

# 南方红壤侵蚀区芒萁散布与坡位的关系——以朱溪小流域为例

郑宗沧 (福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007)

**摘要** 以朱溪小流域来油坑野外试验场作为研究区, 以实时动态差分仪 (Real-time kinematic, RTK) 进行微地形实地测量, 生成高精度 DEM 和芒萁分布区, 提取研究区微观地形坡位因子, 对坡度图和芒萁分布图进行空间叠加, 分析坡位对芒萁散布的影响。结果表明, ①芒萁散布明显地表现为高度集中于沟谷、低坡和高坡, 中坡和平坡地区也少量存在, 沟脊不存在或者零星地出现。低坡占 41.68%, 沟谷 30.52%, 高坡占 17.48%, 平坡、中坡和沟脊所占面积最小, 均不足 5%。②坡位引起水肥变化, 导致芒萁在不同坡位上的分布比例不均。③微观地形的研究在实际水土流失区治理中具有重要的意义。

**关键词** 芒萁; 散布; 微观地形; 坡位; 朱溪小流域

**中图分类号** S154.4 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)29-250-05

## The Relationship between Distribution of *Dicranopteris dichotoma* and Slope Positions in the Red Eroded Area of Southern China: A Case Study in Zhuxi Small Watershed

ZHENG Zong-cang (College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007)

**Abstract** Taking a field experimental area, named Laiyoukeng, in Zhuxi small watershed as the study area, this research uses the real time kinematic, RTK, to process the measurements of the microtopographic so that creating high precision DEM and *Dicranopteris dichotoma* distribution area. It extracts the microtopographic slope factor in the study area to do the spatial overlay, which analyze the influence of microtopographic slope factor to *Dicranopteris dichotoma*. The results show that: ① It is obvious that *Dicranopteris dichotoma* clusters in valley, low slope and high slope, where *Dicranopteris dichotoma* respectively occupy for 30.52%, 41.68%, 17.48%. The mesoslope and the flat slope also have small amounts, and groove ridge doesn't exist or rarely grow it, in which it even under 5%. ② When different slope positions occurs, the natural growth and the conditions of spread and distribution of *Dicranopteris dichotoma* happens. Different slope positions show variation characteristics of the overall continuations and internal differences from the valley to the groove ridge, which cause uneven distribution proportion of *Dicranopteris dichotoma* in different slope positions. ③ The research of the microtopography in the management for the actual soil and water loss is of great importance.

**Key words** *Dicranopteris dichotoma*; Separation; Microtopography; Slope position; Zhuxi small watershed

坡位 (Position) 指形态相对简单的沟脊、坡肩、背坡、坡脚、沟谷等基本的地形组成部分, 能够形象地反映地形在纵向上的相对位置。自然界中的坡面上, 不同的坡位例如坡肩、坡脚等由于其特殊的地形地貌特征而使土壤、水文、地貌等许多地理过程以及相关的人地系统呈现出不同的特征<sup>[1-2]</sup>。在自然景观和流域尺度下, 坡位直接影响各种土壤与环境之间物质能量交换的成土过程, 是影响土壤发生的主要因素<sup>[3-5]</sup>。同时, 坡位影响着坡面上存在的各类生物, 尤其是植被。在自然状态下, 植被的生长及其分布均与植被生长的坡位密切相关。因此, 客观准确地对坡位进行提取, 对于农林种植、环境保护、资源调查、灾害防治及地学调查等等各个方面都具有重要意义<sup>[6]</sup>。

芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 为里白科 (Gleicheniaceae) 芒萁属 (*Dicranopteris*) 的多年生常绿蕨类植物, 广泛分布于我国长江以南各省区、朝鲜南部以及日本<sup>[7]</sup>。在我国南方红壤侵蚀区的水土保持工作中, 选择芒萁为标志性指示植物, 并作为防治强度和极强度水土流失区的首选植物<sup>[8]</sup>, 是因为芒萁显著的耐旱耐贫、喜阳耐酸、繁殖生长能力极强的特点完全契合了南方红壤侵蚀区的恶劣环境, 作为最重要的先锋草本植物之一, 可以通过散布孢子, 蔓延到任何适宜的生长环境中, 进而逐渐地改善分布区域的水分、养分等环境条件, 对改善

水土流失区的生态环境具有重要意义, 为随后进入的演替过程创造最关键的生境条件, 从而起到促进植被演替的效果<sup>[9]</sup>。

该研究以福建省长汀县河田镇中东部朱溪小流域为研究区, 以基于实地调查, 采用 RTK (Real Time Kinematic, 实时动态差分) 高精度测量的来油坑野外试验场三维坐标样点, 在 GIS 软件中生成栅格数据, 并使用空间叠加分析的方法, 开展南方红壤侵蚀区芒萁散布与坡位的关系研究, 以期探索不同坡位对芒萁群落的空间分布、蔓延的影响机制。

