

粤北石漠化地区植被退化过程及其建模*

陆冠尧^{1,2,*} 李森² 魏兴琥¹ 梁钊雄¹ 熊彦¹ 黄金国¹

(¹佛山科学技术学院国土资源环境与旅游研究中心, 广东佛山 528000; ²西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要 在粤北石漠化地区选取不同石漠化阶段的样地, 运用面上调查和定位观测相结合的方法, 研究石漠化地区植被退化及构建其理论模型。结果表明: 随石漠化程度的加深, 粤北石漠化土地的植物群落结构越来越趋于简单, 植被演替趋势为(黄连木、芒麻、黄荆、三裂叶野葛)→(黄连木、青蒿、野菊)→(五节芒、野古草、牛筋草)→黄叶凤尾蕨, 群落层片从4层变为1层, 物种减少比例从0→14%→46%→86%, 土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量也随石漠化程度的加深呈极显著下降。植被演替退化可以用不同物种关于某种资源的竞争模型来描述, 由此建立了粤北石漠化地区植被退化的模型。

关键词 石漠化; 植被退化; 建模; 粤北

中图分类号 Q948.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)6-1629-07

Vegetation degradation and its modeling in rock desertification area of northern Guangdong, South China. LU Guan-yao^{1,2,*}, LI Sen², WEI Xing-hu¹, LIANG Zhao-xiong¹, XIONG Yan¹, HUANG Jin-guo¹ (¹Resources and Environmental Science Research Institute, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China; ²Department of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1629–1635.

Abstract: In this paper, site investigation and fixed position observation were conducted in the sampling plots with four different stages of rock desertification in rocky desertification area of northern Guangdong to study the vegetation degradation and its modeling in rocky desertification area. With the development of rocky desertification, the plant community structure in the study area became increasingly simpler, with the dominant plant species evolved from *Pistacia chinensis* + *Boehmeria nivea* + *Vitex negundo* + *Pueraria phaseoloides* to *Pistacia chinensis* + *Artemisia caruifolia* + *Dendranthema indicum* to *Miscanthus floridulus* + *Arundinella anomala* + *Eleusine indica* to *Fissidens zippelianus*. The community's layer was from 4 layers to 3 layers to 2 layers to 1 layer, and the proportion of species reduction was from 0 to 14% to 46% to 86%. The soil organic matter, total N, available N, available P, and available K contents were all decreased significantly with the development of rocky desertification. Vegetation degradation could be described by the competition models of different species to certain kinds of resources, and thus, a model was established for the vegetation degradation in rocky desertification area of northern Guangdong.

Key words: rock desertification; vegetation degradation; modeling; northern Guangdong.

我国的石漠化土地主要分布在长江上游的乌江流域、珠江上游的北盘江流域和粤北的岩溶山区。广东岩溶总面积 1064566.8 hm², 占广东土地总面积

的 5.9%, 全省石漠化面积 81329.8 hm² (广东省林业调查规划院, 2005), 主要集中于粤北的清新、英德、连州、阳山、乳源、乐昌、封开、怀集等县市。粤北是我国南方中亚热带脆弱的岩溶生态环境区域, 是石漠化演变过程十分典型、石漠化问题依然严重的区域, 从 20 世纪 80 年代初期岩石裸露率 > 70% 的石漠化土地占岩溶区面积的 6.12%, 到 90 年代初期

* 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目 (LYM11126)、广东省自然科学基金项目 (S2012010009272)、国家自然科学基金项目 (31170486) 和广东省哲学社会科学十二五规划项目 (GD12CGL01) 资助。

