

# 基于 RS 和 GIS 的敦煌市沙漠化动态监测

尚立照<sup>1,2</sup>, 陈翔舜<sup>1,2</sup>, 王小军<sup>1,2</sup>, 高斌斌<sup>1,2</sup>, 丁乾平<sup>1,2</sup>, 赵洪民<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃省生态环境监测监督管理局, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省林业调查规划院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** [目的] 研究敦煌市沙漠化动态变化特征, 为敦煌市沙漠化防治和文物保护工作提供理论依据。[方法] 基于遥感和 GIS 技术, 选取 2004 和 2009 年的 TM 和 ETM 遥感数据进行调查判读。[结果] 敦煌市沙漠化土地面积为  $1.97 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占土地总面积的 73.8%; 研究期内沙漠化土地总面积减少 9 102.59  $\text{hm}^2$ , 年变化率 -0.001%; 极重度沙漠化向重度、中度和轻度沙漠化转变, 沙漠化程度整体减轻。[结论] 研究区植被盖度有所好转, 沙漠化程度在减缓, 但土地沙漠化趋势尚未根本改变, 防沙治沙仍是敦煌市的长期任务。

**关键词:** 沙漠化; 动态监测; 敦煌市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0125-04

中图分类号: X144

**文献参数:** 尚立照, 陈翔舜, 王小军, 等. 基于 RS 和 GIS 的敦煌市沙漠化动态监测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 125-128. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.024

## Desertification Monitoring of Dunhuang City Based on GIS and RS

SHANG Lizhao<sup>1,2</sup>, CHEN Xiangshun<sup>1,2</sup>, WANG Xiaojun<sup>1,2</sup>,  
GAO Binbin<sup>1,2</sup>, DING Qianping<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongmin<sup>1,2</sup>

(1. Ecological Environment Supervision and Administration Bureau of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Forest Inventory and Planning Institute of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** [Objective] Studying the dynamic change of desertification in Dunhuang City in order to provide a support for desertification prevention and cultural relics protection. [Methods] Based on the remote sensing data and geographic information system, the TM and ETM images were determined by field investigation and man-machine interactive interpretation. Aerial land desertification information of Dunhuang City from 2004 to 2009 were extracted. [Results] There were  $1.97 \times 10^6$   $\text{hm}^2$  desertification land in the whole city, covered 73.8% of the total land area. The total desertification land was reduced about 9 102.59  $\text{hm}^2$  during the study period, the annual decrease ratio is -0.001%. Very severe desertification lands reversed to severe, moderate and light desertification land. The desertification was alleviated largely. [Conclusion] Vegetation coverage is improved in the study area, which made the desertification slowed down and reversed, but desertification had not been fundamentally changed, desertification prevention will still be a long-term task for Dunhuang City.

**Keywords:** desertification; dynamics monitoring; Dunhuang City

沙漠化是干旱、半干旱及部分半湿润地区由于人地关系不协调所造成的以风沙活动为主要标志的土地退化<sup>[1]</sup>。沙漠化所造成的大面积草场和耕地退化已严重影响了区域的生态安全<sup>[2]</sup>和经济社会的可持续发展<sup>[3]</sup>。沙漠化土地监测是定期、准确掌握沙漠化动态, 为防沙治沙决策及措施实施提供依据、为国民经济和社会发展服务的基础性工作。中国于 1994 年由原林业部组织了首次沙漠化普查, 并规定每隔 5 a 进行一次全国荒漠化和沙化监测<sup>[4]</sup>, 2004 和 2009 年分别进行了第 3 期和第 4 期荒漠化和沙漠化监测, 目

前(2014 年)正在进行第 5 次监测工作。甘肃省和敦煌市是全国监测重要组成部分之一。敦煌是历史文化名城、全国优秀旅游城市。敦煌市域范围内有世界文化遗产莫高窟, 有全国重点文物保护单位玉门关及汉长城、悬泉置遗址, 也有阳关、寿昌城、渥洼池等著名历史文化遗迹。然而, 近几十年来, 沙漠化的发展不但对生态环境造成破坏, 而且对境内文物古迹的保护构成严重威胁。如被联合国列入世界文化遗产的莫高窟, 其精美的壁画和彩塑受到不同程度的损坏, 其中风沙是最严重的危害因素之一<sup>[5]</sup>。目前众多学

