

毛乌素沙地生物土壤结皮与沙化土地的关系研究

咎国盛

(国家林业局 调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 生物土壤结皮在荒漠地区广泛分布, 是固沙和促进沙地生态恢复的重要生物因子。利用 1989、2002 和 2006 年的 Landsat 遥感影像, 分别通过生物土壤结皮指数和 NDVI 阈值法, 提取了毛乌素沙地生物土壤结皮和沙化土地的空间分布, 并分析了二者之间联系。结果表明: (1) 研究区 1989、2002 和 2006 年结皮面积所占比例分别为 54.77%、55.72% 和 64.29%, 表现为持续增加趋势, 结皮斑块间连接度在增强, 结皮的稳定性进一步巩固。(2) 1989—2006 年区内沙化土地的程度逐渐减弱, 沙化程度综合指数由 1989 年的 3.24 下降到 2006 年的 2.65。(3) 1989—2006 年, 中度和重度沙化土地结皮分布范围最为广泛, 均在 70% 以上; 极重度沙化土地内的结皮面积表现为持续下降, 1989、2002 和 2006 年分别为 19.40%、5.76% 和 2.80%。(4) 以 1989 年沙化土地的格局为基础, 1989、2002 和 2006 年极重度沙化土地内生物结皮的数量比例分别为 19.40%、33.18% 和 45.21%, 处于上升趋势。

关键词: 生物土壤结皮; 沙化程度; NDVI; 毛乌素沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)04-0027-05

中图分类号: S156, TP79

Relationship of Biological Soil Crusts and Land Desertification in Mu Us Desert Lands

ZAN Guo-sheng

(Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: Biological soil crusts are widely distributed in the desert as an important biological factor to stabilize the sand dunes and promote restoration of sandy ecosystem. Landsat remote sensing images of Mu Us Desert in 1989, 2002 and 2006 were used to extract spatial distribution of biological soil crusts and land desertification based on the biological soil crust index and NDVI threshold. Furthermore, the relationship between biological soil crusts and land desertification was discussed. The results show that the areas covered by biological crusts accounted for 54.77%, 55.72% and 64.29% of the total area in the three study years, respectively, indicating biological soil crusts in the study area increased continuously. In addition, the connectivity among crust patches was enhanced, and the crust stability was further strengthened. In contrast, the degree of land desertification was gradually weakened during the study period, as the composite index of land desertification dropped to 2.65 in 2006 from 3.24 in 1989. Biological soil crusts distributed most widely (over 70%) in the lands experienced moderate and severe desertification. However, the area of biological soil crusts continued to decline in extremely severely desertified lands, accounting for 19.40%, 5.76% and 2.80% of the total area of the extremely severely desertified land in the three study years, respectively. The number of biological soil crusts was increasing in extremely severe desertification land, indicated by the ratio of 19.40%, 33.18% and 45.21% in the three study years, respectively.

Keywords: biological soil crusts; desertification degree; NDVI; Mu Us Desert Lands

在干旱和半干旱地区, 广泛分布着生物土壤结皮, 在一些植物群落中, 生物土壤结皮中的生物可占这些地区生物组成的 70% 之多, 这些结皮由不同种

类的苔藓、地衣、地钱、藻类、真菌、蓝藻以及细菌等与其下层很薄的土壤共同形成的一个复合生物土壤层^[1]。在植被稀疏的荒漠生态系统中生物土壤结皮

收稿日期: 2011-12-19

修回日期: 2012-01-06

资助项目: 国防科工局专项项目“林业资源调查与评估信息服务系统及示范先期攻关项目”(E0305/1112/03); 林业公益性行业科技专项经费项目(200804020)

作者简介: 咎国盛(1978—), 男(汉族), 山东省商河县人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事遥感和地理信息系统在生态环境监测及评价中的应用。E-mail: btnu2000@gmail.com。

