

区域土壤侵蚀遥感抽样调查方法

朱梦阳¹, 杨勤科^{1,2}, 王春梅¹, 张晓萍², 刘宝元^{2,3},
魏欣³, 庞国伟¹, 李玉茹¹, 土祥¹

(1.西北大学城市与环境学院, 西安 710127;

2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 3.北京师范大学地理学院, 北京 100875)

摘要: 土壤侵蚀是全球性环境问题, 土壤侵蚀调查是水土保持规划和生态文明建设的科学基础。为了完善土壤侵蚀抽样调查方法, 快速、精准地估算土壤侵蚀实际速率, 对基于高分辨率遥感影像进行目视解译, 提取高精度土地利用和水土保持措施信息的方法进行了研究。基于现代地理信息科学, 充分利用虚拟地球及其提供的公开高分辨率遥感数据资源, 考虑土壤侵蚀及其治理的时空特征, 采用分层不等概系统空间抽样方法布设抽样单元, 通过对公开高分辨率遥感影像的目视解译, 完成泛第三极地区土地利用和水保措施的遥感抽样调查。研究实现了2万个抽样调查单元的解译, 提取了土地利用和水土保持措施信息; 基于CSLE模型完成了典型抽样调查单元的土壤流失速率计算, 并对解译结果进行了精度和实用性分析。结果表明: 基于公开高分辨率遥感影像、利用分层不等概系统空间抽样方法, 可快速提取土地利用和水土保持措施信息, 完成区域土壤侵蚀抽样调查。

关键词: 泛第三极; 土地利用; 水保措施; 遥感抽样调查

中图分类号: S159.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0064-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.010

Sampling Survey Method of Regional Soil Erosion Based on Remote Sensing Images

ZHU Mengyang¹, YANG Qinke^{1,2}, WANG Chunmei¹, ZHANG Xiaoping²,
LIU Baoyuan^{2,3}, WEI Xin³, PANG Guowei¹, LI Yuru¹, TU Xiang¹

(1.College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academic Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3.College of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Soil erosion is one of server global environmental problems, soil erosion survey is the scientific basis for soil and water conservation. In order to improve the methods applied in soil erosion sampling survey, and to calculate soil erosion rates accurately and rapidly, the interpretation methods for land use and soil conservation measures were studied based on the high spatial resolution remote sensing images. The sampling design was developed using a stratified variable probability systematic sampling method in which spatiotemporal characteristics of soil erosion and conservation were derived based on the GISci, virtual global tool, and finer resolution images accessible in Google Earth. Land use and soil conservation measures in the sampling units were interpreted from the open access, high-resolution remote sensing images using visual interpretation. More than 20 thousand sampling units were interpreted, then the information on the land use and soil conservation measures was extracted; the soil erosion rate was calculated using CSLE for some of the units, and the accuracy and applicability of the interpretation results were analyzed. The results showed that this sampling survey method could be used for the soil erosion survey in the very large region. The information about land use and soil conservation measures could be interpreted based on open access, fine resolution remote sensing images, and the stratified variable probability systematic sampling method.

Keywords: the Pan-Third Pole Area; land use; soil conservation measures; remote sensing, variable probability sampling

收稿日期: 2019-03-27

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040202)

第一作者: 朱梦阳(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事区域土壤侵蚀调查与定量评价研究。E-mail: myangyang@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 杨勤科(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形分析研究。E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

泛第三极是全球环境与气候变化的敏感区和功能脆弱区^[1],受全球变化和人类活动的双重作用,泛第三极地区土壤侵蚀有明显的增加趋势^[2-4]。但是从总体上看,泛第三极地区土壤侵蚀观测数据、调查制图数据匮乏,不能满足该地区的水土保持和生态环境建设与绿色“一带一路”倡议实施的需求。开展泛第三极地区土壤侵蚀定量评价,对于该地区各国进行土壤流失治理、保证一带一路倡议实施具有十分重要的意义。

土壤侵蚀是全球性的生态环境问题之一^[5],土壤侵蚀的治理,必须以土壤侵蚀定量评价制图为基础^[6-7]。区域土壤侵蚀调查制图可归纳为2类方法,遥感制图法和抽样调查法。第1种方法是一种区域普查方法,该方法将地图制图、遥感解译、GIS技术和土壤侵蚀模型结合,完成对调查区域的评价和制图。在国家和大洲尺度上的代表性研究先后有朱显谟等^[8]、Lu等^[9]、Panagos等^[10]的研究;全球尺度的代表性研究有Yang等^[11]和Borrelli等^[12]的研究。这种方法的成果可用于宏观分析土壤侵蚀及其影响因素的空间变异,但是由于分辨率相对较粗、水保措施考虑不全或者没有考虑,依旧存在土壤侵蚀潜在危险性,因此对于评价水土保持效益、制定水土保持规划措施意义有限。第2种方法是一种抽样调查方法,该方法由美国农业部在自然资源调查中逐渐发展而成(National Resources Inventory,以下简称“NRI”)^[13-15]。中国第一次全国水利普查(Water Resources Inventory, WRI),采用了分层不等概系统空间抽样方式,在全国布设调查单元,采用以野外调查为主的技术方法采集土地利用、水土保持措施等数据,基于CSLE模型计算土壤侵蚀速率,并且采用地统计学方法编制土壤侵蚀速率图^[16-17]。抽样调查方法所获得的土地利用、水保措施和计算得到的土壤侵蚀速率,更加接近地表实际,因此可为水土保持规划、人为因素影响和土壤侵蚀动态分析提供支撑^[17]。WRI由于采用了以野外调查为主的技术方法,工作量比较大,在大区域土壤侵蚀调查中推广应用受到限制。

