

鼎湖山土壤理化性质对海拔梯度的响应*

黄志宏 周国逸 褚国伟 尹光彩 张倩媚
(中国科学院华南植物研究所 广州 510650)

摘要: 本文对鼎湖山森林生态系统定位研究站各样点测得的土壤理化性质数据与海拔梯度等组合因素进行了典型相关性分析。结果表明: 在海拔高度、土壤类型、植被类型作为一个整体的组合中, 海拔高度为其主导因子, 它影响着土壤类型和植被类型; 在所检验的六项指标中土壤有机质及全氮含量占土壤理化性质权重系数相对而言较高。随着海拔高度的升高, 土壤理化性质中土壤有机质和全氮含量受到的影响很大。土壤有机质含量变化趋势与海拔高度呈正相关性, 土壤全氮含量与海拔高度呈负相关性, 说明随着海拔升高, 土壤的 C/N 比值在逐步上升。

关键词: 鼎湖山; 土壤理化性质; 海拔梯度; 典型相关分析

Response of Soil Physiochemical Characteristics to the Gradient of Altitudes in Dinghushan of Bioserve

HUANG Zhi-Hong ZHOU Guo-Yi CHU Guo-Wei
YIN Guang-Cai ZHANG Qian-Mei

(*South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences,
Guangzhou 510650, China*)

Abstract: The relationship, employing canonical correlation method, has been analyzed between soil physiochemical characteristics and gradient of altitudes based on the data sampled from Dinghushan Forest Ecosystem Research Station in this paper. The results indicate that: 1) altitude is a kind of leading factor among the combined factors of altitudes, soil types and vegetation types; 2) soil physiochemical characteristics are determined by the contents of organic matters and total nitrides in soil; and 3) Soil type and vegetation type have a close correlation to altitudes, both soil type and vegetation type change at the same time, however, in opposite directions with increasing altitudes—soil type has a positive relativity and vegetation type a negative one, and the total nitrides decreased more rapidly than organic matters in soil along with increasing altitudes. This kind of phenomenon indicated an increasing C/N ratio of soil along with the increasing altitudes.

Keywords: Dinghushan; Soil physiochemical characteristics; Gradient of altitudes; Canonical correlation analysis

* 本研究得到国家重点野外台站鼎湖山站的资助 (4~19)。
本文得到孔国辉、郁梦德、余清发研究员的指导与帮助, 特此致谢!

自从1970年R.H. Whittaker^[1]提出梯度分析的三个概念以来,梯度分析在国内一直受到广泛的关注,这方面做过较多的研究。在鼎湖山自然保护区,其土壤类型、分布及其特性已有较多研究^[2,3,4],其中也有森林群落中种群分布格局和森林群落的排序研究^[5,6,7,8]。李志安^[9]对南亚热带丘陵地土壤分类并对分类法效果作过比较。陆地植物群落物种多样性与五种梯度变化间的关系,海拔梯度就是其中之一^[10]。山西高原植被与土壤分布格局关系研究表明,随着海拔高度的增加,棕壤、山地草甸土、亚高山草甸土与山西高原植被的垂直分布格局相平行,气候、土壤、植被格局具有一致性^[11]。最近,长白山森林——沼泽生态交错带群落和环境梯度分析的结果再次表明群落梯度和环境梯度具有高度相关性^[12]。目前国内在环境梯度分析这一领域,已经可以做到将样方和物种信息在排序空间中进行定量地表达^[13],而且可以把影响植被动态的各种因子进行定量地分析,从而更全面地更深入地诠释植被与环境的关系^[14,15]。

目前在鼎湖山自然保护区进行的研究,多是侧重于群落或种群的某一个方面,也有土壤理化性质方面的研究;但海拔变化梯度在群落或是生态系统中所起的作用没有受到相当的重视,尤其是包含海拔梯度在内的环境因子同土壤理化性质间的关系研究较少,而且多为描述性的。对鼎湖山自然保护区土壤理化性质变化趋势与海拔高度、植被类型、土壤类型间关系作为一个整体研究少有报道。鼎湖山森林生态系统定位研究站在植物种、群落及土壤理化性质方面已有大量的研究成果。本文以上述实地调查研究结果及长期定位观测资料为依据,采用典型相关分析,研究土壤理化性质对海拔梯度等因子的响应,将各种因素对土壤理化性质的作用情况给出一个定量的表达。

