

地面三维激光扫描方法研究红壤侵蚀恢复区植被垂直结构^①

张海东^{1, 2}, 于东升^{1*}, 史学正¹, 王 宁¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:利用地面三维激光扫描仪 HDS 3000 对南方红壤侵蚀恢复区植被样方进行扫描, 提取了植被的平均树高、胸径, 并分层反演了森林冠层及灌草层投影叶面积指数。结果表明: 利用地面三维激光扫描仪能够准确获取样方尺度上的植被垂直结构信息, 研究区整体投影叶面积指数达 0.60, 林冠层投影灌草层平均投影叶面积指数分别为 0.37 和 0.41。样方植被整体的变异性较小, 而垂直方向上林冠层和灌草层的变异性较大。成土母质是引起植被垂直结构差异的重要原因, 不同成土母质红壤上植被垂直结构恢复度由高到低依次为: 千枚岩林地 > 红砂岩林地 > 花岗岩林地, 垂直结构恢复水平的不同引起了林下土壤侵蚀的差异。

关键词: 植被恢复; 土壤侵蚀; 投影叶面积指数; 植被结构

中图分类号: S157.1

植被是影响土壤侵蚀最敏感的因子^[1-2], 通过截留降雨、减小雨滴动能及增加土壤渗透等方式减少土壤侵蚀的发生^[3-4]。由于植被垂直方向上不同冠层(如林冠层、灌木层和草本层)距离地面的高度不同, 其防治土壤侵蚀的作用也存在着差异。现有研究大多将植被作为一个整体的概念^[5-6], 却忽略了植被水土保持功能在垂直方向上的异质性。最新研究表明, 土壤侵蚀强度随植被垂直结构的不同而改变^[7]。大多植被防侵蚀功能研究的重点集中在林冠层, 而最新研究显示林下穿透雨滴的侵蚀力是空旷地的 2.59 倍, 表明林地系统中灌木、草本和凋落物保护土壤不受侵蚀的重要性^[8]。因此, 植被垂直结构参数定量化对林下土壤侵蚀的研究至关重要。

红壤在中国南方地区广泛分布, 面积达 $2.18 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占中国土地面积的 1/5。土壤侵蚀是红壤地区最主要的生态问题, 区域侵蚀面积比高达 40%^[9]。中国南方红壤地区原始植被以常绿阔叶林为主, 然而受自然与人为因素的干扰, 该区域原始植被已不复存在, 大多被次生马尾松林所取代。受不同管理措施、土壤养分及地形地貌等因素的影响, 植被垂直结构在区域上呈现出较大的异质性, 从而导致林下土壤侵蚀相应地呈现出较大的差异。通过获取不同高度冠层的投影叶面积指数(projected leaf area index, *PLAI*, 定义为光线从无限远的距离穿过树叶投射到地面的区

域累计投影面积比)、覆盖度等信息^[10], 能够适宜地描述植被不同高度上的冠层分布状况, 从而更好地研究植被垂直结构与土壤侵蚀之间的关系。

传统的植被参数测量方法难以定量化垂直方向上的植被覆盖度等关键植被因子, 因此较多研究采用目估法获取植被覆盖度^[11-12], 数据精度难以保证。照相法的使用有效提高了植被参数获取的精度^[13], Gu 等人^[14]利用照相法垂直向上、向下分别拍照, 获取拍照区域植被覆盖度, 从而达到分离森林冠层和林下植被的目的。然而照相法不适用于林分密度较高的地区; 且获取的样方范围有限, 未必能获取代表性的数据; 此外, 该方法所得到的数据是影像照片, 无法进行空间量测。一些研究尝试利用光学遥感影像提取植被垂直结构, 而 Maltamo 等人^[15]则认为用遥感影像几乎不可能判别植被的垂直结构。地面激光雷达(terrestrial laser scanning, TLS)的应用能够解决上述问题, 其提供的有效射程内基于一定采样间距的采样点坐标, 形成了一个基于 3D 数据点的离散三维对象模型, 精度能够达到厘米级别, 完全能够满足样方尺度上植被参数测量精度的需求^[16]。

