

南方山丘区坡改梯工程的水土保持与 作物增值效益评估与优化

——以湖北省丹江口市为例

余冰^{1,2}, 李璐^{1,2}, 杨伟^{1,2}, 罗志邦³, 张文婷⁴

(1.湖北省水利水电科学研究院, 湖北 武汉 430064; 2.湖北省水土保持工程技术研究中心, 湖北 武汉 430064;
3.武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079; 4.华中农业大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: [目的] 评估和优化南方山丘区小流域尺度上坡改梯工程的水土保持效益与作物增值经济效益, 分析二者之间的权衡关系, 为该区域坡改梯工程的空间优化布局提供科学指导。[方法] 基于遥感和空间分析技术, 识别丹江口市梯田的空间分布并划定小流域。结合中国土壤流失方程(CSLE)模型和实地调查, 评估坡改梯工程中水土保持效益与作物产值提升之间的权衡关系, 采用线性优化方法搜索多情景下坡改梯工程的最优空间布局。[结果] 丹江口市的梯田和坡耕地主要分布在中部以及北部的流域内, 这些区域具备更高的水土保持效益及作物增值经济效益总量。对各小流域的空间优化分析的结果显示, 在水土保持效益优先情景下坡改梯工程主要分布于西南部流域; 而在作物增值效益优先情景下, 坡改梯工程则更集中于中部流域。多情景的线性优化结果表明: 水土保持效益优先与作物增值效益优先间存在显著权衡关系。各情景中最大的水土保持效益为: 减少侵蚀量约 3.21×10^6 t, 此时作物增值经济效益约为 1.78×10^8 元; 最大的作物增值经济效益约为 1.87×10^8 元时, 水土保持效益仅为约 3.01×10^6 t。非劣解可以反映二者的权衡关系。[结论] 通过线性优化方法合理配置流域内的坡改梯面积, 能够显著提升水土保持效益和作物增值经济效益并缓解两者的权衡, 为管理部门提供了一系列非劣解的空间优化方案。

关键词: 梯田; 水土保持效益; 线性优化; 小流域; 丹江口市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)01-0114-13

中图分类号: S157.2

文献参数: 余冰, 李璐, 杨伟, 等. 南方山丘区坡改梯工程的水土保持与作物增值效益评估与优化[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 114-126. Yu Bing, Li Lu, Yang Wei, et al. Evaluation and optimization of soil and water conservation and crop value-added benefits after converting slope to terrace land in hilly areas of Southern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 114-126. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.013; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.013.

Evaluation and optimization of soil and water conservation and crop value-added benefits after converting slope to terrace land in hilly areas of Southern China

—A case study in Danjiangkou City, Hubei Province

Yu Bing^{1,2}, Li Lu^{1,2}, Yang Wei^{1,2}, Luo Zhibang³, Zhang Wenting⁴

(1. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan, Hubei 430064, China;

2. Hubei Engineering and Technology Research Center of Soil and Water Conservation, Wuhan, Hubei

430064, China; 3. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079,

China; 4. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: [Objective] The soil and water conservation benefits and the economic benefits of crop increments in terrace reclamation projects at the small watershed scale in the hilly areas of Southern China were evaluated and optimized, and the trade-off relationship between the conservation benefits and the economic

收稿日期: 2024-09-04

修回日期: 2024-10-29

采用日期: 2024-10-29

资助项目: 湖北省水利重点科研项目“丹江口市水土保持率目标实现路径研究”(HBSLKY202306)

第一作者: 余冰(1990—), 女(汉族), 湖北省丹江口市人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水土保持与荒漠化防治工作。Email: yu20008bing@163.com.

通信作者: 罗志邦(1999—), 男(汉族), 湖南省新邵县人, 博士研究生, 研究方向为土地利用时空动态变化及其生态耦合效应。Email: luozhibang2024@163.com.

benefits was analyzed in order to provide scientific guidance for the formulation of a spatial optimization layout for the Danjiangkou City, Hubei Province. [Methods] Remote sensing and spatial analysis techniques were used to identify the spatial distribution of terraces in Danjiangkou City and delineate the small watersheds. The Chinese Soil Loss Equation (CSLE) model was combined with field investigations to evaluate the trade-off between soil and water conservation benefits and crop value added when slope cropland was converted to terrace cropland. A linear optimization method was used to determine the optimal spatial layout of the project under multiple scenarios. [Results] The terraces and slope croplands in Danjiangkou City were mainly distributed in the central and northern watersheds and they exhibited higher total benefits in terms of soil and water conservation and value-added economic benefits. The spatial optimization analysis of each small watershed indicated that under the soil and water conservation priority scenario, the changing slope cropland to terrace land project areas were primarily concentrated in the southwestern watershed, whereas under the crop value-added economic benefits priority scenario, the project areas were more heavily concentrated in the central watershed. The linear optimization results under the different scenarios showed a significant trade-off between the soil and water conservation priority and the crop value-added economic benefits priority. Under the different scenarios, the maximum soil and water conservation benefit was an approximately 3.21×10^6 t reduction in erosion with crop value-added economic benefits of approximately 1.78×10^8 yuan. The maximum crop value-added economic benefit result was approximately 1.87×10^8 yuan with soil and water conservation benefits reduced to approximately 3.01×10^6 t. The Pareto optimal solutions reflected the tradeoff between the two. [Conclusion] The spatial optimization methods used in this study quantified and optimized the trade-off relationship between water conservation benefits and the crop value-added economic benefits in projects where sloping land was converted to terrace land. The results provide a series of non-dominated solutions that can be used to aid government decision-making processes.

Keywords: terrace; soil and water conservation benefit; linear optimization; small watershed; Danjiangkou City

新时代以来中国对生态文明建设持续重视,水土保持工作面临新的挑战和要求。为应对水土流失问题,政府实施了诸如退耕还林、淤地坝、梯田建设等措施,取得了显著成效^[1]。其中,梯田在防治水土流失和促进粮食生产方面发挥了重要作用^[2-3],并在中国南方丘陵^[3]、黄土高原^[4]以及日韩、东南亚等地区广泛分布^[5]。坡改梯工程能够提高水土保持效益和粮食产量,但其效益受到坡度、土壤类型、耕作制度和气候等多因素的影响,导致不同空间位置上实施坡改梯工程会产生相异的水保与经济效益价值。因此,揭示坡改梯工程建设的水土保持效益与粮食增产效益之间的权衡关系并确定优先进行坡改梯工程建设的空间位置,是中国进行高标准农田建设、土地整治等^[6]的重要参考依据,也是维护农业农村可持续发展的重要举措。

在生态环境领域已有许多研究关注多目标间的权衡与优化问题。其中线性优化模型具有计算快速且容易收敛的优势,为多目标的权衡问题提供合适的解决方案^[7]。如包蕊等^[8]构建多目标线性规划模型明确甲积峪小流域内 3 类生态系统服务之间的权衡情况,并以生态系统服务价值总值最高为最终目标取得了最优解。谭传东等^[9]发现城市绿色空间配置过程中除了关注生态方面的效益外,还需要考虑行政地区间公平性

的问题,并基于此构建了线性优化模型寻找到了帕累托(Pareto)最优解集。此外有研究利用线性优化的方式对农业可持续发展中的不同目标进行了多情景优化分析^[10]。水土保持作为生态系统服务中的一项重要内容,许多学者^[8,11]针对水土保持等相关内容进行了空间优化,这类研究的优化对象主要是土地利用,通过改变土地利用方式来提高或权衡水土保持方面的目标。坡改梯工程作为水土保持措施中的重要内容之一。目前鲜有研究关注坡改梯工程中的水土保持效益与粮食增值效益之间的权衡关系。因此本研究从坡改梯建设角度对水土保持效益与作物增值经济效益情况进行评估,并在空间上对其进行优化配置。

丹江口市作为中国重要的水土流失防治区域之一,自 2007 年起便开展了综合水土保持措施,如“丹江口库区及上游水土保持重点防治工程”(简称“丹治”)一、二期等工程^[12]。同时,在《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十四五”规划》中,指出需以小流域为载体采取坡改梯建设在内的多项水保措施。因此,本研究以丹江口市作为研究区,在小流域尺度上采用高分影像数据提取研究区梯田空间分布,结合中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation, CSLE)评估梯田及坡改梯建设的水土保持量,并采用

全球农业生态区划 (global agro-ecological zones, GAEZ) 数据集与调研数据量化单位梯田建设的粮食产量与产值, 基于线性优化方法构建 2 个情景及每个情景 909 种权重的组合, 评估小流域尺度上坡改梯工程的水土保持效益与作物增值经济效益, 分析两类目标间的权衡关系, 并提出相应的空间优化布局。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

