,与坡度关系尤其密切(图 6)。水平阶、水平沟、鱼鳞坑等措施布设坡位较靠上、坡度偏高,能够减少工程量,发挥其最佳效果。水平阶通常用于配合植树造林,树种以油松、刺槐为主,多分布在 10—20°坡度之间,布设于在土层较厚、坡度较大的坡面。水平沟的布设更加灵活,运用形式更加多样,通常布设于在方便施工的坡度(15—25°),以配合灌木和草本种植,能有效消减坡面径流,创造适宜植物生长的土壤条件,树种上多为沙棘、柠条等,草本以当地优势种为主。鱼鳞坑,因其土方量少、施工简单、适用灵活的优点,适用于坡度在 25°以上或坡面破碎、水土流失严重的区域。梯田多位于平均坡度在 10—15°之间的缓坡位和中下部坡位,多分布于沟道两侧和村庄附近,常配置地埂防护林用作耕地和果园。水土保持林的配置多在风蚀较弱、水分条件较好的缓坡和沟坡。沟道治理以谷坊、淤地坝等拦蓄措施,配合沟道防护林为主,用以减缓沟坡沟道的侵蚀,增强流域水土资源的利用。

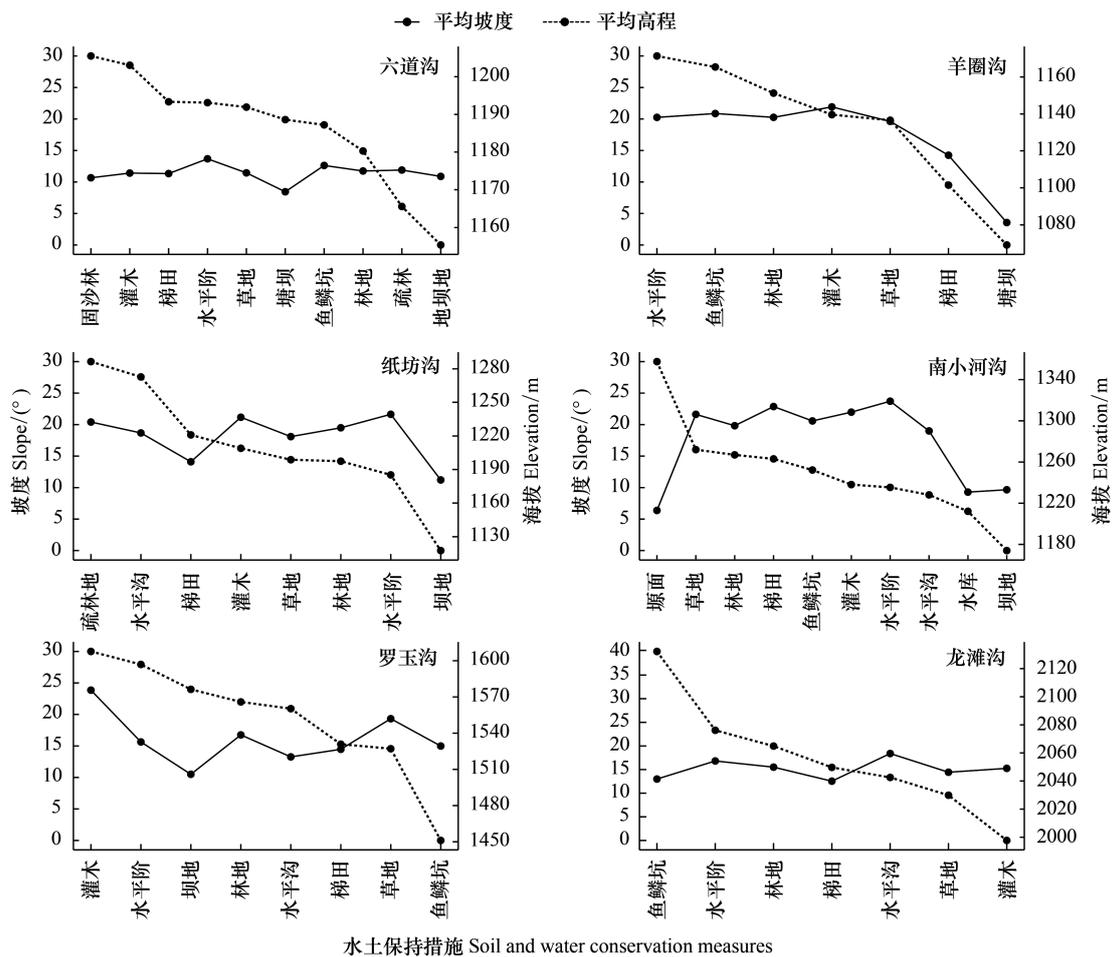


图 6 6 流域措施平均高程坡度
Fig.6 The average elevation and average slope of the major measures

4 水土流失治理模式

水土流失治理模式,是流域在应对生态系统破坏和退化,并满足区域经济发展的治理思想、方法和技术的集成,是生态需求和经济需求相互协调作用后的产物,是水土流失治理措施体系在小流域水土流失治理工作的高维体现。通过对小流域的生态系统、经济系统和社会系统进行系统分析和调查,结合小流域的水土流失治理措施体系,总结了以下 6 种小流域水土流失综合治理模式。

4.1 黄土高原丘陵沟壑区治沟造地模式

陕西延安羊圈沟流域属于黄土高原丘陵沟壑区治沟造地模式。流域地处退耕还林示范市,林地面积(1.53 km²)占流域总面积的72.24%,退耕力度大。流域植树造林工程推进导致林地面积急速增多,草地、耕地的面积减少^[32]。因此为了解决因退耕还林后耕地面积减少的问题,流域开始推广治沟造地工程,坝地建设面积已达流域总面积的6.14%,有效增加了耕作方便的高标准农田面积,实行退耕、林、田、坝、路、渠、排水、产业的综合开发。

