

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.02.013

# 黄河水源涵养区土地利用变化的区域分异特征 及未来格局

梁康<sup>1</sup>, 公丽<sup>1,2</sup>, 宋小青<sup>2</sup>, 张永勇<sup>1</sup>, 刘昌明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 解析黄河水源涵养区历史和未来的土地利用/覆盖变化(LUCC)对于保护黄河流域水土资源和维系生态系统服务功能等具有重要意义。在研究区及其三大子区(I 黄河上游水源区、II 渭河南山区、III 伊洛河区), 基于1990—2020年的土地覆盖产品数据, 采用转移矩阵、地理探测器、CA-Markov模型等方法, 分析LUCC特征、探测驱动因素和预测未来期(2025年)空间格局。结果表明: 自2000s以来, 研究区及分区地类呈现退耕还林还草和建设用地快速增长的2条主线变化趋势, 其中, 全区LUCC主要受到粮食产量、高程和人口密度驱动, I区、II区和III区LUCC的主导驱动因素分别是高程、人口密度和粮食产量。未来生态保护情景相对于自然发展情景, 耕地和建设用地扩张将受到约束, 能更好地保障生态用地面积以支撑水源涵养等生态服务功能。

**关键词:** 水源涵养; 土地利用/覆盖变化; 地理探测器; CA-Markov模型; 黄河流域

**中图分类号:** S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)02-0325-13

土地利用/覆盖变化(LUCC)是全球环境变化的重要原因和结果<sup>[1-2]</sup>, 影响粮食安全、生态安全和社会稳定<sup>[3]</sup>。黄河流域是中华文明的诞生地, 是中国重要的生态屏障<sup>[4]</sup>。1999年开始实施的“退耕还林还草”生态工程, 引起了黄河流域土地利用格局的重大变化, 改善了生态环境<sup>[5-6]</sup>, 减少了水土流失和山洪灾害的发生<sup>[7]</sup>。然而, 随着城镇化快速发展, 黄河流域土地利用/覆盖正在发生新的变化。城镇化和工业化快速发展使得大量农田被建设用地占据, 导致农田面积减少<sup>[8]</sup>, 可能影响黄河流域粮食安全。与此同时, 全球变暖和人类活动等使得黄河流域的土地利用呈现多样化和复杂化的变化态势, 可能会对黄河流域重要生态服务功能区的生态环境产生重大影响<sup>[9]</sup>。因此, 深入研究黄河流域土地利用变化的发展模式、了解历史和预测未来的LUCC, 对区域土地利用规划、粮食安全和生态服务功能的保障具有重要意义。

自1995年“LUCC科学研究计划”实施以来<sup>[2,10]</sup>, 国内外学者们对土地利用/覆盖的时空演变规律、驱动因素分析和模拟预测等方面做了大量研究<sup>[1,11-13]</sup>。其中, 对历史土地利用变化驱动因素的定量解析和未来变化的预测是当前研究的重点和难点<sup>[14]</sup>。土地利用驱动因素分析从定性探究<sup>[15]</sup>转为采用数理统计方法, 例如主成分分析法、相关分析法、logistic回归模型、层次分析法、地理加权回归和地理探测器等<sup>[16-22]</sup>。其中, 地理探测器被广泛应用于定量探析地理要素空间异质性驱动力, 具有适用性强、理论基础可靠、操作简便等优点<sup>[14]</sup>。土地利用变化的模拟预测主要采用模型方法, 经历了从数量到空间格局模拟、从单一模型到耦合模型模拟, 呈现出多模型、多技术和智能化的发展态势<sup>[11,23]</sup>, 涌现出元胞自动机-马尔可夫(CA-Markov)模型、小尺度土地利用变化及效应(CLUE-S)模型和未来土地利用情景模拟(FLUS)模型等<sup>[24-26]</sup>多种技术方法。其中, CA-Markov模型综合了CA模型和Markov模型的优点<sup>[27-28]</sup>, 可以对土地利用类型空间分布和数量演变

收稿日期: 2023-09-07; 网络出版日期: 2024-02-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240204.1421.003>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3201102); 国家自然科学基金资助项目(41971035)

作者简介: 梁康(1986—), 男, 重庆人, 副研究员, 博士, 主要从事流域水文过程演变机理与水资源安全研究。

E-mail: liangk@igsnr.ac.cn

进行预测,得到了国内外学者的广泛认可<sup>[4]</sup>。但其在建立 CA 模型运行规则时,大多数研究基于 logistic 回归方程来校正,可以解决各种因素的非线性和复杂性<sup>[29]</sup>,但在空间分异性探测上略显不足,而将地理探测器的空间分异性探测优势与 CA-Markov 模型相结合,有望提升土地利用模拟预测的准确性和可靠性。综合多种方法优势以实现土地利用变化驱动要素定量解析和未来变化的模拟预测,是当前及未来土地利用研究领域的发展趋势<sup>[30]</sup>。

黄河水源涵养区是黄河流域非常重要的生态功能区,包括黄河源区、秦岭、祁连山、六盘山和若尔盖(“生态五区”<sup>[31]</sup>)重点生态安全屏障,因此,研究该区 LUC 是科学支撑新时代黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的基础。以往研究对该区的界定主要集中于黄河源区和上游水源涵养区<sup>[32-33]</sup>,主要针对三江源、祁连山和若尔盖重点生态功能区,而容易忽略六盘山和秦岭北麓所在的渭河南部山区支流流域及秦岭余脉所至的伊洛河流域。以往该区 LUC 研究更多的是单独对黄河源区<sup>[32]</sup>、渭河流域<sup>[34]</sup>、伊洛河流域<sup>[35-36]</sup>的分散研究,缺乏将渭河南部山区支流流域和伊洛河流域统一纳入黄河水源涵养区范围内开展系统完整的综合研究。

本文以黄河水源涵养区作为研究区,并依据黄河流域重点生态功能区的分布情况和水利部划分的水资源三级分区,将其划分为三大子区和 10 个水资源三级分区,重点对比分析全区、三大子区及 10 个水资源分区的 LUC 特征,定量探析 LUC 的空间分异原因,并结合空间分异原因预估未来的 LUC 情势,期望能为黄河水源涵养区下垫面变化综合分析、黄河流域的水源涵养能力综合评估、水资源和生态安全系统保护等提供参考。

## 1 研究区与数据来源

### 1.1 研究区概况

本文界定的黄河水源涵养区位于 32°N—39°N、96°E—114°E 之间,具体包括自西向东地理位置相互连接的三大区域,即 I 黄河上游水源区(兰州以上流域)、II 渭河南山区(渭河华县以上流域,不含泾河,以下简称“渭河南山区”)和 III 伊洛河区。根据空间分异探析的研究需求,参考水利部划分的全国水资源区划(<http://ghjh.mwr.gov.cn/>),进一步将三大区域划分为 10 个水资源分区(图 1 和表 1)。黄河水源涵养区跨青海、四川、甘肃、宁夏、陕西和河南 6 省,东西长约 1 550 km,南北宽约 710 km,面积约 28.7 万 km<sup>2</sup>,

