

基于无人机高精度 DEM 数据的梯田自动提取算法

赵 飞^{1,2,3}, 熊礼阳^{1,2,3}, 姚 瑾⁴, 方 炫^{1,2,3,5}, 代 文^{1,2,3}, 汤国安^{1,2,3}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

(4. 自然资源部第一地理信息制图院, 陕西 西安 710054)

(5. 南京晓庄学院环境科学学院, 江苏 南京 211171)

[摘要] 提出一种基于无人机高精度 DEM 数据的梯田自动提取算法。首先, 基于无人机航测技术获取 1m 分辨率的 DEM 数据, 在此基础上计算地面坡度。此时, 梯田田坎处于坡度的极大值区。其次, 采用坡面流水模拟算法实现对该极值区的提取。最后, 对提取结果进行掩膜滤波, 消除非梯田区域, 得到最终梯田提取结果。以陕西省长武县王东沟流域为实验样区, 进行梯田提取实验, 并将实验提取结果与梯田目视解译结果及光照晕渲模拟方法提取结果进行对比。结果显示, 相比目视真值, 该方法提取梯田的准确率为 90.67%, 具有较高的提取精度; 相比光照晕渲模拟方法, 该方法可提取出更为完整和连续的梯田结果。该梯田快速提取方法及结果可为水土保持、农业发展、生态环境治理等研究提供依据。

[关键词] DEM, 梯田提取, 无人机高精度 DEM

[中图分类号] S284 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)02-0059-07

An Automatic Extraction Algorithm for Terraced Fields Based on UAV High Precision DEM Data

Zhao Fei^{1,2,3}, Xiong Liyang^{1,2,3}, Yao Jin⁴, Fang Xuan^{1,2,3,5}, Dai Wen^{1,2,3}, Tang Guoan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

(4. First Geographic Information Mapping Institute, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China)

(5. School of Environment Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

Abstract: This paper proposes an automatic extraction algorithm for terraced fields based on DEM slope characteristics. Firstly, one-meter resolution DEM is obtained with the basis of UAV aerial survey technology, and slope is calculated on this basis. Meanwhile, terrace line is located in the maximum area of slope digital terrain model. Secondly, the slope flow simulation algorithm is used to extract the extreme value region. Finally, the extraction results are masked to eliminate the non-terraced areas, and the final terraced extraction results are obtained. Taking Wangdonggou watershed in Changwu County of Shaanxi Province as an experimental sample area, the experimental results are compared with the results of terrace extraction, which are labeled by visual interpretation based on remote sensing image, or extracted from illumination model of DEM shading. The comparison results show that the accuracy of this method is 90.67%. Compared with true value of visual interpretation, it has a higher extraction accuracy. Compared with the results of illumination model of DEM shading, this method can provide more complete and continuous result of terrace. The rapid extraction method and results of the terrace can provide a basis for the research of soil and water conservation, agricultural development and ecological environment control.

Key words: DEM, terraced extraction, high precision DEM of UAV

收稿日期: 2019-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601411、41671389、41871313).

通讯作者: 熊礼阳, 博士, 副教授, 研究方向: 黄土继承性 DEM 数字地形分析研究. E-mail: xiongliyang@njnu.edu.cn

梯田是一种重要的人工地貌,历史悠久,据文字记载最早可追溯至秦汉时期,在人类的农耕文明史上扮演着重要的角色.我国梯田现今主要分布在黄土高原地区和西南丘陵地区,均属于水土流失较为严重的地区^[1].在这些区域内,大面积修建梯田可以改变地表形态,减缓坡度,缩短坡长,改变流水侵蚀的过程,从而有效地治理水土流失^[2].同时,还可以有效拦截、储蓄雨水,并加以充分利用,使得农业缺水问题得到一定程度的缓解.因此,梯田的修筑深得人们重视,是国家推进水保工作的有效手段^[3].此外,梯田的修建还有着极大的社会效益.赵护兵等研究发现,在黄土高原地区进行退耕还林以及坡改梯工程可显著促进地区生态质量的提升^[4].此外,可观的经济效益是梯田被广泛应用的又一重要因素.梯田的修建有效地降低了劳动成本,为实现精耕细作提供了条件,为山区水利化和山区高效农业的发展提供了重要的保障.调查研究发现,梯田能够有效提高农作物产量,有的作物能实现增产 50%~100%,果树产量能提高 2 倍左右.同时,农民收入也有明显的提高^[5].可见,梯田信息的提取,对于水土保持工作的开展、农业和生态环境的发展与治理,有着重要的指引作用.