1 研究地概况与研究方法

鼎湖山自然保护区位于广东省中部(23°08'N, 112°35'E),面积17 000亩,最高峰在鸡笼山顶,海拔1 000.3m。保护区地处南亚热带南缘,年均气温21℃,年均降雨量1 927.3mm。地质基础主要由泥盆纪砂岩、砂页岩、页岩和石英砂岩组成。在南亚热带生物气候条件下,发育着地带性土壤~砖红壤性红壤,鸡笼山顶上分布着灌丛草甸土^[4]。植被属亚热带常绿林,依种类组成、外貌与结构及生境特点的差别,可分为南亚热带常绿阔叶林、沟谷雨林、针叶阔叶混交林、针叶林和河岸林等森林群落类型^[8]。

典型相关分析是研究两组指标(变量)间的一种多变量统计分析方法,其目的是寻找一组指标的线性组合与另一组指标的线性组合,使两组之间的相关达到最大(即两组典型变量的相关达到最大值)。典型相关分析不同于一般相关分析仅考虑一个指标与一个指标间的关系,或者一个指标与多个指标间的关系,它更能反映现象间的本质联系。

2 结果与分析

鼎湖山不同海拔高度样点的土壤类型、植被类型及其主要土壤理化性质抽样调查结果如下表1表示。其中,对于土壤类型和植被类型非数量化特征数量化的依据是:土壤类型在一定海拔梯度上分布具有一定的规律性,可将其分别赋值为1, 2, 3, ……;而植被类型赋值依据与之类似。这样处理的结果,不会对数据分析结果产生系统性的影响,因为这种赋值也带有一定的规律性。

2.1 土壤理化性质与海拔高度的典型相关性分析

表 1 鼎湖山不同海拔高度样点、土壤类型、植被类型及其主要土壤类型的化学性质 *

Table 1 Plots of different altitudes, soil types, vegetation types and its main soil physiochemical characteristics in Mt. Dinghushan

| 海拔 Altitude | 土壤类型 Soil type | 植被类型 Vegetation | pH 值 pH value | 土壤有机质 Organic matter | 全氮量 Total nitrogen | 交换性氢 Exchangeable hydrogen | 交换性铝 Exchangeable aluminum |
|----------------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 50.00 | 1.00 | 1.00 | 4.58 | 1.82 | 0.08 | 0.13 | 1.93 |
| 160.00 | 2.00 | 2.00 | 4.28 | 3.35 | 0.16 | 0.33** | 6.60** |
| 160.00 | 2.00 | 2.00 | 4.35 | 1.17 | 0.07 | 0.32 | 7.12 |
| 160.00 | 2.00 | 2.00 | 4.42 | 0.78 | 0.06 | 0.34 | 6.08 |
| 180.00 | 2.00 | 3.00 | 6.12 | 6.47 | 0.35 | 0.06 | 0.02 |
| 230.00 | 2.00 | 4.00 | 4.28 | 1.90 | 0.09 | 0.04 | 7.12 |
| 230.00 | 2.00 | 4.00 | 4.34 | 0.96 | 0.05 | 0.19 | 4.76 |
| 230.00 | 2.00 | 4.00 | 4.46 | 0.56 | 0.05 | 0.24 | 5.12 |
| 230.00 | 2.00 | 4.00 | 4.58 | 0.44 | 0.04 | 0.19 | 4.28 |
| 240.00 | 2.00 | 5.00 | 4.12 | 2.36 | 0.12 | 0.35 | 7.30 |
| 240.00 | 2.00 | 5.00 | 4.18 | 1.14 | 0.06 | 0.23 | 6.18 |
| 240.00 | 2.00 | 5.00 | 4.42 | 0.66 | 0.04 | 0.24 | 5.52 |
| 610.00 | 3.00 | 6.00 | 4.30 | 5.54 | 0.23 | 0.53 | 7.43 |
| 610.00 | 3.00 | 6.00 | 4.46 | 2.02 | 0.10 | 0.17 | 4.44 |
| 610.00 | 3.00 | 6.00 | 4.65 | 1.06 | 0.06 | 0.10 | 3.73 |
| 610.00 | 3.00 | 6.00 | 4.66 | 1.02 | 0.05 | 0.04 | 3.13 |
| 800.00 | 3.00 | 7.00 | 4.68 | 1.93 | 0.08 | 0.17 | 2.45 |
| 800.00 | 3.00 | 7.00 | 4.68 | 1.03 | 0.04 | 0.41** | 1.75** |
| 800.00 | 3.00 | 7.00 | 4.86 | 0.83 | 0.04 | 0.10 | 2.00 |
| 800.00 | 3.00 | 7.00 | 4.98 | 0.53 | 0.02 | 0.95 | 0.79 |
| 1 000.00 | 3.00 | 7.00 | 4.42 | 3.48 | 0.13 | 0.60 | 6.81 |
| 1 000.00 | 3.00 | 7.00 | 5.00 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 3.00 |
| 1 000.00 | 3.00 | 7.00 | 5.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 2.00 |