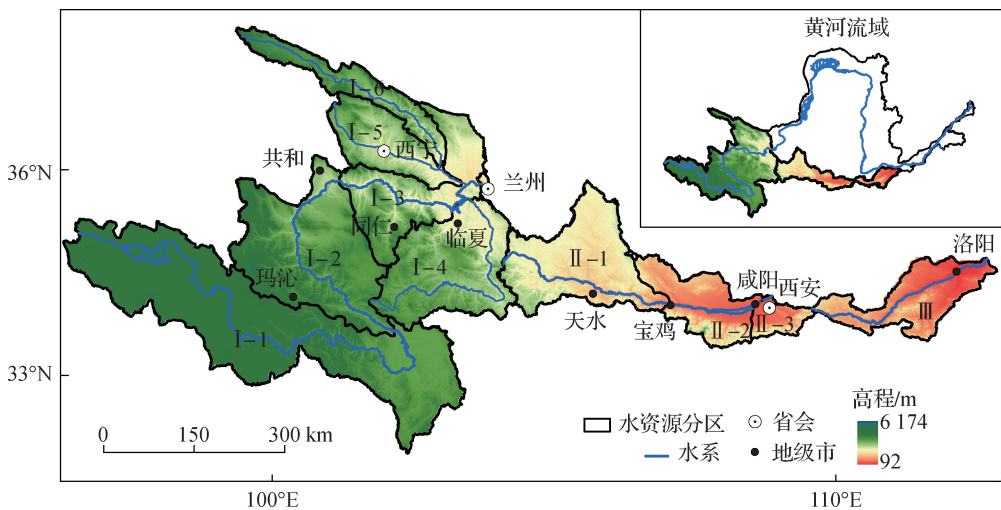


图 1 黄河水源涵养区地理位置及 DEM

Fig. 1 Location and DEM of the water conservation zone of the Yellow River

占黄河流域总面积的38%,贡献了黄河流域约84%的河川年均径流量<sup>[31]</sup>。研究区西北高,东南低,高程范围为92~6 174 m。降水量和多年平均气温都呈由东南向西北递减的特征,雨季集中在6—9月。

表1 黄河水源涵养区水资源分区概况

Table 1 Overview of water resources subzones in the water conservation zone of the Yellow River

水源涵养区	水资源分区编号	水资源分区名称	分区面积/km <sup>2</sup>
I 黄河上游水源区	I-1	河源—玛曲	83 502.88
	I-2	玛曲—龙羊峡	44 151.31
	I-3	龙羊峡—兰州	26 326.81
	I-4	大夏河—洮河	32 860.07
	I-5	湟水	16 330.53
	I-6	大通河享堂以上	14 471.81
II 渭河南山区	II-1	渭河宝鸡峡以上	30 733.28
	II-2	宝鸡峡—咸阳	15 750.75
	II-3	咸阳—华县	4 610.99
III 伊洛河区	III	伊洛河流域	18 139.45

## 1.2 数据来源与处理

本文主要包括两大类数据:土地利用数据与影响土地利用变化的驱动因子数据。本文选用的土地利用数据(1990—2020年,共31期)来自武汉大学黄昕教授团队制作的中国30 m年度土地覆盖产品,该数据基于5 463个目视解译样本,总体精度达80%<sup>[37]</sup>。根据研究需要和参照国家标准《土地利用现状分类:GB/T21010—2007》,对黄河水源涵养区土地利用遥感监测数据重新划分为草地、耕地、林地、未利用土地、水域和建设用地共6类。

基于研究区的实际情况以及驱动因子可获取性、可量化性等原则,本文选取涉及地形地貌(高程、坡度)和水热条件(降水、气温)两方面的4个自然地理因子,以及人口密度、GDP、粮食产量、城镇化率4个社会经济因子。其中,高程数据采用美国国家航空航天局(NASA)发布的全球30 m分辨率DEM数据;坡度数据基于DEM数据得到;将从中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)获取的逐月气温和降水数据处理为年均数据(2000年、2005年、2010年、2015年、2020年共5期);人口密度数据集(2000年、2005年、2010年、2015年、2020年)来自World Pop(<https://hub.worldpop.org/project/categories?id=18>);GDP数据(2000年、2005年、2010年、2015年、2019年)来自Chen等<sup>[38]</sup>修正的实际国内生产总值数据;县级粮食产量和城镇化率数据(2000年、2005年、2010年、2015年和2020年)来自中国经济社会大数据研究平台(<https://data.cnki.net/>)。上述所有数据的空间分辨率均处理为1 km。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用动态变化研究方法

土地利用转移矩阵是分析LUCC的一种有效工具,能够揭示特定时期区域各土地利用类型间的相互转化,包括数量的结构特征和转移方向<sup>[39]</sup>。

本文采用Mann-Kendall趋势检验法检测1990—2020年LUCC趋势显著性。该方法是一种非参数检验方法,其优势在于对异常值不敏感,计算原理简单易懂,且无需检测序列符合某种概率分布<sup>[40]</sup>。本文给定显

著性水平  $\alpha = 0.05$ ，通过统计量  $Z$  值 ( $|Z| > 1.96$ ) 进行显著性检验，当  $Z > 1.96$  时，上升趋势显著，当  $Z < -1.96$  时，下降趋势显著。

## 2.2 土地利用空间分异驱动力分析方法

空间分异性探测是地理探测器的核心特点之一，是揭示内在驱动力的一种新兴统计学手段<sup>[41]</sup>。因子探测通过研究因变量 LUC 的空间异质性，定量探测各驱动因子对 LUC 的解释力 ( $q$ )， $q$  越大，则该因子对土地利用变化的影响越大。公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (1)$$

式中： $q$  的取值范围为  $0 \sim 1$ ； $L$  为影响因子类型数； $N_h$  为类型量  $h$  的样本数， $h = 1, 2, \dots, L$ ； $N$  为全区的样本数； $\sigma_h^2$  为类型量  $h$  的离散方差； $\sigma^2$  为研究区土地利用的方差。

## 2.3 土地利用变化预测模型

### 2.3.1 模型构建

CA-Markov 模型是由 CA 模型和 Markov 模型耦合而成，以适宜性图集和转移矩阵为规则，模拟未来土地利用类型变化。适宜性图集是 CA 的关键核心部分，主要用于模拟土地利用复杂的空间变化<sup>[27]</sup>，转移矩阵作为 Markov 过程的初始转移概率，用于模拟土地利用未来的数量变化。本文在模型构建时，分模型识别期（基期为 2010 年，模拟 2015 年土地利用）、验证期（基期为 2015 年，模拟 2020 年土地利用）和应用期（基期为 2020 年，模拟 2025 年土地利用）3 期进行。以模型识别期为例，构建黄河水源涵养区 LUC 预测模型的 4 个主要步骤为：

