

多尺度历史航照于地景变迁分析之应用 – 以台湾石门水库上游集水区为例

庄永忠 江正雄 廖泫铭 范毅军

(台湾中央研究院人社中心 台北)

摘要 历史航照为重要文化资产，具有记录时空变迁之珍贵价值，更是自然环境科学与人文社会研究重要素材。但航照像片或原始底片常因年代久远而产生物理性质损毁与老化。有鉴于此，中央研究院地理信息科学研究专题中心近年来积极与台湾历史航照原始保存单位合作，进行航照底片数字化扫描，并利用航高、内外方位等属性数据定位航照地理坐标，以建立台湾历年时空变迁研究之核心架构。

为验证台湾历史航照在空间定位后之应用价值，并尝试建立地景变迁分析流程，本研究以石门水库集水区大崙崁流域为例，分别采用 1957~1959 年、1973~1975 年之黑白航照，以及 2000~2001 年拍摄之彩色正射影像为基础数据，首先利用地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 搭配航线信息与地面控制点，进行航照纠正与立体像对生成，以分析集水区内与人为屯垦相关之特殊地形面；另一方面则将不同时期航照等地表分类项目数字化，以产出地表覆盖分类图，后透过文献收集、现场调查与访谈等方式验证数字化判释之正确性。

分析焦点方面，本研究主要透过地表覆盖分类图分析历年人为垦殖范围与聚落分布，此将有助于了解山地集水区人为活动拓展与聚落选址特性；另一方面则着重集水区整体地形地貌与地表覆盖分析，由此可看出长时期自然环境变迁之趋势，并可对照人为活动范围说明人为活动对自然环境之影响；焦点三则透过区域分析或整体分析两不同观点，解释集水区地景变迁之空间关联与因果关系。此流程将有助于还原大崙崁溪于石门水库兴筑前后之实际变化，亦可呈现水库上游长期之人地关系变化。

研究结果显示，大崙崁流域因地势陡峭，故历年人为开发和聚落选址与地形具密切关联，其初垦位置多位于坡度较缓之缓坡、河阶、河滩地、河流汇流处或曲流堆积坡，多呈破碎区块分布，且逐渐朝较陡之坡面延伸。除此之外，透过历年航照亦发现，长时期聚落间链接道路之密度有增加趋势，且早期道路拓展与边坡林木砍伐程度具显著空间关联，而道路开发往往影响边坡稳定，进而造成集水区内严重之土石灾害。

由本研究流程可证实，数字化历史航照不仅具完善保存数据与流通便利之功能，在空间坐标定位后亦有高度研究参考价值。未来可进一步结合历史影像数据库进行系统性时空变迁分析，相信将能大幅拓展相关研究之深度与广度。

1 前言

历史航照为记录时空变迁之重要文化资产，亦为自然环境科学与人文社会研究重要参考素材。以台湾为例，早期拍摄之航空照片多做为特定时期政府施政与国防需求使用，但随任务结束或目标成果完成，历史航照之原始像片与底片大多进入档案室封存。而若无良好保存环境，其将随时间产生老化与物理性质损毁而再也无法使用。

此现象于 2002 年數位典藏国家型计划(National Digital Archives Program)开始进行后有所改善。该计划将各种文化资产资料转以數位形态储存，并将庞大数值化数据移植入计算机中进行保存、管理与应用，以达数据永久保存之目的，并增加推广与应用效率。其中子机构计划「近代中国歷史地图与遥测影像信息典藏计划」之主要目标，为广泛搜集大陸及台湾各類主题地图与歷史航照，并予以数字化建档保存。而有鉴于妥善保存历史航照文化资产与典藏信息公开化之原则，中研院人社中心地理信息科学研究专题中心除访查国内藏有地图、遥测影像与地图之机构或个人，于征得主管机关同意后将数据全面數位化扫描与建文件编目外，亦依其相关主题内容建立具多尺度时空架构之检索系统，如中华文明之时空基础架构(CCTS)与台湾历史地图系统(THCTS)加以整合，以开放给学界及一般民众使用。

总体而言，航照数字典藏除具文物保存价值，就实用性角度而言，亦可配合国际空间资料标准建立诠释资料(Metadata)，可大为提高數位化歷史航照使用之便利性及流通性。

2 研究动机与目的

航空照片提供最真实且丰富之大面积地表信息，而多时期航照则有助于研究古今地形地物与社会文化变迁演化，并提供最直接且连续之证据。但由于此优点，早期航空照片被列为管制资料，后才由农委会农林航空测量所贩卖供学术单位与一般民众使用。而中研院「近代中国歷史地图与遥测影像信息典藏计划」内容则广为收集大陸及台湾自 1940 年代迄今累计超过百万张之航照底片，堪称为珍贵且完整之歷史记录。

但因先前单位搬迁与数据老化而造成之数据散失，中研院当初取得原始底片时，并没有取得完整之航迹图、航摄信息与像机参数，故仍有大量底片在进行扫描數位化后，无法进行影像对位(Georeferencing)定义精确地理位置坐标，以在地理信息系统(Geographic Information System, GIS)平台上供研究与展示使用。也因此若欲赋予航照扫描文件地理空间坐标时将受下列数点限制：

- 一、 缺少完整或精确航迹图做为航照定位参考，故需专业人士判讀以决定航照拍摄位置。
- 二、 缺少当时之航摄完整信息(如内外方位与像机参数)，故无法于三维空间精确定位航空照片。
- 三、 因不同年代地表状态(尤其是人为地景)变迁剧烈，造成影像对位所需之控制点选取困难，而控制点不足将降低坐标定位之精度。
- 四、 历史航照除了二维之几何校正外，还有三维地形起伏位移之消除，才能得到正确之空间坐标。

有鉴于此，若参照一般平面地图定位方式，以少量控制点进行方位参数校正，就测量学与地图学强调精确空间信息之观点而言，此缺少精确地理空间标记之历史航照，除提供研究者定性描述与判读外，并无法提供图层空间套迭、地景区块数字化分析与制作数值地形之后续应用价值。但就学术研究角度观之，因历史航照本身具备资料唯一性、时空记录特性与不可取代性，故若将历史航照屏除在 GIS 分析架构外，将大幅降低空间信息研究之时间纵深与内容广度。为弥补空间信息定位精度不足之缺憾，如何应用现有的知识及技术，让这组历史航照经由较佳之地理空间标记作业方式重新赋予较高之利用价值，且降低操作门槛让非专业人士亦能进行历史航照地理空间标记作业，并进一步应用于地景变迁与环境科学研究，乃是本研究主要目的。