## 1 研究区概况

朱溪小流域位于福建省长汀县河田镇中东部, 25°38'15"~25°42'55" N, 116°23'30"~116°30'30" E, 流域面积约为 4 495.65 hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。该流域属中亚热带季风性湿润气候, 春夏温暖湿润, 秋冬温和少雨, 夏长冬短, 具有明显的干湿季; 年降水量 1 400~2 450 mm, 年际分配不均且强度较大, 多为双峰型, 大多集中在 3~8 月; 年内径流量季节变化大, 3~6 月径流量占全年比例较大, 约为 73%, 径流系数约为 0.6, 变幅可达 3.3 倍; 全年平均蒸发量约为 990~1 140 mm; 季风气候显著, 夏季盛行东南风, 冬季盛行西北风。流域地势自东北向西南倾斜, 海拔 270~680 m, 地貌类型以低山、丘陵为主, 在河流沿岸及支流处零星分布面积大小不等的河谷盆地。朱溪小流域土壤以红壤、侵蚀红壤为主, 由燕山晚期矿物晶粒粗大的黑云母花岗岩在长期湿热气候条件下风化发育而成。土层厚度约 10~20 m, 最厚可达 50~60 m, 节理发育, 但极其松软, 抗蚀性极差, 且酸性强, 保水保肥能力低<sup>[11]</sup>。朱溪小流域的地带性植被为亚热带常绿阔叶林, 但由于长期的人为破坏, 原生植被基本消失, 几乎被次生针叶林所代替。

**基金项目** 福建省自然科学基金项目 (2013J01156); 国家科技支撑计划基金项目 (2013BAC08B03); 福建省科技重大专项 (2010NZ0002-1-5)。

**作者简介** 郑宗沧 (1991-), 男, 福建三明人, 硕士研究生, 研究方向: 区域开发与国土整治。

**收稿日期** 2015-08-26

在实施水保措施前,不少地方寸草不生,侵蚀较强的区域植被盖度仅为 5% ~ 10%,且年生长量极低。主要植被类型为次生马尾松中、幼林,树种单一,结构简单,林下灌木主要为散生的小叶赤楠、黄瑞木、石斑木等,草类包括芒萁、鹧鸪草等。近年来发展了板栗、杨梅、银杏等果树<sup>[12]</sup>。流域内的行

政区划包括河田镇的寒坊、游坊、晨光、松林、朱溪、下街等 7 个自然村,以及南山镇的大田和谢屋两个自然村<sup>[13]</sup>,如图 1 朱溪小流域地理位置图所示。该研究选择朱溪小流域东部来油坑野外试验场,区域面积约为 20 000 m<sup>2</sup>,高程约 345 ~ 363 m,坡度约 0 ~ 65°,来油坑野外试验场景观如图 2。

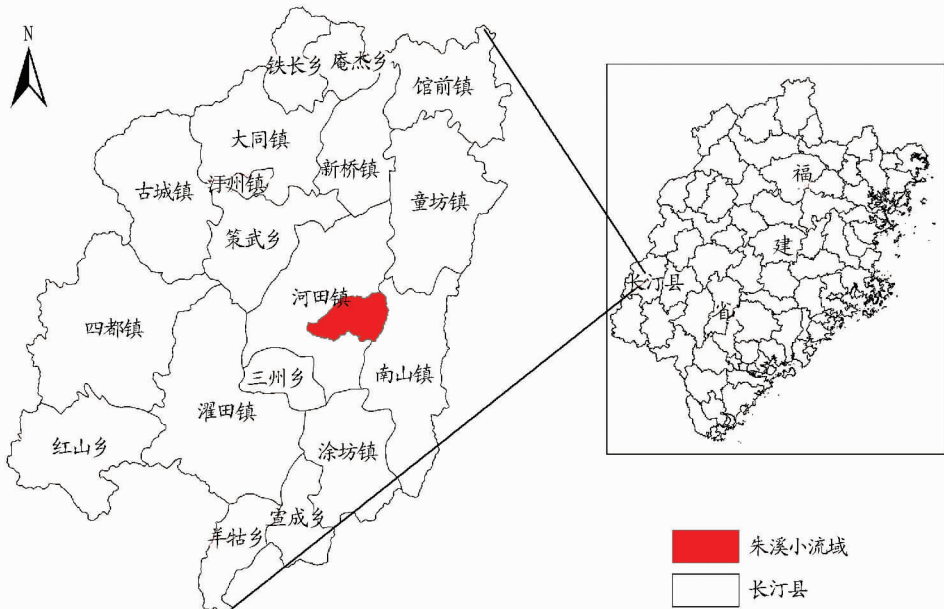


图 1 朱溪小流域地理位置



图 2 来油坑野外试验场景观

2 数据获取与研究方法

**2.1 数据获取** 该研究基于实地调查,采用 RTK 高精度测量了长汀县朱溪小流域的来油坑野外试验场。该研究对测量点的选取按照坡度较陡的地区布点较密,相邻测量点间距 30 cm 左右,坡度较缓的地区,布点较稀,相邻测量点间距控制在 60 cm 以内的分布原则,从野外试验场东南角向西北角的顺序地毯式地形测定。对芒萁分布区边界测定,则在此原则的基础上尽可能地沿芒萁分布边缘布点,最大限度地保留芒萁自然生长空间的分布特征。实地测定试验场总计 3 300 个测量点的三维坐标(图 3)。随后使用 Make XY Event layer 工具将点图层加载到 ArcGIS9.3 软件中,生成分辨率为 0.1 m × 0.1 m 的高精度 DEM 数据(图 4)。加载地形分析套件 Land Facet Corridor Designer,使用其中的 Topographic Position Index Tools 工具对坡位信息进行分类提取,得到研究区坡位图(图 5)。同理在 ArcGIS 中导入所测量的芒萁边界点,生成