丹江口市是中国中南部的县级城市, 隶属于湖北省十堰市, 地处汉江中上游, 介于 $110^{\circ}48' - 111^{\circ}34'E$, $32^{\circ}13' - 32^{\circ}58'N$, 为北亚热带季风性湿润气候, 全年平均温度约 $15 \sim 16^{\circ}C$, 年均降水量约 $750 \sim 900 \text{ mm}$, 且降雨主要集中在夏季, 冬季降雨较少。地势上呈现出明显的中部河谷丘陵区高程低而南北山区海拔较高的形态, 中心地段分布着中国国家南水北调中线工程源头——丹江口水库。市内的主要土壤类型为黄棕壤、水稻土、紫色土、石灰土等, 其中黄棕壤的面积

比例最大^[13]。2023 年丹江口市的常住人口数约 40.57 万人, 城镇化率达到 64.76%, 地区生产总值达 365.18 亿元, 在农业方面市内广泛种植粮食、油料、蔬果等作物, 并持续发展如烟叶在内的特色优势经济作物^[14]。在“丹治”工程及坡耕地水土流失综合治理等工程中, 丹江口实施了多项水土保持治理措施, 例如坡改粮梯、坡改果梯、保土耕作、退耕还林等, 并取得了明显成效^[12]。其中丹江口市坡改梯工程的实施自 2006 年国务院批准《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划》后便已系统开展, 在规划中丹江口市 2010 年前计划坡改梯面积达 $9\ 016 \text{ hm}^2$, 并在后续跟进该项目的“十二五”及“十三五”规划, 并在最新的《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十四五”规划》中指出需以小流域为单元选用包括坡改梯在内的水保工程来加强水土流失防治。

1.2 数据获取与处理

(1) 基础数据。本研究采用社会经济、自然气候等一系列基础数据, 各类数据的来源、说明等详见表 1。

表 1 基础数据信息

Table 1 Information of basic data

数据类型	数据名称	数据说明
土地利用	丹江口市土地利用数据	2018—2022 年 1 a 一期, 分辨率 30 m, 取自 CLCD 数据集 ^[15]
地形数据	数字高程数据 DEM (Digital Elevation Model)	GDEM V2 数字高程数据, 分辨率 30 m, 由地理空间数据云平台 (https://www.gscloud.cn/) 提供
遥感影像	高分一号影像	2018—2022 年, 分辨率 2 m
	谷歌地图 ETM ⁺ 传感器数据	2018—2022 年, 分辨率 2 m
	Landsat 8OLI	2018—2022 年, 分辨率 30 m
降雨数据	NOAA Physical Sciences Laboratory 每日降雨数据	时间跨度 2000—2022 年, 来源网站 (https://psl.noaa.gov/data/gridded/), 分辨率 0.5°
NDVI 数据	MODIS NDVI 月度最大值数据	时间跨度 2000-01 至 2022-12, 分辨率 250 m
行政区划	丹江口市行政区划	来源资源环境数据中心 (https://www.resdc.cn/)
土壤属性	HWS D2.0 (Harmonized World Soils Database version 2.0)	来源网站 (https://gaez.fao.org/pages/hwsd/), 分辨率 1 km
粮食产量	GAEZ (Global Agro-Ecological Zones)	来源网站 (https://gaez.fao.org/pages/glossary/), 分辨率 5 km
人口栅格	WorldPop 数据	来源网站 (https://hub.worldpop.org/geodata/summary?id=6524), 分辨率 100 m

(2) 基于高分影像的梯田提取。利用 Google Earth Engine (GEE) 平台对高分影像的原始影像进行重采样、裁剪和镶嵌等预处理。通过波段指数特征计算、灰度纹理特征提取、主成分变换和特征融合等构建高分影像的分类特征集。利用随机森林对丹江口市梯田进行分类提取, 选用的主要特征包括光谱特征、指数特征和纹理特征等, 共融合 30 个特征用于高分影像分类 (表 2)。

采用目视解译法选取训练和验证样本。分类依据《土地利用现状分类 (GB/T 21010—2017)》标准及湖北省土地利用现状图 (2018—2020 年), 确定梯田、草地、建设用地、林地、水体、未利用地和耕地 7 种类别。研究区被划分为 50 个等面积网格区域, 每类

用地每区选取 1~2 个随机样本, 总体样本数超过 400, 且每类用地样本点不少于 50 个。训练样本与验证样本按 7:3 比例分配, 确保服从同一分布。结果显示, 整体土地利用分类精度和 kappa 系数超过 0.9, 其中梯田识别的用户精度和生产者精度分别达到 0.83, 0.82。

(3) 基于 DEM 的小流域提取。本研究基于 GDEM V2 数字高程数据, 参考《小流域划分及编码规范 (SL 653—2013)》, 使用 ArcGIS 10.8 软件完成小流域提取。在流域划分过程中主要使用 ArcGIS 的水文分析工具箱。在流域边界处理中, 将小流域面积尽量控制在 $3 \sim 50 \text{ km}^2$, 充分考虑地表汇水关系以保证上下游汇水关系的正确性, 并确保边界与其他各级边界

相吻合,参照自然地形最大程度保证流域形态的完整性。

表 2 高分影像分类特征集

Table 2 Feature set of high-resolution image classification

特征类型	特征
光谱特征	R(红波段)
	G(绿波段)
	B(蓝波段)
指数特征	NDVI(归一化植被指数)
	NDBI(归一化建筑物指数)
	NDWI(归一化差分水体指数)
	EVI(增强植被指数)
	RVI(比值植被指数)
	DVI(增强型植被指数)
纹理特征	朝向
	坡度
	海拔高度
	ASM(Angular Second Moment)
	CONTRAST(Contrast)
	CORR(Correlation)
	VAR(Variance)
	IDM(Inverse Difference Moment)
	SAVG(Sum Average)
	SVAR(Sum Variance)
	SENT(Sum Entropy)
	ENT(Entropy)
	DVAR(Difference variance)
	DENT(Difference entropy)
	IMCORR1(Information Measure of Corr. (1))
	IMCORR2(Information Measure of Corr. (2))
	maxCORR(max Corr)
DISS(Dissimilarity)	
INERTIA(Inertia)	
SHADE(Cluster Shade)	
PROM(Cluster prominence)	

2 研究方法

2.1 水土保持效益评估方法

本研究中水土保持量(土壤侵蚀模数)估算选择采用《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》中推荐的 CSLE 模型,该模型经刘宝元等^[16]提出,在估算形式上更适用于中国水土保持工作的实际情况。CSLE 方程的计算公式为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; R 为降雨侵

蚀力因子 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(\text{mg} \cdot \text{h})/\text{MJ} \cdot \text{mm}]$ 。剩余因子无量纲,分别为坡长坡度因子 LS , 植被覆盖与生物措施因子 B , 工程措施因子 E , 耕作措施因子 T 。其中 R, K, LS 因子计算参考了《2022 年湖北省水土流失动态监测技术指南》(以下简称《指南》); B 因子的计算以及丹江口地区林地林下盖度情况参考毛馨^[17]的研究;而 E 因子与 T 因子是根据土地利用具体情况直接进行赋值得到。本研究主要考虑丹江口市内主要的水土保持措施表示土坎水平梯田,参考《指南》将其赋值为 0.084;对于耕作措施,丹江口市隶属于秦巴山区旱地二熟一熟兼水田两熟区,该区域的 T 值为 0.403。

本研究中梯田的水土保持效益是指假设梯田并未建设时与现有梯田的土壤侵蚀量之间的差值。具体计算公式为:

$$SE_i = R \cdot K \cdot LS \cdot B \cdot (E_P - E_T) \times T \quad (2)$$

式中: SE_i 表示梯田的水土保持效益值; E_P, E_i 分别表示坡耕地与梯田的水土保持工程措施因子 E 的数值。

2.2 作物增值经济效益评估方法

本研究将作物增值经济效益定义为坡改梯工程实施后因作物产量提升带来的产值增长。坡耕地单位面积作物产量的确定步骤如下:首先,通过 GAEZ 数据库获取研究区的作物产量均值,主要作物包括玉米、小麦、土豆、水稻、油菜、大豆、花生、棉花、烟草和葵花籽;然后,依据不同坡度的产量系数进行调整,参考 Zeng 等^[18]的研究,具体的作物产量计算公式为:

$$G = \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cdot \beta_i \cdot G_{ave} \quad (3)$$

