

# 基于组合滤波算法的机载 LiDAR 数据 DEM 构建

田香勇<sup>1,2</sup>, 胡洪<sup>1,2\*</sup>, 许邦鑫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601;

<sup>2</sup>安徽省矿山生态修复工程实验室, 安徽 合肥 230601;

<sup>3</sup>中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230601

**摘要** 针对采用单一渐进式形态学滤波处理机载激光雷达(LiDAR)数据时难以生成高质量数字高程模型(DEM)的问题,提出一种基于空间向量投影的后处理滤波方法,以剔除对DEM构建精度影响较大的近地面点。该方法以每个激光点为起点,以与距离它最近的9个网格最低点为终点构建向量,然后累加9个向量在Z方向上的投影,并将结果与预先设置的阈值比较,进而识别、分类当前激光点。为了验证所提方法的有效性,选取6组国际摄影测量与遥感协会(ISPRS)提供的不同地形条件下的测试数据进行实验,分别将加入后处理滤波前后提取的地面点云生成1 m×1 m分辨率的DEM,并与同一研究区域的参考DEM进行线性拟合。结果表明:与单一渐进式形态学滤波算法相比,渐进式形态学滤波和基于空间向量投影的后处理滤波的组合算法在城市地区和地形连续的乡村地区可以获得更好的点云滤波精度和DEM构建精度,具有良好的适用性和可靠性。

**关键词** 激光雷达; 点云滤波; 渐进式形态学滤波; 后处理滤波; 数字高程模型

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1001001

## DEM Construction for Airborne LiDAR Data Based on Combined Filtering Algorithm

Tian Xiangyong<sup>1,2</sup>, Hu Hong<sup>1,2\*</sup>, Xu Bangxin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China;

<sup>2</sup>Anhui Province Engineering Laboratory for Mine Ecological Remediation, Hefei 230601, Anhui, China;

<sup>3</sup>Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Group, Hefei 230601, Anhui, China

**Abstract** Herein, a method of post-processing filtering based on space vector projection is proposed to eliminate the near-ground points that have a considerable impact on the accuracy of digital elevation model (DEM) construction to address the problem of difficulty in generating a high-quality DEM via single progressive morphological filtering for airborne light detection and airborne ranging (LiDAR) data. Initially, the proposed method takes each laser point as starting point and then constructs vectors with the lowest laser point of each of the nine grids closest to it at the end. Thereafter the method accumulates the projection of each of the nine vectors in the Z direction, compares the results to the preset threshold, and identifies as well as classifies the laser point. To validate the effectiveness of the proposed method, this study selects six groups of test data from the international society for photogrammetry and remote sensing (ISPRS) under different terrain conditions and generates 1 m × 1 m resolution DEM using ground

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-05-16; 录用日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(41704036)

通信作者: \*huhong@ahu.edu.cn

points extracted before and after the post-processing filtering as well as performs linear fitting with reference DEM in the same research area. The results show that when compared with a single progressive morphological filtering algorithm, the combined algorithm of progressive morphological filtering and post-processing filtering based on space vector projection can achieve higher precision of point cloud filtering and DEM construction in urban area and rural area with continuous terrain as well as has good applicability and reliability.

**Key words** LiDAR; point cloud filtering; progressive morphological filtering; post-processing filtering; digital elevation model

## 1 引言

随着数字高程模型(DEM)在地理信息产业中发挥着日益重要的作用,关于地形数据采集与高质量DEM构建的研究受到广泛关注。与传统的遥感技术相比,机载激光雷达(LiDAR)不易受天气条件影响,且能够有效、准确地采集地表的三维坐标信息<sup>[1-2]</sup>。但是LiDAR采集的原始点云不仅含有裸地反射的地面点,也含有植被和建(构)筑物等反射的地物点,以及传感器、飞鸟等产生的粗差点<sup>[3]</sup>。采用地面点云构建DEM之前需要去除原始点云中不需要的各种粗差点和地物点等非地面点,即点云滤波<sup>[4-5]</sup>。

现有的点云滤波方法一般分为基于坡度的方法、基于表面的方法和基于数学形态学的方法。基于坡度的方法流程简单、执行效率较高,但受单一阈值影响,无法顾及所有地形,在城市地区、地形陡峭区域表现不佳<sup>[6-9]</sup>。基于表面的方法以渐进加密三角网滤波算法和布料模拟滤波算法为代表<sup>[10-13]</sup>。渐进加密三角网滤波算法能够较好地保留地形陡峭区域的地面点,但在执行过程中对最大角度和最大距离两个阈值的选择非常敏感<sup>[10]</sup>。另外,在逐渐加密过程中对初始地面种子点的选取一定程度上影响对其他查询点的判别,最终影响点云滤波精度<sup>[11]</sup>。文献[12]提出一种布料模拟滤波算法,与传统的点云滤波算法相比,该算法参数较少且易于设置。但是布料模拟滤波算法的执行是一种基于内力作用的物理过程,不具有广泛的地形适应性<sup>[13]</sup>。基于数学形态学的方法是当下点云滤波的主流算法之一<sup>[14-19]</sup>。此类算法的关键在于滤波窗口大小选择,过小的窗口不能去除大型地物,过大的窗口容易平滑突出地形<sup>[14-15]</sup>。文献[16]提出了一种经典的渐进式形态学滤波算法,在该算法中,高差阈值随滤波窗口大小的变化而变化,以实现去除不同大小地物的目的,但是受窗口尺寸、地形坡度、高差阈值等参数的相互影响,一方面难以去除接近地形表面

的非地面点,即近地面点,另一方面容易导致陡峭区域过度滤波。文献[17]在文献[16]的研究基础上进行改进并实现一种适用于城市地区的简单形态学滤波器(SMRF),利用输入的最大滤波窗口尺寸、地形坡度两个参数和最小表面生成一个临时地表,分类原始点云。文献[18]按照地形特征人工对原始点云生成的数字表面模型(DSM)进行分块,使用每个分块区域的标准偏差预测该区域的地形坡度参数,实现自适应地形坡度参数的渐进式形态学滤波。文献[19]选择将多级克里金插值算法融入渐进式形态学滤波过程中,在渐进式形态学滤波的每层滤波窗口中进行克里金插值,以实现地形坡度参数的预测。为了提高渐进式形态学滤波算法的点云滤波精度,文献[17-19]分别采用不同的改进方法降低地形复杂区域的I类误差(将地面点错分为非地面点的比例),但难以去除对DEM构建精度影响较大的近地面点,不能有效降低II类误差(将非地面点错分为地面点的比例)。

针对单一渐进式形态学滤波算法难以去除近地面点的问题,提出一种基于空间向量投影的后处理滤波方法。渐进式形态学滤波和基于空间向量投影的后处理滤波的组合算法能够在抑制I类误差增大的前提下进一步剔除近地面点,大幅降低II类误差,提高生成的DEM质量。

## 2 算法与精度评价

首先采用统计滤波移除原始点云中的粗差点,并在此基础上依次执行渐进式形态学滤波、基于空间向量投影的后处理滤波。为了评价所提算法的性能,需要对比分析每组测试数据加入后处理滤波前后的点云滤波精度和DEM构建精度。其中,对点云滤波精度的评价采用国际摄影测量与遥感协会(ISPRS)官方给出的方法,对DEM构建精度的评价采用线性回归分析的方法。

