

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

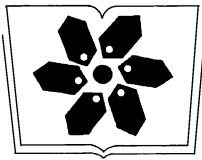
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第15期 Vol.32 No.15 **2012**

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 32 卷 第 15 期

2012 年 8 月 (半月刊)

## 目 次

|                                                        |                         |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| 放牧对青藏高原东部两种典型高寒草地类型凋落物分解的影响.....                       | 张艳博, 罗 鹏, 孙 庚, 等 (4605) |
| 北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素.....                              | 王苏铭, 张 楠, 于琳倩, 等 (4618) |
| 温带混交林碳水通量模拟及其对冠层分层方式的响应——耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡模型 .....     | 施婷婷, 高玉芳, 袁凤辉, 等 (4630) |
| 洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响 .....                            | 刘 娜, 王克林, 段亚锋 (4641)    |
| 大辽河口水环境污染生态风险评估.....                                   | 于 格, 陈 静, 张学庆, 等 (4651) |
| 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数 .....                        | 渠晓东, 刘志刚, 张 远 (4661)    |
| 不同年龄段大连群体菲律宾蛤仔 EST-SSR 多样性 .....                       | 虞志飞, 闫喜武, 张跃环, 等 (4673) |
| 基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性 .....                      | 杨晓明, 戴小杰, 朱国平 (4682)    |
| 广东罗坑自然保护区鳄蜥生境选择的季节性差异.....                             | 武正军, 戴冬亮, 宁加佳, 等 (4691) |
| 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质.....                               | 魏 强, 凌 雷, 柴春山, 等 (4700) |
| 短轮伐期毛白杨不同密度林分土壤有机碳和全氮动态.....                           | 赵雪梅, 孙向阳, 康向阳, 等 (4714) |
| 放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响.....                        | 丁小慧, 官 立, 王东波, 等 (4722) |
| UV-B 辐射增强对抗除草剂转基因水稻 CH <sub>4</sub> 排放的影响 .....        | 娄运生, 周文麟 (4731)         |
| 基于核磁共振波谱的盐芥盐胁迫代谢组学分析.....                              | 王新宇, 王丽华, 于 萍, 等 (4737) |
| 广西甘蔗根际高效联合固氮菌的筛选及鉴定.....                               | 胡春锦, 林 丽, 史国英, 等 (4745) |
| 不同稻蟹生产模式对土壤活性有机碳和酶活性的影响.....                           | 安 辉, 刘鸣达, 王耀晶, 等 (4753) |
| 大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征.....                             | 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (4762) |
| 川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态.....                               | 崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 等 (4772) |
| 内生真菌角担子菌 B6 对连作西瓜土壤尖孢镰刀菌的影响 .....                      | 肖 逸, 戴传超, 王兴祥, 等 (4784) |
| 西江颗粒直链藻种群生态特征.....                                     | 王 超, 赖子尼, 李跃飞, 等 (4793) |
| 大型人工湿地生态可持续性评价.....                                    | 张依然, 王仁卿, 张 建, 等 (4803) |
| 孢粉、炭屑揭示的黔西高原 MIS3b 期间古植被、古气候演变 .....                   | 赵增友, 袁道先, 石胜强, 等 (4811) |
| 树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制 .....                          | 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (4819) |
| 豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系 .....              | 杨 宁, 赵护兵, 王朝辉, 等 (4827) |
| 一次陆源降雨污水引起血红哈卡藻赤潮的成因.....                              | 刘义豪, 宋秀凯, 靳 洋, 等 (4836) |
| 盐城国家级自然保护区景观格局变化及其驱动力.....                             | 王艳芳, 沈永明 (4844)         |
| 城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例.....                    | 邵天然, 李超骥, 曾 辉 (4852)    |
| 黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势.....                            | 王介勇, 吴建寨 (4861)         |
| 重庆市生态功能区蝴蝶多样性参数 .....                                  | 李爱民, 邓合黎, 马 琦 (4869)    |
| <b>专论与综述</b>                                           |                         |
| 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展.....                           | 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等 (4890) |
| 土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素.....                        | 栾军伟, 刘世荣 (4902)         |
| 森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展.....                         | 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等 (4914) |
| 湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展 .....                                  | 范俊楠, 赵建伟, 朱端卫 (4924)    |
| <b>研究简报</b>                                            |                         |
| 刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响.....                            | 吕改云, 何怀东, 杨丹菁, 等 (4932) |
| <b>学术信息与动态</b>                                         |                         |
| 全球气候变化与粮食安全——2012 年 Planet Under Pressure 国际会议述评 ..... | 安艺明, 赵文武 (4940)         |

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 338 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 35 \* 2012-08



**封面图说:** 水杉是中国特有种, 国家一级保护植物, 有植物王国“活化石”之称, 是 1946 年由中国的植物学家在湖北的利川磨刀溪发现的。水杉曾广泛分布于北半球, 第四纪冰期以后, 水杉属的其他种类全部灭绝, 水杉确在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存, 成为旷世奇珍。水杉耐水, 适应力强, 生长极为迅速, 其树干通直挺拔, 高大秀颀, 树冠呈圆锥形, 姿态优美, 枝叶繁茂, 入秋后叶色金黄。自发现后被人们在中国南方广泛种植, 成为著名的绿化观赏植物, 现在中国水杉的子孙已遍及中国和世界 50 多个国家和地区。

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



DOI: 10.5846/stxb201111151734

魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.

Wei Q, Ling L, Chai C S, Zhang G Z, Yan P B, Tao J X, Xue R. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4700-4713.

## 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质

魏 强<sup>1,\*</sup>, 凌 雷<sup>1</sup>, 柴春山<sup>1</sup>, 张广忠<sup>1</sup>, 闫沛斌<sup>2</sup>, 陶继新<sup>2</sup>, 薛 睿<sup>1</sup>

(1. 甘肃省林业科学研究院, 兰州 730020; 2. 甘肃省兴隆山国家级自然保护区管理局, 兰州 730117)

**摘要:**在森林群落恢复演替过程中, 由于森林类型及其所处立地环境不同, 森林与土壤相互作用过程具有复杂性。以甘肃兴隆山 6 种森林类型(青杆林、青杆-白桦林、山杨-白桦林、灌丛林、落叶松林和油松林)0—60 cm 土壤层为研究对象, 探讨森林恢复演替过程中土壤理化性质的变化规律, 旨在为该区域退化森林生态系统恢复与重建提供依据。结果表明: 1) 在土壤剖面上, 兴隆山森林土壤容重随深度的增加而逐渐增大, 总孔隙度、毛管孔隙度、自然含水量、最大持水量、毛管持水量、田间持水量均随深度的增加而减小; pH 值差异不显著, 无明显变化规律; 土壤有机质、全 N、水解 N、有效 P、速效 K 均随深度的增加而变小, 表聚效应明显; 全 P 差异不显著, 呈“圆柱体”分布模式; 2) 在森林恢复演替过程中, 天然林容重、孔隙度、持水能力、渗透性明显好于人工林, 随森林正向演替的进行, 天然林容重不断减少, 孔隙度明显改善, 通透性能不断增强, 而人工林土壤物理性质出现明显退化现象; 天然林 pH 值在演替方向上并未表现出酸化现象; 天然林土壤有机质、全 N、水解 N、有效 P 和速效 K 变化规律不明显, 但总的变化趋势为先增加后减小; 3) 有机质与全 N、水解 N、最大持水量、毛管持水量、田间持水量呈显著正相关, 而与容重呈显著负相关; 全 N 与水解 N 呈显著正相关; 土壤有机质在改善土壤理化性质和促进养分循环方面具有重要作用, 已成为植被恢复过程中土壤变化的一个重要标志。

**关键词:**土壤理化特性; 天然林; 人工林; 森林演替; 兴隆山

## Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu

WEI Qiang<sup>1,\*</sup>, LING Lei<sup>1</sup>, CHAI Chunshan<sup>1</sup>, ZHANG Guangzhong<sup>1</sup>, YAN Peibin<sup>2</sup>, TAO Jixing<sup>2</sup>, XUE Rui<sup>1</sup>

1 Gansu Provincial Academy of Forestry Sciences, Lanzhou 730020, China

2 Administration Bureau of Xinglong Mountain National Nature Reserve of Gansu, Lanzhou 730117, China

**Abstract:** The interactions between forest and soil are complex in the process of forest community succession and recovery due to the difference in forest types and site environment conditions. In this study, we selected the Xinglong Mountain located in Gansu province as study area to quantify the response of soil properties to the forest succession and recovery processes. Soil physical and chemical properties in depth of 0—60 cm layers under 6 main forest covers including *Picea wilsonii* pure forest, *Larix principis-rupprechtii* pure forest, *Pinus tabulaeformis* pure forest, *Picea wilsonii* and *Betula platyphlla* mixed forest, *Populus davidiana* and *Betula platyphlla* mixed forest, *Cotoneaster multiglorus* and *Rosa xanthina* mixed shrubs were analyzed, based on field sampling and laboratory test. The results showed that: (1) The value of bulk density in forest soil of Xinglong Mountain increased with the increasing of soil depth in the 0—60cm soil layers, while the soil physical properties including the soil porosity, capillary porosity, soil water content, field maximum water capacity, capillary water capacity and field capacity were all decreasing with the increasing of soil depth in these layers. However, no significant difference of pH value was detected in the 0—60 cm soil profile. The value of soil chemical properties containing

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160180); 甘肃省自然科学基金项目(096RJZA025)

收稿日期: 2011-11-15; 修订日期: 2012-04-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1974weiqiang@163.com

the soil organic matter, total nitrogen (TN), hydrolysable nitrogen (HN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) decreased with the increasing of soil depth. Profile distribution characteristics of soil chemical properties showed obvious accumulation effect in the top soil layers. However, no significant difference of total phosphorus (TP) had been found in the top and deeper soil layers. The profile distribution of total phosphorus appeared a “cylinder” distribution pattern. (2) The bulk density, soil porosity, soil water holding capacity and soil penetrability in natural forest were obviously better than that in artificial forest during the processes of forest succession and restoration. The bulk density in natural forest was gradually degrading, but the soil porosity and soil perviousness were enhancing with the positive succession of natural forest community. Nonetheless, compared with the dynamics of soil properties in natural forest, the soil physical properties in artificial forest presented an obviously degeneration in the entire soil profile. No obvious acidification phenomenon was detected during the succession of natural forest by pH value test. Furthermore, no obvious change in soil chemical properties including soil organic matter, total nitrogen, hydrolysable nitrogen, available phosphorus and available potassium had been found during this process. Generally, the trend of soil chemical properties in natural forest was that the value increased in early stage but decreased in latter period. (3) The observation in this study showed a significant positive correlation between soil organic matter and total nitrogen, hydrolysable nitrogen, field maximum water capacity, capillary water capacity and field capacity. The correlation analysis showed the total nitrogen also had a significant positive correlation with hydrolysable nitrogen, the soil organic matter on the other hand showed a significant negative correlation with soil bulk density. These findings indicated that the soil organic matter played an important role in improving soil physical and chemical properties as well as promoting the soil nutrient cycling. For practice, the soil organic matter can be employed as an indicator of soil properties change during the process of vegetation restoration. The results of this study can provide scientific guidance for the restoration of degenerated forest ecosystem in this area.

