

# 陡坡密集点云双重滤波方法研究

李永强<sup>1,2</sup>, 吴立新<sup>1</sup>, 刘会云<sup>2</sup>, 张健雄<sup>2</sup>, 刘昌华<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学空间信息科学与技术研究所, 北京 100875;

2. 河南理工大学矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室, 河南 焦作 454100)

**摘要:** 用地形三维激光扫描仪监测陡坡表面的细微变化, 关键技术之一是对原始点云的精确滤波, 即从密集点云中准确滤除非地形点, 保留真实地形点。针对地势陡峭、表面复杂、植被多、密度分布极不均匀的陡坡点云, 笔者发展了一种双重滤波方法: 在对原始点云进行投影面变换的基础上, 采用变窗口均值限差法滤除明显的非地形点, 完成粗滤波; 通过局部区域增长法找出绝大多数地形点, 以占优势的地形点为参考, 用局部最小二乘曲面拟合法对剩余未分类数据点进行检核, 分离出非地形点, 完成精滤波。文中选用 3 个不同类型的陡坡点云实例验证了该方法对于陡坡密集点云具有良好的滤波效果。该算法对野外大场景三维激光扫描点云滤波也有一定的参考价值。

**关键词:** 点云; 投影变换; 局部区域增长; 最小二乘曲面拟合; 双重滤波

**中图分类号:** TP75   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-0504(2011)01-0007-04

## 0 引言

地形三维激光扫描仪具有数据获取速度快、精度高、非接触获取大面积密集点云等优点, 在许多领域得到了广泛应用, 陡崖、滑坡体的形变监测是其中相对活跃的一个研究领域<sup>[1-3]</sup>。使用地形三维激光扫描仪获取滑坡体表面三维点云后, 非常重要的一个环节是点云滤波, 即滤除多余的非地形点, 保留必需的地形点。点云滤波是各项研究工作的基础, 滤波的质量直接影响着后续数据处理的质量, 与研究结论密切相关。受扫描方式的限制, 地形三维激光扫描仪在获取地势陡峭、表面复杂、植被覆盖广的滑坡体表面数据时, 会出现非地形点比重大、点云密度分布极不均匀的情况, 而变形监测往往要求达到毫米级精度<sup>[4]</sup>, 这对点云滤波提出了特殊要求: 既要准确滤除非地形点, 又要准确保留地形点, 还不能以牺牲数据点的密度为代价<sup>[5,6]</sup>。地表形变监测常用方法是通过对比不同时期的表面模型, 找出模型间不相符区域<sup>[7]</sup>, 无论使用点云模型还是格网模型, 都要求真实可靠的地形点数据, 所保留地形点在滤波前后不能有变动, 因此改变数据值的滤波方法(如中值滤波法)不可取。目前在点云滤波方面已开展了大量研究, 出现了很多滤波方法, 大致可以分为基于数学形态学法<sup>[8]</sup>、区域增长法<sup>[9]</sup>、拟合法<sup>[10]</sup>、基于坡度法<sup>[11]</sup>等。但是现有滤波算法很多是基于机载 LiDAR 点云, 机载 LiDAR 点云与地形三维激光扫描

点云有较大差异, 后者不但数据密度大, 而且没有二次回波, 因此机载 LiDAR 点云滤波算法应用于地形三维激光点云有一定局限性。当前在陡坡密集点云滤波方面的研究还很少, 针对上述问题, 笔者试图找到一种有效的陡坡点云滤波方法。

## 1 陡坡密集点云双重滤波

地形三维激光扫描仪获取的陡坡点云有如下特征: 裸露岩石的凸出部分数据点密集, 凹进部分数据点稀疏, 甚至存在数据缺失; 植被较多区域数据点密度较小, 植被数据点所占比重很大, 且明显高出地面, 而地形点密度相对较小; 从较小尺度看, 陡坡表面呈现凸凹不平的波浪状。针对以上特点, 笔者采用双重滤波策略: 先进行粗滤波, 滤除明显的非地形点, 减小非地形点的比重; 再进行精滤波, 在找出绝大多数地形点后, 以占绝对优势的地形点为参考, 按一定规则对剩余的少量未分类数据点进行检核, 区分出地形点和非地形点。上述滤波思想的实现, 可按顺序分解为以下 4 个步骤。

