#### DOI: 10.5846/stxb202011132938

纪秋磊,梁伟,傅伯杰,吕一河,严建武,张为彬,金朝,兰志洋.基于 Google Earth Engine 平台与复杂网络的黄河流域土地利用/覆被变化分析.生态学报,2022,42(6):2122-2135.

Ji Q L, Liang W, Fu B J, Lü Y H, Yan J W, Zhang W B, Jin Z, Lan Z X.Land use/cover change in the Yellow River Basin based on Google Earth Engine and complex network. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6):2122-2135.

### 基于 Google Earth Engine 平台与复杂网络的黄河流域 土地利用/覆被变化分析

纪秋磊1,梁 伟1,\*,傅伯杰2,吕一河2,严建武1,张为彬3,金 朝4,兰志洋1

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119

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

3 西安谷博电子智能科技有限公司,西安 710068

4 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100

摘要:黄河流域在中国社会经济发展和生态安全方面的地位十分重要,过去几十年的自然演变和人类活动对其造成了深远影响,系统科学地认识黄河流域的环境格局变化是实现黄河流域高质量发展的重要前提。基于 Google Earth Engine 平台和复杂网络分析方法,解译并分析了 1986 年至 2018 年黄河流域的连续年度土地利用/覆被变化(LUCC)。基于 1000 个独立验证点进行的评估显示解译的覆盖黄河流域 33 年的年度土地利用/覆被数据集的 7 个一级类的总体准确率为 82.6%,15 个二级类的总体 准确率为 74.7%。分析结果显示黄河流域的土地系统在整个研究期间呈现出复杂的时空变化,主要的 LUCC 模式包括:不变或 很小的变化、伴随耕地流失的城市扩张、草地恢复、果园和梯田扩张和森林增加。基于复杂网络方法对黄河流域土地系统的分 析表明,土地利用/覆被转移网络中的高覆盖草地、低植被覆盖地表和落叶常绿混交林与其他地类的转移较频繁,地类节点的中 介中心性和度值较高,是黄河流域土地系统中的关键地类。另外与人类活动关系密切的果园和梯田、谷物耕地和城市及建设用 地节点组成了较为活跃的网络社区结构,它们都有较高的结构多样性、接近中心性,这些地类之间的转移是土地系统中重要的 地类转移类型。时间序列的转移网络分析表明黄河流域的土地系统在 1993—1998 年、2001—2007 年、2011—2014 年存在三个 不稳定时期,这三个不稳定时期的出现可能分别由大量的农业土地开发、退耕还林还草工程和果园梯田的大量增加导致。对黄 河流域的长时间土地利用/覆被动态的系统性分析提供了关于环境政策和社会经济活动对土地系统造成何种影响的见解,表明 黄河流域正朝着实现农民生计安全,区域经济增长和生态环境保护的可持续发展的目标迈进,并为 LUCC 研究提供了新的数据 处理方式和新的系统科学视角,有助于实现区域的高质量可持续发展和理解人与自然系统之间的相互作用关系。 关键词:黄河流域;Google Earth Engine 平台;复杂网络;土地利用/覆被变化

## Land use/cover change in the Yellow River Basin based on Google Earth Engine and complex network

JI Qiulei<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>1,\*</sup>, FU Bojie<sup>2</sup>, LÜ Yihe<sup>2</sup>, YAN Jianwu<sup>1</sup>, ZHANG Weibin<sup>3</sup>, JIN Zhao<sup>4</sup>, LAN Zhiyang<sup>1</sup>

1 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

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

3 Xi'an Gu Bo Electronic Intelligent Technology Co., Ltd., Xi'an 710068, China

4 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**基金项目:**国家自然科学面上基金项目(42071144,41771118);国家重点研发计划重点专项(2016YFC0501601);中央高校基本科研业务费专项 资金(GK202003060)

收稿日期:2020-11-13; 网络出版日期:2021-11-26

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liangwei@ snnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

Abstract: The Yellow River Basin plays an important role in China's economic and social development and ecological security. The natural evolution and human activities in past decades had a profound impact on the Basin. A systematic and scientific understanding of the environmental changes in the Yellow River Basin is an important premise to achieve the highquality development of the Basin. Using landsat imagery (17080 scenes) and the classification and regression trees algorithm, mapped and analyzed the annual continuous land use/cover change (LUCC) of the Yellow River Basin based on the Google Earth Engine platform and complex network analysis methods, and provided a set of 90 m resolution continuous annual land use/cover maps from 1986 to 2018. The assessment based on 1000 independent validation points collected in Google Earth indicated that these maps achieved an overall accuracy of 82.6% for 7 first-degree classes and 74.7% for 15 second-degree classes. The analysis of the land system showed that the Yellow River Basin presented complex temporal and spatial changes during the study period. The main LUCC patterns included no change or little change, urban expansion with croplands loss, grasslands restoration, orchard and terrace expansion, and forests growth. In the land use/cover transfer network, high coverage grasslands, low-vegetated lands, and the mixed forests were the key land class nodes in the land system of the Yellow River Basin, with high degrees and frequent transfers with other classes. In addition, the nodes of orchard and terrace, croplands, and urban and built-up all had high diversity and closeness and form one relatively active network community structure. The transfers between them were more important land transfer types in the land system. Time series transfer network analysis showed that the land system of the Yellow River Basin had three unstable periods in 1993— 1998, 2001-2007, and 2011-2014 with lower average shortest-path length and higher network density and network transitivity. The possible reasons for these three periods are the reclamation of a large amount of agricultural land, the implementation of the Grain for Green program, and the large increase in orchard and terrace, respectively. Based on the data and analysis results, we can further understand the role of the land system in the mutual feedback between society and the environment. The results of LUCC analysis revealed the land use/cover dynamics caused by frequent human activities in the Yellow River Basin, provided insights on the impact of environmental policies and socio-economic activities on the land system, which showed that the Yellow River is moving towards achieving the sustainable development goals of livelihood security, economic growth, and ecological protection. Research provided new data processing methods and new system science perspectives for LUCC analysis, which can help to achieve high-quality regional development and to understand the interaction between human and natural systems.

