

海南岛西部热带沙漠化土地特征与成因

李 森^{1,2}, 孙 武³, 李 凡¹, 林培松¹, 郑影华^{1,3}, 聂 磊¹

(1. 佛山大学资源与环境科学研究所, 佛山 528000;

2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

3. 华南师范大学地理系, 广州 510631)

摘要: 海南岛西部沙漠化土地具有热带海岸沙地的地域特征、形态特征、旱生植被景观特征和土地利用快速演变特征。在大气环流、雨影区和海流的共同影响下, 岛西形成热带半干旱气候和热带稀树草原环境, 孕育并存在自然沙漠化发展的动力、空间和物质基础。岛西历史时期沙漠化受气候变化和毁林开荒等活动的影响, 但仍是自然沙漠化为主的沙漠化过程。20 世纪以来现代沙漠化经历了发展、恢复、再发展、逆转、波动等 5 个阶段, 沙漠化既受数年或数十年尺度的气候变化的作用, 又受人为为不合理经济活动的影响。用因子分析等诊断、分析后认为人为活动的贡献率远大于气候变化的贡献率, 现代沙漠化已演变为以人为沙漠化为主的沙漠化过程。

关键词: 海南岛; 沙漠化; 热带半干旱气候

海南岛西部是我国唯一的热带稀树干草原沙漠化地区。从岛西北的洋浦港到岛西南莺歌海的沙质海岸平原、河流三角洲平原及部分沙质台地上, 形成一个长 170 km、宽 3~20 km, 呈狭长带状的沙漠化土地分布区。沙漠化对岛西生态环境和经济社会发展造成了严重危害。海南岛西部的热带沙漠化土地与我国北方和青藏高原的沙漠化土地在景观特征、退化过程、成因等方面有一定的差异, 而与非洲萨赫勒地区的沙漠化相似, 具有明显的地域性、特殊性和复杂性。但过去仅有朱震达、吴正等对海南岛西部的沙漠化问题作过初步论述^[1-3], 刘瑞华对沙地地层沉积相作了调查^[4], 毕华等分析了岛西昌江县沙漠化的原因^[5,6]。迄今为止, 本区仍是我国沙漠化研究很薄弱区域之一, 使我们对热带海岛区沙漠化土地的特征、形成过程与动力机制等问题还不甚清楚。本文拟在分析岛西热带沙漠化土地特征的基础上, 阐明沙漠化形成的气候与环境, 探讨历史时期以来沙漠化正、逆变化的原因, 为防治沙漠化提供决策依据。

1 岛西热带沙漠化土地特征

1.1 沙地分布特征

沙漠化土地主要分布在沿海平原和沙质台地上, 在昌化江、通天河、感恩河、珠碧江等河流三角洲平原及莺歌海周边平原分布比较集中。除在昌化大角和莺歌海西南形成大片沙地外, 其余地段的沙地面积较小, 且多与耕地、林地、水塘等交错分布, 总体上形成沿海岸带不连续分布的格局, 表现出明显的海岛沙地的地域分布特征。

1.2 沙地地表形态较为简单, 植被覆盖度的增加使沙丘形态易发生变异

沙地地表形态主要为纵向沙垄、草灌丛沙丘、新月形沙丘、爬升沙丘和沙席等, 形

收稿日期: 2004-12-21; 修订日期: 2005-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40271012); 海南省重点科技项目 (2003) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40271012; Key project of Science and Technology of Hainan (2003)]

作者简介: 李森 (1948-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 中国地理学会会员, 主要从事环境演变与沙漠化研究。

E-mail: fslisen@163.com

态比较简单, 高度多在 20 m 以下。从海岸后滨向内陆依次为: 海岸前丘→纵向沙垄→草灌丛沙丘/新月形沙丘→沙席/爬升沙丘, 并由流动沙丘逐步过渡为半固定沙丘、固定沙丘。纵向沙垄多是末次冰期强风能条件下形成的原始沙垄, 草灌丛沙丘、新月形沙丘、沙席等则是发育在原始沙垄之上的全新世~现代叠置沙丘。沙丘的植被覆盖度增加后, 沙垄和沙丘向固定型沙丘演变, 其形态亦发生变异, 沙丘迎风坡和落沙坡逐渐变缓, 波形对称指数缩小, 使部分叠置沙丘变异为形态不完整的沙丘、沙席, 甚至消亡, 表现出热带海岸带沙地的形态特征。

1.3 沙地植被为热带旱生、中生植物群落, 呈现热带旱生植被景观, 季节变异比较明显

沙地上植被稀疏矮小, 为耐旱的草本、灌木和稀疏的小乔木。在流动、半流动沙地上可见厚藤 (*Ipomoea pescaprae* Sweet)、白背荆 (*Vitex Trifolia var.unifoliolata*)、鬣刺 (*Spinifex littoreus* Merr)、露兜 (*Pandanus tectoriuks*)、海滨莎 (*Remirea maritime*)、绢毛飘拂草 (*Fimbristylis sericea* Br) 群落, 草本层高 10~30 cm, 匍伏分布, 覆盖度 < 10%。在固定、半固定沙地上主要为刺葵 (*Phoenix hanceana* Naud)、刺篱木 (*Flacourtia indica* Merr)、仙人掌 (*Opuntia dillenii* Haw)、露兜 (*Pandanus tectoriuks*)、茅根 (*Perotis indica*) 等沙生刺灌丛和厚藤、鬣刺、铺地黍 (*Panicum repens* Linn) 等藤本、草本群落^[7-8], 以及木麻黄 (*Casuarina equisetifolia* Linn)、窿缘桉 (*Eucalyptus exserta* F.v.Muell)、椰子 (*Cocos nucifera* Linn) 等人工乔木林。草本层高 10~30 cm, 灌丛高 1~2 m, 群落覆盖度 10~50%。沙地上的乔、灌木为旱、中生常绿植物, 而草本植物多数在春天萌发、夏季迅速生长、秋末逐渐凋萎或枯死, 有较明显的季相变化。沙地呈现热带旱生植被景观特征, 且具有比较明显的季节变异性。

1.4 沙地演变速度快, 常形成沙地-耕地-沙地-林地或沙地-水塘的拉锯式演变

沙地保持有一定的生产力, 有机质含量为 0.059~0.297 g.Kg⁻¹, 全 N、全 P 和全 K 的平均含量分别为 0.465 g.Kg⁻¹、0.043 g.Kg⁻¹ 和 3.646 g.Kg⁻¹, 因此, 既能在短时间内退化, 也能在较短的时间内恢复, 演变速度快。沙地的土地利用形式主要为林地、耕地和水塘, 常形成沙地-耕地-沙地-林地或沙地-水塘的拉锯式演变, 表现出热带沙漠化土地快速演变的特征。