多年来,梯田信息的提取一直是相关学者关注的研究内容.早期,梯田主要依靠人工解译提取,并统计其相关信息,实现水保效应的估算^[6].该方法效率低下,成本较高,可重复性差.随着遥感影像和 DEM 数据获取手段的不断发展,学者们对于梯田自动化提取的算法也展开了研究.根据其使用的数据不同,可分为基于遥感影像的梯田自动化提取算法和基于 DEM 的梯田自动化提取算法.对于前者,学者们提出诸多梯田提取算法^[7-10].例如,于浩等^[7]提出了基于傅立叶变换的梯田纹理特征提取.但由于受制于遥感地物分布复杂性的影响,该算法会受到如太阳倾角、地形变化及纹理不规则等因素的影响.赵汉青^[8]提出了基于面向对象的梯田提取方法,选用多种影像特征和地形因子对梯田进行准确的提取.但是,多种影像特征和地形因子的参与增加了计算的复杂性,降低了结果的稳定性.随着数字高程模型数据获取精度的不断提升,诸多学者开始基于 DEM 数据进行梯田的自动化提取^[1,11-12].代文等^[1]提出基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取,从光照晕渲模拟的角度对梯田进行提取,提取精度高,但提取的梯田系统性较差,梯田提取结果较为破碎.

梯田田坎线本质上是地表面的特征变换位置,即地形坡度转折处.因此,坡度特征是有效和准确地提取梯田的核心指标.受制于以往 DEM 数据精度的限制,梯田田坎线往往难以用粗分辨率的 DEM 数据表达.因此,基于该 DEM 的坡度提取结果在以往的研究中难以用于提取梯田.随着无人机航测技术的不断成熟,DEM 数据精度得到了快速提升,使得梯田微地形特征能够在高精度的 DEM 数据上表达.因而,基于无人机高精度 DEM 的坡度计算结果可用于梯田微地形特征的提取.

1 研究方法

1.1 梯田的特征分析

梯田是对各种自然剖面地形进行人工改造而逐步形成的.在坡面总体形态上,继承了原有自然坡面的宏观地形特征,在其地表复合了各类人工改造的微观地形特征(例如梯田的平坦田面和陡直台阶等).因此,梯田地形具有对自然地形的继承性和特殊的微观地形特征.

1.1.1 继承性

梯田是人类对于原始坡面的一种微观改造,其继承了原始坡面的宏观地形特征,如坡度.根据赵文礼的研究^[13],梯田修建要因地制宜,一般应规划在 25°以下的坡耕地上.一般而言,坡度大于 18°就不适合发展耕地.根据我国《退耕还林还草技术规范》,坡度大于 25°的林地、草地不适合发展耕地.根据《中华人民共和国水土保持法》,梯田工程在 5°~25°的坡耕地上建设,25°以上区域为禁垦地.因此,本文将坡度属于 5°~25°作为梯田候选区域的提取标准.

1.1.2 微观地形特征

根据赵卫东等^[14]提出的依据剖面形态分类的思路,梯田可分为水平梯田、坡式梯田、反坡梯田和复式梯田.具体的形态特征如表 1 所示.梯田的坡面特征可概括为两点:田面坡度低于梯田所处坡面的原始坡度(梯田田面坡度一般小于 25°);田坎和台阶处陡直.

