

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.02.001

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:赵益奇,宁松瑞,任会朋,史名杰,秦国强.新疆温宿绿洲土地利用及其生态风险时空演变特征和驱动因素分析[J].西安理工大学学报,2026,42(2):151-163.

Zhao Yiqi, Ning Songrui, Ren Huipeng, Shi Mingjie, Qin Guoqiang. Analysis of the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of land use and ecological risk in Wensu Oasis of Xinjiang[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 151-163.

新疆温宿绿洲土地利用及其生态风险时空 演变特征和驱动因素分析

赵益奇¹, 宁松瑞¹, 任会朋¹, 史名杰², 秦国强³

(1. 西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 新疆农业大学 资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 随着旱区绿洲面积的不断扩张,其土地利用变化及引发的生态风险不容忽视。本文以温宿绿洲 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 期 Landsat 遥感影像为基础,结合土地利用转移矩阵、CA-Markov 模型及地理探测器等方法,分析了温宿绿洲近 30 年土地利用变化及其生态风险的时空演变特征和驱动因素,预测了 2025 年和 2030 年的土地利用格局。结果表明:①1990—2020 年温宿绿洲未利用地面积显著增加,水域面积明显缩减,主要变化时段在 2000—2010 年。②温宿绿洲不同地类转换频繁,主要为北部山区的水域转为未利用地,中部草地和未利用地的双向转换,南部草地向耕地、建设用地转变,且土地利用变化受人为因素影响较大。③未来 10 年间(2020—2030 年),温宿绿洲土地利用变化主要呈水域面积增加,未利用地面积缩减的趋势。④分析温宿绿洲土地利用生态风险可知,中等风险区 and 高风险区面积显著增加,中等风险区主要向南部扩张,高风险区向北部扩张,且生态环境在 2000—2010 年变差;社会经济因素对土地利用生态风险的影响不断弱化而自然因素不断增强。本研究为南疆绿洲的水土资源利用、生态环境保护提供了科学指导。

关键词: 土地利用格局; 绿洲; 土地利用生态风险; 未利用地; 地类转换

中图分类号: F323.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)02-0151-13

Analysis of the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of land use and ecological risk in Wensu Oasis of Xinjiang

Zhao Yiqi¹, Ning Songrui¹, Ren Huipeng¹, Shi Mingjie², Qin Guoqiang³

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The rapid expansion of oasis areas in arid regions has raised concerns regarding land use changes and associated ecological risks. Based on Landsat remote sensing images of the Wensu Oasis in four periods (1990, 2000, 2010, and 2020), combined with land use transfer matrices,

收稿日期: 2024-09-06; 网络首发日期: 2025-04-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250416.1617.008>

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项资助项目(2023A02002-2); 新疆维吾尔自治区重点研发专项资助项目(2024B03023-3); 中央引导地方科技发展资金资助项目(ZYYD2025QY07)

第一作者: 赵益奇,男,硕士生,研究方向为旱区农业水土资源高效利用。E-mail: 18103416163@163.com

通信作者: 宁松瑞,男,博士,副教授,研究方向为旱区农业水土资源高效利用。E-mail: ningsongrui@163.com

the CA-Markov model and the geographical detector, the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of land use change and ecological risk are analyzed in Wensu Oasis over the past 30 years. Moreover, the land use pattern in 2025 and 2030 is predicted in Wensu Oasis. The results indicate that: ①From 1990 to 2020, Wensu Oasis experiences a significant expansion of unused land (primarily occurring between 2000 and 2010) accompanied by substantial reduction in water bodies. ②Frequent conversion among land use types is observed in Wensu Oasis. Northern mountainous water bodies transform into unused land; reciprocal conversion between grassland and unused land occurs in central regions, and southern grasslands transition to cultivated land and construction areas. Human activities emerge as dominant drivers of these changes. ③The CA-Markov model indicates that the land use changes in Wensu Oasis will mainly show a reversal trend over the next decade (2020—2030), with water bodies recovering and unused land decreasing. ④The assessment of ecological risks caused by land use changes reveals a substantial expansion of medium-risk zones southward and high-risk zones northward, particularly during 2000—2010 when environmental degradation intensifies. Notably, socioeconomic factors exhibit a weakening influence on ecological risks while natural factors demonstrate increasing effects. This research provides a scientific guidance for optimizing water-soil resource utilization and ecological conservation in southern Xinjiang's oasis ecosystems.

Key words: land use pattern; oasis; land use ecological risk; unused land; land type conversion

绿洲作为旱区特有的景观类型,其面积仅占我国旱区面积的 3%~5%,但却承载了旱区 90%以上的人口和 95%以上的社会财富^[1]。绿洲是受人类活动和气候变化影响最敏感的区域之一^[2],绿洲的土地利用变化及生态风险是研究旱区社会经济发展和生态环境演变的重要内容,对评估旱区可持续发展具有重要意义。

近年来,在绿洲土地利用演变相关研究领域已取得大量成果,主要体现在两方面。一是绿洲土地利用变化演变特征分析。尽管绿洲土地利用演变过程复杂,但是耕地与建设用地持续增长、林草地与未利用地缩减已成普遍趋势^[3]。学者们发现近年来新疆库车河三角洲^[4]、于田地区^[5]及喀什噶尔河流域^[6]等区域的耕地面积扩张是绿洲扩展的主要方式,耕地主要由草地和未利用地转换而来,说明当地农业开发对绿洲土地利用演变的影响深刻。二是绿洲土地利用变化驱动机制研究。研究表明影响绿洲土地利用的驱动因素众多,主要有社会经济发展,气候变化及经济政策^[7-8]等。

通过不断改造当地自然环境,使得绿洲面积不断扩大,其带来的生态风险不容忽视^[2]。温宿绿洲地处西北干旱区,受自然因素和人类活动的影响,绿洲内的土地开发利用程度不断增大,其引发的土地荒漠化加剧、植被退化明显、冰川萎缩加快等生态问题日益突出,严重威胁着绿洲的生态环境和可持续发展^[9]。现有研究主要关注旱区绿洲土地利用变化过程特征、驱动机制及与生态系统服务价值的响应关系^[3-10],而对土地利用变化导致的生态风险研究

较少。温宿绿洲作为新疆南疆的典型绿洲,本文通过解译温宿绿洲 1990—2020 年的遥感影像,分析温宿绿洲近 30 年的土地利用变化特征,结合通径分析、地理探测器模型等方法,揭示自然因素与人为因素对绿洲土地利用及其生态风险的影响,以期为温宿绿洲以及南疆绿洲的水土资源配置、生态保护提供参考,对西部大开发战略和生态文明建设具有重要实践意义^[10]。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

作为南疆代表性绿洲之一,温宿绿洲(图 1)地处南疆阿克苏河流域中北部、塔里木河流域上游,(79°27'50"~81°29'58"E,40°51'41"~42°15'13"N),面积约 1.43×10^4 km²,自然资源丰富,是南疆主要的粮、棉及林果生产基地,也是国家优质棉生产基地、中国核桃之乡、中国“冰糖心”苹果生产基地。温宿绿洲地势垂直差异较大,属典型的大陆性干旱气候,降水稀少但水资源丰富、蒸发强烈、光照充足、昼夜温差大,年均气温 8.4℃~10.1℃,年均日照时数 2 556 h~2 760 h。温宿绿洲生态环境脆弱、敏感。近 30 年来,受自然因素和人类活动的影响,绿洲的土地开发利用强度不断增大,造成生态环境恶化风险^[11]。

1.2 数据源及预处理

选用 1990、2000、2010、2020 年 4 期 Landsat 系列遥感影像,空间分辨率 30 m 作为基础数据。其中 1990 年的遥感影像来自 Landsat 5,2000 年和

