

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

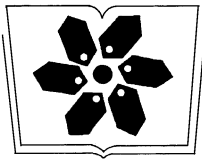
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第9期 Vol.34 No.9 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 9 期

2014 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于土壤食物网的生态系统复杂性-稳定性关系研究进展 陈云峰,唐政,李慧,等 (2173)
- 滇西北高原入湖河口退化湿地生态修复效益分析 符文超,田昆,肖德荣,等 (2187)
- 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究
..... 李阳兵,罗光杰,白晓永,等 (2195)
- 青藏高原东缘高寒草原有毒植物分布与高原鼠兔、高原麝鼠的相关性 ... 金樑,孙莉,崔慧君,等 (2208)
- 周边不同生境条件对茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构的影响 黎健龙,唐劲驰,黎秀娣,等 (2216)

个体与基础生态

- 三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性对凋落物分解的影响 葛晓改,肖文发,曾立雄,等 (2228)
- 芦苇、香蒲和蘆草 3 种挺水植物的养分吸收动力学 张熙灵,王立新,刘华民,等 (2238)
- 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响 ... 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等 (2246)
- 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (2256)
- 遮阴对米槠和杉木原位排放甲烷的影响 陈细香,杨燕华,江军,等 (2266)
- 桔小实蝇和番石榴实蝇对 6 种寄主果实的产卵选择适应性 刘慧,侯柏华,张灿,等 (2274)
- 鼠尾草属东亚分支的传粉模式 黄艳波,魏宇昆,葛斌杰,等 (2282)

种群、群落和生态系统

- 养分资源脉冲供给对几种微藻种间竞争的影响 李伟 (2290)
- 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等 (2297)
- 黄土丘陵区植物功能性状的尺度变化与依赖 丁曼,温仲明,郑颖 (2308)
- 湘潭锰矿栎树叶片和土壤 N、P 化学计量特征 徐露燕,田大伦,王光军,等 (2316)
- 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素 阳伏林,张强,王文玉,等 (2323)
- 尾矿区不同植被恢复模式下高效固氮菌的筛选及 Biolog 鉴定 李雯,阎爱华,黄秋娟,等 (2329)
- 四川理县杂谷脑干旱河谷岷江柏造林恢复效果评价 李东胜,罗达,史作民,等 (2338)

景观、区域和全球生态

- 闽南-台湾浅滩渔场二长棘鲷群体景观多样性 蔡建堤,苏国强,马超,等 (2347)
- 面向土系调查制图的小尺度区域景观分类——以宁镇丘陵区中一小区域为例
..... 卢浩东,潘剑君,付传城,等 (2356)

气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响..... 胡 玮,严昌荣,李迎春,等 (2367)

资源与产业生态

基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析 刘 源,李向阳,林剑艺,等 (2378)

可持续生计目标下的生态旅游发展模式——以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例.....

..... 王 瑾,张玉钧,石 玲 (2388)

荔枝树干液流速率与气象因子的关系 凡 超,邱燕萍,李志强,等 (2401)

肿腿蜂类寄生蜂室内控害效能评价——以松脊吉丁肿腿蜂为例 展茂魁,杨忠岐,王小艺,等 (2411)

城乡与社会生态

内蒙古草原人类福祉与生态系统服务及其动态变化——以锡林郭勒草原为例.....

..... 代光烁,娜日苏,董孝斌,等 (2422)

基于农业面源污染分区的三峡库区生态农业园建设研究 刘 涓,谢 谦,倪九派,等 (2431)

“交通廊道蔓延”视角下山地城市典型样带空间格局梯度分析 吕志强,代富强,周启刚 (2442)

学术信息与动态

美国地理学家协会 2014 年会述评 孙然好,肖荣波 (2450)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 280 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-05



封面图说: 峰丛洼地石漠化——峰丛主要分布在云贵高原的边缘部分及桂西、桂西北地区,相对高度一般为 200—300m,高的可达 600m 以上。在峰丛之间,岩溶洼地、漏斗、落水洞很发育,常形成峰丛洼地或峰丛漏斗的组合形态。峰丛洼地中的土地相当贫瘠,由于当地人们依靠这些土地种植庄稼为生,石漠化的发展趋势已经越来越明显。尤其在土地承载力低、人口压力大的区域石漠化相当严重,研究峰丛洼地耕地资源分布、土地利用强度和石漠化发育状况之间的机理,有助于从本质上认识石漠化的发生,对石漠化治理实施科学指导。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201306111672

李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 孙余丹, 胡砚秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. 生态学报, 2014, 34(9): 2297-2307.

Li J P, Xu M F, Su Z Y, Sun Y D, Hu Y Q. Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2297-2307.

不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价

李静鹏, 徐明锋, 苏志尧*, 孙余丹, 胡砚秋

(华南农业大学林学院, 广州 510642)

摘要: 科学确定森林土壤肥力指标并进行肥力质量的评价, 对立地生产力和多目标森林经营的研究有着重要意义。以采伐(径级 12 cm 择伐)迹地上发育来的稀树灌丛、针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林为研究对象, 进行每木调查与群落分析, 并比较各群落土壤因子间的差异, 用典范对应分析(CCA)和因子分析对土壤肥力质量进行定量评价。结果表明, CCA 可以有效地筛选土壤肥力质量指标, 有助于质量指标的科学确定; 土壤肥力质量综合评价分值为稀树灌丛(0.438) > 常绿阔叶林(0.414) > 针阔混交林(-0.170) > 针叶林(-0.331); 演替初期(19 a)的植被恢复并未使土壤结构发生明显变化, 土壤肥力质量是下降的; 无人干扰的 3 种群落类型, 针叶林表现为更高的生物量积累, 而天然更新的常绿阔叶林则更有利于生物多样性的增加与土壤养分的保蓄。

关键词: CCA; 因子分析; 群落类型; 土壤肥力质量

Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns

LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao*, SUN Yudan, HU Yanqiu

College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: Soil fertility quality assessment based on scientifically determined indicators has significant implications for the study of stand productivity and multi-objective forest management. We carried out plant census and community analysis, and compared soil physicochemical properties among forest communities in Kanghe Nature Reserve. The four community types, i.e., scrub, evergreen broadleaved forest, coniferous-broadleaved mixed forest, and coniferous forest, represented different vegetation restoration patterns originating from a selective-logging (at 12 cm diameter) event on the subtropical evergreen broadleaved forest. The main soil factors influencing tree composition and distribution were screened by Canonical Correspondence Analysis (CCA), which were subsequently used to build the minimum data set (MDS). Soil fertility quality was quantitatively assessed with Factor Analysis on MDS.

The results showed that distribution of tree species was uneven. With the lowest species richness, the coniferous forest was exclusively dominated by *Cunninghamia lanceolata*, whereas in the most species rich evergreen broadleaved forest, codominant tree species existed. Average tree DBH (diameter at breast height) decreased successively among coniferous forest, coniferous-broadleaved mixed forest and evergreen broadleaved forest.