随着遥感技术的发展、高分遥感数据的积累和众源地理大数据方法的应用,空间信息学科发展到了可以实时全景采集地表信息的阶段^[18-19]。基于高分遥感影像的虚拟地球(如Google Earth)及其提供的公开高分数据已覆盖全球,并被广泛应用于地学研究^[19]。这些使基于高分影像解译进行土壤侵蚀抽样调查成为可能。

本文以泛第三极为研究区,从抽样单元布设、抽样单元解译和抽样单元解译结果分析3个方面,对泛第三极地区土壤侵蚀抽样调查中土地利用和水土保持措施提取方法予以介绍(以下简称“遥感抽样法”),

以期完善现有土壤侵蚀抽样调查方法,发展大区域土壤侵蚀快速调查制图技术体系。

1 研究方法

1.1 研究区域简介

泛第三极地区涵盖青藏高原、帕米尔、兴都库什、伊朗高原、高加索、喀尔巴阡等山脉,包含中国、尼泊尔、印度、不丹、巴基斯坦、阿富汗、孟加拉国、缅甸、斯里兰卡、哈萨克斯坦、土库曼斯坦、伊朗等65个国家(图1)^[1]。据估算,该地区面积5 145.72万km²,占全球陆地面积的34.95%。由于该区域范围比较广,迫切需要发展基于遥感的抽样调查方法,加快数据采集效率。

1.2 数据基础

数据可分为基本数据、辅助数据和参考数据3个层次。(1)基本数据:本次抽样调查单元遥感解译以2017—2018年Google Earth影像为数据基础。经调查,在泛第三极地区70%面积有高分辨率影像,27%的面积仅有中等分辨率影像,其余3%为裸土、水域或冰川,地表覆盖单一,无需细节判读(图1);(2)辅助数据:辅助数据指间接支持抽样调查单元遥感解译的地理数据,包括全球范围1弧秒分辨率SRTM(<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>)和全球30m分辨率土地覆盖图(GLC30)^[20];(3)参考数据:为了获取泛第三极地区基本地理背景知识,解译过程中参考了《世界地理地图集》^[21]以及全球基础地理要素图。

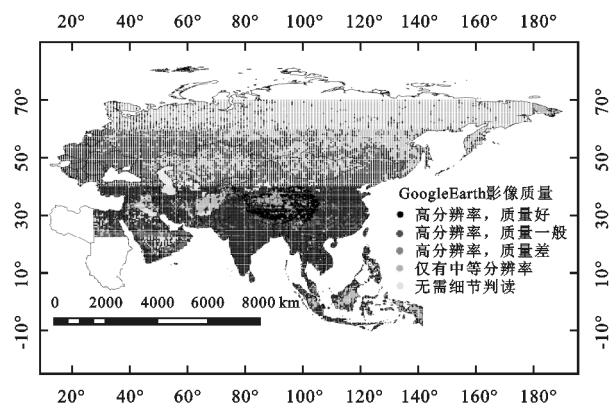


图1 泛第三极国家位置以及抽样单元影像质量

1.3 抽样单元布设方法

土壤侵蚀抽样调查的单元,是一个具有固定位置、有一定面积、可表现土壤侵蚀基本特征、在土壤侵蚀因子(特别是水土保持措施)方面表现出空间异质性的微小地理区域。根据WRI方法,抽样调查单元的基本形状是一个在地面或高分影像上可明确辨识的小流域,面积可规定为0.2~3.0 km²(没有高分影像时稍大)。抽样单元布设,包括抽样单元的定位(点位置)、抽样单元形状和范围的确定(面定位)2个方面。

1.3.1 抽样单元定位 遥感抽样调查单元(remotely sensed sampling unit, RSSU)布设采用了WRI方法,即分层不等概系统空间抽样^[16-17]。样点只布设在

75°N—15°S, 10°—180°E 范围内,而在纬度 70°以上不布设样点。所有抽样调查单元分为基本单元和加密单元。

基本单元的布设:60°—70°N 范围内,按照 0.5 纬度×1 经度布设样点;40°—60°N 范围内,按照 0.5 纬度×0.75 经度布设样点;40°N 以南范围内,按照 0.5 纬度×0.5 经度布设样点。单元间距在南北方向和东西方向大约均为 55 km,基本调查单元 20 880 个。

加密单元布设:在中国西部布设加密单元。其中青藏高原范围内,按照 0.25 纬度×0.25 经度(当地约 23 km)布设样点;青藏高原周边的新疆、青海、甘肃、四川、云南等地将用第一次全国水利普查水土保持普查中布设的调查单元。加密抽样单元 8 771 个。

抽样调查单元图:抽样调查单元布设结果,用一个 GIS 专题层来记录,每个单元为 1 个点,每个单元记录了位置、编号等。

1.3.2 单元形状和范围确定 要想完成抽样调查单元的遥感解译,必须完成抽样单元的面定位。定位的技术环节包括:(1)数据准备,以每个抽样单元点为准,切割出其右上方 5 km×5 km 范围(无高分影像范围为 10 km×10 km)的 1 弧秒分辨率 SRTM 和 30 m 分辨率土地覆盖数据,然后基于 SRTM 计算坡度、划分小流域单

