

侵蚀红壤恢复区植被垂直结构对土壤恢复特征的影响^①

张海东^{1,2}, 于东升^{1*}, 董林林¹, 史学正¹, 王 宁¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 通过获取典型的侵蚀红壤恢复区植被垂直结构参数及林下土壤属性值, 构建归一化土壤恢复指数, 研究了植被垂直结构对林下侵蚀土壤恢复特征的影响。结果显示: 研究区植被垂直结构与土壤属性特征较侵蚀期均有所恢复, 植被垂直结构对侵蚀土壤的恢复影响显著, 土壤重组有机碳、全氮和黏粒含量的恢复水平均呈现出纯林<林草<林灌草的趋势, 体积质量顺序相应为林灌草<林草<纯林。植被投影叶面积指数与归一化土壤恢复指数呈显著正相关($r = 0.332^*$, $P < 0.05$)。在投影叶面积指数大于 0.2 的情形下, 土壤恢复特征随植被垂直层次的增多呈正向演变, 不同植被结构投影叶面积指数的增大有利于侵蚀区退化土壤质量的恢复, 灌草层是侵蚀红壤恢复的重要影响因素。

关键词: 植被垂直结构; 土壤侵蚀; 投影叶面积指数; 归一化土壤恢复指数

中图分类号: S158.3

中国南方红壤地区曾遭受严重的土壤侵蚀, 至 20 世纪 50 年代末, 该区域原始植被基本消失, 侵蚀最严重区域表层土壤(A 层和 B 层)完全损失^[1], 土壤肥力急剧下降。土壤侵蚀不仅造成大量水土资源的流失, 而且导致土地退化等生态环境问题频发。随着国家对南方红壤区土壤侵蚀的高度重视, 近 30 年来, 大规模的植被恢复措施得以实施, 以马尾松(*Pinus massoniana*)为主的先锋树种已经基本替代了原始常绿阔叶林植被。然而, 前期土壤侵蚀程度的差异引起了植被恢复的多样性, 土壤侵蚀程度较低的区域, 林灌草结构层次分明; 而在侵蚀严重的区域, 仅有马尾松存活, 林下无任何植被生长^[2]。林下土壤的恢复程度也随植被结构变化呈现出较大的波动。

已有研究表明, 植被恢复与林下土壤恢复特征呈正向关系^[3-4]。一方面, 植被通过截留降雨、减小雨滴动能、增加土壤渗透等方式^[5], 直接改善侵蚀土壤环境, 有效保护和改善土壤结构, 降低土壤养分的流失程度^[6]; 另一方面, 植被通过凋落物和根系向土壤提供有机质, 促进土壤有机碳的积累, 改善土壤的理化性质, 提高土壤质量^[7-9]。作为植被恢复的重要指标, 植被垂直结构在植被-土壤交互过程中发挥着重要的作用^[10]。植被垂直结构是群落在空间中的垂直分化或成层现象, 地上部分的垂直结构可以定义为不

同高度处植被冠层的总量^[11], 其对林下土壤质量的改善影响显著^[12]。植被垂直结构越好, 其防治土壤侵蚀能力越强, 李相玺等^[13]研究表明, 南方红壤侵蚀区乔灌草、灌草、乔灌和乔草植被下的土壤侵蚀量分别比乔木纯林植被减少了 74.19%, 65.16%, 62.15% 和 61.16%。植被垂直层次越多, 供给土壤的凋落物量、死亡根系和根际分泌物也越多, 从而更好地促进了林下土壤肥力的提高^[1, 14]。

大量研究以表征植被整体情况的植被覆盖度、林分密度等因子来量化植被, 进而探讨植被对土壤恢复的影响^[15-17], 而较少考虑不同高度处植被冠层对土壤恢复影响的异质性。本研究通过分离植被的林冠层和灌草层, 分别提取其投影叶面积指数, 结合林下土壤理化性质及侵蚀土壤恢复指数, 研究了南方侵蚀红壤恢复区植被垂直结构对林下土壤恢复特征的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兴国县是中国南方典型的红壤侵蚀区域, 位于江西省中南部(115°01'~115°51'E, 26°03'~26°41'N), 总面积 3 214.5 km²。东西北三面环山, 地貌以低山和丘陵为主, 海拔 127.9~1 204.0 m。属亚热带季风气候, 年均气温为 18.9℃, 年均降雨量达 1 538.7 mm,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB950702)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050507)资助。

