1988—2018 年哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力

高鹏文[1]，阿里木江·卡斯木[1,2]，赵永玉[1]，
图尔荪阿依·如孜[1]，赵禾苗[1]，哈力木拉提·阿布来提[1]

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 新疆师范大学 丝绸之路经济带城镇化发展研究中心，新疆 乌鲁木齐 830054)

摘　要：[目的] 对近 30 a 来哈密绿洲植被覆盖度时空变化及驱动力进行分析，为该地区绿洲持续健康发展提供理论借鉴。[方法] 以 1988，1998，2008 及 2018 年 4 期影像为基础数据，利用像元二分模型计算了基于 $AFRI_{SWIR_2}$ 指数提取的植被覆盖度，利用动态度指数与植被覆盖度转移矩阵分析哈密绿洲植被覆盖度动态变化；再通过地理探测器对 8 个影响因子进行探测，探寻哈密绿洲植被覆盖度的驱动因子。[结果] 近 30 a 来哈密绿洲面积从 1988 年的 214 km^2 增长到 2018 年的 632.1 km^2，增幅达 195%，但绿洲内植被覆盖度等级却较低，同时哈密绿洲面积主要扩展的区域在西北部和东南部区域；哈密绿洲的发展阶段可分为 3 个阶段：1988—1998 年为低强度稳定期，1998—2008 年为极度扩张期，2008—2018 年为高强度稳定期。[结论] 土地利用类型变化是造成哈密绿洲植被覆盖度变化的直接原因，同时在近 30 a 内，人为因素对哈密绿洲植被覆盖状况的影响远高于自然因素。

关键词：植被覆盖度；像元二分模型；地理探测器；哈密绿洲

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)06-0273-08　　**中图分类号**：S157.1；TP79

文献参数：高鹏文，阿里木江·卡斯木，赵永玉，等. 1988—2018 年哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报，2020，40(6)：273-280. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.039；Gao Pengwen，Kasim·Alimujiang，Zhao Yongyu，et al. Spatial and temporal changes and driving forces of vegetation coverage in Hami Oasis during 1988—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(6)：273-280.

Spatial and Temporal Changes and Driving Forces of Vegetation Coverage in Hami Oasis During 1988—2018

Gao Pengwen[1]，Kasim·Alimujiang[1,2]，Zhao Yongyu[1]，
Ruzi·Tursunayi[1]，Zhao Hemiao[1]，Halimulati·Abulaiti[1]

(1. *College of Geographical Science and Tourism，Xinjiang Normal University，Urumqi，Xinjiang* 830054，*China*；2. *Research Center of Urbanization Development of Silk Road Economic Belt，Xinjiang Normal University，Urumqi，Xinjiang* 830054，*China*)

Abstract：[Objective] The temporal and spatial changes and driving forces of vegetation coverage in Hami Oasis in the past 30 years were analyzed in order to provide theoretical reference for the sustainable and healthy development of oasis in this area. [Methods] Based on the 4 images of 1988，1998，2008 and 2018，the vegetation coverage extracted from the $AFRI_{SWIR_2}$ index was calculated using the pixel binary model. The vegetation coverage of Hami Oasis was analyzed using the dynamic index and the vegetation coverage transfer matrix. Then，8 influencing factors were detected by the geographic detector，to explore the driving factors of the vegetation coverage of Hami Oasis. [Results] In the past 30 years，the area of Hami Oasis increased from 214 km^2 in 1988 to 632.1 km^2 in 2018，with increase range of 195%. The development speed was relatively fast，but the level of vegetation coverage in the oasis was low. At the same time，the main expansion area was in the northwest and southeast regions. The development stage was defined as follows：1988—1998 was the low-strength stable period，1998—2008 was the period of extreme expansion，and 2008—2018 was

收稿日期：2020-07-07　　**修回日期**：2020-09-17

资助项目：国家自然科学基金项目“一带一路”新疆段城镇景观格局变化及生态安全评价(41661037)；自治区研究生科研创新项目(XJ2020G237)

第一作者：高鹏文(1995—)，男(汉族)，新疆维吾儿自治区哈密市人，硕士研究生，研究方向为资源环境遥感。Email：1185589831@qq.com。

通讯作者：阿里木江·卡斯木(1976—)，男(维吾尔族)，新疆维吾儿自治区克拉玛依市人，博士，教授，主要从事环境遥感方面的研究。Email：alimkasim@xjnu.edu.cn。

the high-strength stable period. [Conclusion] The change of land use type is the direct cause of the change of vegetation coverage in Hami Oasis. At the same time, in the past 30 years, the influence of human factors on vegetation coverage of Hami Oasis is much higher than natural factors.

Keywords: vegetation coverage; pixel binary model; geodetector; Hami Oasis

绿洲是干旱区水系分布不均及空间降水量不平衡共同作用下形成的特殊地理单元[1-3]，因为土壤、湿度、地形等因素的共同影响下，绿洲成为干旱区内对生命系统承载力较高的，人类生产生活聚集地[4-6]。干旱区内的主要景观类型是荒漠，而绿洲的出现改变了这种格局，故绿洲化与荒漠化是一个相互博弈的过程，为防范过渡荒漠化就必须研究绿洲形成的机理，绿洲扩展的方式及驱动力[7-10]。目前国内对于绿洲的研究多在石羊河流域[11]、黑河流域[12]、疏勒河流域[13-14]、艾比湖流域[15]、玛纳斯河流域[16]、和田河流域[17]等，由此可见绿洲大多发源于大河流域，其研究主要为土地利用变化[18-20]、荒漠化与绿洲化[21-22]、绿洲时空演变[23]，植被覆盖度的变化对于绿洲生态系统稳定作用明显[25]。植被覆盖度的反演研究对于区域内土壤、水文及生态有重要意义[26]。对于植被覆盖度的研究国内外研究较为深入，也出现了大量研究方法[27]，其中像元二分模型估算植被覆盖度又是较为常用且有效的方法[28]。因此本文从干旱区绿洲大背景出发，利用像元二分模型计算哈密绿洲植被覆盖度，从而找寻干旱区哈密绿洲发展规律，分析内在驱动因素。哈密绿洲是干旱区内相对独立的绿洲，因此没有条件形成大片绿洲群，同时该地区为典型的温带大陆性气候，夏季炎热少雨，冬季寒冷干燥，仅有的哈密河也在 21 世纪初下游已经干涸，因此探讨哈密绿洲的植被覆盖度变化以此间接了解哈密绿洲生态环境状况，从自然与人文两个角度共同探寻哈密绿洲变化的内在驱动力，为该地区持续健康发展提供理论借鉴。

