

退耕还林还草背景下黄土高原粮食生产系统可持续性的时空演变

刘晓琳^{1,2}, 卢晓妍¹, 秦张璇¹, 李 飞^{1,2,3*}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省黄河研究院, 西安 710127; 3. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘 要: 粮食生产系统的可持续性事关国家粮食安全目标的实现, 探究退耕还林还草背景下粮食生产系统的可持续性对准确评估生态安全和粮食安全之间的关系具有重要意义。基于 2000、2010 和 2018 年黄土高原县域粮食生产相关数据, 构建粮食生产系统可持续性综合测度指标体系, 对黄土高原粮食生产系统的可持续性进行综合分析; 通过分析典型生态修复工程“退耕还林还草”, 阐明退耕对粮食生产系统可持续性的影响。结果表明: 1) 2018 年黄土高原粮食生产系统的可持续性高于 2000 年, 系统的可持续性在逐步增强; 粮食生产系统可持续性由自然资源供给为主导, 转变到以社会经济可持续发展为主导的阶段。2) 2000—2010、2010—2018 年间黄土高原粮食生产系统可持续性增长率分别达到 31.03% 和 28.81%, 因此, 2000—2010 年间是粮食生产系统可持续性大幅提升阶段。3) 退耕背景下虽然耕地大幅减少 (−33.48%), 但平均海拔和坡度也呈下降趋势 (分别下降了 20.3 m 和 0.88°), 土壤侵蚀模数由 16.14 t/(hm²·a) 降至 9.34 t/(hm²·a), 产水量和粮食生产潜力则年均增长 5.09 mm/(km²·a)、53.75 kg/hm²。4) 退耕背景下粮食生产系统的可持续性显著提升, 工程的实施对六个分区粮食生产系统的可持续性都呈正向的促进作用; 其中, 土石山区粮食生产系统的可持续性指数由 0.14 增长至 0.17, 其受退耕的影响最大。退耕还林还草工程对易造成水土流失和土地沙化的生态脆弱地区实行退耕, 虽减少了粮食生产的物质基础, 但通过改变其空间分布格局, 对耕地质量、耕地平均海拔和高度均产生影响, 由此使得土壤侵蚀模数下降、水源涵养能力提高, 有效地改善了生态环境, 显著提升了粮食生产系统的可持续性。整体而言, 退耕还林还草提升了粮食生产系统的可持续性, 生态安全对粮食安全存在着正向的促进作用。

关键词: 土地利用; 粮食; 退耕还林(草); 时空分异; 可持续性; 黄土高原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.030

中图分类号: S17

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0249-09

刘晓琳, 卢晓妍, 秦张璇, 等. 退耕还林还草背景下黄土高原粮食生产系统可持续性的时空演变[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 249–257. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.030 <http://www.tcsae.org>

Liu Xiaolin, Lu Xiaoyan, Qin Zhangxuan, et al. Spatiotemporal changes of the sustainability of grain production system in the Loess Plateau based on Grain for Green Project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 249–257. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.030 <http://www.tcsae.org>

0 引言

粮食生产与粮食安全是关乎国计民生的重大问题, 保障粮食生产、稳定粮食安全对于促进国家经济持续发展与维护社会稳定具有重要意义^[1]。越来越多的学者一致认为粮食安全与粮食生产可持续发展密切相关^[2–3], 粮食生产的可持续性已成为全球关注的焦点^[4–5]。长期以来, 由于全球气候变暖和人口数量激增, 土地资源退化和水土流失等生态环境问题频发, 不仅严重影响生态环境质量, 而且对全球粮食生产造成了威胁^[6–7]。扩大耕地面积是保障粮食安全最基本的途径之一^[8], 近几十年来, 为了确保粮食安全, 全球范围内出现大规模的农田扩张, 农田的迅速扩张不仅会使不同生态系统相互转换, 而且会削弱生态系统维持其功能以及提供生态系统产品的能力^[9], 加剧了全球生态环

境问题^[10–11], 反过来又对粮食安全造成了影响。

针对已出现的生态环境问题, 国内外总结已有的先进经验和治理理念, 促成一系列生态修复的典型实践案例^[12–13]。但在自然生态系统修复过程中, 粮食生产等供给服务与土壤保持、水源涵养、碳存储等调节或支持服务之间存在不同程度的此消彼长的权衡关系^[14–15]。退耕还林还草背景下供给服务与调节、支持服务之间的权衡尤为明显。大规模退耕还林还草对区域植被覆盖、水源涵养、土壤保持等发挥了重要的作用^[16–17], 改善了日益恶化的生态环境。然而, 退耕还林还草减少了粮食生产的物质基础, 致使粮食生产规模减小、粮食总量下降^[18–21]。加剧了粮食生产等供给服务与调节服务的权衡^[9,22]。但也有研究表明, 工程的实施能够提供多重生态系统服务, 粮食生产等供给服务与地块水源涵养、土壤保持服务之间表现为显著协同关系^[23]。此外, 粮食生产物质基础的下降使得农户改变以往粗放型生产模式, 加强了土地利用集约化程度, 从而有效改善了区域环境和土壤肥力, 提高了粮食生产物质基础的质量和粮食单产水平^[24], 一定程度上弥补了因粮食生产物质基础减少而造成的粮食产

收稿日期: 2022-01-19 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42171197)

