

毛乌素沙地景观格局变化研究

吴 波, 慈龙骏

(中国林业科学研究院中国防治荒漠化研究和发展中心, 北京 100091)

摘要:通过对毛乌素沙地不同时期的景观分类和制图以及景观格局计算, 分析了 50 年代到 90 年代毛乌素沙地景观动态与景观格局变化的特征和模式。研究表明, 50 年代以来, 毛乌素沙地景观发生了巨大变化, 流动沙地、半固定沙地面积大幅度增加, 固定沙地面积迅速减少, 农田面积明显增加, 草原、柳湾和盐湿低地等面积显著减少。50 年代时, 整个景观以流动沙地和固定沙地占优势, 而 90 年代, 则以流动沙地占绝对优势。伴随着荒漠化的发展, 各种景观要素类型之间相互转化, 景观格局发生显著变化。固定沙地面积减少伴随着斑块的破碎化, 大型斑块数量减少, 小型斑块数量增加; 流动沙地面积增加的同时, 一方面, 较小的斑块不断联合形成更多的大型斑块, 另一方面, 流动沙地不断向固定、半固定沙地内部渗透, 形成更多的小型斑块, 使整个景观更加破碎。不合理的人类活动是荒漠化扩展及景观格局发生显著变化的主要驱动因素。

关键词: 毛乌素沙地; 景观动态; 景观格局; 景观过程; 尺度; 荒漠化

Temporal and spatial patterns of landscape in the Mu Us Sandland, Northern China

WU Bo, CI Long-Jun (*Chinese Research and Development Center for Combating Desertification, Chinese Academy of Forestry, Beijing 10091, China*)

Abstract: Based on the landscape classification and cartography and the analyses of landscape patterns, the temporal and spatial patterns of landscape from the 1950s to the 1990s in the Mu Us Sandland, Northern China were investigated. The results show that since the 1950s the landscape in this area have undergone dramatic changes. The shifting and semi-fixed sandy land expanded rapidly and fixed sandy land reduced fast. The area of farmland increased and that of grassland, willow and wetlands salinized and/or damp decreased significantly. In the landscape, both of shifting and fixed sandy land had the largest proportion in the 1950s, and the shifting sandy land occupied the dominant position irrepachable in the 1990s. As a consequence of desertification development, a significant change appeared in landscape patterns. The decrease of area of fixed sandy land was followed by patch fragmentation, the decrease of number of big patches and the increase of number of small patches. Accompanied with the increase of area of shifting sandy land, small patches associated with others to produce more big patches; on the other hand, shifting sandy land invaded into fixed and semi-fixed sandy land to produce more small patches, so that the landscape was more fragmented. Irrational human activities seem to be the main driving forces for the desertification expansion and significant changes of landscape patterns.

Key words: the Mu Us Sandland; landscape dynamics; landscape patterns; landscape process; scale; desertification

文章编号: 1000-0933(2001)02-0191-06 中图分类号: Q149 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(批准号: 39990490)、国家“九五”攻关资助项目(批准号: 96-017-01-05)和中国林业科学院科学技术发展基金资助项目

收稿日期: 1999-10-16; 修订日期: 2000-03-20

作者简介: 吴 波(1968~), 男, 吉林抚松人, 博士, 研究员。主要从事景观生态学与荒漠化过程等研究。

景观空间结构与生态过程之间的密切关系、景观空间格局是景观生态学主要研究焦点之一^[1~3]。近年来,为了发展土地覆盖变化的综合模型,许多学者试图深入理解景观变化的时空格局^[4~6]。人类活动是形成景观、构建由自然和人工管理斑块组成镶嵌体的主要动力^[1,8]。对景观变化的格局、成因以及这种变化的社会和生态后果的充分理解将增强人们预测未来景观动态和制定更加有效的景观管理策略的能力^[9]。

