

DOI: 10.5846/stxb201709271749

刘洋, 侯占山, 赵爽, 齐国辉, 张雪梅, 郭素萍. 太行山片麻岩山区造地边坡植被恢复过程中植物多样性与土壤特性的演变. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Liu Y, Hou Z S, Zhao S, Qi G H, Zhang X M, Guo S P. Evolution of plant species diversity and soil characteristics on hillslopes during vegetation restoration in the gneiss region of the Taihang Mountains after reclamation. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

太行山片麻岩山区造地边坡植被恢复过程中植物多样性与土壤特性的演变

刘 洋^{1,2}, 侯占山³, 赵 爽^{1,2}, 齐国辉^{1,2,*}, 张雪梅^{1,2}, 郭素萍^{1,2}

1 河北农业大学林学院, 保定 071000

2 河北省核桃工程技术研究中心, 邢台 054000

3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

摘要:为了探究太行山片麻岩山区造地后坡面植被的演变规律,以太行山片麻岩山区不同治理年限的坡面为研究对象,研究了坡面的植被状况与土壤理化性状。结果表明:随着治理年限的增加,坡面植被覆盖度、地上生物量和植物种类均显著增加,分别由第2年的18.00%、67.52 g/m²、10种增加到了第7年的92.67%、379.91 g/m²、19种。随治理年限的增加,坡面土壤的理化性质得到改善,土壤容重由第2年的1.40 g/cm³降低到了第7年的1.29 g/cm³,土壤有机质含量由第2年的4.91 g/kg增加到了第7年的7.18 g/kg;土壤总孔隙度、全氮、碱解氮、速效钾含量分别由第2年的47.15%、0.17 g/kg、16.10 mg/kg、26.58 mg/kg增加到了第6年的51.60%、0.61 g/kg、62.18 mg/kg、57.40 mg/kg,在第7年又分别降低为51.42%、0.50 g/kg、37.80 mg/kg、30.90 mg/kg。坡面植被多样性与土壤多项理化性状表现为显著相关。随着治理年限延长,造地后的坡面土壤的理化性质发生改变,土壤有效养分增多,持水能力增强,植被覆盖度与植物种类均显著增加,植物多样性稳步提高,生态环境得到有效改善。

关键词:太行山;片麻岩;坡面土壤;土壤理化性质;植被

Evolution of plant species diversity and soil characteristics on hillslopes during vegetation restoration in the gneiss region of the Taihang Mountains after reclamation

LIU Yang^{1,2}, HOU Zhanshan¹, ZHAO Shuang^{1,2}, QI Guohui^{1,2,*}, ZHANG Xuemei^{1,2}, GUO Suping^{1,2}

1 College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China

2 Research Center for Walnut Engineering and Technology of Hebei, Xingtai 054000, China

3 Institute of Agricultural Resources and Agricultural Regionalization, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: To explore the evolution of the slope vegetation in the gneiss region of the Taihang Mountains after reclamation, the vegetation on the hillslope and the physical and chemical properties of the hillslope soil after differing years of reclamation in the gneiss region of the Taihang Mountains were studied. The results showed that as the reclamation years passed, the vegetation coverage increased from 18.00% in the 2nd year to 92.67% in the 7th year, above-ground biomass increased from 67.52 g/m² in the 2nd year to 379.91 g/m² in the 7th year, and the plant species grown on the hillslope increased from 10 species in the 2nd year to 19 species in the 7th year. As the reclamation years passed, the physical and chemical properties of the hillslope soil were also improved, as follows: soil bulk density decreased from 1.40 g/cm³ in the

基金项目:林业公益性行业科研专项经费项目(201504408);河北省高等学校科学技术研究项目(ZC2016146)

收稿日期:2017-09-27; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bdqgh@sina.com

2nd year to 1.29 g/cm³ in the 7th year; soil organic matter content increased from 4.91 g/kg in the 2nd year to 7.18 g/kg in the 7th year; total soil porosity increased from 47.15% in the 2nd year to 51.6% in 6th year, and then decreased to 50.04% in the 7th year; soil total nitrogen content increased from 0.17 g/kg in the 2nd year to 0.61 g/kg in the 6th year, and then decreased to 0.50 g/kg in the 7th year; soil alkali-hydrolyzable nitrogen content increased from 16.10 mg/kg in the 2nd year to 62.18 mg/kg in the 6th year, and then decreased to 37.80 mg/kg in the 7th year; soil available potassium content increased from 26.58 mg/kg in the 2nd year to 57.40 mg/kg in the 6th year, and then decreased to 30.90 mg/kg in the 7th year. There were significant correlations among vegetation diversity on the hillslope and soil physical and chemical properties. As the reclamation years passed, the physical and chemical properties of the hillslope soil were improved, the soil available nutrients increased, soil water holding capacity was enhanced, vegetation coverage and plant species increased significantly, plant diversity improved steadily, and the ecological environment was effectively improved.