不仅是一种重要的生物覆盖,也发挥着重要的生态功能,是荒漠地区植被演替的重要基础。首先,结皮的生物组分通过自身所分泌的有机凝胶体和多聚糖,或通过地下菌丝和假根将松散的土粒同自身粘结在一起,形成了一个致密的抗蚀层,可以显著地提高起沙风速,有效抑制风蚀发生^[2]。其次,生物土壤结皮还是干旱半干旱地区生态系统重要的氮源和碳源,通过地衣和蓝藻固定氮而增加系统中氮的输入,通过光合作用增加系统中有机碳的输入,并影响土壤的养分含量,从而促进植被恢复和演替^[3-4]。最后,生物土壤结皮是流动沙丘中具有显著固沙能力的微形态特征,是沙丘固定的明显标志,其出现和动态变化指示了沙漠演替的方向,可作为生态环境健康评价重要指标^[5-7]。正是由于生物结皮在荒漠生态系统中的重要作用,生物土壤结皮研究得到了越来越多的关注。

在生物土壤结皮资源空间分布特征和规律的研究上,遥感提供了一种了有效的手段,目前已有多位学者提出了生物土壤结皮信息的提取算法^[8],Karnieli等^[9-10]研究了以色列半干旱区的生物土壤结皮的植被光谱,在对比了不同组成的生物结皮光谱曲线和分析结皮中藻胆素对蓝光的影响后,首先提出了一个以红光波段和蓝光波段为基础的结皮指数(crust index, CI),这一指数用于解读以蓝绿藻为主的生物结皮的空间分布。Chen等^[11-12]研究了中国新疆古尔班通古特沙漠南缘的地衣结皮的地面光谱特征,提出了一个新的生物土壤结皮指数(biological soil crust index, BSCI),并利用 ETM⁺ 数据进行了研究区结皮盖度信息的提取,对区域内的生物结皮覆盖变化进行了研究。陈晋等^[13]采集古尔班通古特沙漠结皮样本,经水化实验后,对光谱进行分析,又提出了连续统去除技术(continuum removal)推算生物土壤结皮覆盖度的新方法,Weber等^[14]在南非西北部通过 CASI 高光谱数据也单独提出了连续统去除技术的新算法,并与 CI 和 BSCI 进行了比较。

基于上述背景及问题,本研究试图利用多期遥感影像,运用 Chen 等提出的生物土壤结皮指数(BSCI),从多个时期的影像上提取生物结皮的空间分布,并以此为基础利用景观格局分析方法揭示研究区多年来生物结皮空间分布的变化特征及在各个时期内结皮覆盖的景观特征,同时利用该区域荒漠化动态变化,分析生物结皮与荒漠化之间的内在联系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地位于我国季风区的西部边缘,属于典

型的温带干旱大陆性气候,气候区划上属于亚干旱向干旱的过渡地带,是我国荒漠化和沙化最为活跃的地区之一^[15],本研究区位于毛乌素沙地腹地,属陕西省榆林市榆阳区、神木县,内蒙古乌审旗、伊金霍洛旗境内,范围 38° 40' 14"—38° 59' 30" N, 109° 17' 20"—109° 57' 20" E, 平均海拔 1 200 m, 年均降水量约 400 mm, 集中在夏季, 平均气温 8.1 °C, 湿润指数 0.45, 年日照时数 2 927 h。灌木是区域内典型生活型, 主要物种包括沙柳(*Salix psammophila*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、乌柳(*Salix cheilophila*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。区域内生物结皮广泛分布, 主要以藻类生结皮层、藻类苔藓复合结皮层和苔藓类生物结皮层为主, 根据形成时间和结皮层所处的坡位, 结皮厚度介于 0.1~1.5 cm^[16]。

1.2 数据来源及预处理

为研究多年来毛乌素沙地南缘生物结皮空间分布的变化特征,选取的遥感影像包括 Landsat TM 和 Landsat ETM⁺, 数据获取时间分别为 1989 年 9 月 11 日(TM)、2002 年 8 月 6 日(ETM⁺)和 2006 年 9 月 10 日(TM), 数据来源于 GLCF 数据中心。对上述数据经过几何纠正、辐射纠正和大气纠正获得了消除大气影响的地表反射率图像。数据投影采用 UTM(49N), 球体 WGS84, 重采样精度 30 m, 大气纠正由于缺少相应的气象参数, 统一采用 ENVI 提供的 FLASSH 模型进行纠正, 该模型使用 MODTRAN4 中的辐射传输计算方法, 可以针对不同区域提出用于纠正的大气模型和气溶胶模型, 精确补偿大气影响, 有效消除大气和光照等因素对地物反射的影响, 获得地物较为准确的反射率。本研究根据研究区的具体情况在模型中选定的大气模型为中纬度夏季模式(Mid-Latitude Summer, MLS), 气溶胶模型选定为乡村模式(Rural)。

