

红壤侵蚀区微地形上芒萁分布与地形湿度指数特征

魏胜龙^{1,2}, 陈志彪^{1,3}, 陈志强^{1,3}, 王秋云^{1,2}, 马秀丽^{1,2}, 鄢新余^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007; 3. 福建师范大学地理研究所, 福建 福州 350007)

摘要:南方红壤侵蚀退化区由于土壤侵蚀在均匀坡面上形成细沟、浅沟、切沟等不同规模的侵蚀沟, 以及大小不等、形状各异的微地形。为研究芒萁分布与地形湿度和地表起伏的关系, 本研究在实测微地形生成高精度 DEM 的基础上, 进行地形湿度指数的计算; 在以地形位置指数和坡度为主要判定依据划分坡位的基础上, 采用随机采样的方法, 调查实验样区芒萁生长特征。结果表明, 在地表起伏的微地形上, 芒萁趋向于分布在 0~15°坡度的沟谷和缓坡范围内; 沟底芒萁生物量、生长密度、高度分别为沟坡的 2.25 倍、1.57 倍和 1.68 倍。模拟结果显示, 地形湿度指数: 沟谷>缓坡>陡坡>脊部; 有芒萁覆盖区与无芒萁覆盖区的地形湿度指数平均值分别为 2.13 和 1.15, 前者明显大于后者。基于上述结果, 为研究南方红壤严重侵蚀退化区芒萁的生长蔓延提供理论基础和实践指导。

关键词:侵蚀区; 微地形; 芒萁; 地形湿度指数

中图分类号: S155. + 25; Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2767(2016)04-0042-06 DOI: 10.11942/j.issn1002-2767.2016.04.0042

我国南方红壤地区占国土面积的 1/5, 耕地面积占全国的 30%, 是粮食和经济作物的重要产地, 也是仅次于黄土高原的第二大土壤侵蚀退化区^[1]。土壤侵蚀在均匀坡面上形成细沟、浅沟、切沟等不同规模的侵蚀沟, 以及其它大小不等、形状各异的微地形, 微地形造成光、热、土壤温湿度和养分等因素的空间再分配而形成区别于原状坡面的微环境, 最终影响植物的生长与分布。国外有关微地形与植被分布格局的研究表明, 坡位、地表干扰是植被分布格局的主要影响因子^[2-4]。在我国, 研究主要集中于植物群落的组成、结构与微环境的关系, 比如光照、地形、土壤肥力、土壤温湿度等基本因子^[5-8]; Hara 等人研究发现, 坡面上部和坡面下部的坡位差异是影响植被生长的最基本的异质性生境条件^[9]; 路保昌、赵荟等人做了干旱阳坡微地形土壤水分分布研究, 并提出在植被恢复与重建时, 要充分考虑微地形的土壤水分分布特征^[10-11]。土壤水是植物生长所需水的直接来源, 制约着植物的生长、分布。同时土壤水分也影响

着土壤理化性质, 制约着土壤微生物的活动, 影响土壤养分的积累^[12]。尤其在土壤侵蚀退化区, 植被稀少, 土层薄, 土壤保水保肥能力弱, 研究微地形上植被与土壤水分关系就显得更为重要。邓慧平等人的研究显示地形湿度指数与土壤相对含水量具有线性关系^[13]。

芒萁(*Dicranopteris dichotoma*) 属里白科芒萁属的多年生常绿蕨类植物, 广泛分布于我国长江以南各省区、朝鲜南部及日本^[14]。在南方花岗岩及紫色砂页岩的水土流失区广泛分布着大量芒萁, 它具有耐酸、耐瘠、耐旱、适应性强等特点。长期研究发现, 芒萁是严重退化生态系统中最后退出的草本植物之一, 也是治理中最早侵入的草本植物之一, 在生态系统退化严重, 许多植物难以生长的情况下, 芒萁仍能在坡地小沟谷或地势低洼处生长^[15]。即便在人工措施引入其它草本治理南方红壤退化区, 若干年后都演化成以芒萁为主的群落, 因此芒萁在南方红壤侵蚀区生态恢复与重建中具有至关重要的位置。本研究以分辨率高达厘米级的 DEM 为基础, 研究南方红壤侵蚀区微地形上地形湿度指数与芒萁分布格局的关系, 主要研究目标是: 1) 明确南方红壤侵蚀区微地形上地形湿度指数特征和芒萁的分布特征; 2) 芒萁分布与地形湿度指数特征有何关系。进而为南方红壤侵蚀区微地形的改造、芒萁的快速覆盖和微环境的改善提供科学依据。