**Key Words:** soil physical and chemical properties; natural forest; artificial forest; forest succession; Xinglong Mountain

土壤和植被是陆地生态系统的重要组成部分,是植物群落更新演替过程中不可或缺的研究内容。其中,土壤是生态系统中诸多生态过程的载体,并随植被演替的进行总是在不断地发生变化<sup>[1]</sup>。在植物群落演替过程中,土壤与植物相互影响,不同植物群落将导致其生长地土壤化学性质的不同,而不同土壤养分状况又会作用于群落内的许多生态过程<sup>[2]</sup>,并间接影响到地上植被的演替进程。在一定程度上,植物群落的进展演替也是土壤养分不断积累、物理性能不断改善的过程<sup>[3]</sup>。由于植被与土壤相互作用具有复杂性,两者之间相互影响过程及机理还不十分清楚,因此土壤与植被的互动过程便成为近年来土壤生态研究的热点问题之一<sup>[4]</sup>。通过对特定环境条件下森林群落演替过程中土壤理化性质变化的研究,将有助于认识森林演变过程中地上与地下相互作用关系及机理、森林、土壤整个生态系统过程,进而为实现人工调控森林更新演替的进程提供科学依据。

甘肃兴隆山森林位于黄土高原最西端与祁连山东延余脉的交汇处,是以黄土和石质山地为主要成土母质、在降水量不足条件下发育而成的隐域森林,主要分布于坡度>25°的阴坡及半阴坡。兴隆山森林是兰州市天然的生态屏障,对于兰州及周边地区在涵养水源、保持水土、调节气候、改善空气质量等方面具有不可替代的作用。近年来,该地区森林植被得到了有效保护,植被覆盖度有了明显增加,森林生态功能也有了显著提高。但森林植被经过较长时期的更新演替后,林下土壤理化性质及变化趋势如何,地上森林演替又怎样影响地下土壤的演变,以及构建怎样的森林植被才有利于该区域土壤性质的改善等问题,迄今为止,该方面尚缺乏研究。为此,以兴隆山原始青杆纯林、天然青杆-白桦针阔混交林、天然次生山杨-白桦阔叶混交林、天然次生灌丛林、落叶松人工纯林和油松人工纯林6种典型森林类型为研究对象,探讨森林演变过程中土壤理化性质变化及地上森林与地下土壤相互作用过程,以期为该区域退化森林生态系统的快速恢复与重建提供依据。

## 1 研究区域概况

甘肃兴隆山国家级自然保护区位于兰州市东南约 45 km 处 ( $103^{\circ}50'—104^{\circ}10' E, 35^{\circ}38'—35^{\circ}58' N$ ), 属于祁连山的东延余脉, 东西长 37 km、南北宽 17 km, 总面积 33301  $hm^2$ , 包括兴隆山全部和马啣山北麓, 海拔 1800—3670 m, 是黄土高原最西端的一颗绿色岩岛。本区域属于温带半湿润半干旱气候类型, 受地形及海拔高度的影响, 研究区内气候差异较大, 在海拔 <1800 m 区域, 年均降水量 350 mm; 海拔在 1800—2600 m 区域, 年降水量为 400—600 mm; 海拔在 2600—3000 m 区域, 年降水量为 600—800 mm。地貌以石质山地和山间谷地为主要特征, 土壤由高山草甸土、亚高山草甸土、灰褐土、栗钙土、黄绵土、新积土组成。保护区内植物种类繁多且垂直地带分布规律极为明显, 森林类型主要有寒温性针叶林、落叶阔叶林、落叶阔叶灌丛林和常绿阔叶灌丛林, 其中原始青杆林分布较广, 平均年龄达 100—200a, 是主要群系, 生态系统较为稳定<sup>[5]</sup>。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 研究材料

原始青杆纯林: 简称青杆林 ( $S_1$ ), 乔木层由青杆 (*Picea wilsonii*) 组成; 灌木层由华西箭竹 (*Fargesia nitida*)、红毛五茄 (*Eleutherococcus giraldii*)、山生柳 (*Salix oritrepha*) 等组成。天然青杆-白桦针阔混交林: 简称青杆-白桦林 ( $S_2$ ), 乔木层由青杆和白桦 (*Betula platyphlla*) 组成, 树种组成比例为 7 青杆+3 白桦; 灌木层由华西箭竹、红毛五茄、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、陕甘花楸 (*Sorbus koeheana*)、甘肃小檗 (*Berberis kansuensis*) 等组成。天然次生山杨-白桦阔叶混交林: 简称山杨-白桦林 ( $S_3$ ), 乔木层由白桦、山杨 (*Populus davidiana*) 和辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 组成, 树种组成比例为 5 山杨+4 辽东栎+1 白桦; 灌木层由华西箭竹、鞘柄菝葜 (*Smilax stans*)、淫羊藿 (*Epimedium brevicornum*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*)、刺毛樱桃 (*Cerasus setulosa*)、蒙古荚迷 (*Viburnum mongolicum*) 等组成。天然次生灌丛林: 简称灌丛林 ( $S_4$ ), 灌木层由水栒子 (*Cotoneaster multiflorus*)、黄刺玫、蒙古荚迷、甘肃小檗、高山绣线菊 (*Spiraea alpina*)、葱皮忍冬 (*Lonicera ferdinandii*) 等组成, 树种组成比例为 4 水栒子+2 黄刺玫+1 蒙古荚迷+1 甘肃小檗+1 高山绣线菊。油松人工纯林: 简称油松林 ( $S_5$ ), 乔木层由油松 (*Pinus tabulaeformis*) 组成; 灌木层由黄刺玫、甘肃小檗、水栒子、高山绣线菊等组成。落叶松人工纯林: 简称落叶松林 ( $S_6$ ), 乔木层由华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 组成; 灌木层由水栒子、虎榛子、甘肃山楂 (*Crataegus kansuensis*)、陕甘花楸等组成。6 种森林中, 灌丛林、山杨-白桦林、青杆-白桦林和青杆林是森林正向演替过程中所处的不同阶段, 演替序列由低到高; 落叶松和油松林分别是阴坡、阳坡灌丛林抚育改造的两种主要模式。兴隆山 6 种森林类型详细情况见表 1。

表 1 林地基本概况

Table 1 Basic condition of different forest types

| 森林类型<br>Forest type | 郁闭度<br>或盖度<br>Canopy<br>density or<br>Coverage/% | 海拔<br>Elevation/m | 坡向<br>Aspect | 坡度<br>Slope/(°) | 林龄<br>Age<br>/a | 平均胸径<br>Mean breast<br>diameter/cm | 平均高<br>Mean<br>high/m | 林分密度<br>Stand<br>density<br>/(株/ $hm^2$ ) | 土壤类型<br>Soil type |
|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------|
| $S_1$               | 0.85                                             | 2475              | N            | 30              | 65              | 11.10                              | 12.65                 | 1475                                      | 淋溶灰褐土             |
| $S_2$               | 0.65                                             | 2477              | NW25°        | 44              | 41              | 17.40                              | 6.70                  | 850                                       | 淋溶灰褐土             |
| $S_3$               | 0.80                                             | 2238              | NW10°        | 35              | 46              | 8.40                               | 12.92                 | 2350                                      | 灰褐土               |
| $S_4$               | 95.00                                            | 2333              | NE70°        | 41              |                 |                                    | 1.80                  |                                           | 灰褐土               |
| $S_5$               | 0.65                                             | 2293              | S            | 23              | 25              | 8.50                               | 7.80                  | 4825                                      | 石灰性灰褐土            |
| $S_6$               | 0.65                                             | 2389              | NW15°        | 30              | 23              | 15.50                              | 13.30                 | 2050                                      | 灰褐土               |

$S_1$ : 青杆林 *Picea wilsonii* forest;  $S_2$ : 青杆-白桦林 *Picea wilsonii* and *Betula platyphlla* forest;  $S_3$ : 山杨-白桦林 *Populus davidiana* and *Betula platyphlla* forest;  $S_4$ : 灌丛林 *Cotoneaster multiglous* and *Rosa xanthina* shrubs forest;  $S_5$ : 油松林 *Pinus tabulaeformis* forest;  $S_6$ : 落叶松林 *Larix principis-rupprechtii* forest. 下同 The same below

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 土壤样品采集

在对兴隆山森林详细踏查的基础上,选择6种主要森林为研究对象,每种林分各选5个标准样地(20 m × 20 m 正方形),调查环境与林分因子(表1),林分起测高1.5 m、胸径2.0 cm。然后在各林分5个标准样地中,选1个具有代表性样地,在样地中心按走蛇形方式各选3个采样点,各点间距在5 m之内,用环刀分层(0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm)取样,每层3次重复,做为物理性质测试样品;每个采样点分层取样0.5 kg,将各采样点每层3个土样均匀混合,后取1.0 kg混合样品装入土壤袋,做为化学性质测试样品。研究区域森林植被根系主要分布在0—60 cm土壤层中,因此以0—60 cm土壤层作为研究对象。

### 2.2.2 土壤物理性质测定

容重测定采用环刀法;总孔隙度用 $p_t = 93.947 - 32.995 \times b$ 来计算, $b$ 为容重, $p_t$ 为总孔隙度;毛管孔隙度测定采用环刀法;非毛管孔隙度用 $p_o = p_t - p_c$ 来计算, $p_o$ 为非毛管孔隙度, $p_c$ 为毛管孔隙度;入渗特性测定采用双环渗透法。以上分析方法见森林土壤分析方法<sup>[6]</sup>。

### 2.2.3 土壤化学性质测定

pH值采用2.5:1的水土比,用电位计法测定;有机质采用硫酸重铬酸钾氧化为容量法测定;全N采用硫酸钾为硫酸铜为硒粉消煮,定氮仪自动分析法测定;水解N采用碱解扩散法测定;全P采用硫酸为高氯酸消煮为钼锑抗比色法测定;有效P采用碳酸氢钠浸提为钼锑抗比色法测定;全K采用氢氟酸为高氯酸消煮火焰光度计法测定;速效K采用中性乙酸铵提取为火焰光度计法测定。以上分析方法见土壤农业化学分析方法<sup>[7]</sup>。

