

# 不同植被恢复模式对退化花岗岩红壤 渗透性和持水量的影响

白永会<sup>1,2</sup>, 查轩<sup>3</sup>, 吴伟成<sup>1</sup>, 毛兰花<sup>4</sup>

(1.东华理工大学 江西省数字国土重点实验室, 江西 南昌 330013; 2.东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3.福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 4.韶关学院 旅游与地理学院, 广东 韶关 512005)

**摘要:** [目的] 研究不同植被恢复模式对退化花岗岩红壤渗透性和持水量的影响, 为该区水土保持和红壤退化地的精准恢复提供理论依据。[方法] 采用野外调查、室内分析和环刀法, 以严重退化花岗岩红壤和自然林为对照, 对不同植被恢复模式下退化花岗岩红壤的土壤渗透性和持水量进行研究。[结果] 不同植被恢复模式和对照样地的土壤渗透性均随土层深度的增加而降低, 土壤入渗特征值均表现为: 初始入渗率 > 平均渗透率 > 稳定入渗率; 不同植被恢复模式与对照样地比较, 土壤渗透性指标和前 30 min 土壤渗透总量数值顺序为: 自然林 > 乔灌草 > 条沟草灌 > 封禁 > 低效林改造 > 全坡面播草 > 严重退化地; 0—40 cm 土壤持水量的顺序为: 自然林 > 乔灌草模式 > 条沟草灌 > 封禁 > 低效林改造 > 全坡面播草 > 严重退化地。0—5 cm 土壤渗透性指标和土壤理化指标的冗余分析表明, 土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值、粉粒含量是改善土壤渗透性的因子, 而土壤硬度、土壤容重、黏粒和砂砾含量是制约土壤渗透性的因子。[结论] 5 种植物恢复模式中乔灌草植被恢复模式是改善土壤渗透性和持水量的最佳模式。

**关键词:** 植被恢复模式; 退化花岗岩红壤; 渗透性; 持水量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0009-07

中图分类号: S152.7

**文献参数:** 白永会, 查轩, 吴伟成, 等. 不同植被恢复模式对退化花岗岩红壤渗透性和持水量的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 9-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.002; Bai Yonghui, Zha Xuan, Wu Weicheng, et al. Effects of different vegetation restoration types on permeability and water holding capacity of degraded granite red soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 9-15.

## Effects of Different Vegetation Restoration Types on Permeability and Water Holding Capacity of Degraded Granite Red Soil

Bai Yonghui<sup>1,2</sup>, Zha Xuan<sup>3</sup>, Wu Weicheng<sup>1</sup>, Mao Lanhua<sup>4</sup>

(1.Key Laboratory of Digital Lands and Resources and Faculty of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2.School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3.School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China; 4.College of Tourism and Geography, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong 512005, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different vegetation restoration types on the permeability and water holding capacity of degraded granite red soil were studied in order to provide a theoretical basis for soil and water conservation and accurate restoration of degraded red soil in this area. [Methods] With seriously degraded granite red soil and natural forest (NV) as the control treatment, we determined the soil permeability and soil water holding capacity of degraded granite red soil under different vegetation restoration types using field investigation, laboratory analysis, and the ring knife method. [Results] Soil permeability decreased with increasing soil depth for different vegetation restoration types. The characteristic values of soil infiltration followed the order of initial infiltration rate > average infiltration rate > stable infiltration rate. The soil

收稿日期: 2022-06-09

修回日期: 2022-08-15

资助项目: 东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放基金项目(DLLJ202003); 国家重点研发计划课题“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC0505403); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2019004)

第一作者: 白永会(1981—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 讲师, 主要从事植被生态恢复研究。Email: fjbaiyonghui@163.com。

通讯作者: 查轩(1961—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 教授, 博士生导师, 主要从事植被生态恢复研究。Email: xzha@fjnu.edu.cn。

permeability and the total amount of soil permeability in the first 30 min for the different vegetation types were compared with that of NV. Soil permeability and total soil permeability in the first 30 min followed the order of NV > arbor, shrub, grass (ASG) > grass in irrigation ditches (GGH) > closed canopy (CC) > low-efficiency forest transformation (IFT) > grass sown in the whole slope (FSG) > severely degraded land (HDL). The sequence of saturated water storage in the 0—40 cm soil layer followed the order of NV > ASG > GGH > CC > IFT > FSG > HDL. Redundancy analysis of soil permeability indexes and soil physical and chemical properties from the 0—5 cm soil layer showed that soil hardness, soil bulk density, silt content, and sand content were the factors that restricted soil permeability, and soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium, available potassium, pH value, and clay content were the important factors that could increase soil permeability. [Conclusion] ASG was the best vegetation restoration type to increase soil permeability and water holding capacity.