### 1.1 投影面变换

激光点云中每个数据点都具有空间三维坐标  $(x, y, z)$ , 点云数据处理的实质就是依据数据点间的空间几何关系, 在相应规则下实现空间变换与判断。为计算方便, 往往将三维空间简化到二维空间, 把三维中的某一维(例如  $z$ )作为属性信息对待。对于陡坡点云, 在一个很小的水平面区域内, 可能会包含非常

收稿日期: 2010-08-30; 修订日期: 2010-11-01

作者简介: 李永强(1976-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光扫描、灾害测量。E-mail: liyongqiang@hpu.edu.cn

多的数据点,既影响数据处理效率,也使得数据处理结果的可靠性得不到保障,因此有必要将陡峭地形转化为缓和地形。投影面变换能有效解决上述问题,因为三维空间简化到二维空间的实质就是投影面变换,即把垂直于轴的水平面作为投影面进行投影。对陡坡点云选择适当的投影面(空间平面或曲面),每个数据点经投影面投影变换后得到新值 $(x', y', z')$ ,使原来陡峭的坡面变缓。在本研究中,对原始点云进行最小二乘平面拟合,把拟合平面作为投影面,投影变换后的陡坡明显缓和。尽管原始点云中包含大量非地形点,但对拟合投影面的影响有限,经验证,滤波前后点云最小二乘拟合平面法向量间的夹角仅有 $1^\circ$ ,因此直接将原始点云拟合的平面作为投影面。

### 1.2 变窗口均值限差法粗滤波

要滤除树冠等明显的非地形点,均值限差法<sup>[12]</sup>是一个简单有效的方法。其主要思想是设定一个滤波窗口,计算该窗口内所有数据点高程的平均值,根据非地形点在顶部、地形点在底部、多数非地形点高于均值的特性,设定一个限差值,凡与平均值高差大于限差值的点都视为非地形点。在地形点占优的区域,非地形点明显高于平均值,但当非地形点所占比重较大时,非地形点与平均值的高差变小,限差的设置困难,太大则滤波效果不明显,太小可能将地形点滤掉。因此,在均值滤波中,限差值的确定非常重要,对于机载 LiDAR 密度相对均匀的点云,可通过自适应调整限差值进行有效滤波,但对密度分布不均匀的陡坡地形三维激光扫描点云效果并不理想。笔者综合考虑均值限差法中的两个重要参数:限差值和窗口大小,提出变窗口均值限差法:先设置较小滤波窗口和较大限差值完成一次滤波,窗口内数据点的数目减小,非地形点所占比重降低,再适当增加窗口宽度、减小限差值,完成一次滤波,重复数次操作,即可有效地滤除明显的非地形点。

### 1.3 地形点局部区域增长

经过粗滤波操作,点云中大部分明显非地形点被滤除,但是点云中还包含有不明显的非地形点和少量明显非地形点,由于地形的复杂性和点云密度的不平衡性等因素,这些非地形点较难直接从点云中直接滤除。粗滤波后的点云中地形点占绝对优势,非地形点所占比重较小的,可以先找出绝大多数的地形点,再以这些地形点为参考判断未分类的地形点,从而间接滤除非地形点。要查找出大多数的地形点,区域增长法<sup>[13,14]</sup>是有效的方法,在本研究中算法描述如下:1)对点云按平面坐标划分格网,将各

数据点分配到对应格网中,属性值设置为未分类;2)判断各格网中数据点数,若少于限差,不参与后续运算;3)对各格网内的数据点按高程排序,选取高程较低的某个数据点为种子点,其属性设置为地形点;4)对每个种子点所在格网及邻近格网内未分类的数据点按空间距离进行局部区域增长,符合条件的点属性设置为地形点;5)把新添加的数据点作为种子点,进行步骤 4 的操作;6)重复数次步骤 5 的操作。

区域增长算法中,种子点的选择很重要,选择不当会带来较大误差。由于陡坡点云密度分布很不均匀,在空间上存在不连续现象,种子点过少可能会使增长局限在有限区域,因此应在整个点云空间中均匀选择较多种子点。笔者采取以下措施保障种子点的恰当选择:

(1)将点云投影到格网内后,判断每个格网内的点数,若小于限差,则该格网内不选择种子点。因为当格网内数据点较少时,地形点较少甚至不存在地形点,该格网内选择的种子点的可靠性较差。

(2)每个格网内的数据点按高程排序后,从最低点算起,按该格网内总数的 10% 向上推,将该点作为种子点。因为在局部小区域内,地形点的高程小于非地形点,高程最低点可认为是地形点,为了避免噪声,从最低点向上推格网内点数的 10%。

