

**编者按** 2003 年黄河发生了自 1981 年以来历时最长、洪水总量最大的洪水,从 8 月下旬至 11 月下旬,黄河秋汛持续了 80 多天,使上游、中游和下游地区都不同程度遭受了洪灾。黄河洪水又一次受到社会各界的高度关注。黄河是中华民族的母亲河,同时又是世界上最难以治理的河流。要保障黄河的防洪安全,维系黄河流域社会经济可持续发展,还需要坚持不懈地继续探索、认识和把握黄河的自然特性与规律。为此,本期特刊发《黄河流域生态环境综合评价及其演变》等一组文章,希望引起更多的科研与工程技术人员对黄河问题的重视。

文章编号:1008-2786(2004)02-0133-07

## 黄河流域生态环境综合评价及其演变

王思远,王光谦,陈志祥

(清华大学河流海洋研究所,北京 100084)

**摘 要:**在定性分析黄河流域自然生态环境特点的基础上,针对黄河流域不同的地理特征与生态环境特征,从气候环境、水文环境、土地覆盖、土壤侵蚀、土地利用和地形地貌等方面选择评价指标,在遥感与地理信息系统技术支持下,首先通过一系列的模型计算与遥感影像解译,分别生成黄河流域 1980 年代末期与 1990 年代末期数值型的生态环境背景因子,而后应用主成分分析法对生态环境质量进行了综合评价,得出了不同空间尺度下的反映黄河流域 1980 年代末期与 1990 年代末期生态环境质量的分级图,并对黄河流域近 10 年间的生态环境演变进行了分析。

**关键词:**黄河流域;生态环境综合评价;遥感技术;GIS

**中图分类号:**X144

**文献标识码:**A

黄河流域是中华文明的发祥地,自古至今具有特殊的地位。然而,长期以来,由于受传统观念及人口快速增长等因素的影响,广种薄收、毁林开荒、陡坡耕种现象严重,水土流失逐年加剧、生态环境不断恶化,黄河流域已经成为我国乃至世界水土流失最为严重的地区,严重制约社会经济的可持续发展。因此,本文选择黄河流域生态环境演变作为研究内容,在遥感与 GIS 技术的支持下,通过自然环境因子的定量化分析,以有序数值阵列方法建立数字环境模型,分不同的空间尺度对黄河流域近 10 年来的自然生态环境及其演变进行了分析。

### 1 评价指标体系建立与数据处理

由于影响生态环境质量的因子是多方面的,既

有自然因素也有人为因素,是自然环境和人文环境之间进行能量交换和物质循环的动态平衡系统。而指标体系的建立则是为了科学、系统的实现对研究目标的综合分析,故指标群的选取应充分考虑科学性与区域特殊性的紧密结合。在环境评价指标体系确定原则的指导下,运用层次分析方法,同时在定性分析黄河流域生态环境特点的基础上,考虑到数据的可获取情况,文中研究主要以自然生态环境为主,针对黄河流域不同的地理特征以及空间尺度,从气候环境、水文环境、土壤环境、土地覆盖、土壤侵蚀、土地利用和地形地貌等方面选择评价指标,建立能反映黄河流域自然生态环境特点的综合指标体系。

在进行黄河流域的生态环境综合评价时,我们选取了 14 个评价指标,它们是: $<0^{\circ}\text{C}$  积温、 $>10^{\circ}\text{C}$  积温、年平均温度、湿润系数、年均降水量、干燥度、

收稿日期(Received date):2003-12-11;改回日期(Accepted):2004-03-01。

基金项目(Foundation item):国家重大基础研究发展规划(973)(No. G1999043607)和中国博士后科学基金项目[Foundation Item: National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No. G1999043607 and Postdoctoral Science Foundation of China.]

作者简介(Biography):王思远(1972-),男,博士后,主要从事 GIS,模式识别,环境遥感等方面研究工作,已发表相关论文 30 多篇。E-mail: wangsiyuan02@tsinghua.org.cn [Wang Siyuan: Male, postdoctor, born 1972, studying Geographical information system and remote sensing.]