Key Words: Yellow River Basin; Google Earth Engine; complex network; land use/cover change

土地系统中的土地利用/覆被变化(Land use/cover change,LUCC)既是环境变化的原因又是环境变化产 生的结果<sup>[1]</sup>,是全球环境变化的重要组成。土地利用/覆被是了解人类活动与生态环境之间复杂相互作用的 重要信息来源,对于提高对全球可持续性发展和人地关系的认识至关重要<sup>[2]</sup>。黄河流域是中国重要的生态 走廊和经济地带,但是却遭受着水土流失和环境退化的困扰。脆弱的生态环境和不发达的社会经济使黄河流 域成为人与自然竞争的热点区域。得益于政府实施的大规模生态保护和生态恢复工程,黄河流域及其中部地 区(黄土高原)呈现出中国乃至全球最大的植被绿化趋势<sup>[3]</sup>。但是近些年来,生态系统与人类之间的潜在竞 争仍然激烈,并已经威胁到了黄河流域的可持续发展<sup>[4-5]</sup>。黄河流域在中国的生态安全和经济社会发展方面 具有十分重要的地位,中国政府已经将黄河流域生态环境保护和高质量发展作为一项重大的国家战略,旨在 改善环境,优化水资源配置,改善人民生活质量并促进黄河文化的传承<sup>[6]</sup>。中国希望在黄河流域寻求更加绿 色和可持续的发展策略,在环境保护与经济增长之间找到平衡。在人口增长,资源消耗和环境变化的巨大压 力下,人类社会系统和生态系统的动态变化密集而复杂。为了了解该流域的过去及预测其未来,亟需连续长 时间序列的土地利用/覆被信息和新的研究方法来揭示人与自然系统之间的相互作用关系。

在黄河流域相关的各领域相关研究中,已经有多种土地利用/覆被数据被使用,但是这些数据中的大部分

都是单一某一年或者时间分辨率较低。黄土高原地势起伏大,地表异质性强,复杂的地貌和土地特征影响着 该区域的 LUCC 和生态系统的响应,现有数据的分类策略和分类系统无法准确地描述该地区特殊的土地转 变。借助 Google Earth Engine(GEE)平台及其中可免费获取的大量遥感数据,可以方便快速地解译土地利用/ 覆被图,提供连续高分辨率的地类数据供 LUCC 分析。此外,传统的 LUCC 分析通常采用在各个地类的角度 比较量上的占比和变化,缺乏整体性和系统性。地理科学作为一个复杂巨系统<sup>[7]</sup>,可以使用复杂系统的研究 方法对其进行分析和讨论。复杂网络作为研究复杂系统的有力工具,已经广泛应用在社会学<sup>[8]</sup>、互联网<sup>[9]</sup>、 疾病传播<sup>[10]</sup>等研究领域中,并且已有部分研究使用了相关方法来分析一些小区域的 LUCC<sup>[11-12]</sup>。但这些研 究使用的土地利用/覆被数据的时间分辨率都不够高,并不能细致系统地分析土地系统在时间上的连续变化。 本研究借助 GEE 平台生产的连续土地利用/覆被信息,以土地系统中的各种地类之间的转移关系为研究对 象,将地类视为网络的节点、地类之间的转化视为网络的连边,识别出控制土地系统的关键地类节点和转移类 型,并在网络的整体结构性质上评价土地系统的稳定性,从而分析黄河流域土地系统的 LUCC 特征及其在时 间上的变化趋势,更好的理解黄河流域过去 33 年发生的变化以及此流域的人与自然和谐的可持续发展过程。

#### 1 研究区概况

本文的研究区域覆盖了黄河流域和黄土高原(图1),总面积为96.7万km<sup>2</sup>,约为中国陆地领土的十分之一。黄河流域是中华文明的发源地,为约1.07亿人的主要淡水源,拥有1260万hm<sup>2</sup>耕地并生产了中国18%的粮食。黄土高原位于黄河流域的中部,是中国四大高原之一,生态环境脆弱,水土流失严重。由于数千年的土壤侵蚀和环境问题,黄土高原70%的地区已经布满丘陵和沟壑,是黄河泥沙的主要来源<sup>[13]</sup>。研究区地形复杂,包括山脉,盆地,亚高原,沟壑,丘陵和冲积平原等地貌类型,海拔-52—6254 m,中西部为半干旱气候,东部为半湿润气候。



Fig.1 Study area

#### 2 数据和方法

#### 2.1 土地利用/覆被数据解译

#### 2.1.1 数据来源及获取

GEE 是由谷歌云计算驱动的地学数据库及数据处理平台,其中包含 PB 级的遥感影像和地球科学数据, 具有行星级的运算处理能力,为研究和开发人员提供了一个方便快捷的数据采集、处理和分析平台<sup>[14]</sup>。本研 究使用了 33 年的 Landsat 影像数据和其他辅助数据来解译 1986—2018 年黄河流域的年度土地利用/覆被图

#### (表1)。所有这些数据都可以在 GEE 中直接免费获得。

Table 1 Datasets used in this study									
数据集 Dataset	GEE ID GEE ID	数据提供方 Dataset provider	时间段/年 Period	空间分辨率 Spatial resolution					
Landsat 5 地表反射率数据 Landsat 5 surface reflectance data	LANDSAT/LT05/C01/T1_SR	USGS	1986—2011	30 m					
Landsat 7 地表反射率数据 Landsat 7 surface reflectance data	LANDSAT/LE07/C01/T1_SR	USGS	2012	30 m					
Landsat 8 地表反射率数据 Landsat 8 surface reflectance data	LANDSAT/LC08/C01/T1_SR	USGS	2013—2018	30 m					
SRTM 数字高程数据 SRTM digital elevation data	USGS/SRTMGL1_003	NASA/USGS/JPL	2000	30 m					
SRTM 地形多样性数据 SRTM topographic diversity data	CSP/ERGo/1_0/Global/SRTM_ topoDiversity	Conservation Science Partners	2000	270m					

表1	本研究使用的数据集
----	-----------

Landsat 计划是美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的联合项目,以 30 m 的空间分辨率记录整个地球表面,并提供了几十年的全球地表观测数据。由于 2003 年 5 月 31 日 Landsat 7 卫星的机载扫描行校正器出现的故障,所有之后的 Landsat 7 ETM+图像都存在数据丢失条带的问题<sup>[15]</sup>,本研究选择了使用 1986 年至 2011 年的 Landsat 5、2012 年的 Landsat 7 和 2013 年至 2018 年的 Landsat 8 的地表反射率数据,这些数据都已经完几何精校正和大气校正,并且包括了使用 CFMASK 算法生成的云、阴影、水和雪的掩模波段。SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)数字高程数据由 NASA 喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提供,分辨率为 30 m。全球 SRTM 地形多样性数据计算自 SRTM 数字高程数据,它表征了物种可将某地作为栖息地的各种湿度和温度条件,意味着更多样的地形气候生态位可以支持物种更高的持久性和多样性<sup>[16]</sup>。