1 研究区概况

哈密绿洲位于新疆维吾尔自治区东部，也是内地省份进入新疆的第一片绿洲，属于哈密市伊州区行政管辖。哈密绿洲南侧为大片荒漠戈壁，北侧为是东天山南部的洪积扇。因地处干旱区，属于典型的温带大陆性干旱气候。昼夜温差大，最大日较差 26.7 ℃，年均气温仅有 9.8 ℃，年均降水量仅有 33.8 mm，同时蒸发量却高达 3 300 mm，气候干燥。哈密绿洲内有哈密河流经，但常年处于干涸状态，主要水源由地表水（降水、降雪）和地下水（东天山冰川融化）两部分提供。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究数据主要为 3 部分：①遥感影像数据。选取了 1988，1998，2008 年 Landsat TM 数据和 2018 年的 Landsat OLI 数据（https://www.usgs.gov/），获取时间分别为 7 月 24 日，8 月 7 日，7 月 29 日及 7 月 20 日。再进行几何校正、辐射定标、大气校正等步骤消除大气对于植被覆盖度计算时的影响，再对其拼接裁剪，得到绿洲植被覆盖度影像。②空间数据。从资源环境云平台（http://www.resdc.cn/）获取 DEM、人口密度、GDP、温度、降水和土地利用栅格数据。统一重采样至 30 m，重分类为 5 类。③基础地理信息数据。从国家地理信息中心获取 1∶100 万的地理信息数据，选取道路及水系。先对获取的道路与水系两种矢量数据转换坐标系，依据研究区图裁剪需要的范围，再对处理后数据做核密度分析。之后再转栅格依据，同时重采样至 30 m，最后利用自然断点法分成 5 类。

2.2 植被指数选择

众多学者对全球 40 多种植被指数进行了比较，高志海[29]综合比较结果显示归一化植被指数（NDVI）与全球环境监测指数（GEMI）能够反映民勤绿洲的总体情况，而盛莉[30]等人采用去气溶胶植被指数（AFRI）代替 NDVI，较为有效地排除了气溶胶对植被覆盖度提取的干扰，并取得了较好的结果，同时滑永春[31]等人通过试验发现 $AFRI_{WIR_2}$ 在干旱区内对于植被覆盖度的提取效果好于 $AFRI_{SWR_1}$，因此本文选择 $AFRI_{SWIR_2}$ 指数来提取哈密绿洲植被覆盖度。

$$ARVI=(NIR-RB)/(NIR+RB) \quad (1)$$

$$RB=red-\gamma(blue-red) \quad (2)$$

$$AFRI_{SWIR_2}=(NIR-0.5WIR_2)/(NIR+0.5SWIR_2) \quad (3)$$

式中：NRI，red，blue 分别为 Landsat 影像近红外、红色、蓝色波段的反射率；γ 为大气光路修订系数，取值为 1；$SWIR_2$ 为 TM 及 OLI 影像的第 7 波段。

2.3 像元二分模型

采用像元二分模型估算植被覆盖度，该模型也是较为简单实用且被大量印证过得模型，其原理为：假定有植被覆盖度与无植被覆盖度的区域共为一个像

元 S,如全部覆盖植被则表示 S_{veg},全部覆盖土壤则表示 S_{soil}。由此可得植被覆盖度公式:

$$S=S_{veg}+S_{soil} \tag{4}$$

通过推到得出基于 $AFRI_{SWIR_2}$ 指数的植被覆盖度公式:

$$FVC=\frac{AFRI-AFRI_{min}}{AFRI_{max}-AFRI_{min}} \tag{5}$$

式中:FVC 为植被覆盖度;$AFRI_{max}$,$AFRI_{min}$ 表示 $AFRI_{SWIR_2}$ 影像中纯植被像元值与纯裸地像元值。

理论上 $AFRI_{min}$ 值近似为 0,但由实际地理环境影响,不同研究区内需依照实际情况进行取值[32-34]。图 1 为哈密绿洲 $AFRI_{SWIR_2}$ 累计频率,分别选择累计频率为 10%与 95%的值为 $AFRI_{min}$ 和 $AFRI_{max}$ 值[26]。

