

基於 RS 與 GIS 技術的毛烏素沙漠邊緣地帶 環境變化研究—以無定河中游的榆林、 橫山、米脂交界帶為例

Marginal zone of Mu us Desert Environment Change
Investigation by using RS & GIS Techniques—Boundaries
amongst Counties of Yulin, Hengshan & Mizhi exempld

何洪鳴*¹

Hong-Ming He

周 傑*²

Jie Zhou

Abstract

Environment changes research has been carried on in Mu sus Desert marginal zone (boundaries amongst Counties of Yulin, Hengshan & Mizhi), which based on remote sensing and geography information system techniques. Research shows regional environment deterioration has been sped up by improper human activities under increasing drying background ever since late of 1980's. With RS digital image manipulation techniques, information of environment elements have been extracted, while vegetation coverage variations were also analyzed with 1:50000 scale thematic maps. Furthermore, regional general environment evolution study has been put forward by integrated system employed social and economic data as well.

Key words: Marginal zone of Mu us Desert, Environment change, RS&GIS techniques

中文摘要

本文闡述了基於RS與GIS技術支援下的毛烏素沙漠邊緣地帶近二十年來的環境的動態變化。通過利用遙感資訊的數位圖像處理技術，提取了必要的環境要素資訊；通過1：50000比例尺的遙感專題製圖，進行了研究區的土地覆蓋變化研究；結合自然環境及社會經濟資料對該區的環境變化進行了系統的分析。研究

*¹ 中國科學院地球環境研究所黃土與第四紀地質國家重點實驗室博士

*² 中國科學院地球環境研究所黃土與第四紀地質國家重點實驗室研究員

表明：自1980年代後期以來，本區的環境變化是在比較乾旱的環境背景下，人為負面活動加重了環境的惡化。

關鍵字：環境變化、毛烏素沙漠邊緣地帶、RS與GIS技術

黃土高原廣大地區生活著約8000萬的人口，同時其生態環境又是極其的脆弱，因而如何在本地區進行有效區域整治與開發工作不僅關係到黃土高原地區的可持續發展，也是實施西部開發戰略的重要組成部分^[1]。黃土高原生態環境又面臨如此的失衡，長期以來學術與政府有關部門無不傾力改變其脆弱的生態面貌。比如，早在1980年代中國科學院綜合考察委員會等單位即對該區的自然與社會經濟環境狀況展開了全面的考察，為本區今後的規劃提供了基本依據。

為了深入探討在本區實行可持續發展的可行性，我們選取了毛烏素沙漠邊緣的陝北黃土高原作為重點研究區域。本研究區域位於毛烏素沙漠邊緣與黃土高原區的交界帶---陝北無定河中游的榆林、橫山、米脂交界地帶，位於東經109°30′ 110°，北緯37°50′ 38°05′，其中東西長44 km，南北寬28 km，面積大約為1232km² (如圖1)。通過案例研究，以期為其他區域環境研究提供有益的參考。

近年來隨著遙感理論及其應用技術的發展，資源環境遙感研究工作正向著快速、精確、實用的方向發展。同時與地理資訊系統技術的結合也日益緊密，使區域資源環境遙感及環境變化研究更為便利^{[2][3]}。

本研究選用多時相、多類型遙感資料為主要資訊源，通過遙感影像的數字圖像處理技術，數字化研究區的植被、土壤、水域、地形地貌等環境要素以分析它們的空間分佈及時間序列的變化，同時結合氣候、人口等其他地學輔助資料對研究區十多年來的環境變化進行了綜合分析。選用的主要資料源有1987年5月17日的Landsat-7 TM，2000年7月31日的Landsat-7 ETM+ (增強型的主題成像感測器)1987年的全色SPOT影像(其中西側一景的時相為1988年6月15日，東側一景的時相為1988年8月28日)以及1981年版1:50000地形圖。

本文將闡述基於RS與GIS技術的毛烏素沙漠邊緣地帶近十幾年來的環境變化研究。

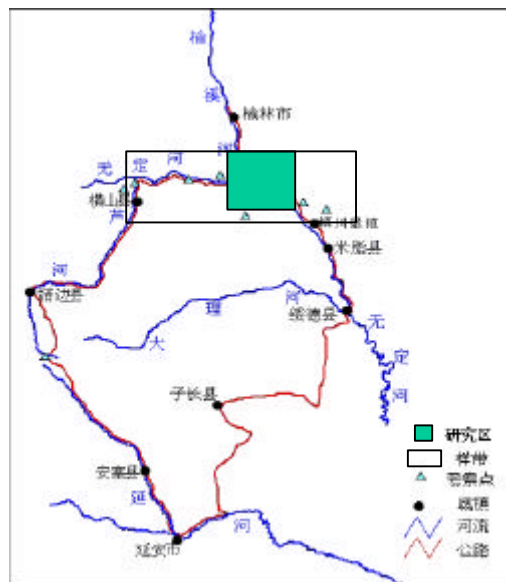


圖 1 樣帶及研究區的範圍

一、區域環境要素的資訊提取與時空動態分析

在進行區域環境要素的資訊提取與時空動態分析時，主要運用了遙感圖像資訊處理技術對圖像光譜特徵、空間特徵、紋理特徵進行了提取，以獲取目標地物的顏色、灰度以及波段間的亮度比值等，並通過植被指數(NDVI指數)、土壤亮度指數(纓帽變換)、土壤濕度指數(NDMI指數)等多個指標來充分反映研究區環境的植被狀況^{[3][4][5][6]}。通過DEM進行了溝穀密度及流域坡度分析以反映不同區域的水土流失程度。以此為基礎進而對區域土地覆蓋動態分析。