模式按照“山上退耕还林、山下治沟造地”的空间布局立体整治^[33]。梁顶上以耐旱的灌木和乔木种如柠条、沙棘、侧柏等构建防护林,为保证造林存活率选择搭配鱼鳞坑、水平阶等整地措施。坡面治理以全坡面生态恢复为主,构建植被防护体系,在陡峭、破碎的坡面形成规模种植草、灌,以加固坡面;在坡度较缓、连贯的坡面开展水平阶造林,充分发挥乔木优秀的保水固土能力。25°以上的坡耕地进行全面退耕,作为代替在人口聚集处密集处发展梯田农业。

沟道中构建坝地系统,层层拦蓄防控。充分发挥淤地坝优秀的拦蓄能力,对水沙资源进行利用造地。为稳固边坡,增加耕地面积,在主沟道两侧以及特殊陡峭部位采取分级削坡填沟。同时构建防洪系统,增强区域的抗洪能力,主要通过沟道中修建排洪渠、溢洪道,边坡修建截排水沟,用以协调提升流域治理措施拦、蓄、排、灌的能力,实现坝地农业的高产稳产。

该模式适用于以农业开发为主、拥有良好治理基础的流域,模式以解决生态修复中出现的人地矛盾为核心,是“两山精神”的体现。模式既包含对生态建设成果的保护,又保证农业用地面积,同时平阔肥沃的坝地种植能减少农民支出,使得该模式的实施推广得到农民的理解支持,是新时代脱贫攻坚和生态建设等要求指导下的成功经验。

4.2 风蚀水蚀交错区防蚀固沙模式

六道沟流域位于晋陕蒙风蚀水蚀交错带的强烈侵蚀中心区,是典型的盖沙黄土丘陵地貌,草地沙化、土壤退化严重。因其矿产丰富,95%以上的男性劳动力都投入到煤炭产业中^[34],产业变更深刻影响了流域内治理方式和土地利用结构。

20世纪60年代,流域开始推动农业耕作条件的改善,经历“三北防护林”建设后,一些研究者认为应控制流域内乔木数量^[34-35];在村民支持退耕还林、工矿业高红利的大背景下,流域内耕地面积开始快速减少、林草面积迅速增加,逐渐形成强调建造植被、优化植被结构和优化农田结构来高产稳产的治理思路。治理上以防治水蚀风蚀为中心,配合工矿业开发,为区域经济环境可持续发展创造条件。在流域风蚀水蚀逆境下,流植被建造的主要矛盾是干旱缺水^[35],因此流域植物措施以灌草为主,减少使用高耗水的乔木,形成了植被建造面积中28.85%为灌木、36.84%为草地、16.79%为乔木的格局。

坡面植被防护体系构建上,在撂荒地、退化草地上以水平沟种植草灌为主,采用灌、草间作增加地表覆盖率;在坡度较缓、连续的坡面兴修梯田,但因人口减少和从农意愿降低,控制梯田面积,仅保留条件较好、离村庄较近的梯田发展农业,其余皆优化为生态恢复,优化面积占梯田总面积的43.75%。盖沙区治理上在水分条件较好、地势平坦的区域构建密度适中的防风固沙林;在水分较差、坡度较大的区域采取沙障固定。开发区治理主要以矿区恢复和园区绿化为主,重点是加强对工矿开发、环境保护的法制管理。沟道治理主要是建设塘坝和淤地坝,合理搭配上沟道防护林,通过坝地高效农业的构建,既促进坡面耕地的退耕,减少梯田的管理支出,又积极适应了区域劳动力变化趋势。

依靠先天煤炭资源优势,六道沟小流域发展了高红利的煤矿业,拥有良好的经济基础,因此农民这一主体对当地生态建设的热情减少,导致精细化的果树管理、梯田种植、措施维护和后续配套保障体系实施的投入变少。该模式形成了依靠植被建设构建防灾减灾、防风固沙体系的治理思路,沟道中的冲蚀防治技术应用和淤地坝布设,提供了高效的坝地农田,在满足当地生态安全建设的同时满足当地基本的粮食需求。流域因发展矿业,劳动力转移,导致需要精细化管理的梯田等水土保持措施粗放化,但该模式注重以治理促发展,以发展

保治理的流域发展方向,有效的解决了这一问题。

4.3 生态经济友好型水土保持生态农业发展模式

从 1973 年开始,为应对人口增长、无节制开垦带来生态环境严重的破坏,流域内通过水土流失综合治理,经历开始—平稳—良性发展等三个阶段,先后满足流域居民生存和长期发展的需要^[36]。流域治理从仅注重水土保持和生态修复向构建生态经济的良性发展转变^[37-38],农林牧结构从 1991 年的 1:2.5:0.8、2008 年 1:6.0:4.3 演变到现在的 1:5.2:2.2。治理上协调经济发展和环境治理之间的关系,调整产业结构发展养殖业、果业等逐渐减弱农业需求压力;调整耕地结构发展梯田、坝地来提高农业资源生产能力,发展经济和治理环境两手抓,促进流域农业经济系统和农业生态系统的有机统一。

该治理模式主要包含农林复合发展和生态防护体系构建。农林复合发展体系的构建是以村庄为辐射核心,修建水窖、排水渠等小型水利措施发展庭院经济。在环村庄的缓坡上修建梯田营造高效农业,同时在梯田周围构建水平沟灌草防护林,形成农林间作体系。流域以水热资源配置合理利用、强化降雨的就地入渗为核心,优化农林果业的布局;通过优化道路系统,促进农、林、畜牧养殖的多元产业发展。在保护生态的同时,加强经济林管理和管护,保证果品产量质量。

生态防护体系是通过措施布设构建以生态修复为主的治理体系,布设区域在流域严重的水土流失区域,主要是难以发展农业、远离村庄的区域。远离村庄的流域上游和下游位置,以植物措施为主,工程措施为辅,对区域进行全面生态修复。在缓坡地进行退耕还林还草,在大于 25° 的坡面、上坡位构建水土保持林,退化严重的区域使用整地措施种植草灌。

该模式的主要特征是兼顾生态效益与经济效益,生态修复和发展经济两手抓。流域内部耕地结构的调整有效提高了农业资源生产能力。同时积极调整产业结构,通过发展果业、养殖业等多元产业,使各类农副产品不仅可以满足流域内农民需求,还有一部分富余能用作社会商品,可以提高农户的收入。流域经过治理后,各项措施用地比较合理,形成了通过协调环境治理和经济发展,促进流域农业经济系统、农业生态系统有机统一的模式。