水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀、植被指数、土地利用程度、海拔高度、坡度和坡向。评价指标体系及其数据获取如表 1,其中>0℃积温、>10℃积温、年平均温度、湿润系数、年均降水量、干燥度等数据,采用 1980 年代末期与 1990 年代末期各前后 5 年的气象站点和水文站点的统计数据,依据各站点所处位置的经纬度、海拔高度进行反向距离加权平均的方法内插出黄河流域的气候环境背景数据;而土地利用和土壤侵蚀数据是通过 1980 年代末期与 1990 年代末期黄河流域的 LANDSAT TM 图像进行目视判读得到的,在判读过程中,充分利用如地形地貌图等辅助数据,并进行了实地勘察。根据全国《土地利用现状调查技术规程》和土地的用途、经营特点、利用方式和覆盖特征等因素作为土地利用的分类依据,区分差异性,归纳共同性,从高级到低级逐级划分,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地共 6 个一级类型和 24 个二级类型。土壤侵蚀数据根据《全国土壤侵蚀调查技术规程》,并在充分分析土壤环境、气候环境、植被环境、物质文化环境以及地形地貌的基础上,将土壤侵蚀分为水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀 3 个一级类型,水力侵蚀与风力侵蚀分别又分为 6 个等级:微度、轻度、中度、强度、极强和剧烈侵蚀,冻融侵蚀被分为 4 级:微度、轻度、中度和强度;植被的覆盖情况可以由归一化植被指数(NDVI)来反映。NDVI 是利用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 图像的近红外

波段与红光波段之差除以二者之和。NDVI 最大值的生成基于每个季节中最小云量时相的图像数据,原影像数据经过一系列的制图处理过程,包括太阳高度角校正、几何精纠正后的地图投影、基于反射率物理量转换基准上的影像增强处理、数字镶嵌等,最后生成反映黄河流域 1980 年代末期与 1990 年代末期植被覆盖的 NDVI 数据;地形地貌特征计算主要基于黄河流域 1:10 万 DEM 数据,在 Arc/Info Grid 软件环境下,利用 slope 和 aspect 命令分别生成坡度、坡向专题数据。评价指标确定以后,直接用它们去进行环境评价是很困难的。因为各个因子间的量纲不统一,没有可比性。即使对同一个参数,尽管可以根据它们实测数值的大小来判断其对环境的影响程度,但也因缺少一个可比的环境标准而无法确切地反映其对环境的影响。为此,必须对所有参评因子进行量化处理。量化方法多种多样,比较简单的做法是将其量化分级,即依其对环境的重要程度分若干级。本文依参评因子对生态环境演变的有利与否,将其分为 6 等级。

以上几种数据均被统一到统一的坐标系和投影下。所采用的投影为等面积割圆锥投影,并采用统一的中央经线和双标准纬线,中央经线为 105°E,双标准纬线分别为北纬 25°和北纬 47°,所采用的椭球体为 KRASOVSKY 椭球体。在 Arc/Info 软件环境下,所有数据都被统一栅格化成 500 m×500 m 的 GRID 数据。

表 1 黄河流域生态环境综合评价指标

Table 1 The eco-environment evaluation index of Yellow River Basin

一级指标	二级指标	三级指标	数据获取
气候环境(水热)	热量	>0℃ 积温	气象站点实测资料
		>10℃ 积温	气象站点实测资料
		年平均温度	气象站点实测资料
		湿润指数	气象、水文站点实测资料计算
		水量	年均蒸发量
气象、水文站点实测资料计算		年降雨量	气象、水文站点实测资料计算
侵蚀环境综合指标	各类土壤侵蚀强度等级		遥感资料解译
植被覆盖	NDVI		遥感资料计算
土地利用程度	土地利用		遥感图像解译
	海拔高度		DTM 数据
地形地貌	坡度		DTM 数据计算
	坡向		DTM 数据计算

2 黄河流域生态环境的综合评价

在环境评价中,如何将多指标综合为一个综合评价指数始终是环境评价的重点环节,也是较难解决的问题。目前,环境评价中常用的方法有指标权重法、层次分析法 AHP(Analytical Hierarchy Process)、群组决策特征根法 GEM(Group Eigenvalue Method)等。本文采用主成分分析法进行评价。

