

渭河源区坡耕地时空变化及其土壤保持效应

孙旭伟^{1,2}, 姜泳波^{1,2}, 王乃亮^{1,2}, 王亚晖³, 赵鸿雁^{3,4}

(1.甘肃省生态环境科学设计研究院, 甘肃 兰州 730020; 2.甘肃省黄河上游水源涵养区生态保护和修复工程研究中心, 甘肃 兰州 730020; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 分析渭河源区不同等级坡耕地的时空变化, 揭示不同坡耕地类型的土壤保持效应, 探讨退耕还林还草工程对渭河源区坡耕地及土壤保持的影响, 为完善不同坡耕地资源合理规划利用提供科学依据。[方法] 利用 1990, 2000, 2010 和 2020 年 4 期渭河源区土地利用和地形数据, 通过叠加分析、耕地动态度、土地利用转移矩阵和中国土壤流失方程等方法进行分析。[结果] ①1990—2020 年耕地呈先缓慢增加后急剧减少再缓慢减少的趋势, 面积净减少 321.03 km², 其中陡坡耕地和缓坡耕地是耕地变化主要类型。②近 30 a 来, 耕地的时空变化主要表现为 1990—2000 年耕地少量转入, 主要分布在漳县和岷县; 随着退耕还林还草工程的实施, 有 279.80 km² 的坡耕地转变为林草地, 其中耕地转换为草地主要分布在通渭和陇西县, 而耕地转换为林地主要分布在陇西和岷县。③1990—2000 年渭河源区林草地开垦导致土壤保持量减少 5.52×10⁴ t, 而 2000—2020 年退耕还林还草导致土壤保持量增加 2.21×10⁶ t, 其中大于 15° 的坡耕地的转变对土壤保持量变化影响更大。[结论] 渭河源区退耕还林还草工程成效显著, 其中 2000—2010 年陡坡耕地的退耕面积最大, 陡坡耕地退耕地土壤保持总体效应最大, 但峭坡耕地退耕地单位效应最大。峭坡耕地仍有较大退耕空间, 依旧是新一轮退耕任务的主要目标。

关键词: 坡耕地; 土壤保持; 时空变化; 退耕还林工程; 渭河源区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0405-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 孙旭伟, 姜泳波, 王乃亮, 等. 渭河源区坡耕地时空变化及其土壤保持效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 405-412. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230508.003; Sun Xuwei, Jiang Yongbo, Wang Nailiang, et al. Spatiotemporal changes of sloping farmland and their soil conservation effect at source area of Weihe River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 405-412.

Spatiotemporal Changes of Sloping Farmland and Their Soil Conservation Effect at Source Area of Weihe River

Sun Xuwei^{1,2}, Jiang Yongbo^{1,2}, Wang Nailiang^{1,2}, Wang Yahui³, Zhao Hongyan^{3,4}

(1. Gansu Academy of Eco-environmental Sciences, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Research Center of Ecological Protection and Restoration Engineering in Water Conservation Area of

Upper Yellow River, Lanzhou, Gansu 730020, China; 3. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese

Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal changes of different grades of sloping farmland, the soil conservation effects of different sloping farmland types, and the impact of returning farmland to forest or grassland on sloping farmland and soil conservation at the source area of Weihe River were studied in order to provide a scientific basis for the rational planning and utilization of different sloping farmland resources. [Methods] Land use and topographic data at the source area of Weihe River from 1990 to 2020 were analyzed by superposition analysis, farmland dynamic attitude, land use transfer matrix, and the Chinese soil loss

收稿日期: 2022-08-22

修回日期: 2022-11-19

资助项目: 甘肃省自然科学基金项目“渭河源区生态系统服务权衡与协同关系研究”(20JR10RA443); 甘肃省软科学专项(20CX9ZA026); 甘肃省生态环境厅重点项目(2020zfcg02072)

第一作者: 孙旭伟(1983—), 男(汉族), 甘肃省静宁县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态状况评估、生态服务功能评价和生物多样性保护研究。Email: sxwei0115@163.com。

通讯作者: 姜泳波(1973—), 女(汉族), 甘肃省兰州市人, 大学, 正高级工程师, 主要从事生态服务功能评估研究。Email: jyongbo1@163.com。

equation. [Results] ① During 1990 to 2020, the area of cultivated land increased slowly, then decreased sharply, and then decreased slowly, with a net decrease of 321.03 km². Steep slope cultivated land and gentle slope cultivated land were the main types of cultivated land change. ② The temporal and spatial changes of cultivated land were mainly characterized by a small increase in cultivated land from 1990 to 2000, mainly located in Zhangxian County and Minxian County. With the implementation of the grain for green project (GGP), 279.80 km² of sloping land were transformed into forest and grassland, in which the conversion of cultivated land to grassland was mainly located in Tongwei and Longxi counties, while the conversion of cultivated land to forest land was mainly located in Longxi and Minxian counties. ③ The reclamation of forest and grassland at the source area of Weihe River from 1990 to 2000 reduced soil conservation by 5.52×10^4 t, while returning farmland to forest and grassland increased soil conservation by 2.21×10^6 t from 2000 to 2020. The transformation of sloping land with greater than 15° slope could affect changes in soil conservation. [Conclusion] The implementation of GGP has achieved remarkable results at the source area of Weihe River. The area of farmland conversion on steep slopes was the largest from 2000 to 2010. The soil conservation effect on steep slopes was the largest on abandoned land. Steeply sloping farmland will be the main target during the new round of returning farmland.