元,并将该单元的 SRTM、坡度、小流域划分结果和 30 m 分辨率土地覆盖数据链接于抽样单元 ID;(2)解译模板文件准备,在 ArcGIS 下生成解译单元模板文件(1 个空的面要素和线要素数字矢量图),对属性数据库作出严格规定。面要素层属性表包括土地利用、生物措施、工程措施、影像分辨率、影像日期和影像质量等字段;线要素层属性表包括土地利用代码、道路宽度和类型。(3)单元形状和位置确定,利用自编的程序,一键调入每个抽样单元 ID 对应的数据和模板文件,根据解译单元点右上方地形特征(如平均坡度)选择小流域或矩形区域为解译的空间单元。小流域在事先划分的小流域单元图上选择,选择原则是靠近抽样调查单元点、流域完整并接近梨形、避免域间流域。

1.4 解译内容与方法

在 91 卫图助手快速定位至调查单元(点),根据地形特征(参考 DEM、坡度)确定调查范围为流域还是矩形区域,下载对应矩形区域范围或小流域外接矩形范围的影像。利用“基础数据快速加载辅助工具”快速调用 Geodatabase 库中的模板文件及解译辅助基础数据,在 ArcMap 下进行目视解译。解译结果经过 2 级和 3 层质量检查,合格的数据产品(RS—SU)提交入库(图 2)。解译与分析工作于 2018 年 4—12 月完成。

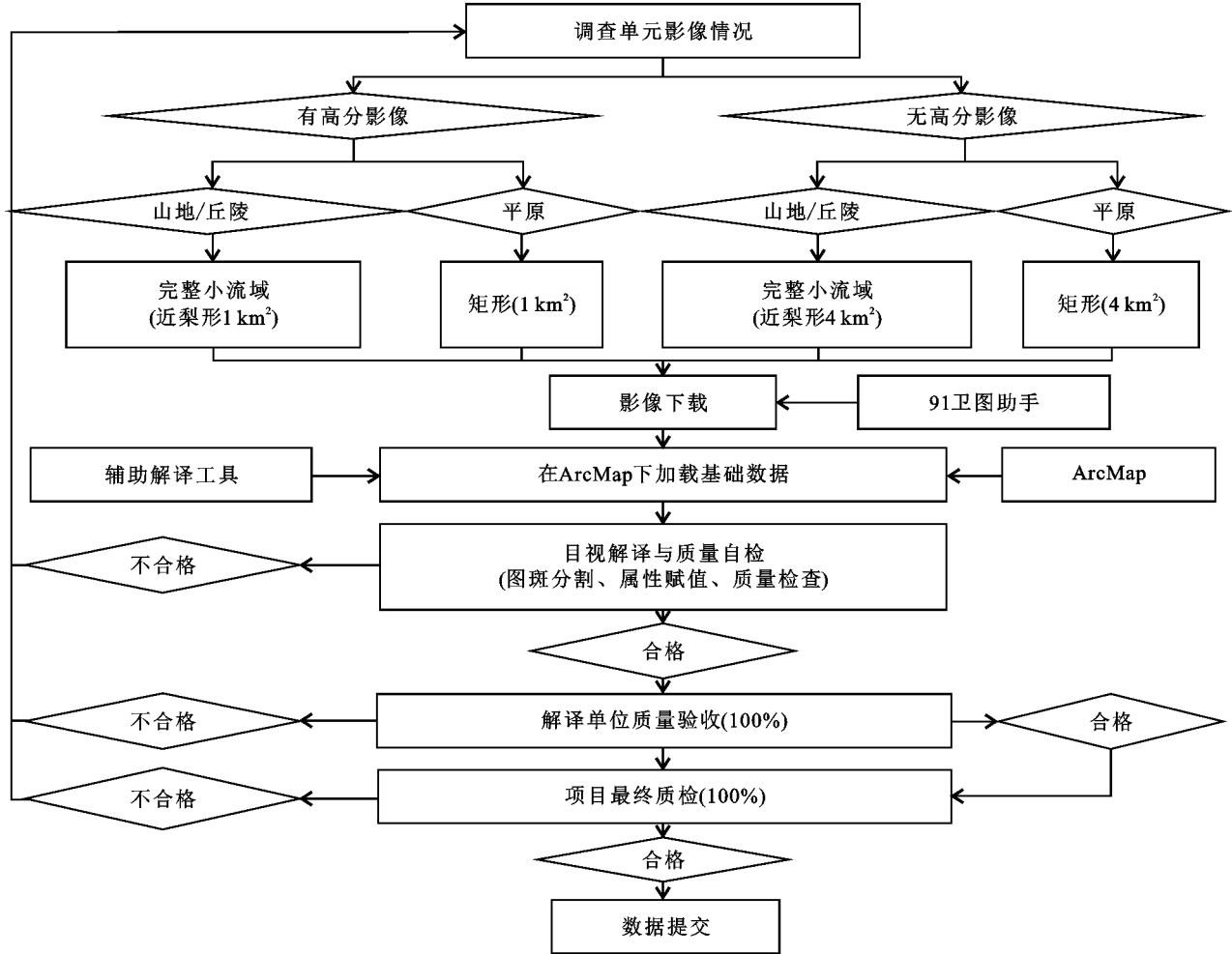


图 2 土地利用和水保措施遥感解译技术路线

1.4.1 软硬件环境 泛第三极土壤侵蚀抽样调查的遥感解译,用到的软件主要有 ArcGIS、91 卫图助手、Google Earth 和奥维互动地图等。为了加快进度并保证质量,还开发了一些辅助工具。