由美国统计学家皮尔逊创立的主成分分析法是从多指标分析出发,运用统计分析原理与方法提取少数几个彼此不相关的综合性指标而保持其原指标所提供的大量信息的一种统计方法。空间主成分分析法则是在地理信息系统软件的支持下,通过将原始空间坐标轴旋转,将相关的多变量空间数据转化为少数几个不相关的综合指标,实现用较少的综合指标最大限度的保留原来较多变量所反映的信息。与层次分析法和群组决策特征根法不同,主成分分析的整个过程不再需要专家打分。其基本原理是:设有  $N$  个相关变量  $X_i(i = 1,2,\dots,N)$ , 由其线性组合成  $N$  个独立变量  $Y_i(i = 1,2,\dots,N)$ , 使得独立变量  $Y_i$  的方差之和等于原来  $N$  个相关变量  $X_i$  的方差之和,并按方差大小由小到大排列。这样就可把  $P$  个相关变量的作用看作主要由为首的几个独立变量  $Y_i(i = 1,2,\dots,M)(M < N)$  所决定,于是  $N$  个相关变量就缩减成  $M$  个独立变量  $Y_i, Y_i(i = 1,2,\dots,M)$  就是通常所说的主成分。为了进行生态环境综合评价,综合指数定义为  $M$  个主成分的加权和,而权重用每个主成分相对应的贡献率来表示。因此,总评价函数可表示为

$$E = a_1 Y_1 + a_2 Y_2 + \dots + a_M Y_M$$

式中  $E$  为环境综合评价结果;  $Y_i$  为第  $i$  个主成分;  $a_i$  为第  $i$  主成分对应的贡献率。

在地理信息系统 Arc/Info 的 GRID 模块支持下,首先将  $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、年平均温度、年平均降水量、年均蒸发量、湿润指数进行主成分分

析,生成气候环境综合指数,将海拔高度、坡度、坡向进行主成分因子提取,生成地形地貌指数,而后在将气候综合指数、植被指数、土壤侵蚀、土地利用程度和地形地貌进行主成分综合评价,计算出生态环境综合指数。根据表 2 和主成分分析综合评价方法的基本原理,各综合指数的计算公式如下:

1. 气候综合指数的计算公式

$$Climateprin = Climateprinc6c1 \times 0.6468 + Climateprinc6c2 \times 0.2895$$

式中  $Climateprin$  为气候综合指数,  $Climateprinc6c1$  为由  $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、年平均温度、平均年降水量、年均蒸发量、湿润指数进行主成分分析提取的第一主因子,  $Climateprinc6c2$  为由  $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、年平均温度、平均年降水量、年均蒸发量、湿润指数进行主成分分析提取的第二主因子,两个主因子的累积贡献率为 93.63%,只有 6.37% 的信息被损失,可信度较高。

2. 地形地貌指数的计算公式

$$Demprin = Demprinc3c1 \times 0.4754 + Demprinc3c2 \times 0.3563$$

式中  $Demprin$  为地形地貌指数,  $Demprinc3c1$  为由海拔高度、坡度和坡向进行主成分分析提取的第一主因子,  $Demprinc3c2$  为第二主因子,两个主因子的累积贡献率为 83.17%,有 16.83% 的信息被损失,可信度较高。

3. 生态环境综合指数的计算公式

$$ENVprin = Envprinc5c1 \times 0.6350 + Envprinc5c2 \times 0.2751$$

式中  $Envprin$  为生态环境综合指数,  $Envprinc5c1$  为由气候综合指数、植被指数、土壤侵蚀、土地利用程度和地形地貌指数进行主成分分析提取的第一主因子,  $Envprinc5c2$  为由气候综合指数、植被指数、土壤侵蚀、土地利用程度和地形地貌指数进行主成分分析提取的第二主因子,两个主因子的累积贡献率为 91.01%,说明只有 8.99% 的信息被损失,可信度较高。

表 2 各主成分的特征值、贡献率和累计贡献率

Table 2 The eigenvalues and attribute-ratio in the principal components analysis

主成分因子	气候环境指数			地形地貌指数			生态环境综合指数		
	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
主因子一	1.654 15	64.68	64.68	0.633 79	47.54	47.54	3.402 77	63.50	63.50
主因子二	0.740 26	28.95	93.63	0.474 95	35.63	83.17	1.377 94	25.71	89.21
主因子三	0.162 69	6.37	100	0.224 37	16.83	100	0.578 19	10.79	100

