

链谱视角下干旱海湾国家土地利用 变化特征及驱动因子分析 ——以卡塔尔为例

张志秀, 马彩虹

(宁夏大学地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 聚焦干旱海湾国家土地利用变化的时空分异规律与驱动机制解析, 基于GEE平台获取的30 m分辨率土地利用数据, 整合气象、社会经济等多源辅助数据, 以卡塔尔为研究区, 揭示了1995—2020年土地利用变化的特征与驱动机制。结果表明: (1) 1995—2020年卡塔尔土地利用变化呈现沙地减少、耕地和不透水面持续扩张、稀疏植被和灌木地比例明显提升的基本特征。(2) 首都多哈作为不透水面的超极扩展中心, 由填充式发展转为外延式扩张, 其他港口城市表现为填充与外延交替扩张模式。(3) 耕地以灌溉耕地为主要扩张类型, 形成以东北沿海为轴心向西北和西南向双轴向扩展模式。(4) 生态用地的扩张以稀疏植被和灌木地为主要类型, 主要扩张时段为1995—2000年与2015—2020年。空间上, 形成以海岸带为核心的稀疏植被为主体的绿化圈层结构, 灌木地因资源约束呈团块状分布, 且在东海岸集聚效应更为显著。(5) 土地利用变化呈现“油气经济驱动-水资源约束”双轨机制。其中, 1995—2005年以人口密度为核心驱动力, 2005年以后转为GDP与夜间灯光指数主导的经济扩张模式, 且叠加了地下水资源的约束效应。今后发展中, 应强化水资源约束-经济转型-生态修复协同发展机制, 以节水技术为支撑实现城市扩张与生态保护的动态平衡。

关键词: 土地利用; 链谱协同; 地理探测器; 卡塔尔

文章编号: 1000-6060(2026)04-0868-12(0868~0879)

作为人类活动与自然环境交互作用的核心界面, 土地利用时空演变表征着人地关系的复杂耦合过程^[1-5], 而对其时空变化规律和驱动机制的掌握, 则为深入剖析土地利用变化效应、科学模拟预测及精准调控提供了关键支撑^[6]。基于“净面积”法的土地利用动态度^[7]、土地利用程度指数^[8]等指标, 在土地利用变化定量分析中发挥了重要作用。然而, 净面积法因难以捕捉土地利用变化的非线性特征^[9], 在一定程度上制约了对土地变化潜在过程及其模式的深入理解^[10-12]。基于矢量属性的土地利用变化流^[13-15]的提出, 而在此基础上提出的土地利用转移

链为揭示土地利用变化的时空演变模式提供了新思路^[16]。如徐羽等^[17]采用土地转移流分析了江西省各地类的转移交互强度, 谢玲等^[18]的研究表明, 土地利用转移流的数量规模及方向特征共同塑造了石漠化地区土地利用变化的独特模式。驱动机制方面, 自然条件与社会经济因素在时空尺度上的异质性导致土地利用变化驱动因子呈现动态分异特征。研究表明, 在绿洲系统中, 降水、气温、土壤类型^[19]、海拔^[20-21]等自然因子对土地利用变化起主导作用, 在人类活动密集区, 土地利用变化则由社会经济因素与自然因子的协同驱动所主导^[22-23]。综

收稿日期: 2025-07-14; 修订日期: 2025-08-29

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2024AAC02022, 2024AAC03054); 宁夏高等学校自然科学基金项目(NYG2024007)资助

作者简介: 张志秀(2001-), 女, 本科, 主要从事GIS空间分析与智能模拟等方面的研究. E-mail: zzx1233212012@163.com

通讯作者: 马彩虹(1974-), 女, 博士, 教授, 主要从事旱区资源环境遥感等方面的研究. E-mail: mchayanni@163.com

上,区域分异特征决定了土地利用变化驱动机制的复杂性与空间异质性^[24-25]。未来研究需突破传统单一维度分析的局限,融合链谱协同视角深化对土地系统非线性演变规律的认识,为差异化土地管理提供针对性与前瞻性的决策参考。

干旱区覆盖全球41%陆地,生态系统本底脆弱,全球变暖趋势进一步加速了其扩张进程,并引发土壤退化、生物多样性下降等一系列连锁生态反应。根据联合国防治荒漠化公约(UNCCD)最新报告,全球荒漠化面积已达 $3.6\times 10^9\text{ hm}^2$,并以每年 $5\times 10^5\sim 7\times 10^5\text{ km}^2$ 的速度扩张,这一趋势严重威胁着全球约 20×10^9 人口的生存环境,对联合国可持续发展目标(SDG15.3)中的“土地退化零增长”愿景构成前所未有的挑战。卡塔尔作为海湾国家中城市化进程最迅速的国家之一,其快速的城镇化进程与大规模的能源开发活动对土地系统产生剧烈扰动。这种双重压力不仅改变了土地利用格局,还加剧了生态系统的脆弱性,使得研究卡塔尔土地利用变化特征及其驱动因子显得尤为紧迫。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

卡塔尔地处西亚,位于波斯湾西南岸的卡塔尔半岛($50^{\circ}45'\sim 51^{\circ}40'\text{E}$, $24^{\circ}27'\sim 26^{\circ}10'\text{N}$),其西部和南部接壤沙特阿拉伯,东部和北部濒临波斯湾(图1)。陆地面积 11586 km^2 ,海岸线长 563 km 。首都多哈市为全国政治、经济、交通和文化中心。地势低平,南部的沙漠为鲁卜哈利沙漠的东北延伸。属于热带沙漠气候,三面临海,无常年性河流,年均降水量不足 100 mm ,淡水资源极度匮乏。耕地稀少,农业高度依赖人工干预,粮食自给率极低。截至2020年底,总人口为 288.1×10^5 ,外籍劳务人口超过80%,主要分布在以多哈为中心的沿海地区。经济结构高度依赖能源产业,油气收入占GDP的60%,旅游业占7%,农业占比极小。

1.2 研究方法

1.2.1 链谱分析法 土地利用变化链谱分析法包括土地利用空间图谱分析和土地利用转换链分析2大过程。通过对3个时期及以上变化代码进行溯源记录形成土地利用变化链。土地利用转换链的构建可采用顺推法^[26],以基期地类为初始类型,叠加上

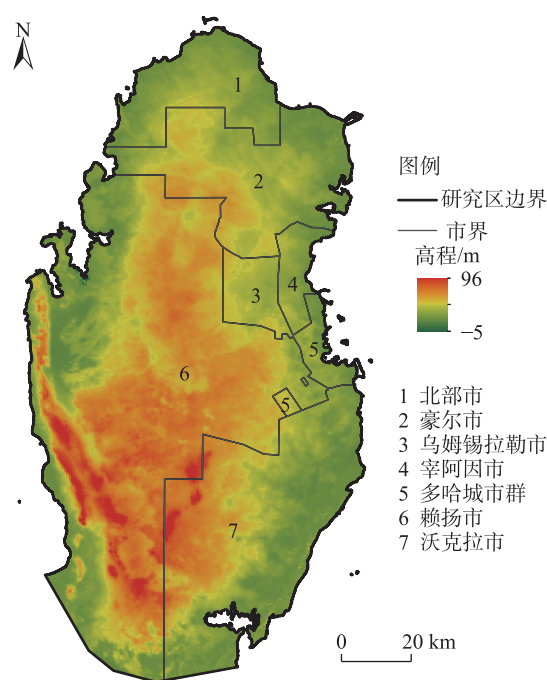


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

序列土地利用转换链代码。按照年份记录的图斑编码称之为完整链码。建立年份与字母的对应关系,当图斑编码发生变化时,用下标标注变化年份字母,称之为简码。完整链码记录图斑编码及其对应年份的完整变化序列,可还原图斑的完整变化历史,简码则便于快速识别关键转折点。编码中要求建立年份与字母的对应关系(如:1995=a,2000=b,2005=c),基本规则如下(表1)。

