

DOI: 10.11766/trxb202511140546

CSTR: 32215.14.trxb202511140546

杨圆圆, 孔维锦, 唐颖, 刘拓宏, 李渝, 刘彦伶, 张雅蓉, 刘新敏, 李航. 西南地区黄壤旱作中低产田空间分布与产能提升潜力[J]. 土壤学报, 2026,

YANG Yuanyuan, KONG Weijin, TANG Ying, LIU Tuohong, LI Yu, LIU Yanling, ZHANG Yarong, LIU Xinmin, LI Hang. Spatial Distribution and Potential Productivity of Medium- and Low-Yield on Yellow Soil Drylands in Southwest China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

西南地区黄壤旱作中低产田空间分布与产能提升潜力*

杨圆圆¹, 孔维锦¹, 唐颖^{1†}, 刘拓宏¹, 李渝², 刘彦伶², 张雅蓉²,
刘新敏¹, 李航¹

(1. 西南大学资源环境学院, 界面过程与土壤健康重庆市重点实验室, 重庆 400715; 2. 贵州省土壤肥料研究所, 贵阳 550006)

摘要:西南地区四川、重庆、贵州、云南四省(市)是我国黄壤旱作耕地的核心分布区, 该区域中低产田比例高、产能提升难度大, 精准识别障碍因子与量化产能潜力对保障粮食安全至关重要。本研究基于2010—2018年中国高分辨率国家土壤信息格网数据集(90 m)等多源数据, 构建耕地质量等级评价指标体系, 利用最优参数地理探测器与归一化植被指数(NDVI)量化粮食产量, 系统解析西南黄壤旱作中低产田的空间分布特征、障碍因子及产能提升潜力。结果表明: (1) 区域耕地破碎化程度高, 中低产田面积达344.42万hm², 占比89.71%, 分布面积依次为贵州省 > 四川省 > 云南省 > 重庆市。(2) 农田管理(灌溉能力, $q=0.60$)和立地条件(地形部位, $q=0.26$)是质量提升的关键障碍因子, 理化性状中pH-容重-有机质协同障碍显著。(3) 中低产田粮食产量呈“高值斑块镶嵌于连片低值区”的分布特征, 且随着耕地质量等级提升呈先平稳增加后快速上升的变化趋势。(4) 情景模拟显示, 中低产田耕地质量提升0.5、1.0、1.5和2.0个等级时, 区域粮食产量可阶梯式增加2.94%、5.24%、8.04%和11.47%, 相当于节约6.18~24.10万hm²耕地。(5) 初步分析了西南地区黄壤旱作中低产田耕地质量等级提升和产能增效的可能实现路径与难度。本研究系统揭示了西南黄壤旱作耕地中低产田的障碍机制与提升潜力, 研究成果可为该区域实施“障碍诊断-质量提升-产能增效”的治理策略提供科学依据。

关键词: 西南地区; 黄壤旱作耕地; 中低产田; 耕地质量; 产能提升

中图分类号: S15

文献标志码: A

Spatial Distribution and Potential Productivity of Medium- and Low-Yield on Yellow Soil Drylands in Southwest China

YANG Yuanyuan¹, KONG Weijin¹, TANG Ying^{1†}, LIU Tuohong¹, LI Yu², LIU Yanling², ZHANG Yarong², LIU

*国家重点研发计划项目(2023YFD1900300)、中央高校基本科研业务费专项资金(SWU-KT26033)和国家自然科学基金项目(42007339)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China(No.2023YFD1900300), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.SWU-KT26033) and National Natural Science Foundation of China(No.42007339)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: tying920@swu.edu.cn

作者简介: 杨圆圆(1999-), 女, 贵州榕江人, 硕士研究生, 主要从事土壤耕地质量与制图研究。E-mail: 19823760426@163.com

收稿日期: 2025-11-14; 收到修改稿日期: 2026-08-05; 网络首发日期(www.cnki.net):

Xinmin¹, LI Hang¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Interface Process and Soil Health, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Guiyang 550006, China)

Abstract: 【Objective】Sichuan, Chongqing, Guizhou, and Yunnan Province in Southwest China constitute the core distribution area of yellow soil drylands in China. This region is characterized by a high proportion of medium- and low-yield croplands, facing significant challenges on agricultural productivity enhancement. Consequently, precisely identification of limiting factors and quantification of yield potential is critical to ensure national food security. 【Method】This study constructed a comprehensive cultivated land quality evaluation framework based on multi-source geospatial datasets, including the High-resolution National Soil Information Grid of China (90 m resolution) from 2010 to 2018. By employing the optimal parameters-based geographical detector model and the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)-based grain yield estimation approach, the spatial distribution, constraining factors, and productivity enhancement potential of medium- and low-yield croplands on yellow soil drylands in Southwestern China were systematically analyzed. 【Result】The results showed that: (1) The regional drylands exhibited distinct spatial fragmentation. Medium- and low-yield croplands covered 3.4442 million hectares, accounting for 89.71% of the total cropland area, with a spatial distribution ranking: Guizhou Province > Sichuan Province > Yunnan Province > Chongqing Municipality. (2) Field management (e.g., irrigation capacity, $q = 0.60$) and site natural conditions (e.g., terrain position, $q = 0.26$) were the key constraining factors limiting cultivated quality improvement. Among soil physicochemical properties, synergistic constraints involving pH, bulk density, and soil organic carbon (SOC) content were identified as statistically significant limiting mechanisms. (3) Grain yield in medium- and low-yield croplands showed a heterogeneous spatial distribution pattern, charactering as "high-value patches embedded within contiguous low-value zones". It increased gradually at lower grades, followed by accelerated increases upon reaching higher quality thresholds. (4) Scenario-based simulations indicated that improving the cultivated land quality grade of medium- and low-yield croplands by 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 grades would increase regional grain yield by 2.94%, 5.24%, 8.04%, and 11.47%, respectively, equivalent to conserving 61 800~241 000 hectares of cropland area. (5) Feasible pathways and implementation challenges associated with quality improvement and productivity enhancement for medium- and low-yield croplands on yellow soil drylands in Southwest China were preliminarily analyzed. 【Conclusion】This study systematically reveals the obstacle mechanisms and improvement potential of medium- and low-yield yellow soil drylands in Southwest China, thus can provide a scientific basis for implementing the governance strategy of "obstacle diagnosis-quality improvement-productivity enhancement" in this region.

Key words: Southwest China; Yellow soil dryland farmland; Medium- and low-yield croplands; Cultivated land quality; Productivity enhancement

粮食是人民生活的必需品，粮食安全对国家稳定、经济发展、民生保障以及国际战略格局均具有重要影响^[1]。2004 年至 2022 年，我国连续 19 年发布的中央一号文件将“粮食安全”作为重要内容^[2]，而在 2022 年和 2023 年的中央一号文件中，更是将“保障国家粮食安全”和“防止规模性返贫”列为当前工作的两条底线任务^[3]。自新冠肺炎疫情爆发和俄乌冲突以来，世界粮食价格出现较大波动，全球粮食贸易量同比降低了 2.6%^[4]。受国际动荡局势和国内粮食生产力水平的双重影响，我国粮食安全面临诸多问题和挑战。西南地区作为我国六大粮食主产区之一，承担着国家粮食生产战略大后方的重要角色，然而，近十年来该区域粮食产量占中国粮食总产量的比重由 12.36% 下降至 11.31%^[5]。尽管过去 20 年该区域人均粮食占有量整体有所增长，但仍低于全国平均水平^[6]，反映出区域粮食自给能力不足。因此，提高西南地区粮食产能对于保障国家粮食安全、实现供需平衡以及维护多民族地区社会和谐稳定等均具有重要意义。

耕地是粮食生产的重要物质基础^[7]。西南地区粮食产量不足，一方面源于该区域在发展过程中因

耕地“非粮化”“非农化”现象和撂荒问题导致的耕地数量减少^[8]，另一方面也与区域独特的地形地貌、气候条件以及不合理利用所引起的耕地质量下降密切相关^[9]。西南地区季节性干旱和水资源短缺问题突出，耕地多为旱作坡耕地^[10]，主要土壤类型包括紫色土、红壤、黄壤和棕壤^[11]。其中，黄壤是西南地区分布最广、最具代表性的地带性土壤之一，占全国耕地总面积的 28%^[12]。黄壤在贵州省内分布尤为广泛，其面积分别占贵州省国土面积和土壤总面积的 41.90%和 46.40%，密集覆盖黔东、黔中、黔北、黔西北及黔西南山原地区^[13]，是该省最主要的农业土壤类型；重庆次之，黄壤占比为 28.00%，集中分布于渝东南等山地丘陵地带^[14]；云南省黄壤占比约 6.51%，主要分布于滇西、滇西南、滇东南湿润的较高山地地区^[15]；四川省黄壤耕地面积占总耕地面积的 9.35%（四川省第二次土地调查），且主要分布在四川盆地周围海拔较高的丘陵山区地带^[16]。独特的发生发育过程使得黄壤旱作耕地具有酸性强、质地黏重、养分贫瘠等特征，水分渗透性差，易造成地表径流，加剧水土流失^[17]。因此，黄壤旱作耕地中低产田比例通常较高，成为制约区域粮食安全与农业可持续发展的核心瓶颈。中低产田，是指土壤中存在一种或多种制约农业生产的障碍因素，导致单位面积产量相对低而不稳的耕地^[18]，系中产田和低产田的统称。因此，明确西南黄壤旱作中低产田的空间分布特征、障碍因素及其产能提升潜力，是研发区域耕地质量提升技术、保障国家粮食安全的重要前提和基础。