2.1.2 土地利用/覆被分类系统

根据所使用数据的特性和黄河流域的区域特征,本研究设计了适用于黄河流域的分类系统(表 2)。草地 生态系统是研究区域最重要的生态系统之一,不同地区的草地因气候条件差异造成生长状况不同,本研究根 据草地覆盖度将草地分为低、中、高覆盖草地。此外,自 1999 年实施的退耕还林工程至今已有 20 年,作为促 进农村生态和经济发展的重要措施,退耕还林工程鼓励农户种植林木,其中经济林木(例如果树)占了很大比 例。同时,作为沟道治理工程和水土保持工程的重要措施,广泛分布在黄土高原上的以种植果树和农作物为 主的人工梯田在减轻水土流失和加强农业生产方面发挥着重要作用。因此,本研究的分类系统增加了"果园 和梯田"类别,将农业用地分为了"谷物农田"和"果园和梯田"两类。本研究的分类系统共定义了 7 个一级类 别,15 个二级类别,每个类别的名称及详细说明见表 2。

#### 2.1.3 分类和验证

针对连续年度土地利用/覆被数据的生产,本研究使用了一个高效的融合多变量要素的土地利用/覆被类型分类框架(图2)。数据生产过程完全基于 GEE 平台,包括 Landsat 数据的预处理、年度影像合成、训练样本 绘制、分类与回归树(Classification and Regression Trees, CART)<sup>[17]</sup>算法分类、结果优化和结果的评估。

经过云量筛选后(云覆盖率<10%),从1986年到2018年,在研究区域总共获得了17080景Landsat影像, 其中包括12957景的Landsat 5、527景的Landsat 7和3596景的Landsat 8影像,平均每年获得517景影像,并 且更多的影像分布在高纬度地区。为了使用足够数量的高质量Landsat影像用于目标年份的分类,本研究选 择 24 个月为影像选择的时间窗口。将目标年时间窗口中的 Landsat 数据进行筛选、去云和数据修复后,使用 中位数合成方法合成研究区域的年度影像。除了 Landsat 本身的 6 波段(蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波 红外 2),还加入了高程、坡度、SRTM 地形多样性数据和四个遥感指数作为年度分类的特征集,使用的四个遥 感指数包括归一化建筑指数(Normalized Difference Built-up Index, NDBI)<sup>[18]</sup>、归一化湿度指数(Normalized Difference Moisture Index, NDMI)<sup>[19]</sup>、土壤调节植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)<sup>[20]</sup>和归一化植 被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)<sup>[21]</sup>。另外还加入了最大 NDVI 和最小 NDVI(目标年份 内对应位置上所有影像像素 NDVI 值的 95%和 5%分位数)来帮助区分落叶和常绿植被。

Table 2 The classification system of land use/cover in this study								
一级类	二级类	说明						
First-degree class	Second-degree class	Description						
林地 Forests	落叶阔叶林	以落叶阔叶林木为主(冠层>2m,林木覆盖率>60%)						
	常绿针叶林	以常绿针叶林木为主(冠层>2 m,林木覆盖率>60%)						
	落叶常绿混交林	以落叶林木和常绿林木为主(每种占 40%—60%)的混交林地(冠层>2 m, 林木覆盖率>60%)						
灌丛 Shrublands	灌丛	以矮小的木本多年生灌木为主(1—2 m 高),>60%的覆盖率						
草地 Grasslands	低覆盖草地	覆盖度较低的草地,<30%的覆盖度,多为矮小的一年生旱生草本植物						
	中覆盖草地	覆盖度中等的草地,30%—60%的覆盖度						
	高覆盖草地	覆盖度较高的草地,>60%的覆盖度,多为多年生温带草本植物						
农业用地 Agricultural lands	谷物耕地	以一年生草本农作物(<2 m)为主。有 80%以上的谷物种植						
	果园和梯田	在坡地上生长的农业用途的人工植被的混合,包括果园和梯田						
城市及建设用地 Urban and built-up	城市及建设用地	至少 60% 的面积被建筑材料、运输用地或其他不透水面所覆盖						
水体 Water bodies	地表水	至少 60% 的区域被地表液态水所覆盖						
	湿地	长时间被淹没的土地,其水体覆盖率为30%—60%,植被覆盖率大于10%						
	积雪和冰	至少有 60% 的面积被积雪和冰覆盖						
沙漠和低植被覆盖地表	沙漠和裸土	至少 60% 的区域被沙漠或裸露的岩石和土壤覆盖						
Desert and low-vegetated lands	低植被覆盖地表	至少 60% 的地区是植被覆盖率不足 10% 的低植被土地, 例如冻原和盐碱地						

表 2	本研究的地类分类系统
表 2	本研究的地尖分尖系统

用于训练的每个目标年的参考样本均匀地分布在研究区域内,在这些参考样本中提取出用于分类器训练 的特征值。参考样本是在 GEE 中借助 Landsat 的 RGB 真彩色合成影像和 Google Earth 高分辨率图像进行视 觉判断并手动绘制的。针对这种规模大类别多的分类,比较了多种监督分类方法的适用性和效率,本研究选 择了 CART 作为分类器算法。CART 分类器由基于数据集中变量的规则集合构建预测模型,对数据空间进行 递归划分,根据每个数据空间分区内的预测变量和目标变量来拟合预测模型,最后获得完整的决策树。针对 分类过程中的过度拟合现象,CART 算法使用交叉验证对决策树进行修剪。如果树枝保持较高的准确率,则 保留该树枝,否则将其删除,最后,获得能够模拟数据集的最优二叉树。在每年的分类中,随机使用 80%的参 考样本参加训练,其余 20%用于验证分类器的训练精度。为了进一步优化分类结果,本研究使用分类器对每 一年进行 10 次分类,并将它们众数合成。然后在时间序列的分类结果中使用众数时间滑动窗口进一步调整 数据集的时间一致性,滑动窗口会将焦点年度的土地类别标签更新为时间窗口内所有类别标签的众数值。本 研究在 33 年中使用参考样本测试了 3 年和 5 年滑动窗口,最后选择了效果更好的 5 年窗口。通过这些有效 的分类和优化策略,最后生产出一套黄河流域 90 m 的连续年度土地利用/覆被数据集。