2 岛西热带沙漠化形成的气候与环境

2.1 热带半干旱气候的形成

2.1.1 季风环流对气候的控制作用 海南岛是位于南海北部、“马纬度带”南侧 18°10' N~20°10' N 间的一座岛屿。受西太平洋副高压和南海季风环流的控制, 形成典型的热带季风气候。自冬至夏, 西太平洋副高位置逐渐北移, 强度增大。春季, 500 hPa 副高脊线位于 15°N 附近, 横穿中南半岛南部~吕宋岛, 南海高空及其附近为强盛的南海高压所控制。在脊后槽前的天气型下, 副高西北翼对流层中、下层为下沉辐散气流, 岛西盛行 NW 风。夏季, 500 hPa 副高脊线伸入南海^[9], 随着孟加拉湾季风在 5 月上旬爆发和副高脊线北跳, 南海夏季风于 5 月第 4 候爆发, 全岛成为气旋、台风、赤道辐合线等系统活动的场所^[10], 岛西盛行 SW 风。秋季, 副高脊线从大陆上空回跳到 25°N 附近, 再回跳到 20°N 以南, 南海夏季风逐渐减弱, 但台风影响频繁。10 月中下旬后, 蒙古高压开始向南扩张。冬季, 海南全岛受冷高压控制, 南下的 NNE 向气流分两支沿海南岛两侧绕流到岛西南偏南部再次汇合^[11], 岛西盛行 NNE-NE 风, 地面常有冷锋甚至有寒潮天气南压过境。

2.1.2 两个雨影区交汇的影响 岛西既处于中南半岛长山山脉东侧孟加拉季风的雨影区, 又处于五指山西侧南海季风的雨影区。来自孟加拉湾的偏西气流和来自西太平洋的偏东气流分别受长山山脉和五指山脉地形的热力作用, 在对流层低层形成热低压, 位于

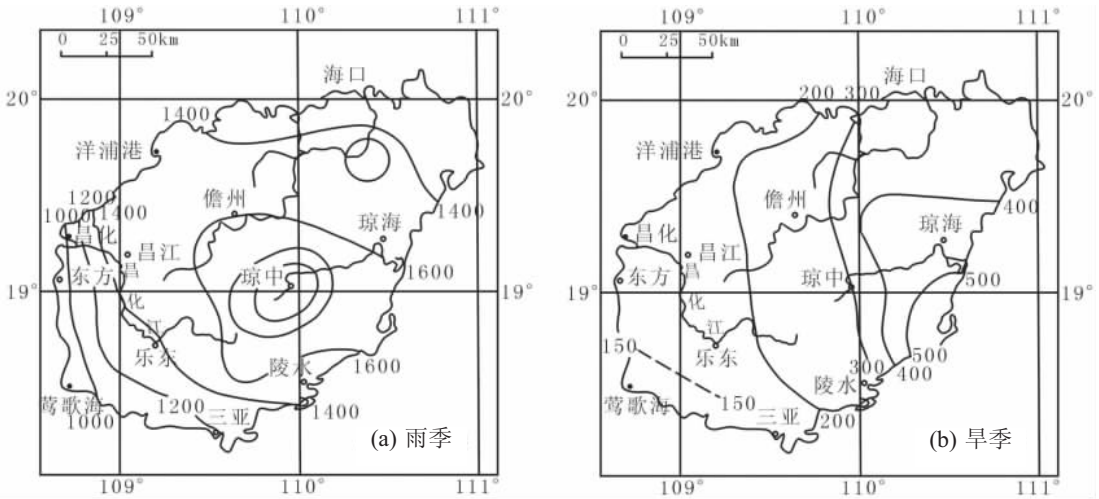


图 1 海南岛雨季 (a)、旱季 (b) 平均降水量 (mm) 分布图 (文献[10])

Fig. 1 The average rainfall distribution of rainy season and dry season in the Hainan Island

山脉迎风坡的热低压前部吹潮湿的“低纬风”，位于山脉背风坡的热低压后部则吹干燥的“高纬风”^[12]，从而使岛西对流层的中高层和低层均存在下沉运动，焚风效应十分明显，无论雨季与干季降水量均明显少于岛东 (图 1)，气候干旱少雨。

2.1.3 北部湾海流的影响 据观测与模拟，北部湾海域的海流终年为规模较大的逆时针运动的环流。冬半年在 NNE 向风应力作用下西向海流沿越南海岸南下，到湾口时受东向流的带动，一部分海水转向东北沿海南岛西海岸北流，并在湾北与西向流汇合，形成逆时针运动的风生流、密度流。此时北部湾中部海形成冷水团，海流为冷水流；夏半年在 SW 向风应力作用下，外海水北上漂流自湾南沿海南岛西海岸北流至湾北，再西流汇入越南沿岸南向海流，亦形成逆时针运动的风生流、密度流。由于中部海的冷水团在 4、5 月后已扩展至底层，使夏半年的海流仍具冷流性质。虽然海流向北回流的流速仅为 0.3~0.4 kn^[13]，但在离岸风尤其冬半年在偏北风的长期作用下，使表层海水被吹离海岸带，近岸下层冷水上涌。冷水面与空气接触后，形成逆温层，虽有时相对湿度较大，但仅能成雾不能成雨。岛西在 12 月至翌年 1 月~4 月约出现 10 次雾天，其作用类似于中、低纬度冷流对非洲、南美热带大陆西岸多雾沙漠的影响。

2.2 热带沙漠化形成的环境

2.2.1 水热条件极不协调与风力强盛的气候环境 在大气环流、雨影区和海流的作用下，海南岛西部形成典型的热带半干旱气候。其特点：一是干旱季节水热条件极不协调^[2, 8]。气温终年较高，年平均温度为 24.5~25.2 °C，≥ 10 °C 的活动积温在 8500 °C 以上；旱季雨季分明，多年平均降雨量仅 967.5~1091 mm，且年内分配极其不均，在 5 月~10 月的夏半年，降水充沛，降水量占全年的 90%，而在 11 月~翌年 4 月的冬半年，降水稀少 (图 1)，干旱月份长达 5~5.5 个月；全年蒸发量高达 2525 mm，年干燥度达 1.97，冬半年干燥度可达 4.0 以上。二是风季漫长，风力强盛。岛西冬季盛行偏 N 风，月均最大风速可达 6.7 m/s，最大风力可达 10 级；春季盛行干热的 NW 风 (俗称老撾风)，月均最大风速可达 6.8 m/s，最大风力可达 11 级；夏半年又盛行 SW 风。在 6~10 月的台风季节，平均有 6.8 个/a 台风登陆或影响岛西^[9]。台风登陆前，对流层中低层辐散风动能转换为旋转风动能，风速增大；台风登陆时，对流层中低层旋转风又向辐散风转换，风力仍可达到 6~12 级，风速在 10.7~32.7 m/s 间，最大可达 40 m/s。据观察，台风不仅能使地表上干燥的沙物质形成饱和风沙流，而且还能使沙丘移动数米。总之，岛西是寒潮大风、干热风