表1 土地利用变化链编码规则

Tab. 1 Coding rules of land use change chain

图斑代码	N1	N2	N3	N4	N5	N6	完整全连码	简码
图斑代码(例)	5	8	5	5	5	5	5855555	5,8,5
年份代码	a	b	c	d	e	f		
年份(例)	1995	2000	2005	2010	2015	2020		

图谱分析中,以 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 作为图谱空间单元,兼顾空间分辨率与计算效率,适用于中尺度土地利用变化分析。通过空间图谱表达土地利用变化链,通过变化链码(如完整链码或简码)建立特征链与图谱的时空映射关系,实现“时间序列变化-空间格局”的联动表达。为了显性表达特征链的空间格局特征,本文采用核密度制图法对土地利用变化链进

行空间制图,可突出变化链的空间集聚特征,更直观地揭示“变化-空间”耦合关系。

1.2.2 地理探测器 地理探测器是一种用于分析空间异质性及其驱动因素的定量工具^[27]。其中,单因子探测器能够评估因变量(Y)的空间异质性,并量化各自变量(X)对因变量空间分布的贡献,其影响力通过解释力(q 值)进行衡量, q 值的取值范围为0~1,其值越大,表明该因子对 Y 的解释力越强,其中因变量指卡塔尔研究时段内像元尺度上土地利用变化量。公式如下:

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

式中: q 为驱动因子对 Y 的解释力度,值越大表示该因子贡献度越高; L 为影响因子的分类数; N 和 N_h 分别为研究区的单元总数和类别 h 的样本量; σ_h^2 和 σ^2 分别为 h 的方差和全区 Y 值的方差。

交互作用探测器旨在评估不同驱动因子之间的交互效应。通过分析驱动因子 X_1 与 X_2 共同作用时对因变量 Y 解释力的增强或削弱情况,亦或两者对 Y 的影响是否呈现独立性。本文通过各单因子的 q 值与其交互作用后的 q 值之间的差异量化评估因子的交互效应。本文采用因子探测器和交互作用探测器2大模块开展土地利用变化驱动分析。

1.3 数据来源与预处理

基于GEE平台获取土地利用数据,主要土地利用类型总体准确率为80.88%。以《土地利用现状分类》GB/T21010-2017作为标准,对土地利用数据进行重分类,地类及代码依次为雨养耕地(1)、灌溉耕地(2)、不透水面(4)、灌木地(5)、草地(6)、稀疏植被(7)、水体(8)以及沙地(9)。结合其自然地理特征(气候干旱、水资源匮乏、地形平坦)和人类活动特征(高度城市化、经济依赖油气产业、人口高度集中),筛选出7个关键指标作为地理探测器分析的驱动因子(表2)。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化动态特征

2.1.1 土地利用数量结构变化特征 卡塔尔土地利用呈现耕地扩张、不透水面倍增与生态修复并行的特征(图2),典型体现了资源型国家在城市化进程中统筹农业开发与生态恢复的转型路径。1995—

表2 驱动因子数据来源

Tab. 2 Driving factors and data sources

数据名称	分辨率/m	数据来源
夜间灯光指数	500	http://www.geodata.cn
高程	90	地理空间数据云(gscloud.cn)
地下水开采量	1000	卡塔尔水利部(MME)
降水	1000	CHIRPS(Climatic Hazards Group)
气温	1000	ERA5-Land(ECMWF)
人口密度	1000	World Pop
GDP	1000	GHSL Data

2020年耕地从1.1%增至3.0%,增幅2.73倍;不透水面从1.9%增至4.3%,扩张2.26倍;稀疏植被从1.4%增至7.6%,增加了5.42倍;灌木地从0.01%增至0.02%;水体从0.7%增至1.3%;沙地表现为明显的收缩特征,从94.9%下降至83.7%,25 a间净减少11.2%。

2.1.2 土地利用转移流特征 卡塔尔土地利用经历了从单一资源开发向多元协同的转型过程。沙地作为主要转出类型,其空间持续缩减,而耕地、不透水面、灌木地及水体成为核心转入类型,其中耕地与稀疏植被的转入规模尤为突出,占比显著高于灌木地和不透水面(图3)。耕地与稀疏植被始终占据主导地位(合计占比超60%),且转入强度呈现“双峰”分布,其中,1995—2000年与2015—2020年转入量分别占研究时段内变化总量的35%和40%;而不透水面的持续转入,年均增长率达15%,直接反映了城市化进程的加速,其变化节奏与2022年世界杯基建投资、人口增长及经济多元化战略高度同步。

2.2 耕地格局演变及关键链谱特征

2.2.1 耕地空间格局演变特征 耕地主要集中于北部及沿海区域,其分布格局与水资源条件紧密相关。北部邻近波斯湾,地下水资源相对充沛。沿海地区则依托集装箱农业等现代化技术突破土地限制。耕地扩张呈现出雨养耕地与草本覆盖型耕地并进的态势。通过典型区遥感影像分析可见,排布规整的圆形灌溉农田与沙漠边界形成鲜明对比。典型区的土地利用变化扩张过程具有显著时段特征,2005年前呈零星分散状态;2010年前后进入快速扩张期,面积急剧增长且连片化特征明显;2015年后扩张速度趋缓,转向填补存量区域空隙,形成鲜明的阶段性差异(图4)。