作者简介: 刘晓琳, 研究方向为粮食生产系统可持续性评价。

Email: liuxl0110@163.com

*通信作者: 李飞, 博士, 副教授, 博士生导师。研究方向为农业土地系统转型与粮食安全。Email: lifei@nwu.edu.cn

量的减少。综上，退耕还林还草对粮食生产系统的影响尚存在争议，究其原因现有研究多关注退耕还林还草对粮食生产某一方面的影响，未从粮食生产系统的角度进行系统性分析。

黄土高原位于黄河中游地区，农耕历史悠久，是中国乃至世界水土流失最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一。20 世纪 80 年代以来，黄土高原地区先后开展了小流域治理、退耕还林还草、生态补偿等一系列生态工程和政策，显著改善了该区的生态条件和水土保持功能^[25]。特别是 2000 年以来，黄土高原实施了大规模退耕还林还草工程，其在显著改善区域生态环境的同时，也对粮食生产系统产生了深远影响。因此，本研究基于黄土高原 332 个县域的 3 期（2000、2010 和 2018 年）截面数据，从自然资源系统、社会经济系统和粮食产出系统 3 个方面构建了粮食生产系统可持续性评价指标体系，系统分析了退耕还林还草背景下黄土高原粮食生产系统可持续性的变化特征，旨在为协调黄土高原粮食安全和生态安全之间的关系提供决策依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于 33°41′~41°16′N，100°54′~114°33′E 之间，地形起伏，沟壑纵横，地势西北高，东南低，平均海拔约为 2 000 m，年均降雨量约 150~750 mm，具有夏秋多雨、冬春干旱少雨的降水特征。黄土高原盆地农业与河谷农垦历史悠久，在保障国家粮食安全和粮食生产中占有重要位置。由于地处半湿润气候区向半干旱、干旱气候区的过渡地带，黄土高原的自然环境也相对脆弱，曾是中国乃至全球水土流失最为严重的地区之一^[26]。黄土高原包含山西、内蒙古、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏 7 个省级行政区，共计 332 个县区，可划分为六大地理分区（黄土高原地区综合治理规划大纲（2010—2030 年））（图 1）。由于部分区县数据的不可得性，本研究着重对其中的 314 个县区进行了重点分析。

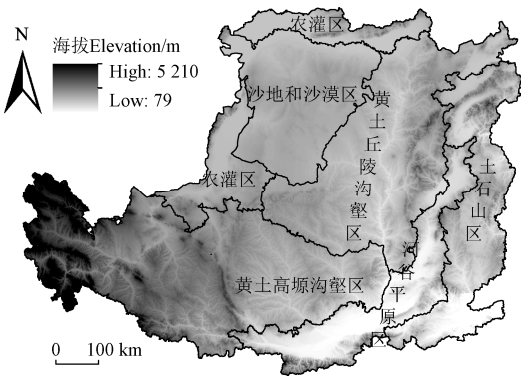


图 1 研究区海拔与地理分区

Fig.1 Elevation and geographic division of the study area

1.2 数据来源

研究数据主要分为两部分：1）自然资源数据。气象数据共 3 期（2000、2010、2018 年），从中国气象数据网（http://data.cma.cn）下载。地形和土地利用数据来源于中国

科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/）。土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心《基于世界土壤数据库（HWSO）的中国土壤数据集（v1.1）》（http://westdc.westgis.ac.cn），分辨率为 1 km。2）社会经济数据和粮食产出数据。社会经济数据和粮食产出数据共 3 期（2000、2010、2018 年），主要来源于《中国县域统计年鉴》《中国农业发展银行统计年鉴》，各省、地级市、县区统计年鉴和统计公报。部分缺失数据通过以往年份预测得到。

1.3 研究方法

1.3.1 粮食生产系统指标体系设计与构建

可持续的粮食生产系统是一个宏观性的综合系统，与社会经济和自然资源紧密相连^[27-28]。自然资源系统可持续是系统发展的基础，其侧重于考查资源约束下的粮食生产能力，离开稳定、可持续的自然资源系统，粮食生产系统将难以可持续运转。因此，研究粮食生产的自然资源配置有利于粮食生产系统的可持续性发展。社会经济系统中维护农户生计与保障粮食生产可持续发展的功能对应了粮食生产系统的社会经济属性。粮食产出可持续是社会经济及自然资源系统可持续的综合保障，因此将粮食产出纳入粮食生产系统可持续性研究具有重要意义。本文基于以上考量和相关研究结果的基础上^[29-30]，从资源基础、生产投入和农业产出 3 个方面设计指标，同时依据可持续性评价指标体系的基本原则和数据的可得性，构建了黄土高原粮食生产系统可持续评价指标体系用以测算粮食生产系统的可持续性。具体如表 1 所示。

表 1 粮食生产系统可持续性评价指标体系
Table 1 Sustainability evaluation index system of grain production system

目标 Target	系统层 System layer	指标层 Indicator layer	权重 Weights	数据来源/计算方式 Data source /Calculation method	指标性质 Indicator nature
粮食生产系统可持续性	自然资源系统 (资源基础)	粮食生产潜力	0.028	GAEZ 模型	+
		土壤侵蚀模数	0.004	RUSLE 方程	-
		水源涵养能力	0.166	InVEST 水源涵养模型	+
		耕地面积	0.067	耕地面积	+
		耕地平均海拔	0.007	耕地的平均海拔	-
		耕地平均坡度	0.027	耕地的平均坡度	-
	社会经济系统 (生产投入)	农村居民人均纯收入	0.078	农村居民人均纯收入	+
		农业机械化水平	0.080	农业机械总动力	+
		化肥使用强度	0.001	化肥施用量/耕地面积	-
		土地垦殖率	0.028	耕地面积/行政区划总面积	+
		耕地承载乡村人口量	0.099	乡村人口/耕地面积	+
		农业从业人口比例	0.037	农业从业人员/总人口	+
	粮食产出系统 (农业产出)	粮食播种面积	0.066	粮食作物播种面积	+
		粮食总产量	0.084	粮食总产量	+
人均粮食占有量		0.073	粮食总产量/乡村人口	+	
粮食单位面积产量		0.039	粮食总产量/粮食作物播种面积	+	
第一产业增加值		0.117	第一产业增加值	+	

1.3.2 自然资源系统指标估算

1) 粮食生产潜力。选取 GAEZ 模型用以估算黄土高原粮食生产潜力 (图 2)。GAEZ 模型包含两种模拟情景, 即灌溉和雨养。灌溉条件下假设水分充足, 即不考虑水分对作物的影响, 雨养条件下, 则仅考虑降水对作物产量的影响。本文将粮食生产潜力作为自然资源系统的核心指标, 因而直接采用雨养情境下的粮食生产潜力。