沙地景观具有显著的空间异质性^[10],在空间上表现为不同退化程度的斑块的镶嵌。对荒漠化过程中沙地景观格局动态进行研究,是对传统荒漠化机制研究的重要补充,对揭示荒漠化发生机制与过程具有重要意义^[10~12]。本文在不同时期的景观分类和制图的基础上,分析与揭示了 50 年代到 90 年代毛乌素沙地的景观动态与景观要素类型空间格局变化的特征和规律,并对荒漠化形成与加速扩展的原因进行了讨论。

毛乌素沙地位于内蒙古、陕西、宁夏的交界地带,地理位置为 37°27'30"~39°22'30"N,107°20'~111°30'E,面积约 4×10⁴km²,处在鄂尔多斯高原与黄土高原之间的过渡地区。毛乌素沙地位于我国东部季风的尾间地区,属典型大陆性半干旱气候,年降水量 250~440mm^[13]。其生物气候带处于干旱荒漠带与半湿润森林草原带之间的干旱荒漠草原至半干旱草原亚地带的过渡位置^[14]。该地区位于我国北方农牧交错带上,其西北部为牧业区,向东南部和东部农业区过渡。毛乌素沙地虽然位于半干旱草原地区,但流沙广布,荒漠化扩展迅速,危害严重,因此,是我国荒漠化研究的重点地区。前人围绕环境变迁^[15,16]、荒漠化成因^[17~19]、自然资源合理利用^[13,20,21]等做了大量工作,积累了丰富的资料和数据,为开展深入研究奠定了基础。

1 研究方法

1.1 景观分类与制图 研究时间为 50 年代至 90 年代。使用了 1993 年 9 月下旬 1:200 000TM 影像 4 景,合成方案为 3(兰)、4(红)、5(绿)假彩色合成。另外还使用了北京大学地理系等^[13]通过对 50 年代黑白航片(航摄时间为 1957~1959 年间,大部分为 1958 年;航摄比例尺为 1:36 000~1:65 000)的解译完成的 1:500 000 毛乌素沙地系列专题图一套,共 10 张。根据地貌、植被、土壤等主导因子,在 1:500 000 尺度上将毛乌素沙地划分为 13 种景观要素类型:1)草原;2)固定沙地;3)半固定沙地;4)流动沙地;5)沙丘-盐湿丘间低地复合体;6)盐湿滩地;7)农田;8)撂荒地;9)水体;10)居民地;11)灌丛;12)沙丘-柳湾复合体;13)人工林。

根据资料来源的不同,采用两种制图方法:(1)以 50 年代毛乌素沙地系列专题图为基础,参考其它有关资料和图件,完成 50 年代 1:500 000 毛乌素沙地景观类型图;(2)在野外调查的基础上,对卫星影像进行目视解译,完成 90 年代 1:500 000 毛乌素沙地景观类型图^[22]。所有图件经扫描、细化、矢量化,输入 ARC/INFO,以 1:200 000 地形图为准进行空间纠正、配准、拼接。为了保证空间上的可比性,毛乌素沙地的范围沿用了 50 年代各专题图的制图范围,制图范围 3.79×10⁴km²。

1.2 景观格局计算 景观格局计算使用了目前国际上最流行的景观空间格局分析软件包 FRAGSTATS,全部计算在 SUN 工作站上完成。文中用到的景观指数计算公式如下^①:

(1) 斑块数 (NP)
$$NP = n_i \tag{1}$$

(2) 平均斑块面积 (MPS)
$$MPS = ((\sum_{j=1}^n a_{ij}) / n_i) (\times 1/10\ 000) \tag{2}$$

(3) 最大斑块指数 (LPI)
$$LPI = (\max_{j=1}^n (a_{ij}) / A) (\times 100) \tag{3}$$

(4) 斑块密度 (PD)
$$PD = (n_i / A) (\times 10\ 000) (\times 100) \tag{4}$$

(5) 景观形状指数 (LSI)
$$LSI = (\sum_{k=1}^n e_{ik} / 2 \sqrt{\pi \cdot A}) \tag{5}$$

(6) 斑块面积标准差 (PSSD)
$$PSSD = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \left[a_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \right) \right]^2}{n_i} \right]^{1/2} \times (1/10\ 000) \tag{6}$$

① McGarigal, K. & Marks, B. J. Fragstats-spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis, USA.