(1) 生成土地利用适宜性图集。研究区 2010 年土地利用类型数据作为因变量，选取 2010 年的自然地理因子和社会经济因子作为自变量，将地理探测器计算出的驱动力作为权重，利用布尔交叉法生成 6 种土地利用类型的适宜性图像，进而打包成 2010 年土地利用适宜性图集。

(2) 计算参考期土地利用转移矩阵。采用 Markov 链计算 2005—2010 年识别期的土地利用面积转移矩阵。

(3) 模拟预测土地利用结果。利用 CA-Markov 模型，通过设置  $5 \times 5$  滤波器、循环次数为 5 等参数，基于 2005—2010 年土地利用面积转移矩阵和 2010 年土地利用适宜性图集，模拟得到 2015 年研究区土地利用类型分布图。

(4) 检验模拟预测结果精度。对模拟预测的 2015 年土地利用数据进行数量和空间模拟精度验证，利用 Kappa 指数评价空间模拟精度，利用相对误差评价数量模拟精度，如精度测试通过，则应用此耦合模型模拟未来土地利用。

### 2.3.2 模拟情景设置

模拟情景设置主要是根据流域发展的不同需求而设定，本文设定自然发展情景和生态保护情景 2 种土地利用未来发展情景，并参照上述 LUC 预测模型构建步骤，预测研究区 2025 年土地利用空间分布格局。

(1) 自然发展情景。不考虑任何人类活动和自然条件等限制性因素的影响，黄河水源涵养区未来土地利用的演变是由该区 2015—2020 年土地利用变化的发展规律决定，即采用 2015—2020 年的转移概率和转移面积作为未来土地利用类型的转换规则。

(2) 生态保护情景。为保障研究区生态用地面积和减缓耕地面积的损失，在 2015—2020 年面积转移矩阵的基础上，将林地、草地和水域转换为其他土地利用类型的面积设置为 0，将耕地转化为除耕地以外的其他土地利用类型的面积比例减少 30%。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用演变特征

##### 3.1.1 土地利用结构及变化特征

黄河水源涵养区整体的土地利用时空分布特征见图2( $\alpha$ 为斜率)和图3。研究区1990—2020年3个主要地类的多年平均面积占比排序依次为草地、耕地、林地,这3类面积之和占总面积的96.92%,其次为未利用土地、水域和建设用地。近30余年来,研究区各地类面积的线性趋势表现不同,其中,林地、建设用地和未利用土地均呈现显著增加趋势( $p < 0.05$ ),耕地和草地呈现显著减小趋势,水域为不显著减少趋势。值得注意的是,草地、耕地和水域的变化趋势都在2002年前后发生转变,草地和水域趋势均由下降变为上升,耕地则相反,此外,未利用土地面积的上升趋势在2009年之后增强。黄河水源涵养区1990—2020年不同时期土地利用类型的总体空间分布格局相似(图3),表现为草地广泛分布在整个研究区,且更集中分布于西部区域,耕地和建设用地区主要分布在中东部的低海拔地区,林地主要分布在西部北侧、中部南侧和东部西侧,水域靠近黄河干支流,未利用土地集中在西部高海拔区域。

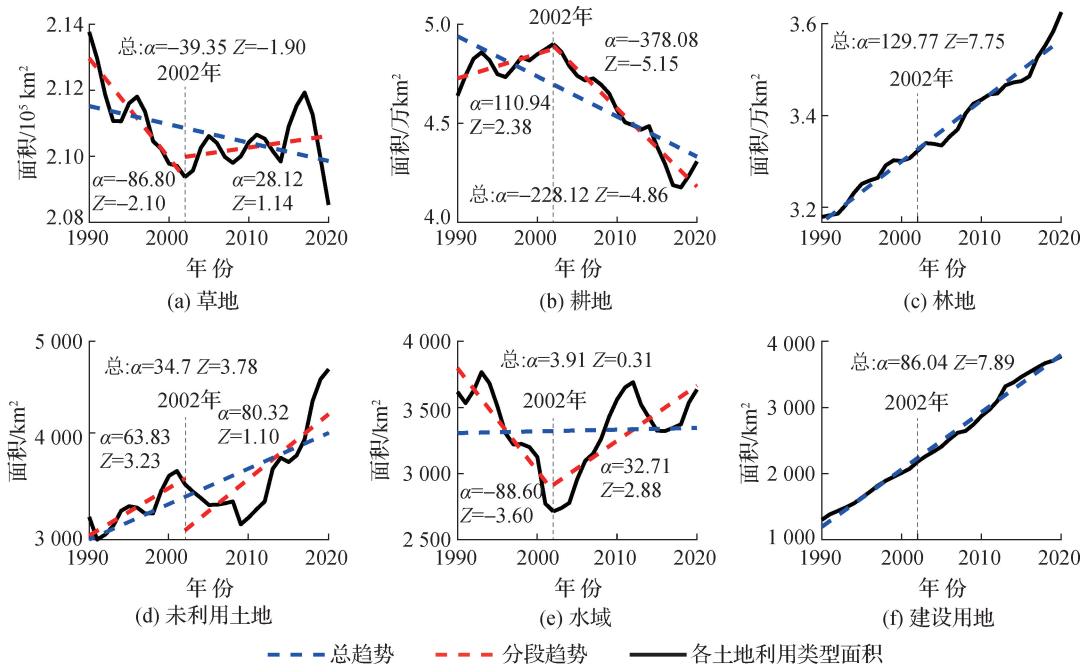


图2 黄河水源涵养区1990—2020年各土地利用类型面积变化

Fig. 2 Area change of each land use type in the water conservation zone of the Yellow River from 1990 to 2020

对于黄河水源涵养区分区尺度下的LUCC特征,在三大子区之间和各子区内部不同水资源分区之间,其土地利用类型结构和面积变化趋势等均存在明显差异(表2和图3)。首先,对于I区及内部6个水资源分区而言,草地是多年平均面积占比最大的地类,同时I区表现出草地面积缩减及建设用地迅速扩张,特别是在I-4区和I-6区,建设用地增长尤为显著。然后,对于II区而言,耕地、草地、林地和建设用地具有地带规律分布特征,即草地和耕地面积自西向东减少,而林地和建设用地自西向东增加。II区整体上呈现出耕地急剧减少趋势,尤其是在II-2区和II-3区;建设用地区在II-1区、II-2区和II-3区都呈现出显著增长,显示出较为强烈的工业或城市发展导致的土地转变。最后,对于III区而言,耕地和林地是主要地类,该区土地利用变化趋势与II区相似。

