

DOI: 10.5846/stxb201509111881

胡梦琚, 潘宁惠, 左海玲, 李向锋. 基于 RS 和 GIS 的玛曲高原土地沙漠化时空演变研究. 生态学报, 2017, 37(3): - .

Hu M J, Pan N H, Zuo H L, Li X F. Spatio-temporal change in desertification of the Maqu Plateau based on RS and GIS. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

## 基于 RS 和 GIS 的玛曲高原土地沙漠化时空演变研究

胡梦琚\*, 潘宁惠, 左海玲, 李向锋

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**摘要:** 基于 RS 和 GIS 空间分析技术, 以玛曲高原多期 Landsat 遥感数据为主要信息源, 监测分析了 1977—2014 年玛曲高原沙漠化土地的时空演变规律。结果表明: 近 40 a 来玛曲高原的土地沙漠化经历了迅速发展—缓慢发展—急速逆转—缓慢逆转—快速逆转的变化过程。1977—1995 年玛曲高原沙漠化处于快速扩张阶段, 年均扩张速率为 3.01%; 1995—2014 年沙漠化扩张趋势出现逆转, 年均逆转速率为 4.14%。沙漠化土地的发展和逆转区域主要分布在东北部欧拉秀玛乡和尼玛乡黄河沿岸、东南部采日玛乡和曼日玛乡沼泽区、西南部齐哈玛乡和中部阿万仓乡黄河支流两岸。玛曲高原沙漠化土地的发展和逆转过程并非逐级递增或递减, 而是在 15—20 a 的时间段内交替出现, 不同等级沙漠化土地之间的转移也存在明显的跃变。从整体来看, 玛曲高原土地沙漠化呈现逆转趋势, 区域生态环境得到明显改善。

**关键词:** 玛曲高原; 土地沙漠化; 时空演变; 转移矩阵; 动态度

## Spatio-temporal change in desertification of the Maqu Plateau based on RS and GIS

HU Mengjun\*, PAN Ninghui, ZUO Hailing, LI Xiangfeng

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** The Maqu plateau, an important part of the Qinghai-Tibet plateau, is the main water conservation area in the upper reaches of the Yellow River. In recent years, under the influence of natural environmental and human activities, the ecologically sensitive Maqu plateau area has experienced environmental problems such as glacier retreat, permafrost degradation, aeolian desertification, and grassland degradation. The Maqu plateau is one of the largest pasture lands in Asia, with a rangeland area of  $8.58 \times 10^7 \text{ hm}^2$ . In the past decade, the eco-environmental problems of the Qinghai-Tibetan plateau have received increasing attention owing to global warming and intensifying regional development. The aim of this study was to quantify the developmental processes in these region, as well as any changes in the spatial distribution of land desertification. We used remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) technologies, and applied multi-temporal Landsat imagery to investigate the spatio-temporal development of land desertification in the Maqu Plateau during 1977—2014. The remote-sensing data used in this study include: Landsat multi-spectral scanner images from 1977; Thematic Mapper images from 1989, 1995, 2006, and 2014; and Enhanced Thematic Mapper images from 2001 and 2010. We mainly selected images recorded between June and October, because aeolian desertified lands are more easily recognized during this period of greater vegetation growth. Our results indicated that the area of desertified land in the Maqu plateau had experienced five main phases: rapid development, where the area of aeolian desertified land increased at a rate of 2004.6  $\text{hm}^2/\text{a}$  between 1977 and 1989; slow development, where it increased at a rate of 57  $\text{hm}^2/\text{a}$  between 1989 and 1995;

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41161036, 41171018); 甘肃省自然科学基金项目(1010RJA016); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划(NWNU-LKON-10-34)

收稿日期: 2015-09-11; 网络出版日期: 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lele200466@163.com

rapid reverse, where it decreased at a rate of 3868 hm<sup>2</sup>/a between 1995 and 2006; slow reverse, where it decreased at a rate of 893.4 hm<sup>2</sup>/a between 2006 and 2010; and, fast reverse, where it decreased at a rate of 2129.3 hm<sup>2</sup>/a between 2010 and 2014. The area of desertified land expanded rapidly between 1977 and 1995, with an average growth rate of 3.01% per year. An obvious decrease in the area of desertified land was observed from 1995 to 2014, with an average reversal rate of 4.14% per year. The areas affected by the development and reversal of aeolian desertification were mainly distributed alongside the Yellow River, including near the Oulaxiuma and Nima villages of the northeastern region, the marshlands of the Cairuma and Manrima villages in the southeastern region, and the riversides of tributaries to the Yellow River near the Qihama and Awancang villages of the southwestern region. We found that the spatial distribution of aeolian desertification changed significantly over time, with fragmentation of the desertified land increasing rapidly between 1977 and 1995. Aeolian desertification in the Maqu Plateau has not been progressive, but instead, it has been an alternating process of development and reversal approximately every 15 to 20 years. There was an abrupt change in the desertification level of lands in different levels of the plateau. Overall, we found that the trend of aeolian desertification in the Maqu plateau had been reversed and the local environment had improved since 1995.

**Key Words:** Maqu plateau; aeolian desertification; spatio-temporal change; transition matrix; dynamic degree

玛曲高原位于青藏高原东北部边缘,既是青藏高原的重要组成部分,也是黄河源头重要的水源涵养地<sup>[1-3]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来,随着气候的暖干化和人类活动的不断加剧,玛曲高原沙漠化土地快速扩张并逐渐发展成为青藏高原沙漠化发展的重点区域<sup>[4-7]</sup>。沙漠化导致的草场退化是玛曲草原生态恢复与经济发