注：* 本表主要数据引自王铸豪等 (1982)，略有改动，** 为原数据缺失，取该类型样点平均值填充。

已有研究表明，土壤理化性质主要受海拔高度、植被类型、土壤类型等多种因素的影响。因此，这里先将海拔高度 x_1 、植被类型 x_2 、土壤类型 x_3 三个变量作为第一组变量组 X ；把土壤 pH 值 y_1 、土壤有机质 y_2 、全氮含量 y_3 、交换性氢 y_4 、交换性铝 y_5 等作为另外一组 Y 反映土壤理化性质的指标。用典型相关分析方法研究两个变量组 (X, Y) 的相互关系。计算结果见表 2。

表 2 典型相关分析结果表

Table 2 Results of canonical correlation analysis

| 典型相关与变量 Canonical correlation and canonical variations | 第一-变量组与第二-变量组 The first and the second canonical variations |
|--|--|
| 第一典型相关系数 ρ the first canonical correlated coefficient ρ | 0.908 ($P < 0.006$) |
| 第一典型变量 (u_1, w_1) the first canonical variants (u_1, w_1) | $u_1 = 0.219y_1 + 2.211y_2 - 2.497y_3 + 0.216y_4 - 0.230y_5$ $w_1 = 1.937x_1 - 0.923x_2 - 0.217x_3$ |

从表 2 可以知道, 第一变量组与第二变量组间的第一典型相关系数为 0.908。在它们的相关关系中, u_1 与 w_1 组成第一典型变量, u_1 是土壤理化性质的组合而成的典型变量, w_1 是海拔高度、土壤类型和植被类型三者组合成的典型变量。在 u_1 线性组合中, 土壤全氮含量和土壤有机负荷量(也称权重系数)分别是 2.497, 2.211, 可见二者在典型变量中起主要作用, 其他理化性质负荷量较小; 在典型变量 w_1 中, 负荷量最大的是海拔高度, 其次是土壤类型, 最小的是植被类型。对此, 刘创民等^[16]曾有相似的研究结果。

由此可见, 典型变量 u_1 与 w_1 之间的相关性, 实质上就是海拔高度与土壤全氮含量、土壤有机质含量之间的相关。海拔高度决定着土壤全氮含量及有机质含量。在第一组由三个子变量组合的典型因素中, 海拔高度处于主导地位(其权重系数为 1.937), 然后是土壤类型(0.923), 植被类型所起作用相对而言更小(0.217)。在气候、土壤、植被三者的关系中, 气候居于主导地位, 土壤受到气候的深刻影响, 二者进而影响植被的分布与类型。显然, 在这里海拔高度就成了气候的代表, 海拔不同, 气候条件不同, 植被与土壤类型也就不同。在这一点上和米湘成等^[11]的观点是一致的。海拔同土壤类型、植被类型及土壤理化性质之间的关系, 不是简单的决定与被决定关系。土壤理化性质受到多种因素的影响(如图 1), 但主要还是受海拔的影响与决定作用; 海拔高度的影响又有直接与间接之分。