3 历史航照摄影特性及种类

在进行航照空间标记前，必须先就历史航照种类与特性进行了解。以台湾之历史航照为例，早期航照拍摄成果多透过美军航空摄影所得，而「近代中国历史地图与遥测影像信息典藏计划」所采用之历史航照，可依航空摄影像机种类加以区分为单幅式像机、连续型航带式像机及全景式像机，其中像片类型主要包含(江正雄，2007)：

- 一、 全色黑白像片：简称全色片，大部分历史航照多属黑白像片，而本研究所采用之两期历史航照(1957~1959 年、1973~1975 年)亦属之。
- 二、 彩色像片：较黑白照片更具丰富色调，有助于提升地形地物辨识。
- 三、 红外线黑白像片：因红外线光谱范围超过可见光区，故具有较佳之云层穿透力与较广之光谱辨识范围。

四、红外线彩色像片：又称伪色片，常应用于植物病虫害调查、土壤分析及水污染研究等。

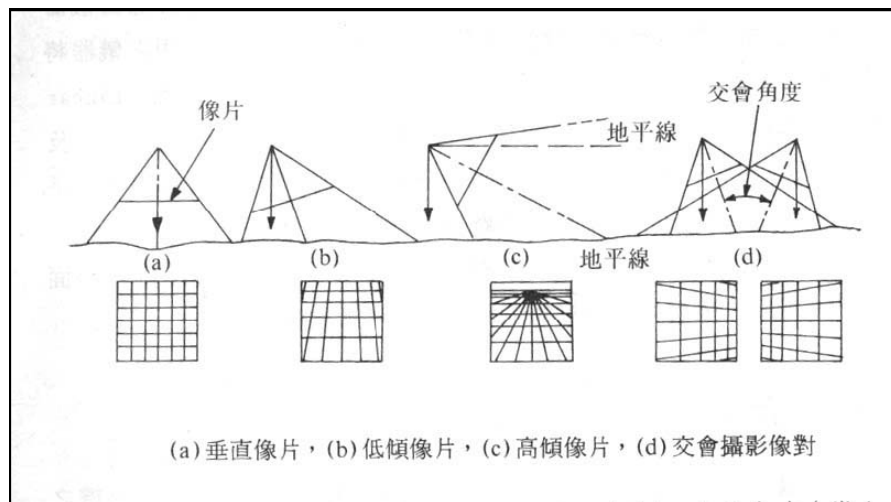


图3.1 拍摄角度分類图(江正雄, 2007)

另说明拍摄角度种类如下：

- 一、垂直照片(Vertical Photograph)：像机在拍摄时，光轴以垂直或近似垂直(倾斜角度小于3度内)由空中对地面摄影产生像片，一般用来绘制地图或从事资源及灾害之调查(图 3.1a)。
- 二、低倾斜照片(Low Oblique)：像机在拍摄时，光轴偏离垂线方向，但拍摄之航照未包含地平线(图 3.1b)。
- 三、高倾斜照片(High Oblique)：像机在拍摄时，光轴故意偏离垂线方向，而拍摄航照包含地平线(图 3.1c)。
- 四、交会摄影照片(Convergent Photograph)：两张低倾斜照片，其光轴互相交会，且大部分涵盖区域重迭(图 3.1d)。

而像幅尺寸如下(江正雄, 2007)：

- 一、9×9 inch：摄影测量制图与应用最广泛之尺寸如(图 3.2a)。
- 二、9×18 inch：主要是使用于全景型式航空摄影机使用，多为军事侦察使用(图 3.2b)。
- 三、5×5 inch：单幅型式航空摄影机专用，多使用于军事侦察及特定目标判读用途(图 3.2c)。
- 四、75×75 mm：主要是使用于单幅型式航空摄影机，多为军事侦察判读及特定目标判读用途(图 3.2d)。

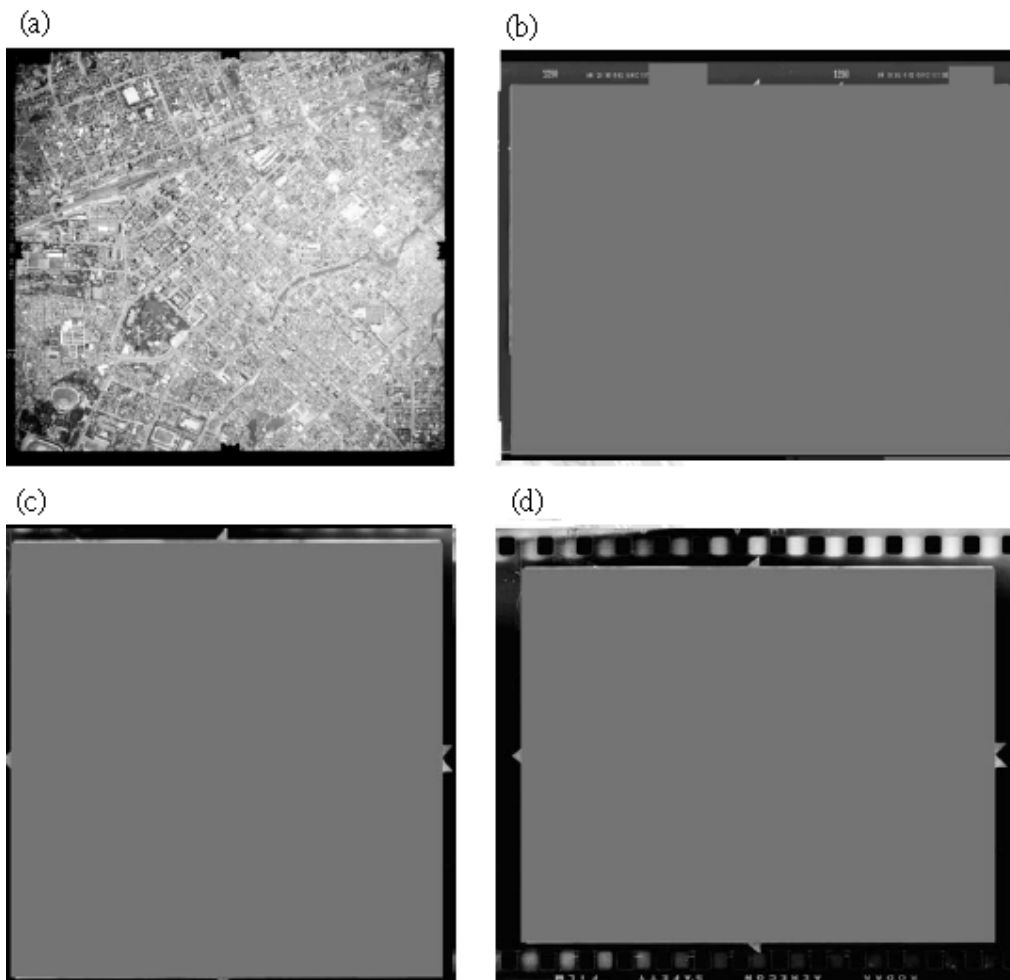


图3.2 像幅尺寸

本研究所选用之两期历史航照(1957~1959年、1973~1975年),为连续航带像机以垂直角度拍摄之连续型全色黑白片影像(图3.3),尺寸为9×9 inch。而后透过中研院 Vexcel Ultra Scan 5000 自动进片扫描机,以 21 μ m 进行高精度扫描(图3.4)。

