

DOI: 10.5846/stxb201506091165

冯天骄, 卫伟, 于洋, 陈利顶, 杨磊, 张涵丹. 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Feng T J, Wei W, Yu Y, Chen L D, Yang L, Zhang H D. Effects of land preparations and vegetation types on soil chemical features in a loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

## 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响

冯天骄<sup>1,2</sup>, 卫伟<sup>1,\*</sup>, 于洋<sup>1</sup>, 陈利顶<sup>1</sup>, 杨磊<sup>1</sup>, 张涵丹<sup>1,2</sup>

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. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**合理的坡面整地和人工植被恢复能够改善土壤状况,进而促进植被生长和生境改善。在半干旱黄土高原地区,研究不同植被类型和整地方式下的土壤属性变化规律,对于揭示整地-植被-土壤之间的相互作用机制有重要意义。基于外业采样和室内测定的方法,测定了样品的有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、有效磷和酸碱度,对比和分析黄土高原小流域不同整地方式和植被类型下的土壤养分特征。结果表明:(1)土壤养分变化的总体规律是明显的表聚性,土壤养分含量随土层的增加而减少,0—1m 养分平均含量只有表层含量的 43.1%—86.8%,除此之外全磷、全钾养分含量还具有波动性、富集性等特点;(2)整地和植被类型对土壤养分的影响;整地方式下养分含量依次为:水平沟、水平阶>鱼鳞坑>反坡台,植被类型养分对比结果:柠条>油松>山杏>侧柏,同时发现整地方式对速效养分的影响较大,而植被恢复对全量养分的影响占主导优势;(3)植被对不同土壤养分的吸收利用响应:分析植被的养分利用特点,发现侧柏对磷素的消耗较大,柠条对钾素的消耗较大,并且发现有机质含量存在波动层、渐变层和稳定层等分布特征。

**关键词:**黄土高原;整地方式;水土保持;生态恢复;土壤改良

## Effects of land preparations and vegetation types on soil chemical features in a loess hilly region

FENG Tianjiao<sup>1,2</sup>, WEI Wei<sup>1,\*</sup>, YU Yang<sup>1</sup>, CHEN Lingding<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Handan<sup>1,2</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract:** Reasonable land preparation and artificial vegetation restoration can improve soil conditions and contribute to the growth of vegetation. In the semi-arid Loess Plateau region, a study of soil properties under different vegetation and land preparation strategies is highly significant. This study reveals the interactive mechanisms between land preparation, vegetation, and soil conditions. Methods of soil sampling and laboratory measurements are utilized in this study. In the semi-arid watershed of the Loess Plateau, the physiochemical properties of soil under different land preparations were compared and analyzed. Results indicated that: (1) the nutrient content of the soil of various land preparation and vegetation types had a significant effect on surface aggregation. Surface nutrients were generally 43.1%—86.8% higher than the average content of other nutrients within the 0—1m soil layer. In addition, the total phosphorus and the total potassium content were also enriched and volatile; (2) the soil nutrients under different vegetation types decreased with the order of *Caraganakorshinskii*, *Pinustabulaeformis*, *Armeniacasibirica* and *Platycladusorientalis*. Due to the differences among plant

基金项目:国家自然科学基金项目(41371123,41401209,41501091)资助

收稿日期:2015-06-09; 修订日期:2015-11-24

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

properties, tree species always had a larger biomass and a higher coverage area, which might support the accumulation of soil nutrients. The effectiveness of land preparation methods were compared in the descending order of: Level bench>Level ditch>Fish Scale Pit>Adverse Grade Tableland. In general, land preparation measures mainly influenced the available nutrients while vegetation restoration affected total nutrients; (3) the usage features of different vegetation types on soil nutrients were also captured. It was found that *Caraganakorshinskii* and *Platycladusorientalis* might absorb more potassium and phosphorus, respectively. Moreover, the vertical distribution of organic soil content might consist of a volatile layer, a graded layer and a stabilizing layer.

**Key Words:** Loess Plateau; land preparation; soil and water conservation; ecological restoration; soil improvement

土壤养分是土壤肥力的主要组分,是土壤物理、化学、生物等性质的综合反映,土壤养分的各种基本性质都能通过直接或间接的途径,影响作物生长,对植被恢复至关重要<sup>[1-2]</sup>。黄土高原气候干燥、降雨集中、土层深厚、土质疏松,极易导致水土和养分流失。由于生态环境的持续恶化,黄土高原的粮食产量低、植被幼苗成活率不高等问题日益明显,为有效解决这一问题,在该地区开展了包括整修梯田、鱼鳞坑、反坡台、水平阶、水平沟等形式多样的整地措施<sup>[3-4]</sup>。研究证明,整地对黄土高原生态修复和环境改善有重要作用<sup>[5-6]</sup>。相比自然坡面,坡改梯整地方式有拦沙截流、蓄水保墒、改善土壤和植被生长条件等功效,同时大量实验表明整地有防洪减灾、蓄水保土、改良土壤、提高土地生产力等优势<sup>[7-9]</sup>。探讨整地和植被耦合下的土壤属性变异,对于优化黄土高原土地利用和促进生态环境改善有重要意义。

围绕这一核心议题,已有不少国内外学者开展了试验研究。譬如,黄土沟壑区小流域坡地的研究表明,土壤养分是限制坡地植被恢复的重要因素<sup>[10-11]</sup>,整地后可以对土壤理化性质有明显改善;王莉<sup>[12]</sup>、马云<sup>[13]</sup>和信忠保<sup>[14]</sup>在不同地区的研究均表明,土地利用对土壤理化性质的影响显著,对流域尺度上土壤有机质、全 N 和速效 P 含量的影响达到显著水平。在美国西南部,Boerner<sup>[15]</sup>和 Leifeld<sup>[16]</sup>对比了土地利用类型和扰动方式对土壤有机碳、无机氮和有效磷的空间格局,证明了整地能有效提高养分有效性和土壤碳储量;Bocchi<sup>[17]</sup>等在意大利北部的坡地农田对比了土壤养分的协同变异特征,发现整地后显著提高了区域养分含量,Rossi<sup>[18]</sup>等在美国密歇根州西南部也研究了地形、植被和土壤性质的关系,Tesfahunegn<sup>[19]</sup>等使用地质统计学方法研究了埃塞俄比亚北部 Mai-Negus 的土壤养分指标的空间变异特征,绘制了有机碳、氮磷等养分指标的空间分布图,并提出了相应的土地管理措施。上述研究均从不同方面说明了整地后对土壤养分有提高作用并且土壤养分对植被恢复至关重要。然而,除了整地措施重要性研究之外,整地方式和植被类型对土壤和环境的耦合作用仍然是亟待解决的问题,对于整地方式的多样性和植被类型的复杂性,植被和整地措施综合作用下的土壤属性变化仍然存在很大的不确定性和难度,亟待进一步深入研究。