表 3 黄河流域生态环境综合评价结果

Table 3 The synthetic eco-environmental evaluation table of Yellow River Basin

环境等级	栅格数	面积 (km <sup>2</sup> )	面积百分比 (%)
1	14 158	14 158	1.79
2	125 476	125 476	15.86
3	143 570	143 570	18.15
4	190 577	190 577	24.09
5	149 809	149 809	18.94
6	167 368	167 368	21.16
合计	790 958	790 958	100

表 3 和图 1 分别为 1990 年代末期黄河流域生态环境综合评价分级图和评价结果统计表。根据生态环境综合指数大小将黄河流域划分为六级不同的生态环境质量区。其中,第四级、六级生态环境质量区占全区比例最大,分别占总区域面积的 24.09% 和 21.16%,其次是第三级、第五级生态环境质量区,各占全区总面积的 18.15%、18.94%;占全区域生态环境质量区面积比例最小的等级为一级区,占总黄河区域面积的 1.79%。通过对比黄河流域植被覆盖数据与土壤侵蚀数据可以发现,生态环境六级区其植被覆盖最好,水土流失较小,是综合生态环境最好的区域。

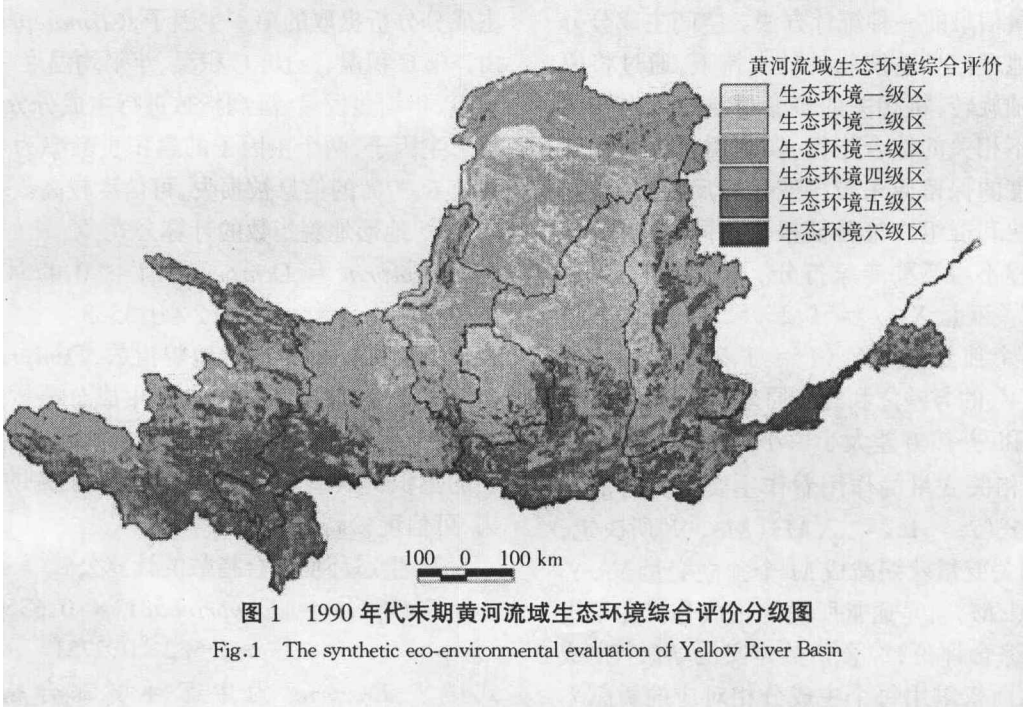


图 1 1990 年代末期黄河流域生态环境综合评价分级图

Fig.1 The synthetic eco-environmental evaluation of Yellow River Basin

3 近 10 年不同空间尺度的黄河流域生态环境演变分析

3.1 近 10 年全流域生态环境动态

同 1990 年代末期生态环境综合评价一样,进行 1980 年代末期黄河流域生态环境的综合评价,通过空间对比分析,得出近 10 年黄河流域生态环境演变情况,其动态空间分布图如图 2 所示。表 4 为近 10 年来黄河流域生态环境综合评价动态结果统计表。可以看出:黄河流域的源头地区总体生态环境变好(图中绿色区域),部分区域生态环境变好达二个等级值;而在黄河流域中下游地区部分区域生态环境有明显恶化的趋势(图中红色区域),如黄土高原东

