

DOI: 10.5846/stxb202102220488

杨帆, 郝梓君, 黄来明, 芦园园, 杨峰, 韩光中. 华西雨屏区植被恢复对紫色土酸化的影响. 生态学报, 2022, 42(4): 1410-1419.

Yang F, Hao Z J, Huang L M, Lu Y Y, Yang F, Han G Z. Effect of vegetation restoration on Purple soil acidification in rainy area of Western China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1410-1419.

## 华西雨屏区植被恢复对紫色土酸化的影响

杨帆<sup>1</sup>, 郝梓君<sup>1,2</sup>, 黄来明<sup>3,4</sup>, 芦园园<sup>5</sup>, 杨峰<sup>6</sup>, 韩光中<sup>1,\*</sup>

1 内江师范学院地理与资源科学学院, 土壤过程模拟实验室, 内江 641100

2 攀枝花市第三十二中小学校, 攀枝花 617066

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

4 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

5 生态环境部南京环境科学研究所, 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042

6 成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225

**摘要:**退耕还林是控制水土流失、恢复森林植被和改善生态环境的重要举措。植被恢复进程中会发生土壤酸化, 进而影响植物生长, 厘清不同还林树种对土壤酸化的影响程度及作用机制有助于更好地评估退耕还林工程的整体生态效益。以华西雨屏区紫色土坡耕地(玉米)为对照, 分析了退耕 20a 后柳杉纯林、柳杉-光皮桦混交林、慈竹林和茶园土壤 pH 的变化及其垂直分异。结果表明: 玉米地、慈竹林、茶园、混交林和柳杉纯林 0—50 cm 土壤 pH 平均值分别为 5.66、5.55、5.12、5.03 和 5.00, 相较于玉米地, 柳杉纯林、混交林和茶园土壤 pH 值显著下降( $P < 0.01$ ), 土壤酸化严重。相较于玉米地土壤 pH 值的均匀分布, 植被恢复不同类型人工林 pH 值随土壤深度的增加而增加, 10—50 cm 土壤 pH 值(4.89—5.90)显著高于 0—10 cm 土壤 pH 值(4.72—5.21) ( $P < 0.01$ ), 表层土壤酸化最明显。土壤 pH 值与土壤有机质含量呈极显著负相关, 而与风化指数 Na/K 比值呈显著正相关, 有机质含量和 Na/K 比值共同解释了土壤 pH 值变化的 53.9%, 表明植被恢复引起的土壤有机质积累与长石类矿物风化是驱动紫色土酸化的重要过程。通过对紫色土人工林酸化特征及其过程的揭示, 可为华西雨屏区森林生态系统恢复及其管理提供科学依据。

**关键词:**土壤酸化; 紫色土; 退耕还林; 植被类型; 土壤有机质

## Effect of vegetation restoration on Purple soil acidification in rainy area of Western China

YANG Fan<sup>1</sup>, HAO Zijun<sup>1,2</sup>, HUANG Laiming<sup>3,4</sup>, LU Yuanyuan<sup>5</sup>, YANG Feng<sup>6</sup>, HAN Guangzhong<sup>1,\*</sup>

1 Laboratory of Simulation on Soil Process, College of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China

2 Panzihua No. 32 Primary and Secondary School, Panzihua 617066, China

3 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

5 State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

6 College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

**Abstract:** The Chinese Grain for Green Project is crucial for controlling water and soil erosion, rehabilitation forest vegetation, and improvement of the environment. Soil acidification could be induced during the vegetation restoration, which

基金项目: 内江师范学院科研启动费项目(18B10); 四川省教育厅重点项目(17ZA0223)

收稿日期: 2021-02-22; 网络出版日期: 2021-11-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanguangzhong@163.com

has a negative impact on plant growth. It is important to clarify the degrees and mechanisms of the influences of reforestation species on soil acidification in order to achieve a better ecological benefit of the Grain for Green Project. In this study, we used the Purple soil of sloping farmland (planted *Zea mays*) as control group (SF) in rainy area of western China, and analyzed the changes and profile distribution of soil pH value after a 20-year farmland to artificial forestland with plant species of *Cryptomeria fortune* (CF), *Cryptomeria fortune* & *Betula luminifera* (MF), *Neosinocalamus affinis* (NA) and *Camellia sinensis* (CS). Results showed that the weighted average value of soil pH in the top 50 cm was 5.66 for SF, 5.55 for NA, 5.12 for CS, 5.03 for MF, and 5.00 for CF. Soil pH value of CF, MF and CS decreased significantly compared with SF ( $P < 0.01$ ), and these soils exhibited severe acidification. In addition, vegetation restoration increased the degree of vertical variations of soil pH for SF that showed a uniform profile distribution. By contrast, soil pH for artificial forests exhibited greater profile differentiations. Soil pH values (4.89—5.90) of the 10—50 cm layer for different artificial forests were significantly higher ( $P < 0.01$ ) than those (4.72—5.21) of the 0—10 cm layer suggesting that soil acidification was most intense for the top 10 cm. There were significantly negative correlations between soil pH value and soil organic matter content, while significantly positive correlation between soil pH value and Na/K ratio of weathering index was observed. 53.9% of the variation for soil pH was explained by soil organic matter content and Na/K ratio, indicating that the acidification of Purple soil in this area were driven by the accumulation of soil organic matter during the process of returning farmland to forests and sorts of feldspar weathering. By revealing the acidification characteristics and its processes for Purple soil, this study provides a scientific basis for future vegetation restoration and ecosystem management in rainy area of western China.

