

喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应*

宋同清^{1,2} 彭晚霞^{1,2} 曾馥平^{1,2} 王克林^{1,2} 刘璐^{1,2} 鹿士杨^{1,2} 杜虎^{1,2}

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

(2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100)

摘要 石漠化生态重建的关键是恢复植被, 本质是提高土地生产力。本文以典型喀斯特峰丛洼地的坡耕地为对照, 对退耕种植任豆、香椿、板栗、柑橘、任豆+桂牧 1 号、桂牧 1 号和撂荒 7 种主要模式固定标准地的 21 个土壤指标进行调查分析, 探讨了退耕还林还草的土壤综合生态效应, 筛选了优化模式。结果表明, 与同纬度地区的红壤相比, 喀斯特峰丛洼地的土壤质量除全钾和速效磷含量稍低外均较高; 退耕还林还草显著或极显著提高了大部分土壤主要养分、水分和矿质养分含量, 降低了 SiO_2 含量, 除任豆模式外均恢复到了石漠化以下水平, 同时提高了土壤微生物种群数量、 B_C 、 B_C/SOM 和 B_C/TN , 但 B_N 和 B_N/TN 略有降低; 聚类分析直观地将坡耕地和 7 种模式分为土壤显著改良型、改良型、缓慢改良型和改良迟滞型 4 种类型, 其中香椿和板栗的土壤生态效应最好。

关键词 退耕还林还草; 土壤理化性状; 土壤微生物; 优化模式; 喀斯特峰丛洼地

中图分类号 S154.1 文献标识码 A

西南喀斯特(世界三大岩溶区之一)是青藏高原隆起在东亚大陆亚热带气候区一个海拔梯度大、地势格局复杂的独特环境单元^[1]。受地球内动力、强烈的地质运动、高温多雨且分布不均、碳酸盐岩溶蚀性强、水文二维结构明显以及其适生植物具有嗜钙性、耐旱性和石生性等限制特点的影响, 该区域具有天然的高度异质性和脆弱性, 环境容量小, 极易退化, 与黄土、沙漠、寒漠并列为中国四大生态环境脆弱区^[2]。峰丛洼地是典型的喀斯特地貌, 集中分布在西南喀斯特南部斜坡地带, 面积约 9.7 万 km^2 , 土壤贫瘠、水土流失严重、人地矛盾尖锐、“喀斯特贫困”现象严重与强烈的人为干扰等因素导致了以脆弱的生态地质环境为基础、以强烈的人类活动为驱动力、以植被减少为诱因、以土地生产力退化为本质、以出现类似荒漠化景观为标志的复合退化状态, 且呈不断扩张的态势, 植被恢复和生态重建迫在眉睫^[3-4]。

退耕还林还草是指从保护和改善生态环境出发, 将易造成水土流失和土地荒漠化(沙漠化和石漠化)的耕地, 有计划、有步骤地停止继续耕种, 本着因地制宜、适地适树原则, 造林种草、恢复林草植被^[5]。美国和欧洲一些发达国家迫于环境压力先后实施了退耕还林还草, 但研究不多, 涉及土壤改良效果研究的指标单一^[6-7]。我国退耕还林还草经历了初步认识(1949~1979 年)、提高认识(1980~1998 年)、高度重视(1998~2001 年)和大规模推动(2002 年至今)4 个阶段, 研究的侧重点主要针对黄土高原退耕还林政策、技术措施、效益三个方面。西南喀斯特位于我国长江和珠江两大水系的上游, 退耕还林还草能迅速恢复植被、防止水土流失、提高土地生产力, 对该区域的可持续发展和我国半壁江山的生态安全影响重大, 而有关方面的研究很少^[8-11]。本文运用生态恢复学原理, 分析了喀斯特峰丛洼地典型退耕还林还草模式早期土壤的物理、化学和微生物环境变化特征, 筛选了优化模式, 为峰丛洼地乃至整个西南喀斯特区域不同程度石漠化植被恢复方案优化设计及退耕还林工程的顺利实施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县下南乡古周村(24° 50'N, 107° 55'E)一个典型的喀斯特峰丛洼地景观单元, 最高海拔 818 m, 最低 376 m, 属亚热带季风气候, 年平均气温 16.5~20.5 °C, 平均降雨量为 1 389 mm, 雨季旱季分明。土壤主要为碳酸盐岩发育的钙质石灰土, 洼地平均土层深度约为 100 cm, 部分地段土深仅为十余厘米, 石芽广泛出露, 山地平均土层深度 20~40 cm, 80%为 25°以上坡地, 岩石裸露率高

*中国科学院知识创新工程项目(KZCX-2-YW-436)、国家自然科学基金项目(Nos. 31070425、31000224、30970508 和 U1033004)和国家科技支撑计划(2009 BADC6B008)资助

作者简介: 宋同清(1962—), 男, 研究员, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: songtongq@163.com