(1)通用软件:ArcGIS、91 卫图助手、Google Earth 和奥维互动地图。ArcGIS 主要用于解译、数据管理和后期计算;91 卫图助手和 Google Earth 用于影像下载;奥维互动地图用于野外验证。

(2)辅助工具:以 ArcGIS 为基础平台,通过 Python 语言调用 ArcPy 扩展库,开发相应的辅助工具,实现对解译单元矩形范围小区域生成、调查单元面和线模板生成、数据快速加载工具条、数据检查的工作的自动化等。

1.4.2 解译内容与解译标志 本研究的解译内容包括土地利用和水土保持措施 2 个方面。其中水土保持措施包括生物措施、工程措施和耕作措施。考虑到遥感解译的限制,耕作措施暂未考虑,但是在野外校核中要求记录。土地利用和水土保持措施分类系统直接利用了水利普查的分类方案^[22]。

遥感图像的解译标志是指能够反映和表现目标地物信息的各种影像特征,包括影像的色彩、形状、纹理和结构等^[23]。在分析了泛第三极地区各地土地利用和水土保持措施特征以后,参考水土流失普查动态监测与公告^[24]项目的规定,建立本次遥感解译的标志。

1.4.3 解译技术方法 利用 ArcGIS 10.2 软件在 ArcCatalog 下创建数据库,调用已经建好的模板文件,在 ArcMap 下基于下载的影像进行人工目视解译。

(1)参考数据及模板文件调用:通过“数据快速加载辅助工具”一键调用对应单元所需的基础数据及辅助数据。根据前述方法选择好抽样单元范围和形状后,调用面和线要素模板文件。

(2)影像下载:加载从 91 卫图助手中下载的对应该范围的 Google Earth 影像。要求下载近期(2017—2018 年)、质量好的影像,高山高寒区尽量选择夏季影像。

(3)土地利用、水土保持措施解译:在 ArcMap 软件下目视解译分割图斑,同时给面要素和线要素模板文件属性表中赋属性项属属性(相当于野外调查的填表)。如调查单元内存在宽度小于 20 m 的道路和淤地坝,则按线状要素勾绘在调查单元线状地物矢量图中,并赋土地利用代码、宽度、类型 3 个属性。

(4)最小图斑标准:根据水利普查实践,结合高分影像特征,建设用地、水域及水利设施用地、交通运输用地、其他土地为 400 m²,耕地、园地为 600 m²,林地、草地为 2 500 m²,线状地物(道路、河流)宽度大于 20 m。

1.4.4 质量控制方法 质量控制内容:图像上可以

辨识的地物是否勾绘成面或线要素、已勾绘成面或线要素的边界与实际是否吻合、每个面要素或线要素在属性表中是否有完整的属性项。质量控制采用分级和分层控制方法。

2 级控制:2 级控制指解译工作小组和解译工作领导小组 2 个级别的质量控制。3 层检查:包括(1)解译工作小组 10%组间相互抽查,若发现问题则需 100%再次自查并修正相应问题;(2)解译工作小组质检员 100%检查,发现质量问题,质检员直接对其进行修正并提交给解译工作领导小组;(3)解译工作领导小组 100%检查,由解译工作领导小组抽调各解译工作小组的技术骨干成立项目检查小组,对解译工作小组提交的解译结果进行最终的检查,并对存在的问题做出修改,如果问题太多(>30%)则返回解译工作小组修改并完成前 2 个检查。

数据质检过程中可采用“数据检查支持工具”进行待检数据的基础数据快速加载、问题数据的快速删除等操作,以提高工作效率。

2 结果与分析

2.1 宏观分析

根据泛第三极地区地理特征的空间分异差异,在研究区布设 11 个大样方,分别代表东北漫岗地区、中国西北黄土丘陵地区、中国南方红壤丘陵地区、中国青海地区、中国西藏地区、中国新疆地区、南亚地区、中亚大湖地区、中东地区、东欧地区和俄罗斯地区。每个样方包含了 100 个抽样单元所覆盖的地区。在每个样方,针对土地利用一级类计算 RS—SU 与 GLC30 数据^[20]的直方图相似度指数^[25],分析 RS—SU 数据结果与 GLC30 数据的相似性以及 2 种数据集之间差异的主要原因。

对 11 个样方上土地利用一级类结果计算直方图相似度指数,此处采用直方图的交(HS)来表示两种数据集的相似性,其取值范围为 0~1,HS 值越大,说明两种数据集的相似性越高。计算结果(图 3)表明,中国西北黄土丘陵、东北漫岗、青海、新疆、中亚大湖、中东、东欧以及俄罗斯地区 2 种数据集的直方图相似度指数均大于 0.80,因此,这些地区的抽样解译结果与 GLC30 数据具有极高的相似性。中国南方红壤丘陵以及南亚地区的相似度指数值分别为 0.78,0.75,抽样解译结果基本符合 GLC30 数据的土地利用结构。西藏地区的相似度指数值仅为 0.31,解译结果与 GLC30 数据的差别较大。