## 2.3 数据处理

采用Excel软件进行绘图,利用SAS 9.0分析软件进行统计分析和相关性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同森林类型的土壤物理性质

#### 3.1.1 土壤容重

土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标,表征土壤的疏松程度与通气性,是土壤质量的一个重要参数,其值大小与土壤的通气性、透水性和根系生长阻力有关<sup>[8]</sup>。兴隆山6种森林在土壤剖面上容重差异显著,40—60 cm分别是20—40 cm、10—20 cm、0—10 cm的1.16倍、1.37倍和1.67倍,变化规律随深度的变深而不断增大。不同森林类型间容重差异显著,均值0.562—1.181 g/cm<sup>3</sup>,油松林>灌丛林>山杨-白桦林>落叶松林>青杆林>青杆-白桦林;天然林随正向演替的进行,容重先变小后增大,处于演替后期的青杆-白桦林最小(表2)。

#### 3.1.2 土壤孔隙度

土壤孔隙状况直接影响着土壤的通气透水性及根系穿插的难易程度,对土壤中水、肥、气、热以及生物活性等发挥着不同的作用<sup>[9]</sup>。从表2看出,兴隆山6种森林在土壤剖面上总孔隙度差异显著,均值58.386%—72.656%,变化规律随深度的增加而减少。不同森林类型间总孔隙度差异显著,均值54.990%—75.402%,青杆-白桦林>青杆林>落叶松林>山杨-白桦林>灌丛林>油松林;天然林随森林正向演替的进行,总孔隙度先增加后减小。

兴隆山6种森林在土壤剖面上毛管孔隙度差异显著,均值50.677%—58.511%,变化趋势随深度的变深而不断减小;不同森林类型间其差异显著,青杆-白桦林最大(60.606%),油松林最小(47.743%)。

不同森林在土壤剖面上非毛管孔隙度差异显著(表2),变化趋势随土壤深度的变深先减少后增加,0—10 cm是其它土层的2.0倍;6种森林类型间其差异显著,青杆-白桦林>青杆林>山杨-白桦林>灌丛林>油松林>落叶松林,青杆-白桦林是落叶松林的2.2倍;人工林明显低于天然林,天然林随森林正向演替的进行,其值先增加后减小。



表2 不同森林类型的土壤物理性质

Table 2 Physical properties of different soil horizons in different forest types

| 森林类型或土层厚度<br>Forest type or soil layer/cm |       | 容重<br>Bulk density / (g/cm <sup>3</sup> ) | 毛管孔隙度<br>Capillary porosity/%       | 非毛管孔隙度<br>Non- capillary porosity/% | 总孔隙度<br>Total porosity/%            |
|-------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| S1                                        | 0—10  | 0.359±0.058Cd                             | 69.546±5.182Aa                      | 15.823±5.956Aab                     | 82.095±1.903Aa                      |
|                                           | 10—20 | 0.449±0.053Cc                             | 62.042±1.259Ab                      | 17.836±0.443Aa                      | 79.135±1.762Ab                      |
|                                           | 20—40 | 0.676±0.022Bb                             | 60.521±0.707Ab                      | 11.226±0.268Aab                     | 71.630±0.718Bc                      |
|                                           | 40—60 | 1.194±0.035Aa                             | 44.347±1.360Bc                      | 10.210±0.616Ab                      | 54.557±1.158Cd                      |
| S2                                        | 0—10  | 0.363±0.081Bc                             | 47.602±3.359Bb                      | 35.866±2.386Aa                      | 81.976±2.673Aa                      |
|                                           | 10—20 | 0.493±0.022Bb                             | 65.372±0.340Aa                      | 12.713±0.660Bb                      | 77.691±0.719Ab                      |
|                                           | 20—40 | 0.675±0.043Aa                             | 64.646±2.403Aa                      | 7.017±1.217Cc                       | 71.663±1.438Bc                      |
|                                           | 40—60 | 0.717±0.020Aa                             | 62.056±0.734Aa                      | 8.222±0.693Cc                       | 70.278±0.659Bc                      |
| S3                                        | 0—10  | 0.628±0.008Bc                             | 60.851±4.667Aa                      | 14.771±3.005Aa                      | 73.224±0.266Aa                      |
|                                           | 10—20 | 0.771±0.041Bb                             | 61.113±1.339Aa                      | 6.861±0.002Ab                       | 68.509±1.327Ab                      |
|                                           | 20—40 | 1.075±0.058Aa                             | 50.240±0.797Bb                      | 8.235±2.305Aab                      | 58.475±1.907Bc                      |
|                                           | 40—60 | 1.158±0.124Aa                             | 44.652±2.154Bb                      | 13.555±4.755Aab                     | 55.725±4.102Bc                      |
| S4                                        | 0—10  | 0.825±0.031Cd                             | 55.822±0.584Aa                      | 10.905±1.591Aa                      | 66.727±1.041Aa                      |
|                                           | 10—20 | 0.920±0.032Bc                             | 55.908±2.189Aa                      | 6.045±0.847Bb                       | 63.581±1.056Bb                      |
|                                           | 20—40 | 1.004±0.018Ab                             | 54.068±0.557Aab                     | 6.760±0.958Bb                       | 60.828±0.594Cc                      |
|                                           | 40—60 | 1.078±0.027Aa                             | 53.458±0.505Ab                      | 5.493±0.170Bb                       | 58.377±0.886Cd                      |
| S5                                        | 0—10  | 0.985±0.071Bc                             | 48.980±1.748Aa                      | 14.795±0.811Aa                      | 61.444±2.337Aa                      |
|                                           | 10—20 | 1.290±0.038Aa                             | 47.758±1.341Aa                      | 3.630±1.698Bc                       | 51.388±1.260Bc                      |
|                                           | 20—40 | 1.153±0.028ABb                            | 48.374±0.699Aa                      | 7.530±1.620Bb                       | 55.904±0.940ABb                     |
|                                           | 40—60 | 1.295±0.091Aa                             | 45.858±2.680Aa                      | 5.368±1.313Bbc                      | 51.226±2.990Bc                      |
| S6                                        | 0—10  | 0.712±0.056Bb                             | 64.631±1.830Aa                      | 7.396±0.646Aa                       | 70.467±1.822Aa                      |
|                                           | 10—20 | 0.782±0.038Bb                             | 62.869±0.596Aa                      | 5.274±0.892Aa                       | 68.143±1.279Aa                      |
|                                           | 20—40 | 0.989±0.084Aa                             | 52.651±0.701Bb                      | 7.047±0.777Aab                      | 61.300±2.778Bb                      |
|                                           | 40—60 | 1.024±0.046Aa                             | 53.690±1.548Bb                      | 6.464±0.284Ab                       | 60.154±1.535Bb                      |
| 森林类型<br>Forest type                       | S1    | 0.670±0.341Cc                             | 58.681±10.850ABab                   | 13.377±3.993Aa                      | 71.854±11.235Ab                     |
|                                           | S2    | 0.562±0.155Cd                             | 60.606±7.172Aa                      | 14.287±11.620Aa                     | 75.402±5.102Aa                      |
|                                           | S3    | 0.908±0.234Bb                             | 53.587±7.750BCc                     | 10.564±4.172ABab                    | 63.983±7.733Bc                      |
|                                           | S4    | 0.957±0.101Bb                             | 54.814±1.514ABc                     | 7.607±2.500Bb                       | 62.378±3.344Bc                      |
|                                           | S5    | 1.181±0.142Aa                             | 47.743±1.942Cd                      | 7.197±4.232Bb                       | 54.990±4.697Cd                      |
|                                           | S6    | 0.877±0.148Bb                             | 58.988±5.638ABab                    | 6.410±1.023Bb                       | 65.016±4.870Bc                      |
| 土壤层<br>Soil layer/cm                      | 0—10  | 0.645±0.240Dd                             | 58.511±8.472Aa                      | 16.155±9.475Aa                      | 72.656±7.923Aa                      |
|                                           | 10—20 | 0.784±0.290Cc                             | 58.444±6.404Aa                      | 8.116±5.086Bb                       | 68.075±9.580Bb                      |
|                                           | 20—40 | 0.929±0.196Bb                             | 54.896±6.157ABa                     | 7.823±1.858Bb                       | 63.300±6.475Cc                      |
|                                           | 40—60 | 1.077±0.196Aa                             | 50.677±6.736Bb                      | 8.055±3.018Bb                       | 58.386±6.481Dd                      |
| 森林类型或土层厚度<br>Forest type or soil layer/cm |       | 最大持水量/%<br>Maximum water capacity         | 毛管持水量/%<br>Capillary water capacity | 田间持水量/%<br>Field capacity           | 自然水分含量/%<br>Nature moisture content |
| S1                                        | 0—10  | 237.291±40.771Aa                          | 177.529±3.219Aa                     | 167.997±8.340Aa                     | 42.136±4.654Aa                      |
|                                           | 10—20 | 160.406±7.852Bb                           | 143.299±4.445Bb                     | 127.878±4.166Bb                     | 32.646±2.056Bb                      |
|                                           | 20—40 | 108.001±4.199BCc                          | 77.970±4.567Cc                      | 66.099±2.581Cc                      | 29.920±1.256Bb                      |
|                                           | 40—60 | 46.185±2.096Cd                            | 28.979±3.371Dd                      | 23.068±3.415Dd                      | 15.057±1.481Cc                      |
| S2                                        | 0—10  | 225.119±47.722Aa                          | 168.947±9.974Aa                     | 114.125±0.173Aa                     | 35.929±2.400Aa                      |
|                                           | 10—20 | 159.989±9.417ABb                          | 138.453±2.989Bb                     | 125.713±1.909Bb                     | 31.673±1.494ABb                     |
|                                           | 20—40 | 105.085±10.537Bc                          | 87.727±5.366Cc                      | 77.306±5.174Cc                      | 30.713±1.205Bb                      |

