

地形因子对土壤理化性质和植物种类的影响

孙莉英^{1,2}, 栗清亚^{1,2}, 裴亮^{1,2*}, 吴辉^{3,4}, 陈腊娇⁵

(1.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.中国科学院大学, 北京 100049;

3.杭州电子科技大学, 杭州 310012; 4.浙江智慧城市区域协同创新中心, 杭州 310012;

5.中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘要:【目的】研究影响土壤理化性质和植物种类的主要地形因子。【方法】以南方红壤丘陵坡地果园水土保持示范区为研究区域, 采用五点采样法取土, 利用样方法开展植被调查, 利用 ArcGIS 确定各采样点地形因子, 对土壤理化性质(土壤总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、有机质(TOC)、土壤含水率)和植物种数随地形因子(坡度、坡向、坡位)进行相关性分析。【结果】不同坡度等级下土壤含水率表现为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ} > 10^{\circ} \sim 15^{\circ} > 15^{\circ} \sim 25^{\circ} > 0^{\circ} \sim 5^{\circ}$; 在 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 坡度等级下土壤含水率最低为(18.6%)。土壤 TN、TP、TK、TOC 量随坡度和坡向变化无显著差异。土壤 TN、TK 和土壤含水率在不同坡位处无显著差异, TP 和 TOC 量随坡位的下降而增加。研究区内共有植物 183 种, 植物种类数随坡度、坡向及坡位差异显著。植物种类数随坡度变化趋势为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ} > 10^{\circ} \sim 15^{\circ} > 15^{\circ} \sim 25^{\circ} > 5^{\circ} \sim 10^{\circ}$; 坡向上表现为阳坡多于阴坡; 随坡位变化趋势为山坡>山顶, 坡中>坡上>坡下。【结论】坡度是土壤含水率变化的主导地形因子, 坡位是土壤 TP 和 TOC 变化的主导地形因子。

关键词:水土保持; 植被调查; 土壤采样; 坡度; 坡向; 坡位

中图分类号: S715

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020119

孙莉英, 栗清亚, 裴亮, 等. 地形因子对土壤理化性质和植物种类的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 120-127.

SUN Liying, LI Qingya, PEI Liang, et al. Effects of Topographic Factors on Soil Physical and Chemical Properties and Plant Species[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 120-127.

0 引言

【研究意义】江西省约有 42%国土面积处于红壤丘陵区, 200~500 m 之间的丘陵、岗阜和山间盆地交错分布, 地形复杂^[1]。由于人口增长和不合理的开垦利用, 江西红壤丘陵区已成为南方红壤区水土流失重点区域^[2]。果树种植逐渐成为坡地农业发展的主要模式, 不仅是水土保持和改善生态环境的重要措施, 也逐渐成为红壤丘陵区经济效益的重要来源^[1]。但由于传统清耕和粗放的果园土壤管理模式, 果业开发成为红壤丘陵坡地水土流失的重要原因^[3-4]。探索红壤坡地果园精细开发方式, 寻求既能有效控制水土流失又能满足当地经济发展和生态改善的有效水保措施, 提升水土保持措施的综合效益具有非常重要的理论和实践意义。

【研究进展】土壤性质和植被是影响土壤侵蚀及其过程的重要因素, 土壤性质的研究对控制土壤侵蚀、采取合理水土保持措施具有重要意义^[5]。土壤前期含水率影响土壤入渗, 改变坡面流水动力条件, 影响地表产流^[5]。由于土壤含水率会改变土壤团聚体的稳定性、土壤颗粒间黏结力、土壤抗剪强度, 对土壤侵蚀会产生影响^[6-10]。张治国等^[11]研究表明, 随着土壤有机质量增加, 土壤团聚体质量分数增加, 土壤结构得到优化和改善, 水土流失进一步减少。张孝存等^[12]研究发现, 土壤侵蚀分布与区域土壤有机质和氮素质量分数的空间分布密切相关, 土壤侵蚀速率随土壤有机质、全氮质量分数、碱解氮质量分数的增加而下降。植被是南方红壤区水土流失治理的主要措施。植被通过调控坡面地表径流而影响土壤侵蚀, 其作用效果与植被种类密切相关^[13-14]。不同种类植被对侵蚀产沙量、径流量、入渗率和地表糙度产生影响^[15]。林草地通过蓄水减沙而调控水沙, 径流产生时间随植被覆盖度的改变而改变^[16]。

土壤性质和植被同时受到地形因子的制约。各类土壤性质(包括 pH 值、全氮、速效钾、速效磷、有

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC050540503); 国家自然科学基金项目(4197071197, 41771314); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-13)

作者简介: 孙莉英(1978-), 女, 河北石家庄人。副研究员, 研究生导师, 博士, 主要从事水土保持研究。E-mail: sunliying@igsnrr.ac.cn

通信作者: 裴亮(1982-), 男, 江苏南京人。副研究员, 研究生导师, 教授, 博士, 主要从事水资源高效利用研究。E-mail: peiliang@igsnrr.ac.cn