Soils were highly acidic ($\text{pH} < 5.0$) and the content of AvK, ExMg, AvMn, AvZn and AvFe had no significant difference ($P > 0.05$) across the four forest communities. A lower canopy density due to less canopy trees resulted in the lower soil moisture content in the scrub community, which had a higher mineral element content than other vegetation patterns as a whole. Distribution of trees was closely related to soil environmental factors, but the results of CCA indicated that there was no significant correlation (Monte Carlo Test, $P > 0.05$) between composition and distribution of tree species

基金项目: 广东省林业科技创新专项 (2010KJCX012-02, 2011KJCX031-02)

收稿日期: 2013-06-11; 修订日期: 2014-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zysu@scau.edu.cn

and the seven soil factors, i.e., AN, ExCa, AvK, TP, ST, AP and NCP, which should be excluded when building the MDS. Therefore, the findings revealed that CCA was an effective tool for screening soil fertility quality indicators and establishing MDS by demonstrating the effect of soil fertility on plant patterns.

Factor analysis was applied on MDS to assess the fertility quality and the cumulative variance explained by five principal components was 84.67%, indicating this evaluation method was reliable. The integrated soil fertility quality assessment scores for scrub, evergreen broadleaved forest, coniferous-broadleaved mixed forest, and *coniferous* forest were, in a descending order, 0.438, 0.414, -0.170, and -0.331, respectively. Vegetation restoration did not obviously change soil structural parameters, such as soil texture, capillary porosity, non-capillary porosity, and bulk porosity, however, soil fertility quality declined in the early succession stage (19 a). In the three community types without human disturbance, coniferous forest had the highest biomass accumulation, whereas evergreen broadleaved forest from natural regeneration was more conducive to the increase of biodiversity and soil nutrient accumulation. Site-specific indicators, including soil physicochemical factors and biological factors, should be selected in future assessment of soil fertility quality. The appropriate quantitative ecological methods could make the determination of evaluation index more scientific.

Key Words: CCA; factor analysis; community types; soil fertility quality

植被恢复作为改善脆弱和退化生态系统生态环境现状的有效措施,可以在一定程度上提高生物多样性、影响地上和地下生态系统的群落结构与功能,而土壤作为生态系统中诸多生态过程的载体和植物生长的基质^[1-2],不同的植被恢复类型必然影响到土壤结构与矿质营养组成,因此土壤肥力可以作为度量退化生态系统生态功能恢复与维持的关键指标^[3]。在由土壤退化诱发生态环境恶化的今天^[4-5],土壤肥力质量的监测和评价也对土地资源的科学利用有着重要的意义^[6-8]。土壤质量的综合评价涉及到诸多土壤因子,如何确定土壤质量评价指标一直是土壤质量评价的核心问题^[9-11]。Larson 和 Pierce 曾引入土壤质量指标的最小数据集(MDS)这一概念,包含 10 个简单易测的土壤指标,并提出用转化函数来估计难以测定或测定费用昂贵的土壤指标^[12]。这一概念得到广泛的应用^[9,13-15],但由于土地利用方式的多样化和地域差别的存在^[11],不同研究中所用到的具体质量指标也有所不同^[16-18]。

土壤肥力质量是指生物物质的优质适产、可持续供给植物养分以及抵御侵蚀的能力^[4,19],当今森林经营也面临着提高生产力和可持续发展的问题^[20],对森林土壤进行肥力质量的评价将有利于森林生产力的提高和森林的可持续经营。森林土壤的肥力质量直接影响到林木的生长状况,是土壤内部理化性质和生物特性的综合表现,在较少人工干扰的情况下,往往影响到森林植物的生长和分布^[20-21]。

森林土壤肥力的构成因子很多,如果能在肥力质量的综合评价中,用数量生态学方法对诸多因子进行取舍,便能解决人为选定评价指标的不确定性,基于此,本文以康禾保护区的采伐迹地上发育而来的四种植被恢复类型为研究对象,对各群落的土壤肥力质量进行量化评价,研究植被恢复过程中土壤理化性质的变化规律,以期为南亚热带类似立地条件下的植被恢复与重建、以及森林土壤肥力的改良提供一定的科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于广东康禾省级自然保护区(115°04'—115°09' E, 23°44'—23°53' N)。该保护区地处河源市区北部、东源县东南部,总面积为 7263.9 hm²。保护区处于中亚热带和南亚热带交界处,有南亚热带气候特征,年均气温 20.3—21.1 °C,无霜期 345—350 d,年均日照时数 1810.2—2056.9 h,年均降雨量为 1889.9 mm,相对湿度较大,年均湿度达 78%。保护区主要地形为低山丘陵,最高峰白石岗海拔为 893.3 m。区内以花岗岩和砂岩为主要成土母岩,土壤以赤红壤为主,其次为山地红壤和山地黄壤。

1.2 研究方法

1.2.1 群落调查与土壤取样

在相同原始土壤发育条件、同一连续山地上设置 3 个调查样地(各 1 hm²),3 样地内的群落类型依

次为杉木纯林(以下简称针叶林)、以杉木为优势树种的针阔混交林(以下简称针阔混交林)、以阳性树种为主的次生常绿阔叶林(以下简称常绿阔叶林)(表 1)。三者采伐前的原始植被均为相同群落类型的次生常绿阔叶林,现有群落是由 1993 年择伐胸径 12 cm 大树后经不同的幼苗更新方式重新演替而来。其中杉木林为初始种植幼苗的人工林,即人工更新;常绿阔叶林由原始择伐迹地自然演替而来,即天然更新;针阔混交林的人工种植幼苗情况介于两者之

间,位于人工种植杉木林与原始择伐迹地的交错区,即人工促进天然更新。自 1993 年封山育林至今,3 样地均无强烈的人为干扰,群落自然发育。

另选同样由择伐迹地发展而来、人为干扰(捡取薪柴、放养禽畜)较为强烈的稀树灌丛作为对照,稀树灌丛由于受人为干扰较为频繁,群落结构较为简单(最接近择伐后群落),但未发生逆行演替,地上植被层覆盖良好,无水土流失现象。

表 1 群落概况

Table 1 General description of communities

群落类型 Community type	海拔/m Elevation	母岩 Parent rock	坡度 Slope	坡向 Aspect	次生演替时间/a Succession time
稀树灌丛 Scrub	166	砂岩	30°	西偏南 20°	19
针叶林 Coniferous forest	187	砂岩	35°	西偏南 25°	19
针阔混交林 Coniferous-broadleavedmixed forest	255	砂岩	33°	西偏南 24°	19
常绿阔叶林 Evergreen broadleaved forest	253	砂岩	32°	西偏南 27°	19

调查取样于 2012 年 6 月中旬进行,在每公顷调查样地内,于代表性地段选取 10 个 10 m × 10 m 的样方对胸径大于 1 cm 的乔木进行调查,记录其种名、胸径和树高等数据。每个样方中用环刀法取表层土(0—25 cm)测定土壤自然含水量、容重和孔隙度等指标,设置 2 次重复;用土钻在每个样方中按“S”型取表层混合土样(0—25 cm)约 1 kg,土样混合均匀并去除植物根系和石块后带回实验室。稀树灌丛仅进行土壤取样,不进行每木调查。

1.2.2 土壤理化性质的测定

对采集的土壤样品,选取 pH 值、土壤有机质(OM)、土壤容重(BD)、土壤质地(ST)、总孔隙度(BP)、毛管持水量(CMC)、毛管孔隙度(CP)、非毛管孔隙度(NCP)、土壤含水量(SMC)、通气孔隙度(AP)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AvP)、速效钾(AvK)、交换性钙(ExCa)、交换性镁(ExMg)、有效铜(AvCu)、有效锌(AvZn)、有效铁(AvFe)、有效锰(AvMn)、有效硼(AvB)等 23 个指标,进行土壤理化性质的测定^[22]。