耕地质量等级评价法是判定研究区域中低产田的常用方法之一^[19]。目前，已有部分学者针对西南地区部分省市的耕地质量开展了初步研究。例如，黄厅厅等^[20]基于贵州省 1989—2010 年县域尺度耕地变化数据，结合区域耕地特征与土壤类型分布，构建了耕地质量评价指标体系，分析了全省耕地质量的时空演变规律。左媛月^[21]以四川省中江县丘陵区行政村建成的高标准农田为评价单元，综合土地利用数据、遥感影像和土壤检测结果，建立了适用于该区域的耕地质量评价指标体系，探讨了耕地质量等级空间分布格局及其空间异质性特征。然而，现有研究尚存在以下不足：首先，尚未对黄壤旱作耕地这一西南地区典型且具代表性的土地利用类型开展系统性评估；其次，在西南各省市耕地质量评价过程中，因数据来源、指标体系与评价方法存在显著差异，中低产田划分标准不统一，导致评价结果可比性不足；此外，尽管已有研究指出，黄壤酸性、黏重和养分贫瘠是制约其产能提升的关键障碍，但现有研究多局限于单一因子的描述性分析或变量间的线性相关性探讨，尚未系统揭示多因子间非线性关系及其协同/拮抗作用机制^[17]；最后，虽然情景模拟方法已被广泛应用于区域尺度产能潜力估算^[22]，但针对西南地区黄壤旱作耕地这一典型土地利用类型，尚缺乏对其产能提升潜力的系统性、定量化评估。

基于此，本研究依据《耕地质量等级》（GB/T 33469—2016）国家标准，构建西南地区黄壤旱作耕地质量等级评价指标体系，系统解析其质量等级、面积及空间分布特征；采用最优参数地理探测器识别影响中低产田耕地质量提升的关键自然、人为管理及理化障碍因子；结合 2010—2018 年区域统计年鉴中的粮食产量数据与归一化植被指数（NDVI）量化粮食产量的方法，明确中低产田粮食产能的空间格局及其与耕地质量等级之间的对应关系；最后通过情景模拟方法估算中低产田的产能提升潜力。研究成果有望填补西南地区黄壤旱作耕地质量与产能关系研究的空白，为区域内中低产田精准改良与高标准农田科学布局提供决策支持，对保障西南山地粮食安全、推动农业绿色可持续发展具有重要的实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

从行政区域划分来看，西南地区包括四川省、云南省、贵州省、重庆市及西藏自治区。受高原地理环境制约，西藏自治区耕地分布范围十分有限，其粮食产量多年来仅占西南地区总量的 1.3%左右^[5]，因此本文研究范围为贵州省、重庆市、四川省和云南省四个省（市）。研究区地理位置介于

21°08′—34°19′N、97°21′—110°11′E 之间,总耕地面积约 0.16 亿 hm^2 ,其中贵州省耕地面积约 276.60 万 hm^2 ,四川省约 639.45 万 hm^2 ,云南省约 460.23 万 hm^2 ,重庆市约 224.11 万 hm^2 。

本研究所采用的土壤属性数据,包括有效土层厚度、有机质、质地、容重、全磷、全钾、pH 和阳离子交换量,均来源于中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018)中的土壤表层(0~15 cm)属性空间分布图集,空间分辨率为 90 m,能够充分代表 2010—2018 年我国土壤属性的空间变异特征。该数据集由国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心—土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)公开发布;土壤类型数据采用 2018 年 1:100 万比例尺的全国土壤类型图(<https://www.resdc.cn/>);土地利用数据来源于武汉大学土地利用(China Land Cover Dataset, CLCD)数据集,空间分辨率为 30 m,时间跨度为 2010—2018 年^[23],根据国土资源部土地利用现状分类标准,重分类为 6 种类型;行政区划数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>);数字高程模型(DEM)数据采用中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的中国 30 m DEM (ASTER DEMv3),坡度通过 ArcGIS 10.8 软件由 DEM 提取;运用欧氏距离工具测算耕地至水源、沟渠、农村道路的最近距离,分别表征耕地的灌溉能力、排水条件和道路通达度;粮食产量数据来源于 2010—2018 年四省(市)政府公布的统计年鉴、各城市国民经济和社会发展统计公报、各地级市统计年鉴等,覆盖区、县、县级市共 438 个行政单元,经整理得到各单元 2010—2018 年年均粮食产量;植被指数(NDVI)数据来源于中国 30 m 逐年 NDVI 最大值数据集,取自资源环境科学数据注册与出版系统^[24]。所有空间数据均经 ArcGIS 10.8 软件处理,考虑到 90 m 为国家尺度土壤制图的最优分辨率^[25],因此,空间数据统一重采样至 90 m 空间分辨率,投影坐标系统一采用“WGS_1984_UTM_Zone_50N”。

1.2 研究方法

(1)耕地质量等级计算。本研究采用耕地质量等级评价法评估西南地区黄壤旱作耕地质量状况。通过叠加土地利用、土壤 pH、土壤类型及行政区划数据确定评价单元,并依据《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)国家标准,整合地形与土壤属性等多源空间数据,构建了耕地质量等级评价指标体系。具体评价步骤如下:

首先,针对西南地区黄壤旱作耕地特点,以 90 m×90 m 栅格为最小评价单元。根据本研究区域的自然条件和实地状况,耕地质量指标由基础性指标和区域性补充指标组成,将各要素划分为目标层、准则层和指标层 3 个层次,采用层次分析法确定各评价指标的权重(表 1)。

表 1 耕地质量等级评价指标权重

Table 1 Evaluation index weights for cultivated land quality grades

目标层	准则层	指标层	指标类型	指标权重
Target layer	Criterion layer	Indicator layer	Indicator type	Indicator weight
耕地质量 Cultivated land quality	立地条件 Site condition	地形部位	基础性指标	0.1397
		有效土层厚度	基础性指标	0.0974
		海拔	区域补充性指标	0.0666
	理化性状 Physical and chemical properties	坡度	基础性指标	0.0353
		质地	基础性指标	0.0843
		容重	基础性指标	0.0442
		酸碱度	区域补充性指标	0.0598
		阳离子交换量	基础性指标	0.0320
		有机质	基础性指标	0.1072

农田管理 Farmland management	全磷	基础性指标	0.0644
	全钾	基础性指标	0.0601
	灌溉能力	基础性指标	0.1154
	排水能力	基础性指标	0.0716
	道路通达度	基础性指标	0.0220

其次,根据模糊数学基本原理,将评价指标与耕地质量之间的关系分为戒上型函数、戒下型函数、峰型函数、直线型函数和概念型 5 种类型。其中,有机质、全钾、有效土层厚度对耕地质量呈正向影响,满足戒上型函数;土壤容重、pH、全磷对耕地质量呈抛物线影响,满足峰型函数;海拔与耕地质量呈直线关系,满足直线型函数。除以上数值型指标外,概念型指标包括灌溉能力、质地、排水能力、坡度、道路通达度、地形部位和土壤阳离子交换量,依据《四川省耕地质量等级评价技术规范》(DB51/T 2723—2020),采用特尔斐法直接给出隶属度。

最后,计算耕地质量综合指数及划分耕地质量等级,采用累加法计算耕地质量综合指数:

$$P = \sum_{i=1}^n (C_i \times F_i) \quad (1)$$

式中, P 为耕地质量综合指数, C_i 为第 i 个评价指标的组合权重, F_i 为第 i 个评价指标的隶属度。

根据评价单元耕地质量综合指数结果,采用累积频率曲线法确定分级标准,参考《四川省耕地质量等级评价技术规范》(DB51/T 2723—2020),将耕地质量划分为 10 个等级。耕地质量综合指数越大,耕地质量水平越高,其中,1 等地耕地质量最高,10 等地耕地质量最低。依据《2019 年全国耕地质量等级情况公报》标准分级,1~3 等地为高产田,4~6 等地为中产田,7~10 等地为低产田。