为了说明 2 种数据集在各个土地利用类型方面的差异,对各地物类型计算 2 种数据集之间的差值绝对值

和。差值绝对值和越大,说明某土地利用类型在 2 种数据集之间的差异越大。各地物类型的计算结果见图 4。

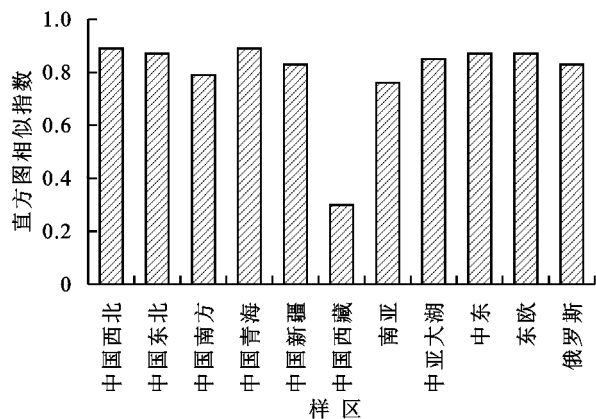


图3 各样区2种数据集相似度

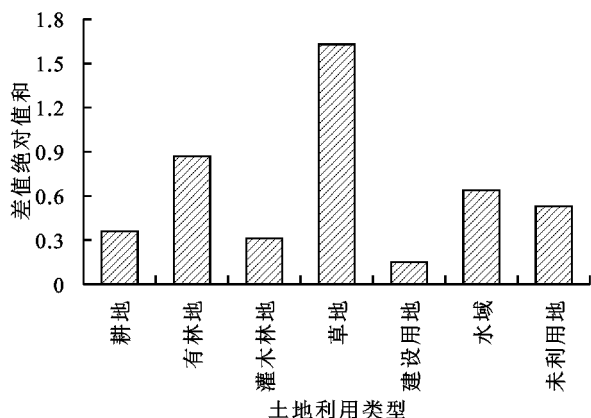


图4 各地物类型2种数据集相似度

总体来说,RS—SU 数据结果与 GLC30 数据土地利用类型的差异主要源于草地、有林地、水域和未利用土地,耕地、灌木林以及建设用地在 2 种数据集之间具有较高的一致性。对于中国西北黄土丘陵地区、青海地区、新疆地区以及中亚大湖地区,主要是存在草地以及未利用土地混分的问题,解译过程中根据实际影像的特征,结合先验知识以及部分野外校检,对该类地物进行明确的解译判断。西藏地区解译结果和 GLC30 数据对比,差异主要在灌木林、草地、水域和未利用土地,特别是水域百分比相差 51.7%,GLC30 数据所给水域主要包含冰川积雪,但通过历史影像判断多数并非永久积雪,并且经过野外校检,该地区更多是草地类型。对于中国南方红壤地区和南亚地区,差异主要是耕地和有林地,原因在于 GLC30 数据没有细分园地这种地物类型,并且由于分辨率较粗,地物特征难以判别,易造成耕地和林地的混分。中东、东欧以及俄罗斯地区的差异主要在于有林地、灌木林以及草地,该类问题在抽样解译过程中严格按照地物纹理特征以及树木郁闭度进行判断并进行详细的区分,因此,所得结果比 GLC30 数据更加准确。

综上,RS—SU 数据结果与 GLC30 数据有较高

的相似性,RS—SU 数据对于区域土地利用的宏观结构特征具有很好的代表性表达。

2.2 微观分析

在西藏南部和泰国中北部布设典型断面,在西藏和泰国断面上的 9,18 个典型单元上进行结果验证。基于验证和修改的解译结果,计算 Kappa 系数和精确度,完成精度评价;然后检查其他未进行野外验证的调查单元,如有相同错误,进行进一步修改。

西藏地区以实地无人机影像解译结果作为基准,计算室内解译结果的 Kappa 系数和精确度。由图 5 可知,对于百林村、才乌、茶巴朗村、嘎啦村、马乡、娘盖村、日多乡、斯希和扎西岗村的 9 个解译单元,Kappa 系数平均值为 0.70,平均精确度为 80.1%,因此,抽样单元的解译结果与实际土地利用类型基本保持一致且精度较高。才乌村、嘎啦村的解译精确度分别达到 93.8% 和 91.8%,Kappa 系数均介于 0.70~0.90,解译结果与验证结果具有高度一致性。斯希村解译精度为 89.4%,但 Kappa 值为 0.46,原因是该单元解译过程存在草地、灌木与裸地的混分。

泰国地区的精度验证以野外调查土地利用解译结果为基准,18 个调查单元计算结果(图 5)表明,除 2 号单元,其他 17 个小流域的 Kappa 系数均大于 0.50,平均精确度达到 85.8%,解译结果与野外验证结果具有较高一致性。该地区解译存在的问题主要是实地种植的荔枝、咖啡等的幼苗,从影像上难以分辨,土地利用类型易误判为草地或耕地。

经野外验证,西藏地区和泰国地区室内抽样遥感解译的结果与实际土地利用类型基本保持一致,精确度均达到 80% 以上,结果精度较高。所有存在的混分问题都在后期工作中得到了系统纠正。