式中: α_i 为坡耕地的类别,依据坡度情况将其分为 6 类($<6^\circ, 6^\circ \sim 10^\circ, 10^\circ \sim 15^\circ, 15^\circ \sim 20^\circ, 20^\circ \sim 25^\circ$ 及 $>25^\circ$); β_i 表示不同坡度及地区产量系数(表 3); G_{ave} 各类作物单位面积产量的均值(t); G 为总产量(t)。

表 3 坡耕地产量系数

Table 3 Yield coefficient of slope cropland

坡耕地类别	$<6^\circ$	$6^\circ \sim 10^\circ$	$10^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 20^\circ$	$20^\circ \sim 25^\circ$
产量系数	1.05	0.99	0.90	0.78	0.70

于 2024 年 6 月的实地调研获取丹江口区域坡改梯工程建设后作物产量的提升情况如下:玉米提升 31%,土豆 36%,小麦 75%,烟叶 0.84%,其余作物按照平均提升 47%计算。基于此计算坡改梯后作物增加的产量;同时作物单价参考湖北产地货源价格(数据来源:https://www.ymt.com/,访问时间:2024 年 7 月),具体单价详见表 4。

表 4 丹江口区域主要作物单价

Table 4 Unit price of crops in Danjiangkou area

作物类别	玉米	小麦	土豆	水稻	油菜	大豆	花生	棉花	烟草	葵花籽
单价/(元·kg)	2.64	2.62	2.06	5.20	16.98	6.24	6.96	12.56	40.00	12.00

最终坡改梯工程带来的作物增值经济效益的计算公式为:

$$EC_t = (G_t^n - G_p^n) \times P_n \quad (4)$$

式中: EC_t 表示坡改梯工程带来农产品产值的提升值(元); G_t^n 表示梯田的第 n 种作物的产量(t); G_p^n 表示坡耕地上第 n 种作物的产量(t); P_n 为第 n 种作物的单位价格(元/t)。

2.3 小流域尺度空间优化模型

本研究使用 Matlab 2018b 软件构建丹江口市坡改梯空间优化模型。优化对象为小流域内的坡度在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 之间的坡耕地,其范围确定参考坡改梯的建设标准(《湖北省高标准农田建设规划(2022—2030年)》),将此部分坡耕地称为目标坡耕地,优化目标为最大化坡改梯带来的水土保持效益与粮食增值效益。具体优化方式为:

2.3.1 目标函数

(1) 目标 1。使得坡改梯的水土保持效益收益最大,即水土保持效益优先。

$$\max Fval_1 = \sum_i^n f_{1i} \cdot X_i \quad (5)$$

$$f_{1i} = a_i \quad (6)$$

式中: f_1 表示目标 1 系数; n 为小流域个数为 79; a 表示小流域 i 内可转梯田的耕地上平均土壤侵蚀系数,通过各流域 R, K, LS, B, T 因子相乘的平均值以及坡改梯实行后 E 因子变化的数值量,与单位栅格表示的面积相乘得来(t/hm²); X_i 为第 i 个小流域坡改梯面积(hm²); $Fval_1$ 表示坡改梯的水土保持效益值(t)。

(2) 目标 2。使得坡改梯的作物增值经济效益最大化,即作物增值效益优先,该目标中考虑了两种情景。

①情景 1。最大化坡改梯后的作物产值提升。

$$\max Fval_2 = \sum_i^n f_{2i} \cdot X_i \quad (7)$$

$$f_{2i} = v_i \quad (8)$$

②情景 2。在产值提升的基础上考虑人口在各流域间的空间分布情况。

$$\max Fval_2 = \sum_i^n f_{2i} \cdot X_i \quad (9)$$

$$f_{2i} = pp_i \times v_i \quad (10)$$

式中: f_2 表示目标 2 系数; pp_i 表示小流域 i 内流域的人口分布系数(无量纲,取值 $0 \sim 1$),计算方式为每个小流域的人口数减去全市所有流域内人口最小值

后再除以全市流域内最大人口数与最小人口数的差值; v 表示单位面积坡改梯带来的产值提升系数(万元/hm²); X 为坡耕地面积。

2.3.2 成本函数与约束函数

本研究同时设计成本函数,认为某一流域内目标坡耕地坡度与现有梯田平均坡度的比值越大,其建设难度与成本会有所提升。具体计算公式为:

$$S_i = \frac{Cul_{s_i}}{Ter_{s_i}} \quad (11)$$

式中: S_i 表示小流域 i 内坡耕地建设的难度,从 $0 \sim 1$,越高表示越难,无量纲; Cul_{s_i} 为流域内的目标耕地的坡度平均值; Ter_{s_i} 为流域内已有梯田的坡度平均值。

设置每个小流域内目标坡耕地转为梯田的约束函数:

$$Per = \sum_i^n \frac{X_i}{A} \quad (12)$$

$$X_i \geq 0, \quad \forall_i \in n \quad (13)$$

$$X_i \leq U_i, \quad \forall_i \in n \quad (14)$$

$$\sum_i^n X_i \leq A \quad (15)$$

式中: Per 为发生坡改梯的耕地面积比例,其取值为 $10\% \sim 90\%$,取值间隔为 10% ; A 表示整个研究区内目标坡耕地的总面积; U 表示各小流域内目标坡耕地的总面积。

本研究设计的总目标函数为:

$$Fval = \sum_i^n \frac{\omega \cdot sf_{1i} \cdot X_i + (1-\omega) \times sf_{2i} \cdot X_i}{S_i} \quad (16)$$

式中: $Fval$ 为总目标; ω 为权重系数(取值为 $0 \sim 1$, 0.01 为间隔),权重取值有 101 种情况,由于限制条件中坡改梯的耕地面积比例设计了 9 种情况,因此不同权重间的组合共计有 909 种情况。由于 $Fval_1$ 与 $Fval_2$ 之间存在数量级上的差异,因此在进行线性优化时对二者的系数 f_1 与 f_2 作了正态标准化的归一化处理,处理后的系数分别为 sf_1 与 sf_2 。

3 结果与分析

3.1 梯田提取及坡耕地的空间格局分析

本研究以 2022 年数据为基准,得到丹江口市梯田及目标坡耕地的空间分布情况(图 1)。其中梯田提取的用户精度和生产者精度分别达到 0.83 与 0.82,

满足使用需求。结果显示,丹江口市内共有 79 个小流域,最大面积约为 239.56 km²,最小面积约为 14.05 km²。整体来看,梯田与目标坡耕地的面积分布主要集中在中部及北部的流域内,而在南部的分布相对较少,这主要是因为丹江口市的南部有较大面积

的林地分布,压缩了耕地的分布空间。从坡度上看,丹江口市梯田的平均坡度约为 12.94°,而目标坡耕地的平均坡度约为 14.01°。此外各小流域内梯田与目标坡耕地的平均坡度情况在空间分布较为相似,呈现出西南部坡度偏高、东部及北部坡度较平缓的格局。