* 通讯作者(dshyu@issas.ac.cn)

作者简介: 张海东(1984—), 男, 江苏东台人, 博士研究生, 主要从事资源环境与遥感信息研究。E-mail: arronkwokzhang@163.com

降雨主要集中在 4—6 月份, 占全年的 48.5%^[18]。林地总面积达 2 260.0 km², 占整体县域面积的 70.2%。由于长期的人为破坏, 原始植被已基本消失, 现有植被主要为次生马尾松林, 约占林地总面积的 94%, 林下生长着胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、油茶(*Camellia oleifera*)等灌木, 草本植被主要有铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)和宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)等。经过大规模治理, 兴国县平均森林覆盖率已达到 60% 以上。

1.2 植被垂直结构参数获取

在进行整体调查的基础之上, 基于研究区植被垂直结构的总体分布特征, 选取了 56 个具有代表性的植被样方, 分布于纯林结构、林草和林灌草结构样方上, 植被采样于 2011 年 10 月进行。

植被投影叶面积指数(projected leaf area index, PLAI)是光线从无限远的距离穿过树叶投射到地面的区域累积投影面积比, 该参数能够适宜地描述植被垂直方向上不同高度冠层的分布状况^[19]。利用徕卡 HDS 3000 三维激光扫描仪对植被样方进行多站点扫描, 基于Cyclone 软件的坐标匹配功能将各站点的点云数据进行拼合, 通过人机交互解译选取 10 m × 10 m 的代表性样方, 对点云数据进行平移、旋转、缩放及改变视场角等操作, 剔除噪声点云, 将植被样方的森林冠层及灌草层进行分离, 分别计算植被整体投影叶面积指数 (PLAI of the total vegetation, PLAI_T)、植被林

冠层投影叶面积指数 (PLAI of the forest canopy, PLAI_F) 和林下植被投影叶面积指数 (PLAI of the understory vegetation, PLAI_U)。

1.3 土壤样品采集与分析

每个样方采集 5 个表层(0 ~ 10 cm)土壤样品进行混合得到 1 kg 混合样, 并用环刀采集 3 个重复样品用于测量土壤体积质量。采集的混合样经过风干, 挑拣出土样中的植物残体, 部分样品研磨过 2 mm 和 0.25 mm 土筛待测。土壤重组有机碳的测定先采用密度分组技术分离重组和轻组土壤, 再用重铬酸钾氧化滴定法测定重组的有机碳含量; 全氮采用半微量开氏法测定; 土壤黏粒含量采用卡氏制比重计法测定; pH 采用电位法测定^[20-21]。

1.4 侵蚀土壤恢复指数计算

本研究中土壤恢复指数(soil restoration index, SRI)主要包括两大因素, 一是物理因素, 主要为有效土层厚度和体积质量, 二是以有机碳为中心的肥力因素^[22]。选取土壤物理化学属性表层土壤厚度、剖面土壤厚度、黏粒、体积质量、重组有机碳、全氮、pH 作为 SRI 计算的指标。

参照王效举和龚子同^[23]在研究区相邻区域干烟洲试验站的研究结果, 确定指标权重(表1), 将各因子划分为 4 个等级、 、 、 , 得分依次为 4、3、2、1, 从而计算 SRI(公式 1)。

$$SRI = \sum W_i I_i$$

(1)

表 1 侵蚀土壤恢复指标权重与分级
Table 1 Weights and grades for evaluation indicators of soil restoration

评价指标	权重				
表层土壤厚度(cm)	18	>20	15 ~ 20	15 ~ 10	<10
剖面土层厚度(cm)	14	>100	80 ~ 100	50 ~ 80	<50
黏粒含量 (g/kg)	16	>400	400 ~ 300	300 ~ 200	<200
体积质量 (g/cm ³)	14	<1	1 ~ 1.35	1.35 ~ 1.55	>1.55
重组有机碳 (g/kg)	18	>12	12 ~ 8	8 ~ 3	<3
全氮 (g/kg)	11	>2.0	1.25 ~ 2.0	0.75 ~ 1.25	<0.75
pH	9	5.5 ~ 7	5 ~ 5.5	4.5 ~ 5	<4.5