(2) 最优参数地理探测器。地理探测器是一种基于空间统计的分析方法^[26],能有效揭示空间分异性及其背后的驱动因子^[27]。相较于传统离散化方法,最优参数地理探测器可显著降低人为干预引入的主观误差和离散化结果的不稳定性^[28]。该方法是利用 R 语言中的 GD 包^[29],将分类等级设置为 3 至 7 类,通过系统组合连续型变量的多种离散化方法与分类数,从中筛选出 q 值最大的离散化方案作为最优分析参数^[30]。本研究采用地理探测器中的因子探测器识别各影响因子对西南地区黄壤旱作中低产田空间分布的影响强度,同时通过交互探测器分析因子间的相互作用,评估其对耕地质量空间分布的联合影响效应。

(3) NDVI 量化粮食产量。NDVI 能有效反映植被生长状况,被广泛应用于植被动态监测和作物产量预测^[31-32]。本研究通过栅格 NDVI 值与耕地总 NDVI 值的比值,将粮食产量分配到栅格单元中。经验证,NDVI 比例分配得到的各区县粮食产量与统计年鉴收集整理得到的数据整体高度吻合,说明该方法能够有效反映粮食产量的空间分布特征。具体计算公式如下:

$$G_i = \left(\frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \right) \times G_{sum} \quad (2)$$

式中, G_i 为栅格 i 的粮食产量, $NDVI_i$ 为栅格 i 的归一化植被指数, $NDVI_{sum}$ 表示耕地栅格归一化植被指数总和, G_{sum} 表示研究区粮食总产量。

1.3 情景分析

为探究西南地区黄壤旱作中低产田的产能提升潜力,本研究基于 2010—2018 年四省(市)统计年鉴中的耕地粮食总产量数据,通过 NDVI 量化粮食产量,对黄壤旱作中低产田范围进行掩膜提取,进而利用趋势函数(TREND)预测其 2035 年产量水平^[33]。依据“十四五”规划中关于《北方干旱半干旱和南方红黄壤等中低产田产能提升科技创新》的任务部署,核心示范区坡耕地质量需平均提升 1~2 个等级。在此政策导向基础上,参考李玉浩等^[22]和陈卓^[33]在相关研究中的等级提升梯度设置情况,本研究在保持现有耕地等级和面积不变的前提下,设定耕地质量等级分别提升 0.5、1、1.5 和 2 个等级四种情景,初步评估西南地区黄壤旱作中低产田的产能提升潜力。

1.4 数据管理

采用 Excel2019、ArcMap10.8、Python、RStudio、Origin、SPSS 软件对数据进行处理分析与图件制作。

2 结果与讨论

2.1 西南地区黄壤旱作中低产田的空间分布规律

2.1.1 西南地区黄壤旱作耕地质量等级空间分布 西南地区四省（市）黄壤旱作耕地总面积为 392.69 万 hm^2 ，占区域总耕地面积的 19.22%，主要分布在云贵高原、四川盆地周边山地及丘陵地带，尤以贵州高原、滇中高原、川中丘陵、川南山地以及重庆丘陵山地区最为集中。根据耕地质量等级评价结果（图 1a），黄壤旱作耕地质量的空间分布差异显著，图斑破碎化明显，整体呈现“中产主导，低产集聚”的空间分布格局。进一步量化分析表明（图 1b），黄壤旱作耕地平均质量等级为 5.02 等，高于全国（4.76 等）和西南地区（4.98 等）耕地平均等级（《2019 年全国耕地质量等级情况公报》），说明西南地区黄壤旱作耕地质量相对较差。值得注意的是，黄壤旱作耕地中产田（4~6 等地）面积为 284.88 万 hm^2 ，占比为 72.55%，显著高于全国中产田平均水平。低产田（7~10 等地）面积为 59.54 万 hm^2 ，占比约 15.16%，亦高于高产田（1~3 等地）占比（12.29%）。以上结果充分证明西南地区中产田比例较大，中产田既是区域粮食安全的压舱石，也是未来提质增效的核心潜力区^[34]。

需要指出的是，本研究采用统一的耕地质量等级评价指标体系进行区域评价，旨在揭示西南地区黄壤旱作耕地的整体特征与宏观规律。鉴于区域内各二级农林区的气候条件和立地背景等可能存在明显差异，后续研究可在本次宏观评价的基础上，进一步构建分区适配的评价指标体系和差异化权重，结合实测样点数据进行参数校正，以提升区域耕地质量等级评价结果的精度与针对性。

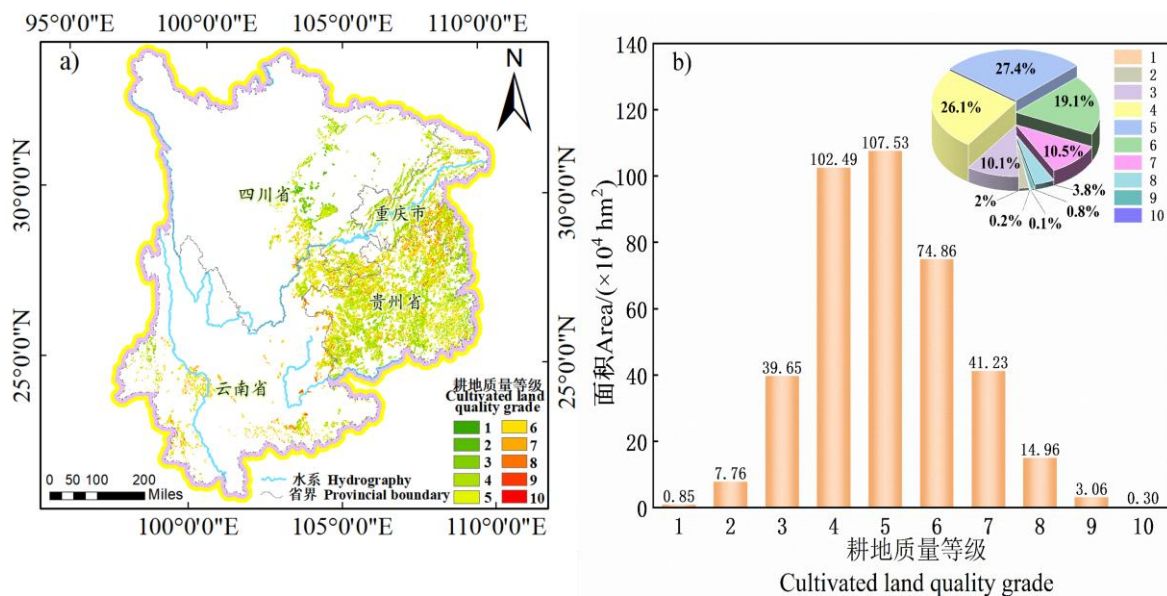


图 1 西南地区黄壤旱作耕地质量等级空间分布图（a）和各等级面积及占比（b）

Fig 1 Spatial distribution maps of quality grades of yellow soil drylands in Southwest China (a) and the area and proportion of each grade (b)

2.1.2 西南地区黄壤旱作中低产田空间分布特征 图 2 为各省（市）耕地质量等级空间分布及中低产田占比情况。研究表明，西南地区各省（市）黄壤旱作中低产田面积及占比差异显著，整体呈现

“云贵高、川渝略低”的分异特征。其中,贵州省黄壤旱作耕地面积最大,为 210.56 万 hm^2 , 中低产田占比达 90.37% (190.29 万 hm^2) (图 2a); 云南省黄壤旱作耕地面积为 54.65 万 hm^2 , 中低产田占比高达 97.15% (53.09 万 hm^2) (图 2d); 相较于贵州省和云南省而言,重庆市和四川省的中低产田占比相对较低,分别占其黄壤旱作耕地面积的 84.53% (47.66 万 hm^2) 和 75.09% (53.39 万 hm^2) (图 2b 和图 2c)。从空间分布来看,黄壤旱作中低产田在贵州省分布最广、面积最大,主要分布在黔中(开阳县)、黔北(德江县、思南县)、黔西(纳雍县)及黔南(平塘县、望谟县)山原地区;其在重庆市主要分布于渝东南(酉阳县、秀山县)和渝东北地区(云阳县、巫溪县);在四川省主要分布于盆地边缘的丘陵山区(安州区、通江县、古蔺县、叙永县);在云南省主要分布于滇西(盈江县)、滇西南(澜沧县)、滇东北(大关县、镇雄县)以及滇东南(屏边县、马关县)等山地地区。这些地区耕地基础质量偏低、土地碎块化程度高,再加上农田基础设施相对滞后、抗自然风险能力较弱等问题突出^[35],导致中低产田占比较高,耕地质量改良空间较大。