### 2.1 渐进式形态学滤波

渐进式形态学滤波算法是对数学形态学方法

的继承与发展。该算法通过逐渐增大窗口尺寸去除不同大小的地物,同时引入地形坡度、高差阈值等参数解决土包“顶部”被“切除”的问题。如图 1 所示,初次滤波在  $w_1$  窗口尺寸下进行。当某一激光点

$P$  与滤波表面的高差  $h_{P,1}$  小于或等于高差阈值  $h_{T,1}$  时,分类  $P$  为地面点,反之为非地面点。 $h_{\max(t),1}$  为滤波前地形表面与滤波表面之间的最大高差,如果  $h_{\max(t),1} < h_{T,1}$ ,则保留地形表面的所有激光点。

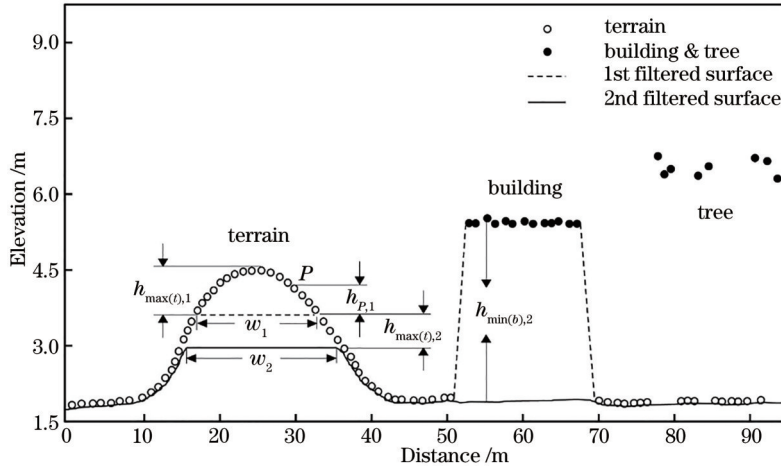


图 1 渐进式形态学滤波示意图

Fig. 1 Schematic of progressive morphological filtering

第 2 次滤波中窗口尺寸增加至  $w_2$ 。如果上一次滤波表面和此次滤波表面之间的最大高差  $h_{\max(t),2}$  小于高差阈值  $h_{T,2}$ ,则保留距离此次滤波表面的高差小于  $h_{\max(t),2}$  的所有激光点。类似地,如果上一次滤波操作与当前滤波操作之间建(构)筑物的最小高差  $h_{\min(b),2}$  大于  $h_{T,2}$ ,则移除建(构)筑物反射的非地面点。

第  $k$  次滤波中窗口尺寸增加至  $w_k$ 。如果某一激光点  $P$  与此次滤波表面的高差  $h_{P,k}$  小于或等于高差阈值  $h_{T,k}$ ,则分类  $P$  为地面点,反之为非地面点。 $h_{T,k}$  通常为研究区域内建(构)筑物的最小高度。

上述每一次滤波过程中都需要确定窗口尺寸  $w_k$  和高差阈值  $h_{T,k}$ 。对于  $w_k$ ,有两种计算公式:

$$w_k = 2kw_0 + 1, \quad (1)$$

$$w_k = 2w_0^k + 1, \quad (2)$$

式中: $k$ 为滤波次数; $w_0$ 为初始窗口尺寸。 $h_{T,k}$ 与研究区域内的地形坡度密切相关,表达式为

$$h_{T,k} = \begin{cases} h_0, & w_k \leq 3 \\ s(w_k - w_{k-1})c + h_0, & w_k > 3 \\ h_{\max}, & h_{T,k} > h_{\max} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $h_0$ 为初始高差阈值; $s$ 为地形坡度; $c$ 为栅格大小; $h_{\max}$ 为最大高差阈值。其中地形坡度  $s$  与窗口尺寸  $w_k$  和  $w_{k-1}$ 、研究区域内地形的最大高差  $h_{\max(t),k}$  存在的关系为

$$s = \frac{h_{\max(t),k}}{\frac{w_k - w_{k-1}}{2}}. \quad (4)$$

但是窗口尺寸、地形坡度、高差阈值等参数之间常常难以协调,导致接近地形表面的非地面点部分遗留,提取的“地面点云”不能生成高质量的 DEM。

### 2.2 基于空间向量投影的后处理滤波

为了进一步去除近地面点,提高生成的 DEM 的质量,提出一种基于空间向量投影的后处理滤波方法。如图 2 所示, $P_0$  是当前待识别的激光点, $P_1 \sim P_{16}$  是各自所属网格内的最低点,以  $P_0$  为起点,分别

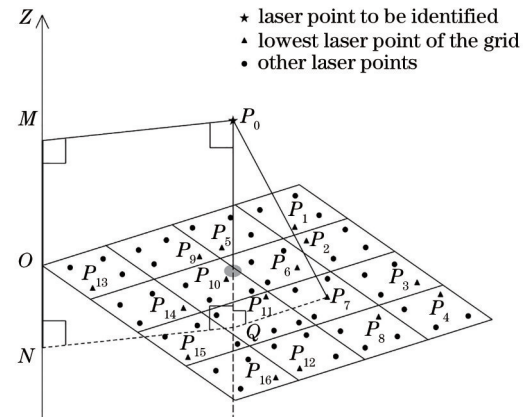


图 2 基于向量投影的后处理滤波示意图

Fig. 2 Schematic of post-processing filtering based on space vector projection

以与距离它最近的 9 个网格最低点  $P_1、P_2、P_5\sim P_7、P_9\sim P_{11}、P_{14}$  为终点构建向量。以向量  $\overrightarrow{P_0P_7}$  为例, 向量  $\overrightarrow{P_0Q}$  是  $\overrightarrow{P_0P_7}$  在  $Z$  方向上的分量,  $|\overrightarrow{MN}|$  是  $\overrightarrow{P_0P_7}$  (或  $\overrightarrow{P_0Q}$ ) 在  $Z$  方向上的投影。

具体实现过程如下。

1) 初始化点标签。首先对渐进式形态学滤波提取的“地面点云”中所有的激光点增添一个非负整型的“label”属性, 并初始化为“0”。每个属性值代表对应激光点的类别, “0”表示地面点, “1”表示非地面点。

2) 获取网格最低点。为了更准确地识别、分类激光点, 需要对“地面点云”划分规则网格, 获取每个网格内的高程最低的激光点, 约束待识别的激光点。但是在 2.1 节中大量的非地面点已经被去除, 提取的“地面点云”在不同区域的密度不同。为了更好地约束待识别的激光点, 在地形复杂的乡村地区, 设置“地面点云”的网格间距  $d$  时, 需要确保在任意网格内部含有 5 个左右的激光点, 在地形平整的城市地区可以适当放宽激光点个数的限制。

3) 累加向量投影。以当前第  $i$  个待识别的激光点为起点, 分别以与距离它最近的 9 个网格最低点为终点构建向量, 然后累加 9 个向量在  $Z$  方向上的

投影, 得到投影之和  $l_i$ 。

$$l_i = \sum_{j=1}^9 |\overrightarrow{MN}_{ij}|, \quad (5)$$

式中:  $i$  为当前待识别的激光点索引;  $j$  为距离第  $i$  个激光点最近的 9 个网格最低点索引;  $|\overrightarrow{MN}_{ij}|$  为第  $i$  个激光点与距离它最近的第  $j$  个网格最低点构成的向量在  $Z$  方向上的投影。