现有 TLS 关于植被的研究, 多集中在单株立木树高与胸径的提取以及森林冠层结构的估算^[17-20], 而对土壤侵蚀区恢复植被垂直结构的研究较为少见。本研究利用徕卡 HDS 3000 获取南方典型红壤侵蚀区

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB950702)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050507)资助。

* 通讯作者(dshyu@issas.ac.cn)

作者简介: 张海东(1984—), 男, 江苏东台人, 博士研究生, 主要从事资源环境与遥感信息研究。E-mail: arronkwokzhang@163.com

次生恢复林林分结构,对整体结构进行层次分离,从而提取植被林冠层与林下灌草层的投影叶面积指数参数,并通过实际测量对其精度进行验证,旨在为南方红壤地区土壤侵蚀研究提供精确的数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兴国县位于江西省中南部(115°01'~115°51'E, 26°03'~26°41'N),总面积 3 214.5 km²,海拔 127.9~1 204.0 m (图 1)。全县三面环山,形成以县城为中央的小盆地,主要的地貌类型有河谷冲积平原、红土岗地、红岩丘

陵与花岗岩和变质岩山地。属亚热带季风湿润气候,年均气温为 18.9℃,年均降雨量达 1 538.7 mm,雨量集中在 4—6 月,且多暴雨出现^[21]。主要的土壤类型为红壤。研究区林地总面积达 2 260.0 km²,占整体县域面积的 70.2%。现有植被主要为次生马尾松林,由于土壤养分条件差,林下植被稀疏,马尾松生长滞缓,30 年生马尾松平均树高不超过 20 m,部分树高低于 10 m。经过大规模治理,兴国县森林覆盖率显著提高,但水土流失依然严重,主要集中在盆地中心的紫色岩、红砂岩及丘陵区花岗岩母质的广大地区。

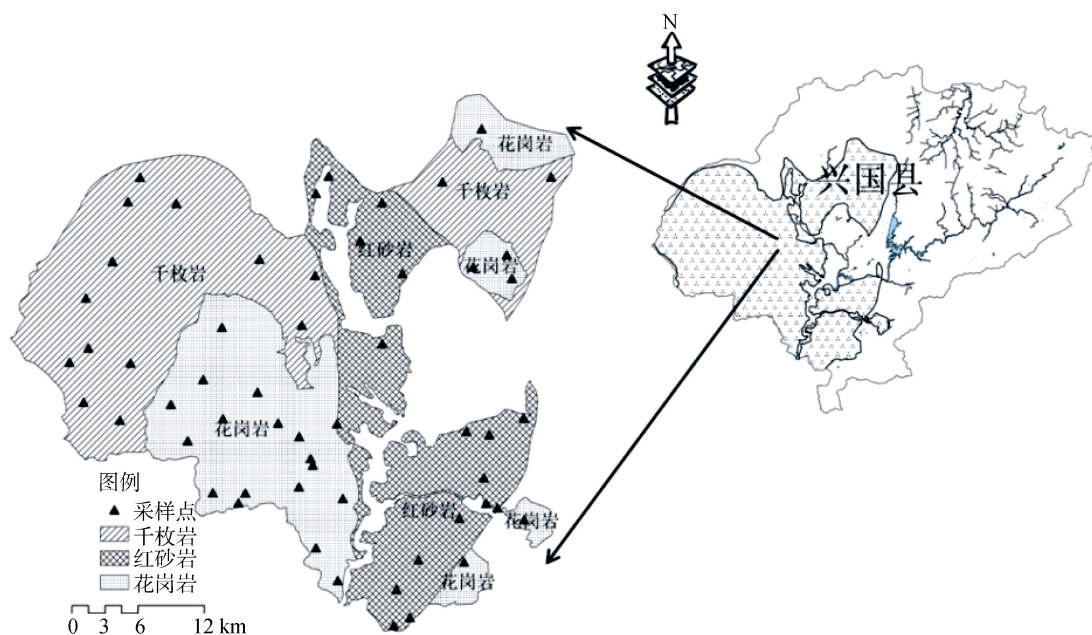


图 1 研究区位置

Fig. 1 The location of the study area

1.2 试验设置

在对研究区已有考察的基础之上,在兴国县西南部按成土母质面积比例选取 56 个植被样方,其中千枚岩和红砂岩上各 17 个,花岗岩上 22 个,分别布于不同覆盖度的纯林、林草及林灌草植被下,样方数据采集时间为 2011 年 9 月至 10 月。

