

干旱高原湖泊湿地土地利用变化与驱动因素分析 ——以泊江海子湿地闭流区为例

葛茹香¹, 马超^{1,2}

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003;

2.河南理工大学, 自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室, 河南 焦作 454003)

摘 要:鄂尔多斯高原湖泊湿地土地利用变化及生态趋势研究,可为干旱区资源管理、环境保护和生态规划提供科学依据和决策支持。基于 Landsat 卫星系列影像及气候数据,采用支持向量机(SVM)方法对 1986—2019 年的 16 期影像进行监督分类,通过变化检测、叠加分析,获得土地利用转移矩阵及各土地利用类型空间变化,定量描述了不同时段土地利用数量及空间转化特征。结果显示:(1) 研究期间裸地、低覆盖度草地和高覆盖度草地是流域主导土地利用类型,占整个研究区的 93%~99%,水体、建设用地及林地在总体面积中所占比例很少,分别为 1%、1%和 2%;(2) 34 年间土地利用状况发生了较大的变化,主要表现为裸地、水体面积减少,低覆盖度草地、高覆盖度草地、林地和建设用地面积增加,其中建设用地面积增幅最大,增加了 44.3 倍;(3) 研究区土地类型的转换主要发生在裸地、低覆盖度草地、高覆盖度草地之间,裸地转入转出主要为低覆盖度草地,总体转出速度高于转入速度,裸地面积大幅减少 31.79%,低覆盖度草地分两个阶段持续转化为高覆盖度草地,使高覆盖度草地占比从 14.63%增加到 35.98%。(4) 受气候变化和人类活动共同影响,研究区土地利用变化剧烈,且人类活动影响占主导地位。

关键词:鄂尔多斯高原; 泊江海子湿地; 土地利用变化; 土地利用转移矩阵; 桑基图

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)01-0376-10

Analysis on Land Use Change and Driving Factors of Lake Wetland in Arid Plateau

—A Case Study on the Inflow Area of Bojianghaizi Wetland

GE Ruxiang¹, MA Chao^{1,2}

(1.School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic

University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 2.Key Laboratory of Spatio-temporal Information

and Ecological Restoration of MNR, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: The study on land use/cover changes and ecological trend of lake wetland in Ordos Plateau can provide scientific basis and decision support for resource management, environmental protection and ecological planning in arid areas. Based on the series of Landsat satellite images and climate data, 16 scenes from 1986 to 2019 were captured and classified by the support vector machine (SVM) supervised classification method. Through change detection and overlay analysis, the land use conversion matrix and spatial change of each land use type were obtained, and the quantity of land use and the characteristics of spatial conversion in different periods were quantitatively described. The results show that: (1) bare land, low-coverage grassland and high-coverage grassland, accounting for 93%~99% of the whole study area, were the dominant land use types in the basin during the study period; the proportions of water body, built-up land and forest land were very small, which were about 1%, 1% and 2%, respectively; (2) during the past 34 years, great changes had taken place in the land use situation including the reduction of bare land, water body, and the increase of

收稿日期: 2021-01-04

修回日期: 2021-02-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(41975036); 国家基金委与英国皇家学会联合基金(42011530174)

第一作者: 葛茹香(1997—), 女, 河南淅川人, 在读研究生, 研究方向: 光学遥感、雷达遥感资源管理与环境监测研究。E-mail: 1903399784@qq.com

通信作者: 马超(1967—), 男, 内蒙赤峰人, 博士, 教授/博导, 研究方向: 自然灾害遥感、生态环境遥感。E-mail: mac@hpu.edu.cn

low-coverage grassland, high-coverage grassland, woodland, built-up land; the increase of the construction land was the largest, the construction land increased by 44.3 times; (3) the conversion of land types in the study area mainly occurred among bare land, low-coverage grassland and high-coverage grassland; bare land which in total reduced 31.79% was mainly converted into and out of low-coverage grassland, and the overall outgoing rate was higher than incoming; the low-coverage grassland was converted into high-coverage grassland, which increased the proportion of high coverage grassland from 14.63% to 35.98%; (4) jointly influenced by climate change and human activities, the land use in the study area had changed dramatically, and the impact of human activities was dominant.

Keywords: Ordos Plateau; Bojianghaizi wetland; land use and cover change (LUCC); land use conversion matrix; Sankey diagram

土地是人类生产生活和社会发展过程中的重要自然资源和物质保障,可作为人与环境联系的桥梁与纽带,且其作为陆地生态系统的载体,在研究人类与环境的相互关系中具有重要作用^[1-3]。土地利用是人类生产生活的最基本方式,与陆地生态系统功能关系密切^[4]。土地利用方式变化,表现为各土地利用类型面积、空间分布的变化,其变化直接影响着生态系统提供服务 and 产品的能力^[5]。因此,土地利用/覆被变化 (LUCC) 研究,作为国际地圈生物圈计划 (IGBP) 和全球变化人文计划 (IHDP) 共同推动的核心研究,对于研究自然格局、区域水循环、环境质量、可持续发展、人地关系、制定区域发展战略与决策等都十分重要^[6-7]。同时,土地利用/覆被变化,也引起许多环境和社会问题,如生物多样性丧失^[8]、食品安全降低等^[9],因此研究土地利用演变过程及其人文驱动因子,对于揭示土地利用变化规律,探寻其内在人文驱动机制具有重要学术价值和实践意义^[10-11]。

泊江海子湿地作为国际重要湿地,位于农牧交错区,是典型的生态脆弱区,是我国干旱区土地利用变化研究的重要地区^[12]。作为国内首个遗鸥繁殖地发现于 20 世纪 90 年代初期^[13],在 2002 年被列为全球第 1148 号国际重要湿地,到 2004 年遗鸥群落弃居该地迁居红碱淖^[14],最终在 2005 年研究区水鸟群落彻底消失^[15-17],受气温升高,降水减少,区域暖干化影响,短短的十几年时间,以泊江海子湿地为核心的鄂尔多斯遗鸥国家自然保护区就由一处极具代表性的荒漠湿地衰退至 1.0~2.0 km² 的浅水水面^[14],生态系统遭受严重创伤,生态服务功能退化。

在过去的研究中,有针对鄂尔多斯高原沙漠化^[18]、生态承载力^[19]、景观格局演变^[20]、土壤水力侵蚀^[21]、植物分布等^[22],也有针对鄂尔多斯土地利用及生态安全^[23-25]、黄河中游土地利用等^[26] 方面的研究,但所研究的尺度太大,区域土地利用变化特点及

驱动因素难以确定。针对泊江海子小区域的研究中,重要集中于对泊江海子矿^[27]、桃—阿海子^[28] 及流域水资源^[29-30]、生物群落^[13-14] 以及气候变化^[31] 研究,对研究区土地利用变化及驱动机制的研究相对薄弱,仅有的对泊江海子流域土地利用变化及驱动力的研究^[3],研究时间间隔长,时间序列短,数据时效性低,对研究区土地利用变化及驱动机制的研究不够细致全面。