**Keywords:** vegetation restoration types; degraded granite red soil; permeability; water holding capacity

土壤渗透性是指降水以及其他形式的地表水进入土壤的过程,其渗透能力决定了灌溉、降水过程中地面径流量的调节和转换,是反映土壤涵养水源和水土保持功能的重要参数<sup>[1-2]</sup>。土壤入渗性能越好,地表径流量越小,林木水分利用效率高,植物生长旺盛,发生土壤侵蚀概率小,是影响土壤侵蚀和土壤的水源涵养作用重要因素之一,是土壤水文效应评价的重要指标<sup>[3-5]</sup>。土壤渗透性也是评价植被恢复下土壤水分调节能力的重要指标,与地表径流、表土结构、土壤密度、土壤孔隙状况、土壤持水量及植被特征等多种因素有关。有关土壤入渗与持水量的研究国内外已有大量报道<sup>[6]</sup>。国外主要集中在土壤入渗过程机理及模型方面<sup>[7-8]</sup>。国内研究<sup>[9-11]</sup>表明,土壤渗透能力与土壤容重、孔隙度等物理性质关系显著或极显著,与土壤有机质、氮、磷、钾等化学性质有直接或间接的关系。还与降雨强度、植被类型、植被根系结构、土壤理化性质、土壤种类、土壤微生物和土壤动物等有关。因此,探讨红壤区植被恢复下土壤水分入渗对于改善土壤退化和预防土壤侵蚀的防治具有十分重要的意义。中国是世界上遭受水力侵蚀引起的土壤退化的国家之一<sup>[12]</sup>,其中南方红壤区侵蚀强度仅次于黄土高原,福建长汀县是南方红壤区水力侵蚀引起的土壤退化的最严重的地区之一<sup>[13-14]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来,一直进行红壤退化的植被恢复治理研究工作,并取得丰硕成果。该治理研究已经从植物恢复多样性、土壤理化和土壤微生物性质和植被恢复下土壤微生物多样性、侵蚀退化地土壤生态化学计量学等方面进行研究<sup>[15-17]</sup>,但从不同植被恢复模式对土壤渗透性和持水量的还显薄弱。为此,本文对不同植被恢复模式下花岗岩退化红壤的土壤渗透性和持水量进行研究,揭示土壤渗透规律,探讨不同植被恢复模式下影响土壤渗透能力的主要因子。以期为红壤区的

水土保持和红壤退化地的精准恢复提供理论依据和实践。

## 1 研究区概况

福建省长汀县河田镇(35°35′—25°46′N,116°16′—116°30′E),属于中亚热带季风气候区,气候温暖湿润,降雨充沛,年降雨量 1 698.7 mm,年均温 17.5~18.8 °C,季节性降雨显著,降水集中在 3—6 月。植被以马尾松人工林为主,林分结构较单一。土壤以花岗岩红壤为主,土壤抗冲刷和抗蚀能力较弱,土壤保肥保水能力差,存在极其严重的林下水土流失现象。但该地区自 20 世纪 80 年代以来一直采取植被恢复措施,水土流失得到明显改善。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

2020 年 11 月,在长汀县河田镇选取 2006 年开始植被恢复的且具有典型性的不同植被恢复模式样地,以严重侵蚀退化地和自然林为对照,严重侵蚀退化地是未采取任何植被治理措施的严重水土流失区,自然林是乡村人自发组织营造林地,保留较好,没有自然和人为因素的破坏。本研究选择样地坡度均处于 13°~20°,研究区内分别设置相邻的 3 个 20 m×20 m 的标准样地。样地基本概况详见表 1。

### 2.2 土壤样品采集与测定

每一样地沿对角线取 3 个土壤剖面,100 m<sup>3</sup> 的环刀分别取 0—5,5—20,20—40 cm 样品,每个土层重复 3 次。

(1) 土壤物理指标。烘干法测定土壤含水量和环刀法(100 cm<sup>3</sup>)测定土壤容重、土壤孔隙度;二环刀法(100 cm<sup>3</sup>)测定土壤渗透性;土壤硬度计测定土壤硬度;激光粒度仪测定土壤颗粒组成。

表 1 不同植被恢复模式样地基本情况

Table 1 Basic situation of plots with different vegetation restoration modes

样地名称	严重退化地 (HDL)	低效林改造 (IFT)	条沟草灌 (GGH)	封禁 (CC)	全坡面播草 (FSG)	乔灌草 (ASG)	自然林 (NV)
位置	来油坑	龙颈	红畲	晨光	游坊	水东坊	露湖
海拔/m	315	351	327	328	331	329	321
坡度/(°)	16~19	15~19	14~18	13~18	14~19	15~18	15~20
坡向	SE15°	SE16°	SE16°	SE14°	SE15°	SE15°	SE14°
植被覆盖度/%	10	75	85	85	75	90	95
主要植物类型	马尾松、竺萁	马尾松、枫香、木荷、百喜草、竺萁	马尾松、木荷、枫香、百喜草、宽叶雀稗、竺萁	马尾松、枫香、木荷、胡枝子、竺萁	马尾松、百喜草、宽叶雀稗、竺萁	马尾松、枫香、木荷、胡枝子、宽叶雀稗、竺萁	马尾松、木荷、杉木、胡枝子、紫穗槐、黑荆、宽叶雀稗、百喜草、竺萁