Key Words: Taihang Mountain; gneiss; hillslope soil; physical and chemical properties of soil; vegetation

太行山片麻岩区是我国水土流失严重的地区之一,由于长期的人类活动,导致了该区域森林生态系统的严重退化和生物多样性的严重丧失,部分森林已退化成灌丛和草坡,水土流失日趋严重,洪涝灾害呈现增加的趋势^[1]。为提高该立地条件下的造林成活率、改善农民生活水平,近年来,人们通过机械整地的方式对太行山片麻岩山区进行治理,开发出高标准隔坡沟状梯田,修造梯田式耕地,在田中配置核桃、苹果、樱桃等经济树种,在绿化荒山、充分利用土地资源的同时取得了较好的经济效益,让有限的土壤得到了充分的利用,大大提高了山区植被覆盖率,极大地改善了当地百姓的生活水平。然而,修造梯田常伴随大量边坡的开挖,使原始坡面植被遭到破坏,产生大量的次生裸地,极易造成水土流失;操作不当,还会出现泥石流。随着长期的自然沉降和植被恢复,坡面理化性质得到改善,群落结构渐趋合理,物种多样性趋于稳定。

物种多样性是退化生态系统恢复与重建的重要内容与标志,是衡量某一地区生物多样性状况和一个群落结构和功能复杂性的重要指标之一^[2]。张继义等^[3]研究发现随演替进展群落种类组成与物种多样性增加,群落生态优势度下降,而均匀度增加,群落趋向稳定。王费新等^[4]发现选取适当树种人工造林可以省略先锋物种强阳生草本的发育时间,提早诱发灌木和草本植物发育,大大加速植被恢复演替过程。土壤是植物生长的重要物质基础,土壤理化性质对植物的生长起着至关重要的作用,从而影响到物种多样性^[5]。有研究发现植被恢复不仅可以降低土壤容重,增加土壤总孔隙度、饱和导水率以及团聚体稳定性,改善土壤的物理性质^[6],还可以显著改善土壤有机质含量与速效磷、全氮、全磷含量,提高土壤养分^[7]。坡面植被生长状况和土壤改良效果是山区综合治理生态评价的重要指标,但目前对片麻岩山地造地边坡植被恢复与土壤特性的研究未见报道。本研究以太行山片麻岩山区造地边坡为研究对象,通过对不同治理年限的坡面植被的调查,以及土壤理化性状的分析,探讨造地边坡自然演替过程中植物物种组成、多样性以及土壤养分变化规律,从而为片麻岩山地的合理开发、水土保持和生态系统恢复与重建提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北省中部太行山东麓的平山县葫芦峪农业科技有限公司的生产基地。该地区所在地理位置为 114°5'38"—114°7'33"E, 38°26'5"—38°27'47"N, 属于暖温带半干旱大陆性季风气候,夏季炎热高温,冬季寒冷干燥;降水量较少,多年平均降水量 538.8 mm,雨量多集中于夏秋季节;年平均气温 13.2℃,多年平均日照时数为 2611 h,多年平均太阳辐射总量为 133—138 kCal/cm²,年有效积温为 4853.5℃,无霜期为 140—180 d。自 2009 年开始,该公司对该区坡度小于 25°的片麻岩山地逐年修造梯田式耕地^[8]。造地后当年在坡面上均匀播撒苜蓿种子。

1.2 研究方法

1.2.1 样地植被调查及土壤样品采集

2016年8月1日到8月5日在平山县葫芦峪农业科技有限公司的生产基地,对2014年(治理第2年)、2013年(治理第3年)、2012年(治理第4年)、2011年(治理第5年)、2010年(治理第6年)、2009年(治理第7年)治理的坡面进行调查取样。每一年份均随机选取3个20 m×5 m的典型坡面作为研究样地,每个样地采用等距取样法设置3个1 m×1 m的样方,在样方的4个角和中心处设置5个采样点。用环刀和自封袋采集坡面表层土壤带回实验室,用于测定土壤的理化指标。同时记录每个样方的植物种类、各种植物的个体数、盖度、生物量等指标。

1.2.2 土壤理化性状的测定

采用环刀称重法测定土壤的容重、持水量和孔隙度;采用筛析法测定干土各粒组占该土总质量的百分数;电位计法测定土壤 pH 值;重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量;半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量,钼锑抗比色法测定土壤全磷含量,采用原子吸收分光光度法测定土壤全钾含量;碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定速效钾含量^[9]。坡面植被生物量采用烘干称重法。

1.2.3 植物多样性的测定

植物多样性测定采用 Shannon 多样性指数、丰富度指数和 Pielou 均匀度指数^[10]3个指标进行评价。计算公式如下:

$$\text{Shannon 多样性指数: } H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (P_i = N_i/N)$$

$$\text{丰富度指数: } R = S$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } JH = (- \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i) / \ln S$$

