

南滚河自然保护区森林群落特征与土壤性质之间关联分析

任玉连<sup>1</sup>,曹乾斌<sup>1</sup>,李 聪<sup>1</sup>,冯 峻<sup>2</sup>,陆 梅<sup>1\*</sup>,王邵军<sup>1</sup>,王志胜<sup>3</sup>

(1. 西南林业大学 生态与水土保持学院,云南 昆明 650224;2. 云南省林木种苗工作总站,云南 昆明 650215;  
3. 云南南滚河国家级自然保护区 沧源管理局,云南 沧源 677499)

**摘 要:**植被类型与土壤特征之间关联性是理解“植被-环境”相互作用关系的基础,也是生态系统经营管理的重要依据。以南滚河自然保护区 5 种不同森林类型为研究对象,利用灰色关联法分析不同森林类型群落多样性与土壤环境因子之间的关系。结果表明,不同森林类型群落多样性存在显著差异,物种多样性指数由大到小依次为:山地雨林(Ⅱ)>沟谷雨林(Ⅰ)>半常绿季雨林(Ⅲ)>季风常绿阔叶林(Ⅳ)>中山湿性常绿阔叶林(Ⅴ)。土壤理化性质亦存在一定差异,总体而言,中山湿性常绿阔叶林的土壤理化状况优于较其他森林类型。关联度分析表明,森林群落多样性及群落特征参数与土壤理化指标的关联度存在一定差异。其中,Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数与土壤 pH、速效氮、全磷和容重的关联度最大;Simpson 指数与土壤速效氮、有机质、全氮和容重的关联度最大;年均降雨量、年均温度、乔木覆盖度、林下植被覆盖度、凋落物厚度和土壤厚度与土壤有机质、pH、速效氮、全氮、含水量和容重的关联度最大。5 种森林类型群落多样性、群落特征参数与土壤因子之间的关联度整体>0.6,均与土壤含水量和容重有较高的关联关系。表明南滚河自然保护区不同森林类型下“植被-土壤特征”存在显著的关联作用及样地差异性,与森林群落的组成、结构、多样性及样地微环境紧密的关联。

**关键词:**植被类型;土壤理化性质;植被群落多样性;关联度分析

**中图分类号:**S718.542      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2019)03-0050-10

Correlation Analysis between Forest Community Characteristics and Soil Characteristics  
in Nangunhe Nature Reserve

REN Yu-lian<sup>1</sup>, CAO Qian-bin<sup>1</sup>, LI Cong<sup>1</sup>, FENG Jun<sup>2</sup>, LU Mei<sup>1\*</sup>, WANG Shao-jun<sup>1</sup>, WANG Zhi-sheng<sup>3</sup>

(1. College of Ecology and Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;  
2. Forest Seed and Seedling Station of Yunnan Province, Kunming 650215, Yunnan, China;  
3. National Nature Reserve Cangyuan Authority in Yunnan Nangun River, Cangyuan 677499, Yunnan, China)

**Abstract:** The correlation between vegetation types and soil characteristics is the basis for understanding the interaction between vegetation and environment, and also an important basis for ecosystem management. Five different forest types in the Nangunhe Nature Reserve were used as research objects, and the relationship between community diversity and soil environmental factors of different forest types was analyzed by gray correlation method. The results showed that there were significant differences in community diversity among different forest types. The order of species diversity index from large to small was mountain rainforest (Ⅱ)>ravine rainforest (Ⅰ)>half evergreen monsoon forest (Ⅲ)>monsoon evergreen broad leaved forest (Ⅳ)>mid-mountain humid evergreen broad-leaved forest (Ⅴ). There were also some differences in

收稿日期:2018-08-12 修回日期:2018-11-28  
基金项目:国家自然科学基金(31660191,41461052);云南省应用基础研究面上项目(2013FB053);西南林业大学科技创新基金资助项目(C17129)。  
作者简介:任玉连,女,硕士在读,研究方向:土壤生态。E-mail:renyulian0411@163.com  
\*通信作者:陆 梅,女,博士,副教授,研究方向:土壤生态、湿地生态及土壤微生物生态。E-mail:lumeizx@126.com

the physicochemical properties of soil. In general, the soil physicochemical status of mid-mountain humid evergreen broad-leaved forest was better than other forest types. Correlation analysis showed that there was a certain difference in the degree of correlation between forest community diversity and soil physicochemical indicators. Shannon-Wiener diversity index, Pielou index and Margalef richness index were most significantly correlated with soil pH, available nitrogen, total phosphorus and bulk density. Simpson index was most significantly correlated with soil available nitrogen, organic matter, total nitrogen and bulk density. The annual average rainfall, annual average temperature, canopy density, coverage, litter thickness and soil thickness were most significantly correlated with soil organic matter, pH, available nitrogen, total nitrogen, water content and bulk density in forest community. The correlation degrees between community diversity, community characteristics and soil factors of the five forest types were greater than 0.6, which were highly correlated with soil water content and bulk density. It indicated that there was a significant correlation between the “vegetation-soil characteristics” under different forest types in the Nangunhe Nature Reserve and the differences in plots, which were closely related to the composition, structure, diversity and micro-environment of the forest community.

**Key words:** vegetation type; soil physicochemical property; vegetation community diversity; correlation analysis

植被和土壤是生态系统中的重要组成部分,能量流动和物质循环在二者之间较活跃地进行着<sup>[1]</sup>。植被类型如凋落物对土壤的有机质、养分状况有很大的影响<sup>[2]</sup>。一方面,植物通过根系的物理作用和分泌的有机物质,在土体中穿插、缠绕来分散、串联、固结土壤颗粒,在土壤中形成的孔隙可增加渗透性和土壤动物的生存空间,有利于土壤有机物积累和丰富土壤生物多样性<sup>[3]</sup>。另一方面,土壤为植物生长及群落发生和演替提供必需的物质基础和环境条件,土壤水分、通气性及其他理化性质不仅能够影响地上植物的生长与发育,还能通过改变植物组成、种内种间动态分布关系以及对养分的分配和利用<sup>[4]</sup>,进而影响植物群落演替过程中多样性变化<sup>[5-6]</sup>。研究自然森林生态系统中植被类型与土壤因子之间的关联性,不仅可以反映森林生态学过程<sup>[7]</sup>,而且能够表征森林土壤肥力的形成过程、状况及植被演替<sup>[8]</sup>。不同森林植被类型能够导致不同的地上与地下资源输入,形成不同的微气候环境、物理条件以及土壤性质。U. Suleiman<sup>[9]</sup>等研究表明,土壤发育过程不仅受地上植被及枯枝落叶输入的质与量所调控,还受地下林木根系、微生物活动的影响。刘义<sup>[10]</sup>等研究表明,因凋落物组成和分解速率的不同,不同森林类型土壤养分存在差异,其中阔叶林土壤肥力水平较针叶林高。刘跃建<sup>[11]</sup>等研究了 16 个群落类型的森林土壤,发现土壤养分总体上表现为高海拔植被大于低海拔植被。钱亦兵<sup>[12]</sup>等对土壤异质性与植物群落分布特征的关系进行研究,表明不同林型和林地环境因素是影响土壤性质差异的主要原因,不同海拔、坡度、坡向、植被类型对土壤物理性质影响不