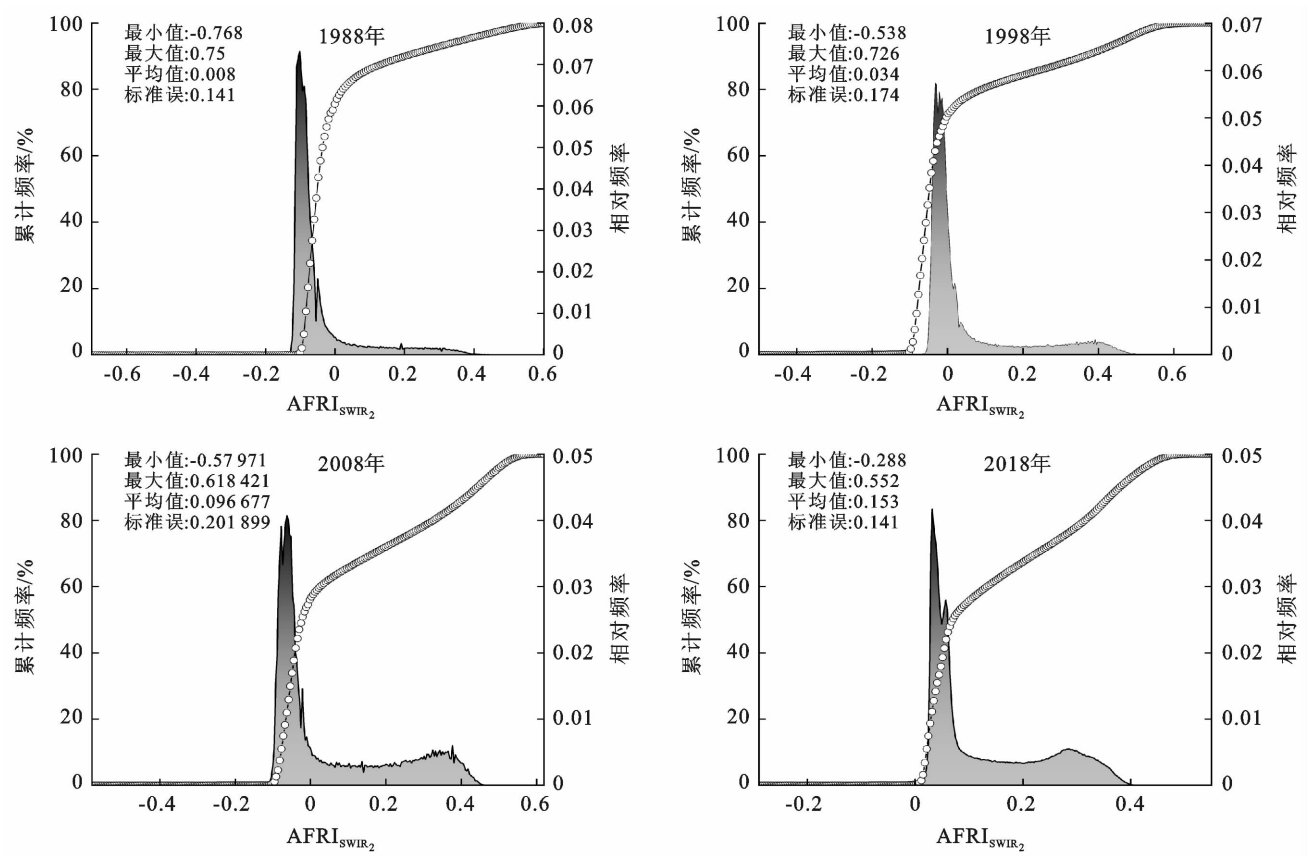


图 1　哈密绿洲去气溶胶植被指数 $AFRI_{SWIR_2}$ 频率直方图与累计频率

2.4　植被覆盖度动态度

研究期内哈密绿洲植被覆盖度不同等级面积动态变化,可以用动态度表示,具体为:

$$K=\frac{D_e-D_s}{D_S}\times\left(\frac{1}{T}\right)\times 100\% \tag{6}$$

式中:T 为研究时间段;D_s,D_e 分别表示研究初期及末期植被覆盖度面积。在本文表示为绿洲的扩张程度,$K>0$ 表示绿洲扩张,$K<0$ 表示绿洲萎缩,K 的绝对值越大表示越剧烈。

2.5　植被覆盖度分级

本文依据国家《土地利用现状调查技术规程》《草场资源调查技术规范》《土壤侵蚀分类分级标准》及《中国荒漠化防治国家报告》,再结合朱震达等人[35]的研究,将哈密绿洲的植被覆盖度分成 5 个等级,分别是极低植被覆盖度(覆盖度<10%)、低植被覆盖度(覆盖度 10%～30%)、中植被覆盖度(覆盖度 30%～50%)、中高植被覆盖度(覆盖度 50%～70%)、高植被覆盖度(覆盖度 70%～100%)。

2.6　地理探测器

地理探测器是用来度量地理现象及其潜在影响因子关系的空间分析模型,其不仅能较好的表达同一区域内的相似性和不同区域间的差异性,也可解释自变量 X 对因变量 Y 的解释强度[36]。

因子探测器可计算不同因子对生态质量时空变化分异性,以及探测其影响程度大小,计算公式为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{7}$$

式中:N 为研究区全部样本数;σ^2 为整个区域 Y 值的离散方差;h 为变量 Y 或因子 X 的分区,$h=1,2,\cdots,L$;L 表示分区数目;q 为绿洲生态质量的空间异质性,值域范围为[0,1],若分区是由自变量 X 生成的,

则 q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强，反之则越弱。

交互作用探测为判断不同影响因子之间的交互作用，即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加还是减弱对生境质量的解释力，两个因子之间的关系详见表 1—2。

表 1 两个自变量对因变量交互作用的类型

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = [q(X_1) + q(X_2)]$	独 立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

生态探测用于比较两两因子对生态质量的空间分布的影响是否具有有显著的差异：

$$F = \frac{N_{X_1}(N_{X_2}-1)\mathrm{SSW}_{X_1}}{N_{X_2}(N_{X_1}-1)\mathrm{SSW}_{X_2}} \tag{8}$$

式中：N_{X_1}，N_{X_2} 分别表示因子 X_1 和 X_2 的样本数量；SSW_{X_1}，SSW_{X_2} 分别表示由 S 和 X_1 形成的分层的层内方差之和。

表 2 哈密绿洲植被覆盖度驱动因子

类 型	分类标准
坡度(X_1)	从 DEM 数据中提取，由自然断点法分为 5 类
GDP(X_2)	由自然断点法分为 5 类
降水(X_3)	由自然断点法分为 5 类
道路(X_4)	核密度分析后由自然断点法分为 5 类
人口密度(X_5)	由自然断点法分为 5 类
温度(X_6)	由自然断点法分为 5 类
水系(X_7)	核密度分析后由自然断点法分为 5 类
土地利用(X_8)	土地利用状况分类(GB/T21010-2017)