4.4 黄土高原“三大体系”多元发展治理模式

南小河流域是典型的黄土高原沟壑区,土壤侵蚀导致塬区面积的萎缩是其主要治理问题。经过 60 多年的水土流失治理,流域治理从单纯水土流失治理变化到治理与开发相结合发展,形成了构建多层次稳固体系,以服务塬区发展、保护塬区面积为核心的治理模式。

塬区治理、沟坡治理和沟道治理治理体系称为流域的“三大体系”,流域治理上三大体系互相支撑、互相影响,目的是减少径流线从上往下的流动^[39]。

塬区治理体系以减少径流产生和下泄为核心,形成路、田、林拦蓄体系。通过种植道路防护林、农田防护林来构建塬区防护林网带;依靠建设水渠、水窖、涝池,构建塬区径流调控体系,在塬面缘上构建植物地埂,加强对塬面径流拦截。

沟坡治理主要通过水平沟、水平阶等整地措施,集水造林种草,配合耐旱牧草、护坡林的种植稳固坡面,加强降雨的就地入渗;沟道治理通过修建谷坊、淤地坝拦沙淤地,搭配沟道防护林,抬高侵蚀基准线,加固沟坡。三个体系互相配合,为相邻体系的水土保持提供基础。

该治理模式实现了环境、粮食、旅游、教育、文化的多元发展。治理后在塬区发展农业、果业,沟道修建水库发展渔业,把握流域良好的水、林环境资源开发旅游业。生态旅游的发展能为流域治理注入血液,使创收与治理兼顾,改变流域治理只投入的现象。景区与科技示范园的积极建设,有力推动当地生态文明建设进程。

4.5 梯田特色果业开发模式

模式来源罗玉沟流域,属于黄土高原丘陵沟壑区。人口密度大、贫困人口多是流域内一大问题,该流域 1986 年的人口为 16066 人,2004 年增长到 19019 人,年增长率为 0.83%,同时人口增长伴随生态修复工程的实施,1986 年到 2002 年间,人均耕地从 0.33 hm^2 减少到 0.24 hm^2 ,年减少率达 6.25%^[40-41]。小流域治理前基

本属于掠夺式经营,为解决严重的水土流失问题,避免无节制的开垦导致的环境退化,缓解流域人地间的矛盾,流域采用以梯田利用为主的特色果业开发模式,有效的使流域内低值林草农向更高值的果蔬转移,平衡区域内农民脱贫致富与生态建设两方面的需求。

治理上梁、坡、沟综合治理,层次分明,大力发展果业。梁上构建生态防护林,防治梁面水蚀风蚀,有效减少水沙下泄,从而为流域内果园等产业的发展创造良好的生态环境;通过对缓坡坡面梯田化(梯田化面积为 43.4 km²,占流域总面积 58.35%),加强降雨就地入渗,拦蓄径流,同时高效利用雨水资源集雨灌溉,为发展果园产业提供优质的水肥条件和生长环境。流域气候适中、光照时间长,是黄土高原最适合发展果树种植的区域之一,通过营造梯田种植体系,构建了大樱桃、苹果、核桃等特色林果基地。种植措施上利用起垄覆膜(地布)、果实套袋、合理间作套种、抗旱保墒、病虫害综合防控、改良土壤等高新技术,提高产果质量和经济收入;开发措施上优化产业结构、培养专业团队、建立高新示范园区,为流域的果业发展创造完善的治理—种植—经营销售链。

流域沟道比降较大、深切狭窄,在沟道治理上选择防治效果较好、工程量较小的中小型拦蓄工程,同时在沟头、沟道两侧、沟底种植沟道防护林,结合植物措施控制沟头前进、沟岸扩张和沟道下切。

模式能有效改善流域经济收入,为解决流域人地矛盾,提供了开发和治理思路。通过积极发展特色经果业的开发思路,贯彻“因地制宜,因害设防,综合利用,为农业生产服务”的思想,把水土流失治理、改善生态环境同合理开发利用土地、提高经济效益统一起来^[42]。利用梯田优秀的拦蓄能力,充分利用水土资源创收。治理思路上下护梁、保坡、固沟并行,梁顶、沟道等在不适宜进行开发的部位营造生态防护林,坡面构建梯田为主的坡耕地改造,保水保土,在人类发展空间和生态修复和之间创造平衡。

4.6 半干旱半贫困水土资源高效利用模式

流域属于半干旱黄土丘陵区,降水较少,蒸发强烈,水资源短缺是该地区植被恢复和生态建设最主要制约因子^[35,43]。在陇中地区脆弱生态环境下形成的旱作文明是该地区农民赖以生存的传统产业、基础性产业和支柱性产业^[44]。土地是流域内农民的零成本资产,也是流域内农民稳定生存和可持续发展的先决条件。但流域人口增长与过度开垦问题、严酷的自然条件、极端脆弱的生态环境,都导致流域严重的水土流失和土地生产力下降,使以农耕为基础产业的流域进入越垦越穷的恶性循环。在退耕还林等生态修复工程的实施后,流域内人均耕地面积又面临减少的问题。因此为了满足改善脆弱的生态环境、缓解人口增长压力的双重要求,该治理模式以水资源的高效利用为核心,通过对自然降雨的科学管理缓解流域干旱,采用集雨节灌使自然降雨就地入渗,减少水土流失,从而改善流域内生态、农业环境。

流域治理主要以坡面和村庄道路治理为主。坡面的治理上,对坡度 25°以上的区域,进行全面的退耕还林还草。在荒芜沟坡区,修建造鱼鳞坑、水平沟、水平阶等工程整地措施共计 3.99 km²,占到流域总面积的 24.8%,结合植物措施构建蓄水固土为主要目的的水土保持体系。以当地实际水分条件出发,在坡度较大的区域,采取水平沟、水平阶等工程措施整地,营造以灌木为主的灌草间作,改善土壤水分和养分条件,为坡面的稳固防护体系建立提供基础;在坡度较缓的区域,配合整地措施,种植密度适中的油松、山杏等优势抗旱植物种。农田区建设以坡改梯为核心,全面改造坡耕地为梯田,流域内梯田面积已达 6.18 km²,占流域总面积的 36.49%,梯田化程度达到 96.5%。同时将粮食地膜种植等旱作农业适用技术进行推广,配套抗旱集雨节灌工程,建立“两高一优”(高产、高效、优质)农业,将当地农业生产从广种薄收向少种高产多收发展,解决当地贫困问题^[45]。在村庄道路等的治理上,通过修建排水渠、涝池、水窖等集水蓄水措施来拦蓄降水,解决人畜用水与农田灌溉,发展庭院经济,充分高效的利用该区域的水资源。