式中: W_i 为指数权重, I_i 为评价指标等级的分数。

将 SRI 进行归一化计算(公式 2), 得到归一化土壤恢复指数(normalized soil restoration index, NSRI)。

$$NSRI = SRI / SRI_{\max} \times 100$$

(2)

式中: NSRI 为归一化土壤恢复指数, SRI 为土壤恢复指数, $SRI_{\max}$ 为样方中最大的土壤恢复指数值。

2 结果与分析

2.1 植被垂直结构参数统计特征

PLAI_T 最高值达 0.91, 最低值仅有 0.17, 平均

值为 0.60。其中, PLAI_F 在 0.10 ~ 0.85 的范围内波动, 平均值为 0.37; PLAI_U 介于 0.01 ~ 0.77 之间, 平均值为 0.34, 表明不同区域植被恢复程度存在着较大的异质性(表 2)。垂直结构上, 受前期侵蚀程度差异的影响, PLAI_F 和 PLAI_U 的分布没有呈现明显的规律。结合野外实际调查数据, 当 PLAI_F 和 PLAI_U 均大于 0.4 时, 表明植被的垂直结构恢复较为理想, 该范围内共分布 12 个植被样方, 占整体的 21%, 其他样方植被垂直结构恢复程度相对较低。

表 2 植被垂直结构层次参数特征
Table 2 The layer parameters of vertical vegetation structure

指数	最小值	最大值	中值	均值 ± 标准差	变异系数(%)
PLAI _T	0.17	0.91	0.57	0.60 ± 0.18	30.00
PLAI _F	0.10	0.85	0.34	0.37 ± 0.19	51.35
PLAI _U	0.01	0.77	0.38	0.34 ± 0.18	52.94

2.2 土壤恢复指标及 NSRI 的统计特征

随着植被的逐渐恢复，林下地表植被凋落物日渐增加，植被根系也日益发达，促使表层土壤恢复指标值较侵蚀期有所提升。由于前期土壤侵蚀程度不同，表层土壤厚度和剖面土层厚度的波动范围较大。土壤重组有机碳和全氮因子具有较高的变异性，变化范围分别为 1.87~38.59 g/kg 和 0.10~2.26 g/kg。

重组有机碳和全氮的增加改善了红壤侵蚀区的土壤结构，增大了土壤孔隙，从而减小了土壤体积质量，提高了土壤中的黏粒含量比例，土壤体积质量的变异性较小，而土壤黏粒含量具有中等变异性(表 3)。由于红壤自身为酸性土，且红壤区植被也呈酸性，因此研究区土壤的 pH 较为稳定，介于 4.14~5.18 之间。

表 3 植被样方土壤理化性质(0~10 cm)
Table 3 Soil physical and chemical properties under forest land

指标	样方数	最小值	最大值	均值 ± 标准差	变异系数(%)
表层土壤厚度(cm)	56	5	40	13.27 ± 6.27	47.25
剖面土层厚度(cm)	56	8	120	45.75 ± 26.27	57.42
黏粒含量 (g/kg)	56	18.4	526.6	243.6 ± 125.8	51.64
体积质量 (g/cm ³)	56	0.88	1.62	1.29 ± 0.15	11.63
重组有机碳 (g/kg)	56	1.87	38.59	9.51 ± 7.18	75.50
全氮 (g/kg)	56	0.10	2.26	0.67 ± 0.49	73.13
pH	56	4.14	5.18	4.58 ± 0.21	4.59

经计算，研究区 NSRI 值介于 0.31~0.73 之间，参考 Marzaioli 等^[24]研究将 NSRI 分为 3 个等级：低级恢复水平(NSRI<0.45)、中级恢复水平(0.45≤NSRI≤0.65)和高级恢复水平(NSRI>0.65)，样方个数分别为 19、31 和 6 个，约 90% 的植被样地土壤质量恢复程度处于中、低水平，仅部分样地的土壤恢复水平较高。