注:表中植物学名分别为:马尾松 *Pinus massoniana*, 竺萁 *Dicranopteris dichotoma*, 枫香 *Liquidambar formosana*, 木荷 *Schima superba*, 百喜草 *Paspalum notatum*, 宽叶雀稗 *Paspalum wettsteinii*, 胡枝子 *Lespedeza bicolor*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*, 黑荆 *Acacia mearnsii*。

(2) 土壤化学指标。重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳, 半微量开氏法测定土壤全氮; 浓硫酸和高氯酸消煮法测定土壤全磷, 双酸浸提法测定土壤速效磷, 氢氧化钠熔融法测定土壤全钾, 乙酸铵浸提法测定土壤速效钾。火焰光度计测定土壤钾素。水和土壤比为 2.5 : 1 浸提法测定土壤 pH 值。

### 2.3 土壤渗透性的测定

土壤初始入渗率 = 最初入渗时段内渗透量 / 入渗时间。初始入渗时间取前 3 min, 平均渗透速率 = 达稳渗时渗透总量 / 达稳渗时时间, 稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率, 因为所有土样渗透速率在 30 min 前已达稳定, 本文渗透总量统一取前 30 min 内的渗透量<sup>[18]</sup>。

### 2.4 土壤持水量的测定

土壤持水量包括毛管持水量和非毛管持水量, 二者之和为土壤最大持水量<sup>[18]</sup>。计算公式为:

$$W_c = 1\ 000 P_c HR \quad (1)$$

$$W_o = 1\ 000 P_o HR \quad (2)$$

$$W_p = W_c + W_o \quad (3)$$

式中:  $W_p$ ,  $W_c$ ,  $W_o$  分别为土壤最大持水量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )、非毛管持水量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )、毛管持水量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $P_c$ ,  $P_o$  分别是非毛管孔隙度 (%), 毛管孔隙度 (%);  $H$  为土层厚度 (cm);  $R$  是水的密度。

### 2.5 数据分析

首先用单因素方差分析和 LSD 多重比较对不同植被恢复模式和对照样地的 0—5 cm 土壤理化指标进行差异性分析, 再用单因素方差分析不同植被恢复模式和对照样地的差异性。以上分析在 SPSS 21.0 中进行。再用 Canoco 5.0 对 0—5 cm 不同植被恢复

模式土壤渗透性和土壤理化指标的关系进行冗余分析。图表用 Origin 2022 和 Excel 2007 整理绘制。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同植被恢复模式下土壤理化指标特征

由表 2 可知, 0—5 cm 不同植被恢复模式和对照样地的土壤颗粒组成存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。砂粒含量在严重退化地最大 72.90%, 自然林砂粒含量最低 61.67%, 其中乔灌草植被模式砂粒含量最低 67.67%, 从整体的数值来看, 粉粒的含量差异较小; 黏粒的含量最小值出现在严重退化地为 10.66%, 最大值出现在自然林 24.06%。土壤容重和土壤含水量的最大值和最小值均出现在自然林和严重退化地, 不同植被恢复模式的土壤容重、土壤含水量和 pH 值差异不显著 ( $p > 0.05$ )。但不同植被恢复模式与自然林和严重退化地的土壤养分指标差异显著 ( $p < 0.05$ )。不同植被恢复模式的土壤养分指标差异显著 ( $p < 0.05$ )。土壤有机碳、全氮、全磷和速效磷以及全钾和速效钾的最大值和最小值分别出现在自然林和严重退化地, 但是乔灌草植被恢复模式的土壤养分指标数值最大。

### 3.2 不同植被恢复模式下土壤渗透性指标特征

由图 1 可知, 0—5, 5—20, 20—40 cm 不同植被恢复模式和对照样地之间的土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均渗透率差异显著 ( $p < 0.05$ ), 且不同植被恢复模式之间和对照样地前 30 min 渗透总量差异显著 ( $p < 0.05$ ), 但 0—5 cm, 5—20 cm, 20—40 cm 不同植被恢复模式之间的土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均渗透率差异不显著 ( $p > 0.05$ ) (图 1)。0—5 cm 不同植被恢复模式初始入渗率分别为严重退化地的 94.51,