本研究选择黄土高原的典型小流域,基于坡面不同整地方式(水平沟、水平阶、反坡台、鱼鳞坑)和植被恢复类型(油松、柠条、山杏、侧柏),采集土样,通过对土壤养分的室内测定,分析比较不同植被恢复和整地条件下的土壤养分变化,探讨植被和微地形变化对土壤质量的综合影响,为该地区生态恢复与重建提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

龙滩流域(35°43'—35°46'N, 104°27'—104°31'E)地处甘肃定西市西北部,属于典型的半干旱黄土丘陵区,流域面积 16.1km<sup>2</sup>,海拔 1800—2200 m。该区属半干旱大陆性气候,据长期观测资料(1958—至今),平均气温 6.8℃,平均无霜期 152d,平均日照时数 2052h;年均降水量 386.3mm,降雨主要集中在 7—9 月份,且多暴雨,潜在蒸发量为 1649.0mm,年平均相对湿度 72%,干燥度 1.9。本区属祖厉河流域,地形以黄土长梁为主,地貌以梁状丘陵为主,年均侵蚀模数 2000—5000 t/m<sup>3</sup>,水土流失严重。

为改善生态环境,自 20 世纪 50 年代以来,该地区开始施行推广坡改梯和植被恢复工程,主要有反坡梯

田、水平阶、水平沟、鱼鳞坑等。该地区属于典型草原地带,天然植被约 190 多种,主要植被类型为多年生草本为主,主要自然植物种类有长芒草 (*Stipabungeana*)、赖草 (*Leymussecalinus*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappusaltaicus*) 等,人工植被种类以紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、柠条 (*Caraganakorshinskii*)、山杏 (*Armeniacasibirica*)、侧柏 (*Platycladusorientalis*)、油松 (*Pinustabulaeformis*) 等为主。

该流域土质均一,土壤以黄绵土为主,有机质含量低,土壤贫瘠。黄土土质虽然有较多的钙质,但是由于土壤中有有机物质的缺失,仍未能发育成良好的土壤结构,加上气候和母质等成土条件的影响,土壤发育过程迟缓,发育土壤形式简单,淋溶作用微弱,土壤贫瘠,水分缺乏,剖面分化很弱,土壤层次不明显。在此土壤条件下,选择正确合理的整地方式和抗旱性、适应能力强的植被,不失为一种重要的生态系统管理手段。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 对照样地设立

为改善生态环境,当地从 20 世纪 50 年代起就开展了大规模植被恢复和地形改造工程。实践证明,只有大量蓄积利用有限降水资源,才能达到更好效果,其中,反坡台、鱼鳞坑、水平沟、水平阶作为传统的整地方式,能够使土壤疏松,拦蓄地表径流,加强入渗作用,提高水分利用率;另一方面,由于该区气候干燥,降雨量少且分布不均,表层土壤极易流失水分,在这种情况下,造林树种选择时要考虑其抗旱、速生、耐贫瘠和适应能力,而油松、侧柏、柠条和山杏均作为较好的生态效益植被被普遍推广,可以固土保水,改良土壤,是当地植被恢复的代表性植被。本研究根据研究区内的人工恢复特征和实地踏查,选择当地典型的鱼鳞坑、反坡台、水平沟、水平阶 4 种整地方式,以及代表性植被恢复作物油松、侧柏、柠条、山杏等植被,布设柠条水平阶、山杏水平沟、侧柏反坡台、油松反坡台、侧柏鱼鳞坑、油松鱼鳞坑等小区,6 个小区根据不同的整地方式和植被恢复的组合设立对比,本实验对不同整地方式和植被类型下的土壤理化指标进行对比。各小区的实际尺寸、具体情况、植被状况、地理信息见下表 1。

### 1.2.2 土壤取样和测定方法

选择在小区内上、中、下坡位 3 个位置各设点取样,作为 3 次重复以表示各小区样地内土壤养分状况,在 2014 年 8 月中旬进行采样,在以尽量不破坏小区为前提,保证样点选取的分布均匀性、科学性、可比性,各小区取样方法、时间、位置和处理方法保持一致,采集样品按 0—100 cm 分为 8 个土层(0—5cm、5—10cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm)进行取土,各 3 个重复,每次取样后用取样袋带回实验室进行化验和测定。

其中,土壤全氮按凯氏蒸馏法测定,土壤全磷按 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定,土壤全钾按碱融—原子吸收分光光度法测定,土壤速效养分的测定方法分别是:土壤碱解氮用碱解扩散法,土壤有效磷用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提钼锑抗比色法,土壤速效钾用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度法<sup>[20]</sup>。

## 1.3 统计分析方法

采用描述性统计和方差分析等方法对数据进行处理,相关数据采用平均值±标准差(Mean±SD)来表示,同一因素不同水平间差异显著性采用最小显著差数法(LSD)进行检验,显著性水平  $P \leq 0.05$ 。统计分析和图表绘制分别用 SPSS Statistics 20 和 SigmaPlot 12.5 完成。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤有机质状况

土壤有机质是评价土壤质量的重要指标,它不仅能增强土壤的保肥和供肥能力,提高土壤养分有效性,而且可促进团粒结构形成,改善土壤透水、蓄水及通气性,增强土体缓冲性。柠条水平阶(1bNT)、侧柏鱼鳞坑(fspCB)、山杏水平沟(1dSX)、侧柏反坡台(adtCB)、油松鱼鳞坑(fspYS)和油松反坡台(adtYS)不同土层深度的土壤有机质(SOM)分析结果如图 1 所示。