利用 HDS 3000(Leica Geosystems HDS, San Ramon, CA, USA)进行植被样方扫描。HDS 3000 是一款基于时间测量距离的高密度三维激光扫描仪,其扫描获取的点云数据具有 X, Y, Z 坐标,能够直接得到研究对象的精确尺寸,最大视场分别为水平方向 360°、垂直方向 270°,在距离目标 50 m 范围内样方测量精度小于 6 mm,因此能够精确地获取目标信息。

在利用 HDS 3000 扫描前,用仪器内嵌的数码相机通过自动旋转的反射镜拍摄全视角的真彩色相

片,用于目视解译过程中障碍物的剔除和立地特征的判别。由于部分样方植被覆盖较好,树木之间特别是林冠层存在遮挡现象,单站点测量易导致激光扫描仪发射的激光束被树木遮挡而形成信息缺失,为了获取更精确的测量数据,本研究在每个样方选取 3 个扫描站点进行扫描^[19]。扫描过程中在每测站扫描过程中放置控制标靶,便于将不同测站获取的点云数据拼接到同一坐标系下,并确保每个站点扫描数据有部分区域重复,以利于数据配准。在每一测站安置好仪器后,在与 HDS 3000 连接的电脑屏幕上选取扫描区域,水平方向与垂直方向上扫描分辨率均设为 10 mm,在其他参数设置完毕后利用扫描仪进行自动扫描,对重点区域利用 SmartScan 智能扫描技术获取精细图像。

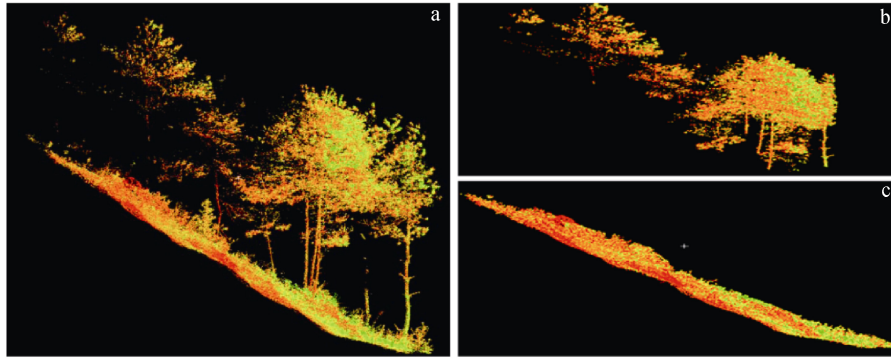
同时,利用直径卷尺、测高仪对样方内便于测量

的树木进行树高和胸径的测量,作为实测数据对 TLS数据的精度进行验证,根据公式(1)计算点云测量值的相对误差,从而得到其精度。

$$\text{相对误差} = \frac{\text{TLS参数值} - \text{实测参数值}}{\text{实测参数值}} \quad (1)$$

1.3 植被结构定量提取

TLS 点云数据的植被信息提取在 Cyclone 7.0(Leica Geosystems HDS, San Ramon, CA, USA)软件中进行。



(a: 植被样方; b: 林冠层; c: 灌草层)