** 通讯作者 E-mail: guanyaolu2005@126.com

收稿日期: 2012-12-25 接受日期: 2013-03-20

已占到 11.25%, 年均扩展 31.84 km², 从 60 年代到 90 年代, 其植被覆盖率由 35.8% 减少到 16.8%, 土壤流失的面积、强度分别由 18.2% 和 605 t · km⁻² · a⁻¹ 增加到 41.3% 和 2863 t · km⁻² · a⁻¹ (王兮之等, 2007), 该地区 30% 的农民年均收入不到 300 元, 远低于非岩溶区农民的人均水平。因此, 土地石漠化成为导致粤北地区人民贫困的主要因素, 在此开展石漠化的研究工作具有重要的科学价值和现实意义。相对于贵州、广西石漠化地区, 粤北石漠化地区的研究起步较晚, 近年来对该区域的研究主要集中在石漠化的景观、成因、治理等方面(李森等, 2007; 王兮之等, 2007; 王金华等, 2007; 黄金国等, 2008; 王明刚和李森, 2011; 魏兴琥等, 2011), 关于粤北岩溶山区石漠化土地植被退化过程研究较少。植被退化过程是土地石漠化过程中最为直观的先导过程, 由此可造成土壤侵蚀、地表水流失等一系列的生态环境问题, 成为石漠化地区可持续发展的障碍之一。由于一直以来缺乏对该地区植被长期系统的观测与研究, 人们对该地区植被退化的原因和机理理解不清, 使得该地区的石漠化治理工作效果甚微。定点调查与观测是研究植被群落变化的重要方法, 另一方面, 根据调查与观测的结果, 结合理性分析构建数学模型也是一条可行的重要的研究途径。因此, 在本区选择典型样地, 系统调查不同石漠化阶段的植被特征及其土壤养分的变化, 对不同阶段石漠化土地植被演替过程进行研究, 并通过调查与观测的结果构建石漠化土地植被退化过程模型, 为预测岩溶石漠化地区植被退化格局的动态变化提供参考, 还可为石漠化土地的合理利用与管理、石漠化的防治提供理论指导。

1 试验设计与方法

1.1 研究区样地

在粤北石漠化地区设置 2 个石漠化土地试验地: 岩背试验地和江英试验地, 在连州、乐昌、乳源、曲江和翁源设置多个观测点(图 1)。岩背试验地位于广东省英德市岩背镇, 该镇位于英德市西部, 地势北高南低, 东面为具有深厚风化层的林业山地, 西面大部分为裸露石灰岩山地。属亚热带季风气候, 年均气温 17.5 °C, 年均降水量近 1800 mm。在选择的调查区内, 有近 1000 m² 的极重度石漠化土地, 岩石裸露率在 95% 以上, 在其周围逐渐向外扩展, 岩石裸露率逐渐降低, 植被层片、盖度也逐渐增加。江英

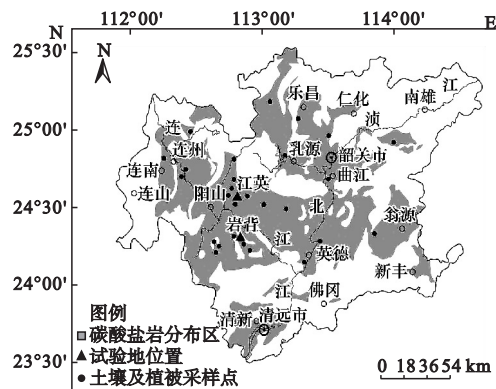


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

试验地位于江英镇东南 1 km 的岩溶丘陵上, 试验地出露石炭系下统大赛坝组石灰岩地层, 节理、裂隙密集, 平均达 5.9 条 · m⁻², 渗漏系数 0.60 ~ 0.47。坡向西南, 平均坡度 22°。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查与取样 在岩背、江英、连州、乐昌、乳源、曲江和翁源观测点对土壤和植被采样, 每个观测点以地表岩石裸露率程度为主要依据, 以极重度石漠化土地(岩石裸露率 > 90%) 为中心, 由近至远选择极重度、重度(岩石裸露率为 70% ~ 90%)、中度(岩石裸露率为 50% ~ 70%) 和轻度(岩石裸露率为 30% ~ 50%) 4 个不同程度的石漠化样地, 每个样地大小为 30 m × 30 m。在每个样地内随机设置 3 个 1 m × 1 m 的草本样方, 有灌木处样方面积扩大到 3 m × 4 m (灌木多为藤本和小灌木)。采用常规群落调查方法, 调查每一样方内的植物种数、各物种的个体数、各物种的分盖度(草本植物采用针刺法, 灌木植物采用实测法)、测量自然高度。采集植物标本鉴定物种。每个样方中的草本植物留茬 1 cm 刈割, 每种草本植物至少 10 株以上, 灌木种每株剪取 3 ~ 5 个典型枝, 至少 3 株。将各物种编号分装, 在烘箱烘至恒重(85 °C), 用感量为 0.0001 g 的电子天平称干量。