1.2.3 数据分析

每木调查数据由软件 PC-ORD 6.0 处理,进行群落特征的统计分析;运用 SASTISTICA 8.0 对各群落的主要土壤指标进行基本统计,并进行单因素方差

分析(One-way ANOVA)和 Duncan 差异显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

各土壤指标对树种组成与分布的影响采用典范对应分析(CCA)来进行研究。综合样方-树种信息矩阵和样方-土壤指标矩阵,运用 CANOCO 4.5 进行 CCA 排序与蒙特卡罗(Monte Carlo)检验,筛选出影响乔木树种组成和分布的主要土壤肥力指标,为土壤肥力评价指标的确定提供科学依据。

1.2.4 土壤肥力质量的综合评价

经 CCA 排序后确定的土壤肥力质量指标,在 SASTISTICA 8.0 中经过数据标准化,去除单位和量纲的不同,继而进行 Bartlett (Bartlett's Test of Sphericity)球形度检验。检验后的数据经因子分析得到相关系数矩阵、特征值及贡献率、因子载荷矩阵和因子得分系数矩阵,由公式(1)计算各群落类型下土壤肥力质量评价分值^[11,13,16]。

$$SFQAV = \sum a_i z_i \quad (1)$$

式中, SFQAV 为土壤肥力质量评价分值; a_i 为各因子的方差贡献率; z_i 为因子得分, $z_i = \sum w_{ij} x_{ij}$, w_{ij} 为第 i 个变量在第 j 个因子处的因子得分系数, x_{ij} 为第 i 个变量在第 j 个因子处的标准化值。

2 结果与分析

2.1 3种植被恢复类型的群落特征

不同的幼苗更新方式使择伐迹地上发育成了3种不同的植被类型,3种植被类型呈现出各自的群落特征。常绿阔叶林拥有较高的生物多样性水平,其树种丰富度和立木数远大于针叶林和针阔混交林(表2)。这与它由择伐迹地自然演替而来有关,因为森林砍伐后,遗留了大量的树种幼苗和繁殖体,没有主要的优势树种,大量的树种和幼苗自由竞争而逐步生长,便导致了树种组成的多样化和立木数量

的增多。针叶林由于是在择伐迹地上人工种植幼苗而发育成的杉木林,优势种单一,杉木的早期优势限制了其他树种幼苗或繁殖体的生长和发育,因此导致物种丰富度最小;但由于杉木生长良好,导致其森林群落的立木拥有较高的平均胸径和树高。针阔混交林的情况介于两者之间,一方面杉木生长占优势,但阳性先锋树种也拥有较好的生长速度,针阔树种交错生长、相互竞争,便形成了以杉木为主要优势树种的针阔混交林相,其物种多样性、立木数和树高、胸径等群落指标均处于中等水平。

表 2 群落特征及主要优势树种

Table 2 Features and dominant species of canopy in different communities

群落因子 Community factor	针叶林 Coniferous forest	针阔混交林 Coniferous-broadleaved mixed forest	次生常绿阔叶林 Secondary evergreen broadleaved forest
丰富度 Richness	24	35	54
立木数 Stems/株	361	313	526
平均胸径 Average DBH/cm	7.81±0.30 a	6.37±0.34 b	5.62±0.33 b
平均树高 Average Height/m	8.25±0.24 a	8.51±0.34 a	6.32±0.20 b

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

物种序位-多度曲线也清晰地反映出了3个群落的物种数量及不同物种分布的均匀程度(图1)。

针叶林中的树种较少,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)相对多度远大于其他树种,树种分布均匀

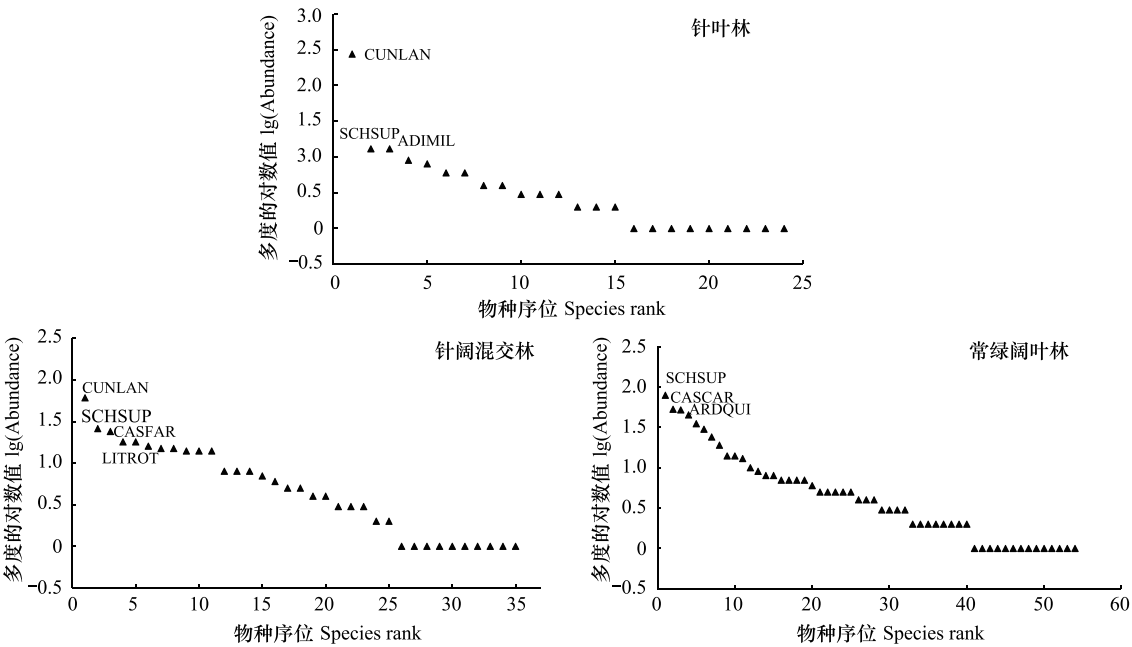


图 1 3种森林群落的物种序位-多度曲线

Fig.1 Species rank- abundance curve of the three forest communities

CUNLAN:杉木 *Cunninghamia lanceolata*;SCHSUP:木荷 *Schima superba*;ADIMIL:杨桐 *Adinandra millitii*;CASFAR:红背椎 *Castanopsis fargesii*;CASCAR:米锥 *Castanopsis carlesii*;LITROT:豺皮樟 *Litsea rotundifolia*;ARDQUI:罗伞树 *Ardisia quinqueгона*

性较差;针阔混交林中虽然杉木相对多度仍然最大,但红背椎 (*Castanopsis fargesii*)、木荷 (*Schima superba*)、山乌柏 (*Sapium discolor*) 等阔叶树种也占有重要地位,树种分布稍显均匀;常绿阔叶林中物种序位-多度曲线趋于平滑,不同树种间的相对多度差异不断减小,各树种分布最为均匀。由针叶林到常绿阔叶林,森林群落中阔叶树种越来越多,逐渐占据重要地位,树种丰富度和均匀度以及群落结构都发生了明显的变化,常绿阔叶林中生态位分配更加优化,群落结构趋于复杂,生物多样性水平更高。