| 续表                                        |       |                                   |                                     |                           |                                     |
|-------------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 森林类型或土层厚度<br>Forest type or soil layer/cm |       | 最大持水量/%<br>Maximum water capacity | 毛管持水量/%<br>Capillary water capacity | 田间持水量/%<br>Field capacity | 自然水分含量/%<br>Nature moisture content |
| S3                                        | 40—60 | 98.271±3.608Bc                    | 80.495±6.505Cc                      | 68.321±3.054Cd            | 29.611±1.951Bb                      |
|                                           | 0—10  | 116.777±1.629Aa                   | 93.005±4.430Aa                      | 75.591±2.954Aa            | 22.130±1.850Aa                      |
|                                           | 10—20 | 85.975±5.933Bb                    | 65.806±6.521Bb                      | 52.466±6.358Bb            | 18.343±0.925Bb                      |
|                                           | 20—40 | 51.012±4.935Cb                    | 43.963±3.621Cc                      | 35.917±4.260Cc            | 12.138±0.981Cc                      |
| S4                                        | 40—60 | 45.200±5.519Cb                    | 35.478±2.559Cc                      | 27.429±2.290Cd            | 11.383±0.886Cc                      |
|                                           | 0—10  | 80.916±4.853Aa                    | 64.086±2.082Aa                      | 54.502±3.881Aa            | 13.905±0.115Aa                      |
|                                           | 10—20 | 69.472±4.035Bb                    | 53.620±3.210Bb                      | 42.970±3.375Bb            | 12.635±0.489Bb                      |
|                                           | 20—40 | 59.787±0.872Cc                    | 49.867±2.742Bbc                     | 40.946±4.045Bb            | 11.326±0.086Cc                      |
| S5                                        | 40—60 | 53.424±2.070Cd                    | 46.740±1.019Bc                      | 38.071±1.731Bb            | 10.881±0.219Cc                      |
|                                           | 0—10  | 60.048±5.376Aa                    | 51.022±2.803Aa                      | 41.405±1.954Aa            | 6.404±0.065Bb                       |
|                                           | 10—20 | 40.266±2.207BCc                   | 36.389±1.129BCb                     | 29.361±1.249Bb            | 9.826±0.209Aa                       |
|                                           | 20—40 | 48.397±1.785Bb                    | 40.224±2.338Bb                      | 30.641±1.696Bb            | 10.320±0.194Aa                      |
| S6                                        | 40—60 | 36.113±1.047Cc                    | 30.725±0.053Cc                      | 27.888±5.887Bb            | 9.847±1.033Aa                       |
|                                           | 0—10  | 104.464±5.464Aa                   | 91.629±0.549Aa                      | 71.499±5.486Aa            | 24.334±0.281Bb                      |
|                                           | 10—20 | 83.315±5.195Bb                    | 77.279±4.775Bb                      | 66.472±3.555Aa            | 27.271±0.636Aa                      |
|                                           | 20—40 | 52.339±0.640Cc                    | 49.381±0.769Cc                      | 43.294±0.021Bb            | 23.478±1.090Bb                      |
| 森林类型<br>Forest type                       | 40—60 | 51.626±0.102Cc                    | 49.249±3.410Cc                      | 42.473±2.588Bb            | 24.109±0.211Bb                      |
|                                           | S1    | 135.931±78.711Aa                  | 96.250±59.920Ab                     | 93.386±60.283Aa           | 29.940±10.410Aa                     |
|                                           | S2    | 147.116±57.357Aa                  | 114.356±36.782Aa                    | 94.752±25.913Aa           | 31.981±2.942Aa                      |
|                                           | S3    | 74.741±30.410Bb                   | 59.563±23.560BCc                    | 47.851±19.531BCbc         | 15.998±4.767Cc                      |
|                                           | S4    | 65.900±11.215Bbc                  | 52.623±6.591BCcd                    | 43.178±6.529BCbc          | 12.187±1.259CDd                     |
|                                           | S5    | 47.123±9.821Bc                    | 40.396±7.767Cd                      | 32.324±6.230Cc            | 9.099±1.701Dd                       |
| 土壤层<br>Soil layer/cm                      | S6    | 74.089±22.749Bb                   | 66.160±18.735Bc                     | 57.084±14.169Bb           | 24.798±1.626Bb                      |
|                                           | 0—10  | 139.376±75.804Aa                  | 102.605±49.354Aa                    | 87.920±45.343Aa           | 24.140±12.650Aa                     |
|                                           | 10—20 | 96.345±45.551Bb                   | 82.426±40.908Bb                     | 70.983±38.937Ab           | 22.066±9.292ABab                    |
|                                           | 20—40 | 71.854±27.041BCc                  | 58.706±19.165Cc                     | 49.371±18.036Bc           | 19.649±8.998BCb                     |
|                                           | 40—60 | 56.545±21.524Cc                   | 46.134±18.399Cc                     | 37.875±15.849Bc           | 16.815±7.730Cc                      |

经 Duncan 多重比较,不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平下差异显著;不同大写字母表示在  $P<0.01$  水平下差异显著;反之,差异不显著

3.1.3 土壤自然含水量及持水状况

(1) 土壤自然含水量

研究发现,兴隆山不同森林各土层间自然含水量差异显著,变化规律各异(表2),天然林随深度的变深而减小,人工林随深度的变深先增加后变小;不同森林类型间差异显著,均值9.099%—31.981%,青杆-白桦林最大,油松林最小;天然林随正向演替的进行,其值先增加后减小。

(2) 土壤持水状况

从表2看出,6种森林在土壤剖面上最大持水量差异显著,均值从上到下依次为139.376%、96.345%、71.854%和56.545%,变化规律随深度的增加而减小。不同森林类型间最大持水量差异显著,青杆-白桦林最大,油松林最小,青杆-白桦林是油松林的3.12倍;天然林随森林正向演替的进行,其值先增加后减小。

对于毛管持水量和田间持水量,不同森林类型下各土层间差异显著(表2),变化规律均随深度的增加而不断减少;6种森林类型间其差异显著,青杆-白桦林>青杆林>落叶松林>山杨-白桦林>灌丛林>油松林;天然林随森林正向演替的进行,其值先增加后减小。

3.1.4 土壤渗透性

土壤渗透性是土壤理水调洪功能极为重要的特征参数之一,是将地表径流转化为壤中流、地下径流的能



力,对土壤水土保持及水源涵养功能影响极大<sup>[10]</sup>。对于土壤初渗速率和稳渗速率,兴隆山 6 种森林不同土层间变化规律各不相同(图 1),白桦-山杨林、油松林和落叶松林均随深度的增加而减小,青杆林均随深度的增加先增加后减小,青杆-白桦林和灌丛林均随深度的增加先减小后增加。青杆林、青杆-白桦林和山杨-白桦林土壤渗透特性较好,各土壤层间差别比较明显;灌丛林、落叶松林、油松林土壤渗透特性较差,渗透速率均在 8 mm/min 以下,不同土层间差别不明显。由以上可见,兴隆山 6 种森林土壤渗透性差别较大,青杆林、青杆-白桦林和山杨-白桦林较好,其它居中,油松林较差。

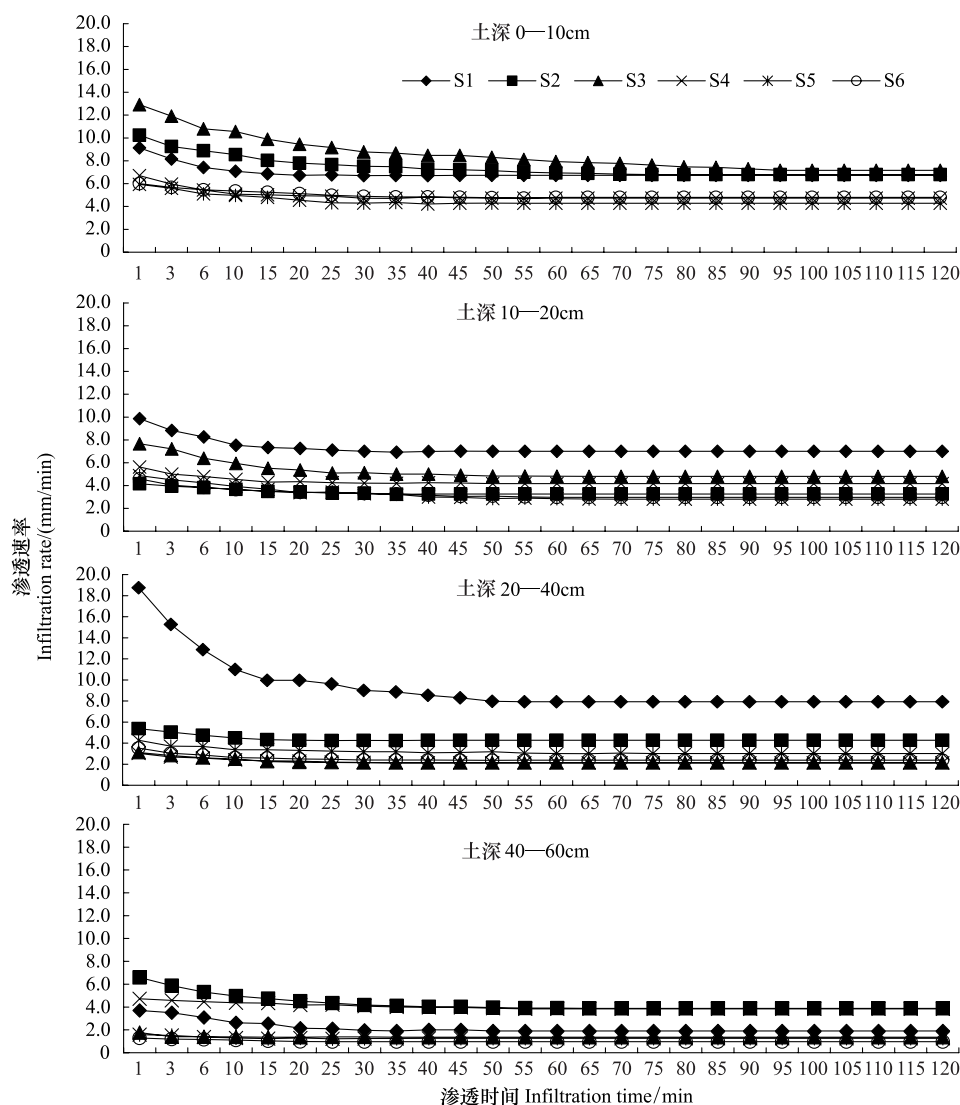


图 1 不同森林类型的土壤渗透过程

Fig. 1 Process of soil infiltration of forest types

### 3.2 不同森林类型的土壤化学性质

#### 3.2.1 土壤有机质及 pH 值

##### (1) 土壤有机质

土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分,它与土壤矿物质共同作为林木营养的来源,直接影响和改变土壤的一系列物理、化学和生物学性质<sup>[9]</sup>。研究表明(图 2),兴隆山 6 种森林不同土层间有机质差别较大,变化趋势随土壤深度的加深而减小;6 种森林间差异显著(表 3),均值 38.713—134.043 g/kg,青杆-白桦林>青杆林>落叶松林>灌丛林>油松林>山杨-白桦林;整体上兴隆山森林各土层间差异显著(表 3),均值 36.447—106.748 g/kg,表层明显大于深层,土壤有机质表聚效应明显。