类似龙滩沟这样以农业产业为主要支柱、半干旱半贫困的流域,发展转型困难。在当前我国对区域脱贫攻坚的要求下,提高当地的农业生产力水平、充分改善当地农业的生态环境、缓减人地矛盾是发展流域农业经济的首要问题。该模式通过构建水资源高效利用体系,深入发掘流域的自然资源潜力,采取主动抗旱、以水治旱、高效利用的治理思想,积极发展高效高产的可持续农业。

5 水土流失治理模式形成机制

流域水土流失治理模式的形成受到自然地理环境和社会经济发展情况的共同驱动,具有长期性和复杂性。因此确定流域的水土流失治理模式,是开展流域水土流失治理过程中重要的基础性工作。

流域的水土流失治理模式需要综合考虑整体和局部、生态和经济、长期和短期、个人和集体等问题,由流域自然地理、人文、社会经济状况共同决定,具有明显区域自然资源特色和显著的阶段性。因此流域的治理模式是一个动态的治理过程,会随着流域的治理需求和文化经济发展方向的变化而变化,在治理过程中对治理措施配置进行适当的调整,对流域水土流失治理的空间配置、生态可持续发展方案进行逐渐的细化(图 7)。立足于流域地理区位条件,从国家生态建设理念、当地政府以及流域所在人民实际需求出发,将流域水土流失治理、区域环境保护和社会经济发展结合起来确定流域发展的主导方向,包括保护为主、保护与开发兼顾、开发为主等不同类型。充分考虑流域气候、地形、土壤、植被等自然地理条件,尤其是水土流失治理现状,诊断当前所存在主导性生态环境问题和主要生态、社会经济需求。以流域空间分区为基础,确定各分区功能定位和水土流失治理方向,确定与之对应的治理措施,形成流域水土流失治理模式。

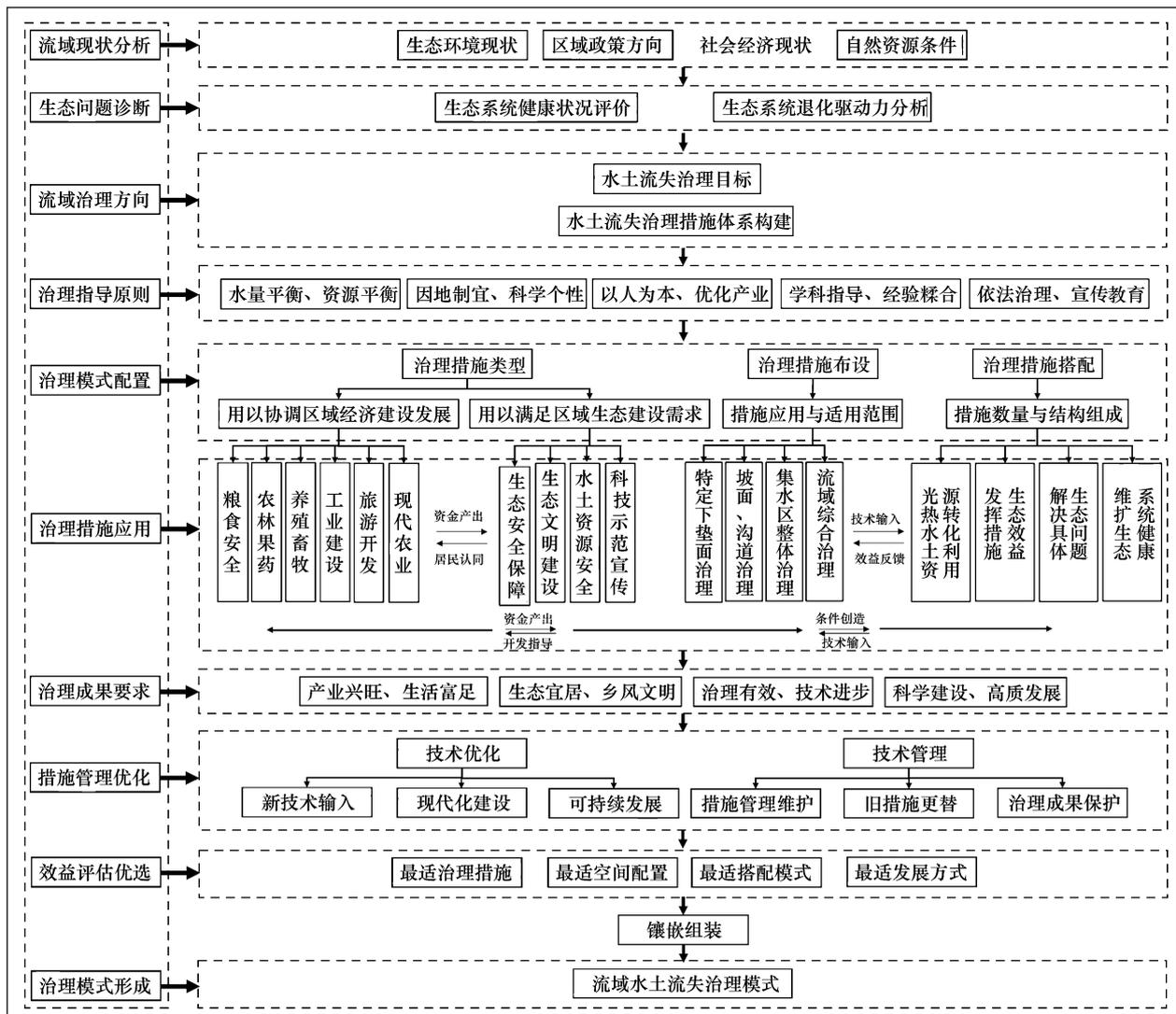


图 7 水土流失治理模式的形成框架

Fig.7 The formation framework of soil and water conservation model

5.1 水土流失治理模式的比较

黄土高原不同流域的水土流失治理模式存在众多共同点,这是由于相似的自然地理特征和生态环境问题所决定的。从出发点上,黄土高原水土流失治理的终极目的都是改善环境,创造人与自然和谐可持续发展的环境,从而改善人类生存和发展空间。从治理技术上,径流调控都是流域水土流失治理的核心,都是通过林草措施和工程措施相互配合来改善生态环境的技术手段^[5,10-12],工程措施主要以梯田、淤地坝发展经济^[33,37]。措施的布设上都是以村庄为中心向外辐射,靠近村庄的多布设为交互型措施,例如梯田、经济林;远离村庄的为恢复型,例如封禁、生态林。