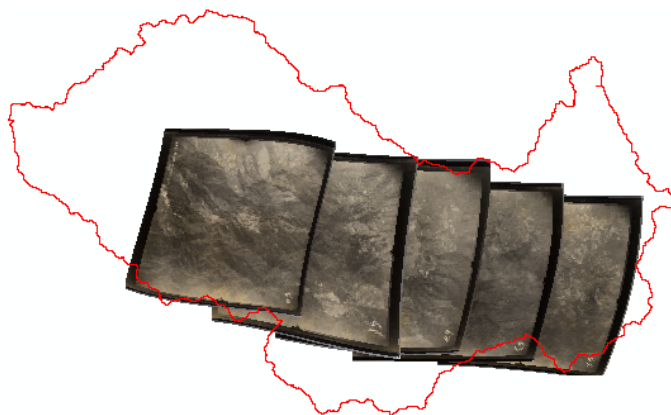


图3.3 历史航照连续性资料示意图

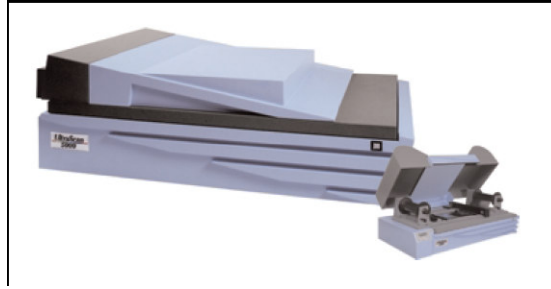


图3.4 Vexcel. Ultra Scan 5000扫描机

4 前期研究概述

而与历史航照相关之前期研究方面，中研院已针对台湾历史航照影像资料，与工研院能源与环境研究所(前身为能源与资源研究所，简称能资所)共同合作进行资料數位化和保存工作，目前中研院已调查分析历史航照属性内容，记录任务编号、摄影时间、拍摄角度、航高焦距、拍摄照片号码等信息(图 4.1)，并完成大部分历史航照數位化与数据分类整理，后交由工研院能源与环境研究所收藏数字化像片扫描文件，原始底片则典藏于美国国家档案馆。

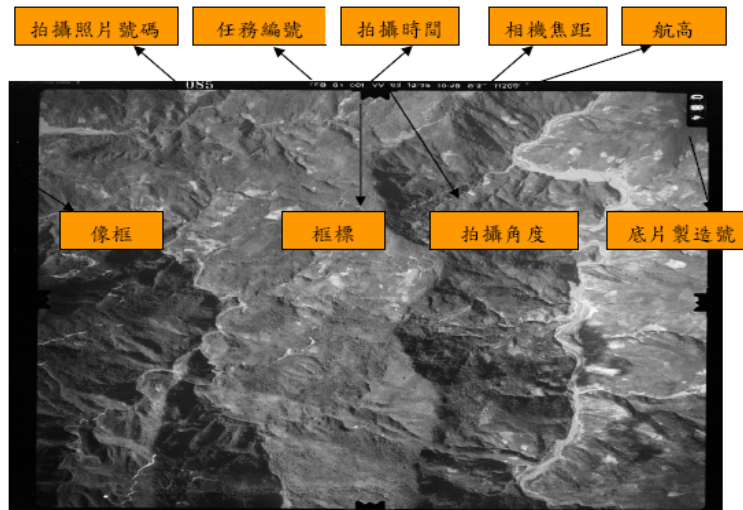


图4.1 航照属性介绍(江正雄, 2007)

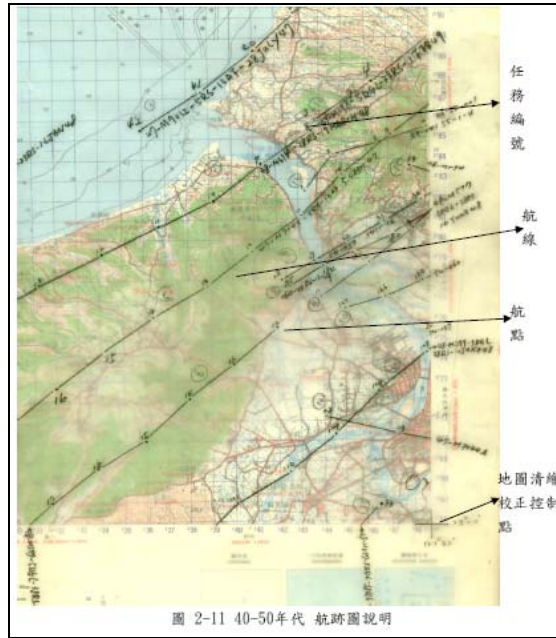


圖 2-11 40-50年代 航跡圖說明

图4.2 1940~1950年代航迹图(江正雄, 2007)