式中,S为物种数目; P_i 为第*i*种的相对个体数,即 N_i/N ,其中*N*为样方内全部种的个体总数, N_i 为第*i*种的个体数。

1.3 数据处理

利用 Excel 软件计算物种多样性指数,利用 DPS 进行不同治理年限坡面的植被盖度、生物量、物种多样性和土壤理化性状的方差分析和多重比较;并采用 CANOCO 4.5 软件的冗余分析(Redundancy analysis, RDA) 来研究植被物种多样性和土壤理化性质的对应关系。

2 结果

2.1 不同治理年限坡面植被变化状况

随坡面治理年限的增加,坡面植被盖度、地上生物量、植物种类均呈现出上升趋势(表1)。坡面植被盖度、地上生物量均在治理的第3年出现了显著增长,在以后的各年份,二者增加速度变缓。坡面植物种类也在治理第3年出现明显增加,相比第2年治理坡面增加了4个种;在第5年,植物种类相较前一年出现了小幅度的下降;其他各年份的植物物种数以每年1—2种的速度在增加。治理后的坡面随年份的增加,其优势种由苜蓿(*Medicago sativa* L.)变为狗尾草(*Setaria viridis*(L.) Beauv.)和马唐(*Digitaria sanguinalis*(L.) Scop.),苜蓿盖度呈现出先增加后迅速减少的趋势,而狗尾草、马唐逐渐成为盖度接近的优势种。同时,葎草(*Humulus scandens*(Lour.) Merr.)等也有逐渐变为优势种的趋势。坡面植物物种数随年份有小幅度增加,而且主要是以草本为主,只是零星分布少量的乔、灌木,且随治理年限增加呈现出:先出现灌木,后出现乔木,先出现少数乔木与灌木种类,后出现多种乔木与灌木的局面,整体呈现出群落演替的趋势,但就目前而言,出现的灌木和乔木种类恒定。

表 1 不同治理年限坡面植被盖度、地上生物量、植物种类变化

Table 1 Changes of vegetation coverage, aboveground biomass and plant species on the hillslopes after reclaimed for different years

治理年限 Reclaimed years	地上生物量 Above ground biomass/(g/m ²)	坡面植物种类及主要植物百分比组成/% Plant species on hillslope and percentage of major plants species
第 2 年 2 years	18.00±3.00e	苜蓿(16%)、紫穗槐 (<i>Amorpha fruticosa</i> L.)、蓼 (<i>Polygonum orientale</i> L.)、狗尾草、猪毛菜 (<i>Salsola collina</i> Pall.)、荆条 (<i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> (Franch.) Rehd.)、蒺藜 (<i>Tribulus terrestris</i> L.)、翻白草 (<i>Potentilla discolor</i> Bunge.)、藜 (<i>Chenopodium album</i> L.)、刺儿菜 (<i>Cephalanoplos segetum</i> (Bunge) Kitam.)。共计 10 种
第 3 年 3 years	66.33±5.13d	苜蓿(27%)、狗尾草(35%)、益母草 (<i>Leonurus artemisia</i> (Lour.) S. Y. Hu)、地梢瓜 (<i>Cynanchum thesioides</i> (Frey) K. Schum.)、荆条、金荞麦 (<i>Fagopyrum crymosum</i> (Trev.) Meisn.)、蒺藜、猪毛菜、马唐、紫穗槐、裂叶牵牛 (<i>Pharbitis nil</i> (L.) Choisy.)、臭椿 (<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle)、飞蓬 (<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.)、蒿 (<i>Artemisia annua</i> L.)、萝藦 (<i>Metaplexis japonica</i> (Thunb.) Makino.)。共计 15 种
第 4 年 4 years	73.00±3.61c	苜蓿(21%)、荆条(42%)、尖叶大狗尾草 (<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv. subsp. <i>pyncocoma</i> (Steud.) Tzvel.)、马唐、蒺藜、金荞麦、酸枣 (<i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> (Bunge) Hu et H. F. Chow)、苘草 (<i>Arthraxon hispidus</i> (Thunb.) Makino)、狗尾草、猪毛菜、榆树 (<i>Ulmus pumila</i> L.)、臭椿、藜、益母草、地梢瓜、蒿、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i> L.)。共计 17 种
第 5 年 5 years	79.67±4.04b	苜蓿(43%)、马唐(35%)、狗尾草、荆条、金荞麦、茜草、飞蓬、益母草、臭椿、藜、尖叶大狗尾草、猪毛菜、蒺藜、裂叶牵牛。共计 14 种
第 6 年 6 years	88.00±2.00a	苜蓿(59%)、狗尾草(19%)、菵草(5%)、裂叶牵牛、猪毛菜、蒿、荆条、翻白草、紫穗槐、藜、酸枣、飞蓬、益母草、地黄 (<i>Rehmannia glutinosa</i> (Gaert.) Libosch. ex Fisch. et Mey.)、地梢瓜、牛筋草 (<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.)、苦菜 (<i>Ixeris debilis</i> (Thunb.) A. Gray)。共计 17 种
第 7 年 7 years	92.67±1.15a	苜蓿(19%)、马唐(30%)、狗尾草(38%)、菵草(6%)、尖叶大狗尾草、金荞麦、猪毛菜、荆条、翻白草、紫穗槐、裂叶牵牛、打碗花 (<i>Calystegia hederacea</i> Wall ex Roxb.)、榆树、臭椿、藜、酸枣、刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)、飞蓬、益母草。共计 19 种