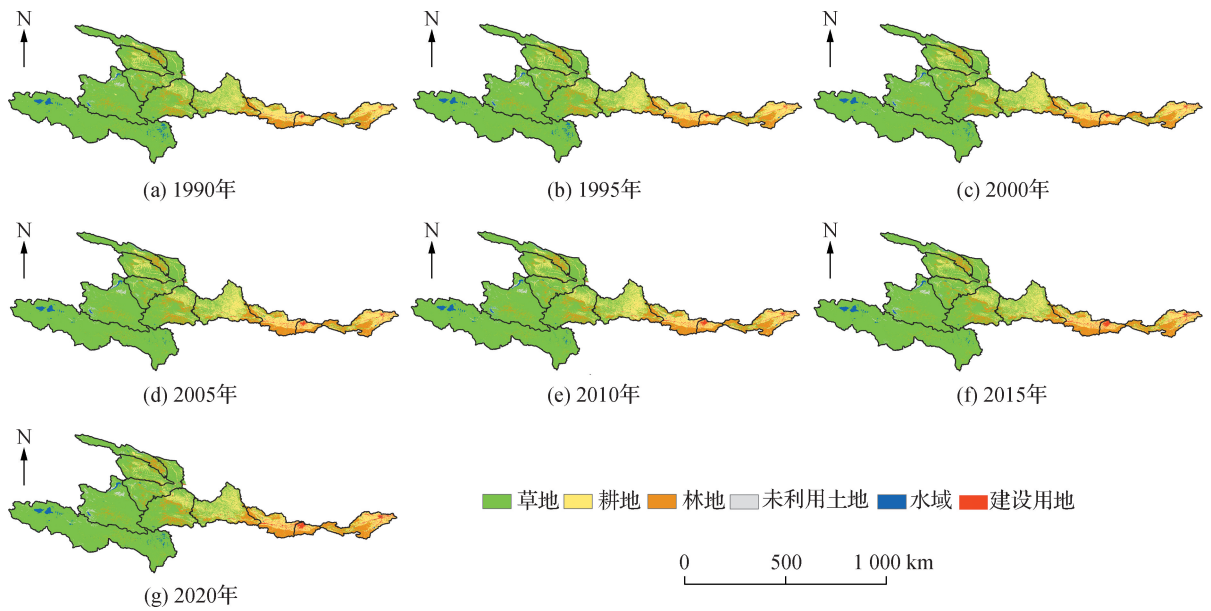


图3 黄河水源涵养区1990—2020年不同时期土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use in the water conservation zone of the Yellow River in different periods from 1990 to 2020

表2 黄河水源涵养区各水资源分区土地利用类型面积比例及变化趋势

Table 2 Proportion and trend of land use type area of each water resources subzone in the water conservation zone of the Yellow River

分区	草地		耕地		林地		未利用土地		水域		建设用地	
	面积占 比/%	Z	面积占 比/%	Z	面积占 比/%	Z	面积占 比/%	Z	面积占 比/%	Z	面积占 比/%	Z
I 区	86.09	-4.11 *	5.16	-1.77	5.85	6.46 *	1.47	4.66 *	1.37	-0.07	0.06	6.49 *
I-1 区	96.00	-1.52 *	0.02	-4.22	1.20	7.01 *	0.60	5.00 *	2.50	-2.07 **	0	0
I-2 区	90.67	-2.00 **	0.62	-4.15 *	3.76	-3.38 *	3.85	4.52 *	1.10	4.96 *	0	0
I-3 区	82.29	0.56	9.31	-3.03 *	6.50	3.30 *	1.17	-0.17	0.59	6.82	0.15	4.71
I-4 区	69.09	-4.49 *	14.25	1.87	16.26	5.23 *	0.07	0.51	0.32	4.59	0.02	6.39 *
I-5 区	72.70	0.14	19.73	-1.36	7.07	5.44 *	0.29	3.79 *	0.09	2.98 *	0.13	6.19 *
I-6 区	76.37	-3.57 *	4.69	-4.86 *	13.96	2.16 *	4.02	4.62 *	0.92	2.50 *	0.03	1.14
II 区	22.93	2.48 *	49.96	-5.71 **	24.19	7.89 *	0	0	0.17	2.30 *	2.74	7.85 *
II-1 区	34.30	2.58 *	51.76	-3.67 *	13.46	7.75 *	0	0	0.06	2.43 *	0.41	7.70
II-2 区	6.63	-1.84	48.16	-6.83 *	40.38	7.82 *	0	0	0.36	2.28 *	4.47	7.82 *
II-3 区	1.64	-7.29	45.70	-7.89 *	39.90	7.46	0	0	0	0	12.76	7.89
III 区	6.38	-6.08 *	46.59	-7.14 *	41.44	6.70 *	0	0	0.43	4.83	5.16	7.89

注: \* 为置信水平小于0.01; \*\* 为置信水平小于0.05。

### 3.1.2 土地利用转移特征

从黄河水源涵养区多期土地利用转移矩阵结果可知(图4), 不同时期的土地利用流转方向、转移规模大小存在差异, 并且因退耕还林还草政策的实施, 研究区在2000年前后呈现出不同的变化特征。具体而言, 2000年前的土地利用类型转移活跃(尤其是1990—1995年), 耕-林草转移表现为耕增-林草减, 耕-建转移则表现为耕减-建增。2000年后退耕还林还草效果明显, 表现为其他地类转向草地和林地, 耕-林-草转移表现

为耕减-林草增,但耕-建转移依旧表现为耕减-建增,但不可忽视的是,近20 a,草地向未利用土地转变逐渐增强,说明草地存在一定的退化趋势。此外,以耕地流入主导的建设用地快速增加的特征及发展趋势较明显。

进一步以2000年为界,通过1990—2000年和2000—2020年2期土地利用转移矩阵对比,在分区尺度下分析研究区土地利用转移特征。在2000年以后,土地利用转移在三大分区普遍出现耕-草互转方向改变,即从耕增-草减转变为耕减-草增。在I区,该转变发生在I-2区、I-3区、I-5区和I-6区。此外,草地流向未利用土地的面积均在2000年后增强,尤其在I-1区和I-2区,分别增加了294 km<sup>2</sup>和162 km<sup>2</sup>。在II区,该转变主要发生在II-1区和II-2区,而II-3区则从耕减-草增转变为耕增-草减。在III区,还呈现出耕地转为建设用地规模增强的特征。综上,在分区尺度下,三大子区和绝大多数水资源分区的土地转移方向跟全区尺度转移方向基本一致,但仍存在个别水资源分区(如II-3区)与主导转移方向不一致。此外,退耕还草效果不够稳固有退化风险的区域主要在I-1区、I-2区。