2010 年的遥感影像来自 Landsat 7,2020 年的遥感影像来自 Landsat 8;在 Google Earth Engine (GEE) 云平台中进行去云、影像融合和裁剪等操作。参考《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)和全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系方法,根据温宿绿洲的景观特点,按照区分差异性、归纳共同性方法,将研究区的土地资源划分为林地、草地、水域(含冰川)、耕地、建设用地及未利用地 6 种类型。通过 ENVI 5.6 软件采用目视解译和监督分类的方法按以上类型进行分类^[12]。在研究区随机抽取 100 个定位点,通过实地调查逐一验证 2020 年土地利用类型解译的准确度,总体精度大于 80%,满足研究需要。

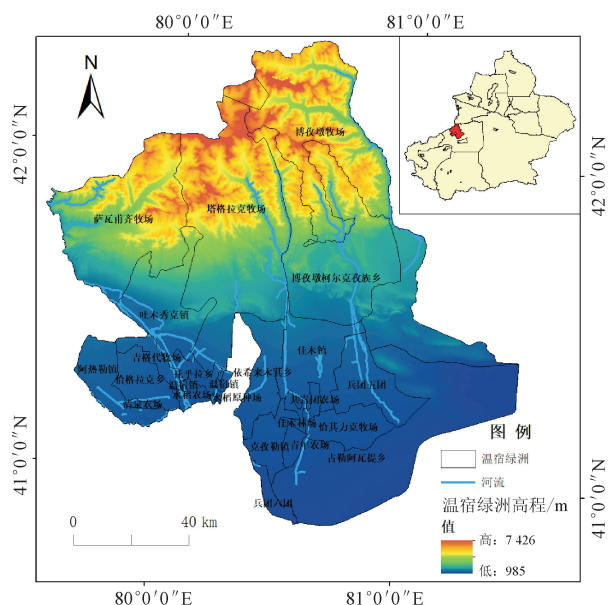


图1 温宿绿洲地理位置

Fig.1 Location map of the Wensu Oasis

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改。

1990—2020 年温宿县的气象和社会经济发展等资料源自《新疆统计年鉴》、《阿克苏地区统计年鉴》及温宿县土地利用现状图等,数据包括年降雨量、年均气温、人口、农业人口、GDP、第一产业增加值、第二产业增加值、第三产业增加值、农业机械总动力、棉花产量和粮食产量,DEM 数据由地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供,高程和坡度通过 DEM 数据提取,NDVI 数据根据原始图像数据计算提取。

1.3 研究方法

绿洲土地利用演变过程复杂,主要包括土地利用的结构变化、净变化、变化方向、变化速度等特征。为系统阐明温宿绿洲近 30 年的土地利用演变过程

及趋势,本文从绿洲土地利用类型变化的数量、幅度、速度、不同土地利用类型间的相互转换关系及土地利用变化对生态产生的正负效应等角度分析,采用单一土地利用面积动态变化^[13]、单一土地利用动态度、综合土地利用动态度^[14]、土地转移矩阵^[15]、土地覆被转类指数^[16]、耕地垦殖指数、植被覆盖指数^[14]等 7 个指标进行定量分析。关于不同指标的计算公式与参数设置的材料详见本文电子版附录 A1。

1) 马尔科夫(CA-Markov)模型^[17]:利用矢量化的 2015、2020 年土地利用遥感数据,采用 CA-Markov 模型预测 2025、2030 年温宿绿洲的土地利用动态变化。利用 Markov 链分析 2015、2020 年不同地类之间相互转化的概率,将各个地类的转换概率作为适应性图集,检验模型的模拟精度后,用于预测 2025、2030 年温宿绿洲土地利用格局变化。

2) 土地利用生态风险指数(ERI)^[18]:用于描述土地利用类型与综合生态风险之间联系。依据景观生态学原理,按照研究区景观平均斑块面积的 2~5 倍原则,将研究区划分为 1 004 个 4 km×4 km 的评价单元,通过土地利用类型面积比重与景观损失度指数构建生态风险指数(ERI)。

3) 地理探测器:用于分析地理对象空间异质性并揭示其驱动因素^[19]。本文使用地理探测器中的“因子探测”模块,对研究区土地利用生态风险空间分异的影响因子进行定量探测。“因子探测”的原理及计算方法参照文献^[19]。

2 结果与分析

2.1 温宿绿洲土地利用时空演变特征

2.1.1 土地利用面积变化

通过监督分类,对温宿绿洲 1990、2000、2010、2020 年的遥感影像进行解译和数据处理,得到 4 期土地利用分类图(图 2)及不同土地利用类型的面积(表 1)。4 期图像监督分类的 Kappa 系数均大于 0.80,满足分类精度要求,能较真实反映研究区土地利用变化。

1990—2020 年间温宿绿洲土地利用类型变化显著(表 1)。耕地、建设用地、未利用地整体呈扩张趋势,草地、林地、水域整体呈缩减趋势。未利用地的面积占比均超过 30%,其面积变化最大,从 4 507.12 km² (31.48%) 增加到 6 407.33 km² (44.76%),增加了 1 900.21 km²,在 2000—2010 年的面积变化最明显,增加了 1 814.33 km²。耕地的面积一直呈增加趋势,从 1 045.47 km² (7.30%) 增长到 2 020.40 km² (14.11%),增加了 974.93 km²,其中在 2000—2010 年变化最大。建设用地的面积占比

最小(不足 1%)且增加的面积最小,从 51.23 km² (0.36%)增长到 118.03 km² (0.82%),仅增加了 66.80 km²。水域的面积下降最为明显,由 2 294.56 km² (16.03%)减少到 795.66 km² (5.56%),减少了 1 498.90 km²,在 2000—2010 年面积缩减最为明显,减少了 1908.14 km²。草地的面积呈减少趋势,

由 6 138.76 km² (42.88%)下降到 4 774.24 km² (33.35%),减少了 1 364.52 km²,2010—2020 年其面积变化最明显。林地的面积呈先增后减趋势,从 1990 年的 278.24 km² (1.94%)增加到 2000 年的 381.39 km² (2.66%);之后减少到 2020 年的 200.29 km² (1.40%)。

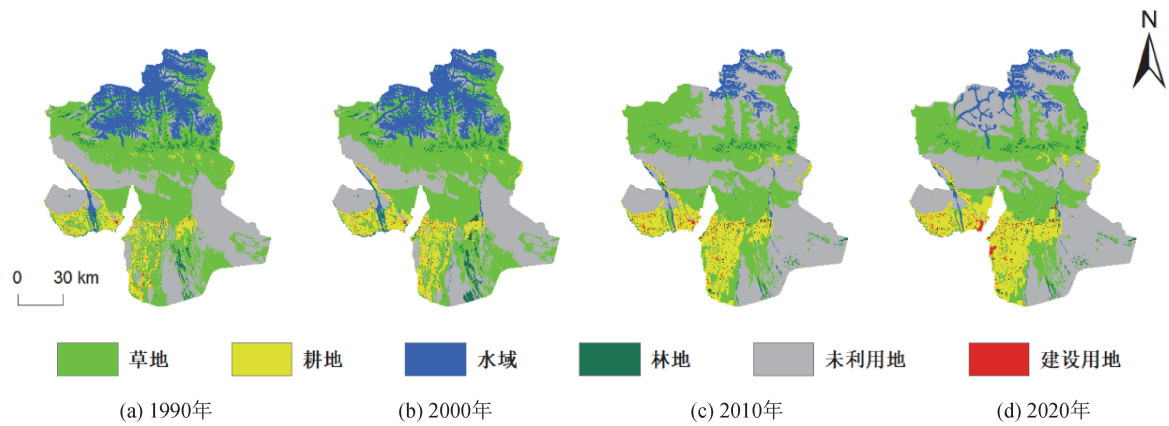


图 2 不同研究时期温宿绿洲土地利用分类

Fig. 2 Land use classification in Wensu Oasis in different research periods

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改。

表 1 温宿绿洲土地利用类型面积统计

Tab. 1 Statistical analysis of land use types area in Wensu Oasis

土地利用类型	年份							
	1990 年		2000 年		2010 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
耕地	1 045.47	7.30%	1 265.54	8.84%	1 739.55	12.15%	2 020.40	14.11%
草地	6 138.76	42.88%	5 952.36	41.58%	5 514.33	38.52%	4 774.24	33.35%
建设用地	51.23	0.36%	49.26	0.34%	83.96	0.59%	118.03	0.82%
林地	278.24	1.94%	381.39	2.66%	205.64	1.44%	200.29	1.40%
水域	2 294.56	16.03%	2 315.08	16.17%	606.94	4.24%	795.66	5.56%
未利用地	4 507.12	31.48%	4 351.27	30.40%	6 165.60	43.07%	6 407.33	44.76%
土地总面积	14 315.38	100%	14 314.89	100%	14 316.01	100%	14 315.94	100%