表 1 梯田形态及几何特征

Table 1 Terrace morphology and geometric characteristics

梯田类型	形态特征	几何特征
水平梯田	田面水平或接近水平;田坎和台阶陡直;台沿线分布规则	$\theta=0^\circ; \beta, \gamma \in [45^\circ, 90^\circ]$
坡式梯田	田面倾斜,倾向与原始坡面一致;田坎和台阶陡直;台沿线分布规则	$\theta > 0^\circ, \theta \leq \alpha; A \approx A_0; \beta, \gamma \in [45^\circ, 90^\circ]$
反坡梯田	田面倾斜,倾向与原始坡面相反;田坎和台阶陡直;台沿线分布规则	$\theta > 0^\circ; A - A_0 \approx 180^\circ; \beta, \gamma \in [45^\circ, 90^\circ]$
复式梯田	复式梯田形态特征由以上所有特征随机组合	复式梯田几何特征由以上所有特征随机组合

注: θ 为田面倾角; α 为原始坡面坡度; β, γ 为田埂的外坎和内坎倾角; A, A_0 为梯田田面和原始坡面的倾角。

1.2 基本原理

将梯田抽象为一种线性要素,可以用田坎加以形象地描述.如图 1 所示,将一条梯田田坎加上两个梯田田面抽象为一组梯田单元.对该地形单元进行坡度运算,将得到的坡度图像抽象理解为一个坡度的数字地面模型.由于梯田面坡度远低于田坎处坡度,因此梯田单元对应的坡度数字地面模型是一个极大值区域,形态类似于一座山峰,如图 2 所示.从而,提取梯田田坎要素的目标也转变为提取坡度数字地面模型中的“山脊线”。

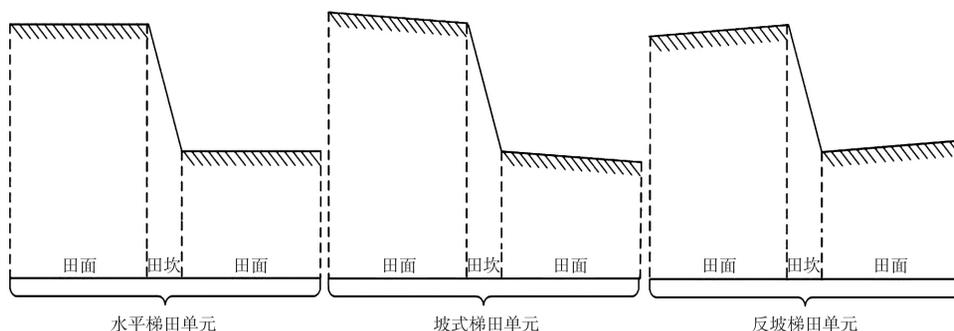


图 1 梯田单元

Fig. 1 Terrace unit

1.3 实现方法

研究整体技术流程如图 3 所示,主要分为基于高精度 DEM 数据的坡度计算、基于坡度数字地面模型的极大值区提取、梯田田坎线滤波 3 个步骤.在结果评价过程中,实现了基于光照晕渲模拟的梯田提取和基于 DOM 影像人工解译的梯田提取.通过对三者的梯田田坎提取结果进行对比,来评价本文方法的精度.

1.3.1 基于高精度 DEM 数据的坡度计算

目前,以数字高程模型为数据基础的坡度因子提取算法众多,常用的有简单差分、Frame 差分、三阶反距离权差分、三阶反距离平方权差分、三阶不带权差分、二阶差分等.龚健雅等^[15]的研究表明,在 DEM 数据精度较高的情况下,二