展的瓶颈,对此诸多学者对玛曲高原的沙漠化土地面积变化和时空分布<sup>[8-11]</sup>、风沙地貌类型及分布规律<sup>[12]</sup>、土地利用/覆盖变化<sup>[13-16]</sup>以及草地退化成因和治理措施<sup>[17-20]</sup>进行了研究分析。上述研究显示对玛曲高原沙漠化土地的发展演化、驱动机制等已有一定的探讨,但考虑到沙漠化土地的演化发展存在时间尺度上的缓慢性和空间尺度上的相对集中性,因而对其进行长时间序列的监测分析有助于更好地把握区域沙漠化的演变过程及驱动机制,而目前已有研究中缺乏时间跨度较大的年份序列数据,尤其对不同等级沙漠化土地之间的相互转移也缺乏相关的研究与探讨。鉴于此,本文选取玛曲高原 1977、1989、1995、2001、2006、2010 和 2014 年的 7 期遥感影像数据,建立了 7 个时期的沙漠化土地时空数据库,并通过对 7 期矢量数据进行叠加分析,得到不同时段各类沙漠化土地之间的转移矩阵,以此分析了近 40 a 来玛曲高原沙漠化土地的时空演变过程,以期把握黄河上游乃至整个黄河流域沙漠化土地的发展态势,进而为黄河上游地区沙化草地恢复及生态环境治理提供相关的科学依据和理论基础。

## 1 研究区概况

玛曲高原地理坐标为 33°06'30"—34°30'15"N, 100°45'45"—102°29'00"E,位于甘肃省甘南藏族自治州西南部,与青藏高原东端的青海、四川两省相邻。总面积 10109.67 km<sup>2</sup>,境内海拔 3300—4806 m,黄河从南、东、北三面绕县境而过,流程 433 km,形成黄河第一弯,故称黄河首曲。在中国的大地貌单元中,玛曲高原处于第一和第二阶梯交界处,全区地貌可分为西北部高山区,中南部丘陵区 and 东部河岸阶地三大区。阿尼玛卿山由西向东横贯全区,西倾山绵亘于区境北部,中部分布着两大山系的山前丘陵(图 1)。

玛曲高原年平均降水量为 564 mm,主要集中在 5—9 月;年平均蒸发量为 1347.3 mm,相对湿度 62%;年平均气温 1.2℃,最冷月(1 月)平均温度-8.7℃,最热月(7 月)平均温度 11.3℃,活动积温 253.6℃,无霜期仅 20 d 左右。全年日照时数 2613.9 h,平均风速 2.5 m/s,最大风速 36 m/s,全年大风日数 77.1 d(8 级以上)。玛曲高原植被以高寒草甸为主,其中天然草地 9106 km<sup>2</sup>,占全区总面积的 90.01%,整体植被景观有向高寒荒漠化景观方向演变的趋势<sup>[21]</sup>。土壤类型较多,以亚高山草甸土分布面积最广。

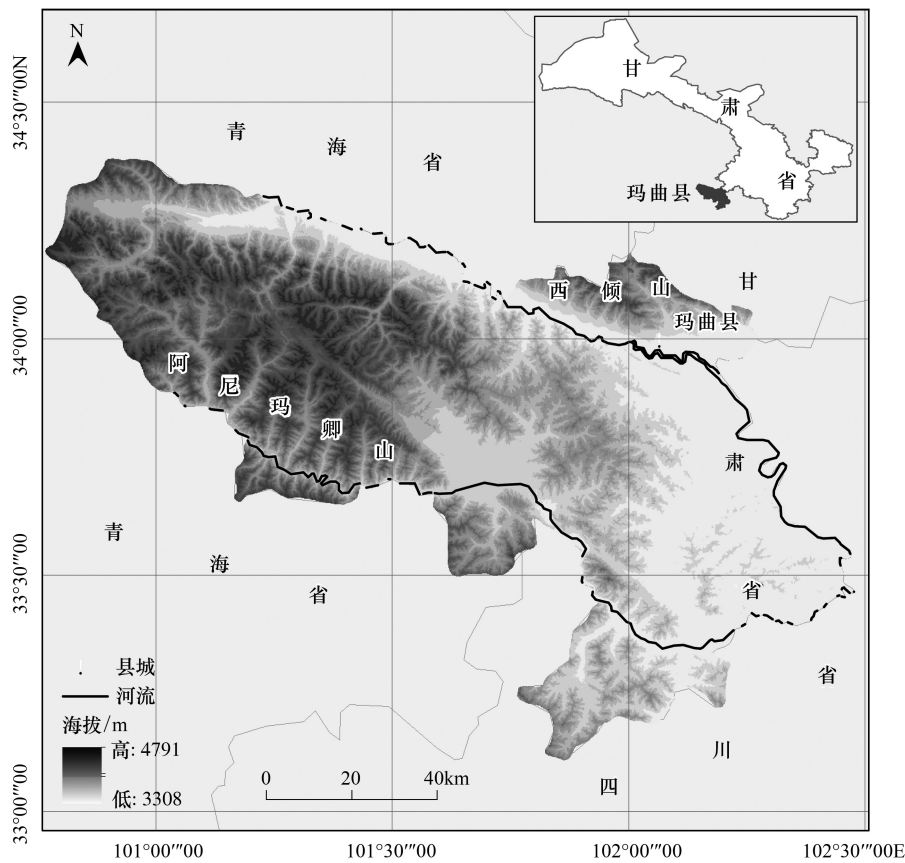


图1 研究区位置图

Fig.1 The location of the studied region

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源及处理

根据遥感影像的可获取性和植被生长的季相,本研究选取轨道号为 131/36-37、132/36-37 的玛曲高原 7 期陆地卫星影像各两景(表 1),利用 ERDAS 经过“多波段数据组合”和“图像拼接”技术得到玛曲高原的遥感影像并对其进行辐射纠正。以经过精纠正的遥感影像为参考影像,采用 432 标准假彩色合成,从地形图上选取控制点,选择二次多项式重采样方法对其进行校正,校正精度控制在 0.5 个像元之内,地面分辨率控制在 30 m×30 m。遥感影像的季相选择极大地影响沙漠化土地的监测效果,7—9 月是玛曲高原植被覆盖度最好的季节,沙漠化土地在影像上也比较容易区分,因此,在选取影像时,除 1989 年无夏季数据及 2014 年夏季影像云量过大影响目视解译外,其他年份均选取 7—9 月的影像作为数据源。

