

1995—2018 年黄河流域土地利用变化及驱动力分析

黄钰清¹, 李骁尧¹, 于 强^{2*}, 黄华国¹

(1. 北京林业大学 森林资源和环境管理国家林草局重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘 要:黄河流域土地利用变化会对其生态环境产生影响,分析土地利用变化情况及其驱动力,有利于制定黄河流域土地管理方案及生态环境治理修复措施。基于1995—2018年土地利用数据,使用土地利用动态模型和土地利用转移矩阵的方法,分析黄河流域土地利用的时空变化特征,利用地理探测器探究黄河流域变化的驱动力。结果表明,1)1995—2018年,草地是研究区的主体,其面积关系为中覆盖度草地>低覆盖度草地>高覆盖度草地。总体上,草地、旱地、灌木林地的面积均呈现上涨趋势,其他土地类型的变化较小。2)有林地的单一动态度最高,达22.1%,其他建筑用地的单一动态度最低,为-3.82%。黄河流域整体综合动态度为0.41%,其中,2015—2018年综合动态度最高,为10.02%。3)在选取的10个地类中,转移矩阵转入和转出面积最大的是中覆盖度草地。4)土地利用变化的驱动力主要由气象、经济和政策3大因素构成,对整个黄河流域而言,气温变化对土地利用变化的解释力最强;而上中下游的主要驱动力存在差异,政策因素对上下游解释力较强,气象因素和经济因素对中游解释力较强。1995—2018年,草地是研究区主要的土地类型,面积占比最大且变化最频繁,应多关注草地的利用。研究通过分析气象因素、经济因素和政策因素对黄河流域不同地区的影响,为黄河流域高质量发展规划提供理论基础。

关键词:黄河流域;土地利用;动态度;转移矩阵;地理探测器

中图分类号:F301.24

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)06-0113-09

An Analysis of Land Use Change and Driving Forces in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

HUANG Yu-qing¹, LI Xiao-yao¹, YU Qiang^{2*}, HUANG Hua-guo¹

(1. Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management, National Forestry and Grass Administration/Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forestry College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The analysis of land use change is the basic study of the Yellow River Basin which has practical significance in providing methods for land consolidation, ecological environment remediation and sustainable development in the basin. Based on the data of land use from 1995 to 2018, the dynamic attitude model of land use and the method of land use transfer matrix were used to analyze the spatial-temporal change characteristics of land use in the basin, and the driving forces of the change were explored by the approach of geodetector. The results showed that 1) from 1995 to 2018, grassland was the main type of land, and its area ranked as: medium coverage grassland > low coverage grassland > high coverage grassland. On the whole, the areas of grassland, dry land and shrub land were on the rise, while other land types changed slightly. 2) The single dynamic attitude of forest land was the highest, reaching 22.1%, while that of other construction land was the lowest as -3.82%. The overall comprehensive dynamic attitude of the basin was 0.41%, among which the comprehensive dynamic attitude was the highest in 2015—2018, which was

收稿日期:2021-10-08 修回日期:2021-12-20

基金项目:国家自然科学基金(42001211)。

第一作者:黄钰清。研究方向:植被定量遥感。E-mail:h451063239@163.com

*通信作者:于 强,博士,讲师。研究方向:3S技术在生态环境中的应用。E-mail:yuqiang@bjfu.cn

10.02%。3) Among the 10 selected land types, the grassland with medium coverage had the largest transfer-in and-out area according to the transfer matrix. 4) The driving forces of land use change were mainly composed of meteorological, economic and policy factors. For the whole basin, the temperature change had the strongest explanatory power to land use change. There were differences in the main driving forces between the upper, middle and lower reaches of the basin. Policy factors had strong explanatory power to the upper and lower reaches, while meteorological factors and economic factors were strong to the middle reaches. From 1995 to 2018, grassland was the main land type in the study area, with the largest area and the most frequent changes, so more attention should be paid to the utilization of grassland. By analyzing the influence of meteorological factors, economic factors and policy factors on different areas of the basin, this study provides theoretical basis for high-quality development planning of the Yellow River Basin.

Key words: Yellow River; land of use; dynamic graph; transition matrix; geodetector

土地利用变化(land use/cover change, LUCC)是人类活动作用于自然生态最直接客观的反映^[1]。随着现代工业的发展,城市化进程不断加快,人类对土地资源的开发越来越频繁^[2],全球的土地利用结构发生了巨大的改变,全球生态系统功能和生物多样性正面临来自多方面的巨大压力和严峻挑战。为了解决人类与土地互利关系,一方面,2005年制定的“全球土地计划(GLP)”、1995年制定的“国际地圈生物圈计划(IGBP)”和“全球变化人文因素计划(IHDP)”都把土地利用/覆被变化设定为全球变化研究的核心内容;另一方面,很多学者在这方面做了大量的研究。近年来,学者们对土地利用变化展开了多维度、多视角的研究,在土地转型分析等方面取得了丰硕的成果,基本形成了国家^[3-4]、地区^[5]等多尺度研究体系。

针对LUCC的时空格局演变,不同的学者有不同的研究方法。以土地利用结构变化为主题的研究主要集中在LUCC时空变化过程分析^[6]、LUCC变化轨迹模拟^[7-9]、未来时空变化预测^[10]、变化驱动力^[11]等方面。由于近几年遥感技术的飞速发展,遥感在研究LUCC方向中已经得到了较为广泛的应用。显然,低成本地获取大面积数据、快速获取信息、不受地面条件约束的遥感技术在土地利用研究中更受学者青睐。