为更详尽地理解干旱高原湖泊湿地区域土地利用变化特点及其驱动机制,为流域生态恢复工程、水土保持工程提供建设性意见。本文利用 Landsat 卫星系列影像,对研究区泊江海子湿地 1986—2019 年土地利用进行分类统计,并对其时间、空间变化规律以及驱动因素、驱动机制进行分析。本研究是对泊江海子湿地土地利用变化研究数据和方法上的补充,时序更长,采样间隔短,对区域变化过程、格局与驱动力论述更为详细,可为研究区土地利用政策实施、水资源利用、湿地保护提供科学参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

泊江海子湿地 (109°05′—109°36′E, 39°41′—39°57′N) 位于内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜区以西约 45 km 处,面积约 677.6 km²。气候类型为温带干旱半干旱大陆性气候,年均气温 5.2℃,年均降水量 324.8 mm。地势由西北向东南和缓倾斜,于高原中部凹成盆地,形成封闭性的集水区域。泊江海子湿地包括桃力庙—阿拉善湾海子(简称桃—阿海子)、侯家海子和苏家圪卜海子 3 个主要湖泊。其中桃—阿海子是呈驼形的盐碱湖,东西跨度约 6 km,南北宽 2.5 km,面积最大时可达 14.545 km² (1998 年),注入桃—阿海子的径流均属季节性河流,最主要的两条河流是鸡沟河(又称扎日格沟)和乌尔图河。其东部为

水蚀黄土丘陵沟壑区,西部为风蚀沙化地貌,南部为毛乌素沙地,北部为库布齐沙漠。

1.2 数据来源

遥感数据来源于美国陆地资源系列卫星 Landsat(<https://earthexplorer.usgs.gov>) TM/ETM/OLI 影像,空间分辨率为 30 m,用于获取研究区土地覆盖状况及土地利用状况信息;气候数据源于 1986—2019 年中国气象数据网站(<https://data.cma.cn/>) 东胜站点,用于分析气候变化及其对土地利用变化的

驱动效果;高程数据采用美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 90 m 水平分辨率数字高程模型(SRTM3 DEM, v4.0) (<ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/>),用以进行流域分析,获取研究区边界;成图边界选用中国 1:25 万基础地理信息数据(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。综合考虑遥感影像的数据质量、云覆盖量以及研究区植被生长的季节特征等因素,筛选出植被生长旺季的 7—9 月份的遥感影像 16 期(表 1)。

表 1 数据源及用途分类

数据类型	L5	L5	L5	L5	L5	L5	L5	L7	L5	L5	L5	L5	L8	L8	L8	L8
数据用途	1986-8-09	1988-9-15	1992/8/25	1994-7-14	1996-9-05	1998-9-11	2000-8-31	2002-8-29	2004-9-27	2006-7-31	2008-10-08	2010-7-26	2013-8-03	2015-8-25	2017-8-30	2019-7-03
NDVI 计算	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
LUCC 分类	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

注:流域分析采用 SRTM DEM(2001)。

2 研究方法

2.1 遥感数据预处理

(1) 辐射定标:将传感器记录的 DN 值转换为对应目标像元的绝对辐射亮度值或表观反射率,用以消除不同传感器、不同时间获取的数据中存在的误差。绝对辐射亮度值(L_λ):

$$L_\lambda = \frac{DN}{Gain} + Bias \tag{1}$$

式中:Gain 和 Bias 分别表示辐射校正增益和偏移值。

在辐射亮度值的基础上,引入日地距离、太阳光谱辐照度及太阳天顶角,计算大气层顶的表观反射率:

$$\rho_\lambda = \pi L_\lambda d^2 / E_o \cos \theta \tag{2}$$

式中: ρ_λ 表示大气层顶的表观反射率; d 为日地平均距离; E_o 为大气层外相应波长的太阳光谱辐照度, d 和 E_o 都可查得; θ 为太阳天顶角。本文采用绝对辐射亮度值作为辐射定标的结果。

(2) 大气校正:此过程的目的是消除大气分子、气溶胶以及云粒子等吸收、散射的影响。本文采用 ENVI FLAASH 算法对 TM,ETM+ 和 OLI 数据进行大气校正。FLAASH 是以太阳波谱范围(不包括热辐射)和平面朗伯体为基础,其传感器入瞳处接收到的像元光谱辐射亮度为^[32]:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1-\rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_o \tag{3}$$

式中: L 是像元在传感器处接收到的辐射亮度值; ρ 是像元表面反射率; ρ_e 是像元及其周围像元平均地表反射率; S 是大气球面反照率; L_o 是大气后向散射辐射率; A, B 是基于大气条件和几何条件决定的系数。其中 ρ_e 可通过空间平均辐射亮度 L_e 构建以下近似公

式进行估算:

$$L_e \approx \left[\frac{(A+B)\rho_e}{1-\rho_e S} \right] + L_o \tag{4}$$

式中: L_e 是像元及其周围像元的空间平均辐射亮度。

2.2 归一化植被指数(NDVI)

NDVI 作为衡量植被生长和覆盖状况的重要参数,广泛应用于植被因子动态监测中^[33]。其数学模型为:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \tag{5}$$

式中: ρ_{nir} 为近红外波段的反射值; ρ_{red} 为红光波段的反射值。NDVI 的取值范围为 $[-1, 1]$, 负值表示有云、水、雪等对可见光高反射目标; $[0, 0.2]$ 表示有岩石或裸土等,其反射率 ρ_{nir} 和 ρ_{red} 近似相等; $(0.2, 1]$ 表示有不同程度的植被覆盖。

2.3 支持向量机(SVM)

支持向量机是以统计学习理论为基础的监督分类方法。SVM 方法是从线性可分的两类分类问题发展而来的,其基本原理是用决策面将类分开,并最大限度的增加类间的间隙,该曲面通常称为最优超平面,最接近超平面的数据点称为支持向量。对于线性不可分情况,利用非线性核函数将低维特征空间中的线性不可分样本转化到高维特征空间使其线性可分。采用支持向量机的监督分类方法时,可选择的核函数有线性核函数、多项式核函数、径向基核函数和 Sigmoid 核函数,本试验选择径向基核函数,其数学模型为^[34]:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-g \|x_i - x_j\|^2), g > 0 \tag{6}$$

式中: $(x_i, x_j) i, j = 1, 2, \dots, n$ 是训练样本集; g 是表示径向宽度的参数。选择径向基核函数后其参数的选择,按照系统默认即可。