24.01, 9.88, 3.59, 2.86 和 1.76 倍, 5—20 cm 不同植被恢复模式的初始入渗率分别为严重退化地的 30.30, 4.65, 4.74, 3.30, 2.60 和 1.94 倍, 20—40 cm 不同治理模式初始入渗率分别为严重退化地的 13.20, 5.36, 10.56, 7.52, 4.72, 3.00 倍。0—5 cm 平均渗透率的平均值分别为严重退化地的 61.01, 16.19, 5.40, 2.42, 1.91 和 0.98 倍, 5—20 cm 平均渗透率的平均值分别为严重退化地的 23.31, 3.61, 3.36, 2.38, 1.92 和 1.56 倍, 20—40 cm 平均渗透率的平均值分别为严重退化地的 6.00, 5.67, 5.44, 3.63, 2.96, 1.11 倍。0—5 cm 稳渗率的平均值分别为严重退化地的 98.96, 26.60, 9.15, 3.45, 3.4 和 1.62 倍, 5—20 cm 稳渗率的平均值

分别是严重退化地的 38.00, 4.93, 4.53, 3.71, 3.41 和 2.07 倍, 20—40 cm 稳渗率的平均值分别为严重退化地的 26.47, 12.35, 13.28, 6.29, 6.06 和 2.65 倍。0—5, 5—20, 20—40 cm 土层土壤初始入渗率、平均渗透率、稳渗率数值总体表现为: 自然林 > 乔灌草 > 条沟草灌 > 封禁 > 低效林改造 > 全坡面播草。不同植被恢复模式前 30 min 渗透总量的规律为: 自然林 > 乔灌草 > 条沟草灌 > 封禁 > 低效林改造 > 全坡面播草 > 严重侵蚀退化地。不同植被恢复模式土壤渗透性均随土层深度的增加而降低, 说明不同植被恢复模式均不同程度改善土壤渗透性, 但改善程度存在差异, 乔灌草植被恢复模式改善土壤渗透性效果最好。

表 2 不同植被恢复模式 0—5 cm 土壤理化性质特征

Table 2 Physical and chemical properties of 0—5 cm soil under different vegetation restoration modes

指标	严重退化地 (HDL)	低效林改造 (IFT)	条沟草灌 (GGH)	封禁 (CC)	全坡面播草 (FSG)	乔灌草 (ASG)	自然林 (NV)
砂砾/%	72.90±0.06 <sup>a</sup>	73.60±0.47 <sup>a</sup>	71.77±0.64 <sup>a</sup>	68.83±0.84 <sup>a</sup>	70.07±0.87 <sup>a</sup>	67.67±0.45 <sup>b</sup>	62.67±0.79 <sup>c</sup>
粉粒/%	17.13±0.20 <sup>a</sup>	15.47±0.30 <sup>c</sup>	16.23±0.12 <sup>b</sup>	17.13±0.12 <sup>b</sup>	15.20±0.15 <sup>d</sup>	10.13±0.12 <sup>f</sup>	13.16±0.09 <sup>e</sup>
黏粒/%	10.66±0.36 <sup>d</sup>	10.69±0.33 <sup>d</sup>	11.35±0.33 <sup>d</sup>	11.05±0.08 <sup>d</sup>	15.04±0.03 <sup>c</sup>	21.51±0.26 <sup>b</sup>	24.06±0.01 <sup>a</sup>
土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.53±0.02 <sup>a</sup>	1.39±0.08 <sup>a</sup>	1.28±0.04 <sup>c</sup>	1.16±0.06 <sup>d</sup>	1.08±0.01 <sup>c</sup>	1.01±0.01 <sup>f</sup>	0.94±0.01 <sup>f</sup>
土壤含水量/%	13.01±0.01 <sup>d</sup>	27.22±0.01 <sup>b</sup>	32.02±0.01 <sup>b</sup>	34.31±0.01 <sup>b</sup>	33.01±0.02 <sup>b</sup>	36.03±0.02 <sup>a</sup>	41.05±0.01 <sup>a</sup>
pH 值	4.94±0.02 <sup>a</sup>	4.45±0.01 <sup>b</sup>	4.45±0.01 <sup>b</sup>	4.42±0.02 <sup>c</sup>	4.66±0.03 <sup>b</sup>	4.41±0.02 <sup>c</sup>	3.96±0.17 <sup>d</sup>
有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.82±0.03 <sup>e</sup>	10.80±0.35 <sup>f</sup>	12.60±0.34 <sup>e</sup>	26.72±0.48 <sup>d</sup>	28.10±0.42 <sup>c</sup>	45.56±0.64 <sup>b</sup>	60.10±0.88 <sup>a</sup>
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.40±0.01 <sup>e</sup>	0.50±0.03 <sup>f</sup>	0.77±0.02 <sup>c</sup>	0.95±0.03 <sup>d</sup>	1.15±0.05 <sup>c</sup>	1.48±0.01 <sup>b</sup>	2.40±0.01 <sup>a</sup>
全磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.037±0.001 <sup>e</sup>	0.059±0.01 <sup>f</sup>	0.090±0.002 <sup>c</sup>	0.130±0.005 <sup>d</sup>	0.133±0.005 <sup>b</sup>	0.177±0.005 <sup>b</sup>	0.185±0.004 <sup>a</sup>
速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.52±0.01 <sup>d</sup>	3.64±0.05 <sup>c</sup>	3.70±0.08 <sup>c</sup>	4.00±0.07 <sup>c</sup>	5.13±0.40 <sup>b</sup>	5.85±0.01 <sup>b</sup>	6.99±0.08 <sup>a</sup>
全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.91±0.03 <sup>e</sup>	1.32±0.02 <sup>f</sup>	1.96±0.04 <sup>c</sup>	2.10±0.07 <sup>d</sup>	2.44±0.05 <sup>c</sup>	5.41±0.02 <sup>b</sup>	6.93±0.01 <sup>a</sup>
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	12.36±0.17 <sup>e</sup>	47.35±0.54 <sup>d</sup>	107.26±0.54 <sup>c</sup>	241.07±0.99 <sup>c</sup>	345.5±0.51 <sup>b</sup>	349.50±0.28 <sup>b</sup>	414.00±1.15 <sup>a</sup>