受限于高分辨率 Google Earth 图像在时间上各不相同的可用性,本研究使用随机采样方法从 Google Earth 高分辨率图像中收集了分布在 2001 年至 2018 年的 1000 个带有高分辨率图像的空间随机验证点对结果进行 评估(图 3)。验证结果显示数据准确性良好,7 个一级类的准确率达到 82.6%,15 个二级地类的总体准确率 为 74.7%。混淆矩阵显示分类器在积雪和冰,高覆盖草地和常绿针叶林(F1-score 分别为 0.92、0.92 和 0.91)



图 2 本研究的长时间年度土地利用/覆被数据生产的工作流程

#### Fig.2 Workflow for the long-term annual land use/cover production in this study

CART: 分类与回归树 Classification and Regression Trees; NDBI: 归一化建筑指数 Normalized Difference Built-up Index; NDMI: 归一化湿度指数 Normalized Difference Moisture Index; SAVI: 土壤调节植被指数 Soil Adjusted Vegetation Index; NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index

的分类中表现更好,但在中覆盖度草地,低植被覆盖地表和低覆盖草地上表现稍差(F1-score 分别为0.55、0.61 和0.67)(表3)。在沙漠和裸土与低植被覆盖地表之间,以及在谷物农田与果园和梯田之间存在一些错误分 类,但它们仍属于相同的一级类别。此外,由于低覆盖度草本植物的光谱特征与收获后的农田相似,因此谷物 农田易被误分类为低覆盖草地。



图 3 在 Google Earth 中收集的 1000 个独立的空间随机验证点的分布。

**Fig.3** The geographical distribution of 1000 independent random validation points collected in Google Earth 插图是验证点的示例, *N* 表示验证点在各年份的数量, *n* 表示验证点在各类别的数量

http://www.ecologica.cn

#### 2.2 复杂网络视角下的地类转移

将黄河流域的土地系统视为一个复杂系统,基于复杂网络方法,结合 GEE 得到的黄河流域连续年度 LUCC 信息,构建土地利用/覆被转移网络。其中网络的节点为各个地类,连边为两个地类连续两年之间的转 移关系。描述 LUCC 的复杂网络属于有向有权网络,连边由转出地类指向转入地类,连边的权重为地类转化 的面积。基于此所构建的全时期土地利用/覆被转移网络见图 4,网络中节点的大小表征着地类节点的度,连 边的粗细表征着地类转移的面积,连边的颜色表征转移发生的年份。节点的不同颜色代表着根据连边的中介 中心性监测出的不同社区结构<sup>[22]</sup>,即从土地系统中划分出的包含更加紧密联系的地类节点的土地子系统。 本文对全时期土地利用/覆被转移网络中节点进行分析的度量指标主要包括:中介中心性<sup>[23]</sup>、度<sup>[24]</sup>、接近中 心性<sup>[25]</sup>和结构多样性<sup>[26]</sup>(表 4)。

				Table	5 COL	nusion	matin	or muc	pendem	, vanua	uon po	mus set.					
类别缩写	i							产	品预测	类别 Pre	diction						
Class		DBF	ENF	MF	Shrub	LCG	MCG	HCG	Crop	OT	UB	Water	Wet	Snow	DB	LV	PA
地面真实类别	DBF	58	0	5	1	0	0	0	0	5	0	0	1	0	0	0	83%
Reference	ENF	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
	MF	8	1	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85%
	Shrub	2	3	1	32	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	78%
	LCG	0	0	0	0	64	20	0	6	9	0	0	0	0	2	7	59%
	MCG	7	0	5	2	2	51	4	2	7	2	0	1	0	5	3	56%
	HCG	1	0	7	0	0	1	159	2	3	1	0	1	0	2	4	88%
	Crop	1	0	2	0	12	14	0	96	23	4	0	3	0	2	1	61%
	OT	3	0	3	3	2	2	0	6	77	0	0	0	0	0	2	79%
	UB	0	0	0	0	2	1	0	0	3	31	0	1	0	0	2	78%
	Water	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	25	2	0	0	0	83%
	Wet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	12	0	0	0	86%
	Snow	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	100%
	DB	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	26	0	96%
	LV	0	0	0	0	0	4	3	1	0	0	0	0	3	6	28	62%
	UA	72%	83%	68%	84%	78%	54%	96%	85%	59%	76%	96%	57%	86%	60%	60%	75%
F1-score		0.77	0.91	0.76	0.81	0.67	0.55	0.92	0.71	0.67	0.77	0.89	0.69	0.92	0.74	0.61	

表 3 独立验证点集的混淆矩阵 Table 3 Confusion matrix of independent validation points set

DBF:落叶阔叶林, Deciduous Broadleaf Forests; ENF:常绿针叶林, Evergreen Needleleaf Forests; MF:落叶常绿混交林, Mixed Forests; Shrub:灌丛, Shrublands; LCG:低覆盖草地, Low Coverage Grasslands; MCG:中覆盖草地, Medium Coverage Grasslands; HCG:高覆盖草地, High Coverage Grasslands; Crop:谷物耕地, Croplands; OT:果园和梯田, Orchard and Terrace; UB:城市及建设用地, Urban and Built-up; Water:地表水, Surface Water; Wet:湿地, Wetlands; Snow:积雪和冰, Snow and Ice; DB:沙漠和裸土, Desert and Bare soil; LV:低植被覆盖地表, Low-vegetated Lands; UA:用户准确率 User's accuracy; PA: 生产者准确率 Producer's accuracy, F1-score 是 PA 和 UA 的调和平均数

为了进一步探究黄河流域土地系统过去 33 年在时间尺度上的变化,将全时期土地利用/覆被转移网络拆 分成 32 个两年之间的土地利用/覆被转移子网络,每一年的土地类型作为网络中的节点,每连续两年之间的 土地利用/覆被转移作为网络的连边。计算出每两年之间土地利用/覆被转移子网络的度量指标,分析时间序 列子网络度量指标的变化,从而揭示黄河流域土地系统结构的变化规律,使用的网络结构度量指标包括:平均 最短路径长度<sup>[27]</sup>、网络密度<sup>[28]</sup>和网络传递性<sup>[29]</sup>(表4)。

