

南方红壤侵蚀区不同治理年限样地芒萁和土壤的生态化学计量特征及相关性分析

冯柳俊, 陈志强^①, 陈志彪, 潘宗涛, 张巧玲

(福建师范大学地理科学学院 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)

摘要: 以未治理(P1)样地和风水林(P6)样地为对照,对福建省朱溪流域治理样地 P2、P3、P4 和 P5(分别治理 2、7、13 和 30 a)的土壤以及芒萁(*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh.)叶片、叶柄和地下部的全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量以及 C/N 比、C/P 比和 N/P 比进行了比较和分析。结果表明:总体上看,随着治理年限的增加,土壤的 C 和 N 含量以及 C/P 比和 N/P 比先下降后上升,P 含量先上升后下降,C/N 比波动变化;芒萁各器官的 C 含量变化不明显,N 和 P 含量逐渐上升,C/N 比和 C/P 比逐渐下降,N/P 比先下降后上升。方差分析结果表明:多数治理样地土壤的 6 个指标与 P1 和 P6 样地差异不显著。多数治理样地芒萁各器官的 C 含量以及部分治理样地芒萁叶柄和地下部的 N 含量与 P1 和 P6 样地差异不显著,但多数治理样地芒萁叶片的 N 含量与 P1 和 P6 样地差异显著;多数治理样地芒萁叶片和叶柄的 P 含量显著高于 P1 样地,但与 P6 样地差异不显著,而 4 个治理样地芒萁地下部的 P 含量与 P1 和 P6 样地差异不显著;部分治理样地芒萁各器官的 C/N 比与 P1 和 P6 样地差异显著,而多数治理样地芒萁各器官的 C/P 比和 N/P 比与 P1 和 P6 样地差异不显著。相关性分析结果表明:芒萁叶片及叶柄的 C 含量与土壤各指标的相关性不显著,而其 N 和 P 含量与土壤部分指标的相关性显著;芒萁地下部 C/N 比和 N/P 比与土壤 C 和 N 含量的相关性显著或极显著,而芒萁地下部与土壤的其余指标的相关性不显著。综上所述,芒萁能够在南方红壤侵蚀区生长,可用于该区域生态恢复和水土流失治理,但该区域土壤严重缺磷,限制芒萁生长,因此,建议在芒萁生长区施加磷肥。

关键词: 南方红壤侵蚀区; 芒萁; 土壤; 生态化学计量特征; 方差分析; 相关性分析

中图分类号: Q946.91; S157.2; X144 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)03-0058-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.03.08

Ecological stoichiometric characteristics of *Dicranopteris dichotoma* and soil of plots with different governance years in red soil erosion area of south China and correlation analysis FENG Liujun, CHEN Zhiqiang^①, CHEN Zhibiao, PAN Zongtao, ZHANG Qiaoling (State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(3): 58-65

Abstract: Taking no governance (P1) and Fengshui forest (P6) plots as the control, contents of total carbon (C), total nitrogen (N) and total phosphorus (P) and ratios of C/N, C/P and N/P in soil and blade, petiole and under-ground part of *Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh. in governance plots of P2, P3, P4 and P5 (governance for 2, 7, 13 and 30 a, respectively) in Zhuxi River basin of Fujian Province were compared and analyzed. The results show that in general, with increase of governance years, contents of C and N and ratios of C/P and N/P in soil decrease at first and then increase, content of P increases at first and then decreases, and ratio of C/N has a fluctuation change; content of C in each organ of *D. dichotoma* changes unobviously, contents of N and P increase gradually, ratios of C/N and C/P decrease gradually, and ratio of N/P decreases at first and then increases. The variance analysis

收稿日期: 2018-10-21

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J01462)

作者简介: 冯柳俊(1995—),男,浙江义乌人,硕士研究生,主要从事水土保持方面的研究。

^①通信作者 E-mail: soiltuqiang061@163.com

result shows that 6 indexes of soil in most governance plots have no significant difference with those in P1 and P6 plots. Content of C in each organ of *D. dichotoma* in most governance plots and content of N in petiole and under-ground part of *D. dichotoma* in partial governance plots have no significant difference with those in P1 and P6 plots, but content of N in blade of *D. dichotoma* in most governance plots has a significant difference with that in P1 and P6 plots. Content of P in blade and petiole of *D. dichotoma* in most governance plots is significantly higher than that in P1 plot, but has no significant difference with that in P6 plot, while that in under-ground part of *D. dichotoma* in 4 governance plots has no significant difference with that in P1 and P6 plots. Ratio of C/N in each organ of *D. dichotoma* in partial governance plots has a significant difference with that in P1 and P6 plots, while ratios of C/P and N/P in each organ of *D. dichotoma* in most governance plots have no significant difference with those in P1 and P6 plots. The correlation analysis result shows that the correlation of content of C in blade and petiole of *D. dichotoma* with each index of soil is not significant, while the correlations of their contents of N and P with partial indexes of soil are significant. The correlations of ratios of C/N and N/P in under-ground part of *D. dichotoma* with contents of C and N in soil are significant or extremely significant, while those of other indexes between under-ground part of *D. dichotoma* and soil are not significant. Overall, *D. dichotoma* can grow in red soil erosion area of south China, and can be used for ecological restoration and soil and water loss governance of this area, but the phosphorus deficiency of this area soil is serious, which restricts the growth of *D. dichotoma*, thus, it is recommended to apply phosphorus fertilizer in *D. dichotoma* growth area.