2.3 植被垂直结构与土壤恢复指标关系特征

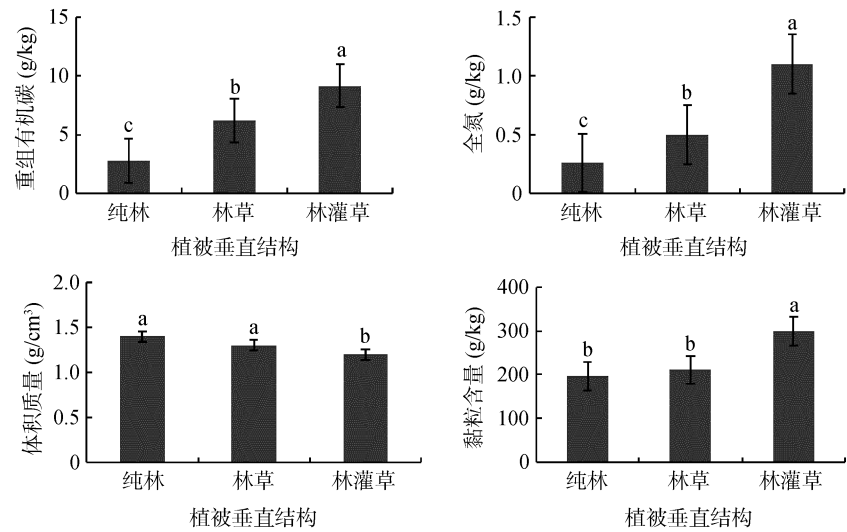
土壤重组有机碳、全氮和黏粒含量均随着植被垂直结构层次的增加而增加，土壤体积质量则相应地呈降低趋势(图 1)，表明植被垂直结构对林下侵蚀土壤的恢复影响显著，植被垂直层次越多，越容易促进林下土壤养分的积累和土壤结构的优化^[6]，而灌木层的存在对土壤各因子重组有机碳、全氮、体积质量和黏粒因子的影响作用极为显著。单因素方差分析结果显示，重组有机碳和全氮因垂直结构的不同呈极显著差异($P < 0.01$)，土壤体积质量与黏粒含量呈显著差异 ($P < 0.05$)，表明了植被垂直结构的不同引起了侵蚀土壤恢复的多样性，这与 Yimer 等^[25]的研究结果保持一致。受前期侵蚀程度和红壤自身属性的影响，不同的植被垂直结构间表层土层厚

度、剖面土壤深度及 pH 三因子的均值没有明显的差异。

纯林植被结构下，林下土壤因子受 PLAI 的影响不显著(表 4)，随 PLAI 的变化无明显的规律性，土壤属性值主要受约于树高引起的林下土壤侵蚀程度^[18]。在 PLAI 介于 0.2~0.5 时，纯林结构下受植被影响的主要土壤恢复因子重组有机碳、全氮、体积质量和黏粒均处于最佳状态(表 4)。

林草和林灌草植被结构下 PLAI 分段研究显示，PLAI_T 较小(<0.2)的情形下，林草样方仅有一个，而林灌草结构样方不存在，因此植被垂直结构对侵蚀土壤恢复的作用无法显现。在 PLAI_T 较大(0.2~0.5 和 >0.5)的情形下，林下土壤属性值均随着 PLAI 的增加呈正向增长。在 PLAI_T 相同的情况下，近地表植被的恢复对侵蚀土壤的修复作用高于纯林植被的恢复(表 4)。

PLAI_F 保持一定的情况下，由植被垂直结构引起的土壤因子的恢复呈现出明显的规律，各土壤因子值均随着植被垂直结构的增加而更加优化，不同 PLAI_F 分组的植被样方上，土壤属性都呈现出纯林<林草<林灌草的趋势(表 5)。



(图中小写字母不同表示组间均值差异达到 $P<0.05$ 显著水平)

图 1 植被垂直结构对土壤属性的影响

Fig. 1 Effects of different vertical vegetation structures on soil properties

表 4 不同垂直结构 $PLAI_T$ 下土壤理化性质

Table 4 Soil physical and chemical properties of $PLAI_T$ with different vertical vegetation structures