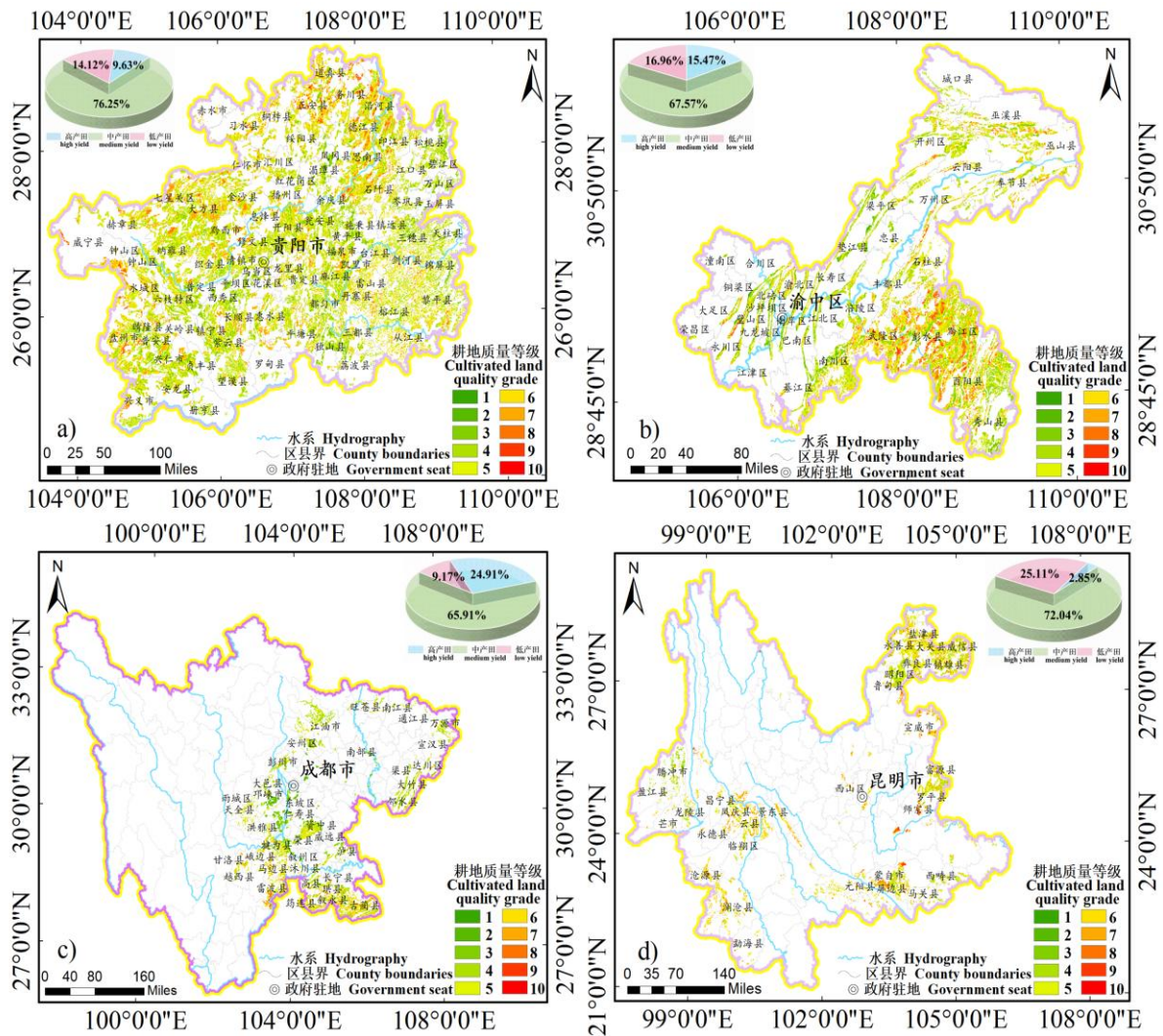


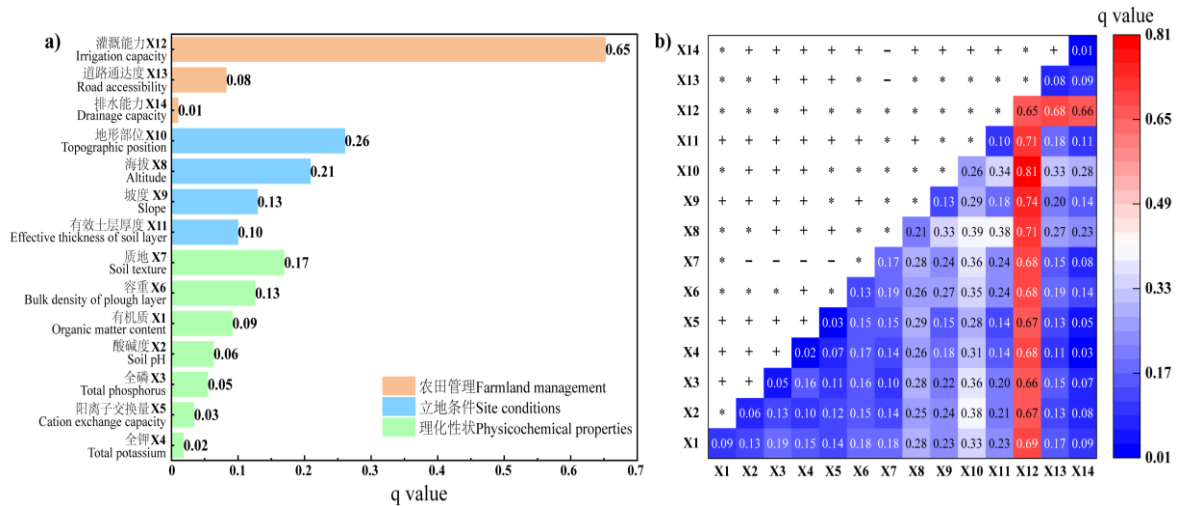
图2 贵州省(a)、重庆市(b)、四川省(c)、云南省(d)黄壤旱作耕地质量等级空间分布图及中低产田占比

Fig 2 Spatial distribution maps of cultivated land quality grades and proportions of medium- and low-yield yellow soil drylands in Guizhou (a), Chongqing (b), Sichuan (c), and Yunnan Province (d)

2.2 西南地区黄壤旱作中低产田障碍因子

中低产田耕地质量受多种因素的影响^[36], 定量解析这些障碍因素对耕地质量的影响强度是提升中低产田耕地质量的前提和基础。本研究采用最优参数地理探测器定量解析理化性状、立地条件及

农田管理等 14 个指标对西南地区黄壤旱作中低产田空间分布的影响作用。如图 3 所示, 单因子探测结果表明各因子的重要性排序为: 灌溉能力 ($q=0.65$) > 地形部位 ($q=0.26$) > 海拔 ($q=0.21$) > 质地 ($q=0.17$) > 坡度 ($q=0.13$) $\geq$ 容重 ($q=0.13$) > 有效土层厚度 ($q=0.10$) > 有机质 ($q=0.09$) > 道路通达度 ($q=0.08$) > 酸碱度 ($q=0.06$) > 全磷 ($q=0.05$) > 阳离子交换量 ($q=0.03$) > 全钾 ($q=0.02$) > 排水能力 ($q=0.01$)。该结果表明农田管理中的灌溉能力, 立地条件中的地形部位、海拔、坡度和有效土层厚度, 土壤理化指标中的质地、容重、有机质、酸碱度是西南地区黄壤旱作中低产田的主要障碍因子(图 3a)。进一步的交互因子探测结果表明(图 3b), 任意两个因子的交互作用均显著强于单个因子的独立影响, 主要表现为双因子增强或非线性增强。这表明西南地区黄壤旱作中低产田空间分布是多因子共同作用的结果^[37]。值得注意的是, 灌溉能力与所有其他因子的交互作用均表现出极强的显著性, q 值远高于其他因子间的 q 值, 且其与立地条件(如地形部位、海拔、坡度和有效土层厚度)的交互作用 q 值均大于 0.70, 说明立地条件和灌溉能力的交互作用共同奠定了西南地区黄壤旱作中低产田空间分异的基础框架, 同时也印证了水资源可及性是山地旱作农业生产提升的关键因素^[38]。



注: (a): 单因子探测; (b): 交互作用探测; “+”: 非线性增强; “*”: 双因子增强; “-”: 单因子非线性减弱。Note: (a): single-factor detection; (b): interaction detection; “+”: non-linear enhancement; “*”: two-factor enhancement; “-”: single-factor non-linear weakening.

