

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2024.703
CSTR:32274.14.ALG2024703

中国西北干旱生态移民区跨流域调水生态效益研究 ——以黄花滩生态移民区为例

田晋华¹, 黄 泉², 高雅玉^{2,3,4}, 郝建斌², 吴冠衡⁵, 何文博²

(1. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州理工大学土木与水利工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃有色工程勘察设计研究院, 甘肃 兰州 730030;
4. 自然资源部高寒干旱区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 甘肃 兰州 730030;
5. 甘肃省景泰川电力提灌水资源利用中心, 甘肃 白银 730400)

摘 要: 生态移民与跨流域调水是西北干旱区生态恢复和环境保护的重要举措, 对实现乡村振兴和生态文明建设具有不可或缺的意义。以黄花滩生态移民区为研究对象, 从自然气象、植被概况、人类活动和景观格局4个层面选取15个生态指标, 构建生态移民区生态效益评价体系, 系统分析2005—2020年自然和人类活动对研究区生态效益的影响。结果表明: (1) 2005—2020年黄花滩生态移民区旱地、疏林地和建设用地增加, 其他土地利用类型减少, 主要土地利用转移方式为旱地、草地和裸地之间的相互转换。(2) 在类型水平上, 草地和裸地破碎化程度先减小后增大, 旱地先增大后减小, 其他土地利用类型基本不变; 在景观水平上, 除聚合度指数外其他指数均呈现先增大后减小的趋势。(3) 2005—2020年归一化植被指数年均值呈持续上升趋势, 上升了109.41%, 主要表现为高值区向周边地区不断改善的变化趋势。(4) 植被净初级生产力(NPP)年均值变化较小, 90%左右地域NPP年均值处于1~50 g C·m⁻²之间。在西北干旱区进行生态效益评价探索性研究, 可为全面评价西北干旱区生态移民和跨流域调水工程的生态环境效益以及生态保护管理等提供科技支撑。

关 键 词: 生态效益; 生态移民; 跨流域调水; 景观格局; 植被覆盖; 中国西北干旱区

文章编号: 1000-6060(2025)11-1926-13(1926~1938)

生态移民工程是一种以生态保护为目的协调人口、资源环境与经济社会可持续发展的扶贫专项工程^[1]。其旨在将生态系统遭到严重破坏或者自然环境极其恶劣地区的人口向其他地区迁移, 减少人类活动对生态环境的影响, 从而保护和修复该区域的生态系统^[2-4]。我国的生态移民最早于1983年在甘肃省定西市、河西走廊和宁夏回族自治区南部山区等地实施^[5]; 21世纪以来, 生态移民计划在生态脆弱或退化地区得到了广泛应用, 以解决生态退化问题^[6]。随着人口的迁移, 原来的村庄通过土地整理

和土地复垦工程变成了农田或林地, 显著改善了这些地区的生态环境, 提高了土地经济价值^[7]。但是, 随着生态移民计划的不断进行, 一系列问题也随之而生, 例如生态移民区内大量的耕地、林地、草地被闲置和遗弃; 移民区水资源匮乏, 水资源供需不平衡等。

跨流域调水工程是指将水资源从相对富裕的地区转移到相对贫困的地区, 缓解受水区的缺水问题, 提高受水区的经济增长和社会福利^[8]; 此类工程是我国西北干旱地区21世纪以来生态恢复和环境

收稿日期: 2024-11-14; 修订日期: 2025-01-09

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(22YF7FA165); 2022年陇原青年创新创业人才(团队)项目(甘组通字[2022]77号); 甘肃省水利科学试验研究及推广计划项目(甘水建管发[2025]24、[2024]78号); 兰州理工大学研究生课程思政示范项目(KCSZ-SF-202302606)资助

作者简介: 田晋华(1986-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事生态建设与水土保持方面的研究. E-mail: tjhggy@yeah.net

通讯作者: 高雅玉(1985-), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事水资源与水土保持方面的研究. E-mail: gyy@lut.edu.cn

保护的主要举措之一,在缺水流域得到了广泛应用^[9]。经过多年的科学研究与规划建设,我国成功在西北干旱地区修建了南水北调西线工程^[10]、引大济湟工程、黑河引水工程等多个大型跨流域调水工程。并且随着跨流域调水工程的不断完善,西北干旱地区不仅获取了充足的农业、生活和工业用水,减少了人口增长和经济发展带来的水压和缺水风险^[11],还改善了生态系统质量,提高了水源涵养、土壤保持和防风固沙等生态系统服务功能^[12]。

对此,如何合理调配调动的水资源,提高西北干旱区生态恢复和保护的用水效率,实现人与自然的平衡^[13],有必要对跨流域调水后生态效益进行综合量化^[14]。但是,现阶段关于西北干旱区生态效益的研究,仍是以土地利用变化为基础,探讨景观格局、植被覆盖或净初级生产力等因素的变化,最后综合分析生态环境状况^[15]。而将各研究内容连贯融合,并分析各因素之间存在联系的研究较为鲜见^[16-17]。对此,本研究以典型西北干旱生态移民区——黄花滩生态移民区为研究对象,参考王效科等^[18]的生态效益指标挑选准则,从土地利用转移特征、景观格局指数的时间波动、植被覆盖的时空变化及其驱动因素4个方面选取指标评估该地区的生态环境状况,并通过3种相关性分析量化自然与人类活动对归一化植被指数(NDVI)和植被净初级生产力(NPP)的影响,旨在分析生态移民和调水工程建设对受水移民区生态环境的影响,以期为西北干旱移民地区生态环境恢复建设提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄花滩生态移民区(黄花滩镇;37°26′42.228″~37°50′16.695″N, 103°01′53.480″~103°14′22.828″E)位于甘肃省武威市古浪县西北部,地处西北高原,位于腾格里沙漠南缘,占地面积280 km²(图1)。该地区海拔在1551~2585 m之间,地势东南高、西北低^[19];全年平均气温6.6℃,极端最高气温33℃(1967年7月28日),极端最低气温-26.4℃(1968年2月8日);多年平均降水量207.7 mm,最大降水量314 mm(1970年),最小降水量95 mm(1962年);年蒸发量2807 mm,日照时数2852.3 h,风速3.6 m·s⁻¹,无霜期平均为142 d;沙尘暴最多日数47 d(1973年),大多发生在春季和夏初;最大冻土层深度110 cm,冻结日期一般在11月下旬;历年最大积雪深度11 cm(1963年4月5日),降雪日期一般在10月下旬一次年4月下旬^[20]。在黄花滩境内的河流主要为支流,有旱石河、白崖沟河、白石头河和大土沟河,其中有部分支流出现断流情况。

1.2 数据来源与生态效益评价指标体系构建

生态效益评价是制定生态环境保护政策的重要依据,是对评价人类福祉的社会效益和经济效益的补充。本研究将2005—2010、2010—2015、2015—2020年3个时间段,划定为“自然阶段”“生态移民阶段”和“跨流域调水阶段”3个阶段,分析土地