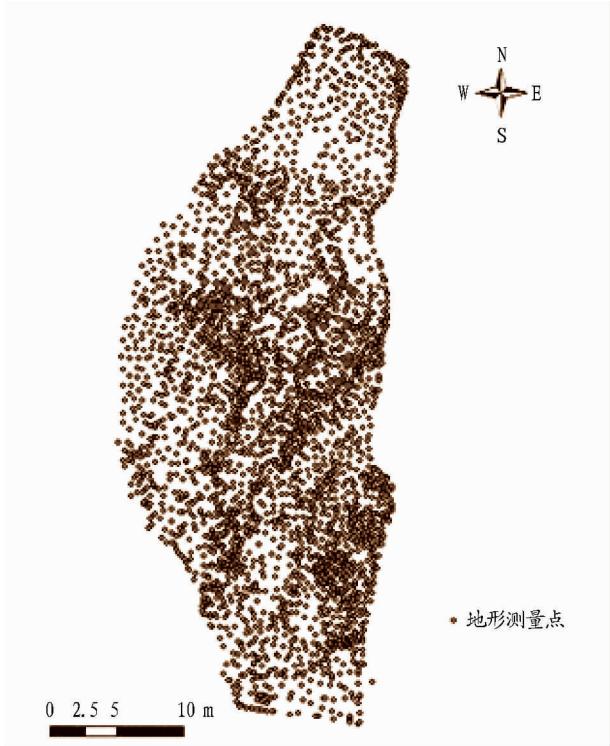


图 3 野外试验区测量点分布

面图层后,再转为栅格数据后,获得研究区芒萁分布图(图 6),将芒萁斑块按照从上到下从左到右的原则编号 bk1 ~ bk7。将坡位图和芒萁分布图相叠加进行空间分析即可得到在每一个坡位上芒萁分布的整体情况。

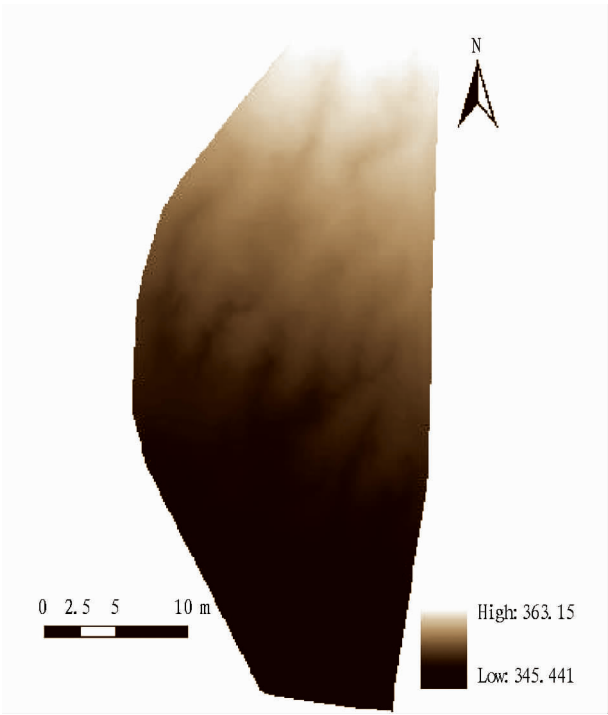


图4 野外试验区 DEM

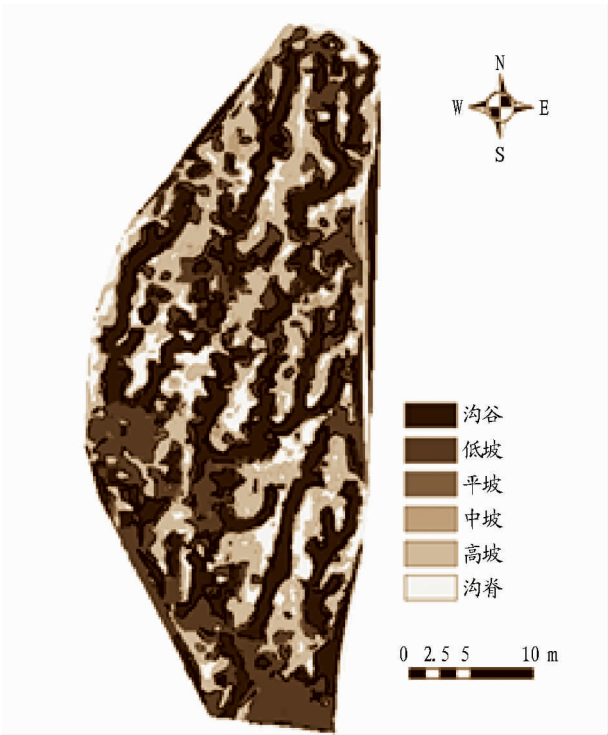


图5 野外试验区坡位分类

**2.2 研究方法** 地形位置指数(Topographic Position Index, TPI)是由 Andrew Weiss 在 2001 年 ESRI 国际用户大会上提出,它是地形分类体系的基础参数<sup>[14]</sup>。TPI 的基本原理是研究目标点与其邻域高程平均值的差值,按照差值的大小(区分正负)来判定研究点位于地形纵剖面中的上下位置关系。

$$TPI = Z - \bar{Z}$$
 (1)