2.2 各群落类型的土壤理化性质比较

土壤样品的测定结果表明,4 种植被类型的理化

性质存在不同程度的差异(表 3,图 2)。4 群落的土壤 pH 值均小于 5.0,属强酸性土壤。土壤质地(< 0.01 mm 粒级含量)、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度并没有显著差异,说明森林群落在演替的初期(19 a)并不能对土壤结构产生明显的影响和改变。稀树灌丛的土壤自然含水量显著小于其他 3 个群落,表明在植被恢复过程中,土壤保持水分的能力明显得到提高。这一现象可能是因为稀树灌丛缺少冠层树种,不能形成闭合的群落环境,阳光直射到地表,土层水分蒸发量较大,导致其土壤自然含水量较小。

表 3 各群落土壤 pH 和物理性质

Table 3 Soil pH and physical properties in different communities

土壤因子 Soil factor	群落类型 Community types			
	稀树灌丛 Scrub	针叶林 Coniferous forest	针阔混交林 Coniferous-broadleaved mixed forest	常绿阔叶林 Evergreen broadleaved forest
pH	4.47±0.08 b	4.80±0.04 a	4.26±0.04 c	4.49±0.08 b
OM/(g/kg)	22.23±2.42 c	43.51±3.09 a	33.17±1.05 b	25.40±1.53 c
BP/%	71.58±0.88 a	75.47±1.18 a	75.10±0.98 a	70.92±0.97 a
CP/%	18.63±0.32 a	22.85±1.37 a	21.56±0.79 a	18.37±1.21 a
BD/(g/cm ³)	0.76±0.03 ab	0.65±0.03 b	0.66±0.03 ab	0.77±0.03 a
< 0.01 mm 粒级含量/%	35.67±6.23 a	33.50±2.83 a	36.50±2.62 a	33.10±3.24 a
CMC/(g/kg)	247.68±11.81 b	356.72±25.04 a	330.10±15.41 a	238.40±13.48 b
NCP/%	52.95±0.56 a	52.62±1.99 a	53.54±1.39 a	52.55±1.91 a
SMC/(g/kg)	107.53±13.34 c	293.94±17.36 a	266.83±15.54 a	203.98±12.59 b
AP/%	64.45±1.46 a	56.57±1.88 b	57.62±1.58 b	55.36±1.34 b

OM:土壤有机质 Organic matter;BD:土壤容重 Bulk density;BP:总孔隙度 Bulk porosity;CMC:毛管持水量 Capillary moisture capacity;CP:毛管孔隙度 Capillary porosity;NCP:非毛管孔隙度 Non-capillary porosity;SMC:土壤含水量 Soil moisture content;AP:通气孔隙度 Aeration porosity

有机质含量在稀树灌丛和常绿阔叶林中最低,针阔混交林其次,针叶林中最高。在土壤矿质元素的比较中(图 2),AvK、ExMg、AvMn、AvZn、AvFe 等矿质离子的含量在 4 个森林群落中并无显著差异($P > 0.05$),但这几个因子水平(有效锌除外)在稀树灌丛群落中表现出最高;而且稀树灌丛中全钾、交换性钙、有效硼等元素也显著大于其他 3 个群落,表明稀树灌丛虽然处于较低的群落演替层次,但其土壤中并没有发生矿质元素淋失的现象,相反,由于植物吸收利用量小,大量的矿质元素得以保存在土壤中。

土壤全氮和碱解氮的含量在针叶林和针阔混交林中较高,而在稀树灌丛和常绿阔叶林中较低,这可能与土壤有机质的含量有关,因为土壤有机质含有

大量的富氮物质,如胡敏酸、富啡酸、胡敏素、蛋白质、氨基酸、生物碱、胺和维生素等,土壤氮含量随有机质的增多而增多。土壤全钾、有效铜在针阔混交林中含量最低,其余 3 种群落间并无显著差异;而有效硼的含量则为常绿阔叶林最低、稀树灌丛最高,针叶林和针阔混交林居中。土壤全磷和交换性钙的含量,除稀树灌丛较高外,其余 3 个群落并无显著性差异。综合来看,稀树灌丛的各项矿质元素含量较高,常绿阔叶林和针阔混交林居中,而针叶林的矿质元素含量较少。

2.3 土壤因子对乔木树种分布的影响

群落树种的组成受各种环境因子的综合影响,CCA 排序的结果表明,乔木树种和各土壤因子有极显著的相关性(Monte Carlo Test, $P=0.002 < 0.01$),

在影响树种分布的土壤因子中(图3), AvZn、AvB、TK 等因子影响作用明显,而 AN、ExCa、AvK、TP、ST、AP 和 NCP 等 7 个因子的箭头连线较短,且与树种的组成与分布无显著的相关性(Monte Carlo Test, P

> 0.05),表明在各群落中,这 7 个因子可能对树种分布的影响作用不明显,可以在接下来的因子分析中去除这几个指标,进而对 4 群落的土壤肥力质量进行综合评价。