表 1 玛曲高原土地沙漠化变化监测多期数据源

Table 1 Date used in monitoring desertification land around Maqu Plateau

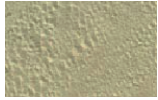
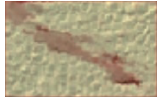



年份 Year	数据源 Sensor type	日期 Acquisition time	采用波段 Bands
1977	MSS	1977 年 7 月 14、1977 年 7 月 15 日	4(红)、3(绿)、2(蓝)
1989	TM4-5	1989 年 2 月 3 日、1989 年 1 月 25 日	5(红)、4(绿)、3(蓝)
1995	TM4-5	1994 年 7 月 3 日、1995 年 6 月 11 日	4(红)、3(绿)、2(蓝)
2001	ETM	2000 年 8 月 12 日、2001 年 7 月 5 日	4(红)、3(绿)、2(蓝)
2006	TM4-5	2006 年 8 月 5 日、2006 年 7 月 27 日	4(红)、3(绿)、2(蓝)
2010	ETM	2009 年 9 月 22 日、2010 年 8 月 15 日	4(红)、3(绿)、2(蓝)
2014	TM4-5	2014 年 11 月 15 日、2014 年 11 月 22 日	1(红)、2(绿)、3(蓝)

## 2.2 建立玛曲高原沙漠化土地解译标志

根据不同程度沙漠化土地的空间分布特征与假彩色合成影像的光谱特征,结合地学知识和野外调研建立了玛曲高原沙漠化土地的解译影像标志库(表 2)。

表 2 玛曲高原 4、3、2 波段 RGB 合成 TM 影像沙漠化土地解译标志

Table 2 Interpretation keys of TM imageries( RGB=bands 4,3,2) for desertification land in Maqu Plateau

类型 Classification of desertification land	景观特征 Landscape characteristics	图像 Imageries
极重度沙漠化 Extremely severe desertification	大面积连续沙地,流沙面积 $\geq 50\%$ ,沙丘、沙垄等地貌形态明显;植被覆盖度 $< 10\%$ 。影像一般呈均匀灰色。	
重度沙漠化 Severe desertification	$25\% \leq$ 流沙面积 $< 50\%$ ,风沙流活动明显或流沙纹理明显,呈不规则斑块分布,沙丘清晰; $10\% \leq$ 植被盖度 $< 30\%$ ,表土有灌丛分布。影像呈灰白色间隔分布。	
中度沙漠化 Moderate desertification	$5\% \leq$ 流沙面积 $< 25\%$ ,风沙流活动不明显的沙化土地,半固定沙地(丘)或半裸露砂砾石裸地成片分布; $30\% \leq$ 植被盖度 $< 50\%$ ,有沙丘分布。影像一般为深灰色。	
轻度沙漠化 Slight desertification	流沙面积 $< 5\%$ ,基本无风沙流活动的土地;植被盖度 $\geq 50\%$ ,主要为固定的灌丛沙包和零星的草地相间分布。图像一般呈浅灰色。	
潜在沙漠化 Potential desertification	主要为草地退化,一般分布在水体(河流、沼泽)及山麓附近;地表偶见流沙点或风蚀斑,但尚无沙堆分布。水体周围为条带状,颜色大多为浅红色中镶嵌红色斑点。	

## 2.3 研究方法

在 ERDAS 和 ArcGIS 软件的支持下,结合光谱直接分类法和实地调查,通过目视解译对 7 期遥感影像参照表 2 中的解译标志提取沙漠化土地信息(1989 和 2014 年沙漠化土地信息根据相邻年份解译信息对照类比提取),建立沙漠化土地数据库。利用 ArcGIS 9.3 在对矢量化的 7 期数据分别进行叠加分析的基础上进行属性数据统计,得到近 40 a 来 6 个时段不同等级沙漠化土地之间以及与其他地类之间的转移数据,建立土地类型转移矩阵,以此来分析近 40 a 来玛曲高原沙漠化土地的转移方向和转移量,进而恢复沙漠化土地的时空演化过程。

## 3 结果分析

对所获取的玛曲高原 7 期遥感影像进行解译整理后建立了不同土地利用类型时空变化数据库(图 2,表 3,图 3),以此为依据分析探讨玛曲高原沙漠化土地的动态变化。

### 3.1 近 40 a 来玛曲高原沙漠化土地的时空演变

#### 3.1.1 沙漠化土地面积的时间变化

动态度是反映单位时间内不同土地利用类型面积的变化幅度与变化速率及区域土地利用变化中的类型差异<sup>[22-24]</sup>,沙漠化土地作为一种土地类型,其动态度可反映研究期内沙漠化土地的变化程度,其模型公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中, $K$  为研究时段内某类型沙漠化土地的动态度; $U_a$ 、 $U_b$  分别为研究期初及研究期末某一种沙漠化土地类型

的数量; $T$ 为研究时段长,当 $T$ 为年时, $K$ 的值就是该研究区域某种沙漠化土地类型年变化率。对玛曲高原沙漠化土地的态度进行计算,得到各时段沙化土地总体和各等级的动态度(图2)。

资料表明,20世纪60年代以前玛曲高原没有土地沙漠化现象,60年代开始出现零星沙漠化土地和小沙丘<sup>[18]</sup>。由表3可知,到1977年,玛曲高原沙漠化土地总面积达45091 hm<sup>2</sup>,极重度、重度、中度、轻度和潜在沙漠化土地占沙化土地总面积的1.70%、5.10%、6.44%、15.22%和71.53%。1977—1989年,玛曲高原沙漠化土地面积快速增加,净增量为24054.6 hm<sup>2</sup>,年均扩展速率达4.45%;就不同程度沙漠化土地而言,极重度、重度、中度、轻度和潜在沙漠化土地面积均呈现不同程度的增长,占净增量的比重分别为2.14%、5.13%、9.94%、13.95%和68.82%;动态度分别为6.1%、4.88%、7.44%、4.44%和4.67%,可见中度和极重度沙漠化土地在该时期沙漠化土地的扩张中起主导作用;1989—1995年,沙漠化扩张速度较前一阶段明显减缓,沙漠化土地面积增加了341.8 hm<sup>2</sup>,年均扩张速率为0.08%;其中,极重度、重度和中度沙漠化土地发生逆转,动态度分别为-0.8%、-0.34%和-0.08%;而轻度沙漠化土地面积增加了4328.9 hm<sup>2</sup>,动态度为7.06%。表明在该时期沙漠化土地的扩张在程度上有较为明显的减弱趋势,沙漠化土地较前一时段表现出主要向轻度沙漠化土地转移。