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度空间变化特征分析

本文利用 4 期影像计算哈密绿洲近 30 a 植被覆盖度空间变化(图 2)，并对其进行面积统计(表 3)。由此可知 4 个时间段内极低覆盖度面积占比都不足 1%；低覆盖度的面积占比都超过了 50%，说明哈密绿洲总体上低植被覆盖度占主要份额；中覆盖度与中高覆盖度从近 18 a 内呈现增长趋势；高植被覆盖度呈现先增加后减小的总体趋势。①1988—1998 年，极低覆盖度增加了 0.01 km²；而低覆盖度的面积从 1988 年的 1 150.64 km² 降低到 1998 年的 1 049.66 km²，降低了 7.39%；中覆盖度、中高覆盖度及高覆盖度面积占比分别增加了 0.98%，2.24% 和 4.18%。同时从图 2 的 1988 年植被覆盖度中发现面积最大的低覆盖度区域主要在哈密绿洲的西南部及东北部，且中覆盖度、中高覆盖度及高覆盖度的区域沿西北—东南方向的条带状分布。

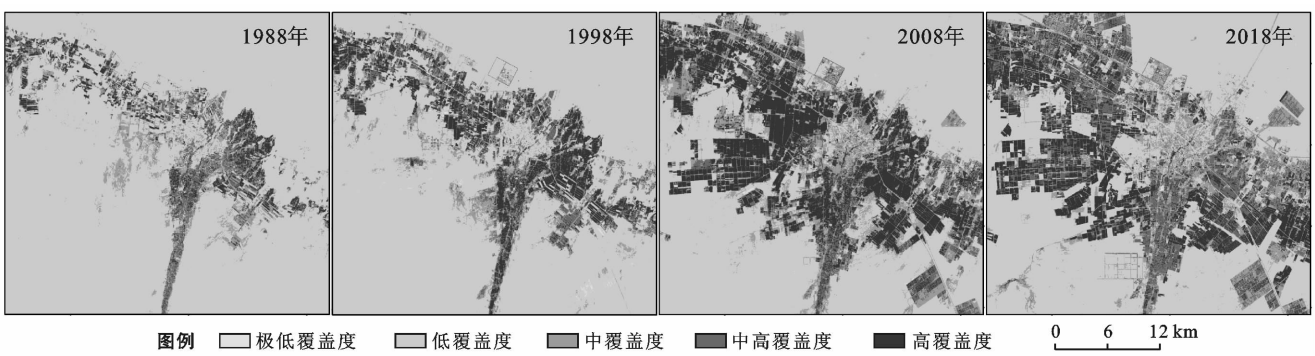


图 2 哈密绿洲植被覆盖度时空变化

表 3 哈密绿洲植被覆盖度面积统计

植被覆盖度等级	1988 年		1998 年		2008 年		2018 年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
极低覆盖度	0.29	0.02	0.30	0.02	0.34	0.02	0.32	0.02
低覆盖度	1 150.64	84.25	1 049.66	76.86	773.40	56.63	733.31	53.69
中覆盖度	102.93	7.54	116.32	8.52	190.26	13.93	214.18	15.68
中高覆盖度	72.42	5.30	102.94	7.54	154.49	11.31	219.96	16.11
高覆盖度	39.46	2.89	96.50	7.07	247.25	18.10	197.97	14.50

从图 2 的 1998 年的植被覆盖度图中可知,中覆盖度、中高覆盖度的分布区域相较于 1988 年没有改变。而高覆盖度变化区域变化明显,主要集中在哈密绿洲的西北部及东南部。②1998—2008 年,极低覆盖度变化不明显,低覆盖度区域面积从 1998 年的 1 049.66 km^2降低到 2008 年的 773.40 km^2,降低了 276.26 km^2,降幅 26.36%。中覆盖度、中高覆盖度及高度盖度区域面积分别增加了 79.34,51.54 及 152.32 km^2。可知在该时间段内,低覆盖度区域面积变化最大,从图 2 的 2008 年植被覆盖度发现,引起该变化的原因是在哈密绿洲的西南部新增了较大的绿洲;同时高覆盖度区域从图 2 的 2008 年植被覆盖度中可知,主要分布在东部和西部。③2008—2018 年,极低植被覆盖度变化依旧不明显,同时低植被覆盖度在该段时间内也仅降低了2.94%,中植被覆盖度与中高植被覆盖度面积分别增加了 23.91 和 65.47 km^2,而高植被覆盖度则首次下降,降幅 3.61%。从图 2 中可知,该段时间内,各植被覆盖度等级变动较小,仅仅是小区域环境下的改动,绿洲增加的区域也仅在原有绿洲的周围扩展,同时可以看到高植被覆盖度的变化区域在绿洲北部接近天山南坡洪积平原前缘的区域。这说明近 10 a 哈密绿洲整体变动较为稳定,绿洲斑块形状趋于固定,变动也仅是从植被覆盖度低的区域向植被覆盖度高的变化。

3.2　绿洲动态度变化分析

经计算可知哈密绿洲植被覆盖度动态度(图 3)1988—1998 年,从极低覆盖度到高覆盖度呈现为先降低后增加的趋势。1998—2008 年,从极低覆盖度到高覆盖度表现为先减小后增加再减小再增加的波动过程。2008—2018 年,从极低覆盖度到高覆盖度呈现出先增加后减小的趋势。由此可知 3 个时间段内,哈密绿洲植被覆盖度不同等级之间出现了 3 种不同方式的变化,其原因在于前 10 a 绿洲空间形态较为稳定,而这种稳定是由于总体面积不大,变化空间小;中间 10 a 间哈密绿洲植被覆盖度不同等级之间面积变化最为剧烈,该过程拌随着不同植被覆盖度等级之间相互转化;最近的 10 a 间,绿洲空间形态也较为稳定,而该稳定是因为总体面积扩大,现有绿洲基本框架基本形成所导致的。分析发现,3 个时期内极低覆盖度的动态度先增加后减少,但结合表 1 可知,3 个时期内该等级的面积基本没变;低覆盖度区域面积的动态度均为负值,表明 3 个时期中低覆盖度区域面积始终在减小,且降幅呈现为先增加后减小趋势。起因在于前 10 a 内低覆盖度区域面积减小较少,而在中间 10 a 内该区域面积变化最为剧烈,在近 10 a 变化较小;中覆盖度区域面积动态度与中高覆盖度区域在 3 个时期内变化一致,均为正向变化,表明面积都在增加,且增加幅度均表现为先增加后降低。但中高覆盖度比中覆盖度区域增幅大;高覆盖度区域的动态度在前两个时期内增速最大,但在近 10 a 内为负方向增长,表明高覆盖度区域面积在近 10 a 降幅较大。

