

顾祝军, 罗 昊. 植被三维结构对水蚀红壤粒径分布及养分含量的作用 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 383–387.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.07.129

植被三维结构对水蚀红壤粒径分布及养分含量的作用

顾祝军¹, 罗 昊²

(1. 南京晓庄学院生物化工与环境工程学院, 江苏南京 211171; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

摘要:基于福建省长汀县河田镇 48 个样区 (15 m × 15 m) 植被垂直分层类型, 不同垂直层次的总体植被覆盖度、枯落物厚度、土壤粒径分布及养分含量 3 类土壤属性数据, 分析植被特征与土壤属性间的相互关系, 并比较不同侵蚀程度、不同垂直结构类型下植被覆盖度、枯落物厚度与土壤粒径分布及养分含量的差异。结果表明, 植被覆盖度、枯落物厚度与侵蚀程度显著负相关, 与土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量显著正相关, 但与全钾含量差异不显著。当植被覆盖度达到 50%、枯落物厚度达到 20 mm 时, 可以有效保持水土, 其中枯落物较上层植被的水土保持作用更明显。不同植被垂直结构组合中, 选择林灌草、林灌、灌草、纯草均可以较好地促进植被生长、改良土壤结构、保持土壤肥力。

关键词: 植被; 土壤养分; 三维结构; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2015)07-0383-05

长期以来, 我国南方红壤区由于降水量大, 土壤淋溶作用强, 加上不合理的土地利用方式, 水土流失严重, 严重制约了当地经济发展、社会进步, 并威胁当地的生态平衡^[1-3]。植被是治理水土流失的关键因子, 植树造林一度成为治理水土流失的首要措施^[4-5]。经过多年治理, 我国南方红壤区的森林覆盖率已达 50% 以上, 但由于林下普遍缺少灌木或草本植被覆盖, 即林地结构不完整, 水土流失问题仍然突出^[6]。土壤结构、土壤肥力变化影响植被群落的发生、发育以及演替速度和方向^[7-8]。对不同林地结构与土壤粒径分布和养分含量关系进行研究是水土保持理论研究的重要组成部分, 也是治理“林下流”, 保护生态环境的关键^[9-11]。植被覆盖度 (vegetation fractional coverage, VFC) 主要反映植被水平结构信息。植被覆盖度是主要的减流减蚀因子, 植被覆盖度与径流量、土壤流失量呈负相关^[12-13]。即使在高植被覆盖地区, 由于林下植被、枯落物缺乏, 仍会发生中度甚至强度水土流失, 即林下流问题十分严重^[14-15]。林地植被地上部分一般可分为垂直的 3 个层次, 即林冠层、灌草植被层、枯落物层, 这 3 个作用层在水土调节中各有其重要作用^[16-18]。植被覆盖度作为植被结构水平信息的表征值不能反映垂直层次的信息, 所以具有明显的局限性。现阶段, 能够表征植被垂直分布密度信息的叶面积指数 (leaf area index, LAI) 已得到了广泛运用, 用叶面积指数评价植被对于水土流失作用的科学性已得到证实^[19-20]。当植被覆盖度与产沙量无明显关系时, 叶面积指数与产沙量也有很高的相关性^[21]。但叶面积指数不能完