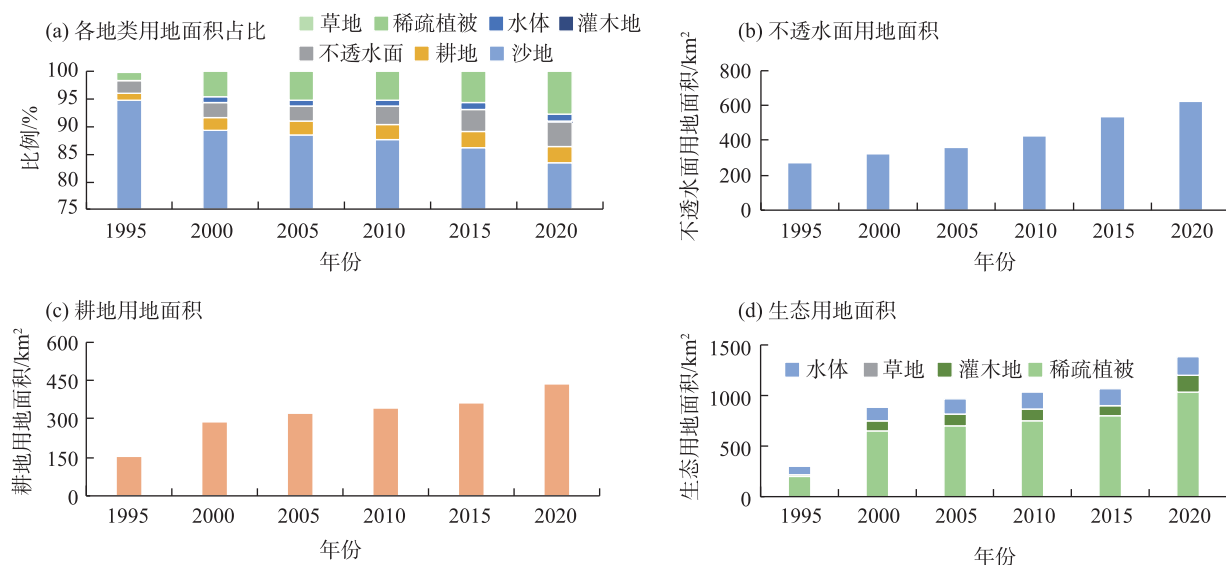
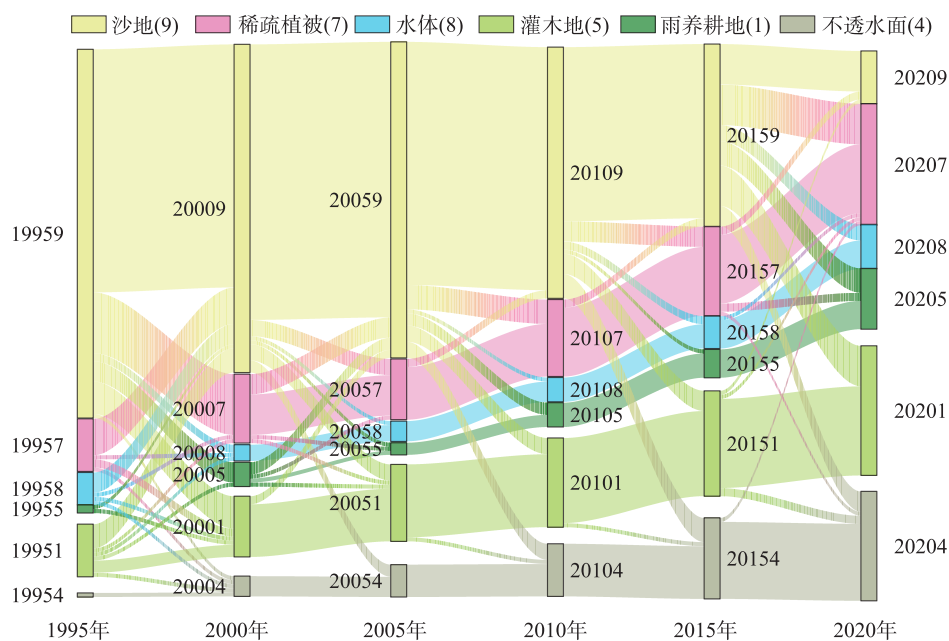


图2 1995—2020年卡塔尔土地利用数量结构变化

Fig. 2 Changes in the quantity structure of land use in Qatar from 1995 to 2020



注:4位数年份后面的数字代表地类,如19959表示1995年的代码为9的地类。

图3 1995—2020年卡塔尔土地利用转移流动态

Fig. 3 Land use transfer flow dynamics in Qatar from 1995 to 2020

2.2.2 耕地变化链谱特征分析 耕地的转移主要为沙地转雨养耕地(91型)和沙地转灌溉耕地(92型),合计占土地利用变化链的12.8%(图5)。其中,91型由大到小为 $9_{a1} > 9_{c1} > 9_{b1} > 9_{e1} > 9_{d1}$,92型由大到小依次为 $9_{a2} > 9_{c2} > 9_{b2}$ 。2种类型的转入序列呈现倒“U”型态势,即1995—2000年和2015—2020年为耕地转入流的2个高峰时期,且1995—2020年的额度

最大。空间上,以东北部沿海平原区为轴心向西北和西南2个方向形成双轴推进格局,该态势在 9_{a1} 型和 9_{a2} 型变化链中表现最为突出。

2.3 不透水面格局演变及转换链谱特征

2.3.1 不透水面格局演变特征 多哈资源、人口、产业高度集聚,导致不透水面在核心区高度集中,形成典型的单核极化格局。随着城市化扩张,形成了

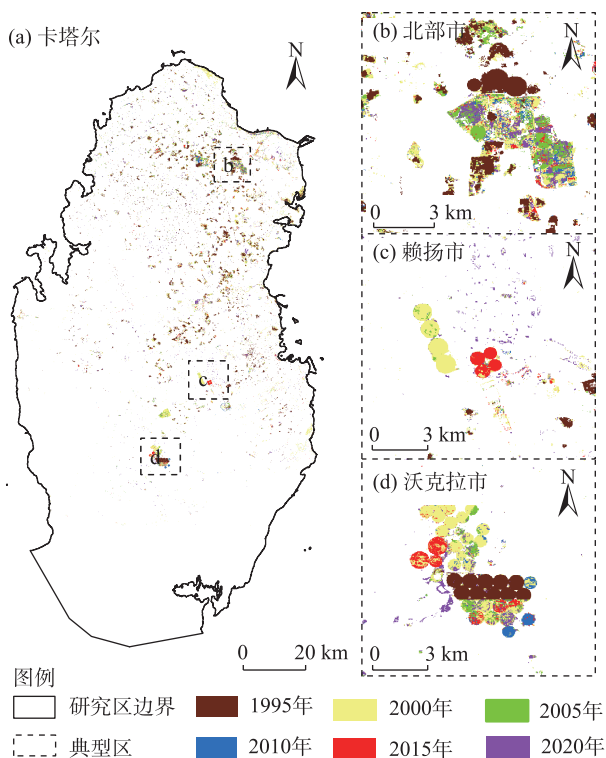


图4 1995—2020年卡塔尔耕地扩张空间格局
Fig. 4 Spatial pattern of cultivated land expansion in Qatar from 1995 to 2020

以其为中心的近海城市群—多哈城市群,在1995—2010年为填充式扩张,2010年以后表现为外延扩张(图6)。东部沿海港口城市如沃克拉市、豪尔等以填充式扩张与外延式扩张交错的形式扩张。

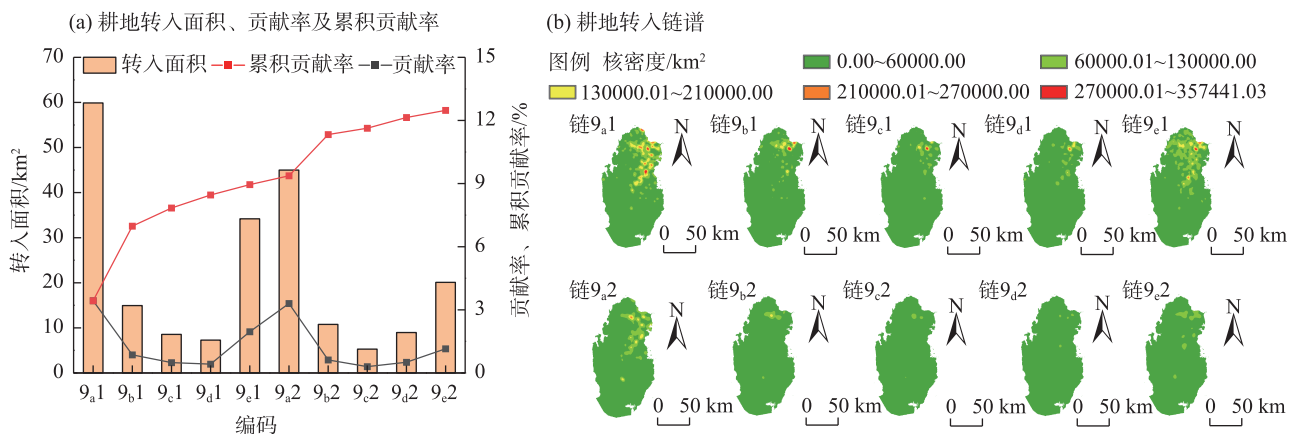
2.3.2 不透水面转换链谱特征 不透水面的转入链主要表现为沙地转入型和稀疏植被转入型(图7),累积贡献率占土地利用变化链总量的13.6%,贡献率大