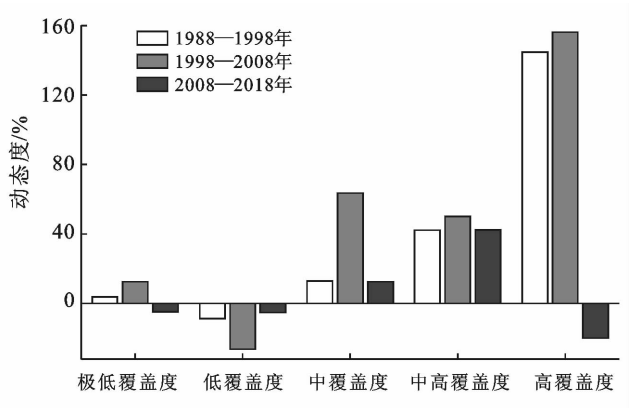


图 3　哈密绿洲植被覆盖度动态度

3.3　哈密绿洲植被覆盖度空间转移分析

为探究哈密绿洲内部不同植被覆盖度之间的相互转化,及判断哈密绿洲近 30 a 变化阶段,本文对 4 期数据做植被覆盖度转移矩阵(表 4—6)。从表 4 可知,1988—1998 年低覆盖度区域转出到中覆盖度、中高覆盖度及高覆盖度区域的面积分别为 71.03,31.70及 20.21 km^2,转出面积占比为 10.68%。由此可知 1988 年低覆盖度区域 89.32%都转入到 1998 年的低覆盖度区域,也表明该时间段内低覆盖度区域面积基本没有转变。中覆盖度区域转入低覆盖度区域面积占比 19%,转入中高覆盖度区域面积所占比例 30%,转入高覆盖度区域面积所占比例 17%,而没有转出的面积占比为 33%。由此可知,中覆盖度区域向覆盖度更高的区域转入比例 47%,所以中覆盖度区域在 1988—1998 年主要向更高的覆盖度区域转变。中高覆盖度及高覆盖度区域也主要是转入到高覆盖度区域内。因此总体上,在 1988—1998 年除低覆盖度区域主要转出区域为自身等级植被覆盖度区域外,其他等级的植被覆盖度区域均向比自身更高的区域转变。但转出的面积较小,不同植被覆盖度等级之间的转化不够显著,转化强度较低。由表 5 可知,1998—2008 年低覆盖度的区域没有转出的面积有 765.83 km^2,占比 73%,而转入到中覆盖度区域、中高覆盖度及高覆盖度的区域面积分别为 135.48,67.87 及 80.13 km^2,所占比例分别为 12%,6%及 7%。由此可知低覆盖度区域在该时间段内变化最剧烈,转出面积

在各等级覆盖度中最多。因此可说明哈密绿洲在该时间段内植被覆盖度的变化主要是低覆盖度区域向更高等级覆盖度区域转变,低覆盖度区域成为哈密绿洲扩展的主要源地。从图 3 的 1998 和 2008 年两期植被覆盖度图中可以发现,低覆盖度区域减少的区域集中在哈密绿洲的西南部区域。中覆盖度区域及中高覆盖度区域转入到比自身高一个等级的面积占比也分别 31%及 55%。究其原因在于哈密绿洲中部的伊州区城区内的植被变化较为复杂,城区周围的植被覆盖度也变化较为活跃,因为在该时间段内哈密绿洲在西部大开发战略实施影响下农业及工业的大力发展。因此总体上在该时间段内,哈密绿洲植被覆盖度总体是从低覆盖度区域向更高覆盖区域转变。也正是这种不同覆盖度等级之间的转变,基本形成了现在哈密绿洲的框架。由此可认为 1988—2008 年是哈密绿洲快速扩展时期,是形成现在绿洲框架的关键时期。由表 6 可知,2008—2018 年低植被覆盖区域无转入,转出的区域仅占 10%。中覆盖度区域既向低覆盖度区域转变,也向高覆盖度区域转入,该等级转出的区域占比 60%,但主要转出依旧是中覆盖度区域。中高覆盖度为变动的面积 68.08 km^2,转入高覆盖度、中覆盖度及低覆盖度的面积分别是 31.93,44.33,10.14 km^2。由此可知中高覆盖度主要的变动还是该区域。高覆盖度转出高覆盖度、中高覆盖度、中覆盖度的面积占比分别为 46%,37%,10%。综上所知,在 2008—2018 年内哈密绿洲的植被覆盖度各等级都未发生较大规模的转出入情况,所以改时间段内哈密绿洲总体扩展较为缓慢,即哈密绿洲空间格局并非在该时间段内形成,而是在 2008 年前已完成该过程,但已形成的绿洲内部各等级之间的转化成为最剧烈的时期。

表 4 哈密绿洲 1988—1998 年植被覆盖度转移矩阵 km^2

植被覆盖度等级		1998 年				
		极低覆盖度	低覆盖度	中覆盖度	中高覆盖度	高覆盖度
1988 年	极低覆盖度	0.04	1.75	0.08	0.01	0.00
	低覆盖度	0.16	1 025.96	19.25	2.80	1.50
	中覆盖度	0.02	71.03	34.27	9.20	1.80
	中高覆盖度	0.04	31.70	31.18	30.26	9.77
	高覆盖度	0.03	20.21	18.14	30.15	26.40

