

基于 3S 技术的库布齐沙漠抛物线形沙丘形态变化研究

社会石, 哈斯额尔敦, 雷军, 杨越

(北京师范大学 资源学院, 北京 100875)

摘要: 以库布齐沙漠南缘典型抛物线形沙丘为研究对象, 利用差分 GPS 实测数据, 通过 GIS 空间插值生成 DEM, 提取地形因子和形态参数。利用多期高分辨率遥感影像, 获取环境本底, 同时结合气象数据, 对抛物线沙丘形态变化进行分析。结果表明, 沙丘平面形态呈 U 型, 丘臂指向 W; 纵剖面上迎风坡较缓, 背风坡较陡, 横剖面不对称; 沙丘平均移动速度为 11.69 m/a; 沙脊线所夹中轴线走向为 WNW—ESE, 与盛行风或合成输沙方向一致; 油蒿灌丛分布在两翼及其间平地, 植被盖度年均减少 0.95%; 在长期合成风的作用下, 沙丘向前移动, 两丘臂间的油蒿灌丛发生阶段性的自然恢复。

关键词: 抛物线形沙丘; 形态变化; 3S 技术; 库布齐沙漠

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0165-05

中图分类号: P231.5

A Study of Morphological Change of Parabolic Dune in Hobq Desert Based on 3S Technology

DU Hui-shi, HASI Eerdun, LEI Jun, YANG Yue

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: A typical parabolic dune in the south margin of the Hobq Desert was taken as the research object. GIS spatial interpolation was used to generate DEM that was obtained by on-site RTK GPS measurement and the topographical factor and morphological parameter were collected. High resolution images were then used to obtain environmental background information. Form changes of parabolic dune can be analyzed by referring to relevant meteorological data. Results show that the flat form of the dune is U-shaped, with its arm pointing to the west. The windward slope is gentle, while the leeward one is steeper in the long section. However, the cross section is dissymmetrical. The average moving speed is 11.69 m/a. The axes of the crest move toward WNW—ESE, in the same direction as the prevailing wind or the resultant sand drift. *Artemisia ordosica* shrub is distributed on the arms as well as the plain area between them. There is an annual decrease of 0.95% in vegetation coverage. Under long-term resultant wind, the dune moves forwards, while the *Artemisia ordosica* shrub between the arms recover periodically and spontaneously.

Keywords: parabolic dune; morphological change; 3S technology; Hobq Desert

抛物线形沙丘是平面呈 U 形或马蹄形, 沙丘两翼向上风方向延伸, 迎风坡平缓凹进、背风坡陡而凸出, 顺风向呈弧形的一种沙丘类型, 多发育在水分、植被条件较好的内陆区及沿海地带^[1]。典型的抛物线形沙丘分布在印度和巴基斯坦的塔尔沙漠, 中亚荒漠区及中国的古尔班通古特沙漠、毛乌素沙地等地^[2]。抛物线形沙丘形态发育与区域风况、沙源供应、植被覆盖等密切相关。目前, 对抛物线形沙丘研究多集中在沙丘形态与分布^[3-4], 历史时期活动性^[5], 移动速率^[6], 沉积构造^[7]和现代过程^[8]等方面。

3S 技术是遥感 (remote sensing, RS)、地理信息系统 (geography information systems, GIS) 和全球定位系统 (global positioning systems, GPS) 的统称, 是现代地学研究重要手段^[9]。中小尺度风沙地貌三维形态多集中于地面测量, 主要观测手段有差分 GPS^[10]、全站仪^[11]和三维激光扫描仪^[12]。数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 是分析地表形态特征及其变化规律的有效方法^[13]。将测量的沙丘三维离散坐标数据, 通过 GIS 空间插值生成 DEM, 进而可对其进行形态参数提取和特征分析^[14]。遥感是

收稿日期: 2012-06-04

修回日期: 2012-07-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“抛物线形沙丘的动态变化研究”(41171002); 国家“十二五”科技支撑计划项目“荒漠化地区退化土地治理与植被保育技术集成与示范”(2012BAD16B02); 中央高校基本科研业务费专项资金(2012YBXS11)

作者简介: 社会石(1983—), 男(汉族), 吉林省伊通县人, 博士, 主要研究方向为干旱区地貌与 GIS 应用。E-mail: duhs@163.com。

通信作者: 哈斯额尔敦(1964—), 男(蒙古族), 内蒙古科左中旗人, 教授, 博士, 主要研究方向为干旱区地貌与环境研究。E-mail: hasi@bnu.edu.cn。