注:因不同时期遥感影像的处理过程不可避免地存在误差,导致各解译时期的土地总面积略有差异。下同。

2.1.2 地利用动态变化

不同研究时段,温宿绿洲土地利用单一动态度和土地利用综合动态度分析结果见表 2。

1990—2000 年,水域、耕地和林地的面积分别增长了 0.09%、2.10%和 3.71%,表明当地农业发展和生态建设初见成效。草地、建设用地以及未利用地的面积分别减少了 0.30%、0.38%和 0.35%,表明这一时期对自然资源的保护意识逐渐增强。此外,这 10 年间,林地的动态度最高(3.71%),反映出当地可能实施了大规模的造林计划或生态保护措施。

2000—2010 年,草地、林地和水域面积显著减少,尤其是水域,其动态度为-7.38%。耕地、未利用地及建设用地面积增加,特别是建设用地的动态度达 7.05%。这一时期的综合土地利用动态度为 1.62%,是近 30 年中最高的时段,表明当地土地利用结构在此期间经历了剧烈变动。

2010—2020 年,尽管未利用地、耕地、水域和建设用地继续扩张,而草地和林地则持续缩减。其中,建设用地的动态度达到 4.06%,突显出城镇化进程持续推进。此外,与 2000—2010 年相比,本时期的综合土地利用动态度降至 0.52%,整体变化趋于平稳。

表 2 1990—2020 年温宿绿洲土地利用动态度
Tab. 2 Land use dynamics degree of Wensu Oasis from 1990 to 2020

研究时段	综合土地利用动态度	单一土地利用动态度					
		耕地	草地	建设用地	林地	水域	未利用地
1990—2000 年	0.24%	2.10%	−0.30%	−0.38%	3.71%	0.09%	−0.35%
2000—2010 年	1.62%	3.75%	−0.74%	7.05%	−4.61%	−7.38%	4.17%
2010—2020 年	0.52%	1.61%	−1.34%	4.06%	−0.26%	3.11%	0.39%
1990—2020 年	0.68%	3.11%	−0.74%	4.35%	−0.93%	−2.18%	1.41%

近 30 年来,未利用地、耕地和建设用地的面积保持扩张趋势,且建设用地的增幅最大(4.35%),但同时期的草地、林地和水域的面积呈减少趋势。

2.1.3 土地利用转移矩阵

各时段的温宿绿洲地类转换分析弦图见图 3 (关于土地利用转移矩阵的材料详见本文电子版附录 A2)。1990—2000 年,草地主要由耕地和未利用

地转入(图 3(a)),主要转为耕地。耕地主要由草地转入,耕地与草地间的互相转换可能是农业政策动态调整,温宿绿洲处于退耕还草与耕地开垦的动态平衡过程。水域和建设用地的转入转出都较少。未利用地主要由草地转入,主要转向草地。林地主要由耕地和未利用地转入。

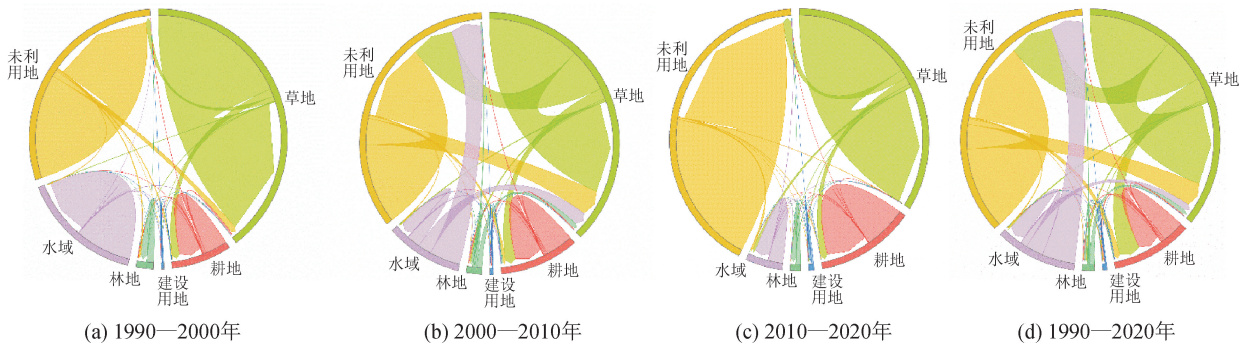


图 3 不同研究时段的温宿绿洲土地利用转移弦图
Fig. 3 Chord diagram of land use transition in Wensu Oasis in different research periods

2000—2010 年,未利用地的扩张最为明显,主要来自于草地和水域(图 3(b)),这可能是由于旱区气候变暖加速冰川消融,导致季节性河流断流,进而引起水域萎缩和草地沙化,促进未利用地扩张^[20]。草地主要由林地,水域和未利用地转入,转向耕地和未利用地。耕地主要由草地和未利用地转入,流向建设用地和林地。水域主要向未利用地和水域转出,转入较少。建设用地转换不明显。林地主要向草地转出,转入较少。此外,2005—2010 年各地类间的转化最为剧烈,是温宿绿洲近 30 年来地类变化最为频繁的时段。

2010—2020 年呈现生态修复迹象,草地主要转向耕地、未利用地和水域(图 3(c)),转入较少,草地产出量较前期大幅减少,但仍有大部分面积转向未利用地,反映局部地区生态恢复的脆弱性。水域和未利用地均主要由草地转入,水域转出少,未利用地主要转向水域。建设用地和林地的转入转出面积均

较少。

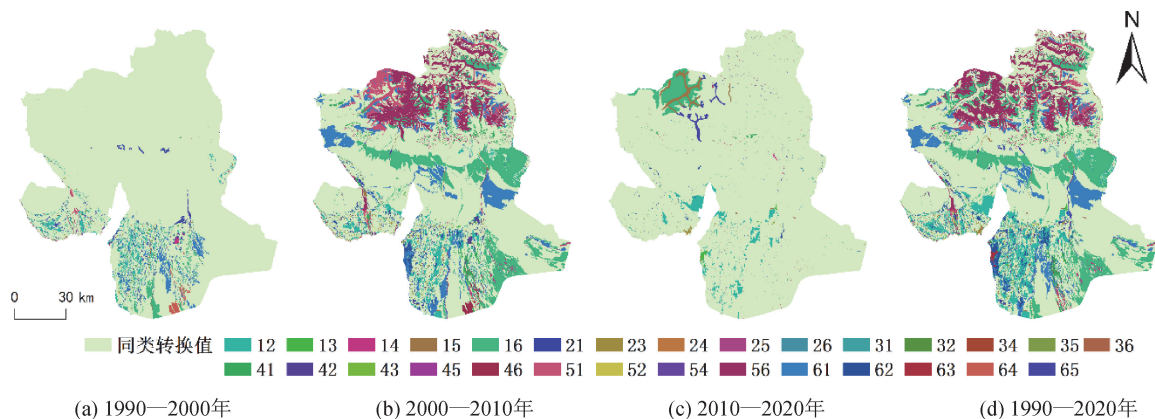
1990—2020 年,未利用地转入面积最多,主要由草地和水域转入,转向草地和耕地。草地主要由未利用地、林地和水域转入(图 3(d)),转出面积最多,主要转向耕地和未利用地。耕地主要由草地和未利用地转入。水域主要转向草地和未利用地,其中未利用地占比较大。林地和建设用地在 30 年间转换面积较少。