同。因此,明确不同植被类型下土壤养分时空动态及不同植被类型间土壤养分含量之间的差异性,有助于理解植被-土壤之间相互耦合的过程及作用机制。

南滚河自然保护区是具有世界意义的生物多样性保护关键地区之一,也是中国典型的热带森林分布区域。该地区植被类型多样、植被垂直分布规律典型,主要的地带性植被类型包括沟谷雨林、山地雨林、半常绿季雨林、季风常绿阔叶林和中山湿性常绿阔叶林。本研究以 5 种植被类型为对象,分析不同植被类型的群落多样性与土壤理化特征之间的相互关系,旨在为理解保护区内“植被-土壤”时空分布格局、形成机理及相互作用规律提供基础数据,同时也为探究雨林、季雨林和阔叶林的植物多样性保护与森林有效经营与管理奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

南滚河国家级自然保护区地处亚热带南部和北部交汇地带,23°09′12″—23°40′08″N,98°57′32″—99°26′00″E,横断山脉南段西部边缘,南亚季风环流控制区域,地势起伏大,相对高度 2 467 m。巨大的高差,使水热垂直分异显著,并形成多种垂直气候带,促使植被类型的多样化。自然保护区以其极丰富的生物多样性、完整多样的生态系统、珍稀濒危特有物种种类多、生物多样性敏感脆弱、生物文化多样性富集等特点,成为中国极具特色的自然保护区之一,是全球 25 个生物多样性热点地区的重要组成部分,具有世界意义关键生物类群的热带森林生态

系统。保护区天然森林植被保存完好,是西南地区现存天然森林植被的典型代表。

1.2 样地设置

选择沟谷雨林、山地雨林、半常绿季雨林、季风常绿阔叶林及中山湿性常绿阔叶林 5 种森林植被类型为对象。于 2016 年 5—6 月在云南省南滚河自然

保护区上述样地共设置 39 个 25 m×25 m 的永久性森林动态样地,利用对角线法以样地中心为准将其划分为 3 个 1 m×1 m 的小样方。对每个样地中的 3 个土壤取样点旁埋设 1 个规范的水泥标记桩并进行编号,同时记录主要林木物种名称。5 个样地植被群落基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况  
Table 1 The basic situation of the sample plots

项目	沟谷雨林 (Ⅰ)	山地雨林 (Ⅱ)	半常绿季 雨林(Ⅲ)	季风常绿 阔叶林(Ⅳ)	中山湿性常绿 阔叶林(Ⅴ)
样地数	9	6	9	6	9
群落外貌特征	林冠不整齐,各种复叶和大型叶的种类多,群落层次和林层结构复杂,种类组成丰富	群落层次复杂性较季节雨林低,组成种类减少,植物的热带性成分有所下降	干湿交替明显,在热带季风气候条件下形成的森林植被种类组成丰富	林冠较整齐,缺少大型叶种类,革质叶和中小型叶的种类较多植物的种类成分相对较少,林层结构较简单	群落外貌、层片结构和生境都以“湿”为特点,林内树干普遍出现苔藓地衣以及蕨类等附生植物,而且群落的灌木层中一般都有一个比较明显的竹子层片
优势代表植物	绒毛番龙眼( <i>Pometia tomentosa</i> )、千果榄仁( <i>Terminalia myriocarpa</i> )、皮孔葱臭木( <i>Dysoxylum lenticellatum</i> )、黄棉木( <i>Metadina trichotoma</i> )、野桐( <i>Mallothus</i> sp.)和辛果漆( <i>Drimycarpus anacardifolius</i> )等	顶果木( <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> )、千果榄仁、绒毛番龙眼( <i>Pometia tomentosa</i> )、厚叶石砾( <i>Lithocarpus pachyphyllus</i> )和白花羊蹄甲( <i>Bauhinia variegata</i> )等	白花羊蹄甲、四数木( <i>Tetrameles nudiflora</i> )、常绿榆( <i>Ulums lanceaeifolia</i> )和臭黄皮( <i>Clauserna excavata</i> )等	刺栲( <i>Castanopsis hystrix</i> )、红花木樨榄( <i>Olea rosea</i> )、润楠( <i>Machilus. sp.</i> )、假杜鹃( <i>Barleria cristata</i> )和毛叶水棉树( <i>Wedlandia tinctoric</i> )等	山杜英( <i>Elaeocarpus sylvestris</i> )、马蹄荷( <i>Symingtonia populnea</i> )、瓦山栲( <i>Castanopsis ceratacantha</i> )、红花木莲( <i>Manglietia insignis</i> )和万寿竹( <i>Disporum cantoniense</i> )等
土壤类型	砖红壤	砖红壤	赤红壤	红壤	黄壤
海拔/m	543~554	597~624	1 260~1 270	1 510~1 514	2 173~2 176
坡度/(°)	1~35	1.5~36	15~60	5~22	8~25
年均降雨量/mm	1 340.1	1 549.4	1 810.9	2 020.1	2 229.3
年均温度/℃	23.4	22.8	19.8	17.7	14.6
乔木覆盖度/%	93	92	88	80	76
林下植被覆盖度/%	75	76	61	55	49
凋落物厚度/cm	1.5	1.6	1.8	2	3
土壤厚度/cm	20	20	20	20	20

1.3 土壤样品采集与理化分析

在各样地的 3 个 1 m×1 m 小样方中心位置取 0~20 cm 深度的土样混合后带回实验室,经过自然风干、碾磨、过筛等预处理后,进行土壤化学性质分析。同时利用环刀在相同土层深度进行土壤取样并带回实验室,进行土壤物理性质分析。土壤容重和含水量采用环刀法测定,pH 值采用电位法测定,有机质采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用高氯酸-硫酸消化(福斯 KJ800 全自动定氮仪法)测定,速效氮采用碱解扩散吸收法测定,全磷和速效磷采用钼锑抗比色法测定,全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定《土壤理化分析》<sup>[13]</sup>。