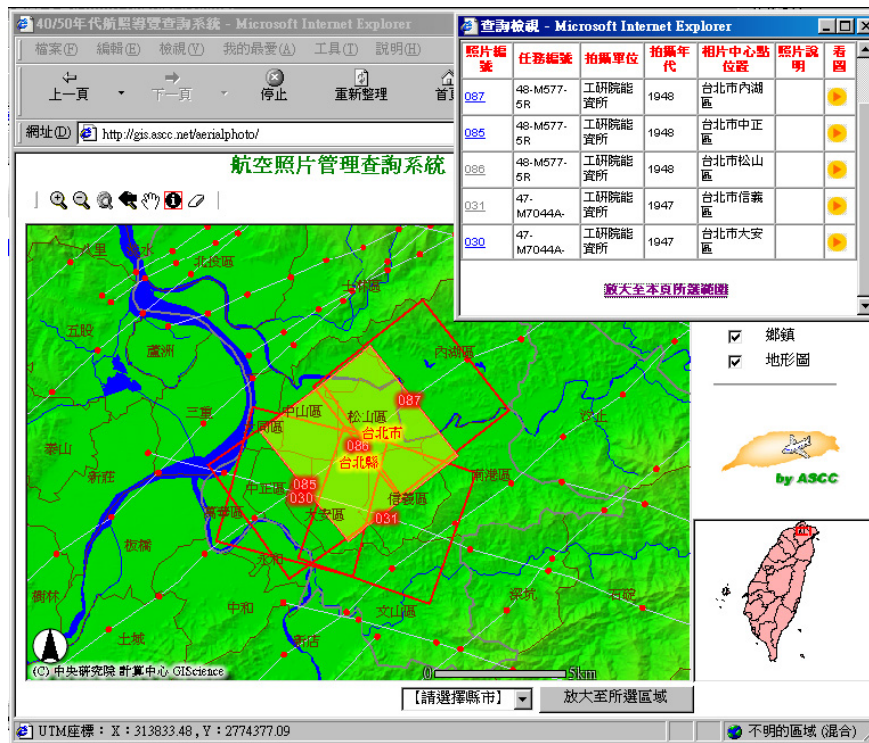


图4.3 航照查询系统

而在成果应用方面，中研院则透过原保管单位所提供之航迹图(图 4.2)或专家判释，建立具航迹图与各航照拍摄范围图框之空间索引查询系统(图 4.3)，也因此目前只要透过该航照查询系统，即可得知历史航照航迹与拍摄位置概略之四角坐标。

5 5 研究内容与流程

本研究主要目标在于建立较高精度之历史航照影像对位流程，并尝试应用于多时期地景变迁之初步研究上。实验材料则选定石门水库集水区大嵙崁流域 1957~1959 年、1973~1975 年两期不具地理坐标之数字化扫描历史航照，对照组则为农航所生产之近年具坐标彩色正射影像。研究内容与流程如下：

5.1 研究范围选取与航照分类整理

本研究选定之石门水库集水区大嵙崁流域，位于东经 $120^{\circ}10'15'' \sim 121^{\circ}23'10''$ ，北纬 $24^{\circ}25'45'' \sim 24^{\circ}51'20''$ 之间，集水面积约 76340 ha，行政区域除东边之一部份属宜兰县大同乡、西端一带属新竹县五峰乡，西北角之极少部份属新竹县关西镇、桃园县大溪镇与龙潭乡外，大部分地区均隶属桃园县复兴乡与新竹县尖石乡。集水区内地形除罗浮西北端为较低缓丘陵地外，大部分为山岳地带，地势起伏介于海拔 135 m(石门水库坝址)至 3,529 m(品田山)之间，全区地形自东南向西北倾斜。集水区内坡度多大于 55%，约占集水区之 60.5%。其内水系发源自雪山山脉，由泰岗溪、白石溪、三光溪、大嵙崁溪汇合而成，流路呈不规则树枝状，总长约 352.63 km(台湾省北区水资源局，1998)。

而透过数值地形模型自动产出集水区边界后，即可于 GIS 平台上对照历史航照属性及航迹图选定拍摄范围符合之历史航照(图 5.1)，其中 1957~1959 年共 79 张，1973-1975 年则有 268 张，而本研究则针对能涵盖集水区大部份范围之数张航照进行实验处理。

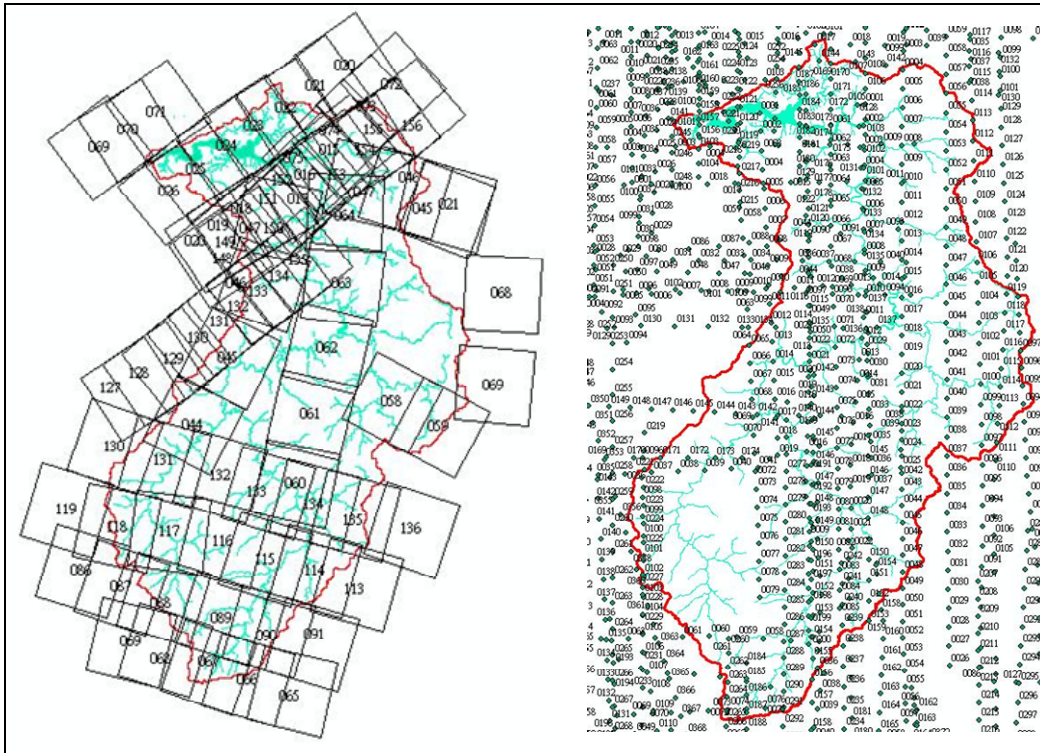


图5.1 石门水库集水区1957~1959年(左)、1973~1975年(右)之航照分布图

5.2 航照特性与研究限制分析

由于过去历史航照拍摄时尚未以 GPS 辅助空中飞行定位,而飞机拍摄时又易受航速、风速、亂流等外力影响而无法获得准确之拍摄参数,故无法以航空测量方式,利用航空照片拍摄之航高与内外方位进行数值地形与正射影像生产,也因此本研究转而采用以控制点辅助影像对位方式,进行历史航照空间参照对位。另一方面,虽本研究所使用之历史航照缺乏定位所需参数,但其属于连续航带形式像片,故仍可利用立体镜观测观测其地形面起伏,并增进地表判释之准确性。