第一典型变量表达式 u_1 与 w_1 中, pH 值与海拔高度的系数符号相同, 说明随着海拔的升高, 土壤 pH 值会逐渐升高, 趋向于中性。造成这种现象的原因可能是: 随着海拔的升高, 水热环境、植被类型、成土过程、土壤类型逐步改变, 土壤氧化物的淋失和富集情况逐步减弱。在低海拔的地方, 盐基严重淋失, 盐基不饱和, 呈酸性, 交换性酸以交换性铝占绝对优势; 在高海拔的地方, 富铝化作用弱, 交换性铝也低。另外, 土壤有机质含量与海拔高度的系数符号相同, 说明它们也是正相关关系; 但土壤全氮含量与海拔高度呈负相关性。出现这种情况的原因可能是: 随着海拔升高, 地表的凋落物层逐年在增厚, 但由于随着海拔的升高引起的平均温度降低、昼夜温差加大、土壤水分含量降低, 土壤微生物活动下降导致土壤有机质分解减慢, 结果造成 C/N 比值逐步升高。何宜庚^[4]的研究表明土壤 C/N 比值随着海拔升高而变宽, 这就为土壤全氮含量与海拔高度的负相关性这一结论提供了证据。

2.2 土壤理化性质与海拔高度的典型相关性检验

在表 2 的计算结果中, 可知第一对典型变量间相关性大小, 从中可以看出土壤理化性质变化与海拔梯度组合因素间相互关系的总体轮廓, 下面给出第一、第二与第三典型相关系数值及其显著性检验。检验结果如表 3 所示。

表 3 结果表明, 第一典型相关特征根最大, 其累计百分比为 97.391, 达到显著性程度 ($P < 0.006$); 第二、三典型相关的特征根分别为 0.107, 0.020, 典型相关系数分别为 0.311, 0.139, 显著性程度检验值各为 $P < 0.977$, $P < 0.952$ 。也就是说, 只有第一典型变量 (u_1, w_1) 具有显著相关性 ($P < 0.05$); 第二典型变量 (u_2, w_2) 及第三典型变量 (u_3, w_3) 二者相关性均未达到显著性。另外, 海拔高度、土壤类型、植被类型等变量与典型变量 w_1 的相关性值分别为 0.903、0.647、0.703, 表明典型变量 w_1 与其各分量相关性是很高的。

表 3 特征值与典型相关系数、相关性检验

Table 3 Eigenvalues, canonical correlation and test of H_0

| 特征值 Eigenvalue | 累计百分比 Cumulative | 典型相关系数 Canonical Correlation | 显著性值 F Significance of F |
|-------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 4.715 | 97.391 | 0.908 | 0.006 |
| 0.107 | 99.591 | 0.311 | 0.977 |
| 0.020 | 1.000 | 0.139 | 0.952 |

2.3 土壤理化性质与海拔高度间的相关性检验

在此,进一步对土壤理化性质中各指标同海拔高度、土壤类型、植被类型三者的相关性作检验,以确定其相关是否达到显著性程度。这种检验是在典型相关基础上作的,是对典型相关性关系的进一步细化与明确,检验结果见表 4。

表 4 变量 X , Y 中各特征因子间相关性检验 ($\alpha=0.05$)Table 4. Test of significance between special variables in X & Y ($\alpha=0.05$)

| 变量名 Variables | 海拔高度 Altitudes | 土壤类型 Soil type | 植被类型 Vegetation |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 土壤 pH 值 pH | 0.520 | 0.624 | 0.904 |
| 土壤有机质 Soil organic matter | 0.000* | 0.034* | 0.022* |
| 土壤全氮量 Soil total nitrogen | 0.000* | 0.019* | 0.009* |
| 交换性氢 Exchangeable hydrogen | 0.112 | 0.247 | 0.278 |
| 交换性铝 Exchangeable aluminum | 0.617 | 0.899 | 0.608 |