1.4 植物多样性测定

1.4.1 物种多样性 采用 Shannon-Wiener 指数(*H*)和 Simpson 指数(*D*)计算:

$$H=-\sum_{i=1}^s(P_i\ln P_i) \tag{1}$$

$$D=1-\sum_{i=1}^sP_i^2 \tag{2}$$

1.4.2 物种均匀度 采用 Pielou 指数(*J*)计算:

$$J=D/(1-1/S) \tag{3}$$

1.4.3 物种丰富度 选用 Margalef 指数(*R*)计算:

$$R=S-1/\ln N \tag{4}$$

式中,*P<sub>i</sub>* 为种 *i* 的相对密度,*P<sub>i</sub>*=*n<sub>i</sub>*/*N*; *N* 为种 *i* 所在样方的各个种的个体数量之和;*n<sub>i</sub>* 为种 *i* 的个体数量;*S* 为种 *i* 所在样方的物种总数<sup>[14]</sup>。

### 1.5 统计与分析

灰色系统理论是以分析和确定因素间的相互影响程度或因子的贡献程度而进行评估的一种分析方法<sup>[15]</sup>。应用灰色关联分析进行评价,解决了众多因子作用的排序问题<sup>[16]</sup>。江源<sup>[17]</sup>等结合前人的研究将植被土壤系统的关联度划分为 4 级:以 0.4、0.6 和 0.8 为界,依次为  $0 < \lambda_{ij} \leq 0.4$  低关联度(土壤资源基本不利于其发展的物种)、 $0.4 < \lambda_{ij} \leq 0.6$  中等关联(土壤资源基本有利于其发展的物种)、 $0.6 < \lambda_{ij} \leq 0.8$  较高关联(土壤资源有利于其发展的物种)和  $0.8 < \lambda_{ij} \leq 1$  高关联(土壤资源最有利于其发展的物种)<sup>[17]</sup>。关联度越大,子数列与母数列的发展趋势就越接近,即表明该区域土壤越有利于植物种发展。

#### 1.5.1 建立原始数据矩阵

$$(X'_1, X'_2 \cdots X'_n) =$$

$$\begin{pmatrix} x'_1(1) & x'_2(1) & \cdots & x'_n(1) \\ x'_1(2) & x'_2(2) & \cdots & x'_n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_1(m) & x'_2(m) & \cdots & x'_n(m) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $m$  为指标的个数,  $X'_i = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(m))^T, i=1, 2, \dots, n$

#### 1.5.2 确定参考数据列

$$X'_0 = [x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(m)] \quad (6)$$

1.5.3 矩阵无量纲化(初值化), 无量纲化后的数据序列形成如下矩阵

$$(X_0, X_1, \dots, X_n) =$$

$$\begin{pmatrix} x_0(1) & x_1(1) & \cdots & x_n(1) \\ x_0(2) & x_1(2) & \cdots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0(m) & x_1(m) & \cdots & x_n(m) \end{pmatrix} \quad (7)$$

#### 1.5.4 计算绝对值 $|X_0 - X_i|$ :

$$|x_0(k) - x_i(k)| \quad (8)$$

( $k=1, \dots, m; i=1, \dots, n$ 。  $n$  为被评价对象的个数)

#### 1.5.5 求最值

$$\Delta_{\min} = \min_{i=1}^n \min_{j=1}^m |x_0(t) - x_i(t)| \text{ 与 } \Delta_{\max} = \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m |x_0(t) - x_i(t)| \quad (9)$$

#### 1.5.6 计算关联系数

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij}(t) + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}(t)}{\Delta_{ij}(t) + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}(t)} \quad (10)$$

式中:  $\xi_{ij}(t)$  为关联系数;  $\Delta_{ij}(t)$  为比较数列与参考数列各对应点的绝对差值;  $\rho$  为分辨系数,  $\rho$  越小, 分辨率越大, 一般  $\rho=0.5$ 。

#### 1.5.7 计算关联度

$$\lambda_{ij} = 1/n \sum_{k=1}^n \xi_{ij}(t) \quad (11)$$

式中,  $\lambda_{ij}$  为关联度;  $n$  为样品数,  $\lambda_{ij}$  用平权法求得。

其他数据比较时, 采用 SPSS20.0 进行方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD法,  $\alpha=0.05$ )。利用 R 语言软件(v3.1.2)中“ggplot 2”包和 Excel 2013 软件进行绘图处理。