收稿日期: 2010-05-27; 收到修改稿日期: 2010-12-29

达 85%。研究区人地矛盾突出,人为干扰强烈,植被退化严重,森林覆盖率仅为 13%,长年水土流失导致石漠化趋势明显,生态环境十分脆弱。2002 年列为中国科学院亚热带农业生态研究所喀斯特峰丛洼地生态恢复与重建试验示范区,在完成环境移民 50%的基础上全面实施退耕还林还草工程。

1.2 试验设计与调查

2007 年 8~11 月在试验示范区,以坡耕地(玉米—黄豆)为对照,选择种植任豆(*Zenia insignis*)、香椿(*Toona sinensis*)、板栗(*Castanea mollissima*)、柑橘(*Citrus reticulata*)、任豆+桂牧 1 号(*Guimu No. 1 Forage*)、桂牧 1 号和撂荒 7 种主要退耕还林还草模式,各模式在退耕前均为坡耕地(玉米—黄豆),退耕时间均为 2002 年。在母质、土壤类型、坡度等立地条件基本一致的坡中下部沿等高线各设置 3 块 400 m²(20 m × 20 m)的固定标准地,系统进行植被、立地因子、人为干扰等因子调查,并用手持 GPS(GPSmap 60)定位。

1.3 土壤取样与分析

2007 年 11 月 16 日在标准地内按五点法进行土壤水分(0~10 cm)、土壤容重测定,水分采用铝盒烘干法(一次性土壤水分测定意义不大,限于篇幅,不同季节土壤水分的时空分布及变化另作分析),容重采用环刀法。同时按 S 型法采取 15 个样本(0~20 cm)混合组成待测土样,充分混合后分成两部分。一部分带回实验室风干研磨成粉测定 pH、有机碳(OC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、硅(SiO₂)、铁(Fe₂O₃)、钙(CaO)、镁(MgO)、铝(Al₂O₃)和锰(MnO),分析方法详见文献[12];另一部分保存于 4℃的冰箱中,10 d 后测定土壤微生物量碳(B_C)、氮(B_N)、磷(B_P)和细菌、真菌、放线菌数量,其中土壤微生物量碳、氮、磷的转换系数 K 分别采用 0.45、0.45 和 0.4,分析方法详见文献[13]。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2003 和 SPSS16.0 软件进行数据处理和分析,试验数据采用单因素分析(one-way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)进行处理间差异性检验,聚类分析采用欧氏距离、离差平方和法。

2 结果与分析

2.1 不同退耕还林还草模式的土壤理化性质

土壤容重和含水量是表征土壤结构和水源涵养功能的物理环境指标。土壤含水量的测定时间为 11 月 16 日的干旱季节(最后一轮的降雨时间是 11 月 4 日,降雨量仅为 3.3 mm),但坡耕地和不同退耕还林还草模式土壤含水量仍高达 20.76%~29.10%(表 1),且差异很大,有的达到了显著或极显著水平。从高到低的顺序为:板栗、香椿、撂荒、柑橘、坡耕地、任豆+桂牧 1 号、桂牧 1 号、任豆模式。可能受有机质含量、人为管理措施与植被生长状况影响,不同退耕还林还草模式的土壤容重不同(见表 1),从小到大的顺序为:香椿、板栗、坡耕地、任豆+桂牧 1 号、柑橘、撂荒、桂牧 1 号、任豆,不同模式之间的差异大部分达到了显著或极显著水平。

与坡耕地相比,任豆模式的有机质及磷钾全量养分、桂牧 1 号和撂荒模式的全钾、香椿和板栗模式的速效磷极显著降低,不同退耕还林还草的 pH 和其他大部分土壤养分均有不同程度提高,除任豆模式的速效磷、速效钾和柑橘、任豆+桂牧 1 号的 pH 外,均达到了显著或极显著水平,其中有机质、氮和钾养分含量均以香椿和板栗最高,而全磷含量以撂荒模式最高(表 1)。

2.2 不同退耕还林还草模式的土壤矿物质特征

SiO₂、Al₂O₃ 在土壤矿物质元素组成中占绝对优势,其次是 Fe₂O₃,三者占了土壤矿物质含量的 90%以上,CaO 和 MgO 相对较少(表 2)。与坡耕地相比,不同退耕还林还草模式显著或极显著降低了 SiO₂ 含量,极显著增加了其他矿质养分含量。SiO₂ 含量以坡耕地和任豆模式最高,分别达 797.6 和 743.5 g kg⁻¹,两者之间差异显著,且极显著高于其他模式;模式 III~VII 的 SiO₂ 含量在 502.3~549.5 g kg⁻¹ 之间,差异不显著;撂荒地的 SiO₂ 含量仅为 402.4 g kg⁻¹,极显著低于其他模式;Al₂O₃ 的大小顺序为 IV>V>VIII>VI>III>II>VII>I,各模式之间的差异极显著。模式 III~VIII 的 Fe₂O₃ 含量在 65.27~72.25 g kg⁻¹ 之间,而坡耕地和任豆的 Fe₂O₃ 含量很低,分别只有 25.34 和 40.77 g kg⁻¹。CaO 的含量大小顺序为 VIII>III>IV>V>VI>VII、II>I,除 VII、II 模式外,各模式之间的差异均达到了显著或极显著水平;撂荒地由于基岩出露厉害,CaO 含量高达 64.80 g kg⁻¹,其他模式的含量在 1.22~10.29 g kg⁻¹ 之间。MgO 含量的大小顺序为 VIII>IV>III>V、VII、VI>II>I,除模式 V、VI、VII 的差异不显著外,其他模式之间均达到了显著或极显著水平。