1.2.2 土壤特性测定 选取的每个样方中分别采集 0 ~ 10 cm 土层的土样, 用于有机质、有机碳、全氮含量等测定。土壤 pH 值采用电位法测定; 有机质含量采用重铬酸钾容量法测定, 全氮含量采用重铬酸钾硫酸消化法, 速效氮采用碱解扩散法, 速效磷采用碳酸氢钠法, 速效钾采用醋酸铵火焰光度法。

1.2.3 数据分析 (1) 物种重要值。物种重要值的数值大小可作为群落中植物种优势度的一个度量标

志,并可以体现群落中每种植物的相对重要性及植物的最适生境(李博,2000),其计算公式为:

①乔木层重要值(%)=(相对多度+相对显著度+相对高度)/3

其中,相对高度(%)=100×某个种的高度/所有种的总高度;相对显著度(%)=100×某个种的基径断面积/所有种的基径断面积之和;相对多度(%)=100×某个种的株数/所有种的总株数。

②灌木层和草本层的重要值(%)=(相对多度+相对盖度)/2

其中,相对盖度(%)=100×某个种的盖度/所有种的总盖度;相对多度(%)=100×某个种的株数/所有种的总株数。

(2)群落的共有度。

群落的共有度可定义为两个群落共有种的数目占两群落物种总数的百分比。本文的群落共有度用Jaccard 指数测度(Magurran,1988),如群落A 的物种数为a,群落B 的物种数为b,二者的共有物种数为c,则二群落的物种总数为a+b-c,群落A 与群落B 的共有度CP 为:

$CP=c/(a+b-c) \times 100\%$

式中,CP 的数值为0~1;为0 时表示两群落树种完全不同,为1 时表示两群落树种完全相同。共有度通过二群落共有物种所占的比例,一定程度上直观地反映出二群落的相似(或相异)性程度。

(3)相关分析采用 SPSS 16.0。

2 结果与分析

2.1 不同石漠化阶段植被变化

在调查区域内,从轻度→中度→重度→极重度石漠化土地,植被覆盖度降低,植物群落组成成分减少,物种从28 减少到4,物种减少比例从0→14%→46%→86%。群落中,只有轻度和中度石漠化土地有乔木树种。从轻度→中度石漠化土地,虽然物种减少,但中度石漠化土地不同生活型物种比例最为均匀;从中度→重度石漠化土地,乔木物种消失,草本植物物种数从54% 增加到80%;从重度→极重度石漠化土地,植物物种数从15 骤减到4,乔木、灌木和藤本植物物种消失,出现了大量苔藓植物。各石漠化阶段中不同生活型植物物种数所占的比例见图2。

在不同石漠化阶段,植被演替过程中发生了不同程度的物种替代(表1)。从轻度→中度→重度→

极重度石漠化土地,乔灌木和藤本物种的重要值越来越低,而乔木、草本和苔藓植物都在重度石漠化阶段发生转折。草本植物的重要值在重度石漠化阶段达到最高点后开始降低,而乔木在重度石漠化阶段开始消失,苔藓植物开始大量出现(图3)。

2.2 不同石漠化阶段物种共有度

植物群落之间的物种共有度能够表示不同石漠化阶段的植物组成及其地上生物量分配的差异。如果不同石漠化阶段植物组成及其地上生物量分配相似,则它们间的共有度就接近1。在调查区域内,不同石漠化阶段植物群落之间的共有度最大的只有0.461,而中度和极重度石漠化阶段植物群落之间的共有度为0,其他都介于0.062~0.307,说明不同石漠化阶段植物群落差异显著(表2)。

2.3 不同石漠化阶段土壤特性的变化

从轻度→中度→重度→极重度石漠化土地,土壤有机质、全氮、速效氮、磷、钾含量均呈下降趋势,特别在轻度→中度过度阶段,下降幅度最大;土壤

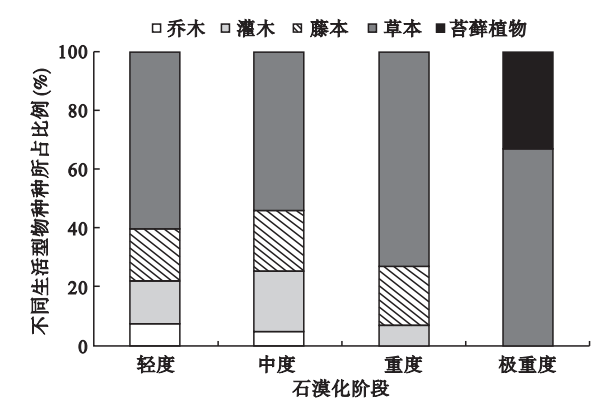


图2 不同石漠化阶段植物生活型谱
Fig.2 Plant life form spectrum in different stages of rocky desertification