2) 土壤侵蚀模数。土壤侵蚀模数的计算采用修正的通用水土流失方程 (RUSLE) [31]。

3) 水源涵养能力。水源涵养能力用产水量来表征, 利用 InVEST 水源涵养模型 [25] 计算得到黄土高原的产水量。

4) 耕地平均海拔和耕地平均坡度。耕地平均海拔和耕地平均坡度是通过地形数据与土地利用数据综合处理得到的, 其值依据耕地分布的变化而变化。

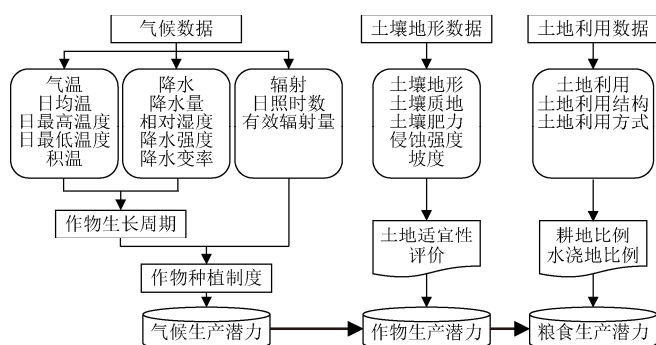


图 2 GAEZ 模型结构
Fig.2 Structure of GAEZ model

1.3.3 熵权法

熵权法是计算权重较为客观的一种方法。使用该方法可以避免因主观因素而造成的权重的偏误, 其计算步骤如下:

$$x_{ij}' = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}} \quad (\text{正向指标})$$

$$x_{ij}' = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\}} \quad (\text{负向指标}) \quad (1)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^m x_{ij}'} \quad (2)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (4)$$

式中 m 表示评价对象个数, 本文中 $m=314$, n 表示总指标数量, 本文 n 取 17; x_{ij} 为第 j 个评价指标在第 i 个评价对象的指标值; x_{ij}' 为 x_{ij} 标准化后的值; p_{ij} 为第 j 个指标中第 i 个对象占该指标的比重; e_j 为第 j 个指标的熵值; w_j 为指标的权重。

1.3.4 TOPSIS 综合评价法

TOPSIS 法是根据多个评价对象、多项数据指标, 对

评价对象进行排序的判定方法。其基本原理是依据熵权法得出的权重, 求出决策矩阵, 分析各评价对象与正理想目标和负理想目标之间的欧氏距离。最优的评价对象为最靠近正理想解且最远离负理想解, 其取值范围为 $(0,1]$ 。具体计算步骤如下:

$$(a_{ij})_{m \times n} = (w_j \times x_{ij}')_{m \times n} \quad (5)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (X_j^+ - a_{ij})^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (X_j^- - a_{ij})^2} \quad (6)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (7)$$

式中 w_j 为熵权法求得的权重; x_{ij}' 为 x_{ij} 标准化后的值;

a_{ij} 为决策矩阵; X_j^+ 为正向指标决策矩阵中最大值, X_j^- 为负向指标决策矩阵中的最小值; D_i^+ 、 D_i^- 分别为到正理想解 (X^+)、负理想解 (X^-) 的欧氏距离; C_i 为各评价对象与理想解的相对接近度, C_i 越接近 1, 评价水平越高, 反之则评价水平越低。

1.3.5 退耕还林还草背景下粮食生产系统可持续性测算

退耕还林还草主要通过改变耕地的面积、分布格局 (进而影响到耕地的平均海拔和坡度)、粮食生产潜力及区域的土壤侵蚀和水源涵养而影响到粮食生产系统的可持续性。其中, 耕地的粮食生产潜力及区域土壤侵蚀模数和水源涵养能力不仅受到退耕还林还草的影响, 还受到气候变化的制约。为客观测算退耕对粮食生产系统可持续性的影响, 故设置如下两个情景 (表 2)。通过两个情景的对比可将气候变化的影响消除, 单独测算退耕还林还草的影响。

表 2 情景设置

Table 2 Scenario settings

情景设置 Scenario settings	是否发生 Does it happen	
	退耕还林还草 Grain for Green Project	气候变化 Climate change
情景 A Scenario A	否	否
情景 B Scenario B	是	否

2 结果与分析

2.1 粮食生产系统可持续性的时空格局

总体而言, 2000 年以来黄土高原粮食生产系统可持续性不断提升 (图 3), 其中社会经济系统对粮食生产系统的可持续性影响最大。社会经济系统可持续性指数的增长代表着农业经济社会可持续性的提升, 并在粮食生产系统可持续发展进程中发挥着重要的作用, 2000—2018 年社会经济系统可持续水平的占比从 34.55% 跃升至 47.48%。自然资源系统和粮食产出系统对粮食生产系统可持续性的贡献则逐渐变弱, 二者相应减少了 9.56% 和 3.37%。2000 年粮食生产系统可持续性较低主要受制于社会经济发展水平; 得益于经济的快速发展、农业机械化水平的提高和农民生活质量的提升, 2018 年黄土高原粮

食生产系统的可持续性得到极大的增长。黄土高原粮食生产系统可持续性已由最初的以自然资源供给为主导, 转变为以社会经济发展为主导的阶段。

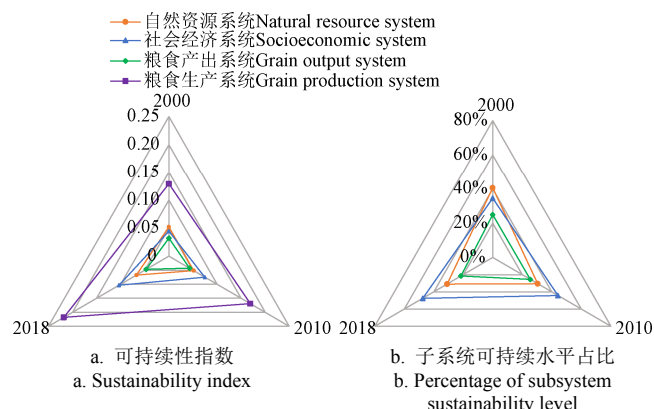


图3 2000—2018年粮食生产系统可持续性变化趋势

Fig.3 Trends in sustainability of grain production systems from 2000 to 2018

根据计算结果将粮食生产系统的可持续性划分为低可持续(≤ 0.15)、中可持续($>0.15 \sim 0.25$)和高可持续(>0.25) (图4)。2000年黄土高原各县域粮食生产系统可持续性差异较小(图4), 大部分地区处于中低可持续性等级, 仅偃师市粮食生产系统可持续性为高可持续。具体表现为农灌区、河谷平原区南部、土石山区东南部 and 黄土高塬沟壑区中部为中可持续, 其余地区为低可持续等级。究其原因, 该时期各县域社会经济系统和粮食