式中, $TPI$  为地形位置指数, $Z$  为研究对象高程值, $\bar{Z}$  为邻域高程平均值。当  $TPI$  接近 0 时,判定该地区较平缓, $TPI$  趋向

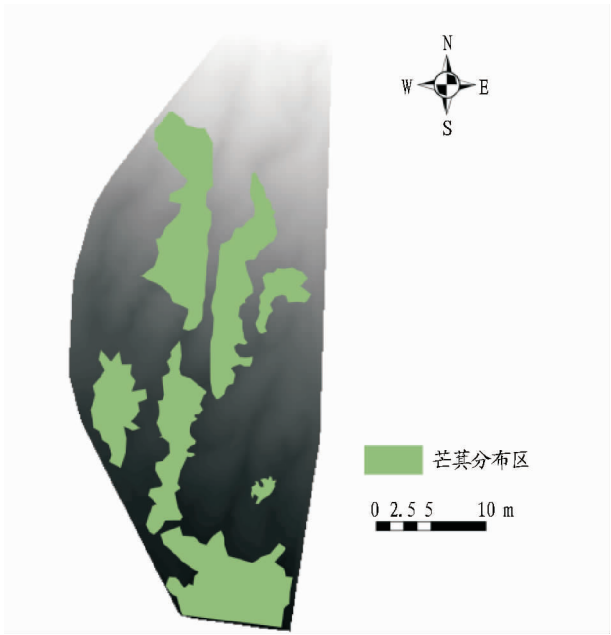


图6 野外试验区芒萁斑块

于正值时,则判定该地区趋近沟脊,反之则趋近沟谷。

$$SLOP\ POSITION = f(TPI, SLOP)$$
 (2)

式中, $SLOP\ POSITION$  为坡位, $TPI$  为地形位置指数, $SLOP$  为坡度。其中  $TPI$  的取值与邻域的范围大小及形状设置密切相关<sup>[14]</sup>, $TPI$  邻域尺度差异影响如图 7 所示。结合试验样区的实际情况,采用以 1 m 为半径的圆形邻域。

该研究中,按照六级分类法,选择沟脊(Ridges)、高坡(Upper slopes)、中坡(Steep slopes)、平坡(Gentle slopes)、低坡(Lower slopes)和沟谷(Valleys)6 类坡位。此坡位类型的分类基本类似于 Ruhe 所划分的沿纵坡面的地形单元<sup>[15]</sup>。这 6 类坡位构成了一个包含自坡顶向坡底逐渐过渡的完整序列的坡面,在传统的确定性坡位分类中覆盖了绝大多数的空间范围<sup>[16]</sup>。经过试验获得相关参数如表 1。

3 结果与分析

**3.1 野外试验区芒萁分布与坡位的关系** 对研究区范围内各类坡位芒萁分布所占面积以及比例做了统计。各坡位芒萁分布斑块图如图 8 所示,研究区内芒萁于各个坡位分布比率图见图 9,研究区坡面上不同坡位芒萁的面积比率如表 2 所示。

综上所述,①野外试验区总面积为 820.84 m<sup>2</sup>,其中主要的坡位类型为沟谷、低坡和高坡,分别占野外试验区总面积的 24.65%、29.47% 和 27.17%,其他 3 种坡位类型之和仅占 18.78%,尤其是平坡极少,仅占 1.77%。②芒萁的覆盖面积为 219.68 m<sup>2</sup>,仅占野外试验区总面积的 26.76%,其中低坡分布最多占 41.68%,其次为沟谷 30.52%,高坡占 17.48%,平坡、中坡和沟脊所占面积最小,均不足 5%。③野外试验区内各个坡位中存在芒萁的比例特点为:低坡、平坡、沟谷最大,分别为 37.86%、33.86% 和 33.23%,其次为中坡 22.08%、高坡 17.21%,沟脊最少,仅占 8.50%。④图 9 显示在所有芒萁覆盖区内各坡位所占比例特点为:低坡、沟谷最大,分别为 42% 和 31%,其次为高坡 17%,最少的还是中坡、平坡以及沟脊,均不足 5%。

