

衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段植物群落特征及其与土壤理化性质的耦合关系

陈孙华

(湖南环境生物职业技术学院 园林学院, 湖南 衡阳 421005)

摘 要:采用空间代替时间序列的方法,在野外样方调查和室内实验分析的基础上,分析衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段群落物种多样性、土壤理化特征以及二者的耦合关系。结果表明:(1)在整个植被恢复阶段,物种多样性指数存在明显差异,Patrick 丰富度指数(R)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H)沿演替中后期(Ⅲ)→演替后期(Ⅳ)→演替中前期(Ⅱ)→演替初期(Ⅰ)的顺序显著减小($P<0.05$),Simpson 优势度指数(D)沿Ⅰ→Ⅱ→Ⅳ→Ⅲ的顺序显著减小($P<0.05$),Pielou 均匀度指数(E)沿Ⅳ→Ⅲ→Ⅱ→Ⅰ显著减小($P<0.05$);(2)在植被恢复过程中,0—20 cm 土层土壤有机碳(Soil Organic C, SOC)、全氮(Total N, TN)和碱解氮(Available N, AN)显著增加($P<0.05$),土壤容重(Soil Bulk Density, SBD)显著减小($P<0.05$),土壤含水量(Soil Water Content, SWC)变化虽有波动,但总体上升,在 20—40 cm 土层,土壤理化性质的变化虽在整体上呈现出与 0—20 cm 土层相同的变化趋势,但改善程度要低于 0—20 cm 土层,在 40—60 cm 土层,土壤理化性质的变化并不呈现一定的规律,表明其与植被恢复没有必然的联系;(3)物种多样性指数与土壤理化因子存在一定的相关性,其中 0—20 cm 土层 SOC 和 TN 与物种多样性指数呈显著正相关($P<0.05$),随土层的加深,物种多样性对土壤理化性质的影响表现出减弱的趋势。

关键词:植被恢复; 物种多样性; 土壤理化因子; 紫色土; 衡阳

中图分类号:Q948.113;S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)05-0007-06

Coupling Relationship between Plant Community Characteristics and Soil Physic-chemical Properties at Different Revegetation Stages on Sloping Lands with Purple Soil in Hengyang of Hu'nan Province, China

CHEN Sun-hua

(College of Landscape and Architecture, Hu'nan Environmental-Biological Polytechnic College, Hengyang, Hu'nan 421005, China)

Abstract: Based on the survey of community plots and laboratory analysis, we studied the biodiversity, soil physic-chemical properties and their coupling relationship at different revegetation stages by using the spacial series to replace time series. The results showed that: (1) biodiversity index had significant difference at different revegetation stages, Patrick richness index(R) and Shannon-Wiener index(H) significantly decreased in the sequence of succession middle anaphase stage(Ⅲ)→succession anaphase stage(Ⅳ)→succession middle prophase stage(Ⅱ)→succession initial stage(Ⅰ) ($P<0.05$), Simpson index(D) significantly decreased in the sequence of Ⅰ→Ⅱ→Ⅳ→Ⅲ ($P<0.05$), Pielou evenness index(E) significantly decreased in the order of Ⅳ→Ⅲ→Ⅱ→Ⅰ ($P<0.05$); (2) in the 0—20 cm soil layers, SOC(Soil Organic Carbon), TN(Total Nitrogen) and AN(Available Nitrogen) significantly increased but SBD(Soil Bulk Density) significantly decreased with the revegetation succession ($P<0.05$), SWC(Soil Water Content) was increasing with a little fluctuation. The changes in 20—40 cm soil layers followed the same rules of 0—20 cm soil layers, but the better degree was lower than that of 0—20 cm soil layers. The change of 40—60 cm soil layers was not followed with some rules, which showed there was no casual link with the succession of revegetation; (3) there were certain correlations between biodiversity index and soil physic-chemical factors, among which SOC and TN were signifi-

收稿日期:2013-11-22

修回日期:2014-12-16

资助项目:湖南省重点项目“衡邵盆地生态公益林重点建设区植被恢复研究与示范”(62020608001);湖南省林业科技创新计划项目“衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复研究与示范”(XLK201341)

作者简介:陈孙华(1972—),男,湖南茶陵人,讲师,本科,主要从事林业技术教育与园林的教学与研究工作。E-mail:chensunhua1@sina.com

cantly positive correlated with biodiversity index. The effects of biodiversity on the soil physic-chemical properties were weakening with the increase of soil depth.