收稿日期: 2015-02-07

修回日期: 2015-03-16

资助项目: 林业公益性行业科研专项项目“全国荒漠化和沙化第四次监测”(2008040200)

第一作者: 尚立照(1976—), 男(汉族), 甘肃省景泰县人, 学士, 高级工程师, 主要从事荒漠化监测和林业调查规划方面的研究工作。E-mail: shanglizhao@163.com.

者在该区域开展了很多有关土地沙漠化方面的科研工作,主要集中在沙漠化的现状、成因、防治对策、风沙危害以及沙漠旅游发展等方面<sup>[6-8]</sup>。本研究采用最新两期(第 3 期和第 4 期)的敦煌市 TM 和 ETM 遥感数据,通过野外调查和人机交互解译,采用矩阵转移分析研究了 2004—2009 年该区域沙漠化动态变化特征,以期对敦煌市沙漠化防治和文物保护工作提供科学的最新基础数据和理论依据。

## 1 研究区概况

敦煌市位于甘肃省西北部,河西走廊最西端,地处库姆塔格沙漠前沿<sup>[9]</sup>,甘青新 3 省(区)交界处,隶属甘肃省酒泉市管辖。地处东经 92°13′—95°30′、北纬 39°40′—41°35′,东接瓜州县,南连肃北蒙古族自治县和阿克塞哈萨克族自治县,西北与新疆维吾尔自治区接壤。该市总土地面积  $2.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中绿洲面积 1 400  $\text{km}^2$ ,仅占总面积的 4.5%。该市辖 7 镇 2 乡,总人口 20 万人,其中农业人口 9.3 万人。总人口中汉族占绝大多数,回、蒙、藏、维吾尔等少数民族仅占 2.2%。该市经济主要以农业为主,旅游服务业次之,没有相对较强大的工业。敦煌气候干燥,降雨量少且变率大,蒸发强烈,昼夜温差大;春季温暖多风,夏季酷暑炎热,秋季凉爽,冬季寒冷,属典型的暖温带干旱性气候。据 2009 年第 4 次沙漠化监测结果,全市沙漠化土地面积为  $1.97 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占土地总面积的 73.8%。该市每年因沙害损失数千万元,风沙危害是敦煌生态环境的最大威胁。

## 2 研究方法

### 2.1 数据资料

选用 2004 和 2009 年的敦煌市 TM 和 ETM 多

光谱遥感数据作为基础数据源(地面分辨率均为 30 m,成像时间为 6—9 月,云量小于 5%)<sup>[10]</sup>。同时选用了覆盖全县的 1:5 万的最新地形图和提供辅助信息的土地利用详查图、森林分布图、土壤分布图、野外景观照片、实地调查资料,以及敦煌市 2004—2009 年的水文、气象及社会经济统计资料。

### 2.2 研究方法

2.2.1 遥感图像处理与解译 参照已有的 TM 影像波段组合方法,采用多波段遥感数据组合的方法,对遥感数据进行假彩色合成,应用地形图按高斯—克吕格投影进行几何精校正,得到基础的卫星影像数据。根据不同区域的地理气候和遥感影像数据特征,选择野外调查区,手持 GPS 定点调查沙漠化土地类型、土地利用类型、土壤、植被及地形地貌等,拍摄与遥感数据时相接近的野外景观照片,将沙漠化土地类型与遥感数据影像特征对应,建立解译标志<sup>[10]</sup>。依据解译标志采用人机交互判读的方式,在 ArcView 软件中对图像矢量化并建立空间数据库。解译完成后,手持 PDA 进行野外调查,经验证实际解译定性精度可达到 95% 以上。最后在 ArcGIS 平台支持下对解译结果进行统计和分析<sup>[11]</sup>,获取沙漠化土地变化的数量信息和空间信息,得到变化的数据,利用年变化率、转移矩阵进行分析。