表 1 选择小区的基本情况

Table 1 Basic characteristics of the selected plots

| 小区名称                                 | 柠条水平阶<br>(lbNT)  | 山杏水平沟<br>(ldSX)   | 侧柏反坡台<br>(adtCB)   | 油松反坡台<br>(adtYS)  | 侧柏鱼鳞坑<br>(fspCB)  | 油松鱼鳞坑<br>(fspYS)  |
|--------------------------------------|--|---|--|---|---|---|
| 土质 Soil                              | 黄绵土  | 黄绵土   | 黄绵土  | 黄绵土   | 黄绵土   | 黄绵土   |
| 坡向 Aspect                            | 西偏南  | 东   | 东偏南  | 东偏北   | 南   | 西   |
| 坡度 Slope                             | 26°  | 18°   | 24°  | 16°   | 39°   | 20°   |
| 坐标 Coordinate                        | N 35°45'12.61"<br>E104°33'37.35"   | N 35°43'31"<br>E104°29'18"  | N 35°43'30.57"<br>E104°29'29.71"   | N 35°44'11.01"<br>E104°30'24.94"  | N 35°44'11.01"<br>E104°30'24.94"  | N 35°44'24.69"<br>E104°30'39.11"  |
| 树高 Height/m                          | 1.14±0.30  | 1.97±0.60   | 2.70±0.48  | 5.71±0.41   | 1.49±0.38   | 5.98±0.53   |
| 胸径 DBH / cm                          | 1.06±0.95  | 4.25±0.66   | 4.72±1.02  | 8.71±0.49   | 3.31±0.37   | 8.97±0.98   |
| 容重 Bulk density / g cm <sup>-3</sup> | 1.22±0.04  | 1.21±0.03   | 1.19±0.05  | 1.13±0.04   | 1.27±0.04   | 1.15±0.04   |
| 林龄/a                                 | 39   | 47  | 49   | 45  | 49  | 45  |
| 整地描述<br>Site preparation method      | 将 3.5—4.0 m 长的<br>坡面径流集中<br>到 1.0—1.5 m<br>的阶面<br>反坡 3—5°  | 将 3.5—4.0 m 长的<br>坡面径流集中<br>到 1.0—1.5 cm<br>的沟面<br>沟面宽 1.5 m 长 1.8m   | 将 4.0 m 长的<br>坡面径流集中<br>到 0.6—1.0 m<br>的台面<br>反坡 5—8°  | 将 1.5—2.0 m 长的<br>坡面径流集中<br>到 1.0—1.5m<br>的台面<br>反坡 5—8°  | 鱼鳞坑直径、<br>长、宽分别为<br>135、80、50cm   | 鱼鳞坑直径、<br>宽、高分别为<br>80、80、30cm  |
| 盖度<br>Understory layers cover        | 50%  | 40%   | 40%  | 30%   | 35%   | 45%   |
| 主要植被                                 | 骆驼蓬<br>( <i>Peganumharmala</i> )、<br>乌里芯芭<br>( <i>Cymbariadahurica</i> )、<br>阿尔泰狗娃花<br>( <i>Heteropappusaltaicus</i> )、<br>长芒草<br>( <i>Stipabungeana</i> ) | 苜蓿<br>( <i>Medicago sativa</i> )、<br>白莲蒿<br>( <i>Artemisia capillaris</i> )、<br>赖草<br>( <i>Leymussecalinus</i> )、<br>长芒草<br>( <i>Stipabungeana</i> )、<br>铁杆蒿<br>( <i>Artemisia sacrorum</i> ) | 百里香<br>( <i>Thymus mongolicus</i> )、<br>北方獐牙菜<br>( <i>Swertiadiluta</i> )、<br>长芒草<br>( <i>Stipabungeana</i> )、<br>披针叶野决明<br>( <i>Thermopsis lanceolata</i> ) | 中华隐子草<br>( <i>Cleistogeneschinensis</i> )、<br>阿尔泰狗娃花<br>( <i>Heteropappusaltaicus</i> )、<br>长芒草<br>( <i>Stipabungeana</i> ) | 束伞亚菊<br>( <i>Ajaniqparijflora</i> )、<br>阿尔泰狗娃花<br>( <i>Heteropappusaltaicus</i> )、<br>二裂委陵菜<br>( <i>Potentillabifurca</i> )、<br>长芒草<br>( <i>Stipabungeana</i> ) | 中华隐子草<br>( <i>Cleistogeneschinensis</i> )、<br>冷蒿<br>( <i>Artemisia frigida</i> )、<br>阿尔泰狗娃花<br>( <i>Heteropappusaltaicus</i> )、<br>赖草<br>( <i>Leymussecalinus</i> ) |
| 粘粒 Clay/%                            | 20.75±4.03   | 17.38±3.89  | 21.96±3.70   | 18.38±6.87  | 8.20±0.73   | 11.72±0.82  |
| 粉粒 Silt/%                            | 69.53±3.26   | 71.84±2.96  | 67.79±2.95   | 71.94±5.18  | 70.12±3.71  | 73.41±3.63  |
| 砂粒 Sand/%                            | 9.72±1.37  | 10.77±1.19  | 10.25±0.88   | 9.68±1.92   | 21.68±3.98  | 14.87±4.38  |

缩写对应小区名称: lbNT—Level bench Caraganakorshinskii; ldSX—Level ditch Armeniacasibirica; adtCB—Adverse grade tableland Platycladusorientalis; adtYS—

Adverse grade tableland Pinustabulaeformis; fspCB—Fish-sacle pit Platycladusorientalis; fspYS—Fish-sacle pit Pinustabulaeformis; 粒径分级是按照国际制土壤质地分级标准,粘粒(<0.002mm,%) 粉砂(0.02—0.002mm,%) 砂粒(2—0.02mm,%) 进行分类

如图 1 所示,除柠条水平阶小区表层有机质含量存在一定变异外,各小区土壤有机质含量均表现了显著的表聚性,土壤有机质平均含量依次为油松鱼鳞坑>柠条水平阶>油松反坡台>侧柏反坡台>山杏水平沟>侧柏鱼鳞坑,平均含量依次为 17.0 g/kg、15.1 g/kg、13.7 g/kg、12.6 g/kg、12.3 g/kg、11.6 g/kg,其中油松鱼鳞坑处理在表层土壤中有机质含量显著高于其他处理,其含量达到了 27.9 g/kg。