产出系统的可持续性差别不大, 粮食生产系统的可持续性受制于自然资源供给的限制, 脆弱的自然本底条件和过度的资源利用导致大部分县域粮食生产系统可持续性较差。2000—2010年黄土高原粮食生产系统的可持续性得到了大幅提升, 54.78%县域粮食生产系统的可持续等级处于中高可持续水平, 且分布于黄土高原的西北部 and 东南部。低可持续等级集中于中部的黄土丘陵沟壑区、东部土石山区和黄土高塬沟壑区南部和东部。得益于社会经济发展和退耕还林还草工程的大力推进, 该时期粮食生产系统的可持续性较2000年增长31.03%, 其增长率大于2010—2018年的增长率(28.81%), 是黄土高原粮食生产系统可持续性大幅提升阶段。2000—2018年黄土高原粮食生产系统可持续性指数增长了68.78%, 三个子系统的可持续性指数分别增长了28.98%、131.91%和45.98%。由此可见, 经济社会发展对黄土高原粮食生产系统可持续性水平影响最大。2018年黄土高原大部分县域处于中高可持续性等级, 低可持续等级县域则主要分布于黄土丘陵沟壑区的东部和南部。黄土丘陵沟壑区的自然资源系统和社会经济系统可持续性指数比其他区低1.68%和2.59%, 该区水土流失严重, 坡耕地较多且土壤贫瘠, 加之该区长期采用广种薄收的农业生产方式, 因而粮食生产系统可持续性水平依旧较低。总体而言, 2000—2018年间粮食生产系统可持续性在不断增强。尤其是黄土丘陵沟壑区西部、沙地和沙漠区与农灌区, 粮食生产系统可持续性指数翻了一番。

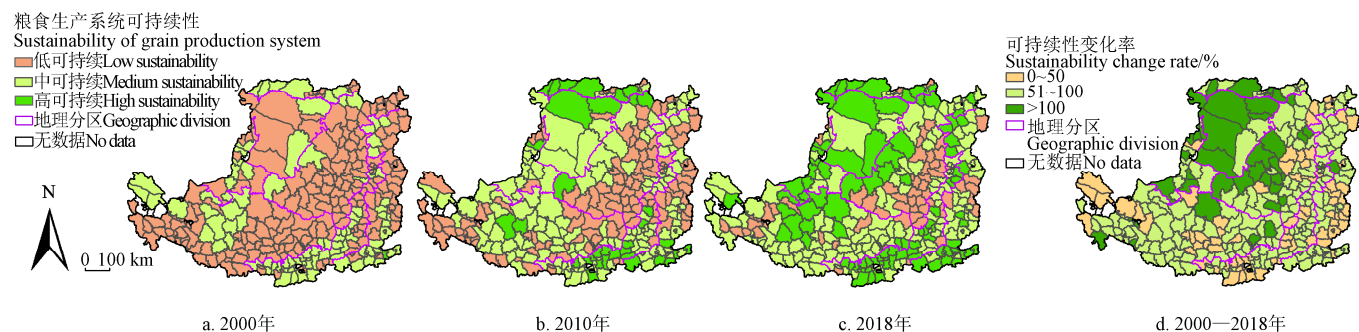


图4 粮食生产系统可持续性的演化特征

Fig.4 Evolutionary characteristics of the sustainability of the grain production system

2.2 退耕还林还草对粮食生产系统可持续性的影响

2.2.1 自然资源系统指标变化

2000—2018年间黄土高原土地利用类型结构稳定, 主要土地利用类型为草地、耕地、林地和未利用地。土地利用类型的空间分布也较为相似, 草地和耕地广泛分布于整个研究区内, 林地集中于研究区的东南部, 而未利用地多分布于西北部。整体上, 黄土高原的土地利用变化表现为耕地、未利用地和草地面积减少, 分别减少了5.38% ($11.09 \times 10^5 \text{ hm}^2$)、10.15% ($4.38 \times 10^5 \text{ hm}^2$)、0.03% ($0.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$), 而建设用地、林地和水域的面积呈现不同程度的增长(图5)。

退耕还林还草首先对耕地面积产生影响, 耕地面积由 $206.26 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 减少至 $137.09 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 较2000年减少33.53%(表3)。生态退耕对坡耕地和生态脆弱区实

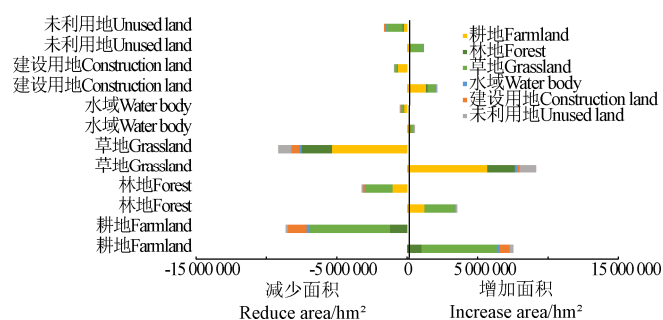


图5 2000—2018年黄土高原土地利用转移情况

Fig.5 Land use transfer in the Loess Plateau from 2000 to 2018

施退耕, 使得黄土高原地区耕地的海拔和坡度分别下降了1.76% (20.3 m) 和13.23% (0.88°)。当坡度较大且土壤遭受外力作用时, 极易发生水土流失; 工程的实施使得耕地的