**Key Words:** soil acidification; Purple soil; Grain for Green Project; vegetation types; soil organic matter

酸化是土壤形成过程中产生  $H^+$ , 酸性增加的一种普遍现象<sup>[1-2]</sup>。自然条件下, 土壤酸化是一个缓慢的成土过程<sup>[3]</sup>; 近年来, 人为作用, 如施用化肥、改变土地利用方式、酸沉降等加剧了土壤酸化<sup>[4-8]</sup>。土壤酸化加速养分和盐基离子的淋失, 造成土壤养分保蓄能力及肥力下降; 活化金属离子(如铝、锰、重金属等), 毒害植物生长、危害水体; 降低土壤生物活动及其酶活性, 造成植被退化、农作物产量和品质下降等<sup>[3-4, 9-10]</sup>。因此, 土壤酸化改变了生态系统生物地球化学循环, 对生物群落产生有害作用, 造成土壤退化<sup>[3, 11]</sup>。林地是酸性土壤分布面积最大的生态系统, 其酸化现象严重<sup>[3, 5, 12-13]</sup>。植物和酸雨被认为是林地土壤酸化的两大成因, 关于植物对土壤酸化的影响已取得一系列共识: 林木根系吸收盐基离子同时释放  $H^+$  (以达电荷平衡) 引起的盐基离子重新分配、有机酸性物质的输入(林木凋落物分解形成腐殖质)和土壤呼吸产生  $CO_2$  (形成  $HCO_3^-$  淋失)<sup>[11, 14-16]</sup>。1949—1970 年间, 瑞典南部森林表层土壤 pH 下降了 0.5—1.0 个单位<sup>[12]</sup>; 1950—1980 年间德国森林 2 m 土壤 pH 下降了约 1 个单位<sup>[13]</sup>; 1980—2000 年间我国森林表层 30 cm 土壤 pH 平均下降了 0.36 个单位, 西南地区森林土壤 pH 下降程度最高<sup>[17]</sup>。自退耕还林工程实施以来, 我国森林覆盖率增加, 对全球绿化面积的增加贡献显著<sup>[18]</sup>, 但森林恢复也加速了土壤酸化<sup>[19]</sup>。比利时耕地改种阔叶林 35a 后, 表层 5 cm 土壤 pH 下降了 2—3.3 个单位, 树种类型是导致土壤酸化的重要因素<sup>[20]</sup>, 但退耕还林后植物加速土壤酸化的机理尚不明确。在退耕还林工程中, 科学合理地选择还林树种是有效控制水土流失、恢复自然生态环境的关键, 但不同树种对土壤酸化的影响程度及其差异的研究还十分匮乏。

华西雨屏区是四川盆地向青藏高原过渡区, 是四川省降雨量最丰富的地区之一, 也是我国水土流失及相关自然灾害频发区<sup>[21]</sup>。自 1999 年起, 该地区开展大规模退耕还林, 将坡耕地停止耕种, 改种杉树、光皮桦、竹子、茶树等恢复森林植被。紫色土是华西雨屏区分布最广的土壤资源, 由于紫色土化学成分具有较强的稳定性, 盐基得到母岩风化的不断补充, 使得紫色土对酸性物质的缓冲性较为复杂, 其酸化特征和过程仍不清楚<sup>[22]</sup>。基于此, 本研究以华西雨屏区紫色土坡耕地作为参考, 分析了柳杉纯林、柳杉-光皮桦混交林、慈竹林、茶园植被恢复 20a 后紫色土 pH 变化及其垂直分布特征, 对理解紫色土坡耕地植被恢复过程土壤酸化以及人

工林的经营管理具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

洪雅县(102°49′—103°47′ E, 29°24′—30°01′ N)是四川省退耕还林工程重点区域,位于四川盆地西南缘华西雨屏区,地貌以低山丘陵为主<sup>[19]</sup>。研究区属中亚热带湿润山地气候,降雨量 1300—2000 mm,降雨集中在 6—8 月,年均温 14—16℃,地带性植被为常绿阔叶林,广泛分布着发育于中生代紫色泥岩、砂岩和页岩的紫色土<sup>[19]</sup>。地质条件不稳定、降雨强度大以及耕作粗放、林地破坏等自然和人为原因导致水土流失严重。基于此,洪雅县于 1999 年启动退耕还林(草)工程。为了兼顾生态和经济效益,建立了生态林和经济林的复合还林模式,主要造林树种有柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、慈竹(*Neosinocalamus affinis*)、茶树(*Camellia sinensis*)等。1999—2006 年,洪雅县退耕还林面积达 14600 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率超过 65%。

### 1.2 样品采集与分析

2019 年对洪雅县退耕还林工程进行实地考察,设计以紫色土坡耕地(玉米地, SF)为对照,采集退耕后形成的代表性柳杉纯林(CF)、柳杉-桦树混交林(MF)、慈竹林(NA)、茶园(CS)紫色土为研究对象(表 1)。各样点挖掘三个标准土壤剖面,记录土壤剖面形态特征,按照 10 cm 间隔采集 0—50 cm(紫色土体浅薄)土壤分析样品和环刀原状样品。土壤样品挑去植物残体和侵入体,室内自然风干。风干土样过 10 目尼龙筛,记录砾石和细土重量;然后将细土在玛瑙研钵磨细,分别过 60 目和 100 目尼龙筛,保存备用。土壤理化属性分析参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[23]</sup>:土壤 pH,电位法(土水比 1: 2.5);土壤含水量、容重,环刀法;土壤比重,比重瓶法;土壤有机质,重铬酸钾-硫酸消化法;土壤全氮,凯氏定氮法;另外,土壤 K、Na 全量,碳酸锂-硼酸熔融法<sup>[24]</sup>。土壤化学指标均设置全程空白,并以国家标准土壤样品(GSS-3 和 GSS-5)作为质量控制。

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of sampling sites

编号 No.	地理位置 Geographical location	主要植被 Dominant vegetation	植被盖度 Vegetation coverage	土体构型 Soil profile configuration
SF	29.7063°N, 103.2481°E, 696 m	玉米	80%	Ap-Bw-BC-C
CF	29.7058°N, 103.2481°E, 708 m	柳杉	85%	Ah-Bw-BC-C
MF	29.7090°N, 103.2427°E, 654 m	柳杉、光皮桦	90%	Ah-Bw-BC-C
NA	29.6927°N, 103.2394°E, 614 m	慈竹	80%	Ah-Bw-BC-C
CS	29.7063°N, 103.2482°E, 698 m	茶树	65%	Ap-Bw-Br-BC-C

Ap, 耕作层 Plough horizon; Ah, 腐殖质层 Humus horizon; Bw, 雏形层 Cambic horizon; Br, 氧化还原层 Redox horizon; BC, 过渡层 BC transitional horizon; C, 母质层 C horizon; SF 为玉米地 Cornfield; CF 为柳杉纯林 *Cryptomeria fortunei* forest; MF 为混交林 Mixed forest; NA 为慈竹林 *Neosinocalamus affinis* woodland; CS 为茶园 Tea plantation