图 2 植被垂直结构分层提取

Fig. 2 Extraction of the vegetation canopy at different heights

选取植被点云数据与地面的交点作为单木的最低点,其与最高点云间的距离作为单木树高,对样方内测量的所有单木树高值取平均即得到样方的平均树高;由单木基点向上量取单木距离地面 1.3 m 高度处树干的宽度作为单木的胸径,并对样方内所有树木的胸径值取平均即可得到样方的平均胸径值;植被垂直方向上投影叶面积指数的测量包括林冠层(图 2b)和林下灌草层两个层次(图 2c),林冠层投影叶面积指数($PLAI$ of forest canopy, $PLAI_F$)提取方式如下:在 Top view 视角下,选择将 TLS 点云数据投影在 XY 平面上,剔除冠层以下点云数据,仅保留林冠层数据,分别提取枝叶分布的点云区域,利用软件的 patch 功能建模后累加各树冠的投影面积,即可获取冠层实际的投影面积,再除以样方面积即得到 $PLAI_F$ (公式 2)。类同于 $PLAI_F$ 的提取,林下灌草层投影叶面积指数($PLAI$ of understory, $PLAI_U$)提取时剔除冠层和树干的点云,对地表植被进行测量(公式 3)。

$$PLAI_F = \left(\sum_{i=1}^n F_i \right) / A \quad (2)$$

$$PLAI_U = \left(\sum_{i=1}^n U_i \right) / A \quad (3)$$

式中: $PLAI_F$ 为林冠层投影叶面积指数, $PLAI_U$ 为灌草层投影叶面积指数, F_i 为样方内各斑块冠层投影

首先利用原始点云数据提供的坐标匹配功能,将 3 个测站获取的点云数据拼合为一个完整样方的点云模型。其次,对点云数据进行预判读,选取扫描区域内有代表性的植被区域进行人机交互解译,提取面积为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的正方形区域进行植被参数定量提取。对点云数据进行平移、旋转、缩放,并通过改变视场角等操作,剔除植被样方外的点云,并在垂直方向上对样方植被林冠层和灌草层进行分割(图 2)。

叶面积指数, U_i 为样方内各斑块灌草层投影叶面积指数, n 为样方内各斑块投影到地面的数量, A 为样方面积。

2 结果与讨论

2.1 TLS 数据精度验证及影响因素

考虑到垂直方向上各冠层的 $PLAI$ 难以实际测量,本研究通过在 32 个易于测量的样方手工测量树高与胸径信息(本研究中树高和胸径均为样方各单木数据的累加平均值),用于 TLS 数据的精度验证。结果显示:TLS 数据获取的树高总体相对误差平均值为 15.3%($RMSE = 3.18 \text{ m}$),树高测量的精度为 84.7%;胸径的总体相对误差平均值为 17.9%($RMSE = 3.85 \text{ cm}$),胸径测量精度为 82.1%;相关性分析结果表明,树高与胸径手工测量和 TLS 测量结果相关性较为显著(图 3),决定系数 R^2 分别为 0.76($P < 0.01$)和 0.67($P < 0.01$)。可见利用 TLS 提取的植被参数具有较高的精度。

TLS 提取树高、胸径等参数反演的精度主要受点云数据植被与地面交界点判别的影响,由于研究区地表有枯枝落叶层的覆盖,其点云颜色与土壤颜色较为接近,不利于目视解译,因此植被在地面的基部位位置判别存在一定的误差,从而导致了树高测量值的偏差;而胸径的测量位置也会相应地上下移动,从而测量的距离地面 1.3 m 高度处的树木横截面与真实横