表 4 黄河流域生态环境综合评价动态结果

Table 4 The dynamic of eco-environmental evaluation in ten years, Yellow River Basin

环境综合评价指数	1990 年代末期的面积 (km <sup>2</sup> )	1980 年代末期的面积 (km <sup>2</sup> )	10 年间面积变化差值 (km <sup>2</sup> )	1990 年代末面积比重 (%)
1	14 158	21 670	-7 512	1.79
2	125 476	129 164	-3 688	15.86
3	143 570	113 166	30 404	18.15
4	190 577	311 397	-120 820	24.09
5	149 809	143 909	5 900	18.94
6	167 368	72 912	94 456	21.16

部和毛乌素沙地的大部分区域,生态环境变差达 1~2 个等级。通过表 4 也可以看出:10 年间,黄河流域综合生态环境 4 等级、2 等级与 1 等级面积减少

都有不同程度减少,而 3 等级、5 等级、6 等级面积增加,这也反映了在人类活动影响下,由于开展生态保护与环境整治,部分生态环境恶劣的区域生态环境在好转,但也有部分区域由于自然与人为因素,生态环境仍在持续恶化。

3.2 不同行政区域生态环境动态

以行政区县为生态环境评价的基本单位,分别对 1980 年代末期和 1990 年代末期黄河流域不同区县的生态环境进行综合评价,1990 年代末期评价结果及 10 年生态环境动态如图 3 所示。可以看出:生态环境最好的县主要分布在黄河源头与渭河流域的部分区域,而生态环境最差的县集中分布于黄河流域的中部偏东北地区,包括黄土高原东部与毛乌素沙地等地区,这一地区植被覆盖率低,地表覆盖主要以低覆盖草地与沙化土地为主,风力侵蚀严重,是需要重点治理的区域。10 年间,黄河流域各县生态环境总体变化不大,黄河源头等部分县市生态环境好转,也有少数县市生态环境有恶化的趋势(图中红色区域)。

3.3 不同地貌类型区域生态环境动态

针对黄河流域不同的地貌类型,对 1980 年代末期与 1990 年代末期黄河流域不同地貌类型区的生态环境进行综合评价,结果如图 4,统计结果如表 5 所示。从中可以看出:生态环境最好的为林区与干燥草原区,其综合环境指数为 5 级,而生态环境最差的为风沙区,环境综合指数仅能达到二级。同时也可以看出,10 年间黄河流域不同地貌类型区的总体生态环境变化不大,生态环境变好的区域主要位于为高地草原区、黄土高原沟壑区与林区,生态环境总体变好一级(图中绿色区域),其它地貌类型生态环境变化不大。

表 5 黄河流域不同地貌类型区生态环境综合评价  
Table 5 The synthetic eco-environmental evaluation table for physiognomy types in Yellow River Basin

地貌类型	综合环境指数	栅格数
黄土丘陵沟壑区	3	202374
黄土高原沟壑区	4	27089
黄土阶地区	4	33930
冲积平原区	4	77703
土石山区	4	191532
高地草原区	3	5125905
干燥草原区	5	108857
风沙区	2	78899
林区	5	22125