Key words: red soil erosion area of south China; *Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh.; soil; ecological stoichiometric characteristics; variance analysis; correlation analysis

中国南方红壤区的降水丰富、强度大且集中,该区域风化壳厚且松软,山地丘陵广布,地势起伏较大,为水土流失提供了动力基础和物质基础^[1]。南方红壤区是中国的主要水土流失区,部分水土流失严重的区域甚至出现了“红色沙漠”^[2]。研究结果显示:南方红壤区的侵蚀区面积占丘陵面积的15%^[1],森林覆盖率达52.87%,但林下植被稀疏,导致出现中度甚至重度的水土流失现象^[3-4]。目前,南方红壤区水土流失严重,土壤侵蚀危害巨大,极大地制约了该区域社会经济的发展,因此,解决该地区水土流失具有重要的生态学意义和社会价值。

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是一门结合了物理、化学和生物等多学科的基础原理,分析生态过程中化学元素间平衡关系的新兴学科,广泛用于生态恢复和水土流失治理等生态学相关研究^[5]。相关研究结果^[6-8]显示:碳是植物的结构性物质;氮和磷既是植物的基本营养元素,也是植物体内蛋白质和遗传物质的主要组成元素,还是植物生长的限制元素。鉴于此,可根据南方红壤侵蚀区植被和土壤生态化学计量特征分析其生态恢复状况和治理成效。

芒萁[*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh.],又名铁狼萁、狼萁,隶属于里白科(Gleicheniaceae)芒萁属(*Dicranopteris* Bernh.),为蕨类植物,主要分布于中国长江中下游以南以及西南地区的广大低山丘陵

区,具有极强的耐贫瘠、耐旱和耐酸等能力以及很强的水土保持功能^[9-11]。目前,关于芒萁的研究多集中在基本特征^[10-11]、与土壤互作^[12-16]、稀土元素分布和吸收^[17-19]以及化感作用^[20-22]等方面,而从生态化学计量学角度探讨南方红壤侵蚀区芒萁养分分布状况及其与土壤养分含量关系的研究却鲜见报道,关于土壤对芒萁生长进程中体内化学元素的限制情况也尚未清晰,因此,亟待明确芒萁的生态化学计量特征,并探明生态恢复过程中芒萁与土壤养分的关系。

为此,作者研究了朱溪流域不同治理年限样地中土壤和芒萁不同器官的生态化学计量特征,以期揭示在南方红壤侵蚀区生态恢复过程中芒萁生长的限制元素,进一步明确该生态系统内营养元素的循环过程,从而分析不同治理年限样地的生态恢复状况和水土流失治理效果,以期为南方红壤侵蚀区的生态恢复和水土保持研究提供基础数据和参考依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

朱溪流域位于福建省西南部,具体位置为北纬25°38'15"~25°42'55"、东经116°23'30"~116°30'30",地势东、西、北部高而中、南部低,总体呈现由北向南倾斜的趋势,地貌以低山丘陵为主。该区域属中亚热

带季风性气候,多年平均气温 18.4 °C,降水量大且集中(主要集中在春、夏两季),年内分配呈双峰型,多年平均降水量 1 621.0 mm,雨热同期^[23];土壤以酸性红壤为主。该区域的原生植被为亚热带常绿阔叶林,但由于人类活动的严重破坏,目前多为人工次生林,草本种类以芒萁、白茅 [*Imperata cylindrica* (Linn.) Beauv.]、金茅 [*Eulalia speciosa* (Debeaux) Kuntze]、五节芒 [*Miscanthus floridulu* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.] 和画眉草 [*Eragrostis pilosa* (Linn.) Beauv.] 等为主,灌木种类以石斑木 [*Rhaphiolepis indica* (Linn.) Lindl. ex Ker]、南烛 [*Vaccinium bracteatum* Thunb.]、油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 和梔子 (*Gardenia jasminoides* Ellis) 等为主,乔木种类以马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.) 和杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 等为主。