#### 3 结果与讨论

#### 3.1 土地利用/覆被变化时空分析

1986—2018年间,黄河流域最主要的地类是草地,平均占总面积的42.9%,其中包括分布于黄河流域上游的高覆盖草地(18.8%)、黄土高原西北部的中覆盖草地(12.5%)和中部的旱生的低覆盖草地(11.6%)。其次是分布在平原及丘陵沟壑区的农业用地,谷物农田与果树和梯田面积相当,共占黄河流域总面积的29.6%。接下来依次是包括三类森林类型的林地(12.9%),灌丛(3.0%)和城市及建设用地(3.0%)。水体面积最小

#### (2.2%),主要分布在黄河源区和黄河干流(图5)。



图 4 全时期地类转移网络和网络的社区结构

Fig.4 Land use/cover transfer network of the whole period and its community structure

Table 4 Structural properties of network									
度量指标	度量对象	定义	说明						
Properties	Object	Definition	Description						
中介中心性	世上	网络中经过某节点的最短路径占全部最短	<b>西土的唐末三次</b> 世上风叶西夕的县后收久						
Betweenness	思い	路径的比例	史人的祖衣小肉,自然空过史多的取短始任						
度 Dograd	节点	由该节点指出(出度)或指向(入度)该节点 的选进数量	更大的值表示该节点与更多的节点直接连接						
begree by the		时建过效里	要与处理书言这些专家社会学者生的权						
接近中心性 Closeness	节点	来个下点到所有具他下点的最短路径距离 的累加起来的倒数	更大的值表示该 下点距具他所有 下点路径 更短						
结构多样性	节点	表征连接某节点的连边的权重的香农熵	更大的值表示该节点的邻居节点属于更多的						
Diversity			<b>进</b> 迪分重						
平均最短路径长度 Mean shortest paths	网络整体	网络中所有节点对的最短路径长度的平 均值	更小的值表示该网络中的节点之间能更加容 易的通过最短路径连接						
网络密度 Density	网络整体	网络中实际存在的边数与可容纳的边数上 限的比值	更大的值表示该网络中的连边越多						
网络传递性		表征网络中每个节点的两个相邻节点相连	更大的值表示该网络中拥有相同邻居节点的						
Transitivity	网珀整体	的概率的大小	节点之间更容易连接						

#### 表 4 网络结构度量指标及说明

研究期间内,黄河流域的土地利用/覆被在总面积和空间格局上发生了重大变化,通过各类土地利用/覆 被类型变化速率的可视化图,可以明显的观察出 LUCC 的时空特征。根据各个地类的变化速率及空间分布, 使用 k 均值聚类算法识别出了黄河流域的五个 LUCC 模式(图 6),如下:(1)不变或者很小变化,(2)伴随耕地 流失的城市扩张,(3)草地恢复,(4)果园和梯田扩张,(5)森林增加。

33年间黄河流域的 LUCC 呈现出明显的时空特征。城市及建设用地面积增长了 88%,谷物耕地面积减 少了 15%,且都主要分布在黄河的中下游地区(图 6)。1986年至 2018年的土地利用/覆被转移矩阵显示从 谷物耕地向城市及建设用地的转移占了总变化面积的 5.7%(20200 km<sup>2</sup>),这些城市扩张主要发生在一些城市 及其周围的农村地区,并在 2000年之后加速发展(图 6)。这对保障地方和区域粮食安全提出了巨大挑战。



图 5 2018 年黄河流域土地利用/覆被的空间分布及研究期间各一级土地利用/覆被类型的平均面积百分比

Fig.5 Spatial distribution of land use/cover of the Yellow River Basin in 2018 and the average area percentage of each first-degree land use/cover class during the study period

因此,为了满足不断增长的粮食需求和实现地区可持续发展,应考虑通过农业集约化和更好的土地管理措施 来增加粮食收获面积,并避免过度耕作和农业污染,保护耕地,守住耕地红线。

数据结果显示,伴随着沙漠和低植被覆盖地表面积的减少,在毛乌素沙地出现了连续的草地面积增长的 区域(图 6),表明了国家生态系统保护政策如退耕还林还草和天然林保护工程的效益明显<sup>[30]</sup>。1986—2018 年,研究区内的沙漠裸土面积减少了 24%(9637 km<sup>2</sup>),表明该区域的植被覆盖正在逐渐恢复。但是黄河流域 的某些地区仍面临着土地退化的问题,通过对 LUCC 的分析,本研究还发现了黄河源区严重的水体萎缩,消失 的水体中大部分退化为低植被覆盖地表或高覆盖度的草地(图 6),这些变化主要是由于人类活动压力增加(例 如过度放牧)和升温引起的多年冻土融化导致的水量下降<sup>[31-32]</sup>导致。水体面积的减少可能会使这个脆弱的生 态系统转变为不可逆的状态,造成严重的生态环境问题,还可能会影响到黄河中下游地区的水资源供给。

黄河流域的森林和草地基本表现为减少-增加-减少的变化趋势。最开始的减少主要因为该地区早期的 环境破坏和农业开垦,之后的增加主要来源是退耕还林还草等环境保护政策带来的植被恢复,再次减少主要 来自农业发展和森林管理对土地利用的改变作用。据报道,1999—2012年宁夏、陕西和山西省的绿化总面积 达到 3.8×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>(占三省面积的11%)<sup>[33]</sup>,大规模的植树造林导致了森林的快速增加<sup>[34–35]</sup>。2011年,第一轮 退耕还林所有林种补偿全部到期<sup>[36]</sup>。2012年后,在集中连片贫困的山区,如六盘山和吕梁山等地,出现了森 林流失现象。在这些地区,一旦政府补偿结束或补偿不足,居住在这些山区和丘陵地带的农民可能会再次将 其土地上的林地转变为农业用途<sup>[37–40]</sup>。另一方面,LUCC信息还表明,大多数损失的森林已转变为果园和梯 田,1986年至 2018年的土地利用/覆被转移矩阵显示由林地,草地和谷物耕地到果园和梯田的转移占了总变 化面积的 19.8%(69586 km<sup>2</sup>),是最主要的 LUCC类型。大量的土地向果园和梯田的转移反映了退耕还林还 草政策的变化,具体而言,与第一轮退耕还林还草工程(1990—2007年)相比,该工程的第二轮(于 2014年启 动)更加鼓励农民发展经济林业,比如种植果树、药材等,旨在使贫困的群体摆脱贫困并促进农村的经济发 展,鼓励经济林木种植,增加其经济补偿<sup>[41]</sup>。但这可能导致了森林的流失,2014年后果园和梯田面积的迅速