3 结果与分析

3.1 闭流区土地覆被结构

对经过预处理的裁剪影像进行 NDVI 波段运算,参考同类研究,对 NDVI 结果影像进行 5 级密度

分割^[3,35],即水体 $[-1.0,0.0]$ 、裸地 $((0.0,0.2])$ 、低覆盖度草地 $((0.2,0.4])$ 、高覆盖度草地 $((0.4,0.6])$ 、林地 $((0.6,1])$,对分割影像进行类统计,统计每一级所占比例,进而分析各土地覆被类型变化趋势(图 1)。

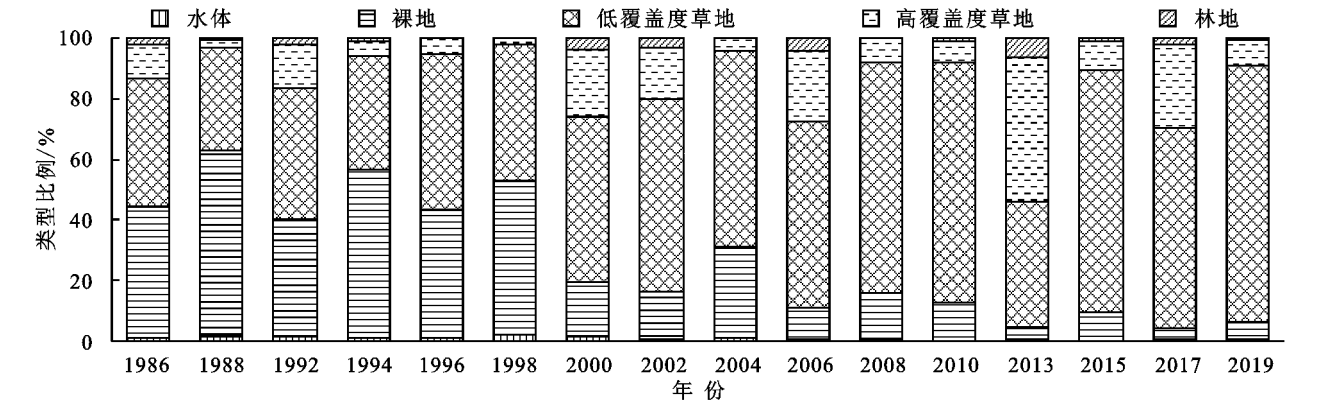


图 1 NDVI 密度分割的植被类型百分比

从 NDVI 的密度分割获得的植被类型百分比得出:(1) 1986—2019 年水域面积呈波动下降,其中 1998 年水域面积最大,与分类结果相符;(2) 裸地 $(0<NDVI\leq0.2)$ 的面积从 1986 年的 43.46%下降到 2019 年的 5.86%;(3) 低覆盖草地 $(0.2<NDVI\leq0.4)$ 占比呈增加趋势,从 1986 年的 42.21%增加到 2019 年的 84.62%,增加了一倍;(4) 高覆盖草地 $(0.4<NDVI\leq0.6)$ 、林地 $(0.6<NDVI\leq1.0)$ 占比均呈少量减少趋势,泊江海子的地表覆被发生了很大变化。对获得的 NDVI 影像用图像统计工具,计算每一期影像的 NDVI 均值和总值,得到 NDVI 年值变化趋势。结果显示高于均值和低于均值的年份数量相当,但 NDVI 均值和总值在研究期内总体呈上升趋势 $(0.4\%/10\text{ a})$ 。

3.2 闭流区土地利用时空变化

按照国家《土地利用现状调查技术规程》,结合 Google Earth 高分辨率影像开展分类训练样本选择、可分离性计算、聚类分析和去小斑等工作,综合考虑研究区土地利用特征及研究目的,将研究区土地利用类型分为水体、裸地、建设用地、低覆盖度草地、高覆盖度草地、林地共 6 类。

精度评价方法选用混淆矩阵,计算混淆矩阵需使用地表真实图像或地表真实感兴趣区,本文选择使用地表真实感兴趣区作为验证样本,选择过程与选择训练样本时相同。验证样本选择完成后,利用 ENVI 5.2.1 的混淆矩阵模块输出混淆矩阵报表,在报表中选择总体分类精度和 Kappa 系数两个评价指标,各期影像的分类精度见表 2。

表 2 分类精度评价

参数	1986-8-09	1988-9-15	1992-8-25	1994-7-14	1996-9-05	1998-9-11	2000-8-31	2002-8-29	2004-9-27	2006-7-31	2008-10-08	2010-7-26	2013-8-03	2015-8-25	2017-8-30	2019-7-03
总体精度/%	97.92	95.63	95.19	94.39	98.58	96.50	96.61	97.29	97.48	97.09	97.60	97.29	97.89	97.57	98.84	99.19
Kappa 系数	0.92	0.86	0.84	0.82	0.88	0.89	0.88	0.83	0.85	0.82	0.85	0.83	0.87	0.85	0.93	0.95

总体分类精度是正确分类的像元总数与总像元数的比值,本次分类的总体精度均在 90% 以上。Kappa 系数表示的是两幅影像间的吻合度,本次分类的 Kappa 系数均在 0.8 以上。

1986—2019 年土地利用类型空间分布见图 2。土地利用类型专题图显示:研究区主要土地利用类型为裸地、低覆盖度草地和高覆盖度草地三大类,据统计这 3 类占整个研究区的 93%~99%,其余水体、建设用地及林地最高占比分别为 2.24%,1.96% 和 3.76%。研究区水域边界变化剧烈,水域面积总体呈下降趋势;裸地的减少主要体现为低覆盖度草地和高

覆盖度草地的增加;1986 年以来,居民建设用地空间分布格局由分散到聚拢,斑块数量由 368 块增加到 1 580 块,面积由 0.3 km² 增加到 13.3 km²,面积扩大了 44.3 倍。

为了进一步体现土地覆被变化的空间格局,利用叠加分析方法,对相邻的分类结果影像进行分析最终得到土地利用空间变化图,并统计各时间段的变化面积(图 3)。1986—2019 年研究区各地类间相互转化频繁,土地利用变化遍布整个研究区。据统计显示土地利用变化面积在 1986—2002 年总体呈增加趋势,在 2000—2002 年土地利用变化面积达到最大值为

354.2 km², 占整个研究区面积的 52.28%。2002 年之后, 变化面积呈波动下降趋势, 2017—2019 年变化面积降为 181.9 km²。在整个研究期间, 土地利用变