表 1 不同退耕还林还草模式的土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils of different grain-for-green models

项目 Items	I	II	III	IV
含水量 Water content (%)	24.55±0.83BCb	21.75±0.37CDc	26.92±0.94ABab	29.10±0.30Aa
容重 Bulk density (g cm ⁻³)	1.28±0.03CDd	1.46±0.01Aa	1.17±0.03Ee	1.26±0.05DEd
pH	6.44±0.06Dd	7.15±0.03Aa	6.85±0.01Bb	6.65±0.07BCDbc
有机质 OM (g kg ⁻¹)	20.66±0.99Fg	17.42±0.41Gh	45.51±0.45Aa	38.36±0.89Bb
全氮 TN (g kg ⁻¹)	1.40±0.11De	1.20±0.02De	3.13±0.10Aa	2.75±0.06Ab
全磷 TP (g kg ⁻¹)	0.87±0.04Cd	0.69±0.03De	1.07±0.02Bbc	1.03±0.02Bc
全钾 TK (g kg ⁻¹)	6.76±0.09Dd	3.28±0.10Fg	10.07±0.36Bb	11.25±0.10Aa
碱解氮 AN (mg kg ⁻¹)	43.65±0.29Ee	60.32±1.49Dd	141.6±3.7Aa	143.2±0.9Aa
速效磷 AP (mg kg ⁻¹)	4.95±0.73Ee	5.31±0.17Ee	3.73±0.10Ff	3.53±0.17Ff
速效钾 AK (mg kg ⁻¹)	33.59±2.60Ee	33.95±1.42Ee	83.84±0.35Aa	84.47±1.02Aa

项目 Items	V	VI	VII	VIII
含水量 Water content (%)	25.68±1.01ABb	24.54±1.19BCb	20.76±1.12Dc	26.05±1.12ABb
容重 Bulk density (g cm ⁻³)	1.37±0.02BCbc	1.34±0.01BCDcd	1.42±0.02ABab	1.39±0.01ABbc
pH	6.54±0.02CDcd	6.41±0.06Dd	6.81±0.00BCb	7.20±0.16Aa
有机质 OM (g kg ⁻¹)	33.01±0.58Cd	26.31±0.16Ef	30.22±0.40De	36.45±0.70Bc
全氮 TN (g kg ⁻¹)	2.22±0.05BCc	2.24±0.05Bc	1.83±0.16Cd	1.83±0.13Cd
全磷 TP (g kg ⁻¹)	1.11±0.02Bb	1.10±0.03Bbc	1.08±0.00Bbc	1.35±0.00Aa
全钾 TK (g kg ⁻¹)	9.99±0.20Bb	9.11±0.10Cc	4.79±0.04Ee	4.28±0.09Ef
碱解氮 AN (mg kg ⁻¹)	109.4±0.8Bb	98.69±0.13Cc	96.98±0.99Cc	97.39±1.73Cc
速效磷 AP (mg kg ⁻¹)	8.87±0.10Cc	6.63±0.09Dd	10.76±0.14Bb	15.00±0.23Aa
速效钾 AK (mg kg ⁻¹)	68.15±1.45Bb	42.30±1.32CDcd	39.57±0.41DEd	46.63±1.27Cc

注: I: 坡耕地; II: 任豆; III: 香椿; IV: 板栗; V: 柑橘; VI: 任豆+桂牧 1 号; VII: 桂牧 1 号; VIII: 撂荒。同一行不同大小写字母的数据间差异分别达到极显著 $p<0.01$ 和显著水平 $p<0.05$ 。下同 Note: I: slope field; II: cultivation of *Zenia insignis*; III: cultivation of *Toona sinensis*; IV: cultivation of *Castanea mollissima*; V: cultivation of *Citrus reticulata*; VI: cultivation of *Zenia insignis* + Guimu No. 1 Forage; VII: cultivation of Guimu No. 1 Forage, and VIII: desertion. Different capital letters and lowercase letters within a row indicate significant difference at $p<0.01$ level and $p<0.05$ level, respectively. The same below

表 2 不同退耕还林还草模式的土壤矿物质特征

Table 2 Soil mineral properties under different grain-for-green models

模式 Models	SiO ₂ (g kg ⁻¹)	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	CaO (g kg ⁻¹)	MgO (g kg ⁻¹)	Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)
I	797.6±47.3Aa	25.34±1.90Ee	1.22±0.02Fg	4.51±0.02Ff	109.6±4.3Hh
II	743.5±1.9Ab	40.77±0.24Dd	6.97±0.03Ef	7.18±0.07Ee	360.5±4.1Ff
III	502.3±0.6Bc	72.25±0.55Aa	10.29±0.11Bb	10.57±0.20BCc	431.7±0.8Ee
IV	500.9±2.1Bc	69.30±0.16ABb	9.84±0.10Bc	11.22±0.09Bb	685.7±5.4Aa
V	549.5±1.8Bc	65.28±0.03Cc	8.79±0.07Cd	9.98±0.10CDcd	611.4±0.1Bb
VI	528.6±0.3Bc	70.09±0.68ABab	7.56±0.00De	9.64±0.38Dd	454.8±0.9Dd
VII	542.8±8.1Bc	68.01±0.47BCb	7.11±0.15DEf	9.68±0.37Dd	179.1±0.0Gg
VIII	402.4±0.4Cd	65.27±0.26Cc	64.80±0.27Aa	22.87±0.05Aa	507.6±0.9Cc