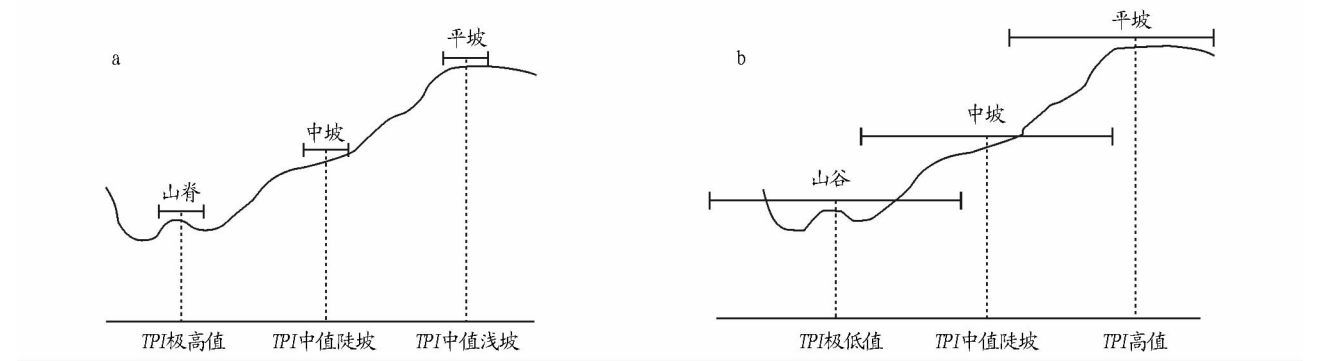


图 7 小(a)、大(b)尺度邻域坡位分类示意图

表 1 坡位分类参数

| 编号     | 类型 | 分类依据                                                      |
|--------|----|-----------------------------------------------------------|
| 坡位类型 1 | 沟脊 | $TPI > [1] SD$                                            |
| 坡位类型 2 | 高坡 | $[0.35] SD < TPI \leq [1] SD$                             |
| 坡位类型 3 | 中坡 | $[0.2] SD < TPI \leq [0.35] SD$ Slope $> [18]$ degrees    |
| 坡位类型 4 | 平坡 | $[0.2] SD < TPI \leq [0.35] SD$ Slope $\leq [18]$ degrees |
| 坡位类型 5 | 低坡 | $[-0.5] SD < TPI \leq [0.2] SD$                           |
| 坡位类型 6 | 沟谷 | $TPI \leq [-0.5] SD$                                      |

注:SD 代表 standard deviation from elevation,即 TPI 与邻域像元高程的标准偏差值<sup>[14]</sup>。

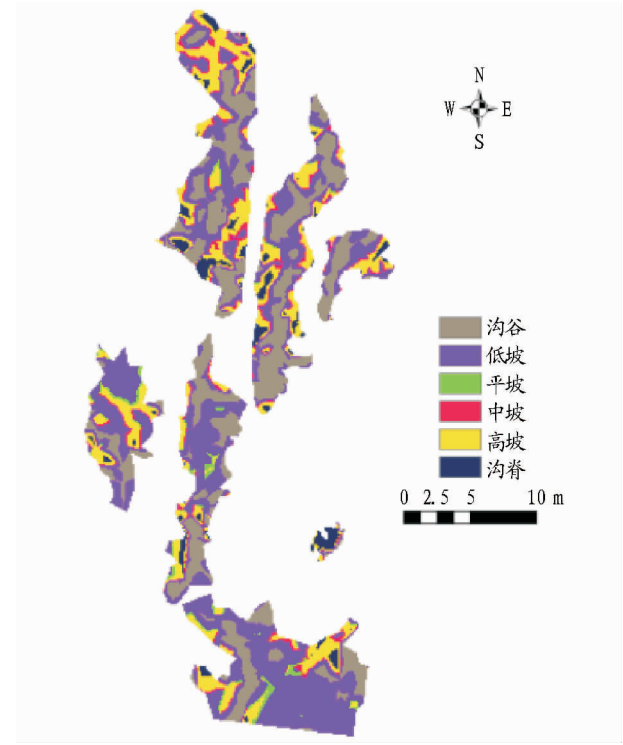


图 8 野外试验区各坡位芒萁斑块

可见,该区域较为平缓的面积虽然达到一半以上,但是芒萁自然存活区域仅 25% 左右,也就是说存在近一半的面积裸露而且较为陡,水土保持不易。针对整个野外试验区而言,芒萁的分布具有集中于沟谷、平坡和高坡,沟脊没有或者极少地零星分布的明显特点。针对芒萁覆盖整体区域而言,同样也存在芒萁分布集中在沟谷、低坡和高坡,沟脊极少,中坡和平坡少量的规律性。不难看出二者具有统一性,如图 10

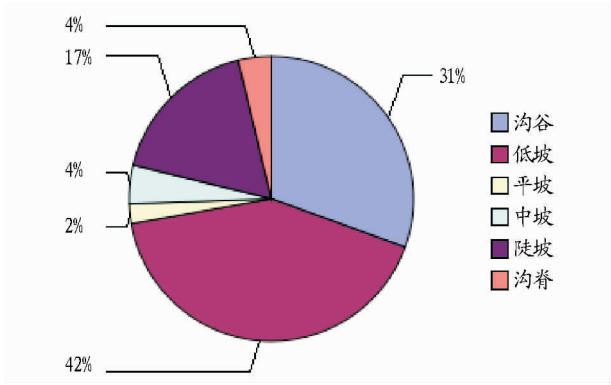


图 9 芒萁覆盖区内各坡位所占比例

所示的集中分布于特定坡位的规律明显。

表 2 野外试验区坡面不同坡位上芒萁的面积与比例

| 坡位 | 研究坡面               |        | 芒萁斑块               |        | 各坡位中的芒萁比例//% |
|----|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------|
|    | 面积//m <sup>2</sup> | 比例//%  | 面积//m <sup>2</sup> | 比例//%  |              |
| 沟谷 | 201.77             | 24.65  | 67.04              | 30.52  | 33.23        |
| 低坡 | 241.88             | 29.47  | 91.57              | 41.68  | 37.86        |
| 平坡 | 14.50              | 1.77   | 4.91               | 2.24   | 33.86        |
| 中坡 | 43.43              | 5.29   | 9.59               | 4.37   | 22.08        |
| 高坡 | 223.06             | 27.17  | 38.39              | 17.48  | 17.21        |
| 沟脊 | 96.20              | 11.72  | 8.18               | 3.71   | 8.50         |
| 总计 | 820.84             | 100.00 | 219.68             | 100.00 | 26.76        |