和台风频繁吹袭的“走廊”，全年风季漫长、风力强盛，年均风速达 3.5~4.6 m/s，年均大风日数达 20 d (图 2)。这种“风季”与“旱季”在时间上的同步，导致风力吹扬作用频繁且强盛，为沙漠化的发展提供了动力。

2.2.2 植被稀疏的热带稀树草原环境 热带半干旱气候造就了岛西的热带稀树干草原。在海岸平原和沙质台地上主要有耐旱的草本植物为主构成大面积的沙生草地，混生着耐旱的灌木和非常稀疏的乔木^[6,7]，呈现热带旱生植被特有的群落结构和生态景观外貌。沙生草地的植被盖度虽在 5~50%间，但由于草本植物是多年生或一年生的，到秋末即逐渐休眠或枯死，使稀树草原呈现一片植被稀疏、凋零的景色，地表大面积裸露，这就为沙漠化发展提供了空间场所。

2.2.3 沙物质丰富的物源环境 岛西地表有十分丰富的沙

物质，其粒级组成以中沙、细沙为主，微沙、粉沙和粘土组分小。沙物质来源广泛，一是 Q_3 八所组和 Q_4 全新世的埋藏古风成沙、残留古风成沙。当地表原生植被和土层结构遭到破坏后，古风成沙在风力作用下就地起沙、前移、再堆积；其次是河流输沙。近几十年，由于岛西各河流上中游水土流失加剧，河流含沙量都大大增加，如昌化江自上世纪 50 年代到 80 年代含沙量就增加了 42.8% 以上，多年输沙量达 74.3×10^4 t/a，雨季时下游和河口三角洲泥沙沉积量加大，昌化港淤积严重，落潮时水深仅 2 m^[9]；旱季时水位下降 6.5 m，使河漫滩大面积出露，大量沙物质在风力作用下不断向岸输移；三是由近岸下层海水上涌形成的上升流，携带底层沙物质，在向岸风的作用下源源不断的向海岸输送，加之岛西近南北向的弧形海岸与向岸风呈斜交，提高了海岸侵蚀频率和输沙率。此外，在海岸平原东侧的燥红壤台地上，由于地表植被破坏和连年种植旱作籽瓜等不合理的耕作方式，导致燥红壤遭风蚀逐渐粗化、沙化。上述各种来源的沙物质，由于沙粒持力小，风蚀模数高，经多次转变后就地起沙、输沙，成为土地沙漠化的物质基础。

综上所述，岛西热带半干旱气候造就了脆弱的稀树草原环境，具有土地沙漠化形成、发展的动力、空间和物质基础。由于稀树草原的生态易损性较高，使本区自古以来就孕育并存在自然沙漠化过程。

3 历史时期土地沙漠化发展演变的成因

3.1 历史时期土地沙漠化的发展

据研究，西汉元封元年(前 110 年)汉武帝在海南岛西北设儋耳郡(今儋州西北)时，全岛森林面积占总面积的 90%，岛西是一片充满热带稀疏草原原始风貌的处女地，设郡标志着岛西开发历史由此开始。东晋至隋唐时，由于汉民族的大量入居和大陆俚人集群南迁儋耳，对土地的垦辟日益扩大，滨海平原已有两熟水稻、八收蚕业，土地面积也相当，但当时人口还较少，仅沿海森林遭破坏而后退^[14]。五代以后，避乱、经商的移民日众，宋、元时人口最多达 3 万余众。为解决粮食短缺问题，移民和当地黎族仍多用刀耕火种方式砍伐森林、开垦土地、消耗燃料。发生于明成化二十一年~清光绪二十三年(1485 年~1897 年)的中国热带的小冰期，对岛西沙漠化影响甚大。当时年均温较现代约低 0.6 °C，多次出现冷冬年，不仅使椰子、槟榔的分布北界逐渐南移，也使海岸风沙活跃、灾害频发^[15]。对昌化中角草灌丛沙丘剖面进行热释光测年及粒度分析也表明，小冰期时风成沙粒度变粗，中沙组分含量达 43.67%，沉积厚度仅为全新世大暖期的 12% 左右，反映此时沙丘风蚀速率大于沉积速率，沉积厚度变薄，粒度变粗，导致草灌丛沙丘活化。

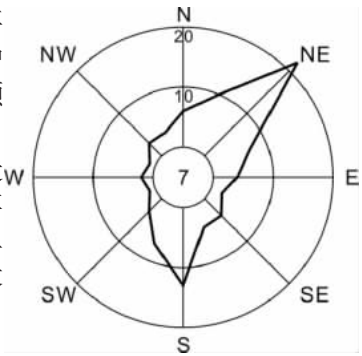


图 2 海南岛西部风向频率玫瑰图
Fig. 2 The frequency of wind-direction in the west of Hainan Island

小冰期也引发人口向海南岛的迁移, 仅清一代大陆移民就达 217 万。人口的不断增加, 使开垦土地成为岛西此时发展经济的主要手段^[4], 但开荒不当又使沙化土地日众。据民国感恩县志记载: 明万历九年 (1581 年) 感恩县治 (今东方) 因“近海浮沙为患, 移治于大雅坡”。道光十五年 (1835 年) 岛西儋州、昌江、感恩等 3 县人口增至 21 万^[4], 再起垦荒高潮。据昌化县志记载: 清乾隆至嘉庆年间 (1736~1820 年) 昌江“西南浮沙荡溢, 垦之为田…无男女老稚, 昼夜力于田事”, 感恩、昌化、儋州新垦土地占耕地总面积的比例分别达到 37%、25%和 13%^[4]。然仅到道光元年 (1821 年), “自儋至崖, 丰草与丛棘间生, 顽石与深沙载道”, “浮沙没膝, 白如银, 跬走如炮烙, 往来必须夜行”。岛西沙丘延绵, 流沙遍地, 稀树草原景观已大为改变。

3.2 历史时期沙漠化的成因

岛西历史时期沙漠化与近 2000 年来我国的多次冷、暖变化和岛西人为活动的强度增大有密切关系。尤其是明~清末的小冰期, 使区域气候降温减湿, 植被覆盖度降低, 海岸风沙活动, 加之人口渐多, 汉、黎族长期用刀耕火种方式毁林开荒, 对小气候变干、地表含沙量增大及表土被风蚀或水蚀影响都很大^[4], 加速了土地沙漠化的发展。但相对于气候变化而言, 由于这个时期岛西人口总量毕竟有限, 人为活动对沙漠化的作用虽在不断加重, 但仍处于从属于千年或百年尺度气候变化, 可以认为, 历史时期岛西沙漠化是以自然沙漠化过程为主的发展过程。