Keywords: sloping farmland; soil conservation; spatial-temporal change; the grain for green project; source area of Wei River

黄土高原是中国水土流失最为严重的区域^[1]。渭河源区是黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区极具代表性地区,对渭河流域土壤保持,保障中下游行洪安全具有不可替代的作用。长久以来,陡坡开垦是造成该区域水土流失的主要因素^[2]。大量坡耕地的存在及其严重的水土流失,导致耕地资源损失,土地生产力降低^[3]。因此,及时掌握坡耕地的时空变化是合理利用坡耕地资源、制定坡耕地的土壤保持措施与政策的前提条件,对区域土地资源可持续利用具有重要的意义。退耕还林工程的实施对坡耕地的退耕产生重要影响,坡耕地面积呈大幅减少趋势^[4]。近年来,国内学者主要针对退耕还林(草)背景下坡耕地的时空变化、坡耕地的土壤侵蚀量、土壤保持量和土壤保持效益及驱动机制等方面进行了大量的研究^[5-8]。结果表明,随着耕地坡度的增加,其水土流失的敏感性越高,稳定性越差^[6],所以在各项退耕还林任务中,25°以上坡耕地是治理的重点。因此,退耕还林前后不同坡度等级的坡耕地及其土壤保持量的时空变化研究不仅是评价退耕还林工程效益的重要内容,也可为新一轮退耕还林还草工程规划与实施提供科学依据。然而,目前,多数退耕还林工程效益评价研究对不同坡度的退耕面积尤其是 25°以上坡耕地的面积变化缺乏详细阐述;同时单纯由退耕因素导致土壤保持的增加量尚不清楚,这些问题的深入研究对水土保持措施的制定和坡耕地的可持续利用具有重要意义。渭河源区作为黄土高原的典型区域,坡耕地是其粮食生产和农业活动的重要载体。但是,退耕还林还草工

程前后该区域不同坡度等级的坡耕地的时空变化及其土壤保持变化尚不明确,严重制约了未来新的退耕还林还草政策的制定。基于此,本研究以渭河源区为研究对象,利用 1990,2000,2010 和 2020 年 4 期土地利用数据及地形数据,通过叠加分析、耕地动态度、土地利用转移矩阵和土壤保持服务模型,对渭河源区不同坡度属性耕地的时空变化进行系统分析,深入探讨不同坡耕地类型的土壤保持效应,旨在为渭河源区制定区域差异化的土壤保持措施,完善不同坡耕地资源合理规划利用提供科学依据。

1 研究区概况

渭河作为黄河流域的第一大支流,发源于定西市渭源县西南海拔 3 495 m 的鸟鼠山^[9],其源区位于甘肃省定西市西南部(103°12′—105°38′E,34°12′—35°30′N),行政区域涉及定西市 6 县 1 区,源区流域面积 9 968.79 km²,占渭河流域 7.3%^[10-11]。渭河源区地处黄土高原和西秦岭山地交汇区,地貌形态有黄土高原丘陵区、西秦岭山地和河谷川、台地区 3 大部分^[12],地势起伏较大,山脉纵横。区域内气候属暖温带半湿润及中温带半干旱气候,年平均气温 6.3 °C,年均降水量 580.7 mm,蒸发量 1 441.9 mm^[9-10]。源区主要土壤类型为黑垆土和黄绵土^[10],62.80%的土地覆被类型为耕地,其中坡耕地占耕地面积的 87.16%。从 1999 年起,源区范围内实施了大规模退耕还林还草工程,统计显示,退耕还林持续实施 20 a 后,森林覆盖率提高到 12.60%^[10]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

本研究使用的主要数据包括土地利用/覆被(LUCC)数据、数字高程数据(DEM)数据、降水数据、归一化植被指数(NDVI)和土壤数据。

(1) LUCC 数据。1990, 2000, 2010 和 2020 年 4 期 30 m 空间分辨率的 LUCC 数据来自于中国科学院实施的战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”及甘肃省生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查评估项目, 2010—2015 年甘肃省生态状况变化遥感调查评估项目和 2015—2020 年甘肃省生态状况变化遥感调查评估项目生产的 China Cover 数据。在坡耕地提取及变化分析过程中涉及到的 LUCC 数据类型为耕地、林地和草地类型, 经分层随机抽样的野外验证, 3 种类型数据精度分别为 97.7%, 96.0% 和 88.6%^[13], 可以保证后续坡耕地提取和时空变化分析的要求。

(2) DEM 数据。30 m 空间分辨率的 DEM 为 ASTER GDEM v3 版本数据, 来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>)。

(3) 降水数据主要是 1990—2020 年的逐日降水数据。来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。选取了研究区周边 9 个气象站点的日降水量数据, 具体气象站点包括临洮、榆中、华家岭、会宁、天水、天水北道区、武都、岷县和郎木寺。