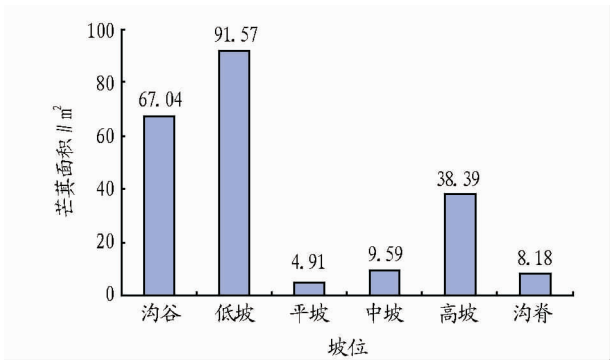


图 10 野外试验区内坡位差异与芒萁分布特征

3.2 野外试验区各芒萁斑块分布与坡位的关系 首先,对野外试验区芒萁分布范围内部各类坡位所占面积进行比例统计,但是由于第 6 块芒萁图斑 bk6 太小,仅占野外试验区的 0.2% 左右,所以统计时进行合理舍弃处理,避免过大的离散值影响统计结果。经计算得到野外试验区坡面上不同坡

位芒萁的面积统计,如表 3 所示。芒萁各斑块内部不同坡位类型所占据的比例如图 11 所示。

由表 3、图 11 可知,①在 bk1、bk4、bk5 和 bk7 芒萁图斑区域内,各坡位占据面积均有低坡>沟谷>高坡,并且三者均远大于沟脊、中坡和平坡;在 bk2 和 bk3 中则表现为沟谷>低坡>高坡,并且三者也远大于沟脊、中坡和平坡所占面积的规律。②在 bk1~bk7(除剔除的高度离散数据 bk6)中,每一个斑块内部均呈现出沟谷和低坡为主要散布区域,两类坡位就达 70%~80%左右,还存在低坡、沟谷、高坡 3 类总计约占 80%~90%的高度集中性和沟脊部位极少分布,仅有少

量芒萁分布于中坡和平坡的明显规律,和试验区芒萁分布与坡位的关系高度吻合。③遵循自上而下,由左及右规律的 bk1~bk7(除剔除的高度离散数据 bk6)6 个区域,也从各斑块的角度纵向地表征了整个野外试验区坡面由下而上芒萁的分布比重从沟谷和低坡向中坡和平坡迅速递减,以及高坡上稍平坦位置向沟脊部位迅速消失,证明了芒萁分布在沟谷、低坡、高坡平缓区域,并向中坡、平坡、沟脊区域迅速消失的高度集中性与蔓延趋向性。该研究结果基本反映了野外试验区芒萁分布各斑块范围内不同部位坡位因子的显著影响力。

表 3 研究坡面上不同坡位及芒萁的面积统计

| 坡位 | bk1            |        | bk2            |        | bk3            |        | bk4            |        | bk5            |        | bk7            |        | 芒萁总            | 野外试验           |
|----|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------------|
|    | 面积             | 比例     | 面积             | 比例     | 面积             | 比例     | 面积             | 比例     | 面积             | 比例     | 面积             | 比例     | 面积             | 区总面积           |
|    | m <sup>2</sup> | %      | m <sup>2</sup> | %      | m <sup>2</sup> | %      | m <sup>2</sup> | %      | m <sup>2</sup> | %      | m <sup>2</sup> | %      | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> |
| 沟谷 | 17.39          | 30.82  | 17.71          | 42.12  | 4.48           | 41.25  | 4.29           | 18.04  | 12.24          | 37.73  | 10.93          | 20.20  | 67.04          | 201.77         |
| 低坡 | 17.67          | 31.31  | 12.50          | 29.73  | 3.78           | 34.81  | 12.45          | 52.35  | 13.67          | 42.14  | 31.50          | 58.20  | 91.57          | 241.88         |
| 平坡 | 0.40           | 0.71   | 0.30           | 0.71   | 0.00           | 0.00   | 1.04           | 4.37   | 1.13           | 3.48   | 2.04           | 3.77   | 4.91           | 14.50          |
| 中坡 | 3.84           | 6.80   | 1.93           | 4.59   | 0.60           | 5.52   | 0.90           | 3.78   | 0.75           | 2.31   | 1.57           | 2.90   | 9.59           | 43.43          |
| 陡坡 | 13.65          | 24.19  | 7.55           | 17.95  | 1.63           | 15.01  | 4.78           | 20.10  | 3.66           | 11.28  | 7.12           | 1.77   | 38.39          | 223.06         |
| 沟脊 | 3.48           | 6.17   | 2.06           | 4.90   | 0.37           | 3.41   | 0.32           | 1.35   | 0.99           | 3.05   | 0.96           | 1.77   | 8.18           | 96.20          |
| 总计 | 56.43          | 100.00 | 42.05          | 100.00 | 10.86          | 100.00 | 23.78          | 100.00 | 32.44          | 100.00 | 54.12          | 100.00 | 219.68         | 820.84         |

