

# 黄河中游多沙粗沙区流域坡面水保措施变化特征

周 旭<sup>1,2</sup>, 杨胜天<sup>1</sup>, 刘晓燕<sup>3</sup>, 刘昌明<sup>4,5</sup>, 周秋文<sup>1</sup>, 赵海根<sup>1</sup>, 罗 娅<sup>1,6</sup>, 马红斌<sup>7</sup>

- (1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;  
2. 西华师范大学国土资源学院, 四川 南充 637009;  
3. 黄河水利委员会, 郑州 450003;  
4. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;  
5. 中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;  
6. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001;  
7. 黄河水土保持生态环境监测中心, 西安 710021)

**摘要:** 选用 Landsat TM、环境星 CCD、SPOT4 和资源三号卫星影像等多源地学数据, 通过人机交互式解译和修订土地利用与梯田数据, 提出用相邻图幅递进回归分析法消除 NDVI 时相差异后反演植被盖度, 构建起退耕还林还草面积比例、植被盖度均值变化量和有效梯田累计保存面积比例 3 个坡面特征变化指示参数后, 运用综合聚类分析和多要素贡献率模型研究黄河中游多沙粗沙区的流域坡面水保措施变化特征。结果表明: (1) 1998-2010 年间研究区内流域坡面水保措施变化显著, 平均退耕还林还草面积比例为 5.55%, 平均林草植被盖度均值增加 20.63%, 平均有效梯田累计保存面积比例达 6.25%; (2) 多要素水保措施变化共同作用下的流域坡面变化特征主要有 7 种类型, 即植被盖度变化主导型、植被—土地变化主导型、土地—植被变化主导型、植被—梯田变化主导型、梯田—植被变化主导型、梯田面积变化主导型和多要素变化共同主导型; (3) 不同类型的空间分布存在一定的地貌背景差异, 后续研究应结合流域坡面变化特征及其地貌格局来优化配置水保措施, 并合理估计水沙模型模拟的敏感性参数。

**关键词:** 变化; 坡面; 水保措施; 黄河中游多沙粗沙区

DOI: 10.11821/dlxb201401006

## 1 引言

黄河中游多沙粗沙区是黄土高原水土保持治理的重点区域。区内大规模的水保工作始于 20 世纪 70 年代, 主要有造林、种草、封禁和修梯田等坡面措施, 以及修淤地坝和谷坊等沟道措施<sup>[1]</sup>。特别是 2000 年后, 国家大面积推广退耕还林还草工程, 水土流失治理和土地利用变化等人类活动以前所未有的强度影响着流域坡面特征<sup>[2]</sup>。坡面是黄土高原水土流失的主要来源地, 坡面特征变化深刻影响到流域径流过程、侵蚀产沙过程和水沙关系变化等<sup>[3-6]</sup>。水利部两期水沙基金等, 许多重大项目均主要研究造林、种草和梯田等坡面措施的蓄水拦沙指标与效益<sup>[7]</sup>。因此, 及时研究其坡面水保措施变化特征有重要的现实意义。

水保措施变化研究长期受到业界重视。赵文礼等系统总结了梯田的作用及其设计与施工方法<sup>[8]</sup>。唐克丽等指出黄河中游黄土高原地区种树、种草应与梯田建设同步进行<sup>[9]</sup>。彭

收稿日期: 2013-09-10; 修订日期: 2013-10-27

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题 (2012BAB02B00); 水利部公益项目 (201101037); 中央高校基本科研业务费专项 [Foundation: National Key Technologies R&D Program, No.2012BAB02B00; Public Welfare Fund of the Ministry of Water Resources of China, No.201101037; The Fundamental Research Funds for the Central Universities]

作者简介: 周旭 (1981-), 男, 四川古蔺人, 副教授, 在读博士生, 主要从事水资源与水环境遥感研究。E-mail: zxy8178@163.com

通讯作者: 杨胜天 (1965-), 男, 贵州贵阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境遥感研究。

E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

文英等以县(区)为基本单元,将黄土高原地区退耕还林还草的紧迫性分为4级,表明退耕还林还草的落实情况存在时空差异<sup>[10]</sup>。徐勇等按植被恢复指数高低,将黄土丘陵区的林草植被恢复水平分为极高、较高、中等和较低4种类型,表明林草植被恢复亦存在空间差异<sup>[11]</sup>。康玲玲等参考系列水沙变化研究成果,聚类分析黄土高原不同类型区的梯田蓄水拦沙指标,表明梯田建设质量及其水保效益也存在空间差异<sup>[12]</sup>。这些研究主要分析单要素水保措施的实施及其时空变化特征,缺乏多要素水保措施变化共同作用下的流域坡面变化特征综合分析,不足以完整刻画流域坡面的变化特征,从而难以支撑水保措施优化配置及其减水减沙效益模拟等。

本文选用Landsat TM、环境星CCD、SPOT4和资源三号卫星影像等多源地学数据,人机交互式解译和修订土地利用与梯田数据,提出用相邻图幅递进回归分析法消除NDVI时相差异后反演植被盖度,构建起退耕还林还草面积比例、植被盖度均值变化量和有效梯田累计保存面积比例3个坡面特征变化指示参数,运用综合聚类分析和多要素贡献率模型,研究1998-2010年间黄河中游多沙粗沙区流域坡面的水保措施变化特征,为小流域综合治理水保措施优化配置,以及水保措施减水减沙效益的模型模拟等提供科学依据。