注: 数值为平均值±标准误( $n=3$ )。不同字母表示不同植被恢复模式和对对照样地之间差异性显著( $p<0.05$ )。

### 3.3 不同植被恢复模式下土壤持水量特征

不同植被恢复模式和对照样地的 0—5, 0—20, 0—40 cm 土层持水量总体表现差异性显著 ( $p<0.05$ ) (图 2)。0—5 cm 土层持水能力的最大值和最小值分别在自然林和严重退化地 4.06, 2.06 kg/hm<sup>2</sup>, 其中乔灌草植被恢复模式的持水量最大 3.95 kg/hm<sup>2</sup>。0—5 cm 其他植被恢复模式持水量规律为: 条沟草灌 > 低效林改造 > 封禁 > 全坡面播草。0—20 cm 土层持水量最大值和最小值的数值为 15.4, 5.4 kg/hm<sup>2</sup>, 乔灌草模式持水量最大是 12.3 kg/hm<sup>2</sup>, 其他植被恢复模式持水量大小表现为: 封禁 > 条沟草灌 > 低效林改造 > 全坡面播草。0—40 cm 土层持水量自然林最大数值为 30.5 kg/hm<sup>2</sup>, 最小值是严重侵蚀退化地数值为 13.2 kg/hm<sup>2</sup>, 乔灌草模式持水量最大是 22.59 kg/hm<sup>2</sup>, 其他植被恢复模式持水能力规律