数据获取的重要手段,基于多期高分辨率影像,不但可提取沙丘平面形态特征,还可获取植被指数、植被盖度等信息。目前,将 3S 技术进行集成,对内陆抛物线形沙丘进行综合研究并不多见^[15-16],本文以库布齐沙漠南缘典型抛物线形沙丘为研究对象,开展长期沙丘形态测量与特征提取,影像解译与分析,研究抛物线形沙丘形态变化特征。

1 研究区概况与数据获取

库布齐沙漠位于鄂尔多斯高原东西向隆起带北部,内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗、达拉特旗和准格尔旗的部分地区(109°30′—110°45′ E, 39°48′—40°33′ N)。其西、北、东 3 面均由黄河环绕,地势南高北低。沙漠东部属半干旱区,降水较多,年降水量 250~400 mm,西部属干旱区,降水较少,仅 150~250 mm,降水主要集中在 7、8 月,且多以暴雨形式降落。年均蒸发量 2 100~2 700 mm,为降水的 6 倍(东部)~17 倍(西部),年均气温 6.0~7.5 °C,东低西高,年日照时数 3 000~3 200 h,无霜期 156 d。年均风速 3.5 m/s,全年大风日数 25~35 d,盛行西北西风、西风、东南风。沙漠北部沿黄河密集分布流动沙丘带,南部剥蚀高原面上分布着由南北向干沟分隔的片状流动沙丘地、灌丛地和灌丛沙堆地,其间有抛物线形沙丘。该区沙丘发育的沙物质来源为当地下伏形成于中更新世的古湖泊沙泥沉积物、现代黄河冲积物、季节性川沟沉积物的吹扬物、当地草灌丛沙丘植被枯死或破坏风蚀起沙物。根据沙丘平面形状、断面形态、背风坡滑落面发育以及上风侧植被状况等,选择典型抛物线形沙丘为 109°07′49″ E, 40°14′39″ N 进行研究。

形态测量利用徕卡 1 200 差分 GPS,在测量前收集研究区资料,包括坐标系统、中央子午线等。在沙丘周围没有风沙影响的地方,均匀埋设 3 个以上的标石作为控制点,用于连续测量时检测仪器随机误差。利用 GPS 接收机,在静态模式下对控制点进行观测,将测得 WGS-84 坐标转成北京-54 坐标。在沙丘形态测量时采用动态测量模式,先用流动站测量已知控制点的 WGS-84 坐标,再用 7 参数法将其转化成北京-54 坐标,最后对沙丘形态进行碎步点测量。本文数据测量时间为 2009 年 10 月,2010 年 5、10 月,2011 年 5、7、9 月。实地测量中,保证流动站单杆水平气泡居中;在沙丘背风坡侧等表面松软部位,使流动站单杆底部与沙丘表面接触,避免其重力下沉。经检验,数据误差小于 20 mm,满足研究精度要求。

为准确把握沙丘周围植被覆被变化,选取具有一定时间跨度的遥感数据进行分析。所用遥感数据为 2005 年 8 月,2007 年 2 月,2010 年 5 月 QuickBird 影像。影像的预处理包括:多光谱单波段数据波段合成;利用差分 GPS 对照全色波段数据,测量选定的地面控制点(包括明显灌丛几何中心、建筑物拐点、典型乔木等),控制点均匀分布全区,尤其典型沙丘周围增加控制点数;利用实测控制点对 2010 年全色波段影像进行几何精校正,误差小于 2 个像元;以校正后的全色波段为基础,对波段合成后的影像进行几何精校正。

2 结果与分析

2.1 沙丘 DEM 及其形态特征

利用 GIS 的 3D Analyst 方法,将差分 GPS 测量的离散点数据插值生成 DEM。因所测沙丘形态属于小尺度地形,直接生成不规则三角网(triangular irregular network, TIN)表面较粗糙,可对高程点进行空间插值生成栅格表面,再由栅格表面生成等高线,最后生成 TIN DEM 效果较好^[17]。

根据实地调研和 DEM 分析(图 1),所测抛物线形沙丘主体平面形态呈 U 型,丘臂指向 W,与来风方向一致。沙丘迎风坡下凹、背风坡上凸。目前丘体长 262.45 m,宽 147.09 m,相对高度 5.19 m,丘臂长 168.66 m,丘臂内宽 91.36 m,平面面积 18 600.58 m²,体积 40 239.06 m³。迎风坡脚处有风蚀残墩出露,因其改变气流场结构,致使迎风坡有多个长条状风蚀坑发育,落沙坡坡度减少,滑落面高度降低,两丘臂发育有油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛沙堆。从沙丘长宽比分析,呈叶形(LLWR 在 1.0~3.0),具有较成熟的抛物线形沙丘长宽比特点。