化面积为 449.6 km², 占整个研究区面积的 66.36%, 土地利用变化空间变化分布广泛, 在北部和西北角土地利用空间变化分布稍弱。

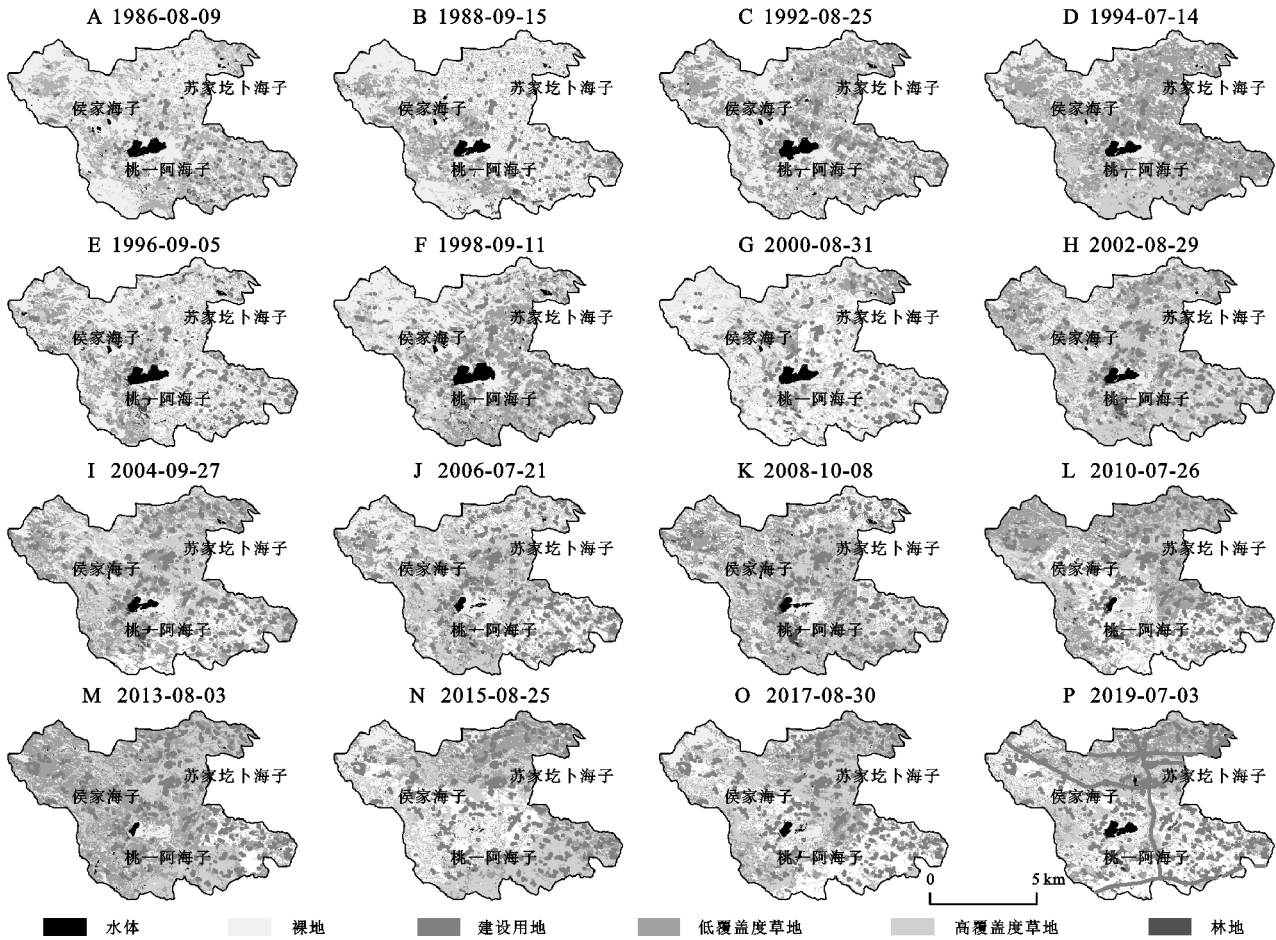


图 2 土地利用覆被及变化 (LUCC) 时间序列专题图

3.3 闭流区土地利用数量变化特征

对土地利用面积变化的分析, 可以了解土地利用趋势及其结构的变化。用类统计工具对研究区分类结果影像各土地利用类型面积进行统计, 结果见图 4。(1) 在研究期内, 裸地面积从 1986 年的 325.74 km² 减少至 2019 年的 110.32 km², 面积总计减少 215.43 km², 减少幅度为 66.13%; 低覆盖度草地从 1986 年的 233.4 km² 增加至 2019 年的 284.2 km², 面积总计增加 50.8 km², 增加幅度为 21.77%; 高覆盖度草地从 1986 年的 99.1 km² 增加至 2019 年的 243.8 km², 34 a 总计增加 144.7 km², 增加了 1.46 倍。(2) 建设用地面积从 1986 年的 0.3 km² 持续增加至 2019 年的 13.3 km², 面积扩大了 44.3 倍; 水体面积波动剧烈, 1998 年水体面积最大为 15.11 km², 2015 年水体面积最少, 仅为 0.2 km², 是最大面积的 1.32%, 2018 年后受引黄工程影响, 水域面积有所增加。研究期内水域面积总体是减少的, 从 1986 年的 7.66 km² 减少至 2019 年的 4.68 km², 总体面积减少 2.98 km², 减少幅

度为 38.9%; 林地面积波动也较大, 最大面积为 1998 年的 25.5 km², 最小面积为 1994 年的 2.7 km², 仅为最大面积的 10.59%。林地面积在整个研究期内是呈上升趋势, 从 1986 年的 11.4 km² 增加至 2019 年的 21.3 km², 总体增加了 9.9 km², 增加幅度为 86.84%。

总体来说, 1986—2019 年 34 a 土地利用状况发生了较大的变化, 主要表现为裸地、水体面积减少, 低覆盖度草地、高覆盖度草地、林地和建设用地面积增加, 其中建设用地面积增加幅度最大。

3.4 闭流区土地利用转移特征

土地利用转移特征可描述各类用地变化的来源和归宿, 其通过分析研究初期和末期各地类构成及转化方向, 可清晰地表达土地利用状态的时空演化过程^[36]。利用变化检测工具, 得到相邻两期影像面积转移矩阵, 并计算百分比, 得到 1986—2019 年相邻影像各类型土地的转入转出概率, 最终通过桑基图有效表达不同时期不同土地利用类型间的相互转换关系。