(一)基於光譜資訊指數環境指標的提取

遙感圖像的特徵包括光譜特徵、空間特徵、紋理特徵等，光譜特徵的提取是提取目標地物的顏色、灰度以及波段間的亮度比值等。為了充分反映研究區的生態環境狀況，研究中選取了植被指數(NDVI指數)、土壤亮度指數(纓帽變換)、土壤濕度指數(NDMI指數)、水域(TM B432方案)、沙地(TM B123方案)等各類環境要素指標進行資訊提取。

在區域環境研究中，植被是一重要的環境因數^{[6][7]}。在研究植被指數資訊的提取中採用了歸一化植被指數(NDVI)指標，同時基於時相上的差異，採用了標準偏差分級，對研究區1987年與2000年的植被指數圖(如圖2、3)進行統計分析。

根據NDVI數值的標準偏差統計，1987年與2000年的NDVI值，低於一個標準差的占分別占61%與81%，而高於一個標準差的分別占23%與9%，因此，儘管1987年河谷區的NDVI數值較低，但整個區域的數值偏高。

土壤亮度指數反映裸地、土地退化、土壤乾燥度等不同環境因素。研究區跨過了典型的沙黃土和黃土丘陵區，土壤背景的差異，在土壤亮度值中有明顯地反映。土壤亮度指數的標準偏差統計表明：1987年與2000年的土壤亮度指數數值，低於一個標準差的占分別占30%與27%，而高於一個標準差的分別占39%與45%。因此，儘管研究區2000年河谷區的土壤亮度值較低，但整個區域的亮度值偏高。研究區的土壤亮度指數，呈現出沙區-沙黃土區-河谷區的趨勢。相關分析表明，2000年土壤亮度指數與植被指數呈現出比較明顯的負相關，相關係數為-0.72；但在1987年二者的相關係數僅為-0.29，1987年與2000年的土壤亮度指數的相關係數為0.75，由此可以看出1987年的植被狀況較2000年要好一些。

在對不同類型區的土壤濕度研究中，進行了土壤濕度指數($NDWI = \frac{Band2 - Band5}{Band2 + Band5}$)的提取^{[7][8][9]}。研究區的土壤濕度指數，呈現出與土壤亮度指數的負相關性，在兩期的土壤濕度指數圖上，濕度指數比較低的地方，往往都是土壤亮度值較高的地方，如榆溪河的兩岸被沙所覆蓋的地方。不同的是，與1987年相比，儘管沙區的土壤濕度指數值比較低，但在2000年的土壤濕度指數分佈圖上，與沙黃土區的級別差距加大，反映了沙區的土壤背景區域乾旱化。根據土壤亮度指數的標準偏差統計，研究區1987年與2000年的土壤濕度指數數值，低於一個標準差的占分別占71%與54%，而高於一個標準差的分別占24%與35%，因此，研究區1987年河谷區的土壤濕度值較高，但整個區域的濕度值偏低。