研究期内,沙丘主体向东移动,沙丘相对高度由 5.41 m 减少到 5.19 m (0.11 m/a),迎风坡脚移动 23.22 m (11.61 m/a),背风坡脚移动 23.52 m (11.76 m/a),沙丘主体平面面积因沙丘发育而增加 1 901.70 m² (950.85 m²/a),丘体体积减少 840.78 m³ (420.34 m³/a),减少原因主要是沙丘的沙物质被少量吹走及沙丘覆盖的下垫面起伏不平所致。该沙丘相对高度较小,移动速度较快。背风侧中部以滑落面崩塌形式向前移动,而东北侧与东南侧则以舌状蔓延向前发展,主要是沙丘主体发育的条状风蚀坑,成为其风沙输移的主要通道。

2.2 沙丘剖面及其形态特征

利用 GIS 的 3D Analyst 模块,基于 DEM 数据,进行沙丘纵横剖面的提取与分析,结果如图 2 所示。

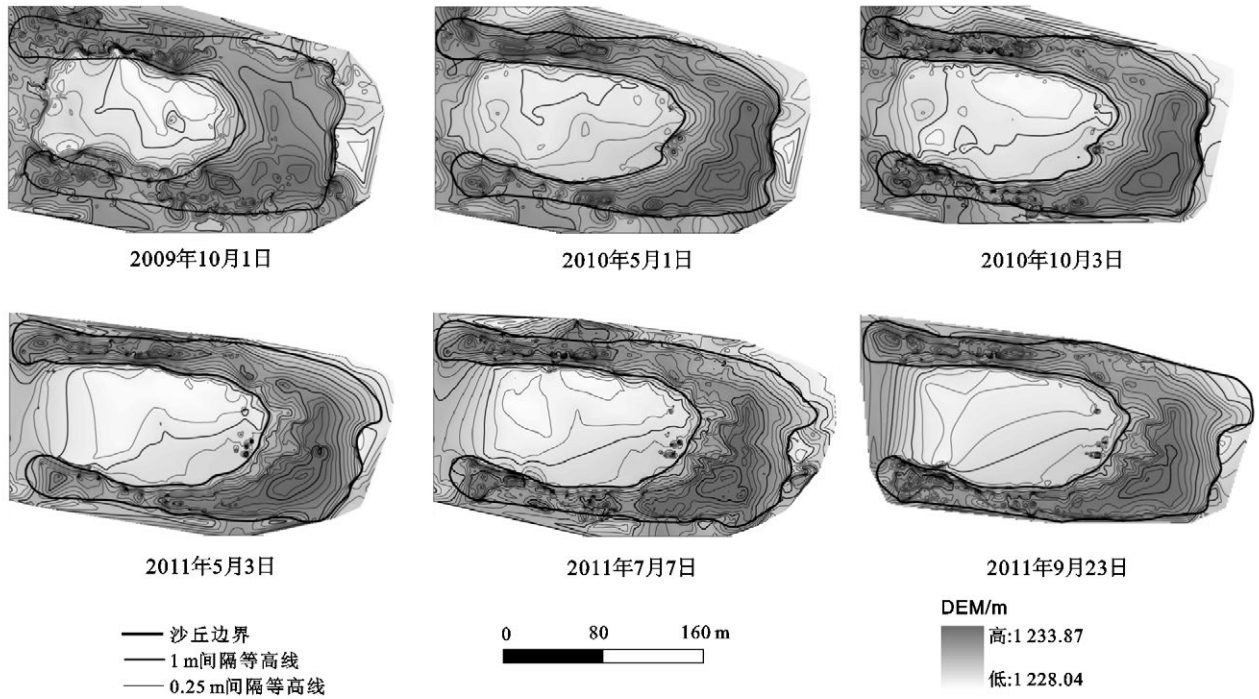
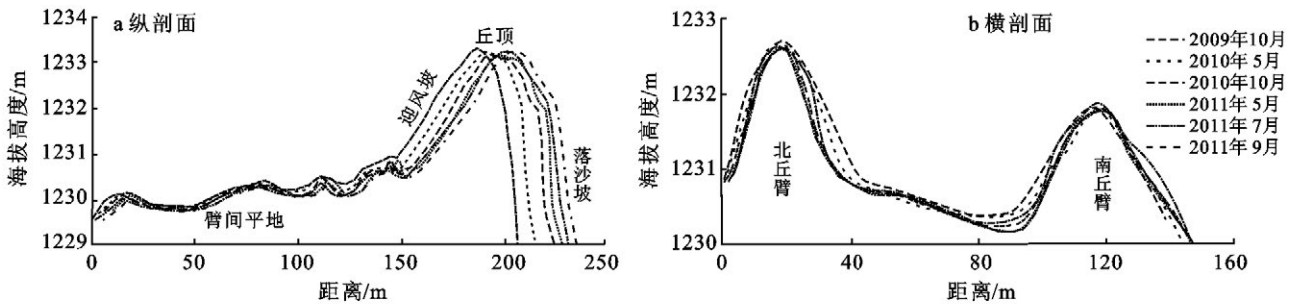