Key words: revegetation; biodiversity; soil physic-chemical factors; purple soil; Hengyang

植被与土壤是相互作用、协调发展的统一体,植被演替伴随着土壤性状改变^[1-2]。植物群落变化总是与土壤的演化相关联,土壤分异导致植被变化,植被变化影响着土壤的发育。因此,关于植被与土壤环境之间关系的研究,一直是生态学研究的一个重要领域。近年来,有关这方面的研究取得了一定的研究成果,并取得一致的结论^[3-8]:在群落演替的早期,随着演替的进程,物种多样性增加;在群落演替的后期,当群落中出现非常强的优势种时,多样性会降低;群落中物种多样性的最大值可能出现在演替中后期。而对于演替过程中群落物种多样性与土壤养分梯度的相互关系,目前研究不多,结果也不尽一致,Gentry^[9]及 Gartlan^[10]等的研究显示土壤中 P、Mg、K 的水平与热带植物群落物种多样性存在着显著的相关关系,国内研究也表明,土壤有机质、全氮和速效磷与物种多样性有显著的相关性,另有学者认为,物种多样性与土壤盐分物质关系密切,而与土壤全氮和有机质的相关性较弱等。已有的研究多集中在黄土高原地区,但对于衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植物群落特征及其与土壤理化性质的耦合关系的研究相对薄弱,导致在该区域进行植被恢复时所从事的经营措施存在盲目性。

衡阳紫色土丘陵坡地是湖南省环境最为恶劣的地区之一,该区域水土流失严重,植被稀疏,基岩裸露,有的区域几乎没有土壤发育层,生态环境十分恶劣,植被恢复十分困难^[11-12]。本研究以衡阳紫色土丘陵坡地为例,研究植被不同恢复阶段植物群落特征及其与土壤理化性质的耦合关系,为该区域植被恢复与重建提供依据。

1 研究区环境概况与研究方法

1.1 研究区概况

该区域位于湖南省中南部,湘江中游,地理坐标为 110°32′16″—113°16′32″E,26°07′05″—27°28′24″N。属亚热带季风湿润气候,年平均气温 18℃;极端最高气温 40.5℃,极端最低气温 -7.9℃,年平均降雨量 1 325 mm,年平均蒸发量 1 426.5 mm。平均相对湿度 80%,全年无霜期 286 d。地貌类型以丘岗为主。紫色土面积有 1.625×10^5 hm²,呈网状集中分布于该区域中部海拔 60~200 m 的地带,东起衡东县霞流、大浦,西至祁东县过水坪,北至衡阳县演陂、渣江,南达常宁市官岭、东山和耒阳市遥田、市炉一带,以衡南、衡阳两县面积最大。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及调查方法 采用“空间序列代替时间序列”的方法^[13-15],选择坡度、坡向、坡位和裸岩率等生态因子基本一致的坡中下部沿等高线的有代表性的样地,代表 4 类不同的演替阶段(群落演替的初始条件均为撂荒地),在每个样地内设置 20 m×20 m 的样方来调查乔木植物,且在其四角与中心分别设置 5 个 4 m×4 m 与 1 m×1 m 的小样方来调查灌木植物与草本植物,测定群落的种类组成及其特征值(盖度、高度、频度等)(表 1)。

1.2.2 土样样品的采集及分析方法 2013 年 7 月中旬至 8 月中旬进行土样采集,各群落内随机布设 3 个样点,分 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 3 层,每层 3 个土样均匀混合,去掉土样中的可见植物根系和残体,风干后过 2 mm 筛供测土壤理化性质。

表 1 样地概况

演替阶段	演替年限/a	坡度(°)/坡向	海拔/m	群落类型
演替初期(I)	2~5	25/SW	115	狗尾草群落
演替中前期(II)	8~15	55/SW	120	牡荆+狗尾草群落
演替中后期(III)	20~25	30/SW	125	枫香+牡荆+狗尾草群落
演替后期(IV)	≈50	25/SW	115	枫香+牡荆群落