相同深度不同整地方式之间土壤有机质含量差异显著( $P<0.05$ ),不同土层深度的有机质含量变化特征不同。如图 1 所示,0—5cm,油松鱼鳞坑土壤有机质含量显著低于其他 3 种整地类型( $P<0.05$ ),而另外五种整地类型之间无显著差异。5—10 cm,柠条水平阶、油松鱼鳞坑、油松反坡台显著高于侧柏鱼鳞坑、侧柏反坡台和山杏水平沟( $P<0.05$ )。而在 20—30 cm,油松鱼鳞坑、柠条水平阶有机质含量显著高于侧柏反坡台、侧柏鱼鳞坑,但与油松反坡台差异不显著( $P<0.05$ )。30—40 cm、40—60 cm 和 60—80 cm 土层中有机质含量规律相似,均为油松鱼鳞坑、柠条水平阶和油松反坡台含量高于侧柏反坡台和山杏水平沟,侧柏反坡台含量最低,但各处理之间并无显著差异。80—100 cm 时各处理之间差异不大,各处理之间均无显著性差异。

从土壤垂直剖面看,不同整地方式下有机质含量随土层深度的增加而减少,同时有机质含量存在活跃层(0—20cm)、渐变层(20—60cm)、稳定层(60cm 以下)。初步结果显示,鱼鳞坑和油松覆盖的配置比其他整地

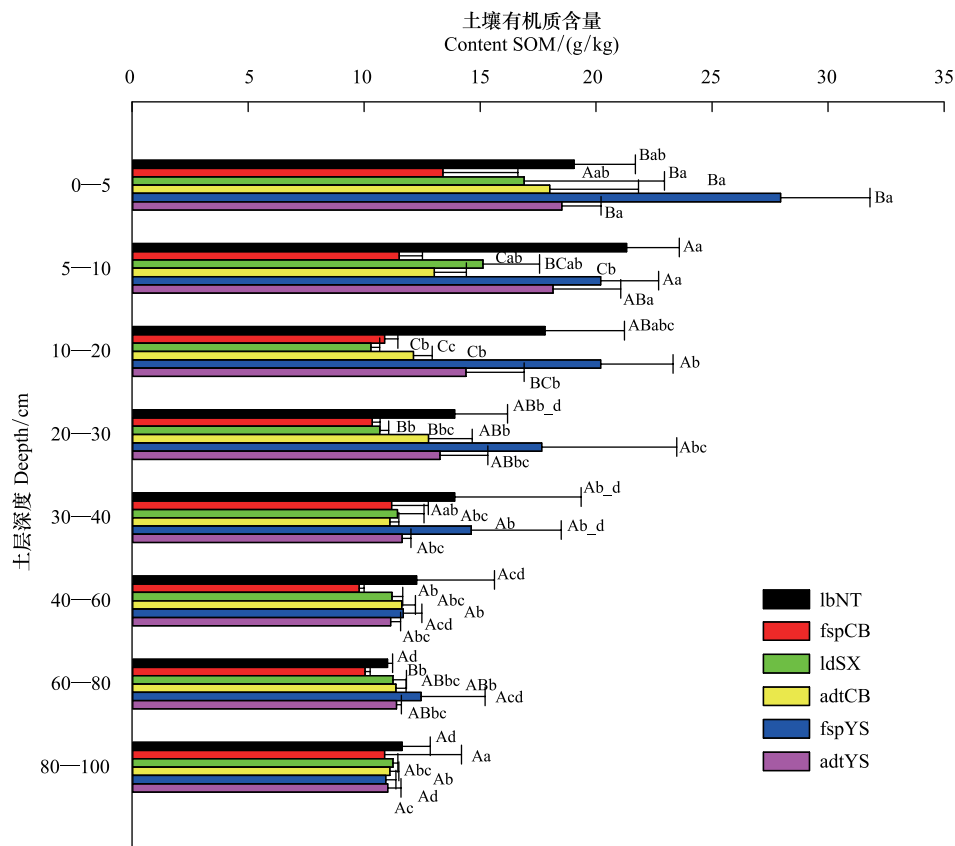


图1 不同整地方式和植被类型土壤有机质含量

Fig.1 Soil organic matter content of different land preparation and vegetation types

图中不同大写字母表示不同整地方式差异显著,不同小写字母表示不同土层深度之间差异显著  $P < 0.05$ ; 图例缩写对应小区名称: lbNT: 柠条水平阶 Level bench Caraganakorshinskii; fspCB: 侧柏鱼鳞坑 Fish-sacle pit Platycladusorientalis; ldSX: 山杏水平沟 Level ditch Armeniacasibirica; adtCB: 侧柏反坡台 Adverse grade tableland Platycladusorientalis; fspYS: 油松鱼鳞坑 Fish-sacle pit Pinustabulaeformis; adtYS: 油松反坡台 Adverse grade tableland Pinustabulaeformis

方式和植被覆盖更有利于表层有机质积累,表现在相同植被条件下(油松),鱼鳞坑 0—5 cm 有机质含量达到了 27.9 g/kg,显著高于其他处理,而各小区有机质含量 60 cm 以下土层趋于相近;侧柏覆盖情况与此相似,在与其他整地方式的对比中,表层有机质含量高。

## 2.2 土壤氮素状况

研究区不同植被恢复和整地措施条件下,土壤全 N 含量分布如图 2 所示,可以看出全氮含量的垂直分布具有明显的表聚性。

各整地方式中,土壤全氮平均大小依次为柠条水平阶>油松鱼鳞坑>油松反坡台>山杏水平沟>侧柏鱼鳞坑>侧柏反坡台,平均含量依次为 0.73 g/kg、0.71 g/kg、0.54 g/kg、0.54 g/kg、0.40 g/kg、0.40 g/kg。

土壤全氮含量在不同整地条件下存在垂直变化规律。由图 2 可知,土壤全氮含量随土层深度的增加明显减少,相比较而言,水平阶柠条和鱼鳞坑油松的全氮含量较其他配置高一些,这一特点在表层 0—40 cm 比较明显,各小区 40—100 cm 土层的全氮含量相对差异不显著。不同植被类型下:油松和柠条优于山杏和侧柏,其中油松、柠条 0—5cm 表层土壤全氮含量分别达到 1.04 g/kg 和 1.13 g/kg,高于山杏和侧柏,其中山杏、侧柏表层 0—5 cm 土层全氮含量只有 0.87 g/kg、0.62 g/kg 和 0.81 g/kg;另一方面,从整地方式的角度分析,鱼鳞坑比反坡台更具有优势性,表现在相同植被覆盖(油松、侧柏)情况下的鱼鳞坑处理的 0—1 m 全氮含量均值为 0.71 g/kg 和 0.40 g/kg,高于反坡台 0—1m 全氮含量,其相应植被条件(油松、侧柏)全氮含量只有 0.54 g/kg 和 0.40 g/kg。