### 1.3 数据分析

土壤孔隙是容纳水分和空气的空间,也是水分迁移的通道。本研究运用容重的经验公式对土壤孔隙度进行计算<sup>[23]</sup>。

$$f = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100$$

式中,  $f$  为土壤总孔隙度(%),  $\rho_b$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\rho_s$  为土壤比重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

采用 SPSS 24.0 统计软件进行不同植被类型土壤属性间、同一植被类型下不同土层间土壤 pH 值的方差分析(ANOVA)和土壤属性间相关分析(Pearson),并运用线性逐步回归来解释不同土壤属性对紫色土酸化的

影响(筛选并剔除引起多重共线性的变量,使得保留在模型中的解释变量是最重要的),采用 OriginPro 2016 软件进行图像化处理。

## 2 结果

### 2.1 不同植被恢复后紫色土理化属性的变化

不同植被类型下土壤有机质和全氮含量分别为 7.15—38.63 g/kg 和 0.53—1.91 g/kg(图 1)。玉米地各层土壤有机质和全氮含量最低(10—20 cm 除外),显著低于退耕还林后土壤( $P < 0.05$ ),植被恢复促进了土壤有机质和氮的积累,以茶园土壤最为明显。土壤全 K 含量为 18.69—34.59 g/kg,柳杉纯林各层土壤全 K 含量最高,显著高于其他土壤( $P < 0.05$ ),玉米地土壤次之,慈竹林土壤最低(图 1)。土壤全 Na 含量为 5.80—17.01 g/kg,玉米地各层土壤全 Na 含量最高,显著高于退耕还林后土壤( $P < 0.05$ ),茶园土壤次之,慈竹林土壤最低(图 1)。

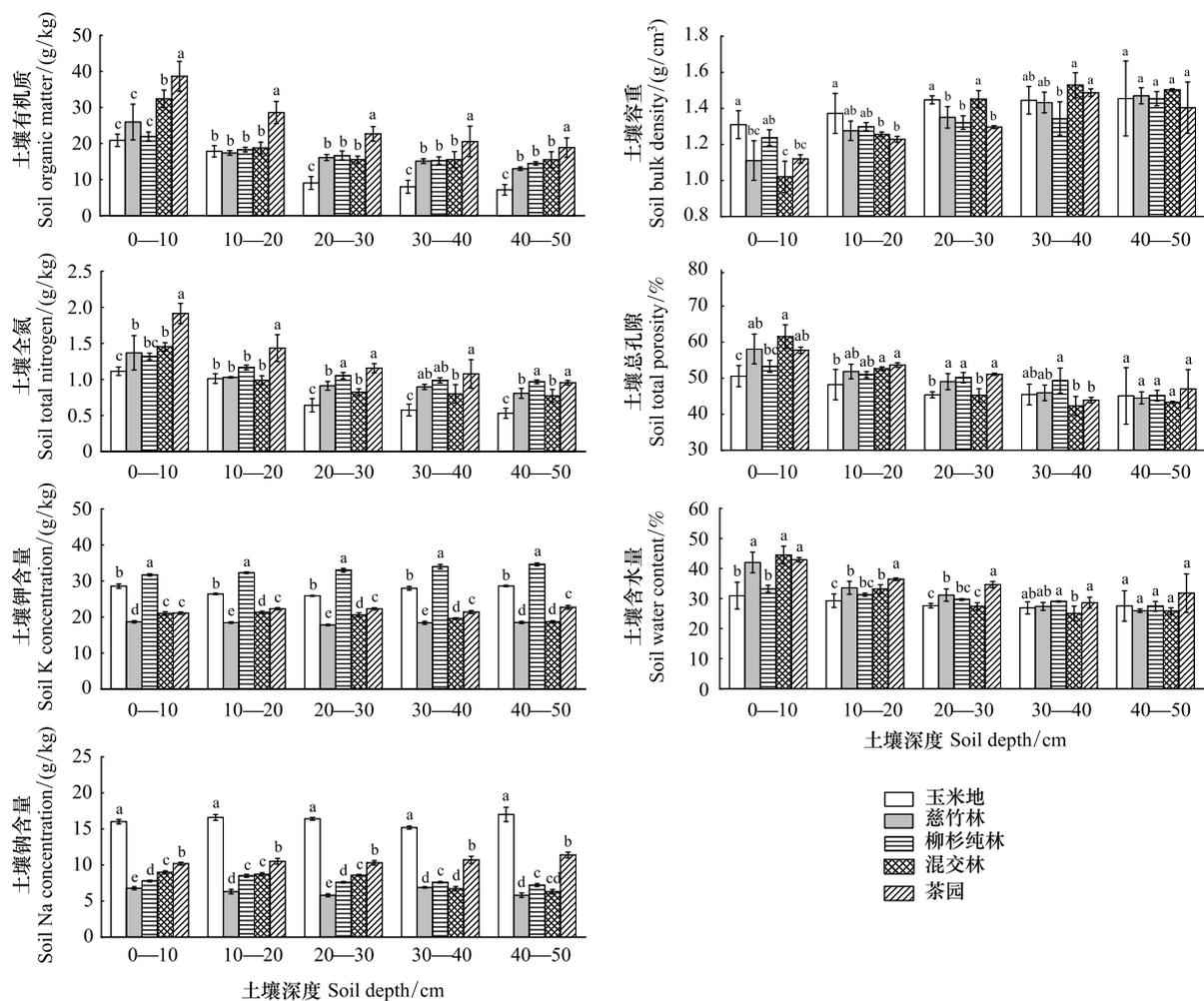


图 1 不同植被类型土壤理化属性

Fig.1 Selected soil physico-chemical properties in different vegetation types

不同小写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著( $P < 0.05$ ),图中数据为平均值 $\pm$ 标准差( $n = 3$ )

土壤容重为 1.02—1.50 g/cm<sup>3</sup>(图 1)。0—20 cm 土壤容重,玉米地土壤最高,柳杉纯林土壤次之,混交林土壤最低;20—50 cm 土壤容重,混交林土壤最高,玉米地土壤次之,柳杉纯林土壤最低(40—50 cm 除外)(图 1)。土壤总孔隙度为 42.32%—61.51%(图 1)。0—20 cm 土壤总孔隙度,混交林土壤最高,茶园土壤次之,玉