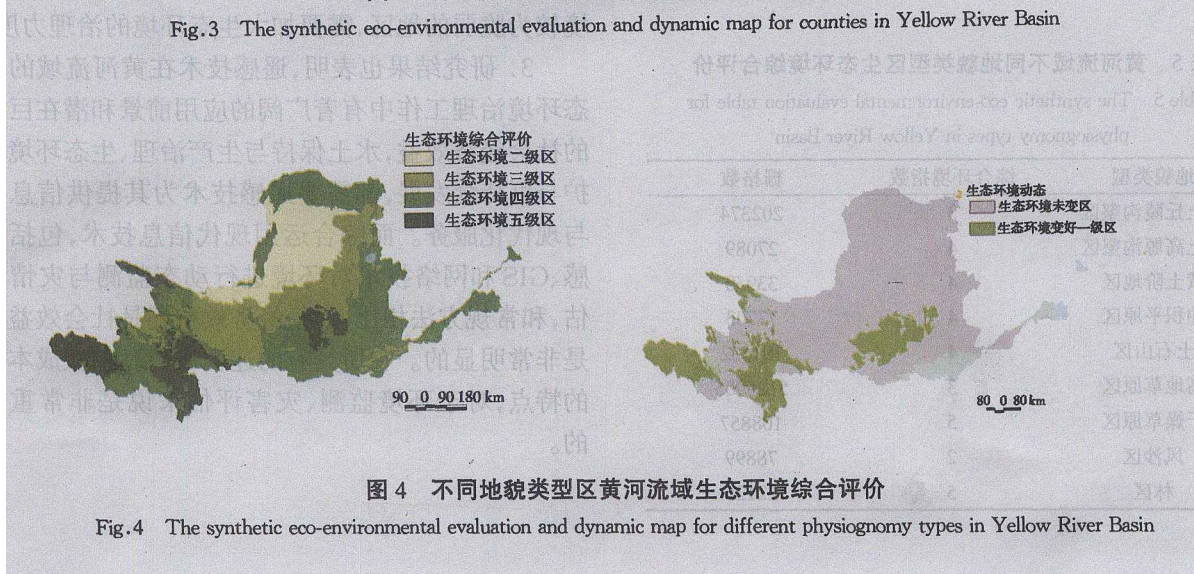
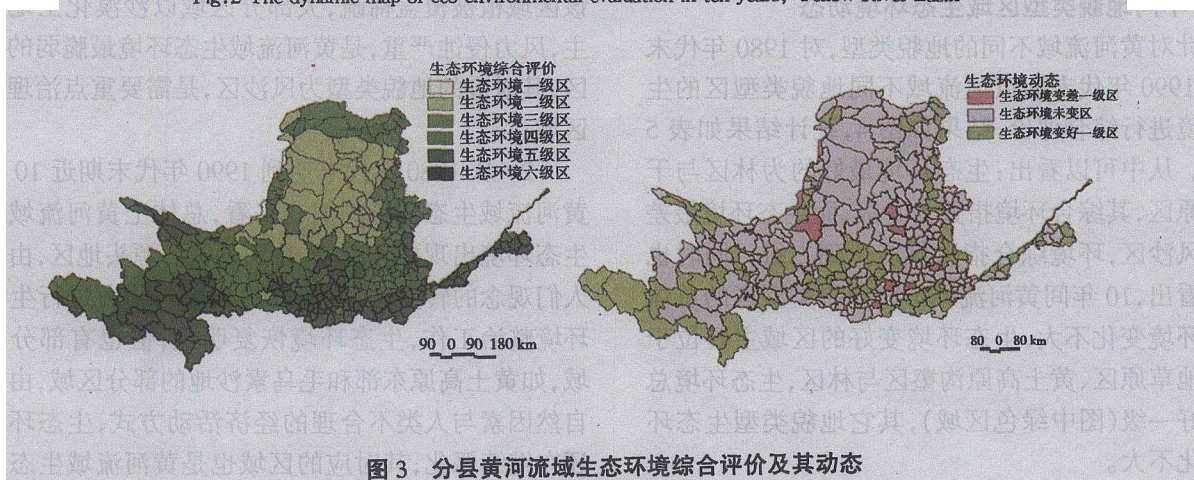
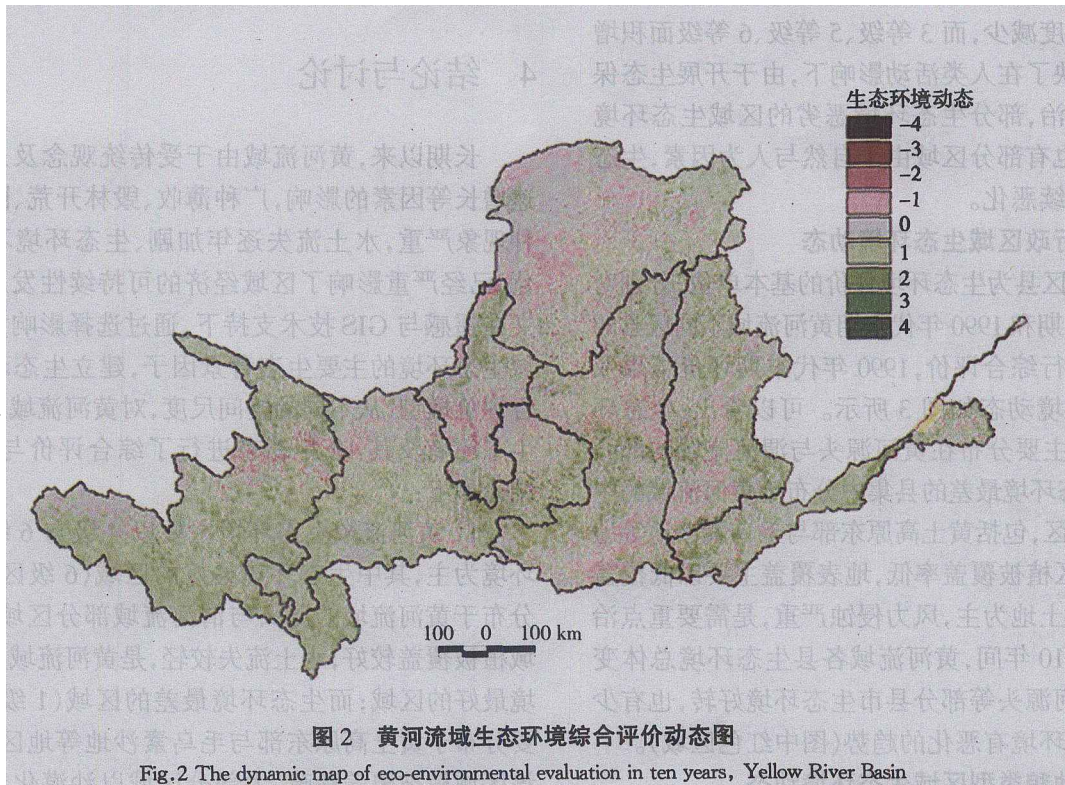
4 结论与讨论