由于本研究的内容主要是生物土壤结皮动态变化与沙化土地之间的关系, 因此, 在计算生物土壤结皮及分析沙化土地动态变化前, 还将耕地、水域和居民工矿和交通用地采用监督分类的方法予以剔除。

1.3 生物土壤结皮指数的计算

生物土壤结皮指数由 Chen 等^[11-12]提出, 他们通过分析古尔班通古特沙漠中结皮的光谱特征, 发现在 550~700 um(绿光—红光)范围内, 生物结皮的光谱曲线上上升趋势比裸沙和干枯植物平缓, 在可见光—近红外波段比裸沙和干枯植物的反射率低很多, 据此光谱特征, 根据 Landsat ETM⁺ 卫星的波段设置, 提出了用生物土壤结皮指数(BSCI)区分结皮和非结皮

区域。其定义为:

$$BSCI = \frac{1-L \times |R_{red} - R_{green}|}{R_{GRNIR}^{mean}}$$

式中: R_{green} , R_{red} ——Landsat ETM⁺传感器的绿光和红光波段(即第 2 和第 3 波段)的反射率; R_{GRNIR}^{mean} ——绿光、红光和近红外波段反射率的平均值, 对应 Landsat ETM⁺传感器的第 2, 3 和 4 波段; L ——经验调整参数, 用于强调 R_{green} 和 R_{red} 差的绝对值的贡献率, 一般取值为 2。

按照 BSCI 的定义, 该指数能有效地增强生物结皮与其他地物的区别, 可以认为 BSCI 值的大小主要取决于像元内生物结皮的覆盖率。为了区别背景地物(裸沙和干枯植物)以及水、云、高大沙丘阴影和生物结皮, 结合 Landsat ETM⁺的光谱响应函数, 可得到 ETM 影像中的生物结皮对应的 BSCI 的下限阈值(结皮覆盖约在 33% 的像元)和上限制阈值(结皮覆盖在 100% 的像元)分别为 3.69 和 6.59。考虑到 TM 传感器和 ETM⁺传感器波段设置和波谱响应函数基本一致, 本研究中, 采用统一阈值。

1.4 沙化动态监测

沙化过程引起地表条件的变化主要表现为植被覆盖和景观格局的变化, 其核心指标是沙化程度的变化, 研究区地处毛乌素沙地腹地, 区域内均为沙地土地, 因此沙化动态评价只需考虑沙化程度的变化。本研究沙化程度分级采用 2009 年颁布的国家《沙化土地监测技术规程》标准^[17], 该标准依据植被盖度将沙化土地分为极重度(植被盖度 < 10%, 流动沙丘); 重度(10% ≤ 植被盖度 < 30%, 半固定沙丘); 中度(30% ≤ 植被盖度 < 50%, 固定沙丘)和轻度(50% ≤ 植被盖度, 固定沙丘)4 个等级。研究区域内整体沙化程度动态变化评价采用权重指数法, 其定义为:

$$LDI = \frac{\sum LDW_i \times A_i}{AREA}$$

式中: LDI——区域内沙化程度的综合指数, 取值范围为 [0, 4], LDI 数值越高, 区域内沙化程度越重; LDW_i ——各程度沙化土地的权重, 根据不同程度赋权分别是: 极重度为 4, 重度为 3, 中度为 2, 轻度为 1, 非沙化土地为 0; A_i ——相应沙化程度土地的面积; AREA——区域总面积。

植被盖度与 NDVI 有强烈的相关性, 许多研究已经表明用 NDVI 估算植被盖度是一种可行的方法, 本研究在比较分析了区域内 NDVI 数值采用二分法计算植被盖度后, 通过多项式变换, 反解出不同植被盖度下的 NDVI 阈值, 进而对沙化程度评价。NDVI 阈值与植被盖度及沙化程度关系为: (1) ND-