米地土壤最低;20—40 cm 柳杉纯林土壤总孔隙度显著高于其他土壤 ( $P < 0.05$ ), 不同植被类型 40—50 cm 土壤总孔隙度差异不显著 ( $P > 0.05$ )。土壤含水量为 25.05%—44.46% (图 1)。0—20 cm 土壤含水量, 混交林土壤最高, 茶园土壤次之, 玉米地土壤最低 (图 1)。综上表明华西雨屏区植被恢复有利于降低表层土壤容重、增加表层土壤孔隙度和含水量, 改善了紫色土物理状况。

## 2.2 不同植被恢复后紫色土 pH 的变化及其剖面分异

不同植被类型 0—50 cm 土壤 pH 加权平均值 ( $n = 3$ ) 为 5.00—5.66 (图 2), 玉米地 ( $5.66 \pm 0.45$ ) > 慈竹林 ( $5.55 \pm 0.05$ ) > 茶园 ( $5.12 \pm 0.05$ ) > 混交林 ( $5.03 \pm 0.05$ ) > 柳杉纯林 ( $5.00 \pm 0.03$ )。以玉米地为参照, 慈竹林 0—50 cm 土壤 pH 加权平均值下降 0.11 个单位, 差异不显著; 而茶园、混交林和柳杉纯林 0—50 cm 土壤 pH 加权平均值分别下降了 0.54、0.63 和 0.66 个单位, 显著下降 ( $P < 0.01, n = 15$ )。茶园、混交林和柳杉纯林土壤酸性增强, 紫色土由酸性变为强酸性。

不同植被类型土壤 pH 值垂直分布特征见图 3。玉米地各层土壤 pH 值为 5.54—5.73, 呈酸性; 相邻土层 pH 值差异不显著 ( $P > 0.05, n = 15$ ), 且不同土层 pH 的变异系数 ( $CV = 1.5\%$ ), 变异弱, pH 在玉米地土壤剖面中呈均一分布。慈竹林各层土壤 pH 值为 5.21—5.90,  $CV = 5.3\%$ , 随土壤深度的增加而增加; 0—20 cm 土壤 pH 值显著低于 20—50 cm 土壤 ( $P < 0.01, n = 15$ ), 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤 pH 值较 40—50 cm 土壤分别降低了 0.69 和 0.61 个单位。茶园各层土壤 pH 值为 4.79—5.42, 呈强酸性,  $CV = 5.1\%$ , 随土壤深度的增加而增加; 0—10 cm 土壤 pH 值显著低于 10—50 cm 土壤 ( $P < 0.01, n = 15$ ), 较 40—50 cm 土壤 pH 值下降 0.63 个单位。柳杉纯林和混交林各层土壤 pH 值为 4.72—5.26, 呈强酸性,  $CV$  分别为 4.3% 和 2.2%, 均随土壤深度的增加先增加后降低, 在 30—40 cm 处达到最大值, 但 40—50 cm 与 30—40 cm 土壤 pH 值差异不显著 (图 3); 柳杉纯林和混交林 0—10 cm 土壤 pH 值显著低于其下部土壤 ( $P < 0.01, n = 15$ ), 较 40—50 cm 土壤 pH 值分别下降了 0.24 和 0.45 个单位。

华西雨屏区植被恢复 20a 后, 人工林紫色土 pH 值总体随土壤深度的增加而增加。以母质层 (40—50 cm) 为参照, 慈竹林、柳杉纯林、混交林和茶园 0—10 cm 土壤 pH 值下降了 0.24—0.69 个单位, 呈显著下降趋势。华西雨屏区植被恢复不仅引起了土壤酸化, 同时也改变了土壤 pH 值的剖面分异, 由玉米地的均一分布模式转变为随土壤深度的增加而增加分布特征, 表层 0—10 cm 土壤酸化明显。

## 2.3 土壤 pH 值与理化属性的相关性分析

土壤 pH 值与土壤有机质 (SOM)、全氮均呈极显著负相关关系 (图 4)。植被恢复增加了林地生物量及其凋落物返还土壤, 有利于土壤腐殖质的积累, 土壤有机质和全氮含量增加; 另外, 凋落物分解形成土壤腐殖质过程产生  $H^+$ 。因此, 人工林土壤形成腐殖质的过程, 土壤有机质和全氮含量增加, pH 值降低, 土壤酸化。水和孔隙是土壤元素溶解、运移的载体和通道, 土壤 pH 与土壤总孔隙度、含水量呈极显著负相关关系 (图 4)。Na/K 比值是表征土壤风化的重要参数, 土壤 pH 值与土壤 Na/K 比值呈显著正相关关系 (图 4)。在相关分析的基础上, 对土壤 pH 值进行逐步回归分析。回归模型为:  $pH = -0.029SOM + 0.723Na/K + 5.35$ , 模型通过显著性检验 ( $P < 0.01, n = 25$ ), 其决定系数  $R^2 = 0.539$ , 表明土壤有机质含量与 Na/K 比值共同解释了土壤 pH 变异的 53.9%, 土壤有机质积累和风化是紫色土酸化的重要驱动因素。

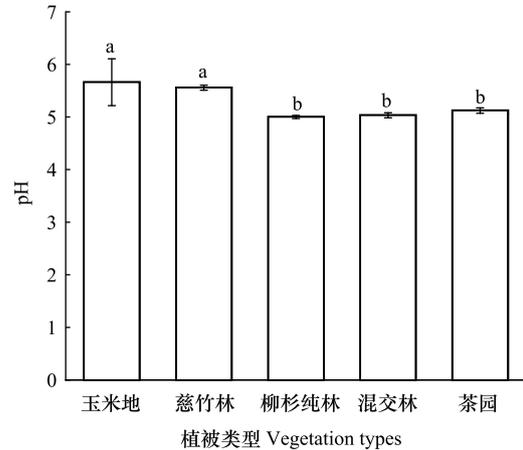


图 2 不同植被类型 0—50 cm 土壤 pH 加权平均值

Fig. 2 The weighted average soil pH value within 0—50 cm in different vegetation types

不同小写字母表示不同植被类型间土壤 pH 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图中数据为平均值  $\pm$  标准差 ( $n = 3$ )