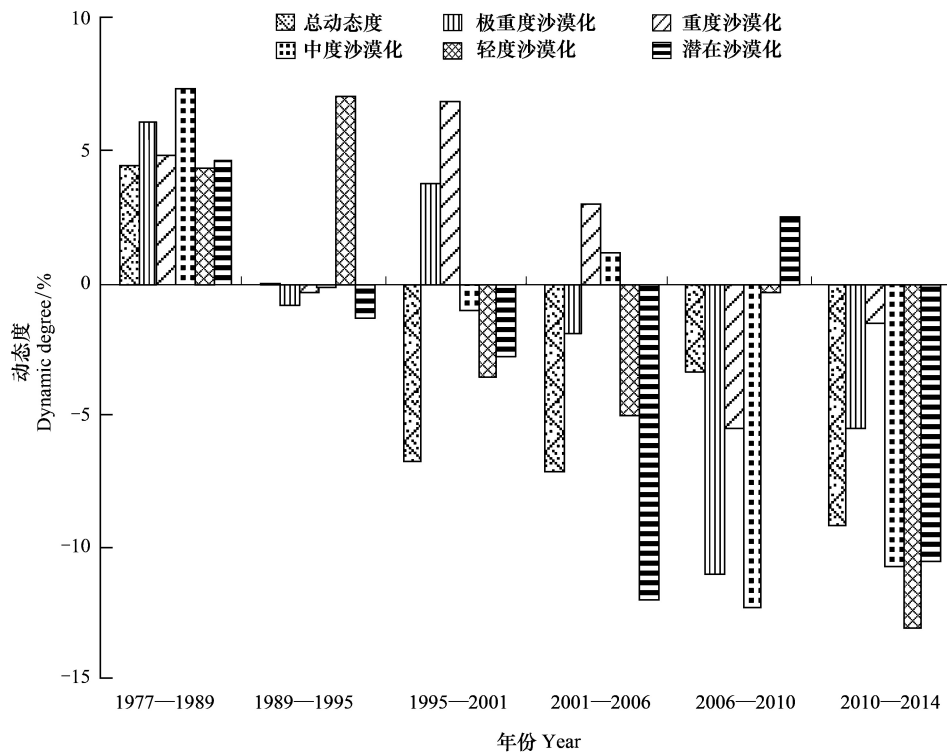


图2 1977—2014年玛曲高原沙漠化土地类型动态度

Fig.2 Dynamic degrees of different classes of desertification land types in Maqu Plateau during 1977—2014

1995之后,沙漠化扩张趋势出现逆转。1995—2001年,玛曲高原沙漠化土地面积减少了27891.8 hm<sup>2</sup>,年均缩减速率为6.69%。其中,中度、轻度和潜在沙漠化土地面积减少量占总逆转量的比重分别为1.19%、11.06%和26.58%,动态度分别为-1.05%、-3.53%和-2.75%,土地沙漠化逆转趋势明显,逆转以轻度和潜在沙漠化为主。2001—2006年,沙漠化土地面积减少了14655.4 hm<sup>2</sup>,年均缩减速率较上一时期明显加快,达7.05%;沙漠化的逆转以潜在沙漠化为主,逆转面积占转化总面积的93.97%,动态度为-11.91%。在该阶段,极重度和潜在沙漠化土地的态度与前一时段相比降幅较大(图2),表明极重度和潜在沙漠化土地在该时期沙漠化土地的演化中起主导作用。2006—2010年,沙漠化土地面积减少了3573.5 hm<sup>2</sup>,年均缩减速率较上一时期明显降低,为3.32%;就不同程度沙漠化土地而言,极重度、重度、中度和轻度沙漠化土地面积均呈现不同程度的减少,减少量占转化总面积的比重分别为16.58%、34.10%、71.29%和1.69%,动态度分别为-10.91%、-5.

40%、-12.18%和-0.28%,可知在该时段沙漠化土地显示了与前一时期同样的变化方向。其中,极重度、重度和中度沙漠化土地的动态度降幅较大,表明该时段沙漠化程度明显下降,土地沙漠化逆转明显。2010—2014年,沙漠化面积减少了 8517.3 hm<sup>2</sup>,年均缩减速率为 9.11%,土地沙漠化呈现急速逆转趋势。极重度、重度、中度、轻度和潜在沙漠化土地逆转面积占总逆转量的比重分别为 1.95%、3.13%、13.37%、32.35%和 50.47%,动态度分别为-5.42%、-1.51%、-10.61%、-12.99%和-10.43%,表明该时段各类型沙化土地均呈现不同程度的逆转,沙漠化土地逆转趋势持续明显。

表 3 近 40 a 来玛曲高原不同程度沙漠化土地面积变化/hm<sup>2</sup>

Table 3 Changes of aeolian desertified land areas in Maqu Plateau in recent 40 years