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171232, 40871141)

第一作者简介: 魏胜龙(1990-), 男, 四川省资阳市人, 硕士, 主要从事自然资源与环境及 GIS 应用研究。E-mail: shenglong423@163.com。

通讯作者: 陈志彪(1962-), 男, 福建省平潭县人, 教授, 从事资源与环境、应用气象及水土保持等方面研究。E-mail: chenzhib408@vip.163.com。

1 研究区概况

朱溪小流域(N 25°38'15"~25°42'55", E 116°23'30"~116°30'30")是南方红壤侵蚀区水土流失治理的典型代表,位于福建省西南部。属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 18.3℃,年均降雨量 1 737 mm。土壤为花岗岩发育的红壤,结构松散,抗蚀性弱,且酸性强,受早期人为因素影响,地带性植被已破坏殆尽,水土流失严重。地貌类型以海拔 300~400 m 的山丘为主,经长期流水冲刷,坡面形成不同规模的侵蚀沟和复杂的微地形。本研究选取典型侵蚀坡面为实验样区,高程范围在 345~363 m,坡度范围 0~65°,植被以芒萁为主,包括零星的马尾松小老头树。实验样区包括三条芒萁生长沟和三条裸地沟,其中,芒萁生长沟的沟底到沟坡中部附近芒萁成片生长,脊部有芒萁零星散布;裸地沟无植被覆盖。

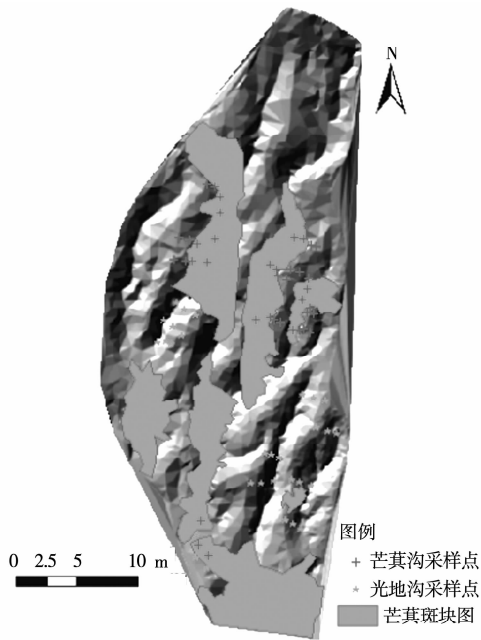


图 1 实验样区采样点布设图

Fig. 1 The sampling points layout in experimental plot

2 研究方法

2.1 数据的采集

2.1.1 微地形测量 2012 年 8 月利用实时动态差分仪实测 820 m²实验样区的三维坐标,起伏较大区域布点较密集,点与点距离大约 20 cm,较平缓区域点与点间距离约 40 cm,共测 3 300 多个三维坐标点,利用 ArcGIS10.1 软件获取分辨率为 0.1 m×0.1 m 的 DEM。

2.1.2 芒萁取样 2012 年 8 月,对芒萁生长沟

的沟底和生长边界进行芒萁生物量采集。三条沟共布设 18 个采样点,为了尽可能减少对芒萁微斑块的破坏,采用直径为 0.35 m 的铁皮圆筒按照布设的采样点随机选取样方,将样方内芒萁从基部齐地剪下,称鲜重,后于恒温烘箱 103℃ 杀青 1 h,60℃ 烘干至恒重,称量干重。在剪裁前,进行株高和株径数的测量,然后计算不同部位的芒萁密度。其中,生物量指单位面积生物生产的有机物质的(干重)总量,包括地上和地下生物量;株高为土壤表面至植株叶片伸直后的叶尖最高处,不包括干枯部分;密度为单位样方内植株的数量。