## 2 结果与分析

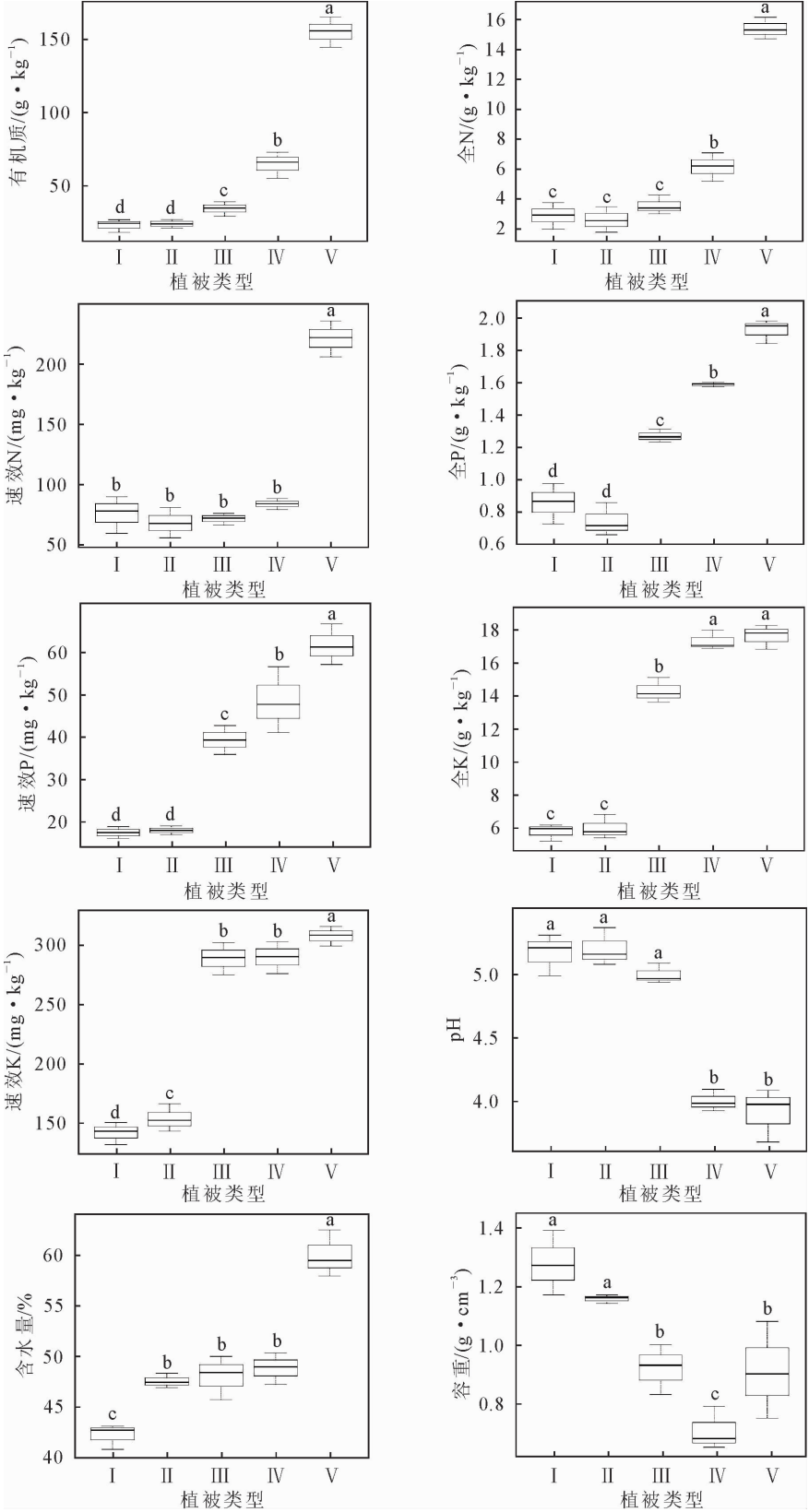
### 2.1 不同森林群落土壤分级特征

根据研究数据结合全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[18]</sup>。对南滚河自然保护区不同植被类型土壤特征进行分级(1 级为“高”、2 级为“中”、3 级为“低”)。植被类型 I 的土壤有机质、全 N、速效 N、全 P、速效 P、全 K、速效 K 和含水量为表现出极低水平, 归为 3 级; 而土壤 pH 和容重表现出极高水平, 归为 1 级。植被类型 II 的土壤有机质、全 N、速效 N、全 P、速效 P 和全 K 含量表现出极低水平, 归为 3 级; 而土壤速效 K 和含水量含量表现出中等水平, 归为 2 级, 土壤 pH 表现出较高水平, 归为 1 级。植被类型 III 的土壤有机质、全 N、速效 N 和容重表现出极低水平, 归为 3 级; 土壤全 P、速效 P、全 K、pH 和含水量表现出中等水平, 归为 2 级; 土壤速效 K 含量表现出较高水平, 归为 1 级。植被类型 IV 的土壤有机质、全 N、速效 N、全 P、速效 P 和含水量表现出中等水平, 归为 2 级; 土壤全 K 和速效 K 表现出较高水平, 归为 1 级; 土壤 pH 和容重表现出极低水平, 归为 3 级。植被类型 V 的土壤有机质、全 N、速效 N、全 P、速效 P、全 K、速效 K 和含水量表现出极高水平, 归为 1 级; 土壤 pH 和容重表现出极低水平, 归为 3 级。总体来说, 植被类型 V 土壤养分水平较高, 归为 1 级。

在 5 种植被类型中, 土壤有机质、速效 P、全 K、速效 K 和含水量的变化规律表现为植被类型 V > 植被类型 IV > 植被类型 III > 植被类型 II > 植被类型 I; 土壤全 N 和全 P 为植被类型 V > 植被类型 IV > 植被类型 III > 植被类型 I > 植被类型 II; 土壤速效 N 为植被类型 V > 植被类型 IV > 植被类型 I > 植被类型 III > 植被类型 II; 5 种植被类型土壤 pH 值的变化范围在 3.98~5.37; 土壤容重为植被类型 I > 植被类型 II > 植被类型 V > 植被类型 III > 植被类型 IV (图 1)。方差分析表明: 植被类型 V、IV 与 I、II、III 的有机质和全 N 含量差异性显著 ( $P < 0.05$ ), 植被类型 V 与 I、II、III 和 IV 的速效 N 含量差异性显著 ( $P < 0.05$ ), 全 P、速效 P 含量在植被类型 III、IV 和 V 间差异性显著 ( $P < 0.05$ ), 全 K 在植被类型 IV、

V 与 I、II 和 III 间差异性显著 ( $P<0.05$ ), 植被类型 I、II、III 与 V 和 IV 的土壤 pH 差异性显著 ( $P<0.05$ ), 植被类型 V 与 I、II、III、IV 的土壤含水量差

异性显著 ( $P<0.05$ ), 植被类型 I 与 III、IV 土壤容重的差异显著 ( $P<0.05$ )。



注:不同字母表示差异性显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 不同植被类型土壤特征比较

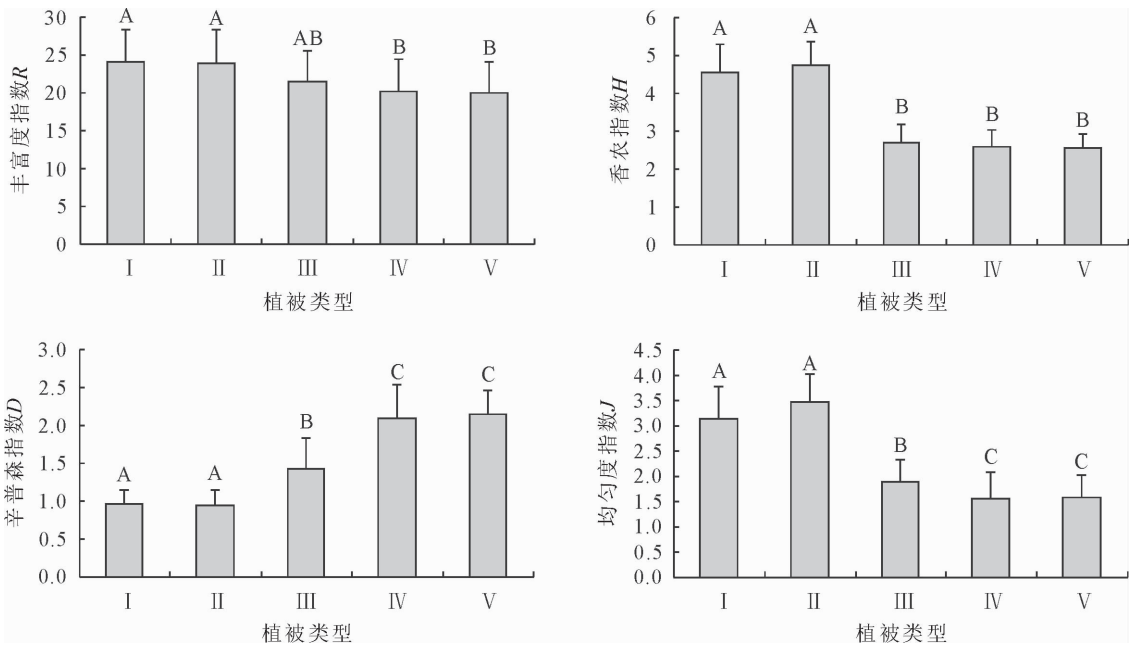
Fig. 1 Comparison of soil characteristics between different vegetation types