整反映植被水平、垂直层次的结构, 即三维结构。反映植被结构三维信息的生物量 (biomass)、植被密度 (density)、绿量 (live vegetation volume, LVV) 已得到应用^[22-24]。雷婉宁等比较了无草层次林地、采伐上层林、清除枯落物林地、完整层次林地的水土流失量, 确定上林冠层、草被层、枯落物层对减少水土流失的权重因子, 并据此权重在植被覆盖度的基础上提出了结构化植被指数^[25-26]。植被可以减少侵蚀、改良土壤结构、提高土壤肥力。范淑英等在江西省红壤坡地发现, 植被覆盖能大大减少径流量、土壤侵蚀量, 并有效改善土壤物理属性, 增加土壤有机质、氮、磷、钾含量^[27]。Zhang 等研究指出, 黄土中 K 含量与植被间关系不明显^[28]。阔叶林土壤综合肥力高于针阔混交林, 纯针叶林最差, 自然恢复林高于人工植被^[29]。纯乔、纯灌、纯草 3 类植被土壤中, 全氮、全磷含量以纯乔最高, 全钾含量以纯灌最高^[30]。夏江宝等研究结果表明, 植被能够改善土壤结构属性, 针阔混交林土壤粒径分布结构最好, 其次是纯林, 纯针叶林好于纯经济林^[31]。另有研究指出, 提高土壤有机质含量是改善土壤结构状况的关键, 通过增加土壤的植被枯落物或施加肥料也能达到增加土壤肥力、改良土壤结构的效果^[7]。综上所述, 有关植被结构、植被对土壤粒径分布和养分含量作用研究已取得诸多成果, 但关于三维植被结构, 即综合植被水平、垂直分层结构与粒径分布和养分含量之间关系的研究较少。笔者在野外选取 48 个不同侵蚀程度样方, 调查各样方的植被垂直层次, 计算不同垂直层次的总体植被覆盖度、地面枯落物厚度作为三维植被结构指标, 研究三维植被结构与土壤属性间的关系及变化特征, 并找出保持水土的最佳植被垂直层次组合, 以期作为“林下流”治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

研究区位于福建省长汀县河田镇 (25°38′17.9″N, 116°27′35.7″E) (图 1), 是福建省水土流失最严重的地区之一, 地貌以丘陵为主, 土壤为黑云母花岗岩风化形成的山地红

收稿日期: 2014-06-27

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41071281); 江苏省自然科学基金 (编号: BK20131078); 江苏省教育厅“青蓝工程”青年学术带头人培养计划。

作者简介: 顾祝军 (1970—), 男, 江苏涟水人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持、植被遥感与 GIS 应用研究。Tel: (025) 86178264; E-mail: zhujungu@163.com。

壤,绝大部分山地土壤露出心土层(B层),有的甚至露出母质层(C层)、母岩层(D层),属中亚热带季风气候,年平均气温 18.3℃,年均降水量 1 500~1 700 mm。该区地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,由于历史上严重的毁林开荒,阔叶林已破坏殆尽,现有重建植被主要是马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)林,林下灌草植被较少,在水土流失严重地段几近裸地,灌草覆盖度极低,“林下流”现象严重。

1.2 样本区选取与分类

2010 年 12 月 17—18 日,在河田镇罗地草山、大路口风水林、张坑、露湖四处相邻山地(海拔 200 m 左右)选取 48 个样本区。样本区土壤皆为发育于花岗岩母质的山地红壤,坡面平整,坡度为 10°~15°,西南坡,投影大小均为 15 m ×

15 m。按坡地植被垂直层次样,本区可分为裸地、纯林区、纯草区、林灌区、林草区、灌草区、林灌草区。乔木以马尾松为主,另有少量木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、栗树(*Castanea* Mill.),灌木以油茶(*Camellia oleifera* Abel.)、甘松(*Nardostachys chinensis* Batal.)、小叶赤楠(*Syzygium buxifolium* Hook. & Ar)居多,草本植被主要是篦荑[*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh.]、鹧鸪草(*Eriachne pallescens* R. Br.)、狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]、茅草[*Imperata cylindrica* (Linn.) Beauv.]。根据 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》,按侵蚀土壤程度将样本区分为剧烈、强度、中度、轻度、无明显(微度)共 5 级侵蚀,并数值化为 5、4、3、2、1。

