

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第4期 Vol.33 No.4 **2013**

中国生态学会
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 33 卷 第 4 期 2013 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 王晓学,沈会涛,李叙勇,等 (1019)
- 植物叶片水稳定同位素研究进展 罗伦,余武生,万诗敏,等 (1031)
- 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展 陈利顶,孙然好,刘海莲 (1042)
- 城市生物多样性分布格局研究进展 毛齐正,马克明,邬建国,等 (1051)
- 基于福祉视角的生态补偿研究 李惠梅,张安录 (1065)

个体与基础生态

- 土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响 雷垚,郝志鹏,陈保冬 (1071)
- 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响 叶佳舒,李涛,胡亚军,等 (1080)
- 转 *mapk* 双链 RNA 干扰表达载体黄瓜对根际土壤细菌多样性的影响 ... 陈国华,弭宝彬,李莹,等 (1091)
- 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害 万五星,夏亚军,张红星,等 (1098)
- 茅苍术叶片可培养内生细菌多样性及其促生潜力 周佳宇,贾永,王宏伟,等 (1106)
- 低温对蝶蛹金小蜂卵成熟及其数量动态的影响 夏诗洋,孟玲,李保平 (1118)
- 六星黑点豹蠹蛾求偶行为与性信息素产生和释放的时辰节律 刘金龙,荆小院,杨美红,等 (1126)
- 氟化物对家蚕血液羧酸酯酶及全酯酶活性的影响 米智,阮成龙,李姣蓉,等 (1134)
- 不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响 梁俊平,李健,李吉涛,等 (1142)

种群、群落和生态系统

- 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估 吕一河,马志敏,傅伯杰,等 (1153)
- 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例 崔天翔,官兆宁,赵文吉,等 (1160)
- 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法——以北京野鸭湖湿地为例 林川,官兆宁,赵文吉,等 (1172)
- 浮游植物群落对海南小水电建设的响应 林彰文,林生,顾继光,等 (1186)
- 菹草种群内外水质日变化 王锦旗,郑有飞,王国祥 (1195)
- 南方红壤区 3 种典型森林恢复方式对植物群落多样性的影响 王芸,欧阳志云,郑华,等 (1204)
- 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征 胡会峰,刘国华 (1212)
- 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型 李晓炜,赵刚,于秀波,等 (1219)

景观、区域和全球生态

- 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例 杨青生,乔纪纲,艾彬 (1230)
- 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异——以江苏海岸带为例 唐得昊,邹欣庆,刘兴健 (1240)
- 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响 欧阳扬,李叙勇 (1251)

西部地区低碳竞争力评价..... 金小琴,杜受祜 (1260)

基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究 郑 鹏,林 韵,潘文斌,等 (1268)

基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,等 (1276)

长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系..... 陈 列,高露双,张 赞,等 (1285)

资源与产业生态

河西走廊绿洲灌区循环模式“农田-食用菌”生产系统氮素流动特征 李瑞琴,于安芬,赵有彪,等 (1292)

施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响..... 王才斌,郑亚萍,梁晓艳,等 (1300)

耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响..... 庞 绪,何文清,严昌荣,等 (1308)

基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1317)

学术争鸣

基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想 张智光 (1326)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿须知 (I)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-02



封面图说: 石羊河——石羊河流域属大陆性温带干旱气候,气候特点是:日照充足、温差大、降水少、蒸发强、空气干燥。石羊河源出祁连山东段,河系以雨水补给为主,兼有冰雪融水成分。上游的祁连山区降水丰富,有雪山冰川和残留林木,是河流的水源补给地。中游流经河西走廊平地,形成武威和永昌等绿洲,下游是民勤,石羊河最后消失在腾格里沙漠中。随着石羊河流域人水矛盾的不断加剧,水资源开发利用严重过度,荒漠化日趋严重,民勤县的生态环境已经相当恶化,继续下去将有可能变成第二个“罗布泊”。

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/stxb201112091888

胡会峰, 刘国华. 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征. 生态学报, 2013, 33(4): 1212-1218.

Hu H F, Liu G H. Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1212-1218.