2 研究区与研究数据

2.1 研究区概况

研究区为黄河中游多沙粗沙区,包括黄河干流头道拐水文站至龙门水文站之间,以及北洛河刘家河水文站以上、泾河景村水文站以上、渭河干流的北道和社棠2个水文站控制区以西(图1),面积约18.70万km<sup>2</sup>,是黄河泥沙的主要来源区<sup>[13]</sup>。地貌格局影响和决定着径流泥沙的分配与汇集过程,且与植被和土壤水分等水土流失因子关系密切<sup>[14]</sup>。主要地貌类型有峁状黄土丘陵、沙丘、宽谷长梁丘陵、梁状黄土丘陵、片沙黄土丘陵、黄土塬、石质山地、陇西丘陵、黄土低山、黄土破碎塬、风蚀沙化丘陵和冲积平原等<sup>[15]</sup>。坡面侵蚀强度大,已布设有大量的坡面水保措施。

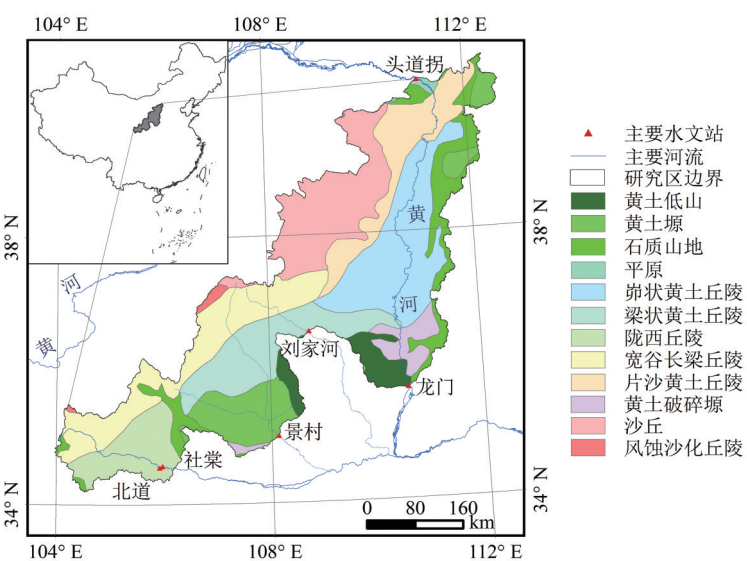


图1 研究区位置及其主要地貌类型分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of different geomorphologic types

2.2 数据来源与处理

2.2.1 数据来源 数据来源为植被生长茂盛季节、空间分辨率30 m的Landsat TM和环境星CCD影像,以1998年和2010年的数据为主,相邻图幅的数据有一定时相差异。为辅助遥感专题信息提取,还收集到部分空间分辨率10 m的1998年SPOT4和2.1 m的2012年资源三号卫星影像,以及2000年1:10万土地利用图、30 m的ASTER GDEM、250 m的MODIS产品MOD13Q1、1:100万土壤图、1:50万地貌类型图、1:250万水土保持分区图、黄河流域水土保持基本资料和第一次全国水利普查公报等(表1)。

2.2.2 数据处理

(1) 土地利用人机交互式解译 参考《土地利用现状分类》国家标准<sup>[16]</sup>,将土地利用分为

表 1 基础数据信息  
Tab. 1 Information of the data sources

序号	数据名称	数据特征	主要用途
1	Landsat TM	1997年和1998年的7-9月获取30 m空间分辨率数据,有一定时相差异	1998年土地利用解译和植被盖度反演
2	2000年土地利用图	中国科学院地理科学与资源研究所解译1:10万土地利用矢量数据	两期土地利用解译工作底图
3	ASTER GDEM	美国NASA制作30空间分辨率DEM	提取坡度、坡向和流域边界
4	环境星 CCD	2010年和2011年的7-9月获取30 m空间分辨率数据,有一定时相差异	2010年土地利用解译和植被盖度反演
5	MODIS产品 MOD13Q1	美国NASA反演250 m空间分辨率NDVI	植被盖度遥感反演参考
6	土壤图	中国科学院南京土壤研究所编制1:100万土壤图	植被盖度遥感反演参考
7	黄河流域水土保持基本资料	黄河上中游管理局2001年编写	有效梯田面积获取参考
8	第一次全国水利普查公报	中华人民共和国水利部和国家统计局2011年编制	有效梯田面积获取参考
9	SPOT4	1998年7-9月获取10 m空间分辨率数据	1998年土地利用、植被盖度和梯田面积获取数据精度检验
10	资源三号 CCD	2012年7-9月获取2.1 m空间分辨率数据	2010年土地利用、植被盖度和梯田面积获取数据精度检验
11	地貌类型图	1986年张宗祜编制1:50万黄土高原地貌类型图	流域地貌背景分析
12	水土保持分区图	2001年黄河上中游管理局编制1:250万黄河流域黄土高原水土保持分区图	水土保持措施变化综合聚类参考