5.3 历史航照空间对位

本研究所使用之历史航照由于受当时航摄飞行姿态与高度、速度变化等因素,以及后续数字化扫描可能产生之偏歪影响,使航照在几何形态上产生(1)比例尺(2)方向(3)形状等畸变差。且由于本研究所选之历史航照多位于具明显三维地形起伏之中高海拔山区,除二维几何校正外,还需消除三维地形起伏所造成之效应,故在进行影像对位必须采用与二维地图不同之控制点选取方式。

而一般处理航照或卫星影像之几何纠正之方法为解析法(Analytic)与橡皮张法(Rubber-sheet Stretching)。解析法需利用飞行航高、飞行姿态(Attitude)等信

息才能进行空间演算，故通常在应用上多采用橡皮伸张法，亦即利用地面控制点來仿真地面特征点与影像上相应点之几何转换关系(吴声杰，2001)，后利用此关系进行历史航照之几何纠正，而其有下列三种方法：

(一)最小平方方法(Least Square Method)

(二)双线性转换法(Bilinear Transformation)

(三)齐次坐标转换法(Homogeneous Coordinates)

其中最小平方方法为利用二阶转换函数进行纠正，航照所产生之空间几何扭曲较小；双线性转换法则利用控制点來推定修正系数，修正后影像可保有原来影像之连续性；而齐次坐标相关转换法则使用行列式进行演算，此法除可修正坐标位移、旋转及比例外，尚可调整影像内比例变化。但上述三种不同坐标转换模式所产生之影像很难区分优劣，故纠正成效主要还是取决于地面控制点选择之准确与否(吴启南与宋国成，1984)。

而地面控制点选取则多以古今不变之明显清晰地表物为佳，例如河川汇流处与弯曲点、道路交叉口，以及特殊地形点等。其分布设定则有四角分布、四边分布、角落群集分布与均匀分布等方式(姚建中，1988)。但本研究实际针对石门水库集水区历史航照进行影像对位之控制点调阅与选取时，发现山区地面控制点找寻不易，而若使用像片基本图上之特征点作为地面控制点，因控制点数量少，故容易造成全幅航照位置大致正确，但其内各子集水区位置却扭曲或偏移之问题。

为有效解决此问题，本研究以不同级序集水区之河川水系、谷系与山棱线作为控制点选取依据，依序进行航照影像对位。采用此法之原因在于历史航照山区之棱线与谷系常因坡向不同，而呈现明显之向光面与背光面(图 5.2)，故在判释上能增加其分辨率；且山棱线与谷系之地形特征点随时间变迁而产生之变化，相对于地表人为构造物与水系变化而言极小。故本研究于集水区边界不变之假设下，以农航所 40 m* 40 m 网格格式数值地形模型为演算材料，透过 Arc/Info Grid 模块中之单流向算法，以生产流向图层与设定集流阈值之方式，撰写程序自动萃取集水区水系，并依据河川级序产出集水区边界与各级序之子集水区范围作为两期历史航照影像对位参考之依据。

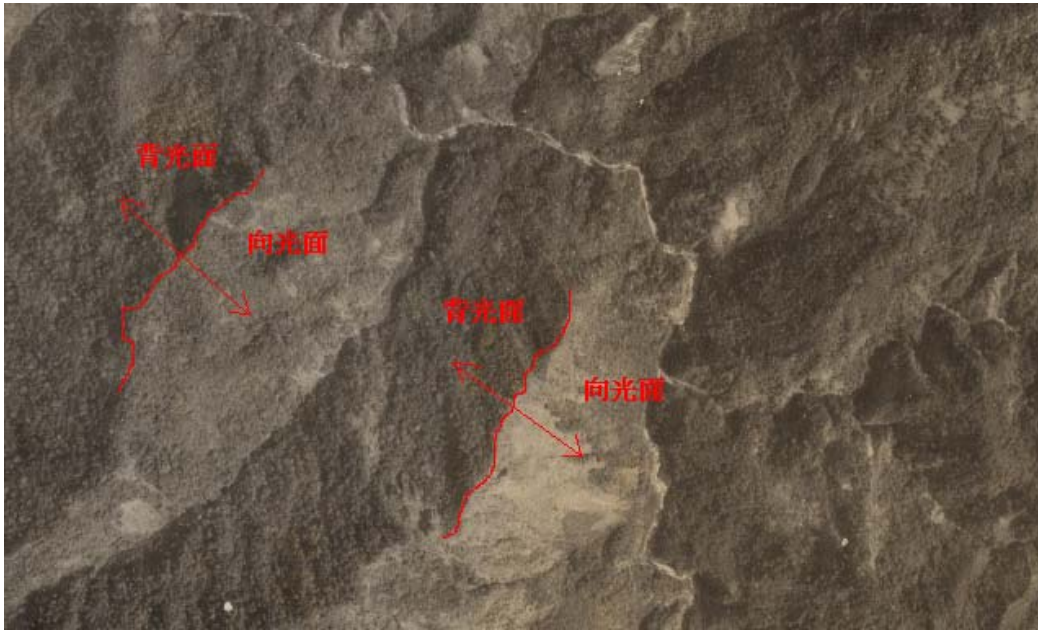


图5.2 黑白航照内所呈现之山区向光面与背光面

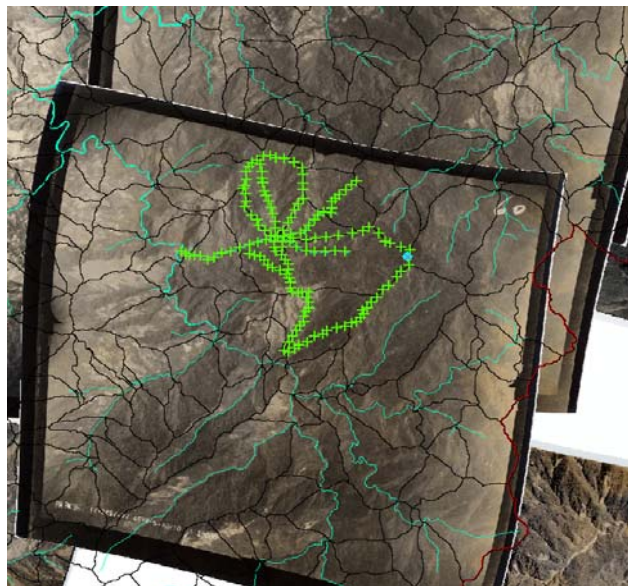


图5.3 以集水区边界与水系为依据之影像对位作业示意图

而在细部操作方面，为增加航照内子集水区位置之影像对位精度，本研究首先使用较高级序之集水区边界对整张航照进行纠正(图 5.4a)，而后依序采用较低级序之子集水区边界进行细部对位(图 5.4b、图 5.4c、图 5.4d)，如此即可弥补子集水区内部控制点不足之问题。最后本研究亦利用农航所 40 m* 40 m 网格式数值地形模型，对各张纠正后之航空照片进行垂直投影，以产出最终之定位航照。