对本次调查数据和第 3 次调查监测结果(2004 年)进行对比,获得沙化土地动态变化情况。由于前后两次所采用的监测方法、手段和技术路线均相同,因而对两次监测结果进行对比分析能更客观、合理地认识沙漠化动态变化特征。

2.2.2 沙漠化土地类型和程度划分 本研究根据 2004,2009 年两期沙漠化土地监测技术细则的分类标准,将敦煌市沙漠化土地划分为 9 种类型(表 1)。

表 1 沙漠化土地类型划分及特征

沙漠化土地类型	划分标准
流动沙地(丘)	指土壤质地为沙质,植被总盖度 < 10%,地表沙物质常处于流动状态的沙地或沙丘
半固定沙地(丘)	指土壤质地为沙质,10% ≤ 植被总盖度 < 30%(乔木林冠下无其他植被时,郁闭度 < 0.50),且分布比较均匀,风沙流活动受阻,但流沙纹理仍普遍存在的沙地或沙丘
固定沙地(丘)	指土壤质地为沙质,植被盖度 ≥ 30%(乔木林冠下无其他植被时,郁闭度 ≥ 0.50),风沙活动不明显,地表稳定或基本稳定的沙地或沙丘
露沙地	指土壤表层主要为土质,有斑点状流沙出露(< 5%)或疹状灌丛沙堆分布,能就地起沙的土地
沙化耕地	主要指没有防护措施及灌溉条件,经常受风沙危害,作物产量低而不稳的沙质耕地
非生物治沙工程地	指单独以非生物手段固定或半固定的沙丘和沙地
风蚀残丘	指干旱地区由于风蚀作用形成的雅丹、土林、白砬墩等风蚀地
风蚀劣地	指由于风蚀作用导致土壤细粒物质损失,粗粒物质相对增多或砾石和粗砂集中于地表的土地
戈壁	指干旱地区地表为砾石覆盖,植被稀少且广袤而平坦的土地

土地沙漠化划分为轻、中、重、极重 4 个等级:

(1) 轻度沙漠化。植被盖度  $>40\%$  (极干旱、干旱区、半干旱) 或  $>50\%$  (其他气候区类型区), 基本无风沙流活动的沙化土地, 或一般年景作物能正常生长、缺苗较少 (作物缺苗率  $<20\%$ ) 的沙化耕地。(2) 中度沙漠化。  $25\% <$  植被总盖度  $\leq 40\%$  (极干旱、干旱、半干旱区) 或  $30\% <$  植被总盖度  $\leq 50\%$  (其他气候类型区), 风沙流活动不明显的沙化土地; 或作物长势不旺、缺苗较多 ( $20\% \leq$  作物缺苗率  $<30\%$ ) 且分布不均的沙化耕地。(3) 重度沙漠化。  $10\% <$  植被总盖度  $\leq 25\%$  (极干旱、干旱、半干旱区) 或  $10\% <$  植被总盖度  $\leq 30\%$  (其他气候类型区), 风沙流活动明显或流沙纹理明显可见的沙化土地; 或植被盖度  $\geq 10\%$  的风蚀残丘、风蚀劣地及戈壁; 或作物生长很差、作物缺苗率  $\geq 30\%$  的沙化耕地。(4) 极重度沙漠化。植被总盖度  $\leq 10\%$  的沙化土地。

2.2.3 年变化率分析 2004—2009 年敦煌市沙漠化土地面积发生变化, 可利用计算公式定量描述年变

化率<sup>[12]</sup>, 其计算公式为:

$$R = \sqrt[n]{D/A} - 1 \quad (1)$$

式中:  $R$ ——某一地区沙漠化年变化率;  $n$ ——测算相隔年限;  $D$ ——测算终结年沙漠化土地面积;  $A$ ——测算起始年沙漠化土地面积。

### 3 结果分析

#### 3.1 沙漠化土地现状及空间分布

根据 2009 年第 4 次沙漠化监测结果, 目前该市共有各类沙漠化土地面积  $1.97 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占土地总面积的 73.7% (表 2)。其中, 流动沙地 (丘)  $5.46 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 27.7%; 半固定沙地 (丘)  $5.01 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 2.5%; 固定沙地 (丘)  $2.70 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 13.7%; 戈壁  $1.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 55.2%; 风蚀残丘  $1.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 0.8%; 沙化耕地、非生物工程治沙地和风蚀劣地  $200 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 0.1%。