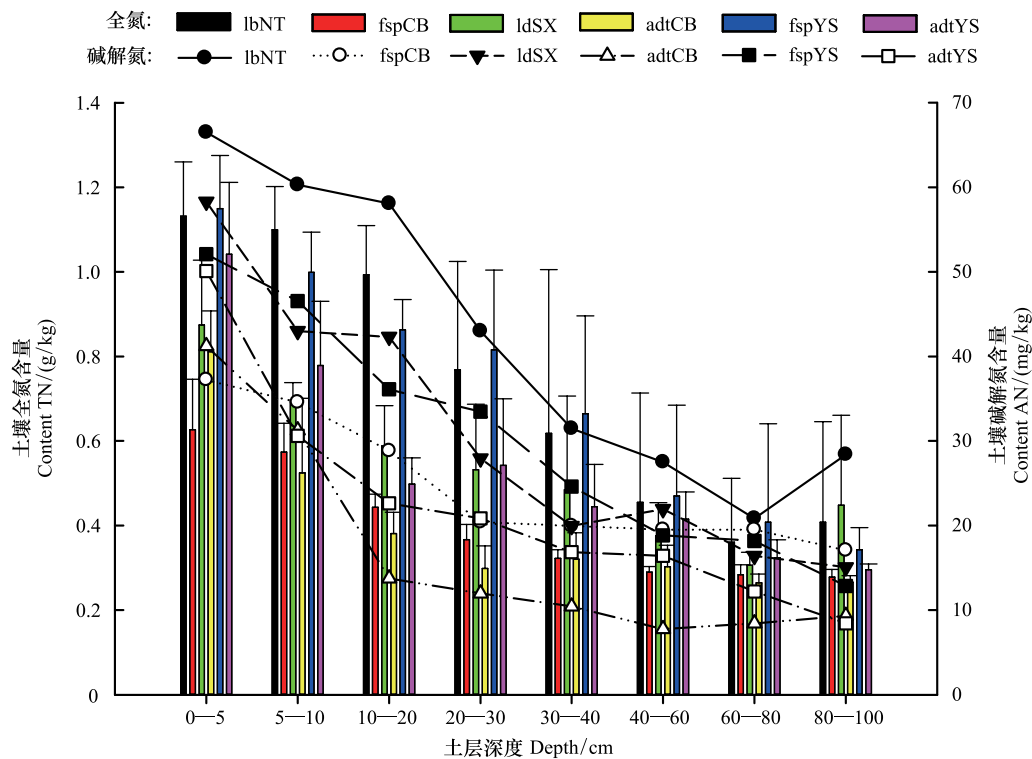


图2 不同整地方式和植被类型土壤氮素含量

Fig.2 Soil Nitrogen content of different land preparation and vegetation types

从图中可以看出碱解氮含量随土层深度的增加而逐渐减少,下降趋势明显。柠条和山杏植被覆盖情况下的碱解氮含量相对较高,含量达到了 42.00 g/kg 和 22.25 g/kg,而油松植被覆盖情况下的碱解氮次之,含量为 22.25 g/kg 和 30.34 g/kg,侧柏覆盖情况下的碱解氮含量较低,最低只有 16.76 g/kg;从整地方式来分析,水平阶和水平沟整地方式的碱解氮含量较高 42.00 g/kg 和 30.62 g/kg,深层土壤碱解氮含量差异明显,在 80—100 cm 土层反坡台整地方式的碱解氮含量最低,只有 9.31 g/kg,鱼鳞坑整地方式介于水平沟和反坡台之间。相比全氮含量相比,在植被配置对碱解氮的影响作用更明显。

### 2.3 土壤钾素状况

不同植被恢复措施条件下,土壤全 K 含量分布如图 3 所示,可见钾素含量的垂直分布具有富集性。

全钾含量各处理随土层深度变化程度不显著,各土层含量均在 20—25 g/kg 之间,说明了黄土高原该小流域钾素含量较为丰富。

此外可以从图中看出柠条植被覆盖的处理在土层 30—60 cm 的全钾含量相对较低,也是所有处理各土层中的极小值,只有  $(20.50 \pm 2.32)$  g/kg、 $(19.50 \pm 2.03)$  g/kg 和  $(20.00 \pm 0.50)$  g/kg,而对比钾磷含量可以发现,侧柏对全钾含量的消耗较小;而柠条相反,可以说明柠条这种植被对钾素的消耗和对磷素的保持是有积极的影响的,即水平阶柠条处理的全钾含量比较低、全磷含量比较高,侧柏则与之相反。

土壤速效钾含量随着土层深度的加深而逐渐减少,与其他速效养分含量变化规律相似,具有明显的表聚性。数据表明表层速效钾含量高的情况下深层速效钾含量较低,即速效钾 0—100 cm 速效钾含量总量基本相同,平均含量都在 80—100 mg/kg 之间,也说明了在该地区相对充足的钾素情况下,速效钾含量相对平衡,具有明显的表聚性,各处理之间没有明显差异。

### 2.4 土壤磷素状况

各处理的土壤全磷含量在土层中含量变化较大(图 4),呈现出波动性。在全磷含量的变化上随土层规律并不明显,平均含量在 0.80 g/kg—1.80 g/kg 之间,原因是磷元素在土壤中的移动性较弱,不易随着雨水淋溶或

