

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201710017

引文格式: 曾月娥, 陈志强. 南方红壤丘陵区微地形对芒萁生长特征及其土壤肥力的影响 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 687-695
ZENG YE, CHEN ZQ. Effects of microtopography on *Dicranopteris dichotoma* growth characteristics and soil fertility in an experiment plot in red soil hilly region of South China [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 687-695

南方红壤丘陵区微地形对芒萁生长特征及其土壤肥力的影响

曾月娥¹, 陈志强^{2*}

(1. 泉州师范学院 资源与环境科学学院, 福建 泉州 362000; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 该研究以福建省长汀县来油坑野外实验区为研究区, 分析了微地形如何影响芒萁生长特征和土壤养分。结果表明: (1) 芒萁斑块中的微地形面积比例顺序为脊部<上坡<中坡<下坡<沟谷, 其中脊部面积比例为9.38%, 上坡、中坡和下坡分别为 18.55%、19.63%和 22.71%, 沟谷为 28.43%。(2) 所有芒萁生长特征包括高度、密度、地上生物量、地下生物量和总生物量与部分土壤肥力因子包括有机质、全氮(TN)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)和 pH 值在三种微地形(脊部、沟坡和沟谷)分别存在显著差异, 并按自沟谷经沟坡到脊部的顺序分别趋于下降, 而 pH 值反之。所有芒萁生长特征与部分土壤肥力因子(有机质、全氮、碱解氮、速效钾和 pH 值)分别呈显著正相关, 基本上与部分土壤肥力因子(全磷、速效磷、全钾和 < 2 μm 黏粒质量分数)分别无显著相关。(3) 沟谷的地表温度和地下 5 cm 温度比脊部分别低 3.51 °C 和 1.65 °C, 而沟谷的地下 5 cm 湿度比脊部高约 40%。(4) 微地形对芒萁生长特征和土壤养分具有重要影响。在南方红壤丘陵区, 应创建微地形尤其是沟谷以诱发芒萁群落演替, 进而加速生态恢复进程。

关键词: 生态恢复, 植物-土壤系统, 微地形, 芒萁, 中国南方红壤丘陵区

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)06-0687-09

Effects of microtopography on *Dicranopteris dichotoma* growth characteristics and soil fertility in an experiment plot in red soil hilly region of South China

ZENG Yue'e¹, CHEN Zhiqiang^{2*}

(1. College of Resource and Environmental Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, Fujian, China;

2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Field work, laboratory experiment, geographic information system (GIS), and global positioning system (GPS) were used to explore how microtopography influenced the distribution of *Dicranopteris dichotoma* patches, growth

收稿日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(41371512); 福建省社会科学规划项目(FJ2016C046) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41371512); Social Science Planning Program of Fujian Province (FJ2016C046)].

作者简介: 曾月娥(1988-), 女, 福建惠安人, 博士, 讲师, 主要从事城市与区域规划研究, (E-mail) yuee8806@163.com。

*通信作者: 陈志强, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态恢复研究, (E-mail) soiltuqiang061@163.com。

characteristics, soil fertility factors and microenvironment factors in the experiment plot in Laiyoukeng of Changting County, Fujian Province, which is a typical representative of the red soil hilly region of China. The results were as follows: (1) The percentage of microtopographies increased in order ridge < upper slope < middle slope < lower slope < valley in *D. dichotoma* patches. The ridge occupied 9.38% of the total area; the upper slope, the middle slope, and the lower slope were almost evenly distributed (18.55%, 19.63% and 22.71%); the valley accounted for 28.43% of the total area in *D. dichotoma* patches. (2) There were significant differences in all *D. dichotoma* growth characteristics including plant height, plant density, aboveground biomass, underground biomass, and total biomass and part of soil fertility factors including organic matter, total nitrogen(TN), alkali-hydrolyzable nitrogen(AN), available kalium(AK), and pH value among the three microtopographies (ridge, slope, and valley), respectively, and they tended to decrease in order from the valleys through the slopes to the ridges, respectively, while pH value tended to increase in the same order. TP, available P, TK, and < 2 μm clay content were not significantly different among the three microtopographies, respectively. All *D. dichotoma* growth characteristics were significantly correlated positively with part of soil fertility factors (organic matter, TN, AN and AK), respectively, while all *D. dichotoma* growth characteristics were significantly correlated negatively with pH value, respectively. There was no significant correlation between all *D. dichotoma* growth characteristics and other soil fertility factors [TP, available phosphorus(AP), TK, and < 2 μm clay content] (except for AP and plant density), respectively. (3) Surface temperature, temperature underground 5 cm, and moisture underground 5 cm showed statistically significant differences between the ridges and valleys, respectively ($P < 0.05$). Surface temperature and temperature underground 5 cm in the valleys were significantly lower than those of the ridges, respectively, while moisture underground 5 cm on the valleys was significantly higher than that of the ridges. (4) Microtopography plays an important role in *D. dichotoma* growth characteristics and soil fertility. Microtopography especially valley should be created to trigger the succession of *D. dichotoma* communities, so as to accelerate ecological restoration in the red soil hilly region of South China.