4 现代土地沙漠化发展演变的成因

4.1 近百年来现代土地沙漠化的发展演变

20 世纪上半叶岛西沙漠化发展演变情景主要采用历史资料和两期地形图对比分析的方法进行研究。资料表明, 1930 年代~1940 年代岛西森林砍伐和土地开发的强度继续加大^[4], 森林覆盖度从 1933 年的 50%陡降为解放前夕的 35%, 沿海平原植被遭到大面积破坏, 导致沙漠化迅速扩张, 沙丘蔓延, 风沙肆虐。利用 1930 年代和 1950 年代两期大比例尺地形图判读、分析八所和昌化两典型区沙漠化的发展演变, 该时期八所地区沙漠化土地由 1.68 km² 扩展到 23.62 km², 昌化地区沙漠化土地则由 4.24 km² 扩展到 10.24 km², 分别增长了 14 倍和 2.42 倍, 沙漠化年均扩展速率高达 10.8%~3.45%。这表明, 20 世纪上半叶是岛西生态环境变迁最大、沙漠化发展最快的时期。

近 50 年来岛西沙漠化发展演变情景通过不同时期航空和卫星影像的遥感解译、辅以野外调查的方法进行定量研究。依据海南岛西部沙漠化土地分级及景观综合指征^[6], 对 1959 年和 1975 年两期航片结合同时期的地形图进行目视判读, 运用 ERDAS8.6 和 Arcview3.2a 等地理分析软件对 1975 年 MSS 卫星影像和 1986、1996、2003 年 TM 卫星影像数据人一机交互判读^[20], 获得包括东方、昌江、儋州、乐东 4 县、市大部及白沙县一部的岛西监测区 (面积 10682.20 km²) 沙漠化土地动态变化图件及数据库。结果表明, 1950 年代末~1970 年代岛西沙漠化土地由 201.45 km² 扩展到 257.92 km², 年均扩展 3.53 km², 升级率达到 19.97%; 1980 年代沙漠化土地减少至 222.19 km², 年均缩小 3.25 km², 升级率演变为 -20.84%; 1990 年代以来沙漠化土地先减至 144.97 km², 再减至 122.57 km², 年均缩小 -7.72~3.20 km², 升级率为 -35.93%。虽然总体上呈逆转态势, 但在 1990 年代中、后期出现反复、波动, 沙漠化逆转速率变缓, 降级率上升。近 50 年来岛西沿海沙质平原、泻湖平原和昌化江等河流下游三角洲平原是沙漠化发展演变的主要区域, 其中, 珠碧江下游和感恩河下游感城一带, 沙漠化土地明显减少; 昌化江下游三角洲平原和昌化大角地区, 沙漠化的面积与程度都有所下降; 东方沿海平原新街一带, 沙漠化土地虽呈减少趋势, 但 1990 年代以来又有部分耕地、林地等转化为沙漠化土地; 莺歌海泻湖平原

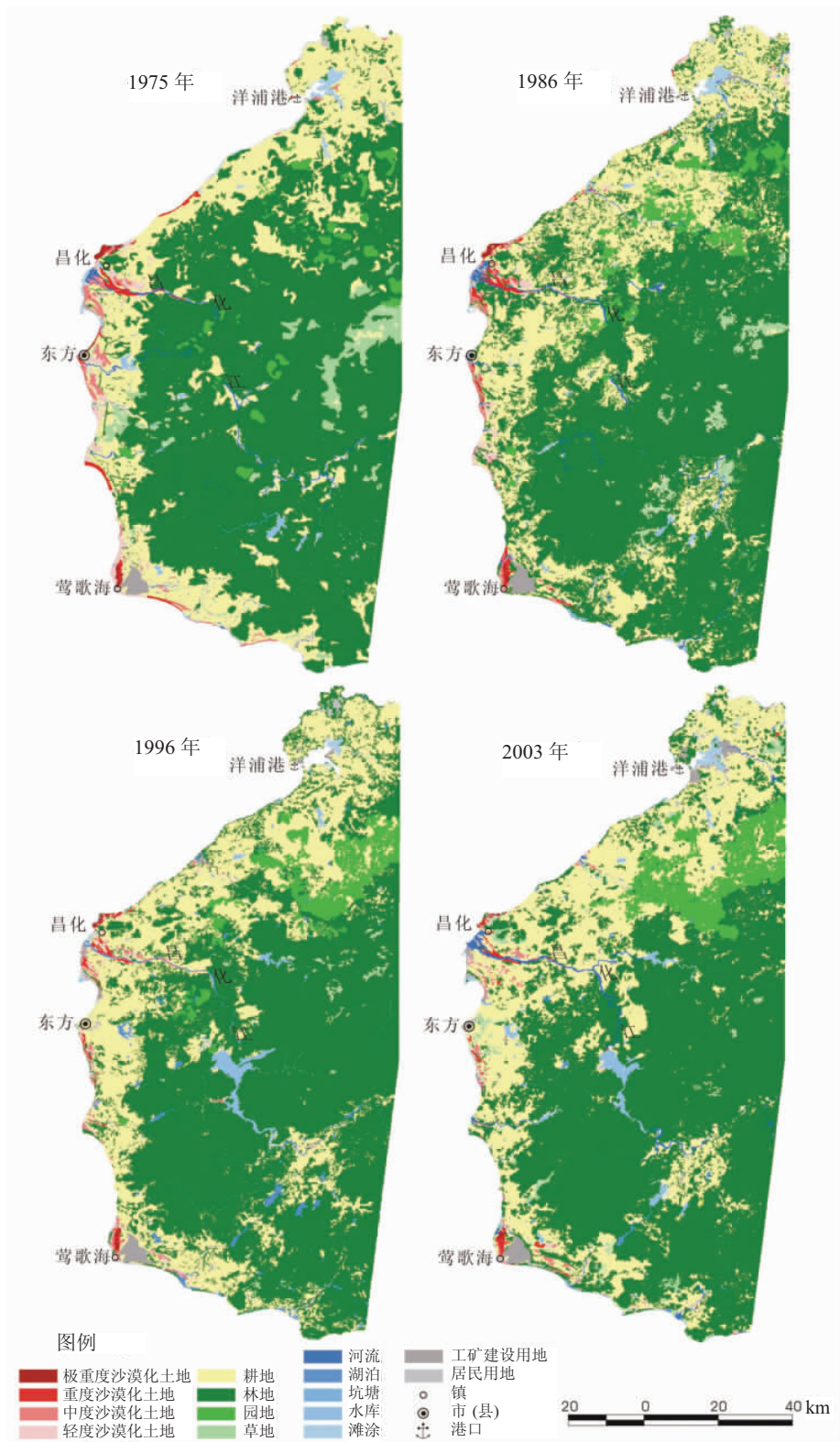


图3 近30年海南岛西部沙漠化土地的时空演变图

Fig. 3 Spatial-temporal changes map of sandy desertified land in the west of Hainan Island during recent 30 years

表 1 近 50 年海南岛西部沙漠化土地面积与程度变化

Tab. 1 The changes of area and level of sandy desertified land in the west of Hainan Island during recent 50 years