1.2 方法

1.2.1 样地设置 于 2013 年 10 月,在朱溪流域及

附近共选择 6 个不同区域的林地作为样地,包括 2 个对照样地和 4 个治理样地,样地面积均为 20 m × 20 m。其中,2 个对照样地分别为未治理 (P1) 样地和风水林 (P6) 样地;4 个治理样地分别编号为 P2、P3、P4 和 P5,治理时间分别为 2、7、13 和 30 a,治理方式均为生态林草治理(即选择适宜当地环境的乡土植物,人工种植乔灌草复合林,并在乔灌草复合林种植的第 1 年施加钙镁磷复混肥,施肥量约 900 kg · hm⁻²)。各样地的基本状况见表 1,其中,P1 样地植被以马尾松和芒萁为主;P2 样地植被以马尾松、胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.)、枫香树 (*Liquidambar formosana* Hance) 和芒萁等种类为主;P3 样地植被以马尾松、芒萁、黄檀 (*Dalbergia hupeana* Hance) 和五节芒等种类为主;P4 样地植被以马尾松、芒萁、金茅和黄檀等种类为主;P5 样地植被以杉木、马尾松、芒萁和胡枝子等种类为主;P6 样地植被以马尾松、木荷、枫香树、荷花玉兰 (*Magnolia grandiflora* Linn.) 和芒萁等种类为主。

表 1 南方红壤侵蚀区不同样地的基本状况

Table 1 Basic status of different plots in red soil erosion area of south China

样地 ¹⁾ Plot ¹⁾	纬度 Latitude	经度 Longitude	平均海拔/m Mean altitude	坡度/(°) Slope	治理措施 Governance measure	土壤侵蚀程度 Soil erosion degree	植被覆盖率/% Vegetation coverage
P1	N25°39'45"	E116°28'58"	367	13	未治理 No governance	重度 Severe	25
P2	N25°39'51"	E116°28'51"	388	31	生态林草 Ecological forest and grass	中度 Moderate	96
P3	N25°39'32"	E116°27'38"	330	15	生态林草 Ecological forest and grass	中度 Moderate	91
P4	N25°40'03"	E116°27'24"	320	20	生态林草 Ecological forest and grass	轻度 Light	97
P5	N25°40'16"	E116°26'07"	329	26	生态林草 Ecological forest and grass	轻度 Light	96
P6	N25°37'54"	E116°27'39"	329	7	封禁 Ban	轻度 Light	97

¹⁾ P1: 未治理 No governance; P2: 治理 2 a Governance for 2 a; P3: 治理 7 a Governance for 7 a; P4: 治理 13 a Governance for 13 a; P5: 治理 30 a Governance for 30 a; P6: 风水林 Fengshui forest.

1.2.2 取样方法 在每个样地内沿对角线设置 3 个样方,共 18 个样方,样方面积均为 2 m × 2 m。在每个样方内用直径 35 cm 的无底圆筒划分取样区域,先齐地剪取圆筒内所有芒萁植株(包括地面凋落物),装入自封袋中带回实验室,再挖取圆筒内 0~20 cm 土层(即芒萁根系分布区域)的土壤,每个样方取土量约 100 g,装入自封袋中带回实验室。将同一样地 3 个样方的芒萁植株混匀后装袋,并将同一样地 3 个样方的土样混匀。

1.2.3 样品处理方法 挑出土样中芒萁的地下部,用去离子水清洗干净;将芒萁的叶片、叶柄和地下部分别置于 105 °C 条件下杀青 30 min,再在 80 °C 条件

下烘干至恒质量,经粉碎机粉碎后,过 100 目尼龙筛,装入自封袋中保存、备用。去除土样中石头等杂质,经自然风干后,研磨成粉末,过 100 目尼龙筛,装入自封袋中保存、备用。

1.2.4 指标测定方法 采用 Vario MAX 碳氮元素分析仪(德国 Elementar 公司)测定土壤的全碳和全氮含量,加样量 0.90~1.10 g;采用 Vario EL III 元素分析仪(德国 Elementar 公司)测定芒萁叶片、叶柄和地下部的全碳和全氮含量,加样量 8~10 mg;采用硫酸-高氯酸消煮法提取待测液,并采用 San++ 连续流动分析仪(荷兰 Skalar 公司)测定土壤及芒萁叶片、叶柄和地下部的全磷含量^[8,11],加样量 0.27~0.30 g。根

据上述测定结果计算土壤及芒萁叶片、叶柄和地下部的C/N比(全碳含量与全氮含量的比值)、C/P比(全碳含量与全磷含量的比值)和N/P比(全氮含量与全磷含量的比值)。所有指标均重复取样测定3次。

1.3 数据处理

采用EXCEL 2010软件统计实验数据,采用SPSS 22.0统计分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和Pearson相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同治理年限样地土壤的生态化学计量特征