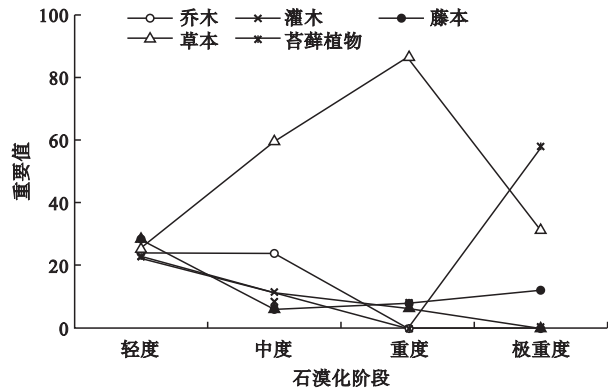


图3 不同石漠化阶段不同生活型植物重要值
Fig.3 Importance values of different plant life form spectrum in different stages of rocky desertification

表 1 不同石漠化阶段植物种的重要值
Table 1 Importance values of species in different stages of rock desertification

| 群落层 | 物种 | 石漠化阶段 | | | |
|-----|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 轻度 | 中度 | 重度 | 极重度 |
| 乔木 | 黄连木 <i>Pistacia chinensis</i> | 18.38 | 23.63 | | |
| | 欒木 <i>Loropetalum chinense</i> | 5.55 | | | |
| | 乔木合计 | 23.93 | 23.63 | 0 | 0 |
| 灌木 | 黄荆 <i>Vitex negundo</i> | 12.5 | 5.02 | 6.16 | |
| | 灰白毛莓 <i>Rubus tephrodes</i> | 4.5 | 2.34 | | |
| | 小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i> | 0.24 | 1.75 | | |
| | 中南鱼藤 <i>Derris fordii</i> | 5.28 | | | |
| | 小叶构子 <i>Cotoneaster microphyllus</i> | | 0.28 | | |
| | 铁包金 <i>Berchemia lineata</i> | | 0.4 | | |
| | 深绿卷柏 <i>Selaginella doederleinii</i> | | 1.45 | | |
| | 灌木合计 | 22.52 | 11.24 | 6.16 | 0 |
| | 铁线莲 <i>Clematis florida</i> | | 1.49 | | |
| | 龙须藤 <i>Bauhinia championi</i> | 0.26 | 0.33 | | |
| 藤本 | 藤金合欢 <i>Acacia sinuata</i> | 0.23 | 0.58 | | |
| | 鸡血藤 <i>Millettia reticulata</i> | 0.6 | | | |
| | 三裂叶野葛 <i>Pueraria phaseoloides</i> | 11.8 | 1.75 | 3.07 | |
| | 苎麻 <i>Boehmeria nivea</i> | 15.25 | 1.75 | | |
| | 雀梅藤 <i>Sageretia thea</i> | | | 1.61 | |
| | 戟叶鹅绒藤 <i>Cynanchum sibiricum</i> | | | 3.18 | 11.86 |
| | 藤本合计 | 28.14 | 5.9 | 7.86 | 11.86 |
| | 加拿大飞蓬 <i>Conyza canadensis</i> | 0.34 | | 0.45 | |
| | 苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i> | 0.72 | 0.7 | | |
| | 三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> | 0.83 | | | |
| 草本 | 海金沙 <i>Lygodium scandens</i> | 0.87 | | | |
| | 青蒿 <i>Artemisia caruifolia</i> | 0.96 | 14.8 | 1.04 | |
| | 野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> | 1.04 | | | |
| | 剑叶凤尾蕨 <i>Pteris ensiformis</i> | 1.16 | | | |
| | 隐囊蕨 <i>Notholaena hirsuta</i> | 1.25 | 0.51 | | |
| | 乌蕨 <i>Stenoloma chusanum</i> | 1.31 | | | 24.18 |
| | 鞭叶铁线蕨 <i>Adiantum caudatum</i> | 1.34 | | | |
| | 水蔗草 <i>Apluda mutica</i> | 2.4 | | | |
| | 吊丝竹 <i>Dendroclamus minor</i> | 4.61 | 3.38 | | |
| | 牛筋草 <i>Eleusine indica</i> | 6.04 | 4.03 | 12.4 | |
| | 鸭嘴草 <i>Ischaemum aristatum</i> | 0.24 | 3.65 | | |
| | 华南毛蕨 <i>Cyclosorus parasiticus</i> | 0.24 | | | |
| | 乌荻莓 <i>Cayratia japonica</i> | 1.8 | | | |
| | 卷柏 <i>Selaginella moellendorffii</i> | 0.26 | | 0.36 | |
| | 飘拂草 <i>Fimbristylis ferrugineae</i> | | 1.79 | | |
| | 胜红蓟 <i>Ageratum conyzoides</i> | | 2.19 | | |
| | 少花龙葵 <i>Solanum photeinocarpum</i> | | 4.03 | 4.99 | |
| | 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> | | 4.65 | | |
| | 白茅 <i>Imperata cylindrica</i> | | 5.56 | 4.85 | |
| | 类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> | | 6.05 | | |
| 苔藓 | 野菊 <i>Dendranthema indicum</i> | | 7.89 | 7.33 | |
| | 蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i> | | | 1.74 | |
| | 野古草 <i>Arundinella anomala</i> | | | 20.34 | |
| | 五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i> | | | 29.62 | |
| | 白花柳叶箬 <i>Isachne albens</i> | | | 2.86 | |
| | 黑果薄柱草 <i>Nertera nigricarpa</i> | | | | 6.77 |
| | 草本合计 | 25.41 | 59.23 | 85.98 | 30.95 |
| | 黄叶凤尾蕨 <i>Fissidens zippelianus</i> | | | | 57.19 |
| | 苔藓植物合计 | | | | 57.19 |