4) 识别、分类激光点。如果投影之和  $l_i$  小于预先设置的阈值  $l$ , 则判断当前待识别的第  $i$  个激光点为非地面点, 并更改它的“label”属性值为“1”。阈值  $l$  与最大高差阈值  $h_{\max}$  存在相关性:

$$l = k' \times h_{\max}, \quad (6)$$

当  $k' = -4$  时, 可以较好地识别、分类激光点。需要指出的是, 投影之和  $l_i$  含有正负号, 此处阈值  $l$  也含有正负号, 正号表示沿着  $Z$  轴正方向, 负号表示沿着  $Z$  轴负方向。

5) 重复步骤 3)~4), 直到遍历完“地面点云”中的所有激光点。

6) 条件滤波提取。根据“label”属性, 采用条件滤波器提取属性值为“0”的“新”地面点云。

### 2.3 精度评价

ISPRS 在 2003 年提出以交叉表格的形式量化点云滤波结果和评价点云滤波精度<sup>[20]</sup>, 如表 1 所示。

表 1 交叉表格  
Table 1 Cross table

Reference point	Filtered point		Sum
	Ground points	Non-ground points	
Ground points	$a$	$b$	$e = a + b$
Non-ground points	$c$	$d$	$f = c + d$
Sum	$g = a + c$	$h = b + d$	$n = a + b + c + d$

表 1 中,  $a$  表示原始点云中地面点被正确分类的个数;  $b$  表示原始点云中地面点被错误分类为非地面点的个数;  $c$  表示原始点云中非地面点被错误分类的个数;  $d$  表示原始点云中非地面点被正确分类的地面点的个数;  $e$  表示参考数据中真实地面点的个数;  $f$  表示参考数据中真实非地面点的个数;  $g$  表示经过点云滤波分类为地面点的个数;  $h$  表示经过点云滤波分类为非地面点的个数;  $n$  表示原始点云中激光点的总数。

采用 I 类误差、II 类误差、总误差对点云滤波精度进行评价。

$$E_I = \frac{b}{e}, \quad (7)$$

$$E_{II} = \frac{c}{f}, \quad (8)$$

$$E_T = \frac{(b + c)}{n}, \quad (9)$$

式中:  $E_T$  表示点云滤波结果与参考数据不一致的比例。

除了 3 类误差, 还可以采用 Kappa 系数评价点云滤波结果与参考数据的一致性<sup>[21]</sup>, 表达式为

$$C_{\text{Kappa}} = \frac{n(a + d) - (ge + hf)}{n^2 - (ge + hf)}. \quad (10)$$

可以通过随机抽取所在研究区域若干测试点对生成的 DEM 进行线性回归分析和精度评定。采用决定系数  $R^2$  和均方根误差 (RMSE) 作为评价指标。 $R^2$  又称拟合优度, 在本文实验中表示在点云滤波之后提取的地面点云生成  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  分辨率的 DEM 与同一研究区域同一分辨率的参考 DEM 的

拟合程度。 $R^2$  数值越大,拟合程度越好,生成的 DEM 精度越高。

$$R^2 = \frac{\sum_{i_1=1}^m (\hat{z}_{i_1} - \bar{z})^2}{\sum_{i_1=1}^m (z_{i_1} - \bar{z})^2}, \quad (11)$$

式中: $m$  为抽取的测试点的个数; $\hat{z}_{i_1}$  为第  $i_1$  个测试点的预测高程值; $z_{i_1}$  为第  $i_1$  个测试点的参考高程值; $\bar{z}$  为所有测试点的参考高程值的均值。

RMSE 通过分析生成的 DEM 与参考 DEM 对应测试点的高程值偏差评定生成的 DEM 精度。RMSE 数值越小,偏差越小,生成的 DEM 精度越高。

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i_1=1}^m (z_{i_1} - \hat{z}_{i_1})^2}. \quad (12)$$

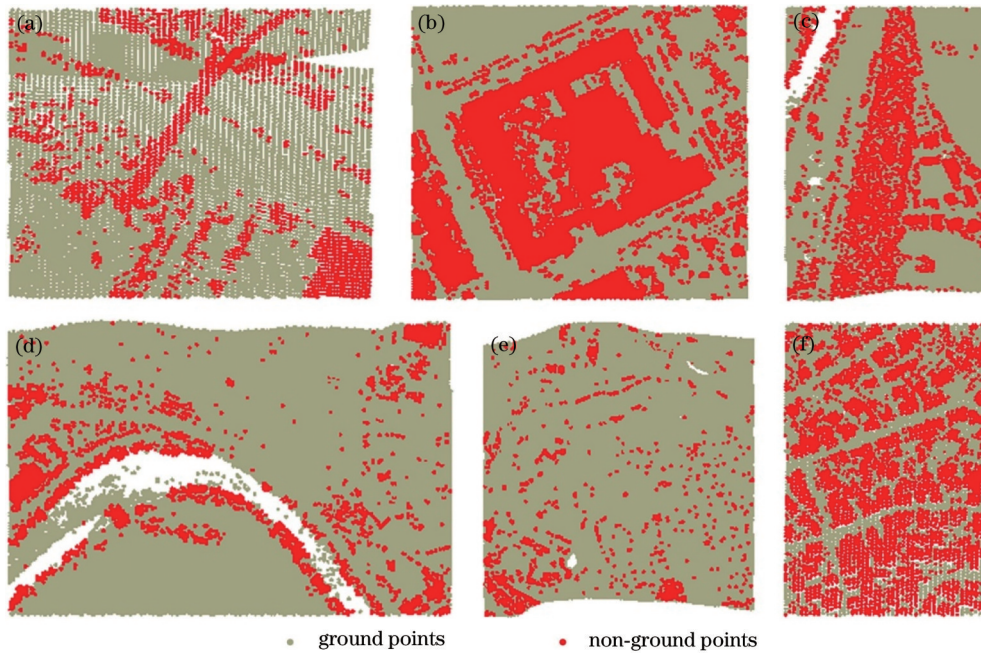


图 3 原始点云数据。(a) Samp21; (b) Samp31; (c) Samp51; (d) Samp52; (e) Samp53; (f) Samp54  
Fig. 3 Original point cloud data. (a) Samp21; (b) Samp31; (c) Samp51; (d) Samp52; (e) Samp53; (f) Samp54

基于点云库(PCL)和 C++ 语言实现所提算法。PCL 中含有封装好的渐进式形态学滤波器,只需要输入原始点云和初始化相关参数即可处理数据。为了降低对后处理滤波的影响,渐进式形态学滤波器参数参考文献[16]中的相关要求设置。渐进式形态学滤波参数(最大滤波窗口尺寸  $w_{\max}$ 、地形坡度  $s$ 、最小高差阈值  $h_0$ 、最大高差阈值  $h_{\max}$ )和后处理滤波参数(规则网格间距  $d$ 、投影之和阈值  $l$ )的设置如表 2 所示,并对 6 组测试数据进行点云滤波处理。

为了对比分析,统一采用反距离权重法生成  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  分辨率的 DEM。分别将每组原始点云加入后处理滤波前后提取的地面点云构建 DEM,并

### 3 实验结果与分析

为了验证所提算法的有效性,选取 6 组 ISPRS 提供的具有代表性的测试数据进行实验。如图 3 所示,各组测试数据分为城市地区和乡村地区两类。其中,Samp21、Samp31 为城市地区,点间距分布为  $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ ,地形平整,含有大型复杂建(构)筑物和大量道路绿化树木。Samp51~Samp54 为乡村地区,点间距分布为  $2.0 \sim 3.5 \text{ m}$ ,其中 Samp51 地形连续,伴有山坡,山坡区域含有大量森林植被;Samp52、Samp53 地形陡峭,伴有断层,含有少量树木植被;Samp54 地形连续,伴有缓坡,含有大量简单建(构)筑物。