同列数字后不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平

2.2 不同治理年限坡面植物物种多样性比较

坡面植被的 Shannon 多样性指数、丰富度指数和 Pielou 均匀度指数均随坡面治理年限的增加而增加(表 2)。Shannon 指数和丰富度指数除了第 3 年的变动幅度显著高于第 2 年外,其他相邻年份间均没有显著差异;除第 5 年与第 6 年、第 6 年与第 7 年的 Pielou 指数之间存在显著差异外,其他相邻年份间均没有显著差异。

表 2 不同治理年限坡面植物物种多样性比较

Table 2 Comparison of plant species diversity on hillslope after reclaimed for different years

治理年限 Reclaimed years	Shannon 指数 Shannon	丰富度指数 Richness	Pielou 指数 Pielou
第 2 年 2 years	37.21±1.93d	9.67±0.58c	9.72±0.77c
第 3 年 3 years	55.07±3.71c	14.67±2.52b	11.47±0.22bc
第 4 年 4 years	60.18±1.66bc	16.67±0.58ab	12.55±1.24b
第 5 年 5 years	52.26±4.02c	13.67±1.53b	10.34±0.93c
第 6 年 6 years	69.49±5.87ab	16.67±2.52ab	13.09±1.84b
第 7 年 7 years	78.92±10.19a	19.33±2.52a	15.43±0.6a

2.3 不同治理年限坡面土壤物理性质变化状况

随治理年限增加,坡面土壤的总孔隙度呈现先升高后趋于稳定的趋势(表 3),从第 2 年的 47.15% 增加到了 51.23%,之后稳定在 51.42%—51.60% 之间;毛管孔隙度一直呈现出稳步增加的趋势,从第 2 年的 30.71% 增加到了 32.91%,两个相邻年份之间的变化越来越小;非毛管孔隙度虽然在个别年份出现了下降,但整体上升的大趋势没有变,但各年份间变化不显著。土壤容重整体呈现先下降后趋于稳定的趋势,由第二年的 1.40 g/cm³ 降低到了第 5 年的 1.29 g/cm³,之后稳定在 1.28—1.29 g/cm³ 之间。

表 3 不同治理年限坡面土壤容重及孔隙度

Table 3 Bulk density and porosity of the soil on the hillslopes after reclaimed for different years

治理年限 Reclaimed years	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	土壤容重/(g/cm ³) Soil bulk density
第 2 年 2 years	47.15±0.59b	30.71±1.54a	16.44±1.75ab	1.40±0.02a
第 3 年 3 years	46.76±2.05b	31.63±0.93a	15.13±2.79a	1.41±0.05a
第 4 年 4 years	47.73±1.40b	31.93±1.91a	15.80±2.38ab	1.39±0.04a
第 5 年 5 years	51.23±3.15a	32.57±1.22a	18.66±2.32ab	1.29±0.08b
第 6 年 6 years	51.60±2.22a	31.60±3.18a	20.00±2.69a	1.28±0.06b
第 7 年 7 years	51.42±0.52a	32.91±1.12a	18.51±1.22ab	1.29±0.01b

随治理年限的增加,坡面土壤的饱和持水量、毛管持水量、田间持水量整体上均呈现出上升趋势,而且上升趋势的变化大体一致(表 4)。在治理前几年里均呈现出缓慢上升趋势,第 5 年均呈现出较大幅度的增加,饱和持水量由 23.09% 增加到了 27.32%,毛管持水量由 22.52% 增加到了 26.50%,田间持水量由 21.93% 增加到了 25.57%,之后三者趋于稳定。其中,饱和持水量各年份整体增加幅度大于毛管持水量,而毛管持水量各年份整体增加幅度又远大于田间持水量。

表 4 不同治理年限坡面土壤的持水能力变化

Table 4 Change of water-holding capacity of the soil on the hillslopes after reclaimed for different years