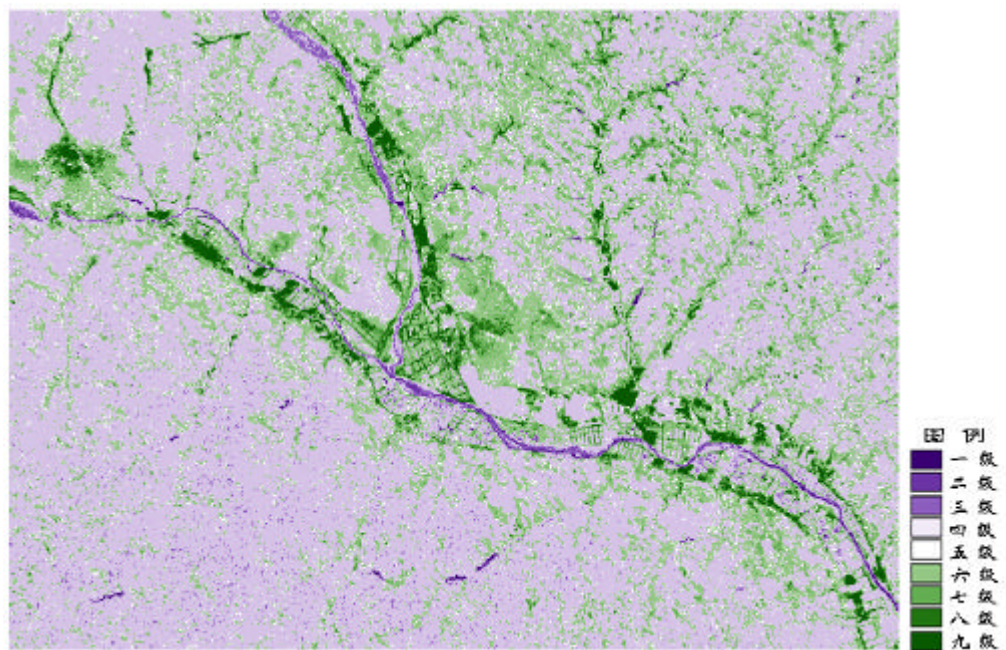


圖 2 研究區 1987 年 NDVI 指數圖

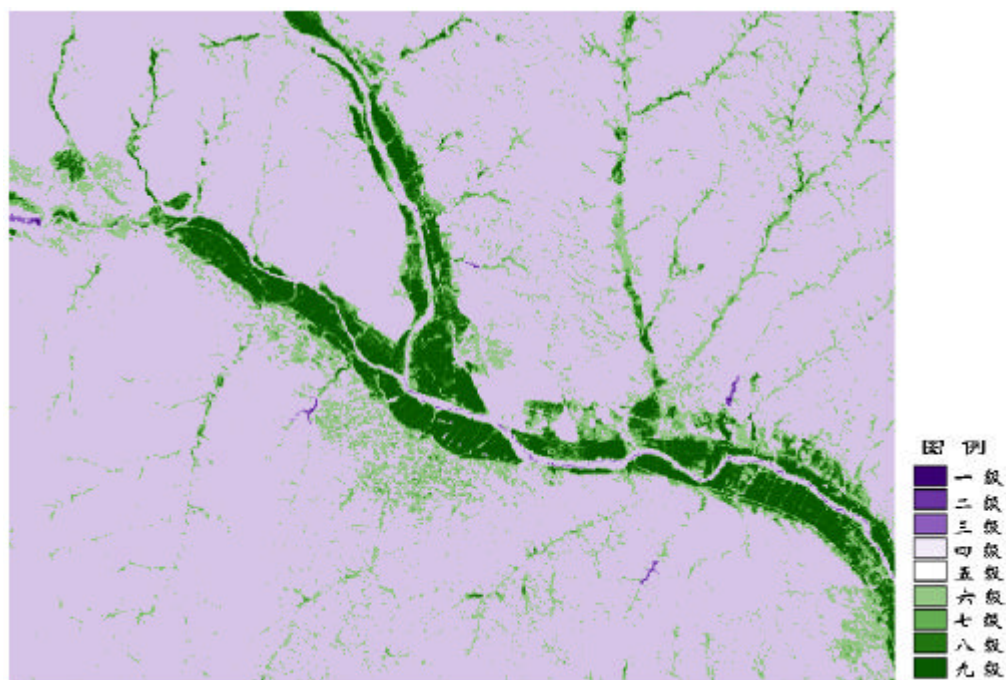


圖 3 研究區 2000 年 NDVI 指數圖

(二)基於DEM模型的區域環境研究

DEM數位高程模型具有的定位、量化優點使它擁有著廣泛的應用領域。本研究應用DEM對研究區域進行了溝穀密度及流域坡度分析^{[8][9][10][11][12]}。

在ARC/INFO的GRID環境下，用SLOPE函數對研究區的LATTICE進行計算取整。得到的坡度分級情況見表1。由表中可以看出，研究區河谷面積較大的影響，0-3度的坡度級占48%，但是該區仍有20%的面積處於25度以上，因此，可以看出研究區的土壤侵蝕還是相當嚴重的。