表 2 敦煌市沙漠化土地现状

沙漠化类型	流动沙地(丘)	半固定沙地(丘)	固定沙地(丘)	戈壁	风蚀残丘	其他类型
面积/ $10^4 \text{ hm}^2$	54.6	5.01	26.99	108.69	1.66	0.02
占沙漠化土地面积比例/%	27.7	2.5	13.7	55.2	0.8	0.1

轻度沙漠化  $4.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 2.2%; 中度沙漠化  $2.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 11.6%; 重度沙漠化  $6.89 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化地面积的 3.5%; 极重度沙漠化  $1.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占沙漠化土地面积的 82.8%。敦煌市沙漠化土地类型主要以流动沙地 (丘)、半固定沙地 (丘)、固定沙地 (丘) 和戈壁为主, 其总面积占到总监测面积的 73.2%。流动沙地 (丘) 主要位于西南部库姆塔格沙漠卡拉塔格、三跌水、西头沟、沙山子道班和敦煌绿洲南面的鸣沙山地区, 集中连片, 以裸沙地为主; 半固定沙地 (丘)、固定沙地 (丘) 主要位于玉门关以西段疏勒河南侧、玉门关以东段疏勒河两侧、西沙窝和绿洲内部沙区, 介于绿洲外围与流动沙丘、戈壁之间, 分布较整齐, 以林地和草地为主; 戈壁主要位于玉门关以西段疏勒河北面、七里镇与芦苇井之间、方山口、青墩峡与八道桥之间和一百四十里戈壁等地区, 集中连片, 主要以裸地和林地为主; 露沙地、沙化耕地和风蚀劣地在全市零星分布, 以耕地、草地和未利用地为主。沙漠化程度轻度以固定沙地 (丘) 和沙化耕地为主, 中度以固定、半固定沙地 (丘) 和戈壁为主, 重度以半固定沙地 (丘) 和戈壁为主, 极重度以戈壁和流动沙地 (丘) 为主。

#### 3.2 沙漠化土地类型变化

通过两期监测数据对比, 敦煌市沙漠化土地总面积减少  $9102.59 \text{ hm}^2$ , 年变化率  $-0.001\%$ 。其中: 流动沙地 (丘) 减少  $141.82 \text{ hm}^2$ , 半固定沙地 (丘) 减少  $241.02 \text{ hm}^2$ , 固定沙地 (丘) 减少  $8364.59 \text{ hm}^2$ , 戈壁减少  $358.52 \text{ hm}^2$ , 沙化耕地增加  $6.10 \text{ hm}^2$ , 非生物工程治沙地增加  $2.58 \text{ hm}^2$ , 风蚀残丘减少  $5.32 \text{ hm}^2$ 。7 种类型中除沙化耕地和非生物工程治沙地增加外, 其余类型面积均减少。

利用转移矩阵分析沙漠化土地类型发现 (表 3), 流动沙地 (丘) 演变为固定沙地 (丘)  $91.82 \text{ hm}^2$ , 半固定沙地 (丘) 演变为固定沙地 (丘)  $45.59 \text{ hm}^2$ , 反映出植被盖度有所好转。

#### 3.3 沙漠化程度变化

沙漠化程度变化: 轻度沙漠化减少  $318.47 \text{ hm}^2$ , 中度沙漠化减少  $7905.50 \text{ hm}^2$ , 重度沙漠化减少  $183.54 \text{ hm}^2$ , 极重度沙漠化减少  $546.55 \text{ hm}^2$ 。利用转移矩阵分析沙漠化程度发现 (表 4), 重度演变为中度  $17.16 \text{ hm}^2$ , 极重度演变为轻度、中度和重度分别为  $26.93, 107.05, 11.86 \text{ hm}^2$ 。以上结果反映出沙漠化程度整体呈减缓趋势。