河流流域是人类活动最频繁的区域之一^[12-18],流域的土地利用变化更明显。一般来说,河流上游生态环境被破坏后,会直接影响到中下游的生态环境,因此研究河流流域的土地时空格局演变尤为重要。但是,学者们对河流流域的研究还比较少。目前,中国的7大流域中,已有许多流域的土地资源被过度开发与利用。黄河——中国第一大流域,自改革开放后,城镇化进程加快,人们对土地的开发愈加频繁,上游的土地荒漠化^[19]、中游的水土流失、下游形成的“地上悬河”^[20],影响了整个流域的生态系统

平衡,恶劣的环境问题严重制约了黄河流域的高质量发展。自2019年起,黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家重大战略,黄河流域的土地利用变化成为了国家重大战略和学术界关注的热点。

但现有的流域研究大多数只针对流域流经的省级行政区域,或只选取流域的某一段进行研究,没有从整个流域的土地利用结构深入分析。此外,大多数学者都只研究一级地类下的土地利用结构变化,忽视了同一级地类中土地的相互转化。因此,黄河流域缺少针对全流域以及关注同级地类转化的文献。关于驱动力分析的研究中,目前大多文献都是利用主成分分析法分析土地利用变化的驱动力,从单一的线性关系分析自变量与因变量之间的联系,忽视了土地类型之间单因子变量的空间分异性以及两个自变量空间分布的耦合性。就选取驱动因子而言,多数文献只包含气象因素和经济因素,鲜有讨论政策因素对土地类型变化的影响。

综上,本研究选用黄河流域23a的土地利用数据,分析1995、2000、2005、2010、2015、2018年土地利用类型的时空变化关系,借鉴生信学科近年来广泛应用的弦图对二级地类之间土地结构转换结果进行可视化,利用气温、降水、夜光遥感、NDVI等遥感数据基于地理探测器^[21]探究黄河流域变化的驱动力,揭示黄河流域过去23a的时空格局演变,对黄河流域的土地整治、生态修复以及生态文明可持续发展提供借鉴。

1 研究区概况

黄河流域(95°5′—119°3′E, 32°9′—41°51′N)位于中国中部,总面积为 $8.09 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。黄河流域主要包括了青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、四川省、陕西省、河南省以及山东省,还包括了黑河、清水河、汾河等13条支流。黄河流域的上游以山地为主,下游以平原丘陵为主。自

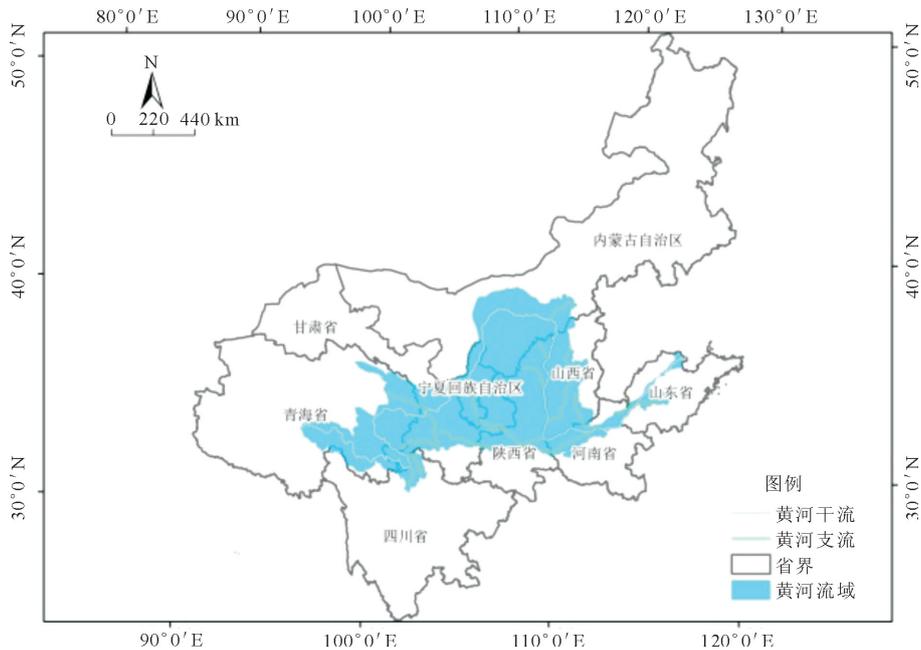


图 1 黄河流域地理位置

Fig. 1 Location map of the Yellow River Basin

改革开放以来,人们频繁地生产活动,导致土地利用类型发生变化,影响了流域的生态环境及生物多样性。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究采用的黄河流域范围、各省市行政区域,空间分辨率为 1 km 的土地利用遥感监测数据,均来源于资源环境云平台 (<http://www.resdc.cn/>)。黄河干流与支流数据来自 OpenStreetMap (<http://www.openstreetmap.org/>)。气温数据 (ERA5)、降水数据 (TRMM)、NDVI 数据 (MODIS) 来源于 Google Earth Engine 平台。本研究采用的夜间灯光数据是首套 2000—2018 年全球 500 m 分辨率的“类 NPP-VIIRS”夜间灯光数据集^[22]。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态度 土地动态度^[23]可以分为单一土地利用动态度和综合土地利用动态度。

1) 单一土地利用动态度,常用 K 表示,表达的是某研究区一定时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况,其表达式为