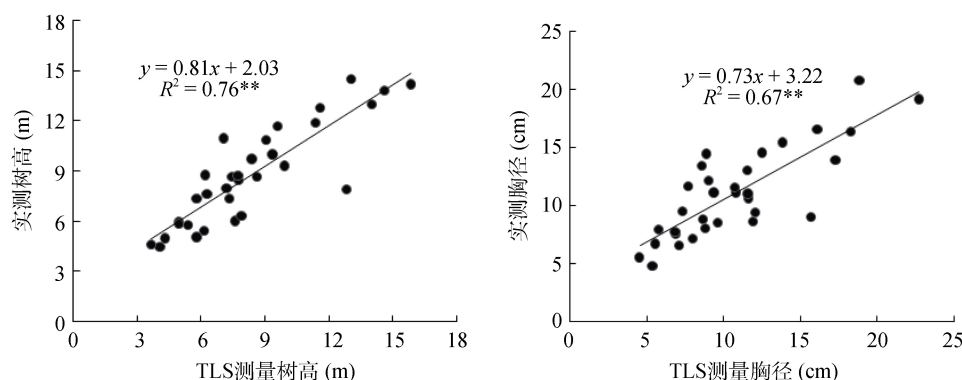


图 3 TLS 数据与实测数据相关性

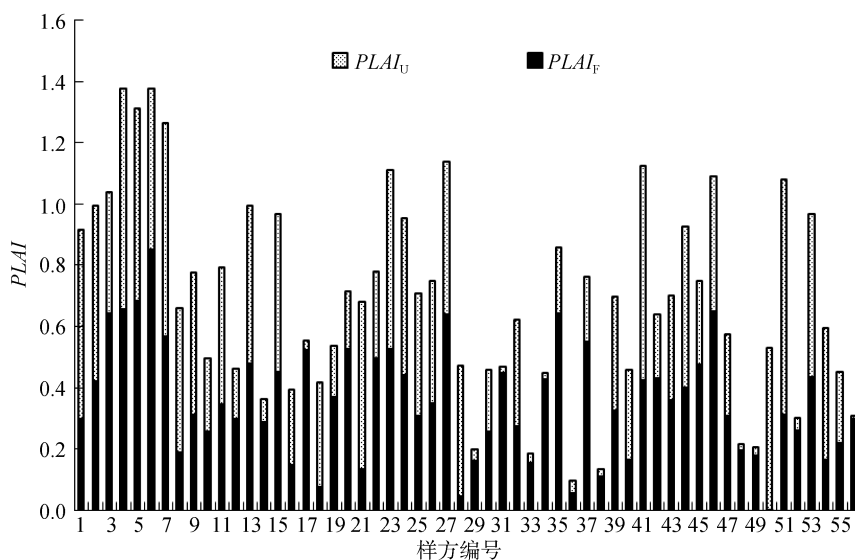
Fig. 3 The relationship between the data from TLS and manual measurement

截面有所位移,引起胸径测量值与真实值间的差异。此外,扫描站点数量的设置也是 TLS 数据提取精度的影响因素之一。通常,基于 TLS 的单棵立木精确扫描的站点数多达 10 余个,而考虑到本研究扫描目标为样方尺度,因此每个样方仅设置了 3 个扫描站点,虽然满足了扫描对象立体成像的基本要求,但点云信息仍然有所损失,扫描精度在一定程度上有所下降。

2.2 植被垂直结构特征

植被点云数据解译结果显示(图 4),研究区树高和胸径平均值分别为 7.47 m 和 10.95 cm,与正常立地条件下 30 年生马尾松相比,两个参数值均较小,原因在

于前期的土壤侵蚀导致研究区立地质量较差,抑制了侵蚀区植被的正常生长。 $PLAI_F$ 在 0.04 ~ 0.85 的范围内波动,平均值为 0.37; $PLAI_U$ 分布范围为 0.02 ~ 0.77,平均值为 0.41,植被总体恢复状况较侵蚀期已有较大转变。垂直结构上, $PLAI_F$ 和 $PLAI_U$ 大体呈现出高低结合的形式,同一样方如果 $PLAI_F$ 较大, $PLAI_U$ 则会较小;反之, $PLAI_F$ 较小, $PLAI_U$ 则会较大。这主要是因为研究区灌木较少,林下植被主要以铁芒萁为主,而铁芒萁是喜阳性植物,林冠层较密会遮挡阳光,不利于铁芒萁的生长。在少数样方也出现了 $PLAI_F$ 和 $PLAI_U$ 都比较低的现象,这可能是由于前期土壤侵蚀过于严重,而导致样方土壤养分过低而引起的。

图 4 林冠层和灌草层 $PLAI$ 分布状况Fig. 4 The $PLAI$ values of forest canopy and shrub and grass canopy

植被的变异系数表明了不同样方上植被恢复状况的差异。研究结果显示,植被整体 $PLAI$ 的变异系数相对较小,平均值约 30.2,表明经过多年的治理,整体研究区植被一定程度上均有所恢复。然而,不同的垂直结构下林冠层和灌草层的恢复差异性明