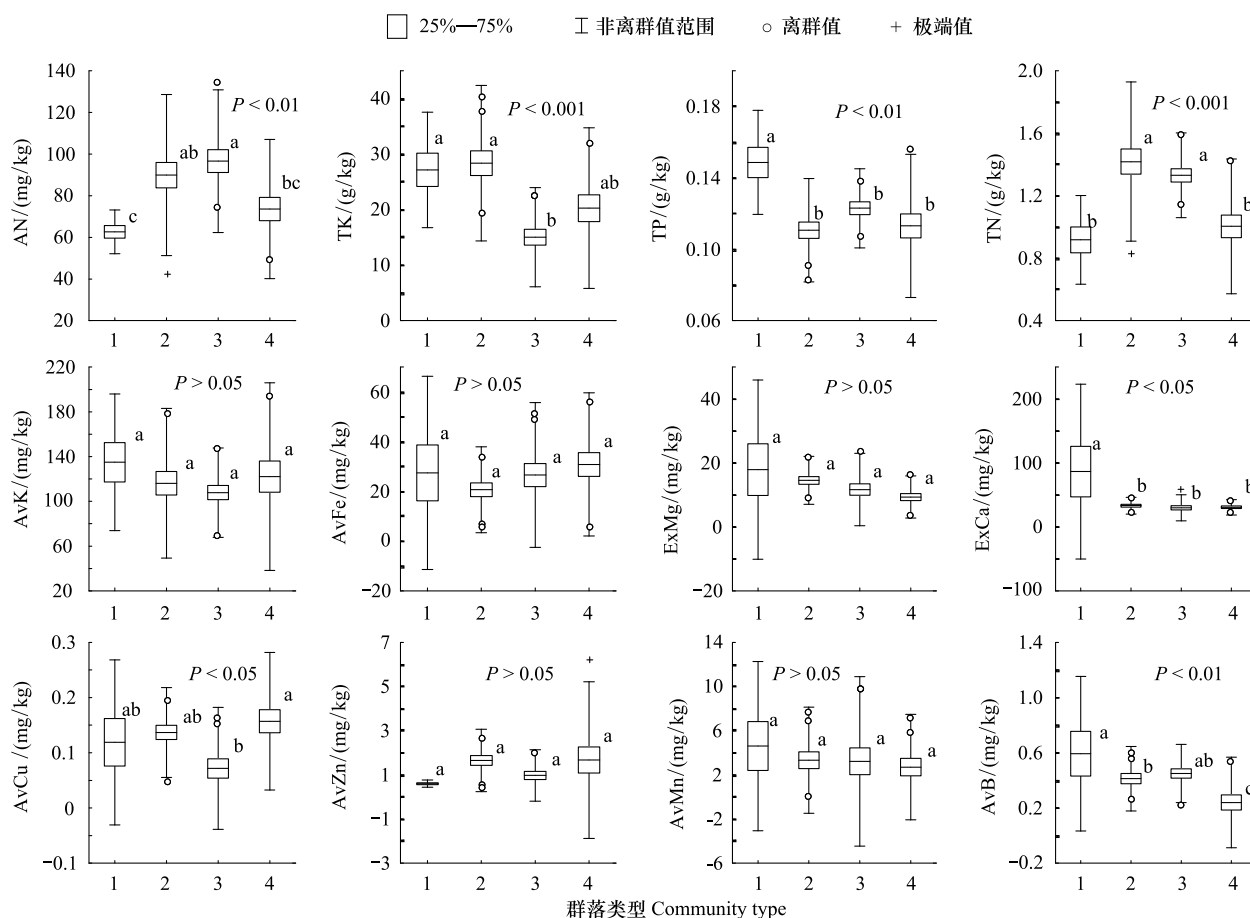


图2 不同群落类型的土壤矿质元素含量

Fig.2 Soil mineral element contents in different communities

1: 稀树灌丛; 2: 针叶林; 3: 针阔混交林; 4: 常绿阔叶林; TN: 全氮 Total N; TP: 全磷 Total P; TK: 全钾 Total K; AN: 碱解氮 Available N; AvK: 速效钾 Available K; ExCa: 交换性钙 Exchangeable calcium; ExMg: 交换性镁 Exchangeable magnesium; AvCu: 有效铜 Available copper; AvZn: 有效锌 Available zinc; AvFe: 有效铁 Available Fe; AvMn: 有效锰 Available manganese; AvB: 有效硼 Available boron; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 土壤肥力质量评价

因子分析是从多个变量中选择少数几个综合变量(独立新变量)的一种降维多元统计方法,用以达到数据简化的目的。本研究对去除了 AN、ExCa、AvK、TP、ST、AP 和 NCP 等因子后的 16 个土壤指标进行的 Bartlett 球形检验的显著系数为 $0.00 < 0.05$,表明数据适合做因子分析。经因子分析得到相关系数矩阵、特征值序位及贡献率和因子载荷矩阵。

按照特征值 > 1 的原则,抽取了 5 个公因子(表 4),其特征值分别为 4.87、3.91、1.96、1.62 和 1.18,累

计方差贡献率达 84.67%,表明因子分析用于评价土壤肥力质量是可靠的。由因子载荷矩阵得知(表 5),其中公因子 1 主要支配 BD、BP、SMC、CMC、AvCu 和 AvFe 等指标(因子载荷值的绝对值 > 0.6),公因子 2 主要支配指标为 TN、OM、AvMn 和 ExMg,公因子 3 主要支配 AvB,公因子 4 只支配 AvZn,公因子 5 并无明显的支配因子,多种因子综合起作用。

经因子分析进行处理的 16 个土壤指标,其得分系数矩阵和标准化数据值加权,5 个公因子可获得在不同群落水平的得分,进而由各因子得分和方差贡

献率加权得到不同群落类型的土壤肥力质量评价分值(表 6):稀树灌丛(0.438) > 次生常绿阔叶林(0.414) > 针阔混交林(-0.170) > 针叶林(-0.331)。这一结果表明在群落演替初期,促进群落结构复杂、植物多样性增加的植被恢复类型,即择

伐后天然更新的方式更有利于土壤肥力质量的保持和改善,并且在演替初期(19 a),群落土壤的肥力质量是有所下降的,这可以由稀树灌丛的分值大于其余 3 种群落类型的分值看出。

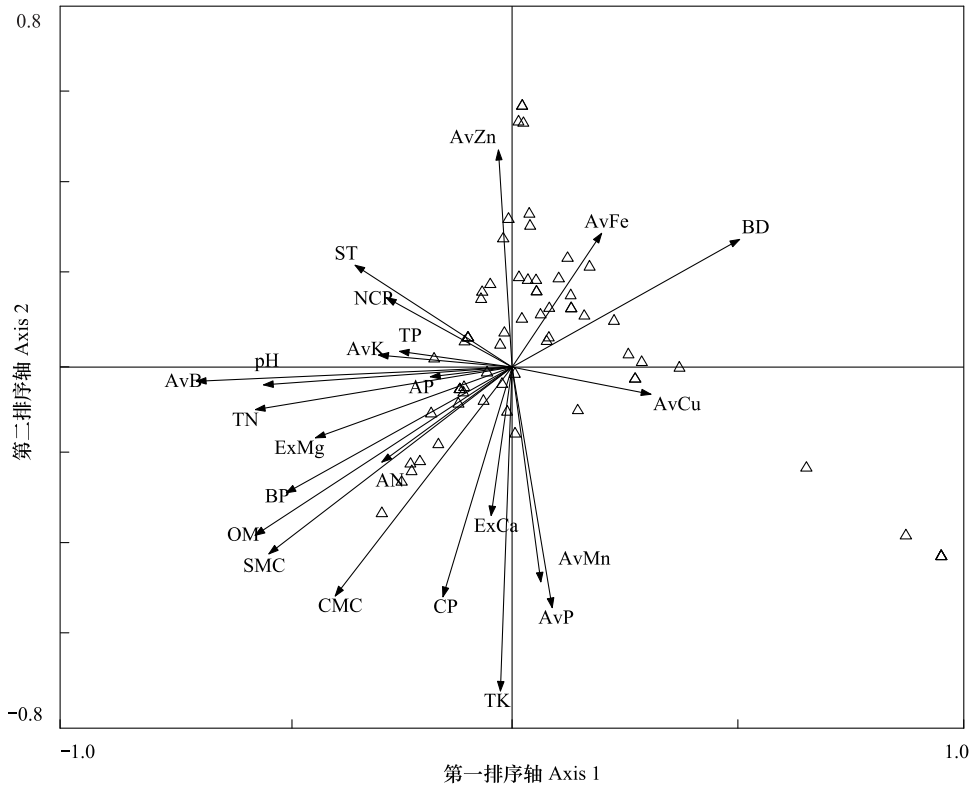


图 3 乔木树种与土壤因子的典范对应分析

Fig.3 Canonical Correspondence Analysis showing the effect of soil factors on canopy tree patterns

表 4 因子特征值和方差贡献率

Table 4 The eigenvalues and percent of variance explained

因子 Component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance Explained/%	累计方差贡献率 Cumulative Variance Explained/%
1	4.87	30.41	30.41
2	3.91	24.45	54.86
3	1.96	12.26	67.13
4	1.62	10.14	77.27
5	1.18	7.40	84.67

表 5 因子载荷矩阵

Table 5 Matrices of principal component loadings

土壤因子 Soil factor	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5
TN	-0.56	-0.64 *	-0.21	-0.23	-0.21
TK	0.17	-0.59	0.41	0.27	0.55
pH	-0.27	-0.27	0.50	-0.46	0.43
OM	-0.55	-0.61 *	-0.19	-0.34	0.08
BD	0.82 *	0.03	0.27	-0.13	-0.34