长期以来,黄河流域由于受传统观念及人口快速增长等因素的影响,广种薄收、毁林开荒、陡坡耕种现象严重,水土流失逐年加剧、生态环境不断恶化,已经严重影响了区域经济的可持续性发展。本文在遥感与 GIS 技术支持下,通过选择影响黄河流域生态环境的主要生态背景因子,建立生态环境综合评价模型,从不同的空间尺度,对黄河流域总体的生态环境及其 10 年动态进行了综合评价与分析。结论如下:

1. 黄河流域生态环境主要以 4 级与 6 级生态环境为主,其中生态环境最好的区域(6 级区)主要分布于黄河流域的源头与渭河流域部分区域,该区域植被覆盖较好,水土流失较轻,是黄河流域生态环境最好的区域;而生态环境最差的区域(1 级区)主要分布于黄土高原东部与毛乌素沙地等地区,由于该区域植被覆盖稀疏,大部分区域以沙漠化土地为主,风力侵蚀严重,是黄河流域生态环境最脆弱的地区,其对应的地貌类型为风沙区,是需要重点治理的区域;

2. 从 1980 年代末期到 1990 年代末期近 10 年黄河流域生态环境的演变来看,总体上黄河流域的生态环境出现好转趋势,特别是黄河源头地区,由于人们观念的转变,投入较多的人力与物力进行生态环境整治工作,生态环境恢复明显;但也有部分区域,如黄土高原东部和毛乌素沙地的部分区域,由于自然因素与人类不合理的经济活动方式,生态环境还在继续恶化,其对应的区域也是黄河流域生态环境较为脆弱的地区,需要加大生态环境的治理力度;

3. 研究结果也表明,遥感技术在黄河流域的生态环境治理工作中有着广阔的应用前景和潜在巨大的社会效益,水土保持与生产治理、生态环境保护与可持续发展,都需要遥感技术为其提供信息化与现代化服务。而综合运用现代信息技术,包括遥感、GIS 和网络技术对环境进行动态监测与灾情评估,和常规方法相比,无论经济效益还是社会效益都是非常明显的。它所具有的速度快、精度高、成本低的特点,对于环境监测、灾害评估来说是非常重要的。