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_a 和 U_b 分别代表前期和后期土地利用类型面积, T 代表两期间隔的时间。

2) 综合土地利用动态度分析某一研究样区的综合土地利用动态度,其值常用 L_c 表示,指该研究区

土地利用年变化率。

$$L_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_{U_{i-j}}}{2 \sum_{i=1}^n \Delta L_{U_i}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta L_{U_{i-j}}$ 为第 i 类土地利用类型转为非 i 类土地利用类型面积的绝对值, ΔL_{U_i} 为前期土地利用类型的面积, T 为 2 期间隔的时间。

2.2.2 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵可以定量地表明 2 个时期不同土地利用类型之间的转化情况,还可以揭示不同土地利用类型间的转移速率,反映了土地的时空格局的变化,其表达式为

$$K_{ab} = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{s1} & k_{s2} & \cdots & k_{sn} \end{vmatrix} \quad (3)$$

式中: K_{ab} 指初始时期的第 a 种地类转变为终止时期的第 b 种地类的面积, n 为土地利用类型数量。

2.2.3 地理探测器 地理探测器是一种探测空间异质性,分析驱动因素之间相互关系的研究方法^[24]。本研究主要利用因子探测和交互探测分析黄河流域土地利用变化的驱动力。

2.2.3.1 因子探测 探测自变量即气温、降水、夜间遥感数据和 NDVI 的变化对因变量(土地利用变化)的空间异质影响力,结果通常用 q 表示,若 q 越大表示自变量对因变量的解释力越强, q 在 0~1 的范围内。其表达式如下

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{S_{SW}}{S_{ST}} \quad (4)$$

$$S_{SW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (5)$$

$$S_{ST} = N \sigma^2 \quad (6)$$

式中： $h=1, L$ 为因变量 Y 或自变量 X 的分层，即网格的分类或分区； N_h 和 N 分别为分层 h 和全区的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区因变量的方差。 S_{SW} 和 S_{ST} 分别为各层内方差之和、全区总方差。

2.2.3.2 交互探测 用于判断 2 个不同的驱动力之间是否有显著的差别，通常用 t 表示。交互作用结果共分为以下几种：当 $q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$ ，为双因子增强；当 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ ，为非线性增强；当 $q(X_1 \cap X_2) >$

$\text{Min}(q(X_1), q(X_2))$ ，为非线性减弱；当 $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ 时， X_1 和 X_2 对因变量的影响相互独立。

3 结果与分析

3.1 土地利用分布情况

黄河流域的土地利用类型以草地为主，分为低覆盖度草地（盖度为 0.1~0.2）、中覆盖度草地（盖度为 0.2~0.5）、高覆盖度草地（盖度 > 0.5），约占研究区总面积的 47%，按面积占比从大到小排列的顺序分别是中覆盖度草地、低覆盖度草地、高覆盖度草地。其次是旱地，约占研究区总面积的 25%，林地分为有林地、疏林地、灌木林、其他林地，约占 13%。

表 1 黄河流域土地利用类型面积占比

Table 1 Proportions of land use types in the Yellow River Basin

%

| 土地利用类型 | 2018 年 | 2015 年 | 2010 年 | 2005 年 | 2000 年 | 1995 年 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 旱地 | 24.56 | 25.60 | 25.24 | 25.32 | 25.73 | 25.74 |
| 中覆盖度草地 | 22.31 | 21.77 | 21.73 | 21.71 | 21.88 | 21.84 |
| 低覆盖度草地 | 16.34 | 15.53 | 15.70 | 15.68 | 15.90 | 15.79 |
| 高覆盖度草地 | 9.44 | 10.01 | 10.01 | 10.01 | 9.90 | 10.22 |
| 灌木林 | 6.06 | 5.91 | 5.99 | 5.98 | 5.94 | 5.93 |
| 有林地 | 4.64 | 4.62 | 4.61 | 4.66 | 4.50 | 4.50 |
| 沙地 | 4.05 | 4.48 | 4.56 | 4.55 | 4.49 | 4.49 |
| 农村居民点 | 2.05 | 1.99 | 2.04 | 2.04 | 2.03 | 2.03 |
| 疏林地 | 1.99 | 1.63 | 1.86 | 1.85 | 1.79 | 1.75 |
| 裸岩石质地 | 1.74 | 1.49 | 1.52 | 1.52 | 1.52 | 1.52 |
| 沼泽地 | 1.11 | 0.96 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 0.98 |
| 城镇用地 | 0.95 | 0.88 | 0.87 | 0.88 | 0.90 | 0.86 |
| 其他建设用地 | 0.79 | 0.77 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 |
| 水田 | 0.74 | 0.66 | 0.70 | 0.69 | 0.73 | 0.73 |
| 滩地 | 0.60 | 0.57 | 0.55 | 0.58 | 0.57 | 0.50 |
| 河渠 | 0.46 | 0.52 | 0.46 | 0.42 | 0.38 | 0.40 |
| 其他林地 | 0.40 | 0.45 | 0.42 | 0.42 | 0.38 | 0.37 |
| 水库塘坑 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.39 | 0.34 | 0.33 |
| 盐碱地 | 0.37 | 0.39 | 0.37 | 0.37 | 0.33 | 0.32 |
| 湖泊 | 0.33 | 0.37 | 0.35 | 0.36 | 0.31 | 0.31 |
| 戈壁 | 0.31 | 0.34 | 0.32 | 0.33 | 0.23 | 0.22 |
| 裸土地 | 0.23 | 0.32 | 0.28 | 0.27 | 0.22 | 0.22 |
| 其他 | 0.09 | 0.29 | 0.20 | 0.17 | 0.14 | 0.13 |
| 永久性冰川雪地 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 滩涂 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 海洋 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