6大类、24亚类(表2)。用人机交互式解译方法<sup>[17]</sup>,以2000年1:10万土地利用矢量数据为工作底图,叠加显示遥感图像和坡度、坡向等,直接解译出土地利用变化图斑,并加以定性和集成。2010年解译图用GPS定位考察资料验证,1998年解译图用SPOT影像抽样验证,共检验400个样本点,精度为91.5%。

(2) 植被盖度定量遥感反演 由于归一化植被指数(NDVI)与植被长势、生物量、盖度和叶面积指数等有极强相关性<sup>[18]</sup>,且能部分消除辐照条件变化对反演参数的影响,因此,用基于NDVI的像元二分模型(式1)定量反演30 m空间分辨率的植被盖度。

$$\begin{cases} VC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \\ NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \end{cases} \quad (1)$$

式中,VC为植被盖度;NDVI<sub>soil</sub>为裸土或无植被覆盖区NDVI值,NDVI<sub>veg</sub>为完全被植被覆盖区NDVI值;NIR为近红外波段,R为红光波段。

为保证多时相遥感数据的NDVI有可比性,原始数据经辐射定标、简单大气校正和几何精校正后,提出用相邻图幅递进回归分析法(式2)消除NDVI时相差异。

$$Image'_i = k_{i-1} \times Image_i + q_{i-1} \quad (i = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (2)$$

式中,Image'<sub>i</sub>为校正后影像数据矩阵,Image<sub>i</sub>为原始影像数据矩阵,k<sub>i-1</sub>和q<sub>i-1</sub>分别为影像数据矩阵OL = Image'<sub>i-1</sub> ∩ Image<sub>i</sub>的回归分析斜率与截距,n为总的影像图幅数。

表 2 土地利用分类体系  
Tab. 2 The land use classification system

大类	亚类
耕地	山区水田、丘陵区水田、平原区水田、山区旱地、丘陵区旱地、平原区旱地
林地	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地
草地	高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地
水域	河渠、水库、湖泊、滩地
建设用地	城镇建设用地、农村居民点用地、工交建设用地
未利用地	沙地、戈壁、裸土地、裸岩石砾地

多数裸地表面的  $NDVI_{soil}$  理论上应接近 0, 但由于受大气效应和地表水分等影响,  $NDVI_{soil}$  一般在 -0.1~0.2 之间; 由于受植被类型影响,  $NDVI_{veg}$  也会随时间和空间而改变<sup>[18]</sup>。因此, 用土壤类型图分图斑统计  $NDVI$  的累积频率, 选取土种单元内累积频率为 5% 的  $NDVI$  值作  $NDVI_{soil}$ , 用土地利用图分类型统计  $NDVI$  的累积频率, 选取林地和草地累积频率为 95% 的  $NDVI$  值作  $NDVI_{veg}$ 。

反演出两期植被盖度后, 在无显著变化区域内, 用 GPS 定位拍摄 192 个样地 330 张照片, 照相法获取植被盖度<sup>[19]</sup>, 检验精度为 91.7%。

(3) 有效梯田累计保存面积数据获取 1998-2010 年间的有效梯田累计保存面积数据由黄河上中游管理局、黄河水土保持生态环境监测中心提供。主要是在 2011 年全国第一次水利普查时各县上报数据基础上, 用 2012 年 2.1 m 的资源三号卫星影像人机交互式解译进行修订和核实。成果数据用 GPS 定位考察资料验证, 共检验 240 个样本点, 精度为 81.7%。

### 3 研究方法

#### 3.1 单要素变化特征分析方法

为揭示各种水土保持措施变化对流域坡面变化的影响, 构建退耕还林还草面积比例 (%)、植被盖度均值变化量 (%) 和有效梯田累计保存面积比例 (%), 分析单要素水土保持措施变化特征。

退耕还林还草面积比例 (式 3), 反映坡面耕地转为林地和草地的数量变化特征, 揭示土地利用类型变化对流域坡面变化的影响。

$$AR_{CCFG} = (S_{CCFG} / S_{basin}) \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $AR_{CCFG}$  为退耕还林还草面积比例,  $S_{CCFG}$  为 1998-2010 年间退耕还林还草面积,  $S_{basin}$  为流域面积。

植被盖度均值变化量 (式 4), 反映坡面土地利用类型没有发生变化的林地和草地的质量变化特征, 揭示植被盖度变化对流域坡面变化的影响。

$$D_{VC} = (vc_{2010} - vc_{1998}) \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $D_{VC}$  为植被盖度均值变化量,  $vc_{2010}$  为流域内 2010 年植被盖度均值,  $vc_{1998}$  为流域内 1998 年植被盖度均值。

有效梯田累计保存面积比例 (式 5), 反映坡面还有水土保持功能的梯田的数量变化特征, 揭示梯田面积变化对流域坡面变化的影响。

$$AR_{ET} = (S_{ET2010} / S_{basin}) \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $AR_{ET}$  为有效梯田累计保存面积比例,  $S_{ET2010}$  为至 2010 年的有效梯田累计保存变化面积,  $S_{basin}$  为流域面积。