年份 Year	极重度沙化 Extremely severe desertification	重度沙化 Severe desertification	中度沙化 Moderate desertification	轻度沙化 Slight desertification	潜在沙化 Potential desertification	沙化总量 Total area of desertification	变化率/% Change rate
1977	767.7	2301	2902.9	6864.3	32255.1	45091	—
1989	1283.2	3536	5293.8	10220.3	48809.4	69145.6	—
1995	1221.9	3464.4	5269.6	14549.2	44982.3	69487.4	—
2001	1499.1	4903.5	4937.1	7136.5	23119.4	41595.6	—
2006	1357.1	5644.4	5230.5	5361.1	9347.1	26940.2	—
2010	764.6	4425.9	2683	5300.8	10300.4	23366.7	—
2014	598.8	4159.1	1544.3	2545.6	6001.6	14849.4	—
1977—1989	+515.5	+1235	+2390.9	+3356	+16554.3	+24054.6	+4.45
1989—1995	-61.3	-71.6	-24.2	+4328.9	-3827.1	+341.8	+0.08
1995—2001	+277.2	+1439	-332.5	-3083.8	-7412.5	-27891.8	-6.69
2001—2006	-142	+740.9	+293.4	-1775.4	-13772.3	-14655.4	-7.05
2006—2010	-592.5	-1219	-2547.5	-60.3	+953.3	-3573.5	-3.32
2010—2014	-165.8	-266.8	-1138.7	-2755.2	-4298.8	-8517.3	-9.11

注: +表示增量; -表示减量

综上所述,1977—2014年,玛曲高原沙漠化土地在不同阶段呈现出不同的发展势态,总体表现为快速发展—缓慢发展—急速逆转—缓慢逆转—快速逆转的变化过程。

### 3.1.2 沙漠化土地面积的空间变化

由图 3 可看出,近 40 a 来玛曲高原的沙漠化土地主要分布在黄河沿岸、东南部沼泽区和西南部黄河以南地区。沙漠化土地扩张的程度和方向在不同时期有着明显的差别。

1995 年之前,玛曲高原沙漠化土地的分布区域呈扩张态势。1977 年沙漠化土地以不连续斑块状分布在东北部欧拉秀玛乡和尼玛乡黄河沿岸以及东南部采日玛乡和曼日玛乡沼泽区;1989 年,东南部采日玛乡和曼日玛乡沙漠化土地面积迅速扩展成不完全连续片状,西南部齐哈玛乡发现有条带状轻度和潜在沙化土地分布,东北部黄河沿岸沙化土地面积较前期明显减小,以斑点状镶嵌在黄河两岸;1995 年,沙漠化扩张区域主要分布在玛曲高原中部阿万仓乡黄河支流两岸,东南部采日玛乡和曼日玛乡沙化面积较前一时期明显减小,呈小面积斑块状和条带状分布。

1995 年之后,玛曲高原沙漠化土地扩张势态发生逆转。2001 年沙漠化土地面积较前 20 a 明显减小,东北部欧拉秀玛乡和欧拉乡、东南部采日玛乡和曼日玛乡沼泽区以及尼玛乡南部沙化面积均发生不同程度的缩小;2006 年,东南部采日玛乡和曼日玛乡沼泽区沙化面积进一步缩小,呈零星斑块和斑点状分布;2010 年沙漠化逆转速率与前一时期相比明显下降,逆转的沙漠化土地主要分布在玛曲高原中部阿万仓乡黄河支流两岸;2014 年玛曲县城北部尼玛乡和齐哈玛乡沙化面积减小明显,东南部采日玛乡和曼日玛乡沼泽区潜在沙漠化土地面积快速减小。