但在不同的小流域环境下,水土流失治理模式有不同的表现形式,其治理模式存在差异性^[11,29]。治理技术上,降雨多少区分了水土保持工作中流域径流调控的内涵,降雨较为充沛的流域强调蓄水、保土更多,降雨少的流域更加强调水资源调控和保水。在目的上,根据当地环境构建不同的特色发展方向,不同流域细分为不同需求,例如水土流失治理型、山地灾害防护型、经济开发型等,治理上各有重心。

5.1.1 黄土高原水土流失治理的相似性

在水土流失治理上,黄土高原上不同流域存在着众多相同点,这是由水土流失治理以人为本的本质决定的。

从出发点来看,黄土高原流域水土流失治理有个两目的。一是修复由于人类不合理活动导致的自然环境的破坏,例如大面积的、不合理的土地开垦使生态环境遭到破坏,导致农业生产基础缺失,迫使流域发展陷入越垦越穷的怪圈;二是流域治理是为区域的发展和生产建设服务,贯彻“两山”精神,治山、水同时也要治穷。总的来说,黄土高原水土流失治理的终极目的是改善生态环境,从而改善人类的生存发展空间。

从指导思想上看,黄土高原的流域治理都遵循因地制宜、因害设防的总体方针。将流域视为整体进行规划,强调山水林田湖草统筹,综合、集中、连续治理,预防与治理并重。流域建设发展始终秉持可持续发展、高质量发展、以人为本的理念,治理上都严格遵循生态科学的思想指导,以径流调控、水量平衡等科学理论作为支撑。

从流域治理技术体系上,径流调控都是各流域水土流失治理的中心,通过植物措施和工程措施的搭配,来改善生态环境,协调生态环境治理和社会经济发展。黄土高原小流域治理在工程措施和植物措施的搭配都是相似的,植物措施与工程措施相结合,草灌先行、坡沟皆治;植物措施,一般会配合鱼鳞坑、水平阶、水平沟等整地措施实施;工程措施以梯田、淤地坝等拦蓄措施为主,提高作物产量、缓解区域人地压力的同时对流域生态修复做出了巨大贡献。措施布置具有相似的垂直结构和水平结构,垂直结构上以流域为整体,根据地形地貌特点,从山顶到沟底配套相应的植物、工程和耕作措施;水平结构上以村庄为中心辐射,例如梯田、经济林等需要人类活动参与的交互型措施布设在村庄周围,恢复型措施如封禁、生态林等远离村庄布设,措施布设上形成一个完整的治理技术体系。

5.1.2 黄土高原水土流失治理的差异性

黄土高原不同的流域环境下,水土流失治理模式有不同的表现形式。根据不同小流域的生态环境现状、社会经济条件和自然资源禀赋,流域有不同的生态系统健康问题和生态系统退化驱动力。治理模式按照流域治理目的可大致分为生态型小流域、经济型小流域和综合型小流域。

(1) 生态型小流域

生态型小流域主要以治理为主,在治理上侧重满足流域的生态和社会效益,其水土流失治理技术体系多以植物措施为主导。流域在进行综合治理后,粮食产出和经济发展能基本满足流域内农民的需要,人类活动对流域的生态环境扰动变小。例如羊圈沟流域,进行良好的生态治理后,林地面积已占流域总面积 72.24%,农民的生活生产已变为流域内和谐的一部分。生态型小流域的基本特征是有较高的植被覆盖率,以服务生态建设为主指导土地利用,治理上注重流域的生态效益。

(2) 经济型小流域

经济型小流域,是指在流域的综合治理上偏重于配合和支持区域的经济建设和发展,以梯田、耕作措施等治理措施的建设为主,提高土地生产力,使流域内的产出不仅能满足流域的内部经济需求,还能以市场交换转变的形式为社会商品。例如罗玉沟流域通过兴建果园,流域内农民的年净收入从 2000 年的 831 元,增加到 2005 年的 1205 元,仅通过种植美国大樱桃年收入就达 8000 多万元^[41]。该类型流域基本特征是依托梯田、淤地坝等工程措施的建设,能提高土地生产力,拥有较发达道路系统,植被覆盖率相对较低。

(3) 综合型小流域

综合型小流域的主要特征是兼顾经济效益和生态效益,流域内农副产品的产出,不仅能满足农民的需求,还有一定的富余可以用作社会商品,流域经过治理后各项措施用地和分布比较合理。以纸坊沟流域为例,以耕地结构调整为手段来提高农业资源的生产能力,通过产业结构的调整,多元发展农业、果业、养殖业等产业,协调环境治理和经济发展的关系,促进农业经济系统和农业生态系统的有机统一。

5.2 自然条件对流域水土流失治理的影响

5.2.1 气象水文的影响

水土资源作为水土保持中的主体,是自然环境中的重要组成部分,对其治理和保护的行为模式被气候条件深刻影响^[7,14]。水土流失治理则是通过对可控因素的改造,去适应无法显著改变的自然因素(如降水、温度等气象因素),来满足区域治理和发展需求。通过比较 6 个流域水土保持措施种类、数量关系发现,降水量深刻影响着植物措施的结构种类和数量关系,降水量充沛的流域会优先使用高耗水但水保效益更高的乔木,其他学者的研究结果也反映了这一现象^[39,41]。植物措施与工程措施的结合就是通过改造地形,适应无法显著改变因素^[26,29,32],通过发挥梯田、水平阶、水平沟、鱼鳞坑等的拦蓄能力,确保植物措施能正常的发挥其水土保持效益。