2.3 解译结果的适用性分析

基于抽样调查解译结果,采用区域土壤侵蚀因子等数据产品(降雨侵蚀力因子 R ,土壤可蚀性因子 K ,坡度坡长因子 LS ,植被覆盖度 FVC 和非光合植被覆盖度),参照中国水力侵蚀普查的方法^[16],用中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)计算抽样调查单元的土壤流失速率($t/(km^2 \cdot a)$)。典型单元计算结果(图 6)表明:(1)计算结果是 1 个小流域(或者矩形小区域)土壤流失模数图,可以反映土壤侵蚀的局地空间变异性;(2)潜在土壤侵蚀(或者危险性,即 $RKLSB$)与真实的土壤侵蚀速率($RKLSBET$)之间有算法明显的差异。可见,基于中低分辨率的遥感制图结果,基本上只能反映土壤侵蚀的危险性^[11-12],而基于抽样解译单元计算的土壤流失速率则更加接近真

实的土壤流失^[17]; (3)图中显示的几个样区,土壤侵

蚀强度与已有研究^[3,26]报道的基本一致。

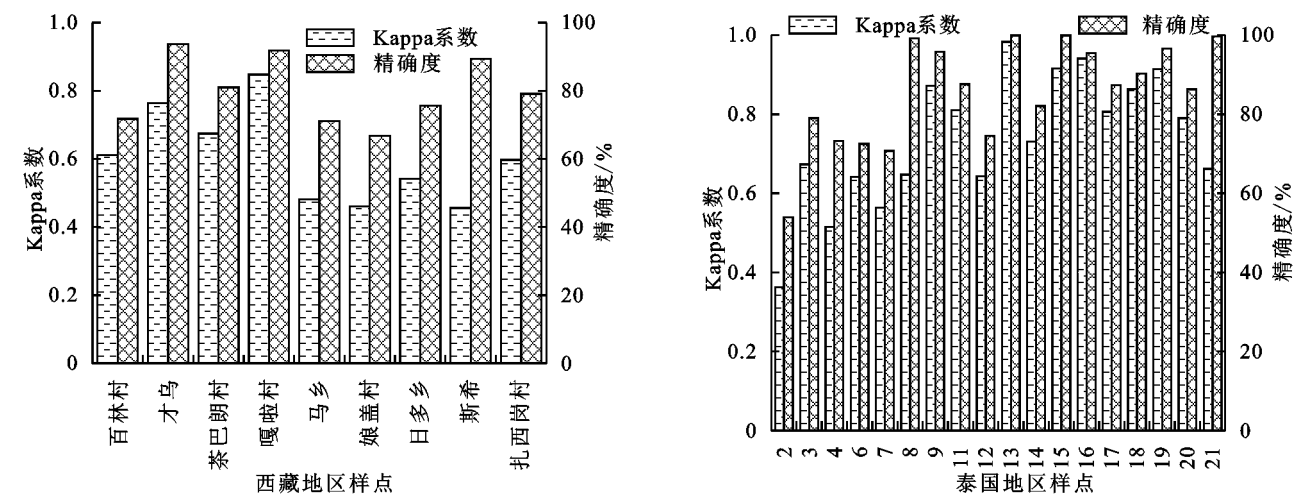
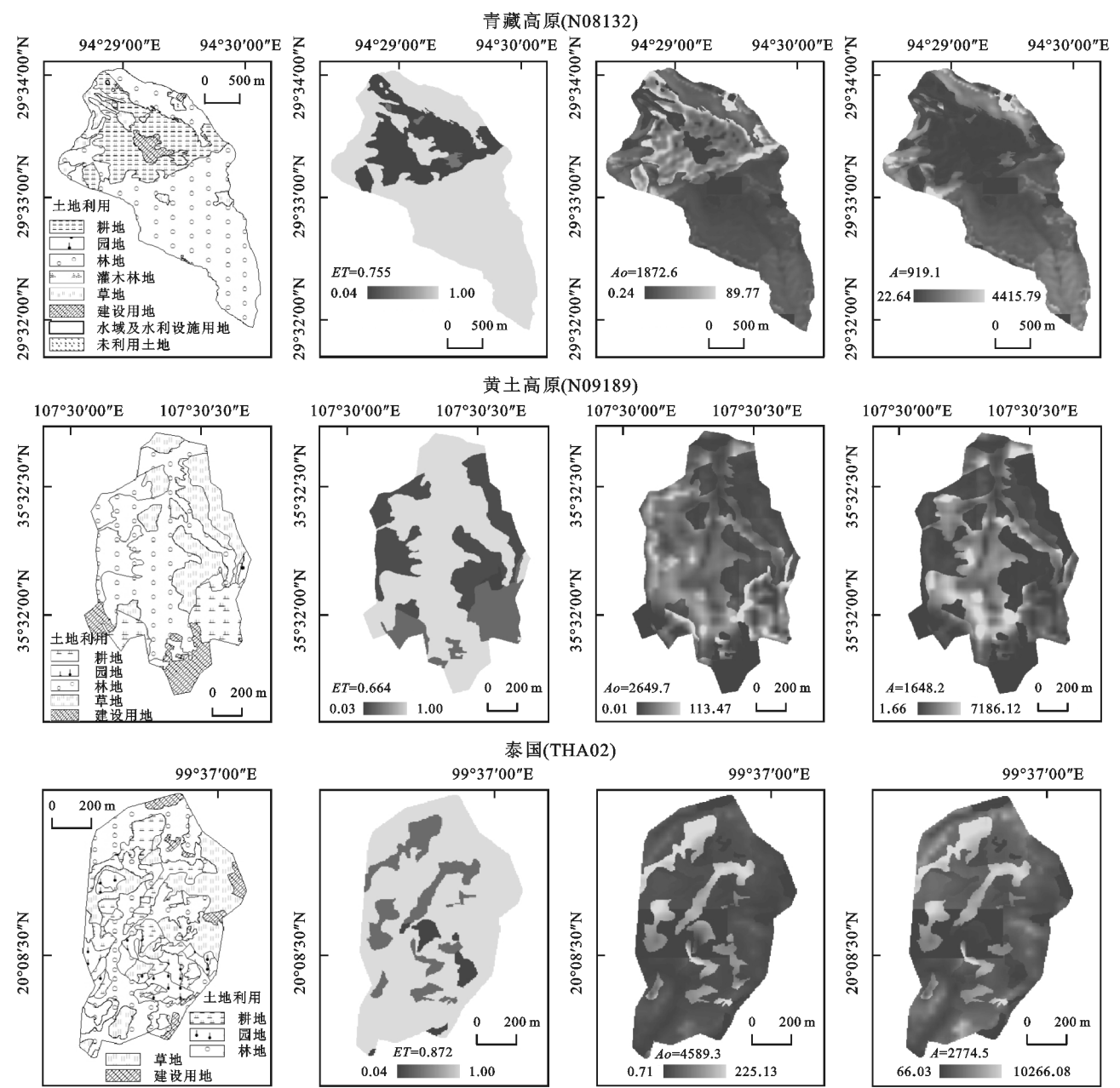