(7)斑块面积变异系数($PSCV$)

$$PSCV = (PSSD/MPS) \times 100$$

(9)

(8)边缘密度(ED)

$$ED = (\sum_{k=1}^n e_{ik}/A) \times 10\,000$$

(8)

(9)面积加权平均斑块分维度($AWMPFD$)

$$AWMPFD = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{2 \ln p_{ij}}{\ln a_{ij}} \right) \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right]$$

(9)

式中: $i=1,\cdots,n$ 斑块类型序号; $j=1,\cdots,a$, 斑块序号; n , 景观中斑块总数; A , 景观总面积; a_{ij} , 斑块 ij 的面积; p_{ij} , 斑块 ij 的周长; e_{ik} , 景观中斑块类型 i 和 k 之间的边缘总长度; n_i , 景观中类型 i 的斑块数。

2 结果与分析

2.1 景观要素类型的面积变化

50 年代以来,流动沙地、半固定沙地面积大幅度增加,分别增加了 14.3 个百分点和 10.6 个百分点,农田增加了 4.4 个百分点;而固定沙地面积大幅度减少,减少了 15.1 个百分点,草原、柳湾和盐湿低地等面积也显著减少,草原减少 2.2 个百分点,柳湾减少 5.1 个百分点,盐湿低地减少 4.8 个百分点。50 年代时,整个景观以流动沙地和固定沙地占优势,二者面积分别占景观总面积的 30.24%和 22.33%;而 90 年代,则以流动沙地占绝对优势,其面积占到景观总面积的 44.53%(图 1)。

2.2 景观格局变化的基本特征

两个时期景观水平上的景观指数见表 1。从 50 年代到 90 年代,毛乌素沙地景观发生了巨大变化,荒漠化扩展迅速。伴随着荒漠化的扩展,在整个景观中,斑块密度(PD)增大,景观更加破碎;但最大斑块指数(LPI)升高,斑块面积标准差($PSSD$)和变异系数($PSCV$)增大,斑块面积的离散程度增加;景观形状指数(LSI)、边缘密度(ED)和分维度($AWMPFD$)升高,斑块形状更加不规则;景观中面积在不同景观要素类型之间的分配更加不均衡,景观面积向少数几种类型集中。90 年代,流动沙地和半固定沙地面积的和超过 60%,而水体、居民地、灌丛、柳湾、人工林所占面积总和仅占景观总面积的 2.3%。

表 1 毛乌素沙地主要景观指数比较

Table 1 Comparison of landscape indices in the Mu Us Sandland

指数 Index	1950s	1990s	指数 Index	1950s	1990s	指数 Index	1950s	1990s	指数 Index	1950s	1990s
LPI	8.16	14.54	$PSCV$	673.99	1141.91	MPS	1155.06	744.89	LSI	48.78	63.69
NP	3278	4083	ED	8.62	11.34	$PSSD$	7785.05	8505.96	$AWMPFD$	1.28	1.31

2.3 主要景观要素类型格局变化

固定沙地、半固定沙地和流动沙地是毛乌素沙地 3 种最主要的景观要素类型,50 年代这 3 种类型的面积和占沙地总面积的 63.5%,90 年代占 73.2%。三者不仅在面积上占优势,而且都分布在梁坡、梁地以及滩地的边缘地带,在空间上呈相间分布,互相包含,彼此镶嵌在一起,在荒漠化发展过程中互相转化,关系密切。图 2 是这 3 种类型不同面积级别斑块的数量和面积的变化情况,图 3 是各种类型的 MPS 、 LPI 和 $PSCV$ 的变化情况。