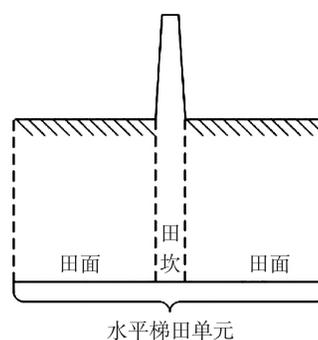


图 2 坡度图像下对应的梯田单元

Fig. 2 Terrace units corresponding to slope images

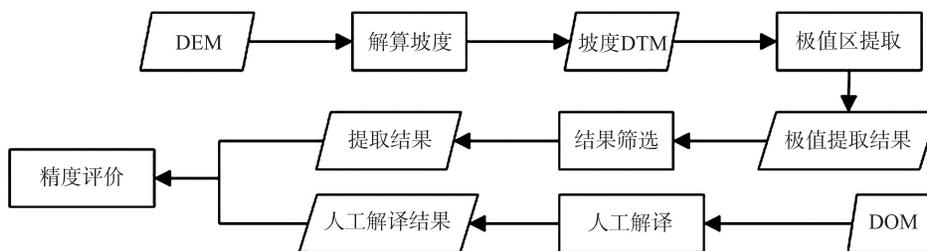


图 3 技术路线图

Fig. 3 Flow chart of the technology

阶差分的坡度计算结果精度较高. 算法的精度序列为二阶差分、三阶反距离平方权差分、三阶反距离权差分、三阶不带权差分、Frame 差分和简单差分. 本文基于无人机获取的高精度 DEM 数据, 选用二阶差分算法求取坡度, 从而有效地规避算法误差.

1.3.2 基于坡度数字地面模型的极大值区提取

基于规则格网 DEM 提取极大值的算法层出不穷. Peucker 和 Douglas 在 1975 年提出了一种基于图像处理技术原理的算法, 该算法计算简单, 但受 DEM 中噪声影响较大, 且提取的山脊线较为破碎, 难以连接成线^[16]. 此外, 周启鸣等^[17]提出基于地形表面流水物理模拟分析原理的算法, 该算法采用了 DEM 整体追踪分析的思路与方法, 提取精度高, 分析结果系统性好, 但在地形平坦区域内, 由于汇流累积量差距不大, 因而漏分误差较大. 受制于 DEM 数据精度的影响, 因 DEM 数据沟底缺乏实测数据, 插值过程中存在大量的平地, 该算法求取结果中错分误差较高. 本文的实验样区为黄土高原地区, 地表千沟万壑, 十分破碎, 选用地形表面流水物理模拟分析原理算法可有效规避算法的漏分误差. 此外, 王婷婷^[18]提出的迭代挖深算法, 对 DEM 沟底平地进行人为改造, 可有效规避该算法在沟底区域的错分误差. 因此, 本文采用王婷婷改进后的基于地形表面流水物理模拟分析原理的算法, 从而精确提取出系统性更高的极大值区结果.

1.3.3 梯田田坎线滤波

考虑到梯田主要修建于正地形且坡度处于 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的坡耕地上, 要实现梯田的有效提取, 避免负地形的干扰, 需要将正地形且坡度处于 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的地形从整个实验区域中提取出来, 将提取结果作为掩膜层来提取坡度数字地面模型中的极大值. 掩膜运算结果可能会出现一些独立的碎线, 这些碎线的长度一般远小于田坎长度, 因此可通过适当的长度阈值将其过滤.

2 实验样区与数据

如图 4(a) 所示, 本文选取梯田广泛分布的黄土高原地区作为研究区域, 以其中梯田分布及特征相对典型的陕西省长武县王东沟流域作为研究样区. 王东沟流域位于长武县西 12 km 的陕甘交界处, 属于典型的黄土高原丘陵沟壑区, 区域内梯田分布广泛且保留较为完好. 样区处于西北内陆腹地, 属于暖温带大陆性季风气候, 受黄土高原地形及海拔高度的影响, 气候垂直分布特征明显, 降雨适中, 多年平均降水量为 581.4 mm. 样区内地势特点呈现北高南低, 区域内高程差约为 240 m.