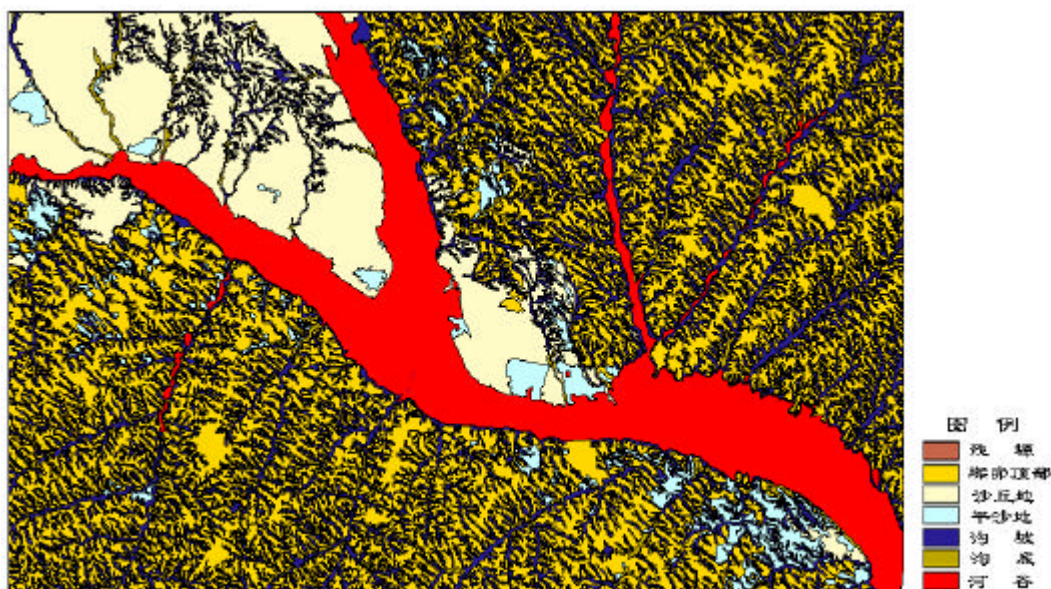


圖 4 研究區地貌類型 DEM 圖

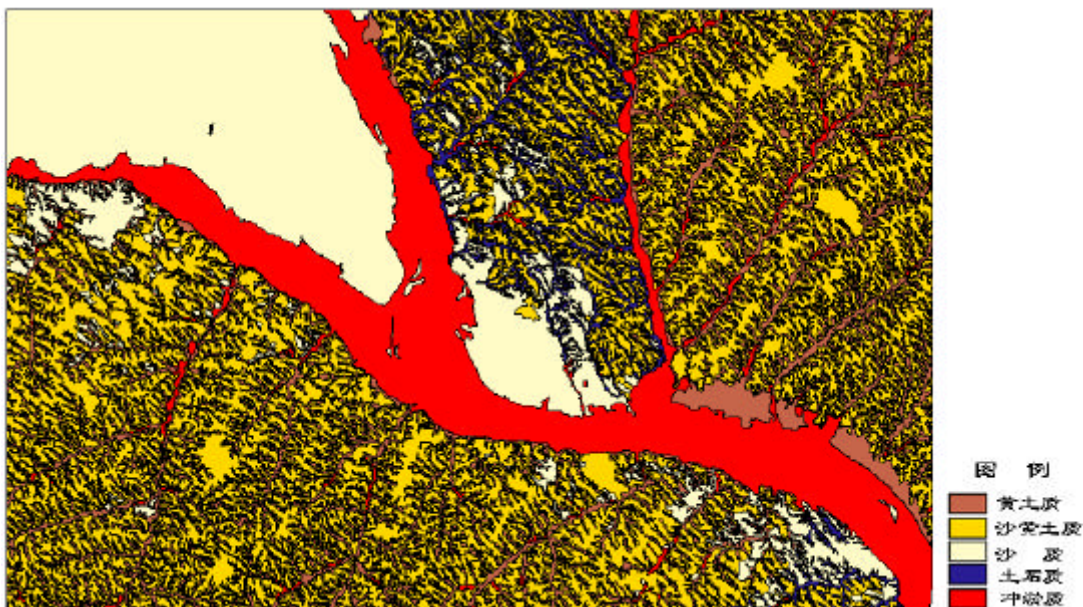


圖 5 研究區地表物質成分圖

由於研究區土壤質地的不同,因此,坡度也應該在空間上存在分異同,在ERDAS環境下,利用AOI (area of interesting)對沙區與沙黃土區的坡度情況進行了分別統計,統計結果如表1。由三個分區統計表可以看出,沙區與沙黃土區的坡度分異較大,25度以上的陡坡,沙區僅佔據7%,而沙覆黃土區則佔據了38%與46%,反映了土壤質地對水土流失的影響,沙黃土區的土壤侵蝕已經非常嚴重。並且沙黃土區的南北兩岸亦存在差異,大於25度以上的坡度分別是38%與46%,南岸高於北岸。

表 1 研究區坡度分級統計表

區域範圍 坡度級別	總研究範圍區	研究區中的沙覆區	無定河以北沙黃土區	無定河以北沙黃土區
0/2-3 度	48%	8%	2%	2%
3-7 度	5%	29%	4%	4%
7-15 度	10%	36%	17%	16%
15-25 度	17%	20%	39%	32%
25-35 度	13%	6%	26%	28%
35 度以上	7%	1%	12%	18%

在GIS軟體ARC/INFO中,基於3*3視窗計算流向“溢流跟蹤”確定匯流網路,經過網格點流向的確定、提取匯流網路與分水網路等步驟,提取流域地形。結果表明研究區不同的小流域在溝穀形態與溝穀密度上均存在差異。

在ARC/INFO軟體中,選取小流域樣區用Clip進行裁剪生成新的檔。將生成的檔用Infodbase轉為EXCEL可讀的Dbase格式,在EXCEL環境下計算溝谷的長度與面積。通過計算表明:研究區的溝穀密度均大於6 km/km²,局部地區大於6.5 km/km²,在空間上差異不大,但都有處於強侵蝕區。

(三)土地覆蓋動態變化研究

1.不同土地利用類型之相互轉化分析

為了較好地反映各類環境因數的變化,尤其是植被、水體等重要環境因數的變化及相互之間的轉化情況,在研究中根據馬爾科夫數學過程(肖篤寧,1999)^[10],利用土地覆蓋的轉移矩陣表示出不同類型土地利用之間的轉移概率(表2)。

表 2 不同類型土地利用之間的轉移矩陣

2000 年 1987 年	耕地	林灌地	草地	水域	難利用土地	建設用地
耕地	92.7	2.5	3.1	-	1.4	0.2
林灌地	16.3	67.6	5.6	0.1	10.5	-
草地	1.6	0.5	97.8	0.1	-	-
水域	12.6	-	9.7	77.1	0.7	-
難利用土地	4.1	8.8	0.5	-	86.6	-
建設用地	-	-	-	-	-	100