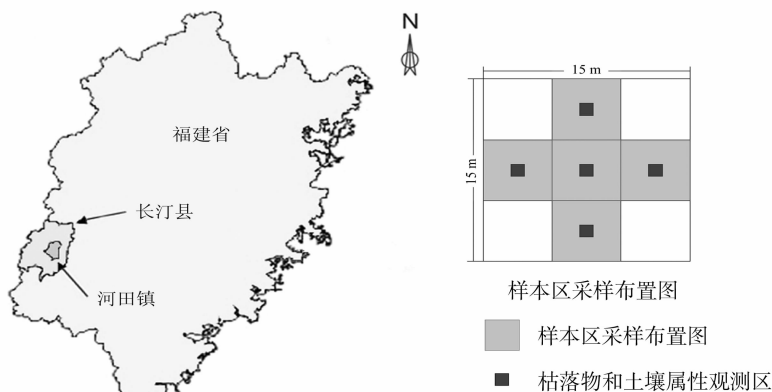


图1 研究区地理位置及样本区采样方法

1.3 数据观测与分析

每个样本区按图 1 所示采样,用数码照相法分别垂直向上、垂直向下拍摄每个子样本区的乔木、灌草相片,灌草难以区分,所以作为同一层看待。根据相片中植被、非植被像元的灰度值差异,多次计算后取平均值作为样本区乔木、灌草覆盖度,计算样本区不同垂直分层结构的总体覆盖度^[32]:

$$TSG = T + SG - 1.134 \times T \times SG - 0.025.$$

式中: TSG 为总体覆盖度, T 为乔木林冠覆盖度, SG 为灌草覆盖度,当 $TSG < 0$ 时取值为 0, $TSG > 1$ 时取值为 1。在每个子样本区中心位置选取 1 m × 1 m 的小样方收集枯落物,晾干后,在底面积为 1 m²、壁面平整光滑的柱形容器中平铺,测得厚度值,5 个子样本值平均后得样本区枯落物厚度。在每个枯落物收集区内随机用 20 mm 直径的土样钻取器取 3 份 0~5 cm 的表层土壤^[28],混合后,2 mm 以下颗粒使用 Beckman Coulter LS230 激光粒度仪进行超声分散(160 W, 10~15 min),以美国制粒径 7 级分级标准输出测试结果:2.00~1.00 mm;1.00~0.50 mm;0.50~0.25 mm;0.25~0.10 mm;0.10~0.05 mm;0.050~0.002 mm;<0.002 mm,石砾(2~1 mm)、粗沙砾(1~0.25 mm)、细沙砾(0.25~0.05 mm)、粉黏粒(<0.05 mm)^[31]。每个子样区混合土样取部分,测定全氮(全 N)、有机质(OM)、全磷(全 P)、全钾(全 K)含量^[33],所有样本区的土壤理化属性均取 5 个子样本的平均值。

1.4 数据分析

采用 SPSS 17.0 统计软件中的 one-way ANOVA、Pearson 相关分析、Duncan's 处理数据。

2 结果与分析

根据 RUSLE(revised universal soil loss equation,修正通用土壤流失方程)所述^[34],侵蚀影响因子共有降水、土壤可蚀性、坡长和坡度、植被、人为措施五大类,由于样本区坡度、坡长、降水条件基本一致,土壤可蚀性为土壤本身属性,本研究暂不考虑人为措施,所以本研究主要分析植被与土壤属性的关系。

2.1 植被三维结构与土壤属性间的相关性

由表 1 可知,植被覆盖度、枯落物厚度均对侵蚀等级、N、OM、全 P 作用明显,除枯落物厚度对粗沙砾作用明显外,植被覆盖度、枯落物厚度对其他土壤组成粒径和全 K 作用不明显,说明植被对于土壤组成结构和钾素肥力的改良作用有限,这可能是红壤钾素主要受成土矿物类型、数量影响的缘故^[35]。由表 2 可知,植被覆盖度、枯落物厚度均与侵蚀等级显著负相关,与 N、OM、全 P 含量显著正相关,这表明植被覆盖度、枯落物厚度的增加能够显著减弱侵蚀,增强土壤 N、OM、P 肥力。侵蚀等级则与 N、OM、全 P 显著负相关,这与植被与土壤 N、OM、P 肥力关系相反。除覆盖度与石砾含量显著负相关外,其他土壤组成粒径与植被、侵蚀等级间关系不显著,但不同土壤组成粒径之间相关值为 0.50~0.85,其中粉黏粒含量与细沙砾含量正相关;粗沙砾含量与粉黏粒含量、细沙砾含量负相关,与石砾含量正相关。土壤中 N、OM 含量与粗沙砾含量显著正相关,全 P 含量则与石砾含量显著负相关,这说明 N、OM 与全 P 含量的增加能够促进水稳性大团聚体