2.2 数据处理

2.2.1 坡位划分 坡位借助 ArcGis10.1 中扩展工具分析套件 Land Facet Corridor Designer 中的 Topographic TPI 工具进行提取。主要以地形位置指数和坡度两地参数为判定依据,采用四分法划分实验样区坡位。

$$TPI = Z - Z'$$

式中, TPI 为地形位置指数, Z 为研究对象高程值, Z' 为邻域高程值。



图 2 TPI 取值意义

Fig. 2 Significance of TPI

TPI 取值与邻域的范围大小及形状密切相关,结合样区实际情况,采用以 1m 为半径的圆形邻域形状,将样区坡位划分为沟谷、缓坡、陡坡和脊部。相关参数设置^[16]见表 1(SD 代表 TPI 与邻域像元高程的标准偏差值)。

表 1 坡位分类参数

Table 1 The parameter settings of slope positions

编号 No.	类型 Type	分类依据 The basis of classification
1	沟谷	$TPI \leq [-0.71] SD$
2	缓坡	$[-0.71] SD < TPI \leq [0.71] SD$ $Slope \leq [18] \text{ degrees}$
3	陡坡	$[-0.71] SD < TPI \leq [0.71] SD$ $Slope > [18] \text{ degrees}$
4	脊部	$TPI > [0.71] SD$

2.2.2 地形湿度指数 Benen 和 Kikby 提出了地形湿度指数的概念,并将其定义为:

$$TWI = \ln(A_s / \tan \beta)$$

其中, A_s 为上坡面积,即流经地表某点的单

位等高线长度上的汇流面积($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$),反映径流在流域中任一点的累积趋势, β 为该点的坡度($^\circ$), $\tan\beta$ 为该点的坡角,反映重力使径流沿坡面移动的趋势。