年代	沙漠化土	占岛西	极重度-重度沙		中度沙漠化		轻度沙漠化		沙漠化发	沙漠化年	年均扩
	地总面积	面积比	漠化面积	比例	面积	比例	面积	比例			
	(km ²)	例 (%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	展/逆转面	均增减量	展速率
									积 (km ²)	(km ² /a)	(%)
1959 年	201.45	1.89	69.34	34.45	55.99	27.79	76.07	37.76			
1975 年	257.92	2.42	59.99	23.26	83.47	32.36	114.46	44.38	56.47	+3.53	1.56
1986 年	222.19	2.08	45.38	20.42	75.28	33.88	101.53	45.70	-35.73	-3.25	-1.35
1996 年	144.97	1.36	27.87	19.22	51.04	35.21	66.06	45.57	-77.22	-7.72	-4.18
2003 年	122.57	1.15	29.15	23.78	56.76	46.31	36.66	29.91	-22.40	-3.20	-2.37

西部及佛罗、黄流等地，沙漠化面积虽逐渐减少，但程度却出现反弹、升级。上述区域沙漠化土地的演变反映了岛西现代沙漠化经历了快速发展、初步逆转、波动变化等演变过程，并由发展态势逐渐转变为逆转态势(表 1、图 3)。

4.2 气候变异对现代沙漠化演变的影响

岛西现代沙漠化受区域气候变异影响显著。据研究，我国 100 °E 以东地区在 20 世纪上半叶，干燥度尽管存在波动，但总的呈逐渐升高之势，1920~1940 年是 20 世纪最暖、干燥度指数最高的时段^[17]。将海南岛西部年与各季气温和降水序列分别按 50 年、30 年、10 年三个时段用线性回归方程： $\hat{y}(t) = a_0 + a_1t$ 计算气温倾向率和降水倾向率(其中 a_0 为 $t = 0$ 时的 \hat{y} 值， a_1 为用此回归方程所作回归直线的斜率， t 为时间)^[18]，结果显示，近 50 年岛西年均气温和年均降水的倾向率分别为 0.24 °C/10a 和 -23.93 mm /10a(表 2)，明显高于我国气温以 0.04 °C/10a 上升、降水以 -12.66 mm /10a 下降的平均水平^[19, 20]。在气温上升过程中，冷期与暖期交替变化：1951~1953 年、1965~1966 年 1979~1982 年和 1986~2000 年为偏暖期，气温平均偏高 0.4 °C，其中 1998 年气温偏高 1.4 °C，为 50 年最高值；1954~1964 年、1967~1978 年和 1983~1985 年为偏冷期，气温平均偏低 0.4 °C。在降水下降趋势中，多雨期和少雨期交替出现：1965~1971 年、1981~1989 年和 1997~2000 年为少雨期，降水平均偏少 160.5 mm，其中 1969 年为 275.4 mm，达到 50 年来的谷底；1951~1964 年、1972~1980 年和 1990~1996 年为多雨期，降水平均偏多 173.3 mm(图 4)。各时期温湿组合关系是：50 年代、70 年代变冷和变湿相联系，60 年代变冷和变干相联系，而 80 年代和 90 年代分别与变暖变干和变暖变湿相联系。

对 1950 年以来各温湿组合期的年均气温 (X_1)、年均降水量 (X_2)、相对湿度 (X_3)、蒸发量 (X_4)、年均风速 (X_5)、大风日数 (X_6) 等 6 个气候因子与同期沙漠化面积 (y_1) 经均值化后作关联度分析，得出：湿润期的关联序为： $X_3 > X_1 > X_5 > X_4 > X_2 > X_6$ 。

关联矩阵为：0.91837 0.64011 0.95701 0.84579 0.86826 0.63397

干旱期的关联序为： $X_4 > X_3 > X_1 > X_5 > X_2 > X_6$ 。

关联矩阵为：0.90963 0.62117 0.92884 0.93505 0.86756 0.49138

这表明，在区域气候增温减湿的背景下，相对湿度、蒸发量、温度、风速、降水量等因子的变化仍是影响沙漠化发展与逆转的重要动力因子。

表 2 海南岛西部年与各季平均气温倾向率与降水倾向率 (°C/10 a/ mm /10 a)

Tab. 2 The annual and quarterly average tendency rates of temperature and precipitation in the west of Hainan Island (°C/10 a/ mm /10 a)

时间序列	春季		夏季		秋季		冬季		全年	
	气温	降水量	气温	降水量	气温	降水量	气温	降水量	气温	降水量
1951~2000a	0.15	12.60	0.22	-41.96	0.30	2.68	0.35	2.72	0.24	-23.93
1971~2000a	0.26	17.74	0.34	-37.46	0.38	-10.14	0.49	2.99	0.37	-26.87
1991~2000a	0.30	104.24	0.36	-372.77	0.44	243.69	-0.37	-12.75	0.22	-37.58

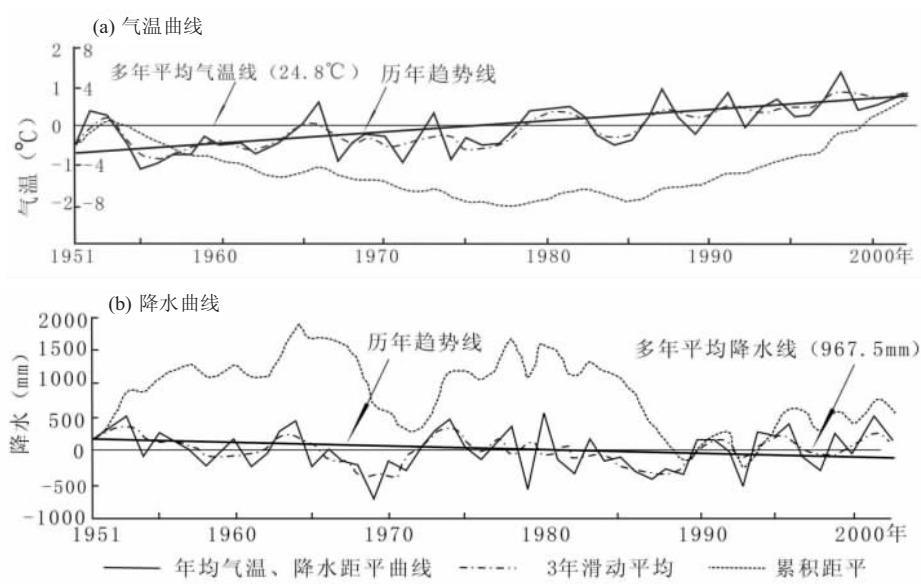


图4 近50年海南岛西部温度和降水变化曲线

Fig. 4 The changes of temperature and precipitation in the west of Hainan Island during recent 50 years

4.3 人为活动对沙漠化演变的影响

过度的人为活动是导致土地过度利用即“三滥”活动的根源。自1928年至2002年岛西4县人口和牲畜数量分别增加6.74倍与5.89倍，年均增长率分别达26.12%与35.58%。人、畜数量的持续增加，必然使自然潜力本来就属中等或偏低的土地资源处于高强度开发水平，导致土地资源的过度开发利用。据对人为活动相关资料和沙漠化面积变化趋势的综合分析可知，1900年以来岛西出现5个人为活动变化期(图5)：