小依次为 $9_{a4} > 9_{b4} > 9_{c4} > 9_{d4} > 9_{e4} > 7_{a4}$ 。不透水面的转入表现出明显的时空异质性。扩张模式方面,7_{a4}型主要是在不透水面的填充式扩张,9_{a4}型表达的是外延式扩张。9_{a4}型主要在多哈城市群形成数个集聚高密度中心。9_{a4}型虽形成高密度区但密度值低于9_{b4}型。2010—2015年9_{a4}型在多哈形成高密度区,2015—2020年的9_{a4}型表现出明显的外延式扩张特征。

2.4 生态用地格局演变及链谱特征

2.4.1 生态用地格局演变特征 生态用地以稀疏植被和灌木地的分布最为广泛。稀疏植被主要集中在北部和东部,灌木地主要分布在南部和中部。研究时段内生态用地的范围明显扩大,形成了以稀疏植被为主体的多哈城市群、东部关键港口城市、西部关键港口城市为核的海岸带绿化圈。由于灌木林的建设与维护对水土资源要求更高,灌木地体现为集中连片分布特征(图8)。这一转变得益于《国家愿景2030》的系统性生态治理,包括立法强制城市绿化、推广海水淡化与滴灌技术、构建多哈人工绿洲带、实施“绿色走廊”计划,以及运用耐旱植物修复荒漠边缘等。

2.4.2 生态用地变化链谱特征分析 卡塔尔非常重视荒漠化治理工作。研究时段内,大量沙地转向稀疏植被、灌木地、水体等生态用地。其中,体量突出的有前2种,研究时段内累积贡献率占到土地利用变化链的48.7%。1995—2000年和2015—2020年是2个高峰段(图9)。沙地转稀疏植被变化链由大到小依次为 $9_{a7} > 9_{b7} > 9_{c7} > 9_{d7} > 9_{e7}$,沙地转灌木地变化链主要有9_{a5}和9_{b5}。空间上,形成近海岸带高密



注:中间的字母指地类变化的年份,前后的数字表示变化的地类,如链9_{a1},在1995年由沙地变为雨养耕地。下同。

图5 1995—2020年卡塔尔耕地面积格局变化

Fig. 5 Changes in the pattern of cultivated land area in Qatar from 1995 to 2020

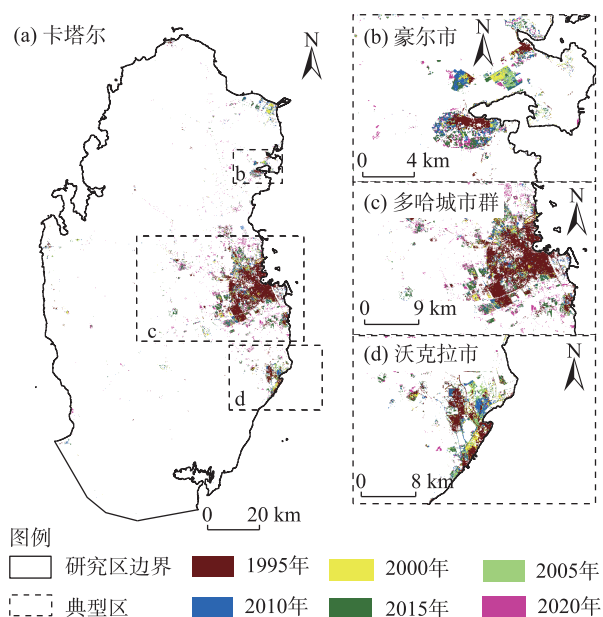


图6 1995—2020年卡塔尔不透水面扩张空间格局

Fig. 6 Spatial pattern of impervious surface expansion in Qatar from 1995 to 2020

区,且东海岸分布范围更为广泛。不同时段的高密区存在空间异质性,以灌木形成开展的生态修复体量明显小于稀疏植被,总体上呈近海岸分布态势,但空间上的聚合态势显著。

2.5 土地利用变化演变的驱动因子分析

2.5.1 单因子驱动作用 土地利用变化受到多因子综合驱动作用,但各因子在不同阶段的贡献率有一定差异(图10)。

可以看出,1995年以人口密度为主导,夜间灯光指数和气温构成辅助驱动层,反映早期人口分布对土地开发的直接影响。2000年后驱动格局发生结构性转变,GDP和夜间灯光指数形成双核驱动,地下水开采量开始显著上升,而人口密度解释力下降,标志着发展动力从人口导向转向经济-资源协同模式。2005年起进入新稳态阶段,地下水开采量与GDP、夜间灯光指数构成稳定三角,降水和气温持续处于解释力洼地。人口密度在早期对土地利用变化的驱动效应显著,GDP与夜间灯光指数的强耦合印证基建驱动对土地利用空间格局的重构产生重要驱动作用;水资源约束呈阶梯式强化,2000年以来,地下水开采量从次要因素跃居核心,反映农业/工业用水需求的指数级增长。综上可见,卡塔尔土地利用变化的驱动因子更替呈现去人口化-资源-经济集聚的递进逻辑,体现出海湾国家能源经济体的典型特征,凸显干旱区人类活动干预强度随发展阶段持续升级的基本规律。

2.5.2 交互因子基本特征 基于交互分析,共识别出4类主导交互组合,表现为地下水开采量-气温、夜间灯光指数-高程、GDP-人口密度、降水-气温。其中,自然要素(气温、地形)限制开发潜力,人文要素(GDP、人口密度)通过正反馈循环加速土地利用空间重构(图11)。