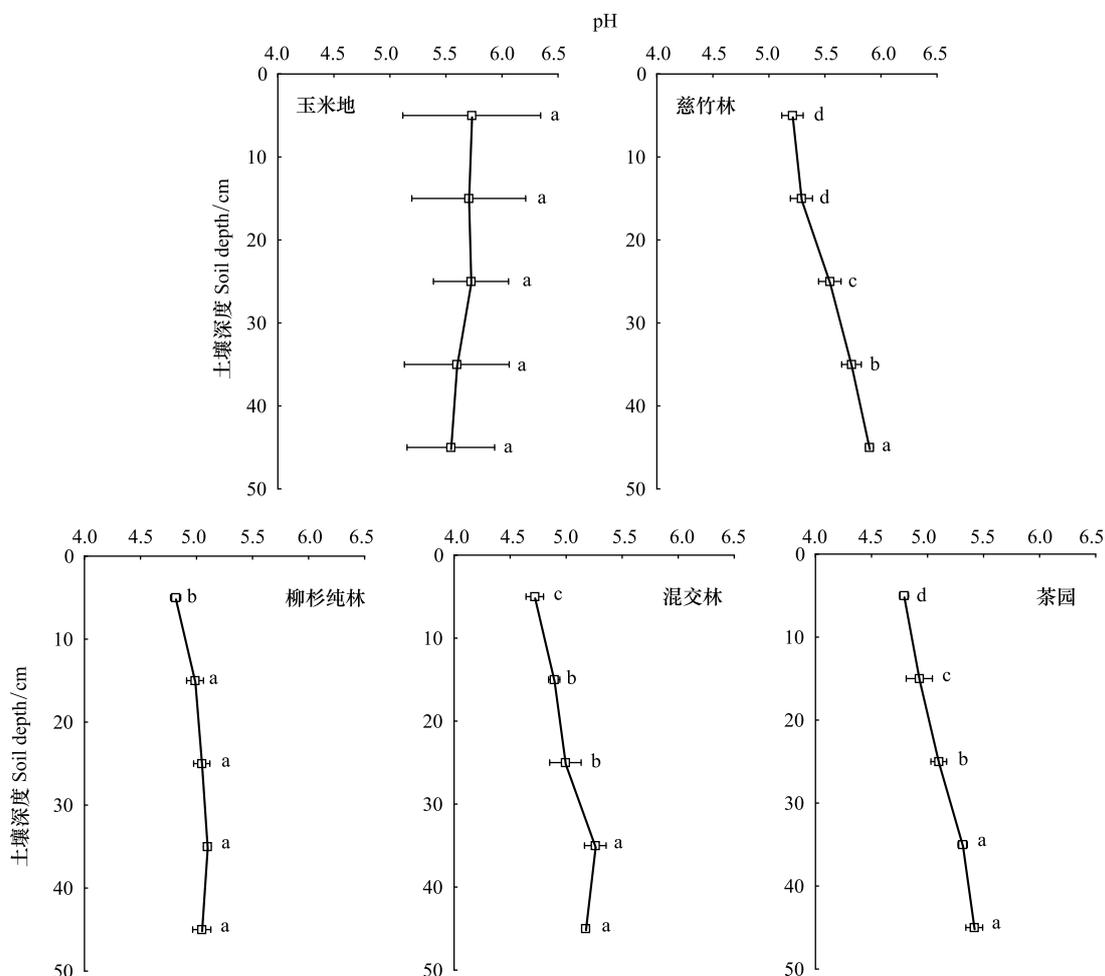


图3 不同植被类型土壤 pH 的垂直分布

Fig.3 The vertical distribution of soil pH in different vegetation types

不同小写字母表示同一植被类型不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图中数据为平均值  $\pm$  标准差 ( $n = 3$ )

### 3 讨论

#### 3.1 植被类型对紫色土酸化的影响

研究区定位 ( $n = 3$ ) 试验表明 2006 年紫色土坡耕地表层 (0—20 cm) 土壤 pH 值约为 5.6<sup>[25]</sup>, 这与本研究紫色土坡耕地表层土壤 pH 值相当, 其相对变化小于 1%, 表明本研究选用紫色土坡耕地作为参照是合理的。研究区植被恢复 20a 后紫色土 pH 值均呈下降趋势, 慈竹林土壤 pH 值下降不显著, 柳杉纯林、混交林 (柳杉为建群种) 和茶园土壤 pH 值则呈显著下降趋势, 表明不同植物类型对紫色土酸化的影响程度不同。在华西雨屏区, 胡慧蓉对雅安退耕还林区的研究表明紫色土坡耕地植被恢复 30a 后, 柳杉林、慈竹林 0—20 cm 土壤 pH 值分别降低了 0.97 和 0.25 个单位, 种植柳杉造成土壤表层明显酸化<sup>[26]</sup>。Jackson 等<sup>[19]</sup>的研究表明大规模种树可能造成土壤酸化, 柳杉生长迅速<sup>[27]</sup>, 樊吉尤等<sup>[28]</sup>研究表明广西柳杉成年林平均每年净生产力为 7.89 t/hm<sup>2</sup>, 柳杉从土壤中吸收盐基阳离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  和  $\text{Na}^{+}$ ) 的同时, 为保持土壤体系的电荷平衡, 向土壤溶液释放  $\text{H}^{+}$ , 使土壤酸性增强。土壤腐殖质的形成过程是土壤自然酸化过程之一<sup>[11]</sup>, 柳杉成年林每年凋落物为 8.89 t/hm<sup>2</sup> (叶片年凋落量为 1.88 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[29]</sup>, 而 30 年龄的柳杉林凋落物可达 9.60 t/hm<sup>2</sup><sup>[26]</sup>, 凋落物分解形成土壤腐殖质过程中, 尤其以萜类、醇类及酸类为主的叶片在分解过程中产生大量的酸性物质, 进入土壤造成 pH 值下降。本研究的结果表明植被恢复有利于人工林地土壤腐殖质积累, 其土壤有机质含量显著增加, 而土