(1) 1930~1940年代末生态破坏时期。1928年岛西各县人口达29万。由于新式运输发展，公路延伸到沿海，森林砍伐和土地开垦的强度进一步加大。抗战时期日本军队实施“以战养战、就地供给”的方略，在岛西从事掠夺性的土地、矿产拓殖活动，曾用20万劳工开采石碌铁矿、修建石碌—八所铁路和八所港、大量砍伐林木。日军的掠夺性开采，使森林覆盖率从1933年的50%陡降为解放前夕的35%，相当于元、明、清三朝森林消失的总和^[4]，岛西生态环境陡然恶化，沙漠化迅速扩张。

(2) 1950年代生态恢复时期。1950年岛西人口达47.67万。随着农村地权、山权、林权普遍确定，群众在“谁种谁有，伙种伴有”的政策引导下，积极植树造林，地表植被得到有效的保护、恢复，沙漠化初步得到遏制。

(3) 1950年代末期~1970年代盲目开发时期。大炼钢铁、兴建国营农场和建设八所港、南罗盐田等大型开发活动，使大片杉木、榕树林地和海防林被毁，全岛森林面积锐减至 $33.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。岛西耕地面积和牲畜数量分别以年增长速率1.37%和3.21%的速度猛增，至1975年分别达 $10.339 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 59.52×10^4 头(只)。这一时期农村、农垦等各路兵马的滥垦乱伐活动，尤其是不合理开荒和刀耕火种的耕作方式，使海岸平原的植被遭到严重破坏。地表原生植被和土层结构遭受破坏后，风蚀、风积过程加速，导致土地沙漠化的急剧扩张，年扩展速率高达1.56%。

(4) 1980年代生态建设时期。虽然人畜数量增长对土地的压力仍未得到缓解，但在国家环境保护政策的导向下，岛西“三滥”活动逐步减少、停止。在控制耕地和水域养殖面积的同时，大力营造海防林、经济林，并限制滨海采砂、采矿，耕地和水域养殖多年分别保持在 $10.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $1.45 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的水平上，累计造林面积也达到 15.18×10^4

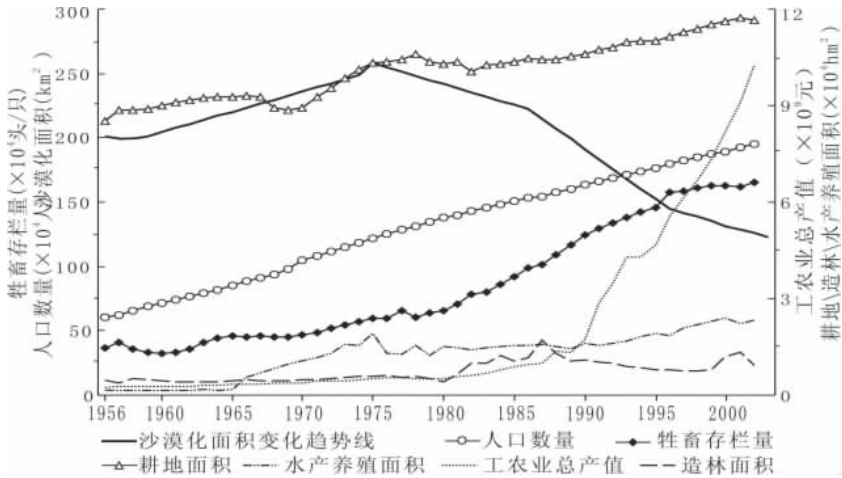


图 5 近 50 年海南岛西部沙漠化面积和人为活动因子变化曲线

Fig. 5 The changes of sandy desertified area and artificial factors in the west of Hainan Island during recent 50 years

hm², 使生态环境得到有力保护。加之海南建省后经济快速发展, 岛西 4 县市 GDP 年保持 13.62% 的高增长速度, 使政府和农民有经济能力投入生态建设, 从而促进了沙地植被的恢复、重建和沙漠化土地的逆转。这一时期沙漠化面积已转为负增长, 年扩展速率达 -1.35%。

(5) 1990 年代至今生态建设与盲目开发并重时期。1990 年代前期岛西沙漠化治理力度较大, 后期则出现一边治理、一边破坏的局面。此时期, 人口、牲畜、耕地、水产养殖面积和城市建设用地高速增加, 至 2002 年, 前四者分别达到 195.36×10⁴ 人、165.5×10⁴ 头 (只)、11.663×10⁴ hm² 和 2.29×10⁴ hm²。造林面积却有下降趋势, 且多处海防林被毁, 形成缺口、断带, 仅儋州、乐东和东方 3 县市的海防林 2000 年比 1995 年就分别减少 9.5%、4.9% 和 4.2%, 导致海岸平原的林地、草地大面积减少, 生态质量下降, 沙漠化逆转速率由 4.18% 降至 2.37%, 形成总体逆转、局部反复的波动变化。

对上述后 3 个变化期的人口数量 (X₇)、牲畜数量 (X₈)、耕地面积 (X₉)、水产养殖面积 (X₁₀)、造林面积 (X₁₁)、工农业总产值 (X₁₂) 等 6 个人为因子与同期沙漠化面积 (y_i) 经均值化后作关联度分析, 得出: 沙漠化发展或波动期各因子的关联序为: X₉ > X₇ > X₈ > X₁₁ > X₁₂ > X₁₀

关联矩阵为: 0.90503 0.89307 0.97933 0.7333 0.86579 0.84299

沙漠化逆转期各因子的关联序为: X₉ > X₁₀ > X₇ > X₈ > X₁₁ > X₁₂

关联矩阵为: 0.84941 0.73475 0.88878 0.8835 0.72706 0.61188

这表明, 毁林开荒或退耕还林导致的耕地面积变化, 以及人、畜数量的增、减、持平变化导致的林地、草地和水产养殖面积的变化, 都是直接作用和影响沙漠化发展或逆转的重要动力。

4.4 现代沙漠化成因的综合分析

区域气候异常变化和过度的人为经济活动是岛西现代沙漠化发展 / 逆转的两类驱动力。自然驱动力和人为驱动力的各因子叠加与综合作用, 产生激发—互动作用, 加速、加剧了岛西现代沙漠化的发展或逆转, 从而使岛西现代沙漠化经历了发展、恢复、再发展、逆转、波动 5 个演变阶段。在气候变冷与人为盲目开发活动增强相耦合时期, 由于“三滥”活动频繁, 气温较低, 相对湿度降低, 使土壤干燥化, 地表植被减少, 风蚀侵蚀力增大, 地表沙物质遭风蚀、沙化, 导致现代沙漠化迅速发展; 相反, 在气候变暖和盲目开发活动减少相耦合时期, 由于“三滥”活动减缓、停止, 气温较高, 相对湿度提高,