黄土高原地区是世界上水土流失最为严重的地区之一, 表层覆盖有大量的黄土, 经过长期的流水侵蚀, 逐渐形成千沟万壑、地形破碎的自然景观. 梯田作为典型的人工地貌, 与原始地貌有着巨大的差别, 主要反映在梯田田面平坦, 且田坎线处坡度转折剧烈. 本文从坡度入手, 以梯田单元在坡度图像中特殊的纹理特征为依据, 可快速有效地提取出黄土高原梯田.

本研究的实验数据, 采集于 2016 年 4 月 21 日的实地测量, 采用无人机摄影测量的方法获取. 测量设备为一台 Microdronesmd4-1000 型号无人机, 搭配 Sony ILCE-7R+50 mm f2.8 镜头. 航迹如图 4(b) 所示. 测量共获取 290 张航片, 用于生成立体像对. 最终得到如图 4(c) 所示的分辨率为 1 m 的数字高程模型 (DEM) 和如图 4(d) 所示的分辨率为 0.3 m 的数字正射影像 (DOM), 用于实现梯田的自动提取.

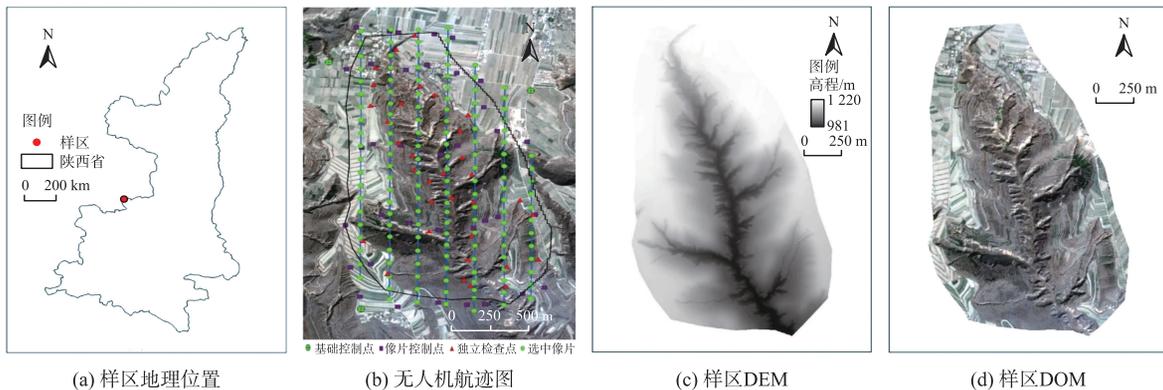


图 4 样区位置及实验数据

Fig. 4 Location of the study area and experimental data

3 实验结果与分析

3.1 实验过程

首先对 DEM 数据进行坡度运算,得到坡度数字地面模型.采用坡面流水模拟算法,进行梯田田坎的提取.在坡面流水模拟过程中,由于 DEM 插值过程部分区域缺乏实测数据,沟底可能存在一定量错误的平地,导致流水分析过程中存在一系列的平行河网问题需要解决.本文采用王婷婷提出的迭代挖深算法对平行河网进行修正.梯田田坎提取过程中需要首先提取负地形,并对负地形进行迭代挖深,本实验采用 800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300 作为迭代阈值,可基本消除平行河网的影响.对迭代挖深的结果进行基于地形表面流水物理模拟分析,采用阈值 K 作为提取山脊线的依据, K 的大小直接影响了梯田提取的形态和精度.为了选取合适的阈值 K ,本文取 100、200、300、400、500、600、700、800 分别作为阈值进行实验,探究精度与阈值 K 的关系,实验结果如表 2 所示.表 2 可知,当 K 值取 500 时,梯田的提取精度最高,故本文阈值 K 设置为 500.最后,依据正负地形提取结果,对梯田结果进行掩膜运算.掩膜运算的结果中存在一定量的碎线,由于样区的梯田田坎平均长度大于 10 m,此处以 10 m 为长度阈值进行过滤.