注:数据中右上角标星号者,表示达到显著性程度(置信度为 95%)。

从表 4 中第一列可以看出,土壤有机质、土壤全氮含量同海拔高度的相关性达到显著性程度 ($P<0.001$)。我们知道,土壤有机质含量与土壤全氮含量是正相关的。在这里,土壤有机质含量、土壤全氮含量均和海拔高度相关性显著 ($P<0.001$)。土壤有机质主要是由各种凋落物形成的,山底与山顶的土壤有机质总量有一定的差别,但这不是主要的;差别在于不同海拔的地方,土壤微生物活性差异导致有机质分解速度不同。随着海拔的升高,降水量减少,影响生物量,进而影响有机质的生成量;温度和水分还是影响有机质矿化的主要因素,特别是在较高的温度条件下有利于矿化速率增大。正是由于土壤微生物活动对海拔高度的敏感性,这在一定程度上影响着土壤全氮含量对海拔高度的显著相关性。也即,有机质与全氮含量呈正相关性,在高海拔的地方这种相关性格局仍然没有改变,但随着海拔升高、土壤全氮含量下降得更快,使得土壤中 C/N 比值并不是维持在一个水平上。一般来说,影响土壤氮矿化的影响因素主要有三类,即环境因子、凋落物质量、土壤动物和微生物^[17]。Puri 最近的研究认为,土壤温、湿度是影响总氮矿化的最重要因子;且一般温度的影响强于湿度,二者具有明显的正交互作用^[18]。有研究表明:高海拔土壤的有机质质量更高,但低温限制了其氮矿化。

关于土壤有机质、土壤全氮含量和海拔高度的相关性见图 2。交换性铝和海拔高度的相关性原因在 2.1 中已有解释。在土壤理化性质和土壤类型及植被类型的相关性检验中，达到显著性水平的指标相同，分别是土壤全氮量、土壤有机质。

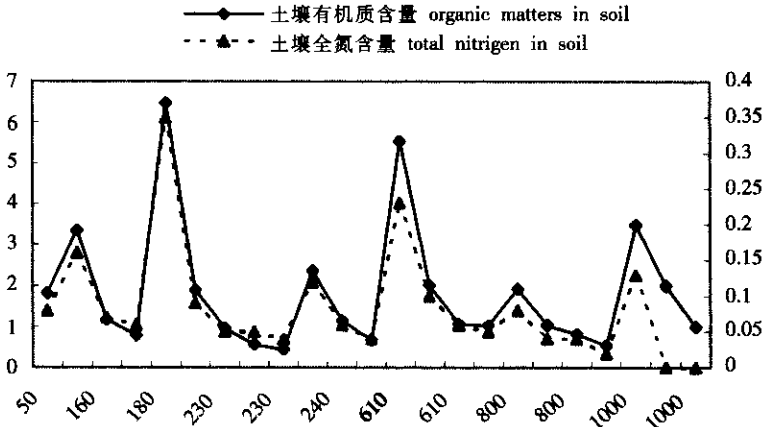


图 2 土壤有机质与土壤全氮含量的正相关性关系
Figure 2 Relationship between organic matters and total nitrogen in soil sampled from Mt. Dinghushan plots

3 结论与讨论

综合以上相关分析结果，可得如下主要结论：

在海拔高度、土壤类型、植被类型等组合的因子中，海拔高度为主导因子，其次为土壤类型；在所检验的土壤理化性质的六项指标中，土壤有机质和全氮含量是其主要因子。土壤理化性质受海拔高度、植被类型、土壤类型等因素影响。随着海拔升高，土壤有机质和全氮含量受到很大的影响，但二者随海拔高度而变化的方向相反，土壤有机质与海拔高度呈正相关性，土壤全氮含量与海拔高度呈负相关性，且土壤全氮含量下降得更快些。