(4) NDVI 数据。LandSat NDVI 主要是采用的是监测年份 NDVI 的最大值(30 m 分辨率)。数据主要来自于 GEE(Google Earth Engine, <https://code.earthengine.google.com/>) 平台, 以渭河源为边界和对应监测时段为筛选条件, 采用 NDVI 最大值合成方法获取监测年份的最大 NDVI。

(5) 土壤类型与质地数据。来自于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 耕地的分级与提取方法 根据《第二次全国土地调查技术规程》^[14], 结合研究目的及前人的研究成果^[4,6], 将耕地按坡度分为 4 个等级: 平地耕地(<6°)、缓坡耕地(6°~15°)、陡坡耕地(15°~25°)、峭坡耕地(>25°)。利用 DEM 数据, 利用 ArcGIS 中 Slope 工具计算研究区地形坡度, 然后利用 ArcGIS 中的重分类方法(reclassify), 按照耕地坡度分级进行重分类, 并转成矢量格式, 最后利用叠加分析方法(intersect), 将 LUCC 数据与坡度分级数据叠加获得

不同坡度等级的耕地数据。

2.2.2 耕地时空变化分析 采用耕地动态度、土地利用转移矩阵来研究耕地的时空变化。其中耕地动态度用以表征研究区耕地面积 1990—2020 年的动态变化。具体计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为研究时段内坡耕地动态度(%/a); U_a, U_b 为研究时段期初和期末坡耕地的面积(km²); T 为研究时段长(a)。

采用土地利用转移矩阵研究不同等级耕地从 1990—2020 年的转入与转出情况。具体表示为:

$$A = \begin{bmatrix} \cdots & A_{12} & \cdots & \cdots \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & A_{n2} & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: A 为面积(km²); A_{2n} 为耕地转移为其他土地利用类型的面积(km²); A_{n2} 为其他土地利用类型转移为耕地的面积(km²); n 为转移前后土地利用类型数。

2.2.3 土壤保持量的计算 为揭示退耕还林工程在不同坡耕地类型的土壤保持效应, 本研究采用中国土壤流失方程(CSLE)^[15] 分别计算 1990, 2000, 2010 和 2020 年 4 个时期的土壤保持量来评价退耕还林还草工程阶段研究区坡耕地变化的土壤保持效应。计算公式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \times E \times T \quad (3)$$

式中: A 为土壤保持量[t/(hm²·a)]; R 为降水侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)], 采用多年平均降水侵蚀力; K 为土壤可侵蚀性因子[(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)]; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。本研究主要聚焦实施退耕还林还草工程对土壤保持量的影响, 淤地坝、梯田、耕作方式等水土保持措施在该遥感数据尺度下难以反映, 因此文中 $E=1, T=1$ ^[16]。其他参数的详细计算参考生态保护红线监管技术规范生态功能评价(试行)^[17]。

3 结果与分析

3.1 耕地动态变化特征

2020 年, 渭河源区耕地总面积 6 575.25 km², 占源区总面积的 62.80%, 主要分布在研究区的南部(图 1), 其中坡耕地面积为 5 731.06 km², 占耕地面积的 87.16%, 主要为缓坡耕地和陡坡耕地(表 1)。1990—2020 年耕地利用格局发生了显著的变化, 面

积净减少 321.03 km²。对比 2000 年前后的耕地变化情况发现,研究区耕地面积呈先略微增加后显著减少的变化趋势,其中 1990—2000 年耕地总面积略有增加,由 1990 年的 6 896.29 km²,增加到 2000 年的 6 914.38 km²,增加 18.09 km²。2000—2020 年耕地总面积逐步减少,其中 2000—2010 年耕地面积减少最快,共减少 320.42 km²,2010—2020 年,随着“退耕还林还草”政策调整以及“藏粮于地”方针的落实,研究区耕地面积减少放缓,仅减少 18.70 km²。不同坡度的耕地面积变化分析表明,4 种类型的耕地面积变化均是以 2000 年为时间节点呈现先增加后减少的变化趋势,其中以 2000—2010 年陡坡耕地的减少面积最大,为 123.76 km²,峭坡耕地减少速度最快,耕地动态度为 -0.70%/a。

由此可见,渭河源区自 2000 年实施退耕还林以来,使耕地资源总量呈减少趋势,其中对坡耕地的影响尤为显著。

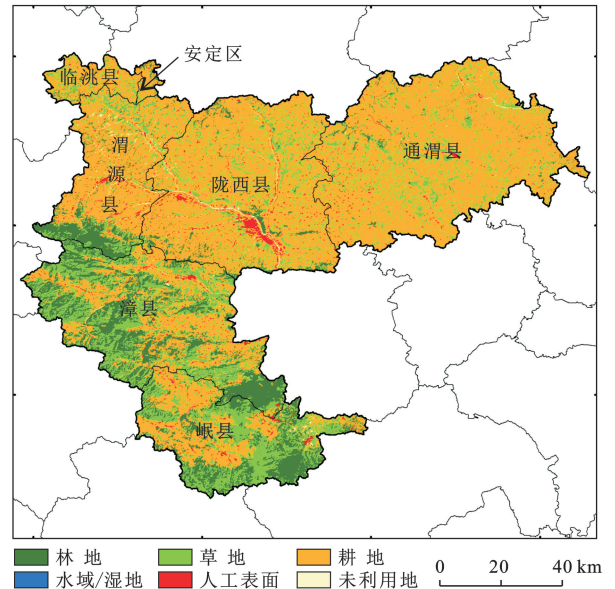


图 1 渭河源区 2020 年土地覆被分布

Fig.1 Land cover distribution at source area of Weihe River in 2020

表 1 渭河源区不同坡度耕地面积及变化量

Table 1 Area and change of farmland at different slopes at source area of Weihe River