表 2 点云滤波参数

Table 2 Parameter of point cloud filtering

Sample	$w_{\max} / \text{m}$	$s$	$h_0 / \text{m}$	$h_{\max} / \text{m}$	$d / \text{m}$	$l / \text{m}$
Samp21	20	0.3	0.5	3	6	-12
Samp31	20	0.3	0.5	3	6	-12
Samp51	20	1	1	3	6	-12
Samp52	20	1	1	5	6	-20
Samp53	10	1	1	5	6	-20
Samp54	10	0.5	0.5	3	6	-12

与 ISPRS 提供的真实地面点云生成的参考 DEM 进行比较。然后,在每组测试数据覆盖的研究区域随机抽取 1000 个测试点,对测试点所在位置采用线性

回归分析法分析在加入后处理滤波前后构建的 DEM 中的高程值的变化情况。表 3 给出了 6 组测试数据加入后处理滤波前后对应的 3 类误差、Kappa

系数、决定系数  $R^2$  及 RMSE, 其中加粗字体为对比之后的佳值。

表 3 6 组测试数据的误差、Kappa 系数、 $R^2$  及 RMSE  
Table 3 Errors, Kappa coefficient,  $R^2$ , and RMSE of 6 groups of test data

Sample	No post-processing filtering						Add post-processing filtering					
	I -typed error / %	II -typed error / %	Total error / %	Kappa	$R^2$	RMSE	I -typed error / %	II -typed error / %	Total error / %	Kappa	$R^2$	RMSE
Samp21	<b>0.58</b>	6.05	1.79	0.9474	0.9852	0.0812	0.67	<b>4.94</b>	<b>1.62</b>	<b>0.9526</b>	<b>0.9924</b>	<b>0.0567</b>
Samp31	<b>0.18</b>	4.98	2.39	0.9517	0.8393	0.4219	0.23	<b>3.02</b>	<b>1.52</b>	<b>0.9694</b>	<b>0.9863</b>	<b>0.1087</b>
Samp51	<b>0.26</b>	29.58	6.66	0.7825	0.9996	0.3521	0.7	<b>12.53</b>	<b>3.28</b>	<b>0.9002</b>	<b>0.9999</b>	<b>0.1571</b>
Samp52	<b>7.36</b>	39.2	<b>10.71</b>	0.4843	<b>0.9975</b>	<b>1.3837</b>	9.33	<b>24.51</b>	10.92	<b>0.5325</b>	0.9968	1.5816
Samp53	<b>3.63</b>	52.56	<b>5.61</b>	0.3772	<b>0.9961</b>	<b>1.0794</b>	6.37	<b>30.31</b>	7.34	<b>0.4010</b>	0.9957	1.1347
Samp54	<b>0.65</b>	12.74	7.14	0.8577	0.9907	0.5526	1.68	<b>5.56</b>	<b>3.76</b>	<b>0.9246</b>	<b>0.9981</b>	<b>0.2269</b>

图 4 和图 5 分别给出了 6 组测试数据在后处理滤波前后提取的地面点云的对比图, 结合表 3 分析可知, 各组数据的近地面点在后处理滤波之后均获得了进一步去除, II 类误差普遍降低, 平均降幅超过 40%。特别地, 在城市地区和地形连续的乡村地区, 总误差降低, Kappa 系数提高并维持在 0.90 以上, 点云滤波的结果得到改善。图 6~11 给出了提取的地面点云生成的 1 m × 1 m 分辨率 DEM 及线性回归分析结果。在各组图中, 图 6(a)~11(a)为采用

统计滤波移除原始点云中的粗差点后生成的 DSM; 图 6(b)~11(b)为真实地面点云生成的参考 DEM; 图 6(c)~11(c)为未加入后处理滤波提取的地面点云生成的 DEM; 图 6(d)~11(d)为加入后处理滤波提取的“新”地面点云生成的 DEM; 图 6(e)~11(e)为图 6(c)~11(c)对图 6(b)~11(b)的线性回归分析; 图 6(f)~11(f)为图 6(d)~11(d)对图 6(b)~11(b)的线性回归分析。

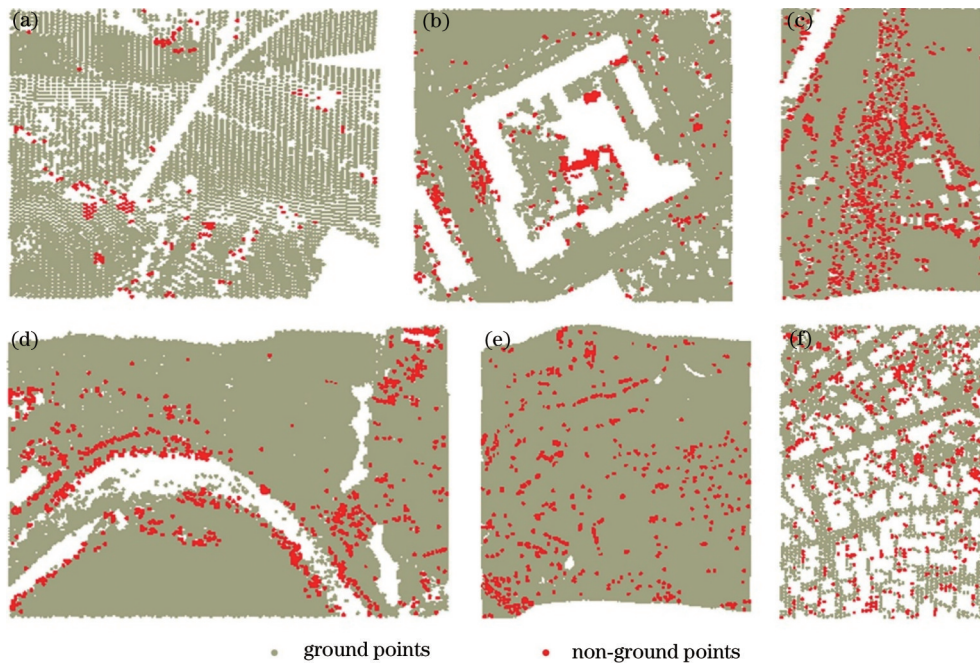


图 4 单一渐进式形态学滤波提取的地面点云。(a) Samp21; (b) Samp31; (c) Samp51; (d) Samp52; (e) Samp53; (f) Samp54

Fig. 4 Ground point cloud extracted by single progressive morphological filtering. (a) Samp21; (b) Samp31; (c) Samp51; (d) Samp52; (e) Samp53; (f) Samp54