2.3 不同退耕还林还草模式的土壤微生物性状

2.3.1 土壤微生物种群数量 土壤微生物种群数量受多种因素的影响, 能够敏感地反映土壤生态系统受人为干扰或生态恢复重建的细微变化及其程度, 是土壤质量变化的指标之一。由表 3 可知, 除任豆模式外, 不同退耕还林还草模式均能提高土壤微生物总数量。总数量的顺序为: VII>VIII>VI>IV、III、V、I、II, 其中, VII、VIII、VI模式之间差异达到了极显著水平。细菌数量的顺序为: VII>VIII>III>IV>V>VI>II>I, 各模式之间的差异均达到了极显著水平。真菌为VIII>II、VII>V、IV、I>III>VI, 各排序之间差异均达到了显著或极显著水平。放线菌数量的差异达到了 3 个数量级, 第一个数量级为桂牧 1 号和撂荒, 数量相近; 第二个数量级为任豆+桂牧 1 号; 其他 5 个模式为第三个数量级, 差异不显著。微生物种群数量

组成上细菌的比例为 3.54%~71.79%，放线菌为 27.97%~96.44%，真菌的比例很小，不足 1%。

表 3 不同退耕还林还草模式土壤微生物主要种群数量

Table 3 Populations of main soil microbes in soils of different grain-for-green models

模式 Models	细菌 Bacteria ($\times 10^6 \text{ g}^{-1}$)	真菌 Fungi ($\times 10^4 \text{ g}^{-1}$)	放线菌 Actinomycetes ($\times 10^6 \text{ g}^{-1}$)	总数 Sum ($\times 10^6 \text{ g}^{-1}$)	细菌比例 Percentage of bacteria (%)	真菌比例 Percentage of fungi (%)	放线菌比例 Percentage of actinomycetes (%)
I	1.07 \pm 0.09Hh	2.80 \pm 0.36CDd	4.22 \pm 1.82BC	5.32 \pm 1.85Dd	28.07 \pm 12.60B	0.65 \pm 0.18AB	71.28 \pm 12.77Bb
II	2.67 \pm 0.03Gg	3.81 \pm 0.03Bb	1.75 \pm 0.00Cc	4.47 \pm 0.03Dd	59.88 \pm 0.22Aa	0.85 \pm 0.00Aa	39.27 \pm 0.23Ccd
III	6.45 \pm 0.05Cc	2.18 \pm 0.00De	2.51 \pm 0.00Cc	8.99 \pm 0.05CDd	71.79 \pm 0.15Aa	0.24 \pm 0.00CD	27.97 \pm 0.15Cd
IV	6.18 \pm 0.07Dd	2.95 \pm 0.02Ccd	4.98 \pm 0.00BC	11.19 \pm 0.07CD	55.24 \pm 0.29Ab	0.26 \pm 0.00CD	44.49 \pm 0.29Cc
V	5.23 \pm 0.07Ee	3.19 \pm 0.02BCc	2.55 \pm 0.00Cc	7.81 \pm 0.07CDd	66.93 \pm 0.31Aa	0.41 \pm 0.00BC	32.66 \pm 0.31Ccd
VI	3.43 \pm 0.05Ff	0.42 \pm 0.00Ef	13.37 \pm 0.48Bb	16.80 \pm 0.43Cc	20.43 \pm 0.82BC	0.02 \pm 0.00Dd	79.54 \pm 0.82ABb
VII	16.83 \pm 0.00Aa	3.37 \pm 0.00BCb	252.4 \pm 4.9Aa	269.3 \pm 4.9Aa	6.25 \pm 0.11Cd	0.01 \pm 0.00Dd	93.74 \pm 0.11Aa
VIII	9.06 \pm 0.00Bb	7.00 \pm 0.24Aa	247.1 \pm 4.8Aa	256.3 \pm 4.8Bb	3.54 \pm 0.06Cd	0.03 \pm 0.00Dd	96.44 \pm 0.07Aa