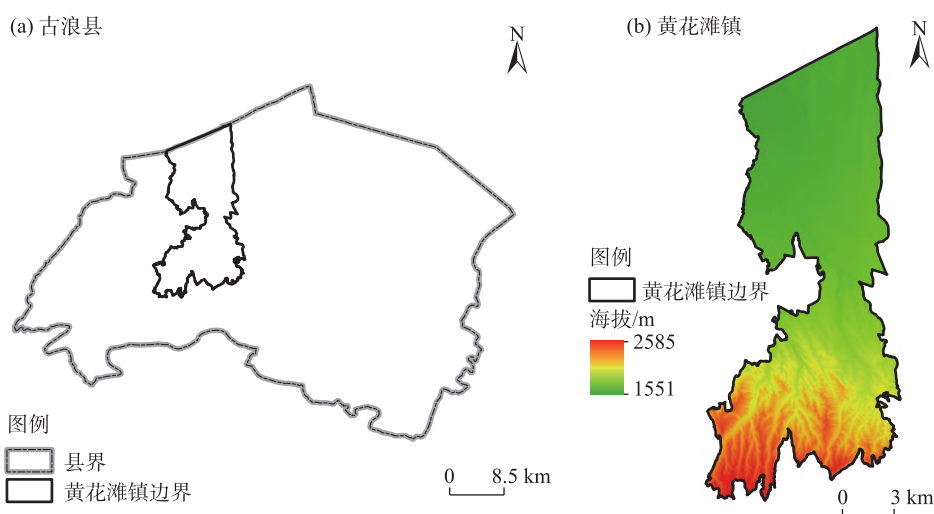


图1 黄花滩生态移民区概况

Fig. 1 Overview of Huanghuatan ecological immigrant area

利用转变下黄花滩生态移民区景观格局演变特征和自然与人类活动对其植被覆盖变化的响应。具体评价方法可分为3个步骤:(1)分析研究区的土地利用面积变化、转移特征并以此为基础探讨研究区景观格局变化;(2)通过描述NDVI和NPP的空间分布规律及时间变化趋势,揭示研究区植被覆盖的时空演变规律;(3)运用3种相关系数法探究年降水量、年蒸发量、气温、平均相对湿度、跨流域调水与NDVI、NPP之间的相关性。本研究涉及多种数据,具体来源及生态学意义见表1。

1.3 研究方法

(1) 肯德尔(Kendall)相关系数法

Kendall相关系数是一个用来衡量2个随机变量之间的有序关联的统计量,取值范围为-1~1,其越接近1,表示2个随机变量之间的相关性越好^[21-22]。

$$\sigma = \frac{c-d}{k(k-1)/2} \quad (1)$$

式中: σ 为2个变量的Kendall相关性; c 为一致元素对的个数; d 为不一致元素对的个数; k 为集合中元素的个数。

(2) 斯皮尔曼(Spearman)相关系数法

Spearman相关系数是用双变量等级数据作单调相关分析,对输入变量的总体分布形态或样本容量大小并不作要求,只要2个变量的观测值相互成对即可用该系数进行计算,甚至可对由连续变量转化而来的等级数据进行分析^[23]。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m d_i^2}{m(m^2 - 1)} \quad (2)$$

式中: ρ 为2个变量的Spearman相关性; m 为数据长度; d_i 为2个变量间秩差。

(3) 皮尔逊(Pearson)相关系数法

Pearson相关系数分析法适用于连续型变量的相关性分析。Pearson相关系数(r)反映2个变量之

表1 生态效益评估指标数据来源及其生态学意义

Tab. 1 Data sources and ecological significance of ecological benefit evaluation indices

| 要素层 | 指标层 | 生态学意义 | 数据来源 |
|------|----------|---|--|
| 自然气象 | 年降水量 | 直接影响土地植被的生长、水资源的运动和分布、土壤侵蚀和养分流失等 | 中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn);2005—2023年;空间分辨率:中国地面国家级基准、古浪基本站) |
| | 年蒸发量 | 反映土地利用和气候变化影响最有效的因素 | |
| | 气温 | 气温变化直接影响生态系统的结构 | |
| | 平均相对湿度 | 影响植被群落的结构和物种组成,进而影响生态系统的稳定性 | |
| 植被概况 | 归一化植被指数 | 对植被变化状况监测、植被资源合理利用和其他生态环境相关领域的研究有十分重要的参考意义 | 国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/);2005—2020年;空间分辨率:30 m×30 m);Google Earth Engine平台(https://earthengine.google.com/);2005—2020年;空间分辨率:500 m×500 m) |
| | 植被净初级生产力 | 评估生态系统的碳储存能力、生物量生产以及对气候变化的响应,可以更好地理解生态系统的生产力和健康状况 | |
| 人类活动 | 土地利用 | 人类活动作用于自然环境的主要途径之一,是土地覆被变化的最直接和最主要的驱动因子 | 中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn);2005—2020年;空间分辨率:30 m×30 m);景电工程管理局(2013—2022年) |
| | 土地转移 | 人类活动作用于自然环境的主要途径之一,是土地覆被变化的最直接和最主要的驱动因子 | |
| | 跨流域调水量 | 反映生态系统中人类活动的影响 | |
| 景观格局 | 斑块数量 | 分析生态系统类型在区域内的分布规模和破碎程度,从而评估人类活动对景观格局的影响 | 基于土地利用数据利用FRAGSTATS 4.2软件计算所得 |
| | 斑块密度 | 分析生态系统类型在区域内的分布规模和破碎程度,从而评估人类活动对景观格局的影响 | |
| | 分割度指数 | 评估景观破碎化对生态系统服务和生物多样性的影响,以及人类活动对生态系统的潜在影响 | |
| | 辛普森多样性指数 | 有助于评估和理解生态系统的多样性和健康状态,从而为生态环境保护规划提供科学依据 | |
| | 聚合度指数 | 考察每一种景观类型斑块间的连通性,有助于评估景观的连通性和生态过程的连续性 | |
| | 分离度指数 | 衡量景观中斑块或区域的空间分散程度,其值越大,表示景观中的斑块被更多的线性特征(如道路、河流等)所分隔 | |

间变化趋势的方向以及程度, $r=0$ 表示2个变量不相关, $r>0$ 表示正相关, $r<0$ 表示负相关,绝对值越大表示相关性越强。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r 为2个变量的Pearson相关性; x_i 、 y_i 分别为 x 、 y 的观测值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x 、 y 的平均值; n 为样本数量。

2 结果与分析

2.1 移民区降水及跨流域调水情况

2005—2023年古浪县降水变化规律为丰水年与枯水年不断交替,但总体上略微呈上升趋势(图2)。这说明生态移民和跨流域调水的政策正在逐渐改善该地区生态环境。为保障黄花滩生态移民区 6.28×10^4 居民的生活生产用水,黄花滩扶贫开发项目规划从景电二期工程总干渠尾端的南北干渠分水闸引水,将黄河水引入调蓄池中,沉淀后作为黄花滩居民生活生产用水。黄花滩灌区骨干工程于2013年竣工,并开始调试跨流域调水蓄水,供水情况如图2所示。起初供水量较少,仅 $0.7654 \times 10^6 \text{ m}^3$,随着调蓄供水工程的逐渐完善供水量逐年递增。截至2022年,供水量已达到 $34.9861 \times 10^6 \text{ m}^3$,供水量相较于2013年提高了44.71倍,其中2022年相较于其他年份供水增加量最多,增加了 $7.6579 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

2.2 土地利用转变下景观格局演变特征

2.2.1 土地利用面积变化 对黄花滩生态移民区土地利用类型重分类后,利用ArcGIS绘制该地区2005、2010、2015年及2020年不同土地利用空间分布特征图(图3),并计算不同土地利用类型面积及占比(表2)。从图中可以看出,黄花滩生态移民区北部受到腾格里沙漠的影响,分布着大量的沙地,南部交替分布着大量的草地和旱地;而农村居民点主要分布在中西部地区,裸地主要分布在西南和中部边缘地区,疏林地集中分布在西南角上。