從表中可以看出，研究區從1987年到2000年的土地利用變化中，呈現出以下幾方面的特點：

- (1) 諸多景觀類型覆蓋區面積發生了差異性的變化。影像統計分析的結果表明：到2000年止，耕地、林灌地、草地、水域、難利用土地等諸類型土地面積分別只占1987年相應類型土地的92.7%，67.6%，97.8%，77.1%，88.6%。各土地利用類型的穩定性存在一定的差異，從整體來說，耕地和草地的變化相對穩定，林灌地、水體面積的變化較大。其中2000年的林灌地面積僅占1987年同類地面積的67.6%，總共減少了21.4 km²，而1987年林灌地中另外的32.4%發生了轉化，其中有5.6%成為草地，10.5%轉變為難利用土地。2000年較之於1987年，由其他類型土地轉化為草地的面積，總數增加了12.3 km²，難利用土地面積增加了9.2 km²。
- (2) 人為活動的影響顯現於對土地利用面積的變化。耕地是人類活動對景觀改造強烈區域，雖然耕地面積數量在整體上變化不大(1987年為295.2 km²，2000年為295.8 km²)，但到2000年時，已有占1987年16.3%，12.6%和4.1%的林灌地、草地、水域、難利用土地被轉變為耕地，而約占1987年占難利用土地13.4%的面積總共為5.78 km²，到2000年時已被墾為耕地或成為林灌地及草地，這可以解釋為在人口壓力的脅迫下而對土地的糧食生產與供給能力提出的需求。
- (3) 土地類型的變化存在穩定性上的差異，區域景觀的植被存在一定程度的退化。前後由林灌地、耕地變為難利用土地，水體變為耕地、草地，林灌地面積退化為草地等現象似乎可以成為推測該地區氣候存在乾旱化的依據。

2. 不同土地利用類型與地貌部位之關聯性分析

黃土高原的特殊地貌，使得土地利用在不同的部位間存在一定的變化，將地貌部點陣圖與土地覆蓋圖進行迭加，可以得到土地覆蓋變化與地貌部位研究的相關性結果，如表3。沙區與沙黃土區各種土地利用類型的覆蓋變化中，有以下幾個特點：

表3 研究區各類土地覆蓋變化與地貌部位相關分析(%)

地貌單元 土地利用	頂部		沙丘地		平沙地		溝坡		溝底		河谷	
	1987年	2000年	1987年	2000年	1987年	1987年	2000年	2000年	1987年	2000年	1987年	2000年
耕地	69.7	69.9	---	---	1.6	1.8	---	---	3.2	2.8	25.1	25.4
林灌地	38.4	31.5	47.2	53.7	8.7	11.9	5.3	2.7	0.4	---	---	---
草地	12.1	15.2	1.1	1.3	0.8	1.0	83.5	80.9	0.74	0.9	3.0	2.38
水域	---	---	---	---	---	---	---	---	29	11.7	70.8	88.3
難利用	2.5	5.2	85.4	78.6	8.6	14.2	0.6	0.4	0.4	0.4	2.3	1
建設	5.3	2.3	4.2	1.7	---	---	---	---	---	---	90.4	95.7

首先，土地利用類型與地貌呈現出一定的相關性。如耕地受作物生長條件的限制，主要分佈於梁頂部與河谷地區，水域、建設用地等亦呈現出這種趨勢。相比之下，林灌地、草地與難利用土地分佈的地貌類型則較為廣泛。與耕地的穩定性相比，灌類在沙黃土區的梁頂部與沙丘地、平沙變化明顯。研究區的林灌地在減少的同時，沙黃土區梁頂部灌類面對積降，計算表明，此類

型面積在10年間共減少13.87 km²，而沙丘地的灌類植被面積增加了0.76 km²，由此可說明沙黃土區植被的破壞相對嚴重。

其次，草地在總面積增加的基礎上，沙黃土區的樑頂部面積百分比有所上升。地或林灌木等植被，因而這可能是局部土地退化的結果。此外，沙區與沙黃土區難利用土地面積的增加，反映了沙黃土區的裸沙區面積增加。

(四) 季節因素對景觀變化分析之影響

本區域在氣候上屬於溫帶半乾旱區，本區年降水量在250 - 400 mm左右，在時間上分配極不均勻，7 - 9月份占年降水量的70%左右，冬季僅占5%左右(如圖7)。本區的乾燥度為3.0 - 4.0之間，季節變化上，以春季為最大，冬夏季次之，秋季最小。地帶性植被屬於森林草原植被環境，不過現存植被大多屬於草原成分，加之黃土與沙地的保水性能較差，因而土地覆蓋之植被受季節水分條件因素的影響較大。在水熱條件配合的作用下，以夏季氣候對景觀及土壤濕度影響的貢獻最大，而其他季節相對要小得多。所以通過對本區夏季的遙感影像分析可以較好地反映本區土地覆蓋植被之總體狀況。