南方红壤侵蚀区不同治理年限样地土壤的全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量及其比值见表2。由表2可以看出:在供试的6个样地中,P1(未治理)样地土壤的C、N和P含量均最低,分别为6.09、0.43和0.09 g·kg⁻¹。4个治理样地中,P2(治理2 a)样地土壤的C和N含量较高,而P3(治理7 a)样地土壤的C和N含量最低,P4(治理13 a)和P5(治理30 a)样地土壤的C和N含量逐渐升高,且P5样地土壤的C和N含量与P2样地在同一水平;P2样地土壤的P含量最低,P3和P4样地土壤的P含量逐渐升高,且P5样地土壤的P含量略低于P4样地,但水平相当。P6(风水林)样地土壤的C和N含量高于4个治理样地,土壤的P含量高于P2和P3样地,但

低于P4和P5样地。总体上看,随着治理年限的增加,土壤的C和N含量呈先下降后上升的趋势,而土壤的P含量呈先上升后下降的趋势。方差分析结果表明:仅P5样地土壤的C和P含量以及P4样地土壤的P含量显著($P<0.05$)高于P1样地,其余治理样地土壤的C、N和P含量均与P1样地差异不显著;P3样地土壤的C和N含量以及P4样地土壤的N含量显著低于P6样地,其余治理样地土壤的C、N和P含量与P6样地差异不显著。

由表2还可以看出:在供试的6个样地中,P4样地土壤的C/N比最高(18.79),P1样地土壤的C/N比最低(14.04),4个治理样地土壤的C/N比均高于P1和P6样地;P2样地土壤的C/P比和N/P比均最高(分别为154.27和9.59),P4样地土壤的C/P比和N/P比均最低(分别为47.49和2.53),4个治理样地土壤的C/P比和N/P比基本上高于P1样地,但低于P6样地。总体上看,随着治理年限的增加,土壤的C/N比呈波动变化趋势,而土壤的C/P比和N/P比呈先下降后上升的趋势。方差分析结果表明:P4和P5样地土壤的C/N比显著高于P1和P6样地,P2和P3样地土壤的C/N比与P1和P6样地差异不显著;P2样地土壤的C/P比和N/P比显著高于P1样地,P4样地土壤的C/P比和N/P比以及P3和P5样地的N/P比显著低于P6样地,其余治理样地土壤的C/P比和N/P比与P1和P6样地差异不显著。

表2 南方红壤侵蚀区不同治理年限样地土壤的全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量及其比值($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Contents of total carbon (C), total nitrogen (N) and total phosphorus (P) and their ratios in soil of plots with different governance years in red soil erosion area of south China ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

样地 ²⁾ Plot ²⁾	含量/(g·kg ⁻¹) Content			比值 Ratio		
	C	N	P	C/N	C/P	N/P
P1	6.09±1.34c	0.43±0.06b	0.09±0.01b	14.04±1.18b	65.48±5.54c	4.66±0.17b
P2	14.08±2.21ab	0.88±0.10ab	0.09±0.01b	16.10±0.69ab	154.27±24.37a	9.59±1.19a
P3	7.93±2.22bc	0.50±0.16b	0.10±0.02b	15.87±1.16ab	78.88±4.91bc	4.97±0.53b
P4	11.43±4.08abc	0.61±0.21b	0.24±0.13a	18.79±4.07a	47.49±10.46c	2.53±0.93b
P5	15.77±2.96a	0.88±0.21ab	0.23±0.05a	17.95±1.17a	69.42±13.58bc	3.87±1.00b
P6	16.61±8.44a	1.14±0.30a	0.15±0.02ab	14.54±1.18b	112.00±55.29ab	7.70±3.40a

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

²⁾ P1: 未治理 No governance; P2: 治理2 a Governance for 2 a; P3: 治理7 a Governance for 7 a; P4: 治理13 a Governance for 13 a; P5: 治理30 a Governance for 30 a; P6: 风水林 Fengshui forest.

2.2 不同治理年限样地芒萁的生态化学计量特征

南方红壤侵蚀区不同治理年限样地芒萁各器官的全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量及其比值见

表3。由表3可以看出:P1(未治理)样地芒萁叶片的C含量最高,该样地芒萁叶片的N和P含量以及叶柄和地下部的C、N和P含量基本上最低。4个治理

表 3 南方红壤侵蚀区不同治理年限样地芒萁各器官的全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量及其比值($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 3 Contents of total carbon (C), total nitrogen (N) and total phosphorus (P) and their ratios in each organ of *Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh. in plots with different governance years in red soil erosion area of south China ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