2005—2020年黄花滩生态移民区以旱地和低覆盖度草地为主,两者面积占比均在30%以上;其次是沙地和中覆盖度草地,面积占比分别在20%和10%左右;其他土地利用类型总面积占比不到10%(表2)。2005—2010年旱地、低覆盖度草地和沙地面积减少,中覆盖度草地、农村居民点、裸地面积增加,疏林地面积及占比基本不变;2010—2015年旱地、农村居民点、建设用地和裸地面积增加,中覆盖度草地和沙地面积减少,疏林地面积及占比基本不变;2015—2020年旱地、低覆盖度草地、建设用地面积增加,中覆盖度草地、农村居民点、沙地和裸地面积减少,疏林地面积及占比基本不变。

2.2.2 土地利用转移特征 2005—2010年黄花滩生态移民区土地利用变化最显著的特征是在旱地、草地和裸地之间相互转移(图4)。土地利用转出量:旱地>低覆盖度草地>中覆盖度草地>沙地>裸地>农村居民点>有林地>疏林地,土地利用转入量:裸地>旱地>中覆盖度草地>低覆盖度草地>沙地>农村居民点>疏林地。在自然条件下,旱地向裸地和中、低覆

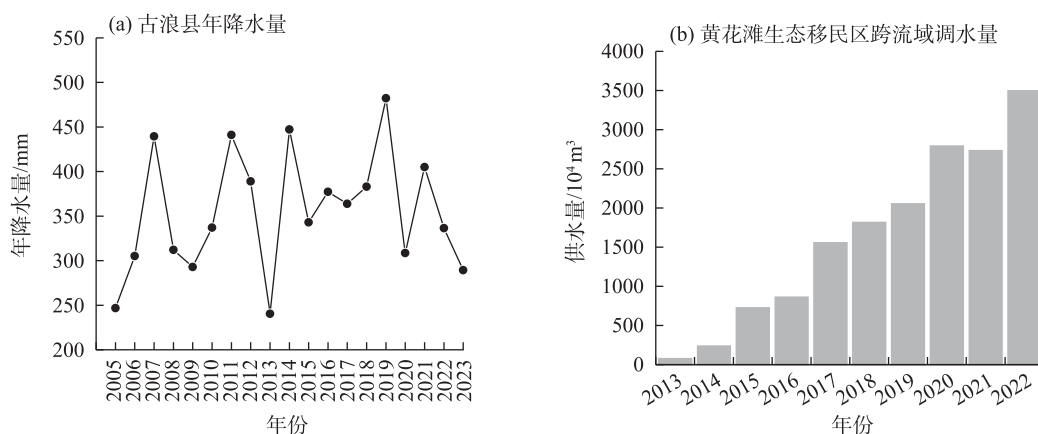


图2 古浪县年降水量及黄花滩生态移民区跨流域调水量变化

Fig. 2 Changes of annual precipitation in Gulang County and inter-basin water transfer in Huanghuatan ecological migration area

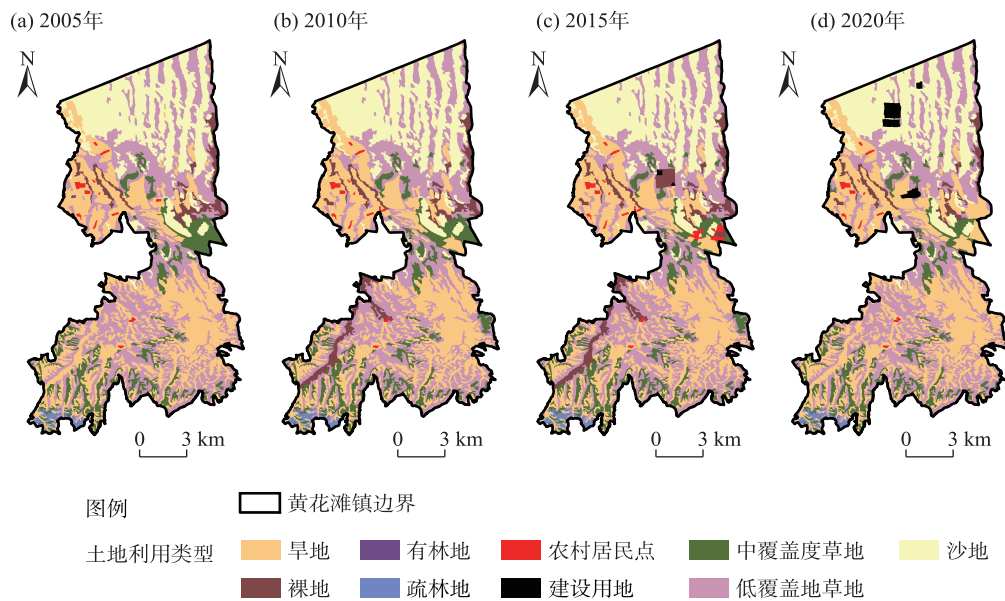


图3 2005—2020年黄华滩生态移民区土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of land use in Huanghuatan ecological immigrant area from 2005 to 2020

表2 2005—2020年黄华滩生态移民区不同土地利用类型面积及占比

Tab. 2 Area and proportion of different land use types in Huanghuatan ecological immigrant area from 2005 to 2020

| 土地利用类型 | 2005年 | | 2010年 | | 2015年 | | 2020年 | |
|--------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | 面积/km ² | 占比/% | 面积/km ² | 占比/% | 面积/km ² | 占比/% | 面积/km ² | 占比/% |
| 旱地 | 144.63 | 31.64 | 138.18 | 30.23 | 138.70 | 30.35 | 152.81 | 33.43 |
| 有林地 | 0.12 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 疏林地 | 3.58 | 0.78 | 3.58 | 0.78 | 3.58 | 0.78 | 3.60 | 0.79 |
| 中覆盖度草地 | 45.73 | 10.01 | 47.08 | 10.30 | 43.96 | 9.62 | 41.79 | 9.14 |
| 低覆盖度草地 | 155.66 | 34.06 | 154.45 | 33.79 | 151.89 | 33.23 | 153.15 | 33.50 |
| 农村居民点 | 1.95 | 0.43 | 2.05 | 0.45 | 4.12 | 0.90 | 1.84 | 0.40 |
| 建设用地 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 34.83 | 0.08 | 529.20 | 1.16 |
| 沙地 | 92.20 | 20.17 | 90.69 | 19.84 | 90.19 | 19.73 | 87.74 | 19.20 |
| 裸地 | 13.18 | 2.88 | 21.00 | 4.59 | 24.25 | 5.30 | 10.87 | 2.38 |

盖度草地转移面积最多,分别为8.74 km²、3.86 km²和1.88 km²,而裸地和中、低覆盖度草地向旱地转移面积分别为0.97 km²、2.52 km²和2.98 km²。

2010—2015年土地利用转出量:低覆盖度草地>中覆盖度草地>旱地>沙地>裸地>疏林地>农村居民点,土地利用转入量:裸地>农村居民点>旱地>低覆盖度草地>中覆盖度草地>建设用地>沙地>疏林地。受到生态移民的影响,各土地利用类型之间的转换较为频繁,其中对草地的影响最大,1.57 km²的中覆盖度草地转移为农村居民点,1.28 km²的中覆盖度草地和2.32 km²的低覆盖度草地转移为裸地,草地的转出量是转入量的3.35倍。这是由于选