地下水开采量与气温的交互 q 值在2005年达到峰值,较气温单因子提升8.61倍,反映出地下水超

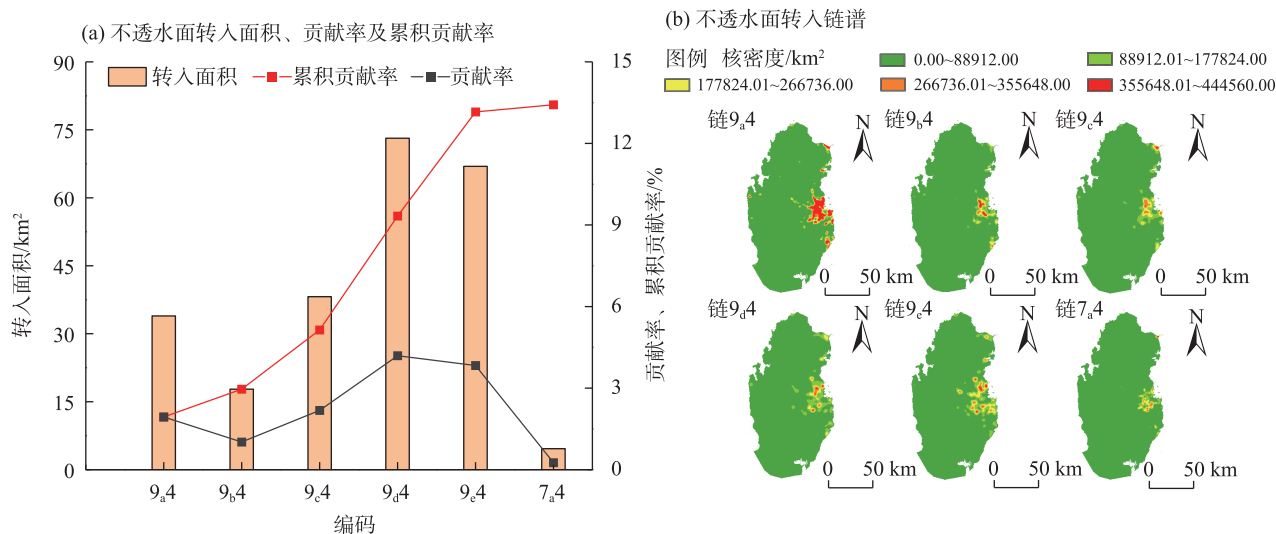


图7 1995—2020年卡塔尔不透水面面积格局变化

Fig. 7 Changes in the pattern of impervious surface area in Qatar from 1995 to 2020

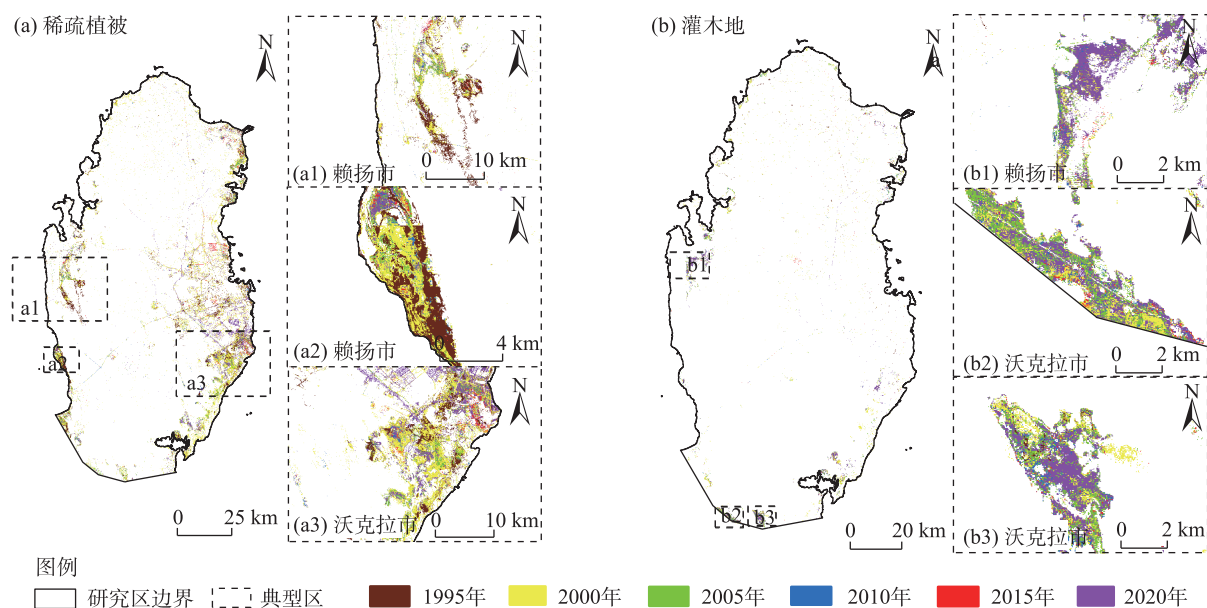


图8 1995—2020年卡塔尔主要生态用地扩张空间格局

Fig. 8 Spatial pattern of major ecological land expansion in Qatar from 1995 to 2020

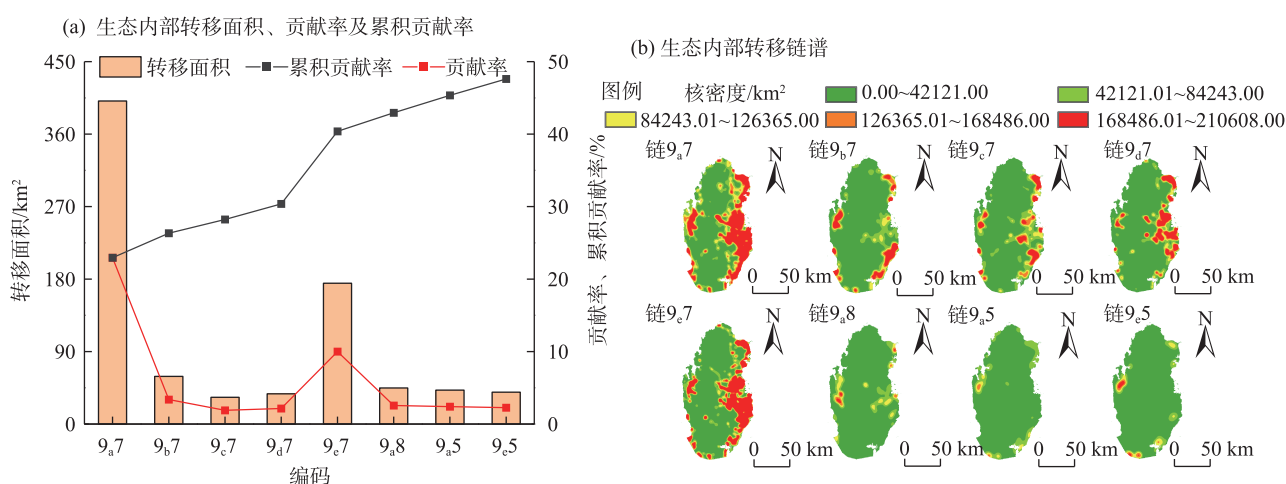


图9 1995—2020年卡塔尔荒漠化治理面积格局变化

Fig. 9 Changes in the pattern of desertification control area in Qatar from 1995 to 2020