### 3.2 沙漠化土地的转移分析

转移矩阵可全面而又具体地刻画区域各种土地利用变化的结构特征与各种地类的转移方向,便于了解研

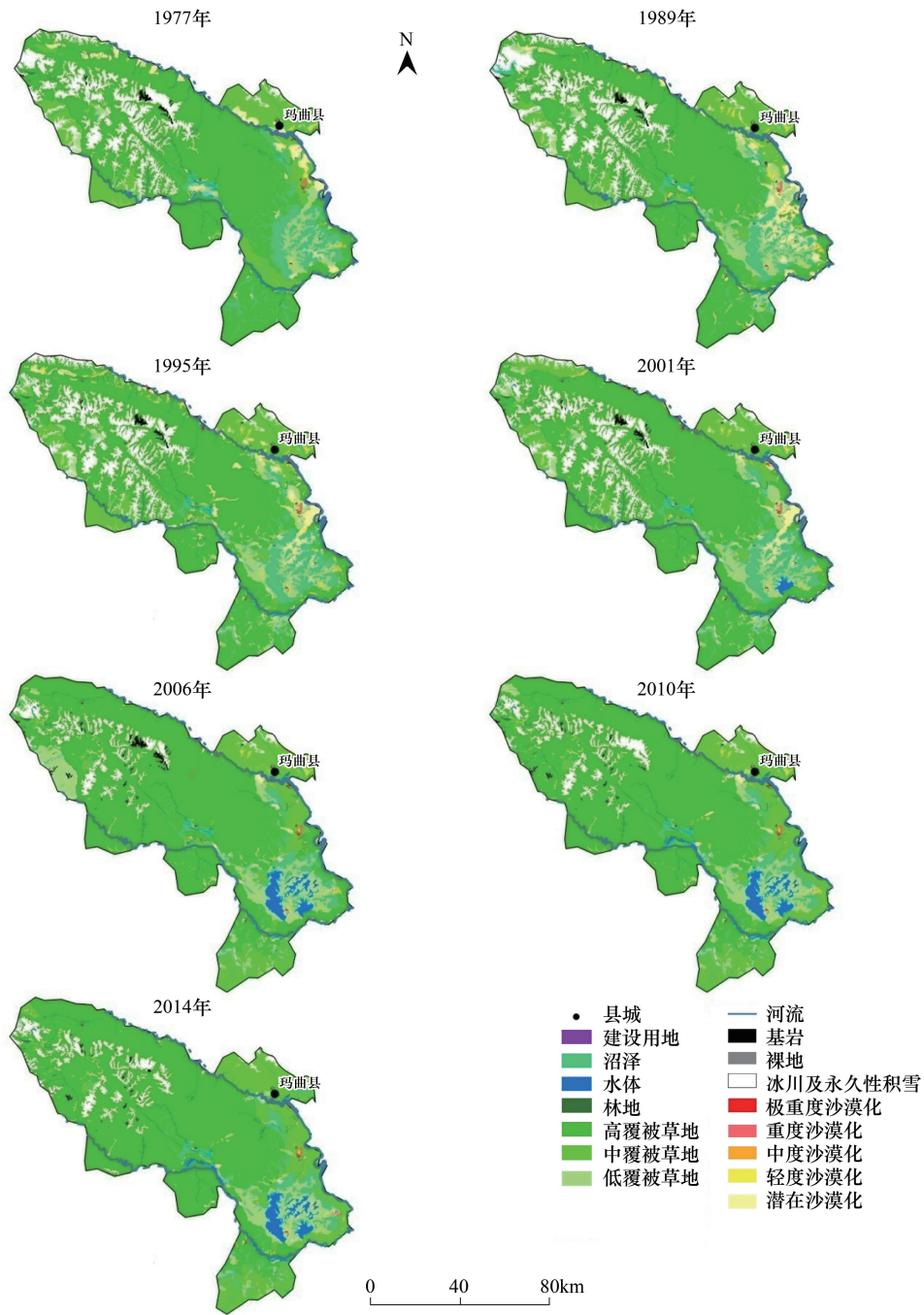


图 3 1977—2014 年玛曲高原沙漠化土地空间分布

Fig.3 Spatial-temporal change maps of desertification land in Maqu Plateau during 1977—2014

究期初各土地利用类型流失去向以及研究期末各土地利用类型的来源与构成<sup>[25-29]</sup>。运用 ArcGIS 对 7 期矢量图层进行叠加分析,得到玛曲高原 1977—1989 年、1989—1995 年、1995—2001 年、2001—2006 年、2006—2010 年和 2010—2014 年 6 个时段不同等级沙漠化土地之间以及与其他地类之间的转移矩阵(表 4)。

由表 4 可看出,1977—1989 年,由非沙漠化土地转变为沙漠化土地的面积 of 51966.7 hm<sup>2</sup>,占非沙漠化土地面积的 5.68%。沙漠化土地中有 61.81%转化为非沙漠化土地,转移面积为 27865.8 hm<sup>2</sup>。在该阶段,不同等级沙漠化土地之间的转移表现为:极重度沙漠化土地基本没有发生转移变化;重度、中度、轻度和潜在沙漠化土地转移比重分别为 25.05%、40.58%、24.02%和 2.85%,且转移比例最大的土地类型分别对应为中度、重度、中度和轻度沙漠化。可见,该阶段玛曲高原沙漠化扩张速度加快,处于快速发展阶段。

1989—1995年,由非沙漠化土地转变为沙漠化土地的面积 $27527.4\text{ hm}^2$ ,占非沙漠化土地面积的3.09%。沙漠化土地中有39.42%转化为非沙漠化土地,转移面积为 $27259.6\text{ hm}^2$ 。在该阶段,不同等级沙漠化土地之间的转移表现为:极重度、重度、中度、轻度和潜在沙漠化土地转移比重分别为11.97%、3.11%、6.6%、13.08%和4.63%,且转移比例最大的土地类型除轻度沙漠化转移为潜在沙漠化外其他均为轻度沙漠化。表明在该阶段,玛曲高原土地沙漠化的发展速度较前一阶段明显放缓,处于缓慢发展阶段。

1995—2001年,由非沙漠化土地转变为沙漠化土地的面积 $4363.5\text{ hm}^2$ ,占非沙漠化土地面积的0.49%。沙漠化土地中有44.71%转化为非沙漠化土地,转移面积为 $31065.4\text{ hm}^2$ 。在该阶段,不同等级沙漠化土地之间的转移表现为:极重度、重度、中度和轻度沙漠化土地转移比重分别为18.97%、14.63%、14.19%和10.75%,且转移比例最大的土地类型分别对应为重度、极重度、重度和潜在沙漠化;潜在沙漠化土地基本没有发生转移变化。由此可知,在该阶段玛曲高原沙漠化土地逆转明显,也表明该区域沙漠化土地在治理措施合理的条件下恢复的潜力较大,速度也会很快。

2001—2006年,由非沙漠化土地转变为沙漠化土地的面积 $1834.9\text{ hm}^2$ ,占非沙漠化土地面积的0.2%。沙漠化土地中有40.44%转化为非沙漠化土地,转移面积为 $16822.7\text{ hm}^2$ 。在该阶段,不同等级沙漠化土地之间的转移表现为:中度和轻度沙漠化土地转移比重分别为3.37%和8.85%,且转移比例最大的土地类型分别对应为重度和中度沙漠化;其他沙漠化土地基本没有发生转移变化,该现象印证了沙漠化发展的正逆过程在时间上是交替出现的,正逆过程的演替可始于其中的任何阶段<sup>[30]</sup>。

2006—2010年,由非沙漠化土地转变为沙漠化土地的面积 $2146.0\text{ hm}^2$ ,占非沙漠化土地面积的0.23%。沙漠化土地中有50.29%转化为非沙漠化土地,转移面积为 $13549.3\text{ hm}^2$ 。

表4 1977—2014年玛曲高原不同等级沙漠化土地与其他地类的相互转移/%

Table 4 Transfer matrix among different desertification land class and non desertification land of Maqu Plateau during 1977—2014

年份 Year	地类 Classification of desertification land	极重度 Extremely severe desertification	重度 Severe desertification	中度 Moderate desertification	轻度 Slight desertification	潜在 Potential desertification	其他地类 Non desertification land
1977—1989	极重度	97.93	0	0	0.55	0	1.52
	重度	2.26	60.98	10.11	3.79	8.89	13.98
	中度	2.08	28.92	46.84	6.37	3.21	12.59
	轻度	0.91	4.79	16.72	35.45	1.6	40.53
	潜在	0	0.19	0.63	2.03	21.55	75.6
	其他地类	0.04	0.1	0.26	0.73	4.55	94.32
1989—1995	极重度	82.64	1.68	0.9	5.45	3.94	5.4
	重度	0.38	87.15	0.89	1.07	0.77	9.74
	中度	0.07	1.26	69.08	3.88	1.39	24.33
	轻度	0	0.25	1.83	51.71	11	35.21
	潜在	0.01	0.02	0.25	4.35	50.39	44.99
	其他地类	0.02	0.03	0.13	0.75	2.16	96.91
1995—2001	极重度	74.38	9.72	3.73	0.27	5.25	6.65
	重度	4.26	85.38	2.68	0.48	1.85	5.36
	中度	1.09	7.74	64.14	2.68	2.68	21.66
	轻度	0.65	0.8	2.62	41.12	6.68	48.14
	潜在	0.12	0.21	0.22	0.87	47.91	50.67
	其他地类	0.03	0.19	0.09	0.05	0.13	99.52
2001—2006	极重度	81.45	0.39	0	0	0	18.16
	重度	0.18	96.1	0	0.84	0	2.87
	中度	0.36	2.5	92.86	0	0.51	3.78