$PLAI_T$	植被垂直结构	重组有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	体积质量 (g/cm^3)	黏粒 (g/kg)
<0.2	纯林	2.55	0.35	1.41	206.5
	林草	2.08	0.14	1.32	75.2
	林灌草	ND	ND	ND	ND
0.2 ~ 0.5	纯林	3.48	0.40	1.35	200.4
	林草	7.01	0.45	1.34	200.8
	林灌草	15.97	1.14	1.21	301.3
>0.5	纯林	3.42	0.36	1.44	182.4
	林草	9.02	0.60	1.31	228.7
	林灌草	16.32	1.23	1.15	291.5

注：ND 表示无数据分布。

表 5 不同垂直结构 $PLAI_F$ 下土壤理化性质

Table 5 Soil physical and chemical properties of $PLAI_F$ with different vertical vegetation structures

$PLAI_F$	植被垂直结构	重组有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	体积质量 (g/cm^3)	黏粒 (g/kg)
<0.2	纯林	2.55	0.35	1.41	206.5
	林草	4.58	0.46	1.29	241.3
	林灌草	13.60	1.23	1.25	330.8
0.2 ~ 0.5	纯林	3.48	0.40	1.35	200.4
	林草	6.01	0.56	1.33	194.4
	林灌草	18.78	1.27	1.16	308.0
>0.5	纯林	3.42	0.36	1.44	182.4
	林草	6.32	0.58	1.32	264.7
	林灌草	17.93	1.24	1.10	327.0

2.4 植被垂直结构对土壤恢复的影响

整体上, NSRI 与植被垂直结构相关分析显示, $PLAI_T$ 与 NSRI 呈显著正相关($r = 0.332^*$, $P < 0.05$), 表明 $PLAI_T$ 是林下土壤 NSRI 的主要影响因素之一, 总体植被层次越多, $PLAI$ 越大, 土壤恢复程

度越高; 而 NSRI 与 $PLAI_F$ 及 $PLAI_U$ 相关性较小, 说明了单一层次植被对 NSRI 的影响小于植被整体的功效。

不同植被垂直结构下, NSRI 基本呈现随 $PLAI$ 的增大而升高的趋势。 $PLAI$ 分组研究显示, 当植被

恢复程度较低时($PLAI < 0.2$), 植被垂直结构与 NSRI 未呈现出明显的规律性。但随着 $PLAI$ 的增大(> 0.2), NSRI 随植被垂直层次的增多呈现出纯林 < 林草 < 林灌草的趋势(图 2)。当 $PLAI_F$ 从 < 0.2 升高到 $0.2 \sim 0.5$ 时, 纯林结构下 NSRI 基本不变, 而林草和林灌草结构下 NSRI 均有所提升, 但幅度较小, 可能是由于林下较低的草本覆盖率引起的, 该结果与 Wang 和 Gong^[26]认为的“一年生草本植被在保护和改善区域土壤质量上发挥着重要的作用”一致; 当 $PLAI_F$ 增

大至 > 0.5 时, NSRI 有明显提升, 表明只有当林冠层覆盖度较高时, 才能有效改善林下土壤质量(图 2b)。如图 2c 所示, 由于灌草层的大量生长促进了营养元素在地表富集, $PLAI_U$ 的增大有效促进了侵蚀红壤的恢复, 这与 Caravaca 等^[27]在地中海地区的研究结果“灌草层决定了林下土壤的质量能否提升”相符。林草结构下, 林下灌草植被 $PLAI$ 的增加稳步提升了 NSRI; 而林灌草结构下, 当 $PLAI_U$ 达到 0.5 时, NSRI 已基本稳定, 提高幅度较小。