注:狗尾草 *Setaria viridis*;牡荆 *Vitex negundo* var. *Cannabifolia*;枫香 *Liquidambar formosana*,下同。

土壤物理性状:土壤含水量(Soil water content, SWC)采用烘干法(105℃,12 h)测定,土壤容重(Soil bulk density, SBD)采用环刀法测定^[16-17]。

土壤化学指标:土壤有机碳(Soil organic C, SOC)采用重铬酸钾氧化-外加加热法、全氮(Total N, TN)采用半微量开氏法、碱解氮(Available N, AN)采

用扩散吸收法^[18]。

1.3 数据处理

采用 Patrick 丰富度指数(*R*)、Simpson 优势度指数(*D*)、Shannon-Wiener 多样性指数(*H*)与 Pielou 均匀度指数(*E*)进行植物群落物种多样性的测度,计算式为^[19]:

$$R=S$$
$$D=1-\sum(P_i^2) \quad (P_i=n_i/N)$$
$$H=-\sum(P_i\ln P_i)$$
$$E=H\times(\ln S)^{-1}$$

式中: S ——物种总数; P_i ——第 i 个物种的相对重要值; n_i ——第 i 个物种的重要值; N ——群落中所有物种的重要值之和。

$$n_i=(\text{相对盖度}+\text{相对密度}+\text{相对高度}+\text{相对频度})\times 100/4$$

采用 SPSS 13.0 软件进行数据统计分析和作图,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和邓肯氏新复极差检验法(DMRT 法)进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$),采用 Pearson 分析法进行相关分析。所有数据均为 3 次重复的平均值。表中数据为平均数±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同恢复阶段的植物群落特征

由表 2 可知,从演替初期(Ⅰ)至演替后期(Ⅳ),恢复区 Patrick 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)随恢复时间的延长先急剧增加而后缓慢下降,在各演替阶段中,Patrick 丰富度指数(R)与 Shannon-Wiener 多样性指数(H)的大小顺序为:演替

中后期(Ⅲ)($21.87\pm1.86,3.56\pm0.06$)>演替后期(Ⅳ)($17.36\pm1.57,3.47\pm0.08$)>演替中前期(Ⅱ)($14.43\pm0.97,3.31\pm0.03$)>演替初期(Ⅰ)($4.20\pm0.32,2.54\pm0.04$)($P<0.05$),在此值得说明的是,在演替中后期(Ⅲ),Patrick 丰富度指数(R)与 Shannon-Wiener 多样性指数(H)的值最大,演替后期(Ⅳ)次之,事实上,在该研究区域中,植被恢复的演变过程并不复杂,主要是由狗尾草群落、牡荆+狗尾草群落、枫香+牡荆+狗尾草群落和枫香+牡荆群落组成,而枫香+牡荆+狗尾草群落只是上述四个植物群落的过渡交错群落,正是交错带特有的生态特性,从而导致在演替中后期(Ⅲ)的 Patrick 丰富度指数(R)与 Shannon-Wiener 多样性指数(H)最大,物种之间的竞争最为激烈,但它只是群落演替过程的一个短暂的、不稳定的过渡阶段,激烈的种间竞争必将使种群生态位出现分离,使群落进入一个相对稳定的阶段,即演替后期(Ⅳ)^[13,20]。

Pielou 均匀度指数(E)表示物种分布的均匀度,其值越大,生态系统越稳定,因此,在各演替阶段 Pielou 均匀度指数(E)的大小顺序为:演替后期(Ⅳ)(0.95 ± 0.01)>演替中后期(Ⅲ)(0.94 ± 0.01)>演替中前期(Ⅱ)(0.92 ± 0.01)>演替初期(Ⅰ)(0.85 ± 0.01)($P<0.05$)。