表 3 海南岛西部气候因素、人为因素与沙漠化主成分因子负荷矩阵

Tab. 3 The principal components load matrix of the climatic factors, the human factors and the sandy desertified land in the west of Hainan Island

因子载荷矩阵	第 1 主因子	第 2 主因子	第 3 主因子	因子载荷矩阵	第 1 主因子	第 2 主因子	第 3 主因子
X ₁ (年均温)	0.58106	-0.13462	-0.27807	X ₈ (牲畜数量)	0.88368	-0.01792	-0.17794
X ₂ (年均降水)	-0.06422	0.04112	0.10328	X ₉ (耕地面积)	0.93937	-0.00043	-0.00813
X ₃ (相对湿度)	-0.07964	0.04840	0.97102	X ₁₀ (养殖面积)	0.90643	0.16104	0.08573
X ₄ (蒸发量)	-0.17575	0.27619	-0.12439	X ₁₁ (造林面积)	0.60403	-0.00750	-0.00908
X ₅ (年均风速)	0.14440	0.86278	-0.06216	X ₁₂ (工农业产值)	0.88465	-0.14636	-0.09934
X ₆ (大风日数)	-0.08743	0.91491	0.11809	方差贡献	4.92117	1.72877	1.11338
X ₇ (人口数量)	0.93878	0.03411	-0.01429	累计贡献	0.41010	0.55416	0.64694

使土壤潮湿化, 地表植被得以恢复, 风蚀侵蚀力减轻, 导致现代沙漠化发生逆转。因此, 驱动力因子之间的激发—互动作用是导致岛西现代沙漠化的动力机制。

为了对现代沙漠化过程中自然和人为驱动力的作用与比重进行辨识、诊断^[1], 采用因子分析方法, 计算近 50 年 12 个气候因子和人为活动因子的变化值, 并用方差最大正交旋转法 (Varimax) 对因子载荷矩阵进行旋转, 得出因子负荷矩阵 (表 3)。表中第一因子中, 人为活动因子 X₇、X₈、X₉、X₁₀、X₁₂ 的载荷很高, 而气候因子的载荷较低, 说明第一因子主要由人为活动动力决定; 在第二、三因子中, 气候因子 X₅、X₆、X₃ 的载荷较高, 而人为活动因子的载荷很低, 说明其主要由气候变异动力所决定。第一、二、三因子对变量的方差贡献率分别为 49.21%、17.29% 和 11.13%, 表明第一因子比第二、三因子更为重要。由此可见, 影响岛西现代沙漠化的动力具有多面性和复杂性, 虽然数年或数十年尺度的气候变化对沙漠化发展 / 逆转都具有举足轻重的作用, 但人为活动强度的变化却是沙漠化发展 / 逆转的主导作用, 其贡献率要远大于气候变化的贡献率, 这证明岛西现代沙漠化已演变为以人为沙漠化过程为主的发展过程。

5 结语

海南岛西部是我国唯一的热带稀树干草原沙漠化地区, 沙漠化土地具有热带海岸带沙地的地域特征、形态特征、旱生植被景观特征和土地利用快速演变特征。沙漠化过程类似于 A. Aubreville 所描述的非洲热带森林演变为热带稀树草原, 而稀树草原又变成类似沙漠景观的发展过程^[1, 2]。历史时期沙漠化主要受全球气候变化控制, 虽然人类经济活动造成的影响愈来愈大, 但其仍受不同时间尺度的气候变化主宰; 20 世纪以来的现代沙漠化既受数年或数 10 年尺度的气候变化的作用, 又受人为不合理经济活动的影响, 且后者的作用与影响是主要的, 这与中国北方和青藏高原沙漠化的成因有相似之处^[22-24]。但是, 岛西沙漠化影响因素中气候冷暖干湿因子、人为活动因子的作用方式和影响程度与上述区域又有一定的差异, 沙漠化驱动因子间的激发—互动作用及其动力机制也有其特殊性。要阐明岛西热带沙漠化的动力机制, 还需对驱动因子的相互作用进行深入研究。认识岛西热带沙漠化土地的特征与成因, 充分利用当前气候变暖增湿的有利影响, 将人为破坏降到最低限度, 积极整治已有的沙漠化土地, 就有可能实现岛西土地沙漠化的全面逆转。

致谢: 本文承吴正教授鼓励和审阅, 李会川同学和曾兰华同学参加野外工作, 谨致谢忱。

参考文献 (References)

- [1] Zhu Zhenda, Liu Shu, Di Xingmin. Sandy Desertification and Control of China. Beijing: Science Press, 1989. 234-248.
[朱震达, 刘恕, 邸醒民. 中国的沙漠化及其治理. 北京: 科学出版社, 1989. 234-248.]