图 1 抛物线形沙丘等值线与 DEM



注:图 2a 横纵比例为 31 : 1,图 2b 横纵比例为 26 : 1

图 2 基于 DEM 数据的沙丘剖面图(a 为纵剖面;b 为横剖面)

沙丘纵剖面地貌单元可分为臂间平地、迎风坡、丘顶和背风坡。目前,沙丘臂间平地长 167.72 m,发育有油蒿灌丛;迎风坡长 46.54 m,坡面下凹,坡度在 16°~21°,底部因栗钙土土壤层出露而风蚀较弱,上部风蚀强烈;背风坡长 32.71 m,坡度在 27°~36°,沙丘主体以滑落面坍塌形式向前移动。东西走向丘臂的横剖面并不对称,沙丘两臂的内侧平缓凹进,表现为侵蚀特性;外侧陡而凸出,表现为堆积特性;南丘臂比北丘臂高 0.75 m。

研究期内,臂间平地长度扩展 23.16 m(11.58 m/a),与迎风坡坡脚移动速度一致,由于其间生长了油蒿,故其高程变化不大;迎风坡、背风坡长度分别变化 23.88 m(11.94 m/a),22.14 m(11.07 m/a);南、北丘臂形态变化不显著。

主导风向控制时,风从沙丘北丘臂和两臂间吹入,风速在两丘臂间不断增加,在沙丘前缘裸沙区侵

蚀强烈;从迎风坡坡脚开始,地势抬升,气流压缩,沙粒受吹扬产生强烈侵蚀;在背风坡,气流逐渐分散,风速降低,沙粒逐步堆积下来;在沙丘南(北)翼内(外)侧吹蚀的沙物质在该丘臂外(内)侧堆积,东南侧侵蚀比东北侧更为剧烈,整体上南翼堆积比北翼堆积强烈。

2.3 沙丘脊线与区域风况分析

沙脊线能反映沙丘整体形态特征及其与区域合成输沙方向的关系^[2],对脊线的提取可通过对地表坡向变率(平面曲率)的提取方法来实现^[18]。所测沙丘沙脊线呈 U 字形,具有典型抛物线形沙丘脊线的特征,轴线走向为 WNW—ESE。研究期内,随着沙丘主体的不断前移,脊线也随之前移 23.36 m(11.68 m/a)。

输沙势(drift potential, DP)是衡量区域风沙活动强度及风沙地貌演变的重要指标,而合成输沙势(resultant drift potential, RDP)与合成输沙方向(re-

sultant drift direction, RDD)可以反映一个区域内的净输沙能力和净输沙方向。根据距离研究区最近的杭锦旗气象站和 2010 年初架设该沙丘附近的自动气象站数据分析得出,多年来主风向为 W 和 WNW;年均输沙势为 201.60 VU,属中能环境;年均合成输沙势 142.99 VU;合成输沙方向为 111.38°,说明该区合成风向以 WNW 为主;方向变率指数(RDP/DP)为 0.71,风向较稳定。沙脊线轴线走向为 WNW—ESE,与盛行风或合成输沙方向一致。

2.4 沙丘形态变化与植被分布特征研究

植被分布特征是控制抛物线形沙丘侵蚀堆积格

局、影响其形成与发展的重要因素^[19]。以往对植被覆盖的测定,植被边界多用 GPS 或全站仪打点,再室内勾画轮廓^[16],盖度则采用植被样方调查的方法人为估算,这些方法不但效率和精度较低,且不能全面反映植被的分布和密度情况,而利用高分辨率遥感影像可以弥补这些不足。