表 2 不同恢复阶段植物群落丰富度与多样性

项目	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
Patrick 丰富度指数(R)	$4.20\pm0.32a$	$14.43\pm0.97b$	$21.87\pm1.86c$	$17.36\pm1.57bc$
Simpson 优势度指数(D)	$0.99\pm0.01a$	$0.97\pm0.01a$	$0.88\pm0.01b$	$0.96\pm0.02a$
Shannon-Wiener 多样性指数(H)	$2.54\pm0.04a$	$3.31\pm0.03b$	$3.56\pm0.06c$	$3.47\pm0.08bc$
Pielou 均匀度指数(E)	$0.85\pm0.01a$	$0.92\pm0.01b$	$0.94\pm0.01ab$	$0.95\pm0.01b$

注:同行不同字母表示不同植被恢复阶段在 0.05 水平上存在显著性差异。

Simpson 优势度指数(D)越大,说明群落内优势种越突出,在各演替阶段,Simpson 优势度指数(D)的大小顺序为:演替初期(Ⅰ)($0.990.99\pm0.01$)>演替中前期(Ⅱ)(0.97 ± 0.01)>演替后期(Ⅳ)(0.96 ± 0.02)>演替中后期(Ⅲ)(0.88 ± 0.01)($P<0.05$)。

2.2 不同恢复阶段土壤理化性质分析

随着植被恢复的进行,在不同的植被恢复阶段土壤理化性质发生相应的变化(表 3)。在 0—20 cm 土层,由演替初期(Ⅰ)至演替后期(Ⅳ),土壤有机碳、全氮和碱解氮显著增加($P<0.05$),分别增加了 31.77%,43.21%和 18.30%,土壤容重显著减小($P<0.05$),减小了 10.40%;但值得一提的是:在演替中前期(Ⅱ),土壤含水量出现一个低谷,可能是由于在演替中前期(Ⅱ)的样地位于阳坡($55^\circ/\text{SW}$),而其他 3

个恢复阶段的样地位于半阳坡($25^\circ/\text{SW}$ 、 $30^\circ/\text{SW}$ 和 $25^\circ/\text{SW}$)。一般来讲,土壤含水量与坡向有较大关系,半阳坡比阳坡有较好的土壤水分条件。尽管坡向的差异在一定程度上掩盖了土壤含水量在整个恢复阶段的变化趋势,但土壤含水量的变化状况总体仍反映了植被恢复的演替趋势,即随着恢复阶段的演替进行,土壤含水量呈增长趋势。

在 20—40 cm 土层,尽管土壤理化性质的变化呈现一定的波动,但整体上仍呈现出与 0—20 cm 土层相同的变化趋势,即随着植被的演替进行,土壤理化性质得到不断改善,但改善程度要低于 0—20 cm 土层。在 40—60 cm 土层,土壤理化性质的变化并不随恢复的进行呈现一定的规律,表明在 40—60 cm 土层土壤理化性质与植被恢复间的联系相对较弱^[3]。

表 3 各恢复阶段不同土层土壤理化性质

土壤性质	土层/cm	I	II	III	IV
含水量/%	0—20	10.19±1.03ABab	9.96±0.98Ba	14.32±1.32Aa	14.45±1.25Aa
	20—40	12.04±1.26Ba	9.24±0.99Ab	13.87±1.30BCb	15.76±1.54Cb
	40—60	9.78±0.89Ab	9.45±0.87Aab	13.54±1.25Bb	15.78±1.50Cb
容重/ (g·cm ⁻³)	0—20	1.25±0.13Aab	1.14±0.11ABa	1.13±0.15ABa	1.12±0.12Bab
	20—40	1.23±0.11Aa	1.22±0.17ABab	1.23±0.09Ab	1.19±0.15Ba
	40—60	1.35±0.15Ab	1.25±0.09ABb	1.18±0.12ABab	1.00±0.08Bb
有机碳/%	0—20	2.99±0.20Aa	3.35±0.27ABa	3.87±0.21Ba	3.94±0.27Ba
	20—40	1.54±0.15Ab	2.98±0.22Bb	2.54±0.23Cab	2.76±0.25BCab
	40—60	1.32±0.13Ab	3.09±0.35Dab	1.99±0.08Bb	2.36±0.22Cb
全氮/ (mg·g ⁻¹)	0—20	1.62±0.13Aa	1.66±0.15Ba	2.32±0.32Ca	2.32±0.32Ca
	20—40	0.87±0.09ABb	0.76±0.05Ab	0.99±0.07Bb	0.88±0.07ABb
	40—60	0.54±0.04Bc	0.86±0.06Cc	0.46±0.05Ac	0.54±0.06Bc
碱解氮/ (mg·g ⁻¹)	0—20	17.65±1.54Aa	20.87±2.75Ba	20.76±2.56Ba	20.88±2.67Ba
	20—40	16.54±1.65Ab	16.54±1.58Ab	16.89±1.39ABab	17.65±1.68Bab
	40—60	16.65±1.53Bb	17.64±1.68Cab	15.83±1.37ABb	14.87±1.54Ab