2.3.2 土壤微生物生物量 土壤微生物生物量碳、氮、磷不仅是研究土壤有机质、氮和磷循环及其转化过程的重要指标，而且是综合评价土壤质量和肥力状况的指标之一。由表 4 可看出，与坡耕地相比，不同退耕还林还草模式(除任豆模式外)明显增加了喀斯特峰丛洼地土壤微生物 B_C ，增加的程度达 136.6~644.4 mg kg^{-1} ，撂荒地最高。土壤微生物 B_N 含量变化范围不大，在 16.67~46.13 mg kg^{-1} 之间，与坡耕地相比呈下降趋势，下降的幅度为 1.61~29.46 mg kg^{-1} ；只有任豆+桂牧 1 号、柑橘和任豆模式达到了极显著水平。土壤微生物 B_P 含量的变异很大，香椿、板栗、撂荒和桂牧 1 号模式土壤微生物 B_P 含量显著或极显著高于坡耕地，其他 3 种模式土壤微生物 B_P 含量略有下降，柑橘模式达到了显著水平。另外， B_C/SOM 和 B_N/TN 的值较小，分别在 0.65%~2.43%、0.74%~3.27% 之间， B_P/TP 差异较大，在 0.40%~7.15% 之间，坡耕地的 B_C/B_N 为 3.62，退耕还林还草模式土壤的 B_C/B_N 值很高，在 10.75~38.38 之间(表 4)。

表 4 不同退耕还林还草模式土壤微生物生物量碳、氮、磷的变化

Table 4 Soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus under different grain-for-green models

模式 Models	B_C (mg kg^{-1})	B_N (mg kg^{-1})	B_P (mg kg^{-1})	B_C/SOM (%)	B_N/TN (%)	B_P/TP (%)	B_C/B_N
I	131.7 \pm 33.2	46.13 \pm 1.34Aa	7.92 \pm 1.84D	0.65 \pm 0.18Bb	3.27 \pm 0.79Aa	0.92 \pm 0.15D	3.62 \pm 1.72Cd
II	268.3 \pm 3.0B	25.13 \pm 0.70BC	7.39 \pm 0.45D	1.55 \pm 0.03A	2.10 \pm 0.03ABC	1.06 \pm 0.11D	10.75 \pm 0.19BC
III	738.0 \pm 3.2A	41.04 \pm 0.90AB	76.65 \pm 0.75	1.62 \pm 0.01A	1.31 \pm 0.04BCD	7.15 \pm 0.17Aa	17.94 \pm 0.46BC
IV	506.6 \pm 88.5	32.70 \pm 2.50AB	56.97 \pm 1.33B	1.69 \pm 0.20A	1.19 \pm 0.10CDd	5.53 \pm 0.19Bb	20.06 \pm 2.98BC
V	448.5 \pm 92.5	24.25 \pm 0.61BC	4.33 \pm 1.50Ef	1.96 \pm 0.25Aa	1.10 \pm 0.05CDd	0.40 \pm 0.14Ef	26.61 \pm 3.43AB
VI	335.3 \pm 100.0	16.67 \pm 0.30Cd	6.03 \pm 0.45Ee	2.43 \pm 0.37Aa	0.74 \pm 0.01De	0.55 \pm 0.05D	38.38 \pm 5.72Aa
VII	559.8 \pm 58.3	33.21 \pm 0.30AB	10.58 \pm 0.80	2.26 \pm 0.19Aa	1.84 \pm 0.16BCD	0.98 \pm 0.07De	20.66 \pm 1.85Bb
VIII	776.2 \pm 0.3A	44.52 \pm 2.44Aab	22.87 \pm 0.31C	2.04 \pm 0.04Aa	2.45 \pm 0.19ABa	1.69 \pm 0.02Cc	16.79 \pm 0.89BC

2.4 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草模式聚类分析

以土壤理化、矿质养分和微生物性状的 21 个指标进行规格化处理，采用欧氏距离、离差平方和法进行聚类得图 1 所示的树状图，从中可看出坡耕地及 7 种不同退耕还林还草模式可分为 4 类(表 5)：第一类为土壤显著改良型，模式为香椿和板栗，除全磷、速效磷、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 和微生物种群数量略低外，其他土壤属性均最好。第二类为土壤改良型，模式为撂荒和桂牧 1 号，土壤各指标含量均处于中上水平，其中第一类中含量稍低的土壤指标均

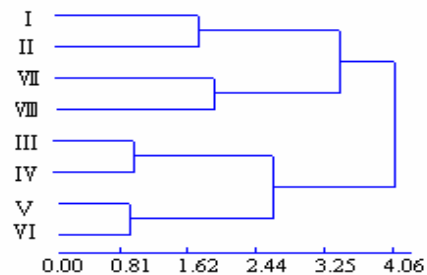


图 1 不同退耕还林还草模式土壤生态效应聚类分析图
Fig. 1 Clustering analysis of soil ecological effects of different grain-for-green models

最好。第三类为土壤缓慢改良型，模式有柑橘和任豆+桂牧 1 号，各土壤指标均处于中下水平。第四类为土壤改良迟滞型，模式为任豆和坡耕地，除 SiO₂、B_N、B_P、真菌数量外其他土壤指标均最差，土壤退化现象严重。

表 5 不同退耕还林还草模式聚类分组各类指标的平均值

Table 5 Mean soil indices in clustering analysis of different groups of grain-for-green models