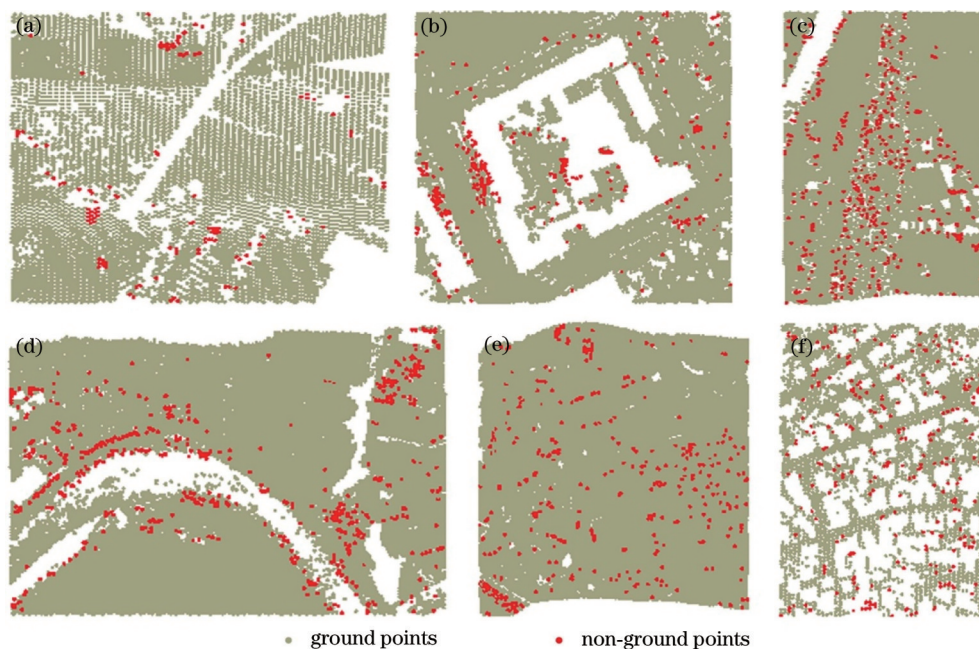


图 5 渐进式形态学滤波+后处理滤波提取的地面点云。(a) Samp21;(b) Samp31;(c) Samp51;(d) Samp52;(e) Samp53;(f) Samp54

Fig. 5 Ground point cloud extracted by progressive morphological filtering and post-processing filtering. (a) Samp21; (b) Samp31; (c) Samp51; (d) Samp52; (e) Samp53; (f) Samp54

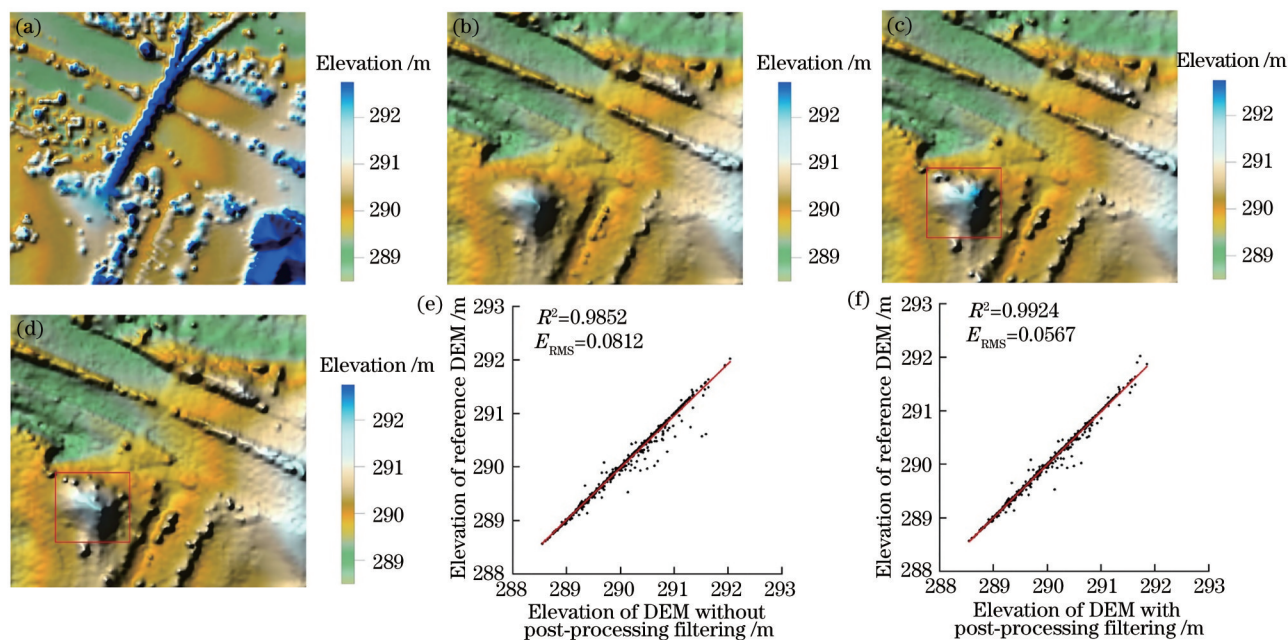


图 6 对 Samp21 的  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  分辨率 DEM 及线性回归分析。(a) DSM;(b)参考 DEM;(c)未加入后处理滤波的 DEM;(d)加入后处理滤波的 DEM;(e)图 6(c)对图 6(b)的线性回归分析;(f)图 6(d)对图 6(b)的线性回归分析

Fig. 6  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  resolution DEM and linear regression analysis for Samp21. (a) DSM; (b) reference DEM; (c) DEM without post-processing filtering; (d) DEM with post-processing filtering; (e) linear regression analysis of Fig.6(c) to Fig.6(b); (f) linear regression analysis of Fig.6(d) to Fig.6(b)

从图 6 和图 7 代表的城市地区可以看出:在未加入后处理滤波生成的 DEM 中,大型复杂建(构)

筑物反射的近地面点部分遗留,出现地形相较于参考 DEM“凸起”的现象;加入后处理滤波之后,遗留

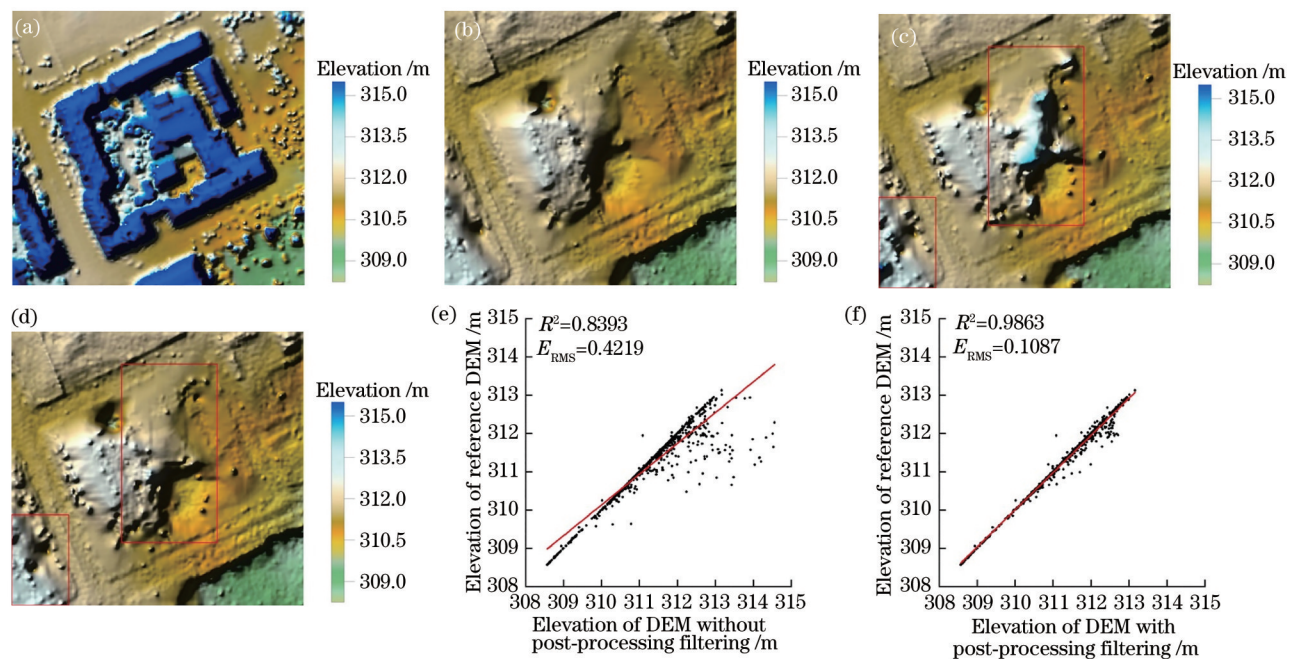


图 7 对 Samp31 的  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  分辨率 DEM 及线性回归分析。(a) DSM; (b) 参考 DEM; (c) 未加入后处理滤波的 DEM; (d) 加入后处理滤波的 DEM; (e) 图 7(c) 对图 7(b) 的线性回归分析; (f) 图 7(d) 对图 7(b) 的线性回归分析