注:不同大写字母表示同一土层不同植被恢复阶段间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一植被恢复阶段不同土层间差异显著($P<0.05$)。

2.3 植物群落特征与土壤理化性质的耦合关系

2.3.1 群落物种多样性指数与土壤理化因子的相关性分析 从表 4 可知,在不同土层土壤理化因子与群落物种多样性指数的相关性不同。在 0—20 cm 土层,土壤含水量、容重、有机碳、全氮和碱解氮与 Patrick 丰富度指数(R)、Simpson 优势度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)与 Pielou 均匀度指数(E)均表现出一定的相关性,其中土壤有机碳与 Simpson 优势度指数(D),全氮与 Pielou 均匀度指数(E)极显著正相关(相关系数分别为 0.967** 和 0.986**)($P<0.01$,双尾检验),土壤含水量与 Patrick 丰富度指数(R),土壤有机碳与 Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Pielou 均匀度指数(E),土壤全氮与 Patrick 丰富度指数(R)、Simpson 优势度指数(D)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H)显著正相关(相关系数分别为 0.892*, 0.897*, 0.937*, 0.899*, 0.940* 和 0.915*)($P<0.05$,双尾检验),表明在植被恢复过程中,物种多样性指数的增加改善了土壤环境,增加了土壤的养分含量;在 20—40 cm 土层,土壤理化性质与群落物种多样性指数仍表现出一定的相关性,但相关性开始变弱,如土壤有机碳与 Simpson 优势度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(E),全氮与 Patrick 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Pielou 均匀度指数(E)显著正相关(相关系数分别为 0.915*, 0.916*, 0.912*, 0.917* 和 0.888*)($P<0.05$,双尾检验),表明在植被恢复过程中,物种多样性的增加有利于土壤理化性质的改善,而良好的土壤环境又有利于植物的生长演替,增加物

种的种类与数量;在 40—60 cm 土层,土壤理化性质与群落物种多样性指数的相关性急剧下降,说明随土层的加深,群落物种多样性对土壤理化性质的影响减弱,对土壤理化因子的改善有限^[21]。综上说明:土壤有机碳和全氮与群落物种多样性指数相关性最明显,关系最为密切,是不同植被恢复阶段对群落物种多样性指数影响最大的土壤因子。

表 4 土壤理化性质与物种多样性指数的相关系数

土壤性质	土层/cm	多样性指数			
		R	D	H	E
含水量	0—20	0.892*	0.643	0.865	0.654
	20—40	0.742	0.400	0.723	0.568
	40—60	0.753	0.531	0.727	0.437
容重	0—20	-0.179	0.571	-0.287	-0.145
	20—40	0.147	0.576	0.254	0.458
	40—60	-0.705	-0.358	-0.540	-0.597
有机碳	0—20	0.873	0.967**	0.897*	0.937*
	20—40	0.856	0.915*	0.843	0.916*
	40—60	0.543	0.658	0.307	0.500
全氮	0—20	0.899*	0.940*	0.915*	0.986**
	20—40	0.912*	0.810	0.917*	0.888*
	40—60	-0.431	0.427	-0.357	-0.280
碱解氮	0—20	0.735	0.707	0.609	0.777
	20—40	0.809	0.578	0.754	0.609
	40—60	-0.568	-0.327	-0.653	-0.576