#### 3.2 多要素变化聚类识别方法

为揭示多种水土保持措施变化共同作用对流域坡面变化特征的影响, 用多要素水土保持措施变化量的 3 维特征空间反映流域坡面变化特征的聚集性和相似性, 用 Pearson 相关聚类法 (式 6) 进行综合聚类分析后, 再用多要素贡献率模型 (式 7) 反映多种水土保持措施变化共同作用下, 土地利用类型变化、植被盖度均值变化和有效梯田面积变化各自对流域坡面变化特征影响的相对强弱, 并作为综合聚类分析结果类型识别的依据。

$$PC(x, y) = \sum_i (Z_{xi} Z_{yi})^2 / (n - 1) \quad (6)$$

式中,  $PC(x, y)$  为  $x$  要素和  $y$  要素的 Pearson 相关性系数,  $Z_{xi}$  为  $xi$  的标准值,  $n$  为样本数。



$$CR_{ij} = S_{ij} / (S_{i,1} + S_{i,2} + S_{i,3}) \times 100\%$$

(7)

式中,  $CR_{ij}$  为第  $j$  要素变化对第  $i$  流域的坡面特征变化的贡献率,  $CR_{ij}$  值越大表明第  $j$  要素变化对第  $i$  流域的坡面特征变化的影响越强烈;  $S_{ij}$  为第  $i$  流域第  $j$  要素变化数值按照从小到大排列的排序号;  $i$  为流域个数 ( $i = 1, 2, 3 \cdots 24$ ),  $j$  为要素个数 ( $j = 1, 2, 3$ )。

4 结果分析

4.1 单要素水保措施变化区域特征

(1) 退耕还林还草面积变化特征  
根据 1998 年和 2010 年遥感解译土地利用图, 叠加分析统计退耕还林还草面积比例 (图 2)。延河、北洛河和清涧河的数值较大, 均超过 15%, 分别为 27.92%、19.83% 和 16.13%; 渭河干流、昕水河、偏关河和朱家川的数值较小, 均小于 1%, 分别为 0.24%、0.63%、0.64% 和 0.80%; 所有流域的平均值为 5.55%。表明黄河中游多沙粗沙区已完成较大面积比例的退耕还林还草, 但造林、种草等坡面水保措施的落实情况在不同流域间仍存在明显差异。

(2) 植被盖度均值变化特征  
利用 1998 年和 2010 年遥感反演植被盖度图, 叠加分析统计植被盖度均值变化量 (图 3)。三川河、无定河和佳芦河的数值较大, 均超过 30%, 分别为 32.85%、32.13% 和 31.33%; 朱家川、窟野河和仕望川的数值较小, 均小于 15%, 分别为 6.30%、10.15% 和 14.64%; 所有流域的平均值为 20.63%。表明黄河中游多沙粗沙区流域坡面尺度的林草植被盖度已发生显著变化, 但不同流域间的植被恢复仍存在一定差异。