增强土壤的抗蚀性,这与已有研究结论^[36]一致。文星跃等指出,植被是土壤粒径分布的影响因素之一,虽然植被覆盖度、枯落物厚度与土壤粒径分布关系基本不显著,但是植被覆盖度、枯落物厚度与 N、OM 含量呈显著正相关,说明植被可通过影响土壤养分来调整土壤粒径分布^[37]。全 K 与小团聚体含量呈显著负相关,与大团聚体呈显著正相关,表明土壤大团聚体比例越多,抗蚀性越强,则土壤钾素肥力越高。

2.2 不同侵蚀程度下植被特征、土壤属性

如表 3 所示,48 个样本区中,侵蚀程度为剧烈、强度、中度、轻度、微度分别有 4、3、4、8、29 个,微度侵蚀区占 60%。样本区总平均植被覆盖度为 53%,总平均枯落物厚度为 21.5 mm,总平均土壤粒径组成以细沙砾为主(47%),其次为粗沙砾(32%),粉黏粒(11%)与石砾(10%)较少,土壤总平

表 1 植被特征作用于侵蚀程度和土壤属性的 ANOVA 分析结果

| 指标 | 植被覆盖度 | 枯落物厚度 |
|------|-----------|-----------|
| 侵蚀等级 | <0.001 ** | <0.001 ** |
| 粉黏粒 | 0.215 | 0.104 |
| 细沙砾 | 0.342 | 0.095 |
| 粗沙砾 | 0.759 | 0.023 * |
| 石砾 | 0.061 | 0.236 |
| OM | 0.013 * | 0.005 ** |
| 全 N | 0.013 * | 0.004 ** |
| 全 P | 0.012 * | 0.047 * |
| 全 K | 0.332 | 0.551 |

注:**、* 分别表示在 0.01 表示 < 0.05 水平下差异显著。下表同。

表 2 植被因子、侵蚀程度和土壤属性相关系数矩阵

| 指标 | 相关系数 | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|--------|-----|
| | 植被覆盖度 | 枯落物厚度 | 侵蚀等级 | 土壤粒级 | | | | 土壤养分 | | | |
| | | | | 粉黏粒 | 细沙砾 | 粗沙砾 | 石砾 | OM | 全 N | 全 P | 全 K |
| 植被覆盖度 | | | | | | | | | | | |
| 枯落物厚度 | 0.435 ** | | | | | | | | | | |
| 侵蚀等级 | -0.612 ** | -0.424 ** | | | | | | | | | |
| 粉黏粒 | 0.171 | -0.051 | 0.157 | | | | | | | | |
| 细沙砾 | 0.246 | 0.119 | 0.072 | 0.769 ** | | | | | | | |
| 粗沙砾 | -0.085 | 0.100 | -0.255 | -0.807 ** | -0.846 ** | | | | | | |
| 石砾 | -0.334 * | -0.244 | 0.095 | -0.707 ** | -0.851 ** | 0.495 ** | | | | | |
| OM | 0.344 * | 0.434 ** | -0.583 ** | -0.107 | -0.039 | 0.307 * | -0.224 | | | | |
| 全 N | 0.325 * | 0.414 ** | -0.587 ** | -0.146 | -0.049 | 0.335 * | -0.220 | 0.945 ** | | | |
| 全 P | 0.372 ** | 0.291 * | -0.559 ** | 0.023 | 0.041 | 0.233 | -0.323 * | 0.831 ** | 0.848 ** | | |
| 全 K | -0.272 | -0.092 | -0.007 | -0.496 ** | -0.408 ** | 0.399 ** | 0.388 ** | -0.009 | 0.096 | -0.163 | |