注: ** 表示 $P<0.01$ (双尾检验); * 表示 $P<0.05$ (双尾检验)。

2.3.2 不同土层理化因子特性与不同演替阶段的群落多样性影响的分析 采用逐步回归法分析不同恢复阶段植物群落物种多样性指数与土壤理化因子的关系(表 5)。从表 5 可知,随着土层的加深,多样性指

数与土壤理化因子的相关性呈下降趋势。在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,多样性指数与土壤理化因子呈显著性相关($P<0.05$,双尾检验),其中 TN、AN 和 SOC 在 0—20 cm 和 20—40 cm 两土层中与多样性指数呈现出较强的相关性,说明恢复过程中多样性的增加改善了土壤环境;此外,在 20—40 cm 土层中土壤含水量和土壤容重与 Patrick 丰富度指数(R)、Simp-

son 优势度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Pielou 均匀度指数(E)均表现出一定的相关性,表明在恢复过程中,多样性的增加有利于土壤理化因子的改善,而良好的土壤环境又有利于植被的恢复,增加其种类与数量;在 40—60 cm 土层中,土壤理化因子与多样性指数未表现出显著的相关性,说明植被恢复对深层土壤环境的改善能力有限。

表 5 物种多样性指数与不同土层的土壤理化特征因子的多元线性回归

土层/cm	多样性指数	多元回归方程	F	P	R^2
0—20	R	$R=-17.87+0.87X_1+4.01X_2+4.56X_4$	4290.5	<0.01	1.000
	D	$D=3.98-1.13X_2+1.21X_3-0.21X_5$	321.78	0.046	0.997
	H	$H=-6.98+0.98X_1+2.65X_4$	50.09	<0.01	0.987
	E	$E=-7.09+3.09X_2+1.29X_3-0.05X_5$	6598.06	<0.01	1.000
20—40	R	$R=-79.65+0.675X_3+26.99X_4+3.98X_5$	3498.09	<0.01	1.000
	D	$D=0.54+1.13X_3$	17.56	<0.01	0.935
	H	$H=-47.54+16.09X_4+2.88X_5$	33.09	<0.01	0.986
	E	$E=-3.43+4.23X_3+0.64X_4$	25.98	0.032	0.985
40—60	R,D,H,E	0	0	0	0

注: X_1 :含水量; X_2 :容重; X_3 :有机碳; X_4 :全氮; X_5 :碱解氮;0:表示回归过程没有变量进入方程。

3 结论与讨论

土壤是植物群落演替的重要环境条件,土壤的理化性质、土壤种子库的特征等影响着植被发生、发育和演替的速度,同时土壤性质也因植被的演变而发生变化,土壤性质与植物群落的组成结构及植物多样性有着密切的关系^[19,22-23]。随着演替的进展,特别是固氮先锋植物的介入,增加了 SOC 和土壤 N 素的含量,改善了土壤环境条件,为后来的植物定居创造了有利条件,从而使先锋植物在竞争中失去优势而让位于后来者,植物种类替代加速,促进了植物群落生物种类多样化和结构复杂化,加速土壤中物质的分解率和生物归还率,促进土壤物质循环,土壤环境得到进一步的改善^[13,24-25]。研究结果亦表明在衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复过程中,植物群落的性质与土壤性质也存在这一关系,与杨小波等^[26]对海南琼北地区的弃荒坡耕地上植物群落性质与土壤性质的关系的研究结果相似。

该研究表明,植被的恢复在促进群落物种多样性增加的同时,也改善了植被所赖以生存的土壤环境,群落物种多样性影响了生态系统的物质循环,同时也影响了生态系统中元素循环与土壤肥力的可持续性^[27]。然而,土壤理化因子与植物群落物种多样性的耦合关系较为复杂,不同学者的研究结果也不尽相同,Gentry^[28]认为随着土壤肥沃程度的增加,群落的物种多样性也逐渐增加,而 Rosenzweig^[29]的研究则表明在小尺度内土壤养分与植物多样性呈负相关。

尽管如此,因为植被恢复是土壤恢复的前提条件,在自然环境中,没有植被恢复就没有土壤肥力的恢复,特别是从草本群落进入灌丛植物群落阶段是一个较敏感的生态过渡阶段,具有重要的土壤与植被恢复生态学意义,因此,土壤养分水平对植物群落多样性水平的重要作用是确定无疑的^[29-30]。必须指出,在退化生态系统恢复的初期阶段(从草本植物群落到疏林植物群落阶段),土壤肥力与植物群落物种多样性的相互耦合关系可以看成是线性关系,但随着植物群落的发展,这种关系变得更加复杂,有待进一步研究^[31-34]。

参考文献:

[1] Mcquilkin W E. The natural establishment of pine in abandoned fields in the Piedmour Plateau Region[J]. Ecology,1940,21(2):135-147.