Key words: ecological restoration, plant-soil system, microtopography, *Dicranopteris dichotoma*, red soil hilly region of South China

微地形,非严格意义上是指单体植株尺度上,可描述高程从大约几厘米到几米范围内的地形变化(Moser et al,2007)。微地形可影响植物种群的边界以及种类分布(Koponen et al,2004),改变土壤理化性质(Tokuchi et al,1999;郭冰寒等,2016),控制土地利用空间格局(方炫等,2017),造成环境异质性,从而形成植物间的生态位分异(Moser et al,2007)等,因而引起相关研究领域的高度重视。一些重要的土壤理化性质,例如可蚀性、湿度、渗透性和养分含量等,很大程度上受到植物影响。这些重要的土壤理化性质的变化,反过来也影响植物。由于植物和土壤之间存在紧密和广泛的联系以及多元反馈,往往形成植物-土壤系统(Sardans & Peñuelas,2013)。例如,植物能够提高土壤质量,提升土壤湿度、水分有效性和土壤酶活性。这些土壤理化性质的提升,反过来又能

促进植物生长。已有研究表明,微地形对微观尺度的植物分布、土壤肥力和植物-土壤系统具有重要影响(Gargano et al,2010)。

芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为里白科多年生蕨类植物,为热带到温带地区分布最广泛的蕨类植物之一(管东生,1996)。芒萁喜酸、喜阳、耐旱、耐瘠,在土壤pH值4.5~5.0条件下生长良好,同时,芒萁对氮和磷的需求极低(陈志强等,2012),因而能够在南方红壤丘陵区十分贫瘠土壤中生存,适宜条件下可迅速覆盖地表,有效抑制水土流失,在南方红壤丘陵区生态恢复中具有重要作用。同时,芒萁在南方红壤丘陵区许多植物群落中占据支配地位,并经常形成纯斑块(邓恢等,2004),为研究微地形对芒萁及其土壤的影响提供了独特的条件。在南方红壤丘陵区,活跃的水文过程经常形成脊、坡和谷等微地形。然而,微尺度地形上

“地形-芒萁-土壤”定量关系的研究鲜见报道,微地形与芒萁生长特征及土壤养分间相互作用的机制还需要进一步深入研究。本研究以福建省长汀县来油坑野外实验区为研究区,研究微地形如何影响芒萁生长特征(芒萁分布与生长特征)及土壤养分(土壤肥力因子和微气象因子),以期为南方红壤丘陵区的生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

朱溪流域位于 $116^{\circ}23'30''$ — $116^{\circ}30'30''$ E, $25^{\circ}38'15''$ — $25^{\circ}42'55''$ N,地处福建省长汀县河田镇东部,总面积 $4\,495.66\text{ hm}^2$ 。早在 1940 年,“福建省研究院”即在该流域设立了土壤保肥试验区,开展了土壤侵蚀治理的试验研究;1995 年以来,由于典型性和代表性,该流域先后被列为福建省重点治理小流域、全国水土保持生态环境建设“十百千”示范小流域和全国 30 条典型监测小流域之一(陈志强等,2012)。

本研究选取朱溪流域来油坑野外实验区 ($116^{\circ}28'55''$ E, $26^{\circ}39'43''$ N) 开展相关工作。来油坑野外实验区总面积 705.37 m^2 ,高程范围为 $345\sim 365\text{ m}$,坡向以正南为主,气候为亚热带季风气候,温暖湿润。根据长汀县气象观测站数据,年平均降水量和温度分别为 $1\,730\text{ mm}$ 和 $18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要土壤类型为粗粒黑云母花岗岩形成的红壤,植被群落主要由芒萁及散生灌木占据主导地位(陈志彪和朱鹤健,2006)。根据长汀县水土保持事业局提供的信息,由于 30 年之前的人为活动影响,来油坑实验区没有原生植物残余,植被覆盖度较低,水土流失强烈,成为严重退化区域。近 30 年来,由于各种因素的影响,该地区已无强烈人为干扰,植物和土壤随时间而自然发展(图 1)。

1.2 数据源与数据处理

1.2.1 微地形及芒萁斑块 2012 年 8 月在来油坑野外实验区采用 Trimble 5800 全球定位系统测量各点位置(平均位置精度 $=0.1\text{ m}$),共计测量 3 358 个点。在 ArcGIS9.3 中,导入各点位置生成点图层,创建 TIN(Triangulated Irregular Network,不规则