续表

土壤因子 Soil factor	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5
BP	-0.83 *	-0.03	-0.27	0.13	0.34
CP	-0.45	-0.30	0.55	0.30	-0.48
AvP	0.32	-0.59	-0.26	0.50	0.04
AvB	-0.14	-0.33	-0.75 *	0.09	0.01
SMC	-0.85 *	-0.16	0.31	0.02	-0.23
CMC	-0.82 *	-0.27	0.30	0.31	-0.14
AvCu	0.62 *	-0.59	0.36	-0.07	0.17
AvZn	0.30	-0.58	-0.02	-0.63 *	-0.15
AvFe	0.67 *	-0.47	-0.15	0.09	-0.15
AvMn	0.34	-0.66 *	0.02	0.49	0.02
ExMg	-0.01	-0.85 *	-0.17	-0.19	-0.15

OM:土壤有机质 Organic matter;BD:土壤容重 Bulk density; BP:总孔隙度 Bulk porosity;CMC:毛管持水量 Capillary moisture capacity;CP:毛管孔隙度 Capillary porosity; SMC:土壤含水量 Soil moisture content;AvP:速效磷 Available P;TN:全氮 Total N; TK:全钾 Total K;ExMg:交换性镁 Exchangeable magnesium; AvCu:有效铜 Available copper; AvZn:有效锌 Available zinc; AvFe:有效铁 Available Fe; AvMn:有效锰 Available manganese; AvB:有效硼 Available boron; * 因子载荷绝对值 > 0.60

表 6 各群落的因子得分及综合评价

Table 6 Factor scores of soil quality assessment in different communities

群落类型 Community type	因子得分 Factor score					综合评价 SFQAV
	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5	
针叶林 Coniferous forest	-0.703	-0.747	0.455	-0.347	0.512	-0.331
针阔混交林 Coniferous-broadleaved mixed forest	-0.429	0.250	-0.668	0.404	-0.816	-0.170
常绿阔叶林 Evergreen broadleaved forest	0.880	0.538	0.405	-0.353	0.092	0.414
稀树灌丛 Scrub	1.260	-0.206	-0.962	1.475	1.062	0.438

3 结论与讨论

3.1 因子分析法对各群落土壤肥力质量的综合评价

本研究中 AN、ExCa、AvK、TP、ST、AP 和 NCP 与树种分布的相关关系并不明显 (Monte Carlo Test, $P>0.05$),但在许多研究中,这些因子被看作是构成植被恢复过程中土壤质量的重要指标,在生物的生长发育和群落的生态学过程和格局中起着至关重要的作用^[23-24],因此,研究生态系统中的生物与环境间的相互关系时,一定要针对具体的生境单元。本文中,ExCa、AvK、TP、ST、AP 和 NCP 等土壤因子在群落中没有显著差异 ($P>0.05$),含量相差不大,其量和质的不足或过多在群落间具有相同的表现形式和作用,所以对群落的土壤肥力质量评价中可以首先排除这些指标,以使评价指标的确定更加科学和合理,亦使过程更加简单。

单一因子的比较来看,矿质离子 AvK、ExMg、

AvMn、AvZn 和 AvFe 含量在 4 群落中并无显著差异 ($P>0.05$),但这几个因子 (AvZn 除外) 在稀树灌丛中有最高的含量;而且稀树灌丛中 TP、ExCa 的含量也显著高于其他 3 个群落;TK、AvB 和 AvCu 的含量也较高。对于常绿阔叶林,其与稀树灌丛拥有较低的 OM、SMC、TN、AN 和 AvB 含量,其他的指标均位于中等水平,矿质营养适中。针叶林拥有较高的 TK、TN、AN 和 AvCu 含量,而其他含量均为最低。针阔混交林除拥有最高的 AN 含量和最低的 TK 含量外,其他指标的含量多介于常绿阔叶林和针叶林之间。土壤肥力质量的综合评价结果显示,稀树灌丛 (0.438) > 常绿阔叶林 (0.414) > 针阔混交林 (-0.170) > 针叶林 (-0.331)。单一因子的比较和基于因子分析得出的结果在某一程度上有所相同,可以相互印证。基于因子分析这一统计方法^[9,17],使得土壤肥力质量的评价结果得以量化,可以为土壤肥力质量的管理和植被恢复措施的选择及林分改

造提供更为直观的参考。

3.2 数量生态学方法在确定肥力质量指标中的应用

相对于人工生态系统,自然演替的森林群落受到的人为干扰较少,其肥力质量通过影响植物的生长和多样性的分布而体现^[20],因此,其评价指标应是影响植物生长和多样性分布的土壤因子。CCA 排序需要种类和环境因子两个数据矩阵,其排序轴不仅反映样方间在种类组成上的相似性,还反映样方间在环境因子组成上的相似性^[25],能直观地反映种类分布、群落分布与环境因素之间的关系。本研究以该方法对待定的土壤肥力质量指标进行筛选,有效的排除了 7 种对乔木树种作用不明显的土壤因子,表明了这一思路在质量指标确定中的可行性与有效性。

对大量可能的土壤评价指标用数学方法加以筛选和甄别,可以大大提高指标选取的科学性与肥力质量评价的可靠性^[21]。而作为对森林土壤肥力质量评价的一次尝试,本研究并没有兼顾所有因素,如许多微量元素、土壤酶和生物因素等,这些因素会在未来的研究中得以体现。运用数量生态学方法,进一步探求森林生态系统中土壤肥力质量的影响因子,最终确定土壤肥力质量评价的最小数据集^[10],将会使森林土壤肥力质量的综合评价方法更具普适性。

3.3 森林土壤肥力质量的影响因素

4 种群落均为强酸性土壤(pH 值 < 5.0),土壤质地(< 0.01 mm 粒级含量)、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度等土壤物理性质也没有显著差异,由此可以看出,作为不同植被恢复类型下的森林土壤,由于初始的土壤条件相同、演替时间较短(19 a),其土壤结构并没有因植被恢复类型的不同而发生明显的变化。

土壤肥力的综合评价结果表明,稀树灌丛、常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林的土壤肥力质量依次下降。稀树灌丛作为最接近采伐迹地的群落类型,由于人为干扰而停留在较低的演替序列,但其群落未发生逆行演替,而是发育成灌木种类和数量增多、结构较为稳定的现有群落,其土壤并没有发生矿质元素淋失的现象,相反,由于植物吸收利用量小,砍伐后枝、叶、根等凋落物的归还,使得较多的矿质元素得以保存在土壤中,因而使其土壤拥有较高的肥

力质量。然而,由于没有郁闭的群落环境,阳光能够直射到地表植被,也使得土壤水分大量蒸发、土壤温度较高、土壤呼吸过程加剧,进而导致了土壤自然含水量的减少、土壤有机质的缺乏和土壤容重的增加,所以相对于择伐前的群落,稀树灌丛的土壤肥力也是有所下降的,但相对于其他 3 种植被恢复类型,其土壤肥力质量处于较高的水平。