1995—2018 年，旱地、高覆盖度草地和沙地占研究区的比例分别降低了 1.18%、0.78%、0.44%；中覆盖度草地、低覆盖度草地、疏林地、裸岩石质地占比分别增加了 0.48%、0.54%、0.24%、0.22%，其他地类变化 < 0.2%。

3.2 土地利用动态度

3.2.1 土地利用单一动态度 1995—2018 年，单

一动态度为正值的前 3 种地类是有林地、中覆盖度草地和滩涂，表明它们的面积增加；面积减少的地类中，其他建筑用地减幅最大，其单一土地利用动态度为 -3.82%。各个时间段单一动态度最大的地类分别是：盐碱地、城镇用地、旱地、其他建设用地、滩涂，它们的动态度分别是 2.9%、4.8%、15.0%、25.2%、144.5%。1995—2010 年的各类土地利用变化表现

得比较剧烈,多个地类的变化度为 0%,2010—2018 年变化的土地种类增多。1995—2018 年,除了有林地、中覆盖草地、滩地和盐碱地出现了明显的增长以及其他建设用地呈现-3.8%的下降趋势以外,黄河流域的其他土地利用类型变化表现较为稳定(图 3)。

3.2.2 综合土地利用动态度 在这 23 a 中,黄河流域的综合土地利用动态度为 0.41%,2000—2005 年发生类型转变面积最多,为 43 956 886.22 km²,2015—2018 年综合动态度最高,为 10.02%,这是因为时间较短,3 a 内的综合动态度变化较大(表 2)。

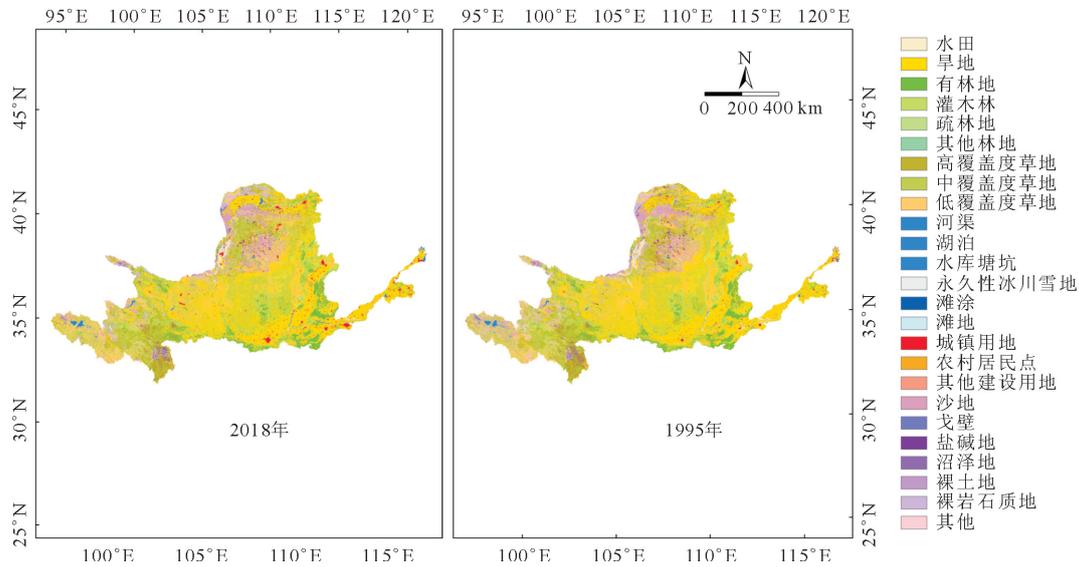


图 2 黄河流域土地利用类型分布

Fig. 2 Distribution map of land use types in the Yellow River Basin

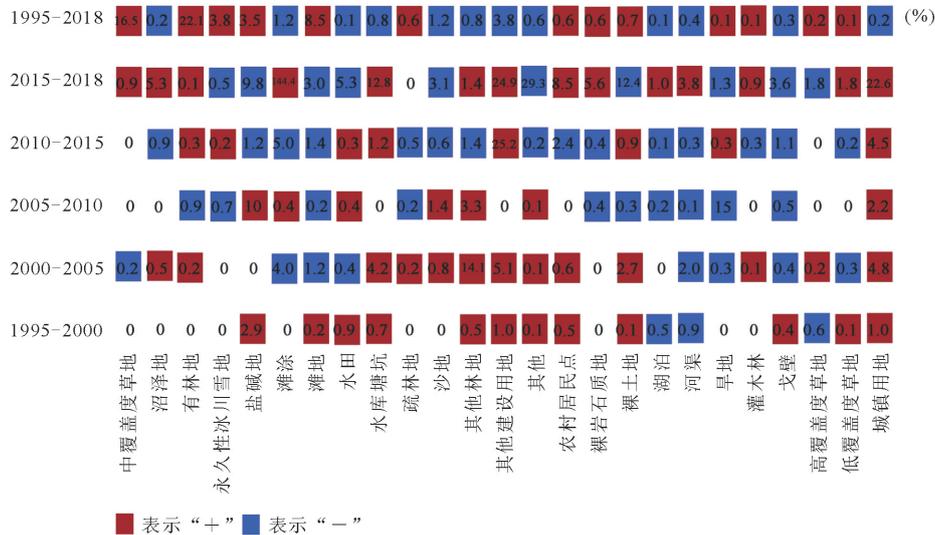


图 3 1995—2018 年各年土地利用类型变化

Fig. 3 Changes in land use types from 1995 to 2018

表 2 1995—2018 年黄河流域综合土地利用动态度变化

Table 2 Dynamic changes of comprehensive land use in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