图3 西南地区黄壤旱作中低产田障碍因子分析

Fig 3 Analysis of constraining factors in medium- and low-yield yellow soil drylands in Southwest China

黄壤旱作中低产田主要分布在海拔较高的山地(81.97%)和丘陵(17.22%)地区, 且分布区灌溉能力不满足和基本满足频率分别为 31.31%和 11.98%, 表层土壤质地类型以粉黏壤(30.26%)和黏壤(18.82%)为主。由此可见, 西南地区复杂地形条件极大地限制了降水和灌溉水的输配效率与田间持水性能, 同时广泛分布的黏重质地(粉黏壤、黏壤)土壤虽保水性强, 但在坡耕地上渗透性差, 易形成地表径流, 加剧土壤及其养分流失, 导致有效耕层浅薄、保水保肥能力弱, 严重制约耕地质量。这印证了前文障碍因素分析结果, 即立地条件和灌溉能力的交互作用共同奠定了西南地区黄壤旱作中低产田空间分异的基础框架。

西南地区亚热带季风气候带来季节性高温多雨, 促使土壤发生强烈的风化与淋溶作用。西南地区黄壤旱作中低产田表层土壤 pH 在 4.40~6.13 范围内, 整体呈现酸化趋势。在黄壤典型的脱硅富铝化过程中, 盐基离子大量流失, 氢离子与铝离子相对富集, 导致土壤呈酸性^[39]。而农民长期偏施氮肥(如尿素)的田间管理习惯进一步加速了酸化进程, 影响作物根系发育与养分吸收。土壤 pH 与

容重呈现双因子增强关系, 且其 q 值达到 0.15 (图 3 b), 这可能是由于土壤强烈的风化和酸化过程促进了氧化铁、高岭石等非膨胀性黏土矿物的形成, 导致土壤质地黏重、孔隙结构差^[40]。此外, 如图 3b 所示, 土壤 pH 与有机质、容重与有机质均呈现双因子增强关系, 且 q 值分别为 0.13、0.18, pH、容重对有机质产生双重影响。黄壤湿时黏韧、干时坚硬, 通气透水性不良, 加剧了坡地水土流失, 并带走细颗粒和可溶性有机质^[41-42]。酸性环境显著抑制细菌和放线菌等微生物的活性, 不利于土壤有机质腐殖化进程。同时, 又因土壤板结与酸铝胁迫导致的作物生物量下降, 加上秸秆还田率低, 外源有机物料输入不足^[43]。因此, 黄壤旱作耕地有机质在“量”与“质”上均难以提升。多数耕地有机质含量低于 2%, 且以易分解组分为主, 稳定性差。低有机质含量导致团聚体胶结物质不足, 土壤团聚度低、结构稳定性差, 进一步影响容重, 削弱土壤缓冲性能, 使酸化问题愈加突出。因此, 西南地区黄壤旱作耕地酸化加剧、结构板结和有机质缺乏三者相互影响, 形成协同障碍。此障碍模式与红壤、黑土等典型土壤类型的主导障碍模式存在明显差异, 其中, 红壤耕地质量主要受土壤酸化、速效氮等障碍因子影响^[44-45]。黑土耕地质量则主要受有机质、有效磷、速效钾等土壤肥力指标影响^[46-47]。

2.3 西南地区黄壤旱作中低产田粮食产能空间分布及提升潜力

2.3.1 西南地区黄壤旱作中低产田粮食产能空间分布特征 基于 NDVI 量化粮食产量, 得到西南地区黄壤旱作中低产田的粮食产能空间分布特征。由图 4a 可知, 该区域粮食产量空间分布呈现高度异质性, 高值区镶嵌于连片低值区, 主要分布在云贵高原山地及周边丘陵、重庆渝东南、渝东北山区以及四川盆地边缘山地。具体而言, 贵州省黄壤旱作中低产田粮食产量在 628.80~9556.20 kg·hm⁻² 范围内 (图 4b); 相较而言, 重庆市黄壤旱作中低产田粮食产量相对较高, 集中在 1362.25~9600.15 kg·hm⁻², 这可能是由于重庆相对平缓区域较易实施小型水利和精耕细作^[48] (图 4c); 四川省和云南省黄壤旱作中低产田的粮食产量分别在 1056.38~8725.20 kg·hm⁻²、628.80~8788.20 kg·hm⁻² 范围内 (图 4d 和图 4e)。相较于相同区域的紫色土和红壤, 黄壤的产量明显偏低。例如, 在三峡库区紫色土油菜—玉米轮作实验中, 油菜产量最高可达 3 492 kg·hm⁻², 玉米产量可达 8 757 kg·hm⁻² ^[49]。红壤区玉米和小麦经有机—无机配施可实现 10%~15% 的年均增产^[50], 而黄壤采用同样的施肥措施增效有限。

需要注意的是, 基于 NDVI 量化粮食产量也存在若干方法学局限。例如, 在高植被覆盖区, NDVI 易饱和, 难以精准区分高覆盖度下粮食作物的生长差异^[51-52]; 不同作物或同一作物不同生长阶段的物候差异也会导致 NDVI 与产量之间的相关性发生时空不匹配^[53]; 作物周边的森林、建筑或其他非粮作物会干扰 NDVI 的提取纯度, 增大估算结果的不确定性^[53]。尽管如此, NDVI 对地表植被覆盖度仍具有较强的敏感性, 能够较好地表征植被覆盖水平及产量信息特点, 在植被生长状态监测、部分辐射误差消除等方面有较强的适用性^[54]。本研究在应用 NDVI 量化西南地区黄壤旱作耕地粮食产量时, 已剔除 NDVI 值低于 0.3 的像元数据, 以排除裸土、休耕地及低覆盖非粮用地的干扰^[55]。因此, 综合考虑区域土地利用结构与数据预处理措施, 上述干扰因素对本研究产量估算结果的影响程度相对较小。