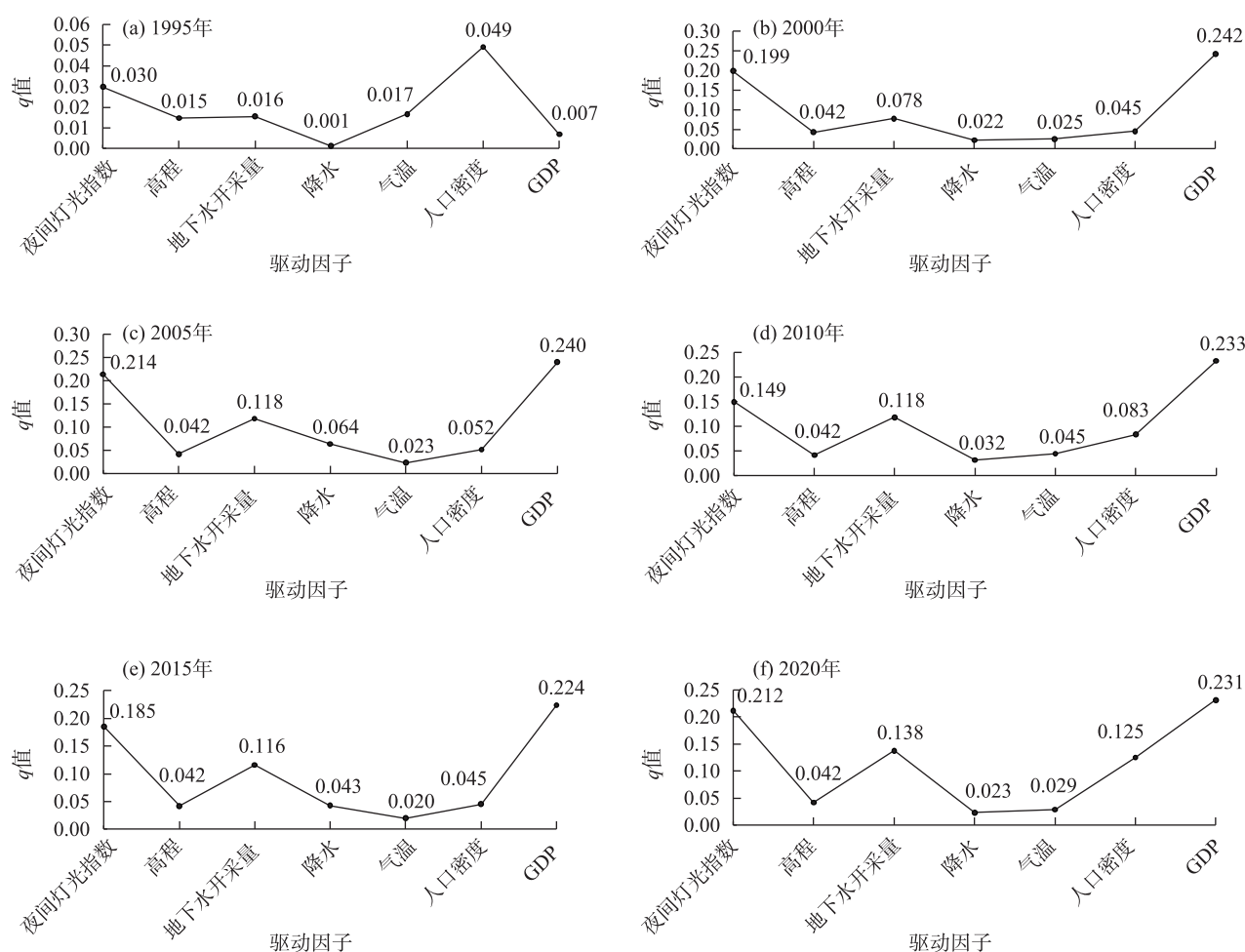
采导致地表植被退化。2010年夜间灯光指数与高程的交互 q 值达0.199,印证了地形约束下的城市化模式—城市扩张集中分布于海拔<50 m的沿海平原。GDP与人口密度的协同效应持续增强,2020年交互 q 值达0.252,反映人口与经济要素的集聚效应对不透水面扩张的驱动作用。夜间灯光指数和GDP在1995—2020年对土地利用变化有显著正向影响。高程和地下水开采量呈显著负向影响,显示地形和水资源利用对土地利用变化有制约作用。综上,卡塔尔土地利用变化受自然与人文要素双重

驱动,自然要素限制开发,人文要素加速空间重构,土地利用变化呈现“油气经济驱动—水资源约束”双轨机制。

3 讨论

(1) 土地利用变化链谱协同寻踪方法

对土地利用变化格局与过程的精细化研究和表达是提高模拟预测准确性的前提和基础。土地利用变化的矢量分析方法,可以揭示出单纯从净面

图10 1995—2020年解释力(q 值)的变化Fig. 10 Changes in the explanatory power (q -value) from 1995 to 2020

积法掩盖的变化过程^[28],如耕地从净值看变化体量很低,但实际上发生了不透水面对优质农田的占用和由荒漠系统的转入和补充。基于矢量思想的土地利用变化链谱协调分析法,通过将2个分析单元的土地利用变化流进行多时序衔接,也即通过对多个时期土地利用流的连续记录,从而构建出土地利用变化链。通过关键转移链与空间图谱的映射关系,从而识别土地利用变化的特征空间图谱,以实现土地利用变化链谱协同分析^[29]。其中,空间信息图谱分析单元和时序分析步长可以依据数据的精细程度和研究需要设定,可根据需要设定多尺度空间图元和变尺度分析步长。

(2) 土地利用变化呈现“油气经济驱动-水资源约束”双轨机制

卡塔尔土地利用变化特征体现出干旱海湾能源经济体的典型特征,呈现“油气经济驱动-水资源

约束”双轨机制。首先,为应对水资源匮乏的现状,大力发展以滴灌、地下渗灌等智能节水技术为核心的现代农业,显著提高了水资源利用效率。其次,不透水面扩张呈近海港口城市极化增长特征,以首都多哈的扩张最为突出,体现了在能源资源与干旱气候双重约束下的适应性选择^[30]。油气资源高度集中催生首都在国家经济中的突出重要性,使基础设施与人口向多哈倾斜;极端干旱环境通过海水淡化与能源消耗进一步固化资源分配失衡。其港口体系依托战略地理位置实现了经济增长,与内陆相对缓慢的城市化对比鲜明。另外,生态修复活动高度集中于沿海区域,形成近海生态修复圈,这与气候特征与水资源稀缺密切相关,反映出水资源是生态修复的基础性约束变量。这一现象与中东水文学家Shaban的结论相互印证^[31]。