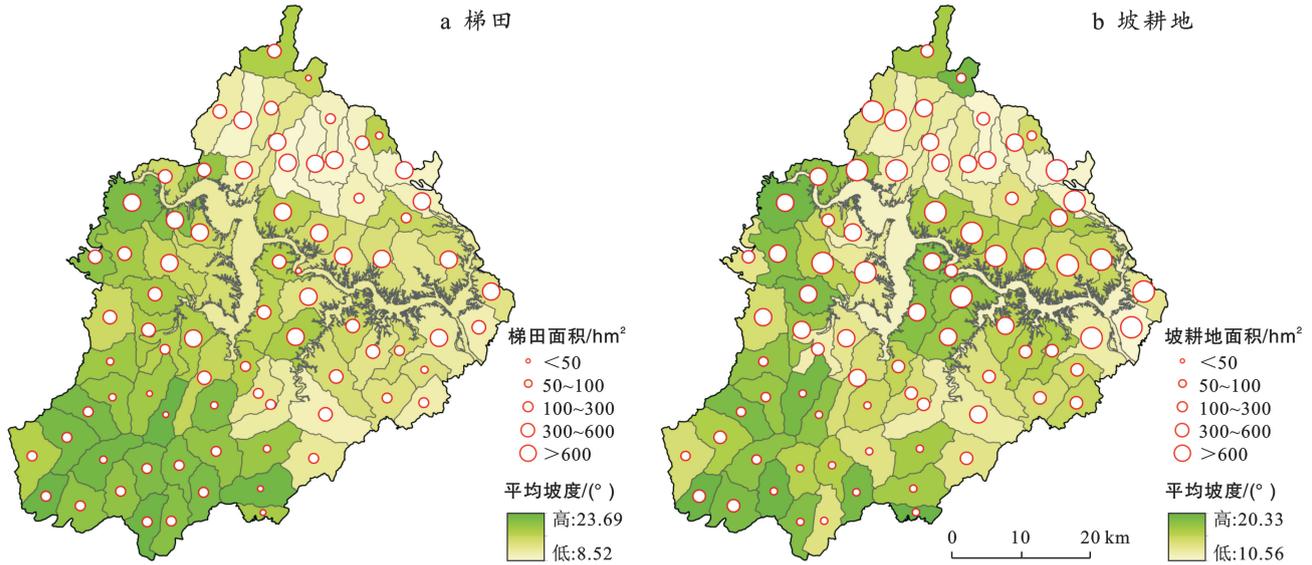


图 1 丹江口市梯田及坡耕地基本情况

Fig.1 Basic situation of terrace and slope cropland in Danjiangkou City

本研究进一步分析了梯田及目标坡耕地分布的空间差异(图 2)。结果显示,已建设的梯田与未来可发展为梯田的目标坡耕地的整体分布位置是相近,且呈现出一定的交错分布的形态。其中梯田的分布重心相较于目标坡耕地而言偏向西南侧,但总体上两者的重心分布接近。

通过对用地分布的标准差椭圆分析发现,已有梯田的标准差椭圆面积为 1 316.91 km²,而目标坡耕地的标准差椭圆面积为 1 208.47 km²。梯田的标准差椭圆面积要高出约 8.97%,说明在丹江口市内目标坡耕地在空间上分布的集中程度要略高一些,而梯田在市内的分布会更为分散。

3.2 梯田的水土保持效益与作物增值经济效益分析

3.2.1 水土保持效益 根据上文方法获取了丹江口市各土壤侵蚀因子情况,其空间分布结果如图 3 所示。

为量化梯田所带来的水土保持效益,本研究计算了假设现有的梯田为坡耕地时的土壤侵蚀量,并得到梯田与坡耕地情形间的差值,从而得到各小流域内梯田的水土保持效益(图 4)总量(10⁴ t)与单位网格面积上梯田的水土保持效益(t/0.09 hm²)。结果显示,在丹江口市西南部区域单位网格面积上梯田的水土保持效益较高,这主要是由于该区域的降雨侵蚀性强(图 3 的 R 因子所示)且地形较为陡峭(从图 3 的 LS 因子所示),导致耕地上更易发生严重的侵蚀。然而梯田带来的水土保持效益在丹江口市的西南部总量偏低,从图 1 显示的梯田面积来看可以发现该区域小流域的梯田面积普遍在 300 hm²以下,从整个市内看属于中下层次,这可能是该区域水土保持效益偏低的重要原因。丹江口水库周边区域的侵蚀减少总量较