3 种无人干扰的植被恢复类型,由于演替初期植物迅速生长,生物量急剧增加,需要大量地从土壤中吸收养分;又由于演替时间不长,群落组成相对简单,养分归还量较小,从而使土壤养分“供”大于“还”,导致土壤肥力质量较低。针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林的森林凋落物量依次增大,但其土壤有机质含量却是依次减小的,这一现象的出现,可能与土壤微生物的种类和数量、酶的活性和质量有关。采伐迹地上自然恢复更新模式比人工抚育的纯林群落拥有更多的土壤水解酶(如蔗糖酶、脲酶和磷酸酶)、过氧化氢酶和微生物含量,并且酶活性更高^[26-27];同时针叶林的凋落物以针叶为主,属粗糙死地被物,有机质分解速率缓慢,有利于土壤有机质的积累,但不利于养分的归还,随着阔叶树种的增多,软质易分解的枯落物增加,有利于养分归还而不利于有机质积累^[26],并且阔叶林有较早归还凋落物和增加土壤养分的能力^[28],因此,常绿阔叶林中拥有最高的凋落物量,但土壤有机质含量却最低,而针叶林却相反。凋落物的矿化又有利于养分的归还,也使得常绿阔叶林的肥力质量高于针阔混交林,针阔混交林又高于针叶林。

这一现象的出现是多个生态学过程综合作用的结果,它表明在次生演替初期土壤的有效养分减少,其土壤肥力质量是下降的;3 种植被恢复类型中,常绿阔叶林可以更好的保蓄土壤肥力,针阔混交林和针叶林保持肥力的效果依次降低。可见,不同的植被类型对土壤条件的改善状况是有差异的,常绿阔叶林更接近该地区的顶级群落,其群落结构更加复杂、物种组成更加丰富,土壤微生物和酶的种类和数量也更多,凋落物更易分解,较好的养分归还与养分保蓄能力,使其土壤肥力质量更高。因此,在林分改造和植被恢复过程中,适当的人为介入使群落直接进入阔叶林(更接近该地区的顶级群落类型)的演替序列中,对环境和土壤质量的改善可能更为有利。

虽然在次生演替初期,植被恢复下的土壤肥力质量是有所下降的,但随着群落演替的发展,森林生产力和凋落物的含量会逐渐增高^[29],森林土壤中的有机质、全氮、全钾的含量以及自然持水量也会不断增加,土壤肥力会最终得到改善^[30-31]。

References:

- [1] Hu C H, Guo L. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [2] Chen J, Yang N. Soil hydrological function at different vegetation restoration stages in purple soil slopelands in Hengyang. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 590-597.
- [3] Gong X, Niu D K, Zhao X R, Lu S B, Liu Y Q, Wei X H, Guo X M. Effects of reforestation on soil chemical properties and microbial communities in a severely degraded sub-tropical red soil region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 1094-1100.
- [4] Liu Z F, Fu B J, Liu G H, Zhu Y G. Soil quality: concept, indicators and its assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 901-913.
- [5] Zhou Q X, Wang Y. Methodological systems of building agricultural soil quality criteria in China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 26 (supplement): 38-44.
- [6] Xu X J, Lei G P, Zhang H, Wang Y H. Study on surface soil fertility quality evaluation of the Southern Songnen Plain in Heilongjiang Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(5): 268-272.
- [7] Marzaioli R, D Ascoli R, De Pascale R A, Rutigliano F A. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(3): 205-212.
- [8] Long J, Deng Q Q, Jiang X R, Liu F. Effects of different defarming and reforestation patterns on changes of soil fertility quality in karst region of southwestern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1279-1284.
- [9] Garrigues E, Corson M S, Angers D A, van der Werf H M G, Walter C. Soil quality in life cycle assessment: Towards development of an indicator. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 434-442.
- [10] Li G L, Chen J, Tan M Z, Sun Z Y. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 16-25.
- [11] Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [12] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality//Proceeding of the international workshop on evaluation for sustainable land management in the developing world. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Resource and Management (IBSRAM), 1991.
- [13] Gong L, Zhang X N, Lü G H, Han L. Soil quality assessment under different land use types in typical oasis of the upper reaches of the Tarim River. *Resources Science*, 2012, 34(1): 120-127.
- [14] Zhang Z, Wei C F, Gao M, Shao J G, Qin J C. Assessment methods for soil quality: a review. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 999-1006.
- [15] Rezaei S A, Gilkes R J, Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 2006, 136(1/2): 229-234.
- [16] Gong L, Zhang H F, Lü G H, Gui D W. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 4136-4143.
- [17] Su J P, Huang B, Ding F, Zou Z, Yin L P, Wang D M, Zhou Z H, Chen X M, Ding K Q, Li F. Variability of soil fertility quality during past 30 years in Rugao County, Jiangsu Province, China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 66-71.
- [18] Zhang Q L, Pan X Z, Wang H J, Liu F C, Shi X Z. Study on spatial distribution of soil quality and quantitative evaluation of soil fertility quality under middle spatial scale. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 493-497.
- [19] Huang T, Yue X J, Ge X Z, Wang X D. Evaluation of soil quality on gully region of loess plateau based on principal component analysis. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(3): 141-147.
- [20] Schoenholtz S H, Miegroet H V, Burger J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138(1/3): 335-356.
- [21] Bautista-Cruz A, Del Castillo R F, Etchevers-Barra J D, Gutiérrez-Castorena M D C, Baez A. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2012, 277: 74-80.
- [22] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [23] Fields-Johnson C W, Zipper C E, Burger J A, Evans D M. Forest restoration on steep slopes after coal surface mining in Appalachian USA: Soil grading and seeding effects. *Forest Ecology and Management*, 2012, 270: 126-134.
- [24] Zhao J, Wang X L, Shao Y H, Xu G L, Fu S L. Effects of vegetation removal on soil properties and decomposer organisms. *Soil Biology Biochemistry*, 2011, 43(5): 954-960.
- [25] Bodaghabadi M B, Salehi M H, Martinez-Casasnovas J A, Mohammadi J, Toomanian N, Borujeni I E. Using canonical