关于土壤特性的空间变化特征，目前在国内正在成为研究热点。王秀红^[19]指出，东部土壤水平地带谱主要反映由温度差异引起的土壤纬向分布，土壤带谱的年均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、年降水量均大致为从北向南逐步增加。黄壤的有机质含量较红壤的高。土壤性状受地带性因素、非地带性因素、时间-空间相互作用以及人为因素所共同作用；有时人为因素可以在其中起更主要的作用^[20]。也有研究表明，土壤有机碳含量与全氮含量之间显著正相关，但植被和与土壤之间的相互关系依赖于不同的空间尺度^[21]。这说明，植被对土壤的作用是一种尺度作用，而非绝对的决定作用^[22]。娄安如等^[23]的研究表明，影响天山北坡荒漠植物物种空间分布格局的主要因子是海拔和 7 月平均温度，降水量、1 月和 7 月平均温度等是影响亚高山草甸优势种群分布的主要因子。土壤有机质含量与物种多样性呈正相关，土壤水解性酸也受乔灌木层的影响——随着灌木物种数和乔木个体数的增加，林地郁闭度增加后会形成一种冷湿的林内环境条件，枯落物在冷湿的条件下经生物化学作用所产生的活性腐殖质酸会使土壤发生酸化^[24,25]。本文的研究结果在不同的角度和程度上同上述结论是一致的，并对研究的统计结果给出了一些解释，但对于其中机理性的原因还有

待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] [美] Robert H. Whittaker 著 1978, 王伯荪译. 植物群落排序, 北京: 科学出版社. 1986
- [2] 何金海, 陈兆其, 梁永天. 鼎湖山自然保护区之土壤. 热带亚热带森林生态系统研究, 1982, (1): 25~38
- [3] 王铸豪, 何道泉, 宋绍敦等. 鼎湖山自然保护区的植被. 热带亚热带森林生态系统研究, 1982, (1): 77~141
- [4] 何宜庚. 广东省鼎湖山自然保护区的土壤. 华南师范大学学报(自然科学版), 1983, (1): 87~96
- [5] 彭少麟, 王伯荪. 鼎湖山森林群落分析Ⅲ种群分布格局. 热带亚热带森林生态系统研究, 1984, (2): 24~37
- [6] 彭少麟, 王伯荪. 鼎湖山森林群落分析Ⅶ群落排序. 生态科学, 1985, (2): 27~33
- [7] 陆阳. 鼎湖山森林植物种群分布格局研究. 生态科学, 1988, (1): 28~39
- [8] 李鸣光. 鼎湖山自然保护区森林群落的排序. 热带亚热带森林生态系统研究, 1989, (5): 17~27
- [9] 李志安. 数量分类在南亚热带丘陵地土壤样本分类上的应用. 生态科学, 1994, (1): 32~38
- [10] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. 植物生态学报, 1997, 17 (1): 91~99
- [11] 米湘成, 张金屯, 张峰等. 山西高原植被与土壤分布格局关系的研究. 1999, 23 (4): 336~344
- [12] 牟长城, 韩士杰, 罗菊春等. 长白山森林/沼泽生态交错带群落和环境梯度分析. 应用生态学报, 2001, 12 (1): 1~7
- [13] 张金屯. 植物生态学定量分析方法. 北京, 科学出版社, 1995
- [14] Legendre P Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 80: 107~138
- [15] Borcard D, Legendre P Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 73: 1 045~1 055
- [16] 刘创民, 李昌哲, 史敏华等. 多元统计分析在森林土壤肥力类型分辨中的应用. 生态学报, 1996, 16 (4): 444~447
- [17] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展. 生态学报, 2001, 21 (7): 1 187~1 195
- [18] Puri G & Ashman M R. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen. *Plant and Soil*, 1998, 30 (2): 251~256
- [19] 王秀红. 我国水平地带性土壤中有机质的空间变化特征. 地理科学, 2001, 21 (1): 19~23
- [20] 王国宏, 杨利民. 祁连山北坡中段森林植被梯度分析及环境解释. 植物生态学报, 2001, 25 (6): 733~740
- [21] 陈玉福, 董鸣. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析. 植物生态学报, 2001, 25 (3): 265~269
- [22] 邱阳, 傅伯杰, 王军等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子. 应用生态学报, 2001, 12 (5): 715~720
- [23] 娄安如, 周国法. 天山中段主要植被类型中种群的空间分布格局与环境的的关系. 植物生态学报, 2001, 25 (4): 385~391
- [24] 吴彦, 刘庆, 乔永康等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响. 植物生态学报, 2001, 25 (6): 618~655
- [25] 张万儒, 黄雨霖, 刘醒华等. 川西米亚罗杉木林土壤动态研究. 林业科学, 1979, 15: 178~193