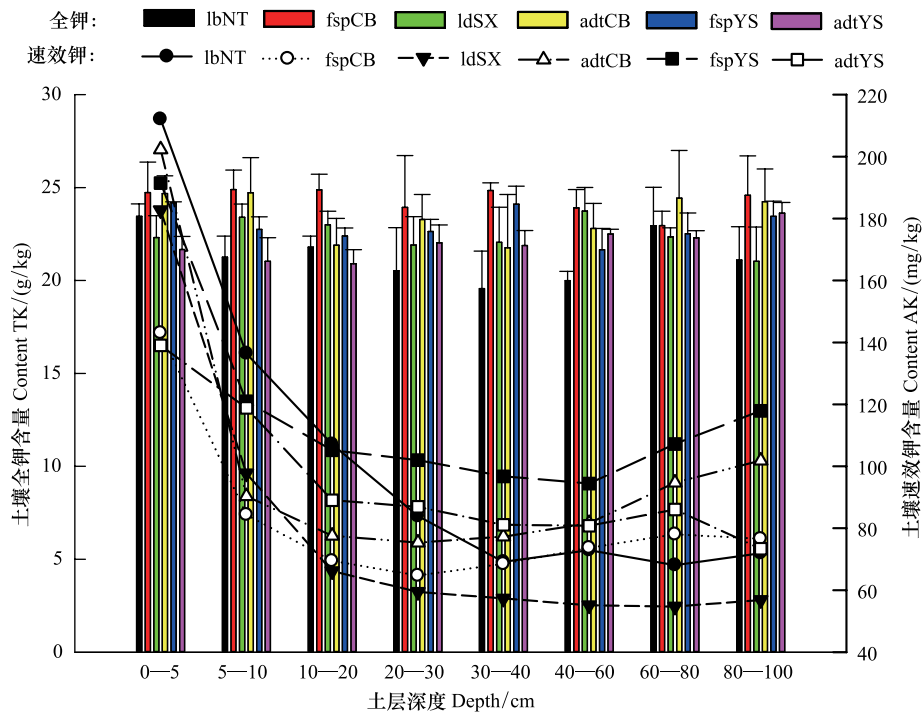


图 3 不同整地方式和植被类型土壤钾素含量

Fig.3 Soil Potassium content of different land preparation and vegetation types

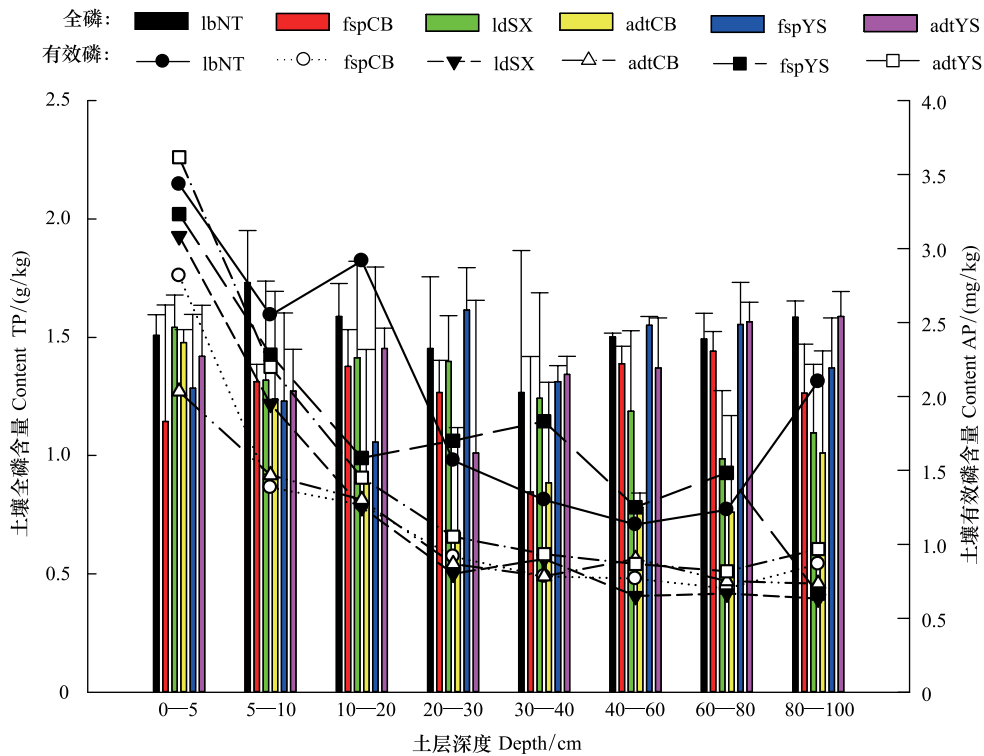


图 4 不同整地方式和植被类型土壤磷素含量

Fig.4 Soil Phosphorus content of different land preparation and vegetation types

者土壤水分下渗,从而使土壤中全磷含量在各土层中变化不大。而侧柏植被覆盖下的整地方式相对油松和柠条的全磷含量较低,其中侧柏反坡 30 cm 土层的全磷含量只有 0.67g/kg;而各处理全磷含量波动较大,柠条水

平阶全磷含量较其他处理相对较高,达到 1.70 g/kg。这样的结果可以反映侧柏对全磷的消耗量比较大,而柠条相反对全磷的消耗较小,与钾素状况相反。

各处理的有效磷的变化趋势同样具有明显的表聚性:随土层深度的增加,有效磷含量逐渐减少。水平阶柠条的有效磷含量高于其他处理的有效磷含量,说明柠条对土壤有效磷的保持作用比较好,而在 20 cm 和 100 cm 土层的有效磷含量较高可能与柠条的根系分布有关,柠条根系主要集中在 0—100 cm 土层,从数据上看 20 cm 和 100 cm 土层的根系吸收效率低于其他位置根系吸收的效率。

从实验测定数据来看,在同种植被覆盖下,有效磷含量高低顺序依次是水平沟、水平阶>鱼鳞坑>反坡台处理,除柠条植被下的含量在 20 cm 和 100 cm 土层处的波动外,其余处理表聚性明显,随土层深度有效磷含量下降明显。

## 2.5 土壤酸碱度状况

对不同整地方式的 pH 分析结果表明(图 5),柠条水平阶的 pH 值最小(8.40),而侧柏反坡台的 pH 值最高(8.80)。总体上看土壤都偏碱性,但是各处理之间的土壤 pH 值并无明显的差异,随土壤深度变化也并不明显。