类型 Types	含水量 Water content (%)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	pH	有机质 OM (g kg ⁻¹)	全氮 TN (g kg ⁻¹)	全磷 TP (g kg ⁻¹)	全钾 TK (g kg ⁻¹)	碱解氮 AN (mg kg ⁻¹)	速效磷 AP (mg kg ⁻¹)	速效钾 AK (mg kg ⁻¹)	SiO ₂ (g kg ⁻¹)
第一类 Type 1	28.01	1.22	6.75	41.93	2.94	1.05	10.66	142.4	3.63	84.16	501.6
第二类 Type 2	23.40	1.40	7.00	33.33	1.83	1.22	4.54	97.18	12.88	43.10	472.6
第三类 Type 3	25.11	1.36	6.47	29.66	2.23	1.10	9.55	104.0	7.75	55.23	539.1
第四类 Type 4	23.15	1.38	6.79	19.04	1.30	0.78	5.02	51.99	5.13	33.77	770.6

类型 Types	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	CaO (g kg ⁻¹)	MgO (g kg ⁻¹)	Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	Bc (mg kg ⁻¹)	B _N (mg kg ⁻¹)	B _P (mg kg ⁻¹)	细菌数 量 Bacteria populatio n (×10 ⁶ g ⁻¹)	真菌数 量 Fungi populatio n (×10 ⁴ g ⁻¹)	放线菌数量 Actinomycet es population (×10 ⁴ g ⁻¹)
第一类 Type 1	70.78	10.07	10.90	560.2	622.3	36.87	66.81	6.32	2.57	3.75
第二类 Type 2	66.64	35.96	16.28	343.4	668.0	38.86	16.72	12.95	5.19	249.8
第三类 Type 3	67.69	8.18	9.81	533.1	391.9	20.46	5.18	4.33	1.81	7.96
第四类 Type 4	33.06	4.10	5.85	235.1	200.0	35.61	7.65	1.87	3.31	2.99

3 讨 论

3.1 退耕还林还草对喀斯特峰丛洼地土壤理化性状的影响

喀斯特峰丛洼地属亚热带季风气候，温湿条件优越，极有利于生物的繁衍和生长，生物“自肥”作用十分强烈，同时加速了岩石的溶蚀、风化和土壤的形成和发育进程。表层土壤的含水量高达 20.76%~29.10%，在生态系统整体处于干旱状况下，土壤仍然存在着局部水分优势的环境；pH 在 6.41~7.20 之间，由微酸性向微碱性变化；与同纬度地区的红壤相比^[14]，除全钾和速效磷含量外，其他养分含量均很高。不同退耕还林还草模式均不同程度地改善了土壤理化性状，但在早期要切实落实 3 个方面的人工管理措施：(1)任豆树虽然具有固氮作用，但前期生长旺盛，消耗了大量的土壤养分和水分，归还量少，土壤水分、有机质、氮、磷、钾的含量极显著减少，容重显著增加，要多施有机肥和复合肥，保障土壤肥力的供应水平，改善土壤结构。(2)桂牧 1 号的生物量全部被人为收获，养分、水分迁出多，其中水分、钾含量严重减少，容重显著升高，土壤呈现贫瘠、板结状况，必须进行人为耕作、多施肥料特别是钾肥。(3)香椿和板栗的土壤理化性状改良作用最明显，消耗了大量的磷，土壤速效磷的含量分别只有 3.73 和 3.53 mg kg⁻¹，在常规管理的情况下要做好磷肥增施工作。

3.2 退耕还林还草对喀斯特峰丛洼地土壤矿物质特征的影响

土壤矿物质是非常重要的土壤物质，它构成土壤的骨骼，占土壤固体部分的 95%以上，对土壤的结构性、交换能力、肥力状况以及植物营养成分的供应等都有非常重要的影响^[15]，其元素组成是各种成土因素和成土过程综合作用的结果，可在一定程度上反映土壤石漠化的类型和强度。一般而言，产生了石

漠化现象的土壤, SiO_2 含量在 700 g kg^{-1} 以上, Fe_2O_3 不足 40 g kg^{-1} , MgO 低于 9 g kg^{-1} , CaO 由于基岩出露, 含量在 50 g kg^{-1} 以上。尚未发生石漠化的土壤, $\text{SiO}_2 < 650 \text{ g kg}^{-1}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \text{ g kg}^{-1}$, $\text{MgO} > 10 \text{ g kg}^{-1}$, 且随着石漠化的加重, 土壤中 SiO_2 含量明显升高, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等成分不断降低, 石漠化导致土壤的形成速度减缓、发育程度变弱^[16]。喀斯特峰丛洼地坡耕地的基岩出露率低, 方便种植农作物, CaO 含量很低, 仅为 1.22 g kg^{-1} , 因长期的干扰破坏出现了严重的石漠化现象, SiO_2 含量高达 797.6 g kg^{-1} , Fe_2O_3 含量仅为 25.34 g kg^{-1} 。不同退耕还林还草模式均不同程度地降低了 SiO_2 的含量, 提高了 Fe_2O_3 的含量, 除退耕种植任豆的 SiO_2 和 Fe_2O_3 含量分别为 743.5 和 40.77 g kg^{-1} 、短期内无法消除石漠化现象外, 其他 6 种退耕还林还草模式(除撂荒地 $\text{CaO} > 50 \text{ g kg}^{-1}$ 外)土壤矿质养分的含量均恢复到了石漠化以下的水平, 具有良好的改土效应。