表 2 不同阈值 K 下的梯田提取精度

Table 2 Terrace extraction accuracy under different thresholds K

阈值 K/m^3	落入缓冲区内长度/m	自身长度/m	精度/%	阈值 K/m^3	落入缓冲区内长度/m	自身长度/m	精度/%
100	14 253.33	17 059.86	83.55	500	12 716.12	14 025.16	90.67
200	13 343.65	15 582.57	85.63	600	11 760.11	13 455.10	87.40
300	13 137.28	15 016.97	87.48	700	10 870.52	12 699.63	85.60
400	12 920.91	14 504.00	89.09	800	9 566.63	11 229.69	85.19

3.2 实验结果与精度评价

本文梯田提取的最终结果如图 5 所示,分别以晕渲模拟的 DEM 和 DOM 作为背景显示.由图 5(c)可知,基于坡度图像的梯田提取算法有较好的提取效果.基于坡度图像的梯田提取算法能够提取出大部分梯田田坎,是较为有效的梯田提取方法.常用的线状要素提取精度多通过和人工解译的结果套合进行评价^[19-20],由于 DOM 的分辨率高于 DEM,故选用 DOM 进行目视解译,与基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法进行对比.本文在研究区中随机生成了 7 个样区进行目视解译,作为精度评价的参考标准.将人工解译的结果生成 1 m 的缓冲区,分别计算两种算法所自动提取的梯田线条落入缓冲区之中的长度与其自身之比,作为衡量提取精度的标准.样区如图 6 所示,精度分析结果如表 3 所示.