为: 条沟草灌 > 封禁 > 低效林改造 > 全坡面播草。

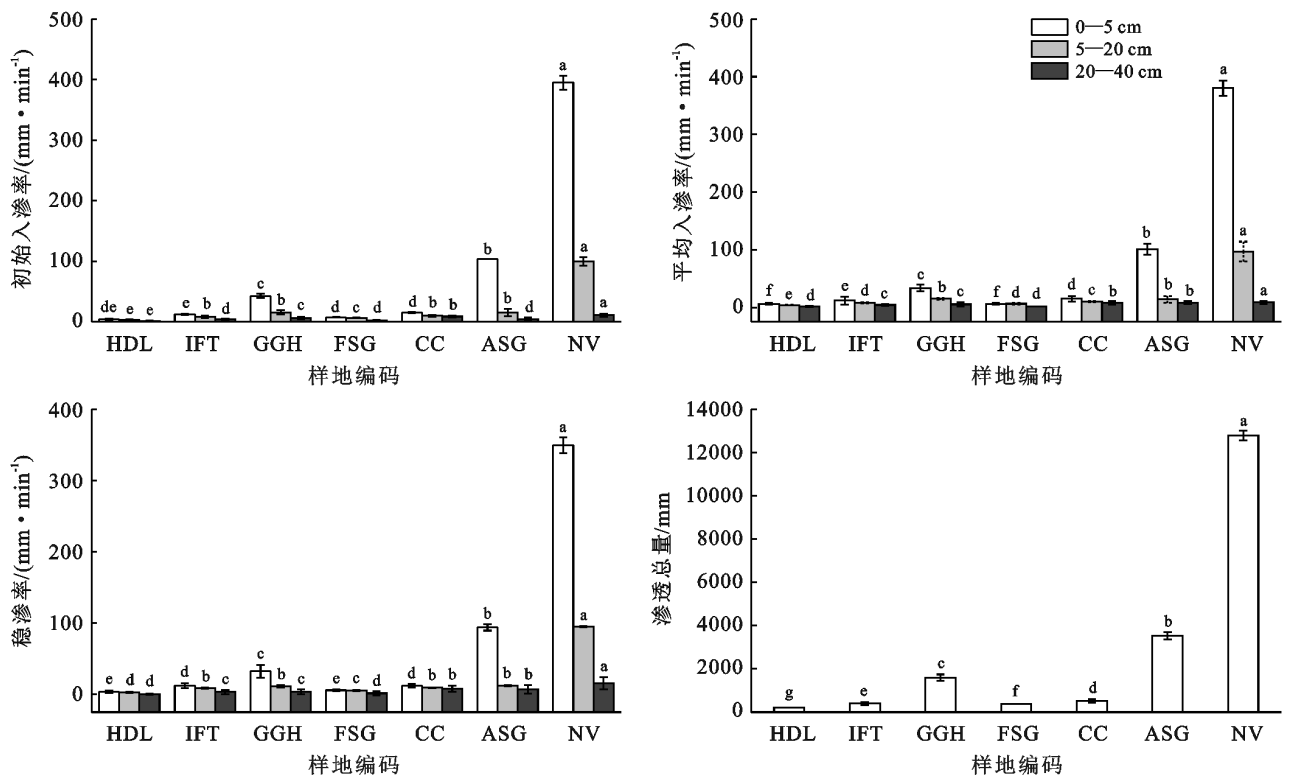
### 3.4 不同植被恢复模式下土壤渗透性指标和土壤理化指标冗余分析

基于不同植被恢复模式 0—5 cm 土壤渗透性和 0—5 cm 土壤理化性质的 13 个指标进行冗余分析 (图 3), 主成分 1 的贡献率为 99.97%, 主成分 2 的贡献率为 0.02%, 累计贡献率已达 99.99%, 基本上保留了 13 个指标评价不同植被恢复模式的绝大部分信息, 因此选取这 2 个主成分作为评价不同治理模式土壤渗透性主成分分析的依据。主成分 1 中土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值、粉粒含量的权重系数较大, 均超过了 0.900。相反地, 主成分 2 中土壤硬度、土壤容重、黏粒和砂砾含量明显负相关, 表明主成分 1 主要反映土壤有机碳、氮素、磷素、钾素和土壤含水量表征不同植被恢复模式土壤渗透



的特征的信息。所以土壤渗透性与土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值、粉粒含量显著

相关,是表示自然林、条沟草灌和乔灌草模式土壤渗透性的重要因子。



注:数值为平均值±标准误( $n=3$ )。不同小写字母表示不同植被恢复模式和对照样地之间差异性显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 不同植被恢复模式土壤渗透性特征

Fig.1 Soil permeability characteristics of different vegetation restoration modes

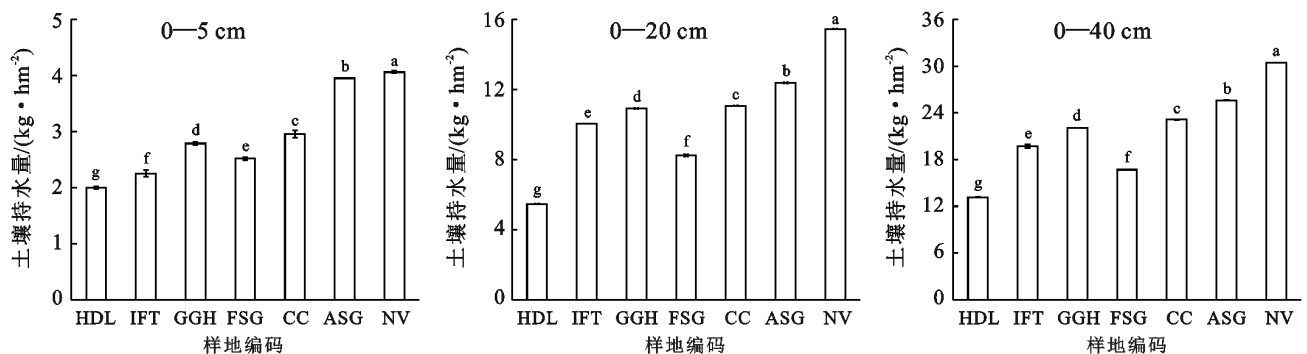


图 2 不同植被恢复模式土壤持水量特征

Fig.2 Soil water capacity characteristics of different vegetation restoration modes

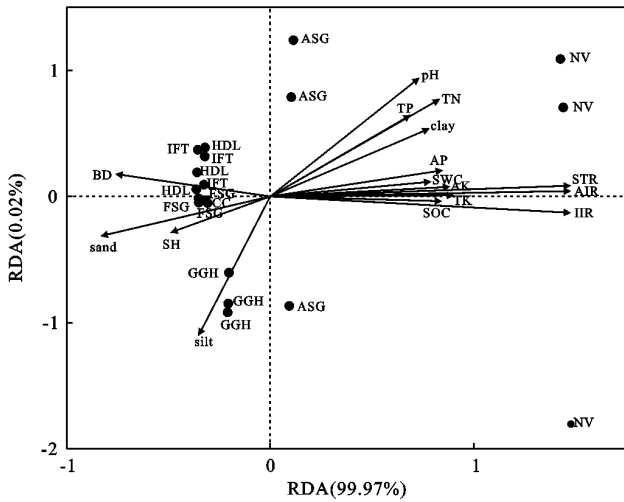
## 4 讨论

本研究表明,土壤渗透性指标和前 30 min 土壤渗透总量数值是自然林数值最大,严重侵蚀退化地数值最小,不同植被恢复模式数值顺序为:乔灌草 > 条沟草灌 > 封禁 > 低效林改造 > 全坡面播草。且 0—40 cm 土壤持水量数值顺序和以上指标一致,且乔灌草恢复模式以上数值仅次于自然林。影响 0—5

cm 土壤渗透性的因子是:土壤硬度、土壤容重、黏粒、砂砾、土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值、粉粒。其结果主要因为地上植被群落结构和多样性,地表凋落物和地表微生物、地表土壤动物和地下根系、微生物和土壤动物这三方面相互影响、相互制约、相互耦合。