表 3 敦煌市 2004—2009 年沙漠化土地类型转移矩阵

hm<sup>2</sup>

项目	后期						
	流动沙地(丘)	半固定沙地(丘)	固定沙地(丘)	沙化耕地	非生物治沙工程地	风蚀残丘	戈壁
流动沙地(丘)	5.46×10 <sup>5</sup>						
半固定沙地(丘)		5.02×10 <sup>4</sup>					6.66
固定沙地(丘)	91.82	45.59	2.70×10 <sup>5</sup>				0.36
沙化耕地	0.90						5.20
非生物治沙工程地			2.58				
风蚀残丘						1.66×10 <sup>5</sup>	
戈壁							1.09×10 <sup>6</sup>

表 4 敦煌市 2004—2009 年沙漠化程度转移矩阵 hm<sup>2</sup>

项目	后期			
	轻度	中度	重度	极重度
轻度	4.25×10 <sup>4</sup>	395.87		26.93
中度		2.28×10 <sup>5</sup>	17.16	107.05
重度			6.90×10 <sup>4</sup>	11.86
极重度				1.63×10 <sup>6</sup>

## 4 沙漠化土地变化原因分析

### 4.1 自然因素

气候变化是敦煌市沙漠化发展形势逆转的重要因素。由于全球显著变暖和水循环加快,使得中国西北区温度上升,降水量、冰川消融量和径流量连续多年增加<sup>[13]</sup>,党河出山径流量总体亦呈增长趋势,2000年出山径流量比平均径流量偏丰 7.34%<sup>[14]</sup>,敦煌市又实施了关井压田工程,从而引起下垫面土壤含水量上升,土壤质地改善,进而导致物种种群和生物多样性增加,沙地植被生产力提高,植被发育良好,很大程度上改变了区域内的生态环境,有效遏制了沙漠化的发展扩张,沙漠化程度趋于减轻。

### 4.2 人为因素

4.2.1 生态工程实施 敦煌市在国家和省上的大力支持下,依托三北工程人工造林、封育管护、退耕还林(草)和自然保护区建设等重大生态工程,2004—2008年共完成沙漠化治理面积 20 056 hm<sup>2</sup>,其中封沙育林 14 066.7 hm<sup>2</sup>,荒沙造林 2 456 hm<sup>2</sup>,退耕还林 3 533.3 hm<sup>2</sup>。同时结合敦煌莫高窟崖顶风沙治理工程、河西走廊农业综合开发工程、疏勒河流域生态移民工程,使部分地区植被盖度增加。植被覆盖的变化对于沙漠化程度和类型的变化是对应的。说明人类有意识干预成果开始显现,植被生长状况变好。

4.2.2 节水型社会建设和关井压田工程实施 敦煌作为国家级节水型社会建设试点城市,不断推进节水型社会建设,强化工业和农业节水规划,优化调整用水结构,增加生态用水。此外,敦煌市实施关井压田

工程在一定程度上影响了土地沙漠化的态势。

4.2.3 基础设施的建设 近年来,国家加大基础设施投资建设力度,高速公路、飞机场、铁路等基础设施的建设,促使沙漠化土地向非沙漠化土地转变,一定程度上使沙漠化土地减少。诸如敦煌市铁路和迎宾大道的建设、敦煌机场的扩建等。虽然工程建设面积少,但由于沙漠化整体变化趋势极小,因而有所显现。

## 5 结论

(1) 与 2004 年监测数据对比,敦煌市沙漠化土地面积减少 9 102.59 hm<sup>2</sup>,年变化率 -0.001%。极重度沙漠化向重度、中度和轻度沙漠化转变,流动沙地(丘)和半固定沙地(丘)向固定沙地(丘)演变,反映出植被盖度有所好转,沙漠化程度整体在减轻。

(2) 敦煌市地处库姆塔格沙漠前沿,沙漠化土地类型主要以流动沙地(丘)和戈壁为主,其面积占到沙漠化土地面积的 82.9%。沙漠化程度以极重度沙漠化为主,占沙漠化土地面积的 82.8%。沙漠化土地治理建议应通过人为干预流动沙地(丘)和戈壁,增加植被盖度,使极重度沙漠化向重度、中度和轻度沙漠化转变。