2.2 不同森林群落植被多样性特征

南滚河自然保护区不同植被类型群落多样性按 1 级(高)、2 级(中)和 3 级(低)进行分级。其中,植被类型 I 和植被类型 II 的丰富度指数、香农指数和均匀度指数均为 1 级,辛普森指数为 3 级,表现出极丰富水平;植被类型 III 的丰富度指数、香农指数、辛普森指数和均匀度指数均为 2 级,表现出中等丰富水平;植被类型 IV 和植被类型 V 的丰富度指数、香农指数和均匀度指数均为 3 级,辛普森指数为 1 级,其植被群落多样性较低。综上,植被类型 I 和植被类型 II 植被群落多样性较高。

物种多样性指数是综合反映群落中种的丰富度和均匀程度的数量指标<sup>[19]</sup>。5 种植被类型总体群落

的多样性存在差异。不同植被类型丰富度指数为植被类型 II>植被类型 I>植被类型 III>植被类型 IV>植被类型 V, I、II 与 IV、V 间的丰富度指数差异显著( $P<0.05$ );香农多样性指数为植被类型 II>植被类型 I>植被类型 III>植被类型 V>植被类型 IV, I、II 与 III、IV 和 V 的物种多样性指数差异显著( $P<0.05$ ),植被类型 III、IV 和 V 之间差异不显著( $P>0.05$ );辛普森指数为植被类型 V>植被类型 IV>植被类型 III>植被类型 II>植被类型 I, I、II 与 III、IV 和 V 的辛普森指数差异显著( $P<0.05$ );均匀度指数为植被类型 II>植被类型 I>植被类型 III>植被类型 V>植被类型 IV, I、II 与 III、IV 和 V 的均匀度指数差异显著( $P<0.05$ )。



注:不同大写字母表示不同植被群落的显著差异( $P<0.05$ )。

图 2 不同植被类型的植被群落多样性指数

Fig. 2 The diversity indices of the different vegetation communities

2.3 森林群落多样性及群落参数与土壤特征间关联度分析

2.3.1 森林群落多样性与土壤特征间关联度分析

选择森林群落多样性指数( $H$ 、 $D$ 、 $J$  与  $R$ )与林地土壤有机质( $X_1$ )、全 N( $X_2$ )、速效 N( $X_3$ )、全 P( $X_4$ )、速效 P( $X_5$ )、全 K( $X_6$ )、速效 K( $X_7$ )、pH( $X_8$ )等 8 个化学因子和土壤含水量( $X_9$ )、容重( $X_{10}$ )2 个物理因子进行灰色关联分析,得出不同土壤因子对自然保护区森林群落多样性的关联度和关联序(表 2、表 3)。结果表明,森林群落多样性指数与土壤理化因子的关联度存在差异。其中,香农指数、均匀度指数和丰富度指数分别与土壤理化因子中 pH(0.955;0.940;0.984)、速效 N(0.863;0.851;0.847)、全 P(0.822;0.812;0.842)和容重

(0.976;0.962;0.964)存在高度关联;辛普森指数与土壤理化因子中土壤速效 N(0.860)、有机质(0.840)、全 N(0.831)和容重(0.779)的关联度最大。说明在南滚河自然保护区内,土壤资源有利于该区域森林类型多样性的发展。

2.3.2 森林群落参数与土壤特征间关联度分析

为了进一步理解土壤因子与森林群落参数之间相互关系,选择年均降雨量( $Y_1$ )、年均温度( $Y_2$ )、乔木覆盖度( $Y_3$ )、林下植被覆盖度( $Y_4$ )、凋落物厚度( $Y_5$ )和土壤厚度( $Y_6$ )与林地土壤有机质( $X_1$ )、全 N( $X_2$ )、速效 N( $X_3$ )、全 P( $X_4$ )、速效 P( $X_5$ )、全 K( $X_6$ )、速效 K( $X_7$ )、pH( $X_8$ )等 8 化学因子和土壤含水量( $X_9$ )、容重( $X_{10}$ )2 个物理因子进行灰色关联分析,得出不同土壤因子对自然保护区森林群落

综合影响参数的关联度和关联序(表 4、表 5)。结果表明,影响参数与土壤因子的关联度整体较高。其中,年均降雨量与土壤理化因子间关联度最大的是土壤含水量(0.945)、速效 N(0.911)、全 N(0.889)、有机质(0.872)、pH(0.945)和容重(0.842);年均温度、乔木覆盖度、林下植被覆盖度和土壤厚度与土壤有机质(0.980;0.988;0.981;0.965)、容重(0.971;0.957;0.974;0.949)、含水量(0.912;0.930;0.914;0.934)、pH(0.886;0.899;0.882;0.906)、速效 N(0.840;0.850;0.837;0.860)和全 N(0.819;0.831;0.820;0.839)的关联度最大;凋落物厚度与土壤含水量(0.940)、速效 N(0.912)、pH(0.896)、全氮(0.895)、有机质(0.877)和容重(0.843)的关联度最大。综上,土壤理化因子与综合影响参数间的整体关联度均较高。

表 2 群落多样性指数与土壤因子的关联度

Table 2 Correlation coefficients between community diversity index and soil factors

多样性指数	土壤化学因子								土壤物理因子	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
H	0.739	0.731	0.863	0.822	0.755	0.729	0.807	0.955	0.893	0.976
D	0.840	0.831	0.860	0.616	0.655	0.652	0.664	0.695	0.635	0.779
J	0.737	0.734	0.851	0.812	0.749	0.747	0.805	0.940	0.891	0.962
R	0.750	0.741	0.847	0.842	0.765	0.762	0.824	0.984	0.923	0.964

表 3 群落多样性指数与土壤因子关系的关联矩阵

Table 3 Correlation matrix of relationship between community diversity and soil factors