显, $PLAI_F$ 和 $PLAI_U$ 变异性均较大,分别达到 48.8 和 49.0。 $PLAI_F$ 的波动主要是由于林地土壤养分的差异引起的,而 $PLAI_U$ 的变异程度则受林地土壤养分与林冠层覆盖度两者的影响。不同垂直植被结构 $PLAI_F$ 的变异系数呈现纯林>林草>林灌草的情形,

表明植被林冠层分布随垂直结构的恢复而逐渐稳定。而林草结构和林灌草结构下 $PLAI_U$ 变异系数分别为 38.6 和 59.3, 则体现出林下植被冠层分布的不确定性。

2.3 植被垂直结构的影响因素

由于成土母质的不同, 研究区植被的垂直结构呈现出一定的差异, 高低顺序依次为: 千枚岩林地>红砂岩林地>花岗岩林地(表1), 其中千枚岩母质林地上植被 $PLAI$ 高达 0.65, $PLAI_F$ 和 $PLAI_U$ 在 3 种母质中也最高, 分别为 0.39 和 0.44; 花岗岩成土母质发育的红

壤林地植被覆盖状况最差, $PLAI_F$ 和 $PLAI_U$ 分别为 0.33 和 0.36。千枚岩林地与红砂岩林地上平均树高与平均胸径基本相同, 花岗岩林地上两参数值相对较低。成土母质中黏粒含量的不同是引起植被垂直结构差异的重要影响原因, 研究区 3 种成土母质表层土壤(0~10 cm)黏粒含量高低依次为: 千枚岩(36.8%)>红砂岩(19.0%)>花岗岩(18.1%)^[21], 与植被垂直结构恢复程度相对应。由于黏粒比表面积大、电荷密度高, 易于吸附土壤中的有机质, 对有机质起到保护作用, 使其不易被分解, 从而保证了植被恢复的营养供给^[22]。

表 1 不同成土母质发育红壤植被垂直结构
Table 1 The vegetation vertical structures from different material parents

成土母质	$PLAI$	$PLAI_F$	$PLAI_U$	平均树高(m)	平均胸径(m)
花岗岩	0.53	0.33	0.36	7.29	0.09
红砂岩	0.58	0.37	0.41	7.48	0.12
千枚岩	0.65	0.39	0.44	7.64	0.11

2.4 植被垂直结构与土壤侵蚀

林冠层和灌草层对降雨具有截流功能, 通过削弱降雨动能和减少林下土壤水分吸水量, 能够有效减少林下土壤侵蚀的发生。植被垂直方向上不同冠层 $PLAI$ 的差异性导致其对林下土壤侵蚀的抑制作用也不同。本研究中, 不同成土母质上各层次植被冠层 $PLAI$ 大小依次为: 千枚岩>红砂岩>花岗岩(表 1), 与野外实际调查的林下土壤侵蚀程度基本一致, 千枚岩发育的林下土壤受降雨侵蚀的影响最小, 而花岗岩发育的林下土壤所承受的降雨动能最大, 其侵蚀程度也最高。在植被各层次中, 灌草层的覆盖是减少林下侵蚀的重要影响因素, 能削弱 40% 的降雨动能^[23]。因此, 土壤侵蚀治理过程中, 在植被覆盖逐渐增加的同时, 更要注重植被垂直结构尤其是林下植被的恢复^[24]。

3 结论

基于 TLS 获取较高精度的植被垂直结构信息, 弥补了传统方法的缺陷, 为南方红壤侵蚀研究提供了精准的植被参数支持。研究结果表明, 南方红壤典型区兴国县的植被总体恢复较好, $PLAI$ 高达 0.60, $PLAI_F$ 和 $PLAI_U$ 分别为 0.37 和 0.41, 不同高度上的植被冠层覆盖较侵蚀期有较大提升。由于前期侵蚀程度和成土母质的差异, 植被垂直结构恢复程度也不相同。林下土壤侵蚀在部分区域仍然存在, 植被垂直结构的不是造成林下土壤侵蚀的重要原因, 植被垂直结构的恢复仍有待提高。