图5 野外验证各样点 Kappa 系数及精确度



注:ET、A_o和A 分别表示水土保持工程和耕作措施因子、潜在土壤流失模数(A_o=RKLSB)和土壤流失模数(A=RKLSBET)。

图6 典型单元土壤流失速率计算结果

3 讨论

(1)“泛三极抽样法”与相关方法的对比:NRI 对于 PSU 的调查,自 2007 年以来已基本上全部利用高分辨率航片解译方法^[14-15];WRI 采用了以野外作业为主的方法^[16]。NRI 对土壤流失速率的计算只针对随机抽样点(其实是 1 个坡面)进行;WRI 和“泛三极抽样法”则针对 1 个微小的区域展开(类似于“美国抽样法”中的 PSU);WRI 中土地利用、水土保持措施等信息均为现场调绘并填写相应表格^[16];“泛三极抽样法”将解译的图斑属性(土地利用和水土保持措施 2 个方面)直接输入属性表。可见,“泛三极抽样法”是 WRI 的延伸,也是 WRI 和 NRI 的集成,此方法有望形成大区域乃至“全球抽样法”。

(2)解译精度与质量控制:野外验证结果初步表明,“泛三极抽样法”的判对率,在西藏和泰国地区分别为 80.1%和 85.8%。这个精度与 WRI 水土流失动态监测遥感解译的精度(64%~91%^[27]),面积加权平均为 76.86%)相当。2 种方法中,园地和灌木林地 2 个类型精度也都相对较低,这也与“泛三极抽样法”的解译结果和 30 m 分辨率土地覆盖比较结果相似。

(3)抽样调查的数据源与自动化:“泛三极抽样法”以 Google Earth 下载的 0.5 m 分辨率影像作为基础信息源,该影像基本为 Quickbird 影像,图像纹理结构清晰,可以满足人工目视解译的需求。正在开展的全国水土流失动态监测与公告项目,采用高分 1 号和资源 3 号数据作为数据源^[27]。相比之下,Google Earth 影像分辨率更细,对于水土保持措施的分辨能力更好;但是能下载到的只是图片,不能做图像处理,也存在一些变形需要纠正。下一步的发展方向必须是基于高分遥感影像数据,利用自动分类方法,实现大区域土地利用和水土保持措施的批量快速提取。为此需尝试引入大数据方法,如众源数据采集方法,降低成本的同时获取现势性强且信息量丰富的数据。

4 结论

(1)基于公开高分遥感影像和目视判读的方法,可快速完成区域土壤侵蚀抽样调查。调查方法主要包括抽样单元样点布设、单元位置和形状确定、土地利用和水土保持措施解译以及质量控制等。该方法充分利用了虚拟地球及其提供的公开高分辨率遥感数据资源,可采集到高分辨率、接近地表实际情况的土地利用、水土保持措施信息。在抽样单元尺度数据采集精度可达到 80.1%以上,土地利用信息与 GLC30 数据的直方图相似指数均值为 0.80,可反映区域土地利用结构特征。该方法以遥感解译为