(3)对初步选择的种子点进行检核,比较其与周围种子点的高差,若明显高于周围种子点,则该点不作为种子点。设置适当的格网宽度和点数限差值,就能保证所选取的种子点为地形点。

由于种子点均匀分布在点云区域,一方面克服了点云不连续的限制,另一方面每个种子点仅在局部区域增长,误差的传播很有限,这保证了地形点查找的正确性。

### 1.4 局部最小曲面拟合精滤波

局部区域增长算法能查找出点云中绝大部分地形点,但仍有少量不能进行分类的数据点,这些点中主要是非地形点,也有少量地形点。在 1.3 节中的局部区域增长算法中,为保证选择地形点的正确性,用于增长的距离限差值较小,密度较稀疏区域的地形点不能被查找出来,而这些区域往往是监测的重要部位,每个地形点在后续的处理中都占有较大权重,因此准确地分离出这些地形点非常重要。陡坡表面在局部细节上表现为空间二次曲面的特性,由局部地形点拟合的曲面能较好地反映出该区域的地形特征。对于局部区域内未分类的数据点,设置一个较小的限差值,到曲面距离小于限差的点为地形

点,大于限差的点为非地形点。选用二次曲面方程  $z = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2$ ,采用局部最小曲面拟合法对未分类数据点进行判别,算法描述如下:1)对点云划分格网,将属性值为地形点的数据点划分到对应格网中;2)对未分类数据点  $P$ ,按坐标值找出其所对应的格网  $M_{i,j}$ ;3)找出格网  $M_{i,j}$  及其邻近格网内的数据点,这些点组合为点集  $S$ ;4)判断点集  $S$  中数据点的数目,若大于给定阈值,则用最小二乘法拟合为空间二次曲面  $C$ ,若小于阈值,则扩大点  $P$  的临近范围,直到满足要求;5)求出点  $P$  到曲面  $C$  的距离,若小于限差,则认为点  $P$  符合局部空间曲面的特

征,属性赋值为地形点,否则属性赋值为非地形点。

## 2 实验分析

选择焦作市缝山针公园中某陡坡为研究对象(图 1),陡坡高度 30~50 m,跨度近 300 m,使用 Leica ScanStation2 激光扫描仪,按 2 cm 采样间隔获取点云数据。为方便数据处理,将实验区划分为 3 个区域(图 1 中 A、B、C)。A 区为倾斜陡坡,植被约占 40%;B 区相对 A 区复杂,其左半部分地势近似垂直,右半部分地势倾斜,植被约占 30%;C 区中植被约占 10%,但地势更复杂,大部分区域近似垂直。

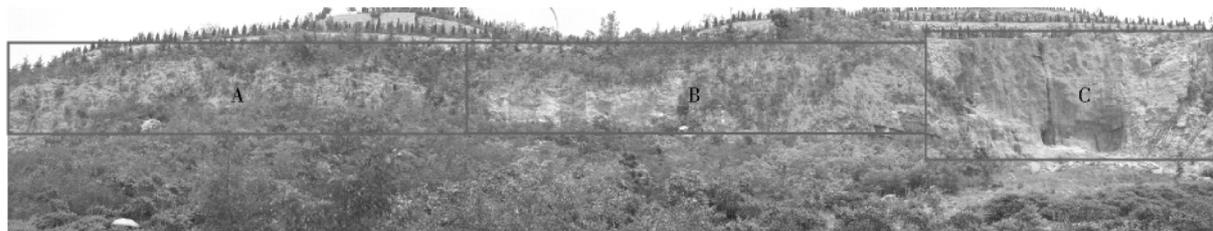


图 1 实验区照片

Fig. 1 Picture of the experimental area

图 2(见封 2)为陡坡点云滤波效果图,从左至右分别为 A、B、C 3 个实验区点云图像。A、B 区依次采用算法中的 4 个步骤进行滤波,C 区中植被集中在平坦区域,若对 C 区进行平面投影,则原先平坦的区域变得陡峭,反而不利于植被的滤除,因此 C 区没有进行投影面变换,直接采用后 3 个步骤进行滤波。从滤波效果看,3 个实验区内点云滤波均能达到预期的效果,几乎不出现错分和漏分现象,证明了本文滤波方法的有效性和可靠性。