2131





# **Fig.6** Spatio-temporal distribution of land use/cover change patterns and area changes of each class in Yellow River Basin 每个子图为黄河流域 1986—2018 年期间各地类通过显著性检验(P<0.05)的面积比变化的空间分布。通过线性回归获得每个类别在每个网格(0.5°)中的面积比的变化率。灰色网格表示变化不显著或者变化率在 0.1%/a 以下(-0.1 至 0.1)

http://www.ecologica.cn

扩张进一步证实了这一点。草地面积变化的原因也同样可以解释。流域内草地面积的变化和部分的林地的 萎缩提醒人们需要继续发展和巩固退耕还林还草工程的成果,在提高农业质量效益和保障农民收入的同时, 人们还需要进一步加强对生态林地的保护。此外结果还证明 LUCC 的长期持续监测对于评价和评估相关环 境政策的现有成就至关重要。

3.2 地类节点分析

本研究基于全时期土地利用/覆被转移网络对各个地类的转移特点进行分析,探究它们在网络中的地位 和作用。节点的度只能在一定程度上表征节点的重要程度。然而中介中心性,即介数,则能在考虑网络整体 连通性的角度考察节点重要地位。地类节点的介数越大表明越多的土地利用/覆被转移路线会经过此节点, 则该地类节点越关键越重要。本文把各个地类节点的度量结果按照中介中心性进行排序列于表5中,在全时 期土地利用/覆被转移网络中,高覆盖草地、低植被覆盖地表和落叶常绿混交林等地类节点不仅中介中心性 强,而且度值、接近中心性也同样较高,这些关键地类节点在LUCC中起到类似桥梁的过渡作用,比如中覆盖 草地→高覆盖草地→灌丛/林地的转化,或者耕地→低植被覆盖地表→中/低覆盖草地等。它们对土地系统的 转化模式起到控制作用,是土地系统中的关键地类节点。接近中心性越大表示该节点的地类越容易与其他地 类发生转移。较高的结构多样性表示该地类节点和其他节点之间存在更多的突破社区结构的关键连接。果 园和梯田、谷物耕地和城市及建设用地都有较高的接近中心性和结构多样性,并被聚类到同一个社区之中 (图4),这表明它们是社区结构中较活跃的社区,它们之间的互相转化是土地系统中比较重要的转移类型,这 与人类活动密切相关。结果显示在全部15种地类中,最不活跃的地类节点是常绿针叶林、积雪和冰和灌丛, 它们的中介中心性、度、接近中心性和节点结构多样性都比较低,主要是因为它们在区域内的面积占比很小且 不易发生转移。

Table 5 Measurement statistics of nodes in the land use/cover transfer network during the whole period									
类别 Land use/cover class	中介中心性 Betweenness	度 Degree	出度 Outdegree	入度 Indegree	接近中心性 Closeness	结构多样性 Diversity			
高覆盖草地 High coverage grasslands	3.59	757	376	381	1	0.87			
低植被覆盖地表 Low-vegetated lands	2.54	818	410	408	1	0.88			
落叶常绿混交林 Mixed forests	2.24	756	382	374	1	0.88			
中覆盖草地 Medium coverage grasslands	1.56	769	383	386	1	0.89			
果园和梯田 Orchard and terrace	1.23	744	373	371	0.93	0.9			
湿地 Wetlands	0.94	672	335	337	1	0.86			
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forests	0.86	652	329	323	0.93	0.87			
谷物耕地 Croplands	0.82	782	392	390	1	0.92			
地表水 Surface water	0.58	692	347	345	1	0.9			
沙漠和裸土 Desert and bare soil	0.52	628	310	318	0.88	0.9			
城市及建设用地 Urban and built-up lands	0.36	688	342	346	0.93	0.86			
低覆盖草地 Low coverage grasslands	0.36	685	343	342	1	0.88			
灌丛 Shrublands	0.35	529	267	262	0.93	0.86			
积雪和冰 Snow and ice	0.03	318	157	161	0.88	0.78			
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forests	0.01	292	145	147	0.88	0.78			

表 5 全时期土地利用/覆被转移网络地类节点度量统计

#### 3.3 土地系统稳定性分析

不同时期的土地系统的稳定性存在差异,通过对时间序列的连续两年之间土地利用/覆被转移网络结构的度量进行分析,讨论黄河流域土地系统在时间尺度上的变化特征。本研究计算了三个网络结构的统计度量指标(图7)。平均最短路径反应了网络的稳定性,平均最短路径越小代表该网络中的网络节点之间越能更容易地相互连接,表明网络越活越,土地系统越不稳定。网络密度和网络传递性相同,值越高说明地类之间发生

转移的概率越大,土地系统越活跃。

结果表明黄河流域土地系统在 1993—1998 年迎来 了第一次不稳定时期,转移网络的平均最短路径长度较 小,网络密度和网络传递性较高。该时期土地系统的变 化主要是天然植被的减少和农业用地的增加。自 1990 年以来,由于人口的快速增长和生活水平的提高,人们 对粮食消费的需求不断增加,但耕地资源却仍然有限。 为了遏制耕地的持续减少并确保粮食安全,中国政府在 20世纪 90年代后期提出了一系列的耕地保护政策和 法律(如《土地管理法》、《基本农田保护条例》和耕地补 偿政策等)。在政府政策和经济利益的驱动下,大量的 草地和未利用土地被开垦为农田<sup>[42]</sup>,特别是在山西、内 蒙古、青海、宁夏和甘肃等省和自治区。大量的人类开 垦活动导致耕地面积的增加并致使土地系统出现一定 的不稳定性。



图 7 1986—2018 年时间序列土地利用/覆被转移网络结构度量 统计的变化

Fig.7 Change of the time series land use/cover transfer network structure measurement statistics during 1986—2018

黄河流域土地系统的第二次活跃时期出现在 2001—2007 年,黄河流域正处于退耕还林工程的第一轮时 期(1999—2007 年)。这时各个网络的平均最短路径长度又出现降低,且网络密度和网络传递性较高,此时正 处于退耕还林还草工程的初期,并取得了一定显著成果,结果显示在此期间,黄河流域的林地面积逐步增加且 谷物耕地面积不断减少(图 6)。