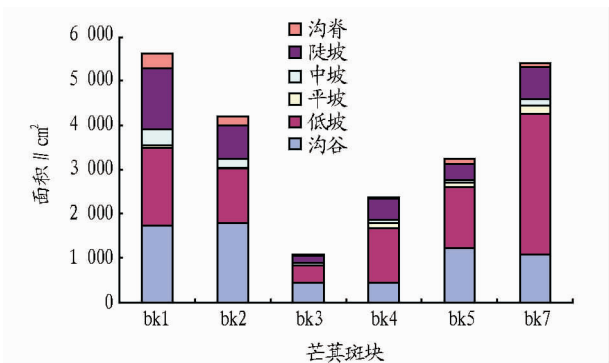


图 11 芒萁各斑块内部不同坡位占据比例

4 结论与讨论

该研究以典型南方红壤侵蚀区长汀县朱溪小流域为研究区,以坡位和芒萁为研究对象,通过野外地形数据采集和基于 GIS 技术、EXCEL 处理软件的室内数据处理,分析得到坡位对芒萁散布的影响规律。主要结论如下:①芒萁自然环境中的生长分布具有显著的规律性,明显地表现为高度集中于沟谷、低坡和高坡,中坡和平坡地区也少量存在,沟脊不存在或者零星地出现极少量。低坡占 41.68%,沟谷 30.52%,高坡占 17.48%,平坡、中坡和沟脊所占面积最小,均不足 5%。②坡位差异引起满足芒萁自然生长和蔓延分布的条件变化,从沟谷到沟脊的不同坡位上呈现整体的连续和内部差异的变化特点,导致芒萁在不同坡位上的分布比例不均。③该研究在小流域内基于微观尺度的综合分析中,验证了芒萁自然生境下的分布与蔓延趋向规律具有实用性,体现了微观地形的研究在实际水土流失区治理中具有重要的意义。

4.1 芒萁散布的影响条件 芒萁散布主要依赖于其地下茎的伸长扩散,趋湿性和趋肥性是芒萁地下茎伸长的两个主要

特性。分别表现为:在较阴湿的地方,芒萁的长势较好,并喜欢向阴湿地区生长蔓延,可见水分条件是芒萁繁殖蔓延的重要条件;在养分条件比较好的地方,芒萁长势也较好,并且更明显地呈现出其向前生长的趋势。如林夏馨的研究表明,芒萁具有顽强生命力和突出的蔓延能力,只要有阴湿的气候条件,芒萁的地下茎虽不能深入地下穿行,但有时可以沿岩石表面或地表穿行<sup>[17]</sup>。可见,芒萁喜阴趋肥的特性决定了它的生长繁殖必定受到所处环境水分条件和养分条件的显著影响。

4.2 坡位对水分、肥力等条件的影响 随着坡位渐变,与之关联的海拔、土壤水分、土壤肥力和光照强度改变,各因子之间相互影响,并出现延续性的变化特征。针对任意一个独立坡面而言,随海拔降低都存在一个坡位由沟脊向沟谷变化的过程。沟脊区域由于坡位较高、且相对较陡,侵蚀作用比较强。随着坡位过渡到高坡,地形相对沟脊趋于平缓,相较于中坡坡度变化率又较小,侵蚀作用也较弱。随着坡位进一步向低位变化,逐渐过渡到坡脚直至沟谷,由于地形趋缓,侵蚀作用减弱,同时上方被侵蚀、冲刷下来的物质到此逐渐沉积下来<sup>[18]</sup>。同时,退化土壤上植物的生物量在一定程度上影响了土壤肥力的恢复<sup>[19]</sup>。邵文军等关于山区小流域不同海拔和坡位土壤养分分布相关性的研究结果揭示,随着海拔的降低,土壤有机质含量迅速增加,不同坡位的土壤养分可以随流水等等因素向下汇聚,呈现出坡位靠近沟谷土壤养分含量升高。这也进一步证实了芒萁自然环境中的生长分布具有显著的规律性,明显地表现为高度集中于沟谷、低坡和高坡,中坡和平坡地区也少量存在,沟脊不存在或者极少生长芒萁的规律。

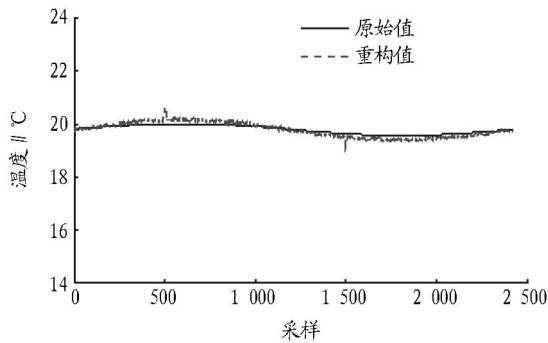


图3 6号农田数据复原

度在过 DCT 域中表现稀疏性的基础上,对农田信息单独进行压缩采样、发送,接收端再对数据进行重构。仿真结果表明运用 CS 算法既减少了采集与传输的数据量,又降低了节点能量损耗,满足了无线传感器网络应用的需求。

#### 参考文献

- [1] JIAO J, MA H M, QIAO Y, et al. Design of farm environmental monitoring system based on the internet of things[J]. Advance journal of food science and technology, 2014, 6(3): 368–373.
- [2] 焦俊, 张水明, 杜玉林, 等. 物联网技术在农田环境监测中的应用[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20): 290–295.