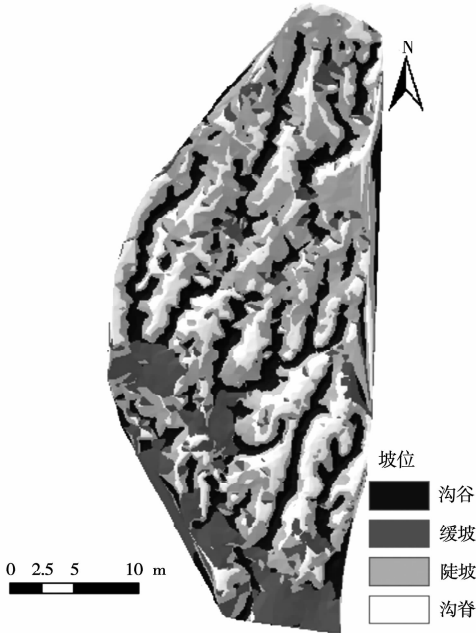


图 3 实验样区坡位图

本研究以生成的高分辨率 DEM 为数据基础,利用秦承志的简化数字地形分析软件和 Arc-Gis10.1 软件进行地形湿度指数的计算^[17]。

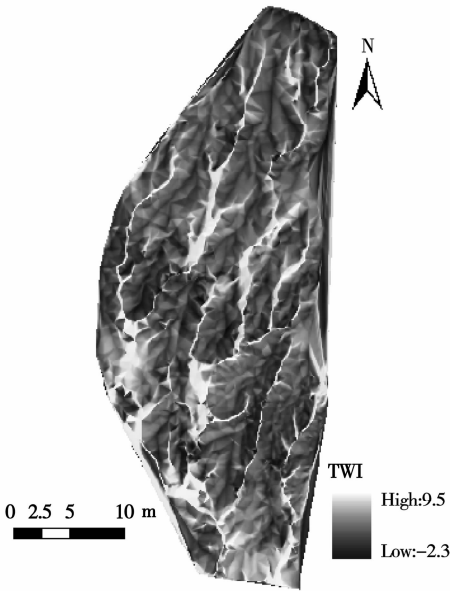


图 4 实验样区地形湿度指数

Fig. 4 The map of TWI in the experimental plot

3 结果与分析

3.1 微地形芒萁分布特征分析

3.1.1 不同坡度芒萁分布特征 图 5 为各坡度土地面积占实验样区总面积的百分比和各坡度上芒萁面积占该坡度面积百分比。可以清楚的看到,坡面上 15~20°、20~25°、25~30°三类坡度所占面积最多。在 0~5°、5~10°、10~15°三类坡度上芒萁占比最大,分别达到 47.46%、54.15%和 43.52%。换句话说,就是在 0~15°坡面上芒萁分布最为密集。H·沃尔特^[18]认为,群落生境的变化可以补偿环境的变化,从而延伸某物种的空间分布,因此,在沟底和缓坡以外发现芒萁也不足为奇。加之坡度 45°以上陡坡的土地面积只占总面积 2.34%,因此在图 5 中表现出一个峰值。

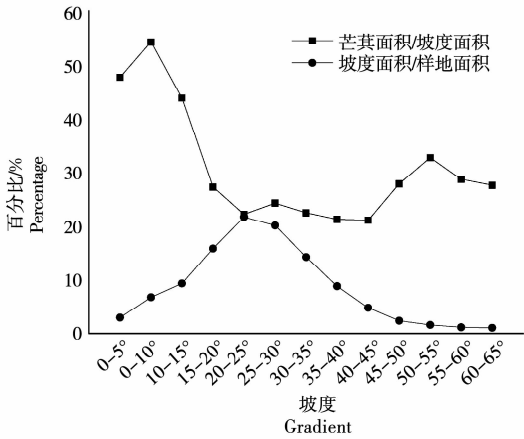


图 5 不同坡度芒萁面积比例统计图

Fig. 5 Distribution of thedicranopteris dichotoma along slope

3.1.2 不同地形部位芒萁分布特征 由图 6 可知,实验样区陡坡面积最大,各坡位面积占比大小依次为:陡坡>脊部>沟谷>缓坡。然而就芒萁面积与坡位面积之比可以看出,缓坡(47.72%)>沟谷(31.04%)>陡坡(24.95%)>脊部(12.35%),说明芒萁多趋于缓坡和沟谷分布。

3.2 芒萁生长与地形湿度指数特征

生境因子的差异如光照、土壤温度、土壤养分等会对芒萁生长产生影响。在水肥适宜的条件下,芒萁高度可达 1 m 以上;干热化严重,土壤贫瘠,强光照条件下,芒萁植株低矮,分布稀疏^[19]。对于水土流失严重的南方红壤侵蚀区,芒萁生长受到较大的限制,且侵蚀强度越大,芒萁生长越困难。实验样区在长期的水土流失过程中形成数条切沟,芒萁多分布于缓坡和地势低洼的沟底,从沟底向沟坡扩张芒萁生长逐渐稀疏低矮,至脊部几

乎无芒萁生长。

株高和密度是植物群落最基本的两大指标,是影响群落生物量的主要因子,对植物的生长环境具有重要指示作用^[20-21]。图7所示,沟底芒萁生物量、密度、株高分别为4 500 g·m⁻²、2 200 株·m⁻²、42 cm;沟坡芒萁生长边界处分别为2 000 g·m⁻²、1 400 株·m⁻²、25 cm。沟底芒萁的生物量为沟坡的2.25倍,芒萁密度、株高也远远大于沟坡。分析原因可能是芒萁生长沟底的土壤温湿度、土壤养分等生境因子更适应芒萁生长,如表2所示,沟谷的地形湿度指数是脊部的7.28倍;加上沟底地势低洼,侵蚀强度相对较弱,土壤相对疏松,有利于芒萁孢子囊的萌发成熟及幼孢子体的生长。