| 年份 | 2015—2018 | 2010—2015 | 2005—2010 | 2000—2005 | 1995—2000 |
|--------------------------|------------|---------------|-------------|---------------|--------------|
| 发生类型转变面积/km ² | 432 754.33 | 18 062 755.79 | 426 728.025 | 43 956 886.22 | 1 503 384.07 |
| 综合土地利用动态度(%) | 10.02 | 2.12 | 0.05 | 5.16 | 0.18 |

3.3 土地利用转移矩阵

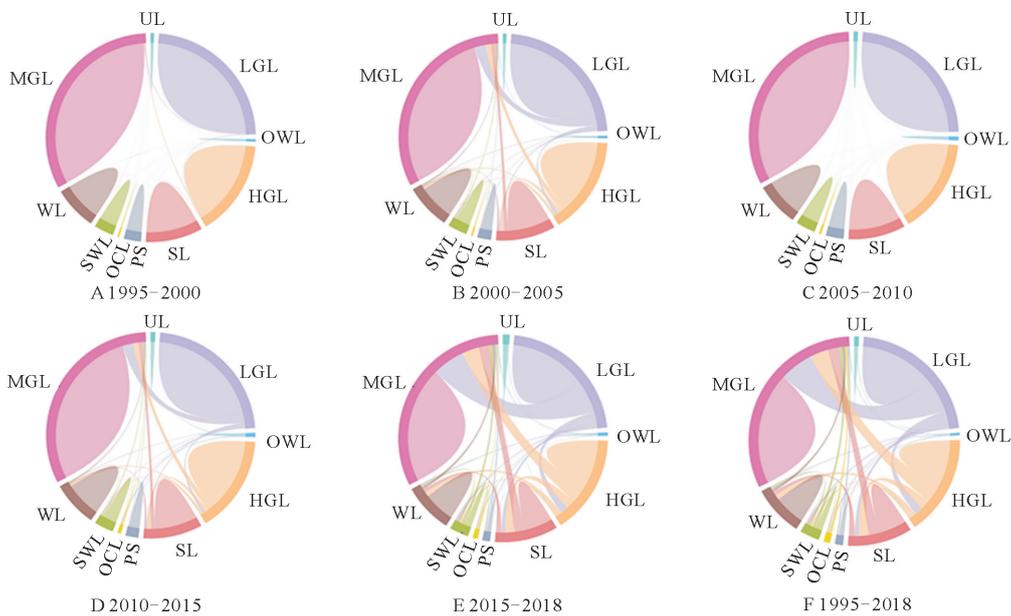
由于涉及的土地类型较多,在此选取了城镇用地、低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地、农村居

民点、其他建设用地、其他林地、疏林地、有林地、中覆盖度草地这 10 个土地类型进行分析。

1995—2000 年土地利用变化总量为 53 166 695.93

km²,中覆盖度草地的转入和转出面积最大,主要来源和主要去向均为低覆盖度草地、高覆盖度草地。2000—2005 年的土地利用变化共 48 102 321.84 km²,其中,中覆盖度草地的净转入和净转出面积最大,主要来源于低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地和疏林地;转出面积的去向主要是低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地和疏林地。2005—2010 年的土地利用变化共 53 549 180.15 km²,但由于大多数是同一地类的变化,因此图中的变化线条较少。其中,转出面积最大的地类是低覆盖度草地,主要的去向是中覆盖度草地;转入面积最大的是中覆盖度草地,主要来源于低覆盖度草地。2010—2015 年的

土地利用类型变化总量约有 48 469 616.64 km²。其中,转出面积最大的地类是中覆盖度草地,转出的主要去向是低覆盖度草地、高覆盖度草地及灌木林地;转入面积最大的地类是中覆盖度草地,主要由低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林、农村居民点、疏林地等地类转入,其中低覆盖度草地转入面积高达 987 671.52 km²。2015—2018 年的土地利用类型变化总量是 5 期数据中最少的,仅有 427 179.11 km²。这一时期里,转出面积最大的依旧是中覆盖度草地,主要转往低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地,转入面积最大的也是中覆盖度草地,主要也是由低覆盖度、高覆盖度草地以及灌木林地转入(图 4)。



注:UL、LGL、HGL、SL、RS、OCL、OWL、SWL、WL 和 MGL 分别代表城镇用地、低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地、农村居民点、其他建设用地、其他林地、疏林地、有林地和中覆盖度草地。