VI < 0.147, 植被盖度 < 10%, 沙化程度为极重度; (2) 0.147 ≤ NDVI < 0.279, 10% ≤ 植被盖度 < 30%, 沙化程度为重度; (3) 0.279 ≤ NDVI < 0.413, 30% ≤ 植被盖度 < 50%, 沙化程度为中度; (4) 0.413 ≤ NDVI, 50% ≤ 植被盖度, 沙化程度为轻度。

2 结果与讨论

2.1 生物土壤结皮的景观特征变化

景观空间格局分析是指用来研究景观结构组成特征和空间配置关系的分析方法, 通过比较不同时间尺度上的景观格局变化, 可以反映生物土壤结皮系统的发展演变。本文选取了两个指标反映生物土壤结皮的景观特征。(1) 景观数量和单元特征的指数: 斑块面积(CA)、斑块个数(NP)、斑块平均面积(PA)、斑块密度(PD); (2) 景观空间特征的指数: 最大斑块指数(LPI)、景观分离度指数(Division)、连接度指数(Cohesion)。所有指数均在计算景观指数的工具 Fragstats 3.3 软件包下完成。

研究区 3 个时期生物土壤结皮广泛发育, 不同年度中, 1989 年结皮面积 107 099.82 hm², 占到研究区总面积的 54.77%; 2002 年增加到 116 411.94 hm², 占 55.72%; 2006 年持续增加, 面积到达 125 712.09 hm², 占 64.29%。数据结果表明, 1989—2006 年区域内结皮的面积持续增长。从其它指征景观数量和特征的指数分析, 斑块个数、斑块密度表现出了一致性, 均在 1989 年处于最低值, 分别为 36 472 和 18.65, 2002 年为最大值, 其数值为 46 235 和 23.64, 2006 年较 2002 年略有下降, 为 44 286 和 22.65, 其原因可解释为 1989—2002 年间, 研究区结皮像元数量虽然显著增加, 但个体规模较小, 空间分布上较为破碎, 未形成大范围均质的结皮地块, 这点从斑块平均面积在 2002 年为 2.52 处于最小值上也得到了体现, 小于 1989 年的 2.94 和 2006 年的 2.84。在景观特征上, 1989—2006 年, 最大斑块指数分别为 29.50, 33.93 和 37.59, 连接度指数分别为 99.76, 99.80 和 99.82, 均有增长, 而分离度指数分别为 0.88, 0.83 和 0.80, 持续下降, 表明区域内最大结皮斑块面积增长的同时, 各个结皮斑块间的连接度也在增加, 结皮的稳定性进一步得到了加强。

2.2 沙化土地动态变化

计算结果显示, 区域内三期沙化程度综合指数依次为 3.24, 2.76 和 2.65, 均在 2.5 以上, 且沙化程度以重度为主, 1989, 2002 和 2006 年重度沙化土地分别占 50.39%, 46.12% 和 54.34%, 说明该区域沙化危害严重, 但从沙化程度综合指数趋势上看, 1989—

2006 年间,研究区沙化程度呈减弱趋势,整体环境质量得到了明显改善。在不同程度沙化土地面积的变化上,极重度沙化土地变化最为明显,三期数据分别为 98 544.96,40 561.20 和 18 886.68 hm^2 ,其比例由 1989 年的 38.25% 下降到 2002 年的 20.74%,至 2006 年已不足 10%,整体减少幅度达 74.51%,说明流动沙地明显得到遏制,转变为半固定或固定沙地;与极重度沙化土地持续减少相反,区域内中度沙化土地一直呈现增加的趋势,其比例分别为 8.28%,21.81% 和 27.32%,2006 年较 1989 年增加了 3.29 倍,中度沙化土地面积的提升,显著地增强了生态系统的稳定性,增加了沙化土地的抗风蚀能力,为促进区域内植被生态恢复提供了良好基础。值得注意的是,研究区内轻度的沙化土地在 2002 年达到 11.33% 后,2006 年有所下降,为 8.67%,这可能有两种原因造成,一是气象条件发生变化,降雨量减少造成高盖度植被区域面积的减少,另一方面则可能是研究区位于干旱气候区域内,植被以灌木为主,其自身的土地承载力不足以支持持续的高盖度植被生长,从而造成灌木林的自疏和死亡,具体的原因还需要做进一步的分析和研究。