根据影像及其解译数据的分析(图 3),图幅范围内植被盖度由 2005 年的 36.81%减少到 2010 年的 32.04%,年均减少 0.95%。虽然沙丘面积迅速增加,但沙丘前移、丘臂拉长的同时,丘臂间油蒿植被面积增加,故植被盖度总体呈现缓慢减少趋势。

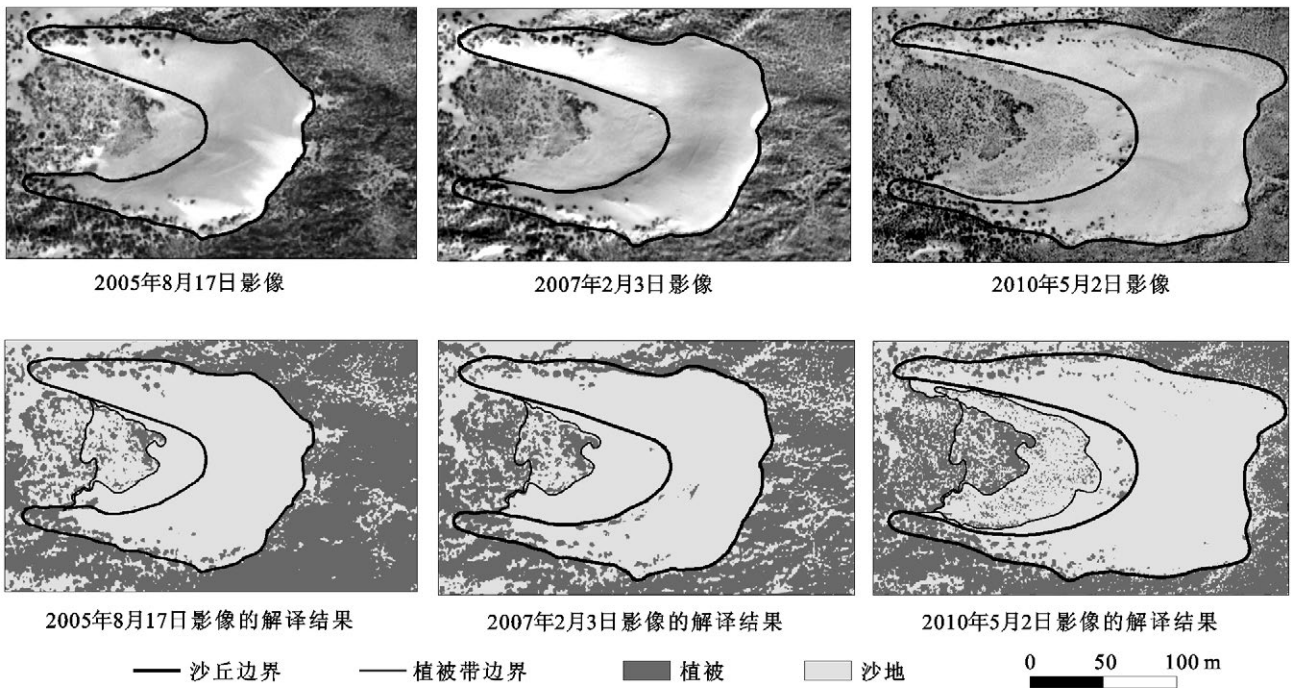


图 3 沙丘影像与解译图

沙丘上的油蒿灌丛主要分布在丘臂及其间平坦地。丘臂上的油蒿灌丛截获风沙后形成较大的灌丛沙堆,沙堆分散分布,其间有一定的裸沙区,成为沙丘的出(入)风口。在合成风的作用下,沙丘前缘裸沙区和迎风坡的沙物质被搬运到背风坡,整体表现为沙丘向前移动,长时间作用后,在两丘臂间形成了较平坦的土壤出露区,这为油蒿的阶段性自然恢复提供了空间。随着抛物线形沙丘不断向前移动,背风坡油蒿灌丛被掩埋,而臂间平地的植被又发生了阶段性的自然恢复,因此,沙丘的发展变化与植被覆盖之间总体上呈现一种动态平衡关系。

3 结论

(1) 基于 GIS 平台,利用差分 GPS 实测数据,通

过空间插值生成 DEM,可以有效地提取地形因子和形态参数,实现风沙地貌形态变化的定量化研究。结合高分辨率影像,有效地获取环境本底,探讨植被分布与沙丘形态变化间的关系。地面测量适合中小尺度 3 维地貌形态的季节、年际变化研究;利用多期高分辨率遥感数据,可以反演大范围地表动态变化,适合大中尺度 2 维地貌形态的年际、年代际变化研究。两者相结合,可相得益彰。