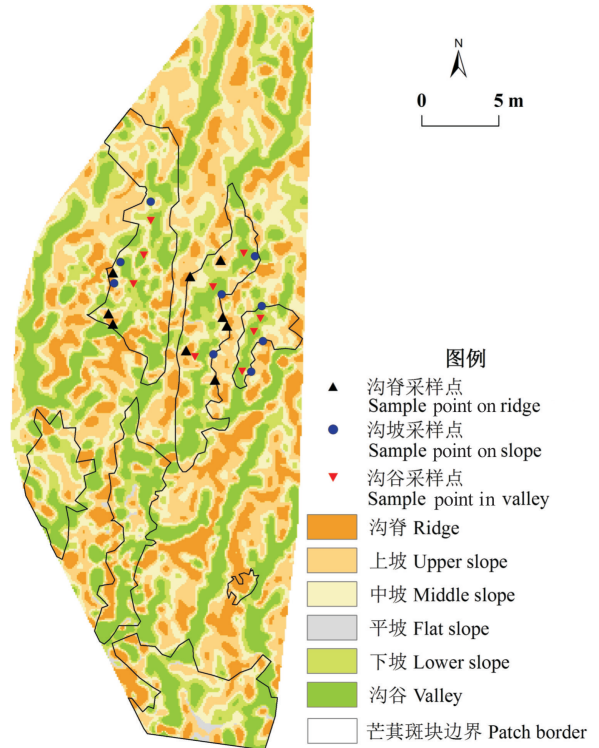


图 1 来油坑野外实验区微地形和植被生长特征与土壤肥力因子采样点

Fig. 1 Microtopographies and sampling points for plant growth characteristics and soil fertility factors in Laiyoukeng experiment plot

三角网)图层。将 TIN 图层转成栅格图层,生成高精度 DEM(Digital Elevation Model,数字高程模型),栅格单元大小为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 。

2001 年已有学者提出了地形位置指数(TPI)的概念以及计算过程。TPI 是一个像元高程值与该像元周围邻域的平均高程之差。邻域定义了该像元周围哪些像元参与计算。TPI 正值表示该像元相比周围较高,而负值表示较低。较高或较低的程度,加上像元的坡度,可用于将像元划分成不同微地形。如果像元相比周围邻域显著较高,则其可能位于或接近山顶或脊部;显著较低表明像元位于或接近谷底;接近于 0 表明其可能位于平地或中坡,并可进一步采用像元的坡度来区分平地或中坡。用于确定 TPI 值的一个方法是采用高程的标准差,其考虑了邻域内高程值的变异。本研究邻域设定为半径 1 m 的圆形,即每个像元的

表 1 来油坑野外实验区微地形的分类标准
Table 1 Classification criteria of microtopography
in Laiyoukeng experiment plot

微地形 Microtopography	分类标准 Classification criteria
脊部 Ridge	$TPI > 0.4 SD$
上坡 Upper slope	$TPI > 0.15 SD \text{ and } \leq 0.4 SD$
中坡 Middle slope	$TPI > -0.05 SD \text{ and } = 0.15 SD$ $Slope > 7 \text{ degrees}$
平坡 Flat slope	$TPI > -0.05 SD \text{ and } \leq 0.15 SD$ $Slope \leq 7 \text{ degrees}$
下坡 Lower slope	$TPI > -0.3 SD \text{ and } \leq -0.05 SD$
沟谷 Valley	$TPI \leq -0.3 SD$

注: SD 是指高程的标准差。

Note: SD indicates standard deviation.

TPI 值是该像元高程值与其周围 1 m 内的所有像元平均值的差 (Weiss, 2001)。采用 TPI 和坡度生成微地形图层 (表 1), 包括沟谷、下坡、平坡、中坡、上坡和脊部 6 种微地形类型 (图 1)。用同样方法测量芒萁斑块边界, 转到 ArcGIS9.3 中生成芒萁斑块图层。将芒萁斑块图层与微地形图层叠加, 计算芒萁斑块内不同微地形的面积和比例 (图 1)。

1.2.2 采样点 选择 3 条相邻的芒萁生长沟, 每条芒萁生长沟选择上、中和下三个部位, 每个部位沿微地形梯度设定 3 种微地形 (脊部、沟坡和沟谷)。由于下坡、平坡、中坡和上坡的形状狭窄, 难以采样, 因此将下坡、平坡、中坡和上坡合并为沟坡) 用于芒萁生长特征和土壤肥力因子采样, 共计确定 27 个采样点, 其中 9 个位于脊部、9 个位于沟坡和 9 个位于沟谷 (图 1)。由于缺乏足够的土壤温湿度计, 本研究不考虑沟坡, 在脊部和沟谷分别选择 4 个点作为微气象因子采样点。由于 2012 年 8 月芒萁生长特征和土壤肥力因子采样点的植物和土壤已被移除和破坏, 2013 年 5 月将微气象因子采样点设于芒萁生长特征和土壤肥力因子采样点附近 0.2~0.3 m。所有微气象因子采样点与相应的芒萁生长特征和土壤肥力因子采样点的微地形一致, 以尽量缩小坡度、坡向和其它要素的影响。因