表 2 不同石漠化阶段植物群落间物种共有度
Table 2 Species co-occurrence of communities in different stages of rocky desertification

| 石漠化阶段 | 轻度 | 中度 | 重度 | 极重度 |
|-------|----|-------|-------|-------|
| 轻度 | | 0.461 | 0.279 | 0.062 |
| 中度 | | | 0.307 | 0.000 |
| 重度 | | | | 0.105 |
| 极重度 | | | | |

碳酸钙含量呈上升趋势,且在重度→极重度过度阶段土壤碳酸钙含量增加幅度最大,而土壤 pH 值呈现波动状态,各石漠化阶段无明显规律(表 3)。

相关分析表明,轻度、中度、重度石漠化土地土壤有机质、全氮、速效氮、磷、钾和碳酸钙含量均呈显著相关性,而与极重度石漠化土地相关性不明显(表 4)。全氮、速效氮、磷、钾含量作为土壤养分的主要指标,表明粤北石漠化土地在土壤养分流失的前期(轻度石漠化阶段)、中期(中度石漠化阶段)和后期(重度石漠化阶段)之间具有一定的规律性,而到末期(极重度石漠化阶段),土壤覆盖率很小,土层又极薄,土壤受外界因素(雨水冲刷,裂隙、溶孔渗漏等)的影响剧烈,土壤养分在该阶段发生了突变。

2.4 石漠化过程中植被退化模型

从数学方法上看,演替系统可以用一般的 Markov 过程描述(赵松岭等,1981)。这种纯粹数学模型的一个显著缺点是转移矩阵与环境因子之间缺乏定量关系。这里,我们参考草原退化模型(郝敦

表 3 不同石漠化阶段土壤特性的变化
Table 3 Changes of soil characteristics in different stages of rocky desertification

| 土壤特征指标 | pH | 碳酸钙 (%) | 有机质 (g · kg ⁻¹) | 全氮 (g · kg ⁻¹) | 速效氮 (mg · kg ⁻¹) | 速效磷 (mg · kg ⁻¹) | 速效钾 (mg · kg ⁻¹) |
|--------|------|---------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 轻度 | 7.42 | 6.33 | 41.23 | 4.96 | 162.13 | 2.79 | 77.56 |
| 中度 | 7.21 | 8.75 | 19.21 | 2.57 | 69.87 | 1.72 | 61.03 |
| 重度 | 7.43 | 18.17 | 12.98 | 1.62 | 45.33 | 1.13 | 38.12 |
| 极重度 | 7.28 | 33.24 | 8.86 | 1.04 | 21.46 | 0.19 | 24.92 |