多样性指数	关联序	
	土壤化学因子	土壤物理因子
香农指数	pH>速效 N>全 P>速效 K>速效 P>有机质>全 N>全 K	容重>含水量
辛普森指数	速效 N>有机质>全 N>pH>速效 K>速效 P>全 K>全 P	容重>含水量
均与度指数	pH>速效 N>全 P>速效 K>速效 P>全 K>有机质>全 N	容重>含水量
丰富度指数	pH>速效 N>全 P>速效 K>速效 P>全 K>有机质>全 N	容重>含水量

表 4 群落参数与土壤因子的关联度

Table 4 Correlation coefficient to community parameter and soil factors

影响参数	土壤化学因子								土壤物理因子	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Y1	0.872	0.889	0.911	0.785	0.796	0.792	0.786	0.866	0.945	0.842
Y2	0.980	0.819	0.840	0.750	0.764	0.760	0.741	0.886	0.912	0.971
Y3	0.988	0.831	0.850	0.756	0.770	0.765	0.747	0.899	0.930	0.957
Y4	0.981	0.820	0.837	0.751	0.765	0.761	0.741	0.882	0.914	0.974
Y5	0.877	0.895	0.912	0.772	0.791	0.792	0.761	0.896	0.940	0.843
Y6	0.965	0.839	0.860	0.760	0.775	0.771	0.750	0.906	0.934	0.949

表 5 群落参数与土壤因子关系的关联矩阵

Table 5 Correlation matrix of relationship between community parameter and soil factors

影响参数	关联序	
	土壤化学因子	土壤物理因子
年均降雨量	速效 N>全 N>有机质>pH>速效 P>全 K>速效 K>全 P	含水量>容重
年均温度	有机质>pH>速效 N>全 N>速效 P>全 K>全 P>速效 K	容重>含水量
乔木覆盖度	有机质>pH>速效 N>全 N>速效 P>全 K>全 P>速效 K	容重>含水量
林下植被覆盖度	有机质>pH>速效 N>全 N>速效 P>全 K>全 P>速效 K	容重>含水量
凋落物厚度	速效 N>pH>全 N>有机质>全 K>速效 P>全 P>速效 K	含水量>容重
土壤厚度	有机质>pH>速效 N>全 N>速效 P>全 K>全 P>速效 K	容重>含水量

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

南滚河自然保护区土壤有机质、全 N、速效 N、全 P、速效 P、全 K、速效 K 和含水量均表现为中山湿性常绿阔叶林(V)最高,沟谷雨林(I)和山地雨林(II)较低。中山湿性常绿阔叶林(V)土壤 pH 值呈强酸性,其他植被类型呈微酸性;中山湿性常绿阔叶林(V)和季风常绿阔叶林(IV)土壤容重较松,其他植被类型土壤容重偏紧。

沟谷雨林(I)和山地雨林(II)的群落多样性最丰富,半常绿季雨林(III)群落多样性较丰富,季风常绿阔叶林(IV)和中山湿性常绿阔叶林(V)的群落多样性较低。

森林群落多样性指数( $H$ 、 $D$ 、 $J$  与  $R$ )与各理化指标的关联度均较高。土壤有机质、全 N、速效 N、全 P、全 K、速效 P、速效 K、pH、含水量和容重均是影响森林群落多样性的重要因子,其中 pH、速效 N、全 P 和容重是影响香农指数、均匀度指数和丰富度指数的主要因子,土壤速效 N、有机质、全 N 和容重是影响辛普森指数的主要因子。土壤理化因子除与植被群落多样性关系密切外,还与年均降雨量、年均温度、乔木覆盖度、林下植被覆盖度、凋落物厚度和土壤厚度等环境变量间紧密联系。

### 3.2 讨论

#### 3.2.1 南滚河自然保护区不同森林群落土壤特征

土壤养分含量变化影响着土壤肥力大小,同时土壤肥力受植物对养分吸收能力的影响,但更取决于各因子的协调程度,是诸多肥力因素综合作用的反映<sup>[20]</sup>。研究表明,5 个植被类型的土壤理化指标均存在显著差异( $P < 0.05$ )。就土壤物理性质而言,中山湿性常绿阔叶林(V)土壤最为疏松与湿润,半常绿季雨林(III)和季风常绿阔叶林(IV)次之,沟谷雨林(I)和山地雨林(II)相对干燥和板结。就土壤化学性质而言,季风常绿阔叶林(IV)和中山湿性常绿阔叶林(V)土壤的酸性最强,中山湿性常绿阔叶林(V)土壤的各项养分含量均显著高于沟谷雨林(I)、山地雨林(II)、半常绿季雨林(III)和季风常绿阔叶林(IV)。总体而言,季风常绿阔叶林(IV)和中山湿性常绿阔叶林(V)土壤具有充足的含水量和适宜的容重,这 2 个因子对季风常绿阔叶林(IV)和中山湿性常绿阔叶林(V)的土壤变异存在主导作用,说明在温度适宜的条件下,湿润、疏松的土壤能满足微生物活动的水、气条件,是养分能成功转化与固持的必要条件。而沟谷雨林(I)和山地雨林(II)土壤变异的主导因子为容易亏缺的养分指标,沟谷雨林

(I)和山地雨林(II)与环境特征表明这些植被类型长时间处于激烈的生长竞争状态,尤其是喜光种之间对光照的竞争,土壤资源供给不足及分解流失较快,使土壤综合质量在短时间内无法得到有效提高。而土壤养分的主要来源是植物凋落物组成和根系分泌的有机质。因此,南滚河自然保护区不同植被类型土壤间的差异主要源于植被类型下环境条件的差异。植被凋落物是连接植物和土壤的纽带,不同植被类型的凋落物组成虽然不同,但叶片为凋落物中比例最大的部分,植被的落叶对土壤产生重要影响<sup>[21]</sup>。植物叶的分化是植物应对外界环境条件而表现出的生态策略,不同叶习性植物在叶片形态、生长周期等方面存在显著差异<sup>[22]</sup>,从而对土壤的影响也存在差异<sup>[23]</sup>。一方面是由于植被所处地理环境不同引起的,5 种植被类型具有不同的高程差,沟谷雨林(I)和山地雨林(II)群落地势最低,半常绿季雨林(III)次之,季风常绿阔叶林(IV)和中山湿性常绿阔叶林(V)群落地势最高,雨林群落具有高温高湿的微气候特征,季雨林群落次之,而阔叶林群落温度低,土壤含水量最为丰富,土壤较为疏松,叠加大量降雨可以为植被和土壤带来大量的凋落物数量与营养物质,所以影响阔叶林和季雨林群落土壤的营养成分显著不同于雨林群落。另一方面在不同环境因素影响下还受植被本身条件影响,植物对土壤的影响是通过植被群落生物量的生长积累、植物的枯落死亡、微生物的腐化分解等过程,使得土壤理化性质在时间、空间尺度上呈现出各种动态变化<sup>[24]</sup>。