均 N 含量为 1.39 g/kg,OM 含量为 43.74 g/kg,全 P 为 0.32 g/kg,全 K 为 28.69 g/kg,总体来说,数据采集区内植被覆盖度、枯落物厚度较高,土壤组成结构、营养状况均较良好,水土保持情况整体较好。植被覆盖度达 50% 以上,枯落物厚度达 20 mm 时水蚀作用大大减弱^[38-40],本研究区的水土保持情况也印证了这一结论。植被覆盖度大体上与侵蚀强度呈负相关,但强度侵蚀下平均覆盖度(55%)明显高于中度侵蚀(36%)。平均枯落物厚度则随着侵蚀程度的减弱而明显增加,如中度侵蚀下平均枯落物厚度(3.0 mm)为强度侵蚀下平局枯落物厚度(0.5 mm)的 6 倍。另外剧烈侵蚀下植被覆盖度、枯落物厚度均明显区别于其他侵蚀情况,其他侵蚀程度下覆盖度差异不明显,强度、中度侵蚀下的枯落物明显区别于轻度、微度,这表明枯落物对于保持水土的重要性^[25,41]。土壤粒径组成随侵蚀程度的加剧有所变化,强度侵蚀下的土壤粒

径分布显著区别于其他侵蚀程度,除石砾外,其他粒径等级下各侵蚀程度粒径分布差异不显著,这说明较其他侵蚀程度而言,强度侵蚀下土壤粒径的分布变化极明显。无论侵蚀程度如何变化,当地土壤仍以细沙砾、粗沙砾为主。总体来看,粗沙砾、石砾更易受地表径流侵蚀,强度侵蚀下尤为明显。Ghadiri 等指出,大粒径组分易受到侵蚀^[42]。但这并不是一定的,土壤理化属性、气候条件、地形、试验措施等因素的变化能够改变这一现象。土壤中的 N、OM、全 P 含量随侵蚀程度的加剧而减少,尤其轻度、中度侵蚀 N、OM、全 P 含量下降极为明显。土壤中 OM、N、全 P 含量在轻度和微度侵蚀之间、剧烈和强度侵蚀之间差异不明显。土壤中全 K 含量在中度侵蚀、轻度侵蚀、微度侵蚀间差异不明显。总体上,侵蚀由强度减弱到轻度时,土壤肥力元素均发生明显变化。水土流失严重时,须尽量降低侵蚀程度,防止土壤肥力明显变差。

表 3 不同侵蚀程度下植被特征、土壤属性

| 侵蚀程度 | 植被覆盖度 (%) | 枯落物厚度 (mm) | 土壤粒级 (%) | | | | 土壤养分 (g/kg) | | | | 样本数 (个) |
|------|-----------|------------|----------|--------|--------|---------|-------------|-------|--------|---------|---------|
| | | | 粉黏粒 | 细沙砾 | 粗沙砾 | 石砾 | OM | 全 N | 全 P | 全 K | |
| 剧烈 | 0a | 0a | 12.52a | 44.72a | 32.09b | 10.67ab | 6.53a | 0.22a | 0.14a | 36.22b | 4 |
| 强度 | 55.0b | 0.5ab | 19.10b | 68.72b | 12.08a | 0.11a | 9.84a | 0.28a | 0.16a | 14.94a | 3 |
| 中度 | 36.0b | 3.0ab | 9.61a | 43.90a | 27.45b | 19.04b | 14.97a | 0.42a | 0.18ab | 31.35ab | 4 |
| 轻度 | 52.5b | 15.9b | 9.57a | 45.46a | 35.52b | 9.45ab | 51.49b | 1.52b | 0.35b | 21.36ab | 8 |
| 微度 | 63.5b | 30.6b | 11.03a | 46.84a | 33.40b | 8.73ab | 54.03b | 1.76b | 0.37b | 30.17ab | 29 |
| 总体 | 53.10 | 21.50 | 11.10 | 47.04 | 32.13 | 9.73 | 43.74 | 1.39 | 0.32 | 28.69 | 48 |