样地 ²⁾ Plot ²⁾	含量/(g·kg ⁻¹) Content			比值 Ratio		
	C	N	P	C/N	C/P	N/P
叶片 Blade						
P1	495.41±2.03a	7.67±0.63d	0.29±0.03c	64.87±5.17a	1758.02±164.76a	27.09±0.76b
P2	484.91±4.59abc	9.47±0.78c	0.27±0.02c	51.45±4.74a	1792.97±141.02a	34.97±3.10a
P3	474.10±12.11c	9.54±0.59c	0.38±0.06b	49.83±3.51b	1256.81±180.38b	25.21±2.92b
P4	488.26±3.32ab	10.78±0.40bc	0.43±0.06b	45.35±1.95bc	1153.85±158.31bc	25.55±4.52b
P5	481.61±2.31bc	12.29±1.11b	0.46±0.03ab	39.40±3.72bc	1042.44±55.85bc	26.57±2.06b
P6	482.17±11.57bc	14.09±1.49a	0.54±0.06a	34.54±4.64c	903.51±118.57c	26.19±1.77b
叶柄 Petiole						
P1	473.95±9.91a	1.97±0.26c	0.07±0.01b	243.00±28.00a	6994.46±955.62a	29.31±7.01a
P2	475.43±0.45a	2.04±0.41c	0.07±0.01b	240.25±54.04a	7309.03±607.94a	31.57±7.94a
P3	478.88±1.55a	2.25±0.40c	0.11±0.01a	216.66±35.40a	4504.30±196.12b	21.11±3.08a
P4	479.99±3.61a	2.44±0.18bc	0.12±0.02a	197.35±13.21ab	3924.47±390.79b	19.90±1.72a
P5	475.94±5.28a	3.46±1.18a	0.13±0.02a	149.29±51.78b	3564.05±376.62b	25.84±9.47a
P6	479.27±1.63a	3.30±0.33ab	0.14±0.04a	146.22±14.94b	3678.69±1062.16b	25.64±8.78a
地下部 Under-ground part						
P1	476.15±8.68b	2.63±0.35b	0.12±0.02a	182.88±21.01a	3848.59±466.76a	21.41±4.92a
P2	481.73±2.67b	3.81±0.65ab	0.15±0.06a	128.62±20.20bc	3432.75±1055.04a	26.22±4.52a
P3	477.19±4.94b	3.66±0.27b	0.17±0.04a	130.79±8.26bc	2953.39±595.80a	22.64±4.78a
P4	478.38±7.92b	3.61±0.19b	0.18±0.06a	132.94±8.61b	2944.04±1143.03a	21.90±7.16a
P5	485.86±3.85b	5.30±1.70a	0.19±0.03a	99.34±36.38bc	2590.51±387.40a	27.44±5.75a
P6	494.23±5.96a	5.24±0.94a	0.18±0.08a	96.08±15.37c	2977.40±1081.81a	30.68±9.34a

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

²⁾ P1: 未治理 No governance; P2: 治理 2 a Governance for 2 a; P3: 治理 7 a Governance for 7 a; P4: 治理 13 a Governance for 13 a; P5: 治理 30 a Governance for 30 a; P6: 风水林 Fengshui forest.

样地芒萁各器官的 C 含量变化规律不明显,各器官的 N 和 P 含量基本上随治理年限增加而上升。P6 (风水林)样地芒萁各器官的 C、N 和 P 含量较高,并总体上高于其余样地。总体上看,随着治理年限的增加,芒萁各器官的 C 含量无明显的变化规律,各器官的 N 和 P 含量呈逐渐上升的趋势。方差分析结果表明:除 P3(治理 7 a)和 P5(治理 30 a)样地芒萁叶片的 C 含量以及 4 个治理样地芒萁地下部的 C 含量外,4 个治理样地芒萁叶片、叶柄和地下部的 C 含量与 P1 和 P6 样地差异不显著。4 个治理样地芒萁叶片的 N 含量以及 P5 样地芒萁叶柄和地下部的 N 含量显著 ($P<0.05$) 高于 P1 样地;4 个治理样地芒萁叶片的 N 含量, P2(治理 2 a)和 P3 样地芒萁叶柄的 N 含量以及 P3 和 P4(治理 13 a)样地芒萁地下部的 N 含量显著低于 P6 样地;其余治理样地芒萁叶片、叶柄和地下部的 N 含量与 P1 和 P6 样地差异不显著。

由表 3 还可以看出:总体上看, P1 样地芒萁叶片、叶柄和地下部的 C/N 比和 C/P 比最高,而 P6 样

地芒萁叶片、叶柄和地下部的 C/N 比和 C/P 比最低; 4 个治理样地芒萁叶片、叶柄和地下部的 C/N 比和 C/P 比随治理年限增加呈逐渐下降的趋势。P1 和 P6 样地芒萁叶片和叶柄的 N/P 比均较高,而地下部的 N/P 比分别最低和最高,4 个治理样地叶片、叶柄和地下部的 N/P 比均随治理年限增加呈先下降后上升的趋势。方差分析结果表明: P2 和 P3 样地芒萁叶片和叶柄的 C/N 比以及 P4 样地芒萁地下部的 C/N 比显著高于 P6 样地;而 P3、P4 和 P5 样地芒萁叶片的 C/N 比, P5 样地芒萁叶柄的 C/N 比以及 4 个治理样地芒萁地下部的 C/N 比显著低于 P1 样地。P2 和 P3 样地芒萁叶片的 C/P 比以及 P2 样地芒萁叶柄的 C/P 比和芒萁叶片的 N/P 比显著高于 P6 样地, P3、P4 和 P5 样地芒萁叶片和叶柄的 C/P 比显著低于 P1 样地,其余治理样地芒萁叶片、叶柄和地下部的 C/P 比和 N/P 比与 P1 和 P6 样地差异不显著。