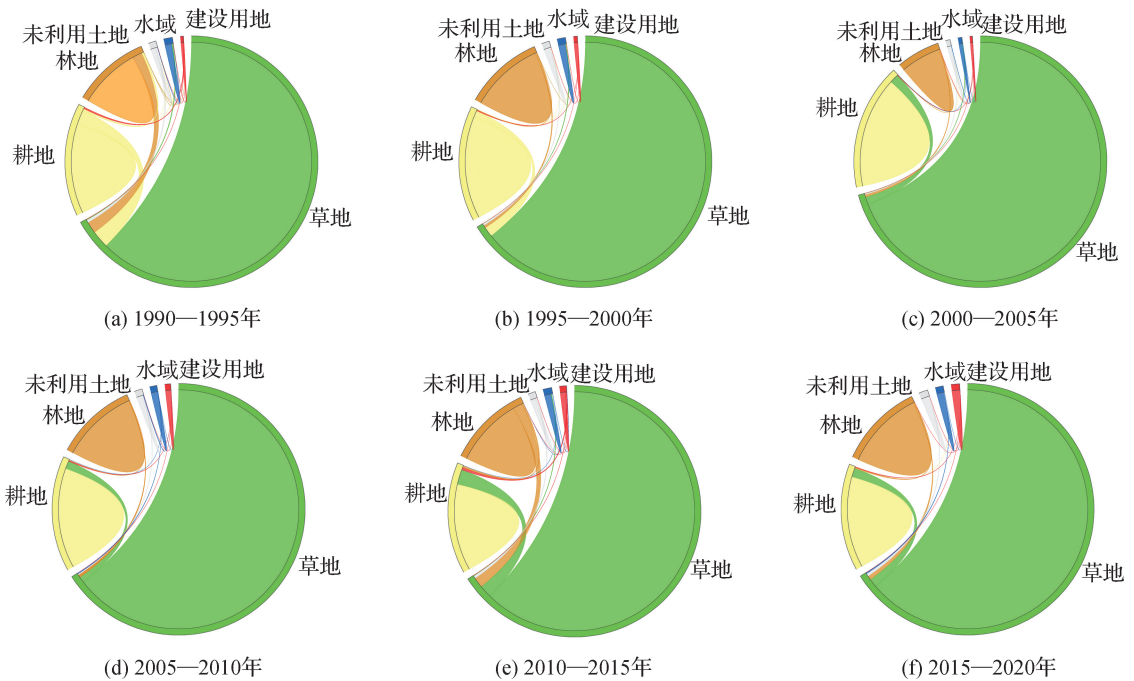


图4 黄河水源涵养区不同时期土地利用转移比例弦图

Fig. 4 Land use transfer ratio chord diagram in different periods in the water conservation zone of the Yellow River

### 3.2 土地利用与覆盖变化的驱动力

利用地理探测器的因子探测方法得到了全区土地利用类型与8个驱动因子之间的关系,如图5(a)所示。自然地理因子和社会经济因子共同驱动研究区LUCC,且社会经济因子的多年平均解释力(0.799)大于自然地理因子的解释力(0.521)。研究区全区主要受到粮食产量、高程和人口密度的影响,多年平均解释力分别为0.290、0.238和0.234,其中,高程和人口密度的解释力均呈逐年下降趋势,坡度和气温的解释力也呈下降趋势,其余驱动因子的变化无明显规律。

对8个驱动因子进行分区探测的结果如图5和表3所示,各分区在主导驱动因子、各因子解释力大小和因子变化趋势等方面存在较强的空间异质性。具体而言,I区主要受自然地理因子的影响(图5(b)),尤其是高程和气温,多年平均解释力分别为0.313、0.278。在I区的6个水资源分区中(表3),虽然自然地理因子普遍占主导地位,但主导驱动因子分区而异,I-1区、I-2区、I-3区、I-4区、I-5区和I-6区分别受降水、GDP、粮食产量、气温、高程和气温的主导驱动;而II区和III区的LUCC更多地受到社会经济因子

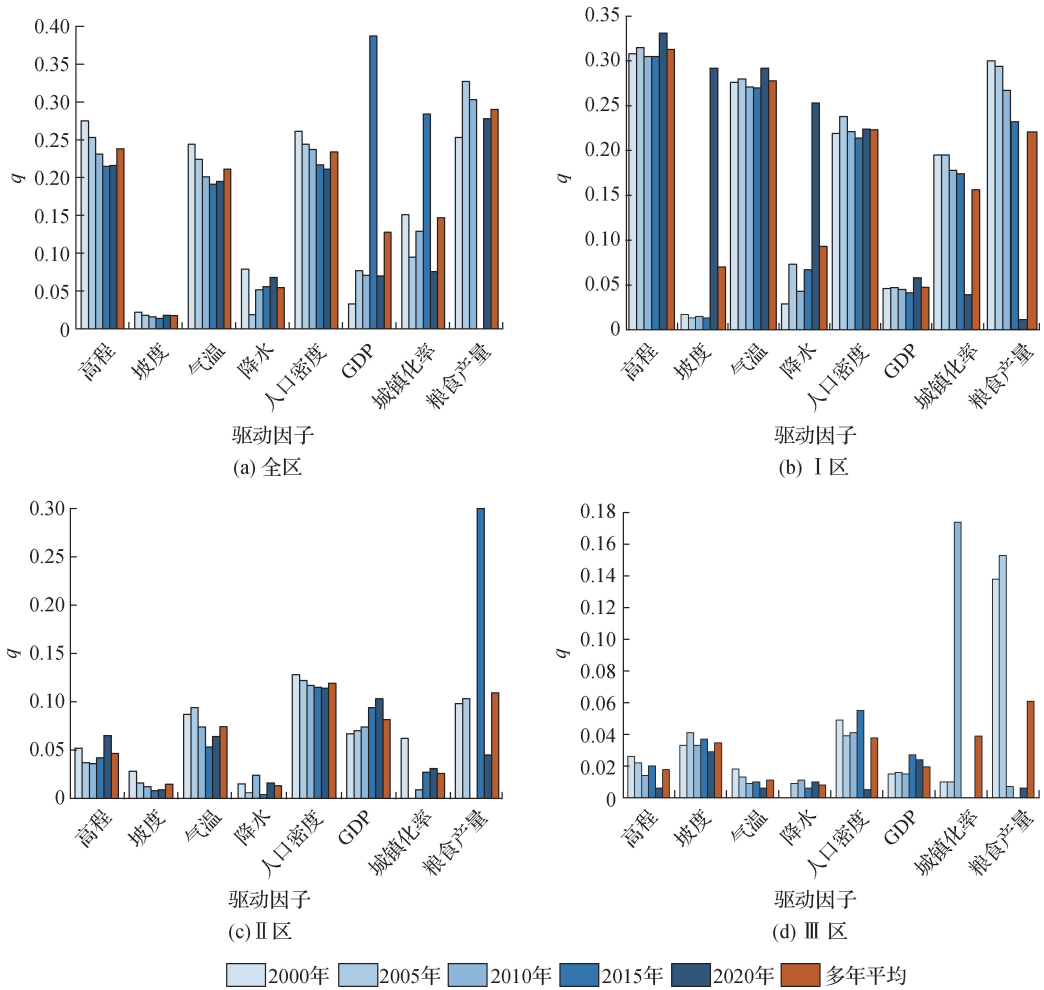


图5 黄河水源涵养区全区及三大子区 LUCC 驱动因子探测结果

Fig. 5 Detection results of LUCC drivers in three major subzones of the water conservation zone of the Yellow River