2.3 生物土壤结皮与沙化土地的关系

本文主要从两个方面研究生物土壤结皮与沙化程度的关系。(1) 分析 3 个时期不同程度沙化土地内结皮的组成及动态变化;(2) 讨论结皮的组成与动态变化与沙化程度的关系。

表 1 分别列出 1989,2002 和 2006 年不同程度沙化土地上的结皮动态变化的计算结果,从各程度沙化土地内结皮分布范围可以看出,中度和重度沙化土地 ($10\% \leq \text{植被盖度} < 50\%$) 结皮的分布范围最为广泛,均在 70% 以上,主要是一定植被盖度条件下,由于植被的遮荫和叶片凝结作用,能够产生足够的湿度,从而为结皮的生长提供充足水分条件。轻度沙化土地 ($50\% \leq \text{植被盖度}$) 虽然也有较为广泛的结皮分布,但分布范围有所波动,1989 年为 47.30%,2002 年为 53.07%,2006 年为 30.98%,因为结皮的分布除受气候、地形等的影响外,合适的空间范围也是影响其分布的重要因素,在轻度沙化土地上,由于植被盖度过大,结皮发育的空间往往受到限制。结皮在极重度沙化土地 (植被盖度 $< 10\%$) 内分布比例最低,均未超过 20%。从时间来看,轻度、中度和重度沙化土地内的结皮分布范围虽然有所波动,但整体相对稳定,极重度沙化土地内的结皮在 1989—2006 年间持续下降,分别为 19.40%,5.76% 和 2.80%,结合极重度沙化土地数量持续减少及区域整体沙化程度明显减弱的趋势分析,表明结皮的发育显著地改善极重度沙化土地的生态条件,使其向良性的方向演替,而剩余的极重度沙化土地自然状况更为恶劣,不易产生结皮。

为了更深入地分析不同程度沙化土地内的结皮变化,以 1989 年沙化土地的格局为基础,研究其内部结皮的组成与动态变化,探讨结皮发育对沙化程度的影响(表 2)。

表 1 研究区 1989,2002 和 2006 年生物土壤结皮分布

沙化程度	1989 年		2002 年		2006 年	
	结皮面积/ hm^2	所占比例/%	结皮面积/ hm^2	所占比例/%	结皮面积/ hm^2	所占比例/%
轻度	2 837.43	47.30	11 758.41	53.07	5 254.11	30.98
中度	11 885.85	73.38	38 522.34	90.32	42 623.91	79.77
重度	77 860.71	79.01	63 792.99	70.74	77 306.04	72.75
极重度	14 515.83	19.40	2 338.20	5.76	528.03	2.80

表 2 以 1989 年沙化程度格局为基础的生物结皮面积

沙化程度	沙化面积/ hm^2	1989 年		2002 年		2006 年	
		结皮面积/ hm^2	所占比例/%	结皮面积/ hm^2	所占比例/%	结皮面积/ hm^2	所占比例/%
轻度	5 998.86	2 837.43	47.30	2 658.24	44.31	2 536.74	42.29
中度	16 196.58	11 885.85	73.38	11 762.82	72.63	10 175.76	62.83
重度	98 544.96	77 860.71	79.01	77 168.61	78.31	79 182.09	80.35
极重度	74 804.85	14 515.83	19.40	24 822.27	33.18	33 817.50	45.21

生物土壤结皮是流动沙丘固定的明显标志,计算结果也表明,1989 年的极重度沙化土地内,生物结皮的数量比例分别为 19.40%,33.18% 和 45.21%,一直处于上升趋势,与区域内极重度沙化土地动态变化