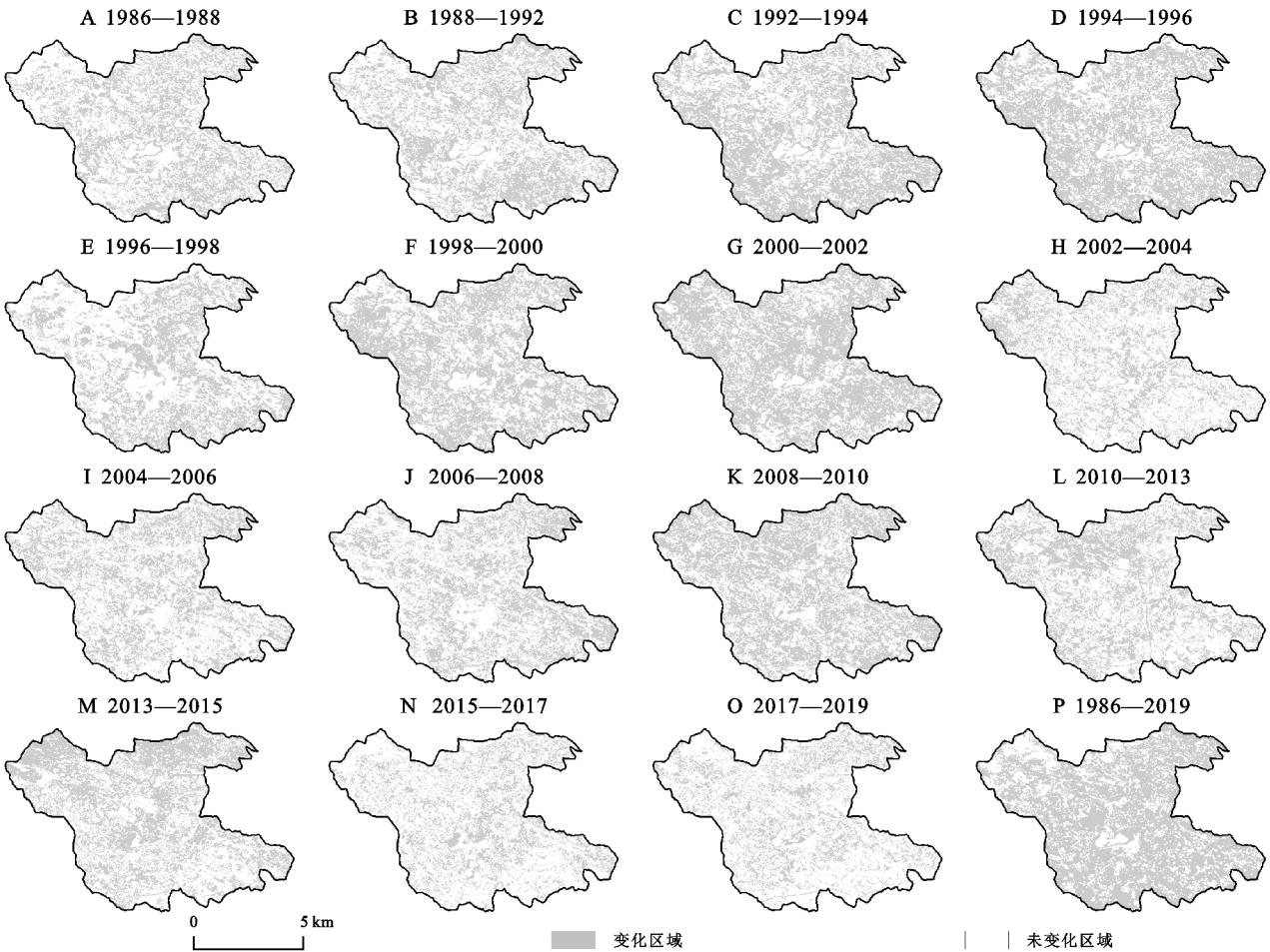


图 3 泊江海子湿地土地利用空间变化

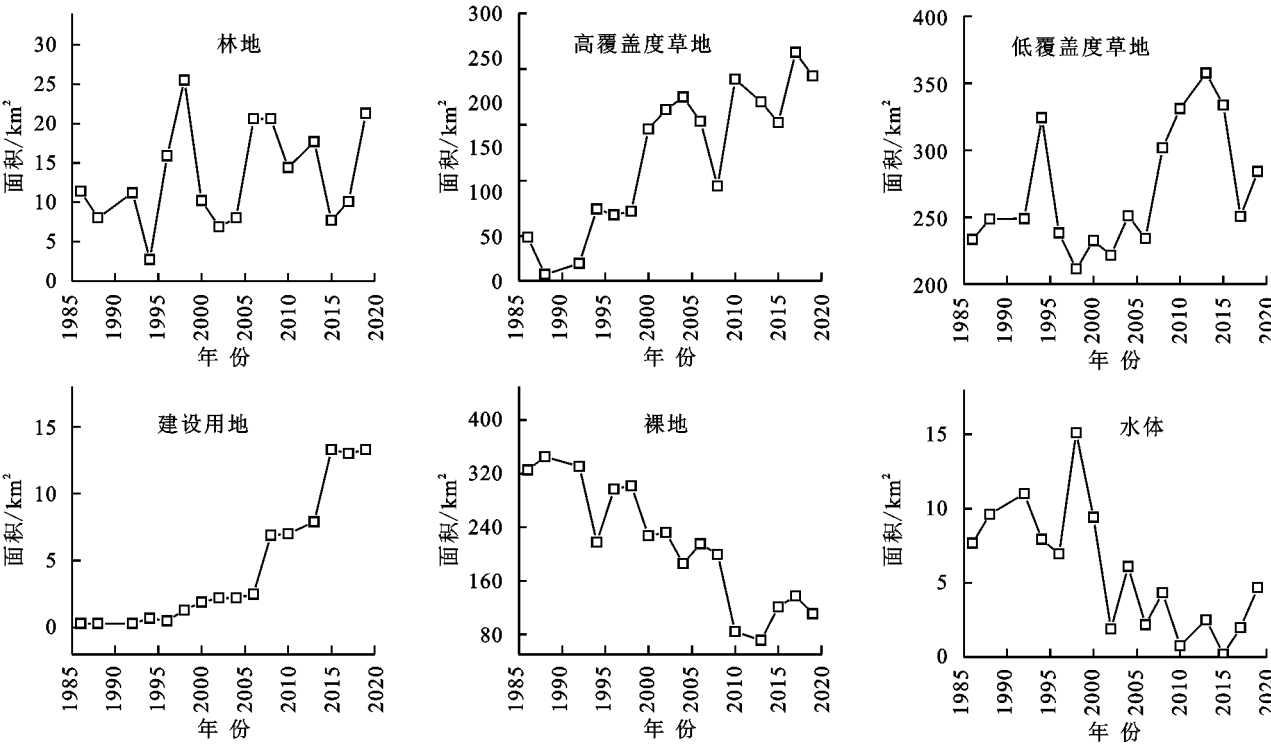


图 4 土地利用面积变化时序图

桑基图显示了各种土地类型的转入转出,土地类型的转换主要发生在裸地、低覆盖度草地、高覆盖度草地之间。主要表现在:(1)裸地的转出转入类型主要为低覆盖度草地,其次为高覆盖度草地,裸地类型