(1) 地上植物群落结构和多样性,不同植被恢复模式均引种阔叶高大乔木、灌木和草本,但乔灌草植

被恢复模式引种的乔灌木种类更多样,如引种枫香、木荷等中亚热带常见的落叶阔叶树种以及固氮灌木胡枝子和紫穗槐等,所以自然林和乔灌草恢复模式相比较其他植被恢复模式林分结构完整。



注: IIR 为初始入渗透速率; AIR 为平均入渗透速率; STR 为稳渗率; SOC 为有机碳; TN 为全氮; TP 为全磷; AP 为速效磷; TK 为全钾; AK 为速效钾; pH 为 pH 值; Clay 为粉粒; sand 为砂砾; silt 为黏粒; SH 为土壤硬度; BD 为土壤容重; SWC 为土壤含水量。

图 3 不同植被恢复模式下土壤渗透性和土壤理化指标的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis of soil permeability and soil physicochemical indexes under different vegetation restoration modes

(2) 地表凋落物的数量和质量,化学组成成分差异和分解程度的差异,以及地表微生物和土壤动物的数量、质量和多样性的差异,地表微生物和土壤动物加速地表凋落物的分解,形成的腐殖质也增加了土壤的孔隙度,且地表动物的生命活动过程改善土壤孔隙的结构,加速了水分的入渗和土壤的持水<sup>[19-25]</sup>。植被恢复模式下积累较多的凋落物,分解后形成较多的有机碳,引种固氮灌木胡枝子等提高了土壤氮素,改善土壤化学性质,提高土壤渗透性,这与李林代等<sup>[5-6]</sup>的研究结果一致。此外,土壤有机碳对促进团粒结构的形成、维持土壤结构稳定有着重要作用,有机质含量越多,土壤团粒结构就越多,从而具有良好的透气透水能力,土壤有机碳还可以通过改善土壤的孔隙性,增加入渗水流的过水断面面积,提高土壤的水力传导度<sup>[21]</sup>,实现土壤渗透和持水能力的改善。三是地下土壤微生物多样性和生态功能、地下根系的分布、生长、分解、死亡和分泌物以及地下土壤动物的活动如筑穴、挖掘、促进有机物分解等活动,影响土壤的物理和化学指标。不同树种或者草本的根系分布特征会影响土壤结构,高大乔木和灌木以及百喜草、宽叶雀

稗这些草本植物的根系主要分布在土壤不同层次,根系在土壤中缠绕、生长过程的穿插、挤压和分割等作用增加土壤中的大孔隙,以及根系死亡后在土壤中形成较多的小孔隙,改善土壤容重,提高土壤渗透性能和持水量;根系的代谢还会产生有机化合物胶结土壤颗粒,促进团聚体的形成,进而影响土壤的渗透性能<sup>[24-27]</sup>。以上地上、地表和地下的所有生物的生命过程,是地上植被恢复过程改善地表凋落物、地表土壤微生物和土壤动物以及地下根系、地下土壤微生物和土壤动物等,实际是通过以上过程改善土壤理化性质,改善土壤结构,增强土壤通透性,进而改善土壤渗透性和持水量。

土壤入渗指标与土壤容重、土壤硬度呈负相关,这个和众多学者的研究结论一样,均认为土壤容重和土壤孔隙度是决定土壤水源涵养功能的重要物理指标<sup>[26]</sup>。李建兴等<sup>[22]</sup>研究发现土壤入渗性能与机械组成中砂粒含量显著正相关,与粉粒和黏粒含量显著负相关,其认为主要是由于土壤中砂粒含量越多,黏粒含量越低,其结构越疏松,质地越粗糙,越有利于水分的渗透。但与本研究不一致,本研究结果是土壤渗透性与砂砾和黏粒呈负相关,与粉粒正相关,一方面可能是研究区域不同,另一方面可能是本研究区历史上由于自然和人文环境的影响,强降雨和植被的缺乏造成 0—5 cm 表层土壤黏粒和粉粒的流失,导致表层土壤颗粒组成不合理,砂砾含量增多,土壤粉粒缺失持水能力弱。所以,合理的土壤颗粒组成更有利于提高土壤渗透性和持水量。土壤 pH 值对渗透性影响显著,与赵洋毅等<sup>[4]</sup>研究结果一致。而刘广路等<sup>[23]</sup>认为土壤 pH 值与土壤渗透性关系不显著,原因可能是由于该区属于酸雨较严重的地区,土壤酸化严重,对土壤结构产生了破坏,导致土壤 pH 值与土壤渗透性没有直接关系。关于土壤 pH 值和土壤酸化对土壤渗透性的影响问题有待进一步探讨。