- correspondence analysis (CCA) to identify the most important DEM attributes for digital soil mapping applications. *Catena*, 2011, 86(1): 66-74.
- [26] Fang X, Tian D L, Qin G X, Xiang W H. Nutrient contents and enzyme activities in the soil of *Cunninghamia lanceolata* forests of successive rotation and natural restoration with follow after clear-cutting. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(12): 65-71.
- [27] Zhang D H, Lin X W. A preliminary study on the difference of soil fertility changes between planting chinese fir and recovering Broad-leaved forest after clear cutting. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13(3): 261-266.
- [28] Xiang W H, Tian D L, Yan W D, Kang W X, Fang X. Biomass dynamic and nutrient accumulation of natural restoration at early stage after fallow in clear-cutting forestland of Chinese fir plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 695-702.
- [29] Liu W D, Su J R, Li S F, Zhang Z J, Li Z W. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [30] Jiang H M, Li M Z, Wang Q, Liu X X. Dynamics of soil nutrients under different vegetation types in the eastern Qilian Mountain. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(5): 166-170.
- [31] Wei Y C, Ouyang Z Y, Miao H, Wang X K, Zheng H, Jiang L J. Spatial heterogeneity of soil properties in Jianfengling Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 197-203.
- [8] 龙健, 邓启琼, 江新荣, 刘方. 西南喀斯特地区退耕还林(草)模式对土壤肥力质量演变的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1279-1284.
- [10] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 孙志英. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集. *土壤学报*, 2008, 45(1): 16-25.
- [11] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [13] 贡璐, 张雪妮, 吕光辉, 韩丽. 塔里木河上游典型绿洲不同土地利用方式下土壤质量评价. *资源科学*, 2012, 34(1): 120-127.
- [14] 张贞, 魏朝富, 高明, 邵景安, 秦建成. 土壤质量评价方法进展. *土壤通报*, 2006, 37(5): 999-1006.
- [16] 贡璐, 张海峰, 吕光辉, 杜东伟. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价. *生态学报*, 2011, 31(14): 4136-4143.
- [17] 苏建平, 黄标, 丁峰, 邹忠, 殷丽萍, 王冬梅, 周志宏, 陈小明, 丁扣琪, 李峰. 江苏省如皋市 30 年来土壤肥力质量演变分析. *土壤通报*, 2009, 40(1): 66-71.
- [18] 张庆利, 潘贤章, 王洪杰, 刘付程, 史学正. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价. *土壤通报*, 2003, 34(6): 493-497.
- [19] 黄婷, 岳西杰, 葛玺祖, 王旭东. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价—以长武县耕地土壤为例. *干旱地区农业研究*. 2010, 28(3): 141-147.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [26] 方晰, 田大伦, 秦国宣, 项文化. 杉木林采伐迹地连栽和撂荒对林地土壤养分与酶活性的影响. *林业科学*, 2009, 45(12): 65-71.
- [27] 张鼎华, 林肖文. 采伐迹地恢复阔叶林与人工栽杉土壤肥力变化差异的初步研究. *生态学报*, 1993, 13(3): 261-266.
- [28] 项文化, 田大伦, 闫文德, 康文星, 方晰. 杉木林采伐迹地撂荒后植被恢复早期的生物量与养分积累. *生态学报*, 2003, 23(4): 695-702.
- [29] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 张志钧, 李忠文. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [30] 姜红梅, 李明治, 王亲, 刘星星. 祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 166-170.
- [31] 魏彦昌, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 郑华, 姜立军. 尖峰岭自然保护区土壤性质空间异质性. *生态学杂志*, 2007, 26(2): 197-203.

参考文献:

- [1] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [2] 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. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 590-597.
- [3] 龚霞, 牛德奎, 赵晓蕊, 鲁顺保, 刘苑秋, 魏晓华, 郭晓敏. 植被恢复对亚热带退化红壤区土壤化学性质与微生物群落的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1094-1100.
- [4] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-913.
- [5] 周启星, 王毅. 我国农业土壤质量基准建立的方法体系研究. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(增刊): 38-44.
- [6] 徐晓嘉, 雷国平, 张慧, 王元辉. 黑龙江省松嫩平原南部表层土壤肥力质量评价研究. *水土保持研究*, 2010, 17(5): 268-272.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.9 May ,2014(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on ecosystem complexity-stability relationships based on soil food web CHEN Yunfeng, TANG Zheng, LI Hui, et al (2173)
- The ecological restoration effort of degraded estuarine wetland in Northwest Yunnan Plateau, China FU Wenchao, TIAN Kun, XIAO Derong, et al (2187)
- The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression ... LI Yangbing, LUO Guangjie, BAI Xiaoyong, et al (2195)
- Correlation between the distribution characteristics of poisonous plants and *Ochotona curzoniae*, *Myospalax baileyi* in the East of Tibetan Plateau Alpine meadow ecosystem JIN Liang, SUN Li, CUI Huijun, et al (2208)
- Effects of the surrounding habitat on the spider community and leafhopper population in tea plantations LI Jianlong, TANG Jingchi, LI Xiudi, et al (2216)

Autecology & Fundamentals

- Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (2228)
- Kinetics of nutrient uptake by three emergent plants, *Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Scirpus triquetra* ZHANG Xiling, WANG Lixin, LIU Huamin, et al (2238)
- Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii* plantation HU Qiwei, NIE Lanqin, ZHENG Yanming, et al (2246)
- Effects of shrub (*Caragana microphalla* Lam.) encroachment on water redistribution and utilization in the typical steppe of Inner Mongolia PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (2256)
- Effects of shadowing on methane Emissions from *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* CHEN Xixiang, YANG Yanhua, JIANG Jun, et al (2266)
- Oviposition preference and offspring performance of the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* and guava fruit fly *B. correcta* (Diptera: Tephritidae) on six host fruits LIU Hui, HOU Bohua, ZHANG Can, et al (2274)
- Pollination Mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China) HUANG Yanbo, WEI Yukun, GE Binjie, et al (2282)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of resource pulse supply on interspecific competition of a few algal species LI Wei (2290)
- Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, et al (2297)
- Scale change and dependence of plant functional traits in hilly areas of the loess region, Shaanxi Province, China DING Man, WEN Zhongming, ZHENG Ying (2308)
- N and P stoichiometry of *Koeleria paniculata* leaf and soil in Xiangtan Manganese Mine wasteland XU Luyan, TIAN Dalun, WANG Guangjun, et al (2316)
- Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau YANG Fulin, ZHANG Qiang, WANG Wenyu, et al (2323)
- Isolation and Biolog identification of the high-efficiency azotobacter from iron tailing under different vegetation restoration modes LI Wen, YAN Aihua, HUANG Qiuxian, et al (2329)
- Assessing effects of *Cupressus chengiana* plantations in the dry valley of Zagunao River, Li county of Sichuan Province LI Dongsheng, LUO Da, SHI Zuomin, et al (2338)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape diversity of *Paerargyrops edita* Tanaka stock in Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground CAI Jiandi, SU Guoqiang, MA Chao, et al (2347)
- Landscape classification in a small area for soil series survey and mapping: a case study in the Ningzhen hills, China LU Haodong, PAN Jianjun, FU Chuancheng, et al (2356)
- Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the north china plain HU Wei, YAN Changrong, LI Yingchun, et al (2367)

Resource and Industrial Ecology

- Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen City based on LMDI method LIU Yuan, LI Xiangyang, LIN Jianyi, et al (2378)
- Evaluation index system of sustainable livelihoods ecotourism strategy: a case study of wangjiazhai community in baiyangdian wetland nature reserve, Hebei WANG Jin, ZHANG Yujun, SHI Ling (2388)
- Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters FAN Chao, QIU Yanping, LI Zhiqiang, et al (2401)
- Evaluation on control efficiency of bethylid parasitoids on pest insects indoor: a case of *Sclerodermus* sp. (Hymenoptera: Bethyridae) ZHAN Maokui, YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, et al (2411)

Urban, Rural and Social Ecology

- The dynamic change of herdsmen well-being and ecosystem services in grassland of Inner Mongolia: take Xilinguole League as example DAI Guangshuo, NA Risu, DONG Xiaobin, et al (2422)
- The construction of the eco-agricultural yards in three gorges reservoir area based on agricultural non-point source pollution zones LIU Juan, XIE Qian, NI Jiupai, et al (2431)
- Spatial pattern gradient analysis of a transect in a hilly urban area in China from the perspective of transportation corridor sprawl LÜ Zhiqiang, DAI Fuqiang, ZHOU Qigang (2442)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 于贵瑞

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 9 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 9 (May, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元