2.3 相关性分析

南方红壤侵蚀区芒萁各器官与土壤间全碳(C)、

全氮(N)和全磷(P)含量及其比值的相关性分析结果见表4。由表4可见:芒萁叶片的N含量与土壤的C和N含量呈极显著($P<0.01$)正相关,相关系数分别为0.594和0.604;其P含量与土壤的C/P比和N/P比呈显著($P<0.05$)负相关,相关系数分别为-0.474和-0.492;其C/N比与土壤的C含量呈极显

著负相关,与土壤的N和P含量呈显著负相关,相关系数分别为-0.596、-0.568和-0.470;其C/P比与土壤的P含量呈显著负相关,与土壤的C/P比和N/P比呈显著正相关,相关系数分别为-0.497、0.478和0.498;其N/P比与土壤的C/P比和N/P比呈极显著正相关,相关系数分别为0.630和0.640。

表4 南方红壤侵蚀区芒萁各器官与土壤间全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)含量及其比值的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis on contents of total carbon (C), total nitrogen (N) and total phosphorus (P) and their ratios between each organ of *Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh. and soil in red soil erosion area of south China¹⁾

叶片指标 Index of blade	与土壤各指标的相关系数 Correlation coefficient with each index of soil					
	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	-0.007	-0.007	-0.011	0.352	-0.138	-0.181
N	0.594**	0.604**	0.448	0.083	0.074	0.062
P	0.322	0.297	0.459	0.305	-0.474*	-0.492*
C/N	-0.596**	-0.568*	-0.470*	-0.115	-0.026	-0.014
C/P	-0.311	-0.262	-0.497*	-0.327	0.478*	0.498*
N/P	0.290	0.340	-0.232	-0.277	0.630**	0.640**

叶柄指标 Index of petiole	与土壤各指标的相关系数 Correlation coefficient with each index of soil					
	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	0.150	0.079	0.337	0.352	-0.138	-0.181
N	0.545*	0.543*	0.299	0.083	0.074	0.062
P	0.165	0.095	0.552*	0.305	-0.474*	-0.492*
C/N	-0.495*	-0.488*	-0.332	-0.115	-0.026	-0.014
C/P	-0.191	-0.119	-0.556*	-0.327	0.478*	0.498*
N/P	0.303	0.380	-0.341	-0.277	0.630**	0.640**

地下部指标 Index of under-ground part	与土壤各指标的相关系数 Correlation coefficient with each index of soil					
	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	0.424	0.468	0.150	-0.075	0.174	0.195
N	0.385	0.380	0.199	0.075	0.087	0.055
P	-0.082	-0.080	-0.003	-0.028	-0.110	-0.144
C/N	-0.490*	-0.476*	-0.234	-0.142	-0.195	-0.144
C/P	0.061	0.065	-0.002	0.013	0.104	0.147
N/P	0.611**	0.614**	0.239	0.123	0.289	0.289

¹⁾ * : $P<0.05$; ** : $P<0.01$.

由表4还可见:芒萁叶柄的N含量与土壤的P和N含量呈显著正相关,相关系数分别为0.545和0.543;其P含量与土壤的P含量呈显著正相关,与土壤的C/P比和N/P比呈显著负相关,相关系数分别为0.552、-0.474和-0.492;其C/N比与土壤的C和N含量呈显著负相关,相关系数分别为-0.495和-0.488;其C/P比与土壤的P含量呈显著负相关,与土壤的C/P比和N/P比呈显著正相关,相关系数分别为-0.556、0.478和0.498;其N/P比与土壤的C/P比和N/P比呈极显著正相关,相关系数分别为

0.630和0.640。

另外,芒萁地下部的C/N比与土壤的C和N含量呈显著负相关,相关系数分别为-0.490和-0.476;其N/P比与土壤的C和N含量呈极显著正相关,相关系数分别为0.611和0.614。