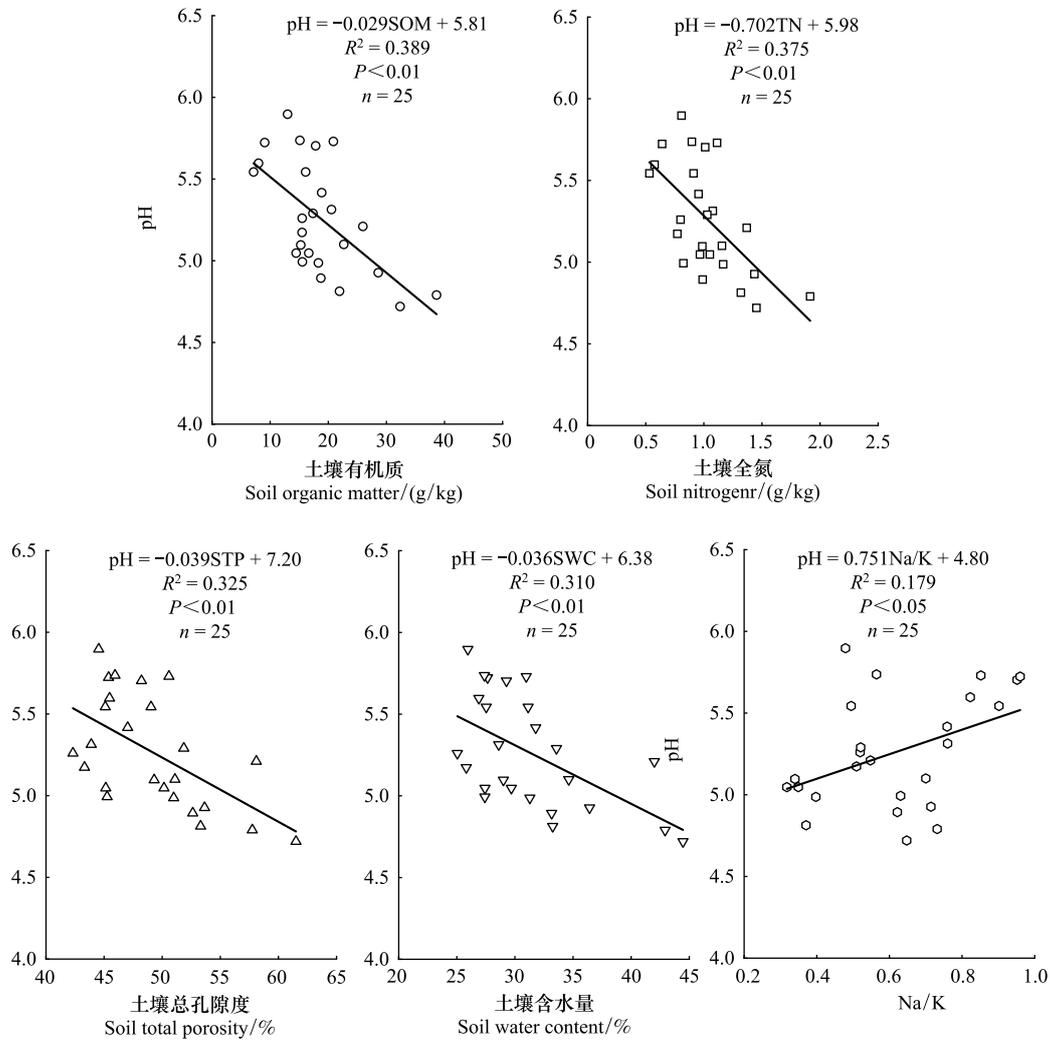


图 4 土壤 pH 值与土壤有机质、全氮、总孔隙度、含水量及其 Na/K 比值相关性

Fig.4 Relationship between soil pH value with soil organic matter (SOM), soil total nitrogen (TN), soil total porosity (STP), soil water content (WSC), and Na/K ratio

壤 pH 值则显著下降,两者呈极显著负相关关系(图 4)。本研究中柳杉-光皮桦混交林土壤 pH 高于柳杉纯林,酸化程度低于柳杉纯林,这与张鼎华等<sup>[30]</sup>在宁德市杉木混交林的研究结果相似。一方面柳杉初级生产力高于光皮桦<sup>[31]</sup>,柳杉纯林比混交林从土壤吸收更多的盐基物质,释放更多的  $H^+$  到土壤溶液;另一方面柳杉落叶凋落物酸不溶组分含量高于阔叶树光皮桦<sup>[32]</sup>,土壤形成腐殖质过程中产生更多的酸性物质。相对于混交林,柳杉纯林树种单一,林木竞争生存环境产生自毒作用分泌有机酸和酚类物质,增加了土壤  $H^+$  的来源<sup>[33]</sup>。

1980—2000 年间,我国茶园 0—20 cm 土壤 pH 值下降了 0.47—1.43 个单位,茶园土壤酸化问题突出<sup>[34]</sup>。本研究紫色土坡耕地种植茶树 20a 后 0—20 cm 土壤 pH 下降 0.77—0.99 个单位,茶园土壤酸化明显。茶树自身的生长发育特性与茶园管理是造成土壤酸化的主要原因<sup>[34—37]</sup>。茶树生长吸收大量养分(包括盐基离子)和  $Al^{3+}$ (富集在叶片),通过离子交换作用向土壤释放  $H^+$ ,经过土壤-植物元素的生物化学循环引起土壤酸化(图 5)。另外,茶树凋落物、修剪物归还茶园和茶树根系代谢物(单宁酸)分别以凋落物和分泌物形式进入土壤<sup>[34,37]</sup>,进一步加速土壤酸化并活化  $Al^{3+}$ 。因此,退耕还林种植茶树促进了紫色土向高酸度、高活性铝的方向演化。