注:同列数字后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下表同。

2.3 不同垂直层次下的植被特征和土壤属性

48 个样本区中,裸地 4 个,纯林、林灌区各 3 个,纯草区 5 个,灌草、林灌草区各 6 个,林草小区最多为 21 个。不同垂直层次组合下土壤粒径分布和养分含量有一定差异(表 4)。裸地、纯林土壤中平均粉黏粒含量明显区别于其他垂直层次组合,以纯林土壤中粉黏粒含量最高(18.5%),其次为裸地(12.5%),其他垂直层次组合区差别不大。纯林土壤中细沙砾、粗沙砾平均含量明显区别于其他植被垂直层次组合区,纯林土壤细沙砾含量最高(68.2%),粗沙砾含量最低(12.0%)。纯林小区平均石砾含量最低(1.25%),灌草小区(15.48%)明显高于其他组合区。从水稳性大团聚颗粒含量,即细沙砾和粗沙砾之和来看,林灌(51.1%)、灌草区(50.1%)含量较高,纯林区(13.3%)最低,其他垂直层次组合区相差不大,可知林灌、灌草区土壤抗蚀性最强,纯林区最差,裸地抗蚀性比纯林区稳定可能是因为裸地表面易被侵蚀颗粒已被侵蚀耗尽^[43]。土壤中平均 N(0.22 g/kg)、OM(6.53 g/kg)、全 P(0.14 g/kg)含量均以裸地最低,平均 N、OM 含量以纯草区、林灌草区较高,平均全 P 含量以林灌区(0.46 g/kg)、纯草区(0.41 g/kg)较高。各植被垂直层次组合区平均全 K 含量差异不显著,表明植被组合对土壤钾素肥

力影响不显著。综合土壤粒径分布、养分来看,要通过增加植被增强土壤抗蚀性、肥力,选择林灌结合种植方式最适宜,其次为灌草、纯草、林灌草结合种植方式,纯种林木方式效果不佳。植被覆盖度、枯落物厚度与全 N、OM、全 P 含量显著正相关,所以两者的增加能增强土壤中全 N、OM 与全 P 含量,并以此增加水稳性大团聚体比例,从而增强土壤肥力、抗蚀性。另外,本研究区枯落物厚度对水土保持的重要性超过覆盖度,所以应尽量提高覆盖度、枯落物厚度,尤其是枯落物厚度。由图 2 可见,纯林平均覆盖度最高(70%),但枯落物平均厚度最低(0 mm),这也是纯林水土保持效果不好的原因。林灌草区的枯落物平均厚度最高(29.2 mm),其平均覆盖度(60%)也只次于纯林、纯草,纯草的平均枯落物厚度(22.0 mm)高于林灌、纯林,但低于其他垂直层次组合区,所以采用林灌草结合种植的方式可增加枯落物厚度,并达到较高的植被覆盖度。结合前面植被垂直层次组合、土壤粒径分布、养分的分析可知,覆盖度低、枯落物厚度低的垂直层次组合类型水土保持效果不一定差,如林灌平均覆盖度、枯落物厚度均较低,但是土壤抗蚀性、肥力高,说明还有其他植被或非植被因素影响不同植被组合下的土壤属性,如根系、微生物、人为措施等^[44],须进一步研究(图 2)。

表 4 不同垂直层次组合下的土壤属性

| 植被组合 | 土壤粒级(%) | | | | 土壤养分(g/kg) | | | | 样本数(个) |
|------|---------|--------|--------|---------|------------|---------|---------|--------|--------|
| | 粉黏粒 | 细沙砾 | 粗沙砾 | 石砾 | OM | 全 N | 全 P | 全 K | |
| 裸地 | 12.52ab | 44.72a | 32.09a | 10.67ab | 6.53a | 0.22a | 0.14a | 36.22a | 4 |
| 纯林 | 18.50b | 68.21b | 12.04b | 1.25a | 11.60ab | 0.32ab | 0.17ab | 15.85a | 3 |
| 纯草 | 10.99a | 43.50a | 33.16a | 12.35ab | 68.44c | 1.86c | 0.41c | 22.13a | 5 |
| 林灌 | 9.83a | 39.07a | 37.79a | 13.31ab | 48.83bc | 1.63bc | 0.46c | 34.44a | 3 |
| 林草 | 11.11a | 48.91a | 31.27a | 8.71ab | 47.60bc | 1.54abc | 0.33abc | 31.44a | 21 |
| 灌草 | 8.55a | 41.35a | 34.62a | 15.48b | 30.67abc | 1.03abc | 0.29abc | 24.96a | 6 |
| 林灌草 | 10.91a | 47.30a | 35.86a | 5.93ab | 55.04c | 1.80c | 0.37bc | 24.21a | 6 |