2.3.1 固定沙地 面积小于 $5\times10^4\text{hm}^2$ 的斑块数量大幅度增长,其中 b 的数量增加了 1 倍多;a 的数量由 4 增加到 137,但由于单个斑块面积小,所以各级别的总面积增加不多。大于 $5\times10^4\text{hm}^2$ 的斑块数量减少,f 的数量 50 年代为 2;90 年代为 0;e 的数量 50 年代为 8,90 年代为 3;d 的数量也明显减少,由于超大型斑块数量的明显减少,总面积大大减少。由图 1 可见,固定沙地总面积减少近 1 倍,但斑块数量增加了近 1 倍; MPS 减少到原来的约 1/6, LPI 大大减小, $PSCV$ 明

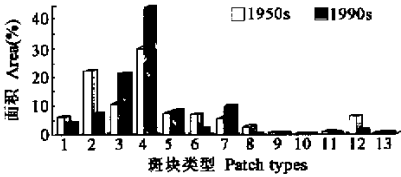


图 1 毛乌素沙地景观要素类型面积比较
(1950s~1990s)

Fig.1 Comparison of area of landscape elements in the Mu Us Sandland(1950s~1990s)

显减小。说明斑块面积的离散程度显著降低,斑块面积趋于均匀,该类型在空间上更加破碎和分散。同时,在景观中的作用大为减弱。

2.3.2 流动沙地 各级别斑块数量都有所增加,而尤以 a 的数量增加显著,由 20 增加到 333。a 的总面积由 $16.5 \times 10^4 \text{hm}^2$ 增加到 $227.5 \times 10^4 \text{hm}^2$,增加了 13 倍多;b、c、d 的总面积增加不多;e 和 f 的面积增加显著,分别增加了 115.3% 和 53.5%。f 前后两个时期斑块数量都是 2,但由于单个斑块的面积急剧增长,所以总面积增长较快。大于 $100 \times 10^4 \text{hm}^2$ 的斑块面积迅速增长,成为流动沙地面积增长的主要来源。由于小斑块数量增加较快,虽然流动沙地总面积增加较多,但 MPS 有所减小。LPI 增加迅速,最大斑块面积占到沙地总面积的 14.54%,加之流动沙地总面积达到占沙地总面积的 44.53%,流动沙地在整个景观中占据绝对优势。PSCV 明显增加,斑块面积离散程度进一步增加。

2.3.3 半固定沙地 各个级别斑块数量都增加,与固定沙地类似,面积小于 $5 \times 10^4 \text{hm}^2$ 的斑块数量增加幅度较大;e 的面积增加了近 10 倍,增加非常显著,其它各级别面积增长数量较均衡,大于 $5 \times 10^4 \text{hm}^2$ 的斑块虽然数量增加较少,但由于单个斑块面积大,所以总面积增加较多。半固定沙地总面积增加了约 1 倍,斑块数量增加了约 1.5 倍,MPS 略有减小,LPI 显著增加。PSCV 明显增大,表明斑块面积离散程度增加。其它各种类型变化相对较小。草原和柳湾-沙丘复合体的 MPS 减小幅度较大,草原的 LPI 明显减小;农田的 LPI 增加、PSCV 增大,离散程度有比较明显的增加。

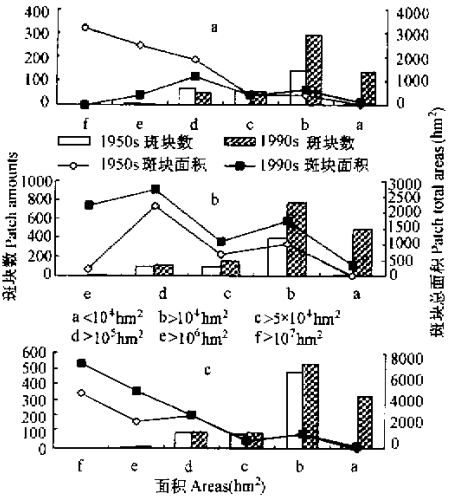


图2 固定沙地(a)、半固定沙地(b)和流动沙地(c)不同面积级别斑块的数量和面积变化

Fig. 2 Variations in amount and area of patches of fixed, semi-fixed and shifting sandy land according to patch size