主,具有精确和快速的特点,可满足大区域土壤侵蚀调查的需要。

(2)基于抽样解译成果可完成抽样单元的土壤流失模数精确计算。典型地区部分调查单元初步计算表明,基于抽样解译的结果和已有土壤侵蚀因子数据产品(包括降雨侵蚀力因子 R 、土壤可蚀性因子 K 、坡度坡长因子 LS 和植被覆盖度等),可完成对抽样单元每个图斑土壤流失速率的计算,结果令人满意;这个过程中,如不考虑水土保持措施则计算的土壤流失速率会出现明显偏差。因此,该方法可很好地弥补传统遥感制图基本上只能表达土壤侵蚀危险性的缺陷,有望形成大区域乃至“全球土壤侵蚀抽样调查方法”,并成为全球土壤侵蚀制图的技术基础。

参考文献:

- [1] 姚檀栋,陈发虎,崔鹏,等.从青藏高原到第三极和泛第三极[J].中国科学院院刊,2017,32(9):924-931.
- [2] 林慧龙,郑舒婷,王雪璐.基于 RUSLE 模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价[J].草业学报,2017,26(7):11-22.
- [3] 马波,张加琼,税军锋,等.西藏中东部地区土壤侵蚀野外调查报告[J].水土保持通报,2018,38(5):1-8,361.
- [4] Teng H F, Liang Z Z, Chen S C, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models [J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 673-686.
- [5] Pimentel D, Burgess M. Soil erosion threatens food production [J]. Agriculture, 2013, 3(3): 443-463.
- [6] 杨勤科.区域水土流失监测与评价[M].郑州:黄河水利出版社,2015.
- [7] 冷疏影,冯仁国,李锐,等.土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J].水土保持学报,2004,18(1):1-6.
- [8] 朱显谟,陈代中,杨勤科.1:1 500 万中国土壤侵蚀图[C]//《中华人民共和国自然地图集》编辑委员会.中华人民共和国自然地图集.2 版.北京:中国地图出版社,1999:200.
- [9] Lu H, Yu B F. Spatial and seasonal distribution of rainfall erosivity in Australia [J]. Soil Research, 2002, 40(6): 887-901.
- [10] Panagos P, Borrelli P, Meusburger K. A new European slope length and steepness factor (LS -Factor) for modeling soil erosion by water [J]. Geosciences, 2015, 5(2): 117-126.
- [11] Yang D W, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(14): 2913-2928.
- [12] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications,

2017,8(1):2013-2025.

[13] Nusser S M, Breidt F J, Fuller W A. Design and estimation for investigating the dynamics of natural resources [J]. *Ecological Applications*,1998,8(2):234-245.

[14] USDA-NRCS.2015 National Resources Inventory; Natural Resources Conservation Service [R]. Washington, DC: USDA, 2018.

[15] 谢云,赵莹,张玉平,等.美国土壤侵蚀调查的历史与现状[J].*中国水土保持*,2013,34(10):53-60.

[16] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].*中国水土保持*,2013,34(10):26-34.

[17] Yin S Q, Zhu Z Y, Wang L, et al. Regional soil erosion assessment based on a sample survey and geostatistics [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018,22(3):1695-1712.

[18] Elwood S, Goodchild M F, Sui D Z. Researching volunteered geographic information: Spatial data, geographic research, and new social practice [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2012, 102 (3):571-590.

[19] Yu L, Gong P. Google Earth as a virtual globe tool for Earth science applications at the global scale:Progress and perspectives [J]. *International Journal of Remote Sensing*,2012,33(12):3966-3986.

[20] Ban Y F, Gong P, Giri C. Global land cover mapping using Earth observation satellite data:Recent progresses and challenges [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,2015,103(1):1-6.

[21] 地质出版社地图编辑室.世界地理地图集[M].北京:地质出版社,2011.

[22] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室.第一次全国水利普查培训教材之六水土保持情况普查[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[23] 梅安新,彭望琚,秦其明,等.遥感导论[M].北京:高等教育出版社,2001:144-148.

[24] 水利部水土保持监测中心.水土流失普查技术规定[R].北京:水利部,2017.

[25] 牛亮,杨勤科.DEM 尺度变换中直方图相似度计算与应用[J].*水土保持研究*,2010,17(3):120-125.

[26] 张加琼,马波,税军峰,等.泰国北部山区土壤侵蚀调查报告[J].*水土保持通报*,2019,39(1):1-8.

[27] 李骛,魏欣,李子轩.土壤侵蚀动态监测中的高分辨率影像土地利用解译精度分析[J].*中国水土保持科学*, 2018,16(3):8-17.

(上接第 63 页)

[27] 孙泉忠,高华端,刘瑞禄,等.黔中喀斯特地区土力学特性对土壤侵蚀的影响[J].*水土保持学报*,2010,24(6):38-41.

[28] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J].*生态学报*,2016,36(8):2264-2273.

[29] 王保一,张荣华,荆莎莎,等.降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019,43(2):114-120.

[30] 张少博,李建贵,黄俊华,等.坡度对伊犁河流域土壤侵蚀的试验分析[J].*甘肃农业大学学报*,2018,53(1):110-114,123.

[31] 汪之松,唐阳红,方智远,等.山脉地形下击暴流风场数值模拟[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2019,46(3):90-98.

[32] 何俊龄,张金沙,杨莹博,等.高原鼢鼠土丘空间格局及主要特征研究[J].*草业学报*,2006,15(1):107-112.

[33] 李锦荣,郭建英,赵纳祺,等.乌兰布和沙漠流动沙丘风蚀空间分布规律及其影响因素[J].*中国沙漠*,2018,38 (5):32-39.