(3) 有效梯田面积变化特征  
运用多源数据获取、修订的有效梯田空间分布图, 叠加分析

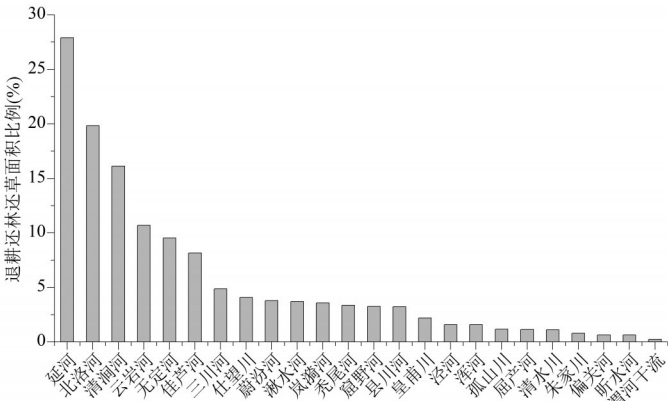


图2 退耕还林还草面积比例

Fig. 2 Area ratios of the conversion of cropland to forest or grassland

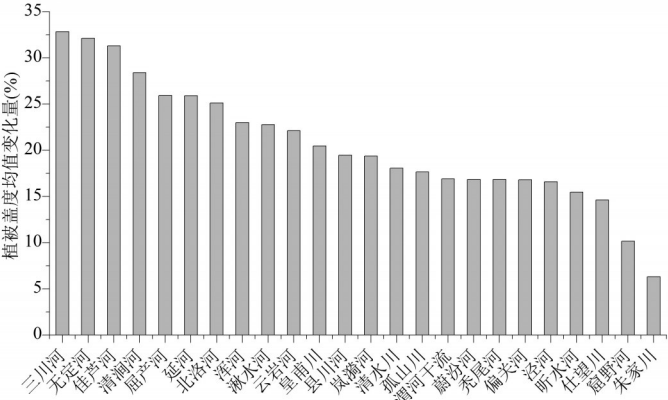


图3 植被盖度均值变化量

Fig. 3 Difference of the mean of vegetation coverage

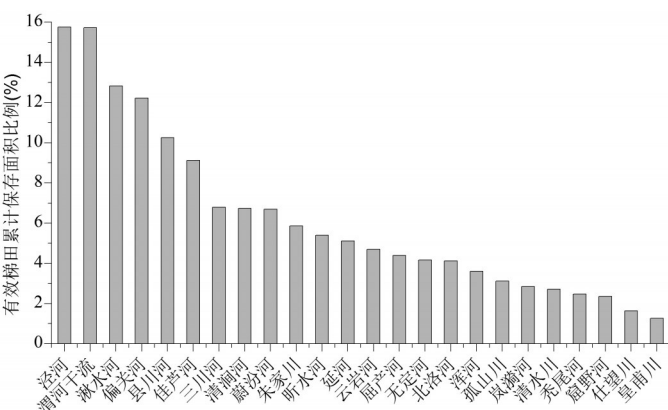


图4 梯田累计保存面积比例

Fig. 4 Area ratios of the accumulated effective terraces

统计有效梯田累计保存面积比例(图4)。泾河、渭河干流、湫水河、偏关河和县川河的数值较大,均超过10%,分别为15.76%、15.73%、12.82%、12.22%和10.26%;皇甫川和仕望川的数值较小,均小于2%,分别为1.27%和1.64%;所有流域的平均值为6.25%。表明黄河中游多沙粗沙区已修筑并保存有较大面积的梯田,但不同流域间的有效梯田累计保存面积亦存在较大差异。

4.2 多要素水保措施变化综合聚类

多要素水保措施变化量间的关系可用3维特征空间表达(图5)。图中各点代表一个流域,该点对应X轴、Y轴和Z轴的距离分别代表有效梯田累计保存面积比例、退耕还林还草面积比例和植被盖度均值变化量的数值。点与点之间的距离表示多要素水保措施变化共同指示的流域坡面变化特征的聚集性和相似性。图中存在点簇聚集现象,表明聚结点簇的流域坡面变化的影响因素存在一定相似性。

用Pearson相关聚类法聚类,多要素水保措施变化共同作用下的流域坡面变化特征有7种类型。相同类的流域坡面变化特征指示参数有一定聚集性和相似性。第1类的平均 $D_{-vc}$ 为16.29%,平均 $AR_{ccfg}$ 为3.29%,平均 $AR_{-et}$ 为2.11%。第2类的平均 $D_{-vc}$ 为27.55%,平均 $AR_{ccfg}$ 为12.12%,平均 $AR_{-et}$ 为5.20%。第3类的平均 $D_{-vc}$ 为25.51%,平均 $AR_{ccfg}$ 为23.87%,平均 $AR_{-et}$ 为4.62%。第4类的平均 $D_{-vc}$ 为21.17%,平均 $AR_{ccfg}$ 为1.24%,平均 $AR_{-et}$ 为3.46%。第5类的平均 $D_{-vc}$ 为16.17%,平均 $AR_{ccfg}$ 为2.43%,平均 $AR_{-et}$ 为8.21%。第6类的平均 $D_{-vc}$ 为16.77%,平均 $AR_{ccfg}$ 为0.83%,平均 $AR_{-et}$ 为14.57%。第7类的平均 $D_{-vc}$ 为32.09%,平均 $AR_{ccfg}$ 为6.51%,平均 $AR_{-et}$ 为7.96%。

统计分析不同聚类的流域构成及其平均相似度(表3)。第1类的典型流域为皇甫川,相似流域有秃尾河、岚漪河、窟野河和仕望川,相似流域与典型流域的平均相似度为0.997。第2类的典型流域为清涧河,相似流域有云岩河和无定河,平均相似度为0.987。第3类的典型流域为延河,相似流域有北洛河,平均相似度为0.974。第4类的典型流域为屈产河,相似流域有孤山川、浑河和清水川,平均相似度为0.999。第5类的典型流域为湫水河,相似流域有县川河、昕水河、蔚汾河和朱家川,平均相似度为0.994。第6类的典型流域为泾河,相似流域有渭河干流和偏关河,平均相似度为0.991。第7类的典型流域为佳芦河,相似流域有三川河,平均相似度为0.999。所有类的最大平均相似度为0.999,最小平均相似度为0.974。

4.3 多要素水保措施变化类型识别

统计分析不同聚类的各影响因素平均贡献率及其地貌特征等(表4)。第1类的 $D_{-vc}$ 对流域坡面变化特征平均贡献率为74.25%,坡面变化主要由植被盖度变化引起,类型识别为植被盖度变化主导型。第2类的 $D_{-vc}$ 平均贡献率为61.50%, $AR_{ccfg}$ 平均贡献率为

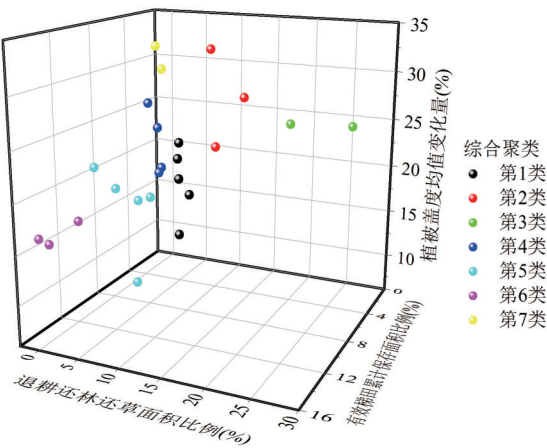


图5 多要素水保措施变化量的3维特征空间  
Fig. 5 3-D vector space of soil and water conservation measures change