表2 固定、半固定和流动沙地的主要景观格局指标变化情况

Table 2 The variations of landscape pattern indices of fixed, semi-fixed and shifting sandy land

类型 Types	面积(%)Areas		MPS		LPI		PSCV		NP	
	1950s	1990s	1950s	1990s	1950s	1990s	1950s	1990s	1950s	1990s
固定沙地①	22.33	7.22	2998.5	506.4	5.06	0.49	508.93	364.32	282	540
半固定沙地②	10.89	21.44	669.5	521.0	0.29	0.92	163.62	370.01	616	1558
流动沙地③	30.24	44.53	1631.0	1550.9	8.16	14.54	815.14	1165.02	702	1087
合计 Total	63.5	73.2							1600	3185

①Fixed sandy land;②Semi-fixed sandy land;③Shifting sandy land;

3 结论与讨论

3.1 景观动态与荒漠化扩展

50年代以来,毛乌素沙地景观发生了巨大变化,流动沙地、半固定沙地面积大幅度增加,固定沙地面积迅速减少,农田面积明显增加,草原、柳湾和盐湿低地等面积显著减少。50年代时,整个景观以流动沙地和固定沙地占优势,而90年代,则以流动沙地占绝对优势。景观动态研究结果表明,50年代以来毛乌素沙地荒漠化扩展迅速,流动沙地和半固定沙地共增加了940 217.4hm²,占毛乌素沙地总面积的24.84%,增长率为60.37%。历年数据(1958年至1993年计算)平均每年增加26 863.4hm²。流动沙地增长速度最快,平均每年增加15 454.7hm²;半固定沙地平均每年增加11 408.6hm²;固定沙地平均每年减少16 346.6hm²。

3.2 景观格局变化模式

荒漠化正向发展过程在景观上表现为固定沙地向半固定沙地和流动沙地及半固定沙地向流动沙地的转化,在局部地方也存在着人为措施干预下的流动沙地向半固定沙地或固定沙地的转化过程,即荒漠化的逆转过程^[23~26]。从 50 年代到 90 年代,固定沙地面积的缩小伴随着大型斑块数量和面积的减少,以及小型斑块数量和面积的增加;而流动沙地面积的扩张伴随着大型斑块数量的增加和单个斑块面积的迅速增长,以及小型斑块数量的急剧增加和面积的增长。分析结果表明,固定沙地的退化表现为大型斑块不断被其它景观要素类型(主要是半固定沙地和流动沙地)分割、蚕食,斑块数量增加而面积迅速减小(图 2a)。流动沙地的扩展存在两种趋势:一方面,较小的斑块不断联合形成更大的斑块,大型斑块面积不断增大(图 2b);另一方面,流动沙地不断向固定、半固定沙地内部渗透,使其孔隙化和碎裂化程度增加,而流动沙地小型斑块的数量和面积不断增加(图 2c)。结果整个景观中斑块数量大大增加,而斑块面积向

两极分化,大的更大,小的则数量不断增多,使景观斑块面积离散程度增加。如果荒漠化进一步发展,固定沙地的面积将进一步缩小, MPS 也将进一步减小,但斑块数量将继续增加;而流动沙地的面积将进一步增加, LPI 也将进一步增大,斑块数量会继续增加。如果荒漠化持续发展下去,到一定程度,固定沙地斑块数量将停止增加,然后伴随着斑块的萎缩逐渐减少,固定沙地的面积继续缩小,直至消失;在某一时刻流动沙地斑块数量也将停止增加,但面积继续增加,斑块不断合并,最终流动沙地将最大限度地占据整个沙地。

3.3 荒漠化过程中景观过程-尺度-格局关系探讨

景观格局与过程具有等级性,特定的景观格局与特定的景观过程相对应,同时它们又与一定的景观尺度相联系。在毛乌素地区,农牧民的生产活动(开垦草地、放牧、樵采等)直接作用于景观的空间尺度一般在 1km^2 以下,时间尺度一般可以以年为单位(1 年或几年),这个尺度上的过程是导致荒漠化发生及整个景观发生变化的基本过程,可称之为小尺度过程。本文主要从宏观尺度对毛乌素沙地的景观格局变化进行了系统分析,空间尺度是整个毛乌素沙地(10^4km^2),时间尺度为几十年,可称之为大尺度过程,这也是由本文的研究手段决定的。