降水影响着植被措施的组成结构。植被措施中乔灌草比例结构随着降水量的变化而变化,降水量越充沛的流域,乔木比例更高。选择高耗水的乔木在水分条件好的地方建设植被,相比灌草,能发挥出更良好的土壤和小气候改良能力,例如年均降水量较高的和纸坊沟流域(548.7 mm)和羊圈沟流域(535 mm),林、灌、草比例分别为 4:2:4、5.6:0.6:3.8;而在降水稀少的流域,草地通过更低的耗水来改变下垫面环境,保护水土资源,充分体现“因地制宜”的治理思想,年均降水量较低的六道沟流域(437.4 mm)、龙滩沟流域(386.3 mm),林、灌、草比例分别为 2.1:3.6:4.3、1:3:6,其灌草占比明显更高。退耕还林工程后,罗玉沟流域由于林地面积变多,导致平均径流量从 0.96 m³/s 下降到 0.88 m³/s^[41],反映了治理措施的选择应遵循水量平衡原理,若不考虑流域实际情况选择植物措施,很可能导致植物的需水大于流域的供给。

温度深刻影响区域农业生产方式。根据 Xiao 等^[46]的分区,调查的 6 个小流域中,羊圈沟、纸坊沟、南小河沟和罗玉沟处于黄土高原的高温多雨区,六道沟、龙滩沟处于低温多雨区。高温区较高的温度会使植物内部的化学反应加快,植被的生长季更长;低温多雨区海拔高,植被因为更低的气温导致植被生长季较短,植被盖度的增加较为困难。日照时间长、温度较高的流域,以罗玉沟流域和纸坊沟流域为例,其年均温分别是 10.7℃ 和 8.8℃,良好的温度条件为流域种植业的发展提供了基础,流域可以构建梯田农地来优先发展果业、农业等。同时温度也是流域内措施布设的影响因素之一,罗玉沟在东坡的果园面积,占流域总面积百分比从 6.98% 变化至 30.00%,和其它坡向相比有大幅度提升,这是由于在果园建设中,向阳面的东坡可以为果树提供更长的光照时间,从而使果园高质增产^[41]。

5.2.2 地形地貌的影响

针对不同地貌位置水土流失特点布设有效的水土保持措施。在坡顶等水分条件较差的部位,风蚀水蚀更为严重,该部位会优先构建方便施工的工程整地措施,例如使用水平阶构造防护林带,能有效拦蓄降雨,缓解径流对坡面的冲刷,同时为坡面植物措施的构建创造良好的生长条件,有利于水土保持措施长期发挥固土保水效益。在坡中部位,水分条件、交通条件较好,通过梯田的修建来改变坡中小地形,截断坡面的径流线,促进降雨的就地入渗,从而发展高效稳产的梯田农业;在进行耕作时利用水土保持耕作措施,同时利用植物措施加

固梯田田坎,三位一体蓄水保土、增加降雨入渗、减少水分蒸发。在坡下位水分条件较好,良好的水分条件为乔木生长提供了保障,可以构建水土保持林等措施。

坡度是退耕还林还草的重要标准。当坡面平整、坡度平缓($\leq 15^\circ$)的条件下,可整修缓坡梯田用于发展经果林,配合防护林带的种植,构建农林复合经营体系。坡度稍大($> 15^\circ$),可采用工程整地,利用鱼鳞坑、水平沟和水平阶等方式,选择种植合适的树种。

在特定退化条件下,根据该区域的治理目的和特殊需求,适地适树,因害设防的灵活选择布设手段。例如六道沟流域的盖沙区治理,采用死沙障对水分条件较差的坡顶部位流沙进行固定,在水分条件较好的坡中部位,选择构建防风固沙林和活沙障的方法。为防治沙区的扩张,防治现有植被的退化,植物种的选择上以抗干旱抗贫瘠为主,来改善沙区的土壤环境。

在沟道治理上,对于降水量较大,坡面水蚀和沟道冲刷剧烈的流域,为防治坡面径流对沟道的冲刷,通常选择建造淤地坝,通过拦蓄泥沙抬高沟道的侵蚀基准面,同时对沟坡进行加固,与坡面治理相互配合。类似流域有羊圈沟、南小河沟等流域。在降雨量稀少、在水土保持措施作用下坡面产流少、防洪压力小的流域,淤地坝不是最佳选择。如龙滩沟流域,实地调查发现,当地降水稀缺。沟道狭窄呈“U”状,在该流域淤地坝并不能充分发挥其拦蓄作用,该流域的沟道治理上主要是减少人类活动干扰、以自然恢复为主。

5.3 社会经济对流域水土流失治理的影响

5.3.1 水土流失治理受到治理效益的需求影响

水土流失治理工作不仅是单一的减少流域水土流失,更蕴含着流域高质量可持续发展的核心思想,流域发展需求决定着水土流失的治理方向^[11,13]。流域的治理需求各不相同,可分为三个阶段。基础阶段是在强烈侵蚀条件下,流域内对生态环境退化的恢复需求,该阶段的治理以减少水土流失、防灾减灾、改善生态环境为主,驱动环境恢复进入良性循环;第二阶段是在水土流失得到有效治理后,将生态和经济建设的双重需求作为治理的主要方向,治理环境与治理贫困同步进行。水土保持措施配置上建立可交互性强的措施体系,例如建立防护林-梯田-淤地坝体系。治理上协调生态修复与生存空间的矛盾,将治理融入到流域发展,构建“以治理促发展-发展巩固治理”的良性循环体系。

第三阶段即是当前阶段,对流域水土流失治理已经上升到了生态文明建设的高度^[15-16]。以营造稳固、可持续发展的生态系统为目的,是统筹山水林田湖路草的平衡、人与自然和谐相处的生态文明建设。把流域的治理成果辐射到周边区域,提升居民的生活品质,也为流域的维护提供经济来源;积极宣传人与自然和谐相处的思想,构建良好的生态环境。