海拔和坡度减小，从而对黄土高原土壤侵蚀具有一定的抑制作用。2000 年黄土高原土壤侵蚀模数为 16.14 t/(hm²·a)，2018 年降低至 9.34 t/(hm²·a)，18 年间减少了 42.13%，地均土壤侵蚀量在逐渐减少。同时黄土高原的水源涵养能力在不断提升，产水量由 2000 年的 176.06 mm/(hm²·a)增长至 2018 年的

267.7 mm/(hm²·a)，年均增长 5.09 mm/(hm²·a)。粮食生产潜力受耕地面积和质量的制约，退耕还林还草对坡耕地等质量较差的耕地实行退耕，虽导致了耕地面积减少，但耕地总体的质量得到了提升，其粮食生产潜力由 2 633.06 kg/hm² 增长至 3 600.60 kg/hm²，年均增长 53.75 kg/(hm²·a)。

表 3 退耕还林还草背景下黄土高原自然资源指标变化

Table 3 Changes of natural resource indicators in the Loess Plateau under the background of Grain for Green Project							
项目 Item	年份 Years	粮食生产潜力 Grain production potential/(kg·hm ⁻²)	土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	水源涵养能力 Water conservation capacity/(mm·km ⁻² ·a ⁻¹)	耕地面积 Cultivated area/(10 ⁵ hm ²)	耕地平均海拔 Average altitude of cultivated land/m	耕地平均坡度 Average slope of cultivated land/(°)
指标变化 Indicator changes	2000	2 633.06	16.14	176.06	206.26	1 156.13	6.65
	2010	3 282.55	12.82	200.60	202.34	1 155.61	6.64
	2018	3 600.60	9.34	267.70	137.09	1 135.83	5.77
变化量 Variation	2000—2010	649.49	-3.32	24.54	-3.92	-0.52	-0.01
	2010—2018	318.06	-3.48	67.10	-65.25	-19.77	-0.87
变化率 Rate of change/%	2000—2010	24.67	-20.57	13.94	-1.90	-0.05	-0.18
	2010—2018	9.69	-27.15	33.45	-32.25	-1.71	-13.04

2.2.2 退耕背景下粮食生产系统可持续性时空格局

退耕背景下粮食生产系统可持续性明显高于退耕前（图 6）。从分区角度来看，黄土高原六个分区粮食生产系统可持续性都得到了很大的提升，其中，土石山区粮食生产系统的可持续性指数由 0.14 增长至

0.17，各分区可持续性指数增长率从高到低依次为：土石山区>黄土高塬沟壑区>黄土丘陵沟壑区>河谷平原区>农灌区>沙地和沙漠区。工程的实施显著提高了自然资源系统的可持续性，由此提高了粮食生产系统的可持续性水平。

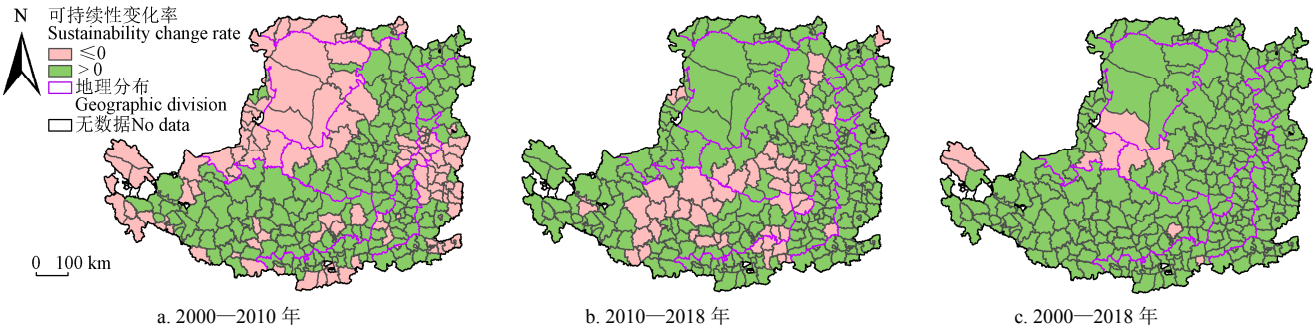


图 6 退耕还林还草背景下粮食生产系统可持续性的演化特征

Fig.6 Evolution characteristics of sustainability of grain production system under the background of Grain for Green Project

由于退耕还林还草工程的实施，2000—2010 年黄土高原粮食生产系统可持续性显著提升。粮食生产系统可持续性增长的区域主要分布于黄土丘陵沟壑区东部、土石山区北部和南部、黄土高塬沟壑区和河谷平原区。究其原因，退耕还林还草主要发生在黄土高原中部，尤其是在黄河中游段的西侧最为集中，还包括宁夏回族自治区南部、青海省的东部地区^[32]。随着工程的实施这些县域耕地的平均海拔和坡度分别下降了 17.94 m 和 0.91°，由此提高了该区域的水源涵养能力，降低了土壤侵蚀力度，使得自然资源系统可持续性指数增长了 14.54%。粮食生产系统可持续性下降的区域主要分布于农灌区、沙地和沙漠区、黄土丘陵沟壑区西部和土石山区的中部地区，这是由于耕地面积下降所致，这些县域耕地面积较 2000 年下降了 7.28%，相应自然资源系统可持续性较 2000 年下降了 17.46%。2010—2018 年黄土高原粮食生产系统可持续性也有较大提升，仅有 48 个县域粮食生产系统可持续性呈下降趋势，主要分布于黄土丘陵沟壑区中部和南部、黄土高塬沟壑区中部及河谷平原区的中部地区。2000—2018

年黄土高原粮食生产系统可持续性整体趋好。西部和中部少量县域呈下降趋势，该区域耕地面积和水源涵养能力分别减少了 15.06%和 8.76%，粮食生产系统可持续性下降主要受水源涵养能力和耕地面积变化的影响。综上所述，退耕还林还草工程虽减少了粮食生产的物质基础，但其通过重构耕地空间格局，提高了耕地质量，同时降低了耕地的海拔和坡度，减小了土壤侵蚀强度，增强了水源涵养能力，最终促进了黄土高原粮食生产系统的可持续性的提升。