荒漠化是自然过程和人为过程共同作用的结果。毛乌素沙地位于我国北方农牧交错区,生态系统比较脆弱和气候干旱是荒漠化得以发生、发展的前提。50 年代以来,毛乌素地区气温趋于升高,降水 70 年代显著减少,80 年代有所增加,但低于 60 年代水平,气候存在干旱化倾向。农牧交错区因为人口密度大,生产经营方式落后,人类活动在现代荒漠化过程中起着重要作用。50 年代以来,毛乌素沙地荒漠化迅速扩展的主要原因是滥垦、过牧和滥樵采等不合理的人类活动;气候波动起一定促进作用^[23,26~28]。

近代以来尤其是建国后,在毛乌素地区,牧业以分散的定居放牧为主要形式,农业则以村落聚居形式为主。滥垦、过牧和滥樵采的共同特点是以户为单位,无组织、无计划,量大、面广、分散,因此,对草地的破坏也是分散的,而这正是毛乌素沙地流动沙地、半固定沙地小型斑块大量增加的主要来源。由于人口不断增加,草场不断退化,使可利用草场面积不断减少,人类活动不断向条件较好的草场内部渗透,使固定沙地变得日益破碎,促使相距较近的流动沙地进一步联合形成更大的斑块。50、60 和 70 年代,毛乌素地区曾有过 3 次有组织的大规模开荒,对草场造成巨大破坏^[28],但对不同时期航片的分析发现,撂荒地的

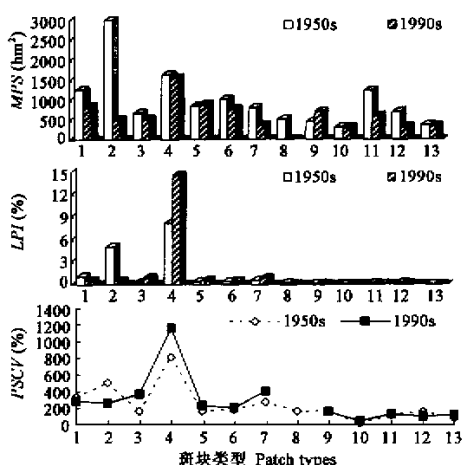


图3 各种景观要素类型 MPS 、 LPI 和 $PSCV$ 的比较 (1950s~1990s)

Fig. 3 Comparison of MPS , LPI and $PSCV$ of landscape elements

退化并不表现为大面积草场的迅速退化,在很多地方表现为斑点状或羽毛状退化,而在另外一些地方植被逐渐恢复,这也使小型斑块迅速增加。因此,不同尺度上的景观格局与过程是相互联系的,大尺度过程是由小尺度过程决定的,小尺度过程是形成大尺度过程的基础;同时大尺度过程也揭示了看似杂乱无章的小尺度过程的内在规律性。二者相耦合,共同构成了整个景观的荒漠化过程,而景观格局是景观过程在不同时间片段上的具体体现。为了揭示荒漠化过程的机制,首先必须揭示不同尺度上的景观过程,然后必须揭示各不同尺度上景观过程之间的耦合机制,在此基础上才有可能最后揭示整个景观的变化过程。这应该是今后荒漠化过程研究及景观生态学研究的方向。