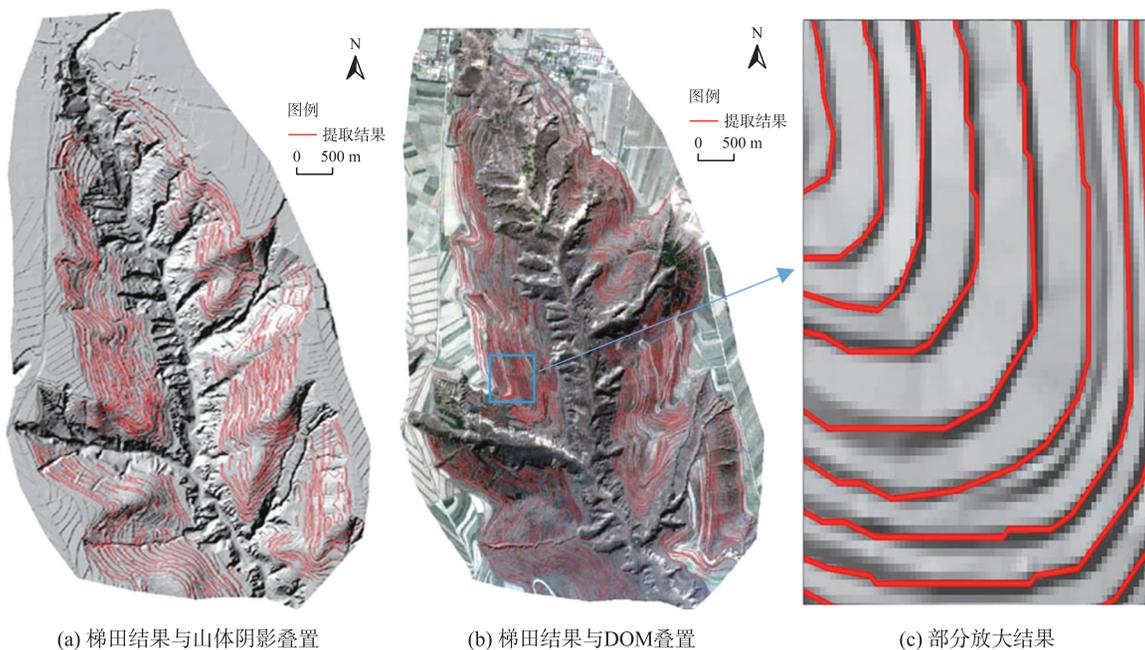


图 5 基于无人机高精度 DEM 数据的梯田提取结果

Fig. 5 Terrace extraction results based on high precision DEM of UAV

由表 3 可知,本文梯田提取的总体精度为 90.67%,比基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法精度更高. 在 7 个样区中,样区 1 精度最低,为 81.91%;样区 7 精度最高,为 95.47%. 造成差异的主要原因是不同样区沟蚀活动程度不同. 在沟头区域受到溯源侵蚀的影响,沟蚀活动更为剧烈,地表更为破碎. 由于自然侵蚀产生了大量的坡度陡变处,且随着溯源侵蚀现象的不断加剧,此类坡度陡变处的数量还在不断增加,此类地貌形态上与梯田相似,最终导致提取精度较低. 在切沟中部地区,梯田修建过程中坡面得到了平整,自然侵蚀带来的坡度陡变处被消除,且由于切沟中部处于沟蚀发育的后期,沟蚀活动相对稳定,自然侵蚀带来的新增坡度陡变处较少,故提取精度更高.

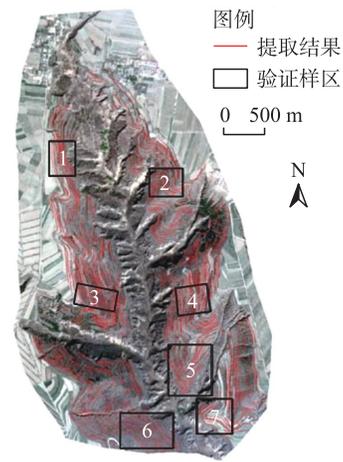


图 6 精度评价样区

Fig. 6 Sample area of precision evaluation

表 3 两种算法自动提取田坎与人工解译田坎精度对比

Table 3 Precision comparison of two automatic extraction algorithms and manual interpretation of ridge lines

样区	算法 A 落入缓冲区内长度/m	算法 B 落入缓冲区内长度/m	自身长度/m	算法 A 精度/%	算法 B 精度/%
1	1 289.10	1 348.35	1 573.89	81.91	85.67
2	1 612.92	1 399.05	1 699.52	94.90	82.32
3	1 993.56	1 962.88	2 167.01	92.00	90.58
4	1 881.00	1 899.47	2 072.75	90.75	91.64
5	2 281.08	2 352.81	2 626.78	86.84	89.57
6	2 050.35	1 950.59	2 200.82	93.16	88.63
7	1 608.09	1 580.95	1 684.37	95.47	93.86
总计	12 716.12	12 494.09	14 025.15	90.67	88.90

注:算法 A 为本文的基于无人机高精度 DEM 数据的梯田自动提取算法,算法 B 为基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法.

如图 6 所示,相比于基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法,本文在样区 2、3、6、7 处提取的精度更高. 实地观测后发现,这四处样区田面更平坦宽阔,故在坡度图像中田面和田坎线的差距更明显(田面接近平于 0°,田坎线处 90°),便于提取. 而样区 1、4、5 田面则相对狭窄且田面具有一定的坡度. 由此可知,本文算法可快速有效地提取出梯田田坎线,且对水平梯田的提取精度最高,而对田面具有一定坡度的坡式梯田和反坡式梯田结果略差.

此外,由于采用流水模拟的方法进行田坎线追踪,故梯田提取结果的系统性更高,而基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法提取的结果则更破碎. 本文利用提取的田坎线的平均长度作为衡量提取结果系统性(Systematisms)的标准:

$$\text{系统性(Systematisms)} = \text{田坎线长度}(C) / \text{田坎线数量}(N). \quad (1)$$

分别计算两种算法的系统性可知,基于无人机高精度 DEM 数据的梯田自动提取算法提取结果的系统性指数为 83.96,基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法提取结果的系统性指数为 40.84. 基于无人机高精度 DEM 数据的梯田自动提取算法的系统性明显高于基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法.