取了部分生态环境较好的地区建设生态移民区,而部分质量较差的草地由于缺少人工养护和自然干旱导致其转移为裸地,使得局部地区的生态环境受到一定的影响。

2015—2020年土地利用转出量:裸地>低覆盖度草地>旱地>中覆盖度草地>沙地>农村居民点>建设用地>疏林地,土地利用转入量:旱地>低覆盖度草地>建设用地>中覆盖度草地>沙地>裸地>疏林地>农村居民点。裸地向旱地和中、低覆盖度草地的转移面积分别为10.85 km²、0.60 km²和2.44 km²。这与为满足移民的生活需要实行原宅基地复垦,并且随着黄华滩灌区骨干工程的不断完善生态供水

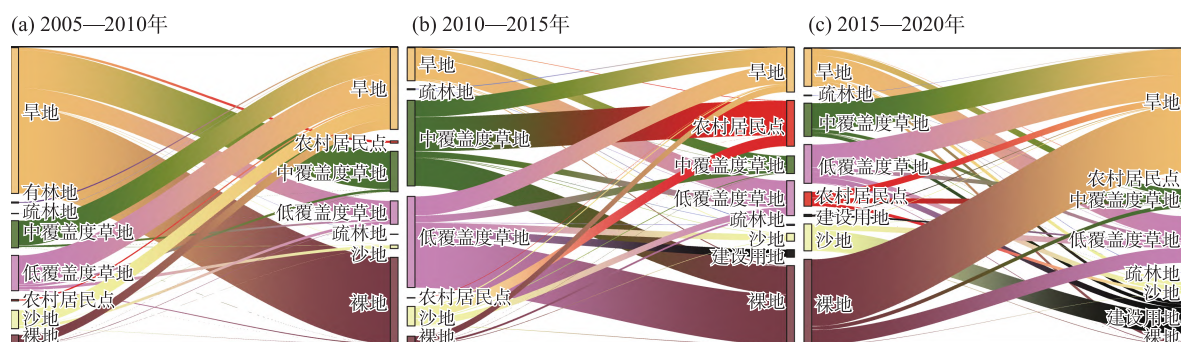


图4 2005—2020年黄花滩生态移民区土地利用转移变化

Fig. 4 Land use transfer changes in Huanghuatan ecological immigrant area from 2005 to 2020

量逐渐提高,水资源足以支持恢复农业生产,以及荒漠化治理等生态保护政策有关。

2.2.3 景观格局演变特征 在类型水平上(图5), 2005—2020年黄花滩生态移民区斑块数量和斑块密度总体上变化趋势一致,其中草地和裸地的斑块

数量和斑块密度先增大后减小,旱地的斑块数量和斑块密度先减小后增大,其他土地利用类型的斑块数量和斑块密度基本不变。分割度指数变化极不明显,变化幅度小于0.1%,且均趋近于1,说明研究区各土地利用类型分布较为分散,未形成统一的整

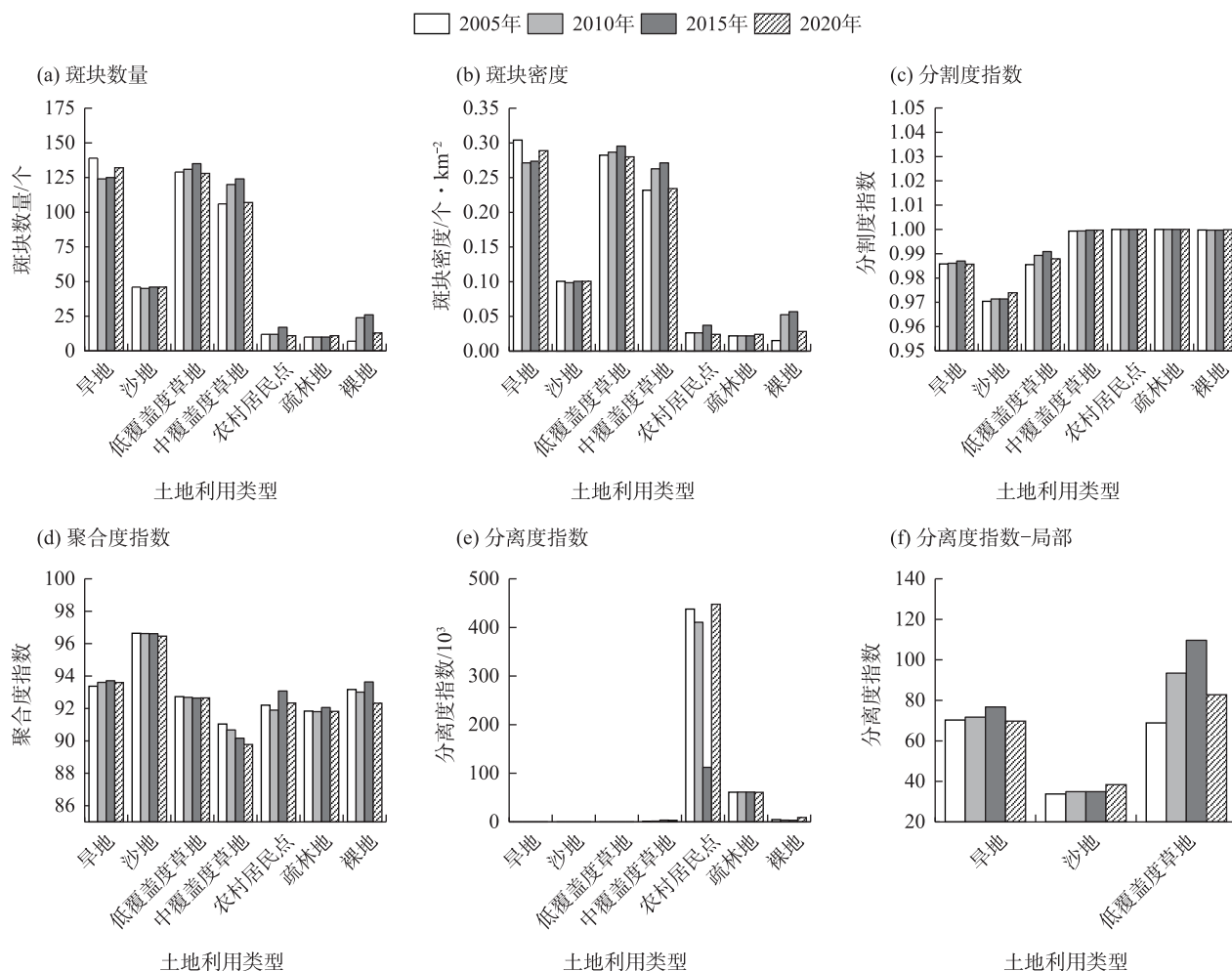


图5 2005—2020年黄花滩生态移民区景观格局指数变化

Fig. 5 Changes of landscape pattern indices in Huanghuatan ecological immigrant area from 2005 to 2020

体。从聚合度指数来看,沙地的指数最大且趋于100,说明其斑块间的聚合程度与其他土地利用类型相比更集中;而中覆盖度草地最小且呈持续下降趋势,说明其斑块不断趋于分散;其他土地利用类型变化不明显。从分离度指数来看,旱地和低覆盖度草地呈先增大后减小的趋势;中覆盖度草地呈持续上升趋势,说明中覆盖度草地斑块不断趋于分散;农村居民点和裸地呈先减小后增大的趋势,且农村居民点的指数仍较大,说明其斑块间的分离程度与其他土地利用类型相比仍较高。