Fig. 7  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  resolution DEM and linear regression analysis for Samp31. (a) DSM; (b) reference DEM; (c) DEM without post-processing filtering; (d) DEM with post-processing filtering; (e) linear regression analysis of Fig.7(c) to Fig.7(b); (f) linear regression analysis of Fig.7(d) to Fig.7(b)

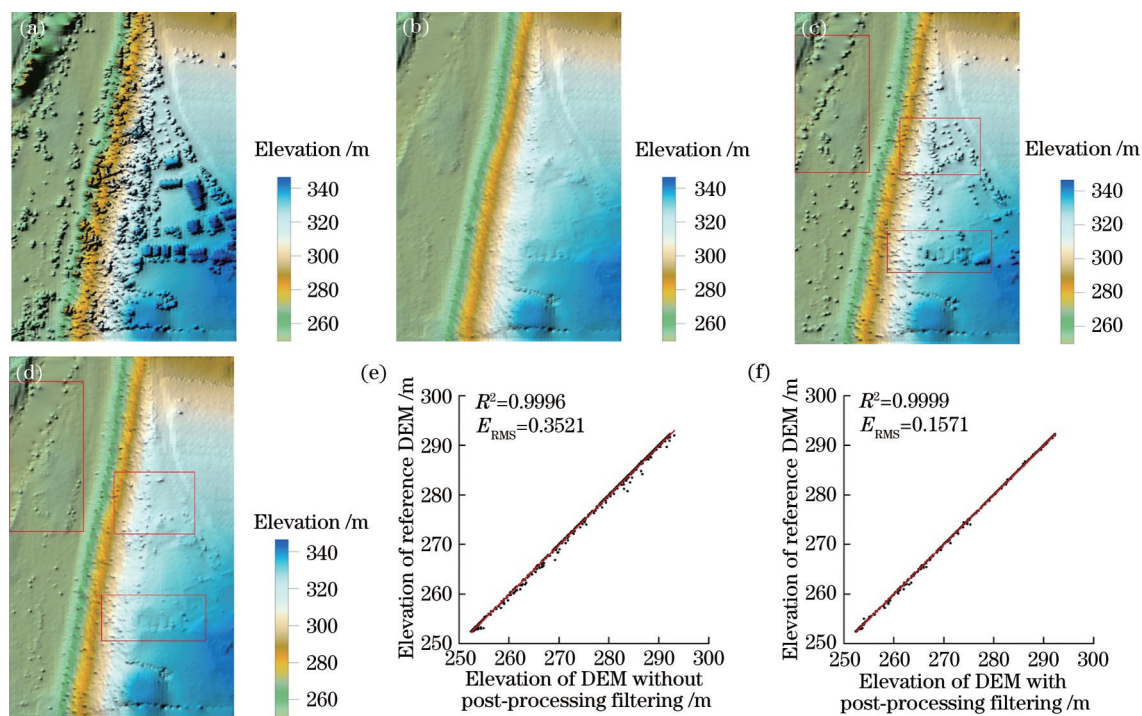


图 8 对 Samp51 的  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  分辨率 DEM 及线性回归分析。(a) DSM; (b) 参考 DEM; (c) 未加入后处理滤波的 DEM; (d) 加入后处理滤波的 DEM; (e) 图 8(c) 对图 8(b) 的线性回归分析; (f) 图 8(d) 对图 8(b) 的线性回归分析

Fig. 8  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  resolution DEM and linear regression analysis for Samp51. (a) DSM; (b) reference DEM; (c) DEM without post-processing filtering; (d) DEM with post-processing filtering; (e) linear regression analysis of Fig.8(c) to Fig.8(b); (f) linear regression analysis of Fig.8(d) to Fig.8(b)



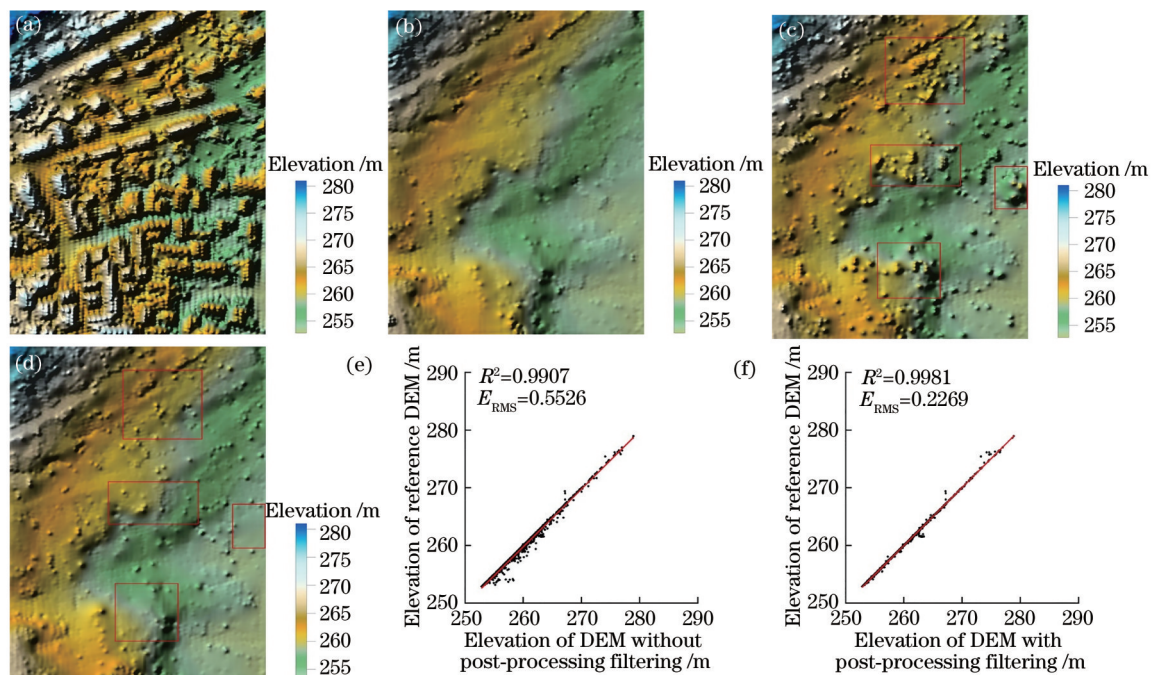


图 9 对 Samp54 的  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  分辨率 DEM 及线性回归分析。(a) DSM; (b) 参考 DEM; (c) 未加入后处理滤波的 DEM; (d) 加入后处理滤波的 DEM; (e) 图 9(c) 对图 9(b) 的线性回归分析; (f) 图 9(d) 对图 9(b) 的线性回归分析