2.1.4 土地利用空间变化

不同研究时段温宿绿洲土地利用空间变化见图 4。1990—2000 年,草地扩张主要分布在绿洲西南部及南部平原区(图 4(a)),由未利用地和耕地转入,少量分布在中部平原以及北部山区,这可能与当地退耕还草政策、水土保持政策以及农业种植结构调整促使未利用地和部分盐碱程度较重、产能较低的弃耕地向草地转化。林地的扩张分布在南部平原区,在西部少有扩张,主要由草地转入,这可能与当

地生态防护林建设有关。耕地的扩张主要在南部和西南部的平原区,主要由草地和未利用地转入,在东部边缘有少量转入,反映了农业开发范围不断扩展。

未利用地的扩张主要在南部和平原区,少量分布在北部山区以及西部的平原区。建设用地在南部平原区也有扩张趋势。



注:图例中 1、2、3、4、5、6 依次代表草地、耕地、建设用地、林地、水域和未利用地。图例 12 代表草地转变为耕地,其它数字意义相同。

图 4 不同研究时段的温宿绿洲土地利用变化空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use changes in Wensu Oasis in different research periods
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改。

2000—2010 年,未利用地的扩张主要分布在温宿绿洲中部和东南部平原区以及北部山区(图 4(b)),在西南部也有少量扩张。草地的扩张主要分布在中部和南部平原区以及北部山区。耕地的扩张主要分布在南部以及西南部的平原区,在东部也有少量扩张。林地的扩张主要分布在北部山区,由草地转入,这与天然林保护工程和三北防护林建设有关,少量分布在南部平原区,由耕地转入。水域和建设用地的扩张不明显。此外,2005—2010 年的不同土地利用类型的扩张与缩减最明显,这与塔里木河流域综合治理、《新疆生态功能区划》等政策实施有关。

2010—2020 年,水域的扩张主要分布在温宿绿洲西北部山区(图 4(c))。未利用地扩张主要在北部山区及南部的平原区,在中部也有少量扩张。耕地主要在南部和西南部平原区,主要由草地转入。草地、建设用地和林地的扩张不明显。

1990—2020 年,草地的扩张主要分布在温宿绿洲中部和南部平原区以及北部山区(图 4(d)),主要由林地,水域和未利用地转入,这反映了自然恢复及生态保护措施的效果。耕地的扩张主要分布在南部以及西南部的平原区,主要由草地和未利用地转入,在东部也有少量的扩张,来自草地的转入,显示出持续的农业扩展需求。建设用地的扩张主要分布在南部平原区。林地的扩张主要在北部山区,少量分布在南部平原区。水域的扩张主要分布在西北部山区,主要由草地转入,这可能是由于水资源管理和气候因素的影响。未利用地的扩张主要分布在中部和东南部

平原区以及北部山区,在西南部也有少量扩张。

2.1.5 耕地复垦及植被覆被分析

由图 5 可知,不同研究时段的温宿绿洲耕地复垦指数总体呈上升趋势,从 8.7% 上升到 14.94%,表明近 30 年间温宿绿洲对耕地保护较为重视,耕地面积与土地总面积的比例持续上升,且耕地质量持续提升。

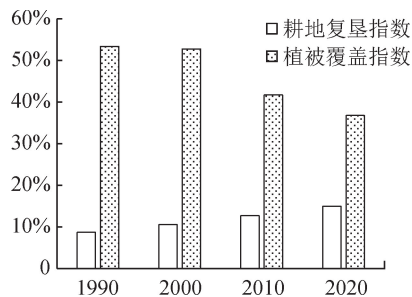


图 5 不同时期温宿绿洲耕地复垦和植被覆盖指数
Fig. 5 Land reclamation and vegetation cover index of Wensu Oasis in different periods

不同研究时段的温宿绿洲植被覆盖指数呈下降趋势,从 53.38% 下降到 36.79%,说明近 30 年在气候变化以及人类活动影响下,温宿绿洲的植被覆盖率有所下降,这与段峥嵘等^[16]在阿克苏绿洲的研究结果相似。

温宿绿洲 1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2020 年和 1990—2020 年的土地覆被转类指数分别为 1.65%、-38.39%、0.79% 和 -36.51% (图 6)。说明近 30 年间,温宿绿洲的土地覆盖和生态环境状况整体转差,尤其是在 2000—2010 年的转

差程度最大,在1990—2000年和2010—2020年的生态环境状况好转。整体来看,1990—2020年温宿绿洲的生态环境状况不容乐观,这可能是近30年间存在草地大量转出情况,导致土地覆被转类指数为负。

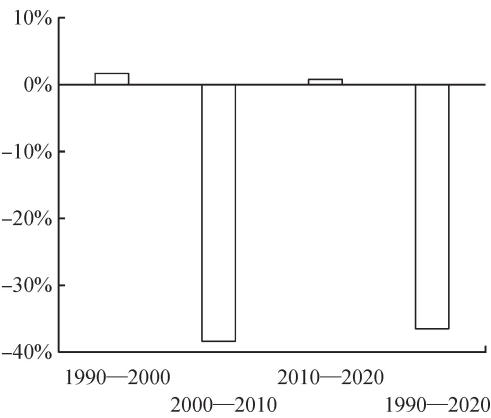


图6 不同研究时段温宿绿洲土地覆被转类指数
Fig. 6 Land cover transition index of Wensu Oasis in different research periods

2.1.6 土地利用变化驱动因素分析

社会经济发展和自然因素是导致旱区土地利用变化的根本原因^[13]。按照科学性、完备性、动态性以及数据的可获取性原则,参考相关成果^[13],结合温宿绿洲的社会经济发展和自然因素等情况,本文选取6种土地利用类型为因变量:耕地(Y_1)、草地(Y_2)、建设用地(Y_3)、林地(Y_4)、水域(Y_5)和未利用地(Y_6);选取11个指标作为自变量:其中社会经济因素包括人口(X_1)、GDP(X_2)、第一产业增加值(X_3)、第二产业增加值(X_4)、第三产业增加值(X_5)、农业人口(X_6)、农业机械总动力(X_7)、棉花产量(X_8)、粮食产量(X_9),自然因素包括降雨量(X_{10})和气温(X_{11}),利用通径分析方法量化不同土地利用类型与其主要影响因素间的真实作用程度,结果见表3(关于通径分析完整结果的材料详见本文电子版附录A3)。

表3 不同驱动因子对土地利用类型的通径系数

Tab. 3 Path coefficients of different driving factors on land use types

因变量	自变量	直接通径系数	因变量	自变量	直接通径系数	因变量	自变量	直接通径系数
Y_1	X_{11}	0.29	Y_3	X_{11}	0.02	Y_5	X_{11}	-0.16
	X_6	0.28		X_6	-0.21		X_6	0.21
	X_{10}	-0.06		X_{10}	0.19		X_{10}	-0.25
	X_4	0.66		X_4	1.24		X_4	-0.97
	X_8	0.84		X_8	-0.79		X_8	1.26
	X_9	-0.66		X_9	0.49		X_9	-1.25
Y_2	X_{11}	0.81	Y_4	X_{11}	0.52	Y_6	X_{11}	-0.45
	X_6	0.77		X_6	0.53		X_6	-0.76
	X_{10}	-0.95		X_{10}	-0.66		X_{10}	0.81
	X_4	-0.87		X_4	-1.36		X_4	1.16
	X_8	1.67		X_8	3.12		X_8	-2.69
	X_9	-1.99		X_9	-2.65		X_9	2.73