表 4 不同石漠化阶段土壤特性相关性分析
Table 4 Pearson's correlation coefficients of soil characteristics in different stages of rocky desertification

| 石漠化阶段 | 轻度 | 中度 | 重度 | 极重度 |
|-------|----------|----------|-------|-----|
| 轻度 | | | | |
| 中度 | 0.936 ** | | | |
| 重度 | 0.897 * | 0.965 ** | | |
| 极重度 | 0.372 | 0.505 | 0.706 | |

* P<0.05; ** P<0.01。

元等,1997),利用理论生态学基本原理,探讨石漠化土地中植被退化的理论模型。

石漠化过程中生态群落的演替类型属于外因导致的植被类型的逆向演替。野外观测显示,植被群落演替从乔灌草混合群落退化为草本群落,直至苔藓,层片数从 4 变为 1,平均高度和盖度均显著降低。自然界中所有植物的存在和繁衍都离不开一定的水分、阳光、温度和可利用的土壤养分等环境因子。随着土壤侵蚀的不断加剧,最容易发生改变的环境因子是土壤养分。设单位面积中可供植物利用的土壤养分 R 正比于其厚度 h ,即:

$$R=ah \tag{1}$$

设单位面积中植被质量为 $B_{i,j}$,则其动态变化为:

$$\frac{dB_{i,j}}{dt}=f_{i,j}(R)B_{i,j}-m_{i,j}B_{i,j}-h_{i,j}B_{i,j} \tag{2}$$

式中,脚标 i 为石漠化土地类型或相应的植被演替阶段, j 为植物种类,详见表 5; $m_{i,j}$ 为自然死亡速率, $h_{i,j}$ 为人类活动导致的死亡速率; $f_{i,j}$ 为拓殖率。

拓殖率 $f_{i,j}$ 为关于土壤养分 R 的单调递增且逐渐趋于饱和的函数,常采用 Michaelis-Menten 形式:

$$f_{i,j}=\frac{r_{i,j}R}{R+k_{i,j}} \tag{3}$$

式中, $r_{i,j}$ 为最大拓殖率, $k_{i,j}$ 为半饱和常数。

式(3)仅仅考虑了土壤养分的影响。实际上,较高植株因更容易占有阳光资源而影响到低矮植株的生长。因此,拓殖率 $f_{i,j}$ 可以进一步写成:

$$f_{i,j}=\frac{r_{i,j}R}{R+k_{i,j}}-\beta\sum_{j=1}^{J_i-1}C_{i-1,j} \tag{4}$$

式中, $C_{i,j}$ 为植被盖度, β 为修正系数。该式右边最后一项体现了前一演替阶段的植被类型对后一阶段植被拓殖率的影响。随着植被的演替和流水的侵蚀,土壤中的养分逐渐流失,其动态变化为:

$$\frac{dR}{dt}=S(R)-\sum_{i,j}Q_{i,j}f_{i,j}B_{i,j}-W(R) \tag{5}$$

表 5 石漠化土地与植被演替阶段
Table 5 Stages of rocky desertification land and vegetation succession

| 石漠化阶段(i) | 植被类型(J_i) |
|--------------|--------------------|
| 轻度(1) | 黄连木、苕麻、黄荆、三裂叶野葛(4) |
| 中度(2) | 黄连木、青蒿、野菊(3) |
| 重度(3) | 五节芒、野古草、牛筋草(3) |
| 极重度(4) | 苔藓(1) |

式中, $S(R)$ 为输入速率, $Q_{i,j}$ 生产每单位质量植物所消耗的土地养分数, $W(R)$ 为土壤侵蚀导致的流失速率。相对于成土过程,石漠化过程发展较快。土壤养分的输入速率 $S(R)$ 可以忽略不计。

对于每一种植被而言,都有其最低的生存条件 $R_{i,j}^*$ 。根据方程(2),

$$R_{i,j}^*=f_{i,j}^{-1}(m_{i,j}+h_{i,j}) \tag{6}$$

对轻度石漠化土地而言, $i=1, J_1=4$ 。模型(2)表示黄连木($j=1$)、苕麻($j=2$)、黄荆($j=3$)、三裂叶野葛($j=4$) 4 物种处于竞争状态。如果石漠化过程不再继续发展, $R_{i,j}^*$ 值最低者将长期存在,另 3 个物种将逐渐消亡。对轻度向中度过渡的石漠化土地而言, $i=1, 2, J_1=4, J_2=3$ 。受土壤养分流失的影响,乔木群落(黄连木、苕麻、黄荆、三裂叶野葛)在和灌木群落(黄连木、青蒿、野菊)竞争中处于劣势,黄连木、苕麻、黄荆、三裂叶野葛四者按照 $R_{i,j}^*$ 从高到底逐渐消亡,中度石漠化土地中的黄连木、青蒿、野菊开始了新一轮的竞争。其他的石漠化土地类型及其过渡中的植被演替动态描述与此类似,不再赘述。