km²

年份	平坡耕地	缓坡耕地	陡坡耕地	峭坡耕地	总计
1990	881.60	2 923.88	2 388.60	702.20	6 896.29
2000	882.91	2 927.96	2 396.04	707.46	6 914.38
2010	853.70	2 810.37	2 272.28	657.60	6 593.95
2020	844.19	2 803.39	2 270.49	657.18	6 575.25
1990—2000	1.31	4.08	7.43	5.26	18.09
2000—2010	-29.22	-117.59	-123.76	-49.86	-320.42
2010—2020	-9.51	-6.99	-1.78	-0.42	-18.70

3.2 耕地转移时空动态分析

根据 1990—2020 年土地利用变化,生成 1990—2020 年渭河源区不同坡度类型耕地的转出变化(表 2)和转入变化(表 3)。由表 2 可知,1990—2020 年共有 352.94 km² 的耕地转变为其他土地利用类型,其中 2000—2010 年是耕地转出面积最多的阶段,转出面积为 324.03 km²,占整个研究阶段转出面积的 91.81%。该阶段主要的转出耕地类型为陡坡耕地和缓坡耕地,主要转变为草地和林地类型,转出面积分别为 238.29 和 74.53 km²,分别占该阶段转出耕地的 73.54% 和 23.00%。耕地向建设用地的转换也是耕地转出的重要方向,并且转换呈现加速趋势,1990—2020 年共转出 29.56 km²。从表 3 可知,研究区仅有 31.9 km² 的耕地转入,主要转入阶段为 1990—2000 年,主要由草地转变而来,转变面积为 22.90 km²。通过以上分析可知,近 30 年来,渭河源区以耕地的转出为主,转出面积为转入面积的 11.06 倍,然而

1990—2000 年表现为耕地的少量转入,随着 2000 年该区域退耕还林工程的实施,驱使大量零星的坡耕地转变为草地和林地。

根据耕地提取的结果,按耕地转入转出发生的主要时段绘制了 2000—2010 年耕地转出和 1990—2000 年耕地转入的时空分布图(图 2)。退耕还林工程影响了研究区内的所有县区,其中耕地转换为草地主要分布在通渭县和陇西县,而耕地转换为林地主要分布在陇西县和岷县。而耕地的转出主要分布在漳县和岷县。

3.3 耕地变化的水土保持作用

基于 CSLE,计算 1990,2000,2010 和 2020 年 4 个时期的土壤保持量并利用标准差分级法对 1990—2020 年渭河源区土壤保持变化趋势进行划分(图 3)。结果表明,研究区土壤保持发生变化的区域主要分布在研究区的北部的耕地区。1990—2000 年研究区土壤保持量呈现减少趋势;随着退耕还林工程

的实施,2000—2010 年研究区局部区域的土壤保持量的减少趋势被遏制,主要分布在通渭县的东部和

陇西县的西南部;与 2000—2010 年相比,2010—2020 年研究区土壤保持量增加趋势更进一步(图 3)。

表 2 渭河源区 1990—2000 年不同类型耕地转出面积

Table 2 Conversion area of different types of farmland at source area of Weihe River from 1990 to 2000 km²

年份	类型	耕地→林地	耕地→草地	耕地→湿地	耕地→建设用地	耕地→未利用地
1990—2000	平坡耕地	0.19	0.66	0.00	1.59	0.02
	缓坡耕地	1.13	1.76	0.00	1.51	0.02
	陡坡耕地	1.47	0.80	0.00	0.25	0.00
	峭坡耕地	0.61	0.14	0.00	0.05	0.00
2000—2010	平坡耕地	5.30	19.76	0.01	4.32	0.25
	缓坡耕地	27.48	86.79	0.03	4.02	0.60
	陡坡耕地	30.73	92.93	0.02	0.80	0.68
	峭坡耕地	11.02	38.81	0.01	0.26	0.21
2010—2020	平坡耕地	0.00	0.00	0.17	8.89	0.44
	缓坡耕地	0.00	0.03	0.19	6.13	0.63
	陡坡耕地	0.00	0.04	0.05	1.41	0.28
	峭坡耕地	0.00	0.01	0.01	0.34	0.07

表 3 渭河源区 1990—2000 年不同类型耕地转入面积

Table 3 Transferred area of different types of farmland at source area of Weihe River from 1990 to 2000 km²

年份	类型	林地→耕地	草地→耕地	湿地→耕地	建设用地→耕地	未利用地→耕地
1990—2000	平坡耕地	0.13	1.55	2.03	0.00	0.06
	缓坡耕地	0.65	6.95	0.86	0.00	0.04
	陡坡耕地	0.90	8.98	0.07	0.00	0.00
	峭坡耕地	0.63	5.43	0.01	0.00	0.00
2000—2010	平坡耕地	0.00	0.37	0.04	0.00	0.00
	缓坡耕地	0.00	1.31	0.03	0.00	0.00
	陡坡耕地	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
	峭坡耕地	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00
2010—2020	平坡耕地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	缓坡耕地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	陡坡耕地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	峭坡耕地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2000—2010年的耕地转出变化