## 5 结论

(1) 不同植被恢复模式和对照样地的土壤渗透性均随土层深度的增加而降低。

(2) 不同植被恢复模式和对照样地土壤渗透性指标均表现为:初始入渗率>平均渗透率>稳定入渗率;且土壤渗透性指标和前 30 min 土壤渗透总量数值顺序为:自然林最大,严重侵蚀退化地最小,不同植被恢复模式顺序为:乔灌草>条沟草灌>封禁>低效林改造>全坡面播草。

(3) 0—40 cm 土壤持水量乔灌草恢复模式仅次于自然林,严重侵蚀退化地最低,其余植被恢复模式

顺序为:条沟草灌>封禁>低效林改造>全坡面播草。

(4) 筛选出不同植被恢复模式下退化花岗岩红壤区制约 0—5 cm 土壤渗透性因子是土壤硬度、土壤容重、黏粒和砂砾;提高 0—5 cm 土壤渗透性的因子是土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值和粉粒。

(5) 不同植被恢复模式均不同程度地提高了土壤渗透性和持水量,其中,乔灌草植被恢复模式是改善土壤渗透性和持水量的最佳模式。

#### [参 考 文 献]

- [1] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等.不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J].水土保持研究,2016,23(1):13-17.
- [2] Ma Wenmei, Zhang Xingchang. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(3):331-340.
- [3] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2001,18(6):1-5.
- [4] 杨静,张耀艺,谭思懿,等.亚热带不同树种土壤水源涵养功能[J].生态学报,2020,40(13):4594-4604.
- [5] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,2(1):33-36.
- [6] Startsev A D, McNabb D H. Effects of skidding on forest soil infiltration in West Central Alberta [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000,80(4):617-62.
- [7] Philip J R. Theory of infiltration [J]. Advance in Hydroscience, 1969,5:216-296.
- [8] 王全九,来剑斌,李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J].农业工程学报,2002,18(2):13-16.
- [9] 王意锬,金爱武,方升佐.浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响[J].应用生态学报,2017,28(5):1431-1440.
- [10] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等.渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2010,(15):4162-4172.
- [11] 张昌顺,范少辉,管凤英,等.闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J].林业科学,2009,45(1):36-42.
- [12] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,等.中国生态退化的主要类型特征及分布[J].生态学报,2000,1(1):13-19.
- [13] 赵其国.我国红壤的退化问题[J].土壤侵蚀与水土保持报,1995,27(6):281-286.
- [14] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变应用[J].生态学报,2016,27(3):735-745.
- [15] 查轩,黄少燕,林金堂.林地针叶化对土壤微生物特征影响研究[J].水土保持报,2003,17(4):18-21.
- [16] 朱鹤健.长汀水土保持研究[M].北京:科学出版社,2013.
- [17] 王玉婷,查轩,陈世发,等.红壤侵蚀退化马尾松林下不同治理模式土壤化学计量特征[J].应用生态学报,2020,31(1):8.
- [18] 张淑兰,张海军,张武,等.小兴安岭南麓典型森林类型的土壤水文功能研究[J].水土保持研究,2015,22(1):140-145.
- [19] 王辉,王全九,邵明安.前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J].环境科学学报,2008,28(8):1571-1578.
- [20] Evincr V T, Hawker C V. Embracing variability in the application of plant soil interactions to the restoration of communities and ecosystems [J]. Restoration Ecology, 2008,16(4):713-729.
- [21] Chartier M P, Rostagno C M, Pazos U E. Effects of soil degradation on infiltration rates in grazed semiarid rangelands of Northeastern Patagonia, Argentina [J]. Journal of Arid Environments, 2011,75(7):656-661.
- [22] 李建兴,何丙辉,徐小军.生物埂护坡下不同土地利用方式对土壤渗透性的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):243-248,253.
- [23] 刘广路,范少辉,漆良华,等.不同类型毛竹林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2008,22(6):44-47.
- [24] Pang X Y, Bao W K. Effect of substituting plantation species for native shrubs on the water-holding characteristic of the forest floor on the Eastern of Tibetan Plateau [J]. Journal of Resources and Ecology, 2011,2(3):217-224.
- [25] 王大力,尹澄清.植物根孔在土壤生态系统中的功能[J].生态学报,2000,20(5):869-874.
- [26] 吴庆贵,邹利娟,吴福忠,等.涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能[J].水土保持学报,2012,26(6):254-258.
- [27] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11):3979-3987.