[2] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系[J]. 应用生态学报, 2013,24(1):90-96.

[3] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析[J]. 农业现代化研究, 2012,33(6):757-761.

[4] Nihlgrad B. Pedological influence of spruce planted on former beech forest soil in Scania[J]. South Sweden Oikos,1971,22(3):302-314.

[5] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J]. 生态学报,2014,34(10): 2693-2701.

[6] Kellner O, Redbo-torstensson P R. Effects of elevated

- nitrogen deposition on field-layer vegetation in coniferous forests[J]. *Ecological Bulletins*, 1995, 44(1): 227-237.
- [7] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤微生物量碳的变化及其与土壤理化因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(1): 25-30.
- [8] 杨满元, 杨宁, 郭锐, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物数量特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 229-232.
- [9] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients[J]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1988, 75(3): 1-34.
- [10] Gartlan J S, Newbery D M, Thomas K W, et al. The influence of topography and soil phosphorous on the vegetation of Korup forest reserve[J]. *Gameroun Vegetation*, 1986, 65(3): 131-148.
- [11] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植被恢复模式建设[J]. *草业科学*, 2010, 27(10): 10-16.
- [12] 陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物特性[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 739-742.
- [13] 杨宁, 邹冬生, 李建国, 等. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落自然恢复演替进程中种群生态位动态[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 87-93.
- [14] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉的种群结构和空间分布格局[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(10): 2100-2105.
- [15] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落生物量特征[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2009, 35(5): 466-469.
- [16] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地土壤水分变化动态研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(6): 16-21.
- [17] 陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复过程中土壤水文效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 590-597.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植物群落数量分类及物种多样性研究[J]. *农业现代化研究*, 2009, 30(5): 615-619.
- [20] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地自然恢复灌丛阶段主要种群空间分布格局[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 996-1001.
- [21] 杨宁, 彭晚霞, 邹冬生, 等. 贵州喀斯特土石山区水土保持生态经济型植被恢复模式[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(S1): 474-477.
- [22] 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地自然恢复植被特征及恢复模式构建[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010: 52-68.
- [23] Zhang J Y, Zhao H L, Cui J Y, et al. Effects of clonal plants on community structure and function along a restorational gradient in Horqin sandy land[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 5-9.
- [24] Crocker R L, Major J. Soil development in relation to vegetation and surface age at Glacier Bay, Alaska[J]. *J. Ecology*, 1955, 43(5): 427-448.
- [25] Bormann B T, Sidle R C. Change in productivity and distribution of nutrients in chronosequence at Glacier Bay, national Park[J]. *Alaska, J. Ecology*, 1990, 78(9): 561-578.
- [26] 杨小波, 张桃林, 吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 190-196.
- [27] Tilman D, Wedln D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. *Nature*, 1996, 379(10): 718-720.
- [28] Gentry A H. Endemism in tropical vs. temperate plant communities in Soule [M]. *Conservation Biology*. Sinauer Press. Sunderland, Massachusetts, 1986: 153-181.
- [29] Rosenzweig M L. Species diversity in space and time [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [30] 杨宁, 杨满元, 雷玉兰, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 575-580.
- [31] 陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤基础呼吸及代谢熵的变化[J]. *热带亚热带植物学报*, 2013, 21(6): 514-520.
- [32] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤酶活性特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1516-1524.
- [33] 陈璟, 杨宁. 亚热带红壤丘陵区 5 种人工林对土壤性质的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(12): 167-173, 178.
- [34] 杨宁, 陈璟, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉林不同林冠环境下箭竹分株种群结构特征[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(11): 2326-2331.