人工油松林恢复过程中土壤理化性质及 有机碳含量的变化特征

胡会峰^{1,2}, 刘国华^{1,*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. School of Agricultural, Forest, and Environmental Sciences, Clemson University, Clemson 29634, USA)

摘要: 采用时空替代法, 选取岷江上游大沟流域内不同恢复时期(12、18、25、35a)的人工油松林为研究对象, 研究了植被恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征, 同时探讨了它们之间的相互关系。研究表明沿恢复梯度, 土壤质量得到了改善, 主要表现为土壤粘粒含量、比表面积、有机质含量显著增加, 土壤粉粒含量和 pH 值则显著下降。土壤有机质与土壤粘粒和比表面积呈显著正相关, 与土壤容重呈显著负相关。此外, 土壤有机碳含量沿恢复梯度显著增加, 0—50 cm 内土壤有机碳含量从 5.59 kg/m² 增加到 12.64 kg/m², 土壤年平均固碳速率为 0.31 kg/m²。

关键词: 人工油松林; 土壤理化性质; 土壤有机碳; 岷江

Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations

HU Huifeng^{1,2}, LIU Guohua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 School of Agricultural, Forest, and Environmental Sciences, Clemson University, Clemson, 29634, USA

Abstract: Soils are the largest carbon pool in the world and contain two to three times as much as carbon as either terrestrial vegetation or the atmosphere. Therefore, even a slight change in the soil carbon stock could have a major impact on global terrestrial carbon cycling. Afforestation and reforestation are widely recognized as cost-effective methods to mitigate global warming caused by rising atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentrations through sequestering CO₂ in the atmosphere into vegetation biomass and soil organic matter.

Based on the chronosequence of *Pinus tabulaeformis* (PT) plantations (12, 18, 25, and 35 years old) located at the Dagou catchment in a dry valley region of the upper Minjing River, Southwestern China, we investigated the dynamics of soil physical-chemical properties and soil organic carbon content following restoration. Using these data, we examined the correlated relationships between soil organic matter and soil physical properties and among soil physical properties. The results show that soil quality was significantly improved along the restoration chronosequence, with the improvement in soil quality attributed to significant increases in soil clay content, soil surface area, and soil organic matter, as well as significant decreases in soil silt content and soil pH. Soil organic matter was significantly, positively correlated with soil clay content and soil surface area but significantly, negatively correlated with soil bulk density. Soil surface area was significantly, positively correlated with soil clay content and negatively correlated with soil silt content. Soil organic carbon

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40871248); 中国科学院战略先导科技专项(XDA05060100)

收稿日期: 2011-12-09; **修订日期:** 2012-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ghliu@rcees.ac.cn

content also significantly increased along the restoration chronosequence (from 5.59 kg/m² in PT12 to 12.64 kg/m² in PT35 at 0—50 cm depth). However, the annual soil carbon sequestration rate ranged from an initial rate of 0.05 kg/m² (PT12—PT18) to late 0.36 kg/m² (PT25—PT35), with the mean of 0.31 kg/m².

Key Words: *Pinus tabulaeformis* plantations; soil physical-chemical properties; soil organic carbon; Minjiang

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,全球约有 1500 Pg C(0—100 cm 内;1 Pg = 10¹⁵ g)以有机质形式存在于土壤中,其贮量大约是陆地植被碳贮量(500—600 Pg C)的 3 倍、大气碳贮量(750 Pg C)的 2 倍^[1-4],因此土壤有机碳库的微小变化,都会对全球碳循环和碳平衡产生重要影响^[5-7]。植被恢复,特别是造林、再造林,增加了陆地森林生态系统的碳贮存和“碳汇”功能,有效调节了陆地与大气之间的碳交换,减少了人为源 CO₂ 和其他温室气体的排放,已被公认为是一种减缓全球气候变化的有效手段^[8-11]。此外,通过枯枝落叶腐质化和矿质化过程及根系与土壤的生理生化作用,森林恢复还可以有效改善土壤结构以及土壤养分,而改善后的土壤结构,一方面可以提高土壤保存肥力、固定养分、涵养水分的功能,促进植物的健康成长,从而达到改善当地环境、遏制生态退化的目的,而另一方面可以增强森林生态系统的“碳汇”功能^[12-14]。本文目的就是通过研究岷江上游人工油松林恢复过程中土壤理化性质及土壤有机碳含量的变化特征,一方面为我们理解植被恢复过程中植物与土壤的相互作用机理,指导退化生态环境的恢复和重建提供理论支持,另一方面也为评估区域森林生态系统的“碳汇”功能提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外研究位于岷江上游大沟流域——中国科学院茂县山地生态系统定位研究站(31°42' N, 103°54' E, 海拔 1826 m)站区。该区气候类型属山地温带气候,年日照时数 1378.8 h,年日照百分率 31%;年均温 9.3 °C,极端最高气温 30.9 °C,极端最低气温 -13.5 °C,最冷月 1 月份平均气温 -0.9 °C,最热月 7 月份平均气温 18.6 °C,≥10 °C 年有效积温 954.1 °C,无霜期 215 d;年降雨量 825.2 mm,年蒸发量 968.7 mm,年均相对湿度 81.1%^[15-16]。该地段土壤为淋溶褐土至棕壤性土,母岩多变质岩,母质为千枚岩残坡积物,高阶上为第四纪黄土状物质^[17]。由于长期森林砍伐以及人为破坏,该流域森林资源锐减,大部分原始森林退化成次生灌丛、坡地和荒坡,加之干旱河谷生态环境极端脆弱,使环境退化程度不断加重,滑坡、泥石流等自然灾害频繁发生,是四川省水土流失最为严重的区域之一,制约了当地社会经济的发展^[17-18]。为有效遏止当地生态环境退化,尽快恢复和重建退化植被,自 20 世纪 60 年代以来,该流域一直通过人工造林来加速恢复当地植被,防治环境退化,目前森林植被中有 60 年代至 90 年代等不同年代所造的油松林(*Pinus tabulaeformis*; PF)、云杉林(*Picea asperata*)以及自然恢复的油松-辽东栎(*Quercus wutaishanica*)针阔混交林和次生灌丛等,植被长势良好。