在景观水平上(表3),2005—2020年聚合度指数呈现波动减小的趋势,其他指数均呈现先增大后减少的趋势。2005—2010年聚合度指数减小了0.02%;斑块数量和斑块密度分别增加了3.56%和3.55%;分割度指数和辛普森多样性指数分别增加了0.54%和1.37%;分离度指数变化最大,增加了9.43%;景观破碎化程度和景观复杂性增加;说明在移民前黄花滩生态移民区生态遭到了一定的破坏,这也是为什么要对该地区进行生态移民的原因。2010—2015年各景观水平指数均呈现增大的趋势;

相较于前一阶段,斑块数量、斑块密度和聚合度指数增长率上升,其他指数增长率减小;说明移民前期由于供水量不足导致生态环境的破坏加剧,景观内部各斑块间连通性下降,破碎化程度上升。2015—2020年各景观水平指数均呈现减小的趋势,其中斑块数量和斑块密度变化最为明显,分别减小了6.80%和6.82%;辛普森多样性指数以及分离度指数次之,分别减小了3.01%和2.18%;聚合度指数和分割度指数减小了0.17%和0.08%;说明随着对黄花滩生态移民区供水量的提高,研究区生态环境在景观格局方面得到了有效的改善。

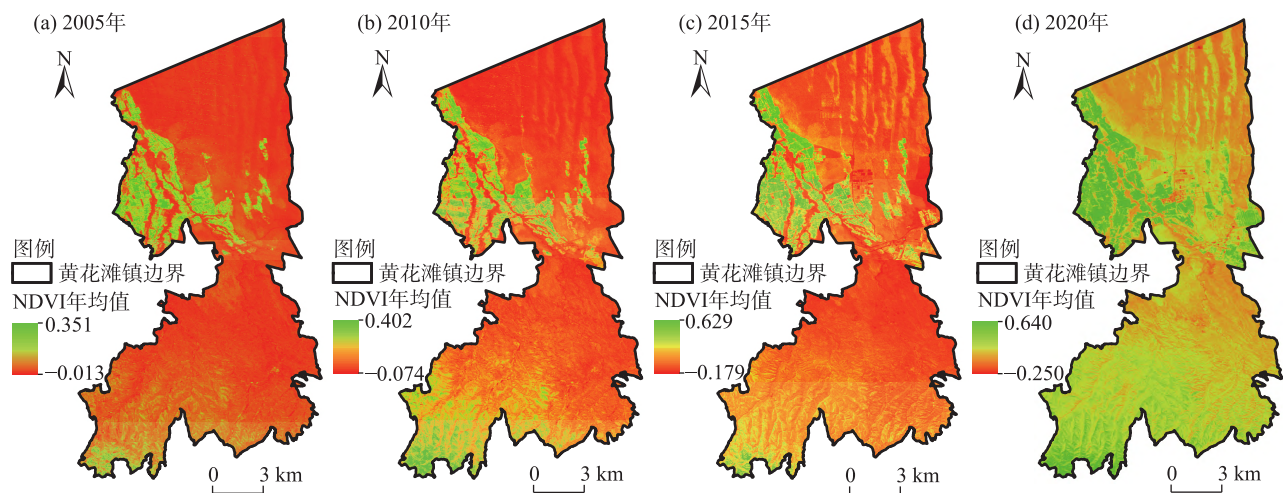
2.3 植被覆盖变化分析

2.3.1 NDVI变化 从空间分布上看(图6),2005—2020年黄花滩生态移民区NDVI年均值高值区主要分布在疏林地所在的西南地区 and 农村居民点所在的中西部地区;主要原因是西南地区为山地,雨水资源与北部沙漠地带相比较为丰富,为植物提供所需的水分,有利于植物的生长和发育。而NDVI年均值低值区主要分布在北部和中下部地区,这是由于黄花滩生态移民区北部连接着腾格里沙漠,所以

表3 2005—2020年黄花滩生态移民区景观格局指数变化

Tab. 3 Changes of landscape pattern indices in Huanghuatan ecological immigrant area from 2005 to 2020

| 年份 | 斑块数量/个 | 斑块密度/个·km ⁻² | 分割度指数 | 分离度指数 | 辛普森多样性指数 | 聚合度指数 |
|------|--------|-------------------------|--------|---------|----------|---------|
| 2005 | 450 | 0.9846 | 0.9408 | 16.8841 | 0.7322 | 93.5590 |
| 2010 | 466 | 1.0196 | 0.9459 | 18.4766 | 0.7422 | 93.5449 |
| 2015 | 485 | 1.0612 | 0.9486 | 19.4632 | 0.7463 | 93.5702 |
| 2020 | 452 | 0.9888 | 0.9470 | 18.8768 | 0.7300 | 93.4910 |



注:NDVI为归一化植被指数。下同。

图6 2005—2020年黄花滩生态移民区NDVI年均值空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of annual mean NDVI values in Huanghuatan ecological immigrant area from 2005 to 2020

分布着大量的沙地,中下部地区远离农村居民点,大量的旱地和低覆盖度草地缺乏管理。从时间分布上看(图6、表4),2005—2020年黄花滩生态移民区NDVI年均值和最大值均呈现上升趋势,“自然阶段”“生态移民阶段”和“跨流域调水阶段”NDVI年均值分别上升了41.50%、25.41%和18.01%,主要表现为NDVI年均值在高值区域向周围地区扩散的积极增长态势。这说明在退耕还林还草、生态保护政策和“两山理论”的影响下,黄花滩生态移民区植被覆盖得到了有效改善,高覆盖度斑块面积增加并连接成大斑块的特征也愈加明显。

2.3.2 NPP变化 2005—2020年黄花滩生态移民区NPP年均值空间分布特征总体上变化不明显,均呈现北部和东南部偏大和其他地区偏小的状态(图7),且90%左右地域NPP年均值介于1~50 g C·m⁻²

之间。如表4所示,2005—2020年黄花滩生态移民区年均值变化较小。这是由于黄花滩生态移民区林地和中覆盖度草地覆盖较小,其主要来源于NPP较小的低覆盖度草地,并且不同土地利用变化频繁,但林地、草地总体面积变化较小,所以NPP处于相对稳定状态。

2.4 相关性分析

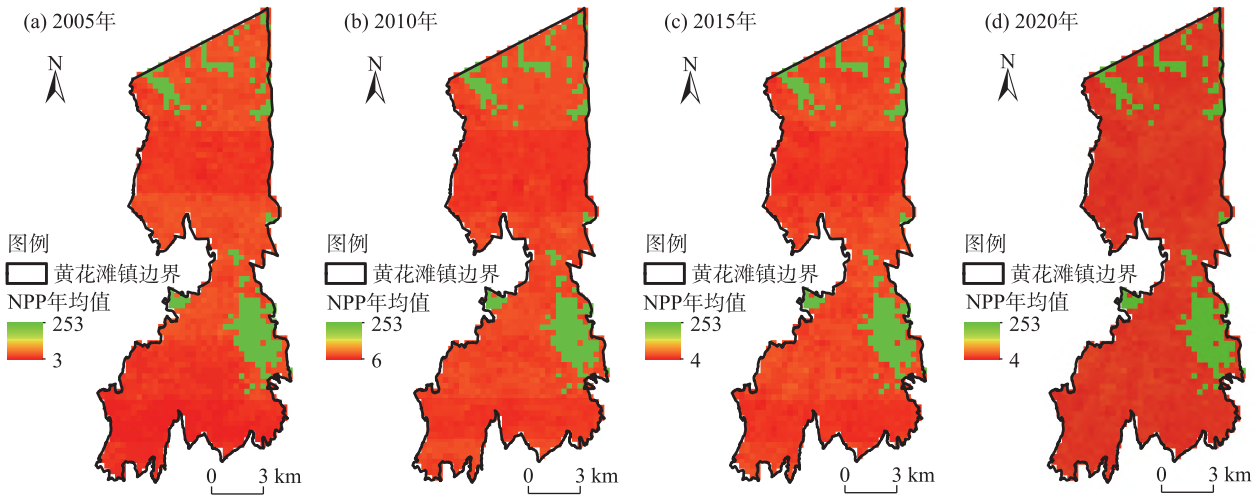
干旱区植被生物对水资源的敏感性较强,干湿气候变化直接影响流域植被的生长和生态系统的演变。如图8所示,3种相关性分析的结果较为一致,NDVI与年降水量、平均相对湿度和供水量呈正相关性,与气温、年蒸发量呈负相关性,其中与供水量、平均相对湿度相关性显著,这是由于在沙漠边缘地带,植被对水资源的需求更加迫切,而生态供水能够直接为植被提供生长所需的水分,湿度上升会减小植