(3) 敦煌市沙漠化土地面积 1.97×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,占土地总面积的 73.8%,年减少率仅为 0.001%,土地沙漠化趋势尚未根本改变,防沙治沙仍是敦煌市一项长期任务,任重而道远。

### [参 考 文 献]

- [1] 王涛,朱震达.我国沙漠化研究的若干问题(1):沙漠化的概念及其内涵[J].中国沙漠,2003,23(3):209-214.
- [2] 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.
- [3] 董玉祥.中国土地沙漠化问题的环境伦理学思考[J].中国沙漠,2007,27(2):210-213.
- [4] 王建宏,张龙生,尚立照.甘肃省沙漠化监测结果[J].中国沙漠,2005,25(5):775-779.

- heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84-91.
- [13] 孟庆欢, 梁成华, 谢飞, 等. 土壤微团聚体对镉吸附-解吸特性影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 231-236.
- [14] 张玉, 张朝, 王世杰, 等. 黑土不同粒径有机-矿质复合体对镉的吸附特性[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(4): 447-452.
- [15] 焦文涛, 蒋新, 余贵芬, 等. 土壤有机质对镉在土壤中吸附-解吸行为的影响[J]. *环境化学*, 2005, 24(5): 545-549.
- [16] 谷勋刚, 王果, 方玲. 有机肥非水溶性分解产物对铜、镉吸附及解吸的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 93-102.
- [17] 袁志业, 白顺果, 姜永海, 等. 土壤颗粒级配对镉吸附-解吸规律的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(5): 1979-1983.
- [18] Acosta J A, Martinez S, Faz A, et al. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials[J]. *Geoderma*, 2011, 161(5): 30-42.
- [19] 戴志刚, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 油菜秸秆用量对淹水培养土壤表层溶液理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 197-201.
- [20] 胡宏祥, 汪玉芳, 何方, 等. 水稻秸秆的腐解特征及其培肥增产作用研究[J]. *中国水土保持*, 2012(7): 51-53.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] Arias M, Perez-Novo C, Osorio F, et al. Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer of acid soils[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 288(1): 21-29.
- [23] 张晋京, 窦森, 曹亚澄. 特定培养条件下土壤有机质分解转化规律的研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 23-26.
- [24] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科技出版社, 1992: 3-30.
- [25] Curtin D, Campbell C A, Messer D. Prediction of titratable acidity and soil sensitivity to pH change[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(6): 1280-1284.
- [26] Mahara Y, Kubota T, Wakayama R, et al. Effects of molecular weight of natural organic matter on cadmium mobility in soil environments and its carbon isotope characteristics [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 387(1/3): 220-227.
- [27] Yin Y, Impellitteri C A, You S J, et al. The importance of organic matter distribution and extract soil: Solution ration on the desorption of heavy metals from soils[J]. *Science of Total Environment*, 2002, 287(7): 107-119.

(上接第 128 页)

- [5] 王晓云, 颀耀文, 吴莹莹. 敦煌市文物古迹的沙漠化环境[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(3): 34-38.
- [6] 李鹏, 朱峰. 沙漠化地区的旅游发展对沙漠化的影响研究: 以河西走廊为例[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(4): 641-647.
- [7] 汪万福, 张伟民, 李云鹤. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治研究[J]. *敦煌研究*, 2000(1): 42-48.
- [8] 屈建军, 胡世雄. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治问题[J]. *中国科学(D): 地球科学*, 1997, 27(1): 82-88.
- [9] 库姆塔格沙漠综合科学考察队. 库姆塔格沙漠研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [10] 王小军, 陈翔舜, 魏金平, 等. 甘肃省 2004—2009 年土地沙漠化时空变化分析[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 33-37.
- [11] 梅卓华. 基于 TM 影像的县级土地利用动态监测[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(5): 186-190.
- [12] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 31-38.
- [13] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.
- [14] 蓝永超, 沈永平, 高前兆, 等. 祁连山西段党河山区流域气候变化及其对出山径流的影响与预估[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1259-1267.