续表

年份 Year	地类 Classification of desertification land	极重度 Extremely severe desertification	重度 Severe desertification	中度 Moderate desertification	轻度 Slight desertification	潜在 Potential desertification	其他地类 Non desertification land
2006—2010	轻度	0.13	0.9	4.1	74.69	3.72	16.46
	潜在	0.09	0.07	0.04	0	34.71	65.09
	其他地类	0.01	0.06	0.03	0.02	0.08	99.81
	极重度	56.34	29.04	2.92	0	0	11.7
	重度	0	67.74	0	0.16	0	32.1
	中度	0	0	51.93	0	0	48.07
	轻度	0	0.23	0	32.17	62.17	4.89
	潜在	0	0	0	5.83	0	94.17
2010—2014	其他地类	0	0	0.01	0.06	0.16	99.77
	极重度	78.21	21.79	0	0	0	0
	重度	0	69.95	10.82	6.01	1.15	12.06
	中度	0	26.72	31.69	13.99	0.54	27.06
	轻度	0	0.66	3.70	27.42	15.14	53.09
	潜在	0	0	0	0.78	37.69	61.53
	其他地类	0	0.01	0.01	0.04	0.13	99.81

注:表中横坐标表示 k+1 时期,纵坐标表示 k 时期。百分数表示 k 时期 i 等级沙漠化土地转移为 k+1 时期 j 等级沙漠化土地的比例

在该阶段,不同等级沙漠化土地之间的转移表现为:极重度和轻度沙漠化土地转移比重分别为 31.96% 和 62.40%,且转移比例最大的土地类型分别对应为重度和潜在沙漠化;其他沙漠化土地基本没有发生转移变化,表明在该阶段玛曲高原沙漠化土地逆转速度较前一时期明显加快。

2010—2014 年,由非沙漠化土地转变为沙漠化土地的面积为 1779.6 hm<sup>2</sup>,占非沙漠化土地面积的 0.19%。沙漠化土地中有 44.56% 转化为非沙漠化土地,转移面积为 10411.8 hm<sup>2</sup>。在该阶段,不同等级沙漠化土地之间的转移表现为:极重度、重度、中度和轻度沙漠化土地转移比重分别为 21.79%、17.98%、41.25% 和 19.5%,转移比例最大的土地类型分别为重度、中度、重度和潜在沙漠化;潜在沙漠化土地基本没有发生转移变化。可见,在该阶段,玛曲高原沙漠化扩张态势逆转明显,极重度和重度沙漠化土地得到了有效控制。

#### 4 结论与讨论

近 40 a 来玛曲高原沙漠化土地在不同时期呈现出不同的发展态势,总体表现为迅速发展—缓慢发展—急速逆转—缓慢逆转—快速逆转的变化过程。

1977—1995 年玛曲高原沙漠化土地处于快速扩张阶段。1977 年沙漠化土地面积为 45091 hm<sup>2</sup>,18 a 间沙漠化土地面积增加了 24396.4 hm<sup>2</sup>,年均扩张速率为 3.01%。1995—2014 年,沙漠化扩张趋势出现逆转。1995 年玛曲高原沙漠化土地面积为 69487.4 hm<sup>2</sup>,19 a 间沙漠化土地面积减少了 54638 hm<sup>2</sup>,年均逆转速率为 4.14%。可见,玛曲高原沙漠化土地逆转速度快于其扩张速度。研究表明<sup>[8,14]</sup>,1975—2000 年玛曲高原沙漠化土地迅速发展;2000—2005 年沙漠化扩张态势出现逆转。本文研究结果与上述研究结果整体变化趋势基本一致,但也略有偏差,究其原因,除对沙漠化土地的分类标准不同外,主要是由于研究时段划分上的不一致。沙漠化发展演化存在着时间尺度上的缓慢性 and 正逆过程出现上的交替性,因而对其进行实时跟踪监测以及长时间序列研究仍是探讨沙漠化演化内在规律的重要方面。

玛曲高原沙漠化土地的发展和逆转区域主要分布在东北部欧拉秀玛乡和尼玛乡黄河沿岸、东南部采日玛乡和曼日玛乡沼泽区、西南部齐哈玛乡和中部阿万仓乡黄河支流两岸。从总体空间变化来看,沙漠化的发展和逆转多发生在人口相对密集地区,表明该区域沙漠化的发展与逆转对人类活动的反应敏感。玛曲高原沙漠化土地的演化是在气候干湿交替扰动下,人类活动强度在敏感脆弱的高寒生态系统中辗转变化的产物。全球

变暖大自然背景下气候的暖干化是玛曲高原土地沙漠化扩张的前提和基础,持续且不合理的人类活动会扰乱生态平衡,使得土地沙漠化扩展速率加快;反之,在气温和降水趋于稳定、风速减缓的自然条件下,土地沙漠化则出现逆转趋势,而在环境承载能力内的合理人口数量和牲畜数量以及政府政策的扶持将影响土地沙漠化发生逆转的速度。

玛曲高原土地沙漠化的发展和逆转过程并非逐级递增或递减,而是在 15—20 a 的时间段内交替出现。在沙漠化发展的不同阶段,不同等级沙漠化土地之间的转移也存在明显的跃变,表明该区域沙漠化土地在治理措施合理的条件下恢复的潜力很大,速度也会很快;相反,该区域的其他地类在人类活动干扰和一定的自然条件下也有可能演变为沙漠化土地,因此,要加大对天然草场的保护,防止非沙漠化土地的退化。