机质等)与高程、坡度、坡向、坡形、坡位以及坡向-坡位组合呈相关关系^[17]。Hirobe 等^[18]研究表明, C/N 比、pH 值等土壤性质与坡位关系密切。地形因素对植被分布的影响则通过影响其他生态因子(如光照、温度、水分、土壤等)的空间分布而发生作用^[19-21]。

【切入点】江西红壤丘陵区的重要特征是地形复杂,地形因子对土壤性质和植被的影响规律和机制尚不清晰。特别是红壤丘陵坡地果园开发区域,在人工水土保持措施和果园管理措施综合作用下,地形因子对土壤理化性质和植被覆盖的影响规律是提升水土流失防治和调整土地利用结构的重要基础,对水土保持措施功能提升和生态环境保护有重要影响。【拟解决的关键问题】因此,本文旨在探索南方红壤丘陵坡地果园水土保持示范区地形因子对土壤性质和植物种类的影响作用,以期对南方红壤丘陵坡地果园精细开发及水土保持措施空间配置的优化和综合效益提升提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以南方红壤丘陵区坡地果园水保示范区为研究区,位于江西省宁都县固厚乡(26°14'51"N—26°19'56"N; 116°02'29"E—116°06'56"E),面积为 5.59 km²。该区域地处亚热带湿润季风气候区,多年平均气温为 18.9 °C,多年平均降水量为 1 550.6 mm。降水年内分配不均,主要集中在 4—6 月,约占全年降水量的 49.8%,且多以暴雨形式出现,年降水量最大为 2 438.9 mm。研究区地貌类型以低山、丘陵为主,局部为河滩地。研究区内林草覆盖率约为 74.9%。

研究区成土母质以花岗岩类风化物为主,土壤类型主要有红壤和水稻土,具有自然肥力低酸性偏强的特点。研究区土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主,裸地土壤侵蚀模数为 2 796 t/(km² a)。为进一步抑制水土流失,2016 年 7 月在研究区建立了坡地果园水土保持示范区,形成“顶林、腰果、谷农、底渔”为特色的农林复合水土流失综合治理体系,其中“腰果”以梯田种植脐橙为主要经济作物,前埂后沟,梯壁植草,并辅助修建蓄水池、沉沙池、路网排水沟、水平竹节沟等排水设施。

1.2 土壤采样、植被调查与分析方法

1.2.1 土壤采样

采用五点采样法取土,兼顾均匀、等量和多点混合的原则^[22-23],充分考虑地形因子影响,均匀布局 48 个采样点。以布设的采样点为中心,制定 30 m×30 m 样方,分别在样方的中心点和 4 个顶点依次用梅花形采样法^[24-25]采集土样,并记录 5 点的经纬度。取样

时去掉表面枯枝落叶和土壤中的植物根系、砾石等杂物,用铁铲沿垂直地面方向取 0~10 cm 左右的土壤,利用封口袋密封,标记采样日期和编号,采集土壤质量约为 0.5 kg。土壤采样点在不同坡度、坡向和坡位处分布见表 1。

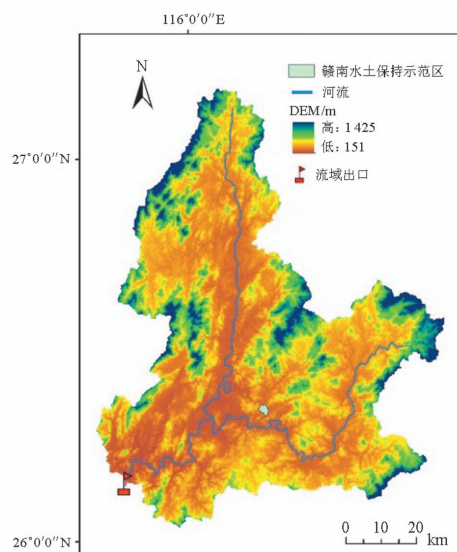


图 1 赣南水土保持示范区位置

Fig.1 Location of soil and water conservation demonstration area in southern Jiangxi Province

1.2.2 植被调查

本文采用样方法进行植被调查,结合土壤采样,样方大小定为 30 m×30 m,同时进行乔、灌、草植被调查。考虑坡度、坡向、坡位等地形因子的影响,选取 17 个点进行植被调查,包括 3 个山顶调查点和 14 个山坡调查点。其中,山坡调查点包括 5 个坡上调查点、4 个坡中调查点和 5 个坡下调查点。

山顶植被调查分别记录乔木、灌木、草类的物种名称、物种数和优势物种。山坡植被调查依据梯田分布情况,分别记录梯田埂壁、坡沟和田面上的植被类型、优势物种和植被数量。借助花伴侣软件对调查过程中的每种植物进行识别并初步记录植物名称,同时对每种植物进行观察和拍照,记录基本外形特征。在软件识别基础上,根据记录的特征和植物照片,查阅植物分类学和植物鉴别手册,核对植物种类名称。