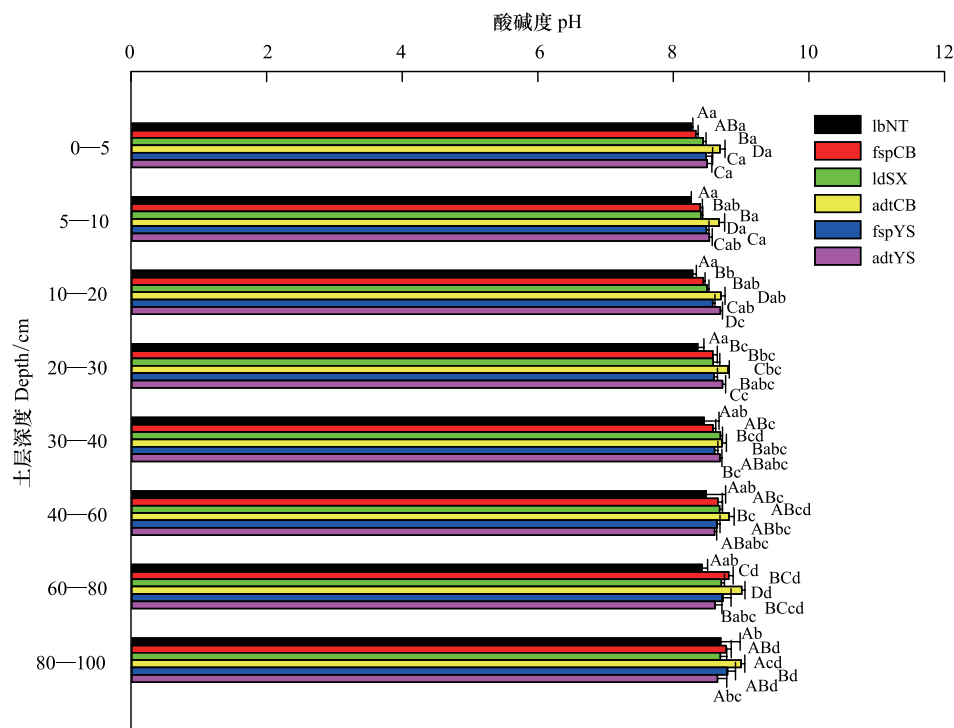


图 5 不同整地方式和植被类型土壤 pH

Fig.5 pH of different land preparation and vegetation types

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

在黄土高原的生态环境治理和植被恢复过程中,每年都会有大量的植被枯落物随土壤生物分解和雨水淋洗,转化为土壤养分进入土壤<sup>[21-22]</sup>。如:有机物质通过土壤微生物的分解变化为腐殖质,使土壤有机质增加;植物对大气中的氮元素的固定作用,氮元素通过落叶或其他死亡组织掉落地面,最终增加了土壤氮素含量等等<sup>[22]</sup>。在这些过程中,整地和植被覆盖对土壤养分积累与循环都有一定影响,如乔木的枯枝落叶层比较厚,但也存在着其凋落物木质素含量较高,分解速度较慢的问题<sup>[23-24]</sup>,合理的整地方式可以发挥其地形优势。所以在不同植被覆盖下的地形和地区,土壤养分存在差异,本研究通过对不同整地方式和植被恢复条件下土壤



养分的测定和对比,总结不同条件下的土壤养分变化规律,揭示整地-植被-土壤相互作用机制。

很多学者已经证明整地方式有利于提高有机质含量。杨洁<sup>[25]</sup>、张维国<sup>[26]</sup>等学者发现整地能将有机质含量提高 9.2%—41.7%;在黑龙江地区的宾县梯田有机质含量比坡地高 41.7%<sup>[26]</sup>;本研究对比不同整地方式和植被覆盖条件的有机质含量,发现油松的有机质含量显著高于其他植被,可能原因是油松生物量较大,而且林地乔木的高密闭度下,地表温度低湿度大,有利于有机质的积累,所以才会显著高于其他处理的有机质含量。以上研究说明,整地和植被覆盖条件下的有机质含量是有一定优势的,在地形改造和植被覆盖耦合作用下的土壤养分含量会相对有所提高。

此外,许多学者对不同整地方式条件下的氮素营养做过分析和比较,张彦军<sup>[27]</sup>在黄土高原丘陵沟壑区的砖窑沟流域的结果表明整地(水平梯田、林地和草地)条件下的 SOC 和 TN 含量较坡耕地依次提高了 18%和 24%、70%和 59%、25%和 21%;沟坡上依次提高了 76%和 54%、25%和 27%,可见整地后的土壤养分含量有明显的提升<sup>[27]</sup>。本研究对氮元素在不同整地方式和植被恢复的对比中,可以发现植被类型对全氮含量的影响占主导作用,油松和柠条在不同整地方式条件下均大于其他植被的全氮含量,而碱解氮主要受整地方式影响,结果显示水平阶(沟)>鱼鳞坑>反坡台。磷元素在土壤中不易移动,前人研究主要集中在土壤磷素的有效性和土壤磷素的全量含量的对比,虎久强<sup>[28]</sup>、张维国<sup>[26]</sup>等在宁夏南部等不同地区的研究表明,土壤 60cm 内,水平沟、反坡梯田、鱼鳞坑的土壤有效磷含量分别比荒坡高 3%—5%、2.5%—4%、1%—1.2%;黑龙江地区整地后梯田的全磷含量提高了 11.5%。本研究结果分析中讨论了磷元素在不同土层的分布中具有显著的波动性,原因是磷元素在土壤中移动缓慢,降雨事件时不同程度的淋洗作用造成不同土层磷元素的含量差异。整地方式对钾素的提高作用前人有许多研究,文波龙<sup>[29]</sup>在对水保措施(集流梯田)和坡耕地对比中,土壤全钾含量显著增加了 14.25%—30.13%。说明整地方式对提高土壤养分状况有明显积极作用。在本研究区内,钾素的含量比较充裕,造成土层钾素的富集并不同植被和整地条件下差异不显著,本研究测定不同处理的钾元素含量,得出土壤全钾平均含量在 21 g/kg—24 g/kg 之间,并无明显差异;土壤速效钾平均含量在 80 mg/kg—100 mg/kg。

基于我们的研究结果,发现不同土壤养分在垂直分布具有不同特性,如全量含量的波动性(P 素)、富集性(K 素)。之前很多研究已经表明土壤养分普遍具有层次性:如胡忠良<sup>[30]</sup>、巩杰<sup>[31]</sup>在黄土高原发现土壤养分具有明显的垂直分布特性—表层含量明显高于深层;张振国<sup>[32]</sup>、罗歆<sup>[33]</sup>等在其他地区对不同植被类型下土壤养分含量进行研究,也表明了土壤养分含量的表聚性。本研究除发现不同养分的表聚性特性外,还发现有机质分布的分层现象,即以 20 cm 为单位分别具有活跃层(0—20 cm)、渐变层(20—40 cm)、稳定层(40cm 以下)。另一方面,柠条覆盖下土壤磷素显著提高,侧柏覆盖下土壤钾素含量提高,说明了不同植被覆盖下和整地条件下的土壤养分有所提高,北京林业大学王华芳通过对不同种源侧柏对磷的吸收过程研究,证明了不同环境条件和生长过程中植被被养分吸收利用有所差别<sup>[34]</sup>,植被对不同土壤养分的吸收利用响应有所不同。