表4 黄花滩生态移民区供水阶段NDVI及NPP变化

Tab. 4 Changes of NDVI and NPP in Huanghuatan ecological immigrant area in water supply stage

| 年份 | NDVI | | | | NPP/g C·m ⁻² | | | |
|------|-------|------|------|------|-------------------------|--------|-------|-------|
| | 最小值 | 最大值 | 年均值 | 标准差 | 最小值 | 最大值 | 年均值 | 标准差 |
| 2013 | 0.02 | 0.63 | 0.17 | 0.07 | 3.00 | 253.00 | 41.20 | 71.60 |
| 2014 | -0.07 | 0.57 | 0.18 | 0.07 | 12.00 | 253.00 | 45.75 | 69.84 |
| 2015 | -0.18 | 0.63 | 0.16 | 0.06 | 4.00 | 253.00 | 42.81 | 70.88 |
| 2016 | -0.13 | 0.66 | 0.18 | 0.08 | 4.00 | 253.00 | 42.81 | 70.88 |
| 2017 | -0.35 | 0.64 | 0.17 | 0.06 | 4.00 | 253.00 | 42.81 | 70.88 |
| 2018 | -0.26 | 0.65 | 0.21 | 0.08 | 4.00 | 253.00 | 42.81 | 70.88 |
| 2019 | -0.24 | 0.61 | 0.22 | 0.07 | 2.00 | 253.00 | 41.04 | 71.59 |
| 2020 | -0.25 | 0.64 | 0.18 | 0.07 | 4.00 | 253.00 | 42.81 | 70.88 |

注:NDVI为归一化植被指数;NPP为植被净初级生产力。



注:NPP为植被净初级生产力。下同。

图7 2005—2020年黄花滩生态移民区NPP年均值空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of annual mean NPP values in Huanghuatan ecological immigrant area from 2005 to 2020

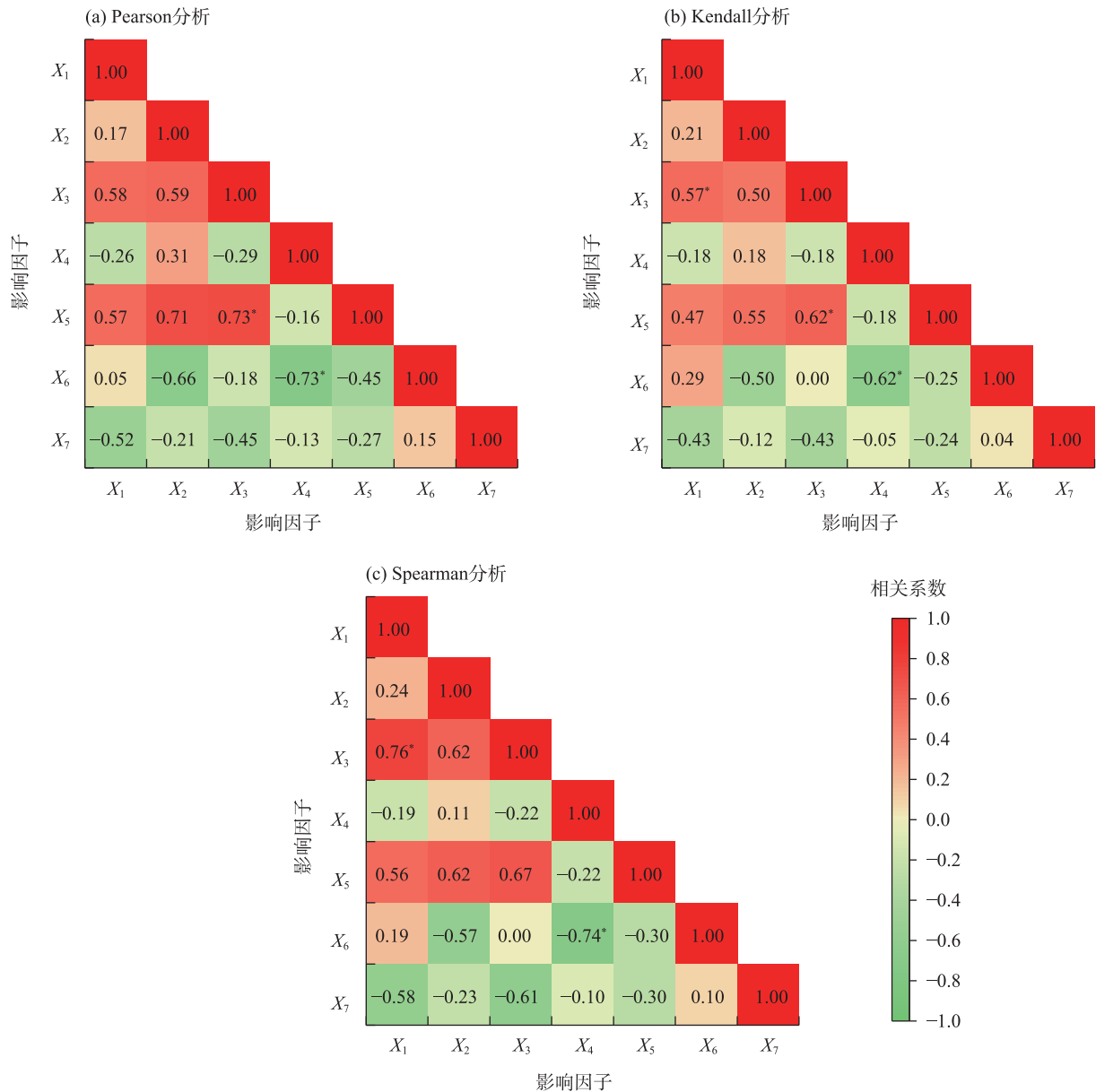


图8 黄花滩生态移民区NDVI、NPP影响因子相关性

Fig. 8 Correlation of NDVI and NPP influencing factors in Huanghuatan ecological immigrant area

被的蒸腾作用。NPP与年蒸发量、气温、平均相对湿度、供水量均呈负相关性,与年降水量呈正相关性,其中与年蒸发量相关性显著,这是由于蒸发量上升,会降低植被对水分的吸收和利用,从而限制了植被生长。