共同指示的流域坡面变化特征的聚集性和相似性。图中存在点簇聚集现象,表明聚结点簇的流域坡面变化的影响因素存在一定相似性。

第1类的典型流域为皇甫川,相似流域有秃尾河、岚漪河、窟野河和仕望川,相似流域与典型流域的平均相似度为0.997。第2类的典型流域为清涧河,相似流域有云岩河和无定河,平均相似度为0.987。第3类的典型流域为延河,相似流域有北洛河,平均相似度为0.974。第4类的典型流域为屈产河,相似流域有孤山川、浑河和清水川,平均相似度为0.999。第5类的典型流域为湫水河,相似流域有县川河、昕水河、蔚汾河和朱家川,平均相似度为0.994。第6类的典型流域为泾河,相似流域有渭河干流和偏关河,平均相似度为0.991。第7类的典型流域为佳芦河,相似流域有三川河,平均相似度为0.999。所有类的最大平均相似度为0.999,最小平均相似度为0.974。

所有类的最大平均相似度为0.999,最小平均相似度为0.974。

表3 不同类型的流域构成及其平均相似度

Tab. 3 Compositions and average similarity of different types

序号	典型流域	相似流域	平均相似度
1	皇甫川	秃尾河、岚漪河、窟野河、仕望川	0.997
2	清涧河	云岩河、无定河	0.987
3	延河	北洛河	0.974
4	屈产河	孤山川、浑河、清水川	0.999
5	湫水河	县川河、昕水河、蔚汾河、朱家川	0.994
6	泾河	渭河干流、偏关河	0.991
7	佳芦河	三川河	0.999

表 4 不同类型的影响因素贡献率及其地貌特征

Tab. 4 Contribution rates of each factor and identification of different type					
序号	$D_{VC}$ 贡献率	$AR_{CCFG}$ 贡献率	$AR_{ET}$ 贡献率	类型识别	地貌特征
1	74.25	15.72	10.03	植被盖度变化主导型	主要地貌有片沙黄土丘陵、沙丘、峁状黄土丘陵、石质山地和黄土低山等
2	61.50	26.93	11.57	植被-土地变化主导型	主要地貌有沙丘、峁状黄土丘陵、片沙黄土丘陵、宽谷长梁丘陵和黄土低山等
3	34.96	44.43	20.61	土地-植被变化主导型	主要地貌有梁状黄土丘陵、宽谷长梁丘陵、黄土低山、峁状黄土丘陵和黄土破碎塬等
4	59.90	13.36	26.74	植被-梯田变化主导型	主要地貌有片沙黄土丘陵、石质山地、峁状黄土丘陵、黄土塬
5	27.95	17.66	54.39	梯田-植被变化主导型	主要地貌有石质山地、峁状黄土丘陵、黄土破碎塬、黄土塬
6	20.14	12.24	67.62	梯田面积变化主导型	主要地貌有宽谷长梁丘陵、石质山地、黄土塬、陇西丘陵和梁状黄土丘陵等
7	36.33	32.83	30.84	多要素变化共同主导型	主要地貌有石质山地、峁状黄土丘陵、片沙黄土丘陵、沙丘、黄土塬

26.93%,坡面变化主要由植被盖度变化和土地利用变化引起,类型识别为植被—土地变化主导型。第3类的 $AR_{CCFG}$ 平均贡献率为44.43%, $D_{VC}$ 平均贡献率为34.96%,坡面变化主要由土地利用变化和植被盖度变化引起,类型识别为土地—植被变化主导型。第4类的 $D_{VC}$ 平均贡献率为59.90%, $AR_{ET}$ 平均贡献率为26.74%,坡面变化主要由植被盖度变化和梯田面积变化引起,类型识别为植被—梯田变化主导型。第5类的 $AR_{ET}$ 平均贡献率为54.39%, $D_{VC}$

平均贡献率为27.95%,坡面变化主要由梯田面积变化和植被盖度变化引起,类型识别为梯田—植被变化主导型。第6类的 $AR_{ET}$ 平均贡献率为67.62%,坡面变化主要由梯田面积变化引起,类型识别为梯田面积变化主导型。第7类的 $D_{VC}$ 平均贡献率为36.33%, $AR_{CCFG}$ 平均贡献率为32.83%, $AR_{ET}$ 平均贡献率为30.84%,坡面特征变化由植被盖度变化、土地利用变化和梯田面积变化共同引起,没有明显的主导因素,类型识别为多要素变化共同主导型。

不同类型的流域坡面变化空间分布如图6所示。植被盖度变化主导型占黄河中游多沙粗沙区面积比例为10.57%,以片沙黄土丘陵、沙丘和峁状黄土丘陵为主。植被—土地变化主导型占19.32%,以沙丘、峁状黄土丘陵和片沙黄土丘陵为主。土地—植被变化主导型占8.01%,以梁状黄土丘陵、宽谷长梁丘陵和黄土低山为主。植被—梯田变化主导型占4.78%,以片沙黄土丘陵、石质山地和峁状黄土丘陵为主。梯田—植被变化主导型占6.58%,以石质山地、峁状黄土丘陵和黄土破碎塬为主。梯田面积变化主导型占37.28%,以宽谷长梁丘陵、石质山地和黄土塬为主。多要素变化共同主导型占2.83%,以石质山地、峁状黄土丘陵和片沙黄土丘陵为主。