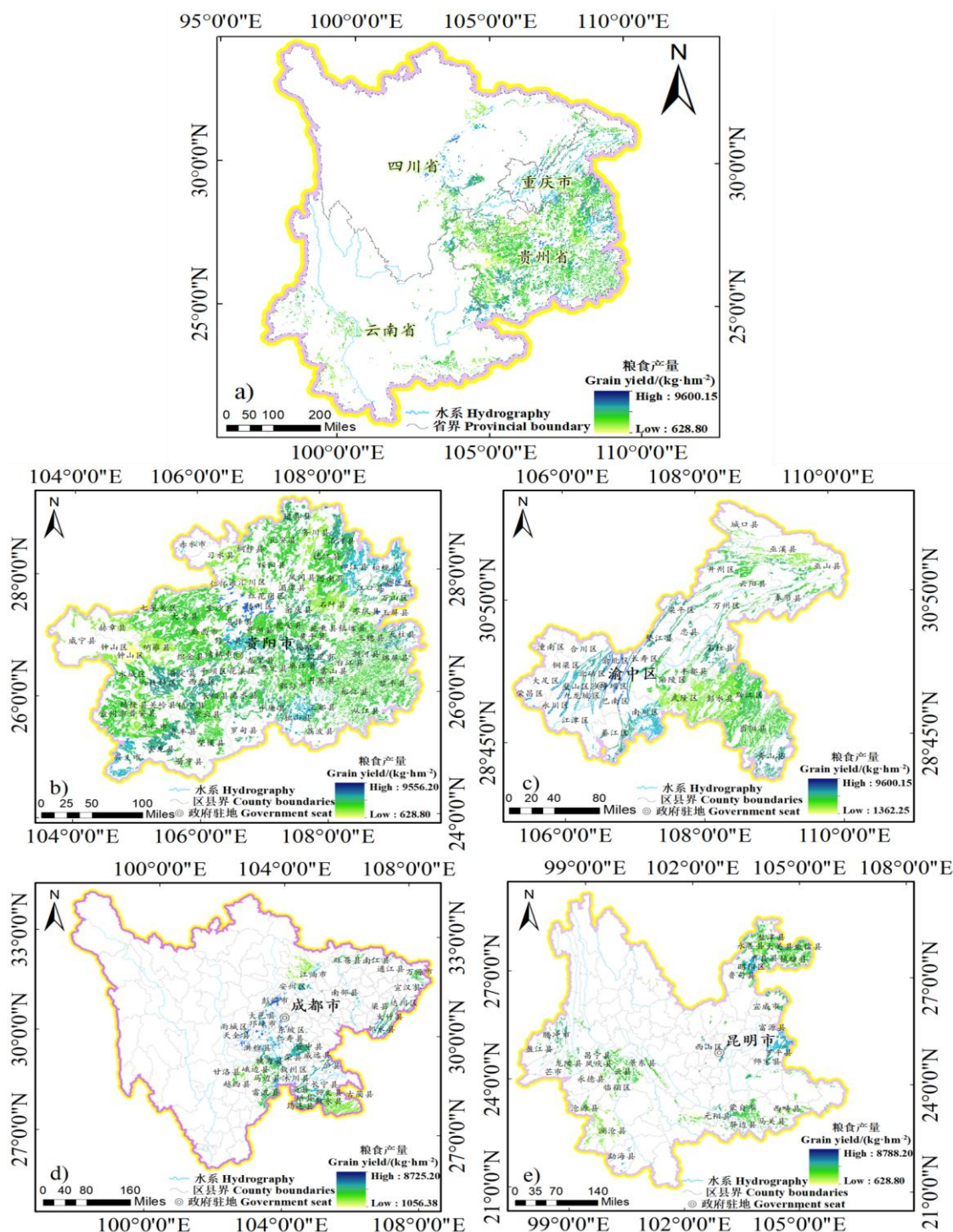


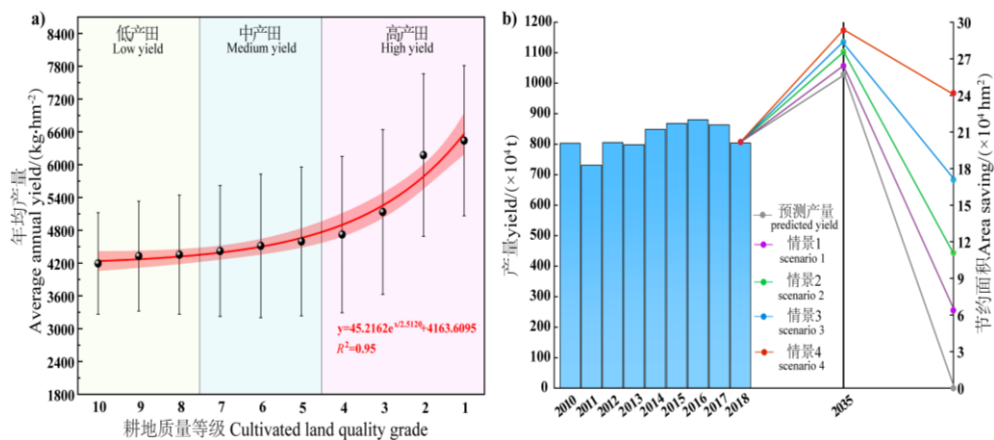
图4 西南整体 (a)、贵州省 (b)、重庆市 (c)、四川省 (d)、云南省 (e) 黄壤旱作耕地中低产田粮食产量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution maps of grain yield of medium- and low-yield yellow soil drylands in Southwest China (a), Guizhou (b), Chongqing (c), Sichuan (d), and Yunnan Province (e)

2.3.2 西南地区黄壤旱作耕地质量和产能提升潜力 通过构建西南地区黄壤旱作耕地质量等级与平均粮食产量的关系模型 (图 5a), 发现二者之间整体呈正相关关系 ($R^2=0.95$), 且拟合曲线表现为指数衰减函数形式: 即随着质量等级数值降低, 粮食产量先平稳增加, 随后迅速上升。其中, 一等地和二等地的平均产量最高, 超过 $6150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 10 等地的平均粮食产量最低, 仅为 4193.81

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；其余等级的耕地对应的平均粮食产量主要集中于 $4327.53\sim 5133.20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间。进一步分析发现，高、中、低产田的平均粮食产量分别为 5915.40 、 4610.62 和 $4323.95 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，中低产田的粮食产量显著低于高产田。这一非线性趋势可能主要归因于研究区内中低产田普遍存在的多重障碍因素（如图 3）。这些障碍因子限制了低等级耕地的产能提升空间，导致其产量响应相对迟缓；而当耕地质量突破中产田阈值后，障碍因素减弱，产量开始快速攀升，从而形成了先缓后陡的拟合曲线，并呈现出较高的整体相关性。需要注意的是，本研究的粮食产量数据是基于不同质量等级图斑的 NDVI 量化粮食产量数据统计而来，受各区县统计年鉴数据精度、空间异质性和评估方法误差等的影响，可能存在一定的系统误差或聚集效应。尽管如此，本研究粮食产量与耕地质量等级之间的整体正相关趋势与李玉浩等^[22]关于华南地区稻田耕地质量等级与水稻产量关系的耦合关系较为一致，这一方面印证了耕地质量提升与保护对粮食产能的支撑作用具有普遍性^[56]，另一方面也表明不同区域、不同利用方式下的响应曲线可能存在差异。

采用情景模拟的方法估算西南地区黄壤旱作中低产田产能提升潜力（图 5b）。假设保持 2018 年黄壤旱作耕地面积不变，在本研究的耕地质量等级下，2035 年西南地区黄壤旱作中低产田粮食总产量预测将达到 1038.72 万吨。然而，在系统消除西南地区黄壤旱作中低产田土壤障碍因子，全面提升当前耕地质量等级 0.5、1.0、1.5、2 个单位的条件下，西南地区黄壤旱作中低产田的粮食总产量可分别提升至 1069.28、1093.15、1122.28 和 1157.82 万吨，较预测值增幅分别为 2.94%、5.24%、8.04% 和 11.47%，这相当于分别节约耕地面积 6.18、11.01、16.91 和 24.10 万 hm^2 。该情景模拟证实耕地质量提升是驱动区域粮食产量增长、实现耕地资源集约利用、保障国家粮食安全大局的核心动力，与 Qiao 等^[57]的研究结果一致。值得注意的是，实际产能增长幅度还受未来政策资金投向、技术推广实效及农户响应程度等多重因素影响。



注：情景 1 至情景 4 分别对应耕地质量等级提升 0.5、1.0、1.5 和 2.0 个等级。Note: Scenarios 1 to 4 correspond to incremental improvements in cultivated land quality grade of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 levels, respectively.

图 5 西南地区黄壤旱作耕地质量等级与粮食产量关系 (a) 及产能提升情景模拟 (b)

Fig 5 Relationship between cultivated land quality grade and grain yield (a) and scenario-based simulation of productivity improvement (b) of yellow soil drylands in Southwest China

2.4 西南地区黄壤旱作中低产田耕地质量与产能提升路径及难度

西南地区黄壤旱作耕地中低产田分布广泛，土壤障碍因子复杂多样且呈现显著的复合性特征，成为制约该区域耕地质量和粮食产量提升的核心瓶颈。结合前文分析得到的西南地区黄壤旱作中低产田的主要障碍因素，本研究进一步从指标层面初步分析了实现耕地质量等级提升的可行性。灌溉能力不足是制约本区域耕地质量提升的首要障碍因子。从理论上讲，若灌溉条件由现状提升至“完全满足”，耕地质量等级可获得显著提升。然而，考虑到西南地区水资源时空分布不均、山地农田水利设施建设成本高昂，且现有基础设施抵御特大自然灾害能力不足等现实问题^[58]，灌溉能力的全域

性根本改善难度较大。可行路径是在有条件的地区分阶段逐步提升灌溉保证率,以提高耕地质量和实现产能提升。从土壤理化性状改良层面看,容重偏高、有机质缺乏和酸化(pH障碍)是本区域黄壤旱作耕地的主要土壤障碍因子,且三者表现出协同障碍特征。现有研究表明,多因子的协同改良效果明显优于单因子改良,尤其是有机质提升配合结构改良与酸化调控,耕地质量和产能的提升效果更为突出^[59-60]。考虑到该多因子协同障碍是区域气候、立地条件和长期施肥管理综合作用的结果,其在短期内难以根本逆转。在气候和立地条件基本稳定的前提下,仅通过常规改良措施(如施用有机肥或秸秆还田等)可在一定程度上缓解障碍、提升产能^[61-62],但其长期效应可能受土壤缓冲能力、养分循环及农户持续投入意愿的影响而存在不确定性。

综合区域实际情况,西南地区黄壤旱作中低产田不同幅度质量等级提升和产能增效的实现路径和难度可能存在显著差异。其中,小幅提升(如提升0.5个等级以内)或可通过针对性改良单一主导障碍因子实现。例如,在灌溉设施基础较好区域重点提升有机质,或在酸化严重区域施用改良剂调节pH。这类路径技术相对成熟,投资相对适中,推广可行性较强。中幅提升(如提升0.5~1.5个等级)则通常需要灌溉与土壤改良的协同推进。例如,在建设山地农田水利灌溉设施、普及滴灌和农膜覆盖等技术^[63-64]以改善灌溉利用率的同时,配套有机培肥措施。此类路径对技术集成和资金投入要求相对较高,实施周期通常较长,易受地形条件和农户接受度影响而增加推广难度。对于大幅提升(如提升1.5~2个等级),则可能必须依赖pH-容重-有机质等多障碍协同改良,并配合灌溉保障能力的根本性提升,实现难度通常更大。