表 3 不同森林类型的土壤化学性质

Table 3 Chemistry properties of different soil horizons in different forest types

| 因子<br>Factors        |       | pH                                     | 有机质含量/(g/kg)<br>Organic matter content       | 全 N/(g/kg)<br>Total nitrogen contents         | 全 P/(g/kg)<br>Total phosphorus contents      |
|----------------------|-------|----------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 森林类型<br>Forest type  | S1    | 7.195±0.205Cc                          | 95.490±69.992ABb                             | 4.983±3.727Bb                                 | 2.106±0.171Aa                                |
|                      | S2    | 7.386±0.095Bb                          | 134.043±29.854Aa                             | 7.373±1.339Aa                                 | 2.370±0.287Aa                                |
|                      | S3    | 7.460±0.014ABab                        | 38.713±18.403Cc                              | 2.163±1.077Cc                                 | 2.058±0.274Aa                                |
|                      | S4    | 7.430±0.037ABb                         | 71.795±25.085BCb                             | 3.510±1.681BCbc                               | 2.060±0.188Aa                                |
|                      | S5    | 7.475±0.031ABab                        | 39.668±20.253Cc                              | 2.210±1.047Cc                                 | 2.015±0.174Aa                                |
|                      | S6    | 7.590±0.026Aa                          | 73.618±35.015BCb                             | 4.735±2.153Bb                                 | 2.365±0.250Aa                                |
| 土壤层<br>Soil layer/cm | 0—10  | 7.355±0.219Ab                          | 106.748±44.968Aa                             | 5.870±2.141Aa                                 | 2.273±0.234Aa                                |
|                      | 10—20 | 7.410±0.171Aab                         | 96.447±48.732ABa                             | 5.378±2.706Aa                                 | 2.232±0.178Aa                                |
|                      | 20—40 | 7.443±0.099Aab                         | 62.575±33.054BCb                             | 3.363±2.065Bb                                 | 2.073±0.152Aa                                |
|                      | 40—60 | 7.483±0.058Aa                          | 36.447±31.673Cc                              | 2.037±1.799Bb                                 | 2.072±0.379Aa                                |
| 因子<br>Factors        |       | 全 K/(g/kg)<br>Total potassium contents | 水解 N/(mg/kg)<br>Hydrolysis nitrogen contents | 有效 P/(mg/kg)<br>Available phosphorus contents | 速效 K/(mg/kg)<br>Available potassium contents |
| 森林类型<br>Forest type  | S1    | 18.113±2.599 Aa                        | 13.133±7.434Aab                              | 5.665±4.291Aab                                | 80.718±53.539Aab                             |
|                      | S2    | 17.400±0.834 Aa                        | 16.238±2.736Aa                               | 7.055±3.869Aa                                 | 112.853±97.006Aa                             |
|                      | S3    | 17.308±1.175 Aa                        | 5.640±3.297Cc                                | 4.105±2.987Ab                                 | 88.658±85.369Aab                             |
|                      | S4    | 17.283±1.238 Aa                        | 7.423±3.232BCc                               | 4.680±2.256Ab                                 | 99.328±65.922Aab                             |
|                      | S5    | 18.295±0.292 Aa                        | 5.155±2.309Cc                                | 4.440±1.670Ab                                 | 92.740±44.297Aab                             |
|                      | S6    | 17.713±0.573 Aa                        | 11.605±3.382ABb                              | 5.540±3.456Aab                                | 57.660±27.011Ab                              |
| 土壤层<br>Soil layer/cm | 0—10  | 17.295±1.172 Aa                        | 13.265±4.284Aa                               | 8.513±2.089Aa                                 | 178.290±51.379Aa                             |
|                      | 10—20 | 17.218±0.791 Aa                        | 11.408±5.064Aab                              | 6.887±2.092Aa                                 | 77.003±30.827Bb                              |
|                      | 20—40 | 17.602±1.241 Aa                        | 9.372±5.988ABb                               | 3.520±1.052Bb                                 | 51.748±13.613Bb                              |
|                      | 40—60 | 18.625±1.472 Aa                        | 5.417±4.488Bc                                | 2.070±0.614Bb                                 | 47.595±10.763Bb                              |

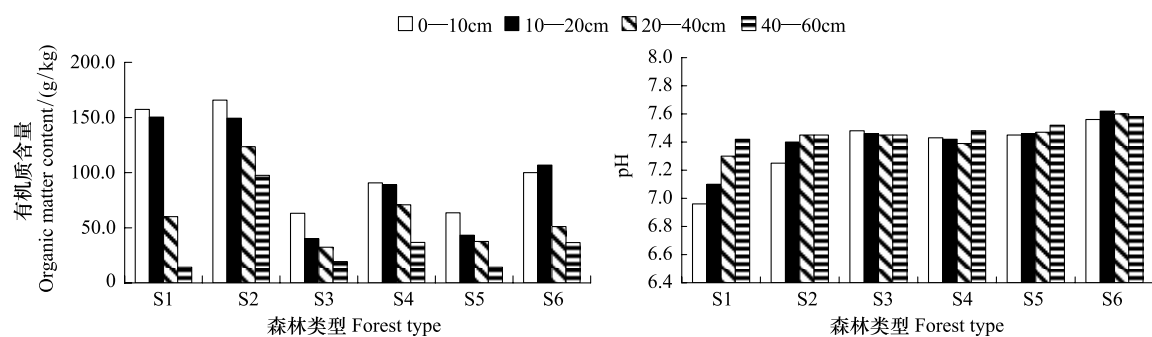


图 2 不同森林类型 0—60cm 土壤 pH 及有机质含量

Fig. 2 Soil pH and organic matter content change in 0—60cm layer under different forest types

## (2) 土壤 pH 值

6 种森林不同土层下 pH 值差别不大(图 2),青杆林和青杆-白桦林随土壤深度的变深而增大,其它森林无明显规律。研究区 6 种森林间 pH 值差异不显著(表 3),均值 7.195—7.590。整体而言,兴隆山森林各土层间 pH 值差异不显著(表 3),均值 7.36—7.48。根据我国土壤酸度分级,研究区土壤属中性土壤。

## 3.2.2 土壤氮素

全氮是土壤 N 素养分的储备指标,在一定程度上说明土壤 N 的供应能力<sup>[11]</sup>;水解 N 能较好地反映出近期内土壤 N 的供应状况和 N 的释放速率。兴隆山 6 种森林不同土层间全 N 差别较大(图 3),变化规律随深度的变深而减小;不同森林间差异显著(表 3),均值 2.163—7.373 g/kg,青杆-白桦林>青杆林>落叶松林>灌

丛林>油松林>山杨-白桦林;天然林在演替方向上变化规律与有机质相一致。对于研究区森林,在土壤剖面上全 N 差异显著(表 3),均值 2.037—5.870 g/kg,表层明显大于深层,土壤全 N 表聚效应明显。

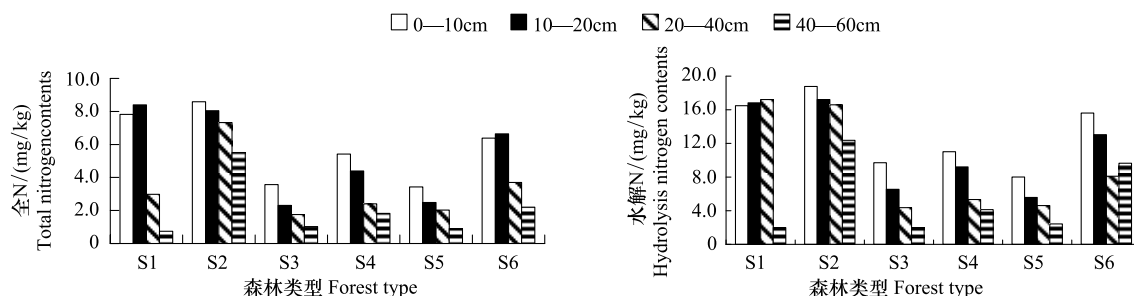


图3 不同森林类型0—60cm土壤全N和水解N

Fig 3 Total nitrogen content and hydrolysis nitrogen content change in 0—60cm layer under different forest types

研究表明,6种森林不同土层间水解N差别较大,变化趋势随深度的变深而减小;不同森林间差异显著(表3),青杆-白桦林(16.238 mg/kg)最大,油松林(5.155 mg/kg)最小。总体上,兴隆山森林在土壤剖面上水解N差异显著(表3),表层明显大于深层,土壤水解N表聚效应明显。

### 3.2.3 土壤磷素

全磷是衡量土壤中各种形态磷总和的一个指标,其值大小受土壤母质、成土作用影响很大,另外与土壤质地和有机质有关系<sup>[12]</sup>。从图4看出,6种森林不同土层间全P差别不大,无明显变化规律;不同森林间差异不显著(表3),均值2.015—2.370 g/kg,该值高于1.0—1.5 g/kg<sup>[13]</sup>,说明本地区土壤中P可以满足林木的正常生长发育。对于兴隆山森林,在土壤剖面上全P差异不显著(表3),全P含量表现为“圆柱体”分布模式。

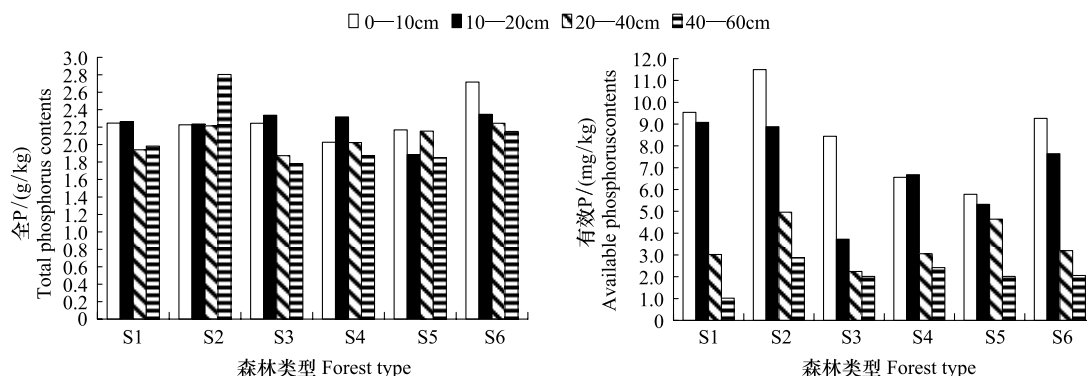


图4 不同森林类型0—60cm土壤全P和有效P

Fig. 4 Total phosphorus content and available phosphorus content change in 0—60cm layer under different forest types