## 3 讨论

(1)地形三维激光扫描仪获取的点云数据中,除包含点的空间坐标外,还包含纹理、反射强度等信息。由于地形三维激光扫描仪内置(或集成)相机的分辨率有限,而扫描对象的距离较远(100 m 以上),可见光相机受外界影响较大,加上配准误差等因素的影响,用纹理作为辅助信息对整个滤波效果的帮助不大,甚至带来更多误差。反射强度是另外一个可供选择的辅助信息,但是受材质、扫描角度和扫描距离的影响,会出现“同质异谱”和“同谱异质”的现象,即使在较小的局部区域内,也同样出现上述现象,因此以反射强度作为辅助滤波信息的应用范围有限。本研究仅根据点云的空间关系进行滤波,没有采用辅助信息。Alba 等<sup>[15]</sup>用近红外相机与激光点云融合,将近红外影像作为点云滤波的辅助信息,

笔者拟将地形三维激光扫描仪与高分辨率相机的立体影像融合来研究点云滤波。

(2)本研究的一个重要策略是对点云划分格网,滤波计算都局限在当前格网及其邻近格网的局部范围内,在算法中顾及了点的密度、离散度等特征,其它一些特征如坡度、坡向、复杂度等还需在进一步的研究中加入到算法中。

(3)笔者发展的双重滤波方法主要分 4 个步骤:投影变换、粗滤波、地形点的区域增长、精滤波。投影变换的主要目的是“缓和”地形,利于后续处理。笔者选取的 3 个实验区中,A、B 在空间形态上都接近于平面,因此进行平面投影变换成功地“缓和”了地形,但是陡坡地形的空间形态是多变的,可以考虑采用其它类型的投影面,如柱筒面、锥面等;粗滤波时,笔者选用变窗口均值限差法,主要是顾及了点云密度不均及局部植被占优的情况,实际操作中,在滤波前,可以利用交互工具直接从点云中移除明显的非地物点,再进行滤波,为了进行可靠性验证,图 2 中的效果图是基于原始点云进行的操作;区域增长算法在本质上属于聚类方法,文中按空间距离进行增长,极少数与地形点相连的非地形点(树干)可能会误分为地形点,在后续的研究中,还需考虑其它的限制条件,如把局部渐进增长的 TIN<sup>[16]</sup>作为限制条件对增长的数据点进行检核;精滤波操作中,文中选择能较好表达局部地形特征的空间二次曲面来模拟

地形,作为判断地形点和非地形点的依据,若所研究区域地形存在一定的特殊性,可考虑与该区域地形更为相似的其它空间曲面模型。

本研究实验数据采集工作得到了河南理工大学测绘学院师生李天子、邓安健、于海洋、刘宁、王玉鹏、赵国强、吴新辉的大力支持,此致致谢!

#### 参考文献:

- [1] PROKOP A, PANHOLZER H. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9: 1921—1928.
- [2] SUI L, WANG X, ZHAO D, et al. Application of 3D laser scanner for monitoring of landslide hazards[A]. XXI ISPRS Symposium[C], 2008. 277—282.
- [3] OPPIKOFER T, JABOYEDOFF M, BLIKRA L, et al. Characterization and monitoring of the Aknes rockslide using terrestrial laser scanning[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2009, 9: 1003—1019.
- [4] ABELLAN A, JABOYEDOFF M, OPPIKOFER T, et al. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to a rockfall event[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9: 365—372.
- [5] 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚, 等. 海量激光点云的分块处理及植被自动过滤技术研究[A]. 第一届全国激光雷达对地观测高级学术研讨会[C], 2010. 101—104.
- [6] 刘春, 陆春. 三维激光扫描数据的压缩与地形采样[J]. *遥感信息*, 2005(2): 6—10.
- [7] BITELLI G, DUBBINI M, ZANUTTA A. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslides bodies[A]. XXth ISPRS Congress[C]. Turkey, 2004. 246—251.
- [8] JIANG J J, MING Y. Classification and filtering of LiDAR point clouds for DTM generation[A]. ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes" [C]. The Netherlands, 2006.
- [9] BAMEA S, FILIN S, ALCHANATIES V. A supervised approach for object extraction from terrestrial laser point clouds demonstrated on trees[A]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*[C], 2007. 135—140.
- [10] TOVAN D, PFEIFER N. Segmentation based robust interpolation: A new approach to laser data filtering[A]. *Laser Scanning 2005*[C], 2005. 79—84.
- [11] FILIN S, PFEIFER N. Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(2): 71—80.
- [12] 王明华, 张小红, 曾涛, 等. 机载 LiDAR 数据率预处理方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(2): 224—227.
- [13] 成晓倩, 赵红强. 基于区域生长的 LiDAR 点云数据滤波[J]. *国土资源遥感*, 2008(4): 6—8, 21.
- [14] 胡怀宇, 崔汉国, 代星, 等. 基于区域增长法的散乱点云分区方法[J]. *计算机应用*, 2009, 29(10): 2716—2718, 2722.
- [15] ALBA M, SCAIONIM. Automatic detection of changes and deformations in rock faces by terrestrial laser scanning[A]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*[C], 2010.
- [16] 李卉, 李德仁, 黄先锋, 等. 一种渐进加密三角网 LiDAR 点云滤波的改进算法[J]. *测绘科学*, 2009, 34(3): 39—40, 216.