参考文献

- [1] Forman R T T. *Land Mosaics, the Ecology of Landscapes and Regions*. New York: Cambridge University Press, New York, USA 1995.
- [2] Gustafson E J and Parker G R. Relationship between landcover proportion and indices of landscape spatial pattern. *Landscape Ecology*, 1992, **7**: 101~110.
- [3] Turner M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1989, **20**: 171~197.
- [4] Medler K E, Okey B W, Lucas M F, et al. Landscape change with agricultural intensification in a rural watershed, southwestern Ohio, U. S. A. *Landscape Ecology*, 1995, **10**: 161~176.
- [5] Pan D, Domon G, Blois S, et al. Temporal (1958~1993) and spatial patterns of land use changes in Huat-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes. *Landscape Ecology*, 1999, **14**: 35~52.
- [6] Simpson J W, Boerner R E J, DeMers M N, et al. Forty-eight years of landscape change on two contiguous Ohio landscapes. *Landscape Ecology*, 1994, **9**: 261~270.
- [7] Domon G, Bouchard A and Gariépy M. The dynamics of forest landscape of Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada): interactions between biological factors perceptions and policy. *Landscape and Urban Planning*, 1993, **25**: 53~74.
- [8] Luque S S, Lathrop R G and Bognar J A. Temporal and spatial changes in an area of the New Jersey Pine Barrens landscape. *Landscape Ecology*, 1994, **9**: 287~300.
- [9] Kienast F. Analysis of historic landscape patterns with a Geographical Information System—a methodological outline. *Landscape Ecology*, 1993, **8**: 103~118.
- [10] 常学礼, 邬建国. 科尔沁沙地景观格局特征分析. *生态学报*, 1998, **18**(3): 225~232.
- [11] 常学礼. 坝上地区沙漠化过程对景观格局影响的研究. *中国沙漠*, 1996, **16**(3): 221~226.
- [12] 常学礼. 景观间隙度指数在沙漠化研究中的应用. *中国沙漠*, 1997, **17**(4): 351~354.
- [13] 北京大学地理系, 等. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用. 北京: 科学出版社, 1983. 1~18.
- [14] 陈昌笃. 我国典型草原亚地带和荒漠草原亚地带中段(鄂尔多斯地区)的分界线在哪里? *植物生态学与地植物学丛刊*, 1964, **2**: 143~150.
- [15] 董光荣, 高尚玉, 金 炯, 等. 毛乌素沙漠的形成、演变和成因问题. *中国科学(B)*, 1988, (6): 633~642.
- [16] 史培军. 地理环境演变研究的理论与实践——鄂尔多斯地区晚第四纪以来地理环境演变研究. 北京: 科学出版社, 1991. 1~173.
- [17] 侯仁之. 从红柳河上的古城废墟看毛乌素沙漠的变迁. *文物*, 1973, (1): 35~41.
- [18] 王北辰. 毛乌素沙地南沿的历史演化. *中国沙漠*, 1983, **3**(4): 11~20.
- [19] 吴 正. 浅议我国北方地区的沙漠化问题. *地理学报*, 1991, **46**(3): 266~275.
- [20] 李 博主编. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究. 北京: 科学出版社, 1990. 1~97.
- [21] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设原则与优化模式. *植物生态学报*, 1994, **18**: 1~16.
- [22] 吴 波. 沙质荒漠化土地景观分类与制图——以毛乌素沙地为例. *植物生态学报*, 1999, **24**: 52~57.
- [23] 吴 波, 慈龙骏. 五十年代以来毛乌素沙地荒漠化扩展及其原因. *第四纪研究*, 1998, (2): 165~172.
- [24] 刘新民, 赵哈林, 赵爱芬. 科心沁沙地风沙环境与植被. 北京: 科学出版社, 1996. 258~261.
- [25] 吴 薇, 王熙章, 姚发芬. 毛乌素沙地沙漠化的遥感监测. *中国沙漠*, 1997, **17**(4): 415~420.
- [26] 吴 波, 慈龙骏. 毛乌素沙地荒漠化发展的阶段和成因. *科学通报*, 1998, **43**(22): 2437~2440.
- [27] 董光荣, 吴 波, 慈龙骏, 等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策. *中国沙漠*, 1999, **19**(4): 318~332.
- [28] 孙金铸. 鄂尔多斯草原沙漠化的因素与防治意见. *内蒙古师范学院学报(自然科学版)*, 1981, (1): 60~67.