1990—2000年耕地转入变化

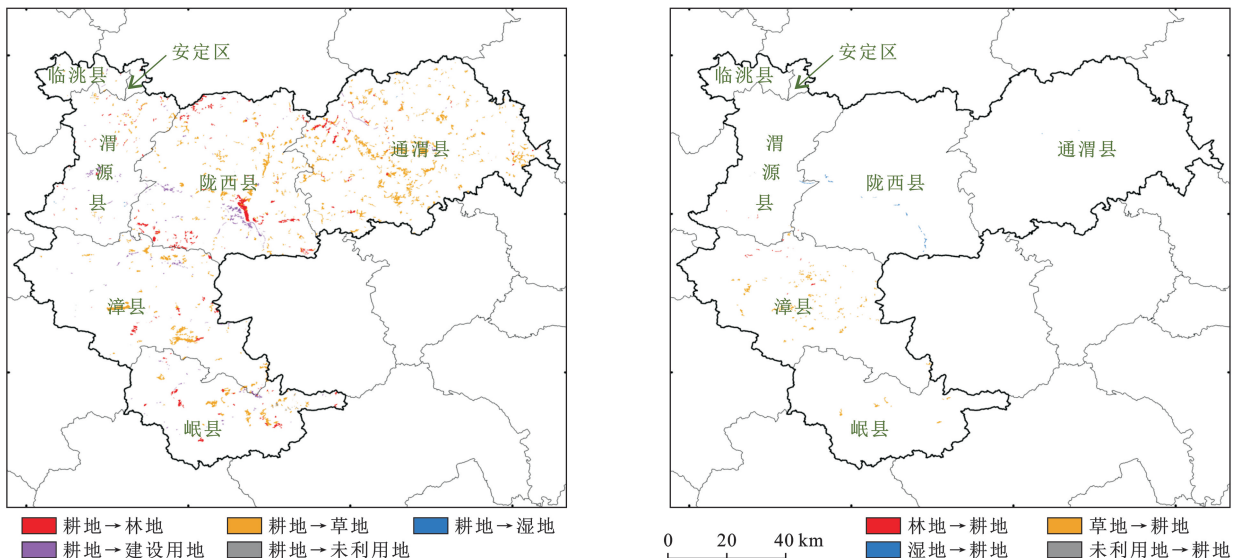


图 2 渭河源区主要阶段的耕地变化

Fig.2 Changes of farmland at source area of Weihe River in main periods

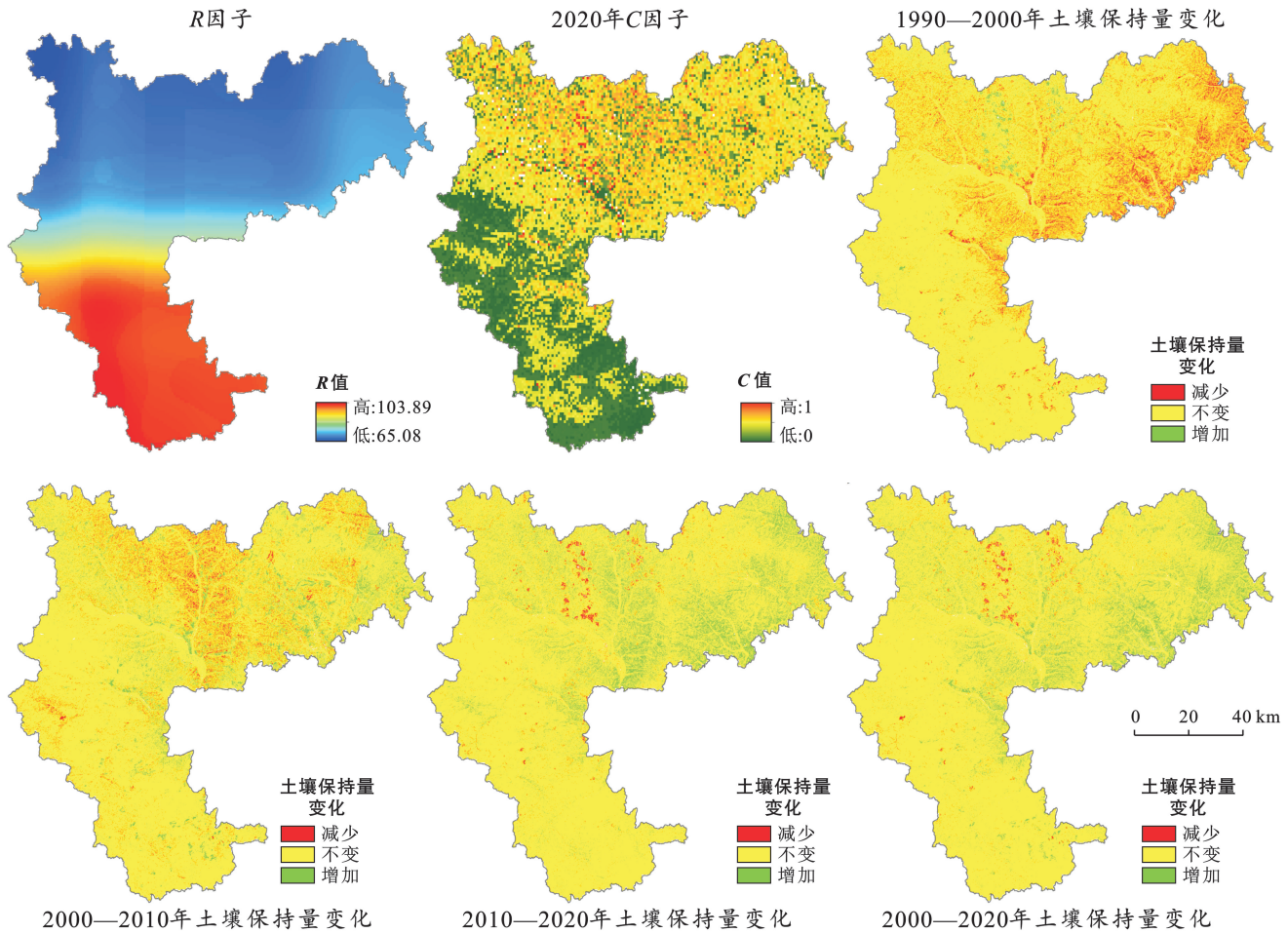


图 3 渭河源区 1990—2020 年土壤保持变化趋势及关键因子

Fig.3 Trends and key factors of soil conservation at source area of Weihe River from 1990 to 2020

根据耕地转移的时空变化特点,利用 CSLE 分别计算了 1990—2000 年林草地开垦和 2000—2020 年退耕还林还草导致土壤保持变化量(表 4)。由表 4 可知,1990—2000 年由于林地和草地开垦为耕地导致的土壤保持净减少量为 5.52×10^4 t,其中主要是陡坡耕地和峭坡耕地的开垦导致的土壤保持量减少,分别减少 2.21×10^4 t 和 2.45×10^4 t。从单位面积变化量上分析,随着开垦坡度的增加,单位面积土壤保持减少量呈线性增加状态,由平坡耕地的 4.4 t/hm² 增加到峭坡耕地的 41.59 t/hm²,峭坡耕地单位面积增加量导致土壤保持减少量分别是平坡耕地和缓坡耕地的 9.45 和 3.96 倍。而 2000—2020 年由退耕还林还草导致土壤保持增加量为 2.21×10^6 t,其中以陡坡耕地减少导致的土壤保持量增加最大,为 1.04×10^6 t;峭坡耕地和缓坡耕地次之,分别为 7.18×10^5 t 和 4.19×10^5 t。从单位面积变化量分析,随着坡度增加,单位面积土壤保持增加量呈线性增加状态,由平坡耕地的 13.75 t/hm² 增加到峭坡耕地的 145.85 t/hm²。峭坡耕地单位面积减少量导致土壤保持增加量分别是平坡耕地和缓坡耕地的 10.60 和 3.93 倍。

通过 2000 年前后耕地变化导致土壤保持量变化

对比发现,退耕还林还草工程对研究区内土壤保持功能具有重要影响,由 2000 年以前耕地开垦土壤保持量减少转变为 2000 年以后退耕还林还草导致土壤保持量显著增加,其中坡耕地,尤其是峭坡耕地的转变更能影响研究区内土壤保持量变化。