### 3.2 紫色土酸化的土壤过程

土壤腐殖质指有机物经微生物分解转化形成一种构造复杂的大分子胶体,是土壤有机质存在的主要形

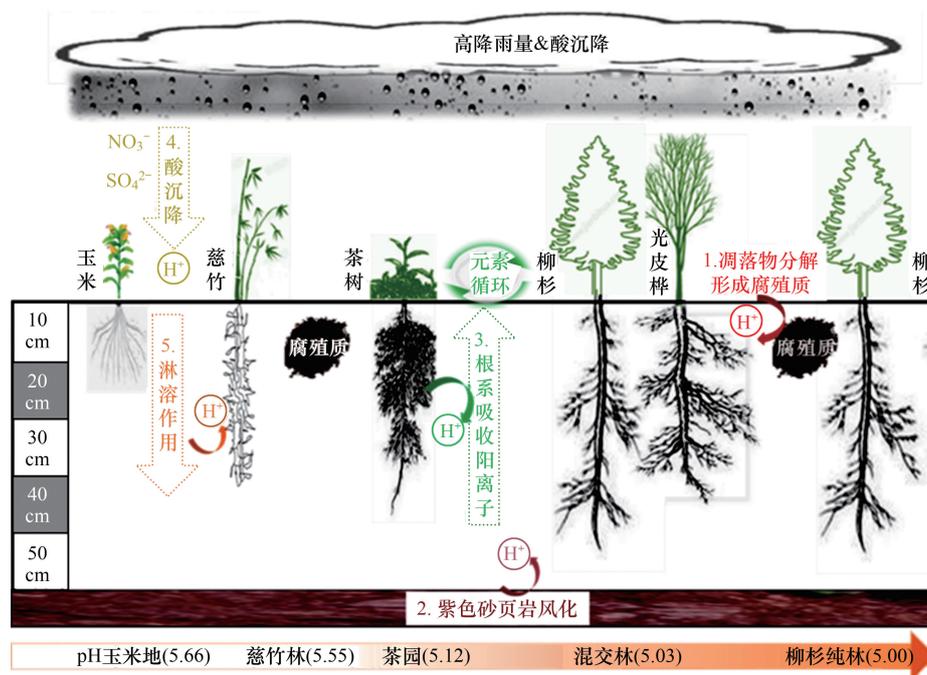


图 5 华西雨屏区植被恢复紫色土酸化示意图

Fig.5 Conceptual diagram of Purple soil acidification during the progress of Grain for Green Project in rainy area of western China

式。腐殖质按在酸、碱中溶解性的差异分为胡敏酸、富里酸和胡敏素,呈弱酸性<sup>[38]</sup>。华西雨屏区植被恢复进程中增加了人工林凋落物的归还,在微生物作用下形成腐殖质,显著提高了紫色土有机质含量,以表层土壤(0—10 cm)最为明显。腐殖质形成过程产生大量有机酸进入土壤,引起土壤酸化(图 5)。因此,植被恢复过程人工林紫色土表层 0—10 cm 酸化严重。本研究表明树种对退耕还林区紫色土的酸化程度影响不同,这与 De Schrijver<sup>[20]</sup>的研究结果相似:不同树种叶片组成及其凋落物分解速率具有明显差异,植被类型是影响比利时退耕还林土壤酸化的主要因素。另外,植被类型对矿质养分在土壤-植物的生物循环过程也具有重要影响,植物吸收盐基阳离子的种类、总量不同,释放  $H^+$  总量不同,这是森林土壤酸化的主要过程之一(图 5)。为了更加全面地理解华西雨屏区紫色土酸化的进程,将来应加强植物生理过程对土壤酸化的研究,为人工林的管理提供全面的参考。

紫色砂页岩矿物组成复杂,易风化的长石类矿物丰富<sup>[39—40]</sup>,因此,紫色土成土速度快,在风化过程中快速地消耗  $H^+$ ,同时释放  $Na^+$  和  $K^+$ ,在降雨丰富的气候条件下, $Na^+$  优先被淋失,部分  $K^+$  则转化形成伊利石或蛭石等黏土矿物保存下来,淋溶作用使土壤胶体表面吸附的盐基离子减少,土壤 pH 值下降<sup>[11, 41]</sup>。本研究中紫色土快速风化,土壤  $Na/K$  比值增加,而土壤 pH 值下降(图 4)。表明紫色砂页岩含有丰富的长石类矿物风化是华西雨屏区紫色土酸化的重要特征(图 5)。

华西雨屏区位于四川盆地到青藏高原过渡地理单元,是四川省降雨量最丰富的地区之一<sup>[21]</sup>。成都平原产生的  $NO_3$  和  $SO_2$  受华西雨屏区地形影响,形成酸雨沉降下来,造成土壤酸化<sup>[42—43]</sup>。另外, Huang 等研究表明我国南方酸沉降不仅直接向土壤中输入  $H^+$ ,而且还会通过氮素转化间接产生  $H^+$ ,加剧土壤酸化过程<sup>[6]</sup>。华西雨屏区人工林的形成增加了林冠对酸雨的截留,减少了地表径流<sup>[44]</sup>,增加了土壤下渗;另外,植被恢复改善了紫色土物理状况,表层土壤总孔隙度和含水量增加,较高的土壤孔隙度和含水量,有利于紫色土铁锰氧化物的水化和盐基离子淋溶,造成土壤 pH 值下降(图 5)。本研究主要探讨植被类型和土壤形成过程对紫色土酸化的影响,酸沉降对华西雨屏区紫色土酸化的贡献未来仍需要进一步研究。