3.3 退耕还林还草对喀斯特峰丛洼地土壤微生物性状的影响

喀斯特峰丛洼地土壤微生物种群数量均较高, 不同退耕还林还草模式除任豆外均不同程度地提高了微生物种群数量, 其变化趋势和组成不完全与细菌相同, 这与前人研究结果不太一致^[17-18]。4 种退耕还林模式即任豆、香椿、板栗、柑橘土壤细菌占有优势, 比例在 $55.24\% \sim 71.79\%$ 之间; 禾本科植物比例较大的桂牧 1 号、任豆+桂牧 1 号、撂荒 3 种退耕还林还草模式和坡耕地土壤放线菌的比例均达 80% 以上, 占绝对优势。微生物数量特别是放线菌数量增加, 其分解林木凋落物中含有较多木质化纤维成份等难分解物质的能力增强, 能促进土壤生态系统物质和能量循环^[19], 在石漠化地区实行退耕还林还草时一定要注意林草结合。

喀斯特峰丛洼地土壤微生物 B_C 的含量接近和超过了亚热带稻田土壤^[17]。退耕还林还草明显增加了土壤微生物 B_C ; 降低了土壤微生物 B_N 的含量但幅度不大, 与陈国潮等^[18]研究得出的土地利用方式对红壤土壤微生物 B_N 的影响相对较小的结果相似; 对土壤微生物 B_P 的影响因模式的不同而不同。许多研究表明^[20], 旱地土壤表层 B_C/SOM 的范围为 $0.5\% \sim 4\%$, B_N/TN 为 $2\% \sim 6\%$, B_P/TP 为 $1\% \sim 5\%$ 。喀斯特峰丛洼地退耕还林还草模式提高了 B_C/SOM 、降低了 B_N/TN , 土壤有机质与 B_C 含量同步上升, 而土壤全氮和 B_N 含量同步下降, B_P/TP 差异较大。土壤微生物生物量碳与微生物量氮(B_C/B_N)的比值是否恒定, 不同学者其观点不同, Anderson 等^[20]认为 B_C/B_N 平均值为 6.7 , 陈国潮等^[18]认为红壤土壤 B_C/B_N 平均值为 6.2 , 喀斯特峰丛洼地坡耕地的 B_C/B_N 很低, 仅为 2.86 , 而退耕还林还草土壤的 B_C/B_N 高达 $10.69 \sim 20.11$, 这可能是由于退耕还林还草模式改变了土壤微生物的群落结构, 提高了微生物生物量碳的固持能力^[19]。

3.4 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草模式优化分析

一般认为, 喀斯特峰丛洼地环境脆弱, 生态系统极不稳定, 破坏容易恢复难。本研究表明, 喀斯特峰丛洼地除退耕种植任豆模式外, 其他退耕还林还草模式在第 5 年时对土壤均具有明显的改良效应, 其时限远低于其他土壤(至少需要退耕还林还草 10 年才能产生改良效果)^[21]。这可能是因为喀斯特峰丛洼地的土壤主要以“石碗土”形式存在, 聚集容易流失难, 只要土地利用方式合理, 在石漠化还没有发展到不可逆转的前提下, 土壤的恢复和改良速度相对较快。但喀斯特峰丛洼地异质性强、地势险峻、岩石裸露率高, 退耕还林还草实施的难度大, 应尽量避免人为干扰和破坏。聚类分析直观地将喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式分为土壤显著改良型、改良型、缓慢改良型和改良迟滞型 4 种类型, 各种模式的生态服务功能及生态经济的耦合关系还需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] Sweeting M M. Karst in China, its geomorphology and environment. Berlin: Springer-Verlag, 1995
- [2] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 2008, 28(2): 811—820. Peng W X, Wang K L, Song T Q, et al. Controlling and restoration models of complex degradation vulnerable karst ecosystem (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 811—820
- [3] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征的变化. 生态学报, 2007, 27(12): 5 110—5 119. Zeng F P, Peng W X, Song T Q, et al. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in Northwest Guangxi (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5 110—5 119
- [4] 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. 地球科学进展, 2003, 18(4): 489—492. Academic Divisions of Chinese Academy of Sciences. Some propositions on advancing the comprehensive control of karst mountain areas in southeast China (In Chinese). Advances in Earth Science, 2003, 18(4): 489—492