参考文献:

[1] 查轩, 黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 109-114

[2] Morgan RPC. Soil Erosion and Conservation[M]. 3 ed. Malden, MA: Blackwell, 2005

[3] Baver LD. Soil Physics[M]. 3 ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1956

[4] 秦富仓, 余新晓, 张满良, 谢媛媛. 小流域林草植被控制土壤侵蚀机理研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1 618-1 622

[5] 李斌, 张金屯. 不同植被盖度下的黄土高原土壤侵蚀特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 241-244

[6] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 游珍. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407

[7] Wen ZM, Brian GL, Jiao F, Lei WN, Shi HJ. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion[J]. Catena, 2010, 83: 87-93

[8] Geißler C, Kühn P, Böhnke M, Bruelheide H, Shi XZ, Scholten T. Splash erosion potential under tree canopies in subtropical SE China[J]. Catena, 2012, 91: 85-93

[9] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6): 281-285

[10] Zheng G, Moskal LM. Retrieving leaf area index (lai) using remote sensing: theories, methods and sensors[J]. Sensors, 2009, 9: 2 719-2 745

[11] 张岩, 张清春, 刘宝元. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 268-272

[12] 章文波, 符素华, 刘宝元. 目估法测量植被覆盖度的精度分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 403-408

[13] 章文波, 路炳军, 石伟. 植被覆盖度的照相测量及其自动计算[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 9-42

- [14] Gu ZJ, Zeng ZY, Shi XZ, Li L, Weindorf DC, Zha Y, Yu DS, Liu YM. A model for estimating total forest coverage with ground-based digital photography[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 318–325
- [15] Maltamo M, Packalén P, Yu X, Eerikäinen K, Hyyppä J, Pitkänen J. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 216: 41–50
- [16] Dassot M, Constant T, Fournier M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68: 959–974
- [17] 李丹, 庞勇, 岳彩荣, 赵旦, 徐光彩. 基于 TLS 数据的单木胸径和树高提取研究[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(4): 79–86
- [18] 赵阳, 余新晓, 信忠保, 范敏锐, 吴海龙. 地面三维激光扫描技术在林业中的应用与展望[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(4): 41–45
- [19] Béland M, Widlowski JL, Fournier RA, Côté JF, Verstraete MM. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151: 1 252–1 266
- [20] Zande DVD, Hoet W, Aardt JV, Coppin P. Influence of measurement set-up of ground-based lidar for derivation of tree structure[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141: 147–160
- [21] 张海东, 于东升, 王宁, 史学正, 宋正姍, 顾成军. 植被恢复过程中侵蚀红壤有机质变化研究[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 856–861
- [22] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 彭少麟, 易惟熙, 李志安, 姜漫涛. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 1–9
- [23] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 森林植被垂直截留作用与水土保持[J]. *水土保持研究*, 1994, 1(3): 8–13
- [24] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 顾祝军, 张文太, 杨浩. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1 060–1 066

Retrieval of Forest Vertical Structure in Eroded Area of Southern China Using Terrestrial LiDAR Systems

ZHANG Hai-dong^{1,2}, YU Dong-sheng^{1*}, SHI Xue-zheng¹, WANG Ning¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

Abstract: The terrestrial laser scanning (TLS) was employed to scan the vegetation in the eroded red soil region to measure the tree height and diameter at breast height, the projected leaf area index (*PLAI*) of forest canopy and understory was also obtained. The results showed that the *PLAI* value of vegetation in the study area was up to 0.60, while the *PLAI* value of forest canopy and understory canopy were 0.37 and 0.40, respectively. The variation coefficient of *PLAI* of the total vegetation was less than the value of forest canopy and understory canopy. The parent material is an important factor causing the difference of the vegetation structure varying from plots. The restoration of vegetation structure was in an order of phyllite rock > red sandstone > granite. The TLS based method could precisely measure the vegetation vertical structure with a precision higher than 80%, which suggests this method could be used widely in the eroded red soil region in southern China.

Key words: Vegetation restoration, Soil erosion, Projected leaf area index, Vegetation structure