3 讨论

综合借助地形地势、因地制宜与因时制宜选择不同的发展模式是改变粮食生产能否可持续、高质量发展的关键。2018 年黄土高原大部分县域处于中高可持续性等级，低可持续县域主要分布于土石山区的中部、黄土丘陵沟壑区的东部和南部。土石山区山地多由薄层黄土所组成，植被条件较好，为黄土高原水源涵养地区，因此应大力推进以小流域为单元的整体综合整治，因地制宜，做好山川田、缓坡地等农田基本建设。黄土丘陵沟壑区

15° 以上的土地面积约占全区面积的 50%~70%，水源短缺、耕地质量较差、农业生产困难，因此应以种植灌草为主，在防风固土控制土壤侵蚀的基础上，发展建设部分基本农田来保障粮食生产的可持续发展。其余区域粮食生产系统大都处于中高可持续性等级，因此应巩固退耕成果以维持粮食生产系统的可持续性。粮食生产系统的可持续发展有赖于自然资源、社会经济和粮食产出的协调发展，因此要保证将生态安全与粮食生产活动放在同等重要的地位。

从短期考虑，旨在改善生态环境状况的退耕工程可能造成部分地区粮食减产，甚至可能给当地的粮食生产问题造成更大压力^[24,33]。但长期来看，退耕还林还草对粮食生产具有显著的正向影响，工程的实施增加了植被覆盖，减少了水土流失，提高了生态服务功能，促进了粮食生产系统可持续发展，这与黄麟等^[23-24]的研究结果一致。粮食问题是黄土高原区域首要问题^[33]，扩大种植面积、提高作物单产是粮食增长最基本的两个途径^[8,34]。扩大种植面积这种外延式发展带来的粮食产量的增长不仅增加了区域水资源压力，还容易造成土地沙化，因此提高单产是黄土高原地区粮食产量提升的重要手段。退耕背景下，黄土高原粮食生产系统可持续性整体趋好，仅沙地和沙漠区南部、黄土丘陵沟壑区西部和黄土高塬沟壑区西北部少量县域呈下降趋势，这主要是由耕地面积和水源涵养能力下降所致，对这些地区建议放缓退耕力度以维持粮食生产所需的耕地资源，同时巩固退耕成果以提高水土保持能力，提高粮食供给服务与生态调节服务之间的协同。生态修复需遵循“宜草则草、宜荒则荒、宜林则林”原则，一个最优的、多目标的生态系统管理必须最大限度地提高协同、尽量减少权衡，以保证多重服务之间协同发展。此外应对黄土高原全域实行“退耕还水”，在积极发展管灌、滴灌技术的同时适度地减少耕地面积来缓解区域用水压力，保护土壤环境。充分利用现有水资源，提高农业技术水平，减少水分的无效损耗。耕地面积的减少是限制粮食生产可持续性的直接原因，有限的耕地资源条件下，想要解决粮食安全问题就必须促进单产的提高和种植结构的调整^[35]，单产的增加可通过地膜技术的应用来实现，提高玉米、马铃薯的播种面积也可促进粮食生产的可持续发展^[36]。此外，为了保证工程实施效益能够可持续、最大化的发挥以及保证耕地数量安全，要加强对基本农田的保护，严守耕地红线，并加强对耕地占补平衡工作的监管，以确保耕地数量安全。

本文深入探讨了黄土高原粮食生产系统的可持续性，从退耕还林还草工程实施的背景分析了自然资源系统变化对粮食生产系统的影响，但还存在一定的缺陷。首先，对比退耕实施前后两个阶段的变化可以更好地表明工程实施效果，但由于 2000 年以前黄土高原各县区统计数据不完善，因此未能对工程实施阶段和其他阶段进行对比分析；此外，在选取指标过程中，灌溉对黄土高原粮食生产系统的影响较大，但由于涉及县域多数数据难以获取，因此未能分析灌溉对粮食生产系统可持续

性的影响。其次，退耕还林不仅对自然资源系统影响深远，也影响着农业经济社会的发展，本文未能考虑由退耕导致的社会经济系统变化对粮食生产系统的影响；文章仅从地理学宏观角度分析了退耕的影响，并未区分天然林及人工林对区域水土保持能力的影响，今后将尝试从生态学视角对其进行进一步评估，使研究更加的完善。再者，本文仅对黄土高原所有县域粮食生产系统可持续性的演变特征进行分析，并未对低可持续地区未来的发展方向进行深入的研究。因此，依据粮食生产系统发展状况提出具有针对性的对策也是下一步亟需完善的问题。

4 结 论

本文依据黄土高原各县域 2000、2010 和 2018 年三期数据，构建了粮食生产系统可持续性评价指标体系，分析了粮食生产系统可持续性的时空变化。同时研究了退耕还林还草工程对自然资源系统指标的影响，探讨了退耕还林还草背景下粮食生产系统可持续性的演变特征。主要结论如下：

1) 2000—2018 年黄土高原粮食生产系统可持续性指数增长达到 68.78%，粮食生产系统可持续性呈现增强的趋势，且粮食生产系统由自然资源供给为主导，转变到以社会经济发展为主导的阶段。

2) 2000 年黄土高原粮食生产系统可持续性差异较小，大都处于中低可持续性等级。2000—2010 年、2010—2018 年粮食生产系统可持续性指数增长率分别达到 31.03% 和 28.81%，因此 2000—2010 年是黄土高原粮食生产系统可持续性大幅提升阶段。

3) 2000—2018 年黄土高原土地利用变化特征为耕地、未利用地和草地面积减少，建设用地、林地和水域面积呈现不同程度的增长。退耕还林还草工程对自然资源系统的变化影响显著，退耕背景下耕地大幅减少、其平均海拔和坡度也呈下降趋势。工程的实施使得黄土高原土壤侵蚀模数下降，水源涵养能力不断提升，对黄土高原水土保持具有重要意义。