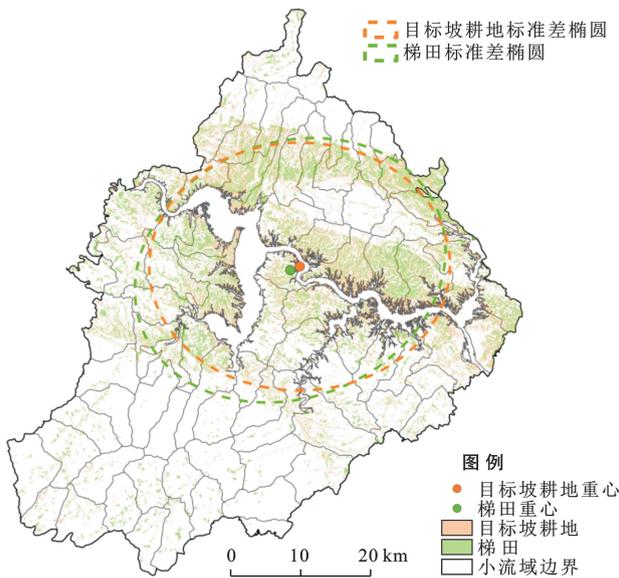


图 2 丹江口市梯田及坡耕地的栅格分布情况

Fig.2 Grid distribution of terrace and slope cropland in Danjiangkou City

大,而单位面积梯田的水土保持效益则较低。从图 3 反映的情况来看,该部分区域的 R 因子及 LS 因子明显较西南地区的数值要低,使得单位面积上梯田的水

土保持效益要更少。但图 1 显示这些区域小流域内的梯田面积大多在 600 hm^2 以上,因为数量优势而在整体上表现出更高的水土保持效益。

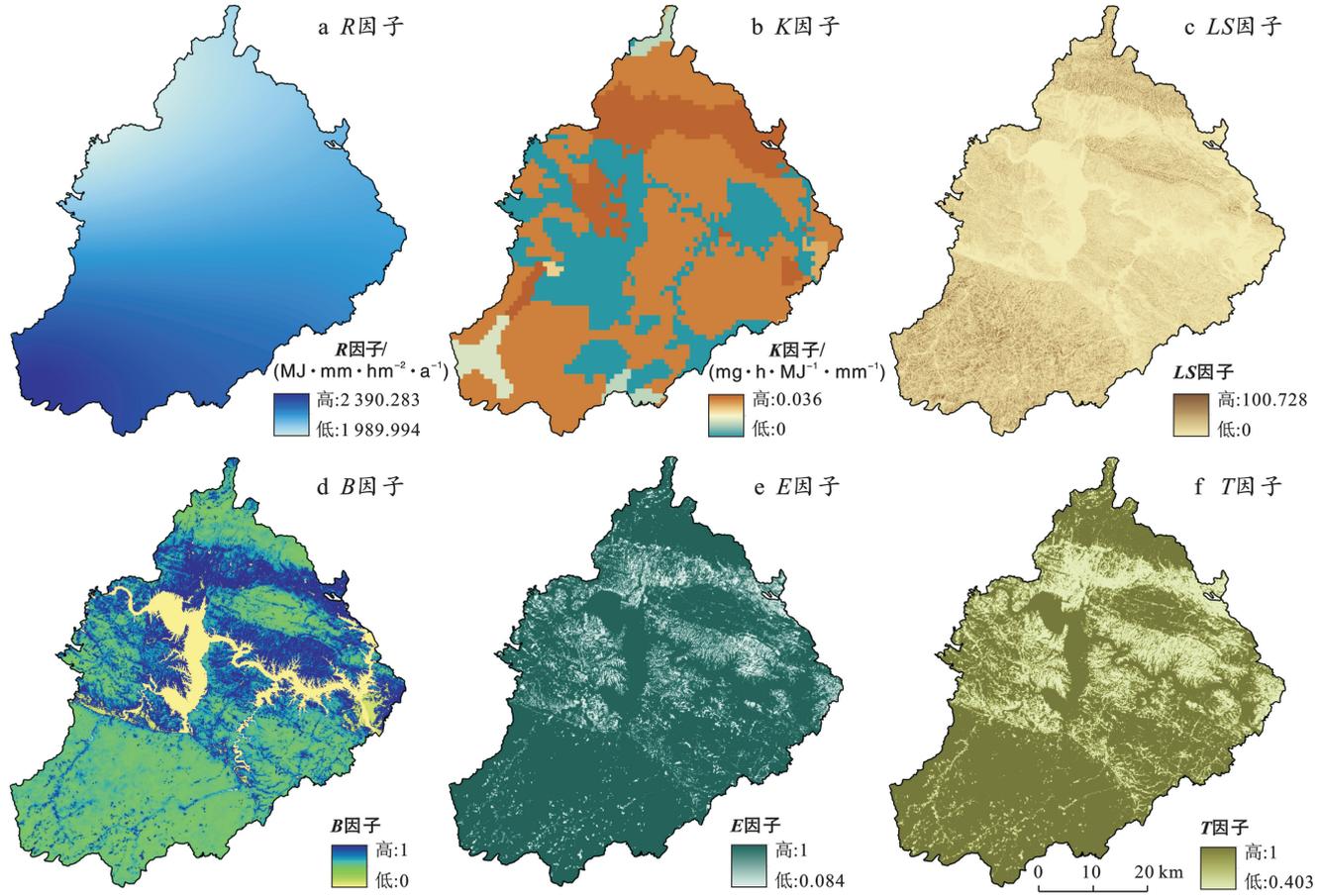


图 3 丹江口市土壤侵蚀因子分布

Fig.3 Distribution of factors affecting soil erosion in Danjiangkou City

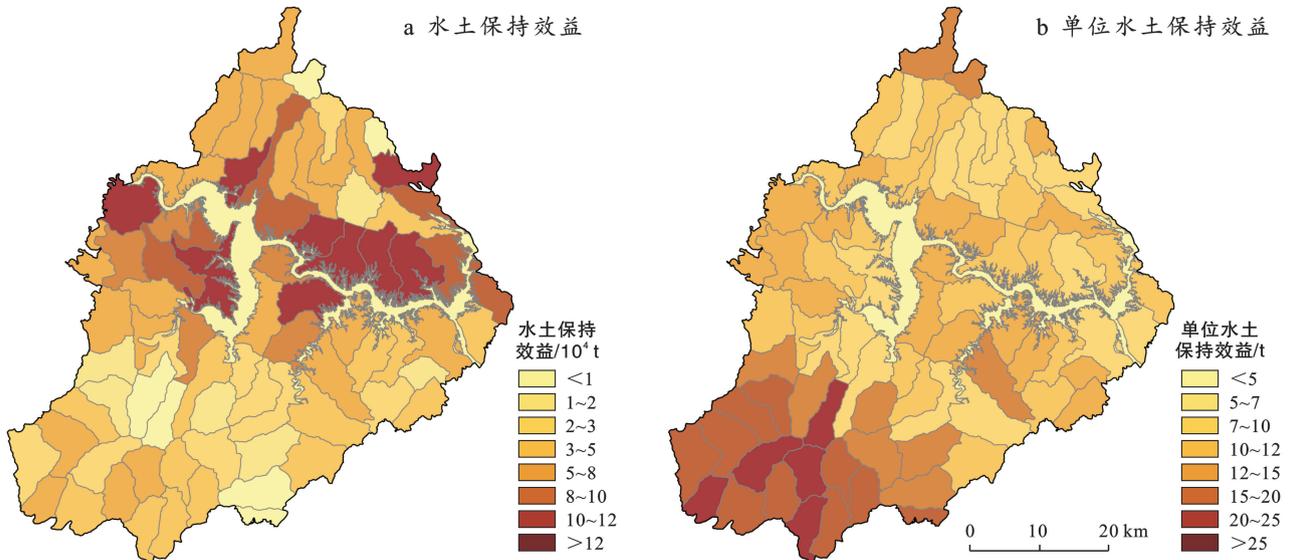


图 4 丹江口市梯田的水土保持效益空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil and water conservation benefits of terrace in Danjiangkou City

3.2.2 作物增值经济效益 为量化坡改梯带来的作物增值经济效益,参考上文介绍的作物产值计算方法,得到已有梯田相较于坡耕地其作物产值提升情况(图 5)。结果表明,梯田的作物产值提升较高的区域分布在丹江口市的东部及北部的流域内,这些区域大多位于丹江口水库周边,而市内西南部的作物产值提升量相对较少。对比流域内人口数目可以发现,在人

口密集的流域内坡改梯工程产生的作物增值经济效益一般也是较高的,说明现有的梯田建设符合自然、社会发展规律,倾向于在人口数量较多、种植条件好的位置进行坡改梯建设。

3.2.3 线性优化模型系数空间分布特征分析 参照上文介绍的方法提取各小流域内所需的系数值,其具体的空间分布情况如图 6 所示。

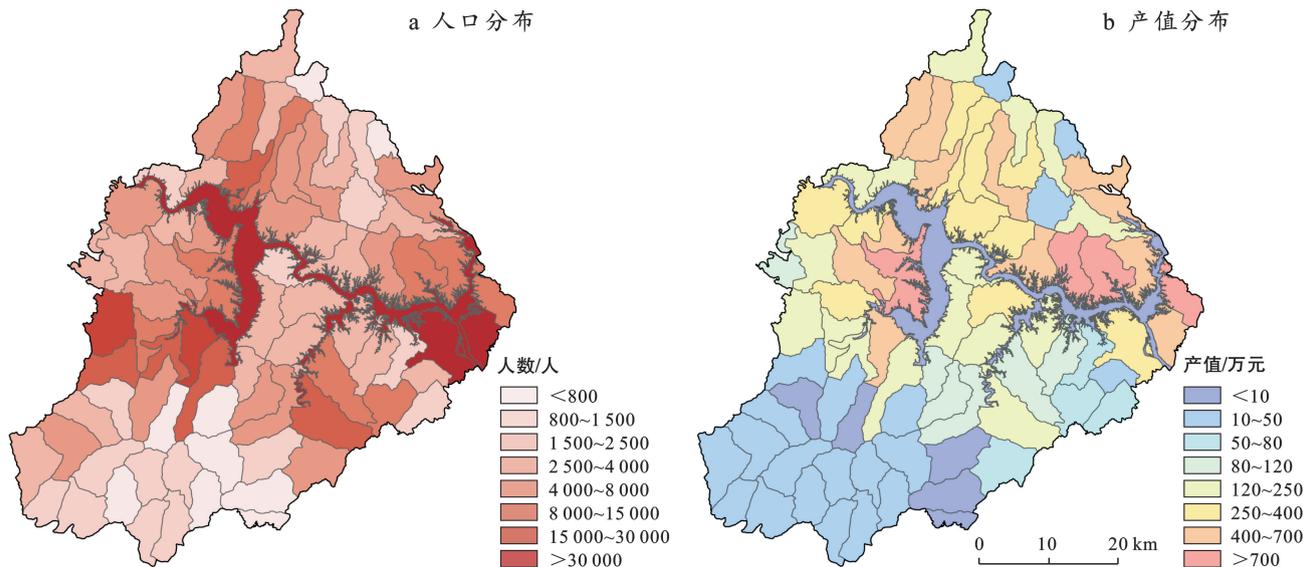
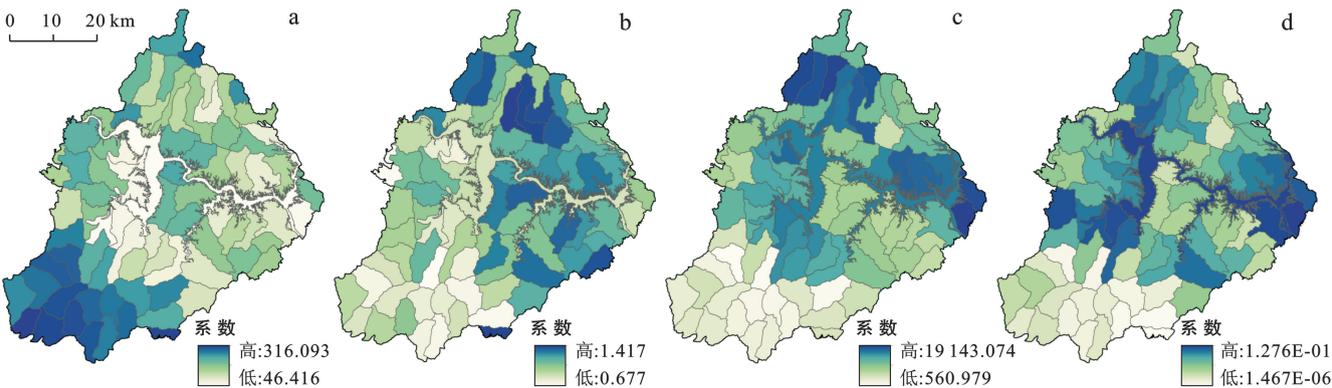


图 5 丹江口市各流域内的人口数及梯田作物增值经济效益空间分布

Fig.5 Spatial distribution of population and economic benefits of terrace crop increment at each watershed of Danjiangkou City



注:a 表示目标 1 系数; b 表示成本系数; c 表示未考虑人口分布的目标 2 系数; d 表示考虑了人口分布的目标 2 系数。

图 6 线性优化中丹江口市各流域的系数空间分布差异

Fig.6 Spatial distribution differences of linear optimization at each watershed of Danjiang City

目标 1 的系数为进行坡改梯之后每 1 hm² 梯田可带来的水土保持量,空间分布与已有梯田平均水土保持效益近似,在西南侧的流域梯田带来的单位面积水土保持效益较高。目标 2 的原始系数(目标 2 的情景 1)为建设每 1 hm² 梯田可能带来的作物产值提升量,可以发现在该目标下中部以北地区的系数值明显较高,而西南部地区的数值偏低。这可能是因为在实际建设中坡度较高的耕地本身的作物产量较低;这导