表 4 渭河流域不同时期林草地与耕地转化土壤保持变化量
Table 4 Soil conservation change of mutual transformation between forest and grass land and farmland at source area of Weihe River during different periods

转化阶段	耕地类型	变化量/ 10 ⁴ t	单位变化量/ (t · hm ⁻²)
1990—2000 年 林草地开垦导致 土壤保持减少量	平坡耕地	0.07	4.40
	缓坡耕地	0.79	10.50
	陡坡耕地	2.21	22.64
	峭坡耕地	2.45	41.59
2000—2020 年 退耕还林还草致 土壤保持增加量	平坡耕地	3.40	13.75
	缓坡耕地	41.87	37.11
	峭坡耕地	71.84	145.85

4 讨论

退耕还林是党中央、国务院为改善生态建设、建

设生态文明作出的重大决策。1999年起,甘肃、四川、陕西3省率开展退耕还林还草试点,2002年在全国范围内全面启动。渭河源区是全国最先实施退耕还林工程的区域,已完成退耕还林工程 $1.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[18],在改善生态环境、提升生态环境质量方面发挥了重要作用。退耕还林工程本质是通过改变陆地表面下垫面而影响其土壤保持量。主要表现有两个方面:①改变土地覆被类型,如耕地转变为林地(草地);②造林工程后植被覆盖度的变化。因此,为量化退耕还林工程对土壤保持量的生态效应,避免年际降水量波动对土壤保持量的影响,计算土壤保持量时,降雨侵蚀力因子采用多年平均值(1990—2020年)表示。结果表明,1990—2020年4个时期单位面积土壤保持量在 $130.67 \sim 145.93 \text{ t/hm}^2$,研究结果略低于刘宥延等^[18]在定西市安定区的模拟结果(167.3 t/hm^2 ,2017年),主要是因为定西市2017年的降水量要远高于研究中采用的多年平均降水量。因此,本研究中土壤保持量的结果基本可靠。