兴隆山6种森林不同土层间有效P差别较大(图4),变化规律随深度的增加而变小;不同森林间差异显著(表3),均值4.105—7.055 mg/kg,基本能满足针叶树和阔叶树的正常生长发育。整体上,研究区森林各土层间有效P差异显著(表3),均值2.070—8.513 mg/kg,表层明显大于深层,土壤有效P表聚效应明显。

### 3.2.4 土壤钾素

土壤钾是植物光合作用、淀粉合成和糖类转化所必需的元素,也是衡量土壤肥力的一个重要指标<sup>[12]</sup>;速效钾是植物能利用的钾,占土壤中K素的极少部分,能真实反映土壤中钾素的供应情况。兴隆山6种森林不同土层间全K差别不大(图5),无明显变化规律;不同森林间差异不显著(表3),均值17.283—18.295 g/kg。就兴隆山森林,在土壤剖面上全K差异不显著(表3),均值17.218—18.625 g/kg。研究区6种森林不同土层间速效K差别较大(图5),变化规律随深度的增加而变小;不同森林间差异显著(表3),均值57.660—112.853 mg/kg,青杆-白桦林>灌丛林>油松林>山杨-白桦林>青杆林>落叶松林;天然林在演替序列上无明显



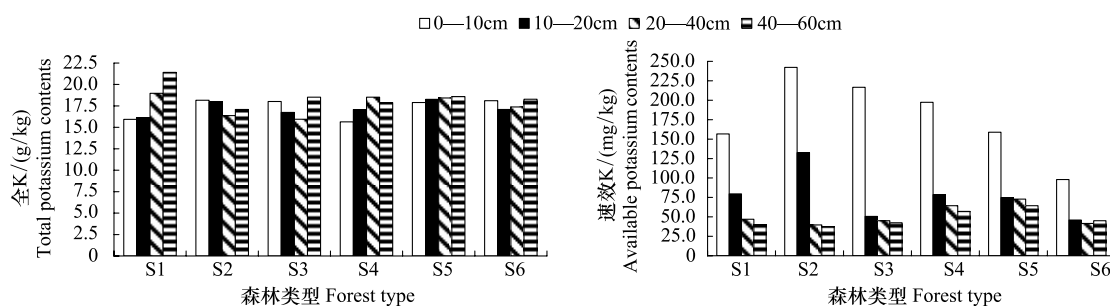


图5 不同森林类型0—60cm 土壤全K和速效K

Fig 5 Total potassium content and available potassium content change in 0—60 cm layer under different forest types

变化规律。从总体上看,兴隆山森林各土层间速效K差异显著(表3),均值为47.595—178.290 mg/kg,表层明显大于深层,土壤速效K表聚效应明显。

### 3.3 兴隆山森林土壤理化特征相关性分析

兴隆山森林0—60 cm 土壤层理化特征相关性分析表明(表4),pH值与有机质、全N、水解N、有效P呈显著负相关性;有机质与容重、全K呈显著负相关性,而与全N、全P、水解N、有效P、速效K、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量呈显著正相关性;全N与全K呈显著负相关性;全N、全P、水解N、有效P间呈显著正相关性;有效P与速效K呈显著正相关性;容重与总孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量呈显著负相关性。由相关性分析看出,土壤有机质与其它理化特征均具有相关性,说明有机质在改善土壤理化性质和促进养分循环方面起着关键作用。

## 4 讨论与结论

土壤是在气候、植被、地形、母质等因子综合作用下形成的,并随着植被演替的进行总是在不断地发生变化。在一定程度上,植物群落的进展演替过程也是土壤养分不断积累、物理性能不断改善的过程<sup>[3]</sup>。由于植被类型及其所处立地环境条件不同,因此在植被群落恢复演替过程中地上植被与地下土壤相互作用过程具有复杂性。

### 4.1 兴隆山森林与土壤物理性质的关系

森林类型不同,导致地表凋落物储量及其构成、树木根系生长发育和凋落物分解速率等均存在一定差异,从而造成不同林分土壤物理性质的不同<sup>[14]</sup>。本研究发现,兴隆山天然林土壤容重、孔隙度明显好于人工林。因天然林是经过多年发育而形成的地带性森林群落,物种多样性丰富,凋落物分解较快,因此在降低容重、增大孔隙度等方面要优于人工林<sup>[15]</sup>。天然林随森林正向演替的进行,容重不断减少,孔隙度明显变大,通透性能不断增强。就其原因,主要是土壤有机质含量不同所致<sup>[16]</sup>。随森林正向演替的进行,林分地表凋落物不断累积并逐渐增厚,土壤中微生物活性受到限制,腐殖质矿化作用减弱,致使土壤中有机质含量不断增加,因此土壤容重、孔隙度和通透性明显得到改善。

土壤水分是森林土壤的一个重要组成部分,它积极参与土壤中物质的转化和代谢过程,并在母岩风化和土壤形成过程中起着重要作用。研究发现,兴隆山森林土壤自然含水量随土壤深度的变深而不断减小,这与方伟东等<sup>[17]</sup>研究结果相似。本研究土壤含水量测定是在8月上旬进行,此时正是当地高温期,已有连续十多天未降雨,土壤含水量仅为毛管孔隙所贮存的水分,而毛管孔隙度随土壤深度的增加而减小;其次,林地地表凋落物层较厚,土壤蒸发量少;所以表层土壤贮存水分较多,并高于深层。不同森林类型间土壤持水能力不同,天然林高于人工林,天然林在演替序列上在不断增强,其原因是土壤总孔隙度和毛管孔隙度不同所致。

土壤渗透性是反映森林土壤水源涵养、理水调洪功能的重要指标<sup>[18]</sup>。青杆林、青杆-白桦林和山杨-白桦林土壤透水性较好;落叶松林和油松林土壤透水性较差,地表容易产生径流,森林水土保持和水源涵养功能较差。产生上述结果的原因是土壤非毛管孔隙度不同所致,因非毛管孔隙度是反映土壤理水调洪能力大小的一

项重要指标<sup>[19]</sup>。

表 4 0—60cm 土壤主要特性的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient among soil properties in six forest types (0—60cm soil layer,  $n=24$ )

|          | $X_1$       | $X_2$       | $X_3$       | $X_4$       | $X_5$       | $X_6$       | $X_7$       |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $X_2$    | -0.57497 ** | 1.00000     |             |             |             |             |             |
| $X_3$    | -0.45921 *  | 0.97924 **  | 1.00000     |             |             |             |             |
| $X_4$    | 0.02877     | 0.52098 **  | 0.58224 **  | 1.00000     |             |             |             |
| $X_5$    | 0.24870     | -0.47106 *  | -0.50413 *  | -0.27069    | 1.00000     |             |             |
| $X_6$    | -0.44775 *  | 0.88679 **  | 0.90326 **  | 0.54351 **  | -0.37331    | 1.00000     |             |
| $X_7$    | -0.43490 *  | 0.83760 **  | 0.83828 **  | 0.45837 *   | -0.35871    | 0.73098 **  | 1.00000     |
| $X_8$    | -0.35572    | 0.49069 *   | 0.45234 *   | 0.10748     | -0.16567    | 0.38820     | 0.73288 **  |
| $X_9$    | 0.59011 **  | -0.88859 ** | -0.87204 ** | -0.54688 ** | 0.43323 *   | -0.90277 ** | -0.76462 ** |
| $X_{10}$ | -0.59012 ** | 0.88868 **  | 0.87211 **  | 0.54688 **  | -0.43300 *  | 0.90275 **  | 0.76490 **  |
| $X_{11}$ | -0.29302    | 0.65410 **  | 0.67769 **  | 0.62254 **  | -0.52559 ** | 0.72968 **  | 0.49403 *   |
| $X_{12}$ | -0.57429 ** | 0.55212 **  | 0.49498 *   | 0.06251     | -0.01274    | 0.47620 *   | 0.58703 **  |
| $X_{13}$ | -0.74949 ** | 0.87548 **  | 0.82504 **  | 0.38035     | -0.32643    | 0.81442 **  | 0.78676 **  |
| $X_{14}$ | -0.70632 ** | 0.91097 **  | 0.87517 **  | 0.42376 *   | -0.37291    | 0.84612 **  | 0.81720 **  |
| $X_{15}$ | -0.73222 ** | 0.89379 **  | 0.85995 **  | 0.40505 *   | -0.42154 *  | 0.82638 **  | 0.76579 **  |
|          | $X_8$       | $X_9$       | $X_{10}$    | $X_{11}$    | $X_{12}$    | $X_{13}$    | $X_{14}$    |
| $X_2$    |             |             |             |             |             |             |             |
| $X_3$    |             |             |             |             |             |             |             |
| $X_4$    |             |             |             |             |             |             |             |
| $X_5$    |             |             |             |             |             |             |             |
| $X_6$    |             |             |             |             |             |             |             |
| $X_7$    |             |             |             |             |             |             |             |
| $X_8$    | 1.00000     |             |             |             |             |             |             |
| $X_9$    | -0.51074 *  | 1.00000     |             |             |             |             |             |
| $X_{10}$ | 0.51101 *   | -1.00000 ** | 1.00000     |             |             |             |             |
| $X_{11}$ | 0.09277     | -0.75491 ** | 0.75483 **  | 1.00000     |             |             |             |
| $X_{12}$ | 0.70627 **  | -0.61045 ** | 0.61056 **  | -0.04707    | 1.00000     |             |             |
| $X_{13}$ | 0.59211 **  | -0.92672 ** | 0.92682 **  | 0.57791 **  | 0.73057 **  | 1.00000     |             |
| $X_{14}$ | 0.56278 **  | -0.94022 ** | 0.94034 **  | 0.62491 **  | 0.69222 **  | 0.98829 **  | 1.00000     |
| $X_{15}$ | 0.48251 *   | -0.91835 ** | 0.91842 **  | 0.70327 **  | 0.57219 **  | 0.95878 **  | 0.97867 **  |

\* \* :表示在  $P < 0.01$  水平上极显著相关; \* :表示在  $P < 0.05$  水平上显著相关;  $X_1$ : pH;  $X_2$ : 有机质 Organic matter content;  $X_3$ : 全 N Total nitrogen contents;  $X_4$ : 全 P Total phosphorus contents;  $X_5$ : 全 K Total potassium contents;  $X_6$ : 水解 N Hydrolysis nitrogen contents;  $X_7$ : 有效 P Available phosphorus contents;  $X_8$ : 速效 K Available potassium contents;  $X_9$ : 容重 Bulk density;  $X_{10}$ : 总孔隙度 Total porosity;  $X_{11}$ : 毛管孔隙度 Capillary porosity;  $X_{12}$ : 非毛管孔隙度 Non- capillary porosity;  $X_{13}$ : 土壤最大持水量 Maximum moisture content;  $X_{14}$ : 毛管持水量 Capillary moisture content;  $X_{15}$ : 田间持水量 Minimum moisture content