1.2 样地设置

采用时间序列方法,以空间代替时间,在茂县生态站附近主要人工造林区域,分别选择 4 个不同恢复时期的人工油松林样地(PT12(12a)、PT18(18a)、PT25(25a)、PT35(35a))作为恢复系列的研究对象。其中,人工油松林的林龄采用年轮钻钻树的方法确定:在每个样地内选择一个 10 m×10 m 的大样方,在其中选择 10 棵标准木,用年轮钻在其胸径处钻取木芯,通过数年轮的方法确定每棵树的林龄,最后取平均来确定整个样地的恢复时期;其余调查内容包括:地理位置、海拔、坡度、坡向、坡位;同时调查了每棵树的胸径、冠幅、枝下高、树高等基本特征(表 1)。林下主要灌木物种有峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*),虎榛子(*Qstryopsis davidiana*),美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)等;主要草本物种有丝叶苔草(*Carex capilliformis*),毛茛菜(*Viola collina*)等。

1.3 土壤样品采集和分析

在 10 m×10 m 的大样方内随机选取 2 个取样点,采用分层多点混合取土样方法进行。在每个取样点以 0—15 cm,15—30 cm,30—50 cm 为土层间隔,用标准环刀(100 cm³)取样,然后将环刀内土壤在 105 °C (至少

24 h) 的高温下烘干至恒重,称量并计算土壤含水率和土壤容重。同时相应地在各个土层取一些土壤,自然风干,用 2 mm 直径的筛子过筛,拣去石块、草根等杂质,同时称量大于 2 mm 的砂砾的质量,进一步拣去过筛土壤中的杂质(主要是草根、动物的排泄物)后,将来自同一样方同一土层的土样混均,用四分法取样,一部分用于土壤物理指标的测定,一部分用土壤粉碎机(S100, Retsch Co., Germany)将土壤研细,备化学实验分析所用。

表 1 人工油松林样地基本情况

Table 1 Plot characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantations

样地代号 Plot ID	海拔 Altitude /m	坡度 Slope /(°)	平均林龄 Average age /a	胸径 DBH /cm	平均树高 Average height /m	冠幅 Crown /(m×m)	枝下高 HLB/m
PT12	1785	25	12	8.8	5.7	2.3×2.6	1.3
PT18	1783	22	18	8.2	7.5	2.8×2.4	1.1
PT25	1991	10	25	15.5	13.4	2.9×2.7	4.2
PT35	2131	15	35	23	16.5	3.7×3.5	5.3

PT12, PT18, PT25, PT35 分别代表 12, 18, 25a 和 35a 的人工油松林

土壤理化性质按照中国土壤学会编写的土壤农业化学分析方法进行^[19],土壤容重和土壤孔隙度采用标准环刀(100 cm³)取样分析法(假定土壤比重为 2.65 g/cm³)测定;土壤 pH 值用室内用土壤 pH 计(Delta320)(1:2.5 的土水质量比)测定;土壤质地和土壤比表面积采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern Instruments Co., UK)测定;土壤有机质含量用重铬酸钾油浴外加热法测定^[20];土壤有机碳含量(kg/m²)采用分层法计算^[21],公式如下:

$$\text{SOC}(\text{kg/m}^2) = \sum_{i=1}^n D_i \times \rho_i \times \text{OC}_i \times (1 - C_i) / 100$$

式中, SOC 为土壤有机碳含量(kg/m²), n 为土壤剖面的层数, D_i 为土壤第 i 层的厚度(cm), ρ_i 为第 i 层的土壤容重(g/cm³), C_i 为第 i 层土壤中直径大于 2 mm 的砂砾含量(%), OC_i 为第 i 层土壤有机碳浓度(g/kg)。

1.4 数据处理和统计分析

相关分析以及单因素方差分析(Analysis of variance; ANOVA)在 SAS 9.1 (SAS Institute Inc., USA)中完成,显著性检验采用 Fisher's LSD ($P < 0.05$) 检验。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