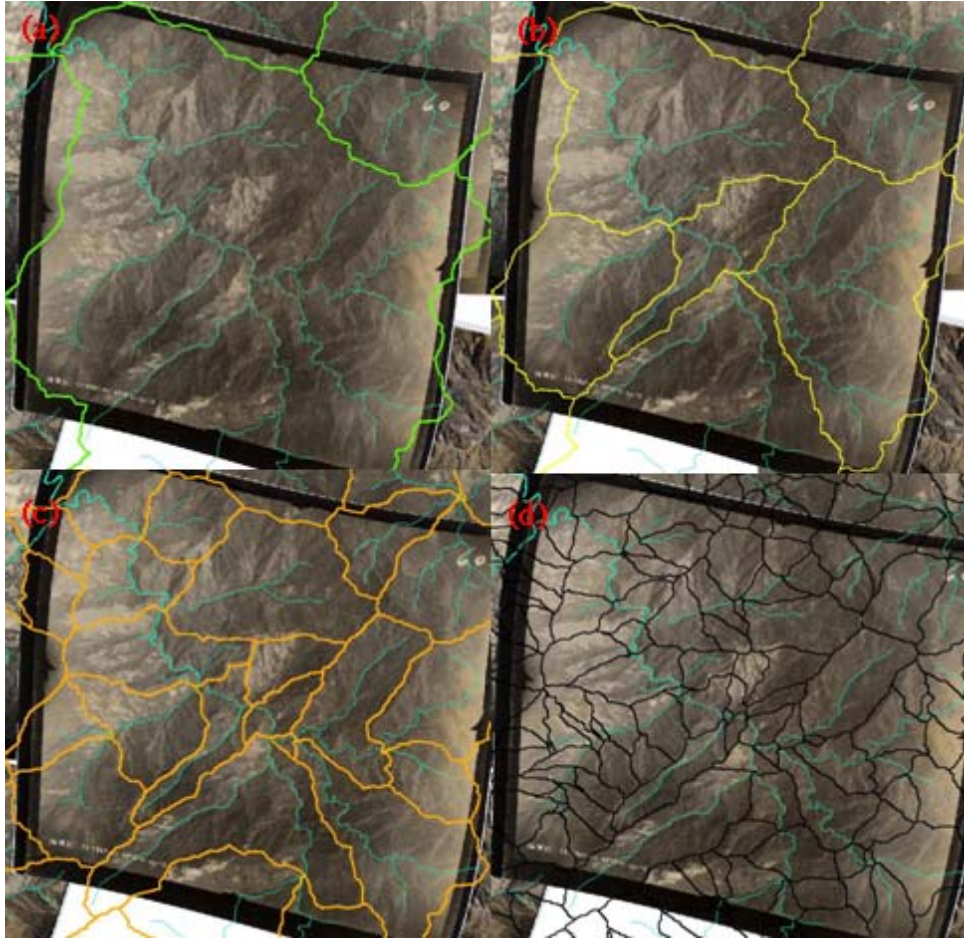


图5.4 使用不同级序子集水区边界与谷系进行航照定位纠正

5.4 地表类型数字化与地景变迁分析

在完成 1957~1959 年与 1973~1975 年两时期石门水库集水区大嵙崁流域之历史航照空间对位后，将多张影像融合即可产出集水区全局之定位航照影像(图 5.5)。由于已就集水区细部进行控制点纠正，并利用数值地形模型垂直投影消除地形误差，故该纠正航照虽无法如空中三角测量所产出之正射影像般达高精度定位，但已能有效于 GIS 平台上套迭多时期航照，并进行定性或半定量之地景变迁分析。

也因此，本研究分别就三个时期航照，选定现今石门水库淹没区，以及近年崩塌灾害最为严重之马里阔丸溪段(图 5.5 黑框处)进行地表类型判释与数字化，以产出简易之地表覆盖分类图(森林地、森林砍伐区、人为垦地、聚落与道路)，后透过文献收集、现场调查与访谈等方式验证数字化判别正确性。

分析焦点方面主要透过地表覆盖分类图，比较石门水库淹没区与马里阔丸溪段于 1957~1959 年、1973~1975 年与 2000~2001 年之人为垦殖范围与聚落分布变化，此将有助于了解山地集水区人为活动拓展与聚落选址特性；另一方面则分析

该区长时期地形地貌与地表覆盖变变迁趋势，并对照人为活动范围说明人为活动对自然环境之影响；最后则透过区域分析或整体分析两不同观点，解释集水区地景变迁之空间关联与因果关系。此流程将有助于还原大嵙崁溪于石门水库兴筑前后之实际变化，亦可呈现水库上游长期之人地关系特性。

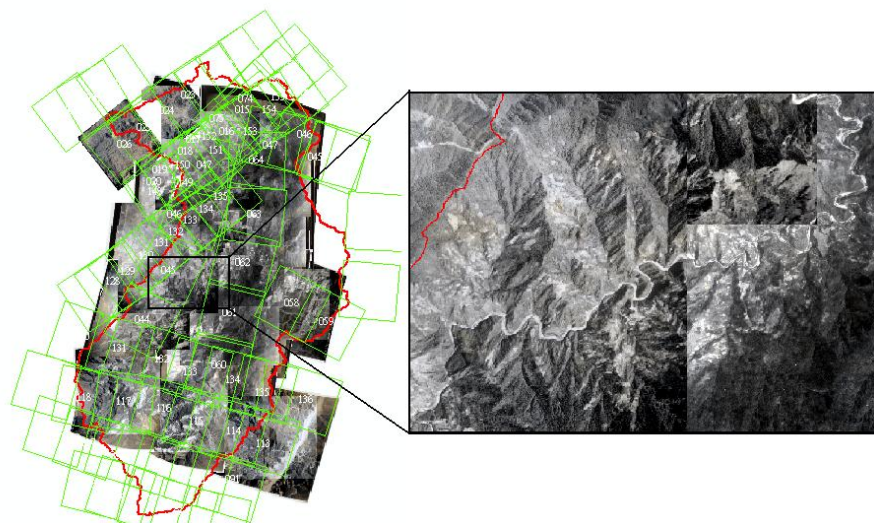


图5.5 将多张定位航照进行融合后之集水区全局航照影像

6 研究结果与讨论

透过历史航照数字化分析，可探讨某地区地景地貌形态与人为活动属性，亦可呈现两者间特有之人地关系，而比较多时期之历史航照信息则可更进一步了解该地人地关系变化之前因后果，并增加研究时间纵深。