3 结论

本研究系统揭示了西南地区黄壤旱作耕地“中产主导、低产集聚”的空间分异特征,明确农田管理(如灌溉能力)和立地条件(如地形部位)是区域耕地质量提升的关键障碍因子,理化性状中pH-容重-有机质协同障碍现象突出,是区域气候、立地条件和长期施肥管理综合作用的结果。此外,粮食产能的空间分布呈现“高值镶嵌于连片低值区”的特征,且随着耕地质量等级的提高,粮食产量呈现先平稳增加后迅速上升的变化特征。基于情景模拟的估算结果显示,耕地质量等级提升对粮食产量具有明显增产效应,当耕地质量等级分别提升0.5级、1.0级、1.5级与2.0级时,区域粮食产量可对应提升2.94%、5.24%、8.04%与11.47%,其增产效益等效于节约耕地资源6.18~24.10万hm²。最后,初步分析了西南地区黄壤旱作中低产田质量等级提升和产能增效的实现路径和难度。本研究结果为西南地区黄壤旱作耕地粮食产能提升提供了可行的实施路径参考,对保障区域粮食安全具有重要战略意义,也为国家“藏粮于地”战略在区域尺度上的落地实施奠定了科学基础。

致谢:感谢国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心—土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)、武汉大学中国土地覆被及动态数据集、中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)、中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn>)、资源环境科学数据注册与出版系统提供的数据支撑,感谢气候变化与生态环境效应青年研究群体的支持。

参考文献 (References)

- [1] Qing P, Deng X X, Ming S, et al. Food security resilience and risk management strategy in China in the context of “Dual Circulation” [J]. Chinese Academy of Engineering, 2023, 25(4): 26-38. [青平, 邓秀新, 闵师, 等. “双循环”背景下我国粮食安全韧性及风险管控战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 26-38.]
- [2] Li G D, Zhang J W. Research on building China's grain security system under the 'storing grain in the land and through technology' strategy: A qualitative study based on the No. 1 Central Document[J]. Agricultural Economy, 2023(10): 26-28. [李国栋, 张建伟. “藏粮于地、藏粮于技”战略下我国粮食安全保障体系构建研究-基于“中央一

- 号文件”的质性研究[J]. 农业经济, 2023(10): 26-28.]
- [3] Li Y Z, Zhang J Z, Jia J Y, et al. Research progresses on farmland soil ecosystem multifunctionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1177-1189. [李奕赞, 张江周, 贾吉玉, 等. 农田土壤生态系统多功能性研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1177-1189.]
- [4] Wang Y, Bouri E, Fareed Z, et al. Geopolitical risk and the systemic risk in the commodity markets under the war in Ukraine[J]. *Finance Research Letters*, 2022, 49: 103066.
- [5] Guo Y H, Kuang J X, Du X R, et al. Research on the potential, influencing factors and strategies of grain production increase in Southwest China[J]. *Resource Development & Market*, 2024, 40(6): 843-850. [郭耀辉, 况嘉欣, 杜兴端, 等. 中国西南地区粮食增产潜力、影响因素与策略研究[J]. 资源开发与市场, 2024, 40(6): 843-850.]
- [6] Liu X, Wang R T, Zhang F, et al. Research on evaluation of food security in Southwest China[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 46(2): 115-124. [刘现, 王儒桐, 张凤, 等. 西南地区粮食安全评价研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 115-124.]
- [7] Liu K L, Du J X, Ma C B, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil potassium in main dry-farming grain arable land of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 673-684. [柳开楼, 都江雪, 马常宝, 等. 中国主要旱作粮食耕地土壤钾素的时空演变特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 673-684.]
- [8] Wu Y L, Zhang P, Yu Y Y, et al. Progress review on and prospects for non-grain cultivated land in China from the perspective of food security[J]. *China Land Science*, 2021, 35(9): 116-124. [吴郁玲, 张佩, 于亿亿, 等. 粮食安全视角下中国耕地“非粮化”研究进展与展望[J]. 中国土地科学, 2021, 35(9): 116-124.]
- [9] Wu K N, Yang Q J, Zhao R. A discussion on soil health assessment of arable land in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 537-544. [吴克宁, 杨淇钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 537-544.]
- [10] Lou Y B, Shi D M, Jin H F, et al. Coupling degree diagnosis on suitability evaluation of cultivated-layer quality for slope farmland in purple hilly region of South-Western China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(4): 661-675. [娄义宝, 史东梅, 金慧芳, 等. 西南紫色土坡耕地农作物-耕层质量适宜性的耦合度诊断[J]. 中国农业科学, 2019, 52(4): 661-675.]
- [11] Chen Y, Qi Y, Wei Y, et al. Root traits and soil detachment in response to variable slope gradients in a representative purple-soil sloping grassland[J]. *Catena*, 2024, 239: 107936.
- [12] Li K Y, Song L H, Zhang Y, et al. Effects of biochar application amount and frequency on yellow soil nutrients and key enzyme activities[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2): 1065-1075. [李开钰, 宋理洪, 张龔, 等. 生物质炭施用量与频率对黄壤养分和关键酶活性的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 1065-1075.]
- [13] Chen Y, Lin Y C, Yang Z X, et al. Effects of biochar-based fertilizer on physiology and nitrogen uptake of flue-cured tobacco and nitrogen balance in yellow soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 864-872. [陈懿, 林英超, 杨志晓, 等. 炭基肥对黄壤烤烟生理和氮素吸收与平衡的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 864-872.]
- [14] Zhang Y R, Luo S, Chen Y, et al. Characteristics of soil pollution and source analysis of typical pollutants in the petrochemical site[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6933-6946. [张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 等. 重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6933-6946.]
- [15] Chen Z F, Shi D M, He W, et al. Quality evaluation of slope farmland in Yunnan Province based on “element-demand-regulation” framework[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12): 236-246. [陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 基于“要素-需求-调控”的云南坡耕地质量评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 236-246.]
- [16] Ma R, Zheng Z C, Wang S, et al. Soil anti-erodibility at different growth stages of maize in hilly yellow soil areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19): 107-114. [马瑞, 郑子成, 王双, 等. 山地黄壤区玉米不同生育期土壤抗蚀性特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 107-114.]

- [17] He S qin, Ma R, Wang N na, et al. Comparison of nitrogen losses by runoff from two different cultivating patterns in sloping farmland with yellow soil during maize growth in southwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(1): 222-234.
- [18] Zhou X P, Chen B M, Wang P. Future comprehensive grain production capacity and food security in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Social Sciences), 2006(6): 134-140. [周小萍, 陈百明, 汪鹏. 中国未来粮食综合生产能力与粮食安全保障[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2006(6): 134-140.]
- [19] Wang L, Zhou Y, Li Q, et al. An intelligent model of cultivated land quality evaluation based on random forest and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1279-1292. [王丽, 周勇, 李晴, 等. 基于随机森林的耕地质量评价智能模型及其应用研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1279-1292.]
- [20] Huang T T, Lu D B, Yang J. Comprehensive evaluation and analysis on spatiotemporal variation of cultivated land on provincial scale based on GIS-A case study in Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 253-257. [黄厅厅, 卢德彬, 杨建. 基于 GIS 的省级耕地质量综合评价及时空演变分析—以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 253-257.]
- [21] Zuo Y Y. Evaluation of cultivated land quality in the completed high-standard farmland area of the hilly region of Sichuan Province[D]. Chengdu: College of Resources, Sichuan Agricultural University, 2022. [左媛月. 四川丘陵区高标准农田建成区耕地质量评价研究[D].成都: 四川农业大学资源学院, 2022.]
- [22] Li Y H, Wang H Y, Zhang J D, et al. Spatial distribution of cultivated land quality and potential for capacity improvement of paddy fields in South China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(10): 1613-1625. [李玉浩, 王红叶, 张骏达, 等. 华南区稻田耕地质量空间分布与产能提升潜力[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(10): 1613-1625.]
- [23] 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.
- [24] Xu X L. China's 30m annual NDVI maximum dataset[DB/OL]. Resource and Environmental Science Data Registration and Publishing System, 2022.[徐新良. 中国 30 m 逐年 NDVI 最大值数据集[DB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统, 2022.]
- [25] Liu F, Wu H, Zhao Y, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(3): 328-340.
- [26] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.]
- [27] Wu Z L, Chen H, Que J L, et al. Geographical pattern and influencing factors of aquaculture in Poyang Lake Basin based on aquaculture entity classification[J]. Geography and Geo-Information Science, 2025, 41(4): 51-59, 67. [邬志龙, 陈浩, 阙江龙, 等. 基于主体分类的鄱阳湖流域水产养殖地理格局及其影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2025, 41(4): 51-59, 67.]
- [28] Zhang X W, Wang L X, Yang Y, et al. Spatiotemporal evolution of carbon sources/sinks and analysis of multi-factor driving mechanisms in the Weihe River Basin[J]. Environmental Science, 2026, 47(5): 3155-3165. [张信伟, 王丽霞, 杨耘, 等. 渭河流域碳源/碳汇时空格局演变及多因子驱动机制分析[J]. 环境科学, 2026, 47(5): 3155-3165.]
- [29] Song Y, Wang J, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(5): 593-610.
- [30] Li C, Wu Y M, Gao B B, et al. Spatial differentiation and driving factors of rural settlement in Plateau Lake:A case study of the area around the Erhai[J]. Economic Geography, 2022, 42(4): 220-229. [李琛, 吴映梅, 高彬斌, 等. 高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测-以环洱海地区为例[J]. 经济地理, 2022, 42(4): 220-229.]
- [31] Zhang M, Li G, He T, et al. Reveal the severe spatial and temporal patterns of abandoned cropland in China over the