1.2.3 土壤性质分析

土壤性质测定考虑对水土保持和经济作物影响,较大的指标进行测定,包括总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)和有机质质量分数(TOC)及土壤含水率(SWC)。土壤含水率(SWC)采用烘干法测定。测定 TN、TP、TK、TOC 前,将土样自然风干,去除土样中的石头、植物根系等杂物,研磨过筛(标准检验筛,GB/T6003.1—2012,目数:100;孔径:0.15 mm),备用。

表 1 土壤采样点在不同坡度、坡向和坡位处分布

Table 1 Distribution of soil sampling points at different slope gradients, slope directions and slope positions

坡向 Slope direction	坡位 Slope position	坡度 Slope gradient	采样点数量 Number of sampling points	坡向 Slope direction	坡位 Slope position	坡度 Slope gradient	采样点数量 Number of sampling points
阴坡 Shady slope	坡上 Up slope	0~5°	3	阳坡 Sunny slope	坡上 Up slope	0~5°	2
		5~10°	6			5~10°	1
		10~15°	2			10~15°	0
		15~25°	2			15~25°	1
	坡中 Middle slope	0~5°	0		坡中 Middle slope	0~5°	1
		5~10°	5			5~10°	7
		10~15°	3			10~15°	1
		15~25°	0			15~25°	2
	坡下 Down slope	0~5°	2		坡下 Down slope	0~5°	0
		5~10°	1			5~10°	3
		10~15°	3			10~15°	1
		15~25°	0			15~25°	2

参照文献[25],采用 TOC 分析仪测定土壤有机碳, TN 量采用凯氏定氮仪-凯氏定氮法, 采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮及钼蓝比色法测定土壤中 TP, 采用火焰光度计法测定土壤 TK。

1.2.4 统计分析方法

利用 SPSS (22.0) Pearson 进行相关性分析。

1.2.5 地形因子确定

利用 ArcGIS 结合数字地面模型 (DEM) 提取地表坡度 (图 2 (a))、坡向 (图 2 (b))。

坡度是代表地表陡缓的重要地形特征因素之一

[29], 根据小洋果园地形特征, 按照 0°~5°、5°~10°、10°~15°、15°~25° 对坡度进行分级^[26-28]。坡向是投影到水平面上所指向的方向^[26], 是影响土壤性质和植被的地形因子之一。提取坡向时按坡向角度分为北、东北、东、东南、南、西南、西、西北 8 个方位, 依据坡向的二分法^[26], 从北向的 0° 开始, 顺时针转动, 将 112.5°~292.5° 称为阳坡, 将 292.5°~112.5° 称为阴坡。小洋果园海拔最高为 287.5 m, 最低为 165 m。将坡面从上到下平均分为 3 等份, 其中靠近坡顶部分为坡上, 中间部分为坡中, 靠近坡脚部分为坡下。

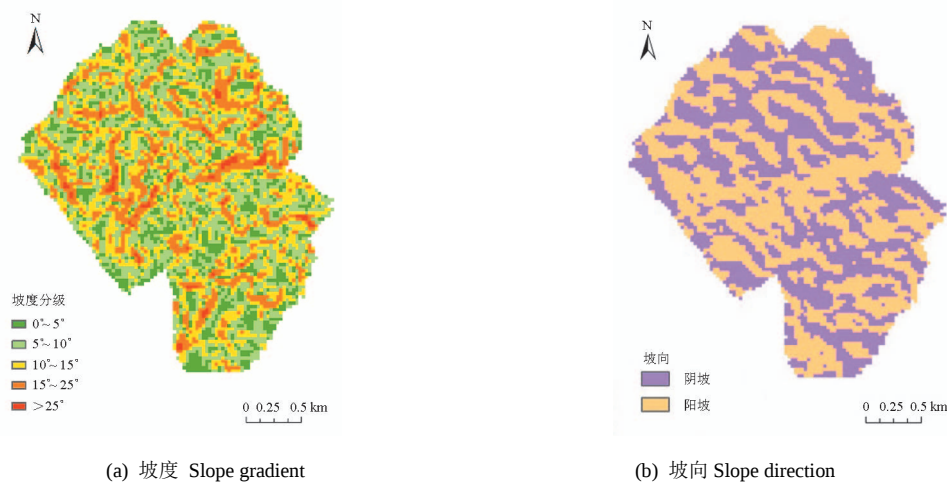


图 2 小洋果园坡度、坡向分布

Fig.2 Distribution of slope gradient and slope direction of Xiaoyang orchard

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质随地形因子变化

地形因子变化下的土壤理化性质如表 2 所示。不同坡度下土壤含水率存在显著差异。0°~5° 坡度的土

壤含水率最低为 18.6%, 而在 5°~10° 土壤含水率可达 21.2%。土壤 TN 量、TP 量、TK 量及 TOC 质量分数随坡度变化无显著性差异, 但呈现一定变化趋势, 10°~15° 坡度土壤 TN、TP、TOC 质量分数均高于其他坡度条件下的质量分数, TK 质量分数随坡度的增