### 3.2 结论

(1) 土壤养分含量具明显表聚性,各处理养分平均含量一般只有表层养分含量的 43.1%—86.8%,全量养分和速效养分含量均随土层深度的增加含量逐渐减少;酸碱度差异不明显。有机质含量存在活跃层(0—20cm)、渐变层(20—60cm)、稳定层(60cm 以下)的分布特征。

(2) 植被类型与整地方式对土壤养分的影响:整地方式下养分含量依次为:水平沟、水平阶>鱼鳞坑>反坡台,植被类型养分对比结果:柠条>油松>山杏>侧柏。同时发现整地方式对速效养分的影响占主导优势,植被恢复对全量养分的影响占主导优势。

(3) 植被对不同土壤养分的吸收利用响应:分析发现侧柏对磷素的消耗较大,并且对保持钾素有利,而柠条正好相反,对钾素的消耗较大,这点可以利用在植被种植和土地保护工作中。在养分(如钾素)充足情况下,整地方式对该养分的影响不大。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Ouyang W, Xu Y M, Hao F H, Wang X L, Siyang C, Lin C Y. Effect of long-term agricultural cultivation and land use conversion on soil nutrient contents in the Sanjiang Plain. *Catena*, 2013, 104(5): 243-250.
- [ 2 ] 傅伯杰, 马克明, 周华峰, 陈利顶. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响. *科学通报*, 1998, 43(22): 2444-2448.
- [ 3 ] 赵其国. 我国的土地资源. *地理学报*, 1990, 45(2): 154-162.
- [ 4 ] 刘绪军, 刘丙友, 景国臣, 陈棣, 周艳明. 新修梯田对土壤理化性质及作物产量的影响. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 276-277, 280-280.
- [ 5 ] Wei W, Chen L D, Yang L, Samadani F F, Sun G. Microtopography recreation benefits ecosystem restoration. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(20): 10875-10876.
- [ 6 ] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, He P, Lei Q L, Liang G Q. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. *Geoderma*, 2014, 235-236: 39-47.
- [ 7 ] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测. *生态学报*, 2008, 28(3): 946-954.
- [ 8 ] Chen S K, Chen Y R, Peng Y H. Experimental study on soil erosion characteristics in flooded terraced paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 2013, 11(1/4): 433-444.
- [ 9 ] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [ 10 ] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. *生态学报*, 2007, 27(2): 603-612.
- [ 11 ] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶, 余莉. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性. *生态学报*, 2002, 22(8): 1173-1178.
- [ 12 ] 王莉, 张强, 牛西午, 杨志平, 张建杰. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 53-56.
- [ 13 ] 马云, 何丙辉, 陈晓燕, 史志民, 何建林. 不同土地利用方式下坡面土壤养分分布特征. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 118-122.
- [ 14 ] 信忠保, 余新晓, 张满良, 李庆云, 李海光. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征. *干旱区研究*, 2012, 29(3): 379-384.
- [ 15 ] Boerner R E J, Scherzer A J, Brinkman, J A. Spatial patterns of inorganic N, P availability, and organic C in relation to soil disturbance: a chronosequence analysis. *Applied Soil Ecology*, 1998, 7(2): 159-177.
- [ 16 ] Leifeld J, Bassin S, Fuhrer J. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 105(1/2): 255-266.
- [ 17 ] Bocchi S, Castrignanò A, Fornarò F, Maggiore T. Application of factorial kriging for mapping soil variation at field scale. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(4): 295-308.
- [ 18 ] Rossi J, Govaerts A, De Vos B, Verbista B, Vervoort A, Poesen J, Muys B, Deckers J. Spatial structures of soil organic carbon in tropical forests - a case study of Southeastern Tanzania. *Catena*, 2009, 77(1): 19-27.
- [ 19 ] Tesfahunegn G B, Tamene L, Vlek P L G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117: 124-139.
- [ 20 ] 吕贻忠, 李保国. *土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2006: 53-53.
- [ 21 ] Cooke G W, 李庆远. 现代土壤知识的进展及其应用. *土壤学进展*, 1991, 19(1): 15-19.
- [ 22 ] Cui B, Zhao H, Li X, Zhang K J, Ren H L, Bai J H. Temporal and spatial distributions of soil nutrients in Hani terraced paddy fields, Southwestern China. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1032-1042.
- [ 23 ] 李香兰, 刘玉民. 黄土高原不同林型与土壤有效态微量元素关系的研究. *土壤学报*, 1991, 22(5): 231-234.
- [ 24 ] 余存祖, 刘耀宗, 彭琳, 戴鸣钧. 黄土区土壤肥力形成过程与肥力指标分析. *土壤通报*, 1990, 21(5): 197-201.
- [ 25 ] 杨洁, 喻荣岗, 谢颂华. 水土保持措施对红壤坡地果园土壤结构和肥力的影响. *安徽农业科学*, 2010, 38(33): 18784-18786, 18802-18802.
- [ 26 ] 张维国, 曹丽萍. 反坡梯田整地效果的探讨. *防护林科技*, 2008, (5): 126-126, 130-130.
- [ 27 ] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 李俊超. 水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响. *生态学报*, 2012, 32(18): 5777-5785.
- [ 28 ] 虎久强, 安平, 李英武. 不同整地方法对造林成效影响的比较研究. *宁夏师范学院学报*, 2007, 28(3): 110-113.
- [ 29 ] 文波龙, 任国, 张乃明. 云南元阳哈尼梯田土壤养分垂直变异特征研究. *云南农业大学学报*, 2009, 24(1): 78-81, 93-93.
- [ 30 ] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 杜有新, 王新洲. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性. *生态学报*, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [ 31 ] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 湖陈霞, 卫伟. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 93-96.
- [ 32 ] 张振国, 黄建成, 焦菊英, 白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕地人工柠条林土壤养分特征及其空间变异. *水土保持通报*, 2007, 27(5): 114-120.
- [ 33 ] 罗歆, 代数, 何丙辉, 刘秀华, 唐寅. 缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 64-69, 91-91.
- [ 34 ] 王华芳. 三个种源侧柏一年生苗木对磷的吸收. *林业科学*, 1996, 32(3): 219-224.