2011—2014 年是黄河流域土地系统的第三次不稳定时期,该时期有大量的林地、草地和谷物耕地转移向 果园和梯田。正如前文分析,为进一步巩固退耕还林还草工程的成果并加强贫困地区的扶贫工作,中国政府 于 2014 年开始了新一轮的融资,退耕还林还草工程进入第二阶段。得益于退耕还林还草和农业综合开发等 相关国家政策的不断投资,导致该区域的果树和梯田面积的不断增长<sup>[43—44]</sup>。谷物耕地的面积减少与果园和 梯田面积的增加表明该地区的农业产业结构发生了变化,这些增加的经济林木不仅增加了该区域的植被覆 盖,而且还增加了农户的收入<sup>[35,45]</sup>,促进着社会经济发展与环境保护之间双赢局面的实现。果园和梯田的大 量增加表明中国正朝着实现生计安全,经济增长和生态平衡的可持续发展目标迈进。实际上,中国已通过各 种政策手段为实现全球可持续发展目标(SDGs)做出了巨大的努力<sup>[39,46]</sup>。最近的一项研究表明,从 1978 年到 2015 年,中国在针对土地系统的 16 个主要可持续发展项目上的投资总额为 3785 亿美元,远远超过了其他全 球重要的国家可持续发展项目<sup>[39]</sup>。这些可持续发展项目通过森林生态保护、草地系统恢复和农业产业发展, 大大改善了自然环境和农村地区的生活质量并提高了农业生产效率,促进了人类和自然系统的可持续发展, 体现了中国环境政策与环境治理的成就<sup>[39,47]</sup>。但是研究结果也表明强烈的人类活动将影响土地系统的稳定 性,使土地系统压力增大。并可能会带来一系列生态环境问题,建议流域的未来发展着重于挖掘土地利用潜 力,提升土地利用效率,进一步加强生态服务型用地的保护,实现土地资源的科学可持续利用。

#### 3.4 不确定性

数据评估显示本研究生产的土地利用/覆被数据准确可靠,后续网络分析结果合理。但是其仍然存在一些缺陷。首先,生产的土地利用/覆被数据的质量受到 Landsat 影像质量和数量的限制。此外,本研究中使用的训练数据和验证数据都是由人工采集,并且缺少 2000 年之前的参考资料,这些都会给数据生产和评估带来较大的不确定性。另一方面数据产品的不确定性也会为随后的分析带来误差,比如地类面积的评估和地类转移网络的构建与分析。本研究的数据生产流程完全基于 GEE 平台强大的云存储和云计算能力,大大减轻了本地数据存储和数据处理的压力。因此,尽管存在上述不足和不确定性,本研究独特且适合研究区域的分类系统和包含多源数据的分类方法仍然可以灵活有效地生产此类长时间序列的土地利用/覆盖动态数据,并对

6期

研究区域的土地系统进行系统性分析。

#### 4 结论

本研究基于 GEE 大数据处理平台和复杂网络分析方法, 解译并分析了黄河流域的年度连续 LUCC, 对黄 河流域的土地保护和管理工作有重要参考意义。基于 1000 个独立验证点进行的评估表明本研究生产的覆盖 黄河流域 1986 年至 2018 年的年度土地利用/覆被数据集 7 个一级类别的总体准确度为 82.6%,15 个二级类 别的总体准确度为 74.7%。分析结果表明,由政策、社会和经济因素共同驱动的黄河流域的 LUCC 在整个研 究期间呈现出复杂的时空特征。最主要的 LUCC 是由林地、草地和谷物耕地向果园和梯田的转移(占所有变 化面积的 19.8%)。其次是由谷物耕地向城市及建设用地的转移(占所有变化面积的 5.7%)。研究区 LUCC 主要的模式包括:不变或很小的变化、伴随耕地流失的城市扩张、草地恢复、果园和梯田扩张和森林增加。接 下来本研究借助复杂网络方法分析了黄河流域土地系统的关键地类和系统稳定性的时间变化。土地利用/覆 被转移网络中的高覆盖草地、低植被覆盖地表和落叶常绿混交林和其他地类的转移频繁,中介中心性和度值 较高,是黄河流域土地系统中的关键地类节点。另外和人类活动密切相关的果园和梯田、谷物耕地和城市及 建设用地节点都有较高的结构多样性、接近中心性,是一组较活跃的网络社区节点,它们之间的转移是土地系 统中重要的转移类型。时间序列的土地利用/覆被转移网络分析表明黄河流域的土地系统在 1993—1998 年、 2001—2007年、2011—2014年存在三个不稳定时期,这三个不稳定时期的出现可能分别由大量的农业土地开 发、退耕还林还草工程和果园梯田的大量增加导致。土地系统内各地类的变化和相互转移信息,是理解流域 内社会、经济以及自然相互作用动态演化的关键。基于这些数据以及分析结果,能进一步理解土地系统在社 会与环境互馈中的作用,为环境变化下黄河流域生态系统保护、高质量发展和流域可持续管理政策的制定提 供支撑。对黄河流域的长时间土地利用/覆被动态的系统性分析提供了关于环境政策和社会经济活动对土地 系统造成何种影响的见解,表明黄河流域正朝着实现农民生计安全,区域经济增长和生态环境保护的可持续 发展的目标迈进,突显了基于地学大数据处理平台和复杂系统分析方法的 LUCC 分析对于理解人与自然系统 之间相互作用的重要性,并有助于实现区域的高质量和可持续发展。

#### 参考文献(References):

- [1] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [2] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [3] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.
- [4] Feng X M, Fu B J, Piao S, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [5] Liang W, Bai D, Wang F Y, Fu B J, Yan J P, Wang S, Yang Y T, Long D, Feng M Q. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [6] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 水资源开发与管理, 2019, (11): 1-4.
- [7] 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论.自然杂志,1990,13(1):3-10,64-64.
- [8] Nekovee M, Moreno Y, Bianconi G, Marsili M. Theory of rumour spreading in complex social networks. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 374(1): 457-470.
- [9] Holme P, Kim B J, Yoon C N, Han S K. Attack vulnerability of complex networks. Physical Review E, 2002, 65(5): 056109.
- [10] Liu C Y, Wu X Q, Niu R, Wu X Q, Fan R G. A new SAIR model on complex networks for analysing the 2019 novel coronavirus (COVID-19). Nonlinear Dynamics, 2020, 101(3): 1777-1787.
- [11] 武鹏飞,宫辉力,周德民.基于复杂网络的官厅水库流域土地利用/覆被变化.地理学报,2012,67(1):113-121.
- [12] 张琨,张宝雷,冯朝阳,梁凯.基于复杂网络的小清河流域土地利用/覆被变化研究.水土保持通报,2013,33(4):81-84.
- [13] Zhao G J, Mu X M, Wen Z M, Wang F, Gao P. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the loess Plateau of China. Land Degradation & Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [14] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.