### Double-Filtering Algorithm for Dense Point Cloud with Steep Slope

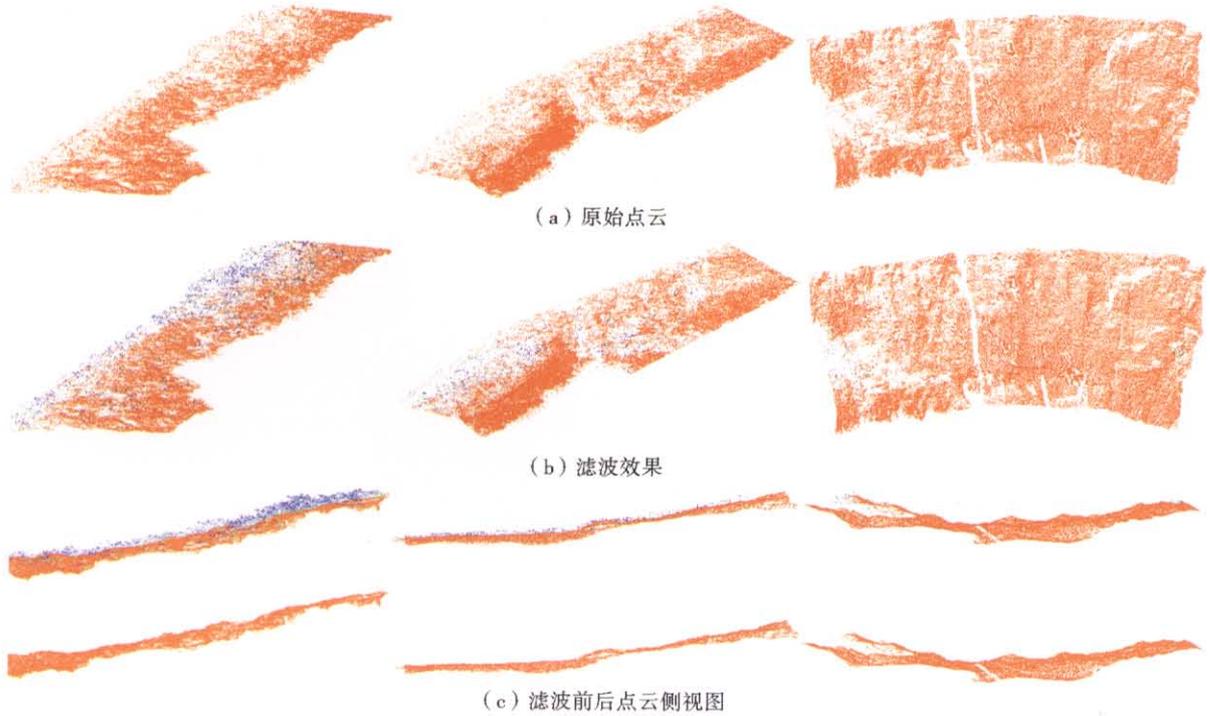
LI Yong-qiang<sup>1,2</sup>, WU Li-xin<sup>1</sup>, LIU Hui-yun<sup>2</sup>, ZHANG Jian-xiong<sup>2</sup>, LIU Chang-hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2. Key Laboratory of Mine Spatial Information Technologies of SBSM, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454100, China)