由表 2 可见,对不同恢复阶段 0—15 cm 土壤层而言,所测定的土壤理化指标都存在显著差异,其中土壤比表面积和土壤粘粒含量沿恢复梯度逐渐增加,PT12 土壤比表面积显著小于 PT18, PT25 和 PT35, PT12 和 PT18 土壤粘粒含量显著小于 PT25 和 PT35。与 PT12 相比,PT35 显著增加了土壤砂粒和有机质含量,显著降低了土壤粉粒含量和 pH 值;对不同恢复阶段 15—30 cm 土壤层而言,所测定的土壤理化指标除土壤砂粒含量外,都存在显著差异,其中土壤比表面积和土壤粘粒含量依旧沿恢复梯度逐渐增加,PT12 土壤比表面积显著小于 PT35, PT12 和 PT18 土壤粘粒含量显著小于 PT25 和 PT35,并且 PT25 土壤粘粒含量也显著小于 PT35。与 PT12 相比,PT35 显著增加了土壤有机质含量,显著降低了土壤粉粒含量和 pH 值;对不同恢复阶段 30—50 cm 土壤层而言,所测定的土壤理化指标除土壤容重,土壤孔隙度外,其它指标依然存在显著差异,其中土壤比表面积和土壤粘粒含量依旧沿恢复梯度逐渐增加,PT12 和 PT18 土壤比表面积显著小于 PT35, PT12 和 PT18 土壤粘粒含量显著小于 PT25 和 PT35,并且 PT25 土壤粘粒含量也显著小于 PT35。与 PT12 相比,PT35 显著增加了土壤砂粒和有机质含量,显著降低了土壤粉粒含量和 pH 值。

土壤理化性质的相关分析表明(表 3),土壤有机质与土壤粘粒,土壤比表面积显著正相关,与土壤容重显著负相关。在所测定的土壤物理指标中,土壤比表面积与土壤粘粒显著正相关,与土壤粉粒显著负相关;土壤

粘粒与土壤粉粒显著负相关,与土壤砂粒显著正相关;土壤粉粒则与土壤砂粒显著负相关。

表 2 人工油松林恢复过程中土壤理化性质的变化

Table 2 Dynamics of soil physic-chemical properties along the restoration chronosequence in <i>Pinus tabulaeformis</i> plantations									
样地类型 Forest type	层次 Soil depth	土壤容重 Bulk density /(g/cm ³)	土壤孔隙度 Soil porosity /(%)	土壤比表面积 Soil surface area /(m ² /g)	粘粒 (<0.002mm) Clay particle /(%)	粉粒 (0.05— 0.002mm) Silt particle /%	砂粒 (2— 0.05mm) Sand particle /%	土壤 pH Soil pH	土壤有机质 Soil organic matter /(g/kg)
PT12	0—15 cm	1.17 a	55.98 b	0.67 b	0.44 b	96.72 a	2.85 c	6.36 a	22.07 d
PT18		0.68 b	74.38 a	0.81 a	1.13 b	95.14 a	3.74 bc	5.48 b	44.64 b
PT25		1.02 ab	61.51 ab	0.82 a	2.75 a	90.68 b	6.58 a	5.05 c	39.50 c
PT35		0.95 ab	64.02 ab	0.86 a	3.09 a	91.47 b	5.44 ab	5.47 b	60.82 a
PT12	15—30 cm	1.28 ab	51.81 ab	0.72 b	0.87 c	94.51 a	4.63 a	6.28 a	17.18 c
PT18		0.89 b	66.47 a	0.77 ab	1.07 c	94.94 a	3.99 a	4.81 d	22.86 b
PT25		1.33 a	49.77 b	0.78 ab	2.11 b	92.89 b	5.01 a	4.99 c	19.71 bc
PT35		1.03 ab	61.25 ab	0.87 a	2.61 a	92.67 b	4.72 a	5.86 b	40.98 a
PT12	30—50 cm	1.37 a	48.45 a	0.67 b	0.53 c	95.82 a	3.65 b	6.88 a	12.89 c
PT18		1.30 a	51.09 a	0.74 b	0.82 c	96.17 a	3.02 b	5.23 c	12.00 c
PT25		1.55 a	41.60 a	0.75 ab	1.78 b	92.40 b	5.82 a	5.19 d	15.16 b
PT35		1.19 a	55.17 a	0.82 a	3.00 a	91.13 b	5.87 a	5.94 b	28.53 a

同一土壤层次中标有不同小写字母的数值表示差异显著 (Fisher's LSD 检验, $P < 0.05$)