- [5] 国家林业局. 退耕还林技术模式. 北京: 中国林业出版社, 2001. State Forestry Administration, PR China. Ecological models of returning land for farming to forestry (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2001
- [6] Turnbull L A, Rees M, Crawley M J. Seed mass and the competition colonization trade-off: A sowing experiment. *Journal of Ecology*, 1999, 87: 899—912
- [7] Mitchell R J, Marrs R H, LeDuc M G, et al. A study of the restoration of heathland on successional sites: Changes in vegetation and soil chemical properties. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 36: 770—783
- [8] 刘苑秋, 郭圣茂, 王红胜, 等. 退化石灰岩红壤区四种人工林旱季土壤水分的空间变异. *土壤学报*, 2010, 47(2): 229—237. Liu Y Q, Guo S M, Wang H S, et al. Spatial variability of soil moisture in four plantations in degraded limestone red soil region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 229—237
- [9] 文亦帝, 毕玉芬, 董亚芳. 金沙江流域退耕还草地水土保持效益分析研究. *土壤*, 2006, 38(4): 489—493. Wen Y D, Bi Y F, Dong Y F. Benefit of forage on water and soil conservation in Jinsha Valley (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(4): 489—493
- [10] Sun D F, Li H, Dawson R, et al. Characteristics of steep cultivated land and the impact of the grain-for-green policy in China. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 215—223
- [11] 吴礼军, 刘青, 李琢, 等. 全国退耕还林工程进展成效综述. *林业经济*, 2009, 9: 21—37. Wu L J, Liu Q, L L, et al. Review on the effectiveness of the National Forest Project (In Chinese). *Forestry Economics*, 2009, 9: 21—37
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析: 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [13] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006. Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Soil microbial biomass—Methods and application (In Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006
- [14] 宋同清, 王克林, 彭晚霞, 等. 亚热带丘陵茶园间作白三叶草的生态效应. *生态学报*, 2006, 26(11): 3 647—3 655. Song T Q, Wang K L, Peng W X, et al. Ecological effects of intercropping whiter clover on tea plantation in a subtropical hilly region (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3 647—3 655
- [15] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究. *土壤学报*, 2005, 42(3): 419—427. Long J, Jiang X R, Deng Q Q, et al. Characteristics of soil rocky desertification in the karst region of Guizhou Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 419—427
- [16] 黄昌勇. 土壤学: 面向21世纪课程教材. 北京: 中国农业出版社, 2000: 154—157. Huang C Y. Soil science: Textbook series for 21st century (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 154—157
- [17] 刘守龙, 肖和艾, 童成立, 等. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应. *农业现代化研究*, 2003, 24(4): 278—283. Liu S L, Xiao H A, Tong C L, et al. Microbial biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 2003, 24(4): 278—283
- [18] 陈国潮, 何振立. 红壤不同利用方式下微生物量的研究. *土壤通报*, 1998, 29(6): 276—278. Chen G C, He Z L. Study on microbial biomass in red soil under different land use types (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(6): 276—278
- [19] 龙健, 李娟, 江新荣, 等. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究. *土壤学报*, 2004, 41(4): 597—602. Long J, Li J, Jiang X R, et al. Soil microbial activities in Maolan karst forest, Guizhou Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 597—602
- [20] Anderson J P E, Domsch K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, 1980, 130: 211—216
- [21] 胡亚林, 曾德慧, 姜涛. 科尔沁沙地退耕杨树人工林生态系统 C、N、P 储量和分配格局. *生态学报*, 2009, 29(8): 4 206—4 214. Hu Y L, Zeng D H, Jiang T. Effects of afforested poplar plantations on the stock and distribution of C, N, P at Keerqin Sandy Lands (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4 206—4 214

SOIL ECOLOGICAL EFFECTS OF CONVERTING CROPLAND TO FOREST AND GRASSLAND IN DEPRESSIONS BETWEEN KARST HILLS

Song Tongqing^{1,2} Peng Wanxia^{1,2} Zeng Fuping^{1,2} Wang Kelin^{1,2} Liu Lu^{1,2} Lu Shiyang^{1,2} Du Hu^{1,2}

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Changsha 410125, China)

(2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, CAS, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract The key to ecological restoration of rocky desertification is to recover vegetation, of which the nature is to improve soil productivity. With a tract of farmland on the slope of depression in between typical karst hills as control, integrated ecological effect of the practice of “Grain for Green” was analyzed by determining 21 soil indexes of seven models of “Grain for Green”, i.e. converting farmland to land of *Zenia insignis*, *Toona sinensis*, *Castanea mollissima*, *Citrus reticulata*, *Zenia insignis* + Guimu No. 1 Forage, Guimu No. 1 Forage, or desertion for comparison with those of the control. On such a basis, an optimal model was screened out. Results show that in comparison with red soil in regions at the latitude, the soil in karst depression was higher in soil nutrient except for total potassium and available phosphorus. The practice of “Grain for Green” significantly increased most of the soil main nutrients, soil water content, and mineral nutrients, but reduced the content of SiO₂, indicating that all the seven models, except for cultivation of *Zenia insignis*, had their nutrient

status restored up to the pre-rocky desertification level. Besides, the practice also increased microbial population, B_C , B_C/SOM , and B_C/TN , but decreased slightly B_N and B_N/TN . Clustering analysis intuitively divided the slope field and 7 conversion models into 4 types, i.e. remarkable improvement, improvement, slow improvement, and sluggish improvement, and the models of cultivation of *Toona sinensis* and *Castanea mollissima* are best in soil ecological effects.

Key words Grain for green; Soil physicochemical properties; Soil microorganisms; Optimal model; Karst depression