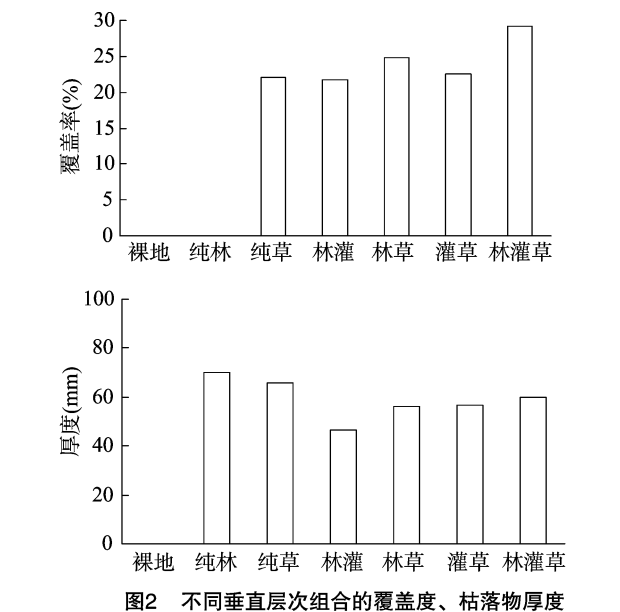


图2 不同垂直层次组合的覆盖度、枯落物厚度

3 结论

本研究基于福建省长汀县河田镇 48 个野外坡地样本区

植被特征、土壤属性数据,对比分析不同侵蚀状况、不同植被垂直层次类型下植被与土壤的关系,结果表明,增加植被覆盖度、枯落物厚度能够显著减弱侵蚀,增强土壤 N、OM、P 肥力促进水稳性大团聚体增长,增强土壤的抗蚀性。K 素肥力与植被、侵蚀关系不显著,但是与土壤中大团聚体呈显著正相关。植被覆盖度、枯落物厚度均需达到一定量才能有效保持水土,其中枯落物对于水土保持的重要性超过植被冠层覆盖度。不同侵蚀程度下,强度侵蚀下土壤粒径分布变化最明显。最大不同植被垂直层次组合中,选择林灌草、林灌、灌草、纯草均可以较好地增加植被生物量、防止水土流失、改良土壤。

参考文献:

[1]刘 征,党宏媛,赵旭阳,等. 基于景观格局的土壤侵蚀演变研究——以石家庄市地表水源保护区为例[J]. 江苏农业科学, 2013,41(4):299-303.

[2]张海涛,王永会,张爱军. 模拟降雨下雨强对石灰岩坡地土壤径流及泥沙含量的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):287-289.

[3]陈志清. 福建省长汀县河田镇的水蚀荒漠化及其治理[J]. 地理科学进展,1998,17(2):67-72.

[4]刘志韬. 山西管涔山林区森林对径流的影响[J]. 水土保持通报,1981,1(4):56-61.