在本研究中,油松林在造林前林地土壤与灌丛林基本相似,并且立地条件(坡度、坡向和海拔)相似,但造林后经过 20 多年油松林的生长发育,便出现土壤物理性质明显变差、土壤严重退化现象。就其原因,主要是油松林造林密度大且后期未进行择伐(4825 株/hm<sup>2</sup>)、树种单一、物种多样性明显减少和凋落物分解较慢所致。相比油松林,落叶松林土壤退化现象不如前者明显,主要是落叶松造林后进行过一次择伐,大大降低了林分密度(2050 株/hm<sup>2</sup>)。由此可见,在今后该地区退化森林抚育改造过程中,纯林可引起土壤严重退化,因此应以多树种混交方式营造混交林并进行抚育措施,这样即能提高林分生产力,又可增强森林生态系统的稳定性及保持水土与涵养水源功能。

#### 4.2 兴隆山森林与土壤化学性质的关系

土壤有机质主要来源于植物凋落物,而凋落物性质和数量是影响有机质积累的主要因素<sup>[20-21]</sup>。本研究

表明,兴隆山森林土壤有机质随深度的加深而逐渐变小,土壤有机质表聚效应明显,这与程瑞梅<sup>[22]</sup>、刘鸿雁等<sup>[9]</sup>的研究结果相同。因地表凋落物和植物根系分解所形成的有机碳首先进入土壤表层,致使表层有机碳含量明显高于深层。不同森林类型间有机质含量差异显著,天然林高于人工林;天然林随森林正向演替的进行,土壤有机质总体上在不断增加,这与程瑞梅等<sup>[22]</sup>、宋洪涛等<sup>[23]</sup>、赵世伟等<sup>[16]</sup>等的研究结果相似。随森林的正向演替,森林归还于土壤的凋落物逐渐增多,从而通过凋落物输入土壤的有机质就增多,致使土壤有机质含量呈明显增加的趋势。但本研究中也出现反常现象,如白桦-山杨林有机质含量很低,并略低于植被演替初期阶段的灌丛林,这很可能与人类对该种森林的过度干扰以及该森林发育时间短、树龄较小、年凋落物量较少等有关。

土壤酸碱度是土壤的重要化学性质,直接影响植物的生长和微生物的活动以及土壤的其他性质与肥力状况。已有研究表明,针叶林随植被正向演替的进行,土壤 pH 值在逐渐降低,土壤呈现出酸性特征<sup>[22,24]</sup>。但本研究中,兴隆山天然林在演替方向上 pH 值差异不显著,森林土壤并未表现出酸化现象,均值 7.195—7.590,基本属于中性土壤。产生上述结果的原因很可能是研究区森林位于高海拔地区,凋落物层较厚,年降水量少,土壤温湿度较低,土壤中微生物活性受到一定程度的限制,凋落物分解慢,土壤淋溶作用弱,所以土壤并未演化为酸性。

兴隆山森林土壤全 N、水解 N 均随深度的变深而减小,表聚效应明显,这与刘兴诏等<sup>[25]</sup>、程瑞梅等<sup>[22]</sup>、耿玉清等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。因森林土壤 N 素主要来源于凋落物的归还,这导致 N 素首先在土壤表层密集,然后再随水或其他介质向下层迁移扩散,从而形成土壤氮素浓度从表层到底层越来越低的分布格局。6 种森林类型间变化规律不明显,特别是天然林,在演替序列上出现反常现象,即白桦-山杨林全 N、水解 N 低于灌丛林,其变化趋势与土壤有机质相一致,产生上述结果的原因很可能是灌丛林年凋落物量较大所致<sup>[27]</sup>。研究发现,兴隆山森林不同土层间全 P 差异不显著,在土壤剖面上表现为“圆柱体”分布模式,这与刘兴诏等<sup>[25]</sup>的研究结果相一致;不同森林类型间全 P 差异不显著,均值 2.015—2.370 g/kg。就其原因,土壤 P 素主要来源于岩石风化,而岩石风化是一个漫长的过程,风化程度在 0—60 cm 土壤层中差异不大,这就导致 P 素在土壤中垂直分布呈“圆柱体”分布模式及不同森林类型间差异不显著的结果。兴隆山不同森林及各土层间全 K 无明显变化规律,因研究区森林土壤成土母质基本相同,均以变质玄武岩、安山玄武岩、凝灰岩、千枚岩等震旦系岩石风化物的堆积物为主,加之不同森林气候条件差异不大,土壤发育大体相同,所以不同土壤层间、不同森林类型间全 K 差别不大。

#### 4.3 兴隆山森林土壤物理化学性质的相关性

土壤理化性质各特征指标间具有相关性<sup>[28-30]</sup>,但不同地区、不同植被类型其相关性也不相同。本研究通过对兴隆山 6 种森林类型的 4 层土壤理化特征相关性分析,发现每个土层相关性各不相同,并且差异很大,说明土壤层不同其相关性及相关性大小也不尽相同。但不论是哪一土层,总存在相似变化规律,即有机质与全 N、水解 N、持水量呈显著正相关,而与容重呈显著负相关;全 N 与水解 N 呈显著正相关;容重与孔隙度、持水量呈显著负相关。从这一结果看出,土壤有机质在改善土壤理化性质方面具有重要作用。因此,兴隆山在森林植被恢复过程中,应通过增加物种多样性、改善林分内光照、温度、水分等抚育改造措施,来改善凋落物组成及其性质,促进其快速分解,不断提高土壤中有机质含量,改善土壤理化性质,进而促进地上植被恢复演替的进程。

#### References:

- [1] A S Z, Bo Y J, Wen Z M, Jiao F, Yang Q K. Research on effect of different types of vegetation on nutrient changes in Loess Hilly Region-Taking Zhifanggou Watershed in Ansai as an example. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(6): 58-62.
- [2] He Y Q, Shen Q R, Wang X X. Dynamic of nutrients in artificial forest soil in low hill red soil region. *Soils*, 2003, 35(3): 222-226.
- [3] Kang B, Liu S R, Cai D X, Lu L H, He R M, Gao Y X, Di W Z. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2479-2486.

- [4] Yang W Q, Wang K Y. Advances in soil ecosystem process of subalpine forest in Western Sichuan. World Science-Technology Research and Development, 2003, 25(5): 33-40.
- [5] Wang X T, ed. Investigation of Resource Background in Administration Bureau of Xinglong Mountain Preserve Region of Gansu Province. Lanzhou: Gansu National Publishing House, 1996.
- [6] Ma X H, ed. Methodological Guidelines for Forest Ecosystem Location Research. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994.
- [7] Lu R K, ed. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [8] Zheng Y S, Chen L G, Hong W. Study on productivity and soil properties of mixed forests of Chinese fir and *phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens*. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34(1): 16-25.
- [9] Liu H Y, Huang J G. Dynamics of soil properties under secondary succession forest communities in Mt. Jinyu. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2041-2046.
- [10] Wu Q X, Han B, Li Y Y. Characteristics of soil infiltration in watersheds in Loess Hilly Region. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(2): 1-5.
- [11] Lin D X, Fan H B, Su B Q, Liu C L, Jiang Z K, Shen B G. Effect of interplantation of broad-leaved trees in *pinus massoniana* forest on physical and chemical properties of the soil. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 655-659.
- [12] Ding S L, Yang N G, Zhao C C, Yang Q M, Wang S, Dong X. Soil physical and chemical properties in water conservation forest in eastern Qinghai Province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(6): 1-6.
- [13] Beijing Forestry University. Agrology (First volume). Beijing: Chinese Forestry Press, 1982.
- [14] Li D S, Zhang P, Zhang S L, Yin J D, Lu F D. A study on water conservation capacity of forest soil in Huangqian reservoir area. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2004, 28(1): 25-27.
- [15] Yang W Q, Zhong Z C, Tao J P, He W M. Study on temporal and spatial characteristics of available soil nitrogen, phosphorus, and potassium among the forest ecosystem of Mt. Jinyun. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(8): 1285-1290.
- [16] Zhao S W, Zhao Y G, Wu J S. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau. Science China: Earth Science, 2010, 40(2): 223-231.
- [17] Fang W D, Kang X G, Zhao H Y, Huang X F, Gong Z W, Gao Y, Feng Q X. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Changbai Mountain. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(4): 40-47.
- [18] Liu X, Zhang G C, Li X L, Xing X S, Zhao M. Characteristics of soil infiltration and water-holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of Small Watershed. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 1-5.
- [19] Wang Y Q, Wang Y J. Soil water retaining capacity and infiltration property of typical forests in the Jinyun Mountain. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(3): 102-108.
- [20] Pan K W, Xu Z H, Blumfield T, Totua S, Lu M X. In situ mineral  $^{15}\text{N}$  dynamics and fate of added  $^{15}\text{NH}_4^+$  in hoop pine plantation and adjacent native forest in subtropical Australia. Journal of Soil and Sediments, 2008, 8(6): 398-405.
- [21] Zhou Y D, Wu J S, Zhou S W, Guo S L, Lu P. Change of soil organic matter and water holding ability during vegetation succession in Ziwuiling region. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(6): 895-900.
- [22] Cheng R M, Xiao W F, Wang X R, Feng X H, Wang R L. Soil nutrient characteristics in different vegetation successional stages of Three Gorges reservoir area. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9): 1-6.
- [23] Song H T, Zhang J F, Tian K, Guo H, Chen H L, Liu Z J, Xue Y F. Response of soil chemical properties to vegetation succession of *Quercus pannosa* forest in Subalpine Area of Northwest Yunnan. Journal of West China Forestry Science, 2007, 36(2): 65-70.
- [24] Zhang Q F, You W H, Song Y C. Effect of plant community succession on soil chemical properties in Tiantong, Zhejiang Province. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(1): 19-22.
- [25] Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, Liu S Z, Chu G W, Yan J H. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64-71.
- [26] Geng Y Q, Yu X X, Yue Y J, Niu L L. Variation of forest soil nutrient content in Mountainous Areas, Beijing. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5): 169-175.
- [27] Huang R, Pan K W, Wang J C, Li W. Comparison of soil nitrogen status among three stand types in the semi-arid areas of upper reaches of the Minjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1210-1216.
- [28] Qu G H, Guo J X. The relationship between different plant communities and soil characteristics in Songnen grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2003, 12(1): 18-22.
- [29] Chang C, Xie Z Q, Xiong G M, Zhao C M, Shen G Z, Lai L S, Xu X W. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Three Gorges reservoir area. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5978-5985.