3 讨 论

在粤北石漠化地区,从轻度→中度→重度→极重度石漠化土地,土壤有机质、全氮、速效氮、磷、钾含量均呈下降趋势,植被的生境逐步向岩生和旱生转化,群落结构变得单一化,多样性和生物量逐渐降低,最终使地表植被完全退化。这与贵州省黔中石漠化地区植被退化过程基本相似(王德炉等,2003;彭熙等,2009;王月容等,2012),但在不同阶段的植物优势种有差异:在粤北石漠化地区,草本阶段的优势种主要是乌蕨(*Stenoloma chusanum*)、野古草(*Arundinella anomala*)和五节芒(*Miscanthus floridulus*),在灌藤阶段主要是黄荆(*Vitex negundo*)、苕麻(*Boehmeria nivea*)和三裂叶野葛(*Pueraria phaseoloides*),在乔木层阶段主要是黄连木(*Pistacia chinensis*)和欆木(*Loropetalum chinense*);而在黔中石漠化地区,在草本阶段,占优势的物种是大披针臺草(*Carex lanceolata*)、黄背草(*Themeda japonica*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)和中国蕨(*Sinopteris grevilleoides*),在灌藤阶段主要物种有小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、异叶鼠李(*Rhamnus heterophylla*)等,而乔木层主要的树种有圆果

表 6 不同石漠化阶段植被-土壤特性相关性分析
Table 6 Pearson's correlation coefficients of vegetation and soil characteristics in different stages of rocky desertification

| 因子 | pH | 有机质 | 全氮 | 速效氮 | 速效磷 | 速效钾 | 碳酸钙 |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|----------|----------|
| 地上生物量 | 0.227 | 0.866 | 0.898 | 0.883 | 0.981 * | 0.978 * | -0.987 * |
| 植被盖度 | 0.199 | 0.912 | 0.939 | 0.923 | 0.989 * | 0.997 ** | -0.961 * |

* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

化香树 (*Platycarya longipes*)、窄叶石栎 (*Lithocarpus confinis*) 和安顺润楠 (*Machilus cavaleriei*) 等 (杨华斌等, 2009)。粤北和黔中地区同属于亚热带湿润季风气候, 但粤北年平均气温较高、年降水量较大, 在气温和雨水的影响下, 植物优势种自然也有差异。

在非石漠化土地上, 土壤各指标的状况基本上能够反映植被的状况, 而且土壤-植被之间的相互关系在很大程度上可以定量化 (Qi & Lin, 2005)。在粤北石漠化土地上同样能体现这一点。对 7 个观测点中 4 个石漠化阶段的共 28 个植被和土壤样本进行分析, 可以发现不同石漠化阶段植被特征与土壤养分具有相关性 (表 6)。土壤养分在轻度→中度石漠化阶段降低得最快, 由于土层较厚, 虽然物种减少, 但中度石漠化土地不同生活型物种比例最为均匀, 而到重度石漠化阶段, 基岩裂隙、溶孔发育强烈, 土壤中碳酸钙含量陡升, 雨水的作用加剧土壤的地表流失和地下漏失, 土层变得越来越薄, 植物种数骤减, 直到极重度阶段, 几乎无土可流, 植物也难以生长。

土地石漠化是在脆弱的岩溶环境和特殊的双层结构土地上, 受气候变化和人为活动二元动因的驱动, 土地生态系统由一种因素的变化联系和影响其他多种因素的变化, 由一个过程的变化联系和影响其他过程的变化, 多生态过程之间具有牵一发而动全身的作用, 在植被遭受破坏或其他过程发生后, 坡面土壤侵蚀、地表水与地下水流失、基岩溶蚀侵蚀、土地生物生产力等过程相继发展、加剧, 出现土地石漠化多过程相互耦合、共同作用、彼此影响的正向生态过程, 最终形成石漠化土地。在土地石漠化过程中, 植被退化过程是最直观的先导过程。因此, 石漠化土地的恢复改良须从地表植被恢复演替着手, 在植被恢复过程中保持水土、改良土壤, 逐步形成植被-土壤-水分-基岩协调的良性生态系统。