致西南部在拥有更多较高坡度耕地的情况下,其进行坡改梯工程后带来的作物增值经济效益更低。同时,由于坡改梯带来的作物增值经济效益是针对当地农民而言,因此设置目标 2 的情景 2,认为在人口分布更多更密集区域应更多地考虑作物产值提升并进行坡改梯工程建设。这将有利于梯田工程被农户高效利用,减少其撂荒可能性。目标 2 的情景 2 显示系数较高的小流域主要向位于中部,这与丹江口市人口分布

情况相符。在成本系数上,本研究假设各流域内坡改梯的建设水平与已有梯田相关,若新增的坡改梯工程的坡度大于已有梯田坡度,则建设难度相应增大;反之,则建设难度会更小。结果显示北部以及东南区域目标坡耕地与已有梯田的坡度值差异偏大因而具有更高的成本系数(图 6)。

3.3 小流域尺度的坡改梯空间优化结果

利用线性优化的方法分析不同情景下的坡改梯工程在流域内分配优化结果及水土保持效益与作物增值之间的权衡关系。

3.3.1 基于不同目标下优化结果的空间差异 分别设置水土保持效益最高(“目标 1 优先”情景)、作物增值经济效益最高(“目标 2 优先”情景)及二者权重相

同作为(“权衡”情景)优化目标,在优化求解过程中,采用了不同坡改梯面积限制条件,同时在目标 2 的系数上根据是否考虑人口的空间分布将求解结果分成了两大情景(考虑人口分布情景及不考虑人口分布情景)。不同情景下坡改梯工程在流域内的空间分配情况如图 7 所示。从各情景的空间分布结果看,在“目标 1 优先”情景下,优先对西南部位的流域进行坡改梯建设。而在“目标 2 优先”情景下,优先对中部的流域分配坡改梯建设。在“权衡”情景下,优化结果权衡了两类目标得到较为折中的优化结果。

对情景 1 与情景 2 对比发现,在作物增值效益优先下,情景 2 给流域分配的坡改梯面积集中在东部以及丹江口水库周边的流域,符合图 5 中人口分布的情况。

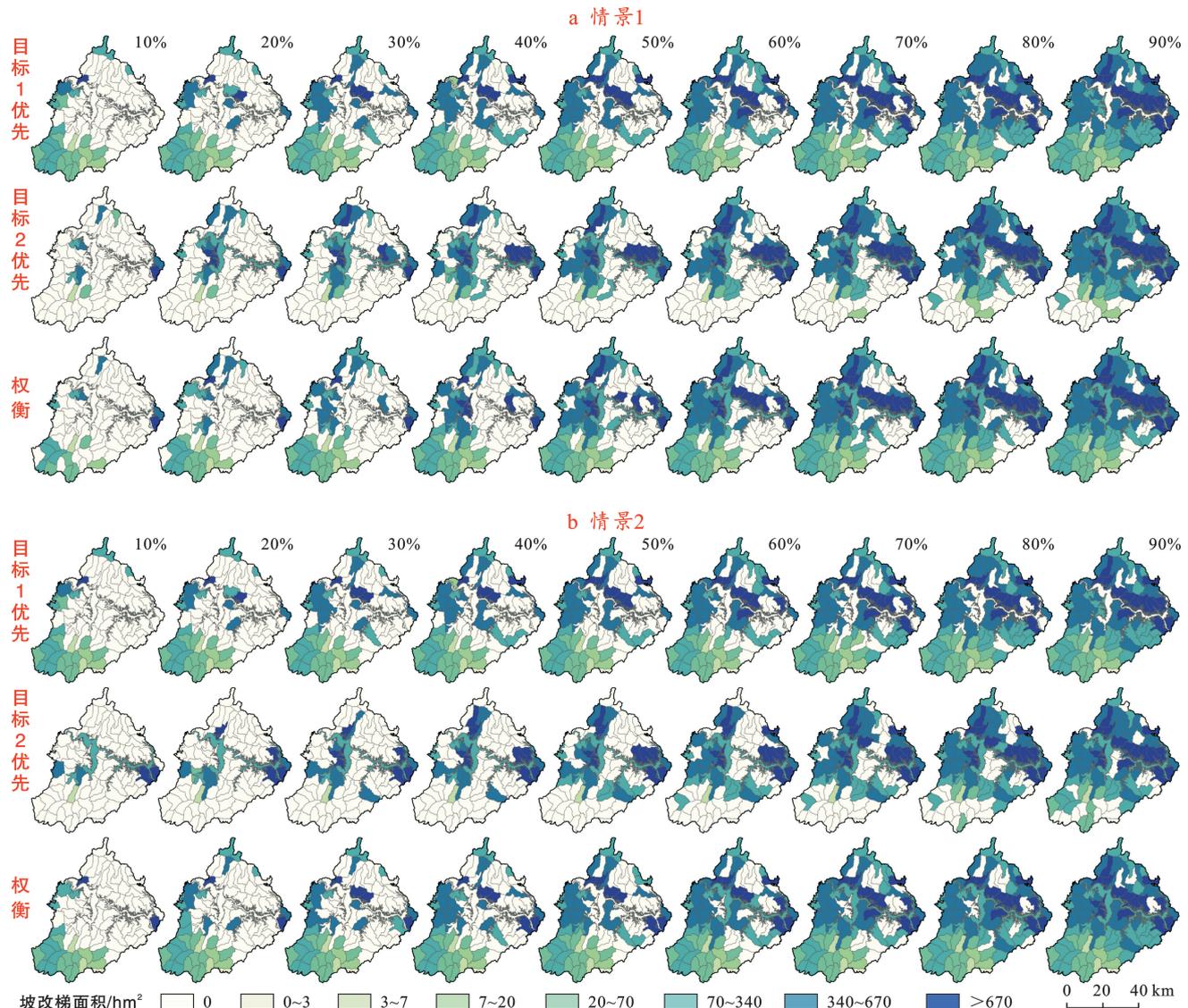


图 7 不同比例的坡改梯情形下坡改梯工程在丹江口市各流域内的最佳面积空间分布

Fig.7 Spatial distribution of optimal area allocation within changing slope cropland to terrace project in each watershed of Danjiang City under different proportions of project

各情景下线性优化带来水土保持效益与作物增值情况详见表 5。在追求水土保持效益优先时(即“目标 1 优先”),情景 1 与情景 2 的两类效益值及坡改梯的空间分配是相同的,最高的水土保持效益为减少侵蚀约 3.21×10^6 t。而在追求作物增值效益优先时(即“目标 2 优先”),情景 2 的效益值会略低于情景 1,最高的作物增值经济效益值约为 1.87×10^8 元。而对于追求权衡的情况,情景 2 的水土保持效益会稍高于情景 1,而作物增值经济效益的提升则明显偏低一些。这表明在考虑了人口分布条件的公平性之后,会在一定程度上损失一些作物增值经济效益。此外,

对比不同情景下各小流域具体效益值的差异情况,以情景 1 下完成 90% 的坡改梯比例这一情景为例,在水土保持效益方面,“目标 1 优先”情景比“目标 2 优先”情景平均高出约 2 500 t 的水土保持量,最高差值约为 1.16×10^5 t。“权衡”情景则比“目标 2 优先”平均高出约 1 400 t 的水土保持量,最高差值约为 4.84×10^4 t;而在经济效益方面,“目标 2 优先”情景结果比“目标 1 优先”情景平均提高了约 1.18×10^5 元,最高差值约 3.77×10^6 元。此时“权衡”情景比“目标 1 优先”情景平均提高了约 7.90×10^4 元,最高差值也约为 3.77×10^6 元。

表 5 各情景下的线性优化结果效益值

Table 5 Benefit values of linear optimization results under each scenario

项目		情景 1								
效益类别	情景名	坡改梯比例								
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
水土保持效益/ 10^4 t	目标 1 优先	51.1	93.4	132.0	167.5	200.6	234.6	264.0	293.6	320.7
	目标 2 优先	29.4	57.9	87.2	118.8	157.4	189.6	226.3	265.2	301.3
	权衡	38.7	77.3	115.5	143.2	176.8	214.9	247.2	279.2	312.5
作物增值经济效益/ 10^5 元	目标 1 优先	119.6	293.4	501.0	697.6	876.1	1 058.5	1 259.1	1 454.8	1 781.1
	目标 2 优先	352.4	591.3	859.3	1 077.7	1 267.5	1 457.0	1 618.5	1 749.7	1 874.5
	权衡	318.1	539.6	733.3	946.0	1 160.1	1 327.7	1 521.3	1 699.1	1 843.3
项目		情景 2								
效益类别	情景名	坡改梯比例								
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
水土保持效益/ 10^4 t	目标 1 优先	51.1	93.4	132.0	167.5	200.6	234.6	264.0	293.6	320.7
	目标 2 优先	25.1	57.9	85.6	116.3	151.4	186.8	225.5	261.4	300.9
	权衡	45.7	84.6	124.7	159.4	193.0	224.6	259.1	288.6	317.8
作物增值经济效益/ 10^5 元	目标 1 优先	119.6	293.4	501.0	697.6	876.1	1 058.5	1 259.1	1 454.8	1 781.1
	目标 2 优先	285.0	511.8	709.7	989.5	1 228.2	1 380.2	1 572.3	1 735.5	1 862.6
	权衡	220.5	443.2	591.4	785.5	990.5	1 170.7	1 347.0	1 529.2	1 759.2