表 5 哈密绿洲 1998—2008 年植被覆盖度转移矩阵 km^2

植被覆盖度等级		2008 年				
		极低覆盖度	低覆盖度	中覆盖度	中高覆盖度	高覆盖度
1998 年	极低覆盖度	0.01	0.30	0.02	0.00	0.00
	低覆盖度	0.20	765.83	6.03	1.03	0.31
	中覆盖度	0.23	135.48	42.07	9.52	2.97
	中高覆盖度	0.41	67.87	36.75	34.91	14.54
	高覆盖度	1.03	80.18	31.44	57.49	77.10

表 6 哈密绿洲 2008—2018 植被覆盖度转移矩阵 km^2

植被覆盖度等级		2018 年				
		极低植被覆盖度	低植被覆盖度	中植被覆盖度	中高植被覆盖度	高植被覆盖度
2008 年	极低覆盖度	0.01	0.28	0.03	0.00	0.00
	低覆盖度	0.25	664.38	44.57	10.14	13.97
	中覆盖度	0.07	59.07	85.03	44.33	25.68
	中高覆盖度	0.01	24.22	35.54	68.08	92.11
	高覆盖度	0.00	25.45	25.10	31.93	115.48

4 驱动力分析

由因子探测的结果可知(表 7),所选的 8 个生态因子均通过了 p 值小于 0.05 的显著性检验。且不同因子的决定力 q 值普遍较高。q 值从大到小排序依次为:土地利用>GDP>人口密度>降水>温度>道路>水系>坡度。

由此可知土地利用变化是引起绿洲植被覆盖度变化的第一影响因子,第二影响因素是人口密度与 GDP,然后是温度与降水,最后是水系及道路网络的影响。表明干旱区哈密绿洲植被覆盖度变化的主要驱动因素是土地利用类型。由于绿洲是基于人类活动在干旱区的产物,受自然因素如降水、气温、坡度等影响的同时,人类活动也对其产生更为深刻的影响。哈密绿洲发展过程受人口密度、道路等人工设施的建设影响较大。哈密绿洲内人口密度与 GDP 的贡献率明显高于温度与降水,而土地利用类型是主导因子。自然因子与人类活动对于不同时间尺度上对绿洲演化起着不同的作用。表明在研究期内哈密绿洲,人为因素对植被覆盖度状况的影响远高于自然因素。随着西部大开发的实施,新疆城镇发展迅速,经济社会进程稳步加快,人类活动对地表影响日益深刻,由此造成绿洲植被覆盖度变化剧烈。

表 7 哈密绿洲植被覆盖度的因子探测结果

项 目	坡度	GDP	降水	道路	人口密度	温度	水系	土地利用
q 统计量	0.056	0.545	0.489	0.122	0.51	0.325	0.114	0.647
p 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

从交互探测(表 8)可知,坡度∩道路(0.209)、坡度∩河流(0.184)、道路∩温度(0.465)和道路∩河流(0.417)(带 *)为非线性增强,其余为双因子增强。而在因子探测中坡度(0.056)与道路(0.122)的解释力最低,说明经过交互探测,坡度与道路对于绿洲植被覆盖度的解释力有大幅提升。其他双因子增强按解释力大小排序为:土地利用∩GDP(0.791)>土地利用∩人口(0.787)>土地利用∩降水(0.784)>土地利用∩温度(0.752)>土地利用∩河流(0.687)>土地利用∩道路(0.685)>土地利用∩坡度(0.666),其他因子交互探测值均小于 0.65。可知土地利用与其他因子交互探测后解释力均大于原来单因子探测的结果,同时土地利用对于哈密绿洲植被覆盖度有及其重要意义。

综上分析说明不同类型的土地利用方式直接决定了该区域内绿洲植被覆盖度,当然其他自然与人文因子对哈密绿洲植被覆盖度有间接影响作用。生态探测(表 8)可知,河流与坡度、河流与道路、温度与道路以及道路与坡度,表现为无显著差异,而其他因子之间的生态探测均表现出显著差异。

表 8　哈密绿洲植被覆盖度的交互探测与生态探测结果

项目	坡度	GDP	降水	道路	人口密度	温度	水系	土地利用
坡度	0.056							
GDP	0.556^{+}	0.545						
降水	0.510^{+}	0.652^{+}	0.489					
道路	0.208*	0.630^{+}	0.568^{+}	0.122				
人口密度	0.520^{+}	0.595	0.637	0.588^{+}	0.510			
温度	0.382^{+}	0.633^{+}	0.529^{+}	0.465^{*+}	0.610^{+}	0.325		
水系	0.184*	0.624^{+}	0.548^{+}	0.417*	0.590^{+}	0.406^{+}	0.114	
土地利用	0.666^{+}	0.791^{+}	0.784^{+}	0.685^{+}	0.787^{+}	0.752^{+}	0.687^{+}	0.647

注:①加 * 号表示两两因子的交互作用为非线性增强;②不加 * 号表现为双因子增强,加+号表现表示生态探测中为显著差异,否则无标记。

5　讨 论

5.1　哈密绿洲扩展阶段

绿洲扩展阶段主要分为前中后期 3 个阶段[37],前期主要是绿洲主体内部的填充,中期为向外拓展,后期为稳定扩展阶段[38]。本文首次定义了哈密绿洲的发展阶段,其中哈密绿洲在前期(1988—1998 年)总体植被覆盖度较低,且覆盖度较好的区域都相对集中,不同等级的覆盖度相互转化的强度较低,属于绿洲低强度稳定期[39];中期(1998—2008 年)属于极度扩张期,在该时期哈密绿洲面积增幅高达 85%,同时不同等级的覆盖度区域内相互转化的强度较高,高覆盖度及中高覆盖度区域转入的贡献率最高的是低覆盖度区域,同时由于该时期快速扩展,初步形成了哈密绿洲现在的基本框架[40];后期(2008—2018 年)属于高强度稳定期,在该时期内绿洲面积扩展较慢,但中覆盖度、中高覆盖度及高覆盖度区域之间的相互转移最为剧烈,该定义过程与刘亚文[5]对吐鲁番绿洲、鲁晖[41]对民勤绿洲、廖杰[42]对黑河绿洲阶段划分一致。