通過對區域環境要素的資訊提取及其時空的動態分析為進行區域環境演化的綜合分析的提供了重要的條件。以下將對區域環境演化進行綜合分析。

二、區域環境演化綜合分析

研究區的自然條件在空間上存在著重要差異，社會經濟活動亦不相同。通過對二者的綜合分析可以較為全面地反映出本區人為需求與土地資源間的相互矛盾，以確定在本地區環境動態研究中所需重點應對解決的環境問題^{[13][14][15]}。

(一) 近年來的氣候演化分析

研究區地處毛烏素沙漠邊緣與黃土高原區的過渡帶，面積為1200 km²左右，從景觀單元上可以明顯地分為三種類型：無定河與榆溪河兩岸有大片的川耕地表現為河谷平川景觀區；榆溪河以西，無定河以北的地區，地表組成物質以沙質為主，表現為平地 and 沙丘；其餘的部分被沙黃土所覆蓋，表現為黃土丘陵區景觀，局地有成片沙地的覆蓋。氣候上屬於溫帶大陸性季風氣候區，年平均氣溫8-10℃，平均降水量400-450 mm，蒸發量為1700-2500 mm/a。7、8、9三個月的降水占全年降水總量的70%以上，在季節變化幅度大的同時，表現出降水的年際變化幅度大。研究表明，本區的氣溫與夏季降水呈現出10年尺度的週期性變化，1980年代後期以來，氣溫的上升趨勢較為明顯；降水則表現為相反的趨勢，開始進入降水量明顯減少的時期，大氣的相對濕度與降水總量具有較為一致的變化，由此反映出研究區的氣候條件有乾旱化之趨勢(如圖6、7)。不過氣候變化在區域的整體趨勢上具有較明顯的一致性。在河谷地區水熱條件相對較好；黃土、沙漠區的蒸發量大，夏季降水過後，加之少有植被覆蓋，使得地表徑流不容易存儲，並在7、8兩月的強降水期極易表現為洪災，令本區的水資源更為缺乏。

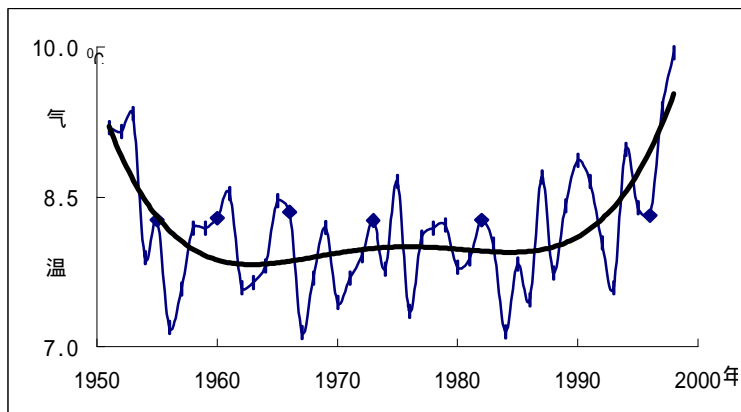


圖 6 榆林市 1950~1998 年年平均氣溫(折線)及趨勢線(曲線)圖

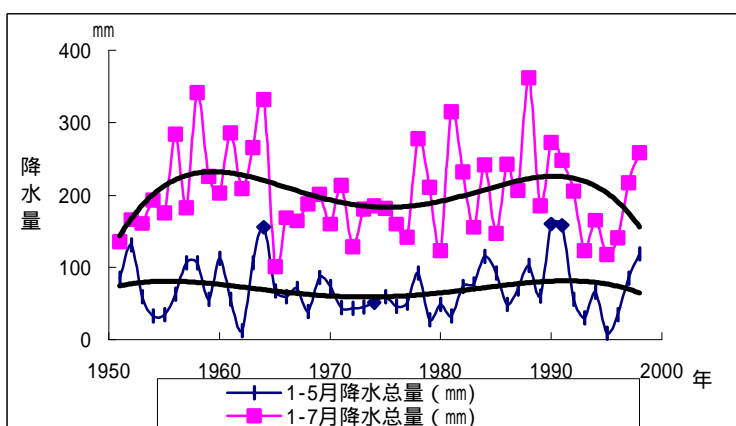


圖 7 榆林市 1950~1998 年多年降水量(折線)及趨勢線(曲線)圖

根據陝西省氣象臺自1930年代以來的實測資料分析表明：陝北地區大氣降水量自1970年代初開始進入少雨期，到了1980年代出現的連年乾旱有呈加劇的趨勢；氣溫從1980年代中後期進入相對的暖期^[16]，這與本文的分析是一致的。因此可以推測該研究區從1987年以來，處於降水量減少，而氣溫相對上升的時期。研究同時表明，無定河、榆溪河對本區的水資源有著重要的貢獻。然而無定河的地表徑流卻呈逐年減少趨勢，其中1987-1997年間，地表徑流量逐年平均減少0.82%^{[16][17]}，這對植被的生長及生態環境的建設來說是不利的。