图 4 1995—2018 年土地利用转移矩阵弦图

Fig. 4 Chord diagram of land use transfer matrix from 1995 to 2018

总体来看,1995—2018 年的土地利用变化面积达到了 4.3×10^9 km²,主要的变化发生在了 1995—2000 年和 2005—2010 年。中覆盖度草地成为黄河流域转入面积最大的土地类型,约 9.6×10^8 km²,转入面积前 5 名按从大到小排列依次为中覆盖度草地、低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地、有林地,其转入面积均超过 1.5×10^8 km²,是黄河流域面积的 1.5 倍以上。中覆盖度是转出面积最大的土地类型,面积约 9.4×10^8 km²,转出面积前 6 名按从大到小排列依次为中覆盖度草地、低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地、有林地,它们的转出面积均超过 1.5×10^8 km²,是黄河流域面积的 2 倍以上。因此,黄河流域土地变化类型关注的重点是中覆盖度草地、低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地、有林地等。

3.4 黄河流域土地利用变化驱动分析

土地利用变化的驱动力主要包含了降水因素、气温因素、经济因素和政策因素。有相关研究表明,夜光灯光数据能够综合反映人类社会的生产和生活情况^[25],因此利用夜光遥感数据作为本研究的经济数据。由于黄河流域地理的特殊性,涉及了三北防护林建设工程、黄河中游防护林建设工程等大型林业工程。近年来,国家在全国范围内大力推进退耕还林还草工程、天然林保护工程,这些政策因素导致黄河流域森林覆盖率提高,而归一化植被指数(NDVI)能够描述植被覆盖情况^[26],因此,本文将 NDVI 作为政策因素影响的数据。

3.4.1 黄河流域土地利用驱动因子探测 由表 3 可知,不同时期的驱动因子对黄河流域土地利用变化的影响作用不同。2005—2015 年间,驱动力的 q

值从大到小依次为气温变化、降水变化、NDVI 变化、夜光变化,但在 2000—2005 年时,气温变化 > NDVI 变化 > 降水变化 > 夜光变化,2015—2018 年,降水变化 > 气温变化 > NDVI 变化。从整体上看,气温变化对土地类型变化的解释力最强,夜光遥感数据代表的经济因素对地类变化的解释力最弱。

表 3 各年份各驱动因子的解释力

Table 3 The explanatory power of each driving factor in each year

| 驱动因子 | q | | | |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2000—2005 年 | 2005—2010 年 | 2010—2015 年 | 2015—2018 年 |
| 气温变化 | 0.040 069* | 0.068 115* | 0.057 383* | 0.055 234* |
| 降水变化 | 0.007 315* | 0.022 159* | 0.044 042* | 0.070 16* |
| 夜光变化 | 0.000 712 | 0.001 153 | 0.031 993* | 0.001 005 |
| NDVI 变化 | 0.018 196* | 0.018 156* | 0.012 403* | 0.021 111* |

注: * 表示该项 $P < 0.05$ 。表 4 同。

3.4.2 黄河流域土地利用驱动因子交互探测 交互探测是将双因子交互作用所得 q 与单因子作用时 q 的比较,探究双因子间是否存在交互作用。黄河流域 2000—2018 年各年份土地类型变化驱动因子的交互探测结果(图 4)表明,交互作用的结果均为非线性增强或双因子增强,表明黄河流域土地利用变化的原因比较复杂,通常是由多个因子交互作用造成的。2000—2018 年间,气温变化与其他 3 个因子交互的 q 均为最大,证明在 18 a 气温变化对黄河流域土地利用变化的解释力最强,但在 2005—2010 年气温变化与降水变化出现了双因子增强,2000—2005 年气温变化与 NDVI 变化在双因子增强,表明这 2 个时期气温变化和 NDVI 变化以及气温变化和降水变化在一定程度上增强了土地利用变化的解释力。

3.4.3 上中下游土地利用驱动因子探测 本研究利用地理探测器对 2000 年与 2018 年 2 期数据进行因子探测,其中,对黄河流域的上中下游做了分区,得到了上中下游土地类型变化驱动力 q (表 4)。就上游而言,NDVI 变化的 q 最大,表明对土地类型的影响最大,林业部门实施的一系列林业工程在 2018 年看到了显著成效;中游地区,气温变化和夜光变化的 q 最大,由于城镇用地和农村居民点较多,人口密度较上游更多,土地利用的变化原因主要围绕着气温变化与夜光变化;下游地区,NDVI 变化的 q 最大,主要是因为城市化进程加快,下游地区很多旱地转为城镇用地(图 2),因此植被覆盖度变化成为了下游土地利用变化的主要因素。

3.4.4 上中下游土地利用驱动因子交互探测 黄河流域 2000—2018 年土地类型变化驱动因子的交互探测结果(图 5)表明,在上游地区,其他 3 个因子与 NDVI 变化交互作用的 q 均为最大,这证明了

NDVI 对上游地区土地利用变化的解释力最强。在中游地区,气温变化和降水变化的 q 以及降水变化与夜光变化最大即它们的交互作用最强,而气温变化与夜光变化交互的 q 最小,证明气温变化与夜光变化之间存在共线性。在下游地区,情况与上游地区相似,其他 3 个因子与 NDVI 变化交互作用的 q 均为最大,这足以证明了政策因素在黄河流域的上游和下游,甚至整个黄河流域都有着举足轻重的影响力。

表 4 2000—2018 年上中下游各驱动因子的解释力

Table 4 The explanatory power of each driving factor in the upper, middle and lower reaches from 2000 to 2018

| 驱动因子 | q | | |
|---------|------------|------------|------------|
| | 上游 | 中游 | 下游 |
| 气温变化 | 0.003 641* | 0.008 253* | 0.016 627* |
| 降水变化 | 0.017 527* | 0.006 737* | 0.004 433 |
| 夜光变化 | 0.003 641* | 0.008 253* | 0.016 627* |
| NDVI 变化 | 0.088 280* | 0.003 265* | 0.036 909* |