5.3.2 水土流失治理受社会经济条件限制

根本上,水土流失治理是以人为本、为流域可持续发展服务的,最终使当地居民的生产生活状况得到改善的一项治理活动,其活动方式深刻受到流域内社会经济发展需求的影响^[47]。因此小流域的经济发展需求决定了水土保持措施的应用情况,不同人口情况、产业结构组成和治理的需求导致水土保持措施的选用、空间布设和结构组成存在差异。措施的布设要调节人与自然的的关系,减缓生态恢复和经济发展的冲突^[48]。

对于人口压力大,以治促富需求强烈的流域。在治理模式的结构选择上,既要保障农民安全良好的生产生活环境,又要调节环境治理和经济发展之间的关系,避免出现压缩经济发展空间来为流域生态修复提供空间、或把生态恢复的空间压缩来发展经济的现象。该类型流域多利用梯田等措施,根据流域情况选择适合的生产创收方式,协调生态与经济的关系改变贫困。以罗玉沟和龙滩沟为例,治理上建设大面积的梯田缓解人地矛盾和生态经济矛盾。罗玉沟从当地生态环境出发,发展特色经果业,其农地、林地、草地的比例为5:2:1,以脱贫致富为出发点,措施布设强调生态系统的稳定,例如植物措施以生态林种植为主,为梯田的稳产高产提供基础;龙滩沟降雨量少,就业依赖农业,农林草比例为4:1:4。在治理措施上强调集水蓄水,以科学调配流域内的水资源为核心,植物措施采用灌草,来适应半干旱条件下的流域发展需求。

对于人口压力中等,拥有多元或支撑性就业结构的流域,以良好的经济效益为基础,核心工作是保护水土

流失治理成果,推动实现人与自然和谐发展。例如六道沟流域,流域内高红利的工矿业开发,保障了当地的收入条件,导致农民对农业的开展热情一般,梯田大多退耕。为了预防山地灾害和满足流域内的基本粮食需求,流域治理上大力发展坝地农地高效农业。纸坊沟流域村庄集中于流域中部,流域内多元发展农、果、畜牧等产业,依靠生态经济的建设改善当地的收入,形成了流域中部村庄为发展圆心,上下游集中治理的结构。

对于人口压力小,经济发展压力小的流域,生态治理上将占据大部分空间。人口较少的羊圈沟流域,其粮食需求只需要小面积的耕地就能满足。其治理模式结构上,坡面几乎进行全面的生态恢复,高效的坝地农业用以解决流域内的农业需求,其农、林、草比例为 1:6:1。南小河沟流域平坦的塬面为发展经济提供了良好的基础,在其治理上以强调保证塬面面积,防止其减少为重点。对沟道进行全面治理,为塬面发展服务,建设水库渔业、坝地农业,同时利用治理成果建设治理示范区和旅游风景区。

5.3.3 水土流失治理模式以区域政策为指导

在流域的改造过程中,当地农户的参与程度和方式不仅受到农户自身经济条件的影响,还受到当地政府政策的影响^[49]。就农户受区域政策的影响而言,一些农户不会采用的水土保持技术,在政府的组织、宣传、要求、推广和支持下可能会被农户所采用,政策对水保技术的激励、投资和补贴会促使农户改变决策,从而参与到治理技术的更替中来。以罗玉沟为例,政府政策对农户水土保持技术的采用行为有着重要作用,在政府未推行生态修复政策前,流域处于低投入低产出-开垦新地-水土流失加剧-低产的恶性循环中。政府在 1980 年在流域内推行开展大规模的梯田农田建设政策,7 年间梯田面积从 11700 hm²增长到了 15800 hm²^[50]。2008 年流域全面开展退耕还林还草工作,政策的大力宣传推广得到了农户们的积极响应,因此流域内土地利用的结构开始发生剧烈变化,其中 25°以上耕地面积由政策实施前的 771.98 hm²减少到了 339.21 hm²,共减少 432.77 hm²^[41]。流域实地调查过程中询问当地农户发现,在停止发放退耕还林工程的补贴时,有退耕地被重新开垦的现象发生。可以看出,农户对水土保持技术的采用行为深刻受到区域政策的影响。

6 结论

水土流失治理模式,是集成流域内所有水土流失工作治理思想的结晶,通过对过去几十年治理效果良好的 6 个流域的治理技术体系和模式进行总结,为新时代背景下的水土流失治理和工作提供基础。

(1)黄土高原小流域水土流失治理措施深刻受到当地自然环境和社会经济的影响。植物措施的布设贯彻“因害设防、因地制宜”思想,遵循当地的水分条件调整植物措施的结构;工程措施主要以改变地形为目的的坡面整地工程,包括鱼鳞坑、水平阶、水平沟和梯田等,其中梯田因其能同时发挥优秀的水土保持生态效益和经济效益,是解决生态和经济发展冲突问题的调和剂。

(2)黄土高原小流域水土流失治理模式具有鲜明的流域特色。流域水土流失治理在根本上是为了改善流域的生态条件,为当地居民创造更安全、更高收入的生产生活环境,但实现这个目的途径各有特色,必须考虑流域实际自然地理条件和社会经济条件,要避免生搬硬套其他流域的成功治理经验。

(3)生态文明建设是新时代黄土高原水土流失治理的新目标。随着中国跨入新时代,传统的水土流失治理模式可能已不适宜未来的发展趋势。流域治理需求从以往的改善生态环境、脱贫致富,逐渐向人与自然和谐相处发展。既要满足人们对美好生活条件的追求,又要保障生态的安全可持续发展。这都对黄土高原水土流失治理提出了新的要求,优化流域内的经济结构,使人这一主体进入小流域治理的可持续性、良性循环和上升中。

参考文献 (References):

- [1] 罗珉. 管理学范式理论述评. 外国经济与管理, 2006, 28(6): 1-10.
- [2] 毕华兴, 刘立斌, 刘斌. 黄土高原沟壑区水土流失综合治理范式. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 27-33.
- [3] 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.
- [4] 黄河水利委员会水土保持局. 黄河流域水土保持研究. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [5] 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.