加呈减小的趋势。土壤 TN、TK、TOC 及土壤含水率随坡向变化无显著性差异。土壤 TN，TK 和土壤含水率在不同坡位无显著性差异，而土壤中的 TP 和 TOC 质量分数随坡位变化呈显著性差异，随坡位下降而上升。

土壤理化性质与地形因子相关性分析见表 3，土壤理化性质中仅 TK 与坡度呈显著负相关关系，相关系数为-0.325，导致 TK 随坡度增加而呈减小规律。土壤 TP 和 TN 显著正相关，相关系数为 0.342。土壤含水率随土壤 TK 极显著负相关，相关系数为-0.424。

表 2 地形因子变化下的土壤理化性质

Table 2 The change of physical and chemical properties of soil vary with topographic factors

地形因子 Topographic factors		TN/ (g kg ⁻¹)	TP/ (g kg ⁻¹)	TK/ (g kg ⁻¹)	TOC/ (g kg ⁻¹)	含水率/% Moisture content
坡度 Slope gradient	0°~5°	0.35±0.11 ^a	0.10±0.06 ^a	5.26±1.67 ^a	6.38±2.83 ^a	18.61±1.64 ^a
	5°~10°	0.34±0.07 ^a	0.14±0.06 ^a	5.13±1.46 ^a	6.12±2.45 ^a	21.22±2.15 ^b
	10°~15°	0.38±0.08 ^a	0.15±0.05 ^a	4.86±1.35 ^a	9.09±5.74 ^a	20.49±1.65 ^b
	15°~25°	0.35±0.04 ^a	0.10±0.04 ^a	4.17±0.84 ^a	7.43±2.51 ^a	20.37±2.04 ^{ab}
坡向 Slope direction	阴坡	0.36±0.08 ^a	0.12±0.05 ^a	5.03±1.50 ^a	7.16±1.92 ^a	20.59±2.03 ^a
	阳坡	0.34±0.07 ^a	0.14±0.06 ^a	4.86±1.30 ^a	6.74±4.95 ^a	20.41±2.27 ^a
坡位 Slope position	坡上	0.34±0.08 ^a	0.10±0.06 ^a	5.31±1.30 ^a	6.67±1.96 ^a	19.98±2.08 ^a
	坡中	0.34±0.04 ^a	0.15±0.05 ^b	4.96±1.40 ^a	5.72±2.22 ^a	20.64±2.36 ^a
	坡下	0.38±0.11 ^a	0.14±0.04 ^{ab}	4.44±1.51 ^a	9.38±5.54 ^b	21.05±1.71 ^a

注 不同字母表示土壤理化性质随地形因子变化呈显著性差异 ($p<0.05$)
Note Different lowercase letters indicated that the physical and chemical properties of the soil varied significantly with the topographic factors ($p<0.05$).

表 3 土壤理化性质与地形因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis between soil physical and chemical properties and topographic factors

分析指标 Analysis indicators	高程 Altitude	坡度 Slope gradient	坡向 Slope direction	TN	TP	TK	TOC	含水率 Moisture content
高程Altitude	1							
坡度Slope gradient	0.376**	1						
坡向Slope direction	0.048	0.367*	1					
TN	0.169	0.088	-0.053	1				
TP	-0.005	0.030	0.102	0.342*	1			
TK	0.047	-0.325*	-0.057	0.073	0.186	1		
TOC	0.061	0.160	0.071	0.313*	0.223	0.048	1	
SWC	-0.246	0.165	0.064	0.160	0.119	-0.424**	-0.136	1

注 *代表显著相关，**代表极显著相关。下同。
Note * represents significant correlation, ** represents highly significant correlation. The same as below.

2.2 地形因子对植物种类的影响

植被调查结果见表 4，研究区内共计有植物种类数 183 种，其中乔木有 26 种，灌木有 62 种，草本植物 95 种。山顶植被覆盖率高，成林后较少受到人为活动的影响，植物种类数为 52 种，其中乔木有 12 种，灌木有 26 种，草本植物 14 种。山顶植被的优势物种 7 种。坡面梯田上共有乔木 23 种，灌木 54 种，草本 89 种，共计植物种类数 166 种，优势物种 12 种。梯田田面上以人工种植的脐橙为主。经过人工除草后，田面上除了脐橙，有少许杂草。未经过人工除草的田面上，生长有芒萁、皱叶狗尾草、筒轴茅、马唐、乌

毛蕨等草类植物，且生长茂盛。梯田埂壁上植被生长较茂盛，植物种类和覆盖度均高于田面。埂壁上以芒萁为优势物种，草类植物类型多达 89 种，还生长有包括杉木等在内的乔木，箬竹等在内的灌木。山坡植物种类数明显多于山顶，约为山顶植物种类的 3 倍。不同坡位处植物种类也存在一定差别，坡中位置调查得到的植物种类数（101）大于坡上植物种类数（89）和坡下植物种类数（81）。山顶和山坡共有的优势物种为芒萁，而坡上、坡中和坡下处共有的优势物种为脐橙（人工种植）、宽叶雀稗 k（人工种植）和芒萁。