4 结论与讨论

1995—2018 年,草地是研究区主要的土地类型,面积占比最大。单一动态度最高的是有林地,为 22.1%,单一动态度最低的是其他建筑用地,为 -3.82%。虽然黄河流域综合土地利用动态度处于较低水平,仅为 0.41%,但主要关注同一级地类之间的相互变化。

1995—2018 年,黄河流域的转移矩阵表明,转入面积和转出面积最多的地类从大到小依次为旱地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、高覆盖度草地、灌木林地,这说明了草地在黄河流域中的转换最为活跃。

驱动黄河流域土地利用变化主要是气象因素、经济因素和政策因素,从单因子方面来看,2000—2015 年,土地利用的变化与气温密切相关,2015—2018 年,土地利用的变化与降水密切相关。然而,植被覆盖变化对黄河流域的上游地区和下游地区解释力最强,气温和夜光数据变化对中游地区的解释力最强,这证明政策因素成为影响黄河流域各部分区域土地类型变化的主要因子。

从交互因子探测的结果来看,黄河流域土地利用变化的原因比较复杂,通常是由多个因子交互作用造成的。2000—2018 年,NDVI 对上游和下游地区土地利用变化的影响最大,气温变化与夜光变化对中游地区的土地类型变化影响最大。因此,上游和下游地区的林业部门应该加强林业工程的监管,重视政策因素导致的植被覆盖变化,中游地区除了

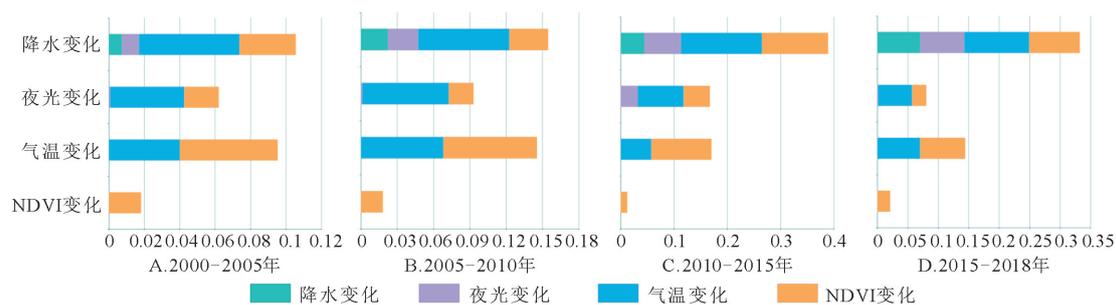


图5 2000—2018年各年份土地类型变化驱动因子交互探测

Fig. 5 Interactive detection map of driving factors of land type change in various years from 2000 to 2018

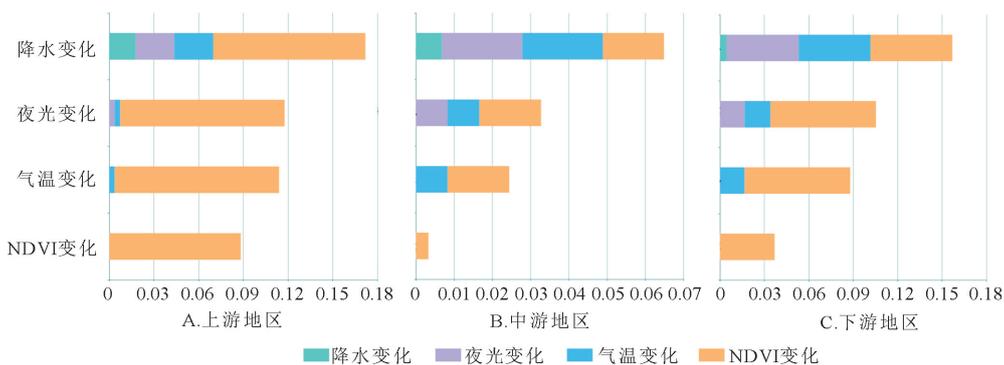


图6 2000—2018年上中下游地区土地类型变化驱动因子交互探测

Fig. 6 The interactive detection map of driving factors of land type change in the upper, middle and lower reaches of the upper, middle and lower reaches from 2000 to 2018

气温因素不能多加干预以外,应该重视经济发展给土地利用变化带来的影响。

在二级地类之间的土地类型转换中,草地的转换面积最大、最频繁。其中,中覆盖度草地和低覆盖度草地在土地类型的转出与转入中扮演重要角色。因此,草地应该成为黄河流域最受关注的土地类型之一。黄河流域土地利用变化所涉及的驱动力分为气候因素、经济因素和政策因素。随着人类对自然环境的干扰越来越多,政策因素逐渐成为影响区域土地利用变化的主导因素。在政策因素的带动下,黄河流域开展了各种林业工程以及环境修复措施。

黄河流域的土地利用变化研究是大尺度研究,因此选用了分辨率为1 km的土地利用分类数据来分析黄河流域的整体时空变化特征,为以后研究黄河流域的局部地区打下基础,对于小尺度的研究可以选用分辨率更高的空间数据。

参考文献:

- [1] XU G Y, WANG Z J, HU Z D, *et al.* Comprehensive index evaluation of land use and cover in Qaidam Basin[J]. Journal of Hydroelectricity, 2019, 38(9): 44-55.
- [2] 杨静怡, 吴峰. 贵阳市1980—2018年土地覆盖类型及碳储量变化研究[J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2020, 40(4): 115-121.