5.2　哈密绿洲植被覆盖度影响因素

干旱区绿洲扩展主要表现为人工绿洲的扩展,对植被覆盖度的分析可量化人工绿洲扩展[43]。植被覆盖度变化影响因素的研究较多,在干旱区内不同区域影响因素差异较大,当绿洲内有径流量较大的河流存在时,河流与盐渍化的影响较大[44-45]。王耀斌等人[46]认为绿洲面积的波动受制于农业绿洲灌溉情况。当然河道变迁和水位变化是绿洲植被覆盖度变化的另一个重要原因。进入到哈密绿洲发展中期,哈密河水位降低明显同时在其周围的植被及作物减少。在绿洲进入快速发展时期,人为影响速率明显强于自然影响速率[47]。本文从地理探测器交互探测得到哈密绿洲植被覆盖度影响因素中人类活动的影响更大,而这一结果与刘亚文[5]对同属东疆区域的吐鲁番绿洲分析相同。本文也存在诸多不足之处,对哈密绿洲植被覆盖度变化方向没有实现定量化的度量。同时本文仅用一种中等分辨率遥感类型数据,今后对哈密绿洲研究中还需要加入多种数据源,并提高数据的空间分辨率,以此达到更加精细化的效果。

6　结 论

(1) 近 30 a 内,哈密绿洲总体上低植被覆盖度占主要份额;中覆盖度与中高覆盖度从近 18 a 内呈现增长趋势;高植被覆盖度呈现先增加后减小的总体趋势。

(2) 哈密绿洲从植被覆盖度分析,(1988—1998 年)属于绿洲低强度稳定期;(1998—2008 年)属于极度扩张期,形成了现在哈密绿洲基本框架;(2008—2018 年)属于高强度稳定期。

(3) 土地利用类型变化是造成哈密绿洲植被覆盖度变化的直接原因,同时在近 30 a 内,人为因素对哈密绿洲植被覆盖度状况的影响远高于自然因素。

[参 考 文 献]

[1] 陈曦,姜逢清,胡汝骥. 中国干旱区自然地理[M]. 北京:科学出版社,2015.

[2] 赵文智,庄艳丽. 中国干旱区绿洲稳定性研究[J]. 干旱区研究,2008,25(2):155-162.

[3] 贾宝全,慈龙骏. 干旱区绿洲研究回顾与问题分析[J]. 地球科学进展,2000,15(4):381-388.

[4] 樊自立. 塔里木盆地绿洲形成与演变[J]. 地理学报,1993,60(5):421-427.

[5] 刘亚文,阿不都沙拉木·加拉力丁,阿拉努尔·艾尼娃尔,等. 1989—2016 年吐鲁番高昌区绿洲时空格局变化及其驱动因素[J]. 干旱区研究,2018,35(4):945-953.

[6] 崔卫国,穆桂金. 绿洲演变动态监测的遥感分析[J]. 地球信息科学,2004,6(3):105-107.

[7] 罗格平,周成虎,陈曦,等. 区域尺度绿洲稳定性评价[J]. 自然资源学报,2004,19(4):519-524.

[8] 廖杰,王涛,薛娴. 近 55 a 来黑河流域绿洲演变特征的初步研究[J]. 中国沙漠,2012,32(5):1426-1441.

[9] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠,2009,29(1):1-9.

[10] 周跃志,潘晓玲,何伦志. 绿洲稳定性研究的几个基本理论问题[J]. 西北大学学报(自然科学版),2004,34(3):359-363.

[11] 韩涛,王大为. 2000—2014 年石羊河流域植被覆盖变化研究[J]. 中国农学通报,2017,33(13):66-74.

[12] 董敬儒,颉耀文,段含明,等. 黑河流域绿洲变化的模式与稳定性分析[J]. 干旱区研究,2020,37(4):1048-1056.

[13] 吕利利,颉耀文,张秀霞,等. 1986—2015 年瓜州绿洲变化[J]. 生态学报,2017,37(16):5482-5491.

[14] 张秀霞,颉耀文,卫娇娇,等. 1986—2015 年干旱区敦煌绿洲景观的时空演变过程[J]. 干旱区研究,2017,34(3):669-676.

[15] 谢霞. 艾比湖流域绿洲化与荒漠化过程时空演变研究[J]. 中国沙漠,2013,33(1):38-45.

[16] 罗格平,周成虎,陈曦. 干旱区绿洲土地利用与覆被变化过程[J]. 地理学报,2003,58(1):63-72.

[17] 艾克拜尔·买提尼牙孜,阿里木江·卡斯木. 新疆维吾尔自治区皮山县绿洲景观格局变化及驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(7):55-62.

[18] 田文婷,颉耀文,陈云海. 近 50 年高台县绿洲时空变化研究[J]. 干旱区研究,2013,30(6):1122-1128.

[19] 鲁晖,颉耀文,张文培,等. 1986—2015 年民勤县绿洲时空变化分析[J]. 干旱区研究,2017,34(6):1410-1417.

[20] 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.

[21] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠,2009,29(1):1-9.

[22] 黄铃凌,王平,刘淑英,等. 民勤绿洲农田生态系统能值空间分异特征[J]. 中国沙漠,2014,34(1):291-298.

[23] 卫娇娇. 基于遥感的甘肃河西地区绿洲分布提取及时空变化分析[D]. 甘肃 兰州:兰州大学,2016.

[24] 阿里木江·卡斯木. 绿洲城市扩展空间过程驱动机制研究[M]. 湖北 武汉:武汉大学出版社,2016.

[25] 师庆东. 基于 FVC 指数对 1982—2000 年中国西部干旱区植被覆盖时空变化特征分析[D]. 江苏 南京:南京气象学院,2004.

[26] 岳丹,刘东伟,王立新,等. 基于 NDVI 的乌梁素海湿地植被变化[J]. 干旱区研究,2015,32(2):266-271.

[27] 谢晓华,赖日文,李永实. 基于 RS 技术的闽江流域植被覆盖度时空变化分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2008,25(5):536-539.