3.3.2 作物增值经济效益与水土保持效益权衡的帕累托前沿 为了揭示本作物增值经济效益与水土保持效益权衡关系,在优化过程中每种坡改梯比例下由 101 组权重来构建目标函数,并进行优化求解(图 8)。结果显示,随着坡改梯面积上升,作物增值经济效益与水土保持效益的值也相应上升。但社会经济效益与水土保持效益目标之间存在着明显的权衡关系(图 9)。优化模型中目标 1 和目标 2 的值随着权重系数(取 0~1)发生变化。具体表现为目标 1,2 的数值随着对应目标的权重系数提升而提升。随着坡改梯面积的上升,目标 1 的水土保持效益以及目标 2 的作物增值经济效益均得到了增长,同时情景 1 与情景 2 之间的各坡改梯面积限制条件下,曲线取值的范围是近似的,且目标值分布近似于弧形。其中非劣解(非劣解是指在所给可供选择的方案集中,已找不到使每

一目标都能改进的解^[19])表明随着水土保持效益的提升,作物增值量有所下降,这表明两个目标之间存在一定的权衡关系,无法同时实现水土保持效益与作物增值量均最大。

在实际应用中,非劣解通常是决策者较为关注的解集,此解集提供多个目标相互权衡情况下的可行解。如在 20% 坡改梯比例下,当作物增值效益在 4.40×10^7 元以上,或是水土保持效益在 8.46×10^5 t 以上时,此时的解集为非劣解;这部分的解集为决策者提供了较高的水土保持效益或较高的作物增值效益。在实际应用中,决策者可以根据当地的实际情况、政策导向等,选择某一个非劣解进行实施和应用。图 9 进一步分析了不同权重系数下非劣解在所有解集中的比例(情景 1 与情景 2 的情况相同)。结果显示,当权重系数靠近 0 或 1 时,能够产生更多的非劣

解,非劣解总数及比例也相应提高。实际上,如何搜索到非劣解一直是空间优化中的关键问题之一^[20],目前的研究探讨了方法模型、参数设置、目标设定等对

非劣解搜索效率的影响^[21]。本研究采用线性优化方法,采用多权重组合来搜索非劣解的方法丰富了现有研究。

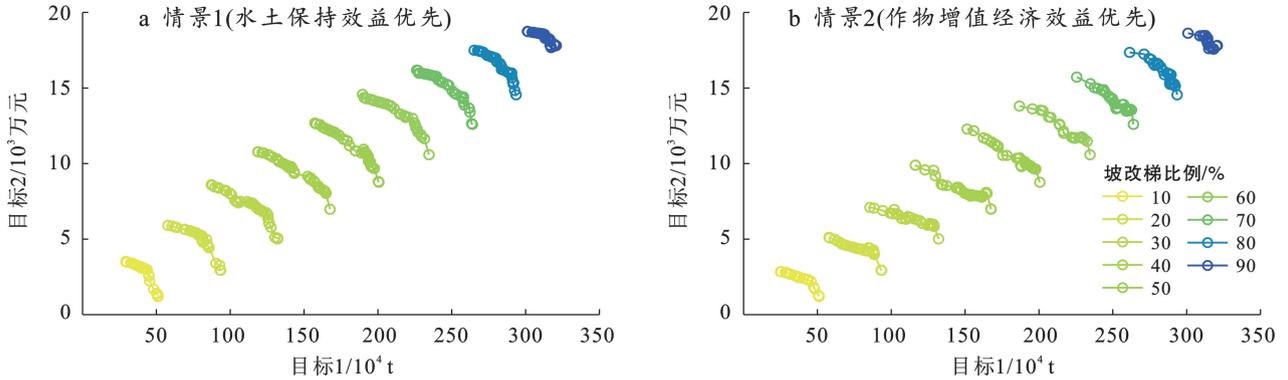


图8 不同情景下坡改梯面积限制条件下作物增值经济效益与水土保持效益的权衡关系

Fig.8 Tradeoff relationship between crop increment economic benefit and soil and water conservation benefit under different constraints of area

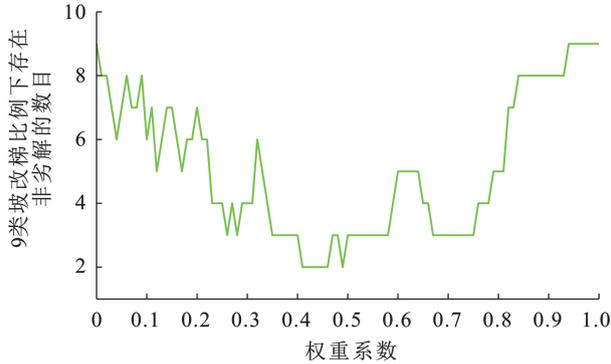


图9 不同坡改梯比例情景下的非劣解情况

Fig.9 Situation of non-inferior solution under different proportion of changing slope cropland to terrace

4 讨论

本研究以小流域为研究单元,揭示坡改梯建设中水土保持效益与作物增值经济效益之间的权衡关系,提出因地制宜分配坡改梯建设量的建议。以小流域为单元开展水土流失治理是中国水土流失治理的发展趋势,识别出需要优先治理的小流域是一种高效合理促进水保工作的方法^[22]。本研究通过空间优化的方式量化不同目标优先情景下各小流域最优的坡改梯建设数量与中国实际的水保工作需要相符的,具有现实意义。

在优化过程中主要探讨了坡改梯建设中水土保持效益与作物增值经济效益二者之间的权衡关系,及其所导致的坡改梯工程在空间上分布的差异性。目前对水土保持措施相关研究中,权衡其生态效益与经济效益间的关系十分普遍。如许尔琪等^[23]认为在退耕还林过程中增加防治侵蚀量与减少粮食产量的损

失之间存在显著的权衡,因而可从土地利用面积分配的角度来寻找权衡最优的土地利用情景。而坡改梯建设的特殊之处在于,其对水土保持及经济效益均存在正向作用,但这种正向效益在不同空间位置有显著差异。因此更需要关注在不同的区域条件下坡改梯建设的具体效益值。未来的优化工作可以更全面及深入地评估坡改梯建设的区位条件及其对效益的影响,例如量化降水、海拔、地形等自然因素^[24]对坡改梯建设的生态效益及经济效益的影响,坡耕地与村镇及道路间的距离^[25]可能改变坡改梯工程的建设成本,在不同坡度下进行坡改梯所实施的梯田类型及成本也有所不同^[26]。此外有研究^[27]指出,在管理不善的情况下,梯田反而会引起许多负面效应,如加剧土壤侵蚀,恶化土壤质量等。目前梯田撂荒的现象在世界范围内普遍存在,如中国^[28]与地中海地区^[29]。在中国,梯田的撂荒被认为与劳动力情况、户主年龄、交通条件、耕地细碎程度等因素相关^[30],因此在优化配置坡改梯建设时,如何更好地避免撂荒现象也是未来可以深入探索的内容之一。最后,在后续研究中,可以采用非线性、空间化的优化方法以实现栅格尺度上的优化,实现从更精细的尺度描述、揭示坡改梯建设社会经济生态效益的空间差异及权衡。

5 结论

(1) 通过高分影像遥感解译结果显示丹江口市内梯田与坡耕地主要集中在中部及北部的流域内,在南部分布较少。水土保持效益计算的结果表明,在丹江口市的西南部单位面积梯田带来的水土保持效益更高(即单位面积梯田与坡耕地土壤侵蚀的差值),但

此区域梯田与坡耕地的总面积较少。而作物增值经济效益较高的流域主要集中在东部及北部的流域内,分布在丹江口水库周边等人口较多的地带。

(2) 线性优化的空间分布结果表明,坡改梯建设过程中的水土保持效益和作物增值经济效益提升之间存在一定权衡关系。对两类目标分别进行优化的结果显示坡改梯建设的空间分布存在比较明显的差异性,其中水土保持效益要求优先对西南处流域进行坡改梯,而作物增值经济效益则是优先在中部流域内进行坡改梯建设。