表 3 人工油松林土壤理化性质的相关分析

Table 3 Correlation analysis with soil physic-chemical properties in <i>Pinus tabulaeformis</i> plantations						
	土壤容重 Bulk density /(g/cm ³)	土壤比表面积 Soil surface area /(m ² /g)	粘粒 (<0.002mm) Clay particle /(%)	粉粒 (0.05— 0.002mm) Silt particle /(%)	砂粒 (2—0.05mm) Sand particle /(%)	土壤有机质 Soil organic matter /(g/kg)
土壤容重 Bulk density/(g/cm ³)	1.000					
土壤比表面积 Soil surface area/(m ² /g)	-0.254	1.000				
粘粒 (<0.002mm) Clay particle/%	0.085	0.820 ***	1.000			
粉粒 (0.05—0.002mm) Silt particle/%	-0.177	-0.569 **	-0.874 ***	1.000		
砂粒 (2—0.05mm) Sand particle/%	0.208	0.379	0.719 ***	-0.966 ***	1.000	
土壤有机质 Soil organic matter/(g/kg)	-0.697 **	0.545 *	0.443 *	-0.388	0.319	1.000

Pearson 相关分析: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

2.2 土壤有机碳含量

从图 1 可以看出,沿恢复梯度,0—50 cm 的土壤有机碳含量呈显著增加趋势,从 PF12 的 5.59 kg/m² 显著增加到 PF18 的 5.91 kg/m²(6%),PF25 的 8.40 kg/m²(50%),及 PF35 的 12.64 kg/m²(126%),平均每年增加 0.31 kg/m²。此外土壤有机碳在恢复过程中表现出加速增加的趋势,从最初的平均每年增加 0.05 kg/m² (PF12—PF18),提高到中期的 0.36 kg/m² (PF18—PF25),以及后期的 0.42 kg/m² (PF25—PF35)。

3 结论与讨论

3.1 植被恢复过程中土壤理化性质的变化趋势

土壤结构的改善以及土壤肥力的提高,是植被恢复的一个重要目标^[13-14]。森林群落演替与土壤演化之间存在相互影响、相互作用的关系。植被通过根系分泌物和残体向土壤提供 C、N,影响土壤有机质的输入,从而显著影响土壤结构和理化性质^[22-23]。通过研究植被恢复过程中土壤理化性质的变化规律,认识植被对土壤肥力、土壤质量的作用,揭示植被恢复过程中土壤肥力的演化机制,可以为森林生态系统的可持续管理和利

用提供理论依据^[24]。研究结果表明土壤理化性质随着植被的恢复呈现出一定的变化规律,其中土壤比表面积和土壤粘粒含量表现最为明显。沿恢复梯度,在不同的土壤层中,土壤比表面积和土壤粘粒含量都呈现显著逐渐增加的趋势,只是显著性在不同土壤层有所不同而已。此外,与恢复初期相比,恢复后期土壤粉粒含量和土壤 pH 值都有显著降低,而土壤有机质含量呈显著提高,表明恢复过程中土壤肥力的持续改善。土壤有机质与土壤容重呈显著负相关,这是因为土壤有机质与土壤物理性质密切相关,一般有机质含量越高,团粒结构越多,土壤单粒排列疏松,孔隙度越大,通气性能越好,土壤容重越低^[25]。土壤有机质与土壤粘粒含量呈显著正相关,主要是因为土壤细颗粒的增多有助于土壤养分的积累^[23,26]。土壤比表面积反映土壤固定和吸附营养元

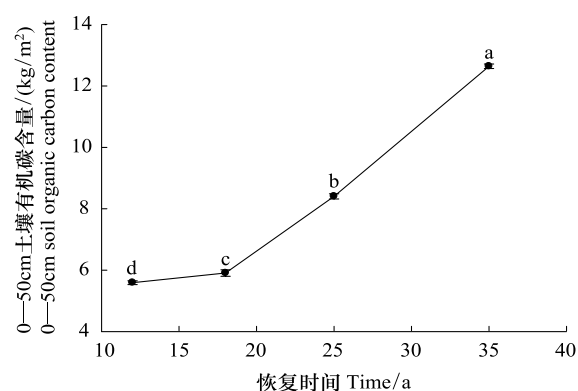


图1 不同恢复阶段人工油松林0—50cm 土壤有机碳含量

Fig.1 0—50 cm Soil organic carbon content of *Pinus tabulaeformis* plantations along the restoration chronosequence *

不同小写字母的数值表示差异显著 (Fisher's LSD 检验, $P < 0.05$)

素的能力,单位质量的面积越大,土壤吸附养分的能力越强,土壤肥力也越高,所以两者之间呈现显著正相关。而土壤细颗粒的多少,也直接反映了单位质量土壤表面积的多少,相关分析也证明土壤比表面积显著正相关与土壤粘粒含量,却显著负相关与土壤粉粒含量。此外刘占锋等在同一地区的研究还发现随着植被的恢复,土壤全氮,全磷以及土壤微生物生物量 C、N 也都有不同程度的增加^[23]。游秀花对武夷山不同林龄的马尾松天然演替林的研究同样发现:随着马尾松天然林群落的进展演替,土壤物理性状得到改善,土壤容重减小,土壤的渗透性、自动调节能力、水源涵养功能等能力得到提高,土壤有机质、全 N、速效 K 等土壤养分指标递增^[24]。其他类似的研究也表明人工林可以恢复退化土壤的性状和维持土壤肥力^[27-29]。