- [2] Wu Zheng, Huang Shan, Hu Shouzhen. Coastal wind-drift sand in Hainan Island, China, and its harnessing measures. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 1992, (2): 104-106. [吴正, 黄山, 胡守真. 海南岛海岸风沙及其治理对策. 华南师范大学学报(自然科学版), 1992, (2): 104-106.]
- [3] Wu Zheng, Huang Shan, Hu Shouzhen et al. The Landform of Coastal Wind-drift Sand in South China. Beijing: Science Press, 1995. 38-39. [吴正, 黄山, 胡守真 等. 海南海岸风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1995. 38-39.]
- [4] Liu Ruihua, Zhang Zhongying, Han Zhongyuan. Geneses of sandy desertification land in the west of Hainan Island. *Tropical Geography*, 1986, 6(3): 256-263. [刘瑞华, 张仲英, 韩中元. 海南岛西部的沙地成因探讨. 热带地理, 1986, 6(3): 256-263.]
- [5] Bi Hua, Liu Qiang. Desertification and re-afforestation of the coast land in Changjiang County, Hainan Island. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(2): 223-228. [毕华, 刘强. 海南昌江县海滨土地风沙化及其环境整治. 中国沙漠, 2000, 20(2): 223-228.]
- [6] Ma Ronghua, Hu Mengchun, Mao Duanqian et al. Study on dynamic change of land sand desertion and land degradation in the west of Hainan Island based on RS and GIS. *Ecologic Science*, 2002, 19(2): 19-23. [马荣华, 胡孟春, 毛端谦 等. 基于 RS 和 GIS 的海南西部土地沙化 / 土地退化动态趋势研究. 生态科学, 2000, 19(2): 19-23.]
- [7] Zeng Zhaoxuan, Zeng Xianzhong. *Natural Geography of Hainan Island*. Beijing: Science Press, 1989. 165-172. [曾昭璇, 曾宪中. 海南岛自然地理. 北京: 科学出版社, 1989. 165-172.]
- [8] Chen Zhanghe. The types of grassland in Hainan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1987, 11(1): 32-41. [陈章和. 海南草地的类型. 植物生态学与地植物学学报, 1987, 11(1): 32-41.]
- [9] Mao Jiangyu, Wu Guoxiong, Liu Yimin. Study on modal variation-subtropical high and its mechanism during seasonal transition (part I). *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(4): 400-408. [毛江玉, 吴国雄, 刘屹岷. 季节转换期间副热带高压带形态变异及其机制的研究(I). 气象学报, 2002, 60(4): 400-408.]
- [10] Gao Suhua, Huang Zengming, Zhang Tongqin et al. *Climate of Hainan Island*. Beijing: China Meteorological Press, 1988. 22-34. [高素华, 黄增明, 张统钦 等. 海南岛气候. 北京: 气象出版社, 1988. 22-34.]
- [11] Zhai Wuquan, Li Guojie, Sun Bin et al. Season's wind fields of mesoscale circulation in Hainan Island. *Journal of Tropical Meteorology*, 1997, 13(4): 315-322. [翟武全, 李国杰, 孙斌 等. 海南岛附近四季风场的中尺度环流. 热带气象学报, 1997, 13(4): 315-322.]
- [12] Tang Maocan, Jiang Hao, Liu Yanxiang et al. Cause analysis of arid region formation on the world. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 1-5. [汤懋苍, 江灏, 柳艳香 等. 全球各类旱区的成因分析. 中国沙漠, 2002, 22(1): 1-5.]
- [13] Xia Huayong, Li Shuhua, Shi Maochong. A 3-D numerical simulation of wind-driven currents in the Beibu Gulf. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(6): 12-23. [夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟. 海洋学报, 2001, 23(6): 12-23.]
- [14] Situ Shangji. *Exploitation of the Land Resources of Hainan Island in Historical Times*. Haikou: Hainan Press, 1992. 81-105, 130-150, 170-212. [司徒尚纪. 海南岛历史上土地开发研究. 海口: 海南出版社, 1992. 81-105, 130-150, 170-212.]
- [15] Zhang Weiqiang, Huang Zhenguo. The little ice age and its environment effects in the tropical zone of China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6): 744-750. [张伟强, 黄镇国. 中国热带的小冰期及其环境效应. 地理学报, 2000, 55(6): 744-750.]
- [16] Lin Peisong, Li Sen, Li Baosheng. Correlativity between land desertification and climate variability in the west of Hainan Island during past nearly 20 years. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(1): 27-32. [林培松, 李森, 李保生. 近 20 年来海南岛西部土地沙漠化与气候变化关联度研究. 中国沙漠, 2005, 25(1): 27-32.]
- [17] Ye Duzheng. *Climate Change of China*. Beijing: China Meteorological Press, 1992. 24-25. [叶笃正. 中国的气候变化与研究. 北京: 气象出版社, 1992. 24-25.]
- [18] Lin Peisong, Li Sen, Li Baosheng et al. A study of climate variability in western Hainan Island for last 50 years. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(2): 51-54. [林培松, 李森, 李保生 等. 近 50 年来海南岛西部气候变化初步研究. 气象, 2005, 31(2): 51-54.]
- [19] Lin Xuechun, Yu Shuqiu. Diagnostic analysis of climate tendency of China during past 40 years. In: *Theses of Conference on Climate Tendency Diagnostic Analysis*. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 14-19. [林学椿, 于淑秋. 近 40 年我国气候趋势的诊断分析. 见: 全国气候变化诊断分析会议论文集. 北京: 气象出版社, 1991. 14-19.]
- [20] Lin Xuechun. Climate Tendency of China during Past 40 Years. *Meteorological Monthly*, 1990, (10): 45-53. [林学椿. 近 40 年我国气候趋势. 气象, 1990, (10): 45-53.]
- [21] Dong Yuxiang. Quantitative identification of driving factors of contemporary sandy desertification in semi-arid zone in China. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(4): 412-417. [董玉祥. 我国半干旱区现代沙漠化驱动因素的定量辨识. 中国沙漠, 2001, 21(4): 412-417.]
- [22] Dong Guangrong, Jin Heling, Chen Huizhong et al. Geneses of desertification in semiarid and subhumid regions of

northern China. *Quaternary Sciences*, 1998, (2): 136-144. [董光荣, 靳鹤龄, 陈惠忠 等. 中国北方半干旱和半湿润地区沙漠化的成因. 第四纪研究, 1998, (2): 136-144.]

[23] Wang Tao, Wu Wei, Xue Xian et al. Spatial-temporal changes of sandy desertified land during last 5 decades in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 203-212. [王涛, 吴微, 薛娴 等. 近 50 年来中国北方沙漠化土地的时空变化. 地理学报, 2004, 59(2): 203-212.]

[24] Li Sen, Dong Yuxiang, Dong Guangrong et al. *Sandy Desertification Problem and Sustainable Development of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau*. Beijing: China Tibetology Press, 2001. 146-150. [李森, 董玉祥, 董光荣 等. 青藏高原沙漠化问题与可持续发展. 北京: 中国藏学出版社, 2001. 146-150.]

Study on the Characteristics and the Cause of Sandy Desertified Land in the West of Hainan Island

LI Sen^{1,2}, SUN Wu³, LI Fan¹, LIN Peisong¹, ZHENG Yinghua¹, NIE Lei¹

(1. *The Resources and Environmental Science Research Institute, Foshan University, Foshan 528000, China;*

2. *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China;*

3. *Department of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)*

Abstract: The west of Hainan Island is the only sandy desertified area of the tropical dry grasslands with sparse trees in China, and it is a very typical sandy desertified land type and course. The sandy desertified land, which is on the sandy coastal plain, the river delta and the sandy mesa, is distributed in the long and narrow area. The sandy desertified lands have the tropical coastal dene characteristics in the district, the shape, the xerophyte and the rapid evolvement of land use. Under the influence of tropical monsoon climate, the foehn effect of the rain shadow field of the Changshan Mountains and the Wuzhishan Mountains and the cold ocean current in the Beibu Gulf, it is developed into the semi-arid climate and the environment of dry grasslands with sparse trees. So that it comes into being for the driving force, the space and the material base of the desertification. The sandy desertified land in the west of Hainan Island in history is due to many factors such as the climate change, the excessive reclamation and excessive firewood, but the factor of human leads the first. The present-day sandy desertified land in the west of Hainan Island can be divided into five stages of increase, renewal, re-increase, reversion and fluctuation in the 20th century, its process is not only controlled by the climate change in several years or decades scale, but also the unreasonable human activities. The area of sandy desertified land increased from 201.45 km² to 251.61 km² from the end of the 1950s to the 1970s with an increasing rate of 3.53 km²/a. It has decreased to 122.57 km² since the 1990s with a decrease rate of -7.72 to -3.20 km²/a. The temperature in the west of Hainan Island appeared to go up by 0.24 °C/10a and the precipitation descended by -23.93 mm/10a for the past 50 years. The land resources are being excessively exploited because of continuous increase in population and domestic animals in recent decades. The results show that the human activities are greatly associated with desertification degree, and the present-day sand desertification in the west of Hainan Island has evolved into the desertification process which is mainly affected by the human activities.

Key words: Hainan Island; sandy desertification; tropical semi-arid climate