在1986—1994年、2002—2010年两个时间段有大规模的迁移,如1986—1988—1992—1994年各有47.58 km²,79.74 km²,106.31 km²转化为低覆盖度草地、2002—2004—2006—2008—2010年各有48.76 km²,37.30 km²,64.70 km²,102.74 km²转化为低覆盖度草地,两阶段共有487.13 km²转化为低覆盖度草地。裸地也在持续不断的转化为高覆盖度草地,但相对低覆盖度草地较少,在整个研究期,裸地共有334.26 km²转化为高覆盖度草地;裸地只有在1996—1998年、2006—2008年、2013—2015年、2015—2017年这4个时间段的转出面积小于转入面积,其余时间段裸地转出面积均大于转入面积,总体转出大于转入,面积大幅度减少31.79%。(2)低覆盖度草地分两个阶段持续转化为高覆盖度草地,使高覆盖度草地占比从14.63%增加到35.98%。这两次重大转移与国家生态可持续管理政策相吻合。(3)建设用地主要由裸地和草地转入,且转入速度大于转出速度,面积不断增加。(4)水域面积波动剧烈,水体在1998年达到峰值,占研究区面积的2.24%。在2000—2002年、2004—2006年、2008—2010年、2013—2015年这4个时间段,水体主要转出为裸地,分别为76%,77%,61%,65%。水体和建设用地间不存在转化关系,与林地存在极少量的转化;(5)林地的波动也相当剧烈,林地的面积输入50%以上都来自低覆盖度草地和高覆盖度草地,林地面积转出比例很高,除2015年转出比例为39%,其余年份转出比例均高于50%。

对比闫国振1990—2015年的土地利用类型变化分析发现,本研究中建设用地、草地、林地、水体的总体变化趋势与其一致。其中水体、林地所占比例也相近。水体占总面积的百分比都小于2.5%,林地占总面积的百分比都小于4.5%。总体而言,研究区的裸地面积在大幅度减少,草地大幅增加,总体生态状况在逐渐好转。在2010—2015年期间建设用地面积增加主要来源为草地,与闫国振的研究相符^[3]。

4 讨论

土地利用变化不外乎有两种驱动因素:一种是自然力(如气温、降水);一种是人为因素(如煤矿开采、生态恢复工程建设、水利工程建设、居民建设用地);下面将从这两方面来讨论土地利用变化的原动力。

4.1 气候变化分析

气温和降水作为气候变化的主要表现形式,对土地利用变化驱动是长期的、较缓慢的,相对稳定的,且具有累积效应^[37-38]。

研究区1986—2019年气温和降水的变化趋势见图5。研究区年均气温和降水均呈整体上升趋势。主要表现为:(1)34年平均气温为7.1℃,1986—1998年、1999—2009年和2010—2019年的多年平均气温分别为6.6℃,7.2℃和7.7℃,1999—2009年、2010—2019年相较于第一阶段的年平均气温分别升高了0.6℃,1.1℃;(2)34年平均降水量为360.4 mm,在各时间段,研究区的年均降水量均呈升高趋势、但1999—2009年、2010—2019年两个时间段的多年平均降水量分别为341.3 mm,365.4 mm,相较于1986—1998年的年多年平均降水量分别减少31.5 mm,7.4 mm。2000年以来的20 a间,有14 a气温高于均值,10 a降水量低于均值,说明干旱少雨的年份出现的概率在增加,有暖干化趋势。

1986—1998年的低气温及高降水,使得研究区内的蒸发量较小,水量能得以保存。蓄水量的增加使得湖泊周围的裸地转化为水体,裸地逐渐生出低覆盖度草地,低覆盖度草地逐渐向高覆盖度草地转化,高覆盖度草地也部分向林地输入,最终气候对土地利用变化的驱动在这一时间段主要表现为,水体、高覆盖度草地及林地面积的增加,裸地及低覆盖度草地面积的减少。1998年后降水量减少,平均气温升高,蒸发量增大,蓄水量减少,水域面积急剧减少是1999—2009年这一时间段土地利用的主要变化趋势。

将分类得到的6类土地利用类型和气候数据做相关性分析,得到各土地利用类型和气候数据间的互相关矩阵(表3)。根据表中的结果显示:水体和裸地呈正相关,相关系数为0.753,且在0.01水平上显著;水体与建设用地、高覆盖度草地在0.01水平上均呈显著负相关,与低覆盖度草地在0.05显著水平上呈负相关;裸地与建设用地、低覆盖度草地、高覆盖度草地及气温均呈负相关,且在0.01水平上均呈显著负相关;建设用地与低覆盖度草地在0.05水平上呈显著正相关,与高覆盖度草地和气温在0.01水平上呈显著正相关;高覆盖度草地与气温呈正相关,相关系数为0.741,且在0.01水平上显著。

4.2 人类活动的影响

人类活动是土地利用变化的主要驱动力之一^[39],该区域主要人为因素包括煤矿开采、政策制度实施、居民生活设施建设等影响土地利用结构变化的重要因子。综合利用研究区土地利用状况和变化趋势及现有研究资料,从煤矿开采、生态恢复工程建设、水利工程建设及居民用地建设等方面,对1986—2019年研究区土地利用变化受人类活动因素影响进行分析。

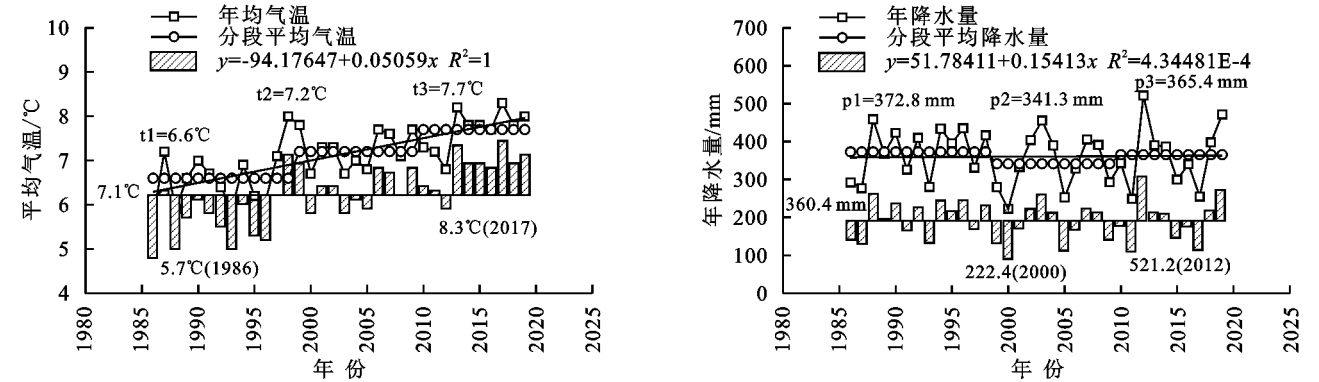


图 5 研究区气温和降水(1986—2019 年)变化趋势

表 3 各土地利用类型和气候数据间的互相关矩阵

指标 (采样数)	水体	裸地	建设 用地	低覆盖度 草地	高覆盖度 草地	林地	气温	降水
水体(16)	1.000	0.753 **	-0.646 **	-0.510 *	-0.718 **	0.121	-0.433	0.279
裸地(16)	0.753 **	1.000	-0.805 **	-0.714 **	-0.868 **	-0.096	-0.742 **	0.206
建设用地(16)	-0.646 **	-0.805 **	1.000	0.529 *	0.698 **	0.168	0.715 **	-0.215
低覆盖度草地(16)	-0.510 *	-0.714 **	0.529 *	1.000	0.284	-0.086	0.329	0.076
高覆盖度草地(16)	-0.718 **	-0.868 **	0.698 **	0.284	1.000	0.077	0.741 **	-0.363
林地(16)	0.121	-0.096	0.168	-0.086	0.077	1.000	0.382	0.181
气温(34)	-0.433	-0.742 **	0.715 **	0.329	0.741 **	0.382	1.000	-0.087
降水(34)	0.279	0.206	-0.215	0.076	-0.363	0.181	-0.087	1.000