此, 这一方法是可行的。

1.2.3 芒萁生长特征 在每个芒萁生长特征和土壤肥力因子采样点采用直径 35 cm 圆环调查芒萁生长特征。通过测量圆环内 5 个位置的芒萁高度 (中间 1 个, 四周 4 个), 将其平均后得到一个平均值; 计算先每个圆环内的芒萁株数, 再计算出芒萁密度; 考虑到芒萁为草本植物, 根系较浅, 挖掘每个圆环至 20 cm 深, 分别采集芒萁地上部分和地下部分, 洗净后在 60 °C 下烘干 48 h 并称重, 计算得到芒萁地上生物量、地下生物量和总生物量。

1.2.4 土壤肥力因子 在采集芒萁生长特征的同一采样点中, 采集从芒萁基部至 20 cm 深度的土壤样品。在每个采样点采用铁铲挖掘 5 个位置 (中间 1 个, 四周 4 个) 的土壤, 混合成一个土壤样品, 存储于聚乙烯袋用于实验室分析。在分析之前, 用手将土壤样品中肉眼可见的根系、石头和其它碎屑清除, 再将土壤样品风干和过筛。选取并测定 9 个土壤肥力因子: 有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法, 全氮采用开氏消煮法, 碱解氮采用碱解扩散法, 全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法, 速效磷采用双酸浸提-钼锑抗比色法, 全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法, 速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度法, pH 值采用 1 : 2.5 水浸-电位法, <2 μm 粘粒质量分数采用氢氧化钠分散-吸管法。测定方法详见《土壤理化分析与剖面描述》(刘光崧, 1996)。

1.2.5 微气象因子 2013 年 5 月, 在微气象因子采样点测量土壤的微气象因子, 包括地表温度 (WQG-15 地面温度表, 上海气象仪器厂有限公司, 平均温度精度 = ±0.5 °C)、地下 5 cm 温度和地下 5 cm 湿度 (RR-7125-8 土壤温湿度计, 雨根科技有限公司, 平均温度精度 = ±0.2 °C, 平均湿度精度 = ±3%), 分别收集土壤的地表温度、地下 5 cm 温度和地下 5 cm 湿度样本 232 个。

1.2.6 统计分析 芒萁生长特征、土壤肥力因子和微气象因子的主要特征如表 2 所示。数据的初步检验表明一些变量 (全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值和 < 2 μm 粘粒质量分数) 大致为正态分布, 因而无需变换。其它变量 (芒萁高度、密度、地上生物量、地下生物量、总生物量、有机质、碱解

表 2 来油坑野实验区芒萁生长特征、土壤肥力因子和微气象因子的主要特征

Table 2 Main characteristics of growth, soil fertility factors and microenvironment factors of *Dicranopteris dichotoma* in Laiyoukeng experiment plot

因子 Factor	数量 Number	平均值 Mean	标准误差 Standard error
高度 Plant height (cm)	27	26.82	2.94
密度 Plant density (stem · m ⁻²)	27	340.99	42.14
地上生物量 Aboveground biomass (g · m ⁻²)	27	533.08	93.87
地下生物量 Underground biomass (g · m ⁻²)	27	231.47	50.07
总生物量 Total biomass (g · m ⁻²)	27	764.55	129.64
有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	27	9.56	1.27
全氮 TN (g · kg ⁻¹)	27	0.41	0.04
碱解氮 AN (mg · kg ⁻¹)	27	38.82	3.46
全磷 TP (g · kg ⁻¹)	27	0.09	0.002
速效磷 A P (mg · kg ⁻¹)	27	0.07	0.01
全钾 TK (g · kg ⁻¹)	27	2.10	0.09
速效钾 AK (mg · kg ⁻¹)	27	12.00	1.70
pH 值 pH value	27	4.49	0.02
< 2 μm 粘粒质量分数 < 2 μm clay content (%)	27	54.53	0.78
地表温度 Surface temperature (°C)	232	27.64	0.30
地下 5 cm 温度 Temperature underground 5 cm (°C)	232	26.42	0.22
地下 5 cm 湿度 Moisture underground 5 cm (%)	232	15.02	0.35

表 3 来油坑野实验区芒萁斑块的微地形面积和比例

Table 3 Areas and percentages of microtopographies in *Dicranopteris dichotoma* patches in Laiyoukeng experiment plot