而依据本研究针对石门水库淹没区与马里阔丸溪段，所进行之三个时期地表类型数字化成果(森林地、森林砍伐区、人为垦地、聚落与道路)(图 6.1、图 6.2)，可显示石门水库集水区大嵙崁流域因整体地势坡度陡峭，故各时期聚落选址均受地形限制，而多位于坡度较缓且具较厚土壤层之缓坡、河阶、河滩地、沙洲、河埔高地、河流汇流处或曲流堆积坡(图 6.2)，且多呈破碎区块分布，此现象说明聚落分布与周遭地形具密切关系，并符合人类多选取地势平坦且可免水患之高地、取水便利之河岸或盆地边缘、土地肥沃和资源充沛之地或是利于防守的地势等做为聚落寻址之特性(张政亮等，2004)。

在不同时期之聚落分布变迁上，以马里阔丸溪段为例，由 1957~1959 年之历史航照可显示大嵙崁流域当时之聚落房舍密度较低且分布较为分散(图 6.1a)，且各聚落间无明显可由航照判释之宽道路(推测该时期道路多为航照无法观测之森林小径)；但随道路开发密度提升，各聚落间连结性亦大幅增高，聚落内之房

舍逐渐向山区道路两侧聚集延伸，整体而言聚落分布与人为活动影响范围缩小，但道路密度逐年增加，且道路两侧较陡之坡地亦开始产生密集之人为垦殖(图 6.1c)。由于该地大部份属泰雅族传统领域，故此变化趋势亦可呈现泰雅族原住民聚落分布，已由过去之大面积散居型态，逐渐受山区道路开辟之影响而转变为类似汉人聚落之聚集型态。

而石门水库淹没区之部份，可由结果图层显示石门水库大坝上游一带，在 1957~1959 年时期尚可见广大之河阶与扇阶群及其上之村落梯田景象(图 6.2a)。但于 1964 年石门峡一带大坝完成后，原有之河阶与扇阶群已有数个遭淹没(图 6.2b)，范围包括桃园县大溪镇所属之三层、相坪、八结、阿姆坪以及复兴乡所属之竹头角、拉号、水流东、新柑坪、角板山等地，其中面积约 1024 ha 之耕地与民房，都成为水库计划之淹没区(徐薰，1963)，而此计划亦造成原住民 128 户，汉族 288 户，共计 2,870 人之居住地搬迁(石门水库建设委员会，1966)。换言之，自石门水库大坝溯大崙崙溪而上，直至拉号，长约 16.5 km，两岸海拔高度 250 m 以下之聚落与耕地，现今均位于河水面下，由此可显现水库兴建对聚落分布变迁之重大影响。

另一方面，由于石门水库集水区近年遭遇不少水土保持灾害问题，而现今研究多由近年台风降雨空间分布、地质脆弱性、拦砂坝工程与道路开辟等角度切入，鲜少将时间尺度拉长至 50 年前甚至更早之环境状态进行讨论。故本研究除分析人为活动与聚落位置变化外，亦透过历史航照调查该区于 1989 年林务局发布森林禁伐令前之山坡地森林砍伐现象。由 1957-1959 年与 1973~1975 年两期航照与数字化图层可发现，马里阔丸溪段两岸之山坡地于该时期均曾遭大规模砍伐，其中又以三光至马望僧侣山之山坡、马美旧社、抬耀溪、石磊溪与泰平溪集水区等地砍伐密度最高，原分布于集水区边坡之原始(天然)林地受大规模皆伐影响而呈现半裸露之状态，且当时主要道路分布与大规模森林砍伐区域具显著空间关联(图 6.1a)，此显示 1957~1959 年马里阔丸溪两岸环境受林木伐採等经济活动影响甚深。而 1973~1975 年之森林砍伐程度已较 1957~1959 年减少许多，许多大规模伐採区域之林木已逐渐复育，但道路两侧之边坡伐採程度依然严重，与 2001 年发布森林禁伐令后之地表覆盖状态差异极大。此大规模林木伐採是否为现今石门水库集水区水土保持问题之远因颇值得后续深入探讨。