Fig. 9  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  resolution DEM and linear regression analysis for Samp54. (a) DSM; (b) reference DEM; (c) DEM without post-processing filtering; (d) DEM with post-processing filtering; (e) linear regression analysis of Fig.9(c) to Fig.9(b); (f) linear regression analysis of Fig.9(d) to Fig.9(b)

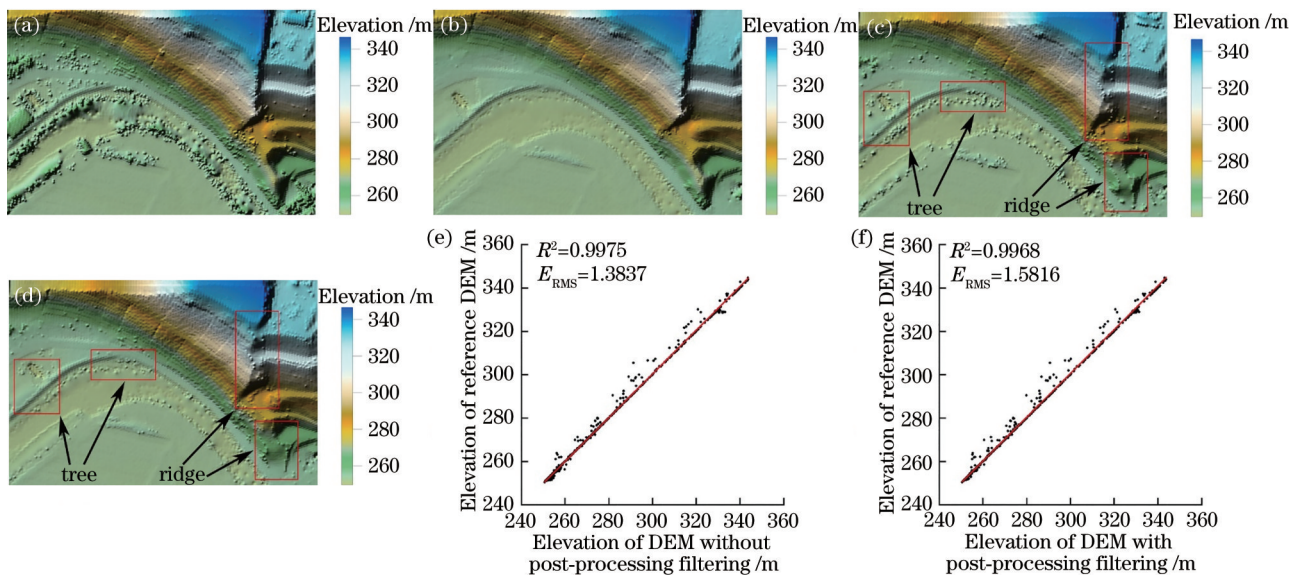


图 10 对 Samp52 的  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  分辨率 DEM 及线性回归分析。(a) DSM; (b) 参考 DEM; (c) 未加入后处理滤波的 DEM; (d) 加入后处理滤波的 DEM; (e) 图 10(c) 对图 10(b) 的线性回归分析; (f) 图 10(d) 对图 10(b) 的线性回归分析

Fig. 10  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  resolution DEM and linear regression analysis for Samp52. (a) DSM; (b) reference DEM; (c) DEM without post-processing filtering; (d) DEM with post-processing filtering; (e) linear regression analysis of Fig.10(c) to Fig.10(b);

(f) linear regression analysis of Fig.10(d) to Fig.10(b)

的近地面点被进一步去除, II 类误差、总误差减小, Kappa 系数提高, 生成的 DEM 中的“凸起”缩小, 且大小与参考 DEM 中的接近, 决定系数  $R^2$  提高,

RMSE 减小。其中, 图 7 在加入后处理滤波之后的 II 类误差和总误差降幅均超过 35%, 分别减小至 3.02% 和 1.52%, Kappa 系数提高至 0.9694,  $R^2$  增

幅超过 15%，提高至 0.9863，RMSE 降幅超过 70%，减小至 0.1087，生成的 DEM 得到改善。在地形平整的城市地区，加入后处理滤波的组合算法能够进一步剔除大型复杂建(构)筑物反射的近地面点，消除或减弱“凸起”的现象，提高生成的 DEM 质量。

在地形连续的乡村地区，图 8 森林地区中的大量的植被残留在加入后处理滤波之后被进一步剔除，Ⅱ类误差和总误差降幅均超过 50%，分别减小至 12.53% 和 3.28%，Kappa 系数提高 10 个百分点以上，提高至 0.9002；在生成的 DEM 中，山坡上的植被残留产生的“凸起”的数量相较于未加入后处理滤波的情况大幅减少，河流边缘的植被残留和坡顶的人工建(构)筑物残留产生的“凸起”也被进一步削弱，决定系数  $R^2$  提高至 0.9999，RMSE 从 0.3521 减小至 0.1571，生成的 DEM 得到改善。类似地，图 9 中的简单建(构)筑物残留产生的“凸起”在加入后处理滤波之后也被进一步削弱，生成的 DEM 得到改善。在以森林为主的地形连续的地

区，加入后处理滤波的组合算法能够进一步剔除单一渐进式形态学滤波难以去除的植被残留，减少或削弱在构建 DEM 中产生的“凸起”，提高生成的 DEM 的质量。

在图 10 和图 11 地形陡峭的乡村地区，图 10 河流边缘的植被残留在加入后处理滤波之后被进一步剔除，Ⅱ类误差减小，Kappa 系数提高，该区域的 DEM 得到改善，但是“山脊”区域出现平滑的现象，其原因主要是渐进式形态学滤波在该区域过度滤波，其次是加入后处理滤波之后又加重“山脊”区域过度滤波，导致该区域生成的 DEM 的质量较差，总误差和 RMSE 增大，决定系数  $R^2$  下降。此外，在图 11 中，所提算法会错误地移除一些位于“断层”边缘的地面点，造成生成的 DEM 中的“断层”边缘出现平滑的现象，导致该区域的 DEM 的质量降低。在地形陡峭的地区，加入后处理滤波的组合算法难以保留复杂且关键的地形特征，不能构建高质量的 DEM。