3.2 植被恢复过程中土壤有机碳含量的变化趋势

植被恢复,除了有效减缓地区的生态恶化,改善地区环境外,另一方面利用植物的光合作用和土壤有机碳的蓄积固定了大气中的 CO_2 ,有助于缓解全球的温室效应^[6,10,30-33]。在本研究中,采用时间序列方法探讨了岷江上游人工油松林恢复过程中土壤有机碳的动态变化。结果表明 0—50cm 土壤有机碳含量沿恢复梯度呈显著逐渐递增的趋势,平均年际固碳速率达到 0.31 kg/m^2 。国内外类似的许多研究结果也证实了这种增长的存在^[6,10,32,34-35]。例如,Zerva 等发现新英格兰 12、20、30a 硬木云杉人工林下土壤有机碳含量分别是 14.、18.1、24.9 kg/m^2 ,平均年际固碳速率为 0.57 kg/m^2 ^[35]。

土壤固碳速率受气候、耕作历史、土壤母质、栽种树种、恢复时间、取样深度等诸多因素的影响^[8,10,32,36]。目前全球次生林和人工林的土壤平均年际固碳速率是 33.8 g/m^2 ^[32] 和 30 g/m^2 ^[8]。研究结果要明显高于全球的平均值,但与热带、亚热带某些地区次生林和人工林的土壤固碳速率相当。Lugo 和 Sanchez 研究发现,热带波多黎各地区弃耕 100—300a 的次生林的土壤固碳速率高达 $0.08—0.40 \text{ kg/m}^2$ ^[37];Brown 和 Lugo 也发现,弃耕 50a 的亚热带桃心木人工林 50 cm 内土壤的固碳速率为 0.31 kg/m^2 ^[38]。如此高的土壤固碳速率,是与该区域土壤最初的肥力有关,土壤越贫瘠,植被恢复后土壤固碳速率越大^[8]。岷江上游以前由于生态系统退化、水土流失严重,土壤非常贫瘠,因此一旦有植被覆盖后,土壤肥力就会迅速回升,因此固碳速率较高。许多研究表明土壤固碳速率会随着恢复时间的推移迅速下降^[8,33,38-40]。例如,Silver 等通过分析文献资料,发现在热带退耕农田和牧场上造林后,0—25 cm 土壤 100a 内的平均年际固碳速率为 41 g/m^2 ,但是前 20a 内的平均年际固碳速率则高达 130 g/m^2 ^[40]。土壤有机碳固碳速率在本研究尺度内,并没有随着恢复时间的推移迅速下降,反而表现出加速增加的趋势,从最初的平均每年增加 0.05 kg/m^2 ,提高到中期的 0.36 kg/m^2 ,以致后期的 0.42 kg/m^2 。一方面表明土壤结构的改善,可以加速土壤有机碳的累积,另一方面也说明了岷江上游人工油松林在植被恢复 35a 之后土壤还具有很大的固碳潜力。

References:

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [3] Jobbàgy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [4] Fantappiè M, L'Abate G, Costantini E A C. The influence of climate change on the soil organic carbon content in Italy from 1961 to 2008. *Geomorphology*, 2011, 135(3/4): 343-352.
- [5] Turner J, Lambert M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133(3): 231-247.
- [6] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [7] Poeplau C, Don A, Vesterdal L, Leifeld J, van Wesemael B, Schumacher J, Gensior A. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2415-2427.
- [8] Bruce J P, Frome M, Haite E, Janzen H, Lal R, Paustian K. Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54(1): 382-389.
- [9] IPCC. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide // Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J, eds. *Land Use, Land-Use Change and Forestry: A Special Report of the International Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000: 183-238.
- [10] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J P, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [11] Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439-453.
- [12] Hu H, Liu S Q, Chen Q H, Wang C Q, Pan K W, Pang X Y. Changes of soil properties during artificial recovery of subalpine coniferous forests in western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(4): 308-314.
- [13] Plotnikoff M R, Bulmer C E, Schmidt M G. Soil properties and tree growth on rehabilitated forest landings in the interior cedar hemlock biogeoclimatic zone: British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 2002, 170(1/3): 199-215.
- [14] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77-96.
- [15] Wu N, Liu Q. Restoration and Rehabilitation of Degraded Mountain Ecosystem on Upper Minjiang River. Chengdu: Sichuan Scientific and Technology Press, 2007: 19-28, 32-33.
- [16] Jiang Y M, Pang X Y, Bao W K. Soil microbial biomass and the influencing factors under *Pinus tabulaeformis* and *Picea asperata* plantations in the upper Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 801-811.
- [17] Wang C M, Bao W K, Chen J Z, Sun H, Xie J S. Profile characteristics and nutrients of dry cinnamon soils in dry valley of the upper Minjiang River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(3): 230-234.
- [18] Guo Y M, Tang Z X. Prevention and control of soil erosion in the upper reaches of the Minjiang River. *Mountain Research*, 1995, 13(4): 267-272.
- [19] Lu R K. Analytical Methods of Soil Agrochemistry. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1999.
- [20] Bao S D. Analysis of Soil Agrochemistry. 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 14-38.
- [21] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [22] Rutigliano F A, Ascoli R D, De Santo A V. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1719-1729.
- [23] Liu Z F, Liu G H, Fu B J, Hu H F, Zheng X X, Wu Y Q. Dynamics of soil microbial biomass C, N along restoration chronosequences in pine plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1011-1018.
- [24] You X H. Dynamics of soil physical and chemical properties in different succession stages of *Pinus massoniana* natural forests. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2005, 25(2): 121-124.
- [25] Pang X Y, Liu S Q, Liu Q, Wu Y, Lin B, He H, Zhang Z J. Influence of plant community succession on soil physical properties during subalpine coniferous plantation rehabilitation in western Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4): 42-45, 50-50.
- [26] Arunachalam K, Arunachalam A. Effect of soil pH on nitrogen mineralization in regrowing humid subtropical forests of Meghalaya. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 2000, 48(1): 98-101.
- [27] Shen B G. Study on soil fertility in *Quercus vqriabilis* plantation with thirty-five years. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2002, 22(2): 154-156.
- [28] Liu S L, Fu B J, Lü Y H, Chen L D, Ma K M. Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope. *Acta Ecologica*

- Sinica, 2003, 23(3): 414-420.
- [29] Zheng H, Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H, Zhao T Q, Peng T B. Effects of forest restoration types on soil quality in red soil eroded region, Southern China. *Acta Ecological Sinica*, 2004, 24(9): 1994-2002.
- [30] Turner D P, Koerper G J, Harmon M E, Lee J J. Carbon sequestration by forests of the United States. current status and projections to the year 2040. *Tellus B*, 1995, 47(1/2): 232-239.
- [31] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [32] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [33] Six J, Callewaert P, Lenders S, De Gryze S, Morris S J, Gregorich E G, Paul E A, Paustian K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [34] McLauchlan K K, Hobbie S E, Post W M. Conversion from agriculture to grassland builds soil organic matter on decadal timescales. *Ecological Applications*, 2006, 16(1): 143-153.
- [35] Zerva A, Ball T, Smith K A, Mencuccini M. Soil carbon dynamics in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) chronosequence on a peaty gley. *Forest Ecology and Management*, 2005, 205(1/3): 227-240.
- [36] Shi J, Liu J Y, Gao Z Q, Cui L L. A review on the influence of afforestation on soil carbon storage. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 410-416.
- [37] Lugo A E, Sanchez, M J, Brown S. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil*, 1986, 96(2): 185-196.
- [38] Brown S, Lugo A E. Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen content of soils in Puerto Rico and US Virgin Islands. *Plant and Soil*, 1990, 124(1): 53-64.
- [39] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [40] Silver W L, Ostertag R, Lugo A E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Restoration Ecology*, 2000, 8(4): 394-407.

参考文献:

- [12] 胡泓, 刘世全, 陈庆恒, 王昌全, 潘开文, 庞学勇. 川西亚高山针叶林人工恢复过程的土壤性质变化. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(4): 308-314.
- [15] 吴宁, 刘庆. 山地退化生态系统的恢复与重建——理论与岷江上游的实践. 成都: 四川科学技术出版社, 2007: 19-28, 32-33.
- [16] 江元明, 庞学勇, 包维楷. 岷江上游油松与云杉人工林土壤微生物生物量及其影响因素. *生态学报*, 2011, 31(3): 801-811.
- [17] 王春明, 包维楷, 陈建中, 孙辉, 谢嘉德. 岷江上游干旱河谷区褐土不同亚类剖面及养分特征. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 230-234.
- [18] 郭永明, 汤宗祥. 岷江上游水土流失及其防治. *山地研究*, 1995, 13(4): 267-272.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-38.
- [23] 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 胡会峰, 郑晓翮, 吴雅琼. 人工油松林(*Pinus tabulaeformis*)恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 1011-1018.
- [24] 游秀花. 马尾松天然林不同演替阶段土壤理化性质的变化. *福建林学院学报*, 2005, 25(2): 121-124.
- [25] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 吴彦, 林波, 何海, 张宗锦. 川西亚高山针叶林人工重建过程中植物群落演替对土壤性质的影响. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 42-45, 50-50.
- [27] 沈宝贵. 35 年生栓皮栎人工林土壤肥力研究. *福建林学院学报*, 2002, 22(2): 154-156.
- [28] 刘世梁, 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 马克明. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响研究. *生态学报*, 2003, 23(3): 414-420.
- [29] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 赵同谦, 彭廷柏. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响. *生态学报*, 2004, 24(9): 1994-2002.
- [36] 史军, 刘纪远, 高志强, 崔林丽. 造林对土壤碳储量影响的研究. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 410-416.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 4 February, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al (1019)
- Advances in the study of stable isotope composition of leaf water in plants LUO Lun, YU Wusheng, WAN Shimin, et al (1031)
- Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian (1042)
- An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity MAO Qizheng, MA Keming, WU Jianguo, et al (1051)
- Ecological compensation boosted ecological protection and human well-being improvement LI Huimei, ZHANG Anlu (1065)