表3 黄河水源涵养区各水资源分区 LUCC 驱动因子多年平均 q 值

Table 3 Multi-year average  $q$ -values of LUCC drivers for each water resources subzone in the water conservation zone of the Yellow River

分区	高程	坡度	气温	降水	人口密度	GDP	城镇化率	粮食产量
I -1	0.098	0.069	0.072	0.105	0.018	0.037	-	0.079
I -2	0.110	0.003	0.108	0.022	0.121	0.123	0.025	0.030
I -3	0.075	0.020	0.057	0.049	0.073	0.062	0.074	0.093
I -4	0.072	0.010	0.074	0.054	0.058	0.051	0.055	0.067
I -5	0.106	0.007	0.092	0.061	0.074	0.057	0.050	0.052
I -6	0.286	0.022	0.304	0.166	0.220	0.189	0.196	0.163
II -1	0.011	0.005	0.004	0.017	0.014	0.011	0.011	0.020
II -2	0.038	0.034	0.012	0.022	0.044	0.042	0.014	0.029
II -3	0.018	0.014	0.001	0.013	0.117	0.125	-	0.099
III	0.018	0.035	0.011	0.008	0.038	0.019	0.049	0.061

注：“-”为未通过显著性检验。



的驱动,在Ⅱ区的3个水资源分区中(表3),社会经济因子同样占有较高影响,尤其是粮食产量。总体而言,自然地理因子在Ⅰ区对LUCC影响较大,而在Ⅱ区和Ⅲ区,社会经济因子更为显著;同时,社会经济因子影响力在Ⅱ区和Ⅲ区不同年份之间波动剧烈,而在Ⅰ区则呈逐年下降趋势。

### 3.3 黄河水源涵养区土地利用/覆盖变化未来模拟与预测

#### 3.3.1 模型模拟精度验证

利用地理探测器的各驱动因子对LUCC的解释力,结合CA-Markov模型对研究区LUCC进行模拟和预测。利用模拟和实际的土地利用数据计算Kappa指数( $K$ ),当 $K > 0.75$ 时,通常被认为具有较高的可靠性<sup>[42]</sup>。模型识别期和验证期 $K$ 分别为0.88和0.93,表明基于地理探测器和CA-Markov模型耦合模拟的空间分布结果是合理的,但无论是识别期还是验证期,模拟的土地利用类型相对于实际的土地利用类型分布更加集中(图6)。进一步将各土地类型的模拟面积与2015年、2020年的实际面积进行比较(图6(e)),2期土地利用模拟面积精度均大于83%,未利用土地是模拟精度最高的土地利用类型,其次是草地和建设用地。

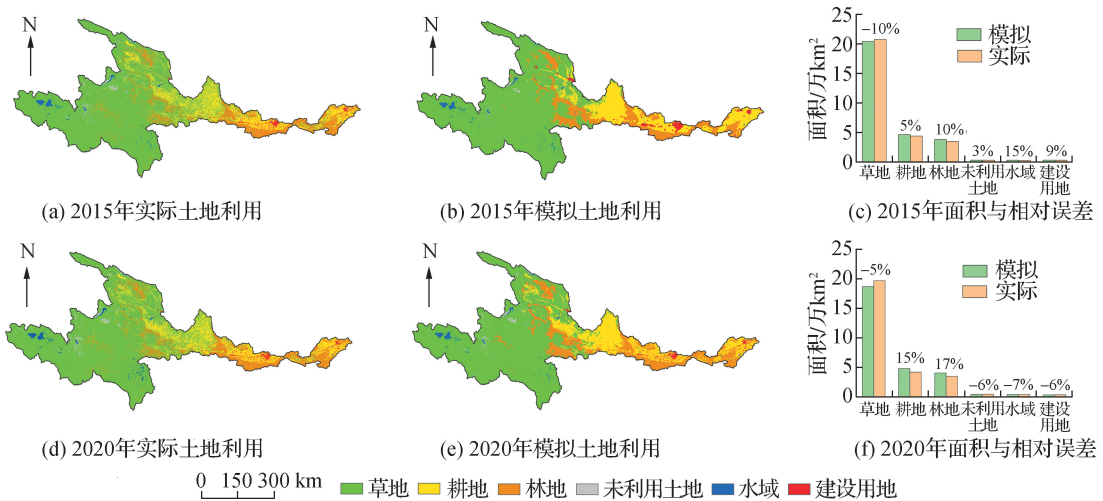


图6 黄河水源涵养区识别期和验证期土地利用类型空间分布及相对误差

Fig. 6 Spatial distribution of land use types and relative error in the identification period and verification period of the water conservation zone of the Yellow River

#### 3.3.2 未来2025年土地利用情景模拟

以2020年为预测基准期,对研究区2025年自然发展情景和生态保护情景的土地利用进行预测。在2种情景下,各地类未来空间分布格局相较于基准期总体变化较小,且未来土地利用类型仍然以草地、耕地和林地为主,但不同地类的面积增减变化方向和数量存在较大差异(图7)。具体而言,在自然发展情景下,草地和未利用土地面积减少,主要集中分布在Ⅰ区,其中Ⅰ-4区的草地面积减少比例最大(13.4%);耕地、林地和建设用地区面积增加,其中耕地增加主要在Ⅱ区,尤其是Ⅱ-1区(19.7%)。在生态保护情景下,研究区的林地、草地和水域面积增长,尤其是Ⅰ-5区的草地面积增加比例最大(6.1%);耕地面积在所有分区上均减少,Ⅰ-5区减少面积比例最大(6.0%)。总体而言,在生态保护情景下,黄河水源涵养区的耕地和建设用地区的发展将受到限制,生态用地面积将得到保障,生态环境将持续改善。

黄河水源涵养区未来地类转移特征如图8所示。研究区在2种情景下均以林-草-耕地间的转变为主,自然发展情景倾向于耕地的扩增,生态保护情景则偏向于增加草地面积。草地向未利用土地的转变在自然发展情景下呈现草地退化趋势,在生态保护情景下以草地面积增加为主。具体到分区尺度,Ⅰ区在自然发展情景下,地类转移较活跃,草地普遍转向耕地,例如,在Ⅰ-3区和Ⅰ-4区,草地流失面积分别为268 km<sup>2</sup>和