- [6] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the loess plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [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] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. *Nature Geoscience*, 2015, 10(8): 739-741.
- [9] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, Han M W, He Z, Rubin Z, Wang F, Gao P, Sun W Y. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2017, 148: 126-137.
- [10] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [11] 赵诚信, 常茂德, 李建牢, 王正果, 吴明山. 黄土高原不同类型区水土保持综合治理模式研究. *水土保持学报*, 1994, 8(4): 25-30.
- [12] 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.
- [13] 谢永生, 李占斌, 王继军, 姜志德. 黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 211-214.
- [14] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, Jia X X. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the loess plateau; a review. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-8.
- [15] 蒲朝勇. 贯彻落实十九大精神做好新时代水土保持工作. *中国水土保持*, 2017, (12): 1-6.
- [16] 席婷婷. 自然、社会与人: 习近平生态文明思想的三维解读. *长江师范学院学报*, 2019, 35(4): 93-99.
- [17] Qiao M, Wang J J, Li Y, Cheng S M, Li M S. Soil and water conservation technology in the Zhifanggou watershed. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(4): 433-440.
- [18] 郭锐, 杜雪, 郑娇, 郭嘉, 党小尼, 赵嘉莹, 雷文坛. 南小河沟水土保持科技示范园提质增效措施体系探讨. *中国水土保持*, 2019, (2): 25-26.
- [19] 张由松, 肖自幸, 牛健植, 朱蔚利, 李想, 武晓丽, 赵玉丽, 潘振泰. 基于 GIS 的罗玉沟流域降雨侵蚀力时空分布规律研究. *湖南农业科学*, 2011, (15): 87-90.
- [20] 陈百明, 周小萍. 《土地利用现状分类》国家标准的解读. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 994-1003.
- [21] Tahmasebi T, Karami E, Keshavarz M. Agricultural land use change under climate variability and change: drivers and impacts. *Journal of Arid Environments*, 2020, 180: 104202.
- [22] Liu M, Han G L. Assessing soil degradation under land-use change: insight from soil erosion and soil aggregate stability in a small karst catchment in southwest China. *PeerJ*, 2020, 8: e8908.
- [23] 李平, 李秀彬, 刘学军. 我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析. *地理研究*, 2001, 20(2): 129-138.
- [24] Devátý J, Dostál T, Hösl R, Krása J, Strauss P. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion-Case studies from Lower Austria and Central Bohemia. *Land Use Policy*, 2019, 82: 674-685.
- [25] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102962.
- [26] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [27] Chen J, Xiao H B, Li Z W, Liu C, Ning K, Tang C J. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data. *Science of the Total Environment*, 2020, 735: 139517.
- [28] 刘宝元, 刘瑛娜, 张科利, 谢云. 中国水土保持措施分类. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 80-84.
- [29] 魏童, 谭军利, 马中昇. 黄土高原地区水土保持措施对土壤水分影响研究综述. *节水灌溉*, 2018, (10): 97-99, 103-103.
- [30] Xia L, Song X Y, Fu N, Meng C F, Li H Y, Li Y L. Impacts of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Loess Plateau Gully Region, China. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(10): 2028-2041.
- [31] 王彦武, 牛莉婷, 张峰, 高金芳, 陈天林, 王莉. 黄土区高标准梯田生态服务功能及其价值. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 190-196.
- [32] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 梁地. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应. *生态学报*, 2015, 35(18): 6060-6069.
- [33] 刘彦随, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 1-9.
- [34] 王力, 张青峰, 卫三平, 王全九. 黄土高原水蚀风蚀交错带煤田开发区小流域植被恢复模式. *北京林业大学学报*, 2009, 31(2): 36-43.
- [35] 查轩, 唐克利. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究. *自然资源学报*, 2000, 15(1): 97-100.
- [36] Dang X H, Liu G B, Xue S. Models of soil and water conservation and ecological restoration in the loess hilly region of China. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 72-80.
- [37] 王继军, 谢永生, 卢宗凡, 权松安. 退耕还林还草下生态农业发展模式初探. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 134-137.
- [38] 董乾坤. 基于 GIS 的纸坊沟流域土地利用时空格局研究. *矿山测量*, 2015, (4): 59-64.
- [39] 李怀有. 黄土高塬沟壑区径流调控综合治理模式研究. *人民黄河*, 2008, 30(10): 77-79.
- [40] 李建牢. 甘肃省黄土丘陵沟壑区第三副区小流域综合治理模式研究. *水土保持研究*, 1994, 1(1): 54-62.
- [41] 易扬, 信忠保, 覃云斌, 肖玉玲. 生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 6277-6286.
- [42] 董锁成, 吴玉萍, 王海英. 黄土高原生态脆弱贫困区生态经济发展模式研究——以甘肃省定西地区为例. *地理研究*, 2003, 22(5): 590-600.
- [43] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 陈利顶. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺. *生态学报*, 2011, 31(11): 3060-3068.
- [44] 师尚礼, 曹文侠, 尹国丽, 蒲小鹏, 鱼小军, 王琦. 陇中干旱区草粮兼顾型生态农业模式构建. *草原与草坪*, 2017, 37(5): 1-7.
- [45] 穆兴民. 黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用. *农业工程学报*, 2000, 16(2): 41-45.
- [46] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" Program on the Loess Plateau in China. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(12): 2261-2275.
- [47] Wynants M, Kelly C, Mtei K, Munishi L, Patrick A, Rabinovich A, Nasser M, Gilvear D, Roberts N, Boeckx P, Wilson G, Blake W H, Ndakidemi P. Drivers of increased soil erosion in East Africa's agro-pastoral systems: changing interactions between the social, economic and natural domains. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(7): 1909-1921.
- [48] Liu L, Di B F, Zhang M Y. The tradeoff between ecological protection and economic growth in China's county development: Evidence from the soil and water conservation projects during 2011-2015. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 156: 104745.
- [49] de Graaff J, Aklliu A, Ouessar M, Asins-Velis S, Kessler A. The development of soil and water conservation policies and practices in five selected countries from 1960 to 2010. *Land Use Policy*, 2013, 32: 165-174.
- [50] 刘世德, 李建牢. 罗玉沟流域坡面土壤侵蚀与土壤理化性质. *水土保持学报*, 1989, 3(1): 43-50.