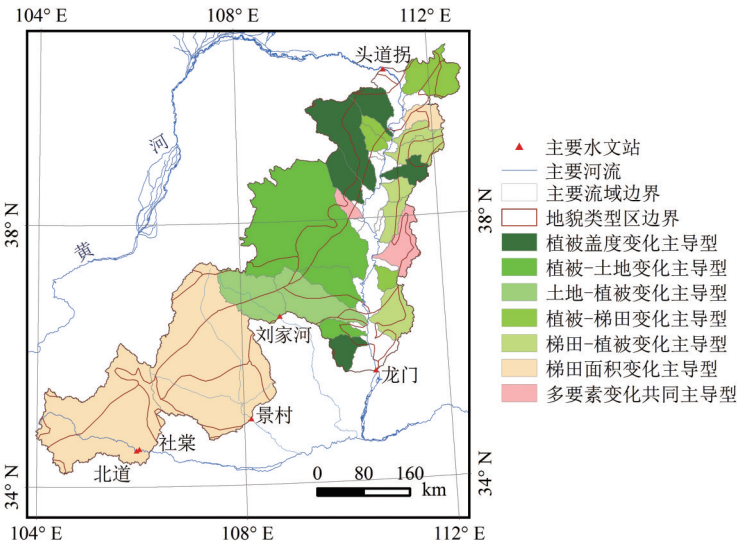


图6 不同类型的流域坡面变化特征空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of different types of watershed slope change characteristics

## 5 结论

(1) 1998-2010年间黄河中游多沙粗沙区流域坡面特征已发生显著变化。变化主要表现为林地、草地和梯田面积显著增加,同时林草植被盖度明显改善。以流域为基本单元,平均退耕还林还草面积比例为5.55%,平均有效梯田累计保存面积比例为6.25%,平均林草植被盖度均值增加20.63%。不同流域间单要素水土保持措施变化还存在一定区域差异。

(2) 多要素水土保持措施变化共同作用下的流域坡面变化特征综合聚类有7种类型。相同类的流域坡面变化特征指示参数均有一定聚集性和相似性,各类均有典型流域和相似流域,且类内平均相似度均比较高,最小平均相似度为0.974。

(3) 不同类型的流域坡面变化主导性影响因素不同。据各影响因素平均贡献率大小,将综合聚类分析结果识别为植被盖度变化主导型、植被—土地变化主导型、土地—植被变化主导型、植被—梯田变化主导型、梯田-植被变化主导型、梯田面积变化主导型和多要素变化共同主导型。

## 参考文献 (References)

- [1] Bao Weimin. Classified-quantitative analysis of changed runoff and sediment yields. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(1): 41-46. [包为民. 流域水沙变化原因分类定量分析. *地理科学*, 1997, 17(1): 41-46.]
- [2] Chinese Academy of Sciences. Several suggestions on the returning farmland to forests or grassland in the Loess Plateau. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 28(2): 168-171. [中国科学院学部. 关于进一步在黄土高原地区贯彻中央退耕还林(草)方针的若干建议. *地球科学进展*, 2003, 28(2): 168-171.]
- [3] Mu Xingmin, Wang Wenlong, Xu Xuexuan. The influence of the soil and water conservation on the surface runoff in the watersheds in the gully plateau region of Loess Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, (2): 71-75. [穆兴民, 王文龙, 徐学选. 黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响. *水利学报*, 1999, (2): 71-75.]
- [4] Xu Jiongxin. Response of erosion and sediment producing processes to soil and water conservation measures in the Wudinghe river basin. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 972-981. [许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的响应. *地理学报*, 2004, 59(6): 972-981.]
- [5] Chen Hao, Zhou Jinxing, Lu Zhongchen et al. Impact of environmental factors on runoff and sediment variations in middle reaches of the Yellow River. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 179-187. [陈浩, 周金星, 陆中臣等. 黄河中游流域环境要素对水沙变化的影响. *地理研究*, 2002, 21(2): 179-187.]
- [6] Tian Guangming, Wang Fei'er, Chen Yingxu et al. Effect of different vegetation systems on soil erosion and soil nutrients in red soil region of southeastern China. *Pedosphere*, 2003, 13(2): 121-128.
- [7] Kang Lingling, Wang Yunzhang. Review and evaluation of index systems on water storage and silt detention under the slope measures of soil and water conservation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1): 83-88. [康玲玲, 王云璋. 水土保持坡面措施蓄水拦沙指标体系的回顾与评价. *中国水土保持科学*, 2004, 2(1): 83-88.]
- [8] Zhao Wenli. Terraces in the Yellow River Basin. *Soil and Water Conservation in China*, 1983, (3): 36-40. [赵文礼. 黄河流域的梯田. *中国水土保持*, 1983, (3): 36-40.]
- [9] Tang Keli, Zhang Zhongzi. Forests and pastures measures should be carried out simultaneously with the construction of terraces in middle reaches of the Yellow River and the Loess Plateau. *Yellow River*, 1987, (3): 56-59. [唐克丽, 张仲子. 黄河中游黄土高原地区种树种草应与梯田建设同步进行. *人民黄河*, 1987, (3): 56-59.]
- [10] Peng Wenying, Zhang Keli, Li Shuangcai. Studies of the regional classification about returning farmland to forests or grassland on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(4): 438-443. [彭文英, 张科利, 李双才. 黄土高原退耕还林(草)紧迫性地域分级论证. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 438-443.]
- [11] Xu Yong, Tian Junliang. Eco-environmental rehabilitation and spatial differentiation based on enlarging terrace and de-farming in the loess hilly-gully region. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(4): 430-437. [徐勇, 田均良. 黄土丘陵区“梯田退耕”生态重建及地域分异特征. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 430-437.]
- [12] Kang Lingling, Bao Hongzhe. Analysis and confirm of the indexes of water storage and sediment trapping on the terrace of different type regions at the Loess Plateau. *Science of soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 51-56. [康玲玲, 鲍宏喆. 黄土高原不同类型区梯田蓄水拦沙指标的分析与确定. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 51-56.]
- [13] Xu Jianhua, Li Xuemei, Zhang Peide et al. Delimitation of coarse sediment and study on overlap of coarse sediment and sediment abundant areas in the middle Yellow River Basin. *Journal of Sediment Research*, 1998, (4): 36-46. [徐建华, 李雪梅, 张培德等. 黄河粗泥沙界限与中游多沙粗沙区区域研究. *泥沙研究*, 1998, (4): 36-46.]
- [14] Wang Jiping, Huang Zhilin, Liu Yang et al. Quantitative analysis of the relationship between watershed topography and erosion-sediment processes. *Geographical Research*, 2013, 32(2): 275-284. [王计平, 黄志霖, 刘洋等. 地貌格局与