3 讨论

3.1 土地利用动态变化与景观格局时空演变特征

土地利用景观格局演变直观反映了人类干扰的方式和程度^[24],黄花滩生态移民区作为腾格里

沙漠南缘防风固沙的重要屏障,其北部分布着大量的沙地,生态系统较为脆弱,所以受人为干扰的影响下,景观格局演变较为剧烈。从分析结果来看,随着生态移民和跨流域调水工程的建设,黄花滩生态移民区旱地、草地和裸地之间的相互转移为频繁,景观破碎化程度先增大后减小,景观复杂性增加。2005—2020年黄花滩生态移民区土地利用和景观变化明显,这是由于研究前期移民区的安置,兴建了大量的道路、房屋和蓄水池等设施,导致斑块破碎化加深,而后期随着引水蓄水设施

的完善,得到缓解,景观连通性增加。土地利用和景观变化对生态移民区环境的长期影响是多方面的,包括生态移民的环境压力^[17]、生态系统服务价值的变化^[25]、生态风险的评估^[24]、水资源动态以及土地利用变化的驱动力^[26]等。这些因素共同作用,对生态移民区的生态环境和可持续发展产生深远影响。深入分析黄花滩生态移民区的土地利用和景观格局的时空演变,有助于更全面地理解土地利用的动态变化,这将为预测未来的土地利用趋势和确保景观生态功能的持续优化提供坚实的基础,同时为区域土地利用规划和生态安全保障提供宝贵的参考,以实现生态移民区的可持续发展。

3.2 自然与人类活动对植被覆盖变化的响应

为进一步分析黄花滩生态移民区生态效益的转变,本研究选取NDVI和NPP对研究区的植被覆盖变化进行分析,并通过3种相关性分析指数量化自然和人类活动对植被覆盖变化的影响。研究发现,2005—2020年黄花滩生态移民区NDVI年均值和最大值呈现持续上升趋势,这一结论与已有研究一致^[27-29],可能是由于2010年起在石羊河流域实施的持续调水工程、退耕还林还草工程、封山禁牧工程等综合治理工程对该地区的植被恢复和生态修复起到了促进作用^[30]。NDVI与年降水量、平均相对湿度和供水量呈正相关性,与气温、年蒸发量呈负相关性,这和尹振良等^[31]的“在中国西北地区降水、平均相对湿度以显著正相关占优,气温、日照均以显著负相关占优”研究结果较为一致。在干旱地区,年降水量和供水量直接影响植被的水分可用性,进而影响植被的生长和生产力;气温升高会导致植物的蒸腾加剧,从而抑制植被生长^[32],但在高湿度环境可以减少植被的水分蒸发,从而可能提高NDVI^[31]。NPP与年蒸发量、气温、平均相对湿度、供水量均呈负相关性,与年降水量呈正相关性;在沙漠边缘地带,植物的生长对自然因子的响应较为敏感,气温升高会导致蒸发量上升,从而降低水分的利用效率,以至于限制了植被的生长;降水和供水可直接提供植物生长所需的水分,从而提高NPP,但大规模生态建设工程的实施,使得区域植物生态需水量增加,在降水波动背景下会出现植被NPP下降的现象^[33]。

4 结论

(1) 2005—2020年黄花滩生态移民区土地利用以旱地和低覆盖度草地为主,旱地面积及占比先减小后增加,疏林地面积基本不变,草地面积略微减少,农村居民点和裸地面积先增加后减少,沙地面积逐渐减少,整体指标趋向于生态改善。

(2) 黄花滩生态移民区各景观格局指数总体上呈现先增大后减少的趋势。这是由于移民新区道路、设施建设等景观的增加导致景观内部各斑块间连通性总体下降,破碎化程度增加;而随着供水量的逐渐增加,聚合度指数增加,小斑块合并为大斑块,且景观多样性增加。

(3) 黄花滩生态移民区NDVI呈上升趋势,NPP变化不明显。黄花滩生态移民区将生态遭到破坏地区的人口集中迁移到同一地区,从而降低了人类活动对生态脆弱环境的持续影响,再加上实施的持续调水工程、退耕还林还草工程等综合治理工程,使得该地区的植被得以恢复。

参考文献(References)

- [1] 钟水映,冯英杰.生态移民工程与生态系统可持续发展的系统动力学研究——以三江源地区生态移民为例[J].中国人口·资源与环境,2018,28(11):10-19. [Zhong Shuiying, Feng Yingjie. Research on the system dynamics of ecological migration engineering and ecosystem sustainable development: For example of Three-River-Source region ecological migration[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(11): 10-19.]
- [2] 赵多平,赵伟佚,撒小龙,等.宁夏生态移民社区生活空间融合与重构的影响因素及机理——以宁夏闽宁镇为例[J].自然资源学报,2022,37(1):121-134. [Zhao Duopin, Zhao Weiyi, Sa Xiaolong, et al. Influencing factors and mechanism of living space integration in an ecological migrant community of Ningxia: Taking Minning Town as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(1): 121-134.]
- [3] Zhao T T, Du Z R, Yang J Y, et al. Land cover mapping and ecological risk assessment in the context of recent ecological migration[J]. Remote Sensing, 2021, 13(7): 1381, doi: 10.3390/rs13071381.
- [4] Tai X J, Lu L G, Jiang Q B, et al. The perception of desertification, its social impact and the adaptive strategies of ecological migrants in the desertification area, China[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2020, 18(4): 324-330.