(3) 不同情景下坡改梯建设空间优化结果显示,坡改梯面积的提升会直接增加水土保持效益及作物增值经济效益的数值,但各坡改梯面积限制条件下,目标之间仍存在着明显的权衡关系。基于线性优化结果,决策者可以根据当地的实际情况、政策导向等,选择某一个非劣解的空间优化方案进行坡改梯工程的建设,满足区域内发展的特定需要。

参考文献 (References)

- [1] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J].地理学报,2015,70(9):1503-1515.
Gao Haidong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree [J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(9):1503-1515.
- [2] Chen Die, Wei Wei, Chen Liding. Effects of terracing on soil properties in three key mountainous regions of China [J]. Geography and Sustainability, 2021,2(3):195-206.
- [3] 陈蝶,卫伟,陈利顶,等.梯田生态系统服务与管理研究进展[J].山地学报,2016,34(3):374-384.
Chen Die, Wei Wei, Chen Liding, et al. Progress of the ecosystem services and management of terraces [J]. Mountain Research, 2016,34(3):374-384.
- [4] 张玥,郭学锋,韩剑桥,等.黄土高原近 40 年梯田建设的土壤固碳效益初步估算[J].水土保持学报,2024,38(4):190-197.
Zhang Yue, Guo Xuefeng, Han Jianqiao, et al. Preliminary estimation of soil carbon sequestration benefits of terrace construction on the Loess Plateau in the past nearly 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):190-197.
- [5] 陈蝶,卫伟,陈利顶.梯田景观的历史分布及典型国际案例分析[J].应用生态学报,2017,28(2):689-698.
Chen Die, Wei Wei, Chen Liding. History and distribution of terraced landscapes and typical international cases analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2):689-698.
- [6] 谭少军,邵景安.基于生态适宜性评价的西南丘陵区土地整治工程布局研究[J].地理研究,2018,37(4):659-677.
Tan Shaojun, Shao Jingan. Land consolidation project layout based on ecological suitability evaluation in hilly areas of Southwest China [J]. Geographical Research, 2018,37(4):659-677.
- [7] Wang Jia, Liu Jiahong, Wang Hao, et al. Approaches to multi-objective optimization and assessment of green infrastructure and their multi-functional effectiveness: A review [J]. Water, 2020,12(10):2714.
- [8] 包蕊,刘峰,张建平,等.基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化[J].生态学报,2018,38(3):812-828.
Bao Rui, Liu Feng, Zhang Jianping, et al. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiayiyu small watershed in the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(3):812-828.
- [9] 谭传东,洪歌,吴雪飞.协同生态系统服务与公平性的城市绿色空间配置优化:以武汉市中心城区为例[J].现代城市研究,2024(7):24-29.
Tan Chuandong, Hong Ge, Wu Xuefei. Synergizing ecosystem services and equity in allocation optimization of urban green space: A case study of the central urban area of Wuhan [J]. Modern Urban Research, 2024(7):24-29.
- [10] Xie Wei, Zhu Anfeng, Ali Ttaiq, et al. Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China [J]. Nature, 2023,616618(7966):300-305.
- [11] Li Zeng, Li Jing, Zhou Zixiang, et al. Optimizing land use patterns for the grain for Green Project based on the efficiency of ecosystem services under different objectives [J]. Ecological Indicators, 2020,114:106347.
- [12] 李海燕.丹江口市水土保持工作成效及发展对策[J].中国水土保持,2021(12):64-66.
Li Haiyan. Achievements and development countermeasures of soil and water conservation in Danjiangkou City [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(12):64-66.
- [13] 廖雯,胡砚霞,于兴修,等.丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能时空特征及其影响因素[J].水土保持通报,2021,41(6):288-294,376.
Liao Wen, Hu Yanxia, Yu Xingxiu, et al. Spatiotemporal variation and influence factors of soil conservation function in Danjiangkou Reservoir Area during 2010—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):288-294,376.
- [14] 丹江口市统计局.丹江口市 2023 年国民经济和社会发

- 展统计公报[EB/OL].2024,(2024-5-27)[2024-8-10].
http://www.djk.gov.cn/xxgk/bmxdh/zfbm/tjj/zfxxgk_83736/fdzdgdgk_1/tjxx/202405/t20240527_4533301.shtml.
- Danjiangkou Municipal Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of National Economic and Social Development of Danjiangkou City in 2023 [EB/OL].2024,(2024-5-27)[2024-8-10]. http://www.djk.gov.cn/xxgk/bmxdh/zfbm/tjj/zfxxgk_83736/fdzdgdgk_1/tjxx/202405/t20240527_4533301.Shtml.
- [15] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [16] 章文波,刘宝元.基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J].水土保持学报,2003,17(2):89-92.
Zhang Wenbo, Liu Baoyuan. Development of Chinese soil loss equation information system based on GIS [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003,17(2):89-92.
- [17] 毛馨.基于土壤侵蚀控制潜力的丹江口市小流域治理优先级研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2023.
Mao Xin. Study on the priority of watershed management in Danjiangkou City based on soil erosion control potential [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [18] Zeng Yi, Ran Lishan, Fang Nufang. How to balance green and grain in marginal mountainous areas [J]. *Earth's Future*, 2022,10(5):e2021 EF002552.
- [19] 高培超,王昊煜,宋长青,等.多目标优化 NSGA 系列算法与地理决策:原理、现状与展望[J].地球信息科学学报,2023,25(1):25-39.
Gao Peichao, Wang Haoyu, Song Changqin, et al. NSGA multi-objective optimization algorithms and geographic decision-making: Principles, state of the art, and the future [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2023,25(1):25-39.
- [20] Lee L H, Chew E P, Teng S Y, et al. Finding the non-dominated Pareto set for multi-objective simulation models [J]. *IIE Transactions*, 2010,42(9):656-674.
- [21] Yang Junie, Zhou Jianzhong, Liu Li, et al. A novel strategy of pareto-optimal solution searching in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2008,57(11):1995-2000.
- [22] 程冬兵,赵元凌,孙宝洋,等.小流域水土流失治理优先度的评价与应用[J].农业工程学报,2023,39(22):104-111.
Cheng Dongbin, Zhao Yuanlin, Sun Baoyang, et al. Evaluation and application of the management priority of soil erosion in small watersheds [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(22):104-111.
- [23] 许尔琪,李婧昕.干旱区水资源约束下的生态退耕空间优化及权衡分析:以奇台县为例[J].地理研究,2021,40(3):627-642.
Xu Erqi, Li Jingxin. Spatial optimization of ecological cropland conversion and trade-off analysis under water resources restriction in the arid region: Taking Qitai County as a case study [J]. *Geographical Research*, 2021,40(3):627-642.
- [24] 邓刚,张富,马瑞,等.以坡耕地梯田化促进农业产业化发展对策[J].中国水土保持,2022(3):5-8.
Deng Gang, Zhang Fu, Ma Rui, et al. Countermeasures for promoting the development of agricultural industrialization by terracing sloping farmland [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022(3):5-8.
- [25] 高云飞,王丽云,王惠泽,等.新时期黄土高原旱作梯田建设思路[J].中国水土保持,2020,(9):73-75.
Gao Yunfei, Wang Liyun, Wang Huize, et al. Thoughts on the construction of dry farming terraces in the Loess Plateau in the new period [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(9):73-75.
- [26] Chen Die, Wei Wei, Chen Liding. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017,173:109-121.
- [27] Deng Chuxiong, Zhang Guangye, Liu Yaojun, et al. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021,9(3):344-359.
- [28] Dong Shijie, Xin Liangjie, Li Shengfa, et al. Extent and spatial distribution of terrace abandonment in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023,33(7):1361-1376.
- [29] Djuma H, Bruggeman A, Zissimos A, et al. The effect of agricultural abandonment and mountain terrace degradation on soil organic carbon in a Mediterranean landscape[J]. *Catena*, 2020,195:104741.
- [30] 王亚辉,杨邀邨,辛良杰,等.中国不同类型耕地撂荒时空分异及其影响因素研究:基于全国 346 个山区县的调查数据[J].地理研究,2024,43(8):1977-1993.
Wang Yahui, Yang Aoxi, Xin Liangjie, et al. Spatial and temporal differentiation and influencing factors of fallowing in different types of farmland in China: Based on survey data from 346 mountainous counties [J]. *Geographical Research*, 2024,43(8):1977-1993.