棉花产量(X_8)对耕地面积(Y_1)的直接影响作用最大(0.84),降雨量(X_{10})对耕地面积的直接影响作用最小(-0.06),降雨量(X_{10})和粮食产量(X_9)对耕地面积变化为负向作用,其余4个因子对耕地面积变化均为正向作用。

粮食产量(X_9)对草地面积(Y_2)的直接影响作用最大(-1.99),农业人口(X_6)对草地面积的直接影响作用最小(0.77),第二产业增加值(X_4)、降雨量(X_{10})和粮食产量(X_9)对草地面积变化为负向作用,其余3个因子对草地面积变化为正向作用。

第二产业增加值(X_4)对建设用地面积(Y_3)的直接影响作用最大(1.24),气温(X_{11})对建设用地面

积的直接影响作用最小(0.02),农业人口(X_6)和棉花产量(X_8)对建设用地面积变化为负向作用,其余4个因子对建设用地面积变化为正向作用。

粮食产量(X_9)对未利用地面积(Y_6)的直接影响作用最大(2.73),气温(X_{11})对未利用地面积的直接影响最小(-0.45),农业人口(X_6)、气温(X_{11})和棉花产量(X_8)对未利用地面积变化为负向作用,其余3个因子对未利用地面积变化为正向作用。

综上,近30年间温宿绿洲的农业与经济发展(第二产业增加值(X_4)、棉花产量(X_8)、粮食产量(X_9))等人为因素在影响土地利用方面发挥主导作用。

2.1.7 土地利用动态及格局变化预测

根据已获得的 2015、2020 年两期土地利用数据,应用 CA-Markov 模型预测 2020 年温宿绿洲土地利用格局,将模型预测的 2020 年土地利用结果与已获得的 2020 年实际土地利用分类数据进行对比,并计算 Kappa 系数(K),当 $K>0.75$ 时,通常被认为具有较高的可靠性^[21]。

模型模拟精度的验证结果表明, K 为 0.95,表明模型预测结果与现状数据的一致性程度较高,模型可用于预测温宿绿洲 2025、2030 年的土地利用空间分布,预测结果见图 7。

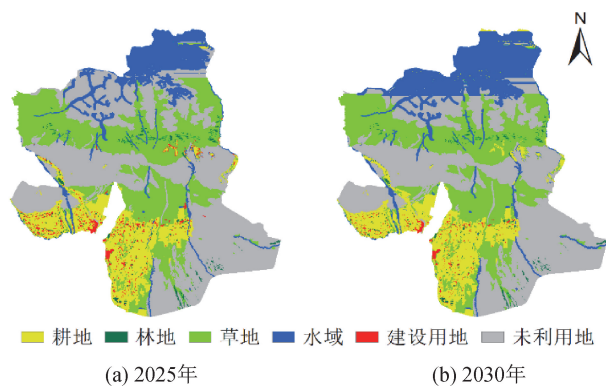


图 7 温宿绿洲 2025 和 2030 年土地利用图预测
Fig. 7 Predicted land use maps of Wensu Oasis for 2025 and 2030 in different research periods
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改。

由图 7 和表 4 可知,2025 年温宿绿洲的土地利用格局变化平缓,水域和建设用地呈扩张趋势。水域扩张趋势显著,从 2020 年的 795.66 km² 增加到 2025 年的 1 761.89 km²,增加了 966.23 km²,扩张集中在北部山区。建设用地呈缓慢扩张趋势,面积仅增加了 84.99 km²。其余土地利用类型均呈缩减趋势,草地缩减趋势明显,从 2020 年的 4 774.24 km² 下降到 2025 年的 4 060.51 km²,减少了 713.73 km²。未利用地从 2020 年的 6 407.33 km² 下降到 2025 年的 6 198.38 km²,下降了 208.95 km²。耕地和林地呈缓慢缩减趋势。

2030 年,温宿绿洲的水域面积继续扩张,从 2025 年的 1 761.89 km² 增加到 2030 年的 2 497.61 km²,增加了 735.72 km²,扩张主要在北部的山区。耕地呈缓慢扩张趋势,从 2025 年的 1 909.77 km² 增加到 2030 年的 1 972.37 km²,增加了 62.6 km²。建设用地、草地、林地和未利用地则呈缩减趋势。未利用地的缩减趋势最明显,从 2025 年的 6 198.38 km² 下降到 2030 年的 5 746.92 km²,减少了 451.46 km²。草地从 2025 年的 4 060.51 km² 下降到 2030 年的 3 850.32 km²,下降了 210.19 km²。建设用地和林地呈缓慢缩减趋势。

表 4 温宿绿洲 2025 和 2030 年土地利用类型面积预测
Tab. 4 Prediction of land use type areas in Wensu Oasis in the years 2025 and 2030

年份	面积/km ²						
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	总计
2020 年	4 774.24	2 020.40	118.03	200.29	795.66	6 407.33	14 315.94
2025 年	4 060.51	1 909.77	203.02	188.54	1 761.89	6 198.38	14 322.10
2030 年	3 850.32	1 972.37	132.92	166.52	2 497.61	5 746.92	14 366.65

2.2 温宿绿洲土地利用生态风险评价

2.2.1 土地利用生态风险时间演变分析

温宿绿洲 1990—2020 年不同土地利用类型的生态风险指数见表 5。

由破碎度指数可知,温宿绿洲 30 年间耕地、草地、建设用地和未利用地的破碎化程度整体呈下降趋势,耕地从 0.010 3 下降到 0.003 0,未利用地从 0.004 5 下降到 0.001 9。林地和水域的破碎化程度

增加。1990—2020 年间建设用地的破碎化值皆高于其他 5 类土地利用类型,且在 2010—2020 年下降最明显(0.015 7)。

由分离度指数可知,林地和建设用地的分离度较大,林地在 2020 年最大(0.738 3),建设用地在 2000 年最大(2.268 9),说明其空间结构多样性丰富。水域和林地的分离度呈增加趋势,其它 4 类土地利用类型均呈下降趋势,说明其趋于分散。

表 5 不同研究时期温宿绿洲土地利用生态风险指数
Tab. 5 Land use ecological risk index of Wensu Oasis in different research periods

景观类型	脆弱度	1990 年					2000 年				
		破碎度	分离度	优势度	干扰度	损失度	破碎度	分离度	优势度	干扰度	损失度
耕地	0.19	0.010 3	0.187 4	0.111 4	0.372 7	0.070 8	0.005 2	0.121 3	0.098 0	0.337 0	0.064 0
林地	0.10	0.024 7	0.563 1	0.060 3	0.441 6	0.044 2	0.018 0	0.411 1	0.076 1	0.408 4	0.040 8
草地	0.14	0.004 8	0.052 7	0.395 3	0.613 5	0.085 9	0.003 6	0.046 8	0.372 5	0.588 3	0.082 4
水域	0.24	0.003 4	0.072 8	0.123 8	0.347 4	0.083 4	0.003 3	0.071 3	0.137 3	0.360 3	0.086 5
建设用地	0.05	0.068 9	2.194 2	0.028 5	0.921 2	0.046 1	0.070 9	2.268 9	0.034 6	0.950 7	0.047 5
未利用地	0.29	0.004 5	0.059 7	0.280 8	0.501 0	0.145 3	0.003 9	0.056 3	0.281 5	0.500 3	0.145 1