3.2.2 南滚河自然保护区不同森林群落多样性与土壤特征的关系 物种多样性变化与其生境因子存在紧密的相互作用。一方面,森林是地球上最复杂的系统,它是生物以不同的组织层次、森林类型、森林结构和功能多样性以及物种多样性所表现的各种规律在森林当中都会有不同程度的体现<sup>[5]</sup>,必然影响到土壤理化性质。另一方面,土壤是植物生长的基础物质,土壤性质都将影响到植物的生长及植物的群落演替。在森林群落生态系统中,Shannon-Wiener 和 Simpson 多样性指数、物种均匀度指数、物种丰富度指数与土壤环境因子存在密切的关联关系,关联度均  $> 0.616$ ,且物种多样性与土壤环境因子的关联程度有所不同。导致关联程度不同的原因可能与不同植被类型的植物组成结构相关,沟谷雨林(I)和山地雨林(II)的结构与组成相似,沟谷雨林(I)生物生长量、林木蓄积量最高且植物种类及生物多样性最为丰富的植被类型,在降水、空气及土壤湿度大的背景下发育起来的一种雨林类型,由于湿度增大,温度较高,土壤水分易蒸发,在高温高湿



的林下环境会加速养分分解与减缓养分富集。半常绿季雨林(Ⅲ)有明显干湿季交替,旱季落叶成分多,藤本植物和附生植物增多。季风常绿阔叶林(Ⅳ)和中山湿性常绿阔叶林(Ⅴ)在群落结构组成上,与雨林和季雨林有显著不同,前者林冠整齐,林层结构简单;后者林冠不整齐,林层结构复杂。中山湿性常绿阔叶林(Ⅴ)位于保护区高海拔地带,是云南省常绿阔叶林在山地垂直带上的重要植被类型,生境更加湿润,植被的组成种类以壳斗科、木兰科、樟科等阔叶落叶树种为主<sup>[25]</sup>。这些植被组成差异可能是导致植被群落多样性与土壤因子关联不同的主要原因。土壤因子与生物多样性因子之间存在明显的数量关系<sup>[26]</sup>,土壤因子对植物多样性具有显著影响<sup>[27]</sup>。

植被群落参数与土壤特征之间的关联度分析显示,群落特征参数(降雨量、温度、林木种类组成、覆盖度、凋落物等)与土壤理化指标(有机质、N、P、K、水分和通气性等)具有极高的关联度,其关联度均>0.741。整体上,土壤有机质、pH、全氮、速效氮、含水量和容重的关联关系最密切。土壤有机质主要来源于植物地上部分的凋落物以及地下的根系,因此植被群落覆盖度越高,植物物种组成越丰富,相应凋落物种类越丰富,有机质含量相应也就越高,因此有机质的高低可以直接反映生物多样性大小。土壤有机质含量是土壤各种养分特别是 N、P 元素的重要来源,并对土壤结构改良、保肥性和缓冲性能等的提高有着积极作用<sup>[28]</sup>。江源<sup>[17]</sup>等研究认为土壤有机质的变化能在一定程度上反映群落物种多样性、乔木覆盖度、林下木覆盖度、凋落物厚度和土壤厚度的变化。此外,植物生长除了需要有机质和氮素外,也需要大量的 P、K 元素,植物生长所需要的 P、K 主要靠根系从土壤中吸收。土壤 pH、含水量和容重也是影响植被群落的重要因素,与各影响参数间的关系密切。土壤酸碱性是土壤母质状况和许多土壤化学性质的综合反映,是土壤肥力的一项重要指标<sup>[29]</sup>。土壤 pH 不仅影响土壤微生物的种群和活性,而且与土壤中养分的形成、转化和有效性密切相关<sup>[30]</sup>,土壤 pH 过低或过高,使土壤养分有效性发生变化,导致植株营养失调。土壤容重是土壤理化性质的综合反映指标,腐殖质多,疏松多孔,容重越小,越紧实,容重越大。一般来说,土壤水分是植物生长的重要限制因子,土壤容重与含水量是影响细根分布的关键因素<sup>[31]</sup>,土壤容重增大,土壤透水透气性逐渐降低,使有机质含量在不断变化,可供降解的有机质也越少,微生物数量迅速下降,氮矿化随之下降<sup>[32]</sup>,从而影响植被生长。总之,相同指标

在不同植被群落下关联度不一,说明植被群落不仅对各个因子存在影响,而且对因子间相互作用也存在影响,这可能是因为土壤养分的分配主要由凋落物成分决定,养分的转化方向与程度及其有效性受微生物种类与环境影响,且最终受植被组成和结构的调控。

参考文献:

[1] 刘瑞英,谭胡燕,杨改河,等. 辛家山不同森林类型土壤基本化学性质研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(5):18-23.  
LIU R Y,TAN H Y,YANG G H,*et al.* Soil chemical properties of different forest types in Xinjiashan mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(5):18-23. (in Chinese)

[2] 蒋文伟,周国模,余树全,等. 安吉山地主要森林类型土壤养分状况的研究[J]. 水土保持学报,2004,18(4):73-76.  
JIANG W W,ZHOU G M,YU S Q,*et al.* Research on nutrient status of soils under main forest types in Anji Mountainous region [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(4):73-76. (in Chinese)

[3] 黄林,王峰,周立江,等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J]. 生态学报,2012,32(19):6110-6119.  
HUANG L,WANG F,ZHOU L J,*et al.* Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties [J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(19):6110-6119. (in Chinese)

[4] KIANIAN M K. Studying surface properties of desert pavements and their relation to soil properties and plant growth in Hajaligholi playa, Iran [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014,7(4):1457-1461.

[5] 安树青. 土壤因子对次生森林群落多样性发育和维持的影响[J]. 武汉植物学研究,1997,15(2):143-150.

[6] JAFARI M,BINIZA M,JANFATA E,*et al.* Relationship between soil characteristics and vegetation types in damghan [J]. Desert,2013,17(1):129-135.