自1999年退耕还林还草工程实施以来,针对不同工程区退耕还林还草的生态效益评价研究层出不穷,然而针对渭河源的退耕还林还草生态工程效益的评价研究却较少,尤其是关于退耕还林还草工程实施前后(1990—2010年)和新阶段(2010—2020年)下坡耕地的时空变化及其土壤保持效应,为此本文通过研究1990—2010年渭河源区坡耕地的时空变化及其土壤保持变化,揭示退耕还林还草工程在渭河源区的退耕效果及其土壤保持作用。研究结果显示,2000年以来,渭河源区“退耕还林还草”工程取得了巨大的成效,共有 312.91 km^2 的耕地转变为林地和草地,其中89.42%为坡耕地($>6^\circ$)(表2),有效遏止了研究区水土流失。2000—2020年土壤保持量增加了 $2.21 \times 10^6 \text{ t}$ 。然而,自2010年以来,随着《渭河源区生态保护与综合治理规划》实施及国家“退耕还林还草”政策的阶段性调整,尤其是从2007年起为“确保全国耕地不少于18亿亩”,国家暂停安排退耕地还林还草,继续安排宜林荒山造林、封山育林^[19],对研究区内坡耕地的时空变化影响较大,主要表现为从2000—2020年退耕地面积变化呈倒U形变化,2000—2010年退耕地急剧增加,2010年达到峰值,2010—2020年急剧减少^[20]。与此同时,2000—2020年研究区的土壤保持量却呈增加趋势,2020年达到最大(图2—3),退耕变化时间和土壤保持量变化时间并不一致,说明退耕还林还草发挥其生态功能具有明显的滞后期^[21-23]。这主要是因为从2007年开始,虽然退耕还林还草暂缓,但宜林荒山造林和封山育林继续实施,研究区植

被覆盖度有所增加。二是林地生产力达到峰值需要一定的时间,研究表明在黄土高原刺槐林地的生物量生产力在5~8a达到峰值,随后呈下降趋势^[24]。而目前离最早的退耕林草地已经过去15a以上,如何维持退耕还林区较高的生态功能将成为后续工程的重点规划方向。另外,众多研究表明随着坡度的增加,坡耕地的退耕导致的土壤保持效应也相应增加^[4-6]。本文研究结果显示,峭坡耕地单位面积减少量导致土壤保持增加量是平坡耕地的10.60倍,得到了相同的结论。因此,坡度在 25° 以上的耕地(峭坡耕地)长期以来是退耕还林还草的重点治理对象。通过对峭坡耕地的变化分析,近20a间,峭坡耕地仅减少了 50.28 km^2 ,仅占2000年峭坡耕地的7.11%。尽管,渭河源区退耕还林还草工程取得显著的成效,但是针对峭坡耕地的退耕工作仍显不足。针对以上不足,2015年财政部等8部门联合下发的《关于扩大新一轮退耕还林还草规模的通知》和2018年中共中央、国务院印发的《关于打赢脱贫攻坚战三年行动的指导意见》,均将 $>25^\circ$ 的坡耕地、坡耕地梯田作为新一轮退耕还林还草的退耕范围^[19],这也将成为处于退耕还林(草)瓶颈期的渭河源区,继续扩大退耕规模的重要目标。

通过以上分析表明,退耕还林(草)已进入瓶颈期和全新阶段,面临巩固已有成果和继续扩大规模的双重任务^[25]。在巩固已有成果方面,从提高退耕还林工程生态功能角度考虑,建议在人工林生长达到峰值后有计划地进行补植、更新、改造^[26]。在继续扩大规模方面,将 25° 以上的坡耕地作为未来退耕还林重点区域,综合评估该区域退耕的生态、社会和经济价值,切实落实退耕还林、流域生态建设、水土保持建设等政策。

本研究以渭河源为研究区,分析了不同坡度属性耕地的时空变化及其土壤保持效应,但研究过程中仍存在一些不足。如研究表明不同的种植结构对土壤保持量具有显著差异,但是本研究中C因子计算过程中没有考虑种植结构的差异,增加了土壤保持量的不确定性,在未来的土壤保持效益评价研究中应考虑种植结构的差异。国土绿化主要包括退耕还林还草、宜林荒山荒地造林和封山育林等。而目前研究者的关注点主要集中在退耕还林还草导致的耕地向林草地转化过程中的生态效益方面,忽视了宜林荒山荒地造林和封山育林等工程措施带来的工程效益。截至2020年,全国累计实施宜林荒山荒地造林和封山育林面积占退耕还林还草工程总面积的59.20%^[27],因此宜林荒山荒地造林和封山育林的工程效益是不容忽视的,在后续的研究中应强化宜林荒山荒地造林和封山育林工程措施的生态效益评价研究。

5 结论

(1) 渭河源区退耕还林还草效果显著但仍有不足。1990—2020 年耕地面积分别以 2000 年和 2010 年为时间节点呈先略微增加后显著减少再缓慢减少的变化趋势,其中以 2000—2010 年陡坡耕地的减少面积最大,峭坡耕地减少速度最快。然而 2000 年以来峭坡耕地减少了 50.28 km²,仅占 2000 年峭坡耕地的 7.11%。未来峭坡耕地仍有较大的退耕潜力,建议继续将峭坡耕地当作渭河源区新一轮退耕还林(草)任务的重要目标。