表 4 植被调查结果

Table 4 Vegetation survey results

坡位 Slope position	植被调查点数量 Number of vegetation survey points	优势物种 Dominant species	植物种数 Number of plant species
山顶 Top hill	3	刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>)、马尾松 (<i>Pinus massoniana</i> Lamb)、 芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、地毯草 (<i>Axonopus affinis</i>)、三叶草 (<i>Shamrock</i>)、 野古草 (<i>Arundinella Raddi</i>)、岗松 (<i>Baeckea frutescens</i>)、中华草沙蚕 (<i>Tripogon chinensis</i>)	52
坡上 Up slope	5	枫香树 (<i>Liquidambar formosana</i> Hance)、脐橙 (<i>Citrus sinensis</i>)、宽叶雀稗 (<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack)、 芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、乌毛蕨 (<i>Blechnum orientale</i> Linn)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、 象草 (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)、筒轴茅 (<i>Rottboellia exaltata</i>)、三裂叶野葛 (<i>Pueraria phaseoloides</i>)、 金丝草 (<i>Pogonatherum crinitum</i>)、马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i>)、 木荷 (<i>Schima superba</i>)、欆木 (<i>Loropetalum chinense</i>)	89
山坡 坡中 Slope Middle slope	4	宽叶雀稗 (<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack)、芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、脐橙 (<i>Citrus sinensis</i>)、 铃木 (<i>Eurya japonica</i> Thunb)、枫香树 (<i>Liquidambar formosana</i> Hance)、筒轴茅 (<i>Rottboellia exaltata</i>)、 皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、金丝草 (<i>Pogonatherum crinitum</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i> Mill)、 木荷 (<i>Schima superba</i>)、杠板归 (<i>Polygonum perfoliatum</i>)、岗松 (<i>Baeckea frutescens</i>)、 积雪草 (<i>Centella asiatica</i>)、绵毛酸模叶蓼 (<i>Polygonum lapathifolium</i>)、三叶草 (<i>Shamrock</i>)	101
坡下 Down slope	5	宽叶雀稗 (<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack)、芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、脐橙 (<i>Citrus sinensis</i>)、 菱蒿 (<i>Artemisia selengensis</i>)、矮蒿 (<i>Artemisia lancea</i> Van)、雀舌草 (<i>Stellaria alsine</i> Grimm)、 轮叶蒲桃 (<i>Syzygium grijsii</i>)、矛叶荩草 (<i>Arthraxon lanceolatus</i>)、三裂叶野葛 (<i>Pueraria phaseoloides</i>)、 欆木 (<i>Loropetalum chinense</i>)、筒轴茅 (<i>Rottboellia exaltata</i>)、越桔 (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)	81

坡度对植物种类数影响显著 (表 5)。0°~5° 坡
度上调查得到的植物种类数较高 (91 种), 其次为
10°~15° 坡度植物种类数 (88 种) 和 15°~25° 坡度
(71 种), 在 5°~10° 坡度上调查得到的植物种数最
少 (60 种), 约为 0°~5° 坡度上植物种数的 66%。
阴坡和阳坡调查得到的植物种类数差别显著 (表 5),
阳坡分布的植物种类数 (149 种) 明显多于阴坡 (68
种), 是阴坡植物种类数的 2.2 倍。植物种数与地形
因子相关性分析结果 (表 6) 表明, 植物种类数与高
程、坡度、坡向的相关系数均为负值, 具有负向关
系, 但无显著相关性。

表 5 不同坡度、坡向条件下植物种类

Table 5 The influence of slope gradient and slope
direction on plant species

地形因子 Topographic factors	面积占比 Area proportion/%	植被调查点个数 number of vegetation survey points	植物种数 number of plant species
0°~5°	15.95	3	91
坡度 Slope gradient	5°~10°	31.67	3
10°~15°	28.71	4	88
15°~25°	21.93	4	71
坡向 Slope direction	阴坡	48.52	4
阳坡	51.48	10	149

表 6 植物种类与地形因子相关性分析结果

Table 6 Correlation analysis between plant species and
topographic factors

分析指标 Analysis indicators	高程 Altitude	坡度Slope gradient	坡向Slope direction	植物种数 Plant species
高程Altitude	1			
坡度Slope gradient	0.217	1		
坡向Slope direction	0.029	0.129	1	
植物种数 Plant species	-0.351	-0.360	-0.243	1

3 讨论

研究区地形因子对植被影响较土壤理化性质显著。不同坡度、坡向、坡位植物种类数均差异显著, 而坡度是土壤含水率变化的主导地形因子, 坡位是土壤 TP 和 TOC 质量分数变化的主导地形因子。程先富等^[30]采用 GIS 技术对江西省兴国县土壤 TN 进行估算, 指出地形变量中坡向对土壤 TN 质量分数影响最大, 而坡度与土壤 TN 质量分数的相关性不显著。刘序等^[31]研究表明, 广东红壤区, 土壤 TN 与坡度呈负相关关系。陈冲等^[26]研究指出红壤丘陵区土壤 TOC 和 TN 质量分数在阴坡显著高于阳坡, 土壤 TP 和有效磷质量分数阳坡显著高于阴坡。黄萍萍^[17]研究表明, 土壤