(二)社會經濟分析

社會經濟研究表明，本區工業化速度緩慢並仍是以農業為主體的社會經濟結構。本區的經濟產業結構表現為以農業為主的特徵，這可以由以下方面加以例證。一方面農業總產值占到國民生產總值的70%以上，雖然，農業結構內部又以種植業為主。另一方面農業人口在總人中的比例占絕對優勢。1999年的陝西省統計年鑒，榆林市的總人口為39.8萬人，其中鄉村人口為29.4萬人，占總人口的73.9%；橫山縣的總人口為31萬人，鄉村人口為28.8萬，占總人口的92.8%；米脂縣的總人口為20.8萬，鄉村人口為18.5萬，占89%^[16]。

本地區農業人口比例從整體上看，自1990年代以來普遍有下降的趨勢(圖9)，不過在橫山和米脂的鄉村勞動力總數卻呈上升趨勢。人口密度變化曲線(圖8)圖反映了黃土丘陵區的人口密度分佈不均勻，且人口壓力依舊很大。黃土丘陵區人口密度大，1999年的統計數字表明，米脂縣的人口密度平均為170人/km²，榆林市則為56人/km²。人口密度分佈不均勻，黃土丘陵區人口密度大，統計數字表明，1999年米脂縣的人口密度平均為170人/km²，榆林市則為56人/km²。

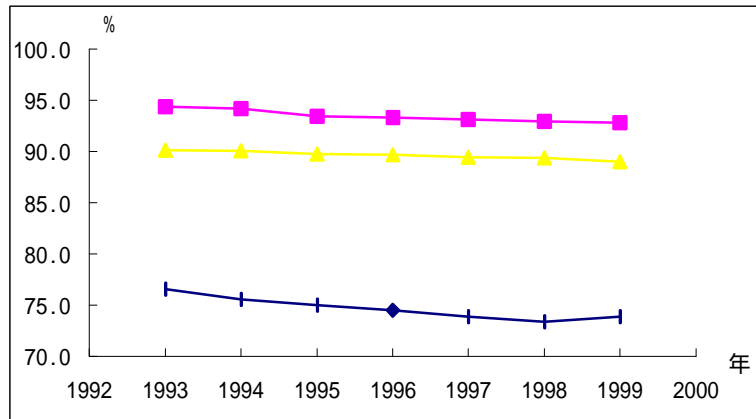


圖 8 榆林(菱形)、米脂(三角形)、橫山(正方形)的農業人口比例變化曲線圖

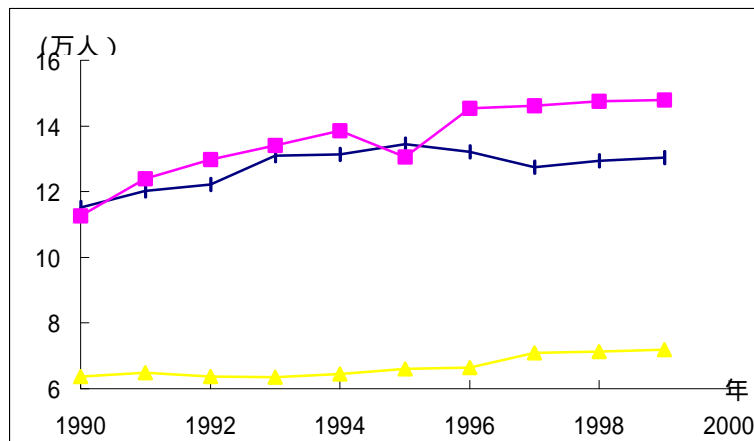


圖 9 榆林(菱形)、橫山(正方形)、米脂(三角形)的鄉村勞動力變化曲線圖

(三)環境演化綜合分析

通過DEM數位高程模型的迭加分析，發現研究區中耕地總量保持相對穩定的同時緩坡(0⁰-7⁰)的耕地比例下降。實地調查中得知，這主要是由於近期氣候日益乾旱的影響，因無法耕種使其撂荒而形成的。

土壤濕度指數與土壤亮度指數的提取的結果表明：2000年的土壤濕度指數整體偏高但植被指數卻相對較低，這應是受夏季風降水的影響所致。

定量分析結果表明，本區25⁰以上的陡坡占20%以上，平均溝穀密度大於6.0 km/km²。這預示著沙黃土區在面臨較嚴重的風沙侵蝕的同時，潛伏著嚴重的水土流失的可能。

土地覆蓋動態變化制圖表顯示，各類土地類型都發生了不同程度的轉換。灌類植被區發生了較大的

變化，其在總面積減少的同時級別亦有所下降，如原覆區轉為草地、難利用地或被墾為耕地。這些現象的發生可以從下方面加以推論：首先，反映了自然生態條件的惡化，尤其是氣候的乾旱化的影響；其次，灌類植被覆區總體減少而難利用土地面積增加的現象亦反映出了空間的分異，如沙黃土區的塬頂部植被破壞嚴重，沙地面積增加較快，而沙覆區卻相對要慢。

人類活動在土地覆蓋動態變化中起了建設與破壞作用。到2000年有占1987年16.3%，12.6%和4.1%的林灌地、草地、水域、難利用土地轉變為耕地，占1987年7.6%的耕地的退還為林灌地、草地的現象，例證了在退耕還林還草的政策下，人類對生態的恢復與建設作用；而約有面積占1987年4.4%的難利用土地已被墾為耕地，這可以解釋為在人口壓力的脅迫下而對土地的糧食生產與供給能力提出的需求。同時，由於人口的增加及城市的擴張，建設用地在河谷地區增長較快。