(2) 退耕还林还草工程显著提升研究区土壤保持功能。1990—2000 年渭河源区林草地开垦导致土壤保持量减少 5.52×10⁴ t,而 2000—2020 年退耕还林还草导致土壤保持量增加 2.21×10⁶ t,其中大于 15°的坡耕地的转变更能影响研究区内土壤保持量变化。

(3) 对比退耕地面积和土壤保持量的时间变化趋势,退耕还林(草)地发挥其土壤保持功能具有明显的滞后期,建议在退耕林生长达到峰值后有计划地进行补植、更新、改造,以维持其较高的土壤保持功能。

[参 考 文 献]

- [1] 杨萌,宋晓鹏,张岩,等.黄土高原丘一区典型流域坡耕地分布及其侵蚀地形特征[J].中国水土保持科学(中英文),2020,18(6):1-8.
- [2] 蔺鹏飞,张晓萍,刘二佳,等.黄土高原典型流域水沙关系对退耕还林(草)的响应[J].水土保持学报,2015,29(1):1-6.
- [3] 李小芳,王治国,张超,等.西北黄土高原区旱作梯田高质量发展思考[J].水利规划与设计,2022(4):16-19,99.
- [4] 罗光杰,王世杰,李阳兵,等.岩溶地区坡耕地时空动态变化及其生态服务功能评估[J].农业工程学报,2014,30(11):233-243.
- [5] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015 年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报,2019,35(15):256-265.
- [6] 王祯,吴金华,白帅,等.延安市坡耕地资源时空变化及其土壤侵蚀效应[J].水土保持研究,2022,29(3):1-11.
- [7] Han Ze, Song Wei. Spatiotemporal variations in cropland abandonment in the Guizhou-Guangxi karst mountain area, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,238:117888.
- [8] Di Baofeng, Yang Zhaotian, Liu Lei, et al. The regionalized ecological, economic and social benefit of China's sloping cropland erosion control during the 12th five-year plan (2011—2015) [J]. Journal of Environmental Management, 2020,276:111314.
- [9] 蒲金涌,张强.渭河上游气候因子变化特征及其与径流量的关系[J].水土保持通报,2013,33(3):95-99.
- [10] 定西市人民政府.甘肃定西渭河源区水源涵养提升山水林田湖草沙一体化保护和修复工程实施方案[R].甘肃定西:定西市人民政府,2021.
- [11] 赵婷婷,肖超,张方哲,等.甘肃渭河源区山水林田湖草生态环境问题与生态修复研究[J].矿产勘查,2020,11(12):2823-2827.
- [12] 周添惠,杨磊,赵方凯,等.渭河源流域源汇景观演变对径流泥沙的影响[J].生态学报,2022,42(1):58-66.
- [13] 吴炳方.中华人民共和国土地覆被图集(1:1000000)[M].北京:中国地图出版社,2017.
- [14] 中华人民共和国国土资源部.第二次全国土地调查技术规程[R].北京:中华人民共和国国土资源部,2007.
- [15] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- [16] 包玉斌,黄涛,吕林涛.陕北黄土高原实施退耕还林还草工程后的土壤保持效应[J].宁夏大学学报(自然科学版),2021,42(3):1-8.
- [17] 中华人民共和国生态环境部.生态保护红线监管技术规范生态功能评价(试行)[R].北京:中华人民共和国生态环境部,2020.
- [18] 刘宥延,刘兴元,张博,等.黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估[J].水土保持学报,2020,34(3):84-90,97.
- [19] 国家林业和草原局.中国退耕还林还草二十年(1999—2019)[R].北京:国家林业和草原局,2020.
- [20] 匡文慧,张树文,杜国明,等.2015—2020 年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析[J].地理学报,2022,77(5):1056-1071.
- [21] 谢怡凡,姚顺波,丁振民,等.退耕还林和地理特征对土壤侵蚀的关联影响:以陕西省 107 个县区为例[J].生态学报,2022,42(1):301-312.
- [22] Ding Zhenmin, Yao Shunbo. Ecological effectiveness of payment for ecosystem services to identify incentive priority areas: sloping land conversion program in China [J]. Land Use Policy, 2021,104:105350.
- [23] Qian Chen, Shao Liqun, Hou Xianhui, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend across distinct local landscapes under China's grain to green program: a case study in Shaanxi Province [J]. Catena, 2019,183:104182.
- [24] 李军,王学春,邵明安,等.黄土高原半干旱和半湿润地区刺槐林地生物量与土壤干燥化效应的模拟[J].植物生态学报,2010,34(3):330-339.
- [25] 吴兆喆.科学精准评估退耕还林还草工程生态效益[N].中国绿色时报,2022-07-01.
- [26] 吴普侠,汪晓珍,吴建召,等.中国退耕还林工程固碳现状及固碳潜力估算[J].水土保持学报,2022,36(4):342-349.
- [27] 李世东.世界著名生态工程:中国“退耕还林还草工程”[J].浙江林业,2021(8):9-11.