[7] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等. 渝北不同模式水源涵养林植物多样性及其与土壤特征的关系[J]. 生态环境学报,2009,18(6):2260-2266.  
ZHAO Y Y,WANG Y J,WANG Y Q,*et al.* Plant biodiversity of different water conservation forest models and their relationship with soil properties in northern water source area of Chongqing City,southwestern China [J]. Ecology and Environmental Sciences,2009,18(6):2260-2266. (in Chinese)

[8] PRESTON F W . The canonical distribution of commonness and rarity,part 1 [J]. Ecology,1962,43:185-215.

[9] SULEIMAN U,SAMAILA S N,ABBKAR M K. Dynamic surface soil components of land and vegetation types in Kebbi State Nigeria [J]. Eurasian Journal of Soil Science,2016,5(2):113-120.

[10] 刘义,关继义,葛建平. 不同森林类型土壤肥力的差异分析[J]. 东北林业大学学报,2002,30(3):76-78.  
LIU Y,GUAN J Y,GE J P. Comparison of soil fertility for different forest types [J]. Journal of northeast forestry uni-

versity,2002,30(3):76-78. (in Chinese)

[11] 刘跃进,李强,马明东. 四川西北部主要森林植被类型土壤养分库比较研究[J]. 水土保持学报,2010,24(5):146-148.  
LIU Y J,LI Q,MA M D. Comparison of soil nutrient storage of forest vegetation type in northwest of Sichuan Provice [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (5): 146-148. (in Chinese)

[12] 钱亦兵,蒋进,吴兆宁. 艾比湖地区土壤异质性及其对植物群落生态分布的影响[J]. 干旱学学报,2006,28(6):56-59.  
QIAN Y B,JIANG J,WU Z N. Soil heterogeneity and its impact on ecological distribution of plant community in the Aiby Lake area [J]. Arid Land Geography,2006,28(6):56-59. (in Chinese)

[13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978,62-140.

[14] 叶绍明,温远光,杨梅,等. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析[J]. 水土保持学报,2010,24(4):246-256.  
YE S M,WEN Y G,YANG M,*et al.* Correlation analysis on biodiversity and soil physical &- chemical properties of eucalyptus spp. plantations under successive rotation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (4): 246-256. (in Chinese)

[15] 林培松,尚志海. 韩江流域典型区主要森林类型土壤肥力的灰色关联度分析[J]. 水土与农村韩江学报,2009,25(3):55-58.  
LI P S,SHANG Z H. Grey relational analysis of soil fertility of main forest soils in typical district of Hanjiang river basin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2009,25(3):55-58. (in Chinese)

[16] 李川,朱陈名,葛之葳,等. 芦苇与土壤间氮磷化学计量的灰色关联分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(2):16-20.  
LI C,ZHU C M,GE Z W,*et al.* Gray correlation analysis on nitrogen and phosphorus stoichiometry between *Phragmites australis* and soil [J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition,2016,40(2):16-20. (in Chinese)

[17] 江源,章异平,杨艳刚,等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被-土壤系统耦合的影响[J]. 生态学报,2010,30(4):837-846.  
JIANG Y,ZHANG Y P,YANG Y G,*et al.* Impacts of grazing on the system coupling between vegetation and soil in the alpine and subalpinem eadows of Wutai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(4):837-846. (in Chinese)

[18] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1995.

[19] 覃林. 统计生态学[M]. 北京:中国林业出版社,2009:72.

[20] 赵军,尚杰,耿荣,等. 西安咸阳国际机场绿地土壤养分分析与评价[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):257-262.  
ZHAO J,SHANG J,GENG R,*et al.* Analysis and evaluation of green land soil nutrients in Xi'an Xianyang international airport [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(1):257-262. (in Chinese)

[21] 苏建荣,刘万德,李帅锋,等. 西部季风常绿阔叶林恢复生态学[M]. 北京:科学出版社,2015.

[22] CORNWELL W K,AMATANGELO K,DORREPAAL E,*et al.* Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide [J]. Ecology Letters,2008,11(10):1065-1071.

[23] FASSNACHT K S,GOWER S T. Comparison of soil and vegetation characteristics of six upland forest habitat types in north central wisconsin [J]. Northern Journal of Applied Forestry,1998,15(2):69-76.

[24] 杜峰,梁宗锁,徐学选,等. 陕北黄土丘陵区撂荒地群落生物量及植被土壤养分效应[J]. 生态学报,2007,27(5):1652-1673.  
DU F,LIANG Z S,XU X X,*et al.* The community biomass of abandoned farm land and its effects on so soil nutrition in the loess hilly region of northern Shaanxi,China [J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(5):1652-1673. (in Chinese)

[25] 唐芳林,杜凡,孙国政. 云南南滚河国家级自然保护区综合科学考察研究[M]. 北京:中国林业出版社,2015,8.

[26] 刘世梁,马克明,傅伯杰,等. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究[J]. 植物生态学报,2003,27(4):496-502.  
LIU S L,MA K M,FU B J,*et al.* The relationship between landform,soil characteristics and plant community structure in the Donglingshan mountain region,Beijing [J]. Acta Phytocologica Senica,2003,27(4):496-502. (in Chinese)

[27] 杨青青,杨众养,薛杨,等. 海南文昌滨海台地不同森林林下灌草多样性及其与土壤因子关联分析[J]. 热带作物学报,2015,36(12):2238-2244.  
YANG Q Q,YANG Z Y,XUE Y,*et al.* Associated analysis between forest understory vegetation diversity and soil factors in Hainan Wenchang coastal platform [J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2015,36(12):2238-2244. (in Chinese)

[28] 黄雅茹,郝玉光,董礼隆,等. 乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):1-9.  
HUANG Y R,HAO Y G,DONG L L,*et al.* Comparative study on soil chemical properties of typical sand-fixing forests in Ulanbuh desert [J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(2):1-9. (in Chinese)

[29] 许自成,王林,肖汉乾. 湖南烟区土壤 pH 分布特点及其与土壤养分的关系[J]. 中国生态农业学报,2008,16(4):830-834.  
XU Z C,WANG L,XIAO H Q. pH distribution and relationship to soil nutrient in Hunan tobacco lands [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16 (4): 830-834. (in Chinese)

[30] 林毅,梁颂捷,朱其清. 三明烟区土壤 pH 值与土壤有效养分的相关性[J]. 烟草科技,2003(6):35-37.

[31] 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.  
LYU D,YANG Y H,ZHAO W H,*et al.* Fine root biomass distribution and coupling to soil physicochemical properties under different restored vegetation types [J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3979-3987. (in Chinese)

[32] 蔡春轶,黄建辉. 四川都江堰地区桢楠林、杉木林和常绿阔叶林土壤 N 库的季节变化[J]. 生态学报,2006,26(8):2540-2548.