YANG J Y, WU F. Study on change of land cover type and carbon storage during 1980—2018 in Guiyang[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2020, 40(4): 115-121. (in Chinese)

- [3] LIU J Y, NING J, KUANG W H, *et al.* Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802.
- [4] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [5] LIU J Y, NING J, KUANG W H, *et al.* Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802. (in Chinese)
- [6] PERRING M P, DE F P, BAETEN L, *et al.* Global environmental change effects on ecosystems: the importance of land-use legacies[J]. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1361-1371.
- [7] 张冉, 王义民, 畅建霞, 等. 基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 274-287.
- [8] ZHANG R, WANG Y M, CHANG J X, *et al.* Response of land use change to human activities in the Yellow River Basin based on water resources division[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 274-287. (in Chinese)
- [9] 肖东洋, 牛海鹏, 闫弘轩, 等. 1990—2018年黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 271-281, 326.
- [10] XIAO D Y, NIU H P, YAN H X, *et al.* Spatiotemporal evolu-

- tion of land use pattern in the Yellow River Basin(Henan section) from 1990 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 271-281, 326. (in Chinese)
- [8] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731-2739.
YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2731-2739. (in Chinese)
- [9] 凌成星, 刘华, 纪平, 等. 基于无人机影像 VDVI 指数的植被覆盖度估算: 以陕西神木防护林工程研究区为例[J]. 森林工程, 2021, 37(2): 57-66.
- [10] 黄金亭, 曹艳萍, 秦奋. 基于土地利用/覆盖变化模拟的黄河流域生态环境质量分析[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2020, 50(2): 127-138.
HUANG J T, CAO Y P, QIN F. Analysis of eco-environment quality based on land use/cover change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2020, 50(2): 127-138. (in Chinese)
- [11] 刘博远. 基于 Google Earth Engine 的郴州市土地利用变化及其驱动力分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [12] 傅春, 毛安琪. 抚河流域径流对土地利用变化时空响应[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(2): 342-350.
- [13] 高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2248-2260.
GAO Y L, LI H B. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2248-2260. (in Chinese)
- [14] ASNAKE K, WORKU H, ARGAW M. Assessing the impact of watershed land use on Kebena river water quality in Addis Ababa, Ethiopia[J]. Environmental Systems Research, 2021, 10: 1.
- [15] 李硕, 沈占锋, 柯映明, 等. 1974—2019 年大河流域土地利用景观时空变化[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 195-203, 210.
LI S, SHEN Z F, KE Y M, *et al.* Spatial-temporal variation and driving forces of land use types in the Daqing River Basin from 1974 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 195-203, 210. (in Chinese)
- [16] 张吕成, 张一帆, 董灵波. 基于 Landsat TM 数据的大兴安岭森林景观空间格局及其关联性[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 1-9.
- [17] OWOKOTOMO A I, AJAYI O O, ALABI O O, *et al.* Watershed land use, surface water vulnerability and public health risks of two urban rivers, Ado-Ekiti, South-West Nigeria[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(11).
- [18] WANG Y, ZHANG S, ZHEN H, *et al.* Spatiotemporal evolution characteristics in ecosystem service values based on land use/cover change in the Tarim River Basin, China[J]. Sustainability, 2020, 12(18).
- [19] 孙永军, 周强, 杨日红. 黄河流域土地荒漠化动态变化遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2008(2): 74-78, 121.
- [20] 胡春宏, 张治昊. 论黄河河道平衡输沙量临界阈值与黄土高原水土流失治理度[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1015-1025.
HU C H, ZHANG Z H. Discussing of the critical threshold of equilibrium sediment transport in the Yellow River and the degree of soil erosion control in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1015-1025. (in Chinese)
- [21] 高焕霖, 张廷龙, 樊华焯, 等. 基于地理探测器的杨凌示范区生态环境质量影响因素定量分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 185-194.
GAO H L, ZHANG T L, FAN H Y, *et al.* Quantitative analysis of the factors affecting ecological environment quality in Yangling Demonstration Zone based on geographical detector[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 185-194. (in Chinese)
- [22] CHEN Z, YU B, YANG C, *et al.* An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J/OL]. Earth Syst. Sci. Data, 2021, 13: 889-906. <https://doi.org/10.5194/essd-13-889-2021>, 2021.
- [23] 刘峰, 杨光, 韩雪莹, 等. 科尔沁沙地土地利用时空演变及空间自相关分析——以奈曼旗为例[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 148-157.
LIU F, YANG G, HAN X Y, *et al.* Spatial-temporal evolution of land use and spatial autocorrelation analysis in Horqin sandy land—a case study of Naiman Banner[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 148-157. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 王璇璇, 赵明松, 谢毅, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜光遥感的江苏省人口数据空间化研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2020, 34(3): 31-35.
WANG X X, ZHAO M S, XIE Y, *et al.* Research on the population data spatialization based on NPP-VIIRS nighttime light data in Jiangsu Province[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2020, 34(3): 31-35. (in Chinese)
- [26] 吴秉校, 侯雷, 宋敏敏, 等. 西安市 NDVI 时空演变分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 213-220.
WU B X, HOU L, SONG M M, *et al.* NDVI Temporal and Spatial Evolution Analysis in Xi'an[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 213-220. (in Chinese)