治理年限 Reclaimed years	饱和持水量/% Saturation moisture capacity	毛管持水量/% Capillary moisture capacity	田间持水量/% Field water capacity
第 2 年 2 years	23.09±0.80c	22.52±0.84b	21.93±1.08a
第 3 年 3 years	23.93±0.63bc	23.21±0.56ab	22.43±0.60a
第 4 年 4 years	24.86±1.64abc	23.67±1.38ab	23.07±1.53a
第 5 年 5 years	27.20±2.39a	26.36±2.48a	25.30±2.51a
第 6 年 6 years	26.98±2.59ab	25.91±2.97a	24.72±3.19a
第 7 年 7 years	27.32±1.04a	26.50±0.92a	25.57±0.93a

随治理年限的增加,坡面土壤颗粒组成的变化整体趋势为:粗颗粒减少,细颗粒增多(图 1)。其中,坡面土壤中直径 1—2 mm 颗粒所占百分比一直呈现出缓慢下降趋势,在治理第 5 年下降趋势较其他年份明显;坡面土壤中直径小于 0.25 mm 颗粒所占百分比一直呈现出缓慢上升趋势,也在治理第 5 年上升趋势较其他年份明显;直径 0.5—1mm 和直径 0.25—0.5 mm 的土壤颗粒所占百分比变化不显著,主要在于两者在向着较细颗粒发展的同时,又有更大颗粒的土壤向其转变。

2.4 不同治理年限坡面土壤化学性质变化状况

随治理年限的增加,坡面土壤的全氮、有机质含量整体呈现出上升趋势,土壤全磷、全钾含量整体呈现出下降的趋势(表 5)。坡面土壤全氮含量在治理后的前 6 年,呈现逐年上升的趋势,且相隔两年间的差异显著,但在第 7 年却显著降低。坡面土壤全磷、全钾的变化趋势相似,整体呈现出随年限增加稳步下降的趋势,在第 7 年比第 2 年分别降低了 16.67% 和 18.15%,全钾各年份间的变化明显大于全磷各年份间的变化。坡面土壤有机质含量整体呈稳步上升的趋势。随治理年限的增加,坡面土壤 pH 值整体变化趋势为先上升后下降。总体来说,随治理年限的增加坡面土壤养分状况逐渐

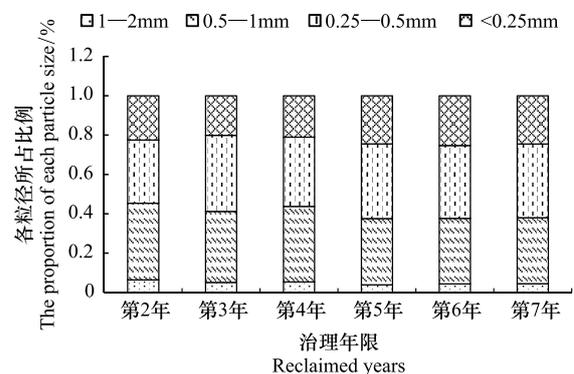


图 1 不同治理年限坡面土壤颗粒组成的变化

Fig.1 Changes of soil particle composition on the hillslopes after reclaimed for different years

得到改善。

表 5 不同治理年限坡面土壤全氮、全磷、全钾及有机质含量变化

Table 5 Changes of total nitrogen, total phosphorus, total potassium and organic matter contents of the soil on the hillslopes after reclaimed for different years

治理年限 Reclaimed years	全氮含量 Total nitrogen content/ (g/kg)	全磷含量 Total phosphorus content/ (g/kg)	全钾含量 Total potassium content/ (g/kg)	有机质含量 Organic matter content/ (g/kg)	pH
第 2 年 2 years	0.17±0.07e	0.36±0.09a	6.06±0.83a	4.91±0.28d	7.43±0.07b
第 3 年 3 years	0.28±0.05d	0.34±0.03a	5.59±0.81ab	4.89±0.28d	7.58±0.05a
第 4 年 4 years	0.44±0.07c	0.30±0.05a	5.01±0.71b	5.81±0.57c	7.59±0.03a
第 5 年 5 years	0.52±0.05b	0.29±0.05a	4.94±0.60b	6.04±0.50bc	7.34±0.10cd
第 6 年 6 years	0.61±0.05a	0.32±0.07a	5.69±0.64ab	6.38±0.33b	7.27±0.02d
第 7 年 7 years	0.50±0.02bc	0.30±0.03a	4.96±0.56b	7.18±0.38a	7.36±0.02c

在前 6 年随治理年限的增加,坡面土壤的碱解氮、有效磷、速效钾含量整体均呈现出逐年上升趋势,但在第 7 年却出现了显著降低(表 6)。其中,碱解氮含量在各治理年限之间差异均达显著水平;有磷钾、速效钾含量在各治理年限间差异只有少数年份达显著水平。坡面土壤中这 3 种速效养分在各年份间的变化趋势以碱解氮变化最为明显,其次是有效磷和速效钾。