4) 退耕背景下研究区粮食生产系统的可持续性明显高于退耕前，工程的实施提高了粮食生产系统的可持续性。黄土高原 6 个分区可持续性指数增长率从高到低依次为：土石山区>黄土高塬沟壑区>黄土丘陵沟壑区>河谷平原区>农灌区>沙地和沙漠区。由此，黄土高原地区的自然资源可持续发展对粮食生产系统的可持续发展存在着正向的促进作用。

【参 考 文 献】

- [1] 张秋梦, 杨方社, 李飞. 改革开放以来中国粮食生产空间重构[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1426-1438.
Zhang Qiუმeng, Yang Fangshe, Li Fei. The grain production space reconstruction in China since the reform and opening up[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1426-1438. (in Chinese with English abstract)
- [2] Garnett T, Appleby M C, Balmford A, et al. Sustainable intensification in agriculture: Premises and policies[J].

- Science, 2013, 341(6141): 33-34.
- [3] 段健, 徐勇, 徐小任. 1985-2015 年黄土高原地区粮食生产空间格局变化及原因[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 381-388.
- Duan Jian, Xu Yong, Xu Xiaoren. Spatial pattern and changes of grain production in Loess Plateau region between 1985 and 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 381-388. (in Chinese with English abstract)
- [4] Berry E M, Dernini S, Burlingame B, et al. Food security and sustainability: Can one exist without the other?[J]. Public Health Nutrition, 2015, 18(13): 2293-2302.
- [5] Garnett T. Three perspectives on sustainable food security: Efficiency, demand restraint, food system transformation. What role for life cycle assessment?[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 73(15): 10-18.
- [6] 孙从建, 张文强, 李新功, 等. 基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 165-172.
- Sun Congjian, Zhang Wenqiang, Li Xingong, et al. Evaluation of ecological effect of gully region of loess plateau based on remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(12): 165-172. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王兵, 张光辉, 刘国彬, 等. 黄土高原丘陵区水土流失综合治理生态环境效应评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 150-161.
- Wang Bing, Zhang Guanghui, Liu Guobin, et al. Ecological and environmental evaluation for water and soil loss comprehensive harness in Loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 150-161. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘玉, 蒙达, 周艳兵, 等. 京津冀地区粮食产量变化及其作物结构分析[J]. 经济地理, 2014, 34(8): 125-130.
- Liu Yu, Meng Da, Zhou Yanbing, et al. Contribution factors to grain production increase based on gravity center model and LMDI model in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1990 to 2010[J]. Economic Geography, 2014, 34(8): 125-130. (in Chinese with English abstract)
- [9] 芦蔚叶, 姜志德, 张应龙, 等. 保障粮食安全造成的生态价值损失评估模型及应用[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2561-2570.
- Lu Weiye, Jiang Zhide, Zhang Yinglong, et al. The loss of ecosystem services value caused by food security assessment model and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2561-2570. (in Chinese with English abstract)
- [10] 韩思雨, 张路, 陈亚杰. 粮食安全与生态安全双约束下江苏省耕地休耕规模探讨[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 247-255.
- Han Siyu, Zhang Lu, Chen Yajie, et al. Fallow scale of major grain producing areas in Jiangsu Province under food security and ecological safety constraints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(23): 247-255. (in Chinese with English abstract)
- [11] 苏康传, 杨庆媛, 张忠训, 等. 中国耕地差异化休耕模式及技术措施探讨[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 283-291.
- Su Kangchuan, Yang Qingyuan, Zhang Zhongxun, et al. Investigation of differential fallow patterns and technical measures for cultivated land in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(9): 283-291. (in Chinese with English abstract)
- [12] Analie B, F Joseph, Smith M P. Mapping trade-offs in ecosystem services from reforestation in the Mississippi Alluvial Valley[J]. Bioscience, 2016(3): 223-237.
- [13] Onaindia M, Beatriz F, Madariaga I, et al. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation[J]. Forest Ecology & Management, 2013, 289: 1-9.
- [14] Willem V, Emma H, Michael S, et al. Optimizing the allocation of agri-environment measures to navigate the trade-offs between ecosystem services, biodiversity and agricultural production[J]. Environmental Science & Policy, 2018, 84: 186-196.
- [15] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 等. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素: 以延安市为例[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3443-3454.
- Sun Yijie, Ren Zhiyuan, Hao Mengya, et al. Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services, and its influencing factors in Yanan, Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3443-3454. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄麟, 曹巍, 祝萍. 退耕还林还草工程生态效应的地域分异特征[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4041-4052.
- Huang Lin, Cao Wei, Zhu Ping. The regional variation characters of ecological effects of the Grain for Green Project[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4041-4052. (in Chinese with English abstract)
- [17] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6597-6612.
- Deng Yuanjie, Hou Mengyang, Xie Yifan, et al. Impact of the Grain for Green Project on the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6597-6612. (in Chinese with English abstract)
- [18] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's loess plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [19] Wang J, Peng J, Zhao M, et al. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 57-64.
- [20] Geng Q, Ren Q, Yan H, et al. Target areas for harmonizing the Grain for Green Programme in China's Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31: 325-333.