- [15] Markham B L, Storey J C, Williams D L, Irons J R. Landsat sensor performance: History and current status. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(12): 2691-2694.
- [16] Theobald D M, Harrison-Atlas D, Monahan W B, Albano C M. Ecologically-relevant maps of landforms and physiographic diversity for climate adaptation planning. PLoS One, 2015, 10(12): e0143619.
- [17] Breiman L, Friedman J, Stone C J, Olshen R A. Classification and Regression Trees. Routledge: Chapman and Hall/CRC, 1984.
- [18] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(3): 583-594.
- [19] Wilson E H, Sader S A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. Remote Sensing of Environment, 2002, 80 (3): 385-396.
- [20] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.
- [21] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [22] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [23] Barthélemy M. Betweenness centrality in large complex networks. The European Physical Journal B, 2004, 38(2): 163-168.
- [24] Pržulj N. Biological network comparison using graphlet degree distribution. Bioinformatics, 2007, 23(2): e177-e183.
- [25] Okamoto K, Chen W, Li X Y. Ranking of closeness centrality for large-scale social networks//Proceedings of International Workshop on Frontiers in Algorithmics. Changsha, China: Springer, 2008; 186-195.
- [26] Eagle N, Macy M, Claxton R. Network diversity and economic development. Science, 2010, 328(5981): 1029-1031.
- [27] Mao G Y, Zhang N. Analysis of average shortest-path length of scale-free network. Journal of Applied Mathematics, 2013, 2013: 865643.
- [28] Van Wijk B C M, Stam C J, Daffertshofer A. Comparing brain networks of different size and connectivity density using graph theory. PLoS One, 2010, 5(10): e13701.
- [29] Burda Z, Jurkiewicz J, Krzywicki A. Network transitivity and matrix models. Physical Review E, 2004, 69(2): 026106.
- [30] Xiu L, Yan C Z, Li X S, Qian D W, Feng K. Monitoring the response of vegetation dynamics to ecological engineering in the Mu Us Sandy Land of China from 1982 to 2014. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(9): 543.
- [31] Qin Y, Yang D W, Gao B H, Wang T, Chen J S, Chen Y, Wang Y H, Zheng G H. Impacts of climate warming on the frozen ground and ecohydrology in the Yellow River source region, China. Science of the Total Environment, 2017, 605-606: 830-841.
- [32] Song X, Yang G X, Yan C Z, Duan H C, Liu G Y, Zhu Y L. Driving forces behind land use and cover change in the Qinghai-Tibetan Plateau: a case study of the source region of the Yellow River, Qinghai Province, China. Environmental Earth Sciences, 2009, 59(4): 793-801.
- [33] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" Program on the Loess Plateau in China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(12): 2261-2275.
- [34] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic Ecosystem Responses to Natural and Anthropogenic Changes in the Loess Plateau of China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [35] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 260-270.
- [36] 皮泓漪,张萌雪,夏建新.基于农户受偿意愿的退耕还林生态补偿研究.生态与农村环境学报,2018,34(10):903-909.
- [37] Guo J, Gong P. Forest cover dynamics from Landsat time-series data over Yan'an city on the Loess Plateau during the Grain for Green Project. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(17): 4101-4118.
- [38] Song C H, Zhang Y L, Mei Y, Liu H, Zhang Z Q, Zhang Q F, Zha T G, Zhang K R, Huang C L, Xu X N, Jagger P, Chen X D, Bilsborrow R. Sustainability of Forests Created by China's Sloping Land Conversion Program: A comparison among three sites in Anhui, Hubei and Shanxi. Forest Policy and Economics, 2014, 38: 161-167.
- [39] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, Sun X F, Connor J D, Crossman N D, Stafford-Smith M, Wu J G, He C Y, Yu D Y, Liu Z F, Li A, Huang Q X, Ren H, Deng X Z, Zheng H, Niu J M, Han G D, Hou X Y. China's response to a national land-system sustainability emergency. Nature, 2018, 559(7713): 193-204.
- [40] Cao S X, Xu C G, Chen L, Wang X Q. Attitudes of farmers in China's northern Shaanxi Province towards the land-use changes required under the Grain for Green Project, and implications for the project's success. Land Use Policy, 2009, 26(4): 1182-1194.
- [41] 皮泓漪, 张萌雪, 夏建新. 退耕还林生态补偿标准研究——基于宁夏泾源县农户调查数据. 林业经济问题, 2018, 38(2): 39-44.
- [42] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, Zhuang D F, Zhang Z X, Zhang W, Tang X M, Deng X Z. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000; An analysis based on Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 442-456.
- [43] 李亮, 王玺, 孙慧英, 王达菲, 李敏生. 基于偏离份额分析法 黄土高原区水果产业结构及增长分析. 果树资源学报, 2020, 1(4): 72-75.
- [44] 高云飞, 王丽云, 王惠泽, 李鹏飞, 王婷婷. 新时期黄土高原旱作梯田建设思路. 中国水土保持, 2020, (9): 73-75.
- [45] Yang M, Wang S F, Zhao X N, Gao X D, Liu S. Soil properties of apple orchards on China's Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2020, 723: 138041.
- [46] Xu Z C, Chau S N, Chen X Z, Zhang J, Li Y J, Dietz T, Wang J Y, Winkler J A, Fan F, Huang B R, Li S X, Wu S H, Herzberger A, Tang Y, Hong D Q, Li Y K, Liu J G. Assessing progress towards sustainable development over space and time. Nature, 2020, 577(7788): 74-78.
- [47] 国家林业和草原局政府网.中国退耕还林还草二十年(1999—2019).(2020-06-30).http://www.forestry.gov.cn/zlszz/4262/20200701/ 095836370996190.html.