注: * 表示显著($p<0.05$); ** 表示非常显著($p<0.01$)。

(1) 煤矿开采的影响。野外调查表明,该区域煤炭开采对流域土地利用变化最显著的影响是草地向沉陷积水区的转化。研究区属高潜水位地区,煤矿的开采,破坏含水层,造成地下水流失,开采沉陷使地表潜水渗漏,形成沉陷积水,改变了土地利用类型。同时煤炭开采使土地生产力下降,从而影响地表植被的生长,进而影响湿地功能。煤炭资源开发所固有的时间持续性、空间扩展性和强干扰性使得矿区土地利用受到影响,从而使研究区生态功能受到损伤^[40]。

(2) 生态恢复工程建设的影响。泊江海子流域是典型的半荒漠高原湖泊湿地生态系统,位于鄂尔多斯东胜区西部沙漠、沙化区。进入 21 世纪,鄂尔多斯市实施退耕还林工程,资料表明,以种植沙棘为主,与柠条、红柳等树种混交造林,东胜区在 2000—2003 年,沙漠化面积由 1 219.94 km² 减少至 986.54 km², 减少了 10.92%。到 2006 年林地覆盖率和植被覆盖率分别由 21.5% 和 70% 提高至 28.2% 和 85%^[41]。草地和林地面积的增加可减少入黄泥沙,但同时退耕还林还草工程也加剧退耕区蒸散发,引起径流量减少^[42]。

为更好研究退耕还林工程对土地利用变化的影响,利用 Google Earth 历史影像对 2019 年研究区幼

林地进行解译。据统计,幼林地面积为 503.3 km², 占整个研究区面积的 74.3%,其在分类结果中主要表现为低覆盖度草地,与分类结果不冲突(图 6)。大面积植树造林,退耕还林,幼林地几乎覆盖整个研究区,在中部、东北角林地覆盖稍稀疏,退耕还林效果显著。

(3) 水利工程建设的影响。研究区因采矿形成的沉陷积水、人工开挖形成的蓄水池、人工坝等大大增加了水体蒸发。为了研究区域内水资源特征对土地利用变化的影响,在 2016 年 11 月—2018 年 4 月间对研究区开展了野外流域调查,同时利用 Google Earth 历史影像(2009-10-17—2019-6-29)对流域主要来源河流鸡沟河、乌尔图河沿线水坝、淤地坝、蓄水池进行了遥感调查。

遥感调查表明,2009 年以后,采矿、坑塘与人工坝大量增加,鸡沟河、乌尔图河沿线水坝 8 处、淤地坝 4 处。坝体长度 200~470 m 不等,大部分长度超过 300 m,拦截了大量汇入桃—阿海子的径流量,形成大面积集水区域,导致区域内水流渗流和蒸发量增大。遥感调查还发现大量用于幼林灌溉的人工开挖的蓄水池,规模从几百 m² 到几万 m² 不等。利用最新的 Landsat 8 OLI 影像,NDWI 阈值法(NDWI>0)获得的除了 3 个湖泊的蓄水区域共 195 处,总面积达 0.965 km²。虽

然,部分坝体因遵循生态保护部门的政策制度被拆除,但造成的水流量损失是难以挽回的。

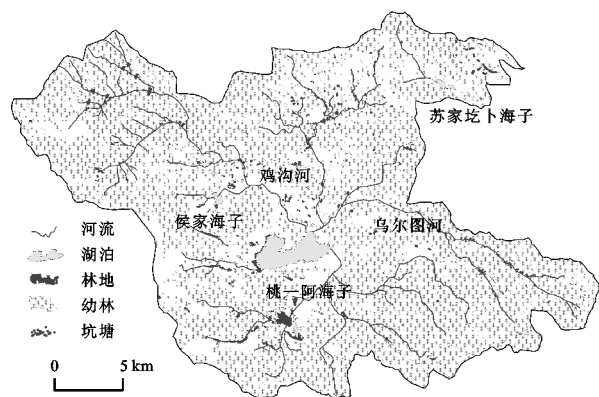


图6 2019年研究区幼林地解译

(4) 居民建设用地的影响。通过对研究区居民建设用地解译发现,研究区居民建设用地在1986—2019年由 0.3 km^2 增加至 13.3 km^2 ,空间分布从分散到聚拢,城镇化趋势明显。G109,G18等高速公路、公路、铁路以及工业设施的修建压占植被,且施工过程中破坏植被,使研究区植被覆盖率降低,引起水土流失、景观破碎等^[43],从而改变土地利用类型。

5 结论

(1) 研究区主要土地利用类型为裸地、低覆盖度草地、高覆盖度草地,占整个研究区的93%~99%。在研究期内,裸地面积和水域面积呈波动减少趋势,低覆盖度草地、高覆盖度草地、林地以及建设用地面积均呈增加趋势。

(2) 研究期内土地利用类型变化频繁:土地利用类型的转化主要表现为裸地、低覆盖度草地、高覆盖度草地之间的相互转换,裸地主要转出为低覆盖度草地,且转出速度大于转入速度,使裸地面积大幅减少31.79%;裸地和低覆盖度草地的持续输入使高覆盖度草地占比从14.63%增加到35.98%;裸地、低覆盖度草地和高覆盖度草地间的转化可以达到动态平衡。

(3) 气候变化和人类活动对研究区土地利用变化驱动作用显著。气候变化作用于土地利用变化的主要表现为水域面积的减少;研究区采矿、生态恢复工程、水利工程建设、居民建设等人类活动对土地利用变化的综合影响主要表现为水体、裸地面积的减少,低覆盖度草地、高覆盖度草地、林地、建设用地面积的增加,影响范围更广,作用更显著。

参考文献:

[1] 张增祥,汪潇,温庆可,等.土地资源遥感应应用研究进展

[J].遥感学报,2016,20(5):1243-1258.

[2] 桑潇,国巧真,潘应阳,等.基于TM和OLI数据山西省潞城市土地利用动态变化分析与预测[J].国土资源遥感,2018,30(2):125-131.