表 6 不同治理年限坡面土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量变化

Table 6 Changes of alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium contents of the soil on the hillslopes after reclaimed for different years

治理年限 Reclaimed years	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen content/ (mg/kg)	有效磷含量 Available phosphorus content/ (mg/kg)	速效钾含量 Available potassium content/ (mg/kg)
第 2 年 2 years	16.10±2.42e	1.89±0.47c	26.58±3.25d
第 3 年 3 years	37.10±4.87d	2.30±0.76bc	39.70±13.98bc
第 4 年 4 years	44.45±2.36c	2.90±0.62b	45.68±13.28b
第 5 年 5 years	51.10±4.39b	2.71±0.49b	41.87±6.62b
第 6 年 6 years	62.18±2.66a	4.80±0.76a	57.40±6.20a
第 7 年 7 years	37.80±3.28d	1.70±0.47c	30.90±2.98cd

2.5 物种多样性与土壤理化性质的相关分析

应用 RDA 分析物种多样性与土壤养分,得到物种多样性-土壤养分因子的双序图(图 2)。RDA 排序的前 2 个轴保留了物种数据总方差的 83.5%,其与环境因子的相关系数分别达 0.9152 和 0.9377,且两排序轴的相关性极小,仅为-0.0333,说明排序图能够反映物种多样性沿着土壤因子的变化趋势。在排序图中,各多样性指标点的位置反映其在环境因子梯度上取得高值的位置。指向诸环境因子的箭头方向代表其与排序轴的正负相关性,长度反映环境因子与多样性指数分布格局之间关系的强弱^[11]。从表 7 和图 2 可看出,RDA 第 1 主轴主要与有机质、全氮、碱解氮呈正相关关系,主要与全磷、全钾、土壤容重呈负相关关系;而第 2 排序轴与毛管持水量、田间持水量、饱和持水量、总孔隙度呈正相关关系,主要与土壤容重、有效磷、速效钾呈负相关关系。

由图 2 可知,Shannon 多样性指数位于排序轴的右上方,主要与有机质、全氮、碱解氮等呈正相关关系,其最大值出现在环境因子最高的地方,主要与全磷、全钾等呈负相关关系;Pielou 均匀度指数和丰富度指数位于图的右下方,主要与有机质、全氮、碱解氮等呈正相关关系,主要与全磷、全钾等呈负相关关系。

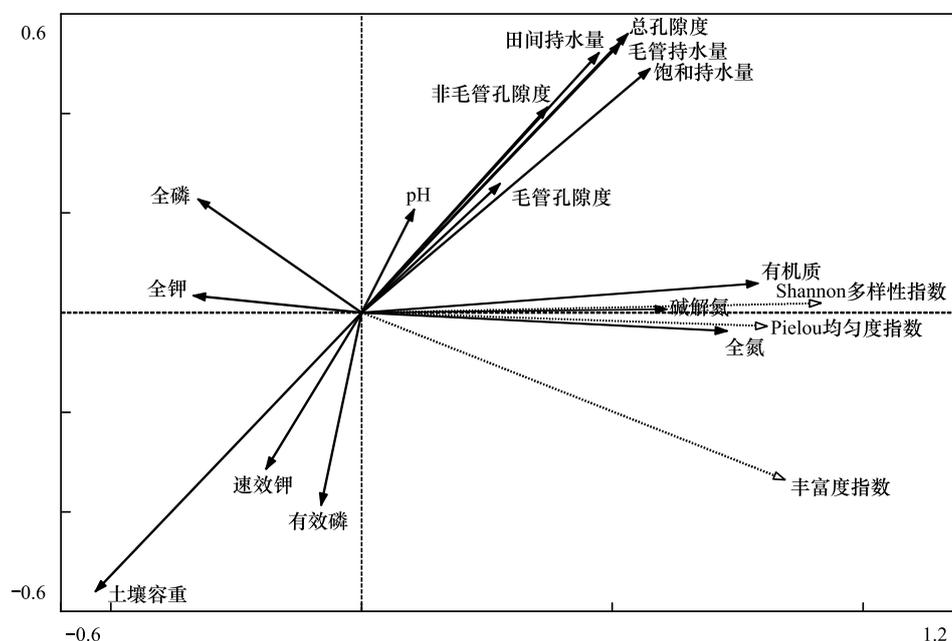


图2 土壤理化性质和物种多样性关系的 RDA 双序图

Fig.2 RDA biplot of the relationship between plant species diversity and soil physical and chemical factor

表7 RDA 前两轴与土壤理化性质的相关性

Table 7 Intra-set correlation of the soil physical and chemical properties with the first two axes of RDA