**致谢:**感谢兰州大学田丽慧博士后在影像解译期间的耐心指导,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所逯军峰研究员在提供 1977 年遥感影像上的支持以及高峰甘肃中心马超工程师在影像处理上给予的帮助。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 林春英, 李希来, 金惠瑛, 周万福, 王黎俊, Gao J, 马玉岩, 韩辉邦, 刘珍花. 黄河上游河曲地区湿地植物多样性及其湿地退化的气候背景分析. *江苏农业科学*, 2015, 43(5): 348-356.
- [ 2 ] 汪治桂, 王建兵, 王素萍, 王世文. 近 40 年玛曲草地暖干化趋势及影响因子分析. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(4): 54-58.
- [ 3 ] 李晓英, 姚正毅, 王宏伟, 肖建华. 若尔盖盆地沙漠化驱动机制. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 51-59.
- [ 4 ] 冯文兰, 钟昊哲, 王永前, 龚雪梅. 2001-2013 年若尔盖地区植被退化的时空格局分析. *草地学报*, 2015, 23(2): 239-245.
- [ 5 ] 康相武, 吴绍洪, 刘雪华. 浑善达克沙地土地沙漠化时空演变规律研究. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 1-6.
- [ 6 ] 樊胜岳, 徐裕财, 徐均, 兰健. 生态建设政策对沙漠化影响的定量分析. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 893-900.
- [ 7 ] 刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 苏志珠, 张彩霞. 全新世共和盆地沙地时空演化及其驱动机制. *中国沙漠*, 2014, 34(4): 982-991.
- [ 8 ] 逯军峰, 董治宝, 胡光印, 宋翔, 魏振海. 甘肃省玛曲县土地沙漠化发展及其成因分析. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 604-609.
- [ 9 ] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 颜长珍. 黄河源区 1975-2005 年沙漠化时空演变及其成因分析. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1079-1086.
- [ 10 ] 张龙生, 马立鹏. 黄河上游玛曲县土地沙漠化研究. *中国沙漠*, 2001, 21(1): 84-87.
- [ 11 ] Dong Z B, Hu G Y, Yan C Z, Wang W L, Lu J F. Aeolian desertification and its causes in the Zoige Plateau of China's Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 59(8): 1731-1740.
- [ 12 ] 刘虎俊, 徐先英, 王继和, 李毅, 唐进年, 柴成武, 纪永福, 李发明, 魏怀东. 黄河上游玛曲地区风沙地貌的类型及其分布. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 348-357.
- [ 13 ] 胡光印, 金会军, 董治宝, 颜长珍, 逯军峰. 黄河源区土地利用/覆盖变化(LUCC)研究. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 573-581.
- [ 14 ] 胡光印, 董治宝, 王文丽, 魏振海. 近 30a 玛曲县土地利用/覆盖变化监测. *中国沙漠*, 2009, 29(3): 457-462.
- [ 15 ] 李文龙, 薛中正, 郭述茂, 徐丹丹, 范成勇, 张晶. 基于 3S 技术的玛曲县草地植被覆盖度变化及其驱动力. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(1): 85-90, 95-95.
- [ 16 ] Yan X P, Mo J X, Pu J. Research on the human dimensions of land use changes in the mega-urban region: a case study of the Pearl River delta. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6): 613-623.
- [ 17 ] Dong Y X. Research on the status of sandy desertification disaster and its driving force in Xizang. *Journal of Natural Disasters*, 2001, 10(2): 96-102.
- [ 18 ] 钱鞠, 王根绪, 马金珠. 黄河上游玛曲县生态环境问题与综合治理对策. *生态学杂志*, 2002, 21(3): 69-72.
- [ 19 ] 盛海洋, 王玉珏. 若尔盖高原沙漠化成因及其治理对策. *水土保持通报*, 2007, 27(1): 126-131, 158-158.
- [ 20 ] Hou F J, Yang Z Y. Effects of grazing of livestock on grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 244-264.
- [ 21 ] 胡梦珺, 田丽慧, 张登山, 李森, 高尚玉. 遥感与 GIS 支持下近 30a 来青海湖环湖区土地沙漠化动态变化研究. *中国沙漠*, 2012, 32(4): 901-909.
- [ 22 ] 刘盛和, 何书金. 土地利用动态变化的空间分析测算模型. *自然资源学报*, 2002, 17(5): 533-540.
- [ 23 ] 曾辉, 高凌云, 夏洁. 基于修正的转移概率方法进行城市景观动态研究——以南昌市为例. *生态学报*, 2003, 23(11): 2201-2209.
- [ 24 ] 陈百明. 区域土地可持续利用指标体系框架的构建与评价. *地理科学进展*, 2002, 21(3): 204-215.
- [ 25 ] 樊亚辉, 塔西甫拉提·特依拜, 王宏, 谢霞. 艾比湖地区土地沙漠化遥感动态监测. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(7): 161-167.
- [ 26 ] 郑影华, 李森, 王兮之, 李会川, 高尚玉. RS 与 GIS 支持下近 50a 海南岛西部土地沙漠化时空演变过程研究. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 56-62.
- [ 27 ] 王小军, 陈翔舜, 魏金平, 尚立照, 高斌斌, 赵洪民. 甘肃省 2004-2009 年土地沙漠化时空变化分析. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 33-37.
- [ 28 ] Hu G Y, Dong Z B, Wei Z H, Lu J F, Yan C Z. Spatial and temporal change of desertification land of Zoige Basin in recent 30 years and its cause analysis. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8): 908-916.
- [ 29 ] 孙林军, 盖艾鸿. 基于 RS 和转移矩阵的区域生态风险强度指数测算——以庆阳市西峰区为例. *中国农学通报*, 2014, 30(17): 186-189.
- [ 30 ] 许端阳, 李春蕾, 庄大方, 潘剑君. 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用评价综述. *地理学报*, 2011, 66(1): 68-76.