- past 30 years[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159591.
- [32] Zahra S, Ruiz H, Jung J, et al. UAV-based phenotyping: A non-destructive approach to studying wheat growth patterns for crop improvement and breeding programs[J]. Remote Sensing, 2024, 16(19) : 3710.
- [33] Chen Z. Cultivated land quality assessment, obstacle factors, and productivity enhancement potential analysis on the Yunnan-Guizhou plateau[D]. Kunming: College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, 2024. [陈卓. 云贵高原耕地质量评估、障碍因子及产能提升潜力分析[D]. 昆明: 云南农业大学资源与环境学院, 2024.]
- [34] Bai X Y, Zhang J, Cui Z L, et al. Advances in the indicator and assessment approaches of medium-low yield fields[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 913-924. [白雪源, 张杰, 崔振岭, 等. 中低产田评价指标与主要方法研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 913-924.]
- [35] Wang X, Xu X F. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of landscape fragmentation of cultivated land in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(16): 11-20. [王学, 徐晓凡. 中国耕地景观细碎度时空变化特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 11-20.]
- [36] Jin H F, Shi D M, Zhong Y J, et al. Diagnosis of degradation characteristics and obstacle factors for topsoil quality in red soil sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 84-93. [金慧芳, 史东梅, 钟义军, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 84-93.]
- [37] Zhang Y, Dai Y Q, Chen Y Y, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of cultivated land multifunctional coupling coordination development in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 244-255. [张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 中国耕地多功能耦合协调时空演变及其驱动因素[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 244-255.]
- [38] Zhao Y, Wang H X, Wang Y, et al. Efficient utilization and optimal allocation of agricultural water resources in the Yellow River basin[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(4): 158-168. [赵英, 王海霞, 王毅, 等. 黄河流域农业水资源高效利用与优化配置研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 158-168.]
- [39] Weng H L, Ci E, Li S, et al. Pedogenetic process and taxonomy of yellow soil in Chongqing, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 579-589. [翁昊璐, 慈恩, 李松, 等. 重庆市黄壤的成土特点与系统分类研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 579-589.]
- [40] Wang W P, Zhang H. Effects of long-term fertilization on the microstructure and stability of cinnamon soil aggregates in cropland of North China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10): 68-74. [王伟鹏, 张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 68-74.]
- [41] Han Z G, Mao T X, Tu D, et al. Effects of vegetation change on the distribution and stability of soil aggregate in the source of the Yangtze River[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(3): 801-807. [韩贞贵, 毛天旭, 屠丹, 等. 长江源区草地覆盖变化对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 801-807.]
- [42] Wang J Y, Deng Y S, Li D Y, et al. Characteristics of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity of successive *Eucalyptus* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7689-7699. [王金悦, 邓羽松, 李典云, 等. 连栽桉树人工林土壤大孔隙特征及其对饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7689-7699.]
- [43] Nie C Y, Yang F, Wang Z C, et al. Effects of tillage synergistic material addition on physical and chemical properties of cultivated sodic-saline soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 235-243. [聂朝阳, 杨帆, 王志春, 等. 耕作协同物料添加对苏打盐碱化耕地土壤理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 235-243.]
- [44] Liu Z P, Shi D M, Jin H F, et al. Soil quality and its limitation factors of slope farmland plough layer of red soil[J].

- Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(3): 7-13, 41. [刘志鹏, 史东梅, 金慧芳, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 7-13, 41.]
- [45] Lyu F J, Lyu R J, Wang R Q, et al. Study on the key soil fertility factors limiting the improvement of sesame yield in red soil upland[J]. Soils and Crops, 2024, 13(3): 331-339. [吕丰娟, 吕茹洁, 汪瑞清, 等. 限制红壤旱地芝麻产量提高的关键土壤肥力因子探究[J]. 土壤与作物, 2024, 13(3): 331-339.]
- [46] Yang Z P, Ma Q M, Wu L, et al. Spatiotemporal dynamics of maize yield and associated driving factors in the blacksoil region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(18): 72-80. [杨兆鹏, 马秋梅, 郭磊, 等. 东北黑土区玉米产量时空演变规律及其驱动因素[J]. 农业工程学报, 2025, 41(18): 72-80.]
- [47] Wei C L. Shrinkage-cracking characteristics of lime concretion black soil and improvement with biochar [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. [魏翠兰. 砂姜黑土收缩开裂特征及生物质炭改良效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.]
- [48] Li L L, Li J W, Zhong S Q, et al. Suitability evaluation of suitable-for mechanization transformation of cultivated land based on topographic complexity in Chongqing, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(2): 302-313. [李伶俐, 李江文, 钟守琴, 等. 基于地形复杂度的重庆市耕地“宜机化”改造适宜性评价[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(2): 302-313.]
- [49] Zhu H Y, Gao M, Long Y, et al. Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field[J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1921-1929. [朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1921-1929.]
- [50] Liu S J, Li D C, Gao J S, et al. Correlation of red paddy soil fertility with rice yield under long-term fertilization and county verification[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(7): 1262-1272. [刘淑军, 李冬初, 高菊生, 等. 长期施肥红壤稻田肥力与产量的相关性及其县域验证[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1262-1272.]
- [51] Hussain M H, Abuhani D A, Khan J, et al. A light-weight cropland mapping model using satellite imagery[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6729.
- [52] Aranguren M, Castellón A, Aizpurua A. Wheat yield estimation with NDVI values using a proximal sensing tool[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2749.
- [53] Shen J, Evans F H. The potential of landsat NDVI sequences to explain wheat yield variation in fields in western Australia[J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2202.
- [54] Zhang J, Zhang H, Chi H, et al. Eco-geological environment quality assessment in a mining city: A case study of Jiangxia District, Wuhan City[J]. Geocarto International, 2023, 38(1): 2245795.
- [55] Xie Y, Huang J. Integration of a crop growth model and deep learning methods to improve satellite-based yield estimation of winter wheat in Henan Province, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4372.
- [56] Zhang Y, Feng X K, Ren S B, et al. Evaluation index system of cultivated land quality and productivity: A case study of Binyang County, Guangxi[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1039-1050. [张英, 冯雪珂, 任少宝, 等. 耕地质量和产能评价指标体系研究—以广西宾阳县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1039-1050.]
- [57] Qiao L, Wang X, Smith P, et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(6): 574-580.
- [58] Fang F P, Li F B, Xu C C, et al. Southwest China drought, food security and policy reflection[J]. Issues in Agricultural Economy, 2010, 31(7): 77-82. [方福平, 李凤博, 徐春春, 等. 西南大旱、粮食安全及政策反思[J]. 农业经济问题, 2010, 31(7): 77-82.]
- [59] Goulding K W T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the

- United Kingdom[J]. Soil Use and Management, 2016, 32(3): 391-399.
- [60] Nurida N L, Rachman A. Amelioration of acid upland to increase soil productivity and soybean yield[J]. Journal of Agricultural Science, 2020, 42(2):350-359.
- [61] Song J H, Li T Y, Lu J Y, et al. Analysis of the effect of long-term fertilization on summer maize yield and soil organic carbon in purple soil areas under climate change based on the DNDC model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(5): 872-882. [宋健鸿, 李天阳, 卢佳怡, 等. 基于 DNDC 模型的气候变化下长期施肥对紫色土区玉米产量和土壤有机碳影响的分析[J]. 中国生态农业学报, 2025, 33(5): 872-882.]
- [62] Wang Z T, Ling J, Liu Z X, et al. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 663-674. [王治统, 凌俊, 刘子熙, 等. 秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(4): 663-674.]
- [63] Wan L, Jian Y, Zhang M, et al. Improving water productivity using subsurface drip irrigation in the southwest monsoon area in Yunnan Province of China[J]. Agronomy, 2024, 14(4): 679.
- [64] Ramos T B, Darouich H, Pereira L S. Mulching effects on soil evaporation, crop evapotranspiration and crop coefficients: A review aimed at improved irrigation management[J]. Irrigation Science, 2024, 42(3): 525-539.

(责任编辑: 檀满枝)