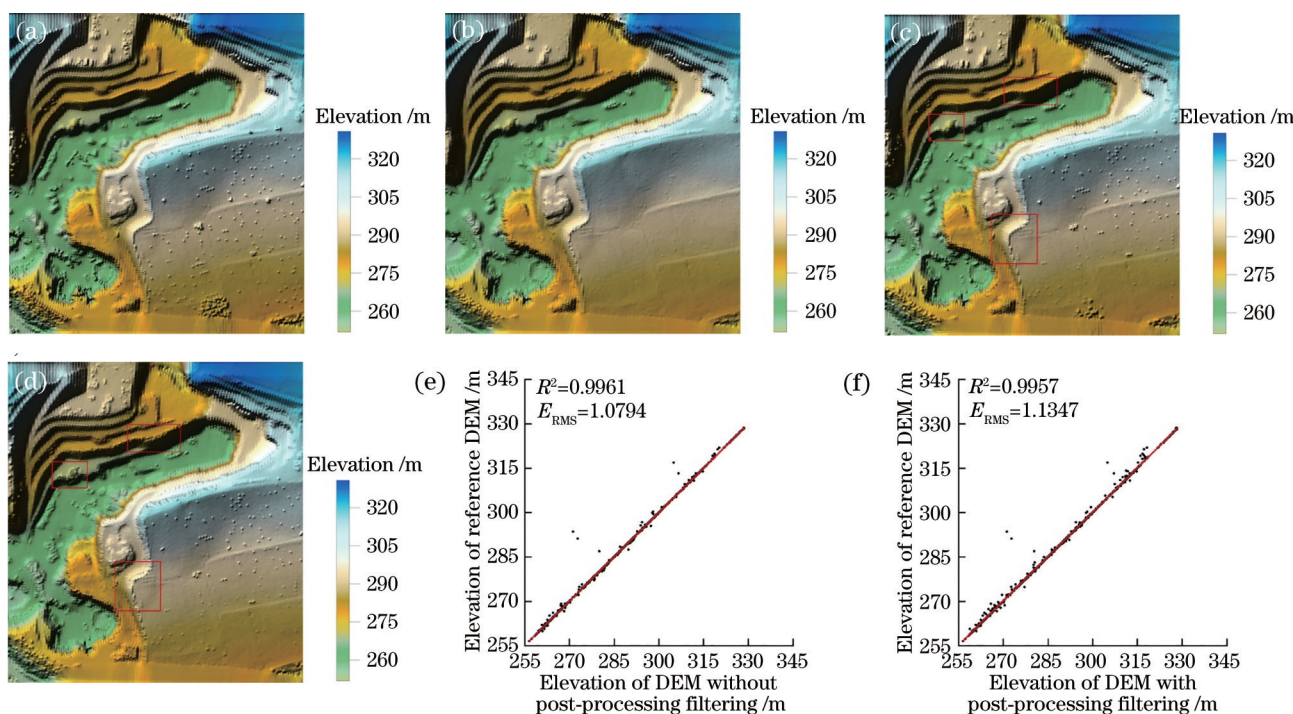


图 11 对 Samp53 的  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  分辨率 DEM 及线性回归分析。(a)DSM;(b)参考 DEM;(c)未加入后处理滤波的 DEM;(d)加入后处理滤波的 DEM;(e)图 11(c)对图 11(b)的线性回归分析;(f)图 11(d)对图 11(b)的线性回归分析

Fig. 11  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  resolution DEM and linear regression analysis for Samp53. (a) DSM; (b) reference DEM; (c) DEM without post-processing filtering; (d) DEM with post-processing filtering; (e) linear regression analysis of Fig.11(c) to Fig.11(b); (f) linear regression analysis of Fig.11(d) to Fig.11(b)

## 4 结 论

提出了一种基于空间向量投影的后处理滤波

方法。通过采用 6 组 ISPRS 提供的不同地形条件下的测试数据进行实验，渐进式形态学滤波和基于空间向量投影的后处理滤波的组合算法能够在抑制

I 类误差增大的前提下进一步剔除单一渐进式形态学滤波算法难以去除的近地面点,大幅降低近地面点遗留导致的 II 类误差,消除或减弱在生成的 DEM 中异常“凸起”的现象,在城市地区和地形连续的乡村地区可以获得更好的点云滤波精度和 DEM 构建精度,具有良好的适用性和可靠性。所提算法在地形陡峭区域构建 DEM 还需要进一步研究,一方面是渐进式形态学滤波算法在陡峭区域容易出现过度滤波,难以保留关键且复杂的地形信息,另一方面是在执行后处理滤波过程中该区域的地形突变会导致投影之和  $L_i$  异常偏大,使位于陡峭边缘的地面点被错误分类,加重过度滤波。下一步拟解决有关点云滤波参数自适应不同地形的问題,以增加算法在复杂地形中的适用性。

### 参 考 文 献

- [1] Liu X Y. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2008, 32(1): 31-49.
- [2] 惠振阳, 胡友健. 基于 LiDAR 数字高程模型构建的数学形态学滤波方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080001.  
Hui Z Y, Hu Y J. Review on morphological filtering algorithms based on LiDAR digital elevation model construction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080001.
- [3] Meng X L, Currit N, Zhao K G. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: a review of critical issues[J]. Remote Sensing, 2010, 2(3): 833-860.
- [4] Axelsson P. Processing of laser scanner data: algorithms and applications[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2/3): 138-147.
- [5] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 23(B4): 110-117.
- [6] Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2000, 33(B3/2): 935-942.
- [7] Sithole G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2001, 34(3/W4): 203-210.
- [8] Susaki J. Adaptive slope filtering of airborne LiDAR data in urban areas for digital terrain model (DTM) generation[J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1804-1819.
- [9] 丁少鹏, 刘如飞, 蔡永宁, 等. 一种顾及地形的点云自适应坡度滤波方法[J]. 遥感信息, 2019, 34(4): 108-113.  
Ding S P, Liu R F, Cai Y N, et al. A point cloud adaptive slope filtering method considering terrain[J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(4): 108-113.
- [10] Shi X T, Ma H C, Chen Y W, et al. A parameter-free progressive TIN densification filtering algorithm for lidar point clouds[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(20): 6969-6982.
- [11] 刘洋, 习晓环, 王成, 等. 一种改进的渐进加密三角网点点云滤波算法[J]. 测绘科学, 2020, 45(5): 106-111, 125.  
Liu Y, Xi X H, Wang C, et al. An improved progressive TIN densification filtering algorithm for point clouds[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(5): 106-111, 125.
- [12] Zhang W M, Qi J B, Wan P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 501.
- [13] 李雅盟, 李朝奎, 王书涵, 等. 一种顾及地形特征的布料模拟滤波改进方法[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1261-1268.  
Li Y M, Li C K, Wang S H, et al. A CSF-modified filtering method based on topography feature[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1261-1268.
- [14] 隋立春, 张熠斌, 柳艳, 等. 基于改进的数学形态学算法的 LiDAR 点云数据滤波[J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 390-396.  
Sui L C, Zhang Y B, Liu Y, et al. Filtering of airborne LiDAR point cloud data based on the adaptive mathematical morphology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(4): 390-396.
- [15] 王竞雪, 张雪洋, 洪绍轩, 等. 结合形态学和 TIN 三角网的机载 LiDAR 点云滤波算法[J]. 测绘科学, 2019, 44(5): 151-156, 183.  
Wang J X, Zhang X Y, Hong S X, et al. Aerial LiDAR point cloud filtering algorithm combining mathematical morphology and TIN[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(5): 151-156, 183.
- [16] Zhang K Q, Chen S C, Whitman D, et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data[J]. IEEE

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 872-882.
- [17] Pingel T J, Clarke K C, McBride W A. An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LiDAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 77: 21-30.
- [18] 苗启广, 郭雪, 宋建锋, 等. 基于区域预测的LiDAR点云数据形态学滤波算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011003.
- Miao Q G, Guo X, Song J F, et al. LiDAR point cloud data with morphological filter algorithm based on region prediction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011003.
- [19] Hui Z Y, Hu Y J, Yevenyo Y Z, et al. An improved morphological algorithm for filtering airborne LiDAR point cloud based on multi-level kriging interpolation [J]. Remote Sensing, 2016, 8(1): 35.
- [20] ISPRS Commission III, Working Group 3. Report: ISPRS comparison of filters[R]. Mekelweg: Delft University of Technology, 2003: 18-23.
- [21] Meng X L, Wang L, Silván-Cárdenas J L, et al. A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LiDAR[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(1): 117-124.