景观类型	脆弱度	2010 年					2020 年				
		破碎度	分离度	优势度	干扰度	损失度	破碎度	分离度	优势度	干扰度	损失度
耕地	0.19	0.003 5	0.084 5	0.121 1	0.348 2	0.066 2	0.003 0	0.072 7	0.128 6	0.351 9	0.066 9
林地	0.10	0.030 0	0.722 0	0.079 7	0.511 3	0.051 1	0.030 5	0.738 3	0.078 9	0.515 6	0.051 6
草地	0.14	0.002 9	0.043 3	0.345 5	0.559 9	0.078 4	0.003 1	0.048 0	0.309 3	0.525 3	0.073 5
水域	0.24	0.007 8	0.214 1	0.073 6	0.341 8	0.082 0	0.007 0	0.176 8	0.088 6	0.345 1	0.082 8
建设用地	0.05	0.060 6	1.607 5	0.063 5	0.776 0	0.038 8	0.044 9	1.166 9	0.066 9	0.639 4	0.032 0
未利用地	0.29	0.001 9	0.033 6	0.316 5	0.527 6	0.153 0	0.001 9	0.032 9	0.327 7	0.538 6	0.156 2

从优势度指数分析,近 30 年间草地和未利用地占据优势地位,耕地和水域次之,林地和建设用地最弱。建设用地的优势度变化最明显,从 0.028 5 上升到 0.066 9。草地的优势度变化呈下降趋势,从 0.395 3 下降到 0.309 3。30 年来,温宿绿洲从 1990 年单一的土地利用类型(草地和未利用地)逐步发展,到 2020 年使得土地利用类型多样化,提升了景观优势度。

从干扰度指数分析,各土地利用类型均易受人类活动影响,其中建设用地最明显,1990 和 2000 年分别为 0.921 2 和 0.950 7,是不同土地利用类型的最大值。未利用地和草地相较于其他类型较高。耕地呈下降趋势,林地呈上升趋势,水域相对较为稳定。

从损失度指数分析,近 30 年来温宿绿洲未利用地受外部环境干扰和损失度始终最大(均大于 0.1),建设用地最小(仅 0.032 0)。耕地,草地和建设用地的损失度呈下降趋势,林地呈上升趋势,未利用地和水域基本不变。

2.2.2 土地利用生态风险空间演变分析

本文利用自然断点法对温宿绿洲土地利用生态风险指数(ERI)进行分级^[22]: $ERI < 0.025$,低风险区; $0.025 \leq ERI < 0.035$,较低风险区; $0.035 \leq ERI < 0.045$,中等风险区; $0.045 \leq ERI < 0.055$,较

高风险区; $ERI \geq 0.055$,高风险区。近 30 年间,温宿绿洲土地利用生态风险空间分布及面积见图 8 和表 6。

温宿绿洲低风险区的土地面积有缩减:从 1990 年的 485.51 km² 下降到 2020 年的 406.53 km²,这种缓慢缩减可能与绿洲边缘地带防护林带退化有关。较低风险区面积整体呈减少趋势,从 1990 年的 2 935.36 km² 下降到 2000 年的 2 750.11 km²;2010 年前的低风险区主要分布在中上和 中下部,2000—2010 年则在西北部呈大面积扩张,面积达到最大(3 289.06 km²),这可能与同期实施的退耕还林工程产生短期生态效益相关,随后低风险区在西北部呈缩减趋势。

温宿绿洲中等风险区面积呈增加趋势,从 1990 年的 2 429.86 km² 增加到 2020 年的 3 542.21 km²,增加了 1 112.35 km²,占比增加了 7.78%,在南部和西南部扩张明显,这与耕地扩张区高度重叠,表明农业开发导致的土地覆被单一化加剧了生态风险。较高风险区面积呈减少趋势,从 1990 年的 3 575.86 km² 下降到 2020 年的 1 821.15 km²,减少了 1 754.71 km²,占比减少了 12.26%;2000—2010 年,较高风险区在温宿绿洲北部发生大量缩减,从 2000 年的 3 577.27 km² 下降到 2010 年的 1 938.84 km²,下降了 1 638.43 km²,分布较分散。

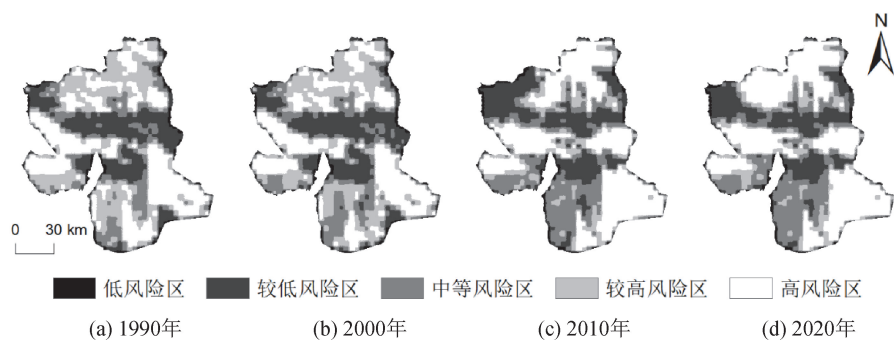


图 8 不同研究时期温宿绿洲土地利用生态风险等级空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of land use ecological risk levels in Wensu Oasis in different research periods

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改。

表 6 不同研究时期温宿绿洲土地利用生态风险等级面积统计

Tab. 6 Statistical analysis of land use ecological risk level area in Wensu Oasis in different research periods

土地利用生态风险等级	面积/km ²			
	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
低风险区	485.51	483.80	446.23	406.53
较低风险区	2 935.36	3 006.69	3 289.06	2 750.11
中风险区	2 429.86	2 820.21	3 311.52	3 542.21
较高风险区	3 575.86	3 577.27	1 938.84	1 821.15
高风险区	4 888.79	4 426.92	5 330.37	5 795.94
总计	14 315.38	14 314.89	14 316.01	14 315.94

温宿绿洲高风险区面积占温宿绿洲总面积的比例最高,且呈增加趋势,从 1990 年的 4 888.79 km² 上升到 2020 年的 5 795.94 km²,增加了 907.15 km²,占比增加 6.34%。高风险区面积在 1990—2000 年有缩减,减少了 461.87 km²,但在随后均呈扩张趋势,主要扩张区域分布在北部,中部和东南部。温宿绿洲的生态环境在 2000—2010 年间发生恶化,从 2000 年的 4 426.92 km² 增加到 5 330.37 km²,增加了 903.45 km²,主要分布在东南部和北部,这与中部城镇扩张导致的生态空间破碎化及气温升高导致冰川融水增加进而使地表过程紊乱存在相关性。

总的来说,土地利用生态风险格局演变的转折点(2000 年、2010 年)与区域重大生态政策实施节点吻合。2000 年前后,新疆实行“提高单产与扩大耕地面积并举”,通过大规模水利设施建设、膜下滴灌技术推广及地下水开发实现农业扩张,但同期生态用水遭受挤压、耕地扩张导致绿洲景观单一化,加剧了水土资源矛盾与生态风险^[23]。而 2010 年后高风险区扩张趋缓可能得益于水资源管理、生态红线政策对土地开发的刚性约束。

2.2.3 土地利用生态风险驱动因素分析

土地利用生态风险的时空变化受自然和社会经

济等因素影响^[11]。按照科学性、完备性、动态性以及数据的可获取性原则,参考相关成果^[17-18],结合温宿绿洲的地形、自然因素以及社会经济发展等情况,选取 7 个影响因子:地形选取高程、坡度共 2 个影响因子,自然因素选取年均气温、年降雨量、归一化植被指数共 3 个影响因子,社会经济因素选取人口数量、GDP 共 2 个影响因子。采用地理探测器模型分析影响 1990—2020 年温宿绿洲生态风险空间分异的主要驱动因素^[22],不同驱动因素对应的贡献量(q 值)见表 7。

1990 年,归一化植被指数(NDVI)、年降雨量、人口数量和 GDP 的贡献量均大于 0.90,说明这 4 个因素在该时期是影响土地利用生态风险的主要因素。2000 年和 2010 年,自然因素对土地利用生态风险的影响力不断增强,其中,年均气温和高程的贡献量均达到 0.75 以上,年降雨量在 2010 年达到 1.00;而社会经济因素的影响呈现下降趋势,人口数量从 1990 年的 0.94 下降到 2010 年的 0.90,GDP 从 1990 年的 0.95 下降到 2010 年的 0.91。2020 年,自然因素的影响力大体呈现上升趋势,仅降雨量的贡献量由 2010 年的 1.00 下降至 0.83,社会经济因素的贡献量发生大幅度下降,人口数量和 GDP 的