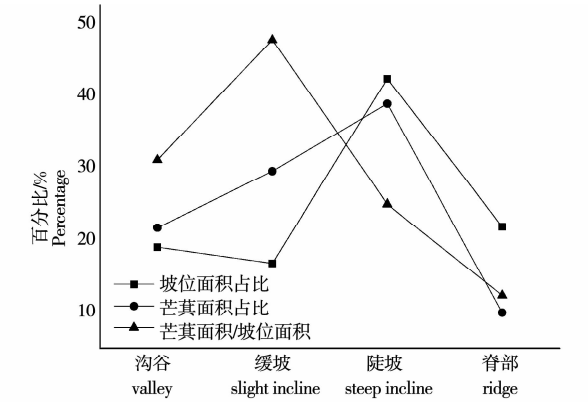


图6 不同坡位各指标统计图

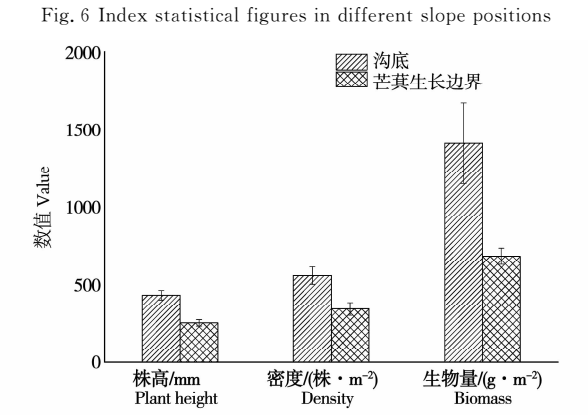


图7 不同地形部位的芒萁生长特征

Fig. 7 The growth of thedicranopteris dichotoma in different part

表2 不同坡位地形湿度指数
Table 2 Topographic wetness index in different slope positions

	沟谷	缓坡	陡坡	脊部
地形湿度指数	2.62	2.31	1.13	0.36

统计模拟值显示,地形湿度指数沟谷>缓坡>陡坡>脊部。

利用土壤湿度实测数据,在 ArcGis10.1 软件的 Zonal Statistics as Table 工具分别对无芒萁覆盖区和有芒萁覆盖区的地形湿度指数进行统计建模。统计结果显示,无芒萁覆盖区的地形湿度指数平均值为1.15,芒萁覆盖区的地形湿度指数平均值为2.13。说明芒萁覆盖区的土壤相对湿润。

4 结论与讨论

黄奕龙等^[22]对黄土丘陵小流域地形的研究表明不同坡向间以阴坡土壤水分最大。刘迎春等人^[23]的研究进一步发现半阳坡上芒萁的长势好于阳坡和阴坡,芒萁属于喜阳植物,阴坡不利于芒萁的生长。本文选择南方红壤侵蚀未治理区半阳坡作为实验样区,研究了沟状微地形上不同坡度、不同坡位的芒萁生长特征和土壤湿度指数特征。

沟状微地形,包括切沟、浅沟、细沟等,是最常见的微地形之一。尤其在严重侵蚀退化地区,地表植被遭到破坏,岩层裸露,原状坡面受强降雨和坡面径流的影响,形成地表起伏、错综复杂的各种沟状微地形。局部地区的地形变化,通过对光照、降雨等资源的再分配而形成局部小气候或微生境,最终影响植被的分布格局^[24]。目前国内对土壤水分限制因子的研究主要集中在黄土高原等干旱、半干旱地区^[25-28]。邝高明等对黄土丘陵沟壑区坡面内地表起伏形成微地形的研究发现,各微地形土壤水分顺序为:塌陷>缓台>切沟底>浅沟底>原状坡>陡坎^[29];路保昌等采用固定点动态监测的方法,对黄土丘陵区半阳坡各微地形土壤水分进行了对比研究,结果表明半阳坡各微地形土壤水分顺序为:平缓坡>浅沟>陡坡>极陡坡^[30]。本文对南方红壤侵蚀区自然恢复状态下沟状微地形的研究显示,地形湿度指数沟谷>缓坡>陡坡>脊部;地形湿度指数芒萁覆盖区域(缓坡和沟谷)远大于裸地,微地形表面土壤湿度大的部位芒萁生物量、密度、株高均远大于土壤湿度小的部位。在一定立地条件下,土壤水分越多,能承载的生物量也就越大。植物的生长发育与所处的微环境是相互作用的,地形和地表植被共同影响着土壤水分的分布,对南方红壤严重侵蚀地而言,有无芒萁覆盖以及芒萁生长好坏直接决定土壤侵蚀强度。