TN、TK、TP 及 TOC 质量分数与坡位呈极显著相关，随坡位的下降而逐步升高。本文的研究结果与前人的不完全一致，主要原因在于梯田措施及人工施肥的影响。当地农民根据脐橙生长发育需求定期进行施肥，人工施肥对土壤养分（TN、TK、TP、TOC）质量分数产生了影响。灌溉、降水及梯田淋洗效果也会影响地形因子对养分的影响规律。梯田措施也会改变坡度对土壤含水率及土壤养分的影响。地形虽然不是植物生长发育所需的直接生态因子，却可通过控制不同生态因子的时空分布及其组合而影响植物分布^[32]。在红壤丘陵坡地果园，环境因素具有高度异质性，坡度可通过改变单位面积接受环境能量而影响植物生长，坡向和坡位通过改变小气候而影响植物生长的光热条件，导致研究区果园植物种数随坡度、坡向和坡位变化均呈显著性差异^[19,20,27-29]。可见，不同地形因子对研究区植被的影响具有交互作用，在不同地形因子对研究区植被群落和植物种类的耦合作用及机制方面仍需进一步加强研究。

4 结 论

1) 南方红壤丘陵坡地果园地形复杂，因为人工施肥及梯田等水土保持措施的影响，地形因子对植物种类的影响较其对土壤养分及土壤含水率的影响显著。

2) 坡度对土壤含水率影响较大，0°~5°坡度的土壤含水率最低。坡位对土壤总磷质量分数和有机质质量分数影响较显著，二者随坡位的下降呈上升趋势。

3) 植物种类数随坡度、坡向和坡位呈显著性差异。0°~5°坡度范围内植物种类数最多，5°~10°范围内植物种类数最少。植物种类数在阳坡显著多于阴坡，并且在山坡植物种数要高于山顶，坡中植物种类数最多。

参考文献：

- [1] 张华明. 红壤坡地果园不同套种模式水土保持效果研究[D]. 南昌：江西农业大学, 2011.
ZHANG Huaming. Soil and water conservation effect study of different orchard interplanting mode on red soil slope[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2011.
- [2] 涂安国, 杨洁, 李英, 等. 赣江流域水土保持生态建设减水减沙效益评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 148-151.
TU Anguo, YANG Jie, LI Ying, et al. Effects of runoff and sediment reductions by soil and water conservation measures in Ganjiang watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 148-151.
- [3] 张杰, 陈晓安, 汤崇军, 等. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 165-173.
ZHANG Jie, CHEN Xiaolan, TANG Chongjun, et al. Benefit evaluation

- on typical soil and water conservation measures in citrus orchard on red soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 165-173.
- [4] 刘俏. 红壤丘陵地区经济林坡地侵蚀产沙与养分流失特征研究[D]. 杭州：浙江大学, 2014.
LIU Qiao. Soil erosion and nutrient loss characteristics of economic forest slope land in red soil hilly region[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [5] 朱乐红, 唐科明, 李豪, 等. 土壤理化性质对土壤侵蚀影响研究综述[J]. 现代农业科技, 2018(14): 189-191, 197.
ZHU Le hong, TANG Ke ming, LI Hao, et al. Review on effects of soil physical and chemical properties on soil erosion[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(14): 189-191, 197.
- [6] 黄秉维. 谈黄河中游水土保持问题[J]. 中国水土保持, 1983(1): 10-15.
HUANG Bingwei. Soil conservation in the middle reaches of the Yellow River [J]. China Soil and Water Conservation, 1983(1): 10-15.
- [7] 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 23-29.
ZHANG Xiangyan, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Effects of antecedent soil moisture on hillslope runoff-generation and soil erosion over red soil-mantled landscapes[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 23-29.
- [8] 陈晓安. 前期旱情等级对红壤坡面土壤裂缝及产流产沙特征的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 89-93, 99.
CHEN Xiaolan. Effects of pre-dry grade on soil cracks and characteristics of runoff and sediment in red soil slopes[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(6): 89-93, 99.
- [9] 张玉斌, 郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 5-10, 17.
ZHANG Yubin, ZHENG Fenli. Effects of near-surface soil water conditions on soil erosion process[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 5-10, 17.
- [10] 金鑫, 牛志强, 王春振, 等. 小型红壤坡面土壤含水率时空特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 28-34, 39.
JIN Xin, NIU Zhiqiang, WANG Chunzhen, et al. Spatial-temporal characteristics of soil moisture on small red soil slope[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 28-34, 39.
- [11] 张治国, 马福武. 土壤有机质对坡耕地土壤侵蚀及作物产量的影响[J]. 中国水土保持, 1997(8): 11-13.
ZHANG Zhiguo, MA Fuwu. Influence of soil organic matters on soil erosion and crop yield of cultivated slope land[J]. Soil and Water Conservation in China, 1997(8): 11-13.
- [12] 张孝存, 郑粉莉, 安娟, 等. 典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 182-186.
ZHANG Xiaocun, ZHENG Fenli, AN Juan, et al. Effects of soil erosion on soil organic matter and nitrogen in sloping farmland in typical black soil region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4):