贡献量均下降至 0.73 以下。近 30 年间,NDVI 始终保持较高的贡献量(≥ 0.95),说明其是影响温宿绿洲土地利用生态风险的直接因素。近 30 年来,

随着时间推移,社会经济因素对温宿绿洲土地利用生态风险的影响不断弱化,而自然因素的影响不断增强。

表 7 不同研究时期温宿绿洲土地利用生态风险驱动因素及贡献量

Tab. 7 Land use ecological risk driving factors and contribution in Wensu Oasis in different research periods

年份	驱动因素的贡献量						
	人口数量	GDP	年均气温	年降雨量	高程	坡度	归一化植被指数(NDVI)
1990 年	0.94	0.95	0.76	0.99	0.82	0.54	0.95
2000 年	0.94	0.96	0.77	1.00	0.82	0.56	0.97
2010 年	0.90	0.91	0.80	1.00	0.83	0.63	0.98
2020 年	0.67	0.73	1.00	0.83	0.84	0.64	0.99

3 讨 论

作为南疆典型的人工绿洲,温宿绿洲近 30 年来的土地利用变化及其生态风险时空演变特征代表了干旱区绿洲发展中的普遍性与特殊性。本文研究结果表明,未利用地面积大幅增长与水域面积急剧缩减是温宿绿洲最显著的变化趋势,尤其在 2000—2010 年表现最为剧烈,这可能与塔里木河流域处于耕地开发时期有关^[24]。此外,这些变化趋势与同处在新疆塔里木盆地的喀什噶尔河流域^[6]、和田河流域^[4]及和田地区^[25]等地相似,研究表明这些地区的绿洲扩张普遍以耕地和建设用地面积增长为特征,同时伴随草地、水域等面积的持续缩减。此外,温宿绿洲的未利用地扩张规模显著高于其他绿洲,可能与当地独特的冰川融水补给减少及土壤盐渍化加剧有关,这进一步凸显了气候变化对干旱区绿洲的差异化影响^[20]。近 30 年间,温宿绿洲未利用地、耕地和建设用地的单一土地利用动态度均为正值,且建设用地的动态度最大,说明其状态变化最剧烈,这与乌伦古河绿洲^[26]等地的变化趋势一致。此外,温宿绿洲的综合土地利用动态度随时间推移呈先增后减趋势,且在 2000—2010 年的变化最剧烈,但近 30 年间的土地利用变化较为稳定,这与石河子绿洲^[27]的研究相似。

人类活动是影响旱区土地利用变化的重要驱动力之一。为应对绿洲人口增长所带来的粮食需求,大量非耕地被转换为耕地以满足粮食需求。温宿绿洲近 30 年间的农业发展与经济发展等人类活动因素在影响土地利用面积变化方面发挥主要作用,这与新疆策勒绿洲相似,其中粮食产量和棉花产量对耕地(0.84)、草地(-1.99)和未利用地(2.73)面积变化的影响较大。这表明随着人口增加和城镇化进程加快,温宿绿洲对耕地的需求增加,促使当地将草地、未利用地和水域等地类被转换为耕地,从而满足

粮食需求和促进区域经济可持续发展。

土地利用生态风险的空间分异特征进一步揭示了绿洲发展的矛盾性。本研究分析温宿绿洲土地利用生态风险发现,中等风险区和高风险区在 2000—2010 年的面积显著增加,与当地土地利用发生剧烈变化时段一致,这与新疆叶尔羌河流域等^[28]的研究结果一致。另外,中等风险区向温宿绿洲南部农业扩张区集中,高风险区向北部山区扩张,这与当地土地利用单一化导致的景观破碎化及冰川消融、萎缩引发的地表过程紊乱^[20]相关。尽管 2010 年之后,水资源管理和生态红线等政策实施一定程度上抑制了高风险区的扩张速率,但未利用地持续增长仍导致生态恢复的脆弱性。此外,与张掖绿洲^[29]相比,温宿绿洲高风险区面积占比更高,凸显南疆绿洲生态保护的紧迫性。随着研究时间推移,温宿绿洲的自然因素(如年降雨量、年均气温等)对土地利用生态风险影响的贡献量逐渐增加,而社会经济因素(如人口数量、GDP 等)对土地利用生态风险的影响减弱,这也表明气候变化对旱区绿洲土地利用生态风险的潜在长期影响,这与段峥嵘等^[16]在阿克苏绿洲的研究结论相似。此外,归一化植被指数(NDVI)始终是影响土地利用生态风险的关键因素,这说明植被覆盖对维持旱区生态平衡的重要性^[30]。

4 结 论

本文以温宿绿洲为南疆代表性人工绿洲,研究了 1990—2020 年温宿绿洲土地利用变化特征,并对其驱动因素进行解析,同时预测了 2025 年和 2030 年温宿绿洲土地利用格局,并评估了温宿绿洲近 30 年的土地利用生态风险及驱动因素,主要结论如下。

1) 温宿绿洲土地利用面积变化剧烈,主要呈现耕地、建设用地、未利用地增加,草地、林地、水域减少的特征,其中未利用地和水域的面积变化最大,且

2000—2010 年为变化最剧烈时段。

2) 温宿绿洲不同地带类间转换频繁,北部山区的水域转为大量未利用地,草地和未利用地间的转换剧烈,主要集中在研究区中部和东南部;耕地和建设用地主要由草地转入,集中在南部和西南部;南部山区的小部分林地转为草地。影响土地利用变化的主要驱动因素为第二产业增加值、棉花产量、粮食产量等人为因素。