- [5] 彭绍云, 顾祝军, 修平. 南方红壤试验小区乔灌木多年水土保持效应比较[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 25–29.
- [6] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 1–8.
- [7] 钟继洪, 唐淑英, 谭军. 广东红壤类土壤结构特征及其影响因素[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 61–65.
- [8] de Deyn G B, Raaijmakers C E, van der Putten W H. Plant community development is affected by nutrients and soil biota[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(5): 824–834.
- [9] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998, 11(6): 15–24.
- [10] Lewis D C. Annual hydrologic response to watershed conversion from oak woodland to annual grassland[J]. *Water Resource Research*, 1968, 4(1): 59–72.
- [11] 中野秀章. 森林水文学[M]. 李云森, 译. 北京: 中国林业出版社, 1983: 216–221.
- [12] Descroix L, Viramontes D, Vauclin M, et al. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico) [J]. *Catena*, 2001, 43(2): 115–135.
- [13] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(2): 189–217.
- [14] 赵鸿雁, 吴钦孝, 陈云明. 黄土高原不同处理人工油松林地水土流失研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 171–173.
- [15] 邱雪红, 杨洁. 江西省林地水土流失状况调查及对策[J]. 亚热带水土保持, 2007, 19(4): 35–37.
- [16] Bornmann F H, Likens G E. Pattern and processes in a forested ecosystem[M]. Heidelberg: Springer – Verlag, 1979.
- [17] 陈仁兴, 王益和. 胡枝子的水土保持效应分析[J]. 福建水土保持, 2002, 14(3): 56–58.
- [18] 张颖. 黄土地区森林植被对坡面土壤侵蚀过程影响机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [19] 王库, 史学正, 于东升, 等. 红壤丘陵区 LAI 与土壤侵蚀分布特征的关系[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1052–1055.
- [20] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 等. 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): 1060–1066.
- [21] Zhang W T, Yu D S, Shi X Z, et al. The suitability of using leaf area index to quantify soil loss under vegetation cover[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(4): 564–570.
- [22] 张津涛, 张建军, 郭小平. 晋西黄土残塬沟壑区沙棘生物量及水土保持效益的研究[J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(4): 118–124.
- [23] 陈芳, 周志翔, 王鹏程, 等. 武汉钢铁公司厂区绿地绿量的定量研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 592–596.
- [24] Lampin – Maillet C, Jappiot M, Long M, et al. Mapping wildland – urban interfaces at large scales integrating housing density and vegetation aggregation for fire prevention in the South of France[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(3): 732–741.
- [25] 雷婉宁, 温仲明. 基于植物群落结构的水土流失植被因子指数研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 68–72, 77.
- [26] 雷婉宁, 温仲明. 基于 TM 遥感影像的陕北黄土区结构植被因子指数提取[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2736–2742.
- [27] 范淑英, 吴才君. 野葛对红壤坡地水土保持和改良土壤效应的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 141–143.
- [28] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on Sediment – Bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(5): 676–684.
- [29] 姜春前, 徐庆, 姜培坤. 不同森林植被下土壤化学和生物化学肥力的综合评价[J]. 林业科学研究, 2002, 15(6): 700–705.
- [30] 张璐, 文石林, 蔡泽江, 等. 湘南红壤丘陵区不同植被类型下土壤肥力特征[J]. 生态学报, 2014(14): 3996–4005.
- [31] 夏家宝, 顾祝军, 周峰, 等. 红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 9–15.
- [32] Gu Z J, Zeng Z Y, Shi X Z, et al. A model for estimating total forest coverage with ground – based digital photography [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 318–325.
- [33] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 266.
- [34] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington: United States Department of Agriculture, 1997.
- [35] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 等. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 27–28, 69.
- [36] 董雪, 王春燕, 黄丽, 等. 侵蚀程度对不同粒径团聚体中养分含量和红壤有机质稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 525–533.
- [37] 文星跃, 黄成敏, 黄凤琴, 等. 岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2011(1): 80–86.
- [38] 郭忠升. 水土保持林有效覆盖率及其确定方法的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 67–72.
- [39] 吴钦孝, 刘向东, 苏宁虎, 等. 山杨次生林枯枝落叶蓄积量及其水文作用[J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 71–76.
- [40] 韩冰, 吴钦孝, 刘向东, 等. 林地枯枝落叶层对溅蚀影响的研究[J]. 防护林科技, 1994(2): 7–10.
- [41] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J]. 林业科学, 2003, 39(1): 168–172.
- [42] Ghadir H, Rose C W. Sorbed chemical – transport in overland – flow. I. A nutrient and pesticide enrichment mechanism[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, 20(3): 628–633.
- [43] Nicolau J M, Solé – Benet A, Puigdefàbregas J, et al. Effects of soil and vegetation on runoff along a catena in semi – arid Spain [J]. *Geomorphology*, 1996, 14(4): 297–309.
- [44] Li X H, Zhang Z Y, Yang J, et al. Effects of bahia grass cover and mulch on runoff and sediment yield of sloping red soil in southern China [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 238–243.