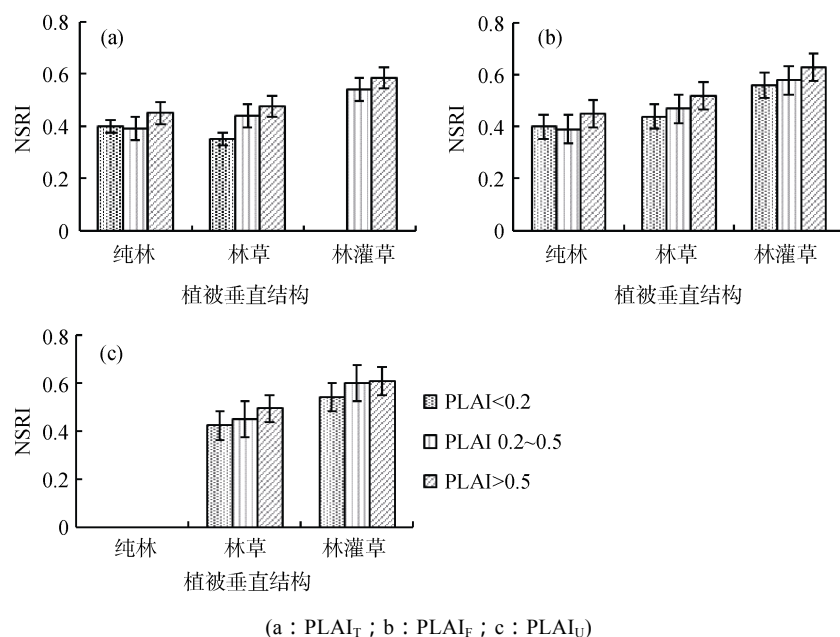


图 2 不同层次植被投影叶面积指数对 NSRI 的影响

Fig. 2 Effects of vertical vegetation structure on normalized soil restoration index

近十多年来, 南方红壤侵蚀区基本处于自然恢复的状态, 因此人为因素对土壤恢复的影响较小, 而自然因素成为了林下土壤恢复的主导因素, 其中植被垂直结构的恢复对土壤恢复意义重大。垂直方向上植被层次引起林下土壤恢复程度差异的原因在于: 在中幼林阶段, 次生马尾松林需吸收土壤中的大量养分来维持自身生长发育, 而归还给土壤的枯枝落叶和营养物质较少, 因此对退化土壤恢复的作用相对较小; 而近地表灌木和草本的存在为侵蚀土壤的恢复提供了大量的凋落物, 凋落物对土壤团聚体及空隙的形成作用显著, 较高的凋落物量是土壤养分归还的重要途径, 凋落物的累积促进了表层土壤养分的积累, 同时增加了氮素的供给并降低了 C/N, 加快了土壤微生物对有机质的分解, 促进了表层土壤养分的积累, 优化了表层土壤的结构。此外, 南方红壤地区夏季降雨集中, 林冠层在降雨初期虽然能够截取部分降雨, 但是随着降雨历时的延长和降雨强度的增大, 林内会形成二次降雨, 其降雨动能远高于林外降雨, 因此林下植被及

地表凋落物能够形成对降雨的二次缓冲带, 减轻林下土壤侵蚀的发生; 同时林下植被的根系增大了土壤持水量, 促进地表水的渗透并减缓了地表径流的形成。与纯林结构相比, 林草和林灌草结构的植被层次性更强, 受降雨侵蚀的作用相对较小, 土壤养分的流失也较小, 因而林下土壤恢复得较好。

4 结论

南方红壤侵蚀区次生马尾松林的逐步演替为侵蚀土壤的恢复提供了重要的物质基础, 促进了土壤养分的积累和土壤质量的提高。植被垂直结构参数与土壤恢复及其特征因子间呈正相关, $PLAI_F$ 和 $PLAI_U$ 的增大均促进了林下侵蚀土壤质量的提升。在植被-土壤交互过程中, 近地表植被对土壤恢复的作用最为显著, 原因在于其增加了土壤养分的供给, 并减少了降雨侵蚀的发生。因此, 在侵蚀区退化土壤恢复的过程中, 需高度重视植被垂直结构的发展, 在乔木林达

到一定程度的覆盖时,需侧重林下植被的恢复,才能更好地促进侵蚀区域生态环境的好转。

参考文献:

- [1] Zhang B, Wang HL, Yao SH, Bi LD. Litter quantity confers soil functional resilience through mediating soil biophysical habitat and microbial community structure on an eroded bare land restored with mono *Pinus massoniana* [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57: 556–567
- [2] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 顾祝军, 张文太, 杨浩. 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): 1 060–1 066
- [3] Dantas VDL, Batalha MA. Vegetation structure: Fine scale relationships with soil in a cerrado site[J]. *Flora*, 2011, 206: 341–346
- [4] Jiao F, Wen ZM, An SS. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2011, 86: 110–116
- [5] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析[J]. *干旱区资源与环境*. 1999, 13(2): 62–68
- [6] Vásquez-Méndez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, Hernández-Sandoval L, Parrot JF, Nearing MA. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico[J]. *Catena*, 2010, 80: 162–169
- [7] 常雅军, 陈琦, 曹靖, 鲁海燕, 王威. 甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J]. *生态学报*, 2011, 31(9): 2 392–2 400
- [8] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 三峡库区典型流域退耕地植物种类及凋落物对土壤有机碳固定的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2 742–2 747
- [9] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 852–862
- [10] Sundermeier A. Zur Vegetationsdichte der Xerothermrassen Nordwestlich von Halle/Saale – Erfassungsmethoden, Strukturelle Vegetationstypen Undder Einfluß der Vegetationsdichte auf das reproduktive Potential von Xerothermrassenarten[M]. Berlin: J. Cramer, 1999
- [11] Lindberg E, Olofsson K, Holmgren J, Olsson H. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 151–161
- [12] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 陈涛, 岳庆玲, 李云驹. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 38–41
- [13] 李相玺, 左长清, 姚毅臣, 范明华. 花岗岩侵蚀区植被层次结构优化模式研究[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(1): 202–207
- [14] 何圣嘉, 谢锦升, 周艳翔, 胥超, 吕茂奎, 杨玉盛. 南方红壤侵蚀区马尾松林下植被恢复限制因子与改造技术[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 118–124
- [15] 盛炜彤. 不同密度杉木人工林林下植被发育与演替的定位研究[J]. *林业科学研究*, 2001, 14(5): 463–471
- [16] 赵汝东, 樊剑波, 何园球, 宋春丽, 屠人凤, 谭炳昌. 林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(2): 297–301
- [17] 陈志强, 陈志彪. 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变——以福建省长汀县为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(10): 3 002–3 010
- [18] 张海东, 于东升, 王宁, 史学正, 宋正姍, 顾成军. 植被恢复过程中侵蚀红壤有机质变化研究[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 856–861
- [19] Zheng G, Moskal LM. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: Theories, methods and sensors[J]. *Sensors*, 2009, 9: 2 719–2 745
- [20] 南京农业大学主编. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [22] 章明奎. 退化红壤肥力恢复性能与土壤性质的关系[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(3): 52–56
- [23] 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1): 135–139
- [24] Marzaioli R, D'Ascoli R, Pascale RAD, Rutigliano FA. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44: 205–212
- [25] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia[J]. *Geoderma*, 2006, 135: 335–344
- [26] Wang XJ, Gong ZT. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China[J]. *Geoderma*, 1998, 81: 339–355
- [27] Caravaca F, Figueroa D, Barea JM, Azcón-Aguilar C, Palenzuela J, Roldán A. The role of relict vegetation in maintaining physical, chemical, and biological properties in an abandoned *Stipa*-grass agroecosystem [J]. *Arid Land Res. Manag.*, 2003, 17: 103–111

Effect of Vertical Vegetation Structure on Soil Restoration Characteristic in Eroded Red Soil Region of Southern China

ZHANG Hai-dong^{1,2}, YU Dong-sheng^{1*}, DONG Lin-lin¹, SHI Xue-zheng¹, WANG Ning¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The effect of vertical vegetation structure (VVS) on normalized soil restoration index (NSRI) was studied in the eroded red soil areas of southern China, by obtaining the vegetation projected leaf area index (PLAI) and soil properties of 56 samples. The results showed the VVS and soil quality both well restored, the effect of VVS on the physicochemical properties of the eroded soil was remarkable. The restoration of heavy fraction organic carbon, total Nitrogen and clay content rank of different VVS was in order of pure forest < forest and grass < forest, shrub and grass, while the rank of bulk density was opposite. In the situation where PLAI > 0.2, soil properties improved with PLAI increased. The NSRI correlated significantly with PLAI ($r = 0.332^*$, $P < 0.05$). In general, the increase of vegetation layers was conducive to the improvement of soil restoration degrees in southern China, the shrub and grass vegetation was crucial to the restoration of the eroded red soil.

Key words: Vertical vegetation structure, Soil erosion, Projected leaf area index, Normalized soil restoration index