微地形 Microtopography	研究区 Study area		斑块 Patch	
	面积 Area (m ²)	比例 Percentage (%)	面积 Area (m ²)	比例 Percentage (%)
脊部 Ridge	101.63	14.41	19.91	9.38
上坡 Upper slope	182.40	25.86	39.37	18.55
中坡 Middle slope	139.28	19.75	41.67	19.63
平坡 Flat slope	3.83	0.54	2.75	1.30
下坡 Lower slope	122.85	17.42	48.19	22.71
沟谷 Valley	155.38	22.03	60.35	28.43
总计 Total	705.37	100.00	212.24	100.00

表 4 来油坑野实验区不同微地形的芒萁生长特征及其土壤肥力因子
Table 4 *Dicranopteris dichotoma* growth characteristics and soil fertility factors among microtopographies in Laiyoukeng experiment plot

因子 Factor	微地形 Microtopography		
	脊部 Ridge	沟坡 Slope	沟谷 Valley
高度 Plant height (cm)	11.64±1.12c	25.44±2.26b	43.38±3.84a
密度 Plant density (stem · m ⁻²)	117.56±16.10c	345.30±40.95b	560.11±55.98a
地上生物量 Aboveground biomass(g · m ⁻²)	110.28±18.50c	434.35±61.55b	1 054.63±155.62a
地下生物量 Underground biomass(g · m ⁻²)	88.80±9.19c	250.38±63.38b	355.24±125.84a
总生物量 Total biomass (g · m ⁻²)	199.08±20.58c	684.72±51.80b	1 409.86±260.67a
有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	3.26±0.26c	9.85±1.34b	15.58±2.08a
全氮 TN (g · kg ⁻¹)	0.21±0.02c	0.43±0.03b	0.58±0.06a
碱解氮 AN (mg · kg ⁻¹)	24.21±1.73c	36.77±3.61b	55.47±6.25a
全磷 TP (g · kg ⁻¹)	0.08±0.003a	0.09±0.003a	0.09±0.003a
速效磷 AP (mg · kg ⁻¹)	0.04±0.01a	0.07±0.01a	0.09±0.03a
全钾 TK (g · kg ⁻¹)	2.15±0.13a	2.15±0.20a	1.98±0.16a
速效钾 AK (mg · kg ⁻¹)	5.28±1.46b	12.62±3.26b	18.11±2.23a
pH 值 pH value	4.61±0.02a	4.44±0.03b	4.41±0.03b
< 2 μm 粘粒质量分数 < 2 μm clay content (%)	55.27±1.30a	53.86±0.88a	54.45±1.83a

注: 数值后相同字母代表无显著差异, 不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The same letters indicate no significant differences, the different letters indicate significant differences ($P<0.05$).

表 5 来油坑野实验区芒萁植物群落特征与土壤肥力因子的相关性
Table 5 Correlation of *Dicranopteris dichotoma* plant community characteristics with soil fertility factors in Laiyoukeng experiment plot

因子 Factor	高度 Plant height	密度 Plant density	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Underground biomass	总生物量 Total biomass
有机质 Organic matter	0.82 **	0.79 **	0.77 **	0.63 **	0.84 **
全氮 TN	0.81 **	0.80 **	0.76 **	0.63 **	0.83 **
碱解氮 AN	0.79 **	0.77 **	0.78 **	0.62 **	0.85 **
全磷 TP	0.20	0.25	0.23	0.12	0.24
速效磷 AP	0.36	0.40 *	0.33	0.15	0.28
全钾 TK	-0.25	-0.30	-0.36	-0.06	-0.31
速效钾 AK	0.67 **	0.65 **	0.65 **	0.56 **	0.70 **
pH 值 pH value	-0.65 **	-0.73 **	-0.65 **	-0.75 **	-0.78 **
< 2 μm 粘粒质量分数 < 2 μm clay content	-0.25	-0.24	-0.13	-0.16	-0.10

注: 无 * 表示相关性不明显; * 表示在 $P<0.05$ 水平相关性显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平相关性显著。

Note: No * indicates no significant differences; * indicates significant differences ($P<0.05$); ** indicates significant differences ($P<0.01$).

表 6 来油坑野实验区两种地形的微气象因子

Table 6 Microenvironment factors between ridge and valley in Laiyoukeng experiment plot

因子 Factor	微地形 Microtopography	
	脊部 Ridge	沟谷 Valley
地表温度 Surface temperature (°C)	29.40±0.47a	25.89±0.29b
地下 5 cm 温度 Temperature underground 5 cm (°C)	27.24±0.33a	25.59±0.27b
地下 5 cm 湿度 Moisture underground 5 cm (%)	12.53±0.48a	17.51±0.38b

注: 数值后字母相同代表无显著差异, 字母不同代表差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The same letters indicate no significant difference, the different letters indicate significant differences ($P<0.05$).