地形湿度指数以数字高程模型(DEM)为基础,综合考虑了地形和土壤特性对土壤水分分布的影响,在流域土壤水分空间分布的研究中具有重要意义^[31]。王洪明等研究小流域尺度上土壤水分与地形湿度指数关系得出,二者的相关程度达到中等相关,且随着土壤水分取样深度的增加,两者的相关性越大^[32]。地形湿度指数由于能够准确刻画地形的变化及其对土壤径流的影响,从而在土壤水分分布的空间模拟及分析中得到广泛应用。本研究利用分辨率为厘米级的DEM模拟地形湿度指数,具有极高的精度。

实验样区芒萁主要趋于沟谷、缓坡分布,0~15°坡度范围居多;沟底与沟坡部位芒萁生长差异较大,沟底芒萁长势远远好于沟坡部位。不同部位地形湿度指数:沟谷>缓坡>陡坡>脊部。沟底有芒萁覆盖的土壤湿度显著高于脊部无芒萁覆盖的土壤湿度。

参考文献:

- [1] 董雪,王春燕,黄丽,等.侵蚀红壤腐殖酸组分特点及其对水稳性团聚体的影响[J].土壤学报,2014(1): 14.
- [2] Nagamatsu D, Miura O. Soil disturbance regime in relation to micro-scale landforms and its effects on vegetation structure in a hilly area in Japan[J]. Plant Ecology, 1997, 133(2):191-200.
- [3] Nagamatsu D, Hirabuki Y, Mochida Y. Influence of micro-landforms on forest structure, tree death and recruitment in a Japanese temperate mixed forest[J]. Ecological Research, 2003, 18(5): 533-547.
- [4] Sakai A, Ohsawa M. Vegetation pattern and microtopography on a landslide scar of Mt Kiyosumi, central Japan[J]. Ecological research, 1993, 8(1): 47-56.
- [5] 杨永川,达良俊,由文辉.浙江天童国家森林公园微地形与植被结构的关系[J].生态学报,2006,25(11): 2830-2840.
- [6] 邝高明,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响[J].水土保持研究,2012,19(3): 74-77.
- [7] 王晶,朱清科,秦伟,等.陕北黄土区封禁流域坡面微地形植被特征分异[J].应用生态学报,2012,23(3): 694-700.
- [8] 马旭东,张苏峻,苏志亮,等.车八岭山地常绿阔叶林群落结构特征与微地形条件的关系.生态学报,2010(19): 5151-5160.
- [9] Hara M, Hirata K, Fujihara M, et al. Vegetation structure in relation to micro-landform in an evergreen broad-leaved forest on Amami Ohshima Island, south-west Japan[J]. Ecological Research, 1996, 11(3): 325-337.
- [10] 路保昌,薛智德,朱清科,等.干旱阳坡半阳坡微地形土壤

水分分布研究[J].水土保持通报,2009(1): 027.

- [11] 赵荟,朱清科,秦伟,等.黄土高原沟壑区干旱阳坡的地域分异特征[J].地理科学进展,2010,29(3): 327-334.
- [12] 张强,肖风劲,牛海山,等.我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J].生态学杂志,2005,24(7): 715-718.
- [13] 邓慧平,李秀彬.地形指数的物理意义分析[J].地理科学进展,2002,21(2):103-110.
- [14] 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.
- [15] 李小飞,陈志彪,陈志强,等.南方红壤侵蚀区芒萁生长特征及其对环境因子的响应[J].水土保持通报,2013,33(3):33-37.
- [16] Weiss A. Topographic position and landforms analysis[C] Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA. 2001: 200-200.
- [17] 秦承志,杨琳,朱阿兴,等.平缓地区地形湿度指数的计算方法[J].地理科学进展,2006,25(6): 87-93.
- [18] H·沃尔特.中国科学院植物研究室译.世界植被[M].北京:科学出版社.1984
- [19] 陈建.不同环境条件下芒萁群落生物量动态规律的研究[J].生态学杂志,1991,10(4):18-22.
- [20] 倪红伟,臧淑英,高亦珂.三江平原沼泽化草甸小叶章种群地上生物量及其生长速率季节动态的研究[J].植物研究,1996,16(4): 489-495.
- [21] 李丽纯,林瑞坤,吴振海,等.闽江口湿地互花米草地上生物量的月动态特征[J].资源科学,2009,31(11): 1967-1972.
- [22] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3): 334-342.
- [23] 刘迎春,刘琪,汪宏清,等.芒萁生物量分布特征[J].生态学杂志,2008,27(5): 705-711.
- [24] Tateno R, Takeda H. Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor[J]. Ecological Research, 2003, 18(5): 559-571.
- [25] 周堂,贺晓,徐军,等.半干旱区采煤沉陷对地表植被组成及多样性影响[J].生态学报,2010,29(8): 4517-4128.
- [26] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,23(8): 1640-1647.
- [27] 陈少勇,郭凯忠,董安祥.黄土高原土壤湿度变化规律研究[J].高原气象,2008,27(3): 530-537.
- [28] 刘颖,韩士杰,胡艳玲,等.土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响[J].应用生态学报,2005,16(9): 1581-1585.
- [29] 邝高明,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响[J].水土保持研究,2012(3):19.
- [30] 路保昌,薛智德,朱清科,等.干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究[J].水土保持通报,2009(1):62-65.