土壤理化因子 Soil physical and chemical factors	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	土壤理化因子 Soil physical and chemical factors	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2
土壤容重 Soil bulk density	-0.4859	-0.5248	有机质 Organic matter	0.7237	0.0551
总孔隙度 Total porosity	0.4859	0.5248	全氮 Total nitrogen	0.6667	-0.0348
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.2528	0.2424	全磷 Total phosphorus	-0.2981	0.2138
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	0.3394	0.3864	全钾 Total potassium	-0.3066	0.0319
饱和持水量 Saturation moisture capacity	0.5259	0.4591	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen	0.5573	0.0067
毛管持水量 Capillary moisture capacity	0.4725	0.5068	有效磷 Available phosphorus	-0.074	-0.3618
田间持水量 Field water capacity	0.4332	0.4886	速效钾 Available potassium	-0.174	-0.2939
pH	0.0955	0.1941			

3 讨论

3.1 坡面植被恢复过程中植物群落的变化

植被恢复与重建是人类治理退化生态系统的重要手段和内容。植被恢复过程中植物群落组成的监测有助于了解恢复的发生过程,对进一步了解干扰后植物群落的恢复机理提供更多的数据支持^[12]。本试验通过对不同治理年限的坡面植被的调查,发现随年限增加,坡面植被覆盖度和植被种类均逐年增多,并逐渐出现乔木物种,物种多样性稳步提高。时连俊等^[13]的研究也得出了相似的结论。原因在于随着恢复年限的增加,土壤理化性质的改善影响植物的生长和种类组成,进而影响物种的多样性指数。但曾歆花等^[10]的研究却发现植被恢复 22 年后,群落结构和物种组成发生了明显的变化,群落逐渐由草本向乔灌木转变,且草本植物的物种数显著减少。原因可能在于曾歆花的试验中灌木的盖度和生物量显著增加,引起灌下小环境的改变,不利于某些草本植物的生长,从而导致物种多样性和丰富度指数降低。本试验中苜蓿的覆盖度在第 7 年出现了显著下降。王书转等^[14]和刘增宝等^[15]的研究也发现苜蓿人工草地会逐渐退化,被其他植物群落替代。

3.2 坡面植被恢复过程中土壤理化性质的变化

土壤结构与养分状况对植物的生长起着关键性作用,直接影响植物群落的组成与生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平,是度量退化生态系统生态功能恢复与维持的关键指标之一^[16]。通过对所采集土壤样本理化性质的测定发现,随治理年限增加,土壤的理化性质得到有效改善,持水能力增强,养分含量增高。这种变化趋势与 Garcia 等^[17]和 Gil-Sotress 等^[18]的研究结果基本一致。杨玉海^[19]研究认为随种植苜蓿年限增加土壤 pH 逐渐增高,而杨恒山^[20]研究结果与之相反。本研究结果表明:坡面土壤 pH 值变化趋势与坡面土壤总孔隙度变化趋势大体相似,但整体变化趋势的波动性更强,变化趋势为先下降,后逐步上升,再逐步下降,且不是像总孔隙度更趋于整体上升的趋势。土壤颗粒整体向着细颗粒方向发展。影响土壤风化的主要有气候、生物、母质、时间、人为等五大因素。片麻岩山地经过机械化整地后,由岩石变成了碎石粒,表面积显著增大,容易受到水、空气、CO₂等化学物质作用而发生化学风化,而且种植苜蓿后,土壤理化性质逐步改善,土壤微生物^[21]与土壤酶^[22]的作用增强,这些因素都加速了土粒的风化程度。

3.3 植被群落与土壤理化性质的相关性分析

土壤作为植物生长环境的一部分,不仅影响着植物群落的发生、发育和演替的速度,而且决定着植物群落演替的方向^[23]。本研究结果表明,植被恢复过程中,土壤质量得到不断恢复提高,并能促进植被的生长繁衍,推动植被恢复演替进展,植被恢复健康和演替的同时,亦进一步推动土壤质量的改善提高,二者之间表现为正向协同效应。彭东海等^[24]的研究也得出了相似的结论。王轶浩等^[25]在研究三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征时发现,植被恢复能有效改善紫色土土壤团粒结构,且随植被恢复年限增加而增强。植被恢复的过程中,不仅改善了土壤质量,同时也提高了土壤稳定性和抗蚀性。戴全厚等^[26]和荣浩等^[27]的研究也发现植被地上生物量和植被覆盖度与关系密切,它们与表示土壤抗蚀性能的土壤团聚度、结构系数之间呈正相关,与土壤分散系数、结构体破坏率之间呈负相关。土壤容重与土壤大团聚体、水稳性团聚体含量之间呈负相关,土壤大团聚体含量与水稳性团聚体含量之间亦呈正相关。

4 结论

随着治理年限延长,坡面植被覆盖度和植被种类均显著增加,群落逐渐出现乔木物种,物种多样性稳步提高;

经过人工治理的坡面,随治理年限的增加,坡面土壤多项理化性质得到改善,土壤有效养分增多,保水能力增强,适合越来越多植物的生存,坡面生态环境越来越好;