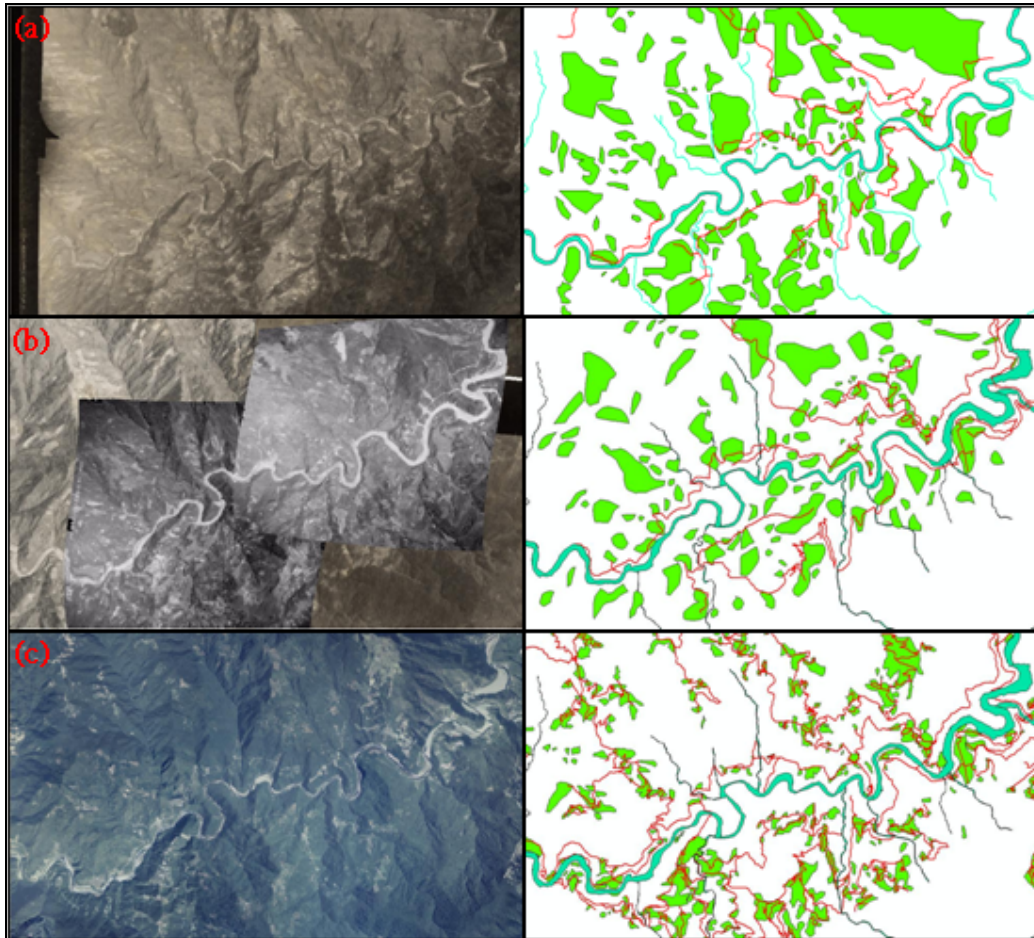


图6.1 马里阔丸溪段三个时期(a) 1957~1959年、(b) 1973~1975年、(c) 2000~ 2001年之航照与土地覆盖数字化档(白色：森林地；绿色：森林砍伐与人为屯垦区域；红色：道路；蓝色：水系)

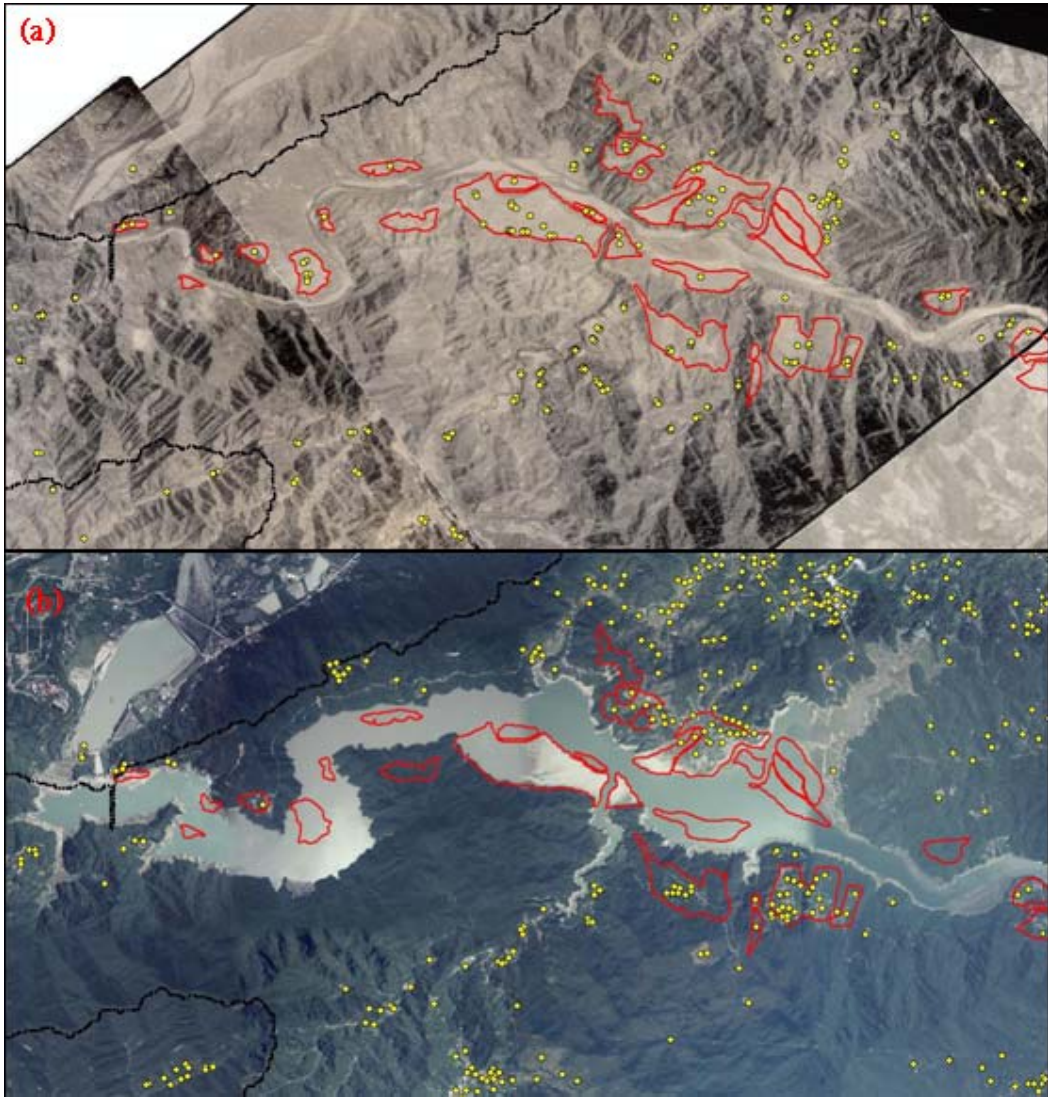


图6.2 石门水库淹没区两时期(a) 1957~1959年、(b) 2000~2001年之航照、河阶与扇阶(红线标示处)与聚落房舍位置(黄点)数字化档

7 结论

本研究尝试以不同级序集水区之河川水系、谷系与山棱线作为控制点选取依据，依序针对无完整航迹图、航摄信息与像机参数之历史航照进行影像对位，以提升历史航照于 GIS 平台上之使用价值与对位精度，而后更进一步以定位历史航照为题材，分析长时期之水库集水区地景变迁。

而此流程证实数字化历史航照不仅具完善保存数据与流通便利之功能，在空间坐标定位后亦有高度研究参考价值。未来可进一步结合历史影像数据库进行系统性时空变迁分析，相信将能大幅拓展相关研究之深度与广度。

参考文献

- 台湾省北区水资源局. 1998. 石门水库集水区崩塌地与土地利用航测调查计划整体报告书.台湾省北区水资源局
- 江正雄. 2007. 开放式地理平台于历史航照空间标记之研究. 逢甲大学土地管理所硕士论文
- 吴启南、宋国成. 1984. 卫星影像与地形资料之套合, 航空测量及遥感探测 14: 54-69
- 吴声杰. 2001. 应用几何校正法辅助无人载具空拍影像从事调查分析之研究.国立中兴大学水土保持学系硕士论文
- 张政亮、邓国雄、吴健兰. 2004. 台北地区汉人聚落拓垦与地形之相关研究.台北: 台湾师范大学地理研究报告. 40: 67-90
- 姚建中. 1988. 数字式 SPOT 影像定位分析. 国立成功大学航空测量研究所硕士论文
- 徐鼐. 1963. 石门水库. 桃园: 石门水库建设委员会