ChinaXiv:202604.00328v1

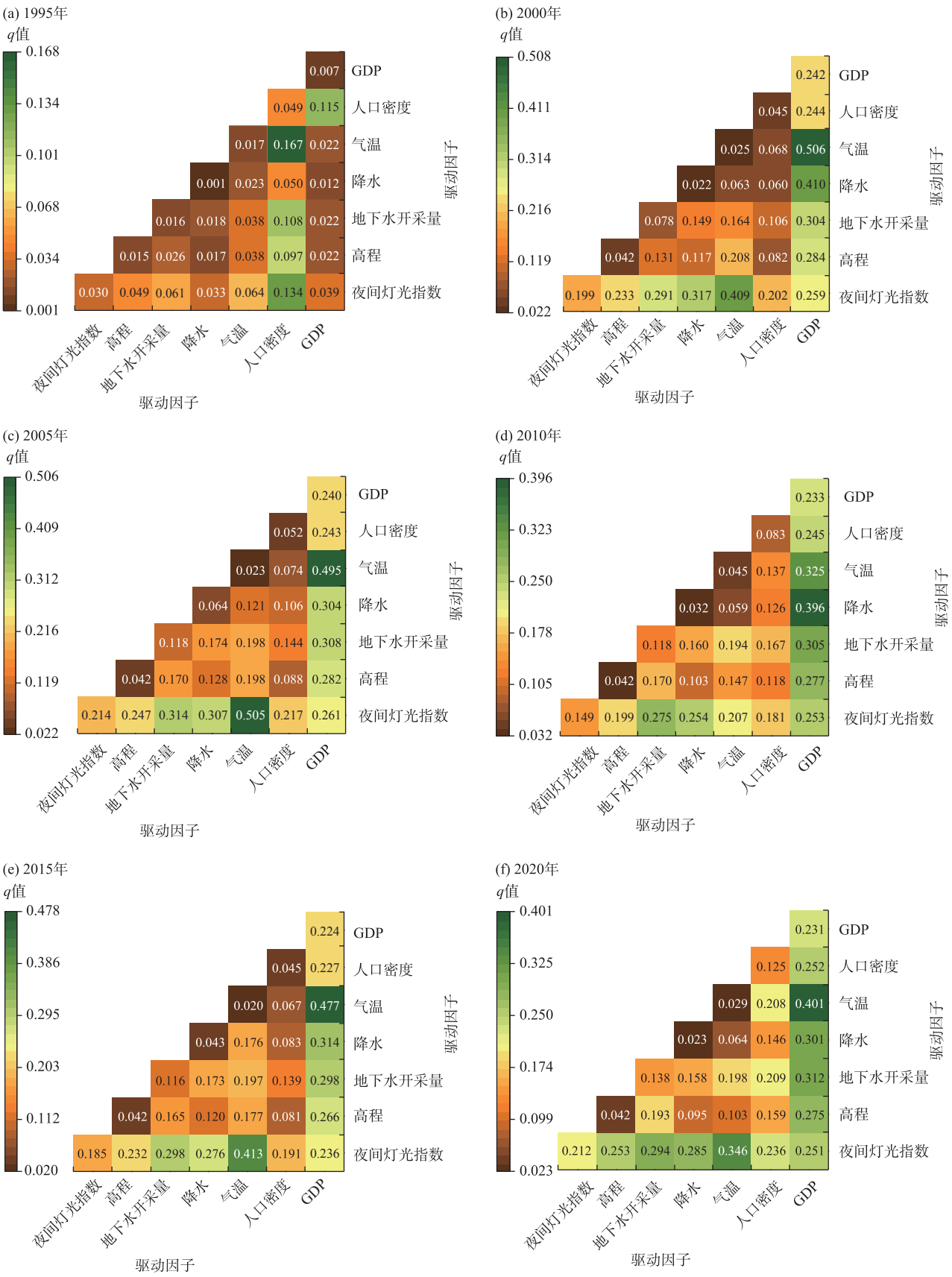


图 11 各因子交互作用影响力
Fig. 11 Influence of interaction among various factors

(3) 启示

卡塔尔土地利用呈现出油气驱动的不透水面倍增、集约化耕地扩张与生态修复工程同步推进,折射出资源型国家在城市化中平衡开发与可持续发展的转型策略,深刻揭示了干旱区海湾国家在快速发展中面临的普遍性挑战与协同发展路径,为同类区域提供了双重启示。一方面,经济多元化驱动固然可促进繁荣,但若缺乏生态约束性规划,会加剧水资源短缺和环境恶化;另一方面,生态修复的梯度圈层结构表明,基于水资源承载力的生态修复可有效遏制荒漠化。为实现绿洲-城市-生态协同可持续发展,同类区域需明白,过度依赖经济扩张导向的土地利用模式可能破坏水资源平衡与生态韧性。可将水资源约束作为国土空间规划的核心要素,优先发展节水型绿洲农业和低耗水城市绿化;强化海岸带生态圈层保护,利用植被修复提升区域气候调节功能,并且通过政策调控推动经济多元化与生态修复的协同。最终,需通过系统性的空间治理和政策创新,实现资源约束下发展与保护的动态平衡。

4 结 论

(1) 1995—2020年卡塔尔土地利用变化呈现出不透水面倍增、集约化耕地扩张与生态修复工程同步推进的动态特征。

(2) 耕地的扩张以1995—2000年和2015—2020年为2个高峰时期;空间上,以东北部沿海平原区为轴心向西北和西南2个方向形成双轴推进格局。

(3) 不透水面扩张呈核心极化复合梯度扩散特征。多哈作为超极化中心,经历填充式向外延式的阶段性扩张,形成放射状交通网络,其他港口城市则呈现填充与外延交替模式,反映城市发展从单极集聚向多中心网络的演进轨迹。

(4) 生态用地演变呈现近海修复的梯度圈层特征。1995—2000年与2015—2020年形成2个生态建设高峰段,通过沙地转稀疏植被(9.7型)和灌木地(9.5型)实现荒漠化治理。空间上形成以海岸带为核心的稀疏植被为主体的绿化圈层结构;灌木地则因资源约束呈集约化节点分布,东海岸集聚效应显著。

(5) 土地利用变化呈现“油气经济驱动-水资源

约束”双轨机制。前期人口密度主导扩张(1995—2005年),后期转向GDP与夜间灯光指数驱动的经济集“约化模式,同时地下水开采量形成刚性约束,体现出资源型城市从规模扩张到质量提升的转型轨迹。

参考文献(References)

- [1] 李常斌, 杨林山, 杨文瑾, 等. 洮河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 848–855. [Li Changbin, Yang Linshan, Yang Wenjin, et al. Land use and land cover change in Taohe River Basin and its driving forces[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(7): 848–855.]
- [2] 李广东. 全球土地覆被时空变化与中国贡献[J]. 地理学报, 2022, 77(2): 353–368. [Li Guangdong. Spatio-temporal change of global land cover and China's contribution[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(2): 353–368.]
- [3] 费兵强, 吴波, 殷婕, 等. 1964—2020年毛乌素沙地新垦耕地和弃耕地空间格局变化及其对荒漠化的影响[J]. 干旱区地理, 2025, 48(4): 661–672. [Fei Bingqiang, Wu Bo, Yin Jie, et al. Spatial pattern changes of newly cultivated and abandoned farmland and their impacts on desertification in the Mu Us Sandy Land from 1964 to 2020[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(4): 661–672.]
- [4] 刘园园, 马彩虹, 马丽娅. 黄河流域典型绿洲城市扩张模拟及其生态韧性响应研究[J]. 干旱区地理, 2025, 48(3): 506–516. [Liu Yuanyuan, Ma Caihong, Ma Liya. Simulation of urban expansion and its response to ecological resilience of typical oases in the Yellow River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(3): 506–516.]
- [5] Cao X M, Cui M C, Lei X, et al. Spatial-temporal process of land use/land cover and desertification in the Circum-Tarim Basin during 1990—2020[J]. *Land*, 2024, 13(6): 735, doi: 10.3390/land13060735.
- [6] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643–650. [Zhu Huiyi, Li Xiubin. Discussion on the index model of regional land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 643–650.]
- [7] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 225–230. [Liu Jiyan. Research on macro investigation and dynamic monitoring of national resources and environment remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(3): 225–230.]
- [8] 尹慧慧, 毋兆鹏. 干旱区绿洲城市建设用地扩张时空格局变化特征研究[J]. 生态科学, 2023, 42(5): 231–240. [Yin Huihui, Wu Zhaopeng. Spatiotemporal changes of urban construction land expansion in oasis in arid region[J]. *Ecological Science*, 2023, 42(5): 231–240.]
- [9] 袁焯城, 李宝林, 高锡章, 等. 内蒙古自治区土地覆被相互转换现象研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 58–63. [Yuan Yecheng, Li Baolin, Gao Xizhang, et al. Study on the land cover