- 182-186.
- [13] 崔鸿侠, 史玉虎, 胡文杰, 等. 大别山低山丘陵不同植被类型水土保持效益研究[J]. 湖北林业科技, 2018, 47(5): 1-3, 20.
- CUI Hongxia, SHI Yuhu, HU Wenjie, et al. Effects of different vegetation types on soil and water conservation in hilly area of dabie mountain[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2018, 47(5): 1-3, 20.
- [14] 梁娟珠. 南方红壤区不同植被措施坡面的水土流失特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 95-99.
- LIANG Juanzhu. Characteristics of soil and water erosion on the slopes with different vegetation patterns in red soil region of Southern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 95-99.
- [15] 刘丹, 丁明军, 文超, 等. 赣南红壤丘陵区 137Cs 示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 62-67.
- LIU Dan, DING Mingjun, WEN Chao, et al. Effects of soil erosion on soil nutrient elements based on 137Cs tracer in the red soil hilly region of southern Jiangxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 62-67.
- [16] 于国强, 李占斌, 裴亮, 等. 不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 1-5, 11.
- YU Guoqiang, LI Zhanbin, PEI Liang, et al. Difference of runoff-erosion-sediment yield under different vegetation type[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 1-5, 11.
- [17] 黄萍萍. 紫色丘陵区旱耕地土壤性质空间变异及地形分异特征研究: 以地震重灾区回龙村为例[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- HUANG Pingping. Study on the characteristics of soil properties in spatial variability and topographic differentiation of dry land in purple hilly region[D]. Yaan, China: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [18] HIROBE M, TOKUCHI N, IWATSUBO G. Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a Cryptomeria japonica D. Don plantation[J]. European Journal of Soil Biology, 1998, 34(3): 123-131.
- [19] 井学辉, 曹磊, 郭仲军, 等. 阿尔泰山小东沟林区植被随地形分布规律[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(3): 533-539.
- JING Xuehui, CAO Lei, GUO Zhongjun, et al. Distribution of vegetation types with topography in the Xiaodonggou forest region of Altai Mountains, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2015, 21(3): 533-539.
- [20] ASTRÖM M, DYNESIUS M, HYLANDER K, et al. Slope aspect modifies community responses to clear-cutting in boreal forests[J]. Ecology, 2007, 88(3): 749-758.
- [21] 朱晓勤, 刘康, 秦耀民. 基于 GIS 的秦岭山地植被类型与环境梯度的关系分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 192-196.
- ZHU Xiaoqin, LIU Kang, QIN Yaomin. GIS-based study of vegetation-environment gradient relationship in Qinling mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 192-196.
- [22] 杨琳, 朱阿兴, 秦承志, 等. 基于典型点的目的性采样设计方法及其在土壤制图中的应用[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 279-286.
- YANG Lin, ZHU Axing, QIN Chengzhi, et al. A purposive sampling design method based on typical points and its application in soil mapping[J]. Progress in Geography, 2010, 29(3): 279-286.
- [23] 张磊, 朱阿兴, 杨琳, 等. 基于分融策略的土壤采样设计方法[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1 079-1 090.
- ZHANG Lei, ZHU AXing, YANG Lin, et al. A sample differentiation and fusion strategy for designing of soil sampling[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1 079-1 090.
- [24] 王科. 黄河下游防洪工程区植被现状调查与评价[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012.
- WANG Ke. Vegetation survey and evaluation to the flood control project area of the lower Yellow River[D]. Xinxiang: China: Henan Normal University, 2012.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. Soil Agrochemical Analysis[M]. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] 陈冲, 周卫军, 郑超, 等. 红壤丘陵区坡度与坡向对耕地土壤养分空间差异的影响[J]. 湖南农业科学, 2011(23): 53-56.
- CHEN Chong, ZHOU Weijun, ZHENG Chao, et al. Impacts of slope gradient and slope aspect on soil properties of farmland in red soil hilly region[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(23): 53-56.
- [27] 丁翔. 黄土区露天煤矿排土场坡度坡向对植被盖度影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- DING Xiang. Study on the relationship among dump slope aspect and the vegetation coverage of large opencast coal mine in loess plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [28] 王学强, 蔡强国, 和继军. 红壤丘陵区水土保持在不同坡度坡耕地上优化配置的探讨[J]. 资源科学, 2007, 29(6): 68-74.
- WANG Xueqiang, CAI Qiangguo, HE Jijun. Water and soil conservation measures for different slope land in red-earth hilly region[J]. Resources Science, 2007, 29(6): 68-74.
- [29] 温美丽, 陈瑜, 何小武, 等. 基于 GIS 的崩岗分布及坡向选择性验证[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3): 1-7.
- WEN Meili, CHEN Yu, HE Xiaowu, et al. Distribution of collapsed gullies (Beng Gang) using GIS and verification of slope aspect selection[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(3): 1-7.
- [30] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 基于 GIS 的土壤全氮空间分布估算: 以江西省兴国县为例[J]. 地理研究, 2007, 26(1): 110-116.
- CHENG Xianfu, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Spatial estimation of soil total nitrogen using GIS: A case study in Xingguo County, Jiangxi Province[J]. Geographical Research, 2007, 26(1): 110-116.
- [31] 刘序, 胡月明, 李华兴, 等. 基于 DEM 的广东省赤红壤全氮含量与地形特征相关分析[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(1): 17-21.
- LIU Xu, HU Yueming, LI Huaxing, et al. The correlation analysis on the soil total nitrogen content of lateritic red soil and terrain characteristics in Guangdong Province based on DEM[J]. Journal of South China Agricultural University, 2010, 31(1): 17-21.