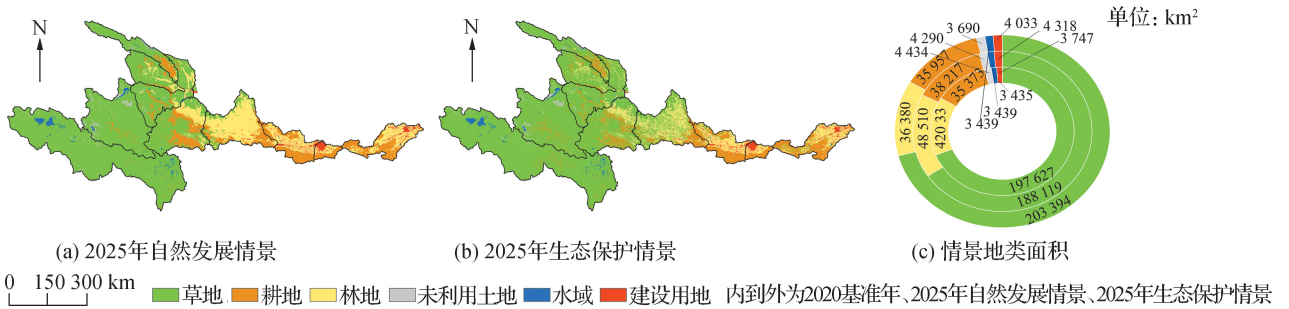


图 7 黄河水源涵养区 2025 年 2 种不同情景下的土地利用空间分布及面积

Fig. 7 Spatial distribution of land use types and areas under two different scenarios in 2025 in the water conservation zone of the Yellow River

491 km<sup>2</sup>; 在生态保护情景下, I 区的耕地和未利用土地转为草地, 特别是在 I-5 区。在 II 区土地利用变化中, 自然发展情景导致耕地和建设用地增加, 林草地减少; 而在生态保护情景下则呈现耕地减少、林草地增加的趋势, 其中 II-2 区一直保持耕地减少和林草地增加的状态。对于 III 区, 仍是自然情景下耕地增加显著, 在生态保护情景下, 耕地减少、林草地增加。

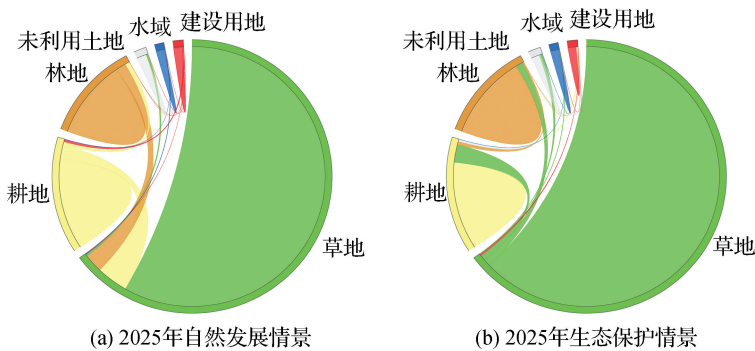


图 8 黄河水源涵养区 2025 年 2 种发展情景的土地利用转移比例弦图

Fig. 8 Land use transfer ratio chord diagram for two development scenarios in the water conservation zone of the Yellow River in 2025

## 4 结 论

本文以黄河流域生态保护和高质量发展国家战略为导向, 将秦岭和六盘山所在的渭河南部山区流域和伊洛河流域共同纳入黄河水源涵养区, 以“演变规律-驱动机制-未来预测”为主线对黄河水源涵养区及分区 LUCC 进行定量分析, 得出以下结论:

(1) 近 30 余年, 黄河水源涵养区及分区的土地利用结构总体上未发生根本改变, 草地、耕地、林地是最主要的 3 种地类, 草地广泛分布在 I 区(黄河上游水源区), 耕地主要分布在 II 区(渭河南山区)和 III 区(伊洛河区), 林地主要分布在 I 区北部、II 区南部和 III 区西部。全区从 2000s 后呈现退耕还林还草和建设用地快速增长的 2 条主线变化趋势, 但在 I 区存在草地退化趋势。

(2) 自然地理因子和社会经济因子共同驱动黄河水源涵养区 LUCC, 全区 LUCC 主要受到粮食产量、高程和人口密度驱动, I 区、II 区和 III 区 LUCC 的主导驱动因素分别是高程、人口密度和粮食产量。I 区自然地理因子的解释力呈波动增强趋势, 社会经济因子的解释力呈减弱态势, 应高度重视未来气候变化可能造成的影响, 而在 II 区和 III 区的 2 类驱动力总体上均呈增强趋势, 需要更加注重气候变化和人类活动协同驱动下

的影响。

(3) 在自然发展情景下, 2025年的草地减少, 耕地和建设用地面积增加, 预示生态用地的面积受到城市化发展和耕地扩张的挤压, 将导致区域生态压力增加、生态空间减少, 不利于黄河水源涵养区的生态服务供给; 在生态保护情景下, 2025年的耕地和建设用地扩张将受到约束, 能够保障生态用地面积以支撑黄河水源涵养区生态保护和水源涵养功能的可持续性。

### 参考文献:

- [1] SONG X P, HANSEN M C, STEHMAN S V, et al. Author correction: global land change from 1982 to 2016[J]. *Nature*, 2018, 563: E26.
- [2] LAMBIN E F, BAULIES X, BOCKSTAEL N, et al. Land-use and land-cover change (LUCC): implementation strategy[R]. Stockholm: IGBP Report 48, 1995, 125.
- [3] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [4] 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[N]. 人民日报, 2021-10-09[2023-08-05]. (Outline of the Yellow River basin ecological protection and high-quality development plan[N]. *People's Daily*, 2021-10-09[2023-08-05]. (in Chinese)).
- [5] 王紫荆, 徐梦珍, 胡宏昌, 等. 1982—2020年黄河流域植被变化特征及驱动因素[J]. *水科学进展*, 2023, 34(4): 499-509. (WANG Z J, XU M Z, HU H C, et al. Characteristics of vegetation changes and their drivers in the Yellow River basin from 1982 to 2020[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(4): 499-509. (in Chinese))
- [6] YU Y, HUA T, CHEN L D, et al. Divergent changes in vegetation greenness, productivity, and rainfall use efficiency are characteristic of ecological restoration towards high-quality development in the Yellow River basin, China[J]. *Engineering*, 2024, 34(3): 111-121.
- [7] YU S Y, LI W J, ZHOU L, et al. Human disturbances dominated the unprecedentedly high frequency of Yellow River flood over the last millennium[J]. *Science Advances*, 2023, 9(8): ead8576.
- [8] XUE D, YUE L, AHMAD F, et al. Empirical investigation of urban land use efficiency and influencing factors of the Yellow River basin Chinese cities[J]. *Land Use Policy*, 2022, 117: 106117.
- [9] 谢丽霞, 白永平, 车磊, 等. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 196-207. (XIE L X, BAI Y P, CHE L, et al. Construction of ecological zone based on value-risk ecological function area in the Upper Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 196-207. (in Chinese))
- [10] TURNER B L, SKOLE D, SANDERSON S, et al. Land cover change science/research plan[R]. Stockholm: IGBP Report No. 35, 1995.
- [11] 何春阳, 张金茜, 刘志锋, 等. 1990—2018年土地利用/覆盖变化研究的特征和进展[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2730-2748. (HE C Y, ZHANG J X, LIU Z F, et al. Characteristics and progress of land use/cover change research during 1990—2018[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2730-2748. (in Chinese))
- [12] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14. (LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. (in Chinese))
- [13] TURNER B L, LAMBIN E F, REENBERG A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [14] XU D H, ZHANG K, CAO L H, et al. Driving forces and prediction of urban land use change based on the geodetector and CA-Markov model: a case study of Zhengzhou, China[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 2246-2267.
- [15] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. *地理学报*, 2009, 64(4): 456-468. (TANG H J, WU W B, YANG P, et al. Recent progresses of land use and land cover change(LUCC) models[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 456-468. (in Chinese))
- [16] SEIBOLD S, GOSSNER M M, SIMONS N K, et al. Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers[J]. *Nature*, 2019, 574(7780): 671-674.