- swap change in Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(5): 58–63.]
- [10] Pontius Jr R G, Shusas E, Mceachern M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 101(2–3): 251–268.
- [11] Yhdego S M, Hubert H, Chen G, et al. Analyzing land use/land cover changes and aridity dynamics in the Nile River Basin, north-eastern Africa[J]. *Journal of Arid Environments*, 2025, 230: 105412, doi: 10.1016/j.jaridenv.2025.105412.
- [12] Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122–129.
- [13] 马彩虹, 任志远, 李小燕. 黄土台塬区土地利用转移流及空间集聚特征分析[J]. *地理学报*, 2013, 68(2): 257–267. [Ma Caihong, Ren Zhiyuan, Li Xiaoyan. Land use change flow and its spatial agglomeration in the loess platform region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(2): 257–267.]
- [14] 马彩虹, 安斯文, 文琦, 等. 基于土地利用转移流的国土空间格局演变及其驱动机制研究——以宁夏原州区为例[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(3): 925–934. [Ma Caihong, An Siwen, Wen Qi, et al. Evolution of territorial spatial pattern and its driving mechanism based on land use transfer flow: A case of Yuanzhou District in Ningxia[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(3): 925–934.]
- [15] 汪建珍, 卢李朋, 赵锐锋, 等. 基于土地转移流的干旱区河谷城市土地系统稳定性评价——以兰州市近郊四区为例[J]. *经济地理*, 2014, 34(4): 153–158. [Wang Jianzhen, Lu Lipeng, Zhao Ruifeng, et al. Estimation of urban land system stability of river valley: A case study of the four districts in suburbs of Lanzhou City [J]. *Economic Geography*, 2014, 34(4): 153–158.]
- [16] 刘杨. 基于土地利用转移分析的辽宁省某矿区土地利用变化研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(11): 64–66. [Liu Yang. Study on land use change in a mining area of Liaoning Province based on land use transfer analysis[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(11): 64–66.]
- [17] 徐羽, 钟业喜, 冯兴华, 等. 江西省土地利用变化及其对人类活动的响应[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 181–186, 193. [Xu Yu, Zhong Yexi, Feng Xinghua, et al. Response of land use change to the human activities in Jiangxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 181–186, 193.]
- [18] 谢玲, 邓晓军, 卢月燕, 等. 广西石漠化地区土地利用空间变化的生态风险研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(8): 113–121. [Xie Ling, Deng Xiaojun, Lu Yueyan, et al. Ecological risks caused by land use variations in the rocky desertification mountainous area in Guangxi Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(8): 113–121.]
- [19] 焦岩, 闫峰, 卢琦, 等. 西北干旱区绿洲时空变化及驱动力[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(8): 2206–2216. [Jiao Yan, Yan Feng, Lu Qi, et al. Spatio-temporal changes and driving forces of the oasis in the arid northwest region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(8): 2206–2216.]
- [20] 邹易, 蒙古军. 干旱区绿洲-城镇-荒漠景观演变及生态环境效应[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(6): 988–1001. [Zou Yi, Meng Jijun. Evaluation of an oasis-urban-desert landscape and the related eco-environmental effects in an arid area[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(6): 988–1001.]
- [21] 赵晨光, 程业森, 李慧瑛, 等. 腾格里沙漠东北缘人工植被恢复区土地利用/覆被变化及其驱动因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(6): 131–138. [Zhao Chenguang, Cheng Yesen, Li Huiying, et al. Land use/cover change of an artificial vegetation system in the northeastern edge of Tengger Desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(6): 131–138.]
- [22] 杨利, 石彩霞, 谢炳庚. 长江流域国家湿地公园时空演变特征及其驱动因素[J]. *经济地理*, 2019, 39(11): 194–202. [Yang Li, Shi Caixia, Xie Binggeng. Temporal and spatial pattern evolution characteristics and driving factors of National Wetland Parks in the Yangtze River Basin[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(11): 194–202.]
- [23] Liu Y Y, Ma C H, Ma L Y. Dynamics of the oasis-desert-impervious surface system and its mechanisms in the northern region of Egypt[J]. *Land*, 2024, 13(9): 1480, doi: 10.3390/land13091480.
- [24] Masood M, He C G, Shah S A, et al. Land use change impacts over the Indus delta: A case study of Sindh Province, Pakistan[J]. *Land*, 2024, 13(7): 1080, doi: 10.3390/land13071080.
- [25] 纪秋磊, 梁伟, 傅伯杰, 等. 基于 Google Earth Engine 平台与复杂网络的黄河流域土地利用/覆被变化分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2122–2135. [Ji Qiulei, Liang Wei, Fu Bojie, et al. Land use/cover change in the Yellow River Basin based on Google Earth Engine and complex network[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2122–2135.]
- [26] 马彩虹, 贾科利, 邹淑燕, 等. 土地转移流视角下土地利用变化过程追踪方法探讨——以宁夏中部干旱带盐池县为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(4): 101–106. [Ma Caihong, Jia Keli, Zou Shuyan, et al. Study on tracing method of land use change process based on the perspective of land use transfer flow: A case study in Yanchi County in arid area of central Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(4): 101–106.]
- [27] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.]
- [28] 马彩虹, 贾科利, 邹淑燕, 等. 基于矢量属性的宁夏中部干旱带土地利用变化信息挖掘[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 260–265. [Ma Caihong, Jia Keli, Zou Shuyan, et al. Information mining in arid area of central Ningxia Hui Autonomous Region based on vector properties of land use change[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 260–265.]
- [29] 叶庆华, 刘高焕, 田国良, 等. 黄河三角洲土地利用时空复合变

- 化图谱分析[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004(5): 461–474.
- [Ye Qinghua, Liu Gaohuan, Tian Guoliang, et al. Analysis of spatial-temporal composite pattern of land use change in the Yellow River Delta[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2004 (5): 461–474.]
- [30] Karanisa T, Achour Y, Ouammi A, et al. Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: Case study of Qatar[J]. Environment Systems and Decisions, 2022, 42(4): 521–546.
- [31] Shaban A. Impact of climate change on water resources of Lebanon: Indications of hydrological droughts[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 125–143.

Land use change characteristics and driving factors in arid gulf countries from the chain-spectrum perspective: A case of Qatar

ZHANG Zhixiu, MA Caihong

(School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: To comprehensively understand the spatiotemporal characteristics and dynamic mechanisms of land-use change and to provide decision-making references for the sustainable management of land resources, this study employed the land-use chain spectrum analysis method integrated with the Geodimeter model on the Google Earth Engine platform to investigate land-use change and its driving mechanisms in Qatar, a gulf country in arid regions. The key conclusions are as follows: From 1995 to 2020, land-use change in Qatar exhibited a reduction in sandy land, continuous expansion of cultivated land and impervious surfaces, and a notable increase in the proportion of sparse vegetation and shrubland. Doha, the capital of Qatar, functioned as a “super expansion center” for impervious surfaces, with its development pattern transitioning from infill expansion to outward expansion, while other port cities demonstrated an alternating expansion mode of infill and outward expansion. Irrigated cultivated land constituted the primary type of cultivated land expansion, forming a dual-axis expansion pattern centered on the northeastern coast and extending toward the northwest and southwest. The expansion of ecological land was dominated by sparse vegetation and shrubland, with 1995–2000 and 2015–2020 serving as the key expansion periods. Spatially, a greening circular structure dominated by sparse vegetation, with the coastal zone as the core, was formed. Shrubland was distributed in clumps owing to resource constraints, with a more prominent agglomeration effect along the eastern coast. Land use change in Qatar exhibited a “dual-track mechanism” characterized by oil- and gas-economy-driven growth coupled with water resource constraints. Specifically, during 1995–2005, population density served as the core driving force; however, after 2005, the driving model shifted to an economic expansion pattern dominated by GDP and the nighttime light index, superimposed with the constraining effect of groundwater resources. For future development, it is essential to strengthen the coordinated development mechanism of “water resource constraint-economic transformation-ecological restoration” and to adopt water-saving technologies as the foundation for achieving a dynamic balance between urban expansion and ecological protection.

Keywords: land use; chain-spectrum collaboration; geographical detector; Qatar