持续降低相反,中度和重度沙化土地内,生物土壤结皮数据基本保持稳定,而在轻度沙化土地内,结皮的数量则在减少。综合沙化土地程度变化和土壤结皮空间范围变化,结果表明生物结皮在流沙固定的初始

阶段发挥着重要的生态功能,是流沙固定的先锋,在中度和重度沙化土地上广泛的生物结皮,有助于沙地生态系统的稳定,而在轻度沙化土地内,由于植被盖度较高和地表枯枝落叶层的影响,生物结皮的发育受到了限制。

3 结论

(1) 研究区域内生物土壤结皮广泛发育,1989—2006年结皮面积持续增加,其比例分别由1989年的54.77%,增加到2002年的55.72%,至2006年,达到64.29%。在景观特征上,各个结皮斑块间的连接度在增强,结皮的稳定性进一步得到巩固。

(2) 研究区沙化土地以重度为主,1989—2006年,土地沙化的程度逐渐减弱,沙化程度综合指数由1989年的3.24下降到2006年的2.65,流动沙地显著减少,固定沙地大量增加,沙地生态系统恢复特征明显。

(3) 在3个时期各程度沙化土地中,中度和重度沙化土地结皮分布范围最为广泛,轻度沙化土地虽然也有较为广泛的结皮分布,但分布范围有所波动,随着极重度沙化土地数量持续减少,剩余极重度沙化土地内结皮的比例不断下降。

(4) 以1989年沙化土地的格局为基础,极重度沙化土地的生物结皮的数量比例持续上升,中度和重度沙化土地生物土壤结皮数据基本保持稳定,而在轻度沙化土地内,结皮的数量则在减少。

(5) 生物土壤结皮在沙化土地综合治理方面具有特殊的作用,目前研究主要集中在生物土壤结皮对养分输入、种子萌发、土壤水文过程、土壤抗蚀性等微观层面上,使用遥感手段反演生物土壤结皮的景观格局和过程,并分析其对沙化土地景观尺度上的影响仍然处于探索阶段,技术手段和方法尚不成熟,有待于进一步加强研究。

[参 考 文 献]

- [1] Belnap J, Kaltenecker J H, Rosentreter R, et al. Biological Soil Crusts: Ecology and Management[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [2] 李晓丽, 申向东. 结皮土壤的抗风蚀性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 203-207.
- [3] Veste M, Littmann T, Breckle S W. The role of biological soil crusts on desert sand dunes in the Northwestern Negev, Israel [M] // Sustainable Land-use in Deserts. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 357-367.
- [4] 潘臻. 不同植被下沙地生物结皮对土壤养分的影响[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [5] 吴玉环, 高谦, 程国栋. 生物土壤结皮的生态功能[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 41-45.
- [6] 李守中, 肖洪浪, 李新荣, 等. 干旱、半干旱地区微生物结皮土壤水文学的研究进展[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 500-506.
- [7] 张军红, 吴波, 贾子毅, 等. 毛乌素沙地油蒿植冠下生物结皮分布特征及其影响因素研究[J]. 林业科学研究, 2010, 23(6): 866-871.
- [8] 房世波, 刘华杰, 张新时, 等. 干旱、半干旱区生物土壤结皮遥感光谱研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1842-1845.
- [9] Karnieli A, Kokaly R F, West N E, et al. Remote sensing of biological soil crusts [M] // Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 431-455.
- [10] Karnieli A. Development and implementation of spectral crust index over dune sands [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(6): 1207-1220.
- [11] Chen Jin, Zhang Mingyuan, Wang Le, et al. A new index for mapping lichen-dominated biological soil crusts in desert areas [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(2): 165-175.
- [12] 张元明, 陈晋, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 53-60.
- [13] 陈晋, 杨伟, 张元明, 等. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮反射光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 28-32.
- [14] Weber B, Olechowski C, Knerr T, et al. A new approach for mapping of biological soil crusts in semi-desert areas with hyperspectral imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2187-2201.
- [15] 吴薇. 近50年来毛乌素沙地的沙漠化过程研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 164-169.
- [16] 薛英英. 鄂尔多斯沙区沙漠生物结皮特征的研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [17] 国家林业局. GB/T24255—2009 沙化土地监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.