- [21] 璩路路, 王永生, 李裕瑞, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道农业生产功能空间演变特征及其启示[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 259-268.
Qu Lulu, Wang Yongsheng, Li Yurui, et al. Spatial evolution of gully agricultural production function and its enlightenment in loess hilly and gully region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(21): 259-268. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘忠, 李保国. 退耕还林工程实施前后黄土高原地区粮食生产时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 1-8.
Liu Zhong, Li Baoguo. Spatial and temporal changes in grain production before and after implementation of Grain for Green Project in Loess Plateau region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [23] 黄麟, 祝萍, 曹巍. 中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1178-1188.
Huang Lin, Zhu Ping, Cao Wei. The impacts of the Grain for Green Project on the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1178-1188. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郑雪, 姚顺波, 鲁亚楠. 退耕还林工程对粮食生产的影响: 以山西省为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 239-246.
Zheng Xue, Yao Shunbo, Lu Yanan. Impacts of sloping land conversion program on grain production: A case study in Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 239-246. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170.
Liu Youyan, Liu Xingyuan, Zhang Bo, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6161-6170. (in Chinese with English abstract)
- [26] Cao Z, Li Y R, Liu Y S, et al. When and where did the Loess Plateau turn "green"? Analysis of the tendency and breakpoints of the normalized difference vegetation index[J]. Land Degradation & Development, 2017, 29(1): 162-175.
- [27] 戈大专, 龙花楼, 乔伟峰. 改革开放以来我国粮食生产转型分析及展望[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 658-670.
Ge Dazhuan, Long Hualou, Qiao Weifeng. The transformation of China's grain production since reform and opening-up and its prospects[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 658-670. (in Chinese with English abstract)
- [28] Tendall D M, Joerin J, Kopainsky B, et al. Food system resilience: Defining the concept[J]. Global Food Security, 2015, 6: 17-23.
- [29] 张利国, 鲍丙飞. 我国农业系统可持续发展协调度分析[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9295-9303.
Zhang Ligu, Bao Bingfei. Coordination degree of sustainable development of agricultural system in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9295-9303. (in Chinese with English abstract)
- [30] 戈大专, 龙花楼, 李裕瑞, 等. 城镇化进程中我国粮食生产系统多功能转型时空格局研究: 以黄淮海地区为例[J]. 经济地理, 2018, 38(4): 147-156.
Ge Dazhuan, Long Hualou, Li Yurui, et al. The spatio-temporal pattern of multifunctional transformation of China's grain production system in the process of urbanization: the case of Huang-Huai-Hai Plain[J]. Economic Geography, 2018, 38(4): 147-156. (in Chinese with English abstract)
- [31] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控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]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1503-1515. (in Chinese with English abstract)
- [32] 尤南山, 董金玮, 肖桐, 等. 退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 315-323.
You Nanshan, Dong Jinwei, Xiao Tong, et al. The effects of the "Grain for Green" Project on gross primary productivity in the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 40(2): 315-323. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王兵, 刘国彬, 张光辉, 等. 黄土高原实施退耕还林(草)工程对粮食安全的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 241-245.
Wang Bing, Liu Guobin, Zhang Guanghui, et al. Effects of Grain for Green Project on food security on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 241-245. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张利国. 我国区域粮食安全演变: 1994—2008[J]. 经济地理, 2011, 31(5): 833-838.
Zhang Ligu. Evolution of China's regional food security: 1949-2008[J]. Economic Geography, 2011, 31(5): 833-838. (in Chinese with English abstract)
- [35] 胡文海. 我国中部地区粮食生产特征及其对我国粮食安全的影响[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 885-896.
Hu Wenhai. Characteristics of grain production in Central China and its influence on national grain safety[J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 885-896. (in Chinese with English abstract)
- [36] 方彦杰, 张绪成, 侯慧芝, 等. 近 20 年来甘肃省黄土高原区粮食产量的影响因素及未来粮食需求分析[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(4): 165-175.
Fang Yanjie, Zhang Xucheng, Hou Huizhi, et al. Influence factors of grain yield in the Loess Plateau of Gansu Province during the latest 20 years and analysis on its future grain requirement[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(4): 165-175. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal changes of the sustainability of grain production system in the Loess Plateau based on Grain for Green Project

Liu Xiaolin^{1,2}, Lu Xiaoyan¹, Qin Zhangxuan¹, Li Fei^{1,2,3*}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Yellow River Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710127, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China)

Abstract: Sustainability in the grain production system is closely related to the entire food processing and supply chain for the national food security. It is a high demand to explore the sustainability of the Grain for Green Project for the grain production system, in order to accurately assess the relationship between ecological and food security. In this study, a comprehensive evaluation index system was constructed for the sustainability of the grain production system using the relevant data of grain production in various counties and districts of the Loess Plateau in 2000, 2010, and 2018. A typical ecological restoration project "Grain for Green" was then analyzed to clarify the impact of returning farmland on the sustainability of the grain production system. The results show that: 1) The sustainability of the grain production system on the Loess Plateau in 2018 was higher than that in 2000, indicating a gradually increasing trend. Specifically, the sustainability of the grain production system was dominated by the supply of natural resources, and then shifted to a stage dominated by the sustainable socio-economic development. 2) There were small differences in the sustainability of grain production systems on the Loess Plateau, most of which were in the low-to-medium sustainability level in 2000. Furthermore, the sustainable growth rate of the grain production system on the Loess Plateau reached 31.03% and 28.81%, respectively, from 2000 to 2010 and from 2010 to 2018. Therefore, the period from 2000 to 2010 presented a substantial improvement in the sustainability of the grain production system. 3) Although the cultivated land was greatly reduced (-33.48%) under the background of the Grain for Green Project, the average altitude and slope also showed a downward trend (decreased by 20.3 m and 0.88°, respectively), and the soil erosion modulus decreased from 16.14 to 9.34 t/(hm²·a), while the water volume and grain production potential increased by 5.09 mm/km² and 53.75 kg/(hm²·a) annually, respectively. 4) The sustainability of the grain production system exhibited significant improvement under the background of the Grain for Green Project, indicating a positive effect of project implementation on the sustainability of the grain production system in the six sub-regions. More importantly, there was an increase from 0.14 to 0.17 in the sustainability index of the grain production system in the rocky mountainous area, which was the most affected by the project of the Grain for Green. Correspondingly, the Grain for Green Project can return the farmland to the ecologically fragile areas, particularly of soil erosion and land desertification. Therefore, the spatial distribution pattern greatly varied in the quality, average altitude, and height of cultivated land, indicating the reduced material supply of food production. As a result, the soil erosion modulus was reduced to effectively improve the water conservation capacity, the ecological environment, and the sustainability of the grain production system. On the whole, the Grain for Green Project has promoted the sustainability of the grain production system for the better ecological restoration of national food security.

Keywords: land use; grain; Grain for Green Project; temporal and spatial differentiation; sustainability; Loess Plateau