- [5] Zhao R, Long D P, Yang M L, et al. From resettlement to revitalization: Examining the water resource environment carrying capacity of ecological migrant resettlement areas in China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111879, doi: 10.1016/j.ecolind.2024.111879.
- [6] Wu T J, Liu Y X, Qi X H, et al. The environmental impact assessment of China's ecological migration from a social-ecological perspective[J]. *Ambio-A Journal of Environment and Society*, 2024, 53(9): 1355–1366.
- [7] Li J T, Dong H R, Li S X. Economic development and optimal allocation of land use in ecological emigration area in China[J]. *Land Use Policy*, 2024, 142: 107178, doi: 10.1016/j.landusepol.2024.107178.
- [8] Peng Z Y, Pu H R, Liang Y B. Study on ecological compensation of inter-basin water transfer based on evolutionary game theory[J]. *Water*, 2022, 14(21): 3498, doi: 10.3390/w14213498.
- [9] Li L, Wang L F, Liu R M, et al. Evaluating the impacts of inter-basin water transfer projects on ecosystem services in the Fenhe River Basin using the SWAT model[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(4): 455, doi: 10.1007/s10661-023-11077-0.
- [10] Yan H L, Lin Y Q, Chen Q W, et al. A review of the eco-environmental impacts of the south-to-north water diversion: Implications for inter basin water transfers[J]. *Engineering*, 2023, 30(11): 161–169.
- [11] Lu Z X, Feng Q, Xiao S C, et al. The impacts of the ecological water diversion project on the ecology-hydrology-economy nexus in the lower reaches in an inland river basin[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 164: 105154, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105154.
- [12] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 等. 2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J]. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133–2153. [Shao Quanqin, Liu Shuchao, Ning Jia, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000—2019 using remote sensing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2133–2153.]
- [13] Huang F, Ochoa C G. A Copula incorporated cellular automata module for modeling the spatial distribution of oasis recovered by ecological water diversion: An application to the Qingtu Oasis in Shiyang River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 608: 127573, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127573.
- [14] Huang F, Ochoa C G, Chen X, et al. An entropy-based investigation into the impact of ecological water diversion on land cover complexity of restored oasis in arid inland river basins[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 151: 105865, doi: 10.1016/j.ecoeng.2020.105865.
- [15] 崔国屹, 张艳, 晁阳, 等. 秦岭地区近40年土地利用变化及其生态环境效应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 319–326. [Cui Guoyi, Zhang Yan, Chao Yang, et al. Land use change and eco-environmental effects in Qinling Mountains in recent 40 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 319–326.]
- [16] 冯朝红. 基于水资源承载力的西北地区农业可持续发展评估研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021. [Feng ZhaoHong. Assessment of agricultural sustainable development in northwest China based on water resources carrying capacity[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.]
- [17] 张伟, 周亮, 孙东琪, 等. 干旱区生态移民空间迁移特征与生态影响——以甘肃省古浪县为例[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(2): 618–627. [Zhang Wei, Zhou Liang, Sun Dongqi, et al. Spatial migration characteristics and ecological impacts of ecological migrants in arid regions: A case of Gulang County, Gansu Province[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(2): 618–627.]
- [18] 王效科, 杨宁, 吴凡, 等. 生态效益评价内容和评价指标筛选[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5442–5449. [Wang Xiaoke, Yang Ning, Wu Fan, et al. Ecological benefit evaluation contents and indicator selection[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5442–5449.]
- [19] 古浪县志编纂办公室. 古浪年鉴[M]. 兰州: 甘肃民族出版社, 2023. [Gulang County County Annals Compilation Office. Gulang yearbook[M]. Lanzhou: Gansu Ethnic Publishing House, 2023.]
- [20] 刘洋, 王娅, 周立华. 基于过程和结果的甘肃古浪黄滩生态移民工程绩效评价[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(6): 185–193. [Liu Yang, Wang Ya, Zhou Lihua. Performance evaluation of ecological migration project based on process and outcome: A case study of Huanghuatan migration area in Gulang, Gansu, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(6): 185–193.]
- [21] Alibakhshi S, Azadi H, Leal E L. Can land-use and land-cover change explain reduced resilience in forests?[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1317188, doi: 10.3389/feart.2024.1317188.
- [22] Ning X G, Zhu N, Liu Y F, et al. Quantifying impacts of climate and human activities on the grassland in the Three-River Headwater region after two phases of ecological project[J]. *Geography and Sustainability*, 2022, 3(2): 164–176.
- [23] 杨洁. 黄河流域草地生态系统服务功能及其权衡协同关系研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021. [Yang Jie. Research on grassland ecosystem service function and its tradeoff synergistic relationship in the Yellow River Basin[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.]
- [24] 郝军, 田雅楠, 戈锋, 等. 流域土地利用与景观生态风险响应关系研究[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(11): 6132–6140. [Hao Jun, Tian Ya'nan, Ge Feng, et al. Correlational relationship between land use and landscape ecological risks in Inner Mongolia section of middle Nenjiang River[J]. *China Environmental Science*, 2023,

- 43(11): 6132–6140.]
- [25] 欧阳晓, 陈键, 魏晓, 等. 长株潭城市群土地利用变化对生态系统健康影响的关键类型及阈值效应[J]. 地理科学, 2024, 44(11): 1946–1954. [Ouyang Xiao, Chen Jian, Wei Xiao, et al. Exploring key types and threshold effects of land use change impact on ecosystem health in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(11): 1946–1954.]
- [26] Hu Y C, Zhou W, Yuan T. Environmental impact assessment of ecological migration in China: A survey of immigrant resettlement regions[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2018, 19(3): 240–254.
- [27] Jiang L G, Liu Y, Wu S, et al. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107933, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107933.
- [28] 吴万民, 刘涛, 陈鑫. 西北干旱半干旱区 NDVI 季节性变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1969–1981. [Wu Wanmin, Liu Tao, Chen Xin. Seasonal changes of NDVI in the arid and semi-arid regions of northwest China and its influencing factors[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(12): 1969–1981.]
- [29] 张华, 徐存刚, 王浩. 2001—2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应[J]. 地理科学, 2020, 40(6): 1029–1038. [Zhang Hua, Xu Cungan, Wang Hao. Response of vegetation change to meteorological drought in northwest China from 2001 to 2018[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(6): 1029–1038.]
- [30] 杨晓玲, 丁文魁, 周华, 等. 石羊河流域归一化植被指数变化及其驱动因子分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(10): 1735–1744. [Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Zhou Hua, et al. Normalized difference vegetation index change and its driving factors in Shiyang River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(10): 1735–1744.]
- [31] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000—2019 年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 11–21. [Yin Zhenliang, Feng Qi, Wang Lingge, et al. Vegetation coverage change and its influencing factors across the northwest region of China during 2000–2019[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(4): 11–21.]
- [32] 常文静, 丛士翔, 王融融, 等. 气候变化和人类活动对毛乌素沙地 NDVI 变化的量化分析[J]. 干旱区地理, 2025, 48(1): 63–74. [Chang Wenjing, Cong Shixiang, Wang Rongrong, et al. Quantitative analysis of NDVI changes in Mu Us Sandy Land by climate change and human activities[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(1): 63–74.]
- [33] 员学锋, 施林童, 杨悦, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区人类活动和植被覆盖对关键生态系统服务的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(12): 3235–3246. [Yuan Xuefeng, Shi Lintong, Yang Yue, et al. Impacts of human activities and vegetation cover on key ecosystem services in the Loess hilly-gully region of northern Shaanxi, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12): 3235–3246.]

Ecological benefits of inter-basin water transfer in arid ecological migration regions of northwest China: A case of Huanghuatan ecological immigrant area

TIAN Jinhua¹, HUANG Xiao², GAO Yayu^{2,3,4}, HAO Jianbin²,
WU Guanheng⁵, HE Wenbo²

(1. Institute of Soil and Water Conservation of Gansu Province, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Gansu Nonferrous Engineering Survey, Design and Research Institute, Lanzhou 730030, Gansu, China; 4. Technology Innovation Center for Mine Geological Environment Restoration in the Alpine and Arid Regions, Ministry of Natural Resources, Lanzhou 730030, Gansu, China; 5. Gansu Jingtaichuan Electric Power Irrigation Water Resource Utilization Center, Baiyin 730400, Gansu, China)

Abstract: Ecological migration and inter-basin water transfer are important measures for ecological restoration and environmental protection in the arid regions of northwest China, which are indispensable for rural revitalization and ecological civilization construction. This paper takes the ecological migrant area of Huanghuatan as research object, selecting 15 ecological indicators from four levels: natural meteorology, vegetation profiles, human activities and landscape patterns, constructs an ecological benefits evaluation system, and analyzes the impacts that nature and human activities have the ecological benefits of the study area from 2005 to 2020. The results indicated that: (1) Dry land, open land, and construction land increased, while other land use types fell in the Huanghuatan ecological migrant area from 2005 to 2020. The main transfer mode was conversion among dry land, grassland and bare land. (2) At the level of type, the fragmentation degree of grassland and bare land first decreased and then increased, the dry land first increased and then decreased, and other land use types went largely unchanged. At the level of landscape, with the exception of the degree of the aggregation index, indices showed a trend of increasing first and then decreasing. (3) The annual mean value of normalized difference vegetation index showed a continuous upward trend, increasing by 109.41% overall from 2005 to 2020, mainly showing a trend of continuous improvement from the high-value area to the surroundings. (4) The annual mean value of the net primary productivity (NPP) changed little, and the annual mean value of NPP in about 90% of the regions was 1–50 g C·m⁻². Exploratory research on the evaluation of ecological benefit in the arid region of northwest China can provide scientific and technological support for comprehensive evaluation of the ecological environmental benefits of ecological migration and inter-basin water transfer projects, as well as ecological protection management in the northwest arid region.

Keywords: ecological benefits; ecological migration; inter-basin water transfer; landscape pattern; vegetation cover; arid region of northwest China