坡面植被群落覆盖度和多样性的改变可以改善土壤理化性质,坡面土壤理化性质的改善反过来也会影响坡面植物群落的种类和覆盖度。

参考文献 (References):

- [1] 徐学华, 张金柱, 张慧, 郭素萍, 许玉娟. 太行山片麻岩区植被恢复过程中物种多样性与土壤水分效益分析. 水土保持学报, 2007, 21(2): 133-136, 174-174.
- [2] 孟莹莹, 周莉, 周旺明, 于大炮, 包也, 王晓雨, 郭焱, 代力民. 长白山风倒区植被恢复 26 年后物种多样性变化特征. 生态学报, 2015, 35(1): 142-149.
- [3] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态. 植物生态学报, 2004, 28(1): 86-92.
- [4] 王费新, 王兆印, 杨正明, 纪喜宁. 南亚热带水土流失地区人工加速植被演替过程. 生态学报, 2006, 26(8): 2558-2565.
- [5] 宋创业, 郭柯, 刘高焕. 浑善达克沙地植物群落物种多样性与土壤因子的关系. 生态学杂志, 2008, 27(1): 8-13.
- [6] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 霍竹, 郑纪勇. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [7] 王昭艳, 左长清, 曹文洪, 杨洁, 徐永年, 秦伟, 张京凤. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析. 土壤学报, 2011, 48(4): 715-724.
- [8] 河北省质量技术监督局. DB13/T 2275—2015 片麻岩山地修造梯田式耕地技术规程. 石家庄: 河北省地方标准, 2016.
- [9] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范 (第二版). 北京: 农业出版社, 2014.

- [10] 曾歆花, 张万军, 宋以刚, 璩芳, 赵昕. 河北太行山低山丘陵区植被恢复过程中物种多样性与土壤养分变化. 生态学杂志, 2013, 32(4): 852-858.
- [11] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭森林物种多样性的空间格局分析及其地形解释. 植物学报, 2000, 42(6): 620-627.
- [12] Sluis W J. Patterns of species richness and composition in Re-created grassland. *Restoration Ecology*, 2002, 10(4): 677-684.
- [13] 时连俊, 徐建, 林叶彬, 刘守江. 谢家店植物群落恢复中种类组成及物种多样性分析. 水土保持研究, 2016, 23(2): 83-88.
- [14] 王书转, 郝明德, 普琼, 吴振海. 黄土区苜蓿人工草地群落生态与生产功能演替. 草业学报, 2014, 23(6): 1-10.
- [15] 刘增宝, 钟彩梅. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植被演替分析. 牧草饲料, 2012, (10): 113-113.
- [16] 余海龙, 顾卫, 江源, 刘永兵. 半干旱区高速公路边坡不同年代人工植被群落特征及其土壤特性研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 22-25.
- [17] Garcia C, Hernandez T, Roldan A, Martin A. Effect of plant cover decline on chemical and microbiological parameters under Mediterranean climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5): 635-642.
- [18] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Seoane S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 877-887.
- [19] 杨玉海, 蒋平安, 艾尔肯, 周抑强. 种植苜蓿对土壤肥力的影响. 干旱区地理, 2005, 28(2): 248-251.
- [20] 杨恒山, 张庆国, 邵继承, 葛选良, 王娜娜. 种植年限对紫花苜蓿地土壤 pH 值和磷酸酶活性的影响. 中国草地学报, 2009, 31(1): 32-35, 44-44.
- [21] 叶莹莹, 刘淑娟, 张伟, 舒世燕, 杨珊, 王克林. 喀斯特峰丛洼地植被演替对土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(21): 6974-6982.
- [22] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 林仲桂, 宋光桃, 陈志阳, 赵林峰. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变. 生态学报, 2014, 34(10): 2693-2701.
- [23] Willis K J, Whittaker R J. Species diversity—Scale matters. *Science*, 2002, 295(5558): 1245-1248.
- [24] 彭东海, 侯晓龙, 何宗明, 刘露奇, 蔡丽平, 林静雯, 江瑞荣, 黄福才, 钟均华. 金尾矿废弃地不同植被恢复模式对土壤理化性质的影响. 水土保持学报, 2015, 29(6): 137-142.
- [25] 王轶浩, 耿养会, 黄仲华. 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团聚组成及分形特征. 生态学报, 2013, 33(18): 5493-5499.
- [26] 戴全厚, 薛蕙, 刘国彬, 兰雪, 余娜, 杨智. 侵蚀环境撂荒地植被恢复与土壤质量的协同效应. 中国农业科学, 2008, 41(5): 1390-1399.
- [27] 荣浩, 珊丹, 刘艳萍, 梁占岐. 草原工程侵蚀区植被恢复模式的水土保持效应. 水土保持研究, 2017, 24(3): 24-28.