(上接第 254 页)

**4.3 水土治理中利用坡位促进芒萁散布** 可以参照“类梯田”的构建模式,运用“微积”的形式,进行治理区域坡位微观改造。通过每一个独立坡面中沟脊比重的降低和沟谷、低坡比重的增大或维持,通过一系列“人造”微型沟谷的构建,创造更多满足芒萁生长条件的区域,使芒萁的生长能够先出现在沟谷等低处,进而向其他不同部分蔓延。

#### 参考文献

- [1] 姚华荣, 杨志峰, 崔保山. GIS 支持下的澜沧江流域云南段土壤侵蚀空间分析[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 421–429.
- [2] 李小建, 乔家君. 地形对山区农田人地系统投入产出影响的微观分析: 河南省巩义市吴沟村的实证研究[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 717–726.
- [3] SEIBERT J, STENDAHL J, SØRENSEN R. Topographical influences on soil properties in boreal forest [J]. Geoderma, 2007, 141(1/2): 139–148.
- [4] PENNOCK D J, CORRE M D. Development and application of landform segmentation procedures [J]. Soil and tillage research, 2001, 58(3/4): 151–162.
- [5] GRIFFITHS R P, MADRITCH M D, SWANSON A K. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implication for the effects of climate change on soil properties[J]. Forest ecology and management, 2009, 257(1): 1–7.
- [6] 韦金丽, 王国波, 凌子燕. 基于高分辨率 DEM 的地形特征提取与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2012(1): 33–36.
- [7] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及

- [3] 焦俊, 操俊, 潘中, 等. 基于物联网的农田环境在线监测系统[J]. 农业工程, 2014, 4(6): 18–23.
- [4] QUER G, MASIERO R, PILLONETTO G, et al. Sensing, compression and recovery for WSNs: Sparse signal modeling and monitoring framework[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2012, 11(10): 3447–3461.
- [5] FORNASIER M, RAUHUT H. Compressive sensing[M]//Chapter in Part 2 of the Handbook of Mathematical Methods in Imaging Springer, 2011.
- [6] CANTLES E, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections and universal encoding strategies [J]. IEEE transactions on information theory, 2006, 52(12): 5406–5425.
- [7] 张金成, 吕方旭, 王针, 等. WSNs 中的分簇式压缩感知[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 169–177.
- [8] PATWARI N, WILSON J. Rf sensor networks for device-free localization: Measurements, models, and algorithms[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(11): 1961–1973.
- [9] SIGG S, SCHOL M. Rf-sensing of activities from non-cooperative subjects in device-free recognition systems using ambient and local signals[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2014, 13(4): 907–920.
- [10] CANDES E, ROMBERG T, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. Communications on pure and applied mathematics, 2006, 5998: 1207–12233.
- [11] BARANIUK R. Compressive sensing[J]. IEEE signal processing magazine, 2007, 24(4): 118–121.
- [12] ABOUTORAB N, HARDJAWANA W, VUCCTIC B. Application of compressive sensing to channel estimation of high mobility OFDM systems [C]//ICC 2013. Budapest, Hungary, IEEE, 2013: 4946–4950.

- 多样性研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 67–73.
- [8] 邓恢, 林沁文, 腾华卿, 等. 强度水土流失区芒萁生长规律分析[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(3): 262–264.
- [9] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 120.
- [10] 王秋云, 陈志彪, 陈志强, 等. 福建省长汀县朱溪小流域土地利用景观格局分析[J]. 亚热带水土保持, 2012, 24(3): 4–6.
- [11] 陈丽慧. 基于多源信息的土壤侵蚀敏感性机器生态环境效应研究: 以朱溪河小流域为例[D]. 福州: 福建师范大学, 2009.
- [12] 李时盘. 河田水土保持工作的回顾[J]. 福建水土保持, 1990(3): 50–53.
- [13] 岳辉, 陈志彪. 朱溪河小流域水土流失治理与生态环境效应[J]. 福建地理, 2003(1): 6–8.
- [14] WEISS A. Topographic position and landforms analysis[R]. San Diego, CA: ERSI User Conference, 2001.
- [15] RUHE R. Quaternary landscapes[M]. Ames, IA: Iowa State University Press, 1969.
- [16] NIZEYIMANA E, BICKI T. Soil and soil-landscape relationships in the north central of Rwanda, East-Central Africa[J]. Soil science, 1992, 153: 225–236.
- [17] 林夏馨. 芒萁的生长发育规律及人工繁殖技术[J]. 福建水土保持, 2004, 16(2): 60.
- [18] 秦承志, 朱阿兴, 施迅, 等. 坡位渐变信息的模糊推理[J]. 地理研究, 2007, 26(6): 1165–1175.
- [19] TSUI C C, CHEN Z S, HSIEH C F. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan[J]. Geoderma, 2004, 123(1/2): 131–142.