3) CA-Markov 模拟结果表明,2020—2025、2020—2030 年,温宿绿洲土地利用变化主要特征为未利用地面积的持续缩减,水域面积的持续增加。

4) 分析温宿绿洲土地利用生态风险可知,中等风险区面积和高风险区面积增加幅度较大,中等风险区主要向南部和西南部扩张,高风险区向北部和东南部扩张,且社会经济因素对生态风险变化的影响不断弱化,自然因素的影响不断增强。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,陈忠升. 干旱区绿洲演变与适宜发展规模研究——以塔里木河流域为例[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 134-140.
Chen Yaning, Chen Zhongsheng. Analysis of oasis evolution and suitable development scale for arid regions: a case study of the Tarim River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 134-140.
- [2] Chen Yaning, Fang Gonghuan, Li Zhi, et al. The crisis in oases: research on ecological security and sustainable development in arid regions[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2024, 49: 1-20.
- [3] 马丽娜,张飞云,翟玉鑫,等. 1980—2020 年新疆土地利用变化下生态系统服务价值时空演变分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 253-263.
Ma Li'na, Zhang Feiyun, Zhai Yuxin, et al. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value under land use change in Xinjiang from 1980 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 253-263.
- [4] An Baisong, Wang Xuemei, Huang Xiaoyu. Changing characteristics, driving factors and future predictions of land use in the Weigan-Kuqa River Delta Oasis, China[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 29318.
- [5] 昆比克·巴合吐尔汗,居麦尼亚孜·赛迪艾合麦提,满苏尔·沙比提,等. 新疆于田县 20a 土地利用和覆被变化及预测[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(2): 116-122.
Kunbike Bahetuerhan, Jumeniyaz Seydehmet, Mansuer Shabiti, et al. Land use and cover change and their simulation in Yutian County, Xinjiang in the past 20 years[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(2): 116-122.
- [6] 常雪儿,汪洋,甄慧,等. 1990—2018 年新疆喀什噶尔河流域土地利用/覆被变化空间耦合及其生态效应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(3): 596-607.
Chang Xue-er, Wang Yang, Zhen Hui, et al. Spatial couple of land use/cover changes and its consequence for ecological systems in Kaxgar River Basin in Xinjiang from 1990 to 2018[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(3): 596-607.
- [7] Sun Fan, Wang Yi, Chen Yaning, et al. Historic and simulated desert-oasis ecotone changes in the arid Tarim River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 647.
- [8] 高宇婷,于洋,孙凌霄,等. 塔里木盆地南缘绿洲土地覆盖变化及驱动力[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1172-1183.
Gao Yuting, Yu Yang, Sun Lingxiao, et al. Land coverage change and driving forces of an oasis in the southern margin of Tarim Basin [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1172-1183.
- [9] Tan Zhe, Guan Qingyu, Lin Jinkuo, et al. The response and simulation of ecosystem services value to land use/land cover in an oasis, Northwest China[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106711.
- [10] 陈乐,卫伟. 西北旱区典型流域土地利用与生境质量的时空演变特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1909-1918.
Chen Le, Wei Wei. Spatiotemporal changes in land use and habitat quality in a typical dryland watershed of northwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(9): 1909-1918.
- [11] 阿不都艾尼·阿不力孜,任强,王义成,等. 塔里木河流域绿洲水土资源匹配特征及稳定性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2022, 20(1): 71-78.
Abuduaini Abulizi, Ren Qiang, Wang Yicheng, et al. Analysis on the matching characteristics and stability of oasis water and land resources in the Tarim river basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(1): 71-78.
- [12] 王敏,胡守庚,张绪冰,等. 干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析——以张掖绿洲乡镇为例[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5812-5824.
Wang Min, Hu Shougeng, Zhang Xubing, et al. Spatio-temporal evolution of landscape ecological risk in oasis cities and towns of arid area: a case study of Zhangye Oasis Township[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5812-5824.
- [13] 娄佳乐,党晓宏,蒙仲举,等. 1986—2020 年黄河流域十大孔兑土地利用变化及驱动力分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 319-327, 336.
Lou Jiale, Dang Xiaohong, Meng Zhongju, et al. Land use change and driving force analysis of Ten Tributaries Basin in the Yellow River Basin from 1986 to 2020 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 319-327, 336.
- [14] 彭文君,舒英格. 基于 GIS 的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 342-348, 355.
Peng Wenjun, Shu Yingge. Assessment on ecological risk of land use spatial change at county level in the rocky desertification mountainous area based on GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25

- (1): 342-348,355.
- [15] 郭瑞,刘蔚,李宗省,等. 祁连山甘肃片区土地利用变化特征及驱动力[J]. 中国沙漠,2023,43(3):188-198.
Guo Rui, Liu Wei, Li Zongxing, et al. An analysis on the land use change characteristics and driving forces in Gansu part of the Qilian Mountain[J]. Journal of Desert Research, 2023,43 (3):188-198.
- [16] 段峥嵘,祖拜代·木依布拉,夏建新,等. 近 25 年阿克苏绿洲土地利用时空变化及其驱动力分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26 (2):413-426.
Duan Zhengrong, Zubaidai Muyibula, Xia Jianxin, et al. Land use/cover temporal-spatial change and driving force study in Aksu Oasis during the last 25 years[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26 (2): 413-426.
- [17] 王俊智,张永福. 干旱绿洲区土地利用生态风险分析及预测—以沙雅县为例[J]. 广东农业科学,2015,42 (22):125-130,F0002.
Wang Junzhi, Zhang Yongfu. Analysis and prediction on ecological risk of land use in arid oasis areas—a case study of Shaya County[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(22): 125-130, F0002.
- [18] 程静,王鹏,陈红翔,等. 半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测——以宁夏盐池县为例[J]. 干旱区地理,2022,45(5):1637-1648.
Cheng Jing, Wang Peng, Chen Hongxiang, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions: a case of Yanchi County in Ningxia [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1637-1648.
- [19] 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.
- [20] 李艳菊,丁建丽,张钧泳,等. 2001-2015 年天山北坡植被覆盖对干旱的响应——基于土地利用/土地覆盖分析[J]. 生态学报,2019,39(17):6206-6217.
Li Yanju, Ding Jianli, Zhang Junyong, et al. Response of vegetation cover to drought in the northern slope of the Tianshan Mountains during 2001—2015 based on the land-use and land-cover change[J]. Acta Ecological Sinica, 2019, 39(17):6206-6217.
- [21] 郭冰倩,赵选,刘伟国. 杨凌示范区土地利用变化时空特征及趋势预测[J]. 西安理工大学学报,2024,40 (2):173-181.
Guo Bingqian, Zhao Xuan, Liu Weiguo. Spatio-temporal characteristics and trend prediction of land-use change in Yangling Demonstration Zone[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2): 173-181.
- [22] 孙丽蓉,周冬梅,岑国璋,等. 基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J]. 干旱区地理,2021,44 (5):1384-1395.
Sun Lirong, Zhou Dongmei, Cen Guozhang, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors of the Shule River Basin based on the geographic detector model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44 (5): 1384-1395.
- [23] 樊自立,吴世新,吴莹,等. 新中国成立以来的新疆土地开发[J]. 自然资源学报,2013,28(5):713-720.
Fan Zili, Wu Shixin, Wu Ying, et al. The land reclamation in Xinjiang since the founding of new China[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28 (5):713-720.
- [24] 王悦,蒋志辉,褚家琦,等. 塔里木河流域农业水土资源时空匹配关系研究[J]. 农业资源与环境学报,2024,41 (2):360-370.
Wang Yue, Jiang Zhihui, Chu Jiaqi, et al. Study on the spatiotemporal matching relationship of agricultural water and land resources in the Tarim River basin[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2):360-370.
- [25] 胡翔,聂勇,徐霞,等. 塔里木盆地南缘和田地区土地利用变化的遥感研究[J]. 地理科学进展,2020,39 (4):577-590.
Hu Xu, Nie Yong, Xu Xia, et al. Monitoring land-use change in Hetian Tarim Basin, China using satellite remote sensing observation between 1990 and 2016[J]. Progress in Geography, 2020, 39(4):577-590.
- [26] 李小明,蒲智,唐芳. 乌伦古河流域土地利用动态变化分析[J]. 湖北农业科学,2022,61(4):43-48.
Li Xiaoyu, Pu Zhi, Tang Fang. Analysis on dynamic change of land use in Wulungu river basin[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(4): 43-48.
- [27] 李长晓,范文波,张建新,等. 基于 CA-Markov 模型的石河子垦区土地利用变化及预测[J]. 新疆农业科学,2022,59 (10):2585-2594.
Li Changxiao, Fan Wenbo, Zhang Jianxin, et al. Change and prediction of the land use in Shihezi reclamation area based on CA-Markov model[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(10):2585-2594.
- [28] 司琪,樊浩然,董文明,等. 新疆叶尔羌河流域景观生态风险评价及预测[J]. 干旱区研究,2024,41 (4):684-696.
Si Qi, Fan Haoran, Dong Wenming, et al. Landscape ecological risk assessment and prediction for the Yarkant River Basin, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 684-696.
- [29] 卢调雪,杨林山,冯起,等. 近 20 年张掖盆地绿洲结构和规模变化及其影响因素[J]. 中国沙漠,2023,43 (6):131-141.
Lu Tiaoxue, Yang Linshan, Feng Qi, et al. The change of oasis structure/scale and its influencing factors in Zhangye Basin in recent 20 years[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(6): 131-141.
- [30] 李路,孙桂丽,陆海燕,等. 喀什绿洲土地利用空间格局变化特征分析[J]. 西南大学学报(自然科学版),2020,42 (5):141-150.
Li Lu, Sun Guili, Lu Haiyan, et al. Analysis of dynamic change characteristics of land use spatial pattern in Kashgar Oasis[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(5): 141-150.

(责任编辑 王绪迪)