- [31] 张彩霞,杨勤科,李锐. 基于 DEM 的地形湿度指数及其应
用研究进展[J]. 地理科学进展,2006,24(6): 116-123.
- 指数的相关性分析[J]. 水土保持通报,2009 (4):
110-113.
- [32] 王洪明,杨勤科,姚志宏. 小流域尺度土壤水分与地形湿度

Spatial Distribution Pattern of Topographic Wetness Index
and *Dicranopteris dichotoma* on Micro-Landform in
Eroded Red Soil Region of South China

WEI Sheng-long^{1,2}, CHEN Zhi-biao^{1,3}, CHEN Zhi-qiang^{1,3}, WANG Qiu-yun^{1,2}, MA Xiu-li^{1,2},
YAN Xin-yu^{1,2}

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, 350007, Fuzhou; 2. Key La-
boratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian
Province Funded), Fujian Normal University, 350007, Fuzhou; 3. Institute of geography, Fu-
jian Normal University, 350007, Fuzhou)

Abstract: Eroded Red Soil Region of South China is the second largest eroded area after Loess Plateau. The gul-
ly erosion of different scale, such as rill and shallow ridges, appeared in a homogeneous slope for soil erosion in
Eroded Red Soil Region of South China. *Dicranopteris dichotoma* is much more tolerant of poor and acid soils,
and is widely distributed in South China. It plays an important role in controlling soil and water loss and there-
fore, it can be used as pioneer vegetation in soil and water conservation and ecological restoration of the study
area. The growth characteristics of *Dicranopteris dichotoma*, such as biomass, plant height and density, were
surveyed to study the relationship between vegetation distribution and surface fluctuations, by using sampling
surveys and random sampling. And soil temperature and humidity of 5cm below the surface was measured by
the automatic temperature-humidity observation instrument. On the basis of *Dicranopteris dichotoma* investiga-
tion and automatic temperature-humidity observation data at micro-landform, the vegetation characteristics of
Dicranopteris dichotoma and the relationship of them was analyzed. Results showed that, *Dicranopteris dico-*
toma is distributed mostly at slope gully of 0-15° and slope range; the biomass of *Dicranopteris dichotoma* in
the bottom of ditch is about 2 times as much as side slope, and the *Dicranopteris dichotoma* density and height
is far greater than gully slope. The topographic wetness index (TWI) is strongly correlated to soil temperature
and humidity of 5cm below the surface ($R^2=0.6$). The average value of the TWI on *Dicranopteris dichotoma*
coverage area is 2.13, while the same index on the region with no vegetation is only 1.15. The former was obvi-
ously higher than the later ($P<0.01$).

Keywords: eroded area; micro-landform; *Dicranopteris dichotoma*; topographic wetness index

致 读 者

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊现被《中国学术期刊网
络出版总库》及 CNKI 等系列数据库收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。
如作者不同意文章被收录,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《黑龙江农业科学》编辑部