(2) 所测抛物线形沙丘平面呈 U 型,丘臂指向 W 与来风方向一致,沙丘相对高度较低,移动速度较快,年均移动 11.69 m。由于沙丘不断向前移动,平面面积增加,体积减少。沙脊线所夹中轴线走向为 WNW—ESE,反映了盛行风或合成输沙方向。沙丘平均植被盖度呈减少趋势,在长期合成风的作用下,

沙丘不断向前移动,两丘臂间的油蒿灌丛发生阶段性的自然恢复。

(3) 下一步研究工作,将加密差分GPS测量时间,并结合插钎法测量,研究沙丘不同季节各地貌部位变化特征。同时结合气象数据,分析沙丘在不同自然驱动因子下的形态变化特征,找寻其发展变化规律,为沙丘形态模拟提供基础参数。

[参 考 文 献]

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社, 2003:144-156.
- [2] 朱震达,吴正,刘恕,等. 中国沙漠概论[M]. 北京:科学出版社,1980:37-55.
- [3] Landsberg S Y. The orientation of dunes in Britain and Denmark in relation to wind [J]. *Geographical Journal*, 1956,122(2):176-189.
- [4] 闫娜,哈斯,刘怀泉,等. 抛物线形沙丘的形态与演变的研究进展[J]. *中国沙漠*,2010,30(4):801-807.
- [5] Havholm K G, Running I V. Stratigraphy, sedimentology and environmental significance of late mid-Holocene dunes, Lauder Sand Hills, glacial lake Hind Basin, Southwestern Manitoba [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*,2005,42(5):847-863.
- [6] Marín L, Forman S L, Valdez A, et al. Twentieth century dune migration at the Great Sand Dunes National Park and Preserve, Colorado, relation to drought variability[J]. *Geomorphology*, 2005,70(1/2):163-183.
- [7] Hugenholtz C H, Wolfe S A, Walker I J, et al. Spatial and temporal patterns of aeolian sediment transport on an inland parabolic dune, Bigstick Sand Hills, Saskatchewan, Canada [J]. *Geomorphology*, 2009, 105(1/2):158-170.
- [8] Duran O, Silva M V N, Bezerra L J C, et al. Measurements and numerical simulations of the degree of activity and vegetation cover on parabolic dunes in north-eastern Brazil [J]. *Geomorphology*, 2008,102(3/4):460-471.
- [9] 王高峰,唐川,王洪德,等. 基于RS和GIS的雅鲁藏布江林芝:加查段沿线泥石流源地物源分析[J]. *水土保持通报*,2012,32(1):10-13.
- [10] Rebêlo L P, Brito P O, Monteiro J H. Monitoring the Cresmina dune evolution (Portugal) using differential GPS [J]. *Journal of Coastal Research*, 2002,36:591-604.
- [11] Andrews B D, Gares P A, Colby J D. Techniques for GIS modeling of coastal dunes [J]. *Geomorphology*, 2002,48(1/3):289-308.
- [12] Nagihara S, Mulligan K R, Xiong W. Use of a three-dimensional laser scanner to digitally capture the topography of sand dunes in high spatial resolution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004,29:391-398.
- [13] Baptista P, Cunha T R, Matias A, et al. New land-based method for surveying sandy shores and extracting DEMs: the INSHORE system [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011,182(1/4):243-257.
- [14] Hugenholtz C H. Topographic changes of a supply-limited inland parabolic sand dune during the incipient phase of stabilization[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010,35(14):1674-1681.
- [15] Levin N, Ben-Dor E. Monitoring sand dune stabilization along the coastal dunes of Ashdod—Nizanim, Israel, 1945-1999 [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004,58(3):335-355.
- [16] 陈秀玲,李志忠,陈蜀江,等. 基于差分GPS测量数据的抛物线沙丘形态特征研究[J]. *福建师范大学学报:自然科学版*,2010,26(3):84-89.
- [17] 社会石,哈斯,吴霞,等. 3S技术在抛物线沙丘形态特征研究中的应用[J]. *地理与地理信息科学*,2011,27(5):32-36.
- [18] 汤国安,刘学军,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2006:222-224.
- [19] Pelletier J D, Mitasova H, Harmon R S, et al. The effects of interdune vegetation changes on aeolian dune field evolution: A numerical-modeling case study at Jockey's Ridge, North Carolina, USA [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009,34(9):1245-1254.