[28] 胡健波,陈玮,李小玉,等. 基于线性混合像元分解的沈阳市三环内城市植被盖度变化[J]. 应用生态学报,2009,20(5):1140-1146.

[29] 高志海. 基于 RS 和 GIS 的绿洲植被与荒漠化动态研究[D]. 北京:北京林业大学,2003.

[30] 盛莉,黄敬峰,郭瑞芳,等. 综合利用环境星 CCD 和红外数据反演大气气溶胶光学厚度[J]. 红外与毫米波学报,2013,32(3):277-282.

[31] 滑永春,李增元,高志海. 2001 年以来甘肃民勤植被覆盖变化分析[J]. 干旱区研究,2017,34(2):337-343.

[32] Guerschman J P, Hill M J, Renzullo L J, et al. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009,113(5):928-945.

[33] Rundquist B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,81(1):129-135.

[34] 李向婷,白洁,李光录,等. 新疆荒漠稀疏植被覆盖度信息遥感提取方法比较[J]. 干旱区地理,2013,36(3):502-511.

[35] 朱震达,刘恕. 关于沙漠化的概念及其发展程度的判断[J]. 中国沙漠,1984,4(3):2-8.

[36] 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.

[37] Xie Yaowen, Zhao Hong, Wang Guisheng. Spatio-temporal changes in oases in the Heihe River Basin of China: 1963—2013 [J]. Écoscience, 2015,22(1):33-46.

(下转第 287 页)

[4] 陈宁生,黄娜.普格县荞窝镇 8·8 泥石流灾害应急调查研究[J].山地学报,2018,36(3):482-487.
[5] 亓星,余斌,王涛.沟道坡度对泥石流起动模式影响的模拟试验研究[J].水电能源科学,2014,32(7):116-119.
[6] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2004, 71(1/2):49-61.
[7] 崔鹏,邹强.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J].地理科学进展,2016,35(2):137-147.
[8] 郭志学,曹叔尤,刘兴年,等.泥石流堵江影响因素试验研究[J].水利学报,2004,35(11):39-45.
[9] 钟敦伦,谢洪,李槭,等.四川省甘洛县泥石流[J].山地研究,1990,8(2):107-113.
[10] 高翔.甘洛县的泥石流类型和防范措施[J].水土保持通报,1998,8(4):35-43.
[11] 吴永,何思明,裴向军,等.震后沟道泥石流启动条件——松散堆积体雨中失稳的水力学机制分析[J].岩土力学,2012,33(10):3043-3050.
[12] 李安润,邓辉,余天彬,等.汶川极震区锄头沟泥石流发育特征及启动机理[J].四川地质学报,2019,39(2):285-288.
[13] 高波,任光明,王军,等.四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):1-5.
[14] Gan Binrui, Liu Xingnian, Yang Xingguo, et al. The impact of human activities on the occurrence of mountain flood hazards: Lessons from the 17 August 2015 flash flood/debris flow event in Xuyong County, Southwestern China [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2018, 9(1):816-840.
[15] 崔鹏,何易平,陈杰.泥石流输沙及其对山区河道的影响[J].山地学报,2006,24(5):539-549.
[16] 付兴盛,罗万福,龙启林,等.水土保持综合治理是防治山洪泥石流的根本措施:"7·6"山洪泥石流灾害中两条小流域受灾程度不同的原因分析措施[J].中国水土保持,2011(9):56-59.

(上接第 272 页)

[21] Foltete J C, Clauzel C, Vuidel G. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks [J]. Environmental Modelling & Software, 2012,38:316-327.
[22] Xiao Sun, Crittenden J C, Feng Li, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services: A case study in Atlanta Metropolitan area, USA [J]. Science of the Total Environment, 2018,622/623:974-987.
[23] Yang Bai, Wong C P, Jiang Bo, et al. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning [J]. Nature communications, 2018, 9(1):3034.
[24] 董晓峰,刘申,刘理臣,等.基于熵值法的城市生态安全评价:以平顶山市为例[J].西北师范大学学报(自然科学版),2011,47(6):94-98.
[25] 谢亦欣,袁章帅,邹怡,等.基于 PSR 模型—熵权法的土地生态安全评价:以上海市为例[J].北京印刷学院学报,2019,27(8):94-98.
[26] 韩雅琴,白中科,张继栋,等."一带一路"背景下东南亚地区生态安全评价研究[J].生态经济,2020,36(6):181-187.

(上接第 280 页)

[38] 赵文智,庄艳丽.中国干旱区绿洲稳定性研究[J].干旱区研究,2008,25(2):155-162.
[39] 王雅,蒙吉军.黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响[J].干旱区研究,2017,34(1):200-207.
[40] 高鹏文,阿里木江·卡斯木,图尔荪阿依·如孜,赵孟辰.哈密市生态环境效益时空分析[J].干旱区研究,2020,37(4):1057-1067.
[41] 鲁晖,颉耀文,张文培,等.1986—2015 年民勤县绿洲时空变化分析[J].干旱区研究,2017,34(6):1410-1417.
[42] 廖杰,王涛,薛娴.近 55 年来黑河流域绿洲演变特征的初步研究[J].中国沙漠,2012,32(5):1426-1441.
[43] 罗格平,周成虎,陈曦.从景观格局分析人为驱动的绿洲时空变化:以天山北坡三工河流域绿洲为例[J].生态学报,2005,25(9):2197-2205.
[44] 王小军,陈翔舜,刘晓荣,等.河西走廊区沙漠化年度趋势变化分析研究[J].甘肃科技,2014,30(9):1-4,23.
[45] 孙朋,巩杰,高彦净,等.干旱区流域绿洲时空变化及其景观响应[J].干旱区研究,2014,31(2):355-361.
[46] 王耀斌.基于可持续发展的额济纳绿洲生态环境变化研究[J].甘肃联合大学学报(自然科学版),2010,24(1):58-63,66.
[47] Zhang Hong, Wu Jianwei, Yu Yunjiang, et al. A preliminary study of oasis evolution in the Tarim Basin, Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(3):545-553.