由於本地區表現為以農業為主體的社會經濟結構，加之農業生態環境的極其脆弱，所以經常造成農業生產活動的不穩定。農業的生產活動與其自然環境有較密切的關聯。當一個地區是以農業為主的經濟結構時，那麼該地區的自然生態環境的優劣將直接影響到農業的生產活動進行的順利與否。水土流失是本區的主要環境問題之一，溝穀密度一般在3.5 - 6.0之間，侵蝕模數為4000-20000t/km²*a。本區目前土地利用以種植業為主，墾殖指數較高，在綏德、米脂一帶可達60 - 70%。由此，脆弱的農業生態環境與所要提供的農業生產條件間形成的矛盾，以及長期以來靠廣種薄收的粗放經營維持著低水平的農牧業生產，加劇了土壤侵蝕，造成土地生產能力下降，土地生產率低下，這對於整體生態環境的重建與恢復的壓力愈加顯得重大。

以上通過RS與GIS技術對毛烏素沙漠邊緣地帶近二十年來的環境變化研究可以知，進行區域環境演化分析時，可以有效地利用遙感資訊的數位圖像處理技術，提取與環境變化相關的植被、水體、沙地、土壤下墊面等環境要素資訊，動態反映過渡帶的環境變化。研究表明，研究區近年來因受乾旱化的影響，植被的級別有所下降；沙區與沙黃土區的乾旱化程度差別加大。通過1：50000比例尺的遙感專題製圖進行的土地覆蓋變化研究分析發現，人類對環境的干擾加大，區域中存在不同程度人為破壞植被的現象。在綜合自然環境及社會經濟要素的多種資料對環境變化進行了系統分析的基礎上可知，研究區自1980年代後期以來，在氣候較為乾旱的背景下出現了局部的植被退化，水體的數量有不同程度的減少，受人為活動影響，研究區灌類植被下降趨勢較為明顯。因此可以認為，本區的環境變化是在比較乾旱的環境背景下，人為的活動影響加重了環境的惡化。^[18]

參考文獻

- 盧宗凡主編(1997)：中國黃土高原生態農業[M]，陝西科學技術出版社，1-18。
- 阿爾曼德著，李世玢譯(1992)：景觀科學：理論基礎和邏輯數理方法[M]，北京：商務印書館，8-17。
- 荀兆宏、孫金莊、周伏建等(1997)：水土流失定量遙感方法及其應用研究[J]，土壤學報，34(3)：235-245。
- 陳隆勳等(1998)：中國近45年來氣候變化的研究[J]，氣象學報，56(3)：257-271。
- 劉衛國、呂鳴倫(1997.03)：地理資訊系統和遙感技術支援下的山地環境梯度分析方法研究[J]，地理研究。
- 盧中正、譚克龍、雷建年等(2000)：遙感技術和地理資訊系統在神府——東勝地區環境綜合評價中的作用[J]，國土資源遙感，44(2)：56-61。
- 鄔倫、劉瑜、張晶等(2001)：地理資訊系統—原理、方法和應用[M]，北京：科學出版社，195-216。

- 任志遠(1999)：陝西黃土高原景觀生態環境遙感評價試驗研究[J]，乾旱區地理，22(3): 64-69。
- 史培軍、宮鵬、李小兵等(2000)：土地利用/覆蓋變化研究的方法與實踐[M]，北京：科學出版社，54-57。
- Amanda Wright, A; an H. Fielding & C. Philip Wheater (2000): Predicting the distribution of Eurasian badger (meles- meles) setts over an urbanized landscape: a GIS approach [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66(4): 423-428.
- Archibald, P. D. GIS and Remote Sensing Data Integration [J]. Geocarto International, 3, 67-73.
- Crist, E.P., and R. C. Cicone. Vegetation and soils information contained in transformed thematic mapper data [M]. Proceedings of IGARSS 1986 Symposium, Zurich, 8-11 September, 2:1465-1470.
- 楊勤科、李銳(1998)：中國水土流失和水土保持定量研究進展[J]，水土保持通報，18(5): 13-18。
- 何洪鳴、周傑(2002)：防護林對沙塵阻止作用的機理分析-建立微分方程的動態模型[J]，中國沙漠，22(2): 197-200。
- 陝北黃土高原地區遙感應用研究[M]，北京：科學出版社，1991。
- 陝西省統計局編，1992-2000年陝西省統計年鑒[M]，北京：中國統計出版社出版。
- 中國地面氣象記錄年報[M]，國家氣象中心，1996年-1998年。
- 王燕新：中國科學院碩士學位論文。

基金資助：中國科學院知識創新工程重大專案(KZCX1-Y-05；KZCX1-10)；中國科學院地球環境研究所黃土與第四紀地質國家重點實驗室基金專案(SKLLQG0211)資助。

收稿日期：92年9月3日

修正日期：92年10月19日

接受日期：92年11月3日