- [30] Yang C D, Zhang W R. Study on the organic matter of the forest soils in Wolong natural reserve. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23(1): 30-39.

#### 参考文献:

- [1] 阿守珍, 卜耀军, 温仲明, 焦峰, 杨勤科. 黄土丘陵区不同植被类型土壤养分效应研究——以安塞纸房沟流域为例. *西北林学院学报*, 2006, 21(6): 58-62.
- [2] 何园球, 沈其荣, 王兴祥. 红壤丘岗区人工林恢复过程中的土壤养分状况. *土壤*, 2003, 35(3): 222-226.
- [3] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮峙. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [4] 杨万勤, Wang K Y. 川西亚高山针叶林土壤生态过程的研究. *世界科技研究与发展*, 2003, 25(5): 33-40.
- [5] 王香亭主编. 甘肃兴隆山国家级自然保护区资源本底调查研究. 兰州: 甘肃民族出版社, 1996.
- [6] 马雪华主编. 森林生态系统定位研究方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [7] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [8] 郑郁善, 陈礼光, 洪伟. 毛竹杉木混交林生产力和土壤性状研究. *林业科学*, 1998, 34(1): 16-25.
- [9] 刘鸿雁, 黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2041-2046.
- [10] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究. *中国水土保持科学*, 2004, 2(2): 1-5.
- [11] 林德喜, 樊后保, 苏兵强, 刘春华, 蒋宗垠, 沈宝贵. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究. *土壤学报*, 2004, 41(4): 655-659.
- [12] 丁绍兰, 杨宁贵, 赵串串, 杨乔媚, 王湜, 董旭. 青海省东部黄土丘陵区主要林型土壤理化性质. *水土保持通报*, 2010, 30(6): 1-6.
- [13] 北京林业大学. 土壤学(上册). 北京: 中国林业出版社, 1982.
- [14] 李德生, 张萍, 张水龙, 尹建道, 鲁法典. 黄前库区森林土壤蓄水能力研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(1): 25-27.
- [15] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 何维明. 缙云山森林土壤速效 N、P、K 时空特征研究. *生态学报*, 2001, 21(8): 1285-1290.
- [16] 赵世伟, 赵勇钢, 吴金水. 黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(2): 223-231.
- [17] 方伟东, 亢新刚, 赵浩彦, 黄新峰, 龚直文, 高延, 冯启祥. 长白山地区不同林型土壤特性及水源涵养功能. *北京林业大学学报*, 2011, 33(4): 40-47.
- [18] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 邢先双, 赵玫. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 1-5.
- [19] 王云琦, 王玉杰. 缙云山典型林分森林土壤持水与入渗特性. *北京林业大学学报*, 2006, 28(3): 102-108.
- [21] 周印东, 吴金水, 赵世伟, 郭胜利, 路鹏. 子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化. *西北植物学报*, 2003, 23(6): 895-900.
- [22] 程瑞梅, 肖文发, 王晓荣, 封晓辉, 王瑞丽. 三峡库区植被不同演替阶段的土壤养分特征. *林业科学*, 2010, 46(9): 1-6.
- [23] 宋洪涛, 张劲峰, 田昆, 郭华, 陈华丽, 刘忠杰, 薛阳富. 滇西北亚高山地区黄背栎林植被演替过程中的林地土壤化学响应[J]. *西部林业科学*, 2007, 36(2): 65-70.
- [24] 张庆费, 由文辉, 宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 19-22.
- [25] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [26] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 牛丽丽. 北京山地森林的土壤养分状况. *林业科学*, 2010, 46(5): 169-175.
- [27] 黄容, 潘开文, 王进闯, 李伟. 岷江上游半干旱河谷区 3 种林型土壤氮素的比较. *生态学报*, 2010, 30(5): 1210-1216.
- [28] 曲国辉, 郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系. *草业学报*, 2003, 12(1): 18-22.
- [29] 常超, 谢宗强, 熊高明, 赵常明, 申国珍, 赖江山, 徐新武. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征. *生态学报*, 2009, 29(11): 5978-5985.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.15 August ,2012( Semimonthly )

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                           |                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Effects of grazing on litter decomposition in two alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau .....                                                                                                | ZHANG Yanbo, LUO Peng, SUN Geng, et al (4605)            |
| Distribution pattern and their influencing factors of invasive alien plants in Beijing .....                                                                                                              | WANG Suming, ZHANG Nan, YU Linqian, et al (4618)         |
| Simulation of CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O fluxes over temperate mixed forest and sensitivity analysis of layered methods: stomatal conductance-photosynthesis-energy balance coupled model ..... | SHI Tingting, GAO Yufang, YUAN Fenghui, et al (4630)     |
| Analysis on the responses of flood storage capacity of Dongting Lake to the changes of landscape patterns in Dongting Lake area .....                                                                     | LIU Na, WANG KeLin, DUAN Yafeng (4641)                   |
| Integrated water risk assessment in Daliao River estuary area .....                                                                                                                                       | YU Ge, CHEN Jing, ZHANG Xueqing, et al (4651)            |
| Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity .....                                                                           | QU Xiaodong, LIU Zhigang, ZHANG Yuan (4661)              |
| Genetic diversity analysis of different age of a Dalian population of the Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i> by EST-SSR .....                                                                     | YU Zhifei, YAN Xiwu, ZHANG Yuehuan, et al (4673)         |
| Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of yellowfin tuna ( <i>Thunnus albacares</i> ) purse seine catch in the western Indian Ocean .....                                                       | YANG Xiaoming, DAI Xiaojie, ZHU Guoping (4682)           |
| Seasonal differences in habitat selection of the Crocodile lizard ( <i>Shinisaurus crocodilurus</i> ) in Luokeng Nature Reserve, Guangdong .....                                                          | WU Zhengjun, DAI Dongliang, NIN Jiajia, et al (4691)     |
| Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu .....                                                                                                    | WEI Qiang, LING Lei, CHAI Chunshan, et al (4700)         |
| Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen contents in short-rotation triploid <i>Populus tomentosa</i> plantations .....                                                                         | ZHAO Xuemei, SUN Xiangyang, KANG Xiangyang, et al (4714) |
| Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mongolia .....                                                                                                                 | DING Xiaohui, GONG Li, WANG Dongbo, et al (4722)         |
| Effect of elevated ultraviolet-B (UV-B) radiation on CH <sub>4</sub> emission in herbicide resistant transgenic rice from a paddy soil .....                                                              | LOU Yunsheng, ZHOU Wenlin (4731)                         |
| NMR spectroscopy based metabolomic analysis of <i>Thellungiella salsuginea</i> under salt stress .....                                                                                                    | WANG Xinyu, WANG Lihua, YU Ping, et al (4737)            |
| Screening and identification of associative nitrogen fixation bacteria in rhizosphere of sugarcane in Guangxi .....                                                                                       | HU Chunjin, LIN Li, SHI Guoying, et al (4745)            |
| Effects of different rice-crab production modes on soil labile organic carbon and enzyme activities .....                                                                                                 | AN Hui, LIU Mingda, WANG Yaojing, et al (4753)           |
| The characteristics of soil microbial communities at burned forest sites for the Great Xingan Mountains .....                                                                                             | BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (4762)              |
| Changes of soil faunal communities during the restoration progress of <i>Abies faxoniana</i> Forests in Northwestern Sichuan .....                                                                        | CUI Liwei, LIU Shirong, LIU Xingliang, et al (4772)      |
| The effects of the endophytic fungus <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 on <i>Fusarium oxysporum</i> in a continuously cropped watermelon field .....                                                     | XIAO Yi, DAI Chuanchao, WANG Xingxiang, et al (4784)     |
| Population ecology of <i>Aulacoseira granulata</i> in Xijiang River .....                                                                                                                                 | WANG Chao, LAI Zini, LI Yuefei, et al (4793)             |
| Evaluation of ecosystem sustainability for large-scale constructed wetlands .....                                                                                                                         | ZHANG Yiran, WANG Renqing, ZHANG Jian, et al (4803)      |
| MIS3b vegetation and climate changes based on pollen and charcoal on Qianxi Plateau .....                                                                                                                 | ZHAO Zengyou, YUAN Daoxian, SHI Shengqiang, et al (4811) |
| The effects of stemflow on the formation of "Fertile Island" and "Salt Island" for <i>Haloxylon ammodendron</i> Bge .....                                                                                 | LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (4819)       |
| Accumulation and translocation of dry matter and nutrients of wheat rotated with legumes and its relation to grain yield in a dryland area .....                                                          | YANG Ning, ZHAO Hubing, WANG Zhaohui, et al (4827)       |
| Occurrence characteristics of <i>akashiwo sanguinea</i> bloom caused by land source rainwater .....                                                                                                       | LIU Yihao, SONG Xiukai, JIN Yang, et al (4836)           |
| Analysis on landscape pattern change and its driving forces of Yancheng National Natural Reserve .....                                                                                                    | WANG Yanfang, SHEN Yongming (4844)                       |
| Resource potential assessment of urban roof greening and development strategies: a case study in Futian central district, Shenzhen, China .....                                                           | SHAO Tianran, LI Chaosu, ZENG Hui (4852)                 |
| Analysis of the dynamic coupling processes and trend of regional eco-economic system development in the Yellow River Delta .....                                                                          | WANG Jieyong, WU Jianzhai (4861)                         |
| The diversity parameters of butterfly for ecological function divisions in Chongqing .....                                                                                                                | LI Aimin, DENG Heli, MA Qi (4869)                        |
| <b>Review and Monograph</b>                                                                                                                                                                               |                                                          |
| Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas .....                                                                                                          | WANG Xinyuan, LI Yulin, ZHAO Xueyong, et al (4890)       |
| Temperature sensitivity of soil respiration: uncertainties of global warming positive or negative feedback .....                                                                                          | LUAN Junwei, LIU Shirong (4902)                          |
| The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review .....                                                         | CHENG Shulan, FANG Huajun, YU Guirui, et al (4914)       |
| The research progresses on biological oxidation and removal of nitrogen in lakes .....                                                                                                                    | FAN Junnan, ZHAO Jianwei, ZHU Duanwei (4924)             |
| <b>Scientific Note</b>                                                                                                                                                                                    |                                                          |
| Cutting effects on growth and wastewater purification of <i>Cyperus alternifolius</i> in constructed wetland .....                                                                                        | LÜ Gaiyun, HE Huaidong, YANG Danjing, et al (4932)       |

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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 70 元/册,全年定价 1680 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 32 卷 第 15 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 32 No. 15 (August, 2012)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>Shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 冯宗炜                                                                                                                | Editor-in-chief | FENG Zong-Wei                                                                                                                                                                   |
| 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<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100071                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>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 70.00 元