氮、地表温度、地下 5 cm 温度和地下 5 cm 湿度) 不符合正态分布, 在分析前进行 LOG 变换。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对不同微地形的所有因子进行比较, 显著差异水平设为 0.05。统计分析所用软件为 SPSS19.0。

2 结果与分析

2.1 芒萁斑块中不同微地形的面积比例

芒萁斑块占整个研究区总面积的比例为 30.09%。不同微地形在整个研究区和芒萁斑块的分布如表 3 所示。在整个研究区上坡和沟谷的面积比例稍多。在芒萁斑块中, 不同微地形面积比例顺序为脊部<上坡<中坡<下坡<沟谷。其中, 脊部面积比例为 9.38%; 上坡、中坡和下坡几乎均匀分布 (18.55%、19.63% 和 22.71%); 沟谷为 28.43%, 大约为脊部的 3 倍; 由于平坡的面积比例极小, 因而不考虑。

2.2 不同微地形的芒萁生长特征和土壤肥力因子

所有芒萁生长特征 (芒萁高度、密度、地上生物量、地下生物量和总生物量) 在三种微地形 (脊部、沟坡和沟谷) 均分别存在显著差异 ($P<0.05$)。芒萁高度、密度、地上生物量、地下生物量和总生物量在沟谷最大, 按自沟谷经沟坡到脊部的顺序

分别趋于下降 (表 4)。

有机质、全氮、碱解氮、速效钾和 pH 值在三种微地形 (脊部、沟坡和沟谷) 均分别存在显著差异 ($P<0.05$)。其中, 有机质、全氮、碱解氮和速效钾按自沟谷经沟坡到脊部的顺序分别趋于下降, pH 值则反之; 全磷、速效磷、全钾和 $<2 \mu\text{m}$ 粘粒质量分数在三种微地形 (脊部、沟坡和沟谷) 均分别不存在显著差异 (表 4)。

所有芒萁生长特征 (芒萁高度、密度、地上生物量、地下生物量和总生物量) 分别与部分土壤肥力因子 (有机质、全氮、碱解氮和速效钾) 呈显著正相关, 分别与 pH 值呈显著负相关, 分别与其余土壤肥力因子 (全磷、速效磷、全钾和 $<2 \mu\text{m}$ 粘粒质量分数) 无显著相关 (除了速效磷与芒萁密度) (表 5)。

2.3 不同微地形的微气象因子

地表温度、地下 5 cm 温度和地下 5 cm 湿度在脊部和沟谷分别存在显著性差异 ($P<0.05$)。沟谷的地表温度和地下 5 cm 温度分别显著低于脊部, 而沟谷的地下 5 cm 湿度显著高于脊部。沟谷的地表温度和地下 5 cm 温度比脊部分别低 3.51 °C 和 1.65 °C, 而沟谷的地下 5 cm 湿度比脊部高约 40% (表 6)。

3 讨论

南方红壤丘陵区水土流失是植物和土壤最重要的限制因子之一。微地形与水土流失具有明显的相关关系 (Sardans & Peñuelas, 2013), 因此根据水土流失可大致将微地形分为三类: 汇入区 (相比周围较为低洼, 相当于沟谷)、沟坡 (相比周围高度差异较小) 或流失区 (相比周围较为高耸, 相当于脊部) (Yao et al, 2006)。水土流失可导致流失区的水和土壤的流失, 例如土壤矿物质和有机质等。因此, 相对而言, 流失区水分贫乏、土壤养分贫瘠、土层较浅、稳定性差 (Douda et al, 2012), 进而影响上面定居的植物。例如, 流失区植物种子流失率和死亡率较高。汇入区为有限的水和土的汇集区, 水分和土壤肥力条件较为优越, 从而有效提高植物生长, 产生更多具有高营养质量的落叶, 更好保护土壤, 并进一步促进微生物活性和养分有效

性(Yoshida & Ohsawa, 1999)。因而,与流失区相比,汇入区植物长势相对更好,在种类组成和植物群落上具有更高级演替阶段的特征(Casado et al, 1986)。本研究中,芒萁斑块中的微地形面积比例顺序为脊部<上坡<中坡<下坡<沟谷,沟谷面积比例约为脊部的3倍。因此,微地形对芒萁分布具有重要影响。

土壤肥力恢复是一个缓慢和艰巨的过程,如通过分析黄土高原沟壑区弃耕40 a的土壤演化发现,这一过程十分缓慢(郝文芳等,2005)。微气象因子,如最高地表湿度会在一个相对较短时间内发生明显变化,而土壤肥力的恢复则明显滞后。在长汀县严重水土流失区,森林生态系统部分结构的恢复约需40 a,土壤肥力的恢复约需140 a(陈志彪和朱鹤健,2006)。经过30 a的自然恢复,全磷、速效磷、全钾和 $<2\ \mu\text{m}$ 粘粒质量分数在三种微地形(脊部、沟坡和沟谷)均分别不存在显著差异,说明南方红壤丘陵区严重水土流失下土壤肥力自我发展所需时间较长。然而,所有芒萁生长特征、部分土壤肥力因子和所有微气象因子在三种微地形(脊部、沟坡和沟谷)均分别存在显著差异。沟谷具有最高的芒萁高度、密度、地上生物量、地下生物量、总生物量、土壤有机质、全氮、碱解氮和速效钾,沟坡居中,脊部最低。即使土壤肥力恢复较为缓慢,由于芒萁生长能输出凋落物、减少水土流失以及改善土壤温度和湿度等,且能逐步提高土壤肥力。因此,所有芒萁生长特征均分别与部分土壤肥力因子呈显著正相关或负相关(有机质、全氮、碱解氮、速效钾和pH值)。