#### 4 结论

紫色土酸化是土壤-植物-大气系统中相互作用的结果。本研究表明植物类型是影响华西雨屏区紫色土酸化的重要因素,柳杉和茶树的植被恢复模式造成了紫色土酸化明显。植被恢复提升了紫色土有机质含量,凋落物分解形成土壤腐殖质引起紫色土酸化,以表层 0—10 cm 土壤最为明显;另外,紫色砂页岩长石类矿物快速风化及其随后盐基离子重新分配是华西雨屏区紫色土酸化的重要特征。本研究结果可为紫色土退耕还林区土壤酸化治理及其构建可持续人工林生态系统提供依据和参考。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Reuss J O, Cosby B J, Wright R F. Chemical processes governing soil and water acidification. *Nature*, 1987, 329(6134): 27-32.
- [ 2 ] Yang J L, Zhang G L, Huang L M, Brookes P C. Estimating soil acidification rate at watershed scale based on the stoichiometric relations between silicon and base cations. *Chemical Geology*, 2013, 337-338: 30-37.
- [ 3 ] Von Uexküll H R, Mutert E. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 1995, 171(1): 1-15.
- [ 4 ] Van Breemen N, Burrough P A, Velthorst E J, Van Dobben H F, De Wit T, Ridder T B, Reijnders H F R. Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall. *Nature*, 1982, 299(5883): 548-550.
- [ 5 ] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [ 6 ] Huang L M, Yang J L, Thompson A, Rossiter D G, Zuo S M, Zhang G L. Proton production from nitrogen transformation drives stream export of base cations in acid-sensitive forested watersheds. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 348-357.
- [ 7 ] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [ 8 ] Yu Z P, Chen H Y H, Searle E B, Sardans J, Ciais P, Peñuelas J, Huang Z Q. Whole soil acidification and base cation reduction across subtropical China. *Geoderma*, 2020, 361: 114107.
- [ 9 ] Chadwick O A, Chorover J. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma*, 2001, 100(3/4): 321-353.
- [ 10 ] 许中坚, 刘广深, 俞佳栋. 氮循环的人为干扰与土壤酸化. *地质地球化学*, 2002, 30(2): 74-78.
- [ 11 ] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展. *土壤*, 2015, 47(2): 238-244.
- [ 12 ] Falkengren-Grerup U. Long-term changes in pH of forest soils in southern Sweden. *Environmental Pollution*, 1987, 43(2): 79-90.
- [ 13 ] Grenzius R. Strong acidification of berlin's forest soils. *European Journal of Forest Research*, 1984, 103(1): 131-139.
- [ 14 ] Hagenthorn A, Callesen I, Armolaitis K, Nihlgård B. The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land. *Forest Ecology and Management*, 2004, 195(3): 373-384.
- [ 15 ] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [ 16 ] Jobbágy E G, Jackson R B. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests. *Biogeochemistry*, 2003, 64(2): 205-229.
- [ 17 ] Zhu Q C, De Vries W, Liu X J, Zeng M F, Hao T X, Du E Z, Zhang F S, Shen J B. The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 215-222.
- [ 18 ] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [ 19 ] Jackson R B, Jobbágy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, Le Maitre D C, McCarl B A, Murray B C. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [ 20 ] De Schrijver A, De Frenne P, Staelens J, Verstraeten G, Muys B, Vesterdal L, Wuyts K, Van Nevel L, Schelfhout S, De Neve S, Verheyen K. Tree species traits cause divergence in soil acidification during four decades of postagricultural forest development. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 1127-1140.
- [ 21 ] 庄平, 高贤明. 华西雨屏带及其对我国生物多样性保育的意义. *生物多样性*, 2002, 10(3): 339-344.
- [ 22 ] 刘莉, 杨丽军, 白颖艳, 程永毅, 李忠意. 土壤酸化的研究进展. *贵州农业科学*, 2017, 45(10): 83-87.
- [ 23 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [ 24 ] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012.
- [ 25 ] 徐艳梅. 四种退耕还林(草)模式土壤理化性质及酶活性动态研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.

- [26] 胡慧蓉. 华西雨屏区几种植被恢复类型生态系统碳氮储量及磷钾状况的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- [27] 杨家慧, 谭伟, 冯艳. 不同龄组柳杉人工林土壤肥力特征. 森林与环境学报, 2019, 39(5): 505-514.
- [28] 樊吉尤, 覃德文, 蒋林, 秦武明. 柳杉人工林生物量及生产力研究. 福建林业科技, 2011, 38(4): 1-5.
- [29] 陈爱玲, 林思祖, 何宗明, 陈元镇. 杉木多代连栽地长期轮栽柳杉后凋落物的动态. 北华大学学报(自然科学版), 2006, 7(5): 455-459.
- [30] 张鼎华, 陈天成, 庄在文. 杉木、柳杉混交林土壤肥力演变的调查研究. 福建林学院科技, 1982, 2: 30-40.
- [31] 谢云, 王洪荣, 黄从德. 四川洪雅林场森林植被碳储量的空间分布特征研究. 四川林业科技, 2016, 37(4): 14-18.
- [32] 何聪, 任颖, 麦淑媛, 袁吉, 游成铭, 王旭熙, 吴福忠. 华西雨屏区几种乡土树种不同物候关键时期凋落物的有机组分特征. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 9-15.
- [33] 夏丽丹, 于姣姐, 邓玲玲, 李小艳, 周垂帆, 徐永兴. 杉木人工林地力衰退研究进展. 世界林业研究, 2018, 31(2): 37-42.
- [34] Yan P, Wu L Q, Wang D H, Fu J Y, Shen C, Li X, Zhang L P, Zhang L, Fan L C, Wenyan H. Soil acidification in Chinese tea plantations. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136963.
- [35] Ruan J Y, Ma L F, Shi Y Z, Zhang F S. Effects of litter incorporation and nitrogen fertilization on the contents of extractable aluminium in the rhizosphere soil of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Plant and Soil*, 2004, 263(1): 283-296.
- [36] Wang H, Xu R K, Wang N, Li X H. Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in Eastern China. *Pedosphere*, 2010, 20(6): 799-806.
- [37] 苏有健, 廖万有, 王焯军, 张永利, 罗毅, 胡善国. 单宁酸对不同 pH 茶园土壤中活性铝形态分布的影响. 中国生态农业学报, 2014, 22(1): 22-30.
- [38] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2010.
- [39] 何毓容, 赵燮京, 田光龙, 潘乐华. 紫色土的矿物组成特点及对土壤肥力的影响. 土壤通报, 1987, 2(1/2): 251-254.
- [40] 王朋顺, 李忠意, 冯勃, 程永毅, 曾小桐, 谭孟溪, 严宁珍. 微地形下紫色土的矿物组成和 pH 的耦合特征. 水土保持学报, 2018, 32(4): 310-314.
- [41] Kirkwood D E, Nesbitt H W. Formation and evolution of soils from an acidified watershed; Plastic Lake, Ontario, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(5): 1295-1308.
- [42] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 李仁洪, 何远洋, 田祥宇, 肖银龙, 景建飞. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤活性有机碳库和根生物量的影响. 生态学报, 2010, 30(9): 2286-2294.
- [43] Tu L H, Peng Y, Chen G, Hu H L, Xiao Y L, Hu T X, Liu L, Tang Y. Direct and indirect effects of nitrogen additions on fine root decomposition in a subtropical bamboo forest. *Plant and Soil*, 2015, 389(1): 273-288.
- [44] 赵海蓉, 帅伟, 李静, 吴福忠, 杨万勤, 谭波. 华西雨屏区几种典型人工林降雨截留分配特征. 水土保持学报, 2014, 28(6): 94-100.