- [17] LI S Y, ZHANG Q F. Response of dissolved trace metals to land use/land cover and their source apportionment using a receptor model in a subtropic river, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1/2/3): 205-213.
- [18] ZUO Q, ZHOU Y, WANG L, et al. Impacts of future land use changes on land use conflicts based on multiple scenarios in the central mountain region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108743.
- [19] AKINCI H, ÖZALP A Y, TURGUT B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 97: 71-82.
- [20] PUNZO G, CASTELLANO R, BRUNO E. Using geographically weighted regressions to explore spatial heterogeneity of land use influencing factors in Campania (Southern Italy)[J]. *Land Use Policy*, 2022, 112: 105853.
- [21] WANG H Y, QIN F, XU C D, et al. Evaluating the suitability of urban development land with a Geodetector[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107339.
- [22] 吕锦心, 梁康, 刘昌明, 等. 无定河流域土地覆被空间分异机制及相关水碳变量变化[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(4): 563-572. (LYU J X, LIANG K, LIU C M, et al. Spatial differentiation mechanism of land cover and related changes in water-carbon variables in Wuding River basin[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(4): 563-572. (in Chinese))
- [23] 刘小平. “土地利用模拟”专栏导言[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 516. (LIU X P. Introduction to the column “land use simulation”[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3): 516. (in Chinese))
- [24] RONIZI S R A, NEGAHBAN S, MOKARRAM M. Investigation of land use changes in rural areas using MCDM and CA-Markov chain and their effects on water quality and soil fertility in south of Iran[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(59): 88644-88662.
- [25] ANPUTHAS M, JANMAAT J A, NICHOL C F, et al. Modelling spatial association in pattern based land use simulation models [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 465-476.
- [26] LIU X P, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [27] FU X, WANG X H, YANG Y J. Deriving suitability factors for CA-Markov land use simulation model based on local historical data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 10-19.
- [28] 曾思栋, 夏军, 杜鸿, 等. 气候变化、土地利用/覆被变化及 CO<sub>2</sub> 浓度升高对滦河流域径流的影响[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 10-20. (ZENG S D, XIA J, DU H, et al. Effects of climate change, land use and cover change and CO<sub>2</sub> enrichment on runoff: a case study of the Luanhe River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 10-20. (in Chinese))
- [29] 刘宏娟, 胡远满, 布仁仓, 等. 气候变化对大兴安岭北部沼泽景观格局的影响[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 105-110. (LIU H J, HU Y M, BU R C, et al. Impacts of climate changes on the landscape patterns of potential mire distributions in northern Great Khing'an Mountains[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 105-110. (in Chinese))
- [30] ZHANG Y, CHANG X, LIU Y F, et al. Urban expansion simulation under constraint of multiple ecosystem services (MESs) based on cellular automata (CA)-Markov model: scenario analysis and policy implications[J]. *Land Use Policy*, 2021, 108: 105667.
- [31] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. *水文*, 2022, 42(2): 65. (WANG G Q. Definition of water conservation areas in the Yellow River basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2): 65. (in Chinese))
- [32] FENG S Y, LI W L, XU J, et al. Land use/land cover mapping based on GEE for the monitoring of changes in ecosystem types in the Upper Yellow River basin over the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5361.
- [33] REN J, MA R R, HUANG Y H, et al. Identifying the trade-offs and synergies of land use functions and their influencing factors of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the upper reaches of Yellow River basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111279.
- [34] XU W J, SONG J X, LONG Y Q, et al. Analysis and simulation of the driving mechanism and ecological effects of land cover change in the Weihe River basin, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118320.
- [35] LIANG G F, LIU J Z. Integrated geographical environment factors explaining forest landscape changes in Luoning County in the middle reaches of the Yiluo River watershed, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108928.
- [36] LI X J, PETERSON J, LIU G J, et al. Assessing regional sustainability: the case of land use and land cover change in the mid-

- dle Yiluo Catchment of the Yellow River basin, China[J]. *Applied Geography*, 2001, 21(1): 87-106.
- [37] 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.
- [38] CHEN J D, GAO M, CHENG S L, et al. Global 1 km × 1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption during 1992—2019 based on calibrated nighttime light data[J]. *Scientific Data*, 2022, 9: 202.
- [39] 闫国振, 张征, 梁康, 等. 鄂尔多斯高原泊江海子流域土地利用动态变化及驱动因素分析[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(11): 1693-1706. (YAN G Z, ZHANG Z, LIANG K, et al. Characteristics and driving factors of land use change in the Bojiang Lake basin in Ordos Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11): 1693-1706. (in Chinese))
- [40] XU Y, LU Y G, ZOU B, et al. Unraveling the enigma of NPP variation in Chinese vegetation ecosystems: the interplay of climate change and land use change[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169023.
- [41] 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. (WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [42] FOODY G M. Status of land cover classification accuracy assessment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 185-201.

## Regional differentiation and future patterns of land use changes in the water conservation zone of the Yellow River\*

LIANG Kang<sup>1</sup>, GONG Li<sup>1,2</sup>, SONG Xiaoqing<sup>2</sup>, ZHANG Yongyong<sup>1</sup>, LIU Changming<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** Investigating historical and future land use/land cover change (LUCC) characteristics in the water conservation zone of the Yellow River is important for protecting soil and water resources in the Yellow River basin and maintaining ecosystem service functions. In the study area and three major subareas (I: Upper Yellow River water source area; II: Southern Weihe River mountainous area; III: Yiluo River area), based on land cover product data from 1990 to 2020, a transfer matrix, Geodetector, and CA-Markov model were used to analyze the spatiotemporal characteristics of LUCC to detect the driving factors and predict future spatial patterns (2025). The results showed that since the 2000s, LUCC in the study area and subareas experienced two main trends: returning farmland to forestland and grassland and rapid growth of construction land. LUCC in the whole area was mainly driven by food production, elevation and population density, while the dominant drivers of LUCC in Subareas I, II and III were elevation, population density and food production, respectively. Under the future ecological protection scenario, compared to those under the natural development scenario, the expansion of farmland and construction land will be constrained, and the area of ecological land can be better safeguarded to support ecological service functions such as water conservation.

**Key words:** water conservation; land use/land cover change; Geodetector; CA-Markov model; Yellow River basin

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3201102) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41971035).