[3] 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.

[4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(15):253-260.

[5] 陈永国,刘维军,荣月静,等.基于土地利用与植被覆盖度的大通北川河源区自然保护区生境质量评估[J].水土保持研究,2020,27(6):332-337,393.

[6] 李秀彬.全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J].地理学报,1996,51(6):553-558.

[7] 李振,黄海军.胶州湾海岸带土地利用/覆被变化研究[J].国土资源遥感,2010,22(4):71-76.

[8] Tallmon D A, Jules E S, Radke N J, et al. Of mice and men and trillium: Cascading effects of forest fragmentation[J]. Ecological Applications, 2003,13(5):1193-1203.

[9] 金凤君,张晓平,王长征.中国沿海地区土地利用问题及集约利用途径[J].资源科学,2004,26(5):53-60.

[10] 肖思思,吴春笃,储金宇.1980—2005年太湖地区土地利用变化及驱动因素分析[J].农业工程学报,2012,28(23):1-11.

[11] 李石华,周峻松,王金亮.1974—2014年抚仙湖流域土地利用/覆盖时空变化与驱动力分析[J].国土资源遥感,2017,29(4):132-139.

[12] 成军锋,贾宝全,赵秀海,等.鄂尔多斯高原典型地区土地利用动态变化分析[J].干旱区研究,2009,26(3):354-360.

[13] 张荫荪,白力军,田枳,等.遗鸥繁殖群在鄂尔多斯的新发现[J].动物学杂志,1991,26(3):32-33,65.

[14] 何芬奇,任永奇,郭玉民.内蒙古桃一阿海子的生境演替与水鸟群落的兴衰[J].湿地科学与管理,2015,11(2):54-58.

[15] 王玉华,布仁雅图,孙静萍,等.遗鸥国家级自然保护区近十五年来生态环境变化特征[J].环境与发展,2017,29(1):78-83,87.

[16] 何芬奇,郭玉民,陈克林,等.初论内蒙古泊江海子矿持续补水对桃一阿海子生境恢复之效益[J].湿地科学与管理,2018,14(1):29-32.

[17] 何芬奇,邢小军,肖红,等.初论引黄工程对桃一阿海子湿地生境恢复的作用与影响—兼谈泊江海子采矿区地表沉降成塘的例示[J].湿地科学与管理,2019,15(2):36-38.

[18] 白壮壮,崔建新,丁晓辉.1986—2015年鄂尔多斯高原

- 沙漠化及其驱动因素研究[J].干旱区研究,2020,37(3):749-756.
- [19] 王瑞杰,闫峰,张学良.2000—2015 年鄂尔多斯高原生态承载力时空变化特征[J].水土保持通报,2020,40(1):91-98,107,2.
- [20] 侯宏冰,郭红琼,于强,等.鄂尔多斯景观格局演变及景观生态网络优化研究[J].农业机械学报,2020,51(10):205-212,242.
- [21] 周平,蒙古军.鄂尔多斯市 1988—2000 年土壤水力侵蚀与土地利用时空变化关系[J].自然资源学报,2009,24(10):1706-1717.
- [22] 朱雅娟,叶学华,初玉,等.降水对鄂尔多斯高原克隆植物分布的影响[J].生态学报,2020,40(3):952-963.
- [23] 蒙古军,朱利凯,杨倩,等.鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J].生态学报,2012,32(21):6755-6766.
- [24] 蒙古军,燕群,向芸芸.鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J].中国沙漠,2014,34(2):590-596.
- [25] 蒙古军,周平,艾木入拉,等.鄂尔多斯主体功能区划分及其土地可持续利用模式分析[J].资源科学,2011,33(9):1674-1683.
- [26] 李艳忠,刘昌明,刘小莽,等.植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J].自然资源学报,2016,31(12):2005-2020.
- [27] 朱杰,徐颖,李栋伟,等.泊江海子矿白垩纪地层冻结软岩力学特性试验[J].吉林大学学报:地球科学版,2016,46(3):798-804.
- [28] Yan G Z, Lou H J, Liang K, et al. Dynamics and driving forces of Bojiang Lake area in Erdos Larus Relictus National Nature Reserve, China[J]. Quaternary International, 2018,475(25):16-27.
- [29] 梁康,娄华君,程传周.鄂尔多斯泊江海子流域地下水流特征[J].资源科学,2011,33(6):1089-1098.
- [30] 邢小军,于向芝,白兆勇,等.鄂尔多斯遗鸥自然保护区湿地水量平衡分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(6):100-103.
- [31] 姜雅娟,王维,马玉贞,等.内蒙古鄂尔多斯高原泊江海子全新世气候变化初步研究[J].第四纪研究,2014,34(3):654-665.
- [32] 温素馨,韦玉春,汪美会. TM 遥感图像 FLAASH 大气校正异常值的改正[J].测绘科学,2017,42(7):165-171,177.
- [33] 任荣仪,贺中华,梁虹,等.贵州省 NDVI 时空变化及其对温度和降水变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(2):118-129.
- [34] 张迪飞,张金锁,姚克明,等.基于 SVM 分类的红外舰船目标识别[J].红外与激光工程,2016,45(1):179-184.
- [35] 马超,刘玮玮,赵鹏飞,等.1962—2016 年达里诺尔流域水、草退化及气候响应[J].地理研究,2017,36(9):1755-1772.
- [36] Sanchayeeta A, Jane S. Simulating forest cover changes of Bannerghatta National Park based on a CA-Markov model: A remote sensing approach[J]. Remote Sensing, 2012,4(10):3215-3243.
- [37] 王云琦,齐实,孙阁,等.气候与土地利用变化对流域水资源的影响:以美国北卡罗莱纳州 Trent 流域为例[J].水科学进展,2011,22(1):51-58.
- [38] 李富程,王青,李国蓉.绵阳官司河流域土地利用/覆被变化特征及驱动力分析[J].农业现代化研究,2009,30(6):727-730.
- [39] Togtohyn C, Dennis O. Land use change and carbon cycle in arid and semi-arid lands of East and Central Asia[J]. Science in China (Series C: Life Sciences), 2002(S1):48-54,146-148.
- [40] 王行风,汪云甲,马晓黎,等.煤矿区景观演变的生态累积效应:以山西省潞安矿区为例[J].地理研究,2011,30(5):879-892.
- [41] 吴青畚.打造绿色东胜:东胜区实施生态工程纪实[N].鄂尔多斯日报,2006-08-16(A02).
- [42] 陈永贵.东胜沙棘生态工程实现生态、经济和社会效益三赢[N].鄂尔多斯日报,2011-10-16(1).
- [43] 刘杰,崔保山,杨志峰,等.纵向岭谷区高速公路建设对沿线植物生物量的影响[J].生态学报,2006,26(1):83-90.