Autecology & Fundamentals

- Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis* LEI Yao, HAO Zhipeng, CHEN Baodong (1071)
- Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses YE Jiashu, LI Tao, HU Yajun, et al (1080)
- The effect of transgenic cucumber with double strands RNA of *mapk* on diversity of rhizosphere bacteria CHEN Guohua, MI Baobin, LI Ying, et al (1091)
- The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region WAN Wuxing, XIA Yajun, ZHANG Hongxing, et al (1098)
- Diversity and plant growth-promoting potential of culturable endophytic bacteria isolated from the leaves of *Atractylodes lancea* ZHOU Jiayu, JIA Yong, WANG Hongwei, et al (1106)
- Effects of the low temperature treatment on egg maturation and its numerical dynamics in the parasitoid *Pteromalus puparum* (Hymenoptera: Pteromalidae) XIA Shiyang, MENG Ling, LI Baoping (1118)
- Circadian rhythm of calling behavior and sexual pheromone production and release of the female *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae) LIU Jinlong, JING Xiaoyuan, YANG Meihong, et al (1126)
- Influence of fluoride on activity of carboxylesterase and esterase in hemolymph of *Bombyx mori* MI Zhi, RUAN Chenglong, LI Jiaorong, et al (1134)
- Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory LIANG Junping, LI Jian, LI Jitao, et al (1142)

Population, Community and Ecosystem

- Diversity of ecosystem services and landscape multi-functionality: from scientific concepts to integrative assessment LÜ Yihe, MA Zhimin, FU Bojie, et al (1153)
- Research on estimating wetland vegetation abundance based on spectral mixture analysis with different endmember model: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing CUI Tianxiang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1160)
- Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing LIN Chuan, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1172)
- Responses of phytoplankton community to the construction of small hydropower stations in Hainan Province LIN Zhangwen, LIN Sheng, GU Jiguang, et al (1186)
- Diurnal variation of water quality around *Potamogeton crispus* population WANG Jinqi, ZHENG Youfei, WANG Guoxiang (1195)
- Effects of three forest restoration approaches on plant diversity in red soil region, southern China WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1204)
- Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations HU Huifeng, LIU Guohua (1212)
- Probability models of forest fire risk based on ecology factors in different vegetation regions over China LI Xiaowei, ZHAO Gang, YU Xiubo, et al (1219)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape ecological security dynamics in a fast growing urban district: the case of Dongguan City YANG Qingsheng, QIAO Jigang, AI Bin (1230)
- The difference between exergy and biodiversity in ecosystem health assessment: a case study of Jiangsu coastal zone TANG Dehao, ZOU Xinqing, LIU Xingjian (1240)
- Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems OUYANG Yang, LI Xuyong (1251)
- Evaluation of low-carbon competitiveness in Western China JIN Xiaoqin, DU Shouhu (1260)
- Flood return period analysis of the Bayi Reservoir Watershed based on HEC-HMS Model ZHENG Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, et al (1268)
- Simulation of rainfall interception process of primary korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains by using the modified Gash model CHAI Rushan, CAI Tiju, MAN Xiuling, et al (1276)
- Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain CHEN Lie, GAO Lushuang, ZHANG Yun, et al (1285)

Resource and Industrial Ecology

- Nitrogen flows in "crop -edible mushroom" production systems in Hexi Corridor Oasis Irrigation Area LI Ruiqin, YU Anfen, ZHAO Youbiao, et al (1292)
- Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut WANG Caibin, ZHENG Yaping, LIANG Xiaoyan, et al (1300)
- Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon PANG Xu, HE Wenqing, YAN Changrong, et al (1308)
- Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on improved set pair analysis SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1317)

Opinions

- Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework ZHANG Zhiguang (1326)

《生态学报》2013 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,探索自然奥秘,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,300 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

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 33 卷 第 4 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 4 (February, 2013)

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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元