**Abstract:** Point cloud filtering is a difficult problem for deformation monitoring with 3D terrestrial scanner, especially for some steep slope that has complex surface, wide coverage vegetation, and inhomogeneous density point cloud. In this paper, the author developed an effective double-filtering algorithm to solve the above problem. The algorithm has four steps: First, to transform the coordinates of the point cloud through a projection on a plane, which is fitted through least square algorithm with original point clouds, this operation slows down the steep slope; Secondly, to remove away obvious non-topographic points using a variable size mean tolerance value algorithm; Thirdly, to find out most of real topographic points using an algorithm called local regional growing; Fourthly, Fitting least square curves with local real topographic points, using these curves to check unclassified points, separate real topographic points from non-topographic points. The former two steps called rough-filtering and the latter two steps called precise-filtering. The author selected three types of steep slope point cloud data to verify the algorithm, result proves that the algorithm has good effect and can meet the requirement. The algorithm also has referential value for other outdoor point clouds.

**Key words:** point cloud; project conversion; local regional growing; least square curve fitting; double-filtering



注: 蓝色点为粗滤波得到的明显非地形点, 绿色点为精滤波得到的不明显非地形点。

图 2 陡坡点云滤波效果

Fig. 2 Result of filtering dense LiDAR point cloud with steep slope

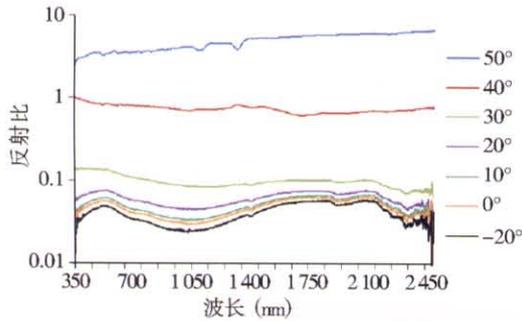


图 2  $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$ , 不同天顶角  $\theta_r$  测量得到的反射比  
Fig. 2 Bidirectional reflectance at different scatter zenith with  $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$

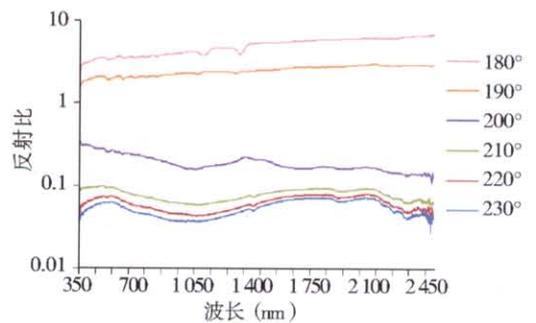


图 3  $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$ , 不同方位角  $\varphi_r$  测量得到的反射比  
Fig. 3 Bidirectional reflectance at different scatter azimuth with  $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$

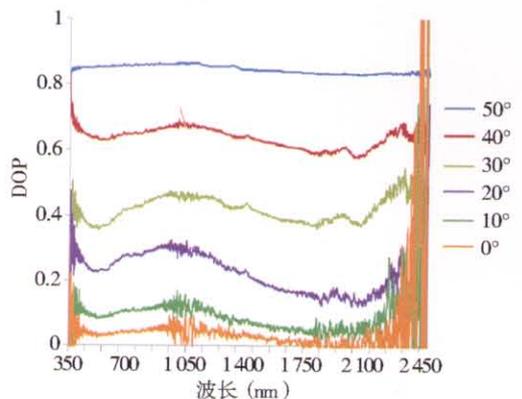


图 4  $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$ , 不同天顶角  $\theta_r$  测量的偏振度  
Fig. 4 DOP at different scatter zenith with  $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$

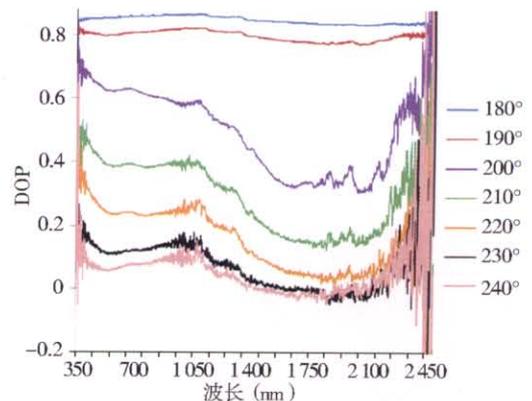


图 5  $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$ , 不同方位角  $\varphi_r$  测量的偏振度  
Fig. 5 DOP at different scatter azimuth with  $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$