Effects of Topographic Factors on Soil Physical and Chemical Properties and Plant Species

SUN Liying^{1,2}, LI Qingya^{1,2}, PEI Liang^{1,2,*}, WU Hui^{3,4}, CHEN Lajiao⁵

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hangzhou Dianzi University,

Smart City Research Center, Hangzhou 310012, China; 4. Zhejiang Regional Collaborative Innovation Center for Smart Cities,

Hangzhou 310012, China; 5. Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100094, China)

Abstract: **【Objective】** Soil properties and vegetation types are important factors affecting soil erosion, which are of great significance for controlling soil erosion and taking reasonable soil and water conservation measures. Both soil properties and vegetation are restricted by topographic factors. The important feature of the hilly area of red soil in Jiangxi Province is that the terrain is complex. The influence of topographic factors on soil physical and chemical properties and vegetation cover is an important basis for improving soil erosion prevention and land use structure adjusting, which is also of significance for improving soil and water conservation measures and ecological environment protection. However, the laws and mechanisms of the terrain factors' influencing on soil properties and vegetation are not clear in hilly orchard of red soil region in southern Jiangxi Province. In this paper, the impacts of topographic factors, such as slope gradient, slope direction and slope position, on soil physical and chemical properties (total nitrogen (TN), total potassium (TK), total phosphorus (TP), total organic carbon (TOC) and soil moisture content) and the number of plant species were investigated, which can provide scientific reference for the fine development of hilly orchards and the comprehensive benefits improvement of soil and water conservation measures in hilly slope land of red soil region in southern China. **【Method】** Taking the soil and water conservation demonstration area of hilly orchard in the red soil region of southern China as the research area, soil sampling was carried out by five-point sampling method, vegetation survey was carried out by quadrat method, the topographic factors of each sampling point were determined by ArcGIS, and the differences of soil physical and chemical properties and plant species with topographic factors and their correlations were analyzed by using statistical software (SPSS 22.0). **【Result】** The change trend of soil moisture content at different slope grades was $5^{\circ} \sim 10^{\circ} > 10^{\circ} \sim 15^{\circ} > 15^{\circ} \sim 25^{\circ} > 0^{\circ} \sim 5^{\circ}$, and the lowest soil moisture content is 18.6% in $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ area. With the change of both slope gradient and slope direction, soil total nitrogen (TN), total potassium (TK), total phosphorus (TP) and total organic carbon (TOC) showed no significant differences. There were no significant differences in TN, TK and soil moisture content at different slope positions. The contents of TP and TOC increased in lower slope positions. There were 183 species of plants in the study area, and the number of plant species showed significant differences with slope gradient, slope direction and slope position. The variation trend of the number of plant species with slope gradient was $0^{\circ} \sim 5^{\circ} > 10^{\circ} \sim 15^{\circ} > 15^{\circ} \sim 25^{\circ} > 5^{\circ} \sim 10^{\circ}$. With the change of slope direction, the number of plant species on the sunny slope was much higher than that on the shady slope. The change trend of the number of plant species was lower on the top slopes, with the order of middle slope > up slope > down slope along slope. **【Conclusion】** All these results demonstrated that the topographic factors have certain influences on the soil properties and plant species in the hilly area of the red soil region in south China. The plant species in the study area showed significant differences with the slope gradient, slope direction and slope position. While, the slope gradient was the dominant topographic factor for the change of soil moisture content, and the slope position was the dominant topographic factor for the change of soil TP and TOC. Therefore, the influence of topographic factors should be taken into full consideration in the careful development of orchards and the spatial allocation of water conservation measures in hilly red soil region of southern China, for the higher economic income and the comprehensive benefits of soil and water conservation measures.

Key words: soil and water conservation; vegetation survey; soil sampling; slope gradient; slope direction; slope position

责任编辑：陆红飞