流域侵蚀产沙过程关系定量分析. 地理研究, 2013, 32(2): 275-284.]

- [15] Type Division on Land Resource in Loess Plateau and Qinba Mountainous. Journal of Northwest Agricultural University, 1995, (Suppl.): 19-22. [杨勤科. 黄土高原和秦巴山地的土地资源类型区划分. 西北农学院学报, 1995, (增刊): 19-22.]
- [16] China's National Standard (GB/T21010-2007). Current Land Use Condition Classification. 2007-08-10. [中华人民共和国国家标准 (GB/T21010-2007). 土地利用现状分类. 2007-08-10.]
- [17] Yang Shengtian, Zhu Qiqiang. Affect of man-computer interactive interpretation method in soil erosion survey of large scale by remote sensing. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 88-91. [杨胜天, 朱启疆. 人机交互式解译在大尺度土壤侵蚀遥感调查中的作用. 水土保持学报, 2000, 14(3): 88-91.]
- [18] Toby N Carlson, David A Ripley. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. Remote Sensing of Environment, 1998, 62(3): 241-252.
- [19] Song Wenlong, Yang Shengtian, Gao Yunfei et al. Integration and application of portable experiment and monitoring system (Eco-monitors) in ecohydrological field study. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 7-12. [宋文龙, 杨胜天, 高云飞 等. 便携式生态水文实验与监测系统 (Eco-monitors) 的集成与应用. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 7-12.]

## Characteristics of soil and water conservation measures change in the watershed slope of the middle Yellow River Basin

ZHOU Xu<sup>1,2</sup>, YANG Shengtian<sup>1</sup>, LIU Xiaoyan<sup>3</sup>, LIU Changming<sup>4,5</sup>, ZHOU Qiuwen<sup>1</sup>,  
ZHAO Haigen<sup>1</sup>, LUO Ya<sup>1,6</sup>, MA Hongbing<sup>7</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China;

2. School of Land and Resource, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China;

3. Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

4. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

5. Key Laboratory of Land Water Cycle and Surface Process, CAS at IGSNRR, Beijing 100101, China;

6. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

7. The Monitoring Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment of Yellow River, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** This study chose multi-source remote sensing images to extract spatial information, and designed three parameters. It applied integrated cluster analysis and factors contribution model to research the variation of watershed slope in the rich and coarse sediment area of the middle Yellow River Basin. Conclusions can be drawn as follows. (1) The watershed slope characteristics of the study area have changed from 1998 to 2010, including a great increment of forest, grassland and terrace area, and vegetation coverage has restored obviously. (2) There are 7 types of watershed slope variation, which are the result of changes of soil and water conservation measures. According to contribution rates, they are named as type-1 dominated by vegetation coverage change, type-2 by vegetation coverage and land use change, type-3 by land use and vegetation coverage change, type-4 by vegetation coverage and terrace area change, type-5 by terrace area and vegetation coverage change, type-6 by terrace area change and type-7 by multi-source factors. (3) The spatial distribution of each type has its unique geomorphic background, and the future work should take the watershed slope characteristics and geomorphic patterns into account, and should assess the sensitivity of different hydrological and sediment yield models rationally.

**Key words:** variation; slope; soil and water conservation measures; rich and coarse sediment area; the middle Yellow River basin