4 结论

(1) 本文提出了一种基于无人机高精度 DEM 数据的梯田自动提取算法. 实验结果表明,在绝大多数地形条件下,可快速准确地提取梯田田坎线,精度较高,提取结果系统性更高.

(2) 基于无人机高精度 DEM 数据的梯田自动提取算法,综合精度可达 90.67%. 从宏观上来看,在沟蚀发育相对早期的黄土塬区,提取精度更高. 此时地表相对平缓,地表坡度转折基本上均为人工修建梯田带来,自然侵蚀带来的坡度转折较少,提取误差少. 从微观上来看,在部分新修水平梯田区域,提取精度更高. 新修梯田田面宽,田坎处变化更大,在 DEM 中更易识别.

(3) 本文算法在提取坡度数字地形模型的极大值“山脊线”的过程中,由于采用坡面流水模拟方法,阈

值 K 的选择存在较大的主观性. 阈值 K 过小,会造成很多地表破碎的转折处被误分为梯田;阈值 K 过大,则会有部分田坎坡度转折相对较小的梯田被漏分. 因而阈值 K 的取值决定了梯田的提取精度.

[参考文献] (References)

- [1] 代文,那嘉明,杨昕,等. 基于 DEM 光照晕渲模拟的梯田自动提取方法[J]. 地球信息科学学报,2017,19(6):754-762.
- [2] 刘芬. 黄土高原梯田 DEM 地形特征研究[D]. 西安:西北大学,2015.
- [3] 张雨果. 基于面向对象的遥感影像梯田信息提取研究[D]. 杨凌:西北农业科技大学,2016.
- [4] 赵护兵,刘国彬,吴瑞俊. 黄土丘陵区不同类型农地的养分循环平衡特征[J]. 农业工程学报,2006,22(1):58-64.
- [5] 熊利锋. 梯田发展现状概述[J]. 甘肃水利水电技术,2015,51(4):55-57.
- [6] 党恬敏. 基于高分影像的黄土高原梯田提取技术研究[D]. 杨凌:西北农业科技大学,2017.
- [7] 于浩,刘志红,张晓萍,等. 基于傅立叶变换的梯田纹理特征提取[J]. 国土资源遥感,2008,20(2):39-42.
- [8] 赵汉青. 梯田自动提取及特征分析[D]. 南京:南京师范大学,2016.
- [9] 张雨果,王飞,孙文义,等. 基于面向对象的 SPOT 卫星影像梯田信息提取研究[J]. 水土保持研究,2016,23(6):345-351.
- [10] 薛牡丹. 基于面向对象分析的无人机影像梯田田面提取研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [11] 张宏鸣,胡勇,杨勤科,等. 基于影像与坡度数据融合的梯田田块分割方法[J]. 农业机械学报,2018,49(4):249-256.
- [12] 胡勇. 面向无人机影像和坡度数据的梯田田块提取方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [13] 赵文礼. 黄河流域的梯田[J]. 中国水土保持,1983(2):36-40.
- [14] 赵卫东,汤国安,徐媛,等. 梯田地形形态特征及其综合数字分类研究[J]. 水土保持通报,2013,33(1):295-300.
- [15] GONG J Y,ZHOU Q M,TANG G A. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model(DEM)[J]. Acta Geodaetica Et Cartographic Sinica,2004,33(3):258-263.
- [16] PEUCKER T K,DOUGLAS D H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data[J]. Computer Graphics & Image Processing,1975,4(4):375-387.
- [17] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[M]. 北京:北京科学出版社,2006.
- [18] 王婷婷. 黄土小流域沟壑的种群特征研究初探[D]. 南京:南京师范大学,2015.
- [19] 赵欣,王晓晶,赵院,等. 国产高分一号卫星数据傅里叶变换提取梯田影像可行性分析[J]. 中国水土保持,2016(1):63-65,73.
- [20] 徐静,王春,张耀民,等. 规则格网 DEM 中平直面状特征地形识别与提取[J]. 测绘科学,2014,39(8):163-166.

[责任编辑:严海琳]