## 参考文献(References):

- [1] Liu Jiyuan. The Macro Investigation and Dynamic Research of The Resource and Environment[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1996, 296~324. [刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996, 296~324.]
- [2] Zhang Zengxiang. The Study of RS Monitoring and Synthetical Evaluate of Resource and Environment In Middle Area of Tibet[M]. Beijing: Yuhang Press, 1998, 53~123. [张增祥. 西藏自治区中部地区资源环境遥感监测与综合评价研究[M]. 北京: 宇航出版社, 1998, 53~123.]
- [3] Wang Huadong. The Evaluation of Environmental Quality[M]. Tianjing: Tianjing Science and Technology Press, 1991, 25~155. [王华东. 环境质量评价[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1991, 25~155.]
- [4] Zeng Hui, Guo Qinghua, Liu Jingyan. Analysis of landscape ecological changing characteristics of Dongguan City[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(5):422~425. [曾辉, 郭庆华, 刘静艳. 东莞市景观生态演化特征的分析[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5):422~425.]
- [5] Chen Guodong. Some understandings about the eco-environmental protection and buildings in the source region of Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(supp.): 1~5. [程国栋. 关于江河源区生态环境保护与建设研究的几点认识[J]. 地球科学进展, 1998, 13(增刊): 1~5]
- [6] C. A. Mucher, K. T. Steinnocher, E. P. Kressler et al. Land cover characterization and change detection for environmental monitoring of pan-Europe[J]. *INT. J. Remote Sensing*, 2000, 21(6):1159~1181.
- [7] Brian M. Steele. Combining multiple classifiers: An application using spatial and remotely sensed information for land cover type mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74:545~556.
- [8] Peter H. Verburg, Tom Veldkamp, Johan Bouma. Land use change under conditions of high population pressure: the case of Java[J]. *Global Environment Change*, 1999, 9:303~312.
- [9] H. Hashiba, K. Kameda, T. Sugimura et al. Analysis of landuse change in periphery of Tokyo during last twenty years using the same seasonal Landsat data[J]. *Adv. Space Res.* 1998, 22(5): 681~684.
- [10] M. L. Mendonca-Santos, C. Claramunt. An integrated landscape and local analysis of land cover evolution in an alluvial zone. Computers[J]. *Environment and Urban Systems*, 2001, 25:557~577.
- [11] Wilson M. Khaemba, Alfred Stein. Use of GIS for a spatial and temporal analysis of Kenyan wildlife with generalized linear modeling[J]. *INT. J. Geographical Information Science*, 2000, 14(8):833~853.
- [12] W. Yang, L. Yang, J. W. Merchant. An assessment of AVHRR/NDVI eco-climatological relations in Nevraska, USA[J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1997, 18(10):2161~2180.

## Eco-environmental Evaluation and Changes in Yellow River Basin

WANG Siyuan, WANG Guangqian, CHEN Zhixiang

(Institute of River and Coastal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Land use and land cover change are a focus for study on the global changes. And the eco-environmental change is important for better understanding of land use/land cover change and environmental management for sustainable development. In Yellow River Basin the ecological environment has been degrading due to both the global changes and the sharper contradiction between human and nature. The ecological environment problem such as grassland degeneration, sandy desertification and water erosion have seriously affected the regional sustainable development. In order to analyze eco-environmental changes in Yellow River Basin, the technologies of Remote Sensing and Geographical Information System were used. The mathematical methodology for study on eco-environment was explored and developed. This research focused on the analysis of eco-environmental synthetic evaluation and dynamic changes in Yellow River Basin in ten years. At first, based on the analysis of the geographical and ecological features in Yellow River Basin, the digital eco-environmental background information was generated from multi-temporal Landsat TM data and meteorological observation data. Secondly, using spatial principal components evaluation method the synthetic eco-environmental evaluation result map of Yellow River Basin were calculated and the eco-environmental changes in recent ten years were analyzed in this paper.

**Key words:** Yellow River Basin; eco-environmental synthetic evaluation; Remote sensing; GIS