3 讨论和结论

本研究结果显示:南方红壤侵蚀区土壤的全碳(C)和全氮(N)含量在治理7~30 a间随治理年限增

加而逐渐上升,土壤的全磷(P)含量则在治理2~13 a间随治理年限增加而逐渐上升。推测造成上述结果的原因有2个:一是芒萁改变了土壤环境,使土壤温度下降,土壤水分含量增大,从而减少了土壤养分的流失^[14];二是芒萁的落叶和死根等凋落物使其吸收的大量营养元素回归土壤,从而增加了土壤的C、N和P含量^[24-27]。值得注意的是,P4(治理13 a)样地土壤的P含量在6个样地中最高($0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),显著($P < 0.05$)高于P1(未治理)样地,但并未超过中国土壤P含量的平均值($0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[28],说明研究区域土壤处于缺磷状态,这与中国南方亚热带地区土壤普遍缺磷^[29]的现状相吻合。

本研究结果显示:随着治理年限的增加,芒萁叶片、叶柄和地下部的C含量并未表现出明显的变化规律,而各器官的N和P含量均呈逐渐上升的趋势;并且,总体来看,4个治理样地芒萁各器官的N和P含量基本上显著高于P1样地,说明随着治理年限的增加,芒萁各器官的N和P含量明显增大。然而,4个治理样地芒萁各器官的N和P含量并未超过全球395种陆生植物叶中N和P含量的平均值(分别为 20.6 和 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[30],说明芒萁各器官生长所需的氮和磷元素的量较少,因此,能够适应南方红壤侵蚀区极度贫瘠的土壤环境。

相关性分析结果表明:南方红壤侵蚀区芒萁各器官与土壤的C、N和P含量存在一定的相关性,尤其是芒萁叶片和叶柄的N含量与土壤的C和N含量以及芒萁叶柄的P含量与土壤的P含量均存在极显著($P < 0.01$)或显著正相关,说明芒萁能够促进南方红壤侵蚀区土壤的养分积累,土壤养分积累又可促使芒萁各器官养分含量增加。

土壤的C/N比、C/P比和N/P比是分析土壤有机质组成和质量的重要指标,能够反映土壤中碳、氮和磷的含量及其地球化学循环的主要成分^[31]。相关研究结果^[32-33]表明:随着植被的恢复,土壤的C/N比、C/P比和N/P比逐渐升高,且土壤的C/N比较C/P比和N/P比稳定。本研究中,4个治理样地土壤的C/N比呈波动变化,未表现出明显的变化趋势,而土壤的C/P比和N/P比则随着治理年限的增加总体呈先下降后上升的趋势,且土壤的C/N比较C/P比和N/P比相对稳定。在供试的6个样地中,P2(治理2 a)样地土壤的C/P比和N/P比均最高,与陈海滨等^[34]对长汀县稀土矿区土壤生态化学计量特征的研

究结果相吻合,这可能是因为在生态林草治理过程中,施加的钙镁磷复混肥导致土壤中的C、N和P含量在短时间内显著升高,但土壤中的磷在治理第1年就被植被大量吸收,导致土壤的P含量在治理2 a样地中未出现最高值,但土壤的C/P比和N/P比在治理2 a样地中却最高;之后,随着治理年限的增加,芒萁大量吸收土壤中的养分,土壤中的C和N逐渐减少,并在治理7 a样地中最低,而土壤中的磷逐渐增多,致使土壤的C/P比和N/P比相对较低,并在治理13 a样地中最低。值得注意的是,4个治理样地土壤的C/N比均高于中国土壤C/N比的平均水平($10 \sim 12$)^[35],说明南方红壤侵蚀区土壤的矿化速率较低,土壤有机质的分解速率也较低。

植物的C/N比和C/P比是评价植物生长速率及氮和磷吸收程度的重要指标,N/P比则在一定程度上反映植物生长过程中的限制元素^[6-7]。研究^[36-37]表明:N/P比低于14时,植物受氮限制;N/P比高于16时,植物受磷限制。还有研究^[38-39]表明:N/P比低于10时,氮是植物生长的限制性因子;N/P比高于20时,磷是植物生长的限制性因子。本研究中,6个样地芒萁叶片、叶柄和地下部的N/P比基本上均高于20,结合本研究区土壤缺磷的现状,判断南方红壤侵蚀区芒萁在生长过程中受到磷元素的限制。

综上所述,芒萁能够在南方红壤侵蚀区生长,可用于该区域的生态恢复和水土流失治理,但由于该区域土壤严重缺磷,限制芒萁生长,因此,建议在芒萁生长区施加磷肥。

参考文献:

- [1] 梁音,杨轩,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):50-53.
- [2] 张会茹,郑粉莉,耿晓东.地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J].水土保持研究,2009,16(4):52-54,59.
- [3] 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.
- [4] 何绍浪,何小武,李凤英,等.南方红壤区林下水土流失成因及其治理措施[J].中国水土保持,2017(3):16-19.
- [5] 卢同平,史正涛,牛洁,等.我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望[J].土壤,2016,48(1):29-35.
- [6] 林永静,武梦娟,卢同平,等.中国生态化学计量学研究热点的可视化分析[J].生物学杂志,2018,35(2):63-66.
- [7] 吴秀平,张振华,罗晓燕,等.基于文献计量的生态化学计量学文献分析[J].冰川冻土,2016,38(3):811-818.
- [8] 冯雪萍,刘金福,BUAJAN S,等.福建三明格氏栲天然林林窗凋落物-土壤的生态化学计量特征[J].植物资源与环境学报,