4 结 论

在粤北石漠化地区, 从轻度→中度→重度→极重度石漠化土地, 植物群落从草本+藤本+乔灌木→草本→苔藓, 群落层片从 4 层→4 层→2 层→1 层, 平均高度从 87.06 cm→63.32 cm→42.13 cm→6.21 cm, 物种减少比例从 0%→14%→46%→86%。轻度石漠化土地是以黄连木和苧麻为优势种、黄荆和三裂叶野葛等为主要伴生种的草本、藤本、乔灌木混合群落。中度石漠化土地是以黄连木和青蒿为优势种、野菊和类芦等为主要伴生种的草本、藤本、乔灌木混合群落, 各物种结构比轻度石漠化较为均匀, 但种类没有轻度石漠化丰富。重度石漠化土地是以五节芒为优势种、野古草和牛筋草为重要伴生种的草本植物群落, 有少量小灌木, 群落结构简单。极重度石漠化土地上仅有苔藓地衣低等植物和极少数低矮草丛群落, 基本没有农业利用的价值。

粤北石漠化地区植被退化模型为: $R_{i,j}^* = f_{i,j}^{-1}(m_{i,j} + h_{i,j})$, 式中: $R_{i,j}^*$ 为植物的最低生存条件, $f_{i,j}$ 为拓殖率, $m_{i,j}$ 为自然死亡速率, $h_{i,j}$ 为人为活动导致的死亡速率。

参考文献

广东省林业调查规划院. 2005. 广东省岩溶地区石漠化监测报告: 26-32.

郝敦元, 刘钟龄, 王 炜, 等. 1997. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究——群落演替的数学模型. 植物生态学报, 21(6): 503-511.

黄金国, 李 森, 魏兴琥. 2008. 粤北岩溶山区土地石漠化治理与农业综合开发模式研究. 中国沙漠, 28(1): 39-43.

李 博. 2000. 生态学. 北京: 高等教育出版社.

李 森, 魏兴琥, 黄金国, 等. 2007. 中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程. 中国沙漠, 27(6): 918-926.

彭 熙, 黄 英, 车家骧, 等. 2009. 不同石漠化等级条件下土壤性状变化规律研究——以贵州喀斯特中心普定站为例. 中国岩溶, 28(4): 401-404.

王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 2003. 贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化. 南京林业大学学报(自然科学版), 27(3): 26-31.

王金华, 李 森, 李辉霞, 等. 2007. 石漠化土地分级指征及其遥感影像特征分析——以粤北岩溶山区为例. 中国沙漠, 27(5): 765-770.

王明刚, 李 森. 2011. 粤北石漠化地区坡地土壤侵蚀模拟

试验研究. 中国沙漠, **31**(6): 1488-1492.

王兮之, 李 森, 王金华. 2007. 粤北典型岩溶山区土地石漠化景观格局动态分析. 中国沙漠, **27**(5): 758-764.

王月容, 卢 琦, 周金星, 等. 2012. 喀斯特山区不同石漠化等级下土壤养分贮量与价值评估——以乌管-偏岩等岩溶小流域为例. 中国岩溶, **31**(1): 40-45.

魏兴琥, 陆冠尧, 周红艳, 等. 2011. 粤北石漠化灌丛坡地模拟降雨地表径流水中钙离子含量变化. 中国沙漠, **31**(5): 1343-1347.

杨华斌, 韦小丽, 党 伟. 2009. 黔中喀斯特植被不同演替阶段群落物种组成及多样性. 山地农业生物学报, **28**(3): 203-207.

赵松岭, 陈庆诚, 李自珍, 等. 1981. 植物群落演替的线性与非线性系统及数字预测. 生态学报, **1**(3): 235-240.

Qi XZ, Lin ZS. 2005. Grassland evolution under soil degradation: Numerical simulation and test. *Pedosphere*, **15**: 41-45.

Magurran AE. 1988. Ecological Diversity and Its Measurement. New Jersey: Princeton University Press.

作者简介 陆冠尧,男,1979 年生,博士,讲师,主要从事粤北地区石漠化治理研究。E-mail: guanyaolu2005@126.com

责任编辑 王 伟