就大尺度而言,许多区域可视为平坦或均质,而在小尺度,微地形常形成异质性的微气象因子。为了揭示种子定居、植物生长和群落发展的内在规律,应考虑由微地形形成的微气象因子(Shida & Nakamura, 2011)。就湿地而言,许多湿地具有与微地形密切相关的有氧或亚有氧微生境,为大量湿地物种提供了生境(胡振鹏等,2010)。与空洞微地形相比,小丘微地形经常具备较高的光能有效性,更高的温度,更低的土壤湿度,因此小丘微地形形成枯枝落叶覆盖和水位的异质性,为赤杨种子定居提供了安全区(Shida & Nakamura,

2011)。对次生盐渍化地区桉树林的研究表明,由于微地形对微气象因子的影响,高度在0.2 m内的微地形差异意味着桉树林完全死亡或健康生长(Cramer et al, 2004)。本研究中,虽然仅在5月份测定地表温度、地下5 cm温度和地下5 cm湿度,但结果与沟谷相比,脊部的地表温度和地下5 cm温度显著较高,地下5 cm湿度显著较低,脊部提供了相对干热的微气象条件,而沟谷相对温和湿润。

通过影响一系列物理、化学和生物因子,仅几厘米的微地形就足以极大程度影响生态系统结构和功能。这一研究对生态恢复的许多方面具有重要启示意义。Moser et al(2007)研究提出,虽然没有法律强制规定,但在生态恢复中微地形可作为执行或监督的标准之一。因此,生态恢复过程中应根据实际情况采用各种技术有意构建微地形。近年来,已有一些地方采用推土机创建微地形进行营林,以提高某几种植物类型的成活率和生长率(Goto et al, 2010)。同时,植物演替的时间长短和进一步的发展方向,很大程度取决于其在微地形的位址。本研究发现,脊部相对干热,而沟谷相对温和湿润。因此,沟谷可能更适合种子定居和植物生长。在促使退化土地的植物扩散、土壤肥力提高和生态恢复方面,沟谷具有更大潜力。本研究建议,在南方红壤丘陵区生态恢复过程中,应使用推土机或者锄头创建微地形尤其是沟谷。创建的微地形在诱发芒萁群落演替上具有重要影响,进而加速生态恢复进程。

4 结论

芒萁斑块中沟谷的面积比例大于沟坡和脊部;所有芒萁生长特征在不同微地形均分别存在显著差异,按自沟谷经沟坡到脊部的顺序分别趋于下降;由于土壤肥力恢复缓慢,部分土壤肥力因子在不同微地形分别不存在显著差异;所有芒萁生长特征分别与部分土壤肥力因子呈显著相关,而与其余土壤肥力因子无显著相关;脊部提供了相对干热的微气象条件,而沟谷相对温和湿润;微地形对芒萁分布、芒萁生长特征、土壤肥力因子和微气象因子具有重要影响,因此在南方红壤丘陵

区,应创建微地形尤其是沟谷以诱发芒萁群落演替,进而加速生态恢复进程。

参考文献:

- CASADO MA, MIGUEL JMD, STERLING A, et al, 1986. Production and spatial structure of Mediterranean pastures in different stages of ecological succession [J]. *Vegetation*, 64 (2-3): 75-86.
- CHEN ZB, ZHU HJ, 2006. The physical and chemical characteristics of soil under the different control measures of soil and water loss [J]. *J Fujian Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 22 (4): 5-9. [陈志彪, 朱鹤健, 2006. 不同水土流失治理模式下的土壤理化特征 [J]. 福建师大学报(自然科学版), 22(4): 5-9.]
- CHEN ZQ, CHEN ZB, CHEN HB, et al, 2012. Spatial relationship between soil fertility quality and human activities accessibility in the red eroded area of southern China: A case study in Zhuxi watershed, Changting county, Fujian province [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 10(1): 103-107. [陈志强, 陈志彪, 陈海滨, 等, 2012. 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量与人为活动可达性的空间关系——以福建长汀县朱溪流域为例 [J]. 中国水土保持科学, 10(1): 103-107.]
- CRAMER VA, HOBBS RJ, ATKINS L, et al, 2004. The influence of local elevation on soil properties and tree health in remnant eucalypt woodlands affected by secondary salinity [J]. *Plant Soil*, 265(1-2): 175-188.
- DOUDA J, DOUDOVÁ-KOCHÁNKOVÁ J, BOUBLÍK K, et al, 2012. Plant species coexistence at local scale in temperate swamp forest: Test of habitat heterogeneity hypothesis [J]. *Oecologia*, 169(2): 523-534.
- DENG H, LIN QW, TENG HQ, et al, 2004. Analysis on the growth regularity of *Dicraopteris dichotoma* in areas of intensive soil erosion [J]. *J Fujian Coll For*, 24(3): 262-264. [邓恢, 林沁文, 滕华卿, 等, 2004. 强度水土流失区芒萁生长规律分析 [J]. 福建林学院学报, 24(3): 262-264.]
- FANG X, CAO JJ, NA JM, et al, 2017. Spatial patterns of land use changes in different micro-geomorphic types of loess hilly area: A case study of Hechuan Town in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Geogr Geo-Inform Sci*, 33(4): 113-118. [方炫, 曹建军, 那嘉明, 等, 2017. 黄土丘陵区土地利用变化的微地貌分异研究——以宁夏固原河川乡为例 [J]. 地理与地理信息科学, 33(4): 113-118.]
- GARGANO D, VECCHIO G, BERNARDO L, 2010. Plant - soil relationships in fragments of Mediterranean snow-beds: ecological and conservation implications [J]. *Plant Ecol*, 207(1): 175-189.
- GOTO S, IJIMA H, KIMURA N, 2010. Long-term effects on tree regeneration of soil scarification with microtopography manipulation in mixed forests of central Hokkaido, northern Japan [J]. *J For Res*, 15(5): 328-336.
- GUAN DS, 1996. A study of nutrients in fernland of Hong Kong [J]. *Acta Phytocool Sin*, 20(3): 235-244. [管东生, 1996. 香港芒萁群落养分的研究 [J]. 植物生态学报, 20(3): 235-244.]
- GUO BH, WANG RS, XIAO HJ, et al, 2016. Effects of microtopography on the distribution of soil condensation water on a sand dune in Mu Us Sandland [J]. *J Soil Water Conserv*, 30(4): 102-109. [郭冰寒, 王若水, 肖辉杰, 等, 2016. 毛乌素沙地微地形对土壤凝结水分布的影响 [J]. 水土保持学报, 30(4): 102-109.]
- HAO WF, LLANG ZG, Chen CG, et al, 2005. Study of the different succession stage community dynamic and the evolution of soil characteristics of the old-field in Loess Hills Gully [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 21(8): 226-231. [郝文芳, 梁宗锁, 陈存根, 等, 2005. 黄土丘陵沟壑区弃耕地群落演替与土壤性质演变研究 [J]. 中国农学通报, 21(8): 226-231.]
- HU ZP, GE G, LIU CL, et al, 2010. Structure of poyang lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure [J]. *Resourc Environ Yangtze Basin*, 2010, 19(6): 597-605. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 等, 2010. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究 [J]. 长江流域资源与环境, 19(6): 597-605.]
- KOPONEN P, NYGREN P, SABATIER D, et al, 2004. Tree species diversity and forest structure in relation to microtopography in a tropical freshwater swamp forest in French Guiana [J]. *Plant Ecol*, 173(1): 17-32.
- LIU GS, 1996. Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles [M]. Beijing: Standards Press of China. [刘光崧, 1996. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社.]
- MOSER K, AHN C, NOE G, 2007. Characterization of microtopography and its influence on vegetation patterns in created wetlands [J]. *Wetlands*, 27(4): 1081-1097.
- SARDANS J, PEÑUELAS J, 2013. Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change [J]. *Plant Soil*, 365(1-2): 1-33.
- SHIDA Y, NAKAMURA F, 2011. Microenvironmental conditions for Japanese alder seedling establishment in a hummocky fen [J]. *Plant Ecol*, 212(11): 1819-1829.
- TOKUCHI N, TAKEDA H, YOSHIDA K, et al, 1999. Topographical variations in a plant-soil system along a slope on Mt Ryuoh, Japan [J]. *Ecol Res*, 14(4): 361-369.
- WEISS A, 2001. Topographic position and landforms analysis; proceedings of the Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, F [C].
- YAO J, PETERS DP, HAVSTAD KM, et al, 2006. Multi-scale factors and long-term responses of Chihuahuan Desert grasses to drought [J]. *Landsc Ecol*, 21(8): 1217-1231.
- YOSHIDA N, OHSAWA M, 1999. Seedling success of *Tsuga sieboldii* along a microtopographic gradient in a mixed cool-temperate forest in Japan [J]. *Plant Ecol*, 140(1): 89-98.