- 2017, 26(4): 18-24.
- [9] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第二卷[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 120-121.
- [10] 刘迎春, 刘琪璟, 汪宏清, 等. 芒萁生物量分布特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 705-711.
- [11] 陈奶寿, 张秋芳, 陈坦, 等. 退化红壤恢复过程中芒萁的N、P化学计量特征[J]. 林业科学研究, 2016, 29(5): 735-742.
- [12] 黄美玲. 南方红壤侵蚀区芒萁的散布特征及土壤肥力响应: 以朱溪小流域为例[D]. 福州: 福建师范大学地理科学学院, 2014: 45-46.
- [13] 鄢新余. 南方红壤侵蚀区芒萁生长特征及土壤养分效应[D]. 福州: 福建师范大学地理科学学院, 2015: 43-46.
- [14] 陈坦, 江军, 杨燕华, 等. 植被恢复过程中芒萁对侵蚀红壤碳氮库的影响[J]. 南昌工程学院学报, 2014, 33(4): 23-27.
- [15] 聂阳意, 陈坦, 吕茂奎, 等. 植被恢复过程中芒萁覆盖对侵蚀红壤氮组分的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6964-6971.
- [16] 张浩, 吕茂奎, 谢锦升. 红壤侵蚀区芒萁对土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1639-1649.
- [17] CHEN Z, CHEN Z, BAI L. Rare earth element migration in gullies with different *Dicranopteris dichotoma* covers in the Huangnikeng gully group, Changting County, Southeast China[J]. Chemosphere, 2016, 164: 443-450.
- [18] WANG X P, SHAN X Q, ZHANG S Z, et al. Distribution of rare earth elements among chloroplast components of hyperaccumulator *Dicranopteris dichotoma* [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2003, 376: 913-917.
- [19] 李小飞, 陈志彪, 陈志强. 南方稀土采矿恢复地土壤稀土元素含量及植物吸收特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2126-2132.
- [20] 陈少波. 芒萁的化感活性及化学成分薄层分析[D]. 南昌: 江西师范大学生命科学学院, 2011: 31.
- [21] 袁宜如, 李晓云. 芒萁生化他感作用机理初探[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(17): 5047-5048.
- [22] 罗丽萍, 葛刚, 陶勇, 等. 芒萁对几种杂草和农作物的生化他感作用[J]. 植物学通报, 1999, 16(5): 591-597.
- [23] 陈志彪, 陈志强, 邱辉. 花岗岩红壤侵蚀区水土保持综合研究: 以福建省长汀朱溪小流域为例[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 19.
- [24] HÄTTENSCHWILER S, TIUNOV A V, SCHEU S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2005, 36: 191-218.
- [25] HOORENS B, AERTS R, STROETENGA M. Does initial litter chemistry explain litter mixture effects on decomposition? [J]. Oecologia, 2003, 137: 578-586.
- [26] FIFE D N, NAMBIAR E K S, SAUR E. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment[J]. Tree Physiology, 2008, 28: 187-196.
- [27] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [28] 史军辉, 王新英, 刘茂秀, 等. 不同林龄胡杨林叶片与土壤的化学计量特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 815-822.
- [29] HOU E, CHEN C, WEN D, et al. Phosphatase activity in relation to key litter and soil properties in mature subtropical forests in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 515/516: 83-91.
- [30] 严思维, 陈爱民, 林勇明, 等. 干热河谷区不同林龄赤桉叶中养分含量和再吸收率的比较及其线性回归分析[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(1): 39-46.
- [31] CAO Y, WANG B, WEI T, et al. Ecological stoichiometric characteristics and element reserves of three stands in a closed forest on the Chinese loess plateau[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188: 80-93.
- [32] 张珂, 苏永中, 王婷, 等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3235-3243.
- [33] TIAN H, CHEN G, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98: 139-151.
- [34] 陈海滨, 陈志彪, 陈志强, 等. 不同治理年限的离子型稀土矿区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 258-266.
- [35] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [36] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [37] PAN F, ZHANG W, LIU S, et al. Leaf N:P stoichiometry across plant functional groups in the karst region of southwestern China[J]. Trees, 2015, 29: 883-892.
- [38] SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PEÑUELAS J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives[J]. Biogeochemistry, 2012, 111: 1-39.
- [39] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164: 243-266.

(责任编辑: 佟金凤)